

铝电解槽用铝基打壳锤头的研究与应用

曹永峰¹ 张华锋² 管瑞江² 马军义¹ 王慧瑶¹

(1. 中铝郑州有色金属研究院有限公司, 河南 郑州 450041;

2. 四川广元中孚分公司, 四川 广元 628000)

[摘要] 打壳锤头在强磁场、高温环境下工作,受熔盐电解质的腐蚀以及下料口硬质壳面的冲击磨损,打壳锤头逐渐消耗,其中的铁、镉等杂质进入原铝液中影响电解槽原铝品位。本文开展了专用铝基打壳锤头的试验研究及开发,对铝基打壳锤头试样的耐磨、耐热、耐蚀等性能进行研究,找出适宜打壳作业的性能组合,试验数据结果表明,铝合金锤头的耐高温性、硬度、耐磨性及耐蚀性均能达到现场使用要求。实际应用效果表明,使用铝基锤头后电解槽原铝液中的铁含量降低了0.0178%,从根本上解决了铁质打壳锤头消耗磨损造成原铝污染的问题。在25万t/a系列上推广,每年节约成本和因铝品质提升而带来的效益可达132万元,经济效益良好。

[关键词] 铝电解槽;原铝品位;打壳锤头;铁质锤头;耐磨性;耐高温性;抗压性;性能

[中图分类号] TF821 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2024)01-0049-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.01.009

0 前言

铝电解槽采用计算机自动控制的打壳系统(包括打壳锤头、连接杆、打壳气缸)周期性打开电解质壳面补充氧化铝。打壳锤头是实现打壳功能的重要部件^[1-2]。大型电解槽单点日均打壳次数高达900余次。电解槽打壳时,低温打壳锤头受熔盐电解质和铝液的侵蚀,不但物理性能降低,其使用寿命也会受到影响。相关数据显示^[3],铝电解行业打壳锤头目前均为铁质锤头,一般使用寿命为8~10个月。按照我国2022年电解铝产量4 021.4万t计算,每年需消耗打壳锤头17.8万根以上,一根铁质打壳锤头重约18 kg,更换下来的锤头重量约12 kg,即每根锤头熔化磨损约6 kg,也就是说仅打壳锤头磨损消耗每年带入原铝液中的杂质约1 068 t。低品位铝液给下游合金加工带来一定影响,尤其对A199.90等

级铝(即3N,国家有色行业《重熔用精铝锭》(YS665—2018)标准要求)生产影响会更大。杂质元素Fe含量变化是影响3N、3N2、3N5不同品级铝的原铝品位的最主要因素^[4]。生产中,若打壳锤头异常脱落,掉入槽内熔化,全槽铁含量上升,原铝品位需要一周左右的时间才能恢复^[5]。如何从根本上解决铁质锤头消耗给原铝品位带来的影响,实现高品质原铝的稳定生产,对铝电解生产具有重要意义。基于此目的,本文开展了专用无污染铝基打壳锤头的试验研究及开发,并在某系列电解槽上推广应用,取得良好效果,本文研究内容对铝电解生产中提高原铝品质具有重要参考意义。

1 无污染铝基锤头研发背景

电解铝企业无论是生产普通重熔用铝锭铝还是3N铝,电解槽所使用的打壳锤头,均为铁质或铁基材料,例如铁镍合金锤头、镍铁钴耐磨锤头、Q235材质锤头等,无法从根本上解决铁元素的渗入问题,因此,开发铝电解槽用无污染铝基打壳锤头具有重大意义。

某电解铝企业使用铝合金锤头前原铝质量见表1。从表1可以看出,在编号为750[#]~771[#]电解槽连续三日66个样品的分析数据中,有13个样品铝含量在99.90%以下。在这杂质超标的13个样品中,除去铁硅同时超标(硅含量大于0.03%)的原铝,A199.90等级的精铝不达标率为13.6%。根据图1

[收稿日期] 2023-09-05

[作者简介] 曹永峰(1975—),男,本科,正高级工程师,主要从事铝电解生产及节能技术研发推广工作。

[引用格式] 曹永峰,张华锋,管瑞江,等.铝电解槽用铝基打壳锤头的研究与应用[J].绿色矿冶,2024,40(1):49-54.

CAO Yongfeng, ZHANG Huafeng, GUAN Ruijiang, et al. Research and application of aluminum shelling hammer for aluminum reduction cell[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024,40(1):49-54.

表 1 某电解铝企业 2021 年 11 月份使用铝合金锤头前原铝质量

序号	槽号	Al 含量/%			Fe 含量/%			Si 含量/%		
		11 日	12 日	13 日	11 日	12 日	13 日	11 日	12 日	13 日
1	750#	99.88	99.83	99.89	0.059	0.072	0.054	0.037	0.04	0.034
2	751#	99.94	99.94	99.94	0.023	0.021	0.02	0.016	0.017	0.016
3	752#	99.89	99.94	99.94	0.038	0.02	0.021	0.023	0.02	0.021
4	753#	99.92	99.93	99.93	0.036	0.029	0.027	0.018	0.018	0.017
5	754#	99.93	99.94	99.94	0.026	0.025	0.022	0.017	0.017	0.021
6	755#	99.93	99.93	99.93	0.029	0.026	0.026	0.02	0.02	0.02
7	756#	99.92	99.93	99.92	0.026	0.022	0.022	0.032	0.032	0.033
8	757#	99.92	99.93	99.93	0.04	0.034	0.03	0.02	0.02	0.019
9	758#	99.93	99.94	99.94	0.025	0.022	0.021	0.017	0.017	0.017
10	759#	99.93	99.94	99.94	0.033	0.027	0.025	0.018	0.018	0.017
11	760#	99.93	99.94	99.94	0.022	0.02	0.02	0.026	0.025	0.023
12	761#	99.93	99.88	99.93	0.032	0.045	0.028	0.017	0.02	0.017
13	762#	99.93	99.94	99.94	0.026	0.024	0.024	0.019	0.019	0.019
14	763#	99.93	99.93	99.93	0.035	0.031	0.028	0.019	0.019	0.019
15	764#	99.93	99.94	99.93	0.028	0.023	0.029	0.017	0.017	0.016
16	765#	99.88	99.88	99.89	0.033	0.033	0.03	0.068	0.065	0.059
17	766#	99.76	99.79	99.81	0.135	0.113	0.101	0.058	0.052	0.050
18	767#	99.91	99.92	99.91	0.038	0.036	0.035	0.024	0.024	0.025
19	768#	99.93	99.93	99.93	0.034	0.03	0.028	0.018	0.018	0.019
20	769#	99.93	99.93	99.94	0.03	0.029	0.026	0.018	0.018	0.016
21	770#	99.88	99.89	99.89	0.035	0.034	0.031	0.050	0.047	0.042
22	771#	99.92	99.92	99.92	0.043	0.038	0.038	0.018	0.017	0.017

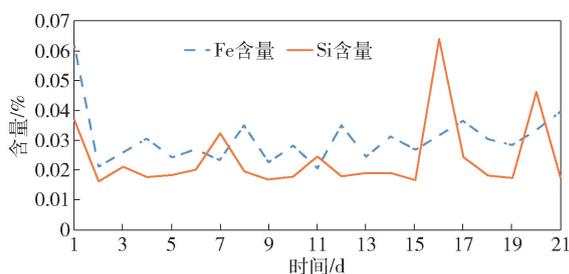


图 1 某电解槽原铝中 Fe、Si 含量波动情况

所列的某台电解槽连续 21 天的原铝铁硅含量的统计情况,铁含量较硅含量的波动大。电解原料中的铁、硅含量都较为稳定,电解铝企业为保证电解 A199.90 等级精铝的合格率,会通过采取精细操作、选取新氧化铝覆料、缩短阳极周期、采用纯净电解质等措施保障原铝液铁含量在 0.04% 以内,但对于打壳锤头磨损带入的铁元素含量则无法有效控制,因此,铁质打壳锤头是造成精铝铁含量波动的最主要因素。如果采用铝基锤头代替铁质锤头,对处于合

格边缘的原铝,解决锤头带入的铁,不合格问题就能解决,将对提高 A199.90 等级精铝的合格率具有积极意义。

2 铝基锤头的试验研究

用铝基锤头代替铁质锤头,最重要的是确保铝基锤头的耐热性、耐腐蚀性能和力学性能能够适应服役电解槽的环境,在电解槽中具有可靠的稳定性和良好的使用寿命。为减少铁元素对原铝液的污染,采用以纯铝为主元素的多元合金,通过调整纯铝中辅助元素的含量,对试样的耐磨、耐热、耐蚀等性能进行研究,找出适宜打壳作业的性能组合,然后通过合适的浇铸方法,使铝合金产品物化性能符合电解槽打壳的实际需要。

2.1 试样制备

根据实际应用要求,制备的打壳锤头须具有一定的耐热性能,且合金中的铁含量尽可能降低,选定

耐热区间为900~1100℃,根据铝-铁二元相图,本试验选择的是铁含量分别为10%、15%、20%及25%的Al-Fe基体合金,添加其他组元作为成品性能优化的辅助元素,采用电磁感应炉熔融,铁模水冷浇铸,浇铸合金锭分别取样,并编号为1#~8#试样。

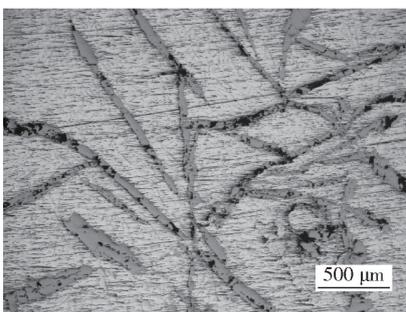
2.2 成分检测

1~8#铝基锤头成分分析见表2。由表2可以看出,在前述熔铸条件下,样品不同部位的铁元素含量差异为0~2%,添加的活泼稀土合金元素化验结果差异均在0.1%以内,成分基本均匀,符合熔铸要求。实际化验铁含量与熔配目标差异为1%~2%,这与样品未充分熔融相关,在后续的熔铸过程中,通过适当延长保温时间,主元素铁含量实际检测结果与配料目标差异可降低到1%以内。

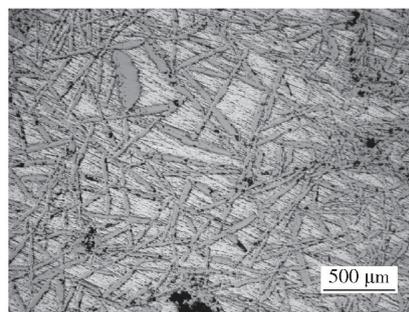
2.3 耐磨性试验

将编号为1#~8#试样加工成规格为直径2.9cm、高度15~17cm的样品,另外取Q235钢加工成相同规格试样进行耐磨性试验^[4]。试验前分别称量每个试样重量,在专用金相磨样机上进行磨损测试。表3是4#样品的实验结果,其耐磨性达到Q235钢材料的90%以上,能够满足现场打壳锤头使用寿命要求。

在铁含量相同条件下,辅助元素加入量对打壳锤头的影响如图2所示。由图2可以看出,随着辅助元素加入量的提高,合金组织得到了优化,韧性得



(a) 辅助元素1.50%



(b) 辅助元素含量2.41%

图2 不同辅助元素含量的合金相组织

2.4 抗压性试验

在浇铸试样有效部位(浇铸冒口及具有明显宏观缺陷的铸件顶部除外)取圆柱样,在压力试验机上进行3.0~3.5倍过载试验,检测其抗压能力。

电解槽打壳锤头直径为90mm,打壳气压≤0.5MPa,打壳时锤头所受最大压力约为3.18kN。过载300%,打壳锤头受力为9.54kN;实际过载试验如图3所示。在最大载荷为9.8kN受压条件下,试样完

到提高,硬度下降,其耐磨性随之降低,与实际检测结果相同。

表2 铝基锤头试样成分分析表 %

序号	取样部位	铁含量目标值	铁含量实测值	平均值	偏离平均误差	其他合金组元含量
1#	上	10	10.07	10.282	0~2	1.41
	下		10.48			
2#	上	15	14.68	14.62	0~2	1.45
	下		14.56			
3#	上	20	19.88	19.79	0~2	1.49
	下		19.70			
4#	上	25	23.44	23.65	0~2	1.51
	下		23.86			
5#	上	10	8.90	9.43	0~2	2.52
	下		9.96			
6#	上	15	14.06	14.79	0~2	2.39
	下		15.52			
7#	上	20	19.33	18.88	0~2	2.46
	下		18.44			
8#	上	25	23.17	23.94	0~2	2.38
	下		24.72			

表3 试样成分优化与磨损性对比

试样	原始重量/g	磨损时间/min	试验后重量/g	磨损比Q235/合金
铝基合金试样4#	37.89	10	34.81	91.6
Q235试样	103.72	10	100.9	

好无开裂,亦无明显变形,说明打壳锤头抗压性可满足电解槽打壳受力要求,而且试验试样截面直径为30mm,实际打壳锤头的截面积是试样截面积的9倍,因此,在一定时间内试验铝基材料承受实际压强约为4.5MPa,完全符合生产要求。

2.5 耐高温性检测

为优化合金试样组织结构,提高其耐高温性及硬度,将不同配方试样置于高温炉中,在930℃保温

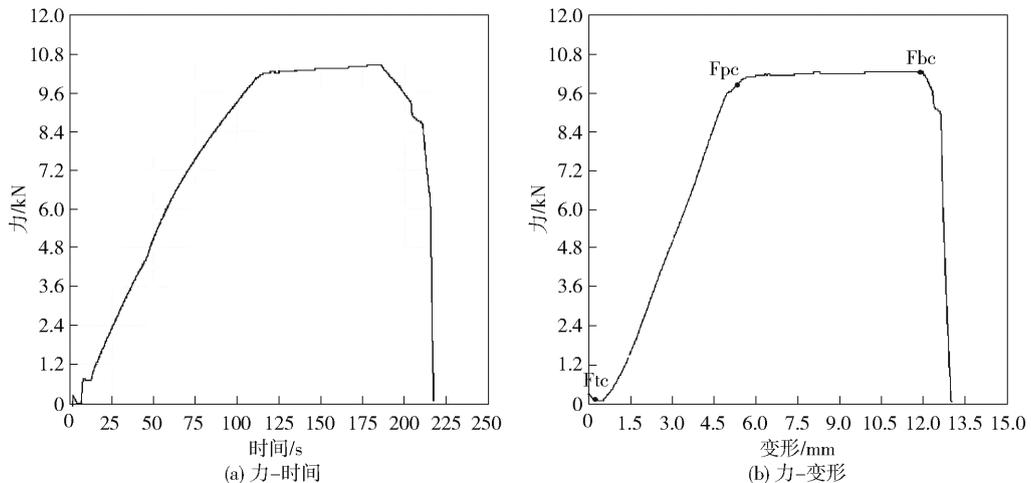


图3 过载试验数据图

状态下保持6~8 min,冷却后比对试样熔蚀情况(图4)。结果表明,2[#]试样在试验过程有低熔点物质析出,而4[#]、6[#]、8[#]试样则均保持较好的耐热性能,无低熔点物析出。同时,实际电解槽打壳锤头在高温熔液停留时间仅为2~3 s,因此,4[#]、6[#]、8[#]试样材料均能够满足使用要求。

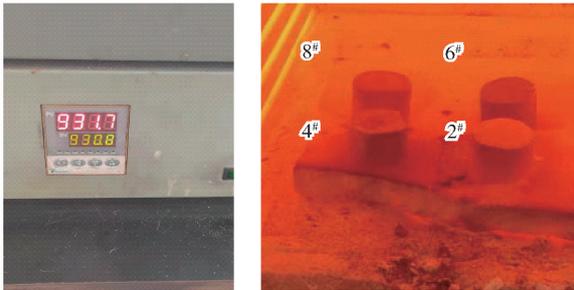


图4 试样在加热保温炉内的形貌

根据耐磨性、抗压性及耐高温性试验结果,综合考虑适用性与经济性,打壳锤头参照4[#]试样的配比进行制备。在实际制备铝基锤头的过程中,可适当提高辅助元素的加入量,从而提高其耐高温性能,并根据上槽实际使用情况,后续可进一步优化合金成分及成型工艺,在达到其最低使用要求的基础上,实现经济最优化,进一步降低企业生产成本。

3 铝基锤头现场应用效果

3.1 原铝品位提高

依据试验结果,选取最佳合金成分,利用水冷金属模一次浇铸成型工艺,制备出铝基无污染合金锤头。为了更加直观体现铝合金锤头应用效果,选取10台试验槽连续3天的原铝质量数据进行对比,试验槽采用参照试样4[#]配比制备的铝基锤头,对比槽

采用企业原有铁质锤头。经过5个月运行,电解槽原铝品位对比见表4。由表4可知,试验槽原铝的铁含量较对比槽降低了0.0178%。

某电解铝企业采用合金铝锤头后原铝质量见表5。由表5可知,原铝质量稳定,试验前铝含量在99.88%~99.89%范围的电解槽基本消除,铝含量超过99.9%的合格率达到98%以上,且铁含量稳定,这说明采用铝基锤头取得了良好的应用效果。

表4 合金铝锤头使用后原铝杂质元素含量对比 %

元素	试验槽	对比槽	差值
Si	0.038	0.038	0.000
Fe	0.055 6	0.073 4	-0.017 8
Cu	0	0	0
Ga	0.017	0.018	-0.001
Mg	0.001	0.001	0.000
Zn	0.008	0.008	0.000
Mn	0.002	0.003	-0.001
Ti	0.004	0.004	0.000
V	0.027	0.027	0.000

3.2 节约生产成本

对比分析铝合金锤头和铁质锤头在400 kA电解槽上的使用成本,结果见表6。现场测试铁质锤头寿命为10个月^[6],铝基锤头寿命为8个月,铁质材料锤头单槽全年费用为1483元,其中采购锤头费用为1296元,人工维护费360元,废旧锤头回收费用173元;铝基锤头单槽全年费用为1184元,其中采购锤头费用为1224元,人工维护费450元,废旧锤头回收费用490元,铝基锤头单槽全年节约

表5 某电解铝企业2022年4月份使用铝合金锤头后原铝质量^[3]

槽序号	Al/%			Fe 含量/%	Fe 偏离均值/%			Si 含量/%	Si 偏离均值/%		
	7日	8日	9日		7日	8日	9日		7日	8日	9日
1#	99.93	99.93	99.93	0.027	7.4	-3.7	-3.7	0.02	0	0	0
2#	99.92	99.93	99.92	0.023	11.4	-5.7	-5.7	0.032	-1	-1	2.1
3#	99.92	99.93	99.93	0.035	15.4	-1.9	-13.5	0.02	1.7	1.7	-3.4
4#	99.93	99.94	99.94	0.023	10.3	-2.9	-7.4	0.017	0	0	0
5#	99.93	99.94	99.94	0.028	16.5	-4.7	-11.8	0.018	1.9	1.9	-3.8
6#	99.93	99.94	99.94	0.021	6.5	-3.2	-3.2	0.025	5.4	1.4	-6.8
7#	99.93	99.88	99.93	0.035	-8.6	28.6	-20	0.018	-5.6	11.1	-5.6
8#	99.93	99.94	99.94	0.025	5.4	-2.7	-2.7	0.019	0	0	0
9#	99.93	99.93	99.93	0.031	11.7	-1.1	-10.6	0.019	0	0	0
10#	99.93	99.93	99.93	0.031	10.9	-2.2	-8.7	0.018	-1.8	-1.8	3.6
平均	99.93			0.027 9				0.020 5			

费用299元。如果在规模25万t/a电解槽上推广,每年可节省费用约7万元。经市场调研,Al99.90品位铝销售收入较Al99.85品位铝增加500元/t,

按照原铝品位合格率提高1%计算,全年多生产Al99.90品位的铝量为2500t,产生经济效益125万,合计效益132万元。

表6 不同材质锤头使用效益分析

打壳锤头	单根重量/kg	单根费用/元	使用周期/月	单槽年费用/元	人工维护费用/元	废旧材料回收/元
铁质材料	18	180	10	1296	360	173
铝基材料	6.8	136	8	1224	450	490

4 结束语

本文针对电解槽打壳锤头材质影响原铝质量的问题,开展无污染铝基打壳锤头试验研究。试验数据结果表明,铝合金锤头的耐高温性、硬度、耐磨性及耐蚀性均能达到现场使用要求。根据铝基锤头的现场应用效果分析,使用铝基锤头后电解槽原铝液中铁含量降低了0.0178%,从根本上解决了打壳锤头异常脱落,掉入槽内融化造成原铝污染的问题,实现了Al99.90等级精铝的生产,原铝品质提升效果十分显著。如果在25万t/a系列上推广,每年节约的成本和因铝品质提升而带来的效益可达132万元。铝基锤头可从根本上解决铁质锤头对原铝液的污染问题,对铝电解生产中提高原铝品质具有重要借鉴意义。

[参考文献]

- [1] 曾振双,蒋学先,余龙进,等. 500 kA 铝电解槽单点打壳下料智能控制系统研究与应用[J]. 2023,39(5): 33-37.
- [2] 刘驰,郭彬,王建国,等. 铝电解槽打壳气缸升降装置的设计和试用[J]. 有色设备,2022,36(2):41-44,51.
- [3] 李发玉,张志广,仓斌. 圆形打击头的开发与使用[J]. 轻金属,2001(10):29-30.
- [4] 李冬生,刘丹,刘英,等. 预焙铝电解槽原铝质量的影响因素及解决方法[J]. 世界有色金属,2020(1):11-12.
- [5] 毛文军,张芬萍. 铝电解槽打壳锤头粘包原因及减少粘包措施分析[J]. 铝镁通讯,2019(2):28-30,33.
- [6] 宗琳,刘政军,高海亮,李乐成. 等离子熔覆铁基堆焊合金显微组织与耐磨性[J]. 沈阳工业大学学报,2011,38:382-350.

Research and Application of Aluminum Shelling Hammer for Aluminum Reduction Cell

CAO Yongfeng¹, ZHANG Huafeng², GUAN Ruijiang², MA Junyi¹, WANG Huiyao¹

(1. Zhengzhou Nonferrous Metals Research Institute Ltd of Chalco, Zhengzhou 450041, China;

2. Sichuan Guangyuan Zhongfu Branch, Guangyuan 628000, China)

Abstract: The shelling hammer works in a strong magnetic field and high temperature environment. Due to the corrosion of molten salt electrolyte and the impact wear of the hard shell surface of the discharge port, the shelling hammer is gradually consumed. The impurities such as iron and cadmium enter the original aluminum liquid and affect the original aluminum grade of the electrolytic cell. In this paper, the experimental research and development of special aluminum-based shell hammer were carried out. The wear resistance, heat resistance and corrosion resistance of aluminum-based shell hammer samples are studied, and the performance combination suitable for shelling operation was found out. The test data show that the high temperature strength, hardness, wear resistance and corrosion resistance of aluminum alloy hammer can meet the requirements of field use. The practical application results show that the iron content in the original aluminum liquid of the electrolytic cell is reduced by 0.0178% after using the aluminum-based hammer. The aluminum-based hammer fundamentally solves the problem of primary aluminum pollution caused by the consumption and wear of the iron shelling hammer. If it is promoted on the 250 000 t/a series of electrolytic cells, the annual cost savings and the benefits brought by the improvement of aluminum quality can reach 1.32 million yuan, and the economic benefits are good.

Key words: aluminium electrolytic cell; original aluminum grade; shelling hammer; iron hammer; wear resistance; high temperature resistance; compression resistance; hammer performance