

聚焦碳排放

电解铝行业碳排放现状和趋势分析

王旋 许立松

(沈阳铝镁设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110001)

[摘要] 通过分析全球原铝生产碳排放量和碳排放强度,以及各工序的碳排放强度变化趋势,揭示了原铝生产量、电解铝交流电耗和电力能源结构是影响碳排放的最主要3个因素。其中电力能源结构是影响碳排放强度的最重要因素,电力碳排放强度的增加完全抵消了非电力碳排放强度大幅下降的贡献。因此,控制电力碳排放是降低电解铝碳排放的重中之重。今后,中国将进一步降低电解铝交流电耗,调整电力能源结构、大幅提高绿电使用比例,为实现“碳中和”目标和应对气候变化作出更大贡献。

[关键词] 电解铝; 碳排放; 温室气体; 交流电耗; 电力能源结构; 碳排放强度

[中图分类号] TF821 [文献标志码] A [文章编号] 1008-5122(2022)04-0001-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2022.04.001

0 前言

2020年9月,中国宣布将力争二氧化碳排放于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和;2020年12月,进一步宣布2030年我国单位产值碳排放比2005年下降65%以上和非化石能源占一次能源消费比重达到25%左右等目标;2020年12月16—18日,中央经济工作会议首次将“做好碳达峰、碳中和工作”列为2021年的重点任务。与此同时,《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》《2030年前碳达峰行动方案》等更高层级的重磅文件出台。可见,随着我国政府一系列的政治表态和切实行动,“碳达峰、碳中和”已经上升到国家战略层面,成为今后相当长一段时期我国经济社会发展和产业政策调整的大背景。

电解铝行业是典型的高耗能产业,也是高碳排放产业,并且电解铝行业的高碳排放特性从属于其高耗能特性。因此,虽然我国电解铝能耗指标处于国际先进水平,但作为全球电解铝第一大国,“碳达峰、碳中和”行动势必对我国电解铝行业产生深远影响。

1 铝行业碳排放总量及强度

按照国际铝业协会(IAI)的口径和数据^[1-2],铝行业碳排放涵盖原铝生产和再生铝等的碳排放,其中原铝生产碳排放占比达95%。原铝生产碳排放按生产工艺流程可分为铝土矿、氧化铝、阳极、电解铝和铸造5个工序的碳排放;按排放类型又分为电力排放(间接)、PFC排放(直接)、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。

1.1 碳排放总量

全球原铝生产量和碳排放量变化如图1所示。根据IAI公布的数据^[1-2],2019年、2020年和2021年全球原铝生产量分别达到6365.7万t、6532.5万t、6724.3万t;2019年全球原铝生产碳排放量(全口径)达到10.13亿t,后续年度的碳排放量数据IAI尚未公布。2005年至2019年的15年间(本文中引用及分析的数据除特殊说明外均指这15年),全球原铝生产碳排放量从5.40亿t逐步提升至7.23亿t(2010年)、9.34亿t(2015年),直至10.13亿t,累计增长了87.7%,复合年均增长4.3%。同期全球原铝生产量分别为3190.5万t(2005年)、4235.3

[收稿日期] 2022-03-14

[作者简介] 王旋(1986—),男,贵州金沙人,硕士,高级工程师,主要从事铝电解工程设计与研发工作。

[引用格式] 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.

万 t(2010 年)、5 845.6 万 t(2015 年)及 6 365.7 万 t(2019 年),累计增长 99.5%,复合年均增长 4.7%。可见,全球原铝生产碳排放量增幅略小于原铝生产量增幅,这也意味着全球原铝生产吨铝平均碳排放量即碳排放强度总体呈下降趋势。

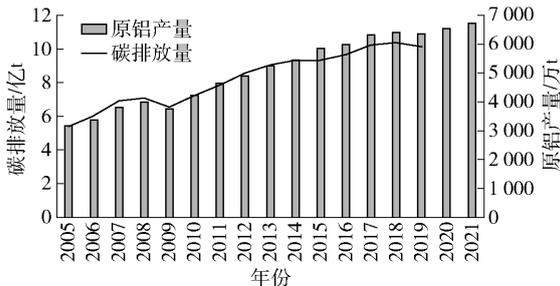


图 1 全球原铝生产量和碳排放量变化趋势

1.2 碳排放强度

15 年间,全球累计原铝产量约 7.36 亿 t,累计碳排放量约 123.5 亿 t,累计碳排放强度约为 16.8 tCO₂e/t-Al。全球原铝生产各工序碳排放强度 15 年加权平均值如图 2 所示。从图 2 可知,电解铝工序以 75.8% 的占比高居首位,其次是氧化铝工序(20.1%),而阳极、铝土矿和铸造工序占比较低。

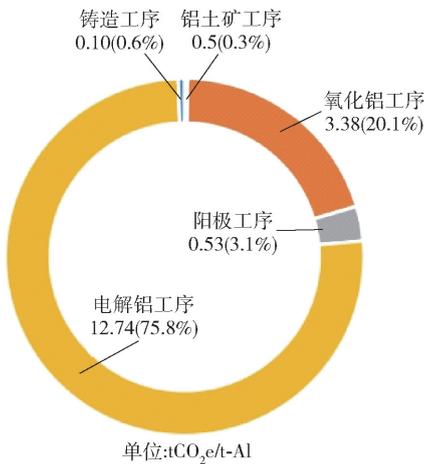


图 2 全球铝生产各工序碳排放强度分布

全球原铝生产电解铝工序各类碳排放强度 15 年加权平均值如图 3 所示。由图 3 可知,电力排放以 78.8% 的占比居绝对主导地位,其次是 CO₂直接排放(12.3%),排第三位的是 PFC 排放,运输排放和辅助材料排放则占比较小。可见,在整个原铝生产碳排放中,电解铝工序的电力排放占比高达 59.7%,因此降低电解铝工序电力碳排放是铝行业降碳最重要的任务之一。

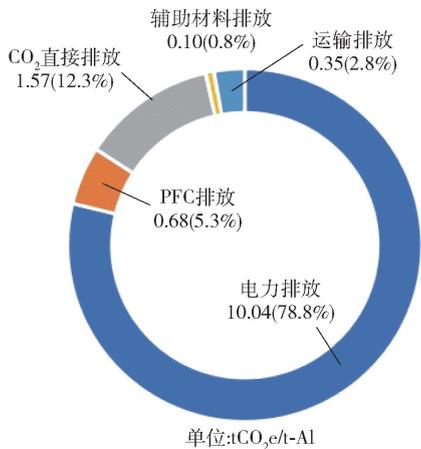


图 3 电解铝工序各类碳排放强度分布

2 碳排放强度演化趋势

全球原铝生产及氧化铝、电解铝工序的碳排放强度变化如图 4 所示。

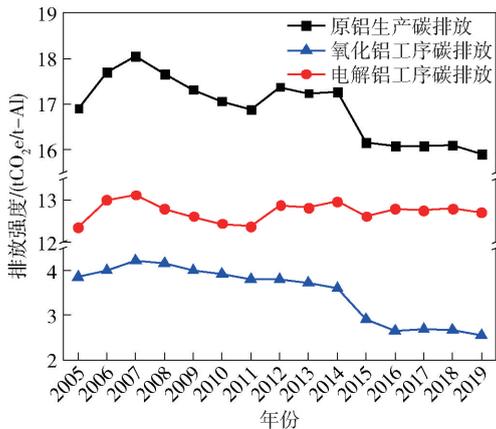


图 4 全球原铝生产及氧化铝、电解铝工序碳排放强度变化趋势

由图 4 可知,2019 年全球原铝生产碳排放强度为 15.91 tCO₂e/t-Al,比 2005 年的 16.91 tCO₂e/t-Al 降低了 5.9%,比期间最高值 18.04 tCO₂e/t-Al(2007 年)降低了 11.8%。15 年间全球原铝生产碳排放强度的小幅下降主要得益于氧化铝工序碳排放强度的下降。随着氧化铝工艺技术的进步、优质铝土矿的普遍使用、控制技术和生产管理的进步,氧化铝工序碳排放强度由 3.86 tCO₂e/t-Al 降低至 2.55 tCO₂e/t-Al,降幅达 33.9%;其在原铝生产碳排放强度中的占比也从 22.8% 降低至 16.0%。电解铝工序碳排放强度则始终在 12.7 tCO₂e/t-Al 左右徘徊,呈现出前 10 年震荡波动、后 5 年渐趋稳定的态势。由于电解铝工序碳排放强度没有整体性降幅,其在

原铝生产碳排放强度中的占比从 73.1% 升高至 79.9%。

数据显示,铝土矿和铸造工序的碳排放强度在 15 年间均未发生变化,分别为 $0.05 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$ 和 $0.10 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$;阳极工序碳排放强度也仅从 2014 年及之前的 $0.55 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$ 降低至 2015 年及之后的 $0.50 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$ 。可见,铝土矿、阳极和铸造三个工序在整个原铝生产碳排放强度中所占的比例较小(合计仅 4.0%),且由于工艺的成熟,碳排放处于稳定。

以 2005 年数据为基准(100%)的电解铝工序非电力碳排放强度相对变化趋势及其与氧化铝工序碳排放强度相对变化比较如图 5 所示。电解铝工序非电力碳排放强度与电力碳排放强度的变化趋势如图 6 所示。

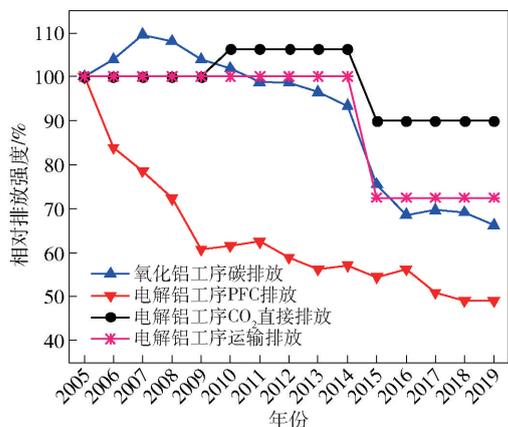


图5 电解铝工序非电力碳排放强度相对变化图

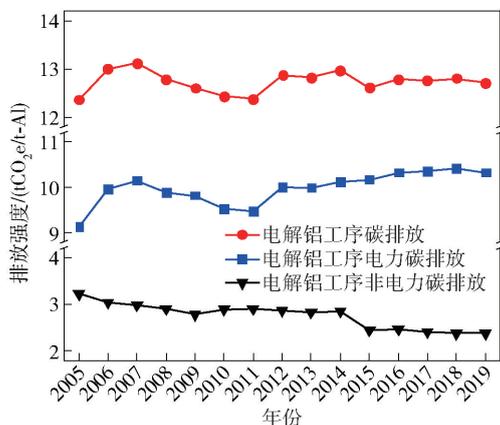


图6 电解铝工序非电力碳排放强度与电力碳排放强度变化对比图

电解铝工序碳排放涉及电力碳排放、PFC 排放、 CO_2 直接排放、辅助材料排放和运输排放 5 类。由图 6 可知,15 年间非电力碳排放强度累计降低 0.84

$\text{tCO}_2\text{e/t-Al}$,降幅达 26.1%,其中 PFC 排放、运输排放和 CO_2 直接排放分别降低 50.9%、27.5% 和 10.0% (图 5),降幅与氧化铝工序碳排放强度降幅基本相当。这些降幅主要得益于电解槽设计及生产工艺技术的进步,也包括控制系统水平的提高和生产管理系统的改进。

15 年间电解铝工序电力碳排放强度累计增加 $1.19 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$ (增幅 13.0%),这不仅将非电力碳排放强度降低的贡献完全抵消,还导致整个电解铝工序碳排放强度小幅升高了 $0.35 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$ (增幅 2.8%)。

总体上看(图 4、图 6),由于电解铝工序电力碳排放强度呈上升趋势,而电解铝工序碳排放强度呈稳定趋势,原铝生产碳排放强度呈下降趋势,因此电解铝工序电力碳排放强度占电解铝工序碳排放强度以及占整个原铝生产碳排放强度的比例均呈现明显的上升趋势。2019 年电解铝工序电力碳排放强度 ($10.33 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$) 占电解铝工序碳排放强度 ($12.71 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$) 的 81.3%,占整个原铝生产碳排放强度 ($15.91 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$) 的 64.9%。按 15 年加权平均值计算,电解铝工序电力碳排放强度 ($10.04 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$) 占电解铝工序碳排放强度 ($12.74 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$) 的 78.8%,占整个原铝生产碳排放强度 ($16.8 \text{ tCO}_2\text{e/t-Al}$) 的 59.7%。可见,控制电力碳排放是降低电解铝工序乃至整个原铝生产碳排放的重中之重。

3 电解铝工序电力碳排放强度影响因素

电解铝工序电力碳排放强度主要由电解铝交流电耗和电力排放因子决定。电力是二次能源,电力排放因子由一次能源向二次能源转化过程中的很多因素共同决定,其中最为根本的是一次能源结构。

3.1 电解铝交流电耗

全球以及中国和非中国区域的电解铝交流电耗变化趋势如图 7 所示。

由图 7 可知,2005 年至 2019 年的 15 年间,全球电解铝交流电耗从 $15\,080 \text{ kW}\cdot\text{h/t-Al}$ 逐步降低至 $14\,255 \text{ kW}\cdot\text{h/t-Al}$,累计降低 5.5%。同期中国电解铝交流电耗从 $14\,574 \text{ kW}\cdot\text{h/t-Al}$ 逐步降低至 $13\,531 \text{ kW}\cdot\text{h/t-Al}$,累计降低 7.2%。非中国区域电解铝交流电耗则呈现稳定态势,15 年加权平均值为 $15\,220 \text{ kW}\cdot\text{h/t-Al}$,最高 $15\,407 \text{ kW}\cdot\text{h/t-Al}$ (2013 年),最低 $14\,921 \text{ kW}\cdot\text{h/t-Al}$ (2017 年),总体变化幅度较小。

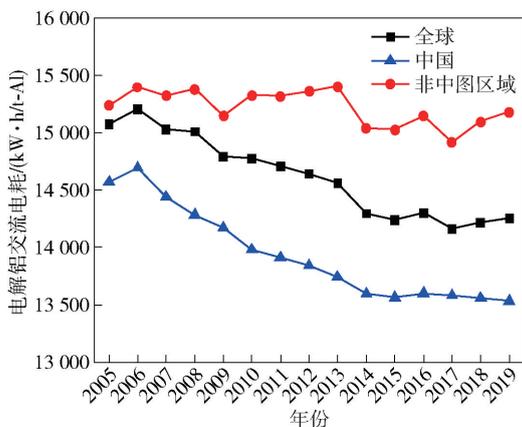


图7 全球电解铝交流电耗变化趋势

可见,在非中国区域电解铝交流电耗基本持平的情况下,中国电解铝交流电耗的持续下降成为全球电解铝交流电耗降低的关键因素,从而有利于降低电解铝工序电力碳排放强度。

3.2 电力能源结构

15年间全球电解铝电力能源结构中,煤炭(火电)占56%,水电占33%,天然气(气电)占8%,核电占2%,其他可再生能源占1%。其中,火电产生的碳排放最多,水电、核电等可再生能源(绿电)产生的碳排放较少,气电居于二者之间(一般约为火电的40%)。为便于说明,将气电按40%和60%的比例折入火电与绿电,得到全球以及中国和非中国区域电解铝绿电使用比例变化趋势,如图8所示。

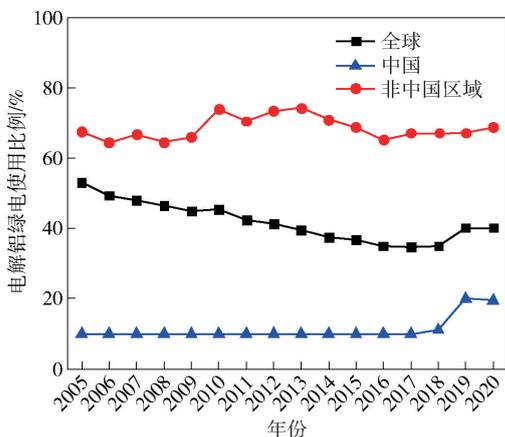


图8 全球电解铝绿电使用比例变化趋势

由图8可知,2017年之前全球电解铝绿电使用比例呈下降趋势,由2005年的53.2%下降至2017年的34.8%,降低18.4个百分点;2018年后略有回升,2019年和2020年均约为40%左右,恢复到2012年至2013年间水平。因此,在全球电解铝交流电耗

呈下降趋势的情况下,电解铝工序电力碳排放强度主要受电力能源结构的变化趋势影响,电力碳排放强度的上升主要受绿电使用比例下降驱动。

4 中国对铝行业碳排放的影响和贡献

通过上述对铝行业碳排放现状和趋势的分析可知,原铝生产量、电解铝交流电耗和电力能源结构是影响碳排放的最主要的3个因素。

4.1 原铝产量和增长趋势

中国、非中国区域及全球原铝产量变化如图9所示。中国是全球电解铝产量第一大国,2005年至2019年的15年间,中国原铝产量增长459%,累计原铝产量占全球的46.9%,全球原铝产量累计增量中的88.1%来自中国。2005年中国原铝产量占全球的24.5%,并保持逐年攀升态势,2007年占比超过30%,2013年突破50%;2019年中国原铝产量达到3579.5万t,占全球比例达到56.2%。可见,随着中国经济的快速发展,中国成为全球原铝工业发展的主要推动力量,在未来全球原铝工业碳减排、碳中和进程中将发挥核心作用。



图9 中国及全球原铝产量变化

4.2 大幅降低电解铝交流电耗

全球及各区域电解铝交流电耗的15年加权平均值如图10所示。由图10可知,全球各区域电解铝交流电耗从低到高依次为:中国、全球平均值、非洲、大洋洲、亚洲(不含中国)、北美洲、南美洲、欧洲。15年间中国电解铝交流电耗加权平均值比全球加权平均值低766 kW·h/t-Al(低5.3%),比非中国区域加权平均值低1442 kW·h/t-Al(低9.5%)。

由于中国电解铝行业不断应用新技术,中国电解铝交流电耗长期处于世界领先水平,因此中国是全球电解铝交流电耗持续下降的主要推动者和贡献者。

2021年8月26日,国家发展和改革委员会印发了《关于完善电解铝行业阶梯电价政策的通知》

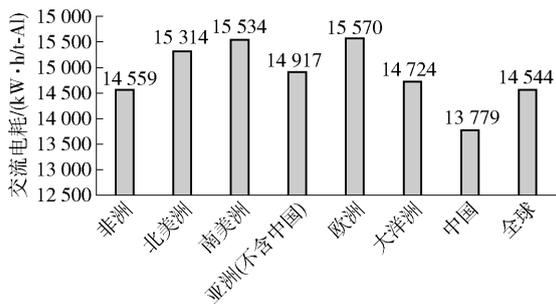


图10 全球及各区域电解铝交流电耗15年加权平均值

(发改价格[2021]1239号)^[3],明确提出自2025年起,电解铝企业电价不加价标准为铝液综合交流电耗13 300 kW·h/t-Al。此外还有一系列的政策文件^[4-6]明确提出了电解铝铝液交流电耗基准水平为13 350 kW·h/t-Al、标杆水平为13 000 kW·h/t-Al,且到2025年能效达到标杆水平的产能比例超过30%,能效基准水平以下产能基本清零,这意味着到2025年中国电解铝交流电耗或达到13 200 kW·h/t-Al以下。

在企业层面,国家电投旗下内蒙古霍煤鸿骏铝电有限公司与沈阳铝镁设计研究院有限公司合作,积极开展石墨化阴极电解槽和数字化电解槽等节能新技术应用,其中一项超低能耗试验项目的目标是将电解槽直流电耗降低至12 000 kW·h/t-Al以下。若试验成功,该技术将是电解铝行业节能降碳的重大突破。中国铝业集团(旗下的至少10个系列)、山东魏桥创业集团、广西银海铝业、宁夏青铜峡铝业(含宁东分公司)以及内蒙古蒙泰铝业等电解铝生产企业都在积极开展石墨化阴极电解槽、新式节能阴极结构技术和磁流体稳定性提升等新技术的应用。

4.3 开启电力能源结构调整

全球及各区域电解铝电力能源结构中绿电使用比例的15年加权平均值如图11所示。由图11可知,全球各区域电解铝绿电使用比例从高到低依次为:南美洲、欧洲、北美洲、非洲、亚洲(不含中国)、全球平均值、大洋洲、中国。

随着近年来中国清洁能源行业的快速发展,中国清洁能源发电量占比逐渐提高。据国家统计局相关数据,2020年中国清洁能源占总体发电量的比例达到24.3%,将电解铝绿电使用比例大幅度提升至20%以上(图8)。部分中国电解铝企业由于历史原因仍采用煤电为主的自备电厂,今后降低碳排放工作将会成为进一步优化的重点。随着中国政府和企业对应对气候变化和“碳达峰、碳中和”工作的越来

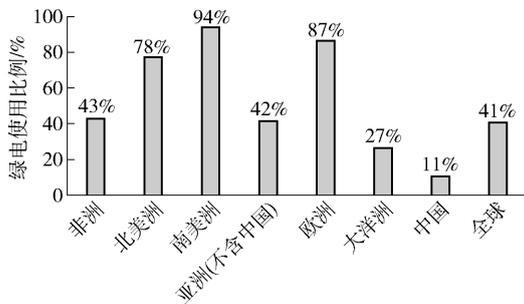


图11 全球及各区域电解铝绿电使用比例15年加权平均值

越重视,中国电解铝绿电使用比例较低的现状有望得到较大改善。2022年6月13日,生态环境部等国家七部委联合印发《减污降碳协同增效实施方案》^[7],明确要求到2030年电解铝使用的可再生能源比例提高至30%以上。同时,国内有关铝行业实现绿色低碳发展以及“碳达峰”“碳中和”的研究^[8-9]也在逐渐增加。

在企业层面,中国铝业集团《2020降碳报告》^[10]显示,截至2020年,中国铝业集团采用绿色能源的电解铝占比已达49.98%。国家电投清洁能源装机比例已提升至60%以上,并计划到2035年提升至75%,未来大幅提升绿色能源电解铝占比仍是大势所趋。山东魏桥创业集团则提出并积极落实电解铝产能大规模向水电资源丰富的云南地区转移的计划。

5 结论

综上所述,2005年至2019年的15年间,全球累计原铝生产量约7.36亿t(增长99.5%),累计碳排放量约123.5亿t(增长87.7%),累计碳排放强度约为16.8 tCO₂e/t-Al。电解铝工序碳排放强度占全球原铝生产碳排放强度的75.8%;其中电解铝工序电力排放强度占比78.8%,占整个原铝生产碳排放强度的59.7%,起主导作用。全球原铝生产碳排放强度小幅下降主要得益于氧化铝工序碳排放强度下降;电解铝工序中非电力碳排放强度大幅降低了26.1%,但电力碳排放强度却上升了13.0%。

中国是全球电解铝交流电耗持续下降的主要推动者和贡献者,电耗长期处于世界领先水平。15年间全球电解铝交流电耗累计降低5.5%,中国电解铝交流电耗累计降低7.2%,非中国区域则基本持平。同时中国政府和企业仍在大力推动节能降耗。

15年间电解铝工序电力碳排放强度上升主要

受电力能源结构影响。非中国区域电解铝绿电使用比例基本稳定,全球电解铝绿电使用比例变化主要受中国影响和驱动。随着中国政府和企业的逐渐重视,电解铝绿电使用比例有望得到大幅提高,为实现“碳中和”目标和应对气候变化作出更大贡献。

[参考文献]

- [1] International Aluminium Institute. Statistics [DB/OL]. <https://international-aluminium.org/statistics/>.
- [2] International Aluminium Institute. GHG Emissions Data for the Aluminium Sector (2005—2019) [DB/OL]. <https://international-aluminium.org/resource/ghg-emissions-data-for-the-aluminium-sector-2005-2019/>.
- [3] 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]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202108/t20210827_1294888.html?code=&state=123.
- [4] 国家发展和改革委员会. 国家发展改革委等部门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]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202110/t20211021_1300583.html?code=&state=123.
- [5] 国家发展和改革委员会. 国家发展改革委等部门关于发布《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平(2021年版)》的通知[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211115_1304012.html?code=&state=123.
- [6] 国家发展和改革委员会. 关于发布《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》的通知[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220211_1315446.html?code=&state=123.
- [7] 生态环境部. 关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html.
- [8] 张伟伟. 有色金属工业碳排放现状与实现碳中和的途径[J]. 有色冶金节能, 2021(2): 1-3.
- [9] 杜心, 谢文俊, 王世兴. 我国铝行业碳达峰碳中和路径研究[J]. 有色冶金节能, 2021(4): 1-4.
- [10] 中国铝业集团有限公司. 2020 降碳报告[EB/OL]. https://www.chinalco.com.cn/shzr/shzr_zrbg/202106/P020210608308712412113.pdf.

Current Situation and Trend Analysis of Carbon Emission in the Electrolytic Aluminum Industry

WANG Xuan, XU Li-song

Abstract: By analyzing the carbon emission and intensity of global primary aluminum production, as well as the change trend of carbon emission intensity of each process, the article reveals that primary aluminum production, AC power consumption by aluminum electrolysis and power structure are the three most important factors affecting carbon emission. Of the three factors, the structure of the energy used for producing electrolytic aluminum is the most important factor affecting carbon emission intensity, and the resultant increase in carbon emission intensity completely offsets the contribution of non-power carbon emission sources. Therefore, controlling the carbon emission of electric power is the most important measure to reduce the carbon emission of electrolytic aluminum. In the future, China will further reduce the AC power consumption by electrolytic aluminum, adjust the energy structure, and significantly increase the proportion of green electricity, so as to make greater contributions to achieving the goal of carbon neutrality and coping with climate change.

Key words: electrolytic aluminum; carbon emissions; greenhouse gases; AC power consumption; energy structure; carbon emission intensity