

# 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

韩博<sup>1</sup> 廖长总<sup>2</sup> 李威<sup>2</sup> 侯金龙<sup>1</sup> 杜立波<sup>1</sup>

(1. 沈阳铝镁设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110001;

2. 广西来宾广投银海铝业有限责任公司, 广西 来宾 546135)

**[摘要]** 由于国家双碳战略目标的提出和实施,电解铝行业的技术升级方向逐渐转为节能型改造。某铝厂330 kA电解槽存在能耗高和电流效率较低的问题,经复核发现该电解槽母线磁场分布不均且数值过大,上部结构的下烟道集气形式效果差,同时采用传统气控打壳下料系统,不利于降低氧化铝下料对电解槽过热度和热平衡的冲击。针对这些问题,本文采用绿色低碳深度节能铝电解技术体系,应用网络化自平衡母线技术、“长健康寿命”内衬结构及热平衡技术及节能型上部结构对电解系列进行节能优化。优化后电流强度提升到350 kA,吨铝铝液直流电耗降低了634 kW·h/t-Al,电流效率提高1.89%,节能增产效果显著。

**[关键词]** 铝电解槽;绿色低碳;电流强度;电流效率;母线;集气烟道;内衬结构;节能

**[中图分类号]** TF821 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1008-5122(2023)04-0041-05

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2023.04.009

## 0 前言

国家“碳达峰、碳中和”战略目标对电解铝行业提出了严控新增产能和能耗双控的要求<sup>[1]</sup>,尤其是2021年8月26日国家发展改革委印发了《关于完善电解铝行业阶梯电价政策的通知》(发改价格[2021]1239号)后,整个电解铝行业进行节能技术升级是必然走向,因此节能降碳成为当前电解铝企业生存和发展的首要目标。

基于以上背景,某设计院根据某铝厂330 kA电解系列实际情况提出综合经济效益最优的节能技术措施,采用绿色低碳深度节能铝电解技术体系对电解槽内衬、母线配置、上部结构及集气系统等进行系列技改升级,使电解系列铝液能耗符合国家产业政策方向,同时实现电解系列降耗、提产双重效果。

## 1 电解槽改造前运行情况

在技改前,该系列电解槽已运行大约15年,设计电流330 kA,目前运行存在如下问题:

1) 330 kA电解槽运行电压和铝液能耗较高,电流效率偏低,电流效率与原材料水平严重不匹配。

2) 电解槽槽膛情况和热平衡情况较差,改进空间明显。

3) 电解槽磁流体稳定性不满足较低极距空间下稳定生产运行的需求。降低电压后,界面波动剧烈,电解槽的稳定性差,难以达到良好的工艺操作要求。

4) 上部结构采用下烟道集气形式,存在沿程阻力大、集气效果不良的问题,造成净化系统能耗较高。

5) 采用传统分组气控控制打壳下料,不利于降低氧化铝下料对电解槽过热度和热平衡的冲击,增加了槽内的氧化铝浓度分布梯度,且全气控结构,管路较为复杂。

## 2 改造方案

本次改造升级以节能为主要方向,辅以增产、增效,同时要在最大程度上节约投资。因此在电解车间、净化与物料输送及电解槽槽膛尺寸基本不变的情况下,改善磁流体稳定性、电解槽热平衡,提高阳

**[收稿日期]** 2023-03-21

**[作者简介]** 韩博(1983—),男,辽宁辽阳人,硕士,中级工程师,主要从事铝电解槽设计与开发工作。

**[引用格式]** 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.

极电流密度以及进行上部结构节能改造,同时将设计运行电流强化至 350 kA。

## 2.1 网络化自均衡母线配置

原有 330 kA 电解槽母线采用国内早期的传统自补偿大面进电区块化配置。近 15 年的生产运行效果显示,原有母线配置磁场分布情况较差,无法满足电解槽较低极距空间下稳定生产运行的需求。电解槽极易出现电压或电流波动,且这种波动很容易在上下游槽间传导,电解槽抗干扰能力和纠偏能力较差。因此,迫切需要利用新型母线技术优化磁场分布和电平衡,提高电解槽磁流体稳定性。

因此,本文依托最新母线磁场仿真设计平台,建立 330 kA 电解槽母线的电磁场仿真模型,对电解槽母线的磁场分布进行模拟计算。通过对比分析改造前后的模拟计算结果,循环优化母线磁场分布和电平衡,首创了网络化自均衡母线配置,在改造后的母线结构中建立一个新的等电位网络,使阴极母线系统与阳极母线、平衡母线、立柱母线构成一个完整的母线回路,大幅提高电解槽磁流体稳定性。

### 2.1.1 计算方法

#### 2.1.1.1 电场计算方法

电势  $V$  由式(1)拉普拉斯方程<sup>[2]</sup>求解得到。

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (1)$$

式中, $V$  为电势, $\nabla$ ;  $\sigma$  为导电材料的电导率, S/m。

电流通过的导电材料中的电流密度  $J$  可由式(2)计算得到。

$$J = -\sigma \nabla V \quad (2)$$

#### 2.1.1.2 磁场计算方法

磁场强度与磁感应强度<sup>[2]</sup>的关系见式(3)。

$$B = \mu_m H \quad (3)$$

式中: $H$  为磁场强度, A/m;  $B$  为磁感应强度, T;  $\mu_m$  为磁导率, H/m。

可由比奥-萨伐定律计算得到磁场强度  $H$ <sup>[2]</sup>, 见式(4)。

$$H = \frac{1}{4\pi} \iiint_{volC} \frac{J \times r}{r^3} d(volC) \quad (4)$$

式中: $J$  为导体中的电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $volC$  为导体的体积, m<sup>3</sup>;  $r$  为导体和所求磁场位置之间的距离向量, m。

### 2.1.2 磁场仿真计算

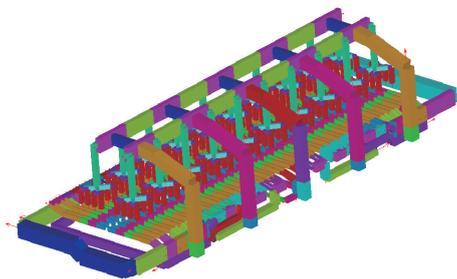
#### 2.1.2.1 电、磁场模型的建立

母线改造后,针对电解槽的电、磁场分布建立

电、磁场模型,结果如图 1 所示。其中图 1(a) 为电解槽坐标系,  $x$  轴方向是指由电解槽烟道端( DE) 指向出铝端( TE),  $y$  轴方向是指由 A 侧指向 B 侧,  $z$  轴方向是指由铝液指向阳极炭块;图 1(b) 为母线电磁场模型,模型由系列相邻电流、槽壳、空气包模型组成。



(a) 电解槽坐标系



(b) 母线电磁场模型

图 1 330 kA 电解槽母线电磁场模型

#### 2.1.2.2 磁场计算结果

330 kA 电解槽母线改造前后的  $z$  方向磁场计算结果见表 1。由表 1 可知,改造前 330 kA 电解槽四个象限磁场的绝对值平均值都大于 5 Gs,同时第 2、第 3 象限的值约为第 1、第 4 象限的 2 倍,说明四个象限垂直磁场的均匀性较差。此外,全槽熔体区范围内垂直磁场最大值偏高,达 32.206 Gs。优化后,四个象限的绝对值平均值均可控制在 5 Gs 以内<sup>[3]</sup>,磁场分布更为均匀,尤其第 2、第 3 象限改善较大,梯度更小。垂直磁场最大值出现在电解槽的角部,优化后的磁场比优化前下降 36.7%,显著提高电解槽的运行稳定性。

表 1 330 kA 电解槽母线  $z$  方向计算结果

状态	第 1 象限	第 2 象限	第 3 象限	第 4 象限	最大值
改造前/Gs	7.184	15.687	14.806	6.512	32.206
改造后/Gs	2.195	3.907	4.222	3.289	20.382

## 2.2 “长健康寿命”内衬结构及热平衡技术

原有 330 kA 电解槽采用传统散热型内衬结构配置,随着槽龄的增长,电解槽区域与整体热平衡情

况普遍较差,平均阴极压降超过 310 mV,炉膛情况较差,角部偏凉,槽底板温度偏高。上述母线优化技术的应用,为提高电解槽磁流体稳定性、降低极距提供了基础,但是电解槽能否长期在低极距条件下高效稳定运行,还与内衬热平衡的匹配密切相关。为实现低极距、低电压运行的目标,配套的内衬设计必须尽量减少阴极区域侧部和底部的散热,并系统性升级内衬侧部和底部的各功能区结构形式,匹配具有良好的耐压抗折强度、保温性能、耐电解质及蒸汽腐蚀的保温材料,以保障低极距、低电压下的电解槽良好热平衡,为延长电解槽内衬“健康寿命”创造条件。为此,针对性地加强角部、钢棒窗口及底部的保温性能;采用阴极钢棒浇铸形式进一步降低炉底压降,保证水平电流均质,增加电解槽稳定性以延长电解槽寿命;保证防渗层厚度合理,使用防渗性能更好的槽底材料,且在防渗层与保温层之间增加物理防渗层对钠蒸汽进行隔绝。

改造前后电解槽内衬的热平衡分析结果如图2所示。从图2(a)中可以看出,改造前阴极侧部等温线并不是很平滑竖直,800℃等温线在钢棒上部有

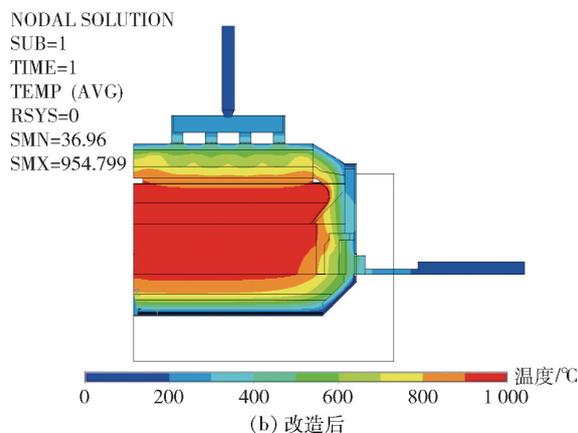
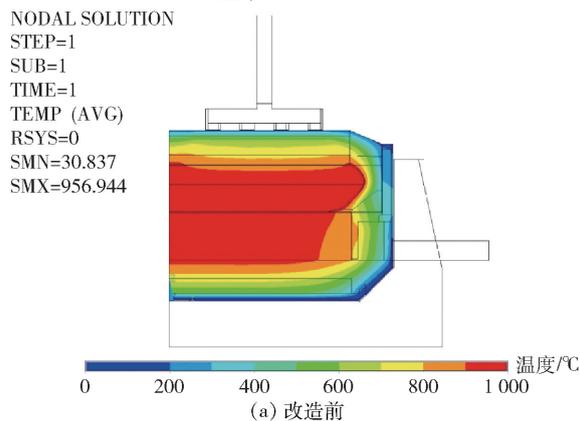


图2 330 kA 电解槽内衬结构改造前后等温线分布

异常凸起,且该凸起位置处于阴极炭块-碳糊-浇注料的结合部位,这会影响到局部的热应力分布。同时伸腿较长,槽膛情况并不理想,不利于电解槽的高效率。改造前电解槽内衬设计中要保证阴极区域热平衡,需降低电解槽散热量,加强保温性能。

图2(b)为改造后槽内衬结构和等温线分布结果。由图2(b)可知,通过优化内衬,保证电解槽区域和整体热平衡,同时阴极内衬得到了很好的保护。

改造前后电热场对比结果见表2。由表2可知,系列电流强化至 350 kA 后,槽平均电压降低了 0.116 V、阴极压降降低了 124 mV,伸腿长度减少 13.2 cm,改造后电热场性能较改造前明显改善,达到节能目的。

表2 改造前后电热场仿真计算结果对比

序号	指标	改造前	改造后
1	系列电流/kA	326	350
2	槽平均电压/V	4.065	3.949
3	覆盖料厚度/cm	18	15
4	电解质温度/℃	957	957
5	过热度/℃	7.5	8.1
6	阴极压降/mV	316	192
7	钢棒头温度/℃	267	283
8	炉帮厚度/cm	17.4	15.2
9	伸腿长度/cm	19	5.8

### 2.3 节能型上部结构

对于上部结构,针对大梁结构、集气系统及打壳下料系统进行改造升级,其中大梁的结构、外轮廓尺寸保持不变,大部分结构均可利旧使用,集气系统改为上烟道集气形式,打壳下料系统由原来的气控形式改为电磁阀控制,大幅简化了槽上部压缩空气配管,减少压缩空气泄露点和用量,便于生产维护,具体改造结构如图3所示。

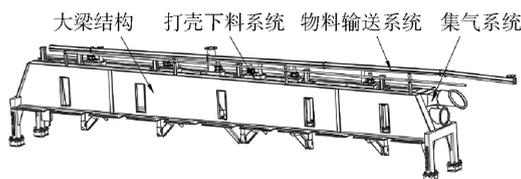


图3 上部结构技改部分

#### 2.3.1 大梁结构

对原有大梁的结构尺寸及外轮廓尺寸保持不变,只是为适应此次升级,改造集气系统、打壳下料系统及

物料输送系统的接口与空间尺寸。大梁原有的上下翼板、立板、门型立柱及部分加强筋均利旧使用。

对 330 kA 电解槽改造前后的应力和挠度采用有限元方法计算,计算主要分为模型简化、网格划分及材料属性定义、载荷与约束条件加载和有限元计算四个部分。大梁由薄板焊接而成,以 shell63 壳单元进行建模<sup>[4]</sup>。改造前后上部大梁结构的应力与挠度值如图 4、图 5 所示。由图 4 和图 5 可知,改造前上部结构最大应力与挠度值分别为 256.3 MPa 和 16.11 mm,改造后最大应力与挠度值分别为 240.6 MPa 和 15.45 mm。应力值降低了 6.1%,挠度值降低了 4.1%,整体结构刚度增强,改造效果达到预期。

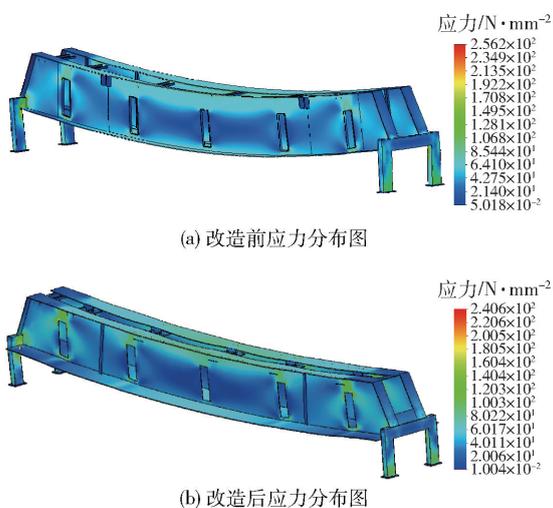


图 4 改造前后大梁结构应力变化

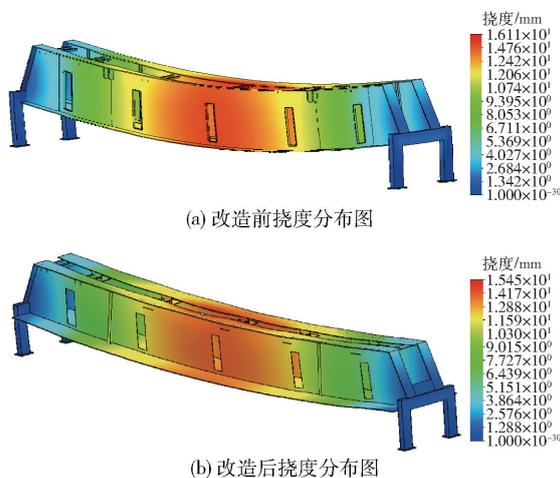


图 5 改造前后大梁结构挠度变化

### 2.3.2 集气系统

原 330 kA 电解槽采用下烟道集气形式,随着槽龄的增长,烟道内积灰严重,集气阻力大,净化系统能耗较高;采用传统分组气控打壳下料形式,氧化铝

下料对电解槽过热度 and 热平衡的冲击较大,阳极效应较多且难以熄灭。

优化后集气系统采用上烟道集气方式,更利于收集阳极气体和确保电解槽能量平衡的稳定<sup>[5]</sup>,优化配置上烟道各个集气罩相对距离,使电解槽长度方向集气更加均匀,大幅度降低集气烟道压力损失和系统风量,从而有效降低净化系统电耗。通过烟道各区域流速模拟控制,避免含尘烟气的沉积问题。本文对改造后的上烟道进行模拟仿真计算,循环优化。在计算中运用流体流动和传热基本方程,对集气系统的流动、压力场进行计算和优化。

#### 2.3.2.1 流体流动和传热基本方程

在模拟仿真计算中,运用了描述流体流动和传热的基本方程,包括连续性方程、动量守恒方程及能量方程<sup>[6]</sup>。

1) 连续性方程,见式(5)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (5)$$

式中: $\rho$  为密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $\mathbf{U}$  为速度矢量。

2) 动量守恒方程,见式(6)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{U}_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}_i) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (6)$$

式中: $\tau_{ij}$  为流体所受到的表面力在  $i$  方向的分力,即广义牛顿黏性应力,包括静压力和流体黏性力; $f_i$  为  $i$  方向上的外部体积力,可以是重力、电磁力等。

3) 能量方程,见式(7)。

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla \cdot T) - \rho \nabla \cdot \mathbf{U} + \Phi + S_h \quad (7)$$

式中: $h$  为显焓; $\lambda$  为流体热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $S_h$  为包括流体内热源、辐射换热等源项; $\Phi$  为由于黏性作用机械能转换为热能的部分,称为耗散函数; $\rho \nabla \cdot \mathbf{U}$  为表面力对流体控制体系所做的功。

#### 2.3.2.2 改造后的上烟道模拟计算

改造后的集气系统各个集气罩的烟气流量及偏差如图 6 所示。从出铝端到烟道端,各集气罩编号依次为 1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>,在保证电解槽各个集气罩流量基本一致的基础上,将出铝端各集气罩的相对流量适当调大,烟道端各集气罩的相对流量适当调小。这种设计形式可以保证在集气系统阻力最小的情况下,使电解槽长度方向集气效果相对均匀,同时保证相对较远的出铝端具备良好的集气效果。

改造后上烟道模型及烟气的压力和流场计算结果如图7所示。从图7可以看出,改造后集气系统平均负压为193 Pa,远小于原下烟道形式的350 Pa左右,改造后集气烟道压力损失和系统风量大幅度降低。同时水平烟道中烟气速度为14 m/s,出口速度达到了17.8 m/s,避免了含尘烟气的沉积问题。

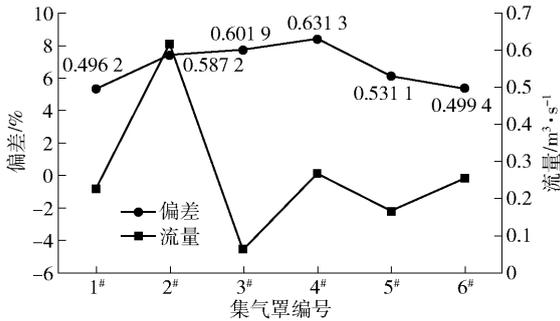
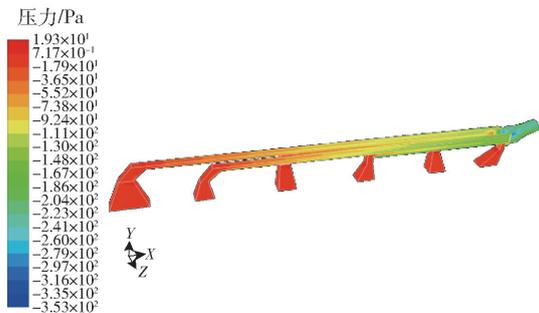
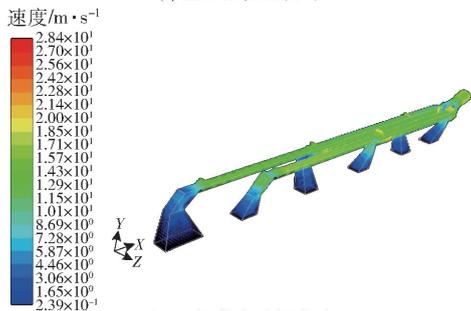


图6 改造后各集气罩的流量及偏差



(a) 上烟道负压分布



(b) 上烟道流动场分布

图7 改造后上烟道压力和速度计算

### 3 改造前后电解槽生产参数对比

改造前后电解槽生产参数对比见表3。从表3可以看出,改造后,电解槽系列节能降耗效果显著,电流效率提升了1.89%,铝液直流电耗由改造前的13 182 kW·h/t-Al降至12 548 kW·h/t-Al,降幅达634 kW·h/t-Al。同时,系列电流成功强化至350 kA,电解系列每年可多产原铝约1.4万t,为企业带来巨

大的经济效益。

表3 优化前后电解系列生产工艺参数对比

指标	优化前数值	优化后数值
运行电流/kA	330	350
电流效率/%	91.91	93.80
平均电压/V	4.065	3.949
阴极压降/mV	316	192
铝液直流电耗/(kW·h·t <sup>-1</sup> )	13 182	12 548

### 4 结论

1) 绿色低碳深度节能铝电解技术体系能够满足铝行业生产单位在“双碳双控”形势背景下的技术升级要求,可在不改变电解铝厂原有整体布局的条件下,对整个系列电解槽的内衬、母线配置和上部结构进行优化改造。

2) 通过优化母线配置、内衬结构和上部结构,节省了投资,节能降耗和增产增效明显,改造后铝液直流电耗降低634 kW·h/t-Al,电流效率提高约1.89%,电流强度提高到350 kA。

优化改造的实施解决了电解铝厂对节能降耗的迫切需求,并为电解铝厂的技术进步和技术改造提供了一定的示范作用。

### [参考文献]

- [1] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. [2021-10-26]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).
- [2] 周爱平,胡红武,王旋,等. SY500铝电解槽磁场的数值模拟与测试研究[J]. 轻金属,2019(3):25-28.
- [3] 王旋,刘伟,李广彬,等. 350 kA系列铝电解槽磁场模拟计算与优化[J]. 金属材料与冶金工程,2015,43(6):30-34.
- [4] 刘大立,李承山,常燕梅. 基于ANSYS的铝电解多功能机组小车端梁有限元优化设计[J]. 有色矿冶,2011(5):41-43.
- [5] 汪艳芳,周云峰,李昌林,等. 铝电解槽上部散热分析与研究[J]. 轻金属,2019(4):20-25.
- [6] 白斌,卢延峰. 350 kA铝电解槽集气烟道改造及运行实践[J]. 有色冶金节能,2017,33(2):10-12,20.

(下转第77页)

## Advance on Application of Ozonation-Biological Aerated Filter in Advanced Treatment of Biochemical Effluent of Landfill Leachate

CAO Di, GAO Yan, GAO Xianghong, ZHAI Xiaopeng, YIN Yunjun, ZHAO Yongzhi

**Abstract:** This paper analyzed and summarized the research and application of ozonation-biological aerated filter (BAF) combined process in the advanced treatment of landfill leachate in recent years. The characteristics of biochemical effluent quality of landfill leachate, the principle of ozone-BAF combined process for treating organic pollutants, the form and influencing factors of ozone-BAF, and the production cost were mainly introduced. The ozonation-BAF process can use the strong oxidation of ozone to oxidize refractory macromolecular organic matter into small molecular organic matter, improve the biodegradability of wastewater, reduce biological toxicity, and then further adsorb, oxidize and decompose the small molecular organic matter through the biofilm in the biological aerated filter, so that the effluent is further purified to achieve COD standard discharge. It is a promising non-membrane advanced treatment method.

**Key words:** ozonation; biological aerated filter; leachate; non-membrane method; advanced treatment; process principle; influencing factors

(上接第 45 页)

## Application of Green Low-carbon Deep Energy-saving Aluminum Electrolysis Technology System on 330 kA Electrolysis Series

HAN Bo, LIAO Changzong, LI Wei, HOU Jinlong, DU Libo

**Abstract:** Due to the proposal and implementation of the national carbon peak and carbon neutrality strategic goal, the technical upgrading direction of the electrolytic aluminum industry has gradually shifted to energy-saving transformation. The 330 kA electrolytic cell in an aluminum plant has the problems of high energy consumption and low current efficiency. After review, it is found that the magnetic field distribution of the cell bus is uneven and the value is too large, and the lower flue gas collection form of the superstructure has poor effect. At the same time, the traditional gas-controlled shelling and blanking system is not conducive to reducing the impact of aluminum oxide blanking on the superheat and heat balance of the electrolytic cell. In view of these problems, this paper adopted the green low-carbon deep energy-saving aluminum electrolysis technology system, applied network self-balancing bus technology, "long healthy life" lining structure and heat balance technology and energy-saving superstructure to optimize the energy saving of the electrolysis series. After optimization, the current intensity was increased to 350 kA, the DC power consumption per ton of aluminum liquid was reduced by 634 kW·h/t-Al, and the current efficiency was increased by 1.89%, and the effect of energy saving and production increase was significant.

**Key words:** aluminum electrolytic cell; green and low carbon; current intensity; current efficiency; bus; gas collecting flue; lining structure; energy conservation