

粉煤灰所产新型氧化铝电解过程中 流场仿真研究

闫淑君

(中国神华哈尔滨乌素露天煤矿循环经济产业孵化基地, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

[摘要] 本文以粉煤灰提取的新型氧化铝为电解原料,根据新型氧化铝性能特点,基于 200 kA 铝电解槽开展仿真计算,研究电解槽内电解质流场和新型氧化铝浓度的分布,分析影响新型氧化铝溶解、扩散及对流的传质因素,掌握新型氧化铝电解过程中溶解输运性能。结果显示,新型氧化铝在电解质中溶解速度快、分散均匀,电解质流场稳定,电解质出铝端和烟道端角部位置的氧化铝溶解最快。在实际生产中,通过合理配置下料器及下料点控制氧化铝浓度的分散、输运,可保持氧化铝浓度分布均匀、电解质流场稳定,有利于减少阳极效应和提高电流效率。

[关键词] 粉煤灰;一步酸溶法;流场仿真;新型氧化铝;流场分布;输运性能;电解质

[中图分类号] TF821

[文献标志码] B

[文章编号] 2097-2423(2023)02-0039-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2023.02.009

0 前言

某公司采用“一步酸溶法”以粉煤灰为原料生产的新型氧化铝纯度达到 99% 以上,其颗粒粒径、磨损指数、流动性等颗粒性质与拜耳法所产氧化铝存在一定差异^[1]。新型氧化铝粒度分布较宽、细颗粒含量较多、磨损系数高、颗粒松装密度较小等。鉴于新型氧化铝和拜耳法所产氧化铝的性质差异,发现阻碍新型氧化铝在电解槽中工业化应用的主要是一些工程问题,如氧化铝输送、添加的顺畅度,颗粒破碎程度以及细颗粒飞扬损失等。铝电解生产过程中,原料氧化铝加入电解槽后,会随着熔体的运动输送分散至电解槽的各个区域,同时发生溶解、扩散及对流的传质过程^[2-3]。本文通过搭建多相流仿真模型,模拟电解槽内新型氧化铝的瞬态输运过程,分析影响新型氧化铝输运的因素,为铝电解生产提供理论指导,解决工业应用问题。

1 流体模型参数、边界条件的设定

本模型中包含电解质(连续相)-固(氧化铝颗粒)-阳极气泡(离散相)三相,而电解质相则包含冰晶石和氧化铝两种组分。本文中流体计算模型属于“电解质-阳极气泡”瞬态两相流,为了提高瞬态计算的效率和迭代过程的收敛能力,忽略铝液相对电解质区域氧化铝输运的影响;同时,为解析氧化铝输运过程的流体动力学特征,将电解质视为含氧化铝的多组分相,故又属于多组分流的研究范畴。

新型氧化铝平均粒度小,活性高,溶解速度为 $2.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,较拜耳法氧化铝溶解速度($1.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)快 40%。新型氧化铝和拜耳法氧化铝的溶解时间见表 1。

表 1 不同氧化铝样品单次溶解时间

试样	温度/°C	不同氧化铝浓度电解质溶解时间/min			
		0%	1%	2%	3%
酸法 Al ₂ O ₃	955	6	6	4	7
拜耳法 Al ₂ O ₃	955	9	9	10	12

考虑到阳极气泡尺寸很小且体积分数也较小,故设置电解质为连续相,阳极气泡为离散相。模型内的流体类型和物性参数设置分别见表 2 和表 3,边界条件见表 4。

[收稿日期] 2022-10-15

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(51674302)

[作者简介] 闫淑君(1986—),男,硕士,工程师,研究方向煤炭伴生资源综合利用及铝电解。

[引用格式] 闫淑君.粉煤灰所产新型氧化铝电解过程中流场仿真研究[J].绿色矿冶,2023,39(2):39-43.

表2 流体模型

流体相	流体类型	壁面条件	湍流模型
电解质	连续相	无滑移	$\kappa-\varepsilon$ 模型
阳极气泡	离散相	自由滑移	$\kappa-\varepsilon$ 模型

表3 物性参数

流体相	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	黏度/ $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-2}$	表面张力/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
电解质	2 046.3	2.136×10^{-3}	0.522
阳极气泡	0.398	5.500×10^{-5}	—

表4 边界条件

位置	边界类型	边界状态	质量流率/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
阳极底掌	入口	气体质量流入	0.027
阳极侧壁	入口	气体质量流入	0.005
电解质表面	出口	脱气条件	—
其他表面	壁面	光滑壁面	—

2 电解槽内电解质流场分布及氧化铝浓度分布

针对 200 kA 铝电解槽,根据前述建立的流场模型、边界条件的设定、新型氧化铝的性质及氧化铝下料及浓度分布计算方法,模拟分析电解槽内电解质流场分布和氧化铝浓度分布。

2.1 新型氧化铝在电解槽内的流场分布

根据工艺特点,按照四点同时下料,下料周期为 136 s,定容器大小 1.6 kg,计算 10 个周期内的下料情况。四个下料点的编号和排列顺序如图 1 所示。

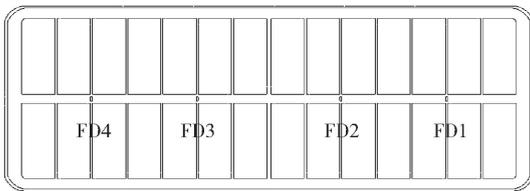


图1 四个下料点位置分布

极距中心截面(极距高度 4.5 cm)的流速分布和流场形态如图 2 所示。在图 2 中分别对进电侧(A 侧)和出电侧(B 侧)的阳极依次按照 A1 ~ A14 和 B1 ~ B14 的顺序进行编号。从图 2 可知,计算得到的氧化铝最大流速和平均流速分别为 0.288 m/s 和 0.075 m/s,在电磁力和阳极气泡的共同驱动作用下,槽膛内有许多小涡旋,其中电解质的出铝端(TE)和烟道端(DE)角部位置的涡旋较大,使得电解槽内氧化铝的输运和传递更快,范围更广^[4]。此

外,进电侧(A 侧)的电解质流速略大于出电侧(B 侧),而电解槽内电解质流速最大值则处于中缝线上靠近出铝端(TE)和烟道端(DE)并且偏向 A 侧的位置。

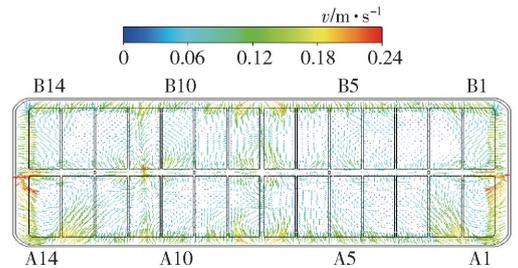


图2 水平截面的氧化铝流速矢量分布图

垂直截面(第 10 块阳极)的氧化铝流速分布和流场形态如图 3 所示。从图 3 可知,在阳极气泡的驱动作用下^[5],电解质在阳极间缝和阳极边缝处有明显的涡流,同时垂直截面上流速较大值也位于间缝和边缝处,电解质最大流速和平均流速分别为 0.125 m/s 和 0.034 m/s。将下料点正下方的极距中心截面处各点的流速数据提取可得图 4。从图 4 中可知,FD2、FD4 下料点流速较大,FD1、FD3 流速较小。

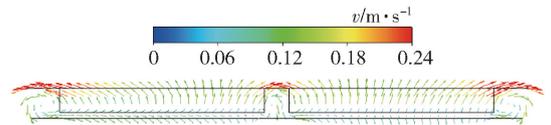


图3 垂直截面的流速矢量分布图

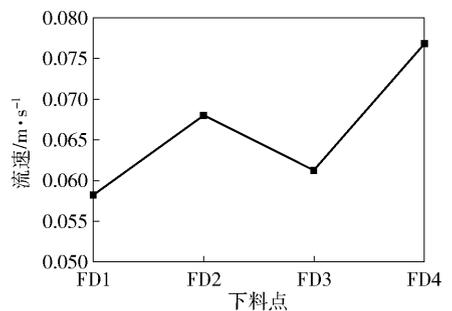


图4 各下料点极距中心位置的电解质流速

2.2 电解槽内氧化铝的浓度分布

为了进一步观察上述流场分布下电解质中氧化铝的运输及浓度分布情况,计算并提取第 1 周期内极距中心截面 4 个时刻的氧化铝浓度分布云图(图 5)。

从图 5 可以看出,在电磁力和阳极气泡的共同驱动作用下,氧化铝下料后,逐步溶解并扩散至全槽^[6]。由 34 s、68 s、102 s 和 136 s 的氧化铝浓度变化情况可以发现,下料点 FD1 和 FD4 扩散速度较

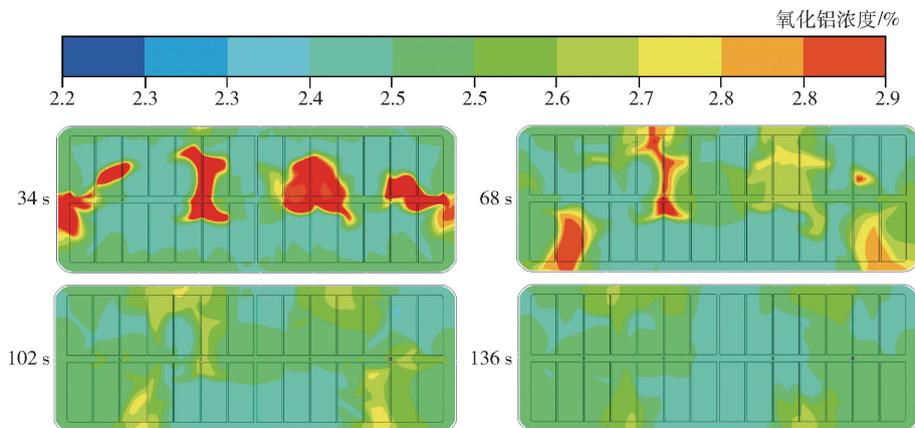


图5 第一周期极距中心截面氧化铝浓度分布变化

快,且同样时间内扩散范围较大;FD2和FD3扩散速度较慢,且相同时间内扩散范围较小。4个下料点处电解质流动的方向如图6所示。

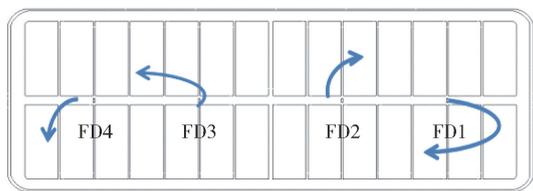


图6 电解质流速的方向

第10个周期结束时,氧化铝已经得到了较均匀的扩散,其浓度分布如图7所示。从图7可以发现,电解槽B侧的TE角部区域氧化铝浓度较低,FD2和FD3中间的区域氧化铝浓度最低,而A侧整体的氧化铝浓度整体比B侧浓度偏高,这可能是因为FD2和FD3的氧化铝向四周扩散较快,同时A侧的电磁力比B侧更大,使得A侧电解质旋转强度更大,涡旋更多,因而氧化铝向A侧扩散得更快^[4]。

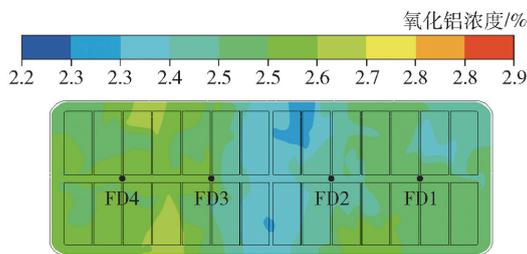
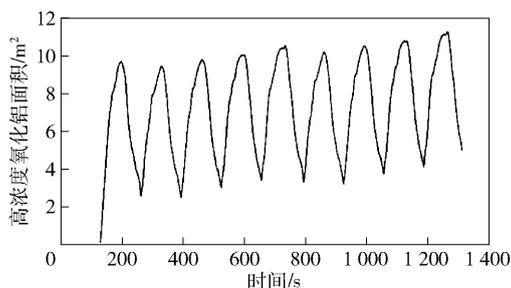
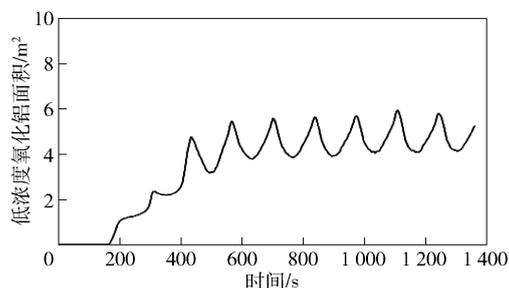


图7 第10周期末极距中心截面处氧化铝浓度分布图

为了进一步分析氧化铝浓度分布的均匀性,求取10个周期内氧化铝高浓度(氧化铝质量分数 $>2.6\%$)区域面积时变图和低浓度(氧化铝质量分数 $<2.4\%$)面积时变图,结果如图8和图9所示。

从图8可以看到,高浓度区域的面积随着时间变化呈现周期性变化。氧化铝下料时,高浓度区

域面积会猛增到 10 m^2 左右,然后又逐渐回落,最低时会降到 2 m^2 左右;从第2个周期开始,氧化铝高浓度区域面积波动情况基本保持一致。从图9可以看出,低浓度区域面积的变化幅度比高浓度区域面积变化幅度要小很多,并且从第5个周期开始,低浓度区域面积变化幅度平稳下来后,基本保持在 $4\sim 5\text{ m}^2$,这说明电解槽内的氧化铝浓度分布基本平衡。

图8 10个周期内氧化铝高浓度区域面积时变图(氧化铝质量分数 $>2.6\%$)图9 10个周期内氧化铝低浓度区域面积时变图(氧化铝质量分数 $<2.4\%$)

此外,在电解槽内取8个观测点(位置如图10所示、表5),统计氧化铝浓度变化情况,得到图11和图12。观察图中的8条曲线,可以发现大部分观察点的氧化铝浓度都随着下料过程呈周期性变化,

其中仅有 OB4、OB5、OB8 等少数下料点位置处变化不明显,这说明氧化铝在该区域的浓度变化不大。而总体来看,中间位置的氧化铝浓度波动大,两端的氧化铝浓度波动小,靠近电解槽 DE 观察点的氧化铝浓度波动幅度比靠近 TE 的更大。

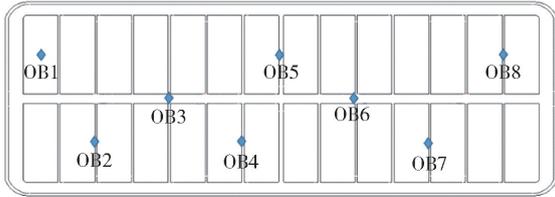


图 10 观测点平面位置

表 5 观测点位置

观测点	OB1	OB2	OB3	OB4	OB5	OB6	OB7	OB8
X/m	10	8.6	7.2	5.8	5.06	3.66	2.26	0.86
Y/m	1	-1	0	-1	1	0	-1	1
Z/m	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08

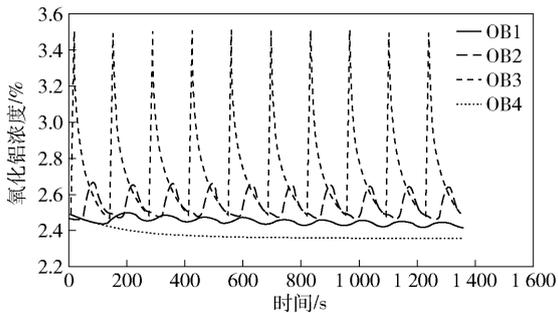


图 11 OB1 ~ OB4 观测点的氧化铝浓度变化

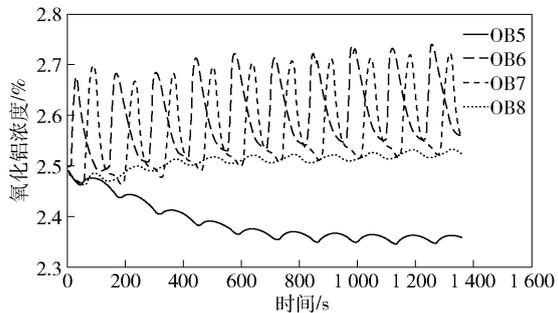


图 12 OB5 ~ OB8 观测点的氧化铝浓度变化

2.3 电解质流场分布以及垂直截面氧化铝浓度分布

对于极距中心电解质分布采用旋转强度和流线分布进行解析,结果如图 13 和 14 所示。与图 2 对比,电解质的旋转强度图和流线图能显示更多的流场信息。从图 13 和图 14 中可以发现,在各个阳极投影的四周普遍分布着范围较小但强度较大的涡流,尤其是边缝和间缝的交叉位置以及烟道端和出

铝端附近;同时,进电侧的旋转强度明显大于出电侧,同时在两侧的角部有两个较大的涡旋^[7]。

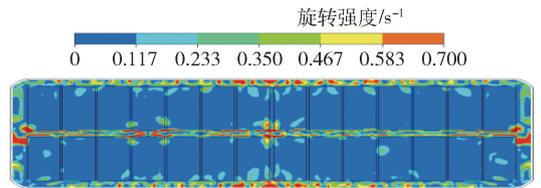


图 13 电解质水平截面旋转强度

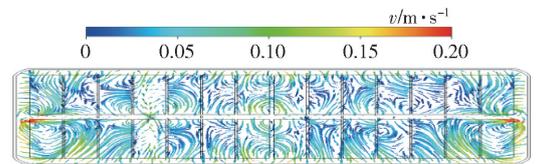


图 14 电解质水平截面流线图

图 15 是阳极气泡的等速面(流速为 0.330 m/s)。从图 15 中可以发现,阳极气泡的主要驱动作用在间缝和边缝区域。在这些位置,阳极气泡的流速分布比较均匀,同时氧化铝的运输速度会更快。

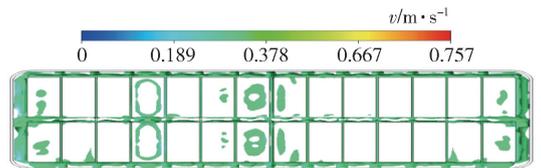


图 15 阳极气泡的等速面(流速等于 0.330 m/s)

氧化铝在前 45 s 内垂直截面的浓度分布变化情况如图 16 所示。从图 16 可以发现,氧化铝在下料后的 5 ~ 20 s 内快速地溶解扩散,基本上在下料后 15 ~ 30 s 内垂直方向上的扩散就结束了,所以氧化铝沉淀最有可能发生在这个时间段。

3 结论

从氧化铝浓度场和电解质流场计算结果可知,电解质流场稳定,新型氧化铝浓度分布合理。在电磁力和阳极气泡的共同驱动作用下,添加的新型氧化铝在电解质中比较分散,形成的团聚体能快速分解,涡旋的存在使得槽内氧化铝的运输和传递更快,同时熔体内产生的气体有助于氧化铝颗粒的分散,以及打破团聚体增加氧化铝溶解速率,电解质出铝端和烟道端角部位置的氧化铝溶解最快。在实际生产中,合理配置下料器及下料点控制新型氧化铝浓度的分散、运输,保持氧化铝浓度分布均匀、电解质流场稳定,有利于减少阳极效应和提高电流效率。

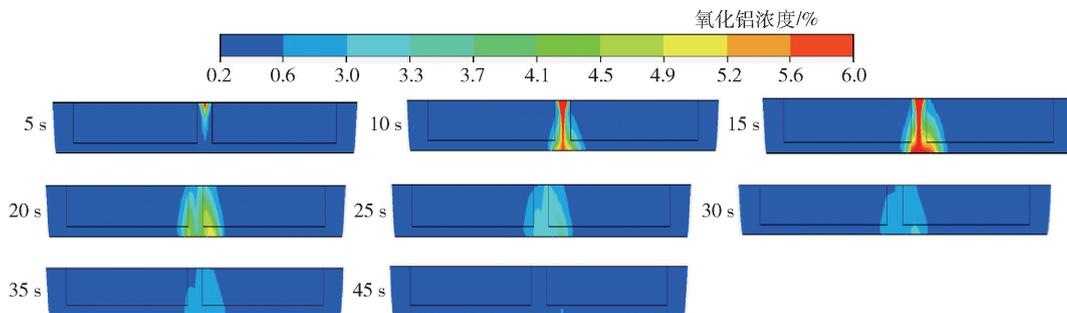


图 16 垂直截面氧化铝浓度分布变化

[参考文献]

- [1] 郭昭华. 粉煤灰“一步酸溶法”提取氧化铝工艺技术及工业化发展研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(7): 5-8.
- [2] MOXNES B, SOLHEIM A, LIANE M, et al. Improved cell operation by redistribution of the alumina feeding [J]. Light Metals, 2009: 461-466.
- [3] 刘伟, 李劫, 赖延清, 等. 铝电解槽电磁流场的数学建模与应用[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(5): 909-916.
- [4] DUPUIS M, SCHNELLER M. Testing the in situ aluminium cell control with the Dyna/Marc cell simulator [J]. 2011.
- [5] 李劫, 丁凤其, 邹忠, 等. 铝电解槽电流强化与高效节能综合技术的开发及应用 [J]. 轻金属, 2011(2): 25-30.
- [6] KUSCHEL G I. The effect of alumina properties and smelter operating conditions on the dissolution behaviour of alumina [J]. Chemical and Materials Engineering, 1990, University of Auckland: Auckland, New Zealand.

Simulation and Analysis of Flow Field in Electrolysis Process of New Alumina Produced by Fly Ash

YAN Shujun

Abstract: In this paper, the new alumina extracted from fly ash was used as the electrolytic raw material. According to the performance characteristics of the new alumina, the simulation calculation was carried out based on the 200 kA aluminum electrolytic cell. The electrolyte flow field and the distribution of the new alumina concentration in the electrolytic cell were studied. The mass transfer factors affecting the dissolution, diffusion and convection of the new alumina were analyzed, and the dissolution transport performance in the new alumina electrolysis process was mastered. The results show that the new alumina dissolves quickly and uniformly in the electrolyte, the electrolyte flow field is stable, and the alumina at the aluminum end and the corner of the flue end dissolves fastest. In actual production, by reasonably configuring the feeder and the feeding point to control the dispersion and transport of alumina concentration, the uniform distribution of alumina concentration and the stability of electrolyte flow field can be maintained, which is beneficial to reduce the anode effect and improve the current efficiency.

Key words: fly ash; one step acid dissolution method; flow field simulation; new alumina; flow field distribution; transport performance