

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.04.001

双碳背景下碳排放核算方法及策略分析 ——以铜铝行业为例

王威¹, 吴晶晶², 葛亚平¹, 李其珂¹

(1. 南通理工学院 基础教学学院, 江苏 南通 226002;

2. 南通理工学院 商学院, 江苏 南通 226002)

摘要: 有色金属行业作为行业碳排放大户, 其降碳减排任务意义重大, 在阐述碳排放核算的方法、步骤的基础上, 结合铜、铝行业, 以铜冶炼企业 A 和电解铝厂 B 为例, 分别对铜、铝企业的碳排放量进行核算。结果表明, 铜冶炼企业 A 每年碳排放量规模为 16.2 万 t, 电解铝企业 B 年碳排放量为 414.07 万 t, 在双碳战略目标下, 提出了针对铜、铝领域新能源产业升级和产能结构转移等降碳减排策略。

关键词: 碳排放; 排放因子法; 碳达峰; 碳中和; 铜; 铝

中图分类号: X74; X322

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2022)04-0001-11

Carbon Emission Accounting Method and Strategy Analysis under the Background of Double Carbon: Taking Copper and Aluminum Industry as an Example

WANG Wei¹, WU Jing-jing², GE Ya-ping¹, LI Qi-ke¹

(1. School of General Education, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, Jiangsu, China;

2. School of Business, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, Jiangsu, China)

Abstract: As a major carbon emitter in the non-ferrous metals industry, its task of carbon reduction and emission reduction is of great significance. On the basis of expounding the methods and steps of carbon emission accounting, combined with copper and aluminum industries, taking copper smelting enterprises A and electrolytic aluminum plants B as examples, the carbon emissions of copper and aluminum enterprises were calculated respectively. The results show that annual carbon emission of copper smelting enterprises A is 162 kt, and annual carbon emission of electrolytic aluminum enterprises B is 414.07 kt. Under the dual carbon strategic goal (carbon peak and carbon neutralization), carbon reduction and emission reduction strategies such as new energy industry upgrading and capacity structure transfer in the field of copper and aluminum are put forward.

Key words: carbon emissions; emission factor method; carbon peak; carbon neutralization; copper; aluminum

收稿日期: 2021-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11971236); 江苏高校哲学社会科学研究项目(2020SJA11635); 南通理工学院中青年骨干教师项目(ZQNGGJS202135); 江苏省“十四五”工商管理重点建设学科项目(SJYH2022-2/285)

作者简介: 王威(1978-), 男, 硕士, 副教授; 通信作者: 吴晶晶(1981-), 女, 硕士, 副教授

2021年10月,习近平主席出席《生物多样性公约》第十五次缔约方大会领导人峰会并发表讲话指出,“为了推动碳达峰、碳中和目标的实现,中国将陆续发布重点领域和行业碳达峰实施方案和一系列支撑保障措施,构建起碳达峰、碳中和“1+N”政策体系。”(<http://www.iswac.cn/index.php?c=index&a=show&catid=121&id=3621>),随着上述政策体系和行动方案框架的完善,“碳达峰、碳中和”战略势必将成为影响我国未来40年的至关重要的发展战略。作为典型的高能耗和高排放行业,铜、铝行业的减排、达峰必将影响到国家战略的全局。学者专家首先对国家双碳政策实施的路径进行了多方面多角度的分析^[1-6]。2021年10月24日,中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》(<https://wallstreetcn.com/articles/3643140>),明确十大重点任务,其中第一条便是制定能源、钢铁、有色金属、石化化工、建材、交通、建筑等行业和领域碳达峰的实施方案。刘诚等^[7]对铜冶炼的碳排放量进行了系统的核算与分析,比较了碳排放核算与能耗核算的关系,对排放因子取值等方面提出标准修订建议。倪阳^[8]利用文献分析法对拜耳法生产氧化铝过程碳排放进行核算。卢浩浩等^[9]采用物质流分析和生命周期评价方法,基于存量水平、技术水平和能源结构设置了15种情景,研究了我国铝工业1990~2100年的能耗和碳排放量,探索不同路径下的节能减排潜力,得出在所有情景下,铝工业都可实现能耗和碳排放放在2030年前达峰的目标。本文在阐述碳排放核算的方法、步骤的基础上,以铜冶炼企业和电解铝厂为例,分别对铜、铝企业的碳排放量进行核算。

1 核算方法

按照发改委发布的温室气体排放核算方法与报告指南^[10],以下逐个步骤介绍核算的主要流程,对修改或调整处做出说明。

1) 确定企业生产边界

核算的主体以企业法人边界为边界。由于不同企业的性质差异较大,在计算时优先选择具有代表性的企业,同时对于运输、储存等环节产生的温室气体排放做了简化处理。

2) 确定应核算的排放源和气体种类

根据IPCC和发改委指南,工业生产的排放源主要涉及能源使用、工业过程和废弃物排放三部分。

3) 识别流入流出企业边界的碳源流及其类别

如图1所示,碳流入涉及化石燃料燃烧、原料使用、电力和热力输入三类,碳流出涉及主产品、联产产品和副产品生产、废弃物排放和电力与热力输出三类。由于废弃物的碳排放量占比极小,传统方法的计算过程繁琐且结果不准确,本文选择省略。

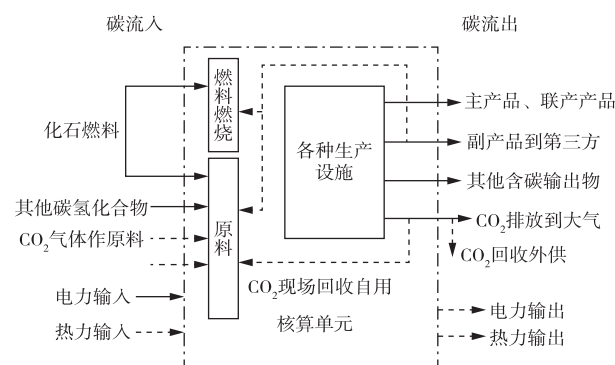


图1 碳源流识别示意图

Fig. 1 Schematic diagram of carbon source flow identification

4) 收集各个碳源流的活动水平数据

活动数据主要涉及燃料和原料的消耗量,直接取决于生产设备和工艺,本文优先选择具有代表性的大型生产设备和主流生产工艺,并参考行业经验数据进行调整。

5) 选择和获取排放因子数据

IPCC提供的排放因子数据多数是基于发达国家的工业水平,和我国的现状不符,所以文中优先采用国内权威机构发布的排放因子数据。

6) 依据相应的公式分排放源核算各种温室气体的排放量

在确定了主体的碳源流后,总的碳排放量 E_A (单位tce)为所有核算单元碳流入与碳流出的求和,通用表达式为:

$$E_A = \sum (E_{F,i} + E_{P,i} + E_{PE,i} + E_{PH,i} - E_{OE,i} - E_{OH,i} - E_{R,i})$$

式中, i 为核算单元编号, E_F 表示燃料燃烧产生的碳排放量; E_P 表示工业生产所有产品(包括废弃物)的碳排放量; E_{PE} 表示购入电力产生的碳排放量; E_{PH} 表示购入热力产生的碳排放量; E_{OE} 表示自备电力部分在输出时产生的碳排放量; E_{OH} 表示输出热力部分产生的碳排放量; E_R 表示外购电力部分在输出时产生的碳排放量。燃料燃烧同时提供热力和电力,热力碳排放量一般和电力合并在一起,而回收产生的碳排放量不宜获取,核算公式修改为:

$$E_A = \sum (E_{F,i} + E_{P,i} + E_{PE,i} - E_{OE,i})$$

其中碳排放量核算优先采用碳排放因子法,即

$$E = AD \times EF$$

式中,AD表示为核算期内生产过程中化石燃料的消耗量、原材料的使用量及购入或输出的电量,气体燃料单位为万立方米(10⁴ m³,标态,下同),固体或液体燃料单位为吨(t)。EF为碳排放因子,主要来源于国内各行业协会实际测量值。

对于复杂工艺,或者没有准确排放因子的情况,则采用质量平衡法计算碳排放量,即:

$$E = AD \times CC \times OF \times \frac{44}{12} \tag{1}$$

式中,CC为含碳量,单位为吨碳每吨(tC/t),对气体燃料,单位为吨碳每万立方米(tC/(10⁴ m³));OF为石化燃料的碳氧化率(%),CC与OF的数值均来自核算国标的附录《常见石化燃料特性参数推荐值》;44/12代表二氧化碳与碳的相对分子质量之比。公式省略了二氧化碳全球变暖潜势GWPCO₂,由于该值固定取1,此处省略。

常见燃料的碳排放因子参考表1,可以看到,含碳量的单位为tC/GJ,需要与低位发热值相乘才能得到公式(1)中的含碳量值CC。

表1 常见石化燃料特性参数推荐值

Table 1 Recommended values of characteristic parameters of common petrochemical fuels

形态	燃料品种	单位	低位发热值/ (GJ·t ⁻¹)或 10 ⁴ m ³	含碳量/ (tC·GJ ⁻¹)	碳氧化率/ %	碳排放因子/ (tCO ₂ ·t ⁻¹)
固体	无烟煤	t	26.7	0.027 4	94	2.52
	烟煤	t	19.57	0.026 1	93	1.74
	褐煤	t	11.9	0.028 0	96	1.17
	洗精煤	t	26.334	0.025 41	93	2.28
	其它洗煤	t	12.545	0.025 41	90	1.05
	型煤	t	17.46	0.033 6	90	1.94
	焦炭	t	28.435	0.029 5	93	2.86
液体	原油	t	41.816	0.020 1	98	3.02
	燃料油	t	41.816	0.021 1	98	3.17
	汽油	t	43.07	0.018 9	98	2.93
	柴油	t	42.652	0.020 2	98	3.10
	煤油	t	43.07	0.019 6	98	3.03
	石油焦	t	32.5	0.027 5	98	3.21
	其他石油制品	t	40.2	0.020 0	98	2.89
	焦油	t	33.453	0.022 0	98	2.64
	粗苯	t	41.816	0.022 7	98	3.41
	炼厂干气	t	45.998	0.018 2	99	3.04
	液化石油气	t	50.179	0.017 2	98	3.10
	液化天然气	t	44.2	0.017 2	98	2.73
气体	天然气	10 ⁴ m ³	389.31	0.015 3	99	21.62
	焦炉煤气	10 ⁴ m ³	179.81	0.0135 8	99	8.86
	高炉煤气	10 ⁴ m ³	33	0.070 8	99	8.48
	转炉煤气	10 ⁴ m ³	84	0.049 6	99	15.12
	密闭电石炉气	10 ⁴ m ³	111.19	0.039 51	99	15.95
	其他煤气	10 ⁴ m ³	52.27	0.012 2	99	2.31

7)核算净购入的电力和热力导致的二氧化碳排放量

一般情况下,大型生产企业常自备电力,在核算

碳排放量时仅计算净购入电力的部分即可。

8)汇总计算企业温室气体排放总量

碳排放核算过程如图2所示。

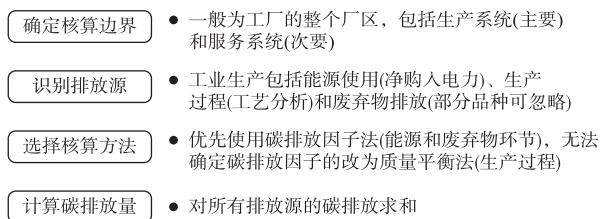


图2 碳排放核算过程

Fig. 2 Carbon emission accounting process

2 铜行业核算法

中国目前是全球最大的精炼铜产量和消费量国家,产业链分布见图3,其中电力板块需求占比达到48%,其次是家电板块占比16%。

火法(闪速)冶炼工艺是目前精炼铜最主要的生产方式。国内的铜冶炼和压延加工业核算碳排放量的方法参考《其他有色金属冶炼及压延加工业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[11]。具体核算示意图见文献^[12],有色金属行业二氧化碳主要由能源消耗引起,95%以上的碳排放量来自于能源消耗^[7],生产过程中基本没有二氧化碳产生^[13]。

以西北某铜冶炼企业A为例,核算铜冶炼企业碳排放量。由经验数据显示,铜冶炼企业热力消费

和生产过程产生的碳排放量占比极低,因此将铜冶炼及压延加工的碳排放量计算公式简化为三部分,即净购入电力、燃料燃烧、能源产生的二氧化碳排放之和。其中,净购入电力的碳排放因子选取生态环境部的数据0.6101;企业消耗天然气所产生的二氧化碳,对应排放因子采用文献^[11]的推荐值21.622。

该铜冶炼企业铜年产量14.6万t,根据企业实际的年消耗量和以上选择的参数,燃料燃烧、净购入电力和能源作为原材料用途三个主要环节的碳排放量计算如表2所示。

经测算,该铜冶炼企业每年碳排放量规模为16.2万t,其中外购电力碳排放占比87%,燃料燃烧碳排放占比11.1%。按照14.6万t的产量计算,单吨铜的碳排放量为1.11t。根据中国有色金属工业协会统计,有色金属行业二氧化碳碳排放量约6.6亿t,仅占全国总排放量的4.7%,其中铜工业贡献的碳排放量占有色金属行业总排放量的不足10%,因此在国家推进“碳达峰、碳中和”发展战略过程中,对铜产量影响相对有限(数据来源:有色金属工业协会副秘书长杨云博:预计有色金属行业碳排放峰值将于2025年后达到峰值为7.5亿t左右; <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1700968289044774382&wfr=spider&for=pc>)。

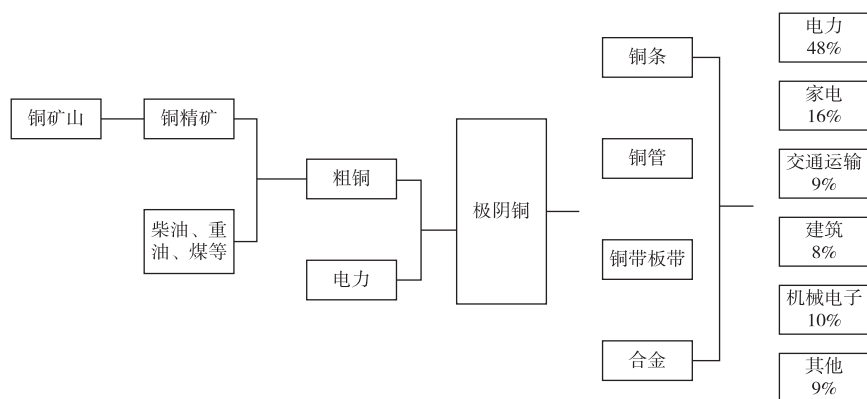


图3 铜产业链

Fig. 3 Copper industry chain

表 2 铜冶炼企业 A 碳排放计算

Table 2 Carbon emission calculation of copper smelting enterprises A

序号	名称	公式中符号	数值	单位
1	年消耗燃料烟煤	FC_C	3 263	t
	烟煤平均低位发热量	NCV_C	19.57	GJ/t
	燃料烟煤碳排放因子	EF_C	0.089 0	t CO ₂ /GJ
	年消耗燃料汽油	FC_G	17.38	t
	汽油平均低位发热量	NCV_G	43.07	GJ/t
	燃料汽油碳排放因子	EF_G	0.067 9	t CO ₂ /GJ
	年消耗燃料柴油	FC_D	100.73	t
	柴油平均低位发热量	NCV_D	42.652	GJ/t
	燃料柴油碳排放因子	EF_D	0.072 6	t CO ₂ /GJ
	年消耗燃料天然气	FC_N	551.70	10 ⁴ m ³
	天然气平均低位发热量	NCV_N	389.31	GJ/10 ⁴ m ³
	燃料天然气碳排放因子	EF_N	0.055 5	t CO ₂ /GJ
$E_F = E_C + E_G + E_D + E_N = FC_C \times NCV_C \times EF_C + FC_G \times NCV_G \times EF_G + FC_D \times NCV_D \times EF_D + FC_N \times NCV_N \times EF_N = 17.974 \text{ kt}$				
2	年外购电力	AD_{PE}	231 190.5	MWh
	电网碳排放因子	EF_{PE}	0.610 1	t CO ₂ /MWh 或 kg CO ₂ /kWh
$E_E = AD_{PE} \times EF_{PE} = 141.049 \text{ kt}$				
3	还原剂天然气消耗量	AD_R	137.93	10 ⁴ m ³
	还原剂天然气碳排放因子	EF_R	21.622	t CO ₂ /10 ⁴ m ³
$E_R = AD_R \times EF_R = 2.982 \text{ kt}$				

3 铝行业核算法

铝工业是国民经济的重要支柱产业,它的可持续发展对国民经济有着重要的促进作用;同时,铝工业和铜工业一样是高能耗高碳排放工业。铝制品目前广泛应用各个领域,特别是铝合金材料被广泛用于国防军工部门以及航空部门,具有高强度的铝缆在电力传输行业中也得到广泛应用,汽车制造业、日用百货、家用电器、机械设备等同样需要使用大量的铝^[13]。

冰晶石—氧化铝熔盐电解法是生产铝的主要工艺。原料为氧化铝,冰晶石为电解质,炭素为预焙阳极。向电解槽两极通入直流电后,在阴极生成熔融状态的铝,同时在阳极生成二氧化碳和一氧化碳气体。定期从电解槽中抽出熔融铝,加入其它调配成分,或直接净化后铸锭。电解质中除了冰晶石(约 80%)外,还有氟化铝(约 6%~12%)、氧化铝(约 4%)和一些用来调整与改善电解质性质的氟化物添加剂(约 5%~7%)^[14]。

2020 年全年,国内铝土矿—氧化铝—电解铝产业链的碳排放总量约 5.6 亿 t,占国内碳排放总量的约 6%,远远高于铜、锌、铅等其他有色金属产业链。电解铝生产过程中的碳排放主要来自两方面:一是电解时对于电力的消耗(约 86%);二是电解过程中阳极消耗和阳极效应产生的碳排放。国家统计局数据显示,2020 年国内电解铝总产量为 3 724 万 t,假设每吨电解铝耗电 13 500 kWh,则 2020 年电解铝

行业总耗电规模达 5 028 亿 kWh,约占全社会总用电量的 6.7%,其中火电占电解铝用电总量的 86%,水电等新能源占 14%^[15]。

为了进一步阐述电解铝行业碳排放情况,以某电解铝厂 B 为例,参考《温室气体排放核算与报告要求第 4 部分:铝冶炼行业》(<http://www.cqjnw.org/article.php?id=11832>)中的碳边界核算的方法,测算该企业的碳排放量数据。首先,确认该企业的生产边界,即生产系统所产生的温室气体排放。其次,确定该企业的碳排放源,包括燃料燃烧、能源作为原材料用途、生产过程排放、净购入电力、热力四方面。

基于上述理论方法,铝冶炼企业温室气体的核算边界,具体分析该企业每个碳排放源,并进行必要调整后,计算该企业碳排放总量。

1)燃料燃烧,该企业使用的液体燃料(燃料油、柴油)以及气体燃料(天然气)产生的碳排放量;

2)能源作为原材料用途,即该企业炭阳极消耗所产生的碳排放量。根据该企业对每批次的炭阳极进行抽样检测并取年度平均值,得到该企业吨铝炭阳极净耗量为 0.41 t,炭阳极平均含硫量为 1.5%,炭阳极平均灰分含量为 0.3%,由此得出炭阳极的碳排放因子为 $0.41 \times (1 - 1.5\% - 0.3\%) \times 44 \div 12 = 1.48$;

3)生产过程,即该企业生产中,阳极效应产生的碳排放量与碳酸盐分解产生的排放量之和,扣除碳

回收利用量。根据该企业实测,平均每天每槽阳极效应持续时间为 0.1 min,采用国际通用的斜率法经验公式,得出四氟化碳的排放因子为 $0.143 \times 0.1 = 0.0143$,六氟化二碳的排放因子为 $0.1 \times 0.0143 = 0.00143$;

4)净购入电力、热力,其中电力碳排放因子采用 2021 年生态环境部规定的 0.610 1;热力排放因子

采用推荐值 0.11。

综上所述,该电解铝企业年产能 40 万 t,根据企业实际的年消耗量和以上选择的碳排放计算参数,碳排放量计算见表 3。从表 3 可知,该电解铝企业年碳排放量为 414.07 万 t,其中,净购入电力碳排放占比 82%,生产过程氟化物占比 14%。按照 40 万 t 的产量计算,单吨电解铝的碳排放量为 10.4 t。

表 3 某电解铝企业 B 碳排放量核算

Table 3 Carbon emission accounting of an electrolytic aluminum enterprise B

名称	公式中符号	数值	单位
年消耗燃料油	AD_F	10 000	t
燃料油碳排放因子	EF_F	3.17	t CO ₂ /t
年消耗天然气	AD_N	2 000	t
天然气碳排放因子	EF_N	21.4	t CO ₂ /t
年消耗柴油	AD_D	3 400	t
柴油碳排放因子	EF_D	3.10	t CO ₂ /t
$E_F = AD_F \times EF_F + AD_G \times EF_G + AD_D \times EF_D = 85.0 \text{ kt CO}_2$			
年生产原铝	P	400 000	t
碳阳极消耗碳排放因子	EF_{CA}	1.48	t CO ₂ /t
$E_R = EF_{CA} \times P = 590.5 \text{ kt CO}_2$			
年生产原铝	P	400 000	t
四氟化碳排放因子	EF_{CF_4}	0.014 3	kg CF ₄ /t
六氟化二碳排放因子	$EF_{C_2F_6}$	0.001 43	kg C ₂ F ₆ /t
$E_P = E_{PFC_2} = EF_{CF_4} \times P \times 10^{-3} + EF_{C_2F_6} \times P \times 10^{-3} = 57.2 \text{ kt CO}_2$			
净购入电力	AD_E	5 590 000	MWh
电网碳排放因子	EF_E	0.610 1	t CO ₂ /MWh
外销的热力	AD_H	23 130	GJ
热力消费排放因子	EF_H	0.11	t CO ₂ /GJ
$E_{PE} = AD_E \times EF_E = 3 410.5 \text{ kt CO}_2$; $E_{OH} = AD_H \times EF_H = 2.5 \text{ kt CO}_2$			

4 铜领域减排策略分析:新能源产业升级,铜需求成长空间打开

有色金属行业作为国家重点关注的六大高排放行业之一,根据正在征求意见的《有色金属行业碳达峰实施方案》(<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1696291845563182019&wfr=spider&for=pc>)中初步提出方案,到 2025 年,有色金属行业力争率先实现碳达峰;2040 年,力争实现减碳 40%。根据我的有色网测算(<https://news.mysteel.com/21/0514/18/E3DBF7FD8C3FA7794.html>),铜冶炼占有色行业碳排放量的 1.68%。

4.1 双碳战略对铜供给影响甚微

从供给端看,铜冶炼企业在“碳达峰、碳中和”工作部署下,对产量的影响具体体现在电力价格和碳排放额度管理两方面。

电力价格方面,电价的调整理论上将会对企业成本产生一定的影响。以 2020 年内蒙古、甘肃两省

区对有色金属行业中电解铝和锌冶炼实施差别化电价政策中^[16],其中限制类加价 0.1 元/kWh,淘汰类加价 0.3 元/kWh 为参考。若以吨铜耗电 1 200~1 500 kWh 估算,0.02 元/kWh 电价变动将会导致 24~30 元成本差异,但抬升幅度仅有 0.7%,对产量并不构成威胁。而且根据国家发改委颁布的《产业结构调整指导目录(2019 年本)》,单系列 10 万 t/a 规模以下粗铜冶炼项目(再生铜项目及氧化矿直接浸出项目除外)被列为限制类;鼓风炉、电炉、反射炉炼铜工艺及设备被列为淘汰类,但目前该两类产业已完全退出国内市场,因此从限产角度,精铜产量也难以受到影响。

在碳排放额度方面,根据之前的测算,目前吨铜的碳排放量大约在 1~3 t,温室气体排放量超过重点排放单位标准的较少,且若是通过购买碳配额进行生产,铜的成本增加大约也仅有 100 元/t,对铜价的实质性影响甚微。

4.2 受益于“碳达峰、碳中和”,铜下游需求多板块增长

在风电方面,铜在风电的具体应用组件为:塔筒电缆、机组内部升压器、机组外部升压器、风电场内

部电缆、电机、开关设备、控制电线和电缆、接地电线和电缆等。对于海上风电来说,各组件的铜使用强度均较陆上风电有所提升,尤其是电缆的铜用量占比可高达 59%。尽管不同技术对铜使用强度也略有影响,但由于电机和增速箱用铜量在风电场整体的比例不高,约 8%~21%,整体影响有限。对铜使用强度最重要的影响因素是在陆上新装还是海上新装,根据 Wood Mackenzie 报告,陆上风电每兆瓦装机需要消耗 5.4 t 铜,海上风电每兆瓦装机需要消耗 15.3 t 铜。结合上文的风电装机量测算,未来 5 年风电用铜量见表 4 所示,累计将达到 150.2 万 t^[17]。

光伏方面,光伏发电系统由光伏组件和平衡系统(BOS)两部分构成,铜的应用主要集中在平衡系统中,尤其是电缆。根据 Wood Mackenzie 报告,光伏系统每兆瓦装机需耗铜 5 t。根据上文的光伏装机量测算和用单位铜量,未来 5 年光伏用铜量见表 4 所示,累计将达到 155 万 t^[18]。

特高压建设尤其是交流电特高压的技术安全性和经济性一直存在着争议,从核准进度来看,2017 年出现了明显的放缓,但在 2018 年 9 月,国家能源局核发《关于加快推进一批输变电重点工程规划建设工作的通知》,随后特高压建设在此出现了明显的加速。2021 年 8 月 31 日,国家能源局发布贯彻落实中央生态环境保护督察报告反馈问题整改方案中对于特高压也表示了未来特高压将继续保持高强度建设,输送新能源占比将大幅上升。在 2021 能源电力转型国际论坛上,国家电网董事长辛保安表示,未来五年,为了推进电网转型升级,国家电网计划投入 3 500 亿美元(约合人民币 2.3 万亿元)^[19]。此外,

国家电网在《“碳达峰、碳中和”行动方案》中也表示,将在“十四五”期间将建成 7 回特高压直流。国家电网到 2025 年,经营区跨省跨区输电输送清洁能源占比达到 50%,输电能力达到 3.0 亿 kW。在特高压上用铜量最大的是变电站,其中包括一些线路的铺设和变压器的使用。根据经验数据,一个变电站内大约安装 3~6 个变压器,耗铜量在 300~600 t,1 000 km 的特高压项目约有 4 个变电站(https://www.sohu.com/a/449639049_249929),未来 5 年特高压用铜量累计将达到 5.36 万 t。

新能源汽车方面,新能源汽车在传统汽车的基础之上,铜使用量在各个方面均有所增加,尤其是“三电系统”:电池、电机、电控。根据 Copper Alliance 数据,一辆燃油车的铜需求量一般在 23 kg 左右,混合动力汽车约为 40 kg,插电式汽车约为 60 kg,纯电动汽车约为 83 kg,混合动力公交车约为 89 kg,纯电动公交车在 224~369 kg。除了新能源汽车自身以外,配套充电桩会带动铜需求,主要用铜部件包括电线电缆、充电机模块、接插件以及各种开关。根据上海有色金属网数据,单个家用充电桩用铜量约 2 kg,公共交流慢充用铜量为 7 kg,公共直流快充用铜量为 25 kg。新能源汽车领域未来 5 年用铜量见表 4 所示,累计将达到 229.6 万 t。

在碳中和的政策背景下,中国铜的产量影响有限,但需求端存在着巨大的增长潜力。国内精铜供需情况如表 4 所示,未来 5 至 10 年铜缺口将进一步扩大。虽然目前我国部分铜消费来源于进口,但目前在碳中和的环境下,国际铜的需求也在不断增加,预计国内铜供需结构将持续维持紧平衡。

表 4 2021-2025 年国内铜供需平衡表

Table 4 Balance of domestic copper supply and demand from 2021 to 2025						/kt
项目	2020	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E
中国精炼铜产量	10 025.1	10 615.1	11 503.0	12 128.4	12 319.5	12 622.7
中国精炼铜消费量	14 229.6	15 246.2	16 567.0	17 391.9	17 773.6	17 754.6
(1)电力耗铜量	6 830.2	7 402.6	8 298.3	8 541.9	8 310.7	7 657.0
(a)电源投资耗铜量	2 601.1	2 991.3	344.3.5	389.1.2	424.1.4	475.0.3
光伏耗铜量	245.7	218.1	256.2	300.9	353.4	421.4
陆上风电耗铜量	364.2	198.9	227.7	260.6	298.2	365.2
海上风电耗铜量	64.5	29.7	30.4	30.8	30.6	29.8
(b)电网投资耗铜量	4 229.1	4 411.4	4 854.8	4 650.7	4 069.4	2 906.7
特高压耗铜量	2.3	11.3	12.5	11.9	10.4	7.5
(2)家电耗铜量	2 276.7	2 367.8	2 509.8	2 710.6	2 819.0	2 903.6
(3)建筑耗铜量	1 138.4	1 103.0	1 042.6	1 034.0	1 026.8	1 106.1
(4)交通耗铜量	1 280.7	1 607.0	1 896.2	2 218.9	2 560.8	2 988.1
(c)传统汽车耗铜量	437.7	469.2	517.6	566.8	616.1	661.2
(d)新能源车耗铜量	130.8	245.3	320.1	404.4	498.2	629.0
(e)充电桩耗铜量	14.1	16.4	24.8	38.0	50.6	69.1
(5)其他耗铜量	2 703.6	2 765.8	2 820.0	2 886.6	3 056.2	3 099.8
平衡(不含净进口)	-4 204.5	-4 631.1	-5 064.0	-5 263.5	-5 454.2	-5 131.9

4.3 铜价中枢抬升对下游企业压力较大

由于碳中和对于铜的需求端影响要明显大于供给端,且铜价整体驱动向下,因此下游用铜企业将面临较大的压力。以家电行业中单件用铜量最高的空调企业为例,根据《产业在线》公开的2020年度空调品牌内销量数据显示,四大龙头企业行业占比分别为36.9%、31.9%、10%和3.8%,合计占全行业超过80%。通过对四大龙头企业因素状况进行分析,四大龙头企业原材料在营业成本中占比分别为86.90%、84.47%、83.20%、91.92%。可以很明确地看到,整个家电行业在营业成本中,原材料占比处于绝对主导地位^[20]。如果原材料价格持续上涨且无任何风险对冲,必将会对公司的经营业绩产生一定影响。

5 铝领域减排策略分析:火电铝成本压力加大,产能结构转移迫在眉睫

2021年2月国际铝业协会(IAI)发布了《2050年全球铝业温室气体减排路径》报告(见表5、6),2018年全球对铝的需求为95 Mt,温室气体排放11.27 Mt;2050年对铝的需求为150~172 Mt,温室气体排放2.5亿t^[20]。对于铝行业而言,较为可行的行业减排的路径见表7^[21]。

表5 2019年全球铝产量及温室气体排放^[20]

Table 5 Global aluminum production and greenhouse gas emissions in 2019^[20]

工序	产量/Mt	吨铝年平均 排放强度/t CO ₂	工序每年 排放量/Mt CO ₂
原铝提取	64	16.6	1 069
消费后废料回收	19	0.6	12
零件机加废料回收	13	0.5	6
铝加工厂废料回收	33	0.3	11
半成品材料加工	95	0.3	29
总计			1 129

表6 2050年全球铝产量及温室气体排放^[20]

Table 6 Global aluminum production and greenhouse gas emissions in 2050^[20]

工序	产量/Mt	吨铝年平均 排放强度/t CO ₂	工序每年 排放量/Mt CO ₂
原铝提取	74~88	2.5	200
消费后废料回收	59~73	0.3	50
零件机加废料回收	2~24	0.25	
铝加工厂废料回收	8~61	0.15	
半成品材料加工	150~172	0.15	
总计			250

表7 铝行业碳减排技术路径^[21]

Table 7 Technical path of carbon emission reduction in aluminum industry^[21]

技术路径	技术路线	措施减排潜力
能效提高	节能新技术及新产品技术推广应用	较小
	能源梯级利用	较小
	循环经济	较小
产业结构调整	淘汰落后产能	较大
	产能向新能源丰富的地区转移	较大
	提高再生铝比例	较大
能源结构调整	可再生能源利用(水、风、光、电)	较大
	核能替代(供电、供热)	中等
	绿色氢能利用(氧化铝焙烧、运输)	较大
	生物质燃料	较大
零碳技术开发	惰性阳极(电解)	较大
	无钙冶金	较小
	农林碳汇	中等
负碳项目开发	碳捕集、利用与封存技术应用(CCUS)	较大
	生物质能碳捕集与封存(BECCS)	较大

5.1 能耗指标大幅下降的空间有限

目前,电解铝生产工艺仍为冰晶石—氧化铝熔盐电解法,产业链见图4。经过100多年来的工艺持续优化,氧化铝、电解铝生产工艺指标潜力挖掘已接近极限,在生产工艺没有发生颠覆性改变的条件下,铝冶炼各项指标下降空间有限。

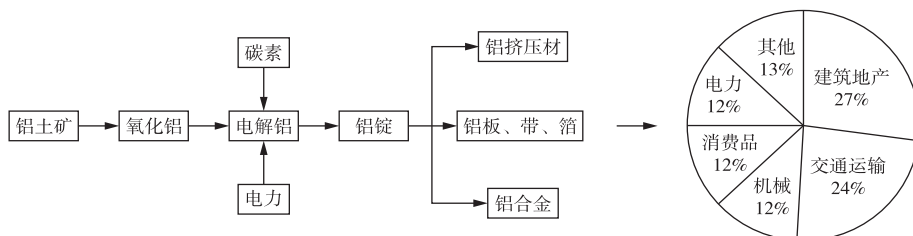


图4 铝产业链图

Fig. 4 Aluminum industry chain diagram

5.2 对新能源的利用

科技进步和新能源大规模化发展将促使新能源

发电成本快速降低,而电解铝生产成本对电价非常敏感。例如我国西北地区,由于得天独厚的地理位

置和环境,风电和光伏发电成本处于全国领先地位,未来电价竞争性极强。青海、甘肃等西北地区的电解铝生产,由于大量使用新能源,显著提升了成本方面的竞争力。预计未来西北地区的新能源装机数量将逐步增加,形成以新能源为主、水电为补充、煤电为调节的能源结构,使火电铝转型为水电铝,进一步转型为风光铝。在保证电解铝产能的前提下,新能源发电富集区域做好承接火电铝向水电铝和风光铝转移的准备,慢慢降低整个电解铝产业链碳排放总量,最终实现电解铝行业碳中和。

5.3 碳中和对电解铝供需平衡影响

“碳达峰、碳中和”背景下,“高耗能、高排放”的电解铝产业链将面临巨大减排压力,目前国内电解铝 4 500 万 t 产能天花板几乎没有打破的可能,电

解铝供给弹性大大降低。

虽然供给端受限严重,但需求端却有望迎来前所未有的发展。中国汽车工程学会发布的《节能与新能源汽车技术路线 2.0》中提出,汽车轻量化是节能汽车、新能源汽车与智能网联汽车的共性基础技术^[22]。目前来说,铝及铝加工品是车辆实现轻量化的最理想材料,在此趋势下,国内单车用铝量有较大提升空间,带动电解铝需求的增长(表 8)。

光伏发电的高速发展亦会带动电解铝需求,光伏用铝主要为光伏组件的边框和光伏支架。光伏边框主要是用来加固、密封太阳能电池组件,以提高组件强度,延长组件使用寿命,同时也便于组件的运输和安装。光伏支架主要用于光伏发电系统的安装过程,铝合金型材是用于制造光伏支架的主要材料之一。

表 8 铝供需平衡预测
Table 8 Aluminum supply and demand balance forecast /kt

项目	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E
国内供给	40 040	41 960	44 120	44 330	44 550
净进口	500	700	800	970	1 120
需求					
建筑地产	12 830	13 090	13 350	13 610	13 870
交通运输(新能源汽车)	9 830(370)	10 130(570)	10 440(820)	10 730(1 050)	11 030(1 270)
电力(光伏)	6 380(1 150)	6 500(1 370)	6 630(1 630)	6 750(1 860)	6 880(2 090)
消费品	2 820	2 870	2 930	2 980	3 040
机械	3 480	3 550	3 620	3 690	3 760
包装	2 540	2 590	2 650	2 700	2 760
其他	2 160	3 230	4 510	4 980	5 930
供需平衡	500	700	790	-140	-1 600

综上所述,一方面,“碳达峰、碳中和”有望驱动国内火电铝生产产能受限、生产成本提升,从而促进电解铝产业能源转型;另一方面,“碳达峰、碳中和”激发铝材大量的新兴需求。4 500 万 t 产能上限使国内电解铝供给弹性逐渐消失,随着需求量的逐步扩大,供需格局将日益紧张,未来铝价中枢有望逐步抬升。

以某电解铝公司为例,简要分析碳排放权带来企业生产成本的提升对于企业净利润的影响。公司 2020 年电解铝产品收入 40.8 亿元,成本 34.2 亿元,销量 36.9 万 t,其电力结构均为火电,假设使用火电与水电生产 1 t 电解铝在电力环节的碳排放差异为 11.2 t,碳排放交易价格基准价格为 50 元/t,则碳排放权价格与电解铝价格变动对于企业净利润的影响如表 9 所示。可以看出,碳排放交易之后,在铝价不变的情况下,火电铝企业的净利润至少会损失 30% 以上,并随着碳排放权价格上涨而加大损失。

表 9 碳排放对电解铝企业净利润的影响

Table 9 Influence of carbon emission on net profit of electrolytic aluminum enterprises /%

铝价格 变化/%	碳排放价格变化						
	0	基准	10%	20%	30%	40%	50%
-20	-123	-155	-158	-162	-165	-168	-171
-15	-92	-124	-128	-131	-134	-137	-141
-10	-62	-94	-97	-100	-103	-106	-110
-5	-31	-63	-66	-69	-72	-76	-79
0	0	-32	-35	-38	-42	-45	-48
5	31	-1	-4	-8	-11	-14	-17
10	62	30	26	23	20	17	13
15	92	60	57	54	51	47	44
20	123	91	88	85	82	78	75

6 结语

有色金属行业是关乎我国经济建设和社会发展的重要工业部门,其产量和消费量一直位居世界前列;铜的产业链分布主要集中在电力板块和家电板块,铜冶炼及压延加工的碳排放量主要源于即净购

入电力、燃料燃烧、能源产生的二氧化碳排放之和。铜工业贡献的碳排放量占有色金属行业总排放量的不足10%，在国家推进双碳战略过程中，对铜产量的影响具体体现在电力价格和碳排放额度管理两方面，影响相对有限，受益于“碳达峰、碳中和”，铜下游多板块如风电、光伏、新能源汽车需求增长，铜价中枢抬升对下游企业压力较大，新能源产业升级是铜领域实现减排目标下的有效路径。

相对于铜金属来说，铝工业是有色行业最大的二氧化碳排放源，探索铝工业碳减排路径对实现双碳目标十分重要，火电铝成本压力加大，能耗指标大幅下降的空间有限，产能结构转移迫在眉睫，科技进步和新能源大规模化发展将逐步降低整个电解铝产业链碳排放总量，最终实现电解铝行业碳中和。

在双碳愿景下，针对有色金属行业的特点，依靠科技进步，采取一系列节能减排措施，努力减少有色金属行业的碳排放，促进中国有色工业产业优化升级和绿色发展。

参考文献

- [1] 王深,吕连宏,张保留,等.基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J].环境科学研究,2021,34(9):2044-2055.
WANG S, LYU L H, ZHANG B L, et al. Low cost carbon peak and carbon neutral path in China based on multi-objective model[J]. Environmental Science Research, 2021, 34(9): 2044-2055.
- [2] 徐振刚.中国现代煤化工近25年发展回顾、反思、展望[J].煤炭科学技术,2020,48(8):1-25.
XU Z G. Review, rethink and prospect of China's modern coal chemical industry development in recent 25 years[J]. Coal Science and Technology 2020, 48(8): 1-25.
- [3] 王一鸣.中国碳达峰碳中和目标下的绿色低碳转型:战略与路径[J].全球化,2021(6):5-18.
WANG Y M. Green and low-carbon transition under the carbon neutral goal of China's carbon peak: Strategy and path[J]. Globalization, 2021(6): 5-18.
- [4] 余碧莹,赵光普,安润颖,等.碳中和目标下中国碳排放路径研究[J].北京理工大学学报(社会科学版),2021,23(2):17-24.
YU B Y, ZHAO G P, AN R Y, et al. Study on China's carbon emission path under carbon neutrality target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition), 2021, 23(2): 17-24.
- [5] 苍大强.钢铁工业“碳达峰”“碳中和”及低碳技术的误区及现实路径[J].中国冶金,2021,31(9):3-8.
CANG D Q. Mistakes and realistic paths of "carbon peak", "carbon neutral" and low carbon technology in iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 3-8.
- [6] 上官方钦,刘正东,殷瑞钰.钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J].中国冶金,2021,31(9):15-20.
SHANGGUAN F Q, LIU Z D, YIN R Y. Research on implementation path of "carbon peak" and "carbon neutral" in iron and steel industry [J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 15-20.
- [7] 刘诚,陈瑞英,王满仓,等.铜冶炼能耗核算与碳排放量核算差异性和相关性分析[J].中国有色冶金,2021,50(4):1-6.
LIU C, CHEN R Y, WANG M C, et al. Analysis of difference and correlation between copper smelting energy consumption accounting and carbon emission accounting [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(4): 1-6.
- [8] 倪阳.拜耳法生产氧化铝过程的碳排放核算[J].轻金属,2021(7):4-8.
NI Y. Carbon emission accounting of alumina production process by Bayer process[J]. Light Metals, 2021(7): 4-8.
- [9] 卢浩浩,王婉君,戴敏,等.中国铝生命周期能耗与碳排放的情景分析及减排对策[J].中国环境科学,2021,41(1):21-30.
LU H H, WANG W J, DAI M, et al. Scenario analysis of aluminum life cycle energy consumption and carbon emission in China and countermeasures for emission reduction [J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 21-30.
- [10] 国家发展和改革委员会.中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[R/OL]. [2021-11-10]. <http://www.cqjnw.org/article.php?id=12265>.
National Development and Reform Commission. Greenhouse Gas Emission Accounting method and Reporting Guide for Chinese Power Generation Enterprises (Trial) [R/OL]. [2021-11-10]. <http://www.cqjnw.org/article.php?id=12265>.
- [11] 邵朱强,杨云博.有色金属行业技术进步对碳排放的影响分析[C]//中国科学技术协会,天津市人民政府.第十三届中国科协年会第7分会场:实现“2020年单位GDP二氧化碳排放强度下降40%~45%”的途径研讨会论文集.天津,2011:5.
SHAO Z Q, YANG Y B. Analysis of the impact of technological progress on carbon Emissions in non-ferrous metal industry [C]//China Association for

- Science and Technology, Tianjin Municipal People's Government. The 7th Session of the 13th Annual Conference of China Association for Science and Technology; Symposium on Ways to Achieve "Carbon Dioxide Emission Intensity Per Unit of GDP by 40%—45% in 2020". China Association for Science and Technology, Tianjin, 2011:5.
- [12] 黄世鑫. 焦作万方公司金属铝期货套期保值方案研究[D]. 辽宁 大连:大连理工大学, 2021.
HUANG S X. Research on hedging scheme of metal and aluminum futures of Jiaozuo Wanfang Company[D]. Dalian; Dalian University of Technology, 2021.
- [13] 邱竹贤. 铝电解原理与应用[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 1998.
QIU Z X. Principle and Application of Aluminum Electrolysis[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1998.
- [14] 赵秀富. 碳达峰、碳中和电解铝如何“火中取栗”[J]. 中国有色金属, 2021(8):57.
ZHAO X F. How about peak, carbon neutralization and electrolytic aluminum gain profit in risk [J]. China Nonferrous Metals, 2021(08):57.
- [15] 《甘肃省高耗能行业执行差别电价管理办法, 甘发改产业规[2021]47号》, 《内蒙古自治区发展改革委工信厅关于调整部分行业电价政策和电力市场交易政策的通知, 内发改价费字[2021]115号》.
《Implementation of Differential Electricity Price Management Measures for Energy-consuming Industries in Gansu Province, Gan Fa Reform Industry Regulation (2021) No. 47》, 《Notice of Industry Information Department of Development and Reform Commission of Inner Mongolia Autonomous Region on Adjustment of Price Policies for Some Industries and Power Market Transaction Policies, in Fa Reform Price Zi (2021) No. 115》.
- [16] 东方证券. 有色金属行业风电和新能源车篇:有色碳中和① 新能源新动能, 铜、稀土将迎需求成长[R/OL]. [2021-12-10]. http://www.nxny.com/report/view_4616141.html.
Orient Securities. Wind power and new energy vehicles in non-ferrous metal industry: Non-ferrous carbon neutralization ① New energy and new driving force, copper and rare earth will meet demand growth [R/OL]. [2021-12-10]. http://www.nxny.com/report/view_4616141.html.
- [17] 东方证券. 有色金属行业光伏和储能篇:有色碳中和② 新能源新动能, 2025年或将拉动铜需求7%[R/OL]. [2021-12-10]. https://data.eastmoney.com/report/zw_industry.jshtml?infocode=AP202104091482921754.
Orient Securities. Photovoltaic and energy storage in nonferrous metals industry: Non-ferrous carbon neutralization ② New energy and new kinetic energy, which may drive copper demand by 7% in 2025" [R/OL]. [2021-12-10]. https://data.eastmoney.com/report/zw_industry.jshtml?infocode=AP202104091482921754.
- [18] 澎湃新闻. 国家电网超2万亿元投向电网转型升级, 释放了哪些信号? [EB/OL]. [2021-12-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1710741268759345206&wfr=spider&for=pc>.
The Paper. cn. What signals have been released when the State Grid Corporation of China invested more than 2 trillion Yuan in the transformation and upgrading of the power grid? [EB/OL]. [2021-12-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1710741268759345206&wfr=spider&for=pc>.
- [19] 国家电网有限公司. 国家电网有限公司2020社会责任报告[R]. 北京:国家电网有限公司, 2021.
State Grid Corporation of China. State Grid Corporation of China 2020 Social Responsibility Report[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2021.
- [20] 王祝堂. 国际铝协称:2018年温室气体排放11亿吨, 2050年应下降到2.5亿吨[J]. 轻金属, 2021(7):62.
WANG Z T. Greenhouse gas emissions of 1.1 billion tons in 2018 should be reduced to 250 million tons in 2050, according to the International Aluminum Association[J]. Light metals, 2021(7):62.
- [21] 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, 37(4):1-4.
DU X, XIE W J, WANG S X. Technical path to achieve carbon peak and carbon neutralization in China's aluminum industry[J]. Energy Saving of Non-ferrous Metallurgy, 2021, 37(4):1-4.
- [22] 《节能与新能源汽车技术路线2.0》正式发布[J]. 信息技术与标准化, 2020(11):6.
Energy saving and new energy vehicle technology route 2.0 was officially released[J]. Information Technology & Standardization, 2020(11):6.