

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.05.004

高锂钾电解质体系下降低炭渣量的技术

包生重,侯光辉,陈开斌,李昌林,罗英涛,
王怀江,张芳芳,石序,罗丽芬

(中铝郑州有色金属研究院有限公司,郑州 450041)

摘要:针对高锂钾电解质体系下铝电解生产过程炭渣量显著偏高的问题,研究分析了电解质对炭素材料润湿性的变化规律,以及分子比对电解质含碳量的影响,并开展了降低炭渣量的工业试验,炭渣量降低显著。结果表明:相比纯净体系电解质,高锂、高钾体系电解质对炭素材料的润湿性较好,降低分子比或提高过热度能够降低润湿性;通常条件下,高锂、高钾体系电解质中含碳量高于纯净体系,但合理的分子比控制范围可以使含碳量保持在0.2%以下;高锂和高钾体系下降低炭渣量的关键措施略有不同,但所遵循的规律与电解质对炭素材料润湿性变化的规律相同。

关键词:炭渣量;高锂钾电解质体系;润湿性;分子比;过热度

中图分类号:TF821 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7545(2023)05-0019-07

Technology of Reducing Carbon Residue Amount in Aluminum Electrolysis Production with High Lithium Potassium Electrolyte System

BAO Sheng-zhong, HOU Guang-hui, CHEN Kai-bin, LI Chang-lin, LUO Ying-tao,
WANG Huai-jiang, ZHANG Fang-fang, SHI Xu, LUO Li-fen
(Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd. of CHALCO, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: Address to significantly high carbon residue amount in aluminum electrolysis with high lithium potassium electrolyte, the wettability of electrolyte on carbon materials and influence of molecular ratio on carbon content in electrolyte melt were studied, then industrial tests were carried out, and the carbon dust amount drops significantly. The results show that the wettability of high lithium potassium electrolyte with carbon materials is better than that of pure electrolyte. The wettability could be reduced by decreasing molecular ratio or increasing superheat of electrolyte. Generally, carbon content in high lithium potassium electrolyte is higher than that of pure system, but reasonable range of molecular ratio could keep the carbon content below 0.2%. The key measures of reducing carbon dust amount in high lithium and high potassium system are slightly different, but the rule is the same as that of electrolyte to the change of the wettability of carbon materials.

Key words: carbon residue amount; high lithium potassium electrolyte system; wettability; molecular ratio; superheat

近年来,国内电解槽普遍存在炭渣过多的现象。增加阳极毛耗和氟化盐单耗、恶化车间环境,并加重炭渣过多会影响电解槽的稳定运行、降低电流效率、工人负担^[1-7]。国家已将炭渣列为危险废物,炭渣的

收稿日期:2023-01-07

基金项目:2022年中国铝业股份有限公司重大科技项目(中铝股份科发字[2022]455号)

作者简介:包生重(1981-),男,硕士,高级工程师

无害化处理增加了企业的生产成本^[7],如果处置利用不当,会对环境造成危害。炭渣过多已经成为长期困扰电解铝生产的技术难题。

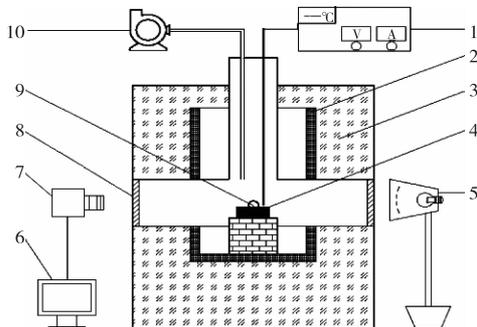
对实体生产企业的调研及相关研究结果表明,阳极生产原料的低质化和电解质成分复杂化是我国电解铝产业的特有情况,也是导致炭渣过多的关键因素^[1-2,6,8]。阳极品质下降特别是抗氧化能力降低,会导致阳极掉渣多,炭渣量升高;电解质成分复杂化主要是锂、钾含量升高,高锂、高钾电解质体系下,炭渣量显著高于纯净体系。

本文重点针对高锂、高钾复杂电解质体系下炭渣量高的问题,从电解质对炭素材料润湿性影响规律的角度出发,结合生产实践,制定针对性的措施,从而降低生产过程中的炭渣量,为生产企业提供技术参考。

1 润湿性分析

电解质与炭阳极的润湿性不仅影响电解反应过程,还会影响电解质与炭粒的分离效果。润湿性好,阳极气体易排出,阳极气膜电阻降低^[9-11],但润湿性好也会使电解质与炭粒不易分离,炭粒被电解质熔体包裹不易燃烧气化。

电解质与炭阳极润湿性的好坏通常用润湿角来表征。测量润湿角的方法有很多种,主要有座滴法、微滴法、浸入法、毛细压力法等^[9,12-13],本文采用座滴法。当液相与固相接触时,液相将在固相表面铺展而形成液滴,座滴法就是利用液体在水平固定垫片上自然铺展形成液滴的形状来测量它的润湿角。试验装置如图 1 所示。



1—控温仪;2—加热体;3—保温层;4—工业阳极;
5—电灯;6—电脑;7—摄像机;8—石英观察窗;
9—电解质液滴;10—真空泵

图 1 润湿角测定试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wetting angle measurement experimental device

润湿角测试开始前,先用真空泵清除密闭系统中的空气,再通入氩气,并升温到 900 °C;随后用真空泵清除氩气,再通入二氧化碳,并将温度升至试验测试温度,同时打开图像记录系统,记录电解质的融化过程。测量过程用工业高速摄影机从观察窗记录电解质融化过程。所有结束后,使用视频剪辑软件对视频中的图片进行提取,然后用 Auto CAD 软件进行角度测量。由于电解质溶化后,通常先收缩成球形液滴,再逐步铺展开来,润湿角是从大到小不断变化的过程。为了便于对比,均取熔化后 5 min 时的润湿角作为对比数据。

图 2 为纯净电解质体系、高钾电解质体系(KF 含量 5%)和高锂电解质体系(LiF 含量 5%),在不同分子比下测定的电解质与炭素材料的润湿角情况,过热度均为 5 °C。

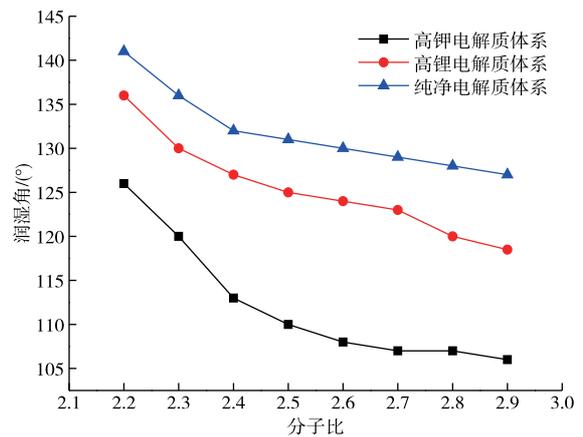


图 2 电解质分子比对润湿角的影响(过热度 5 °C,时间 5 min)

Fig. 2 Effects of electrolyte molecular ratio on wetting angle (Superheat 5 °C ,time 5 min)

图 3 为纯净电解质体系、高钾电解质体系(KF 含量 5%)和高锂电解质体系(LiF 含量 5%),分别在分子比 2.3、2.5、2.8 时,不同过热度条件下,测定的电解质与炭素材料的润湿角情况。

由图 2 和图 3 可知:

1)相比纯净电解质体系,高钾和高锂电解质体系与炭素材料的润湿角小,说明润湿性较好,特别是高钾电解质体系。相同分子比下,三种电解质体系对炭素材料的湿润性从大到小的顺序为:高钾电解质>高锂电解质>纯净电解质;

2)电解质与炭素材料的润湿角随分子比降低或过热度的增加而增大,即润湿性变差。

高锂、高钾电解质体系对炭素材料的润湿性好于纯净体系,这可能是导致高钾、高锂电解质体系下电解质含碳量,以及电解过程炭渣量高于纯净体系的主要原因之一。

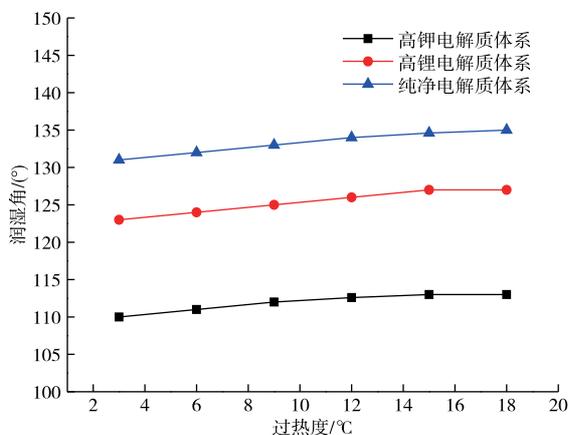


图3 电解质过热度对润湿角的影响(时间5 min)

Fig. 3 Effects of electrolyte superheat on wetting angle (Time 5 min)

2 电解质含碳量分析

在生产实践中,通过取样分析发现,高钾、高锂体系下电解质中的含碳量较多达到了0.2%以上,分子比高的甚至更高,而纯净体系下电解质中含碳

量基本都在0.1%以内。

为了明确电解质中含碳量的关键影响因素,分别在A企业(近纯净体系, $KF < 1.2\%$ 、 $LiF < 1.2\%$)、B企业(南方高钾电解质体系, $KF = 5\%$ 左右)、C企业(北方高锂电解质体系, $LiF = 5\%$ 左右)的电解运行现场,选择不同分子比(CR)的电解槽,进行电解质取样分析。

2.1 A企业不同分子比下电解质含碳量

表1为A企业不同分子比电解槽的电解质分析结果,图4为A企业不同分子比电解槽的过热度 and 电解质含碳量。从表1和图4可以看出:纯净体系下($KF < 1.2\%$, $LiF < 1.2\%$),电解槽运行温度 $950 \sim 965\text{ }^\circ\text{C}$,过热度整体 $5 \sim 10\text{ }^\circ\text{C}$;整体上分子比升高,过热度降低,电解质含碳量升高;纯净体系下,电解质含碳量整体较低,基本都在0.1%以下。

2.2 B企业不同分子比下电解质含碳量

表2为B企业不同分子比电解槽的电解质分析结果,图5为B企业不同分子比电解槽的过热度 and 电解质含碳量。从表2和图5可以看出:高钾体系下($KF = 5\%$ 左右),电解槽运行温度 $945 \sim 955\text{ }^\circ\text{C}$,但过热度整体偏低(小于 $5\text{ }^\circ\text{C}$);整体上分子比升高,过热度降低,电解质含碳量升高;分子比 $2.4 \sim 2.55$ 的电解槽,过热度易保持在 $3\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,且碳含量相对较低,可以低至0.2%以下。

表1 A企业不同分子比电解槽的电解质分析结果

Table 1 Analysis results of electrolyte samples in electrolytic cells with different molecular ratio in enterprise A

槽号	KF/%	LiF	槽温/°C	初晶温度/°C	过热度/°C	CR	C/%
1418#	1.09	1.23	952.3	941.5	10.4	2.26	0.032
1423#	1.34	1.17	953.8	945.3	9.5	2.27	0.034
1415#	1.13	1.18	955.5	947.7	7.8	2.31	0.050
1438#	1.15	1.32	955.7	948.3	7.4	2.34	0.046
1421#	1.26	1.12	957.0	949.8	7.2	2.36	0.048
1420#	1.16	1.21	956.8	950.2	6.6	2.38	0.040
1411#	1.15	1.15	958.0	951.8	6.2	2.40	0.052
1401#	1.28	1.24	959.1	953.3	5.8	2.42	0.054
1432#	1.05	1.08	960.8	955.6	5.2	2.45	0.056
1404#	1.12	1.13	961.1	956.3	5.1	2.46	0.064

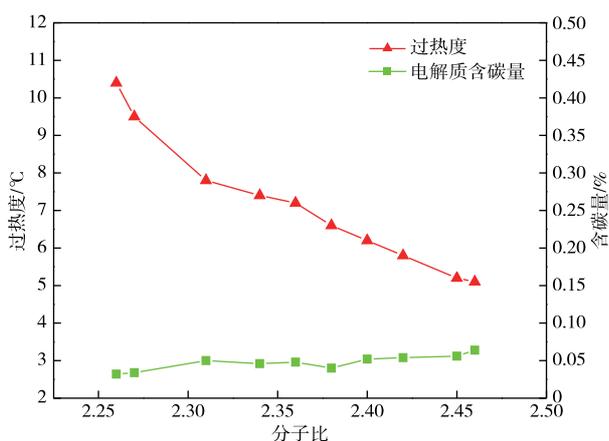


图4 A企业不同分子比电解槽的过热度和电解质含碳量

Fig. 4 Curves of superheat and electrolyte carbon content in electrolytic cells with different molecular ratio in enterprise A

表2 B企业不同分子比电解槽的电解质分析结果

Table 2 Analysis results of electrolyte samples in electrolytic cells with different molecular ratio in enterprise B

槽号	KF/%	槽温/°C	初晶温度/°C	过热度/°C	CR	C/%
2629#	4.62	950	946.2	4.8	2.40	0.12
2628#	4.54	951	947.6	4.4	2.46	0.14
2627#	4.44	949	946.4	3.6	2.50	0.16
2626#	4.30	952	948.8	4.2	2.52	0.17
2630#	4.39	951	947.4	4.6	2.55	0.19
2631#	4.75	953	950.6	2.4	2.62	0.23
2636#	4.46	950	947.8	2.2	2.70	0.29
2635#	4.61	952	949.8	2.2	2.72	0.38
2528#	4.90	953	951.1	1.9	2.82	0.36
2531#	4.57	954	952.4	1.6	2.82	0.42
2615#	4.72	952	950.4	1.6	2.90	0.45
2616#	5.34	953	951.5	1.5	2.92	0.46

2.3 C企业不同分子比下电解质含碳量

表3为C企业不同分子比电解槽的电解质分析结果,图6为C企业不同分子比电解槽的过热度和电解质含碳量。从表3和图6可以看出:高锂体系下(LiF=5%左右),电解槽运行925~938℃,但过热度整体较高(10~12℃);分子比升高,过热度变化不明显,但电解质中含碳量升高;分子2.8以下

的电解槽,电解质含碳量基本在0.2%以下。

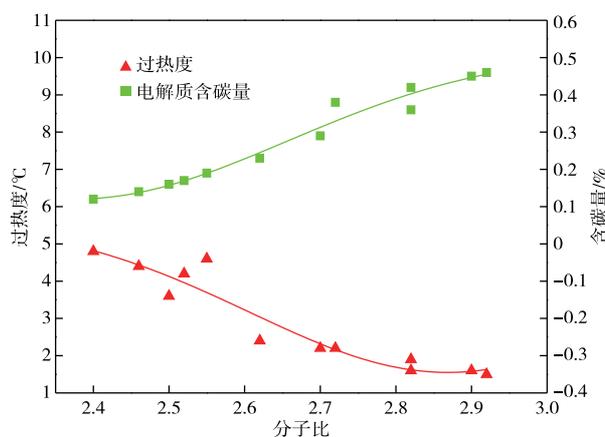


图5 B企业不同分子比电解槽的过热度和电解质含碳量

Fig. 5 Curves of superheat and electrolyte carbon content in electrolytic cells with different molecular ratio in enterprise B

表3 C企业不同分子比电解槽的电解质分析结果

Table 3 Analysis results of electrolyte samples in electrolytic cells with different molecular ratio in enterprise C

槽号	LiF/%	槽温/°C	初晶温度/°C	过热度/°C	CR	C/%
2531#	5.01	934	924.2	10.8	2.65	0.14
2528#	5.03	932	921.5	10.5	2.68	0.15
2134#	5.15	938	926.2	12.8	2.73	0.18
2147#	5.20	932	921.3	10.7	2.73	0.16
2205#	5.32	926	914.4	11.6	2.82	0.21
2208#	5.11	937	924.7	12.3	2.83	0.22
2243#	5.30	930	918.1	11.9	2.89	0.26
2252#	5.50	931	920.2	10.8	2.90	0.25
2254#	5.56	930	917.6	12.4	2.94	0.32
2253#	5.62	928	916.7	11.3	2.95	0.34

通过对A、B、C三个企业三种典型电解质体系下,不同分子比电解槽的过热度与电解质含碳量分析,可以看出:通常条件下,高锂、高钾电解质中含碳量显著高于纯净体系,这与高锂、高钾体系对炭素材料润湿性好于纯净体系的规律一致;电解质含碳量均随分子比的降低而降低,高锂、高钾体系在合适的低分子比区间时含碳量也降低至0.2%以下,这与降低分子比能够降低电解质对炭素材料润湿性的规律一致。

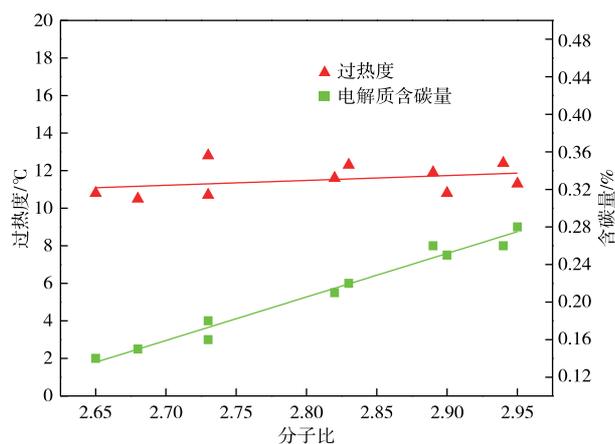


图6 C企业不同分子比电解槽的过热度和电解质含碳量

Fig. 6 Curves of superheat and electrolyte carbon content in electrolytic cells with different molecular ratio in enterprise C

3 降低炭渣量试验

根据现场调研及跟踪分析,高锂、高钾电解质体系下炭渣量显著高于纯净体系。纯净电解质体系下吨铝炭渣量基本在3~5 kg以下,高锂体系大都在5~15 kg,而高钾体系炭渣量基本在10 kg以上,甚至个别企业达到了20 kg以上。

B企业为高钾电解质体系,其主要问题特征是:运行过热度整体偏小,分子比波动相对较大、炉帮薄、堵卡严重、沉淀多、炭渣多、效应多。C企业为高锂电解质体系,其主要问题特征是:运行过热度虽然较高,但电解温度偏低,氧化铝溶解差、沉淀多、炭渣多、闪烁效应多,并且通常为了提高电解温度,而将分子比控制在较高的水平。

本文结合电解质与炭素材料的润湿规律,并根据实际运行特征,针对B企业(高钾电解质体系)和C企业(高锂电解质体系)炭渣量过高的问题,开展降低炭渣量试验,以确定降低炭渣量的关键控制因素。

3.1 B企业降低炭渣量试验

选择3台具有高钾电解质体系典型问题特征的电解槽作为试验槽,其初始槽况为:运行过热度低、分子比波动大、铝水平高、下料口易堵卡、沉淀多、运行不稳定、炉帮薄、炭渣多、电解质发黑、易出现“压槽”。针对该3台槽的状况,制定以“提高过热度-稳定分子比”为核心的针对性措施。

1)清理炉底沉淀,降低铝水平,提高电解槽运行

过热度。先通过清理沉淀降低铝水平,铝水平降低后,散热减小,电解温度提高,运行过热度增加,电解槽的运行稳定性提高。若沉淀清理后,铝水平降低不明显,则辅助加大出铝量,降低铝水平。但要以多点铝水平差异大于3 cm,作为铝水平停止降低的判定依据。

2)稳定控制分子比(2.4~2.55),过热度保持在3~5 °C。增加分子比和过热度分析频次至每周分析2次,及时调整氟化铝加料量。提高过热度主要通过降低铝水平实现,辅助电压调整。过热度升高,电解槽的直观表现为火眼开孔率大于75%。

3)根据铝水平的降低量,缓降槽电压,利用热平衡促进炉帮增厚。铝水平每降低1 cm,槽电压降低量不超过20 mV,利用电压降低,重建热平衡的过程增厚炉帮,并留有余量,确保过热度能在3 °C以上。

经过20周的实施,3台试验槽炭渣量降低显著,稳定性得到大幅改善,槽电压和能耗也显著降低。实施前后电解槽指标变化及炭渣量变化如表4和图7所示。

表4 B企业高钾体系三台试验槽实施前后指标变化

Table 4 Variation of key indicators before and after corresponding measures conducted on the test cells of enterprise B

控制参数及指标	实施前(三槽平均)	实施后(三槽平均)
吨铝炭渣量/kg	20	12
电解质含碳量/%	0.38	0.15
平均电压/V	3.977	3.913
分子比	2.3~2.7	2.4~2.55
电解温度/°C	948	950
过热度/°C	0~3	3~5
压差/mV	32	14
铝水平/cm	29.6	26
炉帮/cm	10	14.6
火眼开孔率/%	50	>90
效应系数	0.26	0.12
吨铝直流电耗/kWh	13 068	12 873

3.2 C企业降低炭渣量试验

选择3台具有高锂电解质体系典型问题特征的电解槽作为试验槽,其初始槽况为:电解温度低(小于930 °C)、分子比高、氧化铝溶解性能差、沉淀多、闪烁效应多、稳定性差、铝水平高、槽电压及能耗偏高。针对该3台槽的状况,制定以“提高电解温度-降低分子比”为核心的针对性措施。

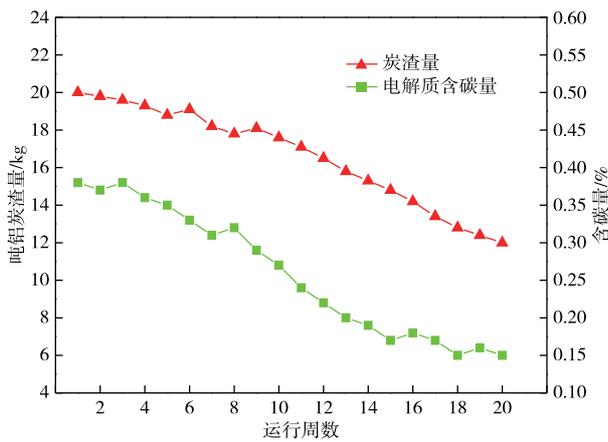


图7 B企业高钾体系三台试验槽炭渣量及碳含量变化

Fig.7 Change tendency of carbon dust amount and carbon content in the test cells of enterprise B

1) 清理炉底沉淀,降低铝水平,提高电解温度。先通过清理沉淀降低铝水平,铝水平降低后,散热减小,电解温度升高,氧化铝溶解性能提高。若沉淀清理后,铝水平降低不明显,则辅助加大出铝量,降低铝水平。但以多点铝水平差异大于3 cm作为铝水平停止降低的判定依据。

2) 降低分子比至2.6~2.8内。增加分子比和过热度分析频次,每周分析2次,及时调整氟化铝加料量。电解温度升高主要通过铝水平调整实现,辅助电压调整,电解温度要保持在930℃以上。

3) 根据铝水平的降低量,缓降槽电压,利用热平衡促进炉帮增厚。铝水平每降低1 cm,槽电压降低量不超过20 mV,利用电压降低,重建热平衡的过程增厚炉帮,并留有余量,确保电解温度能在930℃以上。

经过22周的实施,3台试验槽炭渣量降低显著,槽电压和能耗也显著降低。实施前后电解槽指标变化及炭渣量变化如表5和图8所示。

从B企业和C企业降低炭渣量试验可以看出:针对高钾体系和高锂体系的问题特征,分别实施以“提高过热度-稳定分子比”、“提高电解温度-降低分子比”为核心的针对性措施,炭渣量和能耗均显著降低;高钾和高锂体系的关键措施略有不同,但所遵循的规律相同,即提高过热度或降低分子比至合理范围,能够降低电解质与炭素材料的润湿性,有利于炭粒与电解质分离,从而降低炭渣量。

表5 C企业高锂体系三台试验槽实施前后指标变化

Table 5 Variation of key indicators before and after corresponding measures conducted on the test cells of enterprise C

控制参数及指标	实施前(三槽平均)	实施后(三槽平均)
吨铝炭渣量/kg	15	6
电解质含碳量/%	0.28	0.12
平均电压/V	3.958	3.918
分子比	2.8~2.95	2.6~2.8
电解温度/℃	925	932
过热度/℃	8~12	10~15
压差/mV	30	16
铝水平/cm	31	28
炉帮/cm	10.5	12.4
火眼开孔率/%	75	>90
效应系数	0.119	0.09
吨铝直流电耗/kWh	12 911	12 780

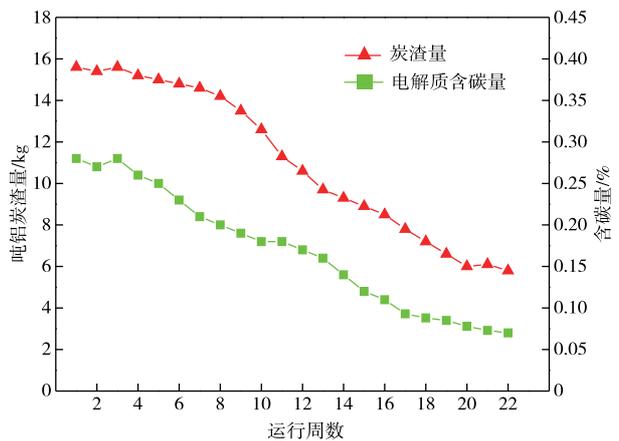


图8 C企业高锂体系三台试验槽炭渣量及碳含量变化

Fig.8 Change tendency of carbon dust amount and carbon content in the test cells of enterprise C

4 结论

1) 相比纯净电解质体系,高钾和高锂电解质体系与炭素材料的润湿性较好,特别是高钾电解质体系。相同分子比下,三种电解质体系对炭素材料的润湿性从大到小的顺序为:高钾电解质>高锂电解质>纯净电解质。降低分子比或提高过热度,电解质与炭素材料的润湿性变差。

2) 电解质含碳量的影响规律与电解质与炭素材料润湿性的影响规律一致。高锂、高钾体系对炭素材料润湿性好于纯净体系,高锂、高钾电解质中含碳量显著高于纯净体系。降低分子比能够降低电解质

与炭素材料的润湿性,高锂、高钾体系下低分子时,也能使电解质中的含碳量降低至0.2%以下。

3)针对当前高锂、高钾电解质体系的问题特征,降低炭渣量的关键措施略有不同,但所遵循的规律与电解质与炭素材料润湿性变化规律相同。高钾体系降低炭渣量的关键措施以“提高过热度-稳定分子比”为核心,高锂体系降低炭渣量的关键措施以“提高电解温度-降低分子比”为核心,提高过热度或降低分子比,都是为了降低电解质与炭素材料的润湿性,促使炭粒与电解质分离,从而降低炭渣量。

参考文献

- [1] 罗英涛,王平甫. 抗氧化低消耗优质炭阳极与电解铝生产高效低耗技术分析[J]. 炭素技术, 2018, 37(2): 58-61.
LUO Y T, WANG P F. Analysis on the technological economy of high quality carbon anode with anti-oxidation and low consumption in aluminum electrolysis [J]. Carbon Techniques, 2018, 37(2): 58-61.
- [2] 包生重,罗英涛,陈开斌,等. 高钾电解质体系下阳极品质和锂钾含量对炭渣量的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(10): 34-41.
BAO S Z, LUO Y T, CHEN K B, et al. Effects of anode quality and KF & LiF contents on amount of carbon dust during aluminum electrolysis with high potassium electrolyte system [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(10): 34-41.
- [3] 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, Beijing, 2008.
- [4] 邱竹贤. 预焙槽炼铝[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
QIU Z X. Aluminum smelting in prebaked cells [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [5] 刘业翔. 现代铝电解[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
LIU Y X. Modern aluminum electrolysis [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [6] 冷龙洋,张正和,文胜毅,等. 高钾电解质体系的物理化学性质及铝电解节能试验[J]. 轻金属, 2022(5): 19-23.
LENG L Y, ZHANG Z H, WEN S Y, et al. Physical and chemical properties of high-potassium electrolyte system and energy saving test for aluminum electrolysis [J]. Light Metals, 2022(5): 19-23.
- [7] 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, 2018(7): 1-3, 5.
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, 2018(7): 1-3, 5.
- [8] 曹阿林,姚世焕. 铝电解质体系中锂的富集机制与应对措施分析[J]. 轻金属, 2017(7): 27-31.
CAO A L, YAO S H. Analysis on enrichment mechanism of Li in the aluminum electrolyte and its measures [J]. Light Metals, 2017(7): 27-31.
- [9] 王斌,杜金晶,刘宜汉,等. NiFe₂O₄基惰性阳极的润湿性及气泡析出行为[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(8): 54-58.
WANG B, DU J J, LIU Y H, et al. Bubble behavior and wettability of NiFe₂O₄-based inert anodes [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(8): 54-58.
- [10] 杨建红,陈晓春,李庆余,等. Na₃AlF₆-5%Al₂O₃熔体对铝电解机械掺杂碳阳极的润湿性研究[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 1999, 30(6): 555-557.
YANG J H, CHEN X C, LI Q Y, et al. Study on wettability of Na₃AlF₆-5%Al₂O₃ melt to mechanically doped carbon anodes in aluminum electrolysis [J]. Journal of Central South University of Technology (Science and Technology), 1999, 30(6): 555-557.
- [11] 叶邵龙,肖劲,杨建红,等. 铝用改性预焙碳阳极实验室研究[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 245-250.
YE S L, XIAO J, YANG J H, et al. Laboratory study on modified prebaked carbon anode for aluminum [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 245-250.
- [12] 席锦会,谢英杰,姚广春,等. 电解质对铝用阳极润湿性的研究[J]. 轻金属, 2007(2): 31-34.
XI J H, XIE Y J, YAO G C, et al. Study on wettability of electrolyte on anodes used in aluminum electrolysis [J]. Light Metals, 2007(2): 31-34.
- [13] 刘世英,李文珍,班允刚,等. 电解质对石墨质阴极炭块的润湿性研究[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(6): 20-22.
LIU S Y, LI W Z, BAN Y G, et al. Study on the wettability of electrolyte for graphite cathode blocks [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(6): 20-22.