

铝电解槽电磁流场的数学建模与应用

刘 伟, 李 劫, 赖延清, 徐宇杰, 刘业翔

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 研究了铝电解槽复杂开域的媒质接触、结构化网格划分、磁场边界条件施加、场耦合等建模问题。运用标量电位法、标量磁位法和有限体积法在商业软件平台上开发了铝电解槽电-磁-流场的计算模块, 并与工业电解槽上的测量数据对比验证其可靠性。在此基础上提出一种母线设计方法, 获得较优的母线配置方案 SG₂。仿真结果表明: SG₂ 水平电流小, 磁场分布对称性好; 熔体平行大面流动有助于氧化铝运输。磁场分析结果表明: 立柱母线中的电流可大幅度抵消非均匀阴极母线电流对磁场分布的影响, 决定最终磁场分布。

关键词: 铝电解; 电磁场; 流场; 母线; 数值计算

中图分类号: TF 821; O 441.4

文献标识码: A

Development and application of electro-magneto-flow mathematic model of aluminum reduction cells

LIU Wei, LI Jie, LAI Yan-qing, XU Yu-jie, LIU Ye-xiang

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The problems, including medium contact, structural grid partition, magnetic conditions on the open boundaries and coupled multi-physical fields in modeling complex aluminum reduction cells were investigated. Based on the commercial software the customized programs for calculation of the electro-magneto-flow field were developed with the voltage scalar potential method, magnetic scalar potential method and finite volume method. The simulated results were validated against the measurements on industrial cells. A busbar designing method was brought out and one optimized busbar scheme SG₂ was obtained. The results from SG₂ show that the horizontal currents are smaller and magnetic field distributes more symmetrically; flow of melts is parallel to the side of the cell and is of benefit to alumina transport. The magnetic results indicate that the currents of anode risers may counteract the effects of nonuniform currents of cathodic busbars on the magnetic field distribution and they are decisive of the final magnetic distribution.

Key words: aluminum reduction; electro-magnetic field; flow field; busbar; numerical calculation

铝电解槽的物理场主要包括电场、热场、应力场、磁场、流场, 其分布情况直接影响电解槽的电流效率、能量效率和槽寿命等技术经济指标。针对电解槽复杂几何和母线结构, 运用先进的数学建模方法和高性能计算平台进行电-磁-流场的仿真与优化研究并设计出高效、低耗、稳定的大容量电解槽, 这一直是电解槽设计的核心问题之一。当前, 国内外在电-磁-流场

的建模和计算方面开展了大量研究工作, 获得一些可行的电磁场模型和流场模型。

母线是铝电解槽设计中需要考虑的重要内容, 在这一方面国外学者进行了较多研究。TVEDT 等^[1]和 BUIZA^[2]分别开发了 1D 线单元母线模型, 并通过求解电热耦合方程进行母线系统的设计与优化。KACPRZAK 等^[3]开发了电解槽及母线的 3D 实体电磁

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(50374081); 国家自然科学基金重点资助项目(60634020)

收稿日期: 2007-06-27; **修订日期:** 2008-03-24

通讯作者: 李 劫, 教授; 电话: 0731-8876454; E-mail: 13808488404@163.com

场计算模型,调整优化了 100 kA 槽阴极软母线中的电流分布。DUPUIS 等^[4]开发了基于 ANSYS 软件的 3D 实体母线模型和基于 TECPLOT 软件的 1D 槽内导体和母线系统模型,进行了 500 kA 槽的母线电流优化。

与电场求解相比,磁场计算则更为复杂,其原因是槽内外分布着大量自由电流及铁磁材料如钢梁、钢爪、钢壳等。针对自由电流产生的磁场,有学者使用了有限长圆柱导体的 Biot-Savart 线积分或体积分法^[5]、磁矢量位法进行计算,而针对铁磁材料磁化磁场则采用了磁衰减系数法、边界元法和有限元法进行计算。由于磁衰减系数法假设钢壳厚度和长度是无限的,这与实际情况差别较大,可能会导致较大的计算误差^[6]。采用边界元法在处理类似铝电解槽这样的开域问题时,不用对整个场域而只需对场域的边界进行离散化处理,因而得到了广泛应用。SEGATZ 等^[7]、李国华等^[8]、SELE^[9]、孙阳等^[10]应用此方法对铝电解槽磁场进行计算,取得了较为满意的结果。有限元法是计算铝电解槽磁场非常有效的方法,其单元具有各种形状,能适应各种边界复杂的区域,而当场域内存在多种媒质时,其分界面上的边界条件能自动满足,同时对于整个场域的第二、三类边界条件也不需要另做处理。DUPUIS 等^[11-14]使用该方法计算了铝电解槽磁场分布,获得了较满意的结果。这些研究尚存在不足,例如没有给出铝电解槽场域划分方法,无法考虑阴极接触电压的存在,不能综合分析多台实体槽导电系统的电磁场分布情况等。

磁场与熔体中电流相互作用产生的电磁力驱使熔体在槽膛内发生循环流动,其对电解质内氧化铝输运及槽体散热有重要意义,须在设计和生产阶段使用数值模拟法和现场测量法进行研究。TARAPORE^[15]、BILEK^[16]、EVANS^[17]、周萍^[18]、吴建康等^[19]使用 $k-\varepsilon$ 二方程湍流模型求解了 Navier-Stokes,获得流动形态及界面形状。在计算中电解质或铝液被视作单相流独立求解,无法考虑界面张力对两相流的影响,因而只能利用界面压强连续条件和质量守恒原理确定界面波形,计算较为繁琐。流场模型一般采用基于交错网格的 SIMPLER 算法或有限元法进行求解^[20]。为了验证流场计算结果,大多采用铁棒溶蚀法测量铝液流速^[21]。

考虑到大型软件的成熟性和通用性,本文作者在 ANSYS 平台上开发铝电解槽电—磁场的统一计算模型,围绕电解槽复杂开域的媒质接触、结构化网格划分、边界条件施加、场耦合、母线优化等问题进行深入研究。CFX 软件具有识别有限元网格、自定义残差收敛标准、可扩展用户函数(耦合电磁力)以及捕捉自

由表面的 VOF 法等特点,选其作为两相流求解器,计算不同电磁力分布下的稳态流场。

1 数学模型

1.1 场域分割

铝电解槽内外存在的媒质有铝导杆、钢爪、炭阳极、电解质、铝液、炭阴极、阴极钢棒、内衬、钢壳、钢支撑梁、铝母线,空气,其中钢爪、阴极钢棒、钢壳、钢支撑梁是铁磁材料,其余都是顺磁材料。SELE^[9]在计算 150 kA 槽磁场时发现,与导体、钢壳相比钢爪对磁场的贡献较小。闫照文等^[13]在研究 230 kA 槽电磁场时用一定厚度的钢壳代替结构复杂的钢摇篮架。MARC^[11,22]建立的 280 kA 槽和 500 kA 槽磁场模型不包括钢爪和钢支撑梁。像这样忽略钢爪、钢支撑梁的简化计算亦出现在文献[10, 18, 23]中。考虑到钢支撑梁、槽壳外阴极钢棒距熔体区较远,钢爪对熔体区磁场的贡献较小,本文作者忽略其铁磁性,仅考虑简化钢壳的附加磁场。

因此,可以把整个铝电解槽场域划分为如图 1 所示的 3 个子域: Ω_0 是包括铝母线和空气的非铁区; Ω_1 是包括钢壳的铁区; Ω_2 为铝导杆、钢爪、炭阳极、电解质、铝液、炭阴极、阴极钢棒及内衬的非铁区。

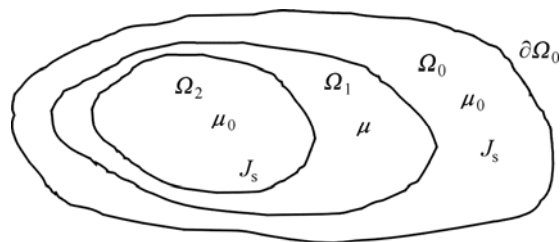


图 1 铝电解槽场域划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of partitioned physical domains of aluminum reduction cells

1.2 物理原理

槽内外导电体服从欧姆定律 $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ 和库仑定律 $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, 根据静电场场强与标量电位的关系 $\mathbf{E} = -\nabla \phi$ 即可求解出电场分布。由于铝液电压降很低(≤ 10 mV), 且极易受下游电路如阴极炭块、炭—钢接触、阴极钢棒及母线的影响而引起较大的水平电流。有研究指出, 接触电压约占阴极压降的 $1/3$ ^[24], 因此, 在电场模型中考虑接触电压能有效避免不必要水平电流的产生, 提高磁场计算精度。穿过两接触面的电流密度定义为 $\mathbf{J} = \sigma(\phi_t - \phi_c)$, 其中 $\mathbf{J}$ 是电流密度, σ 是接

触电导率, ϕ_l 和 ϕ_c 是相应接触面电势。

槽内外导磁体服从安培定律 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ 和本构方程 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, 根据电流源、铁磁材料是否存在以及目标求解区(熔体区)的相对位置关系可使用矢量磁位、标量磁位、磁耦极子、表面磁荷等方法求解磁场分布。有学者提出了存在自由电流区域如导杆、钢爪、炭阳极、熔体、炭阴极与钢棒应的矢量磁位算法, 这无疑是正确的。值得注意的是, ANSYS 使用的是 GP ψ -DP 标量磁位法(Magnetic scalar potential, MSP), 适合于铝电解槽这类内外含有复杂电流分布和多连通区域磁场问题的求解, 其中 $\mathbf{J}$ 可以是电流源单元(母线电流)或具有导电自由度多场耦合单元提供的自由电流(槽内导体电流)。至此, 在 ANSYS 平台上仅使用标量位法即可完成电磁场计算, 从而节约大量计算资源。

电磁力由电流密度与磁感应强度决定, 即 $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 。电磁力驱动下的熔体运动服从 Navier-Stokes 方程和 $k-\varepsilon$ 湍流模型。由于相关磁雷诺数很小, 可不计感生电流 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 及其对电磁力的影响^[25]。

2 建模与求解步骤

2.1 电场有限元模型

电场求解域为 Ω_0 和 Ω_2 。在电场建模中, 使用 SOLID5 六面体单元对槽内导体如炭阳极(浸入电解质部分)、电解质、铝液、炭阴极、阴极钢棒进行连续网格划分; 使用 LINK68 线单元对阳极导杆、钢爪、阴极母线、槽底母线、槽周母线、立柱母线进行建模, 各 LINK68 单元节点首尾相连。为了实现电流的连续传递, 使用界面约束方程把钢爪上的 LINK68 单元节点与炭阳极上部对应位置上 SOLID5 单元进行导电自由度的连接, 用同样方法连接阴极母线上的 LINK68 单元节点与钢棒上的 SOLID5 单元。

电接触现象不仅存在于钢棒与阴极炭块之间, 而且存在于阳极钢爪与阴极炭块之间^[26]。一般来讲, 极间电压在槽电压分配中所占比例最大, 这在很大程度上保证了阳极电场分布的均匀性, 这一区域的电接触压降对铝液电场分布影响的作用不明显。而阴极电场主要受电接触与母线网络等效电阻的影响, 保证阴极电场分布合理是获得可靠磁场分布的前提。

将炭阴极与钢棒之间的实体与网格连接分离开来, 取炭阴极与钢棒的交界面作为目标面, 利用 TARGE170 单元划分目标面, 生成外法线指向钢棒的目标面单元; 选择钢棒与交界面相邻的最外层单元, 利用 CONTA173 单元划分接触面, 生成外法线指向炭

阴极的接触面单元。接触电导率取文献值^[27]。

电场假设及边界条件如下: 假设电路中仅包含欧姆压降, 不计分解电压和过电压, 在上游电解槽进电侧立柱母线上按照进电比例施加电流, 在下游电解槽出电侧立柱母线上施加零电位, 即 Dirichlet 边界条件。有学者在研究电场时把铝液看作等势体, 或在阳极导杆和阴极钢棒端头施加等电势, 这样的边界条件无法考虑到槽内导体、外母线系统中电场的不均匀分布状况, 可能会增加计算误差。本文作者采用的边界条件能够分析槽内外电场的不均匀分布, 且通过迭代计算可以确定一定母线设计条件下的真实进电比。电场分布由标量电位法计算获得。

2.2 磁场有限元模型

磁场有限元网格是与电场有限元网格同时建立起来的, 不同之处是在电场求解时内衬、钢壳、空气等材料的实体有限元单元被指定为空单元, 并不求解电场, 而在求解磁场时这些单元被激活, 赋予导磁自由度与材料属性以参与计算, 实体单元依然采用 SOLID5 单元。LINK68 线单元在磁场模型中转化为 SOURC36 电流源单元, 在获得 SOURC36 单元后 LINK68 单元从磁场模型中删除。电场求解保存的结果文件不仅具有模型信息, 也含有单元的电流密度结果, 而在此基础上生成的磁场模型则自动实现对电场的耦合。

磁场边界条件如下: 铝电解槽磁场求解属于开域问题, 假设有限空气的外表面处于无限远处, 在边界 $\partial\Omega_0$ 的节点上施加零磁标量位, 即 Dirichlet 边界条件。由于磁场强度沿铁磁区 Ω_1 任何一闭合回路的线积分不为零, 为多连通区域, 应采用 GP ψ -DP 标量磁位法求解。本文作者建立的电磁场计算模型见图 2, 直角坐标系 x 轴向上与槽长轴方向平行, y 轴指向阳极立柱进电侧, z 轴垂直于纸面向外。为了兼顾计算资源与效率, 研究磁场、流场所关心的求解区域如电解质、熔体与空气的网格密度都可以程序调节, 最终计算网格选取为当疏、密 2 种不同网格所得解差别较小时的疏网格。

2.3 流场有限体积模型

导出电磁模型中铝液和极距以下电解质单元后直接导入到 CFX 中。由于铝液与电解质不混溶, 需用多相模型进行模拟, 相间自由界面通过 VOF(Volume of fluid)法跟踪^[14]。定义 CFX 的 CEL 表达式保证体系在初始时刻位于界面以上的流体全为电解质, 在界面以下的全为铝液; 定义 User Function 函数调用单位体积

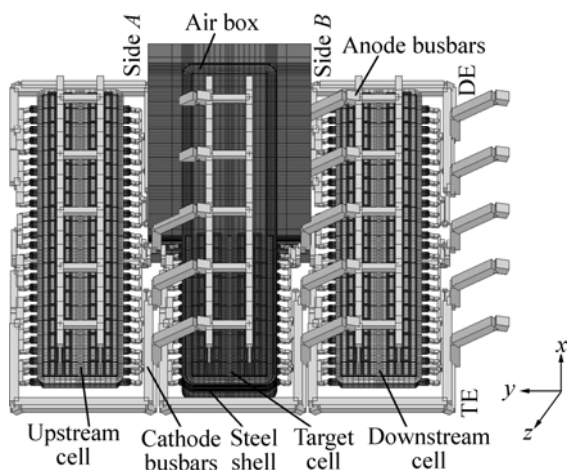


图 2 电磁场有限元模型(空气覆盖半个目标槽)

Fig.2 Finite element electromagnetic model with half-cell air gap covered around target cell

电磁力(x, y, z, f_x, f_y, f_z), 作为源动量施加在整个求解域内。流场边界条件如下: 在熔体周围所有固壁上施加无滑移边界条件。流场的收敛条件是最大残差水平(Maximum residual level)小于 1×10^{-4} 。

2.4 材料属性

材料电导率见文献[3]。由于阴极碳块内的阴极钢棒温度超过居里点温度, 认为是顺磁物质, 而槽壳钢板为铁磁物质, 其 $B-H$ 曲线取自文献[5], 其余材料相对磁导率取 1。铝液与电解质的流体参数见文献[18], 界面张力系数取自文献[28]。

3 模型验证

为验证仿真结果的有效性, 根据河南某厂 350 kA 电解槽的结构和母线设计施工图建立了计算模型, 该系列电解槽采用大面六点进电, 共计 156 台, 安装在间距为 43 m 的 2 栋厂房内。经计算比较, 当电磁场模型含有 14 台槽, 每排 7 台时即可达到较高计算精度。作者参加的测试小组于 2005 年 4 月对该厂进行了物理场综合测试, 其中采用美国 BELL 公司 MODEL9950 型高斯计测量磁场分布, 采用铁棒熔蚀法测量流场分布。图 3 和 4 所示分别为磁场、流场的测量值与计算值。可以看出, A 和 B 两侧磁场分布规律吻合, 计算值与测试值较接近; 铝液流速与方向在 B 侧较符合, 在 A 侧靠近 DE 和 TE 端偏差较大, 这可能是由于该

处槽底有沉淀^[15]。仿真结果基本反映了铝电解槽磁场、流场的分布规律, 说明仿真方法与结果是有效的。误差的来源是: 槽底有沉淀, 高斯计探头与铁棒难以保持垂直位置。

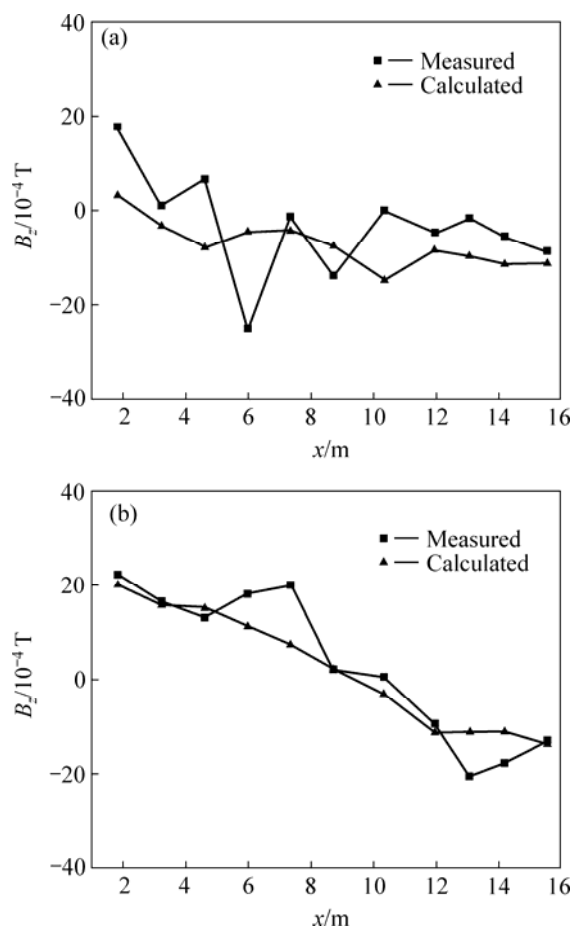


图 3 2010 槽 B_z 的计算值与测量值比较

Fig.3 Comparison of calculated results vs measured results of B_z for 2010 cell: (a) Side A; (b) Side B

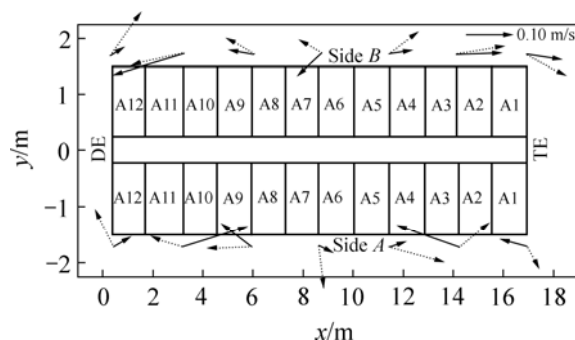


图 4 流场计算结果与测量结果的比较(2010 槽): 实线表示计算结果, 虚线表示测量结果

Fig.4 Comparison of calculated results vs measured results of flow field for 2010 cell: solid line denotes calculated values and dot line denotes measured ones

4 母线设计实例

4.1 配置方案

为便于对比分析, 选取进电比为 11:11:10:11:11。定义软母线电阻 L/S 为 R_f , 软母线跨距间母线电阻 L/S 为 R_b , 定义比例系数 $x = R_b/R_f$ 。通常有 2~3 条支路母线并联到 1 根立柱母线上, 每根支路由局部软母线与回路母线串联构成。为保证立柱母线电流按照进电比分配, 需要使假想的铝液等势面至立柱下部连接点间的支路并联电阻按进电比的反比配置。因此, 一方面可调节 x , 使组内电流分配更加均匀; 另一方面改变回路母线的路径与截面积, 使每条支路电阻及并联电阻接近。基于这样的思路, 把立柱母线电流是否按进电比分配、 x 及支路电阻作为指标讨论了 3 种母线情况: 1) 立柱母线未按照进电比分配, 记作 SO; 2) 立柱母线按照进电比分配, 记作 SG₁; 3) 在第二种条件下进一步降低 x , 调整支路电阻, 记作 SG₂。假设母线电阻率不随温度变化可求得每一根支路电阻 L/S 及并联电阻 L/S , 结果见表 1。

4.2 母线配置对电场分布的影响

图 5 所示为 SG₁ 与 SG₂ 中阴极软母线电流分布情况, 发现 x 越小越利于局部软母线载流的均匀化, 而调整支路电阻 L/S 也使全局电流均匀性依次变好, 即均匀性由大至小的顺序为: SG₂>SG₁>SO。SG₂ 铝液

电势差为 4 mV, 电势分布均匀, 水平电流小, 进出电两侧电流仅相差 0.4%。

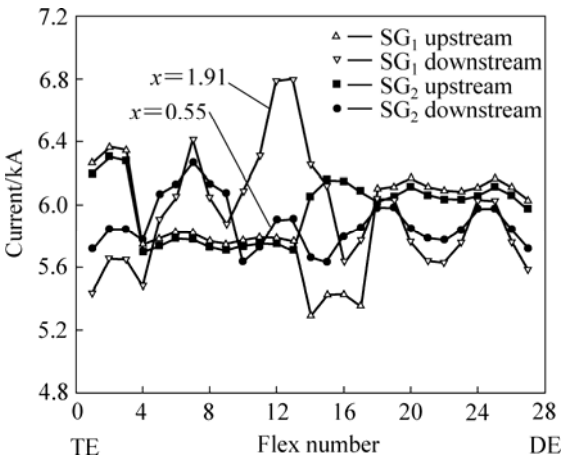


图 5 目标槽阴极软母线载流量对比
Fig.5 Comparison of current pick-up in flexes of target cell

4.3 母线配置对磁场分布的影响

表 2 所列为磁场最值分布情况。在 SG₁ 与 SG₂ 中, 立柱母线载流对磁场分布起决定作用, 这在很大程度上削弱了阴极母线电流差异对磁场的影响, 因此, 两方案磁场分布特征基本一致, 极值出现位置接近。B_z 分布如图 6 所示, 其在进电侧 2 个角部达到最大值, 而在出电侧较小, 这说明端部回流母线补偿了槽内导体在出电侧产生的垂直磁场, 加强了槽内导体在进电侧产生的垂直磁场。

表 1 不同母线方案支路母线电阻 L/S 计算值对比

Table 1 Comparison of L/S value in branch circuits for different busbar schemes

Riser No.	SO			SG ₁			SG ₂		
	Branch	L/S of each branch/m ⁻¹	L/S of parallel branches/m ⁻¹	Branch	L/S of each branch/m ⁻¹	L/S of parallel branches/m ⁻¹	Branch	L/S of each branch/m ⁻¹	L/S of parallel branches/m ⁻¹
1	3	Min:120.7 Max:182.4	51.0	3	Min:165.8 Max:166.9	55.3	3	Min:162.0 Max:166.9	54.9
2	2	Min:164.3 Max:170.3	83.6	2	Min:109.3 Max:112.6	55.5	2	Min:108.0 Max:112.6	55.1
3	3	Min:86.1 Max:193.8	45.8	2	Min:86.1 Max:193.5	59.6	2	Min:120.0 Max:120.7	60.2
4	2	Min:93.5 Max:159.9	59.0	2	Min:111.3 Max:111.3	55.7	2	Min:106.5 Max:111.3	54.4
5	2	Min:107.5 Max:168.4	65.6	2	Min:109.9 Max:111.1	55.2	2	Min:106.2 Max:110.0	54.0

表 2 不同母线方案铝液中间磁场比较($z=1.032\text{ m}$)

Table 2 Comparison of the magnetic field in middle of metal pad for different busbar schemes ($z=1.032\text{ m}$)

Scheme	$B_{x\max}/10^{-4}\text{ T}$	$B_{x\min}/10^{-4}\text{ T}$	$B_{y\max}/10^{-4}\text{ T}$	$B_{y\min}/10^{-4}\text{ T}$	$B_{z\max}/10^{-4}\text{ T}$	$B_{z\min}/10^{-4}\text{ T}$
SO	169.2	-138.0	23.8	-22.1	30.1	-24.6
SG ₁	183.3	-133.0	23.3	-23.3	34.3	-33.6
SG ₂	181.1	-135.0	23.3	-23.2	32.7	-32.7

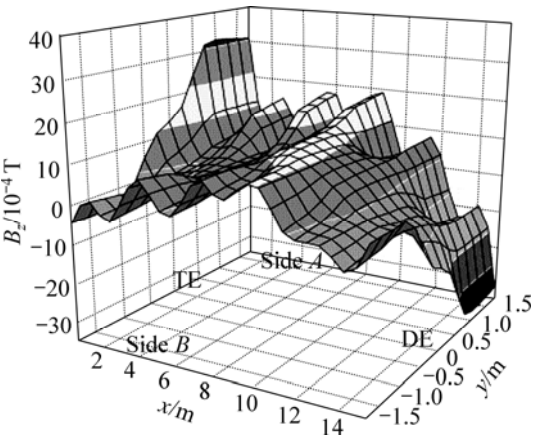


图 6 铝液中间垂直磁场 B_z 分布(SG₂)

Fig.6 Vertical magnetic component B_z in middle of metal pad for SG₂

4.4 母线配置对流场分布的影响

通过比较发现,电解质中水平电磁力较铝液小得多,且3种方案分布非常相近,而铝液中水平电磁力的分布差异更明显,如图7所示。铝液水平电磁力分布的共同特征是:短轴 y 方向的力占主导地位,长轴 x 方向的力较小。其原因是熔体中主要存在 y 方向的水平电流和 z 方向的垂直电流,根据电磁力定义和磁场 B_y 与 B_z 的分布形式可知, F_x 在槽端部位置较大,而在槽中心处较小;同理, F_y 则与磁场 B_x 的分布趋势极为相似,在槽大面处较大,而在槽中心处较小。水平电磁力局部差别较大以及垂直电磁力分量的差异是流动形态不同的原因。铝液与电解质间流场是互相影响的,前者与后者的流动形式相似,且速度快^[14]。如图8所示,3种方案的稳态流场计算结果证明了这一点,因进电侧水平电磁力大于出电侧水平电磁力,所以,电解质在铝液带动下呈现从上至下的环流^[19]。对于SO,SG₁和SG₂3个母线方案,电解质层最大流速分别为15.8,18.2和18.0 cm/s,平均流速分别为5.0,8.1和7.1 cm/s;自由界面平均抬高4.7,5.2和4.7 mm,平均下凹7.3,7.7和6.9 mm。

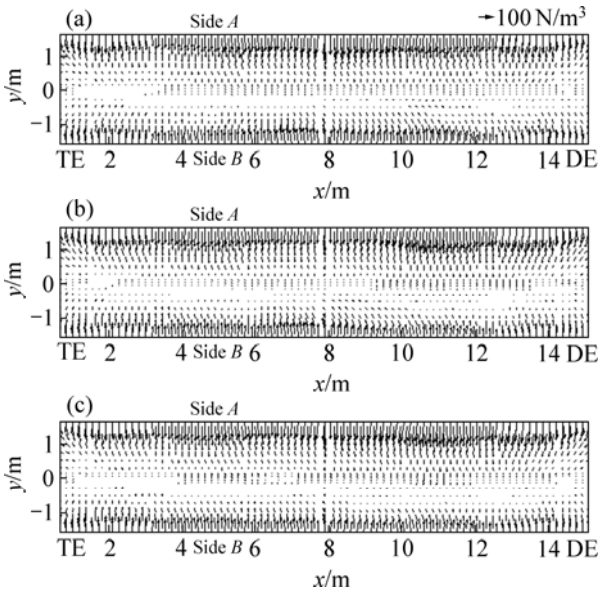


图 7 铝液中间电磁力水平矢量 F_{xy} 分布

Fig.7 Distribution of horizontal force vectors F_{xy} in middle of metal pad: (a) SO; (b) SG₁; (c) SG₂

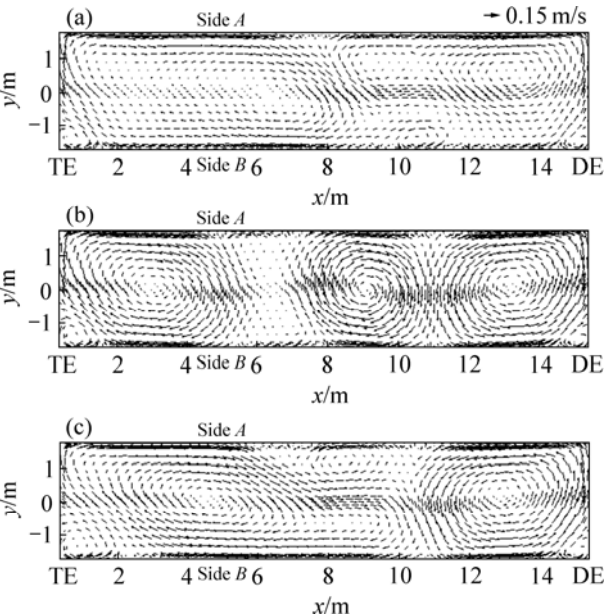


图 8 电解质水平流速矢量 v_{xy} 分布

Fig.8 Distribution of horizontal velocity vectors v_{xy} in middle of bath: (a) SO; (b) SG₁; (c) SG₂

5 结论

1) 解决了媒质接触、结构化网格划分、磁场边界条件施加、场耦合等铝电解槽复杂开域的建模问题,开发了电磁流场耦合仿真模型,并在工业电解槽上进行了计算值与测量值的对比验证,证明了模型正确性。

2) 提出基于参数 L/S 与 x 的母线设计方法, 获得了较优的 320 kA 母线配置 SG_2 , 其水平电流小, 磁场分布对称性好, 熔体平行大面流动有助于氧化铝输运。

3) 立柱母线中的电流可大幅度抵消非均匀阴极母线电流对磁场分布的影响, 并决定最终的磁场分布。

REFERENCES

- [1] TVEDT T, NEBELL H G. Newbus, a simulation program for calculation of the current distribution in the bus bar system of alumina reduction cells[C]//BOXALL L G. Light Metals 1988. Phoenix, AZ: TMS, 1988: 567–573.
- [2] BUIZA J I. Electromagnetic optimization of the V-350 cell[C]//CAMPBELL P G. Light Metals 1989. Las Vegas, NV: TMS, 1989: 211–214.
- [3] KACPRZAK D, GUSTAFSSON M, LI L, et al. Numerical analysis of the collector bar current distribution of a reduction cell[C]//GALLOWAY T J. Light Metals 2006. San Antonio, TX: TMS, 2006: 367–369.
- [4] DUPUIS M, BOJAREVICS V. Busbar sizing modeling tools: comparing an ANSYS based 3D model with the versatile 1D model part of MHD-Valdis[C]//GALLOWAY T J. Light Metals 2006. San Antonio, TX: TMS, 2006: 341–346.
- [5] 姜昌伟, 梅 焱, 周乃君, 徐顺生. 用标量电位法与双标量磁位法计算铝电解槽三维磁场[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 1021–1025.
JIANG Chang-wei, MEI Chi, ZHOU Nai-jun, XU Shun-sheng. Computation of 3D magnetic field in prebaked cells using scalar voltage potential method and two scalar magnetic potentials method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 1021–1025.
- [6] GRJOTHEIM K, KVANDÉ H. Understanding the Hall-Héroult process for production of aluminum[M]. Dusseldorf: Aluminum-Verlag Press, 1978.
- [7] SEGATZ M, VOGELSANG D. Effect of steel parts on magnetic fields in aluminum reduction cells[C]//ROOY E. Light Metals 1991. New Orleans, LA: TMS, 1991: 393–398.
- [8] LI Guo-hua, LI De-xiang. New method for calculation of magnetic field in aluminium reduction cell[C]//EVANS J W. Light Metals 1995. Las Vegas, NV, USA: TMS, 1995: 301–303.
- [9] SELE T. Computer model for magnetic fields in electrolytic cells including the effect of steel parts[J]. Metallurgical Transactions, 1974, 5: 2145–2150.
- [10] 孙 阳, 冯乃祥, 崔建忠. 186 kA 大型预焙阳极铝电解槽磁场的三维数值计算[J]. 金属学报, 2001, 37(3): 332–336.
SUN Yang, FENG Nai-xiang, CUI Jian-zhong. Tridimensional numerical calculation of magnetic field in a 186 kA large prebake anode aluminum reduction cell[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(3): 332–336.
- [11] DUPUIS M, BOJAREVICS V. Weakly coupled thermo-electric and MHD mathematical models of an aluminium electrolysis cell[C]//KVANDÉ H. Light Metals 2005. San Francisco, CA: TMS, 2005: 449–454.
- [12] 姜昌伟. 预焙阳极铝电解槽电场、磁场、流场的耦合仿真方法及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
JIANG Chang-wei. Study on coupled simulation methods and applications of electro-magneto-flow fields in prebake aluminum reduction cells[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [13] 闫照文, 汪友生, 苏东林, 李朗如, 杨 溢. 大型铝电解槽三维电磁场的数值模拟[J]. 电工技术学报, 2003, 18(5): 23–26.
YAN Zhao-wen, WANG You-sheng, SU Dong-lin, LI Lang-ru, YANG Yi. Numerical simulation of the 3D electromagnetic fields of aluminum reduction cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(5): 23–26.
- [14] SEVERO D S, SCHNEIDER A F, PINTO E C V, GUSBERTI V, POTOCHNIK V. Modeling magneto-hydro-dynamics of aluminum electrolysis cells with ANSYS and CFX[C]//KVANDÉ H. Light Metals 2005. San Francisco, CA: TMS, 2005: 475–480.
- [15] TARAPORE E D. Effect of some operating variables on flow in aluminum reduction cells[C]//BELL G M. Light Metals 1981. Chicago, IL: Metallurgical Society of AIME, 1981: 341–355.
- [16] BILEK M M, ZHANG W D, STEVENS F J. Modelling of electrolyte flow and its related transport processes in aluminum reduction cells[C]//MANNWEILER U. Light Metals 1994. San Francisco, CA: TMS, 1994: 323–331.
- [17] EVANS J W, ZUNDELEVICH Y, SHARMA D. Mathematical model for prediction of currents, magnetic fields, melt velocities, melt topography and current efficiency in Hall-Héroult cells[J]. Metallurgical Transactions B, 1981, 12(2): 353–360.
- [18] 周 萍. 铝电解槽内电磁流动模型及铝液流动数值仿真的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.
ZHOU Ping. A research on mathematical models of electromagnetic hydrodynamics and numerical simulation of metal pad flow in aluminum reduction cells[D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [19] 吴建康, 黄 珉, 黄 俊, 姚世煥. 铝电解槽电解质-铝液流动及铝液表面变形计算[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 241–244.
WU Jian-kang, HUANG Min, HUANG Jun, YAO Shi-huan. Computation of flow field of electrolyte- aluminum liquid and surface distortion of aluminum liquid in reduction cell[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 241–244.
- [20] 陶建华. 水波的数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.
TAO Jian-hua. Numerical simulation of water waves[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005.
- [21] PANT A, LANGILLE A, ROY R, WELLS M. Measurement of liquid metal flow velocities in electrolytic cells: test of the iron rod method[C]//MILLER R E. Light Metals 1986. New Orleans, LA, USA: Metallurgical Society of AIME, 1986: 541–550.

- [22] DUPUIS M. Thermo-electric analysis of the grande-baie aluminum reduction cell[C]//MANNWEILER U. Light Metals 1994. San Francisco, CA: TMS, 1994: 339–342.
- [23] 李 茂, 周子民, 王长宏. 300 kA 铝电解槽电、磁、流多物理场耦合仿真[J]. 过程工程学报, 2007, 7(2): 354–359.
LI Mao, ZHOU Jie-min, WANG Chang-hong. Coupled simulation of multiple physical fields in a 300 kA aluminum electrolysis cell[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, 7(2): 354–359.
- [24] LI Jie, LIU Wei, LAI Yan-qing, WANG Zhi-gang, LIU Ye-xiang. Analysis of cathode voltage drop in aluminum electrolysis cells with an electric contact model[C]//SØRLIE M. Light Metals 2007. Orlando, FL: TMS, 2007: 465–470.
- [25] 黄兆林, 杨志峰, 吴江航. 铝电解槽内湍流流动与界面波动的数值模拟[J]. 计算物理, 1994, 11(2): 179–184.
HUANG Zhao-lin, YANG Zhi-feng, WU Jiang-hang. Numerical simulation of turbulent flow and interface oscillation in aluminum reduction cells[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1994, 11(2): 179–184.
- [26] RICHARD D, FAFARD M, LACROIX R, CLERY P, MALTAIS Y. 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.
- [27] RICHARD B. An analytical model for cathode voltage drop in aluminum reduction cells[C]//CREPEAU P N. Light Metals 2003. San Diego, CA: TMS, 2003: 241–245.
- [28] HAARBERG T, OLSEN E, SOLHEIM A, DHAINAUT M, TETLIE P, JOHANSEN S T. Bath-metal interfacial deformation due to gas induced flow in aluminium cells[C]//ANJIER J L. Light Metals 2001. New Orleans, LA: TMS, 2001: 475–479.

(编辑 龙怀中)