高炉熔渣气淬粒化过程的仿真模拟及粒化效果优化

周 君[1,2]，李国涛[3]，刘 超[1]，康 月[1]，孙瑞靖[1]，邢宏伟[1]
（1. 华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063009；2. 曹妃甸职业技术学院，河北 唐山 063009；
3. 河钢集团有限公司，河北 石家庄 050023）

摘要：采用气淬法粒化高炉熔渣能够有效回收利用熔渣内高温余热，同时避免高炉熔渣堆积对环境造成的破坏，实现高炉熔渣的高值资源化利用。气淬喷嘴的高度是渣珠冷却凝固过程中的关键控制参数，直接影响粒化后的渣珠品质。为此，本文通过对熔渣气淬粒化过程进行模拟仿真，构建粒化模型并解析熔渣的破碎粒化机理，通过仿真模型计算渣珠的落地时间，进而确定优化喷嘴高度，获取高炉熔渣最优的粒化效果。结果表明：高炉熔渣在破碎过程中存在“熔渣—液膜—液丝—液滴—渣珠”5 种形态变化，熔渣的冷却凝固过程从迎风面开始，依次为上下两侧和背风面；当气体初速度为 420 m/s、气淬喷孔的直径为 0.051 m、高炉渣处理量为 60 t/h、高炉渣与气淬风相遇点高度为 0.2 m 时，渣珠的飞行速度可达 9～12 m/s；在保证渣珠落地后凝固不黏连的前提下，喷嘴高度的设定范围为 2.2～4.5 m。在适宜的喷嘴高度下，高炉熔渣喷吹粒化主要形成渣珠和未粒化完全的纤维。渣珠的粒度分布主要呈正态分布，且分布较均匀，粒度主要集中在 1～2.5 mm。成珠率随喷嘴高度的增加基本呈现逐渐增加的趋势，超过 4 m 后，增加趋势变缓。本文研究结论可为干式气淬粒化高炉熔渣的工业化应用提供数据支撑。

关键词：高炉熔渣；气淬法；粒化效果；冷却凝固过程；仿真模拟
中图分类号：TF524；X757；TP391.9 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0132－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.038

Analogue simulation of gas quenching granulation process of blast furnace slag and optimization of granulation effect

ZHOU Jun[1,2], LI Guotao[3], LIU Chao[1], KANG Yue[1], SUN Ruijing[1], XING Hongwei[1]
(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Caofeidian College of Technology, Tangshan 063009, Hebei, China;
3. HBIS Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, Hebei, China)

Abstract: The use of gas quenching to granulate blast furnace slag enables the effective recovery and reuse of the residual heat contained within the slag. At the same time, it prevents the environmental damage caused by the accumulation of blast furnace slag, thus facilitating its high-value recycling. The height of the gas quenching nozzle is a key control parameter during the cooling and solidification process of the slag beads, which directly affects the quality of the granulated slag beads. To this end, the granulation process of slag during gas quenching is simulated, a granulation model is constructed, and the mechanism of slag fragmentation is analyzed. The landing time of the slag beads is calculated by the simulation model, and then the optimal nozzle height is determined to obtain the optimal granulation effect of the blast furnace slag. The results show that there are five morphological changes of “slag-liquid film-liquid filament-droplet-slag bead” in

收稿日期：2025－04－04；**修回日期**：2025－08－18
基金项目：燕赵钢铁实验室区域创新能力提升项目(YZISL2024042)；河北省高等学校科学研究项目(CYZD202504)；华北理工大学冶金与能源学院青年教师发展基金(YJY20244283)
作者简介：周 君(1988—)，女，博士研究生，从事冶金资源综合利用和节能减排方面的研究。
通信作者：康 月(1989—)，女，讲师，从事钢铁制造流程大气污染物控制方面的研究。

the crushing process of blast furnace slag, and the cooling and solidification process of the slag starts from the windward side, followed by the upper and lower sides and the leeward side. When the initial velocity of the gas is 420 m/s, the diameter of the gas quenching injection hole is 0.051 m, the processing volume of blast furnace slag is 60 t/h, and the height of the meeting point between blast furnace slag and gas quenching wind is 0.2 m, the flight speed of the slag beads can reach 9 ~ 12 m/s. Under the premise of ensuring that the slag beads solidify and do not stick after landing, the nozzle height is set in the range of 2.2 ~ 4.5 m. At the appropriate nozzle height, the blast furnace slag blowing granulation mainly forms slag beads and ungranulated fibers. The particle size distribution of slag beads is mainly normally distributed, relatively uniform, and the particle size is mainly concentrated in 1 ~ 2.5 mm. The beading rate basically shows a gradual increase trend with the increase of nozzle height, and the increasing trend slows down after more than 4 m. The conclusions can provide data support for the industrial application of dry gas quenched granulated blast furnace slag.

Key words: blast furnace slag; gas quenching method; granulation effect; cooling solidification process; analog simulation

高炉熔渣作为钢铁冶炼过程中产生的一种大宗固体废弃物[1-2]，其产生量大、热量高，但利用附加值极低，可作为简单的水泥掺合料[3]；同时堆存放置的处理方式也给环境带来了巨大危害和污染[4-6]；高炉熔渣的出渣温度约为 1 400 ℃，堆存处置时温度仍较高，造成大量余热浪费。传统采用水淬法对高炉熔渣进行处理，处理过程耗费大量新水，余热被白白浪费，且产生 H_2S、SO_2 等气体污染环境。为避免传统高炉熔渣处理方式的劣势，干式粒化工艺应运而生[7-8]，该工艺直接利用高炉熔渣的余热将熔渣熔融破碎粒化，不会耗费新水和污染大气，粒化后所得渣珠的附加值较高。其中，喷吹动力对粒化效果起主要作用[9-11]，因此，有必要对喷嘴进行参数设计，保证最佳粒化效果。

现有研究表明，喷嘴的结构参数与操作工艺共同决定了气淬过程中气流场分布、温度场分布、粒化效果及最终渣珠形貌，国内外关于喷嘴设计及工艺参数对粒化效果的影响已有相关研究。孙瑞靖等[12]对比了不同工艺参数对高炉熔渣破碎粒化效果的影响，结果表明：增大气淬压力、选用汽水混合的九孔喷嘴以及增加喷水量均能够有效强化高炉熔渣破碎，提升成珠率。刘跃[13]研究了不同喷嘴孔型对粒化凝固及成珠率的影响，结果表明：选取 1.6 mm 的喷嘴孔型可有效减小渣粒直径，提升粒化率。WANG 等[14]研究了粒化过程中余热回收与粒化的最佳工艺参数，并提出了无量纲直径的经验公式。由此可知，喷嘴结构参数可直接影响喷吹气流的射流形态与速度梯度，进而影响熔渣所受剪切力与表面张力之间的平衡关系，控制渣滴的粒度分布与球形度，同时对熔渣的破碎波长、冷却速率及凝固行为具有显著影响。较强的喷吹动力可形成更为均匀的气流分布，增强熔渣与气流的相互作用区域，促进熔渣的精细化破碎，减少不规则颗粒的生成。适当提高喷吹压力可强化熔渣的一次破碎与二次破碎过程，缩小渣粒的粒度分布范围，但过高的喷吹动力又容易引发湍流过度、颗粒碰撞加剧及冷却不均等问题，反而降低成珠率与颗粒均匀性。

因此，开展喷嘴多参数耦合优化设计，明确喷吹动力与熔渣物性、粒化效果之间的匹配关系，是提升干式粒化工艺综合性能的关键所在，对实现高炉熔渣高效资源化利用与余热深度回收具有重要意义。本文通过对气淬粒化过程进行模拟仿真，构建粒化模型并解析高炉熔渣的破碎粒化机理；确保渣珠在落地前充分凝固，以此计算渣珠落地时间，进而确定优化喷嘴高度，获得最优的粒化效果，为干式气淬粒化高炉熔渣的工业化应用提供数据支撑。

1　熔渣粒化过程数值仿真

1.1　数学模型及基本假设

对高炉熔渣气淬粒化过程进行简化，做出如下假设：① 熔渣在计算过程中是均匀且连续的，为不可压缩流体；② 忽略熔渣在破碎过程中的换热；③ 假定熔渣和空气的物化参数为常数。

本文通过 Fluent 14 数值仿真软件，采用 VOF-DPM(流体体积 - 离散相)耦合模型、重整化群 $k-\varepsilon$(RNG $k-\varepsilon$)湍流模型和能量方程等进行模

拟计算。气淬粒化过程数值模拟采用瞬态求解方法，压力－速度耦合采用SIMPLE算法，压力离散使用PRESTO格式，界面捕捉使用Geo-Reconstruct(几何重构)格式，动量方程采用二阶迎风格式。为降低计算成本，若后续需要进行压力、温度等参数分析，直接在计算好的文件中打开能量方程。具体计算方法如下。

(1) 质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \tag{1}$$

式中：ρ为密度，kg/m^3；t为时间，s；x_i、u_i为i方向的位置(m)和速度(m/s)；S_m为连续相的质量，kg/(m^3·s)。

(2) 动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \tag{2}$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)\right] - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_1}{\partial x_1}\delta_{ij} \tag{3}$$

式中：x_j、u_j分别为j方向的位置(m)和速度(m/s)；x_1、u_1分别为1方向的位置(m)和速度(m/s)；τ_{ij}为应力张量，kg/(m·s^2)；F_i分别为i方向的外部体积力，m/s^2；δ_{ij}为Kroncker delta函数。

(3) VOF相分数方程：

$$\frac{\partial(\rho\alpha_q)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_q u_j) = 0 \tag{4}$$

式中：α_q为第q相在计算单元中的容积比率；ρ_q为第q相密度，kg/m^3。

高炉熔渣气淬粒化过程包括多种复杂的流动形式。前述RNG $k-\varepsilon$模型，其湍流动能k和湍流耗散率ε的输运方程如下。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - \rho\varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - \rho C_{2\varepsilon}\varepsilon^3 \tag{6}$$

式中：α_k为湍流动能，J/kg；μ_{eff}为考虑了涡流后的湍流黏度，Pa·s；G_k为平均速度梯度引起的动能产生相，J/(m^3·s)或kg/(m^3·s)；$C_{1\varepsilon}$和$C_{2\varepsilon}$为模型常数；k和α_ε为湍流耗散率ε的有效普朗克数，J·s。

在凝固熔化模型中，采用液相率表征体积中的液相占比，如式(7)所示。$\beta=0$为固相区，$\beta=1$为液相区，β在0与1之间为模糊区。

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ 1, & T > T_l \\ \dfrac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l \end{cases} \tag{7}$$

式中：β为液相率；T_s、T_l分别为固相、液相的温度，K。

1.2 模型构建

(1) 模型参数设定。高炉熔渣的热物性参数设置如表1所示。设置空气入口温度为298.15 K。其中，空气为第一相，熔渣为第二相。选取高炉熔渣的熔化性温度1 606 K(1 333 ℃)为其固相线温度。熔渣在低于该温度后，失去流动性，即此时熔渣均为固相。选取高炉熔渣开始熔化的温度1 723 K(1 450 ℃)为其液相线温度。该温度下熔渣的黏度很小且几乎不发生改变。低于液相线温度，熔渣存在固相或液相；高于液相线温度，熔渣均为液相。

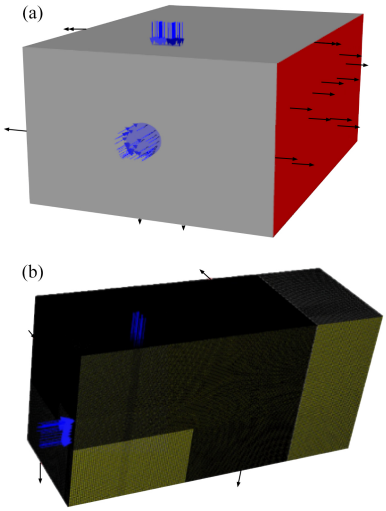
(2) 模型建立。模型计算域为200 mm×70 mm×100 mm(长、宽、高)的三维长方体，熔渣从上方5 mm×8 mm(长、宽)的矩形入口流入，气水射流从左侧直径为20 mm的圆形入口流入。为进一步提高模拟的计算效率，设定对称面，选取计算域的一半进行模拟。模型选用六面体网格进行网格划分，针对射流区域进行局部加密。模型及网格划分示意如图1所示。熔渣和气水射流入口为速度入口，两个入口所在面为边界，其他面均为压力出口，计算步长为5×10^{-6}。考虑重力影响，z方向的重力加速度为－9.8 m/s^2。空气设为基础相，熔渣设为第二相，空气的初始温度为298.15 K，熔渣的初始温度为1 823 K。

(3) 网格无关性及模型准确性验证。以气流速度为420 m/s、熔渣流速为3.7 m/s的工况进行网格无关性及模型可靠性验证。得到11.35 ms时监测点(70，40，70) mm处液膜厚度随网格数量的变化结果如图2所示。由图2可知，当网格数量大于420万个时，液膜厚度的变化趋于平缓，几乎不发生改变。考虑计算结果精确度和计算成本

表 1　高炉熔渣的热物性参数

Table 1　Thermal physical property parameters of blast furnace molten slag

初始温度/K	黏度/($kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)	密度/($kg\cdot m^{-3}$)	比热容/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	相变热量/($J\cdot kg^{-1}$)	固相线温度/K	液相线温度/K
1 823	0.7	2 750	1 200	1.7×10^5	1 606	1 723



（a）物理模型；（b）整体网格

图 1　模型及网格划分示意

Fig. 1　Schematic diagram of model and grid division

的基础上，模拟仿真选取 420 万个网格进行计算。

在上述工况条件下，通过定性分析模拟得到的分布云图及试验所拍摄的图像，如图 3 所示。由图 3 可见，熔渣在粒化过程中存在液膜、液带、液滴 3 种形态，云图呈现的粒化过程和形态基本一致，破碎过程大致相同。

通过定量分析模拟得到的粒化结果与试验收集的粒度分布结果，如表 2 所示。试验得到的渣滴的平均直径为 2.89 mm，而模拟值为 2.96 mm，相对误差为2.42%。由于数值模拟中计算环境和

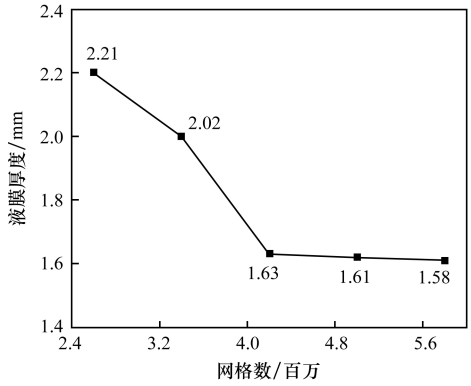


图 2　网格无关性验证结果

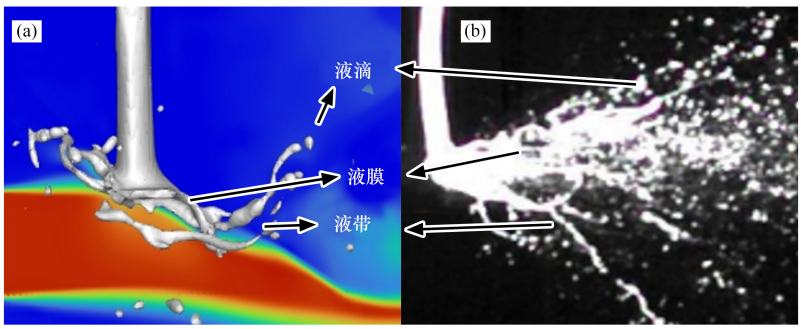
Fig. 2　Grid independence verification results

参数的设置都处于理想状态，但是试验中环境和人工条件变化都会带来误差，故相对误差低于5%属于合理情况。从定性和定量两方面进行考量，该模型具备一定的准确性。

1.3　模拟参数设定

设置气体初速度(v_{gas})为 420 m/s、气淬喷孔直径为 0.051 m、工作状态下熔渣处理量为 60 t/h、熔渣与气淬风相遇点的高度为 0.2 m，定义喷吹第一阶段冷却时间(t_1)为渣珠经过喷孔的时间，第二阶段冷却时间(t_2)为渣珠离开喷孔到落入地面时间。熔渣与气淬风相遇点的高度计算方法如下。

$$L = \frac{1}{2}gt^2 \tag{8}$$



(a)模拟云图;(b)现场试验照片

图 3　粒化模拟及现场试验粒化图

Fig. 3　Granulation simulation contour and field granulation test photo

式中：L 为熔渣与气淬风相遇点的高度，m；t 为熔渣滴落时间，s；g 为重力加速度，m/s^2。

表 2 模型准确性验证定量分析结果（质量分数）

Table 2 Quantitative analysis of model accuracy verification results %

项目	<1 mm	[1,2) mm	[2,3) mm	[3,5) mm	≥5 mm
试验值	11.2	25.1	41.2	13.3	9.2
模拟值	12.3	24.8	42.1	12.3	8.5

将相关数据带入式(8)，可求熔渣与气淬风相遇的时间为 0.202 s，熔渣离开气淬风口的时间为 0.226 s，则熔渣与气淬风的接触时间（Δt）为 0.024 s。这段时间内高炉熔渣的处理量（m_{slag}）为 60 t÷3 600 s×0.024 s=0.4 kg，则有效处理量取该值的 80%。

$$m_{gas} \cdot v_{gas} = (m_{gas} + m_{slag}) \cdot v_{slag} \tag{9}$$

$$v_{slag} = \frac{\pi \cdot \rho_{gas} \cdot v_{gas}^2 \cdot \Delta t}{\pi \cdot \rho_{gas} \cdot v_{gas} \Delta t + m_{slag}} \tag{10}$$

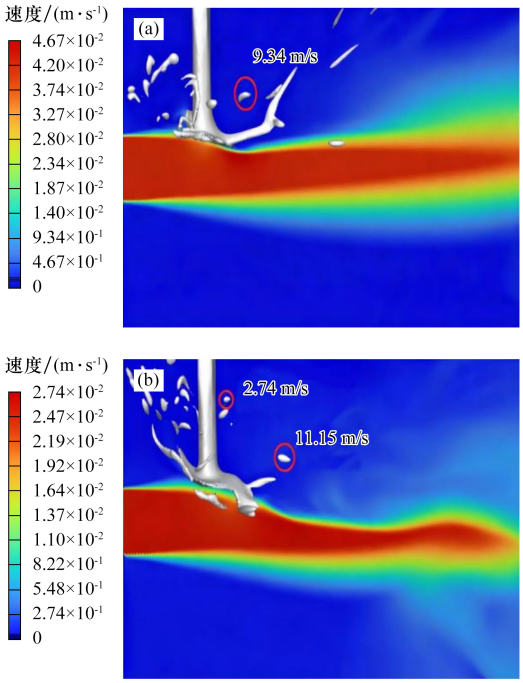
式中：m_{gas}为熔渣与气淬风接触时间内的空气质量，kg/m^3；ρ_{gas}为标况下空气的密度，取1.29 kg/m^3。

根据动量守恒方程(9)得到(10)中 v_{slag}约为 32.18 m/s。气淬粒化速度场模拟仿真的部分结果如图 4 所示。由图 4 可以发现，熔渣首先形成渣膜，之后形成液丝再断裂成渣滴离开气淬区域，之后在空气中飞行冷却。根据采集到的不同渣滴的监测结果发现，完全离开时渣滴的速度在 9～12 m/s 范围内，该范围与利用经典公式理论计算得到的差距较大。导致这种结果的原因是，理论计算未考虑熔渣冲击破碎过程中的能量损耗，其假定气淬动能完全转换为单位质量的渣滴动能，而粒化过程模拟仿真充分考虑了高炉熔渣的物性参数与破碎能量损耗。结合熔渣实际粒化试验情况，选定气淬渣粒的飞行速度为 9～12 m/s。

2 气淬喷孔高度确定

2.1 气淬高度对渣珠凝固的影响

高炉熔渣气淬粒化过程示意如图 5 所示。在熔渣从上方垂直落下进入气淬区域的过程中，设定气淬喷吹口与水平方向的夹角为 30°，以此研究适宜喷吹粒化的喷嘴高度。图 5 中，气淬渣粒的飞行速度选定为9～12 m/s，则可以得到渣粒在水



（a）渣膜形成过程；（b）渣滴冷却过程

图 4 气淬粒化速度场模拟仿真部分结果

Fig. 4 Some results of the simulation of the velocity field of air quenching granulation

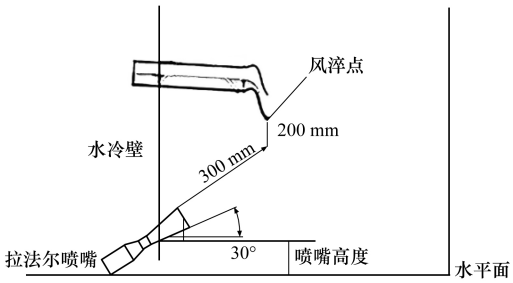


图 5 高炉熔渣气淬粒化过程示意

Fig. 5 Schematic diagram of granulation by air quenching of blast furnace molten slag

平方向的飞行速度为 7.8～10.4 m/s，在垂直方向的飞行速度为 4.5～6.0 m/s。

当喷嘴与水平方向呈一定倾斜角度时，渣流将受到斜向上的喷吹动力，熔渣气淬后渣滴主要做斜抛运动，如图 6 所示。

在理想状态下的斜抛运动中，渣滴做匀变速曲线运动，渣滴的运动形式可分解为在水平和垂直方向上的匀变速直线运动。渣滴飞行时间、垂直初速度、垂直位移的关系式如下。

$$y = v_{slag-y} t - \frac{1}{2} g t^2 \tag{11}$$

technology of desulfurization and denitrification for strand gas in TISCO[J]. China Metallurgy,2011,21(11):19 – 21;29.

[19] 李文涛,傅国志,黄婷,等. 热解炭基载锰脱硝催化剂的制备及其低温脱硝性能[J]. 化工进展,2024,43(12):7025 – 7032.
LI Wentao, FU Guozhi, HUANG Ting, et al. Preparation of pyrolytic carbon-based denitrification catalyst modified by Mn and its low-temperature denitrification performance[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2024,43(12):7025 – 7032.

[20] 李小海. Cu 掺杂磷钼杂多酸催化剂的低温 SCR 脱硝性能[J]. 化工进展,2019,38(6):2784 – 2790.
LI Xiaohai. Study on low temperature SCR denitration of Cu doped phosphomolybdate catalyst [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2019,38(6):2784 – 2790.

[21] 王涛,潘洋,王平,等. 高炉煤气的 CCPP 发电系统运行特性分析[J]. 冶金能源,2024,43(3):39 – 43.
WANG Tao, PAN Yang, WANG Ping, et al. Study on operational characteristics of CCPP with blast furnace gas [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2024, 43 (3): 39 – 43.

[22] 李继明. 马钢 2 500 m^3 高炉煤气余压发电的自动控制[J]. 自动化仪表,2009,30(5):25 – 26;30.
LI Jiming. Automatic TRT control of 2 500 m^3 blast furnace in Ma'anshan iron&steels[J]. Process Automation Instrumentation,2009,30(5):25 – 26;30.

(上接第 122 页)

ZHAO Lingbo, ZHAO Bing, GAO Peng, et al. Experiment study on synchronous iron extraction of pre-oxidation and heat-retaining reduction for a cyanide tailings[J]. Metal Mine,2022(7):170 – 174.

[13] 饶家庭. 不同粒度褐铁矿对高钛型烧结矿指标的影响[J]. 烧结球团,2011,36(5):15 – 18.
RAO Jiating. Effect of different particle size of limonite on high titanium sinter indexes[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(5):15 – 18.

[14] 袁晨光,黄自力,刘楚玉,等. 酒钢镜铁矿尾矿中铁矿物再回收试验研究[J]. 烧结球团,2023,48(1):98 – 105.
YUAN Chenguang, HUANG Zili, LIU Chuyu, et al. Experimental research on recovery of iron minerals from specularite tailings in JISCO[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(1):98 – 105.

[15] GAUTAM P K, VERMA A K, JHA M K, et al. Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018,159:460 – 474.

[16] RZEPA G, BAJDA T, GAWEŁ A, et al. Mineral transformations and textural evolution during roasting of bog iron ores[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2016,123(1):615 – 630.

[17] LIU P F, ZHU X R, HAN Y X, et al. Micropores formation and effects in the magnetization roasting of limonite ore[J]. Powder Technology,2024,448:120339.

(上接第 139 页)

[11] 段文军,吕潇峻,李朝. 高炉渣离心粒化法研究进展综述[J]. 材料与冶金学报,2020,19(2):79 – 86.
DUAN Wenjun, LÜ Xiaojun, LI Zhao. A review of research progress of centrifugal granulation of blast furnace slag[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2020,19(2):79 – 86.

[12] 孙瑞靖,康月,丁洪玲,等. 喷吹工艺参数对高炉渣粒化成珠效果的影响[J]. 钢铁,2024,59(7):159 – 168.
SUN Ruijing, KANG Yue, DING Hongling, et al. Influence of injection process parameters on granulation effect of blast furnace slag to beads[J]. Iron & Steel, 2024,59(7):159 – 168.

[13] 刘跃. 高炉熔渣粒化过程熔滴凝固特性研究[D]. 唐山:华北理工大学,2019.
LIU Yue. Study on droplet solidification characteristics of blast furnace slag granulation[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2019.

[14] WANG L L, ZHANG Y Z, KE H B, et al. Experimental investigation on granulation characteristics and waste heat recovery of molten slag in gas quenching dry granulation technique[J]. Applied Thermal Engineering,2021,184: 116295.