

# 新型数字化槽控机在400 kA系列电解铝中的应用研究

陈伟

(国家电力投资集团铝电公司宁东铝业分公司, 宁夏银川750411)

**[摘要]** 电解铝企业原有的槽控制技术基于单一的电阻信号来判断电解槽运行是否稳定,无法达到可视化效果,缺乏协同控制、优化决策、异常情况诊断的功能。随着电解槽槽型逐步大型化,出现了愈来愈多仅靠人工经验而无法提前预判的问题。以电解铝企业400 kA系列电解铝为研究对象,开发了新型数字槽控机,介绍了新型数字化操控系统的组成及功能,并将该系统进行了实践运用。研究表明,在新型数字化槽控制系统的配合下,400 kA系列电解槽突发事件的预防能力和生产稳定性大幅提高,电能耗损、生产原料成本显著下降,人工效率和电解槽运行的稳定性显著提升。

**[关键词]** 电解槽; 控制系统; 节能降耗; 绿色工业

**[中图分类号]** TF821 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)03-0061-04

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.03.010

## 0 前言

现代电解铝槽是一种多物理场(电、磁、热、力等)以及多相(气-液-相)交互反应的复杂高温电化学反应容器<sup>[1]</sup>。电解槽体量、电流强度日益增大,导致电解槽高效平稳运行难度加大,同时,随着国家对绿色节能生产越来越重视,通过优化电解槽运行条件控制能力来降低消耗的复杂程度增加,对自动化控制水平提出了更高的技术要求。在现有的冶金工艺条件下,铝冶炼技术要在不改变以冰晶石-氧化铝融盐为原料的电解体系中得到进一步的提升已经极为困难。

目前,利用电解铝精准过程控制技术对电解槽进行全面细化成为现代电解铝槽节能降耗、高效运行的不二之选<sup>[2]</sup>。电解铝企业原有的槽控制技术基于单一的电阻信号来判断电解槽运行是否稳定,

并以此依据来估算电解质中氧化铝的实时浓度,由于电解工艺故障具有“局部性”的特点,传统槽控技术的应用受到极大的限制。随着电解槽槽型逐步大型化,出现了愈来愈多仅靠人工经验而无法提前预防的问题,如电解槽局部阳极效应频繁、阳极效应难以熄灭、电解槽内氧化铝浓度差异性大、低电压状态下电解槽稳定性变差、极距变小后气膜电阻影响剧烈等,这些问题严重干扰电解槽的安全稳定生产,也对电解槽生产的技术经济指标有着极大的影响。因此,亟需借助不断发展的计算机技术及自动控制理论来设计一种更为全面的电解槽控制系统<sup>[3]</sup>。

## 1 电解铝生产简述

电解铝是一个复杂的反应过程。原始电解铝系统的材料包括氧化铝、碳阳极、冰晶石和氟化盐,其中氧化铝是至关重要的反应原料。反应过程大致如下:冰晶石和氟化盐一起形成电解质,熔融冰晶石是一种良好的导电熔体,而氟化盐的作用是提高电解质的分子比并降低电解质的初晶温度。电解槽使用碳阳极和碳阴极,当直流电输入电解槽,电解质温度达到940~960℃时,将发生电解反应,在阴极表面析出液态铝,在阳极处产生气体CO<sub>2</sub>、CO。反应过程受到电解温度、氧化铝、极距(阳极和液态铝表面之间的距离)、分子比、氟化盐等因素影响<sup>[4]</sup>。电解铝生产的关键是在保证液态铝质量的同时保障电解

**[收稿日期]** 2023-12-27

**[作者简介]** 陈伟(1984—),男,宁夏青铜峡人,中级工程师,研究方向为电解铝工业化生产。

**[引用格式]** 陈伟. 新型数字化槽控机在400 kA系列电解铝中的应用研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(3): 61-64, 70.

CHEN Wei. Research on the application of new digital tank controller in 400 kA series electrolytic aluminum[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(3): 61-64, 70.

铝系统安全稳定地运行,其中包括氧化铝浓度、分子比、初晶温度、电解温度及过热度等指标,这些指标的控制都依赖于先进的电解铝计算机控制系统。

### 2 传统电解槽控制系统

目前,电解铝企业电解生产所用的原材料(氧化铝、阳极炭块与氟化盐等)品质差异性较大,日常生产中电解铝槽在下料时频繁出现氧化铝飞扬大,致使电解槽内因缺少氧化铝而发生阳极效应等状况,这对电解槽稳定运行是一个巨大的挑战。原材料品质问题导致电解质成分复杂多变和电解工艺技术条件难以稳定保持,是冶金行业在原料方面面临的巨大难题。

电解铝过程是一个复杂多变的非线性过程,在以往的生产过程中,技术人员常根据设备的运行状态和人工经验来调整工艺参数以实现电解铝的控制,由于人工控制具有相当大的局限性,原铝质量往往达不到较高的品质。而日常作业中的人工介入,如周期性的换极、出铝及抬母线等作业,也严重干扰电解槽的正常运行,因此技术人员对电解槽的管理与控制难度显著增大<sup>[5]</sup>。同时电解铝槽中的高温、高腐蚀的反应环境,限制了人工对电解铝槽技术条件的测量和调控。能够进行人工调整的操作包括升降阳极、控制物料投放量和出铝量,而实时检测的技术条件仅有系列电流和槽电压,这种基于单一的综合槽电阻信号来进行电解槽技术条件调整及估算氧化铝浓度的电解槽控制系统,在电解铝生产过程无法达到可视化效果,缺乏协同控制、优化决策、异常情况诊断的功能,更无法对电解工艺技术进行优化。电解铝产业要实现高效化和绿色化,采用更先进的电解槽控制系统来协同技术和管理是大势所趋<sup>[6]</sup>。

### 3 新型数字化槽控系统

电解铝生产过程具有多样化特征,是能量平衡和物料平衡互耦的反应过程,在此期间要综合电解槽多方面调整物料投放、电压升降、两水平等变量使电解槽处于动态平稳状态<sup>[7]</sup>。因此,需要研制新型数字化槽控系统,实现电解铝生产可视化,做到精准把握。基于以上愿景,电解铝企业研发设计了新型数字化槽控系统。

#### 3.1 新型数字化槽控系统构成

电解铝企业研制的新型数字化槽控系统由三大部分组成,包括主计算机控制系统、槽控机和电解

槽。计算机控制系统以信息管理集中与控制功能分散为原则,采用多级分布式控制和决策管理集中的结构形式。槽控系统分为服务器信息共享层、过程管理监控层及过程控制系统,将整个电解铝中的生产管理、过程监控、数据采集有机结合起来,并通过无线 Wi-Fi 实现数据共享。其中主计算机部分一般是由工业控制机、输入设备、显示设备及打印机组成,主要起监视、信息修改、储存、控制软件开闭的作用;槽控机包含逻辑部分、动力部分、显示部分以及操作按钮部分;电解槽部分内嵌各种检测和控制设备,如水平母线电流检测采集线、母线高度计数器、下料电磁阀控制器等。电解铝企业采用集中-分布式计算机控制系统,槽控机可以独立承担各种生产工艺的控制(如阳极升降、抬母线、槽电阻波动检测和消除、阳极效应控制、加氟化盐、出铝换阳极、电压采样和处理)。

#### 3.2 新型数字化槽控系统功能

移动式信息系统的构建,是未来电解铝数字化车间的必备组件,也是目前管控一体化系统的重要一环,这是因为一方面无线 Wi-Fi 技术的飞速发展,使构建 Wi-Fi 网络的成本大幅度降低;另一方面目前电解槽配备的在线传感器需要一套高效低价的人机交互系统,同时又切合当前移动化办公、移动化管理的发展趋势。因此,本系统的构建可大幅提升人机交互能力、提高生产管理水平和效率。本系统的功能主要包括以下几个方面。

##### 3.2.1 电解槽控制的智能优化

槽控机系统控制界面如图 1 所示。槽控机有联机、自动、手动、手工单动四种操作方式,技术人员利用数字化电解槽控制系统以 1~4 Hz 采样速率同步



图 1 槽控机系统控制界面

采集槽电压及在线阳极电流分布,完成阳极效应预报控制逻辑、换极物料和能量按需自动补偿逻辑等部分的智能优化,如需出铝、换极或抬母线等操作时,利用手动+出铝、换极+数字区域+极数字以及抬母线+阳极升等按钮提前告知槽控机,计算机便会进入相应监控状态,通过自动提升0.2~0.8 V的附加电压弥补因出铝和换极而导致的热量损失,即尽量维持电解槽内部能量不变。除输出告警信息外,通过自动调整下料间隔、单点打壳下料和换极区域停料控制等参数触发控制系统作出相应的决策处理,满足日常电解生产的需求。

### 3.2.2 区域浓度分析

新型槽控系统能够做到自行根据电解槽氧化铝浓度调整氧化铝下料量,并采用多点下料模式减少电解槽氧化铝浓度差。

槽控机根据在线阳极电流分布和立柱母线传感信息提取电解槽槽电阻,进而分析氧化铝浓度。氧

化铝下料控制系统如图2所示,可以实时显示下料量,实现电解铝分区精确下料控制。红色水平线为正常阶段,高于水平线为欠料状态,低于水平线为过料状态,采用欠料、过料、正常三阶段循环控制策略。欠料状态时,放大NB间隔,刺激电解槽;过料状态时,缩小NB间隔,补偿欠料阶段的物料;若欠料阶段槽控机依据电阻浓度判定为高浓度时,则不进入过料阶段,进而保证氧化铝浓度向低浓度趋势运行,而在低浓度区域,若出现阳极效应趋势,说明氧化铝浓度偏低,人工修改NB间隔,实现对下料速率的控制,抑制阳极效应。图中F为氟化盐下料状态,根据电解质分子比大小、黏稠度、温度及壳面状况进行人为设定,或添加控制程序,以给定氟化盐基准添加速率作为控制基准,结合对槽况及相关时间的判断,调整 $\text{AlF}_3$ 下料间隔,间隔一段时间 $\text{AlF}_3$ 将通过圆筒氟化盐箱自动打壳加入,无需人工手动添加。

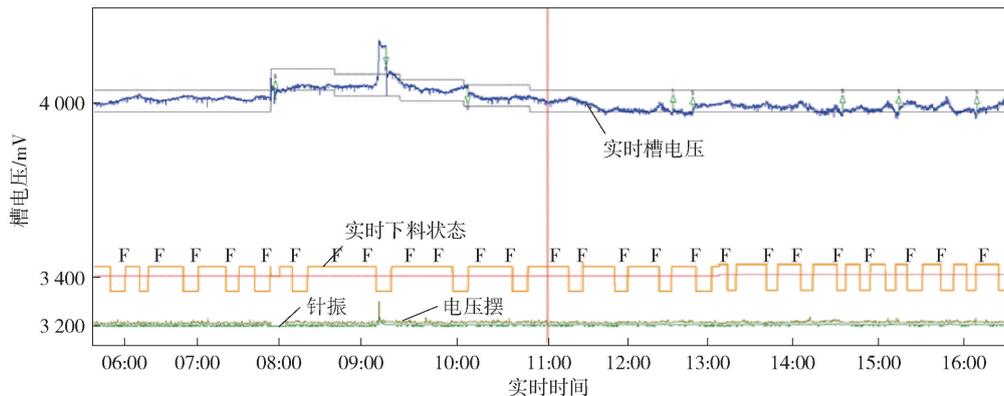


图2 氧化铝下料控制系统

### 3.2.3 阳极效应预报分析、告警和决策

槽控机系统效应预报模块着重于精确阳极效应预报的处理,结合传统槽控系统的阳极效应预报逻辑,对在线阳极电压设定正常波动上下限。当阳极电压高于上限,即大于8 V时,槽控机6个定容下料器自动同时进行一次打壳+下料操作,同时响铃报警“槽号+发生效应”,提示现场人员及时插入效应棒,在3 min内熄回阳极效应。对阳极效应提前进行预报也是电解铝生产节能降耗的研究重点,能够显著减少电耗以及防止烧穿炉膛。若阳极电压低于下限,则槽控机响铃提示“电压异常”,此时槽控机停止自动阳极上升控制和氧化铝浓度控制,现场人员根据电解槽实际状况确认是否将槽控机调整到手动状态,进行人为点抬电压,提升极距,维持电解槽内部的能量守恒。

### 3.2.4 阳极故障分析与告警

槽控机系统配备阳极电流分布监控界面,其作用是基于在线阳极电流分布传感信息提取阳极电压实时分布曲线特征,用于技术人员在线监控换极质量、电解槽病变等状况,并以此为依据与数字电压表、等距压降测量叉、测量钎等工具配合,实测阳极电流分布、两水平高低及炉膛成型等数据,进行分类评估和综合决策,从而形成准确的告警、预判信息,进而实现精准快速处理针振与电压摆等问题,避免滚铝、崩槽及漏铝等恶性突发状况发生。图3为某电解槽中B1、B2、B3、B4阳极实时电流分布监控界面。阳极电流分布监控界面可实时监控每个电解槽上每组阳极的针振与电压摆发生趋势与大小。当电解槽的阳极与铝液面之间出现局部短路现象时,则电压会出现过低或摆动现象,这往往是阳极长包

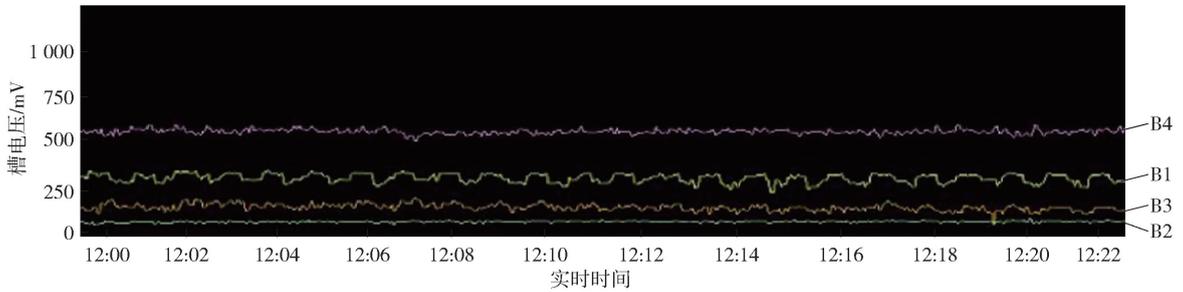


图3 阳极电流分布监控界面

或个别预焙槽阳极组消耗慢或阳极底掌下面有浮动碳块等原因所致,要及时更换阳极,从而提高电流效率。通常情况下,电压摆或针振快,频率很高,数值偏小,一般是电流分布不均;槽底沉淀、大块较多,会导致针振和电压摆不停摆动;若电压摆或针振幅度大且有向下走的趋势,一般为槽膛小或伸腿过大;反之,实时针振数量呈向上走的趋势,则是炉膛槽帮没有形成良好结壳。400 kA 系列电解铝通过安装槽控机,实时显示阳极电流分布监控,极大地提高了生产效率,并降低了劳动强度,为电解铝的顺利高效生产奠定了良好基础。

### 3.3 新型数字化槽控系统效果评价

新型数字化槽控系统实施前与实施后电解槽技

表1 新型数字化槽控系统实施前与实施后电解槽技术指标对比

项目	槽数/台	设定电压/ V	平均 电压/V	闪烁效应 系数	阳极效应 系数	阳极毛耗/ ( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )	电流效率/ %	可比交流电耗/ ( $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ )	原铝氟化盐单 耗/( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )
实施前	144	4.01	4.05	0.09	0.07	495	91.2	13 051	18
实施后	144	4.01	4.03	0.05	0.03	480	93.1	12 834	12.7

## 4 结论

1) 在新型智能优化控制系统的配合下,电解铝企业 400 kA 系列电解槽突发事件的预防能力和生产稳定性大幅提高,电能耗损、生产原料成本显著下降。

2) 新型槽控机系统实时显示每个电解槽 24 组阳极的电流分布,相较于之前人工控制,能够快速且精准锁定电流分布不均的阳极,进行现场测量,确认并调整阳极位置,极大提升了人工效率和电解槽运行的稳定性。

3) 新型槽控机系统实时显示槽电压、针振、摆动、单阳极电压、堵料、新换极号、母线位置等信息,与安装新型槽控机系统前相比,车间阳极效应系数显著降低,人机交互配合现象增加,异常单点、分区域处理效果明显,工人劳动强度亦显著降低。

4) 电解槽的正常运行是电解铝生产稳定运行的基础。安装数字化槽控机,能够快速诊断铝解槽

术指标对比见表 1。从表 1 可见,安装新型数字化槽控机前后,设定电压为 4.01 V,平均电压由 4.05 V 缩减至 4.03 V,未发生太大变化;电解铝企业 144 台电解槽,实施新型数字化槽控系统后,可比交流电耗减少至 12 834  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ,比实施前降低了 217  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ,电流效率提升接近 2%;采用主计算机实时监控,闪烁效应系数与阳极效应系数大幅减小,降耗效果明显;铝氟化盐单耗减少 5.3 t,吨铝阳极毛耗从 495 t 减至 480 t,电解铝生产原料用量及成本显著降低。由此可见,电解铝企业研制的新型数字化槽控系统降低交直流电耗和电解铝原料用量,取得了较好的效果。

出现的生产问题,实现半自动自主调控与解决功能,可提前预防维稳电解槽的安全、可靠的运行。

### [参考文献]

- [1] 梁学民. 400 kA 铝电解槽技术与开发[J]. 轻金属, 2009(12): 26-30.
- [2] 王国坤. 浅谈铝电解槽控制系统升级改造[J]. 有色设备, 2023, 37(4): 83-87.
- [3] 李剑虹,涂赣峰,戚喜全,等. 我国铝电解槽计算机仿真技术的研究发展及现状[J]. 材料与冶金学报, 2010, 9(3): 173-179.
- [4] 曹阿林,曹斌,易小兵,等. 铝电解槽氧化铝浓度控制过程分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(8): 17-21.
- [5] 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.

(下转第 70 页)

## Study on the Recycling Method of Sodium Sulfate in Lead-Zinc Smelting Wastewater

ZHOU Kaimin<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>, Hou Jiao<sup>1</sup>, XIONG Guohuan<sup>3</sup>, ZHU Hongxu<sup>3</sup>, LIU Weiwei<sup>3</sup>, HOU Yanqing<sup>2</sup>

(1. Yunnan Chihong Zinc & Germanium Co., Ltd., Qujing 655011, China;

2. School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Kunming Metallurgical Research Institute, Kunming 650031, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of resource utilization of sodium sulfate in lead-zinc smelting wastewater, the experiment of electrolytic preparation of acid ( $H_2SO_4$ ) and alkali ( $NaOH$ ) was carried out by using a self-made electrolytic cell with diaphragm and two chambers. The effects of sodium sulfate concentration, current density, plate spacing and electrolysis time on the yield of acid and alkali were investigated, so as to determine the optimal electrolysis scheme. The experimental results show that the optimum experimental conditions are as follows: sodium sulfate concentration is 25%, current density is  $85.0 \text{ mA/cm}^2$ , the volume of external circulating electrolyte is 70 mL, the circulation rate is 50 mL/min, the plate spacing is 5 mm, and the electrolysis time is 3 h. Under the above optimal conditions, the yields of acid and alkali can reach about 10%. While realizing environmental protection, it can also realize the recycling of high-salt wastewater and improve the clean and sustainable development ability of lead-zinc smelting.

**Key words:** lead-zinc smelting;  $Na_2SO_4$  electrolysis; wastewater treatment; resource use; zero discharge; high-salt wastewater

(上接第 64 页)

[6] 铁军,赵仁涛,张志芳,等. 基于无线网的铝电解槽电流分布在线监测系统设计与实现[J]. 材料与冶金学报,2010(S1):14-16.

SUN Y, GUI W, CHEN X, et al. A dynamic spatial distributed information clustering method for aluminum electrolysis cell[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 126: 106-108.

## Research on the Application of Digital Tank Controller in 400 kA Series Electrolytic Aluminum

CHEN Wei

(Ningdong Aluminum Branch, Aluminum Power Company, State Power Investment Group, Yinchuan 750411, China)

**Abstract:** The original cell control technology of electrolytic aluminum enterprises is based on a single resistance signal to judge whether the operation of the electrolytic cell is stable, which cannot achieve the visual effect, and lacks the functions of collaborative control, optimization decision-making and abnormal situation diagnosis. With the gradual enlargement of the electrolytic cell type, there are more and more problems that cannot be predicted in advance only by manual experience. Taking 400 kA series electrolytic aluminum of electrolytic aluminum enterprise as the research object, a new digital slot control computer was developed. The composition and function of the new digital control system were introduced, and the system was applied in practice. The research shows that with the cooperation of the new intelligent optimization control system, the prevention ability and production stability of the 400 kA series electrolytic cell emergencies are greatly improved, the power consumption and the cost of production raw materials are significantly reduced, and the labor efficiency and the stability of the electrolytic cell operation are significantly improved.

**Key words:** aluminum electrolytic cell; slot control system; energy saving and consumption reduction; green industry