



## 高温固体颗粒储热耦合燃煤机组深度灵活调峰技术研究进展

齐傲<sup>1,2</sup>, 刘敬樟<sup>1</sup>, 黄玉<sup>1,2</sup>, 宋国良<sup>1,2</sup>, 朱建国<sup>1,2</sup>, 刘玉华<sup>1</sup>, 吕清刚<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院工程热物理研究所煤炭高效低碳利用全国重点实验室, 北京 100190; <sup>2</sup>中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 在“双碳”目标引领与高比例新能源并网的新形势下, 燃煤电厂向深度灵活调峰转型已成为保障电力系统安全稳定运行、提升新能源消纳能力的关键举措。高温固体颗粒储热技术凭借储热密度高、温度适配范围广、成本低廉等优势, 成为耦合燃煤电厂机组实现热电解耦、提升调峰能力的重要技术路径。本文系统综述高温固体颗粒储热耦合燃煤机组深度灵活调峰技术的研究进展: 首先梳理了天然矿物、人工合成陶瓷、工业固废衍生材料三类储热介质的特性与研究现状, 总结了固定床、移动床、流化床等反应器的技术特点与应用场景; 其次分析了煤粉锅炉与循环流化床锅炉在快速变负荷、低负荷稳燃等方面的调峰技术突破; 进而聚焦国内外典型示范项目, 阐述了该技术在工业用能、电网调峰、民生供暖等场景的工程应用成效; 最后指出未来需从高温材料性能优化、系统协同集成、产业标准完善与规模化示范推广三方面突破。高温固体颗粒储热耦合燃煤电厂深度灵活调峰技术的成熟与推广有望为燃煤电厂低碳转型提供重要支撑, 为新型电力系统建设与“双碳”目标实现奠定坚实基础。

**关键词:** 高温固体颗粒储热; 燃煤机组; 深度灵活调峰; 新能源消纳

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0280

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-20

## Progress on high-temperature solid particle thermal energy storage coupled with deep flexible peak regulation technology for coal-fired power units

QI Ao<sup>1,2</sup>, LIU Jingzhang<sup>1</sup>, HUANG Yu<sup>1,2</sup>, SONG Guoliang<sup>1,2</sup>, ZHU Jianguo<sup>1,2</sup>, LIU Yuhua<sup>1</sup>, LÜ Qinggang<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, Beijing, China; <sup>2</sup>School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, Beijing, China)

**Abstract:** Driven by the "dual carbon" goal and the integration of high-proportion renewable energy into the power grid, the transformation of coal-fired power units toward deep flexible peak regulation has become critical to ensuring power system security and stability, as well as improving renewable energy accommodation. Featuring high thermal energy storage density, wide temperature adaptability, and low cost, high-temperature solid particle thermal energy

收稿日期: 2026-04-02; 修改稿日期: 2026-04-22。

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2026ZD1702302); 国家重点研发计划课题 (2024YFB4104902)。

第一作者: 齐傲 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高温固体颗粒储热技术, E-mail: qiao25@mails.ucas.ac.cn; 通信作者: 刘敬樟, 副研究员, 研究方向为高温固体颗粒储热, E-mail: liujingzhang@iet.cn。

引用本文: 齐傲, 刘敬樟, 黄玉, 等. 高温固体颗粒储热耦合燃煤机组深度灵活调峰技术研究进展[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-20.

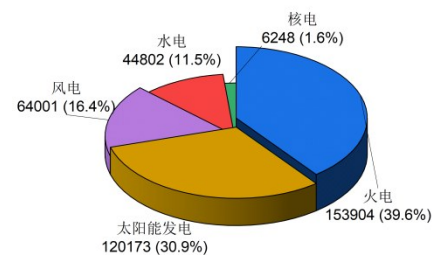
**Citation:** QI Ao, LIU Jingzhang, HUANG Yu, et al. Progress on high-temperature solid particle thermal energy storage coupled with deep flexible peak regulation technology for coal-fired power units[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-20.

storage technology has emerged as an important technical route to realize thermoelectric decoupling and enhance peak regulation capability when coupled with coal-fired units. This paper systematically reviews the research progress of high-temperature solid particle thermal energy storage coupled with deep flexible peak regulation technology for coal-fired power units. Firstly, the characteristics and research status of three categories of thermal storage media—natural minerals, synthetic ceramics, and industrial solid waste-derived materials—are summarized, along with the technical features and application scenarios of reactors including fixed bed, moving bed, and fluidized bed. Secondly, the technological breakthroughs of pulverized coal boilers and circulating fluidized bed boilers in rapid load variation and low-load stable combustion are analyzed. Furthermore, focusing on typical domestic and international demonstration projects, the engineering application effects of the technology in industrial energy consumption, power grid peak regulation, civil heating and other scenarios are elaborated. Finally, three key directions for future breakthroughs are proposed: performance optimization of high-temperature materials, collaborative system integration, and improvement of industrial standards as well as large-scale demonstration and promotion. The maturity and popularization of high-temperature solid particle thermal energy storage coupled with deep flexible peak regulation technology are expected to provide important support for the low-carbon transformation of coal-fired power units and lay a solid foundation for the construction of a new-type power system and the achievement of the "dual carbon" goal.

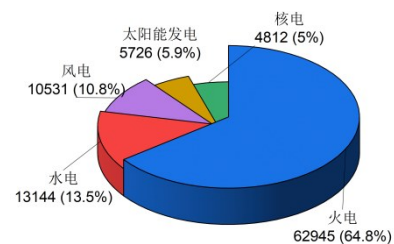
**Keywords:** high-temperature solid particle thermal energy storage; coal-fired units; deep flexible peak regulation; renewable energy accommodation

随着全球气候治理进程的加速推进，我国提出“碳达峰、碳中和”战略目标，这一目标不仅是应对全球气候变化的庄严承诺，更成为引领我国能源结构转型、推动产业绿色升级的核心导向。在能源系统向清洁低碳转型的大背景下，电力行业作为能源消耗与碳排放的核心领域，其转型进程关乎“双碳”目标的实现成效。如图1所示<sup>[1]</sup>，截至2025，我国火电累计发电装机容量虽占比四成左右，发电量占比却高达64.8%，燃煤发电仍为电力供给的绝对主体。但其角色正从提供电量的“主力军”向保障新型电力系统稳定的“调节器”深刻转型，需通过灵活性改造、清洁化技术升级、政策机制与市场环境协同发力，在控量降碳的前提下，推动燃煤发电的高质量、可持续发展<sup>[2]</sup>。

近年来，我国新能源产业实现跨越式发展，风电、光伏等可再生能源装机容量与发电量占比持续攀升，2025年中国新能源装机容量同比增长情况如图2所示<sup>[1]</sup>，高比例新能源并网已成为电力系统发展的必然趋势。然而，新能源固有的间歇性、波动性与随机性特征十分突出<sup>[3]</sup>。尤其在新能源大发



(a) 单位：万千瓦



(b) 单位：亿千瓦

图1 2025年中国全年累计发电装机容量(a)和发电量(b)<sup>[1]</sup>  
Fig.1 China's annual cumulative installed power generation capacity (a) and power generation output (b) in 2025<sup>[1]</sup>

时段存在严重弃风弃光问题，叠加负荷低谷期系统灵活性调峰能力不足的矛盾，严重制约了新能源消纳效率与电力系统运行稳定性<sup>[4]</sup>，亟需构建高效灵活的调峰支撑体系。



图2 2025年中国新能源装机容量同比增长情况<sup>[1]</sup>

Fig.2 Year-on-Year growth of new energy installed capacity in china in 2025<sup>[1]</sup>

在此背景下，燃煤电厂机组肩负着保供稳能与低碳转型的双重使命<sup>[5-6]</sup>，正面临转型发展的深层困境。作为我国能源安全的“压舱石”，燃煤电厂需持续稳定出力以匹配电力负荷的刚性需求，尤其在

极端天气等特殊场景下，保供责任更为突出；但同时为落实“双碳”部署，燃煤电厂又必须严格管控碳排放强度与总量，全面推进节能降碳改造，保供与降碳的双重诉求使其转型挑战凸显。而当前燃煤电厂现有的热电解耦技术，还存在效率偏低、应用场景单一的短板，难以适配电厂高效降碳与灵活运行的实际需求<sup>[7]</sup>。由此，实现高效灵活的热电解耦、提升能源综合利用效率，成为破解燃煤领域碳减排难题、推动燃煤电厂转型的关键突破方向。

热储能技术为破解这一难题提供了有效路径，其可精化解能量供给与需求在时间、空间及强度上的调配矛盾，通过存储供给高峰的冗余能量并在需求高峰释放，有效平抑可再生能源发电的波动性<sup>[8]</sup>。同时，该技术配套的储热设备兼具运行灵活、长时储热性能优异的优势<sup>[9]</sup>，结合低谷电价与调峰相关政策，可推动燃煤电厂实现高效灵活的热电解耦，进而有效提升电网对可再生能源发电的消纳渗透率，助力燃煤电厂在保供与降碳的双重目标间实现平衡发展。根据储热机理不同，热储能分为显热储热、潜热储热和热化学储热，不同储热方式对比如表1：

表1 常规储热方式

Table 1 Common thermal energy storage methods

| 类别    | 原理  | 应用领域                            | 优势  | 局限   |
|-------|---|---------------------------------|---|--|
| 显热储热  | 通过改变储热介质(空气、水、熔盐或固体颗粒等)的温度实现热能存储与释放，过程中物质形态保持不变 | 工业余热回收、光热发电、建筑供暖、火电灵活性改造及综合能源服务 | 工作温度范围广、技术成熟、设计简单和运行成本低 <sup>[10]</sup> 、易规模化 | 常规显热储热密度低、热损大，气体/液体储热受限于600℃以下；高温颗粒储热存在颗粒磨损、积灰堵塞、传热效率受限等瓶颈 <sup>[11]</sup> |
| 潜热储热  | 材料在相变过程中恒温吸收或释放潜热实现能量存储                         | 工业余热回收、太阳能热利用、建筑节能及电力调峰         | 储热密度高、热损失小、充放热温度稳定 <sup>[12]</sup>            | 材料和维护成本高、循环稳定性差、系统复杂；难以满足600℃以上高温场景，存在导热性差、相变材料腐蚀和相分离等问题 <sup>[13]</sup>   |
| 热化学储热 | 利用吸热反应将热能转化为化学能，并在逆反应中释放热能                      | 电力调峰、光热发电、跨季节储能、工业余热回收          | 能量密度高、适合长时间储热、零碳排放运行 <sup>[14]</sup>          | 储热材料循环稳定性差、系统复杂、周期寿命有限 <sup>[15]</sup> 、易产生腐蚀性副产物、工程化滞后 <sup>[14,16]</sup> |

高温固体颗粒储热属于显热储热，它依靠固体颗粒温度变化实现储放热。显热储热凭借原理简洁、技术成熟度高、运行稳定性强及成本低廉等核心优势<sup>[10]</sup>，在中高温储热领域应用广泛，其储热介质化学性质稳定、无相变隐患且适用温域宽，可在常压下实现大规模储热，系统结构简单、安全性高、使用寿命长，同时固体颗粒等显热储热材料来源丰富、环境友好，兼具规模化应用与经济性潜力，相比潜热及热化学储热更易实现工程化推广。

煤电耦合储热的应用中，主流技术为工作温度

最高约570℃的熔盐储热技术，受硝酸盐熔盐热稳定性限制，温度进一步提升易引发分解问题；此外，也有少量电锅炉<sup>[17-18]</sup>、余热锅炉<sup>[19]</sup>与煤电耦合的应用案例，但其整体占比偏低。相较之下，高温固体颗粒储热技术具有储热密度高、在宽温范围内运行稳定性强、成本较低等突出特点<sup>[20]</sup>。Ma等<sup>[21]</sup>对颗粒储热系统的性能展开评估，成本分析结果显示，凭借储热介质与保温环节的低成本优势，该系统的成本不足10\$/kWh<sub>th</sub>，仅为目前主流熔盐储热系统的一半。将其与燃煤电厂耦合，能够在机组高

负荷运行时高效捕获并储存多余热量,有效规避能源浪费;在低负荷或调峰阶段精准释放储存的热量,稳定维持汽轮机进汽参数,进而实现热电解耦,显著提升机组调峰灵活性与运行安全性,为燃煤电厂适配新型电力系统运行需求提供关键支撑。目前,高温固体颗粒储热耦合燃煤电厂机组深度灵活调峰技术正从实验室小试探索逐渐迈向工程化示范应用阶段,主流的储热颗粒体系包括天然矿物<sup>[22-23]</sup>、工业固废衍生材料<sup>[24]</sup>以及高性能陶瓷基复合材料<sup>[25]</sup>等。这些材料具备较高的比热容、良好的高温热稳定性及优异的机械强度,能够在600℃以上的高温环境中稳定运行,能够满足燃煤电厂深度灵活调峰对储热材料的性能要求。现阶段,相关的小试、中试项目已验证该技术可行性与经济合理性,为传统火电转型升级提供了切实可行的技术路径。这一技术路径能够赋予传统火电更强的适配性与可持续性,为其未来向清洁低碳方向发展提供了可行的技术方案。

综上所述,高温固体颗粒储热耦合燃煤电厂深度调峰技术,不仅是应对当前电力系统灵活性挑战的有效手段,更是推动传统化石能源清洁高效利用的重要方向。随着材料性能的持续优化与系统集成方案的不断完善,该耦合模式能够在提升火电灵活性、降低碳排放强度、促进可再生能源消纳等方面发挥多重积极作用,具有重要的理论研究价值与工程应用前景。

## 1 高温固体颗粒储热技术研究进展

高温固体颗粒储热技术在光伏风电消纳、光热发电储热及工业烟气余热回收等场景中展现核心应用价值。熔盐储热技术虽已实现工程化应用,但存在显著的温度与安全约束,其工作温度通常局限于600℃以下,硝酸盐体系在565℃以上容易发生分解反应并产生NO<sub>x</sub>气体<sup>[26]</sup>,加剧设备高温腐蚀;碳酸盐、氟化物等体系也面临挥发、黏度偏高或相变收缩导致的热应力问题;系统需配置两罐式储热结构及高温熔盐泵等专用设备,且熔盐存在凝固堵塞管道与储罐的风险,需依赖电伴热、保温层等辅助措施保障运行<sup>[27]</sup>。而高温固体颗粒储热技术凭借自身材料与结构的特性,恰好能弥补熔盐储热的上述短板,其以固体颗粒为储热介质,不仅能突破600℃的温度限制,适配更高温的能源利用场景,

还能从根本上规避熔盐类介质分解、挥发、凝固堵塞等系列问题,成为更具发展潜力的储热技术路径。

### 1.1 高温储热颗粒材料分析

高温固体颗粒储热材料作为支撑燃煤电厂深度调峰、电加热储热、工业余热回收等能源场景高效运行的核心技术载体,其多元化的材料体系与差异化的储热机制,为不同应用场景的灵活适配提供了关键技术支撑,更是推动能源结构转型、提升能源利用效率的重要保障<sup>[28]</sup>。储热材料根据原料属性可分为天然廉价矿物颗粒、人工合成高性能储热材料、工业固废衍生储热材料三类,各类材料在性能、成本及应用场景上各具特点,相关研究进展如下:

#### 1.1.1 天然廉价矿物颗粒

天然廉价矿物颗粒以自然形成的矿物为核心,典型代表包括石英砂、玄武岩、普通沙子。其核心优势在于来源广泛、价格低廉,且具备热稳定性好、无毒环保的特点,是电加热非相变储热、中小型区域供暖等低成本场景的优选方案。与石英砂和玄武岩相比,普通沙子含杂质多,其中的CaCO<sub>3</sub>在高温下易分解,800℃以上高温环境中该类材料普遍易发生颗粒烧结黏结,导致储热床层孔隙率下降、流动阻力增大,影响系统换热效率与循环稳定性,储热密度偏低,难以满足大规模高密度储能需求<sup>[20]</sup>。Schlipf等<sup>[29]</sup>通过理论建模与实验测试,研究了石英砂、石英砾石、玄武岩砾石等小颗粒材料在填充床高温储热系统中的应用,证实粒径≤2mm的小颗粒储热介质能形成陡峭温跃层、储放热性能优异;Davenport等<sup>[30]</sup>针对α-石英型硅砂颗粒开展系统的热稳定性研究,结果表明硅砂在1200℃下500h长期恒温以及300-1200℃热循环工况中,粒径分布变化微弱、无明显烧结团聚,晶体结构仅发生微量晶相转变,加之其储量丰富、成本低廉,综合性能优异,是适用于大规模、经济高效型高温颗粒储热系统的理想固体储热介质;清华大学与鄂尔多斯实验室魏飞、白丁荣团队<sup>[31]</sup>研发“沙子热力电池”储热装置,该装置通过开发沙子高温储热技术路线,沙子储能密度是传统熔盐的3倍,成本仅为其三分之一,有助于解决高温储热成本高、稳定性差等问题。

### 1.1.2 人工合成高性能储热材料

人工合成高性能储热材料通过人工制备实现高性能，典型代表有SiC陶瓷、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷、高温混凝土及复合型的储热介质等。与天然矿物颗粒形成互补，这类材料适配对温度、传热效率及稳定性要求严苛的高温场景，并且核心优势各有侧重，SiC和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷导热系数高、比热容大、储热效率高且耐高温烧结；高温混凝土抗热震性优异、储热密度高，属于再生建筑材料；复合型储热材料通常兼具多种优异性能。人工合成材料整体具备耐高温性能优异的特点，长期使用温度≥1200℃，部分可在1500℃以上极端高温运行<sup>[32]</sup>，一定程度上解决了天然矿物高温烧结的痛点，且陶瓷材料化学稳定性与力学强度高，在高温氧化环境下不易变质、颗粒磨损率低，能保障系统长期稳定运行，其中SiC陶瓷最高使用温度可达1400℃，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷为1100-1200℃，高温混凝土约800℃；北京工业大学桑丽霞团队<sup>[33]</sup>就陶瓷类材料开展研究，测试分析了三种陶粒砂的储热、光吸收性能与热稳定性，经铜铬黑表面改性后，其太阳光加权吸收比均达0.9以上，改性陶粒砂也更适合作为太阳能发电的固体蓄热介质；Yang等<sup>[32]</sup>设计制备了陶瓷-碳复合导电陶瓷复合材料，可实现最高1936℃直接自加热，在500-1630℃下完成750次热循环无性能衰减，其中SiC+Gr综合性能最优，兼具高能量密度与优异热稳定性。此外，众多学者通过掺杂等方式，制备出多种复合型储热材料，如Xu等<sup>[34]</sup>制备了Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO掺杂镁橄榄石基光热吸收-储热一体化陶瓷，在1540℃、配比8:2时太阳吸收率93.80%，1000℃时储热密度1516.71 kJ/kg，经30次热震后抗弯强度提升70.6%，兼具高吸光、高储热密度与优异抗热震性；Feng等<sup>[35]</sup>通过溶胶-凝胶法制备Fe/Mn/Zr三元掺杂的CaO基储热载体，解决纯CaO基材料太阳光吸收弱、高温易烧结衰减的问题，所得Ca<sub>100</sub>Fe<sub>12</sub>Mn<sub>6</sub>Zr<sub>10</sub>样品平均太阳光谱吸收率达51.42%，10次循环后储热密度为1549.04 kJ/kg且保持97.24%的初始性能；Li等<sup>[36]</sup>采用模板金属盐共沉淀法制备Mn、Zr共掺杂的3DOM结构CaCO<sub>3</sub>纳米材料，最优样品3DOM-Ca<sub>80</sub>Mn<sub>10</sub>Zr<sub>10</sub>太阳吸收率达74.1%、初始储热密度1706.4 kJ/kg，125次循环后储热密度损失低于6.0%且保持1600 kJ/kg以上，DFT计算证实Mn与Zr共掺杂可

显著增强CaO纳米颗粒抗烧结能力。虽然人工合成的储热介质具有诸多优势，但这类材料存在制备工艺复杂、循环稳定性有待提升的问题，且SiC陶瓷和复合型材料成本远高于天然矿物颗粒，经济性短板更是成为制约其工业化推广应用的核心瓶颈<sup>[37]</sup>。优化制备工艺、采用低成本原料、提高生产效率以降低成本，是当前该类材料的主要研究方向。

### 1.1.3 工业固废衍生储热材料

以工业生产废弃物为原料，典型代表包括钢渣/赤泥、气化粗渣、粉煤灰/半焦，经资源化改性处理制备而成，兼具低成本与环保双重优势，契合循环经济与“双碳”战略目标。该类材料成本低、来源广泛、属于固废资源高值化利用，能够大幅降低储热材料的整体造价。Gutierrez等<sup>[38]</sup>探讨了多种工业废料和副产品如含石棉废料、粉煤灰、钢渣等，指出此类废料资源化利用具有环境、经济和社会效益；钢渣、矿渣等原料富含Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO等耐高温氧化物，经高温烧结改性后热稳定性优异，Wang等<sup>[39]</sup>研究探讨了转化钢渣作为储热材料的适用性，开发Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>改性工艺，经测试，SMS-35在200个热周期后仍保持良好稳定性，400-900℃范围内等效比热比钢炉渣高出25.32%、500℃时热导率提升32.7%，成为集中太阳能和工业废热回收系统的潜力储热材料，同时助力解决中国钢渣年产量有效利用率不足30%的问题；Koçak等<sup>[40]</sup>将建筑拆除废弃物经破碎、筛分、干燥、混合预处理后制成均质粉体，通过一系列表征证实该废弃物可在700℃内安全用作显热储热材料，机械强度与循环稳定性满足工业太阳能高温储热要求，是低成本、资源化、可持续的显热储热优选材料。中国科学院工程热物理研究所多种颗粒为储热介质，开展储热中试试验并实现高温储存与稳定投放的过程控制，验证了沙子、焦粉和灰等颗粒储热介质的实际可行性，也为燃煤电厂利用自身固废制备储热介质，实现“以废治废”与灵活调峰双重目标提供了全新路径。

为了更直观地对比，表2汇总了2.1小节提到的三类固体颗粒储热材料的特性：

基于表2可以发现，目前，固体颗粒储热介质品类丰富，部分天然介质成本低廉，但综合储热性能优异的人工合成材料普遍存在制备工艺复杂、生

表2 储热材料及特性  
Table 2 Thermal storage materials and their characteristics

| 材料类别                       | 典型代表  | 比热容<br>(kJ/(kg·K)) | 热导率<br>(W/(m·K)) | 核心优势                   | 温度极限(°C)                  | 成本            | 局限性                               |
|----------------------------|---|--------------------|------------------|------------------------|---------------------------|---------------|-----------------------------------|
| 天然廉价矿物颗粒                   | 石英砂   | 1.2                | 0.48             | 来源广泛、价格低廉、热稳定性好、无毒环保   | 1200 <sup>[30]</sup>      | 几乎无需预处理       | 导热系数较低、高温时易烧结、破碎                  |
|                            | 玄武岩   | 0.85               | 2.1              |                        | 700 <sup>[41]</sup>       | 易获取           | 比热容偏低、热导率较低                       |
|                            | 普通沙子  | 0.92               | 0.27-0.58        |                        | 1000                      | 易获取           | 含杂质多、CaCO <sub>3</sub> 杂质高温易分解    |
| 人工合成的高性能储热材料               | SiC陶瓷   | 1.15               | 83               | 导热系数高、比热容大、储热效率高、耐高温烧结 | 1400 <sup>[41]</sup>      | 成本高           | 陶瓷颗粒耐磨性待提升、制备工艺复杂                 |
|                            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷                                 | 0.76               | 33.4             |                        | 1100-1200 <sup>[41]</sup> |               |                                   |
|                            | 高温混凝土   | 0.84               | 1.7-2.3          | 抗热震性优异、储热密度高、再生建筑材料    | ~800                      | 处于中低水平        | 导热系数较低、高温易出现体积膨胀、开裂               |
|                            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CuO 掺杂<br>镁橄榄石基陶瓷 <sup>[34]</sup> | 1.56               | 3.82             | 高吸光、高储热密度与优异抗热震性       | 1100                      | 成本中高          | 工艺复杂、需严格控制配比                      |
| 工业固废衍生储热材料 <sup>[42]</sup> | 钢渣、赤泥   | 0.877              | 1.46             | 低成本、资源化利用、来源广泛         | >1000                     | 工业副产品，回收利用成本低 | 成分复杂、热稳定性不均、热导率较低 <sup>[42]</sup> |
|                            | 高炉渣   | ~1.0               | 0.8-1.5          |                        | <1000                     |               | 高温时颗粒轻微团聚 <sup>[43]</sup>         |
|                            | 锅炉底渣  | 1.1                | ~0.5             |                        | 1000                      |               | 体积储能密度略低于高炉渣                      |
|                            | 煤矸石   | 0.85               | 0.3-0.9          |                        | <1000                     |               | 颗粒破碎现象较明显                         |
|                            | 热焦粉   | 0.8-1.0            | ~0.6             |                        | ~700 <sup>[44]</sup>      |               | 高温易氧化/烧结                          |

产成本偏高等问题；与此同时，超高温环境下介质的结构稳定性与热循环耐久性仍是主要技术瓶颈。未来应持续优化工业固废改性路线，开发低成本高性能颗粒制备技术，提升材料热导率、储能密度等关键性能，突破传统材料传热受限的问题。

## 1.2 反应器研究进展概述

固体颗粒储热系统的运行效率与颗粒流动特性密切相关，颗粒的流动形式直接决定了系统内热量传递的速率、均匀性及稳定性，因此成为区分不同储热技术类型的核心依据<sup>[20]</sup>。根据颗粒的流动形式，可以将固体颗粒储热技术类型分为固定床、移动床和流化床。

### 1.2.1 固定床反应器

当前，固定床式储热系统凭借结构简单、传热面积大等显著优势，已成为储热技术领域的主流技术路径之一<sup>[45]</sup>。其中，垂直填充床设计因可通过重力驱动颗粒流动，高效实现热量的存储与释放，在实际场景中应用最为广泛。固定床储热系统示意图如图3所示。目前，对填充床储热技术的研究主要聚焦于三大方向，即传热与压降的相关性及结构优化、堆积材料物理特性探究、数值模型构建，相关研究均围绕提升系统储热性能展开<sup>[10]</sup>。赵港归等<sup>[46]</sup>

针对高温固体颗粒填充床这一研究重点，采用局部非热平衡模型模拟床内气固对流换热过程，系统探究了岩石、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiC三种颗粒材料，以及600K、900K、1200K三种储热温度，对床层温度分布、压力损失、蓄热效率等核心性能的影响，研究结果表明，SiC填充床的综合性能最优，且储热温度的提升能显著改善填充床的储热相关性能；与之对应，Jin等<sup>[47]</sup>聚焦填充床感热储存(SHS)系统，针对系统效率优化这一核心目标，基于微观输运方程开发出宏观熵及充能传输方程，通过第二定律分析(SLA)精准识别出罐内温跃层附近的内部损失与罐表面损失，进而对颗粒尺寸、罐体宽高比及形状进行优化，最终使系统振能损失系数从4.9%降至4.1%，证实了SLA结合能量分析的方法可以有效地提升填充床SHS系统的运行效率；中国科学院工程热物理研究所陈海生等人<sup>[48]</sup>针对聚光太阳能发电场景，以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒为储热介质、T66导热油为传热流体，通过兆瓦级实验与一维三相瞬态模型，揭示了喷淋式填充床“储热-存储-释热”全周期的持液率变化规律，经灵敏度分析明确充电比例、充释热温度与流量等参数对系统能效、储能密度的影响，证实该技术相比传统储热方案兼具低成本与高

效率优势。

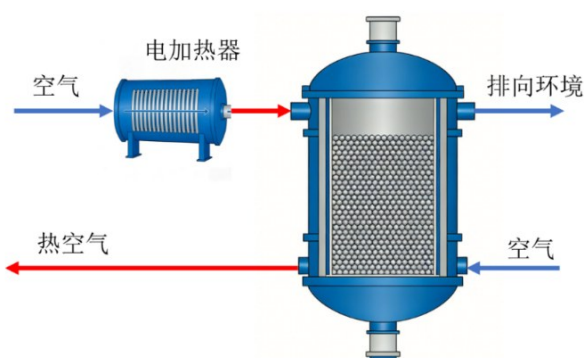


图3 固体颗粒固定床储热系统示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of a solid particle fixed-bed thermal energy storage system

### 1.2.2 移动床反应器

受颗粒流动特性影响，移动床换热器相较固定床更易从颗粒储热材料中提取热能，颗粒物依靠重力垂直移动，与工质完成直接或间接换热，其储热系统示意图如图4。目前移动床换热器的传热表面布置以管壳式、管板式为主，相关研究多聚焦于结构优化、数值模拟，以及颗粒流与传热面的传热特性等。Hertel等<sup>[49]</sup>针对水平管结构移动床热交换器，通过开发探针获得管周局部传热系数实验结果，经实验验证该模型预测的传热系数与实验数据高度吻合，面积加权传热系数误差率低于3%；Guo等<sup>[50]</sup>针对移动床对齐管组开展冶金炉渣颗粒流传热实验，发现慢流态下流量对传热系数影响显著，颗粒平稳混合可强化传热、局部滞后会加剧管周传热，该模型对解释移动床管组周围颗粒流传热极具潜力；Mishra等<sup>[51]</sup>构建了壳板移动床运转/换热器开发耦合传输现象与反应动力学的二维连续热质传递模型，研究发现该模型下移动床的换热效率远优于仅SHS的设计，优化后其热传递速率可大幅提升，模型对移动床的高压设计、放大及工况优化具有重要价值。

### 1.2.3 流化床反应器

流化床是一种可使固体颗粒在气流作用下呈现类流体状态的高效气固接触技术，长期应用于化学反应器与燃烧锅炉等设备，能够显著强化气固直接接触与反应过程。与传统填充床、重力驱动移动床相比，流化床内颗粒处于持续流化运动状态，可大幅提升颗粒与传热表面之间的换热强度，具有更高

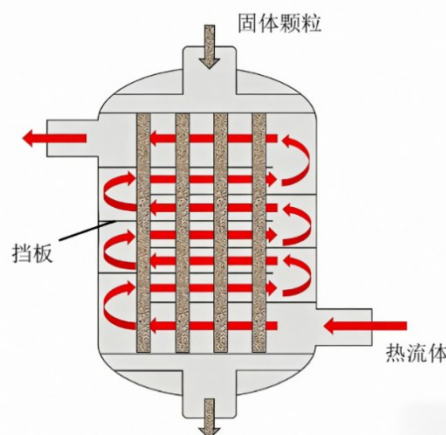


图4 固体颗粒移动床储热系统示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of a solid particle moving-bed thermal energy storage system

的传热系数和更均匀的床层温度分布，从而有效提升反应效率与系统运行稳定性。图5为固体颗粒流化床储热系统示意图，该系统依托流化床优异的传热与流动特性，实现了固体颗粒的高效储热与放热，为热能的高效储存、传输及利用提供了可靠的技术方案。Ma等<sup>[52]</sup>研发出一款新型直接空气-颗粒接触式逆流加压流化床换热器，该设备可将加压空气加热至接近热颗粒的入口温度，同时省去传统换热器中造价高昂的传热界面结构，实现成本降低与性能提升的双重效果；Li等人<sup>[53]</sup>结合CFD-DEM与马尔可夫链统计模型开发了流化床颗粒运输模型，所构建的二维动态传热模型与实验结果高度吻合，为流化床耦合传热与化学反应的建模奠定了基础。

随着我国工业节能减排与绿色低碳转型战略的持续深化推进，流化床技术凭借优异的传热传质性能与高温适应性，在小粒径颗粒高温热量回收场景中展现出突出技术优势，有望快速实现商业化落地与规模化工业应用。

为更清晰地阐述固体颗粒储热反应器的相关特性，本文将固定床、移动床和流化床主要特点汇总如表3所示：

整体来看，三种反应器在结构形式、运行方式上的差异直接决定了其适用规模与温度区间，且各类床型在综合性能上各具优劣、难以兼顾：固定床稳定性最优但传热效率最低，流化床传热效率最高但流动控制与运行稳定性较差，移动床则介于二者之间，而颗粒团聚结块、流体分布不均、传热性能衰减等问题普遍存在，成为制约各类床型储热效率

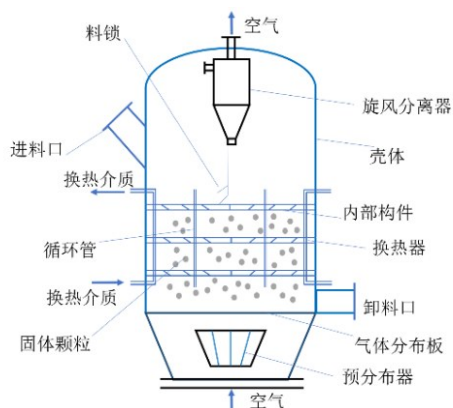


图5 固体颗粒流化床储热系统示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of a solid particle fluidized-bed thermal energy storage system

提升与长期可靠运行的共性关键难题。

## 2 燃煤电厂机组深度灵活调峰研究概述

### 2.1 煤粉锅炉深度灵活调峰

在“双碳”目标引领的能源低碳转型背景下，燃煤电厂作为传统化石能源系统处于深刻的技术变革时期。面对风电、光伏等不稳定可再生能源在电网中占比的持续攀升，电力系统对灵活性调节能力和新能源消纳水平的要求日益严苛。目前，燃煤机组作为保障电网稳定运行的核心调节电源，其参与深度灵活调峰的能力直接决定了电网对风电、光伏等波动性清洁能源的消纳水平<sup>[55]</sup>，然而我国多数燃煤机组的深度灵活调峰能力仍受到诸多技术瓶颈限制。

具体而言，燃煤电厂存在快速变负荷和深度调峰能力不足的问题<sup>[56-57]</sup>。首先，机组负荷的响应速

率难以匹配电网的调度需求，核心是锅炉燃烧系统响应滞后于汽轮机发电系统，且燃料调控存在固有时间差、锅炉热惯性易引发参数波动，需限制负荷变化速率；而且，在深度调峰的低负荷工况下，炉膛燃烧强度随之降低，不仅易引发火焰中断，甚至灭火、爆燃等燃烧故障<sup>[58]</sup>，进而导致水冷壁流动不稳、结焦乃至熄火等设备安全风险<sup>[59]</sup>，还会直接造成燃烧效率下降、能耗攀升，同时脱硝系统因烟气温度达不到工艺要求，引发 $\text{NO}_x$ 排放超标等环保问题<sup>[60]</sup>。

燃煤机组调峰手段主要包括锅炉出力调节、汽轮机旁路控制以及启停调峰等方式<sup>[61]</sup>，为进一步提升调峰灵活性与适配性，现有研究提出了多种调峰技术路径并进行了工程验证。例如，锅炉燃烧系统的适应性改造被视为基础性措施，包括采用新型低氮燃烧器<sup>[62]</sup>、富氧燃烧<sup>[63-64]</sup>、等离子或微油点火助燃技术<sup>[65]</sup>等，以增强煤粉着火稳定性并拓宽燃烧负荷范围；在此基础上，吕清刚团队<sup>[66]</sup>创新性地提出预热燃烧调峰技术，该技术是将粉煤送入基于循环流化床原理、可实现温度自持的预热燃烧器，经部分燃烧放热升温至 $800^\circ\text{C}$ 以上完成燃料改性，形成含煤气和高活性半焦的高温气固混合燃料，为燃煤机组深度调峰提供了全新的高效解决方案。

#### 2.1.1 煤粉锅炉快速深度调峰技术研究进展

为解决煤粉锅炉深度调峰时负荷响应速率慢的问题，学界围绕不同技术路径开展了针对性研究，各团队通过搭建适配试验平台、优化控制策略等方式，在变负荷速率等核心指标上取得了一定的进展，推动了我国燃煤电厂快速深度调峰的进程。具体研究成果汇总如下表4所示：

表3 高温固体颗粒储热反应器对比

Table 3 Comparison of high-temperature solid particle thermal energy storage reactors

| 构型  | 原理                                     | 应用场景                               | 优点  | 现存问题   |
|-----|--|------------------------------------|---|--|
| 固定床 | 气体或液体在堆积的固体颗粒间孔隙穿过并发生热化学反应             | 中低温储热、分布式光热发电、工业窑炉余热梯级利用、小型供暖系统的储热 | 结构简单、成本低、操作便利<br>结构简单、造价低、无颗粒流失/磨损问题，运行稳定性高 | 储热容量有限，材料易团聚、结块，导致气体流动不均匀、传热性能下降、固定床温度分布不均、烧结问题      |
| 移动床 | 固体颗粒状由反应器顶部连续输入，并随着反应的进程向下迁移，最终自底部持续输出 | 大规模系统、大型光热电站的储热系统                  | 成本低、结构紧凑、运行稳定，潜力大                           | 反应过程中易团聚、结块，导致内部流动下降、储热效率低                           |
| 流化床 | 通过流体使固体颗粒悬浮并呈现类似流体                     | 中高温、大型火电厂的调峰储热、集中式光热发电的大容量储热       | 反应速率和传热性能高、结构适应性强                           | 沟流、返混现象，颗粒的积累导致材料堵塞和热传递不均，降低循环稳定性 <sup>[20,54]</sup> |

表4 关于煤粉锅炉提高负荷响应速率的研究进展

Table 4 Research progress on improving load response rate of pulverized coal boilers

| 学者                     | 技术类型                | 平台                   | 调峰性能指标   | 技术核心优势/成果   |
|------------------------|---------------------|----------------------|--|---|
| 吕清刚等 <sup>[67]</sup>   | 煤粉自预热技术             | kW级                  | 25% 负荷下点火燃烧性能优异；负载变化率最高达 3.30 %/min                              | 25%-100% 及 50%-75% 负荷转换响应良好，为燃煤机组深度灵活调峰提供支撑   |
| 王学斌等 <sup>[68]</sup>   | 煤粉预气化强稳燃技术(快速调峰燃烧器) | 5MW 热态中试             | 9% 超低负荷可长期稳定燃烧；15% -100% 负荷区间，降负荷速率 10.63 %/min、升负荷速率 9.44 %/min | 煤粉预热后低负荷稳燃效果好，变负荷时炉内燃烧稳、温变快，调峰速率优。  |
| Chen 等 <sup>[69]</sup> | 数据驱动给水主动调节新型控制      | 330MW 亚临界火电机组        | 升负荷最大 2.5 %Pe/min、降负荷最大 3.0 %Pe/min                              | 通过 DCS 全厂大数据分析实现偏差前馈，有效增强机组深度调峰的运行灵活性   |
| Ji 等 <sup>[70]</sup>   | 动态热流法相变实时建模+模型预测控制  | 600MW 超临界火电机组        | 最高负荷变化率可达 1.2 %Pe/min  | 保障机组安全的同时，提升直流、循环及过渡模式下的负荷变化率   |
| 董珍珠 <sup>[71]</sup>    | 多蓄能协同调度控制           | 600MW 亚临界火电机组        | 机组实际负荷响应速率达 4.9 %Pe/min、响应时间缩短至 15s                              | AGC 响应能力与运行安全性、经济性提升，年直接经济收益超 2000 万元   |
| Liu 等 <sup>[72]</sup>  | 含再循环系统的动态建模+干湿态控制优化 | 660MW 超临界燃煤电厂        | 湿干态转换负荷升速率从 0.5 %Pe/min 提升至 2.0 %Pe/min                          | 明确湿干态转换安全边界，优化水、燃料供给控制，可实现安全快速转换  |
| 丁湧 <sup>[73]</sup>     | 锅炉低负荷稳燃+燃烧优化+脱硝协同   | 1000MW 超超临界对冲燃煤锅炉    | 深度调峰 34% 额定负荷；SCR 入口烟温 320~350℃                                  | 实现 34% 额定负荷长期稳燃；锅炉热效率提升 0.94%，供电煤耗降 3.27 g/kWh；NO <sub>x</sub> 控制在 180~260mg/m <sup>3</sup> |
| 李炜 <sup>[74]</sup>     | 深度调峰工况下一次调频建模与仿真    | 1000MW 超超临界机组 DEH 系统 | 30% THA、45% THA 工况下，功率偏差≤允许值，峰值时间偏差≤0.1s，调节时间偏差≤2.0s             | 建立非线性的电液伺服模型与变参数汽轮机模型，模型误差随负荷点变化，大范围深调区间精度与一致性较好  |

现有研究围绕燃煤机组深度调峰已形成燃烧强化、系统控制、蓄能协同、多目标优化等多条技术路线，且在不同机组容量与试验平台上均取得了显著的调峰性能提升。综合来看，当前燃煤调峰技术已从单一燃烧优化转向机炉电协同、多系统耦合兼顾的精细化调控方向，但现有成果多集中于特定技术环节或单台机组验证，不同技术间的耦合适配性、全工况动态建模精度以及大规模工程推广后的长期可靠性仍有待进一步深化，以支撑新型电力系统下燃煤机组更高比例、更安全高效的深度灵活调峰需求。

### 2.1.2 煤粉锅炉低负荷稳燃技术研究进展

针对燃煤锅炉低负荷运行期间的稳燃难题，诸多科研团队从燃烧器改造、运行参数优化、机组系统耦合等多个维度开展了大量实验与数值模拟研究，提出了多种可行技术路径，为锅炉低负荷稳定运行提供了有力支撑。表5总结了近年来煤粉锅炉低负荷稳燃相关的研究进展。

从表5中可以看出，目前的研究主要围绕锅炉燃烧器优化、运行参数调控及多系统耦合适配等方向开展燃煤机组深度调峰攻关，研究对象覆盖中小负荷工况、大型电站锅炉以及热电联产机组，形成

了较为系统的超低负荷稳燃技术体系。但在深度变负荷过程中的燃烧动态特性、热偏差控制及长期运行可靠性方面仍缺乏系统性研究，未来需进一步发展多目标协同的一体化调控技术，以满足新型电力系统对燃煤机组灵活深度调峰的要求。

### 2.2 CFB 锅炉深度灵活调峰研究

CFB 锅炉因燃料适应性广、低负荷稳燃性强等优势，具备深度调峰与极低负荷运行的突出潜力，是煤电深度调峰的重要技术载体，近年来，得到了迅速发展和广泛应用<sup>[81]</sup>。中国科学院工程热物理研究所深耕 CFB 锅炉耦合预热改性燃料燃烧深度调峰技术，取得重大进展。其技术路线如图6所示。朱建国等<sup>[82-84]</sup>采用床下给煤与炉膛中部喷入 800℃ 以上预热改性燃料的供给模式，预热燃烧器给煤热功率占锅炉负荷 25% 以适配超低负荷运行。并创新性地提出“C 构型”温度分布理念，通过底部颗粒煤与上部预热改性燃料耦合燃烧，解决常规锅炉低负荷主蒸汽温度不足问题，同时经燃料氮预脱除及 NO<sub>x</sub> 均相、异相还原实现深度脱氮。该技术在 240 t/h 锅炉上验证，负荷调节深度从 50% 降至 20%，35%-70% 负荷零喷氨超低 NO<sub>x</sub> 排放，20% 负荷热效率 91.09%、变负荷速率超 2.5%/min；刘

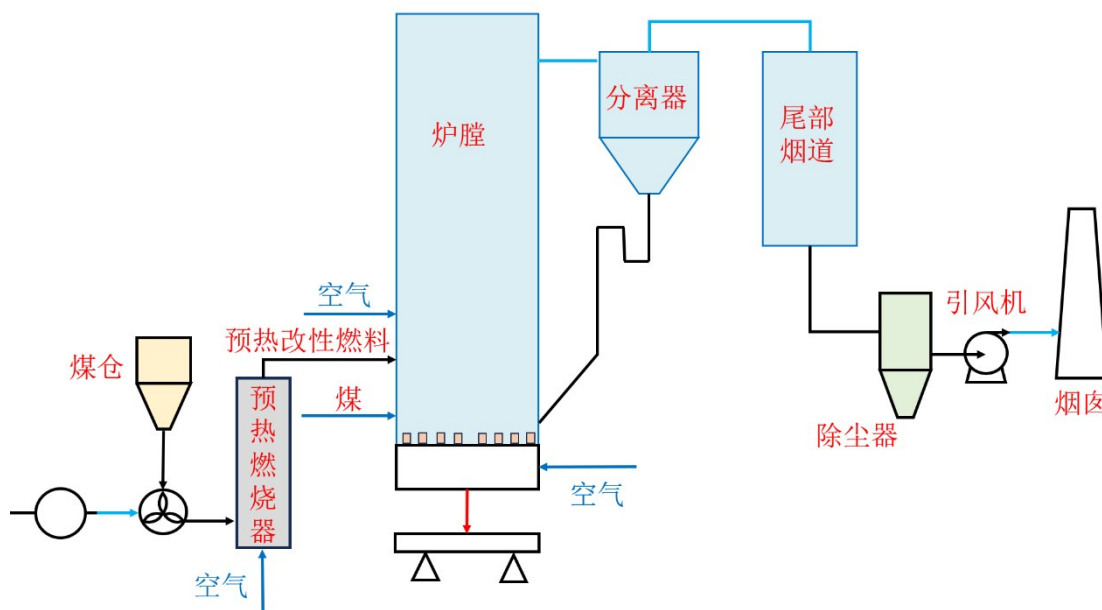
表5 煤粉锅炉低负荷稳燃的研究进展

Table 5 Research progress on low-load stable combustion of pulverized coal boilers

| 学者                    | 研究对象             | 核心技术                           | 负荷范围                      | 关键成效  |
|-----------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------|---|
| Wang等 <sup>[75]</sup> | 新型旋流燃烧器的下燃锅炉     | 偏心二次风布置的新型旋流燃烧器                | 30%负荷、90-100MW超低负荷        | 提升拱下回流区高温烟气回流、煤粉浓度及气流下行深度, 实现稳定燃烧           |
| 李争起等 <sup>[76]</sup>  | 燃烧器              | 新型深度调峰燃烧器(可灵活调控回流区形态与尺寸)       | 15%-30%额定负荷               | 无需辅助手段实现劣煤稳定燃烧, 3%/min升负荷速率下仍稳定, 适配性与稳燃能力提升 |
| Tang等 <sup>[77]</sup> | 600MW电站锅炉        | 自持式内燃燃烧器改造                     | 30%-48%额定连续出力             | 烟气射流刚性增强、流速翻倍, 30%MCR时火焰形态完整, 燃烧稳定性显著提升     |
| 金保昇等 <sup>[78]</sup>  | 1000MW超超临界双切圆锅炉  | 二次风富氧参数优化(35%富氧浓度、开启一层CD层富氧风口) | 30%额定负荷                   | 提温稳燃, NO <sub>x</sub> 排放无明显升高, 实现超低负荷不投油稳燃  |
| 闫超等 <sup>[79]</sup>   | 广东省内某600MW机组燃煤锅炉 | 滑参数降负荷方式                       | 30%额定负荷                   | 稳定运行, 热效率达90.10%, 提供低负荷运行控制实测参考             |
| 周霞等 <sup>[80]</sup>   | 热电联产机组           | 与蒸汽压缩储热系统耦合                    | 供电功率从50%额定负荷降至35%以下(保障供热) | 综合热效率提升7.38%, 解决供热约束下低负荷稳燃问题                |

敬樟等人<sup>[44]</sup>开展了高温焦粉颗粒物理化学储热调峰关键技术开发和中试验证, 获得了储热最高温度674℃, 储热量96.6 MJ, 体积储热密度497.9 MJ/

m<sup>3</sup>, 最大储热调峰速率为5.09%/min, 支撑了循环流化床高温颗粒储热调峰技术发展及工业储热应用。

图6 循环流化床锅炉深度灵活调峰技术路线<sup>[82]</sup>Fig. 6 Technical route of deep flexible peak regulation for circulating fluidized bed boilers<sup>[82]</sup>

为进一步解决CFB机组调峰过程中的负荷响应、安全运行、效率优化等核心难题, 学者也开展了多维度、针对性的研究探索。表6系统梳理了近年来CFB锅炉调峰相关的代表性研究成果:

综上, CFB锅炉具备显著的深度调峰优势, 是煤电深度调峰的重要技术载体。相关研究已证实其

具备快速变负荷潜力, 对推动超低负荷运行、污染物控制等问题的深化研究具有积极意义。

但是CFB锅炉深度调峰运行期间, 受结构构型与气固流态化运行机理的限制, 主要表现在流动惯性、传热惯性、反应惯性及NO<sub>x</sub>排放特性难题, 多因素间复杂的耦合作用, 严重制约了CFB锅炉

表6 CFB锅炉深度灵活调峰研究进展

Table 6 Research progress on deep flexible peak regulation of CFB boilers

| 研究团队                   | 研究平台   | 核心研究内容   | 关键成果/结论  |
|------------------------|--|--|--|
| Huang等 <sup>[85]</sup> | 30 kW 试验平台   | 探究新型煤粉预热技术, 分析燃料特性                                     | 调峰速率3.75 %/min, 实现18%超低负荷稳定燃烧                                  |
| 朱建国等 <sup>[86]</sup>   | 兖州市银河电力240 t/h循环流化床锅炉(耦合2支24 MW <sub>th</sub> 煤粉流态化自预热器) | 20%、25%超低负荷下耦合煤粉预热的燃烧、温度、排放及效率特性                       | 锅炉实现20%、25%超低负荷稳定高效运行, 燃烧效率超98.7%, 炉内喷氨即达成NO <sub>x</sub> 超低排放 |
| Hu等 <sup>[87]</sup>    | 135 MW亚临界CFB锅炉   | 验证动态模型准确性, 模拟负荷响应                                      | 气固两相流惯性为是变负荷传热与燃烧的核心影响因素                                       |
| 聂浩等 <sup>[88]</sup>    | 300 MW亚临界循环流化床锅炉   | 理论分析与现场试验, 揭示变负荷机制                                     | 负荷升降速率4%-9 %Pe/min   |
| Chen等 <sup>[89]</sup>  | 300 MW亚临界自然循环CFB锅炉                                       | 建立水动力计算模型, 探究宽负荷水动力特性                                  | 明确低负荷水动力变化规律, 为超低负荷安全运行提供参考                                    |
| Yu等 <sup>[90]</sup>    | 330 MW亚临界CFB机组(配SNCR脱硝和炉外湿法脱硫)                           | 基于CNN-BiLSTM-Attention建模, 结合改进的量子遗传算法实现多目标优化, 验证不同工况性能 | 运营成本降低1.82%-3.2%, 热效率提升0.72%-1.07%, 污染物排放成本大幅下降                |
| Zhao等 <sup>[91]</sup>  | 350 MW循环流化床锅炉机组  | 提出机理建模与数据驱动校正混合模型及优化策略                                 | 稳态误差<1.5%、动态偏差<10%, 平均变负荷率提升约20%                               |
| Guo等 <sup>[92]</sup>   | 350 MW超临界CFB热电联产机组                                       | 提出四类储能评估方法与量化模型, 分析协同效果                                | 实现90%额定负荷变化, 缩短变负荷时间7.4 min                                    |

变负荷速率, 削弱了其低负荷运行稳定性<sup>[93]</sup>。现有技术方案难以实现锅炉变负荷响应速率与燃烧运行稳定性的协同提升, 未来需要通过多技术路径的综合优化, 全面改善锅炉深度调峰综合性能, 为循环流化床锅炉在新型电力系统下开展灵活深度调峰运行提供理论支撑与技术方案。

### 3 国内外典型高温固体颗粒储热技术

在“双碳”战略持续推进的政策背景下, 高比例新能源接入对电力系统调节能力提出了更高要求<sup>[94]</sup>。燃煤机组通过耦合储热技术开展灵活性改造, 已成为支撑新能源消纳的关键调节资源。总体来看, 我国燃煤电厂深度调峰技术已取得显著突破, 而高温固体颗粒储热作为一种重要的耦合技术, 正为技术升级与低碳转型提供有力支撑, 进一步拓宽燃煤机组深度调峰的潜力。

通过在传统燃煤电厂机组中增设高温颗粒储热系统, 可在机组高负荷富余电能时段, 利用电加热装置将余电转化为热能, 储存于沙子、粉煤灰或半焦等低成本固体介质中; 当电网存在调峰需求时, 释放储存的热量用于锅炉给水加热、空气预热或驱动辅助发电设备, 既能有效降低机组最小技术出力, 又能提升调峰响应速度。相较于传统熔盐储热, 高温固体颗粒储热系统经济性突出<sup>[95]</sup>, 而且固体颗粒材料具备成本低、耐高温、环境友好等显著

优势, 可大幅提升储热系统的温度等级与焓效率, 更能满足电厂余电大规模、低成本储存的实际需求, 为燃煤机组深度调峰与新能源协同发展提供了高效可行的技术路径。

近年来, 国内外围绕该技术的材料创新、系统优化与场景适配, 落地了一批从兆瓦级中试到十万千瓦级示范的标杆项目, 覆盖区域供热、工业用热、电力调峰等多元场景, 为技术规模化商业化奠定了坚实基础。

#### 3.1 国外典型高温固体颗粒储热技术

国际项目聚焦长时储能与低碳转型的重要需求, 以技术原理验证与场景落地验证为主要推进方向。在工业供能、城镇供暖、太阳能发电配套等多元应用场景中形成了特色鲜明的示范成果, 覆盖沙基、陶瓷、耐火材料等多种储热介质, 包含从实验室级到工业级的不同规模技术方案, 具体信息如表7所示, 图7-10为对应的部分系统图。

由表7可知, 国外固体颗粒储热项目已形成材料多元化、场景精准化的发展格局, 整体从实验室验证快速迈向工业示范与商业化运行, 技术路线清晰且工程落地能力突出。在储热介质上, 覆盖普通沙、皂石、天然卵石、铝土矿、再生陶瓷、专用陶瓷颗粒等低成本天然材料与高性能人工颗粒, 兼顾经济性与高温适用性; 系统形式以绝缘筒仓、垂直/水平填充床、壳管式换热器为主, 适配工业供热、建筑供暖、光热发电、高温余热回收等多元场

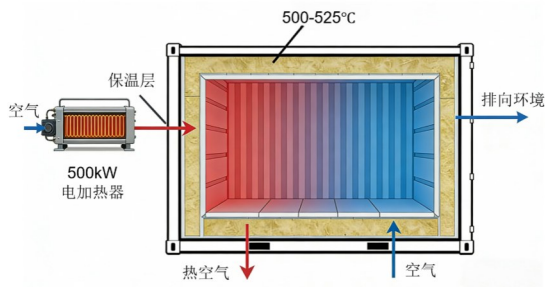
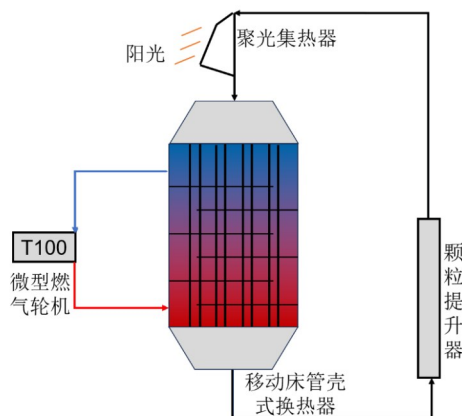
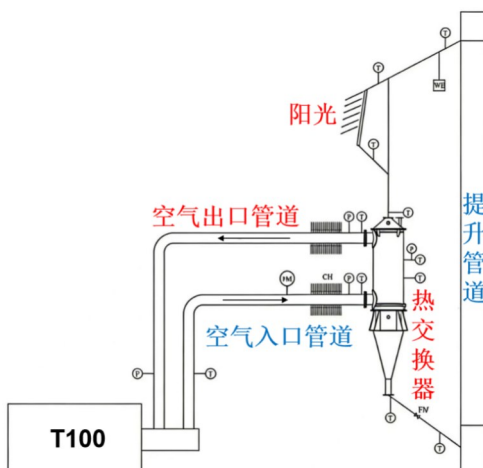
表7 国外典型高温固体颗粒储热技术

Table 7 Typical international high-temperature solid thermal energy storage devices and projects

| 研究团队   | 项目地点                          | 项目规模   | 核心设备                                 | 储热介质             | 功能   | 效果  | 项目状态  |
|--|-------------------------------|--|--------------------------------------|------------------|--|---|---|
| TheStorage <sup>[96]</sup>                                     | 芬兰某啤酒厂                        | 充电功率1-20 MW, 储能容量20-500 MWh  | 两个绝缘筒仓、电加热器、热交换器                     | 普通沙子             | 将可再生电力转化为800℃高温热能储存, 按需以蒸汽或导热油形式释放, 为工业生产供能                | 最高降低工业能源成本70%, 减少碳排放90%; 传热效率比传统静态储热系统最高提升十倍, 可快速适应工业需求变化   | 2026年1月安装首个工业规模试点系统, 处于真实生产环境验证阶段                         |
| Polar Night Energy <sup>[97]</sup>                             | 芬兰南部城镇波尔奈宁                    | 储能容量100 MWh(一次储存量)   | 绝缘筒仓, 可容纳2000吨沙状皂石                   | 沙状皂石             | 满足当地城镇冬季近一周供暖需求  | 循环能效80%, 最高储热温度400℃, 热量损失10%<br>-15%; 每年减少供暖系统等效碳排放约160吨, 助力该地区供暖排放削减近70%   | 2024年7月打造, 全球最大沙基电池示范项目, 已建成, 全面投运后稳定发挥供暖与减碳作用            |
| Eco-Tech Ceram <sup>[98]</sup>                                 | 法国                            | 充电功率300kW <sub>in</sub> , 放电功率350 kW <sub>in</sub> , 储能容量1.9 MWh <sub>in</sub> | 水平容器化填充床, 配备电加热器、风机、热交换器及200mm耐火砖保温层 | 铝土矿陶瓷碎块          | 回收工业中高温余热(最高525℃), 通过空气作为传热流体实现充放热循环, 为工业过程供能              | 热源回收率最高达90%, 无沟流效应, 径向热梯度温和   | 完成500小时实验测试, 技术通过工业规模验证, 未来计划向1000℃以上高温应用拓展               |
| Solex Thermal Science Inc <sup>[99]</sup>                      | 沙特阿拉伯利雅得国王大学                  | 热负荷50 kW <sub>in</sub>   | 壳管式结构, 垂直管内填充, 配备顶部进料斗、底部质量流排放锥及多个挡板 | Carbobead CP陶瓷颗粒 | 集成于粒子基聚光太阳能发电(PBCSP)设施, 实现固体颗粒与加压空气间的热量交换, 为T100微型燃气轮机循环供能 | 换热器效能最高达0.976; 空气侧压力降低仅约5 kPa, 热损失<3%   | 完成稳态测试和部分日照测试, 测量数据准确可重复, 未来计划通过控制定日镜数量实现更高温(>650℃)下的稳态运行 |
| Ceramic Materials Limited、马德里理工大学 <sup>[100]</sup>             | 西班牙马德里理工大学TE4 S实验室、阿尔梅里亚太阳能平台 | 实际储能容量28.6-37.5 kWh, 平均热功率3.4 kW   | ALTAIR垂直圆柱形填充床系统、电加热器                | 再生陶瓷碎块           | 以空气为传热流体, 实现高温热能储存与可控释放, 适配CSP等高温能源系统                      | CSP等高温能源系统长时放电储能37.5 kWh, 能量效率54.5%-71.5%, 焓效率66.1%<br>-67.2%, 热损失1.3±0.1 kW; 700℃循环稳定                                    | 已完成多轮标准化实验测试, 技术处于实验室验证向工业试点过渡阶段, 适用于700℃以上高温储能场景         |
|  |                               | 实际储能容量36.9-37.6 kWh, 平均热功率3.3 kW   |                                      | 天然河卵石            | 以空气为传热流体, 实现高温热能储存与释放, 适配成本敏感型中高温储能场景                      | 短期放电储能36.9 kWh, 能量效率72.7%-73.9%, 焓效率70.9%-71.5%, 热损失1.7±0.1 kW; 700℃循环2次后颗粒破碎   | 已完成多温度工况、多循环实验测试, 适用于600℃以下中温储能场景                         |
| Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf、德累斯顿工业大学 <sup>[101]</sup> | 德国德累斯顿                        | 热功率10 MW <sub>in</sub> , 储能容量50 MWh <sub>in</sub>                              | 储热容器、换热器、鼓风机                         | 耐火砖、氧化铝陶瓷、含石棉废料  | 通过“电-热-电”循环储存与释放高温热能, 适配超临界CO <sub>2</sub> 动力循环            | 耐火砖储能密度0.45 MWh/m <sup>3</sup> 最高、耐火砖与Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷搭配CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> 、Ar综合储热-释热效率超83% | 数值模拟验证完成, 处于技术优化阶段  |

景; 运行温度覆盖400-1000℃, 部分换热器效能接近0.98, 在降本、减碳与余热利用方面表现优异。整体来看, 芬兰、法国、沙特、西班牙、德国等项目分别在沙基低成本储热、工业余热利用、光

热耦合、超临界CO<sub>2</sub>系统集成等方向形成标杆, 验证了固体颗粒显热储热在长时、高温、大功率场景下的技术可行性, 为规模化推广提供了成熟的理论与技术支撑。

图7 法国水平填充床储热系统示意图<sup>[98]</sup>Fig. 7 Schematic diagram of the horizontal packed bed thermal energy storage system in France<sup>[98]</sup>图8 沙特阿拉伯利雅得国王大学 T100 余热驱动下颗粒加热循环流程图<sup>[99]</sup>Fig. 8 Flow chart of particle heating cycle driven by T100 waste heat at King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia<sup>[99]</sup>图9 西班牙高温固体颗粒储热系统流程图<sup>[100]</sup>Fig. 9 Flow chart of high-temperature solid particle thermal energy storage system in Spain<sup>[100]</sup>

### 3.2 国内典型高温固体颗粒储热技术

国内高温固体储热领域涌现出多个技术路线明

确、应用场景多元的重点项目，覆盖工业用能、电网调峰、民生供暖等核心需求，相关项目的研究团队、实施地点、技术参数及进展情况如表 8 所示，图 11-14 为对应的部分装置示意图。

国内固体颗粒储热技术目前已逐步形成以高校科研为引领、企业工程化为主导的良好发展格局，相关项目紧密围绕煤电灵活性改造、新能源大规模消纳、工业高温热能供应、区域清洁供暖等我国能源转型关键场景展开。整体技术已实现从实验室基础研究、MW 级中试验证阶段，逐步向大型规模化储能电站跨越升级。储热介质主要选用炭基颗粒、风积沙、石英砂、热焦粉、煤灰等资源丰富的材料，充分体现出高温性能优异、系统成本可控、高度适配我国能源结构转型需求的鲜明技术优势。当前，国内固体颗粒储热整体处于由实验室验证加速转向工业化示范、部分重点项目已实现落地应用的快速发展阶段，技术成熟度与工程化水平持续提升。与国外相比，国内项目更贴合我国能源系统需求，侧重煤电调峰、工业供能与大型共享储能，规模化推进速度快、成本控制能力突出。

## 4 总结

在“双碳”目标与高比例新能源并网背景下，高温固体颗粒储热技术凭借储热密度高、温度适配广、成本低廉的优势，成为燃煤电厂深度灵活调峰的重要耦合路径。本文系统梳理了天然矿物、人工合成陶瓷、工业固废衍生材料三类储热材料及固定床、移动床、流化床三类反应器的技术特性与研究进展，分析了煤粉锅炉与 CFB 锅炉在快速变负荷、低负荷稳燃方面的技术突破，并综述了国内外兆瓦级至十万千瓦级示范项目的应用成效。

展望未来，高温固体储热技术的规模化落地与高效应用仍需聚焦三大核心方向深耕突破：其一，材料层面需攻克超高温工况下储热介质的结构稳定性、热循环耐久性等关键瓶颈，持续优化工业固废改性工艺与低成本高性能颗粒制备技术，进一步提升材料热导率、储能密度等核心指标，突破传统材料传热局限；其二，系统层面应强化储热装置与燃煤机组、新能源电站的深度协同优化，完善气固耦合换热、多能互补调度等关键技术，提升系统在电网调峰、工业用能等场景下的适配性与运行效率；其三，产业层面需加快构建涵盖材料性能、系统设

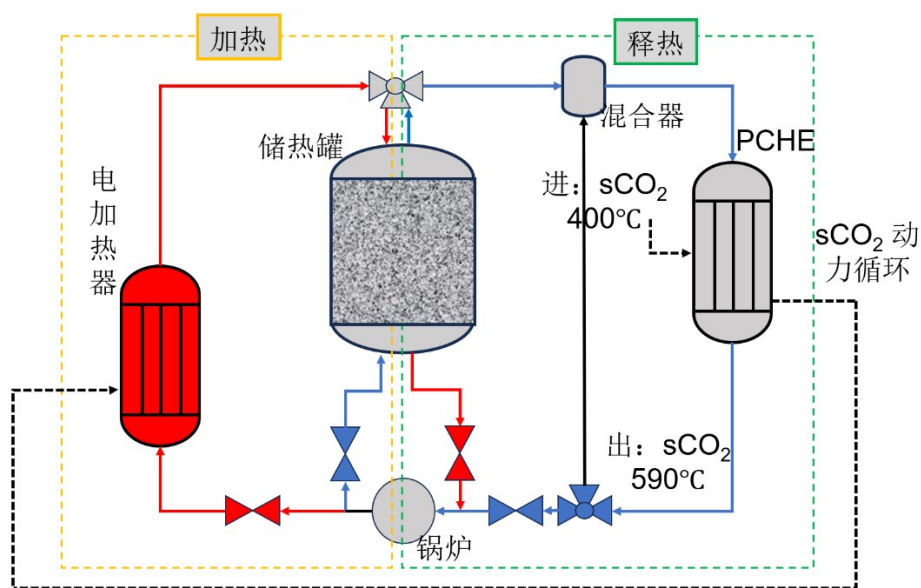
图 10 德国具有  $s\text{CO}_2$  动力循环的固体储热系统图<sup>[101]</sup>Fig. 10 Diagram of a solid thermal energy storage system with  $s\text{CO}_2$  power cycle in Germany<sup>[101]</sup>

表 8 国内典型高温固体颗粒储热技术

Table 8 Typical domestic high-temperature solid thermal energy storage devices and projects

| 研究团队                               | 项目地点      | 项目规模                    | 核心设备         | 储热介质           | 功能   | 效果   | 项目状态                                   |
|------------------------------------|-----------|-------------------------|--------------|----------------|--|--|--|
| 国家能源集团低碳院 <sup>[102]</sup>         | 榆林化工园区    | 2 MW/10 MWh             | 超高温炭基固体储热装置  | 煤液化沥青制备的炭基储热颗粒 | 将波动性光伏电力转化为稳定工业用能，适配煤化工连续用热，后续拓展至煤电灵活性改造、煤矿区清洁供热等        | 储热温度达 900℃，可产 400℃ 高品质工业蒸汽；储热介质热导率提升 7 倍，突破传统材料传热局限；完成 1000 小时工业示范连续运行，实现光伏电力向工业用能转化 | 已落地应用，完成工业示范，后续将拓展应用场景                 |
| 中国科学院工程热物理研究所 <sup>[103]</sup>     | 山西大同      | MW 级                    | 高温固体颗粒储热中试装置 | 廉价固体颗粒         | 适配煤电深度灵活调峰，与循环流化床锅炉耦合，平抑新能源波动、提升电网调节能力                   | 储热温域超 650℃，完成 48h 连续稳定运行；优化气固质量比等关键参数  | 2025 年 9 月取得重大进展，为吉瓦级工程化应用奠定基础         |
| 清华大学、鄂尔多斯实验室 <sup>[104]</sup>      | 准格尔旗大路工业园 | MW 级                    | “沙子热力电池”中试装置 | 本地风积沙          | 适配污水处理、工业蒸汽供应等用能场景，推动沙基储热技术工业化推广                         | 储能密度 120-450 Wh/kg；极端条件下储放热循环效率超 90%，介质及系统投资成本低                                      | 2025 年 7 月实现全流程贯通运行，与企业达成合作意向，计划落地应用   |
| 沙湾鹏煜能源科技有限公司 <sup>[105]</sup>      | 塔城地区沙湾市   | 15 万 kW/120 万 kWh       | 固体储热共享储能电站   | 石英砂            | 能量灵活调度，供给区域民生供暖、工业用热，热能转化电能并网；解决新能源长时调峰难题                | 储热温度 600-800℃，电-热转化效率超 90%，热-电转化效率 35%-45%   | 2025 年 12 月启动工程总承包招标，落地后将加速固体储热技术规模化应用 |
| 沈阳工程学院能源与动力学院 <sup>[106-107]</sup> | 中国沈阳      | 设计产汽量 90 t/h，设计功率 20 MW | 快速流态化床       | 石英砂颗粒          | 解决风电/光伏不稳定性，将电能转化为高温热，生成过热蒸汽推动汽轮机，提供旋转惯量和一次调频能力，实现电能平滑输出 | 石英砂颗粒加热到 700℃，产生 435℃/2.83 MPa 过热蒸汽；储热 5h，床层压差 ≤ 100 kPa                             | 设计阶段                                   |



图 11 国家能源集团低碳院超高温炭基固体储热装置<sup>[102]</sup>  
Fig. 11 Ultra-high temperature carbon-based solid thermal energy storage device from CLDR of CHN Energy<sup>[102]</sup>

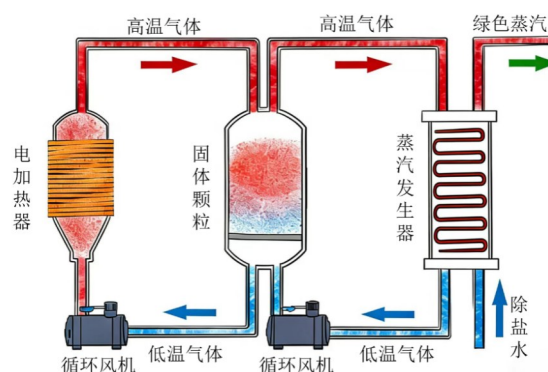
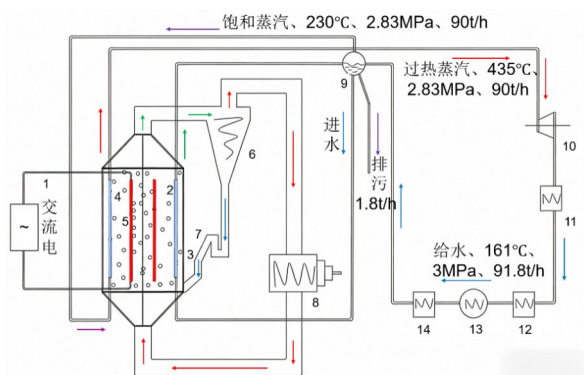


图 13 清华大学、鄂尔多斯实验室中试装置示意图<sup>[104]</sup>  
Fig. 13 Schematic diagram of the pilot plant by Tsinghua University and Ordos Laboratory<sup>[104]</sup>



图 12 中科院工热所 MW 级中试平台<sup>[103]</sup>  
Fig. 12 MW-scale pilot platform of Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences<sup>[103]</sup>



注：1为电线，2为石英砂颗粒，3为水冷壁，4为过热器，5为电加热线，6为旋风分离器，7为回料阀，8为离心风机，9为汽包，10为汽轮机，11为凝汽器，12为低压加热器，13为给水泵，14为高压加热器。

图 14 石英砂高温换热试验装置示意图<sup>[107]</sup>  
Fig. 14 Schematic diagram of the high-temperature heat transfer test device for quartz sand<sup>[107]</sup>

熟发展，高温固体储热技术有望成为传统火电灵活性改造的重要支撑，同时为新能源消纳、能源结构转型提供坚实保障，在“双碳”目标实现与新型电力系统建设进程中发挥不可或缺的关键作用。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2025 年全国电力统计数据[EB/OL]. [2026-01-29]. <https://www.nea.gov.cn/20260129/6874f211acd0417eab7ac10c3061a7c2/c.html>. National Energy Administration. National Energy Administration Releases 2025 National Power Statistics [EB/OL]. [2026-01-29]. <https://www.nea.gov.cn/20260129/6874f211acd0417eab7ac10c3061a7c2/c.html>.
- [2] 苏南. "十五五"煤电转型:不拼规模拼灵活,12亿千瓦煤电寻找新活法[EB/OL]. [2026-01-28]. <https://www.cnenergynews.cn/article/4PIMuBhHIFb>. SU N. "The 15th Five-Year Plan" Coal Power Transition:

计、安全运行的全链条标准规范体系，推进 GW 级大规模示范工程建设，积极拓展工业蒸汽供应、区域清洁供暖、煤电灵活性改造等多元应用场景，推动技术从示范走向规模化推广。随着上述关键技术的持续突破、示范工程的迭代完善以及产业链的成

- Prioritizing Flexibility Over Scale, 120 GW Coal Power Seeks New Ways of Survival.
- [3] BARRERA-SINGAÑA C, COMECH M P, ARCOS H. A Comprehensive review on the integration of renewable energy through advanced planning and optimization techniques[J]. *Energies*, 2025, 18(11): 2961.
- [4] IEA (2026), Electricity 2026, IEA, Paris [2026-04-22]. <https://www.iea.org/reports/electricity-2026/flexibility>.
- [5] 张运洲. 准确把握电力保供与降碳减排的关系[N]. *中国能源报*, 2021-11-29(4).  
ZHANG Y Z. Accurately Grasping the Relationship between Power Supply Guarantee and Carbon Reduction and Emission Abatement[N]. *China Energy News*, 2026-11-29(4).
- [6] 庞骁刚. 科学谋划"十五五"发展 加快推动能源清洁低碳转型[J]. *中国电力企业管理*, 2025(28): 22-23.  
PANG X G. Scientifically Planning the 15th Five-Year Plan Development and Accelerating the Clean and Low-Carbon Transformation of Energy[J]. *China Power Enterprise Management*, 2025(28): 22-23.
- [7] 曾光, 纪阳, 符津铭, 等. 热储能技术研究现状、热点趋势与应用进展[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(S1): 127-142.  
ZENG G, JI Y, FU J M, et al. Research Status, Hotspot Trends and Application Progress of Thermal Energy Storage Technology [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2023, 43(S1): 127-142.
- [8] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. A review of energy storage types, applications and recent developments[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 27: 101047.
- [9] WANG G, DANNEMAND M, XU C, et al. Thermal characteristics of a long-term heat storage unit with sodium acetate trihydrate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 187: 116563.
- [10] 周展民. 固体颗粒高温储热系统组件储热特性与数值模拟研究[D]. 华中科技大学, 2024.  
ZHOU Z M. Thermal storage characteristics and numerical simulation study of components in high-temperature solid particle thermal storage systems[D]. *Huazhong University of Science and Technology*, 2024.
- [11] 陈久林, 薛晓迪, 王丽, 等. 基于中高温烟气余热回收的固体显热储热装置热性能实验研究[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(8): 3185-3193.  
CHEN J L, XUE X D, WANG L, et al. Experimental investigation of thermal performance in a solid sensible heat storage device for medium-high-temperature flue gas waste heat recovery[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(8): 3185-3193.
- [12] TAO Y B, HE Y L. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 245-259.
- [13] 姚舜华. 新型碳基复合定型相变材料的制备与蓄热单元热性能研究 [D]. 太原理工大学, 2024.  
YAO S H. Preparation of Novel Carbon-Based Composite Form-
- Stable Phase Change Materials and Thermal Performance Study of Heat Storage Units[D]. *Taiyuan University of Technology*, 2024.
- [14] 诸葛务农. 热化学蓄热及其材料技术[EB/OL]. 2026-01-29. <https://blog.csdn.net/PhD0791/article/details/152210997>.  
ZHUGE W N. Thermochemical heat storage and its material technologies[EB/OL]. [2026-01-29]. <https://blog.csdn.net/PhD0791/article/details/152210997>.
- [15] Kwasi-Effaha C C, Okpako O. Comprehensive review of emerging trends in thermal energy storage mechanisms, materials and applications[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2025, 13.
- [16] ALI H M, REHMAN T ur, ARICI M, et al. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2024, 100: 101109.
- [17] SINHA R, BAK-JENSEN B, RADHAKRISHNA Pillai J, et al. Flexibility from electric boiler and thermal storage for multi energy system interaction[J]. *Energies*, 2020, 13(1): 98.
- [18] HUANG Y H, CHEN Q, ZHANG Z H, et al. Optimal scheduling of combined electric and heating considering the control process of CHP unit and electric boiler[J]. *Processes*, 2023, 11(3): 753.
- [19] ZHANG G Z, ZHANG S Q, SUN B, et al. Design on a novel waste heat recovery system integrated with the bypass flue and outside primary air preheater for bitumite-fired power plants[J]. *Energy*, 2024, 291: 130341.
- [20] ZENG G, HOU S J, GUO Q K, et al. Advances in solid particle thermal energy storage: a comprehensive review[J]. *Sustainability*, 2025, 17(16): 7244.
- [21] MA Z. Economic Long-Duration Electricity Storage by Using Low-Cost Thermal Energy Storage and High-Efficiency Power Cycle (ENDURING)[J]. 2023.
- [22] 孙丽伟, 宋国良, 纪阳, 等. 固体颗粒储热特性及热稳定性实验研究 [J]. *热能动力工程*, 2024, 39(8): 112-119.  
SUN L W, SONG G L, JI Y, et al. Experimental study on thermal storage characteristics and thermal stability of solid particles [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2024, 39(8): 112-119.
- [23] AMIRI L, ERMAGAN H, KURNIA J C, et al. Progress on rock thermal energy storage (RTES): A state of the art review[J]. *Energy Science & Engineering*, 2024, 12(2): 410-437.
- [24] 何苗, 熊亚选, 闫京, 等. 工业固废复合储热材料制备及应用研究进展[J]. *热力发电*, 2025: 1-12.  
HE M, XIONG Y X, YAN J, et al. Research progress on preparation and application of industrial solid waste composite thermal storage materials[J]. *Thermal Power Generation*, 2025: 1-12.
- [25] Yao X Y, Shi C W, Zhu S Y, et al. Thermal performance enhancement of ceramics based thermal energy storage composites containing inorganic salt/metallic micro-encapsulated phase change material[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2025, 288: 113645.
- [26] 仇秋玲, 张艳梅, 饶万. 光热发电用熔盐及储盐材料腐蚀行为研究进展[J]. *材料保护*, 2024, 57(3): 157-165.

- QIU Q L, ZHANG Y M, RAO W. Research progress on corrosion behavior of molten salts and salt storage materials for concentrated solar power[J]. *Materials Protection*, 2024, 57(3): 157-165.
- [27] TANG Z Y, BAI F, CAO Y F, et al. A review study for physical characteristics and engineering perspectives of dual molten salt tanks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2026, 283: 128840.
- [28] CALDERÓN A, PALACIOS A, BARRENECHE C, et al. High temperature systems using solid particles as TES and HTF material: A review[J]. *Applied Energy*, 2018, 213: 100-111.
- [29] SCHLIPF D, SCHICKTANZ P, MAIER H, et al. Using Sand and other Small Grained Materials as Heat Storage Medium in a Packed Bed HTTESS[J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 1029-1038.
- [30] DAVENPORT P, MA Z W, SCHIRCK J, et al. Characterization of solid particle candidates for application in thermal energy storage and concentrating solar power systems[J]. *Solar Energy*, 2023, 262: 111908.
- [31] 正北方网. 国内首创"沙子热力电池"中试成功[EB/OL]. [2025-12-31]. <https://www.northnews.cn/news/2025/1227/2464297.html>. ZHENG FANG BEI Online. First Domestic Pilot Success of "Sand Thermal Battery" [EB/OL]. [2025-12-31]. <https://www.northnews.cn/news/2025/1227/2464297.html>.
- [32] YANG L, PENG P, WEGER N, et al. Self-Heating Conductive Ceramic Composites for High Temperature Thermal Energy Storage[J]. *ACS Energy Letters*, 2025, 10(2): 1002-1012.
- [33] 王凯音, 桑丽霞, 刘建峰. 陶粒砂的储热性能及光吸收改性研究[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(1): 25-30.
- WANG K Y, SANG L X, LIU J F. Study on thermal storage performance and solar absorptance modification of ceramsite sand[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(1): 25-30.
- [34] Xu X H, LI Y T, Chen T T, et al. Preparation, Microstructure and Properties of Solar Energy Absorbing and Storing Integrated Forsterite-Based Ceramics[A]. SSRN, 2024.
- [35] FENG Q N, WEI Y, FU R C, et al. Preparation of dark Fe/Mn/Zr-doped CaO-based heat carriers for solar-driven thermochemical energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2025, 285: 113532.
- [36] LI H, LIN J F, WU J Z, et al. 3D ordered macroporous Mn, Zr-doped CaCO<sub>3</sub> nanomaterials for stable thermochemical energy storage[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(6): 2412082.
- [37] PALACIOS A, CALDERÓN A, BARRENECHE C, et al. Study on solar absorptance and thermal stability of solid particles materials used as TES at high temperature on different aging stages for CSP applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 201: 110088.
- [38] GUTIERREZ A, MIRÓ L, GIL A, et al. Industrial waste materials and by-products as thermal energy storage (TES) materials: A review[C]//SOLARPACES 2015: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems. Cape Town, South Africa, 2016: 050019.
- [39] Enhancing thermal energy storage with modified steel slag: A sustainable solution[EB/OL]. [2025-12-31]. <https://advanceseng.com/enhancing-thermal-energy-storage-modified-steel-slag-sustainable-solution/>.
- [40] Koçak B, Fernández A I, Paksoy H. Characterization of demolition waste powder to be processed as sensible thermal energy storage material[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111283.
- [41] 高明娟, 宋国良, 宋维健, 等. 高温烟气加热固体颗粒储热技术研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2025: 1-20.
- GAO M J, SONG G L, SONG W J, et al. Research Progress in Solid Particle Thermal Energy Storage Technology Heated by High-Temperature Flue Gas[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025: 1-20.
- [42] Xiong Y X, He M, Wu Y T, et al. A comprehensive review on the utilization of industrial solid waste in thermal energy storage field [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2025, 285: 113562.
- [43] HAN Y, SONG G L, TAN R Z, et al. Characterization research of solid wastes as high-temperature solid particle thermal energy storage materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 133: 117989.
- [44] 刘敬樟, 半焦粒子储放调峰中试平台调试报告[R], 中国科学院工程热物理研究所, 2025.12.
- LIU J Z. Commissioning report on pilot platform for semi-coke particle heat storage and release peak regulation[R]. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2025.12.
- [45] STATHOPOULOS N, PAPADIMITRIOU N, BELESSIOTIS V, et al. Packed bed thermocline thermal energy storage for medium-temperature concentrating solar systems: numerical and experimental study[J]. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2023, 11(5): 1-23.
- [46] 赵港归, 周月桂. 高温固体颗粒填充床储热特性数值研究[J]. *热能动力工程*, 2024, 39(6): 131-138.
- ZHAO G G, ZHOU Y G. Numerical study on heat storage characteristics of high temperature solid particle packed bed[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2024, 39(06): 131-138.
- [47] JIN Y, MAKHOVA E, SPEERFORCK A. Optimization of packed-bed energy storage systems based on a second law analysis[A]. arXiv, 2026.
- [48] BAI Y K, WANG L, LIN L, et al. A performance analysis of the spray-type packed bed thermal energy storage for concentrating solar power generation[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104187.
- [49] HERTEL J D, ZUNFT S. Experimental validation of a continuum model for local heat transfer in shell-and-tube moving-bed heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 206: 118092.
- [50] GUO Z G, TIAN X, WU Z H, et al. Heat transfer of granular flow around aligned tube bank in moving bed: Experimental study and theoretical prediction by thermal resistance model[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 257: 115435.
- [51] MISHRA A, KORBA D, ZHAO J, et al. Heat and mass transfer

- model for a counter-flow moving packed-bed oxidation reactor/heat exchanger[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2024, 146(051006).
- [52] MA Z W, GIFFORD J, WANG X C, et al. Electric-thermal energy storage using solid particles as storage media[J]. *Joule*, 2023, 7(5): 843-848.
- [53] LI J S, ZHU P W, ZHANG J Q, et al. Multi-stage fluidized-bed heat exchanger modeling for high-temperature energy storage: Particle transport and heat transfer[J]. *Solar Energy*, 2025, 301: 113975.
- [54] 张叶龙, 李龙, 于民华, 等. 钙基热化学储热技术研究进展[J]. *化工进展*, 2025.
- ZHANG Y L, LI L, YU M H, et al. Research progress in calcium-based thermochemical heat storage technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025.
- [55] WANG J J, HUO J K, ZHANG S, et al. Flexibility transformation decision-making evaluation of coal-fired thermal power units deep peak shaving in China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1882.
- [56] CHEN X J, WANG J X, WANG Z X, et al. A planning model for flexibility retrofitting of coal-fired power plants[C]//2024 3rd International Conference on Power Systems and Electrical Technology (PSET). Tokyo, Japan: IEEE, 2024: 921-926.
- [57] 韩亨达, 龙妍, 徐俊, 等. 燃煤发电灵活性标准体系建设[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(9): 26-32.
- HAN H D, LONG Y, XU J, et al. Construction of flexibility standard system for coal-fired power generation[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(9): 26-32.
- [58] 王庆华, 刘吉臻, 樊欢豹, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 锅炉系统及汽轮发电机系统[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(18): 7136-7167.
- WANG Q H, LIU J Z, FAN H B, et al. New technologies of flexible coal-fired power generation supporting China's energy transition: boiler system and turbine generator system[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2024, 44(18): 7136-7167.
- [59] TAO Q H, LEI X L, HU Y S, et al. Flow instability of 600 MW supercritical boiler water-cooled wall under low-load in deep peak-shaving process[J]. *Energy*, 2025, 333: 137517.
- [60] AN F X, ZHANG Y W, LE L Y, et al. Investigation on NO and N<sub>2</sub>O emissions characteristics in deep peak regulation circulating fluidized bed boilers[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2024, 22(7): 773-781.
- [61] 张广才, 周科, 鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. *热力发电*, 2017, 46(9): 17-23.
- ZHANG G C, ZHOU K, LU F, et al. Discussion on deep peak regulation technology for coal-fired units[J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(9): 17-23.
- [62] LIANG W Z. Research and application of low nitrogen burner for 600 mw unit boiler[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549(5): 052062.
- [63] KIM B, LEE J G, PARK J, et al. Sustainability assessment of the oxy-combustion coal-fired power plant using low-grade fuel[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110774.
- [64] ZHANG B H, ZHANG Z M, XIAO J B, et al. Low-carbon optimal dispatch strategy of power systems considering the combined operation of oxy-fuel combustion and electric hydrogen production[J]. *International Journal of Green Energy*, 2025, 22(9): 1709-1724.
- [65] ZHANG M H, QI Y F, ZHU S L, et al. A review on low-load stable combustion technology for boiler in deep peak shaving of coal-fired power units[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 229: 116673.
- [66] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(22): 8772-8790.
- OUYANG Z Q, WANG H S, LÜ Q G, et al. Progress on deep peak regulation technology for pulverized coal boiler power generation units[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2023, 43(22): 8772-8790.
- [67] WANG H S, OUYANG Z Q, DING H L, et al. Experimental study on the flexible peak shaving with pulverized coal self-preheating technology under load variability[J]. *Energy*, 2024, 289: 129830.
- [68] 张瀚霖, 周旭, 舒逸翔, 等. 基于煤粉预气化强稳燃的快速调峰燃烧器5 MW中试研究[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(9): 60-67.
- HANG H L, ZHOU X, SHU Y X, et al. 5 MW pilot study on rapid peak regulation burner based on strong stable combustion via pulverized coal pre-gasification[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(9): 60-67.
- [69] CHEN C, ZHAO C Y, LIU M, et al. Enhancing the load cycling rate of subcritical coal-fired power plants: A novel control strategy based on data-driven feedwater active regulation[J]. *Energy*, 2024, 312: 133627.
- [70] JI W M, HONG F, ZHAO Y Z, et al. A real-time phase transition modeling of supercritical steam cycle and load variation rate enhancement of thermal power plants under deep peak shaving [J]. *Energy*, 2024, 312: 133431.
- [71] 董珍柱. 600MW亚临界机组多蓄能协同调度的控制技术研究[J]. *电力学报*, 2021, 36(6): 573-586.
- ONG Z Z. Research on control technology of multi-energy storage coordinated dispatch for 600 MW subcritical units[J]. *Journal of Electric Power*, 2021, 36(6): 573-586.
- [72] LIU Z F, WANG C Y, FAN M Y, et al. Investigation on the allowable load ramping-up rate and wet-to-dry conversion time of a 660 MW supercritical coal-fired power plant with deep peak-shaving work conditions[J]. *Energy*, 2025, 314: 134200.
- [73] 丁湧. 1000 MW超超临界燃煤锅炉深度调峰研究[J]. *发电技术*, 2024, 45(3): 382-391.
- ING Y. Research on deep peak regulation of 1000 MW ultra-supercritical coal-fired boilers[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(3): 382-391.
- [74] 李炜, 侯伟珍, 高源, 等. 1000 MW超超临界机组深度调峰工况下一次调频建模与仿真研究[J]. *发电设备*, 2026, 40(1): 58-62.
- W, HOU W Z, GAO Y, et al. Modeling and simulation study on primary frequency regulation of 1000 MW ultra-supercritical units

- under deep peak regulation conditions[J]. *Power Generation Equipment*, 2026, 40(1): 58-62.
- [75] WANG Q X, CHEN Z C, LI L K, et al. Achievement in ultra-low-load combustion stability for an anthracite- and down-fired boiler after applying novel swirl burners: From laboratory experiments to industrial applications[J]. *Energy*, 2020, 192: 116623.
- [76] HUANG C C, LI Z Q, LU Y, et al. Gas-particle flow and rapid load-up characteristics of a novel deep peak regulation burner[J]. *Frontiers in Energy*, 2025, 19(5): 738-756.
- [77] TANG H, YAO G J, WANG Z B, et al. Study on low-load combustion characteristics of a 600 MW power plant boiler with self-sustaining internal combustion burners[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 267: 125859.
- [78] 王乐甘. 1000MW超超临界双切圆锅炉低负荷燃烧特性的数值模拟及运行优化[D]. 东南大学, 2023.
- WANG L G. Numerical simulation and operation optimization of low-load combustion characteristics for a 1000 MW ultra-supercritical double-tangential circle boiler[D]. Southeast University, 2023.
- [79] 闫超, 李德波, 廖伟辉, 等. 600 MW机组燃煤锅炉30%深度调峰下现场试验研究[J]. *广东电力*, 2024, 37(3): 109-114.
- YAN C H, LI D B, LIAO W H, et al. Field experimental study on 600 MW coal-fired boiler under 30% deep peak regulation[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(3): 109-114.
- [80] 周霞, 李建锋, 周宏, 等. 耦合蒸汽压缩与储热的燃煤热电联产机组调峰性能研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(1): 194-206.
- ZHOU X, LI J F, ZHOU H, et al. Study on peak regulation performance of coal-fired cogeneration units coupled with steam compression and heat storage[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2025, 45(1): 194-206.
- [81] 王海洋, 宋国良, 宋维健. CFB锅炉压火热备和快速启动调峰技术研究进展[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(9): 4502-4515.
- WANG H Y, SONG G L, SONG W J. Research progress on peak regulation technologies of CFB boiler under pressure hot standby and fast start-up[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(9): 4502-4515.
- [82] 朱建国, 韩会忠, 李栋, 等. 240 t/h循环流化床锅炉深度灵活调峰工程示范[J]. *中国特种设备安全*, 2024, 40(10): 89-93.
- ZHU J G, HAN H Z, LI D, et al. Engineering demonstration of deep and flexible peak regulation for 240 t/h circulating fluidized bed boiler[J]. *China Special Equipment Safety*, 2024, 40(10): 89-93.
- [83] 中国科学院工程热物理研究所. 研究所“耦合预热燃料改性的循环流化床锅炉深度灵活调峰技术”顺利通过科技成果鉴定 [EB/OL]. [2026-01-02]. [https://iet.cas.cn/news/zh/202505/t20250526\\_7791662.html](https://iet.cas.cn/news/zh/202505/t20250526_7791662.html).
- Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences. Technical of deep and flexible peak regulation for circulating fluidized bed boiler coupled with preheated fuel modification passes the appraisal of scientific and technological achievements [EB/OL]. [2026-01-02]. [https://iet.cas.cn/news/zh/202505/t20250526\\_7791662.html](https://iet.cas.cn/news/zh/202505/t20250526_7791662.html).
- [84] 朱建国, 吕清刚, 李百航, 等. 循环流化床锅炉深度调峰“C构型”温度分布理念与验证[J]. *中国科学:技术科学*, 2025: 1-14.
- ZHU J G, LÜ Q G, LI B H, et al. Concept and verification of C-configuration temperature distribution for deep peak regulation of circulating fluidized bed boilers[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2025: 1-14.
- [85] HUANG Y, LIU J Z, WANG H G, et al. Characteristics of ultra-low load and flexible peak shaving - a study on circulating fluidized bed preheating combustion[J]. *Fuel*, 2026, 411: 138027.
- [86] 朱建国, 韩会忠, 吕清刚, 等. 240 t/h循环流化床锅炉超低负荷试验研究[J]. *煤炭学报*, 2025: 1-10.
- ZHU J G, HAN H Z, LÜ Q G, et al. Experimental study on ultra-low load of 240 t/h circulating fluidized bed boiler[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025: 1-10.
- [87] HU X N, ZHOU T, WANG T, et al. Validation and transients of a circulating fluidized bed boiler: Load-peaking and response mechanisms[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 506: 159873.
- [88] 聂浩, 柯希玮, 柳成亮, 等. 循环流化床锅炉变负荷特性研究[J]. *热力发电*, 2025, 54(12): 1-8.
- NIE H, KE X W, LIU C L, et al. Study on variable load characteristics of circulating fluidized bed boilers[J]. *Thermal Power Generation*, 2025, 54(12): 1-8.
- [89] CHEN Y, MA Y F, WANG M C, et al. Study on hydrodynamic characteristics of a subcritical CFB boiler with natural circulation at low loads[J]. *Energy*, 2025, 331: 136950.
- [90] YU H Y, GAO M M, ZHANG H F, et al. Data-driven optimization of pollutant emission and operational efficiency for circulating fluidized bed unit[J]. *Energy*, 2023, 281: 128338.
- [91] ZHAO Y D, XUE Y L, LIU P, et al. Mechanism-data hybrid modeling and variable load dynamic characteristics analysis of circulating fluidized bed boilers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2026, 287: 129404.
- [92] GUO J N, GAO M M, LIU J Z, et al. Depth assessment of energy storage and load response characteristics in supercritical circulating fluidized bed cogeneration units[J]. *Energy*, 2025, 333: 137434.
- [93] 汤仔华, 宋国良, 宋维健, 等. 循环流化床锅炉快速变负荷调节技术研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2279-2292.
- TANG Z H, SONG G L, SONG W J, et al. Research progress on rapid load variation regulation technology of circulating fluidized bed boilers[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2024, 44(6): 2279-2292.
- [94] 王放放, 杨鹏威, 赵光金, 等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战[J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 189-198.
- WANG F F, YANG P W, ZHAO G J, et al. Development and challenges of flexibility operation technology for thermal power units under new power system[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(2): 189-198.
- [95] 吕翀, 王斌, 蒋国安, 等. 燃煤电厂耦合熔盐与固体颗粒储热系统热力性能与经济对比研究[J]. *锅炉技术*, 2025, 56(6): 50-59.
- LYU C, WANG B, JIANG G A, et al. Comparative study on

- thermal performance and economy of coal-fired power plant coupled with molten salt and solid particle heat storage systems [J]. *Boiler Technology*, 2025, 56(6): 50-59.
- [96] 新能源网. TheStorage 推出首个工业规模沙基储热系统[EB/OL]. [2026-02-04]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1855994670960285172&wfr=spider&for=pc>.  
New Energy Network. TheStorage launches the first industrial-scale sand-based thermal energy storage system[EB/OL]. [2026-02-04]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1855994670960285172&wfr=spider&for=pc>.
- [97] 国际储能网. 芬兰推出全球最大沙电池储热系统[EB/OL]. [2026-02-04]. <https://mchuneng.in-en.com/html/chunengy-48324.shtml>.  
International Energy Storage Network. Finland launches the world's largest sand battery thermal energy storage system[EB/OL]. [2026-02-04]. <https://mchuneng.in-en.com/html/chunengy-48324.shtml>.
- [98] TOUZO A, OLIVES R, DEJEAN G, et al. Experimental and numerical analysis of a packed-bed thermal energy storage system designed to recover high temperature waste heat: an industrial scale up[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101894.
- [99] SALEH N S, ALAQEL S, DJAJADIWINATA E, et al. Experimental investigation of a moving packed-bed heat exchanger suitable for concentrating solar power applications[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(8): 4055.
- [100] ALONSO E, ROJAS E, BAYÓN R, et al. Experimental comparison of tailored and natural solid fillers for high-temperature air-packed-bed thermal energy storage[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 75: 107222.
- [101] MOHANKUMAR M B, UNGER S, GUILLE-BOURDAS A F, et al. A comprehensive assessment of the design, materials and fluids for high-temperature solid sensible thermal energy storage in a power-to-heat-to-power cycle[A]. SSRN, 2024.
- [102] 国家能源集团. 国内首套超高温炭基固体储热装置连续运行 1000 小时 [EB/OL]. [2026-01-02]. <https://www.ceic.com/gjnyjtww/chnjcxw/202412/8930e611f31a408b816af885d8b6b547.shtml>.  
China Energy Investment Corporation. China's first ultra-high temperature carbon-based solid thermal energy storage device operates continuously for 1000 hours[EB/OL]. [2026-01-02]. <https://www.ceic.com/gjnyjtww/chnjcxw/202412/8930e611f31a408b816af885d8b6b547.shtml>.
- [103] 中国科学院工程热物理研究所. 工程热物理所在 MW 级高温固体颗粒储热中试研究方面取得新进展 [EB/OL]. [2025-12-31]. [http://www.etp.ac.cn/news/kyjz/202509/t20250924\\_7976813.html](http://www.etp.ac.cn/news/kyjz/202509/t20250924_7976813.html).  
Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences. New progress in pilot study on MW-scale high-temperature solid particle thermal energy storage[EB/OL]. [2025-12-31]. [http://www.etp.ac.cn/news/kyjz/202509/t20250924\\_7976813.html](http://www.etp.ac.cn/news/kyjz/202509/t20250924_7976813.html).
- [104] 清华大学碳中和研究院. 清华大学合作研究团队 MW 级高温固体颗粒储热中试装置开车成功[EB/OL]. [2026-01-02]. <https://www.icon.tsinghua.edu.cn/info/1066/1828.htm>.  
Tsinghua University Institute of Carbon Neutrality. Tsinghua university collaborative research team. successful commissioning of the MWh-scale pilot plant for high-temperature solid particle thermal energy storage[EB/OL]. [2026-01-02]. <https://www.icon.tsinghua.edu.cn/info/1066/1828.htm>.
- [105] 塔城地区行政公署. 15 万 kW/8h/120 万 kWh 固体储热共享储能电站项目落地沙湾\_经济动态\_今日塔城\_要闻动态\_塔城地区行政公署 [EB/OL]. [2026-02-04]. [https://www.xjtc.gov.cn/ywtdt/jrtc/jjdt/content\\_49898](https://www.xjtc.gov.cn/ywtdt/jrtc/jjdt/content_49898).  
Administrative Office of Tacheng Prefecture. 150 MW/8 h/1.2 million kWh solid thermal energy storage shared energy storage power station project settled in Shawan[EB/OL]. [2026-02-04]. [https://www.xjtc.gov.cn/ywtdt/jrtc/jjdt/content\\_49898](https://www.xjtc.gov.cn/ywtdt/jrtc/jjdt/content_49898).
- [106] 焦志强, 王启民. 基于储能的石英砂高温换热装置设计[J]. *能源与节能*, 2024(3): 1-7.  
JIAO Z Q, WANG Q M. Design of high-temperature heat exchange device for quartz sand based on energy storage[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2024(3): 1-7.
- [107] 焦志强. 快速流态化石英砂高温储热的技术研究[D]. 沈阳工程学院, 2025.  
JIAO Z Q. Technical study on high-temperature heat storage of fast fluidized quartz sand[D]. Shenyang Institute of Engineering, 2025.