

8 kA 稀土熔盐电解槽中碳颗粒运动轨迹模拟研究

杜鑫^{1,2}, 孔钦可^{1,2}, 李旺^{1,2}, 孙硕怡^{1,2}, 呼斯乐图^{1,2}, 张全军^{1,2},
刘玉宝^{1,2*}, 黄海涛^{1,2*}

(1. 白云鄂博稀土资源研究与综合利用全国重点实验室, 内蒙古 包头 014000;
2. 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014000)

摘 要:在稀土熔盐电解法制取稀土金属过程中, 石墨阳极会脱落碳颗粒进入熔盐中形成杂质, 与稀土金属接触会影响其品质。本文以 8 kA 稀土电解槽为研究对象, 利用 Ansys fluent 软件对电解槽阳极内表面的不同粒径、不同脱落位置的碳颗粒运动轨迹进行仿真模拟。计算结果表明, 碳颗粒的运动轨迹主要受到曳力、浮力和重力的影响, 其中, 曳力为影响颗粒运动轨迹的主要因素; 碳颗粒受曳力影响的程度与其粒径相关, 颗粒粒径越大则曳力作用越明显; 脱落的碳颗粒在电解槽中容易向阴极移动, 增大阴极与阳极间的距离可以有效地避免碳颗粒向阴极运动。因此, 在设计稀土熔盐电解槽及选择石墨时需要考虑碳颗粒运动行为。

关键词:稀土电解槽; 碳颗粒; 多相流; 数值模拟; 公式拟合

中图分类号: TF845

文献标识码: A

文章编号: 1004-0277(2026)01-0031-13

稀土及其合金广泛应用于航天航空、军工、冶金工业等领域, 有着“工业维生素”的美誉^[1~3]。熔盐电解法是制备稀土金属的主要方法^[4], 该方法采用氟化物熔盐体系电解稀土氧化物, 在直流电的作用下稀土离子在阴极获得电子变成金属单质, 氧离子在阳极失电子, 与石墨结合形成二氧化碳或一氧化碳后脱离石墨。在实际生产中, 石墨产生的石墨颗粒从阳极脱落, 石墨颗粒受电解质流场影响易与液态金属接触, 导致稀土金属碳含量升高^[5]。已有学者对稀土电解槽开展数值模拟研究, 通过计算分

析工艺条件及电解槽结构研究其对电解槽内流、电场、热场的影响^[6~10], Chen 等^[11]利用多相流模型模拟了传统立式稀土电解槽与底部阴极电解槽的流场, Panicker 等^[12]利用 LES 模型对铝电解槽流动进行模拟, 刘中兴等^[13,14]对 3 kA 钹电解槽内颗粒受力进行分析, 来模拟颗粒运动轨迹。

本文以 8 kA 稀土电解槽为例, 使用 Comsol 仿真软件, 计算模型采用欧拉多相流模型和 DPM 模型, 可以很好地描述电解槽内气泡与电解质的交互以及电解槽内颗粒的运动^[15,16]。通过对碳颗粒在

收稿日期: 2024-11-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3506800); 内蒙古自治区 2022 年科技领军人才团队项目(2022LJRC0005)

作者简介: 杜鑫(1996-), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 硕士, 主要从事稀土火法冶金相关研究, E-mail: duxinxin@brire.com

* 通信作者: 刘玉宝, 正高级工程师, E-mail: liuyubao@brire.com; 黄海涛, 工程师, E-mail: huanghaitao@brire.com

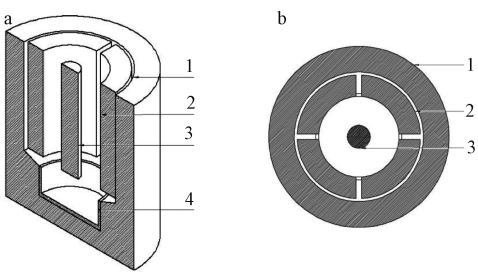
DOI: 10.3724/S1004-0277.20240071

熔盐中运动轨迹进行模拟,分析不同粒径、不同掉落位置的碳颗粒在电解槽内的运动轨迹并对其进行公式拟合,对比不同极距下碳颗粒的运动情况,为电解槽结构优化、石墨材料选择及稀土熔盐电解工艺技术的提升提供理论依据。

1 模型建立

1.1 8 kA 稀土电解槽物理模型建立

8 kA 电解槽主要由石墨阳极、钨棒阴极、金属接收器以及石墨坩埚四部分组成,其中,阳极分为四个独立的瓦片状石墨板,电解槽结构如图 1 所示,电解工艺及电解质物性参数如表 1 所示。



a: 电解槽纵向截面; b: 电解槽横向截面

1: 石墨坩埚; 2: 阳极; 3: 阴极; 4: 接收器

图 1 电解槽示意图

a: Longitudinal section of electrolytic cell;

b: Transverse section of electrolytic cell

1: Graphite crucible; 2: Anode; 3: Cathode; 4: Receive

Fig. 1 Schematic diagram of electrolytic cell

表 1 熔盐物性参数

Table 1 Physical property parameters of molten salt

Operational current/kA	Current efficiency/%	Electrolytic temperature/℃	Electrolyte	Density/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	Viscosity/ ($\text{Pa} \cdot \text{S}$)	Surface tension/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
8	83	1050	$\text{NdF}_3\text{-LiF-Nd}_2\text{O}_3$	3.850	4.9×10^{-3}	2.65

在研究石墨阳极上脱离的碳颗粒在电解质中的流动轨迹时,由于电解槽是轴对称结构,因此对电解槽的物理模型做简化处理,计算区域选择整体模型的四分之一,使用 SolidWorks 软件建立电解槽的三维计算模型,如图 2 所示。为便于计算,结合理论及其实际对电解过程做出以下假设:

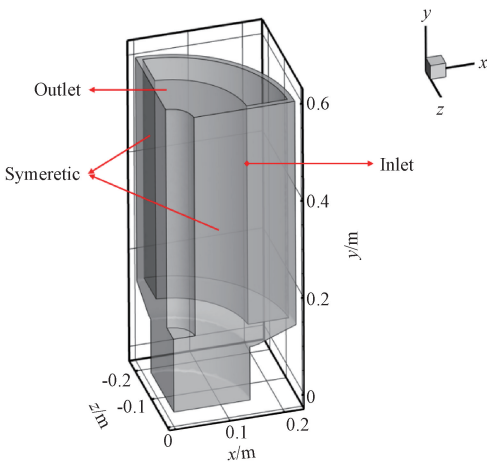


图 2 电解槽计算域

Fig. 2 Computational domain of electrolytic cell

(1) 电解槽中的流体为不可压缩流体;

(2) 本次研究的内容为单个颗粒的运动轨迹,且在实际生产过程中电解槽内颗粒的总体积分数小于 10% 时对流体影响极低,因此只考虑液相对离散相的作用,忽略颗粒之间的相互作用;

(3) 由于本次研究的颗粒很小,为便于计算,设定颗粒为均一的球状。本文主要研究碳颗粒在电解槽内的运动轨迹,所以将阳极产生的气泡假设为大小一致的球状气泡,忽略气泡的破碎、合并;

(4) 电解质运动的驱动力为阳极气体^[17,18]。

1.2 电解槽边界条件确定

根据热力学计算结合相关研究可知,在 1050 ℃ 电解温度下,阳极生成的气体体积比 $\text{CO} : \text{CO}_2$ 为 8 : 1^[19]。

混合气体密度^[20]:

$$\rho = \sum \rho_i r_i \tag{1}$$

混合气体粘度:

$$\mu = \frac{1}{\sum \frac{r_i}{\mu_i}} \tag{2}$$

式中, r_i 为组分 i 所占比例, %。

单位气体生成率^[21]:

$$q = \frac{iRT}{4FP} \tag{3}$$

式中, q 为气体生成率, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; i 为阳极电流密度, A/m^2 ; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K ; F 为法拉第常数, $96500 \text{ C}/\text{mol}$; P 为标准大气压, 101325 Pa 。

气泡尺寸取决于气泡的产生机理, 而气泡的形成方式有多种, 最常见的是从气孔中形成。设置阳极内表面生成气泡为球形气泡, 其平均当量直径为 2.639 mm ^[22,23]。电解槽出口设为压力出口, 选择标准大气压强, 壁面采用无滑移边界。

1.3 控制方程

数值模拟计算对连续性方程、动量方程、 k - ε 湍流方程、离散方程、欧拉-欧拉方程进行计算。

连续性方程^[24,25]:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \cdot \mu_g) = 0 \tag{4}$$

动量守恒方程^[26]:

$$\frac{\partial (\rho_g u_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g u_g u_g) = - \nabla \cdot p + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 u_g + \rho_g g \tag{5}$$

式中, μ_g 为气流速度矢量; 有效粘性系数 $\mu_{\text{eff}} = \lambda/c_p + \mu_t/\text{Pr}_t$, Pr_t 为普朗特常数。

Standard k - ε 方程^[27]:

k 方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \tag{6}$$

ε 方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \tag{7}$$

式中:

$$G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{8}$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{9}$$

式中, μ_t 为湍流粘度系数; k 与 ε 分别为湍流动能与湍流耗散率; μ 为湍流粘性系数。湍流方程中设定的系数如表 2 所示。

表 2 湍流模型常数

Table 2 Turbulence model constants

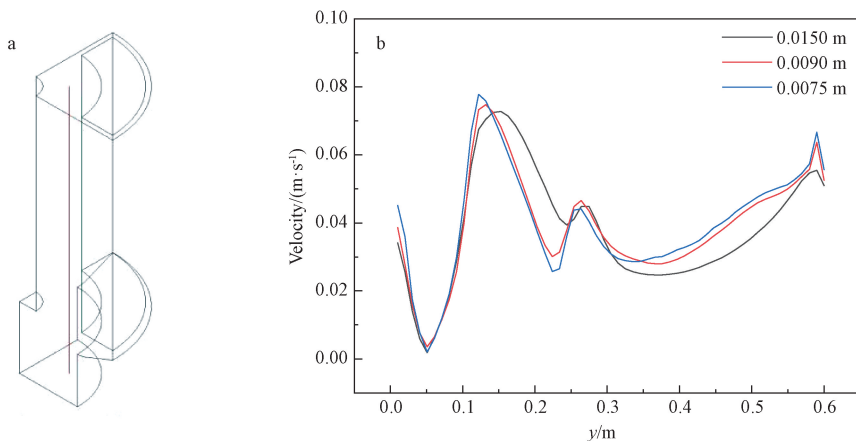
Constant	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
Value	1.44	1.92	1.0	1.3

2 网格无关性验证

在电解槽熔盐内建立一条竖直的线段, 如图 3a 所示, 在该线段上平均设立 60 个点, 使用 Fluent meshing 进行网格划分, 网格类型为 Poly-hexcore。Fluent meshing 通过面网格构建体网格, 将最大面网格设置为 0.0150 m 、 0.0090 m 和 0.0075 m , 计算不同网格数量时在线段下各点的速度变化, 计算结果如图 3b 所示。在最大面网格尺寸为 0.0090 m 和 0.0075 m 时, 线段上各点速度相差很小且在允许的误差范围内, 兼顾计算效率, 确定最大面网格尺寸为 0.0090 m 。

3 颗粒受力分析

在数值模拟中用于描述流体运动的方法主要有拉格朗日法和欧拉法两种, 拉格朗日法注重于流体的质点, 通过各个质点的流动来描述流体的流动状态, 而欧拉法注重于空间, 通过整个空间内各个参数的变化对流体的流动状态进行描述。所以利用欧拉-拉格朗日方法将流体处理为连续相, 将颗粒相作为离散相, 计算在拉格朗日坐标下的颗粒运动轨迹, 可以更好地描述碳颗粒在稀土电解槽中的运动轨迹^[28,29]。



a: 线段位置; b: 不同网格数量下线段的速度

图 3 不同网格数量下轴线速度

a: Line segment position; b: Velocity of line segments under different grid numbers

Fig. 3 Axis velocity under different grid numbers

Fluent 中的 DPM 模型及欧拉-拉格朗日方法, 将流体看作连续的介质求解 Navier-Stokes 方程。离散相通过跟踪颗粒、气泡、液滴的运动轨迹进行求解, 离散相与流体相之间可以进行动量、质量以及能量的交换, 当离散相在计算域中占比足够小时, 可以忽略离散量对流体相的影响以及对颗粒之间的作用^[30~32]。

Fluent 对离散相的受力平衡进行积分计算, 通过拉格朗日坐标系对颗粒的运动轨迹进行描述。其中, 颗粒的力矩平衡包括重力、浮力、曳力、虚质量力、压力梯度力、热泳力、Brownian 力、Saffman 力、Magnus 升力等^[33~40]。

本次计算中只研究单个固体颗粒的运动轨迹, 颗粒运动主要受重力、浮力和曳力影响, 如图 4 所示, 忽略颗粒在流体中的作用以及颗粒受到的其他力。

Schuller-Naumann 曳力模型^[41]:

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_p} (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) & \text{Re}_p < 10^3 \\ 0.44 & \text{Re}_p > 10^3 \end{cases} \quad (10)$$

曳力:

$$F_d = \frac{1}{8} \pi d_p^2 C_d \rho_l |u_l - u_p| (u_l - u_p) \quad (11)$$

重力:

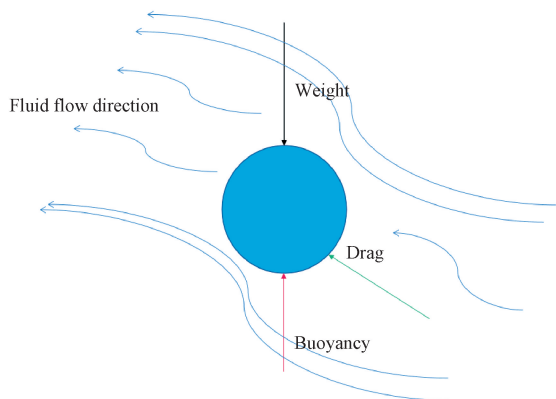


图 4 颗粒受力模型

Fig. 4 Particle force model

$$G_p = \rho_p V_p g \quad (12)$$

浮力:

$$F_p = \rho_l V_p g \quad (13)$$

式中, C_d 为曳力系数; Re_p 为颗粒雷诺数; d_p 为颗粒粒径, m; ρ_l 为液相密度, kg/m^3 ; u_l 为流体速度, m/s; u_p 颗粒速度, m/s; ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; V_p 为颗粒体积, m^3 。

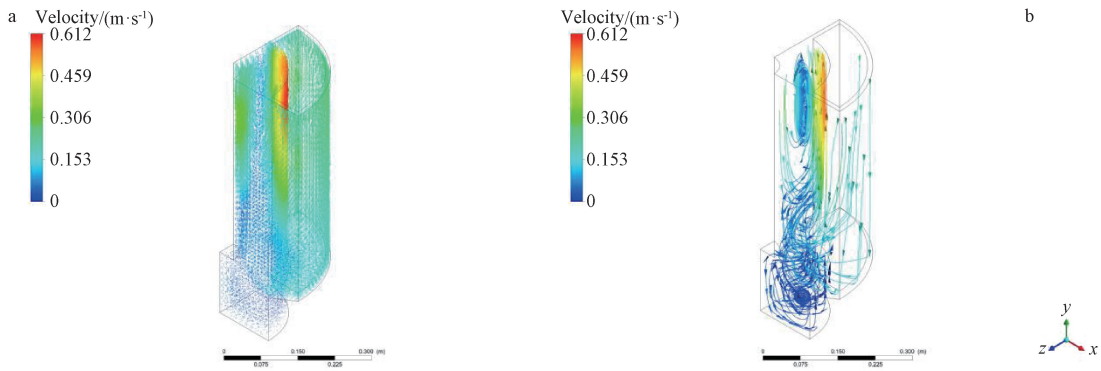
4 结果与讨论

4.1 电解槽内流场分布

电解槽内颗粒的运动主要受流体流动状态的

影响,电解槽内流场如图 5 所示。首先考虑达到电解槽内流场相对稳定的状态,此时靠近阳极内表面的速度达到最大值,液相流动速度由阳极内表面自下而上递增,这是由于生成的 CO 气体在阳

极内表面形成一个由下而上逐渐增厚的气体层,该气体层在阳极内表面上部达到最大值。阳极内表面生成的气泡向上运动,受浮力作用上浮速度逐渐增大。



a: 电解槽速度矢量图;b: 电解槽流场迹线图

图 5 电解槽流场

a: Electrolytic cell velocity vector diagram;b: Trace diagram of flow field in electrolytic cell

Fig. 5 Flow field of electrolytic cell

阳极内表面生成的气泡作为直接动力推进电解槽内电解质的运动,同时产生涡流,有利于新加入的氧化物在电解质中的溶解与循环,与此位置相比,电解槽底部流动缓慢,可以为接收器收集稀土金属创造条件。

电解槽横截面速度云图如图 6 所示,可以清晰看到电解质流速较大的区域主要集中在阳极内表面与阴极表面,由于靠近阳极内表面一侧的电解质在气泡的作用下形成上升流,在到达电解质液面之后受到重力的影响,在阴极表面形成下降流,槽内电解质在此作用下循环流动形成涡流。从图 6 中可以看出,阴极表面下降流的流动速度比阳极内表面上升流的流速小。

4.2 电解槽内碳颗粒运动数值模拟

当电解质流动达到动态稳定后,在电解槽石墨阳极内引入碳颗粒,模拟碳颗粒在电解槽内部的运动状况,碳颗粒以初速度为 0 从阳极内表面中心线脱落。为确定碳颗粒尺寸,取 8 kA 电解槽生产过程中旧阳极内表面的碳粉颗粒进行粒度测试分析,测

试结果如图 7 所示,选取尺寸较普遍的颗粒粒径进行模拟计算,颗粒粒径分别为 45.6 μm、98.7 μm、400 μm、859 μm 和 1850 μm。在石墨阳极内表面平均选取 5 个点作为碳颗粒掉落位置,如图 8 所示,掉落高度自下而上为 150 mm、262.5 mm、375 mm、487.5 mm 和 600 mm。

计算不同颗粒粒径的碳颗粒在不同位置脱离时的运动轨迹,如图 9 所示,受曳力和浮力的影响,262.5 mm、375 mm、487.5 mm 和 600 mm 位置掉落时的运动轨迹基本一致,颗粒脱落后总是向上运动,但随着粒径的增大,向上运动的速度加快。越靠近液面,其含气率越高,所以碳颗粒受到的曳力较大,运动轨迹表现为随电解质做垂直向上运动,偏移距离很小。碳颗粒从 150 mm 的高度掉落时,此位置的气体含气率低,颗粒轨迹发生改变,表现为颗粒在上升的同时伴随着向阴极方向发生偏移,随碳颗粒粒径增大,偏移距离逐步增大。

在 262.5 mm、375 mm、487.5 mm 和 600 mm 的

位置掉落的碳颗粒贴近阳极表面向上运动,碳颗粒在向上运动时会对阳极表面造成冲刷作用,促进阳

极处碳的脱落。因此,可以通过改变阳极结构来削弱冲刷作用。

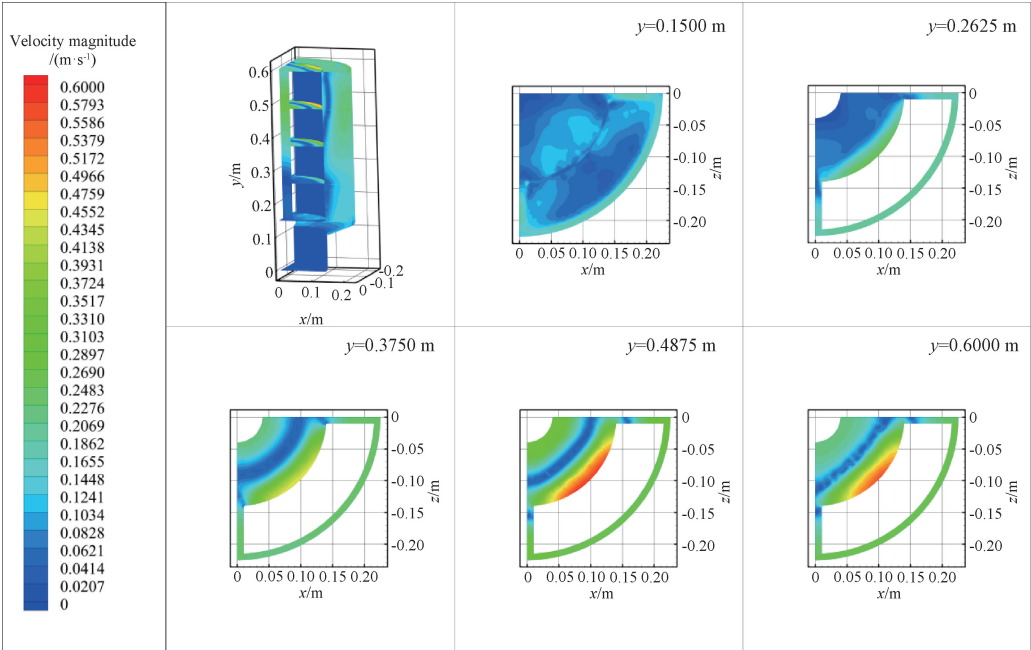


图 6 电解槽纵向截面速度云图

Fig. 6 Longitudinal cross-sectional velocity contour map of electrolytic cell

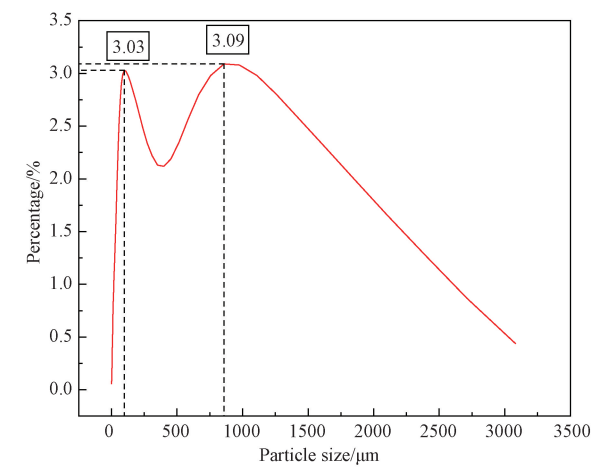


图 7 阳极颗粒粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution of anode particles

图 10 中显示,碳颗粒从 150 mm 的高度掉落时,在 x 轴和 y 轴方向的偏移距离。结果表明,碳颗粒在熔盐内的运动时间与粒径呈反比,颗粒在 x 轴的偏移距离与颗粒粒径呈正比,且在颗粒粒径达到 400 mm 后,偏移量逐渐减小。颗粒粒径越大,在熔

盐内部运动时间越短,受到曳力的影响越明显。150 mm 处掉落的颗粒有向阴极表面运动的趋势,粒径越大,距离阴极表面越近,这种情况可能会促进电解过程中碳颗粒接触阴极而产生稀土金属,造成稀土金属的纯度降低,碳含量增加。

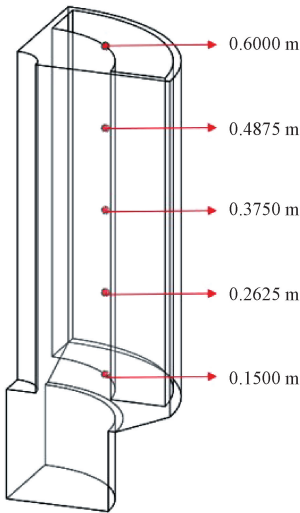
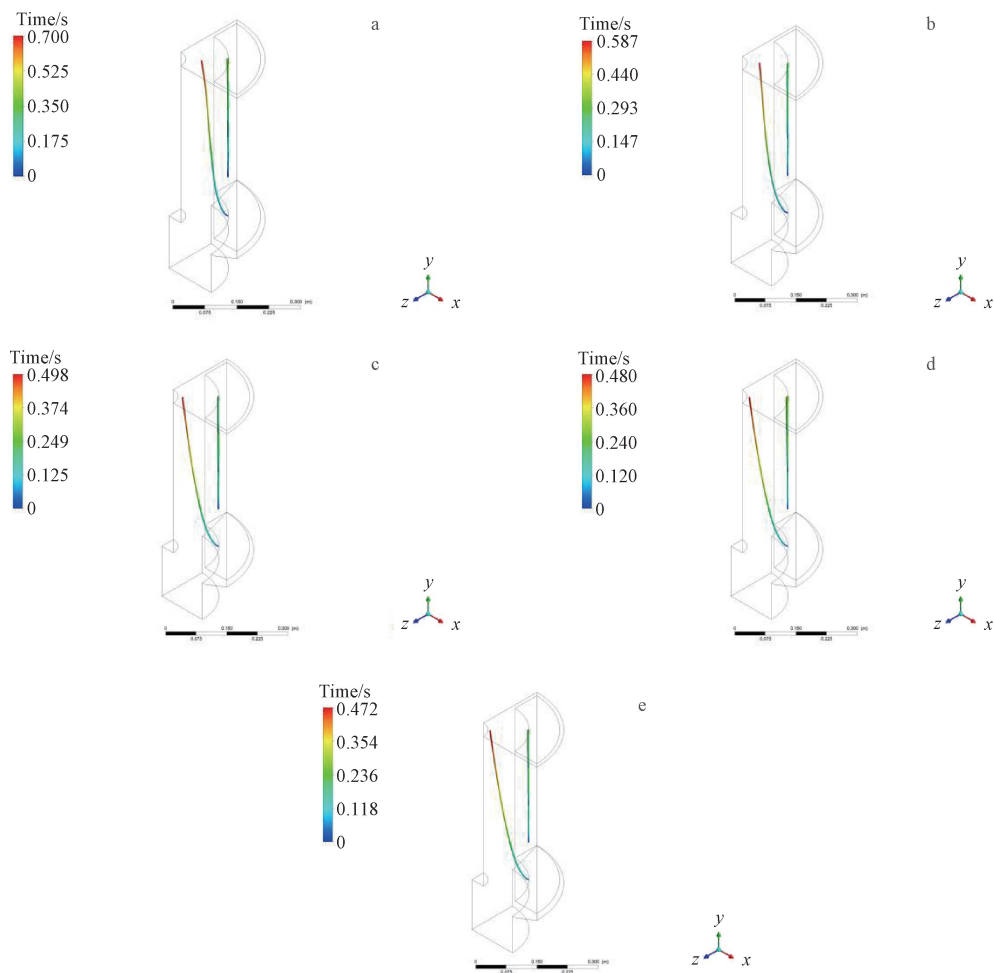


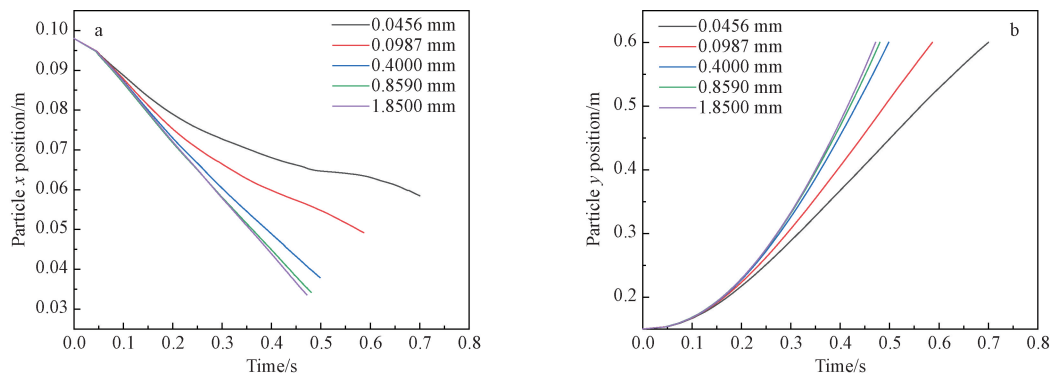
图 8 碳颗粒掉落位置

Fig. 8 Carbon particle falling positions



a: 45.6 μm ; b: 98.7 μm ; c: 400 μm ; d: 859 μm ; e: 1850 μm
图 9 不同粒径颗粒的运动轨迹

Fig. 9 Trajectory of particles with different grain sizes



a: x 轴位置; b: y 轴位置

图 10 颗粒轴线方向偏移距离

a: x axis position; b: y axis position

Fig. 10 Offset distances of particles in axial direction

150 mm 高度掉落的颗粒受力如图 11 所示,颗粒受到曳力的影响大于其自身所受到的重力与浮力的差,所以颗粒的运动轨迹主要受到曳力的影响。随着粒径的增大,颗粒受到曳力的影响递增,粒径小于 $98.7\text{ }\mu\text{m}$ 时,曳力的影响效果未发生明显变化;当粒径大于 $98.7\text{ }\mu\text{m}$ 时,曳力造成的影响成倍增长。因此需要提高石墨阳极的质量,避免大粒径的颗粒进入电解槽内,对金属纯度产生影响。

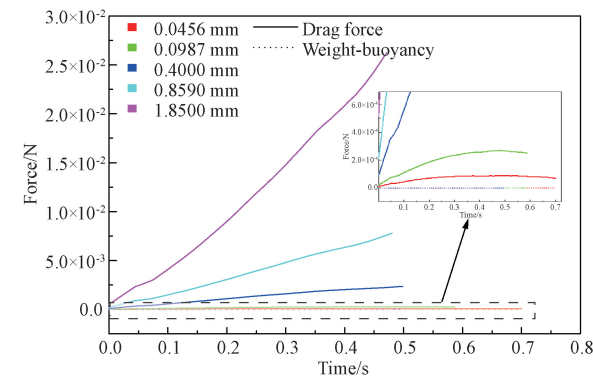


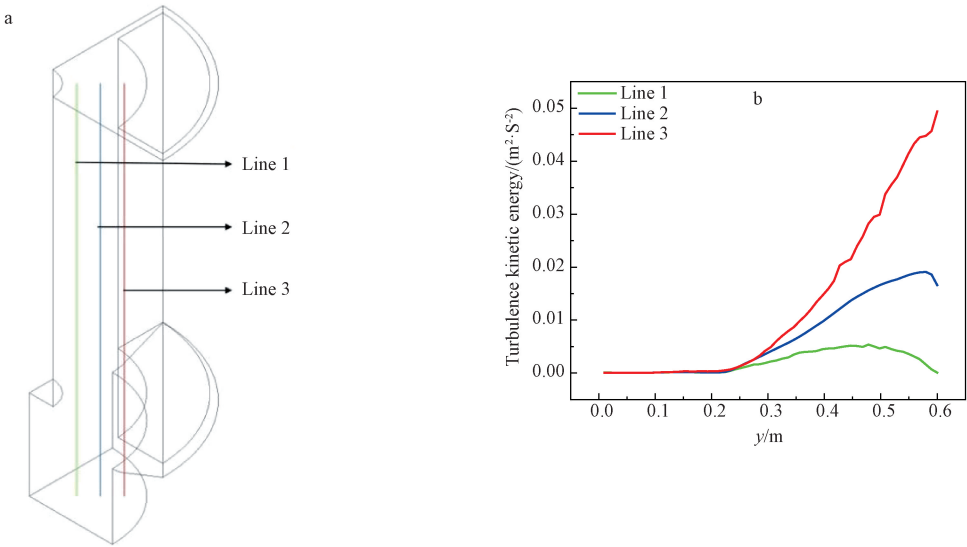
图 11 颗粒运动过程中受力变化

Fig. 11 Force changes during particle movement

4.3 极距对颗粒运动轨迹的影响

于电解槽内设立三条监测线段,如图 12a 所示,三条线段上各点对应的流体湍流动能如图 12b 所示。结果表明电解槽内流体的主要运动区域集中在阴极与阳极之间,改变电解槽内阴极与阳极之间的距离会对电解槽内流场产生影响。目前稀土熔盐电解槽多采用上插阴阳极的方式,随着反应的进行,石墨阳极不断消耗变薄,因此同一阳极服役期内,阴阳极之间的距离存在变化。基于此槽型结构运行过程中,阳极尺寸变化所引起的极距变化,研究不同极距电解槽内碳颗粒的运动轨迹,进行电解槽结构优化分析。

结合阳极尺寸变化所引起的电解槽阴阳极的极距变化进行模拟计算,对比研究原阳极厚度、阳极厚度分别减小 $1/4$ 以及 $1/2$ 时颗粒的运动轨迹。计算结果如图 13 所示,图例 0、1、2、3、4 分别代表粒径为 $1850\text{ }\mu\text{m}$ 、 $859\text{ }\mu\text{m}$ 、 $400\text{ }\mu\text{m}$ 、 $98.7\text{ }\mu\text{m}$ 和 $45.6\text{ }\mu\text{m}$ 的碳颗粒。图 13a、图 13c、图 13e 分别为原阳极厚度、阳极厚度减小 $1/4$ 和 $1/2$ 时电解槽内颗粒的运动轨迹,图 13b、图 13d、图 13f 为对应厚度下电解槽内流体流动迹线。



a: 线条位置; b: 湍流动能

图 12 电解槽轴线方向湍流动能

a: Line position; b: Turbulence kinetic energy

Fig. 12 Turbulence kinetic energy in the direction of electrolytic cell axis

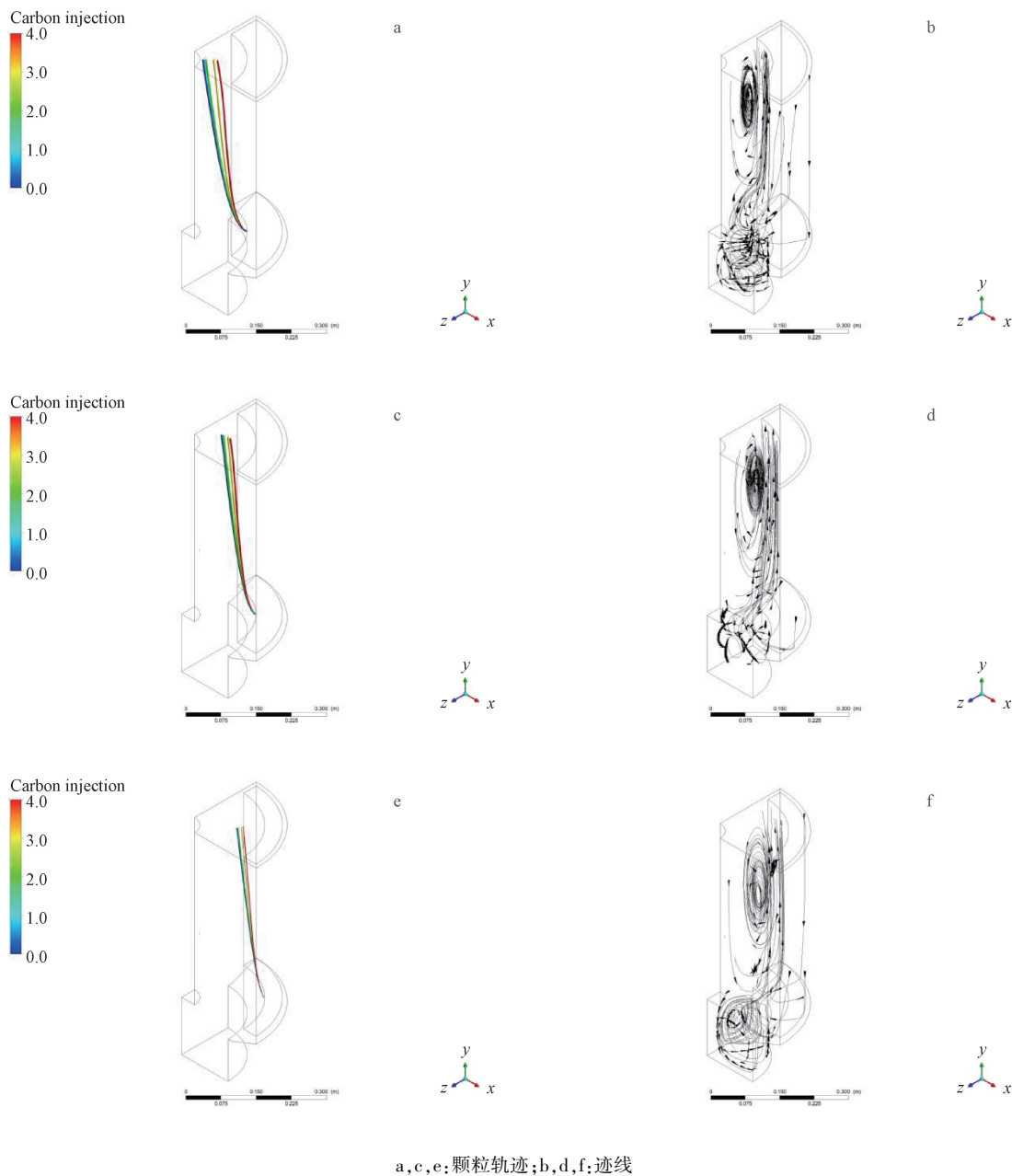


图 13 不同极距下颗粒运动轨迹及电解质流动迹线

a, c, e: Particle trajectory; b, d, f: Path line

Fig. 13 Particle movement trajectory and electrolyte flow trajectory under different polar distances

由图 13 可知,在极距增加后电解槽内流体的流动速度减缓,阴极与阳极之间的涡流范围增大,颗粒受到的曳力减小,其横向偏移量减小,在浮力的作用下颗粒运动轨迹逐渐趋于竖直。极距增大后,颗粒到阴极的横向距离增加,可以有效避免阴极产生的液态金属与颗粒的接触,提高金属纯净度。同时,在阳极厚度减小到原厚度的 1/2 时,电解槽底部的流体流动

更加均匀,可以提高电流效率,减少由于槽内流体流动不均匀而引起的物料积累。

4.4 颗粒运动轨迹未知公式拟合

运用 Python 3.0 编程,将颗粒运动轨迹的横坐标与纵坐标数据封装在 DB Browser for SQLite 数据库中,Matplotlib 模块作为可视化工具进行未知拟合公式的数据拟合,使用 Numpy 最小二乘法对未知拟

合公式的数据点进行多项式拟合,根据拟合值与原始值的契合程度获取最佳的 n 次多项式,函数方法如下:

```
numpy. polyfit ( x , y , deg , rcond = None , full = False , w = None , cov = False ) (14)
```

式中, x 为类数组,表示 M 个采样点的 x 坐标; y 表示采样点的 y 坐标;Deg 为整数,表示拟合多项式的次数,若为 n 次方多项式,则将其设为 n ;cov 为布尔值,返回估算值和估算值的协方差矩阵。

碳颗粒粒径分布主要集中在 $859\text{ }\mu\text{m}$,所以在原始槽型中对 0.15 m 高度掉落的粒径为 $859\text{ }\mu\text{m}$ 的碳颗粒运动轨迹进行未知公式拟合,为便于观察计算结果,对颗粒各个位置的横纵坐标扩大 100 倍处理,Python 计算结果如图 14 所示,图中 R^2 表示拟合优先度,对比发现三次多项式的曲线拟合效果优于二次多项式曲线拟合。因对原坐标进行扩大处理,所以对计算的拟合公式进行修正处理,结果如下:

$y=251.9x^3+51.67x^2-17.27x+1.112$ (15)

由计算结果可知,当前电解槽下最大深度为 1.012 m ,当电解槽总深度超过该值时碳颗粒与阴极易发生接触,影响稀土金属纯度。可用该方法将 Ansys Fluent—DB Browser for SQLite—Python 进行串联,对不同粒径的碳颗粒运动轨迹拟合,计算得出合适的电解槽深度。

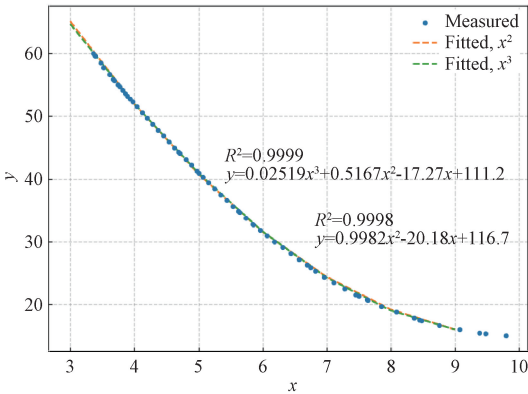


图 14 公式拟合结果

Fig. 14 Formula fitting results

5 结论

- 1. 曳力、重力和浮力是电解槽内碳颗粒运动所受到的主要作用力,其中,曳力为改变颗粒运动的最主要作用力,颗粒粒径越大,受到曳力的作用越明显。
- 2. 阳极内表面掉落的碳颗粒运动轨迹均为向熔盐上表面进行,于阳极内表面底部掉落的碳颗粒在向熔盐表面运动的过程中会靠近阴极表面,颗粒粒径越大则越接近阴极。颗粒在电解质内运动的时间与颗粒粒径成反比,颗粒粒径越大,其在电解质内运动的时间越短。
- 3. 增加极距可以有效增加颗粒与阴极表面的距离,避免碳颗粒进入稀土金属接收器。阳极石墨碳颗粒的脱落及运动轨迹对稀土熔盐电解反应正常运行及质量控制有重要作用,在熔盐电解槽设计过程中需充分结合运动规律进行槽型结构设计,另外,提升石墨质量对减少碳颗粒脱落较为关键。
- 4. 根据拟合公式对电解槽深度进行控制,将 8 kA 电解槽深度控制在 1.012 m 之下可以大幅减少碳颗粒与阴极的接触。

参考文献:

[1] 严纯华,黄小卫. 2023 年中国稀土研究综合评述[J]. 中国稀土学报, 2024, 42(3): 381-418.
Yan C H, Huang X W. Review on research of rare earths field in China in 2023[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2024, 42(3): 381-418.

[2] Wu H F, Hu W X, Ma S B, et al. Effect of Ce on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Ce magnesium alloys[J]. China Foundry, 2023, 20(4): 271-279.

[3] Wei B N, Zhang G S, Song P, et al. Realizing texture in bulk nanocrystalline Nd-Fe-B magnet via high-stress low-temperature rapid deformation[J]. Journal of Rare Earths, 2023, 41(5): 713-720.

[4] Tian L, Ahmadi G. Particle deposition in turbulent duct flows—Comparisons of different model predictions[J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(4): 377-397.

- [5] 薛娟琴, 刘妮娜, 刘志飞, 等. 熔盐电解 Nd 用石墨阳极失效及浸渍硼酸盐防护[J]. 稀有金属, 2016, 40(8): 806-815.
- Xue J Q, Liu N N, Liu Z F, et al. Failure and borate impregnation protection of graphite anode for neodymium electrodeposition in molten salt[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 40(8): 806-815.
- [6] Lü X J, Zhang H X, Han Z X, et al. Numerical simulation of coupled thermo-electrical field for 20 kA new rare earth reduction cell[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 1124-1134.
- [7] 章凯羽, 吕玮中, 吕钰, 等. 阳极开槽对底部阴极稀土电解槽气泡运动影响的数值模拟[J]. 稀土, 2023, 44(6): 18-27.
- Zhang K Y, Jiang W Z, Lü Y, et al. Numerical simulation of the effect of anode slotting on bubble movement in bottom-cathode rare earth electrolytic cell[J]. Chinese Rare Earths, 2023, 44(6): 18-27.
- [8] 张恒星, 吕晓军, 袁水平, 等. 稀土电解槽电场仿真与阴极结构优化[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(5): 667-676.
- Zhang H X, Lü X J, Zhong S P, et al. Electric field numerical simulation and cathode structure optimization of rare earth electrolysis cell[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2020, 38(5): 667-676.
- [9] 盛琦凯, 赵增武, 张亚竹, 等. 电解水过程中微电极制备研究进展[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(2): 13-21.
- Sheng Q K, Zhao Z W, Zhang Y Z, et al. Research progress on microelectrode preparation for water electrolysis process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(2): 13-21.
- [10] 龚姚腾, 吕招东, 陈泽斌, 等. 通电方式对稀土熔盐电解影响的数值模拟及分析[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(1): 112-118.
- Gong Y T, Lü Z D, Chen Z B, et al. Numerical simulation and analysis of influence of electric mode on electrolysis of rare earth molten salt[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(1): 112-118.
- [11] Chen J Q, Sun S C, Tu G F, et al. Current efficiency comparison of two types of rare earth electrolytic cells: Flow field numerical simulation analysis and experimental investigation[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2024, 55(4): 2426-2439.
- [12] Panicker N S, Chaudhary R, Rao V M, et al. A large eddy simulation study of flow turbulence, alumina transport, and bath temperature evolution in conventional aluminum-smelting cell using OpenFOAM[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(4): 2407-2426.
- [13] 刘中兴, 周一凡, 伍永福, 等. 3 kA 钽电解槽流场中颗粒受力分析[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(1): 90-99.
- Liu Z X, Zhou Y F, Wu Y F, et al. Force analysis of particle in flow field of 3 kA rare earth electrolysis cell[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2020, 38(1): 90-99.
- [14] 刘中兴, 张雪娇, 伍永福, 等. 3 kA 稀土电解槽颗粒运动轨迹的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015, (5): 47-50.
- Liu Z X, Zhang X J, Wu Y F, et al. Numerical simulation of particles trajectory in 3 kA rare earth electrolytic cell[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015, (5): 47-50.
- [15] 赵晶晶, 程树森, 陶涛. 钢液中气泡和夹杂物的去除[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(增刊1): 104-107.
- Zhao J J, Cheng S S, Tao T. Bubble and inclusion removal in molten steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(Sup1): 104-107.
- [16] 范世平, 王彦芳, 冯民权, 等. 污染物迁移扩散的质点追踪随机模拟[J]. 武汉大学学报, 2011, 44(1): 32-36.
- Fan S P, Wang Y F, Feng M Q, et al. Particle tracing random simulation on advection diffusion of pollutants[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(1): 32-36.
- [17] Purdie J M, Bilek M, Taylor M P, et al. Impact of Anode Gas Evolution on Electrolyte Flow and Mixing in

- Aluminum Electrowinning Cells [A]. Light Metals 1993 [C]. Warrendale, PA: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 1993: 355-360.
- [18] Bilek M M, Zhang W D, Stevens F J. Modeling of Electrolyte Flow and Its Related Transport Processes in Aluminum Reduction Cells [A]. Light Metals 1994 [C]. Warrendale, PA: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 1994: 323-331.
- [19] 刘奎仁. 钎电解熔盐性质及电极过程研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2001.
- Liu K R. Study on Molten Salt Properties and Electrode Processes of Neodymium Electrolysis [D]. Shenyang: Northeastern University, 2001.
- [20] 刘钊. 稀土熔盐电解槽流场与电场的模拟与探讨 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2015.
- Liu Z. Simulation and Discussion on Flow Field and Electric Field of Rare Earth Molten Salt Electrolyzer [D]. Beijing: Beijing Research Institute of Nonferrous Metals, 2015.
- [21] Solheim A, Johansen S T, Rolseth S. Gas driven flow in hall-heroult cells [J]. Light Metals, 1989: 245-252.
- [22] Gao G, Stott F H, Dawson J L, et al. Electrochemical monitoring of high-temperature molten-salt corrosion [J]. Oxidation of Metals, 1990, 33(1): 79-94.
- [23] 张远君. 两相流体动力学: 基础理论及工程应用 [M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987: 299-303.
- Zhang Y J. Two-phase Fluid Dynamics: Basic Theory and Engineering Application [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1987: 299-303.
- [24] 杨永全, 郭勇. 雷诺应力代数模型在紊流场计算中的应用 [J]. 水力发电学报, 1990, 9(4): 47-57.
- Yang Y Q, Guo Y. Application of Reynolds stress algebraic model in turbulent flow field calculation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1990, 9(4): 47-57.
- [25] Lafn S, Aliod R. Deduction and validation of an eulerian-eulerian model for turbulent dilute two-phase flows by means of the phase indicator function disperse elements probability density function [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2000, 19(3): 189-202.
- [26] Olmos E, Gentric C, Vial C, et al. Numerical simulation of multiphase flow in bubble column reactors. Influence of bubble coalescence and break-up [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(21-22): 6359-6365.
- [27] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [28] 赵殿甲. 两相流体力学研究综述 [J]. 煤炭技术, 2006, 25(7): 113-114.
- Zhao D J. Summarize of research in two-phase flow [J]. Coal Technology, 2006, 25(7): 113-114.
- [29] Subramaniam S. Lagrangian-eulerian methods for multiphase flows [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(2-3): 215-245.
- [30] 张仪, 李兵, 白玉龙, 等. 液固流态化动态过程中相间作用力的数值模拟及实验验证 [J]. 化工学报, 2020, 71(11): 5129-5139.
- Zhang Y, Li B, Bai Y L, et al. Numerical simulation and experimental validation of inter-phase forces in dynamic process of liquid-solid fluidization [J]. CIESC Journal, 2020, 71(11): 5129-5139.
- [31] Yamoah S, Martínez-Cuenca R, Monrós G, et al. Numerical investigation of models for drag, lift, wall lubrication and turbulent dispersion forces for the simulation of gas-liquid two-phase flow [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2015, 98: 17-35.
- [32] Yao Y, He Y J, Luo Z H, et al. 3D CFD-PBM modeling of the gas-solid flow field in a polydisperse polymerization FBR: The effect of drag model [J]. Advanced Powder Technology, 2014, 25(5): 1474-1482.
- [33] Gosman A D, Ioannides E. Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors [J]. Journal of Energy, 1983, 7(6): 482-490.
- [34] Talbot L, Cheng R K, Schefer R W, et al. Thermophoresis of particles in a heated boundary layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 101(4): 737-758.
- [35] Ounis H, Ahmadi G, McLaughlin J B. Dispersion and deposition of Brownian particles from point sources in a simulated turbulent channel flow [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1991, 147(1): 233-250.

[36] Saffman P G. The lift on a small sphere in a slow shear flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1965, 22 (2) : 385-400.

[37] Oesterlé B, Dinh T B. Experiments on the lift of a spinning sphere in a range of intermediate Reynolds numbers [J]. Experiments in Fluids, 1998, 25 (1) : 16-22.

[38] 张若愚. 通风空调管道中颗粒物的运动及沉降规律研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.

Zhang R Y. Research of Particle Movement and Deposition Regularity in HVAC Ducts [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014.

[39] Sippola M, Nazaroff W. Particle deposition in ventilation ducts: Connectors, bends and developing turbulent flow [J]. Aerosol Science & Technology, 2005, 39 (2) : 139-150.

[40] Paz M C, Porteiro J, Eirís A, et al. Computational model for particle deposition in turbulent gas flows for CFD codes[J]. Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer XI, 2010,1: 135-143.

[41] 李永帅, 郑毅, 李岚, 等. 聚乙烯流化床反应器气-液-固流场中升力模型的影响研究[J]. 化工学报, 2022, 73 (12) : 5355-5366.

Li Y S, Zheng Y, Li L, et al. Influence of lift model on gas-liquid-solid flow field in polyethylene fluidized bed reactor [J]. CIESC Journal, 2022, 73 (12) : 5355-5366.

Simulation Study on the Carbon Particles Trajectories in an 8 kA Rare-earth Molten Salt Electrolytic Cell

DU Xin^{1,2}, KONG Qin-ke^{1,2}, LI Wang^{1,2}, SUN Shuo-yi^{1,2}, Husiletu^{1,2},
ZHANG Quan-jun^{1,2}, LIU Yu-bao^{1,2*}, HUANG Hai-tao^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization, Baotou 014000, China;
2. Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014000, China)

Abstract: During the rare-earth molten salt electrolysis process, the graphite anode can release carbon particles into molten salt, forming impurities. Upon contact with rare earth metals, these impurities can adversely affect metal purity and overall product quality. This study focuses on an 8 kA rare-earth electrolytic cell and employs Ansys Fluent software to simulate the motion trajectories of carbon particles with varying particle sizes and different detachment positions on the inner surface of the anode. The calculation results demonstrate that the trajectory of carbon particles is mainly influenced by drag force buoyancy and gravity, with drag force being the main factor affecting the trajectory of particles. The degree to which carbon particles are influenced by drag force is correlated with their particle size; larger particles experience a more pronounced drag force effect. Shed carbon particles tend to migrate toward the cathode within the electrolytic cell. Increasing the inter-electrode distance can effectively inhibit the migration of carbon particles toward the cathode. Therefore, the movement behavior of carbon particles should be considered when designing rare-earth molten salt electrolytic cells and selecting graphite materials.

Key words: rare-earth molten salt electrolytic cell; carbon particles; multiphase flow; numerical simulation; formula fitting