

文章编号:1674-9669(2024)05-0650-10 DOI:10.13264/j.cnki.ysjskx.2024.05.003

引文格式:戴鹏飞,张斌,黎显俊,等.高温铜渣风淬造粒实验研究及铜渣液滴冷凝过程的数值模拟[J].有色金属科学与工程,2024,15(5):650-659.

## 高温铜渣风淬造粒实验研究及铜渣液滴冷凝过程的数值模拟

戴鹏飞<sup>1,2</sup>, 张斌<sup>\*1</sup>, 黎显俊<sup>1</sup>, 尹一鸣<sup>1</sup>, 吴怡康<sup>1</sup>, 李明周<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学冶金工程学院,江西 赣州 341000; 2. 中南大学能源科学与工程学院,长沙 410083)

**摘要:**为了探究高温铜渣风淬造粒的可行性和分析液体黏度对风淬造粒效果的影响,搭建了风淬造粒实验台,对水、机油和液态石蜡的风淬造粒效果进行对比,得出随着液体黏度的升高,液滴形状更加接近球形且尺寸分布更加均匀;冷凝后的石蜡颗粒粒径分布较窄,有利于对高温颗粒进行二次余热回收。使用流体体积函数模型(VOF)和凝固熔化模型和辐射模型(DO)对单个铜渣液滴的冷凝过程进行了数值模拟。结果表明,初始温度为1 355 K,直径为2 mm的铜渣液滴被300 K室温空气冷却时,液滴表面能够快速凝固形成坯壳,经过1.62 s后铜渣液滴完全凝固。冷却过程中迎风面冷却速度较快而背风面较慢,导致液滴凝固不均匀。气流速度越大,对铜渣液滴的冷却能力越强,液滴的冷凝越快;液滴初始粒径越小,换热效率越高,凝固时间越短。

**关键词:**铜渣;风淬造粒;数值模拟;余热回收;凝固融化

中图分类号:TF09;X756 文献标志码:A

## Experimental study on air-quenching granulation of high-temperature copper slag and numerical simulation of cooling and solidification process of copper slag droplet

DAI Pengfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Bin<sup>\*1</sup>, LI Xianjun<sup>1</sup>, YIN Yiming<sup>1</sup>, WU Yikang<sup>1</sup>, LI Mingzhou<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of air-quenching high-temperature copper slag and investigate the influence of liquid viscosity on granulation, an experimental device was built to compare the granulation effectiveness of water, machine oil and liquid wax. The results show that the shape of liquid drops is closer to the sphere, and size distribution is more uniform with increasing liquid viscosity. Solidified wax granular has a narrow size distribution, which is beneficial for secondary the recovery of waste heat. Simulation of cooling and solidification of a single high-temperature copper slag droplet was carried out by using fluid volume function models (VOF), solidification melting model and radiation model (DO). The results indicate that the copper slag droplet with a diameter of 2 mm and temperature of 1 355 K can form a shell quickly and solidify completely after 1.62 s when cooled by air at room temperature of 300 K. The cooling rate at the windward side of the droplet is higher than the leeward side during the cooling process, which will result in uneven solidification. High-velocity

收稿日期:2023-07-31;修回日期:2023-10-13

基金项目:江西省科技厅自然科学基金项目(2021BAB204026);江西省研究生优质课程和案例建设项目(赣教研字[2021]17号);大学生创新创业训练计划项目(DC2023-010)

通信作者:张斌(1983— ),博士,讲师,主要从事冶金过程及设备的数值模拟及节能技术开发研究。E-mail:zhangbin@jxust.edu.cn

airflow has a stronger cooling ability, which can lead to a faster solidification rate of the droplet. Heat transfer efficiency will be higher, and solidification time will be shortened with a decrease in initial droplet size.

**Keywords:** copper slag; air-quenching granulation; numerical simulation; waste heat recovery; solidification and melting

我国是世界上最大的精铜生产和消费的国家,其中通过火法冶炼生产的精铜占总精铜产量的80%以上。每生产1吨精铜可产生2.2吨温度约为1 200 °C的铜渣<sup>[1]</sup>。作为铜冶炼过程的主要副产品,高温铜渣蕴含丰富的余热资源。传统的铜渣处理方法水淬法不仅无法回收余热,还会造成水资源浪费和环境污染<sup>[2]</sup>。因此,回收铜渣余热对于节能减排和降低生产成本具有重大意义。近年来,众多学者对干式熔渣粒化技术和余热回收工艺进行了大量研究<sup>[3-6]</sup>。纪慧敏等<sup>[7]</sup>以离心粒化器为研究对象,研究了离心粒化器的结构、表面粗糙度、直径等因素对粒化效果的影响,结果表明粒化器直径越大,粒化效率越高。邱勇军等<sup>[8]</sup>以高温炉渣的空冷相变过程为研究对象,通过三维数值模拟,揭示了熔渣相变过程的换热特性,讨论了颗粒直径、空气流速等因素对凝固时间的影响。王丽丽等<sup>[9]</sup>对液态熔渣的凝固过程进行了数值计算,研究了颗粒的凝固过程、相界面移动速度、颗粒表面及内部温度分布。王子兵等<sup>[10]</sup>以高炉渣为原料,以空气为气淬介质进行高温渣粒余热回收试验,研究了调质剂、气淬压力和喷嘴结构对系统回收效率的影响。杜宇航等<sup>[11]</sup>对高炉渣液滴二次破碎过程进行数值模拟,结果表明高炉渣液滴表面压力的波动可导致液滴破碎,传热过程对破碎过程的影响可忽略不计。PENG等<sup>[12]</sup>模拟研究了熔渣液滴在湿空气中的固化特性,结果表明湿度对冷却温度分布具有显著影响。

目前干法熔渣余热回收试验大多以高炉渣为研究对象,针对铜渣的研究较为缺乏。此外,高温液态铜渣风淬造粒效果以及粒化后高温液滴的冷凝规律尚不明确,导致风淬法回收铜渣余热还无法实现工业应用。本文采用实验方法对风淬造粒的可行性和粒化后颗粒的尺寸分布特性进行研究,并针对高温铜渣液滴的冷却凝固过程进行数值模拟,从而为实现铜渣余热回收技术的工业应用提供理论基础。

## 1 实验部分

风淬造粒法采用高速空气将液态熔渣流股吹成小液滴,液态熔渣与高速气流接触后,在摩擦力和表

面张力的作用下首先会破碎为液滴、液丝及不规则液体团块,而后在气流的作用下进一步破碎形成更小的液滴。破碎后的高温熔渣液滴会被空气冷却并凝固成为固相颗粒。冷空气被加热后可用于制造蒸汽发电或烘干物料,高温固相颗粒需在固定床或流化床内进行二次余热回收,回收装置如图1<sup>[13]</sup>所示。风淬法相对于离心粒化法、转鼓法等造粒方法不需要旋转设备,运行更加稳定,可靠性更高,且易于实现炉渣均匀粒化<sup>[14-15]</sup>。为了探究熔融液体风淬粒化的可行性以及液滴固化成粒效果,搭建了风淬造粒实验台,对不同黏度工质的粒化效果进行对比分析。

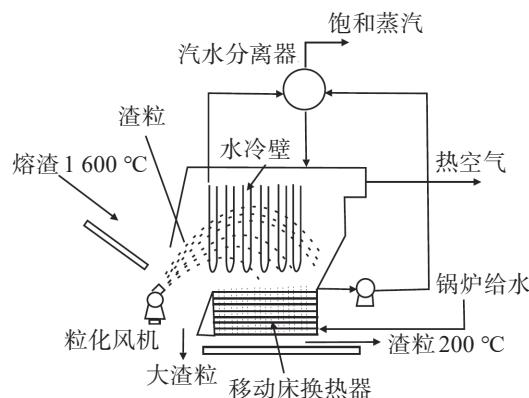


图1 风淬钢渣热能回收装置<sup>[13]</sup>

Fig.1 Heat recovery device of air-quenching steel slag<sup>[13]</sup>

### 1.1 实验装置

实验装置由风嘴、针管、支架、标尺、吸光布、高速摄影仪组成,实验台结构及实验原理如图2所示。液体从竖直的针管中稳定流出形成流股。风嘴固定在针管出口下方,与水平面成30°夹角。高速空气通过风嘴流出并将液体流股吹成液滴。标尺和针管的中心轴线位于同一竖直平面上,以便于测量液滴尺寸。

### 1.2 实验过程

将风速调节至10 m/s并保持不变。将50 mL液体装入针管中,在针管的活塞上放置不同重量的砝码,使3种液体在4 s内流尽,以保证不同黏度液体具有相同的流出速度。从针管中流出的液体流股被高速气流冲击和剪切,最终被破碎成小液滴,如图3所示。风淬过程中使用高速摄影仪记录液体的粒化过程和液滴形态的变化。实验工艺的物性参数如表1所列。

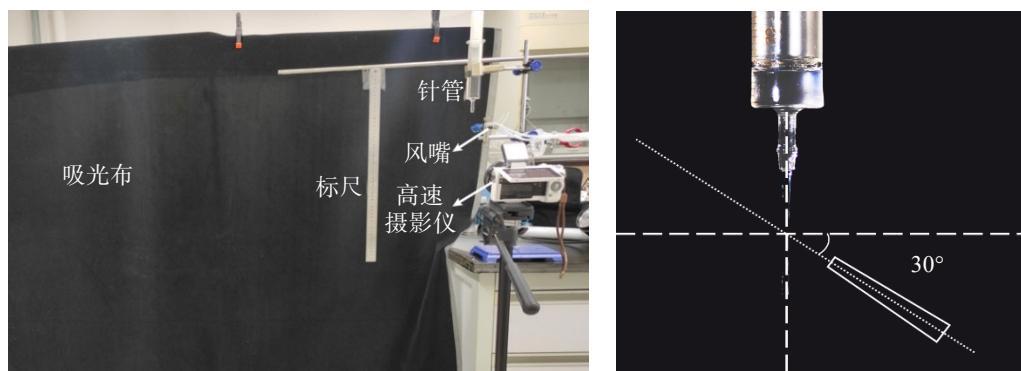


图2 风淬造粒实验台结构及实验原理

Fig.2 Experimental device of air-quenching granulation and experimental principle

表1 实验工质的物性参数

Table 1 Physical properties of experimental fluid

实验工质	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	黏度/ (kg/m/s)
常温水	$1.00 \times 10^3$	0.000 89
机油	$0.91 \times 10^3$	0.008 60
石蜡	$0.86 \times 10^3$	0.003 30



图3 液体流股形状

Fig.3 Shape of fluid stream

### 1.3 实验结果分析

#### 1.3.1 不同黏度液体粒化效果的对比

当常温水从针管中流出,流股被高速气流吹散形成小液滴,粒化效果如图4所示。

从图4中可以看出,大部分液滴为不规则椭球形,如右图中用线条标出的液滴,仅小部分液滴接近球形。液滴尺寸分布并不均匀,最大液滴直径约为5 mm。



图4 水的风淬造粒效果

Fig.4 Results of water granulation through air-quenching

对高黏度机油进行风淬造粒,粒化效果如图5所示。从图5中可以看出,机油从针管流出后形成的流股被气流冲击破碎,最初形成液滴及丝状物,随后在表面张力作用下不规则液滴变为球形,最大直径约为3 mm。对比图4可知风淬粒化后的机油液滴球形度更高。

使用高温液态石蜡进行风淬造粒,粒化效果如图6所示。从图6中可以看出,液态石蜡从针管中流出后形成的流股被高速气流冲击成为石蜡液滴,液滴最大直径约为2 mm。对比风淬造粒水和机油可看出石蜡液滴尺寸分布更加均匀,且形状大多呈球形。

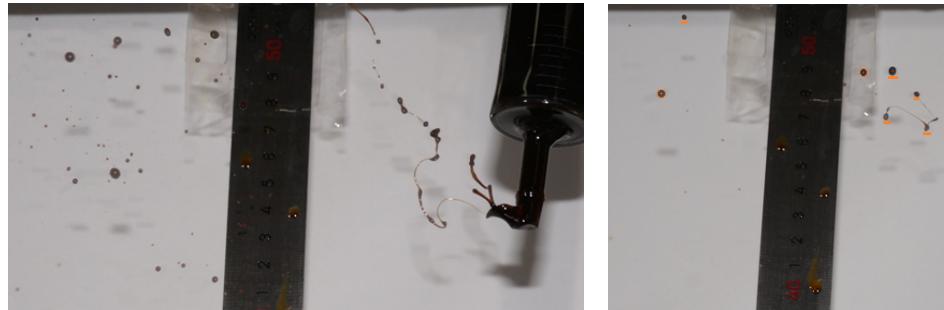


图 5 机油风淬粒化效果

Fig.5 Results of engine oil granulation through air-quenching



图 6 液态石蜡风淬粒化效果

Fig.6 Results of liquid wax granulation through air-quenching

由以上实验可以得出,不同黏度液体风淬粒化后的液滴直径及均匀性存在较大差异。随着黏度的升高,粒化后的液滴形状更加接近球状,尺寸更加均匀。这表明高黏度工质具有更优异的粒化效果。

### 1.3.2 石蜡液滴的冷凝粒化效果

液态石蜡被高速气流风淬为小液滴后,被空气冷却凝固为固相石蜡颗粒。通过电动筛分机将凝固的石蜡颗粒进行筛分并称重,得出 $<0.3\text{ mm}$ 的颗粒重量为 $1.327\text{ g}$ , $0.3\sim0.6\text{ mm}$ 的颗粒 $20.98\text{ g}$ , $0.6\sim0.9\text{ mm}$ 的颗粒 $17.679\text{ g}$ , $>0.9\text{ mm}$ 的颗粒 $1.552\text{ g}$ 。粒径分布如图 7 所示。

从图 7 可以看出,凝固后的石蜡颗粒直径主要分布在 $0.3\sim0.9\text{ mm}$ 之间,其中直径为 $0.3\sim0.6\text{ mm}$ 的颗粒占比较大。由此可以看出,高速气流能够实现熔融液态石蜡的粒化,得到的石蜡颗粒的粒径分布较窄,而尺寸均匀的颗粒二次余热回收效率更高<sup>[16]</sup>。

## 2 高温铜渣液滴冷凝过程数值模拟

采用实验方法难以直观地分析单个高温铜渣液滴的相变过程和热交换特征。数值模拟方法可以快速、准确地得出计算区域内温度、流速、浓度等多物理场分布信息,被广泛用于高温冶金过程

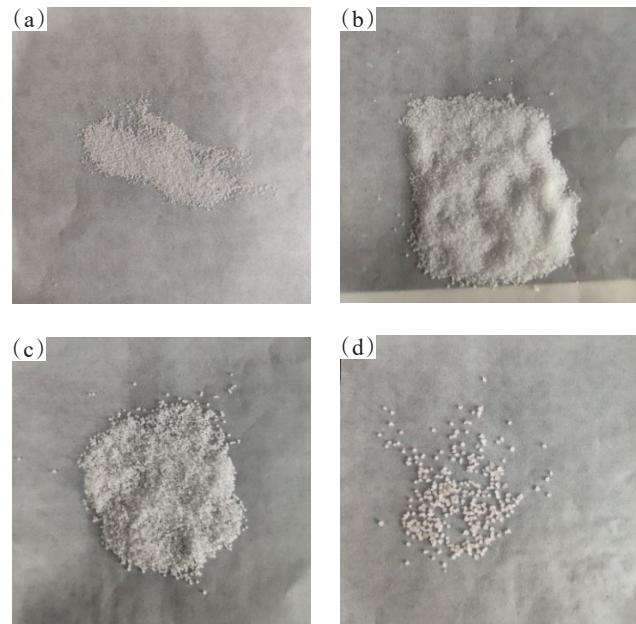


图 7 固相石蜡颗粒尺寸分布:(a)  $<0.3\text{ mm}$ ; (b)  $0.3\sim0.6\text{ mm}$ ; (c)  $0.6\sim0.9\text{ mm}$ ; (d)  $>0.9\text{ mm}$

Fig.7 Size distribution of solid wax granulation: (a)  $<0.3\text{ mm}$ ; (b)  $0.3\sim0.6\text{ mm}$ ; (c)  $0.6\sim0.9\text{ mm}$ ; (d)  $>0.9\text{ mm}$

参数优化和设备的开发<sup>[17-21]</sup>。本文通过数值模拟方法分析高温铜渣液滴冷却过程的温度及相变特性。

## 2.1 数学模型及边界条件

### 2.1.1 模型假设

1) 假设铜渣液滴已被高速气流破碎为球形液滴,冷却过程中液滴不再破碎且保持形状不变。

2) 根据文献实验数据<sup>[7,22]</sup>,冷却后的渣粒直径为0~4.8 mm,大部分渣粒直径分布在2~3 mm,因此假设液滴初始直径为2 mm。

3) 液滴冷却凝固过程中导热系数、比热容等物性参数保持不变。

4) 使用流体体积函数模型(VOF)、凝固熔化模型和辐射模型(DO)模拟单个铜渣液滴的冷凝过程。

### 2.1.2 数学模型

由于本文所研究的气—液两相流存在明显的相界面,故选用VOF多相流模型。气相和渣相的体积分数方程为<sup>[23]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{U}_i) = 0 \quad (1)$$

式(1)中: $\rho_i$ 为第*i*相的密度,kg/m<sup>3</sup>。 $\alpha_i$ 为第*i*相的体积分数。 $\tau$ 为时间,s。 $\vec{U}_i$ 是流场中第*i*相的流速,m/s。

流体相由相同的动量守恒方程描述,即Navier-Stokes方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho \vec{f}_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad (2)$$

式(2)中: $f$ 为单位质量流体所受到的质量力,N; $p$ 为压力,Pa; $\mu$ 是流体的动力黏度,Pa·s; $u_i, u_j$ 为速度*U*在*i,j*方向上的分量,m/s。采用标准*k-ε*双方程模型模拟湍流过程。

能量方程为:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial \tau} + \nabla \cdot [\vec{U} (\rho E + p)] = \nabla [k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_i h_i J_i + (\tau_{\text{eff}} \vec{U})] + S \quad (3)$$

式(3)中:*E*为各微元所具有的总能量,J/kg;*h<sub>i</sub>*为组分*i*的焓,J/kg;*J<sub>i</sub>*为组分*i*的扩散通量,W/m<sup>2</sup>;S为体积热源项,W/m<sup>3</sup>;*k<sub>eff</sub>*为有效导热系数,W/(m·K)。

由于铜渣具有较高的初始温度和较强的辐射能力,因此采用离散坐标辐射模型(DO模型)来计算辐射能。

$$E' = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

式(4)中:*E'*为辐射能,J;ε为黑度;σ为黑体辐射常数,σ=5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>);*A*为表面积,m<sup>2</sup>;*T<sub>1</sub>*为高温表面温度,K;*T<sub>2</sub>*为低温表面温度,K。

熔融铜渣液滴的冷却过程是一个相变过程,因此采用凝固熔化模型来求解熔融铜渣液滴冷凝过程。凝固熔化模型采用液相率( $\beta$ )表示体积中的液相比例。当 $\beta=0$ 表示处于固相区, $\beta=1$ 表示处于液相

区, $\beta$ 在0与1之间时为固液共存区,此时:

$$\beta = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad (5)$$

式(5)中:*T<sub>s</sub>*、*T<sub>l</sub>*分别为材料的固化温度和液化温度,K。

### 2.1.3 边界条件和初始条件

物性参数边界条件如表2所列。

表2 铜渣和空气物性参数

Table 2 Physical properties of copper slag and air

参数	数值
铜渣初始温度/K	1 355
铜渣黏度/(Pa·s)	0.5
铜渣密度/(kg/m <sup>3</sup> )	3 300
铜渣比热容/(J/kg/K)	1 100
铜渣导热系数/(W/m/K)	1.186
铜渣相变潜热/(J/kg)	200 000
铜渣与空气间的表面张力系数/(N/m)	0.35
铜渣分子量/(g/mol)	55
铜渣相变温度点/K	1 345
空气初始温度/K	300
空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.225
空气比热容/(J/kg/K)	1 006.43
空气导热系数/(W/m/K)	0.024 2
空气黏度/(Pa·s)	1.789 4×10 <sup>-5</sup>

使用ANSYS2020中的Geometry模块建立尺寸为3 mm×6 mm的二维轴对称几何模型,液滴直径为2 mm。对计算区域进行网格划分,空气流通区域采用矩形网格,网格尺寸为0.05 mm;铜渣液滴区域为0.02 mm的网格,网格总数为11 507,如图8所示。

左侧空气入口设置为速度入口边界条件,右侧出口设置为压力出口边界条件,铜渣液滴与空气的交界面设置为耦合壁面边界条件,其他边界设置为壁面边界条件。铜渣的初始温度设为1 355 K,空气的初始温度为300 K,初始时刻的温度分布和相分布如图9和图10所示。

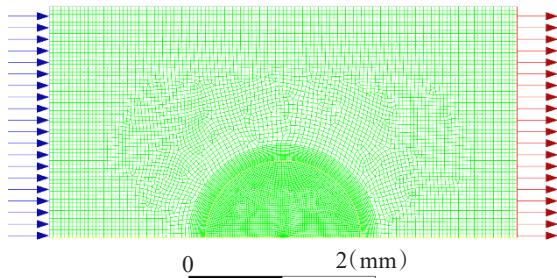


图 8 计算区域网格

Fig.8 Mesh of computational domain

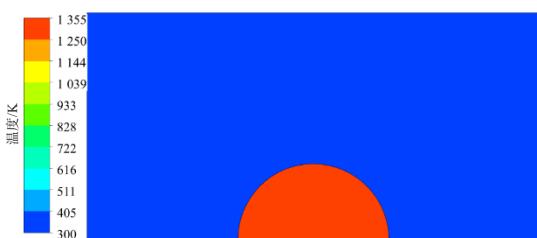


图 9 初始时刻的温度分布

Fig.9 Initial state of temperature distribution

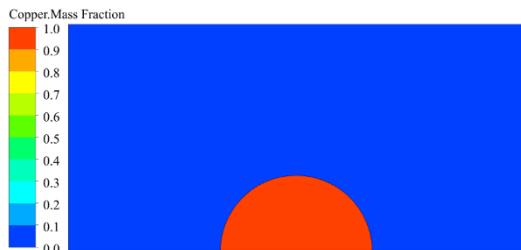


图 10 初始时刻的相分布

Fig.10 Initial state of phase diagram

#### 2.1.4 模型求解

使用 ANSYS2020 对建立的数学模型进行求解。压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法, 压力采用 PRESTO 离散格式, 动量和能量方程采用二阶迎风格式, 湍动能和耗散率采用一阶迎风格式, 亚松弛因子保持默认值。将每个时间步长的最大迭代次数设为 40, 时间步长设为 0.000 1 s, 时步数量设为 60 000 步。

#### 2.2 模拟结果分析

计算得出不同时刻铜渣液滴冷凝过程的速度、温度和相的分布。图 11 为 1 s 时颗粒外部空气流动区域的速度矢量图。从图 11 中可以看出, 初始速度为 10 m/s 的气流从左侧匀速吹入, 流通面积减小导致流速逐渐增大。液滴左侧迎风面气流速度高于背风面, 在液滴顶部空气流速达到最大 13 m/s。气流绕过液滴顶点后出现绕流脱体造成边界层分离, 并在液滴背风面形成了速度较小的回流涡旋。迎风面空

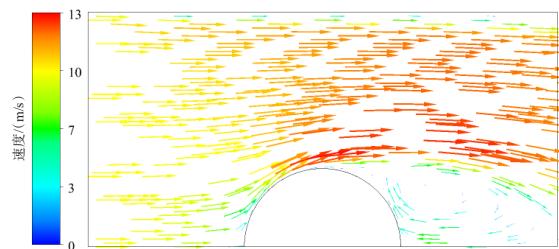


图 11 1 s 时空气流动区域速度矢量

Fig.11 Vector diagram of air flow domain at 1 s

气流速快且边界层较薄, 背风面回流区的风速较小。

根据空气横掠圆管换热系数关系式<sup>[24]</sup>:

$$Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3} \quad (6)$$

对流换热系数与气流速度的 0.466 次方成正比。因此, 分布不均匀的气流速度会导致液滴表面传热系数有较大差别。图 12 为不同时刻铜渣液滴内部和周围气流的温度分布云图。

从图 12 中可以看出, 随着冷空气流过铜渣液滴, 液滴内部的温度从外表面开始向液滴内部逐渐降低。流经颗粒的空气被加热至 545 K 以上, 可用于后续的余热利用。在 0.05 s 时, 铜渣液滴迎风面温度已低于凝固温度 1 345 K, 即液滴表面形成了固相外壳。随着液滴被不断冷却, 液相区域逐渐缩小而固相区域也随之扩大。1.62 s 时铜渣液滴的温度均低于 1 345 K, 表明液滴已经被完全冷却为固相颗粒。此外, 由于迎风面边界层较薄且气流速度更快, 对流换热效率更高, 液滴温度降低更快; 背风面绕流脱体且存在回流, 液滴的冷却速度较慢。

图 13 为不同时刻液滴表面和中心点温度变化曲线。从图 13 可以看出, 随着时间的推移, 铜渣液滴表面各点和中心温度逐渐降低, 但降低速率存在较大差异, 迎风点降温最快而中心点降温最慢。由于迎风点铜渣与冷空气最先接触, 温差最大, 且边界层最薄, 因此换热最为剧烈, 冷却速率最快。背风点的空气已经被加热至一定温度, 与铜渣的温差较小, 且液滴背风面存在回流区, 因此温度降低较慢。

不同时刻铜渣液滴的相分布云图如图 14 所示。从图 14 中可以看出, 0.05 s 时铜渣液滴迎风面已初步形成较薄的固相坯壳, 但液滴顶点右侧由于绕流脱体, 液滴部分表面还未冷凝。随着时间的推移, 铜渣液滴由外向内逐渐固化, 坯壳逐渐增厚。1.62 s 时液态铜渣已经完全凝固。由于迎风面空气流速较快, 温度最低, 对流换热强度大, 因此液滴迎风面最先固化。背风面主要依靠低速的回流空气带走铜渣颗粒

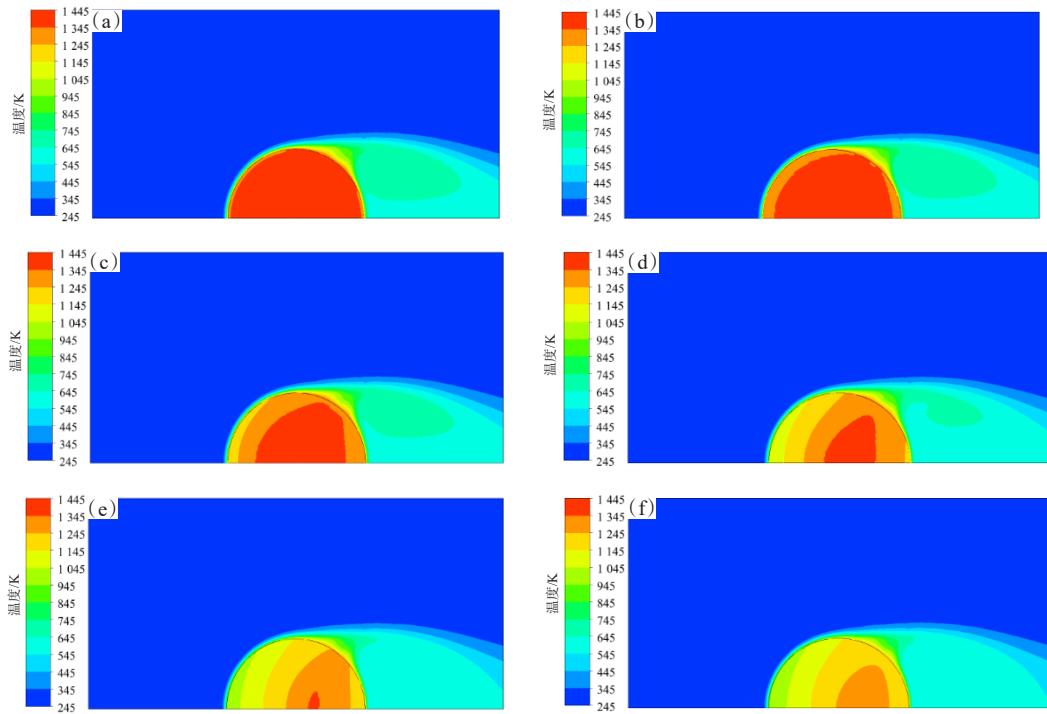


图12 不同时刻铜渣液滴内部和周围空气的温度分布云图:(a)0.05 s;(b)0.2 s;  
(c)0.5 s;(d)1.0 s;(e)1.5 s;(f)1.62 s

Fig.12 Cloud map of temperature distribution inside and around copper slag droplets at different times:  
(a)0.05 s;(b)0.2 s;(c)0.5 s;(d)1.0 s;(e)1.5 s;(f)1.62 s

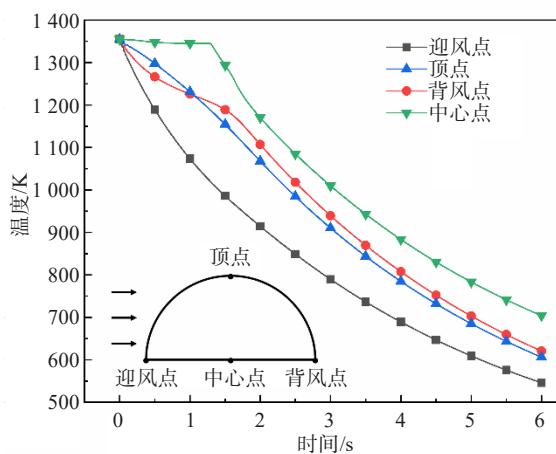


图13 不同时刻液滴表面和中心温度变化

Fig.13 Temperature variation on outer surface and center of copper slag droplet at different times

的热量,换热强度相对较小,固化最慢,即高温液态铜渣的凝固过程在空间上是不均匀的。

## 2.3 模拟结果讨论

### 2.3.1 气流速度对铜渣液滴冷凝的影响

模拟计算了直径为2 mm的铜渣液滴在气流速度分别为5、10 m/s和15 m/s条件下的冷却凝固过程。图15为1 s时铜渣液滴相分布云图。

从图15中可以看出,随着气流速度的增大,对流换热效率越高,液滴左侧迎风面固相区域逐渐变厚,整个液滴的固相区域占比增大。计算得出,气流速度分别为5、10、15 m/s时,铜渣颗粒的固相体积分数分别为70%、82%、90%。

图16为不同气流速度下铜渣液滴的固相体积分数变化曲线。从图16可以看出,随着气流速度增大,铜渣颗粒的固相体积分数显著提高。气流速度为5 m/s和15 m/s时,固相体积分数从0增加到60%所需时间分别为0.83 s、0.55 s,即冷凝时长缩短了约33%。随着气流速度的增大,铜渣液滴的完全凝固时间缩短。喷吹速率为5、10、15 m/s时,液滴完全凝固时间分别为1.97 s、1.62 s、1.41 s,表明气流速度越大,冷空气对铜渣颗粒的冷却能力越强,铜渣液滴的冷却速率越大。然而,持续增大大气流速度也会增大风机能耗,从而降低能源回收效率。

### 2.3.2 铜渣液滴直径对液滴固化的影响

液态铜渣在风淬造粒过程中会被高速空气破碎成小液滴。模拟计算了在气流速度为10 m/s时,铜渣液滴粒径d分别为1、2、3 mm时的冷凝过程。图17为1 s时铜渣液滴相分布云图。

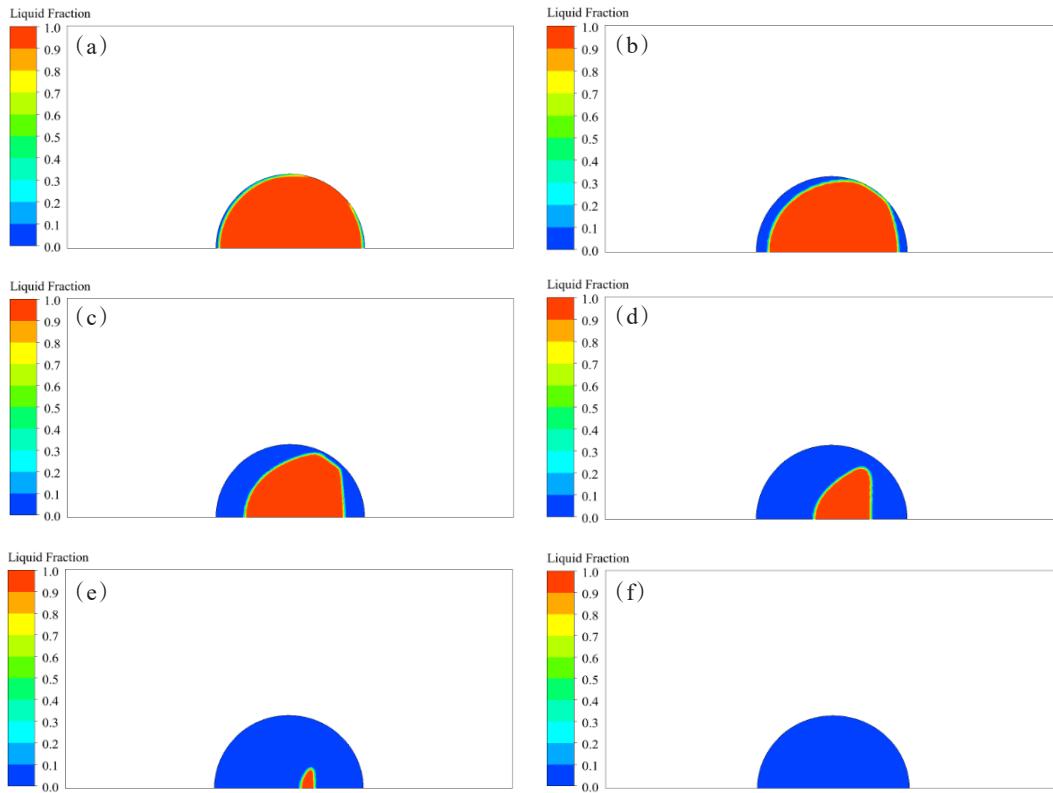


图 14 不同时刻铜渣液滴相分布云图:(a)0.05 s;(b)0.2 s;(c)0.5 s;(d)1.0 s;(e)1.5 s;(f)1.62 s

Fig.14 Phase distribution of slag drop at different times:(a)0.05 s;(b)0.2 s;(c)0.5 s;(d)1.0 s;(e)1.5 s;(f)1.62 s

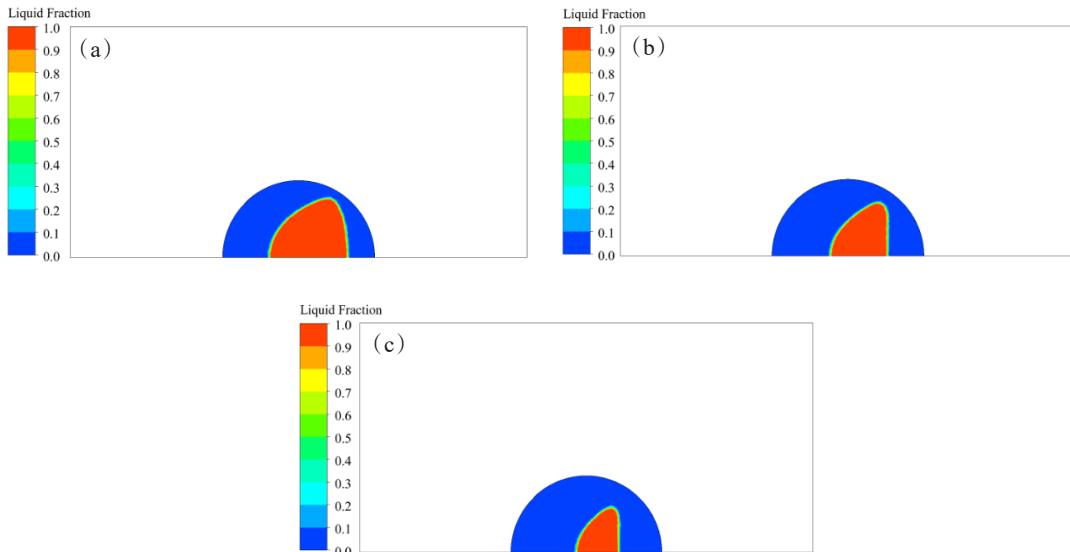


图 15 1 s 时不同气流速度下液滴相分布图:(a)5 m/s;(b)10 m/s;(c)15 m/s

Fig.15 Phase distribution of copper slag drop under different air flow rate at 1 s:(a)5 m/s;(b)10 m/s;(c)15 m/s

从图 17 可以看出, 同一冷却时间下, 粒径越小的铜渣颗粒的固相区域占比越大。初始直径分别为 1、2、3 mm 的铜渣液滴 1 s 时的固相体积分数分别为 100%、82%、54%。

不同直径铜渣液滴固相体积分数随时间变化曲线如图 18 所示。从图 18 可以看出, 粒径为 1、2、

3 mm 铜渣液滴的完全凝固时间分别为 0.52 s、1.62 s、3.05 s。即随着铜渣液滴初始粒径的增大, 完全凝固时间显著延长。粒径越大的铜渣液滴质量越大, 所携带的热量也越多, 且粒径的增大会导致比表面积减小, 从而降低了对流换热效率, 因此铜渣液滴粒径越小, 凝固时间越短。

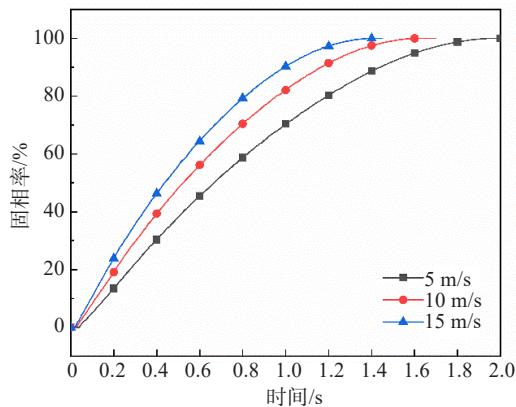


图16 不同气流速度下铜渣液滴固相体积分数随时间的变化  
Fig.16 Solid fraction variation of copper slag droplet at different times

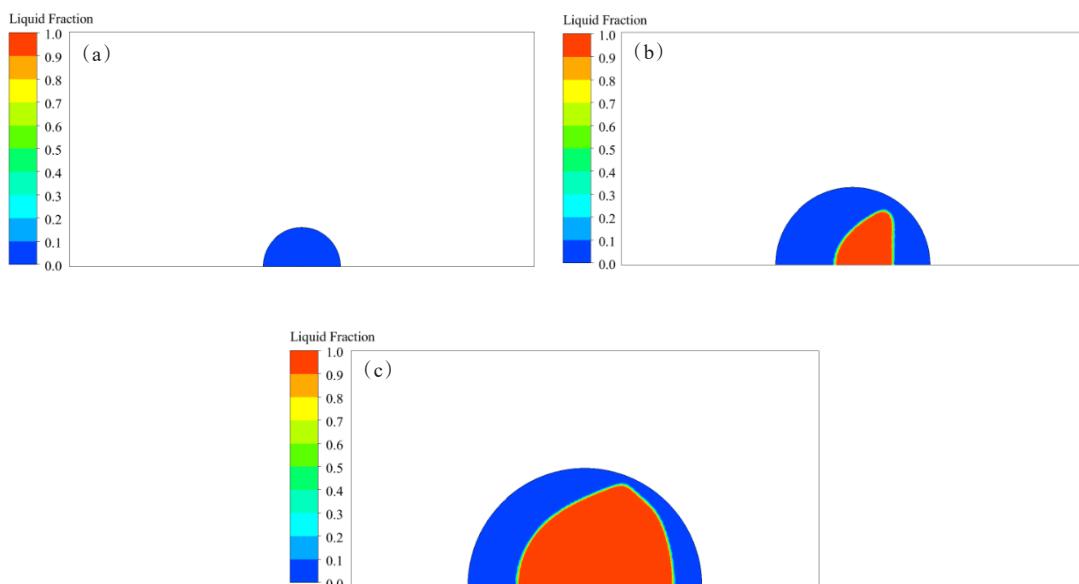


图17 1 s时不同粒径下铜渣液滴相分布图:(a) $d=1\text{ mm}$ ;(b) $d=2\text{ mm}$ ;(c) $d=3\text{ mm}$   
Fig.17 Phase distribution of copper slag drop under different initial size at 1s:  
(a) $d=1\text{ mm}$ ;(b) $d=2\text{ mm}$ ;(c) $d=3\text{ mm}$

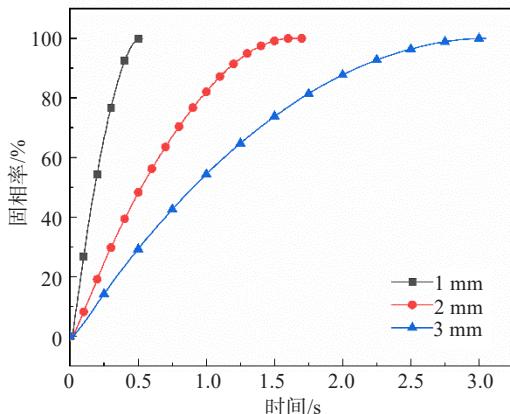


图18 不同粒径下铜渣颗粒固相率随时间的变化  
Fig.18 Solid fraction variation of copper slag drop under different initial size

### 3 结 论

1) 搭建了风淬造粒实验台,对不同黏度工质的粒化效果进行对比分析,得出随着液体黏度升高,液滴形状更加接近球状,液滴尺寸分布越均匀;粒化后石蜡颗粒粒径分布较窄,有利于对高温颗粒进行二次余热回收。

2) 建立了包括VOF、凝固熔化和辐射模型的铜渣液滴冷却凝固过程数学模型。模拟得出铜渣液滴迎风面相对背风面的风速更大,气体温度更低,对流换热效率更高,凝固更快。风速为10 m/s的情况下,粒径为2 mm的铜渣液滴能够快速形成固相外壳,完

全凝固时间为 1.62 s, 空气可被加热至 545 K 以上, 可用于后续的余热利用。

3) 气流速度越大, 冷空气对铜渣液滴的冷却能力越强, 渣颗粒的冷却越快; 铜渣液滴初始粒径越小, 携带的热量越少, 换热效率越高, 凝固时间越短。

## 参考文献:

- [1] 姚志超, 孙彦文. 中国铜工业现状与技术展望[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(7): 103-105.
- [2] 吕义文, 朱恂, 王宏, 等. 高温液态熔渣离心粒化余热回收技术[J]. 中国基础科学, 2020, 22(2): 28-35, 42.
- [3] RAHIMI M, YAZDANPARAST S, REZAI P Y. Parametric study of droplet size in an axisymmetric flow-focusing capillary device[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(4): 1016-1022.
- [4] SURIP W, PUTRA N, ANTARIKSAWAN A R. Design of passive residual heat removal systems and application of two-phase thermosyphons: A review[J]. Progress in Nuclear Energy, 2022, 154: 104473.
- [5] ROGACHEV S O, PRIUPOLIN D V. Effect of a thermal hardening method on the structure and mechanical properties of 20GL steel[J]. Russian Metallurgy (Metally), 2022, 2022(10): 1312-1317.
- [6] 邱琳, 桑大伟, 冯妍卉, 等. 高炉熔渣流化床余热回收的优化分析[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(5): 1086-1094.
- [7] 纪慧敏, 黄友亮, 仪垂杰, 等. 高炉渣干式离心粒化机理及实验研究[J]. 中国粉体技术, 2020, 26(2): 63-69.
- [8] 邱勇军, 朱恂, 王宏, 等. 熔渣颗粒空冷相变换热的三维数值模拟[J]. 化工学报, 2014, 65(增刊1): 340-345.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杜宇航, 刘晓宏, 温治, 等. 高炉渣液滴破碎过程数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(1): 23-29.
- [12] PENG H, HU Z W, SHAN X K, et al. Study on the solidification characteristics of molten slag droplets cooled by mixed cooling medium[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 939-949.
- [13] 王绍文, 梁富智, 王纪曾. 固体废弃物资源化技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [14] WANG L L, ZHANG Y Z, 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(1): 10-18.
- [15] 雷星, 甄新刚, 张炯明. 475 mm 特厚板坯连铸结晶器浸入式水口优化数值模拟研究[J]. 江西冶金, 2023, 43(6): 457-464.
- [16] ZHANG B, ZHOU J M, LI M, et al. Modeling and simulation of iron ore sintering process with consideration of granule growth[J]. ISIJ International, 2018, 58(1): 17-24.
- [17] 谭金池, 张斌, 袁富, 等. 板坯连铸结晶器三维流场模拟仿真研究[J]. 江西冶金, 2020, 40(6): 11-15.
- [18] 戴志海, 张斌, 彭金鹏, 等. 底吹炼铜熔池液面波动数值模拟[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(6): 9-16, 41.
- [19] 袁启盛, 张斌, 戴志海, 等. 底吹炼铜喷口区多相流动特性数值模拟研究[J]. 世界有色金属, 2021(2): 6-10.
- [20] 彭金鹏, 詹佳鑫, 张斌, 等. 铜底吹熔池熔炼炉多相流动数值模拟[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(3): 318-328.
- [21] 文棠根, 张斌, 张家微, 等. 6 kA 稀土钕电解槽多相流动数值模拟[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(5): 706-715.
- [22] 常庆明, 程永楷, 李先旺, 等. 高炉渣干式离心粒化的建模仿真研究[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(1): 69-73, 78.
- [23] ZHANG B, ZHOU J M, LI M. Prediction of sinter yield and strength in iron ore sintering process by numerical simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 70-79.
- [24] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(责任编辑:王庆龙)