



创新前景 储热

支持单位：

除非另有说明，本出版物中的材料可以自由使用、共享、复制、印刷和/或存储，前提是需恰当确认 IRENA 为资料来源和版权所有。本出版物中属于第三方的材料可能受单独的使用条款和限制的约束，在使用此类材料之前，可能需要获得这些第三方的相应许可。

引文：IRENA (2020)，*创新前景：储热*，国际可再生能源署 (IRENA)，阿布扎比。

ISBN：978-92-9260-326-7

本文件为 “*Innovation outlook: Thermal energy storage*” 的译本 ISBN: 978-92-9260-279-6 (2020)。

如中文译本与英文原版的内容不一致，概以英文版为准。

下载地址：www.irena.org/publications

请通过以下网址了解更多信息或向我们提供反馈：publications@irena.org

关于 IRENA

国际可再生能源署 (IRENA) 是国际合作的主要平台、英才中心、政策、技术、资源和金融知识库，也是推动全球能源系统转型的动力。作为成立于 2011 年的政府间组织，IRENA 推进广泛采用和可持续利用各种形式的可再生能源，包括生物能源、地热、水电、海洋、太阳能和风能，以追求可持续发展、能源获取、能源安全和低碳经济的发展与繁荣。www.irena.org

IKI 支持

本报告是“未来城市能源解决方案”项目的一部分，该项目得到了国际气候倡议 (IKI) 的支持。德国联邦环境、自然保护与核安全部 (BMU) 基于一项德国联邦议院决议为该项计划提供支持。

致谢

本创新前景报告在 Francisco Boshell (IRENA) 的指导下，由 Alessandra Salgado、Nadeem Goussous (IRENA)、Manu Ravishankar、Oliver Richards、James Walker、Tom Jennings 和 Flora Buchanan (碳信托)、Anabel Trujillo、Omar Saeed、Helena Navarro、Yulong Ding 和 Yi-Chung Chen (伯明翰大学) 等人共同合作撰写。

IRENA 专家也为该展望做出了积极贡献，他们是：Dolf Gielen、Arina Anisie、Elena Ocenic、Liliana Andreia Morais Gomes、Carlos Fernandez、Paul Komor、Gayathri Prakash、Luis Janeiro、Roland Roesch、Luca Angelino、Yong Chen、Paul Durrant 和 Emanuele Taibi。

以下外部专家对本报告进行审阅并提供了宝贵的反馈意见：Michael Geyer (德国航空太空中心 [DLR])、Deger Saygin (SHURA 能源转型中心)、Saman Nimali Gunasekara (皇家理工学院)、Ruud Kempener (欧盟委员会)、Daria Draganova 和 Jean-Michel Durand (欧洲储能协会 (European Association for Storage of Energy))、Alessandro Provaggi (区域供热供冷系统 + 技术平台/欧洲区域供热供冷协会)、Wim van Helden (国际能源署太阳能供热和供冷实施协议第 58 研究任务/美国能源工程师协会 - 可持续技术研究所)、Fernando Morales (Highview Power)、Joris M. Koornneef (TNO)、Lionel Nadau (苏伊士环能集团)、Jan Diriken 和 Robbe Salenbien (VITO)。

IRENA 感谢 Pablo Ralon (IRENA)、Marcus VA Bianchi (国家可再生能源实验室) 和 Kevin Knosala (能源与气候研究所技术经济系统分析，于利希研究中心) 提供的章节评论、市场评估关键性意见及第 2 章中的预测分析。

第 3 章中的技术评估和重点事项得到了国际能源署太阳能供热和供冷实施协议第 58 研究任务 (IEA SHC Task 58)/国际能源署蓄能节能委员会 Annex 33 (ECES Annex 33) 多位专家的反馈，他们是：Wim van Helden、Danny Muller、Saman Nimali Gunasekara、Harald Mehling、Dominic Groulx 和 Pim Donkers。

下列技术专家通过引导性访谈提供了有用的反馈和信息：David Sanders (Dearman)、Ruud van de Bosch (Ecovat)、Nitin Goel (Inficold)、Jiuliang Chen Nanjing (金合能源材料有限公司)、John Lerch (Axiom Energy)、Mike Hopkins (Ice Energy 前职工)、Sonia Ferrer (阿苯哥)、Huub Keizers (TNO)；Chris Heaton (ETI 前职工)、Andrew Bissell 和 David Oliver (Sunamp)、Bobby Dunn (萨默赛德) 以及 Andrew Tong (俄亥俄州立大学)。

本报告的编辑为 Justin French-Brooks。

IRENA 由衷感谢德国联邦经济事务和能源部的大力支持。

免责声明

本出版物及所使用的资料均按“原样”提供。IRENA 已经采取了所有合理的措施，以验证本出版物中资料的可靠性。然而，IRENA、其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何明示或暗示的担保，且对使用本出版物或材料的任何后果不承担任何责任或法律责任。

本文中包含的信息不一定代表 IRENA 所有成员的观点。提及特定的公司或特定的项目或产品并不意味着 IRENA 认可或推荐这些公司或产品，认为其优先于未提及的类似性质的其他公司或产品。此处采用的名称和本材料的表述，并不意味着 IRENA 会就任何地区、国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位或对边界或边界的划定表示任何意见。

**蓄热为整合高比例的太阳能和
风能提供了必要的灵活性。**

目录

图片	6
表格	8
案例研究.....	9
缩写	10
计量单位.....	11
关键发现.....	12
对政策制定者的启示.....	16
TES 为城市所有能源需求部门提供灵活性	16
TES 市场评估.....	18
部门应用和创新展望.....	22
政策建议.....	32
1 设置情景.....	38
1.1 全球能源转型.....	38
1.2 TES 市场评估.....	42
1.3 TES 在集成能源系统中的作用.....	49
1.4 系统方法.....	51
2 技术概览.....	53
2.1 蓄热技术的主要类型.....	53
2.2 TES 技术的关键属性.....	67

3 各部门现状和趋势	70
3.1 电力.....	71
3.2 工业.....	76
3.3 冷链.....	83
3.4 区域供热和供冷	90
3.5 建筑.....	98
4 加快部署的政策干预措施.....	106
4.1 TES 应用的系统层面障碍	107
4.2 可用的支持机制	109
4.3 各部门面临的主要障碍及建议	112
4.4 广泛部署 TES 的主要障碍	116
5 参考文件.....	120
6 附录.....	128
6.1 本创新展望技术选择背后的方法论	128
6.2 显热蓄热.....	129
6.3 潜热蓄热.....	131
6.4 热化学蓄热.....	133
6.5 机械热储能系统	137

图片

图 1.	TES 在能源部门的关键应用	17
图 2.	所研究 TES 技术的工作温度和时间范围	18
图 3.	与《巴黎协定》一致的 IRENA “能源转型情景”中的 TES 装机容量预测	19
图 4.	熔融盐 TES 装机容量	19
图 5.	全球范围内 TES 空间供冷装机容量和预测容量	20
图 6.	TES 供热应用的装机容量	20
图 7.	TES 在电力部门的技术现状和创新展望	23
图 8.	TES 在工业部门的技术现状和创新展望	25
图 9.	TES 在冷链部门的技术现状和创新展望	27
图 10.	TES 在区域供热和供冷部门的技术现状和创新展望	29
图 11.	TES 在建筑部门的技术现状和创新展望	31
图 12.	TES 部署所面临的障碍	33
图 13.	给政策制定者的建议	36
图 14.	2010-2050 年各部门能源相关的年度 CO ₂ 排放	39
图 15.	截至 2019 年的装机容量	42
图 16.	全球熔融盐 TES 装机容量（吉瓦）	43
图 17.	熔融盐 TES 装机容量	44
图 18.	全球范围内 TES 空间供冷装机容量和预测容量	45
图 19.	ATES 预测	46
图 20.	供热应用的 TES 装机容量（占总装机容量的百分比）	47
图 21.	TES 装机容量预测	48
图 22.	满足电力和热能需求灵活性的集成集中式和分布式电力基础设施概述	48
图 23.	TES 在能源系统的关键应用	49
图 24.	直接熔融盐蓄热系统	56
图 25.	间接熔融盐蓄热系统	56
图 26.	地下储能概念	57
图 27.	本报告中分析的 PCM 的性质，揭示了熔化热和熔点方面的差异	58
图 28.	大容量蓄热系统中的 PCM 封装	59

图 29.	冰盘管系统.....	60
图 30.	热化学蓄热方法和材料.....	62
图 31.	CaL 工艺方案.....	62
图 32.	CREATE 演示蓄热系统图.....	63
图 33.	配备分离反应器的吸收式系统配置.....	64
图 34.	A-CAES 提议现场装置图.....	65
图 35.	发电应用 LAES 的通用系统配置.....	66
图 36.	所研究 TES 技术的工作温度和时间范围.....	68
图 37.	TES 在各部门的主要应用概述.....	70
图 38.	各种储能技术额定容量下的系统额定功率和潜在释能时间.....	72
图 39.	2018 年电力部门适用技术的商业就绪水平.....	72
图 40.	适用于工业部门不同工作温度范围的技术.....	79
图 41.	TES 技术在工业部门应用中的商业就绪水平.....	79
图 42.	使用水作为短期蓄热介质的工厂位置.....	81
图 43.	TES 技术在冷链中的商业就绪水平.....	86
图 44.	未来集成冷链中使用 LAES 的愿景.....	87
图 45.	TES 技术在区域供热和供冷中的商业就绪水平.....	93
图 46.	TES 技术在建筑部门的商业就绪水平.....	101
图 47.	促进 TES 技术商业化的政策方案清单.....	109
图 48.	不同水罐配置.....	130
图 49.	BICPV-石蜡系统概念.....	132
图 50.	用于热化学蓄热的 CSP-CaL 整合.....	134
图 51.	水合盐封闭式系统 (a) 和开放式系统 (b) 的配置.....	135
图 52.	分离反应器概念的工艺配置.....	136
图 53.	吸收式蓄热系统原理图.....	137
图 54.	TES 绝热 CAES.....	138
附录图 1.	2010-2050 年与能源相关的 CO ₂ 排放量 (Gt/yr).....	139

表格

表 1.	各终端用能部门中 TES 相关政策干预概述	34
表 2.	所选 TES 技术的适用规模、工作时间和相关能量矢量	68
表 3.	所选 TES 技术的关键技术属性	69
表 4.	CSP TES 技术创新的主要目标	74
表 5.	太阳能光伏发电和风力发电 TES 技术创新的关键目标	75
表 6.	工业部门的可再生能源技术	78
表 7.	工业部门 TES 技术创新的主要目标	81
表 8.	冷链中 TES 技术创新的关键指标	88
表 9.	冷链应用中 TES 技术的关键材料和系统创新需求	88
表 10.	区域供热和供冷 TES 技术创新的关键目标	96
表 11.	建筑部门 TES 技术创新的主要目标	103
表 12.	欧盟三个成员国的 NREAP 介绍，揭示了 2020 年各部门的可再生能源渗透率目标	112
表 13.	欧盟确定的储能部署障碍	113
表 14.	各终端用能部门中 TES 相关主要支持需求概述	116
表 15.	各终端用能部门中 TES 相关政策干预概述	118
表 16.	科学文献中提出的无机复合材料	133
表 17.	研究人员针对季节性储能应用提出的 TCM 材料	135
表 18.	TES 技术与能源部门	140

案例研究

案例研究 1.	中国利用部门耦合降低弃风率	51
案例研究 2.	货运集装箱的蓄热	85
案例研究 3.	智能供冷在商业零售场所提供需求侧管理服务	85
案例研究 4.	季节性储能太阳能区域供热方案	94
案例研究 5.	柏林区域供热方案使用的水合盐蓄热原型	95
案例研究 6.	将充能的 TES 材料从充能地点运输到需求点	97
案例研究 7.	具备智能能源管理功能的 PCM 热电池可实现低谷期可再生能源的整合	100
案例研究 8.	市政当局引入家用 TES 以减少家庭开支并提高风能利用率	102
案例研究 9.	英国的 LAES 技术推动干预措施	110
案例研究 10.	加利福尼亚州为拉动储能市场实行强制干预措施	111
案例研究 11.	市场改革有助于减少中国的可再生能源弃电问题	113
案例研究 12.	印度实行技术推动和市场拉动干预措施以发展清洁冷链	114

缩写

A-CAES	绝热压缩空气储能	LAES	液态空气储能
ATES	含水层蓄热	LCOE	平均电力成本
BTES	地埋管蓄热	LNG	液态天然气
CAES	压缩空气储能	NREAP	可再生能源国家行动计划
CaL	钙循环	PCM	相变材料
CAPEX	资本支出	PTES	热井蓄热
COP	性能系数	PV	光伏
cPCM	复合相变材料	P2H	电制热
CSP	聚光太阳能热发电	R&D	研究与开发
HT-cPCM	高温复合相变材料	SETS	智能电力蓄热
IEA	国际能源署	TES	蓄热
		TTES	罐式蓄热（通常以水作为蓄热介质）
		UTES	地下蓄热
		VRE	波动性可再生能源
		WTTES	水罐蓄热

计量单位

EJ	艾焦耳
GW	吉瓦
GWh	吉瓦时
Gw_{th}	吉瓦热
K	开
kJ/kg	千焦每千克
kW	千瓦
kWh	千瓦时
MW	兆瓦
MWh	兆瓦时
m²	平方米
m³	立方米
W/m·K	瓦每米开尔文
°C	摄氏度

主要研究结论

《巴黎协定》倡导的全球能源系统转型要求快速实现可再生能源的应用。蓄热 (TES) 技术有助于在发电、工业和建筑部门整合高比例的可再生能源。

在接下来的篇幅中，将阐明 TES 的关键作用。

- **TES 技术具备独特优势，例如将供热供冷需求与即时发电和能源供应的可用性分离。**由此带来的灵活性促成了更广泛利用太阳能和风能等波动性可再生能源的可能性。利用 TES 可减少成本高昂的电网提升需求，帮助平衡季节性需求并支持向以可再生能源为主的能源系统转型。
- **到 2030 年，TES 的全球市场规模可能会增加两倍。**这意味着十年内其装机容量从去年 (2019 年) 的 234 吉瓦时 (GWh) 增加至超过 800 GWh。同时，预计 TES 在供冷和电力应用方面的投资将达到 130 亿美元至 280 亿美元。通过支持向可再生能源、提高能效和更大规模电气化的转变，TES 投资有助于实现长期的气候和可持续性目标。
- **熔融盐储能技术在电力部门得到了广泛应用。**这得益于其先进的技术成熟度及其在聚光太阳能热发电 (CSP) 厂中的应用。到 2030 年，预计将有 491 GWh 至 631 GWh 的熔融盐蓄热装机容量投入使用。其他 TES 技术短期内可能会实现商业上的可行性，包括储存 CSP、太阳能光伏 (PV) 和风能等过剩能源的固态和液态空气储能技术。
- **全球 TES 的供冷装机容量需要增加一倍才能满足 2030 年的预期供冷需求。**这意味着未来十年内需要投资约 5.6 亿美元，使全球投资总额达到 28.2 亿美元。相变材料 (PCM) 和其他 TES 技术可补充冷链应用，实现生产、存储和运输等各环节制冷负荷的灵活性。
- **TES 应用于区域供热和供冷时，可有效地分离需求与供应，从而根据季节储存能源。**区域供热已采用显热技术，例如罐式蓄热 (或 TTES) 和地下蓄热 (或 UTES)。
- **水罐蓄热 (或 WTES) 技术已在全球的建筑部门中广泛使用。**小范围内，地下蓄热也开始应用于较小规模装置。冰和固态热电池的应用当前处于早期开发阶段。
- **而水罐与太阳能热电厂的结合在工业低温热能的生产 and 储存中得到了广泛应用。**其主要应用领域为采矿、食品和纺织工业。当前，显热、潜热和热化学蓄热等相关创新技术也在试验之中，以储存高级热能。
- **投资于技术开发以及采取相关措施增强市场吸引力有助于促进 TES 部署的快速增长。**这些举措可构成以扩大可再生能源规模及能源应用脱碳为目标的整体能源政策的一部分。

TES 是能源转型投资计划的重要组成部分，可帮助各个国家/地区在后新冠疫情时代逐步复苏。TES 以及可再生能源、能源效率和电气化等方面的投资可促进健康、经济的基础设施建设、推动短期复苏并使能源发展跟上全球气候和可持续性目标的步伐。



可再生能源与城市
图片来源: Shutterstock

蓄热可能成为提高能源系统中可再生能源渗透率的重要推动力

太阳能和风力发电在每日和季节性时间范围内都在波动。能源系统运营商可以利用诸如储能等灵活的技术匹配能源供需。这将使能源系统更稳定、更灵活，且建设和运行成本更低。



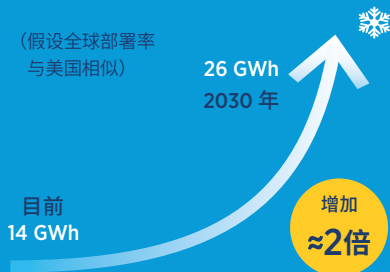
PCM 和其他 TES 技术可整合到冷链的所有环节中，在生产、储存和运输等冷链的各环节实现制冷负荷的灵活性。

水罐可用于现场太阳能热发电，为工业提供低品位热能。当前，显热、潜热和热化学等相关创新技术也在试验之中，以储存高品位热能。

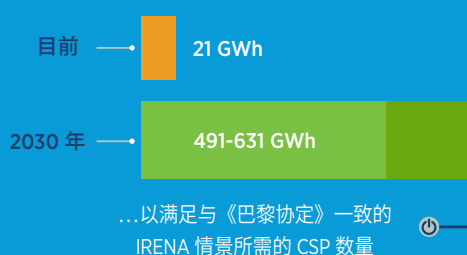
TES 热能应用的当前分类 (热水罐除外)



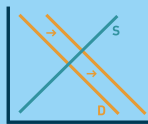
空间供冷 TES 预计显著增加



电力部门的熔融盐需求增加

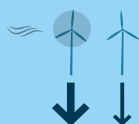


与其他技术形式相比，TES 技术在灵活性方面具备独特优势：



需求转移

TES 有助于灵活的冷热输送并实现供需分离



波动性能源供应整合

即使无太阳直射和强劲风力时，也可以利用可再生能源高峰供电时产生的热能/冷能满足需求。



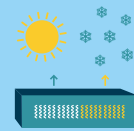
部门整合

TES 通过推动部门整合使整个系统受益，依靠可再生能源电力满足更大规模的能源需求



电网管理

通过部署 TES 可以提高灵活性、缓解电网压力及降低昂贵的电网提升需求



季节性储能

TES 可在阳光充足的夏季储存热能以满足冬季的供热需求，同时在寒冷的冬季储存冷能满足夏季的供冷需求



电力

熔融盐用于使聚光太阳能热发电 (CSP) 厂在夜间释能。
新型显热蓄热技术正在研发之中，以实现大容量独立储能。



建筑

利用家用热水罐和新型显热、潜热和热化学热电池的创新技术可与热泵整合，为建筑热能需求提供灵活性。
冰或 PCM 技术也有助于在温暖气候下实现灵活的供冷负荷。



区域供热和供冷

地下蓄热以及新型 PCM 及热化学 TES 技术已实现了完全由可再生能源供热，包括跨季节供热模式。
冰或 PCM 储能技术可转移区域供冷计划的能源需求。

加速蓄热部署所需的关键行动



确保在能源系统政策制定和规划中采用技术中立的全系统方法，以避免因热能、能源和运输任一部门的孤立思维而产生相互矛盾的规章制度



为研发活动投入更多资金，帮助攻克某些相对而言还不成熟的技术



在能源系统的所有部分增加 TES 示范项目的数量，以帮助利益相关方更好地认识到相关技术的优势

对政策制定者的启示

蓄热为城市所有能源需求部门提供灵活性

到 2050 年，波动性可再生能源应占发电量的 60% 以上，而蓄热是实现这一转变的推动性技术之一。

从电力部门的角度来看，每年将有更高比例的波动性可再生能源 (VRE) (主要是太阳能光伏和风能) 进入电力系统。2018 年，全球能源系统中约有 10% 的电力来自 VRE 发电。IRENA 估计，为了遵守《巴黎协定》的气候目标，到 2030 年 VRE 将增长 3 倍，在全球能源系统中的占比增至 35%，到 2050 年将增长六倍，提供 60% 以上的全球发电量 (IRENA, 2020a)。

由于 VRE 占据如此高的比例，灵活性对于整个能源系统运营而言至关重要。从根本上来讲，蓄热是更广泛的灵活性方案组合 (包括电力储存和需求侧措施) 的一部分。整合各种蓄热 (TES) 技术成为一种颇具前途的解决方案，带来了一系列应用和优势。

超过 234 吉瓦时 (GWh) 的蓄热可为整个能源链 (从供应到需求) 提供灵活性 (图1)。

全球现在大约有 234 GWh¹ 的 TES，是可靠、安全和灵活的能源系统的关键推动因素。图 1 描绘了 TES 在能源系统中的关键应用。从供应侧来看，TES 可以储存太阳能和风能产生的过剩电力，减少弃电、缓解产量的急剧变化并实现稳定的产能。成熟 TES 技术的一个示例是聚光太阳能热发电厂中的熔融盐储能。

1 基于 IRENA 公开项目的数据收集。

什么是蓄热？

指通过加热或冷却储能介质暂时储存能源，以便未来将储存的能源用于发电、供热和供冷。(欧洲储能协会，2017 年)。

TES 可与机械储能技术耦合使用；这对于两种技术而言都是一种互补。

应用于何处？

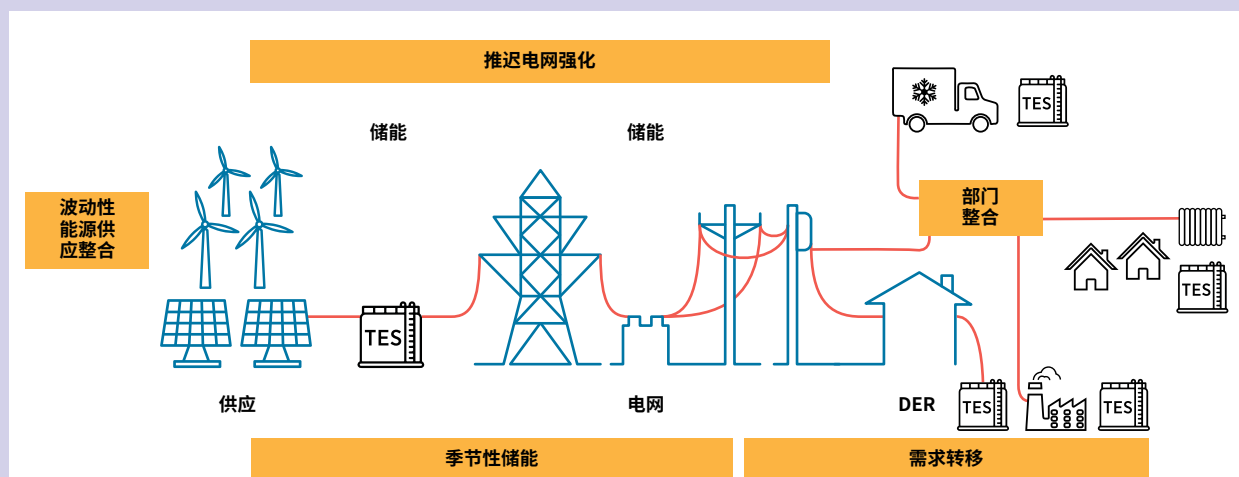
如今 TES 已在多种应用进行了测试和部署，例如并网发电、工业、区域供热和供冷、建筑和冷链物流等。

从输电配电来看，TES 有助于推迟或避免昂贵的电网提升需求。通过负荷转移可更好地利用可再生能源，缓解电网拥堵及规避基础设施投资。

TES 的特殊优势是能够根据季节性需求储存能源。夏季将可再生能源产生的过剩热能储存在 TES 系统中用于满足冬季的供热需求。

从能源需求来看，TES 能够为整个能源系统提供解决方案，而不是着眼于发电、供热或供冷等单个矢量。建筑等终端用能部门的能源需求受到季节性因素的强烈影响。蓄热可将能源储存数小时、数天、数周甚至数月，从而解决供求的季节性变化。诸如蓄热罐 (使用水)、固态 (使用岩石、混凝土和陶瓷砖等储能介质) 和地下蓄热 (UTES) 等 TES 技术可在夏季储存过剩发电量，用于冬季取暖。同样，反过来可在冬季使

图1: TES 在能源部门的关键应用



注: DER = 分布式能源。
基于 IRENA 2019a 分析。

用冷冻储水罐和 UTES 为夏季提供区域供冷。这有助于应对消费者的供热或供冷用电需求高峰。

转向下游能源, TES 有能力耦合不同部门及改善供热和供冷负荷曲线。在确保本世纪全球升温水平低于 2°C 且接近 1.5°C 的情景下, 供热、供冷和交通运输的电气化极大增加了电力负担。最终能源中的电力比例将从 2017 年的 20% 增加到 2050 年的 49% (IRENA, 2020a)。仅依靠发电厂可能会消耗能源系统资源并增加总成本。TES 有助于提高诸如电力制热/制冷等策略的潜力。

TES 可采用对电力和热力系统两者都有利的智能方式帮助整合电力、供热和供冷部门。

低成本和可靠的可再生能源为可再生能源部门与建筑和工业部门整合, 实现跨部门脱碳战略打开了大门。例如, 在低谷时段为蓄热系统充能并在需要时释能, 可以将建筑空间供热和/或供冷的电力需求转移至较低成本时段。这样可以缓解电网拥堵、提高可再生能源的渗透率并降低成本。

工业部门同样可以从 TES 应用中受益匪浅。工业的特点是能源密集型过程, 而 TES 技术的储能介质工作温度范围较广, 从而可以促进这一部门实现更广泛的电气化。例如通过化学循环和固态介质等可达到 500°C 以上的 TES 技术优势, 工业部门可储存低成本能源用于高峰负荷时段, 智能地管理能源需求, 同时还能保证工业过程的高温供热 (图 2)。

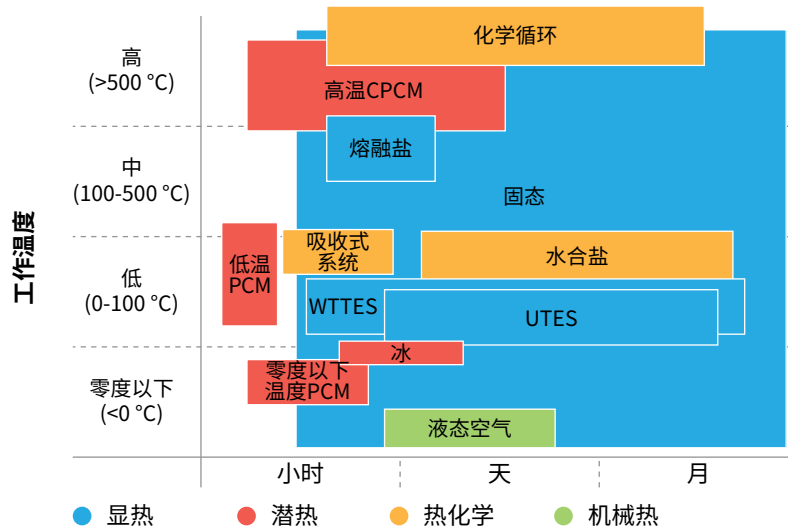
图 2: 本报告所研究的 TES 技术的工作温度和时间范围

能源系统中使用了哪些 TES 技术?

本报告将蓄热技术分为:

- 显热
- 潜热
- 热化学
- 机械-热耦合

探讨 13 种主流 TES 技术的现状、优势和创新需求。第 3 章详细介绍了这些 TES 具体技术。



注: cPCM = 复合相变材料; PCM = 相变材料; WTTES = 水罐蓄热。

TES 市场评估

到 2030 年，TES 可能增长三倍，全球装机容量将超过 800 GWh。

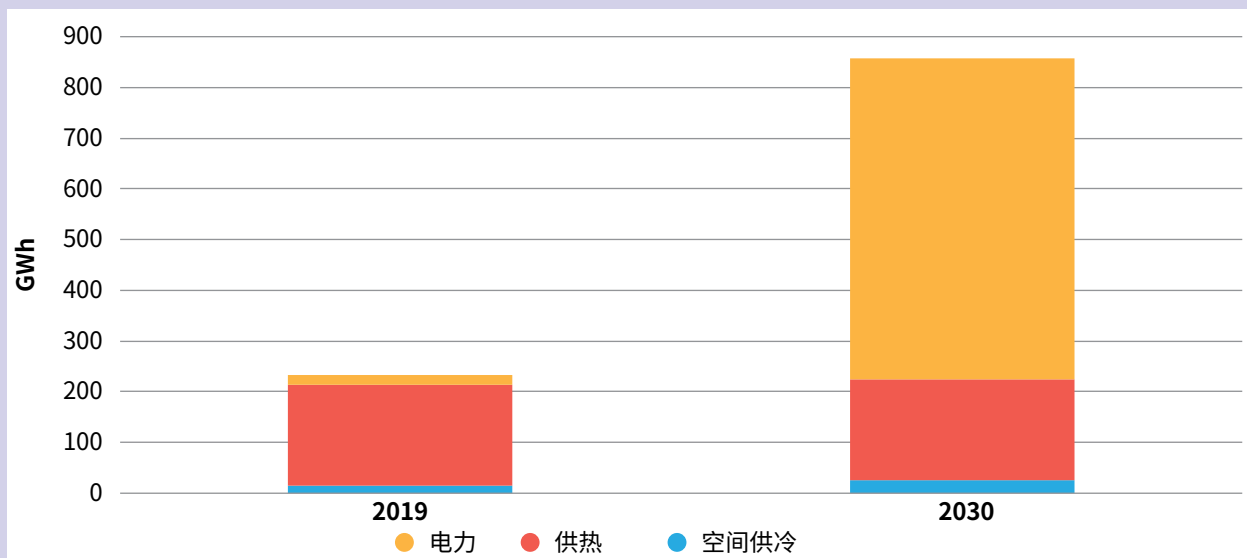
能源系统正在寻找更多解决方案，以顺利整合不断增长的可再生能源比例。例如，近来电池储能已成为电力、建筑和运输部门实现灵活性的关键推动因素。所有这些解决方案的供应链和应用各不相同，储能部门需要实现多样化以避免潜在瓶颈和集中风险。TES 技术的特性，例如季节性储能、超大储能容量、更高的储放效率潜力及更长的生命周期使其成为能源市场极具吸引力的解决方案。图 3 展示了 IRENA 分析结果，表明了到 2019 年底全球 234 GWh TES 装机容量的情况，以及根据与《巴黎协定》一致的 IRENA “能源转型情景”，预计到 2030 年容量增加三倍，达到至少 800 GWh 时的情况。

TES 技术的商业前景将越来越广阔 - 未来十年，预计用于电力和供冷 TES 应用的投资将达到 128 亿美元至 272.2 亿美元。

电力

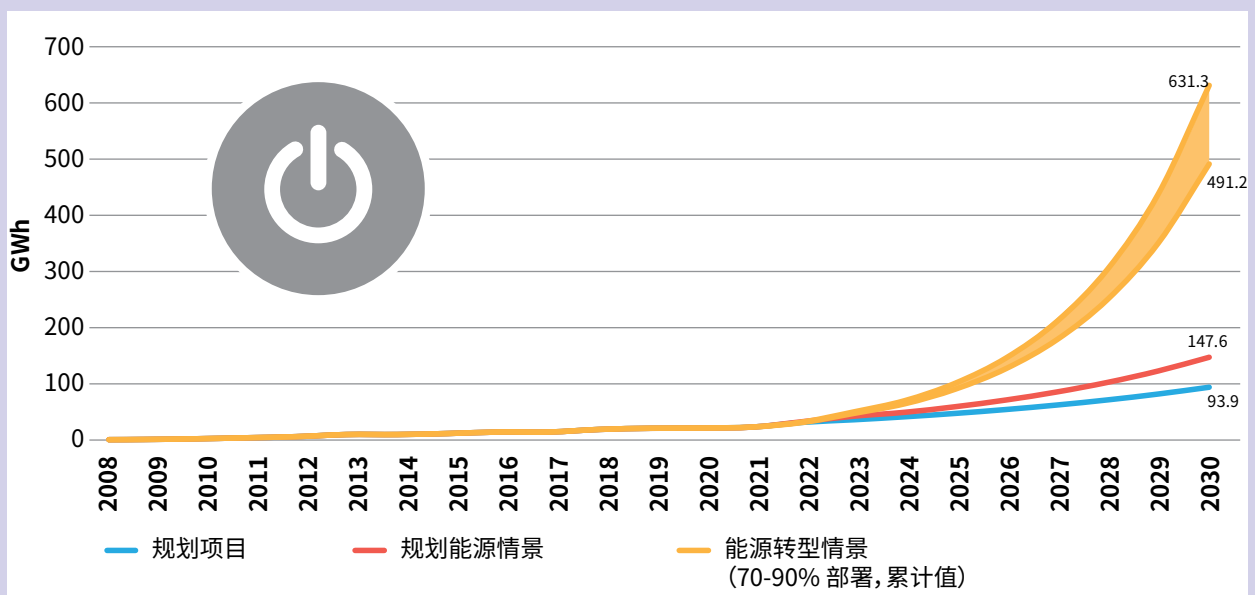
TES 在电力部门用于负荷转移、产能稳定和辅助服务。当前，熔融盐 TES 凭借其先进的技术成熟度及其在聚光太阳能热发电 (CSP) 厂中的应用而成为电力部门应用最为广泛的技术。目前全球范围内的熔融盐储能装机容量已超过 21 GWh。与当前趋势、政策和规划相比，与《巴黎协定》一致的 IRENA “能源转型情景” 预计可再生能源的增长目标更为宏大，到 2030 年需要增加 56 吉瓦 (GW) 的 CSP 装机容量 (IRENA, 2020a)。CSP 装机容量的这种增长 (如图 4 所示) 将使熔融盐 TES 的装机容量 (与“规划能源情景”相比) 增加四倍，达到 491 GWh 至 631 GWh。取决于使用的 CSP 技术，未来 10 年内，熔融盐 TES 所需的累计投资为 123 亿美元至 244 亿美元。

图 3: 与《巴黎协定》一致的 IRENA “能源转型情景” 中的 TES 装机容量预测



注：由于缺乏含水层和小型分布式 TES（例如住宅储水罐）相关数据，本分析不涉及供热预测。尽管如此，鉴于相关技术从短期到季节性范围的广泛应用，预计其装机容量仍将增长。

图 4: 熔融盐 TES 装机容量



空间供冷

在 IRENA 于 2019 年底确定的 400 个 TES 项目中，当前约有 160 个项目的装机容量已超过 13.9 GWh，用于建筑和区域供冷系统。未来几年，这个数字可能还会迅速增加，尤其是一些新兴经济体，这些国家/地区的气温水平即将达到极限，正在寻求更先进的大规模供冷技术。TES 可为电力系统运营商提供帮助，通过额外的需求侧管理确保更低的系统成本和更高的 VRE 整

合度。如图 5 所示，为满足 2030 年的供冷需求，预计全球用于供冷的 TES 部署量需增加一倍，未来十年所需投资约为 5.6 亿美元至 28.2 亿美元。

供热

由于使用了大规模含水层蓄热 (ATES) 和地埋管蓄热 (BTES)，区域供热应用在 TES 当前装机容量中占据最大比例。当前约一半的区域供热项目使用季节性储能 (图 6)，这是 TES 技术为能源系统带来的独特优势。

图 5：全球范围内 TES 空间供冷装机容量和预测容量

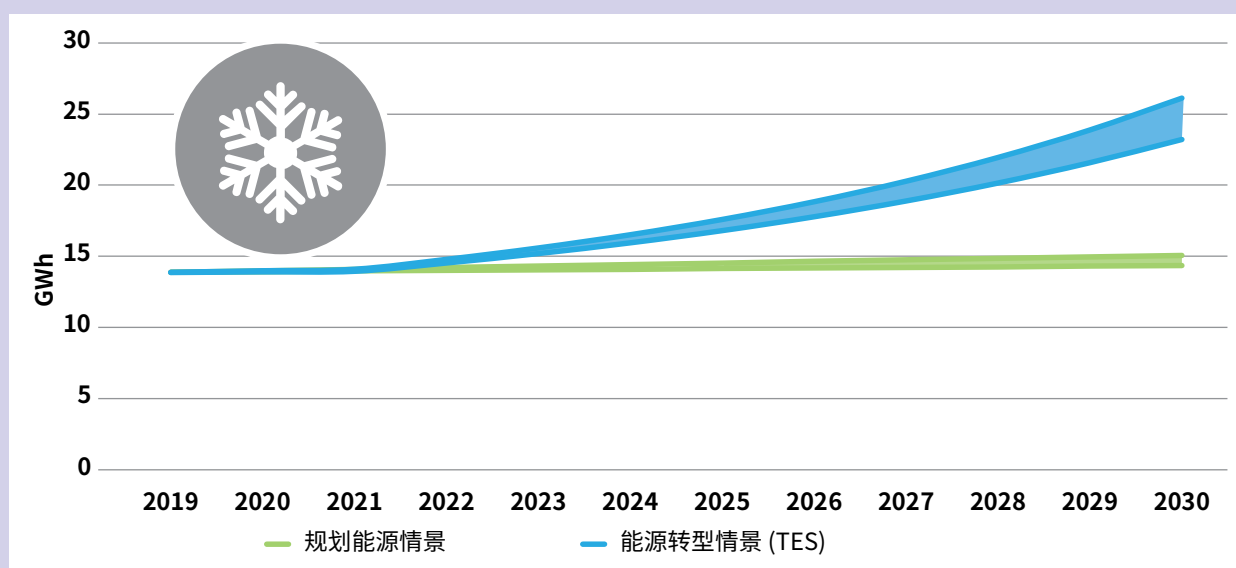
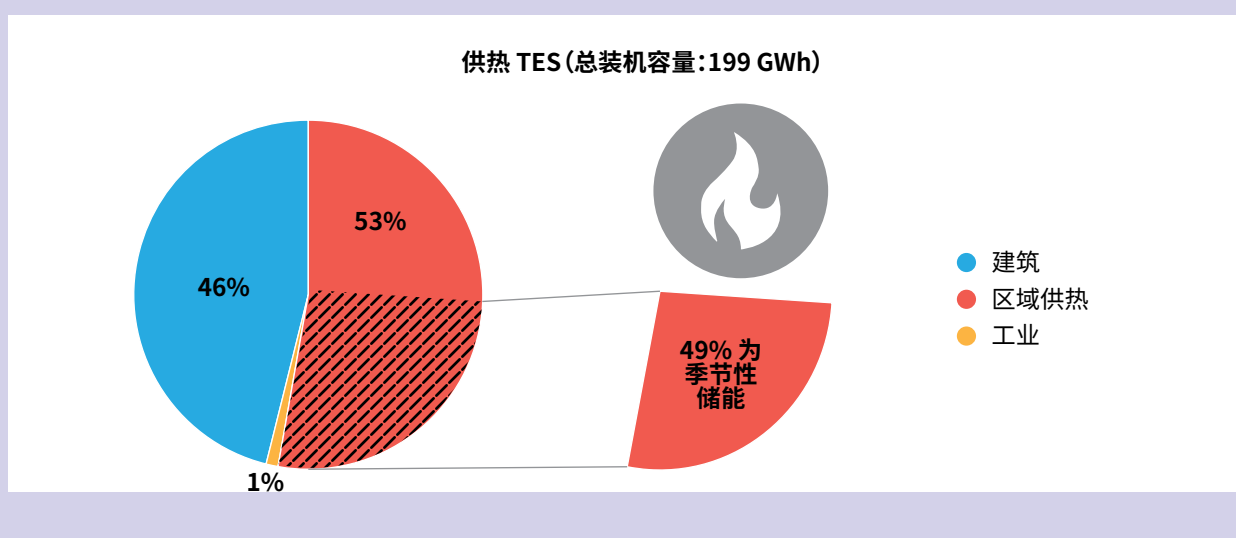


图 6：TES 供热应用的装机容量





太阳能塔
图片来源: Shutterstock

各部门应用和创新展望

TES 技术可在能源转型中发挥重要作用，但其潜力尚未得到开发。仍需进一步创新以提高 TES 技术的商业就绪水平。

TES 有助于引入更多可再生能源，并促进电力、工业、区域供热和供冷、冷链应用和建筑五大关键部门的脱碳。



电力

电力部门通过在 CSP 工厂使用熔融盐储能技术，将 TES 应用扩展至商业规模。未来几年，其他 TES 技术（例如储存 CSP、太阳能光伏和风能产生的过剩能量的固态和液态空气储能技术）可能也会更趋向于商业规模。

如今，熔融盐已用于通过白天充能、晚上释能，以实现 CSP 工厂的持续发电。诸如混凝土固态储能技术等其他 TES 技术也正在试验之中。在本示例中，由于原材料价格便宜，因此可以降低 CSP 应用的资本成本。

CSP 所利用的太阳能也可以通过热化学循环系统储存为化学能，之后再通过化学反应将这些存储的太阳能释放出来（Pardo 等人，2014 年）。

图 7 展示了其他有前景的 TES 技术。随着这些技术突破初期的技术成熟度水平，很有可能用来降低 VRE 供电的快速波动性，帮助电网接纳越来越多的可再生能源。

这些系统需要在未来几年乃至数十年中取得突破，以使正在开发的技术成功实现商业化，同时进一步推广熔融盐储热技术。

未来五年，下一代熔融盐的工作温度范围可提高至 700°C，性能也会提高，这将使 CSP 工厂的储放效率²提高至 92% 以上。可能出现更多固态储能和新型独立熔融盐蓄热电池试点项目。

到 2030 年，TES 发电技术的成本可降低 50% 以上，达到每千瓦时 (kWh) 15 美元。

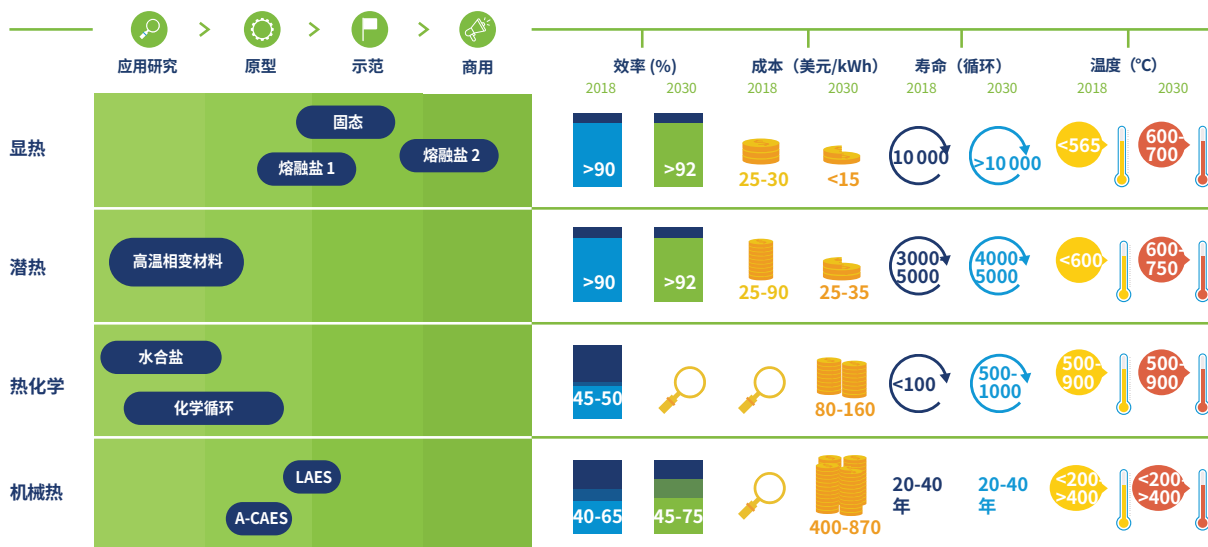
到 2030 年，液态空气储能 (LAES)、绝热压缩空气储能 (A-CAES) 和固态储能系统的效率将进一步提高，扩大 TES 在风能和太阳能光伏发电中的利用范围，并且还有望成为 CSP 熔融盐的有效替代品。

到 2050 年，热化学储能的发展可提高 CSP 工厂的转化效率。同样，熔融盐储能可为化石燃料发电厂带来新的活力，将其重新利用于可再生能源储存，从而节省退役成本并推动发电厂脱碳。

² 储放效率是指储存能量与最后输出能量之间的关系。它代表该技术在储存和释放热能方面的效率情况。此参数可能很大程度上取决于系统的工作条件（例如每天或季节性）。

图 7: TES 在电力部门的技术现状和创新展望

电力



短期 (5年)

- 下一代熔融盐具有更高的工作温度范围和性能，可提高转化效率并降低 CSP 工厂的成本。
- 可能出现固态储能和新型独立熔融盐蓄热电池试点项目。

长期 (10+年)

- 热化学储能的发展将提高 CSP 工厂的转化效率。
- 熔融盐储能可为化石燃料发电厂带来新的活力，将其重新利用于可再生能源储存。

中期 (5-10年)

- LAES、绝热 CAES 和固态储能系统将扩大 TES 在风能和太阳能光伏发电中的利用范围，并且有望成为 CSP 熔融盐的有效替代品。

注：放大镜是指由于技术成熟度低而无法获得相关数值；(1) 独立系统；(2) 与 CSP 并置。

可再生能源蓄热有助于电力、工业、供热、供冷和建筑部门实现脱碳。



工业

工业中的热能生产消耗大量能源，因此急需脱碳。

TES 已经可以用于储存电动热泵或现场太阳能热电厂产生的低温热能。将热能从发电中分离有助于实现灵活性和智能的能源应用，并利用间歇性的可再生能源发电满足持续需求。

水罐蓄热（WTES 或 TTES）与太阳能热电厂的结合刚刚兴起，但当前正在不断增长，主要用于生产和储存采矿、食品和纺织子部门中使用的低温热能（图 8）。主要市场为奥地利、中国、法国、德国、印度、墨西哥和西班牙（Weiss 和 Spork-Dur，2019 年）。

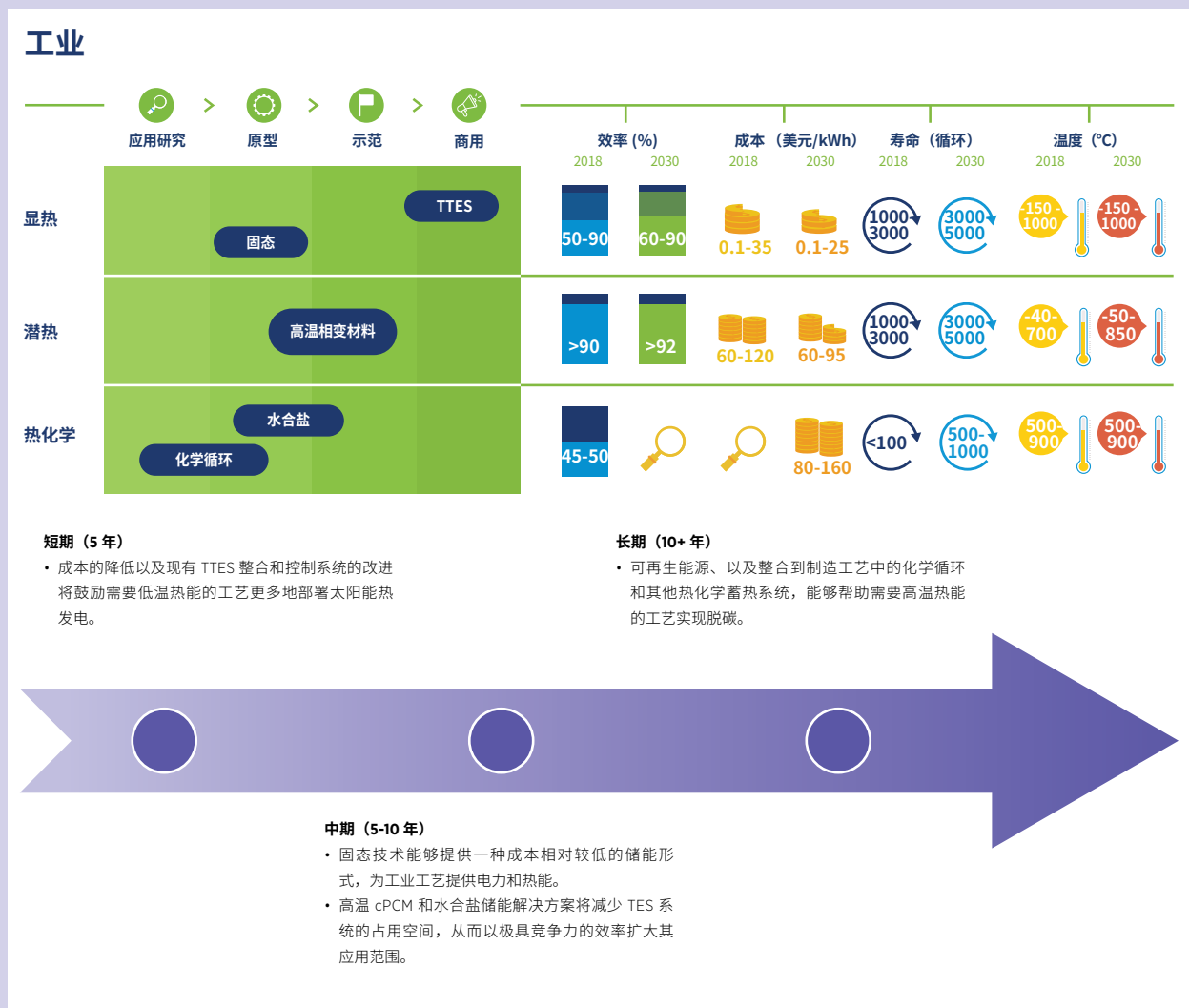
到 2030 年，包括 TTES 在内的显热储热技术成本预计将下降约 30%，从 35 美元/kWh 下降至 25 美元/kWh。结合现有 TTES 整合、管理和控制系统方面的改进，这将鼓励需要低温热能的工艺更多地部署太阳能热发电。

未来十年，固态储热技术可提供一种类似于当今热电联产电厂的低成本储能方式，为工业过程提供电力和热能。

到 2030 年，高能量密度的 PCM 和水合盐储能解决方案将有效减少 TES 系统的占用空间，从而扩大其应用范围。长远来看，还需进一步研究了解将化学循环和其他热化学反应储热系统整合到制造工艺中的潜力，以满足更高温度的工艺热能需求。

**水罐与太阳能热电厂的结合将在低温热能的生产
和储存中得到广泛应用。**

图 8: TES 在工业部门的技术现状和创新展望



注：放大镜是指由于技术成熟度低而无法获得相关数值。



冷链

冰和其他PCM等TES技术如今已经实现了商业化，并应用于整个冷链的冷藏车辆和静态冷却装置中。

冷链是指将必须低温储存的产品从生产商处运往消费点所需的不间断供应链。

预计电力制冷的增长将极大增加相关电网需求，在气候非常炎热的新兴经济体中尤其如此。随着这些经济体的发展，他们将必须以清洁和经济的方式发展冷链。

TES尤其能够为冷链的生产、储存、运输和零售环节提供支持，因为TES能够将电力、供冷和移动性结合在一起。另一可能受益的领域是离网可再生能源发电制冷，用于提高食品和药品供应链的效率。

例如，有几家服务于非洲、中国、欧洲、印度和中东市场的公司将经过改造的PCM整合到冷藏车辆和集装箱中以运输和/或储存食品和疫苗。例如，英国研究人员开发了一种PCM供冷系统，用于在可互换的公路和铁路集装箱中保持低温（伯明翰大学，2018年）。

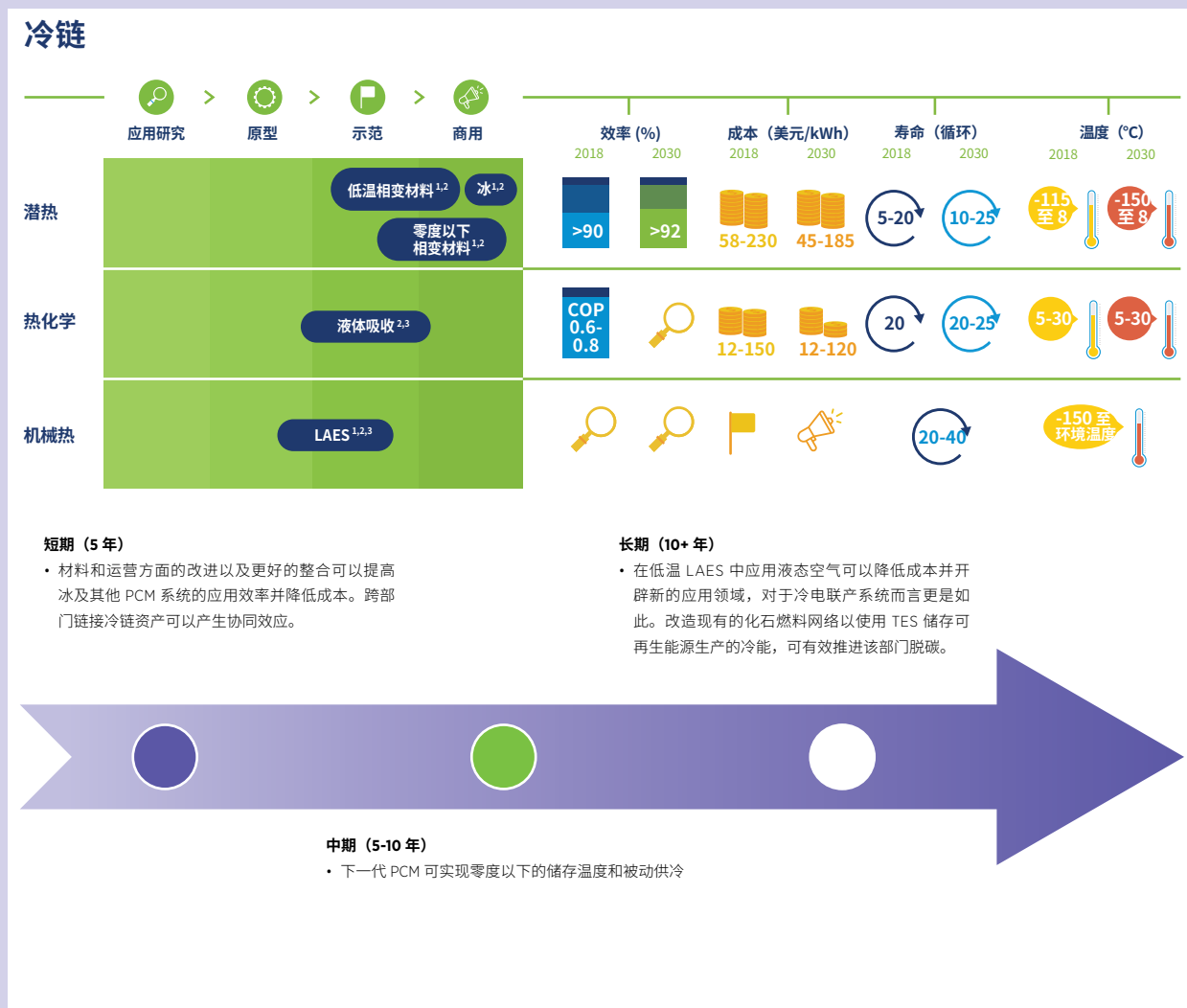
未来五年中，材料和运营方面的改进以及更好的整合可以提高其他PCM系统的应用效率并降低成本（图9）。

未来几十年，可使用TES（特别是吸收式系统）储存可再生能源（例如太阳能和生物质热电联产）产生的冷能。

由于吸收式系统的能量密度高，热能损失极小，可在短时间和长时间范围内（例如季节性地）储存冷能，以在冷链中进行空间供冷。长远来看，液态空气可用于为车辆提供动力及保持车辆凉爽。

储热可将可再生电力、供冷和移动性有效结合起来。

图 9: TES 在冷链部门的技术现状和创新展望



注：放大镜是指由于技术成熟度低而无法获得数值；旗帜指示范阶段；喇叭筒指商业化阶段；(1) 用于蓄冷；(2) 用于冷藏运输；(3) 用于冷能生产。



区域供热和供冷

TTES 已在全球范围内广泛部署，而冰蓄热当前已应用于区域供冷方案。其他 PCM 和热化学储热技术也在研发之中，有望帮助该部门实现脱碳。

如今，TTES 和 UTES 等显热储热技术已与区域供热方案广泛结合。冰和其他 PCM 解决方案也开始在区域供冷部门中得以实施。区域供热和供冷应用 TES 的主要优势是能够将热/冷能的生产与使用分离，从而可能实现从数小时到季节性的能源储存。

中期来看，其他创新 PCM 和固态储热解决方案可通过电加热或季节性太阳能热技术整合大量可再生能源，加拿大、中国和欧洲已经成功进行了相关试验。

预计到 2030 年，工业应用中的 TES 技术效率水平将超过 92%。

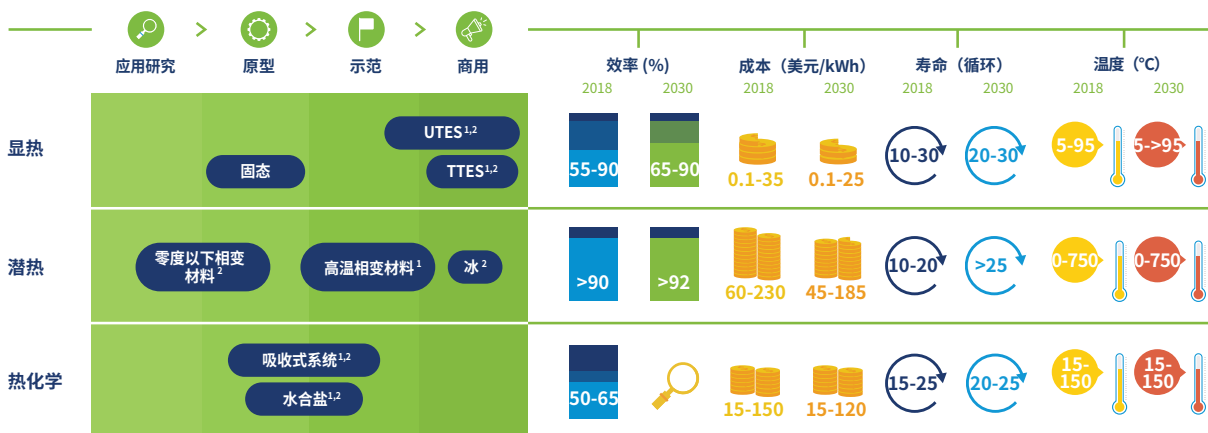
未来十年，正在进行的 PCM 供冷研究和示范项目有望推动更广泛的部署。

到 2050 年，热化学系统将进入示范阶段，以低至 10 美元/kWh 的价格增加可再生能源在区域供热和供冷部门的部署机会，在冷电联产应用中更是如此。在这十年中，部门整合和智能控制技术将获得更多的应用机会，尤其应促成从工业应用中收集（和储存）废弃热能/冷能（图 10）。

**将储能与区域供热供冷网络相关联后，
可将发电需求与使用分离开来。**

图 10: TES 在区域供热和供冷部门的技术现状和创新展望

区域供热供冷



短期 (5年)

- TTES 整合和管理系统方面的改进可显著降低成本并扩大部署机会。

长期 (10+年)

- 预计 PCM 和热化学系统将为冷电联产应用提供更多机会。
- 部门整合和智能控制技术将促进其他部门和应用收集 (和储存) 废弃热能/冷能。

中期 (5-10年)

- 正在进行的 PCM 供冷研究和示范项目有望推动更广泛的部署。

注: 放大镜是指由于技术成熟度低而无法获得数值; (1)用于区域供热; (2)用于区域供冷。



建筑

无论是否配备热泵，基于简单 TTES、固态或更先进 PCM 技术的热电池都可用于电加热。

水罐蓄热在全球范围内广泛应用于建筑蓄热，而 UTES 则在多个案例中应用规模较小。PCM 和固态热电池及代替空调的冰储能技术已经过验证，但当前仅进行了相对较小规模的部署。正处于研究中的热化学技术可作为分布式季节性储能的一种形式（图 11）。

与燃气锅炉相比，基于 PCM 的系统已被证实可为消费者节省费用，应该受到更多关注。

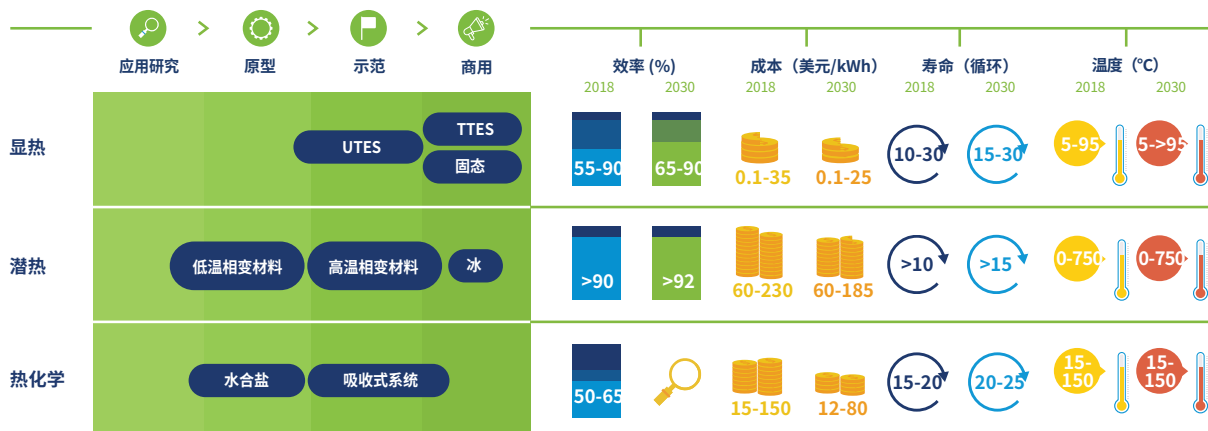
目前正在进行与能源管理系统相结合的 PCM 热电池试验。这些试验可以证明该类电池如何利用低谷期生产的电力实现供热脱碳并帮助消费者节省费用。具有改良的热性能及耐腐蚀性的材料也正在开发之中，以用于罐体和固态 TES 技术；这有助于将效率提高至 90%，而整合和控制系统方面的改进创新则将提高其成本效益。

到 2030 年，下一代高低温 PCM 及复合相变材料 (cPCM) 的成本降低和技术改进将促进建筑中潜热储热技术的部署。长远来看，预计研究和开发 (R&D) 活动的重点是实现热化学 TES 技术材料和系统改进，并可能进入示范阶段。

**储存低谷电力的热电池有助于实现热能脱碳，
并为消费者节省费用。**

图 11: TES 在建筑部门的技术现状和创新展望

建筑



短期 (5年)

- 当前, 正在进行 PCM 热电池与能源管理系统耦合的相关测试, 以示范利用低谷电力实现供热/供冷脱碳并为消费者节省费用。
- 旨在改进罐体和固态 TES 技术热性能和耐腐蚀性的材料开发可以提高效率, 而整合和控制系统方面的创新将提高成本效益。

长期 (10+年)

- 专注于实现热化学 TES 技术的材料及系统改进研究和开发活动可促进该研究进入示范阶段。

中期 (5-10年)

- 新一代高温和低温 PCM 和 cPCM 的成本降低和技术改进有助于增加建筑物中潜热储能的部署。

注: 放大镜是指由于技术成熟度低而无法获得相关数值。

政策建议

电力部门脱碳已经取得进展，但需要制定相关政策充分解决供热供冷部门面临的脱碳挑战，尤其是要进一步提高这些领域的终端用能部门的可再生能源渗透率。

跨能源系统应用 TES 的主要障碍包括（图 12）：

- 某些 TES 技术**缺乏技术成熟度**，以及竞争性技术具有较高的技术成熟度（TRL）（例如廉价的化石燃料供热）。
- **对 TES 如何使社会、公共部门和工业受益缺乏相关知识和了解**。这一点体现为，一方面，蓄热是实现高比例可再生能源所需灵活性的重要手段，而另一方面，对于电池储能的研究工作的关注度却相对较低。
- **未来能源系统的发展存在不确定性**，这导致人们不愿投资长期或大型项目。
- **不同能源矢量（即热/冷和电）和不同部门的孤立思维**，某些情况下会导致政策冲突及规划效率低下。此外，与电力部门相比，供热部门缺乏脱碳的相关政策。

一系列的技术推动、市场拉动及扶持机制有助于储热行业的政策制定者和主要参与者有效解决面临的障碍，同时鼓励更广泛地部署 TES。政策制定者和其他主要利益相关方应考虑采取以下行动：

- 更多关注工业脱碳计划以及供冷供热部门。将这些领域作为**整合能源政策**开发的一部分进行开发，以实现更高的系统效益水平。
- **采用全系统方法进行能源系统脱碳**对于实现经济高效的能源转型至关重要。考虑所有能源种类的各种的灵活性技术，以确定实现最具成本效益的能源系统脱碳途径。
- **为 TES 技术研发投入更多资金**，与其帮助供热、电力、供冷部门脱碳所具备的独特潜力相匹配。为示范项目投入资金，以帮助建立市场意识、增强消费者信心，同时提高技术成熟度。
- 政策制定部门应出台全方位的能源政策，考虑**取消化石燃料补贴并引入碳排放价格**，由此显著提高低碳供热系统的竞争力。
- **建立**诸如分时定价的**市场机制**以促进需求侧的灵活性、降低消费者支出并增加可再生能源的使用。建立技术中立的辅助服务市场帮助克服电池储能方面通常遇到的困难，并为 TES 所有者/运营商提供额外的收入流。

3 特定部门所面临的障碍将在第 4 章进行详细讨论。

图 12: TES 部署所面临的障碍

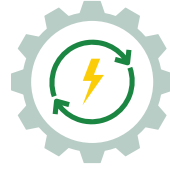
尽管有诸多优势，但是 TES 部署方面仍存在系统性障碍：



技术和系统相对而言不够成熟



缺乏对于这些技术及其优势的认识



对于能源系统未来发展的不确定性



跨能源矢量（即热能/冷能和电能）的孤立思维导致的政策和规划系统冲突



技术推动、市场拉动以及关键的扶持机制
结合在一起，可促进蓄热的快速增长。

表1列出了各部门推进 TES 部署相关的其他潜在政策干预措施。

表 1. 各终端用能部门中 TES 相关政策干预概述

应用	监管/政策环境	利益相关者接受度	技术表现	财务主张
电力	<ul style="list-style-type: none"> 出台脱碳政策。 将热能市场作为整体多矢量能源监管的一部分进行监管。 颁布储能指令。 	<ul style="list-style-type: none"> 为显热储热以及高温 cPCM 的示范及试点项目投入资金，以向投资者和其他利益相关方证明该技术的优势和商业利益。 	<ul style="list-style-type: none"> 为显热储热以及高温 cPCM 的研发、示范及试点项目投入资金，以加快技术成熟。 	<ul style="list-style-type: none"> 为显热储热以及高温 cPCM 的研发、示范项目及企业支持投入资金，以利用创新降低成本。 利用市场拉动政策推动采用 TES 并置储存。
工业	<ul style="list-style-type: none"> 确保脱碳政策涵盖工业部门。 开展国际性合作，以克服竞争力方面的担忧。 取消化石燃料补贴，帮助提高 TES 的价值定位。 	<ul style="list-style-type: none"> 牵头政府项目，与行业参与者共同进行技术试验。 利用示范项目和“冠军”组织支持知识共享和传播，降低技术应用的感知风险。 	<ul style="list-style-type: none"> 为研发、示范和试点项目投入资金（特别是化学和潜热储能方面）以加快开发速度 	<ul style="list-style-type: none"> 为研发、示范和试点项目投入资金（特别是化学和潜热储能方面）以利用创新降低成本。 一旦证明技术有助于克服财务障碍，为其提供投资和价格支持以作为市场拉动方案。
冷链	<ul style="list-style-type: none"> 取消化石燃料补贴，以使冷链技术相比柴油替代方案更具竞争力 	<ul style="list-style-type: none"> 共享潜热储热示范项目的的相关知识。 帮助企业向客户展示传达 TES 的优势，从而帮助企业打入/创建冷链市场。 	N/A	N/A
区域供热和供冷	<ul style="list-style-type: none"> 更全面地改善区域供热和供冷的监管环境。 取消化石燃料补贴，帮助提高 TES 的价值定位。 	<ul style="list-style-type: none"> 共享潜热储能示范项目的的相关知识 	<ul style="list-style-type: none"> 为化学和潜热储能解决方案提供一系列技术推动支持。 为化学储能解决方案提供市场拉动支持机制。 	<ul style="list-style-type: none"> 通过市场拉动机制改善区域供热和供冷部门的财务状况。 共享相关知识，以增强对 TES 优势的了解。
建筑	<ul style="list-style-type: none"> 取消化石燃料补贴，帮助提高 TES 的价值定位。 整合和规范热电市场。 颁布储能指令、建筑法规等。 	<ul style="list-style-type: none"> 提供生态系统支持，以增强公众对家用 TES 应用优势的了解。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 提供技术推动支持，以开发低温 PCM 和水合盐产品。 提供市场拉动支持，以激励家用/非家用消费者购买设备。

注：N/A 表示没有发现主要需求。

应用	产业供应链和技能	市场机遇	公司成熟度	使能基础设施
电力	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 建立平衡市场、推出分时定价机制或其他激励措施，以了解定期储能对电力部门的价值。 引入长期储能收入机制（例如电力购买协议）以满足全天候需求（如迪拜、南非、智利）。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 加速可再生能源的渗透，以推动诸如 TES 等灵活性解决方案的需求。
工业	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 建立平衡市场，推出分时定价机制或其他激励措施，以了解需求灵活性带来的价值，同时帮助开发蓄热（和现场可再生能源）的价值定位。 	<ul style="list-style-type: none"> 引入可信赖的第三方技术认证/认可，以降低感知风险。 	<ul style="list-style-type: none"> 加快太阳能热发电和热泵在工业中的渗透。
冷链	<ul style="list-style-type: none"> 支持供应链发展（例如 LAES）。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 支持企业和生态系统，以提高全新技术（例如 LAES）的知名度。 	<ul style="list-style-type: none"> 协调 LAES 与 LNG 气化基础设施。 开发基于 LAES 的冷链。
区域供热和供冷	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 提供生态系统支持以强调 TES 可为可再生区域能源项目带来的优势。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 作为整合系统方法的一部分，加快可再生能源区域供热和供冷计划的渗透。
建筑	N/A	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 支持热泵的开发和渗透。 确保制定正确的激励措施，以实现有效的电网管理和调整。

注：N/A 表示没有发现主要需求。

图 13: 给政策制定者的建议

政策制定部门为支持TES发展可利用的工具:



政策和规划

对研发活动和示范项目进行投资可以帮助克服技术难题，建立市场对于 TES 系统独特能力的认识，并降低部署的预期风险。



规划和监管框架

确保能源政策制定的连贯性，例如引入碳定价系统，取消化石燃料补贴，出台建筑规范以使供暖系统与化石燃料脱钩。



市场结构

支持技术中立的市场结构的发展，以便 TES 可以与其他灵活性来源竞争，以向能源系统提供服务。



研究与创新

采用整体系统方法进行能源系统规划和制定策略，确保在脱碳工作中考虑供热、供冷和工业能源的使用。

政策制定部门还可以通过有针对性的干预措施应对特定部门的挑战



电力

- 提供补贴或其他技术推动干预措施，以改善财务价值定位并提高消费者对新技术的认识和接受度
- 发展产业供应链和技能



工业

- 实行排放限额制度和碳交易制度，提高企业使用可再生能源和储热技术的财务效益，使其优于化石燃料
- 引入认证制度、媒体宣传和示范项目，以提高认识并建立对新技术的信任



冷链

- 作为整体能源政策的一部分，解决监管框架中储能的系统性障碍
- 提供价格信号以提高灵活性，提升储能技术的价值定位
- 增加专门针对 TES 研发和示范项目的资金



建筑

- 引入投资支持机制和指令与控制机制，例如通过政府采购加快可再生能源区域供热/供冷计划的发展
- 为规划、建筑标准和环境保护提供明确的指导方针和规定



区域供热供冷

- 增加用于研发和示范项目的资金，以帮助加速技术开发
- 通过针对 TES 的媒体活动和价格支持机制或热泵等使能基础设施来鼓励消费者采纳新技术
- 引入强制性建筑法规，以取代化石燃料供暖系统



热电厂
图片来源: Shutterstock

1. 设置情景

1.1 能源转型

全球范围内的能源系统正在经历由脱碳驱动的重大转型

全球能源的生产、储存、输送、分配和使用方式都在变化。这些变化受到各种因素推动，如扩大能源使用范围、确保能源供应更加低价和安全，以及非常关键的一点——减少与能源系统相关的温室气体排放。最近《巴黎协定》重申了国际上为缓解气候变化所做的努力，并设定了一个目标，即将全球平均气温的上升幅度控制在 2°C 以下。撰写本文时，法国、挪威、瑞典和英国已通过出台法律，承诺到 2050 年实现温室气体净零排放，⁴ 其他国家也在努力跟上步伐。

展望 2050 年，若要实现这些国际上减缓气候变化的宏大目标，需要实现能源系统脱碳及整体经济转型。IRENA 定期发布“2050 年能源转型情景”的最新预测，设想如何以有助于实现这些目标的方式进行全球能源系统转型。近期报告给出了实现这些目标的重大挑战包括（IRENA，2020a）：

- 全球经济的能源强度需降低约三分之二。
- 与今天相比，2050 年能源相关排放需要减少 70%。
- 到 2050 年，可再生能源发电所占比例需要从目前的 26% 提高至 86%。

能源广泛应用于人类活动的各个部门和领域，包括发电、供热供冷以及工业、运输和建筑等。图 14 总结了这些部门当前与能源使用相关的全球温室气体排放比例，还列出了每个部门的减排预测，展示了“能源转型情景”下可利用的脱碳机会。

在电力部门中有效整合更高比例的可再生能源将是一项关键挑战

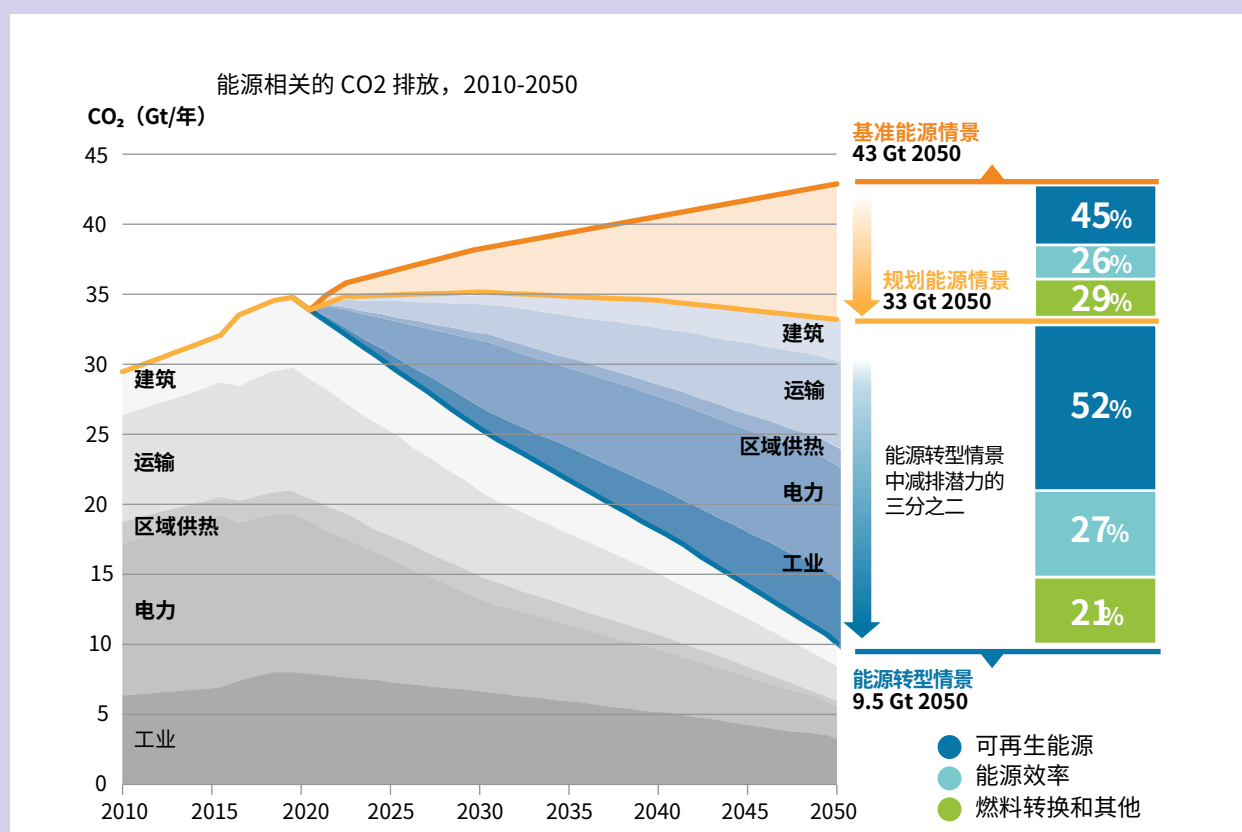
当前的重点是**电力部门脱碳**。由于技术成本降低，人们越发关注利用可再生能源发电，这既促进了相关应用，又受到应用规模增长的推动。例如，2010 年至 2019 年，全球并网规模太阳能光伏（PV）的平均电力成本（LCOE）下降了 82%（IRENA，2020b）。2017 年可再生能源发电所占比例为 26%，预计到 2050 年将增长至 86%（IRENA，2020a）。因此，电力生产部门脱碳仍将是重要的优先事项。

预计风能、太阳能光伏和聚光太阳能热发电（CSP）等可再生能源技术将得到更广泛的部署。然而，多变的天气条件使这些技术本质上具有波动性及间歇性（IRENA，2017a）。

应对可再生能源的波动性将对电力系统运营商的规模扩大构成独特挑战，尤其是需要确保电力分配有效性、系统稳定性和供电安全性。扩大可再生能源部署战略管理的优先事项将是避免弃电，即可再生能源发电厂必须停止发电以满足电网平衡要求的情况（IRENA，2019b）。

⁴ 挪威设定了一个 2030 年目标，瑞典设定了一个 2045 年目标。英国和法国设定了一个 2050 年目标。

图 14：2010-2050 年各部门每年与能源相关的 CO₂ 排放量



来源：IRENA, 2020。

供热和供冷部门的脱碳将是另一项重大挑战

在全球最终能源消耗中，一半为**热能**，而在这其中，空间供热和工业工艺又各占一半。可再生能源目前仅满足全球热能需求（包括热水）的 9%，相比之下，2017 年可再生能源的 26% 用于发电（Collier, 2018 年）。因此，关键是要寻找一种廉价且可持续的方式实现供热脱碳。

空间**供冷**是建筑部门增长最快的能源使用方式，这一趋势在经济快速增长、气温较高的国家（例如印度、印度尼西亚、巴西和中东国家）尤为明显。到 2050 年，全球约三分之二的家庭将拥有空调（IEA, 2018a）。鉴于供冷应用的能源几乎完全是电力，有效脱碳的关键挑战是确保可再生能源满足电力

需求增长，并辅以蓄热 (TES) 系统最大程度地减少对本地电网的影响。

其他终端用能部门的电气化也有助于实现脱碳

随着可再生能源发电装机容量不断增加，电力、运输、建筑（供热和供冷）和工业等其他部门的能源利用向电力的转型可能有助于实现脱碳。其他终端用能部门的电气化是更广泛的部门整合战略的一部分。电气化供冷、供热和运输（例如通过空调、热泵和电动车辆）可与可再生能源的直接部署相互补充以满足工业工艺或老旧建筑等更复杂的需求。电气化与可再生能源直接部署的精确公式因能源系统而异，具体取决于现有基础设施和需求状况。

需要针对特定部门和地理位置制定脱碳解决方案

IRENA 制定的“2050 年能源转型情景”阐明了其他关键能源消费部门所需的转型规模。

在**运输**方面，IRENA 分析预计到 2050 年，全球电动汽车 (EV) 数量将从目前的 790 万辆增长至 11.09 亿辆，运输部门的生物燃料产量将从 2017 年的 1360 亿升/年增加到 6520 亿升/年 (IRENA, 2020a)。全球范围内配套基础设施的推广促进了电动汽车销量的持续增长，这为运输部门脱碳提供了机会。但是，电力需求的增长可能对电力部门构成挑战。最近针对英国在 2035 年前广泛推广 EV 所产生影响的建模表明，不协调的非智能充电可能会给英国电网带来风险。该研究发现，如果所有预测的一千万辆车同时充电，则夜间尖峰需求可能增加 3 GW，而若鼓励智能充电，则仅增加 0.5 GW (Aurora Energy, 2018 年)。英国和所有其他预期 EV 普及率较高的国家一样，都需要采取策略优化充电模式。

工业是向可再生能源应用转型最缓慢的部门，当前可再生能源的占比仅为 13% (主要是生物质)。鉴于该部门与能源相关的 CO₂ 排放位列全球第二，需要大幅提高其可再生能源比例以帮助实现气候变化目标 (IRENA, 2020a)。扩大规模意味着需要更多的太阳能热泵满足低温热能需求、可再生电力制氢和扩大生物质的使用规模以满足中高温热能需求。未来可能通过 CSP 满足高温热能需求。但是，考虑到这些来源的间歇性，有效整合可再生能源与不同的工业工艺 (包括通过燃料转换或部门整合) 对于该部门而言至关重要。

建筑部门涵盖商业和住宅用房，面积约为 1500 亿平方米 (m²)，到 2050 年预计将增加至 2700 亿 m²。到 2050 年，可再生能源在建筑部门的使用比例需要提高到 81%，可再生能源的应用与目前相比将有显著增长，包括太阳能热利用和热泵 (约 10 倍)、现代灶具 (约 12 倍)、生物质 (约 2 倍) 和地热 (约 4 倍) (IRENA, 2020a)。提高建筑中的可再生能源比例需要考虑一些重点领域，如扩大热泵部署规模、有效管理用电高峰、加倍发展 (可再生能源) 区域供热系统以及提高能源效率。

能源系统需要灵活性才能实现可再生能源与所有部门的整合

实现能源系统脱碳的艰巨挑战显而易见。随着 VRE 发电及跨多个部门电气化的迅速增长，开发灵活的能源系统以确保能源基础设施的有效整合和使用非常重要。灵活性是指系统“面对供需的快速大幅波动时仍能可靠和持续地提供服务”的能力 (IRENA, 2017b)。

能源系统中的灵活性措施可分为六大类：

- **供给侧**，主要根据需求变化及网络拥堵情况增加或减少发电量。
- **需求侧**，能源使用随时间而改变，可通过市场参与者远程控制特定负荷或客户响应价格信号实现。这有助于管理尤其是智能系统中波动性可再生能源发电输出的动态变化。
- **市场设计**，用于通过有效的价格信号调节发电或消费活动，并对其灵活性进行奖励，从而帮助管理系统并推动适当的长期投资。
- **系统运营**，系统运营商采用各种平衡服务确保供应时刻满足需求。随着 VRE 来源越来越多，情况也将越发复杂，需要更加先进的市场规则、预测、沟通及控制。

- **输电和配电网**运营商，管理连接供需的有形资产，可在智能系统管理中发挥重要作用。
- **储能基础设施**，用于储存能源以供未来使用。许多技术都可提供储能服务，这些技术在不同的储能介质（即电化学、机械、电力、热物理或化学介质）中吸收不同的能源矢量（即电和热[热或冷]）。根据其地点和用途，储能可用于实现供给侧和/或需求侧的灵活性以及提供额外的网络服务，从而延迟昂贵的网络提升需求（IRENA，2017b）。

储能对于实现能源系统的灵活性至关重要

作为能源系统的关键应用技术，储能技术已在全球范围内引起广泛关注，该技术有助于能源系统整合更高比例的 VRE 并最大程度地减少弃电。储能的基本原理是能够吸收和储存能量并在系统需要时释放能量。由此可实现供需分离，从而为使用高比例 VRE 发电的系统提供关键的管理能力。

一般意义上，储能指在时间和/或空间上以受控方式吸收、储存和释放能量。它与不同能源矢量有关，例如电力、热能和合成燃料（包括天然气）。储能技术通常根据所涉及的矢量进行高级别分类。储电技术吸收并释放电力。该矢量或者直接以电力形式储存，或者转换为其他形式（即势能、机械能、热能、化学能、电化学能、静电能或磁能）储存。同时，储热通过加热或冷却储能介质储存热能，以便未来将储存的热能用于供热和供冷应用或发电（欧洲储能协会，2017 年）。⁵

可用的储存和释放矢量非常多样，此外，储能技术的应用范围也比较广泛，可应用于从发电厂到住宅的整个能源系统，还能够根据系统需求应用于从数秒到数个季节的时间跨度。

根据美国能源部的全球能源储存数据库，抽水蓄能电站占全球当前储能装机容量的 96%，其余部分为储热 (1.6%)、电化学电池储能 (1.1%) 以及机械储能 (0.9%)（美国能源部，未注明出版日期）。但请注意，这些数字不包括诸如家用热水罐或电池等分布式小型储能装置。

电化学储能（电池）最近已成为焦点，全球装机容量大幅增加。由于成本的快速下降，锂离子电池在最近的部署中占据了主导地位。事实上，2010 年至 2016 年，运输应用成本降低比例高达 73%。该类储能预测主要来源于 EV 市场以及全球日益增长的风能和太阳能发电规模。

IRENA 估计，要使可再生能源发电量增加一倍，需将电池储能部署增加 17 倍（IRENA，2017a）。最近的市场估计表明，得益于有力的政策环境，部署规模将增加六倍（Chediak，2018 年）。

由于需要平衡供热和供冷的供需关系，蓄热的重要性也越发显著。它还有可能提高纯电应用（包括火电厂改造）的灵活性。

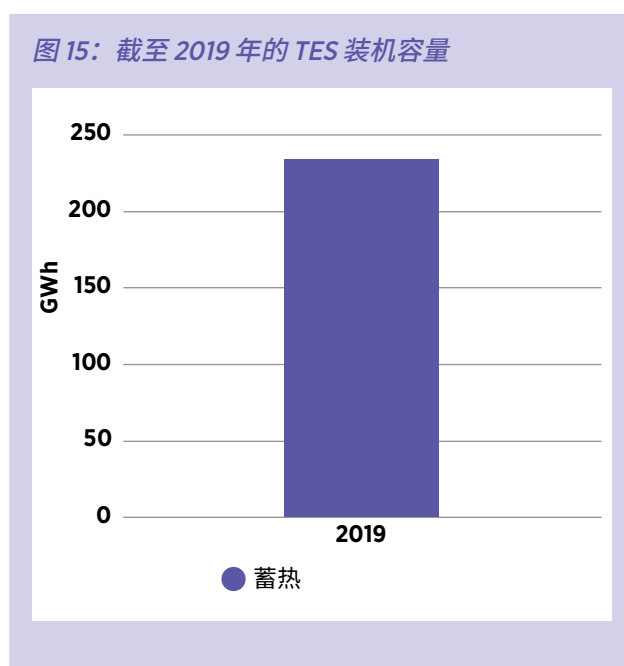
本“创新前景”强调了 TES 的独特能力，其能够进一步促进全球跨部门可再生能源整合，并更高效地满足供热/供冷需求。本报告优先考虑了现有和正在开发的 29 项 TES 技术，并说明了其在未来几十年可为能源系统和细分部门带来的价值和收益。

⁵ 还有将蓄热与电力储存结合使用的混合动力系统。

1.2 TES 的市场评估

有越来越多的解决方案可将更高比例的 VRE 平稳整合到能源系统中。储电技术已成为灵活性的关键来源，特别是对于电力、建筑和运输部门。但是，储能部门需要多元化发展，以避免生产供应链中可能出现的瓶颈，并满足各种终端用能需求。因此，TES 作为热能解决方案在为电力部门以及供热和供冷应用提供灵活性方面的作用显著。2.3 节解释了将 TES 整合到能源系统中的优势。

图 15 展示了 TES 及其他广受青睐的储能技术的装机容量。IRENA 分析估计，到 2019 年底，全球 TES 装机容量已超过 234 GWh，成为私营和公共部门越来越重视的一项技术。对于其他技术的市场状况，到 2019 年底，电动汽车应用的累计电池装机容量约为 200 GWh，而固定式电池储能应用的装机容量约为 30 GWh，包括用于并网发电和分布式系统（屋顶 PV 系统）（IRENA，2020a）。⁶



本节重点探讨三个主要部门（电力、空间供冷和供热）的 TES 市场。该分析基于 IRENA 从 430 多个项目中收集的数据，其中包括：

发电

熔融盐技术：非洲、美洲、亚洲和欧洲已投入运行和规划中的熔融盐 TES。压缩空气储能 (CAES)、液态空气储能 (LAES) 和固态技术。

空间供冷

TES 供冷项目大部分位于美国，还有一些大型项目位于约旦、葡萄牙和卡塔尔等气温较高的国家。

区域集中供热系统、建筑和工业供热

TES 供热项目（不包括小型热水罐）的大部分大型 TES 设施装机容量来自中欧和北欧（尤其是丹麦、德国和瑞典）区域供热系统。

运输（冷链）

相变材料 (PCM) 项目。

电力部门

TES 已经在电力部门应用于负荷转移及产能稳固。根据 IRENA 数据库，凭借其先进的技术成熟度及其在 CSP 发电厂中的应用，熔融盐储能是该部门应用最为广泛的 TES 技术。同时，固态材料（例如陶瓷或热岩石）和 PCM 等其他 TES 技术也已应用于 CSP 和非 CSP 部门的示范和试点项目。

⁶ 由于储能介质性质不同，电化学和热能技术的装机容量无法直接进行比较。这意味着 1 GWh 的电化学储能装机容量并不等于 1 GWh 的蓄热装机容量。因此基于所提供的信息给出相应值，以证明特定技术的市场地位。

熔融盐 TES

由于适合与 CSP 发电厂相结合，大部分熔融盐热装机容量用于电力部门。全球目前的熔融盐储能装机容量已超过 21 GWh。截至 2019 年底，装机容量最高的三个国家/地区是西班牙、美国和南非（图 16）。

随着使用 TES 的 CSP 电厂比例及储热装机容量不断增加，熔融盐储能也会随着 CSP 电厂的进一步建设而快速增长。自 2014 年以来，大多数 CSP 电厂都安装了 TES（21 世纪可再生能源政策网公司，2020 年）。

计划到 2030 年，熔融盐 TES 的装机容量至少达到 74 GWh。为了在当前和规划政策下与当年预测的 20 GW CSP 容量相匹配，还将需要约 126 GWh 的额外熔融盐储能装机容量（相比原计划多 52 GWh）。

与当前趋势、政策和规划相比，与《巴黎协定》一致的 IRENA “能源转型情景” 预计可再生能源的增长目标更为宏大，到 2030 年需要增加 56 吉瓦 (GW) 的 CSP 装机容量（IRENA，2020a）。

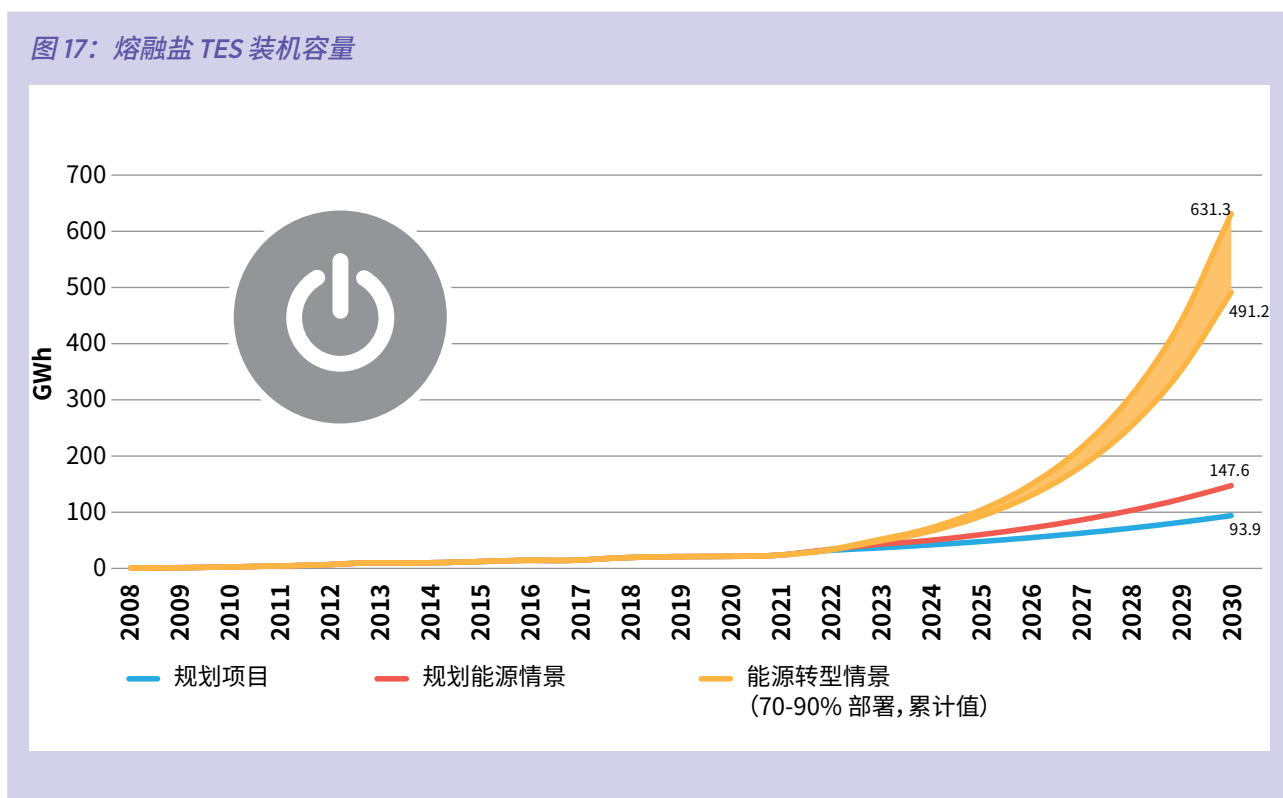
CSP 装机容量的增长（如图 17 所示）将使熔融盐 TES 的装机容量增加四倍（与“能源规划情景”相比），达到 491 GWh 至 631 GWh。该数据为保守估计，即 70% 至 90% 的全新 CSP 发电厂将安装熔融盐储热装置。该情景要求各国实施适当政策（请参阅第 5 章）和激励措施，以加快 CSP 和 TES 的部署。该情景考虑到该部门因新冠疫情造成的增长放缓情况，并假设接下来三年（2020-2023 年）需要建立正确的政策环境，以在 2030 年之前实现这一部署速度。

图 16: 全球熔融盐 TES 装机容量 (吉瓦时)



免责声明：该地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 官方认可或接受。

图 17: 熔融盐 TES 装机容量



IRENA 估计，熔融盐 TES 当前的安装成本为 26.1 美元/kWh 至 40 美元/kWh。假设 TES 的额定工作能力为 8-11 小时，则为满足 CSP 装机容量（根据 IRENA “能源转型情景”），未来 10 年所需的熔融盐 TES 累计投资为 123 亿美元至 244 亿美元，具体数据取决于使用的 CSP 技术。

但是，如果储热技术的成本继续下降（假设到 2030 年成本为 21.8-25.8 美元/kWh），那么所需投资可能会减少至 102-157 亿美元。

熔融盐储热部署的进一步增长也可能来自电力部门的独立大容量储能，已有计划将退役的燃煤发电厂改造成储能设施（请参阅第 4.1 节）。

空间供冷

由于整体经济繁荣、气候变化影响及全球气温上升，全球范围内的空间供冷需求正逐步增加。家用空调销售额持续快速增长。根据 IRENA 分析，2016 年空间供

冷的能源需求达到 8.1 艾焦耳(EJ)，并且还在继续增长，预计到 2030 年将达到约 11.3 EJ。另一方面，IRENA 估计通过提高能效措施（例如建筑保温和改造）和可再生能源技术，到 2030 年，在“能源转型情景”下的增长可能会放缓至 9.3 EJ。无论如何，需求增长要求进一步利用 TES 供冷技术，以实现更大的灵活性和需求转移（请参阅 2.3 节）。如此有助于以较低的整体系统成本满足供冷需求。这些储热技术还包括罐式蓄热 (TTES)、地下蓄热 (UTES) 及 PCM。

当前，在 IRENA 于 2019 年底确定的 400 个 TES 项目中，超过 160 个已用于建筑和区域空间供冷，装机容量超过 13.9 GWh。未来十年这个数字可能会快速增长，尤其是在北非和撒哈拉以南非洲、东南亚和中东地区，因为这些地区的气温已达到极限水平，并已大规模采用更先进的供冷技术。TES 可通过为电力系统运营商提供额外的需求侧管理作为这种增长的补充，确保降低系统成本及整合更高比例的 VRE。

图 18 探讨了全球 TES 供冷应用增长的两种情景，⁷ 供冷需求的增长基于两种情况：一种是当前的政策情景，即“能源规划情景”；另一种是与气候变化相协调的情况，即“能源转型情景”，主要基于可再生能源和能源效率技术。

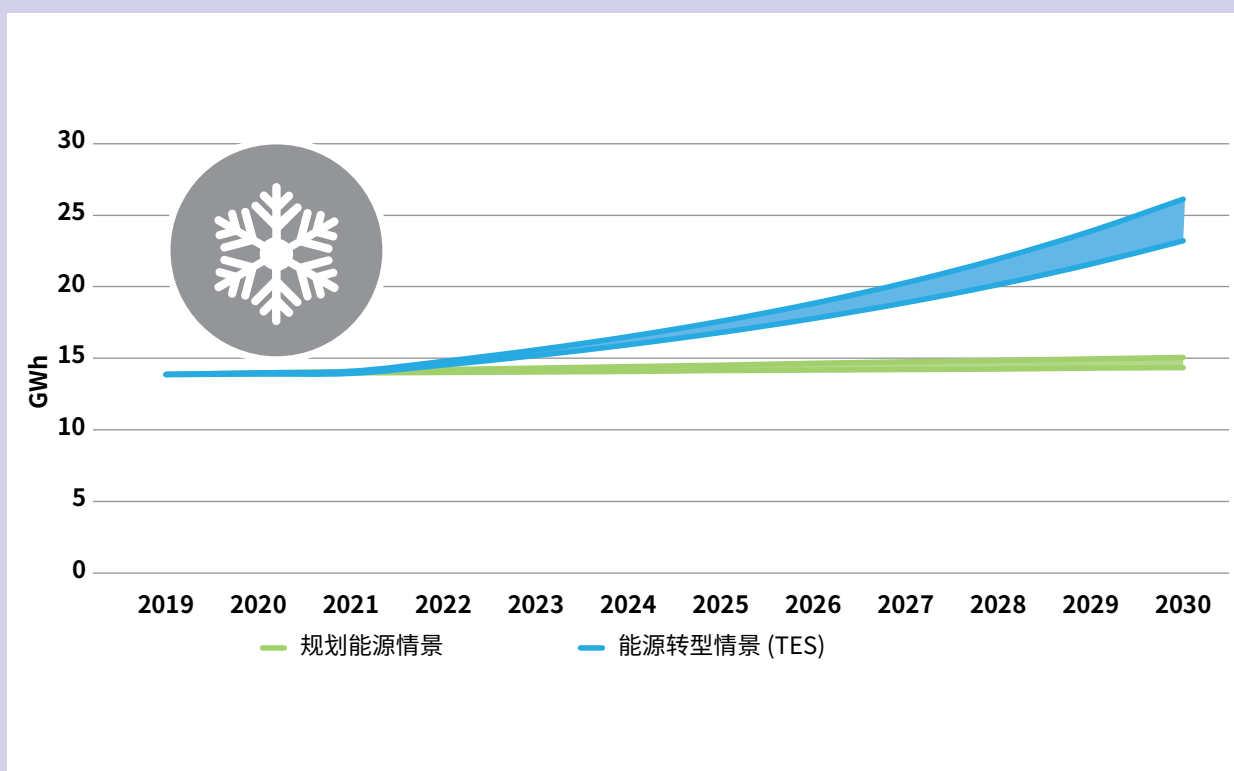
在第一种情境下，TES 供冷应用以目前的速度增长。在“能源转型情景”中，TES 供冷的全球装机容量将根据美国⁸ 的 TES 装机容量与供冷需求比例增长。全球 TES 供冷装机容量需增加两倍才能满足供冷需求，并推动更多需求侧灵活性方案的出现。

同时，还需要技术进步（例如数字化和提高储热容量）、提高效率以及在建筑中实施节能措施。

如前文所述，2020-2023 年将是政策实施的关键时期，这些政策可加快供冷中 TES 技术的应用，使其在全球范围内与美国的部署率相匹配（请参阅第 5 章）。

考虑当前供冷中 TES 技术的安装成本，可以估算出达到“能源转型情景”所需装机容量的投资。以 TES 区域和建筑供冷技术的平均安装成本为 60-230 美元/kWh 计算，未来十年，TES 在供冷中的应用大约需要投资 5.6 亿至 28.2 亿美元，才能使全球 TES 装机容量达到与美国相近的部署水平。

图 18：全球范围内空间供冷 TES 装机容量和预测容量



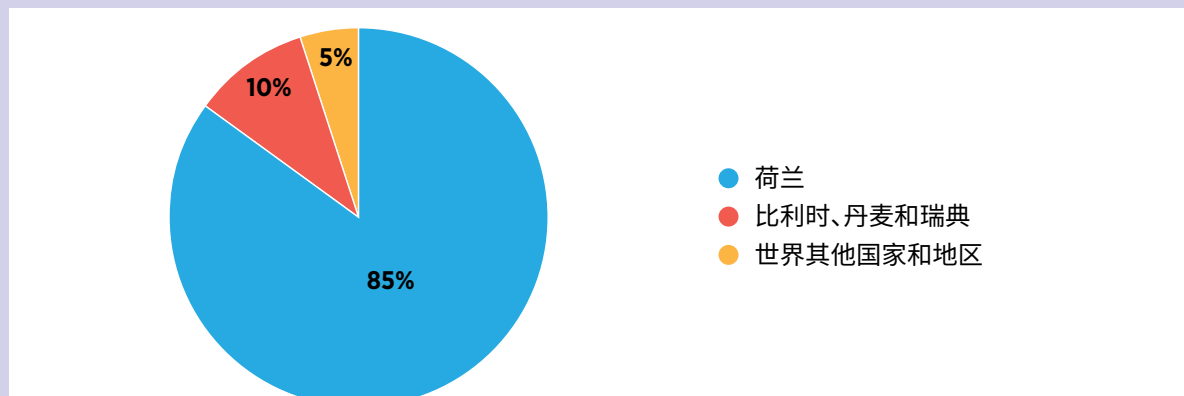
7 由于技术、地理位置和资源数据的可用性受到限制，本预测不涉及含水层蓄热 (ATES)（请参阅方框中的内容）。

8 请注意，这并不意味着美国的 TES 供冷装机容量最高，但美国项目的可用性相对较高，供冷需求数据较为充分，因此可将其案例作为该技术全球部署的参考。

含水层蓄热

含水层蓄热 (ATES) 项目具备最大的 TES 项目储热容量，因此非常适合季节性储能。全球目前已安装了超过 2,800 个 ATES 项目，大多数位于荷兰和西欧（图 19）。这些项目每年提供超过 2.5 TWh 的供冷和供热能力（Fleuchaus 等人，2018 年）

图 19: ATES 项目



来源：改编自 Fleuchaus 等人，2018 年。

全球最大的项目位于斯德哥尔摩的阿兰达机场。含水层体积为 2 亿立方米 (m^3)，最多可储能 9 GWh。各季节使用相同水量用于供冷和供热，例如融化跑道上的积雪及预热通风系统。该项目使机场每年的能耗减少 19 GWh，并且仅使用生物燃料能源（Swedavia Airports，未注明出版日期）。

建筑、区域供热及工业应用

近年来，供热系统（空间供热和热水供应）效率迅速提高，全球供热需求增长放缓。2018 年，全球供热需求达到 212 EJ（IEA，2019 年）。

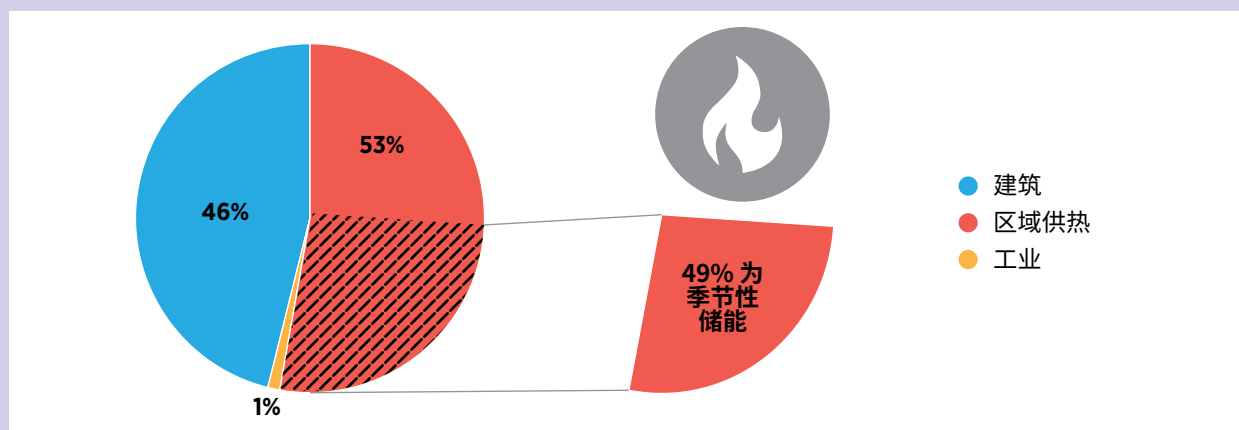
2019 年，IRENA 统计的用于全球建筑、区域供热和工业过程供热的中大型 TES 总装机容量达到了 199 GWh（图 20），其中包括 TTES、UTES 和固态 TES。

由于使用了大体积的 ATES 和地埋管蓄热 (BTES)，区域供热应用占 TES 现有装机容量的最大比例。约一半的区域供热项目采用了季节性储热，这是 TES 技术为能源系统带来的独特优势。

电力部门出台了相关法规和政策，旨在将更高比例的可再生能源整合到电力系统中，这可能将会刺激工业 TES 比例的增加。尽管全球供热需求保持稳定，但 TES 供热系统的整体装机容量可能因此增加，从而提高工业中的工艺加热效率，同时将可再生能源整合到低碳能源系统中。

由于热水罐储热的普遍性及分布式小规模性质，全球范围内的装机容量难以衡量。固态和 PCM 等其他蓄热技术的持续进步可能促进整体装机容量的大幅增长，从而为电网提供急需的灵活性和需求侧管理功能。英国的一项研究预测，如果英国要在 2050 年之前实现碳净零排放，则使用电力供热的英国家庭可能需要安装 TES（Energy Systems Catapult, 2020）。

图 20: 供热应用的 TES 装机容量 (占总装机容量的百分比)



另一项研究预测到 2030 年，在区域供热储能方面，法国供热网将部署 5-10 GWh 的 TES (ATEE, 2016 年)，仅次于丹麦、德国和瑞典等欧盟领先国家。由于 UTES 的广泛使用，目前这些国家/地区的区域供热储能装机容量占全球 60% 以上。

中国正迅速采用各种形式的 TES 供热技术，包括使用复合相变材料 (cPCM) 储存过剩的可再生能源 (否则将发生弃电) 并用于清洁供暖。降低燃煤供热产生的碳排放及造成的空气质量影响这一意愿推动了相关技术应用。根据金合能源数据，中国的 TES 装机容量超过 1.5 GWh (Jinhe Energy, 2020 年)。

由于原型和演示阶段采用了几种 TES 供热技术 (例如固态和 PCM) 及热水罐储能的分布式特性，因而所获信息有限，无法进行全球部署预测。尽管预计供热需求将会下降，但新颖和成熟技术的不断应用证明人们仍将重视 TES 供热所带来的优势。这对于将 VRE 整合到电力系统及大规模电气化至关重要。这些技术应用能够证明 TES 是未来需求侧灵活性的重要源头，有助于实现更高效和更廉价的能源系统 (请参阅第 2.3 节)。

预测总结

未来的电力系统需要储能替代方案的组合，因为每种替代方案具有不同的价值定位 (储存期限、能源密度、具有不同响应时间的市场服务及工作温度等)。图 21 展示了当前和未来的 TES 装机容量估算，尤其是固定式储能 (用于并网规模和分布式屋顶 PV 发电装置)、电动汽车储能和蓄热方面。

总体而言，储能技术前景广阔。在“能源转型情景”中，固定式储能装机容量预计将从 2019 年的 30 GWh 增长至 2030 年的 745 GWh，电动汽车储能装机容量将从 2019 年的 200 GWh 增加至 2030 年的 5065 GWh (IRENA, 2020a)。⁹ 将熔融盐和空间供冷预测考虑在内，TES 技术到 2030 年将达到至少 800 GWh 的储能装机容量，几乎是现在的三倍。必须强调的是，由于未考虑 TES 供热项目和固态 TES 等其他 TES 技术的未来增长，此预测仅涵盖部分 TES 潜力。此外，预计工业和运输部门应用的 TES 解决方案 (例如 PCM 和热化学 TES (如水合盐和液体吸收)) 的技术成熟度将进一步发展，因此未来十年 TES 在全球储能市场的比例将进一步增长。

⁹ 由于储能介质性质不同，电化学和热能技术的装机容量无法直接进行比较。这意味着 1 GWh 的电化学储能装机容量并不等于 1 GWh 的蓄热装机容量。因此基于所提供的信息给出相应值，以确定特定技术的市场地位。

图 21. TES 装机容量预测

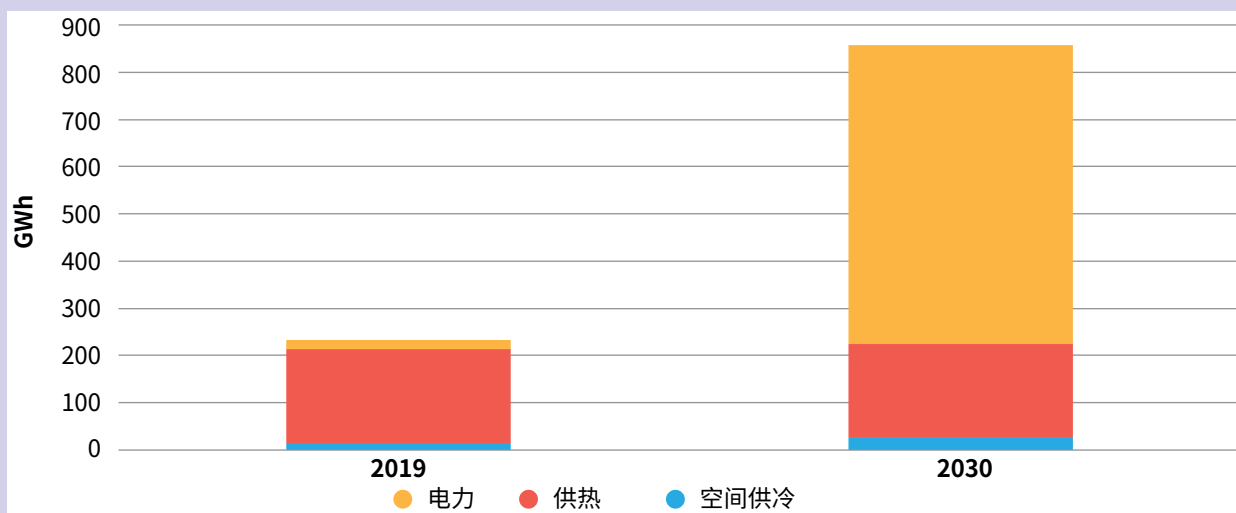
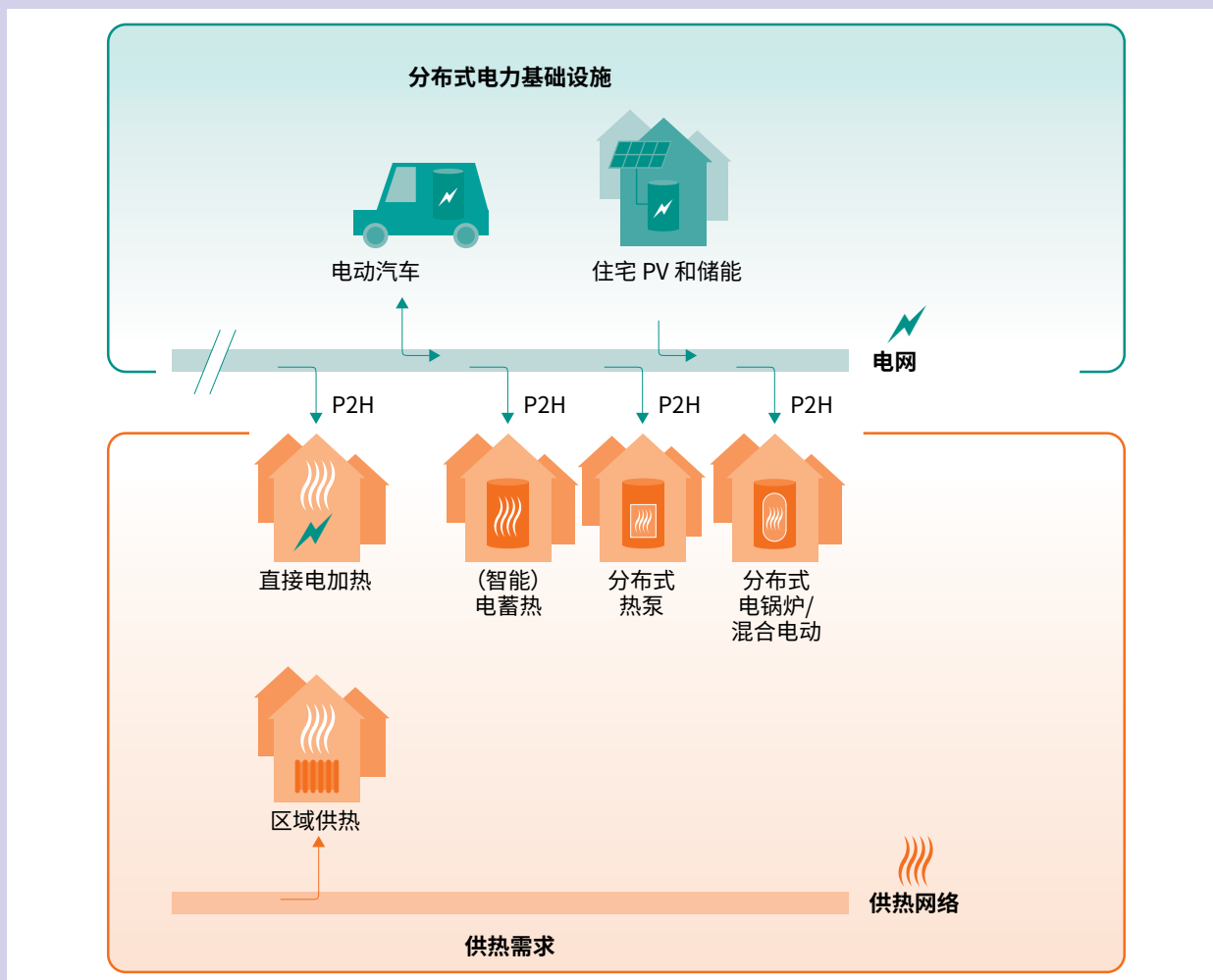


图 22. 为满足电力和供热需求灵活性的并网式和分布式电力基础设施概述



注：P2H = 电制热

来源：Bloess、Schill 和 Zerrahn，2018 年。

1.3 TES 在集成能源系统中的作用

随着能源系统终端用能部门的电气化以及可再生能源发电技术更广泛地应用于电力以外部门，促进部门整合有助于实现更加高效的能源系统。热电耦合的示例之一是“电制热”（P2H）概念（图 22），通过一系列分布式电气化供热和储能技术满足供热需求（Bloess, Schill 和 Zerrahn, 2018 年）。该类方法有时称为“智能能源系统”，它链接并协调电力、热能和天然气网络以发挥协同作用，在为每个部门提供最佳结果的同时最大程度地提高整个系统的效率（Lund 等人, 2016 年）。

TES 还有助于提供更多方案，以实现供热和供冷部门的灵活性。使用 TES 可以增强电力系统的灵活性。在可再生电力供应充足的情况下，应用智能控制系统生产热能（或冷能）并使用 TES 储热，有效平衡电力供需，同时帮助实现供热（或供冷）脱碳。通过优化家用热泵热水罐，蓄热也有望在电力矢量方面发挥重要作用。

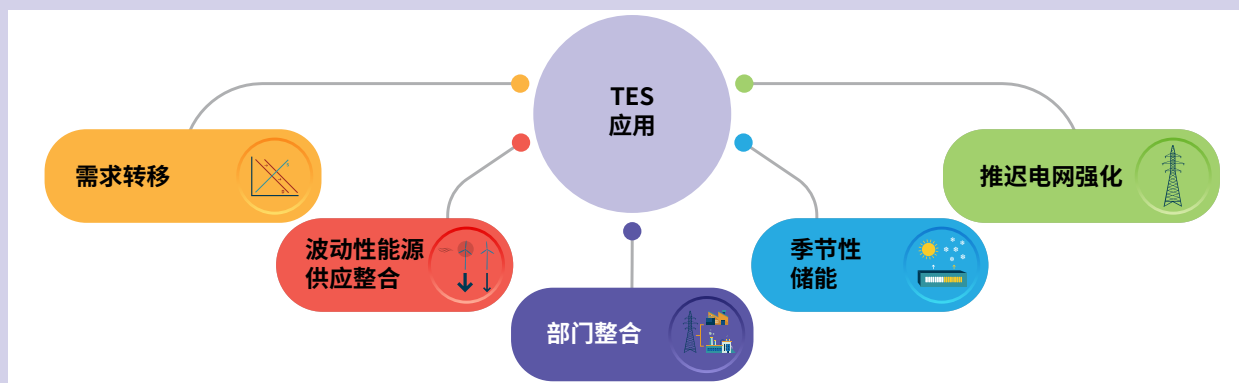
TES 可带来的效益取决于不同的能源系统及其未来发展，与可再生能源的利用以及热能和运输电气化需求有关。TES 的关键应用示例如图 23 所示。通过在不同的设置情景下进行分析，可以对 TES 可能在未来日益

集成的系统中所扮演的角色有更深入的了解。在此，对效益进行了定义及背景说明。本报告还进一步运用示例介绍了哪些领域已经以何种方式实现了这些效益，或者未来在哪些领域其地位会更加重要。TES 部署所带来的具体效益根据不同能源系统、气候和地理位置有所不同。

波动性可再生能源发电整合

蓄热可用于调控波动性可再生能源的出力。有时将其称为产能稳固。用于缓解发电量的快速下降或升高，以及波动性可再生能源的长期供电变化，例如夜间或日间发生的变化。鉴于太阳光照和风力每分钟都在变化，目前需要适当储存由这些来源生产的电力作为常规发电（如煤炭、天然气或抽水储能）的补充，以弥补需求缺口。系统运营商使用各种平衡工具管理从亚秒、分到小时不等的时间范围内的波动。蓄热尚不适合提供例如频率管理等亚分钟需求服务，而电力储存能够更快地解决相关问题。从技术和经济角度来看，**蓄热适合提供跨越数分钟/小时的电力系统平衡服务，以及满足跨越数小时的热能需求变化。**与电池相比，TES 技术的循环使用寿命较长，且随着时间推移效率下降较低，因而整体使用寿命成本更低（Lund 等人, 2016 年）。

图 23. TES 在能源系统的关键应用



部门整合

TES 可以通过部门整合减少弃电并提高可再生能源的利用率。这指的是将过剩的电力转化为热能，从而将发电与其他部门（例如供热）的需求联系起来，以提高能源系统的灵活性。通常热能需求远远高于电力需求（特别是终端供热应用），因此将能源储存为热能而非电力更为高效。鉴于 TES 技术的高成本效益及高效率（Lund 等人，2016 年），TES 的部署有助于利用部门整合帮助**电力系统脱碳**。

供热和运输部门的电气化将极大增加电力系统的负担，仅依靠电力部门设施可能使能源系统资源供应紧张，同时还会增加整体成本。TES 有助于分离交通运输部门的热能需求，并（通过降低车辆的冷却/加热负荷）减少交通运输部门对高比例可再生能源的电力系统的用电需求。TES 还是用于有效部署热泵等技术的关键使能系统组成部分，可以优化热泵功率并以较低成本实现高效满负荷工作。这有助于提高诸如电制热（有助于可再生能源整合）等战略潜力，从而促进了整个系统的发展。

需求转移

使用蓄热可以及时转移能源需求，以更好地匹配 VRE 供电并减少系统压力。例如，低谷时段为蓄热系统充电，需要时释能，可以将诸如建筑空间供热和/或供冷等高峰重合电力负荷转移至较低成本时段。这使得现场需求模式保持不变，但将热能或冷能的生产转移到更有利的时段（例如电网无拥堵、可再生能源发电量高、低价格时段）。此外，还可在可再生能源可用性较高时为蓄热系统充电，未来需求较高时则将其释放，通过提高利用率改善整体系统效率。从系统角度来看，通过储存管理过剩的可再生能源发电量相较于弃电而言效率更高，因其通过避免能源浪费、提高可再生能源的利用率降低了消费者的总体成本。需求转移也是有效实行部门整合的关键推动力，否则将需要通过大量增加总体供应和网络容量以满足相同需求。

网络管理

负荷转移不仅有助于提高可再生能源的利用率，使其满足更高的需求比例，同时有助于推迟或避免昂贵的电网改进需求。由于面临高供应低需求时段的挑战，分布式发电给网络运营商造成压力。如果不强化或增加电网容量，高峰供应时期则必须将电力从本地网络中输出。此外，电网的建设是为了满足高峰需求；供热和交通运输的电气化可能会使需求增加，从而引发额外投资增加峰值储备空间以增加电网容量。

因此，电网容量是一个限制因素，它决定了在本地更大范围地部署可再生能源发电厂、热泵和空调的可行性。如果没有储能或其他形式的需求管理，则全球电网将需要进行大范围强化。**蓄热系统可以有效地管理由供热和供冷负荷驱动的尖峰需求。**这是因为最终需求为热能或冷能而非电力。

例如，对拉脱维亚电力系统的分析表明，即使在供热未完全电气化的情况下，也可能需要强化电网。利用 TES 以高度协调和受控的方式减少峰值负荷将有效避免该类情况（O'Dwyer 等人，2018 年）。虽然这一发现仅针对特定案例，但由此可以了解 TES 在网络管理中的潜在作用。

季节性储能

蓄热可将能源储存数天甚至数月，从而解决供求的季节性变化。这对于热能负荷季节性差异显著地区的能源系统尤其有利。夏季将太阳能光伏或风能等可再生能源生产的过剩热能储存在 TES 中，用于补充或满足冬季供热需求。这一举措将减少高峰时期对不可再生能源的需求。蓄热系统还可在冬天储存自然冷能，以在夏季提供空间供冷。虽然这种特殊的能源利用方式并不直接促进可再生能源整合，但有助于减少夏季高峰时段的用电需求。

1.4 系统方法

越来越多证据表明，采用系统方法以更具成本效益的方式整合可再生能源并帮助能源系统脱碳具有极大优势。例如，芬兰的一项研究发现，使用 TES 的风能制热系统可通过提高风能利用效率增强脱碳能力。采用热泵、电锅炉和 TES 的整合试点系统替代天然气锅炉，与未采用这些技术的对照系统相比，实现了 30% 的减排效果（Kiviluoma 和 Meibom，2010 年）。

此外，随着风能太阳能在能源结构中的比例开始增加，**将 TES 整合到电制热系统将有助于减少可再生能**

源的弃电。例如，美国宾夕法尼亚州 - 新泽西州 - 马里兰州能源市场区域的一项研究发现，使用配备蓄热系统的热泵或分布式电阻加热器将使可再生能源弃电减少 50-90%（Pensini、Rasmussen 和 Kempton，2014 年）。

这些研究表明，给定能源系统能否实现 TES 的优势还取决于某些辅助性设备和基础设施的部署。因此，规划能源系统灵活性和整合性的整体系统方法可带来众多益处。

案例研究 1. 中国利用部门耦合降低弃风率

中国新疆的区域供热系统通过蓄热降低弃风率

由伯明翰储能中心领导、英国工程与物理科学研究理事会和中国国家自然科学基金委员会资助的英中合作项目报告了一项成功的商业示范试点——中国新疆地区使用 cPCM 将蓄热系统整合到区域供热方案中。

该项目一方面由于需要亟待解决可再生能源的间歇性，另一方面与可再生风能的高渗透率以及热电联产区域供热计划造成的电网限制挑战相关。新疆当地电力需求较低，大部分可再生能源（风能和太阳能）发电用于地理位置较远的负荷中心。

需求低迷及电网限制导致 2016 年的弃风率高达 40%。为此，中央和地方政府针对提高可再生能源利用率的途径进行了相关调查。

热能脱碳也被列入了列入政府议程，还通过上网电价为其提供支持。电价的波动性也很大。

主要解决方案是将终端用能部门耦合，以及将过剩的可再生能源转化为热能储存在储热系统中。自 2016 年 10 月开始，使用高温 cPCM 的 6 兆瓦/36 兆瓦时 (MWh) 的示范电厂投入运营。

该电厂在低谷时段（此时电价仅为平常一半）进行蓄热。据估计，其中超过 80% 的电力（即每年超过 5000 MWh）为风力发电（否则将会发生弃风）。

该设施已成功利用当地风力发电机产生的过剩电力降低弃风率、缓解电网限制及储存脱碳热能。由于试点取得了成功，中国各地又建设了另外 20 家发电厂并投入运营（Ding，2018 年）。

从根本上讲，蓄热是更广泛的灵活性方案组合的一部分。相较于TES，电力储存和需求侧措施则具有不同的优点和应用。其他选择包括氢气，氢气作为能源储存载体这一方案也正日益受到重视。其优点在于它是一种灵活的燃料来源，需要时可用于供热、发电或运输。人们对各种储能和灵活性技术在未来能源系统中将要扮演的重要角色愈发了解。

但是，鉴于越来越多的变量正在增加系统的复杂性，因此仍然需要大量工作来开发、设计和落实集成能源系统的策略。齐心协力采用系统方法找到**基础设施和市场信号的正确组合**非常关键。这将推动 TES 应用的**高效项目和商业模型的出现**。

通过全系统范围内协调整合蓄热减少了弃光和弃风现象。

2. 技术概览

基于不同的基本科学原理，蓄热 (TES) 所涵盖的技术非常广泛。本报告针对了 29 种 TES 技术，并根据以下标准进行了优先排序¹⁰：

- **技术特征：**包括技术成熟度、通用性、可复制性和额外性。¹¹
- **克服波动性可再生能源 (VRE) 领域挑战的潜力：**解决方案能够推动减少输电网的弃电、调峰、系统惯性和拥堵；促进电力以外其他部门的电气化。
- **规模：**技术适用于分布式系统、集中式系统或者两种系统皆适用。
- **部门：**TES 技术在电力系统、工业、冷链、建筑或区域供热供冷中的应用。

经过评估后，本报告选择了 13 项 TES 技术，这些技术有望帮助能源系统整合更多的 VRE。¹² 本节针对感兴趣的主要技术进行了概述。根据基本工作原理，这些技术可分为四类：

1. 显热蓄热

- 使用水作为储能介质的罐式蓄热 (TTES)
- 固态蓄热（例如陶瓷砖、岩石、混凝土、填充床）
- 熔融盐
- 地下蓄热 (UTES)

2. 潜热蓄热

- 冰蓄热
- 零度以下的相变材料 (PCM)
- 低温 PCM
- 高温 PCM

3. 热化学蓄热

- 化学循环（钙循环）
- 水合盐
- 吸收式系统

4. 机械热耦合系统

- 压缩空气储能
- 液态空气储能

以下各节将针对每个分组进行概述，并阐明每种技术的范围及其工作原理。若要了解更多关于各项技术的详细信息，请参阅附录。

2.1 蓄热技术的主要类型

显热蓄热

显热蓄热是 TES 最常用、也是最先进的商用技术类型。它通过加热或冷却储存介质（液体或固体）储存热能，但不发生相变。工作温度范围内，储存的能量与充能时的温度变化（上升或下降）以及材料的热容量成正比。

¹⁰ 若要了解更多关于优先排序的详细信息，请参阅附录第 71 节。

¹¹ 通用性 - TES 能够满足能源系统多个用例的能力。可复制性 - TES 可应用于多种能源系统的能力。额外性 - TES 技术在提供特定服务方面的独特性。

¹² 可复制性 - TES 可应用于多种能源系统的能力。

显热蓄热系统可提供每吨 10 kWh 至 50 kWh 的储能装机容量，储热效率为 50% 至 98%，具体取决于储存介质的比热及隔热技术。工作温度范围可介于 -160°C 至 1000°C 以上（欧洲储能协会和欧洲能源研究联盟，2013 年）。

与其他蓄热技术相比，显热储热为最简单、通常也是最廉价的储热形式（通常仅使用水）。因此，当前显热技术的应用最为广泛，通常以住宅水罐或聚光太阳能热发电 (CSP) 厂的熔融盐储能形式出现（欧洲储能协会和欧洲能源研究联盟，2017a）。

显热蓄热可应用于电力部门、工业、建筑以及区域供热和供冷。显热技术的主要缺点包括：所占物理空间较大、较高温度或较长储存时间要求下需要进一步隔热以及需要（能源）投入以维持储存目标温度的潜在需求等。

本报告中探讨的显热储热技术为：

- TTES，使用水作为储存介质
- 固态蓄热（例如陶瓷砖、岩石、混凝土、填充床）
- 熔融盐
- UTES

罐式蓄热

TTES 使用流体（通常是水）作为储能介质储存热能。在本报告中，以下所称的所有 TTES 仅指以水作为储能介质（与熔融盐或其他流体相对）的系统。通过太阳能板、电力或环境温度加热或冷却水，然后根据需要进行输送（Stine 和 Geyer，2001 年）。TTES 代表最简单的蓄热形式，也是应用最为广泛、技术最成熟的 TES 技术。就体积而言，水罐最低仅为几百升大小，与太阳能热结合后适用于小规模住宅应用。受到空间和容器结构限制，其大型应用（商业、工业和区域供热）的最大尺寸约为 80,000 m³。

该系统通常提供日间/全天蓄热。家庭应用中的系统组件为蓄热水罐和热水器，专用于生产热水，某些情况下还用于空间供热、热电联产等。输送水温范围通常为 55-60°C。此外还开发了基于储罐的季节性 TES 系统。有些建成的系统可将 90°C 左右的高温热能储存超过 6 个月的时间，且能量损失小于 10%（BEIS，2016 年）。大规模应用中的热水罐用于季节性储能。它们通常利用太阳能热技术充能将水加热到约 80-90°C。在这种情况下，使用热泵最低可以提取约为 10°C 的热能（IEA 和 IRENA，2013 年）。

固态蓄热

固态或填充床储热使用颗粒储存热能，流经填充床的流体将热能传入或传出系统。此类系统规模各不相同，可以使用多种材料。例如，陶瓷砖可用于储存由家庭电加热器提供的热能，而岩石或混凝土床则以更大的规模储存由风力发电站的过剩电力产生的热能。

固态技术简单、相对廉价且可实现规模化应用。通常应用于只需要低品位热能的建筑中。当前也正在开发新型材料和系统以满足需要更高温度输出的工业和发电应用。

还针对利用例如岩石、混凝土和陶瓷砖等其他天然和人造物质作为储能介质进行了研究。较高温度下，商业上使用基于氧化物（二氧化硅、氧化铝、氧化镁和氧化铁沸石）、碳酸盐（例如菱镁矿）及其混合物的耐火砖。其他材料也在考虑范围内，例如具备更高热性能的混凝土（Xu 和 Chung，2000 年）和 Cofalit 等工业废弃陶瓷材料。（Calvet 等人，2013 年）。



热电站

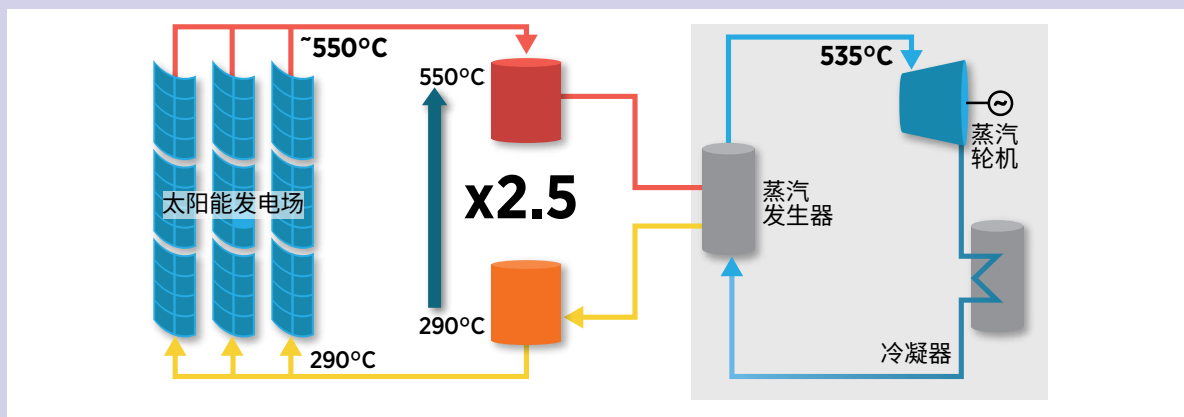
图片来源: Shutterstock

熔融盐

盐是无机化合物。在环境温度下，盐通常呈固态，应用于蓄热时，其温度保持在熔点以上，因而呈液态。

熔融盐用于储存高品味热能。但是它容易固化，因而有可能严重损坏辅助设备。因此，熔融盐的应用仅限于需要高温的严格受控环境，例如电力部门。在电力部门中，熔融盐几乎仅用于帮助整合 CSP，白天储存热能，晚上则将其释放以驱动涡轮机并保证持续发电（图 24）。

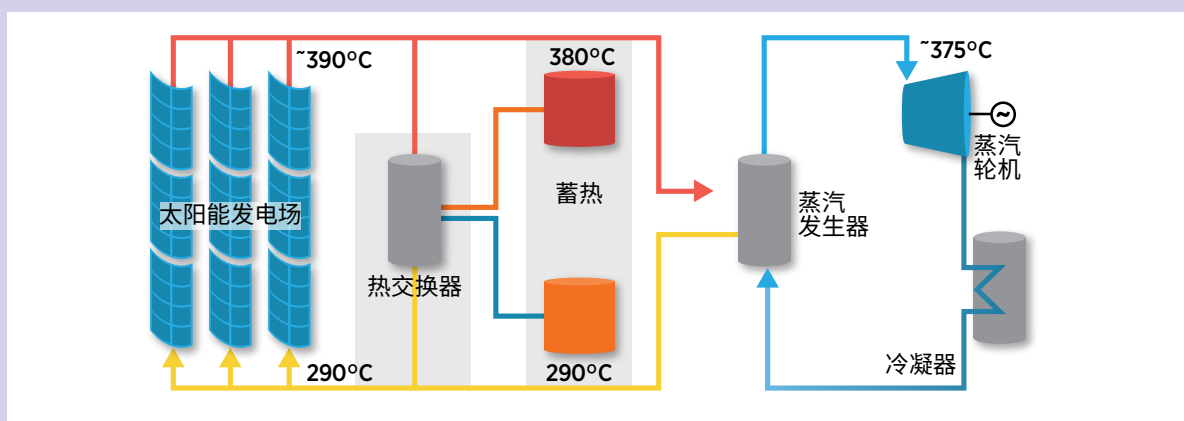
图 24. 直接熔融盐蓄热系统



来源：阿基米德太阳能公司，2020。

两罐式熔融盐蓄热系统是最常用的配置之一（图 25）。熔融盐通过储冷罐和蓄热罐之间的泵送进行充能释能。间接系统使用配备传热流体循环系统的热交换器，而在直接系统中，盐既用作储能介质，又用作传热流体。

图 25. 间接熔融盐蓄热系统



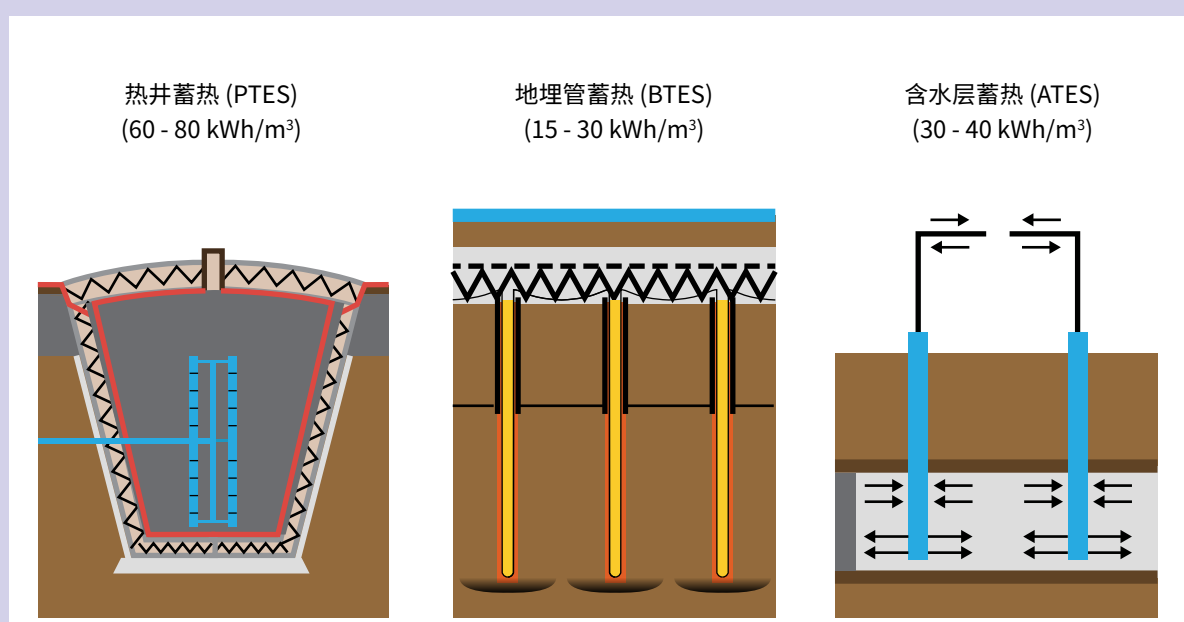
来源：阿基米德太阳能公司，2020。

地下蓄热

UTES 将热能或冷能储存在地下。储能介质可能是由土壤、沙子、坚实基岩、人工井或含水层中的水组成的地质层。UTES 的关键技术有含水层蓄热 (ATES)、地埋管蓄热 (BTES) 和热井蓄热 (PTES) (图 26)。PTES 和 BTES 耦合的混合系统当前也正在开发之中 (欧洲储能协会和欧洲能源研究联盟, 2013 年)。这些技术相对成熟, 其不同形式的应用已有数百年历史。

UTES 系统的主要优点是能够跨季节储存大量热能。但是, 其效率相对较低, 因此最好与廉价热能来源共同部署。UTES 主要应用于区域供热。部分国家当前已经开始将 UTES 技术与可再生能源结合部署, 而其他地区的 UTES 仍处于示范或试点阶段 (欧洲储能协会和欧洲能源研究联盟, 2017a)。

图 26. 地下储能概念



来源: 欧洲储能协会和欧洲能源研究联盟, 2017a

UTES 可用于储存来自太阳能集热器或工业工艺的热能, 或冬季空气的冷能。然后将热/冷能用于冬天空间供热或夏天供冷。部分系统使用热泵帮助部分或整体循环中蓄热系统的充能和释能。供冷应用通常仅使用循环泵 (BEIS, 2016 年)。ATES 利用天然含水层中的地下水为建筑提供冬季供热和夏季供冷。ATES 由一个热井一个冷井组成, 而 PTES 系统则利用隔热的地下井 (装满砾石和水) 减少热量损失。相比 ATES, PTES 的单位成本最低。该系统可通过直接与热水接触或沿砾石使用管道进行充能释能。PTES 相比 ATES 需要更大体积, 但几乎没有地域限制。最后, BTES 使用立式换交热器, 对具有高比热、高导热系数和极低水力传导率的土壤混合物进行充能或释能 (Gao、Zhao 和 Tang, 2015 年)。

潜热蓄热

PCM 使用潜热（储热材料相变（通常从固态到液态）所需的能源）储存热能。PCM 有众多类型和应用。本报告重点介绍在每个关键温度范围内对可再生能源整合潜力最大的类型及应用。

选择 PCM 的主要标准是应用所需的相变温度范围。选择还应考虑如熔化潜热和导热系数等其他热物理性质。图 27 展示了本报告基于这些标准给出的 PCM 分类，并使用 PCM 示例进行了说明。

下面将针对所分析的技术及其工作温度范围进行概述：

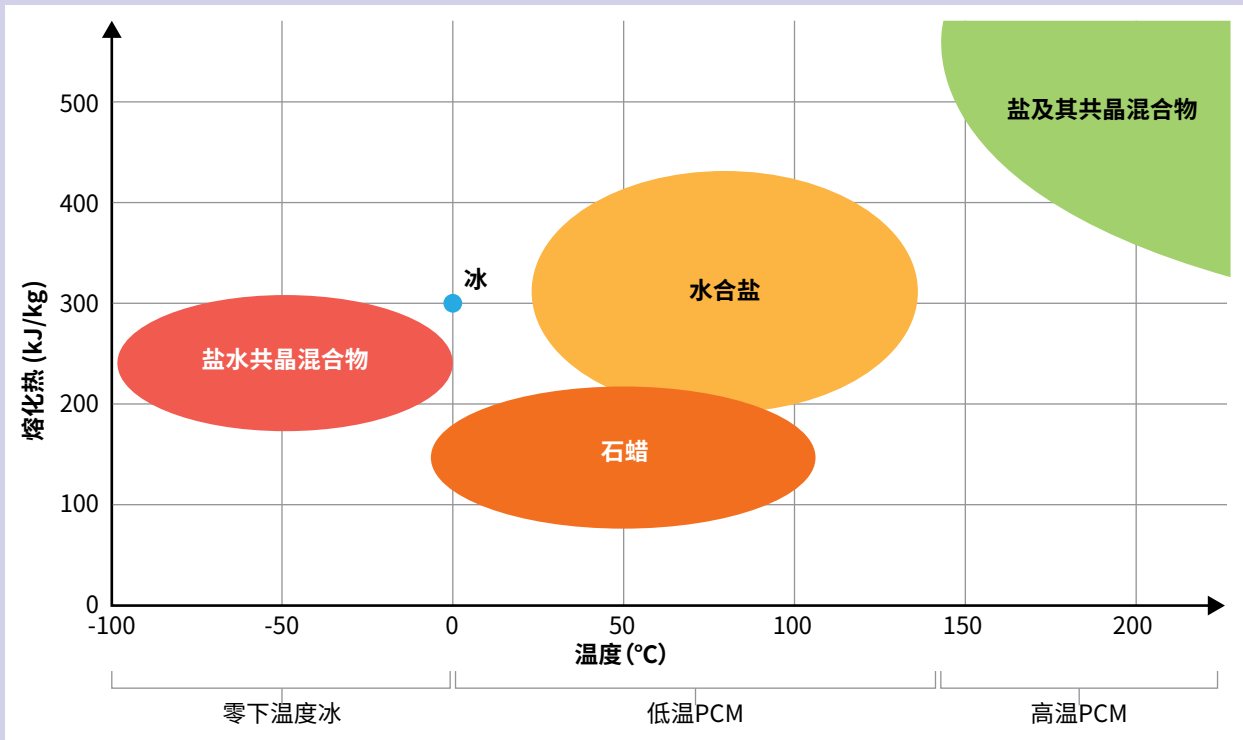
- 零度以下的 PCM：相变温度低于 0°C，例如盐水混合物。

- 冰：转化为水的相变温度为 0°C。
- 低温 PCM：相变温度为 0-120°C，例如石蜡和盐水合物。
- 高温 PCM：相变温度高于 120°C，例如无机盐及其共晶混合物，包括储存在陶瓷支撑材料（称为复合 PCM (cPCM)）中的盐。

与显热蓄热材料相比，PCM 能量密度更高，这意味着其所占物理空间更小。PCM 可进行趋于恒定温度的充能和释能，因此可根据工程需要专门选择 PCM 以提供特定的输出温度。

这种额外控制对敏感性应用（例如冷链中的药物或食物必须在极小温度范围内进行保存）尤其有用。

图 27. 本报告中分析的 PCM 的性质，揭示了熔化热和熔点方面的差异



注：kJ/kg= 千焦每千克。

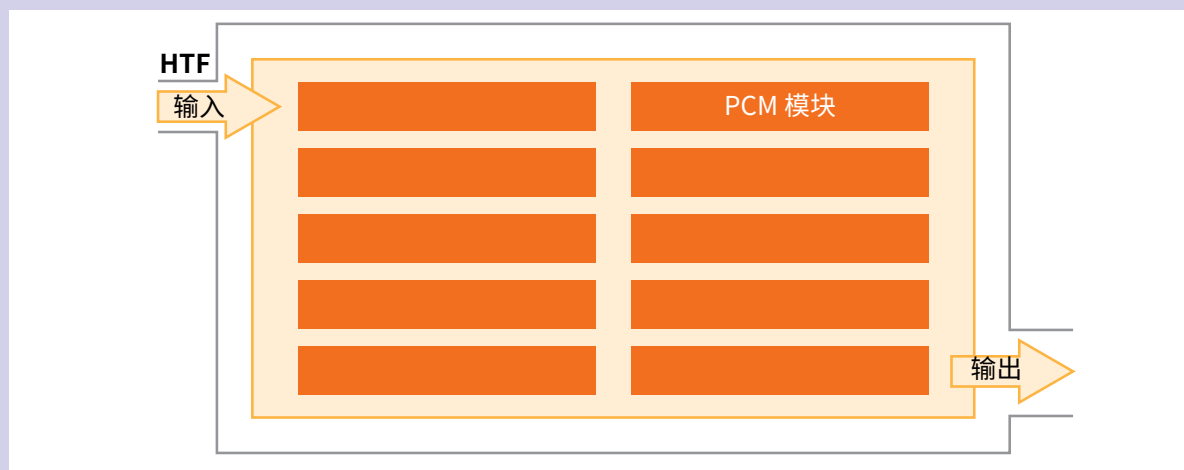
零度以下的 PCM

零度以下的 PCM 既可以是单组分材料，也可以是由两种或多种材料组成的混合物，例如共晶混合物。共晶混合物的定义是按特定比例成分组合导致其熔融温度低于单组分材料熔融温度的混合物。盐水共晶混合物指将盐溶解在水中形成的溶液。所使用的单组分材料或混合材料的成本、相变温度、能量密度及腐蚀性都各不相同。例如，27% 的 NaCl 溶解在水中生成盐水共晶混合物，其冻结温度为 -21.1°C 。水中的盐浓度较低会导致较高的冻结温度。

零度以下的 PCM 可满足相比标准空间供冷更低的冷却温度要求，例如冷链中的供冷。特定情况下，这能够为将冰作为 PCM 提供更有效的解决方案。

大多数应用会将 PCM 封装以避免泄漏，如图 28 所示。大容量储能装置模块中充满了 PCM 并固定在罐中。之后，它们通过吸收流经储罐的传热流体热能将其冷却至特定温度。

图 28. 大容量蓄热系统中的 PCM 封装



注：HTF= 传热流体

来源：Mehling 和 Cabeza, 2008 年

冰蓄热

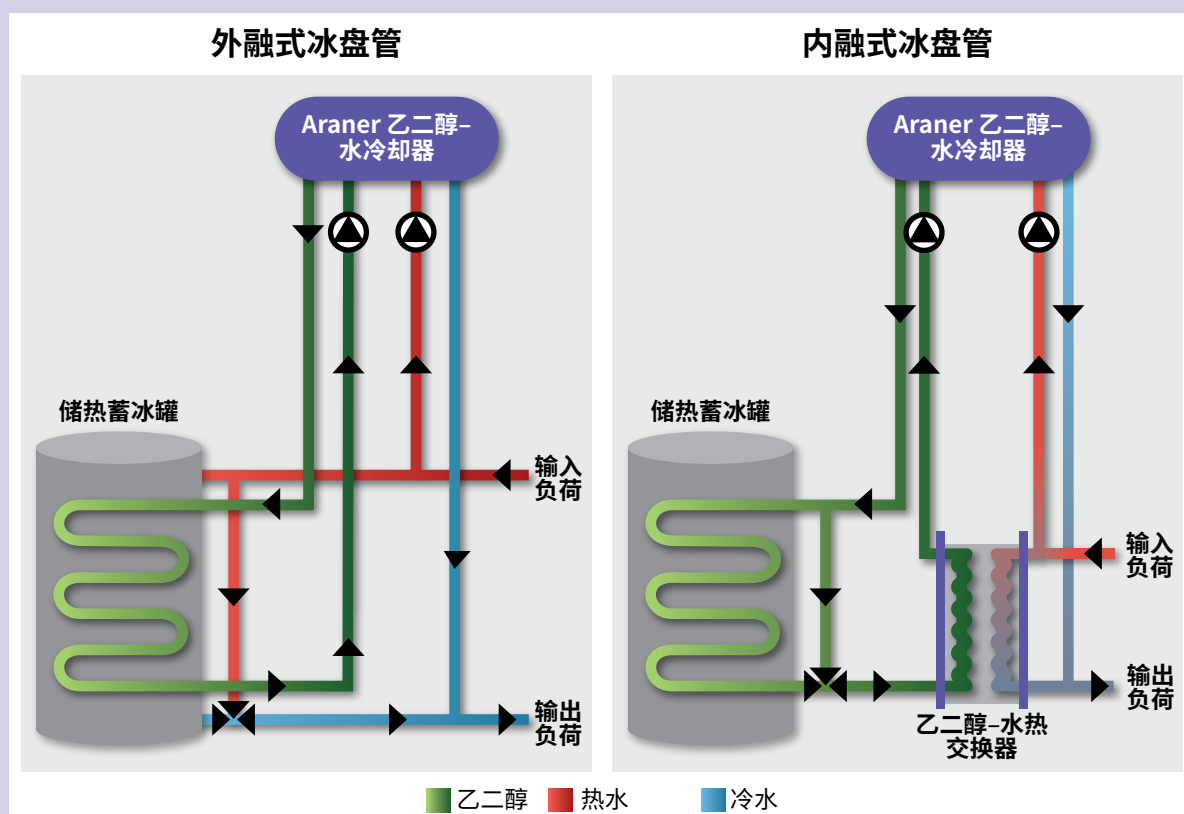
冰具备卓越的储冷属性，如高熔化热 (334 kJ/kg)、高热容量 (4.2 kJ/kg·K) 及无腐蚀性。作为水的固体形式，冰容易获得且廉价。为了将冷能储存在冰中，可以通过放置在冰罐上方的冷却装置或制冰机使用低谷或可再生电力冻结水。冷能通过水或其他传热流体（例如乙二醇）传送以释能。

冰蓄热技术在商业上可用于建筑和区域供冷方案。尽管相比冷冻水罐要贵，但其所占物理空间较小。冰蓄热技术具有两种典型配置，即大容量冰蓄热和冰盘管蓄热。

大容量冰蓄热系统在冷冻温度下将冰储存于装有冷冻水和冰的一个储罐中。充电时，泵将冷却水从储罐传送到制冰机，之后冰回落到储罐。释能过程中，使用另一台泵将储罐的冷却水循环至负荷处，之后温水再从负荷处返回到储罐顶部。冷能还能以冰浆的形式储存用作传热流体。

冰盘管蓄热系统的储存罐中充满了水，且盘管浸没其中。充电过程中，冷却装置将传热流体（例如乙二醇）冷却至零度以下温度并流经盘管，使盘管周围的水冻结。释能过程中，可使用外部循环或配备热交换器的内部循环将冷能从储罐输送到负荷处（图 29）。

图 29. 冰盘管系统



来源: Araner, 2017 年

低温 PCM

低温 PCM 的相变温度为 0°C 至 120°C 。该温度范围内使用的两种常见 PCM 是石蜡和无机盐水合物。石蜡因其多功能性和稳定的化学特性（无毒且无腐蚀性）而成为低温 PCM 的关键材料之一。诸如溴化锶等盐水合物当前已实现家庭供热商业化。

由于价格低廉、潜热适中（约 200 kJ/kg ）及熔融温度范围较广（Jegadheeswaran 和 Pohekar, 2009 年），针对商业石蜡的相关研究数量最多。但是，其导热系数低（每米开尔文 0.2 W/m K ）且易燃，因此应用受到限制。可通过添加高导热系数的颗粒及填料（例如石墨或金属）以有效提高其导热率（Karaipekli 等人, 2017 年）。

低温 PCM 可整合到家用供热和空调设备中，因此尤其适用于建筑物蓄热。

无机盐作为高温相变材料

部分无机盐混合物的相变温度较高（超过 500°C ）。无机盐二元和三元混合物已针对蓄热应用开展了广泛的研究。碱金属的碳酸盐、硝酸盐、氯化物和硫酸盐以及碱金属（例如镁、钾、锂和钙）是用于生产共晶混合物的主要化合物（Pereira da Cunha 和 Eames, 2016 年）。熔融碳酸盐（与硝酸盐一样，是最常用的高温 PCM 之一）的显著特征包括其化学稳定性及在较广温度范围（ $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$ ）下始终保持最佳性能，因此适合于各种高温应用。其储能密度很高，但具有腐蚀性且导热系数低，这限制了充能/释能速率。

当前针对这些问题已提出各种方法，例如使用多孔支撑材料（金属泡沫、多孔碳材料和陶瓷结构）避免泄漏，以及添加例如石墨材料等高导热系数的增强剂。包含多孔支撑材料的解决方案称为高温复合 PCM (HT-cPCM)。HT-cPCM 可应用于建筑中的商用热电池，还能够将过剩风能整合到区域供热方案示范项目中。

热化学蓄热

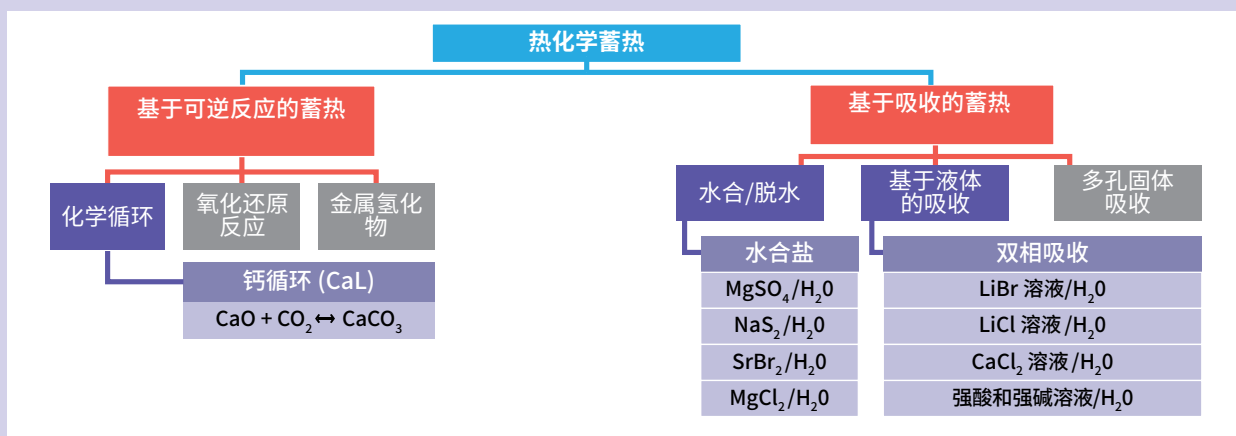
热化学蓄热的能量密度相比显热和潜热蓄热更高。它可分为可逆反应蓄热和吸收式蓄热（Aydin, Casey 和 Riffat, 2015 年）。图 30 对这种分类和相关技术进行了总结。

非吸收式热化学系统基于两种独立化学物质的可逆反应，其中放热合成反应会产生大量能量（Yu, Wang 和 Wang, 2013 年）。

吸收式蓄热则从化学势的角度通过破坏吸附剂与吸附质之间的结合力蓄热（Chang 等人, 2013 年）。

吸收式蓄热只能在约 350°C 的温度下工作，但非吸收式热化学系统可在更高温度下工作并提供更高的储能密度。由于吸收式系统在环境温度下能够尽可能长时间地保存热能而不发生热量损失，因此热化学蓄热技术成为低温下季节性储能(用于建筑)的广泛研究对象。

图 30. 热化学蓄热方法和材料



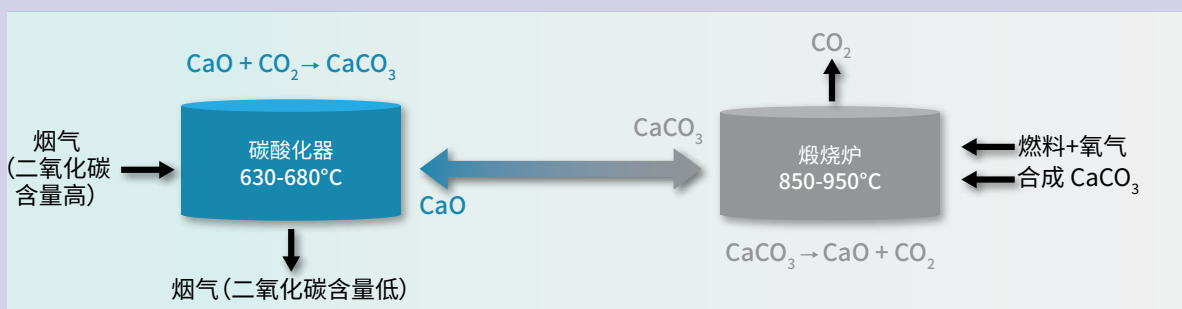
来源：改编自 Ding 和 Riffat，2012 年；Yu、Wang 和 Wang，2013 年；Scapino 等人，2017 年。

化学循环

针对化学循环系统的研究主要是将其作为潜在的碳捕获技术。示例之一是利用氧化钙 (CaO) 和二氧化碳 (CO₂) 之间的可逆反应形成碳酸钙 (CaCO₃)，这称为钙循环 (CaL)。该反应中，CaCO₃ 吸收大量热能，分解为其组成成分 (CaO 和 CO₂) 并将热能提供的能量储存在 CaO 和 CO₂ 分子内的化学键中。然后将 CaO 和 CO₂ 作为储能介质分别储存。

根据条件和能源需求，产品的储存时间可达数周甚至数月而不会造成能量损失。需要时，CaO 和 CO₂ 再次重新结合形成 CaCO₃ 并在此过程中释放热能，如图 31 所示。

图 31. CaL 工艺方案



来源：改编自 Chang 等人，2013 年。

CaL 系统的优势在于其所涉及的所有材料成本极低，且储能密度极高，为每立方米 3.2 吉焦耳 (Chang 等人，2013 年)。但是，该系统涉及的工作温度非常高 (> 600°C)。

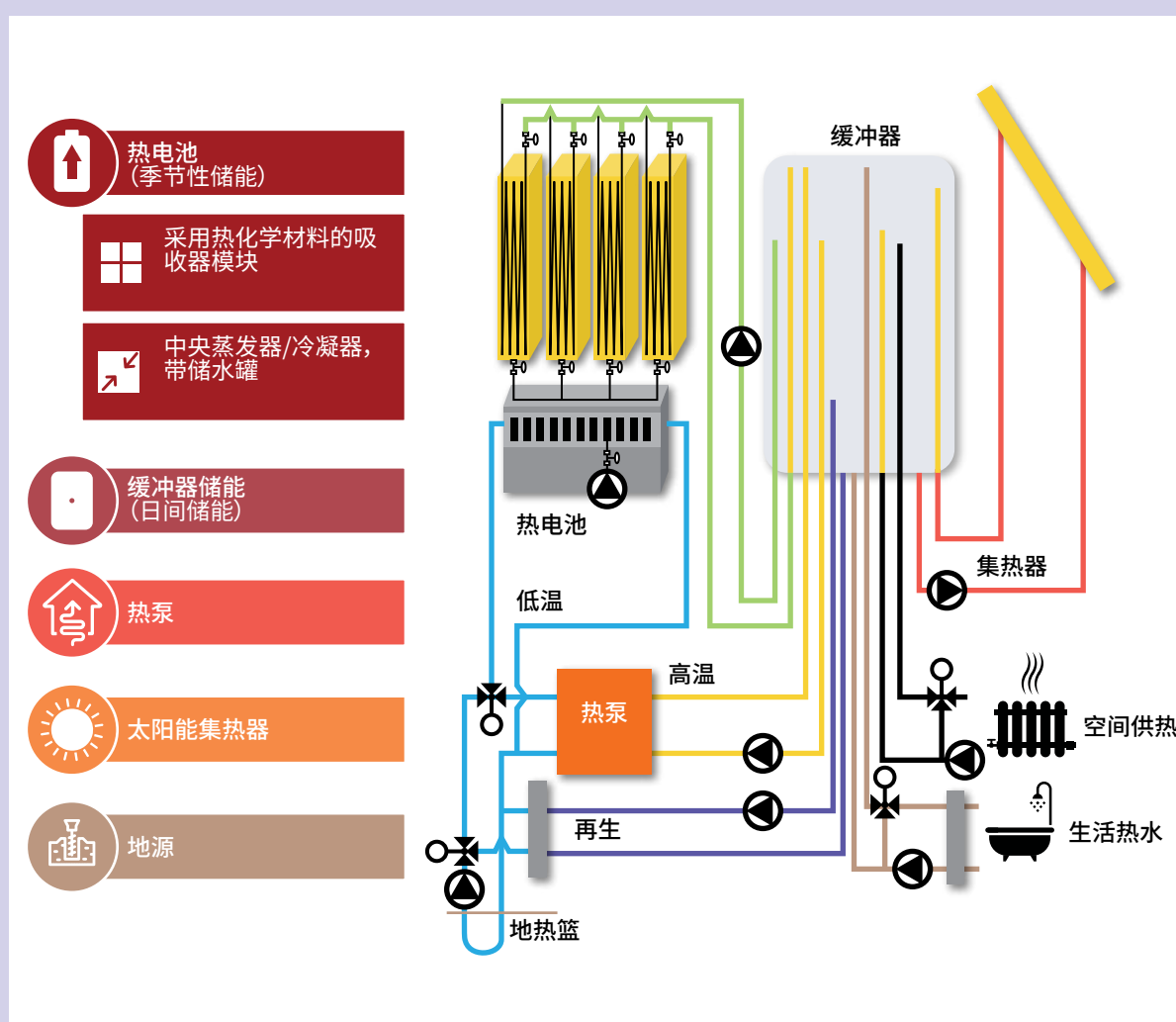
当前正在探索钙循环作为 CSP 储能技术的潜力 (欧盟委员会，2018 年)，同时也在考虑将其用于工业或电力部门的其他高温应用。

水合盐

水合盐是可逆工艺，通过固体盐的水合及随后的脱水吸收和释放能量。水合反应用于蓄热的焦点主要集中于吸湿盐，例如氯化镁 ($MgCl_2$)、硫化钠 (Na_2S)、溴化锶 ($SrBr_2$) 和硫酸镁 ($MgSO_4$) (Yu, Wang 和 Wang, 2013 年)。热能增加时盐会脱水，释放出可与盐分开储存的水分子。需要热能时，将水添加到盐中，盐吸收水并释放热能。利用该工艺的热电池可将少量热能长时间储存，且能量损失最低。

这些性质使得水合反应特别适用于季节性储能。欧洲正在进行学术和工业研究，希望开发与日间蓄热（例如 TTES）结合使用的季节性住宅建筑热电池，如图 32 所示。然而，水合盐蓄热技术也面临一系列挑战，如侵蚀性材料、安全壳结构的腐蚀问题、材料稳定性和劣化/凝结等。

图 32. CREATE 演示蓄热系统图



注：该图展示了如何将基于盐水合物技术的季节性热电池与日间储存以及热泵和太阳能集热器结合使用。

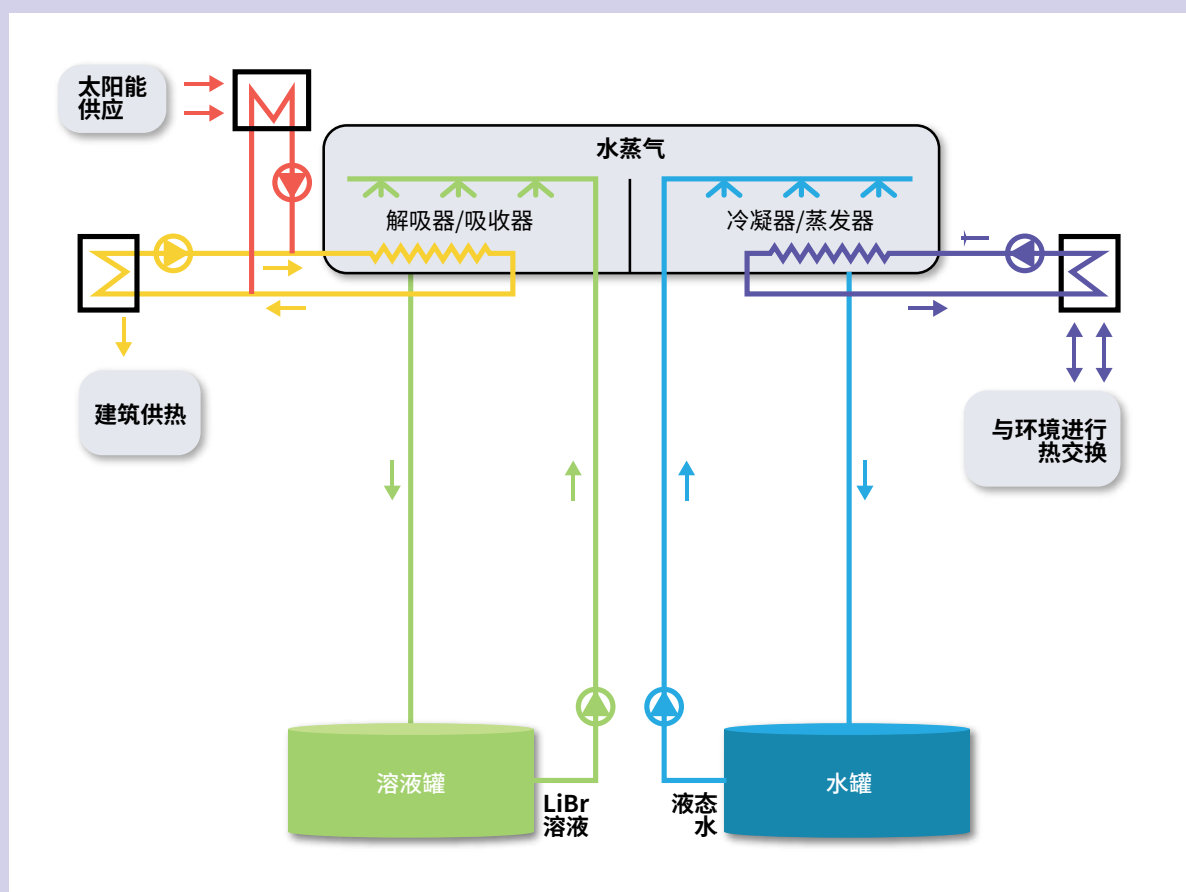
来源：CREATE, 2018 年。

吸收式系统

吸收式热泵本质上是由热源（如太阳能而非电力）驱动的热泵。本报告中的吸收式系统指的是 TES 形式，它使用太阳能吸收式热泵实时产生热能/冷能，并将其储存起来以备后用。

吸收式系统的原理是：浓缩制冷剂溶液（例如氯化钙 $[CaCl_2]$ 、氯化锂 $[LiCl]$ 、溴化锂 $[LiBr]$ 、氢氧化钠 $[NaOH]$ 、氢氧化钾 $[KOH]$ 或氨的水溶液）[Lele, 2016 年] 吸收水分并在这一过程中释放热能。释放出的热量就是吸收的热能，是一定体积的液体吸收水蒸气释放出的能量。该系统通过额外热能充能，而使水分子从制冷剂溶液中解吸。这形成了两种产物：水蒸气和浓度更高的制冷剂溶液。然后将两种产物分离并储存，需要热能时再将其组合。图 33 展示了吸收式系统示意图，该系统配备一个太阳能热源、一个吸收热泵以及分离的浓缩制冷剂和储水罐。

图 33. 配备分离器反应器的吸收式系统配置



来源：N'Tsoukpoé、Le Pierrès 和 Luo, 2013。

吸收式系统是一种极具潜力的蓄热方案，因为其储能密度远远超过水作为显热蓄热技术的储能密度。这主要是因为吸收循环系统更适合低品位热能的储存，在建筑和某些工业应用中的潜力巨大。

机械 TES 系统

将 TES 与机械储能技术耦合使用；这对于两种技术而言都是一种互补。TES 可用于改进系统和提高效率，但因此系统也变得高度复杂（AEE INTEC，2019 年）。

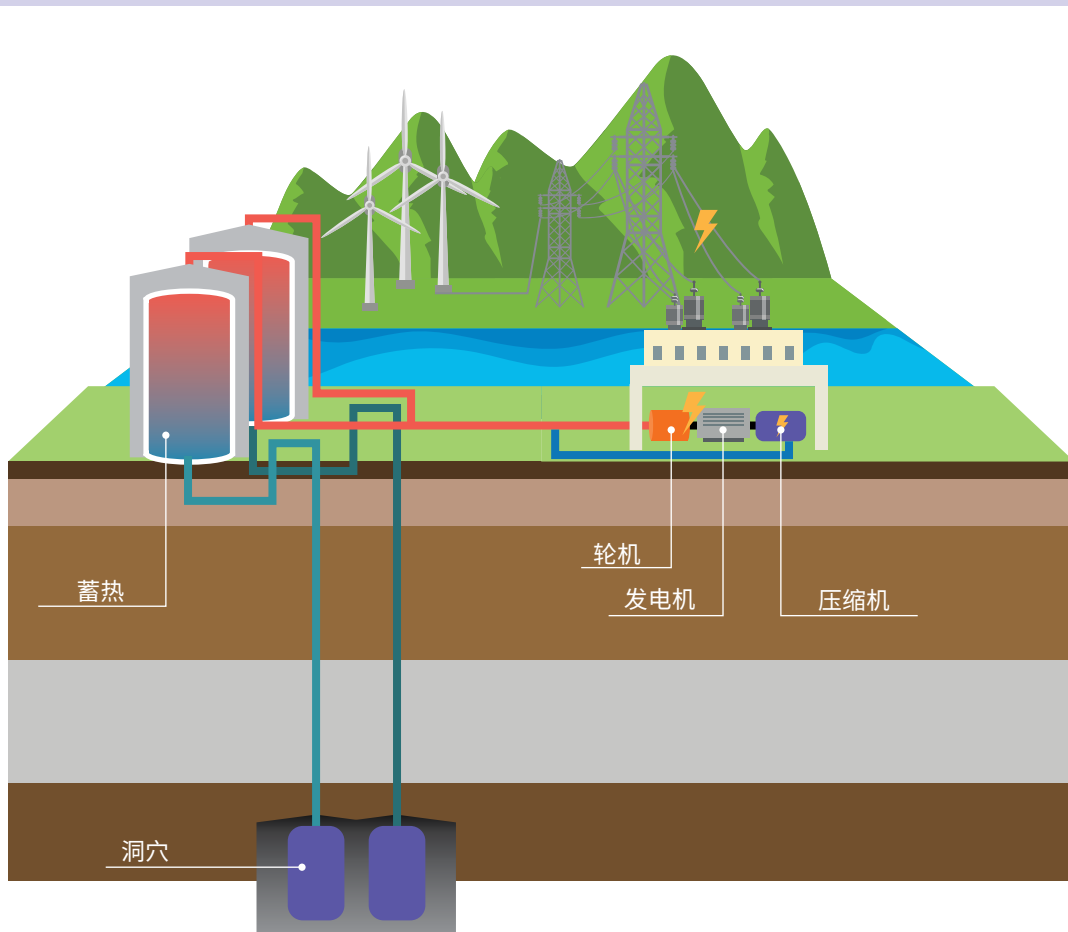
本报告中探讨的两种耦合技术为：

- 绝热压缩空气储能 (A-CAES)
- 液态空气储能 (LAES)

绝热压缩空气储能

传统 CAES 中，用低谷可再生能源电力压缩空气后将其以高压储存在地下洞穴中。需要电力时，通过膨胀压缩空气驱动涡轮机发电。该过程中，冷却装置将压缩热能移出，利用额外热能加热膨胀前的空气。二者都会造成能量损失。当前已提出 A-CAES 系统通过添加高温 TES 装置（例如鹅卵石、陶瓷砖或 PCM）提高总体效率，该装置用于储存压缩热能（否则会在气体压缩阶段损失）以备之后的膨胀使用。图 34 展示了可能实现的 A-CAES 装置。

图 34. A-CAES 提议现场装置图

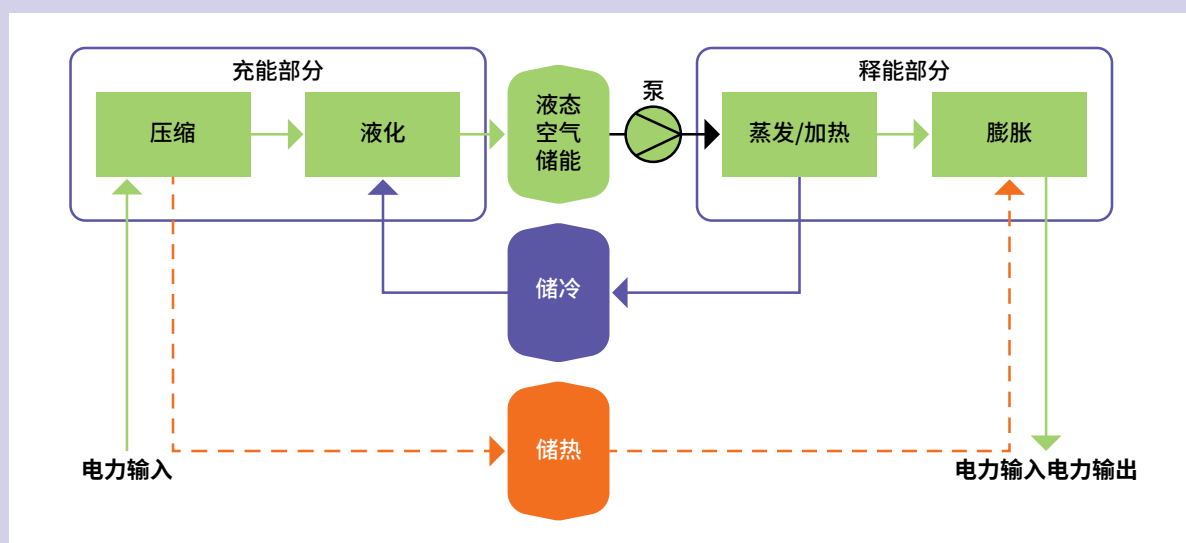


来源：RWE Power AG，2010 年。

液态空气储能

目前正在针对 LAES 开发一种新颖储能形式，与 CAES 相似，它使用储存的压缩空气驱动涡轮机释放能量。二者主要区别在于空气冷却和压缩至液化的程度，这意味着可以将其应用于其他位置和应用的储存和运输。充能时使用低谷或可再生电力将空气压缩到高压 (>60 bar)，压缩过程中产生的热能储存在蓄热系统 (>300°C) 中。通过储冷装置将压缩空气冷却 (至 -145°C)，然后将压力降低至环境水平获得液态空气 (-196°C)。需要释能时，液态空气通过蒸发返回为气体，部分“废弃”冷能保留在储冷装置中。储存的热能进一步加热空气，可用于驱动涡轮机发电。图 35 对此进行了总结。

图 35: 发电应用 LAES 的通用系统配置



来源：欧洲储能协会，未注明出版日期。

利用废弃热源可以实现 70% 的交流往返效率。LAES 可用于电力储存，进行充电和放电。液态空气也可以用作发动机燃料，冷能还可用于供冷（Dearman Engine，未注明出版日期）

2.2 TES 技术的关键属性

本节概述了本报告中考虑技术的关键特性和技术属性。为任何应用选择特定 TES 技术的两个主要标准是所需的工作温度范围及储存时间（图 36）。表 2 和表 3 概述了同样也很重要的其它特性。

表 2 和表 3 中的关键属性定义如下：

- **适用规模**是指 TES 在能源系统不同部门以不同成本效益方式从小规模到大规模的应用能力。“小规模”应用是指为单个建筑提供服务的住宅和商业解决方案，“区域/工业”是指通过区域供热和/或供冷网络连接的本地建筑群或工业场地，其电力储存能力为兆瓦时级别，“公用事业”是指大规模蓄热需求情景，例如通过大型区域供热/供冷网络提供供热/供冷服务或发电，或者用于热电联产设施。
 - **储存时长**是每种技术在用于有效供热、供冷或发电之前可能的储能时间。储存时长可能是几个小时（需求转移）或几个月（季节性储能）。
 - **潜在矢量**是指每个蓄热系统能源输入及输出的形式。
 - **容量范围**是指完全充能后（即显热 TES 中达到储罐材料的最高工作温度；潜热 TES 中完成 100% 的相变转变；或热化学储能中的转化率达到 100%）蓄热系统中可用的能源数量。容量范围是能量密度和储存介质体积的函数。
- **功率范围**描述了能量从系统充能和释能的速率，这取决于系统的设计和技术。
 - 每种技术只能在特定**工作温度范围**工作，该工作温度范围定义为蓄热系统预计最高及最低工作温度，这取决于储存介质的理化性质。
 - **充放效率**是输入能量与从蓄热系统中取回能量之间的关系，表示利用该技术储能后维持和释放热能方面的有效性。此参数可能很大程度上取决于系统的工作条件（例如每天或季节性）。
 - **能量密度**表示每单位体积储能装置累计储存的最大能量量。该值取决于工作条件（最高和最低工作温度）。
 - 所有蓄热系统都会随着使用时间的推移出现疲劳和磨损，从而导致老化和热劣化。**使用寿命**是指储能装置在特定工作条件下使用的预期年限，或者储能装置可以执行的循环数量。例如，若预计某储能资产每天需要执行一个完整的充能/释能循环，1,000 个循环则意味着 3 年的使用寿命。

图 36. 所研究 TES 技术的工作温度和时间范围

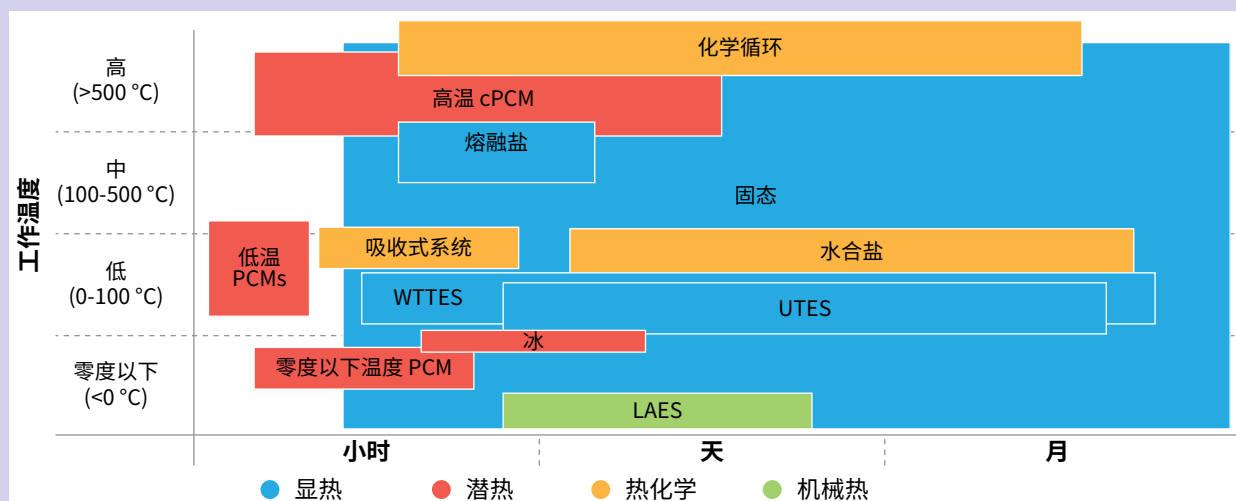


表 2. 所选 TES 技术的适用规模、工作时间和相关能量矢量

TES 类型	TES 技术	适用规模			储存时间				潜在矢量					
		小型	区域	公共事业	小时	天	周	月	输入			输出		
显热	WTES	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	H	C	P	H	C	P
	UTES	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	H	C	P	H	C	P
	固态	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	H	C	P	H	C	P
	熔融盐	红色	绿色	绿色	绿色	绿色	红色	红色	H	C	P	H	C	P
潜热	冰蓄热	绿色	绿色	红色	绿色	绿色	红色	红色	H	C	P	H	C	P
	零度以下的 PCM	绿色	绿色	红色	绿色	红色	红色	红色	H	C	P	H	C	P
	低温 PCM	绿色	红色	红色	绿色	红色	红色	红色	H	C	P	H	C	P
	高温 cPCM	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	红色	红色	H	C	P	H	C	P
热化学	化学循环 (钙循环)	红色	红色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	H	C	P	H	C	P
	水合盐	绿色	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	绿色	H	C	P	H	C	P
	吸收式系统	绿色	绿色	红色	绿色	绿色	红色	红色	H	C	P	H	C	P
机械热	压缩空气储能 (CAES)	红色	红色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	H	C	P	H	C	P
	LAES	红色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	H	C	P	H	C	P

注：绿色表示适用；红色表示不适用；C=冷能；H=热能；P=电力。

表 3. 所选 TES 技术的关键技术属性

TES 类型	TES 技术	容量范围	电力范围	工作温度	往返效率	储存时间	能量密度	使用寿命 (年限或循环次数)
显热	WTES	kWh 至 1 GWh	kW 至 10 MW	10 至 90°C	50 至 90%	数小时至数月	15-80 kWh/m ³ (1)	15-40 年
	UTES	MWh 至 GWh	MW 至 100 MW	5 至 95°C	最高 90%	周至月	25-85 kWh/m ³	50 年
	固态	10 kWh 至 GWh	kW 至 100 MW	-160 至 1300°C	>90%	数小时至数月	0.4-0.9 kWh/m ³ ·K (热能容量) (2)	>5,000 次循环
	熔融盐	MWh 至 5GWh	100 kW 至 300 MW	265 至 565°C (4)	>98%	数小时至数天	70-200 kWh/m ³	>20 年
潜热	冰蓄热	kWh 至 100 MWh	kW 至 10 MW	-3 至 3°C	>95%	数小时至数天	92 kWh/m ³	>20 年
	零度以下的 PCM	kWh 至 100 kWh	kW 至 10 kW	最低至 -114°C	>90%	小时	30-85 kWh/m ³	>20 年
	低温 PCM	kWh 至 100 kWh	kW 至 10 kW	最高至 120°C	>90%	小时	56-60 kWh/m ³	300-3,000 次循环
	高温 cPCM	10 kWh 至 GWh	10 kW 至 100 MW	最高至 1000°C	>90%	数小时至数天	30-85 kWh/m ³	>5,000 次循环
热化学	化学循环 (钙循环) (5)	MWh 至 100 MWh	10 kW 至 1 MW	500 至 900°C	45-63%	月	800-1200 kWh/m ³	>30 年
	水合盐	10 kWh 至 100 kWh	N/A	30 至 200°C	50% (开放系统) 60% (封闭系统)	月	200-350 kWh/m ³	20 年
	吸收式系统	10 kWh 至 100 kWh	10 kW 至 1 MW	5 至 165°C	COP: 0.7-1.7	数小时至数天	180-310 kWh/m ³	50 年
机械热系统	CAES	10 至 1000 MWh	10 至 1000 MW	最高至 600°C	>90% (热能效率)	小时至周	N/A	20-40 年
	LAES	MWh 至 GWh	10 至 300 MW	>300°C (热能) -150°C (冷能) -196°C (液态空气)	>90% (热能效率)	数小时至数月	N/A	> 25 年

注: (1) 水罐蓄热和 UTES 的能量密度基于 20°C 的参考温度; 潜热能量密度计算中不考虑显热; (2) 固态能量密度由工作温差决定; 能量密度 = 热能容量 x 温差; (3) 用于“太阳能盐” (60% NaNO₃ 和 40% KNO₃); (4) 仅指钙循环 (而非其他化学循环示例); kW= 千瓦; MW= 兆瓦; MWh= 兆瓦时; COP= 性能系数。

注: N/A 表示没有发现主要需求。

3. 各行业应用现状及展望

本节概述了如何利用蓄热推动五个耗能关键部门引入更高比例的可再生能源，即：电力、工业、区域供热和供冷、冷链和建筑。部门是指部署 TES 用在什么地方，而 TES 所带来的益处通常为整个系统共享。TES 可作为为供应侧和需求侧提供灵活性的一种形式。电力部门一节仅将 TES 视为供应侧灵活性的推动者，而其他各节（工业、区域供热和供冷、冷链和建筑部门）则将 TES 视为需求侧灵活性以及整合现场可再生能源发电的推动者。

针对每个部门，本报告概述了：

- 整合可再生能源时面临的关键问题及 TES 在帮助解决这些问题方面可以发挥的作用。
- 当前可以应用何种技术推动实现相关优势。
- 对未来可利用哪些技术的展望。
- 提高上述技术商业化水平所需的创新水平。

简介文本框中还总结了每个部门的要点。

图 37 简要概述了如何通过将 TES 整合到不同部门为系统带来益处。本报告第 2.2 节讨论了这些益处。

图 37. TES 在各部门的主要应用概述

	波动性能源 供应整合	部门耦合	需求转移	网络管理	季节性储能
电力	✓✓			✓	
工业	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	
区域供热/供冷	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
冷链	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	
建筑	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓

注： ✓✓ 当前可以应用以推动实现相关益处的技术。
 ✓ 当前正在开发以推动实现相关益处的技术。



3.1 电力

TES 可促进可再生能源在电力部门中更有效的整合

风能和太阳能光伏能源正迅速成为电力部门的主流和富有竞争力的能源来源。尽管二者 2019 年仅占全球发电量的 10%，但预计它们将成为可再生能源增长的主要来源：到 2050 年，预计风能和太阳能光伏合计将占全球总发电量的 61%（IRENA，2020a）。与潮汐、地热和生物质等其他可再生能源不同，太阳能和风能的波动性和间歇性给能源系统带来了挑战。TES 有助于缓解可再生能源波动性带来的问题，同时还能够提高电力部门短期（即非季节性）供应侧灵活性。

TES 对电力部门所起到的主要作用（在此定义为刚好满足需求）：

- **波动性可再生能源供应整合：**指将 TES 建设在 VRE 发电现场，即 CSP 形式的太阳能热发电以及风能和太阳能光伏发电。该应用的重点是帮助缓解短期和周期性电力供应波动，即太阳能发电的阴天或夜间情况以及风能的低风时期。
- **网络管理：**指通过在输电或配电电表前安装 TES 仅向电网提供服务。可利用减少弃电及通过减少弃电延缓网络加固的形式实现网络管理。

电力部门 TES

TES 的作用

- 提高风能和太阳能等波动性可再生能源发电比例给如何以经济有效的方式平衡电力系统带来了挑战。
- 低成本的大型模块化 TES 可能通过提供大容量电力管理服务（例如负荷转移、减少弃电和补偿停产期）发挥关键作用。
- TES 在分离风能和太阳能的可用性与供热和/或供冷需求（将在其他子章节中详细探讨）以实现部门耦合（电制热/冷）方面发挥了关键作用。

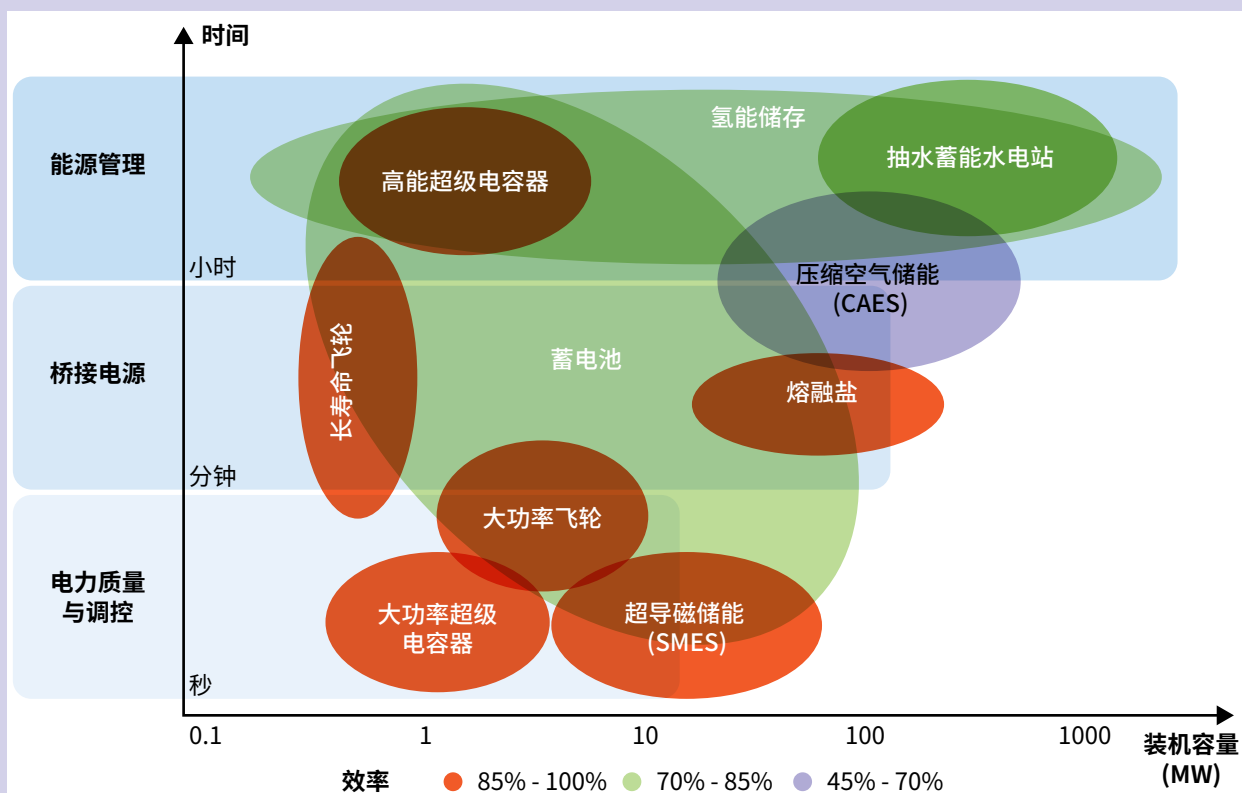
目前的应用项目

- CSP 工厂现已广泛部署熔融盐系统。

创新潜力

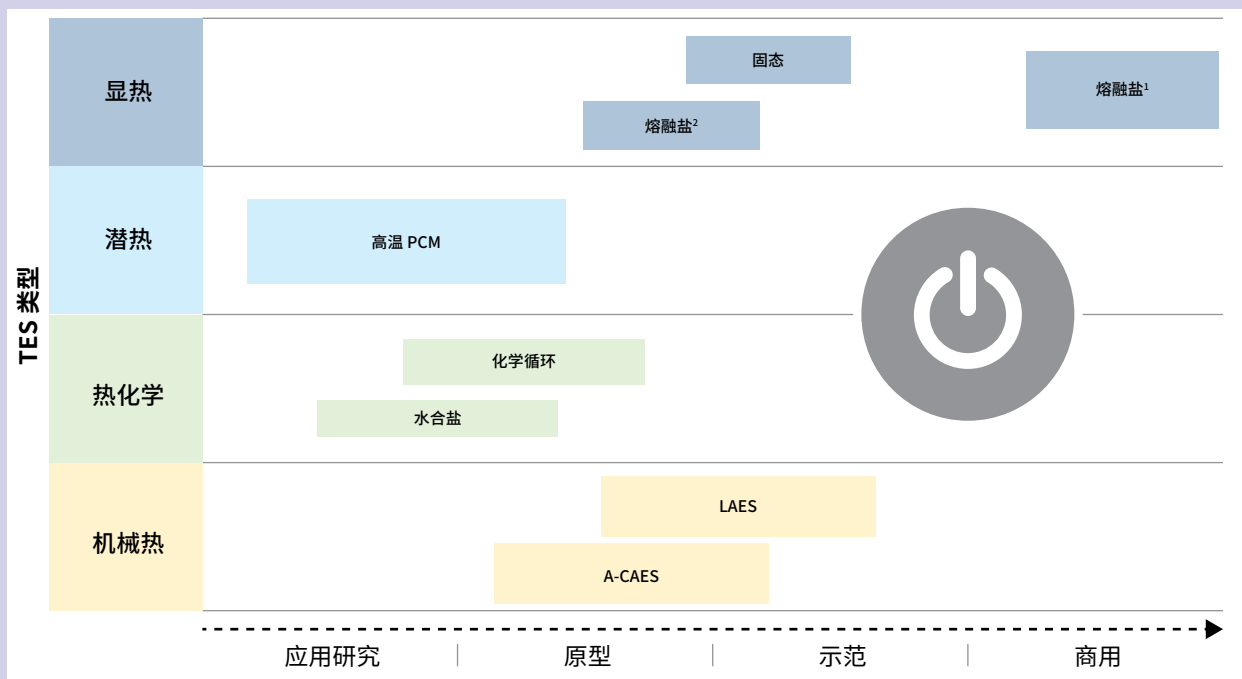
- **短期（5 年）：**下一代熔融盐技术的工作温度范围和性能将得到进一步改善，从根本上提高 CSP 电厂的转化效率，而成本降低则有利于增加其他技术的可行性。可能出现更多固态储能和新型独立熔融盐蓄热电池试点。
- **中期（5-10 年）：**LAES、绝热 CAES 和固态储能系统的成本降低将扩大 TES 在风能和太阳能光伏发电中的利用范围，并且有望成为 CSP 熔融盐的有效替代品。
- **长期（>10 年）：**热化学储能的发展可提高 CSP 工厂的转化效率。熔融盐储能可重新利用化石燃料发电厂进行可再生能源储能，从而节省退役成本。

图 38. 各种储能技术额定容量下的系统额定功率和潜在释能时间



来源：改编自美国国家可再生能源实验室 (NREL) 编制图表。

图 39. 2018 年电力部门可用储热技术的商业就绪水平



注：(1) 与 CSP 并置；(2) 独立系统。

图 38 描绘了各种储能技术及其在电力系统中的作用。一般而言，电池技术容量和响应时间的结合有助于改善电力质量与调控，或提供桥接电源服务。但是，除了抽水储能和 CAES 之外，少有储能技术能在系统中发挥能源管理作用，且抽水储能和 CAES 仅限于特定的地理位置。

由于具备以低成本实现规模化的潜力，蓄热技术（熔融盐、LAES、CAES/A-CAES 和固态 TES）有机会向系统提供能源管理服务。目前这些技术尚未实现商业化，但接下来我们将概述其创新潜力。

TES 技术处于开发和在电力系统应用的不同阶段

图 39 显示电力部门目前已实现商业化的 TES 技术只有熔融盐一种形式。

现状

与聚光太阳能热发电配套

CSP 发电厂使用熔融盐以提高其热电利用效率。熔融盐 TES 与 CSP 共同应用于白天储存热能，随后在夜间将其释放驱动涡轮机发电。

熔融盐在 CSP 电厂中的使用已超过 20 年（Bundesverband Energiespeicher, 2017 年）。**全球现有 93 个 CSP 电厂，其中约一半 (47%) 已与 TES 系统整合**（Pelay 等人，2017 年）。在澳大利亚、智利、中国、印度和中东还有 39 个熔融盐储热配套电厂正处于建设、承包或开发中，占正在开发的 CSP 项目的 70% 以上。。

正在开发其他各种 TES 技术以应用于电力部门。图 39 对此进行了总结。下面针对这些技术在电力部门关键应用中的近期到远期潜力以及预期未来部署进行了探讨。

未来展望

与 CSP 配套

使用**熔融盐** TES 技术的 CSP 发电厂运营商面临诸多挑战。这包括：

- 熔融盐作为储热介质的成本很高。
- 为了减少盐冻结的风险需要大量的备用能源。
- 部分由熔融盐腐蚀性而导致的 TES 系统的可靠性问题。
- 对寄生使用防冻剂和循环泵成本相关的担忧。

蓄热容量为 4 到 8 个小时的 CSP 电厂总安装成本为 3,183 美元/kW 到 8645 美元/kW 不等。八小时或以上蓄热能力的项目成本区间范围较小，在 4,077 美元/kW 到 5,874 美元/kW 之间（IRENA, 2020b）。降低 CSP LCOE 的关键任务之一是降低电厂配套使用储热设备的成本。

此外，为了提高发电厂的整体经济性，还有一个主要任务是提高工作温度。较高的工作温度有助于提高 CSP 电厂的热电效率。目前电厂工作温度不高是因为所使用 TES 材料的功能温度范围限制。例如，熔融盐 TES 材料的热稳定性极限将最高工作温度限制为 565°C。

若要实现高温工作，TES 材料需要特殊的热物理属性，包括低熔点（以增加工作温度范围）、高热容量和高导热系数以及高热稳定性。因此，以中国和美国为主进行的研究正在开发应用于 CSP 的下一代蓄热材料。

表 4. CSP TES 技术创新的主要指标

属性	显热			潜热			热化学		
	2018	2030	2050	2018	2030	2050	2018	2030	2050
成本 (美元/kWh)	25-30	<15	<12	25-90	25-35	<12	研究水平	试点规模, 80-160	示范装置, <80
效率 (%)	>90	>92	>95	>90	>92	>95	40-50	(1)	
能量密度 (kWh/m ³)	70-200	(2)		30-85			800-1,200		
使用寿命 (年限或循环次数)	<10,000	>10,000		3,000- 5,000	4,000- 5,000	5,000- 10,000	<100	500-1,000	>1,000- 3,000
工作温度 (°C)	<565	600- 700	700 以上	<600	600- 750	700- 850	500-900		500- 1,000

注: (1) 由于技术成熟度低而无法获得数值; (2) 数值取决于材料选择。

表 4 列出了此类材料的预期和目标创新要求。受到美国能源部 SunShot 计划影响，该计划的重点是鼓励熔融盐材料的科技创新。该计划的主要目标是降低熔融盐的成本和腐蚀性，同时探索用于 CSP 应用的其他蓄热类型潜力。

由于作为原材料的混凝土非常便宜，**固态混凝土蓄热相比熔融盐可为 CSP 应用提供更廉价的替代品**。另一方面，混凝土蓄热几乎在环境压力下工作，因此无需压力容器，这进一步降低了投资成本。此外，它具备良好的机械性能且是无毒、惰性且不易燃的。典型的混凝土 TES 系统将管道嵌入混凝土砖中，以在砖块和传热流体之间进行热交换。

遗憾的是，目前这些设施的使用寿命有限，这是因为其最高工作温度及高温下的剥落所导致的反复的热胀冷缩循环会导致裂缝 (Alva 等人，2017 年)。使用寿命有望通过研发活动得到提高 (表 4)。中国目前正在开发的两个项目将使用固态

配制的混凝土作为蓄热设备，是该国广泛部署 20 个 CSP 示范项目的一部分 (Kost, 2017 年)。

CSP 所利用的太阳能也可以通过吸热氧化反应储存在**化学循环**系统中 - 将太阳能储存在系统中，之后再通过化学反应释放 (Pardo 等人，2014 年)。碳酸钙具备较高的能量密度 (每立方米 4,400 兆焦耳 (Mj/m³)) 和工作温度 (800-900°C) (Prieto 等人，2016 年)，因此是热化学材料的首选。较高的工作温度有助于开发下一代高效太阳能转换系统。当前正在研究几种配置以调查将化学循环与 CSP 整合的益处 (Alovisio 等人，2017 年)。

2015 年，全球的 CSP 装机容量为 5 GW，但如果宏大的政策框架得以实施，这个数字到 2050 年可能会增加到 309 GW (IRENA, 2020a)。基于此假设及 CSP 约 8 小时的蓄热时间要求，到 2050 年，CSP 的蓄热市场需求可能为 633 GW/2472 GWh。

与风能和太阳能光伏配套

岩石形式的**固态**显热储热可通过电阻加热或热泵升级储存可再生电力。这些应用中，岩石通过电力加热至高温，储存的热能随后用于驱动蒸汽轮机或燃气轮机发电。

由于蒸汽轮机的效率较低，这种方法的充放效率理论上只能达到约 50%。但是，使用高度可扩展的廉价 TES 材料并与现有基础设施（例如火力发电厂停止运行后的蒸汽轮机和发电机）整合，有望实现较低的整体成本（Siemens Gamesa, 2017 年）。因此，关键用例是实现长期储存与当地发电厂相配套，预期储存时间至少为 24 小时（Collins, 2018 年）。

西门子歌美飒 (Siemens Gamesa) 于 2017 年在德国开始建设的 1.5MW/30MWh 示范项目使用岩石作为固态储能形式，与一个工业场所并置。它利用电阻加热，并使用蒸汽轮机将储存的热能排出（Design, 2017 年）。另外，Stiesdal 正在丹麦建设 5 MW/120 MWh 系统，将使用热泵升级蓄热，热能通过基于空气的系统（类似

于燃气轮机）释放。这将提供最多 24 小时的风力发电储存（Collins, 2018 年）。

无论是与太阳能光伏或风力发电场配套，还是独立提供电网服务，预计未来的市场规模、成本和蓄热潜力都将面临一定挑战。目前正在研究的大多数技术仍处于商用准备的早期阶段（图 39）。表 5 列出了基于现有数据的代表性预测。

独立系统

A-CAES 在需求低迷时将能源储存为压缩空气，之后在需求增加时释放电力帮助管理电网负荷。由于缺乏针对该应用的技术特定地下设施的研究（例如地下洞穴适当的地质环境要求），目前 CAES 的部署位置受到限制。但是，隧道掘进机和微型隧道掘进机的发展可能有助于降低成本并减少地质约束。

当前只有两个商业规模的 CAES 电厂正在运行：1978 年在德国洪托夫 (Huntorf) 建造的 290 MW 电厂和 1991 年在美国建造的 110 MW McIntosh 电厂。它们应用于削峰、负荷均衡，储存低谷能源和频率控制。与抽水

表 5. 太阳能光伏发电和风力发电 TES 技术创新的关键目标

属性	显热			潜热			机械热		
	2018	2030	2050	2018	2030	2050	2018	2030	2050
成本 (美元/kWh)	20-45	商业化	商业化	25-95	25-35	<12	示范阶段	400-870	150-260
效率 (%)	> 90	> 92	> 95	> 90	> 92	> 95	40-65	45-75	50-80
能量密度 (kWh/m ³)	0.4-0.9 kWh/m ³ ·K (热能容量)			50-85			2-70		
使用寿命 (年限或循环次数)	>5,000	5,000-7,500	7,500-10,000	3,000-5,000	4,000-5,000	5,000-10,000	20-40 年		
工作温度 (°C)	最高至 600			<600	600-750	700-850	<200 至 >400 (热能) -150 (冷能)		

储能电站相似，其 CAPEX 较高，但使用寿命长，能够提供大容量储存能力，响应速度不如电化学电池。爱尔兰正在建设一个新的 330 MW CAES 工厂，瑞士已开发下一代 A-CAES 示范项目。

LAES 技术正在发展中，可提供 CAES 类似的服务，但受到的地理限制相对较小。英国已完成一个 LAES 示范项目，北美则正在开发商业项目（Sampson，2018 年）。总部位于英国的一家公司的开发人员声称其模块化解决方案可以使 200 MW 发电厂 10 小时的平均储存成本达到 140 美元/MWh。

与传统锂离子电池相比，LAES 和 CAES 都能实现以低成本储存大量能源，但其响应时间较慢。可在输电或配电层面安装这两种技术以克服电网限制、减少可再生能源弃电、推迟网络改进需求，同时还可以提供例如黑启动等其他辅助服务。当前市场中，LAES 和 CAES 可通过能源套利（能源需求高时出售谷底时间储存的能源）创收，但还无法产生足够的价值弥补资本投资。

LAES 的局限性在于其打开并进入这些市场的速度。如果在 SpinGen 模式下运行，LAES 可在约 30 秒内做出响应从而提供某些频率调控服务，但无法实现电化学储存中达到的亚秒级响应。然而，全球首个混合动力飞轮、超级电容器和 LAES 系统目前正在开发，试图打开更高价值的市场（包括英国国家电网（the UK National Grid）增强的频率响应和加固频率响应）（Holder，2017 年）。

同时还提出将**熔融盐**应用于称为卡诺电池的新型独立大容量蓄热系统中。例如，德国正在开发一些概念，将熔融盐储能资产与现有（退役）燃煤电厂的基础设施结合。使用热泵转换过剩电力并作为热能储存，然后使用燃煤电厂的涡轮机将其转换回电力。但是，燃煤电厂的蒸汽循环效率极限约为 40%。

为了解决这一限制，美国一个项目开发了新型涡轮机和热交换器设备，可将效率提高到 60% 左右（太阳

能热发电和热化学系统（SolarPACES，2019 年）。该项目希望使用四缸系统，其中两缸用于熔融盐蓄热和冷却剂储冷。四缸系统可在更广泛的温度范围内工作，从而提高了整个蓄热装置的功率和效率（Freund，2019 年）。目前已经开发了 10 MW/80 MWh 和 100 MW/1000 MWh 系统概念；但是，首个试点的建立可能还需要几年时间。

3.2 工业

高耗能工业的热能需求难以实现脱碳；但 TES 能够提供帮助

工业部门占全球排放总量的三分之一，是能源相关的 CO₂ 第二大排放部门。工业部门使用的交付能源比任何其他终端用能部门都多，通常采取的几种方式如下：

- 通过燃烧燃料在现场产生各种温度水平的工艺热能（热水、蒸汽和直接热能应用）。
- 通过热电联产厂进行现场发电和处理热能。
- 从区域热网输入工艺热能。
- 从电网输入电力。
- 使用太阳能光伏和/或太阳能热电厂发电和/或处理热能。

现场工艺产生的热能占工业能源总消耗的 74%。工艺热能可分为三种类型：低温热能（150°C 以下）、中温热能（150-400°C）和高温热能（400°C 以上）。

工业部门在整合可再生能源方面处于落后地位，工业部门的最终能源消耗只有 14% 来自可再生能源。目前大多数可再生热能来源于生物质，全球工业部门安装的太阳能热容量极小（<1 吉瓦热 [GW_{th}]），且仅限于低温热能，如表 6 所示。

工业部门的 TES

TES 需求

- 工业中使用的大部分能源用于工艺热能生产，因此在利用 TES 与可再生能源结合实行脱碳方面具有一定潜力。
- 将热能从发电中分离将有助于应用灵活性和智能能源，并通过间歇性的可再生能源发电满足持续需求，从而减少浪费和中断。
- TES 可以用于储存热泵热电或现场太阳能热电厂产生的低温热能。
- 当前使用可再生资源难以产生中高温工艺热能，但未来潜在的热化学 TES 解决方案可能发挥作用，帮助促进可再生能源的整合。

现有用例

- 与太阳能热电厂结合使用的水罐蓄热当前处于新生阶段，但也在不断增长，用于产生和储存低温工艺热能。

创新潜力

- **短期（5 年）：**降低成本、提高相关认识以及改进现有 TTES 的整合、管理和控制系统将鼓励需要低温热能的工艺更多地部署太阳能热发电。
- **中期（5-10 年）：**固态技术能够提供一种相对成本较低的储存形式，为工业工艺提供电力和热能。高能量密度的 HT-cPCMs 和水合盐储能解决方案将有效减少 TES 系统的占用空间，从而潜在扩大其应用范围。改进的整合及管理系统也将提高效率。
- **长期（>10 年）：**与可再生能源一起整合到制造工艺中的化学循环和其他热化学蓄热系统可帮助需要高温热能的工艺实现脱碳。

同时，工业部门已经开始应用分散式可再生能源发电厂以缓解波动性电网供应带来的风险、克服电网接入问题（例如在偏远运营环境中）、应对燃料价格上涨风险及解决一部分脱碳运营问题（Philibert，2017 年）。

到 2050 年，满足工业需求的可再生能源使用量可能增长四倍，其比例将从 2017 年的 13% 增长到 62%。

工业部门通往未来更广泛的脱碳途径包括：部署太阳能热发电和热泵以应用于低温热能工艺；更多地将生物质应用于可产生中高温热能的现场热电联产厂。IRENA “能源转型情景”下，预计到 2050 年，电力在工业部门能源使用中的比例将增加到 65% 左右（IRENA，2020a）。

表 6. 工业部门的可再生能源技术

可再生能源种类	2015	2050 ⁽¹⁾
太阳能热装机容量	0.1 GW _{th}	134 GW _{th}
地热	0.02 EJ/yr	4.11 EJ/yr
生物质热	8 EJ/yr	20.2 EJ/yr
热泵	20 万个装置	8,000 万个装置
可再生能源产生的氢气	N/A	7 EJ/yr

注：(1) 2050 年的数值对应与《巴黎协定》一致的情景，主要基于可再生能源的使用及能源效率的稳步提高。

注：N/A 表示没有发现主要需求。

来源：IRENA，2018 年

在试图整合可再生能源电或直接为工业工艺输入热能时可能会面临各种问题。这些问题包括：

- 工业在竞争激烈的全球市场中为盈利性部门，因此需要低成本能源。
- 工业企业通常要规避风险，因此新技术整合及突发情况的威胁对可再生能源的部署构成了障碍。
- 可再生能源供热和发电的波动性与部分工业应用中连续电力或工艺热能的需求无法完美匹配。
- 由于太阳/风力的可用性或电网限制，现有发电厂基础设施的地理位置具有局限性。
- 对于高温工艺 (>400°C) 而言，目前尚不存在可行的技术和商业模式直接利用太阳能热发电厂产生的热能。因而将可再生能源整合到需要高温热能的工艺中受到限制，特别是在需求随时间变化的情况下 (Muster-Slawitsch 等人，2016 年)。

应用 TES 有助于解决这些问题。**关键用例是将热能需求与热能或电力供应分离开来**，从而有效整合更高比例的可再生能源。

不同的 TES 技术适用于将不同温度等级的热能与其来源分离。

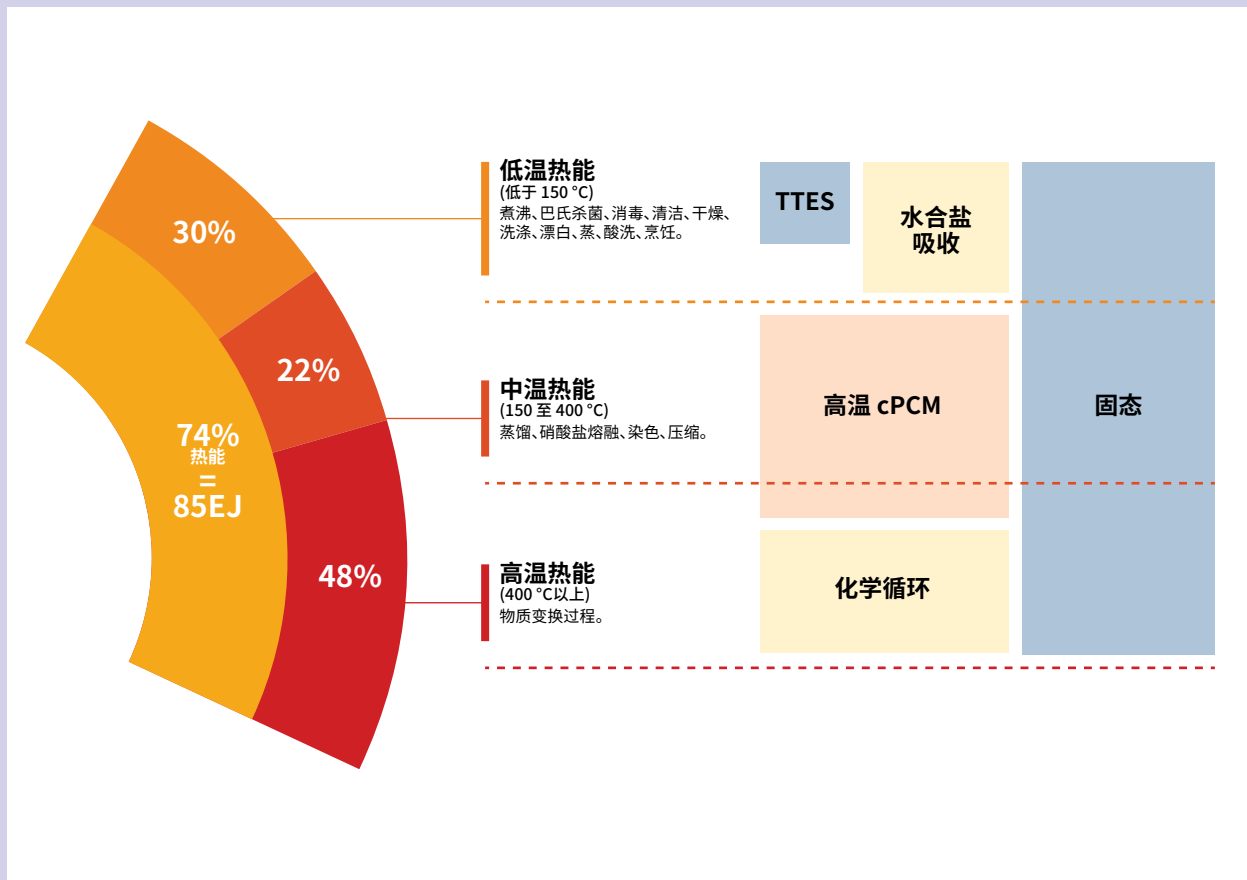
低温工艺和制造应用中，TES 可储存现场波动性太阳能热电厂产生的热能以及由波动性可再生能源提供动力的热泵产生的热能。中高温应用中，TES 可与以生物质为动力的热电联产厂耦合，以消除工业工厂的热电供应。这些用例将提高输入或现场可再生电力和热能的利用率。

在电力成本不断变化的市场中（例如因分时定价机制或时间敏感的电网收费导致的成本变化），TES 也可与热泵结合使用以转移需求并为工业现场节省成本。

现在及未来将出现一系列与工业应用相关的 TES 技术

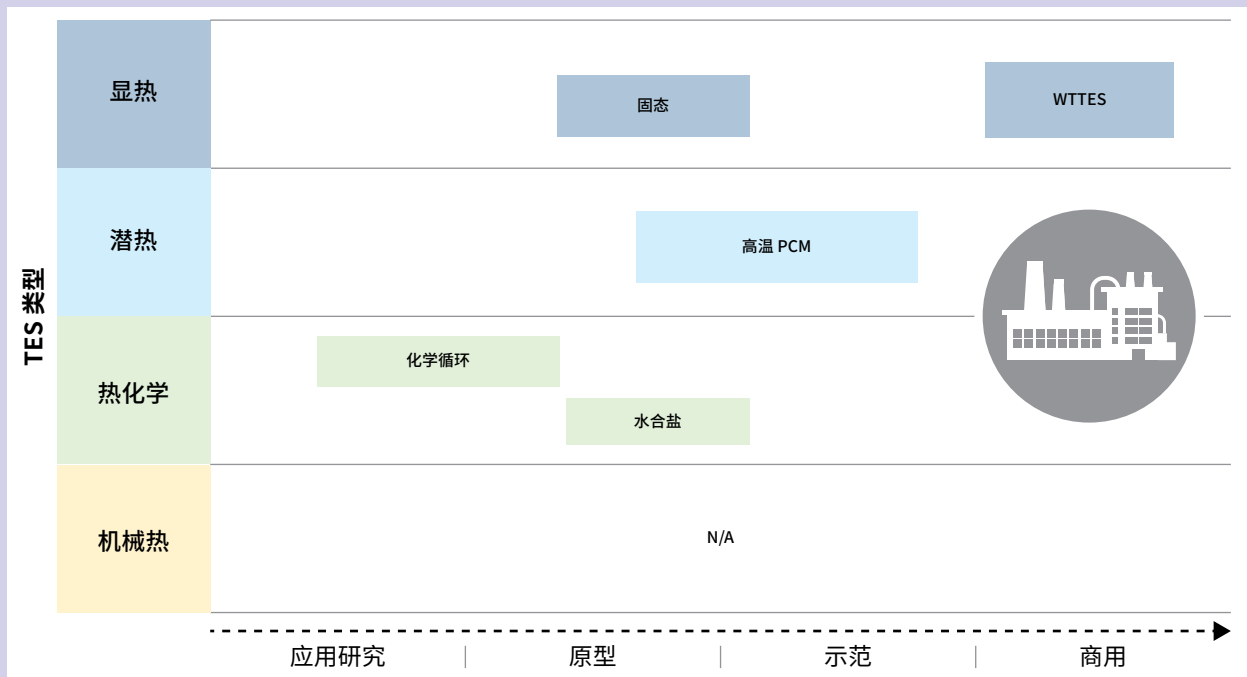
根据它们开发或部署所处的不同阶段 (图 41) 及不同的理想工作温度范围 (图 40)，各种 TES 技术在工业部门的应用各不相同。下文对当前用例、未来可能的部署，以及促进更广泛使用所需的创新进行了总结。

图 40. 适用于工业部门不同工作温度范围的技术



来源：改编自 Solar Payback，2017 年。

图 41. TES 技术在工业部门应用中的商业就绪水平



现状

低温 (<90°C) 工业工艺方面, 从太阳能集热器收集的热能可以用作替代碳氢化合物燃料使用的热源。由于太阳能的间歇性, 使用**水罐**储存热能以确保工业工艺中能源供应的稳定性是管理热能需求的良好选择。

少量但不断增长的太阳热能在工业工艺中主要用于采矿、食品和纺织行业。截至 2018 年底, 全球已安装 741 个太阳能热电厂应用于工业工艺, 总热能容量为 567 兆瓦热 (Weiss 和 Spork-Dur, 2019 年)。主要市场为奥地利、中国、法国、德国、印度、墨西哥和西班牙。国际能源署 (IEA) 的太阳能工业热利用 (SHIP) 数据库列出了约 50% 的此类工厂使用水作为储存介质的短期 TES 形式 (图 42)。

未来展望

水合盐也为将太阳能整合到低温工业工艺中提供了一种替代方法。该技术的主要优点是蓄热容量高, 并且可以长时间蓄热而几乎没有热能损失。目前, 水合盐已进行整合到废热工艺中的工业测试, 例如废热回收或热转化和再整合等 (Richter 等人, 2018 年)。柏林的区域供热系统正在测试一个 0.5 MW/10 MWh 的水合盐电池项目, 其规模可能适用于工业部门。

固态技术在整个能源系统中也正在成为以低成本方式储存大量能源的一种方法。德国一家电力公司正在测试一种系统, 该系统使用钢铁吸收区域发电高峰产生的过量可再生能源, 在最高为 650°C 的温度下以热能形式将其储存, 然后以 2:1 的比例输出热能和电力, 或者仅输出热能。

该 2.4 MWh 的储热试点电厂由欧洲区域发展基金 (European Regional Development Fund) 共同资助, 应用于柏林某公寓楼的区域供热方案, 其蓄热成本预计为 22-34 美元/MWh。

在中温应用情况下, 已经提出了工业应用中的**高温 cPCM**, 例如废热回收以及与太阳能系统的耦合。与显热储热技术相比, cPCM 的能量密度更高, 因此可以提供更紧凑的系统, 有助于解决空间不足的问题。该系统可以储存太阳能以满足未来工业企业的热能需求。水泥生产和非金属材料制造等行业可能成为该技术的终端用户。

在需要高温 (高于 400°C) 热能的制造业中, **化学循环**具备提高可再生能源比例的潜力 (Miró, Gasia 和 Isa Cabeza, 2016 年)。热化学系统通常需要较高温度以启动储能, 但同时在释放能量时也会提供较高温度。目前这些系统仍处于开发的基础研究阶段。台湾地区已尝试采用高效钙循环技术形式的化学循环作为水泥行业的一种碳捕获方法 (工业技术研究院 (ITRI), 2014 年)。但是, 目前专门将可再生能源更好地整合到工业中的化学循环技术还未出现。

TES 需要技术创新才能充分促进工业脱碳

表 7 总结了工业应用中 TES 技术、材料科学和系统工程创新的关键指标。

图 42. 使用水作为短期蓄热介质的发电厂位置



来源：AEE INTEC，2019 年。

免责声明：该地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 官方认可或接受。

表 7. 工业部门 TES 技术创新的主要目标

属性	显热			潜热			热化学		
	2018	2030	2050	2018	2030	2050	2018	2030	2050
成本 (美元/kWh)	0.1-35	0.1-25	0.1-15	60-120	60-95	60-80	研究水平 ⁽¹⁾	试点规模, 80-160	示范装置, <80
效率 (%)	50-90	60-90	70-90	> 90	> 92	> 95	40-50	⁽²⁾	
能量密度 (kWh/m ³)	0.4-0.9 kWh/m ³ ·K (热能容量)			50-85			800-1,200		
使用寿命 (年限或循环次数)	1,000- 3,000	3,000- 5,000	5,000- 7,500	1,000- 3,000	3,000- 5,000	5,000- 7,500	<100	500-1,000	>1,000-3,000
工作温度 (°C)	-150-1000			-40-700	-50-950		500-900		500-1,000

注：(1) 研究水平：材料开发尚处于初期阶段；(2) 由于技术成熟度低而无法获得数值。

不同 TES 技术的共同开发和创新目标是：

- 根据工作温度范围和放电功率等特性，开发更适合工业工艺使用的 TES 材料。
- 开发设计 TES 系统的系统方法，以更好地将可再生能源技术整合至到工业工艺中。增强的系统模块化可用于解决规模化问题。例如将设计和工程重点放在提高在传热系统效率方面。
- 为 TES 开发先进的控制和操作系统，以确保高价格时段工业工艺的储能稳定且灵活。

现在，每个技术领域都在探索各种更加实用的开发和创新以满足相关需求。

显热

虽然显热储热技术广泛用于各种应用且覆盖广泛的温度范围，但相关研究仍然面临挑战。固态材料热特性的自然变化会限制它们的应用，这是由地质条件（例如岩石中存在的矿物质和杂质的比例）决定的（Meier, Winkler 和 Wuillemin, 1991 年）。

对这些固态材料在高温下的热物理性质和机械性能的相关研究很少，这将是未来的重点领域。目前已提出了使用废料回收的（更）低成本系统，为提高性能提供了可持续的方法（IRENA, 2014 年）。这些全新方案还需进一步研究。具体来讲，需要分析储热材料和系统传热流体之间的兼容性、改进绝缘材料以及开发特定应用项目。

在采用太阳能加热的**储罐**系统中，供热系统的控制与管理是主要挑战。天气条件、一天中的时间变化和季节变化所导致的太阳辐射变化使目前利用太阳能为工业供热仍然受到限制。通过增强的 TES 部署应对未来系统中这些挑战的关键将是应用先进的控制和计量系统，以管理能源的产生、储存和使用。

潜热

高温 cPCM 为满足高温工业工艺储存需求提供了可能性，有助于改善当前部署的显热材料。由于其成本相对较高，因此初期开发将着重于改进材料和提高效率以实现规模经济。高温 cPCM 面临着与显热材料相似的整合挑战，而且，由于仍处于开发和部署的相对早期阶段，这些挑战更为艰巨。需要部署示范项目以证明相关系统在不同工作条件和工作温度范围下的性能，并更好地研究这些技术的系统整合方法。

热化学

工业环境中**化学循环**的挑战和机遇与上一节所述的 CSP 类似。钙循环因其高能量密度而具备与太阳能耦合的最大潜力（Pardo 等人，2014 年）。同时，还有其他化学反应也可以应用于高温工业工艺，例如氧化铅（PbO）和氧化铜（CuO）循环（Cao 和 Pan, 2006 年）。该技术在工业工艺中的应用尚不发达，因此需要研究新的反应以适应特定部门的要求。针对太阳能在工业工艺的应用方面，化学循环仍处于发展的早期阶段。需要进一步研究并部署试点示范项目，重点关注与太阳能系统的整合，特别是要研究控制系统和工业工艺中高价格时段热需求所需的管理措施。

水合盐在工业环境中还处于开发的早期阶段。储存材料和应用严重影响了相关系统的性能、成本、稳定性和实用性。因此，第一步必须研究工作条件下的材料特性，以评估使用现有工作盐对的优点。水合盐可能应用于下一代工业热泵。这种热泵有时称为化学热泵，通常用于各种制造工艺中的空间加热和冷却、供冷、低温蒸汽生产、清洁、干燥以及蒸发和蒸馏工艺。热泵技术用于将废热（或太阳热能产

生的热能) 的温度“提升”至可再利用或储存的水平 (Wongsuwanet 等人, 2001 年)。

传统热泵利用吸收或蒸汽压缩技术工作。如果开发水合盐 TES 系统与现有的热泵技术展开竞争, 则能够实现更好的整合以提高系统效率。所面临的主要挑战是优化反应器设计并整合吸附器组件以促进理想的热能和质量传递。预计相关研发活动以及协作的工业部署研究可以显著提高效率。



3.3 冷链

冷链指的是将必须在低温下储存的产品从生产商送到消费点所需的不间断供应链。比如, 疫苗和易腐烂的食品就是这类产品。在供应链的每个阶段, 都会使用冷藏来保持这些产品的新鲜度。据估计, 用于冷藏食品的能源占全球用电量的 8%, 相关排放量占全球温室气体排放量的 2.5% (包括直接和间接排放)。这也是一项可观的成本: 例如, 所耗能源占乳制品增加值的 11% (Dallemand 等人, 2015)。

冷链中的储热系统 (TES)

TES 需求

- 通过增加供冷负荷的需求侧灵活性, TES 可以帮助将可再生能源整合到整个冷链的各个环节 (生产、运输、储存和零售以及消费)。这样可以减少对电网升级的投资需求, 并允许在可再生能源发电的供应高峰时段进行供冷。
- 电气化供冷的增长将增加对电网的需求, 尤其是在新兴经济体国家。TES 可支持发展中国家发展离网可再生能源供电供冷, 以提高食品和药品供应链的效率。
- TES 可用于取代冷链运输中的柴油动力供冷, 有助于运输、冷链和电力部门的相互合作。

现有用例

- 冰和其他相变材料 (PCM) 已广泛用于车辆和静态冷却器的供冷, 取代了柴油和其他化石燃料发电机。

创新潜力

- **短期 (5 年)**: 材料和运营方面的改进以及更好的整合可以提高冰及其他 PCM 系统的应用效率并降低成本。链接不同行业的冷链设备可以产生协同效应。
- **中期 (5-10 年)**: 使用下一代 PCM 可以实现零下储存温度和被动冷却。
- **长期 (>10 年)**: 在低温液态空气储能系统 (LAES) 中使用液态空气可以降低成本并开辟新的应用, 特别是在冷电联合系统中。对现有化石燃料加注网络的改造可提供可再生的 TES 储存冷气, 明显促进脱碳。

冷链通常由以下部分组成：

- **生产：**生产现场的冷藏，例如在奶牛场、渔场或果园。
- **运输：**从生产地到零售或储存地的运输过程中的冷藏。
- **储存和零售：**由分销商（例如连锁超市）运营的仓库和零售站点的冷藏。
- **消费者：**使用前在家庭和工作场所冷藏。

发达国家的冷链已经非常完善，大多数供冷要求可以通过与电网连接的冷藏库来满足。然而，为未连接电网的仓库、冷藏卡车和其他车辆通常用柴油发电机来供电。

发达经济体和新兴经济体之间存在重大差异。例如，在欧洲，所有食品所消耗的嵌入式能源占欧盟 27 国最终能耗总量的 25% 以上（Dallemand 等人，2015）。相比之下，发展中国家的功能性冷链通常很有限或根本没有建立。然而，在人口和经济快速增长的发展中国家，人们对冷藏的需求也在增加。在经历快速城市化的国家，情况尤其如此，其生活方式和饮食习惯的转变已在能耗构成中有所反映。例如，在 1995 至 2007 年期间，中国城市人口的家用供冷设备拥有量从 7% 增加到 95%（Birmingham Energy Institute（伯明翰能源研究所），2015）。此外，发展中国家食品部门的卫生要求正在推动对冷链能源的需求不断增长。

对冷链服务日益增长的需求给全球能源系统带来了重大影响，包括：

- **电气化供冷导致电价持续走高。**确保产品新鲜度需要持续的高能耗冷却。随着大多数供冷设备的电气化，这就对现有的电力网络提出了需求，这种需求增长需要增加对可再生能源的使用，以确保脱碳的稳步进行。

- **在发展中国家，通常电网不够发达且频繁停电，特别是在从事农业生产的农村地区，冷链的引入和发展更具挑战性。**在此类电网上增加供冷负荷将给这些环境中的电网运营商带来额外的问题。
- **冷藏中心和供冷车辆继续从柴油供冷过渡到电气供冷，这将导致需要对电网进行有效的峰值负荷管理。**供冷负荷高峰通常发生在夏季，此时气温最高，而且能源系统已经承受了其他需求的压力。

部署 TES 可能有助于应对全球冷链中的这些挑战

使用 TES 在需求高峰时将供冷与电力供应分离开来，可为电力系统运营商带来巨大效益。这样可以帮助减少高峰时段对火电厂的依赖，进而降低系统成本并减少排放。利用 TES 减少供冷高峰期的需求可有助于**推迟电网加固**。适当时，借助太阳能吸收式供冷机或太阳能光伏板进行供冷的冷藏方法可以提供分散的低碳化冷源，可帮助**解决与电网可靠性差有关的挑战**。

在可再生能源使用率很高的电网中，添加 TES 可以吸纳多余的可再生能源发电量并将其用于供冷，有助于减少弃电（以及因此产生的费用）并提高可再生能源的利用率。因此，通过在供冷车辆中使用蓄热装置并替换柴油动力冰箱（除车辆本身用电外），或者使用液态空气为车辆辅助系统提供动力的同时提供冷却，可以实现运输和电力**部门间的耦合**。

在未来电动汽车可能成为常态的情况下，如果车上有蓄热系统，则可以减少对空调的电力需求，从而增加车辆的续航里程。

现有用例证实了 TES 可帮助可再生能源在冷藏领域部署的范围

服务于非洲、中国、欧洲、印度和中东市场的几家公司已在冷藏车和集装箱中集成了专门设计的 PCM，用于食品或疫苗运输和/或储存。

据估计，由于冷链的供冷限制，全球的粮食损失将近 30%（联合国粮食及农业组织，2015 年）。

然而，全球冷链仍在不断扩展。2016 年，全球冷藏仓库的总容量为 6 亿 m³，年增长率为 4.2%（GCCA，2016 年）。此外，2015 年全球冷藏车的数量为 400 万辆，到 2025 年可能增长到 1,800 万辆（伯明翰能源研究所，2015 年）。预计将需要增加 31 GW 的发电量，才能满足发展中国家冰箱的预计增长需求（伯明翰能源研究所，2015 年）。TES 可以在确保可再生能源满足这些电力需求的过程中发挥作用。

案例研究 2. 货运集装箱的蓄热

世界首创的冷藏货运集装箱

来自英国伯明翰大学储能中心的学者们最近与一家中国铁路运维制造公司合作，展示了公铁两用集装箱所采用的 PCM 冷却系统。该系统可维持 5°C 至 12°C 之间的目标储存温度，维持时间长达 120 小时。

冷藏集装箱在公路上运输了 35,000 公里，在铁路上运输了 1,000 公里，经历了各种气候条件。

项目组注意到，其他运输公司也对上述研究的集装箱很感兴趣。与机械替代品相比，新集装箱中的储存温度保持更为稳定。此外，因为集装箱不需要电源，所以可在不同运输类型之间进行更有效的运输，例如上述情况是铁路到公路的运输（伯明翰大学，2018 年）。

案例研究 3. 智能供冷在商业零售场所提供需求侧管理服务

零售场所的智能供冷在美国提供调峰服务

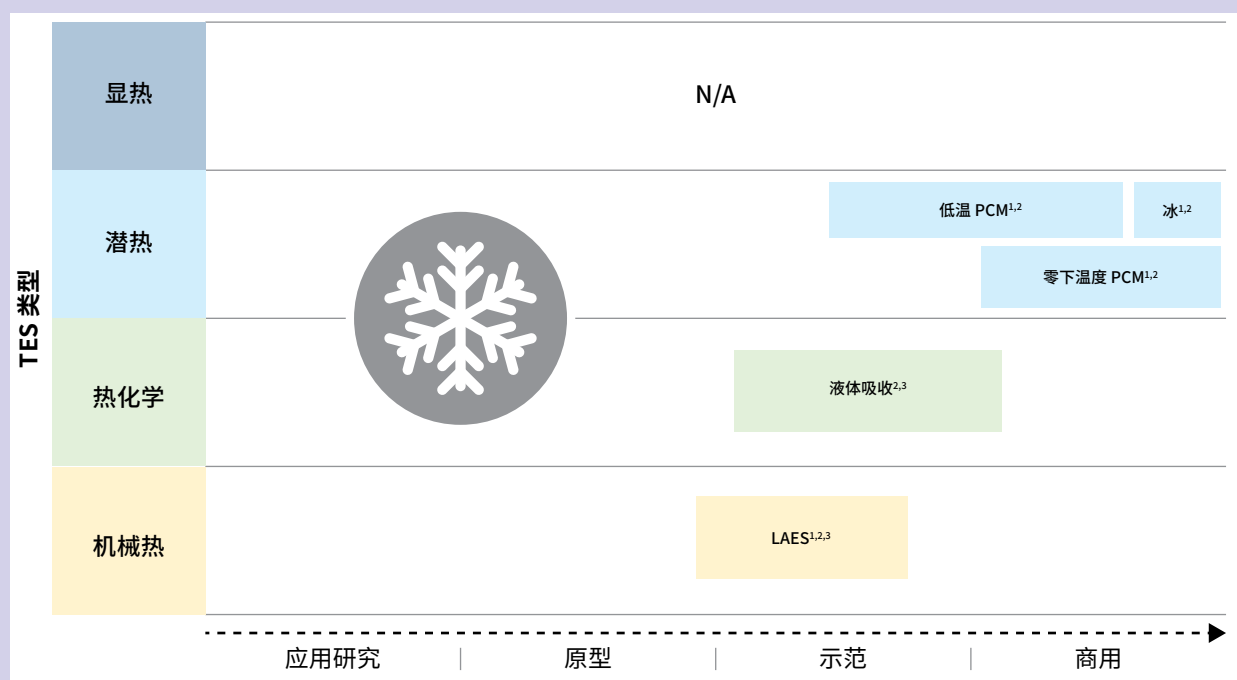
美国的一家创新公司正在使用 PCM，为具有高供冷量能源负荷的超市和商业建筑提供能源管理解决方案。

其产品是一种供冷电池，其工作原理是在夜间将低成本的低谷时段电能储存在冷冻的盐水溶液中，然后在高峰时段，当电价和需求量最高的时候，该系统会放出能量以进行供冷。

这就大大降低了建筑物的峰值负荷。云平台可评估能源使用和电费，以优化系统运行并最大程度地节省成本。以此方式，由电费引起的运行成本和经营风险双双降低。

迄今为止，该产品已经在美国的两家大型连锁超市中进行了两次试点部署。这个在零售供冷系统中使用 TES 的例子是世界首例（Axiom Cloud Inc., 未注明日期）。

图 43. TES 技术在冷链中的商业就绪水平



注：(1) 用于冷储 (2) 用于冷藏 (3) 用于供冷。

其他 TES 技术用于冷链部署的各个阶段

根据开发或部署的相对阶段（图 43），各种 TES 技术在冷链领域的都得到了不同的应用。下文对应用的现状、未来可能的部署，以及促进更广泛使用所需的创新进行了总结。

应用现状

冰可以部分或完全替代高峰时段运行的供冷机组，并利用低谷期或现场可再生能源发电将水转化为冰。当需要供冷时，热能从使用载热流体的冷库中提取并被冰吸收。

零下或低温 PCM 可用于储存从室温到 -114°C （PCM Products, 未注明日期）的冷能。这些冷能可以利用可再生能源发电通过电供冷机或太阳能吸收式系统产生。

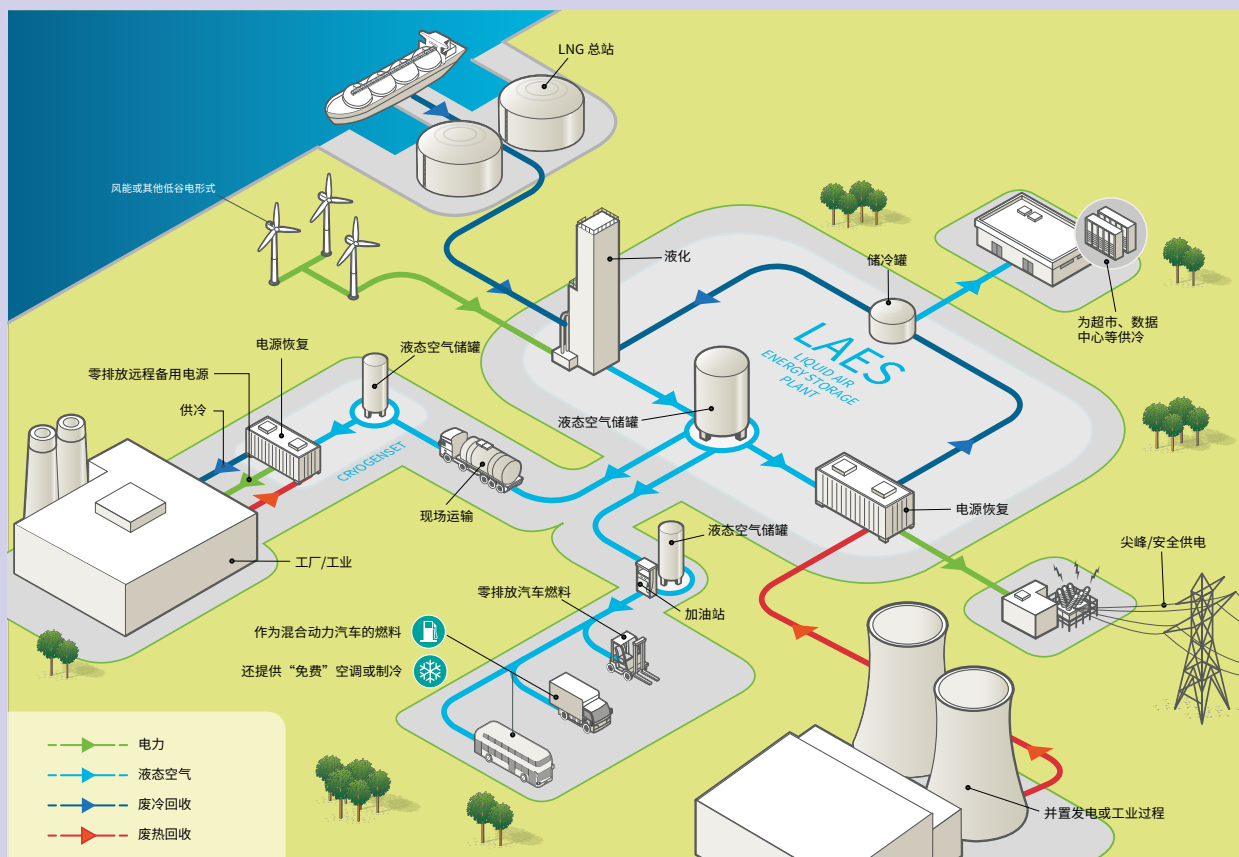
通常情况下，PCM 封装在模块或容器中，并可以在高峰时段作为供冷系统的备用或替代品使用，或者将其安装在冷藏容器中来直接供冷（Oró 等人，2012）。对于冷藏卡车或飞机来说，可将 PCM 模块内置在车厢壁或空调装置中。

目前开发出来的 PCM 可使冷藏车保持 72 小时的恒温。（Huang 和 Piontek，2017）。在静态应用中，PCM 有助于减少太阳能吸收供冷系统所需的物理储存尺寸，最多可减少 40%，进而降低系统成本（Hirmiz、Lightstone 和 Cotton，2018）。PCM 的能量密度比冰高，因此需要的空间更小。由于空间（和重量）都降到了最低，这使其更适用于冷藏车。

未来展望

一些尚不成熟的技术在冷链中展示出巨大的前景。下文对这些技术的潜力进行了概述，下一节将深入探讨在这些解决方案成为主流之前需要应对的创新挑战。

图 44. 在未来集成冷链中使用 LAES 的愿景



来源：伯明翰能源研究所，2015 年。

可再生热能源（例如太阳能和生物质热电联产）产生的冷能可使用**吸收式系统**进行储存。这些系统具有很高的能量密度和极小的热损失，因此可以在短期或长期内（例如跨季节）储存冷能，用于冷链中的空间冷却。

利用可再生能源发电生产**液态空气**将来可用于储冷。将空气在冷却到 -192°C 后液化。液态空气随后可用于在现场或场外提供空间冷却，甚至可用于冷藏车辆上。在释放冷能的同时，还会发生与将空气转换回气态发生的体积膨胀，从而可以驱动发动机并产生无排放的动力。

图 44 描绘了一家 LAES 工厂，该工厂将可再生能源发电与液态空气整合在一起，以实现运输和电网应用。

材料和系统创新将有助于提供适用于未来冷链的 TES 解决方案

表 8 展示了对创新关键指标的概述，而表 9 展示了冷链应用中使用的 TES 系统的预期材料科学和系统工程开发重点。

表 8. 冷链中 TES 技术创新的关键指标

属性	潜热			热化学			机械热		
	2018	2030	2050	2018	2030	2050	2018	2030	2050
成本 (美元/kWh)	58-230	45-185	35-140	12-150	12-120	< 95	示范阶段	商业	
效率 (%)	> 90	> 92	> 95	COP 0.6-0.8	(1)		N/A		
能量密度 (kWh/m ³)	30-92			180-310			78		
使用寿命 (年限或循环次数)	5-20 年	10-25 年	10-30 年	20 年	20-25 年	> 25 年	20-40 年		
工作温度 (°C)	-115 至 8	-150 至 8		5-30			-150 至环境温度		

注: (1) 由于技术成熟度低而无法提供数值; N/A 表示没有发现主要需求。

表 9. 冷链应用中使用的 TES 技术的关键材料和系统创新需求

TES 技术	创新需求
冰	<ul style="list-style-type: none"> 研究新的操作策略, 如完全或部分储存 减少充能过程中的局部结冰, 以提高充能速度和效率
低温和 < 0 °C PCM	<ul style="list-style-type: none"> 提高导热性能; 避免腐蚀和过冷 追求使用低成本材料的新型复合材料 通过开发防腐蚀容器材料, 最大限度地减少相分离 探索零下温度时的冷藏使用方法
吸收式系统	<ul style="list-style-type: none"> 解决结晶特性和工质对分离上的难题 研究替代性吸附剂以提高吸收率 降低驱动热源的温度 研究新的配置以提高双效吸收式系统的吸收率 提高效率, 减少网络部件的空间并避免腐蚀
LAES	<ul style="list-style-type: none"> 优化低温发动机的设计 使用液态空气而不是液氮, 进而降低运营成本 与设备制造商合作, 修改一些现用部件的设计, 以降低成本 开发应急备用电源、超市和数据中心等新应用

潜热

对于**零下温度的 PCM**来说，可以使用成本更低的成分来开发新型无机盐共晶混合物来降低成本。例如，可以用氯化钠 (<20 美元/kg) 代替氯化锂 (> 250美元/kg)，从而降低整体混合物的成本。目前，零下温度的 PCM 主要用于食品储存或运输供冷设备中的冷却，而且其他应用和用例也可以考虑使用。

已有人提出在冷藏卡车中采用 PV 面板和 PCM，因为相比蓄电池系统，其有一个很大的优势，那就是它们的重量更轻。然而，这种方法取决于地理环境，因为可再生能源和太阳辐射的间歇性在其可行性中起着至关重要的作用 (Li 和 Zheng, 2016)。

容器的腐蚀是大多数无机材料所存在的另一个问题。这可能导致热性能较差，还可能会导致盐混合物在使用中泄漏。必须仔细选择合适的容器和涂层材料，以最大程度地减少腐蚀并延长设备寿命 (Ferrer 等人, 2015)，以上内容都是研发活动的主题。

欧盟资助的 FRISBEE 项目正在研究哪种 PCM 最适用于冷链中的各种温度范围。该项目已开发出一款软件工具，用于评估大量水合盐和水醇溶液 (相变温度在 -60°C 至 6°C 之间) 的热物理特性。此外，该项目还研究如何将胶囊形态的 PCM 降低和控制到纳米级，以便更容易地将其用到食品包装中。

热化学

吸收式系统中使用的材料决定了其工作温度范围和系统效率 (Hui 等人, 2011)。为提高系统的可行性，必须对这两个参数进行优化。新型吸收对正在开发之中，以便实现更宽的工作温度范围并提高工艺效率。尽管这些材料经证明具有很高的储能密度 (Ibrahim、Al-Sulaiman 和 Ani, 2018)，但仍需对系统设计和性能进行测试，以确保这些系统能具有较长的使用寿命。需要进一步了解系统和实物模型，以便在真实情况下验证技术的可行性。

机械热

液氮是当前冷链中最常用的供冷“载体”。然而，液态空气在生产中并不需要气体分离过程，可以说是一种价格更为低廉的潜在替代品。

目前，对 **LAES** 研究最多的冷链应用是冷藏运输中的低温发动机。卡车实物模型已设计完毕并正在测试之中，以证明它的经济可行性。LAES 的各种应用也正在探索之中，而这些应用需要灵活的供冷和能源。例如，LAES 系统 (与冷藏整合以使效率保持在合理水平) 预计将用于超市和数据中心的应急能源和供冷备用系统 (Dearman Engine, 未注明日期)。



3.4 区域供热和供冷

区域供热和供冷系统使用隔热管网将热量或冷气从集中的生产源输送到多个建筑物，而不是在每个建筑物中安装单独的锅炉或供冷机。最终用户往往是有空间供热/供冷和/或水供热/供冷需求的家庭或商业场所，但某些区域的能源设施还可以满足工业能源需求。这种能源生产和分配方式通过提高效率来降低排放和成本，并为可再生能源大规模整合到城市中心提供了空间。

各种供热/供冷技术已开始作为集中供热/供冷厂进行部署，包括热电联产厂、传统锅炉、垃圾焚烧炉、工业源的管道余热、太阳能热电厂、热泵和地热能。

如上所述，区域供热/供冷方式可以提高效率，进而促进部门脱碳。在理想的情况下，这些方案还能推动可再生能源发电设施的使用。然而，正如到目前为止讨论的其他部门一样，相关挑战也会伴随而来。

关键挑战包括：

- 在从小时到季度的时间范围内，VRE 在产出与需求负荷之间并不匹配。

TES 在区域供热和供冷中的应用

TES 需求

- TES 技术可以提高区域供热和供冷的效率，时间范围从短（小时）到长（季度），灵活性很强，能够更好地匹配冷热供应与需求，并利用可再生的低谷时期电力。
- 采用 TES 的区域供热/供冷工厂经设计可使其规模满足平均负荷，而无需具备满足尖峰时段需求的能力，进而降低其资本成本。

现有用例

- TTES 已在世界各地广泛部署。
- UTES 已在某些国家/地区使用，但受地下环境的适用性影响。
- 目前，有些地区的供冷计划中使用了利用可再生电力生产的冰。

创新潜力

- 短期（5年）：改进对 TTES 的整合和管理，可以大幅降低费用，扩大部署机会。高温 cPCM 在中国成功示范后得以开发，材料和系统的改进提高了竞争力。
- 中期（5-10年）：正在进行对用于冷却的 PCM 的研究和示范有望促进更为广泛的部署。
- 长期（>10年）：PCM 和热化学系统具有更高的成本效益和效率，预计将增加可再生能源在区域供热和供冷中的应用机会，特别是在供冷和电力联合应用中。部门整合和智能控制技术将增强这方面的机会，特别是有利于从其他部门和应用收集（和储存）废热/冷气。

- 确定供热和供冷的定价方案。
- 波动性负荷导致发电机利用率和效率低下。
- 无法通过增加 VRE 发电机组数量以满足尖峰时段需求。满足尖峰时段需求需要锅炉等配套技术，这就增加了系统成本。

在区域供热/供冷中部署 TES 可能有助于应对这些挑战

在区域供热/供冷中使用 TES 的主要好处是可以将制热/供冷与消耗分离。在这里讨论的每个示例中，TES 的主要用例几乎都是利用可再生能源的供应高峰来储存热能/冷能，以便在以后供不应求时（无论是短期还是长期）使用。

在太阳能热提供区域供热方案中，TES 可用于储存多余的热量。 存储的热量可在太阳辐照度较低的时候（例如在夜间甚至整个冬季）释放。除了覆盖太阳辐照度较低的时段外，TES 还可以调节热量输出，以满足不断变化的需求并更好地平衡本地管网。这些特性有助于降低脱碳供热的成本。欧洲已出台了 200 多个太阳能集中供热计划，主要集中在奥地利、丹麦、德国和瑞典（Solar District Heating, 2018 年）。

UTES 是在这些情况下使用的主要 TES 类型，尤其是热井蓄热 (PTES)。通过季节性储能等方式，可以实现较高的太阳能热利用率（高达 90%）（Han、Wang 和 Dai, 2009 年）。

从波动性风能和太阳能光伏发电中获取能源的区域供热项目已经在中国、丹麦、俄罗斯、瑞典和美国试行（联合国环境规划署，2015 年；Xiong 等人，2016 年；Werner, 2017 年）。这些项目测试了利用可再生能源满足热能需求的各种方法，例如利用热泵或电阻对水进行加热。通过提高发电机利用率，TES 在帮助提高这些计划的可行性上大有可为。

将 TES 整合到由 VRE 供电的区域供热系统中，可以通过在尖峰时段继续发电来避免弃电。

“多余”的能量可以作为热能储存起来，以供以后热量需求回升时使用。在这种情况下，TES 有助于实现低成本的脱碳供热（Liu 等人，2017 年）。

在中国、丹麦、德国、意大利、瑞典和英国部署的**热电联产集中供热项目**中（联合国环境规划署，2015 年），**短期 TES 可以用来帮助满足日常尖峰时段需求**。这使小型热电联产系统的部署成为可能，而这种系统能够连续满负荷运行（不同于为满足需求而调峰的超大型电厂），从而提高系统效率和利用率。地热区域集中供热计划具有类似优势，**可通过促进恒定电量并利用 TES 来满足各种尖峰时段需求，进而提高利用率**。2014 年，在全球范围内的区域供热方案中，地热能占能源的比例不足 1%。目前，此类方式主要在冰岛和法国使用，欧洲其他国家的一些小规模项目也有使用（Werner, 2017 年）。地热项目受当地地热源的限制。然而，据估计，通过城市区域供热计划，地热可为欧洲 25% 的人口供热（Connolly 等人，2012 年）。

与区域供热类似，**供冷负荷也会随着季节的不同而变化，而 TES 有助于提高发电源的利用率**。TES 可实现恒定供冷，同时有助于满足各种负荷的要求。在区域供冷中使用电气供冷机的情况下，TES 还可以将生产转移到总需求较低的时候，进而有助于降低电网的尖峰用电负荷。这有助于通过削减尖峰负荷来避免昂贵的网络加固或扩建。将区域供冷系统在与冷藏结合使用，可将供冷能力降低 15-50%，同时减少了对辅助部件的需求，并可通过更有效地利用压缩机来改善整体系统性能（Cecca, Benassis 和 Poeuf, 2010）。

在区域供热或供冷方案中增加储热装置，可使系统满足更多热负荷要求，并整合具有不同发电特性的可再生能源

源。TES 可以有效地将热能或冷能的生产方式与消耗方式分离。

当采用这种方式为广大用户连续供热和供冷时，同时还必须整合太阳能热具有波动性的可再生发电资源，这一点至关重要。这意味着，可再生能源发电厂可以随时运行发电，在需求低时储能，然后在需求高和供应低时释放能量，从而提高发电利用率。

关键用例表明，TES 已经促进了可再生能源在区域供热/供冷中的部署，并将在未来继续发挥作用

在中国（Nordell，2000 年）、**北美**（IEA，2014 年）和**北欧**，**UTES 技术通常与区域供热和供冷项目一起部署**。使用 BTES 的季节性储能计划已在加拿大和丹麦进行了试验，中国西藏地区也有几个项目正在开发之中。

据估计，全球共有 8 万个区域供热项目。这些项目大多在寒冷的气候条件下进行，在中国北部、北欧和俄罗斯的安装使用率很高。例如，区域供热分别满足丹麦和波兰 51% 和 34% 的供热需求（Werner，2017 年）。在气候很冷的国家，区域供热方式最适用于人口密集的城区或工业区。可再生能源区域供热项目主要使用生物质或热电联产；然而，加拿大和丹麦已出现使用太阳能热板供热的示范项目。

UTES 可用于区域供冷和供热计划，但是其效用可能会受到严格的地理和地质限制。ATES 需要有含水层，而 BTES 则可能会受到地下质量的限制。

无法使用 ATES 的情况下，可以采用闭环 BTES（Mott MacDonald，未注明日期）。UTES 可用于季节性和短期冷能和热能储存（Sarbu 和 Sebarchievici，2018）。

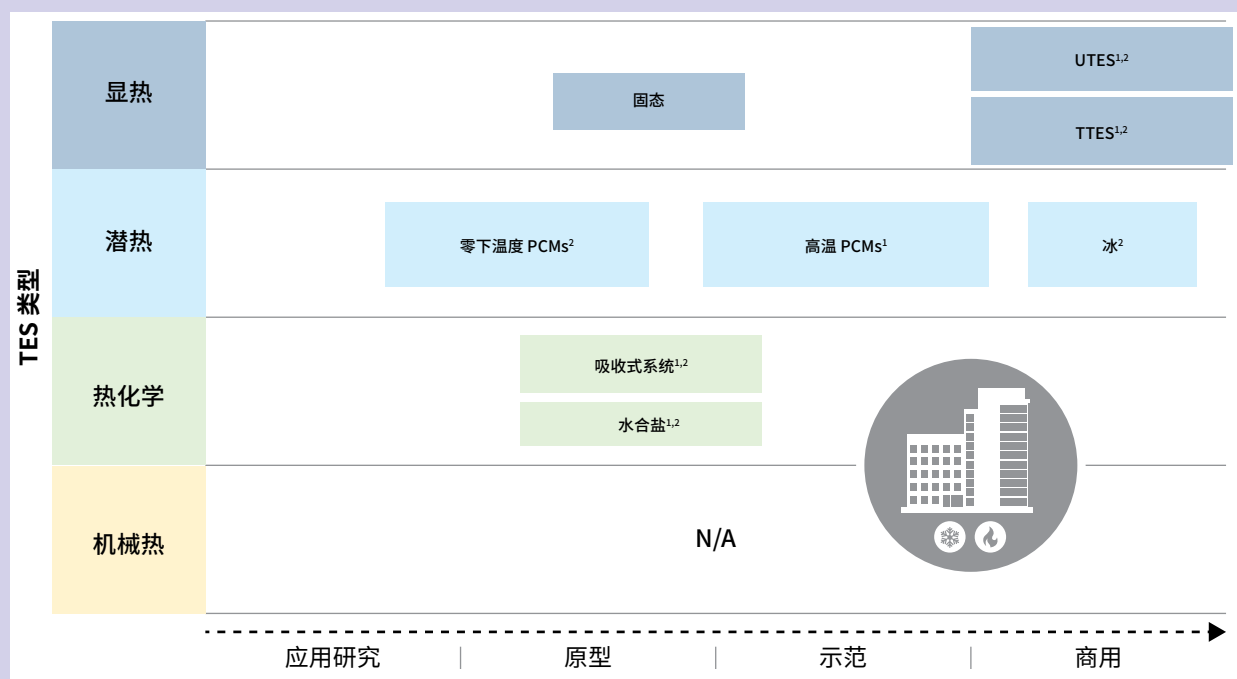
大部分区域供冷都用于中东和美国，但澳大利亚、欧洲和日本也有相关项目在运营之中（Cecca，Benassis 和 Poeuf，2010；Paksoy，2013；JCU，2014；亚洲开发银行，2017；IRENA，2017c）。在阿拉伯联合酋长国，有超过 20% 的空间供冷负荷通过区域供冷来满足（IRENA，2017c）。中国是一个新兴市场，据报告，2013 年全中国有 833 个相关项目（Paksoy，2013 年）。空间供冷的主要用户是服务部门和住宅建筑物（Werner，2017 年）**通常使用冷水罐、冰和吸收式供冷机作为储冷形式**（亚洲开发银行，2017）。

各种纬度的地区都有区域供冷项目，这意味着其部署在很大程度上与气候无关（IRENA，2017c）。使用冰块的短期储冷通常用于电源和冷却负荷存在波动的地方。冰储能的能量密度很高，因为其仅需要冷水罐所需空间的 25%，所以非常适合在城市地区使用（FVB Energy，未注明日期）。UTES 可用于提供长期储冷，但其适用性受到地下环境的限制。

多种 TES 技术已在区域供热和供冷计划中得到部署

图 45 总结了 TES 在区域供热/供冷中的部署状态。这些内容将在下文中按技术类别进行讨论。

图 45. TES 技术在区域供热和供冷中的商业就绪水平。



注：(1) 区域供热；(2) 区域供冷。

当前状态

大型**水罐**经常在区域供热中使用。这种装置由隔热性能良好的系统组成，可减少热量损失并延长有效储存期。在电力需求低谷期或利用太阳能集热器对水进行加热。当需要热量时，将储存的热量排出。这些大型水罐可位于地面上方或下方，具体取决于项目的需要。

冷水罐是用于区域供冷的最常见的储热方案。该装置使用的大型混凝土和钢制水罐，据报道其应用容量可高达 150,000 m³ (Somarriba, 未注明日期)。在这些系统中，高辐照期所有产生的多余太阳能可用于水的冷却，例如使用吸收式供冷机 (Hasnain, 1998 年; BEIS, 2016 年)。

UTES 技术还可与热网一起部署，以对低边际成本的热源进行整合（例如地热和太阳能），以实现季节性储能。热能可在最高 100°C 的温度下储存，并且升级后可供热泵使用。对于区域供冷来说，UTES 通常在温差 6°C 左右的情况下使用。

冰的熔合潜热较高，因此已作为 TES 冷却材料广泛使用。冰由可再生能源发出的电力生产，也可通过太阳能吸收过程将水冻成冰。载热流体（通常是水或乙二醇）通过管道传递冷能，从而为住宅区或办公楼供冷。

案例研究 4. 季节性储能太阳能区域供热方案

季节性 BTES 使区域供热项目可以为加拿大提供近 100% 的可再生热能

Drakes Landing 是一个技术示范项目，利用太阳热能和季节性 UTES 为加拿大阿尔伯塔省一个拥有 52 栋房屋的住宅社区提供区域供热计划。开发该项目是为了提高区域供热的季节性储能效率。

每个房屋上太阳热能装置的总装机容量为 1.5 MW，在夏季收集太阳能，然后利用 BTES 将能量储存在地下。在冬季供热需求量大的时期，热量从储能装置中提取出来并分配到每个家庭。

该项目使当地太阳能产热几乎可提供 100% 的空间供热。该项目表明，通过有效的储能，可以解决可再生能源供应与供热需求之间的季节性不匹配问题。因此，每个家庭的温室气体排放量每年减少了 80% 以上。

这种技术的推广存在着一些非技术性障碍。目前，财务风险比较严峻。

在加拿大，廉价天然气的供应抑制了季节性储能方案的潜在市场需求。在丹麦等能源价格不断上涨的国家，用于区域供热计划的其他季节性蓄热项目也有如雨后春笋般涌现（例如 Vojens）。

预计这种项目的规模必须比现在高 8 到 10 倍，才具有商业可行性。因此，为了使该系统更具商业吸引力，有必要降低成本。然而，BTES 仅占系统总成本的 10-20%，这说明阻碍类似项目推广的是太阳能集热器的成本。

Drakes Landing 的项目由一家燃气公司运营，但同时也依靠一家房地产开发商。将不同的利益相关者召集在一起也很困难，因为没有一方会愿意承担财务风险的负担。在这种情况下，政府承担了风险，这表明公共部门在未来的项目中可能会起到介入作用（Sibbitt, B. 等人，2015 年）。

未来展望

PCM 以盐和水的共晶混合物为基础，熔化温度约为 7-8°C，可以用来代替冷水或冰储能。较高的充能温度更使其充能效率高于冰储能，而且所需的罐体积极明显小于那些含有冰水的水罐。

高温 PCM 可成功地用于区域供热应用。与显热技术相比，该系统具有更高的储能密度和热导率，因此能够在较小的储存空间中储存大量能量。

在与太阳能热能和风能等可再生能源系统（例如太阳能和风能）结合使用后，这种储能技术可用于短期或长期区域供热。同类第一家 6 MW/36 MWh **高温 cPCM 示范工厂** 已于 2016 年 9 月在中国北部投入运营。有关此项目的更多详细信息，请参阅案例研究 1。

与其他类型的储能方式相比，热化学储能有几个关键优势。此类系统的能量密度要比其他 TES 系统（例如 TTES）高出三到六倍，进而减少了对空间的需求。此外，热化学储能系统的热损失非常小，并且可以运输以供远程使用。

示范项目还对**水合盐吸附**系统在住宅和商业的应用进行了研究，以满足独立建筑的需求。该系统可在区域网络中实现，并作为加热水合盐的来源与太阳能集热器或热电联产厂结合使用。该系统将在夏季充能，以达到在冬季使用储存热能的目的，以此满足网络中的热水和供热需求。

吸收式系统是一项很有前景的技术，可以被泵送并作为区域网络中的工作载热流体使用。这样就可以使用远离服务地点的热源。吸收式系统在供冷部门中的应用由来已久，而且在区域供冷方面也前景光明。吸收式热泵可利用区域供热基础设施（太阳能集热器）中的低品位热能提供供冷和空间温度调节。吸收式系统允许临时转移冷却负荷，因此可以利用更适合有效供冷操作的环境条件。

TES 效率的提高也将继续提高配套区域供热和供冷的可行性

表 10 总结了用于区域供热和供冷的 TES 组成部分中的技术创新的主要目标。

显热

UTES 装置没有标准的设计。每个设备都是为特定的位置和应用而设计，因此都是独一无二的，但组件泵、管道和热交换器都是标准的工业产品。因此，UTES 无法实现传统意义上的工业商用化（Nielsen, 2003 年）。此外，UTES 系统还面临一个主要挑战，那就是其可能会威胁到当地的生态系统，进而对环境造成影响。当前，有几项研究正在进行之中，以了解 ATES 系统对环境带来的影响。科学家们需要研究 UTES 对地下水的影响，并进行跨部门的地下储热规划，以最大程度地减少 UTES 与其他地下设施之间的负面冲突（Bonte, 2015 年）。

需要对使用 40-90°C 范围内温度的新系统进行研究，这些系统可以储存来自发电厂、工业过程、地热或太阳能的热能，并在以后作为备用容量在高需求时释放。温度越高，系统热损失就越高，颗粒、气泡、细菌生长和矿物质沉淀等原因都会导致系统各部件结垢和堵塞。还需要对部件腐蚀情况进行测试，以更好地预测设备的寿命。对于高温储能来说，水基储能系统的使用会受到限制。这给 UTES 实现高效季节性储能带来了严峻的挑战。因此，需要选择和研究比热和导热系数高且成本低的其他候选储能介质（RHC-Platform, 2012 年）。

案例研究 5. 柏林区域供热方案使用的水合盐蓄热原型

演示水合盐蓄热系统如何灵活地实现热电联产

2019 年，德国柏林的一家热电联产电厂尝试采用了一种装机容量为 0.5 MW/10 MWh 的吸收式储能解决方案。在电力供应过剩的时候，吸收式系统通过电网或配套的热电联产装置充能。热能随后会根据需要从发电厂分配到柏林的区域供热网络中。

该项目旨在将热力生产与发电脱钩，例如在需要热电联产工厂供热但不需要供电的情况下。

该技术使用纳米涂层盐来最大程度地减少盐劣化问题，并确保在大量充能循环后保持最佳效率（Vattenfall and SaltX Technology, 2019 年）。

表 10. 区域供热和供冷 TES 技术创新的关键目标

属性	显热			潜热			热化学		
	2018	2030	2050	2018	2030	2050	2018	2030	2050
成本 (美元/kWh)	0.1-35	0.1-25	0.1-15	60-230	45-185	35-140	15-150	试验规模 15-120	示范 10-80
效率 (%)	55-90	65-90	75-90	> 90	> 92	> 95	50-65	(1)	
能量密度 (kWh/m ³)	15-80	(2)		30-90			120-250		
使用寿命 (年限或循环次数)	10-30 年	20-30 年	> 30 年	10-20 年	> 25 年	> 30 年	15-20 年	20-25	> 30
工作温度 (°C)	5-95	5 至 > 95		0 至 750			15-150		

注: (1) 由于技术成熟度低而无法提供数值; (2) 具体取决于工作温度范围。

此外,为了提高容量、效率并与可再生热生产技术相配合,需要对混合 UTES 系统进行研究。为了提高节能效果,减少备用系统的使用,还需要对 UTES 进行优化控制 (European Association for Storage of Energy and European Energy Research Alliance, 2017b)。

通过加大水罐的尺寸并提高系统的标准化程度,TTES 将会带来巨大的收益。TTES 的成本可以从 486 美元/m³ (300 m³ 热水罐) 降到 123 美元/m³ (12,000 m³ 热水罐) (BEIS, 2016 年)。预计系统效率将有所提高,或许可以通过新方法增加和维持热分层。这将减少运行成本。

热分层会导致工作时间变长,进而大幅提高了太阳能收集器的利用率,减少了辅助能源的使用和成本。最近的研究提出了各种增加热分层的新方法,例如最大限度地减少将进入热分层蓄热罐的水的混合和湍流降低 (Al-Habaibeh、Shakmak 和 Fanshawe, 2017 年)。这些改进可能会明显提高储能效率,提高幅度在 6% 和 20% 之间 (Han、Wang 和 Dai, 2009 年)。

其他改进措施也在探索之中,例如优化内部换热器和水罐内部自由对流,以及通过尽可能减少管道内寄生热对流造成的热损失。

潜热

高温 cPCM 的创新需要重点关注如何提高热循环稳定性,因为腐蚀和结构不稳定会导致 PCM 泄漏。为了使这项技术具有充分的竞争力,我们需要对新型复合材料和系统进行进一步的研究。在进一步商业化之前,为了确保系统寿命足够长,必须对系统循环和整体系统随时间推移的性能进行分析。创新的主要重点是可提高充/放能速度的新型集成系统,以及旨在提高部件兼容性并降低维护成本的材料科学研究。这些创新将使这项技术能够以更大规模从示范阶段进入商业阶段。

在**零下温度的 PCM**中,当前使用的盐混合物的主要技术挑战是充放能过程中的相分离¹³。这些系统也容易出现过冷¹⁴和腐蚀。

13 含有不同成分的相之间相互分离并引起凝固焓损失的效果。

14 温度低于熔点且材料未开始凝固的效果。

目前，这些因素不但降低了系统的可循环性能，还增加了系统的维护成本。

为克服这些问题，专家们提出了不同策略，例如添加交联材料以使盐保持在溶液中，或添加材料以增加盐的粘度（Li 等人，2013 年）。然而，在开发方面，大多数解决方案仍处于实验室测试阶段，并且没有一个适用于所有解决方案的最佳方法。为了避免或最大程度地减少容器的腐蚀，必须执行选择过程，而且在某些情况下，必须使用封装或涂层（Ferrer 等人，2015 年）。

与其他 PCM 相似，由于移动的液固边界和低导热性，传热速率在充放能过程中会受到限制。可以通过增加传热面积（例如，使用金属翅片）和添加高导热率的材料添加剂（例如石墨、颗粒）来提高传热速率（Oró 等人，2012 年）。

充能过程中的结冰是冰储能的主要问题，可能会通过降低充能速度和效率，进而影响系统的性能。例如，在冰盘管式储热系统的充能过程中，冰从盘管的表面开始产生，并且由于产生的冰自身的热导率很低，导致充能效率下降。专家们提出了解决该问题的各种方法，例如在盘管线圈上增加翅片或环圈。

还可以通过应用不同的运行策略来优化性能，例如完整储能策略和部分储能策略（Yau 和 Rismanchi，2012 年）。

热化学

目前，高昂的投资成本阻碍了热化学 TES 在区域供热/供冷方面的发展。此外，还存在与所用化学品的腐蚀性有关的问题，以及潜在采用者因系统相对复杂而对系统安全性的顾虑。

热化学 TES 系统的季节性储能能力使其在区域供热和供冷应用中具有潜在的吸引力。然而，要实现这些系统的潜力，需要在材料化学方面取得重大进展。对于**水合盐**系统，主要进展包括增强所用盐的活性和耐久性，同时设法保持其亲和性和安全性。同样，在**吸收式系统**中，所用盐的实用性是关键，研究人员正努力去提高盐的稳定性和能量密度。

研究人员基于水合盐（供热）和吸收（供冷）系统，已经提出了将热化学 TES 系统与可再生发电厂相结合的各种配置，以将其用于区域供热和供冷应用。

案例研究 6. 将充能的 TES 材料从充能地点运输到需求点

H-DisNet

欧盟“智能混合热化学区域网络”（H-DisNet）项目正在设法评估一种将热化学 TES 整合到区域供热/供冷中的创新方法。该项目的合作伙伴正在研究一种适用于充能 TES 材料的“混合型”智能运输系统。该系统可远程利用分布在分配网络周围的部分水合/脱水盐溶液来释放储存的热能，以进行供热或供冷。该项目涉及模拟和控制研究，旨在更好地管理热化学 TES 基础设施。此外，在德国、瑞士和英国也有三个示范项目（KU Leuven，2018 年）。



3.5 建筑物

建筑物领域包含商业和住宅用房，面积约为 1,500 亿平方米。能源在建筑物中用于空间加热、空间冷却、热水和烹饪。预计在不久的将来，全球建筑面积每年将增长 3%，该部门的总能耗预计将有所上升（IEA，2017 年）。

因此，未来将需要加大脱碳工作的力度，预计建筑物规模的可再生能源发电应用也将有所增加。

阻碍在建筑物中进一步部署可再生能源的主要挑战集中于管理潜在的电力需求尖峰，并确保能源供应（包括供热/供冷）与变化的需求能够有效匹配。推动能源效率的不断提高应成为管理需求的优先事项。全球需要进一步扩大热泵的部署范围，同时将使用由可再生能源供电的区域供热系统的热量翻倍。

TES 在建筑物中的应用

TES 需求

- 在寒冷的气候条件下，通过增加需求侧的灵活性，减少潜在的尖峰和网络提升的需求，以及提高低谷期可再生能源的利用，TES 可以支持热泵的部署。
- 在温暖的气候条件下，通过转移空调负荷并降低系统压力，TES 可帮助减少与鸭子曲线有关的问题。
- 在电网薄弱或不可靠的地区，分散式的热能/冷能储存还可以减少对电网的依赖性，提高建筑物的能源供应安全性。

现有用例

- 水罐蓄热在全世界范围内广泛用于建筑物蓄热。
- PCM、固态热电池和替代空调装置的冰储能技术已经很成熟，但部署规模相对较小。
- UTES 已在各种情况下使用，较小规模（单个建筑物）设备的实用性也正在研究之中。

创新潜力

- **短期（5 年）：**与能源管理系统结合使用的 PCM 热电池正处于试验阶段。试验可以证明这种电池可以利用低谷期的能量来实现热能的低碳化并为消费者节省开支。通过材料开发，改善 TES 和固态 TES 技术中材料的热性能和耐腐蚀性能，进而提高效率。此外，加强整合和控制系统的创新将会提高成本效益。
- **中期（5-10 年）：**新一代高温和低温 PCM 和 cPCM 的成本降低和技术改进有助于增加建筑物中潜热储能的部署。
- **长期（> 10 年）：**注重于实现热化学 TES 技术中材料和系统改善的研发活动有助于早日进入示范阶段。

鉴于供冷主要是通过电力提供，因此不断增长的电力需求将成为能源系统的另一个挑战。在用电高峰时段（供冷已经是其中的重要因素），这种情况尤其明显。当务之急是将可再生电力（尤其是太阳能）与白天以外的供冷需求相匹配。

到 2050 年，建筑面积预计将增加到 2,700 亿平方米。在住宅方面，面积增长是由于人口和收入的增长，导致人们希望提高每个人的居住空间，减少每个房屋中的居住人口，尤其是在发展中国家（Global Alliance for Buildings and Construction, 2016 年）。例如，印度预测到 2030 年新住宅建筑空间的需求量将达到 200 亿平方米，这相当于住宅建筑能耗将从 2005 年的 1.9 EJ 变为 2030 年的 8.12 EJ - 增加 450%（全球建筑最佳实践联盟，2014 年）。

根据 IRENA 的分析，目前可再生能源能够满足 36% 的建筑能耗，包括将本地生物质用于空间供热和烹饪。这一比例将需要增加，而扩大分散式建筑规模可再生能源的推广范围可能是一个关键的解决方案。到 2050 年，可再生能源的占比可能会上升到 77%，太阳热能和热泵的数量将比当前水平显著增加（约比 2015 年水平高 10 倍），而现代炉灶、生物质（约比 2015 年的水平翻了一番）和地热（约比 2015 年的水平高 6 倍）的使用量也将大幅增加（IRENA, 2018 年）。

空间供冷是建筑物中增长最快的能源使用方式，这一趋势在经济快速增长且气温较热的发展中国家尤为明显。随着这一趋势不断发展，越来越多的市民将有机会使用供冷设备，能源使用量预计也会成比例增长。例如，2010 年中国人共购买了 5,000 万台空调（相当于美国总存量的一半）（Cox, 2012 年）。2016 年，建筑物能源使用总量中有 6% 用于空间供冷，其中绝大部分依靠电力完成。

IEA 估计，到 2050 年，空间供冷的能源需求将增加三倍，这将使供冷用电量在总用电量中的比例提高到 30%，在建筑总用能量中的比例增加近三倍（IEA, 2018b）。到 2060 年，全世界用于空间供冷的能源使用量预计将超出空间供热（Isaac 和 van Vuuren, 2009 年）。

蓄热在建筑物中可以发挥重要作用，有助于可再生能源的整合。TES 可通过热能电气化来实现部门耦合，并有助于满足日益增长的供冷需求。

建筑规模的 TES 有助于满足或转移尖峰需求

供热电气化和供冷需求的增加将导致各种类似问题。将热能生产和冷能生产**脱钩**可以削减各自的负荷峰值。这将减少系统对调峰装置的依赖，并**减少**可再生能源的**缩减**，进而降低整体系统成本。这对于 VRE 渗透率较高的地区/能源系统来说是一个很大的优势。对于供热来说，这适用于每日和季度性储能。此外，将可再生能源多余的能量以热能形式储存比以电能形式储存更高效，这也使得 TES 能比电池更有效地减少负荷与发电量变化之间的不匹配。（Lund 等人，2016 年）。

电力需求的增加也可能对本地网络造成巨大压力。家用 TES 有助于减轻这种压力，并**推迟对电网改进的需求**。

很多 TES 技术可以大范围地直接在建筑物中应用

具有不同工作温度和要求的 TES 技术和系统可以满足建筑领域的各种需求。成熟的 TES 技术已经在建筑规模上部署多年。将来，目前正在开发之中的新型解决方案很有可能对这些技术加以补充。各项技术之间的开发和部署状况各不相同（图 46），下文将详细讨论。

案例研究 7. 具备智能能源管理功能的 PCM 热电池可实现低谷期可再生能源的整合

与燃气锅炉相比，使用 PCM 的热电池可为英国家庭节约成本并减少碳排放

在过去十年中，英国在电力系统脱碳方面取得了重大进展。然而，在最终家庭能源消耗中，电力消耗仅占 16%，而热能消耗却占了 81%。事实上，英国有 90% 的家庭依靠燃气供热。这意味着，总体而言，家庭供热所造成的碳足迹占该国总碳足迹的 25%。因此，如果英国希望在 2050 年之前实现其最近宣布的净零排放目标，那么如何实现家庭供热的脱碳将是一项重大挑战。

使用 PCM 的热电池可以构成解决方案的一部分。其中一种电池使用无机水合盐（乙酸钠），该材料的相变温度为 58°C。PCM 技术经设计可以在不发生任何退化的情况下执行 41,000 次循环。热电池的能量密度是水罐蓄热的四倍，无毒且不易燃烧。

在 15 年（不到电池潜在寿命的一半）的时间段里，电池能够以约 0.05 美元/千瓦时的价格提供热能，比电化学电池储存的等效能量要便宜得多。考虑到热电池使用寿命预计会更长，并且劣化的影响可以忽略不计，因此可成为一种比电化学电池更具成本效益的热能提供方案。

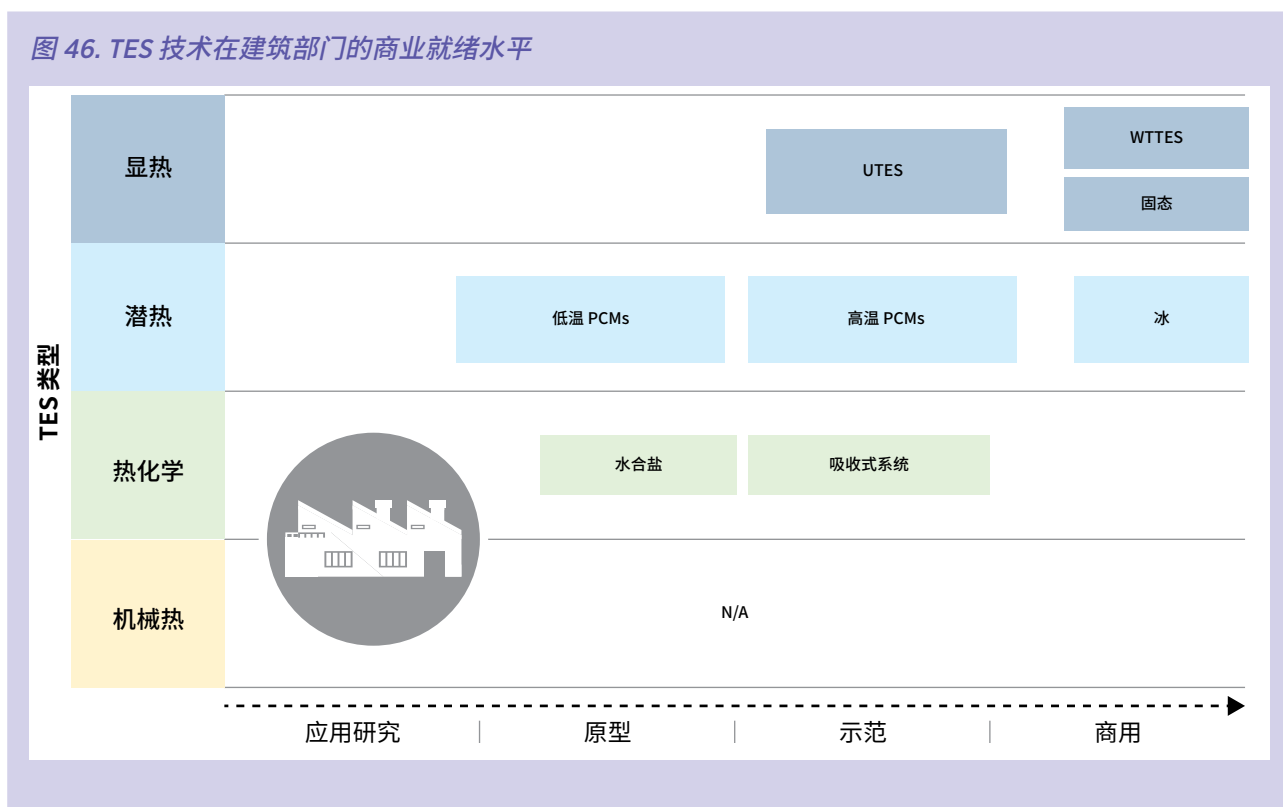
最新款热电池每单位储存的能量在价格上据称比最便宜的锂离子电池还要低 60-90%。

该技术可以与屋顶光伏发电 (PV)、电网电力或热泵结合使用。该技术已经历了几次试验。第一次试验于 2013 年开始，涉及七户家庭。试验结果表明家庭供热运行成本比燃气锅炉低了 50%。新一代电池已在苏格兰的 600 户家庭中进行了大规模试验，其中有 404 户使用屋顶太阳能光伏发电。事实证明，这为大部分住户节省了成本。

2019 年，英国政府宣布拨款 200 万美元，资助电池技术开发商与能源供应商合作进行试验，以使家用客户能够在电力负荷低谷时段用低成本的可再生电力为房屋供热，而这需要通过使用供应商的能源管理平台来实现。该试验旨在证明智能中央供热系统在大众市场上的可行性。

英国政府在 2019 年宣布，将在 2025 年之前禁止在新建房屋中使用燃气供热，因此上述系统可能对英国未来的家庭供热计划至关重要。这证明了 TES 用来提高需求侧的灵活性，如果供热已实现大规模电气化，则这种技术可成为支持电网稳定性的关键所在（Sunamp Ltd，2019 年）。

图 46. TES 技术在建筑部门的商业就绪水平



当前状态

传统民用和商用**水罐**的容量一般在 100 至 1,000 升之间 (Lanahan 和 Tabares-Velasco, 2017)。水罐蓄热是基于在用电需求低谷或太阳能集热器的多余电力期间对水进行加热或供冷。热能可以随后在需求高峰期供应并分配到设备 (Alva, Lin 和 Fang, 2018)。

世界各国均已报道了电热水储存的各种示例。澳大利亚、法国和新西兰的示例证明了 TES 的这种用途的能力，即可通过减少住宅高峰需求来协助管理当地的电网拥堵。2014 年，法国通过这种方式实现了每年 5% 的削峰率 (IEA, 2014 年)。

自 20 世纪中叶以来，住宅蓄热器中的热能一直储存在**陶瓷砖**中，温度高达 70°C。这种家用电器的现代版本，即智能电蓄热 (SETS) 加热器，使用低成本的陶瓷砖储能介质，通过电阻加热储能介质，温度最高可达到 700°C。

SETS 设备已被安装在全球数以万计的住宅中 (欧洲能源储存协会和欧洲能源研究联盟, 2017b)。

同时，加利福尼亚州最近开发了供居民使用的**冰储能**技术，通过减少“鸭子曲线”来帮助公用事业。使用冰储能的设备在整个北美和印度也可以买到，主要设想用于商业建筑。其他低温 PCM 也可以在建筑物中得到了应用。在大多数情况下，**冰和零下温度的 PCM** 封装在模块中，由载热流体将冷能从模块提供给负荷。这些系统可用于支持或替换供冷系统，或在住宅或商业建筑中进行空气调节 (欧洲能源储存协会和欧洲能源研究联盟, 2013)。

主要用于供热，**家用 PCM 加热电池**已在英国成功试验并投入使用。封装的 PCM 可以通过电加热或载热流体 (例如来自太阳能的热水和来自空调的冷气) 交换的热量进行充能。

案例研究 8. 市政府推出家用 TES 以减少家庭开支并提高风能利用率

加拿大市政计划以折扣价格提供 TES，从而提高了当地风能的利用率

萨默赛德是加拿大爱德华王子岛上的一个小镇，人口为 15,000 人。萨默赛德的公用事业部门归市政所有。市政当局拥有并运营的当地风能装机容量为 21 MW，可满足该镇约一半的电力需求。让市政当局感到沮丧的是，在电力需求低迷的时候，其不得不以低价将多余的电力出售给电网，因此没有充分发挥出发电潜力。同时，该镇有近 80% 的供热需求由价格昂贵且能耗高的燃油空间供热满足。

2013 年，该镇实施了“供热省钱”计划，鼓励居民在住宅区使用电蓄热技术（使用陶瓷砖）或分时使用电热水器 (TTES) 来替代住宅物业中的燃油取暖设备并提供折扣电价。在电力公司方面，该镇开发了智能电网来协调负荷的实时控制。

客户可以直接购买或租用 TES 设备，也可以参加 5 年、7 年或 10 年先租后买计划。设备的评估和安装由市政当局管理，从而减轻了消费者的负担。

总共在 238 个地点交付了 366 台储能设备，容量范围从 3 kW 到 80 kW 不等，其中 75% 的 TES 用于住宅用户。商业用户也签署了该计划，从而增加了 3 MW/13.5 MWh 的储存能量。

通过利用“错位时间”的可再生能源，以前出售给电网的能源中有 24% 留在了社区，风电场的容量系数也因此提高了一个百分点。

虽然通过干预，电力公司的收入有所增加，但真正的赢家是消费者。他们使用陶瓷砖蓄热，平均每户每年可节省 1300 加元，而使用 TTES 则可节省 200 加元。

此外，由于减少了燃油加热和备用柴油发电，2015 年避免了 400 吨的 CO₂ 排放量。

省政府也拥有几个风电场，并于 2017 年公布了 10 年能源战略，指出希望效仿萨默赛德的做法，在全省其他地区推广 TTES 和基于陶瓷砖的加热器 (Wong, Gaudet 和 Proulx, 2017)。

未来展望

正如上一节所强调的那样，大规模 **UTES** 已应用于住宅和商用领域的区域供热和联合供热及供冷。目前，一些研究正在测试规模较小且成本较低的 BTES 系统，并在测试中将该系统与温室或单个建筑的太阳能集热器相连 (Baer, Lu 和 McCartney, 2016)。

此外，**高温 cPCM** 可在住宅和商业应用中以相对较小的储能体积储存大量热能。这些材料还将使用类似于当前锅炉的罐体，但尺寸要求要小很多。

水合盐可以长期（季节性）也可以短期（每日）储存来自太阳的热量，以克服住宅和商用领域的需求波动。夏季可以使用太阳能集热器、太阳能电池板或热电联产设备为吸附系统充电，以便在冬季为建筑物提供热水和供热。

该技术在建筑部门还处于早期部署阶段，但其理论能量密度比传统的蓄热技术（如水罐）高 5 至 10 倍，因此潜力巨大（van Essen 等人，2010）。

专家们已根据储热材料、系统和应用需求，提出了各种整合方案（Mette, Kerskes 和 Drück, 2012）：整合到建筑物的通风系统中（MonoSorp 项目 [Bales 等人, 2007]），整合到建筑物的通风系统中，整合到建筑物的通风墙中（SolSpaces 项目），或整合到具有独立反应器和材料库的太阳能热组合系统中（CWS-NT 概念）。

在整合到建筑物通风系统中的情况下，蓄热器经设计可整合到建筑物中。该建筑物应设有可控的通风系统，并可利用太阳能集热器作为可再生能源的来源执行热回收。另一种方案是将吸附装置整合到建筑物的墙壁内。所提出的系统可将吸附和解吸分开，进而将吸收式蓄热分成几段，优点是能够减少储存量。如果要整合到太阳能热组合系统中，则需要储存材料和反应器，以便在其中充能/放能。

吸收式冷却系统是一种新型热化学蓄热方式，有助于将可再生能源整合到建筑物中。

工业应用市场上已经开始提供大型热驱动吸收式冷却系统，但太阳能驱动系统在空调应用中的概念相对较新。

太阳能热供冷可以通过用热驱动空调取代电驱动空调系统，进而减少夏季高峰期的能源需求。吸收循环更适合于低品味热能利用，比其他吸附式系统具有更快的传热和传质速率。

材料科学和系统集成方面的创新将使 TES 能力得到提高

表 11 总结了用于建筑物的 TES 组成部分中的技术创新的主要目标。

显热

UTES 在住宅和商业应用中的主要挑战是如何简化系统设计。对于小规模应用来说，BTES 体积过小会导致更大的热损失和效率低下（Lanahan 和 Tabares-Velasco, 2017）。此外，建造 BTES 的高昂资金成本突显了数值模拟对确保经济和热力学可行性的重要性。

表 11. 建筑物 TES 技术创新的关键目标

属性	显热			潜热			热化学		
	2018	2030	2050	2018	2030	2050	2018	2030	2050
成本 (美元/kWh)	0.1-35	0.1-25	0.1-15	60-230	60-185	60-140	15-150	试验规模 12-80	示范 < 80
效率 (%)	55-90	65-90	75-90	> 90	> 92	> 95	50-65	(1)	
能量密度 (kWh/m ³)	15-80	(2)		30-135			120-250		
使用寿命 (年限或循环次数)	10-30 年	15-30 年	20-30 年	> 10 年	> 15 年	> 20 年	15-20 年	20-25 年	> 30 年
工作温度 (°C)	5-95	5 至 > 95		0 至 750			15-150		

注：(1) 由于技术成熟度低而无法提供数值；(2) 具体取决于工作温度范围。

多项研究表明，在小规模系统中，BTES 与太阳能收集器的联用可以提高效率。一项关于温室设施的研究预测，该设施的运营效率为 80%，预计投资回收期为 14 年（Gao, Zhao 和 Tang, 2015）。

后续试点项目可用于测试 BTES 在其他建筑和商业应用中的设计和性能。

将 PCM 整合到水罐中以提高家用热水储存的能量密度是当前研究的主题。热水/PCM 混用拥有巨大潜力，并有可能在中期内出现（Mette, Kerskes 和 Drück, 2012）。整合 PCM 有助于克服与传统水罐空间限制和重量相关的挑战，否则这些因素会限制其效用。

在系统效率方面，需要采用新的方法来改善和维持热分层，降低系统运行成本。最近的研究提出了很多增加热分层的新方法，例如最大限度地减少将进入热分层蓄热罐的水的混合和湍流降（Al-Habaibeh, Shakmak 和 Fanshawe, 2017 年）。还有一种方法是使用智能恒温控制策略来预测所需的水量，在保持客户舒适度的同时，对电网的变化做出反应（Gelažanskas 和 Gamage, 2016 年）。该系统在运行时根据消耗量预测作出需求响应（Davis, 2014 年）。

智能控制系统可对生产进行上下调节，也可以提高热水器效率。系统更改包括优化内部热交换器整合、水罐内部自由对流，而且因管道中寄生热对流而造成的热损失，也值得进一步研究，以便评估具有更高效率的新设计的潜力。

目前有多个正在进行的项目，旨在将刚上市的小型吸附式供冷机与太阳能水罐相结合，以用于空间供热和供冷（Reda 等人，2017 年）。

大比例 VRE 发电为整合使用陶瓷砖的 **SETS** 加热器创造了新的机遇和理想的条件。

有专家提出用 SETS 系统为需求侧管理提供服务，使低碳能源（例如风能和光伏能）在地方和国家层面的渗透率能够不断提高。有几项研究模拟并优化了分散式 TES 与 SETS 加热器的使用，以提高可再生能源的渗透率（Ali, Ekström 和 Lehtonen, 2017 年；Di Fresco, 2018 年）。研究指出，可以对这些系统进行协调以嵌入互联的 TES 网络。

潜热

与其他 PCM 相似，**低温 PCM** 的低热导率限制了传热速率，并因此阻碍了其更广泛的商业应用。按照前文所述的类似方法，我们可以通过用翅片和设计结构来增加传热面积，扩大嵌入 PCM 的导电基质，或者在基质中添加高导热性材料（例如碳纳米管）来提高传热速率（Karaipekli 等人，2017 年）。但是，大多数解决方案只是以实验室规模进行测试，并且没有一个通用的方法可用于所有共晶体。发展的重点将是在实际条件下测试这些策略。

目前，一些低温系统已经完全实现商业化并可投入使用，但投资成本却非常高。我们需要进行进一步的研究，以仔细观察其在系统层面的长期性能和可靠性。目前的当务之急是降低单个组件的成本，以及开发具有成本效益的新方法来设计整个 TES 系统。

如本报告前面各节所述，我们需要开发**高温 cPCM**，并开展进一步研究，以提高其在循环中储能性能和复合材料稳定性。此外，在整合高温 cPCM 时，还必须克服与无机 PCM 相关的过冷、泄漏、可循环性和腐蚀等方面的常见限制。

对于其他应用来说，在高温 cPCM 实现商业化之前，必须要克服各种障碍。这些障碍包括改善建筑材料和储能介质之间的兼容性，降低整合成本（尤其是短期应用），以及找到能与其他传统技术（显热）竞争的新整合系统。

热化学

在**水合盐**系统中，温度范围和用户条件类似于区域供热。有关开发中材料的技术详细信息，请参阅附录。

一些针对各种应用的经济研究表明，储能材料会极大地影响蓄热系统的性能和成本（通常约占总投资成本的 30%）（Lele, 2016 年）。

要优化所用材料的性能，还需要进一步的努力，特别是在导热性方面，而且还需要研究材料在长期循环中的耐久性。研究人员预测，尽管需要对系统整合进行研究，但这些系统将成为未来长期蓄热的现实可行的选择（Mette、Kerskes 和 Drück, 2012 年）。到目前为止，致力于对这些系统进行规模调整以确保实际适用性的研究工作还很有限，而这是实现商业化的首要任务。

吸收式系统的创新需求与区域供冷部分中提出的需求相同，因为该技术在这两种应用中使用的储能介质并没有区别。如前所述，出于系统复杂性和维护成本的原因，该技术的商业化仍然受到限制。因此，需要研究新的吸收循环并对系统设计进行改善。

**必须降低系统复杂性和维护成本，
才能为商业应用开辟道路。**

4. 加速部署的政策干预措施

本章总结

在整个能源系统使用 TES 的主要系统层面的障碍包括：

- 有些 TES 技术不够成熟，而且存在竞争性技术（例如化石燃料供热）。
- 缺乏对 TES 如何为社会、公共部门和工业带来好处的了解和认识。这表现在当储热可为供热或供冷负荷很高的能源系统带来明显好处时，我们的研发重点却过多地集中在电池储能上。
- 未来能源系统如何发展具有不确定性，这导致投资者不愿对长期或大型项目进行投资。
- 由于对不同能源载体（即热能和电力）和部门的固有思维，在某些情况下会导致政策冲突和规划效率低下。此外，与电力部门相比，供热部门缺乏脱碳的相关政策。

决策者可以实施各种技术推动、市场拉动和扶持措施，以鼓励人们使用 TES。这些技术的精确组合，事实上与相关 TES 技术的组合一样，都取决于能源系统的特性。

主要技术推动干预措施包括：

- 加大对 TES 技术研发的投资力度，充分发挥其独特潜力，以此促进供热、供电和供冷部门实现脱碳。
- 为示范项目提供资金以帮助建立市场意识，增强消费者信心并提高技术成熟度等级 (TRL)。有些技术的供应链已经成熟，但那些最具潜力的技术（整合较高比例可再生能源的技术）的技术成熟度通常较低。

主要的市场拉动干预措施包括：更为注重供热脱碳，鼓励灵活应用，开拓储热的辅助服务市场：

- 取消化石燃料补贴，引入碳定价，以大幅提高低碳供热系统的竞争力。
- 鼓励使用分时定价等机制，以调动需求方的灵活性，帮助减少消费者开支，并提高可再生能源的利用率。
- 确保对辅助服务的参与尽可能保持技术中立，以便克服电池储能的常见障碍，并为 TES 的所有者/运营商提供额外的收入来源。
- 用长远的眼光看待 TES 的开发和部署，并提供激励措施，为投资者降低此类项目的风险。

促进在能源系统中使用 TES 所需的主要推动因素包括：

- 采用全系统方法对能源系统进行脱碳，这对于实现具有成本效益的能源转型来说至关重要。为了给脱碳能源系统确定一条最具成本效益的途径，在研究中应将所有灵活性技术考虑在内。
- 作为整合型能源政策的一部分，积极实施各种策略，以减少能源政策出现冲突的情况，并帮助实现更高层次的系统效益。
- 提高整个行业、公共部门和消费者的认识，有效地宣传 TES 的优势。

从发展阶段和总体特征来看，各个国家的能源系统构成均有所不同。因此，储热技术的适用性取决于具体情况，加速其部署的干预措施也是如此。决策者所采取的方法必须是以全系统思维为指导的整合战略的一部分。

本节对以下内容进行了概述：

- 限制采用 TES 解决方案的主要障碍。
- 决策者为促进 TES 发展可使用的支持机制。
- 各部门对 TES 的支持需求，以及已尝试和测试的干预措施示例。

4.1 TES 应用的系统层面障碍

社会、公共部门和工业的相关认知

一般而言，减缓气候变化的工作重点是电力和运输，有时也会包括农业，但供冷和供热很少会作为优先领域，而其却占据了欧盟成员国年能源消耗的 50% 左右。之所以如此，部分可能是因为供热（和供冷）脱碳相对较难。由于缺乏对供热/供冷脱碳的重视，对相关开发活动和示范项目的投资也就相对较少。

示范项目通常会努力降低与特定技术相关的认知风险，从而鼓励未来的投资。示范活动还有助于提前发现潜在的技术和系统缺陷，并可促进利益相关者和公众群体之间达成共识。在没有通过示范活动建立证据基础的情况下，TES 等新技术的设备和运营成本可能会更高，因此对这些机遇进行投资的风险也会更高。TES 设备的示范结果报告似乎也不多。事实证明，为此类报告收集案例研究非常有难度。

TES 技术相对不成熟

有很多种 TES 技术（特别是潜热技术和热化学技术）尚未在商业化层面得到提升或验证，详见第 4 章。这些系统仍处于早期或中期技术成熟度阶段，要想得到广泛采用，需要先降低成本。在近期内，重点应放在提供示范支持、制定投资机制和建立供应链和战略上，以便顺利地将 TES 整合到能源系统中。

未来能源系统结构具有不确定性

如何解决脱碳的问题存在一定程度的不确定性。例如，可以通过大幅提高（波动性）可再生能源比例来解决这一问题。同样，也可以通过更多利用核电来解决这一问题，而核电没有波动性问题。目前尚不清楚哪种技术组合将构成未来的能源结构。考虑到不同能源技术相关的不同储热需求（时间范围、位置和温度范围等），未来能源系统的结构将决定所使用的 TES（或其他储能形式）的类型。

要找出一个单一的政策建议来解决这种不确定性并不可行，特别是还应该考虑到，未来能源系统的组成将因国家、政府的变化、成本的增加或减少以及其他各种因素而有所不同。然而，对能源系统进行进一步的分析 and 建模将很有益，能够从不同的角度识别可能或不可能发生的各种情景（例如最小成本和最低 CO₂ 排放量）。

对政策和法规的认知不足

如前几节所述，全球供热和供冷部门脱碳并没有跟上电力系统脱碳的步伐。部分原因是相对于电力脱碳而言，决策部门对供热和供冷脱碳的路线图和策略不够重视。用于冷热载体的 TES 技术和这些部门中的其他潜在脱碳解决方案一样，并没有得到像电力部门储能技术那样的政策支持。2016 年，只有 21 个国家制定了可再生能源监管激励措施和规定，强制要求实行太阳能供热或各种技术的供热要求。其中另外有 29 个国家采用了不同的供热或供冷政策。

显然，我们需要在解决供热和供冷问题上付出更多的努力，并应认识到要取得所需成果将面临的挑战，即供热和供冷政策将需要随部门、国家和基础设施类型而不同，这样才能克服具体障碍。

从积极的角度看，欧盟的修订版可再生能源指令中明确指出了与可再生能源供热和供冷有关的挑战。随后，该指令还制定了一个雄心勃勃的目标，即从 2021 年开始，确保可再生能源供热和供冷实现 1.3% 的年增长率。

很多国家已对其电力和天然气能源市场进行了监管。市场监管机构的设立通常是为了防止形成潜在的剥削性垄断，确保市场参与者之间的竞争给消费者带来价值。然而，对于热能（或冷能）的生产、分配或供应，却没有同等的市场监管。值得注意的是，英国有多个行业参与者支持未来在监管机构（目前或新成立）监督下对供热网络进行监管（The Association for Decentralised Energy, 2018 年）。

此外，展望未来，由于部门耦合，能源种类之间的跨部门相互影响预计会更大（英国能源技术研究所，2017 年）。如果决策者采取政策和管理的全系统办法，以对能源载体之间的相互影响和竞争作出反应，使 TES 有机会与其他技术在公平的环境中竞争。

有些 TES 技术也没有在环境或规划和建筑标准监管制度中得到广泛认可。TES 是一种相对较新的基础设施类型，在缺乏有力监管的情况下，可能会遭到公众的强烈反对。因此，应制定相关法规，确保以最佳方式设计这些系统，最大程度地减少 TES 设备和技术本身对环境的影响。

政策冲突

在某些情况下，化石燃料补贴会破坏低碳技术应用的努力和进展（Matsuo 和 Schmidt, 2017 年）。例如，柴油补贴可能会严重限制各国及其行业投资 TES 的积极性，进而缩小了促进高水平可再生能源渗透率的空间。

竞争技术

很多类型的储能设备（例如，电化学电池）可以在当前电力系统中提供与 TES 类似的服务。如果电池（尤其是锂离子电池）的进一步创新促使能源价格降低（部分是由于电动汽车的快速部署），那么这种情况可能会将 TES 技术置于一个很复杂的成本竞争环境中。

热泵可通过电力在家庭层面提供一定比例的热量，但这种技术是否能单独应对供热的挑战还有待观察。在家庭和工业层面，将需要不同规模的可再生能源供热和供冷，这意味着 TES 可能会更好地提供一些可行的方案。

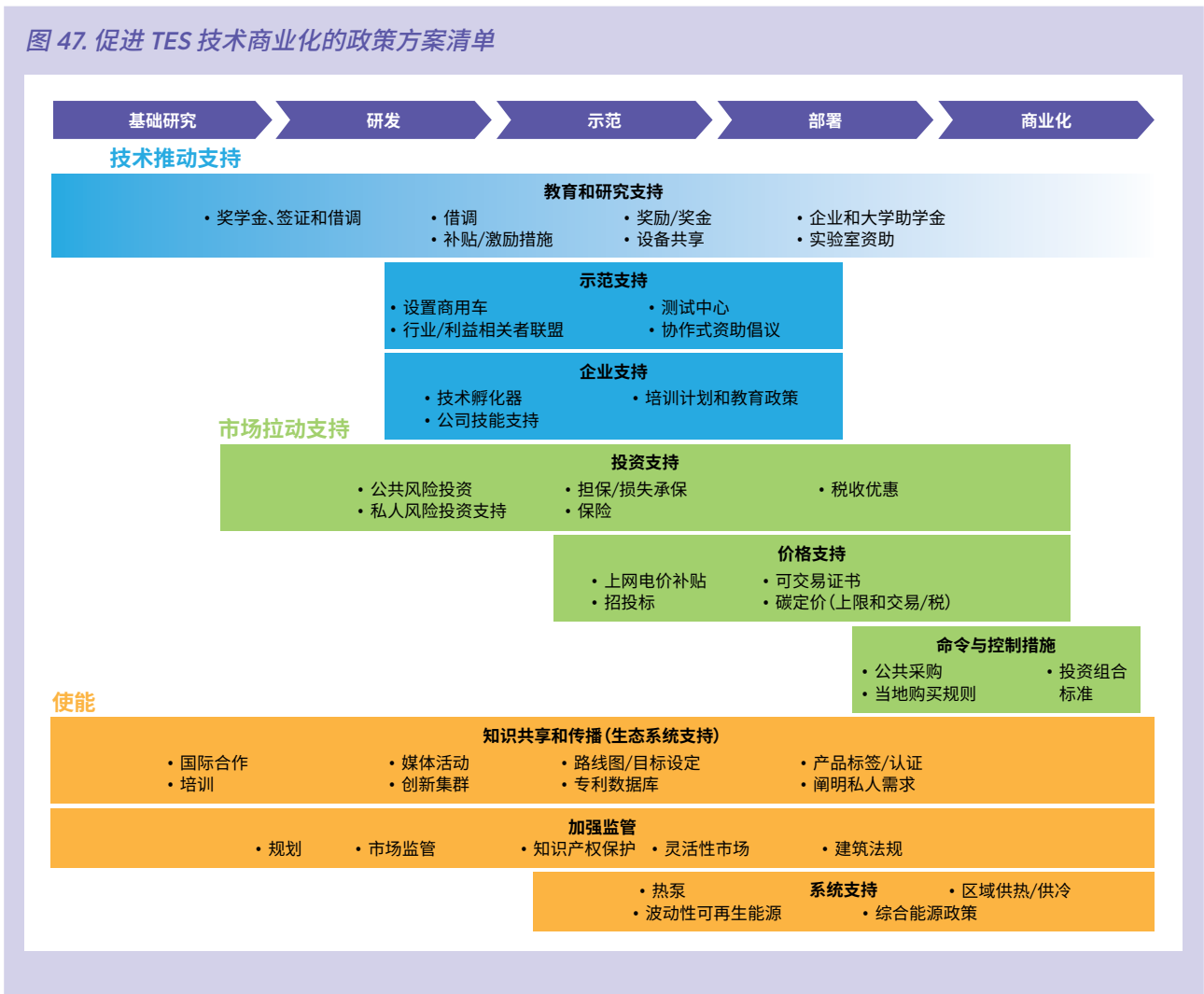
同样，来自替代性供热脱碳技术的竞争也可能会加剧。

例如，氢气在理论上可以利用某些国家已安装的现有地下天然气网络基础设施，并提供天然气的替代载体。这个例子表明，所采用的解决方案需要根据当地情况因地制宜。

4.2 可用的支持机制

决策者可以采取一系列干预措施，以帮助 TES 技术在目标部门加速部署。这些措施涵盖了从研发阶段、到示范和商业部署的所有发展阶段。图 47 中列出了各种已有的干预措施，并将其分类为技术推动支持、市场拉动型支持，以及整体扶持型监管和生态系统支持。

图 47. 促进 TES 技术商业化的政策方案清单



技术推动

随着技术本身的发展，技术推动支持通常在技术开发项目商业化进程的初期实施。它可分为教育和研究支持、示范支持和企业支持。

- **教育和研究支持**主要侧重于商业化进程的早期阶段，包括提供奖学金、签证和借调、实验室资助、企业和大学助学金、设立学术奖和奖项等干预措施。
- **示范支持**侧重于通过试验中心、联合工业项目、资助试验性示范、创新竞赛等机制，在实验室和运营环境中测试未经验证的技术。
- 技术开发人员通常从学术机构、大公司或技术专家中挑选出来，商业化经验非常有限。一旦证明该技术有效，就可以开启商业化进程。这就要求开发人员具备完全不同的技能，而他们在此之前可能只拥有技术专长。因此，技术孵化基地、培训计划和教育政策或公司技能支持等形式的**企业支持**，可以帮助技术初创企业开始建立或改进其商业产品。

市场拉动

市场拉动支持在技术得到验证后提供，旨在让技术具有商业竞争力并达到成功的部署水平。市场拉动支持可分为投资支持、价格支持和指挥控制支持。一旦技术在技术上和商业上得到验证，这些支持机制往往会变得更有意义。

- **投资支持**涉及通过公共或私人风险投资等机制为商业企业提供各种形式的资本，或通过税收优惠、损失承保和保险等方式降低成本。
- **价格支持**包括一系列机制，这些机制可帮助提高技术的竞争力，为技术实施者提供额外的收入来源，有助于降低技术对投资者的财务风险。相关机制包括上网电价、可交易证书，碳定价或限额和交易计划，以及投标和招标支持（例如差价合约）。
- **指挥控制**机制使用自上而下的方法，通过诸如公共采购、本地采购规则和投资组合标准等措施将技术推向市场。

案例研究 9. 英国的 LAES 技术推动干预措施

LAES 在英国的应用

英国的液态空气储能行业已开始受到上述三种示例技术推动支持方式的影响。2013 年，英国工业和工程与物理科学研究委员会拨款 1,360 万英镑，成立了伯明翰低温储能中心和伯明翰储热中心，打造出教育和研究支持的典范。一家寻求将这些技术推向市场的企业在一个由政府资助的清洁技术孵化基地的协助下，发展了商业技能和商业策略。示范支持的提供一直没有间断，最近一次是在 2018 年，曼彻斯特附近的 5 MW/15 MWh LAES 项目便得到了这种支持。该项目是在约 1,000 万英镑的政府拨款支持下建设而成的（Innovate UK，2020 年）。

案例研究 10. 加利福尼亚州为拉动储能市场实行强制干预措施

加州强制储能措施

通过市场拉动技术直接鼓励储能的政策实例之一是美国加州的强制储能措施。该提议于 2013 年由加州公共事业委员会发起，要求加州三大投资者拥有的公用事业公司在 2020 年之前在其能源机构中增加 1.3 GW 的储能。加州的远大目标是使其 50% 的电力来自可再生能源，这可能导致加州政府规划或宣布更多的储能项目。然而，这一可再生电力目标少不了州立法者的不懈努力，才能解决与储能相关的复杂问题，包括如何对储能进行分类和监管（Hill 和 Williams，2016）。

扶持措施

决策部门可以采取一系列扶持性干预措施，使技术直接或间接受益。这些措施在商业化进程的各个阶段都很重要。

- **知识共享和传播（生态系统支持）** 本质上是通过各种手段来提高认识。相关示例包括媒体宣传、培训讲习班、路线图、产品标签或认证、可公开访问的专利数据库以及此类的报告。诸如此类的干预措施有助于增加市场需求，提高利益相关者的认可度，并使投资者获得清晰的认识。
- 政策制定部门可以出台**扶持性法规**，以便向投资者提供清晰的说明并降低技术对投资者的财务风险。通过改善计划法规、引入建筑法规淘汰化石燃料锅炉、调节市场（例如消除法规冲突、建立规范的热电和弹性市场，或实行脱碳政策）或保护知识产权，决策者可以减少壁垒，甚至提供激励措施。

从 2021 年起实施的新欧盟法规要求各国制定能源和气候计划，欧盟成员国必须制定 2021 至 2030 年可再生能源在供热和供冷中的渗透规划。该法规还要求各国评估是否有必要为通过可再生资源生产的区域热能或冷能建设新的基础设施。

- **系统支持**涉及支持可再生能源和其他基础设施发展的干预措施，可视为是发展 TES 技术的间接干预措施，随着扶持性基础设施的普及，对蓄热的需求也很可能会增加。例如，热泵和热水罐的渗透都可视为是 TES 技术跨多部门（建筑、工业、区域供热和供冷）发展的关键推动力。

需要一个**长期规划周期**，以便制定长期电力购买协议或储能容量租赁协议。以约旦为例，该国于 2018 年提出了一项提案，提议建造一个输入输出功率为 30 MW 且可用能源容量为 60 MWh 的储能系统。如果由私人开发商提供资金和管理，并签订一份长期承购协议（15 年），金融家和投资者就会认为对储能系统的项目融资更加可行。这归因于储能系统市场成熟度、技术改进、成本下降以及工程、采购和施工承包商市场的稳定性。

4.3 各部门面临的主要障碍及建议

本节讨论第 3 章中概述的 TES 在各部门中遇到的障碍。此外，本节还提出了与每个部门相关的潜在政策干预措施。这些措施可视为是上一节提出的“政策选项菜单”的补充措施。

电力

在全球范围内，能源市场的法律法规中涉及储能或供热/供冷系统的内容不多。电力部门的规章制度通常基于为被动消费者集中生产基础负荷电力的设想模式来制定的。分布式波动性发电的增长和“产消者”的崛起已经改变了电力市场参与者互动的方式，但监管框架总体上没有跟上步伐。有几个具有挑战性的法规怪圈阻碍了储能技术的发展，其中包括缺乏分类，以及在储能和使用时可能出现的电力双倍收费。

政策部门应**解决这些有关储能的监管障碍**，向更大范围的市场清晰阐述储能应用于电力系统的大好前景。

在欧洲，决策者已经通过向更大范围的市场清晰阐述储能应用于电力系统的大好前景，解决了储能方面的监管障碍（表 13）。具体来看 TES，决策者必须从整个系统的角度评估和修改监管框架，才能确保电力和热力市场不会遭到孤立。

当前的市场结构也限制了 TES 的商业化。**需要释放价格信号来提供灵活性**，以此改善 TES 技术的价值定位。然而，政府应注意避免与 VRE 相关的电价大幅波动。以弃电为例，如果该问题不在更广大的市场上显现出来，就几乎不会有解决该问题或更好地整合 VRE 发电机的动机。如果在间歇性可再生能源渗透率较高的市场中价格波动明显，这就加强了部署储能的经济理由。

欧盟可再生能源指令

能源整合政策的一个跨国案例是欧盟的 2009 可再生能源指令。该指令要求所有欧盟成员国制定国家可再生能源行动计划 (NREAP)，并在其中概述各自的 2020 年可再生能源目标。根据相关政策要求，所有成员国随后都制定了运输、电力和供热的脱碳目标。表 12 展示了三个成员国的 NREAP 目标。自从制定 NREAP 以来，大多数成员国已经采取了相关的政策措施，以实现其宣布的可再生能源部署目标。

表 12. 欧盟三个成员国的 NREAP 介绍，揭示了 2020 年各部门的可再生能源渗透率目标

部门/国家	德国	瑞典	法国
电力	37%	63%	27%
供热和供冷	15%	62%	33%
运输	13%	14%	10.5%

来源：IEA 和 IRENA，2018。

表 13. 欧盟储能部署中遇到的障碍

障碍	解决方案
所有权不明确	明确所有权
价值流	对辅助服务和电网服务给予高额奖励
弃电	消除可再生能源的弃电，例如太阳能和风能
定价	确保热能的定价能反映需求和/或稀缺性

来源：Westgeest, 2017。

案例研究 11. 市场改革有助于减少中国的可再生能源弃电问题

在中国避免弃电问题

中国最近对市场环境进行了改革，以期更好地解决可再生能源弃电问题。中国政府于 2016 年出台了 625 号政策文件，旨在解决高比例的可再生能源弃电问题（Xuan 和 Dupuy, 2016）。该政策的主要特点是可保证电网公司将首先购买可再生能源生产的电力（优先于化石燃料电厂的电力），并保证购买的最低小时数。由国家能源局和国家发改委规划分配情况。前些年在中国，遭受弃电的可再生能源发电商并没有因此得到任何付款或收入损失补偿，可以说，这无疑影响了可再生能源部门对于投资者的吸引力。然而，在出台 625 号文件后，可再生能源发电商有望从不可再生能源发电商或电网公司那里获得弃电补偿，具体取决于弃电的原因。

由于示范项目相对较少，目前关于非 CSP 可再生能源发电热能解决方案的技术和财务业绩的信息也很有限。然而，目前有几个示范项目正在开发或建设中，这些项目将测试 TES 在这些应用中的技术和商业可行性。**我们需要为研究和示范项目提供更多资金**，以推动创新，并进一步降低本报告中分析的所有技术成本，而生态系统支持则有助于确保充分记录和分享通过这些示范项目学到的知识。

工业

工业部门的决策者通常把提高收入放在比降低成本更重要的位置，并且非常重视投资回收期。此外，因为缺乏对 CO₂ 排放等外部进行定价的政策，而且某些情况下还可以获得化石燃料补贴，所以会存在 **TES 部署资金不足** 的问题，导致可再生能源难以整合到工业环境中。

例如，在墨西哥，将太阳热能用于工业生产过程的市場具有很大潜力，但对前期投资的需要和贷款计划的缺乏一直是采用太阳热能的障碍。因此，其他更具有商业吸引力的投资项目可能会将使用或不使用 TES 的可再生能源的优先级降低。**市场拉动干预措施**（如上限和交易制度）可以激励工业部门在特定时间段内投资可再生能源/ TES，以此提高投资兴趣。

风险规避是工业部门脱碳工作中的另一个关键障碍，特别是新资本密集型技术的潜在部署方面。在没有充分保证成功的情况下，决策者通常不愿意冒着影响收入的风险采用新的技术和方法。即使从概念上理解了采用该技术的好处，但也没有任何一个组织愿意率先采取行动。

生态系统和技术推动支持有助于**围绕相关技术建立信任**，例如通过引入由受信第三方管理的认证计划，或通过政府资助的示范项目来建立信任。

最好将目标锁定那些对这种障碍可能不太重要的创新型公司。这些组织通常是面向客户大型公司，拥有专门的可持续发展部门（例如大型汽车制造商），并且对成功实施脱碳计划所带来的名誉很感兴趣。此类活动有助于提高人们对储热所提供机会的**认识**，特别是对尚未商业化的技术的了解。通过**明确 TES 在工业领域的潜在利益**，提供生态系统支持以与相关市场参与者分享学习成果，决策者可以帮助加快 TES 的应用。

冷链

预计冷链的能源需求将大幅增长。重要的是，应该采用系统思维方法，确保政策制定和监管能鼓励这一重要领域实现脱碳。

从历史的角度看，缺乏研发投入是包括储热在内的冷链技术发展的主要障碍之一。然而，自 2015 年以来，有很多政府机构（例如欧盟冷冻中心）、教育机构（例如英国热能研究促进机构）和慈善事业（例如基加利供冷效率计划）发起了一系列倡议。

后面的这个倡议是希望为冷链中应用储热技术这样的解决方案筹集资金。

要加快冷链 TES 技术的商业化进程，需要采取一些**技术推动干预措施**。在理想情况下，最好能对这些类型的倡议同时进行管理，以实现协同作用，例如在英国 LAES 开发项目中实现的协同作用。正如前文所强调的一样，英国**为研发活动和 LAES 示范项目**拨款证明了该技术的潜力，**也有助于发展工业供应链和技术**。

预计冷链领域的大部分增长将出现在发展中国家。目前，实现供冷脱碳所需的技术涉及大量的资本支出成本。冷链在农业中尤为重要，而**小型农户经济资源有限**将是部署 TES 和可再生供冷资产的一个关键障碍。另一个障碍是**利益相关者对冷链 TES 的认识和接受度不够**。

大中型农户拥有投资储热技术的资源，但却没有得到补贴，对相关技术也是一窍不通。事实上，如果技术创新存在影响收入的风险，他们可能会对此持怀疑或反对态度。同样的担忧在冷链的另一端（例如食品零售商）也很明显，他们对这些技术的潜力的认识也很有限。

案例研究 12. 印度实行技术推动和市场拉动干预措施以发展清洁冷链

印度的农业冷链

印度的干预措施成功支持了 TES 解决方案在农业中的早期采用。印度政府为农民投资采用储热技术的设备提供补贴。这是价格支持机制的一个示例。TES 制造商在该国也一直在试行以租代购的方案。这样的方案可以鼓励农民尝试这些新技术，而不必承担前期投资带来的风险和抵押。决策者还可以将技术推动和市场拉动干预措施相结合，通过媒体宣传、知识共享和国际共同运作等生态系统支持，扩大此类示范的影响。这可以将有关储热技术优势的信息广泛传达给利益相关者（伯明翰大学，2017 年）。

区域供热和供冷

尽管相关示范已经证明了设备和基础设施的技术可行性，但投资成本高和可能的风险大目前使开发商不愿意优先考虑这些解决方案。此外，参与区域供热/供冷项目的利益相关者（包括开发商、地方当局、公用事业公司、消费者和住房协会）的复杂性也进一步使这种情况恶化。开发商需要大量的人力和资源才能处理好与上述各种群体的关系。

可以通过**投资支持机制和指挥控制机制**（例如通过公共采购）来加速项目的发展。此外，有关**规划、建筑标准和环境保护的明确准则和法规**将有助于促进项目在开发区域供热/供冷系统的同时配套建设 TES。

欧盟目前关于区域供热和供冷的战略是确保其灵活性，允许更快速地整合和部署可再生能源（欧洲委员会，2016）。UTES 技术可以在有限的占地面积内提供强大的储能能力，并且与这些基础架构类型相关。然而，**地下设施建设必须获得专业的规划许可**，而决策者可以消除项目进展的障碍，并确保规划程序的稳健性，以协助开发商管理相关的利益相关者。

可再生能源区域供热（以及任何与其相关的 TES）的市场需求可能会收到使用方便且具有成本效益的化石燃料方案的影响。认识到继续使用化石燃料的外部成本将有助于创造公平的竞争环境。价格支持机制（例如碳税）构成了更广泛的监管框架的一部分，有助于提升可再生能源区域供热的竞争力。

建筑

电力公司将需要决策者的支持，以便提出解决方案，管理在建筑中使用量日益增多的可再生能源，提高电气化水平。

TES 设备可以帮助管理建筑规模的能源需求，但仍不具备成本竞争力。**消费者**对于建筑物新型储热技术（热能和冷能）**缺乏认识**，而且**市场需求量**也不大。**廉价的电力或天然气的供应和价格信号的缺乏**（例如分时定价）限制了消费者对传统非智能水罐以外的热储能需求。对于商业建筑而言，能源通常只占企业总成本的一小部分，与企业成本结构中更为核心的其他部分相比，很少会被作为战略问题看待。

政府部门可以协助为**研发和示范提供资金**，以证明系统优势，提供生态系统支持（例如**媒体宣传**）以鼓励消费者采用，并提供**价格支持机制**以增强可行性。决策者还可以提供系统支持，即**鼓励使用热泵**，或确保**适当激励电网运营商**有效地管理电网，而不是将投资电网固强作为默认选项。

在很多国家，对现有技术和基础设施的依赖限制了其在供热和供冷领域脱碳方面可发挥的空间。尽管如此，从燃气锅炉向可再生热能的转型将有助于推动储热需求，因此可帮助解决间歇性问题。在建筑物方面，专家们正在考虑通过直接可再生能源供热（例如屋顶太阳能集热板）、清洁的氢气或热能电气化来实现供热脱碳。

这些解决方案的广泛采用可以通过国家或地方主管机构所制定的**强制性建筑**法规来实现。例如，2017年6月，挪威气候与环境部宣布从2020年起禁止将石油和石蜡用于建筑物供热。该禁令将涉及新老建筑物、公共设施，以及私人住宅和企业。列出的一些替代方案包括热泵和木屑燃烧炉，这些设备的使用量将大幅增加。

4.4 广泛部署 TES 的主要障碍

表 14. 各终端用能部门应用 TES 所需支持的汇总表

应用	监管/政策环境	利益相关者接受度	技术表现	财务建议
电力	<ul style="list-style-type: none"> 零散孤立的能源法律法规。 没有对热能或冷能出台规章制度。 	<ul style="list-style-type: none"> 100 MW 规模的商业化 CSP 工厂提高了国际电力项目开发商和承包商的认知度和信心。应在贷款人和消费者的认知上多下功夫。 	<ul style="list-style-type: none"> 公用事业规模的热储能技术（非碳氢化合物用途）仍处于早期发展阶段 熔融盐 TES 的技术性能在多家公用事业规模的 GW 级 CSP 工厂的 10 多年的运行跟踪记录中得到了验证。 	<ul style="list-style-type: none"> 非 CSP 公用事业规模储能技术的商业可行性仍有待证明。
工业	<ul style="list-style-type: none"> 零散孤立的能源法律法规。 没有对热能或冷能的规章制度。 对非电力资产设备的补贴有限。 	<ul style="list-style-type: none"> 规避风险的决策者可能会优先考虑不会影响收入的解决方案，包括现有的化石燃料替代品。 	<ul style="list-style-type: none"> 很多前景光明的技术仍处于早期发展阶段，还没有做好广泛部署的准备。 	<ul style="list-style-type: none"> 商业测试尚未证明除 TTES 以外的其他任何财务主张。 高资本支出的项目令人望而却步。要考虑可再生能源项目的投资回报率必须很高。
冷链	<ul style="list-style-type: none"> 零散孤立的能源法律法规。 没有对热能或冷能的规章制度。 	<ul style="list-style-type: none"> 农业和食品零售业的利益相关者通常会规避风险。没有人愿意成为第一个吃螃蟹的人。失败会使易腐产品变质，进而影响创收。 	N/A	N/A
区域供热和供冷	<ul style="list-style-type: none"> 对于 UTES 技术来说，获取相关计划许可或许会很复杂。 零散孤立的能源监管。 没有对热能或冷能的监管。 	<ul style="list-style-type: none"> 区域供热潜热技术在技术/商业/环境上的表现最近才得到证实，因此利益相关者对这些技术的认识和接受程度还很有限。 	<ul style="list-style-type: none"> 基于新一代高温 cPCM 储能的示范项目很少。 	<ul style="list-style-type: none"> 可再生区域供热/供冷计划，无论是否储能，其前期成本都会很高，进而限制了吸引力。
建筑	<ul style="list-style-type: none"> 对于 UTES 技术来说，获取相关计划许可或许会很复杂。 缺乏鼓励/强制采用化石燃料供热系统替代品的建筑法规。 零散孤立的能源监管。 没有对热能或冷能的监管。 	<ul style="list-style-type: none"> 消费者对家用和非家用热储能（热能和冷能）的认知度都很低。 	<ul style="list-style-type: none"> 在供热/供冷应用中，低温 PCM 和储能解决方案的技术成熟度仍然相对较低。 	N/A

注：N/A 表示未发现主要需求。

应用	产业供应链和技能	市场机遇	公司成熟度	使能基础设施
电力	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏对灵活性规定的重视将减少应用储能（包括 TES）的机遇。 	<ul style="list-style-type: none"> 工程、采购和建筑（EPC）公司通过为 CSP 工厂实施 17 GW 熔融盐 TES 系统而在竞争中日趋成熟。 	<ul style="list-style-type: none"> CSP 采用率有限与熔融盐 TES 的低需求量有关。
工业	<ul style="list-style-type: none"> 目前技术商业化仍处于初期阶段，因此 TES 的供应链还相对欠发达。 	<ul style="list-style-type: none"> 工业通常以收入为导向，因此对降低成本措施的投资往往是次要的优先事项。 可再生能源在工业中的整合程度很低，部分原因是缺乏客户需求，导致客户对 TES 的兴趣受到影响。 	<ul style="list-style-type: none"> 为了规避技术风险，客户会优先选择成熟的设备供应商，这使早期企业很难闯入这一领域。 	<ul style="list-style-type: none"> 工业环境中采用的可再生能源技术非常有限。
冷链	<ul style="list-style-type: none"> 由于是新兴技术，供应链还相对不发达，尤其是对于 LAES。 	<ul style="list-style-type: none"> 发展中国家的小型农户面临经济障碍，阻碍了 TES 的采用。 	<ul style="list-style-type: none"> 与 TES 相关的制造商和其他企业都刚刚进入市场（尤其是对于 PCM，LAES）。 	<ul style="list-style-type: none"> 冷链需要得到完善 - 缺少功能性冷链化合物的问题。 发展中国家缺乏可靠电力基础设施是采用 TES 的驱动因素，因此改善电力基础设施会降低 TES 的价值定位。
区域供热和供冷	N/A	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 相关障碍包括高昂的前期费用、可知的财务风险、资源方面的限制、城市环境和现有网络。
建筑	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 在很多国家，廉价的天然气意味着对热储能和可再生热能的需求较低。 廉价的电力则意味着对用于冷却的热储能（而不是使用交流电）的需求很有限。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 燃气基础设施的沉没成本可能会减缓供热电气化的进程。 在热能需求量最高的欧洲和北美发达国家，热泵仍然相对稀缺。

注：N/A 表示未发现主要需求。

表 15. 终端用能部门中 TES 相关政策干预概述

应用	监管环境	利益相关者接受度	技术表现	财务主张
电力	<ul style="list-style-type: none"> • 脱碳政策。 • 对供热市场进行监管，将其作为整体多载体能源监管的一部分。 • 储能指令。 	<ul style="list-style-type: none"> • 为合理的储能和高温 cPCM 示范及试点提供资金，以便向投资者和其他利益相关者证明技术和商业利益。 	<ul style="list-style-type: none"> • 为合理的储能和高温 cPCM 研发、示范和试点提供资金，以加快技术成熟。 	<ul style="list-style-type: none"> • 为合理的储能和高温 cPCM 研发、示范和企业支持提供资金，以通过创新来降低成本。 • 市场拉动政策可推动同地储能对 TES 的采用。
工业	<ul style="list-style-type: none"> • 确保脱碳政策不会将工业排除在外。 • 开展国际合作，以消除与竞争力有关的担忧。 • 取消化石燃料补贴，有助于提高 TES 的价值定位。 	<ul style="list-style-type: none"> • 由政府主导各种倡议，以便向行业参与者展示技术。 • 使用示范和“冠军”组织提供知识共享和传播支持，以减少采用技术的可知风险。 	<ul style="list-style-type: none"> • 为研发、示范和试点提供资金（特别是对于化学和潜热储能），以加快开发速度。 	<ul style="list-style-type: none"> • 为研发、示范和试点提供资金（特别是对于化学和潜热储能），以通过创新来降低成本。 • 一旦技术得到证明，就应提供投资支持和价格支持，将此作为市场拉动选择，以便克服财政障碍。
冷链	<ul style="list-style-type: none"> • 取消化石燃料补贴，有助于使冷链技术比柴油替代品更具竞争力。 	<ul style="list-style-type: none"> • 提供有关潜热储能示范的知识共享支持。 • 企业支持可帮助企业向客户展示和宣传 TES 的优势，有助于企业闯入/创造冷链市场。 	N/A	N/A
区域供热和供冷	<ul style="list-style-type: none"> • 更全面地改善区域供热和供冷的监管环境。 • 取消化石燃料补贴，有助于提高 TES 的价值定位。 	<ul style="list-style-type: none"> • 提供有关潜热储能示范的知识共享支持。 	<ul style="list-style-type: none"> • 为化学和潜热储能解决方案提供一系列技术推动支持。 • 为化学储能解决方案提供市场拉动支持机制。 	<ul style="list-style-type: none"> • TES 有助于降低区域供热和供冷的能源平准化成本 (LCOE)。虽然区域供热和供冷的财务主张可以进一步得到改善并受益于市场拉动机制，但知识共享支持也可以提高人们对 TES 优势的认识度。
建筑	<ul style="list-style-type: none"> • 取消化石燃料补贴，有助于提高 TES 的价值定位。 • 整合的规范化热电市场。 • 储能指令，建筑法规等。 	<ul style="list-style-type: none"> • 提供生态系统支持，以增强公众对家用 TES 应用优势的了解。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> • 技术推动支持，促进对低温 PCM 和水合盐产品的开发。 • 市场拉动支持，激励家庭/非家庭消费者购买设备。

注：N/A 表示未发现主要需求。

应用	产业供应链和技能	市场机遇	公司成熟度	使能基础设施
电力	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 建立平衡市场、分时定价或其他激励措施，认清定期储存对电力部门的价值。 需要建立长期的储能收入机制（例如电力采购协议），以满足全天 24 小时的需求（例如 迪拜、南非、智利）。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 加速可再生能源的渗透将推动对灵活性解决方案（如 TES）的需求。
工业	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 建立平衡市场，使用分时定价或其他激励措施，认清需求灵活性所提供的价值，并帮助提高热储能（和现场可再生能源）的价值定位。 	<ul style="list-style-type: none"> 由可信赖的第三方进行技术认证/认可，可以降低预期的风险。 	<ul style="list-style-type: none"> 加快太阳能热发电和热泵在工业领域中的渗透。
冷链	<ul style="list-style-type: none"> 支持供应链发展（例如 LAES）。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 企业支持和生态系统支持可提高 LAES 等新技术的知名度。 	<ul style="list-style-type: none"> LAES 与 LNG 气化基础设施的协调。 基于 LAES 的冷链的开发。
区域供热和供冷	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 生态系统支持可突出 TES 在可再生区域能源项目中的优势。 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 作为整合系统方法的一部分，加快可再生能源区域供热和供冷计划的渗透。
建筑	N/A	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> 支持热泵的开发/渗透。 确保制定正确的激励措施，以实现有效的电网管理和调整。

注：N/A 表示未发现主要需求。

参考资料

- ABEDIN, A. H. AND M. A. ROSEN** (2012), "Closed and open thermochemical energy storage: Energy- and exergy-based comparisons (封闭式和开放式热化学能储存: 基于能量和有效能的比较)", *Energy*, Vol. 41, Issue 1, pp. 83–92, doi: 10.1016/j.energy.2011.06.034.
- AEE INTEC** (2019), *World Map of Solar Thermal Projects (世界太阳能热项目地图)*, <http://ship-plants.info/solar-thermal-plants-map> (accessed 17 July 2019).
- AL-HABAIBEH, A., B. SHAKMAK AND S. FANSHAWE** (2017), "The development of an experimental test rig to evaluate the performance of a new technology for stratified hot water storage – The Water Snake (开发实验测试设备, 评估分层热水储存新技术 – Water Snake)", *Energy Procedia*, Vol. 142, Elsevier, pp. 3644–3653, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.12.257.
- ALI, M., J. EKSTRÖM AND M. LEHTONEN** (2017), "Assessing the potential benefits and limits of electric storage heaters for wind curtailment mitigation: A Finnish case study (评估电蓄热装置在缓解风力缩减方面的潜在效益和局限性: 芬兰案例研究)", *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 9, Issue 5, doi: 10.3390/su9050836.
- ALONSO, M. C. 等人** (2016), "Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants (用于混凝土的铝酸钙基水泥作为太阳能热电厂的热储能材料)", *Cement and Concrete Research*, Vol. 82, Elsevier, pp. 74–86, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.12.013.
- ALOVISIO, A. ET AL.** (2017), "Optimizing the CSP-calcium looping integration for thermochemical energy storage (热化储能 CSP - 钙循环整合优化方案。)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 136, pp. 85–98, doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.093.
- ALVA, G. ET AL.** (2017), "Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications (太阳能应用的热储能材料和系统)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 693–706, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.021.
- ALVA, G., Y. LIN 和 G. FANG** (2018), "An overview of thermal energy storage systems (热储能系统概况)", *Energy*, Vol. 144, Pergamon, pp. 341–378.
- ARANER** (2017), *Thermal Energy Storage TES Tank Reference E-Book (热储能 TES 储罐参考电子书)*, ARANER, www.araner.com/ (accessed 26 February 2019).
- ARCHIMEDE SOLAR ENERGY** (2020), Molten salts vs Oil (熔融盐和石油), www.archimedesolarenergy.it/molten_salt_vs_oil.htm.
- ASIAN DEVELOPMENT BANK** (2017), *District Cooling in the People's Republic of China – Status and Development Potential (中华人民共和国的区域供冷 – 现状与发展潜力)*, Asian Development Bank, www.adb.org/publications/district-cooling-prc-status-development-potential.
- ATEE (ASSOCIATION TECHNIQUE ÉNERGIE ENVIRONNEMENT)** (2016), "Étude de valorisation du stockage thermique et du power-to-heat (蓄热和电热转换研究)", <https://atee.fr/system/files/2020-01/20161114-Stockage-Rapport%20complet%20de%20l%E2%80%99C3%89tude%20PEPS3.pdf>.
- AURORA ENERGY** (2018), *The E-Mobility Revolution: Impact of Electric Vehicles on the GB Power System and Emerging Utility Business Models (电动汽车革命: 电动汽车对英国电力系统的影响和新兴的公用事业商业模式)*.
- AXIOM CLOUD INC.** (未注明出版日期), *Virtual Battery Case Study – Multi-site Grid Services Event*, <https://axiomcloud.docsend.com/view/dw695qyn8atvt6wn>.
- AYDIN, D., S. P. CASEY 和 S. RIFFAT** (2015), "The latest advancements on thermochemical heat storage systems (热化学蓄热系统的最新进展)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 356–367, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.054.
- BALES, C. ET AL.** (2007), *Laboratory Prototypes of Thermo-Chemical and Sorption Storage Units (热化学和吸收式储能装置的实验室原型)*, IEA.
- BAŞER, T., N. LU AND J. S. MCCARTNEY** (2016), "Operational response of a soil-borehole thermal energy storage system (埋管蓄热系统的运行响应)", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 142, Issue 4, p. 4015097, doi: 10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0001432.
- BEIS** (2016), *Evidence Gathering: Thermal Energy Storage (TES) Technologies (证据收集: 热储能 (TES) 技术)*, UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy.
- BIRMINGHAM ENERGY INSTITUTE** (2015), *Doing Cold Smarter (智能冷能应用)*, Birmingham Energy Institute, www.birmingham.ac.uk/energy.

- BLOESS, A., W. P. SCHILL AND A. ZERRAHN** (2018), "Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials (可再生能源一体化的电热应用: 对技术、建模方法和灵活性潜力的审查)", *Applied Energy*, Elsevier, pp. 1611-1626, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073.
- BONTE, M.** (2015), *Impacts of Shallow Geothermal Energy on Groundwater Quality (浅层地热能对地下水质量的影响)*, IWA Publishing.
- BUNDESVERBAND ENERGIESPEICHER** (2017), *Fact Sheet, Hochtemperatur Flüssigspeicher (概况介绍, 高温液体储存)*, Bundesverband Energiespeicher.
- CALVET, N. ET AL.** (2013), "Compatibility of a post-industrial ceramic with nitrate molten salts for use as filler material in a thermocline storage system (后工业陶瓷与用作变温层储能系统填充材料的硝酸熔融盐的相容性)", *Applied Energy*, Vol. 109, Elsevier, pp. 387-393, doi: 10.1016/J.APENERGY.2012.12.078.
- CAO, Y. AND W.-P. PAN** (2006), "Investigation of chemical looping combustion by solid fuels. 1. Process analysis (固体燃料化学循环燃烧的调查. 1. 工艺分析)", *Energy & Fuels*, Vol. 20, Issue 5, pp. 1836-1844, doi: 10.1021/ef050228d.
- CECCA, A. DI, F. BENASSIS 和 P. POEUF** (2010), "Energy storage: The Parisian district cooling system (储能: 巴黎地区供冷系统)", *Energy Learning*, www.energy-learning.com/index.php/archive/94-energy-storage-the-parisian-district-cooling-system (accessed 14 February 2018).
- CHANG, M. H. ET AL.** (2013), "Design and experimental investigation of calcium looping process for 3-kWth and 1.9-MWth facilities (3-kWth 和 1.9-MWth 设施钙循环工艺设计与实验研究)", *Chemical Engineering and Technology*, Vol. 36, Issue 9, pp. 1525-1532, doi: 10.1002/ceat.201300081.
- CHEDIAK, M.** (2018), "World's deploying more batteries than ever - but slower (全球部署的电池数量在不断增加, 但速度放缓)", *Bloomberg*.
- COLLIER, U.** (2018), *Renewable Heat Policies Delivering Clean Heat Solutions for the Energy Transition (可再生供热政策为能源转型提供清洁供热解决方案)*, IEA.
- COLLINS, L.** (2018), "Wind and solar can become dispatchable within three years (风能和太阳能可在三年内实现可调度)", *RECHARGE*, www.rechargenews.com/transition/1450958/wind-and-solar-can-become-dispatchable-within-three-years (accessed 8 August 2018).
- CONNOLLY, D. ET AL.** (2012), "Heat roadmap Europe 2050 - Study for the EU27 (2050 年欧洲供热路线图——欧盟 27 国研究报告)", *Euroheat & Power*.
- Cox, S.** (2012), "Cooling a warming planet: A global air conditioning surge (为正在变暖的地球降温: 全球空调数量激增)", *Yale Environment 360*, https://e360.yale.edu/features/cooling_a_warming_planet_a_global_air_conditioning_surge (accessed 7 August 2018).
- CREATE** (2018), "About project (关于项目)", www.createproject.eu/about-project.
- DALLEMAND, J. ET AL.** (2015), *Energy Use in the EU Food Sector: State of Play and Opportunities for Improvement (欧盟食品部门的能源使用: 现状与改进机会)*, *JRC Science and Policy Report*, doi: 10.2790/158316.
- DAVIS, P. R.** (2014), "Monitoring and control of thermal energy storage systems (储热系统的监测和控制)", *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, Woodhead Publishing, pp. 419-440, doi: 10.1533/9781782420965.4.419.
- DEARMAN ENGINE** (n.d.), <https://dearman.co.uk> (accessed 8 August 2018).
- DEIGN, J.** (2017), "Siemens Gamesa starts building hot rock plant for long-duration grid storage (Siemens Gamesa 开始建设用于长周期电网储能的热岩厂)", *Greentech Media*, www.greentechmedia.com/articles/readsiemens-gamesa-starts-on-giant-thermal-storage-plant.
- DI FRESCO, I.** (2018), "12th International Renewable Energy Storage Conference (第 12 届国际可再生能源储能大会)", *Simulation Analysis of the Adoption of Thermal Storage Technology for the Dispatch of Wind Energy Curtailment*, Dusseldorf.
- DING, Y.** (2018), *The Renewables Conundrum (可再生能源难题)*, <https://epsrc.ukri.org/blog/the-renewables-conundrum/>.
- DING, Y. AND S. B. RIFFAT** (2012), "Thermochemical energy storage technologies for building applications: a state-of-the-art review (建筑应用中的热化学储能技术: 先进技术回顾)", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 8, Issue 2, pp. 106-116, doi: 10.1093/ijlct/cts004.
- DUPUY, M. AND W. XUAN** (2016), *China's String of New Policies Addressing Renewable Energy Curtailment: An Update (中国解决可再生能源弃电问题的一系列新政策: 最新进展)*, *Renewable Energy World*.
- EDWARDS, S. E. B. AND V. MATERIC** (2012), "Calcium looping in solar power generation plants (太阳能发电厂中的钙循环)", *Solar Energy*, Vol. 86, Issue 9, pp. 2494-2503, doi: 10.1016/j.solener.2012.05.019.
- ENERGY SYSTEMS CATAPULT** (2020), *Storage and Flexibility: Net Zero Series (储能和灵活性: 净零系列)*, <https://es.catapult.org.uk/reports/storage-and-flexibility-net-zero-series/>.

- ENERGY TECHNOLOGIES INSTITUTE** (2017), *UK Networks Transition Challenges – A Systems View* (英国网络转型的挑战 - 系统观点), Energy Technologies Institute (ETI), Loughborough.
- VAN ESSEN, M. ET AL.** (2010), "Development of a Compact heat storage system based on salt hydrates (基于水合盐的紧凑型蓄热系统的开发)", *Proceedings of the EuroSun 2010 Conference*, pp. 1-8, doi: 10.18086/eurosun.2010.16.37.
- VAN ESSEN, V. M., H. A. ZONDAGET AL.** (2009), "Characterization of MgSO₄ hydrate for thermochemical seasonal heat storage (MgSO₄ 水合物在热化学季节性蓄热中的特性分析)", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 131, Issue 4, p. 41014, doi: 10.1115/1.4000275.
- VAN ESSEN, V. M., J. COT GORESET AL.** (2009), "Characterization of salt hydrates for compact seasonal thermochemical storage (用于紧凑型季节性热化学储能的水合盐的特性分析)", ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability, Vol. 2, pp. 825-830, doi: 10.1115/ES2009-90289.
- EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY** (n.d.), *Energy storage technology descriptions – Liquid Air Energy Storage* (储能技术描述 - 液态空气储能), European Association for Storage of Energy (EASE). European Association for Storage of Energy, <http://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/> (accessed 26 February 2019).
- EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY** (2017), *Thermal Storage Position Paper* (热储能意见书), https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2017/07/2017.07.10_EASE-Thermal-Storage-Position-Paper_for-distribution.pdf.
- EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY AND EUROPEAN ENERGY RESEARCH ALLIANCE** (2017a), *Energy Storage Technology Development Roadmap 2017* (2017年欧洲储能技术发展路线图).
- EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY AND EUROPEAN ENERGY RESEARCH ALLIANCE** (2017b), *European Energy Storage Technology Development Roadmap 2017 Update* (2017年欧洲储能技术发展路线图更新).
- EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY AND EUROPEAN ENERGY RESEARCH ALLIANCE** (2013), *European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030 – Technical Annex* (欧洲2030年储能技术发展路线图 - 技术附件).
- EUROPEAN COMMISSION** (2018), *Solar Calcium-looping integration for Thermo-Chemical Energy Storage* (太阳能钙循环整合在热化学储能中的应用), https://cordis.europa.eu/project/rcn/212577_en.html.
- EUROPEAN COMMISSION** (2016), "Commission proposes new rules on gas and a heating and cooling strategy (欧盟提出天然气新规和供暖供冷策略建议)", <https://ec.europa.eu/energy/en/news/commission-proposes-new-rules-gas-and-heating-and-cooling-strategy> (accessed 17 July 2019).
- FARID, M. M. ET AL.** (2004), "A review on phase change energy storage: Materials and applications (相变储能的回顾: 材料和应用)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, Issue 9-10, pp. 1597-1615, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.015.
- FATIH DEMIRBAS, M.** (2006), "Thermal energy storage and phase change materials: An overview (热储能和相变材料: 概述)", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, pp. 85-95, doi: 10.1080/009083190881481.
- FERCHAUD, C.** (2016), "Experimental study of salt hydrates for thermochemical seasonal heat storage (水合盐用于热化学季节性蓄热的实验研究)", Eindhoven Technische Universiteit.
- FERCHAUD, C. J. ET AL.** (2014), "Thermochemical seasonal solar heat storage in salt hydrates for residential applications – Influence of the water vapor pressure on the desorption kinetics of MgSO₄·7H₂O (住宅用水合盐的热化学季节性蓄热 - 水蒸气压力对 MgSO₄·7H₂O 脱附动力学的影响)", *Energy Procedia, Elsevier*, Vol. 57, pp. 2436-2440, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.252.
- FERRER, G. ET AL.** (2015), "Corrosion of metal containers for use in PCM energy storage (用于 PCM 储能的金属容器的腐蚀问题)", *Renewable Energy*, Vol. 76, pp. 465-469, doi: 10.1016/j.renene.2014.11.036.
- FLEUCHAUS, P. ET AL.** (2018), "Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review (含水层热储能的全球应用评述)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 94, pp. 861-876, doi: doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS** (2015), *Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction* (全球减少粮食损失和废物倡议), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), <http://www.fao.org/>.
- FOPAH-LELE, A. ET AL.** (2016), "Lab-scale experiment of a closed thermochemical heat storage system including honeycomb heat exchanger (蜂窝式热交换器等封闭式热化学蓄热系统的实验室规模实验)", *Energy*, Vol. 114, pp. 225-238, doi: 10.1016/j.energy.2016.08.009.
- FREUND, S.** (2019), *Webinar on Carnot Batteries* (关于 Carnot 电池的网络研讨会), DLR, <https://atainsights.com/wp-content/uploads/2019/04/190404-Michael-Geyer-Sebastian-Freund-Webinar-Carnot-Batteries-distr.pdf> (accessed 17 July 2019).

- FVB ENERGY** (n.d.), *Chilled Water Storage/Ice Storage* (冷水/冰储能), www.fvbenergy.com/district-energy-expertise/thermal-energy-storage/chilled-water-ice-storage/(accessed 14 February 2019).
- GAO, L., J. ZHAO AND Z. TANG** (2015), "A review on borehole seasonal solar thermal energy storage (关于季节性地埋管太阳能蓄热的评述)", *Energy Procedia*, Vol. 70, Elsevier, pp. 209–218, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.02.117.
- GCCA** (2016), *2016 Global Cold Storage Capacity Report Shows Continued Growth* (全球冷储能装机容量持续增长), Global Cold Chain Alliance (GCCA).
- GELAŽANSKAS, L. 和 K. GAMAGE** (2016), "Distributed energy storage using residential hot water heaters (利用住宅热水器的分布式储能)", *Energies*, Vol. 9, Issue 3, p. 127, doi: 10.3390/en9030127.
- GIANNUZZI, G. M. ET AL.** (2017), "Experimental campaign and numerical analyses of thermal storage concrete modules (蓄热式混凝土模块的实验运动和数值分析)", *Solar Energy*, Vol. 157 (August), pp. 596–602, doi: 10.1016/j.solener.2017.08.041.
- GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION** (2016), *Towards Zero-Emission Efficient and Resilient Buildings* (向高效稳健的零排放建筑转型), Global Alliance for Buildings and Construction.
- GLOBAL BUILDINGS PERFORMANCE NETWORK** (2014), *Residential Buildings in India: Energy Use Projections and Savings Potentials* (印度的住宅建筑: 能源使用预测和节约潜力), Global Buildings Performance Network.
- HAN, Y. M., R. Z. WANG 和 Y. J. DAI** (2009), "Thermal stratification within the water tank (水罐内的热分层)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, Issue 5, Pergamon, pp. 1014–1026, doi: 10.1016/J.RSER.2008.03.001.
- HASNAIN, S. M.** (1998), "Review on sustainable thermal energy storage technologies, part II: Cool thermal storage (可持续热储能技术审查, 第二部分: 冷热储能)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, Issue 11, pp. 1139–1153, doi: 10.1016/S0196-8904(98)00024-7.
- HIRMIZ, R., M. F. LIGHTSTONE AND J. S. COTTON** (2018), "Performance enhancement of solar absorption cooling systems using thermal energy storage with phase change materials (利用相变材料储热提高太阳能吸收冷却系统的性能)", *Applied Energy*, Vol. 223, pp. 11–29, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.029.
- HOLDER, M.** (2017), "Highview wins £1.5m backing for liquid air energy storage (Highview 因液态空气储能获得 150 万英镑支持)", *BusinessGreen*, www.businessgreen.com/bg/news/3014913/highview-wins-gbp15m-funding-for-new-hybrid-liquid-air-energy-storage-system(accessed 6 August 2018).
- HUANG, L. AND U. PIONTEK** (2017), "Improving performance of cold-chain insulated container with phase change material: An experimental investigation (提高相变材料冷链保温容器的性能: 实验研究)", *Applied Sciences*, Vol. 7, Issue 12, p. 1288, doi: 10.3390/app7121288.
- HUI, L. ET AL.** (2011), "Evaluation of a seasonal storage system of solar energy for house heating using different absorption couples (对采用不同吸收组合方式的房屋供热季节性太阳能储能系统的评价)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, Issue 6, Elsevier, pp. 2427–2436, doi: 10.1016/j.enconman.2010.12.049.
- IBRAHIM, N. I., F. A. AL-SULAIMAN AND F. N. ANI** (2018), "Solar absorption systems with integrated absorption energy storage - A review (具有集成吸收式储能功能的太阳能吸收系统评述)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, Elsevier, pp. 1602–1610, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.005.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY)** (2019), *World Energy Outlook* (世界能源展望), IEA, Paris.
- IEA** (2018a), *The Future of cooling: Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning* (供冷的未来: 高效空调的机遇), IEA, www.iea.org/reports/the-future-of-cooling.
- IEA**, 2018b, *The Future of Cooling* (供冷的未来), International Energy Agency, Paris. www.iea.org/reports/the-future-of-cooling
- IEA** (2017), *Energy Technology Perspectives 2017 - Executive Summary* (2017 年能源技术展望——执行摘要), IEA, doi: 10.1787/energy_tech-2014-en.
- IEA** (2014), *Technology Roadmap - Energy Storage* (技术路线图——储能), IEA, www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmap_Energystorage.pdf.
- IEA AND IRENA** (2018), *IEA/IRENA Joint Policies and Measures Database* (IEA/IRENA 联合政策和措施数据库), IEA and International Renewable Energy Agency (IRENA), www.iea.org/policiesandmeasures/renewableenergy/(accessed 7 August 2018).
- IEA 和 IRENA** (2013), *Technology Brief: Thermal Energy Storage* (技术简介: 蓄热), IRENA and Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) of the IEA, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2017.02.007.
- INNOVATE UK** (2020), *Case Study: Highview Power* (案例研究: Highview Power), www.gov.uk/government/case-studies/highview-power.
- IRENA** (2020a), *Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050* (全球可再生能源展望), Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2020b), *Renewable Power Generation Costs in 2019* (2019 年可再生能源发电成本), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

- IRENA** (2019a), Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future: Solutions to Integrate Variable Renewables (可再生能源未来创新展望: 整合波动性可再生能源的解决方案), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2019b), Global Energy Transformation 2019: A Roadmap to 2050 (2019 edition) (全球能源转型 2019: 2050 年路线图 (2019 年版)), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2018), Global Energy Transformation 2018: A Roadmap to 2050 (全球能源转型 2018: 2050 年路线图), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf.
- IRENA** (2017a), *Power Sector Crucial for Global Decarbonisation* (电力部门对全球脱碳进程至关重要), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2017b), Rethinking Energy 2017: Accelerating the Global Energy Transformation (能源反思报告 2017: 加快全球能源转型), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2017c), Renewable Energy in District Heating and Cooling: A Sector Roadmap for REmap (区域供热和供冷中的可再生能源: REmap 的部门路线图), Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/remap.
- IRENA** (2014), *A Renewable Energy Roadmap Report* (可再生能源路线图报告), Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/remap.
- ISAAC, M. AND VAN VUUREN, D. P.** (2009), "Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change (建立气候变化背景下全球住宅领域供热和空调能源需求模型)", *Energy Policy*, 37(2), pp. 507-521, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.051.
- ITRI** (2014), *Calcium-Looping CO₂ Capture Technology* (钙循环 CO₂ 捕集技术), Industrial Technology Research Institute (ITRI), Taiwan.
- HILL, R. J. AND E. J. WILLIAMS** (2016), At the Halfway Point: The Effect of California's Energy Storage Mandate (进程过半: 加州储能指令的影响).
- JCU** (2014), Case Study: Campus District Cooling System with Large Scale Thermal Energy Water Storage (案例研究: 使用大规模水热储能的校园区域供冷系统), James Cook University, Australia.
- JEGADHEESWARAN, S. AND S. D. POHEKAR** (2009), "Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review (潜热蓄能系统的性能提升评述)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, Issue 9, pp. 2225-2244, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.024.
- JINHE ENERGY** (2020), *Engineering Applications*, www.jinhe-energy.com/list/?107_1.html.
- KALLENBERGER, P. A. ET AL.** (2016), "Magnesium sulfate/polymer composites for seasonal, thermochemical energy storage (用于季节性热化学储能的硫酸镁/聚合物复合材料)", *Chemie-Ingenieur-Technik*, Vol. 88, Issue 3, pp. 379-384, doi: 10.1002/cite.201500095.
- KARAIPEKLI, A. ET AL.** (2017), "Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes (利用碳纳米管增强导热性的膨胀珍珠岩/石蜡复合相变材料的热学特性)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 134, Elsevier, pp. 373-381, doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.053.
- KIVILUOMA, J. AND P. MEIBOM** (2010), "Influence of wind power, plug-in electric vehicles, and heat storages on power system investments (风力发电、插电式电动汽车和蓄热对电力系统投资的影响)", *Energy*, Vol. 35, Issue 3, pp. 1244-1255.
- KOST, C.** (2017), *CSP Technology in the Market* (市场上的 CSP 技术), Fraunhofer ISE.
- KU LEUVEN** (2018), *H-DisNET Project Overview* (H-DisNET 项目概况), www.h-disnet.eu/ (Accessed: 26 February 2019).
- LANAHAN, M. AND P. C. TABARES-VELASCO** (2017), "Seasonal thermal-energy storage: A critical review on BTES systems, modeling, and system design for higher system efficiency (季节性蓄热: 对旨在提高系统效率的 BTES 系统、建模和系统设计的批判性评述)", *Energies*, Vol. 10, Issue 6, doi: 10.3390/en10060743.
- LELE, A. F.** (2016), *State-of-Art of Thermochemical Heat Storage Systems* (热化学储能系统的先进技术), *A Thermochemical Heat Storage System for Households Combined Investigations of Thermal Transfers Coupled to Chemical Reactions*, doi: 10.1007/978-3-319-41228-3.
- LI, G. ET AL.** (2013), "Review of cold storage materials for subzero applications (零度以下应用冷储能材料评述)", *Energy*, Vol. 51, pp. 1-17, doi: 10.1016/j.energy.2012.12.002.
- LI, G. AND ZHENG, X.** (2016), "Thermal energy storage system integration forms for a sustainable future (可持续发展的未来所用的热储能系统整合形式)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, Pergamon, pp. 736-757, doi: 10.1016/J.RSER.2016.04.076.
- LI, Y.** (2011), *Cryogen Based Energy Storage: Process Modelling and Optimisation* (基于低温的储能: 过程建模与优化), PhD thesis, University of Leeds.

- LIU, C. ET AL.** (2017), "A wind power plant with thermal energy storage for improving the utilization of wind energy (利用储热提高风能利用率的风力发电站)", *Energies*, Vol. 10, Issue 12, pp. 2126, doi: 10.3390/en10122126.
- LUND, H. ET AL.** (2016), "Energy storage and smart energy systems (储能和智慧能源系统)", *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, Vol. 11, pp. 3-14, doi: 10.5278/ijsepm.2016.11.2.
- MATSUO, T. AND T. S. SCHMIDT** (2017), "Hybridizing low-carbon technology deployment policy and fossil fuel subsidy reform: a climate finance perspective (混合低碳技术部署政策与化石燃料补贴改革: 气候资金视角。)", *Environmental Research Letters*, Vol. 12, Issue 1, p. 14002, doi: 10.1088/1748-9326/aa5384.
- MEHLING, H. AND L. F. CABEZA** (2008), *Heat and cold storage with PCM (通过PCM进行冷热储能)*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-540-68557-9.
- MEIER, A., C. WINKLER AND D. WUILLEMIN** (1991), "Experiment for modelling high temperature rock bed storage (高温岩层储能模型实验)", *Solar Energy Materials*, Vol. 4, Issue 1-4, pp. 255-264, doi: 10.1016/0165-1633(91)90066-T.
- METTE, B., H. KERSKES AND H. DRÜCK** (2012), "Concepts of long-term thermochemical energy storage for solar thermal applications - Selected examples (太阳能热应用中长期热化学储能的概念——部分实例)", *Energy Procedia*, pp. 321-330, doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.038.
- MIRÓ, L., J. GASIA AND L. F. ISA CABEZA** (2016), "Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review (用于工业废热 (IWH) 回收的热储能 (TES): 回顾)", *Applied Energy*, Vol. 179, Issue 1, pp. 284-301, doi: 10.1016/j.apen.
- MOTT MACDONALD** (n.d.), *Underground thermal energy storage (地下热储能)*, Mott MacDonald, www.mottmac.com/article/889/underground-thermal-energy-storage (accessed 14 February 2019).
- MUÑOZ-ANTÓN, J. ET AL.** (2015), "Performance study of solar power plants with CO₂ as working fluid. A promising design window (以CO₂为工作流体的太阳能发电厂的性能研究。一个有前景的设计窗口)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, pp. 36-46, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.030.
- MUSTER-SLAWITSCH, B. ET AL.** (2016), *Potential Enhancement of Solar Process Heat by Emerging Technologies (新兴技术对太阳能过程热的潜在增强作用)*, IEA.
- N'TSOUKPOE, K. E., N. LE PIERRÈS AND L. LUO** (2013), "Experimentation of a LiBr-H₂O absorption process for long-term solar thermal storage: Prototype design and first results (长期太阳能蓄热的LiBr-H₂O吸收工艺实验: 原型设计和初步成果)", *Energy*, Vol. 53, pp. 179-198, doi: 10.1016/j.energy.2013.02.023.
- NIELSEN, K.** (2003), *Thermal Energy Storage: A State-of-the-Art (热储能: 先进技术)*, Norwegian University of Science and Technology.
- NORDELL, B.** (2000), "Large-scale thermal energy storage (大规模蓄热)", *Winter Cities 2000, Energy and Environment*, Luleå, Sweden.
- O'DWYER, C. ET AL.** (2018), *D3.6 Cost Benefit Analysis of SETS and Alternative Local Small-Scale Storage Options (D3.6 SETS和当地小规模储能备选方案的成本效益分析)*.
- ORÓ, E. ET AL.** (2012), "Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications (冷热储能相变材料评述)", *Applied Energy*, Vol. 99, pp. 513-533, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.03.058.
- PAKSOY, H.** (2013), *Thermal Energy Storage Today (蓄热的现状)*, February.
- PARDO, P. ET AL.** (2014), "A review on high temperature thermochemical heat energy storage (高温热化学储能回顾)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, Elsevier, pp. 591-610.
- PAULIK, J., F. PAULIK AND M. ARNOLD** (1981), "Dehydration of magnesium sulphate heptahydrate investigated by quasi isothermal-quasi isobaric TG (用准等温-准等压TG法研究七水硫酸镁的脱水问题)", *Thermochimica Acta*, Vol. 50, Issue 1-3, pp. 105-110, doi: 10.1016/0040-6031(81)85048-4.
- PCM PRODUCTS** (n.d.), *PCM Products Ltd*, www.pcmproducts.net/ (accessed 7 August 2018).
- PELAY, U. ET AL.** (2017), "Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants (集中式太阳能发电厂的蓄热系统)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, pp. 82-100, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.139.
- PENSINI, A., C. N. RASMUSSEN AND W. KEMPTON** (2014), "Economic analysis of using excess renewable electricity to displace heating fuels (利用多余的可再生能源替代供热燃料的经济分析)", *Applied Energy*, Vol. 131, pp. 530-543, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.111.
- PEREIRA DA CUNHA, J. AND P. EAMES** (2016), "Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials - A review (利用相变材料进行低温和中温应用的储热回顾)", *Applied Energy*, Vol. 177, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.097.

- PHILIBERT, C.** (2017), *Renewable Energy for Industry: From green energy to green materials and fuels* (工业用可再生能源。从绿色能源到绿色材料和燃料), IEA.
- POSERN, K. ET AL.** (2015), "Thermochemical investigation of the water uptake behavior of MgSO₄ hydrates in host materials with different pore size (MgSO₄ 水合物在不同孔径母体材料中吸水行为的热化学研究)", *Thermochimica Acta*, Vol. 611, pp. 1-9, doi: 10.1016/j.tca.2015.04.031.
- PRIETO, C. ET AL.** (2016), "Review of technology: Thermochemical energy storage for concentrated solar power plants (技术回顾: 热化学储能在聚光太阳能电站中的应用)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 909-929, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.364.
- REDA, A. M. ET AL.** (2017), "Performance of a small-scale solar-powered adsorption cooling system (小规模太阳能吸收式供冷系统的性能)", *International Journal of Green Energy*, Vol. 14, Issue 1, Taylor & Francis, pp. 75-85, doi: 10.1080/15435075.2016.1234380.
- REN21** (2020), *Renewables 2020 - Global status report (2020 年可再生能源 - 全球状况报告)*, www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf.
- RHC-PLATFORM** (2012), *Strategic Research Priorities for Renewable Heating & Cooling (可再生能源供热与供冷战略研究重点)*, *Renewable Heating & Cooling (RHC)*, European Technology Platform.
- RICHTER, M. ET AL.** (2018), "A systematic screening of salt hydrates as materials for a thermochemical heat transformer (水合盐作为热化学热变换器材料的系统筛选)", *Thermochimica Acta*, Vol. 659, Elsevier, pp. 136-150, doi: 10.1016/j.tca.2017.06.011.
- RWE POWER AG** (2010), "ADELE - adiabatic compressed-air energy storage for electricity supply (ADELE - 用于电力供应的绝热压缩空气储能)", RWE Power, Cologne, Germany.
- SAMPSON, J.** (2018), "Highview Power and SNC-Lavalin announce collaboration to deploy liquid air energy storage (Highview Power 和 SNC-Lavalin 宣布合作部署液态空气储能系统)", *gasworld*, www.gasworld.com/highview-power-and-snc-lavalin-collaborate-to-deploy-laes/2014291.article (accessed 8 August 2018).
- SARBU, I. AND C. SEBARCHIEVICI** (2018), "A comprehensive review of thermal energy storage (综合性储热回顾)", *Sustainability*, Vol. 10, Issue 1, p. 191, doi: 10.3390/su10010191.
- SARBU, I. AND C. SEBARCHIEVICI** (2013), "Review of solar refrigeration and cooling systems (太阳能制冷和供冷系统回顾)", *Energy and Buildings*, Vol. 67, Elsevier, pp. 286-297, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.022.
- SCAPINO, L. ET AL.** (2017), "Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale (长期低温应用的吸收式储热: 材料和原型规模的进展回顾)", *Applied Energy*, Vol. 190, pp. 920-948.
- SHARMA, S. ET AL.** (2016), "Performance enhancement of a Building-Integrated Concentrating Photovoltaic system using phase change material (利用相变材料提高建筑一体化聚光光伏系统的性能)", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 149, pp. 29-39, doi: 10.1016/j.solmat.2015.12.035.
- SIBBITT, B. ET AL.** (2015), *Drake Landing Solar Community (Drake Landing 太阳能社区)*, ASHRAE, www.dlsc.ca/reports/JUL2015/Goundbreaking_Solar_Case_Study.pdf.
- SIEMENS GAMESA** (2017), *Electric Thermal Energy Storage (ETES) (电热储能 (ETES))*, Siemens Wind Power, https://windenergietaage.de/wp-content/uploads/sites/2/2017/11/26WT0811_F11_1120_Dr_Barmeier.pdf (accessed 26 February 2019).
- SOLAR DISTRICT HEATING** (2018), *Plant Database (工厂数据库)*, Solar District Heating, www.solar-district-heating.eu/en/plant-database/ (accessed 8 August 2018).
- SOLAR PAYBACK** (2017), *Solar Heat For Industry (工业太阳能热)*, Solar Payback.
- SOLARPACES** (2019), *VC-Funded Thermal "Battery" is Based on CSP Molten Salt Energy Storage (风险投资热力"电池"基于 CSP 熔融盐储能)*, www.solarpaces.org/vc-funded-thermal-battery-based-molten-salt-energy-storage-csp/ (accessed 17 July 2019).
- SOMARRIBA, M. J.** (n.d.), *Chilled Water Thermal Energy Storage Tank Overview (冷水热储能罐概述)*, DNTanks.
- STINE, W. B. AND M. GEYER** (2001), *Power from the Sun (太阳能)*, www.powerfromthesun.net/ (accessed 14 February 2019).
- SUNAMP LTD** (2019), *An Introduction to Thermal Energy Storage (储热简介)*, www.oref.co.uk/wp-content/uploads/2019/02/20190130-Sunamp.pdf.
- SWEDAVIA AIRPORTS** (n.d.), "The world's largest aquifer storage unit supplies energy to the airport (世界上最大的含水层储能装置为机场提供能源)", www.swedavia.com/about-swedavia/the-aquifer/#gref.
- THE ASSOCIATION FOR DECENTRALISED ENERGY** (2018), *Shared Warmth: A Heat Network Market That Benefits Customers, Investors and the Environment (共享温暖: 有利于客户、投资者和环境的热网市场)*, The Association for Decentralised Energy (ADE).

- TRAUSEL, F., A. J. DE JONG AND R. CUYPERS** (2014), "A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage (水合盐在热化学储能方面的特性评述)", *Energy Procedia*, Vol. 48, Elsevier, pp. 447-452, doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.053.
- TREGAMBI, C. ET AL.** (2015), "A model of integrated calcium looping for CO₂ capture and concentrated solar power (二氧化碳捕集和聚光太阳能发电的综合钙循环模型)", *Solar Energy*, Vol. 120, pp. 208-220, doi: 10.1016/j.solener.2015.07.017.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME** (2015), *District Energy In Cities - Unlocking the Potential of Energy Efficiency and Renewable Energy (城市中的区域能源 - 释放能源效率和可再生能源的潜力)*, United Nations Environment Programme (UNEP).
- UNIVERSITY OF BIRMINGHAM** (2018), "UK and China scientists develop world-first cold storage road/rail container (英国和中国科学家开发出世界上第一个公路/铁路冷储能集装箱)", www.birmingham.ac.uk/news/latest/2018/12/scientists-develop-world-first-cold-storage-roadrail-container.aspx(accessed 26 February 2019).
- UNIVERSITY OF BIRMINGHAM** (2017), *India's Third Agricultural Revolution (印度的第三次农业革命)*, www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/energy/Publications/india-third-agricultural-revolution-birmingham-energy-institute.pdf.
- US DEPARTMENT OF ENERGY** (n.d.), *DOE Global Energy Storage Database (DOE 全球储能数据库)*, www.energystorageexchange.org/ (accessed 26 February 2019).
- VATTENFALL AND SALT X TECHNOLOGY** (2019), Salt as Energy Storage: A partnership between SaltX Technology and Vattenfall launch pilot project in Berlin (利用盐储能: SaltX Technology 和 Vattenfall 合作在柏林启动试点项目), <https://saltxtechnology.com/references/>
- WEISS, W. AND M. SPORK-DUR** (2019), Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2018 (世界范围内的太阳能热: 2018 年全球市场发展和趋势), Solar Heat Worldwide Report, www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide.
- WERNER, S.** (2017), "International review of district heating and cooling (区域供热和供冷的国际性回顾)", *Energy*, Vol. 137, Pergamon, pp. 617-631, doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.04.045.
- WESTGEEST, A.** (2017), *EU Regulatory Barriers to Energy Storage - How to Unlock the Grid Code? (欧盟对储能的监管障碍 - 如何解开电网密码?)*, euroBAT.org, https://eera-es.eu/wp-content/uploads/2016/03/7_EUROBAT-EERA-workshop-22-March-2017_AW.pdf.
- WONG, S., G. GAUDET AND L.-P. PROULX** (2017), "Capturing wind with thermal energy storage - Summerside's smart grid approach (利用储热来捕捉风能 - 萨默赛德的智能电网方法)", *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 4, Issue 4, pp. 115-124.
- WONGSUWAN, W. ET AL.** (2001), "A review of chemical heat pump technology and applications (化学热泵技术及应用回顾)", *Applied Thermal Engineering*, pp. 1489-1519, doi: 10.1016/S1359-4311(01)00022-9.
- XUAN, W. AND M. DUPUY** (2016), *China's String of New Policies Addressing Renewable Energy Curtailment: An Update (中国解决可再生能源弃电问题的一系列新政策: 最新进展)*, retrieved from Regulatory Assistance Project, www.raponline.org/blog/chinas-string-of-new-policies-addressing-renewable-energy-curtailment-an-update/.
- XIONG, W.** (2016), "Case study of the constraints and potential contributions regarding wind curtailment in Northeast China (中国东北地区弃风的限制和潜在因素的案例研究)", *Energy (Special issue on Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating)*, Vol. 110, pp. 55-64, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.093.
- XU, Y. AND D. D. L. CHUNG** (2000), "Cement of high specific heat and high thermal conductivity, obtained by using silane and silica fume as admixtures (以硅烷和硅灰为外加剂制备的高比热和高导热率水泥)", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Issue 7, Pergamon, pp. 1175-1178, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00296-9.
- YAU, Y. H. AND B. RISMANCHI** (2012), "A review on cool thermal storage technologies and operating strategies (储冷技术及运行策略回顾)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, Issue 1, Elsevier, pp. 787-797, doi: 10.1016/j.rser.2011.09.004.
- YU, N., R. Z. WANG AND L. W. WANG** (2013), "Sorption thermal storage for solar energy (太阳能吸收式蓄热)", *Progress in Energy and Combustion Science*, pp. 489-514, doi: 10.1016/j.pecs.2013.05.004.
- ZHAI, R. ET AL.** (2016), "Thermodynamic analysis of CO₂ capture by calcium looping process driven by coal and concentrated solar power (煤和聚光太阳能驱动的钙循环过程 CO₂ 捕集的热力学分析)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 117, pp. 251-263, doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.022.

6. 技术附录

6.1 本创新前景技术选择背后的方法论

储热技术涉及很多不同的技术种类，因此我们开发了一种方法，以帮助将报告重点放在与全球可再生能源比例较高的能源系统最相关的技术上。

第一步，我们从文献中收集了一份含有 29 种技术的长名单，其中涉及不同类型、成熟度水平和应用。为了帮助确定这些技术的优先级，我们制定了一个优先级框架，以草拟一份简短的名单。该框架用于映射各种技术的以下属性，以帮助确定最具影响力的热能储存 (TES) 技术：

- **TES 类型** - 将技术大致分为四类：潜热、显热、热化学或耦合
- **子类** - 确定一个特定的子组，如氧化还原或水合/脱水，以帮助进一步对技术进行区分。
- **技术成熟度等级 (TRL)** - 一种标准的 TRL 指标，用来确定每种 TES 技术的技术成熟度（在研究的后期还额外使用了商业就绪水平指标来确定开发需求）。

除了上述基本属性外，我们还制定了四个具体指标，以帮助了解这些 TES 技术在全球可再生能源整合中的适用性，以确保短名单中的技术能广泛地应用于 IRENA 的成员国。这些指标包括：

- **通用性** - 指 TES 能够在—个能源系统中实现多种用例的能力。
- **可复制性** - 指 TES 在多种能源系统中使用的能力。能源系统在集中/分布的程度、市场结构、气候区/地理环境等方面各不相同。因此，有些 TES 技术可能只适用于特定的系统，不能广泛适用。
- **附加性** - 该指标旨在体现 TES 技术在提供特定服务中的独特性。其用来体现 TES 能在多大程度上提供独特的解决方案，以解决另一种形式的储能不能以同样的成本效益解决或根本不能解决的问题。
- **产业聚焦** - 该指标是指技术目前通过私人或公共研究或项目资金受到关注的状况。
- **可再生能源整合** - 我们在较高级别上描述了 TES 可以支持哪些可再生能源整合的用例。为了验证这一要素，我们采用了 IEA 的可再生能源整合挑战，例如输出的波动性、输出的不确定性和地理依赖性。我们随后针对这 29 种技术分别进行了高水平的分析，确定其是否能提供应对其中—项或多项挑战的解决方案，以防止这些挑战构成阻碍可再生能源在全球能源系统中达到高渗透率的障碍。

除上述努力外，我们还根据伯明翰大学的专家意见，在高层次上摸清了哪些地方有进一步创新的巨大潜力，以降低成本并提高绩效。

对于长名单中的 29 项技术，上述这些要素通过定量输入（如 TRL）或红/黄/绿（用于通用性和可复制性等）与其中每项技术进行了匹配。然后根据以下内容进行优先排序，列出技术短名单：

- 中等 TRL 及以上
- 中高工业兴趣水平
- 一个或多个支持可再生能源整合的用例
- 全球能源系统适用性属性平均为黄色或以上
- 中高水平的进一步创新潜力。

我们随后利用这些筛选条件制定了最终的短名单，从长名单中的 29 种技术中选出了 13 种不同的技术。可能还有其他技术符合这些标准，本报告并没有详细介绍，但如上所述，我们对各种备选方案进行了详细分析以得出重点技术清单。

本节进一步提供了报告中所述技术的技术细节。其中包括有关系统组件、材料和配置的进一步细节。这些技术根据支撑其功能的工作原理进行划分：

1. 显热储热。
2. 潜热储热。
3. 热化学储热。
4. 机械热耦合系统。

6.2 显热蓄热

显热储热系统由用于储能介质的容器和用于充放能过程的设备组成。容器的类型取决于工作温度范围、与储能材料的化学相容性以及所需的有效绝热，也构成了 TES 系统总成本的重要组成部分。

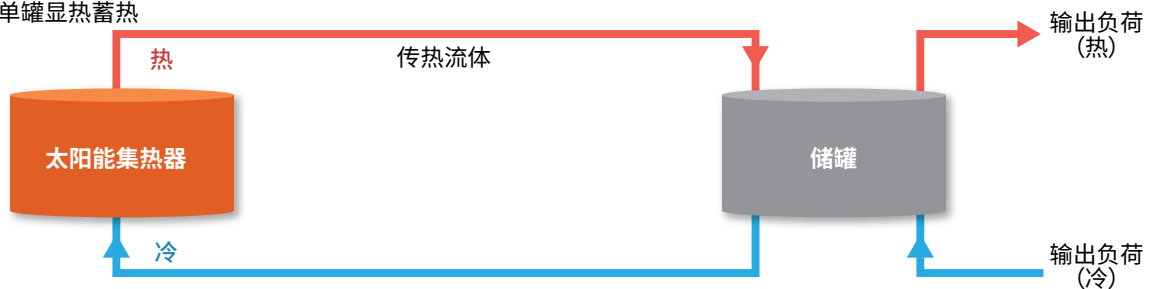
罐式蓄热

在 TTES 中，热能使用流体（通常是水）来储存。这里重点介绍 TTES 系统配置中与应用相关的方面。

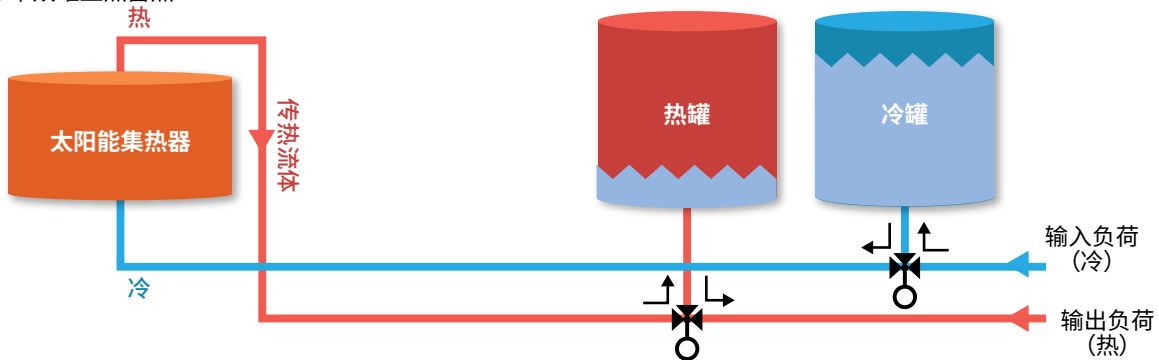
储罐的扩展性很强。容量为几升的小体积储罐与太阳能结合使用，可用于小型住宅应用。对于大型应用（商业、工业和区域供热）来说，储罐最大可扩展到数百万立方米，仅受可用空间的限制。我们可以使用不同的配置（单罐、双罐和多罐），如图 48 所示。单罐是最简单热储能形式。加热在保温罐中的冷流体，使其达到储罐起始温度与载热流体温度之间的平均温度。在双罐系统中，两个罐子都必须有能力容纳所有液体，所以总体积是合理材料体积的两倍。

图 48. 不同水罐配置

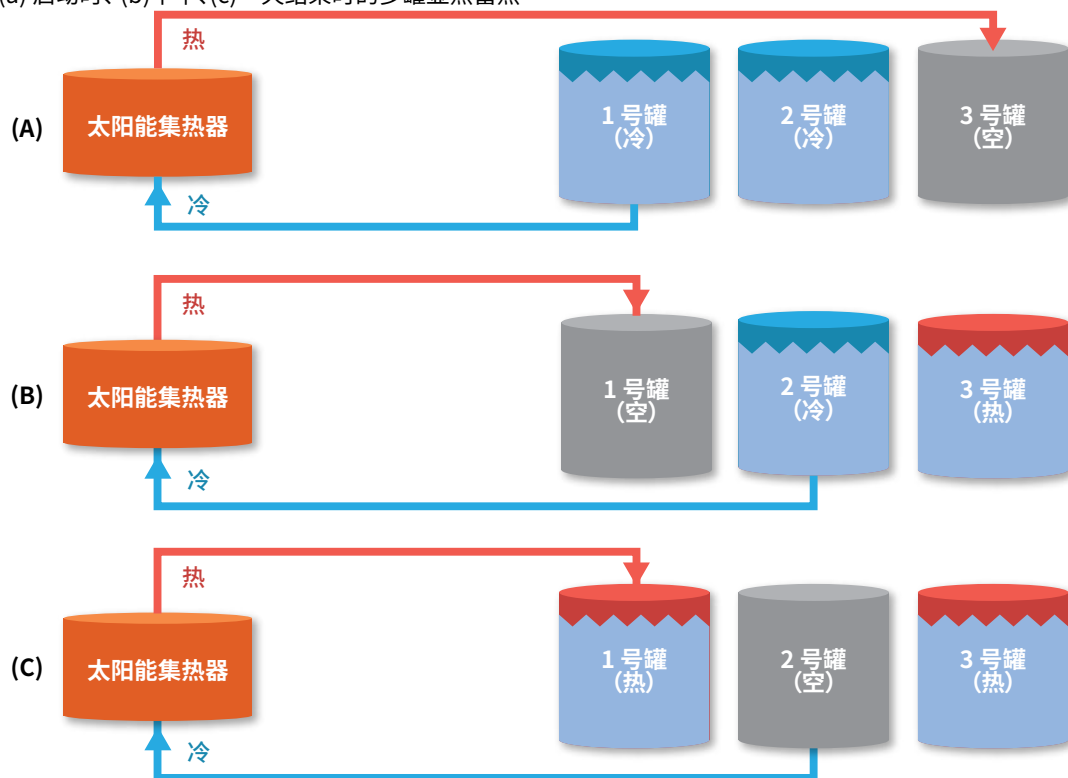
I: 单罐显热蓄热



II: 单双罐显热蓄热



III: (a) 启动时、(b) 中午、(c) 一天结束时的多罐显热蓄热



来源: Stine 和 Geyer, 2001。

固态

固态材料作为显热 TES，可以在从超低温至高达 1000°C 的温度范围中使用（Xu 和 Chung，2000 年）。天然物质和人工物质都已被作为储能介质来研究，如岩石、卵石、混凝土和陶瓷砖等。对于小规模应用（家用和商用），可使用工作温度高达 700°C 的陶瓷砖。该系统的组成部分有：蓄热材料、高性能保温材料（避免热损失），以及将热量从储能介质运送到使用点的风机。这些系统通常在夜间充能，并有一个智能控件来管理充能/释能过程的水平和时间。

熔融盐

最常用的盐是 HITEC 三元盐（53% 的硝酸钾 [KNO₃]，7% 的硝酸钠 [NaNO₃]，40% 的亚硝酸钠 [NaNO₂]），以及一种名为“太阳盐”的二元盐混合物。该混合物由 60% 的硝酸钠 (NaNO₃) 和 40% 的硝酸钾 (KNO₃) 组成（欧洲储能协会和欧洲能源研究联盟，2017a）。

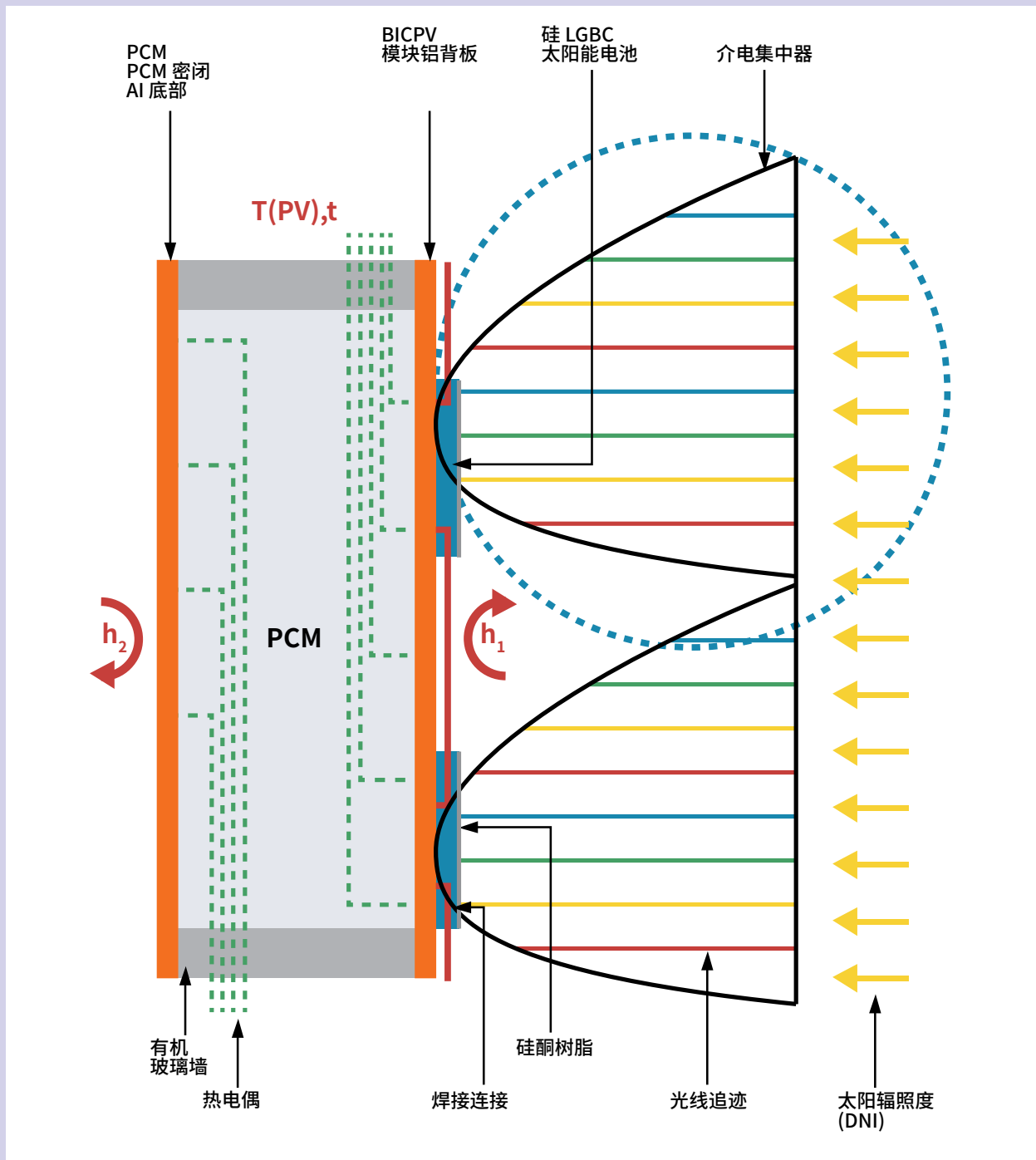
6.3 潜热蓄热

低温相变材料

目前有几种相变材料正得到使用，相变温度从 0 到 120°C。在有机材料方面，石蜡是最常用的材料。这种材料在室温下由蜡形成，化学成分为碳氢化合物和烷烃 C_nH_{2n+2}。熔点随碳原子数的增加而提高（Fatih Demirbas，2006 年）。主要使用实验室级石蜡、十四烷和十六烷及其二元混合物（Farid 等人，2004 年）。在无机材料方面，溴化锶 (SrBr₂·xH₂O) 等盐合物已大量用于家庭供热。

封装或使用形状稳定化（通过将 PCM 整合到支撑材料中并将其在外壳中微囊化以进行制备）是最常用的石蜡形式。最近出现的旨在实现温度控制的光伏 (PV) 和 PCM 系统整合概念，为将其扩展到建筑一体化集中式光伏 (BICPV) 系统提供了机会。被动地使用 PCM 将 BICPV 装置的温度保持在安全的工作范围内，并且还可以收集废热以进行再生（Sharma 等人，2016 年）（请参见图 49）。

图 49. BICPV-石蜡系统概念



来源: Sharma 等人, 2016。

高温复合相变材料

高温复合材料 PCM (cPCM) 的工作温度由其 PCM 熔点决定。对于中温应用（工作温度接近传统熔融盐）和高温应用（温度高于目前的聚光太阳能发电储能系统），无机盐的二元和三元混合物已作为载热流体 (HTF) 和 TES 材料已得到广泛研究并用于各种蓄热应用。碱的硝酸盐、氯酸盐和硫酸盐，以及碱金属，如镁、钾、锂、钙等，是生产中温共晶混合物的主要化合物 (Pereira da Cunha 和 Eames, 2016)。表 16 列出了文献中提出的一些复合材料候选材料。熔融碳酸盐的显著特点包括其化学稳定性、安全性以及在广泛的中温 (500 - 600°C) 和中高温 (600 - 800°C) 条件下的最佳性能，这些特点使其很适用于 CSP 应用。

6.4 热化学蓄热

化学循环

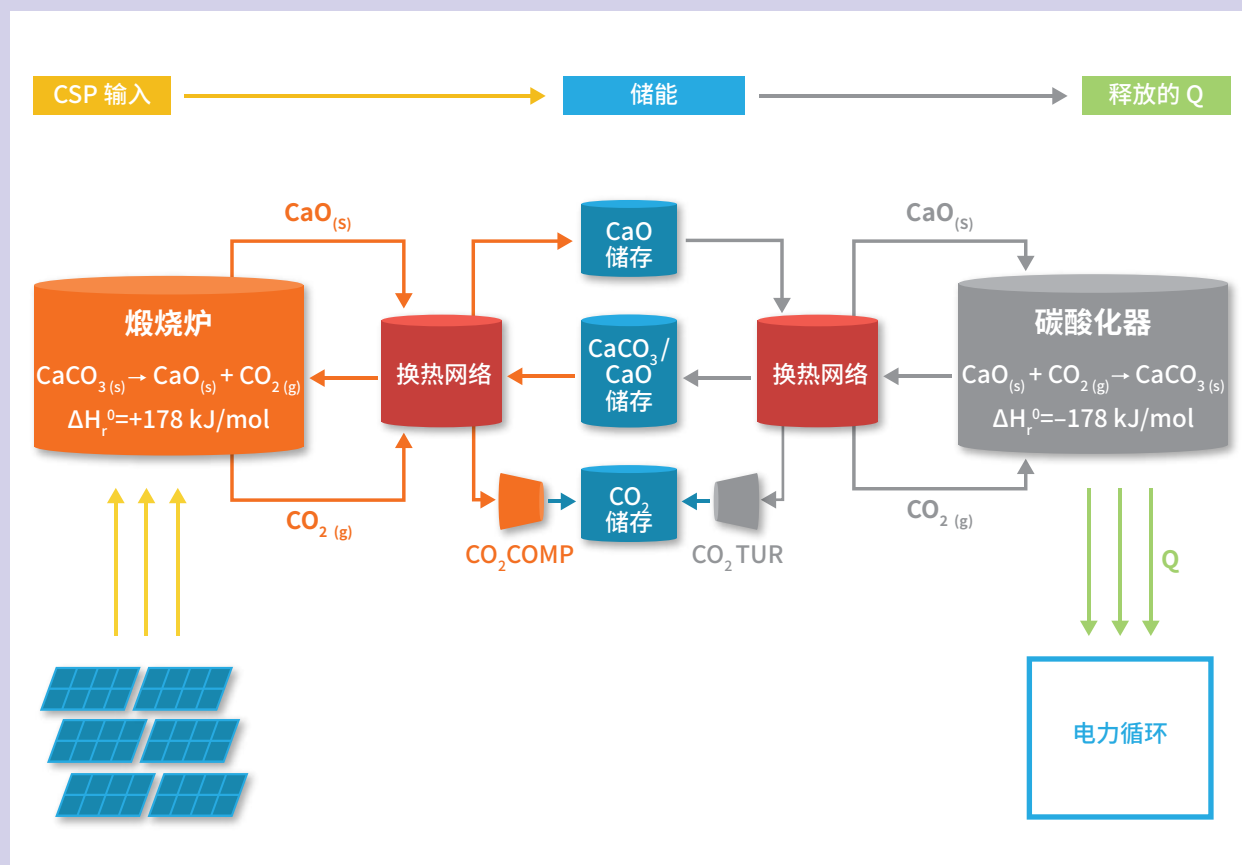
先前已有其他作者考虑了几种方案来分析钙循环 (CaL) 过程和 CSP 的整合。Tregambi 等人(2015) 提出了一种 CSP 辅助 CaCO₃ 焙烧的配置。Zhai 等人(2016) 分析了 CSP 在 CO₂ 捕集系统中回收能量的几种方案。Edwards 和 Materi (2012) 研究了 CSP-CaL 整合，将碳酸化反应器中产生的热量用于通过 CO₂/空气开放循环进行发电。Muñoz-Antón 等人(2015) 分析了在无储能的 CSP 发电厂整合一个接近临界的 CO₂ 布雷顿循环，以实现更高的循环效率。Alovisio 等人(2017) 探讨了几种概念配置，以最大限度地提高 CSP-CaL 整合性能，重点关注碳酸化器的动力循环整合。CSP-CaL 配置的示例如图 50 所示。

表 16. 科学文献中提出的无机复合材料

PCM	陶瓷基质	高热量增强剂	结果	参考
共晶碳酸盐 (LiNaCO ₃)	MgO 的微观结构	天然石墨和碳纳米管	导热率超过 4.3 W/(m·K)， 储能密度超过 530 kJ/kg	(Alonso 等人，2016 年)
共晶硝酸盐 (NaKNO ₃)	N/A	膨胀石墨	导热率最高为 51.5 W/ (m·K)，能量密度最高为 80 kJ/kg。	(Giannuzzi 等人，2017 年)
共晶氯化物 (MgCl ₂ -KCl)	N/A	膨胀石墨和石墨纸	导热系数： 12.7 W/(m·K) 能量密度：205 MJ/m ³	(Giannuzzi 等人，2017 年)

注：N/A 表示没有发现主要需求。

图 50. 用于热化学蓄热的 CSP-CaL 整合



来源: Alovio 等人, 2017。

水合盐吸附

在蓄热应用中使用水化反应的主要关注点在于吸湿性盐类，例如氯化镁 (MgCl_2)、硫化钠 (Na_2S)、溴化锶 (SrBr_2) 和硫酸镁 (MgSO_4) (Yu、Wang 和 Wang, 2013 年)。热化学蓄热材料 (TCM) 的主要特征是能量密度、高吸收性、低充能温度和高导热性。表 17 列出了最有前景的 TCM 及相关研究项目。硫酸镁因其能量密度和成本低的特点，一直是研究人员评估最多的材料 (Paulik, Paulik 和 Arnold, 1981 年; van Essen, Zondag 等人, 2009 年; Ferchaud 等人, 2014 年; Posern 等人, 2015 年; Kallenberger 等人, 2016 年)。然而，大多数研究得出的结论是，由于纯硫酸镁的功率密度很低，可循环性差，实际使用起来非常困难。

根据应用需求可采用两种不同的配置系统：封闭式系统和开放式系统 (图 51)。开放式系统与环境交换质量和能量，通常在环境压力下运行 (Ferchaud, 2016 年)。封闭式系统仅与周围环境交换能量，通常需要抽空以增强吸附质的输送 (van Essen 等人, 2010 年)。根据储能介质、需求条件和系统位置，选择开放式或封闭式系统。与封闭式系统相比，开放式反应器可在大气压下运行，所以使用范围更广。开放式反应器的系统也更紧凑，传热和传质效果更好。此外，据报道，开放式系统的能源效率比封闭式系统高 19% (开放式系统为 69%，封闭式系统为 50%) (Abedin 和 Rosen, 2012 年)。

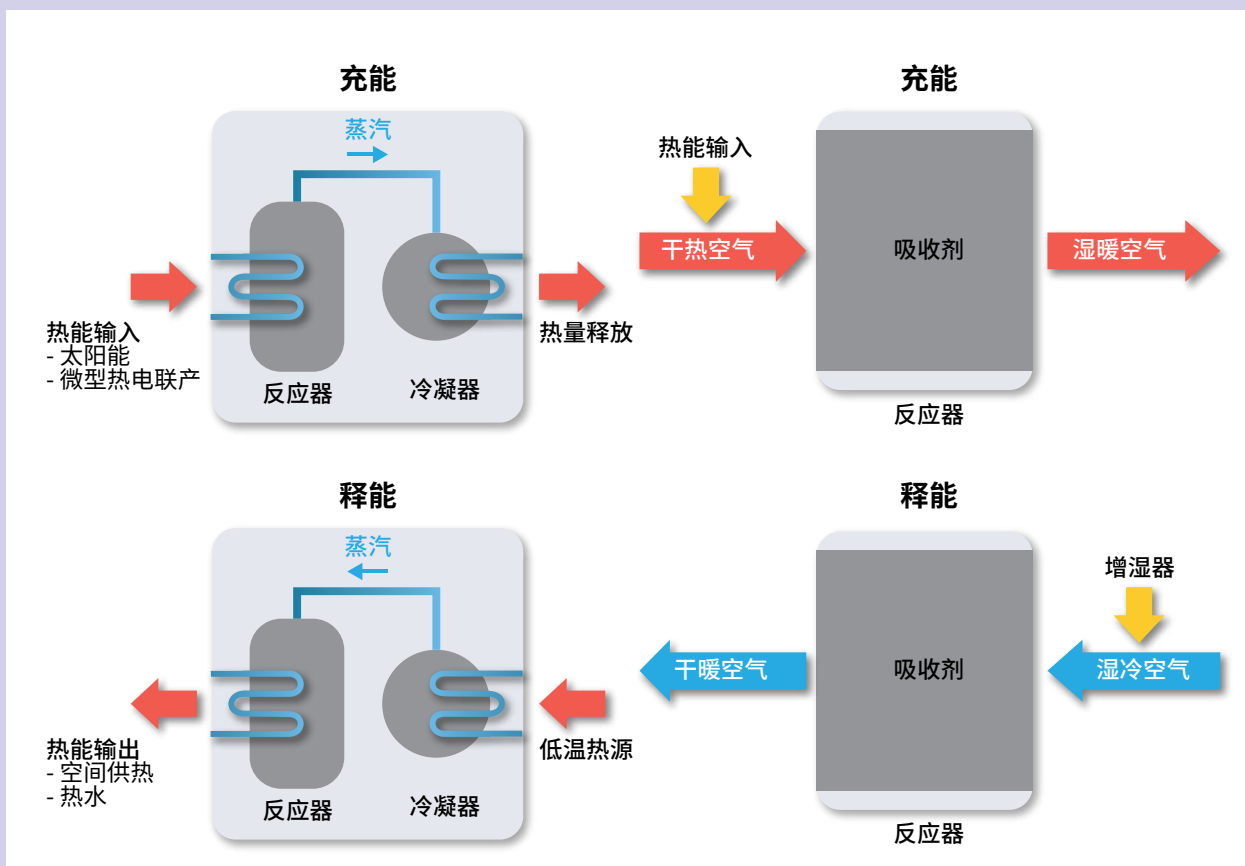
表 17. 研究人员针对季节性储能应用提出的 TCM 材料

材料	理论能量密度 (kWh/m ³) (Trausel, De Jong 和 Cuypers, 2014 年)	原型能量密度 (kWh/m ³)	充能温度 (°C)	释能温度 (°C)	价格 (美元/1000 kg) (Trausel, De Jong 和 Cuypers, 2014 年)	研究水平 (Fopah-Lele 等人, 2016 年)	项目
MgSO ₄ ·7H ₂ O	476	N/A	122-150	30	87	反应器规模 (实验室规模)	N/A
MgCl ₂ ·6H ₂ O	750	140 (5 H ₂ O)	117	35	174	反应器规模 (原型)	N/A
CaCl ₂ ·6H ₂ O	200	60	95	35	131	反应器规模 (理论研究)	SOLAUTARK 项目
SbBr ₂ ·6H ₂ O	635	60	70-80	35	2 708	反应器规模和原型	PROMES, SOLUX 原型

注: 1 欧元= 1.13 美元; N/A 表示未发现主要需求。

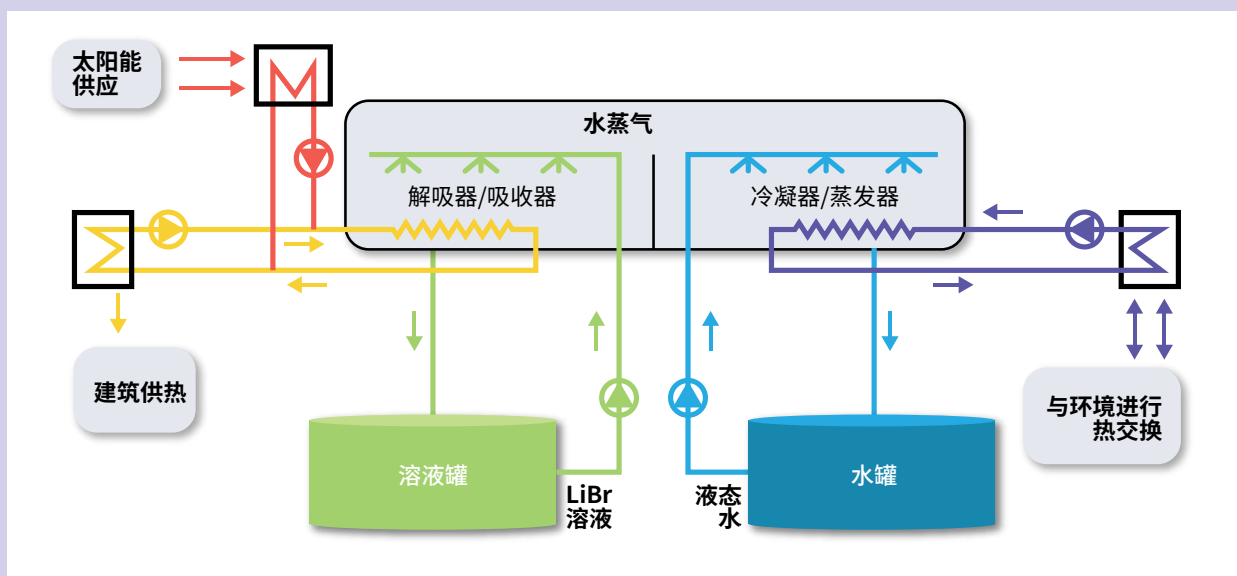
来源: van Essen, Cot Gores 等人, 2009。

图 51. 水合盐封闭式系统 (a) 和开放式系统 (b) 的配置



来源: Lele, 2016。

图 52. 分离反应器概念的工艺配置



来源: N'Tsoukpoe, Le Pierrès 和 Luo, 2013。

吸收式系统

在吸收式系统中，有一个回路用于浓缩溶液和稀释溶液，另一个回路则只用于吸附质。这些系统的工作原理是通过吸附质的吸收和解吸使溶液的浓度由稀变浓，反之亦然。如图 52 所示，浓溶液从蒸发器吸收了吸附质后变成了稀溶液。稀溶液从基础溶液中蒸发出吸附质后，变成浓溶液，然后在发生器中加热后在冷凝器中凝结 (Lele, 2016 年)。

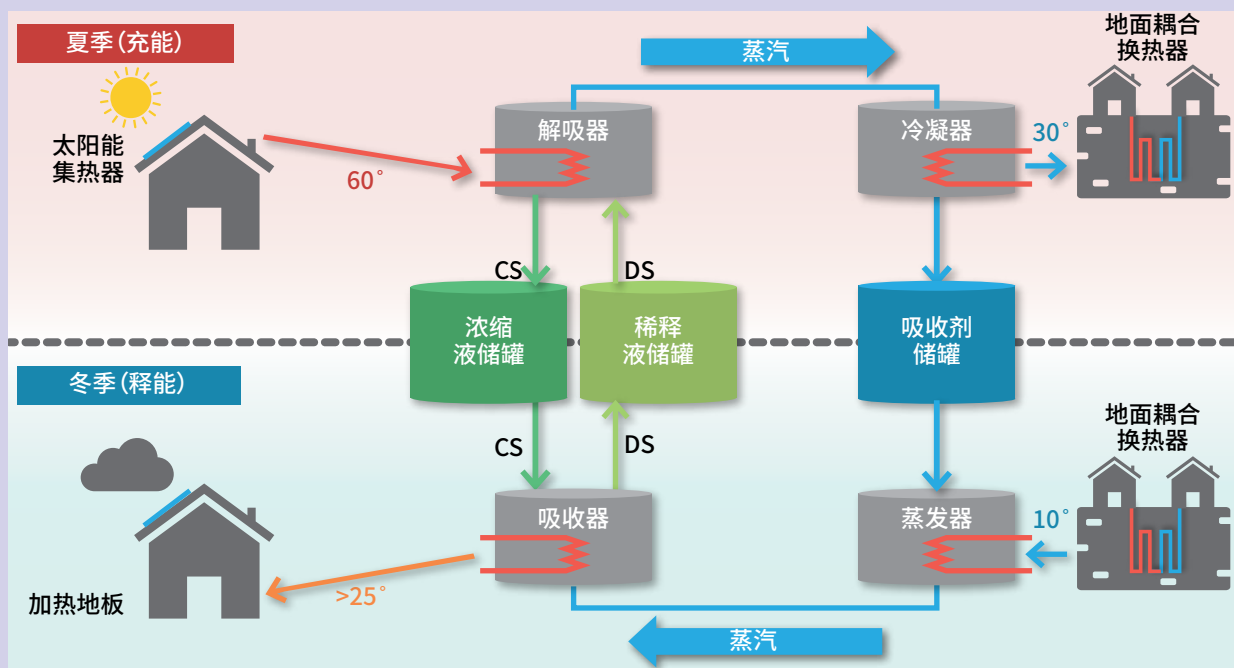
吸收式供冷系统的性能主要取决于工作流体的化学和热力学特性 (Sarbu 和 Sebarchievici, 2013 年)。结合使用吸收剂/供冷剂的主要条件是，它们必须在循环的工作温度范围内具有一定的可混性，而且混合物还应该具有化学稳定性、无毒和无爆炸性 (Sarbu 和 Sebarchievici, 2013 年)。最近研究的材料包括氯化钙 (CaCl_2)、氯化锂 (LiCl)、溴化锂 (LiBr)、氢氧化钠 (NaOH)、氢氧化钾 (KOH) 和氨水的水溶液 (Lele, 2016 年)。

最常见的工作液是水/ NH_3 和 $\text{LiBr}/\text{水}$ (Sarbu 和 Sebarchievici, 2013 年)。对于空间温度调节和其他要求冷却液温度达到 40°C 以上的情况，水/溴化锂是最常见的解决方案。对于较低的温度，一般使用氨/水。确实还存在着很多挑战，例如 $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ 对有可能结晶， $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 对很难分离。因此，对替代溶剂进行研究仍然是一个重要的话题，因为只有这样，才能提高吸附率和效率 (COP)，降低驱动热源的温度，并通过提高吸收率来改善吸收剂的性能 (Ibrahim、Al-Sulaiman 和 Ani, 2018 年)。

吸收式系统由七个主要部分组成：解吸器、吸收器、冷凝器、蒸发器、两个溶液储罐（稀释和浓缩溶液）和吸附质储罐 (图 53)。当有太阳能热能时，系统以充能模式运行，而在供热需求期则以释能模式运行。

吸收式系统可用于空调、供冷等多种应用，并可与太阳能技术整合，用于建筑空间供热的长期太阳能蓄热。图 53 对此进行了总结 (N'Tsoukpoe、Le Pierrès 和 Luo, 2013 年)。

图 53. 吸收式蓄热系统原理图



注: CS = 浓缩溶液; DS = 稀释溶液。

来源: N' Tsoukpoe, Le Pierrès 和 Luo, 2013。

6.5 机械热储能系统

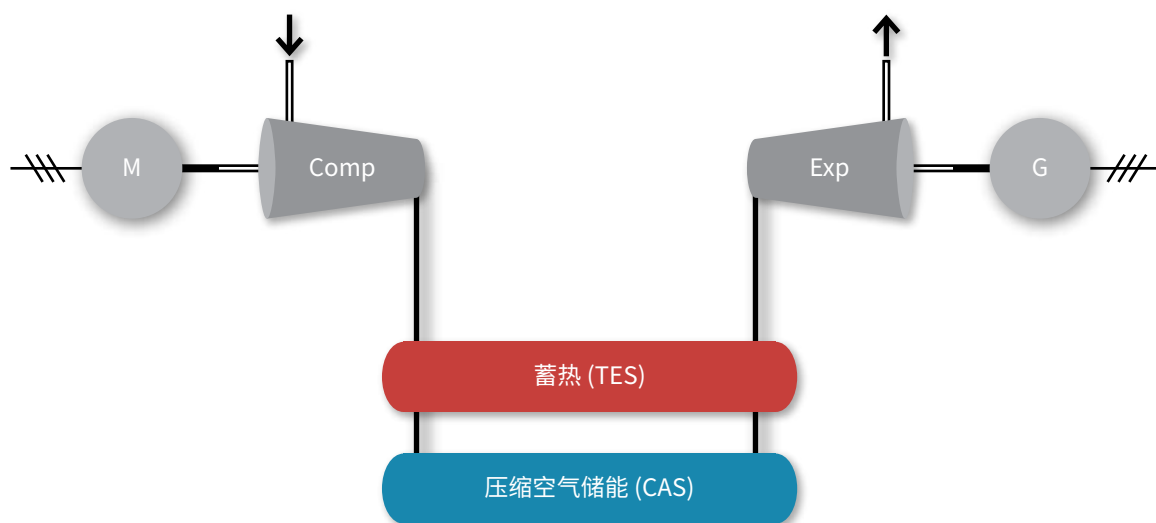
TES 用于绝热压缩空气储能

有专家提议使用绝热压缩空气储能 (A-CAES) 系统，通过增加一个高温 TES 装置来提高 CAES 的整体效率。该装置可储存压缩热，防止这些热量将在气体压缩阶段损失，供以后在膨胀过程中使用。

A-CAES 可以分解为三个部分 (见图 54)，即充能、储能和释能。在充能时，由一台或多台电动机驱动的压缩机给空气加压 ($> 75 \text{ bar}$)。在储能时，压缩空气存储在高压下储存空气，而 TES 在充能过程中储存压缩热。在释能时，由膨胀器驱动发电机。TES 可安装在压缩空气存储器内部，以避免使用高压容器，这种类型的系统被称为先进绝热压缩空气储能 (AA-CAES)。

CAES 工作原理类似充放电的电池。其可以轻松扩展；然而，这种方法一般使用洞穴来降低储存成本，因此通常存在地理限制。

图 54. TES 绝热 CAES



来源: Yu、Wang 和 Wang, 2013。

TES 用于液态空气储能

与 CAES 相比，液态空气储能 (LAES) 的能量密度更高，并且不受地域限制。通过整合废热源，LAES 的效率可进一步提高到 90% 或更高 (Li, 2011 年)。LAES 可以作为电能储存装置来进行充放电。液态空气也可作为发动机燃料使用，而冷能也可以用于供冷 (Dearman Engine, 未注明日期)。

在充能时，电机连接压缩机进行压缩，而膨胀机则用于液化。在释能时，低温泵和蒸发器用于蒸发和加热，空气涡轮机与发电机相连并由膨胀驱动。在储能时，有液态空气储存、冷储能和热储能（例如导热油和/或 PCM）。热交换器用于压缩空气和 TES 之间的冷热传递。对于整合其他生产过程中废热的系统，没有必要储存来自压缩的热量以用于排放过程。

执行摘要的必备信息

上游 - 从电力供应部门的角度来看：

- 对系统的影响 - 需求、容量/峰值、负荷状况、电网投资。
- 灵活性 - 这些负荷/技术是否能成为灵活性的来源？怎样实现？

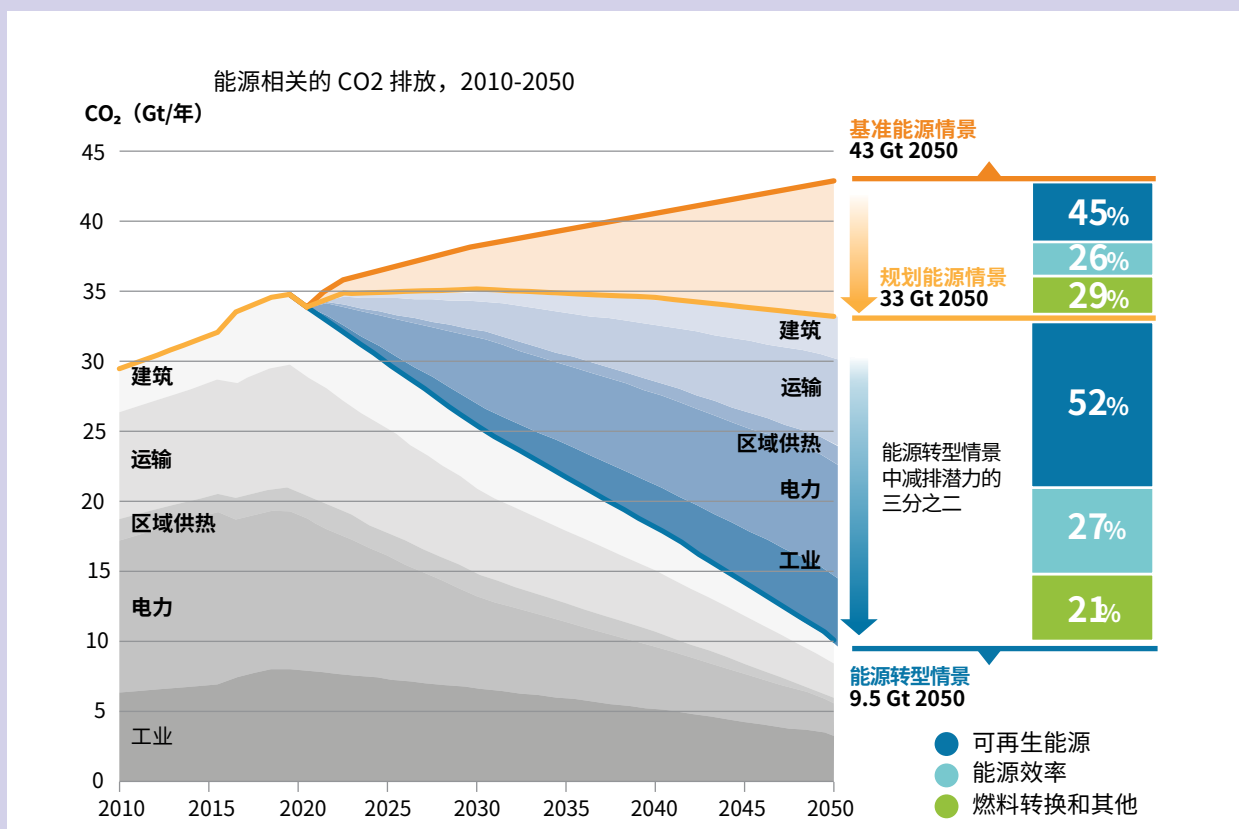
下游 - 从（需求）耦合和服务的角度来看：

- 要在未来成功实现电气化，现在需要考虑到哪些基础设施和其他方面？
- 如何使每个应用的商业案例得到加强？（系统方法；例如分时定价？）

从 TES 的作用出发：

- 从供应方的角度出发，为能源系统提供灵活性。
- 从需求方的角度出发，塑造冷热负荷。
- 电力、燃气、热能、冷能部门耦合的推动力。
- 短期和长期灵活性（从几分钟到季节性）。

附录图 1. 2010-2050 年与能源相关的 CO₂ 排放量 (Gt/yr)



来源: IRENA, 2020。

全球能源系统正在经历由脱碳驱动的重大转型。能源部门在全球碳排放量中的占比很大，每年排放将近 43 GT 的 CO₂。电力部门是脱碳工作的重点所在。然而，其他部门的脱碳（例如建筑、工业的区域供热和供冷以及区域供热和供冷计划）也很重要，而且进展缓慢。根据 IRENA 的预测，考虑到储能系统和终端用能部门的电气化，到 2050 年，可再生能源电力可提供与实现 CO₂ 减排要求相关的 90% 以上的能源。

此外，能源系统的灵活性使所有部门实现可再生能源整合的必要条件，而储能是提高系统灵活性的其中一个关键性技术解决方案。

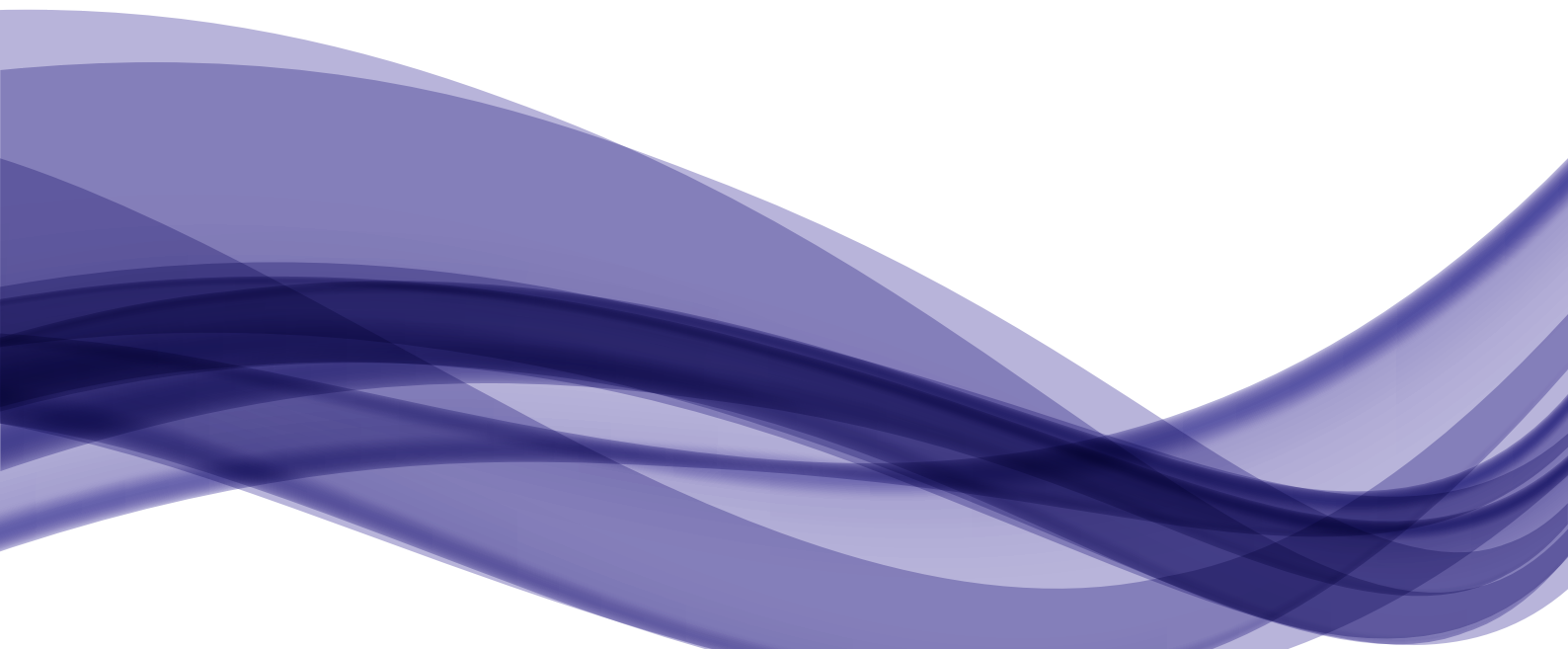
VRE 整合可实现终端用能部门的整合、需求转移，推迟对昂贵的电力基础设施的投资。有些储能技术还能够长期有效地储存能量，很适合于季节性储能。

蓄热技术的技术特征广泛、质量不一，这意味着其可以满足数小时甚至数月的蓄热需求。

蓄热技术的种类很多，主要是按照具体材料储存和释放能量的基本物理原理进行分类。不同的技术还具有不同的工作温度范围，从零下一直到 500°C 以上，而工作温度范围决定了技术的应用范围。本报告研究了 13 种 TES 子技术及其可为能源部门带来的价值和效益。

表 18. TES 技术与能源部门

<p>与可再生能源发电整合</p>	<p>CSP 显热：熔融盐 PCM：无机盐化合物 TCS：化学循环</p>	<p>风能/PV 耦合：CAES、LAES</p>	<p>太阳能热 显热：TTES、UTES TCS：化学循环、水合盐、吸收式系统</p>
<p>在区域级别使用 (大规模)</p>	<p>区域供热 显热：TTES、UTES PCM：无机盐化合物 TCS：化学循环</p>	<p>区域供冷 显热：TTES、UTES PCM：冰 TCS：吸收式系统</p>	<p>工业 显热：卵石/陶瓷砖 PCM：无机盐化合物 TCS：化学循环，水合盐</p>
<p>在消费者级别使用 (小规模)</p>	<p>冷链运输 PCM：冰，共晶体 耦合：LAES</p>	<p>商业 PCM：冰、共晶体、石蜡 TCS：吸收式系统</p>	<p>住宅 显热：TTES、UTES、卵石/陶瓷砖 PCM：石蜡 TCS：水合盐</p>



 www.irena.org www.facebook.com/irena.org www.twitter.com/irena www.instagram.com/irenaimages **IRENA**
International Renewable Energy Agency

© IRENA 2020 版权所有