

引用格式:王培元,李伟伟,杨金中,等. 老旧电解铅车间节能降本改造实践研究[J]. 有色设备,2025,39(3):111-116.

WANG Peiyuan, LI Weiwei, YANG Jinzhong, et al. Practical research on energy saving and cost reduction reconstruction of outdated electrolytic lead workshop[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2025,39(3):111-116.

老旧电解铅车间节能降本改造实践研究

王培元,李伟伟,杨金中*,赵志浩,蒋晨龙

(济源市万洋冶炼(集团)有限公司,河南 济源 459000)

[摘要] 铅电解精炼过程是目前铅火法冶炼的重要环节之一,本研究聚焦电解铅车间E的节能降本改造实践,通过升级电解槽、整流器、阳极立模机组等关键设备,使得车间E在技术和经济效益上取得显著成果。经过改造后,车间E不仅提高生产效率和安全性,也降低故障率和安全风险,还显著减少天然气和电能等能源消耗。5个月的运行数据显示,车间E的电解铅产量稳定且超过设计产能,平均达产率达到107.36%,天然气和电能的消耗均明显降低,每年为企业节省生产成本约389万元,其中天然气费用节省128万元、电费节省68万元、人员成本节省193万元。此外,改造还提升自动化程度,优化工作环境,进一步提升经济效益。车间E的改造不仅促进铅冶炼技术的进步,还为企业带来显著的经济效益,为电解铅生产行业的可持续发展提供有益的借鉴。

[关键词] 电解铅车间改造; 电解槽; 整流器; 阳极立模机组; 集中除铜

[中图分类号] TF812

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)03-0111-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.03.013

0 引言

铅作为一种重要的有色金属,具有多种独特的物理和化学性质^[1-3],在蓄电池、建筑和工业材料、机械制造、化学工业、邮电通信、交通运输、航空航天、核工业以及其他多个领域都有着广泛的应用^[2,4-5]。铅的冶炼技术主要包括火法冶炼和湿法冶炼两大类,目前全球范围内大多数铅冶炼企业以火法冶炼为主,湿法冶炼目前因为成本、环境保护等原因尚处于试验研究阶段^[6-8]。

火法炼铅主要由三连炉粗铅冶炼和粗铅电解精炼两大工段组成^[9-11]。粗铅电解精炼技术作为火法炼铅流程的重要组成部分,其起源可以追溯到20世纪初^[1,12-13]。这一技术由柏兹(Betts)发明,于1902年在加拿大特累尔(Trail)铅厂首次用于工业生产,因此也被称为柏兹法^[14-15]。该技术的出现,标志着铅冶炼行业进入一个新的阶段,推动了铅的纯化和回收效率技术发展。在柏兹法应用之前,铅的精炼主要依赖于传统的火法精炼技术,但存在纯度不高、回收率低等问题^[16-17]。柏兹法通过电解的

方式,可以有效提高铅的纯度,并实现对粗铅中铋、贵金属等元素的分离回收^[18-20]。

目前,公司拥有5条电解铅生产线,为节能降本提高效率,对其中某一条电解铅生产线(电解铅车间E,下文简称为车间E)进行试验性升级改造。本研究通过对电解槽、整流器、阳极立模机组、洗片机组及除铜设备等进行升级改造,并对车间E升级改造后5个月内的电解铅产量、能源消耗、人工成本等进行数据监测和统计分析。通过以上经济指标与其他4个传统工艺未改造车间相应的经济指标进行对比分析,研究此项目节能降本改造效果,并为其他4个电解铅车间日后改造提供数据支持与依据。

1 基础设备改造升级

本研究参考国内先进工艺对电解铅车间E的电解槽、阳极立模机组、洗片机组及除铜设备等进行改造升级。图1为车间E改造前后厂房布局简图。

从图1可以看出,全部工段布置在一个厂房车间内,这会造成交叉污染的现象,进而影响电解铅的品质。通过对比图1(a)和图1(b)可以看出,此次

[收稿日期] 2024-11-29

[第一作者] 王培元(1986—),男,河南济源人,助理工程师,主要从事有色金属冶炼方面的研究工作。

[通信作者] 杨金中(1994—),男,河南济源人,硕士,工程师,主要从事有色金属冶炼及冶金固废回收方面的研究工作。

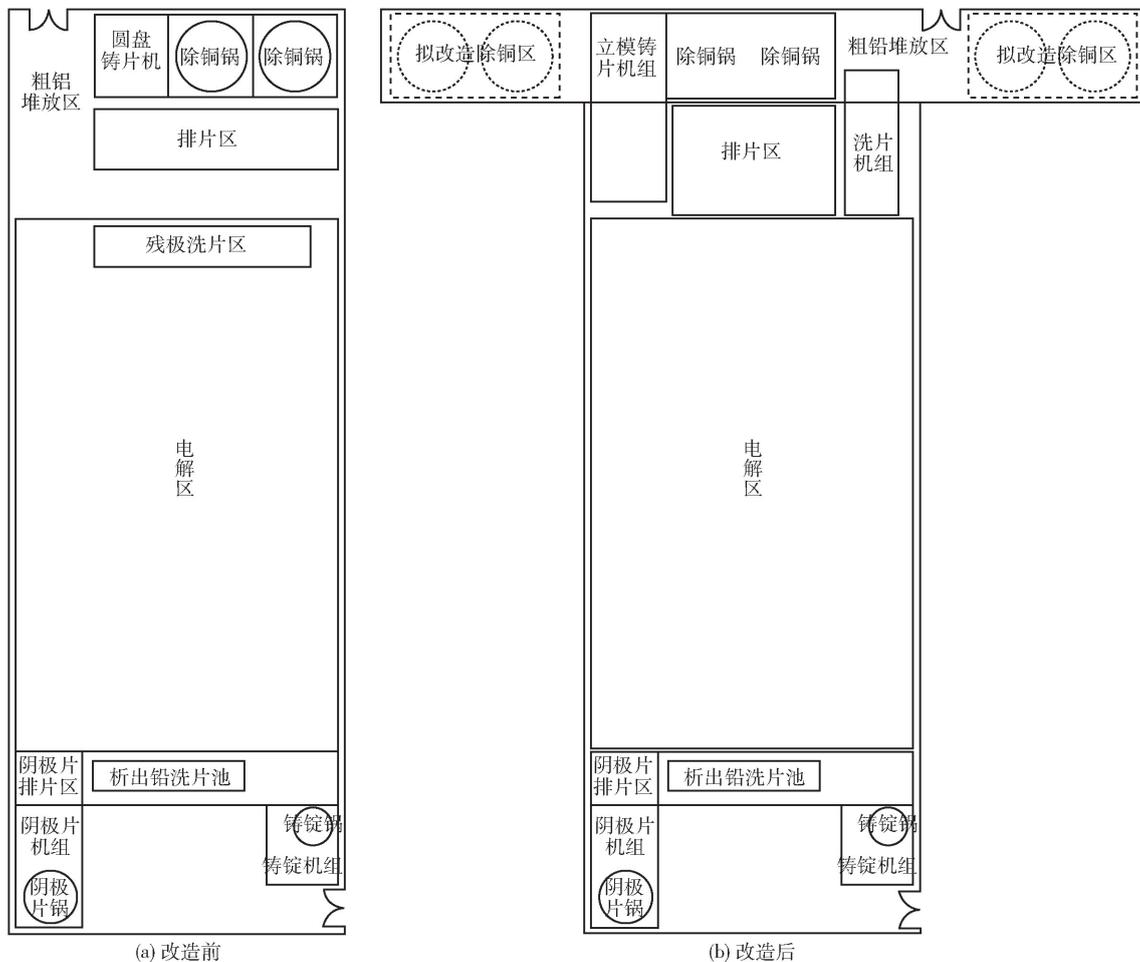


图 1 车间 E 改造前后布局简图

Fig. 1 Simplified diagram of the layout before and after the renovation of workshop E

升级改造不但更新了生产设备,同时总结过以往生产经验,对设备布局进行合理调整。调整后的布局将除铜工段进行集中安置,且为日后增设其他车间除铜工段预留操作区域。

1.1 电解槽

电解槽作为电解铅系统的核心设备,其性能直接影响到电解效率、产品质量、能耗以及整个系统的稳定性和经济效益。铅电解槽一般分为砖砌式电解槽和一体浇筑式电解槽。砖砌式电解槽主要由耐火砖、保温材料、防渗料等砌筑而成。优势在于灵活度高、成本低。劣势为施工难度高、施工技术要求高、热损失大、电解质渗透风险大、耐腐蚀性一般,维修难度高。一体浇筑式电解槽,主要由混凝土、树脂等材料整体浇筑而成。优势在于施工难度低、施工技术要求低、运行热损失小、电解质渗透风险小以及耐腐蚀性强。劣势在于成本高及灵活性差。经过市场调研及综合考虑两种电解槽的利弊,最终车间 E 选

择一体浇筑式电解槽。

精铅电解系统的电能主要通过整流器输入的直流电流提供。此前,车间采用 3 个 ZHJ12000/52 小型整流器分别控制 3 个工段,且整流器采用风冷降温,使得设备自损和热损耗较大。此次改造使用 1 个 15 kA/105 V 的大型水冷降温整流器替换传统的 3 个小型整流器。与风冷的小型整流器相比水冷式等级差调整流变压器机组拥有更低的自损和热损耗,搭配一体滚塑电解槽使用,可以提高电流效率,降低吨铅电耗。

1.2 阳极立模机组

阳极板在铅电解过程中起着至关重要的作用,是电解反应的主要载体,直接影响电解效率、产品质量及整个生产过程的稳定性和经济性。车间 E 改造之前采用的是 1 台 $\phi 7300$, JYZYJ01-SM 阳极板圆盘机组处理阳极板,其产能为 225 片/h,每槽 48 片,每天装 84 槽,18 h 生产完成。该模组生产效率高,

设备故障利用生产间隙进行维护保养,无需专门停产检修时间;出装槽采用3 d为1个电解周期,每天出装槽安排两班,每班42槽,总出槽时间长,出装槽行车运行时间长,行车负荷较大。圆盘机组属于机械加人工配合设备,人为故障率及设备故障率较高,人员劳动量和设备损坏率较高,安全风险较大。

阳极立模机组采用定制的25 000 × 2 835 × 5 000立模浇铸机组,能够显著提高阳极板的制作质量和生产效率。车间E此次改造后2台立模生产线处理阳极板,其产能为116片/h,每槽48片,每天装42槽,16 h生产完成;采用5 d为1个电解周期,设备生产能力和圆盘相同。该模组能够满足生产和例行检修需要,5 d工作模式每天减少铸阳极片和残极复炼数量,出装槽安排一班,减轻出装槽行车运行时长,行车负荷减轻。改造后的立模机组设备自动化程度较高,操作人员劳动量和故障率较低,安全风险较低。

1.3 洗片机

阳极泥是电解铅过程中的一种重要副产品,其富集了原料中的绝大多数贵金属和稀散金属^[21-22]。为更好地回收电解铅过程中产生的阳极泥,阳极片经过电解后要进行洗片操作。车间E改造前,每次清洗残极片为一槽48片,每班洗42槽(每天为2班共84槽),每天工作10 h左右完成任务;洗片机组为刷片机,没有冲洗和吹干功能,洗片质量较差,阳极泥含锑高时,洗片机大梁、刷杆、洗片刷、减速机等设备故障率较高,人员工作量很大;由于阳极片洗刷不净、含尘、含水等原因,残极入锅重炼时会发生小型爆炸、扬尘等不安全现象;洗片工段需要水冲环节,现场地面水渍多,现场行走存在滑倒风险,现场环境较差。

车间E改造后,每次洗片为2片,每槽48片,每班需要洗片42槽(每天一班),实际洗片能力为330片/h,每天工作7 h左右完成任务。改造后,洗片工段一体化自动完成,现场环境整洁;洗片干净、质量高,自带冲洗和吹干功能,操作人员劳动强度降低;故障率降低,阳极泥含锑高时,洗片质量依然良好,可以有效避免残极入锅重炼时发生的爆炸和扬尘等不安全现象。

1.4 除铜设备

铜是电解铅过程中常见的一种有害杂质元素,铜等杂质的存在可能会影响电解过程的稳定性、效率和产品质量。通过除铜处理,可以减少杂质对电

解过程的不利影响,保障电解铅产品质量,提高生产效率和安全性。

车间E改造前除铜以80 t小型除铜锅为主,除铜工段和电解工段在一个房间内进行,残极入锅重炼时出现响炮和扬尘发生等现象。以上情况造成车间环境恶劣,可能存在极大的风险对操作人员身体健康造成危害,同时设备维护难度加大。

此次改造车间E首先使用2个150 t的大除铜锅代替此前3个80 t的小型除铜锅,然后将除铜工段和电解车间分设在独立空间。以上改造措施的优势为车间环境得到极大改善,人员职业健康得到保障,且设备维护简单。

2 经济指标

车间E升级改造设计目标产能为年产5万t电解精铅。本研究通过对电解铅产量、除铜天然气用量、电解铅电耗和人员成本等经济指标进行核算,分析电车间E改造节能降本效果。

2.1 电解铅产量

电解铅产量是评估一个电解铅车间生产情况的重要依据之一。在2023年5月底完成对车间E的基础设施升级改造工作,经过1个月试车调成后,在2023年7月投入生产运营。该车间2023年7~11月电解铅合格产品产量及达产率如表1所示。其中达产率计算公式为:达产率 = 实际产量 ÷ 目标设计产量。

表1 车间E的2023年7~11月电解铅产量

Table 1 Electrolytic lead production of workshop e from July to November 2023

月份	7月	8月	9月	10月	11月
产量/t	4 443.42	4 491.58	4 310.78	4 469.07	4 652.20
达产率/%	106.64	107.80	103.46	107.26	111.65

从表1可以看出,在正式投入运营生产后的5个月电解铅产量均达到了目标设计产量,其最低达产率为103.46%,最高达产率为111.65%,5个月内的平均达产率为107.36%。以上数据表明,本次升级改造后车间生产情况稳定,并没有出现较大产量波动或不达产的情况,且完全能够满足目标设计产能的要求。

2.2 天然气用量

天然气是电解铅车间的重要能源之一,其主要作为除铜锅的加热燃料使用。除铜设备更新时使用2个150 t的大除铜锅代替此前3个80 t的小型除铜

锅,其主要目的是通过集中除铜,提高除铜效率,降低天然气的用量。图 2 为电解铅车间 E 正式运营后 5 个月电解铅天然气单耗量(每吨电解铅消耗的天然气量)与其他 4 个车间的对比图。表 2 为各电解车间 5 个月天然气单耗量的方差。

表 2 各电解车间天然气单耗量的方差

Table 2 Variance of natural gas unit consumption in each electrolysis workshop

电解铅车间	A	B	C	D	E
天然气单耗量方差	3.760	0.588	2.439	10.353	1.020

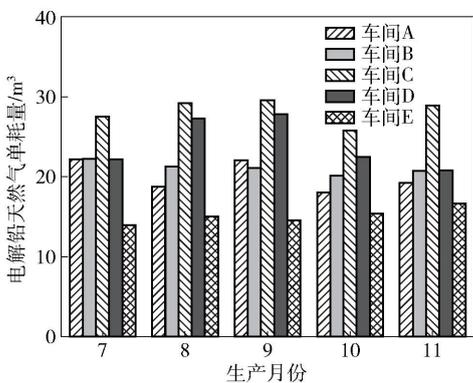


图 2 各车间电解铅天然气消耗量

Fig. 2 Natural gas consumption for electrolytic lead in each workshop

从图 2 可以看出,经过改造后车间 E 天然气单耗明显低于其他 4 个车间。车间 E 天然气单耗量最低 7 月份生产时的 13.95 m³,最高为 11 月份生产时的 16.65 m³,5 个月内的平均单耗量为 15.12 m³。其余 4 个车间的最低单耗量为车间 A 在 10 月份生产时的 18.00 m³,最高单耗量为车间 C 在 9 月份生产时的 29.56 m³,4 个车间平均单耗为 23.36 m³。车间 E 除铜改造后的天然气最高单耗量依然低于其他 4 个车间的最低单耗量。车间 E 在 5 个月内的平均天然气单耗量比其他 4 个车间的平均单耗量低 8.24 m³,天然气价格按 3.12 元/m³ 计算,车间 E 采用集中除铜后每年约节省天然气费用 128 万元。从表 2 可以看出车间 E 的单耗量方差为 1.020,仅次于车间 B,优于其他 3 个车间。这表明改造后的大型除铜锅生产稳定,天然气消耗量稳定,并无较大波动。

2.3 电解铅电耗

电能是电解铅车间的核心能源,其直接影响电解铅的品质,生产稳定性及成本。图 3 为 2023 年 7 ~

11 月各车间吨铅直流电耗。

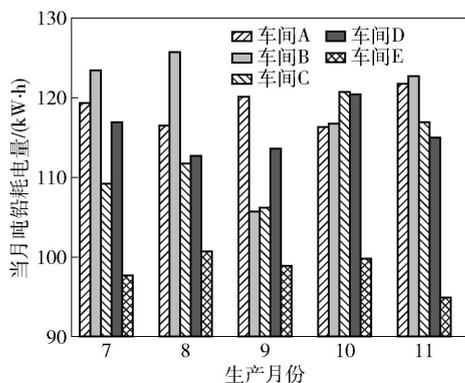


图 3 2023 年 7 ~ 11 月各车间吨铅直流电耗

Fig. 3 DC power consumption per ton of lead in each workshop from July to November 2023

从图 3 可以看出,改造后的车间 E 吨铅直流电耗明显低于其他 4 个未改造的车间。车间 E 的最高吨铅直流电耗为 8 月生产的 100.7 kW·h,最低吨铅直流电耗为 11 月生产的 94.9 kW·h,5 个月内平均吨铅直流电耗为 98.4 kW·h。其他 4 个未改造车间在相同 5 个月内最低吨铅直流电耗为电解铅车间 B 在 9 月生产时的 105.7 kW·h,最高吨铅直流电耗则是电解铅车间 B 在 8 月生产时的 125.7 kW·h。4 个未改造车间 5 个月内的平均吨铅直流电耗分别为 118.78、118.84、112.94、115.72 kW·h,其数值均高于电解铅车间 E 的平均吨铅直流电耗数值。4 个未改造车间 5 个月内总平均吨铅直流电耗为 116.57 kW·h,比电解铅车间 E 高出 18.17 kW·h。电费价格按 0.75 元/kW·h 计算,电解铅车间 E 改造后每年节省电费约 68 万元。表 3 为 2023 年 7 ~ 11 月各车间吨铅直流电耗方差。

表 3 2023 年 7 ~ 11 月各车间吨铅直流电耗方差

Table 3 Variance of DC power consumption per ton of lead in each workshop from July to November 2023

电解铅车间	A	B	C	D	E
吨铅直流电耗方差	5.472	64.998	34.213	9.357	5.060

通过计算吨铅直流电耗的方差,可以说明其生产稳定性。从表 3 可以看出车间 E 在 5 个月内的吨铅直流电耗方差为 5.060,数值最小。这表明该车间为 5 个车间中生产最稳定的一个车间,凸显了车间 E 改造的可行性和优越性。

2.4 人员成本

人员成本是企业运营成本中的核心要素之一,

直接影响到企业的盈利能力和市场竞争力。合理控制并优化用人成本,能够显著提升企业的运营效率,增强企业的财务稳健性和可持续发展能力。此次车间 E 的改造考虑到人员成本问题,表 4 为车间 E 改造前后用人情况。

表 4 车间 E 改造前后用人情况

Table 4 Workforce situation before and after the renovation of workshop E

	除铜/班 组数	电调/班 组数	出装槽/班 组数	总人数
改造前	8/3	6/3	16/2	74
改造后	6/3	5/3	18/1	51

从表 4 中可以看出经过集中除铜改造后,除铜工每个班组可以减少 2 人;采用 1 个大型整流器代替 3 个小型整流器后,电调工每个班组可以减少 1 人;采用的立模机组和残极洗片模组直接将出装槽班组由 2 个班组优化为 1 个班组。从表 4 可以看出,车间 E 经过改造后总体工人数量(不包含天车工)从 74 人减为 51 人。若现公司电解铅车间用人成本以每月约为 7 000 元/人计算,经过改造后在不增加劳动强度的前提下车间 E 工人数量减少 23 人,该车间每年用人成本节省约 193 万元。在不增加劳动强度的前提下精简用人,对于企业的良好发展与运营是至关重要的。

3 结论

本研究针对电解铅车间 E 进行节能降本改造实践,通过对电解槽、整流器、阳极立模机组、洗片机组及除铜设备等关键设备的改造升级,取得显著成效。

1)采用一体浇筑式电解槽替代传统的砖砌式电解槽,有效降低热损失和电解质渗透风险,提高了耐腐蚀性和电解效率,为电解铅生产过程的稳定性和经济效益奠定了坚实基础。改造后每月电解铅产量超过设计产能,平均达产率为 107.36%。

2)引入大型水冷降温整流器,替代原有的三个小型风冷整流器,显著降低了设备自损和热损耗,提高电流效率,降低吨铅电耗,实现了节能目标。

3)采用先进的立模浇铸技术替代圆盘机组,提高了阳极板的制作质量和生产效率,同时降低了人员劳动量和设备故障率,减少了安全风险,提升了生产过程的稳定性和经济性。

4)采用 2 个 150 t 除铜锅代替 3 个 80 t 除铜锅可以有效降低除铜时天然气的消耗量,同时采用集中除铜将除铜锅和电解槽隔开,可以用改善车间环境。

5)通过对车间 E 升级改造后 5 个月内的电解铅产量、能源消耗、人工成本等经济指标进行监测和分析,与传统未改造车间进行对比。结果显示车间 E 降本改造预计每年节省生产成本约 389 万元,其中天然气费用节省约 128 万元,电费节省约 68 万元,人员成本节省约 193 万元。改造后的车间 E 在节能降本方面取得显著成效,为其他电解铅车间的改造提供了科学依据和示范案例。

综上所述,本研究中的电解铅车间节能降本改造实践是可行的,不仅提升了生产效率和产品质量,还显著降低了能源消耗和人工成本,具有重要的推广价值和应用前景。

[参考文献]

- [1] 彭容秋. 铅冶金[M]. 长沙:中南大学出版社,2004.
- [2] 王文辉. 金属铅冶炼研究与生产初探[J]. 机械研究与应用,2003(S1):72-73.
- [3] 翟秀静,谢锋. 重金属冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
- [4] HOHJO E, KISHIMOTO K, KASAI Y, et al. Lead-acid battery [M]. EP. 1992.
- [5] ZHANG C, SHARKH S, LI X, et al. The performance of a soluble lead-acid flow battery and its comparison to a static lead-acid battery [J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(12): 3391-8.
- [6] 孙倬. 重有色金属冶炼设计手册. 铅锌铋卷 [M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
- [7] 尹文新,韩跃新,王德全. 湿法炼铅研究进展 [J]. 矿冶,2005,14(3):49-52.
- [8] 俞小花,鲁顺利,谢刚,等. 湿法炼铅过程中铅电积的研究进展[J]. 矿产综合利用,2010(1):34-37.
- [9] 李小兵,李元香,蔺公敏,等. 万洋“三连炉”直接炼铅法的生产实践[J]. 中国有色冶金,2011,40(6):13-16,23.
- [10] 张博. 缔造铅冶炼新模式——万洋冶炼(集团)有限公司“三连炉”炼铅新工艺[J]. 中国有色金属,2012(15):56-57.
- [11] TOKIAKI, TANAKA. Adhesion of anode slime on anode surface in electrolytic refining of lead[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 1977,8: 651-660.
- [12] 张乐如. 现代铅冶金[M]. 长沙:中南大学出版社,2013.
- [13] LU J, DREISINGER D. Lead electrowinning from methanolic sulfonic acid [J]. Hydrometallurgy, 2021, 203(5):

- 105623.
- [14] 高和欣,王文军,伍秋美,等. 柏兹法电解制备 6N 高纯铅研究[J]. 湖南有色金属,2023,39(6):73-76,104.
- [15] 夏中卫. 添加剂在柏兹法铅电解中的应用[J]. 湖南有色金属,2003(4):20-23.
- [16] 班丽丽,刘中华,雍岐龙,等. 粗铅火法精炼除铜新工艺的热力学分析[J]. 有色金属:冶炼部分,2008(1):15-17.
- [17] 迟有. 粗铅火法精炼除杂工艺实践[J]. 江苏冶金,1999(6):8-9.
- [18] 李怀仁,陈家辉,徐庆鑫,等. 氯化浸出铅阳极泥回收金的研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2011,36(5):14-19,55.
- [19] LI L, LIU D, YANG B, et al. Extracting of Crude Antimony from Lead Anode Slime by Vacuum Distillation [J]. Chinese Journal of Vacuum Science & Technology, 2012, 32(4): 301-305.
- [20] WU W, WANG Z, LIU J. Hydrometallurgical Pretreatment Process for the Recovery of Valuable Metals from the Lead Anode Slime [J]. Advanced Materials Research, 2013, 813:153-156.
- [21] GAO Z, KONG X, YANG B, et al. Extraction of scattered and precious metals from lead anode slime: A short review [J]. Hydrometallurgy, 2023, 220:106085.
- [22] LI S, GAO Z, KONG X, et al. Separation behavior of metal and oxide: Vacuum gasification for metal recovery advanced from lead anode slime [J]. Vacuum, 2024, 227:113383.

Practical research on energy saving and cost reduction reconstruction of outdated electrolytic lead workshop

WANG Peiyuan, LI Weiwei, YANG Jinzhong^{*}, ZHAO Zhihao, JIANG Chenlong
(Jiyuan Wanyang Smelting (Group) Co., Ltd., Jiyuan 459000, China)

Abstract: The lead electrolytic refining process is a crucial component of current pyrometallurgical lead smelting. This study focuses on the energy-saving and cost-reducing renovation practices in Electrolytic Lead Workshop E. By upgrading key equipment such as electrolytic cells, rectifiers, and anode vertical mold units, Workshop E has achieved significant technological and economic improvements. Post-renovation, the workshop not only enhanced production efficiency and safety but also reduced failure rates and safety risks, while markedly decreasing energy consumption of natural gas and electricity. Five months of operational data indicate that Workshop E's electrolytic lead output is stable and exceeds the designed capacity, with an average production rate of 107.36%. The consumption of natural gas and electricity has significantly decreased, saving the company approximately 3.89 million yuan annually in production costs, including 1.28 million yuan in natural gas, 0.68 million yuan in electricity, and 1.93 million yuan in labor costs. Additionally, the renovation has increased automation levels and optimized the working environment, further enhancing economic benefits. The transformation of Workshop E not only advances lead smelting technology but also delivers substantial economic returns, offering valuable insights for the sustainable development of the electrolytic lead production industry.

Keywords: electrolytic lead workshop transformation; electrolytic cell; rectifier; anode vertical mold unit; centralized copper removal

