

中国铅冶炼工业技术创新与应用实践

吴卫国, 宋 言

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 我国铅储量占世界铅资源总量的 17.8%, 约 1 580 万 t, 却提供了全世界 50% 以上的铅产能, 其中 80% 左右的铅被应用于蓄电池行业。铅生产和消费过程中会产生大量的铅基固废, 而且锂电池技术的发展也给铅冶炼行业带来了巨大的危机和挑战。在当前铅矿过度开发、铅资源保证年限不足、铅矿资源依赖进口的环境下, 研究开发出新的铅冶炼技术与铅基固废处理工艺, 已经成为相关行业和企业亟需解决的难题。本文对近几年来我国铅冶炼工业技术创新与应用实践进行了阐述, 指明现阶段原生矿铅冶炼与铅基固废等二次资源冶炼以直接熔池熔炼为主, 未来一体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, 全湿法炼铅技术期待得到进一步的发展。

[关键词] 铅冶炼; 原生矿铅; 铅基固废; 熔池熔炼; 一体化连续高效炼铅工艺; 全湿法炼铅; 资源回收利用

[中图分类号] TF812

[文献标志码] A

[文章编号] 1672-6103(2021)02-0007-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/TF.2021.02.002

0 引言

铅是人类最早使用的金属之一^[1-2]。人类在 7000 年前就已经认识到铅, 公元前 3000 年, 已经会从矿石中熔炼铅^[3-5]。我国在距今 3500 ~ 3800 年的二里头文化遗址中发现了加入铅作为合金元素的青铜器^[6]。

金属铅及铅合金因其优良的延展性和抗腐蚀性被广泛应用于电缆护套、机械制造、船舶制造、轻工等行业, 铅具有优良的防辐射性能, 因此被广泛用于射线防护, 而金属铅的化合物(如硫酸铅等)则多应用于蓄电池领域^[7-12]。新中国成立以来, 我国十分重视铅的生产。2003 年, 我国铅产量达到 154.1 万 t, 超过美国成为全球最大的精铅生产国。2010 年, 我国铅产量突破 400 万 t, 自此连续多年全球铅

产量占比超过 40%^[13-16]。

目前, 我国铅储量世界排名第二, 约为 1 580 万 t, 占全球储量的 17.8%^[17-19]。但我国单一的铅矿很少, 多为铅锌多金属共生矿, 且贫矿多, 开采难度大, 综合利用困难。近十年来, 我国以占世界不到 20% 的铅资源总量提供了全世界 50% 以上的铅产能, 存在铅矿过度开发、铅资源保证年限不足、铅矿资源依赖进口等问题^[20-22]。

近年来, 由于全球经济危机的蔓延, 产能过剩导致铅需求量略有下降。更不容乐观的是目前 80% 左右的铅被应用于蓄电池行业, 而锂电池技术的发展更是给铅冶炼行业带来了前所未有的危机与挑战^[23-26]。如何在现有铅冶炼工艺的基础上, 研究开发出新的铅冶炼技术与铅基固废处理工艺, 已经成为相关行业和企业面临的最大问题。

20 世纪 80 年代, 我国普遍采用烧结焙烧-鼓风炉还原熔炼工艺进行铅的冶炼, 该工艺存在能耗高、烧结焙烧环境污染严重等缺陷。为克服这些缺陷, 我国铅冶炼技术不断发展, 创新并形成了多种铅冶炼直接熔炼工艺, 国内湿法冶炼原生矿铅技术虽处在试验研究阶段, 但近两年来湿法炼铅工艺也已取得一定进步。本文聚焦铅冶炼工艺发展前沿, 对近几年来我国铅冶炼工业技术创新与应用实践进行综述。

[作者简介] 吴卫国(1982—), 男, 湖北黄石人, 硕士, 高级工程师, 主要从事有色金属冶金领域咨询与设计工作。

[通讯作者] 宋言(1989—), 男, 河北邢台人, 博士, 工程师, 主要从事有色金属冶金领域设计工作。

[收稿日期] 2020-09-23 [修订日期] 2020-11-09

[录用日期] 2020-11-13 [出版日期] 2021-04-28

[基金项目] 国家重点研发计划“危险渣土综合利用与安全处置关键技术”(2018YFC1903304); “复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备”(2019YFC1907300)

1 铅冶炼工艺原理

1.1 火法冶炼原理

目前,铅冶炼工艺主要以铅精矿直接熔炼为主,主要化学反应为氧化反应和还原反应。硫化铅精矿的主要成分为方铅矿(PbS),在采用氧气或富氧空气熔炼条件下,一部分 PbS 被氧化为 PbO 。二次铅物料和返回烟尘的主要组成是 PbSO_4 , PbSO_4 在高温下发生离解反应,生成 PbO 。接着,生成的部分 PbO 与 PbS 发生交互反应生成粗铅。氧化过程产出的 PbO 会在碳或一氧化碳的还原作用下生成粗铅。

1.2 湿法冶炼原理

由于硫酸铅不溶于水,湿法炼铅工艺中的铅主要通过酸性条件下的氧化或氯化浸出,将物料中难溶的铅转化为铅离子或铅的络离子的形式,然后通过置换、电沉积、加压氢还原等工序生产铅。

2 我国原生矿铅冶炼工业技术创新与应用实践

2.1 底吹熔炼-底吹熔融还原-富氧挥发连续铅冶炼工艺

针对铅冶炼过程中铅原料的多元性、铅及其化合物的高挥发性、铅液的高渗透性以及铅蒸气的高毒性等技术难点,中国恩菲工程技术有限公司(以下简称“中国恩菲”)与河南某冶炼企业合作,成功研发了“底吹熔炼-熔融还原-富氧挥发”三连炉连续炼铅新技术,解决了现有铅冶炼技术存在的环境污染严重、能耗高、原料适应性差、冶炼过程不连续、生产成本高等问题。

采用“底吹熔炼-底吹熔融还原-富氧挥发”连续炼铅工艺进行铅冶炼,铅精矿和熔剂经过简单备料混合后直接由氧气底吹炉的顶部加料口加入,熔炼过程中喷入富氧空气,硫化铅精矿发生剧烈的氧化反应,形成粗铅、富铅渣和含铅烟气,同时放出大量的热以维持炉内反应体系热平衡。熔融的富铅渣进入底吹还原炉,通过喷入煤粉进行还原反应,同时喷入富氧空气进行补热,从而使富铅渣还原得到粗铅、含铅烟气和还原炉渣。粗铅送铅电解,熔融的还原炉渣进入富氧挥发炉进一步还原挥发,形成含铅烟气和终渣。含铅烟气可进一步回收铅、锌、锡、铜、锑等有色金属,终渣经水碎后可作为一般固废堆存或外卖给建材企业。

采用该工艺,每吨粗铅的综合能耗 $< 220 \text{ kgce}$,比第一代底吹技术降低 50% 左右;生产岗位环境中 $\text{Pb} < 0.03 \text{ mg/m}^3$ 、 $\text{SO}_2 < 5 \text{ mg/m}^3$,低于世界各国标准;铅总回收率 $> 98.5\%$,比氧气底吹鼓风炉还原技术提高 1.5%;金银回收率 $> 98\%$,提高了 2%。

2.2 侧吹熔炼-侧吹熔融还原-富氧挥发连续铅冶炼工艺

侧吹熔池熔炼技术是从熔炼炉侧墙浸没熔池的风嘴或喷枪直接将富氧空气或燃料鼓入金属熔体或炉渣中,使得加入熔池的物料受到鼓风的强烈搅拌作用,快速浸没于熔体之中,从而完成物理化学反应的一种强化熔池熔炼技术^[27]。在“熔池熔炼”工业化生产的基础上,中国恩菲设计开发了第一座侧吹浸没燃烧熔炼工业炉用于熔融富铅渣的还原熔炼。2008~2009 年,国内某冶炼企业与中国恩菲合作进行了首座侧吹炉的工业化示范性生产。自此,该技术在国内外得到进一步推广应用,并且其改进装置已经推广至其他行业。

采用“侧吹熔炼-侧吹熔融还原-富氧挥发”连续炼铅工艺进行铅冶炼,铅精矿经侧吹熔炼炉氧化脱硫,得到粗铅、富铅渣和含铅烟气。富铅渣经侧吹熔融还原炉还原,得到粗铅、含铅烟气和还原炉渣。粗铅送铅电解,还原炉渣经富氧挥发炉进一步还原挥发,综合回收锌、铜、锑等有色金属。侧吹浸没燃烧熔池熔炼法最主要的特征是剧烈的熔池搅动和直接燃烧向熔池补热,因此,该技术具有热利用率高、作业率高、安全性好、喷枪寿命长、烟尘率低、冶炼弃渣无害化等优点。

根据河南某铅锌冶炼企业的操作实践,其液态富铅渣侧吹熔融还原炉的生产技术参数见表 1。

2.3 氧化区-还原区连续铅冶炼工艺

氧化区-还原区连续铅冶炼工艺是一种采用特别设计的反应炉进行的铅冶炼工艺,该反应炉及相关工艺由中国恩菲自主设计研发^[28]。如图 1 所示,炉内设有隔墙,将反应炉炉腔分为氧化区和还原区,隔墙底部设有连通通道使氧化区与还原区下部构成熔池相通。氧化区与还原区顶壁皆设有加料口和出烟口。虹吸放铅口和放渣口分别位于炉腔还原区的炉壁上,氧化区和还原区熔池液面以下分别设有侧吹喷枪。通过该连续炼铅装置使单台反应炉实现了氧化与还原,从而缩短了现有铅冶炼工艺流程,渣中含铅低且稳定密封性能好,环保性能高,充分利用了

表 1 液态富铅渣侧吹熔融还原炉的生产技术参数

序号	指标	数值	序号	指标	数值
1	炉床面积/m ²	18	7	烟尘率/%	6
2	热渣处理量/t·d ⁻¹	约 500	8	氧耗/m ³ ·t ⁻¹	约 80
3	富氧浓度/%	约 65	9	煤耗/kg·t ⁻¹	约 140
4	渣含铅/%	<2.0	10	冶炼能耗/kgce·t ⁻¹	约 180
5	铅的回收率/%	>98.5	11	锡的回收率/%	>95
6	锑的回收率/%	>95	12	硫利用率/%	>98.5

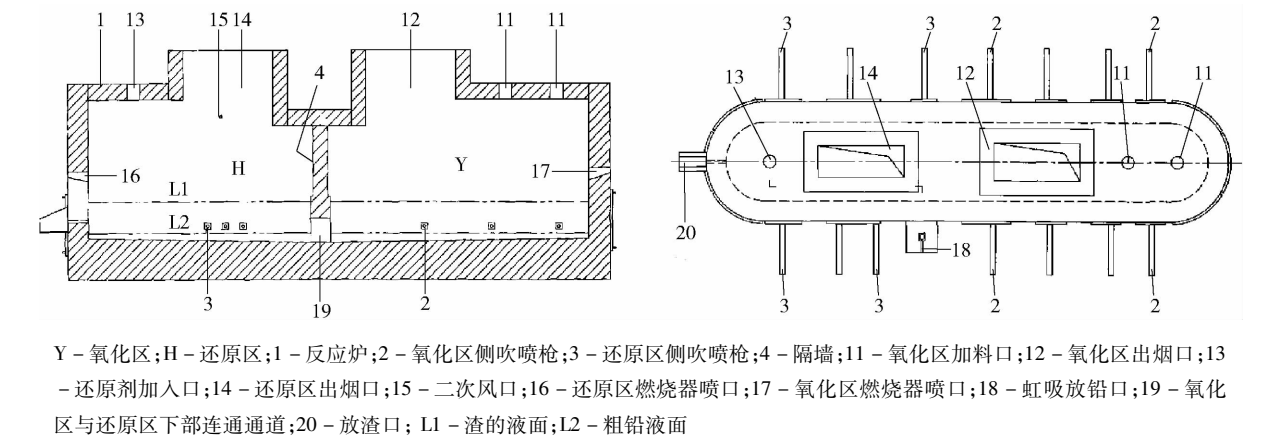


图 1 氧化区-还原区连续炼铅反应炉示意图

渣的热焓,降低了能耗。

采用该工艺将铅精矿和熔剂加入到反应炉的氧化区内,由氧化区的侧吹喷枪向氧化区熔池内喷入氧气进行氧化熔炼,得到粗铅和富铅渣。富铅渣由连通通道进入还原区,在还原区加入还原剂,由还原区的侧吹喷枪向熔池中喷入氧气和燃料为熔池补热,通过还原反应得到粗铅和炉渣。采用该工艺使单台反应炉实现氧化与还原,从而缩短了现有铅冶炼工艺流程,渣含铅低且稳定,密封性能好,环保性高,充分利用了渣的热焓,降低了能耗。但目前,由于该工艺还存在一些操作上的困难,尚未有工业化案例。

2.4 全湿法炼铅工艺

铅与其他金属(诸如铜、镍、钴、锌等)在湿法浸出过程中的最大不同在于铅的湿法浸出无法使用硫酸(硫酸铅不溶于水)。这是制约湿法炼铅产业化的一个重要因素。现阶段,国内外普遍研究的湿法炼铅工艺都是将铅或硫酸铅转化为可溶铅化合物,诸如氯化铅、硝酸铅、硅氟酸铅等^[29]。近几年来,国内外相关研究单位根据各自的原料特点进行了氯盐体系、硝酸盐体系以及硫酸体系下的湿法炼铅工艺

试验,但效果都不尽如人意,很难实现工业化。

2000 年,云南元阳金矿采用盐酸加 CaCl₂ 溶液矿浆电解工艺处理含铅金精矿,精矿含铅约 10%,控制电解液酸度 2.0 左右,可产出含铅 96% 的海绵铅,海绵铅加工费约合 1 400 元/t。但该厂由于资源枯竭已于 2006 年停产。

3 我国铅基多金属固废处理工业技术创新与应用实践

铅基多金属固废来源广、数量大,每年产生千万吨,主要来源两大类,一类是有色行业产生的各种废渣废料,如含铅烟尘、锌浸出渣和含铅尾矿等;另一类是铅消费产生的废铅膏、铅玻璃和铅合金等。铅属于重金属之一,极易造成水-土-气复合污染,“血铅”问题频发,铅污染是危及我国生态安全和人民健康的重大环境问题。造成我国铅污染问题的原因除公众环保意识薄弱外,主要原因是由于我国铅基固废回收利用水平不高、再生利用率低(再生铅产量占铅总产量不足 50%),远低于美国(70% 以上)、欧洲(80% 以上)等发达国家的铅回收利用水平^[30-33]。

生产端产生的铅基固废主要有含铅烟尘、含铅废渣料、锌浸出渣和含铅尾矿等。我国铜、铅、锌、铝等有色金属产量已连续多年世界第一,有色金属冶炼过程中产出的高铅烟尘以及含铅废渣料等多形态铅基固废每年可达百万吨,但由于我国有色金属冶炼厂众多,分布广泛,单个企业含铅烟尘及废料产生量小。由于缺乏有效的协同处理技术,这些有色金属冶炼厂产出的多形态复杂铅基多金属固废绝大部分采用鼓风机、反射炉等落后工艺及装备进行处理,造成了极大的环境污染。

消费端产生的铅基固废以再生铅泥、铅栅、铅烟尘、铅玻璃等为主,每年产量高达约 500 万 t,是我国再生铅的主要来源。其中,铅膏是最为典型的铅基固废,2019 年我国铅产量 579.7 万 t,80% 以上用于铅酸蓄电池的生产,因此,我国铅再生主要集中于废铅酸蓄电池回收利用上^[32-34]。目前铅膏等铅基固废处理工艺仍以落后的短窑、反射炉、鼓风机工艺为主,存在规模小,回收率低,颗粒物、NO_x、重金属等二次污染物排放严重超标的问题,无法满足现有的超低排放、大规模、低成本、高回收率的资源化利用要求。

根据现有铅基固废产量高、成分复杂、多金属并存、回收处理难度大等问题,开发含铅废物短流程资源化绿色协同处理技术,突破关键瓶颈,建立完整循环利用技术体系和实现铅基固废大规模、低成本、零排放、清洁利用具有重要意义。

3.1 铅基固废底吹熔炼工艺

20 世纪七八十年代,国内多个研究设计机构联合研发出底吹熔炼工艺,并成功应用于铅精矿冶炼。该工艺采用底吹熔炼-鼓风机还原工艺生产粗铅,后发展成为熔融铅渣直接热态还原工艺,从而大大降低了炼铅能耗。河南某铅锌冶炼企业与中国恩菲合作将底吹熔炼技术应用于处理铅膏上,成功开发了“氧气底吹熔炼-底吹熔融还原-富氧烟化吹炼”三连炉连续炼铅工艺,采用该工艺可联合处理铅膏等铅基固废和铅精矿。其基本原理与底吹炼铅类似,氧气底吹炉进行铅膏等铅基固废的熔化脱硫造渣,底吹熔融还原炉进行还原,富氧烟化吹炼用于其他有价金属的回收。采用该工艺处理铅膏等铅基固废,铅的回收率可达 98.5%,烟尘率 10%~13%,还原炉渣含铅 1.5%,终渣含铅 0.3%^[30-33]。

3.2 铅基固废侧吹熔炼工艺

侧吹浸没燃烧熔池熔炼法是一种使用多通道侧吹喷枪以亚音速向熔池中喷入富氧空气和燃料(天然气、煤气、粉煤等)来达到强化熔池熔炼目的的工艺。该工艺由我国自主研发。河南某铅锌冶炼公司在我国首次采用侧吹熔炼技术处理铅膏进行工业化生产,并取得了巨大成功。2012 年,由中国恩菲设计,国内第一条用于处理未脱硫铅膏的连续熔化侧吹还原炉生产线在湖北某冶金公司投产,经过投产以来的不断摸索与改进,现已形成铅基固废连续熔池熔炼技术。

这种铅基固废无害化、资源化处理工艺流程,主要包括配料系统、连续熔化侧吹还原熔炼系统、再生铅精炼系统和烟气环保回收系统。该工艺是针对铅基固废开发的一项低温、连续、高效、清洁的熔炼工艺。

目前国内已有多家知名大型再生铅企业升级改造项目采用侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术处理含铅烟尘、含铅锌浸出渣、铅膏等铅基固废,主要生产指标如下:铅回收率大于 98.5%;锑、锡回收率大于 95%;硫利用率大于 98.5%;弃渣含铅小于 1%,属于一般固废^[31-34]。

3.3 铅基固废全湿法处理工艺

3.3.1 氯盐体系全湿法处理铅基固废工艺

2016 年以前,世界铅产能几乎 100% 来自火法冶炼工艺。2016 年 7 月,中国恩菲参与设计,云南某有色金属股份有限公司所建的世界第一座产业化湿法炼铅厂顺利投产,标志着湿法炼铅工艺的产业化。该厂采用氯盐体系全湿法炼铅技术处理原堆存的锌浸出渣(含铅 < 20%)和钢厂烟灰浸锌后的浸出渣(含铅 15%~20%),两种原料中的铅都以硫酸铅的物相存在。设计规模为年产粗铅 3 万 t。

如图 2 所示,该工艺以氯盐(氯化钙和氯化钠)为浸出剂,铅渣(泥)中的硫酸铅经过浸出生成氯化铅,经过滤分离得到氯化铅液。随后该氯化铅液采用锌片置换得到海绵铅后进行电解精炼。置换后液经萃取与反萃,反萃液返回锌电解,锌在系统中循环使用。采用该工艺,1 t 锌可置换 3 t 海绵铅,每生产 1 t 海绵铅耗电 1 200 kW·h,每 t 海绵铅的加工成本为 3 200 元^[31-35]。

3.3.2 原子经济法铅循环利用工艺

原子经济法铅循环利用工艺是由北京化工大学

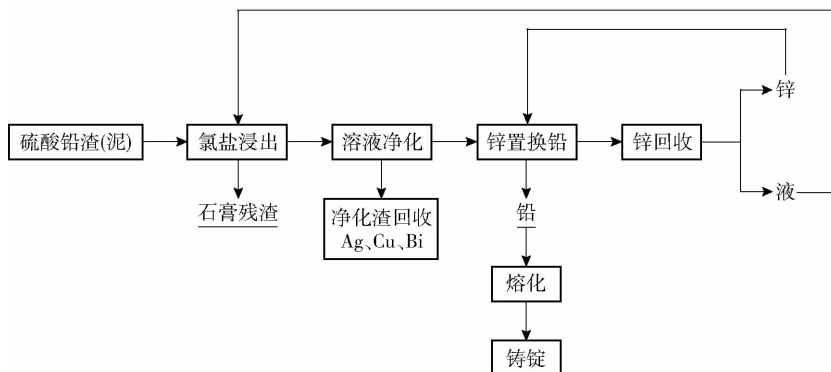


图 2 氯盐体系全湿法处理铅基固废工艺流程简图

研发的一种通过处理铅废旧电池的铅膏泥,直接生产高纯氧化铅的工艺。2016 年 8 月,浙江长兴某集团万吨级“原子经济法铅循环利用”中试线的设计评审工作开始,目前已完成实验室试验和半工业化试验。

该工艺首先要对铅膏泥进行脱硫,工艺采用氢氧化钠等碱性溶液与铅膏泥中的硫酸铅反应生成氧化铅和硫酸钠;然后将生成的氧化铅加热至 600 ℃ 以上,使部分 α 型氧化铅转变为 β 型氧化铅,以满足生产铅电池的要求。浙江某集团研究院采用该工艺完成了千克级规模的扩大试验,具有铅回收率高、工艺流程短、产品附加值高、易于操作等优点,省去了 PbO 还原为金属 Pb 再转化为电池所需的 PbO 的步骤,有望成为直接生产电池材料的新方法^[32-36]。

现阶段相关研究设计单位正在进行万吨级示范性工厂的设计,由于万吨级铅膏泥中含有泥砂等杂物,设计过程中必须增加络合剂溶解铅氧化物的流程,该流程的增加需要将生成的碳酸铅加热分解,这会导致能耗和单位产品成本的增加,因此,该工艺是否能与现有火法工艺竞争还有待进一步比较验证。

3.3.3 其他湿法处理铅基固废工艺

铅膏等铅基固废湿法短流程再生技术一直是国内外的研究热点,但由于受生产规模和关键装备的限制,大规模工业生产及推广应用尚存在较大困难^[31-35]。

1) 脱硫转化-还原浸出-电积工艺。脱硫转化-还原浸出-电积工艺常用来处理铅膏,该工艺最具代表性的是可闭路循环的 RSR 工艺和 CX-EX 工艺,RSR 工艺以碳酸铵为脱硫剂,亚硫酸盐为还原剂,质量分数为 20% 的 H_2SiF_6 或 HBF_4 溶液为浸出剂。铅膏通过碳酸铵脱硫转化为碳酸铅和硫酸铵。

碳酸铅在质量分数为 20% 的 H_2SiF_6 或 HBF_4 酸性溶液体系下浸出,铅溶解并生成二氧化碳,再通过电解可得金属铅;硫酸铵高温分解,生成的二氧化硫返回铅膏还原工序,生成的氨水返回到脱硫转化工序,从而形成闭路循环。电解后废电解液和酸浸分解产生的二氧化碳分别返回浸出工序和脱硫转化工序,整个工艺过程形成闭路循环,三废产出量小。CX-EW 工艺与 RSR 工艺的机理和流程基本相同,所不同的是该工艺以碳酸钠作为脱硫剂,以双氧水或金属铅为还原剂。

2) 硫化转化-氧化浸出-电积工艺。硫化转化-氧化浸出-电积工艺法是基于氟硼酸盐的湿法炼铅技术,先将铅膏进行硫化,利用 $\text{Fe}(\text{BF}_4)_3$ 的氧化性在 HBF_4 溶液中将铅氧化为 $\text{Pb}(\text{BF}_4)_3$,采用隔膜电解生产高纯度电解铅。FLUBOR 工艺最具代表性,根据硫化方法的不同又分为硫化钠转化法和生物硫化技术。前者采用 Na_2S 和 H_2SO_4 作为硫化剂将铅膏中的铅化合物转化为 PbS ,后者采用硫酸盐还原菌将铅膏中的铅化合物转化为 PbS 。

3) 氯盐浸出-电积工艺。该工艺无需经过脱硫或硫化,直接在热 $\text{HCl}-\text{NaCl}$ 体系下将铅转化为可溶的氯化铅,然后采用隔膜电解技术生产金属铅。该方法流程简短,但是氯盐体系浓度较高,腐蚀性强,这是制约该工艺工业化的关键问题。

4) 固相电解还原工艺。该工艺利用粘结剂在阴极板上直接涂抹铅膏,阳极则采用石墨或难溶金属,电解液为 NaOH 溶液,金属铅在阴极还原。该工艺因电流效率低、电解不彻底、电耗高、试剂消耗高等问题至今尚未得到大规模应用。

5) 直接转化生产电池材料方法。华中科技大学研究采用柠檬酸作为浸出剂,将铅膏中的含铅组

分转化为结晶柠檬酸铅沉淀后,在高温下煅烧获得高纯氧化铅。

4 结论

1)我国铅产业存在资源过度开发、资源保障程度偏低、矿石严重依赖进口、铅市场需求低迷、铅基固废等二次资源开发利用滞后等问题,面临着锂离子电池等新兴技术产业带来的巨大挑战。

2)现有的铅冶炼方面的技术创新与工业实践主要集中在以熔池熔炼(底吹、侧吹等)为代表的铅冶炼直接熔炼工艺。

3)为缩短熔池熔炼工艺流程,减少投资成本,进一步降低铅生产能耗,将铅冶炼的氧化熔炼、熔融还原及综合回收等工艺流程进行一体化设计,开发一体化连续高效炼铅设备及工艺已经成为铅冶炼工艺未来的一种创新发展趋势。

4)发展创新铅冶炼工艺,开发利用含铅烟尘、锌浸出渣、含铅尾矿、废铅膏、铅玻璃和铅合金等铅基固废二次资源已经成为未来铅冶炼工艺的发展趋势。

5)随着湿法工艺的进步,硫酸铅等全湿法炼铅技术取得阶段性突破。

[参考文献]

- [1] MUSHAK P. A brief early history of lead as an evolving global pollutant and toxicant [J]. Trace Metals & Other Contaminants in the Environment, 2011, 10(1): 23–39.
- [2] 周文丽,刘思然,刘海峰,等. 中国传统坩埚炼铅技术初探[J]. 自然科学史研究, 2014, 33(2): 201–215.
- [3] 铅锌冶金学编委会. 铅锌冶金学(精)[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 5–35.
- [4] MITSUNE Yutaka, SATOH Shigeki. Lead smelting and refining at Kosaka smelter[J]. Journal of MMIJ, 2007, 123(12): 630–633.
- [5] 李卫锋,张晓国,郭学益,等. 我国铅冶炼的技术现状及进展[J]. 中国有色冶金, 2010, 39(2): 29–33.
- [6] 李仲达,华觉明,张宏礼. 商周青铜容器合金成份的考察——兼论钟鼎之齐的形成[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1984(2): 25–43.
- [7] 陈红雨. 铅酸蓄电池的最新研究与发展动态[J]. 电源技术, 2000, 24(6): 374–376.
- [8] 易大展. 电缆护套用铅基合金[J]. 有色金属(冶炼部分), 1991(6): 39–40.
- [9] 钟建华,陈丙璇,欧阳玲玉. 环保易切削黄铜的研究现状及发展前景[J]. 有色金属加工, 2005(4): 7–8.
- [10] 冯泽臣,娄云,万玲,等. 医用诊断 X 射线防护中不同屏蔽

物质的铅当量[J]. 首都公共卫生, 2012, 6(5): 211–214.

- [11] 宁豪才. 国内外铅冶金生产面面观[J]. 新疆有色金属, 1997(1): 54–60.
- [12] 张乐如. 现代铅冶金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013: 10–55.
- [13] 毛建素,陆钟武. 关于铅产量变化对废铅资源的影响的研究[J]. 中国资源综合利用, 2003(7): 38–41.
- [14] 陈进,吴爱祥,王洪武. 世界与我国铅锌产量和消费量的重构相空间混沌预测[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2007(3): 23–27.
- [15] 张小红. 环保高压下铅锌产量增速放缓——2017 年铅锌周 CEO 高峰论坛发言集锦[J]. 中国有色金属, 2017(24): 40–41.
- [16] 蒋继穆. 国内外铅冶炼技术现状及发展趋势[J]. 有色冶金节能, 2013, 29(3): 4–8.
- [17] 仲世鑫,王登科,吴星需. 中国铅锌矿资源现状和矿业可持续发展的建议[J]. 科技风, 2009(10): 170.
- [18] 顾亚,王建平,王修,等. 我国铅资源开发现状和可持续发展建议[J]. 资源与产业, 2018, 20(1): 39–46.
- [19] 杨荣林. 浅析我国铅锌矿资源开发现状及可持续发展建议[J]. 世界有色金属, 2018(1): 148–150.
- [20] 雷力,周兴龙,文书明,等. 我国铅锌矿资源特点及开发利用现状[J]. 矿业快报, 2007(9): 8–11.
- [21] 张正洁,陈扬,张智勇,等. 我国废铅蓄电池回收行业发展现状及可持续发展策略[J]. 中国科技成果, 2014(15): 9–12.
- [22] 刘永团,许磊,杜青松. 铅锌矿资源分布现状及中资企业开发建议[J]. 资源与产业, 2017(5): 75–81.
- [23] 屈伟平. 锂离子蓄电池的广泛前景及发展障碍[J]. 汽车与配件, 2009(26): 40–43.
- [24] 李煜宇,李真. 全固态锂离子电池正极界面的研究进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(4): 253–260.
- [25] 钟旭航. 新型锂离子动力电池研发和应用研究[J]. 数码设计(下), 2019(9): 239.
- [26] 索蒙敏,李泓. 锂离子电池过往与未来[J]. 物理, 2020, 49(1): 17–23.
- [27] 李东波,陈学刚,王忠实. 现代有色金属侧吹冶金技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019: 1–38.
- [28] 陆志方,王忠实,伍绍辉,等. 连续炼铅装置及连续炼铅工艺: CN201010564943.9[P]. 2011-04-13[2020-08-19].
- [29] 蒋继穆. 关于湿法炼铅的几点思考[N]. 中国有色金属报, 2017-07-18(006).
- [30] 李利丽,赵振波,陈选元. 双底吹熔炼铅膏生产再生铅的工业实践[J]. 资源再生, 2019(1): 58–60.
- [31] 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.
- [32] 王成彦,邱定蕃,徐盛明. 金属二次资源循环利用意义、现状及亟需关注的几个领域[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(E01): 359–366.
- [33] 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.

[34] 诸建平. 废铅酸蓄电池生产再生铅的工艺工程设计[J]. 杭州化工, 2011, 41(3): 31-35.

[35] 陈志雪, 张彦杰, 宋艳龙, 等. 再生铅现状及发展趋势分析[J]. 蓄电池, 2016, 53(2): 96-100.

[36] 徐新. 铅酸蓄电池生产过程中废铅膏的再生铅利用[J]. 广东化工, 2015, 42(4): 31-34.

Industrial technological innovation and application practice of lead smelting in China

WU Wei-guo, SONG Yan

Abstract: China's lead reserves account for less than 20% of the world's total lead resources, about 15.8 million tons. More than 50% of the world's lead production capacity is provided by China, About 80% of the lead is used in the battery industry. A large number of lead-based solid waste is produced in the lead production and consumption process. At the same time, the development of lithium battery technology also brings great crisis and challenge to lead smelting industry. Under the environment of over-exploitation of lead ore, insufficient guarantee life of lead resources and dependence on import of lead ore resources, it has become an urgent problem for related industries and enterprises to research and develop new lead smelting technology and lead-based solid waste treatment technology. The paper describes the technological innovation and application of lead smelting industry in China in recent years, indicating that At present, primary ore lead smelting and secondary resources smelting such as lead-based solid waste are dominated by direct bath smelting. In the future, the process of integrated continuous and high efficiency lead smelting, the recycling and utilization technology of secondary lead resources such as lead-based solid waste will become the trend. And the entirely hydrometallurgy technology of lead is expected to be further developed.

Key words: lead smelting; primary lead ore; lead-based solid waste; bath smelting; continuous and high efficiency lead smelting process; lead hydrometallurgy; recycling and utilization

高集成神经形态人工视觉光电传感器问世

从中科院金属所沈阳材料科学国家研究中心获悉,该所与南京理工大学、中科院苏州纳米所、东北大学、南京大学等单位合作,开发出一种柔性碳纳米管-量子点神经形态人工视觉光电传感器。近日,该成果以“面向神经形态视觉系统的柔性超灵敏光电传感阵列”为题,在《自然·通讯》在线发表。

人工视觉系统的开发,既要重新创建人工系统的灵活性、复杂性和适应性,又要通过高效率计算和简洁的方式来实现它。目前,人工视觉系统往往采用传统的互补金属氧化半导体(CMOS)或者电荷耦合器件(CCD)图像传感器,通过和执行机器视觉算法的数字系统连接,进而实现人工视觉功能。

由于传统的数字人工视觉系统具有功耗高、尺寸大、成本高等缺点,课题组设计并制备了一个1024像素的柔性神经形态光电传感器阵列,其中,铈铅溴钙钛矿量子点作为感光层和光生电荷俘获层,半导体性碳纳米管薄膜作为电荷传输层,二者复合具有良好的柔性,能够均匀的大面积成膜,并能够保持长期稳定性。同时,该光电传感器阵列集成了光传感、信息存储和数据预处理等功能,这与生物系统行为类似,实现实时并行处理信息,这对于模仿生物视觉处理的人工视觉系统具有重要的启发意义。此外,研究还首次实现了在极暗条件下响应并完成神经形态强化学习的案例。

基于此神经形态光电传感器,科研人员希望通过电路设计,构建功能更强大的人工神经网络,模拟大脑对信息的处理过程,实现对已知数据之间的关联和特征进行学习,从而获得对未知数据更加强大的处理能力。

(资料来源:中国有色金属学报)