

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.03.018

铜产业的双碳目标实现路径与方法

张学友 王海北 MA Hao

(矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘 要: 聚焦铜产业的双碳目标实现路径与方法, 分析铜产业碳排放特点, 提出了包括近期、中期和远期三个阶段的双碳目标以及针对性的技术路径和政策路径。在技术路径上, 强调了包含源头控碳、过程控碳和资源循环利用的减碳技术体系, 并列举了包括铜精炼氢冶金技术在内的铜产业先进的碳减排技术方法, 同时归纳了包括使用人工智能技术进行矿产勘查在内的现今变革性技术的进展, 对碳捕集和生态修复固碳等负碳技术也进行了总结。在政策路径上, 建议政府、企业和社会各方共同承担推动铜产业低碳发展的责任, 通过产业布局优化、能源转型、节能降碳、科技支撑、循环发展等措施, 实现铜产业的绿色、高效、可持续发展。梳理了技术路径和政府碳管理路径的不同抓手, 以提升实现双碳目标的可落地性和可操作性。

关键词: 铜; 双碳目标; 技术路径; 政策路径; 低碳发展

中图分类号: TF811; X382; TD17; TD9

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2024)03-0456-10

Paths and methods for achieving carbon peaking and carbon neutrality in the copper industry

ZHANG Xueyou WANG Haibei MA Hao

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: This article focuses on the paths and methods to achieve carbon peaking & neutrality in the copper industry. It analyses the characteristics of carbon emissions in the copper industry, and proposes three stages of carbon peaking & neutrality goals, including short-term, medium-term, and long-term objectives, along with targeted technological and policy paths. On the technological path, a carbon reduction technology system is emphasized, including source control, process control, and resource recycling. Advanced carbon reduction technologies and methods in the copper industry, such as copper refining using hydrogen are listed, and the current transformative technological progress, including the use of artificial intelligence technology for mineral exploration is summarized. A summary has also been made on negative carbon strategies such as carbon capture and ecological restoration carbon sequestration. Regarding the political path, it is suggested that governments, enterprises, and all sectors of society share the responsibility of promoting low-carbon development in the copper industry. This can be achieved by optimising industrial layout, energy transformation, energy conservation and carbon reduction, technological support, and circular development. By employing these methods, green, efficient, and sustainable development in the copper industry can be achieved. Furthermore, different approaches to technology and government carbon management are outlined to enhance their feasibility and operability in achieving carbon peaking & neutrality.

Key words: copper; dual carbon targets; technical path; policy path; low-carbon development

收稿日期: 2024-02-07

基金项目: China Minmetals Corporation(2021ZXD01)

第一作者: 张学友, 博士, 工程师, 研究方向为湿法冶金、火法冶金与双碳研究。E-mail: zhangxueyou@bgrimm.com

通信作者: MA Hao, 博士, 正高级工程师; E-mail: haoma@bgrimm.com

目前,温室气体的排放量持续升高已经成为全人类面临的严重环境问题。为了应对日益恶化的环境问题,实现人与自然的和谐相处,绿色转型与低碳发展之路成为人们的共识。2020年9月,我国明确提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”目标,这是我国实现高质量发展的重大战略安排和任务,同时也是承担大国责任,着力构建人类命运共同体的重大战略举措。

金属矿业的生产工艺和特点决定了各种金属的生产基本均是高能耗、高排放。根据中国有色金属工业协会统计数据显示,2022年我国有色行业二氧化碳排放量约为6.6亿t,约占全国总排放量的6%(2022年中国二氧化碳排放量约为110亿t)。铜具有优异的导电性、导热性、延展性、耐腐蚀性等性能,被广泛应用于电气、电子、能源、汽车、建筑等领域^[1-3]。随着产业绿色发展与新能源结构转型,电力需求持续增长,铜产品的需求量仍呈现出逐年上升的趋势^[4,5]。我国铜消费量早在2002年就升至世界首位,且此后一直保持稳定增长的趋势^[6,7]。图1为2016—2023年中国铜产品产量变化^[8]。在采选环节,2023年我国铜精矿产量169.7万t,同比下降13.4%;在冶炼环节,2023年我国精炼铜的产量为1298.8万t,同比增长了13.5%;在压延加工环节,2023年我国铜材产量为2217万t,同比增长了4.9%。根据《中国有色金属行业发展战略研究》报告的预测^[9],在2010—2050年间全球铜需求量将增长两倍^[10],这也必将导致铜工业生产的二氧化碳排放量持续增加。

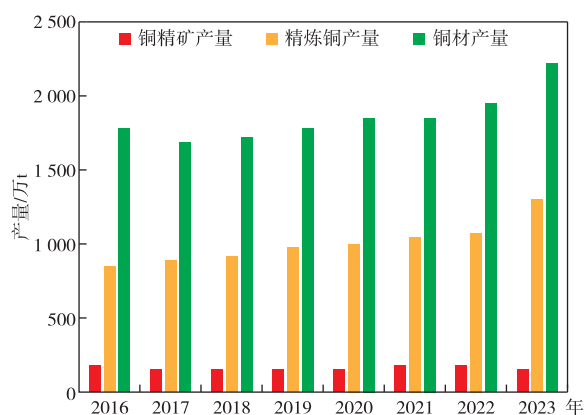


图1 2016—2023年中国铜产品产量变化^[8]

Fig. 1 Copper product production changes in China from 2016 to 2023^[8]

近年来,我国铜工业产业快速发展,形成了上下游贯通的完整产业链,重点品种冶炼及压延加工

产能产量占全球比重大。总体而言,我国在铜冶金技术发展上走了一条引进、集成、再创新的道路。富氧底吹炉、双侧吹炉、奥图泰闪速熔炼—PS转炉吹炼、TSL熔池熔炼—PS转炉吹炼等先进的铜火法冶金技术在国内得到了广泛应用。目前,一批企业在规模、技术、装备、能耗、环保和综合回收等多方面已居于世界先进水平,部分技术和装备已开始出口国外。值得指出的是,中国铜产品是中国唯一一个生产能耗低于国际先进水平的高耗能工业产品,从2018到2022年,这4年间综合能耗下降接近30%(213 kW·h·t⁻¹)。然而,尽管我国铜产业取得了较大的进步,但受产业规模大、用电结构依赖火电、减碳技术缺乏革命性突破、循环经济体系不够完善等影响,碳达峰、碳减排任务依然艰巨。

基于铜产业的现状,本文着重于铜产业的双碳目标实现路径与方法,通过调研和分析,结合行业的技术发展现状和趋势,提出了铜行业应用及重点发展的先进低碳技术。此外,结合政策层面,探讨了相应的政策路线。这些路线旨在引导铜产业朝着更加环保、高效、可持续的方向发展,为全球应对气候变化、实现绿色发展贡献力量,为铜金属绿色低碳发展提供支撑。

1 铜产业碳排放特点

铜产业是一条复杂产业链,涉及矿山采选、冶炼及压延加工等多个环节。铜产业的碳排放来源于多个环节:铜矿石的采选、运输、焙烧和还原、铜的精炼以及副产品的处理等。首先,在采矿过程中,大型机械设备的使用和矿石的破碎、运输都会消耗大量能源,间接导致碳排放。特别是在露天矿和地下矿的开采中,由于作业环境的特殊性,设备的能耗和效率直接影响到碳排放量;在铜矿石的运输环节,即矿石从矿山到冶炼厂的运输过程中,无论是通过公路、铁路还是水路,都会涉及到运输工具的能源消耗,进而产生碳排放。特别是在长距离运输中,这一环节的碳排放不容忽视。铜的焙烧和还原环节是铜冶炼过程中的核心环节,也是碳排放的主要来源。在这一阶段,铜精矿经过高温处理,铜被还原出来。这一过程中需要消耗大量的煤炭和焦炭等作为还原剂,而这些燃料的燃烧会产生大量的二氧化碳。此外,焙烧炉和还原炉的操作温度、压力等参数也会影响到能源消耗和碳排放量;在铜的精炼环节,即在精炼过程中,铜液需要进一步提纯,去除杂质。这一环节需要消耗大量的电能和燃

料。电力的生产主要依赖于化石能源,因此会产生二氧化碳。而燃料的燃烧则直接导致了碳排放。精炼技术的选择和设备的能效也会直接影响到碳排放量。最后是副产品的处理环节,在铜冶炼过程中,会产生一些副产品,如硫酸、炉渣等。这些副产品的处理过程中同样会涉及到能源消耗和碳排放。例如,硫酸的生产需要消耗硫矿石和能源,中和需要大量的熟石灰,而炉渣的处理则需要进行再利用或安全处置等。

铜产业行业碳排放特点主要表现在冶炼和用电两个方面。其中,冶炼是碳排放核心环节,由冶炼过程产生的碳排放约占铜产业碳排放总量的90%^[11];用电是碳排放主要来源,用电导致的间接排放约占全行业碳排放总量的70%^[12]。因此,铜产业进行减碳工作的重点在于铜的冶炼环节改进和能源消耗降低。除此之外,上下游供应商的碳排放也需要进行摸底活动,力争实现产业链和上下游供应商的绿色低碳化。

2 铜产业的双碳目标、减碳路径与方法

2.1 铜产业的双碳目标

为实现铜产业的绿色、高效和可持续发展,需

设定明确的发展目标和关键技术的突破路径,如表1所示,我们建议设定近期、中期和远期的双碳目标。在能耗方面:近期目标是吨铜能耗降低20 kgce,中期目标为能耗降低30 kgce,而远期目标则是实现能耗降低75 kgce。这不仅体现了我国对节能减排的坚定决心,也为我们指明了技术创新的方向。在技术方面:设定了全面推广铜合金加工全流程一体化节能降耗技术的近期目标,并确保推广率达到100%;中期目标则是开发大规格铸坯高速热变形装备技术和强冷塑性变形技术,并进行广泛推广,确保推广率大于90%;远期目标则是突破铜合金连续铸造短流程制备技术,并对其进行推广,确保推广率达到70%。此外,针对双碳目标的实现,也设定了一系列具体的行动计划:在短期,通过建设先进短流程加工技术中试线,并对重点产品进行完全同级回收;中期阶段,通过建设先进短流程生产线,实现重点产品的批量供货,并将重点产品的回收原料容限提高至90%以上;而在远期,要形成完善的连铸板坯、线坯和管坯等标准体系,以及推动先进短流程在铜加工行业的广泛应用。做到这些将有助于提高铜产业的资源利用效率,并降低生产成本,从而实现铜产业的双碳目标。

表1 铜的双碳发展目标和技术路径^[13]

Table 1 Dual carbon development goals and technological paths of copper^[13]

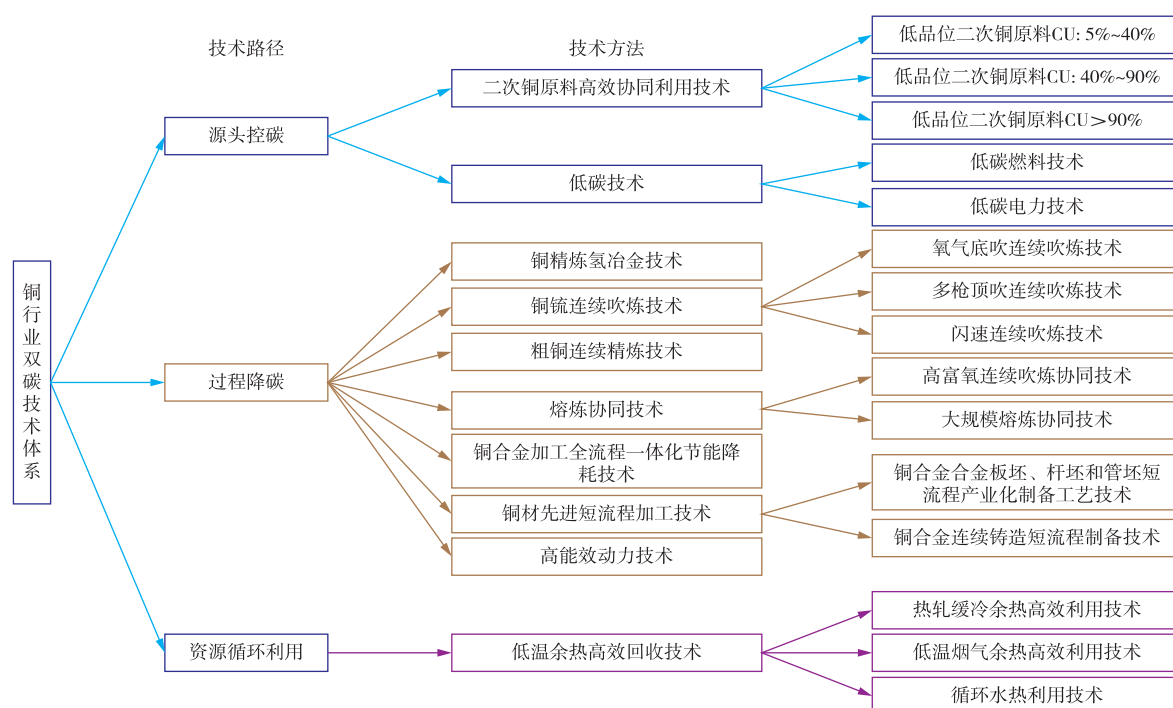
	近期(2021—2030)	中期(2030—2040)	远期(2040—2050)
发展目标	1. 吨铜能耗降低20 kgce; 2. 全面推广铜合金加工全流程一体化节能降耗技术,推广率100%; 3. 建设先进短流程加工技术中试线; 4. 重点产品完全同级回收。	1. 吨铜能耗降低30 kgce; 2. 开发大规格铸坯高速热变形装备于技术以及强冷塑性变形技术,推广率大于90%; 3. 建设先进短流程生产线,实现重点产品批量供货; 4. 重点产品的回收原料容限提高至90%以上。	1. 吨铜能耗降低75 kgce; 2. 突破铜合金连续铸造短流程制备技术,推广率70%; 3. 形成完善的连铸板坯、线坯和管坯等标准体系; 4. 先进短流程广泛应用于铜加工行业
关键技术	1. 二次铜原料高效协同利用技术; 2. 铜材先进短流程加工技术	1. 粗铜连续精炼技术; 2. 粗铜氢精炼技术; 3. 熔炼渣低温热回收关键技术; 4. 铜锍连续吹炼技术; 5. 铜合金加工流程一体化节能降耗技术	1. 二氧化碳捕集、封存与利用技术; 2. 循环水低温热高效利用技术

2.2 铜产业减碳技术路径与方法

在铜冶炼产业方面,通过优化产业结构,一方面能够提高冶炼端的“门槛”,使资源集中化,并且提高资源利用率,同时也可以防止过度的产能扩张,预防铜产业出现明显的产能过剩。众所周知,通过技术创新来推进节能降碳,是铜产业实现减碳的重要动力,因此强化技术节能降碳,将协助铜行业采选业传统模式进行低碳升级,在此期间,行业

龙头企业应努力建设有色金属低碳创新载体,并积极开展共性关键技术、前沿引领技术攻关和示范应用。

图2总结了国内铜行业的减碳技术体系,其中减碳路径主要分为源头控碳、过程控碳和资源循环利用三个部分。在减碳技术路径的基础上,通过应用和发展具体的减碳技术方法,从而实现相应路径上的减碳目标。

图2 国内铜行业减碳技术体系^[13]Fig. 2 Carbon reduction technology system in the domestic copper industry^[13]

在冶炼方面，铜的低碳冶金技术包括粗铜自氧化还原精炼技术、铜精矿短流程一步冶炼技术、铜硫连续吹炼技术、铜冶炼富氧熔炼技术、铜冶炼烟气制酸节能减排技术、铜铅锌搭配冶炼与自循环技术、铜铅锌等火法冶炼中低位余热利用技术、铜冶炼数字化管理技术、铜高效节能电解控制集成技术等众多可以研究利用的技术，其中代表性^[14-23]有：

1) 低品位余热循环发电技术：该技术又称为向心式 ORC 余热发电技术，其利用有机朗肯热力循环原理，将工业中的余热进行回收，并转化为高品质电能，在增加发电量的同时，减少装置冷却能耗，从而大幅度提高工艺装置的能效水平。

2) 高效低碳固态铜料冶炼工艺与成套装备技术：该技术采用氮气微搅拌系统和稀氧燃烧技术，炉膛内形成均匀的加热搅拌体系，可将含铜85%~90%的废杂铜精炼为含铜99.2%及以上的阳极铜，具有自动化程度高、能耗低、低碳安全、污染物排放少等优势。

3) 氧气底吹连续炼铜技术：该技术通过流槽连接，将氧气底吹熔炼产出的高品位铜硫、氧气底吹连续吹炼产出的粗铜导入下一工序，实现铜精矿连续冶炼，且熔炼炉和吹炼炉都是回转型炉型，水冷原件少，采用高富氧，完全依靠化学反应热实现自热冶炼。

4) 电解高效节能集成技术：该技术采用虚拟样机、半实物联合仿真及电液比例伺服集成控制等现代设计及控制技术，自主创新研发电解精炼过程中的关键技术装备，实现系列装备的大型化、高速化、连续化、自动化及节能化，提高电解效率，降低电耗，达到高效节能的目的。

5) 铜铅锌搭配冶炼与自循环技术：铜铅锌冶炼过程产生的固体废弃物直接返回工艺流程系统，或者经过预处理后返回工艺流程系统。例如铜冶炼过程中余热锅炉的重尘直接返回熔炼，黑铜泥直接返回熔炼等，白烟尘首先通过预处理将砷、锌脱除，然后将剩余的物料送至铅冶炼系统。

6) 粗铜自氧化还原精炼技术：通过鼓入惰性气体搅拌铜液，创造良好的反应动力学条件，利用铜液自身的氧和杂质反应，达到一步脱杂除氧的目的；可实现还原剂(天然气)的零消耗，不仅节约了能源，而且从根本上解决了粗铜火法精炼普遍存在的黑烟污染和二氧化碳排放问题。

在压延加工方面，低碳节能技术应用包括无水轧制技术、绿色润滑技术、采用节能电机、余热利用等技术，具体为：

1) 无水轧制技术：也称为干式轧制技术，是一种在轧制过程中不使用或极少使用润滑冷却液的轧制工艺。这种技术的核心在于通过优化轧制设备、

轧制工艺和轧制材料,实现无润滑或微润滑条件下的高效轧制。无水轧制技术能够大幅度降低轧制过程中的能源消耗和水资源消耗,同时减少废水排放,有助于实现绿色生产。无水轧制技术也能够减少轧制过程中的氧化铁皮和油污,提高轧材的表面质量和清洁度。此外,该技术还能够减少轧制过程中的热应力,降低轧材的残余应力,提高轧材的力学性能。

2)绿色润滑技术:绿色润滑技术是一种致力于减少环境污染、提高资源利用效率和保护工人健康的润滑方法。例如,选择具有高效节能特性的润滑剂,能够降低摩擦系数,减少能源消耗,并提高铜压延加工的效率和质量。同时,这种润滑剂还能延长设备的使用寿命,减少维护成本;采用循环润滑系统,将用过的润滑剂进行回收、过滤和再利用,减少润滑剂的浪费和排放;采用干式润滑技术,如固体润滑剂或气体润滑技术,进一步减少润滑剂的使用。

以上列举的是一些已经开始投入使用的碳减排技术,此外,海内外矿业行业均在加快变革性技术创新步伐,新的变革性技术使矿业企业能够以安全、高效、绿色、可持续的方式开采回收以前无法获得的资源,不仅有助于增强矿业企业高质量发展的能力,更重要的还是可实现更好的环境、社会和公司治理(ESG)绩效。低碳技术的创新也遵循一般技术生命周期规律,要经历从基础研究、技术研发、项目示范到市场推广等几个阶段。在海外的大型金属矿业公司中,目前具有变革性技术进展可总结如下^[24-29]:

1)人工智能等前沿技术发展促进矿产勘查发现:包括地质矿产勘查数据人工智能分析,实现高效精准的矿石图像识别和找矿预测、大数据处理能力提升及新技术应用,使便携式分析仪器成为野外地质矿产勘查的可靠手段。

2)生产运营数字化和自动化促进矿山智能化开发和冶炼高质量发展:包括结合工业物联网技术的数字化解决方案,将颠覆矿山生产运营模式以及建设高速稳定通信网络,保障矿山资产—人—系统/平台之间数据信息交换以及实现采矿设备自主运行。如北京北矿智能科技有限公司完成了山东黄金集团三山岛金矿一流示范矿山,通过对矿山进行数字矿山和智能矿山总体规划与设计,推动企业智慧管理,建立数字化、信息化、虚拟化、智能化、集成化的一体化系统,使企业实现整体协调优化、安

全、高效的有色金属智能矿山,促进企业转型升级和高质量发展。

3)方向升级革新促进矿山高效开发,包括:发展机械化装药系统、远程起爆系统等前沿技术,改善爆破采矿作业方式、安全性以及创新开采工艺和技术装备,提升矿山采掘效率。

4)技术装备和工艺流程创新促进矿物回收高效环保:包括利用先进传感器的矿石拣选技术,成为增加可采资源量和减少废石处理量的有效手段。

5)最新绿色节能降耗技术手段:秘鲁正在开发的 Quellaveco 铜矿项目建设粗颗粒浮选回收厂,将通过筛出粗颗粒脉石干式堆放砂石废料以及最大限度地减少传统尾矿的产生和总体耗水量,来提高产量和生产水平,并同时降低环境影响。

6)数字化驱动下的先进过程控制:将实现选矿设备和工艺流程的动态控制与持续优化,如智利 Los Bronces 铜矿通过对半自磨机的先进过程控制,使其稳定性提高 32%,吨矿石的磨矿能耗降低了 17%。

7)等离激元光合制氢:其技术原理是基于纳米级等离激元增强作用,利用金属化合物纳米催化剂的等离激元局域能量增强效应,模拟自然界光合作用,以太阳光或工业废热为主要能量,其反应推动不需要消耗电能,只经过金属纳米催化剂的催化反应即可激活水的化学键,一步分解水并生成氢气,一步实现能量的转化和利用。其他的副产物包括氧气等含氧离子。其过程中因不需要传统电能作为能量来源,也不需要高温高压,使得制氢成本极大降低。

8)微矿分离:此技术可以高效地选择性脱除含碳材料源中的微量元素及矿物质,制备出清洁固体燃料(CSF)、清洁类液体燃料(PLF)以及土壤改良矿物质(SRM),简称为微矿分离(RMS)技术。该技术主要包括 4 个工艺步骤:基于矿物嵌布形态解构,采用流体磨实现碳质组分与无机组分的高效解离;采用颗粒表面改性、多相流界面调控及专用助剂等将碳质颗粒和无机颗粒高效分离;分离之后形成的碳质颗粒流,脱水制成 CSF,或者进入 PLF 制备单元,同时无机颗粒流经脱水制成 SRM;采用多峰级配将碳质颗粒制成高浓度 PLF。

低碳技术的创新和应用是实现有色金属低碳化发展的重要手段,对于上述处于项目示范及市场推广应用的先进低碳技术,铜工业企业需要最快的根据企业运营现状进行消化与吸收,保持低碳趋势快

速发展。而对于变革性甚至颠覆性的新型低碳技术,也需要集中力量进行核心技术的创新和研发工作,加强相关专利池建设,以利于未来技术的形成、发展与应用。

此外,碳治理、碳捕集和生态修复固碳也是各产业应对气候变化和减少温室气体排放的重要策略和方向。其中,碳治理是指通过制定和执行相关政策、法规和制度,推动社会各界减少温室气体排放,提高能源效率,推动低碳经济发展。这包括政府层面的政策引导、企业层面的技术创新和节能减排、以及社会公众的低碳生活方式和消费习惯等。常用的方法包括:

1)减少能源使用:通过节能建筑、提高能源效率、推广可再生能源等方式减少能源消耗。

2)控制温室气体排放:通过实施温室气体排放标准、强制排放限额、实行碳排放交易等政策措施来限制温室气体排放。

3)使用清洁能源:通过推广使用清洁能源,如太阳能、风能、地热能、生物质能等,来减少对化石能源的依赖,降低碳排放。

4)建立碳排放计划:建立碳排放计划,确定碳排放减少目标,并制定有效的实施措施,以达到碳排放减少的目标。

5)其他:包括碳足迹评估、碳减排目标设定、碳减排策略与实施、碳市场和碳抵消、碳报告与披露等。

碳捕集是指通过技术手段将工业生产过程中产生的二氧化碳捕获并储存起来,以减少二氧化碳排放到大气中。在固碳技术中,碳捕集利用与封存技术(CCUS)是最关键的存在。而碳捕集利用与封存运行机制需要上中下游共同发力才能实现。碳减排上游碳捕集是整个固碳技术的核心环节,既包括传统捕集、生物质能碳捕集和空气碳捕集等多种技术,又有燃烧前捕集、富氧燃烧捕集、燃烧后捕集等多种捕集工艺,以及化学吸收法、物理吸收法、膜分离法等多种分离吸收途径;而中游碳运输能够实现“碳转移”,是连接技术链上中下游的关键。未来以管道输运为主流,辅以罐车运输和船舶运输等方式,将建立起多运输方式结合的碳输运体系,满足规模化碳减排需求;下游碳利用和封存,包括陆上咸水层封存、海上咸水层封存和枯竭油气田封存在内的碳封存技术飞速发展,地质利用、物理利用和化学利用等碳利用技术已经初具规模。未来的碳封存,可将二氧化碳储存于地层或海底中,成

为碳元素的“储备池”;而碳利用可从“储备池”提取碳元素进行利用,以多种方式加强二氧化碳中碳元素的经济效益,实现人工碳循环。

生态修复固碳是指通过生态系统的自然恢复和人工修复,增加生态系统的碳储存能力,从而减少大气中的温室气体浓度。生态修复固碳包括林草固碳、土壤固碳与湿地固碳,其中林草途径对应的措施主要包括造林、种草、封育、生态修复、植物护路、梯田、水平阶、草田轮作、横坡带状间作和休闲地绿肥,其原理是:植物在光能的作用下,将叶片等幼嫩组织吸收的 CO_2 和根系输送的水分转化为糖和氧,糖在各种酶的催化下形成纤维素和水;而土壤途径对应的措施主要包括造林、种草、封育、生态修复等,其主要原理以不同农业经营和林草管理等调水保土、工程措施蓄水保土等方式,通过保护现有土壤碳素的流失、逐渐增加土壤有机质方面起到了增加生态固碳的效果。通过以上措施的实施,可以增加植被覆盖,提高土壤碳储量,从而吸收和储存更多的二氧化碳。同时,生态修复还可以改善生态环境,提高生态系统的稳定性和生物多样性。

2.3 铜产业减碳的政策路径与方法

在实现铜产业双碳目标的征程中,既面临着诸多挑战,也孕育着无限机遇。政府、企业和社会各方作为推动铜产业低碳发展的核心力量,需肩负起重大的责任。基于此,本文聚焦于政府、企业和社会在铜产业低碳发展中的关键作用,提出以下具体的政策路径和方法建议。

1)推进产业布局优化和结构调整

优化产业布局结构:打造集群化产业基地,推动产业集聚发展,选择沿海和水电丰富的绿色能源地区进行布局发展产业园,上下游产业链尽可能在园区内统一布局,补齐和延伸产业链;大力发展战略新型产业:提高战略性新兴产业比重,积极发展高端制造、先进材料、高纯金属、绿色低碳、数智化等碳排放强度低的产业,逐步形成核心企业+单项冠军企业+小巨人企业的产业链绿色发展模式;按照绿色低碳把好产业进退关:强化项目准入机制,提高用地强度,严格执行能评环评、碳评制度,严控“两高”项目盲目发展,从源头(开展碳评)和全过程控制温室气体产生和排放;严格实施清洁生产审核、节能监察制度。

2)能源绿色低碳转型

大力发展新能源:围绕碳达峰、碳中和目标发

挥有色金属生产用电基荷大、负荷稳定的特点,采用自主建设、合作开发、电力采购等多种形式不断优化调整用能结构,有序替代化石能源应用,构建能源绿色低碳消费体系;大力推进煤炭清洁高效利用:推动煤电机组节能提效升级和清洁化利用、开展煤电机组供热改造,加快实施煤电机组灵活性制造和改造,跟踪利用成熟低成本的CCUS(碳捕集、利用和封存)技术;加强燃煤自备电厂管理自备电厂通过发电权交易消纳新能源,提高清洁能源消纳比例,逐步降低自备燃煤电厂发电的比例,慎重决策煤电(铜)项目,现有煤电产业进入碳减排快速下降区,研究产业调整,或者实施国家火电行业相同的碳减排措施。

3) 节能降碳增效

提升能源利用效率:实施节能降碳重点工程,以重点用能企业和重点用能产品为重点,加快用能基础设施升级改造,推进重大节能降碳技术示范应用,推动能源系统优化和梯级利用,提升能源资源利用效率,打造一批达到国际先进水平的节能低碳产业和产品;提高资源利用效率:全面提高资产运营质量和效率,降低各类产品物料消耗,减少跑冒滴漏、设备空转,盘活低效无效资产,全方面、全过程提高物料投入产出比;数智化赋能绿色低碳发展:构建有色金属行业全产业链智能制造体系,全面提升集团的生产智能管控与装备、网络协同制造、大数据综合应用等工业基础能力,建设有色云,实现重点领域制造工厂智能化,充分发挥智能化工厂的示范引领作用。

4) 强化绿色低碳科技支撑

打造绿色低碳技术策源地:贯彻新发展理念,打造有色金属绿色低碳原创技术策源地,建设有色金属绿色低碳发展创新联合体,构建适应于有色金属绿色低碳的科技研发体系;推进绿色低碳技术攻关:开发地质矿产勘查数据人工智能分析、利用先进传感器的矿石拣选、余热高效利用、结合工业物联网技术的数字化解决方案、氢能冶金、终端工艺电气化、二氧化碳分离捕集等技术;加快绿色低碳技术产业化推广:推广硫精矿制酸和余热发电技术、铜铅锌搭配冶炼与自循环技术、富氧顶吹熔池熔炼技术等铜冶炼节能技术推广,完成冶炼渣、固(危)废综合处理。

5) 绿色低碳循环化发展

积极发展再生金属:积极发展再生铜产业,适度压减原铜产量,提高再生铜产量比例,建立再生

铜内、外循环相互促进发展新格局,依托大集团形成政府、城市、企业的再生有色金属收利用体系,降低再生金属资源回收成本和大回收规模;加强固体废物综合利用:大幅增加铜渣的综合利用水平,加大铜冶炼渣中镍钴锌等资源化综合利用技术研究,完善铜冶炼高砷物料中砷的脱除与固化,推动建立综合利用产品的相关质量标准和环保准入标准;减污降碳协同增效:统筹碳达峰碳中和与生态环境保护相关工作,强化源头防控,紧盯环境污染物和碳排放主要源头,加快形成有利于减污降碳的产业结构、生产方式,优化技术路径,统筹水、气、土、固废、温室气体等领域减排要求。

6) 构建绿色低碳供应链生态圈

全面构建绿色制造体系:推进行业企业加快建设“绿色工厂”、“智能工厂”、“绿色矿山”、“智能矿山”,积极开展绿色制造评价工作,申报绿色矿山能效领跑者、绿色工厂绿色设计产品、绿色工业园区、绿色供应链管理企业称号;加强绿色低碳供应链管理:开展企业绿色供应链评价指标建设,建立绿色供应链管理体系,打造铜行业绿色低碳产业链,加大对供应商绿色低碳水平审核力度,依据物资特性择机、逐步将绿色产品、绿色标志、节能标志等纳入供应商考核评价体系,为实现有色金属行业全产业链降污降碳做出积极贡献;扩大铜应用和消费:积极研究有色金属参与社会节能降碳工作,将有色金属企业“范围三”碳排放列入企业低碳重大课题研究,为下游客户积极使用有色金属提供便利;打造“绿色”品牌,发布产品环境声明,加快推动社会消纳有色金属,降低下游产品在终端用户使用阶段的碳排放。

7) 强化绿色低碳能力建设

加强碳排放管理:提升企业碳排放管理能力建立碳排放组织机构及碳资产管理团队,强化人才培训和队伍建设,逐步建立一支具有过硬素质的碳排放及碳资产管理队伍;积极参与应对气候变化政策制定:制定行业绿色低碳标准与电解铜碳排放权交易机制,积极参与绿电铜评价标准等团标、行标的编制,开发温室气体减排量核证方法学,为行业、国家温室气体管理政策制定提供技术支持;有色金属行业绿色低碳公共服务平台:创建一个能覆盖和评价有色金属行业“全企业、全足迹、全员”行为的碳排放量的绿色低碳指标评价体系,建设国家有色金属行业绿色低碳公共服务平台,打造“绿色低碳产品检验检测平台、绿色低碳技术验证平台、绿

色低碳标准体系、绿色低碳大数据中心、绿色低碳公共服务中心。

2.4 提高铜产业双碳目标的可落实性

为了提高铜产业的双碳目标技术路径和政策路径的可落实性,针对政府、企业和社会各方,在此提出以下方案^[30]:

1)明确各有关部门、地方政府、行业龙头企业的职责分工,加大基础研究投入力度,采取建设共性技术创新平台、国家或地区重点实验室等形式,向社会各方提出梳理行业的“卡脖子”技术的需求,鼓励企业主动对接与承担国家“十四五”、“十五五”规划等重大工程、工信部和地方政府双碳专项任务。实行一企一策的差别化政策,通过财政补贴、税收优惠、研发资金支持、出台创新的优惠政策、高效的专利审查等方式,支持铜行业企业进行低碳技术改造和升级,降低企业低碳转型的成本。

2)地方政府加快淘汰落后产能,对于高能耗、高污染、产品质量差、安全性差的企业,要坚决依法取缔;进一步完善能耗、环保、质量等方面的法律法规和标准,制定严格的市场准入负面清单,限制新增落后产能,健全落后产能依法退出的长效机制;进一步推动要素市场化改革,使各类生产要素自由流向效益更高的优势企业,倒逼落后产能退出或转型升级;建设“铜材—汽车零部件—电缆器件—家居产品”等产业群。

3)要求生产型企业立足实际,全面梳理和深入分析其产业结构、能源结构、能源消费以及碳排放现状,成立“双碳”工作领导小组,制定并印发节能减碳工作方案、碳资产管理方法、节能减碳工作考核细则等,构建横向到边、纵向到底的管理体系;地方政府重点加大对小微企业、制造企业的减税降费力度。利用好普惠小微企业贷款延期支付工具和普惠小微企业信用贷款支持计划,引导资金更多流向科技创新、绿色发展的小微企业。

4)地方政府有力降低有色金属企业的用能、人工、土地等要素成本以及制度性交易成本。以电力为例,积极推动电力市场化交易。进一步降低有色金属物流成本,其中包括优化部分路段差异化收费、分时段差异化收费;对于纳入国家和省级专项规划、重点工程和重大项目的物流项目,在建设用地指标方面予以重点保障。进一步推进降成本政策落细落实,切实减少各种报表和申报,使有色企业切实享受到减负红利。进一步放开市场准入,使成本在充分的竞争环境下自然降低,从而长远提高企

业盈利和运行效率。

5)相关部门确定基于清洁能源利用水平动态调整加价标准,鼓励铜冶炼企业等提高风电、光伏发电等可再生能源利用水平,减少化石能源消耗,以“城市矿产”示范基地和进口再生资源加工园区为重点,奖励具备废旧电器电子产品、报废汽车等含有色金属废旧再生资源建立回收、拆解、熔炼到深加工的产业链体系的企业,以提高资源利用水平。

6)相关部门发展绿色直接融资,支持符合条件的绿色低碳铜行业企业上市融资、挂牌融资和再融资。推动绿色金融产品研发,支持发行碳中和债券、可持续发展挂钩债券等金融创新产品。鼓励社会资本设立有色金属行业低碳发展相关的股权投资基金,推动绿色低碳项目落地。间接融资方面,引入开发性金融、政策性金融,并与原有的商业金融形成联动互动的机制;直接融资方面,在增加股权融资比例的同时,鼓励发展绿色低碳行业的风险投资基金、股权投资基金。

7)针对国有的有色企业,大力推动有色金属工业“走出去”,通过联合开发、购买矿权、企业并购、项目投资等方式加强国际产能合作,将碳达峰、碳中和工作纳入国有企业考核评价体系,出台实施方案,建立健全激励约束机制。鼓励有条件的国有企业以特色优势产业升级、能源节约利用水平提升、绿色低碳技术科技攻关和创新应用等为重点,开展试点示范,结合实际在人才引进、金融支持、科技攻关、评价激励机制等方面大胆探索,逐步淘汰未采取CCUS技术的燃煤发电,快速增加以可再生能源为主,以核能、碳捕集、利用和封存为辅的多种技术组合发电。

8)各方进行推广使用远程办公、无纸化办公、智能楼宇、智能运输和产品非物质化等技术,开展创建节约型机关、绿色家庭、绿色学校、绿色社区和绿色出行等行动,创建碳中和示范企业、示范园区、示范村镇。不断推广绿色建筑、低碳交通、生活节水型器具,深入广泛开展形式多样的垃圾分类宣传,普及垃圾分类常识,稳步推进垃圾精细化分类。培养工作人员形成绿色出行、绿色生活、绿色办公、绿色采购、绿色消费习惯,着力创造高品质生活,构建绿色低碳生活圈。

3 结论

铜产业作为高能耗、高排放的行业之一,实现双碳目标对其绿色发展具有重要意义。通过技术创

新和政策引导,铜产业可以逐步实现源头控碳、过程控碳和资源循环利用,降低碳排放强度,提高能源利用效率。同时,加强革命性技术的研发和应用,有助于推动铜产业向更加高效、环保的方向发展。政府、企业和社会各方应共同努力,形成合力,为实现铜产业的双碳目标贡献力量。

参考文献

- [1] OISHI T, YAGUCHI M, TAKAI Y. Hydrometallurgical recovery of high-purity copper cathode from highly impure crude copper [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167: 105382. DOI: org/10.1016/j.resconrec.2020.105382.
- [2] DONG D, TUKKER A, STEUBING B, et al. Assessing China's potential for reducing primary copper demand and associated environmental impacts in the context of energy transition and "Zero waste" policies[J]. *Waste Management*, 2022, 144: 454-467.
- [3] LI L, PAN D A, LI B, et al. Patterns and challenges in the copper industry in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 127: 1-7.
- [4] EHELIYAGODA D, WEI F, SHAN G, et al. Examining the temporal demand and sustainability of copper in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(23): 13812-13821.
- [5] WATARI T, NANSAI K, GIURCO D, et al. Global metal use targets in line with climate goals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(19): 12476-12483.
- [6] WANG M, CHEN W, ZHOU Y, et al. Assessment of potential copper scrap in China and policy recommendation[J]. *Resources Policy*, 2017, 52: 235-244.
- [7] DONG D, TUKKER A, VAN DER VOET E. Modeling copper demand in China up to 2050: a business-as-usual scenario based on dynamic stock and flow analysis[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2019, 23(6): 1363-1380.
- [8] 张楠. 2023 年中国铜工业供需形势分析[J]. *中国矿业*, 2024, 33(2): 20-28.
ZHANG N. Analysis of the supply-demand situation of China's copper industry in 2023 [J]. *China's Mining*, 2024, 33(2): 20-28.
- [9] 杨炯.《中国有色金属行业发展战略研究》[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2009.
YANG X. Research on the development strategy of China's nonferrous metals industry[M]. Changsha: Hunan University Press, 2009.
- [10] ELSHKAKI A, GRAEDEL T E, CIACCI L, et al. Copper demand, supply, and associated energy use to 2050[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 39: 305-315.
- [11] 袁永娜, 石敏俊, 李娜, 等. 碳排放许可的强度分配标准与中国区域经济协调发展——基于 30 省区 CGE 模型的分析[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(1): 60.
YUAN Y N, SHI M J, LI N, et al. The intensity allocation standard of carbon emission permits and the coordinated development of China's regional economy: an analysis based on the CGE model of 30 provinces and regions [J]. *Progress in Climate Change Research*, 2012, 8(1): 60.
- [12] 薛香玉, 王长安, 邓磊, 等. 基于全生命周期的富油煤原位热解碳排放[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(4): 1773-1781.
XUE X Y, WANG C A, DENG L, et al. Carbon emissions from in-situ pyrolysis of rich oil coal based on the entire lifecycle[J]. *Journal of Coal Science*, 2023, 48(4): 1773-1781.
- [13] 谢建新, 毛新平, 聂祚仁. 钢铁与有色金属行业清洁低碳转型导论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2023: 115-176.
XIE J X, MAO X P, NIE Z R. Introduction to clean and low carbon transformation in the steel and nonferrous metals industry [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2023: 115-176.
- [14] 张锁江, 张香平, 葛蔚, 等. 工业过程绿色低碳技术[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 511-521.
ZHANG S J, ZHANG X P, GE W, et al. Green and low-carbon technologies in industrial processes[J]. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 511-521.
- [15] 周松林. 低碳铜冶炼工艺技术研究与应用[J]. *中国有色冶金*, 2010(4): 1-4.
ZHOU S L. Research and application of low-carbon copper smelting technology [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2010(4): 1-4.
- [16] 朱宝月, 刘郑, 管佳为, 等. 低碳铜冶炼工艺技术应用分析[J]. *世界有色金属*, 2021(19): 149-150.
ZHU B Y, LIU Z, GUAN J W, et al. Application analysis of low-carbon copper smelting process technology[J]. *World Nonferrous Metals*, 2021(19): 149-150.
- [17] 柴立元, 王云燕, 孙竹梅, 等. 绿色冶金创新发展

- 战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 10-21.
CHAI L Y, WANG Y Y, SUN Z M, et al. Research on innovative development strategy of green metallurgy[J]. China Engineering Science, 2022, 24(2): 10-21.
- [18] 王海北, 章小兵, 谢铿, 等. 废电路板与废杂铜协同处置利用技术与发展方向[J]. 矿冶, 2022, 31(3): 1-5.
WANG H B, ZHANG X B, XIE K, et al. Collaborative disposal and utilization technology and development direction of waste circuit boards and waste copper[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(3): 1-5.
- [19] 杨国强, 刘硕, 史彦辉, 等. 高温铜渣余热回收技术研究进展[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 77-82.
YANG G Q, LIU S, SHI Y H, et al. Research progress of waste heat recovery technology of high temperature copper slag[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 77-82.
- [20] 史彦辉, 武海军, 杨国强, 等. 粒化一气基直接还原回收铜渣余热和有价金属[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 83-87.
SHI Y H, WU H J, YANG G Q, et al. Recovery of residual heat and valuable metals from copper slag by granulation and gas-based direct reduction[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 83-87.
- [21] 李晓波, 赵福生, 刘华海, 等. 利用底吹熔炼技术处理含铜多基固废物料[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(10): 25-31.
LI X B, ZHAO F S, LIU H H, et al. Treatment of multi-base solid waste materials containing copper by bottom blowing furnace[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(10): 25-31.
- [22] 朱文云, 何宗庆, 李奕龙, 等. 富氧侧吹熔炼-多枪顶吹吹炼炼铜工艺杂质元素行为[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(3): 25-34.
ZHU W Y, HE Z Q, LI Y L, et al. Behavior of impurity elements in copper smelting process of oxygen enrichment side blowing smelting—top-blowing with multiple gun[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(3): 25-34.
- [23] 张建, 张力, 李鑫, 等. 底吹熔炼渣中铜与铁组分贫化分离工业化试验[J]. 有色金属工程, 2023, 13(8): 84-93.
ZHANG J, ZHANG L, LI X, et al. Industrial experiment on dilution and separation of copper and iron from bottom-blown smelting slag[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(8): 84-93.
- [24] 杨卉芃, 王威, 柳林, 等. 全球铜矿开发利用技术发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(5): 134-139.
YANG H P, WANG W, LIU L, et al. The development trends of global copper mine development and utilization technology[J]. Mineral Protection and Utilization, 2021, 41(5): 134-139.
- [25] 连民杰, 湛景震, 周文略. 六维矿山建设探讨[J]. 中国矿业, 2023, 32(10): 21-31.
LIAN M J, ZHAN J Z, ZHOU W L. Exploration of six dimensional mine construction [J]. China Mining, 2023, 32(10): 21-31.
- [26] 石垚, 李会泉, 陈少华, 等. 城市多源固废协同利用与区域绿色循环发展研究——以东莞海心沙国家资源循环利用示范基地为例[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1804-1817.
SHI Y, LI H Q, CHEN S H, et al. Research on collaborative utilization of urban multi source solid waste and regional green circular development [J]. Bull Chin Acad Sci, 2023, 38(12): 1804-1817.
- [27] 王庆凯, 杨天皓, 莫雪磊, 等. 黄金矿山智能选矿厂建设关键技术研究与应用[J]. 黄金, 2023, 44(9): 69-74.
WANG Q K, YANG T H, MO X L, et al. Research and application of key technologies for the construction of intelligent mineral processing plants in gold mines[J]. Gold, 2023, 44(9): 69-74.
- [28] 孟宪伟, 葛仲义, 范茹红, 等. 标准化助力黄金行业绿色低碳发展[J]. 黄金, 2023, 44(9): 1-4.
MENG X W, GE Z Y, FAN R H, et al. Standardization helps the gold industry achieve green and low-carbon development [J]. Gold, 2023, 44(9): 1-4.
- [29] 刘成磊. 大数据时代下矿山开采的智能化技术研究分析[J]. 地质研究与环境保护, 2023, 2(9): 52-54.
LIU C L. Research and analysis of intelligent technology for mining in the era of big data[J]. Geological Research and Environmental Protection, 2023, 2(9): 52-54.
- [30] 郭朝先. “双碳”目标下我国有色金属工业转型发展研究[J]. 广西社会科学, 2022(1): 135-143.
GUO C X. Research on the transformation and development of china's nonferrous metals industry under the “Carbon Peaking and Neutrality” goal [J]. Social Sciences in Guangxi, 2022(1): 135-143.