



净零热能：热能存储加速能源系统脱碳





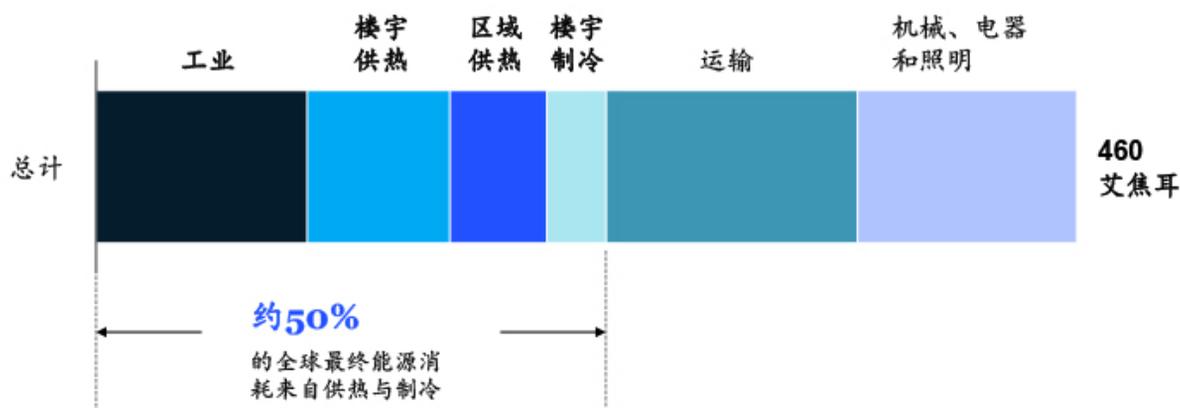
作者：汪小帆、洪晟、陈持平、朱文颖、Godart van Gendt

本文参考麦肯锡作为知识合作伙伴为长时储能理事会（LDES Council）《净零热能报告》提供的研究和分析。

随着全球能源系统脱碳的不断推进，人们的视线也逐渐转移到最重要也最难脱碳的介质之一——热能。热能主要应用于工业生产、楼宇供热/制冷和区域供暖，在全球终端能源消耗中的占比已超过 50%（见图）。由于目前大多数热能的来源仍是化石燃料，供热与制冷占到了全球能源相关碳排放[1]的 45%，加速热能脱碳对实现净零排放至关重要。

图1 供热和制冷占全球最终能源消耗的50%

各行业最终能源消耗
艾焦耳，2019年



McKinsey
& Company

资料来源：麦肯锡全球能源展望

电气化有助于绝大多数热能应用的脱碳，而热能存储（Thermal Energy Storage, TES）则进一步为热电联动提供了更加清洁、灵活的解决方案。储热技术可将介质加热到特定高温（或冷却到低温）后保持温度，并在需要时释放（或吸收）热能，从而实现储能的目的。储热可通过两种机制协助实现零碳排放：一是与具有波动性的可再生能源协同，使更多热能由清洁能源提供；二是在表后优化热能的使用，如在工业流程中储存废热供后续使用，从而提高能效。

近日，长时储能（LDES）理事会参考麦肯锡洞见发布了《净零热能报告》[2]，全面展示了热能存储在热能脱碳中的作用、储热技术的成本与经济性、储热的典型商业用例、“风+光+储+热”一体化能源系统，并总结

了发展储热所需要的关键支持。本文将分享该报告中的部分重点内容，并结合中国热能存储的实践，以期为各位读者带来启发与思考。

三种技术路线，应用场景广泛

储热技术包括显热储能、潜热储能及热化学储能（见图 2），可满足不同的储能时长需求（从跨天到跨季）和温度需求（从零下到 2400°C）。其中，显热储能的材料成本与设备成本较低、技术成熟，是目前较多商业化项目选择的技术路线，主要应用领域包括工业窑炉和电采暖、居民采暖、光热发电等。潜热储能由于相变材料的限制，材料成本较高，且对设备抗腐蚀性要求也高，导致总体造价高昂，商业化应用以熔盐式相变材料为主。热化学储能具有很高的储能密度与较低的热损失，但因工艺技术复杂、储能材料循环性不佳等因素，目前仍处于示范阶段。

图2 储热方式比较

	显热储能	潜热储能	热化学储能
储能材料	石墨、陶瓷、二氧化硅和沙子、熔盐、岩石、钢、地下水、水、热空气	微囊化金属、无机盐和低共熔混合物、钠、其他液态金属、熔融铝合金、石蜡、脂肪酸、盐水合物、盐水混合物、冰、液态空气	碳酸钙体系、氢氧化钙体系
储能密度(GJ/m ³)	~0.2	0.3~0.5	0.5~3.0
工作温度	<0~2,400°C	<0~1,600°C	0~900°C
存储时长	数分钟到数月	数小时到数天	数小时到数月
技术成熟度	大部分商业成熟	部分商业成熟	研发及试点阶段
寿命	长	中等	取决于副反应及材料衰减
技术优势	低成本，技术成熟	能量密度佳，装置系统体积小	储能密度高，可长途运输
技术缺点	热损失大	热导率小，材料腐蚀性强	技术复杂，单次投资大

McKinsey
& Company

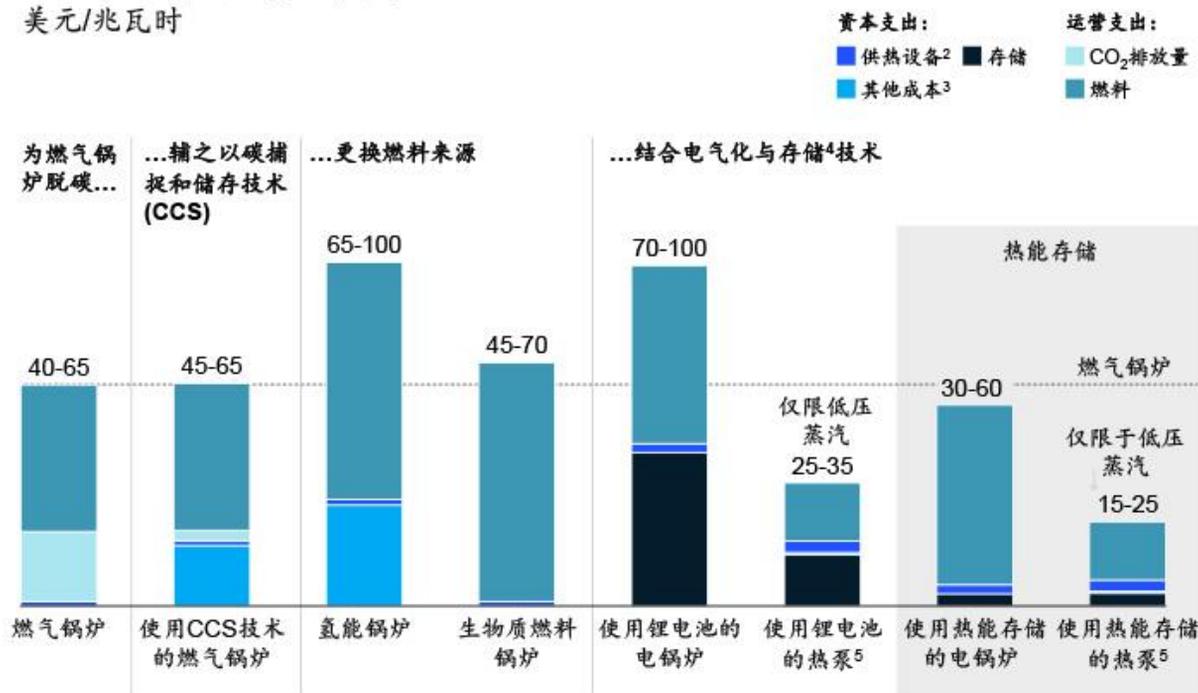
热能存储技术主要有三大应用场景，分别是电力、工业、区域和建筑供暖。

储热有助于实现经济高效的清洁热能供应。《净零热能报告》显示，根据 2022 年长时储能理事会的成本对标结果，对于工业过程中最常见的蒸汽或热空气这两种热能形式，储热已经可以提供具有成本竞争力的电气化与脱碳解决方案。如图 3 所示，在燃气锅炉脱碳的应用中，相比燃气锅炉叠加碳捕捉与存储技术、氢能锅炉、生物质锅炉、结合锂电储能的电锅炉或热泵等脱碳选项，结合了储热系统的电锅炉或热泵更具经济性。

图3 使用电力和热能存储产生的清洁蒸汽比传统燃气锅炉和其他低碳解决方案成本更低

2022年均化热能成本（蒸气）¹

美元/兆瓦时



1. 数字区间代表燃料价格。燃气为每百万英热单位8-12美元，电力为每兆瓦时25-50美元，生物质燃料为每吨200-350美元。就氢能锅炉而言，制氢成本约为每千克2.1-3.2美元
 2. 锅炉、热泵及充电设备
 3. 电解槽、碳捕捉与储存 (CCS)
 4. 假设为现场可再生能源
 5. 高温工业热泵，蒸汽温度最高可达180°C左右
 资料来源：麦肯锡全球能源展望

McKinsey & Company

《净零热能报告》还详细分析了热能存储的四个商业用例。结果显示，部分用例已具备可盈利性，内部收益率（IRR）最高可达 28%。评估用例包括化工厂中的中压蒸汽、区域供热、炼铝厂中的高压蒸汽、离网温室所需的热电联产。以中压蒸汽为例，将原有的燃气锅炉替换为电锅炉配合热能存储，提供蒸汽用于石油炼化和化工产品生产，每年可减少 4.7 万吨二氧化碳排放。通过锅炉改造可带来的收益包括节省燃料费用和碳排放相关成本，内部收益率在基础情形下为 6%（考虑碳价及电网收费），最高可达

28%（考虑电网收费免除、灵活性奖励）。当然，这些用例的可行性及收益率会显著受到当地市场情况与机制设计的影响。比如，在太阳能和风能充足的地区或当前自有热能供给的地区，储热最有可能蓬勃发展；此外，针对储热所带来的系统灵活性，电力市场也需为其提供降低电网费等回馈。

随着市场成熟、规模扩大，储热和其他形式的长时储能技术一样，都将变得更具成本竞争力。长时储能理事会的数据表明，预计从目前到2040年，热能存储的单位资本成本将下降，其中热能释放设备成本将降低5%~30%，储能介质成本降低15%~70%。技术降本将进一步推动更多商业用例的发展及落地。

能源系统正在快速变得更加复杂、更加互联互通，以综合视角进行分析有助于更快发挥热能存储的潜在优势。例如，初步迹象表明，通过热泵、电解槽或氢能锅炉等技术，电力和热能领域以及新兴的氢能行业之间互联程度越来越高，储能技术对于整合复杂的能源系统和脱碳可发挥重要作用。

《净零热能报告》中展示了热能存储可与电力长时储能相结合的用例，将邻近海上风电场的可变输出转化为更稳定的工业清洁热能供给，既为海上风能开发商创造了额外的需求来源，也为工业能源用户提供了更具成本效益的脱碳路径。

正是通过类似的举措，热能存储得以加速全球减排并接近净零目标。报告显示，通过提供高温热能应用等成本效益更高的热能脱碳工艺，热能存储可使全球长时储能产能翻倍。全球系统成本每年有望因此降低高达

5400 亿美元，赋能更快速的可再生能源建设，并优化电网利用率。

工业应用：

· 位于浙江某工业园区的熔盐显热储能项目利用来自西部地区的清洁风光电力以及较为廉价的谷电进行储能，在电网低负荷时段取电、转化为热能存储于熔盐罐内，在高峰时段则对外供热或发电，既可用清洁热能替代园区内目前使用的燃气热能，也可协助电力供需实现削峰填谷。项目可满足园区内 30 余家印染加工企业的热能和蒸汽需求，每年可节约标准煤 7.75 万吨，减排二氧化碳约 14.5 万吨；2023 年，该项目还将新增发电功能，满足园区耗能之外的多余热能可用于发电。届时，项目每年可发电 3200 万千瓦时，节约动力煤 13.9 万吨，减排二氧化碳 36 万吨，每月可产生 300 万元的经济效益。项目预期投资回收期 6 年，内部收益率可达约 15%。

· 一些规划中的国内熔盐储能项目包括：内蒙古自治区达拉特经济开发区配置 61 兆瓦熔盐储能，预计 2023 年底建成投产；江苏省淮安市洪泽经济开发区预计将建设 150t/h 的绿电熔盐供热储能项目，满足开发

预览已结束，完整报告链接和二维码如下：

https://www.yunbaogao.cn/report/index/report?reportId=1_52559

