



## 固态颗粒储热材料动态放热特性实验研究

相海杰<sup>1</sup>, 闫家幸<sup>2</sup>, 黄煜<sup>1</sup>, 胡翠华<sup>1</sup>, 陈麒光<sup>3</sup>, 邢作霞<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中油(新疆)石油工程有限公司, 新疆 克拉玛依 834000; <sup>2</sup>沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; <sup>3</sup>东北财经大学数据科学与人工智能学院, 辽宁 大连 116025)

**摘要:** 为比较固态颗粒储热材料在非稳态放热过程中的温度响应, 选取钢渣、沙漠沙和铝矾土, 在电加热-颗粒储热-闭式空气循环实验平台上, 分析初始设定温度400~800℃及储热管内径28 mm、45 mm条件下的温度-时间记录。以50℃为统一计算参照, 区分降至该温度的特征冷却时间、持续10 min低于指定降温速率的判据时间, 以及由目标温度和供热功率要求确定的有效放热终止时间。基于集中参数能量关系计算参照时间因数、对数放热进程和参照等效换热系数, 并在三种材料共同覆盖的100 K、200 K降温区间开展综合评价及权重敏感性分析。计算采用常物性和圆柱装填近似, 温区边界时刻由线性插值获得; 各指标按同组材料极差归一化, 并以两两得分交点确定排序临界权重。结果表明, 800℃名义工况下, 28 mm管中钢渣、沙漠沙和铝矾土降至50℃的时间较45 mm管分别缩短13.75%、12.64%和4.11%。在相同材料和共同温区的比较中, 小管径的区间平均降温速率提高15.3%~84.1%, 但按内侧面折算的平均显热释放通量变化为-28.3%~14.5%, 不呈统一下降趋势。800℃、45 mm工况下, 三种材料降温速率峰值对应的对数进程分别约为0.071、0.083和0.057; 不同初始温度的换热响应不存在全历程一致的排序。按持续性权重0.70和0.40分别评价100 K和200 K降温区间, 钢渣在所比较工况中均得分最高, 但部分工况的首位材料会随权重改变。研究明确了热响应评价与负荷侧供热能力之间的区别, 可为给定装置构型下的材料和管径比较提供依据。

**关键词:** 电制热储能; 固态颗粒储热; 动态放热; 时间因数; 等效总换热系数

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0773

中图分类号: TM 932

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 10-4161-11

## Experimental study on the dynamic heat release characteristics of solid particle thermal storage materials

XIANG Haijie<sup>1</sup>, YAN Jiaying<sup>2</sup>, HUANG Yu<sup>1</sup>, HU Cuihua<sup>1</sup>, CHEN Qiguang<sup>3</sup>, XING Zuoxia<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>China Petroleum (Xinjiang) Petroleum Engineering Co., Ltd., Karamay 834000, Xinjiang, China; <sup>2</sup>School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China; <sup>3</sup>School of Data Science and Artificial Intelligence, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China)

**Abstract:** This study compares the transient temperature responses of steel slag, desert sand, and bauxite in a thermal storage apparatus comprising electric heating, particle-filled tubes, and closed-loop air circulation. Measured temperature histories were analyzed for nominal initial temperatures of 400—800℃ and tube inner diameters of 28 and 45 mm. A fixed

收稿日期: 2026-09-04; 修改稿日期: 2026-10-09。

基金项目: 中国石油工程建设有限公司科研项目 (CPECC2025KJ12)。

第一作者: 相海杰 (1987—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为热能与动力和新能源, E-mail: 836971381@qq.com; 通信作者: 邢作霞, 教授, 研究方向为新能源控制与并网技术, E-mail: 2148109448@qq.com。

引用本文: 相海杰, 闫家幸, 黄煜, 等. 固态颗粒储热材料动态放热特性实验研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(10): 4161-4171.

**Citation:** XIANG Haijie, YAN Jiaying, HUANG Yu, et al. Experimental study on the dynamic heat release characteristics of solid particle thermal storage materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(10): 4161-4171.

reference temperature of 50°C was used to distinguish three quantities: the characteristic cooling time to this temperature, the first time at which a prescribed low cooling rate persisted for 10 min, and the useful-discharge endpoint defined by the temperature and heat delivery requirements of the load. Reference-based time factors, logarithmic discharge progress, and equivalent heat transfer coefficients were calculated using a lumped energy relation. Composite scores and weight sensitivity were evaluated over common measured temperature intervals with drops of 100 and 200 K. All comparisons used the same material density and specific heat values within a constant-property approximation. Packed masses were estimated from the cylindrical filling volume, and the reference heat transfer area was the inner lateral tube surface. The calculation intervals were selected from the measured temperature ranges shared by all three materials, without extrapolating the data to nominal starting temperatures that were not reached. Linear interpolation determined the times at which the interval boundaries were crossed. Each indicator was normalized by the range across the three materials within the same condition. Pairwise score intersections then identified the weights at which the material ordering changed. At a nominal initial temperature of 800°C, reducing the tube diameter from 45 to 28 mm shortened the cooling time to 50°C by 13.75% for steel slag, 12.64% for desert sand, and 4.11% for bauxite. Across the paired comparisons over common temperature intervals, the smaller tubes increased the interval-average cooling rate by 15.3%—84.1%. However, the corresponding sensible heat release flux based on the inner lateral tube area changed by -28.3% to 14.5%, showing no universal decrease. For the 45 mm tubes at nominal 800°C, the cooling-rate peaks of steel slag, desert sand, and bauxite occurred at logarithmic progress values of approximately 0.071, 0.083, and 0.057, respectively. Different initial temperatures did not produce a consistent ordering of the equivalent heat transfer response throughout discharge. Steel slag received the highest composite score in all selected comparisons when the persistence weights were 0.70 for the 100 K intervals and 0.40 for the 200 K intervals. Nevertheless, the leading material changed with the evaluation weight in some conditions. The rate threshold and calculation interval also affected the low-rate criterion time. These results describe temperature-based response indicators under explicitly stated reference and geometric assumptions. They distinguish such indicators from useful heat delivery to a load and provide a reproducible basis for comparing materials and tube configurations within the tested apparatus.

**Keywords:** electric thermal energy storage; solid particle thermal storage; dynamic heat release; time factor; equivalent overall heat transfer coefficient

随着可再生能源发电规模扩大和工业供热需求增长,电能供给与热负荷需求在时间上的不匹配,使储热系统的调节能力受到关注。固态颗粒显热储热通过材料升温储存能量,再经换热过程向用热端释放,可用于低谷电利用、可再生能源电力消纳及工业余热回收。颗粒材料种类丰富,能够与不同形式的加热和换热装置组合,具有中高温储热应用潜力。然而,储热容量并不能直接代表供热能力:材

料比热容和密度影响可储存的热量,导热特性、堆积状态及换热边界则共同决定热量释放的速度和持续时间。因此,除考察静态热物性外,还需研究颗粒在实际装置中的温度响应,并区分材料降温特征与满足用热端需求的有效放热过程。

围绕颗粒储热材料及传热机制,高明娟等<sup>[1]</sup>和 Georgousis 等<sup>[2]</sup>分别从高温烟气加热颗粒储热和填充床显热储热系统出发,总结了材料、传热及运行

方面的研究进展。李宝让等<sup>[9]</sup>梳理了钢渣固废蓄热及其潜在应用,为工业固废资源化与储热选材提供了参考。孙丽伟等<sup>[9]</sup>通过实验比较固体颗粒的储热特性和热稳定性,为天然颗粒材料的使用提供了依据。Lai等<sup>[9]</sup>开展烧结矿颗粒床储能实验,说明颗粒尺度与堆积状态是分析储放热性能时需要考虑的因素。在填充床结构研究中,张岩岩等<sup>[9]</sup>总结了相变填充床的研究与应用进展,其中有关结构和传热组织的讨论可为颗粒床设计提供参考,但其相变储热机制与本研究显热储热存在区别。赵港归等<sup>[7]</sup>利用数值方法研究高温固体颗粒填充床,进一步分析了材料性质及运行温度对储热特性的影响。

在装置动态性能方面,Trevisan等<sup>[9]</sup>开展径向流高温填充床实验,Muhammad等<sup>[9]</sup>研究与太阳能集热器耦合的工业岩石床系统,分别从流动组织与系统运行角度分析储热性能。陈久林等<sup>[10]</sup>开展中高温烟气余热回收用固体显热储热装置实验;张超等<sup>[11]</sup>设计固体电热储能性能测试平台;杜保存等<sup>[12]</sup>和张鑫等<sup>[13]</sup>分别研究填充床熔盐蓄热器的动态温度与应力、感应加热固体储能装置的多物理场特征。上述成果为实验平台构建及动态评价提供了基础,但不同研究的材料、装填方式和换热边界存在差异,所得结果难以直接用于同一装置中的材料排序。对于管内装填颗粒、管外空气换热的构型,管径改变还伴随装填热容量和面积体积比变化,需结合共同温区与统一指标比较,避免将构型综合响应简单归因于管径,或将低降温速率等同于系统稳态。

基于此,本研究选取钢渣、沙漠沙和铝矾土,在电加热-颗粒储热-闭式空气循环平台上,分析初始设定温度 400~800℃、储热管内径 28 mm 和 45 mm 条件下的温度-时间记录。以 50℃ 为统一计算参照,区分特征冷却时间、低降温速率判据时间及负荷需求决定的有效放热终止时间;在常物性和圆柱装填近似下,利用时间因数、对数放热进程及参照等效换热系数描述动态响应。进一步在三种材料共同覆盖的 100 K 和 200 K 温降区间内,对放热持续性与温度响应速度进行综合评价,并分析速率阈值、计算时间间隔和评价权重的敏感性。本研究限于两种实验室储热管构型,旨在明确所用评价指标的适用范围,为单管模块的材料比较与热响应分析提供依据。

## 1 实验系统与评价方法

### 1.1 实验系统构成

实验平台由电加热单元、保温炉体、颗粒储热管、循环风机、循环风道、水箱换热段以及温度采集与记录单元组成,结构如图 1 所示。装置外形尺寸为 400 mm×400 mm×380 mm,采用 4 根长度 380 mm 的储热管,管内径分别为 28 mm 和 45 mm,壁厚为 3 mm。颗粒装管后经振实,加热至设定初始温度后进入放热阶段。循环风机驱动空气在储热管外流动,高温空气经水箱换热段降温后,通过回流风道返回炉体,形成闭式循环。系统流程及测点示意如图 2 所示。储热管为 304 不锈钢,4 根同规格管等长装填,计算填充长度取 0.38 m。循环风机型号为 YN5-47,装置资料列示流量为 860 m<sup>3</sup>/h;炉膛中心布置 1 支热电偶,4 根储热管的几何中心各布置 1 支热电偶,水箱换热段进、出风位置设置空气温度测点。颗粒测温采用精度为 ±1℃ 的铠装 K 型热电偶。数据处理中,先对 4 根储热管中心测点温度取算术平均,再对同一工况 3 次有效实验的温度曲线取平均。本研究的颗粒平均温度为上述中心测点平均值,用于表征储热管的温度响应。两种管径采用相同的中心布点方式;中心测点平均值与床层体积平均温度的差异取决于床层内部温度分布。热电偶实物及安装方式如图 3(a)(b)所示,四根探头分别从储热管端盖中心引入管内。

测温系统采用多通道温度仪表,各测温通道分别显示对应热电偶的温度信号,便于观察不同测点的温度变化及通道状态。炉温控制与多通道温度监测界面如图 4 所示,炉温控制仪表分别显示温度测量值与设定值,用于加热过程的温度监测与设定。颗粒温度的数据处理采用对应测温通道的实测记录,炉温设定值不参与颗粒平均温度的计算。

### 1.2 实验材料与工况

选取钢渣、沙漠沙和铝矾土作为研究对象。钢渣兼具固废资源化价值与高温储热潜力,沙漠沙购买自灵寿县胜宇矿产品加工有限公司,300 目;铝矾土购买自郑州瑞森耐材有限公司,325 目;钢渣购买自宝武环科武汉金属资源有限责任公司,350 目。材料热物性及实物分别见表 1 和图 5。

比热容可采用 DSC 404 F3 差示扫描量热仪测定<sup>[14]</sup>,热扩散率可采用 LFA 457 激光闪射仪测定<sup>[15]</sup>,

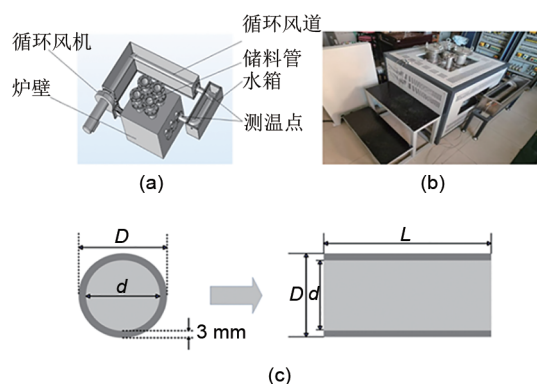


图1 实验装置结构示意图: (a) 物理模型; (b) 实验装置; (c) 结构几何尺寸图

Fig. 1 Experimental setup: (a) Physical model; (b) Apparatus; (c) Tube geometry

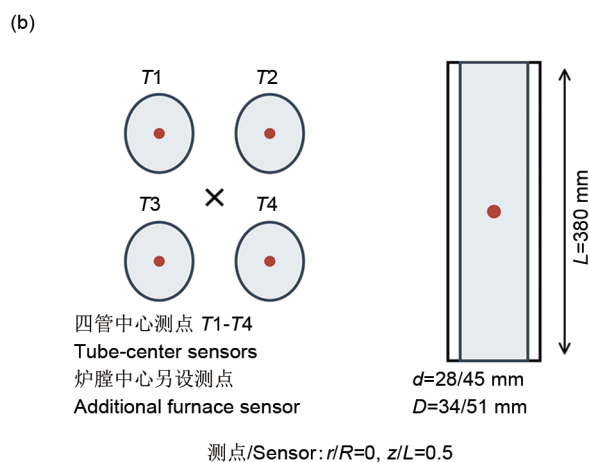
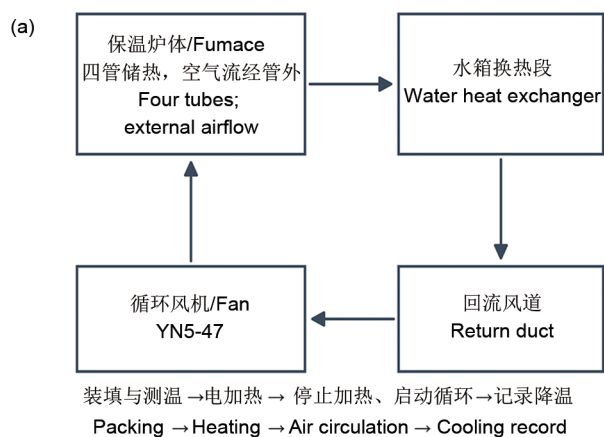


图2 系统流程及测点示意图: (a) 空气循环流程; (b) 尺寸与测点

Fig. 2 Schematic of the system flow and measurement point locations: (a) Air loop; (b) Geometry and sensors

导热系数根据下式计算。计算所用热扩散率、密度和比热容须对应相同温度及试样状态。分析中物性参数按表1数值作常数近似处理。颗粒床堆积密度

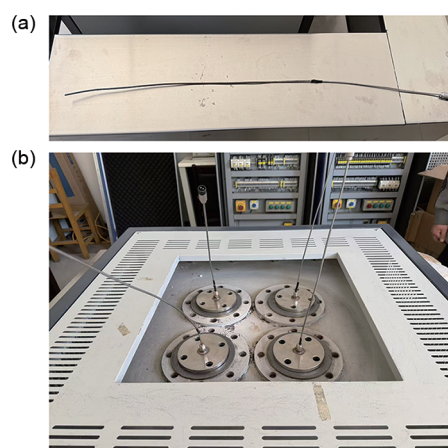


图3 热电偶实物及安装方式: (a) 热电偶实物; (b) 探头安装

Fig. 3 Photographs of the thermocouple and its installation: (a) Thermocouple; (b) Probe installation



图4 炉温控制与多通道温度监测界面

Fig. 4 Furnace temperature control and multichannel temperature monitoring interface

按实际装填体积定义, 应与烧结试样几何密度区分。

$$\lambda(T) = a(T)\rho(T)c_p(T) \quad (1)$$

式中,  $a$  为热扩散率。

实验初始温度设置为 400℃、500℃、600℃、700℃ 和 800℃, 储热管内径为 28 mm 和 45 mm。两种管径在现有平台上满足装填和测温要求, 并形成不同的径向传热长度及装填热容量。对相同填充长度和堆积密度, 装填质量与内径的平方成正比, 28 mm 管的装填量约为 45 mm 管的 38.7%; 因此, 两种管径用于比较不同储热管构型的综合放热响应。对于 MWh 级储热系统, 可通过增加储热管数量及颗粒装填总量提高储热容量, 并通过优化管束排列和流道结构改善流量分配与换热性能。本研究两种管径的实验结果可为单管模块的热响应比较提供参考, 但尚不足以确定大容量系统的最优管径; 工程设计仍需综合考虑供热功率、出口温度、流动

压降及系统热损失等因素。按表 1 堆积密度和圆柱体  
积估算，45 mm 单管的钢渣、沙漠沙和铝矾土质量  
分别约为 1.052 kg、0.885 kg 和 0.796 kg，28 mm  
管分别约为 0.407 kg、0.343 kg 和 0.308 kg。

表 1 材料热物性参数  
Table 1 Thermophysical properties of the materials

| 材料  | 主要成分                                                                              | $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | $c_p/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ | $\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 钢渣  | $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 1740                          | 950                                       | 1.2~1.8                                      |
| 沙漠沙 | $\text{SiO}_2$ 并含少量 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$             | 1464                          | 830                                       | 0.25~0.40                                    |
| 铝矾土 | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$                                          | 1317                          | 730                                       | 1.0~1.5                                      |

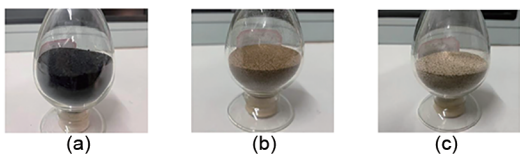


图 5 储热材料实物图：(a) 钢渣颗粒；(b) 沙漠沙颗粒；  
(c) 铝矾土颗粒  
Fig. 5 Photographs of the thermal storage materials:  
(a) Steel slag particles; (b) Desert sand particles;  
(c) Bauxite particles

1.3 数据处理与放热判据

颗粒温度采用精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的热电偶测量，按实验方案对同一工况的 3 次有效实验进行汇总。本次分析使用归档温度序列，采样间隔为 1 s。密度、装填体积、温度测量及数据处理均可能影响导出量，合成标准不确定度的一般传播关系为：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} \tag{2}$$

式中， $u_c(y)$ 为导出量  $y$  的合成标准不确定度； $x_i$ 为参与计算的直接测量量或中间变量； $u(x_i)$ 为  $x_i$  的标准不确定度； $\partial y/\partial x_i$  为灵敏度系数，用于表征  $x_i$  的不确定度向导出量  $y$  传递的程度。

本研究中的颗粒显热释放过程属于非稳态冷却过程。降温速率减小表明颗粒显热释放速率降低，但不能据此判定系统达到稳态或停止有效供热。面向实际用热需求，可采用有效放热终止判据：当供热端温度或可用供热功率低于负荷要求，且持续达到规定的确认时间时，判定有效放热结束。其中，供热温度条件还应考虑颗粒与被加热目标之间维持换热所需的温差，具体截止条件由目标温度、负荷需求及换热器性能共同确定<sup>[16-17]</sup>。

从能量关系看，颗粒显热释放速率可近似表示为 $-mc_p dT/dt$ ；实际送达目标的热量还受到管壁储热、环境散热及中间换热环节影响。若颗粒温度已不足以维持必要的传热温差，即使颗粒仍在降温，

也可能无法满足目标；反之，降温较慢并不必然失去供热能力。因此，本研究采用“放热终止判据”的概念描述运行控制，不用“准稳态”替代对有效供热条件的判定。

在质量和比热容恒定的近似下，以向外放热为正，颗粒显热释放速率可表示为：

$$\dot{Q}_s = -mc_p \frac{dT}{dt} \tag{3}$$

由于管壁储热、环境散热及中间换热过程的影响，该量不等于负荷侧获得的有效供热功率。因此，颗粒仍在降温并不意味着能够满足用热需求，降温较慢也不必然意味着有效供热结束。本研究采用温度记录评价颗粒的冷却响应，负荷侧有效放热终止时间需结合供热温度和功率记录另行确定。

为统一不同工况的比较，定义特征冷却时间  $t_{50}$  和低降温速率判据时间  $t_\varepsilon$ 。  $t_{50}$  为自记录起点至颗粒平均温度首次降至  $50^\circ\text{C}$  的历时，温度跨越  $50^\circ\text{C}$  时采用相邻记录线性插值； $50^\circ\text{C}$  仅作为统一计算参照。以 60 s 为计算间隔，当连续 600 s 内各区间均满足  $|\Delta T/\Delta t| < \varepsilon$  时，将首次满足条件的 600 s 时段末端对应的历时定义为  $t_\varepsilon$ ，其中  $\varepsilon$  分别取 0.01 K/s、0.02 K/s 和 0.03 K/s。受现存分测点记录完整性限制，该指标仅依据颗粒平均温度计算，不包含测点间温差条件。

当  $\varepsilon=0.02$  K/s 时，连续 600 s 内的累计温降仍可接近 12 K，因此该判据用于识别低降温速率阶段，不作为稳态或有效放热终止的判据。  $800^\circ\text{C}$  工况下不同阈值的计算结果见表 2。将计算间隔由 60 s 调整为 30 或 120 s 后， $t_{0.02}$  相对变化范围约为  $-9.4\%\sim 16.2\%$ ，表明判据时间对计算间隔具有一定敏感性。该变化反映数据处理参数的影响，不代表仪器测量不确定度；表 3 和表 4 的评价仍采用三种材料共同覆盖的温降区间。

## 1.4 动态评价指标

放热阶段以颗粒床为控制体,采用无体积内热源的等效导热描述。其能量方程写为<sup>[16]</sup>:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为床层等效密度,  $c_p$  为比热容,  $\lambda_{\text{eff}}$  为床层有效导热系数。 $\lambda_{\text{eff}}$  包含颗粒、孔隙及接触传热的综合作用,不能直接以表1中颗粒材料导热系数替代。在有效物性恒定的近似下,方程可化为常系数导热方程;有温度依赖时,应保留有效导热系数随温度的变化。

当床层内部温差相对于床层与空气之间的温差较小时,将颗粒床视为等效热容器,得到集中参数能量守恒关系<sup>[16]</sup>:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = -h_z A (T - T_f) \quad (5)$$

式中,  $m$  为颗粒质量;  $c_p$  为比热容;  $A$  为所选面积基准;  $T$  和  $T_f$  分别为颗粒平均温度与流体温度;  $h_z$  为等效总换热系数。该关系忽略管壁储热的独立影响,并将床层至外界的综合能量交换等效处理。当  $c_p$ 、 $h_z$  及  $T_f$  近似恒定时,积分可得:

$$\frac{T - T_f}{T_0 - T_f} = \exp\left(\frac{-h_z A t}{mc_p}\right) \quad (6)$$

式中,  $T_0$  为颗粒材料初始温度;  $t$  为放热时间。

为对归档温度记录采用统一口径,以固定计算参照  $T_{\text{ref}}=50^\circ\text{C}$  定义参照时间因数:

$$\tau_{\text{ref}} = \frac{t}{-\ln \theta_{\text{ref}}} \quad (7)$$

式(7)为从记录起点到时刻  $t$  的累计温度衰减尺度,  $T_0$  取各曲线记录起点的实际温度。其较大值表示相对于规定参照的衰减较慢;  $t=0$  处不计算。当实际流体温度随时间变化时,  $\tau_{\text{ref}}$  不能直接作为恒定边界条件下的物理时间常数。

定义参照温度比  $\theta_{\text{ref}}$  及对数放热进程  $\eta$ :

$$\theta_{\text{ref}} = \frac{T - T_{\text{ref}}}{T_0 - T_{\text{ref}}} \quad (8)$$

$\theta_{\text{ref}}$  从1随冷却逐渐减小,  $\eta = -\ln \theta_{\text{ref}}$  从0增大,二者不能混用。本研究统一使用  $\eta$  表示图8和图9的横坐标;  $\eta$  不是已释放热量的比例。实际边界等效换热系数的反算关系为:

$$h_z = -\frac{mc_p}{A(T - T_f)} \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

实际边界系数需要同步流体温度。本研究数值比较统一采用  $T_{\text{ref}}=50^\circ\text{C}$  的参照等效系数  $h_{z,\text{ref}}$ , 以管

内圆柱侧面积  $A=\pi dL$  为面积基准,并用  $m=\rho \pi d^2 L/4$  估算颗粒质量,因此  $mc_p/A=\rho c_p d/4$ 。

集中参数近似的适用性可由内部导热与边界换热的相对热阻判断,常用判据为:

$$Bi = hL_c/\lambda < 0.1 \quad (10)$$

$$\text{其中, } L_c = V/A^{[16]} \quad (11)$$

对于球形单颗粒,  $L_c=d_p/6$ ,  $\lambda$  取颗粒导热系数;对于整个颗粒床,  $L_c$  应按床层体积及其换热边界确定,  $\lambda$  应取床层有效导热系数。单颗粒  $Bi$  较小不等于整床温度均匀。本研究采用等效参数描述测得的温度响应,其应用范围为所测试的装置构型和运行条件。

数值处理采用温度记录对应的实际采样时间,并以记录起点的实测温度作为初始温度  $T^0$ , 名义设定温度仅用于标识实验工况。图7中累计时间因数的计算范围为  $0.1 < \theta_{\text{ref}} < 1$ ; 图8和图9按60 s间隔划分计算区间,仅保留两端均满足  $0.1 < \theta_{\text{ref}} \leq 1$  的完整区间。累计时间因数计算排除  $\theta_{\text{ref}}=1$  的起始点,以避免其定义式中对数项为零;同时排除接近参照温度的数据,以减小温度差较小时测温波动对归一化温度及反算结果的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 初始温度对放热特性的影响

图6给出28 mm管中三种材料在不同名义初始温度下的温度记录,曲线展示至首次降至  $50^\circ\text{C}$  附近。相对于各材料  $400^\circ\text{C}$  工况,  $500^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$  和  $800^\circ\text{C}$  工况的  $t_{50}$  增幅,钢渣分别为15.3%、23.8%、39.4%和34.7%,沙漠沙为34.0%、54.4%、70.5%和69.3%,铝矾土为7.3%、26.2%、36.0%和46.4%。因此,较高初始温度总体对应较长冷却历程,但钢渣和沙漠沙的  $800^\circ\text{C}$  工况并不比  $700^\circ\text{C}$  工况更长,不能将其概括为严格单调增加。

曲线反映了给定装置结构、颗粒装填及换热边界条件下的综合冷却响应,不同放热阶段的降温速率存在差异。初始温度通过影响颗粒显热储量及传热温差改变冷却历程,但仅依据颗粒温度记录,尚不能定量区分各传热路径的贡献。此外,颗粒释放的显热并非全部传递至负荷侧,评价有效供热量还需考虑环境散热及装置其他部件的储热变化。

表2列出了名义初始温度为  $800^\circ\text{C}$  时各工况的低降温速率判据时间  $t_c$  和特征冷却时间  $t_{50}$ 。储热管

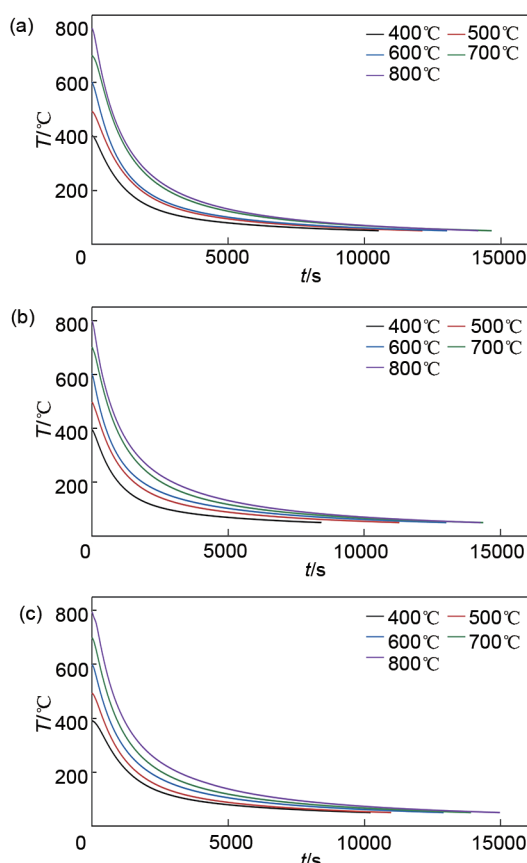


图6 不同初始温度下颗粒储热体的温度变化曲线 (28 mm): (a) 钢渣; (b) 沙漠沙; (c) 铝矾土

Fig. 6 Temperature decay curves of particle beds at different initial temperatures (28 mm): (a) Steel slag; (b) Desert sand; (c) Bauxite

内径由 45 mm 减小至 28 mm 后, 钢渣、沙漠沙和铝矾土的  $t_{50}$  分别缩短 13.75%、12.64% 和 4.11%, 表明在所比较工况下, 小管径构型达到 50℃ 的时间较短。两类时间指标反映不同的冷却特征:  $t_e$  表征降温速率连续满足规定阈值条件的判据时间,  $t_{50}$  表征温度降至统一参照值的历时, 二者不能相互替代。上述差异反映了两种管径构型的综合冷却响应, 可能受到装填热容量、传热路径及换热边界等因素的共同影响, 尚不能单独归因于管径变化<sup>[6, 8-9]</sup>。

## 2.2 时间因数变化规律

图 7 采用各曲线实际  $T_0$  及统一  $T_{ref}$  计算  $\tau_{ref}$ , 每 60 s 取一个计算点, 仅展示  $0.1 < \theta_{ref} < 1$  的区间。时间因数在启动阶段较大, 随后下降并在中后期回升。由于初始温度变化较小时  $-\ln \theta_{ref}$  接近零, 早期  $\tau_{ref}$  对温度读数及时间起点尤其敏感; 其局部高值不能直接解释为材料热惯性突然增大。

表2 800℃名义工况的低降温速率判据时间及特征冷却时间

Table 2 Low-cooling-rate criterion times and characteristic cooling times at nominal 800℃

| 材料  | d/mm | $t_{0.01}/s$ | $t_{0.02}/s$ | $t_{0.03}/s$ | $t_{50}/s$ |
|-----|------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 钢渣  | 45   | 11760        | 8160         | 6360         | 16444      |
| 钢渣  | 28   | 9360         | 6120         | 5040         | 14183      |
| 沙漠沙 | 45   | 12060        | 7980         | 6240         | 16327      |
| 沙漠沙 | 28   | 9600         | 6120         | 4860         | 14263      |
| 铝矾土 | 45   | 10920        | 8340         | 6300         | 15613      |
| 铝矾土 | 28   | 9540         | 6480         | 5160         | 14972      |

对 700℃ 和 800℃ 工况, 采用各自实际起始温度、统一时间零点及温度比定义, 图 7 显示启动阶段的快速变化和后续回升。偏离恒定时间因数表明实际响应不能由单一指数衰减全过程描述。换热边界和高温辐射变化可影响响应, 但没有同步边界数据时, 不将拐折归因为相变或某一种确定传热机制。

图 7(b) 中三种材料的  $\tau_{ref}$  相对位置随阶段变化。钢渣的体积热容量最大, 但温度衰减还受到装置及边界条件影响。第 3 节据相同温区计算区间时间因数, 以避免在不对应的时刻或不同温度范围直接比较。累计时间因数与区间时间因数在非指数过程中一般不相等, 二者分别用于过程展示和区间评价。

## 2.3 等效总换热系数与放热进程

在第 3 节规定的 100 K 和 200 K 共同温降区间内, 对同一材料、同一名义初始温度下的两种管径构型进行比较。结果表明, 28 mm 管的区间平均降温速率较 45 mm 管提高 15.3%~84.1%。以储热管内侧面积为基准, 区间平均显热释放通量计算为:

$$\bar{q}_{ref} = \frac{mc_p(T_a - T_b)}{A(t_b - t_a)} \quad (12)$$

其中,  $T_a$  和  $T_b$  分别为区间起、止温度, 且  $T_a > T_b$ 。相较于 45 mm 管, 28 mm 管的该通量相对变化范围为 -28.3%~14.5%, 表明降温速率提高并不意味着单位面积显热释放通量同步增大, 其变化还与单位面积装填热容量有关。该通量根据颗粒显热减少量估算, 未区分向负荷供热与环境散热, 因而不能直接代表负荷侧的有效热流密度。

图 8 给出了名义初始温度 800℃、管内径 45 mm 条件下, 三种材料的区间平均降温速率  $r$  随对数放热进程  $\eta$  的变化。降温速率按 60 s 完整区间计算, 即:

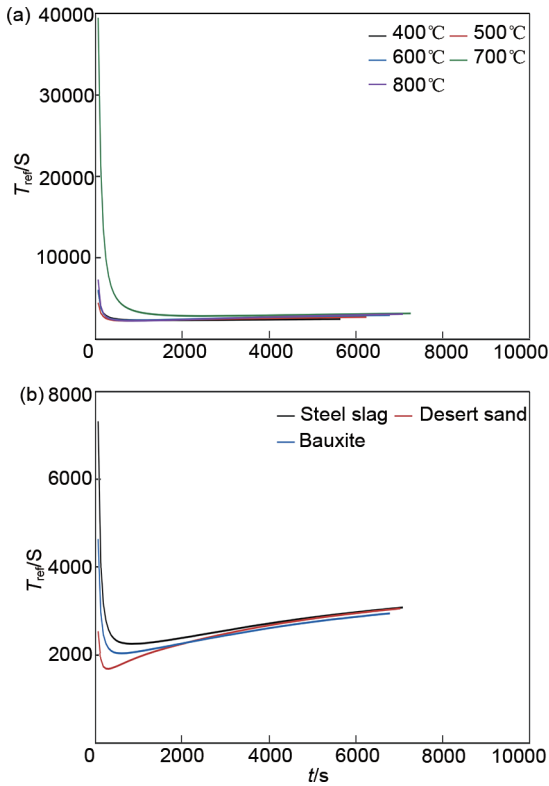


图7 参照时间因数随时间的变化 ( $T_{ref}=50^{\circ}\text{C}$ ): (a) 45 mm 钢渣不同初始温度; (b) 45 mm、800°C 名义工况不同材料  
Fig. 7 Reference time factors ( $T_{ref}=50^{\circ}\text{C}$ ): (a) Steel slag at different initial temperatures,  $d=45\text{ mm}$ ; (b) Different materials at nominal  $800^{\circ}\text{C}$ ,  $d=45\text{ mm}$

$$r = \frac{T_a - T_b}{t_b - t_a} \quad (13)$$

钢渣、沙漠沙和铝矾土的降温速率峰值分别约为 0.342 K/s、0.472 K/s 和 0.385 K/s，对应的  $\eta$  分别约为 0.071、0.083 和 0.057，说明三种材料的最大降温速率出现在不同的对数放热进程位置。上述峰值表征该计算时间间隔下的温度下降速度，不能直接用于判定等效换热系数峰值或最佳供热工况。

图9针对内径 45 mm 的钢渣储热管，根据温度—时间记录计算换热响应。取表 1 中的堆积密度  $1740\text{ kg/m}^3$ 、比热容  $950\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ，以管长 0.38 m 作为几何计算长度。采用等长圆柱填充的计算近似，估算单管颗粒质量为 1.0516 kg，以管内侧圆柱侧面积  $0.053721\text{ m}^2$  为换热面积基准；该质量为几何估算值，面积基准不含端面和颗粒内部表面积。图例中的 400~800°C 表示名义初始温度，计算分别采用记录起点的  $386.9^{\circ}\text{C}$ 、 $493.2^{\circ}\text{C}$ 、 $599.1^{\circ}\text{C}$ 、 $708.3^{\circ}\text{C}$  和  $797.8^{\circ}\text{C}$ 。

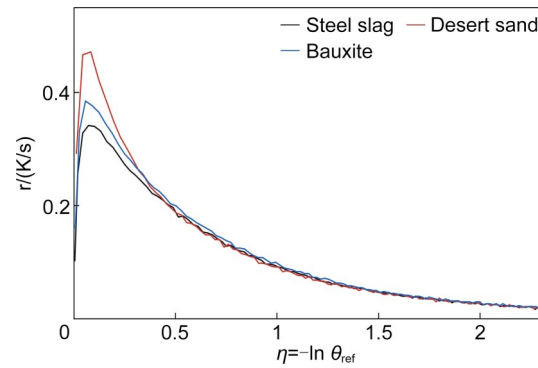


图8 45 mm 管在 800°C 名义工况下的区间平均降温速率与对数放热进程 (计算区间 60 s)  
Fig. 8 Cooling rate versus logarithmic progress at nominal  $800^{\circ}\text{C}$ ,  $d=45\text{ mm}$  (60 s intervals)

沿用计算记录中的  $50^{\circ}\text{C}$  作为参照温度  $T_{ref}$ ，定义参照温度比  $\theta_{ref}$  及其对数变量  $\eta$ ，并由相邻时刻的温度变化计算区间平均参照等效换热系数  $h_{\Sigma,ref}$ ：

$$\theta_{ref} = \frac{T - T_{ref}}{T_0 - T_{ref}}, \eta = -\ln \theta_{ref} \quad (14)$$

$$h_{\Sigma,ref} = \frac{mc_p}{A(t_b - t_a)} \ln \frac{T(t_a) - T_{ref}}{T(t_b) - T_{ref}} \quad (15)$$

式中， $t_a$  和  $t_b$  分别为计算区间的起、止时刻。图9自记录起点按 60 s 划分完整计算区间，横坐标取区间两端对数放热进程  $\eta$  的平均值。为减小颗粒温度接近参照温度时测温波动对反算结果的影响，仅保留两端均满足  $0.1 < \theta_{ref} \leq 1$  的区间，即颗粒相对于参照温度的超温仍大于初始超温的 10%。该范围仅用于限定数据分析区间，不作为实验放热终止判据。计算采用  $50^{\circ}\text{C}$  作为统一参照温度，不代表实际流体温度在全过程中保持恒定。因此， $h_{\Sigma,ref}$  为规定参照条件下的等效响应指标，不等同于采用同步流体温度反算的换热系数。

在所分析区间内， $h_{\Sigma,ref}$  为 0.47~9.41 W/( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ )。各工况曲线在启动阶段上升，随后总体回落或缓慢变化，不同初始温度下的曲线存在交叉，未呈现随初始温度升高而全历程一致增大的规律。将计算时间间隔由 60 s 调整为 30 s 或 120 s 后，上述趋势保持不变，各工况局部峰值相对 60 s 计算结果的最大变化约为 10.4%，表明峰值大小受到计算时间间隔的影响。因此，图9主要用于比较统一参照和数据处理条件下的钢渣温度响应，局部峰值不宜直接解释为材料本身的换热能力。

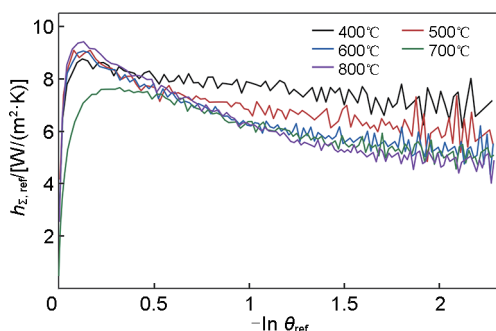


图9 45 mm 钢渣储热管在不同初始温度下的参照等效换热系数 ( $T_{\text{ref}}=50^{\circ}\text{C}$ , 计算区间 60 s)

Fig. 9 Reference-based equivalent heat transfer coefficient of the 45 mm steel-slag tube at different initial temperatures ( $T_{\text{ref}}=50^{\circ}\text{C}$ ; interval: 60 s)

### 3 不同温降区间的材料综合评价

#### 3.1 共同温区与评价方法

本研究选取 100 K 和 200 K 床层温降区间进行比较。名义初始温度不等于记录起始温度, 例如 800 $^{\circ}\text{C}$  组的实际  $T_0$  并非均达到 800 $^{\circ}\text{C}$ 。为避免外推, 100 K 比较分别在 800 $^{\circ}\text{C}$ 、700 $^{\circ}\text{C}$  和 600 $^{\circ}\text{C}$  名义工况下取 750 $\rightarrow$ 650 $^{\circ}\text{C}$ 、650 $\rightarrow$ 550 $^{\circ}\text{C}$  和 550 $\rightarrow$ 450 $^{\circ}\text{C}$  共同温区; 200 K 比较在 800 $^{\circ}\text{C}$  和 700 $^{\circ}\text{C}$  名义工况下取 750 $\rightarrow$ 550 $^{\circ}\text{C}$  和 650 $\rightarrow$ 450 $^{\circ}\text{C}$ 。每个区间均由三种材料实测记录共同覆盖, 区间边界到达时刻采用相邻记录线性插值。

在每个共同温区, 计算区间时间因数

$$\tau_1 = \Delta t / \ln[(T_a - T_{\text{ref}})/(T_b - T_{\text{ref}})] \quad (16)$$

区间平均参照等效换热系数

$$h_1 = \rho c_p d / (4\tau_1) \quad (17)$$

$T_a$ 、 $T_b$  为温区上、下限,  $\Delta t$  为对应冷却历时。两项指标共享温度记录, 且满足  $h_1\tau_1 = \rho c_p d / 4$ , 因此属于相关的评价指标, 不能视为两项独立实验证据。综合得分定义为:

$$S = \alpha P + (1 - \alpha)H \quad (18)$$

式中,  $P$ 、 $H$  分别为区间时间因数和参照等效换热系数的无量纲归一化值。对同一名义初始温度、管径和温区内三种材料进行极差归一化:

$$P = (\tau_1 - \tau_{1,\min}) / (\tau_{1,\max} - \tau_{1,\min}) \quad (19)$$

$$H = (h_1 - h_{1,\min}) / (h_{1,\max} - h_{1,\min}) \quad (20)$$

本次各组指标极差均非零, 故无退化归一化情形。

100 K 温降区间取  $\alpha=0.70$ , 200 K 区间取  $\alpha=0.40$ , 分别表达较重视温度衰减持续性及较重视参

照换热强度的评价偏好。这是用于比较的情景权重, 不是实测负荷需求或通用工程标准。为检查结果对权重的依赖, 令  $\alpha$  在 0~1 变化, 求解任意两种材料得分相等时的临界权重, 并据此划分排序区间。

#### 3.2 100 K 温降区间

表 3 列出 100 K 共同温区的综合得分。以 45 mm、800 $^{\circ}\text{C}$  名义工况的 750 $\rightarrow$ 650 $^{\circ}\text{C}$  区间为例, 钢渣、沙漠沙和铝矾土的  $\tau_1$  分别为 2021.4 s、1638.5 s 和 1852.7 s,  $h_1$  分别为 9.200 W/(m $^2$ ·K)、8.343 W/(m $^2$ ·K) 和 5.838 W/(m $^2$ ·K)。按同组极差归一化后计算  $S$ , 得到 1.000、0.224 和 0.392, 可据此复核归一化及加权过程。

在  $\alpha=0.70$  下, 钢渣在所列 6 个工况中均得分最高。该结论仅指本研究定义的两项指标及共同温区; 100 K 床层温降本身并不能规定目标的用热温度、允许波动或实际供热时长。

部分工况的首位材料会随权重变化。例如 45 mm、650 $\rightarrow$ 550 $^{\circ}\text{C}$  区间在  $\alpha<0.314$  时沙漠沙得分最高, 在  $\alpha>0.314$  时钢渣最高; 28 mm、750 $\rightarrow$ 650 $^{\circ}\text{C}$  及 550 $\rightarrow$ 450 $^{\circ}\text{C}$  区间在  $\alpha$  分别超过 0.759 和 0.821 时, 铝矾土得分高于钢渣。因此, 材料优势应结合权重适用范围表述。

表 3 100 K 共同温区的综合得分 ( $\alpha=0.70$ )

Table 3 Composite scores over common 100 K temperature-drop intervals ( $\alpha = 0.70$ )

| 名义<br>$T_0/^{\circ}\text{C}$ | 温区/ $^{\circ}\text{C}$ | $d/\text{mm}$ | 钢渣    | 沙漠沙   | 铝矾土   | 首位材料 |
|------------------------------|------------------------|---------------|-------|-------|-------|------|
| 800                          | 750 $\rightarrow$ 650  | 45            | 1.000 | 0.224 | 0.392 | 钢渣   |
| 700                          | 650 $\rightarrow$ 550  | 45            | 0.863 | 0.300 | 0.059 | 钢渣   |
| 600                          | 550 $\rightarrow$ 450  | 45            | 1.000 | 0.460 | 0.079 | 钢渣   |
| 800                          | 750 $\rightarrow$ 650  | 28            | 0.778 | 0.190 | 0.700 | 钢渣   |
| 700                          | 650 $\rightarrow$ 550  | 28            | 1.000 | 0.163 | 0.069 | 钢渣   |
| 600                          | 550 $\rightarrow$ 450  | 28            | 0.847 | 0.197 | 0.700 | 钢渣   |

#### 3.3 200 K 温降区间

表 4 列出了 200 K 共同温区在  $\alpha=0.40$  下的评价结果, 4 个工况均为钢渣得分最高。以 45 mm、750 $\rightarrow$ 550 $^{\circ}\text{C}$  区间为例, 三种材料的  $\tau_1$  依次为 2110.4 s、1868.2 s 和 1968.3 s,  $h_1$  依次为 8.812 W/(m $^2$ ·K)、7.317 W/(m $^2$ ·K) 和 5.495 W/(m $^2$ ·K)。该结果说明增加参照换热强度的权重并不必然使沙漠沙最优。

权重扫描显示, 所列 3 个 200 K 工况中钢渣在  $0\leq\alpha\leq 1$  均保持首位; 28 mm、750 $\rightarrow$ 550 $^{\circ}\text{C}$  区间在  $\alpha$

=0.849 处钢渣与铝矾土得分相等，超过该值后铝矾土首位。完整的两两排序临界权重见表 5，临界值处允许并列，表内数值按三位小数报告。

表 4 200 K 共同温区的综合得分 ( $\alpha=0.40$ )  
Table 4 Composite scores over common 200 K temperature-drop intervals ( $\alpha = 0.40$ )

| 名义<br>$T_0/^\circ\text{C}$ | 温区/ $^\circ\text{C}$ | $d/\text{mm}$ | 钢渣    | 沙漠沙   | 铝矾土   | 首位材料 |
|----------------------------|----------------------|---------------|-------|-------|-------|------|
| 800                        | 750→550              | 45            | 1.000 | 0.330 | 0.165 | 钢渣   |
| 700                        | 650→450              | 45            | 1.000 | 0.513 | 0.014 | 钢渣   |
| 800                        | 750→550              | 28            | 0.929 | 0.325 | 0.400 | 钢渣   |
| 700                        | 650→450              | 28            | 1.000 | 0.297 | 0.039 | 钢渣   |

上述评价反映常物性、规定面积和固定参照条件下的温度响应。它不能代替对所需出口温度、负荷侧可用功率、风机功耗及长期运行成本的检查。材料选型应先满足用热约束，再比较候选材料的区间指标及权重敏感性。

### 3.4 应用建议

材料与储热管构型的选择应结合实际用热需求。首先，根据负荷要求确定供热温度、供热功率及有效放热终止条件；其次，在满足供热要求的候选材料与构型中，选取相应温区和评价权重，比较温度响应速度与放热持续性。本研究共同温区内，小管径构型的降温响应较快；对于同一材料，在堆积密度和填充长度相同的条件下，大管径具有更大的装填热容量。因此，管径选择应综合考虑供热持续时间、可供热量及设备布置，不能仅依据降温速度判断其优劣。

本研究综合评价基于颗粒温度记录，并采用规定的几何及常物性近似，所得排序适用于所分析工

况和评价权重。工程放大时，应进一步测定实际装填质量、颗粒粒径分布、进出口流体温度及流量，核验有效供热量和功率，并结合颗粒耐磨性、抗粉化能力、循环稳定性及设备热损失进行综合评价。

## 4 结 论

基于归档温度记录、统一参照和共同温区，对三种固态颗粒材料的动态放热响应进行分析，得到以下结论。

(1) 颗粒冷却历程为非稳态过程，应区分降温速率判据、规定温度的特征冷却时间及负荷侧有效放热终止条件。800℃名义工况下，28 mm 管中钢渣、沙漠沙和铝矾土的  $t_{50}$  较 45 mm 管分别缩短 13.75%、12.64% 和 4.11%。共同温区内的小管径平均降温速率提高 15.3%~84.1%，而面积折算显热释放通量变化为-28.3%~14.5%，结构比较须同时考虑装填量和换热边界。

(2) 参照时间因数随放热阶段变化，早期数值对起始温度及记录分辨率敏感。在 800℃、45 mm 工况下，三种材料降温速率峰值的  $\eta$  分别约为 0.071、0.083 和 0.057，峰值位置随材料而异；45 mm 钢渣不同初始温度的参照换热响应亦不存在全历程一致的单调排序。

(3) 采用统一极差归一化后，钢渣在  $\alpha=0.70$  的 6 个 100 K 工况和  $\alpha=0.40$  的 4 个 200 K 工况均得分最高。部分工况在权重改变后转由沙漠沙或铝矾土首位，说明综合选型结论须与温区、指标定义及权重范围一同给出。所得排序适用于本研究的温度响应评价，不能直接推广为任意负荷下的材料优选结论。

表 5 两两排序临界权重及首位材料变化  
Table 5 Pairwise critical weights and changes in the leading material

| $d/\text{mm}$ | 温区/ $^\circ\text{C}$ | 临界 $\alpha$          | 各开区间首位材料                     |
|---------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| 45            | 750→650              | D=B 0.571            | 0.000~1.000 S                |
| 45            | 650→550              | S=D 0.314; D=B 0.923 | 0.000~0.314 D; 0.314~1.000 S |
| 45            | 550→450              | D=B 0.287            | 0.000~1.000 S                |
| 28            | 750→650              | S=B 0.759; D=B 0.388 | 0.000~0.759 S; 0.759~1.000 B |
| 28            | 650→550              | D=B 0.847            | 0.000~1.000 S                |
| 28            | 550→450              | S=B 0.821; D=B 0.396 | 0.000~0.821 S; 0.821~1.000 B |
| 45            | 750→550              | D=B 0.571            | 0.000~1.000 S                |
| 45            | 650→450              | D=B 0.962            | 0.000~1.000 S                |
| 28            | 750→550              | S=B 0.849; D=B 0.351 | 0.000~0.849 S; 0.849~1.000 B |
| 28            | 650→450              | D=B 0.835            | 0.000~1.000 S                |

注：S 表示钢渣，D 表示沙漠沙，B 表示铝矾土；等号表示两种材料综合评价得分相等。

## 参考文献

- [1] 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.  
GAO M J, SONG G L, SONG W J, 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.
- [2] 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.
- [3] 李宝让, 马慧博, 赵旭章, 等. 钢渣固废蓄热技术及其潜在的应用技术研究[J]. 材料导报, 2023, 37(14): 184-201.  
LI B R, MA H B, ZHAO X Z, et al. Investigations on solid waste steel slag and its potential applied technology in heat storage: A review[J]. Materials Reports, 2023, 37(14): 184-201.
- [4] 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.
- [5] LAI Z Y, DING L W, LYU H K, et al. Experimental study on energy storage characteristics of sintered ore particle packed beds[J]. Journal of Thermal Science, 2025, 34(1): 242-253. DOI:10.1007/s11630-024-2079-9.
- [6] 张岩岩, 熊亚选, 陈亚辉, 等. 相变填充床储热系统研究与应用进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3852-3872.  
ZHANG Y Y, XIONG Y X, CHEN Y H, et al. Recent progress in the investigation and application of packed-bed latent thermal energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3852-3872.
- [7] 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(6): 131-138.
- [8] TREVISAN S, WANG W J, GUEDEZ R, et al. Experimental evaluation of an innovative radial-flow high-temperature packed bed thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2022, 311: 118672. DOI:10.1016/j.apenergy.2022.118672.
- [9] MUHAMMAD Y, SAINI P, KNOBLOCH K, et al. Rock bed thermal energy storage coupled with solar thermal collectors in an industrial application: Simulation, experimental and parametric analysis[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 67: 107349. DOI: 10.1016/j.est.2023.107349.
- [10] 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.
- [11] 张超, 邢作霞, 付启桐, 等. 固体电热储能装置热工与储能性能测试平台设计[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 585-592.  
ZHANG C, XING Z X, FU Q T, et al. Design of thermal and energy storage performance test platform for solid electrothermal energy storage device[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 585-592.
- [12] 杜保存, 黄丽娟, 雷勇刚, 等. 填充床熔盐蓄热器的动态温度与应力特性[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(7): 2141-2150.  
DU B C, HUANG L J, LEI Y G, et al. Dynamic study on the thermal and stress performances of the molten salt packed-bed thermal storage tank[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2141-2150.
- [13] 张鑫, 邢作霞, 付启桐, 等. 采用感应加热的固体电热储能装置多物理场[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3761-3769.  
ZHANG X, XING Z X, FU Q T, et al. Multiphysics study of induction heating for solid electric heat storage devices[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3761-3769.
- [14] NETZSCH. DSC 404 F3 Pegasus[EB/OL]. [2026-09-18]. <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/footer/legacy-products/dsc-404-f3-pegasus>.
- [15] NETZSCH. LFA 457 MicroFlash[EB/OL]. [2026-09-18]. <https://analyzing-testing.netzsch.com/en-US/footer/legacy-products/lfa-457-micro-flash>.
- [16] BERGMAN T L, LAVINE A S, INCROPERA F P, et al. Introduction to heat transfer[M]. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [17] ORTEGA-FERNÁNDEZ I, URIZ I, ORTUONDO A, et al. Operation strategies guideline for packed bed thermal energy storage systems[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(12): 6211-6221. DOI:10.1002/er.4291.