

引文格式:徐薛鹏,黄福川. 液态磷渣风碎工艺的数值模拟[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(5): 84–91.

XU Xuepeng, HUANG Fuchuan. Numerical simulation of the air quenching process of liquid phosphorus slag[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(5): 84–91.

液态磷渣风碎工艺的数值模拟

徐薛鹏^{1,2}, 黄福川^{1,2}

(1. 广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530000;

2. 广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室, 广西 南宁 530000)

[摘要] 目前,国内液态磷渣多采用水碎法进行处理,存在渣粒粒度不均匀、余热无法回收利用等问题。本文借鉴钢渣的水碎处理工艺,采用 FLUENT 仿真模拟方法,建立有限元仿真模型,模拟风碎工艺处理液态磷渣的过程,并分析风碎过程的影响因素和渣粒的凝固换热规律。结果表明,较大风速能够提高渣粒在粒化室内的扩散速度,可有效缓解渣粒粘连问题,而且有利于热场的扩散;当粒化室喷嘴与水平面的角度为 30°时的风碎效果优于 0°,角度为 60°时受到粒化室结构的限制,导致渣粒从出气口飞出;当风速为 100 m/s,喷嘴与水平面夹角为 30°时,粒化室出口气体平均温度最高,能实现余热的高效利用;熔滴的凝固过程是不均匀进行的,凝固率先发生在迎风一侧,迎风侧温度下降最快,且形成的固相厚度大于背风侧;同时,渣粒在 1 s 时表面已经凝固形成渣壳,满足碰壁要求。本研究结果可为优化风碎法处理液态磷渣和实现风碎余热回收提供数据指导。

[关键词] 液态磷渣; 风碎法; 数值模拟; 风速; 喷嘴角度; 余热回收

[中图分类号] X756; TF839 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)05-0084-08

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.05.009

黄磷渣是采用电炉法生产黄磷时产生的固体废弃物,我国是世界上的黄磷生产大国,黄磷生产量占全球 80% 以上^[1],每生产 1 t 黄磷会产生大约 8~10 t 黄磷渣^[2],每年我国排放的磷渣达 500 万 t 以上^[3]。我国的黄磷渣综合利用率低,大部分磷渣露天堆放不仅浪费土地资源,而且其中的有害物质会污染地下水^[4],造成环境破坏,严重危害人类身体健康。目前,国内处理液态磷渣的方法多为水碎法,具有操作简单、处理周期短等优点,处理后的磷渣可以用作混凝土骨料^[5]、水泥生产原料^[6]、矿物掺合料^[7]和制备胶凝材料^[8]等,但水碎法危险系数高,产生的渣粒粒度不均匀,同时过程余热无法回收利用,造成了能量浪费和环境污染。

风碎法是一种常见的处理液态渣的工艺,其以

空气或氮气作为冷却介质,对熔渣冲击破碎,形成液态的渣滴在空中急冷固化后,形成直径较小的渣粒^[9]。该过程是一个受流体性质和流动条件影响的复杂过程,分为粒化阶段和凝固阶段。粒化阶段是熔渣受到高速气流的冲击,破碎为液滴的过程;凝固阶段是液滴换热凝固,变为固体渣粒的过程。

目前,国内外关于炉渣风碎工艺的研究大部分集中在钢渣。李平^[10]提出将钢渣风碎工艺和余热回收技术结合,不仅可以得到 5 mm 以下的粒化渣粒,而且热量回收率达到了 50% 以上;康月等^[11]通过试验发现,增大气体压力,渣粒不仅粒径显著减小,而且形状更加规则;同时,规则的形状更有利于换热,提高了余热回收的效率。因此,采用风碎法处理熔渣,相较于水碎法,得到的渣粒粒径更小且更加均匀,便于后续进行余热回收。

部分学者以钢渣为研究对象对风碎法进行了模拟研究。刘源洞等^[12]通过建立有限元模型和多相流方程,模拟了液态钢渣的风碎过程,为设计工艺参数提供了依据。范一鸣等^[13]运用 FORTRAN 编写

[收稿日期] 2025-02-27 [修订日期] 2025-04-13

[录用日期] 2025-04-16 [出版日期] 2025-10-01

[第一作者] 徐薛鹏(2000—),男,硕士,主要从事熔渣处理工艺方面的研究。

[通信作者] 黄福川(1963—),男,教授,博士生导师。

程序,采用 Runge-Kutta 方法对模型进行求解运算,研究熔渣的运动和换热特性,结果表明粒径对其运动和换热效果影响显著。还有部分学者在离心粒化的基础上结合风碎工艺进行模拟研究。高洁等^[14]以剪切应力运输 $k-\omega$ 模型表达湍流流动,VOF 两相流模型追踪自由界面,模拟风碎作用的离心粒化过程,结果表明,气淬风的加入有利于提高单位时间内熔渣颗粒的产量。Tan 等^[15]将离心粒化和风碎工艺结合起来进行试验,研究高炉熔渣离心粒化的造粒机理及性能。Wang 等^[16]采用 CLSVOF 的方法对液态渣的破碎过程进行数值研究,结果表明,粒化过程包括了平膜破碎和球帽膜破碎两个阶段,空气动力是粒化过程的主要影响因素。此外,在实际工业生产中,风碎工艺还受到喷嘴的安装角度、粒化室的空间结构等参数的影响,因此,为了促进风碎工艺在磷渣工业上的应用以及实现余热的有效回收,有必要探究风碎工艺处理液态磷渣的影响因素和渣粒的换热规律。

本文采用风碎工艺处理液态磷渣,并基于 Fluent 仿真,研究风碎工艺处理液态磷渣的影响因素,探究风碎渣粒在冷却过程中的凝固换热规律,为优化风碎法处理液态磷渣和实现风碎余热回收提供理论基础和指导。

1 磷渣与钢渣性质对比分析

鉴于风碎工艺现阶段的主要应用场景为钢渣处理,本研究针对水碎法在液态磷渣处理中存在的不足,将风碎工艺迁移至液态磷渣处理领域。液态钢渣和液态磷渣的对比见表 1,表 1 数据表明,尽管液态磷渣的温度较低,但黏度和比热容较大,流动性较差,凝固温度区间较窄;同时,其密度相对较小,破碎

效果好。由于二者的主要化学成分相似,因此,基于 FLUENT 模拟时,引用钢渣风碎时的部分参数。

2 建立模型

基于 Fluent 对风碎工艺模拟时,考虑到实际情况复杂,影响因素较多。因此,忽略影响较小的因素,对模型做出以下假设:①液态磷渣以恒定的速度流入粒化室内;②液态磷渣的温度为 1 763 K。粒化室内气体和进气口射流均为空气,初始温度取 278 K,均认为不可压缩流体;③液态磷渣流的密度和黏度为常数;④渣粒视为规则球体;⑤渣粒温度沿径向变化;⑥凝固阶段渣粒的传热方式以热传导为主。

2.1 数学模型

液态磷渣风碎工艺以多相流为主,处于非稳态,选择 VOF 多相流运动方程。多相流的流动必须满足质量守恒方程,即连续性方程,表示为式(1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

式中: u 为 x 方向的速度分量, m/s ; v 为 y 方向的速度分量, m/s ; w 为 z 方向的速度分量, m/s ; t 为时间, s ; ρ 为密度, kg/m^3 。

流体运动必须满足动量守恒定律,动量守恒方程表示为式(2)。

$$\frac{Dv}{Dt} = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v \tag{2}$$

式中: $\frac{Dv}{Dt}$ 为加速度, m/s^2 ; f 为单位质量体积力, m/s^2 ; $\frac{1}{\rho} \nabla p$ 为单位质量压强梯度力, m/s^2 ; μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v$ 单位质量黏性力, m/s^2 。

风碎磷渣过程为湍流运动,选择 standard $k-\varepsilon$ 方程,湍流动能方程和湍流动能耗散率方程分别表示为式(3)和式(4)。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k k)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k - \rho \varepsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + G_{\varepsilon l} \frac{\varepsilon}{k} G_k - G_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式中: k 为质量流体的湍动能, m^2/s^2 ; μ_t 为湍流涡黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; σ_k 为湍流 Prandtl 数,无量纲; G_k 为湍

表 1 液态磷渣和液态钢渣对比表
Table 1 Comparison table of liquid phosphorus slag and liquid steel slag

性质	液态磷渣	液态钢渣
温度范围	一般为 1 400 ~ 1 500 ℃	一般为 1 500 ~ 1 650 ℃
黏度	相对较高,随温度变化大	相对较低,流动性较好
密度	约 2.8 ~ 3.2 g/cm ³	约 3.0 ~ 3.8 g/cm ³
主要化学成分	以 SiO ₂ 、CaO、P ₂ O ₅ 为主,含少量 Al ₂ O ₃ 、Fe ₂ O ₃ 等	以 CaO、SiO ₂ 、FeO/Fe ₂ O ₃ 为主,含少量 MgO、Al ₂ O ₃ 等
比热容	1.4 ~ 1.7 kJ/(kg·K)	1.2 ~ 1.5 kJ/(kg·K)

动能生成项, $\text{W/kg} (\text{m}^2 \text{s}^{-3})$; ε 为湍动能耗散项, m^2/s^3 ; $C_{\varepsilon 1}$ 和 $C_{\varepsilon 2}$ 为经验常数, 无量纲。

凝固阶段涉及相变, 选择 Fluent 中的熔化凝固模型。同时, 也涉及到温度的变化, 需要满足能量守恒定律, 能量守恒方程表示为式(5)。

$$\frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} = -p \operatorname{div} U + \operatorname{div}(\lambda \nabla T) + \phi + S_h \quad (5)$$

式中: h 为比焓, J/kg ; p 为压强, Pa ; λ 为热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; ϕ 为黏性耗散项, W/m^3 ; S_h 能力源项, W/m^3 。

2.2 物理模型

建模时结合液态磷渣风碎粒化室实物, 基于精筒计算考虑, 截取入渣口和进气口方向构成的二维粒化室截面作为模拟的计算域, 如图1所示。其中, 粒化室左侧设有两处进口, 分别为液态磷渣流入口和射流入口, 均设为速度入口; 上方有出口, 设为压力出口。凝固阶段熔滴模型为直径 0.8 mm 的球体。

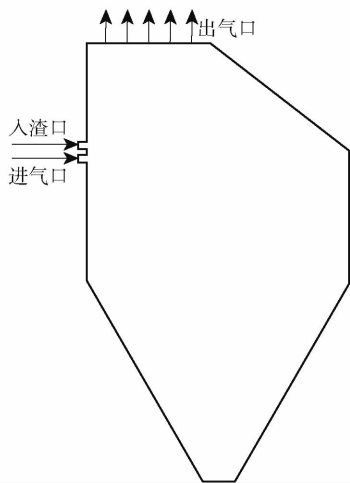


图1 计算域

Fig. 1 Calculates the domain

2.3 模拟目标

1) 通过分析粒化室内温度和磷渣相态的分布规律, 探究风速因素对粒化过程和出口平均温度的影响。

2) 根据已有的实际粒化室模型, 并结合粒化室温度和磷渣相态的分布, 研究喷嘴角度对粒化过程的影响。

3) 通过分析单个熔滴固相的变化, 以及监测点温度的变化, 研究熔滴的凝固规律。

3 粒化阶段影响因素

3.1 风速因素分析

为便于与已有研究进行比较, 参考文献[12], 选择气体速度分别为 100 m/s 和 60 m/s 。图2所示为喷嘴角度 0° 、进风时间 1 s 时, 射流速度分别为 60 m/s 和 100 m/s 的空气冲击液态磷渣后粒化室内的流场分布迹线图。对比分析得到: 风速为 60 m/s 时, 气流低速冲击液态磷渣后, 仅在进渣口的斜上方和下方产生明显的涡流; 风速为 100 m/s 时, 气流高速冲击液态钢渣, 室内气体流动性强, 整个粒化室空间内形成多个较为明显的涡流, 气体与磷渣之间的热交换更加充分。

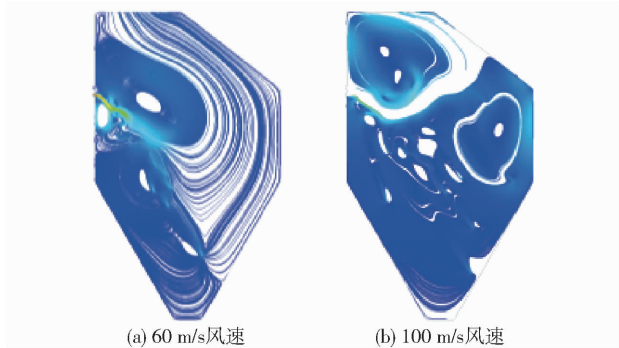


图2 粒化室内流场迹线分布图

Fig. 2 Plot of flow field traces in the granulation room

图3和图4分别为粒化室在进风 0.6 s 、 0.8 s 、 1.0 s 时内部温度场和磷渣相的分布图。由图3分析可知, 为探究风速因素的影响规律, 当喷嘴角度为 0° 时, 在 0.6 s 、 0.8 s 、 1.0 s 时, 不同进风速度下的粒化室内温度和磷渣相分布分别如图3和图4所示。由图3分析可知, 0.8 s 之前无论风速为 60 m/s 还是 100 m/s , 对液态磷渣流的影响都较小, 温度场的分布较为接近, 这是由于初期热量主要通过热对流从磷渣中转移到周围空气中^[17], 风速大小对温度的影响有限; 0.8 s 之后温度分布出现较大差别, 风速为 100 m/s 时, 粒化室内空气流动性对于热量扩散速度的影响明显强于 60 m/s , 此时, 热量的扩散方式主要为高温气体向低温气体传热。同时, 结合图2的流场分析, 在 1 s 时粒化室内形成多个明显涡流。

由图4分析可知, 粒化初期, 液态磷渣集中在入渣口。随后, 在空气的冲击作用下破碎成为小液滴, 并在粒化室内呈平抛运动。当风速为 100 m/s 时,

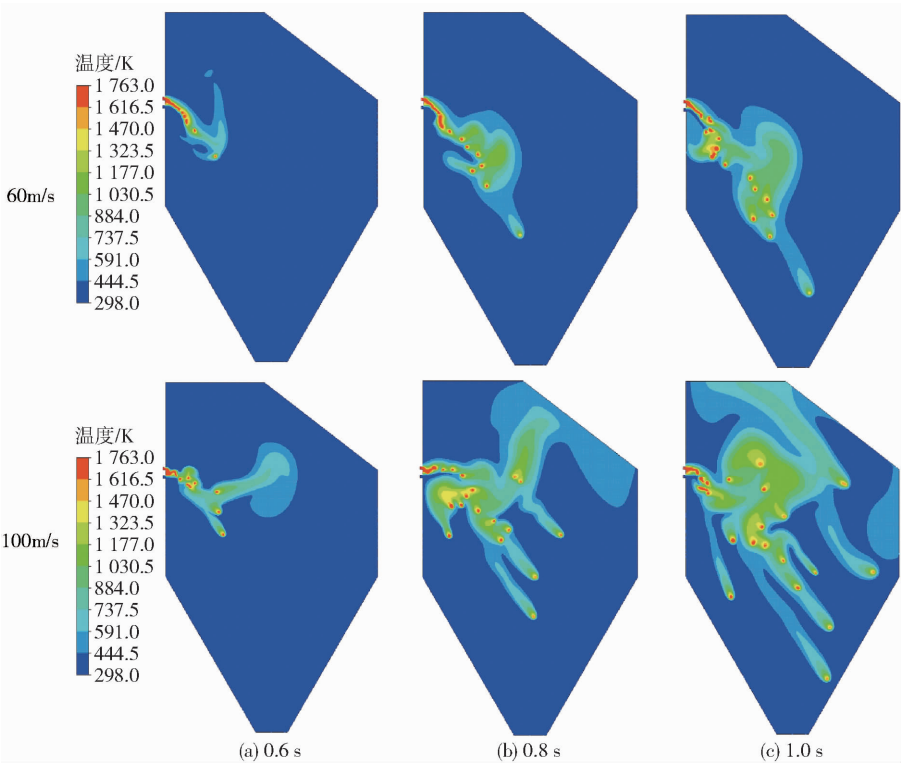


图 3 粒化室内温度分布

Fig. 3 Temperature field distribution map in the granulation room

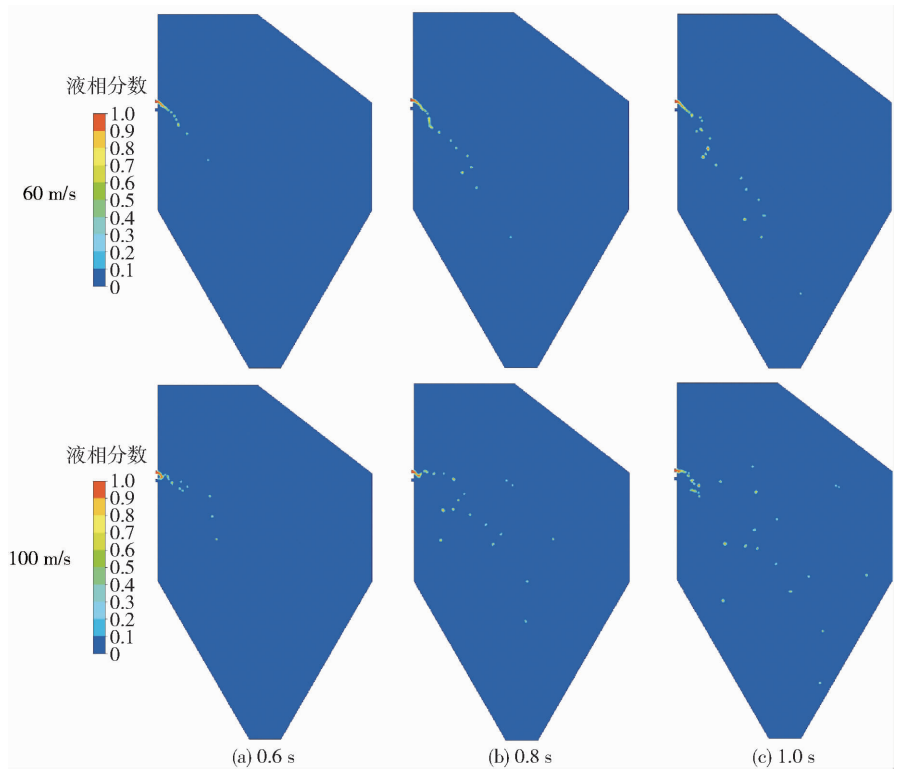


图 4 粒化室内磷渣相态分布

Fig. 4 Phase distribution diagram of phosphorus slag in the granulation room

小液滴在粒化室内的分布范围更广泛。这是因为风速越大,小液滴获得的初动能越大,能够飞行的距离更远,粒化室的空间利用更加充分。在 1 s 时,100 m/s 下小液滴临近碰壁,而 60 m/s 下小液滴仍在换热冷却。分析结果表明,风速越大时,粒化室内空气流动性越强,渣粒的散布范围更加广泛,粒化室空间的利用更加合理。该结论与刘源洞等^[12]模拟风碎工艺处理液态钢渣时的结论相吻合。

3.2 喷嘴角度分析

参照文献[17],选择喷嘴与水平面夹角分别为 0°、30°、60°进行分析。图 5 所示为 1 s 时不同喷嘴角度下粒化室内温度场的分布。图 5 所示为 1 s 时,

风速为 100 m/s 条件下不同喷嘴角度对应的粒化室内温度分布情况。分析得到:当喷嘴与水平面的夹角为 0°时,磷渣流明显向下运动,喷嘴喷出的射流阻挡作用不明显,渣粒在空中换热时间短,渣粒的凝固过程受影响;当喷嘴与水平面夹角为 30°时,喷出的射流抵消了磷渣流向下运动的趋势,使得破碎后的渣粒能够在空中进行较长时间的换热冷却,落地时间更长,但是,会有部分磷渣率先碰到侧壁面;当喷嘴与水平面夹角为 60°时,喷出的高速射流对磷渣流阻挡作用明显,使其在初期时堆积在进气口上方,同时,图 6(粒化室内磷渣的相态分布图)显示,由于粒化室结构的限制,部分渣粒向出气口飞出。

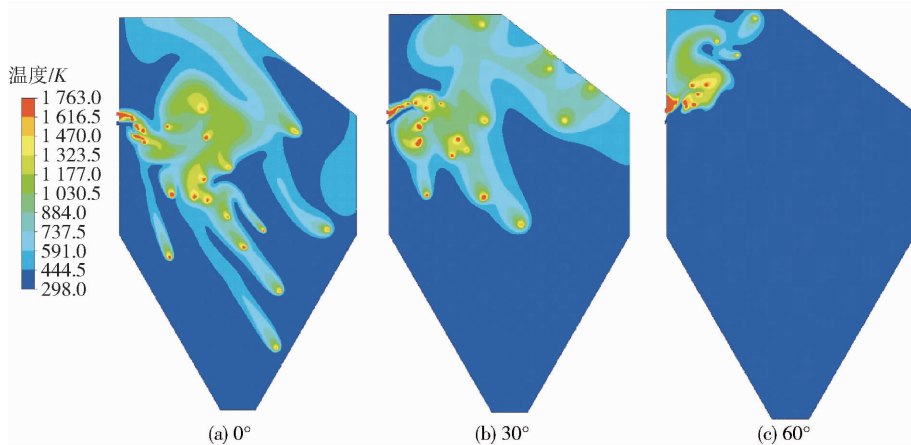


图 5 不同喷嘴角度下粒化室内温度场分布

Fig. 5 Distribution of temperature field in the granulation room under different nozzle angles

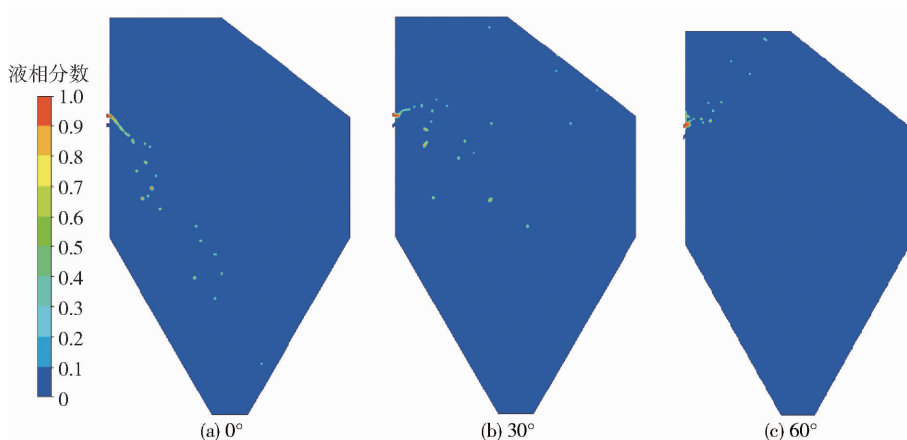


图 6 不同喷嘴角度下粒化室内磷渣相态分布

Fig. 6 Distribution of phosphorus slag in the granulation room under different nozzle angles

3.3 出口平均温度分析

风碎法处理液态磷渣的一个主要目的是回收并

利用产生的余热,关键指标在于出口热空气温度的大小^[18]。图 7 所示喷嘴角度为 30°时,不同风速下

出口平均温度随时间的变化。由图可知,在 0~0.6 s 的粒化初始阶段,液态磷渣与空气间的热量传递以热对流和热辐射为主。由于此阶段热量尚未发生大范围扩散,不同风速条件下的出口平均温度差异较小。在 0.6~1 s 内,随着环境气体温度的快速上升,传热方式转变为高温空气向低温空气传递热量,热交换速率随之加快,出口平均温度因此快速升高。并且当风速为 100 m/s 时,对应的出口平均温度为 681 K,高于风速为 60 m/s 时的出口平均温度。因此,热空气含有的热量更高,余热回收环节能够利用的热能也就更多。

4 凝固阶段换热规律

当风速为 100 m/s 时,熔滴凝固过程中液相分数变化如图 8 所示。液态渣滴的凝固首先发生在迎风侧,然后逐步由表面向中心进行。0.1 s 时迎风面最先凝固形成一定厚度的固相,此时背风处刚开始

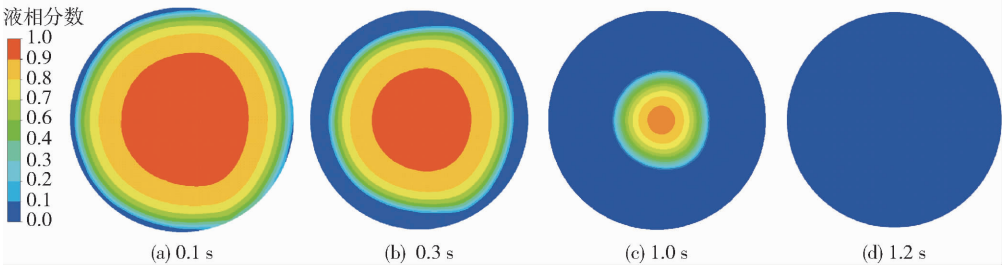


图 8 液相分布图
Fig. 8 Fluid phase distribution diagram

碰壁要求;1.2 s 时熔滴已经完全凝固形成渣粒。
设立如图 9 所示的熔滴局部温度监测点,分析磷渣熔滴凝固过程中不同点位的温度变化规律。监测点 1#~4# 分别为正面迎风点、上侧迎风点、背风点和中心点。四个监测点温度随时间的变化如图 10 所示。

图 10 为熔滴监测点的温度变化曲线。由图可知:熔滴正面迎风点 1# 的温度最低,因其与空气热交换充分,凝固速度较快;上侧迎风点 2# 的温度高于正面迎风点 1#。图中背风点的温度曲线斜率小于迎风点,表明单位时间内背风点的温度降幅小于迎风点,因此背风点 3# 的凝固速度较两处迎风点(1#和 2#)更慢。中心点 4 受潜热释放影响,温度降低速率最慢。由于各点的凝固速度不同,熔滴的凝固过程不是均匀进行的。

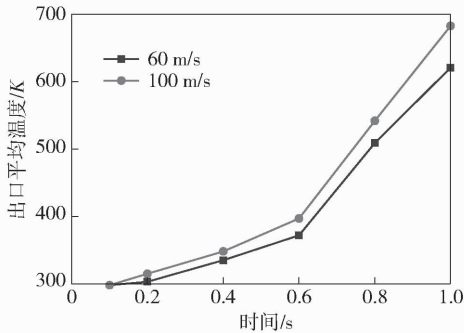


图 7 不同风速下出口平均温度的变化
Fig. 7 The variation of the average outlet temperature under different wind speeds

凝固;0.3 s 时熔滴表面液相分数为 0,已经凝固形成渣壳。同时,熔滴液相分数越来越小,固相分数逐渐增加;1.0 s 时渣粒的渣壳越来越厚,结合图 3 粒化阶段粒化室内温度场的分布图也可以看出,1 s 时即将碰壁的渣粒表面温度已经达到固相线以下,满足

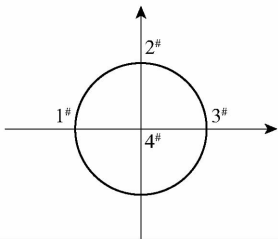


图 9 温度监测点示意图
Fig. 9 Schematic diagram of the temperature monitoring point

5 结论

针对水碎法处理磷渣存在的无法回收余热且产生的渣粒容易粘连的缺点,本研究提出采用风碎法处理液态磷渣;研究基于 FLUENT 软件以实际粒化室进行模拟,系统分析了风碎工艺的影响因素以及

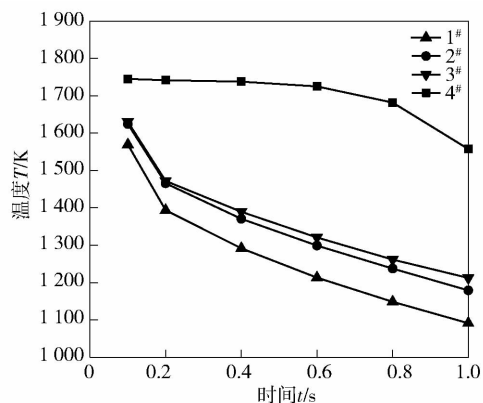


图10 监测点温度随时间的变化

Fig.10 Temperature change of the monitoring point over time

渣粒的凝固换热规律,得到以下主要结论。

1) 研究表明,相对于 60 m/s 的进口风速,100 m/s 风速能显著提升磷渣的换热效率,使粒化室内温度场分布更趋均匀,提高渣粒在粒化室内的扩散速度,扩大分布范围,可有效缓解渣粒粘连问题,从而更充分利用粒化室空间;同时,实际粒化室结构会限制喷嘴的安装角度,为了保证渣粒不会从出气口飞出,建议选取喷嘴与水平方向的夹角为 30°。

2) 当风速为 100 m/s,喷嘴与水平面夹角为 30°时,粒化室出口平均温度最高,此时热空气含有的热量更多,具有极高余热回收潜力,能实现能源的高效利用。

3) 熔滴的凝固过程是不均匀进行的,凝固率先发生在迎风一侧,迎风侧温度下降最快,且形成的固相厚度大于背风侧;同时,渣粒在 1 s 时表面已经凝固形成渣壳,满足碰壁要求。

4) 受理论分析的限制,本研究简化了模型并进行了部分假设,未来需要进一步结合工业实际,设计合理参数进行更精确的数值模拟。

[参考文献]

- [1] 孙成,郑峰伟,任园园,等. 黄磷渣资源化利用研究[J]. 现代化工, 2017, 37(8): 28-31.
SUN C, ZHENG F W, REN Y Y, et al. Research on utilization of yellow phosphorus slag[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(8): 28-31.
- [2] 孙道胜,周婷婷,王爱国,等. 掺有磷渣的水泥基材料研究现状与分析[J]. 材料导报, 2014, 28(13): 96-100.
SUN D S, ZHOU T T, WANG A G, et al. Research status and analysis of cement-based materials mixed with phosphorus slag[J]. Material Guide, 2014, 28(13): 96-100.

- [3] 刘长银,李世武,沈卫国,等. 磷渣综合利用及其在路面基层稳定水泥中的应用[J]. 建材世界, 2018, 39(3): 32-37.
LIU C Y, LI S W, SHEN W G, et al. Comprehensive utilization of phosphorus slag and its application in road base stabilizing cement[J]. Building Materials World, 2018, 39(3): 32-37.
- [4] 王冬冬,付善春. 磷渣改性沥青混合料的综合利用研究[J]. 矿产综合利用, 2022(4): 169-174.
WANG D D, FU S C. Study on comprehensive utilization of phosphorus slag modified asphalt mixture[J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2022(4): 169-174.
- [5] 石东升,王安. 矿渣细骨料混凝土孔隙结构对抗压强度的影响[J]. 混凝土, 2016(3): 80-83.
SHI D S, WANG A. Effect of slag fine aggregate concrete pore structure on compressive strength[J]. Concrete, 2016(3): 80-83.
- [6] 陈丹,程麟,冯皓,等. 利用高掺量磷渣煅烧优质水泥熟料的研究[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(3): 692-697.
CHEN D, CHENG L, FENG H, et al. Study on calcination of quality cement clinker by high addition phosphorus slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(3): 692-697.
- [7] 娄建新,杨建永,张裕显等. 磷渣粉对透水混凝土的影响试验研究[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 209-212.
LOU J X, YANG J Y, ZHANG Y X, et al. Experimental study on influence of phosphorus slag powder on pervious concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 209-212.
- [8] 张敏,马倩敏,郭荣鑫,等. 磷渣-水泥复合及碱磷渣胶凝材料力学性能实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(2): 376-382, 401.
ZHANG M, MA Q M, GUO R X, et al. Mechanical Properties of Phosphorus Slag-Portland Cement Composite and Alkali Phosphorus Slag Cementitious Materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2): 376-382, 401.
- [9] 胡祥东,何苗,郭英. 高温黄磷渣颗粒在余热锅炉内传热特性的模拟与实验研究[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(1): 31-35.
HU X D, HE M, GUO Y. Simulation and test of heat transfer characteristics of high temperature yellow phosphorus slag particles in waste heat boiler[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(1): 31-35.
- [10] 李平. 钢渣处理余热回收技术[J]. 山东工业技术, 2018(7): 62.
- [11] 康月,刘超,张玉柱,等. 气淬法粒化高炉渣实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 212-216.
KANG Yue, LIU C, ZHANG Y Z, et al. Experimental Study on Granulation of Blast Furnace Slag by Gas Quenching[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(2): 212-216.
- [12] 刘源洞,史晋铭,马国军,等. 基于 CFD 的钢渣风淬工艺参数分析与设计[J]. 炼钢, 2021, 37(4): 74-80.
LIU Y J, SHI J M, MA G J, et al. Parameter analysis and design of steel-slag air quenching based on CFD[J]. Steelmaking,

- 2021, 37(4): 74–80.
- [13] 范一鸣, 王景甫. 气淬高温熔渣颗粒运动和换热特性的数值分析[J]. 过程工程学报, 2019, 19(4): 685–692.
- FAN Y M, WANG J F. Numerical analysis on dynamics and heat transfer progress of a granulated molten slag particle by gas[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(4): 685–692.
- [14] 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.
- 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.
- [15] TAN Y, ZHU X, HE X, et al. Granulation characteristics of molten blast furnace slag by hybrid centrifugal-air blast technique [J]. Powder Technology, 2018, 323.
- [16] WANG L, ZHANG Y, LONG Y. Numerical investigation of breakup process of molten blast furnace slag through air quenching dry granulation technique [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28: 10–18.
- [17] 史晋铭. 钢渣风淬工艺的换热规律研究及工艺线改进[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2022: 31–32.
- SHI J M. Study on heat transfer law of steel slag wind quenching process and improvement of process line [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2022: 31–32.
- [18] 陈莹. 高温钢渣余热回收系统的数值模拟研究[D]. 山东: 山东大学, 2014: 46–47.
- CHEN Y. Numerical simulation study of waste heat recovery system of high temperature steel slag [D]. Shandong: Shandong University, 2014: 46–47.

Numerical simulation of the air quenching process of liquid phosphorus slag

XU Xuepeng^{1,2}, HUANG Fuchuan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530000, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Petrochemical Resources Processing and Process Strengthening Technology, Nanning 530000, China)

Abstract: In view of the disadvantages of water quenching treatment of liquid phosphorus slag in industrial production of yellow phosphorus at present, the wind quenching method is used to treat liquid phosphorus slag and the numerical simulation of the wind quenching process is carried out. Based on the FLUENT simulation method, a finite element simulation model was established to simulate the process of liquid phosphorus slag treated by wind quenching technology, and the influencing factors of wind quenching process and the solidification heat transfer law of slag particles were analyzed. The results show that when the air velocity is relatively high, the diffusion speed of slag particles is fast, the temperature distribution in the granulation chamber is uniform, and the layout of the granulation chamber is more reasonably utilized. Moreover, the average outlet temperature is higher, the energy contained in the hot air is greater, and more energy can be utilized in the heat recovery stage. When the angle of the nozzle in the granulation chamber with the horizontal plane is 30° , the air quenching and granulation effect is better than that at 0° ; when the angle is 60° , it is restricted by the structure of the granulation chamber, leading to slag particles flying out from the air outlet. The solidification process of liquid phosphorus slag droplets proceeds unevenly, and the thickness of the formed slag shell is also uneven. It provides a theoretical basis and guidance for optimizing the treatment of liquid phosphorus slag by air quenching and realizing the recovery of air quenching waste heat.

Key words: liquid phosphorus slag; wind quenching method; numerical simulation; air velocity; nozzle angle; waste heat recovery