

基于相变控温性能的改性钢渣基相变微粉 制备方案的响应面法优化

张 浩^{1,3}, 龙红明^{1,2}, 杨 刚⁴

(1. 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243032; 2. 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室(安徽工业大学), 马鞍山 243002;
3. 安徽工业大学建筑工程学院, 马鞍山 243032; 4. 中冶宝钢技术服务有限公司, 上海 200941)

摘 要: 以改性钢渣微粉为壁材, 石蜡为芯材制备改性钢渣基相变微粉。利用响应面法研究磷酸用量、石蜡用量以及真空度对改性钢渣基相变微粉的相变控温性能影响得出预测模型, 对改性钢渣基相变微粉制备方案进行优化, 并且运用差示扫描量热法(DSC)、X射线衍射(XRD)、比表面积(BET)、扫描电镜(SEM)和激光粒度仪(LPSA)对最佳条件下的改性钢渣基相变微粉进行表征。结果表明, 石蜡用量与真空度对改性钢渣基相变微粉的相变控温性能影响显著。改性钢渣基相变微粉的优化方案: 磷酸用量为7.2%、石蜡用量为40.6%以及真空度为-0.08 MPa。磷酸可去除钢渣微粉中f-CaO, 增加改性钢渣微粉的孔体积, 提高对石蜡的有效包裹。

关键词: 改性钢渣; 响应面法; 温度裂缝; 优化; 石蜡; 相变控温性能

中图分类号: TU528

文献标识码: A

0 引 言

混凝土温度裂缝是因混凝土结构内部温度场温差形成温度应力所导致的^[1,2], 即水泥水化放出大量的热量, 因热量聚集导致产生内外温差, 温度应力不断增大, 最后出现温度裂缝。造成结构裂缝的原因是复杂的、综合性的, 是缓慢累积的过程。目前大型混凝土建筑物与构筑物不同程度地存在温度裂缝, 需耗费大量的人力与物力进行维修^[3]。因此如何减少大体积混凝土温度裂缝的产生^[4,5], 已成为建筑材料领域亟待解决的问题和研究热点。

相变储能材料可在等温或近似等温情况下, 利用材料相态变化的储能-放能, 与周围介质或环境进行热量交换, 起到热能储存和温度调控作用^[6]。所以相变储能材料可作为解决大体积混凝土温度裂缝的一种方法, 从而降低混凝土的裂缝程度, 提高建筑构件的力学性能与热工性能。由于无机相变储能材料具有腐蚀性, 在相变过程中存在过冷和相分离。有机相变储能材料热导率较低, 相变过程中

的传热性能差^[7-9], 极大地限制了相变储能材料在建筑材料领域的应用。

利用具有一定孔结构的钢渣与相变储能材料进行复合, 制备有机/无机相变储能复合材料^[10,11], 不仅可提高相变储能材料的传热性, 而且能增强与建筑材料的相容性。本研究以改性钢渣微粉为壁材, 石蜡为芯材制备改性钢渣基相变微粉, 同时基于响应面法和数值模拟方法研究磷酸用量、石蜡用量以及真空度3个因素对改性钢渣基相变微粉的相变控温性能影响, 总结各因素对改性钢渣基相变微粉的相变控温性能影响趋势和显著性, 并且获得关于上述3个因素的二次多项式预测模型。从而实现磷酸用量、石蜡用量以及真空度对改性钢渣基相变微粉的相变控温性能影响由定性分析向定量分析转变, 并且获得优化改性钢渣基相变微粉的制备方案。不仅可拓展钢渣的应用范围, 实现环境减负、企业增效; 而且可解决混凝土温度裂缝问题, 提高建筑构件的力学性能与热工性能; 还能为相变材料在建筑外墙应用, 改善室内热环境, 提供一定的理论基础。

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2017M612051); 国家自然科学基金(51674002); 钢铁冶金新技术国家重点实验室(北京科技大学)资助项目(KF16-04); 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室(安徽工业大学)资助项目(KF17-08)

通信作者: 龙红明(1979—), 男, 博士、教授, 主要从事冶金固废资源利用方面的研究。yafllm@126.com

1 实验方法

1.1 实验原材料

转炉滚筒渣,粒径为 0~3 mm;石蜡,相变温度为 54~58 ℃,相变焓为 225 J/g;磷酸(H_3PO_4),无水乙醇($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$),实验用水均为去离子水。

1.2 主要仪器

DZ-2BC II 型真空恒温干燥箱、AUW120D 型精密电子天平(精度为 0.00001 g)、ZDR-22 型温度记录仪、Autosorb-1 型比表面积及孔径测定仪、D/Max/200 PC 型 X-射线衍射仪、TA2910 型差示扫描量热仪、Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪、JSM-6510LV 型扫描电子显微镜。

1.3 试验步骤

转炉滚筒渣经过球磨机研磨,得到细度约为 45 μm 钢渣微粉,与磷酸按一定质量比混合,利用恒温磁力搅拌器在中速、40 ℃水浴条件下搅拌 12 h 后获得改性钢渣微粉。将石蜡与改性钢渣微粉按一定质量比混合,利用恒温磁力搅拌器在中速、80 ℃水浴条件下搅拌 12 h 后获得石蜡与改性钢渣微粉的混合物。再将上述混合物放入 80 ℃和一定真空度的真空干燥箱,经 24 h 后无水乙醇洗涤多次,获得改性钢渣基相变微粉。

1.4 表征

采用美国 TA 仪器公司 TA2910 型差示扫描量热仪对改性钢渣基相变微粉的相变温度和相变焓进行测试,工作参数:温度范围为-10.0~725.0 ℃,量热精度为 ± 0.05 ℃,升降温速率为 5.0 ℃/min,气氛为 N_2 ,进气速率为 50.0 mL/min。

采用日本理学公司 D/Max/200 PC 型 X-射线衍射仪对改性钢渣基相变微粉的矿物组成进行测试,工作参数:辐射源为 $\text{Cu/K}\alpha$ 靶,衍射角 2θ 的扫描范围为 5.00°~75.00°,波长为 0.1504 nm,测试温度为 23.0 ℃,管电压为 40.0 kV,管电流为 100 mA,衍射角 2θ 的扫描速率为 4.0(°)/min。

采用美国康塔仪器有限公司 Autosorb-1 型比表面积及孔径测定仪对改性钢渣基相变微粉的孔结构进行测试,工作参数:测量范围为孔隙度为 3.5~5000.0 A,比表面积 >0.0005 m^2/g ,极限高真空为 10^{-10} mmHg,分辨率为 2.5×10^{-7} mmHg。

采用日本电子株式会社 JSM-6510LV 型扫描电子显微镜对改性钢渣基相变微粉的微观形貌进行测试,工作参数:工作电压为 0.0~25.0 kV,束斑为 1.5~3.5 mm,最大放大倍数为 100000 倍,真空度 $(8.0 \sim 1.0) \times 10^{-5}$ Torr,观察距离为 10.0~10.5 mm。

采用英国马尔文仪器有限公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪对改性钢渣基相变微粉的粒度分布进行测试,工作参数:测试范围为 0.02~2000.00 μm ,扫描速度为 1000 times/s,标准操作规程(SOP)。

1.5 数据处理方法

响应面法(response surface methodology, RSM)是综合实验设计和数学建模^[12~14]。本工作选取完全二次回归模型,以磷酸用量 A (%,质量分数)、石蜡用量 B (%,质量分数)以及真空度 C (MPa)为影响因素,以改性钢渣基相变微粉的相变控温性能作为目标函数 Y ,即响应值,表 1 给出 3 个影响因素的水平值。采用三因素三水平的 Box-Behnken 方法^[15]对改性钢渣基相变微粉制备方案进行设计。

表 1 因素及水平

Table 1 Factors and levels

| 因素 | 符号 | 水平 | | |
|-----------|-----|-------|-------|-------|
| | | 低 | 中 | 高 |
| 磷酸用量/%,wt | A | 3 | 6 | 9 |
| 石蜡用量/%,wt | B | 15 | 30 | 45 |
| 真空度/MPa | C | -0.03 | -0.06 | -0.09 |

2 结果与讨论

2.1 模型的方差分析

表 2 给出 15 种改性钢渣基相变微粉的相变温度与相变控温性能 Y ,其中相变温度为 52.6~54.8 ℃,说明 15 种改性钢渣基相变微粉的相变温度稳定。表 3 为二次模型的方差分析,表 4 为 Y 的估计回归系数。由表 3 可看出响应面实验设计结果与二次模型吻合良好,校正决定系数 $R^2_{\text{Adj}}=0.9953$,表明改性钢渣基相变微粉的相变控温性能的二次模型的回归效果很好。由表 4 可看出常数项、 B 、 C 、 B^2 、 BC 这 5 项的 P 值均小于 0.05,说明石蜡用量与真空度对改性钢渣基相变微粉的相变控温性能影响显著。

表 2 响应面实验设计及结果

Table 2 Design and results of response surface experiments

| 序号 | A/ % | B/ % | C/ MPa | 相变 温度/℃ | 相变控温 性能 Y/J·g ⁻¹ | 序号 | A/ % | B/ % | C/ MPa | 相变 温度/℃ | 相变控温 性能 Y/J·g ⁻¹ |
|----|---------|---------|-----------|------------|--------------------------------|----|---------|---------|-----------|------------|--------------------------------|
| 1 | 3 | 15 | -0.03 | 54.2 | 24.95 | 9 | 6 | 15 | -0.09 | 53.5 | 35.57 |
| 2 | 9 | 15 | -0.03 | 53.7 | 23.94 | 10 | 6 | 45 | -0.09 | 54.4 | 37.64 |
| 3 | 3 | 45 | -0.03 | 53.5 | 38.22 | 11 | 6 | 15 | -0.06 | 52.6 | 30.22 |
| 4 | 9 | 45 | -0.03 | 54.5 | 37.19 | 12 | 6 | 45 | -0.06 | 54.2 | 39.67 |
| 5 | 3 | 30 | -0.09 | 53.2 | 45.07 | 13 | 6 | 30 | -0.03 | 52.8 | 39.26 |
| 6 | 9 | 30 | -0.09 | 53.0 | 44.24 | 14 | 6 | 30 | -0.03 | 54.8 | 39.26 |
| 7 | 3 | 30 | -0.06 | 52.9 | 39.53 | 15 | 6 | 30 | -0.03 | 53.3 | 39.26 |
| 8 | 6 | 30 | -0.06 | 54.3 | 40.25 | — | — | — | — | — | — |

表 3 二次模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance for the quadratic model

| 源 | 自由度 <i>df</i> | 连续离均 差平方和 Seq SS | 调整离均差 平方和 Adj SS | 调整均方差 Adj MS | 检验统 计量 <i>F</i> | 显著 性值 <i>P</i> |
|--------------------------|--|---|---------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| 回归 | 9 | 4014.45 | 4014.45 | 446.05 | 317.66 | 0.000 |
| 线性 | 3 | 3975.66 | 3975.66 | 1325.22 | 943.82 | 0.001 |
| 平方 | 3 | 15.02 | 15.02 | 5.01 | 3.57 | 0.121 |
| 相互 | 3 | 23.77 | 23.77 | 7.92 | 5.64 | 0.066 |
| 残差 | 5 | 6.85 | 6.85 | 1.37 | — | — |
| 合计 | 14 | 4021.3 | — | — | — | — |
| 方差 <i>S</i> = 1.26105 | 回归系数 <i>R</i> ² = 0.9946 | 校正决定系数 <i>R</i> _{Adj} ² = <i>R</i> _{Adj} ² =0.9953 | — | — | — | — |

表 4 *Y* 的估计回归系数

Table 4 Estimated regression coefficients for *Y*

| 项 | 系数 | 标准错误 | 检验值 <i>T</i> | 显著性值 <i>P</i> | 项 | 系数 | 标准错误 | 检验值 <i>T</i> | 显著性值 <i>P</i> |
|-----------------------|---------|--------|--------------|---------------|-----------------------|---------|--------|--------------|---------------|
| 常数 | 42.3405 | 0.8232 | 61.8887 | 0.000 | <i>B</i> ² | 0.2596 | 0.7839 | 0.4210 | 0.024 |
| <i>A</i> | 0.7565 | 0.5026 | 1.8053 | 0.111 | <i>C</i> ² | -0.1521 | 0.7839 | -0.2462 | 0.736 |
| <i>B</i> | -2.7676 | 0.5026 | -6.6065 | 0.003 | <i>AB</i> | -1.0502 | 0.5952 | -1.7726 | 0.168 |
| <i>C</i> | 1.8072 | 0.5026 | 4.3137 | 0.000 | <i>AC</i> | 0.1487 | 0.5952 | 0.2509 | 0.827 |
| <i>A</i> ² | -0.1897 | 0.7839 | -0.3074 | 0.968 | <i>BC</i> | -1.9906 | 0.5952 | 3.3594 | 0.006 |

从表 4 可看出,以非编码形式表示的响应值各项回归系数,可得到改性钢渣基相变微粉的相变控温性能作为目标函数 *Y*,即响应值的二次多项回归方程为:

$$Y=42.3405+0.7565A+(-2.7676B)+1.8072C+(-0.1897A^2)+0.2596B^2+(-0.1521C^2)+(-1.0502AB)+0.1487AC+(-1.9906BC)$$

2.2 优化结果

利用响应优化器对响应变量进行优化的结果,

当磷酸用量 *A* 为 7.2%、石蜡用量 *B* 为 40.6%以及真空度 *C* 为 -0.08 MPa 时制备的改性钢渣基相变微粉相变控温性能响应值 *Y* 的合意为 1.0000,表明此制备方案相变控温性能的期望较高。

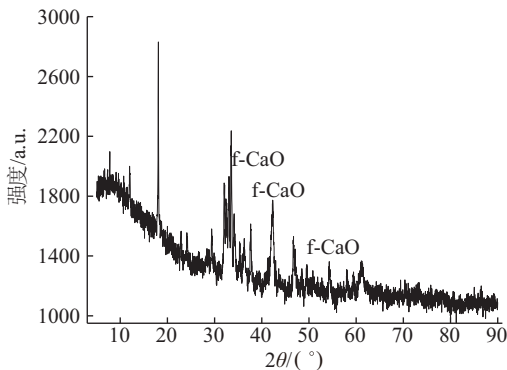
根据改性钢渣基相变微粉的优化方案:磷酸用量为 7.2%、石蜡用量为 40.6%以及真空度为 -0.08 MPa。同时依据 2.3.1 节制备优化方案的改性钢渣基相变微粉,依据 2.3.2 节对优化方案的改性钢渣基相变微粉进行相变控温性能测试,获得

优化方案的改性钢渣基相变微粉,其相变温度 54.4 ℃和相变焓 50.32 J/g。与二次多项回归方程计算结果 52.74 J/g 相比,误差仅为-4.589%,说明完全二次模型的选择是正确的,Y 的二次多项回归方程可用于预测改性钢渣基相变微粉的相变控温性能。

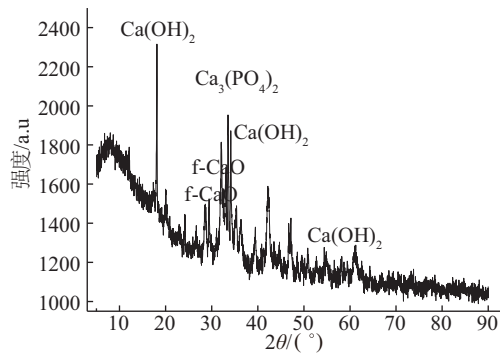
2.3 改性钢渣基相变微粉机理分析

2.3.1 晶型结构分析

从图 1 可看出钢渣微粉中 f-CaO 的特征峰明显,说明钢渣微粉中 f-CaO 含量较高。改性钢渣微粉中 f-CaO 的特征峰强度明显下降,出现 Ca(OH)₂ 的特征峰,说明适量的磷酸可去除钢渣微粉中 f-CaO,增加改性钢渣微粉的孔体积。



a. 钢渣微粉的XRD图



b. 改性钢渣微粉的XRD图

图1 钢渣微粉和改性钢渣微粉的XRD图
Fig. 1 XRD patterns of steel slag powder and modified steel slag powder

2.3.2 孔结构分析

从表 5 可看出对比于钢渣微粉,改性钢渣微粉的比表面积与孔径大幅增加,进一步说明磷酸可去除钢渣微粉孔结构中的杂质,增加改性钢渣微粉孔容积,证实图 1 的测试结果。

表5 钢渣微粉与改性钢渣微粉的孔结构

| 试样 | 孔结构 | | |
|--------|--------------------------------------|------------------------|-------|
| | 比表面积/m ² ·g ⁻¹ | 孔体积/mL·g ⁻¹ | 孔径/nm |
| 钢渣微粉 | 5.01 | 0.026 | 23.23 |
| 改性钢渣微粉 | 16.83 | 0.094 | 26.56 |

2.3.3 微观形貌分析

从图 2 可看出改性钢渣基相变微粉的分散性较好,无大范围的团聚,这是因为改性钢渣微粉中孔结构对石蜡的有效包裹,避免石蜡在改性钢渣微粉表面附着。

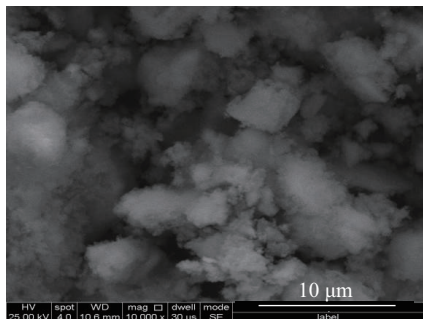


图2 改性钢渣基相变微粉的SEM图

Fig. 2 SEM patterns of modified steel slag-based phase change powder

2.3.4 粒度分布分析

从图 3 可看出,改性钢渣基相变微粉粒径分布均匀,其 d_{10} 为 19.38 μm、 d_{50} 为 37.35 μm、 d_{90} 为 63.67 μm,基本与钢渣微粉粒径一致,进一步说明改性钢渣微粉较好地包裹石蜡,证实了图 2 结果。

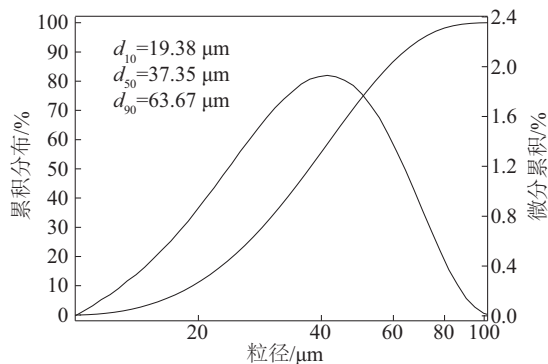


图3 改性钢渣基相变微粉的LPSA图

Fig. 3 LPSA patterns of modified steel slag-based phase change powder

3 结 论

以改性钢渣微粉为壁材,石蜡为芯材制备改性钢渣基相变微粉,同时基于响应面法和数值模拟方法研究磷酸用量、石蜡用量以及真空度 3 个因素对改性钢渣基相变微粉的相变控温性能影响,可得出以下结论:

1) 石蜡用量与真空度对改性钢渣基相变微粉的相变控温性能影响显著。同时获得响应值的二次多项回归方程为:

$$Y = 42.3405 + 0.7565A + (-2.7676B) + 1.8072C + (-0.1897A^2) + 0.2596B^2 + (-0.1521C^2) + (-1.0502AB) + 0.1487AC + (-1.9906BC) \quad (1)$$

2) 改性钢渣基相变微粉的优化方案:磷酸用量为 7.2%、石蜡用量为 40.6% 以及真空度为 -0.08 MPa 。优化方案的改性钢渣基相变微粉,其相变温度 $54.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和相变焓 50.32 J/g 。与二次多项回归方程计算结果 52.74 J/g 相比,误差仅为 -4.589% 。

3) 磷酸可去除钢渣微粉中 f-CaO, 增加改性钢渣微粉的孔体积, 提高对石蜡的有效包裹, 从而避免石蜡在改性钢渣微粉表面的附着。

[参考文献]

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土的温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 54—61.
- [1] Zhu Bofang. Temperature stress and temperature control in mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999: 54—61.
- [2] 姚 武, 钟文慧. 混凝土损伤自愈的机理[J]. 材料研究学报, 2006, 20(1): 24—28.
- [2] Yao Wu, Zhong Wenhui. Mechanism for self-healing of concrete damage[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2006, 20(1): 24—28.
- [3] 陈 辉, 韩芳垣. 大体积混凝土温度裂缝的成因分析及控制措施[J]. 混凝土, 2006, (2): 27—29.
- [3] Chen Hui, Han Fangyuan. Analysis of temperature crack in mass concrete and control ling method[J]. Concrete, 2006, (2): 27—29.
- [4] 杨秋玲, 马可栓. 大体积混凝土水化热温度场三维有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(2): 261—263
- [4] Yang Qiuling, Ma Keshuan, Analysis of massive concrete 3-dimensional finite element hydrated heat temperature field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(2): 261—263.
- [5] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2): 318—345.
- [6] Borreguero A M, Carmona M, Sanchez M L, et al. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(10): 1164—1169.
- [7] He Fang, Wang Xiaodong, Wu Dezhen. New approach for sol-gel synthesis of microencapsulated n-octadecane phase change material with silica wall using sodium silicate precursor[J]. Energy, 2014, 67: 223—233.
- [8] Lee See-Hoon, Yoon Sang-Jun, Kim Young-Gu, et al. The utilization of micro-encapsulated phase change material wallboards for energy saving[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, 28 (11) : 2206—2210.
- [9] 孟 多, 王立久. 脂肪酸/无机纳米颗粒基定形相变材料的制备与热性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 91—96.
- [9] Meng Duo, Wang Lijiu. Preparation and thermal properties of fatty acid/inorganic nano- particle form-stable phase change material[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 91—96.
- [10] 尚建丽, 李乔明, 王争军. 微胶囊相变储能石膏基建筑材料制备及性能研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33 (12): 2140—2144.
- [10] Shang Jianli, Li Qiaoming, Wang Zhengjun. Preparation and thermal performance tests of microencapsulated gypsum-based phase change building material[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33 (12): 2140—2144.
- [11] 尚建丽, 张 浩, 熊 磊, 等. 基于均匀设计优化制备癸酸-棕榈酸/SiO₂ 复合相变材料[J]. 材料工程, 2015, 43(9): 94—102.
- [11] Shang Jianli, Zhang Hao, Xiong Lei, et al. Optimized preparation of decanoic- palmitic acid/SiO₂ composite phase change materials based on uniform design[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(9): 94—102.
- [12] 张 浩, 黄新杰, 宗志芳, 等. 基于吸附性能的生物质基多孔活性炭制备方案的响应面法优化[J]. 材料

- 工程, 2017, 45(6): 67—72.
- [12] Zhang Hao, Huang Xinjie, Zong Zhifang, et al. Optimization of preparation program for biomass based porous active carbon by response surface methodology based on adsorptive property[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(6): 67—72.
- [13] 王 岩, 隋思涟. 试验设计与MATLAB数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 145—149.
- [13] Wang Yan, Sui Silian. Test design and MATLAB data analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 145—149.
- [14] 张 浩. 基于光催化性能的Cu-Ce/TiO₂湿性能[J]. 材料工程, 2018, 46(1): 114—118.
- [14] Zhang Hao. Cu-Ce/TiO₂ moisture performance based on photocatalytic performance[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(1): 114—118.
- [15] 张 浩. 基于RBF网络优化制备均匀粒度分布的微米级SiO₂基相变调湿复合材料[J]. 材料工程, 2017, 45(8): 24—29.
- [15] Zhang Hao. Optimizing preparation of micron SiO₂-based phase change and humidity controlling composites with uniform particle size distribution based on RBF neural network[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(8): 24—29.

OPTIMIZATION OF PREPARATION PROGRAM FOR MODIFIED STEEL SLAG-BASED PHASE CHANGE AGGREGATE BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY BASED ON PERFORMANCE OF PHASE CHANGE TEMPERATURE CONTROL

Zhang Hao^{1,3}, Long Hongming^{1,2}, Yang Gang⁴

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China; 2. Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling (Anhui University of Technology), Ministry of Education, Ma'anshan 243002, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

4. MCC Baosteel Technology Services Co., Ltd., Shanghai 200941, China)

Abstract: Modified steel slag-based phase change aggregate with modified steel slag shell and paraffin core were synthesized. The effect of phosphate amount, paraffin amount and vacuum on phase change temperature control performance of modified steel slag-based phase change aggregate were studied by response surface method, the quadratic polynomial prediction model on the three factors was also developed, the preparation program for modified steel slag-based phase change aggregate was optimized. DSC, XRD, BET, SEM and LPSA were applied to gaining the optimal modified steel slag-based phase change aggregate. The results show that paraffin amount and vacuum have effect on phase change temperature control performance of modified steel slag-based phase change aggregate. Optimization program of modified steel slag-based phase change aggregate: phosphate amount is 7.2%, paraffin amount is 40.6% and vacuum is 0.08 MPa. Phosphoric acid can remove f-CaO in steel slag, increase pore volume of modified steel slag, and improve the effective package of paraffin.

Keywords: modified steel slag; response surface method; temperature crack; optimization; paraffin; phase change temperature control performance