

聚铝沟排布对导流型铝电解槽热应力分布的影响

李相鹏^{1,2}, 李 劼², 赖延清², 刘业翔², 冉永华³, 周 昊¹, 岑可法¹

- (1. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027;
2. 中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083;
3. 昆山铝业有限公司, 昆山 215313)

摘 要: 为了优化导流型铝电解槽聚铝沟设计方案, 对槽内热应力分布特征进行研究分析。采用商用有限元计算软件 ANSYS 针对两种聚铝沟设计方案(即方案 I 为工字型聚铝沟结构; 方案 II 为单聚铝沟结构)的导流槽模型进行了电-热-应力耦合计算, 同时针对热应力引起的槽体形变进行模拟。结果表明: 采用方案 I 工字型聚铝沟结构时, 槽体内部热应力较大, 尤其是两端靠近横向聚铝沟的阴极炭块内部具有较大的应力集中, 而采用方案 II 单聚铝沟结构时, 该处的应力集中得到了较好的缓和, 槽体形变较小。

关键词: 导流型铝电解槽; 热应力; 形变; 有限元方法

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

Influences of various aluminum accumulation sump designs on thermal stress distribution in drained aluminum reduction cell

LI Xiang-peng^{1,2}, LI Jie², LAI Yan-qing², LIU Ye-xiang², RAN Yong-hua³, ZHOU Hao¹, CEN Ke-fa¹

- (1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Kunshan Aluminium Co Ltd, Kunshan 215313, China)

Abstract: In order to optimize the aluminum accumulation sump designs, the characteristics of thermo-stress distribution in the drained style aluminum reduction cells were studied. The electric-thermo-mechanical coupled simulations of two types of drained aluminum reduction cells, i.e. scenario I is with central sump and two accessorial sumps at the ends of the cell; scenario II is with only a central sump at the cell bottom, were conducted on the commercial finite element method software package ANSYS. The results show that, for scenario I, a relatively large thermal stress intensity exists in the carbon cathode, especially for the carbon blocks at the two ends of the cell. For scenario II, the aforementioned thermal stress intensity is relieved remarkably, and the deformation is relatively small.

Key words: drained style aluminum reduction cell; thermal stress; deformation; finite element method

导流型铝电解槽与现有普通预焙槽相比最大的优点是极距明显减小, 极间电解压降低, 电能消耗减少, 进而使生产成本降低。针对导流槽结构和工艺国外已有较多的研究和相关专利^[1-4], 被认为是目前技术条件下最有可能取代现有普通预焙槽的一种新型结构

铝电解槽。然而, 为了维持导流槽在较小的极距下正常电解运行, 一方面需要合理控制热平衡, 另一方面则需要在槽底设置聚铝沟^[5], 使阴极表面电解生成的铝液能汇入其中, 避免极间铝液的波动造成短路现象的产生。图 1 所示为一种典型的采用中心聚铝沟结构

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB623703); 国家自然科学基金资助项目(50374081); 湖南省自然科学基金资助项目(5JJ30103)

收稿日期: 2006-09-08; 修订日期: 2007-01-24

通讯作者: 李 劼, 教授; 电话: 0731-8836268; E-mail: 13808488404@hnmcc.com

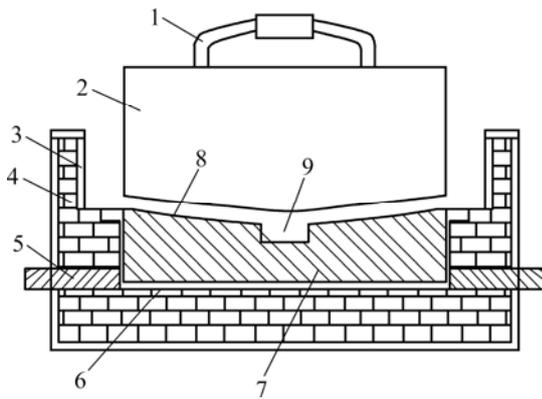


图1 导流槽结构示意图

Fig.1 Sketch map of drained cell structure: 1—Steel claw; 2—Anode; 3—Silicon carbide plate; 4—Thermic insulation; 5—Collector bars; 6—Inner shell; 7—Cathode; 8—Slope; 9—Central channel

的导流槽示意图。

对于现有普通预焙槽，在焙烧启动和正常运行过程中，由于电流和温度分布不均匀，很容易造成槽底开裂现象的产生，引起早期破损^[6-11]。聚铝沟的存在使阴极内部热应力分布更加复杂。聚铝沟截面形貌及其在槽底的排布均会对阴极内部热应力分布产生重要影响。本文作者曾针对不同聚铝沟截面形貌对阴极内部热应力分布的影响进行了专门的探讨^[12]，结果表明采用有导角的聚铝沟可以较好的缓解聚铝沟周围的应力集中，这里应用此结果建立导流槽模型，针对不同聚铝沟排布的影响进行模拟分析。一般来说聚铝沟越多，阴极内部应力分布就越复杂，应力集中的可能性也就越大，聚铝沟的设计首先应当保证阴极炭块在焙烧启动和电解过程中不会因为聚铝沟处的应力集中而开裂破损。而聚铝沟也需要有足够的容积以蓄积较多的铝液，不至于出铝频率过高，使工人操作复杂。为了了解不同聚铝沟排布时导流槽内应力分布的特征，优化 75 kA 导流槽结构，本文作者采用半槽电-热-应力耦合计算模型对导流槽内部的热应力分布进行了模拟。

1 计算模型

针对采用两种聚铝沟设计方案的导流槽进行热应力场计算分析，第一种是槽底采用工字形聚铝沟结构(方案 I，见图 2)，即除槽中部纵向主聚铝沟外，在槽两端另开两条横向的辅助聚铝沟，这种阴极结构可以

使电解槽储铝量增大，降低出铝频率和方便电解槽的出铝操作。横向聚铝沟的深度可以与主聚铝沟相同，也可以较浅，这里采用的辅助聚铝沟深度与主聚铝沟深度相同，由于这种阴极结构较复杂，对其结构应力的分析很重要；第二种是仅采用纵向的主聚铝沟(方案 II，见图 1)，槽两端不开沟，这样可以使阴极炭块内部应力分布较简单，但蓄铝量会有所减少。

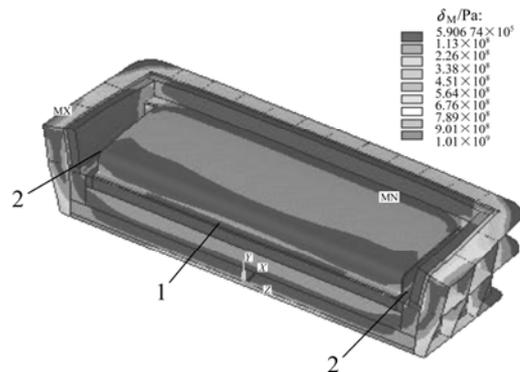


图2 方案 I 半槽模型 Von Mises 应力 δ_M 分布图

Fig.2 Von Mises stress distribution of half cell model with scenario I: 1—Central channel; 2—End channel

计算程序是在有限元计算软件 ANSYS 平台上开发的，该软件具有很强的多物理场耦合求解分析能力，尤其是在结构应力计算方面具有广泛的应用^[13-14]。建立了 75 kA 导流槽电-热-应力场耦合计算模型后，程序计算分为两步，第一步为电热场分布计算，第二步为热应力分布计算。

在进行电热场分布计算时，75 kA 导流槽电热场分布计算模型包括 3 个部分：① 阳极部分，即阳极、上部氧化铝保温覆盖层、结壳；② 熔体部分，即铝液和电解质；③ 阴极部分，即槽帮、阴极炭块、内衬结构、涂层和槽壳等。而在进行应力分布计算时，由于主要是针对槽体阴极部分，对阳极部分不需进行考虑，即假设槽上部氧化铝覆盖层、结壳以及铝液和电解质熔体部分对阴极内部应力分布没有影响，所以在第二步进行热应力分布计算时，除了将原有的电热单元转化为结构单元外，还将①、②部分消去，以简化计算模型。

2 边界条件与求解

网格划分后模型具有单元 75 487 个，节点数为 35 344 个。边界条件分为电热场分布计算边界条件和结构应力计算边界条件；电热场边界在文献[14]中已

有详细介绍。结构应力分布计算时, 将电热场分布计算的温度分布结果导入作为初始条件, 槽体沿长轴的切面视为 x 方向对称面, 其 x 方向位移为 0; 由于槽体固定于水泥墩和工字钢上, 其在垂直方向的位移为 0。

采用程序默认的非线性求解器, 两个模型求解分别耗时 80 min 和 97 min。

3 计算结果分析

3.1 方案 I 工字形聚铝沟时热应力分布计算

由图 2 可知, 槽体等效应力分布最大值出现在端部槽沿板处, 其值为 1.01 GPa。

图 3 所示为采用工字形聚铝沟 75 kA 导流槽在电解温度下产生的形变分布图。从图上可以看出, 采用工字形聚铝沟时, 模型形变最大值出现于端面, 其值约为 12 mm, 而槽大面形变量约为 8 mm, 可见沿长轴方向导流槽形变量较大, 这种形变特征与普通预焙槽在焙烧启动和正常运行过程中形变分布类似。对于普通预焙铝电解槽, 其长轴方向的形变要大于短轴方向的。有研究表明^[15], 当去掉槽两侧大面槽壳形变的约束, 可以使槽体形变减少 20%, 而去掉两端的槽壳约束时, 可以减少 90% 的槽体形变(前提是内衬可以水平移动, 受到的剪应力很小)。对于采用工字形聚铝沟的 75 kA 导流槽而言, 由于槽体沿长轴方向形变较大, 势必引起聚铝沟周围阴极涂层和炭块的应力集中。

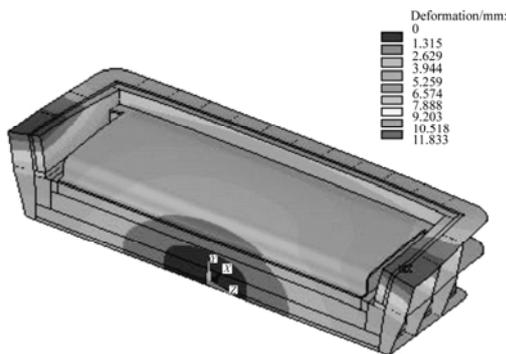


图 3 方案 I 聚铝沟模型阴极部分形变分布图
Fig.3 Deformation of half cell model with scenario I

对于槽体应力的分析重点在于分析阴极炭块中应力的分布, 因为槽体破损最终导致停槽的很大一部分原因也就是由于阴极炭块在焙烧启动或正常电解过程中产生开裂和破损引起漏槽所导致的。

图 4 和图 5 所示分别为阴极炭块 z 方向(长轴方向)

正应力和 $y-z$ 方向切应力分布图。从图 4 可以看出, 阴极炭块上 z 方向正应力最大值达到 236 MPa, 其位置分布在阴极炭块与端部聚铝沟底部连接处, 如图 4 中 a 所示。从图 5 也可以看出, 阴极炭块内部切应力值最大值达到 118 MPa, 其分布位置与 z 方向正应力最大值位置相同, 也是在阴极炭块侧壁与端部聚铝沟底的连接处, 如图 5 中 a 所示。可见, 由于槽两端横向聚铝沟的存在, 阴极炭块端部出现了较大的正应力和切应力, 形成应力集中。这些力作用于两端第一块阴极炭块侧壁, 尤其是 $y-z$ 方向切应力, 与第一块阴极炭块燕尾槽角部产生的切应力连成一体, 形成一个应力集中带, 如图 5 中 b 所示, 很可能使此炭块沿燕尾槽角部发生断裂, 从而产生端部聚铝沟处的漏槽现象。

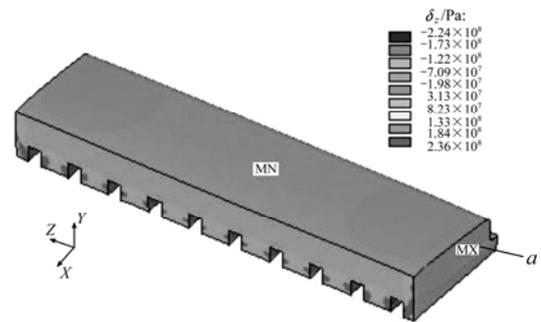


图 4 方案 I 模型阴极炭块部分的 z 方向应力 δ_z 分布图
Fig.4 z -stress distribution in carbon cathode with scenario I

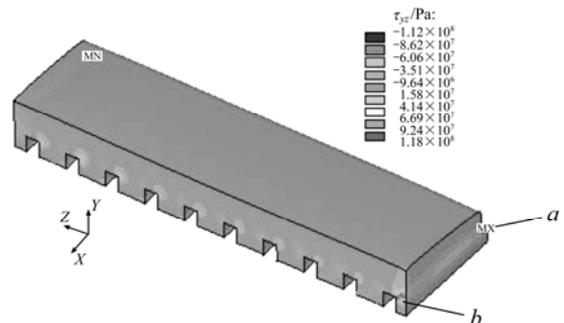


图 5 方案 I 模型阴极炭块部分切应力 τ_{yz} 分布图
Fig.5 Shearing stress distribution in carbon cathode with scenario I

从上面采用工字形聚铝沟的 75 kA 导流槽电-热-应力场分布计算可以看出, 槽两端横向聚铝沟的存在会引起阴极炭块端部的热应力集中, 而且如前所述是多种应力的重叠, 可能造成两端的阴极炭块沿燕尾槽角部产生开裂和破损。为了消除这个应力集中, 需要对聚铝沟的结构进行优化, 比如将端部聚铝沟截

面形貌改成导角、斜坡或将两端第一块阴极炭块换成异型炭块使其燕尾槽离聚铝沟较远等。

3.2 方案II单聚铝沟模型应力分布计算

为了避免阴极内部较大的应力集中，最简单的办法就是去掉槽两端横向聚铝沟，只留槽中部纵向主聚铝沟，将工字形聚铝沟导流槽更换成单聚铝沟导流槽，对其电-热-应力分布进行了计算。

图6所示为单聚铝沟导流槽等效应力分布图。从图6可以看出，应力分布最大值出现在槽底与槽壳侧壁接触处，其值为2.21 GPa，相比工字形聚铝沟导流槽其位置有了改变，而且有明显的增大。而单聚铝沟导流槽的形变分布计算结果表明，槽两端位移最大值约为9 mm，大面形变约为8 mm。相比采用工字形聚铝沟时，槽两端(沿长轴方向)的形变有所减小，而大面的(沿短轴方向)形变量比较接近，而且出现位置一致，均在槽两端中部槽沿板处。

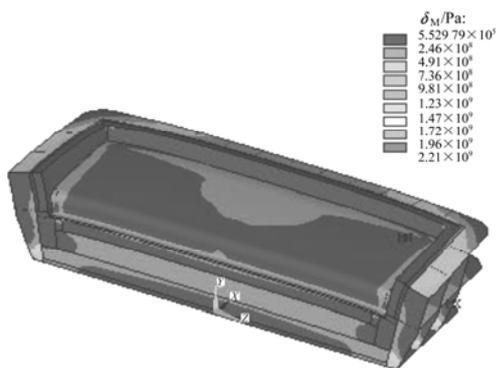


图6 方案II半槽模型 Von Mises 应力 δ_M 分布图
Fig.6 Von Mises stress distribution of half cell model with scenario II

图7和图8所示分别为阴极炭块受到的 z 方向正应力和 $y-z$ 方向切应力的分布图，正应力和切应力的最大值均分布于阴极炭块内的燕尾槽周围，最大值分别为185 MPa和110 MPa，与采用工字形聚铝沟导流槽阴极炭块相比，应力最大值均有不同程度的减小。更重要的是在端部炭块中的应力集中消失了，有利于

保持焙烧启动和正常电解时阴极炭块的完整性。

从图6~8所示对75 kA单聚铝沟导流槽的电-热-应力分布计算结果可以看出，去掉槽端部聚铝沟后，基本消除了阴极炭块端部较大的 z 方向正应力和 $y-z$ 方向切应力集中，减少了阴极炭块在焙烧启动和电解过程中产生开裂和破损的可能性。

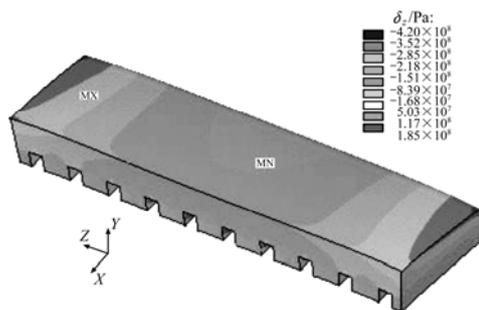


图7 方案II阴极炭块 z 方向正应力 δ_z 分布图
Fig.7 z -stress distribution in carbon cathode with scenario II

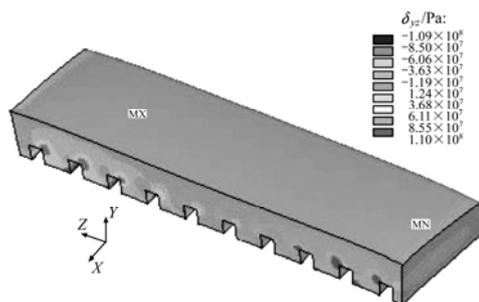


图8 方案II阴极炭块内切应力 τ_{yz} 分布图
Fig.8 Shearing stress distribution in carbon cathode with scenario II

两种聚铝沟设计方案的形变和热应力分布计算结果对比如表1所列。对比两种方案导流槽热应力和形变的计算结果可以看出，采用方案II时，虽然整槽和单独的阴极炭块应力分布的计算结果均显示出较大的等效应力最大值，但在炭块内部 z 方向正应力和 $y-z$ 方向切应力最大值均比方案I有一定的减小，而且槽两端炭块燕尾槽角部附近应力集中有了明显缓和，有

表1 两种聚铝沟排布的应力分布计算

Table 1 Maximum deformation and stress distribution of two scenarios

Scenario	Maximum deformation of whole model/mm	Maximum Von Mises stress/GPa	Maximum deformation of carbon cathode/mm	Maximum z -stress in cathode/MPa	Maximum y - z -stress in cathode/MPa	Maximum Von Mises stress in cathode/MPa
I	12	1.01	7	236	118	469
II	9	2.21	5	185	110	588

利于避免阴极炭块在焙烧启动或者正常电解过程中产生开裂或破损现象。如果要采用方案 I 工字形聚铝沟结构导流槽,需要在现有设计的基础上,进一步对阴极结构进行优化。因此,从目前的研究结果分析,主张 75 kA 导流槽采用纵向排布的单聚铝沟导流槽。

计算结果还表明,采用方案 II 单聚铝沟结构时,75 kA 导流槽电解的出铝周期在 12 h 以上,所以不会使车间操作太复杂。

4 结论

1) 采用方案 I 工字形聚铝沟时,在阴极炭块端部即横向聚铝沟周围会出现较大的应力集中, z 方向正应力和 $y-z$ 方向切应力分别为 236 MPa 和 118 MPa。

2) 采用方案 II 单聚铝沟导流槽时,正应力和切应力的最大值均分布于阴极炭块内的燕尾槽周围,分别为 185 MPa 和 110 MPa。

3) 对比两种方案,可以看出采用方案 II 时聚铝沟内应力集中有所减小,同时较好的解决了阴极炭块端部应力集中的问题,有利于保持涂层阴极在电解过程中的完整性。

REFERENCES

- [1] Berclaz G, de Nora V. Aluminum production cell and cathode[P]. US, 6358393, 2002-03-19.
- [2] de Nora V. Cell for aluminum electrowinning[P]. US, 6093304, 2000-07-25.
- [3] de Nora V. Cell for aluminum electrowinning employing a cathode cell bottom made of carbon blocks which have parallel channels therein[P]. US, 5683559, 1997-11-04.
- [4] Stedman I G, Houston, Shaw R W, Juric D D. Aluminum smelting cells[P]. US, 5043047, 1991-08-27.
- [5] Li X P, Li J, Lai Y Q, Zhao H Q, Liu Y X. Freeze profile and heat balance calculation of the 160 kA drained cell[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2004, 17(2): 215-220.
- [6] 朱旺喜,王福厚. 阴极炭块在铝电解槽中的变形计算[J]. 北京矿冶研究总院学报, 1993, 2(2): 51-54.
ZHU Wang-xi, WANG Fu-hou. Calculating the deformation of the cathode carbon blocks in the Hall-Heroult cells[J]. Journal of Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 1993, 2(2): 51-54.
- [7] 陈柱,李庆余,赖延清. 焙烧启动方法对预焙铝电解槽槽寿命的影响[J]. 矿冶工程, 2002, 22(4): 76-78.
CHEN Zhu, LI Qing-yu, LAI Yan-qing. Effects of preheating and start up procedure on pot life of prebaked anode aluminum

- reduction cell[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(4): 76-78.
- [8] 冷正旭,代军,冯乃祥. 铝电解槽破损机理及槽寿命若干问题的探讨[J]. 矿冶, 2002, 11(1): 62-66.
LENG Zheng-xu, DAI Jun, FENG Nai-xiang. Discussion on breakage mechanism and life of aluminium cell[J]. Mining & Metallurgy, 2002, 11(1): 62-66.
- [9] 卓海宇. 铝电解槽早期破损原因分析及应对措施[J]. 湖南冶金, 2001, 29(1): 13-16.
ZHUO Hai-yu. Cause-analysis and treatment on early cracking of aluminium electrolytic tank[J]. Hunan Metallurgy, 2001, 29(1): 13-16.
- [10] 冀树军,鲍永强,程业莹,高宝堂,贾佼成. 铝电解生产中影响阴极炭块使用寿命的因素分析[J]. 炭素技术, 2001, 20(5): 41-42.
JI Shu-jun, BAO Yong-qiang, CHENG Ye-xuan, GAO Bao-tang, JIA Jiao-cheng. Analysis on the factors influencing the service life of carbon cathodes in the electrolysis process[J]. Carbon Techniques, 2001, 20(5): 41-42.
- [11] 杨建红,李庆余,王先黔,肖劲,殷恩生,刘永刚. 现代工艺条件下预焙铝电解槽破损原因及解决对策[J]. 矿冶工程, 2000, 20(4): 7-9.
YANG Jian-hong, LI Qing-yu, WANG Xian-qian, XIAO Jing, YIN En-sheng, LIU Yong-gang. Failure of prebaking Al electrolytic cells under modern technical conditions, causes and solutions[J]. Mining & Metallurgy, 2000, 20(4): 7-9.
- [12] 刘业翔,李相鹏,李劫,赖延清. 导流槽阴极热应力分布计算和结构优化[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(6): 869-874.
LIU Ye-xiang, LI Xiang-peng, LI Jie, LAI Yan-qing. Calculation of the thermal stress distribution in drained aluminum reduction cell cathode and its structural optimization[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(6): 869-874.
- [13] 陈丽敏,陈思作. 基于 ANSYS 软件的焊接工字型截面梁残余应力的有限元分析[J]. 钢结构, 2003, 18(2): 45-52.
CHEN Li-min, CHEN Si-zuo. FEM analysis of residual stress at I-section beam based on ANSYS software[J]. Steel Construction, 2003, 18(2): 45-52.
- [14] 赖宏,刘天模. 45 钢零件淬火过程温度场的 ANSYS 模拟[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, 26(3): 82-84.
LAI Hong, LIU Tian-mo. Temperature filed ANSYS simulation in quenching process of 45 steel part[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2003, 26(3): 82-84.
- [15] Rolf R L, Peterson R W. Compressible insulation to reduce potlining heaving in Hall-Heroult cells[C]//Light Metals. Warrendale: TMS, 1987: 209-213.

(编辑 杨幼平)