

铝电解槽绿色低碳新技术的应用

张健

(沈阳铝镁设计研究院有限公司, 辽宁沈阳 110001)

[摘要] 在全球能源日益紧张和环保要求日益严格的背景下,电解铝行业因其高能耗和高碳排放受到广泛关注。本文系统研究了铝电解槽节能新技术,重点探讨了阴极磷铁浇铸技术、复合嵌铜钢棒技术、自均衡母线技术、双侧集气技术、新型阳极钢爪、阳极开槽技术等技术的原理及应用。这些技术在减少能源消耗方面表现出显著的潜力,使吨铝直流电耗降至12 200 kW·h以下。应用这些技术有助于缓解电解铝生产企业的节能降碳压力,提高生产的安全性和稳定性。

[关键词] 电解槽;节能降碳;双侧集气;磷铁浇铸;新型阳极钢爪;阳极开槽技术

[中图分类号] TF821 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)02-0063-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.02.009

0 引言

电解铝行业在能源日益紧张和环保要求越来越严格的背景下,因其高能耗和高碳排放受到特别关注。2021年国家发展改革委印发《关于完善电解铝行业阶梯电价政策的通知》(发改价格[2021]1239)之后,电解铝企业面临的重要议题是节能降碳。2020年全国电解铝综合交流电耗为13 543 kW·h/t^[1],按照阶梯电价政策要求,自2023年起各年度的电价及吨铝液电力成本逐渐增加,2025年开始,如某电解铝厂交流电耗为13 543 kW·h/t,则吨铝成本直接增加1 761元,这是许多电解铝企业无法承受的。因此,降低铝电解槽的能耗成为电解铝工业亟待解决的关键问题。铝电解槽节能的总体思路是以理论为指导,以工业化试验及生产实际测试为技术验证手段,研发全新的铝电解槽节能技术体系。近年来,一系列新的节能技术被提出和应用于铝电解槽中,大大缓解了电解铝企业的节能压力,为保证生产的安全性和稳定性提供了技术支持。

1 阴极磷铁浇铸技术

我国铝电解槽大多沿用糊料扎固技术组装阴极炭块,即采用阴极糊充填钢棒两侧的缝隙,人工现场使用风动工具捣固压实。采用这项技术,电解槽启动初期因糊料受热软化产生变形,更重要的是阴极压降较高。阴极磷铁浇铸技术在发达国家电解铝行业已成为主流,约占全部阴极组装数量的60%以上。阴极磷铁浇铸技术的主要优势是阴极炭块组连接均匀性好,能够显著降低阴极压降,具有显著的节能效果,更利于提高电解槽寿命。如果阴极钢棒和阴极炭块预热温度不均匀,会产生热冲击,在磷铁浇铸过程中产生大裂纹,而内裂纹及微裂纹若在生产中进一步扩展,将导致阴极炭块断裂。导致裂纹产生的诸多因素包括阴极炭块材质、磷铁成分、浇铸工艺、浇铸顺序、预热温度及均匀性等。

1.1 阴极炭块材质对裂纹产生的影响

当温度1 350℃左右的磷铁浇铸料浇入阴极炭块钢棒槽之后,阴极炭块钢棒槽内表面温度迅速上升。磷铁浇铸料带来的热量无法从阴极钢棒槽内壁迅速传导到阴极炭块外部,发生不均衡的热膨胀,导致阴极钢棒槽侧壁出现外翻,阴极炭块底部出现上弯的现象,产生裂纹的风险增大,因此,阴极炭块的导热性对磷铁浇铸阴极技术中裂纹产生影响很大。

常用的石墨化、石墨质、半石墨质阴极材料都是碳的同素异形体,但其导电性和导热性存在很大差

[收稿日期] 2024-10-08

[作者简介] 张健(1988—),男,辽宁沈阳人,硕士,高级工程师,主要从事电解铝设计和研发工作。

[引用格式] 张健. 铝电解槽绿色低碳新技术的应用[J]. 绿色矿冶,2025,41(2):63-67.

ZHANG Jian. Application of green low carbon new technologies for aluminum reduction cells[J]. Sustainable Mining and Metallurgy,2025,41(2):63-67.

别^[2-3]。石墨化材料的导电性和导热系数分别比石墨质材料高 1/3 和 2 倍,半石墨质材料的导电性和导热性最差,因而这三种阴极炭块材质的应力变化也存在差异,图 1 是不同材质阴极钢棒槽角部应力变化情况。从图 1 可看出,石墨化阴极炭块产生最大应力所需时间最短,且应力最小,石墨质阴极炭块产生的最大应力和所需时间约为石墨化阴极炭块的 2 倍,半石墨质阴极炭块约为石墨化阴极炭块的 3 倍。阴极炭块吸收磷铁浇铸料热量后温度达到最高时,阴极炭块的应力达到最大,而阴极炭块的导热率决定了最大应力产生的时间,即裂纹可能出现的时间。导热性越差,阴极炭块内部温度梯度越大,裂纹越容易产生,实际生产中也证实了这一结果。通常磷铁浇铸结束后 3 min 之内是半石墨质阴极炭块角部裂纹出现的最危险时段;3 min 后,其角部裂纹产生的概率很小。阴极磷铁浇铸技术中最容易产生各种裂纹的是半石墨质阴极炭块。

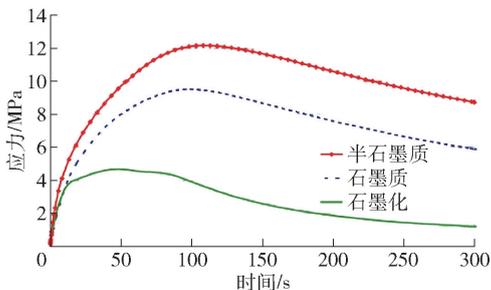


图 1 不同材质阴极炭块钢棒槽角部应力曲线图

1.2 预热温度及均匀性对裂纹产生的影响

当同时预热预组装的阴极钢棒与阴极炭块时,最先吸收热量的是阴极钢棒,通常阴极钢棒很快升温至 500 ℃。阴极炭块通过阴极钢棒被加热过程中,由于受到导热性限制的影响,可能受热不均匀,存在温度梯度,热应力随之产生。而在磷铁浇铸料浇入时,这种热应力在阴极炭块的某些区域会叠加,增加产生浇铸裂纹的可能性。

在阴极炭块结束预热、磷铁浇铸料浇铸之前,阴极炭块的红外图如图 2 所示。利用不同颜色来区分温度,从图 2 中可以直观地看出阴极炭块预热均匀性是不理想的。图 3 中记录了图 2 中 P1 及 P2 所示位置的炭块温度曲线。由于热源来自阴极钢棒上方,阴极炭块长侧面上部(P1)因接近热源而获得更高的温度,平均温度约 420 ℃;阴极炭块长侧面下部(P2)因远离热源且只能通过阴极炭块自身传导热升温,温度较低,平均温度为 220 ℃左右。阴极炭块

预热后水平方向上的温差为 70 ℃,而垂直方向上的温差在 200 ℃左右,导致阴极炭块中部产生弯折上抬,此时阴极炭块钢棒槽竖壁顶面受到的是拉应力,可见产生裂纹的风险增大,这表明炭块预热均匀性对预防裂纹产生的重要性。

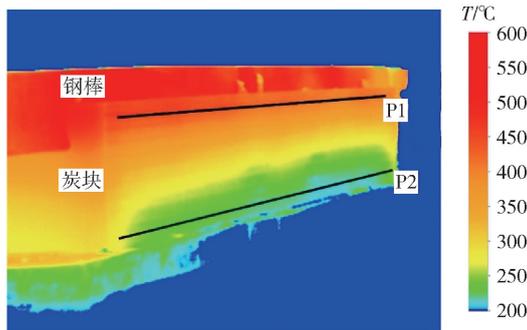


图 2 结束预热前阴极炭块红外图

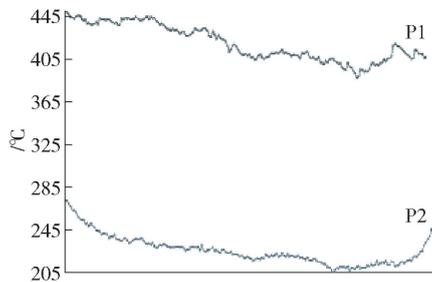


图 3 炭块上部和下部温度曲线图

1.3 阴极磷铁浇铸工艺技术和燃气预热装置

针对上述问题,某公司研发了阴极磷铁浇铸工艺技术和燃气预热装置,并在电解铝行业内积极推广使用,其应用产能达 600 万 t 以上。该技术具有燃控系统、加热系统、循环升温温控系统、浇铸系统等,形成了一整套成熟的阴极组装、生铁浇铸工艺及配套管控技术和装备。新开发的燃气预热系统单块阴极天然气耗量小于 50 m³,成本仅为传统电加热的 70%,磷铁浇铸组装成功率大于 99.9%,阴极压降可降低 70 mV 以上,从而实现吨铝节电 200 ~ 300 kW·h,为电解铝厂带来可观的经济效益。

2 复合嵌铜钢棒技术

铜的导电性远优于钢铁,相同条件下铜电导率是钢铁的 6 倍左右,但铜的价格也远远高于钢铁。为了提高阴极钢棒的导电性又不大幅提高成本,在阴极钢棒中嵌铜是一个重要手段。

通过调整铜和钢的结合形式及加铜量,显著提高了电解槽磁流体稳定性,降低铝液水平电流和阴极压降。据报道,国外铝业公司(如美铝、海德鲁、

EGA等)早已使用该技术措施。某公司最早于2015年10月对某500 kA电解槽进行了复合嵌铜棒技术试验,2台试验槽经过较长时间的平稳运行,阴极压降为150~170 mV,槽寿命已跃过3 000天,铝电解槽直流电耗小于12 450 kW·h/t-Al。

3 自均衡母线技术

产生阳极效应或换极后,电解槽的一些阳极炭块组存在几乎不导电的现象,导致电解槽的阳极及阴极电流分布非常不均衡,并通过母线传递给相邻电解槽,使相邻电解槽磁流体稳定性受到影响,进而出现摆动状况^[4]。某公司研发了非区块化配置方式的自均衡母线技术,该技术通过非区块化配置方式矫正阳极大母线、阳极组、铝液层电流分布偏差,阻断了非稳定状态下波动电流在电解系列中的传导。由于在阴极母线上形成等势体,磁流体稳定性模拟显示,该技术可降低铝电解槽的极距4 mm。

采用自均衡母线技术后,电解槽异常摆动期间和停槽期间电流分布如图4、图5所示。如图4所示,在阳极效应和异常摆动期间,采用自均衡母线技术后,电流分布偏差降低了70%。从图5可以计算出,上游槽A侧电流偏差最大值从13.53%降低到9.23%,平均值从5.15%降低到2.01%;上游槽B侧电流偏差最大值从14.12%降低到6.86%,平均值从4.73%降低到2.02%,也就是说短路状态下上游电解槽均衡性提高了60%左右。

4 双侧集气技术

早期的电解槽采用下烟道集气结构,由于运行时间较长,下部集气罩内积灰严重,造成烟道内压力及气流分布不均匀,远离烟道端的烟气量不足,从而导致电解槽集气效率降低。研发一种更适合大型铝电解槽的高效集气排烟技术就显得尤为迫切。

为了解决上述问题,在分析铝电解槽集气技术的基础上,对电解槽集气系统建立数值模型,利用计算机软件进行模拟,在综合考虑集气效率及投资因素后,采用电解槽双侧集气技术。该技术是在电解槽上部结构中采用两侧多点集气烟道形式,每个火眼都有两个专属的集气罩直接负责烟气收集,与传统下烟道的垂直分区多段集气形式相比,双侧集气形式降低了烟道压力损失,在同等集气效果的前提下,有效降低电解槽单槽排烟量及净化系统实际能耗。

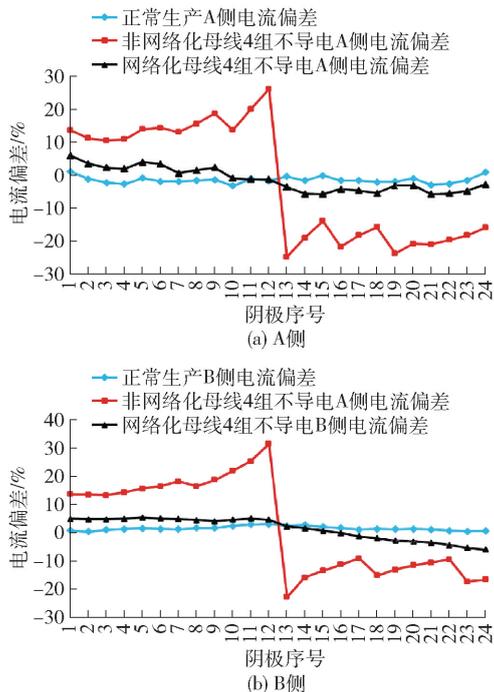


图4 摆动期间电流分布偏差对比图

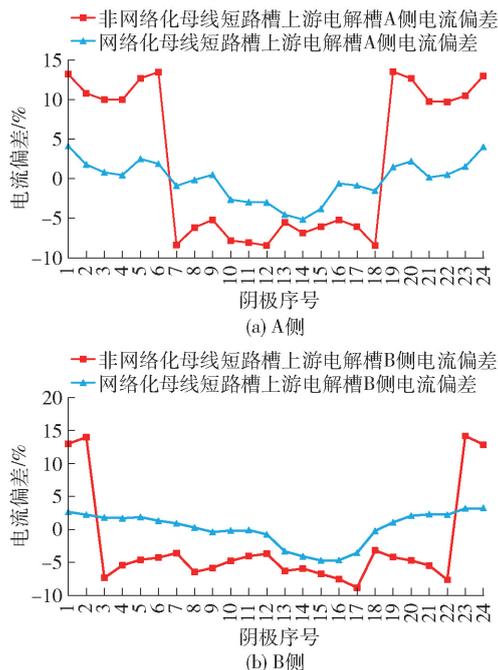


图5 停槽期间上游槽电流分布偏差对比图

某公司对采用双侧集气技术的电解槽内部流场数值模拟,结果见图6^[4]。从图6中可以看出,双侧集气技术能够有效地均衡电解槽内负压,保证电解槽各处排烟均衡,提高电解槽集气效率,从而减少氟化物的无组织排放,实现节能减排。以某电解铝厂的400 kA铝电解槽的集气系统为例,采用双侧集气技术后电解烟气净化效率由98.5%提高到99.7%,烟

道出口压力损失降低 80 Pa, 净化脱硫系统节省用电量约 17 kW·h/t-Al。

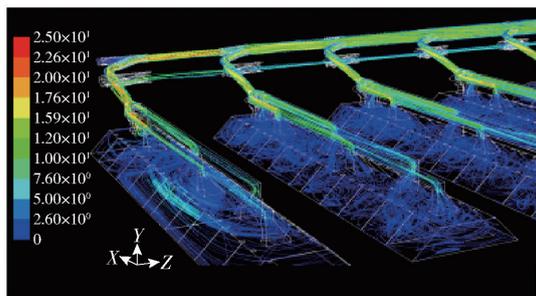


图 6 采用双侧集气技术的电解槽内部流场数值模拟图

5 新型阳极钢爪

阳极钢爪是电解铝生产过程的重要连接构件, 它会直接影响铁-炭压降, 从而影响吨铝电耗。目前电解铝企业普遍采用铸钢材质 (ZG230-450) 钢爪, 此类阳极钢爪在使用过程中, 可能存在内部夹渣、气孔缺陷的问题, 严重时钢爪甚至发生断裂, 造成了现有铸钢钢爪在电解铝生产过程中损坏率偏高, 使用寿命较短等不利因素, 电压降一般约为 60 mV。例如, 西北某企业在热态工况下实测 500 kA 铝电解槽铸钢阳极钢爪压降为 50 ~ 70 mV^[5]。近年来, 研究机构及铝企业开始研究开发使用 Q235 材质的型钢焊接成钢爪, 但由于 Q235 钢的碳含量高, 电阻率也大, 该结构形式的型钢焊接型钢爪效果和铸造钢爪大致相同^[6]。为了解决 Q235 材质的型钢焊接钢爪和铸钢钢爪存在的问题, 开发了新型阳极钢爪。

5.1 新型阳极钢爪成分

新型阳极钢爪采用强导电性材料, 以减少电阻率、增强导电性、降低钢爪压降为目的, 其材质的化学成分控制要求: C ≤ 0.005%、Mn ≤ 0.10%、Si ≤ 0.01%、0.003% ≤ P ≤ 0.005%、S ≤ 0.007%。经测试, 新型阳极钢爪电阻率为 13.65 Ω, 较 Q235 材质钢爪降低 5.08 Ω^[6]。

5.2 新型阳极钢爪结构

新型阳极钢爪对传统钢爪的横梁及尺寸进行了较大优化和改进, 以确保新型阳极钢爪的受力特征^[6], 并在降低电阻率的前提下满足正常生产的需求。

在某 500 kA 电解槽上进行了新型阳极钢爪的应用试验, 结果表明, 采用新型阳极钢爪后, 其压降比传统阳极钢爪降低了 24 mV, 对应吨铝直流电耗降低了 77 kW·h^[5]。

6 阳极开槽技术

阳极开槽技术在国外早已有应用, 国内受阳极质量及开槽增加设备投资等因素影响, 应用范围一直有限。目前, 由于阶梯电价产业政策的逐步实施, 铝电解企业节能降耗压力猛增。为了实现电解铝的绿色发展, 提高能源利用效率, 阳极开槽技术已成为重点推荐的节能技术之一。阳极开槽技术是在阳极底部使用专用的开槽机开出预定间距和深度的槽, 使电解质中阳极气体排出更加通畅, 减少压力底掌气膜的形成, 从而降低气膜电压, 减少阳极效应和二次反应的发生, 提高电流效率, 最终降低阳极电压降, 实现节能的最终目的。

开槽技术应从优化开槽的形式入手, 制定开槽方案 (开槽时机、间距、深度等), 充分发挥该技术的节能潜力。另据有关研究, 底部开槽的气相率为 2.3%, 比未开槽降低 8.8%, 显示出节能降耗的效果^[7]。另据国内外公开报道, 使用阳极开槽技术可使铝电解生产电流效率提升 0.44%, 降低阳极压降约 10 mV, 对应的直流电耗降低 60 ~ 80 kW·h/t。

7 节能新技术应用效果

某公司多年来利用企业新建或老企业技改 (含大修) 时机, 连续在 180 ~ 600 kA 的槽型上应用了一项或多项上述铝电解槽节能新技术, 并在全系列中应用试验成果。其中的一些试验槽应用节能新技术效果见表 1, 全系列应用节能新技术效果见表 2。从表 1 可见, 2 台 400 kA 石墨化阴极炭块结合嵌铜钢棒的试验槽吨铝直流电耗为 12 152 kW·h, 低于

表 1 试验槽应用节能新技术效果统计

槽型/kA	试验槽数量/台	直流电耗/kWh·t ⁻¹
180	3	12 268
200	2	12 242
350	5	12 330
400	2	12 152
500	5	< 12 297
500	5	< 12 292
600	3	12 427

表 2 全系列应用节能新技术效果统计

槽型/kA	系列槽数量/台	直流电耗/kWh·t ⁻¹
240	164	< 12 464
350	280	< 12 500
500	288	< 12 400

12 200 kW·h;全系列采用节能新技术后,电解槽系列吨铝直流电耗小于12 500 kW·h。

8 结论与展望

在全球能源危机和气候变化加剧的背景下,电解铝行业因其高能耗和高碳排放受到特殊的关注,用电价格也受到国家及各级政府的严格限制,节能及生产成本压力陡增,因此,电解铝节能新技术的研究和应用将推动电解铝行业绿色低碳转型。某公司多年来在180~600 kA电解槽型上研究和应用节能新技术,电解槽性能显著提高,运行成本得到明显降低,提高了铝电解槽的安全性和稳定性。未来随着新材料、新技术的不断发展,铝电解槽的节能潜力将进一步被挖掘,研究应着重于这些节能技术的进一步优化与集成,探索技术之间的协同效应。此外,智能化控制系统和大数据分析在优化电解铝生产过程中的应用前景广阔,有望进一步提高能效和降低排放,为铝工业节能和可持续发展提供强有力的支持。

[参考文献]

- [1] 中国有色金属工业协会. 2020年中国有色金属行业经济运行报告[R/OL]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/index.html>.
- [2] 罗英涛,刘风琴,苏白伟,等. 石墨化阴极的性能及在大型铝电解槽上的应用[J]. 中国有色冶金, 2007, 35(6): 12-16, 33.
- [3] 夏百元,张联伟,宋小涛. 提高石墨化阴极生块质量稳定性的技术改造[J]. 有色冶金节能, 2018, 34(6): 17-19.
- [4] 韩博,廖长总,李威,等. 绿色低碳深度节能铝电解技术体系在330 kA电解系列上的应用[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(4): 41-45, 77.
- [5] 王生宁,陈学才. 结构型阳极钢爪在500 kA预焙阳极铝电解槽的应用研究[J]. 酒钢科技, 2017(1): 24-26.
- [6] 马军义,李昌林,侯光辉,等. 新材料在大型铝电解节能降碳技术中的应用与展望[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(2): 41-45, 72.
- [7] ZHZO Zhibin, ZHOU Dongfang, Liu Wei, et al. Numerical investigation on the effects of longitudinal slots and its application in aluminium reduction cells[J]. JOM, 2020 (72): 218-228.

Application of Green Low Carbon New Technologies in Aluminum Reduction Cells

ZHANG Jian

(Shenyang Aluminum and Magnesium Engineering and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110001, China)

Abstract: In the context of increasing global energy constraints and stricter environmental requirements, the aluminum electrolysis industry has come under widespread scrutiny due to its high energy consumption and carbon emissions. This paper systematically studied new energy-saving technologies for aluminum electrolysis cells, focusing on the principles and application of cathode phosphorous-iron casting technology, composite copper-inserted steel bar technology, self-balancing busbar technology, dual-side gas collection technology, new anode steel stubs, and prebaked anode slotting technology. These technologies have demonstrated significant potential in reducing energy consumption, with the lowest direct current consumption in aluminum electrolysis reaching 12 200 kWh/t-Al. The application of these technologies helps alleviate the energy-saving and carbon-reduction pressures faced by aluminum electrolysis production enterprises while enhancing production safety and stability.

Key words: electrolysis cells; energy-saving; dual-side gas collection; phosphorous-iron casting; new anode steel stubs; prebaked anode slotting technology