

含铟粉尘湿法浸出铟的工艺现状与展望

刘勇志^{1,2}, 龙跃^{1,2}, 于奇元^{1,2}, 杜培培^{1,2}

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063200;

2. 华北理工大学现代冶金技术教育部重点实验室, 河北唐山 063200)

[摘要] 含铟粉尘包括铅冶炼粉尘、铜冶炼粉尘、锌冶炼粉尘、钢铁粉尘等,是提取稀有金属铟的重要原料。湿法浸出是处理含铟粉尘的主要工艺。本文在全面综述含铟粉尘湿法浸出铟工艺现状的基础上,对比分析高温高酸浸出、氧化酸浸、机械强化酸浸、外场强化浸出、酸化焙烧浸出等不同工艺对铟金属以及难溶载铟物相浸出的特点与局限性,指出各工艺在工业生产实践中存在的问题。此外,分析了新型浸出剂—低共熔溶剂对铟选择性提取的研究进展,并就低共熔溶剂在铟等稀有金属湿法浸出的工业化应用提出展望。

[关键词] 含铟粉尘;湿法浸出;高温高酸浸出;氧化酸浸;机械强化酸浸;外场强化浸出;酸化焙烧浸出;低共熔溶剂

[中图分类号] TF843.1

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2025)03-0023-06

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.03.004

0 引言

铟是典型的稀有金属,其物理性质与铂类似,具备良好的机械性能和物化性能,是一种重要的多用途战略资源,广泛应用于电子工业、航天工业中。现阶段工业上生产原生铟的原料主要是锌、铅、锡、锑、铜等金属冶炼过程中产生的副产品,如浸出渣、粉尘、电解液、浮渣、阳极泥等^[1]。

含铟粉尘主要包括铅冶炼粉尘、铜冶炼粉尘、锌冶炼粉尘、钢铁厂粉尘等。如表1所示,这些粉尘不仅含有锌、铁、铅、镉等元素,还含有铟、锑、镓等稀少金属,是提取铟金属的重要原料^[2]。现阶段,含铟粉尘的主要处理工艺包括火法富集、湿法浸出、富集

分离等^[3]。火法富集一般是通过回转窑、转底炉等设备将锌、铅、铟等有价元素富集,为后续提铟工作做好准备,工艺较为成熟;湿法浸出主要是以酸、碱或铵盐作浸出剂,将粉尘中的铟等有价金属以离子形态进入浸出液中;富集分离主要通过萃取、置换、电解等工艺,将目标元素铟和其他杂质元素靶向分离,后续再通过净化、除杂等工序回收铟^[4-5]。其中,湿法浸出是含铟粉尘处理的核心工艺,浸出效果直接影响铟的最终回收率。目前,含铟粉尘湿法处理根据处理方式可分为高温高酸浸出、氧化浸出、中性-酸性多段联合浸出、机械强化浸出、外场强化浸出、低共熔溶剂浸出等。

本文梳理现阶段含铟粉尘常用湿法浸出工艺,并对比分析不同铟金属浸出工艺的特点与局限性,阐述新型浸出剂——低共熔溶剂在稀有金属铟湿法浸出过程中的优越性,为低共熔溶剂在铟等稀有金属湿法浸出的工业化应用提供参考。

表1 不同来源含铟粉尘主要组分及含量 %

粉尘名称	Zn	In	Pb	Fe	Cd
铜冶炼粉尘	8.24	0.080	23.80	4.60	0.660
铅冶炼粉尘	1.56	0.051	50.94	1.24	2.650
钢铁厂粉尘	57.96	0.040	33.50	—	0.144
锌冶炼粉尘	10.10	0.048	0.73	15.86	—

1 含铟粉尘常规湿法处理工艺

湿法浸出指在水溶液中通过浸出剂与固体原料

[收稿日期] 2024-11-07

[基金项目] 国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助项目(U20A20271)。

[作者简介] 刘勇志(2001—),男,山西大同人,硕士,主要从事冶金固体废物的综合利用研究。

[通信作者] 龙跃(1976—),男,博士,教授,主要从事冶金固体废物的综合利用研究。

[引用格式] 刘勇志,龙跃,于奇元,等.含铟粉尘湿法浸出铟的工艺现状与展望[J].绿色矿冶,2025,41(3):23-28.

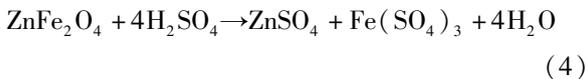
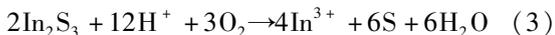
LIU Yongzhi, LONG Yue, YU Qiyuan, et al. The current status and prospects of the hydrometallurgical leaching process of indium from indium containing dust[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(3): 23-28.

(如矿物原料、冶金过程中的副产品、废料等)之间发生作用,使有价金属元素以离子的形式进入溶液并富集,其他杂质元素进入浸出渣,经过过滤分离、萃取、净化、电解等工序收集目标元素的工艺过程。

现阶段在处理含钢粉尘的湿法工艺中,酸浸仍是最常用的方法,最常用的无机酸为硫酸、盐酸和硝酸。通过溶解含钢粉尘,使物料中的钢以离子态形式进入溶液,后续经过一系列的萃取、反萃等工序使钢与其他杂质元素分离,实现钢在溶液中的富集。Matsumoto 等^[6]分别使用硫酸、盐酸、硝酸三种浸出剂处理含钢物料,对比钢浸出行为和反应动力学,分析发现:相比盐酸和硝酸,硫酸作为酸性浸出剂,具有价格低廉、易获取、防腐问题易解决等优点,因此使用硫酸进行含钢粉尘的浸出作业更具显著优势。

1.1 高温高酸浸出

高温高酸浸出是通过提高浸出温度(90~150℃)和浸出溶液酸度(>200 g/L)来溶解物料中的难溶物质,进而提高钢浸出率的方法。在酸浸过程中,酸度对钢浸出效果的影响较为特殊,低酸不易分解难溶物料,而高酸虽然能溶解难溶物料,但随着酸度的增大,物料中其他杂质元素也会被浸出,导致钢回收难度加大。因此,在使用酸浸方式处理含钢粉尘时,应合理控制酸度,保证钢高效浸出的同时避免过多杂质元素进入浸出液。含钢粉尘酸浸时的主要反应见式(1)~(5)。



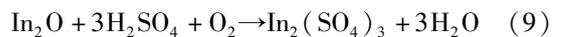
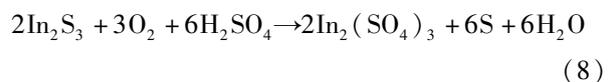
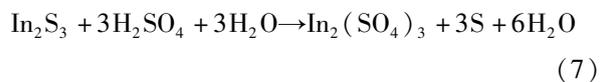
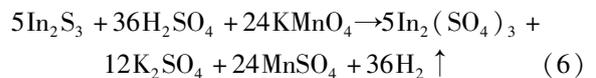
罗虹霖等^[7]采用两段浸出-溶剂萃取方法从氧化锌粉尘中提取钢,首先在低酸环境下将绝大部分的锌浸出而使钢保留在溶液中,接着在高酸条件下将钢浸出,解决了锌与钢在溶液中的分离问题,减轻后续除杂负担,但这种方法的钢浸出率并不高,这是因为在浸出过程中,物料中的铁和锌很容易生成具有尖晶石结构的铁酸锌,而钢则会置换铁酸锌晶格内的铁离子,形成难溶于酸的富钢铁酸锌($\text{ZnFe}_{(2-x)}\text{In}_x\text{O}_4$)^[8]。为解决钢浸出率较低的问题,部分学者对浸出温度进行研究,如 Zhang 等^[9]分析了硫酸浸出钢铁酸锌的动力学,发现当温度升高 20℃,钢的浸出率可提高 27%。高照国等^[10]采用浓硫酸为浸

出剂,通过控制单一变量的方法也发现在同一酸度条件下升高温度可以提高钢的浸出率,浸出率最高可达 91.5%。

综上所述可以看出,高温高酸浸出方法可以处理富钢铁酸锌等难浸载钢物相,提高钢的浸出率,但由于浸出过程需保证在高温、高酸的条件下进行,存在实验成本高、后续除杂难、安全隐患大等问题;另外,使用热酸浸出技术极易对设备造成严重的腐蚀,存在潜在的安全风险,该方法工业化应用水平还有待提高。

1.2 氧化酸浸

针对含钢物料中难浸矿物相(如硫化钢)的处理,氧化酸浸是一种被广泛采用且效果明显的浸出方法^[11]。氧化酸浸可分为常压氧化酸浸和加压氧化酸浸,其中常压酸浸是利用氧化剂来强化浸出过程的方法在浸出体系中加入氧化剂,在酸性环境中生成活性更强的原子态氧,从而参与反应,使包裹在矿物中的钢大量分解并完全暴露,同时,可以将钢的硫化物直接氧化为硫酸盐或亚硫酸盐,实现强化浸出^[12-13]。目前,常用的氧化剂是高锰酸钾和双氧水。在硫酸体系中,高锰酸钾和双氧水分解产生的活性态氧可将 In_2S_3 氧化,从而减少浸出过程对温度和酸浓度的依赖^[14-15]。浸出过程中发生的主要化学反应见式(6)~(9)。



加压氧化酸浸是在反应釜中通入氧气,通过增强氧分压来加强钢的浸出。王继民等^[16]采用 2L 钛制压力反应釜,将含钢物料与浓硫酸混合后加入反应釜中,通入氧气后关闭阀门保压,设定初始氧压为 0.3 MPa,研究发现初始氧压的升高可提高钢的浸出率,当初始氧压为 0.7 MPa 时,钢的浸出率达到最大值,为 91.68%;同时加压可显著降低酸的消耗。相比高温高酸法,该方法流程短、成本低、回收率高、污染小。

总的来说,采用氧化浸出的方法能够显著增强钢的浸出效果,并且使用氧化剂有助于降低反应对温度及酸度的需求;加压处理可以减少氧化酸浸过

程中的酸消耗,并提高钢的浸出效率。然而,加压操作相对复杂,对设备的要求较高。对于一些容易浸出的物料,通常在常压下就能实现较高的浸出率,因此,加压氧化酸浸更适用于处理难浸出的物料。

1.3 机械强化酸浸

机械活化是指在机械力的作用下使矿物晶体内部产生各种缺陷,将机械能转化为晶体内能,使之处于不稳定的能位较高的状态,从而降低矿物的反应活化能。通过机械活化作用,可改变浸出反应控制因素,使原料在较低浸出剂浓度和温度条件下即可高效浸出,从而有效回收有价元素^[17]。目前,机械活化的设备主要有行星磨、搅拌磨、振动磨等^[18-19]。

黎铎海等^[20]发现通过机械活化后,含钢原料与HCl的反应速度明显加快,活化30 min后,含钢原料与HCl反应的活化能由未活化时的90.6 kJ/mol降至53.0 kJ/mol,反应级数由原来的2.30降至1.31。由此可知机械活化增强含钢粉尘的浸出效果,主要体现在两个方面:首先,在机械活化的作用下,固体物料的物理和化学属性及晶体结构都发生了变化,这使得浸出剂与载钢物相能够充分接触,从而提高浸出效率;其次,通过机械活化这种方式可以降低反应的活化能以及反应对实验条件的要求,避免通过改变物料的外部环境来提高浸出效率,节约了成本,并简化了实验流程。

1.4 外场强化浸出

外场强化浸出法是一种在传统酸浸提钢方法基础上加入外场能量以辅助钢浸出过程的工艺^[21]。该工艺可以使含钢固废快速溶解,缩短反应时间和提高浸出率,同时还能有效防止废渣对环境造成污染。常军等^[22]采用微波强化技术对含钢粉尘进行硫酸化焙烧,结果显示,与传统的酸化焙烧方法相比,微波增强可使钢浸出率提高8.97%。进一步使用微波技术对焙烧的含钢物料进行酸化处理,随后水浸提钢,使用响应曲面法对焙烧过程进行了优化处理,研究结果显示,模型预测的钢浸出率达到了92.89%,基本与实验结果相吻合。

与机械活化浸出相比,外场强化浸出主要是在浸出过程中依靠外场的能量来提高钢的浸出率,不影响样品的结构;而机械活化方法则是先活化含钢物料,使其结构改变,降低反应活化能。无论是外场强化浸出还是机械活化浸出,都引入了外部的能量来增强浸出效果,这无疑增加了成本负担。

1.5 酸化焙烧浸出

酸化焙烧浸出是将预处理后的含钢粉尘混合浓

硫酸进行焙烧,该工艺的核心强化原理主要是利用高温焙烧技术破坏难溶载钢物相的稳定结构^[23],将钢难溶物转化为硫酸盐,进而提高钢的浸出率。ZHU等^[24]利用硫酸-焙烧工艺处理(图1)含钢粉尘,酸浸后将浸出渣焙烧处理,之后进行水浸处理,使钢保留在溶液中,其他杂质元素进入渣中,最终99%以上的钢得到富集。然而,工业实践表明,传统的酸化焙烧浸出方法效率很低,不适合大规模应用;且在此过程中必须使用浓硫酸,这不仅会消耗大量的酸,也会产生大量的酸雾,对环境造成污染;此外,硫酸、硝酸等强酸都有很强的腐蚀作用,导致酸化焙烧工艺成本增加。因此,一些学者开始尝试使用固态硫酸盐(如 FeSO_4)替代浓硫酸进行酸化焙烧,这种固态酸不仅运输方便,而且其腐蚀性相对较低。文岳中等^[25]采用固体酸对含钢物料进行焙烧,钢的浸出率达93%。

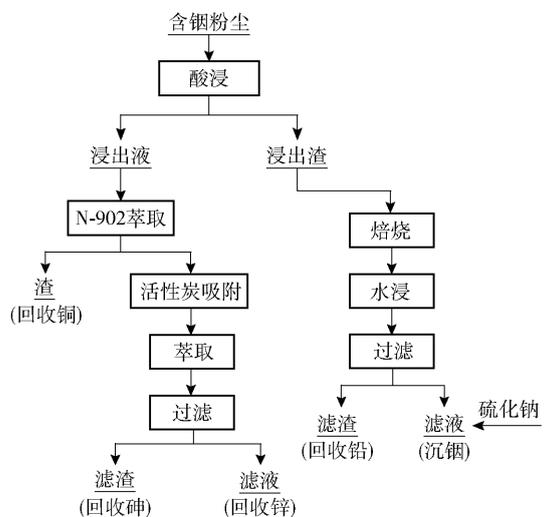


图1 酸化焙烧的工艺流程图

随着近些年湿法处理工艺的发展,一些学者比较了传统的酸浸强化处理方法,并提出了新的常规碱性浸出强化工艺。该工艺通过采用氢氧化钠和碳酸钠作为焙烧试剂,在碱化焙烧处理后,钢会以钠盐的形式进入渣中,经水浸处理后,钢会以氢氧化钢($\text{In}(\text{OH})_3$)和氧化钢(In_2O_3)形式富集于渣相中,从而显著提升钢与碱性浸出剂的反应效率^[25-26],后续通过常规浸出工艺可进一步实现钢的高效分离与回收。

1.6 常规湿法浸出工艺应用分析

含钢粉尘的湿法处理工艺对比见表2。从表2可以看出,工业上大多使用高温高酸浸出工艺,其操作流畅简单,且处理成本较低,适合大规模的工业应用;而氧化酸浸与酸化焙烧工艺虽然可以提高钢的

浸出率,但是其操作相对复杂,且对设备的要求较高,因此只应用于部分工业中。随着技术的不断改进,外场强化、机械强化等工艺手段可以降低酸耗,

大幅减少对环境的污染,但是这些方法很难满足工业中大规模的原料处理,因此目前仍只在实验中使用,工业实践应用还有待研究考察。

表 2 湿法处理含铜粉尘技术分析

浸出方法	温度/℃	试剂	特点	应用
高温高酸	90 ~ 150	H ₂ SO ₄	流程简单,成本较低,但酸耗较大,设备腐蚀严重,易污染环境	工业应用较多
氧化酸浸	约 150	H ₂ SO ₄ ,氧化剂(如 KMnO ₄ 、H ₂ O ₂ 等)	氧化剂可降低浸出对酸度和温度的依赖;加压可以降低酸耗,浸出率高;但对设备要求较高,操作相对复杂	部分工业应用
外场强化	—	—	避免了常规酸浸耗酸的缺陷和不足	实验室
机械强化	—	—	环境友好,成本较低	实验室
酸化焙烧	500 ~ 600	FeSO ₄	浸出率高,但硫酸化焙烧酸耗大,高温浓酸条件对设备腐蚀严重,能耗高,操作环境差	部分工业应用

2 新型浸出剂—低共熔溶剂

低共熔溶剂(DESs)是一种新型浸出剂,其可以定义为含有两种或多种氢键受体(HBAs)和氢键供体(HBDs)的化合物。DESs是在温度 60 ~ 100 ℃ 下^[27],通过简单机械搅拌数小时,由氢键受体和氢键供体依照特定摩尔比混合而形成的低共熔混合物。这些混合物的熔点通常低于其组成成分的熔点,在室温条件下以液体形式存在^[28-29]。与传统的离子液体(ILs)相比,DESs具有蒸气压低、水相容性好、热稳定性好、不易燃性等特性;同时,还有诸如合成简单、原材料广泛、成本低廉、无需精炼和毒性低等优势^[30]。鉴于其多方面的优点,低共熔溶剂在有机合成、溶解、催化、萃取、金属电沉积以及新材料的合成等领域显示出广泛的应用潜力^[31]。随着对低共熔溶剂研究的持续深入,其种类不断增加,新的低共熔溶剂被陆续发现与合成,但目前尚未有明确的分类标准。术语 DESs 和 ILs 在文献中可以互换使用,但有必要指出它们实际上是两种不同类型的溶剂,化学性质表明其应用领域显著不同。

Abott 等^[32]将低共熔溶剂分成 4 类: I 型(季铵盐 + 金属卤化物)、II 型(季铵盐 + 水合金属卤化物)、III 型(季铵盐 + 氢键受体)和 IV 型(金属卤化物 + 氢键供体),可用表 3 中通用公式进行表示。

I 型 DESs 主要是由无水金属卤代盐和季铵盐混合制成。无水金属卤代盐数量是确定的,因此有关这种 DESs 的研究相对较少。采用水合金属卤化物(II 型)和氯化胆碱可大大拓宽 DESs 的应用范围^[32]。II 型 DESs 由 I 型拓展而来,由于大多数水合金属盐具有较低的生产成本,并且对空气和水不

表 3 DESs 分类的通用公式

类型	公式	条件
I	$Cat^+ x^- zMCl_x$	$M = Zn, Sn, Fe, Al, Ga, In$
II	$Cat^+ x^- zMCl_x \cdot yH_2O$	$M = Cr, Co, Cu, Ni, Fe$
III	$Cat^+ x^- zRZ$	$Z = CONH, COOH, OH$
IV	$MCl_x + RZ =$	$M = Al, Zn$
	$MCl_{x-1}^+ \cdot RZ + MCl_{x+1}^-$	$Z = CONH_2, OH$

敏感,因此可以大规模地应用于工业中。组成 III 型 DESs 的氢键受体主要由季铵盐、季磷盐等有机盐构成,而氢键的主要供体则是尿素、羧酸和醇类化合物。由于这些物质溶解各种过渡金属氯化物和氧化物^[33]等物质的能力较高,因此被认为是当前研究最为广泛的 DESs 类型。IV 型 DESs 主要由 ZnCl₂、AlCl₃ 等金属卤代盐与尿素、乙酰胺和乙二醇等氢键供体混合而成^[31-34],虽然这些低共熔溶剂在制备过程中相对困难,但已被证实拥有很好的应用前景。

Zürner 等^[35]研究了三种不同的 III 型 DESs(氯化胆碱 + 乙二醇 1:2、氯化胆碱 + 尿素 1:2、氯化胆碱 + 草酸 1:1)从氧化物烟尘中浸出和选择性提取铜的情况,并与草酸水溶液浸出结果进行了比较,发现氯化胆碱 + 草酸是最有效的浸出剂,在进一步的分离步骤中具有超强的选择性。所用原料以富锌矿(ZnFe₂O₄)为主晶相,同时含有 PbSO₄ 和 Zn₂(SiO₄)。由于铜浸出率提高的同时总是伴随铁和锌的溶解,所以在浸出过程中选择性地提取铜并不可取,因而通过使用两个沉淀步骤从氯化胆碱-草酸浸出溶液中选择性分离了锌、铁、铅,从而将目标金属铜和锡留在溶液中。在温度 50 ℃ 和 70 ℃,浸出剂体积为 75 ~ 200 mL,液固比为 10 ~ 20 的条件下,铜的浸出率达到 88%,实现了铜的选择性提取。

值得一提的是,针对富含钢铁酸锌难溶物的物料,低共熔溶剂也有着良好的处理效果。Liu 等^[36]

提出了一种从富钢铁酸锌物料中选择性提取钢、锌和铁的新策略,通过引入水调节氯化胆碱-无水草酸低共熔溶剂的配位环境,实现了钢、锌、铁的高效浸出和深度分离;水作为助溶剂和稀释剂,在整个过程中发挥着关键作用。在特定浸出条件下(浸出温度 90 ℃,液固比 20:1 mL/g,ChCl 与 Oxa 物质的量之比 = 1:1,DES 与 H₂O 物质的量之比 = 1:3,反应时间 3.5 h),钢、锌和铁的浸出率分别为 96.27%、95.55% 和 96.33%。随后加入大量的水稀释并解离 DESs 的结构,有利于金属离子的逐步沉淀和深度分离,锌和铁的沉淀效率分别达到 93.06% 和 98.07%;溶液中残留的钢离子被活性炭有效吸附,经过 5 次吸附循环,回收率达到 75.7%;最后通过添加草酸,再次回收利用 DESs 溶液。

3 结论与展望

常规湿法浸出工艺仍是目前处理含钢粉尘最常用的一种工艺,其优点在于流程简单、成本较低。在前期物料处理上,可采用机械活化、酸碱化处理,使难溶矿物晶体内部产生各种缺陷,使其物理、化学属性以及晶体结构发生变化,降低反应级数;在浸出过程中可选择高温高酸、体系中添加氧化剂、外场强化等方法使难浸载钢物相分解,实现强化浸出。但常规浸出选择性差、杂质多,不利于后续除杂过程,且设备腐蚀严重,存在安全隐患,限制了进一步工业化应用,还需开展对于含钢粉尘中难浸物料动力学和热力学研究,优化物料预处理及湿法浸出过程。

低共熔溶剂是一种新型浸出剂,因其具有绿色、稳定、高选择性等特点受到学者的广泛重视,未来可采用分子动力学模拟浸出过程,完善金属钢的浸出机理分析,为解决浸出体系成分复杂、浸出选择性低等现存问题提供理论支撑,该溶剂有望代替传统酸或碱作为浸出剂,实现多源冶金粉尘“梯级分离,靶向提取”的目标,具有较好的发展前景。

[参考文献]

[1] 王树楷. 钢冶金[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:1-24.

[2] 陆挺,刘璇,张艳飞,等. 基于产业链分析的中国钢铎镓产业发展战略研究[J]. 资源科学,2015,37(5):1008-1017.

[3] 索宝霆,潘晓勇,田晖,等. 废液晶显示器中钢提取工艺技术研究[J]. 资源再生,2012(7):54-56.

[4] 王贵华,杜培培,张良进,等. 从次氧化锌粉尘中提锌

富钢试验研究[J]. 湿法冶金,2023,42(6):589-595.

[5] 王大伟,刘维,覃文庆,等. 高效提取氧化锌烟尘中钢新工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2015(11):26-29.

[6] MATSUMOTO K, TANIGUCHI S, KIKUCHI A. Acid leaching behavior of zinc ferrite in an agitated vessel[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1999, 63(3):345-351.

[7] 罗虹霖. 氧化锌烟尘提取钢的工艺研究[J]. 稀有金属与硬质合金,2017,45(1):17-22.

[8] RAO B P, RAO K H. Distribution of In³⁺ ions in indium-substituted Ni-Zn-Ti ferrites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2005,292:44-48.

[9] ZHANG Y J, LI X H, PAN L P, et al. Studies on the kinetics of zinc and indium extraction from indium-bearing zinc ferrite[J]. Hydrometallurgy,2010,100(3/4):172-176.

[10] 高照国,曹耀华,刘红召. 含钢铅烟尘提钢试验研究[J]. 稀有金属,2010,34(3):413-419.

[11] 徐瑞. 高硅含锌冶炼粉尘酸浸过程中硅的行为研究[D]. 北京有色金属研究总院,2013.

[12] 饶兵,戴惠新,高利坤. 冶炼废渣中钢回收技术进展[J]. 化工进展,2016,35(12):4042-4052.

[13] 罗文波,王吉坤,赵兴凡,等. 含钢氧化锌烟尘加压硫酸浸出工艺优化[J]. 过程工程学报,2015,15(6):982-987.

[14] 陈荣升,龙伟,杨建广,等. 采用硫酸化焙烧-水浸工艺从铜烟灰氧压酸浸渣中浸出钢[J]. 湿法冶金,2022,41(2):126-132.

[15] 申星梅,吴成志,武杏荣,等. 冶金固废中钢的湿法浸出技术[J]. 有色金属工程,2019,9(4):60-66.

[16] 王继民,曹洪杨,吴斌秀,等. 氧压酸浸法从脱锌氧化硬锌渣中选择性浸出锆和钢[J]. 有色金属(冶炼部分),2013(3):47-50.

[17] 何奥希,陈晋,李毅恒,等. 机械活化在矿物浸出过程中的应用研究[J]. 矿产综合利用,2018(4):1-6,13.

[18] 唐洋洋,李林波,王超,等. 含钢锌渣湿法回收钢工艺进展[J]. 有色金属工程,2021,11(4):55-62.

[19] 姚金环. 从钢铁酸锌中用机械活化方法强化浸出钢、锌的机理研究[D]. 南宁:广西大学,2013.

[20] 黎铨海,李秀敏,潘柳萍. 机械活化强化 ITO 废料中钢浸出的动力学研究[J]. 金属矿山,2006(3):46-48.

[21] 刘殿传,李华楷,兰国辉. 含锆资源湿法处理的研究进展[J]. 云南冶金,2023,52(3):86-90.

[22] 常军,张利波,彭金辉,等. 微波强化焙烧氧化锌烟尘提钢工艺优化研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2018(3):39-44,59.

[23] 李林波,任军权,李路路,等. 铜烟灰浓硫酸熟化-浸

- 出提钢工艺研究[J]. 有色金属工程, 2019, 9(7): 54-58.
- [24] ZHU G, ZHENG M, FAN G, et al. Recovering indium with sulfating roasting from copper-smelting ash[J]. *Rare Metals*, 2007, 26(5): 488-491.
- [25] 文岳中, 刘又年, 舒万良, 等. 固体酸化焙烧-水浸提钢的研究[J]. *稀有金属*, 1999(3): 68-70.
- [26] 张蒙蒙. 次级氧化锌废渣中钢的富集提取工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [27] ABBOTT A P, GLEN C, DAVIES DL, et al. Solubility of metal oxides in deep eutectic solvents based on choline chloride[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data: the ACS Journal for Data*, 2006, 51(4): 1280-1282.
- [28] SANTOS D S E. Deep eutectic solvents: properties, applications and toxicity[M]. Nova Science Publishers, Inc.: 2022-03-21.
- [29] NEGI T, KUMAR A, SHARMA K S, et al. Deep eutectic solvents: preparation, properties, and food applications[J]. *Heliyon*, 2024, 10(7): e28784.
- [30] SMITH L E, ABBOTT A P, RYDER S K. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications[J]. *Chemical Reviews*, 2014, 114(21): 11060-11082.
- [31] ABBOTT A P, DAVID B, GLEN C, et al. Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: versatile alternatives to ionic liquids[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2004, 126(29): 9142-9147.
- [32] ABBOTT A P, CAPPER G, DAVIES D L, et al. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures[J]. *Chemical Communications*, 2003: 70-71.
- [33] ABBOTT A P, GLEN C, DAVIES L D, et al. Selective extraction of metals from mixed oxide matrixes using choline-based ionic liquids[J]. *Inorganic Chemistry*, 2005, 44(19): 6497-6499.
- [34] MORRISON G H, SUN C C, NEERVANNAN S. Characterization of thermal behavior of deep eutectic solvents and their potential as drug solubilization vehicles[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2009, 378(1): 136-139.
- [35] ZÜRNER P, FRISCH G. Leaching and selective extraction of indium and tin from zinc flue dust using an oxalic acid-based deep eutectic solvent[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(5): 5300-5308.
- [36] LIU J, CHEN B, HUANG Y, et al. Efficient and clean treatment of indium-bearing zinc ferrite: A new approach using a water-regulated deep eutectic solvent[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 347127576.

The Current Status and Prospects of the Hydrometallurgical Leaching Process of Indium from Indium Containing Dust

LIU Yongzhi^{1,2}, LONG Yue^{1,2}, YU Qiyuan^{1,2}, DU Peipei^{1,2}

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University Science and Technology, Tangshan 063200, China;

2. Modern Metallurgical Technique Key Laboratory of Ministry of Education, North China University Science and Technology, Tangshan 063200, China)

Abstract: Indium-containing dust, including lead smelting dust, copper smelting dust, zinc smelting dust, steel dust, etc., is an important raw material for extracting rare metal indium. Hydrometallurgical leaching is the main process for treating indium-containing dust. In this paper, the current situation of hydrometallurgical leaching of indium from indium-containing dust was comprehensively reviewed. At the same time, the characteristics and limitations of different processes such as high temperature and high acid leaching, oxidative acid leaching, mechanically enhanced acid leaching, external field enhanced leaching, acidification roasting leaching on indium metal and insoluble indium phase leaching were compared and analyzed, and the problems of each process in industrial production practice were pointed out. In addition, the research progress of selective extraction of indium by new leaching agent-deep eutectic solvent was analyzed, and the prospect of industrial application of deep eutectic solvent in hydrometallurgical leaching of rare metals such as indium was put forward.

Key words: indium-containing dust; hydrometallurgical leaching; high temperature and high acid leaching; oxidative acid leaching; mechanical strengthening acid leaching; external field enhanced leaching; acidification roasting leaching; deep eutectic solvent