

# 硫化法在铅冶炼污酸废水处理中的应用研究

李 懋

(湖南水口山有色金属集团有限公司, 湖南 衡阳 421500)

**[摘要]** 某铅冶炼厂采用石灰-铁盐法处理污酸废水,但存在运行不稳定、水质达标难度大、铊污染风险大、渣处理成本高等问题。为了解决上述问题,本文采用“硫化+一段中和+二段深度中和”的工艺进行污酸废水处理工艺的优化。在进行硫化药剂的对比、分析后续工艺以及所产渣性质的基础上验证了硫化法的可行性。采用该工艺,硫化阶段砷、铊的去除率都达到99%以上,一段中和控制反应终点pH值为2.5~3.0,得到的石膏渣中重金属含量低于0.05%,石膏渣品质能够得到有效保证;二段深度中和处理采取中和+铁盐+深度氧化/硫化工艺,反应终点pH值控制在7.5~8.5,最终出水的重金属含量可达标。该工艺分离出三种渣,大部分重金属污染物以硫化物沉淀形式脱除,硫化渣属于含铊危废;一段中和产出的石膏渣属于一般危废;二段中和产出的中和渣含铊量低于20 g/t,属于危险废物。三种渣均有处置去向,通过改变渣的性质以及回炉处置等方式,可实现危废渣减量65%以上。

**[关键词]** 铅冶炼; 污酸处理; 重金属; 中和渣; 石膏渣; 可行性分析

**[中图分类号]** X703 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2025)03-0041-06

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.03.007

## 0 引言

污酸是有色金属冶金行业生产过程中产生的主要污染物,主要来源于有色金属冶炼高温烟气降温洗涤过程。烟气中含有砷、重金属污染物、三氧化硫、氟氯离子等物质,具有酸度高、重金属成分复杂、氟氯浓度高等特点,因此,企业的污酸处理也存在废渣多、成本高、难回用等难题,污酸废水防治是制约行业绿色发展的重要瓶颈。

目前,国内冶炼企业基本采用“石灰+铁盐”或“硫化+石灰+铁盐”的工艺处理高砷污酸<sup>[1]</sup>。据了解,河南豫光、山东恒邦、安徽池州铅冶炼厂、青海铜业等企业的污酸处理系统,基本均采用硫化工艺,同时株冶集团、五矿铜业也是采用硫化工艺处理污酸废水。由此可以看出,硫化工艺是铜、

铅、锌冶炼行业污酸处理的主流工艺。某铅冶炼厂污酸处理系统采用传统石灰-铁盐工艺,存在产水指标波动大、废渣难以分类利用的问题,考虑到硫化法已在铜、铅、锌冶炼行业的污酸处理中有广泛应用,本文通过工艺分析、实验验证、研究渣的性质等,论证硫化法在某铅冶炼厂污酸处理系统应用的可行性。

## 1 某铅冶炼厂污酸废水处理现状

### 1.1 污酸废水来源

某铅冶炼厂共有底吹炉、侧吹炉、烟化炉三大炉座,这三大炉座的冶炼烟气分别在制酸、离子胺脱硫系统中产生烟气净化洗涤污酸和脱硫脱硝污酸;另外,精铅稀贵厂的火法系统的烟气洗涤、脱硫、脱硝工艺也会产生酸性废水,湿法系统会产生高盐废水。上述各污酸废水的生产情况见表1。由表1可知,以上污酸废水基本为酸性,种类多、成分杂且差异较大,主要污染因子为砷、铊。选取砷、铊为主要分析点,则硫酸净化原污酸为现污酸处理系统主要污染来源,其砷含量占总砷的83%,铊含量占总铊的96%。

现铅冶炼厂一般将上述污酸废水混合均化后再处置,其混合后成分分析见表2。

### 1.2 处理工艺

现阶段,污酸废水处理采用的工艺为石灰-铁

**[收稿日期]** 2024-11-12

**[作者简介]** 李懋(1989—),女,硕士,工程师,主要从事环保、科技管理工作。

**[引用格式]** 李懋. 硫化法在铅冶炼污酸废水处理中的应用研究[J]. 绿色矿冶,2025,41(3):41-46.

LI Mao. Study on the application of sulfidation method in the treatment of waste acid and wastewater from lead smelting [J]. Sustainable Mining and Metallurgy,2025,41(3):41-46.

表1 铅冶炼厂各污酸废水产生情况及污染因子

样品名称	日产生量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	pH	Pb/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Cd/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	As/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{F}^-$ / ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{Cl}^-$ / ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Tl/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
硫酸净化原污酸	180	1.95	15.91	286.6	1 822	2.56	1.00	10.713
侧吹炉烟气洗涤污酸	30	2.74	6.65	5.30	238.1	0.73	0.29	0.20
烟化炉烟气洗涤污酸	30	3.27	13.02	0.546 5	27.48	0.41	0.19	0.011
离子胺脱硝废水	10	7.92	13.13	0.225	26.575	0.02	0.07	0.609 3
硫酸脱硫废水	5	8.2	0.56	0.46	12.05	0.06	0.83	0.632
精铅稀贵脱硫废水	50	2.6	42.31	2.312	1 548	0.17	1.01	0.069
精铅稀贵高盐废水	5	4.78	0.18	2.74	419.8	10.41	1.15	0.084 8

表2 铅冶炼厂污酸混合加权值

参数	日产生量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	pH	Pb/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Cd/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	As/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{F}^-$ /( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{Cl}^-$ /( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Tl/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
数值	310	2.3	17.83	162.18	1 299.23	1.74	0.80	6.09

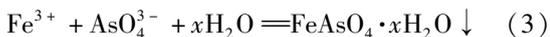
盐法(图1),技术原理是利用石灰中和污酸废水并调节 pH 值,利用砷与铁生成较稳定的砷酸铁化合物,氢氧化铁与砷酸铁共同沉淀这一性质将砷除去。铁的氢氧化物具有强大的吸附和絮凝能力,通过提高 pH 值可将污酸废水中的重金属离子以氢氧化物的形式脱除,达到去除污酸中砷、镉等有害重金属的目的。

石灰-铁盐法沉砷处理的过程为:首先向含砷酸性废水中投入石灰或者石灰乳进行中和,随后投加三价铁盐将砷及其他重金属从水中去除,沉砷矿浆经固液分离之后得到黄色半固态的砷酸钙-砷酸铁渣<sup>[2]</sup>。石灰-铁盐法沉砷过程中,往石灰中和溶液中加入硫酸,调节溶液 pH 至 3~8,当溶液  $\text{pH} \leq 3$  时,砷以砷酸铁的稳定形式沉淀,当  $\text{pH} = 3 \sim 7$  时,则以  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  共沉淀形式沉淀,同时发生砷酸钙的沉淀反应<sup>[3-4]</sup>。发生的化学反应见式(1)~(4)。

中和反应:



脱砷反应:



$\text{FeAsO}_4$  较稳定,但当  $\text{pH} > 10$  时会发生返溶反应,所以一般控制 pH 值在 6~9 为宜。返溶反应式见式(5)。

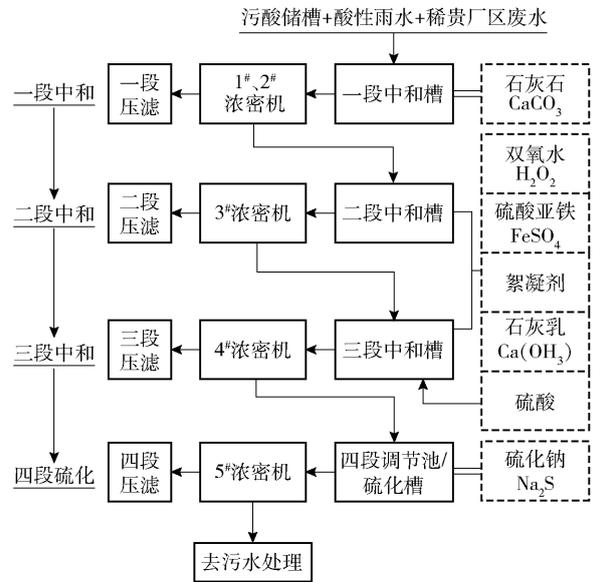
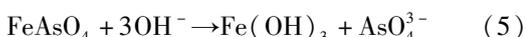


图1 石灰-铁盐法处理工艺流程图

### 1.3 工艺目前存在的问题

#### 1.3.1 工艺达标运行难度大,成本高

铅冶炼厂污酸处理系统主体设备为 2005 年建设,虽后续进行了部分技术改造,但仍存在部分问题。

在工艺上,由于污酸来源多、成分复杂,包括铅冶炼厂、精铅稀贵厂各类酸性废水,在污酸废水水质及酸度不稳定时,除砷效果差。据分析历史数据,在工艺控制不好时,常出现砷超标数百倍的情况,而污酸处理不达标,会导致后续废水处理系统、深度处理系统、浓水系统的结果均不达标,对整个铅厂水系统造成影响。

在成本上,由于铅冶炼厂污酸处理渣量大,且渣中重金属污染物含量较高,只能作为危废委托有相

应资质的单位处理。据了解,污酸环保渣 2016 年处理费用约 600 元/t,2021 年为 747 元/t,而 2022 年最新招标价格已提高至 1 300 元/t,按铅冶炼厂 7 200 t/a 的产生量计算,污酸处理渣的处置费用将达到近 1 000 万元。

### 1.3.2 铊污染管控风险大

按铅冶炼厂现有污酸四段处理工艺,所产出的渣都有铊的存在,铊含量远超过 20 g/t,在现有的政策下,将被认定为含铊污泥。综合政策分析,国家和地方对涉铊企业、涉铊污泥的管控将越来越严格,含铊污泥的处置成本也将越来越高,今后的处置成本将成为企业的负担,同时牵扯的环保风险也将更高。因此,进行渣分类,将铊等重金属富集浓缩,减少含铊污泥量,将会成为未来渣处置降本增效途径。

## 2 污酸废水工艺优化

张德超等<sup>[5]</sup>提出有色冶金中含砷酸性污水主要采用硫化沉淀法处理,砷以硫化砷渣形式固化,硫化砷渣中理论砷含量达到了 60% 以上,除砷产生的危废砷渣量约为石灰法或石灰-铁盐法的十分之一。铅冶炼厂基于当前污酸处理系统产水指标波动大、废渣处置成本高等问题,本文通过工艺分析、实验验证等,论证硫化法在某铅冶炼厂污酸处理系统应用的可行性。硫化工艺流程图如图 2 所示。

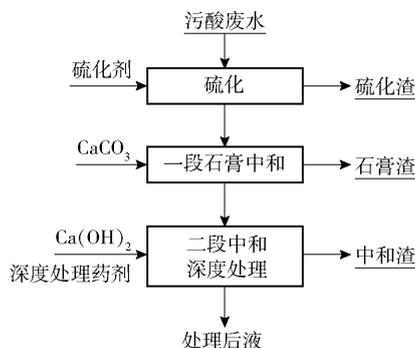


图 2 污酸处理工艺优化实验流程图

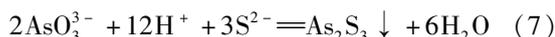
### 2.1 硫化法工艺原理

硫化法的技术原理是利用污酸中 As 及类砷重金属亲硫的天然属性,使硫离子与酸性废水中的污染物质结合,形成不溶于水的共沉淀物,然后通过固液分离实现污染物的去除和净化。

基本反应式见式(6)。



例如砷的硫化去除反应式见式(7)。



### 2.2 硫化药剂的选择分析

目前,行业内硫化药剂为硫化钠、硫化氢、以及市场上尚未广泛推广的缓释硫化剂。就以上硫化剂开展实验分析比对,主要考察反应出水指标、药剂消耗、成本等方面。考虑到硫化氢难以制取、贮存,本次未开展硫化氢的反应实验。

硫化剂各项指标对比见表 3。

表 3 硫化剂各项指标对比

比较项	硫化氢	硫化钠	硫化氢钠	缓释硫化剂
采购原料纯度/%	需自建制备系统	60	70	30(液体)
原料单价/(元·t <sup>-1</sup> )	理论测算 4 000	3 000	3 500	3 000
有效硫占比/%	94.1	41	57.1	尚未明确
单位硫成本/(元·t <sup>-1</sup> )	4 250.8	12 195.1	8 756.6	尚未明确
贮存难度	难	易	易	易
反应活性	极强	强	强	慢
硫利用率	高(>95%)	一般	一般	高

由表 3 可知,综合来看,硫化氢价格低、效率高,并且反应产物为水与硫化渣,不带有杂盐离子,是理论上最佳的硫化剂,但其制取、贮存、操作使用难度较大,安全风险相对较高,需要配套的场地较大,不适用于铅冶炼厂。硫化钠和硫化氢钠价格相近、性质相近,是相对合适的硫化剂。缓释硫化剂为某公司开发的污酸处理硫化剂,相关技术信息尚未明确,其在强酸性条件下能缓慢释放 S<sup>2-</sup>,在保证表面活

性的同时提高 S<sup>2-</sup> 的利用效率,可用于脱除酸性溶液中的重金属和砷,具有脱除效率高、用量低、硫化氢释放量少的优点,解决了传统硫化剂用量大、利用率低、H<sub>2</sub>S 危害严重等问题。

为了验证相关硫化剂的去除效率,在原水各项指标一致的情况下(水质见表 4,其中 Pb 污酸为硫酸净化系统产生的污酸,混合液是指稀贵厂两股废水与铅厂污酸和脱硫废水根据水量按照比例混合得

到混合液),分别添加硫化钠、硫氢化钠、缓释硫化剂进行实验,结果见表5。

表4 实验原水水质

原水	As/ (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb/ (mg·L <sup>-1</sup> )	Cd/ (mg·L <sup>-1</sup> )	Tl/ (μg·L <sup>-1</sup> )
污酸混合液	2 208	4. 865	91. 92	2 248
Pb 污酸	2 242	15. 98	737	13 615

表5 不同药剂实验结果

药剂名称	硫化钠 (60%)	硫氢化钠 (70%)	缓释硫化剂 (30%)
砷去除率/%	98. 6	99. 4	99. 9
铊去除率/%	89. 1	96. 3	99. 5
镉去除率/%	94. 2	92. 0	99. 6
铅去除率/%	73. 0	94. 0	93. 7
单位药剂使用量/(kg·m <sup>-3</sup> )	13. 5	10. 0	7. 5
单位药剂成本/(元·m <sup>-3</sup> )	40. 5	35. 0	22. 5

根据表5数据可知,三种药剂对砷、铊的去除率

表6 一段石膏中和指标

石膏渣指标	反应终点 pH	As/%	Pb/%	Cd/%	Tl/%	Zn/%
混合液一段中和实验1	pH = 3. 58	0. 540	0. 010	0. 03	0. 000 6	0. 010
混合液一段中和实验2	pH = 3. 03	0. 070	0. 070	0. 01	0. 000 1	0. 010
Pb 污酸一段中和实验1	pH = 2. 48	0. 030	0. 140	0. 01	0. 000 8	0. 010
Pb 污酸一段中和实验2	pH = 2. 47	0. 057 2	0. 014	0. 01	0. 000 1	0. 007 4

由表6可看出,在一段石膏中和工段,通过控制溶液反应终点 pH 值为 2.5 ~ 3.0,得到的石膏渣中重金属含量低于 0.05%,石膏渣品质能够得到有效保证。经过酸浸试验,石膏渣的毒性浸出结果满足一般石膏固废的标准要求,这表明该工艺产出的石膏渣不属于有毒有害固废。

### 2.3.2 二段深度中和

二段石灰中和是去除污酸中剩余的重金属离

均比较高。从成本来看,硫化钠、硫氢化钠药剂消耗量偏高,张文岐等<sup>[6]</sup>也提出当酸性废水的砷含量不稳定时,使用硫化钠作为硫化剂,氧化还原电位变化迅速,硫化反应剧烈,反应过程不稳定而难以控制,加入的硫化钠会迅速与废水中的硫酸反应,生成的部分硫化氢还没来得及与溶液中的砷反应,就直接从溶液中逃逸,从而导致硫化药剂利用率低,并影响去除率。

缓释硫化剂的去除效果最佳,单位成本最低,这是因为缓释硫化剂除重金属反应过程中,硫化反应过程缓慢,缓释硫化剂释放出的硫源与溶液中重金属离子结合效率更高,硫化反应平和,但会存在反应时间较长的问题,系统停留时间设计需更长。

## 2.3 后续处理工艺

### 2.3.1 一段石膏中和

一段石膏中和工序主要是去除污酸中的硫酸根离子,产出石膏渣。通过控制反应不同的 pH 值,分析产出石膏渣的性质,判断生产最佳反应终点,结果见表6。

子,使产水达到《铅、锌工业污染物排放标准》(GB 25466—2010)。对比了几种主流的中和工艺,结果见表7和表8,中和实验工艺控制条件见表9。

由表8可知,深度反应过程中,相比不加入硫化剂,增加硫化剂情况下的 As、Tl 的脱除效果更好,表明在石灰中和铁盐法基础上,添加一定量的氧化剂和硫化剂,控制反应过程 pH 值,可以有效保证出水重金属含量达标。

表7 混合液二段石灰中和工艺产水数据比较

参数	终点 pH 值	As/(mg·L <sup>-1</sup> )	Pb/(mg·L <sup>-1</sup> )	Cd/(mg·L <sup>-1</sup> )	Tl/(μg·L <sup>-1</sup> )
实验1(中和+深度氧化+硫化)	9. 68	0. 39	0. 000 1	0. 001	0. 14
实验2(中和+铁盐+深度氧化)	9. 36	0. 039	0. 000 1	0. 004 6	3. 64
实验3(中和+铁盐+深度氧化+硫化)	>9. 36	0. 14	0. 000 1	0. 007	0. 93
实验4(中和+铁盐+深度氧化+硫化)	>8	0. 104	0. 034	0. 011	4. 79
实验5(中和+铁盐+深度氧化)	8	0. 086	0. 022	0. 012	4. 95

表8 二段石灰中和工艺中和渣数据比较

成分	As/%	Pb/%	Cd/%	Tl/%
二段中和渣 1	NA	0.03	0.02	0.000 1
二段中和渣 2	0.02	0.24	0.01	0.000 1
二段中和渣 3	NA	0.01	0.01	0.000 2
二段中和渣 4	NA	0.02	0.01	0.000 1
二段中和渣 5	0.031 6	0.01	0.018 5	0.000 1

表9 二段石灰中和实验工艺技术条件

试验名称	Ca(OH) <sub>2</sub> / (g·L <sup>-1</sup> )	铁盐 / (g·L <sup>-1</sup> )	双氧水 / (mL·L <sup>-1</sup> )	缓释剂 B / (g·L <sup>-1</sup> )	终点反 应 pH
实验 1	0.6	—	2.8	0.45	9.68
实验 2	1.52	2	2.0	—	9.36
实验 3	1.52	2	2.0	0.75	>9.36
实验 4	1.54	0.62	3.08	0.60	>8
实验 5	1.54	0.62	3.08	—	8

### 3 废渣成分及处置

选取缓释硫化剂与硫化钠工艺的试验数据,分析所产渣的性质及数量,结果见表 10 和表 11。

表 10 不同药剂所产渣量及分布

工艺	渣名称	性质	单位渣量(实物量)		渣占比/%
			kg(渣)/m <sup>3</sup> (水)	含水率/%	
缓释硫化 + 两段中和	硫化渣	含铊危废	14.86	50	33.14
	一段石膏渣	一般固废	25.92	25	57.80
	二段中和渣	危险固废	4.06	50	9.05
	合计		44.84		
硫化钠硫化 + 两段中和	硫化渣	含铊固废	9.70	55	18.17
	一段石膏渣	一般固废	37.45	20	70.17
	二段中和渣	危险固废	6.20	70	11.66
	合计		53.35		

表 11 硫化渣成分分析

元素	As/%	Pb/%	Cd/%	Tl/%
混合液实验硫化渣	23.67	0.08	1.13	0.03
Pb 污酸实验硫化渣	28.08	0.24	11.89	0.181 8

经压滤脱水后,含水率一般为 50%,其含砷量最高可达 28%,含铊量最高为 1.8 kg/t;一段石膏中和产出的石膏渣经离心机脱水后,含水率可降至 20% ~ 25%,渣中几乎不含重金属;二段中和产出的中和渣含铊量低于 20 g/t,其他重金属含量也较少。

## 4 结论与展望

### 4.1 硫化工艺可行性及指标控制

通过理论测算、实验论证的方式,验证了硫化法处理铅冶炼污酸的可行性。其中硫化控制条件:终点氧化还原电位 ORP 值 < -30 mV,其中砷、铊浓度分别在 5 mg/L、15 μg/L 以内,硫化去除效率可以达到 99.9% 左右;一段石膏中和控制反应终点 pH 值为 2.5 ~ 3.0,得到的石膏渣中重金属含量低于 0.05%,石膏渣品质能够得到有效保证;二段中和深度处理采取中和 + 铁盐 + 深度氧化/硫化工艺,反应终点 pH 值控制在 7.5 ~ 8.5,最终出水的重金属含

结合各工段出水指标与所产渣的成分分析,硫化工艺可分离出三种渣。该工艺通过硫化将绝大多数的重金属污染物以硫化物沉淀形式脱除,硫化渣

量可达标。

### 4.2 渣的分类及处置

污酸经过硫化预处理后,其中的砷、铊、重金属等污染物大部分被去除至硫化渣中,且污酸的酸度未发生较大变化,再用石灰石等钙基药剂中和所产的石膏渣重金属指标更低,相对石灰-铁盐工艺所产石膏渣更容易达到一般固废标准,可实现渣的减量;另外,重金属主要富集在硫化渣中,可实现渣的分类。为了保证石膏渣、中和渣品质和出水达标,其工艺核心是在硫化工段实现 As、Tl 等重金属的有效脱除和富集。硫化工段的硫化效果决定了后段石膏渣和中和渣产出的品质,同时对出水重金属达标具有极大的促进作用。本次实验硫化工段硫化效率和一段石膏渣品质检测数据都证明技术的可靠性和可行性。

本工艺产出的三种渣均有处置去向,其中硫化渣送往有资质的单位处置;中和渣含铊量低于 20 g/t,产生量小,可回炉处理;石膏渣占比最大,并且达到一般固废标准,可作为水泥辅料销售至水泥厂处置。通过改变渣的性质及回炉处置等方式,可实现危废渣减量 65% 以上。

### 4.3 硫化药剂

经过分析论证,最佳的硫化药剂为硫化氢,其反

应效率高且不引入新的盐离子;缓释硫化剂为新开发产品,并未有市场应用案例,是否对水处理系统的运行有负面影响暂未可知。另外,随着经济和产业结构的发展调整,水泥需求量下降,石膏渣销往水泥厂的难度加大,可能存在难以销售的风险。

缓释硫化剂虽可缓慢释放硫离子,提升硫离子利用率,但在反应过程中还是存在硫化氢逃逸的情况。其安全管控要点,一是要采用多级硫化;二是新增预反应槽,改进硫化反应器,将反应产生的过量硫化氢抽回预反应槽,由污酸中的砷等重金属消耗硫化氢;三是采用氧化还原电位 OPR 值自动控制投药;四是在尾端设置除害塔吸收硫化氢气体。以上措施,在工程应用中要重点考虑。

#### [参考文献]

[1] 郑丹,张云龙,李兴杰. 铜冶炼污酸废水处理工程案例

分析[J]. 有色冶金节能,2020,36(5):60-66.

[2] RIVEROS P A, DUTRIZAC J E, SPENCER P. Arsenic disposal practices in the metallurgical industry[J]. Canadian Metallur Gical Quarterly,2001,40(4):395-420.

[3] 管玉江,陈毓琛. 石灰-聚铁法处理硫酸厂废水的研究[J]. 化工环保,1999(6):328-335.

[4] 方兆珩,石伟,韩宝玲,等. 高砷溶液中和脱砷过程[J]. 化工冶金,2000(4):359-362.

[5] 张德超,张耀阳,罗劲松,等. 含砷酸性废水除砷工艺现状与展望[J]. 云南冶金,2023,52(2):49-58.

[6] 张文岐,朱晓刚,李晓恒,等. 铜冶炼废酸硫化法除砷工艺的改进实践[J]. 有色冶金节能,2019,35(3):16-18,37.

[7] 王文奇,陆佳,刘镔. 铜冶炼硫化氢钠处理含砷废酸的生产实践[J]. 山西冶金,2023,46(10):172-173.

[8] 汪永,晏歆. 硫化氢钠处理含铜砷废酸的探讨[J]. 铜业工程,2021(1):56-58.

## Study on the Application of Sulfidation Method in the Treatment of Waste Acid and Wastewater from Lead Smelting

LI Mao

(Hunan Shuikoushan Nonferrous Metals Group Co., Ltd., Hengyang 421500, China)

**Abstract:** A lead smelter adopts lime-iron salt method to treat waste acid wastewater, but there are some problems, such as unstable operation, difficulty in reaching the standard of water quality, high risk of thallium pollution and high cost of slag treatment. In order to solve the above problems, this paper used the process of “sulfidation + one-stage neutralization + two-stage deep neutralization” to optimize the treatment process of waste acid wastewater. The feasibility of the vulcanization method was verified on the basis of comparing the vulcanization agents, analyzing the subsequent process and analyzing the properties of the slag. Using this process, the removal rate of arsenic and thallium in the vulcanization stage reached more than 99%, and by controlling the pH value of the end point of the reaction to be 2.5-3.0, the content of heavy metals in the gypsum slag was less than 0.05%, and the quality of gypsum slag could be effectively guaranteed. The process of neutralization + iron salt + deep oxidation/vulcanization was adopted in the second stage of neutralization and deep treatment. By controlling the pH value of the reaction end point at 7.5-8.5, and the heavy metal content of the final effluent could reach the standard. The process produced three kinds of slag, most of the heavy metal pollutants were removed in the form of sulfide precipitation by vulcanization. The sulfide slag was a hazardous waste containing thallium; the gypsum residue produced by neutralization of a section of gypsum was general hazardous waste; the content of thallium in the neutralization slag produced by the second stage neutralization was less than 20 g/t, which belonged to hazardous waste. All three kinds of slag have disposal destinations. By changing the nature of the slag and returning to the furnace for disposal, more than 65% of the hazardous waste slag can be reduced.

**Key words:** lead smelting; waste acid treatment; heavy metals; neutralizing slag; gypsum slag; feasibility analysis