

引用格式:陈学刚,李明川,王云. 铅基物料冶炼技术发展趋势[J]. 有色设备,2024,38(5):3-10.

CHEN Xuegang, LI Mingchuan, WANG Yun. Development trend of lead based material smelting technology[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2024,38(5):3-10.

铅基物料冶炼技术发展趋势

陈学刚,李明川,王云

(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

[摘要]我国铅矿资源“贫矿多、富矿少”,海外铅精矿供应过剩量减少。铅冶炼过程存在多元素资源共生、原料品质波动大、冶炼工艺复杂等特点,目前我国有色金属冶炼行业处于机械化、电气化、自动化、信息化并存,不同企业之间呈现发展不平衡的状态。基于以上,本文介绍了铅矿资源(铅精矿和含铅废料)分布情况及铅主要用途,铅冶炼技术发展历程,并概述了当前主要铅基物料冶炼技术,如氧气底吹熔炼-熔融还原-富氧挥发炼铅技术、富氧浸没顶吹炼铅技术、硫酸铅渣湿法炼铅技术、侧吹浸没燃烧熔池熔炼处理再生铅资源技术、脆硫铅锑矿处理技术、铅阳极泥处理技术、铜浮渣及铅精渣处理技术、铅电解技术等,结合铅冶炼的工业生产场景,采用深度学习方法,建立熔炼炉的数据驱动模型,可实现对系统关键运行指标的实时预测与评估,推动铅冶炼技术的智能化、数字化,以迎接铅行业发展机遇与挑战。

[关键词] 铅冶炼; 固废; 浸没燃烧熔池; 智能化; 数字化; 数据模型

[中图分类号] TF812 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)05-0003-08

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.05.001

目前,我国铅储量世界排名第二,约为1580万t,占全球储量的17.8%^[1],但我国的铅矿“贫矿多、富矿少”,开采难度大。据报道,全球铅产量的87.6%用于铅酸蓄电池(LABs)的制备,LABs寿命短(一般为2~4年),导致LABs年均报废量居高不下^[2]。在一次铅资源过度开采和铅需求量居高不下的背景下,开发新的铅冶炼技术和铅基固废处理工艺,成为相关行业和企业面临的最大问题。未来,智能化、数字化连续高效炼铅工艺、铅基固废等二次铅资源的回收利用工艺将成为趋势。

1 铅矿资源分布及铅主要用途

1.1 铅矿资源分布

1.1.1 铅精矿分布情况

世界铅资源主要分布于澳大利亚、中国、俄罗

斯、秘鲁、墨西哥和美国。我国铅精矿进口主要来自俄罗斯、美国、土耳其、秘鲁、澳大利亚等国家。近10年来,全球铅矿产量情况如图1所示。

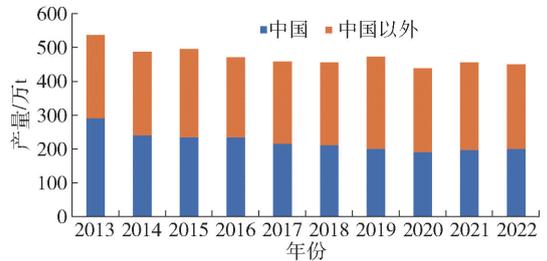


图1 2013—2022年全球铅精矿产量

Fig.1 Global lead concentrate production from 2013 to 2022

从全球来看,2020年全球铅矿产量较2019年下降34万t;2021年以来,随着海外矿山项目建设及投产步伐的加快,新建及扩建铅锌矿山产量逐步释放,带动全球铅精矿产量有所回升。从国内来看,受环保政策趋严的影响,近10年来铅精矿产量整体呈下滑态势,但同时安全环保政策对生产的影响也在边际减弱,大部分省份矿山产量逐渐趋于稳定,2020—2022年,国内铅产量出现小幅增长。2022年

[收稿日期] 2024-04-21

[作者简介] 陈学刚(1982—),男,山西太原人,正高级工程师,主要从事火法冶金和侧吹冶炼工艺的设计研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划-复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备-协同熔炼过程自适应在线智能优化控制系统(2019YFC1907305)。

中央经济工作会议和 2023 年政府工作报告都提到了要加强重要矿产资源的国内勘探开发和增储上产。在此背景下,预计国内铅精矿产量将继续出现恢复性增长。

1.1.2 含铅废料分布情况

我国含铅废料主要来源于各种机动车、电动自行车及工业领域的铅酸蓄电池。近年来,随着国内居民对电动自行车需求的提高和机动车市场的回暖,同时受 5G 基站建设及储能发展的提振,国内铅酸蓄电池产销旺盛,相应地,铅酸蓄电池报废量也迅速增长,为铅冶炼企业提供充足的再生铅原料。

再生铅快速发展的同时,国家对该领域的环保监管力度也在不断加大。2016 年 11 月,工信部制定了《再生铅行业规范条件》,规定废旧铅蓄电池预处理项目规模应在 10 万 t/a 以上,预处理-熔炼项目再生铅规模应在 6 万 t/a 以上,大幅提高了再生铅行业准入门槛。上述法规的实施,将持续压缩行业内非法处置废旧铅蓄电池企业的生存空间,有利于行业的健康发展,资质齐全、处理能力较强的企业因此受益。

1.1.3 精铅供给情况

2017—2022 年,国内精铅产量情况见表 1。

表 1 2017—2022 年国内精铅产量

Table 1 Domestic refined lead production from 2017 to 2022

年份	2017	2018	2019	2020	2021	2022
铅产量	422.6	439.4	512.7	644.30	736.50	781.10

由表 1 可知,近年来,中国精铅产量总体呈上涨态势。2021 年国内电动自行车和汽车产量同比增幅较大,带动铅蓄电池产量大幅增长,同时带动国内精铅产量的增长。未来,随着铅产品下游应用端市场的快速发展,精铅需求量和产量将进一步增长。

1.2 铅主要用途

金属铅广泛应用于铅酸蓄电池、铅材、铅弹等领域,其中铅酸蓄电池为主要应用,在中国消费占比接近 90%。铅酸蓄电池的消费主要包括电动自行车、电动三轮车、低速电动车的动力型铅酸蓄电池,汽车、摩托车的启动型铅酸蓄电池以及通信、UPS、储能等领域的固定电池。金属铅及铅蓄电池的主要用途如图 2 所示。

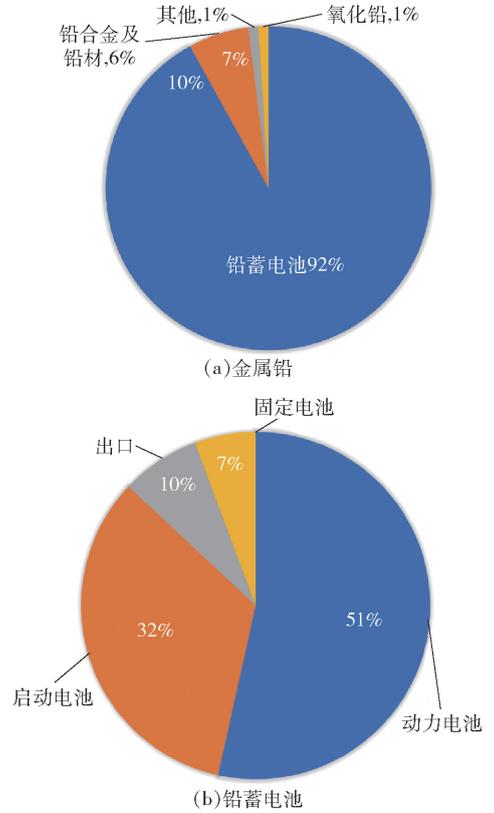


图 2 金属铅及铅蓄电池的主要用途

Fig. 2 Main uses of lead metal and lead-acid batteries

2 铅冶炼技术发展

铅精矿的冶炼主要包括粗炼环节和精炼环节。精炼环节目前国内普遍采用电解精炼工艺,而粗炼环节国内冶炼目前大致经历了三代演变。

1) 第一代冶炼工艺。传统铅精矿冶炼方法即烧结-鼓风炉熔炼法,使用烧结盘、烧结锅、烧结机等装置。该方法二氧化硫回收利用率较低,环保压力较大,且鼓风炉熔炼能耗较高,属于《产业结构调整指导目录》(2011 年版)规定的淘汰类工艺。

2) 第二代冶炼工艺。第二代铅冶炼工艺是 20 世纪 90 年代我国开发的一种直接炼铅方法,生产过程分富氧底吹炉氧化熔炼-鼓风炉还原熔炼-烟化提锌三段进行。与传统炼铅冶炼工艺相比,第二代铅冶炼工艺较好地解决了炼铅过程硫的利用和含铅粉尘的污染问题,同时生产能耗显著降低,但该工艺中氧化炉产出的液态高铅渣需冷却铸块,再送鼓风炉还原熔炼,存在一个热-冷-热的交替过程,造成热量损失。

3) 第三代冶炼工艺。第三代铅冶炼工艺是 2009

年左右国内多家铅冶炼企业为解决液态高铅渣冷却铸块造成的热量损失问题而开发的侧吹/底吹液态铅渣熔融还原技术,该技术取代了第二代技术中高能耗的鼓风炉还原技术。目前,行业内主要铅冶炼企业均采用第三代铅冶炼工艺。

3 铅基物料冶炼技术概述

当前,铅基物料冶炼技术主要有氧气底吹熔炼技术、顶吹熔炼技术、基夫赛特技术等。各种技术应用情况如图3所示。

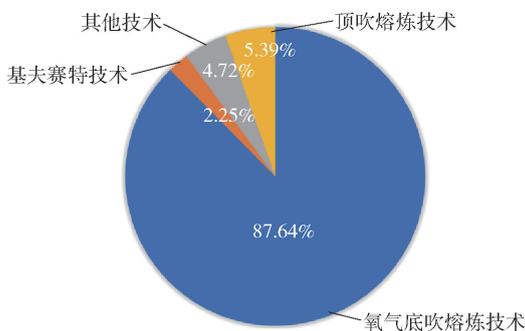


图3 各种铅冶炼技术在中国的应用情况

Fig. 3 Application of various lead smelting technologies in China

其中,中国恩菲掌握底吹、侧吹、顶吹等铅冶炼工艺,设计建成了氧气底吹熔炼-液态渣底吹还原铅冶炼生产线、氧气底吹熔炼-液态渣侧吹还原铅冶炼生产线、氧气底吹熔炼-液态渣侧吹还原处理脆铅锑矿生产线、侧吹浸没燃烧熔池熔炼处理再生铅资源生产线^[3]。中国恩菲铅冶炼核心技术如图4所示。

3.1 氧气底吹熔炼-熔融还原-富氧挥发炼铅技术

该技术由中国恩菲自主研发,处于行业领先水平,占中国矿铅冶炼产能80%以上,是国家九部委联合发文指定的我国首选炼铅工艺,是世界上应用广泛的铅冶炼技术。该技术以硫化铅精矿为原料,可搭配处理氧化铅及其他二次铅物料,原料可直接入炉,产出粗铅;富铅渣通过熔融还原产出粗铅。可采用煤粉、天然气作为还原剂和燃料,将还原炉渣富氧挥发回收铅、锌等金属。氧气底吹熔炼-熔融还原-富氧挥发炼铅技术流程示意如图5所示。

3.2 侧吹浸没燃烧熔池熔炼处理再生铅资源技术

侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术是由中国恩菲与湖北金洋合作共同开发的处理再生铅资源的新工艺,

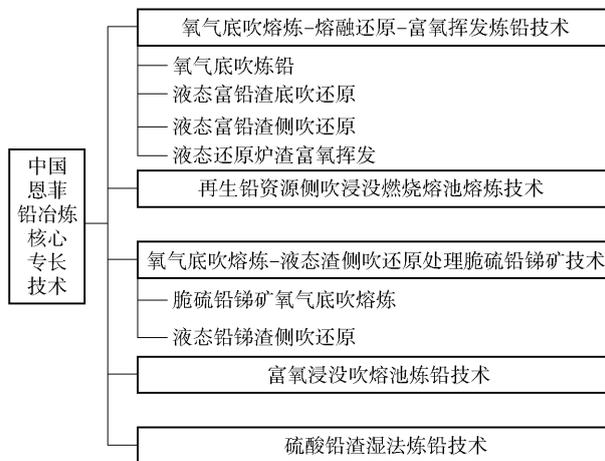


图4 中国恩菲铅冶炼核心技术

Fig. 4 Core technologies of lead smelting in China ENFI Engineering Co., Ltd.

已工业化应用。该工艺通过侧部喷枪喷入富氧空气和燃料(天然气、发生炉煤气、焦炉煤气、煤粉、柴油),强烈搅动熔体,使炉料快速分散到熔体中,与熔体发生快速传热,实现炉料加热、熔化等冶炼过程。冶炼烟气送锅炉回收余热后制酸。

3.3 脆硫铅锑矿处理技术

采用氧气底吹熔炼+液态渣侧吹还原技术处理脆硫铅锑矿是中国恩菲自主研发的一种新工艺。脆硫铅锑矿与熔剂等经配料后直接加入氧气底吹炉,产出的液态渣经侧吹还原熔炼后产出铅锑合金。与传统鼓风炉炼锑工艺相比,该技术能有效解决锑冶炼过程中 SO_2 低空污染、余热无法回收、能耗高等问题。

3.4 富氧浸没顶吹炼铅技术

富氧浸没顶吹炼铅技术通过垂直插入渣层的喷枪向熔池中直接喷入空气或富氧空气、燃料,使炉料完成熔化、氧化、还原、造渣等过程,实现了一炉三段作业,即在1台炉中分阶段完成氧化熔炼、还原熔炼和渣烟化处理。该技术具有节能、环保效果好、熔炼效率高、有价金属回收率高等优点,已在国内多家冶炼厂实现工业化应用。

3.5 硫酸铅渣湿法炼铅技术

该技术是由中国恩菲自主研发的、世界上首次以湿法工艺处理硫酸铅渣并实现工业化应用的技术,能够高效处理锌冶炼中的硫酸铅,综合回收铅、金、银、铜等有价金属,可显著降低生产成本,具有良好的环保和经济效益。具体工艺流程为:硫酸铅渣

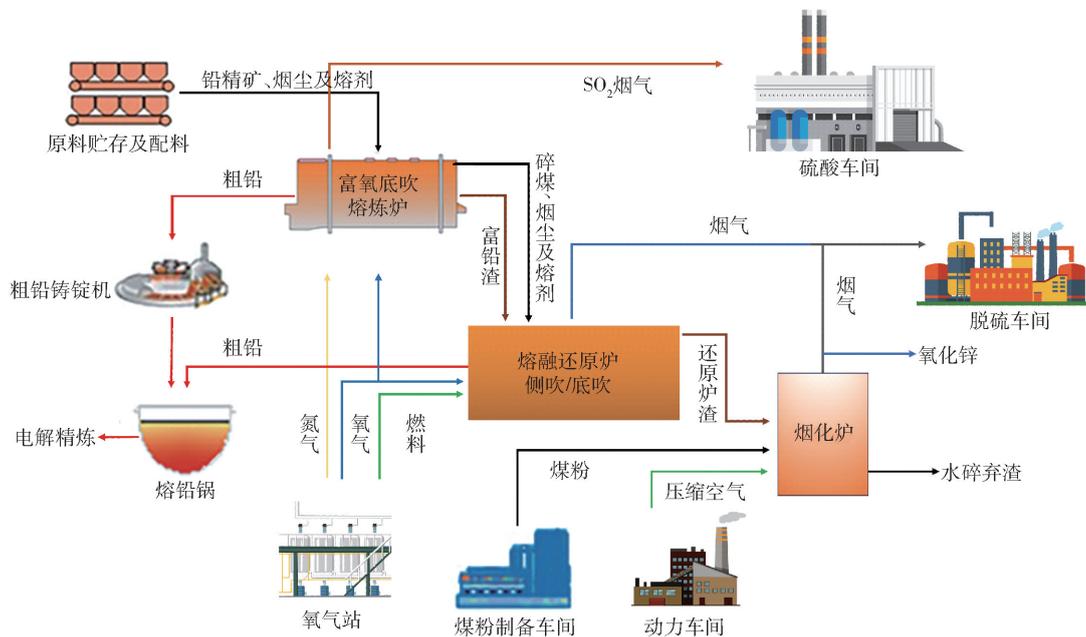


图 5 氧气底吹熔炼-熔融还原-富氧挥发炼铅技术流程示意

Fig. 5 Schematic diagram of oxygen bottom blowing smelting-smelting reduction-oxygen rich volatilization lead smelting technology process

经预处理-两段氯盐浸出-锌板置换-溶液净化-锌溶液萃取,置换后产出的海绵铅经挤压得到铅饼,熔炼后产出铅锭;锌溶液萃取后送锌电解车间产金属锌^[4]。

3.6 铅阳极泥处理技术

铅阳极泥和熔剂进行配料后加入底吹炉或者侧吹炉进行还原精炼,产出的贵铅通过流槽直接流入分银炉进行氧化精炼,分银炉产出的金银合金浇铸成阳极板后送贵金属电解精炼。与传统工艺(贵铅炉及分银炉工艺)相比,底吹炉或侧吹炉阳极泥处理工艺具有投资省、环保好、处理能力大、生产成本低、金银贵金属回收率高、回收周期短、炉窑寿命长、作业率高、自动化程度高等优点。

3.7 铜浮渣及铅精炼渣处理技术

将铜浮渣、铅精炼渣、熔剂、碎煤配料后加入氧气底吹炉中,进行还原、置换及造渣反应,产出铜铈、粗铅及炉渣,产出的高温烟气经余热回收、收尘降温后送烟气脱硫系统。相比传统反射炉工艺,氧气底吹处理工艺具有环保好、热效率高、熔炼强度大、自动化程度高、生产成本低、金属回收率高、生产作业率高等优点。

3.8 铅电解技术

中国恩菲已设计 40 余套铅电解精炼系统,熟悉

并掌握铅电解相关的工艺及装备。其中,应用较多的大极板铅电解工艺,可大幅提升和改善电解精炼的工艺及装备水平、提升生产规模、提高劳动生产率、降低能耗、改善环境和提高资源利用率。同时,阳极板和始极片的制作、阴阳极自动排距、阴极板和残极板的洗涤、铅锭浇铸等均实现了国产化,使我国铅电解技术装备均达到了国际先进水平。

4 铅冶炼智能化、数字化进展

目前,我国有色金属冶炼行业处于机械化、电气化、自动化、信息化并存,不同企业发展不平衡的状态。仅江西铜业、大冶有色等少数大型企业试点实施了智能工厂,而铅冶炼领域的智能化水平整体偏低。近年通过国家重大专项、企业联合攻关等多种形式,中国恩菲在河南豫光金铅、青海西豫有色等铅冶炼企业进行了智能化设计和试点应用,在提升现代化管理水平、冶炼过程精准预测与调控、快速优化配料、预警监控等方面均有显著成效,通过智能化试点应用,生产企业作业环境、工作效率、生产保障等有了明显提升,显著增强了企业市场竞争力,为其他铅冶炼企业提供了示范样板,有色冶炼领域智能化覆盖率将进一步扩大^[5]。

鉴于铅冶炼过程多元素资源共生、原料品质波

动大、冶炼工艺复杂等特点,重点开展了下文所述开发实践,并取得良好效果。

4.1 冶炼过程精准预测与调控

由于铅冶炼过程伴随高温、腐蚀等恶劣环境条件,许多关键工艺参数如熔炼温度、高铅渣成分、烟气成分难以在线实时测量、动态监测。熔炼过程还包含复杂工艺环节,具有显著的通道大时滞、动态非线性、变量强耦合等特点,建立系统动力学机理模型并设计相应的最优控制策略存在困难。此外,作为熔炼原料的铅基多金属固废来源广,成分复杂、差异大,既包含废铅膏、铅玻璃等典型铅基固废,也包含铅烟尘、锌浸出渣等有色行业产生的废渣废料,在生产过程中,系统的输入与工作状态往往波动较大,加剧了优化控制的难度。

针对以上问题,结合铅冶炼的工业生产场景,采用深度学习方法,利用集散控制系统保存的历史数据和化验分析的历史数据建立熔炼炉的数据驱动模型,可实现对系统关键运行指标的实时预测与评估,为实施调控提供及时、有效的依据。

以某底吹炼铅企业的基于数据驱动预测模型应用为例,分别对冶炼温度、炉渣成分和粗铅产量等关键生产参数进行预测。经过统计计算,温度、铁硅比、渣含铅量、二次粗铅产量4项指标预测平均绝对误差分别为 $12.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.11 、 0.275% 、 4.4 块。模型预测解决了以前因取样、送样、制样及分析检验等过程长达 1 h 的信息滞后困境,实现了提前预测与提前校正,使得高铅渣成分、温度等关键参数更容易控制在适宜的范围内。基于数据驱动的预测模型智能化应用效果如图6所示,数据表明模型预测值对实际值有较好的跟踪。

4.2 冶炼原料配比快速优化

采用深度学习方法,根据历史数据建立协同冶炼过程输入-输出的数据驱动模型,不仅能实现对熔炼过程关键运行参数的实时预测,还可实现原材料的最优配比计算。铅冶炼过程中,熔炼炉是否处于最佳工况反映在其炉温与渣型等指标上,而炉温与渣型指标则取决于输入球料的成分配比与氧气配比。从工艺角度可以确定熔炼炉温度、高铅渣成分等指标的最优目标值,利用已经建立的机理模型与数据驱动的深度深度学习模型,输入各种可能的原料配比组合进行计算,从众多的模型仿真结果中检索出输出指标最接近目标设定值的输入配比方案。使用

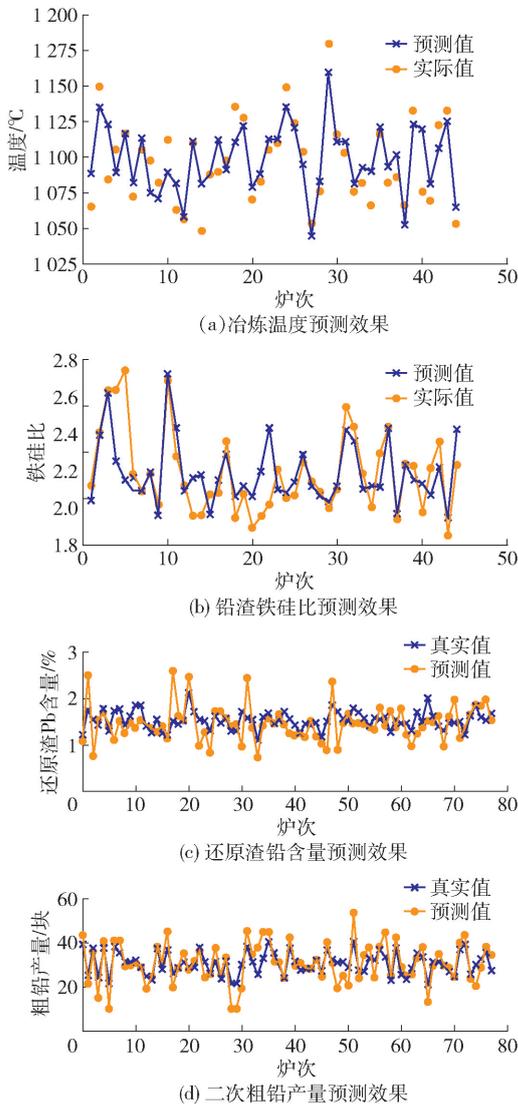


图6 基于数据驱动的预测模型智能化效果

Fig. 6 Intelligent effect of data-driven prediction model

智能化配料系统后,完成一个配料方案的时间降低至 20 min 左右,配料效率大幅度提升。同时,系统有能力统筹目标工况指标和当前原料库存条件,并将配料后混合料的成分波动控制在一个最小的范围内,减少了原料条件变化对协同熔炼过程的影响。

4.3 可视化智能预警与高效监控

可视化技术作为车间生产监控中的重要一环,可以使管理者生动直观地了解当前车间的生产状态和加工信息。传统的车间生产监控可视化技术的表现形式主要有文字、图、表、进度条、变色按钮、动态标签、动画等,主要通过常用的前端界面设计控件实现,如窗体、文本框、列表框、复选框、组合框、列表、图像框、进度条、按钮、标签、定时器、触发事件等。

随着虚拟现实、增强现实技术的发展,多媒体融合的可视化技术已逐渐应用于生产车间监控,其借助于计算机技术,以三维视觉显示器、交互设备、三维建模仪器、声音设备等 4 类设备为依托,呈现多源信息融合的交互式的三维动态视景和实体行为的系统仿真,构建出虚拟现实的场景,使用户沉浸于该环境中。

可视化技术可以实时监控现场运行数据、设备状态、指标参数等,并对实时数据进行运算处理。此外,在优化生产过程的同时,还能识别设备异常,及时对人员安全作出预警,实现高效预警的目的。系统将多种管理系统的复杂信息融合在虚拟仿真环境之中,以符合人类视觉的方式自然呈现,从而大幅提升了信息交互的效率,降低了信息损耗和时间损耗,确保了信息传递的准确性和及时性,降低了信息查询和浏览的难度。同时,系统将各种监控设备的运行数据和状态信息与虚拟车间相结合。通过实时接收监控及预警数据,能够高效地扩展系统功能,允许用户在三维系统中从任意时间、任意地点、任意视角查看任意对象的任意信息,为高效生产管理打下更坚实的基础。

5 铅行业发展机遇与挑战

5.1 铅行业面临的机遇

1) 供给侧改革,有色金属冶炼行业格局长期向好。国家正在大力推进有色金属冶炼行业的供给侧改革,促进行业技术发展,大批不符合国家产业政策、能耗高及排放污染严重的冶炼企业被限产或停产。同时,国家近年来正在全面遏制高耗能、高排放项目的盲目发展,使铅冶炼行业的准入门槛大幅提高。随着供给侧结构性改革的推进,铅冶炼行业竞争格局持续向好,资质齐全、处理能力较强的企业将受益。

2) 政策对重点企业有所倾斜。近年来,国家密集出台了相关产业政策,通过下拨专项资金、土地置换、人员安置和相关政策等方面给予优惠,支持重点有色冶炼企业加大技术改造投入,优化提升冶炼工艺。表 2 介绍了近几年来铅金属冶炼行业的法律法规及政策。

5.2 铅行业面临的挑战

1) 铅精矿供应较为紧张。我国铅矿资源具有“贫矿多、富矿少”等特点,高品位低铅精矿供应紧

张,对外依存度较高。近年来,矿山劳动力及资本开支不足,海运受阻,叠加矿山事故、矿山资源枯萎、矿石品位下降、能源价格暴涨等因素,海外铅精矿供应过剩量减少,造成国内铅精矿加工费自 2021 年二季度出现明显下滑,对行业内企业造成一定不利影响,主要通过调整产品结构来应对不利影响,增加铅品位较低、金和银品位相对较高的矿粉采购,并与高品位再生铅原材料进行混合熔炼,提高效益。

2) 技术发展与资金投入等压力较大。国家正大力推进铅冶炼行业的供给侧结构性改革,鼓励开发先进工艺,淘汰落后产能,同时政策对该领域的安全、环保、能耗等要求不断趋严,铅冶炼企业需要持续投入研发,开发先进工艺,在满足政策要求的前提下降本增效,才能实现更好发展。有色金属冶炼行业属于重资产行业,前期需要投入大量资金建设生产线,同时原材料采购通常采取无/低账期的信用政策,也会占用大量流动资金,造成企业早期投入大,面临着资金挑战。

5.3 铅行业未来发展趋势

1) 铅资源结构将持续优化,再生铅市场比例会继续攀升。

我国未来铅资源结构将持续优化,在铅矿开采、冶炼等成本持续升高与再生铅来源不断增加的双重作用下,再生铅市场比例将持续攀升。一方面,全球范围内铅矿资源日趋紧张,正在转向难采选的矿物领域,进一步推高了铅矿的原料价格,且随着低品位伴生矿的引入,吨铅的冶炼成本也在不断升高,以铅矿为原料的成本优势正在逐渐减弱。另一方面,随着机动车的日趋饱和,铅酸蓄电池报废回收也将在未来迎来高峰期,按照机动车 10~15 年的寿命周期估算,再生铅市场还将有 10~15 年上升期。

2) 技术装备向大型化、高效化、绿色化方向发展。

随着我国生态文明建设的需要和铅冶炼技术的日趋成熟,未来铅冶炼将继续在成本控制、能源消耗、环境保护等方面持续优化。工业生产的大型化、规模化在成本控制方面优势显著,随着落后设备和技术的加速淘汰,铅冶炼行业的投资门槛和技术门槛将明显提升,更有利于监管监督和规范化生产,铅冶炼行业将能更好满足我国社会发展需求,利于“双碳”目标的实现。

表 2 铅金属冶炼行业的法律法规及政策

Table 2 Laws, regulations and policies in the lead metal smelting industry

序号	文件名	颁布单位	颁布时间	主要涉及内容
1	《有色金属行业碳达峰实施方案》	工业和信息化部、 国家发展改革委、 生态环境部	2022 年 11 月	重点推广锌精矿大型焙烧技术、液态高铅渣直接还原技术,以底吹为基础的富氧熔池熔炼技术、锌二次资源萃取关键技术,重点研发难选冶难处理铅锌复合矿熔池熔炼技术
2	《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022 年版)》	国家发展改革委等	2022 年 2 月	到 2025 年,通过实施节能降碳技术改造,铜、铅、锌等重点产品能效水平进一步提升。铜、铅、锌冶炼能效标杆水平以上产能比例达到 50%,4 个行业能效基准水平以下产能基本清零,各行业节能降碳效果显著,绿色低碳发展能力大幅提高
3	《关于加快废旧物资循环利用体系建设的指导意见》	国家发展改革委等	2022 年 1 月	到 2025 年,再生资源加工利用行业“散乱污”状况明显改观,集聚化、规模化、规范化、信息化水平大幅提升。废钢铁、废铜、废铝、废铅、废锌、废纸、废塑料、废橡胶、废玻璃等 9 种主要再生资源循环利用量达到 4.5 亿 t
4	《“十四五”循环经济发展规划》	国家发展改革委	2021 年 7 月	到 2025 年,大宗固废综合利用率达到 60%,再生有色金属产量达到 2 000 万 t,其中再生铜、再生铝和再生铅产量分别达到 400 万 t、1 150 万 t、290 万 t,资源循环利用产业产值达到 5 万亿元
5	《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》	国家发展改革委等	2021 年 3 月	到 2025 年,冶炼渣等大宗固废的综合利用能力显著提升,新增大宗固废综合利用率达到 60%,存量大宗固废有序减少;鼓励从冶炼渣中回收稀有稀散金属和稀贵金属等有价组分,提高矿产资源利用率,保障国家资源安全,逐步提高冶炼渣综合利用率
6	《铅冶炼行业》清洁生产评价指标体系	国家发展改革委、 生态环境部、工业 和信息化部	2024 年 2 月	通过权重值量化生产工艺及装备、能源消耗、水资源消耗、资源综合利用、污染物产生与排放、温室气体排放、产品特征、清洁生产管理等 8 个一级指标及熔炼-还原工艺、单位产品综合能耗等 25 个二级指标,将各指标值分为 I 级清洁生产水平基准值、II 级清洁生产水平基准值、III 级清洁生产水平基准值,再计算清洁生产综合评价指数。对新建铅冶炼企业或新改扩建项目、现有铅冶炼企业清洁生产水平的评价,是以其清洁生产综合评价指数为依据,对达到一定综合评价指数的企业,分别评定为清洁生产先进(标杆)水平、清洁生产准入水平和清洁生产一般水平

3) 生产企业的自动化和智能化趋势更加显著。

随着铅冶炼厂原料和产品的多元化,生产企业对生产过程的实时调整需求更加强烈,而人工智能、大数据、云计算、物联网等新技术的迅猛发展,为铅冶炼企业的自动化、智能化实现提供了可能性。现有生产企业在人员信息化管理、冶炼过程自动配料、可视化监控预警等方面均有广泛应用,已具有丰富的数据基础,结合智慧工厂设计架构,将能进一步提

升企业生产管理,提高工厂的运行安全性与经济性,实现工厂在全周期的运行效益最大化。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 李飞.废铅酸蓄电池冶炼渣资源化及铅膏高值利用方法与原理研究[D].广州:华南理工大学,2023.
- [3] 汤伟,陈亚州,崔鹏,等.国内再生铅火法冶炼工艺技术的进展[J].有色冶金节能,2021,37(4):10-15.

- [4] 陈俊华,武岳彪,田静,等. 硫酸铅渣湿法固相还原铅的工艺研究[J]. 有色冶金节能,2022,38(6):36-39.
- [5] 张哲铠,楚金旺,郝亮钧,等. 铅基固废协同熔炼过程在

线智能优化控制[J]. 中国有色冶金,2024,53(4):65-74.

Development trend of lead based material smelting technology

CHEN Xuegang, LI Mingchuan, WANG Yun

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: China's lead ore resources are characterized by "more poor ore and less rich ore", and the excess supply of overseas lead concentrate has decreased. The lead smelting process is characterized by the coexistence of multiple element resources, large fluctuations in raw material quality, and complex smelting processes. Currently, China's non-ferrous metal smelting industry is in a state of mechanization, electrification, automation, and informatization, and the development of different enterprises is unbalanced. Based on the above, this article introduces the distribution of lead ore resources (lead concentrate and lead-containing waste) and the main uses of lead, the development process of lead smelting technology, and provides a detailed overview of the current main lead based material smelting technologies, such as oxygen bottom blowing smelting-melt reduction-oxygen rich volatilization refining technology, oxygen rich immersion top blowing smelting technology, lead sulfate slag wet smelting technology, side-submerged combustion melting pool smelting treatment technology for regenerated lead resources, brittle sulfur lead antimony ore treatment technology, lead anode mud treatment technology, copper floating slag and lead concentrate slag treatment technology, lead electrolysis technology, etc. Combining with the industrial production scenario of lead smelting, deep learning methods are used to establish a data-driven model of the smelting furnace, which can achieve real-time prediction and evaluation of key operating indicators of the system and promote the intelligence and digitization of lead smelting technology, to meet the development opportunities and challenges of the lead industry.

Keywords: lead smelting; solid waste; immersion combustion melting; intelligence; digitization; data model

