

引用格式:杨华锋,史小毛,田发辉.侧-顶吹熔炼技术在处理铅基固废等物料的生产实践[J].有色设备,2024,38(5):30-36.
YANG Huafeng,SHI Xiaomao, TIAN Fahui. Side-top blowing smelting technology in the production practice of processing lead-based solid waste and other materials[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2024,38(5):30-36.

侧-顶吹熔炼技术在处理铅基固废等物料的生产实践

杨华锋,史小毛,田发辉

(河南金利金铅集团有限公司,河南济源459000)

[摘要]介绍了河南金利金铅集团有限公司新建铅基多金属固废协同强化冶炼产业化示范及锌资源综合利用项目,特别是侧-顶吹熔炼技术处理铅基固废等物料的生产实践。总结了生产情况,阐述了主要生产工艺,列举了主要的生产数据和技术经济指标。国内锌冶炼多以湿法冶炼为主,在其生产过程中会产出含铅的锌渣。以前由于技术落后,该渣多以堆存为主,近些年由于环保问题亟需对该固废进行处理,由此出现各种小型化处理该固废渣的方法。但因该固废渣有价金属较少,处理成本较高,单独处理不经济。本文侧-顶吹熔炼技术的应用,解决了以往锌湿法冶炼产出的含铅锌渣长期堆存造成环境污染和小型化处理且成本普遍较高、不经济的问题。实践证明,侧-顶吹熔炼技术在处理含铅基固废、锌冶炼渣等物料方面是可行的,优势明显,实现了固废资源化综合利用,并且该技术工艺先进,成本较低,可实现规模化、大型化生产。

[关键词]侧-顶吹熔炼;铅基固废;铅锌渣;大型化;资源化;生产实践

[中图分类号] TF812 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)05-0030-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.05.005

随着铅、锌冶炼技术的发展以及对固废资源化处理要求的提高,铅锌冶炼生产互补及固废综合处理成为行业发展的趋势^[1-4]。

国内外对铅锌渣的处理主要采用湿法浸出富集和火法富集2种形式^[5-11]。湿法工艺普遍存在成本较高、占地面积广、流程长、经济效益不高等缺点,而火法工艺普遍占地少,流程短,成本低。火法工艺以回转窑、烟化炉、浸没熔炼熔池应用较多。其中,回转窑与烟化炉最终产品为金属氧化物,银的回收率低,直接经济价值不高,目前一些单位仅将其用于危废处理;浸没熔炼熔池搅动强烈,反应速度快,金属易富集。因此,采用浸没熔炼更为经济合理。侧-顶吹熔炼技术是在“液态铅渣侧吹炉直接还原技

术”基础上优化炉型,属于浸没熔炼技术的一种,对各种物料适应性强。

由河南金利金铅集团有限公司牵头承建并运行的项目课题“复杂铅基多金属固废协同冶炼技术及大型化装备”,于2022年12月1日至今连续稳定运行,利用该技术对铅基固废(如铅膏、低品位含铅杂料、锌冶炼系统铅锌渣)处理,结合金利集团自身优势和技术特点,填补国内含铅和含锌固废综合处理的技术空白,实现了固废资源化。

1 试验原料

在铅锌联合生产过程中,锌冶炼系统产出的铅锌渣需进行无害化处理,因此,铅锌渣可作为侧-顶吹熔炼炉主要原料之一。但是铅锌渣中的铅、锌等金属品位较低,仅处理铅锌渣及回收铅锌渣中有价金属,成本较高。因此,搭配其他高富含多金属物料协同处理更为经济,如铅膏、含铅低品位氧化矿、含铅烟灰、高富含多金属难处理杂料等。本文具体物料包括铅锌渣、铅膏、氧化矿、烟灰、高富含多金属杂料、入炉混合料、石粉和煤粉,其成分见表1~表6。

[收稿日期] 2024-06-12

[第一作者] 杨华锋(1969—),男,湖北公安人,高级工程师,主要从事有色金属冶炼工程建设与技术管理工作,现任河南金利金铅集团有限公司总工程师。

[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-典型及大宗铅基固废协同熔炼技术与大型化装备(2019YFC1907302)。

表 1 铅锌渣成分

Table 1 Lead-zinc slag compositions

%

成分	Pb	Zn	FeO	Cu	S	Au *	Ag *
含量	3 ~ 5	3 ~ 6	22 ~ 30	0.2 ~ 0.8	7 ~ 9	2 ~ 3	300 ~ 700

注：* 代表该成分的单位为 g/t。

表 2 铅膏化学成分

Table 2 Chemical compositions of lead paste

%

成分	Pb	Zn	SiO ₂	FeO	CaO	Cu	S
含量	73	0.16	3.21	0.11	0.19	0.0089	4.8

表 3 氧化矿、烟灰、高富含多金属杂料成分

Table 3 Compositions of oxidized ore, soot, high-enriched impurities

%

成分	Pb	Zn	SiO ₂	FeO	CaO	Cu	S	Au *	Ag *
氧化矿	10.23	12.75	8.55	29.19	4.62	0.9	1.92	14.3	1085
烟灰	50	0.69	0.28	0.08	0.07	0.047	8.03	0	23
高富含多金属杂料	4.21	0.23	60.44	1.63	0.89	1.26	0.33	47.63	10336

注：* 代表该成分的单位为 g/t。

表 4 入炉混合料成分

Table 4 Compositions of mixture in furnace

%

成分	Pb	Zn	SiO ₂	FeO	CaO	Au *	Ag *
含量	38 ~ 40	3 ~ 4	4 ~ 5	8 ~ 9	3 ~ 4	2 ~ 3	200 ~ 300

注：* 代表该成分的单位为 g/t。

表 5 石粉

Table 5 Rock powder

%

成分	SiO ₂	CaO
含量	2.56	50

表 6 煤粉

Table 6 Coal powder

%

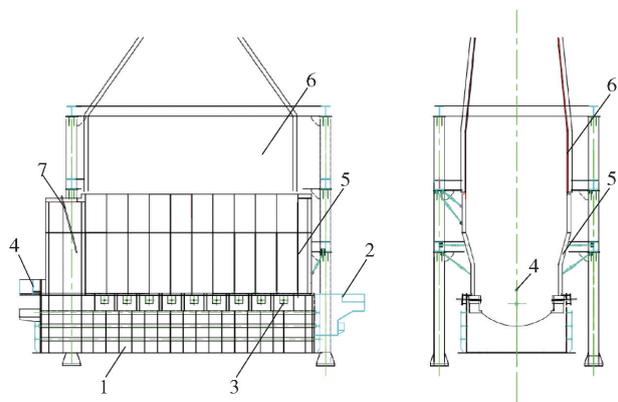
成分	H ₂ O	S(硫)	Q(发热量)/Kcal	A(灰分)	C(碳)	V(挥发分)
含量	0.17 ~ 0.86	0.9 ~ 1.2	6400 ~ 6700	13 ~ 15	80 ~ 85	1.1 ~ 2

2 试验设备

侧-顶吹熔炼炉能处理各种复杂物料,在“液态铅渣侧吹炉直接还原技术”中已经得到验证。因此,该炉型在处理铅基多金属固废等原料是有相关技术支撑的。侧-顶吹熔炼炉为竖式炉型,炉缸以铝质耐火材料为主,炉体以铜水套为主,这些材料为目前侧吹炉主流使用材质,也是基于金利集团“液

态铅渣侧吹炉直接还原技术”长期经过生产实践验证过的材料。炉体设有 18 支喷枪和 1 支顶枪。喷枪采用天然气+氧气、氮气+氧气+粉煤的结合方式进行吹炼。与“液态铅渣侧吹炉”相比,侧-顶吹熔炼炉增加了粉煤喷枪和顶枪的使用,利用粉煤直接与熔体反应,提高了辅料利用率;顶枪的使用,加强了熔体的搅拌,使物料充分反应,实现熔池的强烈搅拌和混合,有助于加快反应速度和提高熔炼效率。

炉体水套由“竖式水套”改为“椅形水套”，增加了渣层空间，防止泡沫渣的生成，降低了烟气流速，利于烟尘的沉降。整套物料输送上料系统和气体管网控制调节系统均采用 DCS 控制调节，实现了精准控制，高度自动化。通过收集和分析熔炼过程中的各种数据，如温度、压力、气体成分等，可以实时调整熔炼参数，优化熔炼过程，以达到最佳的熔炼效果和经济效益。配套余热锅炉系统，对高温烟气进行降温除尘，再送入制酸系统。余热锅炉有效地利用烟气余热，产出蒸汽，供锌系统使用。配套的烟灰输送系统，将冶炼过程中产生的烟灰，输送至原料配料系统，重新进行配料使用。侧-顶吹熔炼炉结构如图 1 所示。



1—炉缸；2—出铅口；3—氧枪（氧气、粉煤、可燃气体）；4—出渣口；5—炉体椅形水套；6—余热锅炉；7—顶枪

图 1 侧-顶吹熔炼炉结构

Fig. 1 Structure of side-top blowing smelting furnace

3 侧-顶吹浸没熔炼熔池工艺流程

3.1 原料处理

利用侧-顶吹熔炼炉处理铅膏加铅锌渣以及铅基高富含多金属杂料，可以实现锌冶炼废渣的无害化和减量化，大幅降低其对环境危害的程度。锌系统产出的铅锌渣经压滤系统压滤后，含水量仍为 25% ~ 30%，需进一步除水。公司建设了 2 条干燥窑系统，用于烘干铅锌渣。铅锌渣经干燥窑干燥，除去部分水分（一般控制在 15%），形成颗粒进行配料。干燥后的铅锌渣与铅膏、烟灰、脉石等经配料仓、抓斗行车预配料。经计量皮带混合后，制粒机进行制粒，经皮带输送机送至炉内。

3.2 熔炼工艺

以铅膏、铅锌渣、含铅杂料为原料，配入脉石等

物质以达到合理渣型。物料与侧-顶吹喷枪喷入的燃气、氧气、燃料等充分熔化、反应，产出粗铅、炉渣、烟尘（返回配料）、含硫烟气等。其中，粗铅作为原料供铅电解使用；炉渣进入烟化炉进行吹炼，产出氧化锌返回锌系统，烟化炉渣作为一般固废外售；含硫烟气去一转一吸-离子液脱硫工序生产硫酸。具体工艺流程见图 2。

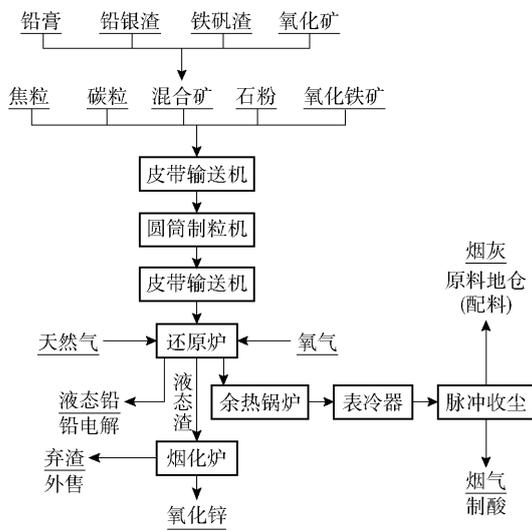


图 2 侧-顶吹熔炼工艺流程

Fig. 2 Side-top blowing smelting process flow

4 主要工艺指标的控制与调整

4.1 物料配置

目前，以再生行业处理铅膏为例，仅处理铅膏时，入炉物料品位较高，但由于物料单一，综合经济价值不高。而侧-顶吹熔炼炉可实现铅锌互补和固废资源化，经济价值高，大幅降低锌冶炼渣对环境的危害，对于处理铅基杂料、铅锌渣和其他高富含多金属物料有一定优势。各种物料需混合均匀，精准配料，制成颗粒，经输送系统均匀投入炉内。2023 年，该炉共处理物料 246 503. 557 t，其中铅膏 132 116 t，铅锌渣 85 605 t。

4.2 侧-顶吹熔炼炉控制指标

侧-顶吹熔炼炉主要根据入炉物料的品位、料量、温度、渣线高度、渣型等参数进行炉况控制与调整。侧-顶吹熔炼炉控制指标见表 7。

4.3 渣型控制

侧-顶吹熔炼炉主要投入物料中铅锌渣含铁较高，故需要合理搭配相应的熔剂调整渣型，通过加入

适量的石英、石粉等调整为高铁、高钙渣型。经过生产实践中配料、炉况调整与观察,目前侧吹还原炉渣型合适,铁硅比 1.7 ~ 2.0,钙硅比 0.5 ~ 0.6。渣含铅低,炉况容易控制,辅料率较低。

表 7 侧-顶吹熔炼炉控制指标

Table 7 Control indicators for side-top blowing smelting furnace

参数	取值
1、料量/(t·d ⁻¹)	950
铅膏量/(t·d ⁻¹)	330
铅锌渣量/(t·d ⁻¹)	400
氧化矿量/(t·d ⁻¹)	220
2、燃料率/%	9 ~ 10
进料期/(kg·h ⁻¹)	5 500 ~ 6 000
还原期/(kg·h ⁻¹)	1 500 ~ 1 800
天然气/(Nm ³ ·h ⁻¹)	510 ~ 550
3、氧气/(Nm ³ ·h ⁻¹)	3 500 ~ 8 000
进料期/(Nm ³ ·h ⁻¹)	7 500 ~ 8 000
还原期/(Nm ³ ·h ⁻¹)	3 000 ~ 3 500
4、温度/°C	1 100 ~ 1 200
5、渣线高度/m	1.4 ~ 2.8
6、单炉作业时间/h	6

5 主要经济指标

5.1 铅金属平衡、直收率、回收率

2023 年投入的含铅物料平均品位为 60.79%,含铅量为 97 807.046 t;铅锌渣平均品位为 4.33%,含铅量为 3 709.435 t。产粗铅 103 044.17 t,品位 96.37%,含铅量 99 303.121 t;产出还原渣 73 951.07 t,渣含铅平均 2%,含铅量 1 479.02 t。

入炉物料中的铅、锌经熔炼后,集中富集在产出的液态铅和还原渣中,两者可作为下一步工序的原料使用。因此,在侧-顶吹熔炼炉生产过程中,铅和锌的直收率和回收率一致。

银作为贵金属,多数富集于液态铅中,还原渣的银富集于氧化锌中,在此仅计算液态铅中银的直收率(式(1))。

$$\text{银直收率} = (\text{液态铅中银} / \text{原料中银总量}) \times 100\% \quad (1)$$

2023—2024 年稳定生产后的金属平衡表见表 8。

表 8 中,损失的铅量为 0.72%,主要包括铅挥发损失以及管理损失和误差。从表中数据得知,侧-顶吹熔炼炉铅回收率为 97.48%。

表 8 侧-顶吹熔炼炉金属平衡分析

Table 8 Metal balance sheet of side-top blowing smelting furnace

物料名称	质量/t	铅		锌		银		
		Pb/%	Pb 金属量/t	Zn/%	Zn 金属量/t	Ag/(g·t ⁻¹)	Ag 金属量/t	
投入	含铅物料	153 490.087	64.24	98 602.032	1.29	1 980.02	69.97	10.74
	铅锌渣	111 479.794	2.93	3 266.358	4.00	4 459.19	280.77	31.30
	合计	264 969.881	38.45	101 868.39	2.43	6 439.21	158.66	42.04
产出	液态铅	103 044.17	96.37	99 303.667	0	0.00	400.80	41.30
	还原渣	79 490.96	2.00	1 589.82	8.00	6 359.28	8.93	0.71
	合计	182 535.13		100 892.94		6 359.28		42.01
金属直收率/%			97.48		98.76		98.24	
金属回收率/%			97.48		98.76		98.24	

还原渣中含铅、锌、银等物相作为烟化炉原料,并搭配锌冶炼产出的铁矾渣,在烟化炉中进行吹炼。烟化炉产出的氧化锌品位见表 9。

5.2 成本指标

侧-顶吹熔炼炉炼铅工艺生产过程简单,动力和燃料消耗少,吨处理量消耗氧气 178.91 m³、天然

表 9 烟化炉产出物的分析

Table 9 Analysis on products produced by fuming furnace

物料名称	Pb/%	ZnO/%	Ag/(g·t ⁻¹)
锅炉灰	12.82	59.30	225.07
布袋灰	13.04	63.52	229.75

气 20.31 m³、电 53.79 kW·h,生产效率高,吨处理量生产总成本 588.02 元。2023 年度侧-顶吹熔炼炉

与金利 3#炉成本对比见表 10。

表 10 2023 年度侧-顶吹还原炉与金利 3#炉成本对比

Table 10 Cost comparison between side-top blowing reduction furnace and Jinli 3 # Furnace in 2023

侧-顶吹熔炼还原炉成本(入炉品位 Pb 38%)					金利 3#炉成本(入炉品位 Pb 65%)				
费用项目	单位	单价/元	单耗	金额/(元·t ⁻¹)	费用项目	单位	单价/元	单耗	金额/(元·t ⁻¹)
石子	t	71	0.020 4	1.45	石子、石粉	t	71.00	0.033 3	2.36
铁矿石	t	673	0.001 6	1.08	铁矿石、铁粉	t	673.00	0.049 3	33.18
铁粉	t	938	0.002 5	2.35	烧碱	t	1 150.00	0.003 9	4.49
双氧水	t	885	0.001 2	1.06	结焦抑制剂	t	7 080.00	0.000 8	5.66
其他	t			2.55	耐火材料				5
耐火材料	t			1.38	香碳	t	1 354	0.038 8	52.54
香碳	t	1 354	0.041 8	56.6	焦炭	t	1 860	0.060 7	112.90
焦炭	t	1 860	0.066 5	123.69	煤气	m ³	0.94	37.234	35.00
天然气	m ³	4.05	20.31	82.26	电	kW·h	0.62	20.312 5	12.59
电	kW·h	0.62	53.79	33.35	氧气	m ³	0.70	114.035 1	79.82
氧气	m ³	0.70	178.91	125.24	工资福利费				26.6
工资福利费				44.98	备品、备件				20
备品、备件				33.76	本月维修费等				6.5
维修费				2.86	安全费				1
安全费				0.79	折旧				12.9
折旧				37.19	装卸				8
装卸				10.18	水费				0.2
水费				0	工资、内部分摊				10.6
工资、内部分摊				14.01	公用分摊				1.2
公用分摊				13.24	合计				430.54
合计				588.02					

表 10 中,侧-顶吹熔炼炉入炉物料含铅仅为 38%,较金利 3#炉(Pb 65%)降低 41.54%,折合成含铅 65%的物料,成本比金利 3#炉低。另外,金利 3#炉仍以铅膏为原料生产,而侧-顶吹熔炼炉采用铅膏加铅锌渣以及铅基高富含多金属杂料为原料,可综合回收物料中的有价金属,经济效益更高。

5.3 能耗指标

5.3.1 煤耗

2023 年侧-顶吹熔炼炉共消耗焦炭 15 417.357 t,焦炭折标系数为 0.971 4 kgce/m³,折合标煤

14 976.421 t。

消耗碳粒 9 528.535 t,碳粒折标系数为 0.942 8 kgce/m³,折合标煤 8 983.503 t。

综上,得出吨铅平均煤耗为 241.28 kgce。

5.3.2 电耗

2023 年侧-顶吹熔炼炉耗电量为 7 738.07 kW·h,电的折标系数按 0.122 9 kgce/kW·h,折合吨铅耗电为 9.58 kgce。

5.3.3 氧耗

2023 年侧-顶吹熔炼炉耗氧量为 41 187.906 km³,

折标系数按 0.1265 kgce/m^3 , 折合吨铅耗氧为 52.47 kgce 。

5.3.4 天然气耗

2023 年侧-顶吹熔炼炉耗天然气为 7134.796 km^3 , 折标系数按 1.100 kgce/m^3 , 折合吨铅耗天然气为 79.03 kgce 。

综合计算, 侧-顶吹熔炼炉吨铅能耗共计为 382.36 kgce 。

6 侧-顶吹熔炼炉技术优势与展望

铅锌互补是行业的发展方向, 针对铅锌混合杂料的选择和配比, 侧-顶吹熔炼炉技术具有以下优势。

1) 能耗低、热效率高、喷枪寿命长。侧吹浸没燃烧熔池熔炼工艺采用富氧熔炼技术, 燃料及助燃气喷入熔池并燃烧, 搅拌强度大, 传质传热快, 热利用率高。熔炼炉产生的高温烟气经余热锅炉回收余热, 产生的蒸汽可以得到充分利用。喷枪结构和布置的优化, 提高了熔池搅动效率和反应速度, 提高了燃烧效率, 喷枪使用寿命超过 6 个月, 真正实现了生产自动化, 改善操作人员劳动环境。

2) 作业率高。侧吹炉炉墙为二层结构形式, 耐火材料能够起到隔热作用, 减少炉子热损失, 外层铜水套在炉墙上形成冷却层, 使炉墙耐火材料始终在低温下工作。铜水套和内衬的结构有利于冷却和刮渣, 大幅延长了炉子的使用寿命, 年作业时间可以达到 330 d 以上。

3) 安全性好。炉墙采用二层结构形式, 内层为耐火砖砌体, 外层为铜水套镶嵌耐火砖, 能够形成保护层, 从而确保炉体的安全运行。

4) 环保好, 冶炼弃渣无害化。熔池熔炼技术采用微负压操作, 无烟气外逸; 系统产生的烟尘密封输送返回熔炼配料, 无铅尘弥散。熔炼烟气采取收尘、一转一吸制酸+离子液、脱硫、脱硝、湿电处理后超低排放。熔池熔炼产出的熔炼渣为玻璃态渣, 属于一般固废, 可用作建材, 无二次污染。

5) 有价金属综合回收率高。该工艺独特的炉体结构使炉内各熔池相分离效率高。金属相位于喷枪下层, 基本处于静止层, 金属熔体和液态渣两相澄

清效果非常好, 可通过调整金属层的高度来调节分离效果。生产指标表明, 侧吹浸没燃烧熔池熔炼炉排出弃渣含铅低于 2%, 金、银回收率均达到 98%。

7 结语

侧-顶吹熔炼炉从 2022 年 12 月 1 日开始生产至今, 先后对处理铅膏、铅膏加铅基杂料、铅膏加铅锌渣以及铅基杂料等进行了生产实践, 均已实现稳定生产。为资源化处理锌系统产出的铅锌渣并考虑生产经济性, 最终确定实际生产工艺处理物料为铅膏加铅锌渣以及铅基杂料。

生产实践证明: 侧-顶吹熔炼炉在铅锌互补生产中起到关键环节, 不仅处理了锌系统产生的铅锌渣, 回收了有价金属, 也解决了锌系统产出的固废资源化处理的技术问题, 为铅锌行业的协同发展提供了技术支持, 为铅锌行业装备大型化、固废资源化提供了有力保障。

[参考文献]

- [1] 马永涛, 王风朝. 铅银渣综合利用探讨[J]. 中国有色冶金, 2008, 37(3): 44-49.
- [2] 赵宏. 铅银渣综合利用新工艺探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2001(4): 16-17.
- [3] 张素娣. 湿法炼锌渣处理现状及综合利用对策[J]. 有色金属, 2000, 52(4): 193-194.
- [4] 李晓蕊. 钴铜原料生产新能源材料固废资源化研究[J]. 有色矿冶, 2022, 38(4): 46-49.
- [5] 王辉. 湿法炼锌工业挥发窑渣资源化综合利用[J]. 中国有色冶金, 2007, 36(6): 46-50.
- [6] D. M. Wyslouzil, R. S. Salter, Lead-Zn 90, Pro. Wold Symp. Metal, Eoviron. Control II 9th Tms Annu. Meet, 1990. 87.
- [7] 付运康. 锌浸出渣不同处理工艺浅析[J]. 四川有色金属, 2003(1): 35-38.
- [8] 刘洪萍. 锌浸出渣处理工艺概述[J]. 云南冶金, 2009, 38(4): 34-37, 47.
- [9] 王福生, 车欣. 浸锌渣综合利用现状及发展趋势[J]. 天津化工, 2010, 24(3): 1-3.
- [10] 杨建军, 丁朝, 李水祥, 等. 湿法炼锌清综合利用工艺现状及分析[J]. 世界有色金属, 2011(6): 44-46.
- [11] 邹小平, 王海北, 魏帮, 等. 锌冶炼厂铁闪锌矿湿法冶炼浸出渣处理方案选择[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(8): 12-15.

Side-top blowing smelting technology in the production practice of processing lead-based solid waste and other materials

YANG Huafeng, SHI Xiaomao, TIAN Fahui

(Henan Jinli Gold and Lead Group Co. , Ltd. , Jiyuan 459000, China)

Abstract: This paper introduces the newly-built project of Henan Jinli Gold-Lead Co. , Ltd. : demonstration of lead-based metal solid waste collaborative strengthening smelting industrialization and comprehensive utilization of zinc resources, especially the production practice of side-top blowing smelting technology to treat lead-based solid waste and other materials. This paper summarizes the production situation, expounds the main production technology, and lists the main production data and technical and economic indicators. Domestic zinc smelting is mainly based on wet smelting, and lead-containing zinc slag will be produced in its production process. In the past, due to backward technology, the slag was mainly stored in storage. In recent years, due to environmental problems, the solid waste must be treated. Therefore, various methods of miniaturization treatment of the solid waste residue have emerged. Because there are few valuable metals in the solid waste residue and the treatment cost is high, it is not economical to treat it alone. However, the application of side-top blowing smelting technology has solved the problems of environmental pollution caused by long-term storage of lead-containing zinc slag produced by zinc hydrometallurgy in the past, or high cost and uneconomical feature caused by miniaturization. Practice has proved that the side-top blowing smelting technology is feasible and has obvious advantages in treating lead-based solid waste, zinc smelting slag and other materials, and realizes the comprehensive utilization of solid waste resources. Moreover, the technology has advanced technology and low cost. Through production practice, it is proved that the technology can realize large-scale production.

Keywords: side-top blowing smelting; lead-based solid waste; lead-zinc slag; large-scale; recycling; production practices

