

储热储冷多场景应用专刊



高温烟气加热固体颗粒储热技术研究进展

高明娟^{1,2}, 宋国良^{1,2}, 宋维健¹, 刘敬樟¹

(¹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; ²中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘 要: 我国工业余热资源丰富, 但余热利用率较低。热能储存(thermal energy storage, TES)技术通过解耦热源与热利用/转换过程, 成为提升余热回收效率的关键手段, 而固体颗粒储热凭借高温适应性广、循环稳定性强、成本低等优势, 在 TES 系统中应用广泛, 尤其在高温烟气加热场景下更具竞争力。本文基于近期国内外相关文献调研, 聚焦以高温烟气为热源、固体颗粒为储热介质的储热技术。首先, 阐述了工业余热的来源和利用方式, 分析了高温烟气加热固体颗粒储热技术原理, 并给出系统评价指标。其次, 结合高温烟气加热固体颗粒储热技术研究进展, 包括储热材料的筛选与性能表征和填充床、移动床、流化床等储热装置设计以及各自的优缺点、适用场景, 并总结了国内外相关的应用实践。然后, 深入剖析了该技术在换热效率提升、颗粒磨损与积灰防控、系统优化控制等应用方面面临的挑战。最后, 展望了在新型储热材料研发、换热结构优化、智能控制技术融合等方面的未来发展方向, 旨在为工业余热利用技术的应用和能源系统的低碳转型提供理论依据和技术支撑。

关键词: 高温烟气; 固体颗粒储热; 显热储热; 余热回收

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0943

中图分类号: TK 11

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1054-19

Research progress on high-temperature flue gas heating in solid particle thermal energy storage technology

GAO Mingjuan^{1,2}, SONG Guoliang^{1,2}, SONG Weijian¹, LIU Jingzhang¹

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

Abstract: China possesses abundant industrial waste heat resources. However, the utilization rates remain relatively low. Thermal energy storage (TES) technologies play a crucial role in improving waste heat recovery efficiency by decoupling heat sources from utilization and conversion processes. Solid particle thermal energy storage, known for its high-temperature adaptability and strong cycle stability, is commonly employed in TES systems and is particularly effective in high-temperature flue gas heating applications. Based on a review of recent domestic and international literature, this study focuses on thermal storage technologies that utilize high-temperature flue gas as the heat source and solid particles as the storage medium. First, it examines the sources and utilization methods of industrial waste

收稿日期: 2025-10-22; 修改稿日期: 2025-11-13。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项课题 (XDA29010100)。

第一作者: 高明娟 (2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高温烟气加热固体颗粒储热技术, E-mail: gaomingjuan@iet.cn; 通信作者: 宋国良, 研究员, 研究方向为循环流化床锅炉深度灵活调峰技术, E-mail: songgl@iet.cn。

引用本文: 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, 2026, 15(3): 1054-1072.

Citation: GAO Mingjuan, SONG Guoliang, SONG Weijian, et al. Research progress on high-temperature flue gas heating in solid particle thermal energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1054-1072.

heat, analyzes the principles underlying solid particle thermal storage when heated by high-temperature flue gas, and proposes metrics for system evaluation. Second, it reviews advancements in solid particle thermal storage systems while discussing material selection and performance characterization. It also considers design approaches for storage devices, such as packed, moving, and fluidized beds, highlighting their respective advantages, disadvantages, and suitable applications. Relevant domestic and international practices are summarized. Third, the review addresses practical implementation challenges, including improving heat transfer efficiency, minimizing particle wear and ash accumulation, and optimizing system control. Finally, this study outlines potential future research directions, such as the development of novel heat storage materials, optimization of heat transfer structures, and integration of intelligent control technologies. The study thus aims to provide a theoretical foundation as well as technical support for advancing industrial waste heat utilization technologies and facilitating the low-carbon transformation of energy systems.

Keywords: high-temperature flue gas; solid particle thermal energy storage; sensible heat storage; waste heat recovery

我国工业能源消耗量是国家能源消费的主要组成部分。如图1所示,2018—2022年,我国工业领域消耗能源量从311151万吨标准煤增加至363782万吨标准煤,2022年工业能源消耗量占全国消费总量的67.2%^[1]。基于热力学第二定律所揭示的能量转换固有规律,以及我国以重化工业为主导的产业结构特征,工业领域每年排放的余热资源超过130000万吨标准煤,相当于全国能源消费总量的17%~67%,其中具备可回收利用潜力的余热资源达60%以上,可见我国余热资源之丰富,具有广阔的发展前景^[2]。

工业余热根据行业来源可以分为基础金属制造

行业、非金属制造行业、化学原料和化学制品制造业、车辆发动机以及发电厂等^[3-4]。余热资源根据温度可以被分为高温($T \geq 600^\circ\text{C}$)、中温($100^\circ\text{C} < T < 600^\circ\text{C}$)和低温($T \leq 100^\circ\text{C}$)^[5-7]。图2是我国2021年余热资源结构图,可见在工业余热资源中占比最大的是高温烟气余热(占50%),高温烟气余热因能量品质高、利用技术相对成熟和减排贡献大的优势,成为工业领域节能的首选余热资源^[8-9]。对工业生产过程释放到环境中的余热资源进行回收利用,可以减少化石能源的消耗,降低二氧化碳的排放,加速推进“双碳”目标^[10]。以钢铁行业为例,2024年5月,国家发展改革委等部门印发的《钢铁行业节能降碳专项行动计划》明确提出要推动全流程余能利用,具体包括加强余能利用改造,有序更新自发电设备,并优化二次能源的直接利用方式以减少能源转换损失,2024—2025年,计划通过对系统进行节能降碳改造与用能设备更新实现约2000万吨标准煤的节能量和约5300万吨二氧化碳减排量,同时,在加快发展低碳冶炼新模式的探索中,还将支持建设工业绿色微电网,加快推进包括工业余能在内的多种能源一体化开发利用,从而系统性地提升全行业的能源利用效率和低碳化水平^[11]。

工业领域的余热回收,指的是通过各种余热回收技术收集并重新利用工业过程中损失的热量,助力减少化石能源的消耗和降低二氧化碳的排放。现有的工业余热回收技术分为被动技术(热量直接在

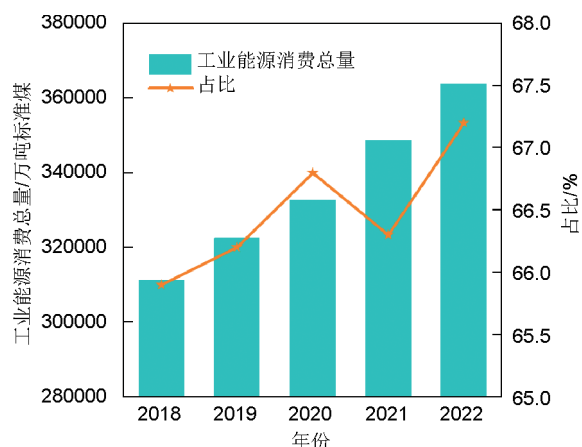


图1 2018—2022年中国工业能源消耗量及趋势
Fig. 1 China's industrial energy consumption and trends from 2018 to 2022

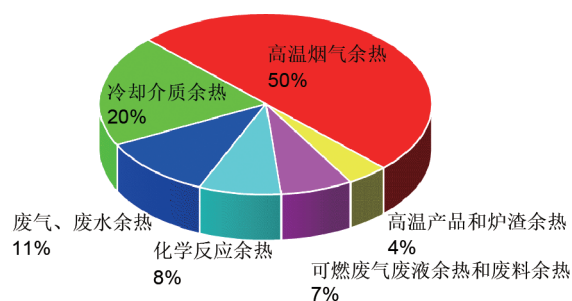


图2 2021年中国余热资源结构图

Fig. 2 The structure diagram of China's waste heat resources in 2021

相同或更低温度水平使用)和主动技术(将其转化为另一种形式的能源或更高温度水平)^[12-13],具体分类如图3所示。然而,工业余热热源固有的间歇性和波动性为它的利用和转换带来了挑战,从而限制了工业余热资源的大规模回收,导致回收利用效率普遍偏低^[13]。在这种情况下,热能储存(thermal energy storage, TES)技术通过实现热源与热能利用/转换环节的时空解耦,有效收集并存储工业生产过程中产生的余热资源,在需求侧通过可控释热实现热能的高效再利用,从而显著提升工业系统的热能利用效率,是工业余热回收领域的核心支撑技术^[3, 14]。

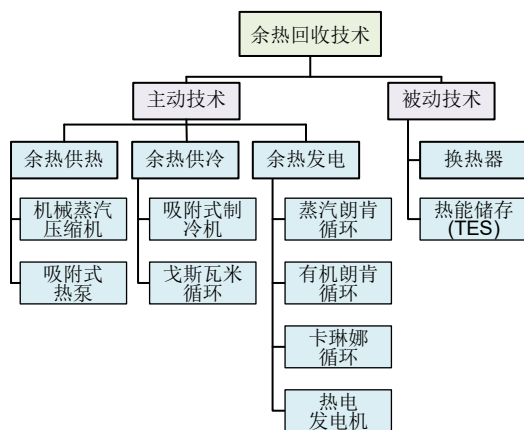


图3 余热回收技术分类

Fig. 3 Classification of waste heat recovery technologies

TES系统根据储热原理可分为三大类:显热、潜热和热化学储热系统。其中显热储热依赖储热介质温度变化储热,潜热储热依托相变过程,热化学储热则基于可逆化学反应^[14-16]。固体颗粒显热储热技术,因其适配高温烟气场景的独特优势,成为工业余热回收的重点方向。在显热储热的各类储热介

质中,气体和液体因其材料特性,例如热稳定性有限、高温下易分解,导致最高工作温度不超过600℃,这种温度局限成为阻碍其在高温场景下广泛应用的关键因素^[17]。而以固体为储热介质的高温显热储热技术,恰好弥补了上述不足,与高温相变储热和高温热化学储热技术相比,具有显著优势:成本低,天然岩石、工业固废等固体材料成本仅1~80欧元/吨,且运行维护成本低,其系统成本预计低于25欧元/kWh,低于相变材料(60~95欧元/kWh)与热化学材料(80~160欧元/kWh)^[18];稳定性与可靠性更强,能适配200~1200℃宽温域,可直接以烟气为换热流体,减少额外换热环节与热损失,而相变材料易因反复相变导致容器破裂或材料粉化,热化学储热材料可能与烟气杂质发生副反应;系统兼容性更好,如填充床显热储热可直接用烟气储热,无需复杂的相变控制或化学反应装置^[19]。

在固体储热介质中,固体颗粒较块状、蜂窝状等固体结构更适配高温烟气换热场景,主要体现在换热效率更高和系统更灵活方面:固体颗粒比表面积远大于块状固体,能增强与换热流体的对流换热,且可通过优化球形度增强高温下的辐射换热;固体颗粒可填充于圆柱形、卧式、锥形等多种形状储罐,适配工业场地空间;粒径可根据实际工况调节以平衡换热与压降,且固体颗粒磨损或污染后可快速更换,无需拆解系统^[18]。综上所述,固体颗粒的优势主要体现在高温适应性广、循环稳定性强、系统兼容性良好及成本效益等方面,这使它在TES系统中应用广泛,尤其在与高温烟气加热场景结合时更具竞争力^[15]。

高温烟气加热固体颗粒储热装置可分为接触式和间壁式,其中接触式换热装置(如填充床^[20]、流化床^[21]、移动床^[22]等)中高温烟气与颗粒直接接触实现了高效传热,设备结构简单且高温兼容性良好,然而烟气携带的灰尘可能会造成换热器堵塞、内部固体颗粒污染以及装置磨损;间壁式换热装置通过换热壁面将烟气与颗粒物理分离,有效避免了烟气污染颗粒的问题,但是与此同时,热量需经过“烟气-管壁-颗粒”三步传递,传热阻力变大,储热效率也相应降低,且需采用耐高温、耐腐蚀的专用换热器,导致设备成本相应增加^[23]。这两种路径为应对不同工业烟气条件提供了可选的解决方案。

本文基于上述背景，主要关注以高温烟气为热源、固体颗粒为储热介质的储热技术，阐述了工业余热的来源和利用，分析了高温烟气加热固体颗粒原理。此外，结合高温烟气加热固体颗粒储热研究进展，展望该技术的挑战和发展方向，为推动工业余热利用技术的应用和能源系统的低碳转型提供理论依据和技术支撑。

1 工业余热的来源和利用

余热通常是离开工业设施边界并进入环境的废气、废水(循环水)和废渣相关的能量^[12]，通常来自各种工业过程，包括窑炉、熔炉、发电厂、内燃机等。表 1 为一些工业过程中的排气温度^[3-4,12]，可以看出高温工艺集中在基础材料制造，如钢铁制造、金属冶炼、玻璃、水泥等，特别是钢铁工艺燃烧排气温度非常高，最高达到 1650℃，这说明烟气余热能量品质高，赋予其显著的应用灵活性。然而这类高温工业余热具有显著的时空间歇性和能量品位差异，若直接回收易因“产热时段与用热时段不匹配”“余热品位与用能需求不匹配”导致利用率不足，成为制约工业余热高效回收利用的瓶颈。

TES 技术作为被动式余热回收技术的重要组成部分，通过暂存与按需释放不稳定余热，适配其间歇性与波动性，保障能源供需平衡及利用连续性；同时整合低品位或分散性余热，提升回收灵活性与工业系统能源效率，为高耗能行业可持续用能提供技术支撑^[12,24]。以钢铁行业中高温储热系统为例，在时空匹配层面，炼钢过程产生的 1000℃ 以上高温余热呈现显著间歇性波动，而下游工序轧钢加热、蒸汽发电等用能需求持续稳定，系统在余热供应峰值阶段利用电弧炉渣吸收并存储过剩热量，在余热低谷或用能高峰时稳定释放，避免高温余热因供需错配直接排放，保障能源利用的连续性，实现能源供需平衡。在品位适配方面，该系统选用的储热介质电弧炉渣具备高品位储热特性，其稳定工作温度与钢铁工业高温余热品位高度契合，无需额外增设品位提升装置，可直接将存储的热量匹配后续中高品位用能需求。这种“余热-用能”的直接品位匹配，大幅减少传统余热回收中因品位转换导致的能量损耗，同时实现工业固废资源化利用^[25]。

综上，TES 技术从时空与能量品位层面构建了余热供应与用能需求的精确匹配关系，为高温工业

余热的间歇性与品位差异问题提供解决方案，为钢铁等高耗能行业突破余热回收瓶颈、构建可持续能源利用体系提供了技术支撑。

表 1 一些工业过程排气温度
Table 1 Exhaust temperatures of certain industrial processes

行业	工艺	温度/℃
基础金属制造业	钢铁制造	1450~1550
	电弧炉炼钢	1370~1650
	镍精炼炉	1370~1650
	铝反射炉	1100~1200
	铜精炼炉	760~820
	水泥烧结	1450
	玻璃熔炉	1300~1540
非金属制造业	窑中石灰石煅烧	900
	氧化镁煅烧	600~800
	水泥窑	450~620
	熟料冷却机废气	177~232
	窑系统排气/预热器	382~816
	炉黑工艺	1200~1900
	氨催化剂反应	510
	油漆和清漆解聚	288~343
	塑料和橡胶	90~200

2 高温烟气加热固体颗粒原理

2.1 高温烟气中的余热

高温烟气中可利用的余热主要取决于其质量流量和比焓，如式(1)所示^[9]：

$$Q_{ex} = [mh(t)]_{ex} = m_{ex} \sum_i [x_i h_i(t)]_{ex} \tag{1}$$

式中， Q_{ex} 为烟气余热损失率，kJ/s； m_{ex} 为烟气质量流量，kg/s； $h(t)$ 是烟气在温度 t 下的比焓，kJ/kg； x_i 是烟气中第 i 种组分的质量分数，%； $h_i(t)$ 是烟气中第 i 种组分温度 t 下的比焓，kJ/kg； i 是烟气组分的种类(如 CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 O_2 等)。

2.2 固体颗粒储热原理

固体介质储热利用材料的比热容实现能量存储(温度变化)，属于显热储热。质量为 m 的材料中存储的能量 $Q_{sensible}$ 描述为^[16,26]：

$$Q_{sensible} = m_s \int_{T_{s,1}}^{T_{s,2}} c_{p,s}(T) dT \tag{2}$$

式中， m_s 为固体颗粒的质量，kg； $c_{p,s}$ 为固体颗粒的比热容，kJ/(kg·K)； $T_{s,2}$ 是储热过程结束时的固体颗粒温度，K； $T_{s,1}$ 是储热过程开始时的固体颗粒温度，K。温差较大时需要考虑 $c_{p,s}$ 的温度依

赖性。

余热回收的传热过程需满足热力学第二定律的基本约束，即热量自发传递的必要条件是热源温度高于热汇温度，形成正向温度梯度 $\Delta T>0$ 。 ΔT 作为传热驱动力，直接决定热流密度的大小。 ΔT 的大小不仅影响瞬时传热速率，更是评估余热品质与回收系统能效的核心参数，过小的 ΔT 将导致不可逆损失显著增加，从而制约技术方案的可行性与经济性。

2.3 固体颗粒材料

TES技术的核心是储热材料的选择，它对储热系统设计和运行等方面有着关键性影响^[27]。固体颗粒材料凭借其宽温度适用范围、耐受高温的能力、固有的化学惰性，展现出显著的优势。此外，相较于以气/液相为储热介质的系统，采用固体介质通常可简化存储容器的设计。固体存储材料可依据其属性划分为金属与非金属两类，同时也可按照来源分为天然材料与人造材料。

以岩石为代表的天然材料，凭借其储量丰富与成本低廉的优势而备受关注^[28]。在高温应用场景中，固体材料的热稳定性和机械稳定性至关重要。在此情况下，花岗岩、玄武岩及石灰岩等岩石展现出与之相适配的性能。在人造固体材料领域，各类陶瓷被广泛应用于储热场景。此外，矿渣作为一种

低成本的固废材料，也被视作潜在的替代方案^[29]。混凝土作为一种潜在的显热存储材料，其成本效益突出(主要得益于廉价的骨料)、易于获取以及可通过浇筑方式实现简单加工^[30]。碳化硅同样是一种具有潜力的固体显热存储介质，具备高热导率及耐极端高温的特性，然而，SiC作为合成材料，其成本远高于天然材料，经济性成为工业规模化应用的主要限制因素。金属材料通常展现出更高的导热性能，但其成本普遍高于非金属材料，这种高导热特性有利于储热系统实现快速的充/放热过程。储量丰富的固体盐，如氯化钠，也具有成为储热材料的潜力。在固体介质的实际应用场景中，蠕变特性、机械强度、制造工艺以及传热流体的兼容性问题通常是需重点关注的关键环节^[16]。

表2为常见固体材料的热物理性质^[26,31]。在固体储热介质的开发过程中，材料的热物理性质(尤其是其温度依赖性)至关重要。其中，密度与比热容的乘积定义了体积热容，该参数直接表征了材料的体积储热能力，体积热容越大表示材料的储热能力越强。另一关键参数是热导率，它表征材料内部传导热量的能力，是影响储热介质与换热流体(或结构)间传热效率的核心因素^[24,32]。较高的热导率有助于提升储热系统的动态热响应特性，即加速其充/放热过程。

表2 常见固体材料的热物理性质
Table 2 Thermal properties of common solid materials

材料	温度/℃	密度/(kg/m³)	比热容/[kJ/(kg·K)]	热导率/[W/(m·K)]	体积热容/[kJ/(m³·K)]
混凝土	350	2250	1.01	1.23	2272.5
花岗岩	20	2750	0.89	2.9	2447.5
玄武岩	20	2768	0.85	2.1	2352.8
石灰岩	20	2600	0.81	2.2	2106
硅基耐火材料	20	2340	0.86	1.75	2012.4
沙子(SiO ₂)	20	1454	0.76	0.25	1105.04
	600	1454	1.2	0.48	1744.8
矿渣	20	2700	0.84	0.57	2268
可浇注陶瓷	20	3500	0.86	1.4	3010
氧化铝	20	3984	0.76	33.4	3027.84
岩盐(Halite)	20	2170	0.88	6.1	1909.6
氯化钠	20	2165	0.86	6.5	1861.9
碳化硅(SiC)	20	3220	1.15	83	3703

大多数最先进的商业TES系统使用硝酸熔盐作为储热材料，其工作温度范围限制在200~600℃，在低温下易冻结(如硝酸盐冰点约200℃)，在

595℃以上分解。熔盐成本在800~1000美元/吨之间，部分熔融盐具有腐蚀性，对储存容器及传热部件的材料耐高温、耐腐蚀性要求严苛(如需特殊合

金)^[33-34]。然而固体颗粒与熔融盐相比有显著优势, 其工作温度范围更广(可从低于冰点延伸至 1000℃ 以上), 无需复杂的防冻伴热系统, 材料成本低廉(如沙子仅 30~40 美元/吨)且来源广泛, 化学稳定性强、无腐蚀性, 对设备材料要求较低; 同时, 通过自绝缘效应可有效降低热损失, 且能适配超临界 CO₂ 等高效高温动力循环, 在大规模、长时储能场景(如聚光太阳能发电和工业余热回收)中具有更高的技术经济性与应用潜力^[35-38]。

2.4 系统性能评价指标

建立科学统一的系统性能评价指标, 是量化高温烟气加热固体颗粒储热技术效能的核心基础。所选指标包括储热、释热能量利用效率以及装置总传热系数, 为不同方案的性能对比、明确优化方向及工程选型提供可量化依据。

2.4.1 储热效率

储热效率指固体颗粒实际储存的热量 Q_{sensible} 与高温烟气提供的热量 Q_{gas} 的比值, 该值反映了系统在储热过程的能量转换效率, 储热效率越高表明固体颗粒从高温烟气获得的热量越多, 热量损失更少。其定义为^[39]:

$$\eta_{\text{charge}} = \frac{Q_{\text{sensible}}}{Q_{\text{gas}}} = \frac{m_s \int_{T_{s,1}}^{T_{s,2}} c_{p,s}(T) dT}{\int_0^{t_{\text{ch}}} Q_{\text{ex}} dt} \quad (3)$$

式中, η_{charge} 为储热效率; t_{ch} 为储热时间, s。

2.4.2 释热效率

释热效率是指系统在放热过程中实际释放并被传热流体回收的热量与固体颗粒存储的总热量的比值, 表明系统释放存储热量的能力, 释热效率越高表明系统存储的热量能更充分地释放并被回收利用, 放热过程中的热量损失(如向环境散热)越少。其定义为^[40]:

$$\eta_{\text{discharge}} = \frac{Q_{\text{recover}}}{Q_{\text{sensible}}} = \frac{\int_0^{t_{\text{dis}}} m_f c_{p,f}(T_{f,2} - T_{f,1}) dt}{m_s \int_{T_{s,1}}^{T_{s,2}} c_{p,s}(T) dT} \quad (4)$$

式中, $\eta_{\text{discharge}}$ 为释热效率; Q_{recover} 是指传热流体吸收的热量, kJ; m_f 为传热流体的质量流量, kg/s; $c_{p,f}$ 为传热流体的比热容, kJ/(kg·K); $T_{f,2}$ 是释热过程结束时的传热流体温度, K; $T_{f,1}$ 是释热过程开始时的传热流体温度, K; t_{dis} 是释热时间, s。

2.4.3 总传热系数

总传热系数 U 基于对数平均温差法计算, 是表征储热装置传热性能的核心指标。其数值反映了包括固体颗粒与传热流体间对流换热、颗粒间导热及壁面效应等多环节传热效能, 直观体现装置内部传热过程的强弱。该值越大, 表明单位换热面积的传热能力越强, 是储热装置高功率密度与紧凑化设计的关键支撑。其定义为^[41]:

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{\text{LMTD}}} \quad (5)$$

式中, Q 为传热速率, 即在稳态下的瞬时热功率, W; A 是总传热面积, m²; ΔT_{LMTD} 为对数平均温差, K; U 为总传热系数, W/(m²·K)。

3 高温烟气加热固体颗粒研究进展

高温烟气加热固体颗粒储热技术是实现工业余热高效回收的关键技术之一, 下文将从“材料-装置-应用-挑战”依次展开论述。系统梳理高温烟气加热固体颗粒储热技术的研究进展, 并总结该技术的工程示范。首先, 综述天然材料和工业固废等储热介质的筛选准则与性能优化策略; 其次, 分析填充床、流化床等储热装置的传热机理与模型构建、结构创新与性能对比; 继而, 总结该技术在工业余热回收、光热发电等领域的工程示范; 最后, 在技术瓶颈层面, 系统剖析该技术在材料、机理与装置等方面面临的挑战, 为后续研究方向提供清晰指引。

3.1 储热材料的筛选与性能表征

3.1.1 天然材料

储热材料是显热储热系统的核心, 其热物理性质(比热容、热导率、高温稳定性等)直接决定系统储热效率与经济性。相关研究聚焦于天然材料和工业固废的开发与应用, 通过实验与理论分析明确其适配场景与性能瓶颈。

天然材料被认为是热能存储的解决方案^[42-43]。岩床储热利用岩石的显热储热, 具有材料成本低、传热效率高、可扩展性强等优势, Soprani 等^[44]首次实验验证水平流向岩石床储热系统性能, 测试了 9 种岩石并评估其热容量、高温稳定性, 发现辉绿岩因热稳定性好、易获取, 被选为实验用岩。Jurczyk 等^[26]的综述系统梳理了适用于大规模综合能源系统的热能存储材料, 提出了基于热物理、化

学、经济等参数的材料选择方法,发现对于100℃、300℃和500℃最优储热方案是选择玄武岩作为储热介质。硅砂的研究进一步提升了天然材料的高温潜力。**Schlipf**等^[45]研究了使用硅砂、石英砾石和玄武岩等细粒材料存储热能的填充床储热系统的蓄热性能,研究表明,此类成本低且储量丰富的材料不仅能降低平准化度电成本(levelized cost of electricity, LCOE),且小颗粒材料能实现更锐利的温跃层,提升储热效率。**Davenport**等^[36]系统研究了二氧化硅颗粒作为储热材料的热稳定性,研究发现,二氧化硅砂在1200℃长期恒温及300~1200℃循环测试中,颗粒尺寸分布和晶体结构变化极小且无团聚现象。结合其高储量、低成本特性,证明其是极具潜力的储热介质,可支持经济高效的大规模储能系统开发。

但以天然岩石和硅砂为储热材料的系统存在循环效率低、能量密度低的问题,这是因为这些材料热导率较低。**Anderson**等^[46]通过实验和建模相结合的方法对以氧化铝颗粒为储热介质的填充床系统特性展开研究,选择氧化铝而非岩石、石英砂等材料,是因其具有较高的热容量和高温稳定性,能存储更多热量且不易发生性能退化。赵港归等^[39]通过数值模拟,分析了岩石、 Al_2O_3 和SiC在600~1200 K对填充床储热性能的影响,研究结果表明, SiC因高体积热容[3703 kJ/(m³·K)]和热导率[83 W/(m·K)],其床层温度分布最均匀,压力损失最小,储热性能最优。然而, SiC作为合成材料,其成本远高于天然材料(如玄武岩),经济性成为工业规模化应用的瓶颈^[47]。相比之下,玄武岩虽热导率较低[2.1 W/(m·K)],但凭借储量丰富和低成本优势,在500℃以下中高温场景仍具竞争力。未来需开发复合改性技术,在控制成本的前提下提升导热性能。

3.1.2 工业固废材料

在材料多元化探索方面,研究人员将目光投向工业固废资源化利用。该方法既有助于降低储热成本,又能解决固废处理问题,成为研究新趋势^[25]。**Keilany**等^[48]研究了将玻璃化石棉废物(**Cofalit®**)作为储热介质的填充床系统实验评估和参数分析,并与氧化铝球进行性能比较,实验结果表明,尽管氧化铝球具有更高的体积热容和热导率, **Cofalit®**在300℃温度水平下表现出优于氧化铝球的热性能,即储/释热效率更高,如图4所示,引入量纲为1的

温度 Θ ,通过“相对温差比”的形式,将温度变化映射到[0, 1]的标准化区间。其定义本质是将某一时刻、某一位置的实际温度与系统温度边界的差值,归一化为系统总温度跨度,确保所有温度数据具备统一的比较基准,以解决不同运行阶段(充热/放热)、不同填充材料及不同实验工况下,绝对温度范围差异大、难以直接对比热性能规律的问题。**Cofalit®**凭借更优的动态热响应和成本效益,实际性能超过传统高体积热容材料氧化铝,表明储能材料选择需平衡理论参数与实际系统特性。**Ortega-Fernández**等^[49]针对钢铁厂电弧炉高温废气余热回收问题,提出了以钢渣为填充床材料的储热系统解决方案。实验结果表明,系统循环效率和填料利用率分别可达65%和85%,证明了钢渣填料的可行性,为工业废热资源化提供经济高效路径。该研究创新地将钢铁厂副产品钢渣作为低成本填料,强化了循环经济价值,但未详细探讨填料长期热稳定性或腐蚀风险。

陶瓷材料则在极端高温场景中表现突出, **Al-Azawii**等^[49]研究了基于回收陶瓷材料(**Flora**)的商业化规模填充床储热装置在1000℃工况下的性能。**Flora**陶瓷成本比氧化铝低35%~53%,最高耐受温度为1200℃。数值模拟结果显示,虽然单次循环热效率(88%)略低于氧化铝(89.3%),但凭借低成本和低压降的优势,综合性能更优。为更直观地对比3.1节提到的各类固体颗粒储热材料的特性,表3汇总了其关键热物理性质与经济性指标。

3.2 储热装置设计

储热装置设计需匹配材料特性与工业场景需求,核心目标是提升传热效率、降低压降与磨损,并适应含尘烟气等复杂工况。本部分基于传热机理与模型构建理论,剖析了典型储热装置特性,阐明了其结构创新路径。

3.2.1 传热机理与模型构建

针对工业烟气余热回收的优化需求, **Kaki**等^[50]发现现有文献缺乏针对立管段的气固传热关联模型,进而通过实验与理论推导提出了采石场粉尘与铁矿石颗粒的努塞尔数关联式[式(6)]。该研究填补了工业副产物作为换热介质在理论模型上的空白,为工业烟气余热回收提供了可量化的传热设计工具,尤其适用于水泥、钢铁等高耗能行业。研究结果表明,这两种材料因其独特的导热特性与比表面

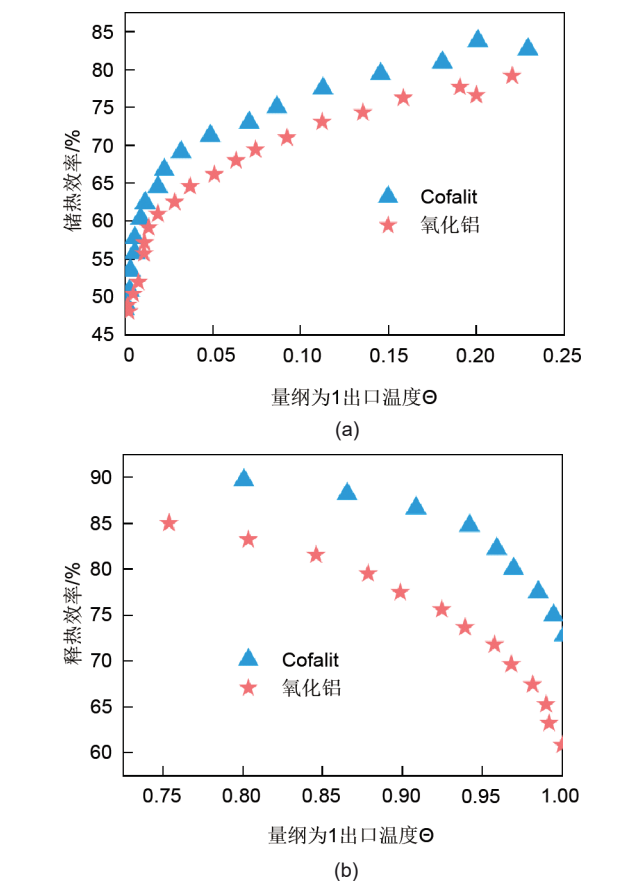


图4 氧化铝-Cofalit®过程效率与无量纲出口温度关系：
(a) 储热过程；(b) 释热过程
Fig. 4 Relationship between alumina-Cofalit® process efficiency and non-dimensional outlet temperature: (a) Charging process; (b) Discharging process

积，可显著提升余热回收效率。尽管文献[50]结合实验数据与理论分析建立了普适性关联式，但未探讨颗粒长期使用的磨损或积灰效应，且实验工况可能未完全覆盖工业实际复杂性。目前对多粒径颗粒

在流化床中与浸没管之间的传热研究较少，尤其是高温条件下的局部传热特性。针对上述问题，Zheng等^[51]采用耦合颗粒动力学理论的欧拉-欧拉双流体模型，通过二维数值模拟研究了混合粒径颗粒的浅层流化床中床层-管道传热机制。研究发现，管道周围局部传热系数在右上45°和左上135°达到最大值，与固体体积分数密切相关，且平均粒径减小可显著提升传热系数，并建立了传热系数预测关联式。该研究为浅层流化床换热器设计提供了理论支撑，但局限性在于仅采用二维模型，可能低估实际三维流动与传热的复杂性。

$$Nu = 0.03875(Re)^{0.8274}(Pr)^{0.4157} \quad (6)$$

Tian等^[60]聚焦移动床流动颗粒在管道存在停滞区和空隙区所导致传热死区的问题，创新设计复合椭圆管结构，通过计算流体力学-离散元法(computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM)双向耦合仿真，揭示了管型对颗粒运动的调控机制。研究表明，相较于传统圆管，椭圆类组合管能显著减小管顶停滞区与管底空隙区，改善颗粒流动均匀性。当颗粒出口速度为10 mm/s时，其整体平均传热系数可达173 W/(m²·K)，相较于传统圆管[157 W/(m²·K)]提升约10%，为移动床反应器“流动-传热”动态耦合与结构创新提供理论支撑，但研究未考虑复合椭圆管在工业应用中的加工可行性和经济成本问题。

Le Roux等^[53]以现有的工业高温空气/陶瓷填充床储热系统EcoStock®为研究对象，采用一维双方程模型(分别描述传热流体和填料材料的热传递)模拟性能，并通过粒子群算法将炯效率与全生命周期环境影响相结合进行多目标优化。传统TES设计方法存在局限，如耗时长、计算成本高，且因系统非

表3 固体颗粒储热材料性能对比							
Table 3 Performance comparison of solid particle thermal storage materials							
材料	密度 /(kg/m³)	比热容 /[kJ/(kg·K)]	热导率 /[W/(m·K)]	体积热容 /[kJ/(m³·K)]	最高使用 温度/℃	成本 /(美元/吨)	主要优缺点
玄武岩	2768	0.85	2.1	2352.8	700	126	成本较低、中低温下稳定、热导率较低
硅砂(SiO₂)	1454	1.2	0.48	1744.8	1200	30~40	温域宽、成本低、热导率低
钢渣	3430	0.877	1.46	3008	≥700	负成本	成本极低、固废利用、热导率较低，成分波动
氧化铝	3984	0.76	33.4	3027.84	1100~1200	1596.8	热导率较高、高温稳定、成本高
碳化硅(SiC)	3220	1.15	83	3703	1400	极高	热导率和体积热容高、成本极高
玻璃化石棉废物							
Cofalit®	3120	0.9~0.964	1.49~1.55	2800~3000	1200	12	成本极低、动态热响应好、长期稳定性待研究
回收陶瓷	2350~						
(Flora)	2400	1.1	2.2	2585~2640	1200	较低	成本较低、环境可持续、高温耐受能力强、热导率较低

线性和动态特性,结果可能不准确。而人工智能(artificial intelligence, AI)技术(如神经网络、模糊逻辑、进化算法等)为解决这些问题提供了新路径。Fang 等^[54]针对颗粒- SCO_2 移动床换热器,不仅分析了其在入口温度及 SCO_2 质量流量扰动下的动态响应特性,更构建了基于 BP(back propagation)神经网络的实时控制模型,推动了模型研究从稳态模拟向智能预测与主动控制的高级阶段发展,该研究的创新点在于首次将 BP 神经网络应用于移动床换热器的动态控制,但其未探讨颗粒粒径分布或管道结构对传热的影响,且未说明模型对极端工况(如颗粒团聚)的适用性。Mehraj 等^[55]在综述中系统探讨了 AI 技术在热能存储系统设计与优化中的应用,结果显示 AI 可突破传统设计方法局限,提升储热系统效率与稳定性,为复杂工况下的性能预测与优化提供新路径,强调了 AI 技术在提升 TES 系统功能、效率和可持续性方面的潜力,未来需解决数据质量、计算成本与模型可解释性挑战,推动 AI 在工业余热资源存储和工业应用中的规模化落地。

3.2.2 典型储热装置特性

Yin 等^[41]针对工业炉高温含尘烟气的余热回收问题,设计了一种采用空心刚玉球(3~5 mm)作为填充颗粒的埋管颗粒床装置,结合实验与计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟,研究了烟气入口温度和冷却水流量对系统性能的影响。图 5 为热交换管排列示意图,由 60 根直径 32 mm 不锈钢管交错排列 8 排构成(换热管交错排列增强扰动、提升传热效率),管道内部通冷却水。基于对数平均温差法,以颗粒床总传热系数表征其换热性能,结果表明,当烟气入口温度为 800°C ,冷却水流量为 $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,余热回收率(释热效率)稳定在 72% 左右,总传热系数为 $60\sim 65 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,且提高冷却水流量和烟气温度可提升余热回收率及传热系数。研究进一步提出了颗粒床总传热系数与冷却水流量、烟气温度的实验关联式。该研究首次量化了埋管颗粒床在极端高温含尘条件下的传热特性,为工业余热回收装置的设计提供了依据。但未探讨颗粒床长期运行中的积灰或磨损问题,且 CFD 模型未考虑颗粒-流体间的非均匀接触效应,未来模拟研究需要进一步优化。

Schwarzmayr 等^[56]针对钢铁工业含粉尘废气余热回收问题,提出了一种以气-粉两相废气为传热

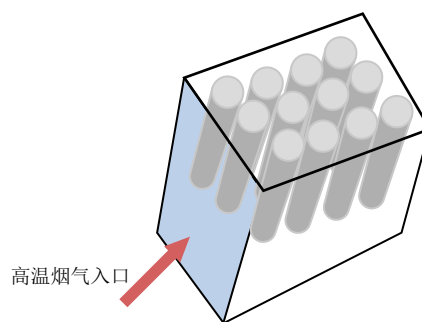


图5 热交换管排列示意图

Fig. 5 Schematic diagram of heat exchange tubes arrangement

流体,矿渣为储热介质的填充床储热系统,通过冷态实验发现,储热过程中,从填充床顶部通入的气-粉两相废气中 98% 的粉尘滞留在填充床内,释热过程中,从填充床底部通入的清洁空气不会将粉尘带出,有效控制粉尘污染问题。但实验发现,如图 6 所示,当空气质量通量为 $0.4 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,随着粉尘质量通量增加,当前填充床总压力降相对于初始干净床压力降的倍数,即相对压降增长更快且呈指数级增加,这反过来会影响循环性能。Schwarzmayr 等^[57]提出从填充床底部充热和顶部放热来应对粉末聚集问题,研究结果表明,虽然这种模式会导致温跃层退化,但仍保持释热效率大于 85%、烟效率大于 80% 的良好循环性能,同时明确定期清除底部粉末沉积的维护需求。Georgousis 等^[58]针对板式窑余热回收问题,提出了独立换热器(standalone heat exchanger, HEX)、填充床换热器(packed-bed thermal storage, PBTS)以及 HEX 与 PBTS 联合三种储热系统,其中填充床换热器以电弧炉钢渣球为储热介质,研究结果表明,优化设计的 PBTS 可以回收窑炉总余热输入的 28%,并在不到 0.32 年内回收投资成本。组合方案虽然回收热量最多,但经济性略逊于单独使用 PBTS,凸显单一填充床系统在特定场景的适配优势。

为了高效、低成本地回收工业烟气(如电厂、钢厂、石化、供暖锅炉等产生的 $100\sim 500^\circ\text{C}$ 烟气)中的余热,同时克服传统换热器(间壁式、热管式、蓄热式)存在的投资大、易磨损、易堵塞等问题^[59-60],提出了一种基于循环分散和集中固体载热颗粒的烟气余热回收装置^[61],即一种直接接触移动床换热器,具体结构如图 7 所示。储热系统利用循环的固体颗粒作为“热载体”,通过让颗粒在烟道

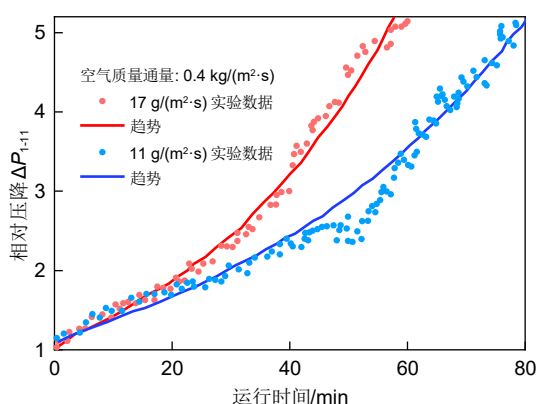


图6 粉末质量通量对气-粉两相流填充床压降的影响

Fig. 6 Effect of powder mass flux on pressure drop in gas-powder two-phase flow packed bed

中分散下落直接接触吸热, 然后集中起来在外部颗粒换热器中与冷水间接接触换热, 巧妙地解决了传统烟气换热器易磨损、易堵塞、效率受限的问题。该装置的核心在于“分散吸热-集中放热”的循环工艺和相应的装置设计, 充分利用了固体颗粒的比表面积大、直接接触换热系数高和抗动态扰动强的优势, 实现了烟气余热的高效、稳定、低成本回收。然而, 固体颗粒在系统中持续循环(经历分散、下落、集中、输送、换热碰撞), 即使选用耐磨材料(如陶瓷), 长期运行仍不可避免产生颗粒磨损粉末, 磨损产生的微细粉末可能随烟气逸出(增加除尘负担)或在换热器、管道中积聚, 影响系统效率和可靠性(如堵塞换热器管道、影响螺旋给料机工作)。因此, 颗粒磨损问题仍是储热系统设计需要考虑的因素。

Popuri等^[62]针对水泥等流程工业的高温烟气余热回收需求, 通过实验研究了流化床垂直立管系统中的气-固两相流动与传热特性。该研究基于现代水泥厂悬浮预热器系统设计缩比实验装置, 实验装置如图8所示。研究重点关注三种颗粒(砂粒、石灰石和黄铜矿)在流化床换热器中的传热行为。实验结果表明, 整体传热系数随气固进料速率变化显著, 当砂粒进口速率为0.0084 kg/s, 空气进口速率为0.0348 kg/s时, 传热速率为2931.85 J/s, 总传热系数为67.81 W/(m²·℃)。该流化床换热器内气固悬浮流化接触以及粉末状固体的高比表面积使其传热系数较高, 能快速实现气固两相温度平衡, 且能适配沙子、石灰石等多种固体颗粒, 通过调控气固参数可灵活适应不同场景以满足工业余热回收

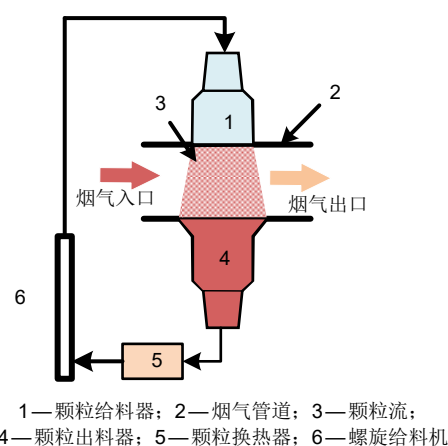


图7 基于循环分散和集中固体载热颗粒的烟气余热回收装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of a flue gas waste heat recovery unit based on cyclic dispersion and concentration of solid heat-carrying particles

需求。但是表观气速增大导致气固接触时间缩短, 传热不充分, 同时总传热系数波动较大, 部分工况(如石灰石进口速率较大时)储热效率偏低, 增加了运行调控难度。

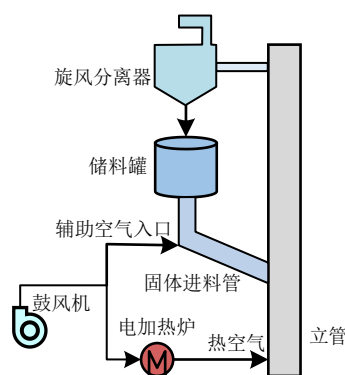


图8 流化床换热器示意图

Fig. 8 Schematic diagram of a fluidized bed heat exchanger

3.2.3 结构创新

压降对填充床储热系统很重要, 它影响泵、压缩机和膨胀机的容量, 以及辅助部件的选择。Trevisan等^[63]提出了一种创新的分层径向流高温填充床储热系统, 通过径向流动与分层颗粒设计协同优化压降和热效率。如图9所示, 储热时, 高温传热流体(heat transfer fluid, HTF)从中心多孔管进入装置, HTF沿径向由内向外流动, 先穿过内层(S1, 大颗粒, 如80 mm), 降低压降, 再流经中层(S2, 可选)和外层(S3, 小颗粒, 如20 mm), 增强传热,

最终汇入外部环形集流腔，从底部出口排出，释热过程则反之。结果表明，该设计相比均匀径向流和轴向流系统压降分别减少 70% 和 85% 以上，可显著降低压力损失的同时仅牺牲低于 5% 的有效储热时长，此研究为高温储热技术提供了兼具高性能与工程可行性的创新解决方案。

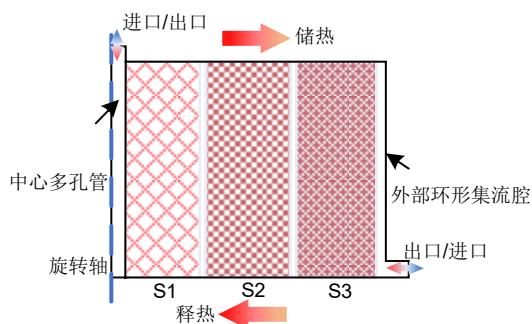


图9 新型分层径向水平填充床
Fig. 9 New layered radial flow packed bed

在移动床间接接触换热器中，圆形管道存在如图 10 所示顶部的滞止区和底部的空隙区，可以发现其呈菱形形状，这两个区域导致颗粒与管壁之间的换热面积减小^[18]。因此，沙特国王大学聚光太阳能发电团队与德国格林策巴赫公司(Grenzbach)合作，制造了一种采用菱形管道替代圆形管道的换热器，如图 11 所示。Alaqel 等^[64]通过实验研究了移动床管壳式换热器中红砂在菱形管上的传热特性，探讨了固体颗粒作为传热介质在聚光太阳能(concentrated solar power, CSP)等应用中的可行性。该换热器的热容量约为 100 kW，采用六程菱形管道(共 894 根管道)，传热面积约为 90 m²，实验使用利雅得红砂作为颗粒材料，微型燃气轮机的回热空气在管内流动用于加热红砂颗粒。实验发现，颗粒流速对传热性能影响显著，颗粒流速增加不到 20% 时，砂粒侧传热系数可提升超过 100%，砂粒侧换热系数最大可达 84 W/(m²·℃)，作者指出，若使用形状更均匀的细小颗粒，砂粒侧换热系数有望进一步提高。而总传热系数最大值约 30 W/(m²·℃)，该数值偏低，原因在于颗粒停留时间过长，导致缓慢流动的颗粒与管壁之间的热梯度减小，导致传热效果不佳。

图 12 展示了聚光太阳能发电领域移动床板壳式换热器模型^[65]，虽不属于高温烟气余热回收领域，但为烟气余热回收移动床板壳式换热器的设计

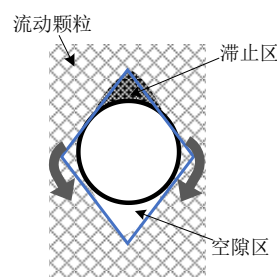


图10 滞止区和空隙区
Fig. 10 Stagnation zone and void zone

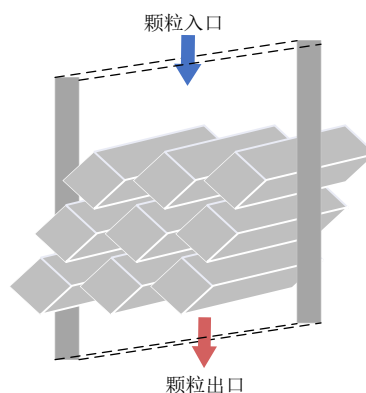


图11 移动床管壳式换热器
Fig. 11 Moving-bed shell-and-tube heat exchanger

提供了参考。蓝色箭头为SCO₂流动方向，红色箭头为颗粒流动方向。该换热器由多组垂直布置的窄宽平行板组成，整体为交叉逆流换热结构：SCO₂经蛇形集管在板组内从换热器底部流向顶部；单组板内为错流结构：颗粒在重力驱动下沿垂直方向流动，SCO₂沿水平方向流动。细颗粒在平行板间以密相流态向下流动，始终处于或接近堆积状态，保证了与垂直传热表面的良好接触^[66]。相比移动床水平管壳式换热器，移动床竖直板壳式换热器具有与颗粒接触的更大比表面积、较高传热系数等优点。然而，其性能提升仍受多重因素制约：一是换热过程中持续发展的热边界层会削弱传热效率；二是热应力易导致换热板面发生翘曲变形，破坏结构稳定性；三是流动通道存在阻塞风险，直接影响颗粒与流体的正常流动。针对上述问题，田兴等^[67]通过离散元法(discrete element method, DEM)研究了平板表面添加如图 13 所示的不同形状掺混单元(梯形、椭圆形、梯形+椭圆形和三角形)对颗粒流动与换热特性的影响。结果表明梯形掺混单元具有最高的掺混效率和传热强化效果，其下游区域传热系数平均提升 41.5%，能有效破坏温度边界层、减小接

触热阻和渗透热阻, 为提高移动床板壳式换热器的换热性能提供了有效的结构优化方案。

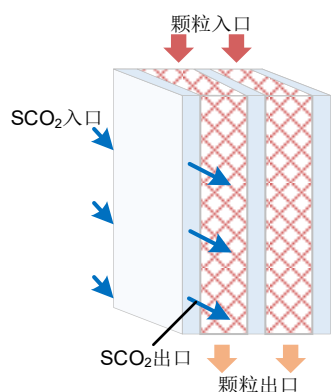


图 12 颗粒- SCO_2 移动床板壳式换热器

Fig. 12 Particle- SCO_2 moving-bed plate-shell heat exchanger

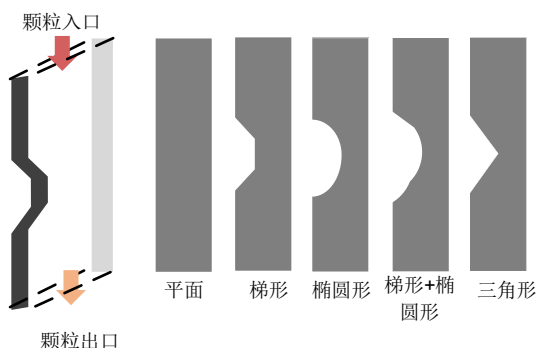


图 13 不同掺混单元的几何模型

Fig. 13 Geometry of different mixing elements

Zheng 等^[68]针对高温气固热化学储能系统, 提出了一种基于反应性钙基颗粒的流化床换热器装置。通过建立结合化学反应动力学与气固传热特性的模型, 对比了单级与多级逆流结构及显热、显热-化学复合两种储热方式的性能, 发现复合储热可使换热器管长缩短为 1/3.5、颗粒质量流量降低为 1/11.5, 两级换热器转化率(99.95%)显著高于单级(97.30%), 并通过敏感性分析明确颗粒比表面积、管直径等参数对系统效能与转化率的影响, 为高效紧凑的热化学储热换热器研发及 CSP 系统优化提供了理论与设计支撑。如图 14 所示, 该新型颗粒- SCO_2 流化床换热器的工作流程如下: 高温蓄热 CaO 颗粒进入流化床换热器, CO_2 分两股流动, 第一股通过底部气体分布器均匀分布, 将流化床换热器的蓄热颗粒流态化, 并与颗粒直接接触, 而管束内流动的 SCO_2 与蓄热颗粒逆流间接接触换热,

加热后的 SCO_2 进入布雷顿动力循环系统。研究人员进一步通过敏感性分析验证了系统运行稳定性, 但未明确讨论长期循环中的颗粒磨损或反应失活问题。虽然该系统不属于高温烟气余热回收领域, 但为烟气余热回收流化床换热器的设计提供了参考。

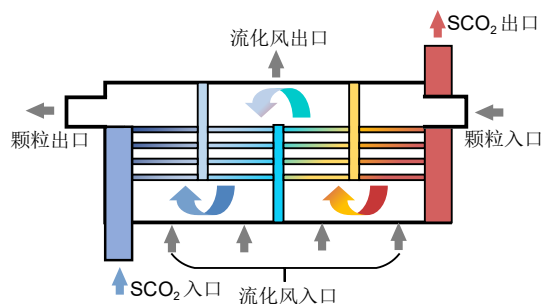


图 14 颗粒- SCO_2 流化床换热器

Fig. 14 Particle- SCO_2 fluidized bed heat exchanger

Jian 等^[69]针对固体废弃物热处理的需求, 提出了一种包含进口段螺旋式、中段平板式、出口段 L 型扬料板的新型三段式结构回转窑, 具体结构如图 15 所示, 通过实验与数值模拟结合的方法系统研究了颗粒运动与传热特性。研究团队首先制作了实验室规模的回转窑装置并进行实验, 验证了 CFD-DEM 耦合模型的准确性。通过该模型, 研究分析了烟气入口温度、进料速率和转速对颗粒行为和传热的影响。在烟气入口温度 700°C 、颗粒进料速率 25 kg/h 以及回转窑转速 3 r/min 的条件下, 数值模拟与实验颗粒出口温度约为 400°C 。颗粒出口温度与烟气入口温度呈线性正相关, 与进料速率和转速呈负相关, 整体体积传热系数介于 $200\sim 700\text{ W}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$, 为复杂回转窑的结构优化与运行参数调控提供了理论依据和数据支撑。

结合 3.2.2 节所提到的典型储热装置, 可以发现烟气-颗粒换热器主要有填充床、移动床、流化床以及回转窑等结构形式, 表 4 总结了不同烟气-颗粒换热器的优缺点以及适用场景。在上述烟气-颗粒换热器中, 填充床换热器因其结构简单、技术成熟、成本低、颗粒磨损小等优势在烟气余热回收领域应用较广, 但难以平衡传热和压降, 且温跃层存在衰减导致换热性能较差的问题。移动床直接接触换热器结构简单、成本低、传热系数高, 但是存在颗粒夹带问题且技术不成熟, 难以工业放大。移动床管壳式换热器因其设计成熟、结构紧凑、温度与压力范围宽等优势被广泛使用在高温烟气余热回

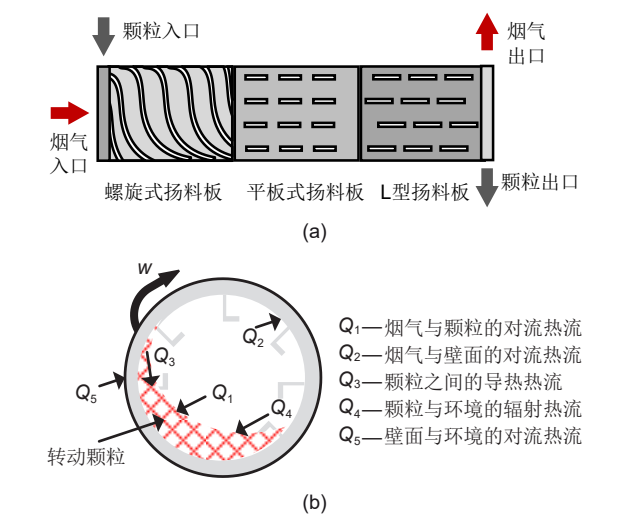


图 15 回转窑结构和运动颗粒：(a) 回转窑结构简图；
(b) 颗粒运动和传热主图

Fig. 15 Rotary kiln structure and moving particles:
(a) Schematic diagram of rotary kiln structure;
(b) Particle motion and heat transfer main diagram

收领域，但受其管道顶部颗粒的停滞区和底部的空隙区影响，导致在实际应用中换热性能有限。相比移动床水平管壳式换热器，移动床竖直板壳式换热器具有颗粒接触的比表面积更大、传热系数较高等

优点，但受压降、高温颗粒膨胀、流动通道的阻塞和承压能力的限制，导致换热板制造工艺更复杂，成本更高且清洁和维护的难度也高于简单平板结构。流化床换热器技术成熟、传热系数高、颗粒储热提升一体化，但烟气出口温度与颗粒温度相同，不可逆损失大同时颗粒存在磨损。回转窑换热器结构紧凑、处理颗粒量大、运行稳定性高，然而存在局部换热不均导致传热性能受限且能耗与维护成本较高。为满足日益复杂的工业需求，未来需积极探索新型烟气-颗粒换热器，推动换热技术向更高效、节能、稳定的方向发展。

在工业余热回收领域，解决换热器的灰垢积累问题与储热系统设计优化同等重要。针对传统换热器易堵塞问题，新型换热结构不断涌现，Tang 等^[70]针对烟气余热回收中飞灰颗粒导致的换热器污垢问题，研究了不同换热表面(对齐圆管束、H 型翅片管束、蜂窝管束及蜂窝 H 型翅片管束)在积垢状态下的传热系数衰减程度与污垢热阻，结果表明蜂窝 H 型翅片管束兼具高抗积灰性(热阻最低)、易清灰特性、适合含尘烟气余热回收场景，为工业余热回收换热器设计提供直接依据。

表 4 烟气-颗粒换热器特点

Table 4 Features of flue gas-particle heat exchangers

类型	优点	缺点	适用场景
填充床换热器	结构简单、成本低、技术成熟，颗粒磨损小	体积庞大、换热性能差、难以平衡传热和压降、热响应速度慢	宽温域储热、低成本需求
移动床直接接触换热器	重力驱动、结构简单、成本低、传热系数高	存在颗粒夹带问题、局部颗粒换热不均匀、难以工业放大	中高温、含尘、易腐蚀烟气
移动床管壳式换热器	重力驱动、传热系数高、不存在工质污染风险、结构紧凑	管道顶部颗粒的停滞区和底部的空隙区影响换热，成本较高	高温储热、无污染要求场景
移动床板壳式换热器	重力驱动、传热系数高、结构紧凑且设计灵活	压降增加、易堵塞、制造与维护复杂性增加	对工作温度、系统可靠性和换热效率有极高要求
流化床换热器	技术成熟、传热系数高、颗粒储热提升一体化	不可逆损失大、流化风能量损失、颗粒夹带与磨损	中高温储热、高传热、高气速、高固含率系统
回转窑换热器	结构紧凑、处理量大、运行稳定性较高	局部换热不均、能耗与维护成本较高、传热性能受限	高温、长停留时间、良好物料混合和高效热交换的固体处理过程

图 16 为 H 型翅片和锯齿螺旋翅片结构示意图。锯齿螺旋翅片管换热器因其比传统翅片管(如 H 型)有更高的传热性能而广泛应用于低温余热回收，但其积灰特性研究较少。Tian 等^[71]针对余热利用中锯齿螺旋翅片管换热器的积灰问题，建立了综合考虑颗粒碰撞能量变化、反弹/滑移后速度变化以及混合粒径时间放大效应的松散积灰模型。通过数值模

拟研究发现，锯齿螺旋翅片因高翘化比和强扰动效应成为主要积灰区域，翅片高度增加 6 mm 仅使沉积率提高 1.2%，而锯齿高度增加 5 mm 则导致沉积率显著增加 14.3%，锯齿高度对积灰的影响远大于总翅片高。与 Tang 等^[70]相比，该研究更侧重微观沉积机制建模模拟，而前者聚焦宏观抗污垢结构对比，两者共同完善了工业烟气余热回收中“机理-

结构”协同优化的研究,未来应开发兼具抗污染与高效传热的余热回收装置。



图16 H型翅片和锯齿型翅片

Fig. 16 H-shaped fins and serrated fins

3.3 工程应用与示范项目

当前高温烟气加热固体颗粒储热技术多数研究停留在实验室原型验证层面,规模化工业应用案例相对较少。而CSP领域的颗粒储热技术已形成成熟的工程示范体系,其在填充床、移动床、流化床等核心装置设计、介质选型、系统集成等方面的实践经验,为高温烟气余热回收场景的技术转化提供了重要借鉴,推动高温烟气颗粒储热技术逐步从实验室走向工业落地,形成了多装置类型、多应用场景的工程示范。

针对工业中高温余热回收需求,法国生态科技陶瓷公司(Eco-Tech Ceram SAS)研发了Eco-Stock[®]工业级集装箱式水平填充床储热系统(图17)^[72],该系统采用集装箱化设计,以16吨铝土矿陶瓷为储热介质,容积8.9 m³,储热容量达1.9 MWth,可适配525℃中高温余热场景,储热/放热功率分别为300 kWth、350 kWth。500小时实验验证显示,系统无沟流效应,径向热梯度温和,铝土矿陶瓷储热占比89%,保温层储热(6.3%)可回收,放热阈值为200℃时余热利用率(释热效率)达90%。首次完成填充床TES系统从“实验室原型”到“工业级装置”的转化,验证了集装箱化设计在工业场地灵活部署的可行性,为工业场地灵活部署提供方案,其高回收效率与稳定循环性能,为中高温工业余热回收提供了可规模化复制的工程范例。

沙特国王大学将加拿大Solex公司(Solex Thermal Science Inc.)研发的50 kWth移动床管壳式颗粒-空气换热器,集成于聚光太阳能发电测试平台,如图18所示^[73]。系统采用陶瓷颗粒为储热介质,颗粒在垂直管内重力流动,空气于壳程侧换热,规避了滞止区与长停留时间问题。实验验证显

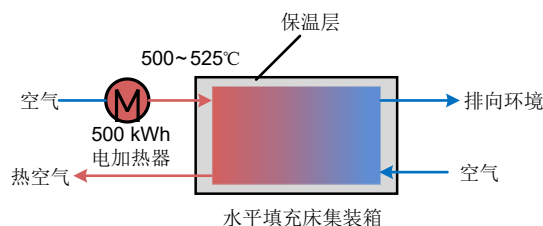


图17 水平填充床储热系统示意图

Fig. 17 Schematic diagram of horizontal packed-bed thermal energy storage system

示,颗粒流量提升可显著优化传热性能,总传热系数最高达151.97 W/(m²·℃),满足美国能源部目标值,空气侧压降仅5 kPa,热损失占比小于3%,换热器储热效能最高可达97.6%。该装置为聚光太阳能发电领域的高温热能传递提供了高效稳定的工程方案,对固体颗粒储热技术的规模化应用具有重要参考价值。

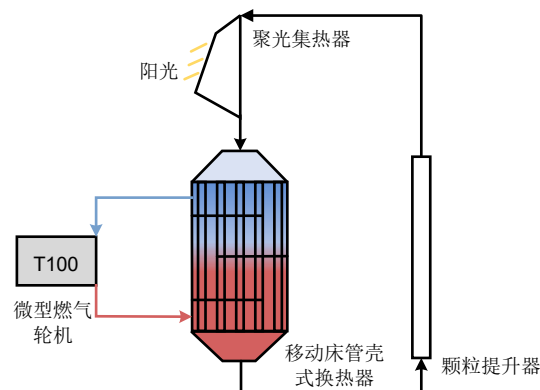


图18 T100余热驱动下的颗粒加热循环流程图

Fig. 18 T100 particle heating cycle flowchart driven by waste heat

清华大学与鄂尔多斯实验室在内蒙古自治区及鄂尔多斯市政府支持下,推进高温固体颗粒储热技术工程化应用,已完成MWh级高温固体颗粒中试示范装置建设,百MWh级工业示范装置设计就绪,2025年底即将建成投产^[17]。该工程化方案利用电磁感应加热、氮气传热与颗粒储热介质耦合的技术路线,如图19所示,成功打破大功率电磁感应加热过程中的热量传递瓶颈,突破电磁感应线圈散热难以回收等关键技术瓶颈。中试装置设计参数:储热温度600~1500℃、储热效率≥90%,输出0.1 t/h、3.0 MPa工业蒸汽,其为工业余热回收、绿电消纳提供规模化、高适配性的工程实践范例^[74]。

以上国内外工程示范项目包括中高温余热回

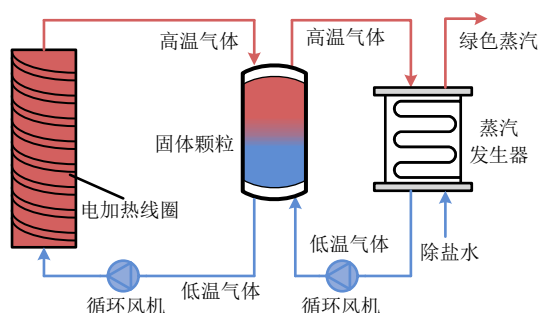


图 19 高温固体颗粒储热技术原理图

Fig. 19 Schematic diagram of high-temperature solid particle thermal energy storage technology

收、聚光太阳能发电等场景。聚光太阳能领域积累的成熟工程实践,不仅为高温烟气加热固体颗粒储热技术落地提供了可借鉴的工程示范,更通过实践验证了填充床、移动床、流化床等不同储热装置在高温环境适应性、传热效率提升及长期稳定运行等关键技术可行性。未来需进一步依托现有工程基础,针对高温烟气含尘、腐蚀性、温度波动等特有工况,优化固体颗粒耐磨防腐性能与装置适配性,推动技术从“可应用”向“规模化普及”迈进,为工业余热高效回收与能源低碳转型提供更具针对性的工程解决方案。

3.4 高温烟气加热固体颗粒储热技术挑战

高温烟气加热固体颗粒技术在理论研究与工业应用中仍面临多维度挑战,主要体现在材料性能、传热机理、装置设计及规模化应用四个层面。

(1) 储热材料性能局限性。天然材料(如岩石)在高温循环下易因矿物不稳定发生碎裂,显著影响系统长期运行稳定性;工业固废的长期热稳定性与腐蚀风险缺乏系统性实验验证与长期数据支撑,影响其大规模工程化应用的可靠性评估。部分高性能材料(如 SiC)虽具备优异的热稳定性与热导率,但其高昂成本限制了经济可行性;而低成本材料(如硅砂)则受限于较低的体积储热密度和低热导率导致的充/放热速率较慢。

(2) 复杂工况下的传热机理与预测模型欠缺。现有针对立管等特定流场的经验性传热关联式(如 Nusselt 数关联式)对实际工业烟气中普遍存在的高温湍流、宽粒径分布、非球形颗粒及高粉尘浓度等复杂因素适应性不足,难以实现传热系数与效率的精准预测。尚未构建储热装置内颗粒磨损和灰分沉积在不同流场结构以及温度场分布相互作用机制下的系统化耦合模型,缺乏对传热性能退化(如污垢

热阻增加)的量化评估工具,制约了装置的循环稳定性与寿命预测。

(3) 颗粒流动、装置传热与运行的耦合难题。在烟气-颗粒换热领域,现有填充床、移动床直接接触式、移动床管壳式、移动床板壳式、流化床以及回转窑换热器各有其优势与局限性。填充床换热器虽结构简单、成本低,但换热性能欠佳;移动床直接接触换热器传热系数高,却存在颗粒夹带及难以工业放大的问题;移动床管壳式换热器结构紧凑且无工质污染风险,不过成本较高且颗粒分布影响换热;移动床板壳式换热器换热面积更大、传热系数更高,但易堵塞且制造与维护复杂性增加;流化床换热器技术成熟且传热系数高,但不可逆损失与颗粒磨损问题突出;回转窑换热器运行稳定、处理量大,却面临局部换热不均与能耗偏高的困境。

(4) 跨行业适配性挑战,不同工艺的高温烟气在温度水平、粉尘特性(浓度、粒径、化学成分)、腐蚀性组分(SO_x , 碱金属蒸汽)等方面都存在显著差异。缺乏针对不同烟气特性的标准化储热装置设计准则、颗粒选型规范及运行控制策略,同时增加了技术跨工艺复现的难度与成本。

在储热材料方面,天然岩石与工业固废展现出良好的应用前景,但其长期热稳定性与导热性能仍是关键;在传热机理方面,通过耦合颗粒动力学理论的数值模型等工具,实现了对装置内流场、温度场的精准模拟,为结构优化提供了关键理论支撑;在储热装置方面,通过填充床、流化床等的结构创新与优化设计,系统在传热效率、抗积灰方面取得了进展;在工程应用方面,国内外中试与示范项目的成功运行,初步验证了该技术路线的工程可行性。然而,正如 3.4 节所深入剖析的,该技术仍面临材料性能局限性、装置长期运行可靠性以及复杂工况下系统控制等挑战。为了突破这些瓶颈,亟需在材料复合改性、装置协同设计与智能控制等领域开展深入研究,从而推动该技术迈向规模化、商业化应用。

4 结 论

固体颗粒凭借宽温域适配、低成本、化学稳定性高及系统兼容性强等特点,较熔盐等储热介质更适用于高温烟气场景,在钢铁、水泥等高耗能行业的余热回收中潜力突出。高温烟气加热固体颗粒技

术已成为提升工业余热回收效率与实现大规模长时热能存储的关键技术发展方向之一, 本文系统综述了其基本原理、材料体系、装置进展及面临挑战, 面向该技术的性能突破与工程化应用, 未来研究应着力于以下关键方向。

(1) 开发天然材料改性(如添加高导热材料SiC)与工业固废复合(钢渣-陶瓷)的新型储热材料, 提升高温稳定性与能量密度, 旨在开发低成本、高导热系数、高体积热容的综合性储热材料; 建立涵盖热物理性质、长期热/机械循环性能及腐蚀行为的大型材料数据库, 提出寿命预测模型与选材标准。

(2) 开发结合CFD、DEM及颗粒磨损/积灰动力学模型的多场耦合数值预测模型, 定量揭示颗粒运动、磨损、沉积与传热/流动的相互作用机制。发展适用于高温、高尘、变物性等复杂工业条件的高精度气固传热与压降预测模型, 为装置放大提供理论依据。

(3) 开发兼具优异热稳定性和高效能量传输能力的新型复合换热结构, 针对不同温区不同来源的烟气余热, 开发与之匹配的新型换热器结构, 借鉴不同换热器的优势, 设计更高效的流道与颗粒分布形式, 减少换热死区, 提升换热均匀性, 提高能量传输能力; 开发新型材料, 采用耐高温、耐磨损且导热性能优异的材料制作换热器部件, 延长设备使用寿命, 同时增强换热效果; 结合智能控制技术, 实时监测与调节换热过程中的参数, 如温度、颗粒流速等, 实现精准换热, 降低不可逆损失与能耗。

(4) 推动工业级示范验证与应用, 验证规模化运行的稳定性与经济性; 制定跨行业技术标准(如烟气参数适配、颗粒选型规范)。结合“双碳”目标, 强化与 SCO_2 布雷顿循环、灵活调峰、零碳园区区域供热等系统的集成, 提升工业余热的梯级利用效率, 助力能源系统低碳转型。

综上所述, 高温烟气加热固体颗粒储热技术通过突破储热材料、机理与换热装置瓶颈, 有望成为工业余热回收领域的核心支撑技术, 为我国节能减排与“双碳”目标的实现提供关键技术支撑。

参考文献

[1] 国家统计局社会科技和文化产业统计司. 中国统计年鉴2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024: 10.40049/y.cnki.yinf.2024.000001.

[2] 姚远, 陆振能, 曲勇, 等. 面向工业应用场景的超高温蒸汽热泵研究进展[J]. 新能源进展, 2025, 13(1): 39-50. DOI:10.3969/j.issn.2095-560X.2025.01.006.
YAO Y, LU Z N, QU Y, et al. Research progress on ultra-high temperature steam heat pumps for industrial application[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2025, 13(1): 39-50. DOI:10.3969/j.issn.2095-560X.2025.01.006.

[3] MIRÓ L, GASIA J, CABEZA L F. Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review[J]. Applied Energy, 2016, 179: 284-301. DOI:10.1016/j.apenergy.2016.06.147.

[4] THEKDI A, NIMBALKAR S. Industrial waste heat recovery-potential applications, available technologies and crosscutting R&D opportunities[R/OL]. (2014-12-25) [2025-10-20]. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub52987.pdf>.

[5] ONONOGBO C, NWOSU E C, NWAKUBA N R, et al. Opportunities of waste heat recovery from various sources: Review of technologies and implementation[J]. Heliyon, 2023, 9(2): e13590. DOI:10.1016/j.heliyon.2023.e13590.

[6] CHRISTODOULIDES P, AGATHOKLEOUS R, ARESTI L, et al. Waste heat recovery technologies revisited with emphasis on new solutions, including heat pipes, and case studies[J]. Energies, 2022, 15(1): 384. DOI:10.3390/en15010384.

[7] NYAKUMA B B, MAHYON N I, CHIONG M S, et al. Recovery and utilisation of waste heat from flue/exhaust gases: A bibliometric analysis (2010–2022) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(39): 90522-90546. DOI: 10.1007/s11356-023-28791-4.

[8] 陈晓庆. 转炉高温烟气石灰石粉分解特性及实验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
CHEN X Q. Decomposition characteristics and experimental study of limestone powder in converter high temperature flue gas [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.

[9] 路哲. 我国工业余热回收利用技术现状分析[J]. 装备制造技术, 2019 (12): 204-206. DOI:10.3969/j.issn.1672-545X.2019.12.055.
LU Z. Analysis on current situation of industrial waste heat recovery in China[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019 (12): 204-206. DOI:10.3969/j.issn.1672-545X.2019.12.055.

[10] 王慧博, 王敏, 邢立东. 转炉烟气余热回收利用技术现状及展望[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(12): 1499-1509. DOI:10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20240179.
WANG H B, WANG M, XING L D. Current status and prospects of waste heat recovery of converter flue[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(12): 1499-1509. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20240179.

[11] 国家发展改革委, 工业和信息化部, 生态环境部, 等. 国家发展改革委等部门关于印发《钢铁行业节能降碳专项行动计划》的通知:发改环资〔2024〕730号[EB/OL]. (2024-05-27) [2025-10-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202406/t20240607_1386774_ext.html.

[12] OYEDEPO S O, FAKEYE B A. Waste heat recovery technologies: Pathway to sustainable energy development[J]. Journal of Thermal Engineering, 2021, 7(1): 324-348. DOI: 10.18186/thermal.850796.

- [13] 何雅玲. 工业余热高效综合利用的重大共性基础问题研究[J]. 科学通报, 2016, 61(17): 1856-1857.
- HE Y L. Research on major common basic problems of efficient comprehensive utilization of industrial waste heat[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(17): 1856-1857.
- [14] ERMIŞ K, FINDIK F. Thermal energy storage[J]. Sustainable Engineering and Innovation, 2020, 2(2): 66-88. DOI:10.37868/sei.v2i2.115.
- [15] JI Z C, SONG G L, TANG Z H, et al. Effect of air distribution on the transport characteristics of solid particles in the thermal storage and release system of circulating fluidized bed[J]. Journal of Thermal Science, 2024, 33(4): 1554-1563. DOI: 10.1007/s11630-024-1902-7.
- [16] BAUER T. Fundamentals of high-temperature thermal energy storage, transfer, and conversion[M]//Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion. Amsterdam: Elsevier, 2021: 1-34. DOI:10.1016/b978-0-12-819955-8.00001-6.
- [17] 张晨曦, 王泽众, 谢劲超, 等. 电加热在高温固体颗粒储热中的应用[J]. 工业加热, 2025, 54(4): 1-10, 25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1639.2025.04.001.
- ZHANG C X, WANG Z Z, XIE J C, et al. Applications of electro-thermal conversions in high-temperature solid-particle thermal energy storage[J]. Industrial Heating, 2025, 54(4): 1-10, 25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1639.2025.04.001.
- [18] 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. DOI:10.3390/su17167244.
- [19] GEORGIOUSIS N, DIRIKEN J, SPEETJENS M, et al. Comprehensive review on packed-bed sensible heat storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 121: 116516. DOI: 10.1016/j.est.2025.116516.
- [20] SCHWARZMAYR P, BIRKELBACH F, WALTER H, et al. Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study[J]. Applied Energy, 2023, 337: 120917. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.120917.
- [21] MA Z, MEHOS M, GLATZMAIER G, et al. Development of a concentrating solar power system using fluidized-bed technology for thermal energy conversion and solid particles for thermal energy storage[J]. Energy Procedia, 2015, 69: 1349-1359. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.136.
- [22] 邓升安, 楼国锋, 徐科珺, 等. 移动床固体颗粒绕流顺排圆管的过程[J]. 工程科学学报, 2018, 40(6): 735-742. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2018.06.012.
- DENG S A, LOU G F, XU K J, et al. Particles flowing process across aligned tubes in a moving bed[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(6): 735-742. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2018.06.012.
- [23] 张宇, 刘文仲, 刘小芳. 翅片管换热器内烟气对流换热模拟研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 189-194. DOI: 10.12415/j.issn.1671-7872.23065.
- ZHANG Y, LIU W Z, LIU X F. Simulation study on convective heat transfer of flue gas in fin-and-tube heat exchangers[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2024, 41(2): 189-194. DOI:10.12415/j.issn.1671-7872.23065.
- [24] ALI H M, REHMAN T U, ARICI M, et al. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, 100: 101109. DOI: 10.1016/j.peccs.2023.101109.
- [25] 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. DOI:10.1016/j.solmat.2025.113562.
- [26] JURCZYK M, SPIETZ T, CZARDYBON A, et al. Review of thermal energy storage materials for application in large-scale integrated energy systems—Methodology for matching heat storage solutions for given applications[J]. Energies, 2024, 17(14): 3544. DOI:10.3390/en17143544.
- [27] 冷光辉, 曹惠, 彭浩, 等. 储热材料研究现状及发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1058-1075.
- LENG G H, CAO H, PENG H, et al. The new research progress of thermal energy storage materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(5): 1058-1075.
- [28] TISKATINE R, OADDI R, AIT EL CADI R, et al. Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 169: 245-257. DOI:10.1016/j.solmat.2017.05.033.
- [29] KRÜGER M, HAUNSTETTER J, KNÖDLER P, et al. Slag as an inventory material for heat storage in a concentrated solar tower power plant: Design studies and systematic comparative assessment[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1833. DOI:10.3390/app9091833.
- [30] 翟茂林, 王伟, 吴玉庭, 等. 混凝土和混凝土-熔盐两种蓄热结构蓄热过程的对比分析[J]. 可持续能源, 2020(1): 1-16.
- ZHAI M L, WANG W, WU Y T, et al. Comparative analysis of heat storage processes of concrete and concrete-molten salt heat storage structures[J]. Sustainable Energy, 2020(1): 1-16.
- [31] LAING-NEPUSTIL D, ZUNFT S. Using concrete and other solid storage media in thermal energy storage systems[M]//Advances in Thermal Energy Storage Systems. Amsterdam: Elsevier, 2021: 83-110. DOI:10.1016/b978-0-12-819885-8.00004-8.
- [32] ALVA G, LIU L K, HUANG X, et al. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 693-706. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.021.
- [33] XU R T, ZHANG C C, WANG G Q, et al. Molten salt stress corrosion of metal alloys—An updated review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 282: 113379. DOI: 10.1016/j.solmat.2024.113379.
- [34] 高松. 熔盐储热技术应用浅析[J]. 机电信息, 2025(7): 86-88. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2025.07.022.
- GAO S. Application of molten salt heat storage technology[J]. Mechanical and Electrical Information, 2025(7): 86-88. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2025.07.022.
- [35] 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. DOI:10.1016/j.solener.2023.111908.
- [36] 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. DOI:10.1016/j.joule.2023.03.016.
- [37] 陶志强, 赵庆, 唐豪杰, 等. 应用于工业余热的超临界二氧化碳布雷顿循环系统的热力学和焓分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39 (23): 6944-6951, 7107. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.190204.
- TAO Z Q, ZHAO Q, TANG H J, et al. Thermodynamic and exergetic analysis of supercritical carbon dioxide brayton cycle system applied to industrial waste heat recovery[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(23): 6944-6951, 7107. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190204.
- [38] 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]. 武汉: 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]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [39] 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. DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2024.06.016.
- 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 (6): 131-138. DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2024.06.016.
- [40] ORTEGA-FERNÁNDEZ I, RODRÍGUEZ-ASEGUINOLA J. Thermal energy storage for waste heat recovery in the steelworks: The case study of the RESlag project[J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 708-719. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.01.007.
- [41] YIN S W, XUE F Y, WANG X, et al. Heat transfer characteristics of high-temperature dusty flue gas from industrial furnaces in a granular bed with buried tubes[J]. *Energies*, 2020, 13(14): 3589. DOI:10.3390/en13143589.
- [42] 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. DOI: 10.1002/ese3.1478.
- [43] HAO J W, QIAO L, LIU Z Y, et al. Effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of sandstone for thermal energy storage: A comprehensive experimental study[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(9): 3887-3908. DOI: 10.1007/s11440-022-01514-8.
- [44] SOPRANI S, MARONGIU F, CHRISTENSEN L, et al. Design and testing of a horizontal rock bed for high temperature thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113345. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113345.
- [45] 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. DOI:10.1016/j.egypro.2015.03.202.
- [46] ANDERSON R, BATES L, JOHNSON E, et al. Packed bed thermal energy storage: A simplified experimentally validated model[J]. *Journal of Energy Storage*, 2015, 4: 14-23. DOI: 10.1016/j.est.2015.08.007.
- [47] 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. DOI:10.1016/j.solmat.2019.110088.
- [48] KEILANY M A, MILHÉ M, BÉZIAN J J, et al. Experimental evaluation of vitrified waste as solid fillers used in thermocline thermal energy storage with parametric analysis[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 29: 101285. DOI:10.1016/j.est.2020.101285.
- [49] AL-AZAWI M M S, ALHAMDI S F H, BRAUN S, et al. Thermocline in packed bed thermal energy storage during charge-discharge cycle using recycled ceramic materials - Commercial scale designs at high temperature[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 64: 107209. DOI:10.1016/j.est.2023.107209.
- [50] KAKI P, POPURI A K. Evolution of nusselt correlation for recovery of waste heat from industry flue gases using quarry dust and iron ore particles[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2023, 104(1): 205-212. DOI: 10.1007/s40033-022-00375-5.
- [51] ZHENG N, LIU H, FANG J B, et al. Numerical investigation of bed-to-tube heat transfer in a shallow fluidized bed containing mixed-size particles[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 211: 124252. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124252.
- [52] TIAN X, GUO Z G, JIA H N, et al. Numerical investigation of a new type tube for shell-and-tube moving packed bed heat exchanger[J]. *Powder Technology*, 2021, 394: 584-596. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.080.
- [53] LE ROUX D, LALAU Y, REBOUILLAT B, et al. Thermocline thermal energy storage optimisation combining exergy and life cycle assessment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 248: 114787. DOI:10.1016/j.enconman.2021.114787.
- [54] FANG W C, CHEN S, SHI S. Dynamic characteristics and real-time control of a particle-to-sCO₂ moving bed heat exchanger assisted by BP neural network[J]. *Energy*, 2022, 256: 124597. DOI:10.1016/j.energy.2022.124597.
- [55] MEHRAJ N, MATEU C, CABEZA L F. Artificial intelligence and thermal energy storage: A review of design techniques and applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 124: 116870. DOI:10.1016/j.est.2025.116870.
- [56] SCHWARZMAYR P, BIRKELBACH F, WALTER H, et al. Packed bed thermal energy storage for waste heat recovery in the iron and steel industry: A cold model study on powder hold-up and pressure drop[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 75: 109735. DOI:10.1016/j.est.2023.109735.
- [57] SCHWARZMAYR P, BIRKELBACH F, WALTER H, et al. Exergy efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage in partial cycle operation: An experimental study [J]. *Applied Energy*, 2024, 360: 122895. DOI:10.1016/j.apenergy.

- 2024.122895.
- [58] GEORGOUSIS N, DIRIKEN J, SPEETJENS M, et al. System configurations for shuttle kiln waste heat recovery: Comparing and combining a packed-bed thermal storage system and a heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127124. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.127124.
- [59] 吴冰洁. 工业炉烟气余热回收利用探究[J]. *中国设备工程*, 2025(6): 97-99. DOI:10.3969/j.issn.1671-0711.2025.06.040.
- WU B J. Exploration on recovery and utilization of waste heat from industrial furnace flue gas[J]. *China Plant Engineering*, 2025 (6): 97-99. DOI:10.3969/j.issn.1671-0711.2025.06.040.
- [60] 何雅玲, 汤松臻, 王飞龙, 等. 中低温烟气换热器气侧积灰、磨损及腐蚀的研究[J]. *科学通报*, 2016, 61(17): 1856-1876. DOI:10.1360/N972016-00248.
- HE Y L, TANG S Z, WANG F L, et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(17): 1856-1876. DOI:10.1360/N972016-00248.
- [61] 睢辉, 屈晓航, 刘永启, 等. 基于循环分散和集中固体载热颗粒的烟气余热回收装置和工艺: CN111271998A[P]. 2020-06-12.
- [62] POPURI A K, GARIMELLA P. Heat transfer studies in a laboratory vertical riser system suitable for waste heat recovery from industrial waste exhaust gases[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2020, 207(11): 1616-1623. DOI: 10.1080/00986445.2019.1708739.
- [63] TREVISAN S, GUEDEZ R. Design optimization of an innovative layered radial-flow high-temperature packed bed thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 83: 110767. DOI: 10.1016/j.est.2024.110767.
- [64] ALAQEL S, EL-LEATHY A, AL-ANSARY H, et al. Experimental investigation of the performance of a shell-and-tube particle-to-air heat exchanger[J]. *Solar Energy*, 2020, 204: 561-568. DOI: 10.1016/j.solener.2020.04.062.
- [65] ALBRECHT K J, HO C K. Design and operating considerations for a shell-and-plate, moving packed-bed, particle-to-sCO₂ heat exchanger[J]. *Solar Energy*, 2019, 178: 331-340. DOI: 10.1016/j.solener.2018.11.065.
- [66] CHENG Z L, TAN Z T, GUO Z G, et al. Technologies and fundamentals of waste heat recovery from high-temperature solid granular materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115703. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.115703.
- [67] 田兴, 张家悦, 郭志罡, 等. 颗粒外掠含不同掺混单元平板的流动换热特性[J]. *化工学报*, 2022, 73(11): 4884-4892. DOI:10.11949/0438-1157.20221011.
- TIAN X, ZHANG J Y, GUO Z G, et al. Flow and heat transfer characteristics of particles flowing along the plate with different mixing elements[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(11): 4884-4892. DOI:10.11949/0438-1157.20221011.
- [68] ZHENG H B, LIU X L, FLAMANT G. Design of reactive particle fluidized bed heat exchangers for gas-solid thermochemical energy storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489: 151305. DOI:10.1016/j.cej.2024.151305.
- [69] JIAN Q S, GU H L, WANG K G, et al. Numerical study of particle behaviours and heat transfer in a complex rotary kiln[J]. *Particology*, 2024, 92: 81-94. DOI:10.1016/j.partic.2024.04.004.
- [70] TANG S Z, HE Y L, WANG F L, et al. On-site experimental study on fouling and heat transfer characteristics of flue gas heat exchanger for waste heat recovery[J]. *Fuel*, 2021, 296: 120532. DOI:10.1016/j.fuel.2021.120532.
- [71] TIAN K, GUO Z F, MA T, et al. Numerical investigation on ash accumulation characteristics of serrated spiral finned tube heat exchanger in waste heat utilization[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 250: 123512. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123512.
- [72] 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. DOI:10.1016/j.est.2020.101894.
- [73] 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. DOI:10.3390/app12084055.
- [74] 清华大学碳中和研究院. 清华大学合作研究团队MWh级高温固体颗粒储热中试装置开车成功[EB/OL]. (2025-07-11) [2025-10-20]. <https://www.icon.tsinghua.edu.cn/info/1066/1828.htm>.