

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.07.001

# 超重力强化分离铜渣中铜的 数值模拟及辅助工业设计

高金涛, 李忠达, 郭磊, 汪增武, 兰茜, 郭占成

(北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 由于当前铜冶炼工艺产生的铜渣铜含量比较高, 采用传统的电炉贫化技术分离铜液滴时间长、回收率低, 因此引入超重力技术对贫化过程进行改善。采用数值模拟的方法, 以卧式离心机为模型基础, 选用转炉铜渣作为试验对象进行研究, 借助 COMSOL Multiphysics 软件构建模型, 模拟铜渣中铜液滴的沉降过程。根据计算结果分析重力系数( $G$ )、温度( $T$ )对不同粒径铜液滴沉降行为的影响。结果表明, 在  $T=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $G=1$  的条件下, 粒径低于  $80\text{ }\mu\text{m}$  的铜液滴无法自由沉降; 在恒定温度下, 重力系数以及铜液滴粒径的增加均有利于铜液滴在铜渣中的沉降; 温度升高会降低铜渣和铜的黏度, 促进二者分离。最后, 根据铜液滴的沉降数据, 对离心机半径、给料速度等工业参数提出优化建议, 以提升铜的回收率, 降低企业生产成本。

**关键词:** 超重力; 离心分离; 数值模拟; 铜渣; 沉降

中图分类号: TF811

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2024)07-0001-11

## Numerical Simulation of Separating Copper from Copper Slag Strengthened by High Gravity and Corresponding Auxiliary Industrial Design

GAO Jintao, LI Zhongda, GUO Lei, WANG Zengwu, LAN Xi, GUO Zhancheng

(State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Since the copper slag produced by the current copper smelting process has a relatively high copper content, the traditional electric furnace depletion technology takes a long time to separate copper droplets and has a low recovery rate. Therefore, the super gravity technology was introduced to improve the depletion process. The numerical simulation method was adopted, based on the horizontal centrifuge model, and converter copper slag was selected as the experimental object for research. A model was constructed with COMSOL Multiphysics software to simulate the settling process of copper droplets in copper slag. Based on the calculation results, the effects of gravity coefficient ( $G$ ) and temperature ( $T$ ) on the settling behavior of copper droplets with different particle sizes were analyzed. The results show that under the conditions of  $T=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $G=1$ , copper droplets with a particle size below  $80\text{ }\mu\text{m}$  cannot settle freely. At constant temperature, the increase in gravity coefficient and copper droplet size is beneficial to the settlement of copper droplets in copper slag. Rising temperature will reduce the viscosity of copper slag and copper, and promote the separation of the two. Finally, based on the settlement data of copper droplets, the optimization suggestions for industrial parameters such as centrifuge radius and feeding speed were put forward to improve copper recovery rate and reduce the production costs of enterprise.

**Key words:** super gravity; centrifugal separation; numerical simulation; copper slag; settlement

收稿日期: 2024-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174275)

作者简介: 高金涛(1983-), 男, 教授, 博士生导师; 通信作者: 郭占成(1963-), 男, 教授, 博士生导师

火法炼铜工艺主要包括造锬熔炼、冰铜吹炼、粗铜火法精炼和阳极铜电解精炼四个步骤<sup>[1]</sup>,铜火法冶炼过程中会产生大量的铜渣<sup>[2]</sup>。目前常用的铜熔炼技术为闪速熔炼和熔池熔炼,熔炼产生的铜渣中铜含量较高。据统计,闪速熔炼产生的铜渣中铜含量可达到1%(质量分数,下同),熔池熔炼产生的铜渣中铜含量在1%~3%<sup>[3]</sup>。此外,冰铜转炉吹炼时产生的铜渣中铜含量依然偏高,高达4%~8%<sup>[4]</sup>。据世界金属统计局(WBMS)公布的数据,2022年全球精炼铜产量为2 508.48万t,每冶炼生产1t精炼铜会产生2~3t铜渣<sup>[5]</sup>。若按照铜渣中1%的铜含量来计算,铜渣中至少含有50万t铜。依照每吨铜7万元的市场价格估算,经济损失高达340亿元,而且铜渣的大量堆积会占用紧缺的土地资源<sup>[6]</sup>,且铜渣中的重金属在风化以及物理侵蚀的过程会严重污染环境<sup>[7]</sup>。因此,如何高效地回收铜渣中的有价金属和实现铜渣资源化利用,并为企业降低成本和创造收益是当前研究的重要课题。

通常,产出的熔融铜渣需要经过贫化处理,以进一步回收铜渣中的铜<sup>[8]</sup>。目前,工业上主要使用的贫化方法为浮选法及电炉贫化法<sup>[9]</sup>。浮选法主要通过物理手段对铜渣中的铜组分进行分选。浮选法贫化后铜渣中铜含量在0.3%~0.5%<sup>[10]</sup>,达不到弃渣要求(渣中铜含量小于0.3%)。虽然浮选法的铜回收率高、能耗低和渣处理量大,但是浮选法无法回收铜渣中溶解态的铜,而且使用的选矿药剂多为具有刺激性气味的有机物,造价高昂<sup>[11]</sup>;电炉贫化法应用较为普遍<sup>[12]</sup>。电炉通过提高熔池温度来降低铜渣黏度,从而促进铜液滴的沉降分离,进而降低铜渣中的铜含量<sup>[13]</sup>。这种方法的优势在于废气排出量低、流程易于控制且能保证高温下有较强还原性。但是电炉贫化法也存在耗电量高、电极消耗大及金属回收率偏低、铜液滴在高温下沉降时间长等问题<sup>[14]</sup>。电炉贫化后的铜渣含铜量通常在0.6%以上<sup>[15]</sup>,按照国际铜研究组织(ICSG)公布的铜矿石标准,电炉贫化处理后的铜渣属于低品位矿石(渣中铜含量0.3%~1.4%),仍然无法达到弃渣要求。因此,如何降低铜渣中的铜含量是非常重要的课题。

提高铜液滴的沉降效率能够有效降低铜渣中的铜含量,已有学者针对铜液滴的沉降过程做出了不同的优化方案。例如在熔融铜渣中吹入适量的氮气,增加铜液滴的碰撞概率,加速细小铜液滴的聚合,使其沉降速率提高<sup>[16]</sup>;在冶炼时加入氧化钙和氧化铝,稳定炉渣结构,平衡炉渣碱度,降低炉渣熔

点和黏度<sup>[17]</sup>,或在铜渣中加入硼酸钙<sup>[18]</sup>、碳粉、重油、甲烷等还原剂和硫化剂( $\text{FeS}_2$ ),将 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 还原为 $\text{FeO}$ ,随后与 $\text{SiO}_2$ 反应生成低熔点的 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 相,从而减小其表面张力,加速铜与渣界面之间的质量传递<sup>[19-20]</sup>。上述方案通过物理化学手段改善铜液滴以及铜渣的物化性质,使铜液滴的沉降效率提高,但是处理后的铜渣铜含量依然在0.55%~1.3%<sup>[21]</sup>。为了有效提高铜液滴沉降速度以降低转炉铜渣的铜含量,本研究引入超重力技术来优化铜液滴的沉降过程。超重力技术是高温多相反应领域的一项突破性技术,能够改善传质过程,有效实现多相物质分离。在高温熔体中,细小颗粒的分离速度与浮力因子( $\Delta\rho g$ , $\Delta\rho$ 为两相之间密度差; $g$ 为重力加速度)及熔体黏度有关。通过增大重力系数,可以显著提高浮力因子,从而提高传质速度来强化相际分离过程<sup>[22]</sup>。例如浮选法中微米量级的铜液滴通常难以回收<sup>[19]</sup>,根据铜与铜渣的密度差,可以利用超重力技术对铜液滴进行分离,进而提高铜的回收率。近年来,超重力法已经被应用于去除液态金属中的固体夹杂物<sup>[23]</sup>,熔融渣相中金属相的分离与富集<sup>[24]</sup>等高温相分离领域。段宇恒等<sup>[25]</sup>利用超重力技术对铝硅合金熔体进行过滤净化,在超重力作用下,实现了铝熔体与硅相的彻底分离;杨玉厚等<sup>[26]</sup>借助超重力场强化粗锡精炼过程,研究 $\text{Sn-3\%Fe}$ (质量分数)熔体中的杂质元素铁在超重力场中的定向富集及过滤分离的规律,以达到提纯粗锡的目的。

然而目前仅能对铜液滴的沉降行为进行离线研究,难以实时观测高温状态下细小铜液滴的动态变化,以及沉降过程中铜液滴的运动行为,在分析铜液滴的沉降行为时,研究结果会失去一定的准确性。利用数值模拟能够控制变量,实时分析铜液滴的沉降运动情况,有效提升试验结果的精确度。因此本文提出了一种基于超重力环境的水平集两相流模型,用于模拟不同温度和重力系数下,不同粒径的熔融铜液滴在熔融铜渣中的沉降行为。最后根据模拟结果,分析铜液滴与铜渣分离的影响因素。对铜渣的给料速度、转筒半径等操作制度以及工业装置参数提出优化建议,以提高工业生产效率、降低企业生产成本、增加企业经济效益。

## 1 建模方案

### 1.1 工业方案与计算域选取

以卧式离心机这一工业试验装置为原型建立模型,工业试验装置的示意图如图1(a)所示。中间渣包

中的热态铜渣经导流槽流入旋转的卧式离心机中,通过高速旋转时产生的离心力场来模拟超重力场,超重力的的大小受转速和离心半径主导,直接影响着渣-铜分离效果,其计算公式如式(1)所示,渣相和铜液滴因密度不同会在超重力的作用下实现分离并分层。离心机入料口的高度略高于出料口高度,当铜液滴完全分离后铜渣会优先从出料口流出进入收渣槽。

$$G = \frac{\sqrt{m^2 g^2 + (m\omega^2 r^2)^2}}{mg} = \frac{\sqrt{g^2 + N^2 \pi^2 r / 900}}{g} \quad (1)$$

式中, $G$ 为重力系数,即离心力与地球重力的比值,无因次; $g$ 为地球重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ; $r$ 为离心机轴心与液滴中心的距离(m); $\omega$ 为离心机旋转的角速度(rad/s); $N$ 为转速(r/min)。

本文模拟对象为熔融铜渣。为了简化过程,选取了离心转筒二维横截面进行模拟,以内腔圆域为基准,选取底部的矩形作为建模对象,如图1(b)所示。

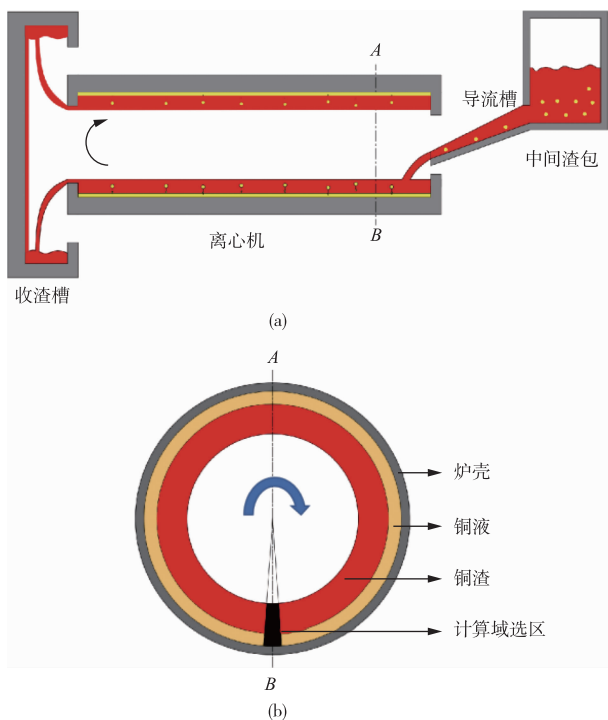


图1 卧式离心工业试验装置示意图(a)及离心机横截面及计算域选区(b)

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal centrifugal industrial test device (a), and cross section of centrifuge and selected calculation domain (b)

## 1.2 假设

本模拟基于以下假设的前提下展开:

1)受表面张力的影响,默认铜液滴为标准的球

形。单个液滴沉降不考虑与其他液滴之间的相互作用影响。

2)熔融铜渣为黏性不可压缩的牛顿流体,恒温下流体黏度不改变。

3)熔融铜渣内部为连续流体,不存在孔隙影响。

## 1.3 流体控制方程

相流体之间的相互作用。由于沉降过程中流体运动相对有序,因此选择在层流环境。流体的控制方程选用 Navier-Stokes 方程,来保证流体在运动过程中的动量守恒以及质量守恒,对应的方程为:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + u(\nabla u + \nabla u^T)] + \rho g + \mathbf{F}_{st} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (3)$$

式中, $t$ 为时间(s); $u$ 为流体速度(m/s); $\rho$ 为流体密度( $\text{kg/m}^3$ ); $p$ 为压力(Pa); $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{F}_{st}$ 为表面张力分量( $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ )。

为了保证模型的稳定性,选用了两相流模型的水平集接口。该接口主要使用水平集方程进行控制,该方程主要功能为界面追踪和形状建模,常用于研究两相流中气泡和液滴等的计算。该方法主要通过水平集函数  $\varphi$  实现,方程式表示如下:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \cdot \nabla \varphi = \gamma \nabla \cdot \left[ \epsilon \nabla \varphi - \varphi (1 - \varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right] \quad (4)$$

式中, $u$ 为流体速度(m/s); $\varphi$ 为是水平集方法的光滑阶跃函数,一般情况下作为追踪流体交界面位置的参数值; $t$ 为时间(s); $\gamma$ 为重新初始化参数(m/s),确定重新初始化的数量,合适的  $\gamma$  为模型中出现的最大速度; $\epsilon$ 为重新初始化参数(m),确定周围界面层的厚度。

由于水平集函数是一个平滑阶跃函数,计算两相流体的交界面处。界面处于动态变化中,这使得流体的密度和动力黏度也会发生改变。为了连续相可以平滑地突破界面进入分散相,此处需要通过平滑函数对流体的物性参数进行处理。由此可得流体密度和动力黏度的表达式,如下所示:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) \varphi \quad (5)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) \varphi \quad (6)$$

式中, $\rho$ 为综合流体密度( $\text{kg/m}^3$ ); $\rho_1$ 和  $\rho_2$ 分别为铜渣与铜液的密度( $\text{kg/m}^3$ ); $\mu$ 为综合流体黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $\mu_1$ 和  $\mu_2$ 分别为铜渣与铜液的黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )。

## 1.4 计算模型与求解流程

试验中用到的原料为转炉铜渣,经测定,铜渣中的铜含量为 4.14%,铜渣的密度为 3 385  $\text{kg/m}^3$ 。经过 RHEOTRONIC II型高温黏度计测量,1 300  $^{\circ}\text{C}$ 下

铜渣动力黏度为  $3.874 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。查阅文献可知,  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 下熔融态铜的密度和动力黏度分别为  $7\ 799 \text{ kg/m}^3$ 和  $0.29 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ <sup>[27-28]</sup>。铜渣的物相分布如图 2 所示,其主要物相为磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、铁橄榄石( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ )和金属铜(Cu)。尺寸较大的金属铜液滴嵌布于磁铁矿和铁橄榄石之间,而尺寸细小的铜液滴夹杂在铁橄榄石基体中。利用 Image Pro 软件对 20 张 SEM 图进行统计分析,得到转炉铜渣中铜液滴的粒径分布及累积体积分布。根据图 3 统计数据显示,粒径在  $20\ \mu\text{m}$  以内的铜液滴数量占比虽然达到  $82.88\%$ ,但是其质量占比仅有  $0.34\%$ 。而细小铜液滴( $d \leq 20\ \mu\text{m}$ )夹杂于渣相中难以流动,因此后续的模拟研究将以  $d = 20 \sim 80\ \mu\text{m}$  的铜液滴为主。

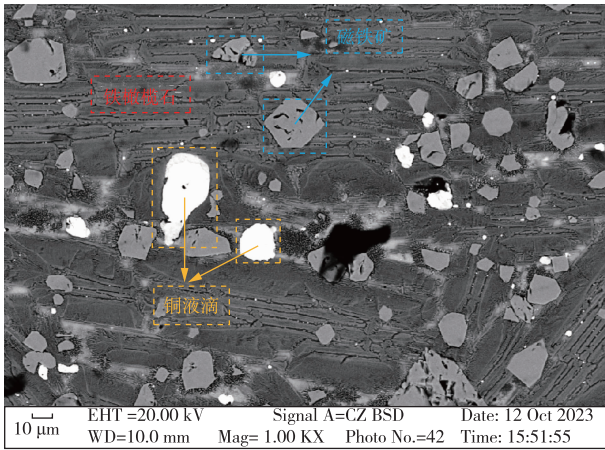


图 2 铜渣中物相分布  
Fig. 2 Phases distribution in copper slag

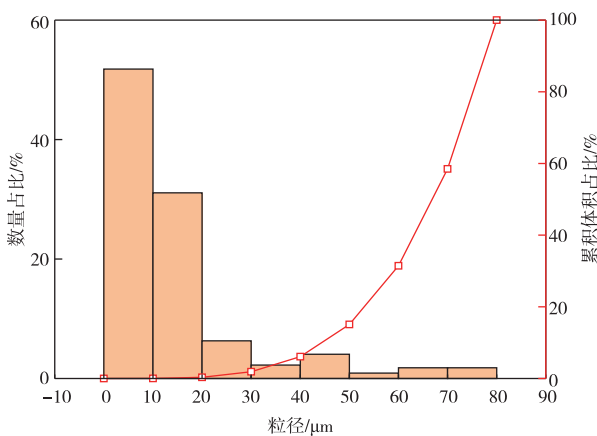


图 3 不同粒径铜液滴在铜渣中的数量占比分布和累积体积占比分布  
Fig. 3 Quantity proportion distribution and cumulative volume proportion distribution of copper droplets with different particle sizes in copper slag

几何模型如图 4 所示。模型中的常重力与超重重力方向均为竖直向下,确保铜液滴能够向下沉降。由于沉降过程铜液滴始终保持对称,模拟二维纵切面即可简化模拟三维沉降过程。模型为底部宽  $1\ 000\ \mu\text{m}$ 、高  $2\ 500\ \mu\text{m}$  的四边形。依据工业生产中熔融铜渣的温度范围( $1\ 200 \sim 1\ 300\ ^\circ\text{C}$ )选取模拟温度,沉降高度为  $2\ 000\ \mu\text{m}$ 。

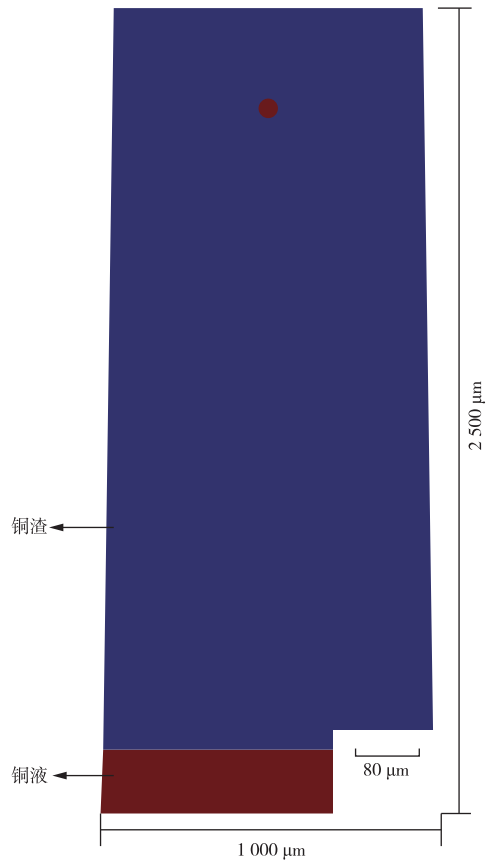


图 4 几何模型示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of geometric model

网格模型中自由三角形网格划分范围为  $0.01d \sim 0.1d$  ( $d$  为液滴直径),以确保能够减小网格对模拟结果的影响。在网格运动过程中按照流体动力学对网格进行校准,当网格失真度超过  $0.5$  时,会自动划分网格。模拟过程采用 COMSOL Multiphysics 求解器进行计算。耦合模型包含流体流动模型和两相流模型。铜液滴以初始速度为  $0$  的状态置入熔融铜渣中,受到超重重力、浮力以及黏滞阻力的作用向下沉降。相场上边界为压力等于  $0$  的开放边界,两侧以及底部界面设置为无滑移界面。底部两侧顶点设置为压力约束点,以提高模型收敛性。流体区域设置为不可压缩流体,流体运动过程不会产生密度变化。在两相流交界处存在两个模型界面:一个界面采用

完全耦合的方法计算两相流耦合模型,在两相流耦合边界处计算两侧压力和黏滞阻力的影响;另一个界面用于计算层流流动模型,计算流体的流速和动量的变化。模拟过程的计算步长为 0.000 01 s,首先计算流体所受作用力的影响,然后求解液滴的新位置以及分析液滴运动对周围流体的影响,液滴完全沉降时停止计算。

## 2 试验结果与分析讨论

### 2.1 铜液滴沉降行为分析

利用域探针测绘了  $d=30\ \mu\text{m}$  的铜液滴在  $G=200$ 、 $T=1\ 300\ \text{°C}$  的条件下沉降过程中的速度变化,如图 5 所示。根据陆耀军<sup>[29]</sup>对于液滴沉降行为的研究,液滴在下沉时速度满足式(7),当液体在层流环境中,液滴初期会在超重力、浮力以及黏滞力的作用下迅速加速。由于自身粒径较小,相应的  $\tau$  也非常小,因此很快到达平均速度区间,随后匀速运动一段距离。铜液滴的速度在接触铜相层前因表面张力的影响而减小,根据刘威<sup>[30]</sup>对于界面运动规律的分析,由于铜液滴对铜相层的湿润性强于对渣相的湿润性,铜液滴在接触铜相层的瞬间加速,此时表面张力将促进铜液滴与铜相层的结合,铜液滴在完全下沉之后,速度迅速下降直到为 0。

$$u = (1 - e^{-t/\tau})u_0 \tag{7}$$

$$\tau = \frac{\rho d^2}{18\mu} \tag{8}$$

式中, $u$  为液滴速度(m/s); $u_0$  为液滴完成加速后的平均速度(m/s); $\tau$  为液滴松弛时间,无因次; $\rho$  为铜渣密度( $\text{kg/m}^3$ ); $d$  为液滴粒径(m); $\mu$  为铜渣

动力黏度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )。

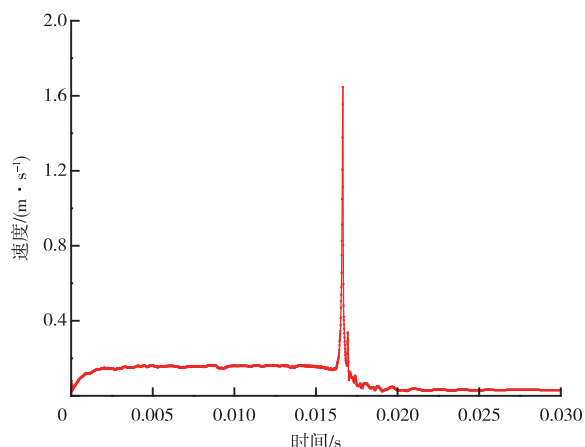
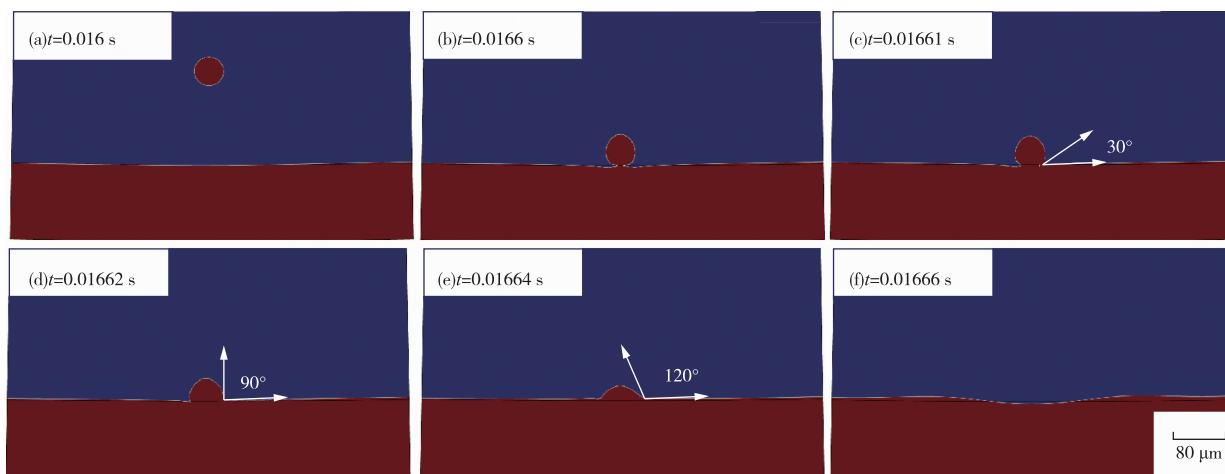


图 5 铜液滴速度与时间关系图  
( $d=30\ \mu\text{m}, G=200, T=1\ 300\ \text{°C}$ )

Fig. 5 Relationship between speed of copper droplet and time ( $d=30\ \mu\text{m}, G=200, T=1\ 300\ \text{°C}$ )

图 6 为铜液滴在  $G=200$ 、 $T=1\ 300\ \text{°C}$  的条件下沉降接触铜相层时的变化过程。铜液滴经超重力的作用从静止状态下沉,由于沉降过程中铜液滴的雷诺数较小,黏滞阻力相远大于惯性力,因此,铜液滴与融融熔渣之间的黏滞阻力会阻碍铜液滴的下沉过程。由于渣-铜界面的表面张力,铜液滴在接近铜相层时,铜相层上表面逐渐内凹。由于铜液滴对渣相与铜相层的湿润性差异,铜液滴逐渐下沉与铜相层接触,并在表面张力的作用下,铜液滴铺展并完全沉降。如图 7 所示,在多液滴共同下沉的过程中,铜液滴因表面张力的作用相互靠近并发生聚并现象,而对距离较远的铜液滴不会产生显著影响。

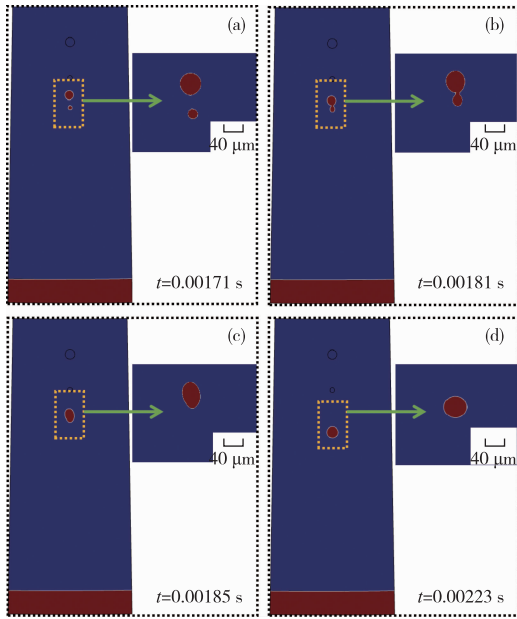


(a)初始状态;(b)刚接触铜相层;(c)铜液滴与铜相层形成 30°接触角;(d)铜液滴与铜相层形成 90°接触角;  
(e)铜液滴与铜相层形成 120°接触角;(f)铜液滴完全沉入铜相层

图 6 不同时间点下铜液滴的形态变化图( $d=30\ \mu\text{m}, G=200, T=1\ 300\ \text{°C}$ )

Fig. 6 The morphological changes of copper droplets at different moment ( $d=30\ \mu\text{m}, G=200, T=1\ 300\ \text{°C}$ )





(a) 初始状态; (b) 双液滴接触形成液柱;  
(c) 液滴聚合; (d) 终止状态

图7 多液滴行为变化 ( $d=20, 40 \mu\text{m}$ ,  
 $G=200, T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$ )

Fig. 7 Behavior changes of multiple droplets  
( $d=20, 40 \mu\text{m}, G=200, T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$ )

## 2.2 铜液滴沉降影响因素分析

### 2.2.1 重力系数及铜液滴尺寸对铜液滴沉降的影响

由于熔融铜渣的出渣温度在  $1\ 200\sim 1\ 300\ ^\circ\text{C}$ , 因此选择温度为  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$  时模拟计算重力系数对不同粒径铜液滴沉降行为的影响规律。首先模拟分析了常重力环境 ( $G=1$ ) 下, 铜液滴在熔融铜渣中的沉降行为。如图 8(a) 所示,  $d < 80 \mu\text{m}$  的铜液滴在常重力环境下无法自由沉降, 仅有  $d = 80 \mu\text{m}$  的铜液滴能够在铜渣中轻微移动。这解释了离心分离过程中细小铜液滴回收困难、铜回收率偏低的问题。进一步模拟结果如图 8(b) 所示,  $d \geq 20 \mu\text{m}$  的铜液滴需在重力系数  $G \geq 70$  时才能在熔融铜渣中自由沉降。按照图 3 中铜液滴的粒径分布, 此时绝大多数铜液滴都具有良好的沉降趋势, 因此引入超重力技术对于提升铜渣中铜的回收率有很大的作用。铜液滴的粒径大小直接影响其在铜渣中的沉降速度, 粒径相对较大的铜液滴具有更快的沉降速度, 离心分离效果更好。为了更全面地了解铜液滴粒径和重力系数对铜液滴沉降的影响, 选取  $d=20\sim 80 \mu\text{m}$  的铜液滴在  $G=200\sim 800$  的环境下进行沉降模拟。

如图 9 所示, 铜液滴的下沉时间与其粒径呈负

相关, 而铜液滴的下沉速度与其粒径呈正相关。此外, 随着重力系数的增加, 铜液滴的下沉时间减少, 下沉速度增大。对于  $d=20\sim 50 \mu\text{m}$  的铜液滴, 当  $G=300, t=0.017\ \text{s}$  时, 铜液滴才能完全沉降。当  $G=500, t=0.011\ \text{s}$  时, 铜液滴即可完全沉降, 此时回收率趋于  $99.65\%$ 。沉降时间显著减少, 有较好的沉降效果。此时铜回收率已经趋于  $100\%$ , 进一步增加重力系数, 虽然能够增加回收率, 但增幅微小, 收益偏低; 对于  $d=50\sim 80 \mu\text{m}$  的铜液滴, 当  $G=300, t=0.007\ \text{s}$  时, 铜液滴即可完全沉降, 此时回收率达到  $93.89\%$ 。当  $G=500, t=0.0055\ \text{s}$  时, 铜液滴完全沉降, 下沉所需时间与  $G=300$  时所需时间差距较小。因此对于  $d=50\sim 80 \mu\text{m}$  的铜液滴选取  $G=300$  即有较高的沉降效率。对于不同的铜渣, 可以按照铜渣中铜液滴的粒径分布确定是否进一步提升重力系数, 以提高对铜液滴的回收率。

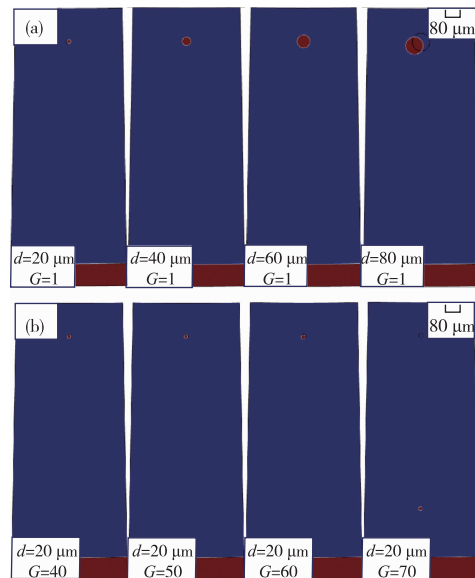


图8 (a)  $G=1$  时不同粒径铜液滴的下沉情况 ( $T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$ ); (b)  $d=20 \mu\text{m}$  的铜液滴在不同重力系数下的沉降情况 ( $T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$ )

Fig. 8 (a) Sinking of droplets with different sizes when  $G=1$  ( $T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$ ); (b) Settlement of copper droplets with  $d=20 \mu\text{m}$  under different gravity coefficients ( $T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$ )

当  $G=200\sim 800$  时, 随着铜液滴粒径以及重力系数的增加, 铜液滴下沉速度的增幅减缓。对于以  $d=20\sim 50 \mu\text{m}$  的铜液滴为主的铜渣, 选择  $G=500$  的条件进行离心会有较高的回收率; 对于以  $d \geq 50 \mu\text{m}$  的铜液滴为主的铜渣, 选择  $G=300$  的条件进行离心会有较高的回收率。在实际生产中, 铜

液滴粒径通常呈现随机分布,因此在模拟计算时应以粒径占比多数为基准确定平均沉降速度。这种方法

更符合实际应用,能更准确地预测和控制铜液滴的运动行为,进而判断整体铜液的运动趋势。

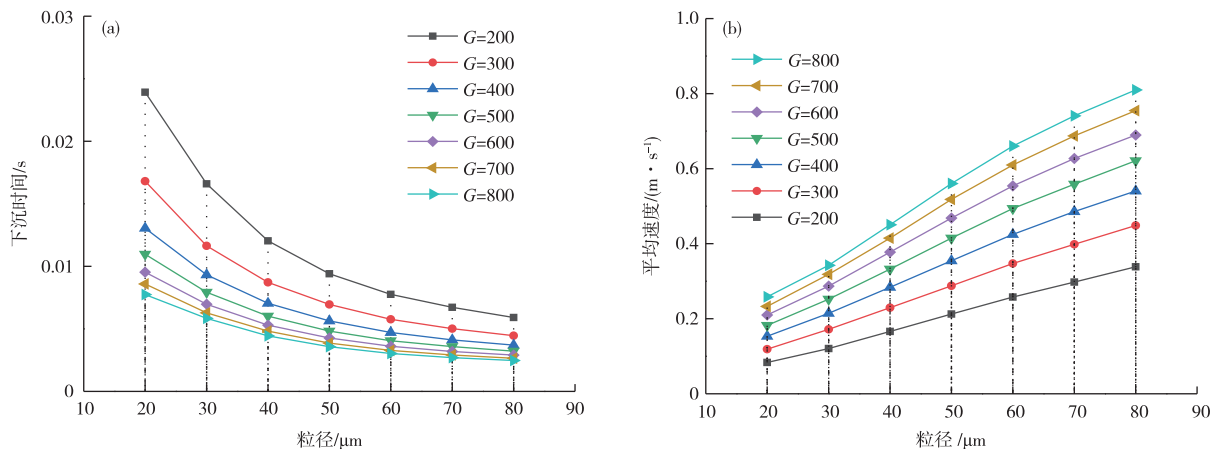


图9 下沉降时间(a)和平均速度(b)与铜液滴尺寸关系图( $G=200\sim 800, T=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 9 Relationships between settling time (a) and average speed (b) and droplet size ( $G=200\sim 800, T=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

### 2.2.2 温度对铜液滴沉降的影响

由于熔融铜渣排出时其温度处于动态下降的状态,温度变化对铜液滴沉降效果有较大影响。为了深入分析温度对铜液滴在铜渣中沉降过程的影响,选取了不同温度进行模拟试验。因为实际生产中,随着温度的降低,熔融铜渣及其内部铜液滴的黏度升高,会阻碍铜液滴的下沉。在模拟试验前,使用美国 Theta 公司生产的 RHEOTRONIC II 型高温黏度计测量了不同温度下铜渣的黏度数据,分析黏度变化对铜液滴沉降的影响。

如图 10(a) 所示,当温度从 1300 °C 降低至 1250 °C 时,铜渣黏度从 3.874 mPa·s 小幅增长至 4.402 mPa·s。温度进一步降低至 1200 °C 时,铜渣黏度的增幅逐渐加大,从 4.402 mPa·s 增长至 8.262 mPa·s。当温度降至 1119 °C 时,铜渣的黏度呈现出明显的上升趋势,从 8.262 mPa·s 增长至 41.058 mPa·s。根据 Assael 等的研究<sup>[20]</sup>,熔融铜的黏度变化趋势与铜渣相似。

如图 10(b) 所示,在 1073~1323 °C 内,随着温度

降低,熔融铜的黏度几乎呈线性上升,从 2.810 mPa·s 增长至 4.030 mPa·s。在 1200~1300 °C 内,铜液滴黏度始终远低于铜渣黏度,且随着温度降低,二者黏度差越大,铜液滴受到的黏滞阻力越大,铜液滴沉降速率越慢。

由于铜渣的排出温度通常在 1200~1300 °C,依照前文选取  $d=30\text{ }\mu\text{m}$  的铜液滴在  $G=500, T=1200\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下进行沉降模拟。如图 11 所示,随着温度的下降,铜液滴的下沉时间逐渐增加,下沉速度逐渐降低。当温度处于 1260~1300 °C 时,温度下降铜液滴的下沉速度变化幅度较小,稳定在 0.17~0.18 m/s。当温度从 1260 °C 降低至 1200 °C 时,铜液滴的下沉速度大幅降低至 0.01 m/s。当温度保持在 1300 °C 时,铜液滴的下沉速度最大,对铜液滴的分离效果最好。因此在离心分离的过程中可以对温度进行一定的调控,温度保持在 1260~1300 °C,此时铜渣的黏度最小,相应的离心分离速率最快,  $t=0.011\text{ s}$  时,铜的回收率将趋于 98.11%。

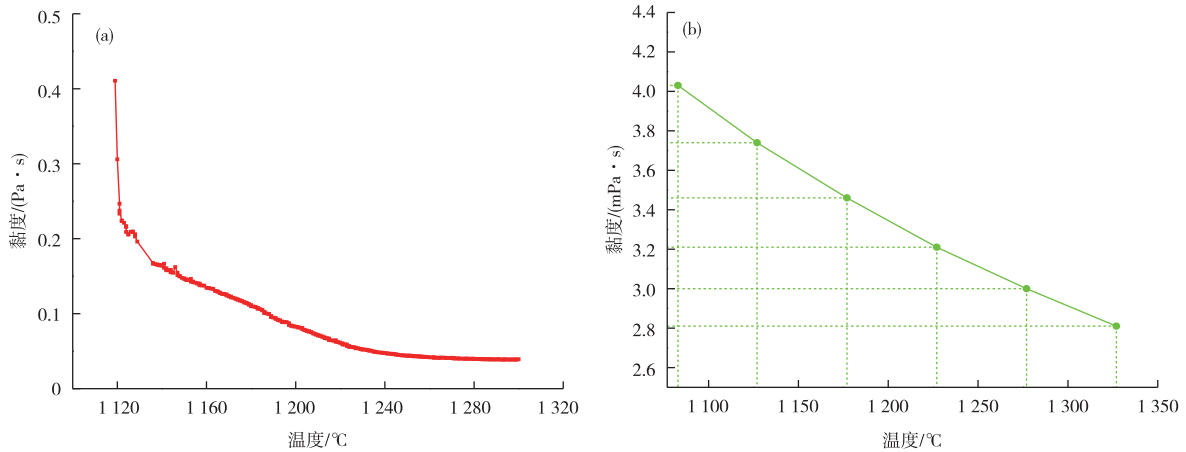


图 10 熔融铜渣 (a) 和熔融铜 (b) 的黏度与温度的关系  
 Fig. 10 Relationships between viscosity of molten copper slag (a) and molten copper (b) and temperature

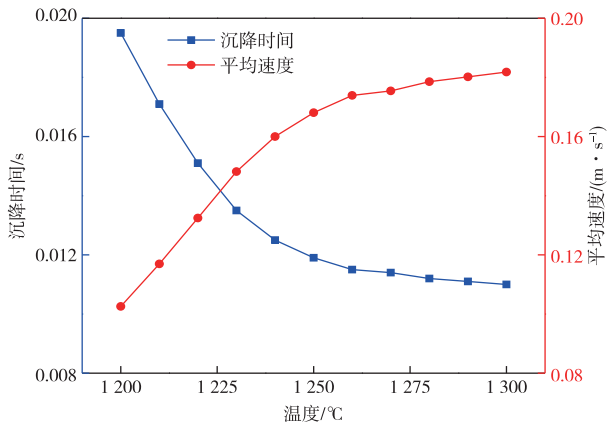


图 11 沉降时间、平均速度与温度变化图 ( $d=30 \mu\text{m}, G=500$ )  
 Fig. 11 Settling time, average speed changes with temperature graph ( $d=30 \mu\text{m}, G=500$ )

### 2.3 离心转筒的辅助工业设计

根据图 1 所示,离心机为一个长 100 cm、内腔半径为  $R$  的空心直筒,进料口挡板距离离心机中心轴 10 cm,出料口挡板距离离心机中心轴 11 cm。本文在  $G=300, T=1300 \text{ }^\circ\text{C}$  的条件下,对离心机的基础参数进行优化计算。对于该离心机,根据重力系数和离心机转速的转化公式(9)计算离心机对应转速,结果如表 1 所示。

$$G = \frac{\omega^2 R}{g} = \frac{(\pi/30)^2}{g} \times N^2 \times R = 1.118 \times 10^{-5} RN^2 \quad (9)$$

式中,  $\omega$  为离心机角速度(rad/s);  $R$  为离心机半径(cm);  $N$  为离心机转速(r/min)。

对于内腔半径为 15 cm 的离心机,其有效容积

表 1 不同离心桶半径对应指标

Table 1 Corresponding data for different radius of centrifuges

离心机半径/cm	转速/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	有效容积/ $\text{m}^3$	沉降时间/s	给料速度/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )
15	1 337	110.6	2.11	52.35
20	1 158	153.13	2.82	54.36
25	1 036	195.67	3.52	55.57
30	945	292.44	4.23	69.21

为离心机出料口挡板到离心机内壁所包围的圆环柱体积。首先求得离心机的有效容积为:

$$V = (\pi R_1^2 - \pi R_{\text{出}}^2) \times L = 0.0326 \text{ m}^3 \quad (10)$$

式中,  $V$  为离心机有效容积( $\text{m}^3$ );  $R_1$  为离心机半径(m);  $R_{\text{出}}$  为出料口挡板与离心机中心轴距离(m);  $L$  为离心机长度(m)。

按照铜渣、铜的密度,铜渣中的铜含量计算,当铜渣充满有效容积时对应的铜渣质量为:

$$m_{\text{铜渣}} = V \times \rho_{\text{铜渣}} = 110.6 \text{ kg} \quad (11)$$

式中,  $m_{\text{铜渣}}$  为离心机有效容积可容纳铜渣质量(kg);  $\rho_{\text{铜渣}}$  为铜渣密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

假设铜液滴从离心机轴心处下沉至离心机内壁时,所有铜液滴完全沉降。根据前文  $20 \mu\text{m}$  的铜液滴的下沉速度  $v_1 = 0.071 \text{ m/s}$ ,则铜液滴完全沉降所需要的时间为:

$$t_1 = R_1 / v_1 = 2.92 \text{ s} \quad (12)$$

式中,  $v_1$  为  $20 \mu\text{m}$  的铜液滴的下沉速度(m/s);  $R_1$  为离心机半径(m);  $t_1$  为铜液滴完全沉降所需时间(s)。

实际生产过程中,为了获得更高的铜回收率,离心分离的时间应该稍长于理想状态(每个铜液滴沉



降互不影响)下铜液滴沉降的时间。此时计算得到的给料速度均为理想状态下的最大给料速度。对于以  $d=20\ \mu\text{m}$  的铜液滴为主的铜渣,最大加料流量为:

$$W_{\max}=V\times\rho_{\text{铜渣}}/t_1=37.86\ \text{kg/s}\quad (13)$$

式中,  $W_{\max}$  为  $G=300$ 、 $T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$  条件下最大给料速度(kg/s)。

根据表1数据,恒定重力系数时,随着离心转筒的半径增加,转筒的转速有所降低,铜液滴沉降时间增加,单位时间内离心机的铜渣处理量也在增加。用于工业生产的离心机应当保证铜液滴沉降时间相对较小的情况下,具有较大的给料速度(即单位时间铜渣处理量)。当铜渣量较大时,离心机需要能达到较高的给料速度。当需求给料速度在  $55.57\sim 69.21\ \text{kg/s}$  时,需要半径为  $25\sim 30\ \text{cm}$  的离心机,此时沉降时间为  $3.52\sim 4.23\ \text{s}$ ;当铜渣量较小时,离心机仅需较低的给料速度。当需求给料速度在  $52.35\sim 54.36\ \text{kg/s}$  时,需要半径为  $15\sim 20\ \text{cm}$  的离心机,此时沉降时间为  $3.52\sim 4.23\ \text{s}$ 。因此可以根据工厂每日产生铜渣量的不同,确定合适的给料速度,进而选取合适的离心机高效地处理铜渣。

当使用半径  $30\ \text{cm}$  的离心机时,在固定出料口挡板高度的情况下分别得到粒径为  $40$ 、 $60\ \mu\text{m}$  的铜液滴的对应数据(表2)。

表2 不同尺寸铜液滴对应数据  
Table 2 Corresponding data of copper droplets of different radius

铜液滴粒径/ $\mu\text{m}$	下沉速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	完全沉降时间/ $\text{s}$	给料速度/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
20	0.071	4.22	69.21
40	0.110	2.72	107.22
60	0.170	1.76	165.71

在  $G=300$ 、 $T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$  的条件下,以图3中铜液滴的分布为例。当给料速度控制在  $52.3\ \text{kg/s}$  以内,  $t=2.1\ \text{s}$  时,铜的回收率趋于  $99.6\%$ 。当给料速度控制在  $81.1\ \text{kg/s}$  以内,  $t=1.4\ \text{s}$  时,铜的回收率趋于  $93.9\%$ 。当给料速度控制在  $125.3\ \text{kg/s}$  以内,  $t=0.9\ \text{s}$  时,铜的回收率仅有  $68.6\%$ ,在这种工艺参数下,铜的回收率偏低,经济效益仍有提升空间。因此对于不同的铜渣,应该按照铜渣中铜液滴的粒径分布以及体积分布选取合适的离心条件。

按照某铜冶炼公司  $1\ 900\ \text{t/d}$  的铜渣产量计算。每日工作  $8\ \text{h}$  的前提下,单离心机给料速度需达到  $65.97\ \text{kg/s}$ ,该铜冶炼公司仅需1台半径为  $30\ \text{cm}$  的

离心机既可满足每日的铜渣处理量。离心机体积仅为  $0.38\ \text{m}^3$ ,工作空间占用小。

### 3 结论

以卧式离心机为原型,利用 COMSOL Multiphysics 软件建立两相流水平集模型并划分网格进行模拟。分析了不同条件下熔融铜渣中铜液滴的沉降行为,通过分析铜液滴的运动位置以及沉降时间分布,得出以下结论:

1)在熔融铜渣中,  $G=1$  时铜液滴无法自由沉降,需要有一定的离心力。铜液滴的沉降速度随其粒径及重力系数的上升而增加。当温度下降时,铜渣以及铜液滴的黏度会增加,铜液滴的沉降速度也会减小。

2)在  $G=200\sim 800$  时,随着铜液滴粒径以及重力系数的增加,其下沉速度的增幅减缓。对于以  $d=20\sim 50\ \mu\text{m}$  铜液滴为主的铜渣,选择  $G=500$  的条件进行离心会有较高的回收率;对于以  $d\geq 50\ \mu\text{m}$  的铜液滴为主的铜渣,选择  $G=300$  的条件进行离心会有较高的回收率。在当  $T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$  时,沉降速度最大,在实际生产过程将温度调控在  $1\ 260\sim 1\ 300\ ^\circ\text{C}$  有较高的沉降速率。

3)根据计算结果,选择  $30\ \text{cm}$  的离心转筒半径可以达到较高的工作效率。当  $G=300$ 、 $T=1\ 300\ ^\circ\text{C}$  时,给料速度控制在  $69.21\ \text{kg/s}$  以内,  $t=4.22\ \text{s}$  时,铜的回收率将趋于  $99.65\%$ 。

### 参考文献

- [1] 陈淑萍,伍赠玲,蓝碧波,等. 火法炼铜技术综述[J]. 铜业工程,2010(4):44-49.  
CHEN S P, WU Z L, LAN B B, et al. Summary of pyrometallurgical copper smelting technology [J]. Copper Engineering, 2010(4):44-49.
- [2] 李俊,鞠艳梅,孙沐. 铜冶炼渣选矿尾渣碱法溶出硅铁分离利用技术[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(7): 20-23,42.  
LI J, JU Y M, SUN M. Separation and utilization technology of ferrosilicon extracted from copper smelting slag and beneficiation tailings by alkali method [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(7): 20-23,42.
- [3] 董越,李晓霞. 国内铜火法冶炼技术现状及展望[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(5): 283-286.  
DONG Y, LI X X. Current status and prospects of domestic pyrometallurgical copper smelting technology [J].

- Modern Industrial Economy and Informatization, 2023, 13(5):283-286.
- [4] 徐晓衣, 俞献林, 艾光华. 某含铜转炉渣回收铜浮选试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(6):75-79.  
XU X Y, YU X L, AI G H. Tests on copper separation in flotation from a kind of converter copper slag[J]. Nonferrous Metal Science and Engineering, 2017, 8(6):75-79.
- [5] 李小凡, 豆志河, 张延安, 等. 铜冶炼渣综合利用进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(4):108-118.  
LI X F, DOU Z H, ZHANG T A, et al. Progress in comprehensive utilization of copper smelting slag[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(4):108-118.
- [6] 王盼, 黄红军, 赖祥生等. 废铜冶炼渣浮选尾矿氨浸试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(11):6-10.  
WANG P, HUANG H J, LAI X S, et al. Ammonia leaching test of scrap copper smelting slag flotation tailings[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(11):6-10.
- [7] 肖瑶. 关于铜渣回收技术的研究与建议[J]. 科技风, 2022(30):152-154.  
XIAO Y. Research and suggestions on technology of recycling copper slag[J]. Technology Style, 2022(30):152-154.
- [8] 蔡兵. 铜冶炼提铜尾渣脱硫技术研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(1):80-83.  
CAI B. Research on desulfurization technology of copper smelting tailings [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(1):80-83.
- [9] 吴国东, 李磊, 李孔斋, 等. 废阴极炭热还原法贫化艾萨铜熔炼渣[J]. 过程工程学报, 2021, 21(10):1187-1195.  
WU G D, LI L, LI K Z, et al. Depletion of Isaac copper smelting slag by carbothermal reduction of waste cathode carbon [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2021, 21(10):1187-1195.
- [10] 曹洪杨, 张力, 付念新, 等. 国内外铜渣的贫化[J]. 材料与冶金学报, 2009, 8(1):33-39.  
CAO H Y, ZHANG L, FU N X, et al. Dilution of copper slag at home and abroad [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2009, 8(1):33-39.
- [11] 郑贺. CO 喷吹还原铜转炉渣及其动力学研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.  
ZHENG H. Study on reduction of converter copper slag by CO injection and corresponding kinetics [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [12] 郑贺, 李博, 周浩, 等. 橡胶籽油还原作用下铜渣的贫化[J]. 过程工程学报, 2019, 19(3):589-596.  
ZHENG H, LI B, ZHOU H, et al. Depletion of copper slag under the reduction effect of rubber seed oil [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(3):589-596.
- [13] 许并社, 李明照. 铜冶炼工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
XU B S, LI M Z. Copper smelting crafts[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [14] 刘宏图, 曹亦俊, 范桂侠. 铜冶炼渣综合回收利用进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(3):34-42.  
LIU H T, CAO Y J, FAN G X. Progress in comprehensive recycling of smelting copper slag [J]. Mineral Protection and Utilization, 2021, 41(3):34-42.
- [15] 郭秀键, 倪晓明, 马丁, 等. 铜渣处理与综合利用[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(2):23-26.  
GUO X J, NI X M, MA D, et al. Treatment and comprehensive utilization copper slag [J]. Non-ferrous Metallurgical Design and Research, 2017, 38(2):23-26.
- [16] 姚素平, 袁剑平, 刘庆华, 等. 一种采用氮气搅拌和富氧气体精炼废杂铜的工艺及其设备: CN101638724A [P]. 2010-02-03.  
YAO S P, YUAN J P, LIU Q H, et al. A process and equipment for refining scrap copper by nitrogen stirring and oxygen-rich gas: CN101638724A [P]. 2010-02-03.
- [17] 马国军, 李志, 刘孟珂, 等. 一种铜渣的全组分综合利用方法: CN108754170A [P]. 2018-11-05.  
MA G J, LI Z, LIU M K, et al. Comprehensive utilization method for all components of copper slag: CN108754170A [P]. 2018-11-05.
- [18] 石瑀, 李博, 戴广平, 等. 硼酸钙对铜渣中夹杂铜沉降效果的影响[J]. 过程工程学报, 2019, 19(3):553-559.  
SHI Y, LI B, DAI G P, et al. Effect of calcium borate on the sedimentation effect of copper inclusions in copper slag [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(3):553-559.
- [19] MAWEJA K, MUKONGO T, MUTOMBO I. Cleaning of a copper matte smelting slag from a water-jacket furnace by direct reduction of heavy metals[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3):856-862.
- [20] GUO Z Q, PAN J, ZHU D Q. Green and efficient utilization of waste ferric-oxide desulfurizer to clean waste copper slag by the smelting reduction-sulfurizing process[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199:891-899.
- [21] TIAN H Y, GUO Z Q, PAN J, et al. Comprehensive review on metallurgical recycling and cleaning of

- copper slag[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105366. DOI: 10. 1016/j. resconrec. 2020. 105366.
- [22] 郭占成,高金涛,王哲,等. 超重力冶金:科学原理、实验方法、技术基础、应用设计[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(12):1592-1617.  
GUO Z C, GAO J T, WANG Z, et al. Supergravity metallurgy: principles, experimental methods, techniques, and applications[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(12):1592-1617.
- [23] 高金涛,郭占成,李军成. 一种超重力去除钢水中非金属夹杂物的方法:CN103602782A[P]. 2014-02-26.  
GAO J T, GUO Z C, LI J C. A method for removing non-metallic inclusions from molten steel by super gravity:CN103602782B[P]. 2014-02-26.
- [24] WANG Z W, GAO J T, LAN X. An environmental-friendly method for recovery of aluminum droplets from aluminum dross:mechanical activation and supergravity separation[J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Process Safety and Environmental Protection, Part B*, 2023, 175:199-211.
- [25] 段宇恒,董立花,赵烁,等. 基于超重力过滤净化铝硅合金的实验研究[J]. *工程技术研究*, 2022, 4(3):81-84.  
DUAN Y H, DONG L H, ZHAO S. Experimental study on filtration and purification of aluminum silicon alloy based on supergravity[J]. *Engineering Technology Research*, 2022, 4(3):81-84.
- [26] 杨玉厚,李京京,宋子睿,等. 利用超重力富集和分离 Sn-3%Fe 熔体中的杂质元素铁[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(1):41-50.  
YANG Y H, LI J J, SONG Z R, et al. Using supergravity to enrich and separate impurity element iron in Sn-3%Fe melt[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(01):41-50.
- [27] ASSAEL M J, ARMYRA I J, BRILLO J, et al. Reference data for the density and viscosity of liquid cadmium, cobalt, gallium, indium, mercury, silicon, thallium, and zinc[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2012, 41(3): 285. DOI: 10. 1063/1. 4729873.
- [28] Reports outline mining and metallurgy findings from Kunming University (apparent viscosity evolution of copper converter slag during a reduction process)[J]. *Mining & Minerals*, 2022, 9:42-43.
- [29] 陆耀军. 油水重力分离过程中的液滴动力学分析[J]. *油气田地面工程*, 1998(4):1-5, 77.  
LU Y J. Analysis of droplet dynamics during oil-water separation by gravity[J]. *Oil and Gas Field Surface Engineering*, 1998(4):1-5, 77.
- [30] 刘威. 钢中非金属夹杂物界面去除过程微观模型研究[D]. 北京:北京科技大学, 2020.  
LIU W. Micromodel research on removal process of non-metallic inclusion interface in steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.