

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.08.009

云南省水电铝行业碳减排途径和潜力研究

梅向阳, 刘群星, 卿华, 赵华, 马启程

(云南省生态环境工程评估中心, 昆明 650032)

摘要:在“双碳”背景下,电解铝行业面临着巨大的减排压力。在对全国电解铝生产各环节碳排放现状调查的基础上,以云南省为例,对比各环节碳排放水平,并对目前各环节碳减排的研究现状、主要措施及降碳效果进行了评述,查找差距并剖析原因,提出云南省电解铝在碳减排方面的措施并核算减排潜力。结果表明,云南省电解铝产业碳排放占比铝行业比重高于全国平均水平,提高绿电结构后,到 2025 年电解铝产业碳排放总量将可降低 30% 以上,远高于国家电解铝电力结构碳减排 5.82% 的指标。阳极碳耗碳排放是除电力碳排放之外占比最大的,通过利用优质的阳极后可降低碳排放 1.20%。通过先进技术革新后铝液综合交流电耗可达到先进清洁生产水平,碳排放可降低 0.63%。我国电解铝生产阳极效应全氟化碳排放量远高于其他发达国家,未来 5 年内云南省电解铝产业阳极效应碳排放将减少 1.31%。

关键词:云南省;电解铝;碳排放;减排对策

中图分类号:TF821

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)08-0072-08

Study on Carbon Emission Reduction Pathway and Potential of Hydropower and Aluminum Industry in Yunnan Province

MEI Xiangyang, LIU Qunxing, QING Hua, ZHAO Hua, MA Qicheng

(Yunnan Provincial Appraisal Center of Environmental Engineering, Kunming 650032, China)

Abstract: Under the background of “dual carbon”, the electrolytic aluminum industry is facing great pressure to reduce emissions. Based on the investigation of the carbon emission status of each link of electrolytic aluminum production in China, the carbon emission level of each link was compared, and the current research status, main measures and carbon reduction effects of each link were reviewed, the gaps were found and the reasons were analyzed, and measures for carbon emission reduction of electrolytic aluminum in Yunnan province were proposed and the emission reduction potential was calculated. The results show that the proportion of carbon emissions of electrolytic aluminum industry in Yunnan Province is higher than the national average level, and the total carbon emissions of electrolytic aluminum industry will be reduced by more than 30% in 2025 after improving the green electricity structure, which is much higher than the national target of 5.82% carbon emission reduction of electrolytic aluminum power structure. Anode carbon consumption carbon emissions account for the largest proportion of carbon emissions in addition to electricity carbon emissions, through the use of high-quality anode can reduce carbon emissions by 1.20%. After the innovation of advanced technology, the comprehensive AC power consumption of liquid aluminum can reach the level of advanced clean production, and the carbon emission

收稿日期:2024-03-08

基金项目:云南省人力资源和社会保障厅牵头项目 2024 年人才发展专项资金资助项目(530000211100000107950)

作者简介:梅向阳(1980-),男,博士,正高级工程师;**通信作者:**刘群星(1984-),男,高级工程师

can be reduced by 0.63%. The anode-effect perfluorocarbon emissions of electrolytic aluminum production in China are much higher than those of other developed countries, and the anode-effect carbon emissions of electrolytic aluminum industry in Yunnan province will be reduced by 1.31% in the next five years.

Key words: Yunnan province; electrolytic aluminum; carbon emissions; emission reduction strategy

中国是电解铝供给大国,产能产量占比过半稳居全球第一,根据 IAI 统计,2022 年全球电解铝产量 6 846.1 万 t,其中我国产量占比达 59.1%。《清理整顿电解铝行业违法违规项目专项行动工作方案的具体通知》中明确了我国电解铝合规产能的天花板为 4 500 万 t。从地域分布看,山东、新疆、内蒙古、云南是目前国内最主要的电解铝生产省区,合计产能占全国 61.02%。在供给侧改革和“双碳”背景下,由于西南及内蒙等地区的电力成本较低,且西南地区的电力结构更符合低碳生产的要求,山东部分电解铝产能持续向云南、内蒙古转移。山东省电解铝产能从 2017 年的 1 167.8 万 t 减少至 2022 年的 837 万 t,云南省电解铝产能从 2017 年的 158.5 万 t 增加至 2022 年的 638 万 t,增幅达 303%。2023 年山东魏桥铝电公司又向云南省转移 193 万 t/a 电解铝产能,目前正在建设中,建成后云南省电解铝产能将会达到 831 万 t/a,产能将会位居全国前列。

云南省“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要提出,“十四五”期间云南省电解铝产能将达 1 000 万 t,并且全部实现省内合金化。2023 年我国有色金属行业二氧化碳排放总量约为 6.7 亿 t,占全国碳排放总量的 4.7%,其中,铝工业碳排放 5 亿 t,占有色金属行业碳排放总量的 74%。云南省作为有色金属大省,结合区域优势和特征研究电解铝生产的碳减排,对促进有色金属行业实现绿色低碳发展及区域碳达峰碳中和工作十分必要。

近年,对铝行业碳排放的相关研究有部分报道,多集中在电解铝行业碳排放核算方法、碳排放的变化和碳减排途径、碳达峰和碳中和模型预测等方面,而在目前云南省电解铝产业迅速发展,在碳排放水平和碳减排等方面的差异性和地域特征还鲜见报道^[1-4]。云南省作为水电能源大省,同时铝土矿与碳素等资源匮乏,在电解铝行业碳排放水平和减排的重要途径方面的研究也尤为重要,以促进电解铝行业在云南省实现低碳绿色发展。

1 国内和云南省电解铝碳排放现状

1.1 国内电解铝碳排放现状

原铝生产碳排放按生产工艺流程可分为铝土矿

开采、氧化铝生产、阳极制造、电解铝生产和铸造 5 个工序的碳排放,根据全球数据统计,电解铝生产工序占整个生产链的 75.8%,其次是氧化铝和阳极生产,分别占比 20.1%和 3.1%,铝土矿工序和阳极铸造工序仅占 1%^[5]。我国电解铝行业年度用电量超过 5 000 亿 kWh,约占全社会用电总量的 6.8%,碳排放量约 4.2 亿 t,远高于铜、铅、锌等其他有色金属行业不超过 0.5 亿 t 的碳排放数量,单位电解铝生产的碳排放是钢的 6 倍^[6-7]。

电解铝生产各工序碳排放类型按照电力排放(间接)、PFC_s排放(直接)、阳极消耗 CO₂直接排放、辅助材料排放(间接)、热能排放(直接或间接)和运输排放(间接)6 类分类统计全球数据,其中主要碳排放环节为电力碳排放(占比 78.8%)、阳极消耗 CO₂直接排放(占比 12.3%)、PFC 排放(占比 5.3%),其余环节排放占比仅 3.6%^[5]。

2023 年,我国电解铝产量为 4 159.4 万 t,按照生产电解铝约需消耗 13 500 kWh/t 电能进行测算,行业总耗电约为 5 615.19 亿 kWh,占 2023 年我国全社会用电量 92 241 亿 kWh 的 6.87%。电解铝用电结构中,水电、核电、风电和太阳能等能源的比重仅占 14%,火电占比 86%,火电占比远高于全球水平。电解铝吨铝碳排放约 13 t,其中火电电力能源消耗排放 11.2 t,用电其他环节碳排放 1.8 t,电力为水电能源时电力碳排放不计入。从电力结构可看出,降低电解铝行业碳排放,主要途径为提高绿色能源比例。

1.2 云南省电解铝碳排放现状

2023 年云南省水力发电量为 2 897.65 亿 kWh,占云南省发电量约 74.20%,是第二大电力来源的 4.5 倍左右(火力发电量占 16.4%),云南省绿色能源具有绝对突出的优势。电解铝生产火电电力碳排放为吨铝 11.2 t · CO₂,按照全国平均电力结构计算综合电力碳排放为吨铝 9.63 t · CO₂,而云南省 79%的绿色能源占比,则综合电力碳排放为吨铝 2.35 t · CO₂,远低于全国综合水平。按照火电碳排放吨铝 13 t · CO₂及目前云南省用电结构计算,云南省电解铝满负荷生产情况下,2022 年碳排放为 2 723 万 t CO₂,山东魏桥铝电公司向云南省转移

193万t/a电解铝产能建成达产后3547万t,规划产能达产后碳排放为4269万tCO₂,其中发电环节碳排放占比为57.83%。

2 电解铝碳排放主要工序

2.1 国内电解铝行业碳排放

电解铝行业理论铝液直流电耗仅为6320kWh(按每吨铝计,下同),大量的电能消耗在铝电解槽的结构和工艺操作中^[8]。2019年中国电解铝铝液综合交流电耗为13531kWh,远低于全球铝液综合交流电耗指标14273kWh^[9]。之后,技术进一步提升,2021年中国电解铝铝液综合交流电耗进一步降低,为13511kWh^[1]。另外,国家发改委相关文件明确自2023年起,电解铝企业电解铝铝液综合交流电耗小于13450kWh才能享受电价不加价政策;自2025年起,电解铝企业电解铝铝液综合交流电耗小于13300kWh才能享受电价不加价政策;到2025年电解铝铝液综合交流电耗大于13350kWh的电解铝企业将基本清零^[10-11]。虽然我国电解铝铝液综合交流电耗低于其他国家,但是由于中国电解铝火电使用比例远高于其他国家,其碳排放总量相对比较高。

从2021年到2025年,电解铝铝液综合交流电耗从13511kWh降低至13300kWh,计算得出将减少碳排放为0.122t·CO₂(减少1.27%)。2021年我国可再生能源发电量的比重约占28%,火电占比约72%,《“十四五”可再生能源发展规划》明确到2025年可再生能源电力总量消费比将达到33%。按照电解铝生产发电环节碳排放吨铝11.2t算,从2021年到2025年电解铝吨铝碳排放将减少0.56t·CO₂(降低5.82%)。从计算结果可知,降低电解铝行业碳排放,在“十四五”期间提高可再生能源比例是重要途径,但通过更新技术减少电耗也是一个重要措施。

PFCs排放(直接)主要是电解槽发生阳极效应时CF₄和C₂F₆等温室气体的排放,此时电解槽电压急剧大幅波动,CF₄和C₂F₆在自然界中极难降解,其当量系数分别是CO₂的6500倍和9200倍^[12-13]。电解槽正常状态CF₄和C₂F₆的排放量较小,一般为吨铝0.01kg,在发生阳极效应时,PFCs的排放量急剧增加,达正常状态的十几倍^[14-16]。比较2011年我国不同电解铝厂监测结果和其他国家2011年的平均PFC排放单耗,我国单位铝CF₄和C₂F₆的排放量比其他国家分别高出74.58%和40.53%,2019年

其他国家吨铝CF₄和C₂F₆平均排放量分别为0.018kg和0.002kg,远低于我国的《电解铝生产全氟化碳排放限额》(审定稿)最严格的目标级要求(CF₄和C₂F₆平均排放量分别为0.090kg和0.009kg),未来若要与国际标准接轨,我国电解铝技术还有很大的提升空间^[17]。

2020年前后我国电解铝生产PFCs碳排放下降到200~300kg·CO₂,根据技术研究进展,2023至2025年PFCs排放量在现有基础上将降低50%^[10]。《中国电解铝企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》中推荐CF₄和C₂F₆排放因子分别为吨铝0.034kg和0.0034kg,由此计算得知PFCs排放当量为0.2523t·CO₂。按照2021年PFCs的CO₂当量排放为0.2523t·CO₂和2025年降低50%计算,从2021年到2025年电解铝碳排放将减少0.126t·CO₂(降低1.31%),碳排放降低值与电解铝企业铝液综合交流电耗降低效果基本一致。

按照《中国电解铝企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》中有色金属工业协会推荐的参数(吨铝阳极净耗0.42t、阳极含硫率和灰分分别为2%和0.4%)计算,吨铝阳极消耗CO₂排放当量为1.503t·CO₂。根据铝化学反应方程式,吨铝理论阳极碳耗为333.3kg,当电流效率降低时,碳耗会升高^[18]。实际大型电解槽吨铝阳极消耗约为410~450kg^[19]。电解铝行业在采取优质预焙阳极时,吨铝炭阳极消耗为380~400kg^[20]。《铝行业规范条件》规定吨铝炭阳极净耗应低于0.41t,按照吨铝阳极消耗从0.42t降低到0.41t计算,电解铝碳排放将减少0.104t·CO₂(降低1.08%)。

2.2 云南省电解铝碳排放主要工序

电解铝用电结构中,2021年云南省绿色能源占比为79%,远高于全国平均水平。《云南省绿色能源高质量发展“十四五”后期工作方案》明确,截至2022年云南省绿色电力装机9632万kW,占比86.3%。到2025年电力总装机力争达到1.6亿kW,其中绿色能源装机力争达到1.45亿kW,占比为90.6%,随着云南省绿色电力装机比例提高,单位电解铝碳排放将会进一步降低。若按照绿色能源发展规划绿色能源装机占比90.6%计算,发电环节碳排放占比将降低至38.13%,电解铝碳排放总量将降低31.85%,远高于国家提高绿色电力结构降低电解铝行业碳排放的比例。

对于电解铝铝液综合交流电耗,2010年至2015年,云南省工信厅发布的电解铝企业铝液综合交流电耗

数据为 13 039~13 913 kWh, 2015 年之后就未见铝液综合交流电耗数据公布。从 2017 年起云南省新建了部分电解铝项目, 从其环评资料可知, 铝液综合交流电耗为 12 234~13 200 kWh。从平均电耗分析, 原有电解铝项目平均铝液综合交流电耗为 13 476 kWh, 新建电解铝项目平均铝液综合交流电耗为 12 717 kWh。原有项目采用的电解槽主要为 420 kA 及以下预焙阳极电解槽, 2017 年以后多采用 500 kA 大型预焙阳极电解槽, 其铝液综合交流电耗指标可能和电解槽及技术先进性有很大关系。《电解铝行业清洁生产评价指标体系》(征求意见稿)中明确Ⅲ级指标为 13 350 kWh, Ⅱ级指标为 12 750 kWh, I 级指标为 12 650 kWh^[21]。云南省电解铝企业新建项目铝液综合交流电耗可达到先进水平。另外, 云南省人民政府明确, 新建电解铝项目须达到 13 000 kWh 的能效标杆水平, 力争 2024 年电解铝项目全面达到能效标杆水平^[22]。从以上历史资料和规划文件要求看, 按照新建项目铝液综合交流电耗达到国际先进水平和原有项目达到能效标杆水平计算, 电解铝行业吨铝碳排放量将减少 0.026 t·CO₂ (0.63%), 由此可知采取降低电解铝铝液综合交流电耗的措施以减少十分有限。

云南省 2016 年以前 158.5 万 t/a 产能的铝电解槽主要为 420 kA 及以下预焙阳极电解槽, 2017 年以后电解铝多采用先进的 500 kA 大型预焙阳极电解槽, 从全国范围看, 云南省大多电解铝产能均为新建的项目, 采用的设备及技术相对先进。对于电解铝过程中发生阳极效应产生的 PFCs 排放, 据中国铝业股份有限公司相关资料显示, 采用相关专利技术后, 吨铝 PFCs 的 CO₂ 当量排放量可降低至 0.260 t·CO₂^[23]。加之云南省后期建设的电解铝项目均采用先进的生产技术, 其 PFCs 的 CO₂ 当量排放量将会进一步降低, 将会优于全国的平均水平。

对于电解铝阳极净耗, 2010 年至 2015 年, 云南省工信厅发布的电解铝企业吨铝阳极净耗数据为 0.404~0.444 t, 2015 年之后就未见阳极净耗数据公布。从 2017 年起云南省新建了部分电解铝项目, 从其环评资料可知, 吨铝阳极净耗为 0.397~0.410 t, 低于 2020 年我国电解铝阳极 0.415 t 的平均净消耗。《电解铝行业清洁生产评价指标体系》(征求意见稿)中明确Ⅲ级指标阳极净耗为 0.420 t, I 级指标为 0.410 t, 说明云南省阳极净耗已经达到先进水平^[23]。按照原有电解铝项目阳极消耗降低至 0.410 t 且新建电解铝项目阳极消耗量不变计算, 电解铝的

吨铝碳排放将减少 0.050 t·CO₂ (降低 1.20%)。

3 电解铝关键节点碳减排研究现状及进展

降低电解铝铝液综合交流电耗, 主要是要降低槽电压和提高电流效率。目前涌现了诸如低温低电压电解铝节能技术、稳流保温铝电解槽节能技术、新型结构电解槽节能技术、新型阴极和阴极磷生铁浇铸技术等一系列的节能减排技术, 如冷龙洋等^[24]以遵义铝业 25 万 t/a 系列大型铝电解槽为研究对象, 对设定电压、电解质水平、分子比等参数进行优化, 电压累计下降了 38 mV, 降低吨铝直流电耗 217 kWh, 电流效率提高了 1 个百分点。利用石墨化阴极技术, 由数学管控模型得出最优管控模型参数后, 500 kA 全石墨化阴极电解槽铝电解直流电耗可降低至 12 518 kWh, 比之前降低了 95 kWh, 电流效率提高了 0.5 个百分点^[25]。对 500 kA 电解槽进行新式节能阴极结构技术、磁场升级、母线自平衡、内衬结构等改造后, 直流电耗从 13 063 kWh 降至 12 400 kWh 以下, 电流效率提高了 2.1 个百分点^[26]。张阳等^[27]采用低阻阳极钢爪、优质无炭渣开槽阳极、石墨化阴极、磷生铁浇筑高导电阴极钢棒等多项优化技术, 直流电耗可降低至 12 251 kWh, 较之前降低了 455 kWh, 电流效率提高了 1 个百分点。通过对工业条件下热控制模型的研究, 开发双端节能工业系统 (HORRS) 并进行了应用, 可实现节能 784.5 kWh, 电流效率提高了 0.7 个百分点^[28]。300 kA 电解槽采用低阻高性能高强度阳极钢爪材料, 低阻高性能阳极钢爪较现用新钢爪降低 42.7 mV, 降电压效果显著, 为电解槽进一步节能降耗提供了空间^[29]。汪艳芳等^[30]利用新型稳流保温铝电解槽节能技术在 400 kA 系列电解槽上推广, 应用表明, 新技术槽进入正常期内系列铝液直流电耗 12 543 kWh, 与传统槽系列对比, 新型稳流保温铝电解槽节能技术槽平均电压降低了 86 mV, 铝液直流电耗降低了 507 kWh, 电流效率提高了 1 个百分点。从节能减排技术改造效果分析, 同时采用多种节能技术效果明显, 电流效率可提高 2 个百分点以上。

研究表明, 导致阳极效应发生主要原因是氧化铝浓度偏低^[16,31]。减少阳极效应发生主要是要降低发生效应频次和缩短效应时间, 近期研究表明, 采取优化下料系统和氧化铝输送系统方案、实现阳极效应熄灭自动化和智能化、进行温度和化学成分控制等措施对减少阳极效应可发挥一定的作用^[32]。针

对某电解铝企业 300 kA 电解槽氧化铝浓度进行了调整,结果表明,将提高氧化铝浓度到 16.5%,阳极效应发生率可降低 40%以上,电流效率较原有可提高 0.35 个百分点^[33]。对某电解铝企业进行智能打壳下料技术进行改造后,解决了氧化铝下料不畅导致氧化铝浓度分布不均、电解槽稳定性变差等问题,该技术可降低阳极效应发生率并节约电耗 50 kWh^[34]。张宇婷^[35]通过分析铝电解 PFCs 排放机理入手,研究提出优化电解槽结构和控制系统设计、工艺技术及原辅料成分控制等可减少铝电解 PFC 排放。姜宇峰^[36]通过便捷性阳极效应熄灭装置和自动化阳极效应熄灭装置两种不同的应用方案实现对于阳极效应的合理控制。赵桔^[37]对 300 kA 电解槽使用新型稳流保温铝电解槽节能技术,研究表明,该技术的使用可有效降低阳极效应系数,达到 0.06 次/(槽·d)。章烈荣^[38]将 350 kA 电解系列作为研究对象,使用高 Li、K 电解质进行电解铝生产,试验表明,确定适宜的电解质成分并配合工艺和操作管理,可实现噪声值下降、阳极效应受控和炉膛状况好转,电流效率提高 2.91 个百分点。另外,在阳极效应的预警预报方面也投入了大量的研究力量,如利用基于 SDAE 的铝电解槽阳极效应预测方法、多元时间序列特征解释 CNN 的阳极效应识别方法和基于分布式感知的铝电解智能识别系统等方法进行预测,均能提前预知并及时调整相关工艺参数和工艺操作,减少阳极效应的发生^[39-41]。

降低铝电解阳极消耗也是减少 CO₂ 排放的一个重要途径,而阳极消耗主要为电解过程中与氧化铝发生化学反应消耗和氧化消耗,主要通过提高电流效率和对阳极抗氧化处理两方面采取措施减少阳极消耗,对如何提高电流效率研究进展前文已进行阐述。对于阳极防氧化,一般有提高炭阳极自身的抗氧化性能和炭阳极表面做涂层处理以隔绝氧气两种途径,即阳极碳素生产工艺控制和后期材料抗氧化处理。阳极碳素生产工艺控制方面,主要是开展了阳极碳素焙烧温度控制、原料成分杂质含量及添加剂等研究工作,如控制原料中的硫、钒、镍、铁等元素含量,控制阳极碳素结构,在阳极中添加硼化合物、磷化合物等,均有利于阳极的抗氧化^[42-43]。阳极结构优化降低阳极毛耗方面,研究表明,将阳极角部极高度由 610 mm 调整到 600 mm,折合铝液吨铝阳极毛耗降低 1.6 kg^[44]。阳极碳素表面处理防氧化技术方面,主要是利用溶液浸渍法及涂层法对阳极碳素表面进行抗氧化处理,如利用纳米陶瓷基阳极防

氧化涂层材料的大规模工业应用进行长期跟踪发现,阳极更换周期延长一天,吨铝阳极毛耗减少约 14 kg,电流效率提高了 0.7 个百分点^[45-46]。

4 云南省电解铝企业碳排放减排对策

由于云南省铝土矿资源匮乏及电解铝须消耗的氧化铝和阳极碳素产业配套不足,电解铝产业碳排放占比电解铝整个行业比重高于全国平均水平,云南省下一步应积极发展“绿电+先进制造业”,培育国家级先进制造业集群,推动“云南制造”品牌升级,推动绿色铝向精深加工和终端制造延伸产业链。

从电解铝产业碳排放各环节分析可知,云南省绿色能源使用比例远高于全国平均水平,单位铝碳排放水平较低,但发电环节碳排放占比仍然超过 50%。根据云南省绿色能源发展规划,将进一步提高绿色能源比例,到 2025 年云南省电解铝产业碳排放总量将可降低 30%以上,转变用电结构仍然是云南省电解铝产业碳减排的主要途径。

阳极碳耗碳排放是除电力碳排放之外占比最大的环节,云南省原有电解铝项目阳极消耗比全国平均水平略高,新建电解铝项目炭阳极消耗比全国平均水平低,降低阳极消耗主要措施是提高电流效率和防止阳极氧化。相关研究表明,采取优质预焙阳极和对阳极进行防氧化处理后,吨铝炭阳极消耗可减少 20 kg 以上,采用先进技术降低阳极消耗以降低碳排放还是有很大的提升空间。

云南省电解铝产业原有项目采用的均为 420 kA 以下小型电解槽技术,铝液综合交流电耗与先进水平还有一定的差距。2017 年之后因全国产能转移迅速发展,发展壮大相对滞后,均采用 500 kA 大型电解槽先进技术,2017 年之后新建项目铝液综合交流电耗均能达到国内先进水平。目前在降低铝液综合交流电耗方面有较多的研究成果,研究实践结果表明,通过先进技术革新后可大幅降低铝液综合交流电耗水平,云南省电解产业碳排放量可减少 0.63%。云南省电解铝产业应积极进行节能降耗新技术应用,进一步降低铝液综合交流电耗和碳排放,已达到先进清洁生产水平。

目前我国电解铝生产全氟化碳排放量远高于其他发达国家,生产技术有极大的提升空间。采用中国铝业先进技术后,云南省原有电解铝项目全氟化碳排放水平基本与全国持平,新建电解铝项目由于采用电解槽及技术相对先进,碳排放量将会低于全

国平均排放量。氧化铝浓度偏低是导致阳极效应发生重要原因,目前研究主要是采取优化下料系统和氧化铝输送系统方案、实现阳极效应熄灭自动化和智能化、进行温度和化学成分控制等措施控制阳极效应,未来5年内全氟化碳排放量将有望在现有基础上降低50%。

5 结束语

云南省电解铝产业碳排放量较大,是铝行业乃至有色金属行业碳排放的最重要组成部分,电解铝行业面临着巨大的减排压力。提高绿电结构可降低碳排放总量30%以上,是电解铝产业碳减排最重要的途径,也是电解铝产业落实“双碳”工作要求的关键一环。降低阳极碳耗碳、减少阳极效应发生和提高电流效率降低铝液综合交流电耗等,是通过技术革新达到碳减排的重要途径,可分别降低碳排放1.20%、1.31%和0.63%。

提高电流效率和防止阳极氧化是降低阳极消耗的主要措施,可采取优质预焙阳极和对阳极进行防氧化处理等措施。氧化铝浓度偏低是导致阳极效应发生重要原因,可采取优化下料系统和氧化铝输送系统、实现阳极效应熄灭自动化和智能化、进行温度和化学成分控制等措施控制阳极效应。降低电解铝铝液综合交流电耗主要是要降低槽电压和提高电流效率,可采取低温低电压电解铝节能技术、稳流保温铝电解槽节能技术、新型结构电解槽节能技术、新型阴极和阴极磷生铁浇铸技术等一系列的节能减排技术等措施降低铝液综合交流电耗。

参考文献

- [1] 李春焕,曹阿林. 铝电解工业碳排放核算方法[J]. 有色金属(冶炼部分),2023(3):47-52.
LI C H, CAO A L. Carbon emission accounting methods for aluminum electrolysis industry [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(3): 47-52.
- [2] 张晶晶,马小龙,李扬. 新疆准东经济技术开发区二氧化碳排放现状与降碳对策研究[J]. 中国环境监测, 2023,39(增刊1):1-6.
ZHANG J J, MA X L, LI Y. Research on the current situation of carbon dioxide emissions and carbon reduction measures in Xinjiang Zhundong Economic and Technological Development Zone [J]. Environmental Monitoring of China, 2023, 39(Suppl. 1): 1-6.
- [3] 王丽娟,邵朱强,熊慧,等. 中国铝冶炼行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 377-384.
WANG L J, SHAO Z Q, XIONG H, et al. Pathway of carbon emissions peak of aluminum industry in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 377-384.
- [4] 李明阳,高峰,孙博学,等. 基于目标情景的中国铝生产碳减排与碳达峰分析[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1):148-158.
LI M Y, GAO F, SUN B X, et al. Analysis of carbon emission reduction and carbon emission peak for aluminum production in China based on target scenario [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 148-158.
- [5] 王旋,许立松. 电解铝行业碳排放现状和趋势分析[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(4):1-6.
WANG X, XU L S. Current situation and trend analysis of carbon emission in the electrolytic aluminum industry [J]. Energy Saving in Nonferrous Metallurgy, 2022, 38(4): 1-6.
- [6] 窦宏秀,王震. 加快电解铝行业碳达峰助力铝产业绿色低碳发展[J]. 轻金属, 2021(7):1-3.
DOU H X, WANG Z. Speed up peaking carbon dioxide emissions of aluminum industry facilitate the green and low-carbon development of aluminum industry [J]. Light Metals, 2021(7): 1-3.
- [7] 李瑛娟,宋群玲,张金梁,等. 碳中和背景下电解铝行业节能减排的探讨[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2021, 37(5):8-14, 37.
LI Y J, SONG Q L, ZHANG J L, et al. Discussion on energy saving and emission reduction of electrolytic aluminum industry under the background of carbon neutralization [J]. Journal of Kunming Metallurgy College, 2021, 37(5): 8-14, 37.
- [8] 王红霞,贾石明. 新型铝电解槽技术与节能新概念[J]. 世界有色金属, 2022(1):1-5.
WANG H X, JIA S M. New aluminum electrolysis cell technology and new concept of energy saving [J]. World Nonferrous Metals, 2022(1): 1-5.
- [9] 周云峰,罗丽芬,汪艳芳,等. 铝电解生产过程温室气体减排潜力分析与计算[J]. 轻金属, 2021(7):17-21.
ZHOU Y F, LUO L F, WANG Y F, et al. Analysis and calculation of greenhouse gas emission reduction potential in aluminum electrolysis production process [J]. Light Metals, 2021(7): 17-21.
- [10] 国家发展和改革委员会. 关于完善电解铝行业阶梯电价政策的通知 [EB/OL]. [2024-02-08]. https://www.gov.cn/jingji/202402/20240208_10146196.htm

- zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18239.2.
National Development and Reform Commission. Notice on improving the ladder electricity price policy of electrolytic aluminum industry[EB/OL]. [2024-02-08]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18239.2>.
- [11] 国家发展和改革委员会. 关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见[EB/OL]. [2024-02-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/dsxs/zcwj2/202201/t20220112_1311854.html.
National Development and Reform Commission. Several opinions on strict energy efficiency constraints to promote energy conservation and carbon reduction in key areas[EB/OL]. [2024-02-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/dsxs/zcwj2/202201/t20220112_1311854.html.
- [12] 赵春芳,张树朝,黄霞,等. 铝工业降低全氟化碳(PFCs)排放的研究[J]. 轻金属,2008(10):26-29.
ZHAO C F, ZHANG S C, HUANG X, et al. Study of PFC emission in aluminium industry[J]. Light Metals, 2008(10):26-29.
- [13] 陈功,石忠宁,史冬,等. 铝电解工业中全氟碳化物排放[J]. 有色矿冶,2010,26(1):50-53.
CHEN G, SHI Z N, SHI D, et al. Perfluorocarbon emissions from aluminum electrolysis industry[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2010, 26(1):50-53.
- [14] 赵春芳,张树朝,褚丙武,等. 铝冶炼厂 PFC 排放计算结果影响因素探讨[J]. 轻金属,2010(9):30-32.
ZHAO C F, ZHANG S C, CHU B W, et al. Discussion on influencing factors of calculation results of PFC emission in aluminum smelter[J]. Light Metals, 2010(9):30-32.
- [15] 张延利,张艳芳,郭瑜,等. 铝电解槽 PFC 排放识别的研究[J]. 轻金属,2017(11):31-35.
ZHANG Y L, ZHANG Y F, GUO Y, et al. Research on identification of PFC emission in aluminum electrolyzer[J]. Light Metals, 2017(11):31-35.
- [16] 秦庆东,邱仕麟. 工业铝电解过程中 PFC 排放机理探讨[J]. 轻金属,2015(6):23-27.
QING Q D, QIU S L. Discussion on the mechanism of PFC emission in industrial aluminum electrolysis[J]. Light Metals, 2015(6):23-27.
- [17] 孙珂娜. 铝电解温室气体的微观形成机理及其捕集回收工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
SUN K N. Study on microscopic formation mechanism and capture and recovery process of greenhouse gases from aluminum electrolysis [D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [18] 邱竹贤. 预焙槽炼铝[M]. 3版. 北京:冶金工业出版社,2005:178-180.
QIU Z X. Precalcined aluminium[M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005:178-180.
- [19] 刘业翔,李劼. 现代铝电解[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社,2008:120-122.
LIU Y X, LI J. Modern aluminum electrolysis[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008:120-122.
- [20] 郎光辉,王慧. 优质预焙阳极助力电解铝降碳生产[N]. 中国有色金属报,2021-04-08(7).
LANG G H, WANG H. High quality prebaked anode helps electrolytic aluminum to reduce carbon production[N]. China Nonferrous Metals News, 2021-04-08(7).
- [21] 国家发展和改革委员会. 电解铝行业清洁生产评价指标体系(征求意见稿)[S]. 北京:国家发展和改革委员会,2022.
National Development and Reform Commission. Evaluation index system of cleaner production in electrolytic aluminum industry (Draft for comment)[S]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2022.
- [22] 云南省人民政府. 云南省绿色铝产业发展三年行动(2022—2024年)[ED/OL]. [2024-02-08]. https://www.yn.gov.cn/ztgg/yhyshj/zccsydhb/cyyhsj/202303/t20230309_255983.html.
Yunnan Provincial People's Government. Yunnan green aluminum industry development three-year action (2022—2024)[ED/OL]. [2024-02-08]. https://www.yn.gov.cn/ztgg/yhyshj/zccsydhb/cyyhsj/202303/t20230309_255983.html.
- [23] 陈开斌,张旭贵,李昌林,等. 一种降低铝电解全氟化碳排放量的方法;CN115110120A[P]. 2022-09-27.
CHEN K B, ZHANG X G, LI C L, et al. A method for reducing perfluorinated carbon emissions in aluminum electrolysis;CN115110120A[P]. 2022-09-27.
- [24] 冷龙洋,陈琦,崔同尧. 大型铝电解槽低电压节能实验及研究[J]. 金属材料与冶金工程,2020,48(3):58-63.
LENG L Y, CHEN Q, CUI T Y. Study on low voltage energy saving of large aluminum electrolysis cell[J]. Metal Materials and Metallurgical Engineering, 2020, 48(3):58-63.
- [25] 孔晔,王旋. 铝电解系列端头槽磁场优化设计[J]. 轻金属,2023(9):31-34,46.
KONG Y, WANG X. Optimization design of magnetic field in the end aluminum reduction pot of potline[J]. Light Metals, 2023(9):31-34,46.

- [26] 侯金龙,刘雅锋,胡红武,等.绿色低碳深度节能铝电解技术 500 kA 系列改造应用实践[J].轻金属,2023(8):25-29.
HOU J L, LIU Y F, HU H W, et al. Application of green low-carbon and deep energy-saving aluminum electrolysis technology to 500 kA potline upgrading[J]. Light Metals, 2023(8):25-29.
- [27] 张阳,张亚楠,方斌,等.铝电解槽节能潜力分析与应用实践[J].有色金属(冶炼部分),2023(8):43-49.
ZHANG Y, ZHANG Y N, FANG B, et al. Energy saving potential analysis and application practice of aluminum electrolysis cells [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(8):43-49.
- [28] 梁学民,冯冰,曹志成,等.铝电解槽双端节能理论及工业应用[J].中国有色金属学报,2023,33(3):850-861.
LIANG X M, FENG B, CAO Z C, et al. Analysis of carbon emission reduction and carbon emission peak for aluminum production in China based on target scenario[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(3):850-861.
- [29] 汪艳芳,张旭贵,李健,等.低阻高性能阳极钢爪材料开发设计及工业试验[J].有色金属(冶炼部分),2021(11):46-53.
WANG Y F, ZHANG X G, LI J, et al. Development and industrial test of low resistance and high performance anode steel claw material[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(11):46-53.
- [30] 汪艳芳,柴登鹏,曹韶峰,等.新型稳流保温铝电解槽节能技术开发及在某 400 kA 电解系列推广应用[J].有色金属(冶炼部分),2020(7):46-52.
WANG Y F, CHAI D P, CAO S F, et al. Development of energy-saving technology based on steady flow and heat preservation and its application in a 400 kA electrolysis series[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(7):46-52.
- [31] 朱烨林,郑谐,陈世杰,等.温室气体四氟化碳处理技术研究进展[J].能源环境保护,2023,37(2):73-84.
ZHU Y L, ZHENG X, CHEN S J, et al. Development of energy-saving technology based on steady flow and heat preservation and its application in a 400 kA electrolysis series [J]. Energy and Environmental Protection, 2023, 37(2):73-84.
- [32] 孙康建,胡红武.铝电解生产减排全氟化碳(PFCs)分析与展望[J].轻金属,2009(6):42-45,67.
SUN K J, HU H W. Analysis and prospect of reducing PFCs emission in aluminium smelters[J]. Light Metals, 2009(6):42-45,67.
- [33] 张旭贵,周云峰,梁玉冬,等.氧化铝浓度参数调控降低阳极效应生产实践[J].轻金属,2021(9):21-24.
ZHANG X G, ZHOU Y F, LIANG Y D, et al. Production practice of reducing anode effect by adjusting alumina concentration parameters[J]. Light Metals, 2021(9):21-24.
- [34] 朱博,王兆文,杨西坚.智能打壳下料技术在大型预焙电解槽的应用研究[J].轻金属,2023(10):24-29.
ZHU B, WANG Z W, YANG X J. Study on the application of intelligent crust breaking and feeding technology to large-amperage prebaked aluminum reduction pots[J]. Light Metals, 2023(10):24-29.
- [35] 张宇婷.铝电解生产过程全氟化碳排放现状与分析[J].绿色矿冶,2023,39(4):36-40.
ZHANG Y T. Current situation and analysis of perfluorocarbon emissions from aluminum electrolysis production process[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2023, 39(4):36-40.
- [36] 姜宇峰.电气技术在铝电解阳极效应熄灭中的应用分析[J].造纸装备及材料,2022,51(7):117-119.
JIANG Y F. Analysis of the application of electrical technology to the extinction of anode effect in aluminum electrolysis[J]. Papermaking Equipment and Materials, 2022, 51(7):117-119.
- [37] 赵桔.FHEST 技术在 300 kA 铝电解槽节能降耗生产实践中的应用[J].山西冶金,2023,46(9):175-177.
ZHAO J. Application of FHEST technology in energy saving and consumption reduction of 300 kA aluminum electrolytic cell in production practice [J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(9):175-177.
- [38] 章烈荣.350 kA 电解槽富 Li、K 电解质体系选择[J].有色冶金节能,2022,38(1):39-43.
ZHANG L R. Selection of Li/K-rich electrolyte system for 350 kA electrolytic cell [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2022, 38(1):39-43.
- [39] 尹刚,陈根,何文,等.基于 SDAE 和随机森林的铝电解槽阳极效应预测方法研究[J].稀有金属,2021,45(4):428-436.
YIN G, CHEN G, HE W, et al. A method for anode effect prediction of aluminium electrolysis cell based on SDAE and Random Forest[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(4):428-436.
- [40] 常玉杰,邓紫晴,陈晓方,等.基于多元时间序列特征解释 CNN 的阳极效应识别方法[J].轻金属,2023(12):18-24.
CHANG Y J, DENG Z Q, CHEN X F, et al. Anode effect recognition method based on feature explanation CNN of multivariate time series [J]. Light Metals, 2023(12):18-24.

- drilling filter in the Naolingou deposit[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 45(2): 147-153.
- [16] 曹英学, 左维, 鲍占祥, 等. 不同抽注比例控制对地浸采铀矿山地下水环境影响的实践与探索[J]. 铀矿冶, 2017, 36(2): 134-143.
- CAO Y X, ZUO W, BAO Z X, et al. Practice and exploration of the impact of different extraction ratios on the underground water environment of uranium in-situ leaching mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(2): 134-143.
- [17] 徐强. 地浸矿山抽注比对溶浸范围影响研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(增刊 1): 93-97.
- XU Q. Study on the influence of extraction ratio on leaching range in in-situ leaching mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(Suppl. 1): 93-97.
- [18] 孙博, 孙占学. 地浸采铀中的环境污染及保护[J]. 铀矿冶, 2008, 27(3): 142-145.
- SUN B, SUN Z X. Environmental pollution and protection in uranium in-situ leaching [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2008, 27(3): 142-145.
- [19] 袁新, 刘金辉, 周义朋, 等. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀工艺对含矿层渗透性的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(5): 50-57.
- YUAN X, LIU J H, ZHOU Y P, et al. Effect of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching of uranium on permeability of ore-bearing layer[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(5): 50-57.
- [20] 杜超超, 周义朋. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀矿层渗透性影响因素[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(7): 48-53.
- DU C C, ZHOU Y P. Influence factors on permeability of ore layer in uranium $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(7): 48-53.

(上接第 79 页)

- [41] 邹忠, 彭晨, 李劼, 等. 基于分布式感知的铝电解智能识别系统及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(2): 732-743.
- ZOU Z, PENG C, LI J, et al. Intelligent identification system and application of aluminum electrolysis based on distributed perception[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(2): 732-743.
- [42] 于易如, 李庆义, 贾鲁宁, 等. 炭阳极电解消耗与炭阳极性能相关性分析[J]. 碳素, 2008(3): 38-42.
- YU Y R, LI Q Y, JIA L N, et al. Correlation analysis between carbon anode electrolytic consumption and carbon anode performance[J]. Carbon, 2023, 54(2): 732-743.
- [43] 李庆宏, 王平甫. 铝用炭阳极添加剂的研究与应用[J]. 炭素技术, 1999(6): 34-36.
- LI Q H, WANG P F. Research and application of carbon anode additives for aluminum [J]. Carbon Technology, 1999(6): 34-36.
- [44] 郑多, 韩顺忠, 晏晶. 铝电解槽角部阳极高度调整降低阳极毛耗实践[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(3): 29-32.
- ZHEN D, HAN S Z, YAN J. Practice of lowering gross anode consumption by adjusting anode height in corners of aluminum electrolytic cell[J]. Energy Saving in Non-ferrous Metallurgy, 2022, 38(3): 29-32.
- [45] 谢伦首, 王博一, 李德赞, 等. 纳米陶瓷基阳极防氧化涂层材料的应用[J]. 轻金属, 2023(3): 31-34.
- XIE L S, WANG B Y, LI D Z, et al. Application of nano-ceramic-based anode anti-oxidation coating materials[J]. Light Metals, 2023(3): 31-34.
- [46] 李乐, 程久元. 铝电解炭素阳极用防氧化保护涂料工业化应用研究[J]. 甘肃冶金, 2023, 45(3): 74-77.
- LI L, CHEN J Y. Industrial application of anti-oxidation protective coatings for aluminum electrolytic carbon anodes [J]. Gansu Metallurgy, 2023, 45(3): 74-77.