

引文格式:武文雅,李纯,蒙毅,等.工业铜电解槽阴阳极板间狭长空间的多漩涡传质数值模拟[J].中国有色冶金,2026,55(1):125-133.

WU Wenya, LI Chun, MENG Yi, et al. Numerical simulation of multi-vortex mass transfer in narrow space between cathode and anode plates of industrial copper electrolytic cells[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(1): 125-133.

工业铜电解槽阴阳极板间狭长空间的多漩涡传质数值模拟

武文雅, 李 纯, 蒙 毅, 铁 军, 朱 琰, 彭兴祖

(北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

[摘 要] 在铜电解精炼过程中,电解液的流动行为及其传质特性对电解效率、产品质量及能耗具有显著影响,工业电解槽中电极尺寸远大于极间距,阴阳极板间会形成特殊的狭长空间,电解质的流动和传质特性更为复杂多变。本文建立了工业尺度电解槽的二维有限元数值模型,深入分析了阴阳极板间狭长空间内电解液的流速分布、铜离子浓度分布及传输情况,得到以下主要结论。极板间电解液流动速度不均匀,上部区域比较慢,下部区域比较快,且形成多个漩涡区域;在阴阳极表面附近,水平方向速度几乎为 0,垂直方向速度在 0.3~15 mm/s 范围内波动;中间线上,水平方向速度在 0~22 mm/s 范围内波动,垂直方向速度在 0~9 mm/s 范围内波动。极板间的漩涡对铜离子浓度分布有较大影响,在阴极表面附近,铜离子浓度在 440~620 mol/m³ 范围内波动,在阳极表面附近,铜离子浓度在 530~740 mol/m³ 范围内波动,中间线上铜离子浓度在 500~630 mol/m³ 范围内波动,浓度的波动与漩涡区域相对应。铜离子的传输主要靠对流驱动,漩涡与漩涡之间的横向流动实现了铜离子从阳极到阴极的直接传输;漩涡在将铜离子从阳极传输到阴极的同时,也将阳极区域附近形成的悬浮杂质携带到阴极表面,阴极的下部区域表面杂质含量高于上部区域。

[关键词] 铜电解精炼;工业电解槽;狭长空间;多漩涡传质;流动特征;流速;铜离子浓度;铜离子传输

[中图分类号] TF811; TF804.4 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)01-0125-09

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.01.014

0 引言

铜主要是从硫化铜矿中提取,硫化铜矿通过火法冶炼获得粗铜,其中含有 As、Zn、Ni、Se 等杂质元素,粗铜再经过电解精炼提纯得到 99.99% 以上的精铜产品^[1]。工业铜电解精炼的电流效率通常为

93%~98%^[2]。在铜电解精炼过程中,在直流电的作用下,铜从阳极板溶解到电解液中成为铜离子,铜离子传递到阴极板获得电子还原为单质金属^[3]。电解液作为电解过程中的核心介质,其流动及传质特性直接关系到电解反应的速率、效率以及产物的质量。工业电解槽中,电极尺寸大,极间距狭小,电解液的流动及浓度分布特征更加复杂多变。

Martin 等^[4]利用 CFD 软件模拟了电解液在阴阳极板之间的流动状态,指出电解液的自然对流是由铜离子浓度梯度产生的浮力引起的,并存在显著的漩涡现象,随着漩涡将一些高浓度液体从阳极表面扩散边界层中移除,进入溶液本体,漩涡上的铜离子浓度增加。Kawai 等^[5]模拟了工业电解槽中电解

[收稿日期] 2025-08-11 [修订日期] 2025-09-25

[录用日期] 2025-09-28 [出版日期] 2026-02-01

[第一作者] 武文雅(2000—),女,河北沧州人,硕士研究生,有色冶金过程数值模拟。

[通信作者] 铁军(1967—),男,博士,教授,有色冶金工艺过程参数检测、数字化表征与智能优化。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(21978004);国家重点研发计划项目(2022YFB3304900)。

液流场和铜离子浓度场,考察了“底部入口到顶部出口”、“顶部入口到底部出口”、“侧面入口到顶部出口”三种方式对局部电解液流动模式及铜离子浓度分布的影响。Zeng等^[6-10]测量了不同极间距下的流场,利用COMSOL Multiphysics仿真软件模拟电流密度和流速等因素对阳极泥复杂流动的影响,并通过二次电流分布模型,研究了对称电极下铜电解精炼颗粒的输运特性。Kim等^[11]利用铜电解槽的简化三维传输模型模拟了电解液中离子流动的电化学动力学。乐安胜^[12]和李明周^[13]模拟铜电解液电解液入口、出口和电极间的局部温度变化,并提出有效措施来改善电解液的流动,最大限度减少了由温度变化引起的传质效应。Hemmati等^[14]利用CFD软件研究了流场、铜离子浓度分布、电流密度等因素对电解槽性能的影响,关注了不同极间距时的垂直速度,发现越靠近极板底部铜离子浓度越大。在小尺寸的模拟研究中,发现阴阳极表面的向上和向下流动驱动电解液形成一个单一的漩涡,阳极溶解形成的铜离子主要以对流的方式沿着电解液流动的方向传输到阴极^[15]。

综上所述,工业铜电解槽极间相对面的电极表面面积高达1 m²左右,而极间距仅10~25 mm,在这样一个尺寸比例差异极大的场景中,电解液的流动及铜离子的传输非常复杂,现有文献研究主要关注特定局部区域的速度分布、杂质传输等,对整体流动行为有待更明确的解析。本研究针对工业尺度下电解槽内阴阳极之间电解液的复杂流动情况,通过数值模拟方法,深入分析阴阳极板间狭长空间内电解液的流速分布、铜离子浓度分布及传输情况,以期电解生产工艺和电解槽的结构优化提供依据。

1 模型描述

1.1 数值模型基本原理

为了模拟电化学精炼过程,假设电解质完全溶解,电离成Cu²⁺、SO₄²⁻、H⁺。电解质中的离子通量使用Nernst-Planck方程(1)描述。

$$\mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_i F c_i \nabla \phi_i + u c_i \quad (1)$$

式中: $\mathbf{N}_i$ 为摩尔通量, mol/(m²·s); D_i 为第*i*种物质的扩散系数, m/s; c_i 为离子的浓度, mol/m³; z_i 为离子种类的电荷; u_i 为带电粒子的迁移率, s·mol/kg; ϕ_i 为电

解液中的电势, V; $\mathbf{u}$ 为流体速度, m/s; F 为法拉第常数。在公式右侧, 第一项为扩散通量, 表示粒子由于浓度梯度而发生运动产生的运输通量; 第二项为电迁移通量, 表示带电荷粒子由于电场作用而运动产生的运输通量; 第三项为对流通量, 表示液体之间由于温度和密度的不同发生的流动。

电解质的流动由Navier-Stokes方程(2)计算。

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F}_{\text{体积力}} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m³; p 为压力, Pa; μ 为动力黏度, Pa·s; $\mathbf{F}_{\text{体积力}}$ 为体积力矢量, N/m³, 是指重力、电磁力、惯性力等, 本文中仅考虑重力, 即 $\mathbf{F}_{\text{体积力}} = \rho \mathbf{g}$, $\mathbf{g}$ 为重力加速度, m/s²; $\mathbf{I}$ 为单位张量。

阴极和阳极的边界条件由Buttler-Volmer方程(3)描述。

$$i_{\text{loc}} = i_0 \left[\frac{C_a}{C_0} \exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \frac{C_c}{C_0} \exp\left(-\frac{\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right] \quad (3)$$

式中: η 为过电位, V, 定义为 $\eta = \varphi_s - \varphi_l - \Delta\varphi_{\text{eq}}$; φ_s 为电极电势, V; φ_l 为与电极相邻的电解质的电势, V; φ_{eq} 为电极和电解质之间在界面处的平衡电势差, V; i_{loc} 为电极表面局部电流密度, A/m²; i_0 为交换电流密度, A/m²; C_a 为阳极表面浓度, mol/m³; C_0 为溶液本体浓度, mol/m³; C_c 为阴极表面浓度, mol/m³; α_a 为阳极对称因子; α_c 为阴极对称因子; R 为摩尔气体常数, J/(mol·K); T 为热力学温度, K; F 同公式(1)。

1.2 模型构建与网格划分

在COMSOL Multiphysics中针对工业铜电解槽中的电解液区域进行二维几何建模, 如图1所示, 由阴极板、阳极板以及电解液三部分组成, 阴阳极板高度均为1 000 mm, 极板下沿至槽底(以下称为“空腔域”)为280 mm, 与工业电解槽尺度相近。其中阳极板厚度40 mm, 阴极板厚度5 mm, 阴阳极板间的距离25 mm。

如图1所示, 在模拟过程中, 我们将阴极和阳极的表面、空腔边界及极板顶部, 被设置为无通量边界条件, 见式(4)。

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为表面的单位法向量; $\mathbf{N}_i$ 同公式(1)。

为了更贴近工业生产环境, 对空腔域设定了一个水平方向速度1.8 mm/s, 同时将空腔区域下方的左右边界设置为周期性边界条件。极板最上方电解液与空气接触的边界设置为滑移边界, 除周期性

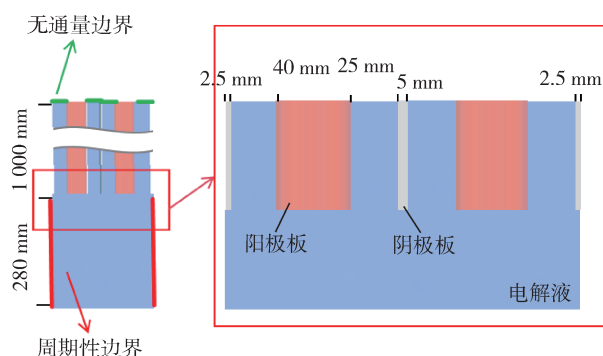


图1 二维几何模型

Fig. 1 Two-dimensional geometric model

边界及滑移边界外,其他边界均使用无滑移边界条件,见式(5)。

$$\mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

对图1进行网格划分处理,得到如图2所示的划分网格后的模型,网格在边角处更为密集。整个网格系统包含195406个总单元,其中30个为网格顶点单元,7739个为边界单元。网格的最大单元尺度为2.47 mm,而最小单元尺度则精细到0.0285 mm。在当前网格划分条件下,使用WIN-MG4T97TE7TR服务器,完成一次计算大约需要10天时间。

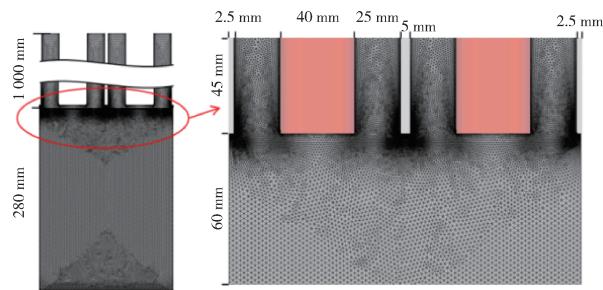


图2 模型网格划分

Fig. 2 Model meshing

1.3 参数设定

基于上述几何模型的建立,对其中物理接口涉及的相关参数进行设置。表1列出了本文中使用的其他主要参数,其取值参照文献[7,17,18]。

2 结果与讨论

2.1 电解液流动特征

图3是电解液流动分布图,其中流线代表电解液的流动方向,颜色分布代表电解液流动速度大小。仿真计算发现,电解液区域流场分布不均匀,

表1 模拟中应用的主要参数

Table 1 Main parameters used in simulation

参数	数值
Cu^{2+} 的初始浓度/($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)	630
温度/K	338.15
交换电流密度/($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)	150
阳极电压/V	0.25
阴极电压/V	0
Cu^{2+} 的扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.13×10^{-9}
H^+ 的扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	2.26×10^{-9}
SO_4^{2-} 的扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	3.77×10^{-10}
阳极传递系数	1.3
阴极传递系数	0.7
空腔域水平速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.8
重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	-9.8

电极附近的电解液流动速度较快,尤其是在阴阳极下部区域及空腔部分区域,速度明显较快(红色区域较多),而在阴阳极间的上部区域的电解液流动速度较为平缓。

如图3所示,可以清晰地观察到在极板之间形成了多个漩涡区域。根据流线方向,这些漩涡呈现出沿阳极表面向下、阴极表面向上的流动方式,这显然是电解液内阳极表面的氧化反应和阴极表面的还原反应形成浓度差引起的自然对流导致的。

2.1.1 多漩涡流动状态

在较小尺度的模拟中,通常仅能观察到沿阳极向下、阴极向上方向旋转的单个漩涡,其直径大约为30 mm^[15]。本文的计算表明,在较大尺度下特别是工业槽中会形成多个漩涡,这些漩涡的直径广泛,最小可达约12 mm,最大则可达140 mm,有时甚至出现个别反向漩涡。

值得注意的是,这些漩涡是持续动态变化的。图4为某一区域的流动状态在模拟达到稳态后依然随着时间不断演变,包括漩涡大小、位置、形状和数量。后续的讨论是基于5 min时的状态进行的。

在空腔区域,电解液的流动也非常复杂,在阳极下沿附近存在多个小漩涡,在空腔的中间高度边缘则形成一个顺时针的大漩涡,在靠近底部区域电解液则呈现从右向左的明显流动形式。

2.1.2 流速分布

为了定量描述阴阳极间电解液的流动特性,采

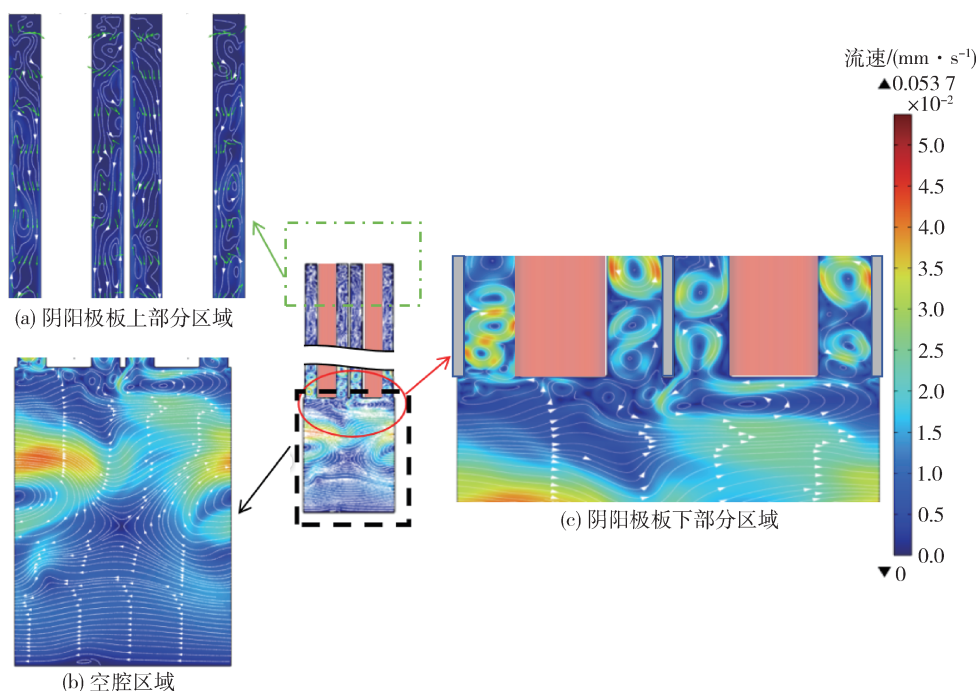


图3 电解情况下电解液流动

Fig. 3 Electrolyte flow under electrolysis

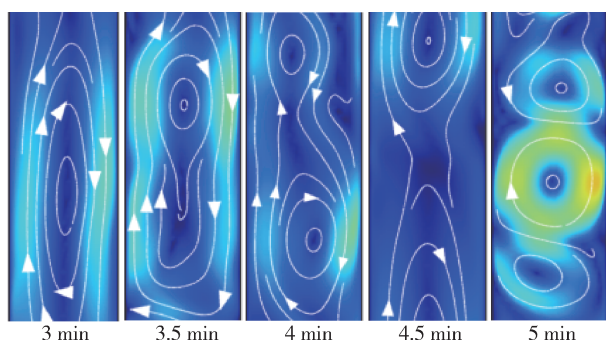


图4 不同时刻同一位置的漩涡变化

Fig. 4 Change of eddy current at the same position at different times

用距离阴极表面 0.2 mm、12.5 mm (即中间线) 及 24.8 mm (距阳极表面 0.2 mm) 处垂直线上的速度来表征阴阳极区域及中间线上的流动特征 (为简单起见, 除特别指出外, 后文中分别用电极表面的两条垂直线代表阴极区域和阳极区域), 图 5 和图 6 分别展示了阴阳极区域和中间线上水平方向及垂直方向上流速随高度变化的状况, 图中高度为相对于极板下沿。

由图 5 可见, 中间线上水平方向的速度在向着阳极和阴极两个方向上具有剧烈波动的流动速度, 速度范围在 $-22 \sim 19$ mm/s 之间变化, 并呈现一定的

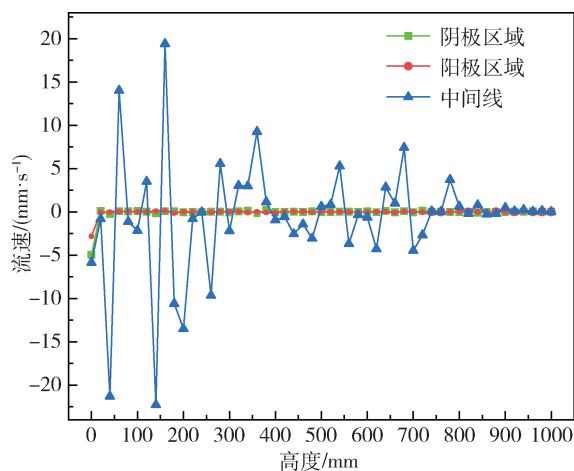


图5 极间区域水平方向电解液流速(正向指向阳极, 负向指向阴极)

Fig. 5 Horizontal electrolyte flow rate in the inter-electrode region (positive point to the anode, negative point to the cathode)

周期性特征, 这种波动特征与图 3 观察到的漩涡现象相对应。这种波动特性并不是分布在电极高度范围, 从下至上的大小分布明显不同: 在约 400 mm 以下波动最为显著, 在 400~800 mm 的高度范围, 速度最大仅为 8 mm/s 左右; 在 800 mm 以上, 减小并趋向于 0, 在生产现场观察到阴阳极间电解

液几乎静止的现象即是对该计算结果给予的证明。

在阴极和阳极区域的水平流动与中间线形成鲜明对比,水平方向的速度相比非常小,几乎为零,说明在电极表面电解液在水平方向几乎没有流动。

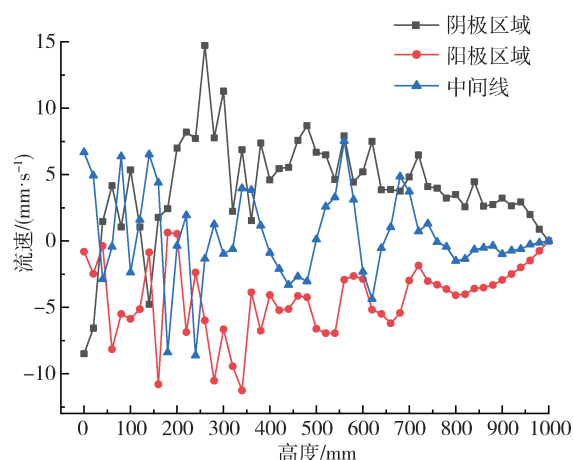


图6 极间区域垂直方向电解液流速(速度向上为正,向下为负)

Fig. 6 The electrolyte flow rate in the vertical direction of the inter-electrode region(speed up is positive, down is negative)

然而,根据图6展示的垂直方向上的速度分布曲线,电极表面区域的速度要略大于中间线上的速度,阴极区域最大接近15 mm/s,阳极最大约11 mm/s,最大值位于300 mm高度附近;300 mm以下,阴极和阳极表面的速度都出现了阴极向下、阳极向上的局部反向速度,显然也是局部的漩涡导致的,但300 mm以上,虽然出现微小波动,但都保持在阳极向下、阴极向上的自然对流特性。阳极区域,800 mm以上时,几乎没有波动,而是逐步趋向于0。

在中间线上,垂直方向的速度亦是正反方向震荡,但幅度明显小于水平方向,最大值略超过8 mm/s。

2.2 电解液中铜离子浓度分析

众所周知,由于阳极表面发生氧化反应、阴极表面发生还原反应,导致阳极表面区域铜离子浓度显著高于电解液本体浓度,阴极表面区域铜离子浓度显著低于电解液本体浓度。也正是因为这种浓度变化引起局部密度的变化,从而导致电极之间电解液的自然对流。图7给出不同高度铜离子浓度随

距离阴极表面位置的变化,与参考文献一致^[15,16]。

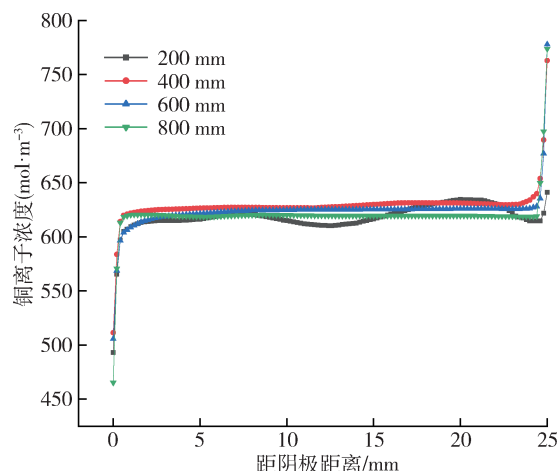


图7 不同高度铜离子浓度随距阴极表面位置的变化

Fig. 7 The variation of copper ion concentration at different heights with the position from the cathode surface

2.2.1 铜离子的传输特性

方程(1)给出的Nernst-Planck模型表明,电解液中的传质包含扩散、电迁移和对流三个部分。为了更进一步明晰铜离子在电解液中的主要传质形式,先考察了阴阳极中间线上铜离子的对流量、扩散通量和电泳通量,见图8。

由图8可见,中间垂直线上的铜离子对流量远远大于扩散通量与电泳通量。通量随高度的变化也表现出与漩涡相对应的振荡特性,并随着高度的增加通量值及其振荡幅度逐渐减小。由图可见,水平方向由阳极向阴极的通量略高,意味着铜离子在中间线上以对流的方式直接从阳极向阴极方向进行传输,电迁移与扩散的传质完全可以忽略不计。

如2.1.1部分所述,漩涡的大小、位置、形状和数量是动态变化的,这种动态变化特性使得图9所示的通量变化曲线也在动态持续变化,从而在电极的各个高度上均匀地将铜离子从阳极区域直接快捷传输到阴极区域,保证了图7所示各高度下电解液本体中铜离子浓度分布的均匀性。

同样,对阳极区域及阴极区域的通量传输进行了分析,给出了这两个区域的对流量、扩散通量以及电泳通量,如图9和图10所示,该图直观展示了这些通量在距离阳极表面和阴极表面0.2 mm垂

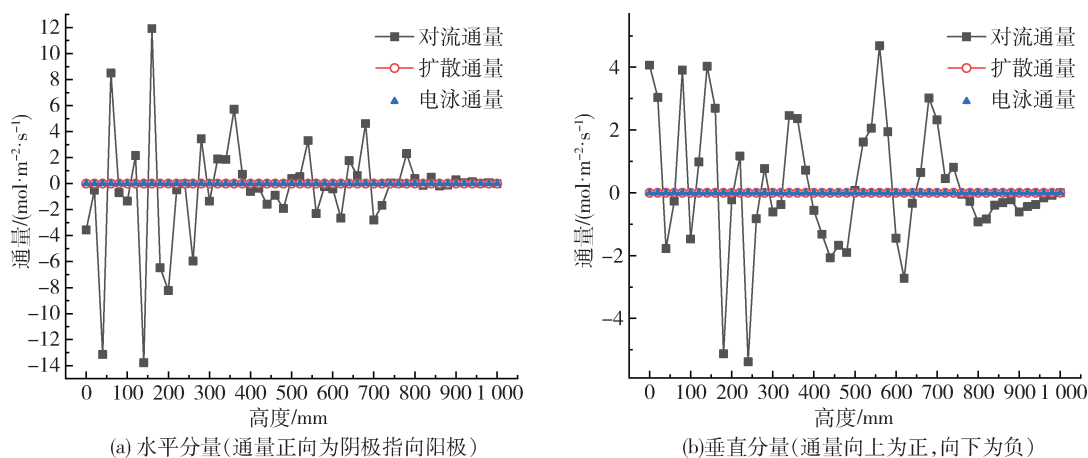


图8 不同高度上铜离子的通量

Fig. 8 Flux of copper ions at different heights

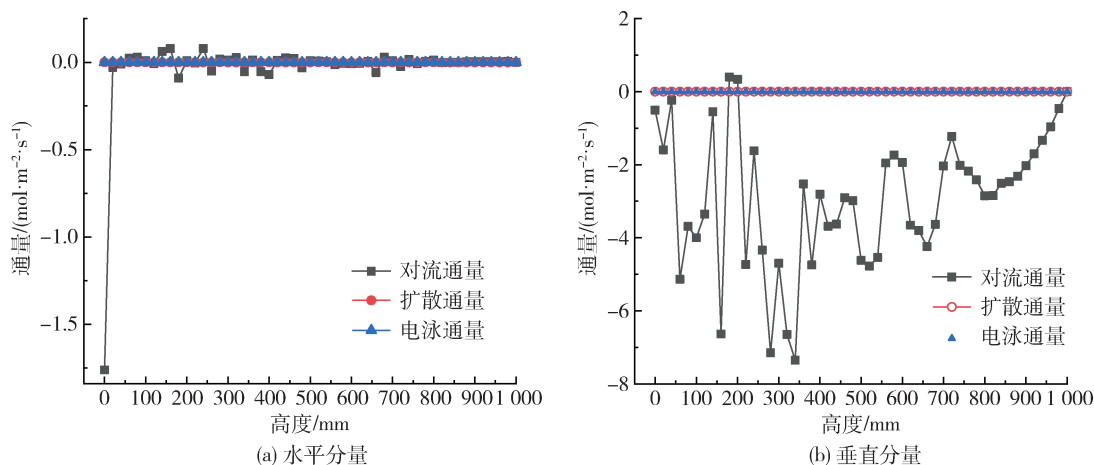


图9 不同高度上阳极区域铜离子的通量

Fig. 9 Flux of copper ions in anode region at different heights

直线上的分布情况。在该垂直线上,与垂直方向通量相比,水平分量几乎为0,且阳极垂直分量向下,阴极垂直分量向上。

显然,在阳极区域和阴极区域,铜离子在电解液中的传输主要依赖于对流作用,而电迁移与扩散并非主导的传质方式。

2.2.2 铜离子浓度分布

图11给出了在工业尺度下电极之间存在多个漩涡时,阴阳极区域及中间区域中铜离子浓度随极板高度的分布变化。在0~950 mm的高度范围,靠近阴极表面垂直线上,电解液中铜离子浓度随极板的高度由 500 mol/m^3 快速上升至 620 mol/m^3 ;靠近阳极表面垂直线上,浓度由 615 mol/m^3 左右快速上升到 740 mol/m^3 ;在中间线上,浓度由 600 mol/m^3 缓慢上升至 630 mol/m^3 。在950~1 000 mm高度范围内,

阴阳极区域及中间线附近电解液浓度在快速下降。由图11可见,这种波动是由于环流所造成的。在950~1 000 mm内,靠近阴极、阳极表面垂直线和中间线上铜离子浓度分别快速下降至 440 mol/m^3 、 530 mol/m^3 、 500 mol/m^3 左右。

如前所述,电解液中铜离子由阳极表面传递到阴极表面主要是通过流动驱动。在小尺寸下的模拟表明,由于还原反应不断消耗铜离子,阴极表面的上部铜离子浓度要低于下部。但是在工业尺度下,由于前述存在众多的漩涡,其能够及时将阳极上产生的铜离子传递到阴极,所以在对应漩涡存在的区域阴极表面垂直线上的铜离子浓度保持稳定,也就是0~950 mm的高度范围铜离子浓度能够保持在 $500 \sim 750 \text{ mol/m}^3$ 并呈现与漩涡对应波动变化的特征。

在950 mm以上的顶部区域,不存在明显的漩

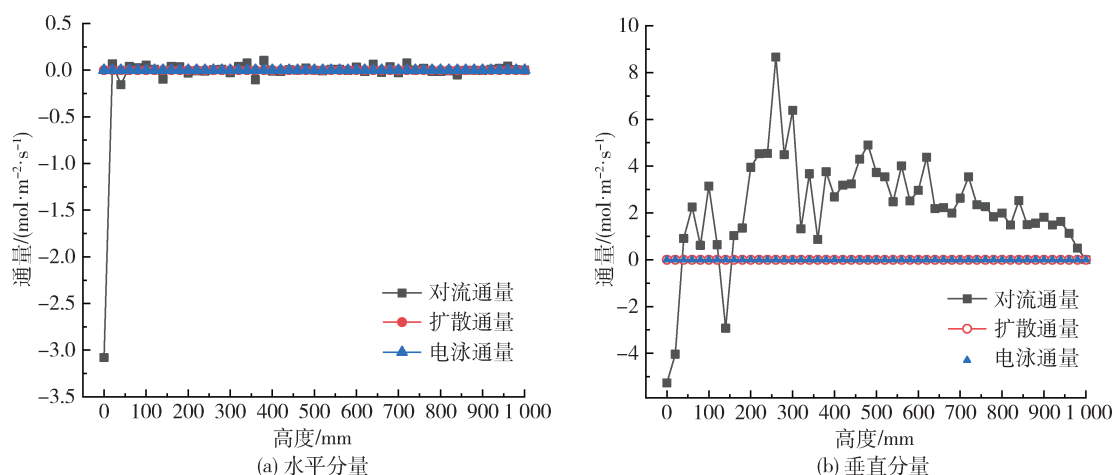


图10 不同高度上阴极区域铜离子的通量

Fig. 10 The flux of copper ions in the cathode region at different heights

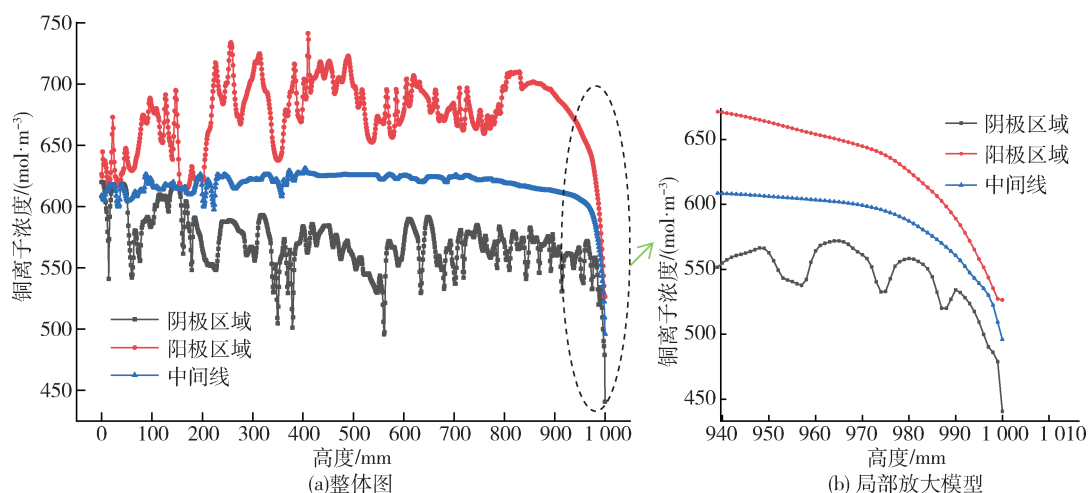


图11 铜离子浓度分布曲线

Fig. 11 Copper ion concentration distribution curve

涡,所以阴极表面铜离子浓度未得到及时补充,铜离子浓度明显偏低并随着高度越来越小。但是,在顶部的电解液由阴极向阳极流动,并且驱动阳极表面电解液向下流动,如图3(a)所示,从而稀释了中间及阳极表面区域的铜离子浓度。

2.2.3 杂质的传输

已知铜阳极溶解过程中,伴随着铜离子进入溶液,较大的杂质颗粒下沉到槽底,而较细的杂质颗粒在阳极区域附近形成悬浮物^[8]。在漩涡的裹携效应下,电解液也会将各高度下的悬浮的杂质传输到阴极表面贴附,因此,一般在阴极的上部区域也能检测到杂质的存在^[11]。当然,在阴阳极间的下部区域,由于漩涡的速度更快,更容易将更多的杂质传送到阴极表面,所以,阴极的下部区域表面杂质含

量会更多^[7]。

3 结论

采用计算机数值模拟的方法,研究了工业尺度下阴阳极板间狭长空间内极间电解液的流动状态及浓度分布特征,得出以下主要结论。

1)极板间电解液流动速度不均匀,上部区域比较慢,下部区域比较快。极板间形成多个漩涡区域,其主要是由电解液在阳极表面的向下流动和阴极表面的向上流动驱动形成的,且随时间不断变化。在阴阳极表面附近,水平方向速度几乎为0,垂直方向速度在0.3~15 mm/s范围内波动;中间线上水平方向速度在0~22 mm/s范围内波动,垂直方向速度在0~9 mm/s范围内波动;速度的波动与漩涡区

域相对应。

2)极板间的漩涡对铜离子浓度分布有较大影响,会导致铜离子浓度在一定范围内波动。在阴极表面附近,铜离子浓度在 $440\sim 620\text{ mol/m}^3$ 范围内波动;在阳极表面附近,铜离子浓度在 $530\sim 740\text{ mol/m}^3$ 范围内波动;中间线上浓度在 $500\sim 630\text{ mol/m}^3$ 范围内波动;浓度的波动也与漩涡区域相对应。

3)铜离子的传输主要靠对流驱动,在整个电极间隙中,漩涡与漩涡之间的横向流动实现了铜离子从阳极到阴极的直接传输。漩涡在将铜离子从阳极传输到阴极的同时,也将阳极区域附近形成的悬浮杂质携带到阴极表面。

[参考文献]

- [1] MORI K, YAMAKAWA Y, OUE S, et al. Effect of impurity ions and additives in solution of copper electrorefining on the passivation behavior of low-grade copper anode [J]. *Materials Transactions*, 2023, 64(1): 242–251.
- [2] 别良伟. 铜电解精炼过程中的节能措施与实践[J]. *铜业工程*, 2011(1): 43–45.
BIE Liangwei. Energy-saving measures and practice in copper electrorefining process [J]. *Copper Engineering*, 2011(1): 43–45.
- [3] 邓文涛, 付伟岸, 袁剑平. 双向平行流技术在铜电解工艺中的应用及优势[J]. *有色冶金设计与研究*, 2019, 40(6): 22–25.
DENG Wentao, FU Weian, YUAN Jianping. Application and advantages of bidirectional parallel flow technology in copper electrolysis process [J]. *Nonferrous Metals Engineering Research*, 2019, 40(6): 22–25.
- [4] MARTIN J, LEAHY M. Modeling natural convection in copper electrorefining: describing turbulence behavior for industrial-sized systems[J]. *Metallurgical Materials Transactions B*, 2011, 42(4): 875–890.
- [5] KAWAI S, MIYAZAWA T. CFD modelling and simulation of industrial-scale copper electrorefining process [J]. *Minerals Engineering*, 2014, 63: 81–90.
- [6] ZENG W, FREE L M, WERNER J, et al. Simulation and validation studies of impurity particle behavior in copper electrorefining [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 162(14): 338–352.
- [7] ZENG W, FREE L M, WANG S. Simulation study of electrolyte flow and slime particle transport in a newly designed copper electrorefining cell [J]. *ESC Trans*, 2016. DOI 10.1149/0722.0023ecst.
- [8] ZENG W, WANG S, FREE L M. Experimental and simulation studies of electrolyte flow and slime particle transport in a pilot scale copper electrorefining cell [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(5): 111–122.
- [9] ZENG W. Experimental and validated modeling studies of electrolyte flow and anode slime behavior and transport in copper electrorefining [D]. University of Utah: Salt Lake City, UT, USA, 2016.
- [10] ZENG W, WERNER J, FREE M L. Experimental studies on impurity particle behavior in electrolyte and the associated distribution on the cathode in the process of copper electrorefining[J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 156: 232–238.
- [11] KIM R K, CHOL Y S, PAEK S, et al. Electrochemical hydrodynamics modeling approach for a copper electrowinning cell [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2013, 8(11): 12333–12347.
- [12] 乐安胜. 铜电解提高电解液温度的生产实践[J]. *中国有色冶金*, 2017, 46(1): 11–15.
LE Ansheng. Improved production practice of copper electrolysis by enhancing electrolyte temperature [J]. *China Nonferrous Metall.* 2017, 46(1): 11–15.
- [13] 李明周, 黄金堤, 童长仁, 等. 铜电解槽内电热场的数值分析[J]. *有色金属科学与工程*, 2016, 7(6): 50–55.
LI Minggang, HUANG Jinti, TONG Changren. Numerical Analysis of Electrothermal Field in Copper Electrolyzer [J]. *Nonferrous Met Sci Eng.* 2016, 7(6): 50–55.
- [14] HEMMATI H, MOHEBBI A, SOLTANI A, et al. CFD modeling of the electrolyte flow in the copper electrorefining cell of Sarcheshmeh copper complex [J]. *Hydrometallurgy*, 2013, 139: 54–63.
- [15] WANG X Y, Li C, Tie J. Numerical simulation of cathode nodule local effects[J]. *Metals*, 2024, 14(4).
- [16] 张鹏. 铜电解槽物理场数值模拟研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
ZHANG Peng. Numerical simulation of physical field in copper electrolytic cell [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2013.
- [17] 李坚, 朱红波, 朱祖泽. 铜电解液物理化学性质之四: 电解液中 Cu^{2+} 的扩散系数[J]. *有色冶金*, 2004(1): 26–31.
LI Jian, ZHU Hongbo, ZHU Zuze. Physicochemical properties of copper electrolyte IV: diffusion coefficient of Cu^{2+} in electrolyte [J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2004(1): 26–31.
- [18] ZHAO J Y, MENG Y, LI C. The effect of nodulation on the distribution of concentration and current density during copper electrolytic refining[J]. *Phys Conf Ser*, 2022, 2285, 012015.
- [19] ADACHI K, NAKAI Y, MITSUNO S, et al. The mechanism of nodular growth in copper electrorefining[J]. *MMIJ* 2020, 136: 8–13.
- [20] DAVENPORT P. Physico-chemical properties of copper electrorefining and electrowinning electrolytes[J]. *Metallurgical Materials Transactions B*, 1981, 12(4): 639–643.

- [21] ZENG W, WANG S, FREE M L. Two-phase flow modeling of copper electrorefining involving impurity particles [J]. *Electrochem Soc.*, 2017, 164(9): 233–241.
- [22] 张鹏飞. 铜电解精炼工艺分析[J]. *中国金属通报*, 2021(1): 9–10.
- ZHANG Pengfei. Analysis of copper electrolytic refining process [J]. *China Metal Bulletin*, 2021(1): 9–10.
- [23] LEAHY J M, SCHWARZ P M. Modeling natural convection in copper electrorefining: describing turbulence behavior for industrial-sized systems [J]. *Metallurgical and Materials Transaction*, 2011, 42(4): 875–890.
- [24] WANG Z R, MENG Y, LI C, et al. Effect of nodules on electrolyte flow and Cu^{2+} concentration distribution in copper electrolytic refining[M]//*Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering Volume 1*. CRC Press, 2022: 309–313.
- [25] FENG Wenyu, CAO Huazhen, SHEN Yukun, et al. A theoretical model for metal cation reduction in the flow field and its application to copper electrorefining [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2022, 17(2). <https://doi.org/10.20964/2022.02.38>.
- [26] KALLIOMÄKI Taina, AJI T A, JAFARI Shila, et al. Industrial validation of conductivity and viscosity models for copper electrolysis processes [J]. *Minerals Engineering*, 2021, 171. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107069>.
- [27] 李爱玲, 董为民, 许维维. 基于 COMSOL 传统铜电解槽流场的数值模拟[J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37(3): 266–268.
- LI Ailing, DONG Weimin, XU Weiwei. Numerical simulation of flow field in traditional copper electrolytic cell based on COMSOL [J]. *Special Casting Nonferrous Alloys*, 2017, 37(3): 266–268.
- [28] 王志刚, 李明周, 徐明明, 等. 双向平行流铜电解过程电解液流场分布仿真[J]. *有色冶金设计与研究*, 2022, 43(4): 9–13.
- WANG Zhigang, LI Mingzhou, XU Mingming, et al. Simulation of electrolyte flow field distribution in bidirectional parallel flow copper electrolysis process [J]. *Nonferrous Metals Engineering Research*, 2022, 43(4): 9–13.

Numerical simulation of multi-vortex mass transfer in narrow space between cathode and anode plates of industrial copper electrolytic cells

WU Wenyu, LI Chun, MENG Yi, TIE Jun, ZHU Yan, PENG Xingzu

(School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: In the process of copper electrorefining, the flow behavior and mass transfer characteristics of the electrolyte have a significant impact on electrolytic efficiency, product quality, and energy consumption. In industrial electrolytic cells, the electrode size is much larger than the spacing between electrodes, forming a special narrow space between the anode and cathode plates, making the electrolyte flow and mass transfer characteristics more complex and variable. This study establishes a two-dimensional finite element numerical model of a industrial-scale electrolytic cell and conducts an in-depth analysis of the electrolyte flow velocity distribution, copper ion concentration distribution, and transport characteristics within the narrow space between the anode and cathode plates, leading to the following main conclusions. The electrolyte flow velocity between the plates is uneven, slower in the upper region and faster in the lower region, with multiple vortex areas formed; near the surfaces of the anode and cathode, the horizontal velocity is almost 0, the vertical velocity fluctuates in the range of 0.3–15 mm/s, the horizontal velocity along the centerline fluctuates in the range of 0–22 mm/s, and the vertical velocity fluctuates in the range of 0–9 mm/s. The vortices between the plates have a significant effect on the copper ion concentration distribution. Near the cathode surface, copper ion concentration fluctuates in the range of 440–620 mol/m³; near the anode surface, it fluctuates in the range of 530–740 mol/m³; along the centerline, it fluctuates in the range of 500–630 mol/m³, with the concentration fluctuations corresponding to the vortex areas. Copper ion transport is primarily driven by convection, and the lateral flow between vortices achieves direct transport of copper ions from the anode to the cathode. While transferring copper ions from the anode to the cathode, the vortices also carry suspended impurities formed near the anode to the cathode surface, resulting in higher impurity content on the lower region of the cathode surface compared to the upper region.

Key words: copper electrolytic refining; industrial electrolytic cell; narrow space; multiple vortex mass transfer; flow characteristics; flow rate; copper ion concentration; copper ion transport