

# 铝电解槽氧化铝浓度区域失衡预警与协同控制技术 研究及实践

李撼宇，练新强，王锐新，杨广飞，张坤\*

云南神火铝业有限公司，云南 文山 663000

DOI:10.61369/ME.2025060013

**摘要：**针对目前大型预焙电解槽内氧化铝浓度控制愈发困难，局部氧化铝浓度不均现象频发，异常槽况干扰氧化铝浓度控制的现状，通过铝电解槽氧化铝浓度区域控制技术，从产生氧化铝浓度不均的原因进行分析，增加控制系统功能，通过多个控制参数设定，科学化、精准化、细致化单个下料点的氧化铝下料控制，在500kA电解槽上使用后，各项生产指标得到明显提升。

**关键词：**铝电解槽；氧化铝浓度；区域控制；异常槽况控制

## Research and Practice on Early Warning and Collaborative Control Technology for Regional Imbalance of Alumina Concentration in Aluminum Electrolysis Cells

Li Hanyu, Lian Xinqiang, Wang Ruixin, Yang Guangfei, Zhang Kun\*

Yunnan Shenghuo Aluminum Co., Ltd., Wenshan, Yunnan 663000

**Abstract :** Addressing the current challenges in controlling alumina concentration within large pre-baked electrolysis cells, where localized imbalances in alumina concentration frequently occur and abnormal cell conditions interfere with concentration control, this study analyzes the causes of uneven alumina concentration distribution through regional control technology for alumina concentration in aluminum electrolysis cells. By enhancing the functionality of the control system and setting multiple control parameters, it achieves scientific, precise, and detailed control over alumina feeding at individual feeding points. After implementation on 500kA electrolysis cells, significant improvements have been observed in various production indicators.

**Keywords :** aluminum electrolysis cell; alumina concentration; regional control; abnormal cell condition control

铝电解槽中氧化铝的浓度控制对电解槽的运行稳定性至关重要。氧化铝在下料点到达电解质区域后，受磁场影响电解质循环运动，流动的电解质将氧化铝运输到槽内的各个区域<sup>[1]</sup>。如今，随着现代大型预焙电解槽生产能力的不断增加，槽型不断向大型化发展，下料点也随之增多，电解槽内氧化铝浓度不均更加频繁出现，局部氧化铝浓度过高或过低现象频发，具体体现为电解槽堵卡频发与炉底沉淀增加<sup>[2]</sup>。此外，在电解槽出现异常槽况时，受多种因素影响，电解槽内电解反应不能正常高效进行，下料点氧化铝需求降低，此时如果不采取措施进行干预，该下料点由于氧化铝消耗量减少将会出现局部氧化铝浓度偏高，严重甚至会出现堵卡、炉底沉淀现象。上述问题均会导致电解质流动性、导电性、溶解性下降，电流效率偏低，影响电解槽各项技术指标及经济指标，为解决这些问题，本文从下面几个方面进行阐述其研究方向及优化方法。

### 一、工业生产中的氧化铝控制策略

由于技术条件限制，如今还不具备能满足工业生产需要的氧化铝浓度传感器，故目前准连续（或称半连续）下料制度采用的

氧化铝浓度控制方式仍为槽电阻控制（槽电压控制），以槽电阻作为主要控制参数。从之前的研究可以得知槽电阻与氧化铝浓度之间存在着一定的相互对应关系，同时槽电阻随氧化铝浓度变化较为敏感（尤其是氧化铝浓度处在低位时），在工业生产中槽电阻的变化

作者简介：李撼宇（1980—），男，河南永城人，本科，工程师，主要从事铝电解生产技术管理工作。

通讯作者：张坤（1973—），男，河南夏邑人，本科，高级工程师，主要从事电解铝生产技术的研究，E-mail: qalyzhk@163.com。

不仅体现了极距的变化，同时也体现着氧化铝浓度的变动。



图1 “三阶段循环”控制策略

目前电解槽氧化铝浓度控制系统多采用“三阶段循环”的控制策略，将控制过程划分为三个阶段：欠料阶段：放大下料间隔，减少氧化铝投入量，降低浓度；过料阶段：缩小下料间隔，增加氧化铝投入量，提高浓度；正常阶段：调整电压，保持极距。通过以转换的方法保持浓度处于持续、合理的波动之中，利用槽电阻上升或下降变化速率（常称为斜率）来判断浓度范围，三个加料周期的切换，使输入量有了足够大的变化，从而保证控制系统充分识别槽电阻变化速率，同时根据斜率来判别电解槽过量或欠量转换<sup>[2]</sup>。

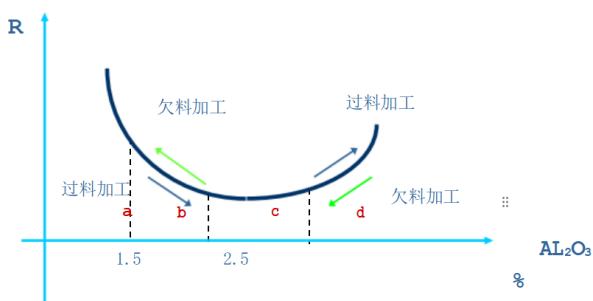


图2 氧化铝浓度变化特征电阻关系图

在极距保持不变的情况下，氧化铝浓度与槽电阻的关系呈现为“凹”形，即在中等氧化铝浓度区间存在一个极小值的点。根据槽电阻与氧化铝浓度的对应关系，以及氧化铝浓度对槽电阻的影响程度，一般将氧化铝浓度特征电阻曲线分为下列四个区域：

- a. 效应区：氧化铝浓度极低（低于1.5%），槽电阻对氧化铝浓度变化最敏感，氧化铝浓度一旦稍微降低，就极易发生效应；
- b. 敏感区：氧化铝浓度低（1.5%~2.5%），槽电阻对氧化铝浓度变化敏感，易进行三阶段循环控制，这一区间电解槽电流效率高，工业生产中通常将氧化铝浓度控制在这一区间；
- c. 不敏感区：槽电阻对氧化铝浓度的变化不敏感，槽电阻基本不随氧化铝变化而变化，保持在相对平稳的区间，不易于进行生产控制，同时这一区间电解槽电流效率较低；
- d. 高浓度区：槽电阻对氧化铝浓度的变化敏感，但氧化铝浓度过高，生产中电解质内氧化铝趋于饱和，电解质对入槽氧化铝溶解度大大降低，容易导致炉底沉淀生成并造成槽况恶化。

经过大量的实验取样，并对氧化铝浓度特征电阻曲线进行分析，可以得出定论：将氧化铝浓度精确控制在敏感区附近，不仅槽况稳定，对初晶温度影响小，而且易于取得高的电流效率。

## 二、正常运行情况下氧化铝浓度区域控制

随着技术的不断发展，国家政策的要求越发严格，政府不断推进落实，电解槽生产能力不断提高，电解槽槽型也随着不断增

大，生产能力较小的小型槽随之淘汰，电解槽的大型化是未来发展的必然趋势。由于槽型的增大，下料点也会随之增多，各个下料点之间的氧化铝浓度平衡问题更加凸显，尽管在大型电解槽设计之处就考虑过该问题，但实际生产中仍然存在，尤其是两端（出铝端与烟道端）下料点尤为突出，生产具体表现为两端下料点容易积料堵卡、两端炉底沉淀多明显高于电解槽内其他部位，究其原因，其一主要由于大型电解槽内铝液与电解质液受磁场影响不断流动，同时铝液与电解质形成的流体场分布不均，各个部位的流速不相同，当未溶解的氧化铝在槽内随流体场的流动被带到两端时，由于转角处流速大大降低，部分氧化铝停滞在这一区域，导致氧化铝沉积，炉底沉淀增加；其二是由于电解槽设计原因，两端角部阳极有一侧为槽壳，相较于中部阳极电化学反应少，氧化铝消耗量较低，下料点处多余氧化铝便容易造成积料致使堵卡，而电解质中氧化铝易饱和则导致产生过剩氧化铝，造成沉淀；其三则是由于两端散热面积较大，热损失较大，两端温度较中部低，而氧化铝在电解质中溶解度随温度的降低而降低，同样的下料点处未及时溶解的氧化铝堆积形成积料，而部分氧化铝也会因未被电解质溶解便直接落入槽底，形成沉淀。

如何解决大型电解槽区域氧化铝浓度分不均的问题，目前已成为大型槽实际生产中必须面对的问题。本文通过以下方法进行解决：通过在电解槽两端、中间及其他部位分别进行电解质取样分析，对比两端、中间及其他部位的氧化铝浓度，根据氧化铝浓度差距进行初步计算，得出正常生产情况下各部位氧化铝饱和下料量，再根据各个下料点的单次下料量计算出下料次数，对比两端、中间及其他部位的下料次数。同时在槽控机控制系统内打开端口，修改下料控制程序，使之可以接收与反馈自槽控机系统内的控制命令，技术人员即可根据电解槽内氧化铝区域浓度的不同偏差来调节下料参数进行控制，将每个点的参数进行根据实际需要逐一设置，使电解槽两端、中间及其他部位的下料频率与间隔在一定范围内可以自行调整，即可设置为每多长时间少下一次料或每多少次下料少下一次料。根据氧化铝浓度偏差将参数设置完成后，在电解槽上进行对比实验，观察电解槽的生产运行情况，同时每隔一段时间进行取样分析试验槽内各个位置的氧化铝浓度，反复实验，直至将槽内氧化铝浓度调整基本均匀，再对该参数优化设置，进行推广使用。此类为通常情况下电解槽内两端氧化铝浓度高于中间下料点，若出现中间下料点氧化铝浓度高于两端下料点情况，也可通过调整中间下料点的下料频率来进行控制，从而实现氧化铝浓度平衡。

氧化铝浓度区域控制策略投入运行前后的同一电解槽的电解槽运行控制曲线，从图中可明显看出，在氧化铝浓度区域控制策略投入运行后，区域氧化铝浓度受控率明显提高，槽电压曲线摆动幅度大幅减小，噪声也随之减少，同时闪烁效应不再发生，有效改善电解槽运行情况。

目前新研发应用的铝电解智能气缸及智能打壳控制系统也能在一定程度上改变槽内氧化铝浓度不均的情况，铝电解智能气缸及智能打壳控制系统可以判别槽内下料点的堵卡情况及打壳情况，根据这些情况，该系统及装置调控打壳间隔、打壳深度、打

壳用气量，做到节气降耗、减少堵卡，同时还可以判别下料点的堵卡、打壳气缸的运行状态、气压正常与否<sup>[3]</sup>，为电解槽内氧化铝浓度平衡控制提高条件。

### 三、非正常运行情况下氧化铝浓度区域控制

上述为电解槽正常运行情况下的氧化铝浓度区域控制策略，但在电解槽的实际生产运行中，往往会出现单个下料点或者多个下料点一段时间内氧化铝入槽量急剧增加或急剧减少的情况，在此情况下，继续使用正常运行情况下氧化铝浓度区域控制策略会导致槽内氧化铝区域浓度失衡程度更加严重，为此探讨非正常运行情况下氧化铝浓度区域控制策略就具有很高的必要性。根据导致电解槽出现非正常运行情况的原因，可将非正常运行情况下氧化铝浓度区域控制策略分为以下几种。

#### (一) 换极后的氧化铝浓度区域控制

在以往的电解槽生产实践中，由于换极后的新极需要吸收热量提升温度，消除新极表面电解质层，流经新极的电流才会逐渐增大，通常在8小时内新极初步升温，而在16小时左右新极基本达到热平衡，通过新极的电流趋于稳定，达到正常水平，故在此期间，由于通过电流相较于正常阳极较少，电解反应发生较少，相对应的氧化铝消耗量也随之降低，同时更换阳极时，部分氧化铝随物料掉入电解槽内，该区域氧化铝浓度也会上升，而更换阳极时热量的散失又导致该区域电解温度下降，从另一方面抑制了电解反应，若不对该非常情况下氧化铝浓度区域控制进行调整，会导致单点下料点区域氧化铝浓度大幅上升，影响电解槽正常运行。

根据上述换极后的电解槽槽内氧化铝浓度变化，制定相应的氧化铝浓度区域控制策略，提出消除换极影响的氧化铝浓度平衡控制方法：通过现场生产实际制定换极表，于槽控机控制系统内新增功能，使之能够存储读取换极表，并能够设定阳极所对应的下料点，通过系统录入一个换极周期内的阳极更换顺序，在对应日期，槽控机系统读取换极表，获取当日换极电解槽槽号与极号，打开端口使此功能与上文中的单个下料点下料控制功能互联<sup>[4]</sup>。在更换阳极时，槽控机上按下换极键，控制系统给出附加电压，槽电压上升达到一定幅度，而换极信号也到达上位机，此时判别电解槽进行换极操作，控制系统读取该电解槽换极极号与对应下料点点位，在换极结束后，随着换极完成信号的给出，控制系统根据设定参数N1对下料点进行控料，该控制参数可根据现场电解槽运行情况设定控料时间N1分钟，在控料时间结束后又可根据上文中分析所得换极后下料点氧化铝的消耗量减少情况，再设定另一组参数，对该下料点电解反应非正常期的氧化铝下料量进行调整，该设定参数可设定下料量自正常下料量的N2%开始恢复，恢复时间为N3分钟，在持续时间结束后，再恢复正常下料。

#### (二) 下料点堵卡后的氧化铝浓度区域控制

在电解生产中，由于下列因素，往往会导致下料点出现堵卡：下料点锤头随时间的增加被消耗而减小，不能有效击穿下料点壳面；电解质物理性质因分子比、电解温度等因素发生改变而变化，下料点处电解质凝结速度过快，结壳迅速；打壳锤头粘黏

电解质，逐步长大形成大锤头，达到一定限度后大锤头落入下料点导致下料点堵塞<sup>[5]</sup>；下料系统故障，导致一次性下料过多导致下料点堵塞。可以发现，导致下料点堵卡的因素很多，电解槽发生堵卡的概率也非常频繁，在堵卡发生时，该下料点由于氧化铝不能进入电解槽，此时的区域氧化铝浓度是非常低的，甚至会引发闪烁效应的发生，而当人工处理完堵卡之后，堵卡点被打通，大量堆积在此处的氧化铝又会立即落入槽内，下料点的区域氧化铝浓度又大幅增加，同时还应考虑到，若堵卡后电解槽电压虚高，导致人工进行效应加工，电解槽除堵卡下料点之外的其他下料点短时间内投入过多氧化铝，区域氧化铝浓度也会上升。

根据上述下料点堵卡后的电解槽槽内氧化铝浓度变化，制定相应的氧化铝浓度区域控制策略，提出消除下料点堵卡影响的氧化铝浓度平衡控制方法：通过上文中的智能气缸或智能打壳系统，使其能够自动判别堵卡下料点位置，再打通该系统与电解槽控制系统的关口，使电解槽控制系统能够读取堵卡下料点位置，同时控制系统根据设定参数N4对下料点进行控料，该设定参数可根据电解槽实际设定减少下料次数N4次，防止下料点处氧化铝继续增加堆积过多，而当下料点堵卡处理结束后，下料点恢复正常信号抵达上位机，此时控制系统根据设定参数N5减少一定时间内堵卡下料点的下料量，该设定参数可根据电解槽实际设定延长该下料点的下料间隔N5秒，同时若进行了效应加工，控制系统读取过去一段时间内的槽控机操作，判断出现效应加工后，控制系统根据设定参数N6对其他下料点进行控料，该设定参数可根据电解槽实际设定减少其他下料点的下料间隔N6次，在N6次下料后，恢复正常下料。

#### (三) 电压异常后的氧化铝浓度区域控制

在一天的电解槽生产周期内，电压异常发生概率比较低，但持续时间却不定，从几分钟到几个小时不等。电压异常一般可分为两种，其一为电压摆，具体表现为电解槽电压摆幅较大，但摆动频率较长，一般由于各种因素导致槽内铝水波动而引发；第二种则为噪声过高超限，具体表现为电压反复摆动，摆幅较小，摆动频率快，一般由于各种因素引起的单块或多块阳极电流分布不均导致的。这两种电压异常均会影响电解槽的正常生产，导致电解反应无法快速高效的进行，但影响层面并不相同，电压摆对整槽的电解反应影响较大，槽内氧化铝消耗量降低，而噪声过高虽然同样会对整槽的电解反应造成影响，但阳极电流分布不均的单块或多块阳极处影响会更大，对于下料点的氧化铝浓度区域浓度差异也更大。

根据上述造成电压异常的原因，以及电压异常后的电解槽槽内氧化铝浓度变化，制定相应的氧化铝浓度区域控制策略，提出消除电压异常影响的氧化铝浓度平衡控制方法：针对电压摆，电解槽控制系统在判别电解槽出现电压摆后，控制系统根据设定参数N7对全槽下料点进行电压摆持续时间内的下料量调整，该设定参数可根据电解槽实际设定延长全槽下料点的下料间隔N7秒；针对噪声过高，电解槽控制系统在判别电解槽出现噪声过高超限后，控制系统根据设定参数N8对全槽下料点进行电压摆持续时间内的下料量调整，该设定参数可根据电解槽实际设定延长全槽下料点的下料间隔N8秒，同时技术人员通过现场测量，发现电流分布异常

的阳极组及对应下料点，再通过上位机人工录入下料点位置，控制系统根据设定参数 N9 对该下料点进行噪声持续时间内的下料量调整，该设定参数可根据电解槽实际设定延长该下料点的下料间隔 N9 秒，其中 N9 参数优先级高于 N8 参数，完成下料点位置录入后 N9 参数可覆盖 N8 参数，电压摆与噪声异常结束后恢复正常下料。

#### 四、氧化铝浓度区域控制技术的应用效果分析

氧化铝区域控制策略在 500kA 电解槽上推广使用，下表为使

用该控制技术前后部分电解槽的技术参数及经济指标对比，从中可以看出，氧化铝区域控制策略在使用前，每日电解槽平均电压差（平均电压与设定电压之差）为 0.041V，平均闪烁效应次数为 6.3，平均噪声为 38.7mV，平均炉底压降为 281.7mV，平均电流效率为 90.9%，而在氧化铝区域控制策略在使用后，电解槽平均电压差为 0.030mV，平均闪烁效应次数为 1.7，平均噪声为 25.6，平均炉底压降为 271.3mV，平均电流效率为 91.4%，具有了很大程度的改善，由此可见，氧化铝浓度区域控制技术在氧化铝浓度受控率上有了很大的提高，从而使得电解槽技术指标得到了非常明显的优化。

表1 氧化铝浓度区域控制技术投入前后电解槽技术参数对比表

槽号	电压差 /V		闪烁效应 /次		噪声 mV		炉底压降 mV		电流效率 /%	
	前	后	前	后	前	后	前	后	前	后
4056	0.042	0.033	4		36	25	281	270	89.8	90.1
4057	0.045	0.036	10	2	43	31	279	266	90.4	91.0
4058	0.039	0.028			32	19	288	278	91.3	91.8
4059	0.042	0.029	8	3	40	28	290	281	90.9	91.5
4060	0.041	0.034	3	1	38	26	271	265	90.8	91.3
4061	0.040	0.026			35	21	277	268	90.5	91.1
4062	0.040	0.025			37	26	276	269	90.6	91.4
4063	0.043	0.033	3		40	29	281	270	91.6	91.8
4064	0.046	0.034	8	1	49	29	293	279	91.0	91.4
4065	0.038	0.030		1	35	20	290	275	91.2	91.5
4066	0.035	0.024			31	18	276	261	91.5	91.9
4067	0.038	0.026			37	21	284	276	90.9	91.2
4068	0.042	0.031	9		40	30	291	280	91.3	91.6
4069	0.041	0.026	2		43	29	274	266	90.9	91.8
4070	0.045	0.032	10	2	45	32	275	265	90.1	91.4
平均	0.041	0.030	6.3	1.7	38.7	25.6	281.7	271.3	90.9	91.4

#### 五、结束语

1. 氧化铝浓度区域控制技术能够有效的提高电解槽内的氧化铝浓度受控率，使其保持在高效运行的氧化铝浓度区间，从而增强电解槽稳定性，提高电流效率，减少电解槽噪声与运行电压差；

2. 氧化铝浓度区域控制技术的使用，大大提升了电解槽内的

氧化铝浓度的均匀性，降低了局部氧化铝浓度过高或过低现象发生的概率，从而减少阳极效应发生次数与炉底沉淀的生成，控制电解槽无用损耗，节能减排；

3. 针对异常槽况下的氧化铝浓度区域控制技术，在异常槽况发生造成电解反应不能正常进行，氧化铝消耗量减少的情况下，通过控料以及延长下料间隔等方式，避免下料点局部氧化铝浓度过高或堵卡现象的发生。

#### 参考文献

- [1] 邱竹贤. 预焙槽炼铝第3版 [M]. 北京 : 冶金工业出版社 , 2005.
- [2] 张延安, 吕国志. 铝冶金技术 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2011.
- [3] 梁学民, 张松江. 现代铝电解生产技术与管理 [M]. 长沙 : 中南大学出版社 , 2011.
- [4] 陈志洋. 提高大型预焙铝电解槽氧化铝浓度控制准确性的方法 [J]. 轻金属 , 2023(8): 30~35.
- [5] 冯乃祥. 铝电解 [M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2006.