

文章编号: 1004-0609(2004)05-0854-06

铝电解槽热电场的有限元分析^①

李贺松, 梅 炽

(中南大学 能源与动力工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 运用大型有限元分析软件 ANSYS 中附带的 APDL 模块解决铝电解槽热非线性和炉帮形状的循环计算问题, 充分考虑电解质发生相变时产生的潜热, 建立了热电场数学模型, 开发了准三维热电耦合模型。选择普通炭块和碳化硅作为侧部保温材料两种情况, 对我国 300 kA 侧部五点进电预焙铝电解槽进行了热电耦合分析, 绘出了热场等温线图。结果表明, 300 kA 侧部五点进电预焙铝电解槽的阴极和侧部炭块的设计是合理的。

关键词: 铝电解槽; 热电场; 耦合; 有限元分析

中图分类号: TF 821; TP 391

文献标识码: A

Finite element analysis of thermo-electric coupled field in aluminum reduction cell

LI He-song, MEI Chi

(School of Energy and Power Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China)

Abstract: By using ANSYS APDL, the non-linear behaviors in aluminum reduction cell were considered and the profile of bath freeze was computed. Considering the phase change problems, the thermo-electric mathematical models and 2D+ thermo-electric models were built up. For the cases of common carbon and SiC, the thermo-electric coupled field of 300 kA prebaked aluminum reduction cell was computed. The results indicate that the design of cathode and side of 300 kA prebaked aluminum reduction cell is reasonable.

Key words: electrolysis cell; thermo-electric field; coupling; FEM

中国是一个产铝大国, 年产铝近 400 万 t, 居世界第一位。氧化铝通过电解生成金属铝需要消耗大量的电能, 我国的吨铝能耗大概为 15 000 kWh, 每年产铝电能消耗为 900 亿 kWh。因此, 如何减少吨铝能耗、提高电流效率是一个不容忽视的问题。

保持良好的能量平衡是减少铝电解能耗的关键。铝电解槽的设计要求维持适当的电解温度, 而侧部热散失能生成一定厚度的电解质结壳以用来保护槽内衬。如果槽底部的热绝缘能力不好, 在阴极炭块表面就会生成电解质结壳, 这将影响槽内电流分布, 最终导致槽电压升高。如果槽侧部热绝缘能很不好, 侧部就不会生成电解质结壳, 电解质和铝

液将腐蚀侧部内衬, 降低铝电解槽寿命。建立有效的数学模型^[1]对实现我国铝电解槽的优化设计以提高其寿命, 减少其能耗是十分有意义的。

1 国内外热电模型分析和比较

总的说来, 国外的热电耦合模型^[2, 3]经历了局部到整体的变迁, 这和铝工业的发展是相适应的。

1984 年, 国外开发了半个阳极热电耦合模型, 并成功应用于阳极原型^[4]的设计。1985 年, 阴极切片模型应运而生, 该模型能模拟侧部电解质结壳的形成过程和最终形状。这两种模型主要偏重于局部

① 收稿日期: 2003-10-29; 修订日期: 2003-12-31

作者简介: 李贺松(1976-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 李贺松, 电话: 0731-8830897; E-mail: liheseng611@Yahoo.com.cn

区域。

随着生产发展的需要, 出现了整体模型。整体模型包括阴阳极切片模型、1/4 槽模型和全槽模型^[5, 6]。但这些模型计算量特别大, 需占用大量的计算机资源。因此, 2002 年国外又从三维模型回到了准二维模型^[7], 原因是准二维热电模型也能在很大程度上代表铝电解槽的热平衡状况, 并且它占用的计算机资源较少, 求解时间短, 适合于铝电解生产的实时分析。应该说, 国外的热电模型^[8, 9]是成功的。

20 世纪 80 年代初国内引进了日本的热电仿真软件来分析铝电解槽热电耦合效应。该模型是在低电流预焙槽基础上开发的, 所以它不适合于高电流槽, 如 300 kA 预焙槽, 它的网格划分也存在着一定的局限性。

国内有些研究单位应用大型商业软件 ANSYS 对铝电解槽的热平衡进行了分析, 并取得了一定的效果。但这些模型的精度不高, 采用了四面体网格, 并且侧部炉帮的计算没有在 ANSYS 平台上实现, 这造成了平台不统一带来的误差。另外这些模型存在共同的缺点, 就是没有考虑电解质发生相变时的潜热。

综上所述, 国内外采用的热电模型的区别如下。

1) 网格的结构化。国外建立的二维和三维模型都采用了结构化网格, 大大提高了计算精度, 减少了误差。而国内的三维模型主要采用非结构化网格, 系统的误差很大, 同时模型的收敛性不好。

2) 计算平台的统一性。国外对热电耦合求解统一在 ANSYS 平台上, 运用 ANSYS^[10] 中的 APDL^[11-13] 模块循环计算出由电解质发生相变所产生的炉帮。在国内, 计算炉帮形状的程序是引进日本的程序, 而其它部分的计算采用自己的程序, 造成平台不统一带来的误差。

2 准三维热电有限元模型

根据前面的介绍可知, 铝电解槽炉帮形状的计算是难点, 而采用三维模型计算炉帮会占用大量的计算机资源, 甚至造成内存不足, 使计算进行不下去。准三维模型对长度上连续的材料使用二维单元, 而对不连续的材料使用三维单元。

另外, 铝电解槽的内衬结构极其复杂, 它包括多种保温和耐火材料, 整个槽的温度变化范围也很大(100~970℃), 因此材料的非线性问题必须要

解决。在铝电解生产过程中, 熔融电解质通过向侧部的散热而凝固, 此过程是一个相变的过程, 必须要考虑其潜热。准三维热电有限元模型运用 ANSYS 中 APDL 能很好地解决这 3 个问题。

2.1 热非线性模型

铝电解槽热场模型属于热非线性模型, 在建立模型时, 槽内衬材料的非线性问题用非线性热分析的热平衡矩阵方程求解

$$[c(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = [Q(T)] \quad (1)$$

式中 $\dot{T}$ 为温度对时间的导数; $\{Q\}$ 为节点热流率向量, 包含热生成; c , K 分别为热容和导热系数。

ANSYS 中参数化设计语言 (APDL) 用参数来定义各个材料的属性, 当温度变化时, 参数的初始值发生改变, 这种变化是非线性的。

ANSYS 用牛顿-拉夫森 (N-R) 法求解非线性系统方程, 较其它模型收敛性好。

2.2 炉帮形状的快速计算

运用 APDL 准三维热电有限元模型可以循环计算炉帮形状^[14]。只要移动炉帮表面上的节点直到炉帮表面温度在事先预定好的电解质初晶温度公差内。计算的具体步骤如图 1 所示。

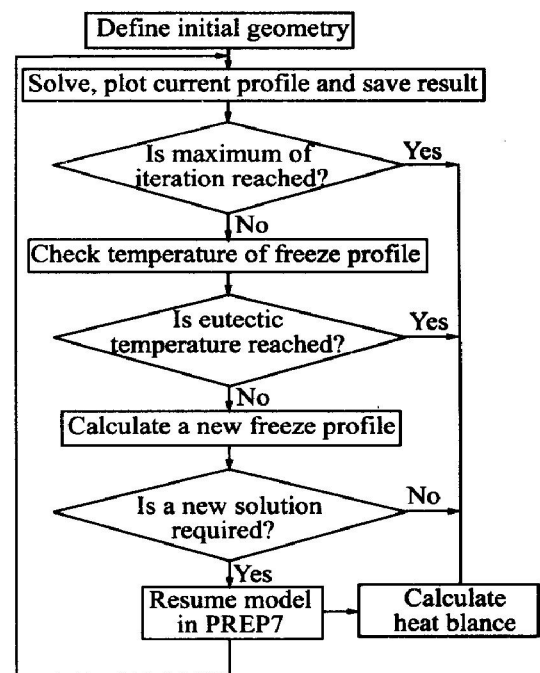


图 1 炉帮形状循环计算流程图
Fig. 1 Freeze profile adjustment loop

- 1) 计算给定炉帮的表面温度;
- 2) 检查炉帮表面节点温度是否在预定的电解

质初晶温度公差范围内;

3) 如果需要, 通过循环计算新的炉帮位置;

4) 如果新的位置和初晶点温度线位置在公差以外, 重新移动节点;

5) 用 * CFOPEN, * CFWRITE 和 * CF-CLOSE 命令生成一个新的输入文件。

反复进行上述循环直到收敛。

2.3 相变的分析

电解质发生相变时, 其控制方程为

$$[c]\{\dot{T}_i\} + [K]\{T_i\} = \{Q_i\} \quad (2)$$

式中 c 、 K 分别为电解质的热容和导热系数; $\{T\}$ 为电解质温度对时间的导数; $\{Q\}$ 为节点热流率向量对时间的函数。

因为相变是高度非线性问题, 因此在求解时可用反向欧拉时间积分法来改进其收敛性。

3 热电场数学模型

铝电解槽的热量源于通过电解槽的电流所产生的焦耳热, 产生的热量通过对流和辐射从槽外部表面向外部空间散失。

1) 电场控制方程

导电过程微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\rho_y} \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial V}{\partial z} \right] = 0 \quad (3)$$

式中 ρ_x 、 ρ_y 、 ρ_z 为材料三维方向的电阻率, V 为电位。

2) 热场控制方程

在稳定的生产情况下, 铝电解槽的热能流动不随时间而变化, 系统的温度和热载荷也不随时间变化。据此热量衡算的控制微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_{vol} = 0 \quad (4)$$

式中 T 为温度, K 为导热系数, q_{vol} 为控制单元的焦耳热, 对于非导电部分则无此项。

相应的有限元热量衡算方程为

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (5)$$

4 铝电解槽热电场的有限元分析

铝电解槽热电场^[15]分析属于热-电耦合有限元

分析^[16]。耦合场分析考虑两个或两个以上的物理场之间的相互作用, 这种分析包括直接和间接耦合分析。由于热电场各自的响应相互依赖, 本工作选择直接耦合分析。

1) 前处理

对阳极、阴极、电解质和铝液使用具有温度和电压 2 个自由度的耦合单元 PLANE67 单元。对其它材料使用只有温度一个自由度的通单元 PLANE55。

2) 加载

同时加载热电场的边界条件, 包括温度、热流率、热流密度、对流、辐射、绝热、生热。

3) 求解

对于一个热电分析, 可以确定普通选项、非线性选项以及输出控制。普通选项主要确定载荷步, 非线性选项主要确定迭代次数、自动时间步长、线性搜索、收敛误差和预测修正, 使用 Predictor 和 Line Search 功能改善收敛性。

4) 后处理

使用 MultiPlots 功能将不同场的结果同时输入多个窗口。

5 300 kA 电解槽热电耦合计算实例

以 300 kA 预焙铝电解槽为例说明热电耦合场的计算方法。300 kA 铝电解槽是大型铝电解槽, 由于计算能力有限, 国内有关报道很少。本研究采用准三维热电耦合模型, 就是采用二维模型模拟 300 kA 电解槽三维物理场。

我国 300 kA 铝电解槽大多采用碳化硅作为侧部保温材料, 在计算中特选用普通炭块和碳化硅两种侧部保温材料以作对比。这两种材料的热导率列于表 1。

表 1 碳化硅和普通碳块的热导率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Table 1 Thermal conductivities of SiC and common carbon ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Temperature/ ℃	SiC		Common carbon	
	Transverse	Longitudinal	Transverse	Longitudinal
0	53	54	3.50	6.70
200	43	44	4.32	7.52
400	35	36	5.15	8.35
600	27	28	5.97	9.17
800	23	24	6.80	10.00
1 000	20	20	7.63	10.83

5.1 建模和求解

1) 建模。取大面切片为分析面, 其中在电解槽纵向上连续的实体如阴阳极、电解质、铝液、耐火砖、保温砖和侧部炭块采用二维模型处理, ANSYS 中采用 PLANE55 二维热单元和 PLANE67 二维热电耦合单元。对在电解槽纵向上不连续的实体如阳极导杆和钢爪以及阴极钢棒采用三维模型处理, ANSYS 中采用 BEAM4 三维热单元。炉帮按假设的尺寸划分为多个长方形, 最好在整体上形成弧形, 这样可以得出便于移动的节点。铝电解槽存在材料非线性问题, 所以在定义材料属性时一定要考虑到属性随温度的影响, 在此用 MPDATA 命令来定义材料非线性属性。槽结构和操作参数如表 2 所示。

表 2 电解槽的基本特征参数

Table 2 Characteristics of cell	
Parameter	Value
Amperage	300 kA
Number of anodes	28
Anode size	1.6 m × 1.5 m
Number of anode studs	4 per anode
Anode stud diameter	18 cm
Anode cover thickness	15 cm
Number of cathode blocks	18
Cathode block length	3.35 m
Thickness of SiC	7.5 cm
ACD	4.5 cm
Excessive AlF ₃	11.5%
Operating temperature	961.4 °C
Liquidus superheat	18 °C
Height of bath	21.7 cm
Height of metal	18 cm

2) 划分网格。模型中网格划分如图 2 所示, 在结构比较简单的地方用结构化网格, 在结构比较复杂的地方用非结构化网格, 其中在槽帮处温度梯度较大的地方加密了网格。共划分为 6043 个四边形单元、8421 个节点。

3) 边界条件。槽体侧部环境温度为 37 °C, 槽体底部环境温度为 26 °C。

槽电流施加在阳极导杆和阴极钢棒上, 电解质和铝液界面设为零电位。槽切片位于槽中心线上的面假设为绝热面, 对侧部和底部施加对流和辐射边界条件, 对槽上部只施加辐射边界。电场计算参数见表 3。

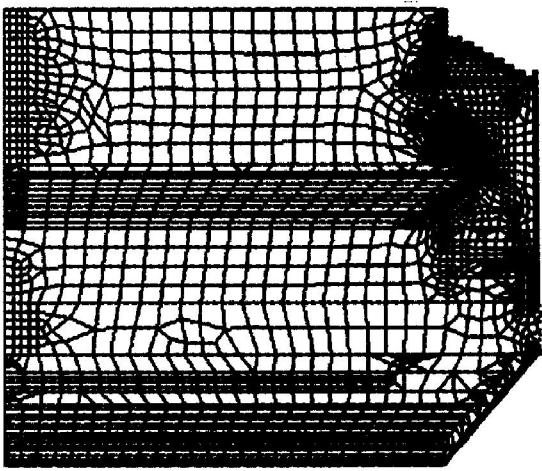


图 2 300 kA 侧部五点进电槽
大面切片热场网格图

Fig. 2 Mesh plot of thermal field
in 300 kA cell

表 3 电场计算用物性参数

Table 3 Physical parameters of electric field (Ω•m)			
Resistivity of bath	Resistivity of metal	Resistivity of anode	Resistivity of bath (cross)
4.55×10^{-3}	2.40×10^{-7}	5.50×10^{-5}	2.45×10^{-5}
Resistivity of bus bar	Resistivity of cathode(vertical)	Resistivity of anode bar	Resistivity of cathode bar
4.06×10^{-8}	3.80×10^{-5}	2.34×10^{-7}	7.78×10^{-7}

4) 求解。计算炉帮形状, 取定炉帮表面上节点温度, 如果节点温度和电解质初晶点相差很远, 则移动炉帮位置, 再求解, 直到收敛。

5) 后处理。用等温线图来表示温度的分布, 可以直观的看出几个特殊等温线的位置。

5.2 计算结果及分析

热场计算得出的结果用等温线表示, 如图 3 和 4 所示。由图 3 和 4 可以得出以下结论。

1) 阴极设计合理

由图 3 和 4 可以看出, 300 kA 侧部五点进电预焙铝电解槽的 NaF 和冰晶石的共晶点等温线(880 °C)都在阴极炭块下面, 避免了渗入阴极炭块中的熔体冷凝固结晶膨胀而造成阴极炭块的破坏, 这符合国际上对大型铝电解槽阴极设计的要求。

2) 侧部散热良好

图 3 表明形成的侧部炉帮较厚, 为 15 cm, 很好地保护了电解槽内衬, 减少了电解质对侧部的冲刷腐蚀, 延长了电解槽的寿命。如图 4 所示, 形成

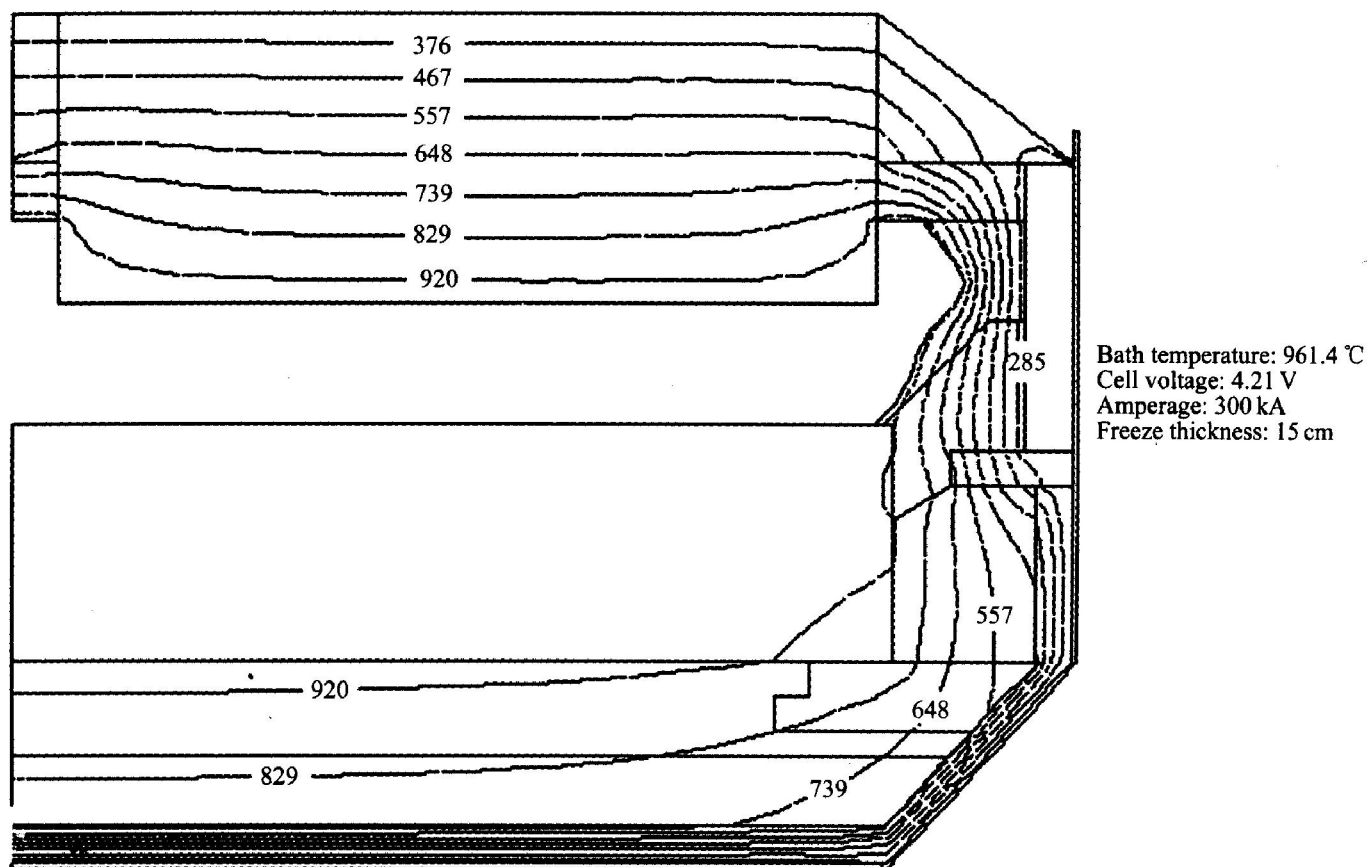


图 3 300 kA 侧部五点进电槽大面切片热场等温线图(碳化硅)(单位: °C)

Fig. 3 Isotherms obtained by model for 300 kA cell(SiC) (unit: °C)

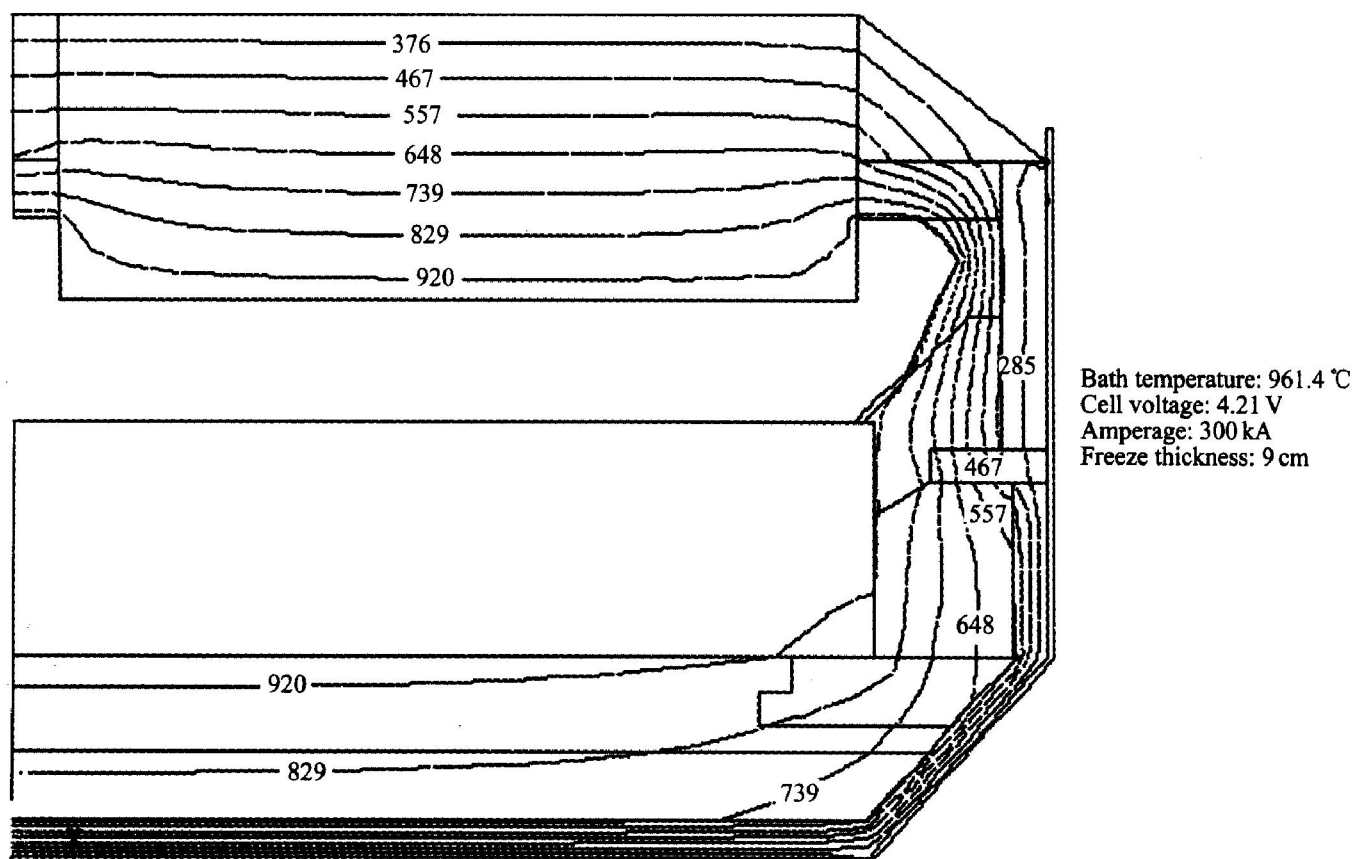


图 4 300 kA 侧部五点进电槽大面切片热场等温线图(普通碳块)(单位: °C)

Fig. 4 Isotherms obtained by model for 300 kA cell(common carbon) (unit: °C)

的炉帮只有 9 cm, 相对较薄。这说明碳化硅作为侧部有保护槽侧部的作用。

3) 侧部温度梯度大

槽帮结壳部分与阳极和阴极内相比, 温度梯度最大, 温度梯度主要集中在这一区域, 所以等温线密度较大, 这一区域的槽壳表面温度比底部高, 符合侧部散热、底部保温的要求。

综上所述, 我国 300 kA 槽内衬设计符合侧部散热、底部保温的要求, 设计是成功的。

6 结论

采用 ANSYS 中的 APDL 模块, 在解决铝电解槽材料非线性和炉帮形状快速计算的问题、充分考虑相变所带来的潜热的基础上, 开发了准三维热电有限元模型, 对我国 300 kA 铝电解槽进行了准三维热电有限元分析, 比较了普通碳块和碳化硅分别作为侧部保温材料的炉帮厚度, 以此说明碳化硅在保持槽侧部散热方面的优越性, 对新型槽的开发、设计有一定的参考价值。

REFERENCES

- [1] Dupuis M, Fradet C. Using ANSYS based aluminum reduction cell energy balance models to assist efforts to increase lauralco's smeltre productivity[A]. Welch B. Proceeding of the ANSYS 8th International Conference[C]. Texas: San Antonio, 1998. 2233 - 2240.
- [2] Tabsh I, Dupuis M, Gomes A. Process simulation of aluminum reduction cell[A]. Hale W. Light Metals[C]. California: Anaheim, CIM, 1996. 451 - 457.
- [3] Cross M, Pericleous K, Leboucher L, et al. Multi-physics modelling of aluminium reduction cells. Presented at 2000 TMS Annual Meeting, Nashville, Tennessee, 2000. 12 - 16.
- [4] Dupuis M. Thermoelectric design of a 400 kA cell using mathematical models: a tutorial[A]. Peterson R D. Light Metals[C]. Tennessee: Nashville, 2000. 297 - 302.
- [5] Dupuis M, Tabsh I. Using a steady-state model of aluminum reduction cell to investigate the impact of design changes[A]. Hale W. Proceeding of the 35th Conference on Light Metals[C]. California: Anaheim, CIM, 1996. 419 - 429.
- [6] Dupuis M, Tabsh I. Thermoelectric coupled field analysis of aluminum reduction cells using the ANSYS parametric design language[A]. Rooy E. Paper Presented at the ANSYS Fifth International Conference and Exhibition[C]. Pennsylvania: Pittsburgh, 1991. 20 - 24.
- [7] Dupuis M, Lacroix R. Development of a 2D+ dynamic model of an aluminum reduction cell[A]. Eckert C E. Proceeding of the 38th Conference on Light Metals[C]. California: San Diego, CIM, 1999. 41 - 55.
- [8] Dupuis M, Tabsh I. Thermoelectric analysis of the grandbaie aluminum reduction cell[A]. Mannweiler U. Light Metals [C]. California: Anaheim, CIM, 1994. 339 - 342.
- [9] Tabsh I, Dupuis M, Gomes A. Process simulation of aluminum reduction cells[A]. Hale W. Light Metals[C]. California: Anaheim, CIM, 1996. 451 - 457.
- [10] Mocanu D, Morega AI, Panaitescu A. An ANSYS approach to the numerical modeling of electrical and heat transfer processes in 88 kA Hall-Heroult electrolysis cells [A]. 2000 ANSYS Inc. Conference and Exhibition [C]. Pittsburgh, USA, 2000. 28 - 30.
- [11] Dupuis M, Tabsh I. Thermoelectric analysis of the grandbaie aluminum reduction cell[A]. Mannweiler U. Light Metals[C]. California: San Francisco, CIM, 1994. 339 - 342.
- [12] Dupuis M. Computation of aluminum reduction cell energy balance using ANSYS finite element models[A]. Welch B. Light Metals [C]. Texas: San Antonio, CIM, 1998. 409 - 417.
- [13] Dupuis M, Tabsh I. Thermoelectric coupled field analysis of aluminum reduction cells using ANSYS parametric design language[A]. The ANSYS Fifth International Conference and Exhibition [C]. Pennsylvania: Pittsburgh, 1991. 20 - 24.
- [14] Pfundt H, Vogelsang D, Gerling U. Calculation of the crust profile in aluminium reduction cells by thermal computer modelling[A]. Campbell P G. Light Metals [C]. CIM, 1989. 371 - 377.
- [15] Dupuis M, Tabsh I. Thermoelectric analysis of aluminum reduction cells[A]. Cutshall E R. Light Metals [C]. California: San Diego, CIM, 1992. 55 - 62.
- [16] Dupuis M, Tabsh I. Thermoelectromagnetic modelling of a Hall-Heroult cell[A]. Mannweiler U. Proceeding of the ANSYS Sixth International Conference [C]. California: San Francisco, CIM, 1994. 3 - 13.

(编辑 袁赛前)