

# 铝电解车间环境的综合治理方法

王麒瑜, 王泽江

(宁夏大学 机械工程学院, 宁夏 银川 750021)

**[摘要]** 电解铝生产过程会排放有害气体和粉尘,污染环境、危害健康。在国家环保政策推动下,电解槽减污降碳改造成为研究重点。本文梳理了铝电解槽在密封优化、槽内烟气收集、槽间排烟控制以及残极烟气收集四个关键领域的现状与问题,并总结了改造优化方案。在密封性改进方面,加强阳极导杆和槽罩板密封可提升集气效率;槽内烟气收集优化方面,在线改造或停槽改造均能改善集气效果,在线改造优势明显;槽间排烟控制通过采用孔板或变径管替代阀门,提高了排烟均匀性和效率;残极烟气收集采用多种方式,其中残极冷却系统表现突出。这些技术改进和工艺优化对改善车间环境、降低氟化物排放、提高能源利用效率以及实现铝电解行业绿色可持续发展意义重大。

**[关键词]** 铝电解车间; 在线改造; 密封优化; 烟道改造; 烟道积灰; 槽内集气; 槽间排烟; 残极烟气

**[中图分类号]** TF808; TF821 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)02-0053-10

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.02.008

## 0 引言

我国电解铝行业在国民经济体系中占据着重要地位,其规模扩张和产能增长在过去的几十年间取得了举世瞩目的成就,于资源丰富区域或能源优势地区形成了众多产业集群<sup>[1]</sup>。国家为引导行业的可持续发展和绿色发展,出台了一系列具有针对性的战略政策。

在电解铝企业生产技术的不断提升过程中,尽管电解铝的质量和产量都获得了很大程度的提高,极大地促进了相关领域的发展,但不可忽视的是,电解铝因其工艺限制,在正常生产过程中会有 HF、CF<sub>4</sub>、SiF<sub>4</sub>等有害气体和粉尘的排放,这些污染物若未经妥善处理而直接排放或者泄漏出去,对电解车间内工作人员的身体健康和当地环境都会造成一定

伤害。因此,国家对电解铝行业的大气污染治理和节能降碳工作也日益重视。自2022年6月,国家生态环境部等7个部门发布了《减污降碳协同增效实施方案》<sup>[2]</sup>,倡导减污降碳协同推进,通过优化改进设备等举措,实现环境效益和经济效益的双赢。2024年7月,国家发展改革委、工业和信息化部等7个部门发布了《电解铝行业节能降碳专项行动计划》<sup>[3]</sup>,进一步提高铝电解行业的规范标准,鼓励企业加大技术创新投入,以适应日益严苛的环保要求,切实履行环境保护的社会责任。

因此,从减污降碳方向针对电解槽结构的改造工作成为近些年国内电解铝企业和相关研究人员关注的重点,尤其是在铝电解槽密封优化、槽内烟气收集、槽间排烟控制以及残极烟气收集这几个关键领域有了长足的进步,可以减少烟气泄漏,有效解决烟道积灰难题,显著提升电解槽集气均匀性和密闭效率,进而改善车间环境质量。铝电解槽经优化改造后,还可以有效改善热平衡均匀性,有利于电解槽节能降耗,但仍然存在诸多有待改进与完善之处。

本文将基于当前铝电解槽减污降碳方面的研究现状,梳理铝电解槽在上述4个方向上的现状以及所面临的问题,系统总结国内电解铝行业内的改造优化方案。

## 1 电解槽密封

铝电解槽的密封在铝电解的整个生产过程中至

**[收稿日期]** 2024-11-20

**[基金项目]** 宁夏回族自治区自然科学基金(2024AAC03040)。

**[作者简介]** 王麒瑜(1989—),男,宁夏银川人,工学博士,硕士生导师。

**[引用格式]** 王麒瑜,王泽江. 铝电解车间环境的综合治理方法[J]. 绿色矿冶,2025,41(2):53-62.

WANG Qiyu, WANG Zejiang. Environmental treatment methods for aluminum electrolysis workshops [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(2): 53-62.

关重要,良好的密封性能不仅可以改善车间环境,还可以降低氯化盐单耗,在生产环境的保护和能源节约等方面具有重要意义。

目前国内外针对电解槽密封的研究和整改主要集中在阳极导杆处密封和槽罩板处密封两方面。

### 1.1 导杆密封

铝电解槽阳极结构由铝导杆、钢铝爆炸焊块和钢爪组依次连接组成<sup>[4]</sup>。在生产过程中,经过多次的循环使用,阳极导杆与电解槽间密封存在失效可能。传统密封件采用酚醛层压玻璃布板材料,经历几个换极周期后易出现破损现象。早期国内一般采用夹石棉布的U型板进行密封,该方法在使用过程中存在石棉布不易更换,且降低工作效率等问题<sup>[5]</sup>,之后国内部分铝企采用定制的低密度U型绝热砖进行密封作业(图1),其质地坚硬,不易破损,经久耐用,且不影响换极作业,使用效果良好,值得借鉴。



图1 U型砖密封

### 1.2 槽罩板密封

槽罩板在电解铝生产中可以起到防止烟气外逸、减少槽内热量损失、隔音降噪等多种作用。针对槽罩板的密封工作主要集中在两端炉门口和角部(图2)。电解槽炉门口是工人操作和物料进出的通道,在日常生产频繁使用中此处密封易出现缺陷。角部是槽罩板的连接部位,在生产过程中由于热胀冷缩效应和设备的振动等因素,此处的密封相对其他部位较薄弱,容易出现较大缝隙。另外,工人进行槽上部结构操作时,由于踩踏可导致槽罩板变形,影响槽罩板密封效果。电解槽炉膛内局部阳极燃烧也可能导致槽罩板损坏,致使电解槽密闭性变差<sup>[6]</sup>,又由于电解槽内外温度不同使槽内外存在较大压差,槽内烟尘会通过电解槽的缝隙溢出,使车间内粉尘飞扬,恶化生产环境<sup>[7]</sup>。

目前针对上述问题,提高槽罩板处密封性的常

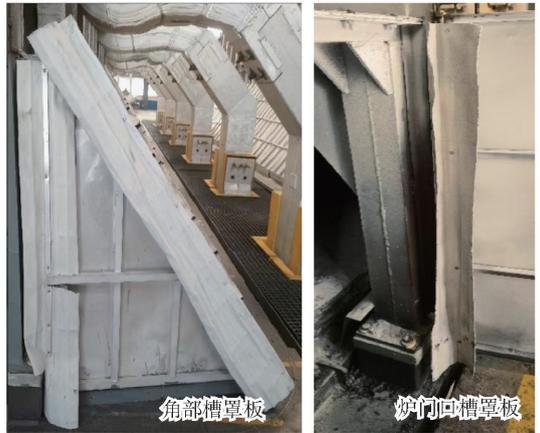


图2 角部槽罩板及炉门口槽罩板密封

见措施有:①加强槽罩板密封面的结构强度,保证槽罩板即使变形也依然具有稳定的周边平整度;②增加槽罩板四周接触面积,保证槽板即使变形四周边框也能紧密接触;③在槽罩板四周边框的接触面设置柔性密封<sup>[8]</sup>(图3),提高密封质量。例如,云铝某公司就对202台200kA电解槽进行槽罩密封保温技术的改进,通过利用密封材料和密封元件对槽罩进行整体保温密封,提高了烟气的捕集率<sup>[9]</sup>。除此之外,中铝青海分公司通过改进电解槽的保温密封结构设计,将集气效率和氟净化效率分别提升至98%和99%,该技术减少了氯化盐的日添加量,有效促进电解槽物料平衡、热量平衡,促进了企业低电压节能降耗生产指标的逐步优化<sup>[10]</sup>。

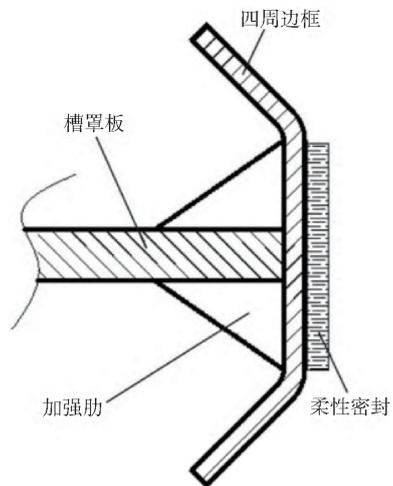


图3 节能型槽罩边框接触形式示意图

如果槽罩板破损严重,在成本允许的情况下,可以考虑全系列整体更换新槽罩板,提高密闭效果显著。

## 2 槽内烟气收集

良好的电解槽密封效果能够有效减少槽内有毒

有害气体和粉尘的外逸,而集气系统可以有效地将生产废气集中收集并进一步处理,既防止废气烟尘在车间内扩散,也减少污染气体对外部环境的排放,对整个电解铝的生产环保有重要意义。因此,电解槽的集气系统优化改造较电解槽密封更为重要,对车间环境的改善有着决定性影响。

电解槽的槽内烟气收集主要依托于电解槽集气系统,其主要包括集气烟道、排烟管路系统以及烟气净化系统等。其中,集气烟道是电解槽排烟的主要通道,集气烟道排烟效果好坏是影响电解车间和净化系统氟化物排放指标和吨铝氟盐消耗量的关键,也是决定电解槽能否建立良好热平衡的重要因素<sup>[11]</sup>。

在铝电解槽的集气系统中,集气烟道非常重要。集气烟道负责收集电解过程中产生的粉尘和烟气,烟气带走的热量占电解槽总散热量的25%~35%,对电解槽热平衡影响较大<sup>[12-13]</sup>。合理的集气烟道布置既可以保持槽膛内的热平衡,也可以保持槽膛内的风压平衡,防止污染物外逸,实现电解槽均匀集气和散热,避免电解车间无组织排放严重和氟化盐单耗偏高等问题<sup>[14]</sup>。

根据结构类型,集气烟道可以分为下集气烟道和上集气烟道两种结构形式。两者的区别在于其与水平罩板的位置关系。布置于水平罩板之下、槽膛范围内的烟道为下集气烟道,而布置于水平罩板以上的槽上部结构范围内的烟道为上集气烟道。

因烟道结构的不合理,电解槽密闭效率偏低,烟道内部易积灰且难清理是国内铝厂普遍存在的共性问题<sup>[15]</sup>。例如,电解槽内集气过程是否均匀决定了电解铝过程中产生的有害气体能否在电解槽内部各个区域被有效收集。若集气不均匀,会导致部分区域的有害气体逸散,恶化车间环境,影响工人健康。另外,烟道积灰问题也是集气系统面临的一大挑战,随着电解过程的持续,烟道内逐渐堆积的灰尘会增加气体流动阻力,改变烟道的气流特性,进而降低集气效率,严重时可能堵塞烟道,直接威胁到集气系统的正常运转,甚至可能导致烟道有垮塌的安全风险。

因此,对现有电解槽集气系统进行分析、研究和改造,解决传统电解槽上、下烟道存在的集气均匀性较差、积灰不易清理的缺陷,提升电解槽密闭效率,杜绝电解槽出铝端冒烟的现象,是优化电解

铝行业生产环境,提高电解铝生产品质标准的关键所在。

## 2.1 下集气烟道优化改造

国内电解铝企业的烟道改造工作主要针对下集气烟道结构,常见的改造方式有两种:一种是利用停槽大修的机会将电解槽原有下集气烟道改造为上集气烟道或者直接对下集气烟道进行改造;另一种方法是采用结构微调的方式对电解槽原有下集气烟道进行在线改造。

### 2.1.1 停槽改造

传统的电解槽通常采用下烟道V形集气罩集气。胡红武等<sup>[16]</sup>充分利用其烟道长烟腔的结构特点,在烟道空腔内通过钢板分隔出第二段烟道,用以收集靠近烟道端槽腔排出的烟气。通过调整原集气孔的孔径,并在出铝端集气烟道增加集气孔,提高槽膛内风压分布均衡及槽内热平衡,该集气结构通过集气罩上设置的多个大小不同的孔来进行集气。该方法虽然使电解槽的集气效果得到改善,但仍有不足。

在某铝厂的400 kA铝电解槽中,电解槽长度为18 m,设有78个集气孔,两侧各开孔39个。对此下烟道集气结构进行仿真模拟后,其结果表明,该结构集气不均匀,烟气中携带粉尘易发生沉降,烟道内积灰严重。李雪娇等<sup>[17]</sup>由此开发了新型上烟道集气结构,其模型如图4所示。

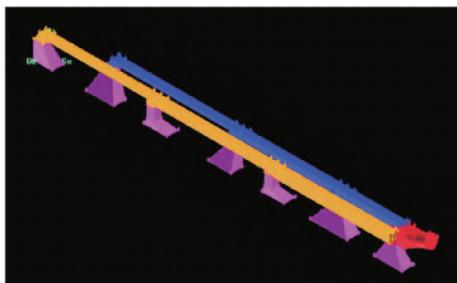


图4 上烟道集气结构图

该集气结构位于电解槽大梁上部,通过水平罩板上方开孔的集气罩连接至变截面设计的集气烟道。其模拟结果表明,改造后的上烟道集气均匀,无明显积灰。根据在电解车间天窗进行的24 h氟化氢无组织排放测试结果可知,改造后的烟道集气均匀性提高,集气效率增加,烟道积灰减少(图5)。

广西某公司的330 kA电解车间槽集气系统也采用传统下烟道结构,打壳下料装置严重阻挡烟气

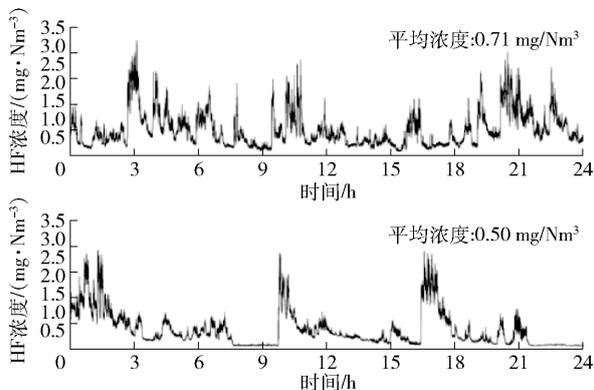


图5 密封和上部集气结构改造前后车间无组织排放测试结果

收集,导致排烟困难。因此,将集气系统由下烟道集气改造为上烟道集气,采用水平烟道与垂直烟道相结合的布置模式,并设置分区多段上集气结构,实现精准集气。建立烟气流速-压力仿真模型,优化各分支集烟口相对位置,较改造前大幅降低集气烟道压力损失,沿电解槽长度方向各分支烟道流量偏差分布更加合理,集气效率显著提高,实现烟气大幅减排(图6)<sup>[18]</sup>。

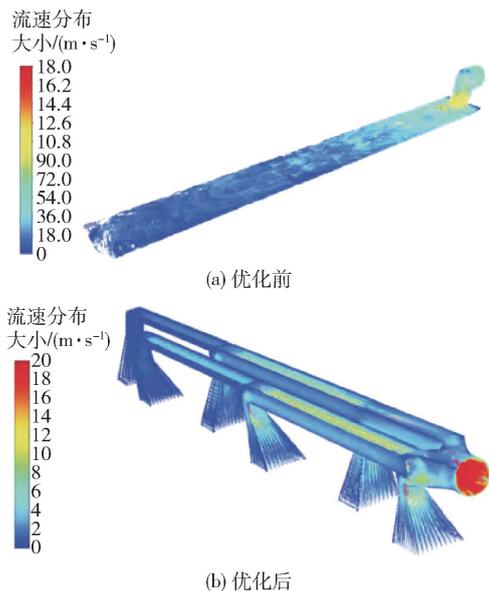


图6 优化设计前后集气系统流场分布

集气烟道由传统的下烟道结构形式改为上烟道结构形式后,提高了槽内集气均匀性和烟气收集效率,减少了烟道积灰,改善了厂房环境,减少电解槽开槽操作时的电解烟气无组织排放,其烟道压力损失更低,气流分配更加均匀。但是,下烟道改造为上烟道这种方法需要在停槽大修阶段进行施工,施工周期长、难度大,改造费用高。

## 2.1.2 在线改造

在线改造方法整体仍然保持烟道结构不变,但是施工周期短、难度小、改造费用低。

李刚等<sup>[19]</sup>对遵义350 kA系列电解槽的原烟道进行了评估,发现存在密封效率低,且集气不均匀的问题,集气偏差最大为82%(图7)。针对该问题,在尽量不改变原烟道设计的基础上,通过切割和焊接改变集气孔的直径与漏料口的数量。通过此种在线改造,电解槽的槽膛内集气平均偏差介于 $\pm 10\%$ 以内(图8),集气的均匀性得到明显改善,从而使得槽膛的密闭效率显著提升,进而改善了烟道积灰和电解车间的环境。

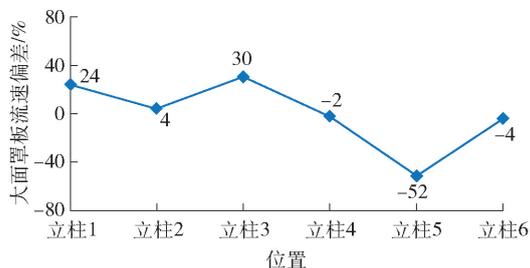


图7 烟道改造前的槽膛内集气分布均匀性实测值

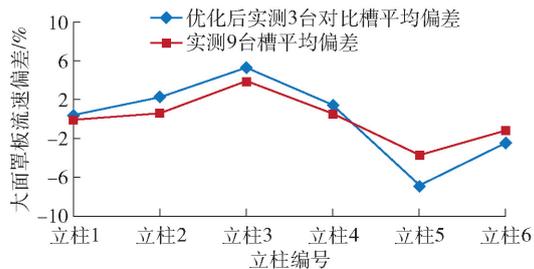


图8 烟道改造后的槽膛内集气分布平均偏差实测值

此外,还有通过在烟道处增设附件来控制烟道积灰的猜想,但这类方法实际使用效果有待验证。如李成元等<sup>[20]</sup>通过引入一种铝电解槽烟道自动吹灰装置来解决烟道积灰这一问题,当需要对集气烟道进行积灰清理时,由电机驱动吹灰盒伸入集气烟道内进行高效吹灰。然而,首先,在电解槽的强大磁场环境下,电机可能无法正常运行,其次,烟尘进入吹灰盒中可能导致机械结构动作困难。许亨权等<sup>[21]</sup>通过在集气烟道和支烟管上安装一种敲击件,对集气罩与支烟管连接处、支烟管与烟道总管连接处进行敲击,以达到清除烟道积灰、保证烟道畅通、提高排烟性能的目的,但这一方法增加了烟道整体重量且可能破坏连接稳定。

## 2.2 上集气烟道优化

随着现代铝电解技术的发展,单台铝电解槽的

容量逐步扩大,铝电解槽上集气烟道长度也随之增加,导致其集气均匀性变差,集气效率降低<sup>[11,22-23]</sup>。国内外学者针对这一系列问题进行了科学有效的分析和研究,并对其优化改造有了一定的构想。早期的电解槽上烟道为V型单烟管下位集气结构,这种结构的集气烟管存在负压分布不均匀、烟道积灰等问题。黄安宁等<sup>[24]</sup>通过仿真模拟和反复实验,设计了一种上位双烟道集气结构,实现槽内集气均匀以及槽内的热平衡(图9)。

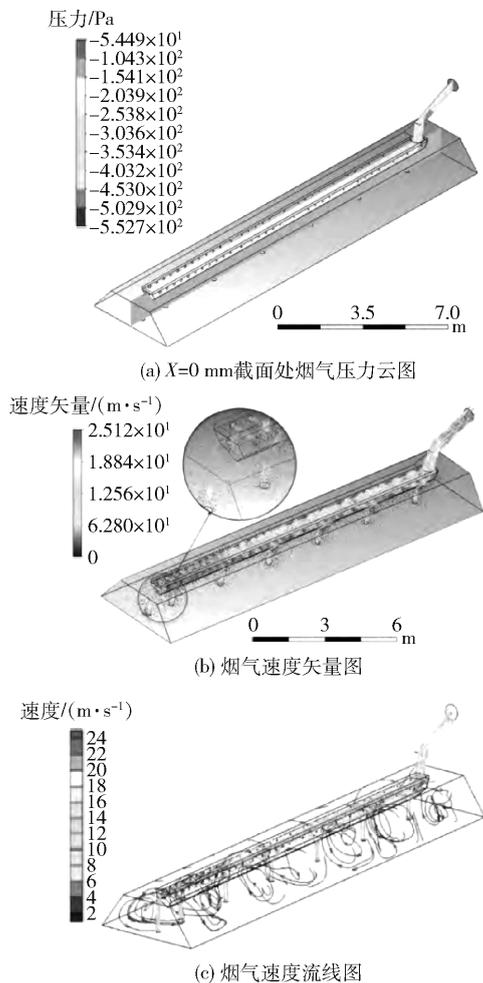


图9 上位双烟管集气烟道内烟气仿真结果

王富强等<sup>[11]</sup>对铝电解槽上集气烟道结构内(非全槽)的烟气流动进行了数值模拟和结构优化,将500 kA电解槽上烟道改为6段烟道分段向上集气(图10),相较于传统的400 kA电解槽,各段烟道进气口速度分布更加均匀,而且进口流速也远小于粉尘的沉降速度,可以有效预防槽膛内因烟气流速偏高而携带粉尘进入上烟道结构内,进而保持上烟道空腔内烟气流通截面的顺畅,避免了烟道积灰。

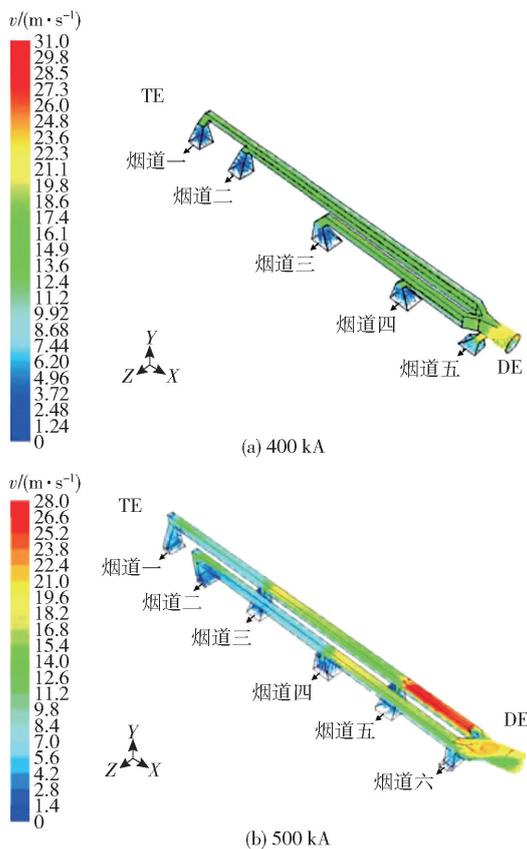


图10 400 kA、500 kA 电解槽上烟道内部烟气流速分布图

在维持原结构框架基本不变的基础上,根据槽膛内烟气流动模拟结果和集气需求,合理调整烟道集气孔的尺寸大小和空间分布,从而达到改善槽膛内烟道集气均匀性的目的,有效提高了电解槽的密闭效率,减少烟气泄漏对车间环境的污染。

目前,上集气烟道和下集气烟道均存在集气不均匀、烟道积灰的问题。下集气烟道已经存在改造完成的先例,但上集气烟道改造案例较少。虽然上、下烟道问题的产生都是由于烟气流动过程中气体流速、热平衡等因素综合作用,致使部分区域气体流速减缓,灰尘易于沉降和堆积,但上、下烟道在结构上存在显著差异。上烟道要与电解槽上部结构适配,其形状和布局更为复杂。因此,对上烟道改造需要具体考量和探索,进而完成相应优化改造。

除了上述烟道改造办法外,为实现槽内烟气收集,还有一种密闭电解槽的超前构想,在电解槽上部增设集气罩,利用风机产生的负压,将电解槽内有害气体吸入集气管道,或者在每个电解槽的出口处分别安装火眼排烟管和负压排烟管,所有火眼排烟管

通过火眼排烟管网与高浓度烟气净化处理系统连接,所有负压排烟管通过负压排烟管网与低浓度烟气净化处理系统连接<sup>[25]</sup>,实现电解槽槽壳内分区域集气以及对二氧化碳的捕获再利用,在改善车间环境的同时,实现节能降碳。

### 3 槽间排烟控制

#### 3.1 支烟管

在铝电解的集气系统中,槽间排烟不均衡的问题主要出现在排烟支管上,可以归结为以下三个方面。首先,调节精度不高是一个重要因素。电解槽间的排烟平衡主要依赖于气动或电动单板蝶阀的开度调节<sup>[26]</sup>,但实际操作中,由于烟尘的堵塞以及人工调整的误差,蝶阀的调整精度往往无法达到要求,这直接影响了排烟的平衡。其次,设备的部件老化也是不可忽视的因素。随着集气系统使用,烟气调节阀的阀板与转轴之间的连接部件可能发生松动或滑移,导致无法通过指示盘准确判断阀板的实际位置,从而引发排烟调节方面的异常。最后,阀门特性的问题也显得尤为突出。蝶阀并不是线性调节阀,阀板的微小位移便可能引起排烟通量的显著变化,因而导致排烟量难以实现精准控制。

在集气烟道中,支烟管是连接集气罩与主烟道的分支管道,实现烟气收集。通过合理的设计和安装支烟管,能够实现槽间的排烟均匀性,从而实现主烟道内的烟气分布均匀,提高整体集气系统的效率。但是支烟管在实际运行过程中,除了存在槽间排烟不均匀以外,还可能存在结构不稳定以及积灰堵塞等问题。为了保证生产的安全性和高效性,对支烟管的优化改造也显得极为重要。通过测量支烟管内的烟气流量和槽膛内(或支烟管)的风速,可以评估槽间排烟均匀性<sup>[27]</sup>。

某公司 350 kA 电解系列出现排烟量分布不均匀问题,是因为存在侧支烟管短距离内拐弯,直管段较短,管内的烟气流速明显偏流,因而采用测量支烟管的同位置风速来对比排烟偏差<sup>[27]</sup>(图 11)。分析可知支烟管优化前的电解槽只能通过阀门来调节排烟量大小,因此导致了槽间排烟偏差较大的问题。李刚等<sup>[27]</sup>经测试诊断后,提出了采用孔板代替支烟管阀门的在线优化方案,以控制每台电解槽排烟量的分布均匀性。支烟管改造后,槽间排烟分布偏差介于  $\pm 10\%$  以内(图 11),槽间排

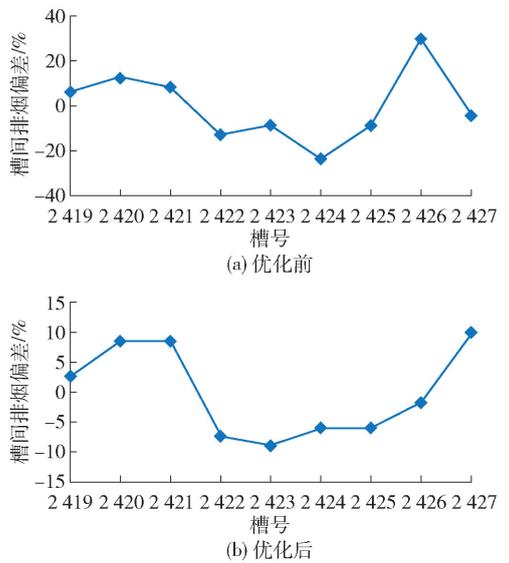


图 11 支烟管优化前后实测槽间排烟分布偏差

烟量分布均匀。利用孔板代替阀门不仅提高槽间排烟的均匀性,同时解决了各个电解槽之间的热平衡差异问题。

#### 3.2 变径排烟管

为了解决烟道积灰问题,传统设计是在电解槽排烟管出口安装阀门,通过调整阀门不同的开度来平衡远近槽的风量,从而实现均匀排烟。然而,这种控制方式存在诸多弊端:①阀门会产生较大的局部阻力损失;②这种方式下要使电解槽排烟量均匀极为困难;③阀门在运行过程中容易出现动作不顺畅的情况;④随着使用年限的增加,阀门还会面临年久失修的问题。

与之相比,电解槽排烟管变径技术可以解决这一问题。通过科学计算,设计并改变电解槽出口烟管的管径,可以保证每台电解槽排烟管的出口负压和流量趋于相等,并且这种改动取消了排烟管上的阀门,在提高排烟效率的同时,节省了成本,延长了设备的使用寿命。

#### 3.3 双烟管

目前,为契合烟道排烟需求,多数电解铝企业对原有电解槽加以改造并装配双烟管。双烟管的核心效用在于显著增大电解槽排烟量,以此减少开槽作业期间的烟气泄漏状况,进而有效降低电解铝烟气的无组织排放水平。电解槽在增设双烟管的情形下,其排烟量达到此前的 1.5 倍及以上<sup>[28]</sup>,如图 12 所示。

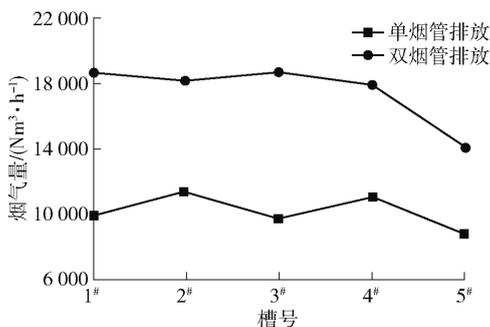


图 12 单烟管与双烟管烟气排放量对比图

显然,双烟管的投入使用有力确保了槽间排烟的连贯性与稳定性。在实际运行时,两根烟管协同作业共同承担排烟重任,有效规避了因单根烟管排烟受阻而引发的烟气泄漏现象,从而为铝厂的车间环境优化与高效运营提供了坚实保障。

### 3.4 电动阀门连锁控制

为了解决槽间排烟的不均匀性问题,还提出了电动阀门连锁控制的方案。早些年前的铝厂因技术和资金受限,在铝电解槽中所使用的阀门基本都是机械阀门,这类阀门结构简单,操作方便,在不需

频繁调节或者紧急状况下以及允许手动操作的环境下较为适用,但在克服槽间排烟均匀性上,需要根据各支烟管的实际排烟量不断调节阀门,才能使得排烟均匀,防止烟气泄漏。因此,就提出了电动阀门连锁控制的方案,通过传感器实时反馈,判断各阀门所需开度的大小,在实现远程操作的同时实现自动化控制。但在实际工况下,这一想法还存在诸多难点需要解决:①在铝电解槽的高温环境下,电子元件会受到干扰或损伤,影响阀门的密封性能和控制精度,造成烟气泄漏;②铝电解槽在运行时产生的强大磁场会对电动阀门的电磁部件产生影响,造成信号干扰,引起系统故障;③槽内含有大量粉尘,这些粉尘容易附着在电动阀门的传动部件和传感器等表面,造成阀门动作迟缓、检测精度降低等问题,进而影响连锁控制的及时性和准确性,不易实现槽间排烟控制。

某电解铝厂通过采用密封优化、槽内烟气收集以及槽间排烟控制等措施,烟道内状况明显变好<sup>[19]</sup>,车间内环境也得到了显著改善,改造前后具体效果对比见表 1。

表 1 烟道改造前后效果对比

对比项目	改造前	改造后
出铝端	冒烟存在	冒烟消失
烟道	灰堆高度超过烟道高度 2/3	灰堆高度低于 1/4
清灰情况	半月清灰一次,单次清灰耗时超 30 min	每月清灰一次,单次清灰耗时小于 10 min
槽温	$T_{\text{出铝端}} > T_{\text{烟道端}}, 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{出铝端}} > T_{\text{烟道端}}, 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
铝帮内形	出铝端空,烟道端厚	两端基本相当
车间环境	差	有所改善,清晰度高

## 4 残极烟气收集

在电解车间的复杂工况下,除了密封强化、槽内集气优化和槽间排烟控制可以优化电解车间的环境,还应注意一些无组织排放问题。例如,换极作业后,残极上的热气裹挟着氟化氢气体肆意飘散,对电解车间环境的影响不容忽视。

在铝电解过程中,阳极炭块会参与反应被消耗,但为了保证原铝的品质,不能让阳极炭块完全消耗,否则不但会损伤阳极钢爪,还会导致原铝中的铁含量大幅提高,降低原铝品质。因此在实际生产中,需要根据阳极炭块的消耗情况,在阳极炭块尚未完全消耗前就进行换级作业。换极过程中,残极被提出时还处于燃烧状态,高温残极与空气中的水分发生

反应,会持续产生氟化氢等有毒有害气体<sup>[29]</sup>。氟化氢的排放主要集中在残极被取出后处于高温的前 30 min 内<sup>[30]</sup>(图 13)。

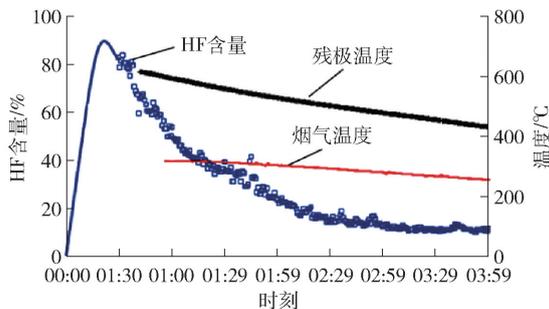


图 13 残极烟气温度和散发量的曲线

Girault 等<sup>[31]</sup>在封闭的残留测试装置中测试了残极的排放情况,发现残极被取出后,前期处于高温

状态,其氟化氢的散发量最大,前 30 min 内 HF 挥发量占总挥发量的一半以上(图 14)。因此,残极烟气的收集应该在取出残极后尽快进行。

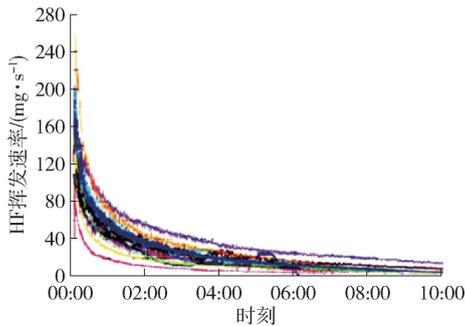


图 14 氟化氢排放速率

现在残极烟气的收集方式大概可以分为三大类。第一种方法是在铝电解车间使用多功能天车将残极上提到刚好脱离电解质液面,将其固定并及时关闭槽罩,使残极气体在铝电解槽内得到充分释放,通过烟气净化系统进行收集处理,待其冷却约 1 h 后,再进行换极作业<sup>[29]</sup>。该方法虽然能在电解槽中保留住更多的热量,也能高效利用原有的烟气净化系统,但是存在残极冷却速度慢,影响正常生产,以及后续还需处理未完全排放的残极烟气等问题。

第二种方法是在取出残极后,迅速将其放入冷却箱内(图 15),并进行密封以与外界隔绝。在这种密闭状态下,残极缓慢散热,从而有效避免污染物的释放<sup>[32]</sup>。该方法散热所需时间长,降低了厂房使用效率,同时工人凭借经验进行作业,存在一定的安全风险。



图 15 手动残极冷却箱

第三种方法是使用残极冷却系统(图 16)<sup>[33]</sup>。残极取出后由天车吊运到托盘上固定,操作人员只需要通过电控启动残极烟气收集设备(密封罩移向工作位点,排烟阀打开),便可进行烟气的收集处理,残极冷却后随托盘一起进入组装车间进行后续

处理。该方法不仅散热速度快、污染物散发少,还可以将回收的氟化氢气体再次利用,降低吨铝氯化物的消耗。

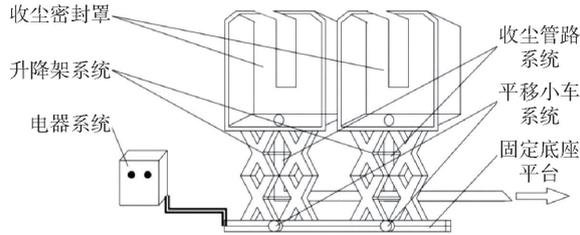


图 16 残极冷却系统

残极烟气处理是铝电解企业实现车间环境治理的重要环节。当前企业面临收集效率低、氟化氢排放不稳定等问题,但通过不断优化残极冷却箱系统和提高自动化水平,可以有效改善现状。

## 5 结论

电解铝生产过程中会产生大量含氟化物的烟气与粉尘,对电解车间及周边生态环境造成持续性破坏,严重威胁工作人员的身体健康。传统的电解槽密封及集气系统虽在一定程度上缓解了污染问题,但存在结构不合理、密封性欠佳、集气均匀性与排烟均匀性差等问题。因此,学者及工程人员有针对性地展开了一系列优化改进工作。

1) 密封性改进:通过对阳极导杆增加 U 型砖密封和槽罩板薄弱部位加强结构强度、采用柔性密封材料,提高电解槽整体密封性,从而提升集气效率。然而改造只能增加电解槽密封性,但密封材料本身老化、频繁操作的变形问题依然存在,因此未来应该针对性地研制适配于电解槽密封的专用材料。

2) 槽内烟气收集优化:通过电解槽运行状态下的烟道在线优化改造,或是停槽状态下的烟道改造,都可改善烟气收集均匀性,减少烟道积灰,显著提升集气效率。但在线改造存在优势的同时也存在一定的局限性,针对不同容量的电解槽,在线改造均需进行差异化方案设计,才能使得优化改造后效果达到最佳。在线改造缺乏通用性,设计成本高,因此需持续开展在线改造技术研究,以构建普适性更强的优化方案库。

3) 槽间排烟控制:针对传统排烟支管阀门控制存在的问题,提出采用孔板结构或变径管等技术替

代阀门,实现槽间排烟均匀性,提高排烟效率并降低能耗。然而,采用现有的孔板结构仍存在动态调节能力缺失的技术瓶颈,需设计出专用的调节仪器;另外,变径管在积灰后集气效果衰减,因此应设计出可以自清洁的变径结构。

4)残极烟气收集:针对换极作业产生的残极烟气,采用槽内释放、冷却箱或残极冷却系统进行收集,其中残极冷却系统在提高收集效率、降低污染物排放和节约资源方面具有显著优势。但该系统存在无法对多个残极同时处理且智能化水平较低的问题,因此需开发具有抗干扰能力强的智能控制系统。

通过对电解槽密封、槽内烟气收集、槽间排烟控制和残极烟气收集等多个关键环节的技术改进和工艺优化,有效改善了车间环境,降低了氟化物排放,提高了能源利用效率,实现了节能降碳的目标,对铝电解行业的绿色可持续发展具有重要意义,其发展方向值得关注。

### [参考文献]

[1] 常玉杰. 350 kA 铝电解槽上部结构节能改造实践[J]. 世界有色金属,2023,(22):41-43.

[2] 生态环境部,发展改革委,工业和信息化部,等. 减污降碳协同增效实施方案[EB/OL]. [2022-06-10]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content\\_5696364.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm).

[3] 国家发展改革委,工业和信息化部,生态环境部,等. 电解铝行业节能降碳专项行动计划[EB/OL]. [2024-7-3]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content\\_6964214.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6964214.htm).

[4] 杨新宇,朱绍升,俞菊芬,等. 铝电解槽阳极铝导杆修复工艺技术[J]. 云南冶金,2010,39(S1):101-104.

[5] 王智堂. 提高铝电解槽导、锤杆密封集气效果的措施[J]. 现代零部件,2006(4):64,66.

[6] 王尚元,班允刚,杨青辰,等. NEUI 600 kA 级铝电解槽烟气流场测试与研究[J]. 有色冶金节能,2021,37(5):13-17.

[7] 柳静献,毛继红,林秀丽,等. 铝电解车间环境治理的风流模拟与结构优化[C]//Northeastern University(东北大学). Proceedings of 2010(Shenyang) International Colloquium on Safety Science and Technology. 东北大学资源与土木工程学院;东北大学设计研究院技术部;2010:5.

[8] 陈丽新. 电解铝烟气净化系统节电技术分析[J]. 轻金

属,2022(11):25-29.

[9] 王强. 质量管理与技术创新在铝电解生产中的实践[J]. 中国金属通报,2020(2):225,227.

[10] 黄卫平. 铝电解槽上部集气结构的密封保温改进措施[J]. 轻金属,2014(9):47-52.

[11] 王富强,杨晓东,刘雅锋,等. 铝电解槽上烟道内的烟气流场数值模拟研究[J]. 轻金属,2014,(11):24-27.

[12] 刘业翔,李劫. 现代铝电解[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.

[13] 邱竹贤. 预焙槽炼铝[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.

[14] 周锋,王怀江,李刚,等. 铝电解槽热平衡均匀性优化实践[J]. 有色冶金节能,2022,38(04):33-36.

[15] WANG Fuqiang, ZHANG Qinsong, LIU Wei, et al. Development and application of a new combination of models to improve the uniformity of ventilation and exhaust in a 500 kA potline[J]. The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society,2020,72(5):1961-1970.

[16] 胡红武,曹曦. 大型铝电解槽技术升级改造与应用[J]. 轻金属,2017(5):18-21,32.

[17] 李雪娇,赵鹤飞,张国权. 铝电解烟气净化系统减污降碳技术措施[J]. 轻金属,2024(9):27-31.

[18] 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.

[19] 李刚,谢青松,何飞,等. 350 kA 电解槽烟道改造实践[J]. 资源信息与工程,2021,36(4):120-122.

[20] 李成元,于议超,侯明云,等. 一种铝电解槽上部烟道自动吹灰装置:CN202320426066.1[P]. 2023-07

[21] 许亨权,李刚,田绍明,等. 一种铝电解槽集气烟道清理装置:CN202211050921.X[P]. 2023-01-10.

[22] 傅长宏,周终强. 铝电解槽集烟管集气均匀性的 CFD 模型[J]. 有色金属设计,2013,40(3):19-22.

[23] 谢亚平,万斌. 铝电解烟气集气净化系统的评价[J]. 有色金属(冶炼部分),2000(3):28-31.

[24] 黄安宁,易智民,张利军. 420 kA 大型铝电解槽上部集气烟道结构优化改造[J]. 有色金属(冶炼部分),2018(5):33-36,40.

[25] 王愚,高爱华,王瑞雪,等. 一种铝电解槽的火眼罩集气装置及其使用方法:CN201810081299.6[P]. 2024-03-26.

[26] 陈丽新. 一种铝电解槽排烟支管的自控蝶阀:ZL201720785233.6[P]. 2018-02-02.

[27] 李刚,何飞,王怀江,等. 350 kA 电解系列槽间排烟均匀性研究及实践[J]. 资源信息与工程,2021,36(3):

- 149 – 151.
- [28] 王文博,李雪娇,宋海琛,等. 电解铝烟气无组织排放深度治理技术研究[J]. 轻金属,2022(8):60 – 62.
- [29] 刘强,钟代勇,杨福全,等. 400 kA 铝电解槽阳极残极烟气回收的研究与实践[J]. 云南冶金,2022,51(4):197 – 200.
- [30] PHILIPPE DUMORITER. Scrubbing Technology for Potrooms and Anode Plants[C]//8th Australasian Aluminium Smelting Technology Conference and Workshop (8AASTC),2008.
- [31] GIRAULT G, BERTOLO J M, MASSAMBI S, et al. Investigation of solutions to reduce fluoride emissions from anode butts and crust cover material[J]. Light Metals, 2011:351 – 356.
- [32] GAGNE J P, BOULIANNE J F, MAGNAN. New Design of Cover for anode trays[C]// Aluminium 2006: Proceedings of the International Symposium on Aluminium, 2006.
- [33] 李成元,李文超,张宁. 残极冷却系统在电解车间的应用[J]. 山西冶金,2023,46(6):207 – 208,211.

## Environmental Treatment Methods for Aluminum Electrolysis Workshops

WANG Qiyu, WANG Zejiang

(School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** The production process of aluminum electrolysis emits harmful gases and dust, which pollutes the environment and endangers human health. Driven by national environmental protection policies, the transformation of aluminum electrolysis cells for pollution reduction and carbon emission reduction has become a research focus. The article reviews the current situations and problems in four key areas of aluminum electrolysis cells: sealing optimization, in-cell flue gas collection, inter-cell exhaust control, and residual electrode flue gas collection, and summarizes the transformation and optimization plans. In terms of sealing improvement, strengthening the sealing of anode guide rods and cell cover plates can enhance the gas collection efficiency. Regarding the optimization of in-cell flue gas collection, both online transformation and transformation during cell shutdown can improve the gas collection effect, and the online transformation has obvious advantages. In inter-cell exhaust control, by replacing valves with orifice plates or reducing pipes, the exhaust uniformity and efficiency are improved. For residual electrode flue gas collection, multiple methods are adopted, among which the residual electrode cooling system performs remarkably. These technological improvements and process optimizations are of great significance for improving the workshop environment, reducing fluoride emissions, enhancing energy utilization efficiency, and achieving the green and sustainable development of the aluminum electrolysis industry.

**Key words:** aluminum electrolysis workshop; online transformation; sealing optimization; flue duct transformation; flue duct ash accumulation; in-cell gas collection; inter-cell exhaust; residual electrode fume