

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.10.005

高钾电解质体系下阳极品质和 锂钾含量对炭渣量的影响

包生重¹, 罗英涛¹, 陈开斌¹, 何飞², 李刚², 冷龙洋², 李昌林¹

(1. 中铝郑州有色金属研究院有限公司, 郑州 450041;

2. 遵义铝业股份有限公司, 贵州 遵义 563000)

摘要:长期跟踪了某电解铝企业电解槽的运行过热度、不同炭阳极运行期间的炭渣量和电解质中含碳量,开展了电解质组分调整试验,跟踪分析了炭渣量和运行过热度随锂钾含量变化的过程。结果表明,高品质阳极能够明显降低炭渣量和电解质中的含碳量。电解运行过热度偏低,炭渣量偏高可能是高钾低锂电解质体系的特征,降低电解质中钾含量、适当提高锂含量,能够提高电解运行过热度,降低炭渣量。阳极质量、电解质中锂钾含量、运行过热度、阳极覆盖料中的含碳量都是影响电解过程中炭渣产生量的重要因素。

关键词:炭渣量;高钾电解质体系;锂钾含量;过热度

中图分类号:TF821

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)10-0034-08

Effects of Anode Quality and KF & LiF Contents on Amount of Carbon Dust during Aluminum Electrolysis with High Potassium Electrolyte System

BAO Sheng-zhong¹, LUO Ying-tao¹, CHEN Kai-bin¹, HE Fei²,LI Gang², LENG Long-yang², LI Chang-lin¹

(1. Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd., CHALCO, Zhengzhou 450041, China;

2. Zunyi Aluminum Co., Ltd., Zunyi 563000, Guizhou, China)

Abstract: Operation superheat of electrolyte, amount of carbon dust and carbon content in electrolyte during period of different quality carbon anodes usage in an aluminum smelter enterprise were tracked for a long time. Electrolyte composition adjustment test was carried out to track and analyze carbon dust amount and operation superheat variations with change of KF and LiF contents. The results show that high quality anodes can significantly reduce amount of carbon dust and carbon content in electrolyte. Low operation superheat and high amount of carbon dust may be the characteristic of aluminum electrolysis process with high KF and low LiF content electrolyte system. Reducing KF content in electrolyte and appropriately raising LiF content can improve operation superheat and reduce amount of carbon dust significantly. Anode quality, LiF and KF contents in electrolyte, operation superheat of bathe, and carbon content in anode covering materials are important factors affecting carbon dust production in electrolysis process.

Key words: amount of carbon dust; high KF content electrolyte system; KF and LiF contents; degree of superheat

收稿日期:2021-05-17

基金项目:2019年中国铝业股份有限公司重大科技项目(中铝股份科字[2019]519号)

作者简介:包生重(1981-),男,河南南阳人,硕士,高级工程师

在铝电解生产过程中,炭阳极受到选择性氧化、不均匀燃烧、电解质的侵蚀、冲刷等原因,部分炭质颗粒从阳极脱落进入熔盐电解质中,形成炭渣^[1-3]。炭渣对铝电解过程有负面影响,还会给企业带来负担^[4-6]。炭渣过多时,导致电解质中含碳量增加,电解质的导电性能降低。研究表明,电解质中含碳量为 0.04% 时,电阻率增加 1%;含碳量为 1% 时,电阻率增加 11%。炭渣过多时还易引起热槽、阳极长包、铝损失增加等,导致电流效率降低。炭渣打捞不仅增加工人劳动强度,还会增加氟化盐消耗。炭渣中通常含有约 60%~90% 的电解质,为了保证铝电解过程电解质的平衡,必须补充更多的氟化盐。炭渣在 2016 年被列入《国家危险废物名录》(代码:321-025-48,危险特性:T)。国家环保部门针对各地区情况规定了不同处置收费标准,一般在 1 500~5 000 元/t。此外,自 2018 年 1 月 1 日起施行的《中华人民共和国环境保护税法》规定,每吨危险废物环境保护税额为 1 000 元。因此,对于电解铝企业来说降低炭渣量有着非常重要的意义。我国不同的电解铝企业,炭渣量差异较大,从吨铝几千克至二十几千克。本文针对我国某高钾

电解质体系的电解铝企业,通过长期的跟踪分析,研究了阳极品质和锂钾含量对炭渣量的影响。

1 试验条件

在某电解铝企业 400 kA 系列的一个工区开展工业试验。该工区共有 400 kA 电解槽 36 台。本文的跟踪分析以及电解质调整试验,主要在该工区的后 18 台槽上进行,槽号为 2619#~2636#。试验前期,该工区电解质平均 KF 含量约为 4.6%,平均 LiF 含量约为 1.5%,属于高钾低锂电解质体系(通常 KF 和 LiF 的含量以 3% 为界,超过 3% 即认为含量高)。

自 2018 年 9 月 26 日至 2019 年 10 月 24 日,重点跟踪了该区域 18 台电解槽的炭渣量、电解质中含碳量、以及运行过热度。期间,该区域的电解槽先后采用了 5 种不同质量等级的阳极。根据表 1 所示的“铝电解用预焙阳极标准(YS/T 285—2012)”以及阳极抽样分析结果,对该 5 种不同阳极的质量等级进行划分,如表 2 所示。综合阳极质量品质、一级品率,以及钒含量,阳极质量从优到差排序为:B>E>A>D>C,B 阳极为高品质阳极。

表 1 有色行业铝电解用预焙阳极标准(YS/T 285—2012)
Table 1 Standard of prebaked anode for aluminum electrolysis
in non-ferrous industry(YS/T 285—2012)

牌号	表观密度/ (g·cm ⁻³)	真密度/ (g·cm ⁻³)	耐压强度/ MPa	CO ₂ 反应性残余率/ %	抗折强度/ MPa	电阻率/ (μΩ·m)	热膨胀系数×10 ⁻⁶ / K	灰分/ %
TY-1	≥1.55	≥2.04	≥35.0	≥83	≥8	≤57	≤4.5	≤0.5
TY-2	≥1.52	≥2.02	≥32.0	≥73	≥8	≤62	≤5.0	≤0.7

表 2 五种预焙炭阳极理化指标
Table 2 Physical and chemical indexes of five kinds prebaked carbon anodes

厂家	阳极编号	使用时间	质量品质	一级品率/%	钒含量/%
甲厂	A	2018-09-26~2019-10-20	普通阳极	45	0.028
甲厂	B	2018-10-21~2019-03-11	高品质阳极	90	0.012 8
乙厂	C	2019-03-12~2019-07-11	普通阳极	60	0.035
丙厂	D	2019-07-12~2019-08-15	普通阳极	20	0.030
甲厂	E	2019-08-16~2019-10-24	加高普通阳极	60	0.028

炭渣量的计量采用集中称量的方式进行,并用周平均吨铝炭渣量作为炭渣量变化的评价依据。每天将该区域 18 台槽的炭渣集中装入收纳箱中,用天车吊秤称量,称量精度为±5 kg。用 18 台槽单日的总炭渣量除以 18 台槽单日的总出铝量,得到单日吨铝炭渣量,再以周为时间单位进行平均,得到周平均吨铝炭渣量。

电解质样是每周在周二和周五各取一次,18 台槽共 36 个电解质样,处理后各取出少量,并等质量混合形成一个混合样。电解质中含碳量、电解质初

晶温度、电解质中 KF 和 LiF 含量等参数都是通过对该混合样的分析获得,其分析结果作为这些参数在一周内的平均值。

电解质中含碳量的测量方法采用“铝电解质中碳含量的测定红外吸收光谱法(YS/T 1035—2015)”。电解质初晶温度采用步冷曲线法测得,并用 18 台槽在 2 次电解质取样时的平均槽温作为平均运行温度,二者差值作为平均运行过热度。电解质中的 KF 和 LiF 含量采用“铝电解质化学分析方法第 3

部分:钠、钙、镁、钾、锂元素含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法(YS/T 739.3—201X)”。

2019年2月至2019年7月,从18台试验槽中选定2620#、2621#、2622#三台槽,从2019年2月2日开始进行电解质组分调整试验。在电解槽中不断补充低氟化钾、高氟化锂含量的电解质块($KF=2.49\%$, $LiF=5.59\%$),从而降低 KF 含量,并提高 LiF 含量。期间持续跟踪电解质中 KF 、 LiF 含量、运行过热度,以及炭渣量的变化。电解质取样方案与前文所述相同,只是针对这3台槽的6个电解质样,再单独取出一部分,等质量混合形成一个混合样。电解质中 KF 、 LiF 含量、运行过热度的分析测量与前文所述的方法相同。炭渣量的计量也是采用集中称量的方式进行,并用周平均吨铝炭渣量作为炭渣量变化的评价依据。

2 试验结果

2.1 跟踪分析

2018年9月26日至2019年10月24日(共59周),持续跟踪了5种炭阳极运行过程中的炭渣量变化、过热度变化,以及电解质中的含碳量变化。图1~3分别是5种不同阳极运行期间18台槽的周平均吨铝炭渣量曲线、周平均过热度变化曲线和周平均吨电解质含碳量的变化曲线。需要说明的是:过热度分析在前期和后期没有按周测量,而是每月抽测一次;电解质含碳量分析在后期没有按周测量,而是每月抽测一次;在跟踪分析的过程中,将运行过热度作为主要的运行参数进行跟踪分析。

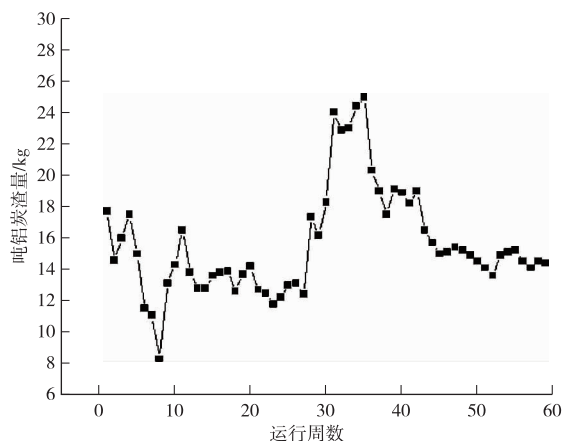


图1 5种不同阳极运行期间18台槽周平均吨铝炭渣量的变化曲线

Fig. 1 Variation curves of weekly average amounts of carbon dust per ton of aluminum of 18 cells during usage of five different anodes

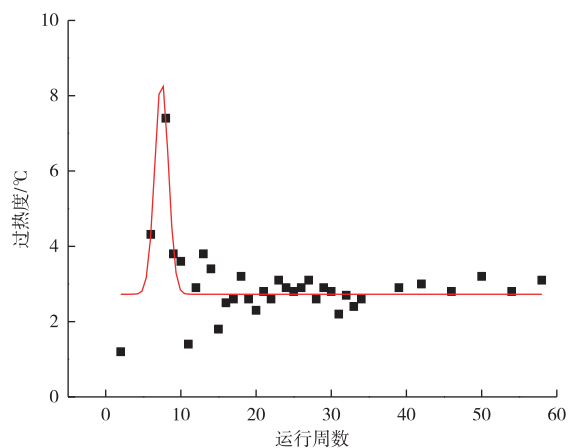


图2 5种不同阳极运行期间18台槽周平均过热度的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of weekly average superheats of 18 cells during usage of five different anodes

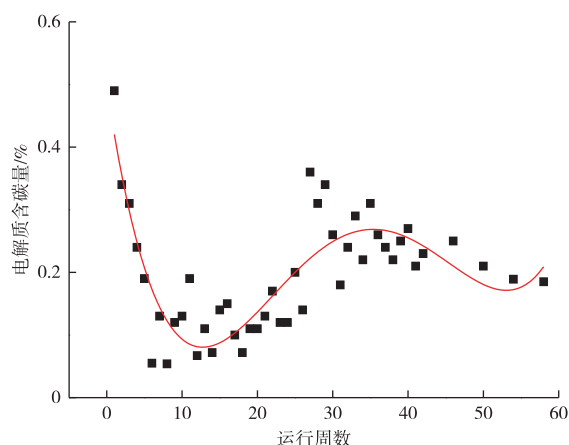


图3 5种不同阳极运行期间18台槽周平均电解质含碳量变化曲线

Fig. 3 Variation curves of weekly average carbon contents of electrolyte in 18 cells during usage of five different anodes

A 阳极运行期间,即前4周(2018-09-26~2018-10-20),整体平均炭渣量约为16.5 kg/t。整体平均电解质含碳量0.345%。运行过热度偏低,在第二周抽测结果为1.2℃。A 阳极运行期间,阳极周期为35 d。

B 阳极运行期间,即第5至25周(2018-10-21~2019-03-14)。在前期,由于工区调整铝水平,铝水平降低后,运行过热度逐步升高至最高7.4℃,周平均炭渣量最低降至8.3 kg/t,电解质含碳量逐步降低至0.055%。但在后期随着铝水平回归正常范围,运行过热度逐步稳定在正常的3℃左右,炭渣量

稳定在 13 kg/t 左右,电解质含碳量稳定在 0.122% 左右。B 阳极运行期间,前 2 个阳极周期为 35 d,后 2 个阳极周期为 36 d。

需要特别说明的是,该区域电解槽正常条件下运行的过热度为 3 ℃ 左右;本次试验跟踪期间,在

第 6~8 周曾保持较高的过热度,如在第 8 周过热度曾一度高达 7.4 ℃ 左右,期间该区域 18 台电解槽普遍出现了热槽的状态(电解质水平升高,导致阳极涮爪、大量电解质需要从电解槽中取出),如图 4 所示。



图 4 阳极极覆盖料熔化涮爪(a)和电解槽中外取的电解质质量增多(b)

Fig. 4 Anode stubs washed by electrolyte melt (a) and large amount of electrolyte melt taken out from 18 cells (b)

C 阳极运行期间,即第 26~42 周(2019-03-15~2019-07-11),随着 C 阳极逐步替换 B 阳极,炭渣量明显升高,最高达到了 25 kg/t 左右;电解质含碳量升高至平均 0.26% 左右;平均运行过热度 2.6 ℃。后期炭渣量逐步降低并稳定在 20 kg/t 左右,电解质含碳量降低至平均 0.24% 左右,平均运行过热度 3 ℃ 左右。C 阳极运行期间,阳极周期为 35 d。

D 阳极运行期间,即第 43~49 周(2019-07-12~2019-08-29),随着 D 阳极逐步替换 C 阳极,炭渣量又明显降低,后期逐步稳定在 15 kg/t 左右;电解质含碳量平均 0.23% 左右;平均运行过热度 3 ℃ 左右。D 阳极运行期间,阳极周期为 35 d。

E 阳极运行期间,即第 50~59 周(2019-08-30~2019-11-07),随着 E 阳极逐步替换 D 阳极,炭渣量逐步稳定在 14.5 kg/t 左右;电解质含碳量平均 0.187% 左右;平均运行过热度 3 ℃ 左右。E 阳极运行期间,阳极周期为 35 d。

通过对 5 种不同质量阳极运行过程的炭渣量、电解质含碳量、运行过热度跟踪分析,可以看出:

1) 炭渣量受阳极质量的影响明显。高质量阳极能够显著降低炭渣量和电解质中的含碳量。B 阳极为高品质阳极,其运行期间炭渣量和电解质中含碳量均显著低于其它阳极;其次是 E 阳极,其运行期间的炭渣量和电解质中含碳量也较低。

2) 炭渣量受过热度的影响明显。当运行过热度高时炭渣量减少,当运行过热度低时炭渣量升高,这

对于不同质量的阳极都有这样的规律。B 阳极和 C 阳极运行期间,由于过热度的变化导致炭渣量变化非常明显。A 阳极质量略高于 D 阳极,但由于 D 阳极运行期间过热度略高于 A 阳极运行期的过热度, D 阳极运行期间的炭渣量略低于 A 阳极。

3) 电解质含碳量同时受到阳极质量和过热度的影响。过热度相当,阳极质量好则电解质中含碳量低。阳极质量相当,过热度高则电解质中含碳量低。在 B、C、D、E 阳极运行期间,当过热度均为 2~3 ℃ 时,阳极质量好的电解质含碳量就低;在 A 和 B 阳极运行期间,都有随着过热度升高,电解质含碳量降低的现象。

4) 电解运行过热度小可能是高钾低锂电解质体系的一个特征。该企业电解槽正常运行的过热度仅有 2~3 ℃;在 B 阳极运行期间,过热度达到 7.4 ℃ 就出现热槽现象,这与传统铝电解过程中对过热度控制范围(5~12 ℃)存在不同的认识。

5) 炭渣量相对偏高可能也是高钾低锂电解质体系的一个特征。B 阳极属于高质量阳极,其质量标准达到了一级,且合格率达到 90%,并且在其运行期间过热度从正常的 2~3 ℃ 升高到会导致热槽的 7.4 ℃,炭渣量也仅仅降低到了 8.3 kg/t,仍然属于偏高水平。仅从提高阳极质量和提高过热度这两个方面着手,已经无法进一步降低炭渣量。

2.2 电解质组分调整试验

2019 年 2 月 2 日至 2019 年 7 月 25 日(从第 20

周到第44周,共25周),在18台试验槽中选2620#、2621#、2622#三台槽,开展电解质组份调整试验。期间,利用高锂低钾电解质块调整电解槽中的电解质组分,并持续跟踪电解质中KF、LiF含量、运行过

热度,以及炭渣量的变化。

3台试验槽KF与LiF含量的变化以及运行过热度变化如图5所示。3台槽的炭渣量与同期18台试验槽炭渣量对比曲线如图6所示。

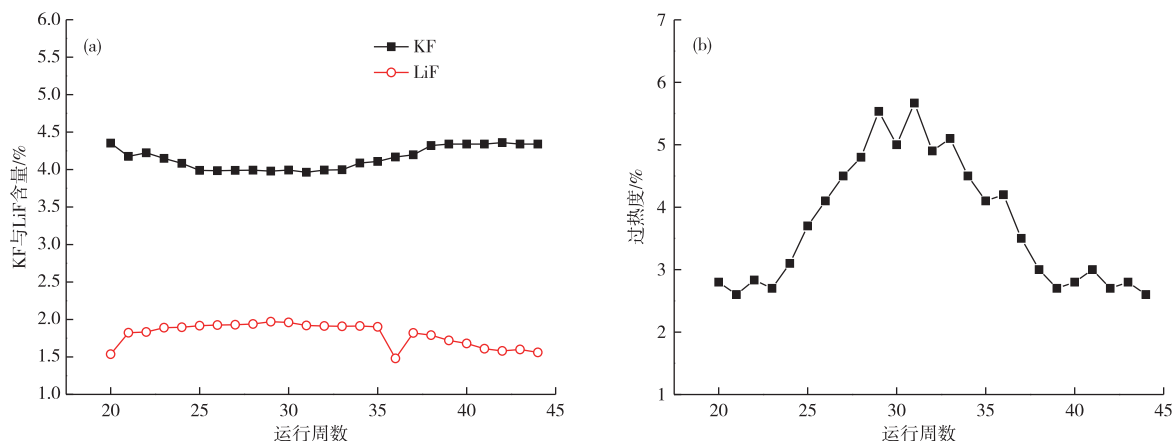


图5 调整试验中3台槽KF和LiF含量(a)和过热度(b)的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of KF and LiF contents (a) and superheats (b) in three cells during adjustment test

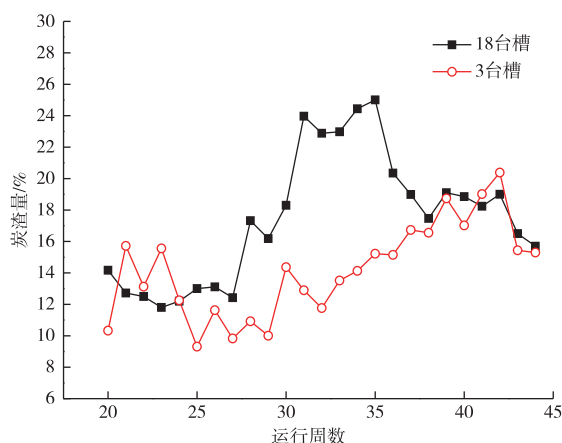


图6 3台槽炭渣量与同期18台槽炭渣量的对比

Fig. 6 Comparison of carbon dust amounts between three cells and cells in same period

该电解质组分调整试验按照调整效果,整体分为三个阶段:

第一阶段,即前五周(2月2日至3月7日),开始补充高锂电解质,KF含量逐步降低,LiF含量逐步升高。该阶段炭渣量、过热度还没有显著变化;

第二阶段,中间十周(3月8日至5月16日),持续补充高锂电解质,KF开始低于4.0%,LiF开始高于1.9%。该阶段3台槽的平均炭渣量已经开始明显低于18台试验槽,平均过热度开始显著升高至4~6℃;

第三阶段,后十周(5月17日至7月25日),高锂电解质补充量减小,最终停止。该阶段KF含量逐步回升、LiF含量降低,且逐步与系列相当,于是炭渣量又逐步升高,并接近18台试验槽的炭渣量。过热度也逐步恢复至原来的2~3℃。

通过对电解质组分的调整试验,可以看出:KF含量降低至4%以下、LiF含量略微提高至1.9%以上时,过热度可以明显提高,炭渣量可以明显降低;第29周至33周期间,运行过热度5℃左右,炭渣量平均12.5 kg/t;相比18台试验槽的平均炭渣量20.9 kg/t,3台槽的炭渣量降低了8.4 kg/t,降低幅度达到了40.2%。

3 讨论与分析

通过对5种不同质量阳极运行过程的跟踪分析,以及电解质组分的调整试验,可以看出:炭渣量除了受阳极质量影响外,还与电解质中锂钾含量和运行过热度有关。电解运行过热度小、炭渣量相对偏高,可能是高钾低锂电解质体系下铝电解过程的特征。

3.1 其它企业调研

为进一步了解电解质组分对炭渣量的影响,试验期间先后对另外两家电解铝企业X、Y进行了调研。为便于对比分析,将各企业的主要工艺参数、阳极情况、电解质组分、炭渣量等情况进行汇总,如表

3 所示。

从调研分析结果可以看出：

1)本企业采用的 B 阳极的质量品质最好，但炭渣量远远高于 X 企业和 Y 企业的炭渣量，这再次证明阳极质量不是炭渣量的唯一决定因素。

2)相比本企业，X 企业和 Y 企业的电解质中 KF 含量低，正常运行条件下过热度高，这可能导致其炭渣量低的重要原因。

3)随着电解质中 KF 含量的降低，炭渣量呈降低趋势。Y 企业的 KF 含量最低，炭渣量也最少。在本企业的电解质调整试验过程，当电解质中的 KF 含量降低至 4% 左右，LiF 含量提升至 1.9% 左右，电解质中的 KF 含量接近了 X 企业(但 LiF 含量还略低于 X 企业)，其炭渣量也相应降低了 40.2%。调研分析结果表明，X 企业的炭渣量的确较低，这也再次证明了电解质组份也是炭渣量的重要影响因素。

4)电解质调整试验中的第 29 周至 33 周期间，运行过热度 5℃ 左右，炭渣量平均 12.5 kg/t，其 KF 含量与 X 企业相近，LiF 含量略低于 X 企业，但炭渣量仍高于 X 企业，其原因可能是本企业采用的 C 阳极质量要差于 X 企业的阳极，并且运行过热度低于 X 企业。

表 3 不同企业调研情况汇总表

Table 3 Summary of investigate results of different enterprises

项目	本企业	X 企业	Y 企业
电解槽类型	400 kA 槽	500 kA 槽	500 kA 槽
运行电流/kA	396.5	497.77	488.92
阳极电流密度/(A·cm ⁻²)	0.797	0.761	0.747
阳极尺寸/mm	1 570×660×650	1 770×770×650	1 770×770×650
阳极是否开槽	不开槽	不开槽	开槽
换极周期/d	36	35	34
阳极品质	高品质阳极 B，一级品率>90%	普通阳极，一级品率<60%	普通阳极，一级品率<60%
阳极中钒含量/%	<0.013 0	0.027 8~0.044 4	0.032 0~0.038 3
电解质中 KF 含量/%	4.55	4.01	1.14
电解质中 LiF 含量/%	1.68	2.62	1.21
平均电解温度/℃	949	946	954
正常槽运行过热度/℃	3	7.2	4.2
炭渣量/(kg·t ⁻¹)	13	2~4.5	0~3

注：正常槽运行状态判定标准为下料口通畅、电解质流动好、电压曲线稳定；X 企业和 Y 企业的阳极品质、钒含量、炭渣量，均为企业提供数据

3.2 阳极净耗与炭渣量

炭渣量与阳极质量密切相关^[7-11]，炭渣中的碳主要来自于“阳极净耗”中所指的“额外消耗”部分。1991 年瑞士铝业公司 W K Fisher 等推导出了阳极净耗与电解工艺参数和阳极质量参数的关系式^[2,7-8]：

$$N_C = C + \frac{334}{C_E} + 1.2(BT - 960) - 1.7C_{RR} + 9.3A_P + 8\lambda - 1.5A_{RR}$$

(1)

式中各参数含义及取值范围： N_C 为吨铝阳极净耗(400~500 kg/t)； C 为电解槽因数(270~310)； C_E 为电流效率(82%~95%)； BT 为电解槽温度(945~980℃)； C_{RR} 为 CO₂ 反应残余率(75%~90%)； A_P 为空气渗透率(0.5~5.0 nPm)； λ 为阳极导热率(3.0~6.0 W/m·K)； A_{RR} 为空气反应残余率(60%~90%)。其中，nPm 是气体通过阳极气孔能力的指标，指在一定时间内、一定压力下，一定

黏度的气体通过一定断面和厚度试样的数量。

阳极净耗包括“电解反应消耗”和“额外消耗”，额外消耗又包括阳极氧化和掉渣、掉块。然而，阳极掉渣或掉块生成的炭粒在进入电解质熔体后会再次被氧化燃烧掉一部分，剩余的炭粒才会形成炭渣。如果电解质与碳润湿性好，或电解质过热度小，炭粒不易与电解质分离，炭粒就会被电解质“包裹”不易氧化燃烧，从而导致炭渣量较多。相反，如果电解质与碳润湿不好，或电解质过热度大，炭粒能与电解质良好分离，炭粒就容易被氧化燃烧，最终炭渣量就会较少。电解质中的 KF 会显著降低电解质的表面张力、增加电解质与碳的润湿性，且 KF 含量越高越明显^[2]，这可能就是本文试验中发现 KF 含量和过热度对炭渣量有显著影响的内在原因。

3.3 其它影响因素

在炭渣量影响因素分析过程，我们注意到了一个问题：本企业全厂的阳极覆盖料采用集中处理，磨

粉后再分配到各个工区,无法对试验工区单独分开;即阳极覆盖料会对试验槽的炭渣量产生影响。

该企业的试验工区共36台槽,由于每天更换阳极需要阳极覆盖料共计约18 t,换算成吨铝每天约175 kg。在B阳极运行期间,多次对新分配来的阳极覆盖料,以及本试验区域B阳极的残极上方覆盖料进行取样,分析其中的含碳量,结果如表4所示。

表4 阳极覆盖料中含碳量分析结果
Table 4 Analysis results of carbon content in anode covering materials /%

取样日期	新分配来覆盖料 (磨粉料)	B阳极的残极上方 覆盖料(不同高度)*
2019-02-12	2.96	
2019-02-21	1.86	
2019-03-02	1.76	0.32
2019-03-31	1.35	0.76
平均	1.982 5	0.54
差值	1.442 5	

注:* B阳极的残极上方覆盖料取样是残极上方不同高度取样后等质量混合形成的混合样

新覆盖料来自全厂残极上方的覆盖料,其碳含量显著高于B阳极残极上方覆盖料的含碳量,这或许可以间接说明B阳极(高质量阳极)掉渣较少。

由于无法准确计算覆盖料在阳极周期内,循环进入电解质熔体中的比例,所以无法准确计算出覆盖料中碳引入的炭渣量。根据新换出残极上方覆盖料的形貌,其绝大部分是新落上面的氧化铝,且两个阳极之间原有的覆盖料大部分被消耗掉,估计覆盖料循环进入电解质熔体的比例将会在50%以上。

如果暂时认为50%~70%的覆盖料会循环进入电解质中,那么根据每天使用的覆盖料质量,以及表4中碳含量的差值,粗略计算因覆盖料而引入的净碳约为1.26~1.77 kg/t。若捞出的炭渣中净碳含量按25%计算,则换算为炭渣约为5~7 kg/t。当然,进入电解质的碳也会被“燃烧”掉一部分,不会全部形成炭渣。

由此可以看出,覆盖料中碳含量对炭渣的产生量也不容忽视。

4 结论

1)高质量阳极能够明显降低电解过程产生的炭渣量和电解质中的含碳量,但是炭渣量也受运行过热度影响。运行过热度相当时,阳极质量高则炭渣

量和含碳量降低;阳极品质相同,运行过热度高则炭渣量和含碳量减少,运行过热度低则炭渣量和含碳量升高。

2)电解运行过热度小、炭渣量相对偏高,可能是高钾低锂电解质体系下铝电解过程的特征。

3)电解质组分调整试验和其它企业调研结果表明,电解质中锂钾含量对炭渣量影响明显,随着电解质中KF含量降低,炭渣量明显降低;提高电解质中的LiF含量,能够明显提高运行过热度,有利于降低炭渣量。

4)在降低炭渣量的过程中,覆盖料本身的含碳量也会是一个重要的影响因素。

参考文献

- [1] PERRUCHOUD R C, HULSE K L, FISCHER W K, et al. Dust generation and accumulation for changing anode quality and cell parameters[C]//TOMSETT A, JOHNSON J. Light Metals 1999, John Wiley & Sons, Ltd. 1999: 649-656. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch85>.
- [2] 冯乃祥. 铝电解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. FENG N X. Aluminum Electrolysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [3] 常福增. 高电流密度下铝电解阳极行为的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009. CHANG Z F. Research on anode behavior of aluminum electrolysis under high current density[D]. Shenyang: Northeast University, 2009.
- [4] 王平甫, 刘凤琴, 童春秋, 等. 铝电解槽炭阳极氧化掉渣裂纹掉块的危害和影响因素[J]. 轻金属, 2002(3): 42-45. WANG P F, LIU F Q, TONG C Q, et al. Hazards and influencing factors of carbon anode oxidation, slag falling, crack and block falling in aluminum reduction cell[J]. Light Metals, 2002(3): 42-45.
- [5] 冯鲁兴, 薛济来, 方宁, 等. 阳极电流密度对预焙阳极孔隙结构及电解消耗的影响[J]. 轻金属, 2015(3): 24-28. FENG L X, XUE J L, FANG N, et al. Effect of current density on porous structures and amount of carbon dust in aluminum electrolysis [J]. Light Metals, 2015(3): 24-28.
- [6] 张亚楠, 柴登鹏, 周云峰, 等. 铝电解炭渣资源化综合利用研究现状[J]. 世界有色金属, 2019(7): 1-4. ZHANG Y N, CHAI D P, ZHOU Y F, et al. Research progress on resource comprehensive utilization technology of carbon dust in aluminum electrolysis[J]. World Nonferrous Metals, 2019(7): 1-4.

- [7] 黄华. 铝用炭阳极净耗的计算及影响因素[J]. 铝镁通信, 2006(4):44-45.
HUANG H. Calculation of net consumption of carbon anode for aluminum and its influencing factors[J]. Aluminum Magnesium Communication, 2006 (4): 44-45.
- [8] 路忠盛. 铝用炭阳极消耗的机理和影响因素[J]. 炭素技术, 2002(3):38-40.
LU Z S. The consumption mechanism of carbon anode for aluminum electrolysis and its influencing factors[J]. Carbon Techniques, 2002(3):38-40.
- [9] 赖延清, 刘业翔. 电解铝炭素阳极消耗研究评述[J]. 轻金属, 2002(8):3-10.
LAI Y Q, LIU Y X. Research review of carbon anode consumption in aluminum electrolysis[J]. Light Metals, 2002(8):3-10.
- [10] 吉延新, 贾鲁宁, 于易如, 等. 提高铝用阳极抗氧化性的分析[J]. 轻金属, 2009(11):37-40.
JI Y X, JIA L N, YU Y R, et al. Analysis of improves oxidation resistance of aluminum anode [J]. Light Metals, 2009(11):37-40.
- [11] 李清, 崔旭东, 高文义. 铝电解生产过程中炭渣产生的根源及应对措施[J]. 轻金属, 2015(11):36-38.
LI Q, CUI X D, GAO W Y. Causes and countermeasures of carbon dust in aluminum electrolysis production[J]. Light Metals, 2015(11):36-38.