

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2020.09.011

# 铝电解槽中气泡行为的可视化研究现状与进展

李松<sup>1</sup>, 石忠宁<sup>2</sup>, 赵志彬<sup>3</sup>

(1. 六盘水师范学院 化学与材料工程学院, 贵州 六盘水 553000;

2. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819;

3. 沈阳铝镁设计研究院有限公司, 沈阳 110001)

**摘要:** 铝电解过程阳极气泡的生长机理、运动规律及对电解质运动的影响对电解槽的稳定运行有非常重要的作用。研究铝电解槽阳极气泡, 最重要的是能够直接观察到阳极气泡的生长和运动规律。为了实现电解槽中气泡行为的可视化, 目前国内外学者建立了各种模型来研究电解过程中气泡的特性, 其中主要的研究模型为室温水模型、低温电解模型、高温电解模型和数值模拟模型。对这四种模型的研究现状进行了分析, 展望了其发展前景。

**关键词:** 铝电解; 阳极气泡; 研究进展

中图分类号: TF821 文献标志码: A 文章编号: 2095-1744(2020)09-0066-06

## Visual Research Status and Development of Bubble Behavior in Aluminum Electrolytic Cell

LI Song<sup>1</sup>, SHI Zhongning<sup>2</sup>, ZHAO Zhibin<sup>3</sup>

(1. School of Chemical and Materials Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553000, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

3. Shenyang Aluminum and Magnesium Engineering and Research Institute, Shenyang 110001, China)

**Abstract:** The growth mechanism, movement of anode bubbles and its influence on the electrolyte flow are very important for cell stability in aluminum reduction cells. One of the most important aspects in studying anode bubbles is to directly observe and investigate the detailed behavior of anode bubbles. To visualize the behavior of bubbles in electrolytic cells and study their characteristics in electrolysis, domestic and foreign scholars have established variety models, such as the room temperature water model, low-temperature electrolysis model, high-temperature electrolysis model, and numerical simulation model. With this background, this paper analyzes the research status and development prospects of the four models above.

**Key words:** aluminum electrolysis; anodic bubble; research progress

收稿日期: 2020-01-18

基金项目: 贵州省教育厅自然科学项目(黔教合 KY 字[2017]273); 六盘水师范学院重点学科项目(LPSSYZDXK201708); 六盘水师范学院科技创新团队项目(LPSSYKJTD201801, LPSSYKJTD201905); 六盘水市重点实验室项目(52020-2018-03-04, 52020-2019-05-09); 六盘水市科技创新团队项目(52020-2019-05-08)

Fund: Supported by the Guizhou Provincial Department of Education Foundation (Qianjiaohe KYZi[2017]273) Project; The Key Cultivation Disciplines of Liupanshui Normal University (LPSSYZDXK201708) Project; The Science and Technology Innovation Group of Liupanshui Normal University (LPSSYKJTD201801, LPSSYKJTD201905) Project; The Liupanshui Key Laboratory(52020-2018-03-04, 52020-2019-05-09) Project; The Science and Technology Innovation Group of Liupanshui (52020-2019-05-08) Project.

作者简介: 李松(1988—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事熔盐电解研究。

引用格式: 李松, 石忠宁, 赵志彬. 铝电解槽中气泡行为的可视化研究现状与进展[J]. 有色金属工程, 2020, 10(9): 66-71.

LI Song, SHI Zhongning, ZHAO Zhibin. Visual Research Status and Development of Bubble Behavior in Aluminum Electrolytic Cell[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(9): 66-71.

阳极气泡行为是近几十年来铝电解工作者的研究热点之一。在铝电解中,阳极底面发生阳极反应生成  $\text{CO}_2$  等气体。阳极气体的产生机理对温室气体(主要是  $\text{CF}_4$  和  $\text{C}_n\text{F}_{2n+2}$ , 其温室潜能分别是  $\text{CO}_2$  的 6 000 倍和 9 200 倍)的产生排放研究有很大帮助。由于气泡的导电性差,气泡在阳极底部的产生、长大和聚集对槽内电场的分布有很大影响。当气泡完全聚集在阳极底掌形成大气泡层时,此气泡层阻止了电流的传递,使电压显著提高,增加了能耗。另一方面,气泡运动是推动电解质循环流动的主要驱动力之一,有助于电解槽内氧化铝的传输和热量的传递。

因此,研究电解槽内阳极气泡的生长机理、运动规律及对电解质熔体运动的影响对电解槽的稳定运行有非常重要的作用。研究铝电解槽阳极气泡的方向之一是要实现阳极气泡行为的可视化,也就是能

够直接观察到阳极气泡的生长和运动规律。为了实现铝电解槽中气泡行为的可视化,国内外学者建立了各种模型来观察和研究电解过程中气泡的特性及对电解槽的影响,其中主要的研究模型为室温水模型、低温电解模型、高温电解模型和数值模拟模型。本文对这几种模型的研究现状进行了总结分析,并展望了其发展前景。

## 1 室温水模型

铝工作者们发现室温下水的黏度和表面张力等性质与高温电解质相似(见表 1),利用相似性质建立了室温水模型。此种模型实验成本低,观察和测量方便容易,还可以根据电解槽的实际情况,建立与工业级别尺寸相同的槽模型来模拟不同工艺条件和不同操作手段下电解槽内气泡的行为,因此很多学者利用室温水模型开展了这方面的研究。

表 1 水模型与工业槽物理性质对比<sup>[1]</sup>

Table 1 Comparison of physical properties between water model and industrial cell

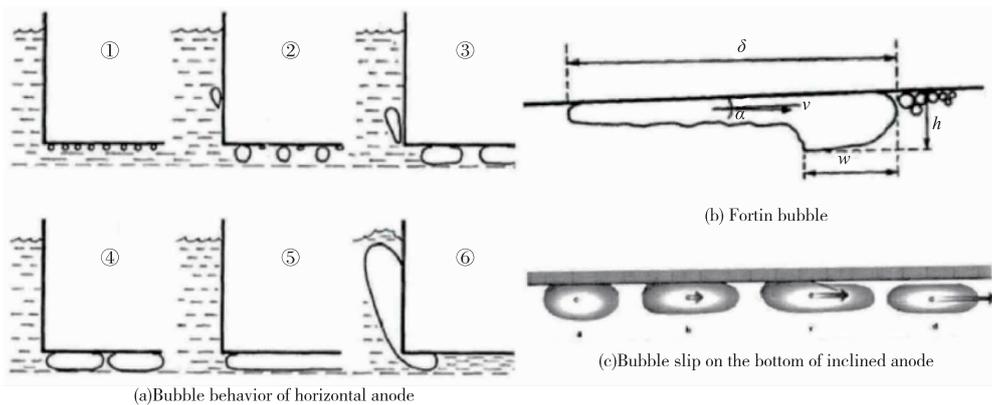
	Water model	Industrial cell
Electrolyte	Water	Fluoride melt
Electrolyte temperature/ $^{\circ}\text{C}$	25	960
The kinetic viscosity of the electrolyte/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$1.003 \times 10^{-2}$ (Change by adding an additive, such as butanol)	$3.0 \times 10^{-3}$
Electrolyte surface tension/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	0.072 (Change by adding an additive, such as butanol)	0.132
Anode material	Porous material	Carbon material
Gas	Air	Carbon monoxide, carbon dioxide, fluorocarbons

1984 年 FORTIN 等<sup>[2]</sup>在 TMS 上做了关于水模型模拟铝电解槽阳极气体行为的报告。他建立了 150 kA 电解槽的二维全尺寸水模型,通过向多孔介质阳极内鼓入压缩空气,模拟阳极气体的产生,用照相机记录气泡行为,并对气泡行为进行了分析,如图 1 所示。由图 1(a)可见,气泡的形成过程共有 6 个阶段,对于水平阳极,小气泡在阳极底面产生,直径长到 5 mm 左右开始横向生长,不同的气泡聚集成大气泡,最后形成一个完全覆盖阳极底掌的气泡层,当气泡边缘达到阳极边缘,气泡快速脱离阳极,留下空白的阳极表面,开始进行下一个气泡循环。由图 1(b)可见,在倾斜阳极上,气泡析出时头部大、尾部较小,这种气泡被称为 Fortin 气泡。由图 1(c)可知,倾斜阳极底面滑移的气泡聚集成几个大气泡,然后依次析出。

CHEN 等<sup>[3]</sup>也做了类似的研究,通过摄像机记录气体通过小直径的管子注入阳极底面模拟气体产生,并研究了阳极倾斜角度、通气管直径、通气速度

对气泡脱离时的气泡体积和上升速度的影响,发现阳极倾斜角度增大可以增大气泡的脱离速度,同时减小气泡脱离时的体积。SOLHEIM 等<sup>[4-5]</sup>通过室温水模型研究了气泡引起的电解质循环,发现电解质循环速度随气体生成速度增大、阳极倾角增大、熔体黏度减小而增大。KISS 等<sup>[6]</sup>也采用水模型研究了气泡行为,但是在气泡产生方面,他采用了很巧妙的方法,加热代表阳极的金属板,在金属板底面生成气体,以此模拟电解槽阳极产生气体。研究发现当阳极尺寸够大时,聚合作用形成的大气泡并不是完美的圆形;运动中的大气泡同样有一个厚厚的头在前面引导,在后面拖着很长的小尾巴。

虽然室温水模型的实验设备简单、成本低、便于观察和测量、应用范围广泛,但是由于气泡产生机理的不同,根据水模型观察到的气泡行为和工业电解槽上的存在一些差异,但不可否认的是,室温水模型在气泡引起的流动方面取得了很好的成绩。

图 1 阳极底部气泡行为<sup>[2]</sup>Fig. 1 Bubble behavior at the bottom of anode<sup>[2]</sup>

## 2 低温电解模型

室温水模型可以在宏观层面预测电解质流动,但在气泡产生、生长、运动等特性方面与真实电解过程存在差异。所以,一些学者建立了低温条件下的电解模型。采用铝电解槽的槽结构,通过电解低温乃至室温的电解质模拟气泡产生以及对铝电解槽的影响。在电解质选取方面,不同学者有不同选择,电解质主要集中在 NaOH 溶液、CuSO<sub>4</sub> 溶液、水和 NaCl 熔盐电解。QIAN 等<sup>[7]</sup>以 NaOH 溶液模拟工业电解质,研究两种阳极在不同设计(开槽)下的气泡行为。阳极一种是表面光滑的石墨电极,另一种是铝电解槽中用过的碳素阳极。实验中用电源连接阴阳极,电解得到气泡。研究发现对于开槽阳极,小气泡很容易在槽底聚集并合并成大气泡,而在未开槽阳极,气泡形成扁平状气泡囊,气泡静止或者运动速度很小。薛玉卿等<sup>[8]</sup>以 CuSO<sub>4</sub> 为电解质,石墨为阳极,通过电解实验模拟工业铝电解中阳极气体的运动规律和气泡运动对电解质运动的影响规律。结果表明,当阳极严格水平时,气泡会一直长大,直到接近阳极底掌边缘然后沿阳极大侧面释放;当阳极倾斜时,大气泡在运动途中合并沿途的小气泡。

在碳阳极底部存在较大的气泡甚至出现气泡层,这些气泡的存在对槽压降影响很大,能增大电阻,进而增大能耗,这一点引起了很多研究者的兴趣。THOMAS 等<sup>[9]</sup>为了研究气泡存在对槽压降的影响,引入非连续的粒子(空心陶瓷粒子)模拟气泡,电解质为 28% 氯化钠和 73% 氯化铅熔盐。在实验时把电极插入到电解质,测量没有气泡存在时的电阻,然后提高电极,向电解质中投入空心陶瓷球,降低电极,再次测量电阻,若两次测量值不同,即可说

明气泡存在对槽电阻的影响。研究者考察了粒子形状、大小对电阻增加的影响,发现气泡产生的电阻大小主要由气泡体积决定。

目前低温电解模型更多的应用在对电解槽内电场的研究上,其气泡产生机理,气液表面张力等性质与真实电解槽还有一定差异,其模拟的准确性也存在一定的缺陷。

## 3 高温电解模型

研究铝电解槽气泡行为最直观和最有效的方法是直接在电解情况下观察和测量阳极气泡,目前学者在这方面也做了不少工作。研究方法主要有两种,一是透明槽技术,二是 X 光照相技术。

铝工作者很早就开始尝试将铝电解过程可视化。1975 年,HAUPIN 等<sup>[10]</sup>用装有蓝宝石窗口的石墨坩埚进行了透明槽实验,观测到了气泡在阳极产生的过程。研究发现氧化物(氧化铝或氧化硅)浓度降低,气泡的体积会变大,气泡体积随电流密度的增大而增大。但这种方法存在致命缺陷:成本高、实验时间短。20 世纪 80 年代,邱竹贤院士发明了低成本的透明槽<sup>[11-12]</sup>。此种透明槽是一种以石英为电解坩埚的电解可视装置,大大降低了高温透明槽的成本,利用透明槽可在阳极底部观察到阳极气泡。GAO 等<sup>[13]</sup>和 WANG 等<sup>[14]</sup>改进了石英坩埚的结构,将坩埚分为两个部分:阴极室和阳极室。在两室之间有一层石英壁,石英壁的底面有一条 2 mm 的小缝隙,为熔盐的导电通道,这样就避免了铝雾扩散到阳极室影响观测视线。他们用这种透明槽研究了石墨阳极和惰性阳极上的气泡行为。结果发现,在碳素阳极上气泡聚集成大气泡,然后快速脱离。2015 年该团队继续开发了多角度观测新型高温透

明电解槽<sup>[15-16]</sup>,首次直接观察到了电解状态下的阳极底面气泡行为。研究了不同阳极不同电流密度下气泡的产生、长大及聚合行为,气泡排出周期以及对应的电压降关系。

除了通过透明电解槽直接观测外,很多学者利用X光透射的特性,将X光照相技术应用到铝电解槽气泡行为的研究上。UTIGARD等<sup>[17]</sup>和CASSAYRE等<sup>[18-19]</sup>利用X光照相机技术研究了电解过程中石墨阳极上的气泡行为。因为X光通过气泡,所以气泡所在位置为白色,而对于高密度的材料,X光不易通过,所以在照片中显示为黑色。研究发现,在电解过程中阳极侧面生成很多的小气泡,阳极底部生成尺寸较大的大气泡。而惰性阳极气泡行为与碳素阳极完全不同,气泡并没有聚合现象,在惰性阳极周围形成一层泡沫状气泡层。气泡的直径大概0.1 mm,比碳素阳极气泡小10~30倍。

高温电解模型可以观察真实电解条件下的气泡的生成行为,但是在研究气泡行为中也存在问题,由于实验室所使用的阳极尺寸很小(60~70 mm),将得到的研究结果放大到工业槽中是否适用,仍需进一步的研究。由于实验成本高,改变阳极的结构和工艺参数对气泡影响的研究也比较麻烦,很难得到在不同阳极结构和不同阳极倾角的气泡行为结果。

#### 4 数值模拟模型

随着信息技术的发展,计算流体力学(CFD)在航空、电力、水力、化工等方面已得到广泛应用,越来越多的冶金工作者开始用数值模拟技术研究铝电解过程中的一些难题,其数值模拟研究主要集中在对气泡行为模拟和对气泡引起的流场模拟方面。

密苏里科技大学的WANG等<sup>[20]</sup>在气泡行为的数值模拟方面做了很好的工作。他们以全尺寸水模型为基础建立了数值模拟模型,研究水模型中气泡流动导致的现象。对大气泡的形状、运动、逸出频率和气泡的流动情况都进行了预测,并用相同尺寸的数学模型进行了验证。澳大利亚的FENG等<sup>[21-22]</sup>在室温下,用CFX软件来模拟电解槽中气泡导致的电解质的流动,CFX软件是商业CFD软件,可进行流体力学、传热学、电磁学等模拟计算。计算结果用水模型实验进行验证,用PIV测量水流速度,通过对比,发现实验测得的结果和模拟结果有较好的相似性。PIV又称粒子图像测速法,是一种瞬态、多点、无接触式的激光流体力学测速方法测量流体速度,后续有多位学者采用此文中的PIV数据为数值模

拟模型进行验证。詹水清等<sup>[23-26]</sup>对铝电解槽熔体内阳极气泡-电解质气液两相流进行数值模拟,计算考虑了阳极气泡的聚集和破裂情况,得到电解质的运动、气泡体积和气泡尺寸分布等信息。

近年来,学者越来越关注电解槽中气泡和电磁力共同作用时对电解质的影响,并取得了较大进展。如SOLHEIM等<sup>[27-28]</sup>早就开始用计算机数值模拟技术结合室温水模型研究气泡引起的电解质循环,发现磁场引起的铝液波动对电解质的流动影响较小。赵志彬<sup>[29]</sup>采用高温透明槽实验结合数值模拟的方法对铝电解过程产生的阳极气泡进行了研究,数值模拟结果表明只有当磁场强度大到一定程度后(1 000倍于工业测量值),电解质才能在电磁力的作用下推动气泡运动,遗憾的是该工作未经过实验验证。SUN等<sup>[30-31]</sup>建立了铝电解槽电-磁-流场三维非稳态数学模型,分别考察了电磁力与气泡对槽内流场分布及界面波动的影响。研究表明,气泡和电磁力均影响电解质-铝液界面的稳定性,且电磁力对电解质-铝液界面的稳定性影响效果更明显。SUN的研究结果和SOLHEIM、赵志彬等的研究结果有差异,说明电磁力和气泡对电解槽内电解质的影响机理还需要再深入研究。

数值模型起步晚,但其强大的解决问题的能力是其他模型不能比拟的,但是数值模拟也存在缺点,目前数值模拟技术还不是很成熟,其应用受到验证模型的限制。在数值模拟中,必须要有室温水模型、低温电解模型和工业测试数据的验证,否则其可信性存在很大问题。

#### 5 结论与建议

目前关于铝电解槽阳极气泡行为的研究日趋成熟,各个模型都取得了有价值的研究成果,但是并没有一种模型是十全十美的,怎样建立一种完美的模型,实现铝电解槽气泡行为的真实再现,是当今铝工作者的研究热点之一。

应将室温水模型、低温电解模型、高温电解模型和数值模拟模型这四种模型有机结合,学者之间应加强合作、取长补短。在气泡产生机理研究上采用高温电解模型和低温电解模型模拟气泡的产生机理和气泡对电场的影响,从而得到一些关于气泡行为的关键数据。在气泡的流体动力学运动方面,结合室温水模型和低温电解模型研究气泡对电解质流动及质液界面的影响,从而得到一些关于气泡流体动力学的关键数据。以前三种模型中得到的数据为基

础,建立符合物理相似、数学相似的 CFD 模型、铝电解槽电-磁-流场耦合模型,同时不断充实和完善 CFD 模型,不断提高数值模拟的准确性和可信性,最终达到用建立的 CFD 模型指导工业生产的目的。

#### 参考文献:

- [1] ZHAO Z B, FENG Y Q, SCHWARZ M P, et al. Numerical modeling of flow dynamics in the aluminum smelting process: Comparison between air-water and CO<sub>2</sub> cryolite systems[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 48(2): 1200-1216.
- [2] FORTIN S, GERHARDT M, GESING A J. Physical modeling of bubble behavior and gas release from aluminum reduction cell anodes[C]//Los Angeles: The Minerals, Metals & Materials Society, 1984: 385-395.
- [3] CHEN J J J, QIAN K X, ZHAO J C. Resistance due to the presence of bubbles in an electrolytic cell with a grooved anode[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2001, 79(4): 383-388.
- [4] SOLHEIM A, JOHANSEN S T, ROLSETH S, et al. Gas induced bath circulation in aluminum reduction cells[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1989, 19(5): 703-712.
- [5] SOLHEIM A, THONSTAD S J. Model cell studies of gas induced resistance in Hall-Héroult cells[C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 1987: 239-245.
- [6] KISS L I, PONCSAK S, TOULOUSE D, et al. Detachment of bubbles from their nucleation sites[C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2004: 159-167.
- [7] QIAN K, CHEN Z D, CHEN J J J. Bubble coverage and bubble resistance using cells with horizontal electrode[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1998, 28(10): 1141-1145.
- [8] 薛玉卿,周乃君,包生重. 铝电解槽内阳极气泡运动的冷态模拟[J]. 中国有色金属学报, 2006, 26(10): 1823-1828.  
XUE Yuqing, ZHOU Naijun, BAO Shengzhong. Normal temperature analogue experiment of anode bubble's behavior in aluminum electrolysis cells[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 26(10): 1823-1828.
- [9] THOMAS M, HYDE B J, WELCH. The gas under anodes in aluminum smelting cells. Part I: Measuring and modeling bubble resistance under horizontally oriented electrodes[C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 1997: 333-340.
- [10] HAUPIN W E, MCGREW W C. See-through hall-Héroult cell[J]. Aluminium, 1975, 51(4): 273-275.
- [11] QIU Z X, FAN L M, GRJOTHEIM K. Dissolution of aluminum in cryolite-alumina melts (see-through cell studies)[C]//New Orleans: The Minerals, Metals & Materials Society, 1986: 525-533.
- [12] QIU Z X, FAN L M, GRJOTHEIM K, et al. Formation of metal fog during molten salt electrolysis observed in a see-through cell[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1987, 17(4): 707-714.
- [13] GAO B L, HU X W, XU J L, et al. Study on bubble behavior on anode in aluminum electrolysis-Part II [C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2006: 467-470.
- [14] WANG Z W, GAO B L, LI H T. Study on bubble behavior on anode in aluminum electrolysis-Part I [C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2006: 463-466.
- [15] ZHAO Z B, WANG Z W, GAO B L, et al. Observation of anodic bubble behaviors using laboratory scale transparent aluminium electrolysis cells[C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2015: 801-806.
- [16] ZHAO Z B, WANG Z W, GAO B L, et al. Anodic bubble behavior and voltage drop in a laboratory transparent aluminium electrolysis cell[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(3): 1962-1975.
- [17] UTIGARD T, TOGURI J M, IP S W. Direct observation of the anode effect by radiography[C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 1988: 127-130.
- [18] CASSAYRE L, UTIGARD O, BOUVET S. Visualizing gas evolution on graphite and oxygen-evolving anodes[J]. Journal of Minerals, Metals and Materials Society, 2002, 54(5): 41-45.
- [19] CASSAYRE L, PLASCENCIA G, MARIN T, et al. Gas evolution on graphite and oxygen-evolving anodes during aluminium electrolysis [C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2006: 421-425.
- [20] WANG Y F, ZHANG L F, ZUO X J. Simulation of the fluid flow-related phenomena in the electrolyte of an aluminum electrolysis cell[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2011, 42(5): 1051-1064.
- [21] FENG Y Q, YANG W, COOKSEY M. Development of bubble driven flow CFD model applied for aluminium smelting cells[J]. The Journal of Computational Multiphase Flows, 2010, 2(3): 179-188.
- [22] FENG Y Q, SCHWARZ M P, YANG W, et al. Two-phase CFD model of the bubble-driven flow in the molten electrolyte layer of a hall-héroult aluminum

- cell[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(4):1959-1981.
- [23] 詹水清,周子民,李茂,等. 开孔阳极铝电解槽熔体中气液两相流数值模拟[J]. 化工学报, 2013, 64(10): 3612-3619.
- ZHAN Shuiqing, ZHOU Jiemin, LI Mao, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in aluminum reduction cells with perforated anodes[J]. CIESC Journal, 2013, 64(10):3612-3619.
- [24] ZHAN S Q, LI M, ZHOU J M, et al. A CFD-PBM coupled model predicting anodic bubble size distribution in aluminum reduction cells[C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2014:777-782.
- [25] ZHAN S Q, WANG Z W, YANG J H, et al. 3D numerical simulations of gas-liquid two-phase flows in aluminum electrolysis cells with a CFD-PBM couple model[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(30):8649-8662.
- [26] ZHAN S Q, YANG J H, WANG Z T, et al. CFD simulation of effect of interphase forces and turbulence models on gas-liquid two-phase flows in non-industrial aluminum electrolysis cells[J]. Journal of Minerals, Metals and Materials Society, 2017, 69(9):1589-1599.
- [27] SOLHEIM A, JOHANSEN S T, ROLSETH S. Gas induced bath circulation in aluminium reduction cells[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1989, 19(5):703-712.
- [28] SOLHEIM A, JOHANSEN S T, ROLSETH S, et al. Gas driven flow in Hall-Heroult cells[C]//Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 1989: 245-252.
- [29] 赵志彬. 铝电解气泡行为的高温实验研究与数值仿真[D]. 沈阳:东北大学, 2016:91-101.
- ZHAO Zhibin. High temperature experimental study and numerical simulation of bubble dynamics in aluminum electrolytic process[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016:91-101.
- [30] SUN M J, MOLLAABBASI R, LI B K, et al. Effects of contact angle on single and multiscale bubble motions in the aluminum reduction cell[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(37): 17568-17582.
- [31] SUN M J, LI B K, LI L M. Multiscale simulation of bubble behavior in aluminum reduction cell using a combined DBM-VOF-MHD method[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(8):3407-3419.