

冶炼工艺

基于节能降耗的电解液流场及电解槽结构模拟仿真研究进展

籍琪^{1,2}, 陈步明^{1,2,3}, 蒋春翔^{1,2}, 黄惠^{1,2,3}, 郭忠诚^{1,2,3}, 何亚鹏^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 云南省冶金电极材料工程技术研究中心, 云南 昆明 650106; 3. 昆明理工恒达科技股份有限公司, 云南 昆明 650106)

[摘要] 电解过程中电耗占总能耗比高达50%以上,而且电解过程是多个物理场与电化学反应的耦合,影响因素复杂,目前通过对物理场和电场进行模拟仿真可以达到优化电耗的目的。本文整理了利用COMSOL Multiphysics、ANSYS对锌、铜、锰、镍等电解槽内的电解液流速场、离子浓度场、电场等多物理场进行数值模拟仿真方面的文献,并且剖析研究结果,认为电解槽上的能耗取决于槽内多物理场的分布,通过改变电解槽进液方式、阳极材料、电解槽几何形状、温度、极板间距、电极相对大小、极板放置方式等,可以影响电流效率以及能耗;利用仿真软件对电解过程进行数值模拟,能够模拟实际电解加工过程,有利于对工艺进行优化,节约成本。目前的仿真模拟主要集中在电解过程中的工艺参数、电极结构、电解槽结构、电解液流场等内部因素,在控制产品杂质、提高生产率和电流效率、改善表面质量和收集矿泥方面研究成果颇丰,但所建模型偏向理想化,未来应该更加注重与实际相结合,考虑温度、湿度、环境等因素造成的影响,提供更准确的模拟结果。

[关键词] 电解能耗; 电解槽结构; 电解液流场; 模拟仿真; 多物理场耦合; 电流效率; 优化工艺

[中图分类号] TF803.2; TP391.99 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2023)02-0007-14

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.02.002

电冶金提取是指从金属或合金的化合物水溶液、非水溶液或熔盐中电化学沉积的过程,是一种不通过阳极溶解取代金属离子而从溶解的金属离子中沉积金属的电化学过程^[1]。电冶金提取锌、铜、锰、镍等金属在湿法冶金工业中具有十分重要的地位,世界上绝大多数的锌和锰是用湿法工艺生产的。与火法冶金对比,湿法冶金原料中有价金属的回收利

用程度高,且材料的运转较为简易,生产过程较易实现自动化和连续化,有利于提高生产效率。电耗占整个电解工艺过程的50%以上,而且电解过程是多个物理场与电化学反应的耦合,影响因素复杂。总的来说,电场和物理场的均匀分布是获得各金属电解良好技术经济指标的关键。

目前,多个基于有限元分析的软件工具可以对物理场和电场进行模拟仿真。COMSOL Multiphysics通过求解偏微分方程和方程组实现单场和多物理现象的仿真,在任意多物理场耦合分析方面展现出其独到的优势,除能满足大多数类型物理单场和多场仿真需要以外,因其求解器强大,还能利用附加功能模块进行软件功能的扩展,在多物理场时可以很方便地自行加入任意的偏微分方程。软件ANSYS在解决热力学和流体等单场以及某些耦合场模拟非常强大,比如结构力学、热传递、流体流动、电磁学以及

[收稿日期] 2022-08-16

[第一作者] 籍琪(1998—),女,山西霍州人,硕士研究生,主要研究方向为湿法炼锌、节能电极材料。

[通信作者] 陈步明(1977—),男,博士,教授,主要研究方向为表面工程、金属粉体和冶金电极材料。

[基金项目] 国家自然科学基金(51564029)。

[引用格式] 籍琪,陈步明,蒋春翔,等.基于节能降耗的电解液流场及电解槽结构模拟仿真研究进展[J].中国有色冶金,2023,52(2):7-20.

其相互作用力场等,模拟结果准确有效收敛,然而在 ANSYS 不太擅长的物理场,耦合精度差。总体来说,COMSOL Multiphysics 的求解器很强大,多物理场求解时,可以很方便地自行加入任意的偏微方程,其扩展性强于 ANSYS。

本文整理了利用 COMSOL Multiphysics、ANSYS 对电解槽内的电解液流速场、离子浓度场、电场等多物理场进行数值模拟仿真方面的文献,并且剖析研究结果,对能够优化调控电解过程的物理场进行总结,以期对相关企业的电解工艺的优化提供参考。

1 湿法冶金电解能耗机理分析

电沉积是湿法冶金的一个重要工艺,在电解过程中会直接消耗大量电能,在很大程度上影响着企业的生产成本。

电解能耗一般是指电解所消耗的电能,可以用电解直流电单耗来表示,电解直流电单耗定义为每生产 1 t 金属(析出金属)所消耗的直流电量^[1],计算公式见式(1)。

$$W = \frac{\text{实际消耗直流电量}}{\text{阴极金属产量}} = \frac{V_{\text{槽}}}{\eta} \times 1000 \quad (1)$$

式中: W 为直流电能的单位消耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$; $V_{\text{槽}}$ 为槽电压(即直流电通过 1 个电解槽的电压降), V ; η 为电流效率, %。

由上式可得,湿法冶炼的电解能耗与电流效率成反比,与槽电压成正比。因此,在生产实践中,尽可能提高电流效率,同时降低槽电压,以确保降低电能消耗。电流效率和槽电压受溶液中的金属含量和酸含量影响较大,随着电解液中锌、铜、锰和镍含量的增加及电解液中酸含量的降低,溶液的比电阻增大,导致槽电压升高,但这时电流效率会增加;阴极板电流密度对电流效率和槽电压也有影响,电流密度增加对提高电流效率有利,但由于电解液电阻的电压与电流密度成正比,所以电流密度的增加会导致槽电压上升;电解液的温度降低有利于电流效率的提高,但槽电压会随着温度的升高而降低;提升电解液的纯度有利于增加电流效率并降低槽电压;增加电解周期,会导致析出金属片增厚,产品的表面粗糙度增加并长出树枝状的疙瘩,增大了阴、阳极板之间接触短路的可能性,实际电流密度会有所降低,使得槽电压和电流效率下降;在电解液中添加适量表面活性剂可使析出的金属表面平整、光滑、致密,从

而提高电流效率,降低单位电耗。

如上所述,同时提高电流效率和降低槽电压的因素经常互相矛盾,因此,需在保证产品质量的前提下辨证分析问题,尽可能采取同时满足降低槽电压和提高电流效率的技术条件,以达到降低电能消耗的目的。

2 各金属物理场特性分析

2.1 锌电积多物理场特性

湿法炼锌已成为目前锌提取冶金的主导技术,其产量占总量的 80% 以上。但湿法炼锌普遍能耗较高,总能耗的 75% 左右发生在锌电积过程中^[2],电积过程中电解槽的涂层脱落和阴极弹性网失去弹性等情况会导致电极性能老化、电解槽极距增大,甚至电柱腐蚀,进一步引起电流分布不均匀,能耗高达 $2\ 450 \sim 2\ 500 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 以上。降低锌电积过程的能耗是湿法炼锌节能和提高经济效益的关键,诸多学者通过提高电流效率和降低槽电压来减少能耗,措施包括采用合理的电流密度、酸锌比、电解液温度、高纯度电解液、表面活性剂,还有缩小电极间距等^[3-6]。除此之外,电解液流场的均匀分布和阳极板材料及结构的设置也是影响能耗的重要因素。

锌电积过程中,电流从阳极传递到阴极,产生电化学反应,金属锌沉积在阴极上;同时,阳极处产生大量微气泡形式的氧气,阴极表面产生氢气。电解槽一般选用长方形槽,其规模与数量一般根据选择的电解参数以及生产规模确定,不同的电解参数需要配备不同的电解槽。

锌电积过程中,电解液循环流动的情况影响电解过程的稳定性,进而也会影响电流效率的提高及能耗的降低;此外,采用传统 Pb 合金阳极板的电积过程能耗较高,通过改进阳极板材料与结构,可以降低锌电积槽能耗。因此可以通过模拟仿真软件,观察并改进电解液循环流动情况和阳极板材料与结构,可以提高电流效率,降低能耗。

2.1.1 电解液流场的影响

在锌电积过程中,能耗受阴极表面离子浓度场和电解液流场影响。电解液流速高,会使锌离子浓度升高、氢离子浓度降低,从而提高电流效率,降低能耗。此外,电解液循环流动的情况对电解操作过程的稳定进行影响重大,而持续稳定的生产又是提高电流效率、降低能耗的基础,所以有必要对工业上使用的锌电积槽内部的电解液流动情况进行分析研究。

王建伟等^[7]采用物理模型和数学模型相结合的方法研究运行中的锌电解槽中的电解液流动情况,发现电解槽的角部存在流速很小的回流,极易容易形成死区。苏寅彪^[2]和 LI 等^[8]对运行中的锌电解槽中电解液的单相流动和气液流动进行了详细数值模拟,并提出用电极间有效流速(IEFR)来定量评价电解液的流动特性,发现入口位置对 IEFR 影响较大。WANG 等^[9]采用三维数学模型模拟电解液以 5 种进液方式在锌电解槽中的流量和停留时间分布(RTD),并进行相应的锌电积试验,研究不同进液方式对电解液流动的影响,试验结果如表 1 所示。结果表明,改变进液方式可以有效提高电流效率。试验所用的锌电解槽结构如图 1 所示。

表 1 锌电解槽的 5 种进液方式和电流效率

Table 1 Five liquid feeding methods and current efficiency of zinc electrolytic cell

方案	进液方式	电流效率/%
I	0 [#]	89.85
II	0 [#] , 1 [#]	96.84
III	0 [#] , 2 [#]	98.90
IV	0 [#] , 3 [#]	97.98
V	0 [#] , 4 [#]	90.10

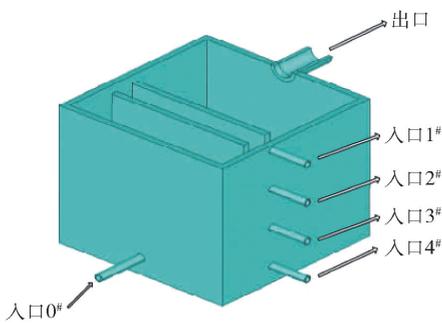


图 1 锌电解槽结构

Fig. 1 Structure of zinc electrolytic cell

结果显示,4 种新型进液方式相较于传统进液方案 I 在电流效率上均有不同程度的提升,进液方案 III 的电流效率最高,可提升到 98.90%。该试验表明,通过改变进液方式能够改善阳极和阴极之间的流速场,可以实现电解液在阳极和阴极之间流动的强化,有利于将锌离子输送到阴极,同时释放反应热,是提升电流效率的有效方法。

邓亦梁等^[10]利用多物理场耦合仿真模拟软件

COMSOL Multiphysics 对锌电解槽进行数值模拟,主要模拟电解液流场、电场、电解能耗和电流效率的分布情况。研究表明,阴极板上方的电解液流动方向是斜向下的,且斜向下流速会随着与入口距离的加大而迅速下降。阴极板下方的电解液流动方向是斜向上的,且斜向上流速不会随着入口距离的加大而变化,基本上保持稳态。同时,发现了阴极板表面存在一部分“流动死区”,使锌离子浓度和电流效率变低,能耗升高,极易引发“返溶烧板”现象,这是由电解液相向流动造成的结果。还发现降低电解液流速会使锌离子浓度和电流效率变低,氢离子浓度升高,反之,升高电解液流速会使锌离子浓度和电流效率升高,氢离子浓度和能耗变低,这表明锌电解能耗受阴极表面离子浓度场和电解液流场影响。

Zhang 等^[11]利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了基于 Nernst-Plank 方程和电极析气反应动力学的锌电积综合模型,该模型计算得到的锌电解槽内的流场显示出了流体流场的产生过程。气泡在阳极表面产生,由于浮力作用,气泡开始上升;上升过程中,气泡加速并与更多的气泡结合,速度和动量同时增加,并在顶部接近最大值;气泡与电解质溶液之间的相互作用产生类似的流体场,不同的是,当气泡到达电解液的顶表面时,大部分气泡被释放到周围环境中,表面受入口处液体的影响,被强制改变方向,向下运动,剩余的气泡与流体电解液之间相互作用,产生漩涡,下部的流体速度要比上部慢得多。

上述研究结果表明,锌电解能耗受阴极表面锌离子浓度场和电解液流场影响,通过模拟仿真模型可以直观观察到电解液流场流动情况,通过改变进液方式等(表 1 中 II ~ V 进液方案)可以改善电流效率和能耗。

2.1.2 阳极板材料与结构的影响

电积过程中阳极板材料与结构直接影响电解槽内电场分布以及电沉积过程能耗,因此降低锌电解槽能耗的最重要途径是改进阳极板材料与结构。

由于使用传统 Pb 合金阳极板在电积过程中易使阴极受到 Pb 的污染,增加能耗,已有研究者开发了新型阳极,包括可电催化涂层阳极(DSA)、多元 Pb 合金阳极和多孔阳极等^[12]。这 3 种新型阳极材料的优点分别是可降低槽电压、提升铅基合金阳极的机械强度、降低阳极电位和槽电压,但仍然存在电极制造成本高、性能不能满足工业需求、导电和力学

性能较差的缺点。为此,LI 等^[13]通过采用金属芯板和多孔层的阳极结构,制备了反三明治结构复合多孔 Pb 合金阳极,构建新的功能与结构,提高了阳极的耐腐蚀性。对于电化学反应电极,其表面电势及电流密度分布将影响电极的电化学性能。黎红兵等^[12]通过 ANSYS 有限元分析软件构建不同结构的 Pb 合金阳极的电化学数值计算模型,研究普通多孔阳极、反三明治结构复合多孔 Pb 合金阳极在电化学反应过程中的导电性、电流与电压的分布规律,并通过锌电积试验来验证仿真模拟结果。结果表明,反三明治结构复合多孔 Pb 合金阳极表面的电流密度分布和电势分布更加均匀,可以降低电积能耗。

黎红兵等^[12]考察的主要对象是反三明治结构复合多孔 Pb 合金阳极的锌电解槽的一个电解单元部分,选取单元的截面示意如图 2 所示。图 3 是传统平板阳极、多孔阳极、复合多孔阳极在 48 h 内的槽电压-时间曲线,结果表明,这 3 种阳极的槽电压均随时间发生波动,这种现象可能是由于循环液流动控制不够精准、阳极表面氧化膜的形成较为缓慢造成的,致使电解液浓度很难完全处于稳定状态。

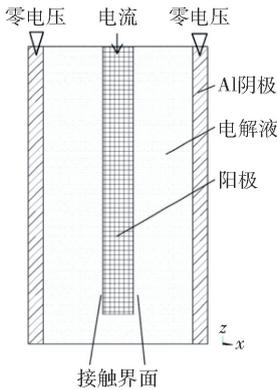


图 2 物理模型与边界条件

Fig. 2 Physical model and boundary conditions

图 4 和图 5 分别为纯多孔 Pb 合金阳极和反三明治结构复合多孔 Pb 合金阳极表面的电流密度分布图和电势分布图。观察得出,与纯多孔阳极表面的电流密度和电势分布相比,反三明治结构复合多孔 Pb 合金阳极表面的电流密度分布和电势分布更加均匀,表明反三明治复合多孔阳极可通过提高电极电导率使电极表面电流密度和电势均匀分布,降低电极的电阻电压降,降低槽电压,减少能耗。

应用计算机仿真模拟技术,对反三明治结构复

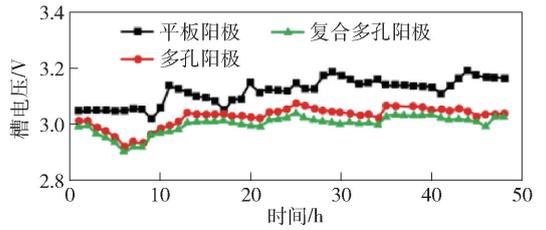


图 3 3 种不同阳极电积时槽电压随时间变化曲线对比

Fig. 3 Comparison of cell voltages of three different anodes in electrodeposition

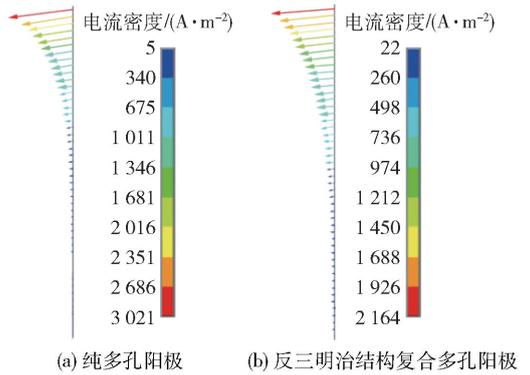


图 4 不同结构阳极表面电流密度的分布
Fig. 4 Distribution of current density on electrode surface

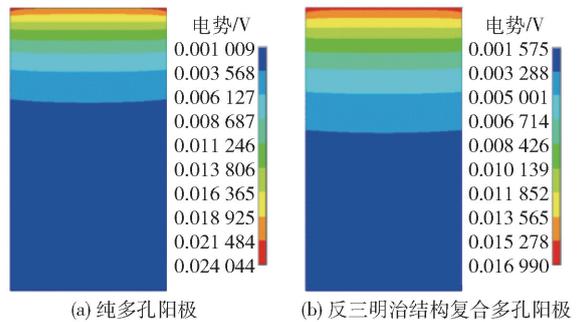


图 5 不同结构阳极的表面电势分布
Fig. 5 Surface potential distribution of anodes with different structures

合多孔 Pb 合金阳极及其他结构阳极进行仿真模拟,呈现出不同的表面电势和电流密度分布结果,可根据分析结果和实际运行情况对阳极结构进行优化,并同时考虑设计难度和制造成本。

2. 1. 3 小结

在锌电积过程中,电解液在电解槽中的流动状况

及阳极材料和结构对电流效率和能耗有重要影响。

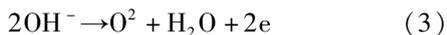
1) 合理的进液方式(表1中Ⅱ~Ⅴ进液方式)加强了阴极和阳极之间的电解质流动,有助于锌离子运输到阴极和释放反应热,提高电流效率,降低能耗。

2) 与其他新型阳极相比,反三明治结构复合多孔阳极可以提高电极电导率使电极表面电流密度和电势均匀分布,降低电极的电阻电压降,降低槽电压,减少能耗。

后期还应加强电解液流场和电场关于进液方式和阳极材料与结构影响方面的仿真模拟研究,以期为提高电流效率和降低能耗提供技术支持,更有效指导生产。

2.2 铜电积/电解精炼多物理场特性

铜电积/电解精炼是工业上广泛应用的生产高纯铜的必要工艺。电积过程中使用不溶(惰性)阴极,所有沉积在阴极上的铜来源于铜溶液,溶液中铜离子浓度随着金属铜的沉积不断下降。铜电积过程中,阴极生成金属铜,阳极产生氧气,可用方程式(2)~(3)表示。



在湿法提取铜过程中,电积工序是主要电耗环节,占总电耗的50%左右。铜电积电耗主要为直流电耗,单位电耗为1700~2700 kW·h/t,能耗较高的主要原因可能是铜电积电效率低、电流密度过高等。因此,降低铜电积电耗关键是降低槽电压、提高电流效率。已有研究采取了很多措施来提高电流效率和降低槽电压以降低能耗,其中电解液流场和电解槽结构起着重要作用。通过利用模拟仿真软件建立模型可以模拟电解槽内部电解液的流动状况,从而对工艺参数进行优化,改善电解液流动情况,降低能耗。

2.2.1 电解液流场的影响

电积铜的主要设备是电解槽,电解槽内许多因素影响电积性能,包括槽内复杂的动量、质量和热量传递,电化学反应和多物理场耦合,电场和温度场的均匀分布等,均是获得铜电解优良生产技术经济指标的关键。

槽内其他物理场受电解液流动情况影响,电化学反应受电场分布影响;电解过程中电解液阻抗产生焦耳热,这些热与循环电解液物理显热构成槽内温度场的热源,温度场对槽内各种离子的扩散速度、电解液黏度、阳极泥沉降性能、电解液阻抗、槽电压

等影响较大^[14]。

李明周等^[15]建立了铜电解槽内多物理场耦合作用数学模型,利用CFD商业软件对铜电解槽内电场、流场和温度场进行数值计算,观察电场和温度场在槽内各区域的分布情况,同时对铜电解槽进行了热平衡分析,发现槽内电解液温度分布不均匀,采用双向平行电解方式可以对槽内温度分布均匀性起到改善作用。周萍等^[16]以铜电解槽为研究对象,建立了4种不同进液方式下电解槽内电解液流动过程的三维计算流体动力学模型并进行数值模拟,这4种进液方式分别是“一端进液”“底部交错进液”“底部中心进液”“上侧交错进液”;研究结果表明,“底部中心进液”式的电解液流速是交错进液时的4倍以上,“底部交错进液”式电解液平均流速是“一端进液”式的4倍,流速差异是电解槽进液口位置分布不均匀和电解液湍流强度大造成的,总的来说,采用“底部交错进液”能够及时将电解液迅速、均匀地补充到极板间,可提高电流密度,增加产能。李爱玲等^[17]利用COMSOL Multiphysics仿真软件对传统电解过程中的槽内流场分布情况进行分析,得出槽内进、出液口处左右两侧电解液流动轨迹相对称,涡流现象体现在进液管和出液口上方及两极板之间的区域,而出液口处的电解液和电解槽靠下位置的电解液流动较为规整,无明显涡流现象;还发现极板之间电解液流速较小,进液口流速相较于出液口大。

2.2.2 电解槽结构的影响

诸多学者在铜电积控制杂质、提高生产效率、改善表面质量和收集矿泥方面做出大量工作,研究成果主要是通过优化工艺参数、改进电极、模拟电解液流场分布、研究阳极泥和电解液中的内部因素来实现^[18-22]。目前,大多数铜精炼厂使用传统矩形电解槽,电解液从电解槽底部附近的入口进入,从电解槽顶部的出口流出,改变电解槽入口和出口的位置是抑制结瘤生长、提高电流效率、提高生产效率的一个有效方法。

ZENG等^[23]基于有限元法采用COMSOL Multiphysics工具设计并建模了一个新型铜电解槽,如图6所示。该电解槽同时具有EMEW电解槽、METTOP电解槽、DBSA电解槽的优点,在流体流场和煤泥颗粒运动方面表现出更好的控制。EMEW电解槽具有非常特殊的圆柱形电极设计,电解液以强螺旋流的方式通过电解槽,使电极之间的对流增强;METTOP电解槽呈矩形,在每个电极间隙的两侧

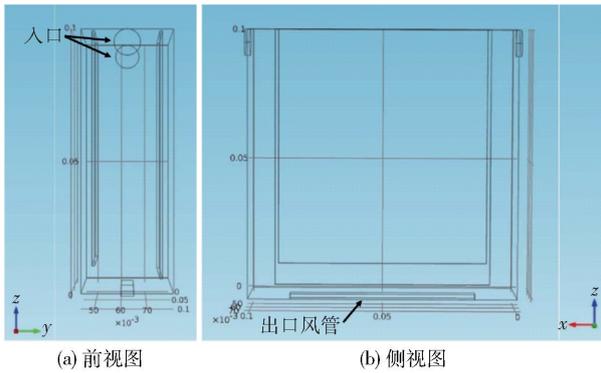


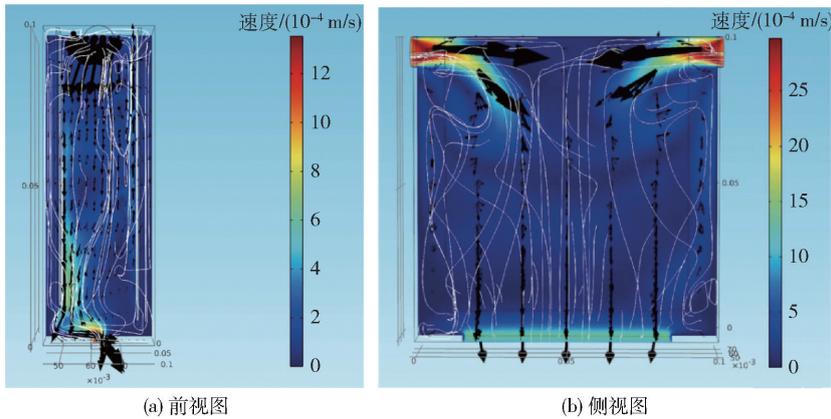
图6 新型铜电解槽的几何形状

Fig. 6 The geometry of the innovative copper electrolytic cell

均有入口和出口,可以迫使流入的电解质进入电极间隙,从而改善铜离子和添加剂的质量运输;DBSA 电解槽在靠近电解槽顶部的每个电极间隙两侧有 2

个入口,在靠近电极底部的入口下方有 2 个相应的出口,因此, DBSA 电解槽不仅有电解质直接进入电极间隙,而且在电解槽中有主导的向下流动的流体,可以有效提高电流密度,增加电流效率。

ZENG 等^[23]通过试验模拟验证了铜电解精炼在该新型电解槽中的效果,并对产生的铜离子浓度分布、流体流速场进行了讨论。如图 6 所示,单元顶部的相对侧有 2 个入口,底部中心有 1 个出口管道。图 7(a)中大多数区域电解液强制向下流动占主导地位,但由于存在剩余的密度梯度,在非常靠近阴极的区域仍然形成向上流动。图 7(b)提供了顶部 2 个入口的电解液流入对电极间隙中流体流场影响的另一个透视图(侧视图),强制向下流动在该区域占主导地位。在 3 个位置(电极附近、本体溶液和电池顶部)的电解槽和传统电解槽的性能对比试验表明,新型电解槽传热性能更好,电解质温度分布更加均匀。



(中心切片上的颜色表示以 m/s 为单位的速度大小,黑色箭头表示速度矢量,白色线表示流线)

图7 新型电解槽中流体流速场

Fig. 7 Flow velocity field of fluid in the innovative electrolytic cell

阴极前沿附近的流场如图 8 所示,尽管强制向下的电解液流占据了大部分极间间隙,但沿阴极表面形成了显著的向上电解液流。

新型电解槽中铜离子的分布比传统电解槽均匀,由于电解液流动性较强,对流较好,电极间隙中的铜耗尽区和扩散边界层变薄。因此,铜离子在此电解槽中的传输非常有效,此新型电解槽可以潜在地应用于铜电解和其他金属电解精炼,以提高有效电流密度和电流效率。

2. 2. 3 小结

在铜电积过程中,电解槽涉及复杂的动量、质量和热量传递过程以及电化学反应过程和多物理场耦

合现象。

1) 铜电解槽 4 种进液方式“一端进液”“底部交错进液”“底部中心进液”“上侧交错进液”中,采用“底部交错进液”方式可使电解槽能够及时将电解液迅速、均匀地补充到极板间,可有效提高电流密度,增加产能。

2) 与传统铜电解槽相比,新型铜电解槽(图 6)顶部的 2 个入口的电解液直接流入电极间隙,在该区域产生更强的强制对流,使铜离子在电解槽中分布更加均匀,同时加强传热,使温度分布更均匀,有利于提高电流效率,降低能耗。

在未来的研究中,应更好利用模拟仿真软件对

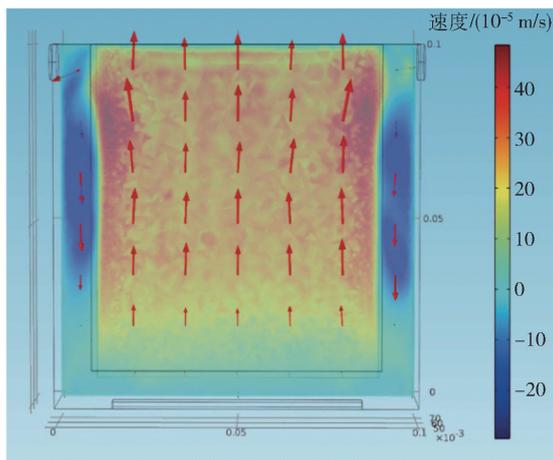


图8 距阴极正面 $100\ \mu\text{m}$ 的薄片上电解液流速场

Fig. 8 Electrolyte velocity field on a sheet 100 microns away from the front of the cathode

进液方式和电解槽结构进行优化,促进电解槽内流体流动,此外,流场对阴极铜产量的作用关系有待进一步研究,深入探索提高电流效率和降低能耗的原因。

2.3 锰电解多物理场特性

电解是金属锰的主流生产工艺,生产的金属锰纯度可高达 99.9% 以上,而且污染相对较小。电解过程中,阴极板上析出金属锰,阳极板上水分子氧化析出氧气,氧气的析出通常需要很高过电位,在金属电解槽中占了相当大的能量消耗百分比。整个锰电解工艺中有 95% 以上的电耗集中在电解槽上,生产单位锰直流电耗达到 $5\ 600 \sim 7\ 000\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,由于电解槽内浓度场、电场、温度场等多物理场与化学场耦合,使得电极上存在竞争反应,产生阳极泥、阴极分形生长和阳极电化学振荡等现象,导致电解阶段能耗一直很高。

近年来,有研究表明通过优化电解槽结构、电流加载方式以及阳极开孔结构,可以有效调节并改善电解槽内多物理场与化学场的分布状况。研究可采用模拟仿真软件对外控参数进行设置和不断优化,实现对电解槽内多场耦合的调控,结果可用来指导生产。

2.3.1 电解槽结构的影响

研究显示,电解是一个多物理场与化学反应耦合的过程(图9),电积能耗受电解槽内物理场分布影响较大^[24-26],而电解槽结构(极板摆放方式,阴、阳极板间距和相对大小)是影响电解槽内物理场分

布的关键因素,因此,可通过探究最佳电解槽结构来降低锰电解能耗。

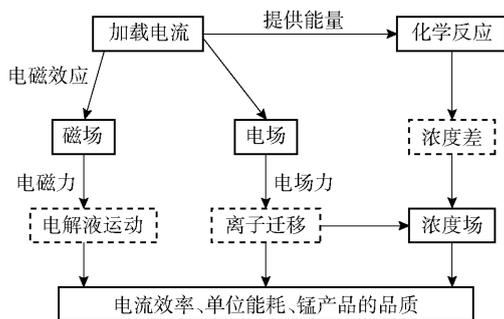


图9 锰电解槽内物理场的耦合关系

Fig. 9 Coupling relationship of physical field in the manganese electrolytic cell

郭岚峰等^[27]利用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合仿真软件对电解槽内电场分布状况和电解液中锰离子的传质过程进行数值模拟,探究阴、阳极板间距和相对大小、阳极板结构和极板在槽内深度等因素对电解槽内电场和浓度场分布状况的影响规律,并建立数学模型模拟电解槽内电场与浓度场的分布状况,图10为电沉积 1 min 后电解槽内 xy 截面与 xz 截面上不同极板间距的电解质浓度分布情况。图10表明,当极板间距较小时,阴、阳极板之间电解质浓度变化迅速,电解质浓度分布不均匀;随着极板间距增加,阴、阳极板之间电解质浓度变化缓慢,存在电解质浓度过渡区。

郭岚峰等^[27]还采用恒流电解法与数值模拟方法研究了极板摆放方式、阴阳极板间距和相对大小对电流效率、槽电压、电解槽内的电场、流场分布及单位功耗的影响。研究表明,在及时补偿电解液中锰离子浓度的前提下可通过降低极板间距来降低能耗;极板摆放角度不超过 2° 时,金属锰沉积速率快,提高了电流效率,降低了能耗。通过分析得出,阳极尺寸小于阴极尺寸时电流效率可提高到 71.74%,有利于降低能耗,减少阳极材料的消耗。

2.3.2 极板结构和材料的影响

有研究显示,电解槽的几何结构、阳极材料、表面性质等直接影响电解能耗、电流效率及阳极泥的产生量^[28-29]。蒋良兴等^[30]制备了反三明治复合多孔阳极,该阳极结构相较于传统阳极结构明显提升了多孔阳极的力学和导电性能;张伟等^[31]发现网状 $\text{Ti}/\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 阳极相较于片状 $\text{Ti}/\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 阳极在

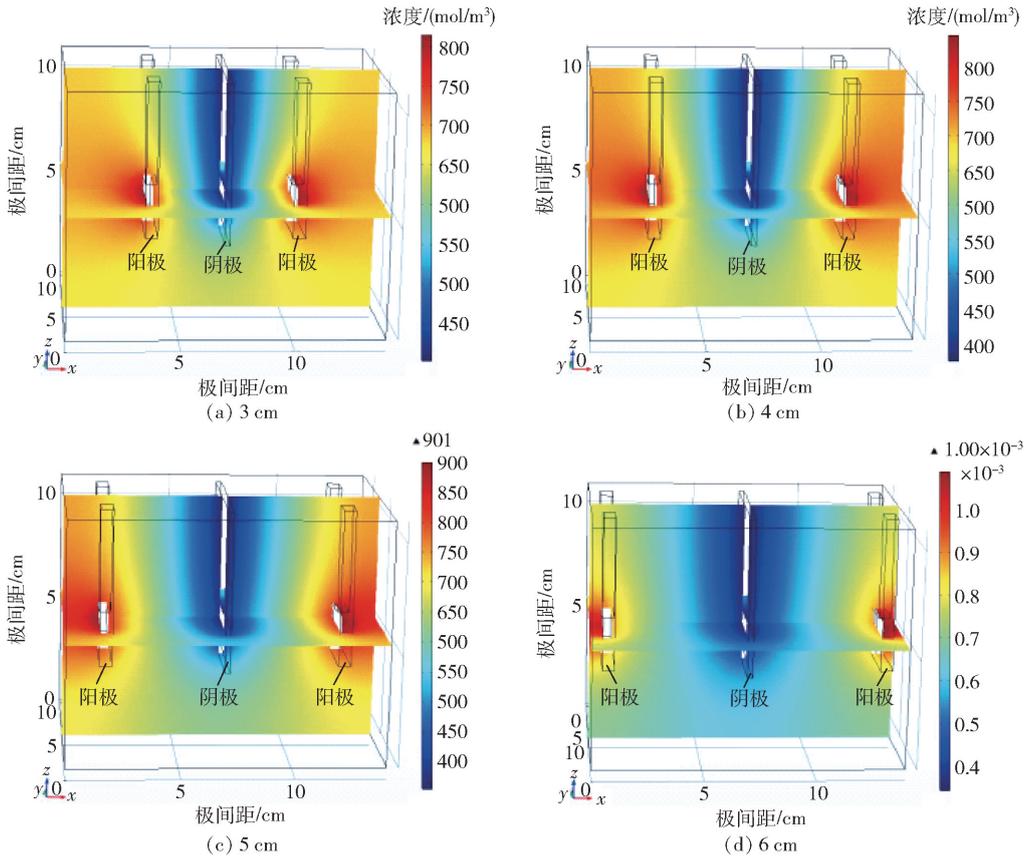


图 10 极板间距对电解质浓度分布的影响

Fig. 10 Influence of plate spacing on electrolyte concentration distribution

24 h 极化后表现更好的电化学性能。上述 2 种阳极均存在研究成本高、制造工艺繁杂等问题,在电化学沉积过程中,不同开孔形状对阴极过电位、电解质电位、阳极电流密度、槽电压等均有较大影响。郭岚峰等^[32]利用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合仿真软件模拟不同开孔形状的阳极板电解时电解槽内电场的分布情况,仿真所用的 3 种阳极板电解几何模型如图 11 所示。

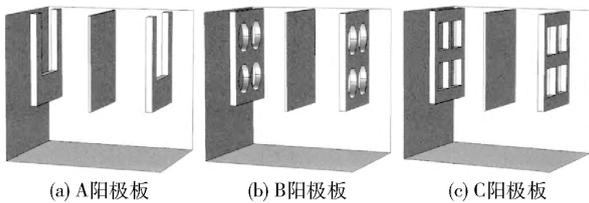


图 11 A、B、C 3 种阳极板电解几何模型

Fig. 11 Geometric models of electrolysis of three anode plates A, B and C

电解过程受电解槽内温度场分布的影响,而温度场分布受电解质电位分布的影响。郭岚峰等^[32]

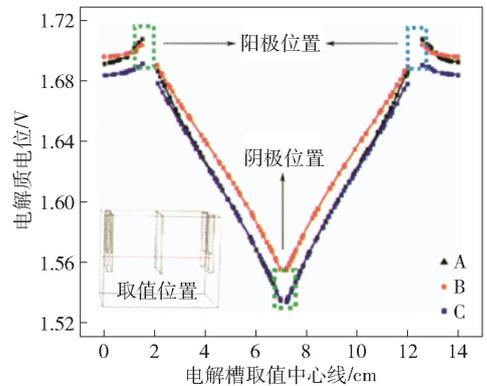


图 12 不同开孔形状的阳极板电解时电解质电位在电解槽水平中轴上的分布情况

Fig. 12 Distribution of electrolyte potential on horizontal axis of electrolytic cell during electrolysis of anode plates with different hole shapes

发现电解质电位高低与阳极板的材料相关,阳极附近越靠近槽体下方的电解质电位越低,阴极附近的电解质电位则情况相反,这是由于电流加载在阳极

顶端的缘故;还发现靠近阴极附近的电解质电位相较于阳极附近电解质电位明显要低。如图 12 所示^[32],采用 A、C 阳极板电解时电解质电位差较大,分别为 0.175 V 和 0.164 V,而采用 B 阳极板电解时电解质电位差为 0.15 V,最小为 0.135 V,表明 B 阳极板电解时电解液内阻电压降要小于 A、C 阳极板。通过对 3 种阳极板电解过程进行仿真模拟,发现 A、B、C 3 种阳极板电解时电解槽内的电场分布规律相似,但采用 B 阳极板电解时,阴极过电位在垂直和水平方向上均获得最负过电位 -1.598 9 V,电解质电位分布更均匀,电解液内阻电压降和电流损失降低,阳极上的电流向其他方向的流量减少。

2.3.3 小结

利用仿真软件对电解槽结构和阳极材料优化的研究表明,电解槽的结构优化(极板间距较小,极板摆放角度不超过 2°,阳极尺寸小于阴极尺寸)和阳极材料的优化(网状 Ti/IrO₂-Ta₂O₅ 阳极,圆形开孔阳极板)能够改善电解槽内物理场分布、降低能耗,但极板相对大小、极板之间尺寸比例还需进一步细化研究。

2.4 镍电积多物理场特性

大部分镍生产来自于电积镍过程。在电积过程中,电解液中的镍沉积在电解槽的阴极上,形成金属镍,阳极产生氧气。但与其他金属电积过程相比,实际镍电积过程中,阴极附近氢离子浓度过高,使得氢还原反应的过电位降低,导致在阴极上与镍沉积过程中产生氢气,大幅降低电流效率,增加电沉积的粗糙度。为了防止阳极反应产生的氢离子以对流、扩散和迁移的方式输送到阴极,通常将阳极和阴极置于聚酯袋^[33]或膜片^[34]中,从而减少气体生成引起的搅动,减缓 H⁺ 向阴极的扩散,同时提高了电流效率。通过仿真模拟,可以从内部流场等物理场来解释隔膜电极的作用机理,并且可以进一步对外控参数进行设置和不断优化,实现对电解槽内多场耦合的调控,结果可用来指导生产。

在电积过程中,电解液成分、温度、pH 值和电流密度是影响电积性能的重要操作参数,这些因素对电沉积层的质量有很大影响,从而影响电流效率和能量消耗。与试验方法相比,建立集成的多物理模型来模拟镍的电积过程是一种高效、低成本的方法。

有学者开发了类似的电化学-计算流体力学(CFD)模型,并将其应用于锌^[11]和铜电积^[35]过程

的建模和模拟。要将这种方法应用到镍电积过程中,最大的困难是电极隔膜的模拟,同时需要考虑阴极表面镍和氢的竞争电极反应动力学。Zhang 等^[36]利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了镍电积过程的流体流动、物理和电化学综合多物理模型,并且提出的达西定律体积力模型能准确地模拟电极膜片在电解槽中的作用,见式(4)。该模型中的隔膜被建模为多孔介质,因此,膜片对流体流动的影响可以用达西定律来模拟。

$$q = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (4)$$

式中: q 为通量, m/s; k 为介质的本征渗透率, m²; μ 为黏度, Pa·s; ∇p 为压力梯度向量, Pa/m。

镍电积过程是电化学、质量运输和两相流等多种过程的结合,并表现出过程之间高度的相互作用。

Zhang 等^[36]采用电化学计算流体动力学模型,考虑两相流、质量传输和电化学反应,对带有电极隔膜的镍电积过程进行了模拟。根据模拟结果分析了电极膜片对流体流动、浓度、电压降和电流分布的影响。图 13 为电解槽的 3D 示意图以及电极与电极之间隔膜的配置方式。在图 13(a)中,单元三维几何结构对称平面用红色虚线标记, x 轴方向,单元的左半部分和右半部分沿对称平面对称;图 13(b)为该对称平面的二维几何图形;图 13(c)为放大图。模型中加入了一个阴极和一个阳极,液相的入口是阴极隔膜上部的开口。在模型中,阳极和阴极均放置在 0.5 mm 厚的电极膜片中。与阴极隔膜不同,阳极隔膜的底部没有关闭。

研究得出,带膜片的镍电解槽在电解 30 s 后,流量达到稳定状态,在随后的时间内变化不大。图 14 为有隔膜电解槽与无隔膜电解槽电解 120 s 后的流体流速对比,结果表明,隔膜使流体流动的速度场变慢。

电解槽顶部的水平压力分布如图 15 所示。很明显,当流体流经隔膜时,压力急剧下降,特别是在图 14 所示的高流速阳极隔膜处,这表明隔膜对流体流动具有很强的阻力。

Zhang 等^[36]模拟结果表明,电极膜片对电解液中的流体流动和压降有显著影响。电极隔膜大幅减少了电解槽中气泡上升引起的强对流,对流体流动有很强阻力,从而减少了 H⁺ (在阳极产生)向阴极的传输。基于该模型,其还分析了不同操作参数对

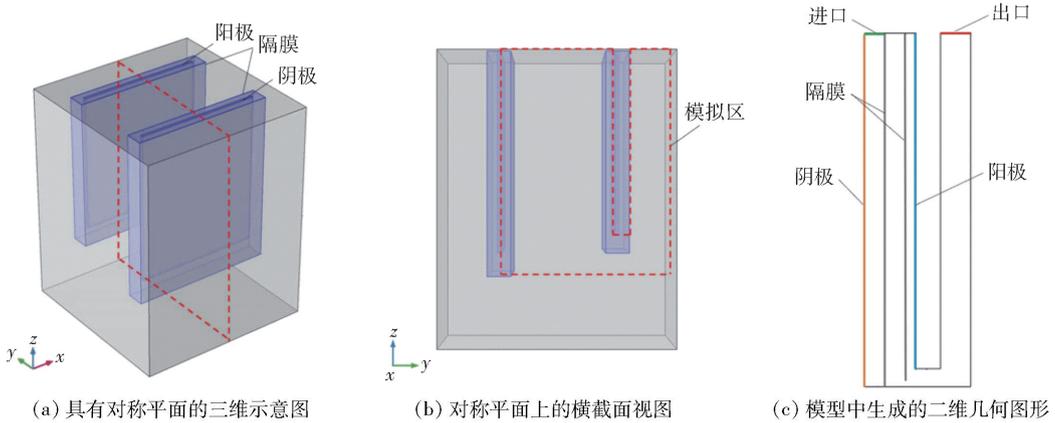


图 13 在模型中生成单元几何图形

Fig. 13 Generating unit geometries in the model

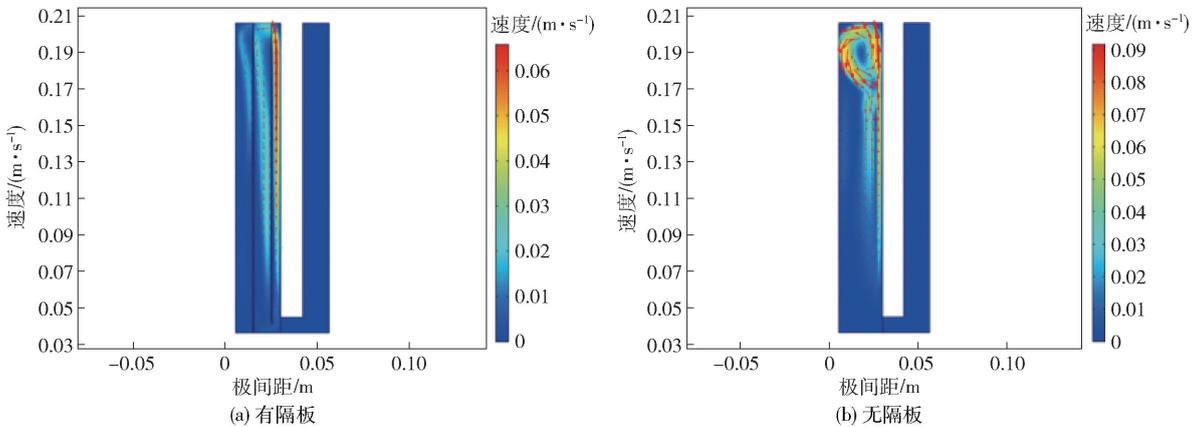


图 14 有隔板和无隔板的流体速度场比较(120 s)

Fig. 14 Comparison of fluid velocity field with and without a baffle at 120 seconds

电解液电位和阴极电流分布的影响,结果表明,与模拟中的其他设置相比,电解槽温度 60 ℃、镍浓度 80 g/L 的工艺条件和相对较低的电流密度更有利于降低电解液压降和沉积粗糙度。

3 研究现状与分析

表 2 列出了本文国内、外电解槽物理场特性相关研究文献情况,可以看出,利用仿真软件对电解槽内的电解液流场、离子浓度场、电场、温度场等进行数值模拟已经得到广泛应用,而且通过仿真模拟结果改进工艺参数、电极和阳极材料及结构,设计新型电解槽等方法已经较为成熟;但关于利用仿真软件模拟电冶金提取金属过程的研究还有很大空间,各文献利用仿真软件模拟电积锌、铜、锰、镍这 4 种电积过程时,大多是对单场进行研究,忽略了溶液的温

度变化以及电解液流速变化,因此,未来的仿真模拟模型应将电场和流场等多物理场耦合;另外,目前对阳极结构变化对电解槽物理场特性影响的研究主要集中在平板状结构基础上的电极尺寸大小、极间距及电解槽尺寸等,而对阳极其他形状结构的研究极少;电积过程会受空气湿度和温度的影响,可能造成极板变形和腐蚀等,电积方面的仿真模拟过程存在过于理想化的问题,未来研究模型应考虑这些不可控因素,使模拟结果更加准确。

4 结论与展望

4.1 结论

1) 电积锌和电积铜的模拟仿真均对最佳进液方式进行了探讨,为提高电流效率和电流密度提供了数据支持。电积铜方面的研究学者模拟利用

表2 电积金属电解槽物理场特性分析研究进展

Table 2 Research progress of physical field characteristics analysis of electrodeposition metal electrolytic cell

类别	电解槽尺寸	物理场类型	阳极结构	仿真软件	主要研究特点	文献
锌电积	电解槽中心纵截面 0.42 mm × 0.31 mm	流场分析	平板型	ANSYS - Fluent	对锌电解槽内部电解液流场进行数值模拟,改善电解槽流场分布情况	王建华,等 ^[7]
	4.10 m × 0.6 m × 1.82 m (工业电解槽)	流场分析	平板型	ANSYS - Fluent	利用三维模型模拟了电解液的流动,提出了电极间有效流率(IEFR)的概念,定量评价电解液的流场特性,优化了电解槽运行条件及结构参数	Li, et al ^[8]
	实验室立方结构电解槽	流场分析	平板型	ANSYS - Fluent	对5种进液方式的锌电解槽的流动特性进行了数值模拟,分析进液方式的变化对电解液流场的影响	Wang, et al ^[9]
	0.32 m × 0.18 m × 0.22 m	流场-电场-电化学反应耦合分析	平板型	COMSOL Multiphysics	基于液相传质原理,结合组分质量守恒、流体动力学及电极动力学方程建立锌电解槽多物理场仿真模型,为锌电积过程的优化控制提供参考	邓亦梁,等 ^[10]
	0.21 m × 0.075 m × 0.16 m	流场(气液两相)-电场-电化学反应耦合分析	平板型	COMSOL Multiphysics	基于Nernst-Plank方程和电极气体析出动力学,建立了预测锌电积过程电流效率模型	Zhang, et al ^[11]
	锌电解槽1个电解单元	电场分析	复合多孔型	ANSYS	构建Pb合金阳极的电化学数值计算模型,分别研究不同结构阳极在电化学反应过程中的导电性、电流与电压的分布规律	黎红兵,等 ^[12]
铜电积	5.74 m × 1.17 m × 1.4 m (工业电解槽)	流场-电场-热场耦合分析	平板型	ANSYS - Fluent	建立铜电解槽内电解液流场、温度场和电场作用数学模型,利用CFD商业软件,对槽内各物理场进行数值计算分析,为优化电解槽温度场分布、改进操作工艺参数提供数据依据	李明周,等 ^[15]
	5.84 m × 1.17 m × 1.4 m (工业电解槽)	流场分析	平板型	ANSYS - Fluent	研究铜电解槽的进液口布置方式对极板间流场的影响,为提高电流密度和增加产能提供数据依据	周萍,等 ^[16]
	5.11 m × 1.04 m × 1.45 m (工业电解槽)	流场分析	平板型	COMSOL Multiphysics	对传统电解过程中的槽内流场分布情况进行分析,得出槽内各区域电解液的流动情况以及流速变化等,进而为电解槽结构的优化及流场参数的合理选取提供参考	李爱玲,等 ^[17]
	0.1 m × 0.055 m × 0.1 m	流场分析	平板型	COMSOL Multiphysics	设计了一种新型铜电解槽,用于改善铜离子的运输和控制泥制颗粒的移动,分析了铜离子浓度分布、液流速度场和泥质颗粒的运动和分布规律	Zeng, et al ^[23]
锰电积	0.14 m × 0.11 m × 0.1 m	电-浓度场耦合分析	平板型	COMSOL Multiphysics	分析了电解槽结构变化对电解过程的影响,并建立了电-浓度场的数学模型模拟电解槽内电场与浓度场的分布状况	郭岚峰,等 ^[27]
	0.14 m × 0.11 m × 0.1 m	电场分析	不同开孔形状	COMSOL Multiphysics	研究阳极板开孔形状对电沉积锰过程的影响规律,优化开孔结构,降低能耗	郭岚峰,等 ^[32]
镍电积	0.21 m × 0.075 m × 0.16 m	流场(气液两相)-电场-电化学反应耦合分析	平板型	COMSOL Multiphysics	建立了镍电积过程流体流动-物理-电化学反应多物理场耦合模型,利用所建立模型研究电极隔膜及相关参数对电积镍性能的影响	Zhang,等 ^[36]

COMSOL Multiphysics 软件设计了一种新型铜电解槽,在流体流场、煤泥颗粒运动方面有更好的控制性能,能够加强电解液流动,从而提高有效电流密度,

使电解液温度、铜离子分布更加均匀。

2) 电解锰方面的研究学者利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件探究了极板摆放方式,阴、阳极板

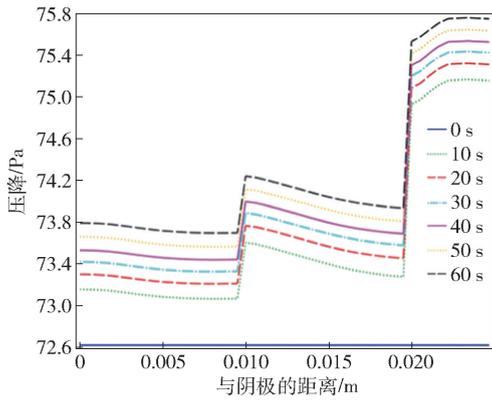


图 15 当流体流过隔膜时的顶部单元压降
Fig. 15 Pressure drop of the top element as fluid flows through the diaphragm

间距和相对大小对电流效率、槽电压、电解槽内的电场、流场分布及单位功耗的影响。结果表明,在及时补偿电解液中锰离子浓度的前提下通过降低极板间距可降低能耗;极板摆放角度不超过 2° 时金属锰沉积速率快,可以提高电流效率,降低能耗;阳极尺寸小于阴极尺寸时有利于提高电流效率、降低能耗、减少阳极材料的消耗。

3) 电积锌和电解锰方面的研究学者利用 ANSYS、COMSOL Multiphysics 仿真软件对阳极材料和结构进行了探索。锌电解槽能耗可以通过改进阳极板材料与结构来降低,其中反三明治结构复合多孔阳极降耗效果最佳;锰电解中传统平板阳极采用圆形开孔方式可使电解质电位分布更均匀,降耗效果最好。

4) 电积镍方面的研究学者利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了镍电积过程的流体流动、物理和电化学综合多物理模型,并且表明可利用达西定律体积力模型克服电极隔膜、阴极表面镍和氢的竞争电极反应动力学的问题。

4.2 展望

1) 目前锌电积仿真模拟模型对单物理场的研究进展较多,今后仿真模拟应注重多物理场耦合分析方面的研究。

2) 目前铜电积仿真模拟通过优化工艺参数、改进电极、设计新型电解槽、模拟电流分布和电解液流动、研究阳极泥和电解液中的内部因素等,在控制产品杂质、提高生产率和电流效率、改善表面质量和收集矿泥方面研究成果颇丰,今后需在阳极材料和结

构方面进行更多研究。

3) 利用仿真软件对锰电解、镍电积进行模拟仿真的研究相比锌电积和铜电积较少,可以借鉴锌电积、铜电积方面的研究成果进行探索,为优化工艺参数、提高生产效率提供依据。

4) 目前仿真模拟所建立的模型偏向理想化,未来应该更加注重与实际相结合,考虑温度、湿度、环境等因素造成的影响,提供更准确的模拟结果。

[参考文献]

- [1] 陈源. 锌湿法冶炼电解过程能耗分析与建模[D]. 长沙:中南大学, 2008.
CHEN Yuan. Analysis and modeling of energy consumption in zinc wet smelting electrolysis process [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [2] 苏寅彪. 锌电解槽流场数值模拟及其优化[D]. 长沙:中南大学, 2012.
SU Yinbiao. Numerical simulation and optimization of flow field in zinc electrolyzer [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [3] Michael Mahon, Spencer Peng, Akram Alfantazi. Application and optimisation studies of a zinc electrowinning process simulation [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2014, 92(4):633-642.
- [4] 陈匡义,周玉琳. 降低锌电解直流电耗的生产实践[J]. 湖南有色金属, 2018, 34(1):35-37.
CHEN Kuangyi, ZHOU Yulin. Practice of reducing DC power consumption in zinc electrolysis production [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2018, 34(1):35-37.
- [5] V M Alkatev, M I Alkatev, L K Va, et al. Influence of impurities in electrolyte (tin, germanium, and antimony) on current efficiency within electrowinning of zinc [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2014, 55(4):327-330.
- [6] D Majuste, E Martins, A D Souza, et al. Role of organic reagents and impurity in zinc electrowinning [J]. Hydrometallurgy, 2015, 152:190-198.
- [7] 王建伟,罗永光,施哲. 锌电解槽内电解液流动现象的水力学和数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(8):4-8.
WANG Jianwei, LUO Yongguang, SHI Zhe. Hydraulics and numerical simulation of flow at electrolyte in zinc electrolysis cell [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(8):4-8.
- [8] Haolan LI, Jie HU, Ping ZHOU, et al. Optimization of operating conditions and structure parameters of zinc electrolytic cell based on numerical simulation for electrolyte flow [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(5):1604-1609.
- [9] Hongdan Wang, Wentang Xia, Wenqiang Yang, et al. Improving current efficiency through optimizing electrolyte flow in zinc electrowinning cell [J]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2016:239-245.
- [10] 邓亦梁,谢永芳,李勇刚,等. 基于液相传质的锌电解过程多物理场仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1):119-126.

- DENG Yiliang, XIE Yongfang, LI Yonggang, et al. Multiphysical simulation analysis for zinc electrowinning based on liquid-phase mass transfer [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(1): 119 - 126.
- [11] Zonglaing Zhang, Joshua M Werner, Michael L Free. Modeling zinc electrowinning for current efficiency prediction based on Nernst-Planck equation and electrode gas evolution reaction kinetics [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, 165(15): 3246 - 3252.
- [12] 黎红兵, 杨健, 蒋良兴, 等. 反三明治结构复合多孔 Pb 合金阳极数值仿真 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2020, 51(12): 3357 - 3366.
- LI Hongbin, YANG Jian, JIANG Liangxing, et al. Numerical simulation of anti-sandwich structure composite porous Pb-alloy anode [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(12): 3357 - 3366.
- [13] Y Li, L X Jiang, X J Lv, et al. Oxygen evolution and corrosion behaviors of co-deposited Pb/Pb-MnO₂ composite anode for electrowinning of nonferrous metals [J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 109(3/4): 252 - 257.
- [14] 朱祖泽, 贺家齐. 现代铜冶金学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- ZHU Zuze, HE Jiaqi. *Modern copper metallurgy* [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] 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 Mingzhou, HUANG Jindi, TONG Changren, et al. Numerical analysis of thermal-electrical fields in copper electrolytic cell [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2016, 7(6): 50 - 55.
- [16] Ping ZHOU, Haibo MA, Ziwei XIE, et al. Evaluation of flow behavior in copper electro-refining cell with different inlet arrangements [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(10): 2282 - 2290.
- [17] 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 tradition copper electrolytic cell based on COMSOL [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2017, 37(3): 266 - 268.
- [18] Weizhi Zeng, Michael L Free, Shijie Wang. Studies of anode slime sintering/coalescence and its effects on anode slime adhesion and cathode purity in copper electrorefining [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(2): E14 - E31.
- [19] W Zeng, M L Free, J Werner, et al. Simulation and validation studies of impurity particle behavior in copper electrorefining [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 162(14): E338 - E352.
- [20] W ZENG, S WANG, M L FREE. 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): E111 - E122.
- [21] ZENG Weizhi, FREE Michael L, WANG Shijie. Simulation study of electrolyte flow and slime particle transport in a newly designed copper electrorefining cell [J]. *ECS Transactions*, 2016, 72(22): 23 - 42.
- [22] ZENG Weizhi, WANG Shijie, Free Michael L. Experimental studies of the effects of anode composition and process parameters on anode slime adhesion and cathode copper purity by performing copper electrorefining in a pilot-scale cell [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 47B(5): 3178 - 3191.
- [23] ZENG W, WANG S, Free M L, et al. Design and modeling of an innovative copper electrolytic cell [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, 165(14): E798 - E807.
- [24] Richard Daniel, Fafard Mario, Lacroix René, et al. Aluminum reduction cell anode stub hole design using weakly coupled thermo-electro-mechanical finite element models [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2001, 37(4): 287 - 304.
- [25] A NEfremov, Yu RKhalimullina, P SPershin, et al. Influence of the electrolyte composition on the current distribution in an electrolytic cell with liquid-metal electrodes [J]. *Russian Metallurgy*, 2015, 2015(2): 115 - 120.
- [26] Jaroslaw Milewski, Giulio Guandalini, Stefano Campanari. Modeling an alkaline electrolysis cell through reduced-order and loss-estimate approaches [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 269(10): 203 - 211.
- [27] 郭岚峰. 电解金属锰电解槽多场耦合仿真与节能优化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- GUO Lanfeng. Multi-field coupled numerical simulation and optimization for electrolytic metal manganese energy saving electrolytic cell [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [28] 周元敏, 梅光贵. 电解金属锰阴、阳极过程的电化学反应及提高电流效率的探讨 [J]. *中国锰业*, 2001, 19(1): 17 - 19.
- ZHOU Yuanmin, MEI Guanggui. Study on the cathode and anode electrochemical reaction & increase current efficiency from electrolyzing manganese [J]. *China's Manganese Industry*, 2001, 19(1): 17 - 19.
- [29] Y Stefanov, T S Dobrev. Developing and studying the properties of Pb-TiO₂ alloy coated lead composite anodes for zinc electrowinning [J]. *Transactions of the IMF*, 2013, 83(6): 291 - 295.
- [30] 蒋良兴, 吕晓军, 李渊, 等. 锌电积用“反三明治”结构铅基复合多孔阳极 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2011, 42(4): 871 - 875.
- JIANG Liangxing, LYU Xiaojun, LI Yuan, et al. Anti-sandwich structure lead-based composite porous anode for zinc electrowinning [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(4): 871 - 875.
- [31] ZHANG Wei, ROBICHAUD Michael, GHALI Edward, et al. Electrochemical behavior of mesh and plate catalytic anodes during zinc electrowinning [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(02): 589 - 598.
- [32] 郭岚峰, 刘仁龙, 刘作华, 等. 阳极开孔形状对金属锰电沉积行为的影响及数值模拟 [J]. *化工进展*, 2017, 36(7): 2584 - 2591.

- GUO Lanfeng, LIU Renlong, LIU Zuohua, et al. Numerical simulation and experimental study on behavior of anode with different opening shapes in manganese electrowinning[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(7):2584–2591.
- [33] R R Moskalyk, A M Alfantazi. Nickel laterite processing and electrowinning practice[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(8): 593–605.
- [34] Holm M, O'keefe T J. Electrolyte parameter effects in the electrowinning of nickel from sulfate electrolytes[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(2):193–204.
- [35] J MWERNER, WZENG, M LFREE, et al. Editors' choice— modeling and validation of local electrowinning electrode current density using two phase flow and Nernst-Planck Equations[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(5):E190–E207.
- [36] Zonglaing Zhang, Joshua Werner, Michael L Free. Modeling nickel electrowinning with electrode diaphragms based on Nernst-Planck Equation and a volume force form of Darcy's Law[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 166(4):D120–D130.

Research progress on simulation of electrolyte flow field and electrolyzer structure based on energy saving and consumption reduction

JI Qi^{1,2}, CHEN Buming^{1,2,3}, JIANG Chunxiang^{1,2}, HUANG Hui^{1,2,3}, GUO Zhongcheng^{1,2,3}, HE Yapeng^{1,2,3}
 (1. College of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
 2. Research Center of Metallurgical Electrode Materials Engineering Technology, Yunnan Province, Kunming 650106, China;
 3. Kunming Science & Technology Hengda Technology Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: Electricity consumption in the electrolysis process accounts for more than 50% of the total energy consumption ratio, and the electrolysis process is a coupling of multiple physical fields and electrochemical reactions with complex influencing factors. Currently, simulation of physical and electric fields can achieve the purpose of optimizing electricity consumption. This paper compiles the literature on numerical simulation of multi-physics fields such as electrolyte flow rate field, ion concentration field and electric field in zinc, copper, manganese and nickel electrolytic cells using COMSOL Multiphysics and ANSYS, and analyzes the research results to conclude that the energy consumption on electrolytic cells depends on the distribution of multi-physics fields in the cells, and by changing the electrolyte feeding method, anode material, electrolyzer geometry, temperature, plate spacing, electrode size, and plate placement, the current efficiency and energy consumption can be influenced; numerical simulation of the electrolysis process using simulation software can simulate the actual electrolysis process, which can help optimize the process and save costs. The current simulation mainly focuses on internal factors such as process parameters, electrode structure, electrolyzer structure, and electrolyte flow field in the electrolysis process, and the research results are very fruitful in controlling product impurities, improving productivity and current efficiency, improving surface quality and collecting sludge. However, the model is idealized, and in the future, more attention should be paid to the integration with reality, taking into account the effects of temperature, humidity, environment and other factors, provide more accurate simulation results.

Key words: electrolytic energy consumption; electrolyzer structure; electrolyte flow field; simulation; multi-physical field coupling; current efficiency; optimization process