

高炉渣水射流粒化特性模拟研究

武新晨¹, 楼国锋^{1*}, 肖永力², 冯鹏博¹

(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: 鉴于常规的气淬粒化工艺可能存在的问题(如耗气量大等), 拟采用水流作为粒化介质, 开展高速水射流作用下熔渣粒化过程的数值模拟研究。研究利用 VOF-to-DPM 模型计算水射流熔渣粒化过程和熔渣粒径分布, 并探究水流速度、熔渣速度、黏度等粒化条件对平均粒径等粒化结果的影响。结果表明: 随着水流速度的增大, 粒化后熔渣平均粒径减小, 当水流速度达到 30 m/s 时, 在所研究的参数条件下, 基本不存在 4 mm 以上的大颗粒; 当熔渣速度增加时, 若水流厚度充足, 对粒化效果和粒径分布影响很小; 若水流厚度不足, 则会出现未破碎熔渣直接下落的现象。为保证水流量充足, 水渣比应达到 2.2 : 1; 当熔渣黏度增加时, 熔渣破碎效果变差, 粒径分布和平均粒径明显增加。

关键词: 水射流; 粒化; 数值模拟; 熔渣; 平均粒径

中图分类号: TF534

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)03-0092-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Simulation study on granulation characteristics of blast furnace slag water jet

WU Xinchen¹, LOU Guofeng^{1*}, XIAO Yongli², FENG Pengbo¹

(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: Given the potential problems of the conventional gas quenching granulation process, such as the high gas consumption, this study intends to carry out a numerical simulation study of the slag granulation process under the action of high-speed water jet, using water flow as the granulation medium. The VOF-to-DPM model was used to calculate the granulation process and slag size distribution of water jet slag, and to explore the effects of water flow velocity, slag velocity, viscosity and other granulation process conditions on the average particle size and other granulation results. The results show that with the increase of water velocity, the average particle size of the slag after granulation decreases, and when the water velocity reaches 30 m/s, there are basically no large particles above 4 mm under the parameters studied. When the slag velocity increases, and the water flow thickness is sufficient, it has little influence on the granulation effect and particle size distribution. When the water flow thickness is insufficient, there will be a phenomenon of unbroken slag falling directly. In order to ensure that the water flow is sufficient, the water slag ratio should reach 2.2:1; when the slag viscosity increases, the slag crushing effect is getting worse, and the particle size distribution and average particle size increase significantly.

Key words: water jets, granulation, numerical simulation, slag, average particle size

收稿日期: 2025-02-05

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22373805D)。

作者简介: 武新晨, 2000 年出生, 男, 山西吕梁人, 硕士, 主要从事高炉渣粒化过程研究, E-mail: 13834741656@163.com;

* 通讯作者: 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。

0 引言

钢铁工业在我国经济发展中占据着支柱性地位,但同时也是高能耗、高排放的产业^[1]。高炉渣作为炼铁副产品,其产量庞大,每产出1 t铁水,便会生成250~350 kg的高炉渣^[2-5]。高炉渣排放时温度约为1 500 ℃,蕴含大量高品位热源,每吨高炉渣的显热可达1 770 MJ^[6],在余热回收方面极具潜力和可行性。当前,高炉渣处理工艺主要有湿法处理工艺和干法处理工艺^[7-8],这两种方法各有优缺点。湿法工艺主要为水淬法,传统水淬法直接把高温熔渣倒入大量水中,该工艺操作简便,但后续热回收困难且渣粒粒径大。干法工艺主要有转鼓法、气淬法和离心粒化法等^[9-11]。其中,气淬法余热回收效率高,且处理后渣粒粒径小,有良好的发展前景^[12-15]。然而,气淬粒化法耗气量大,成本高昂,渣粒玻璃体含量低,这些问题正是当前学者们研究的难点所在。

当前国内外学者已针对熔渣粒化和液体射流破碎过程展开了一些研究。王丽丽等^[16-18]对气淬粒化的粒化机理和粒化过程中的影响因素进行了研究,揭示了气流速度、熔渣黏度等条件对粒化过程的影响规律;刘晓宏等^[19-21]在气淬模拟研究中,提出局部动量比的概念,综合了气渣流速、气渣密度及流量等多种参数,得出熔渣破碎过程实质为动量交换;赵凯等^[22]采用空气+水雾作为粒化介质,研究了气雾介质对粒径分布和熔渣换热造成的影响;LIU^[23]、ZHANG^[24]等研究了液体射流破碎过程,结果表明液体在破碎过程中会受到不稳定波的作用,主要有R-T和K-H不稳定波。廖斌^[25]、GUO^[26]等研究了液滴冲击液体环境时的破碎行为,指出了液体变形破碎的模式。

水射流粒化法以气淬法粒化法为基础,结合了水淬法中水介质的使用,使用高速水流代替高速气流来打击破碎熔渣,在后续过程中,水流与高温熔渣充分换热,转化为高温水蒸汽,可进一步进行余热回收。与气淬法相比,水流成本低,渣粒中玻璃相含量提高,且由于水的比热容远大于空气,在热交换过程中,能够更高效地吸收热量,显著提升余热回收效率;与水淬法相比,耗水量降低,也解决了水淬法后续难以进行有效热回收的缺点。同时,气淬法和水淬法流程完善,水射流粒化法以气淬法为基础,可以合理借鉴其技术要点和安全防护,也可借鉴水淬法发展中形成的水资源循环利用系统,让水射流粒化工艺更加安全、高效、清洁。目前关于水射流粒化工艺鲜有研究,基于上述分析,建立高炉渣水射流粒化物

理模型,展开气水渣三相流动的数值模拟,得到了水射流粒化过程,分析水射流粒化破碎机理,重点研究了水流速度、熔渣速度和熔渣黏度对粒化过程的影响,为后续高炉渣水射流粒化工艺的优化及应用提供一定理论基础。

1 模型建立

1.1 几何模型和网格划分

为简化模型,作以下一些假设:①熔渣流入粒化区域的过程遵循连续性假定,即认为在整个粒化过程中,熔渣以连续介质的形式稳定流入粒化区域。②熔渣粒化过程时间极短,仅需几十毫秒,在这一极短的时间跨度内,熔渣与水流之间的热量交换有限,由此引发的温度变化幅度微小,因此不考虑熔渣粒化过程中水和熔渣因温度波动所导致的物性参数变化。③空气、水和熔渣的物性参数均设置为常数^[27]。

建立水射流粒化区域三维物理模型,如图1所示,计算区域为长250 mm、宽和高160 mm的长方体区域,熔渣从顶测流入,水流从左侧注入,入口均为边长18 mm的正方形。

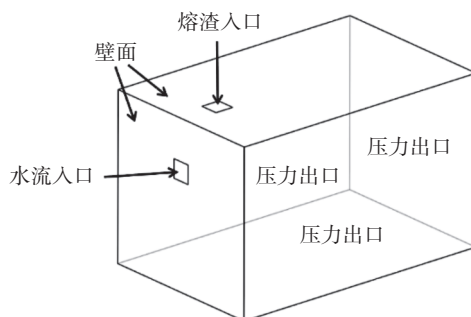


图1 水射流区域模型
Fig. 1 Water jet region model

为确保计算结果的准确性,对熔渣入口和水流入口区域进行局部网格加密,并使用网格自适应加密方法,针对熔渣流动周边的网格进行三级加密,从而能够更精准地捕捉熔渣粒化破碎过程。为确定合适的网格数量,在相同边界条件下选取了6组不同网格数开展数值计算,以熔渣粒化破碎后的质量平均粒径作为观测变量进行网格无关性验证,如图2所示。当网格数达到128万时,熔渣颗粒的质量平均粒径趋于稳定。综合考量网格质量和计算成本,最终确定采用128万网格进行后续模拟研究。

1.2 数学模型

数值模拟所使用商用计算流体动力学软件为ANSYS Fluent,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:

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \rho g + F_{st} \quad (2)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; p 为流体微元体上的压强, Pa ; x_i, x_j, x_k 分别为三个方向的向量; u_i, u_j, u_k 分别为三个方向的速度分量, m/s ; μ 为黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; δ_{ij} 为 Kronecker delta 函数; F_{st} 为表面张力, N 。

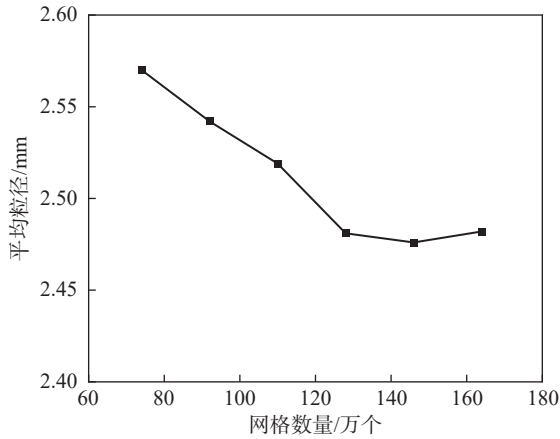


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Mesh independence validation

湍流模型采用 Realizable κ - ε 模型。Realizable κ - ε 模型使用改进的湍流输运模型,通过修正湍流耗散率方程及涡黏性系数公式,显著提升了复杂流动的预测精度,可以更准确地模拟复杂的流体流动,能够更好地处理相界面上的湍流^[28]。

Realizable κ - ε 湍流模型动能和耗散率方程:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} G_b \quad (4)$$

式中: κ 为湍动能, m^2/s^2 ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; σ_κ 为湍流耗散率普朗特数, 1.3; σ_ε 为湍动能普朗特数, 1.0; G_κ 为速度梯度导致的湍动能 κ 的附加项; G_b 为由浮力产生的湍动能; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, 分别为 1.44、1.92、0.09。

VOF 模型:

$$\frac{\partial(\rho \alpha_q)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \alpha_q u_j) = 0 \quad (5)$$

式中, α_q 为第 q 相在计算单元中的容积比率。

VOF-to-DPM 模型:

在水射流粒化过程中, 熔融高炉渣从入口流入后, 在水射流的冲击下发生变形、撕裂和破碎, 最终形成熔渣颗粒, 熔渣破碎过程中可选用 VOF 模型, 但当生成液滴的尺寸接近或小于网格尺度时, VOF 模型计算会失真。为更精确捕捉熔渣液滴分布, 使用 VOF-to-DPM 模型, 在液滴小于一定尺寸时, 将液滴转化为离散液滴, 在后续计算中使用 DPM 方程对离散液滴飞行过程实现更精确的追踪^[29]。

1.3 材料参数及边界条件设置

将计算域网格导入 fluent 软件后, 选择 VOF-to-DPM 模型作为研究熔渣粒化过程和后续熔渣液滴粒径分布的主要模型, 湍流模型选择 Realizable κ - ε , 求解器选择 PISO 的速度耦合求解器。表 1 为计算模拟中的高炉熔渣和水流的物性参数。水流入口条件和高炉渣入口条件均设置为速度入口边界条件, 出口设置为压力出口边界条件。通过改变水流速度, 熔渣速度和熔渣黏度, 分析不同参数对高炉渣粒化破碎后的粒径分布和平均粒径的影响, 总结粒径分布和平均粒径规律。

表 1 模拟计算中气水渣物性参数

Table 1 Physical parameters of water slag in the simulation calculation

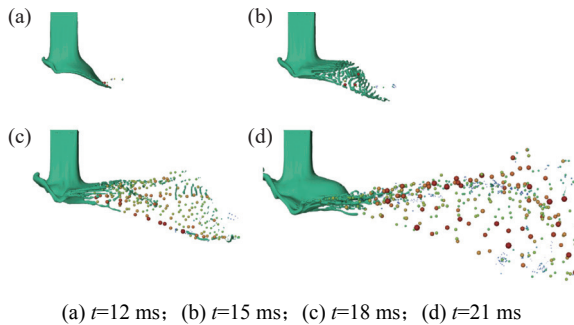
种类	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	表面张力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
高炉渣	2 800	0.45	0.5
水	998.2	1.004×10^{-3}	0.072
空气	1.225	$1.789\ 4\times 10^{-5}$	

2 结果分析与讨论

2.1 高炉渣粒化过程

高炉渣水射流粒化过程如图 3 所示。首先, 高炉渣在重力作用下从矩形截面入口流入后自由下落, 直至与横向水流接触, 如图 3(a)所示; 在水流作用下, 高炉渣液柱在水流的持续作用下弯曲变形, 高炉渣液柱被吹散, 向前端和两侧延伸, 前端在水流作用下形成液膜, 同时, 两侧边缘处以液带和液滴颗粒的形式从液膜表面脱离, 并逐渐向周围扩散, 如图 3(b)所示; 随后液膜纵向发展, 与水流再次接触, 水流对中间区域的液膜再次破碎, 使其从主流液柱中脱落, 将液膜撕裂为条形液带, 并在水流的扰动下逐渐分解成小颗粒, 如图 3(c)所示; 最终, 两侧液滴完全粒化, 在水流的作用下向前运动, 中间区域液膜完全破

碎, 液带、液丝二次破碎完全, 形成液滴在内层同样向前运动, 粒化过程结束, 如图3(d)所示。



(a) $t=12$ ms; (b) $t=15$ ms; (c) $t=18$ ms; (d) $t=21$ ms
图3 熔渣粒化破碎过程

Fig. 3 Slag granulation and crushing process

2.2 高炉渣粒化机理

熔渣遇到水流作用时表面首先发生变形, 在水与熔渣射流交汇的区域, 高炉渣会快速扩展形成一层液膜。同时, 在水和熔渣接触界面处会出现不稳定的波动现象。随着时间的发展, 这些不稳定波动逐渐加剧, 导致形成的液膜开始破裂, 并最终分裂为多个小液滴。在熔渣因水流冲击而破碎的过程中, 主要涉及两种类型的不稳定性: Kelvin-Helmholtz(K-H)不稳定性和 Rayleigh-Taylor(R-T)不稳定性。

熔渣的破碎过程大致可以分为两个阶段: 液膜破碎并形成液丝; 液丝进一步破碎形成液滴。如图4所示为熔渣速度分布和液膜破碎过程。从图中可以发现, 渣流表面形成了不稳定的波动。随着这些波动的发展, 液膜逐步转变为细长的液丝。这是由于水与渣两相之间存在显著的速度梯度, 进而促使了熔渣表面产生 K-H 不稳定状态。然后, 在剪切力的作用下, K-H 波继续发展, 将液膜撕裂为更细小的液带。

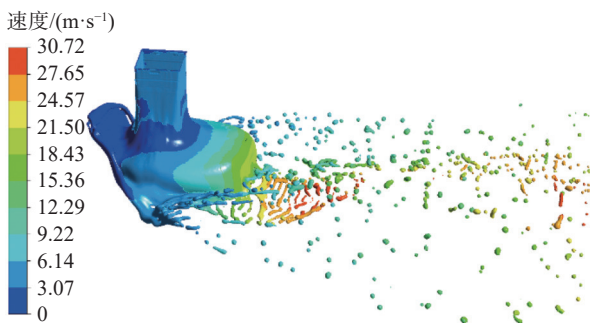


图4 熔渣速度分布和液膜破碎过程

Fig. 4 Slag velocity distribution and liquid film crushing process

如图5所示为液带的破碎过程。在水流作用下, 液带表面会产生 R-T 不稳定波。在此过程中, 波谷区域内的液体向内收缩, 导致该部分变得更细且压力增加; 而波峰处则聚集了更多的液体, 从而形成了

所谓的颈部结构。随着水流进一步作用, 颈部会逐渐变细, 达到一定极限后发生断裂。断裂后的液体由于受到表面张力的影响, 最终形成近似球形的小滴。这种由 R-T 不稳定波主导的液带破碎机制在实际工业应用中意义重大, 明确此机制有助于精准控制粒化产物的颗粒大小与形态, 为工业生产的节能减排与质量提升提供有力支撑。

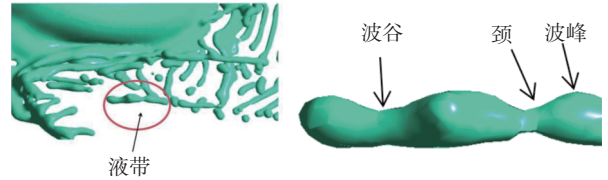


图5 液带破裂示意

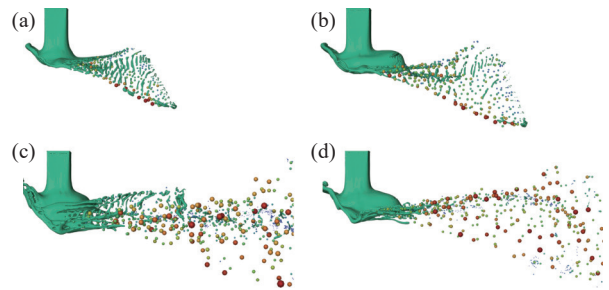
Fig. 5 Schematic diagram of the rupture of the liquid belt

2.3 影响因素分析

影响熔渣粒化的因素很多, 主要包括操作参数(水流速度, 熔渣速度)和熔渣物性参数(黏度)两类, 分别对这些因素进行分析。

2.3.1 水流速度的影响

不同水流速度下高炉渣破碎效果如图6所示。在水流速度为 15 m/s 时, 高炉渣能够发生破碎, 但形成的液膜面积很大且没有完全破碎, 大块高炉渣从主流液柱中脱落后破碎不完全, 可能会直接掉落在粒化仓底部。水流速度为 20 m/s 时, 部分液膜开始破碎, 但是并没有完全破碎, 粒化仓前方仍存在长条液丝; 当水流速度达到 25 m/s 时, 液膜经二次破碎, 基本转化为液带和液丝, 粒化仓前方液带完全转化为液滴, 粒化效果较好; 当水流速度达到 30 m/s 时, 液带和液丝全部转化为小颗粒液滴。同时, 随着水流速度的提升, 脱落的高炉渣破碎逐渐趋于完全。



(a) 15 m/s; (b) 20 m/s; (c) 25 m/s; (d) 30 m/s

图6 不同水流速度粒化效果对比

Fig. 6 Comparison of granulation effects at different water flow rates

不同水流速度对破碎后熔渣粒径分布的影响如图7所示。从图中可知, 随着水流速度的增加, 粒径在 3~4、4~5 mm 区间的高炉渣液滴减少, 甚至在

水流速度 30 m/s 时基本没有 4~5 mm 的液滴。与之相对应的,在小于 1 mm 和 1~2 mm 的区间内液滴的质量占比随着水流速度的增加而增加。

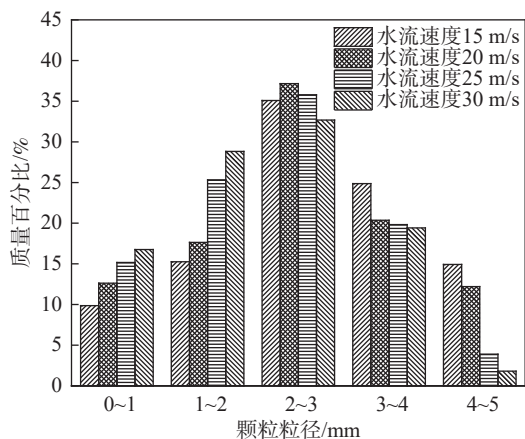


图7 水流速度和熔渣粒径分布

Fig. 7 Diagram of water flow velocity and slag particle size

同时引入质量中位粒径(D50),索特平均粒径D(3,2),质量平均粒径D(4,3)三种平均粒径对颗粒平均粒径进行计算,如图8所示,随着水流速度增加,三种平均粒径均显著下降,一般认为平均粒径小于2.5 mm时,粒化效果良好^[30],即水流速度达到30 m/s。

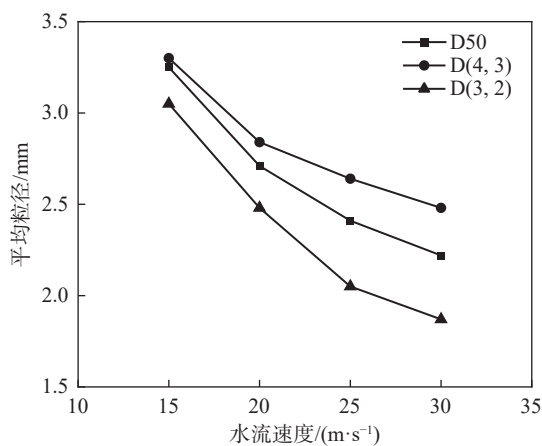


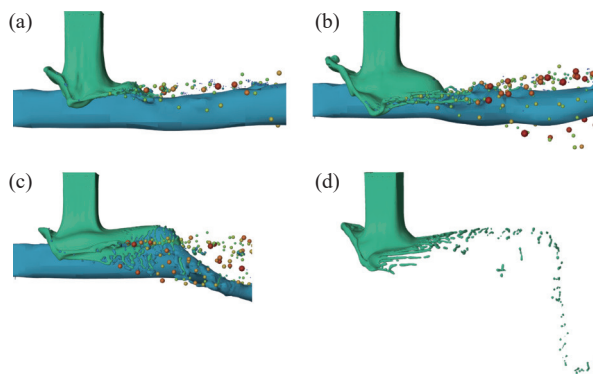
图8 平均粒径随水流速度的变化情况

Fig. 8 The change in average particle size with water velocity

2.3.2 熔渣速度的影响

不同熔渣速度的破碎效果如图9所示。此工况选择水流速度为30 m/s,图中上方为熔渣段,下方为水流段,从图中可以看出,当熔渣速度为3 m/s时,破碎完全时有一半以上的水流场未起作用;而随着熔渣速度增加,这部分流场逐渐减少;而当熔渣速度为6 m/s时,破碎生成的熔渣液带会有部分直接下落,从而堆积在粒化仓底部。经过初步分析,随着熔

渣速度增加,水流需要破碎的单位时间内熔渣量增加,导致水流量不足以破碎所有熔渣,因此出现熔渣直接下落的情况。该结果说明,当熔渣速度较大时,需要更厚的水流层,才能确保生成的熔渣液滴朝着出口方向飞行。



(a) 3 m/s; (b) 4 m/s; (c) 5 m/s; (d) 6 m/s

图9 不同熔渣速度粒化效果对比

Fig. 9 Comparison of granulation effects of different slag flow rates

不同熔渣速度被水流破碎生成液滴粒径分布如图10所示,在熔渣速度小于5 m/s时,熔渣粒径分布较为相似,4 mm以上大粒径液滴较少,当熔渣速度为6 m/s时,3 mm以上熔渣占比均显著增加。在熔渣速度不大于5 m/s时,部分水流并未直接作用于熔渣,且熔渣被水流完全覆盖,因此熔渣速度的增加并未明显影响熔渣颗粒粒径分布;当熔渣速度为6 m/s时,水流厚度不足,不能完全覆盖熔渣,部分熔渣直接下落,这部分熔渣粒化不完全,导致3 mm以上熔渣颗粒显著增加。

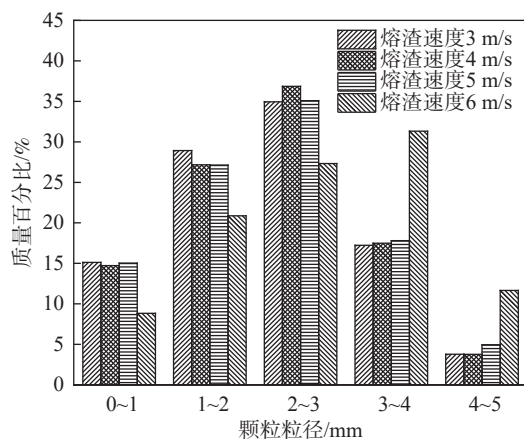


图10 粒径分布随熔渣速度的变化情况

Fig. 10 Particle size distribution as a function of slag flow velocity

而从图11的不同熔渣速度时的平均粒径结果中可以看出,熔渣速度为3~5 m/s时,平均粒径变化幅度较小,推断可知,在水流厚度充足的情况下,

熔渣速度对平均粒径的影响较小。经分析得,此工况可以承载的最大熔渣速度为 5 m/s, 换算为水渣质量比为 2.2 : 1, 即高炉渣水射流粒化过程中, 至少需满足水渣比达到 2.2 : 1。

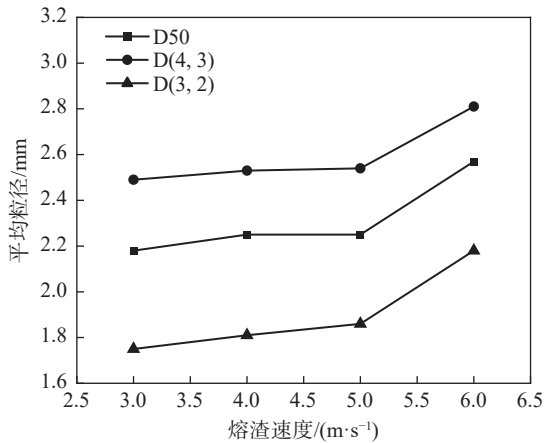


图 11 平均粒径随熔渣速度的变化情况

Fig. 11 The change in average particle size with the flow rate of slag

2.3.3 熔渣黏度的影响

在高炉渣粒化进程中, 除操作参数会产生影响外, 黏度作为熔渣自身的一项重要性质, 受到熔渣温度的影响, 可能会对粒化过程产生影响。取高炉渣黏度分别为 0.35, 0.45, 0.55, 0.65 Pa·s 开展模拟分析。粒径分布随黏度的变化情况如图 12 所示, 从图中能够看出, 随着黏度不断增大, 粒径 3 mm 以上的大颗粒质量分数呈现出显著的上升趋势, 而粒径在 0 ~ 2 mm 的小颗粒所占质量分数均有所下降。

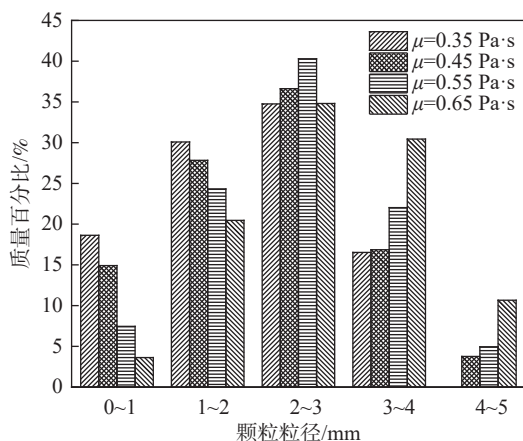


图 12 粒径分布随熔渣黏度的变化情况

Fig. 12 Particle size distribution as a function of slag viscosity

从图 13 能够发现, 熔渣黏度与熔渣平均粒径呈现出正相关特性。随着熔渣黏度增大, 熔渣平均粒径也随之增大。这主要是因为黏度本质上反映了熔

渣内部的内摩擦力, 黏度增大意味着内摩擦力增强。高黏度下, 熔渣中粒子间的相互作用变强, 运动变得迟缓, 粒子更易相互聚集、粘连, 难以分散开来, 进而导致粒径逐渐增大。

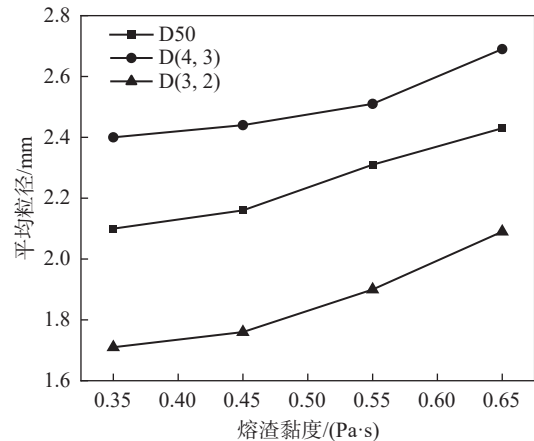


图 13 平均粒径随熔渣黏度的变化情况

Fig. 13 The change in average particle size with the viscosity of the slag

3 结论

通过数值模拟的方法分析了高炉渣经水射流粒化的过程, 并在此基础上研究了水流速度、熔渣速度及其黏度对粒化效果(包括粒径分布和平均粒径)的影响, 得出了以下结论:

1) 熔渣粒化过程主要分为三个阶段: 液膜的形成、初次破碎(即液膜破碎)以及二次破碎(即液带破碎)。液膜破碎的现象是由于水和熔渣界面间的速度差异导致 K-H 不稳定波的产生, 从而引发破碎; 而液带的二次破碎则是通过掐断机制实现的, 这是由 R-T 不稳定波在液带上形成并最终导致其破裂所造成的。

2) 水流速度的增加强化了水渣之间的相互作用, 增强了液膜破碎, 随着水流速度的增加, 粒化效果趋于良好, 平均粒径减小。当水流速度达到 30 m/s 时, 粒化效果良好, 4 mm 以上熔渣颗粒占比小于 3%, 平均粒径低于 2.5 mm。

3) 熔渣速度对粒化过程的影响会受到水流厚度的影响。当水流厚度充足时, 部分水流未直接参与粒化过程, 此时随着熔渣速度的增加, 平均粒径变化不明显; 当水流厚度不足时, 熔渣破碎不完全, 平均粒径明显增大。为保证水流厚度充足, 水渣比需达到 2.2 : 1。

4) 熔渣黏度对粒化过程有较大影响, 尤其是大

颗粒明显增多,由于黏度受熔渣温度影响,即熔渣温度对粒化过程影响较大。随着熔渣黏度的增大,平均粒径增加了 0.35 mm, 4 mm 以上熔渣占比从 2.6% 增加至 10.8%, 3 ~ 4 mm 熔渣占比从 17.1% 增加至 32.7%。

参考文献

- [1] TANG J H, YU J Y, MA B Y, *et al.* Research status of high value-added utilization of blast furnace slag[J]. *Refractory & Lime*, 2022, 47(4): 24-29.
(汤鉴淮, 于敬雨, 马北越, 等. 高炉渣的高附加值利用研究现状[J]. *耐火与石灰*, 2022, 47(4): 24-29.)
- [2] ZHANG L S, LI H, ZHANG H X, *et al.* Comprehensive utilization and prospect of blast furnace slag[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(19): 20-24.
(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.)
- [3] WANG Z L. Research progress in centrifugal granulation of high temperature liquid slag[J]. *Modern Chemical Research*, 2023(4): 25-27.
(王治龙. 高温液态熔渣离心粒化研究进展[J]. *当代化工研究*, 2023(4): 25-27.)
- [4] XIAO Y L, HE F, XIE M Q, *et al.* Study on structure and properties of blast furnace slag[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2022, 44(4): 12-16.
(肖永力, 何峰, 谢梦芹, 等. 高炉熔渣的结构与性质研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2022, 44(4): 12-16.)
- [5] MA Y F. Current status and discussion of steel slag treatment technology[J]. *Metallurgy and Materials*, 2022, 42(2): 119-120.
(马永富. 钢渣处理技术现况和探讨[J]. *冶金与材料*, 2022, 42(2): 119-120.)
- [6] TAN F X, HUANG Y W. Preparation of copper and copper alloy powder by water atomization[J]. *Metal Functional Materials*, 2021, 28(3): 18-22.
(谭芳香, 黄以伟. 水雾化法制备铜及铜合金粉[J]. *金属功能材料*, 2021, 28(3): 18-22.)
- [7] WANG Z B, LIU Y, ZHANG Y Z, *et al.* Experimental study on heat recovery of the process of gas blowing for blast slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2018, 39(4): 93-98.
(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.)
- [8] SUN R J, KANG Y, DING H L, *et al.* Influence of injection process parameters on granulation effect of blast furnace slag to beads[J]. *Iron and Steel*, 2024, 59(7): 159-168.
(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.)
- [9] FANG W Y, WANG H, ZHU X, *et al.* Heat transfer characteristics of molten slag in rotary cup granulation process[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(8): 151-159.
(方维扬, 王宏, 朱恂, 等. 转杯粒化工艺高温熔渣换热数值模拟[J]. *钢铁*, 2020, 55(8): 151-159.)
- [10] ZHANG B, CHENG P, LI Q L, *et al.* The crushing process of a transverse jet of a liquid under the action of an air film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(5): 230-241.
(张彬, 成鹏, 李清廉, 等. 液体横向射流在气膜作用下的破碎过程[J]. *物理学报*, 2021, 70(5): 230-241.)
- [11] SUN G T. Study on mechanical centrifugal granulation characteristics of blast furnace slag[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
(孙广彤. 高炉熔渣机械离心粒化特性研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.)
- [12] JI H M. Research on key technologies of mechanical centrifugal granulation of blast furnace slag[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
(纪慧敏. 高炉熔渣机械离心粒化关键技术研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.)
- [13] WU L, WU H F, WU Y D, *et al.* Discussion on development of heat recovery technology for high temperature molten slag[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(9): 190-193, 88.
(吴龙, 吴华峰, 吴跃东, 等. 高温熔渣热资源回收技术发展及探讨[J]. *环境工程*, 2020, 38(9): 190-193, 88.)
- [14] BROUMAND M, AHMED M A, BIROUK M. Experimental investigation of spray characteristics of a liquid jet in a turbulent subsonic gaseous crossflow[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3237-3244.
- [15] WANG K, YI C J, HU F C, *et al.* Study on the flight and collision process of molten blast furnace slag[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2022, 40(6): 535-540, 548.

- (王凯, 仪垂杰, 胡凤超, 等. 高温液态熔渣飞行及碰撞过程研究[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(6): 535-540, 548.)
- [16] WANG L L, ZHANG Y Z, KE H B, *et al.* Study on granulation performance of blast furnace slag by gas quenching[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(4): 82-86.
(王丽丽, 张玉柱, 客海滨, 等. 气淬高炉熔渣粒化性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4): 82-86.)
- [17] WANG L L, ZHANG Y Z, KE H B, *et al.* Numerical simulation of molten slag film breakup during granulation process using air-quenching[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2020, 19(2): 87-93.
(王丽丽, 张玉柱, 客海滨, 等. 气淬粒化工艺中熔渣液膜破碎数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2020, 19(2): 87-93.)
- [18] GAO J, FENG Y H, FENG D L, *et al.* Centrifugal granulation of liquid slag by wind quenching[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(5): 1288-1292.
(高洁, 冯妍卉, 冯黛丽, 等. 风淬作用下液态熔渣的离心粒化[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(5): 1288-1292.)
- [19] LIU X H, WEN Z, X Y L, *et al.* Analysis of slag granulation mechanism and crushing efficiency under gas quenching[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2023, 44(10): 1424-1430.
(刘晓宏, 温治, 肖永力, 等. 气淬作用下熔渣粒化机理及破碎效果分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(10): 1424-1430.)
- [20] LIU X H, WEN Z, DU Y H, *et al.* Study on liquid film breaking process of gas quenched granulated slag[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 2851-2860.
(刘晓宏, 温治, 杜宇航, 等. 气淬粒化熔渣液膜破碎过程研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(8): 2851-2860.)
- [21] SHAO C, KANG Y, XING H W, *et al.* Experimental and simulation on the granulation process of blast furnace slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(1): 104-114.
(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.)
- [22] ZHAO K, BAI X J, WANG D X, *et al.* Numerical simulation on pneumatic atomized water for granulation and heat recovery of molten slag [J/OL]. China Metallurgy, 1-15[2025-01-13].
(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/OL]. 中国冶金, 1-15[2025-01-13].)
- [23] LIU X H, WEN Z, DU Y H, *et al.* Numerical simulation of the slag granulation process in gas quenching under multi-influencing factors[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2023, 47(4): 1733-1745.
- [24] ZHANG X Y, XU N W, LI X M, *et al.* Numerical simulation of centrifugal granulation characteristics of slag optimized by auxiliary gas quenching winds[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2024, 24(5): 523-532.
(张馨艺, 徐宁文, 李小明, 等. 辅助气淬风优化熔渣离心粒化特性数值模拟[J]. 过程工程学报, 2024, 24(5): 523-532.)
- [25] LIAO B, ZHANG G F, WANG L H, *et al.* Deformation and breakup behaviors of drop in ambient liquid under impact[J]. Journal of Experimental in Fluid Mechanics, 2016, 30(5): 9-16.
(廖斌, 张桂夫, 王鲁海, 等. 冲击作用下液滴在环境液体中的变形破碎行为[J]. 实验流体力学, 2016, 30(5): 9-16.)
- [26] GUO J P, WANG Y B, BAI F Q, *et al.* Unstable breakup of a power-law liquid fuel jet in the presence of a gas crossflow[J]. Fuel, 2020, 263: 116606.
- [27] LI B. Simulation study on gas quenching and granulation of modified blast furnace slag[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2022.
(李兵. 调质高炉熔渣气淬粒化模拟研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2022.)
- [28] ZHANG B W. Study on multiphase flow and atomization characteristic in water atomization process[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.
(张博文. 水雾化过程多相流动及雾化规律探究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.)
- [29] KASHANJ S, KEBRIAEE A. The effects of different jet velocities and axial misalignment on the liquid sheet of two colliding jets[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 206: 235-248.
- [30] ZHANG Y, XU J, CHANG Q, *et al.* Bi-layer coarse-grained DPM of gas-solid systems with mesoscale heterogeneity resolved[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 263: 118058.