

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2025.01.017

引用格式: 张学友, 王海北, MA Hao. 我国铅冶炼行业双碳目标实现方法[J]. 矿冶, 2025, 34(1): 135-143.

ZHANG Xueyou, WANG Haibei, MA Hao. Methods for achieving carbon peaking and carbon neutrality in China's lead smelting industry[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(1): 135-143.

我国铅冶炼行业双碳目标实现方法

张学友 王海北 MA Hao

(矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要: 介绍了我国铅冶炼行业的碳排放特点, 提出了包含近期、中期和远期的分阶段双碳目标。面对高能耗、高排放的传统铅冶炼工艺特点, 我国通过引入氧气底吹炼铅法、液态高铅渣直接还原等先进低碳技术, 显著提升了节能减排效果。在再生铅领域, 火法与湿法工艺并行发展, 其中, 湿法短流程再生技术的研发, 为废旧铅资源的循环利用提供了新途径。此外, 人工智能等新技术在铅冶炼行业中的应用日益广泛, 进一步推动了铅冶炼行业的绿色低碳转型。探讨了我国铅冶炼行业在低碳转型方面的积极探索, 并展望了未来的发展方向, 强调了其在全球铅冶炼行业可持续发展中的重要作用。

关键词: 铅; 双碳目标; 冶炼技术; 智能化; 低碳发展

中图分类号: TF812; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2025)01-0135-09

Methods for achieving carbon peaking and carbon neutrality in China's lead smelting industry

ZHANG Xueyou WANG Haibei MA Hao

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: This article introduces the carbon emission characteristics of China's lead smelting industry and proposes phased dual carbon goals including short-term, medium-term, and long-term goals. Faced with the high energy consumption and high emissions of traditional lead smelting processes, China has significantly improved energy saving and emission reduction effects by introducing advanced low-carbon technologies such as oxygen bottom blowing lead smelting and direct reduction of liquid high-lead slag. In the field of recycled lead, both pyrometallurgical and hydrometallurgical processes are developing concurrently, among which, the development of short-process hydrometallurgical technology provides a new pathway for the recycling of waste lead resources. In addition, new technologies such as artificial intelligence are increasingly being applied in the lead smelting industry, further promoting the green and low-carbon transformation of the industry. The article also summarizes the active exploration and remarkable achievements of China's lead smelting industry in low-carbon transformation, and looks forward to future development directions, emphasizing its important role in the sustainable development of the global lead smelting industry.

Key words: lead; dual carbon targets; smelting technology; intelligence; low-carbon development

自工业化以来, 温室气体排放量的持续升高使得全人类面临着严重的环境问题。为了应对日益恶

化的环境问题, 低碳发展之路已经成为了当下的共识。作为负责任的大国, 我国明确提出“CO₂ 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, 这是我国基于推动构建人类命运共同体的责任担当和实现可持续发展的内在要求而做出的重大战略决策。此举展示了中国为应对全

收稿日期: 2024-07-07

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

球气候变化做出的新努力和新贡献,彰显了中国积极应对气候变化、走绿色低碳发展道路、推动全人类共同发展的坚定决心。

有色金属行业是国民经济的重要基础产业,因其高能耗高排放的特点,该行业也是我国碳排放减排的重点行业。其中,铅是蓄电池、电缆、合金、化工和冶金设备、建筑材料、汽车零部件等领域中的重要原料^[1-3],在我国经济发展中起着重要的作用。目前我国是全球最大的精炼铅的生产国和消费国,我国2022年的铅产量为781万t^[4],同比增长4%,其中,再生铅的产量为423.03万t,同比增加4.5%,再生铅产量占铅总产量的54.1%。其中铅酸蓄电池的铅消耗量约为680多万t,占铅总消耗量的87%以上。近10年来,铅电池市场年复合增长率在2%左右,预计在未来较长时间,铅电池市场仍将维持小幅的增长态势。

铅冶炼实现低碳转型对于保护环境、应对气候变化、节约资源、降低生产成本、提升竞争力以及履行社会责任等方面都具有重要意义。因此,低碳转型是铅冶炼未来发展的必然趋势。工业和信息化部、发改委和生态环境部三部门联合印发了《有色金属行业碳达峰实施方案》^[5],该方案提出了“十四五”期间的目标为有色金属产业结构、用能结构明显优化,低碳工艺研发应用取得重要进展,重点品种单位产品能耗、碳排放强度进一步降低,再生金属供应占比达到24%以上。该方案还提出了节能低碳技术的重点方向,其中铅锌的低碳技术包括液态高铅渣直接还原技术和以底吹为基础的富氧熔池熔炼技术等。

我国铅冶炼经历了技术引进、集成和再创新的过程,国内铅冶炼企业在提高生产效率、降低能耗和减少环境污染等方面取得了显著进展。一些先进的铅冶炼技术,如富氧底吹炉、液态高铅渣直接还原等在国内得到了推广应用^[6,7],此举有效提升了行业的技术水平和竞争力。然而,由于产业规模大、用电结构依赖火电等因素以及铅冶炼在减碳技术、循环经济体系等方面仍存在瓶颈等原因,铅冶炼仍面临着碳达峰、碳减排的艰巨任务。

1 铅冶炼碳排放特点

铅冶炼行业作为传统重工业的重要组成部分,其生产链条从铅矿的勘探、开采,到后续的冶炼加工,直至最终铅材产品的制造与应用,每一个环节都刻有着高能耗与高碳排的特征。这一过程不仅是对自

然资源的深度挖掘,也是对能源的巨大消耗和对环境承载能力的严峻考验。

在铅矿的开采阶段,大型机械设备和爆破技术的使用离不开电力的持续供应,而电力生产本身往往依赖于化石燃料如煤炭、天然气等,这些能源的燃烧直接导致了CO₂、硫化物、NO_x等气体及有害物质的排放,对大气环境构成威胁。此外,开采过程中还可能引发水土流失、生态破坏等环境问题。

对于冶炼环节,这一阶段的能源消耗更是达到了整个铅冶炼行业链的顶峰。高温熔炼、精炼提纯等工艺不仅需要巨大的热能支持,还伴随着复杂的化学反应,这些过程无一不消耗着大量的能源。特别是传统冶炼方法,其效率低下、能耗高、污染重的弊端尤为突出,成为铅行业减碳工作亟待攻克的难关。随着技术的进步,虽然部分冶炼企业开始采用更先进的设备和技术,如富氧熔炼、余热回收等以提高能源利用效率并减少排放,但整体而言,铅冶炼行业的碳排放量在有色金属行业中仍占据显著位置,且随着全球经济的增长和铅需求的增加,这一趋势在短期内难以逆转。

总体上,铅冶炼行业的能源消耗量大、碳排放量高。在铅矿的开采、冶炼以及铅材产品的制造过程中,需要大量的能源,如电力、煤、天然气等。这些能源的消耗不仅导致大量CO₂等温室气体的排放,而且会对环境造成污染。在能源消耗方面,铅产业的能源消耗主要集中在冶炼环节,占整个产业链能源消耗的大部分。在碳排放方面,铅冶炼的碳排放量在有色金属行业中占比较大,且呈现出逐年增长的趋势,因此铅冶炼也是铅行业减碳的重点环节。

2 铅冶炼的双碳目标与关键技术

对于铅冶炼,我们建议设定包括近期(2024—2030)、中期(2030—2040)、远期(2040—2050)三个阶段的双碳目标,如表1所示。

为了实现铅冶炼的碳达峰,近期发展目标设定铅的产量于2030年达峰,其中,再生铅的比重大于60%。技术方面,三连炉覆盖率大于30%,吨粗铅能耗降低15%(小于210 kgce,单位kgce指千克标准煤的热值,下同)。废铅膏湿法再生技术突破,再生铅能耗小于120 kgce。此外,CCUS技术实现工业试验。为了实现铅冶炼的碳中和,需逐步推进实现中期和远期目标。中期目标实现再生铅比重大于70%。三连炉覆盖率大于70%,吨粗铅能耗降低30%(小于

表1 铅冶炼的双碳发展目标和关键技术

Table 1 Dual carbon development goals and key technologies for lead smelting

	近期(2024—2030)	中期(2030—2040)	远期(2040—2050)
发展目标	1. 再生铅比重大于60%； 2. 三连炉覆盖率大于30%，吨粗铅能耗降低15%（小于210 kgce）； 3. 废铅膏湿法再生技术突破，再生铅能耗小于120 kgce； 4. CCUS技术工业试验。	1. 再生铅比重大于70%； 2. 三连炉覆盖率大于70%，吨粗铅能耗降低30%（小于170 kgce）； 3. 废铅膏湿法再生技术推广应用，再生铅能耗降低20%（小于100 kgce）； 4. CCUS技术在铅冶炼行业得到工业化应用。	1. 再生铅比重大于80%； 2. 能耗进一步降低15%~20%； 3. CCUS技术工业推广，零碳甚至负碳排放。
关键技术	1. 三连炉一步炼铅技术与装备； 2. 铅锌冶炼过程三废源头减控技术； 3. 废铅膏短流程清洁低碳再生技术与装备； 4. 复杂铅锌固废协同冶炼技术与装备。	1. 有色冶金高效节能电液控制集成技术； 2. 铜铅锌搭配冶炼与自循环技术。	1. 基于有机胺法的燃烧后CO ₂ 捕获技术； 2. CO ₂ 矿化磷石膏制硫酸铵和碳酸钙。

170 kgce)。废铅膏湿法再生技术推广应用，再生铅能耗降低20%（小于100 kgce）；CCUS技术在铅冶炼行业得到工业化应用。远期目标实现再生铅比重大于80%，能耗进一步降低15%~20%。此外，CCUS技术工业得到推广，工厂实现零碳甚至负碳排放。

值得指出的是，针对铅冶炼行业的双碳发展目标与关键技术设置合理性，我们进行了如下分析：

1)铜铅锌搭配冶炼与自循环技术。铜、铅、锌作为重要的有色金属，常以伴生矿的形式存在于矿石中。通过实施铜铅锌搭配冶炼与自循环技术，可以实现多金属的同时提取，从而有效地减少单一金属在冶炼过程中的资源浪费。这种搭配冶炼技术能够根据原料中各金属的含量和性质灵活调整冶炼工艺，实现资源的最优利用。此外，自循环技术的应用则使得废水、废渣等得以资源化利用，进一步提升资源利用效率。该技术的发展不仅降低了对高品质原生矿的依赖，还提高了低品位矿石和尾矿的利用率。进一步地，通过优化冶炼流程，搭配冶炼可显著降低能耗并减少污染，有助于推进绿色发展。自循环技术在降低废水、废气排放的同时，还减少了废弃物处理所需的能耗，克服了传统冶炼过程对环境造成的严重污染问题。

2)CCUS技术在铅冶炼行业得到工业化应用。CCUS技术，全称Carbon Capture, Utilization and Storage，即碳捕获、利用与封存技术，是应对全球气候变化的关键技术之一。铅冶炼行业设置CCUS技术的目标，可将冶炼过程中排放的CO₂捕集并且进行利用和封存，从而减少铅冶炼行业的碳排放。通过设置三个阶段目标逐步实现CCUS技术的工业试验，工业化应用和工业推广，最终实现铅冶炼行业的双碳目标。

3)三连炉覆盖率、能耗指标和关键技术。三连炉工艺作为铅冶炼最高水平之一的技术，综合能耗较低(230 kgce/t)，通过分阶段的推广，提高该工艺

的覆盖率，可助力双碳目标的实现。此外，通过技术创新来降低综合能耗，逐步将综合能耗逐步降低到2030年的210 kgce/t、2040年的170 kgce/t以及到2050年进一步降低，符合技术创新发展的客观规律，又是实现双碳目标的需要。

4)废铅膏湿法再生技术与装备。与原生铅的生产相比，每吨再生铅的能耗可减少20%~50%，节水60%以上，固体废物排放减少80%，SO₂排放减少70%。此外，相较于火法，湿法工艺在能耗方面更低。因此，研发和推广废铅膏湿法再生技术，可有效降低铅冶炼的能源消耗，减少碳排放，助力双碳目标的实现。

要实现铅冶炼行业的碳达峰和碳中和，首先需要综合考虑生产、能源利用、技术创新、政策引导等多方面因素。在生产方面，铅冶炼行业可以采用清洁、高效的生产工艺，加强工艺控制，降低能耗，提高资源利用率，并推广先进的节能减排技术和设备，以降低CO₂等温室气体排放。其次，改善能源结构，引入清洁能源替代传统的化石能源，同时提高能源利用效率，通过技术改造和设备更新来减少能源消耗，减缓温室气体排放。此外，政策引导也是关键。各级政府可以出台相关政策，如碳排放权交易制度、税收优惠政策、环境保护奖励等，以激励企业减少碳排放，提高能效。同时，建立完善的监管体系，加强对碳排放的监测和处罚力度，推动企业主动减排。行业间的合作也至关重要，铅产业应加强与其他相关产业的协作，共同推进碳排放减少和资源循环利用，并加强国际合作，学习借鉴其他国家的先进经验，促进全球范围内的碳减排和低碳发展。

针对我国铅冶炼行业特色，实现双碳目标可通过技术创新降低单位铅产品的能耗，推广低碳冶炼技术如三连炉技术等，提高再生铅比例，实现CCUS在铅冶炼行业的应用。通过这些方法逐步降低铅冶炼的碳排放，并在2030年前追赶产能扩展导致的碳排

放增长速率,力争在2060年实现碳中和目标。这需要铅冶炼行业不断创新、合作共赢,积极响应国家碳减排政策,推动行业向更加清洁、高效、低碳的方向转型发展。

3 铅冶炼技术发展

3.1 铅冶炼技术

铅冶炼中占主导的工艺是传统的烧结焙烧—鼓风炉还原工艺,该工艺具有能耗高、环境污染严重、烧结 SO_2 浓度低,制酸困难等问题。因不符合环保和节能降耗的要求,单独的烧结炉—鼓风炉炼铅、竖罐炼铅等技术已被纳入产业结构调整淘汰类工艺。近年来,国内外研发多项炼铅工艺先后应用于大型工业化生产。其中具有代表性的炼铅工艺有:

1) 基夫赛特法(Kivcet法)

Kivcet法^[8-10]是20世纪60年代由苏联有色金属科学研究院开发的一种以闪速熔炼为主的直接炼铅工艺。该工艺的核心是基夫赛特炉,该工艺的优势是连续稳定,设备耐用,原料适应广,尾气环保达标,烟尘率低至5%,铅回收率高达97%~98%,基夫赛特法的粗铅综合能耗指标约为350 kgce/t。缺点是设备复杂、耗电量较大。

2) 氧气底吹炼铅法(QSL法)

QSL法^[11]是将硫化铅精矿与熔剂组成的炉料置于一个具有氧气底吹的卧式回转反应器内进行吹氧熔炼和喷吹粉煤还原初渣直接产出粗铅。该方法具有环保优势,粉尘和烟气对环境的污染程度较传统炼铅法轻得多,能充分利用化学反应热,煤耗低,余热锅炉产出的蒸汽相当于制氧站能耗的70%~80%,综合能耗也较传统炼铅法低(综合能耗指标约为380 kgce/t粗铅),经济效益好。而且因工艺流程短,生产费用和建设投资均比传统炼铅法低。

3) 卡尔多炼铅法(Kaldo法)

Kaldo法^[12]由瑞典波利顿(Boliden)公司开发,主要基于氧气冶金原理,在顶吹转炉上实现铅精矿的高效冶炼。该方法具有原料适应性强、冶炼效率高、能耗相对较低、环保性能较好等优点,其综合能耗指标约为360 kgce/t粗铅。

4) 奥斯麦特熔炼法/艾萨熔炼法(Ausmelt/Isasmelt法)

Ausmelt法^[13]是由澳大利亚的Ausmelt公司开发的一种顶吹浸没熔炼技术。Isasmelt法^[14]是由澳大利亚的芒特艾萨矿业公司(Mount Isa Mines

Limited)开发的一种先进熔池熔炼工艺。该方法以其高效、环保、操作灵活、原料适用性强等特性而闻名,其综合能耗指标约为490 kgce/t粗铅。缺点是喷枪的寿命短、维护成本高。

5) 水口山炼铅法(SKS法)

SKS法^[15]是北京有色冶金设计研究院在20世纪90年代开发的一种先进的炼铅工艺,其核心设备是氧气底吹熔炼炉。与传统工艺相比,该方法综合能耗更低(约为499 kgce/t粗铅),生产成本更低,环保效果更好,且具有较强的原料适应性。SKS法三道主要生产工序的能耗分别为:氧气底吹工序为125.967 kgce/t铅,鼓风炉工序为429.476 kgce/t铅,烟化炉工序为1179.47 kgce/t ZnO ^[16]。研究^[17]表明SKS炼铅法企业的系统节能潜力为74.75 kgce/t,碳减排潜力为194.35 kg CO_2 /t。

6) 旋涡闪速炼铅工艺

旋涡闪速炼铅工艺^[18]是一种先进的直接炼铅技术,该工艺的核心设备是中心柱闪速熔炼炉,可高效处理铅品位为20%~70%的炉料,产出粗铅品位不低于98.30%,全系统硫固化率超99%,渣含铅低于3.0%,铅回收率超过98%,粗铅能耗控制在280 kgce/t以下。

表2列出了直接炼铅工艺的熔炼方式、熔炼设备的技术特点和能耗指标情况。与单位粗铅生产所需综合能耗为635 kgce/t的烧结—鼓风炉工艺^[19]相比较,表2中列出的几种炼铅方法的综合能耗更低。Isasmelt法、Ausmelt法和SKS法的能耗指标为490~499 kgce/t, Kivcet法、QSL法以及Kaldo法的能耗更低,为350~380 kgce/t,而旋涡闪速炼铅法的能耗最低,为280 kgce/t,达到了国家铅冶炼的能耗限额值(330 kgce/t)。

为顺应环保、低碳及节能趋势,国内大型冶炼厂引入的三种液态高铅渣直接还原工艺为:

1) 底吹还原工艺:铅精矿、石灰石与石英砂混合配料后,进入氧气底吹炉熔炼,产出粗铅、液态渣及含尘烟气。液态高铅渣随即进入卧式还原炉,通过底部喷枪引入天然气与氧气,上部加料口补充煤粒与石子。天然气与煤粒的部分氧化燃烧供热,驱动还原反应,气体搅拌促进传质,高效实现高铅渣的还原精炼过程。

2) 侧吹还原工艺:熔炼炉产出的熔融态高铅渣由排放口放出通过溜槽加入到侧吹还原炉中,还原粒煤、熔剂经配料由冷料口加入。还原炉的两侧设

表2 直接炼铅工艺技术特点与能耗指标^[8,18]Table 2 Technical characteristics and energy consumption indicators of direct lead smelting process^[8,18]

项目	Kivcet法	QSL法	Kaldo法	Isasmelt法	Ausmelt法	SKS法	旋涡闪速炼铅法
熔炼方式	工业纯氧 闪速熔炼 焦滤层还原	工业纯氧 底吹 熔池熔炼 粉煤为还原剂	富氧 顶吹 闪速熔炼 焦炭为还原剂	富氧 顶吹 熔池熔炼 焦炭作还原剂	富氧 顶吹 熔池熔炼 硫化铅精矿作还原剂	富氧 底吹 熔池熔炼 焦炭为还原剂	富氧 悬浮熔炼 氧化铅与硫化铅交 互反应和还原反应
熔炼设备	固定式 KIVCET炉 固定喷嘴	可转动 QSL炉 固定喷嘴	转动 卡尔多炉 活动喷枪	固定式 富氧顶吹炉 活动喷枪	固定式 富氧顶吹炉 活动喷枪	固定式 氧气底吹炉 固定喷嘴	中心柱闪速熔炼炉 固定喷嘴
单位粗铅综合能 耗/(kgce·t ⁻¹)	350	380	360	490	490	499	280

有煤气和工业氧喷枪为还原炉提供热源，还原炉的下部侧墙设铅虹吸放出口，还原铅由虹吸口排出转送精炼车间。炉渣经还原炉端墙下部的排渣口排除送烟化炉回收锌。侧吹还原过程中产生的烟气，经余热锅炉回收余热，进一步降温后的烟气进入布袋收尘器进行除尘处理，废气送脱硫系统或排空。

3)三连炉工艺：该工艺采用氧化炉-还原炉-烟化炉三炉一体化设计，通过两道连接溜槽无缝串联，实现热渣直流，高效利用液态高铅渣与还原炉渣的潜热。

依据国家发改委发布的温室气体排放核算方法，测算得到三种铅冶炼直接还原技术工艺的综合能耗及碳排放如表3所示，三种工艺的综合能耗达到了国家标准(GB 21250—2014)中规定的先进值355 kgce·t⁻¹，且碳排放均低于700 kgCO₂·t⁻¹。

表3 铅冶炼直接还原工艺综合能耗及碳排放^[20]Table 3 Comprehensive energy consumption and carbon emissions of direct reduction process in lead smelting^[20]

项目	底吹还原	侧吹还原	三连炉
综合能耗/(kgce·t ⁻¹)	276	230	230
单位碳排放/(kgCO ₂ ·t ⁻¹)	681.11	567.59	567.59

3.2 铅冶炼再生处理技术

铅具有较好的循环再生性，且与原生铅的生产相比，每吨再生铅的能耗可减少20%~50%，节水60%以上，固体废物排放减少80%，SO₂排放减少70%^[21]。随着精铅消耗量的不断增加，再生铅产量所占的比例也呈上升趋势。发达国家的再生铅产量可达其总产量的60%以上，例如美国的再生铅比例达到了90%以上。与发达国家相比，我国仍存在再生资源利用率低且回收技术落后的现象。

铅再生材料主要为废铅酸电池，通常包括废电解液(11%~30%)、铅或铅合金板栅(24%~30%)、废铅膏(30%~40%)及有机物(22%~30%)4个部分。废铅酸电池经过拆解分选后，各部分可进一步处理回收。其中，废铅膏是铅氧化物等电极材料与硫酸电解

液充放电后所形成的浆状物质，其主要成分为PbO₂、PbO、PbSO₄和少量金属Pb。由于铅膏中含有不同价态的铅氧化物和硫酸盐，其处理难度大，因此铅膏的处理与回收通常是废铅酸电池循环利用的关键环节。

废铅膏的处理工艺分为火法和湿法，而火法冶金是当前废旧铅膏回收的主流技术。目前，废旧铅膏回收的工艺主要有火法直接熔炼、铅再生湿法工艺与湿法预处理+火法联用工艺。

3.2.1 火法直接熔炼

直接熔炼法^[22]是将废旧铅酸电池的拆解料置于熔炼炉内于1 000℃以上的高温分解脱硫，然后进行还原熔炼获得粗铅。目前国内主要包括侧吹、底吹以及顶吹熔池熔炼等先进技术。相比于传统的鼓风炉熔炼，这些先进的熔炼工艺可以将铅的综合回收率从90%提高到98%左右，实现明显的碳减排效果，烟气排放量显著降低。

3.2.2 火铅再生湿法工艺

火法工艺具有原料适应性强，产能大以及生产效率高等优势，但有较大的铅尘和SO₂烟气排放风险，以及较高的能源消耗(吨铅能耗180~220 kgce)和CO₂排放。中小规模的再生铅生产企业自身难以配套大型火法冶炼设备，因此湿法工艺成为更好的选择。

湿法工艺利用湿化学方法，通过溶液中的化学反应将废铅膏中的铅及其他有价金属转化为可溶性化合物，进而通过沉淀、电解或其他方法实现分离和回收。目前，铅膏等铅基固废湿法短流程再生技术成为国内外实验室研究的热点。其中具有代表性的工艺有^[23-25]：

1) 脱硫转化—还原浸出—电积工艺

最具代表性的是RSR和CX-EW工艺，RSR工艺采用碳酸铵作为脱硫剂，亚硫酸盐作为还原剂，并利用质量分数为20%的H₂SiF₆或HBF₄溶液作为浸出剂。CX-EW工艺则是以碳酸钠为脱硫剂，以双氧水

或金属铅为还原剂。铅膏经碳酸铵脱硫成碳酸铅与硫酸铵。碳酸铅在 20% H_2SiF_6 或 HBF_4 酸性溶液中溶解并释放 CO_2 ，电解后析出金属铅。此技术优点是金属回收率高，但存在脱硫转化试剂消耗大、成本高，且副产物经济性不佳等缺点。

2) 硫化转化—氧化浸出—电积工艺

该工艺是以氟硼酸盐为基础的湿法炼铅技术，首先将铅膏进行硫化处理，随后利用 $\text{Fe}(\text{BF}_4)_3$ 的强氧化性在 HBF_4 溶液中促使铅转化为可溶性的 $\text{Pb}(\text{BF}_4)_3$ 。随之通过隔膜电解技术，从该溶液中提取并生产出高纯度的电解铅。

3) 氯盐浸出—电积工艺

氯盐浸出—电积工艺简化了传统流程，无需脱硫或硫化，在高温 $\text{HCl}-\text{NaCl}$ 体系中直接将铅转化为可溶性氯化铅。之后，利用隔膜电解技术高效制备金属铅。此工艺虽流程精简，但高浓度的氯盐体系带来了强烈的腐蚀性，成为其工业化应用的主要瓶颈。

4) 固相电解

固相电解还原技术是由中国科学院过程工程研究所(原化工冶金研究所)研发，该方法将铅膏均匀涂覆于阴极板表面，随后置于充满 NaOH 溶液的电解槽内。在电解过程中，铅膏中的各类铅化合物接受电子，发生还原反应，以金属形态沉积于阴极板上，而阳极则相应地产出氧气，实现了高效的铅回收与环保的电解过程。

3.2.3 湿法预处理+火法联用

预脱硫转化—熔炼工艺^[26]是先将铅膏通过脱硫转化得到碳酸铅，再将碳酸铅置于回转炉或反射炉熔炼得到粗铅。国外发达国家的铅再生企业主要采用该方法，该工艺可以实现连续熔炼，并具有热利用率高、密封性好、熔炼时间短、操作简单等优点。该工艺也存在对技术控制要求高，炉衬使用寿命短，预脱硫的辅助材料消耗大和脱硫成本高等问题。

3.3 铅冶炼减碳技术发展趋势

铅冶炼行业正积极采纳智能化与远程控制、大数据分析、人工智能辅助决策等尖端技术，力求实现生产流程的全面数字化、自动化与智能化革新。这一系列变革在大幅提升生产效率与作业安全性的同时，也有效促进了能源消耗的减少与碳排放的降低。固废资源化技术、生物浸出技术以及氢气作为新型还原剂的应用，正进一步加速铅冶炼行业的绿色化与低碳化进程。与此同时，高效节能设备与技术，诸如节能型冶炼炉和余热回收系统等，也为

铅冶炼行业的持续健康发展注入了强劲动力。以下对铅冶炼减碳技术发展趋势进行总结并对其碳减排的贡献水平进行评估：

1) 数字化、智能化及人工智能技术等前沿技术

数字化、智能化及人工智能技术^[27]在铅冶炼行业中的应用，正逐步改变着传统的生产模式，通过实时监控、自动化控制、智能决策等手段，不仅显著提高了生产效率与产品质量，还优化了管理流程，降低了能耗与成本，为铅冶炼行业的转型升级与可持续发展注入了新的活力。这些技术的应用显著提高了能源利用效率。根据工业和信息化部对智能制造试点示范项目的数据分析^[28]，智能化改造后，能源利用率平均提升了 16.1%，最高甚至达到了 1.25 倍。这一数据表明，通过数字化、智能化的手段，铅冶炼行业能够更有效地利用能源，从而减少碳排放。这些技术还优化了生产流程，降低了能耗。此外，数字化技术还帮助企业建立了全面的数据监测和分析系统，实时掌握冶炼过程中的能耗和排放情况。这种数据驱动的管理方式，有助于企业更好地制定和执行低碳冶炼策略，进一步降低碳排放。

2) 固废资源化技术

通过研发和推广高效的固废资源化技术，可以有效地将铅冶炼过程中产生的废渣、废气等转化为有价值的资源，实现资源的循环利用，并显著减少固废排放和环境污染。固废资源化技术包括液态高铅渣直接还原技术、废渣综合回收技术、烟尘治理与回收技术等。近年来，液态高铅渣直接还原技术在我国实现了商业化应用，使我国自主创新的炼铅工艺更趋于完善和提升。这一技术能够高效地从废渣中提取铅，提高资源回收率。研究^[29]表明，回收处理 1 t 废铅酸蓄电池的碳减排效益为 923.1 kgCO_2 当量 (kgCO_2eq)。在集中收集与跨区域转运制度实施后，这一数值可能提高到 994.44 或 953.53 $\text{kgCO}_2\text{eq} \cdot \text{t}^{-1}$ 。研究表明^[30]，废铅蓄电池回收企业的单位产品综合能耗(当量能耗)为 98.35 $\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

3) 生物浸出技术

生物浸出技术进行金属提取和净化减少化学试剂的使用，降低能耗和污染^[31]。生物浸出技术具有环保、节能、高效、低成本等优点。该技术不需要消耗大量的能源，降低了开采和治理成本，同时减少了碳排放，对环境影响较小，有利于实现绿色、可持续的金属开采和重金属污染治理。生物浸出技术通常在常温常压下进行，不需要高温高压条件，因此能源

消耗相对较低。相比之下,传统的火法冶炼铅需要消耗大量的能源来加热和熔化矿石,从而产生大量的碳排放。生物浸出技术的能源消耗仅为传统火法冶炼的几分之一到几十分之一,具体数值取决于矿石类型、处理规模和操作条件等因素。

4) 氢气作为还原剂与清洁能源替代

通过替代传统的化石燃料还原剂,氢气不仅能够实现冶炼过程中 CO_2 的零排放,显著降低铅冶炼的碳足迹,还能提升铅的提取效率,减少尾渣中的铅含量,并有效回收其他有价值的金属元素,从而实现了资源的高效、清洁与循环利用。参考钢铁冶金实验数据^[32],高炉富氢还原冶金在一定程度上能够通过加快炉料还原,减少碳排放,碳减排幅度可达10%~20%。而气基直接还原竖炉工艺,利用 H_2 、 CO 混合气体将铁矿石转化为直接还原铁,其 CO_2 排放量可减少50%以上。考虑到氢气在钢铁冶炼中的显著减碳效果,以及铅冶炼过程与钢铁冶炼的相似性,可以合理推测,氢气在铅冶炼领域同样具有显著的减碳潜力。太阳能和风能作为可再生能源,具有清洁、无污染的特点,是铅冶炼能源替代的重要方向。由于化石能源燃烧产生的 CO_2 排放占总排放量比例较高,可高达90%,因此,清洁能源替代可大幅降低铅冶炼过程的碳排放。

5) 高效节能设备和技术

选择具有高效能、低能耗特点的生产设备,节能型冶炼炉等。这些设备在设计和制造过程中采用了先进的节能技术,能够显著降低能源消耗。采用先进的冶炼炉,如液态高铅渣直接还原炼铅炉,相比传统鼓风炉,能耗指标可降低至60%, SO_2 排放浓度降低至10%, CO_2 排放量减少至传统工艺的25%^[33]。

4 结语

铅冶炼行业作为国民经济的重要支柱,其低碳转型不仅是响应国家“双碳”目标的战略要求,也是实现行业可持续发展、提升国际竞争力的关键路径。通过深入分析铅冶炼的碳排放特点,明确双碳目标与关键技术,铅冶炼行业正逐步迈向绿色化、低碳化的新阶段。技术创新、低碳冶炼技术的推广应用、再生铅比例的持续提高以及CCUS技术的工业化应用,将成为铅冶炼行业减排的关键驱动力。同时,智能化、远程控制与大数据分析等先进技术的融合应用,不仅提升了生产效率与安全性,也为碳减排提供了新的可能。未来,通过各级政府对相关政策如铅冶炼行

业碳排放权交易制度及碳排放监管、处罚的引导,鼓励铅冶炼行业应继续加大技术研发力度,推广高效节能设备与技术,探索固废资源化、生物浸出及氢气还原等前沿技术的商业化应用,以期在2030年前有效控制碳排放增速实现碳达峰,并在2060年前实现碳中和的宏伟目标。铅冶炼行业的低碳转型之路虽长且艰,但每一步努力都将为构建人类命运共同体、促进全球可持续发展贡献重要力量。

参考文献

- [1] 李阿欣,王再红,闫娜,等. 铅酸蓄电池用火法精铅和电解铅综述[J]. 蓄电池, 2023, 60(5): 236-239, 250.
LI A X, WANG Z H, YAN N, et al. Review of pyro-refined lead and electrolytic lead for lead-acid batteries[J]. Chinese LABAT Man, 2023, 60(5): 236-239, 250.
- [2] 刘诚,苟海鹏,陈宋璇,等. 铅炭电池技术发展及储能应用的思考[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(3): 1-6.
LIU C, GOU H P, CHEN S X, et al. Advancements in lead-carbon battery technology and strategic considerations for energy storage applications[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(3): 1-6.
- [3] 陈继园,李璐,李玉章,等. 电沉积锌用铅基合金电化学腐蚀性性能研究[J]. 云南冶金, 2023, 52(1): 100-105.
CHEN J Y, LI L, LI Y Z, et al. Performance study on electrochemistry corrosivity of lead-based alloys for electrodeposited zinc[J]. Yunnan Metallurgy, 2023, 52(1): 100-105.
- [4] 王沛. 基于ANSYS的蓄热式熔铅炉供气管道升压过程仿真分析[J]. 有色设备, 2023, 37(3): 25-30.
WANG P. Numerical simulation for regenerative lead melting furnace gas supply pipeline system pressure rising process based on ANSYS[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2023, 37(3): 25-30.
- [5] 何珺.《有色金属行业碳达峰实施方案》发布[J]. 今日制造与升级, 2022(11): 10-12.
HE J. The Implementation Plan for Carbon Peaking in the Nonferrous Metals Industry has been released[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2022(11): 10-12.
- [6] 安剑刚. 富氧底吹炼铅技术的工业实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(12): 4-7.
AN J G. Plant practice of oxygen enrichment bottom blowing process for lead smelting[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(12): 4-7.
- [7] 杜新玲,王红伟,朱喜霞. 液态高铅渣直接还原新技术

- 研究[J]. 济源职业技术学院学报, 2015, 14(2): 9-12.
- DU X L, WANG H W, ZHU X X. Study on direct reduction new technology of liquid rich-lead slag[J]. Journal of Jiyuan Vocational and Technical, 2015, 14(2): 9-12.
- [8] 周志平. 基夫赛特炼铅技术的发展及应用[J]. 山西冶金, 2014, 37(2): 7-10.
- ZHOU Z P. The Development and application of Kivcet technology of lead smelting[J]. Shanxi Metallurgy, 2014, 37(2): 7-10.
- [9] 叶国萍. 基夫赛特炼铅法[J]. 有色金属(冶炼部分), 2000(4): 20-24.
- YE G P. Kivcet lead smelting method[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2000 (4): 20-24.
- [10] 孙月强. 哈萨克斯坦基夫赛特冶炼技术考察报告[J]. 有色金属(冶炼部分), 1994(2): 35-38.
- SUN Y Q. Investigation report on Kivcet smelting technology in kazakhstan[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 1994(2): 35-38.
- [11] 李贵, 李林波, 赵振波, 等. 氧气底吹炼铅工艺比较[J]. 中国有色金属, 2012(6): 66-67.
- LI G, LI L B, ZHAO Z B, et al. Comparison of oxygen bottom blowing lead smelting process[J]. China Nonferrous Metals, 2012 (6): 66-67.
- [12] 许冬云. 卡尔多炉炼铅生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2006(6): 11-12.
- XU D Y. The practice of lead smelting in Kaldo furnace[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2006(6): 11-12.
- [13] 单永得, 孙彦文, 吕南, 等. Ausmelt炉电炉渣含铜等离子贫化探索[J]. 矿冶, 2021, 30(6): 93-97.
- SHAN Y D, SUN Y W, LYU N, et al. Investigation on plasma dilution of Cu-containing slag in Ausmelt furnace[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(6): 93-97.
- [14] 甘文, 张鑫, 舒波, 等. 艾萨法炼铜过程中砷的分布及回收技术现状[J]. 矿冶, 2021, 30(4): 102-110.
- GAN W, ZHANG X, SHU B, et al. Distribution and recovery technology status of arsenic during copper smelting by Isasmelt process[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(4): 102-110.
- [15] 余国徽, 唐志波, 阳自霖, 等. SKS炼铅法过程中钠、钾的平衡与控制[J]. 湖南有色金属, 2022, 38(6): 36-38.
- SHE G H, TANG Z B, YANG Z L, et al. The balance and control of sodium and potassium in SKS lead smelting process[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2022, 38(6): 36-38.
- [16] 杨珂利. SKS炼铅系统的能耗及环境负荷分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- YANG K L. Energy consumption and environment load analysis for SKS lead smelting system[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [17] 王洪才. 基于SKS炼铅法能耗系统的分析研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- WANG H C. Research and analysis on energy consumption system based on SKS lead smelting process[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [18] 汪金良, 吴艳新, 张文海. 铅冶炼技术的发展现状及旋涡闪速炼铅工艺[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(1): 14-18.
- WANG J L, WU Y X, ZHANG W H. Development status of lead smelting technology and the lead vortex flash smelting process[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011, 2(1): 14-18.
- [19] 姚素平. 旋涡柱连续炼铅工艺特点及产业化应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2010, 31(3): 8-10.
- YAO S P. Characteristics of continuous lead smelting process via swirling column and industrial application[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2010, 31(3): 8-10.
- [20] 我的有色. 碳中和背景下铅行业碳排放水平测算[EB/OL]. 2021-05-29. <https://www.mymetal.net/21/0529/18/8B54D84F5527E007.html>.
- Mymetal.net. Measurement of carbon emissions in the lead industry under the background of carbon neutrality[EB/OL]. 2021-05-29. <https://www.mymetal.net/21/0529/18/8B54D84F5527E007.html>.
- [21] 郭朝先, 程国江. 我国有色金属工业发展回顾与转型升级研究[J]. 学习与实践, 2011(6): 5-13.
- GUO C X, CHENG G J. Review of the development and research on transformation and upgrading of China's nonferrous metals industry[J]. Study and Practice, 2011(6): 5-13.
- [22] 孟凡中, 叶国萍. 铅精矿直接熔炼技术[J]. 有色金属(冶炼部分), 1988(6): 51-54.
- MENG F Z, YE G P. Direct smelting technology for lead concentrate[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 1988 (6): 51-54.
- [23] 吴卫国, 宋言. 中国铅冶炼工业技术创新与应用实践[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(2): 7-13.
- WU W G, SONG Y. Industrial technological innovation and application practice of lead smelting in China[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(2): 7-13.
- [24] 王海北. 我国二次资源循环利用技术现状与发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(9): 1-11, 17.

- WANG H B. Status and prospect on recycling technologies of secondary resources in China[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2019(9): 1-11, 17.
- [25] 陈亚州, 汤伟, 吴艳新, 等. 国内外再生铅技术的现状及发展趋势[J]. *中国有色冶金*, 2017, 46(3): 17-22.
- CHEN Y Z, TANG W, WU Y X, et al. Present situation and development trend of secondary lead process at home and abroad[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2017, 46(3): 17-22.
- [26] 邹伟钊, 黄妍, 张俊丰, 等. 废铅酸蓄电池铅膏铈法预脱硫过程的动力学分析[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(3): 772-779.
- ZOU W Z, HUANG Y, ZHANG J F, et al. Kinetic analysis of pre-desulfurization process with ammonium bicarbonate method from lead paste in waste lead-acid batteries[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(3): 772-779.
- [27] 张学友, 王海北, MA Hao. 铜产业的双碳目标实现路径与方法[J]. *矿冶*, 2024, 33(3): 456-465.
- ZHANG X Y, WANG H B, MA H. Paths and methods for achieving carbon peaking and carbon neutrality in the copper industry[J]. *Mining and Metallurgy*, 2024, 33(3): 456-465.
- [28] “中国305个智能制造示范项目 生产效率平均提升37.6%.” 中国新闻网, 2018-12-11, <https://www.chinanews.com.cn/m/cj/2018/12-11/8698852.shtml>.
- “The average production efficiency of 305 intelligent manufacturing demonstration projects in China has increased by 37. 6%.” *Chinanews.com*, 2018-12-11, <https://www.chinanews.com.cn/m/cj/2018/12-11/8698852.shtml>.
- [29] 陈巧, 宋小龙, 李建西, 等. 集中收集和跨区域转运制度下废铅酸蓄电池物质流过程与碳减排效益分析——以贵州省为例[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(12): 4139-4148.
- CHEN Q, SONG X L, LI J X, et al. Material flow and carbon reduction benefit of spent lead-acid batteries under centralized collection and trans-regional transport system: Take Guizhou Province as an example[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(12): 4139-4148.
- [30] 周聪, 郭剑波, 杨春明, 等. 废铅蓄电池回收的节能降碳案例分析[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(10): 3469-3477.
- CHOU C, GUO J B, YANG C M, et al. Analysis of energy conservation and carbon emission reduction in waste lead-acid battery recycling[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(10): 3469-3477.
- [31] 尹升华, 吴爱祥. 微生物浸出过程溶质迁移及其影响因素研究[J]. *矿冶*, 2008, 17(1): 21-25, 44.
- YIN S H, WU A C. Study on the solute transportation of bioleaching process and its influential factors[J]. *Mining and Metallurgy*, 2008, 17(1): 21-25, 44.
- [32] “氢能十解”之五: 氢基能源应用拼图. 2024-02-26. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791921808892437438&wfr=spider&for=pc>.
- “Ten Solutions to Hydrogen Energy” Part 5: Puzzle of Hydrogen based Energy Applications. 2024-02-26. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791921808892437438&wfr=spider&for=pc>.
- [33] 于泳. 节能技术推动铅冶炼行业发展[EB/OL]. 中国新闻网. 2010-08-10. <https://www.chinanews.com/ny/2010/08-10/2457621.shtml>.
- YU Y. Energy saving technology promotes the development of lead smelting industry[EB/OL]. *Chinanews.com*, 2010-08-10. <https://www.chinanews.com/ny/2010/08-10/2457621.shtml>.

(上接第123页)

- reduced graphene oxide, γ -Fe₂O₃ and carbon fibers for excellent electromagnetic interference shielding in the X-band[J]. *Carbon*, 2012, 50(10): 3868-3875.
- [69] LI X, FENG J, DU Y, et al. One-pot synthesis of CoFe₂O₄/graphene oxide hybrids and their conversion into FeCo/graphene hybrids for lightweight and highly efficient microwave absorber[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(10): 5535-5546.
- [70] REN Y L, WU H Y, LU M M, et al. Quaternary nanocomposites consisting of graphene, Fe₃O₄@ Fe core@ shell, and ZnO nanoparticles: synthesis and excellent electromagnetic absorption properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(12): 6436-6442.