

单颗粒熔渣水淬过程相变特性数值模拟

李成博¹, 楼国锋^{1*}, 冯鹏博¹, 肖永力²

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘 要:为明确水淬过程中熔渣的相变机理, 优化工艺参数, 研究了熔渣水淬中的相变过程。首先, 根据熔渣触水瞬间形成的蒸汽薄膜结合流场特性, 构建了含蒸汽薄膜的熔渣模型; 随后, 以粒径 3 mm、水速 5 m/s、温度 1 300 °C 为基础工况, 分析了熔渣的温度场变化、相变进程, 以及不同位置的温度差异; 在此基础上, 分别探究了流速对熔渣换热过程的影响, 以及相同水流速度下不同粒径熔渣的传热特性, 并对 4、5 mm 熔渣冷却下的最佳流速进行了补充验证。结果表明: 流速对熔渣换热存在阈值效应, 超过 5 m/s 后影响趋于平缓; 4、5 mm 熔渣在 5 m/s 水流速度下无法满足冷却要求, 而 10 m/s 水流速度可实现冷却。最终确定最优方案, 研究为水淬熔渣工艺的参数优化提供了理论依据与数据支撑。

关键词:水淬熔渣; 相变过程; 蒸汽薄膜; 温度场; 工艺参数优化

中图分类号: TF046

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0173-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Numerical simulation on phase transformation characteristics during water quenching process of single slag particle

LI Chengbo¹, LOU Guofeng^{1*}, FENG Pengbo¹, XIAO Yongli²

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: To clarify the phase transformation mechanism of molten slag during water quenching and optimize the process parameters, this paper investigates the phase transformation process of molten slag after contact with water. First, combining the characteristics of the vapor film formed at the moment when molten slag contacts water with the flow field properties, a molten slag model containing a vapor film was established. Then, taking a particle size of 3 mm, a water velocity of 5 m/s, and an initial temperature of 1 300 °C as the basic working conditions, the changes in the temperature field, phase transformation process, and temperature differences at different positions of the molten slag were analyzed. On this basis, the effect of water velocity on the heat exchange process of molten slag was explored, as well as the heat transfer characteristics of molten slag with different particle sizes under the same water velocity. In addition, supplementary verification was conducted on the optimal water velocity for cooling molten slag with particle sizes of 4 mm and 5 mm. The results show that water velocity has a threshold effect on the heat exchange of molten slag; its influence tends to flatten out when the velocity exceeds 5 m/s. Molten slag with particle sizes of 4 mm and 5 mm cannot meet the cooling requirements at a water velocity of 5 m/s, while a water velocity of 10 m/s can achieve effective cooling. Finally, the

收稿日期: 2026-01-04; 修回日期: 2026-02-04; 接受日期: 2026-02-09

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22373805D)。

作者简介: 李成博, 2002 年出生, 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事高炉渣粒化过程研究, E-mail: 15532990935@163.com; *通信作者: 楼国锋, 1969 年出生, 男, 博士, 副教授, 主要从事高炉渣处理工艺和余热回收研究, E-mail: lgf@ustb.edu.cn。

optimal process scheme was determined. This study provides theoretical basis and data support for the parameter optimization of the molten slag water quenching process.

Key words: water-quenched molten slag; phase transformation process; vapor film; temperature field; process parameter optimization

0 引言

我国是钢铁生产和消费大国, 粗钢产量连续多年居世界第一^[1]。然而钢铁行业也是我国能源消耗的主要领域之一^[2-3]。在钢铁行业产生的固体废物中, 高炉渣占比显著, 其年产量超 2 亿 t^[4]。高炉渣是高炉炼铁的主要副产物, 主要成分为 CaO、SiO₂、MgO 和 Al₂O₃, 是极具价值的二次资源。近年来, 国内外正不断扩展高炉渣的利用领域, 如制备微晶玻璃、吸附材料等^[5-13]。在此背景下, 高炉渣处理工艺的优化成为了学界与工业界的研究热点。

高炉渣的粒化工艺主要分为湿法与干法两类, 湿法工艺利用水与熔渣的直接接触实现急冷, 所得熔渣玻璃体含量高, 利用价值显著; 干法工艺利用高速气流将熔渣击碎成小液滴提升冷却效率^[14-16]。Yosiinaga 等人^[17]在早期的研究中率先提出高炉渣的处理方法, 推动了工业固废余热回收与资源化利用的后续研究。Brämning 等人^[18]的研究为通过风口喷吹技术进一步优化造渣过程与资源化利用指明了方向。Engström 等人^[19-20]提出急冷可以抑制高炉渣的晶体生成, 提高玻璃体含量, 明确了优化工艺的思路。然而受限于高炉渣的高温特性, 传统试验方法难以获取熔渣相变过程的温度与液相分布, 随着计算流体力学(CFD)的发展, 数值仿真已成为该领域的主流研究手段。Wang 等人^[21]基于焓法构建的相变传热模型, 核心在于糊状区与物性参数对凝固区间的影响, 将微观区域与宏观凝固过程关联, 但该模型未涉及熔渣成分的影响, 存在一定的局限性。任倩倩等^[22-24]通过模拟与试验相结合的方式, 明确了熔渣成分对结晶行为的调控规律, 为后续提供了成分设计依据。Ding 等^[25]在焓-温曲线中引入晶体相含量这一参数, 使相变更贴近实际凝固过程, 为后续多场耦合奠定了基础。康月等人^[26-30]对比了有无冷核条件下的凝固行为, 揭示了内部热源对凝固速率的调控机制。冯鹏博等人^[31]的研究将熔滴飞行模型与结晶模型相结合, 实现了对气淬工艺中熔滴连续凝固过程的动态模拟, 弥补了以往研究对多过程耦合分析的缺失。上述研究集中于气淬工艺, 而赵凯等人^[32-33]针对雾化水粒化工艺的研究, 明确了该工艺下高炉渣的相变机理与传热规律, 填补了水

淬工艺相关基础研究的空白。

在现有研究中, 气淬工艺已得到广泛关注, 而关于水淬工艺的探讨, 尤其在涉及汽化薄膜影响时, 常采用简化模型进行处理。为更真实地反映水淬过程中熔渣颗粒的冷却行为, 研究针对单颗粒熔渣在水淬条件下的传热与相变过程, 开展了基于 CFD 的数值模拟研究。模拟中特别考虑了水蒸气薄膜对颗粒表面传热的实际影响, 以提升模型与实际工况的贴合度。研究通过在颗粒内部及周围布置多个监测点, 对常规工况下的温度场进行动态捕捉, 获取完整的温度分布及相变过程云图, 进而揭示水淬过程中传热机制与相变演化规律。在此基础上, 进一步探究了流速与颗粒粒径之间的耦合对凝固行为的影响, 以期高炉渣水淬工艺的优化与应用提供更为准确的理论依据。

1 模型建立

1.1 物理模型

在相变过程中, 熔渣颗粒受表面对流与辐射换热的共同作用, 会在表层形成凝固外壳^[31], 而表面应力会使熔渣颗粒维持球形形态。因此构建一个球形高炉渣颗粒的物理模型, 将熔渣颗粒置于水中, 通过模拟瞬态条件下颗粒表面汽化薄膜的厚度分布, 为后续仿真提供更贴近实际工况的几何条件。如图 1 所示, 展示了高温炉渣与水接触瞬间的水蒸气膜层的分布特征。由图 1 可见, 颗粒表面与水相界面处形成了明显的汽化膜层, 膜层厚度约为 0.04 mm。这一结果反映了高温炉渣水淬中“Leidenfrost 效应”^[34]下的界面传热特征, 即高温表面与冷流体接触时, 界面汽化形成的蒸汽膜会阻碍换热, 是水淬过程中热量传递与相变换热的关键因素。同时, 在水淬过程中, 熔渣颗粒并不会被水完全包围, 因此构建一个初步的模型用来模拟基本工况下汽膜的分布范围。如图 2 所示, 可以观察到汽膜主要分布在颗粒与水相接触的局部区域, 区域张角约为 105°, 反映了汽膜的局部分布特征。

高炉渣的凝固在实际情况下是一个非常复杂的过程, 为了更好地研究凝固过程, 需要提出以下假设: ①忽略冷却形变, 颗粒始终为球形, 在冷却初期已形成凝固层外壳。②在颗粒表面的汽化膜中填充水蒸

气,并采用温度相关的变物性参数描述物理特性。③在汽化膜区域引入汽化潜热吸热量对应的负源项,实现相变过程吸热的数值模拟,该模型的几何与介质分布特征如图3所示。④假设熔渣颗粒保持静止,与水流的相对运动速度等效为水流速度。⑤工质的热导率、比热容等为温度的函数,环境参数为定值,忽略辐射换热。

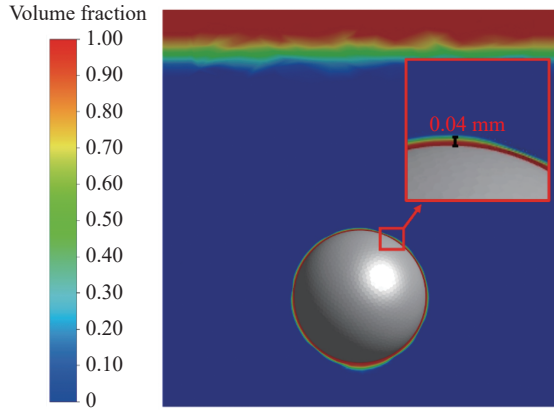


图1 1300 °C 熔渣触水瞬间蒸汽薄膜厚度

Fig. 1 Steam film thickness of 1300 °C molten slag at the moment of water contact

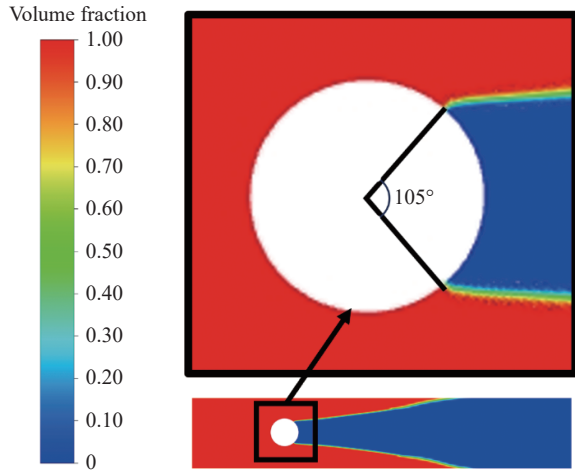


图2 水流冲击熔渣时局部流态特征

Fig. 2 Local flow pattern characteristics of water impingement on molten slag

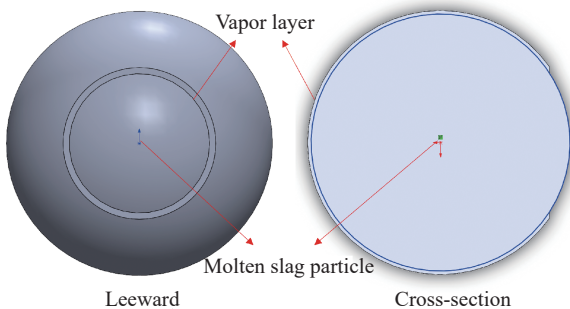


图3 含汽化层的熔渣颗粒几何模型

Fig. 3 Geometric model of molten slag particles with vaporization layer

1.2 数学模型

使用商用计算流体动力学软件 ANSYS FLUENT 进行流场数值模拟,基于 CFD 思想逻辑,在涉及流体计算时,需在以下几方面进行选择和分析:

连续性方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

动量方程如式(2)所示。

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{S}_m \quad (2)$$

能量方程如式(3)所示。

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; $\vec{u}$ 为速度矢量, m/s ; p 为静态压力, Pa ; $\vec{\tau}$ 为应力张量, Pa ; $\vec{g}$ 为重力加速度, m/s^2 ; $\vec{S}_m$ 为动量源项, N/m^3 ; H 为总焓, J/kg ; λ 为热导率, $\text{W/(m} \cdot \text{°C)}$; T 为温度, °C ; S_E 为能量方程的源项, W/m^3 。

湍流模型选择 SST $k-\omega$ (Shear Stress Transport), SST $k-\omega$ 湍流模型结合了标准 $k-\varepsilon$ 模型和标准 $k-\omega$ 模型的优势,在近壁区和远场流动都能保持较高的计算精度。

SST $k-\omega$ 湍流模型的湍动能及耗散率方程表述为式(4)(5)。

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = P_k - \beta^* \rho \omega k + \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \omega) = \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega \omega^2}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (5)$$

式中: k 为湍动能, m^2/s^2 ; ω 为比耗散率, $1/\text{s}$; $\vec{u}$ 为速度矢量, m/s ; P_k 为湍动能生成项, m^2/s^3 ; β^* 、 β 、 γ 为模型常数; μ_t 为湍流粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; σ_k 、 σ_ω 为湍流普朗特数; F_1 为混合函数; v_t 为湍流运动粘度, m^2/s 。

凝固融化模型如式(6)所示。

$$H = c_p T + L \alpha_1 \quad (6)$$

式中: c_p 为比热容, $\text{J/(kg} \cdot \text{°C)}$; L 为熔化潜热, J/kg ; α_1 为液相分数,其中 α_1 表示为式(7)。

$$\alpha_1 = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s} & T_s \leq T \leq T_1 \\ 1 & T > T_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_s 是固相线温度, °C ; T_1 是液相线温度, °C 。

1.3 网格划分与无关性验证

建立熔渣换热三维模型,如图4所示,计算域

为 20 mm×20 mm×50 mm 的六面体, 右侧为速度入口, 左侧为压力出口, 其余为壁面, 计算域中心固体为带汽化膜层的熔渣颗粒。为保证计算结果的准确性, 对熔渣颗粒及周边的网格进行局部加密, 从而获得详细的熔渣相变过程。为了得到合适的网格数量, 在相同工况下选取了 6 组不同的网格数开展数值计算, 以熔渣相变过程中 100 ms 时的平均温度作为监测变量进行网格无关性验证, 如图 5 所示。当数量达到 130 万时, 熔渣颗粒的平均温度趋于稳定。综合考量网格质量和计算成本, 最终确定采用 135 万网格进行后续模拟研究。

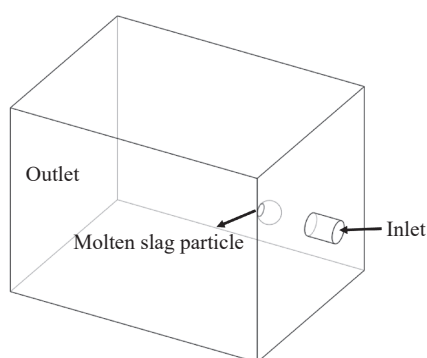


图 4 水淬区域模型

Fig. 4 Water quenching zone model

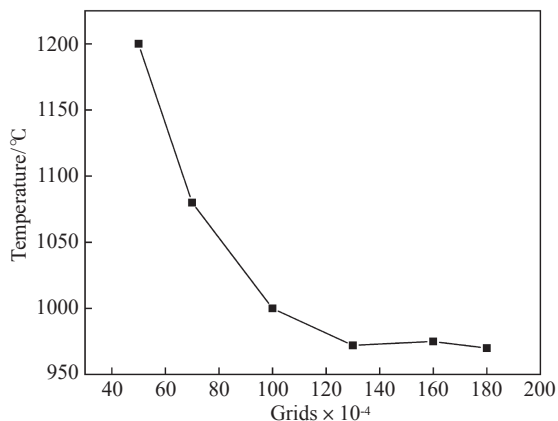


图 5 网格无关性验证

Fig. 5 Mesh independence validation

1.4 参数选取与边界条件设置

水流从右侧流入, 从左侧流出, 对应的分别为速度入口和压力出口, 如图 4 所示, 将计算域中壁面设置为无滑移绝热边界, 初始条件下, 计算域中均匀分布空气, 固体域分别为熔渣与汽化薄膜, 汽化薄膜区填充水蒸气, 不考虑辐射换热, 熔渣与蒸汽等初始条件, 如表 1 所示。

高炉渣的比热容 C_{ps} 以及导热系数 λ_s 随温度变化的公式见式(8)(9)。

$$C_{ps} = 937 + 0.156T - 0.185 \times 10^{-8} T^2 \quad (8)$$

$$\lambda_s = 0.7095 + 7.3468 \times 10^{-4} T + 7.6638 \times 10^{-7} T^2 - 6.5718 \times 10^{-10} T^3 \quad (9)$$

水蒸气的比热容 C_{ps} 以及导热系数 λ_s 随温度变化的公式见式 (10) ~ (11)。

$$C_{ps} = 1790 + 0.107T + 0.367 \times 10^{-8} T^2 - 0.222 \times 10^{-12} T^3 \quad (10)$$

$$\lambda_s = -0.0022 + 0.85 \times 10^{-4} T - 1.2 \times 10^{-8} T^2 \quad (11)$$

表 1 模拟计算中物性参数

Table 1 Physical property parameters in simulation calculation

Species	Temperature/°C	Velocity/(m·s ⁻¹)	Density/(kg·m ⁻³)
Molten slag particles	1 300	0	2 840
Water	25	1/3/5/7/10	1 000
Air	25	0	1.2
Water vapor	1 300	0	0.6

2 模型验证

为验证模型的准确性, 将冷却工质设置为空气, 颗粒温度为 1 500 °C 进行模拟, 对凝固时间进行监控, 模拟结果与刘晓宏^[15] 的模拟结果极为相似, 对比如图 6 所示, 考虑到几何模型的差异, 偏差在合理范围内, 验证了模型的可靠性。

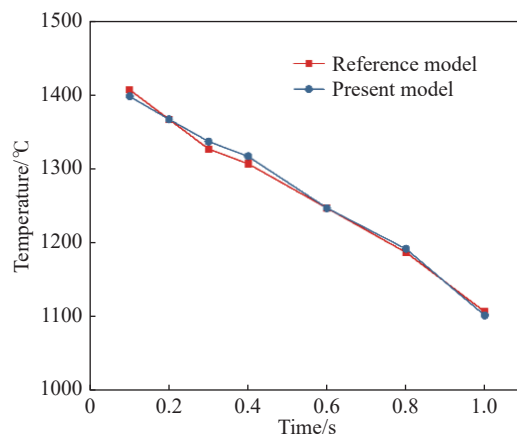


图 6 模型与文献仿真结果的对比验证

Fig. 6 Comparison and validation of the model with literature simulation results

3 结果与讨论

3.1 基础工况冷却结果

图 7 展示了 3 mm 粒径熔渣在 5 m/s 水淬下, 350 ms 内的瞬态温度场演化过程。冷却过程可分为三个阶段: 冷却初期($t=10$ ms), 熔渣颗粒初始温度均匀且高于冷却水温, 其表面与水流间形成强烈

对流换热,导致表面温度快速下降而内部仍维持高温,热量传递方式主要为表面强制对流;冷却中期($t=150\text{ ms}$),表面低温层逐步向颗粒内部扩展,同时内部因温度梯度产生自然对流,借助熔渣高温时的

流动性加速了内部热量传递,使温度场呈现“涡旋状”分布特征;冷却后期($t=300\text{ ms}$),熔渣逐渐发生凝固相变,流动性逐渐消失,热对流效应减弱,热量传递方式转为以导热为主。

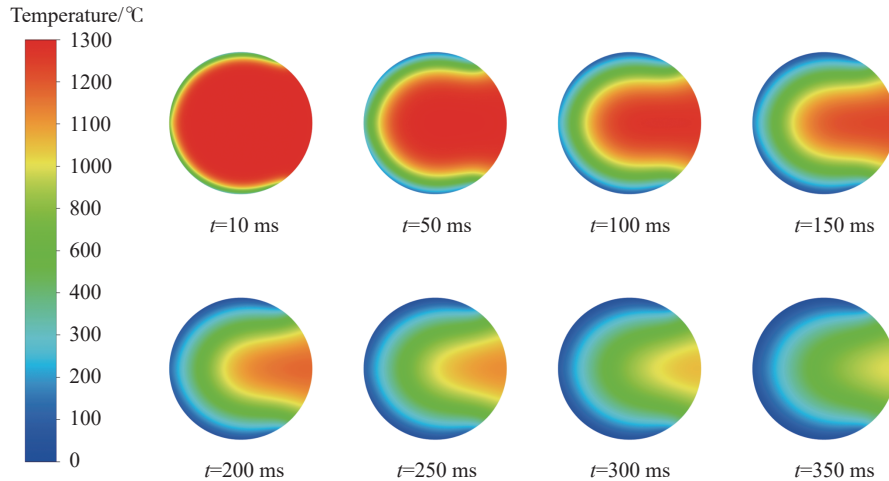


图7 基础工况下熔渣水淬温度场演变过程云图

Fig. 7 Evolution process of temperature field of molten slag during water quenching under basic working conditions

图8展示了熔渣液相率(Liquid fraction)的演化过程,反映了熔渣从熔融态向固态转变的动态相变过程。其中,液相率可定量表示凝固界面的空间特征;而熔渣相变本质是温度场驱动下的固液界面迁移过程,与冷却传热过程存在强耦合关系:前期($t=10\text{ ms}$)熔渣处于全液态,颗粒表面因对流换热快速降温至凝固点以下,形成表层凝固壳,固液界面由颗粒表面向内部逐步推进;相变过程与温度场存在关联,各时刻液相率的空间分布形态与图7温度场的等温线分布特征高度吻合,直观体现了温度低于凝固点导致液相率降低的相变规律。

图9展示了四个监测点的温度变化曲线,出现

温度非均匀分布的本质原因在于绕流过程中形成的流场差异:水流流经颗粒侧风面时处于边界层分离前的剪切流场,流体扰动剧烈且边界层薄,对流换热系数高,因此该区域冷却速率最快、温度最低;迎风面作为来流直接冲击区域,虽存在水流的冲击作用,但流体冲击后速度骤降,导致换热系数略低于侧风面,冷却速率减缓,温度略高于侧风面;背风面处于边界层分离后的回流区,热量传递主要依赖熔渣内部的自然对流与热传导。颗粒中心区域在未凝固阶段,热量依靠自然对流与热传导,随着周围区域温度降低,冷却速率逐渐加快;当中心位置凝固后,热量传递依靠热传导,热阻增大,冷却速率随之下降。

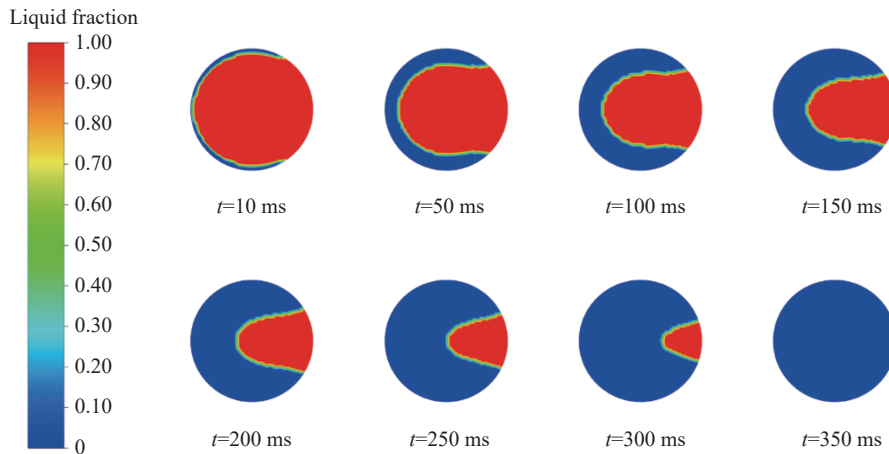


图8 基础工况下熔渣水淬相变过程云图

Fig. 8 Phase transition process of molten slag during water quenching under basic working conditions

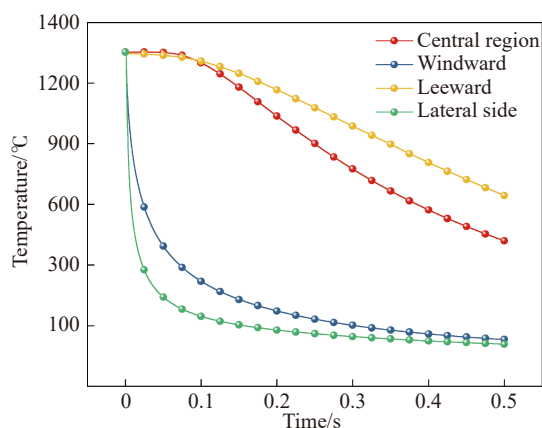


图9 基础工况下熔渣不同位置温度变化曲线

Fig. 9 Temperature variation curves of molten slag at different positions under basic working conditions

3.2 流速对冷却相变的影响

图10展示了3 mm熔渣颗粒在1~10 m/s水流下的温度变化曲线,选取迎风侧轴线平均温度作为对比温度。如图10所示,流速与冷却速率呈正相关关系,流速增大可以增强扰动,降低边界层厚度,进而提高对流换热系数,增大冷却速率;但流速对冷却的强化存在阈值,当流速由1 m/s增至5 m/s时,冷却速率提升幅度显著,而流速增至10 m/s时,不同流速下的温度曲线趋于收敛,差异逐渐缩小,其原因在于5 m/s流速已使侧风端边界层进入充分湍流状态,继续提升流速的影响减弱,对流换热系数的增长同样降低。

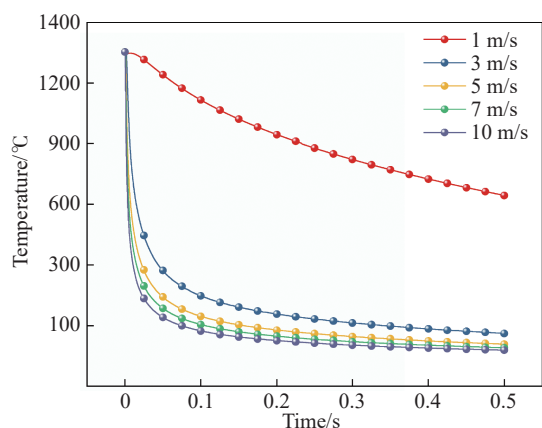


图10 不同水流速度下熔渣温度变化曲线对比

Fig. 10 Comparison of temperature variation curves of molten slag under different water flow velocities

图11展示了改变流速的瞬态温度场对比。如图所示,水流速度与高温区的收缩速率呈正相关,低流速下高温区体积大且形态维持时间长,高流速下高温区域则快速收缩;温度场的形态各向异性随流速增大而增强,所有工况下高温区均呈现沿来流方向的拉伸形态,且流速越高该形态的扁平化特征越

明显,高流速工况下高温区进一步演变为窄条带结构。上述现象的本质是边界层湍流强化与热通量各向异性的协同影响:流速提升可以增强对流换热,使侧风面热通量高于其他区域,热量的快速流失驱动高温区域向非侧风方向收缩,进而形成沿来流方向的拉伸形态。

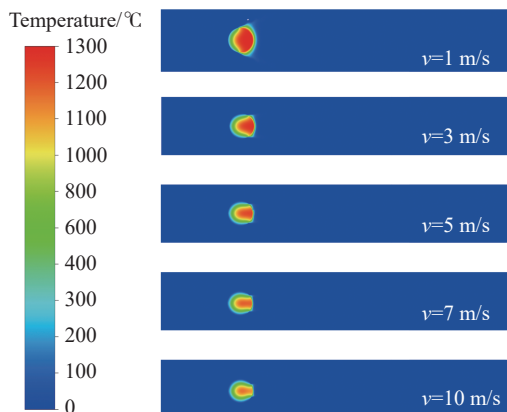


图11 不同水流速度下熔渣水淬温度场对比云图

Fig. 11 Comparison cloud map of temperature field of molten slag during water quenching under different water flow velocities

3.3 粒径对冷却相变的影响

图12展示了直径1~5 mm熔渣颗粒在5 m/s流速下的温度变化曲线。如图所示,熔渣粒径与冷却速率呈负相关,粒径越小,冷却速率越快,其中粒径小于3 mm的颗粒温度曲线斜率随时间快速衰减,而粒径大于4 mm的颗粒温度曲线斜率始终平缓,同时温度衰减表现出尺度效应。上述现象的本质是粒径导致的热阻主导机制切换和尺度效应的共同作用:小粒径颗粒的冷却进程由界面热阻主导,热量传递效率主要取决于对流换热强度;随着粒径增大,冷却进程的主导热阻转变为内部导热热阻,由于熔渣热导率 λ 较低,内部热量难以快速传递至颗粒表面,呈现全程缓慢降温的趋势。粒径尺度效应的核心机理在于颗粒热特征时间的差异,热特征时间与粒径的平方呈正相关,这一机制展示了水淬过程中粒径对冷却的调控作用,即当粒径超过临界值时,冷却过程将从界面换热控制转向内部导热控制。

图13展示了上述工况的瞬态温度场对比。如图所示,颗粒粒径与高温区残留尺度呈正相关,随着粒径由1 mm增大至5 mm,颗粒内部高温区域的体积占比显著提升,其中1 mm小粒径颗粒的高温区体积占比 $<5\%$,而5 mm大粒径颗粒的高温区体积占比 $>80\%$;同时温度场的梯度随粒径增大呈递减趋势,小粒径颗粒的温度场表现为高温区与低温区边界陡峭、温度梯度显著的特征,大粒径颗粒的温

度场则梯度平缓,高温区与低温区的过渡边界趋于模糊。

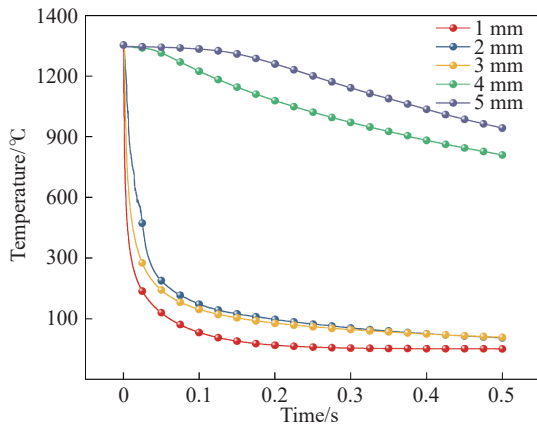


图 12 不同粒径熔渣温度变化曲线对比

Fig. 12 Comparison of temperature variation curves of molten slag with different particle sizes

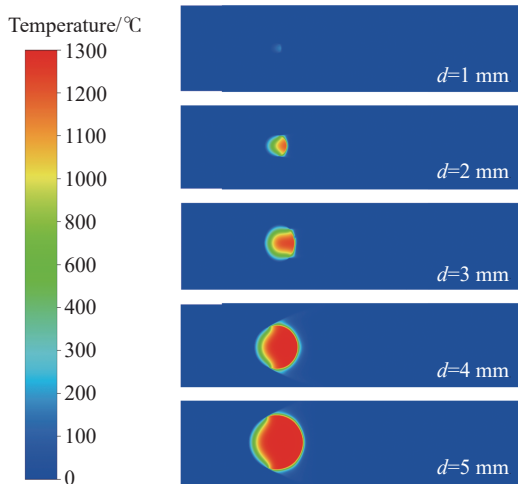


图 13 不同粒径熔渣水淬温度场对比云图

Fig. 13 Comparison cloud map of temperature field of molten slag during water quenching with different particle sizes

3.4 流速-粒径调控的补充验证结果

针对 4、5 mm 熔渣在 5 m/s(v5) 流速下无法满足冷却的现象,对 4、5 mm 熔渣做补充研究。图 14 展示了 4、5 mm 熔渣颗粒在 7 m/s(v7)、10 m/s(v10) 水流速度下的温度曲线,其中温度曲线出现剧烈抖动的本质是外部对流冷却与内部对流加热的动态对抗:大粒径颗粒内部存在温度梯度,驱动高温液态熔渣向表面区迁移,形成内部对流加热;颗粒侧风端的湍流边界层提供外部对流冷却,促使热量向水流中传递。当内部对流加热热通量与外部对流冷却热通量处于非平衡状态时,近表面区的净热通量呈现瞬态波动特征:当 $Q_{in} > Q_{out}$ 时,近表面区温度短暂上升;当 $Q_{in} < Q_{out}$ 时,近表面区温度快速下降,二者的交替主导直接表现为温度曲线的剧烈抖动。进入冷

却后期,熔渣逐渐凝固,内部自然对流被抑制,净热通量由外部对流冷却主导,温度曲线随之趋于平滑。图 15 是 1~3 mm 熔渣(水流速度 5 m/s)与 4~5 mm 熔渣(水流速度 10 m/s)的温度曲线,通过粒径与流速参数匹配,不同工况可实现近似的冷却效果:冷却后期,1 mm-v5、2 mm-v5、3 mm-v5、4 mm-v10、5 mm-v10 工况的温度均趋近 50~100 °C,温度差小于 50 °C,呈现相似的冷却效果。综上,所有粒径经过流速匹配均可以实现近似的冷却速率。

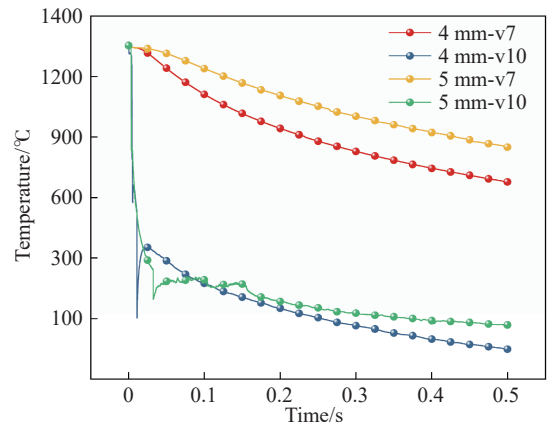


图 14 4~5 mm 熔渣在不同水流速度下的温度变化曲线对比
Fig. 14 Comparison of temperature variation curves of 4-5 mm molten slag under different water flow velocities

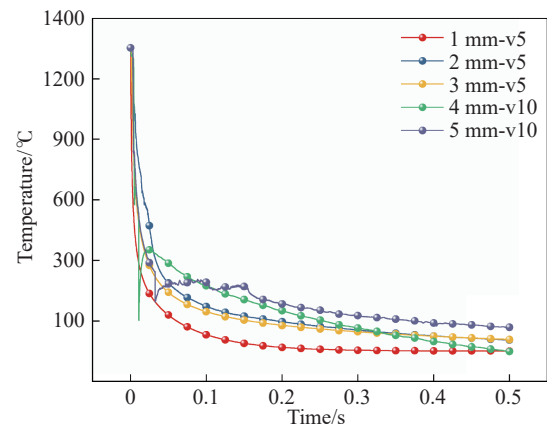


图 15 粒径-水速匹配关系及冷却效果验证曲线

Fig. 15 Comparison curve of particle size-water velocity matching relationship and cooling effect verification

4 结论

通过构建含蒸汽薄膜的熔渣颗粒几何模型,结合基础工况与变参数仿真,系统探究了 1300 °C 熔渣水淬过程的相变特性及工艺参数影响规律,得出以下主要结论:

1)在基础工况下,350 ms 内熔渣温度场呈现空

间差异性,侧风面因流场的剪切作用产生较大的对流换热系数,温度下降速率最快,中心区域温度下降最慢,相变进程随温度场演变逐步推进。

2) 水流速度对熔渣换热效率存在阈值:在1~5 m/s 范围内,随水流速度提升,熔渣冷却速率显著加快;当水流速度超过5 m/s 后,速度提升对换热效果的强化作用趋于平缓,证明了水流速度阈值的存在。

3) 熔渣粒径是影响传热效果的关键因素:在5 m/s 水流速度下,1~3 mm 熔渣可实现有效冷却,而4~5 mm 熔渣因热特征时间大,冷却不到同样效

果;补充研究表明,提升水流速度至10 m/s 可解决4~5 mm 熔渣的冷却问题。

4) 确定最优工艺参数匹配方案:当熔渣颗粒粒径小于3 mm 时,采用5 m/s 水流速度即可满足冷却与相变要求;当颗粒粒径达到5 mm 时,需将水流速度提升至10 m/s,以确保冷却效果达标,实现熔渣相变过程的稳定控制。

研究明确了水淬熔渣相变过程的影响因素及参数作用机制,提出的粒径-速度匹配方案可为水淬工艺的优化设计提供指导意见。后续研究可拓展至多颗粒冷却及3~5 mm 熔渣颗粒的最佳流速匹配。

参考文献

- [1] 王彩云,王维佳,胡小娟. 钢铁行业绿色发展路径研究[J]. 工业安全与环保, 2025, 51(12): 102-106.
Wang Caiyun, Wang Weijia, Hu Xiaojuan. Research on the green development path of the iron and steel industry[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2025, 51(12): 102-106.
- [2] 孙时晴,万迎峰. 钢铁行业碳中和实施路径研究[J]. 工业安全与环保, 2025, 51(12): 97-101.
Sun Shiqing, Wan Yingfeng. Research on implementation pathways for carbon neutrality in the steel industry[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2025, 51(12): 97-101.
- [3] 段志伟,杜唯,刘玉俊,等. 转型金融助力钢铁企业低碳转型发展现状及建议[J]. 钢铁, 2026, 61(1): 201-210.
Duan Zhiwei, Du Wei, Liu Yujun, et al. Current state and suggestion of transition finance supporting low-carbon transformation of iron and steel enterprises[J]. Iron & Steel, 2026, 61(1): 201-210.
- [4] 叶锦明,张伟杰,陈伟锦. 大宗工业固体废物资源化利用处置研究—以钢铁行业为例[J]. 生态与资源, 2025(2): 84-86.
Ye Jinming, Zhang Weijie, Chen Weijin. Research on the resource utilization and disposal of bulk industrial solid waste—Taking the steel industry as an example[J]. Ecology and Resources, 2025(2): 84-86.
- [5] 吴玲予. 改性高炉炉渣对磷的回收性能及其对植物生长影响的研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2025.
Wu Lingyu. Study on phosphorus recovery performance of modified blast furnace slag and its effect on plant growth[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2025.
- [6] 陈桥,董欣,姬龙雪,等. 高炉渣地质聚合物对 Zn^{2+} 的吸附和解吸性能[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(5): 1078-1087.
Chen Qiao, Dong Xin, Ji Longxue, et al. Adsorption and desorption performances of Zn^{2+} by geopolymers based on blast furnace slag[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(5): 1078-1087.
- [7] 郭宇航. 高炉渣微晶玻璃中多种重金属的赋存状态及协同固化机理研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2025.
Guo Yuhang. Study on the existence states and synergistic solidification mechanisms of multiple heavy metals in blast furnace slag glass-ceramics[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2025.
- [8] 杨天歌. 颗粒稳定泡沫法制备水淬高炉渣基泡沫陶瓷及其性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2025.
Yang Tiange. Preparation and properties of water-quenched blast-slag based foam ceramics by particle stabilized foam method[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2025.
- [9] Goodarzi A R, Movahrad M. Stabilization/solidification of zinc-contaminated kaolin clay using ground granulated blast-furnace slag and different types of activators[J]. Applied Geochemistry, 2017, 81: 155-165.
- [10] Oge M, Ozkan D, Celik M B, et al. An overview of utilization of blast furnace and steelmaking slag in various applications[C]//Proceedings of the International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTTE 2018). Materials Today: Proceedings, 2019, 11: 516-525.
- [11] Ibrahim M M, Ei-Sheshtawy H S, El-Magied M O A, et al. Mesoporous Al_2O_3 derived from blast furnace slag as a cost-effective adsorbent for U(VI) removal from aqueous solutions[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2023, 103(13): 2948-2964.
- [12] Mandal S, Chatterjee R, Nag S, et al. Low expansion glass-ceramics using industrial waste and low-cost aluminosilicate minerals: fabrication and characterizations[J]. Transactions of the Indian Ceramic Society, 2023, 82(1): 46-55.
- [13] Singh B, Kemell M, Heikkilä M J, et al. Indoor direct air capture using amorphous MOF pellets from blast furnace slag: waste to porous functional materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 505: 159416.
- [14] 王子兵,刘跃,张玉柱,等. 高炉熔渣气淬粒化热量回收试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(4): 93-98.
Wang Zibing, Liu Yue, Zhang Yuzhu, et al. Experimental study on heat recovery of the process of gas blowing for blast

- furnace slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2018, 39(4): 93-98.
- [15] 刘晓宏. 高炉熔渣气雾粒化机理及凝固换热特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2025.
Liu Xiaohong. Study on granulation mechanism and solidification heat transfer characteristics of blast furnace slag by air-mist[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2025.
- [16] 武新晨, 楼国锋, 肖永力, 等. 高炉渣水射流粒化特性模拟研究[J]. *钢铁钒钛*, 2025, 46(3): 92-99.
Wu Xincheng, Lou Guofeng, Xiao Yongli, et al. Simulation study on granulation characteristics of blast furnace slag water jet[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2025, 46(3): 92-99.
- [17] Yosiiinaga M, Fuji K, Shigematsu T, et al. Method of dry granulation and solidification of molten blast furnace slag[J]. *Tetsu-to-Hagane*, 1981, 67(7): 917-924.
- [18] Brämning M, Wikström J O. A blast furnace view on slags[J]. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2002, 31(2): 88-99.
- [19] Engström F, Adolfsson D, Yang Q, et al. Crystallization behaviour of some steelmaking slags[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94(3-4): 145-152.
- [20] Fredericci C, Zanotto E D, Ziemath E C. Crystallization mechanism and properties of a blast furnace slag glass[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 273(1-3): 64-75.
- [21] Wang Hong, Ding Bin, Liu Xiaoying, et al. Solidification behaviors of a molten blast furnace slag droplet cooled by air[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 915-924.
- [22] 任倩倩. 调质高炉熔渣析晶行为的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
Ren Qianqian. Study on crystallization behavior of modified blast furnace molten slag[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.
- [23] Kang Yue, Liu Chao, Zhang Yuzhu, et al. Study on the mineralogical crystallization of granulation of gas-quenched blast furnace slag[J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2018, 83(9): 1031-1045.
- [24] Liu Wenguo, Pang Zhuogang, Zheng Jianlu, et al. The viscosity, crystallization behavior and glass-ceramics preparation of blast furnace slag: a review[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(11): 18090-18104.
- [25] Ding Bin, Zhu Xun, Wang Hong, et al. Numerical investigation on phase change cooling and crystallization of a molten blast furnace slag droplet[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 471-479.
- [26] 康月, 刘超, 张玉柱, 等. 气淬高炉熔渣冷却凝固相变特性仿真[J]. *中国冶金*, 2022, 32(5): 116-124.
Kang Yue, Liu Chao, Zhang Yuzhu, et al. Phase transition simulation of air quenching blast furnace slag during cooling and solidification[J]. *China Metallurgy*, 2022, 32(5): 116-124.
- [27] 王丽丽, 客海滨, 王立梅. 气淬高炉渣颗粒凝固行为数值模拟[J]. *唐山学院学报*, 2022, 35(6): 35-40.
Wang Lili, Ke Haibin, Wang Limei. Numerical simulation of solidification of gas-quenched blast furnace slag particles[J]. *Journal of Tangshan University*, 2022, 35(6): 35-40.
- [28] 邵宸. 气淬高炉熔渣强化破碎数值仿真[D]. 唐山: 华北理工大学, 2024.
Shao Chen. Numerical simulation of enhanced crushing of gas quenched blast furnace slag[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2024.
- [29] 邵宸, 康月, 邢宏伟, 等. 高炉熔渣粒化工艺试验及其数值仿真研究分析[J]. *钢铁钒钛*, 2024, 45(1): 104-114.
Shao Chen, Kang Yue, Xing Hongwei, et al. Experimental and simulation on the granulation process of blast furnace slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2024, 45(1): 104-114.
- [30] 孙瑞靖, 康月, 邵宸, 等. 气淬高炉渣珠强化冷却凝固过程数值仿真[J]. *中国冶金*, 2024, 34(9): 34-44.
Sun Ruijing, Kang Yue, Shao Chen, et al. Numerical simulation of enhanced cooling and solidification process of gas quenched blast furnace slag beads[J]. *China Metallurgy*, 2024, 34(9): 34-44.
- [31] 冯鹏博, 楼国锋, 武新晨, 等. 高炉渣熔滴连续凝固过程的数值模拟[J]. *钢铁钒钛*, 2025, 46(5): 23-32.
Feng Pengbo, Lou Guofeng, Wu Xincheng, et al. Numerical simulation of continuous solidification process for blast furnace slag droplets[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2025, 46(5): 23-32.
- [32] 赵凯, 白晓军, 王殿新, 等. 气力雾化水用于高温熔渣粒化及热回收的数值模拟[J]. *中国冶金*, 2025, 35(3): 144-154.
Zhao Kai, Bai Xiaojun, Wang Dianxin, et al. Numerical simulation on pneumatic atomized water for granulation and heat recovery of molten slag[J]. *China Metallurgy*, 2025, 35(3): 144-154.
- [33] Wang Lei, Zhang Yuxiu, Zhang Peibin, et al. Recycling steel industry waste for environmental protection: investigation of blast furnace slag cooling process with atomized water granulation method[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 389: 126071.
- [34] Liu Cong, Hu Jinming, Zhen Guangwei, et al. Droplet interactions with hot surfaces: boiling modes, Leidenfrost temperature, dynamics, and applications[J]. *Small*, 2025, 21(26): 2501592.