



基于目标情景的中国铝生产碳减排与碳达峰分析

李明阳, 高峰, 孙博学, 聂祥仁

(北京工业大学 材料与制造学部, 工业大数据应用技术国家工程实验室, 北京 100124)

摘要: 本研究在国家碳达峰目标的指引下, 梳理并核算了原铝生产温室气体排放的历史数据, 并以此为基础, 通过对未来 15 年中国电解铝生产技术改进潜力、电力结构调整及再生铝产量等因素的预测, 建立原铝温室气体排放的多因素分析模型, 探究在基准情景(BAU)、低改进效率情景(LIR)和高改进效率(HIR)三种情景下我国原铝生产温室气体减排和碳达峰路径。结果表明: 我国历年吨铝温室气体排放潜力呈现下降趋势。预测了电解铝先进技术应用、电力消费结构变化及提高再生铝占比对降低吨铝温室气体排放的影响。我国铝生产温室气体排放在 BAU 情景下将在 2030 年达到峰值, 在 LIR 情景下将在 2027 年达到峰值, 在 HIR 情景下将在 2021 年达到峰值。给出了三种情景下铝产量的增长率, 作为确保碳达峰后的限定条件。

关键词: 碳排放; 碳达峰; 原铝; 再生铝

文章编号: 1004-0609(2022)-01-0148-11

中图分类号: TF821; X820.3; X38

文献标志码: A

引文格式: 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36672

LI Ming-yang, GAO Feng, SUN Bo-xue, 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36672

1 研究背景

2020 年 9 月, 国家主席习近平在七十五届联合国大会一般性辩论上提出我国要力争 2030 年实现碳达峰, 努力争取 2060 年前实现碳中和。为实现 2030 年碳达峰目标, 基础原材料行业需做好提前 3~5 年碳达峰的准备, 为下游产业预留时间。铝是应用广泛的金属材料之一, 与国民经济关联度高。目前, 我国是世界最大的原铝生产国, 2020 年中国原铝产量达到 3708 万 t, 约占世界总产量的 57%。中国原铝生产技术总体上已达到世界领先水平, 而且电力消耗在有色金属工业中约占 83%。因此, 无论从产量还是从能耗的角度, 铝生产温室气体减排

对于整个有色金属行业碳达峰具有至关重要的作用和意义。

在铝温室气体排放(即碳排放)研究方面, 国际铝业协会、欧洲铝业协会和北美铝业协会等机构一直跟踪和发布区域性的温室气体排放情况报告^[1-5]。国际铝业协会发布的《2050 年铝业温室气体减排路径》^[6]指出了铝行业减排的三个方向, 包括电力脱碳、减少直接排放及循环利用和资源效率。国内外的研究学者结合不同地区原铝生产的技术水平也开展了温室气体排放的计算与分析。澳大利亚新南威尔士州悉尼麦考瑞大学 FARJANA 等^[7], 采用生命周期评价方法分析了原铝生产的环境负荷, 发现电耗、氧化铝生产过程中的燃料油、柴油和天然气的消耗是造成环境影响的主要因素。北京

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51621003)

收稿日期: 2021-02-25; 修订日期: 2021-05-31

通信作者: 高峰, 教授, 博士; 电话: 010-67391058; E-mail: gaofeng@bjut.edu.cn

工业大学丁宁等^[8]研究了原铝和再生铝生产过程的能耗和温室气体排放, 并与国内历史数据、欧洲和世界水平数据进行了比较。郑州大学王姗姗等^[9]对河南省原铝生产进行生命周期评价研究的结果表明, 铝电解和氧化铝生产过程对环境影响最大, 温室效应对环境影响贡献比例最大。中南大学杨毅等^[10]针对原铝生产过程采用不同能源结构(火力发电和水力发电)进行生命周期分析, 结果表明原铝生产环境负荷主要来自于氧化铝冶炼和电解铝过程, 火电模式的环境负荷明显高于水电模式。在其他行业温室气体排放研究方面, 电力行业作为最为基础的能源行业, 其碳达峰及碳中和的实现对于基础材料行业、下游行业实现碳达峰及碳中和具有重大意义, 其研究方法对本文研究具有很高的参考价值。目前, 电力行业温室气体排放核算方面相关研究主要采用 IPCC 推荐的方法^[11-12], 而电力行业的碳达峰主要关注的是可再生能源的比例。

综上所述, 原铝生产的温室气体排放结构已基本清晰, 而且温室气体排放与生产过程耗电呈线性相关性。尽管国际上已经对铝生产温室气体减排有了明确的方向, 但是各国的技术水平、能源利用结构不同, 所以不同国家铝行业碳达峰的技术路径不尽相同。而且如何基于目标情景, 分析我国铝生产系统未来 15 年温室气体减排情况, 并对碳达峰作出科学预判仍未见到相关研究报道。因此, 本研究在国家宏观碳达峰目标情景的指引下, 通过对原铝生产温室气体排放的历史数据进行梳理和核算, 并依据未来 15 年中国铝生产技术变革、电力结构调整、原铝和再生铝产量等因素, 预测分析我国铝工业温室气体减排情况, 为铝行业实现碳达峰目标提供方法学和基础数据的参考。

2 方法与数据

2.1 系统边界的确定

为了保证与之前研究的历史数据和计算方法的统一, 本研究将原铝生产工艺流程划分为铝土矿开采、氧化铝制备、炭阳极生产、电解铝生产及铝锭铸锭五个单元过程, 确定功能单位为 1 t 铝锭的生产。固定资产投资, 如厂房建设、设备生产等不

在系统范围内考虑, 并且忽略由于原辅料运输所产生的温室气体排放^[8]。原铝生产划分系统边界如图 1 所示。

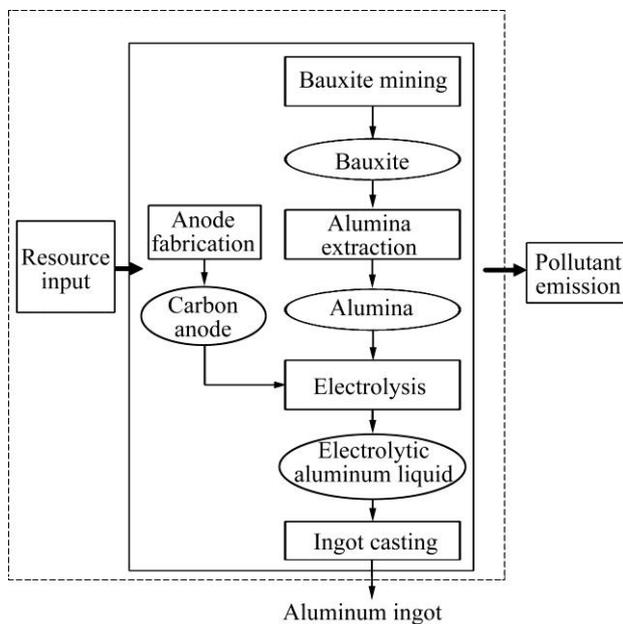


图 1 原铝生产系统边界图

Fig. 1 Boundary system of primary aluminum production

2.2 温室气体排放计算方法

2.2.1 吨铝温室气体排放的因素分析模型

考虑技术改进、电力结构及再生铝比例三种因素对吨铝温室气体变化的影响。各因素计算模型如下。

1) 技术改进模型

$$G = P_{AT} \times G_{AT} + G_0(1 - P_{AT}) \quad (1)$$

式中: G 表示在技术改进因素影响下原铝温室气体排放量; P_{AT} 表示先进技术比例; G_{AT} 表示先进技术吨铝温室气体排放量; G_0 表示未做改进吨原铝温室气体排放量。

2) 电力结构模型

$$G_E = P_T E_T + P_H E_H + P_W E_W + P_N E_N + P_S E_S \quad (2)$$

式中: G_E 表示 1 kW·h 耗电的温室气体排放潜力; P_T 、 P_H 、 P_W 、 P_N 、 P_S 分别表示火力、水力、风力、核能、太阳能发电比例; E_T 、 E_H 、 E_W 、 E_N 、 E_S 分别表示火力、水力、风力、核能、太阳能发电温室气体排放因子。

3) 再生铝比例模型

$$G = P_{RA} E_{RA} + G_0(1 - P_{RA}) \quad (3)$$

式中： G 表示在不同再生铝比例因素下吨铝温室气体排放量； P_{RA} 表示再生铝比例； E_{RA} 表示吨再生铝温室气体排放量； G_0 表示吨原铝温室气体排放量。

4) 混合因素模型

$$\begin{cases} G = P_{RA} G_{RA} + (1 - P_{RA}) \cdot \\ \quad [P_{AT}(G_E W_{AT} + G_{AP}) + (1 - P_{AT})(G_E W_0 + G_{AP})] \\ G_E = P_T E_T + P_H E_H + P_W E_W + P_N E_N + P_S E_S \end{cases} \quad (4)$$

式中： W_{AT} 先进技术改进下的原铝耗电量； W_0 未做技术改进下的原铝耗电量； G_{AP} 除电力外温室气体排放量。

2.2.2 原铝生产温室气体排放的计算

电解铝温室气体排放计算主要参照《中国电解铝生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》(以下简称指南)^[13]。氧化铝生产温室气体排放计算参照IPCC固定源排放计算方法^[14]，化石燃料低位发热量、单位热值含碳量、燃料碳氧化率与电解铝核算方法相同。电力生产的温室气体排放因子依据《2019年中国区域电网基准线排放因子》^[15]取全国的平均值。

2.2.3 再生铝生产温室气体排放的计算

再生铝生产的温室气体主要来源于运输过程，熔铸过程燃料的使用及使用的电力的间接排放^[8]。燃料燃烧排放计算参照IPCC固定源排放计算方法，电力计算方法与原铝生产过程电力计算方法相同。

2.2.4 产量预测方法

研究采用趋势移动平均法建立数学模型来预测我国铝产量，从而分析实现碳达峰目标下的产量和温室气体排放之间的关联性。趋势移动平均法公式如下：

$$M_t^{(1)} = \frac{1}{N} (y_t + y_{t-1} + \dots + y_{t-N+1}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_t^{(2)} &= \frac{1}{N} (M_t^{(1)} + \dots + M_{t-N+1}^{(1)}) = \\ &M_{t-1}^{(2)} + \frac{1}{N} (M_t^{(1)} - M_{t-N}^{(1)}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $M_t^{(1)}$ 为一次移动的平均数； $M_t^{(2)}$ 为二次移动的平均数； N 为移动平均的项数。

$$\begin{cases} a_t = 2M_t^{(1)} - M_t^{(2)} \\ b_t = \frac{2}{N-1} (M_t^{(1)} - M_t^{(2)}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{y}_{t+T} = a_t + b_t T, T = 1, 2, \dots \quad (8)$$

式中： \hat{y}_{t+T} 为预测结果； t 为当前时期数； T 为由 t 至预测期的时期数； a_t 为截距； b_t 为斜率。

2.3 数据来源

原生铝和再生铝产量数据主要来源于中国有色金属工业年鉴及国家统计局相关数据^[16-17]。原铝及再生铝生产技术参数主要来源于中国有色金属工业年鉴及相关文献^[8, 17-19]。能耗数据主要来源于中国有色金属工业年鉴^[17]、典型企业调研报告。铝土矿开采过程数据来源于北京工业大学工业大数据应用技术国家工程实验室基础数据库。

3 结果与讨论

3.1 历史数据与国外数据对比

图2所示为我国原铝生产温室气体排放分析与对比图。图2(a)所示为我国(CN)与欧洲(EU)、北美(NAM)及世界平均水平(GLO)单位原铝生产历史数据的对比^[2, 4, 20]。由于我国2020年铝行业相关生产数据暂未发布，且2018年与2020年原铝生产技术水平基本一致，能源结构相近，因此2020年我国单位原铝生产温室气体排放结果参照2018年相关结果。从2000年开始，我国单位原铝生产温室气体排放明显下降，2015年较2000年下降了40.3%。2015年至2020年单位原铝生产的温室气体排放趋于平稳。从趋势上来看，2010年至2015年期间明显下降的主要原因是，我国氧化铝生产技术取得了一定的进步，核心技术装备水平位居世界前列，适用于拜耳法生产的进口铝土矿比例增大，生产技术由烧结法逐渐转为拜耳法及混联法^[21]，能耗及污染物排放显著降低。在电力消费结构方面，2010年我国火力发电占比达73.4%，2018年降低为70.4%，火力发电占比下降3.0%^[22-23]，一定程度上降低了耗电引起的间接温室气体排放。

我国与世界主要国家及地区吨铝温室气体排放的对比结果表明，与世界平均水平相比，2000年，

2005 年及 2010 年我国均高于世界平均水平。2010 年到 2015 年之间我国吨原铝温室气体排放开始逐渐低于世界水平。然而, 与欧洲及北美地区相比, 我国吨原铝生产温室气体排放仍然较高, 主要原因在于电力消费结构方面, 我国火力发电占比始终高于欧洲及北美地区。2018 年北美地区火力发电占比 59.4%, 欧洲地区火力发电占比 40.5%^[24]。

图 2(b)所示为我国、欧洲、北美与世界平均 2000 年至 2018 年原铝产量图^[6]。由图 2(b)可见, 欧洲和北美地区原铝产量处于下降趋势, 但趋势基本平稳。我国和世界原铝产量处于上升趋势。与欧洲和北美对比来看, 我国 2000 年原铝产量是欧洲原铝产量的 25%, 北美原铝产量的 20%。但 2018 年我国原铝产量却达到了欧洲的 473.3%, 北美的 975.9%。从与世界范围对比来看, 我国从 2000 年原铝产量世界占比 12.1%发展到 2020 年原铝产量世界占比约 57.4%。可见我国原铝行业发展非常迅速, 原铝生产规模快速扩大。

图 2(c)所示为我国与世界主要国家及地区原铝生产温室气体总量的对比。由于产量的增长, 我国原铝温室气体排放总量一直处于上升态势, 在世界原铝生产温室气体总排放量的比例, 从 2005 年的 30.9%增至 2020 年的约 50.0%。

3.2 铝电解先进技术应用对温室气体排放的影响

诸多先进技术的应用可以降低原铝生产的能耗及碳排放。在电解铝生产过程推广应用 600 kA 及以上的大电流电解槽, 将吨电解铝电耗降至 12000 kW·h^[25]具有重要的作用。铝电解阳极效应控制技术、全密闭高效能清洁铝电解新技术和炭阳极余热发电技术^[26-27]的应用, 也将对温室气体减排起到积极的作用。铝大电流电解技术是面向下一代大电流铝电解槽(600 kA 以上)的设计、优化、操作与生产控制, 能实现吨铝能耗和吨铝投资最低、劳动生产率最高、自动化程度最高的目标。阳极效应控制技术可实现各级别电解槽以超阳极效应系数乃至零阳极效应运行, 减少全氟化碳气体排放, 降低铝电解过程能耗, 能够减少乃至实现阳极效应的全氟化碳(PFC)气体零排放。一方面, 全密闭高效能清洁铝电解新技术可实现烟气总量降低 90% 以上,

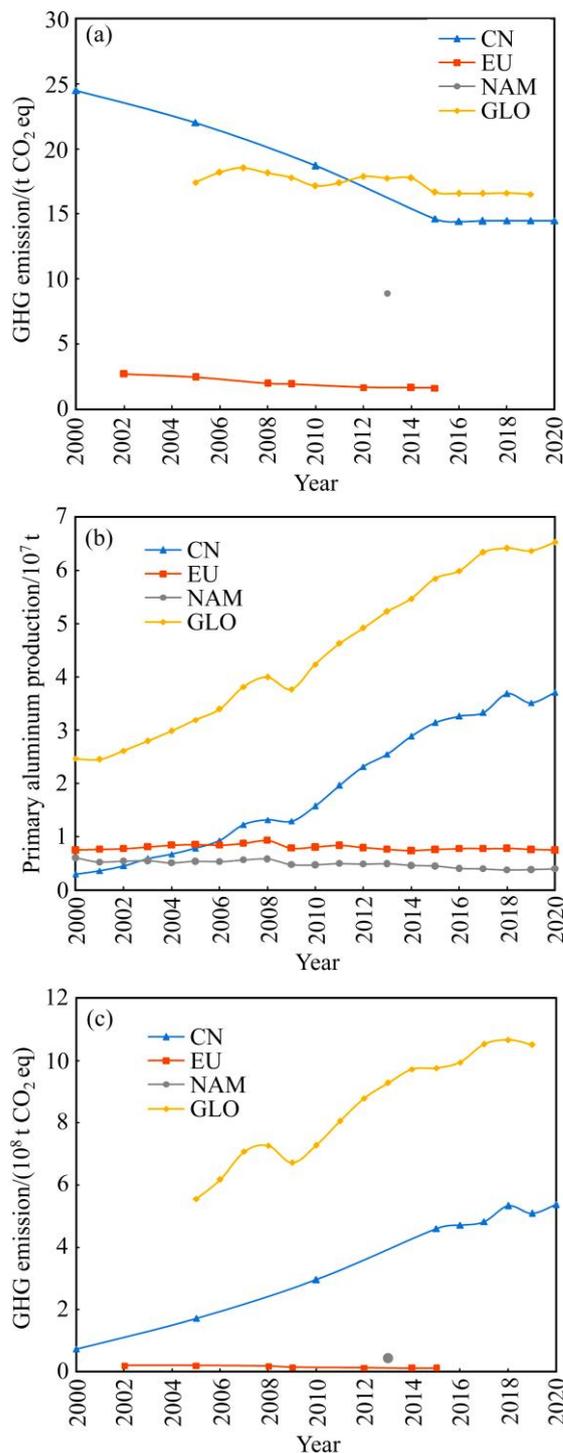


图 2 我国原铝生产温室气体排放分析与对比图

Fig. 2 Analysis and comparison of greenhouse gas emissions from primary aluminum production in China: (a) Domestic and foreign time series comparison of GHG emissions of per unit primary aluminum production; (b) Domestic and foreign time series comparison of primary aluminum production; (c) Domestic and foreign time series comparison of GHG emissions of primary aluminum production

烟气中污染物浓度的提升,能满足烟气污染物的低成本简易化集中处理;另一方面,烟气温度可提升至 600~800 °C,通过烟气余热的深度利用,节约铝电解电能损耗,实现全流程的高能效(能量利用率>70%,吨铝能耗<10000 kW·h)、超低排放(主要污染物排放降低 90%以上)及全自动化。余热发电技术充分利用石油焦煅烧过程产生的余热,为降低阳极生产成本、确保全厂满负荷生产发挥重要作用,在提高经济效益的同时,也减轻了对环境的污染。整个炭素行业采用该技术,将实现年节约标准煤 1.2 万 t。同时,每年可减少碳排放 3 万 t。

图 3 所示为电解铝生产先进技术及其推广应用率变化对温室气体排放变化趋势的分析图。以 2018 年原铝生产相关数据为基准,通过设定 2018 年新技术覆盖率为 10%^[28],按年度提高先进技术及其推广应用率。分析结果表明,电解槽的大型化对温室气体排放的减排效益明显,斜率达到-0.129,即每新增 10%新技术覆盖率能够降低温室气体排放 0.129 t CO₂ eq/t 电解铝。阳极效应控制技术的斜率为-0.082,即每新增 10%新技术覆盖率能够降低温室气体排放 0.082 t CO₂ eq/t 电解铝。若把两种先进技术综合使用,设定同一覆盖率,得到 GWP(Mix)曲线。可以看出,同时应用两种技术能够使温室气体排放潜力显著下降,每增加 10%覆盖率,温室气体排放潜力能够降低 0.210 t CO₂ eq/t 电解铝。

3.3 电力结构变化对温室气体减排的影响

已有研究表明,电力是原铝生产过程的主要能源消耗,也是温室气体排放的主要来源。电力作为二次能源,其带来的温室气体排放主要来源于电力生产过程。电力生产主要分为可再生能源发电和不可再生能源发电。在中国,不可再生能源发电主要为火力发电,可再生能源发电主要包括水电、核电、风电、太阳能发电。在发电结构方面,2020 年中国火力发电占比 68.88%,水电、核电、风电、太阳能发电依次占比 17.77%、4.76%、5.53%、3.06%^[29]。火电和水电是我国主要发电来源。本研究依据国际能源署和中国电力行业相关部门的预测^[30-31],分别设置了 2025 年、2030 年及 2035 年我国电力结构情景,如表 1 所示。

与基准情景相比,三种预测电力结构情景的主要特点是:可再生能源发电比例不断提升,2025 年达 37.82%,2030 年达 42.08%,2035 年接近 50%。以 2020 年为基准,通过计算平均增长率得到 2020~2035 年每年的电力结构情景,从而得出 2020~2035 年不同电力结构情景下温室气体排放因子如表 2 所示。

假设其他条件不变,仅有电力结构随年份发生变化,可计算出吨原铝生产由于电力结构变化导致的温室气体排放潜力,如图 4 所示。2035 年吨原铝温室气体排放与 2020 年相比,将下降 16.76%。

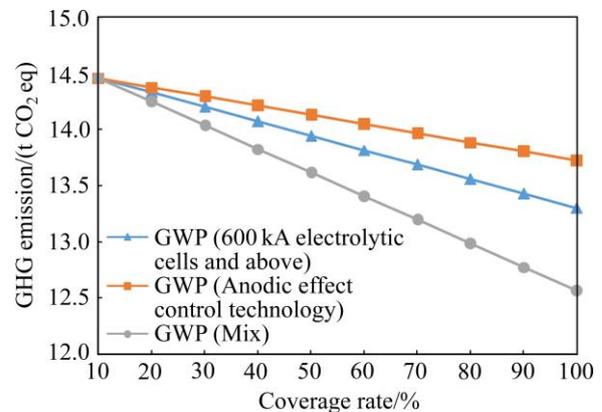


图 3 电解铝生产先进技术及其推广应用率的温室气体排放趋势图

Fig. 3 Greenhouse gas emission curves for different advanced technologies and coverage rates

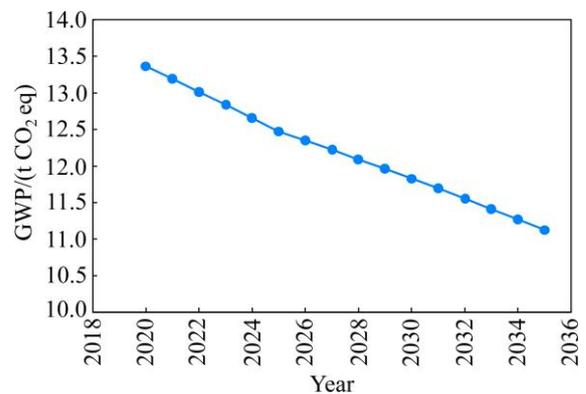


图 4 不同电力结构情景下吨原铝温室气体排放潜力图

Fig. 4 GWP for different years for power mix

3.4 原铝与再生铝产量变化的排放趋势

2018 年中国再生铝产量 695.47 万 t, 占比全部铝产量的 16.03%^[17]。依据 2018 年原铝及再生铝温

表 1 预测的电力结构情景

Table 1 Predicted power structure

Generation mode/Scenario	Baseline year-generation structure in 2020/%	Scenario 1-2025 generation structure/%	Scenario 2-2030 generation structure/%	Scenario 3-2035 generation structure/%
Thermal power	68.88	62.18	57.92	53.30
Hydropower	17.77	17.56	17.46	17.36
Wind power	5.53	6.41	8.19	10.14
Nuclear power	4.76	10.36	11.95	13.67
Solar energy	3.06	3.50	4.47	5.53

表 2 2020~2035 年不同电力结构的温室气体排放因子

Table 2 GHG emission factors for different electricity mixes from 2020 to 2035

Year	GHG emission factor/[kg CO ₂ eq·(kW·h) ⁻¹]					
	Hydropower	Thermal power	Nuclear power	Wind power	Solar power	Total
2020	0.00204	0.74861	0.00070	0.00017	0.00011	0.75163
2021	0.00204	0.73573	0.00087	0.00017	0.00011	0.73891
2022	0.00204	0.72291	0.00104	0.00017	0.00011	0.72627
2023	0.00203	0.71010	0.00120	0.00017	0.00011	0.71362
2024	0.00203	0.69729	0.00137	0.00017	0.00011	0.70098
2025	0.00203	0.68448	0.00154	0.00017	0.00011	0.68834
2026	0.00203	0.67522	0.00159	0.00019	0.00012	0.67914
2027	0.00202	0.66596	0.00163	0.00020	0.00013	0.66994
2028	0.00202	0.65670	0.00168	0.00021	0.00013	0.66075
2029	0.00202	0.64744	0.00173	0.00022	0.00014	0.65155
2030	0.00202	0.63818	0.00178	0.00023	0.00015	0.64235
2031	0.00201	0.62814	0.00183	0.00024	0.00016	0.63238
2032	0.00201	0.61810	0.00188	0.00025	0.00016	0.62241
2033	0.00201	0.60806	0.00193	0.00026	0.00017	0.61244
2034	0.00201	0.59802	0.00198	0.00027	0.00018	0.60246
2035	0.00200	0.58798	0.00203	0.00029	0.00019	0.59249

室气体排放数据及再生铝占比得到 2018 年生产 1 t 铝的温室气体排放潜力(见表 3)。由表 3 可知, 再生铝温室气体排放潜力远低于原铝温室气体排放

表 3 生产 1 t 铝的温室气体排放潜力

Table 3 GWP of producing 1 t of aluminum

Category	GWP/(kg CO ₂ eq)		
	Primary alumina	Recycled aluminum	Aluminum
CO ₂	13647.79	680.17	11569.87
CH ₄	8.49	1.62	7.39
N ₂ O	64.96	3.14	55.05
CF ₄	630.54	0.00	529.51
C ₂ F ₆	128.11	0.00	107.58
Total	14479.89	684.93	12269.40

潜力, 再生铝温室气体排放潜力占比 5.59%。

假设温室气体排放潜力保持不变, 通过再生铝产量占比来分析生产 1 t 金属铝的温室气体排放潜力变化。结果如图 5 所示。随着再生铝在总产量中占比的提高, 吨铝温室气体排放潜力呈现下降趋势。当再生铝占比达 20% 时, 温室气体排放潜力降至 11.7 t CO₂ eq/t 铝, 降幅为 9.96%。当再生铝占比达 30% 时, 温室气体排放潜力降至 10.3 t CO₂ eq/t 铝, 降幅为 15.6%。当再生铝占比达 50% 时, 温室气体排放潜力降低为 7.58 t CO₂ eq/t 铝, 降幅为 38.1%。因此, 提升再生铝产量是实现铝生产温室气体减排的有效措施之一。

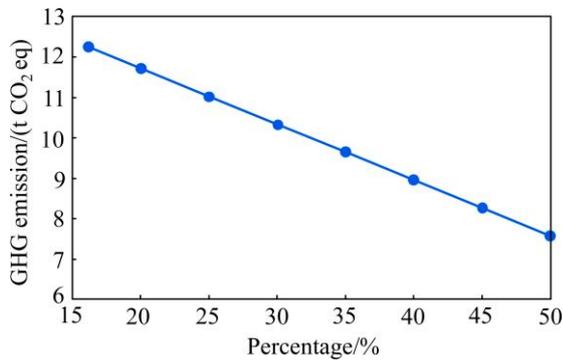


图5 不同再生铝占比对1 t铝生产温室气体排放的影响
Fig. 5 Effects of different percentages of recycled aluminum on GHG emissions of producing 1 t of aluminum

3.5 多因素情景下温室气体排放变化趋势

上文已经分析得出单个影响因素的改变对原铝温室气体排放潜力变化的影响。国际上铝生产温室气体减排主要包括技术改进、电力结构及再生铝利用三个方向,为探究综合影响因素对温室气体排放潜力的影响,结合我国铝生产实际情况及国内外相关研究,研究通过设定三种情景,包括基准情景(BAU)、低改进效率情景(LIR)及高改进效率情景(HIR)分析原铝温室气体排放的变化趋势。相关情景设置如下。

基准情景(BAU):自2020年开始,技术覆盖率逐年增加,于2035年实现覆盖率50%;电力结构调整预测逐年变化,达到2035年预测电力结构;自2020年开始,再生铝比例逐年提高,于2035年再生铝占比达30%。

低改进效率情景(LIR):自2020年开始,技术覆盖率逐年增加,于2030年实现覆盖率50%;电力结构调整预测逐年变化,达到2030年预测电力结构;自2020年开始,再生铝比例逐年提高,于2030年再生铝占比达30%。

高改进效率情景(HIR):自2020年开始,技术覆盖率逐年增加,于2025年实现覆盖率50%;电力结构调整预测逐年变化,达到2025年预测电力结构;自2020年开始,再生铝比例逐年提高,于2025年再生铝占比达30%。

铝产量是碳达峰的重要影响因素。依据我国原铝及再生铝历史产量数据,采用趋势移动平均法,即式(8),获得2020~2035年我国铝产量预估曲线,

如图6所示。预测结果显示,如果按照历史数据发展,铝产量会呈现近似线性增加。结合三种情景及预测产量,得到2020~2035年我国铝业温室气体排放潜力,如图7所示。在BAU情景下,温室气体排放将在2030年达到峰值,为4.51亿t CO₂ eq。在LIR情景下,温室气体排放将在2027年达到峰值,为4.3亿t CO₂ eq。在HIR情景下,温室气体排放将在2021年达到峰值,为4.07亿t CO₂ eq。

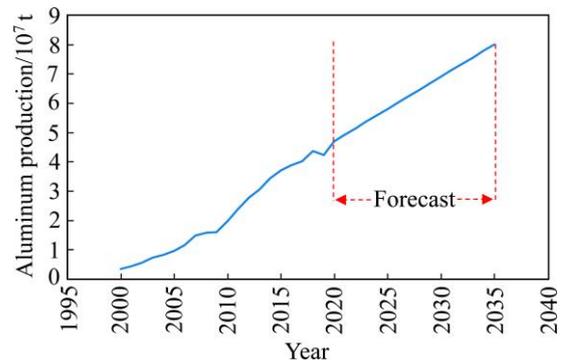


图6 我国铝产量历史及预测图

Fig. 6 China's aluminum production history and forecast chart

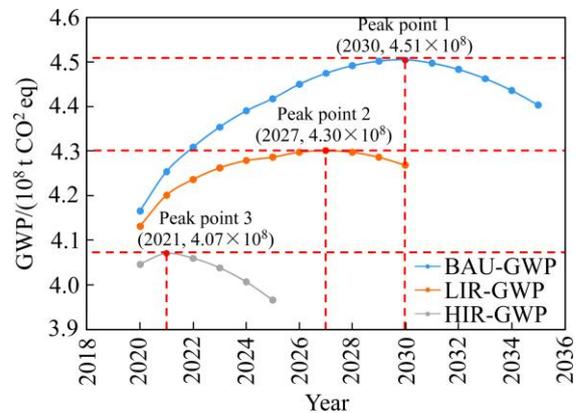


图7 铝行业2020~2035年温室气体排放潜力预测

Fig. 7 Aluminum industry GWP forecast for 2020-2035

尽管在三种情景下,我国原铝生产系统的温室气体排放能够在2030年之前达到峰值,但产量数据是根据历史数据预测得出,而实际产量的变化受到内需、国际经济形势等众多因素的影响,存在较大不确定性。在碳达峰目标的限定下,中国有色金属工业协会党委书记葛红林提出,将电解铝产能严控在4500万t。根据此要求,我国原铝产量及GHG排放将于2024年达峰。此外,为探究三种情景下达峰后铝产量变化,建立碳达峰后模型,其推导过

程如下。

$$P_t G_t \geq P_{t+1} G_{t+1} \quad (9)$$

由式(9)得出:

$$\Delta P \leq \frac{-\Delta G}{1 + \Delta G} \quad (10)$$

式中: P_t 为当年铝产量; G_t 为当年吨铝温室气体排放; P_{t+1} 为后一年铝产量; G_{t+1} 为后一年温室气体排放量; ΔP 为前后两年产量变化率; ΔG 为前后两年吨铝温室气体排放潜力变化率。

依据模型, 求得三种情景下达峰后的产量变化率如表 4 所示。当 ΔP 满足 2022~2035 年表中条件时, 可实现温室气体排放总量的下降。若达到各情景目标年份后, 吨铝温室气体排放不再变化或变化趋势平稳, 铝产量要保持不变或下降, 才能保证温室气体排放总量不变或下降。

表 4 三种情景达峰后的铝产量变化率

Table 4 Change rates of aluminum production after peaking for three scenarios

Year	BAU (2030 up to peak)	LIR (2027 up to peak)	HIR (2021 up to peak)
2022	-	-	$\Delta P \leq 4.7\%$
2023	-	-	$\Delta P \leq 4.8\%$
2024	-	-	$\Delta P \leq 4.9\%$
2025	-	-	$\Delta P \leq 5.0\%$
2028	-	$\Delta P \leq 3.6\%$	-
2029	-	$\Delta P \leq 3.7\%$	-
2030	-	$\Delta P \leq 3.7\%$	-
2031	$\Delta P \leq 3.4\%$	-	-
2032	$\Delta P \leq 3.4\%$	-	-
2033	$\Delta P \leq 3.5\%$	-	-
2034	$\Delta P \leq 3.5\%$	-	-
2035	$\Delta P \leq 3.6\%$	-	-

4 结论

1) 从 2000 年开始, 我国生产 1 t 原铝的温室气体排放潜力呈现下降趋势, 2015 年至 2020 年温室气体排放潜力趋于平稳, 已低于世界平均水平, 但仍高于欧洲及北美地区, 主要原因在于电力消费结

构。由于产量增长迅速, 我国原铝生产温室气体总量在世界原铝温室气体排放总量中占比达到了 50%。

2) 如果 600 kA 及以上大型电解槽和阳极效应控制等先进技术的覆盖率增加 10%, 可减排温室气体 210.43 kg CO₂ eq/t 电解铝。参照电力部门可再生能源占比的预测, 仅电力消费结构的变化, 2035 年我国吨原铝温室气体排放将比 2020 年下降 16.76%。当再生铝产量占比达 30% 时, 温室气体排放潜力将降至 10.3 t CO₂ eq/t 铝, 与 2018 年相比降幅为 15.6%。

3) 基准情景(BAU)、低改进效率情景(LIR)及高改进效率情景(HIR)情景分析的结果表明, 在 BAU 情景下, 温室气体排放将在 2030 年达到峰值, 为 4.51 亿 t CO₂ eq。在 LIR 情景下, 温室气体排放将在 2027 年达到峰值, 为 4.3 亿 t CO₂ eq。在 HIR 情景下, 温室气体排放将在 2021 年达到峰值, 为 4.07 亿 t CO₂ eq。依据产量变化率模型, 得到了铝产量的增长率, 可作为确保碳达峰的限定条件。

REFERENCES

- [1] European Aluminium. Environmental profile report 2018[EB/OL]. 2018. <https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/environmental-profile-report-2018/>.
- [2] The Aluminum Association. The environmental footprint of semi finished aluminum products in North America[EB/OL]. 2013-12. https://www.aluminum.org/sites/default/files/LCA_Report_Aluminum_Association_12_13.pdf.
- [3] The International Aluminium Institute. Report on the aluminium industry's global perfluoro carbon gases emissions[EB/OL]. 2020-08. https://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2020/08/28/2019_anode_effect_survey_result_2020.pdf.
- [4] The International Aluminium Institute. GHG emissions data for the aluminium sector (2005-2019) (2020)[EB/OL]. <https://www.world-aluminium.org/publications/>.
- [5] The International Aluminium Institute. IAI statistical survey forms: Life cycle inventory (2020) [EB/OL]. <https://www.world-aluminium.org/publications/>.
- [6] The International Aluminium Institute. Aluminium sector greenhouse gas pathways to 2050[EB/OL]. 2021-03.

- https://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2021/04/01/iai_ghg_pathways_position_paper.pdf.
- [7] FARJANA S H, HUDA N, MAHMUD M A P. Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 958–970.
- [8] 丁宁, 高峰, 王志宏, 等. 原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(10): 2908–2915.
DING Ning, GAO Feng, WANG Zhi-hong, et al. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(10): 2908–2915.
- [9] 王姗姗, 刘赛男, 王灿, 等. 基于生命周期评价的河南省原铝生产环境影响分析[J]. *轻金属*, 2018(3): 1–7, 16.
WANG Shan-shan, LIU Sai-nan, WANG Can, et al. Analysis on the environmental impact of primary aluminum production in Henan Province based on life cycle assessment[J]. *Light Metals*, 2018(3): 1–7, 16.
- [10] YANG Yi, GUO Yao-qi, ZHU Wen-song, et al. Environmental impact assessment of China's primary aluminum based on life cycle assessment[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(8): 1784–1792.
- [11] 苏燊燊, 赵锦洋, 胡建信. 中国电力行业1990—2050年温室气体排放研究[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(5): 353–362.
SU Shen-shen, ZHAO Jin-yang, HU Jian-xin. Greenhouse gas emissions from power sector in China from 1990 to 2050[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2015, 11(5): 353–362.
- [12] 张莉, 王俏丽, 李伟, 等. 电力行业温室气体排放情景分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(12): 2244–2251.
ZHANG Li, WANG Qiao-li, LI Wei, et al. Scenario analysis on greenhouse gas emission of power sector[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(12): 2244–2251.
- [13] 国家发展改革委办公厅. 中国电解铝生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[EB/OL]. 2013–11–01. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960_ext.html.
- General Office of the National Development and Reform Commission. Greenhouse gas emissions accounting methodology and reporting guidelines for Chinese electrolytic aluminum producers (for trial implementation)[EB/OL]. 2013–11–01. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960_ext.html.
- [14] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories[EB/OL]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. 2020–12–29. http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2019 annual emission reduction project China regional grid baseline emission factors[EB/OL]. 2020–12–29. http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml.
- [16] 国家统计局. 最近20年原铝(电解铝)产量[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0E0H&sj=2019>.
National Bureau of Statistics. Production of Primary Aluminum (Electrolytic Aluminum) in the Last 20 Years[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0E0H&sj=2019>.
- [17] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 2001~2019年中国有色金属工业年鉴[M]. 北京: 中国有色金属工业局, 2019.
China Nonferrous Metals Industry Yearbook Editorial Committee. China nonferrous metals industry yearbook 2001–2019[M]. Beijing: China National Bureau of Nonferrous Metals Industry, 2019.
- [18] GAO Feng, NIE Zuo-ren, WANG Zhi-hong, et al. Greenhouse gas emissions and reduction potential of primary aluminum production in China[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(8): 2161–2166.
- [19] 丁宁. 典型铝合金的生命周期评价[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
DING Ning. Life cycle evaluation of a typical aluminum alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [20] European Aluminium. Greenhouse gas emissions in the aluminium industry[EB/OL]. <https://www.european-aluminium.com>.

- eu/data/environmental-data/greenhouse-gas-emissions-in-the-aluminium-industry/.
- [21] 许文强, 嫣 艳, 潘晓林, 等. 中国氧化铝生产技术大型化发展现状与趋势[J]. 矿产保护与利用, 2017(1): 108-112, 118.
XU Wen-qiang, YAN Yan, PAN Xiao-lin, et al. Current situation and development trend of large-scale production technology of alumina in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(1): 108-112, 118.
- [22] 中国电力企业联合会. 2010 电力统计基本数据[EB/OL]. 2013-04-19. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-126868>.
China Electricity Council. 2010 basic data on electricity statistics[EB/OL], 2013-04-19. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-126868>.
- [23] 中国电力企业联合会. 2018 电力统计基本数据[EB/OL]. 2019-12-13. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-277094>.
China Electricity Council. 2018 basic data on electricity statistics[EB/OL]. 2019-12-13. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-277094>.
- [24] BP 集团. BP 世界能源统计年鉴[EB/OL]. 2019-07-30. https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2019/2019srbook.pdf.
The BP Group. BP world energy statistical yearbook [EB/OL]. 2019-07-30. https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2019/2019srbook.pdf.
- [25] 邓文强. NEUI600 kA 超大容量铝电解槽技术应用与行业进步[J]. 世界有色金属, 2018(8): 44-45.
DENG Wen-qiang. Technology application and industry progress of NEUI600 kA large capacity aluminum reduction potcell [J]. World Nonferrous Metals, 2018(8): 44-45.
- [26] 李 勇, 杨 镇, 任太琳. 余热发电技术在炭素罐式煅烧炉的应用[J]. 水泥技术, 2012(1): 102-103.
LI Yong, YANG Zhen, REN Tai-lin. Waste heat power generation technology in the application of carbon tank calciner [J]. Cement Technology, 2012(1): 102-103.
- [27] 刘红伟, 郝祥平. 索通发展: 绿色炭素行业的领航者[J]. 科技创新与品牌, 2014(7): 10-15.
LIU Hong-wei, HAO Xiang-ping. Suotong development: The leader of green carbon industry[J]. Science and Technology Innovation and Branding, 2014(7): 10-15.
- [28] WEN Zong-guo, LI Hui-fang. Analysis of potential energy conservation and CO₂ emissions reduction in China's non-ferrous metals industry from a technology perspective[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 28: 45-56.
- [29] 中国电力企业联合会. 2020 年全国电力工业统计快报数据一览表[EB/OL]. 2021-01-20. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-292820>.
China Federation of Electric Power Enterprises. In 2020 the national power industry express data list[EB/OL]. 2021-01-20. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-292820>.
- [30] International Energy Agency. Renewables 2020 Analysis and Forecast to 2025[EB/OL]. 2020-11. https://iea.blob.core.windows.net/assets/1a24f1fe-c971-4c25-964a-57d0f31eb97b/Renewables_2020-PDF.pdf.
- [31] 能源转型委员会, 落基山研究所. 电力增长零碳化(2020-2030): 中国实现碳中和的必经之路[EB/OL]. 2021-01. <https://www.rmi-china.com/index.php/news/download?filename=202101151540515741.pdf>.
Energy Transition Commission, Rocky Mountain Institute. Zero Carbonization of Electric Power Growth (2020-2030): The Path to Carbon Neutrality in China[EB/OL]. 2021-01. <https://www.rmi-china.com/index.php/news/download?filename=202101151540515741.pdf>.

Analysis of carbon emission reduction and carbon emission peak for aluminum production in China based on target scenario

LI Ming-yang, GAO Feng, SUN Bo-xue, NIE Zuo-ren

(National Engineering Laboratory for Industrial Big-data Application Technology,
Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: According to the guidance of the national carbon peak target, the historical data of greenhouse gas (GHG) emissions from primary aluminum production were calculated and analyzed in this study. A multi-factor analysis model of GHG emissions from primary aluminum was established by forecasting the potential for improvement of electrolytic aluminum production technology, power structure adjustment and recycled aluminum production in China for the next 15 years. The GHG emission reduction and carbon peaking pathways of primary aluminum production in China were explored under three scenarios including the baseline scenario (BAU), the low improvement efficiency scenario (LIR) and the high improvement efficiency scenario (HIR). The results show that the GHG emission potential of 1 ton primary aluminum production in China illustrated a decreasing trend over the years. The potential of the advanced technology application of aluminum electrolysis, the change of electricity consumption structure and increasing the proportion of recycled aluminum for the GHG emissions reduction of 1 ton aluminum were forecasted. The GHG emissions of China primary aluminum production would peak in 2030 with the BAU scenario, while in 2027 with the LIR scenario and in 2021 with the HIR scenario, respectively. The variation range of aluminum output in the three scenarios was then given as the limiting condition to ensure the peak.

Key words: carbon emission; carbon emission peak; primary aluminum; recycled aluminum

Foundation item: Project(51621003) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-02-25; **Accepted date:** 2021-05-31

Corresponding author: GAO Feng; Tel: +86-10-67391058; E-mail: gaofeng@bjut.edu.cn

(编辑 何学锋)