

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.12.007

# 预焙炭阳极环形槽炭碗设计的仿真研究

李拓夫, 陶文举, 王兆文, 孔令宇  
(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 在工业铝电解槽阳极中,炭碗底部由于存在较大的铁-炭间隙而无法导电.针对这一弊端,提出了一种环形开槽的阳极炭碗设计.采用数值模拟的方法,考察了环形槽炭碗设计对阳极物理场的影响及机理.数值计算结果表明,在重力作用下,工业阳极炭碗底部存在1.2 mm左右的初始铁-炭间隙,而环形槽炭碗设计能够将炭碗底部的初始铁-炭间隙降低到约0.2 mm.因此,阳极运行时,采用环形槽炭碗的阳极中磷生铁和钢爪的热膨胀能够使炭碗底部的铁-炭间隙闭合,从而与炭碗底部产生接触应力,进而增加炭碗导电面积、改善阳极电流分布.采用环形槽炭碗设计能够降低阳极电压降约22 mV,而对阳极温度场分布没有显著影响.

**关 键 词:** 铝电解节能;阳极结构优化;阳极电压降;数值模拟;多物理场耦合

**中图分类号:** TF 821      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)12-1715-06

## Numerical Study on the Ringly-Slotted Stub Hole Design for Prebaked Anode

LI Tuo-fu, TAO Wen-ju, WANG Zhao-wen, KONG Ling-yu  
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Zhao-wen, E-mail: wangzw@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** For the industrial anodes in Hall-Héroult cells, electric current can not pass through the stub hole bottom because of the large initial cast iron-to-carbon air gap at the stub hole bottom. A ringly-slotted stub hole design for the anode was proposed to solve this problem. The effects of the proposed design on the anode and the corresponding mechanism were evaluated by numerical simulations. The initial cast iron-to-carbon air gap at the stub hole bottom in the industrial anode under the gravity was 1.2 mm, while that in the proposed design was reduced to 0.2 mm. Consequently, the thermal expansion of the cast iron and the stub caused the air gap to close during operation, which resulted in the contact pressure at the bottom of stub hole, increased the electrical contact area and improved the current distribution. The ringly-slotted stub hole leads to an anode voltage reduction of 22 mV, but shows insignificant effect on the temperature distribution of anodes.

**Key words:** aluminium electrolysis energy conservation; anode structure optimization; anode voltage drop; numerical simulation; Multiphysics coupling

节能是铝电解研究的重要课题,降低槽电压是铝电解节能的根本途径之一.现代大型预焙阳极铝电解槽中,阳极电压降超过300 mV,约占槽电压的7.5%<sup>[1]</sup>.因此,优化阳极设计、降低阳极电压降是铝电解研究的热点.

研究表明,工业阳极存在一个较大的弊端——炭碗底部不导电<sup>[2-3]</sup>.为解决这一问题,研

究人员提出了在炭碗底部添加金属导电件的方法.

Tremblay等<sup>[4]</sup>提出一种扁平的炭碗结构,并在生阳极炭碗底部埋入三个金属导电薄片.经过炭块焙烧,使金属薄片与炭块紧密结合在一起.然后采用磷生铁浇铸,将钢爪、金属导电薄片和预焙炭块连接起来,从而增加阳极铁-炭接触面积.数

值模拟结果表明,该设计能够降低阳极电压降约 61 mV.

Dagoberto 等<sup>[5]</sup>提出在炭碗底部中心位置插入金属铝棒. 阳极运行时,铝熔化与钢爪底部相接触,联通钢爪与炭碗底部,从而使炭碗底部导电. 数值模拟结果表明该设计能够降低约 40 mV.

Berends 等<sup>[6]</sup>提出在炭碗底部插入金属钉. 金属钉能穿过铁炭间隙,将炭块和磷生铁连接起来,改善接触电阻. 工业测试表明,该方法可以降低阳极电压 20 ~ 40 mV.

然而添加金属导电件的方法存在一定的不足,难以在工业上应用. 首先,在炭碗底部增加导电件会增加预焙炭块制造的难度;其次,金属导电件不易回收,会增加成本;最后,炭碗底部增加金属导电件会增加残极高度,这不仅会增加炭耗,而且会缩短阳极周期,不利于电解槽稳定运行.

针对以上问题,本文提出一种能够改善阳极炭碗底部导电的新型炭碗结构设计,并采用数值模拟的方法考察该设计对阳极物理场的影响,评估其节能降耗效果,分析该设计节能的机理.

# 1 问题分析及解决方案

工业阳极炭碗的螺纹槽结构是炭碗底部不导电的根本原因. 在重力作用下,炭碗底部会产生一个 1 ~ 2 mm 的初始间隙<sup>[3]</sup>. 阳极运行时,磷生铁和钢爪的热膨胀无法使初始间隙闭合,因此炭碗底部无法导电.

工业阳极炭碗底部的铁 - 炭间隙是磷生铁和炭碗之间相对位移的结果. 如图 1 所示,铁 - 炭间隙形成的过程可以分为两阶段:1) 磷生铁浇铸后,液态磷生铁与炭碗之间不润湿,阳极冷却至室温后,磷生铁与炭碗之间由于冷却收缩产生间隙<sup>[7]</sup>;2) 换极过程中,当阳极被吊起时,导杆 - 钢爪 - 磷生铁整体向上移动,而磷生铁与炭碗之间存在接触间隙,因此首先磷生铁相对炭碗向上移动,然后炭碗凹槽与磷生铁建立初始接触. 由于炭碗螺纹凹槽与竖直方向有大约 15°的倾斜角度,磷生铁与炭碗建立接触的过程中产生较大的相对位移,所以炭碗底部出现较大的接触间隙. 此时的铁炭接触状态是阳极运行时磷生铁与炭碗建立接触的初始条件,对于阳极进入电解槽之后的物理场分布具有重要的影响<sup>[8-9]</sup>. 初始铁 - 炭间隙较大,阳极进入电解槽后热膨胀不足以使间隙闭合,因此磷生铁/钢爪无法与炭碗底部接触,从而无法导电.

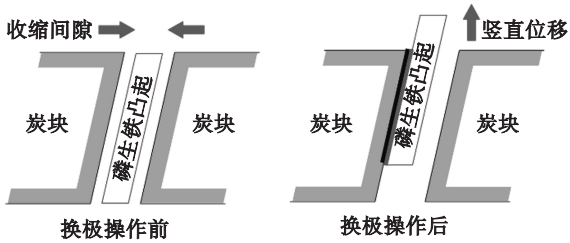


图 1 工业阳极炭碗底部间隙形成示意图  
Fig. 1 Schematic pictures of the air gap at the conventional stub hole bottom

根据上述分析可知,工业阳极螺纹凹槽存在一定的倾斜角度,导致了炭碗底部产生的铁 - 炭间隙较大. 针对这一问题,本文将炭碗中带有倾斜角度的螺纹形凹槽改为水平环形槽,如图 2 所示. 这样做的目的是减小磷生铁和炭块之间的接触滑动,从而降低炭碗底部的铁 - 炭间隙. 与在炭碗底部添加金属导电件的方法相比,此方法不需要增加其他部分,简单易行,且不影响残极高度.

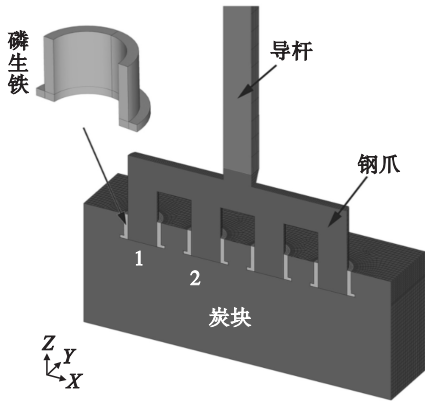


图 2 环形槽炭碗阳极  
Fig. 2 The anode with ringly-slotted stub hole

将左侧两个炭碗编号为炭碗 1(外侧炭碗)和炭碗 2(内侧炭碗). 由于阳极具有对称性,下文将以炭碗 1 和炭碗 2 为例进行分析.

# 2 模型描述

## 2.1 几何尺寸和网格划分

本文将对对比分析工业阳极和采用环形槽炭碗设计的阳极(简称环形槽阳极)的差异. 图 3 给出工业阳极炭碗和环形槽炭碗的结构和主要尺寸. 工业阳极炭碗的螺纹槽和环形槽的截面尺寸同为 15 mm × 15 mm. 计算所用工业阳极和环形槽阳极除炭碗结构外,其他部分完全相同.

环形槽炭碗设计改变了阳极连接结构,但并不增加所用磷生铁的体积和炭碗表面积. 每个工业阳极的磷生铁体积为  $7.22 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ,炭碗表面

积为  $0.548\text{ m}^2$ . 环形槽阳极每个炭碗所需磷生铁体积为  $7.30 \times 10^{-3}\text{ m}^3$ , 炭碗表面积为  $0.550\text{ m}^2$ .

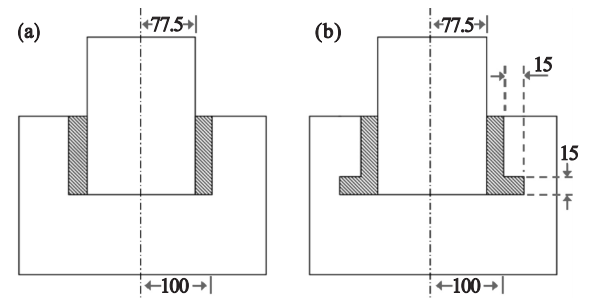


图 3 炭碗结构和几何参数 (mm)

Fig. 3 Dimensions and structure of stub hole (mm)

(a) —工业阳极炭碗; (b) —环形槽炭碗.

基于 ANSYS 软件平台,对几何模型各部分进行离散化,采用了高阶耦合场单元 Solid 226. 模型中考虑了钢爪、磷生铁和炭块之间的接触传热、接触导电和接触应力,为此采用了 Contac 174 单元和 Target 170 单元.

## 2.2 材料属性

模型中考虑了 4 种材料,包括炭块、钢爪、铝导杆和磷生铁. 炭块、钢爪和铝导杆的热导率和电阻率取自文献[10]. 磷生铁的热导率和电阻率取自文献[11]. 各部分的力学性能取自文献[12 – 13]. 计算电解质浮力需要电解质密度,本文中取  $2\,066\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [14].

## 2.3 计算流程及边界条件

阳极结构变化对阳极的生产及使用过程都会产生影响. 本文将依次考虑阳极组装、阳极更换和阳极运行 3 个过程,所以数值模拟也将分为 3 个步骤.

第 1 步,建立阳极组装的瞬态热场有限元模型,模型边界条件见文献[11]. 计算阳极组装的瞬态温度场,并采用温度场结果和几何参数,根据公式(1)计算阳极冷却至室温时的铁 – 炭间隙.

$$r_{\text{gap}} = \gamma + (l - \gamma) \times \alpha_{\text{iron}} \times (t_s - t_0). \quad (1)$$
$$\gamma = R_{\text{stub}} \times \alpha_{\text{stub}} \times (t_{\text{stub}} - t_0).$$

式中:  $r_{\text{gap}}$  表示室温铁 – 炭间隙;  $l$  表示室温下钢爪和炭碗之间的距离;  $R_{\text{stub}}$  表示室温下钢爪直径;  $\alpha_{\text{stub}}$ ,  $\alpha_{\text{iron}}$  分别为钢爪和磷生铁的热膨胀系数;  $t_{\text{stub}}$  是磷生铁凝固时的钢爪温度;  $t_s$  和  $t_0$  分别代表磷生铁凝固温度和室温,本文分别取  $980\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

第 2 步,建立阳极更换的瞬态力场有限元计算模型,以第 1 步中得出的室温铁炭间隙为初始条件,计算得出阳极在重力作用下的初始铁 – 炭接触间隙. 这一步中,对阳极施加重力和电解质浮

力,磷生铁和炭块之间的动摩擦因数取  $0.2$ [3].

第 3 步,引入随接触应力和温度变化的接触电阻率(见文献[2])和随铁 – 炭间隙和温度的接触热导率(见文献[10]),建立阳极运行的稳态热 – 电 – 应力场耦合有限元模型,其边界条件见文献[15]. 以第 2 步得出的初始铁 – 炭接触间隙为初始条件,应用此模型,计算阳极稳定运行时的物理场分布.

## 3 结果与讨论

### 3.1 铁 – 炭初始接触状态

经过阳极组装和阳极更换后,磷生铁与炭碗之间的初始接触间隙如图 4 所示. 图 4a 和 4b 给出了炭碗侧壁的初始铁 – 炭间隙分布. 在工业阳极炭碗中,初始铁 – 炭间隙自炭碗底部向上逐渐增大,在  $0.43 \sim 0.74\text{ mm}$  之间. 环形槽炭碗中,在磷生铁凸起的表面位置,初始铁 – 炭间隙在  $0.71\text{ mm}$  左右;在圆柱面位置,初始铁 – 炭间隙在  $0.46\text{ mm}$  左右.

重力导致磷生铁与炭碗之间产生相对移动,因此炭碗底部与磷生铁/钢爪分离,产生初始铁 – 炭间隙. 如图 4c 所示,工业阳极炭碗底部的初始铁 – 炭间隙在  $1.2\text{ mm}$  左右. 相比之下,环形槽阳极的底部的初始铁 – 炭间隙减小到  $0.2\text{ mm}$  左右,如图 4d 所示.

### 3.2 阳极热 – 电 – 应力场分布

以图 4 中的铁 – 炭间隙分布为初始接触条件,利用热 – 电 – 应力场耦合有限元模型,计算得出阳极稳定运行时的物理场分布.

图 5 为阳极稳定运行时的温度场分布,工业阳极和环形槽阳极温度场并没有显著差异,这表明采用环形槽炭碗设计的阳极对电解槽原有的热平衡影响也较小.

采用环形槽炭碗设计能够显著降低阳极电压降. 如图 6 所示,工业阳极的电压降约为  $295\text{ mV}$ ,而采用环形槽炭碗的阳极电压降减小约  $22\text{ mV}$ ,仅为  $273\text{ mV}$  左右.

环形槽阳极中电流密度减小、电流分布改善是阳极压降降低的根本原因. 图 7 给出工业阳极和环形槽阳极中炭碗 1 和 2 的电流密度分布. 由图 7a 可知,工业阳极的炭碗底部几乎是不导电的,电流密度最大值出现在炭碗侧壁的底部,这表明更多的电流从炭碗侧壁底部进入炭块,这一结果与文献[2 – 3]相符. 相比之下,如图 7b 所示,环形槽阳极炭碗的电流密度最大值出现在炭碗底

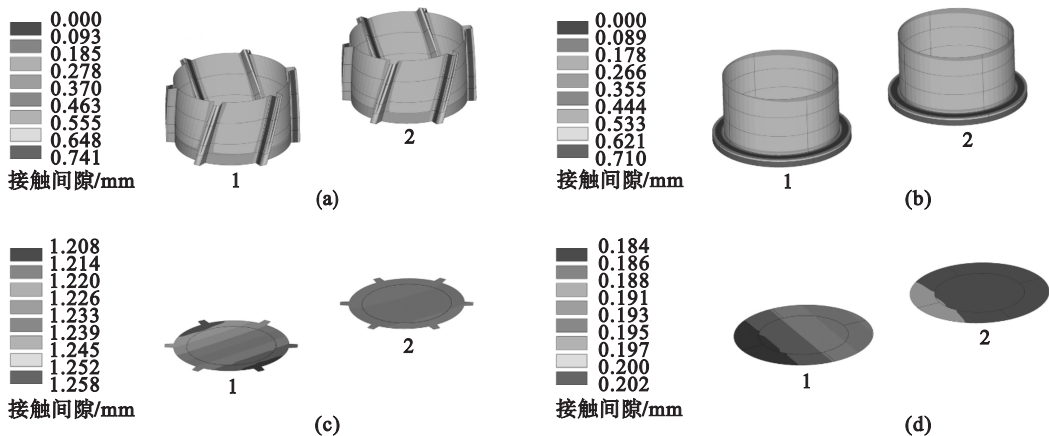


图 4 铁 – 炭初始接触间隙  
Fig.4 The cast iron-to-carbon contact gap

(a)—工业阳极炭碗侧壁；(b)—环形槽阳极炭碗侧壁；(c)—工业阳极炭碗底部；(d)—环形槽阳极炭碗底部.

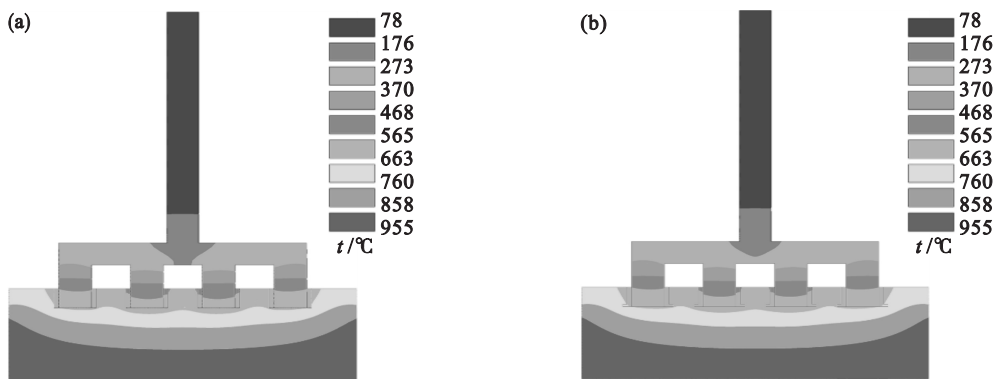


图 5 温度场分布云图  
Fig.5 The contours of temperature field

(a)—工业阳极；(b)—环形槽阳极.

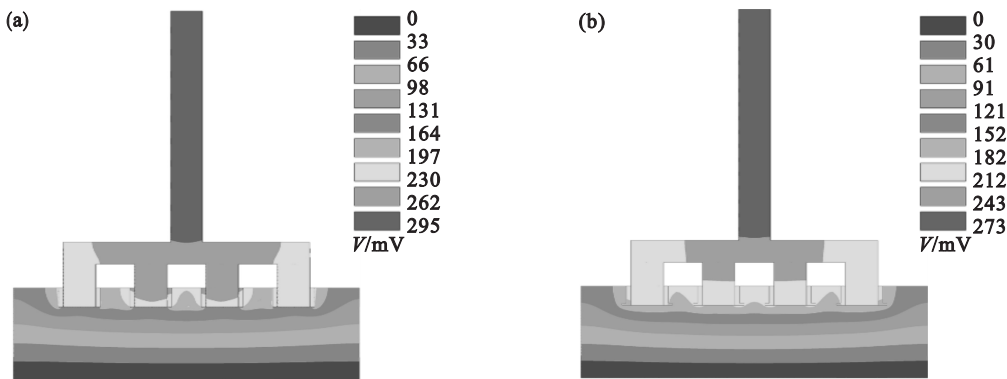


图 6 电势分布云图  
Fig.6 The contours of electrical potential

(a)—工业阳极；(b)—环形槽阳极.

部,表明炭碗底部有大量电流通过,炭碗底部的导电性得到了极大的改善.由于炭碗底部能够导电,环形槽阳极中电流密度分布更加均匀,电流密度值也减小约 40% .

环形槽阳极的铁 – 炭接触面积增加是其电流密度减小和电流分布改善的主要原因.图 8 给出了工业阳极和环形槽阳极的铁 – 炭接触应力分

布,提取图中各部分的实际接触面积列于表 1.由表 1 可知,环形槽阳极炭碗侧壁的实际接触面积比工业阳极炭碗的侧壁接触面积增加约 28% .如图 8c 所示,工业阳极炭碗底部不存在接触应力,这是因为初始铁 – 炭间隙较大(见图 4c),所以工业阳极的炭碗底部无法导电.而环形槽炭碗结构减小了炭碗底部的初始铁 – 炭间隙(见图 4d),当



阳极进入电解槽之后,钢爪和磷生铁产生的热膨胀能够使初始铁 – 炭间隙闭合,因此如图 8d 所

示,环形槽阳极的炭碗底部能够产生足够的接触应力,从而使得炭碗底部导电.

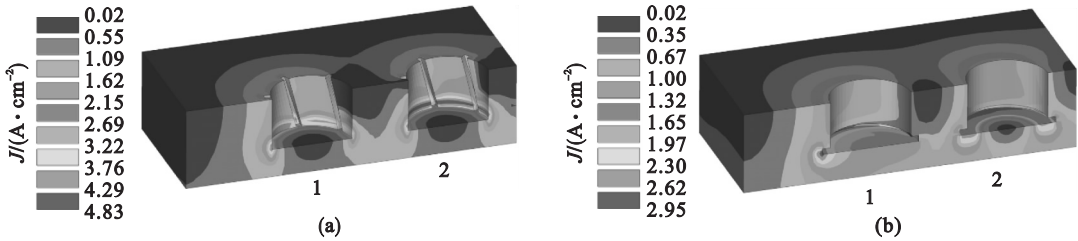


图 7 电流密度分布图  
Fig. 7 The current density profile  
(a)—工业阳极; (b)—环形槽阳极.

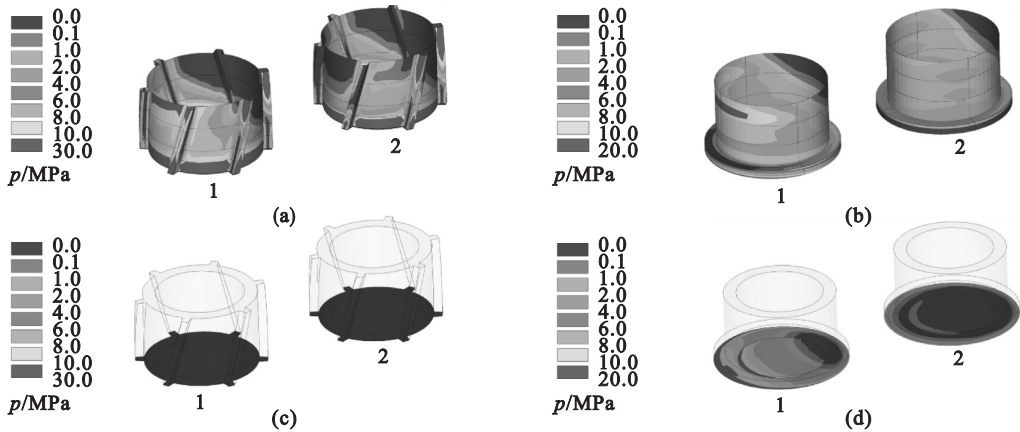


图 8 铁 – 炭接触应力  
Fig.8 The cast iron-to-carbon contact pressure

(a)—工业阳极炭碗侧壁; (b)—环型槽阳极炭碗侧壁; (c)—工业阳极炭碗底部; (d)—环型槽阳极炭碗底部.

表 1 实际接触面积  
Table 1 Real contact area m<sup>2</sup>

位置	工业阳极	环形槽阳极
炭碗侧壁	0. 235 5 (图 8a)	0. 305 6 (图 8b)
炭碗底部	0 (图 8c)	0. 078 2 (图 8d)

4 结 论

针对工业阳极炭碗底部不导电的问题,本文提出了一种环形开槽的炭碗设计. 与现有的改善炭碗底部导电的阳极设计相比,该设计具有不影响残极高度、简单易行的优点. 采用数值模拟的方法探索了该设计对阳极性能的影响及机理. 通过与工业阳极相对比,分析了环形槽炭碗设计的特点和优势.

数值计算结果表明,由于炭碗凹槽变为水平,磷生铁与炭碗在重力作用下的相对位移减小,使得炭碗底部的初始铁 – 炭间隙由 1.2 mm 下降到 0.2 mm 左右. 在阳极运行时,由于环形槽阳极的炭碗底部初始铁 – 炭间隙减小,炭碗底部能够产

生一定的接触应力,并且炭碗侧壁的实际接触面积也提高了约 28%. 环形槽阳极铁 – 炭接触面积增加降低了阳极电流密度,同时改善了阳极电流分布. 与工业阳极相比,环形槽阳极的电压降降低约 22 mV. 此外,环形槽阳极不影响阳极运行时的温度分布.

参考文献:

[ 1 ] 邱竹贤. 预焙槽炼铝 [ M ]. 3 版. 北京: 冶金工业出版社 2005: 28 – 37.  
(Qiu Zhu-xian. Aluminium metallurgy in prebaked anode reduction cells [ M ]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 28 – 37)  
[ 2 ] Fortin H, Kande V, Fafard M. FEM analysis of voltage drop in the anode connector induced by steel stub diameter reduction [ J ]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2012, 52: 71 – 82.  
[ 3 ] Gunasegaram D R, Molenaar D. Towards improved energy efficiency in the electrical connections of Hall-Héroult cells through finite element analysis ( FEA ) modeling [ J ]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 93: 174 – 192.  
[ 4 ] Tremblay S O, Marceau D, Kocafe D, et al. Development of a new approach to increase the electrical performance of anodic assemblies [ C ] // *Light Metals 2015*. Warrendale, PA: TMS, 2015: 1175 – 1180.

- [5] Dagoberto S S, Vanderlei G. Design options to reduce energy consumption in aluminium electrolysis cells [C]//34th International ICSOBA Conference. Quebec, 2016:505 – 517.
- [6] Berends W, Haley S, Gagnon M. Low resistance anode assembly using steel stubhole conductors across the cast iron to carbon interface [C]//Light Metals 2016. Warrendale, PA; TMS, 2016:965 – 969.
- [7] Richard D, Goulet P, Trempe O, et al. Challenges in stub hole optimisation of cast iron rodded anodes [C]//Light Metals 2009. Warrendale, PA; TMS, 2009:543 – 548.
- [8] Richard D, Fafard M, Lacroix R, 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.
- [9] Molenaar D, Kilpatrick T, Montalto A. Experimental investigation of factors affecting the electrical performance of the stub to carbon connection [C]//Light Metals 2013. Warrendale, PA; TMS, 2013:1359 – 1364.
- [10] Chaouki H, Baiteche M, Jacques A, et al. Finite element analysis of slot size effect on the thermal-electrical behaviour of the anode [C]//Light Metals 2017. Warrendale, PA; TMS, 2017:1315 – 1323.
- [11] Li T F, Tao W J, Wang Z W, et al. Numerical simulation on the transient temperature field of anode rodding in aluminium reduction cells[J]. *Metals*, 2018, 8(12):1026 – 1048.
- [12] Li H S, Cao X, Tian Y F. Optimization of anode structure in aluminum reduction cells under low power consumption[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(10):2960 – 2969.
- [13] Wilkening S, Cote J. Problems of the stub-anode connection [C]//Light Metals 2007. Warrendale, PA; TMS, 2007:865 – 873.
- [14] Wang Q, Li B K, Fafard M. Effect of anode change on heat transfer and magneto-hydrodynamic flow in aluminum reduction cell[J]. *JOM*, 2016, 68(2):610 – 622.
- [15] 李拓夫, 陶文举, 王兆文, 等. 磷生铁和钢爪尺寸对铝电解槽阳极物理场的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(6):828 – 834.
- (Li Tuo-fu, Tao Wen-ju, Wang Zhao-wen, et al. Effects of the size of cast iron and stub on the physical field of anode in aluminium reduction cell [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2020, 41(6):828 – 834. )

(上接第 1679 页)

- [7] Wojke N, Bewley A, Paulus D. Simple online and real time tracking with a deep association metric [C]//IEEE International Conference on Image Processing. Beijing, 2017:3645 – 3649.
- [8] Sadeghian A, Alahi A, Savarese S. Tracking the untrackable; learning to track multiple cues with long-term dependencies [C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Venice, 2017:300 – 311.
- [9] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, et al. Generative adversarial nets [C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Montreal, 2014:2672 – 2680.
- [10] Zheng Z, Zheng L, Yang Y. Unlabeled samples generated by GAN improve the person re-identification baseline in vitro [C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Venice, 2017:3754 – 3762.
- [11] 孙亚圣, 姜奇, 胡洁, 等. 基于注意力机制的行人轨迹预测生成模型[J]. 计算机应用, 2019, 39(3):668 – 674.
- (Sun Ya-sheng, Jiang Qi, Hu Jie, et al. Attention mechanism based pedestrian trajectory prediction generation model[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(3):668 – 674. )
- [12] Gupta A, Johnson J, Li F F, et al. Social GAN: socially acceptable trajectories with generative adversarial networks [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, 2018:2255 – 2264.
- [13] Milan A, Leal-Taixe L, Reid I, et al. MOT16: a benchmark for multi-object tracking[J/OL]. arXiv preprint arXiv:1603.00831, 2016:1 – 12.
- [14] Bewley A, Ge Z Y, Ott L, et al. Simple online and real time tracking [C]//IEEE International Conference on Image Processing. Phoenix, 2016:3464 – 3468.