储能材料与器件

# 面向高温显热储能的固体颗粒材料性能数据库构建与多维指标评价

张永春[1,2]，张启涵[3]，贾　颖[1,2]，方青帅[4]，张　骁[3]，周敏敏[3]，王越明[3*]，段伦博[3]
（[1]江苏省特种设备安全监督检验研究院，江苏省 南京市 210036；[2]江苏省市场监管技术创新中心-锅炉安全节能环保，江苏省 无锡市 214174；[3]东南大学 能源与环境学院，江苏省 南京市 211102；[4]南京化学工业园热电有限公司，江苏省 南京市 211500）

**摘　要：**针对高温显热储能固体颗粒材料种类多、物性数据分散以及不同材料难以统一评价的问题，本文构建了包含71种候选材料的固体颗粒显热储热性能数据库，涵盖比热容、密度、体积热容、热导率、最高使用温度和价格6项关键参数，采用Z-score标准化与层次聚类方法分析不同材料的多维性能分布特征，并对66种具有可比性的候选材料开展Pearson相关性分析。结果表明，密度与体积热容之间具有较强正相关性，相关系数为0.78；热导率与最高使用温度呈中等程度正相关，相关系数为0.50，而其余性能参数之间相关性较弱。进一步选取体积热容、热导率、最高使用温度和价格4项指标构建CRITIC-TOPSIS综合评价体系，其客观权重分别为33.14%、19.78%、21.99%和25.10%。综合评价结果表明，氧化镁、碳化硅和氧化铝分别以0.7047、0.6694和0.6581的综合得分位列前三；电弧炉粉尘和碳酸盐浮选废料分别位列第4和第5，表明部分工业固废凭借较高的体积储热能力和低成本优势在本文构建的评价体系下表现出较好的初步筛选结果。不同类别优选代表材料的六维性能对比进一步表明，各类材料的优势来源存在明显差异，固体颗粒储热介质的优选应综合考虑储热、传热、高温适用范围及经济性等多维性能。本研究可为高温显热储能固体颗粒材料的筛选及工程应用提供数据基础和评价参考。

**关键词：**高温显热储能；固体颗粒；材料数据库；材料筛选；多指标评价
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0803
中图分类号：TK 11　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-15

# Performance Database Construction and Multidimensional Evaluation of Solid Particle Materials for High-Temperature Sensible Heat Storage

Zhang Yongchun[1,2], Zhang Qihan[3], Jia Ying[1,2], Fang Qingshuai[4], Zhang Xiao[3], Zhou Minmin[3], Wang Yueming[3*], Duan Lunbo[3]
([1]Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China; [2]Technology Innovation Center of Safety, Energy Saving and Environmental Protection for Boiler for Jiangsu Province Market Regulation, Wuxi 214174, China; [3]School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 211102, China; [4]Nanjing Chemical Industry Park Power Station, Nanjing 211500, China)

**Abstract:** High-temperature sensible heat storage based on solid particles has attracted increasing attention because of its wide operating temperature range, relatively simple system

收稿日期：2026-09-14；修改稿日期：2026-10-03。
基金项目：江苏省市场监督管理局科技计划资助项目（KJ2025001）。
第一作者：张永春（1982—），男，博士，高级工程师，主要从事特种设备安全监管研究，E-mail：zh_yongchun@163.com；通信作者：王越明，副教授，主要从事长时储能技术及受热面安全管控研究，E-mail：yueming@seu.edu.cn。
引用本文：张永春, 张启涵, 贾颖, 等. 面向高温显热储能的固体颗粒材料性能数据库构建与多维指标评价[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-15.
**Citation**：Zhang Yongchun, Zhang Qihan, Jia Ying, et al. Performance Database Construction and Multidimensional Evaluation of Solid Particle Materials for High-Temperature Sensible Heat Storage[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-15.

configuration, broad material availability, and potential for large-scale thermal energy storage. However, the large variety of candidate solid materials, the scattered thermophysical property data reported in different studies, and the lack of a unified evaluation framework make it difficult to directly compare and screen materials for engineering applications. To address these issues, this study establishes a performance database for solid-particle materials used in high-temperature sensible heat storage. A total of 71 candidate materials are collected, covering six key parameters, including specific heat capacity, density, volumetric heat capacity, thermal conductivity, maximum service temperature, and material price. Z-score normalization and hierarchical clustering are employed to characterize the multidimensional performance distribution and similarity among different materials. In addition, Pearson correlation analysis is conducted for 66 comparable candidate materials to identify statistical relationships and potential information redundancy among the six performance parameters. The results show that density exhibits a strong positive correlation with volumetric heat capacity, with a Pearson correlation coefficient of 0.78, while the correlation coefficient between thermal conductivity and maximum service temperature is 0.50, indicating a moderate positive correlation. In contrast, most other parameter pairs show relatively weak correlations, suggesting that thermal storage capacity, heat-transfer performance, high-temperature applicability, and economic performance represent relatively independent dimensions of material performance. Considering both the physical relationships among the parameters and the need to avoid repeated weighting of closely related indicators, volumetric heat capacity, thermal conductivity, maximum service temperature, and material price are selected as the core indicators for comprehensive evaluation. The Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) method is used to objectively determine the indicator weights by simultaneously considering data dispersion and inter-indicator correlation, and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method is subsequently applied to rank the candidate materials according to their distance from the positive and negative ideal solutions. The CRITIC weights of volumetric heat capacity, thermal conductivity, maximum service temperature, and material price are calculated to be 33.14%, 19.78%, 21.99%, and 25.10%, respectively. The TOPSIS results show that MgO, SiC, and $Al_2O_3$ rank first, second, and third, with comprehensive scores of 0.7047, 0.6694, and 0.6581, respectively. Electric arc furnace dust and carbonate flotation waste rank fourth and fifth. These results indicate that, under the evaluation framework adopted in this study, some industrial solid wastes achieve favorable preliminary screening results because of their relatively high volumetric heat-storage capability and low material acquisition cost. However, such rankings should be regarded as material-level preliminary screening results rather than direct recommendations for engineering application. Furthermore, six-dimensional performance comparisons of representative materials from different categories reveal distinct sources of performance advantages. High-performance ceramics generally show advantages in thermal conductivity and maximum service temperature, whereas natural minerals exhibit a relatively balanced combination of thermal storage performance and cost. Some industrial solid wastes show advantages mainly in volumetric heat capacity and economic performance. These results demonstrate that the selection of solid-particle sensible heat storage media

should consider the coordinated trade-off among thermal storage performance, heat-transfer capability, high-temperature applicability, and economic performance rather than relying on a single parameter. The developed database and multicriteria evaluation framework can provide a quantitative basis for the preliminary screening and subsequent engineering assessment of solid-particle materials for high-temperature sensible heat storage.

**Keywords:** high-temperature sensible heat storage; solid particles; material database; material screening; multicriteria evaluation

随着可再生能源装机规模持续增长以及工业过程深度脱碳需求不断提升，高温储热技术在新能源消纳、工业余热回收、电热转换及高温热能调节等领域受到广泛关注。与潜热储热和热化学储热相比，显热储热具有原理简单、运行稳定、储放热过程易于控制以及工程成熟度较高等特点，是高温热能存储的重要技术路径之一[1]。常见显热储热介质包括熔盐、导热油及固体材料等，其中液态储热介质在高温应用中往往受到工作温度范围、腐蚀性及系统运行条件等因素限制。固体颗粒材料具有适用温度范围宽、化学稳定性较好、材料来源广泛以及潜在成本较低等优势，不仅可作为储热介质，部分颗粒还可兼具传热和输运功能，储热过程可通过高温气体与颗粒直接接触换热、颗粒与换热壁面间接换热或颗粒直接吸收高温辐射等方式实现；放热过程则通过颗粒与低温传热介质或换热表面进行热交换释放所储显热。因此固体颗粒材料在高温显热储能领域具有较好的应用潜力[2]。

目前高温显热储热的固体颗粒材料种类繁多，既包含石英砂、玄武岩、橄榄石和铝土矿等天然矿物，也包含 $Al_2O_3$、SiC、MgO 等高温无机及陶瓷材料，以及粉煤灰、钢渣、赤泥等工业固废和副产物。此外，人工陶瓷颗粒、耐火材料及部分金属和工程材料也被用于高温储热相关研究[3]。不同材料在比热容、密度、体积储热能力、热导率、高温适用范围及材料成本等方面存在显著差异。较高的比热容和密度有利于提高单位质量或单位体积的储热能力，较高的热导率有助于改善颗粒内部及颗粒床层中的热量传递，而较高的最高使用温度能够拓宽储热系统的工作温区并提高储存热量的品位。对于需要大量储热介质的大规模系统，材料价格也是影响工程经济性的关键因素[4]。因此，固体颗粒储热材料的适用性难以通过单一物性参数进行判断，而需要综合考虑储热性能、传热性能、高温适用范围和经济性等多个维度。

现有研究已经针对不同固体颗粒材料开展了大量热物性表征、高温性能测试及储热应用研究，并积累了较为丰富的基础数据。然而，不同研究所采用的材料来源、测试条件、评价指标及数据表达方式存在差异，相关数据较为分散，增加了不同候选材料之间横向比较和统一筛选的难度。与此同时，已有材料评价往往侧重于比热容、密度、耐温性能或成本等单项指标，而不同指标之间既可能存在物理关联，也可能表现出明显的性能权衡。例如，体积热容同时受到比热容和密度影响，而较高的储热能力并不必然对应较高的热导率或更宽的高温适用范围；部分高性能陶瓷具有优异的传热和耐温性能，但材料成本相对较高，而部分天然矿物和工业固废虽然单项性能并不突出，却可能凭借较高的体积储热能力和低成本表现出较好的综合应用潜力。因此，有必要构建统一的固体颗粒储热材料性能数据库，并进一步分析不同物性参数之间的关联关系及综合性能差异。

基于此，本文面向高温显热储能应用，系统收集并整理不同类型候选材料的热物性及经济性数据，构建包含 71 种材料的固体颗粒显热储热材料性能数据库，并从比热容、密度、体积热容、热导率、最高使用温度和材料价格六个维度开展材料性能分析。通过标准化及层次聚类方法揭示不同材料的多维性能分布特征，并采用 Pearson 相关性分析识别不同参数之间的相关关系。在此基础上，选取体积热容、热导率、最高使用温度和材料价格，采用 CRITIC 方法综合考虑指标离散程度及指标间相关性确定权重，并结合 TOPSIS 方法对候选材料进行综合评价与排序。进一步选取不同材料类别中的优选代表材料，对其六维性能特征进行对比分析，以揭示不同类型储热材料获得较高综合评价的性能来源。本文所讨论的高温固体颗粒显热储能，根据

颗粒是否运动，实际系统可采用固定床、移动床及流化床等不同构型。不同系统构型对颗粒流动性、机械强度、粒径、床层压降及有效热导率等性能要求存在差异。因此，本文评价主要用于系统构型确定前的材料层级初步筛选，并不代表某一具体储热器构型下的最终工程选材结果。研究结果可为高温显热储能固体颗粒材料的筛选及工程应用提供数据基础和评价参考。

## 1 固体颗粒显热储热材料数据库

### 1.1 数据来源及材料分类

为系统比较不同固体颗粒材料在高温显热储能中的应用潜力，本文基于已公开发表的固体颗粒储热相关文献，对不同候选材料的热物性、高温适用范围及经济性参数进行了系统收集与整理，最终构建包含 71 种候选材料的固体颗粒显热储热材料数据库。数据库包括材料名称、比热容、密度、体积热容、热导率、最高使用温度和材料价格六项参数，并记录相应的数据来源及参考文献。当不同文献给出相同参数的不同数值或温度区间时，保留文献报道范围，并采用区间上下限的算术平均值作为后续统计和综合评价的代表值。对于比热容和热导率等具有明显温度依赖性的参数，本文不对不同文献数据进行跨温度外推或经验修正，而优先采用文献报道的高温范围数据。由于不同研究采用的测试方法、样品状态及测试温度并不完全一致，本文所得代表值主要用于材料层面的横向初步比较，其差异应在具体工程选材时进一步结合统一测试条件进行验证。

由于所收集材料来源和组成差异较大，为便于开展后续统计分析和材料比较，本文按照材料来源、化学组成及工程属性建立了两级分类体系，如图 1 所示。71 种候选材料首先划分为天然矿物、无机材料、工业固废以及金属与人工材料四个一级类别。其中，天然矿物进一步分为岩石与硅酸盐矿物、硅质矿物与砂石、土壤与其他矿物以及金属矿石，主要包括石英砂、玄武岩、铝土矿等。该类材料通常来源广泛、加工过程相对简单，在大规模低成本显热储热中具有较好的应用基础，具体物性参数如表 1 所示。

无机材料主要包括陶瓷材料、隔热耐火材料、硅基材料以及铝硅基材料，涵盖氧化铝、碳化硅、氧化镁、二氧化锆等材料。该类材料的组成和高温性能相对稳定，其中部分工程陶瓷具有较高的热导率和最高使用温度，但其材料成本差异也较为显著。具体物性参数如表 2 所示。

工业固废按照来源进一步划分为煤系固废、矿物加工固废、钢铁冶金固废以及有色冶金固废，主要包括粉煤灰、电弧炉粉尘、不锈钢渣、赤泥等。此类材料兼具低成本和固体废弃物资源化利用的特点，但不同来源固废在组成及热物性方面具有较大区别。具体物性参数如表 3 所示。

**表 1 天然矿物类储热材料的热物性**

**Table 1 Thermophysical properties of natural mineral materials for sensible heat storage**

| 材料名称 | 比热容 [kJ/(kg·K)] | 密度 [kg/m$^3$] | 体积热容 [kJ/(m$^3$·K)] | 热导率 [W/(m·K)] | 最高使用温度 [℃] | 价格 [￥/t] | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 石英砂 | 0.9585 | 2375 | 2336 | 0.8 | 1180 | 297.5 | [1, 4-6] |
| 方石英 | 1.05 | 2330 | 2446 | 0.48 | 1714 | 130 | [1] |
| 铝土矿 | 1.0935 | 3600 | 3937.5 | 0.65 | 1775 | 300 | [1, 5, 7, 8] |
| 橄榄石 | 1 | 3100 | 3190 | 5.5 | 1700 | 875 | [1, 2, 4, 5, 7] |
| 赤铁矿 | 0.65 | 5280 | 3432 | 0.285 | 1581 | 820 | [4] |
| 石墨 | 0.7275 | 1905 | 1449 | 46 | 3605 | 11935 | [4, 5] |
| 玄武岩 | 0.84 | 2695 | 2264 | 0.035 | 1450 | 2115 | [4] |
| 黏土 | 0.879 | 1458 | 1282 | 0.4 | 1000 | 215 | [9] |
| 砂岩 | 0.712 | 2200 | 1566 | 2.7 | 1000 | 1434 | [9-12] |
| 砾石土 | 1.84 | 2050 | 3772 | 2 | 200 | 29 | [9, 10] |
| 白砂 | 0.75 | 1540 | 1155 | 0.8 | 1200 | 40 | [13, 14] |
| 红砂 | 0.7 | 1520 | 1064 | 0.8 | 1200 | 40 | [13, 14] |
| 钛铁矿 | 0.75 | 2200 | 1650 | 2.56 | 900 | 50 | [13] |
| 磁铁矿 | 0.752 | 5177 | 3893 | 3.7 | 1360 | 2582.5 | [9, 11, 15, 16] |
| 铁帽矿 | 1.005 | 3750 | 3769.5 | 2 | 1100 | 0.5 | [17, 18] |

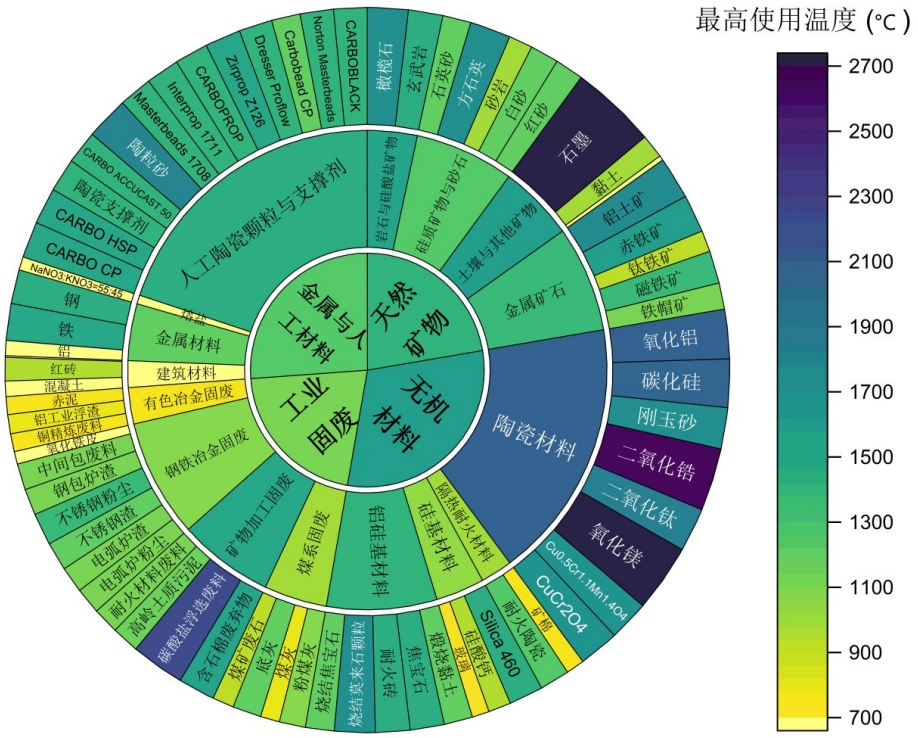



**图1　71种固体颗粒显热储热材料的分类及最高使用温度分布**

**Fig. 1　Classification and maximum service temperature distribution of 71 solid-particle materials for sensible heat storage**

**表2　无机材料类储热材料的热物性**

**Table 2　Thermophysical properties of inorganic materials for sensible heat storage**

| 材料名称 | 比热容 [kJ/(kg·K)] | 密度 [kg/m$^3$] | 体积热容 [kJ/(m$^3$·K)] | 热导率 [W/(m·K)] | 最高使用温度 [℃] | 价格 [¥/t] | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 氧化铝 | 0.995 | 3955 | 3938.5 | 23 | 2061 | 5400 | [1, 4-6] |
| 碳化硅 | 0.8595 | 3105 | 2690 | 100 | 2025 | 4700 | [1, 4, 5, 7] |
| 煅烧黏土 | 1.05 | 2600 | 2730 | 0.55 | 1200 | 180 | [1] |
| 焦宝石 | 1.05 | 1900 | 1995 | 0.18 | 1427 | 180 | [2, 3] |
| 刚玉砂 | 0.995 | 3965 | 3946 | 0.55 | 1727 | 1000 | [2] |
| 二氧化锆 | 0.427 | 6095 | 2603.5 | 1.85 | 2625 | 26300 | [4] |
| 二氧化钛 | 0.69 | 4010 | 2767.5 | 7 | 1840 | 19300 | [4] |
| 氧化镁 | 0.955 | 3560 | 3401 | 45 | 2835 | 3680 | [4] |
| Silica 460 | 1.1 | 2650 | 2915 | 1.4 | 1440 | 245 | [2] |
| 矿棉 | 1.03 | 100 | 103 | 0.05 | 769 | 3055 | [3] |
| 耐火砖 | 1.05 | 1900 | 1995 | 0.18 | 1450 | 1310 | [3] |
| 硅酸钙 | 1.03 | 300 | 309 | 0.15 | 950 | 2100 | [3] |
| 耐火陶瓷 | 1 | 950 | 950 | 0.25 | 1250 | 3375 | [3] |
| 玻璃 | 0.837 | 2710 | 2268 | 0.94 | 715 | 508.5 | [9, 19, 20] |
| 烧结莫来石颗粒 | 1 | 3000 | 3020 | 5.25 | 1700 | 52830 | [8, 11, 21, 22] |
| 烧结焦宝石 | 1.05 | 2600 | 2730 | 0.85 | 1200 | 1221 | [6, 14] |
| Cu0.5Cr1.1Mn1.4O4 | 0.9585 | 2650 | 2540 | 0.65 | 1692 | 30 | [14, 23] |
| $CuCr_2O_4$ | 0.9585 | 2650 | 2540 | 0.61 | 1692 | 30 | [14, 23] |

表3 工业固废类储热材料的热物性

Table 3 Thermophysical properties of industrial solid wastes for sensible heat storage

| 材料名称 | 比热容 [kJ/(kg·K)] | 密度 [kg/m$^3$] | 体积热容 [kJ/(m$^3$·K)] | 热导率 [W/(m·K)] | 最高使用温度 [℃] | 价格 [¥/t] | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 粉煤灰 | 0.915 | 1830 | 1906 | 0.87 | 1098.5 | 70 | [2-5, 17] |
| 煤灰 | 0.72 | 2100 | 1512 | 1.24 | 800 | 68 | [6, 24, 25] |
| 含石棉废弃物 | 0.915 | 3060 | 2807 | 1.75 | 1550 | 600 | [17, 26] |
| 底灰 | 0.915 | 2930 | 2687 | 1.375 | 1200 | 30 | [17] |
| 碳酸盐浮选废料 | 1.05 | 3390 | 3563.5 | 3.5 | 2250 | 0.5 | [17] |
| 煤矿废石 | 0.8 | 2870 | 2299.5 | 9.5 | 900 | 20 | [17] |
| 高岭土质污泥 | 0.8 | 2850 | 2280 | 1.5 | 1150 | 75 | [17] |
| 电弧炉粉尘 | 1.15 | 4275 | 4949 | 1 | 1100 | 35 | [17, 18] |
| 电弧炉渣 | 1.03 | 3370 | 3471.5 | 0.585 | 1100 | 200 | [17, 18, 27] |
| 不锈钢渣 | 0.95 | 3370 | 3204.5 | 0.75 | 1200 | 200 | [17, 28] |
| 不锈钢粉尘 | 0.95 | 4275 | 4225 | 1 | 1350 | 35 | [17] |
| 钢包炉渣 | 0.75 | 3710 | 2785 | 1 | 1100 | 300 | [17, 28] |
| 中间包废料 | 1.085 | 3295 | 3581 | 0.745 | 1100 | 100 | [17] |
| 耐火材料废料 | 0.85 | 3125 | 2679.5 | 1.75 | 1100 | 100 | [17] |
| 氧化铁皮 | 0.85 | 5455 | 4679.5 | 1 | 525 | 100 | [17] |
| 铜精炼废料 | 0.75 | 1870 | 1402.5 | 1.5 | 750 | 3000 | [17, 29] |
| 铝工业浮渣 | 0.69 | 3015 | 2098 | 1.58 | 800 | 350 | [17, 28] |
| 赤泥 | 1.17 | 3340 | 3948.5 | 0.8 | 750 | 35 | [17] |

金属与人工材料主要包括人工陶瓷颗粒与支撑剂、金属材料、熔盐以及建筑材料。涵盖CARBO CP、CARBO HSP、CARBOPROP、Masterbeads、Interprop等商用颗粒与铝、铁、混凝土、硝酸盐等材料。将上述材料纳入数据库，一方面可扩展不同储热介质之间的性能比较范围，另一方面也可为天然矿物、工业固废等低成本候选材料之间的评价提供参照。具体物性参数如表4所示。

由表1至表4可以看出不同类别材料的适用温区存在明显差异。为直观展示数据库的材料组成及高温适用特征，图1同时利用外圈颜色表示不同材料的最高使用温度。由图1可以看出，工程陶瓷及部分高温无机材料总体具有较高的最高使用温度，而部分工业固废、建筑材料及天然矿物的适用温度相对较低。与此同时，不同一级类别内部仍存在较大的性能差异，表明仅依据材料类别或单一高温性能难以完成储热介质优选，还需进一步结合储热能力、传热性能和经济性等指标进行综合评价。

### 1.2 物性参数与评价指标

固体颗粒作为高温显热储热介质时，其应用性能受到储热能力、传热性能、高温适用范围及经济性等多方面因素共同影响。本文建立的数据库选取比热容、密度、体积热容、热导率、最高使用温度和材料价格六项参数进行表征。其中，比热容、密度和体积热容主要反映材料的储热能力，热导率反映材料的热量传递能力，最高使用温度表征材料的高温适用范围，材料价格则反映其大规模应用的经济性。不同指标的物理意义、数值范围和材料间离散程度存在明显差异，因此有必要从多个维度对材料储热性能进行比较。

#### 1.2.1 储热性能指标

储热性能方面，比热容 $c_p$ 是表征显热储热介质单位质量储热能力的基本参数。在给定工作温差 $\Delta T$ 下，单位质量材料的理论储热量可表示为

$$q_m = c_p \Delta T \tag{1}$$

因此，在相同温度区间内，较高的比热容有利于降低达到给定储热容量所需的材料质量。数据库中71种材料的比热容约为0.365～2.39 kJ/(kg·K)，但绝大多数无机固体材料集中在约0.7～1.2 kJ/(kg·K)范围内。例如，二氧化锆的比热容相对较低，而CARBO CP、CARBO HSP、赤泥等材料可达到约1.2 kJ/(kg·K)左右。木材和硝酸盐熔盐表现出较高的比热容，但其工作温度和材料形态与高温固体颗粒存在明显差异。总体来看，不同无机颗粒材料之间的比热容差异相对有限，仅依据该参数难以充分区分不同材料的储热优势。

表4 金属与人工材料类储热材料的热物性

**Table 4 Thermophysical properties of metallic and artificial materials for sensible heat storage**

| 材料名称 | 比热容 [kJ/(kg·K)] | 密度 [kg/m$^3$] | 体积热容 [kJ/(m$^3$·K)] | 热导率 [W/(m·K)] | 最高使用温度 [℃] | 价格 [￥/t] | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CARBO CP | 1.2175 | 3000 | 3652.5 | 0.375 | 1527 | 1000 | [2] |
| CARBO HSP | 1.2175 | 2780 | 3429.5 | 2 | 1527 | 800 | [2, 4, 7, 30, 31] |
| 混凝土 | 0.96 | 2200 | 2154 | 1.15 | 650 | 155 | [3, 9, 17] |
| 红砖 | 0.885 | 1720 | 1537 | 0.525 | 975 | 1.5 | [9, 17, 32] |
| 木材 | 2.39 | 700 | 1673 | 0.12 | 70 | 7027 | [9, 10] |
| 铝 | 0.896 | 2710 | 2428 | 237 | 630 | 18001 | [9, 33] |
| 铁 | 0.452 | 7900 | 3571 | 80 | 1539 | 783 | [9, 15, 20] |
| 钢 | 0.465 | 7840 | 3646 | 51.9 | 1425 | 17219 | [5, 20] |
| 陶瓷支撑剂 | 1.2 | 3300 | 3960 | 0.375 | 1400 | 2543.5 | [30, 31, 34, 35] |
| $NaNO_3$:$KNO_3$=55:45 | 2.025 | 2050 | 4183.5 | 0.525 | 550 | 2035 | [34, 36] |
| CARBO ACCUCAST 50 | 1.1375 | 2000 | 2275 | 0.375 | 1400 | 600 | [7, 30, 31, 35] |
| 陶粒砂 | 0.9 | 1000 | 920 | 0.55 | 1800 | 2713 | [7] |
| Masterbeads 1708 | 0.995 | 1760 | 1751 | 0.375 | 1400 | 2543.5 | [8, 30, 35] |
| Interprop 1711 | 1.2 | 3300 | 3960 | 0.375 | 1400 | 2543.5 | [8, 30, 35] |
| CARBOPROP | 1.1375 | 1890 | 2150 | 0.375 | 1400 | 600 | [8, 30, 31, 35] |
| Zirprop Z126 | 0.46 | 4150 | 1923 | 7.2 | 1500 | 93920 | [8, 15, 16] |
| Dresser Proflow | 1.2 | 3300 | 3960 | 0.375 | 1400 | 2543.5 | [8, 30, 35] |
| Carbobead CP | 0.365 | 2200 | 803 | 0.375 | 1200 | 1000 | [13, 35] |
| Norton Masterbeads | 0.875 | 1760 | 1540 | 0.375 | 1400 | 2543.5 | [30, 35] |
| CARBOBLACK | 1.2175 | 1900 | 2313 | 0.375 | 1400 | 600 | [30, 31, 35] |

对于实际储热系统，储罐体积同样是影响系统规模及投资的重要因素，因此还需进一步考虑材料密度 $\rho$。数据库中不同材料的密度差异显著，约为100～7900 kg/m$^3$，其中矿棉密度最低，而铁、钢和部分金属氧化物具有较高密度。为综合反映比热容和密度对单位体积储热能力的共同作用，本文采用体积热容 $D$ 作为重要储热性能指标：

$$D = \rho c_p \tag{2}$$

则在给定工作温差下，相应的理论体积储热量为

$$q_v = D\Delta T = \rho c_p \Delta T \tag{3}$$

数据库中不同材料的体积热容约为103～4949 kJ/(m$^3$·K)，其离散程度明显高于单独的比热容。其中，电弧炉粉尘、氧化铁皮、硝酸盐熔盐以及部分高密度陶瓷和矿物表现出较高的体积热容，而矿棉、硅酸钙和部分轻质陶瓷材料的体积热容相对较低。因此，对于储罐空间受限的显热储能系统，体积热容相比单一比热容更能反映材料的实际储热能力，且实际工程储罐设计还需进一步考虑颗粒堆积孔隙率和床层堆积密度。

1.2.2 传热性能指标

传热性能方面，热导率 $k$ 用于表征材料在温度梯度作用下传递热量的能力，与颗粒内部温度均匀性以及储放热响应速率密切相关。与比热容相比，数据库中不同材料的热导率表现出更大的离散性，代表值从玄武岩的约0.035 W/(m·K)至铝的约237 W/(m·K)，跨越多个数量级。典型高温陶瓷中，SiC 的热导率约为90～110 W/(m·K)，MgO 约为30～60 W/(m·K)，$Al_2O_3$约为20～26 W/(m·K)，显著高于石英砂、黏土及大多数工业固废。另一方面，金属材料虽然具有很高的热导率，但其成本、高温氧化及相变等因素限制了其作为常规颗粒储热介质的直接应用。因此，热导率虽然能够表征材料自身的传热潜力，但并不能单独决定储热介质的综合性能。

1.2.3 高温适用范围

高温适用范围方面，储热介质的最高使用温度直接决定了系统可采用的储热温区，并进一步影响显热储热容量、输出热能品位以及后续能量利用效率。对于显热储热过程而言，在材料比热容基本一定的条件下，提高最高工作温度可以扩大有效温差，从而提高单位质量材料的储热量。因此，较高的最高使用温度不仅代表材料具有更强的高温服役能力，也意味着其在高温工业余热回收、太阳能热

发电及高温电热储能等场景中具有更大的应用范围。数据库结果表明，不同材料的最高使用温度差异较大，约从70℃延伸至3605℃。其中，石墨具有最高的高温适用范围，氧化镁、二氧化锆、氧化铝和碳化硅等高温无机材料整体表现出较高的使用温度上限，而部分建筑材料、工业固废和有机材料的适用温度相对较低。总体来看，高温无机材料和部分工程陶瓷在高温适用性方面具有明显优势，但其材料成本通常也相对较高；天然矿物和工业固废虽然最高使用温度整体偏低，但其中仍有部分材料能够满足中高温储热需求，并具有较好的成本优势。因此，最高使用温度应与体积热容、热导率和材料价格等指标结合分析，以判断不同材料在具体储热温区和工程场景下的实际适用性。

#### 1.2.4 经济性指标

经济性方面，大规模显热储热系统通常需要使用数十至数千吨储热介质，因此单位质量材料价格对系统投资具有直接影响。数据库中的材料价格跨度尤其显著，代表值从部分工业固废的不足1元/t到锆基商用陶瓷颗粒的约94000元/t。工业固废及副产物整体表现出较明显的成本优势，例如铁帽矿、碳酸盐浮选废料、粉煤灰、底灰及部分冶金固废等；石英砂、黏土和部分天然矿物同样具有较好的成本优势。相比之下，二氧化锆、二氧化钛、烧结莫来石及部分商用陶瓷颗粒的成本明显较高。由此可见，高储热能力、高导热性能和高温适用范围并不必然伴随较好的经济性，不同材料之间存在明显的性能—成本权衡关系。需要说明的是，本文价格指标主要采用公开文献报道的材料市场价格、原料获取价格或成本估算值，用于表征候选材料在材料层面的相对经济性。尤其对于工业固废及副产物，实际用于储热系统时还可能涉及运输、筛分、破碎、造粒、高温预处理及环境治理等附加费用，因此其实际使用成本可能高于本文采用的参考价格。因此本文价格数据主要用于不同材料成本数量级的横向比较，而非实际工程报价或全生命周期成本评估。

为进一步直观比较不同材料在上述多个性能维度上的差异，本文对比热容、密度、体积热容、热导率、最高使用温度和价格六项参数进行标准化处理，并在此基础上采用层次聚类方法对71种候选材料进行分类，结果如图2所示。

由于各参数的量纲和数量级差异较大，采用Z-score方法将各指标转换为均值为0的标准化变量：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \tag{4}$$

其中，$x_{ij}$为第$i$种材料的第$j$项参数，$\bar{x}_j$和$s_j$分别为该指标的均值和标准差。标准化值表示该材料在相应指标上的数值高于（低于）数据库总体平均水平的标准差倍数。由图2可以看出，不同物性指标在材料之间呈现出明显不同的离散特征。其中，比热容整体颜色变化相对有限，说明多数无机储热材料的比热容处于相近水平；相比之下，热导率、价格以及最高使用温度表现出更显著的材料差异。金属材料和部分工程陶瓷具有较高的热导率，但价格通常也处于较高水平；天然矿物整体性能相对均衡，并具有一定成本优势；工业固废及副产物虽然热导率和高温适用性存在较大差异，但多数材料具有较高的体积热容和明显的成本优势。例如，电弧炉粉尘、氧化铁皮及部分冶金固废具有较高的体积热容，而其材料价格远低于多数高性能陶瓷，在本文构建的评价体系下表现出较好的初步筛选结果。

同时，层次聚类结果表明，不同来源材料并未完全按照传统材料类别形成独立聚类，而是根据多维物性组合表现出一定的交叉分组现象。这说明材料来源或化学组成并不能完全决定其储热应用性能，具有不同组成和来源的材料也可能表现出相似的热物性组合。反之，同一类别内部不同材料在传热能力、高温适用范围和经济性方面也可能存在较大差异。因此，仅依靠材料类别或某一单项物性指标难以对候选储热介质进行全面评价，有必要进一步采用多指标综合评价方法对不同材料的综合性能进行定量比较。

## 2 固体颗粒储热材料综合评价

### 2.1 相关性分析

数据库共包含71种材料，其中木材、硝酸钠-硝酸钾熔盐以及铝、铁、钢等金属材料在材料形态、运行方式或高温服役特性方面与常规固体颗粒显热储热介质存在较大差异，主要用于数据库中的横向物性参照。为降低不同材料形态和应用方式对综合评价结果的干扰，本文将上述5种材料保留在数据库统计和多维物性分析中，但不纳入后续综合排名，最终选取66种候选材料进行评价。在开展

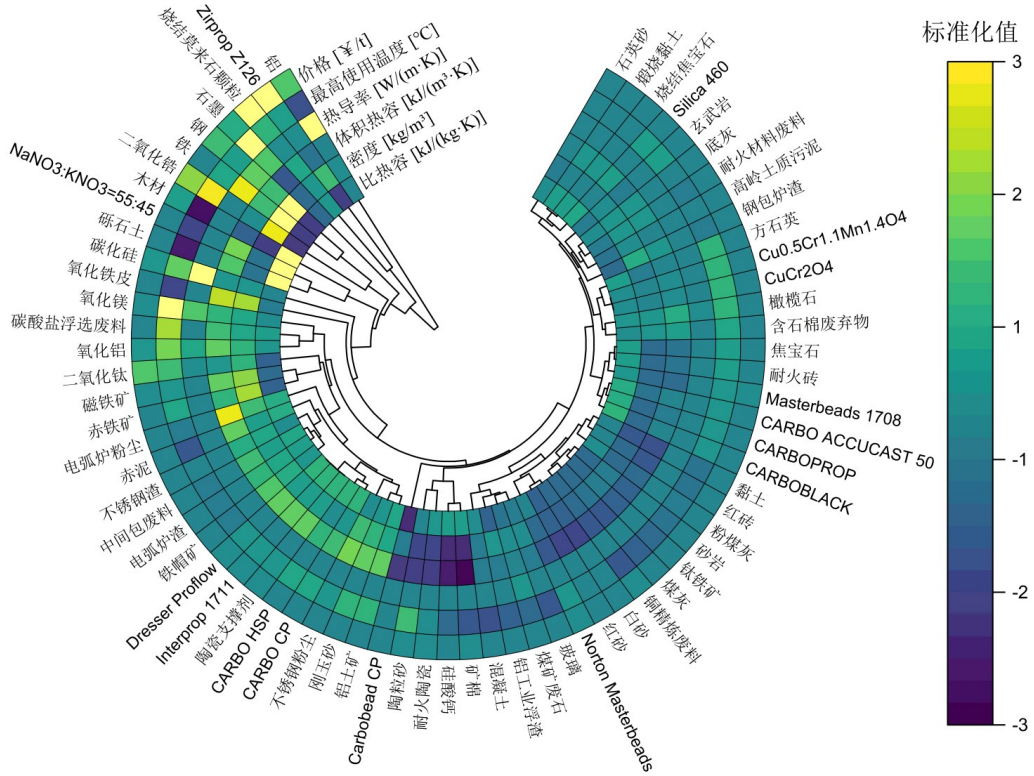



**图2　固体颗粒显热储热材料多维物性参数标准化分布及聚类结果**

**Fig. 2　Standardized multidimensional thermophysical properties and clustering results of solid-particle materials for sensible heat storage**

多指标综合评价之前，为进一步分析各物性参数之间的关联程度，并识别可能存在的信息重复，对66种候选材料的比热容、密度、体积热容、热导率、最高使用温度和价格六项参数进行Pearson相关性分析，结果如图3所示。

由图3可以看出，不同物性参数之间的相关程度存在明显差异。其中，密度与体积热容之间表现出最强的正相关性，相关系数达到0.78；比热容与体积热容之间同样呈现一定正相关关系，相关系数为0.41。需要指出的是，体积热容由密度与比热容的乘积来定义，因此其与密度和比热容之间的相关性具有明确的数学耦合来源，并非独立变量之间产生的统计相关关系。因此，本文引入Pearson相关性分析的主要目的之一是识别评价参数之间的信息重叠。相较之下，体积热容与热导率、最高使用温度及价格等相互独立参数之间的相关性更能反映不同性能维度之间的统计关系，因此后续的CRITIC-TOPSIS评价方法中只选取体积热容、热导率、最高使用温度和材料价格四项参数开展综合评价，密度和比热容不参与其中。

相比之下，体积热容与热导率、最高使用温度和价格之间的相关系数分别仅为0.03、0.10和−0.06，均表现出较弱的线性相关性。这表明具有较高体积热容的材料并不一定同时具有较好的传热性能、更高的使用温度或更高的材料成本，储热性能与其他工程性能之间具有较强的相对独立性。

热导率与最高使用温度之间的相关系数为0.50，表现出中等程度的正相关关系。该现象主要与部分高温无机材料和工程陶瓷同时具有较高热导率和较高耐温能力有关。然而两者之间的相关程度尚不足以表明高温适用范围可以直接替代传热性能，因此仍有必要将其作为两个独立评价维度。

价格与其他性能参数之间整体相关程度较弱。其中，价格与比热容呈一定负相关趋势，相关系数为−0.32；与密度和最高使用温度的相关系数均为0.23，而与体积热容和热导率的相关系数分别仅为

−0.06和0.10。这说明材料成本与热物性之间并不存在简单的单调对应关系，高性能材料并不必然具有较高价格，部分天然矿物和工业固废可能在保持较高储热能力的同时具有明显的成本优势。

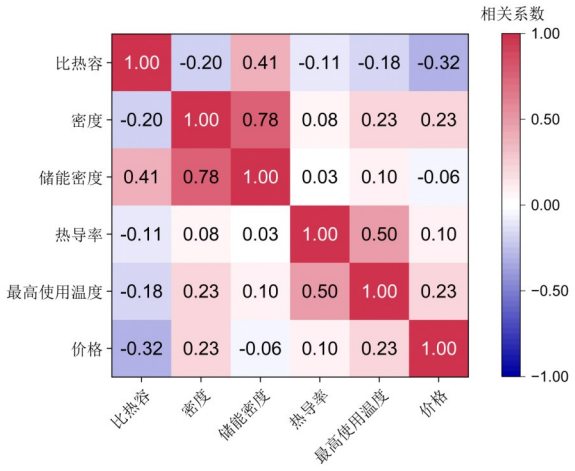



**图3 固体颗粒储热材料六维性能参数的Pearson相关性矩阵**

**Fig. 3 Pearson correlation matrix of six-dimensional performance parameters of solid-particle materials for sensible heat storage**

总体而言，除密度与体积热容之间存在较强相关性外，其余大多数参数之间的相关系数绝对值均低于0.50，表明储热能力、传热性能、高温适用性及经济性能够从不同维度反映候选材料的应用特征。同时，由于比热容、密度和体积热容之间存在明确的物理关联，若将三者同时作为综合评价指标，可能造成储热性能信息的重复筛选。因此，后续CRITIC-TOPSIS综合评价中不再分别引入比热容和密度，而选取体积热容、热导率、最高使用温度和价格四项指标，以提高综合评价指标体系的独立性与合理性。

## 2.2 CRITIC-TOPSIS评价方法

选取体积热容、热导率、最高使用温度和材料价格四项参数开展综合评价。其中，体积热容反映单位体积材料的储热能力，热导率表征材料的传热性能，最高使用温度反映材料的高温适用范围，材料价格则用于衡量其大规模应用的经济性。体积热容、热导率和最高使用温度均为正向指标，即数值越大越优；材料价格为负向指标，即数值越小越优。CRITIC-TOPSIS综合评价的目的在于统一不同指标的方向和数量级，因此采用0～1极差标准化。对于体积热容、热导率和最高使用温度三种正向指标，标准化处理为

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \#(5)$$

对于材料价格这一负向指标，则采用

$$z_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \#(6)$$

其中，$z_{ij}$为第$i$种候选材料第$j$项指标经标准化后的无量纲值；$x_{ij}$为第$i$种候选材料第$j$项指标的原始值；$x_j^{\max}$和$x_j^{\min}$分别为全部候选材料中第$j$项指标的最大值和最小值。经过处理后，各评价指标均转换至0～1范围，且标准化值越大表示该指标对应的评价结果越优。

在此基础上，采用CRITIC（Criteria Importance Through Intercriteria Correlation）方法确定各评价指标的客观权重。该方法同时考虑评价指标在不同材料之间的离散程度以及不同指标之间的信息量。第$j$项指标所包含的信息量可表示为

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^{m} (1 - r_{jk}) \quad (7)$$

式中，$\sigma_j$为第$j$项指标标准化数据的标准差，用于反映该指标对不同材料的区分能力；$r_{jk}$为第$j$与第$k$项指标之间的Pearson相关系数。指标离散程度越大，且与其他指标的相关程度越低，其所能够提供的独立评价信息越多，相应的CRITIC信息量也越大。进一步得到各指标的客观权重：

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^{m} C_j} \quad (8)$$

采用CRITIC方法计算得到各评价指标的客观权重如表5所示。

**表5 综合评价指标属性及CRITIC权重**

**Table 5 Attributes and CRITIC weights of the comprehensive evaluation indicators**

| 评价指标 | 指标属性 | CRITIC权重(%) |
|---|---|---|
| 体积热容 | 正向 | 33.14 |
| 热导率 | 正向 | 19.78 |
| 最高使用温度 | 正向 | 21.99 |
| 价格 | 负向 | 25.10 |

获得各指标权重后，采用TOPSIS（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution）方法对不同候选材料进行综合排序。构

建加权标准化矩阵：

$$v_{ij} = w_j z_{ij} \tag{9}$$

并分别确定各指标的正理想解 $V_j^+$ 和负理想解 $V_j^-$。其中，正理想解由各指标的最优值构成，负理想解则由各指标的最差值构成。随后计算第 $i$ 种材料与正、负理想解之间的距离：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}(v_{ij} - V_j^+)^2} \tag{10}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}(v_{ij} - V_j^-)^2} \tag{11}$$

最终得到第 $i$ 种材料与理想方案的相对接近度：

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \tag{12}$$

其中 $0 \leqslant S_i \leqslant 1$。$S_i$ 越接近 1，说明该材料在当前评价指标体系下越接近综合理想方案，其储热应用综合潜力越高。利用 TOPSIS 方法计算 66 种候选材料与正、负理想方案之间的距离，并得到综合接近度 $S_i$。综合评价排名前 10 名的材料如表 6 所示。

**表 6　固体颗粒储热材料 CRITIC-TOPSIS 综合评价排名**

**Table 6　CRITIC-TOPSIS comprehensive evaluation ranking of solid-particle materials for sensible heat storage**

| 排名 | 材料名称 | 综合得分 $S_i$ |
|---|---|---|
| 1 | 氧化镁 | 0.7047 |
| 2 | 碳化硅 | 0.6694 |
| 3 | 氧化铝 | 0.6581 |
| 4 | 电弧炉粉尘 | 0.6230 |
| 5 | 碳酸盐浮选废料 | 0.6160 |
| 6 | 铝土矿 | 0.6111 |
| 7 | 刚玉砂 | 0.6085 |
| 8 | 不锈钢粉尘 | 0.6070 |
| 9 | 陶瓷支撑剂颗粒 | 0.5929 |
| 10 | 磁铁矿 | 0.5926 |

### 2.3　综合评价结果与分析

由表 5 可知采用 CRITIC 方法计算得到各评价指标的客观权重中，体积热容的权重最高，达到 33.14%，表明在当前候选材料数据集中，该指标具有较大的离散程度并能够提供较多独立信息；材料价格的权重次之，为 25.10%，说明不同材料之间显著的成本差异同样是区分其综合应用潜力的重要因素。最高使用温度和热导率的权重分别为 21.99% 和 19.78%，四项指标整体权重分布相对均衡，并未出现单一指标对综合评价结果形成绝对主导的情况。

而 TOPSIS 综合评价结果表明，不同类别材料均有部分候选对象进入综合排名前列，说明材料来源并不能单独决定其储热应用潜力。由表 6 可知，氧化镁获得最高综合得分。其体积热容约为 3401 kJ/(m³·K)，热导率约为 45 W/(m·K)，最高使用温度达到 2835℃，同时材料价格约为 3680 元/t，在储热能力、传热能力和高温适用范围方面均表现较为突出，并未在某一评价指标上出现明显短板，因此表现出较好的综合性能。碳化硅综合排名第 2，其最突出的优势是约 100 W/(m·K)的高热导率，同时最高使用温度约为 2025℃，具有良好的传热和高温服役能力。虽然其体积热容约为 2690 kJ/(m³·K)，低于部分高密度材料，且价格约为 4700 元/t，但优异的热输运性能使其综合评价结果仍处于前列。氧化铝排名第 3，具有约 3939 kJ/(m³·K)的较高体积热容、23 W/(m·K)左右的热导率以及约 2061℃的最高使用温度，在储热、传热和耐温方面具有较好的综合平衡。其价格高于天然矿物和多数工业固废，但整体性能相对均衡，因此仍获得较高综合得分。

电弧炉粉尘和碳酸盐浮选废料等工业固废分别位列第 4 和第 5。电弧炉粉尘具有当前数据库中最高水平之一的体积热容，约 4949 kJ/(m³·K)，同时材料价格仅约 35 元/t；尽管其热导率和最高使用温度并不突出，但高储热能力与低成本优势显著提升了综合评分。碳酸盐浮选废料则兼具约 3564 kJ/(m³·K)的体积热容、约 3.5 W/(m·K)的热导率、约 2250℃的最高使用温度以及接近零成本的原料价格，在四项指标之间表现出较好的综合平衡。这说明部分工业副产物具有一定的资源化利用和成本优势，在本文构建的评价体系下表现出较好的初步筛选结果。

天然矿物中，铝土矿综合排名第 6，其体积热容约 3938 kJ/(m³·K)，最高使用温度约 1775℃，价格约 300 元/t。虽然其热导率仅约 0.65 W/(m·K)，但较高的体积热容和明显的成本优势使其仍表现出较好的综合竞争力。该结果也说明，对于大规模显热储能系统，材料并不需要在所有单项性能上均达到最高水平，而是在储热性能、高温适用范围和经济性之间实现合理匹配。

总体来看，综合排名前列的材料主要包括高性能陶瓷、天然矿物以及低成本工业固废三类。高性能陶瓷在热导率和最高使用温度方面具有明显优势，天然矿物表现出较好的储热性能与成本平衡，而部分工业固废则依靠较高的体积热容和极低的材料成本获得较高综合评分。因此，不同类别材料分别体现出不同的性能优势，也进一步说明固体颗粒储热材料的筛选具有明显的多目标特征。

为进一步揭示不同类别优选材料的具体性能构成，在CRITIC-TOPSIS综合评价结果基础上，分别选取四个一级材料类别中综合得分最高的材料作为代表，即天然矿物中的铝土矿、无机材料中的氧化镁、工业固废中的电弧炉粉尘以及金属与人工材料中的陶瓷支撑剂颗粒，构建六维性能雷达图，如图4所示。其中，各项性能均采用0～1极差标准化处理。

由图4(a)可见，铝土矿表现出低成本天然矿物特征。其经济性标准化值接近1，体积热容达到约0.79，密度和比热容分别约为0.58和0.49，说明其具有较好的体积储热能力；最高使用温度约为0.46，也能够满足较高温度范围内的显热储热需求。然而，铝土矿的热导率标准化值仅约为0.006，明显低于其他性能指标，表明其主要短板在于材料自身的导热能力。因此，对于以铝土矿为储热介质的系统，实际应用中可能需要通过减小颗粒尺寸、优化颗粒床结构或强化换热方式等手段改善传热过程。

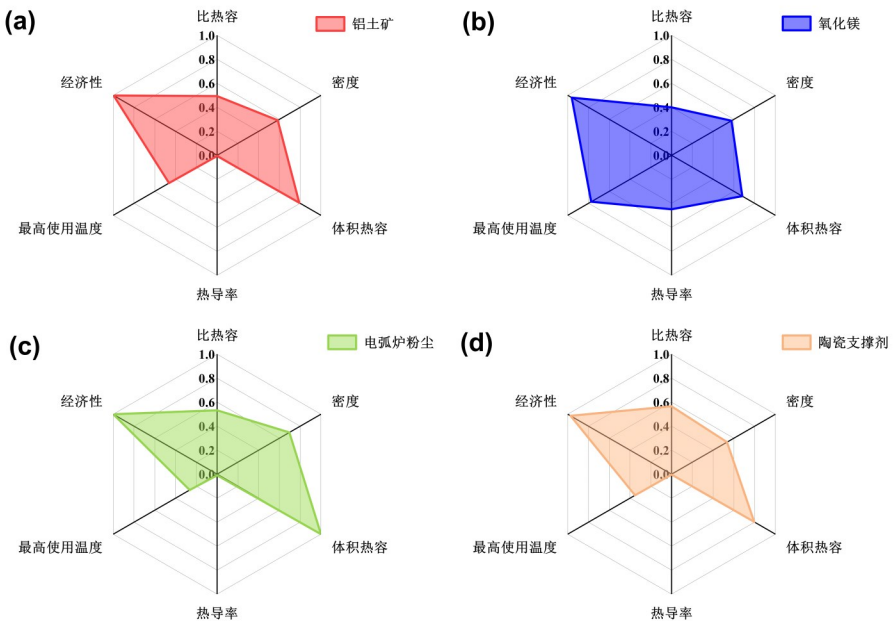



**图4　四类储热材料中优选代表的六维性能雷达图：(a) 铝土矿；(b) 氧化镁；(c) 电弧炉粉尘；(d) 陶瓷支撑剂**
**Fig. 4　Six-dimensional performance radar charts of selected representative materials from four material categories: (a) bauxite; (b) MgO; (c) electric arc furnace dust; and (d) ceramic proppant**

图4(b)所示的氧化镁在本文选取的性能指标及标准化方法下表现出相对均衡的性能分布。其最高使用温度标准化值约为0.77，为四种材料中最高；热导率达到约0.45，也显著高于另外三种代表材料。同时，氧化镁的体积热容约为0.68，密度约为0.58，经济性仍保持在0.96以上，各项指标之间不存在明显短板。与铝土矿和工业固废相比，氧化镁虽然材料成本相对较高，但其优异的高温适用范围和传热性能能够弥补经济性方面的不足。因此，氧化镁呈现出典型的储热性能、传热性能与高温适用范围协同优势，其综合性能较为均衡。

相比之下，图4(c)中的电弧炉粉尘优势更为集中。其体积热容标准化值达到1.00，为四种代表材料中最高，密度和比热容分别约为0.70和0.53，同时经济性接近1，说明该材料在单位体积储热能力和原料成本方面具有显著优势。但其热导率标准

化值仅约为0.01，最高使用温度约为0.26，在传热能力和高温适用范围方面明显弱于氧化镁。该结果表明，电弧炉粉尘能够在综合评价中获得较高排名，主要得益于极高的体积热容和低成本优势，而非各项性能均处于较高水平。对于工作温度要求相对适中、更加关注材料成本及储热密度的大规模储能场景，此类工业固废具有较大的潜在应用价值。图4(d)中的陶瓷支撑剂颗粒则呈现出较好的储热性能与经济性。其比热容标准化值约为0.57，体积热容约为0.80，均处于较高水平，经济性也达到约0.97；但其热导率仅约为0.003，最高使用温度约为0.35。由此可见，该类人工颗粒的主要优势在于较高的储热能力、较规则的颗粒形态以及相对较好的成本水平，而材料本征导热性能并不突出。

四种材料雷达图形状的明显差异进一步说明，不同类别材料获得较高综合评分的原因并不相同，固体颗粒储热介质的筛选并非追求某一项性能的极值，而是在储热能力、传热性能、高温适用范围和经济性等多项指标之间的合理平衡。需要强调的是，CRITIC-TOPSIS综合得分仅反映材料在本文所选指标体系下的相对表现，并不直接等同于实际工程应用性能。特别是对于工业固废，其实际作为高温储热介质还需进一步考虑原料成分波动、重金属或其他有害组分释放、热循环稳定性、烧结与团聚、颗粒机械强度、腐蚀性以及筛分、造粒和预处理成本等因素。对于含石棉废弃物等具有潜在环境与健康风险的特殊材料，本文仅保留其文献物性数据用于数据库比较，不根据当前综合得分直接推断其工程适用性。因此，本文评价结果只为候选材料的第一阶段材料筛选，后续仍需结合安全性、循环性能和具体储热系统工况开展进一步验证。

## 3 结 论

本文面向高温显热储能应用，构建了包含71种候选材料的固体颗粒储热材料性能数据库，并从储热性能、传热性能、高温适用范围及经济性等维度开展材料特征分析和综合评价。不同类别材料在多维物性空间中表现出明显差异，高温陶瓷在热导率和最高使用温度方面整体占优，天然矿物具有较好的综合均衡性，而工业固废则表现出较为突出的低成本优势。

Pearson相关性分析表明，密度与体积热容之间具有较强正相关性，相关系数为0.78，比热容与体积热容之间的相关系数为0.41，与$D = \rho c_p$的物理关系一致；热导率与最高使用温度呈中等程度正相关，相关系数为0.50。除此之外，其余多数参数间相关程度较弱，说明储热性能、传热性能、高温适用范围和经济性具有较强的相对独立性。CRITIC结果表明，体积热容、价格、最高使用温度和热导率的权重分别为33.14%、25.10%、21.99%和19.78%，四项指标整体权重分布相对均衡。TOPSIS综合评价结果显示，氧化镁、碳化硅和氧化铝分别以0.7047、0.6694和0.6581的综合得分位列前3，表现出较好的综合性能；电弧炉粉尘和碳酸盐浮选废料分别位列第4和第5，说明部分工业固废凭借较高的体积储热能力和显著的成本优势，在本文构建的评价体系下表现出较好的初步筛选结果。天然矿物中的铝土矿综合排名第6，进一步表明低成本天然材料在大规模储热场景中具有较强应用潜力。

不同类别优选材料的六维性能雷达图进一步表明，各类材料获得较高综合评分的性能来源存在明显差异。氧化镁在体积储热能力、传热性能和高温适用范围之间表现最为均衡；铝土矿的主要优势在于较高的体积热容和良好的经济性；电弧炉粉尘具有突出的体积储热能力及低成本优势，但热导率和最高使用温度相对有限；陶瓷支撑剂则表现出较好的储热性能和经济性，但传热能力仍相对不足。因此，固体颗粒储热材料的优选本质上是储热、传热、耐温和经济性等多目标之间的协同权衡，应结合具体工作温度、功率需求、储热规模及成本约束进行针对性选择。

### 符 号 说 明

$C_j$—— 第$j$项评价指标的CRITIC信息量
$c_p$—— 比热容，kJ/(kg·K)
$D$—— 体积热容，kJ/(m$^3$·K)
$D_i^+$—— 第$i$种候选材料与正理想解之间的距离
$D_i^-$—— 第$i$种候选材料与负理想解之间的距离
$k$—— 热导率，W/(m·K)
$m$—— 评价指标总数
$n$—— 候选材料总数
$q_m$—— 单位质量材料的显热储热量，kJ/kg
$q_v$—— 单位体积材料的显热储热量，kJ/m$^3$
$r_{jk}$—— 第$j$项与第$k$项评价指标之间的Pearson相关

系数

$S_i$—— 第$i$种候选材料与理想方案的相对接近度（TOPSIS综合得分）

$s_j$—— Z-score标准化中第$j$项指标的标准差，按对应原始指标单位

$V_j^+$—— 第$j$项评价指标的正理想解

$V_j^-$—— 第$j$项评价指标的负理想解

$v_{ij}$—— 第$i$种候选材料第$j$项指标的加权标准化值

$w_j$—— 第$j$项评价指标的CRITIC权重

$x_{ij}$—— 第$i$种候选材料第$j$项指标的原始值，按对应指标单位

$x_j^{max}$—— 第$j$项评价指标在全部候选材料中的最大值，按对应指标单位

$x_j^{min}$—— 第$j$项评价指标在全部候选材料中的最小值，按对应指标单位

$\bar{x}_j$—— 第$j$项评价指标的平均值，按对应指标单位

$z_{ij}$—— 第$i$种候选材料第$j$项指标的标准化值

$\Delta T$—— 储热过程的温度变化范围，K

$\rho$—— 材料密度，kg/m$^3$

$\sigma_j$—— CRITIC方法中第$j$项标准化评价指标的标准差

## 参 考 文 献


[1] JIANG K, DU X, KONG Y, et al. A comprehensive review on solid particle receivers of concentrated solar power [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 116: 109463.

[2] DAVENPORT P, MA Z, 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.

[3] MA Z, DAVENPORT P, ZHANG R. Design analysis of a particle-based thermal energy storage system for concentrating solar power or grid energy storage [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101382.

[4] CALDERóN A, BARRENECHE C, PALACIOS A, et al. Review of solid particle materials for heat transfer fluid and thermal energy storage in solar thermal power plants [J]. Energy Storage, 2019, 1 (4): e63.

[5] KHAN M I, ASFAND F, AL-GHAMDI S G. Progress in technology advancements for next generation concentrated solar power using solid particle receivers [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 54: 102813.

[6] MEHOS M, TURCHI C, VIDAL J, et al. Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap [J]. National Renewable Energy Lab(NREL), Golden, CO (United States), 2017.

[7] NIE F, BAI F, WANG Z, et al. Solid particle solar receivers in the next - generation concentrated solar power plant [J]. EcoMat, 2022, 4(5): e12207.

[8] JIANG K, DU X, ZHANG Q, et al. Review on gas-solid fluidized bed particle solar receivers applied in concentrated solar applications: Materials, configurations and methodologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111479.

[9] KHADIRAN T, HUSSEIN M Z, ZAINAL Z, et al. Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review [J]. Renewable and Sustainable energy reviews, 2016, 57: 916-28.

[10] WANG K, QIN Z, TONG W, et al. Thermal energy storage for solar energy utilization: Fundamentals and applications [J]. Resources, Challenges and Applications, 2020, 415 (9180410.5772).

[11] 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.

[12] RATHNAWEERA T, RANJITH P, GU X, et al. Experimental investigation of thermomechanical behaviour of clay-rich sandstone at extreme temperatures followed by cooling treatments [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107: 208-23.

[13] SAEED R S, ALSWAIYD A, SALEH N S, et al. Characterization of low-cost particulates used as energy storage and heat-transfer medium in concentrated solar power systems [J]. Materials, 2022, 15(8): 2946.

[14] SAEED R, DANISH S N, ALAQEL S, et al. Characterization of Solid Particulates to Be Used as Storage as Well as Heat Transfer Medium in Concentrated Solar Power Systems [J]. Applied Sciences, 2025, 15(15): 8566.

[15] ZEHNDER M, PURWITASARI A, HEINZEL A, et al. Study on Corrosion and Thermal Alteration of Low - Cost Storage Materials for Use in High - Temperature Thermal Energy Storage Systems With Lead as the Heat Transfer Fluid [J]. Energy Storage, 2025, 7 (8): e70305.

[16] MARTINEZ J M, BIESUZ M, DONG J, et al. Flash sintering of zircon: rapid consolidation of an ultrahigh bandgap ceramic [J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2021, 9(1): 374-81.

[17] MAJó M, CALDERON A, SVOBODOVA-SEDLACKOVA A, et al. New database of sustainable solid particle materials to perform a material-based design for a thermal energy storage in concentrating solar power [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 281: 113309.

[18] MAJó M, CALDERóN A, SALGADO-PIZARRO R, et al. Assessment of solid wastes and by - products as solid particle materials for concentrated solar power plants [J]. Solar RRL, 2022, 6(6): 2100884.

[19] BERRHAZI S, AHMED O, BENCHRIFA R, et al. Optimal design with materials selection for thermal energy storages in high temperature concentrating solar power [J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(1): 37-44.

[20] POUSETTE H, KOJOLA N, HUSS J. Experimental Study on the Melting of Hydrogen - Reduced Iron Ore Pellets in Electric Arc

Furnace-Type Slags [J]. steel research international, 2026, 97(1): 205-17.

[21] FRIEDRICH K, HOLZSCHUSTER S, FRITZ T, et al. Benchmark analysis for recycled glass in Austrian waste management [J]. Detritus, 2020, 13(December): 87-98.

[22] ROYO P, ACEVEDO L, ARNAL A J, et al. Decision support system of innovative high-temperature latent heat storage for waste heat recovery in the energy-intensive industry [J]. Energies, 2021, 14(2): 365.

[23] CHUNG K M, CHEN R. Black coating of quartz sand towards low-cost solar-absorbing and thermal energy storage material for concentrating solar power [J]. Solar Energy, 2023, 249: 98-106.

[24] REZAEI H, GUPTA R, BRYANT G, et al. Thermal conductivity of coal ash and slags and models used [J]. Fuel, 2000, 79(13): 1697-710.

[25] LONG X, LI J, WANG H, et al. The morphological and mineralogical characteristics and thermal conductivity of ash deposits in a 220 MW CFBB firing Zhundong lignite [J]. Energy, 2023, 263: 125842.

[26] FAIK A, GUILLOT S, LAMBERT J, et al. Thermal storage material from inertized wastes: Evolution of structural and radiative properties with temperature [J]. Solar Energy, 2012, 86(1): 139-46.

[27] ORTEGA-FERNáNDEZ I, CALVET N, GIL A, et al. Thermophysical characterization of a by-product from the steel industry to be used as a sustainable and low-cost thermal energy storage material [J]. Energy, 2015, 89: 601-9.

[28] YIN M, XIONG Y, ZHANG A, et al. Non-Ferrous metal smelting slags for thermal energy storage: A mini review [J]. Buildings, 2025, 15(13): 2376.

[29] CALDERóN-VáSQUEZ I, SEGOVIA V, CARDEMIL J M, et al. Assessing the use of copper slags as thermal energy storage material for packed-bed systems [J]. Energy, 2021, 227: 120370.

[30] SIEGEL N, GROSS M, HO C, et al. Physical properties of solid particle thermal energy storage media for concentrating solar power applications [J]. Energy Procedia, 2014, 49: 1015-23.

[31] SIEGEL N P, GROSS M D, COURY R. The development of direct absorption and storage media for falling particle solar central receivers [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2015, 137(4): 041003.

[32] LITVAN G G. Determination of the firing temperature of clay brick [J]. American Ceramic Society Bulletin, 1984, 63(4): 617-27.

[33] ZHANG A, LI Y. Thermal conductivity of aluminum alloys—a review [J]. Materials, 2023, 16(8): 2972.

[34] WANG W, HE X, SHUAI Y, et al. Experimental study on thermal performance of a novel medium-high temperature packed-bed latent heat storage system containing binary nitrate [J]. Applied Energy, 2022, 309: 118433.

[35] CHUNG K M, ZENG J, ADAPA S R, et al. Measurement and analysis of thermal conductivity of ceramic particle beds for solar thermal energy storage [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 230: 111271.

[36] KWASI-EFFAH C C, EGWARE H O, OBANOR A I, et al. Development and characterization of a quaternary nitrate based molten salt heat transfer fluid for concentrated solar power plant [J]. Heliyon, 2023, 9(5).