高炉渣基低温相变复合材料的特性表征与分析

邱明伟[1]，龙 跃[1]，杜培培[2]，赵鹏越[1]，王铮铮[1]
（1. 华北理工大学 a. 冶金与能源学院；b. 现代冶金技术教育部重点实验室，河北 唐山 063210；
2. 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819）

摘要：为制备性能良好的高炉渣基低温相变复合材料，本文基于真空浸渍法，研究以改性高炉渣、氧化石墨烯/石蜡复合相变材料为主要原料，采用SEM、Hot Disk及TG-DSC等检测方法分析该材料的微观结构、导热系数及相变潜热等性能，探明材料成型机理。结果表明：对高炉渣基低温相变复合材料的热性能影响程度从大到小依次为复合相变材料在改性高炉渣中的质量分数、改性高炉渣种类、氧化石墨烯在复合相变材料中的质量分数。综合考虑，以酸性改性水淬高炉渣为载体，当复合相变材料中氧化石墨烯的质量分数为4%，载体中复合相变材料的导入量为30%时，该复合材料的性能最优，材料的导热系数为0.59 W/(m·K)，约为酸性改性高炉渣或碱性改性高炉渣的3倍，相变焓约为热循环前的98.82%，熔化潜热、凝固潜热分别为112.27、82.16 J/g，熔融温度、凝固温度分别为50.12、55.45 ℃。

关键词：高炉渣；复合相变材料；相变潜热；表征
中图分类号：TF09；TB332 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0154－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.097

Characterization and analysis of low-temperature composite phase change materials based on blast furnace slag

QIU Mingwei[1], LONG Yue[1], DU Peipei[2], ZHAO Pengyue[1], WANG Zhengzheng[1]
(1. *North China University of Technology a. School of Metallurgy and Energy; b. Key Laboratory of Modern Metallurgical Technology of the Ministry of Education, Tangshan* 063210, *Hebei, China*; 2. *School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang* 110819, *Liaoning, China*)

Abstract: In order to prepare low-temperature composite phase change materials based on blast furnace slag with good performance, based on vacuum impregnation method, the modified blast furnace slag and graphene oxide/paraffin composite phase change materials are used as main raw materials, and the microstructure, thermal conductivity and latent heat of phase change of the materials are analyzed by SEM, Hot Disk and TG-DSC to find out the molding mechanism of the materials. The results show that the degree of influence in descending order on the thermal properties of low-temperature composite phase change materials based on blast furnace slag is the mass fraction of composite phase change materials in modified blast furnace slag, the type of modified blast furnace slag and the mass fraction of graphene oxide in composite phase change materials. Considering comprehensively, with acid modified water quenching blast slag as the carrier, when the mass fraction of graphene oxide in the composite phase change materials is 4% and the introduction amount of the composite phase change materials in the carrier is 30%, the composite material has the best performance. The thermal conductivity of the material is 0.59 W/(m·K), which is about 3 times that of acid-modified blast furnace slag or alkaline-modified blast furnace slag, and the phase change enthalpy is about 98.82% of that before thermal cycle, the latent heat of melting and solidification are 112.27 and 82.16 J/g, respectively, and the

收稿日期：2022－08－15；**修回日期**：2022－08－23
基金项目：河北省自然科学基金资助项目(E2020209209)
作者简介：邱明伟(1994—)，男，硕士研究生，从事冶金固体废弃物综合利用的研究。
通信作者：龙 跃(1976—)，男，博士生导师，教授，从事冶金节能与资源优化方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

melting temperature and solidification temperature are 50.12 and 55.45 ℃, respectively.

Key words: blast furnace slag; composite phase change materials; latent heat of phase change; surface features

在高炉冶炼过程中，当温度为 1 400 ~ 1 500 ℃时，炉料会出现还原熔分，脉石会形成炉渣，其主要化学组成是硅酸盐和铝酸盐。矿石中的脉石、燃料中的灰分、溶剂(一般是石灰石)中的非挥发组分形成固体废物，生成的熔渣即为高炉渣，其主要化学成分为 CaO、SiO_2、Al_2O_3 及 MgO 等[1]。2021 年全国粗钢产量约为 10.35 亿吨，产生钢渣超过 1.2 亿吨，产生高炉渣约为 3.3 亿吨[2]。水淬高炉渣作为一种急冷产物，具有表面粗糙多孔、廉价易得、良好的化学相容性及热稳定性等优点，是作为高品质建筑材料领域硅酸盐类载体的优质材料[3-5]。水淬高炉渣可作为复合相变材料载体，制备出导热率高及热性能良好的新型水淬高炉渣基低温复合相变材料。近年来，国内外学者逐渐发掘复合相变材料在建筑材料领域的潜能[6-8]，开始探索制备高性能复合相变材料的新技术并取得了一定成果。在相变材料导热性越好，单位体积蓄热量越高的前提下[9-11]，郭美茹等[12]发现 2% 的石墨烯/石蜡复合材料的导热系数较纯石蜡提高了约 65%；张运华等[13]将石蜡掺入到相变水泥基复合材料中，使得相变水泥基复合材料储热性能提高。张建波等[14]制备低温相变复合材料，熔融温度和潜热分别为 51.9 ℃和 36.4 J/g，在经过 100 次热循环后仍能保持良好的热稳定性，在建筑节能、太阳能等储能领域具有潜在的应用前景。

本文以改性水淬高炉渣为载体，导入氧化石墨烯/石蜡复合相变材料，制备单位体积蓄热量高、水淬高炉渣高附加值利用的新型高炉渣基低温相变复合材料，可用于工业余热回收及低温储热领域，为水淬高炉渣高附加值利用提供新途径、新思路。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验用高炉渣选自唐山某钢铁厂；石蜡为 50#切片石蜡，产自上海某康复器械厂，熔点为 50 ~ 52 ℃；氧化石墨烯纯度为 99.5%，产自某碳素新材料公司。

取适量改性高炉渣于培养皿内，添加不同氧化石墨烯质量分数的氧化石墨烯/石蜡复合材料；将上述样品在室温条件下研磨，放入真空干燥箱中抽真空 1 h，并将真空干燥箱温度升至 80 ℃，保持 80 ℃持续 30 min，即制得高炉渣基低温相变复合材料。

1.2　试验方法

(1) 正交试验。高炉渣基低温相变复合材料热性能的主要影响因素：改性高炉渣种类(A)、氧化石墨烯在复合相变材料中的质量分数(B)及复合相变材料在改性高炉渣中的质量分数(C)，将这 3 个参数作为三因素三水平进行 9 组正交试验。具体试验方案如表 1、2 所示。

表 1　正交试验的因素和水平

Table 1　Factors and levels of orthogonal experiment

水平	A(炉渣种类)	B(质量分数/%)	C(质量分数/%)
1	水洗改性	0	10
2	酸性改性	4	20
3	碱性改性	10	30

表 2　正交试验方案

Table 2　Scheme of orthogonal experiment

编号	A(种类)	B(质量分数/%)	C(质量分数/%)
1#	A1(水洗改性)	B1(0)	C1(10)
2#	A1	B2(4)	C2(20)
3#	A1	B3(10)	C3(30)
4#	A2(酸性改性)	B1	C2
5#	A2	B2	C3
6#	A2	B3	C1
7#	A3(碱性改性)	B1	C3
8#	A3	B2	C1
9#	A3	B3	C2

1.3　材料表征方法

采用扫描电子显微镜(SEM，德国蔡司

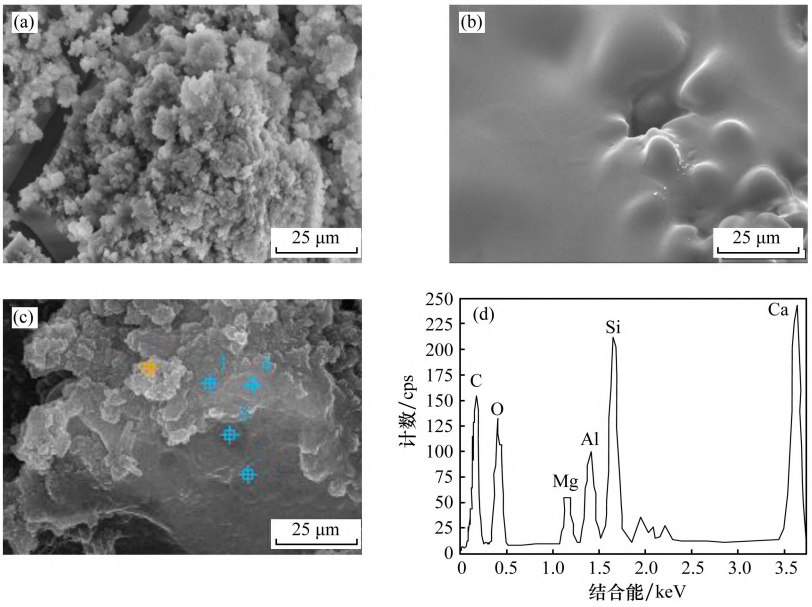
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZEISS MERLIN Compact)观察氧化石墨烯/石蜡复合材料及高炉渣基低温相变复合材料表面形貌；在Ar气氛、温度范围为30～80 ℃、升降温速率为3 ℃/min的条件下，采用差式扫描热量仪测定氧化石墨烯/石蜡复合材料及高炉渣基低温相变复合材料的相变温度和潜热；采用Hot Disk热常数分析仪对改性高炉渣、氧化石墨烯/石蜡复合材料及高炉渣基低温相变复合材料导热系数进行表征。

2 试验结果与分析

2.1 表观形态结构分析

复合相变材料和高炉渣基低温相变复合材料的扫描电镜及能谱分析如图1所示。由图1(a)可知：改性水淬高炉渣表面得到了明显改变，粗糙表面明显扩大，出现大量不规则的孔洞及凹槽缝隙，为氧化石墨烯/石蜡复合相变材料提供了足够的着位点。由图1(b)、(c)可知，大量的氧化石墨烯/石蜡复合相变材料成层覆盖在改性水淬高炉渣的粗糙表面，填充孔洞及凹槽缝隙。由图1(d)可知，高炉渣基低温相变复合材料的光谱中出现了大量新的组分C元素，这表明氧化石墨烯/石蜡复合相变材料在改性高炉渣的微观结构中被成功地吸附，说明其微观结构发生了较大变化。



(a) 改性高炉渣；(b) 复合相变材料；(c) 高炉渣基低温相变复合材料；(d) 高炉渣基低温相变复合材料能谱分析

图1 改性水淬高炉渣和高炉渣基低温相变复合材料扫描电镜与能谱分析

Fig. 1 SEM and EDS of modified water quenched blast furnace slag and low temperature composite phase change materials based on blast furnace slag

2.2 正交试验结果极差分析

选取三因素三水平正交法对高炉渣基低温相变复合材料的热性能进行试验研究，具体极差分析如表3所示。极差为同一列中k_i的最大值与最小值之差，可反映各因素之间变化率的波动大小，极差最大一列对应的影响因素，对试验结果的影响最大。从表3可看出：极差中，C > A > B，即复合相变材料在改性高炉渣的质量分数对高炉渣基低温相变复合材料的热性能

表3 高炉渣基低温相变复合材料的热性能试验结果极差分析

Table 3 Range analysis of thermal performance test results of low temperature composite phase change materials based on blast furnace slag

试验编号	A(种类)	B(质量分数/%)	C(质量分数/%)	相变潜热/(J·g^{-1})
1#	水洗改性	0	10	7.57
2#	水洗改性	4	20	26.99

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（续表 3）

试验编号	A(种类)	B(质量分数/%)	C(质量分数/%)	相变潜热/(J·g^{-1})
3#	水洗改性	10	30	40.04
4#	酸性改性	0	20	10.51
5#	酸性改性	4	30	112.27
6#	酸性改性	10	10	70.33
7#	碱性改性	0	30	43.4
8#	碱性改性	4	10	9.25
9#	碱性改性	10	20	22.96
K_1	74.60	61.48	87.15	—
K_2	193.11	148.51	60.46	—
K_3	75.61	133.33	195.71	—
k_1	24.87	20.49	29.05	—
k_2	64.37	49.50	20.15	—
k_3	25.20	44.44	65.24	—
R	39.50	29.01	45.08	—

注：K_i 是因素 A、B、C 第 i 水平所在试验中的相变潜热值，i 为 1、2、3；k_i 为 K_i 的平均值。

影响最大，改性高炉渣种类影响次之，氧化石墨烯在复合相变材料中的质量分数影响最小。

采用正交试验制得的高炉渣基低温相变复合材料的熔化潜热及凝固潜热如表 4 所示。由表 4 可知：以 5#试验为例，以酸性改性高炉渣为载体，氧化石墨烯在复合相变材料中的质量分数为 4%，复合相变材料在改性高炉渣中的质量分数为 30% 时，融化潜热为 112.27 J/g，凝固潜热为 82.16 J/g。相较于水洗改性高炉渣及碱性改性高炉渣，酸性改性高炉渣有较大的比表面积及孔容，可容纳更多复合相变材料以提供更多的相变潜热。高炉渣基低温相变复合材料中的相变潜热与氧化石墨烯/石蜡复合相变材料在改性高炉渣中质量分数成正比，考虑到改性高炉渣对复合相变材料最多容纳 30%，设置其最佳质量分数为 30%。当氧化石墨烯在复合相变材料中质量分数为 4% 时，氧化石墨烯/石蜡复合相变材料整体相变潜热最高。

表 4　高炉渣基低温相变复合材料的相变潜热值

Table 4　Phase change latent heat value of low temperature composite phase change materials based on blast furnace slag　　J/g

项目	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
熔化潜热	7.57	26.99	40.04	10.51	112.27	70.33	43.40	9.25	22.96
凝固潜热	18.56	46.31	69.94	41.7	82.16	44.12	65.12	56.86	44.75

2.3　材料热性能分析

2.3.1　导热率

石蜡、高炉渣、氧化石墨烯、酸性改性高炉渣、碱改性高炉渣、高炉渣基低温相变复合材料及氧化石墨烯/石蜡复合相变材料的导热系数如表 5 所示。由表 5 可知：高炉渣的导热系数为 0.41 W/(m·K)，酸性改性高炉渣导热系数降低到 0.21 W/(m·K)，碱性改性高炉渣导热系数降低到 0.22 W/(m·K)。制备的高炉渣基低温相变复合材料的导热系数由酸性改性高炉渣的 0.21 W/(m·K)提高到 0.59 W/(m·K)，优于张建波等[14]制备低温相变复合材料的 0.25 W/(m·K)。在制备高炉渣基低温相变复合材料过程中，采用真空浸渍法使得液态氧化石墨烯/石蜡复合相变材料在大气压作用下渗入酸性改性高炉渣或碱性改性高炉渣内部及表面，这在一定程度上提高了高炉渣基低温相变复合材料的致密性，使得整体材料导热系数显著提高。

表 5　制备高炉渣基低温相变复合材料中所用材料的导热系数

Table 5　Thermal conductivity of materials used in preparation of low temperature composite phase change materials based on blast furnace slag　　W/(m·K)

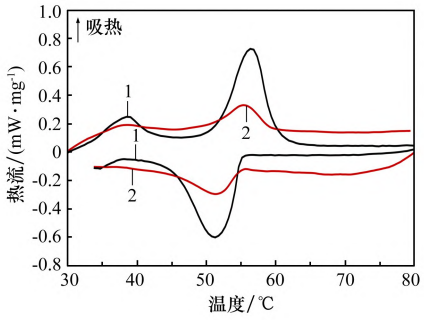
石蜡	高炉渣	复合相变材料	酸性改性高炉渣	碱性改性高炉渣	高炉渣基低温相变复合材料
0.21	0.41	5.83	0.21	0.22	0.59

2.3.2　相变潜热

石蜡和高炉渣基低温相变复合材料的 DSC 曲线如图 2 所示。由图 2 可知：石蜡和高炉渣基低温相变复合材料的熔融温度、凝固温度及

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

熔化潜热和凝固潜热分别为 51.23、55.34、50.12、55.45 ℃和 194.42、131.30、112.34 和 82.23 J/g。高炉渣基低温相变复合材料熔化潜热和凝固潜热均优于文献[14]制备低温相变复合材料的 36.4 和 38.2 J/g。高炉渣基低温相变复合材料相变温度变化很小，氧化石墨烯作为导热增强材料的高导热粒子，在氧化石墨烯/石蜡复合相变材料相变过程中其自身并没有发生任何相变，这是由于氧化石墨烯与石蜡紧密接触进而加强了相互作用力。为了克服两者之间存在的范德华力，导致包裹氧化石墨烯的石蜡排列出现变化，进而影响体系的潜热，高炉渣基低温相变复合材料的熔融和凝固过程温度跨度约为 5 ℃。制备的高炉渣基低温相变复合材料具有较高的潜热值和适宜的熔融温度，其相变温度高于 50 ℃，不适用于建筑外墙蓄热浆料，可用于工业余热回收以及低温储热领域应用。



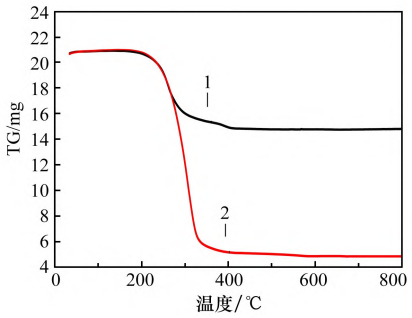
1—石蜡；2—高炉渣基低温相变复合材料。

图 2 石蜡和高炉渣基低温相变复合材料 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curve of paraffin and low temperature composite phase change materials based on blast furnace slag

2.3.3 热稳定性

石蜡与高炉渣基低温相变复合材料的 TG 曲线如图 3 所示。由图 3 可知：石蜡的开始失重温度约为 200 ℃，于 400 ℃左右结束。在失重过程中，高炉渣基低温相变复合材料的初始失重温度和石蜡几乎在同一时间。当温度为200～400 ℃时，失重的原因是石蜡分子链的热降解及高炉渣基低温相变复合材料中氧化石墨烯/石蜡复合相变材料的流失。高炉渣基低温相变复合材料的失重率约为 30%，与改性高炉渣吸附氧化石墨烯/石蜡复合相变的材料量一致，原因是改性高炉渣为氧化石墨烯/石蜡复合相变材料提供了一个与外界隔离的封闭空间，限制了氧化石墨烯/石蜡复合相变材料在高于其相变温度时产生的挥发性产物的损失。这表明将氧化石墨烯/石蜡复合相变材料加入到改性高炉渣中可提高其热稳定性，制备的高炉渣基低温相变复合材料可用于实际应用中储热。



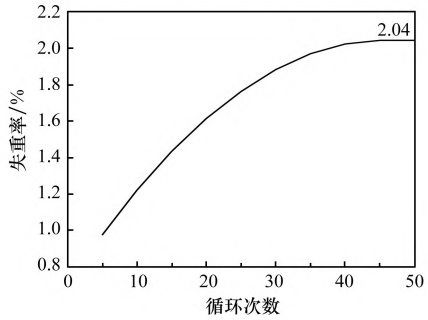
1—石蜡；2—高炉渣基低温相变复合材料。

图 3 石蜡与高炉渣基低温相变复合材料 TG 曲线

Fig. 3 TG curve of paraffin and low temperature composite phase change materials based on blast furnace slag

2.3.4 循环稳定性

高炉渣基低温相变复合材料热循环前、后的质量损失如图 4 所示。由图 4 可知，随着熔化和凝固的循环过程次数的增加，高炉渣基低温相变复合材料会存在一定的质量损失，最终失重率稳定在2.04%。造成高炉渣基低温相变



1—石蜡；2—高炉渣基低温相变复合材料。

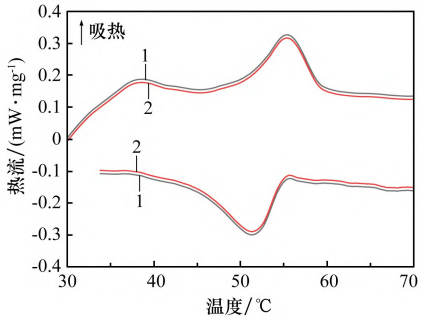
图 4 高炉渣基低温相变复合材料热循环前、后的质量损失

Fig. 4 Mass loss of low temperature composite phase change materials based on blast furnace slag before and after thermal cycling

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

复合材料质量损失的主要原因是氧化石墨烯/石蜡复合相变材料的渗出及称重过程中高炉渣基低温相变复合材料的质量损失。

高炉渣基低温相变复合材料热循环前、后的 DSC 曲线图如图 5 所示。由图 5 可知：高炉渣基低温相变复合材料热循环前、后的 DSC 曲线的形状极其相似；经过 50 次热循环后，制备的高炉渣基低温相变复合材料的熔融和凝固温度分别为 50.01 ℃和 54.78 ℃，潜热分别为 109.67 J/g 和 107.78 J/g。高炉渣基低温相变复合材料的相变焓约为热循环前的 98.28%，这表明即使经过多次热循环，所制备的高炉渣基低温相变复合材料仍能保持良好的储热性能。



1—循环前；2—循环后。

图 5　高炉渣基低温相变复合材料热循环前、后的 DSC 曲线

Fig. 5　DSC curve of low temperature composite phase change materials based on blast furnace slag before and after thermal cycling

3　结　论

（1）采用 TG-DSC 检测手段，石蜡的熔融和冷冻温度分别为 51.14、55.32 ℃，熔化潜热和冻结潜热分别为 194.42、131.30 J/g，氧化石墨烯/石蜡复合相变材料中氧化石墨烯质量分数为 4% 时，熔融和凝固温度分别为 51.18、54.79 ℃，熔化潜热和凝固潜热分别为 237.26、166.35 J/g。

（2）利用正交试验制备高炉渣基低温相变复合材料，结果表明：复合相变材料在改性高炉渣中质量分数对高炉渣基低温相变复合材料的热性能影响最大，改性高炉渣种类影响次之，氧化石墨烯在复合相变材料中质量分数影响最小。

（3）对高炉渣基低温相变复合材料所用材料进行 Hot Disk 检测，结果表明：高炉渣的导热系数为 0.41 W/(m·K)，酸性、碱性改性高炉渣的导热系数分别降低到 0.21、0.22 W/(m·K)，制备的高炉渣基低温相变复合材料导热系数为 0.59 W/(m·K)。

（4）通过对高炉渣基低温相变复合材料 TG-DSC 检测，结果表明：高炉渣基低温相变复合材料的相变焓约为热循环前的 98.82%，其最终失重率稳定在 2.04%。

（5）由于所得高炉渣基低温相变复合材料的相变温度大于 50 ℃，可满足于工业余热回收以及低温储热领域应用。

参考文献：

[1] 张立生，李慧，张汉鑫，等. 高炉渣的综合利用及展望[J]. 热加工工艺，2018，47(19)：20－24.
ZHANG Lisheng，LI Hui，ZHANG Hanxin，et al. Comprehensive utilization of blast furnace slag and prospects[J]. Hot Working Technology，2018，47(19)：20－24.

[2] 鹿娟捷. 提升冶金渣综合利用水平，促进跨行业协同减碳[N]. 中国企业报，2022－03－08(004).
LU Juanjie. Enhance the comprehensive utilization of metallurgical slag and promote cross-industry synergistic carbon reduction[N]. China Enterprise News，2022－03－08(004).

[3] 李艳茹，刘万山，李金莲，等. 鞍钢烧结使用高结晶水、高铝铁矿的实验室研究[J]. 烧结球团，2009，34(5)：5－9.
LI Yanru，LIU Wanshan，LI Jinlian，et al. Laboratory study on the use of high crystalline water and high alumina iron ore for sintering in Anshan Steel[J]. Sintering and Pelletizing，2009，34(5)：5－9.

[4] 吕晓芳. 高炉渣处理、回收利用技术的现状与进展[J]. 南方金属，2010(3)：14－18.
LÜ Xiaofang. Status and progress of blast furnace slag treatment and recycling technology[J]. Southern Metals，2010(3)：14－18.

[5] 钱强. 转炉钢渣烧结杯调渣改性试验研究[J]. 烧结球团，2019，44(4)：67－69；78.
QIAN Qiang. Experimental study on slag modification of converter steel slag sintering cup[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(4)：67－69；78.

[6] 舒钊，钟珂，肖鑫，等. 多孔纳米基复合相变材料在建筑节能中的应用进展[J]. 化工进展，2021，40(S2)：265－278.
SHU Zhao，ZHONG Ke，XIAO Xin，et al. Progress in the

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

application of porous nano-based composite phase change materials in building energy efficiency[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2021,40(S2):265 - 278.

[7] 马超,万保清,吴渝,等. 相变材料在建筑领域中的应用[J]. 中国建材科技,2020,29(6):27 - 30.
MA Chao,WAN Baoqing,WU Yu,et al. Application of phase change materials in the construction field[J]. China Building Materials Science & Technology,2020,29(6):27 - 30.

[8] 张建武,朱建平,宋纤纤,等. 相变储能材料在建筑领域的应用[J]. 化工新型材料,2013,41(10):153 - 155.
ZHANG Jianwu,ZHU Jianping,SONG Xianxian,et al. Application of phase change energy storage materials in construction [J]. New Chemical Materials,2013,41(10):153 - 155.

[9] 石姗姗,钱钊,姜涛,等. 高分子相变材料的导热改性研究综述[J]. 塑料工业,2022,50(2):1 - 5.
SHI Shanshan,QIAN Zhao,JIANG Tao,et al. Review on thermal conductivity modification of polymer phase change materials[J]. China Plastics Industry,2022,50(2):1 - 5.

[10] 胡定华,许肖永,林肯,等. 石蜡/膨胀石墨/石墨片复合相变材料导热性能研究[J]. 工程热物理学报,2021,42(9):2414 - 2418.
HU Dinghua,XU Xiaoyong,LIN Ken,et al. Study on thermal conductivity of paraffin/expanded graphite/graphite sheet composite phase change materials [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2021,42(9):2414 - 2418.

[11] 吴学红,王强伟,王凯,等. 纳米粒子强化有机复合相变材料的热物性及其应用研究进展[J]. 化工新型材料,2021,49(4):40 - 45.
WU Xuehong,WANG Qiangwei,WANG Kai,et al. Research progress on thermophysical properties and application of nano particle reinforced organic composite phase change materials [J]. New Chemical Materials,2021,49(4):40 - 45.

[12] 郭美茹,周文,周天,等. 石墨烯/石蜡复合材料的热物理性能研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(6):1200 - 1205.
GUO Meiru,ZHOU Wen,ZHOU Tian,et al. Study on thermophysical properties of graphene/paraffin composites[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2014,35(6):1200 - 1205.

[13] 张运华,刘芷怡,唐蓓莉,等. 高石蜡掺量相变水泥基复合材料的性能[J]. 复合材料学报,2018,35(4):980 - 988.
ZHANG Yunhua,LIU Zhiyi,TANG Beili,et al. Properties of phase change cement-based composites with high paraffin content[J]. ActaMateriaeCompositaeSinica,2018,35(4):980 - 988.

[14] ZHANG Y,LIU J,SU Z,et al. Preparation of low-temperature composite phase change materials (C-PCMs) from modified blast furnace slag(MBFS)[J]. Construction and Building Materials,2020,238(30):117717.

(上接第75页)

[25] 王晓哲,张建良,刘征建,等. 低硅含镁球团矿还原行为研究[J]. 烧结球团,2018,43(1):44 - 49.
WANG Xiaozhe,ZHANG Jianliang,LIU Zhengjian,et al. Study on reduction behavior of low silicon magnesium pellet [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(1):44 - 49.

[26] 陈书文,田晨,李杰. 高炉瓦斯灰锌铁分离及其动力学研究[J]. 烧结球团,2017,42(5):39 - 43.
CHEN Shuwen,TIANChen,LI Jie. Study on the separation experiments and kinetics of zinc and iron in blast furnace gas ash [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(5):39 - 43.

[27] 华一新. 冶金过程动力学导论[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
HUA Yixin. Introduction to dynamics of metallurgical processes[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2004.

[28] 郭兴忠,张丙怀,阳海彬. 含碳氧化锌球团还原的动力学[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2002,25(5):86 - 88.
GUO Xingzhong,ZHANG Binghuai,YANG Haibin. A kinetic of the reduction of ZnO pellets containing graphite[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition),2002,25(5):86 - 88.

[29] WANG D,ZHU D,PAN J,et al. An investigation into the alkali metals removal from Zn-bearing dust pellets in direct reduction[J]. JOM,2022,74(2):634 - 643.

[30] 杨兆祥,段振瀛. 含氟高炉型炉渣中碱金属还原动力学的研究[J]. 钢铁,1981(9):18 - 25.
YANG Zhaoxiang,DUAN Zhenying. Study on Kinetics of alkali metal reduction in blast furnace slag containing fluorine[J]. Iron & Steel,1981(9):18 - 25.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net