

# 稀土熔盐电解槽物理场研究现状

董云芳<sup>1,2</sup>, 马守营<sup>3</sup>, 伍永福<sup>3</sup>, 刘中兴<sup>2\*</sup>, 刘玉宝<sup>4</sup>, 栗志<sup>3</sup>

1. 内蒙古科技大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古科技大学 稀土产业学院, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010;
4. 包头稀土研究院 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 014030)

**摘要:**熔盐电解法是生产稀土金属的重要工艺, 电解槽是其核心设备。稀土电解槽多物理场研究涉及冶金、物理和数学等多领域学科。近年来, 稀土电解槽多物理场结合数值模拟已经成为电解槽优化设计、辅助生产过程控制的重要手段。本文综述了稀土电解槽的四种物理场: 电场、磁场、流场和温度场。讨论分析不同物理场的研究现状及其对稀土电解过程的影响。多物理场各自产生作用并相互耦合, 直接影响电解产生的能耗、电流效率以及电解槽寿命, 但到目前为止还没有人做到稀土电解槽多物理场真正意义上的耦合求解。各物理场分开计算导致电、磁、流、温度场计算精度不高等问题。稀土电解槽多物理场耦合仿真求解对稀土电解槽物理场的设计和稀土电解槽新槽型的开发具有十分重要的意义, 是重要的发展方向。

**关键词:**熔盐电解; 电场; 磁场; 流场; 温度场

**中图分类号:**TF845

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-0277(2026)02-0130-14

稀土是一种重要的工业元素, 因其具有优质的磁、光、电等特性, 已经被广泛应用在各领域中。稀土氧化物熔盐电解法是生产稀土金属的重要工艺, 其中约95%的稀土金属通过该方法制备。熔盐电解 (Molten salt electrolysis) 是以熔融盐类为电解质进行金属提取或金属提纯的电化冶金方法<sup>[1]</sup>。在稀土熔盐电解的研究中, 电解槽中对电解过程产生

影响的因素是多层次的。稀土电解槽中的稀土电解是电场、磁场、流场和温度场等因素共同作用下的过程。强大的电流在通过阴阳极和电解质时产生了电场和磁场; 在熔盐电解过程中, 电能有两方面的作用: (1) 熔体具有一定的电阻, 当电流通过熔体时就会产生焦耳热形成温度场, 来维持电解质熔融所需要的温度; (2) 用于电解。阳极一般为石墨

收稿日期: 2023-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51964039); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2022LHMS05004; 2021GG0103; 2022LHMS05004); 白云鄂博稀土资源研究与综合利用全国重点实验室开放研究项目(2021H2275); 内蒙古自治区创新平台建设规划项目(2025KYPT0129); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2023CXPT001; 2023YXXS022; 2024QJNS057; 2024RCTD008)

作者简介: 董云芳(1984-), 女, 河北邢台人, 硕士, 讲师, 主要从事稀土冶金过程的数值模拟, E-mail: 252118420@qq.com

\* 通信作者: 刘中兴, 教授, E-mail: liuzx@imust.edu.cn

DOI: 10.3724/S1004-0277.202602014

材料,电解会腐蚀生成  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ ,同时阴极会有金属析出。气泡的上行、金属液的下行及磁场力会驱动熔体循环流动,进一步影响其他物理场。

## 1 电解反应机理

目前,稀土电解以氟化物熔盐体系为主<sup>[2]</sup>。以电解  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  为例,其电解原理如图 1 所示。

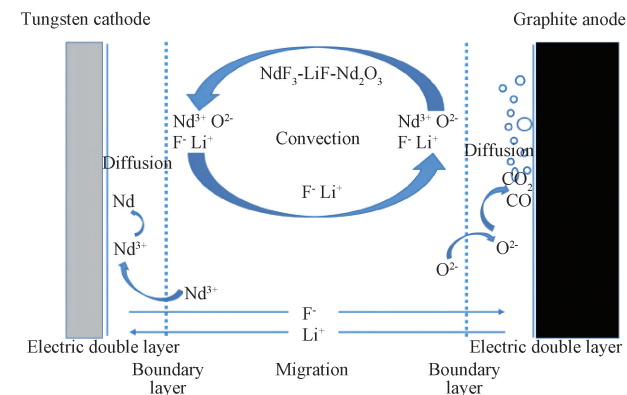


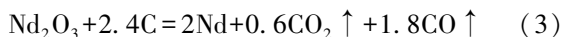
图1 稀土电解槽内组分运输示意简图

Fig. 1 Schematic diagram of component transportation in the rare earth electrolytic cell

(1)溶解过程:在氟化物熔盐体系中,氧化钕( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ )直接解离成  $\text{Nd}^{3+}$  和  $\text{O}^{2-}$ <sup>[3]</sup>,但当  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  的质量分数超过 4%,部分  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  会与  $\text{NdF}_3$  反应形成  $\text{NdOF}_3$ 。 $\text{NdOF}_3$  比重大、熔点高,易沉积于电解槽底形成结瘤<sup>[4]</sup>。



(2)阳极过程:通常以石墨块作为阳极,正常电解时的阳极产物主要为  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$ <sup>[5]</sup>。



(3)阴极过程:钕离子在阴极得电子被还原成金属后析出。其还原过程分为两步,先由  $\text{Nd}^{3+}$  得 1 个电子还原为  $\text{Nd}^{2+}$ ,  $\text{Nd}^{2+}$  进一步得电子被还原成金属  $\text{Nd}$  单质<sup>[6]</sup>。



## 2 各物理场相关参数的研究

稀土电解槽各物理场的研究是建立在电解槽内各物质的性质参数基础上的。其中石墨阳极的电导率  $\rho_{11}$  和钨阴极的电阻率  $\rho_{12}$  与温度有关<sup>[7,8]</sup>:

$$\rho_{11} = \rho_{1000} + \alpha(t - 1000) \quad (6)$$

$$\rho_{12} = -1025T + 4098456 \quad (7)$$

式中: $\rho_{1000}$  为石墨阳极 1000 °C 下的电阻率,  $(9.2 \pm 1.4) \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\alpha$  为电阻的温度系数,  $0.002 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $T$  为热力学温度。

刘奎仁等<sup>[5,9~11]</sup>系统研究了氟化物体系熔盐的相关物性参数。发现  $\text{NdF}_3$  (83%)- $\text{LiF}$  (17%)- $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (2%) 体系在 1050 °C 下的密度约为  $3.844 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 电导率约为  $6.44 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , 且电导率随着  $\text{NdF}_3$  浓度的增加逐渐降低;通过实验得  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  的理论分解电压为 1.27 V, 该值随着温度升高会降低。阴极过电位较小, 介于 0.01 V ~ 0.1 V 之间, 阳极过电位较大, 满足塔菲尔方程:

$$\eta_a = 0.46 + 0.78 \lg i \quad (8)$$

$\eta_a$  为阳极过电位(单位 V),  $i$  是电流密度(单位  $\text{A}/\text{cm}^2$ )。同时,研究发现稀土电解槽阳极电流密度超过  $1.5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 会发生阳极效应;且较大的阳极电流密度会加快阳极碳块的腐蚀。高钰奇<sup>[12]</sup>通过实验进一步探究了电解质粘度参数,发现粘度约为  $583 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 且粘度随温度的增加逐渐降低。

## 3 电场、磁场、流场和温度场研究进展

目前,稀土电解槽的研究多以中小型上插阴阳极式电解槽为主,通常为 3 kA、6 kA 和 8 kA 电解槽;另有小部分万安级电解槽可达到 10 kA 到 15 kA。尽管绝大多数大型稀土电解槽仍处于保密阶段,但依然沿用着上插阴阳极模式。因此对 3 kA、6 kA、8 kA 及部分万安级电解槽的仿真模拟依旧有研究价值。

### 3.1 电场

稀土电解槽电场是整个稀土电解槽运行的能量基础,是其他各物理场形成的根源。一般采用麦

克斯伟(Maxwell)电磁场方程作为电场的模拟控制方程。电场分布主要集中在两极之间<sup>[13]</sup>,典型的电场分布如图 2<sup>[14]</sup>。

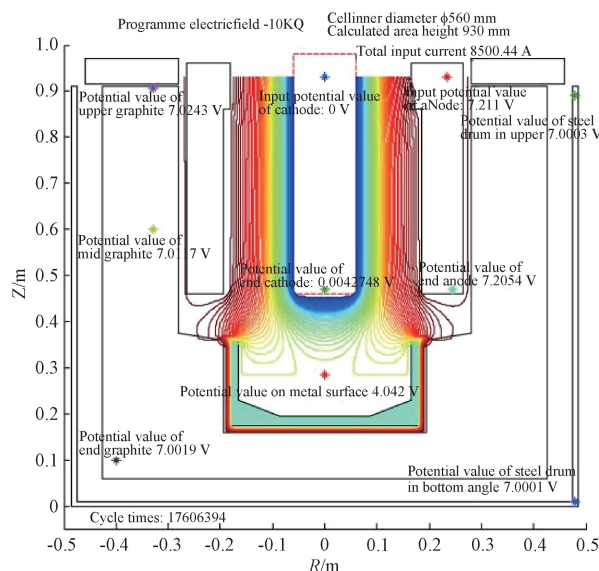


图 2 典型电流场等值线图

Fig. 2 Typical current field contour map

对于 3 kA 稀土电解槽电场的研究,通常是考虑电解槽的导电结构,阴阳极的配置关系是影响电场的重要工艺参数。常规情况下,阴极直径为 50 mm,阳极内径为 200 mm,外径为 300 mm,插入深度为 215 mm,槽电压在 10 V 左右,电流效率在 75% 左右。刘中兴等<sup>[13]</sup>模拟了 3 kA 可调极距式电解槽在槽电压不变的情况下熔体电场的分布,发现电场主要集中在阴阳极之间;任永红等<sup>[15]</sup>模拟发现,极间距对电场影响较大,随着阳极的消耗,熔体压降从 3.809 V 升到 4.350 V,极间距的增加促使熔体电位升高,电解前期到后期相差约 1 V;刘中兴、伍永福等<sup>[16,17]</sup>对电解槽进行了整体电场模拟,模拟的槽电压为 9.707 V,相较于实际电压偏低。由于电解槽外壁设为绝缘边界条件,说明绝缘性良好的石墨槽体可以降低槽电压。同时,在对电极表面电位进行研究时发现,电极并非等势体,阴极上下电位差可达 0.05 V;电极插入过深难以保持电流水平分布,电极插入深度为 215 mm,阳极内径保持在 200 mm

为最佳。米兰<sup>[18]</sup>在此基础上设计了全埋式 3 kA 电解槽,相对于上插式稀土电解槽,全埋式稀土电解槽槽电压可降低 1.3 V,且阳极内径每增加 20 mm,熔体压降增加 0.5 V,得出阳极内径以 220 mm 为最佳;陈国华等<sup>[19]</sup>对电解槽各部分的电压进行计算,发现熔体压降约为 4.30 V,占总槽电压的 45%,同时发现结构压降较大,约为 2.5 V,需对接触点进行进一步优化;汪金良等<sup>[20]</sup>模拟发现熔体压降约可达 5.17 V,由此得出槽电压为 9.9 V,与实际槽电压相符;同时进一步对电极表面电流密度进行分析,阳极电流密度在  $1.35 \text{ A/cm}^2 \sim 1.6 \text{ A/cm}^2$ ,阴极电流密度在  $5 \text{ A/cm}^2 \sim 8 \text{ A/cm}^2$ ;伍永福、刘中兴等<sup>[21~24]</sup>考虑电解过程中电热场之间的相互作用,模拟发现耦合前后电场参数出现 0.03 V~0.19 V 的波动,验证了耦合模拟的合理性,并进一步对不同电极插入深度(170 mm, 220 mm, 270 mm)和极间距(55 mm, 75 mm, 95 mm)进行深入研究,发现阴阳极间存在最优配比关系,插入深度为 220 mm,极间距为 75 mm 为最佳配比。

对于 6 kA 稀土电解槽电场的研究,不再局限于电极插入深度和极间距之间的配比,而是进一步研究电极结构尺寸对电场的影响。常规情况下,阴极直径为 80 mm,阳极内径为 218 mm,外径为 410 mm,插入深度为 290 mm,槽电压在 9 V~10 V 之间,电流效率在 79% 左右。王亮亮等<sup>[25]</sup>采用正交切割阳极片代替传统阳极片,模拟的阴阳极压降为 6.518 V,与传统模型数据相差不大,但新式阳极片消耗明显变缓。吕晓军等<sup>[26]</sup>发现阳极消耗的前 60 mm 属于均匀消耗,之后由于阳极上下冲刷腐蚀,消耗趋于非均匀消耗。前期阳极每均匀消耗 10 mm 时,槽电压就会上升 310 mV 左右,后期阳极每非均匀消耗 10 mm,槽电压提升值比均匀消耗高出 130 mV,为了提高经济效益,阳极消耗到 50 mm 进行更换较为合理。伍永福等<sup>[27]</sup>打破传统稀土电解槽底部阴阳极齐平的特点,研究发现阴极插入深度为 290 mm,阳极插入深度为 250 mm 可以有效提高电流效率。刘康毅等<sup>[28]</sup>分别对不同阴极直径

(60 mm、70 mm、80 mm、90 mm) 的电解槽进行数值模拟,发现阴极直径为 80 mm 时,电解槽温度为 1370 K,可以较好地满足电解需要。张恒星等<sup>[29]</sup>针对稀土电解槽阴极底部的电场分布不均的问题,对电解槽的阴极结构进行了优化,模拟发现阴极底端为半球形结构时,可以使得电解槽的电场分布趋于均匀,消除了电解槽内局部过热的问题。高钰奇<sup>[12]</sup>对 6 kA 稀土电解槽电极表面电流密度进行深入研究,发现阳极电流密度为 1.18 A/cm<sup>2</sup>~1.81 A/cm<sup>2</sup>,阴极电流密度为 3.81 A/cm<sup>2</sup>~6.79 A/cm<sup>2</sup>。相对 3 kA 稀土电解槽,6 kA 稀土电解槽电极表面电流密度整体呈现下降趋势。

近几年来,对于 8 kA 稀土电解槽电场的研究日益增多。常规情况下,阴极直径为 70 mm,阳极内径为 100 mm,外径为 190 mm,插入深度为 410 mm,槽电压在 10 V 左右,电流效率在 84% 左右。逢启寿等<sup>[30]</sup>发现电解槽阴极直径从 60 mm 到 90 mm 逐步变大过程中,阴极底部区域电位从 4.236 V 到 2.133 V 逐渐变低,阴极棒不宜插入过深,直径 70 mm 为最佳;叶楠<sup>[31]</sup>对阳极结构进行了优化研究,发现在电解后期阳极下半部分消耗加快,全倾角阳极为 4°或半倾角阳极为 6°阳极时,可以缓解阳极消耗不均现象;龚姚腾等<sup>[32]</sup>对电极表面电势进行研究,发现阳极表面电势差值可达到 0.4 V;忻治霖<sup>[33]</sup>对比分析不同通电方式对槽电压的影响,发现双侧中位通电式与双侧侧位通电式分别比单侧中位及侧位通电方式减少 83.8 mV 和 125.8 mV 的压降。

稀土电解槽从 3 kA 到万安级电解槽的发展过程中,总体槽电压一直稳定在 9 V~10 V 区间内,其中占比最大的是熔体压降,在 4.0 V~5.5 V 之间,占总槽电压的 40%~55%;其次是结构压降较大,在 2.0 V~3.0 V 之间,占槽电压的 20%~30%,对电能消耗较大。而剩余部分电压约为 2 V 左右,主要为界面电位差,目前难以判断其位置及对电场电位分布的影响,需要进一步探究。课题组借鉴铜电解槽的相关研究<sup>[34~37]</sup>,通过引入 Nernst-Planck 方程、Butler-Volmer 方程建立电极-电解质界面电荷传输

模型,实现 6 kA 稀土电解槽整体电位模拟。以现场工作电流 4010 A 为模拟工况,模拟的槽电压分布如图 3 所示。结果表明,在 4010 A 电流下,界面双电层会产生 1.62 V 的界面电势差,其中阳极过电位为 0.02 V,阴极过电位为 0.24 V, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 理论分解电压为 1.36 V;同时,界面双电层相当于在电极-电解质界面间串联了一个等效电阻,使得整个电极表面上各处的实际电流密度趋于均匀;界面双电层的存在,使得熔体压降提高约 1.46 V,熔体压降为 4.26 V。模拟结果与现场测量数据相吻合。

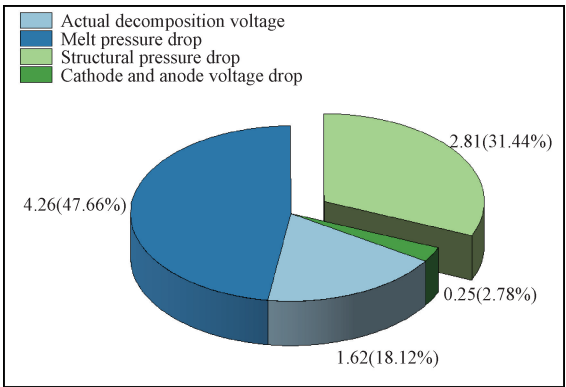


图 3 稀土电解槽槽电压分布统计图

Fig. 3 Voltage distribution statistics of the rare earth electrolytic cell

3.2 磁场

稀土电解槽中,带电导体产生磁场。槽子容积的增大已经成为稀土电解槽获得良好效益的有效途径。但其引发的磁场变大进一步影响熔体流动,磁场分布如图 4 所示<sup>[38]</sup>。石红梅等<sup>[39]</sup>、伍永福等<sup>[40]</sup>以上插式稀土电解槽为研究对象,对槽内的磁场分布进行了 3D 数值模拟,发现磁场主要由阴极电流产生,阳极次之,熔体电流作用最小;且产生的磁场只在圆周上分布,磁通密度最大可达 0.03 T。为了确保稀土电解槽内熔体充分流动,逢启寿等<sup>[41]</sup>以 8 kA 稀土电解槽为研究对象,通过对电解槽外侧上部、下部和底部加装铜线圈进行电磁搅拌来控制熔体流速,发现外侧上部方案较好,可以有效改善流动死区问题。当在外侧上方线圈通入 1 Hz 正弦

波电流,安匝数 3000 AN 时,对应所需总搅拌力 3.5 N,可使熔体速度达到 1.6 m/s。

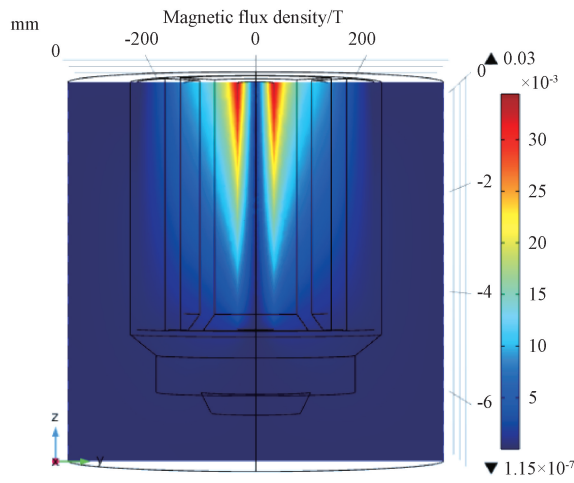


图 4 典型电解槽磁场分布

Fig. 4 Typical magnetic field distribution of electrolytic cell

现阶段针对稀土电解槽磁场的研究报告很少,随着稀土电解槽向着大型化的发展,电磁力对稀土电解槽内熔体的循环流动起到不可忽视的作用。从铝电解槽的相关研究<sup>[42]</sup>中得知,80 kA 及以上的铝电解槽内的电磁力将会影响到电解槽正常的生产工作,而稀土电解槽内电磁力达到多大数值、电解槽容量增至何种规模时才会对稀土电解槽产生实质性影响,仍需要进一步的研究。

3.3 流场

稀土电解槽内熔体运动的最主要原因是:电解过程中,在阳极炭块上进行电化学反应逐渐消耗并持续产生阳极气泡,阳极气泡从阳极的内表面反应生成和逸出过程,对阴阳两极间的电解质起到强烈的搅拌作用。其次阴极金属下沉是电解槽下部熔体流动的主要驱动力。随着槽子容积的增大,电磁力也会对熔体流动产生一定的影响,以及其他物理过程(传质和传热)和各种生产操作等因素。

稀土电解槽内的流动体系有电解质、稀土金属溶液、阳极气体、金属氧化物颗粒以及碳颗粒,是典型的多相流动。不同受力区域如图 5。在不考虑金属氧化物颗粒和杂质颗粒运动的情况下,电极之间

的区域(Ⅰ区)主要受电磁力和气泡上浮的作用力共同影响,熔体流动较剧烈,为标准的气液两相流动;电极底部至坩埚内的区域(Ⅱ区)主要受力是阴极金属下落产生的对熔体的扰动,对流场的影响较小,可看作液液两相流动;阳极外侧到槽壁之间的区域(Ⅲ区)的熔体基本不受力,熔体流动较弱,是电解槽中的流动死区<sup>[43]</sup>。

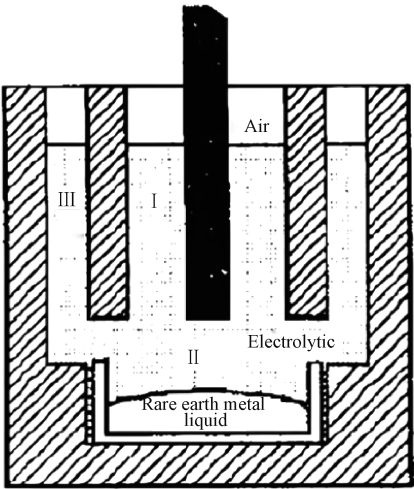


图 5 稀土电解槽内不同受力流动区域划分示意图

Fig. 5 Diagram of division of flow areas under different forces in rare earth electrolytic cell

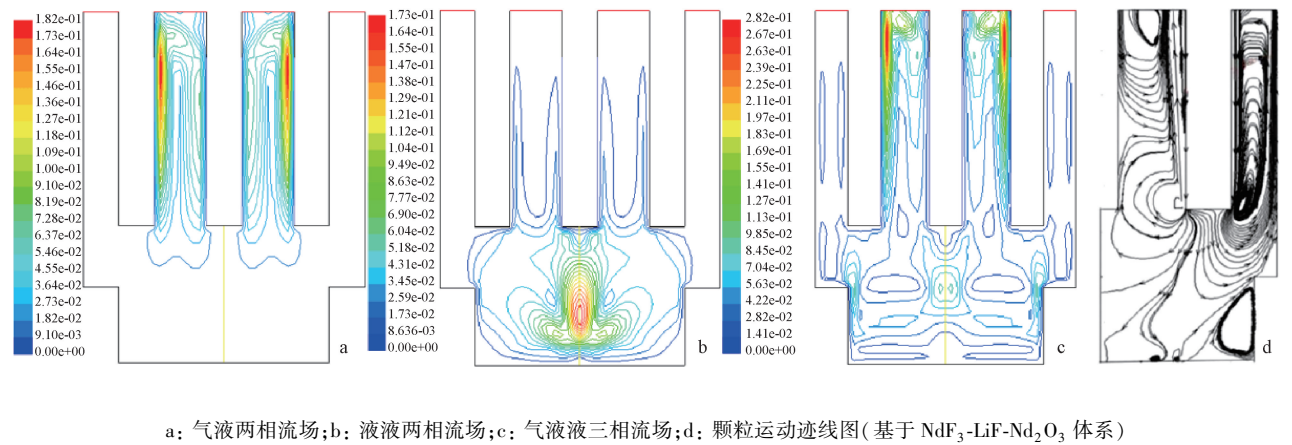
依据不同驱动力建立流场仿真模型,典型电解槽流场分布如图 6<sup>[44]</sup>。阳极气体上浮为电解质循环的主要驱动力,主要作用于阴阳两极之间,并在阳极内侧上表面形成涡流;阴极金属下沉主要作用于电解槽下部区域。

对于稀土电解槽流场参数,以  $\text{NdF}_3\text{-LiF-Nd}_2\text{O}_3$  电解质体系为例,电解质密度为  $3.844\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、粘度为  $0.00495\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、气体粘度为  $4.881\text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ <sup>[45]</sup>。由于雷诺数  $Re \gg 2300$ <sup>[46]</sup>,所以判定稀土电解槽内的电解质的流动为湍流。

由于阳极气体上浮是熔体循环流动的主要驱动力,因此阳极气泡在流场的研究中至关重要。早期对于阳极气泡的生成机制,刘忠杰等<sup>[47]</sup>提出了气体化学当量的观点,并推导出气体电化学当量  $C_g$  模型用以计算单位时间内气体的生成量;为进一步模拟实际

阳极表面不同深度的气体进入速度差异,刘中兴等<sup>[48]</sup>通过编程将槽内阳极气泡在不同位置的表观速度拟合曲线嵌入流场的数值模拟中。但以上模拟会出现气泡冒出速度和表观速度之间的冲突,出现气层不均匀现象。而电解槽实际生产中,经过验证就是一个气泡自然生成冒出的过程。刘宇新等<sup>[49]</sup>以 3 kA 钕电解槽为研究对象,首次将两相流模型与表面化学反应模型相结合,发现有化学反应的气泡比无化学反应的气泡形成的动态气层要均匀,阳极气体浓度主要分布在距离阳极内表面 0.025 m 以内,动态气层紧贴阳极壁面;王杨<sup>[50]</sup>对 6 kA 稀土电解槽流场进行研

究,发现阳极气体生成速度在 0.001368679 m/s ~ 0.003978286 m/s 之间,且阴阳极间熔盐内部在距液面 130 mm 至 400 mm 深度熔盐流动性最好;万福兴<sup>[51]</sup>对 8 kA 稀土电解槽瞬态流场进行研究,通过计算得到阳极气泡尺寸在 0.2615 cm 时脱离阳极,并发现稀土电解槽可以较快达到稳态,更换阳极后重新通电的第 25 s 流场整体平稳;刘庆生等<sup>[52]</sup>以 3500 A 电解槽为研究对象,研究阳极气泡产生、聚并、破裂行为对稀土电解过程的影响,发现极距和阳极电流密度分别为 82.5 mm 和 1.5 A · cm<sup>-2</sup> 有利于电解的高效进行。



a: 气液两相流场;b: 液液两相流场;c: 气液液三相流场;d: 颗粒运动迹线图(基于 NdF<sub>3</sub>-LiF-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系)

图 6 典型电解槽流场分布

a: Gas-liquid two-phase flow field;b: Liquid-liquid two-phase flow field;c: Gas-liquid-liquid three-phase flow field;d: Trace plot of the particle motion

Fig. 6 Typical flow field distribution of electrolytic cell

除了阳极气泡模型的研究,电极的材料结构配置也会对气泡生成起到一定的影响。刘中兴等<sup>[53]</sup>、伍永福等<sup>[54]</sup>以 3 kA 稀土电解槽为研究对象,通过改变阳极角度分析了不同工况下单个气泡的生长过程,发现倾斜角越大,气泡直径也越大,脱离壁面时间越长,最佳倾斜角度的设置可以促进电解,上倾角度设置为 3° 是最佳选择。刘中兴等<sup>[55]</sup>采用 CLSVOF 方法,分析了稀土电解槽内阳极表面不同的湿润角对气泡生长的影响,发现良好的湿润角可以有效的降低阳极效应。湿润角控制在 15° 和 25° 有利于电解的发生。胡永胜<sup>[56]</sup>以 3 kA 稀土电解槽为研究对象,分析了阳极不同比表面积对气体生成的影响,发现阳极比表面积控制在 3.3 × 10<sup>6</sup> m<sup>-1</sup> 左

右流场分布更合理。王军等<sup>[57]</sup>以 10 kA 底部阴极电解槽为研究对象,分析了不同极距对熔体和气体速度分布的影响,发现熔体的最大速度随着极距的增加而减少,最佳极距为 0.12 m,此时熔体的最大速度为 0.248 m/s,阳极气体的最大速度为 1.39 m/s。

阴极金属下落产生对熔体的扰动,对流场的影响较小。刘中兴等<sup>[58]</sup>以 3 kA 稀土电解槽为对象,研究阴极金属滴落对流场分布的影响,建立二维非稳态液液两相流动模型。发现金属液滴的滴落对电解槽上部的影响微乎其微,但对下部熔体的流动起主导作用,熔体最大速度可达 0.0723 m/s。

通过气液液三相流分析可知,电解槽内的流场与单独作用下的流场有明显的不同。伍永福等<sup>[59]</sup>

以 3 kA 钹电解槽为研究对象,研究槽内熔体流动时,在原有的电解质和气泡的二相模型基础上,加入了金属液滴的运动对流场的影响,建立了二维非稳态气液液多相流动模型。发现气液液多相流动可以较好模拟电解的实际情况,模拟数据可以清晰地反应电解中出现的问题,便于全面认识熔体的运动状态。刘庆生等<sup>[60]</sup>以 3500 A 稀土电解槽为研究对象,在已有的气-液-液模型(金属液体、电解质、阳极气泡)的基础上,考虑了阳极非均匀消耗对流场的影响,发现随着电极非均匀消耗加剧,消耗较快的阳极下方熔体稳流逐渐增强。

在稀土电解槽流场的研究中,熔体中微小固体颗粒运动轨迹的研究也至关重要。这些颗粒有碳杂质和未完全熔化的金属氧化物,都会对电解过程和生产金属产生很大的影响。因此必须对其运动轨迹进行追踪,从而促进电解槽优化设计、提高稀土纯度。刘中兴等<sup>[61,62]</sup>以 3 kA 稀土电解槽为研究对象,通过先用欧拉法建立流场模型,然后用拉格朗日法对不同半径的碳颗粒在流场中的运动进行研究。发现颗粒直径为 0.05 mm 是区分颗粒受力发生转变的临界值,当大于临界值时,颗粒会向远离阳极内表面的方向做弯曲向上的运动,直至达到液面。当小于临界值时,颗粒在阳极内表面做竖直向上的运动;高钰奇等<sup>[63]</sup>以 3 kA 稀土电解槽为研究对象,通过流场分布模型和 DPM 离散模型,模拟了不同电极插入深度对槽内颗粒运动的影响。发现对于小于临界值的颗粒,当电极插入深度很浅时,流体会在液面附近形成漩涡。由于流体回流,对钹颗粒的溶解不会产生不好的影响,当电极插入深度增大时,直径相等的钹颗粒在熔体中的运动时间和运动距离会逐渐变大,有利于原料的溶解。但插入深度过大时,会对电解槽底部区域的流动产生干扰。电极插入深度为 220 mm 且控制临界粒径为 0.8 mm,最有利于电解的进行。

前人一方面通过改变阳极结构、材料、形貌等参数去研究气泡生成的过程,另一方面通过引入气体化学当量、表观速度等概念或通过平均电流密度

算出气体切向射入速度代入模型去建立新的气泡生成模型,但依旧没有耦合电化学的气泡生成模型,导致模拟的流场速度始终较大。课题组通过法拉第公式与欧拉-欧拉两相流模型进行流场的耦合,最终实现对稀土电解槽电化学流场的仿真。与传统模型相比,气体不再以垂直于电极表面的方式匀速进入,而是在电极表面设置一个源项,气体通量将根据局部电流密度生成。分析发现气泡上浮力是电解槽流场流动的主要驱动力,电解至 29.9 s 时电解槽内流场整体趋于稳态,阴阳极电解生成物质趋于稳定,流场速度最大值稳定在 0.105 m/s 左右,电解槽内流场最大速度曲线如图 7 所示。

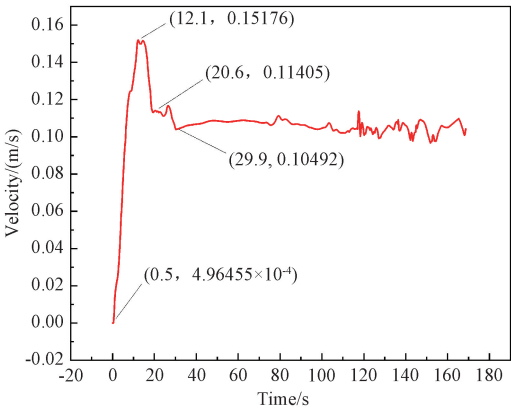


图 7 电解槽内流场最大速度随时间的变化曲线  
Fig.7 Evolution of the maximum flow field velocity in the electrolytic cell with electrolysis time

3.4 温度场

稀土熔盐电解质本身的电压降很大,电解时必然产生焦耳热,形成温度场。稀土熔盐电解质温度过高或过低都对电解造成很大影响,温度场典型分布如图 8 所示。

郭海涛等<sup>[64]</sup>通过数理方程对 3 kA 稀土电解槽的热平衡进行分析,发现熔体上表面散热占总能量的 45%,借鉴铝电解槽槽型设计可以有效降低热量损失。郑鑫等<sup>[65]</sup>通过实验测量获得 3 kA 稀土电解槽内部温度分布情况,发现阴阳极间温度从上到下是先升后降,从阴极到阳极是先降后

升。刘木根等<sup>[66]</sup>通过实验方法研究了电解温度对 6 kA 稀土镨钕电解槽指标的影响,确定生产的最佳温度为 1090 ℃。

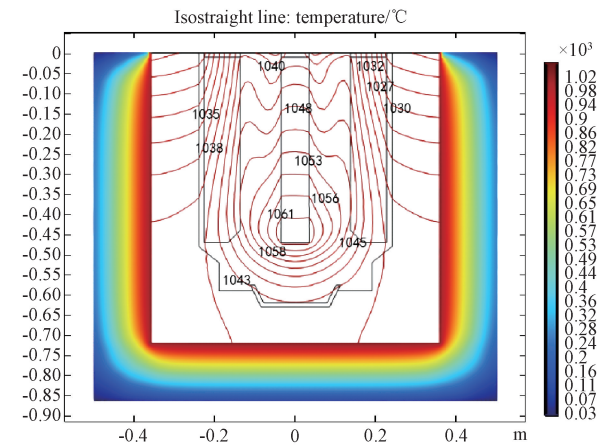


图 8 典型稀土电解槽温度场

Fig. 8 Typical temperature field of rare earth electrolytic cell

随着计算机的发展,数值模拟成为温度场研究的重要手段。伍永福等<sup>[67]</sup>通过数值模拟对 3 kA 钕电解槽内温度场进行研究,在数值模型中考虑了电热场和熔体流动共同作用下对温度场的影响,发现电极间的发热强度最高,但并非温度最高区域;刘中兴等<sup>[68]</sup>以 6 kA 新型铈电解槽为研究对象,用 COMSOL 模拟出不同阴、阳极插入深度对温度分布的影响,发现随着电极插入深度增加电解槽温度升高。何欣欣<sup>[69]</sup>对 6 kA 稀土电解槽各界面换热系数进行分析,得出稀土电解槽液面与环境界面综合换热系数为 73.76 W/(m<sup>2</sup> · K),侧部槽壳与环境界面综合换热系数为 21.2 W/(m<sup>2</sup> · K)。

目前,关于温度场的相关研究甚少,多为对稀土电解槽温度分布趋势的探究,对传热参数的确定并未进行有效的计算,没有研究出完善的温度场求解模型,故对于温度场的研究还有待进一步加强。课题组进一步对稀土电解槽界面换热系数进行研究,分析发现稀土电解槽外壁各界面换热系数更趋近于辐射换热系数,电解槽炉口液面换热系数为 51 W/(m<sup>2</sup> · K),炉体上表面(石墨层)为 38.27 W/(m<sup>2</sup> · K),炉体上表

面(保温层)为 23.34 W/(m<sup>2</sup> · K)、槽体外壁面为 6.41 W/(m<sup>2</sup> · K),模拟结果与电解槽内部实验数据吻合,壁面温度最大达到 245 ℃,与现场外壁面温度在 200 ℃~300 ℃区间相符。

4 结语

1. 稀土电解槽发展过程中,电解质体系变化,使得阳极电流密度从 1.18 A/cm<sup>2</sup>~1.81 A/cm<sup>2</sup> 降到 0.90 A/cm<sup>2</sup>~1.31 A/cm<sup>2</sup>,阴极电流密度从 5 A/cm<sup>2</sup>~8 A/cm<sup>2</sup> 降到 3.81 A/cm<sup>2</sup>~6.79 A/cm<sup>2</sup>;而槽电压一直稳定在 9 V~10 V 区间内。其中,熔体压降在 4.0 V~5.5 V 之间,占总槽电压的 40%~55%,结构压降较大,在 2.0 V~3.0 V 之间,占槽电压的 20%~30%,剩余部分电压约为 2 V 左右,为界面电位差。界面双电层会产生 1.62 V 的界面电势差,其中阳极过电位为 0.02 V,阴极过电位为 0.24 V, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 理论分解电压为 1.36 V。同时,界面双电层使得熔体压降提高约 1.46 V,熔体压降为 4.26 V。

2. 对于稀土电解槽流场研究,气泡上浮力是电解槽流场流动的主要驱动力。阳极气体浓度主要分布在距阳极内表面 0.025 m 以内区域,生成速度在 0.001368679 m/s~0.003978286 m/s 之间。

3. 对于稀土电解槽温度场研究,稀土电解槽外壁各界面换热系数更趋近于辐射换热系数,电解槽炉口液面换热系数为 51 W/(m<sup>2</sup> · K)、炉体上表面(石墨层)为 38.27 W/(m<sup>2</sup> · K)、炉体上表面(保温层)为 23.34 W/(m<sup>2</sup> · K)、槽体外壁面为 6.41 W/(m<sup>2</sup> · K)。

4. 稀土电解槽各物理场的研究相对独立,各物理场分开计算导致计算精度较低,稀土电解槽多物理场耦合仿真求解对稀土电解槽物理场的设计和稀土电解槽新槽型的开发具有十分重要的意义,是重要的发展方向。

参考文献:

[1] 《有色金属冶金》卷编辑委员会 编著. 中国冶金百科全书[M]. 北京:冶金工业出版社,1998. 11.

- lurgy" Volume. Encyclopedia of Metallurgy in China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998. 11.
- [2] 冀燕子, 肖发新, 孙树臣, 等. 大电流稀土熔盐电解槽槽型研究进展[J]. 中国稀土学报, 2022, 40(1): 38-45.
- Ji Y Z, Xiao F X, Sun S C, et al. Research progress on model cell of high current rare earth reduction cell[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2022, 40(1): 38-45.
- [3] 刘奎仁. 钕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 the Properties and Electrode Process of Neodymium Electrolytic Molten Salt [D]. Shenyang: Northeastern University, 2001.
- [4] 郭海涛, 高俊梅, 张小琴, 等. 3 kA 钕电解槽炉底结瘤分析[J]. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(4): 310-312.
- Guo H T, Gao J M, Zhang X Q, et al. The research of the nodule at the bottom of the cell during electrolysis Nd metal[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2003, 22(4): 310-312.
- [5] 刘奎仁, 陈建设, 魏绪钧. 钕电解阳极产物的研究[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1118-1121.
- Liu K R, Chen J S, Wei X J. Analysis of anodic gases in neodymium electrolysis[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2001, 11(6): 1118-1121.
- [6] 陆庆桃, 余仲兴, 颜晓勇. 氧化钕电解的阴极过程及钕的溶解行为[J]. 有色金属材料与工程, 1991, 12(4): 1-7.
- Lu Q T, Yu Z X, Yan X Y. Cathodic process in electrolysis of neodymium and its behavior in molten fluoride salts[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 1991, 12(4): 1-7.
- [7] 钱湛芬. 碳素工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 17.
- Qian Z F. Carbon Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996. 17.
- [8] г. и. 包哥金-阿列克赛夫. 苏联有色金属及其合金手册[M]. 北京: 中国工业出版社, 1963. 506.
- г. и. Bogozin Alexef. Handbook of Non ferrous Metals and Their Alloys in the Soviet Union [M]. Beijing: China Industrial Press, 1963. 506.
- [9] 刘奎仁, 陈建设, 魏绪钧, 等.  $\text{NdF}_3\text{-LiF-Nd}_2\text{O}_3$  系熔盐密度的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2000, 28(4): 7-10.
- Liu K R, Chen J S, Wei X J, et al. Study on the density of  $\text{NdF}_3\text{-LiF-Nd}_2\text{O}_3$  system[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2000, 28(4): 7-10.
- [10] 刘奎仁, 陈建设, 魏绪钧. 钕电解相关物质理论分解电压的计算[J]. 稀土, 2001, 22(2): 30-33.
- Liu K R, Chen J S, Wei X J. Theoretical decomposition voltage for some related substance on neodymium electrolysis[J]. Chinese Rare Earths, 2001, 22(2): 30-33.
- [11] 刘奎仁, 陈建设, 魏绪钧. 钕电解阳极过电位的测定[J]. 材料与冶金学报, 2003, 2(1): 38-41.
- Liu K R, Chen J S, Wei X J. Study of anodic overvoltage in neodymium electrolysis[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2003, 2(1): 38-41.
- [12] 高钰奇.  $\text{LaF}_3\text{-LiF}$  熔盐体系物性参数测定及双电层对电场影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
- Gao Y Q. Measurement of Physical Parameters of  $\text{LaF}_3\text{-LiF}$  Molten Salt System and the Influence of Electric Double Layer on Electric Field [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2021.
- [13] 刘中兴, 石红梅, 贺友多, 等. 可调极距式稀土电解槽电场的计算机模拟[J]. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(1): 29-31, 35.
- Liu Z X, Shi H M, He Y D, et al. Simulation of the electric field in rare earth electrolytic cell[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2003, 22(1): 29-31, 35.
- [14] 廉华, 任永红, 郭海涛, 等. 大尺寸阴极稀土电解槽的电场模拟计算[J]. 稀土, 2021, 42(6): 100-113.
- Lian H, Ren Y H, Guo H T, et al. 3D electric field simulation on rare earth electrolytic cell with large cathode[J]. Chinese Rare Earths, 2021, 42(6): 100-113.
- [15] 任永红, 汪进宝, 贺友多, 等. 稀土电解槽的电场计算与槽电压分析[J]. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(4): 313-317.
- Ren Y H, Wang J B, He Y D, et al. Calculation of

- electric field and analysis on body voltage in rare earth electrolysis cell[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2003, 22(4): 313-317.
- [16] 刘中兴, 伍永福, 张宏光. 稀土熔盐电解槽电场的仿真模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2008, (1): 34-37.
- Liu Z X, Wu Y F, Zhang H G. Analog simulation of the electric field in rare earth electrolytic cell[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2008, (1): 34-37.
- [17] 伍永福, 刘中兴, 李姝婷. 稀土熔盐电解槽电场的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2010, (3): 27-30.
- Wu Y F, Liu Z X, Li S T. Analog simulation of the electric field in rare earth electrolytic cell[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2010, (3): 27-30.
- [18] 米兰. 稀土电解槽电场及流场的模拟研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2008.
- Mi L. Numerical Simulation of Electrical Field and Flow Field for Rare Earth Electrolyzer[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2008.
- [19] 陈国华, 王小青, 张志宏, 等. 稀土熔盐电解槽的电压平衡计算[J]. 稀土, 2013, 34(1): 86-89.
- Chen G H, Wang X Q, Zhang Z H, et al. Calculation of voltage balance of rare earth electrolytic cell[J]. Chinese Rare Earths, 2013, 34(1): 86-89.
- [20] 汪金良, 杨宜清. 基于 Comsol 的稀土熔盐电解槽电场分析[J]. 有色金属科学与工程, 2016, 7(6): 30-34.
- Wang J L, Yang Y Q. Analysis of electric field in rare earth molten salt electrolytic cell based on Comsol[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2016, 7(6): 30-34.
- [21] 伍永福, 冯怀莹, 刘中兴, 等. 基于电热场耦合条件下稀土电解槽电极结构优化模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017, (6): 32-38.
- Wu Y F, Feng H X, Liu Z X, et al. Optimization of electrode structure in rare earth electrolytic cell based on numerical simulation of thermal-electric field coupling[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017, (6): 32-38.
- [22] 伍永福, 赵光磊, 刘中兴, 等. 不同极间距下稀土电解槽内电-热场耦合数值模拟研究[J]. 中国稀土学报, 2017, 35(5): 606-613.
- Wu Y F, Zhao G L, Liu Z X, et al. Numerical simulation study of electric-thermal fields coupling in rare earth electrolytic cell with different polar distance[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2017, 35(5): 606-613.
- [23] 刘中兴, 冯猛, 伍永福, 等. 稀土电解槽内电-热场耦合数值模拟研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2017, 45(5): 11-16.
- Liu Z X, Feng M, Wu Y F, et al. Numerical simulation study of electric-thermal field coupling in rare earth electrolytic cell[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2017, 45(5): 11-16.
- [24] 刘中兴, 李扬磊, 伍永福, 等. 电极插入不同深度下稀土电解槽电热场耦合模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019, (1): 31-36.
- Liu Z X, Li Y L, Wu Y F, et al. Numerical simulation of electric-thermal fields coupling in rare earth electrolytic cell with different insertion depth of electrode[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019, (1): 31-36.
- [25] 王亮亮, 颜波, 刘木根. 阳极结构调整对稀土电解槽的影响[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(2): 217-222.
- Wang L L, Yan B, Liu M G. Influence of adjusting anodic structural on rare earth electrolysis cell[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2015, 33(2): 217-222.
- [26] 吕晓军, 张恒星, 刘颂, 等. 稀土金属电解槽阳极消耗对电场的影响[J]. 中国稀土学报, 2019, 37(4): 481-490.
- Lü X J, Zhang H X, Liu S, et al. Effect of anode consumption of rare earth electrolysis cell on electric field[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2019, 37(4): 481-490.
- [27] 伍永福, 官卜瑞, 刘中兴, 等. 熔盐电解制取铈槽内电场的数值模拟[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(3): 334-340.

- Wu Y F, Guan B R, Liu Z X, et al. Numerical simulation of electric field in molten salt electrolytic cell for preparing cerium[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2016, 34(3): 334-340.
- [28] 刘康毅, 高鹏. 6 kA 镨钕电解槽不同阴极直径下的电热场耦合模拟[J]. 有色金属工程, 2020, 10(2): 60-65.
- Liu K Y, Gao P. Coupling simulation of thermo-electric field in 6 kA Pr-Nd electrolytic cell with different cathode diameters [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(2): 60-65.
- [29] 张恒星, 吕晓军, 衷水平, 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, 10003.
- 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, 10003.
- [30] 逢启寿, 王飞, 郜飘飘, 等. 8 kA 稀土电解槽阴极对电场影响的数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2016, (2): 103-105, 109.
- Pang Q S, Wang F, Gao P P, et al. Numerical simulation of cathode on electric field in 8 kA rare earth electrolytic cell [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016, (2): 103-105, 109.
- [31] 叶楠. 稀土电解槽阳极结构优化及其腐蚀消耗规律研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- Ye N. Study on optimization of anode structure and the consumption of anode corrosion in rare earth electrolytic cell[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020.
- [32] 龚姚腾, 林小程, 逢启寿, 等. 稀土电解槽阳极腐蚀消耗规律研究[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(4): 601-607.
- Gong Y T, Lin X C, Pang Q S, et al. Anode corrosion consumption pattern in rare earth electrolysis cell[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2021, 39(4): 601-607.
- [33] 忻治霖. 稀土电解槽通电结构对阳极压降及槽内磁场的影响研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- Xin Z L. Research on the Effect of Electric Structure on Anode Pressure Drop and Magnetic Flow Field in Rare Earth Electrolysis Cell[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
- [34] Werner J M, Zeng W, Free M L, 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.
- [35] Zeng W Z, Free M L, Werner J, et al. Simulation and validation studies of impurity particle behavior in copper electrorefining[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(14): E338-E352.
- [36] Zeng W Z, 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.
- [37] 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.
- [38] 董子豪. 大电流稀土熔盐电解槽电场全息模拟研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- Dong Z H. Holographic Simulation of Electric Field in High Current Rare Earth Melten Salt Electrolyzer[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.
- [39] 石红梅, 胡定军, 王莉, 等. 可调极距式稀土电解槽内磁场分布的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2005, (6): 29-31.
- Shi H M, Hu D J, Wang L, et al. Study on the magnetic field distribution in rare earth electrolytic cell [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2005, (6): 29-31.
- [40] 伍永福, 李亮亮, 刘中兴, 等. 6 kA 新型铈电解槽内电磁场的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016, (10): 25-28.
- Wu Y F, Li L L, Liu Z X, et al. Numerical simulation of electromagnetic field in 6 kA novel cerium electrolytic cell [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),

- 2016, (10): 25-28.
- [41] 逢启寿, 忻治霖, 林小程, 等. 8 kA 稀土电解槽电磁搅拌数值模拟[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(2): 30-38.
- Pang Q S, Xin Z L, Lin X C, et al. Numerical simulation of electromagnetic stirring in 8 kA rare earth electrolysis cells[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(2): 30-38.
- [42] Capitaine W E, Schmidt-Hatting W H, 裴尚魁. 大容量铝电解槽的磁场[J]. 国外轻金属, 1966, (12): 15-19.
- Capitaine W, Schmidt-Hatting W, Pei S K. Magnetic field in high capacity aluminum electrolytic cells[J]. Light Metals, 1966, (12): 15-19.
- [43] 刘忠杰, 刘中兴, 贺友多. 稀土氧化物电解槽流场的研究[J]. 中国稀土学报, 2003, 21(增刊1): 175-177.
- Liu Z J, Liu Z X, He Y D. Research of fluid field in rare earth oxide electrolysis cell[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2003, 21(Sup 1): 175-177.
- [44] 吴文元. 稀土金属电解槽流场分析及开发设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- Wu W Y. Flow Field Analysis and Development Design of Rare Earth Metal Electrolytic Cells [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology, 2013.
- [45] 逢启寿, 忻治霖, 林小程, 等. 稀土电解槽电化学三维时变流场数值模拟[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(3): 152-158.
- Pang Q S, Xin Z L, Lin X C, et al. Numerical simulation of the electrochemical 3D time-varying flow field in a rare earth electrolytic cell[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022, 13(3): 152-158.
- [46] 冷欣伟. 氟盐体系 Al-Cu-Y 合金制备电解槽电场—流场模拟[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- Leng X W. Electrolytic Cell for Preparation of Al-Cu-Y Alloy in Fluoride Salt System Electric Field-Flow Field Simulation[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [47] 刘忠杰, 刘中兴, 贺友多. 计算稀土电解槽中阳极气体发生量的数学模型[J]. 稀土, 2002, 23(6): 65-66.
- Liu Z J, Liu Z X, He Y D. A mathematical model for calculating the quantity of gas produced around anode in rare earth electrolysis cell[J]. Chinese Rare Earths, 2002, 23(6): 65-66.
- [48] 刘中兴, 鞠阳, 伍永福, 等. 稀土电解槽阳极气体表面速度对其流场影响的数值模拟[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(5): 5-8, 19.
- Liu Z X, Ju Y, Wu Y F, et al. Numerical simulation of effects of anode gas apparent velocity on flow field in rare earth electrolysis cell[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2014, 42(5): 5-8, 19.
- [49] 刘宇新, 刘中兴, 杨立军. 稀土电解槽气液两相流动数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011, (10): 27-30, 33.
- Liu Y X, Liu Z X, Yang L J. Numerical simulation of gas-liquid two phase flow in rare earth electrolysis cell [J]. Nonferrous Metals ( Extractive Metallurgy ), 2011, (10): 27-30, 33.
- [50] 王杨. 6 kA 稀土电解槽电-流场对氧化物颗粒溶解的影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- Wang Y. Effect of Electric-flow Field on Oxide Particle Melting in 6 kA Rare Earth Electrolyzer[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.
- [51] 万福兴. 极间距对稀土电解槽内各物理场的影响与极间距的选择研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- Wan F X. Research on the Influence of Electrode Spacing on Physical Fields in Rare Earth Electrolyzer and the Selection of Electrode Spacing [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- [52] 刘庆生, 汤卫东, 王建鲁. 稀土电解槽内阳极气泡行为的数值模拟[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(6): 737-746.
- Liu Q S, Tang W D, Wang J L. Numerical simulation of anode bubble behavior in rare earth electrolysis cell [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2015, 33(6): 737-746.
- [53] 刘中兴, 韩文帅, 伍永福, 等. 阳极壁面向下倾斜对气泡影响的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015, (6): 59-62.
- Liu Z X, Han W S, Wu Y F, et al. Study on effect of

- anode wall slopes downward on bubble[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2015, (6): 59-62.
- [54] 伍永福, 赵万增, 徐子谦, 等. 稀土电解槽阳极壁上倾对气泡逸出过程的影响研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2016, 44(4): 20-24, 47.
- Wu Y F, Zhao W Z, Xu Z Q, et al. Study on effect of anode wall upward slope on bubble escape in RE electrolyzer[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2016, 44(4): 20-24, 47.
- [55] 刘中兴, 王冠瑞, 伍永福, 等. 稀土电解槽熔盐润湿性对气泡影响的数值模拟[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(10): 1423-1426.
- Liu Z X, Wang G R, Wu Y F, et al. Influence of molten salt wettability to bubbles numerical simulation in rare earth electrolyzer[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2014, 33(10): 1423-1426.
- [56] 胡永胜. 稀土电解槽阳极表面多孔介质对流场影响的数值模拟[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- Hu Y S. Numerical Simulation of Influence of Anode Surface Porous on Flow Field in Rare Earth Electrolytic Cell[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014.
- [57] 王军, 张作良, 涂赣峰, 等. 10 kA 底部阴极稀土熔盐电解槽流场的模拟[J]. *稀土*, 2012, 33(2): 64-68.
- Wang J, Zhang Z L, Tu G F, et al. Simulation of the flow field in 10 kA bottom-cathode-structure rare earth electrolytic cell[J]. *Chinese Rare Earths*, 2012, 33(2): 64-68.
- [58] 刘中兴, 张桢, 伍永福, 等. 稀土钹氧化物电解槽内液—液两相流动研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2011, (5): 27-30.
- Liu Z X, Zhang Z, Wu Y F, et al. Research on two-phase liquid flow in neodymium oxide electrolytic cell[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2011, (5): 27-30.
- [59] 伍永福, 刘中兴, 李姝婷, 等. 稀土熔盐电解槽内多相流动数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2009, 9(增刊1): 410-414.
- Wu Y F, Liu Z X, Li S T, et al. Numerical simulation of multiphase flow in rare earth molten salt electrolysis cells[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, 9(Sup 1): 410-414.
- [60] 刘庆生, 程华金, 谈成亮, 等. 非均一极距对稀土电解多相流影响的数值模拟及实验验证[J]. *有色金属科学与工程*, 2020, 11(5): 59-68.
- Liu Q S, Cheng H J, Tan C L, et al. Numerical simulation and experimental verification of the influence of nonuniform pole pitch to rare earth electrolysis process[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2020, 11(5): 59-68.
- [61] 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.
- [62] 刘中兴, 周一凡, 伍永福, 等. 3 kA 钹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.
- [63] 高钰奇, 刘中兴, 李扬磊, 等. 稀土电解过程中氧化钹颗粒在不同工况下运动轨迹分析研究[J]. *中国铸造装备与技术*, 2020, (6): 37-43.
- Gao Y Q, Liu Z X, Li Y L, et al. Analysis and research on the movement track of neodymium oxide particles under different working conditions in the process of rare earth electrolysis[J]. *China Foundry Machinery & Technology*, 2020, (6): 37-43.
- [64] 郭海涛, 贾海军, 谢兵, 等. 3000 A 金属钹电解槽的能量平衡[J]. *江西冶金*, 2007, 27(3): 13-16, 38.
- Guo H T, Jia H J, Xie B, et al. Study on energy balance in 3000 A Nd electrolytic cell[J]. *Jiangxi Metallurgy*, 2007, 27(3): 13-16, 38.
- [65] 郑鑫, 朱卫花, 彭光怀, 等.  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-NdF}_3\text{-LiF}$  熔盐电解槽温度分布研究[J]. *赣南师范学院学报*, 2012, 33(6): 19-21.
- Zheng X, Zhu W H, Peng G H, et al. Study on tem-

perature distribution of electrolytic cell of  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-NdF}_3\text{-LiF}$  molten salt[J]. Journal of Gannan Normal University, 2012, 33(6): 19-21.

[66] 刘木根, 王亮亮. 电解温度对稀土电解槽技术指标的影响研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(6): 16-19.

Liu M G, Wang L L. Study on the effects of electrolysis temperature on technical indexes of rare earth electrolytic cell[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2014, 42(6): 16-19.

[67] 伍永福, 刘中兴, 李曙阳, 等. 稀土熔盐电解槽内温度场数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012, (1): 27-31.

Wu Y F, Liu Z X, Li S Y, et al. Numerical simulation of temperature field in rare earth electrolytic cell[J]. Nonferrous Metals ( Extractive Metallurgy ), 2012, (1): 27-31.

[68] 刘中兴, 徐子谦, 伍永福, 等. 熔盐电解制取金属铈槽内温度场的数值模拟[J]. 稀土, 2017, 38(6): 82-88.

Liu Z X, Xu Z Q, Wu Y F, et al. Numerical simulation of temperature field in electrolytic bath for preparing rare earth cerium by molten salt electrolysis[J]. Chinese Rare Earths, 2017, 38(6): 82-88.

[69] 何欣欣. 稀土电解槽界面传热模型及电热场耦合模拟[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.

He X X. Interfacial Heat Transfer Model and Electro-thermal Field Coupling Simulation of Rare Earth Electrolytic Cell[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.

Research Progress on Physical Field in Rare Earth Molten Salt Electrolytic Cells

DONG Yun-fang<sup>1,2</sup>, MA Shou-ying<sup>3</sup>, WU Yong-fu<sup>3</sup>, LIU Zhong-xing<sup>2\*</sup>, LIU Yu-bao<sup>4</sup>, LI Zhi<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;  
2. School of Rare Earth Industry, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;  
3. School of Energy and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;  
4. State Key Laboratory of Baiyunebo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization, Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, China)

**Abstract:** The molten salt electrolysis method is an important process for producing rare earth metals, and the electrolytic cell is its core equipment. The research on multiphysics simulation of rare earth electrolysis cell involves many disciplines such as metallurgy, physics and mathematics. In recent years, the combination of multiphysics simulation and numerical simulation of rare earth electrolytic cell has become an important means of optimizing the design of electrolysis cell and auxiliary production process control. This article summarizes four physical fields of rare earth electrolysis cells: electric field, magnetic field, flow field, and temperature field. Discuss and analyze the current research status of different physical fields and their impact on the rare earth electrolysis process. Multiple physical fields within the rare earth electrolytic cell exert individual effects while simultaneously interacting through coupling mechanisms. These interactions directly influence energy consumption during electrolysis, current efficiency, and the operational lifespan of the electrolytic cell. However, to date, no study has achieved a fully coupled numerical solution that comprehensively integrates these multiphysics phenomena. Multiphysics coupled simulation analysis of rare earth electrolytic cells plays a pivotal role in optimizing the design of physical fields within these systems and advancing the development of novel cell configurations, representing a critical pathway toward future technological progress.

**Key words:** molten salt electrolysis; electric field; magnetic field; flow field; temperature field