

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.11.009

我国重有色金属冶炼技术过去、现在和未来发展杂谈

蒋继穆, 李东波, 李兵

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100089)

摘要:1949 年至今,我国重有色金属冶炼技术大体历经三个发展阶段,即中华人民共和国成立后依靠苏联援助艰难起步、改革开放后引进国外技术带动高速发展、进入新世纪自主创新取得多项突破。展望未来,要进一步提高行业的集中度,加强应用基础研究,加大数字智能技术研究。

关键词:重有色金属;冶炼技术;发展

中图分类号:TF80

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)11-0105-05

The Past, Present and Future Development of Heavy Non-Ferrous Metal Smelting Technology in China

JIANG Jimu, LI Dongbo, LI Bing

(China Enfei Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: Since 1949, China's heavy non-ferrous metal smelting technology has generally gone through three stages of development, that is, difficult starting with the help of Soviet Union after the founding of the People's Republic of China, high-speed development driven by the introduction of foreign technology after the reform and opening up, and independent innovation has made a number of breakthroughs in the new century. Looking ahead to the future, it is necessary to further improve the concentration of the industry, strengthen the application of basic research, and increase the research of digital intelligent technology, promote the construction of a modern industrial system, and help China develop into a strong country in heavy non-ferrous metals.

Key words: heavy non-ferrous metal; smelting technology; development

我国重有色金属冶炼技术发展从 1949 年至今已有 75 年,大体可以分为三个发展阶段:20 世纪 50 年代至 80 年代应用苏联冶炼技术阶段、20 世纪 80 年代至 2000 年引进西方冶炼技术阶段、2000 年后再创新和自主创新开发先进节能技术阶段。

1 苏联援助艰难起步

1949 年中华人民共和国成立时,国内重有色金

属冶炼除日本在东北留下的沈阳铜、铅冶炼厂和葫芦岛锌厂外,还有云南个旧锡厂、湖南锡矿山锑厂、水口山锌厂、长沙三义砷锌厂。这些工厂规模很小,1949 年十种有色金属总产量仅为 1.33 万 t,其中,精炼铜产量 0.29 万 t,精炼铅产量 0.26 万 t,锌产量 0.02 万 t,锡产量 0.49 万 t,锑产量 0.28 万 t。铜、铅冶炼均为烧结锅—鼓风炉—电解工艺,铜冶炼采用鼓风炉熔炼,鼓风炉产的冰铜采用真吹炉吹炼^[1],

收稿日期:2024-09-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3901503)

作者简介:蒋继穆(1939-),男,教授级高级工程师,全国工程勘察设计大师;通信作者:李兵(1981-),男,正高级工程师

锌采用多膛炉焙烧—平罐冶炼工艺,锡和锑均为小反射炉工艺。所有冶炼厂烟气均不制酸,全部排空,总体技术落后,操作环境恶劣,但因总量有限对社会环境影响也有限。1953年起国家建设执行第一个五年计划,苏联援助中国建设156项工程,其中重有色金属冶炼接受苏联技术援建的工厂,据不完全统计有:白银铜矿年产3万t电铜的采选冶工程,云南铜厂年产3万t电铜的电炉冶炼工程,大冶铜厂年产3万t电铜的反射炉冶炼工程,株洲冶炼厂年产10万t锌、5万t铅的铅锌冶炼工程,云南个旧锡中矿及云南会泽铅锌氧化矿的烟化炉挥发工程等。当时我国重有色冶炼规模大、工艺最先进的冶炼技术及设备有:5万t/a铅烧结机、鼓风机、电解槽,10万t/a锌流态焙烧炉($3 \times 43 \text{ m}^2/\text{台}$)、酸浸槽、电积槽,3万t/a铜的半氧化流态化焙烧炉、铜吹炼转炉、反射炉。

1960年赫鲁晓夫单方面撕毁合同,撤走专家和带走图纸资料,给这些工程完工带来不少困难,有的厂拖到1965年后才完工,建厂花费十多年时间,好在经过这一折腾,让我们更加吃透了苏联这些技术,为以后的改进、发展、大规模推广应用创造了更为有利的条件。至1978年,我国十种有色金属产量达到了百万吨级(99.6万t)。这一阶段,火法工艺大多是鼓风机、电炉、反射炉、流态化焙烧炉,湿法工艺主要采用酸浸、电积槽,烟化炉不仅用于锡中矿和铅锌氧化矿,后来被广泛用于鼓风机产出的锡渣挥发其中残留的金属,实现炉渣综合利用,提高了有价金属的回收率。这一阶段开启了冶炼烟气制酸,包括锌和铜的流态化焙烧炉、铜转炉等烟气,降低了 SO_2 对大气的污染。

这期间,除20世纪60年代初韶关冶炼厂引进了英国的ISP技术外,我国也开发一些自己的技术,典型代表有白银公司开发了具有自主知识产权的“新型白银铜熔炼炉”,还有沈阳冶炼厂与北京有色设计研究总院合作开发了铅烧结机低浓度烟气制酸技术。

2 改革开放引进西方先进技术、带动高速发展

进入20世纪80年代,西方发达国家重有色冶炼技术发展很快,当时中国与之相比有较大差距。在铜、铅冶炼方面,西方涌现大量的新工艺、新技术,铜有闪速熔炼、诺兰达熔炼、卡尔多炉熔炼、澳斯麦特熔炼、艾萨熔炼、特尼恩特熔炼以及三菱法熔炼

等,铅冶炼有QSL法、瓦纽科夫法、基夫赛特法、艾萨熔炼法、卡尔多炉法等^[2]。这些新工艺有以下特点:

1)单系列规模较大,一般能达到金属产量10万t/a左右;

2)采用富氧熔炼,熔炼强度高,设备单位产能大;

3)富氧熔炼单位产品烟气量少,烟气带走余热率低,热效率高,能耗相对较低;

4)烟气 SO_2 浓度较高,可以采用双转双吸制酸工艺,尾气排放 SO_2 浓度低,对大气污染程度降低;

5)除有较先进的制酸技术外,还有与之配套的污酸、污水处理技术,冶炼对环境的污染远远低于我国当时的状况。

改革开放初期,大家都希望把国民经济尽快搞上去,有色金属在“大矿大开、小矿放开、有水快流”的思想指导下,一时间大批乡镇企业建冶炼厂、化工厂,没有环保措施,国家大部地区的大气和江河湖泊受到严重污染。进入20世纪80年代,国家意识到问题的严重性,1984年5月8日国务院发布实施了《国务院关于环境保护工作的决定》,从此我国环保工作在政策、法律、管理等方面逐步形成较完善的体系。我国开始关停污染严重的乡镇企业,引进发达国家环保好的冶炼技术,如铜冶炼领域,最早贵溪冶炼厂从日本引进闪速熔炼技术,先是中条山后是铜陵金冠铜业从澳大利亚引进澳斯麦特熔炼技术,云南铜业引进艾萨熔炼及艾萨电解技术,大冶和沈冶引进加拿大诺兰达熔炼技术(包括制酸的转化和阳极保护技术及设备,设备到货后,因环保需要,沈冶被政府关闭,大冶后来扩产又将其改造成30万t/a的澳斯麦特熔炼,目前国内已没有诺兰达熔炼技术);铅冶炼领域,白银冶炼厂引进德国鲁奇公司QSL技术(包括收尘效率 $>99\%$ 的电解除尘设备及资料),云南驰宏引进澳大利亚艾萨铅熔炼技术、西部矿业引进了卡尔多炼铅技术;锡冶炼领域,云锡公司引进了澳斯麦特技术;镍冶炼领域,金川首先引进闪速炼镍技术,后中国恩菲与金川公司创新性地闪速炉后联体增加了贫化电炉,实现了镍闪速炉渣直接排放,降低了单位产品能耗。而后金川又引进了澳斯麦特炉,由金川、澳斯麦特公司以及中国恩菲共同研发了“JAE炼镍技术”,其配套的余热锅炉产汽量达98 t/h,送制酸厂的烟气量达30万 m^3/h ;锌冶炼领域,丹霞冶炼厂引进了氧压直浸技术,白银公司从日本三井引进了109 m^2 大型流态化锌冶炼炉;铅锌复合矿冶炼领

域,株洲冶炼厂和江西铜业铅锌金属有限公司引进了基夫赛特炼铅技术。

这一阶段,引进技术广泛应用,工厂规模扩大,单位产品能耗大幅下降,收尘、制酸、污酸、污水处理等配套设施更为完善先进,整体环保得到较大改善,有色金属产量大幅增长,十种有色金属由1978年99.6万t增长到2000年783.8万t,22年增长了6.87倍。有色金属产业和其他产业一样,在改革开放政策的指引下进入了高速发展期。

3 新世纪自主创新助力迈向大国

进入21世纪,我国在吃透苏联技术和消化吸收发达国家先进技术的基础上,开始再创新,研究改进、扩大引进技术产能,并进一步自主创新,研发属于中国人自己的技术。

首先较易实现的是扩大冶炼规模,以闪速熔炼为例,贵溪冶炼厂引进时,电铜产能仅10万t/a。现在扩至两套系统,设计能力为35+35,总产能矿铜超70万t/a。铜陵金隆铜业单台闪速炉矿铜已达33万t/a,还有紫金、金川、白银等均有20~40万t/a电铜的闪速炉熔炼,以上生产线均采用转炉吹炼技术。2005年,山东祥光冶炼厂引进了OT年产矿铜20万t的双闪技术,该厂经多年实践,并自主开发悬浮技术对生产线进行扩产改造,现年产电铜达到40~50万t,悬浮熔炼技术已推广至国内外多家企业。铜陵有色铜基新材料项目正筹建年产电铜50万t以上的新厂,采用双闪技术,中国恩菲正在按单系列年产电铜60万t进行设计。引进技术推广应用以闪速熔炼最为成功,目前已有15家企业建设18台闪速熔炼技术(双闪技术只标一台套),设计产能电铜530万t/a,金川引进年产电镍2万t的闪速炉熔炼已扩大至8万t/a。

引进的109 m²流态化焙烧炉,与原3×43 m²焙烧系统比,车间配置简化、占地面积减少,劳动生产率大幅提高,焙烧成本降低,很快被推广达20家,锌产能增加200万t。白银有色和株洲冶炼厂更是开创出152 m²的锌流态化焙烧炉,济源万洋和南方有色正在建设186 m²和198 m²世界最大的锌流态化焙烧炉,单系列锌产能可达电锌20万t/a。

引进技术也有不太成功的,如前面提到的诺兰达技术,在大冶运行一段时间后,受产能和成本影响,被澳斯迈特熔炼技术取代。株冶从OT引进的锌精炼常压氧浸和丹霞冶炼厂从OT引进的锌精矿氧压直浸技术,运行一段时间后,其生产成本均高于常规焙烧酸浸技术,究其原因焙烧、酸浸工艺充分

利用了硫和铁的氧化潜热,利用烟气余热发电,降低了锌电积单耗。硫氧化后直接制成硫酸,而氧浸技术浸出过程均需外供热、浸出所得的单体硫最终还得送酸厂制酸,且硫与浸出尾渣分离难以彻底。

为解决铅烧结机SO₂大气污染难题,在白银公司引进了鲁奇公司的QSL炼铅技术,该技术在—座长型转炉中前一段送富氧将铅精矿氧化,部分硫化铅与氧化铅交互反应生成少量金属铅,未参与交互反应的氧化铅在转炉后半段送入粉煤还原成金属铅。由于氧化段与还原段没有隔开,烟气从一个出烟口排出,气氛难以精准调控,导致渣含铅不稳定,加上氧化与还原烟气合并增大了制酸成本,氧气喷枪寿命短,有时不到一周就得更换。白银公司一直不能很好控制该技术而被迫关闭。

针对铅冶炼烧结烟气粉尘及SO₂污染成为当时我国重有色冶炼亟需解决的大问题,受QSL技术启发,当时由北京有色设计研究总院牵头向国家科委申请立项,在湖南水口山开展氧气底吹熔炼—鼓风炉还原炼铅扩大试验,参加试验的还有北京矿冶研究总院(现矿冶科技集团有限公司)、北京有色金属研究总院、北京钢铁研究总院(解决氧气喷枪寿命)、白银有色金属研究院、中南矿冶学院(现中南大学)等。扩试成功后在河南豫光和安徽池州冶炼厂同时开展了工业试验,取得了巨大成功。之后,仅8年有16家铅厂用底吹熔炼取代了烧结机,解决铅冶炼污染难题,底吹熔炼完全自热,还将吨铅能耗由630 kgce降至360 kgce。

针对氧化产出的熔融高铅渣铸块冷却进鼓风炉还原,损失了渣的物理热,铅渣鼓风炉还原需要价格较高的焦炭作还原剂等问题,中国恩菲工程技术有限公司、河南豫光金铅股份有限公司等单位联合又研发出氧气底吹熔炼所产高铅渣直接进底吹粉煤还原炉的双底吹技术。该技术降低了还原剂成本,进一步降低能耗,电铅总能耗降至240 kgce/t,双底吹炼铅技术后推广至15家铅厂。另外长沙有色冶金设计院受瓦纽柯夫炉启发,与广西南丹南方冶炼厂合作,开发了侧吹炉炼铅技术。因底吹与侧吹技术密闭性能更好,引进的艾萨炼铅没能获得大规模推广。目前单系列底吹炼铅技术产能已达到精铅40万t/a,豫光2023年铅产量达55.4万t,是国内当前最大的底吹铅冶炼厂。

底吹炼铅成功之后,水口山矿务局与中国恩菲利用铅扩试装置开展了对铜精矿的底吹熔炼试验,试验非常顺利,氧枪寿命成倍延长,试验一举成功(冰铜吹

炼采用传统转炉)。底吹炼铜扩试规模电铜 3 000 t/a, 国内新建的铜冶炼厂基本都在 5 万 t 以上, 试验成功后没有企业愿意第一个工业化应用, 此时正好越南要在生权铜矿建个年产 1 万 t 的电铜厂, 我国以底吹炼铜专利技术出口越南建成投产了世界第一个底吹炼铜厂。国内第一个底吹炼铜厂是山东东营方圆冶炼厂, 设计电铜规模 5 万 t/a, 因留有很大余地, 投产 48 h 达产, 很快产量达 10 万 t/a。进一步, 为解决转炉吹炼 SO_2 低空污染问题, 在国家 863 计划课题“氧气底吹连续炼铜清洁生产关键技术与装备”的支持下, 中国恩菲与河南豫光等企业联合开展了冰铜底吹连续吹炼试验, 并获得成功^[3]。接着又在河南灵宝国投开发了底吹熔炼、吹炼、阳极炉“三联炉”的连续炼铜技术。内蒙华鼎铜业先后进行了底吹熔炼改造鼓风炉熔炼、底吹连续吹炼改造 P-S 转炉吹炼、底吹精炼升级反射炉精炼的改造“三部曲”, 并实现全底吹连续炼铜, 该技术被四部委联合推广为国家绿色应用技术。底吹连续炼铜技术已有 6 家企业采用, 粗铜产能 12~30 万 t/a 不等。东营方圆有色金属有限公司开发了两段底吹连续炼铜技术, 铜产能达 30 万 t/a。中原黄金冶炼厂是我国最大的黄金冶炼企业, 开发了现有最大的底吹熔炼炉($\Phi 58 \text{ m} \times 30 \text{ m}$)。冰铜配闪速炉吹炼实现造硫捕金, 年处理金铜混合精矿达 190 万 t, 产金 30 t/a, 铜 40 万 t/a, 金铜收率均 $>98\%$ 。

由于引进、消化、创新, 我国已全面掌握了顶吹、侧吹和底吹技术, 用这些技术组合创新炼铜工艺, 因此有的企业用侧吹炉(类似瓦纽柯夫炉)熔炼铜配 PS 转炉吹炼^[4], 或氧气底吹吹炼或多枪顶吹吹炼(类似三菱熔炼炉), 使我国炼铜工艺百花齐放, 各有各的优点。其中采用多枪顶吹吹炼的就有 7 个厂, 各家粗铜产能在 12~40 万 t/a 不等。所有这些新的炼铜技术, 均取消了转炉吹炼, 电解全部采用永久阴极。

新建的这些铜厂均能满足国家严格的环保政策要求: 粗铜能耗 $<180 \text{ kgce/t}$, SO_2 排放浓度 $<100 \text{ mg/m}^3$, 粉尘排放浓度 $<10 \text{ mg/m}^3$ 。总体技术已是世界领先, 在铜原料 75% 以上依靠进口不利条件下, 其生产成本与国外比仍具竞争力。

前面提到氧压浸出技术, 后来经研发加压氧浸技术成果成功应用于金川钴冰铜、高冰镍浸出, 金川和吉恩镍业硫酸镍项目以及华友硫化钴铜浸出项目。新疆阜康冶炼厂通过在北京矿冶研究总院的扩大试验, 用加压氧浸高冰镍液电积镍新技术, 建成精浆生产厂, 该厂产能已达 1 万 t/a。

在镍冶炼领域, 随着硫化矿等优质资源日益枯竭, 镍钴金属储量巨大的低品位红土镍矿受到全球关注, 但因矿相结构复杂, 镍、钴、钨含量低, 成分波动大而未得到有效利用, 其大规模高效开发成为世界性重大技术难题。2004 年, 中国恩菲承担中冶集团瑞木镍钴项目, 针对红土镍矿高压酸浸技术(HPAL)“痛点”问题, 中国恩菲对该技术开发取得突破, 填补了我国对红土镍矿处理技术的空白, 成功地将世界的目光聚焦到了中国。之后, 我国企业竞相在印尼大规模投资 HPAL 项目。

2000 年以后, 中国人自己研发出的新工艺、新技术的高速推广应用, 让我国重有色金属冶炼技术跻身世界领先或先进行列。以产量而言, 十种有色金属由 2000 年的 783.8 万 t 增长到 2020 年的 6 188.4 万 t, 20 年增长了 7.89 倍。电铅由 110 万 t 增长到 644 万 t, 增长了 4.82 倍, 金属产量及增长速度均居世界之首。

从环保角度看, 以铅为例, 电铅单耗由 630 kgce/t 降至 240 ce/t, 644 万 t 电铅年节标煤 251.16 万 t, 相当于减排 CO_2 820 万 t, SO_2 排放由烟气的 0.1% 降至 100 mg/m^3 , 降低了 286 倍。富氧熔池熔炼较传统烧结鼓风炉技术, 烟气体积降低 4 倍以上, 故 SO_2 排放量仅为传统工艺 1/1144。2020 年铅冶炼排放的 SO_2 小于传统技术生产 6 000 t 的排放量。

领先的生产工艺加上先进的环保技术, 确保我国成为生产世界重有色金属总产量 40% 以上的生产大国, 仍能保持山是青的、水是绿的、空气是甜的。

4 新征程培育现代化产业是新使命

重金属指铜、铅、锌、镍、钴、锡、锑、汞八种有色金属, 前面论述没有提及锑和汞的冶炼技术, 一是因为这两种金属产量小, 2020 年我国产锑 17.05 万 t, 产汞 1 993 t, 全球 3 700 t, 没有国家兴建的大型项目, 研究开发的积极性不高; 二是因为冶炼这两种金属时, 产出的是气态金属需要冷凝回收。某科研院所曾进行过锑精矿侧吹富氧熔炼试验, 效果不理想。也未见有单位对汞冶炼提过新的冶炼工艺, 所以锑、汞冶炼还停留在反射炉、鼓风炉和电炉技术阶段, 这是今后需要解决的重大技术问题之一。

锌的产量很大, 2020 年达 643 万 t, 这些年除扩大了设备规模、提高了劳动成本生产率外, 工艺上并无创新。现有湿法炼锌浸出渣为危废渣, 锌渣的无害化能耗较高; 采用全火法工艺, 锌精矿熔池熔炼、电热或粉煤熔池还原、铅雨或锌雨冷凝、粗锌火法精炼, 会比现有湿法工艺加渣处理节能。中国恩菲与

中南大学都在开发并已接近产业化,今后仍需努力。

其他金属冶炼技术开发余地有限,有的能耗已接近理论值,装备水平已基本实现自动控制。

党的二十届三中全会强调“加快推进新型工业化,培育壮大先进制造业集群,推动制造业高端化、智能化、绿色化发展”,重有色金属现代化产业体系的培育是今后发展的目标,重有色金属冶炼未来发展方向和研发方向:

1)进一步提高行业的集中度。整编合并中小冶炼企业,实现规模化(50万t/a金属以上)生产,有利于节能降耗,有利于综合利用,有利于提高劳动生产率和经济效益。

2)加强应用基础研究。针对铜钴复杂矿、铅锌复杂矿、含砷复杂矿等复杂矿物低碳冶炼、相似元素高效分离、冶炼渣绿色综合利用等难题,加强应用基础研究,开发先进技术,绿色化发展。

3)加大数字智能技术研究。装备自动化、操作无人化、控制智能化发展越来越迫切,加大数字智能技术研究,推进产业高端化是发展的要求。

5 结束语

75年来,我国重有色金属工业实现了由小到大的历史大跨越,在几代重有色人的艰苦奋斗、顽强拼搏中,我国成为世界第一重有色金属大国。在中国式现代化新征程上,重有色人仍需努力培育现代化

产业体系,助力我国向重有色金属强国发展。以上“杂谈”不当处希望读者指出,以利我们提高。

参考文献

- [1] 林其根. 第一冶炼厂真吹车间创造大风流渣快速炼铜法的经验总结[J]. 有色金属, 1952, 4(7): 1-6.
LIN Q B. Summary of experience in creating rapid copper smelting with large air flow slag in vacuum blow workshop of No. 1 Smelter [J]. Nonferrous Metals, 1952, 4(7): 1-6.
- [2] 重有色金属冶炼设计手册编委会. 重有色金属冶炼设计手册: 铜镍卷[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
Editorial Board of Heavy Non-ferrous Metal Smelting Design Manual. Heavy non-ferrous metal smelting design manual: copper and nickel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [3] 李兵, 尉克俭. 底吹连续炼铜技术研究新进展[J]. 中冶科技, 2012, 2(21): 17-25.
LI B, WEI K J. New progress in bottom-blown continuous copper smelting technology [J]. China Metallurgical Science and Technology, 2012, 2 (21): 17-25.
- [4] 颜杰. PS转炉炼铜技术发展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2023.
YAN J. Development of copper smelting technology in PS converter [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2023.