

铍冶炼渣无害化处置及利用研究

章媛媛^{1,2} 俞音^{1,2} 姜雪^{1,2} 张亚伟³ 贡红娟^{1,2}

1. 新疆环境保护科学研究院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830011
2. 新疆清洁生产工程技术研究中心, 中国·新疆 乌鲁木齐 830011
3. 菏泽市生态环境局鄄城县分局, 中国·山东 鄄城 274700

摘要: 随着工业活动的增加, 特别是金属冶炼行业, 工业废渣的产生量也随之增加, 其中铍冶炼渣由于其潜在的环境风险和资源价值, 成为环境科学和资源回收研究的重点。对此, 论文首先对铍冶炼渣的特性进行介绍, 然后对铍冶炼渣无害化处置技术要点进行分析, 并对铍冶炼渣的资源化利用策略进行探究, 以减轻废渣对环境的负面影响, 将其转变为有价值的资源, 进而支持循环经济的发展。

关键词: 铍冶炼渣; 特性; 无害化处置; 资源化利用

Research on Harmless Disposal and Utilization of Beryllium Smelting Slag

Yuanyuan Zhang^{1,2} Yin Yu^{1,2} Xue Jiang^{1,2} Yawei Zhang³ Hongjuan Yun^{1,2}

1. Xinjiang Academy of Environmental Protection Sciences, Urumqi, Xinjiang, 830011, China
2. Xinjiang Clean Production Engineering Technology Research Center, Urumqi, Xinjiang, 830011, China
3. Yuncheng County Branch of Heze Ecological Environment Bureau, Yuncheng, Shandong, 274700, China

Abstract: With the increase of industrial activities, especially in the metal smelting industry, the amount of industrial waste generated has also increased. Among them, beryllium smelting slag has become a focus of environmental science and resource recovery research due to its potential environmental risks and resource value. In this regard, the paper first introduces the characteristics of beryllium smelting slag, analyzes the key points of harmless disposal technology for beryllium smelting slag, and explores the resource utilization strategy of beryllium smelting slag to reduce the negative impact of waste slag on the environment, transform it into valuable resources, and support the development of circular economy.

Keywords: beryllium smelting slag; characteristic; harmless disposal; resource utilization

1 引言

随着工业化进程的加速, 工业废渣的产生量显著增加, 不仅加剧环境压力, 而且引起社会和政府对于固体废物管理问题的高度关注。在此背景下, 铍冶炼渣的处理问题尤为突出, 其资源化利用潜力的开发显得尤为重要。通过探索和评估各种无害化技术和资源化策略, 可找到最有效的处理和利用路径, 以实现固体废物的减量化、资源化和无害化。此外, 铍冶炼渣的资源化利用符合当前全球推广的循环经济和可持续发展战略。通过将废渣转化为有价值的新材料, 如建筑材料、功能材料和土壤改良剂, 可以减少对原始资源的依赖和开采, 降低生态环境的破坏, 推动固体废物的经济价值转化, 提升环境管理的科技水平和策略效果。因此, 对铍冶炼渣无害化处置及利用策略展开深入研究意义重大。

2 铍冶炼渣的特性分析

铍冶炼渣的物理特性主要体现在粒度、密度、形态和相对稳定性。如果渣粒度较小, 则容易受到风吹散播, 而较大的粒度适合于固体填埋, 另外, 也可作为建筑材料的一部分。铍冶炼渣呈碱性, 对土壤 pH 值产生影响, 进而影响土

壤的生物可用性。通过对铍渣的化学成分进行分析, 在冶炼过程中从原料中释放出铍以及其他有害重金属, 如铅、镉和砷, 重金属不仅增加铍冶炼渣处理难度, 而且会对环境构成污染威胁。因此, 详细的化学分析是确定渣是否可以被安全利用或需要进行特殊处理的关键。环境和健康影响的评估是分析铍冶炼渣特性的另一个重要方面。铍具有毒性, 即使是微量的铍也可能对人体健康造成严重影响, 如呼吸系统疾病。此外, 渣中的其他重金属也会通过食物链积累, 对野生动植物和人类健康构成长期威胁。因此, 需采用科学有效的无害化处理方式^[1]。

3 铍冶炼渣无害化处置技术要点

3.1 固化 / 稳定化处理

固化 / 稳定化处理是一种广泛用于处理含有毒金属的工业废物, 包括铍冶炼渣的技术。这种技术通过改变废物的物理和化学性质来减少其对环境的风险。处理的主要目标是限制有害物质的流动性和生物可利用性, 从而防止迁移到环境中, 如进入地下水系统。在固化 / 稳定化处理过程中, 常用的固化剂包括水泥、石灰、粘土和各种聚合物, 各类物质可

以与废物中的有害成分反应,形成稳定的化合物,或通过物理封装将污染物包围起来。例如,使用水泥作为固化剂时,水泥中的硅酸盐、铝酸盐和钙酸盐会与废物中的重金属如铅、铬、镉形成不溶性的水化物、硅酸盐和磷酸盐,从而减少金属的溶出率。在具体的处理过程中,废物与固化剂混合后会添加适量水进行搅拌,使混合物达到均匀的糊状或泥状状态,然后倾倒入模具中进行固化。固化过程中,混合物逐渐硬化,形成固体块,这个过程可以在自然条件下进行,也可以在控制的环境中(如加热或维持特定湿度)进行,以加速硬化过程和提高固体的稳定性^[2]。此外,固化后的产品需要经过一系列的测试来评估其稳定性和环境安全性。常见的测试包括浸出试验,如 TCLP(毒性特性浸出程序)测试,通过开展测试,模拟固化体在填埋场条件下可能经历的酸性雨水浸泡等情况,评估有毒元素的浸出情况。只有当浸出的有毒物质浓度低于环保标准限值时,才能够保证固化体的安全性。

3.2 化学处理

化学处理是处理铍冶炼渣中有害成分的有效方法之一,通过化学反应转化含有毒性的金属成分,可降低生物可用性和毒性。这种处理不仅针对铍,还可用于渣中的其他有毒金属,如铅、铬和汞等。化学处理的核心是选用合适的化学试剂,试剂能够与有害金属反应,形成更稳定、溶解度低的化合物。例如,使用硫化物处理可以将金属离子转化为其对应的硫化金属,这些硫化金属的溶解度极低,因而减少了金属离子在环境中的流动性。另一种常见的化学试剂是磷酸盐,能与重金属反应生成不溶的磷酸盐沉淀,同样有效降低金属的生物可用性。在进行化学处理时,需要精确控制试剂的加入量和反应条件,如 pH 值、温度和反应时间。这些因素都会显著影响化学反应的效率和产品的稳定性。例如, pH 值对于金属离子的溶解度和沉淀形成有着直接的影响,适当调节 pH 值,优化沉淀的形成,提高处理效果。此外,化学处理还包括氧化还原反应,这种方法可以改变金属的价态,将更易溶的金属离子转变为更难溶的形式。例如,六价铬是一种高毒性的物质,可以通过还原反应转化为三价铬,后者在环境中的稳定性和毒性都大为降低。化学处理完成后,需要进行一系列的环境安全性测试,如浸出试验,评估处理效果,确定处理后的废物是否满足安全处置或进一步利用的标准^[3]。如果有毒成分浓度仍然超过安全标准,还需进一步的处理。

3.3 热处理

热处理是一种通过高温影响废物特性的技术,常用于处理包括铍冶炼渣在内的工业废物。通过热处理,可以改变废物中有害物质的化学形态,使其更加稳定或直接将其转化为无害物质。热处理技术包括焚烧、熔融和热解等不同形式,每种方式都有其特定的应用场景和效果。焚烧是一种常见的热处理形式,主要用于有机物质的氧化分解。在处理铍冶炼渣时,焚烧可以用来减少废物的体积,通过高温燃烧将有机

组分转化为二氧化碳和水蒸气。此外,焚烧过程中,渣中的一些金属可能被转化为更稳定的氧化物形式。然而,焚烧也有可能产生有毒的副产品,如二噁英和重金属颗粒,因此需要配备高效的排气处理系统来控制排放。熔融处理则是通过将废物加热至其熔点以上的温度,使废物熔化成液态。在这一过程中,废物中的无机组分可以被转化为稳定的玻璃态或陶瓷态物质,减少其溶出性。熔融处理特别适用于含有重金属的废物,可以固封重金属在稳定的基质中,防止其环境释放。熔融处理的挑战在于其对能源的高需求和操作成本。热解是在缺氧或低氧条件下进行的热处理过程,主要用于分解废物中的有机物质。在热解过程中,可以将复杂的有机化合物转化为小分子气体、油和碳黑,再进一步利用或处理。在进行热处理时,温度控制是关键因素,不仅影响处理效果,还关系到能源效率和处理成本。高温可以加速化学反应,促使有害物质转化为稳定形态,但同时也会增加能耗。因此,热处理设备通常需要设计得既能承受高温,又能高效利用能源。热处理后,还需要对处理产品进行详细的环境安全评估,包括对固化产品的溶出性和化学稳定性进行测试。这些测试结果将决定是否可以将处理后的物质安全填埋或用于其他目的。

3.4 生物处理

生物处理是一种利用微生物或植物来降解或吸收废物中有害成分的技术。在处理铍冶炼渣这类工业废物时,生物处理可以有效降低有害金属的浓度,从而减少其对环境的影响。这种处理方法相对于传统的化学或物理方法而言,具有成本较低、环境友好、对设备要求不高等优点。微生物处理是生物处理中的一种常见形式,它利用微生物的新陈代谢能力来将有机或无机废物降解成更简单、更稳定的物质。在铍冶炼渣的处理中,可以利用一些具有耐金属高的细菌或真菌,这些微生物能够在高金属浓度的环境中生存和繁殖,并通过吸附、沉淀或还原等方式降低渣中金属的浓度^[4]。例如,一些硫酸盐还原菌可以将重金属离子还原成不溶性的金属硫化物沉淀,从而减少其在环境中的溶解度和毒性。植物吸附是另一种常见的生物处理方式,被广泛应用于重金属污染土壤的修复。一些特定的植物,被称为超富集植物,具有高度吸附重金属的能力,能够将废物中的金属吸收到植物体内,并富集在根系或地上部分。在植物的生长过程中,不仅可以降低渣中重金属的浓度,还可以将金属封存在其组织中,减少其对周围环境的释放。一些典型的超富集植物包括拟南芥、韭菜和紫云英等。生物处理的优势之一是其相对低成本和可持续性。与化学处理或热处理相比,生物处理通常不需要大量的能源和化学试剂,而且过程中产生的副产品也较少。此外,生物处理通常可以在现场进行,不需要大型设备和高技术的支持,因此,应用范围广泛。

4 铍冶炼渣资源化利用策略

4.1 作为建筑材料使用

铍冶炼渣作为建筑材料使用是一种具有潜力的资源化

利用方式,能有效减少废物并缓解自然资源的开采压力。对此,应对铍冶炼渣进行全面的物理和化学性质分析,包括粒度分布、密度、机械强度和化学稳定性,判断铍冶炼渣是否适合用作建筑材料,如用作混凝土骨料或制砖的原料。为确保环境安全和工程质量,渣中的有害元素含量必须控制在安全标准之内。此外,还需进行工程试验,如压缩强度测试和耐久性测试,评估渣在实际应用中的表现,深入了解其在建筑领域的具体应用潜力及技术要求,从而推动其在建筑材料领域的创新与高值化利用。

4.2 金属回收

如果铍冶炼渣中含有贵金属和稀有金属,则可采用金属回收处理方式。对渣中金属含量的详细分析,确定其中包含的金属种类及其浓度。再采用适合的分离和提纯技术,如浮选、磁选、溶剂萃取或电化学方法,从渣中提取这些金属,不仅能有效回收铜、铅、锌等常见金属,而且可针对稀有金属如铍进行专门的回收处理。完成金属提取后,所得的纯金属或金属化合物可以直接送往市场或用于制造新的金属制品。金属回收不仅有利于降低原材料需求,减少矿产资源的开采,而且环保效益比较高,可减少废物的堆积,避免对生态环境造成不良影响,可实现铜渣的高值化利用^[5]。

4.3 制备功能材料

制备功能材料是铍冶炼渣高值化利用的一个创新方向,需深入挖掘铍冶炼渣中的潜在价值。铍冶炼渣中不仅含有金属元素,而且含有能够转化为功能性化合物的其他无机成分。例如,渣中的硅酸盐可以被用来制备高性能玻璃或陶瓷;氧化物成分可以转化为先进的催化剂或吸附材料。通过采用精细化工处理技术,如化学沉淀、溶胶-凝胶法或高温烧结等,可以将这些无机成分转化为具有特定物理或化学性能的材料。这些材料在环境治理、能源存储、电子设备等领域具有广泛应用,不仅有利于提升废渣的经济价值,而且可推动材料科学的发展和环境可持续性的实现,增加材料的附加值,推动废物资源的循环利用,为环保事业贡献力量。

4.4 土壤改良剂

铍冶炼渣作为土壤改良剂的利用是将工业废物转化为农业资源的一种有效方式,可提升土壤质量,促进可持续农

业的发展。利用渣中的矿物质和金属氧化物成分,改善土壤的物理和化学性质,增加土壤肥力。渣中的石灰石或硅酸盐可以有效调节土壤 pH 值,增加土壤的碱性,对于酸性土壤尤为有效。此外,渣中的微量元素如镁、钾和铁等可以作为微量营养素,供植物吸收利用,增强作物的生长和产量。在使用铍冶炼渣作为土壤改良剂之前,必须确保其重金属含量低于安全标准,以避免对作物和土壤环境造成负面影响,充分展示铜渣在农业环境管理中的高值化利用潜力。

5 结语

综上所述,铍冶炼渣的无害化处置及资源化利用研究表明,通过采用固化/稳定化处理、化学处理、热处理以及生物处理等方法,可以有效降低铍及其他重金属的环境风险。此外,资源化利用策略,包括金属回收、制备功能材料和作为建筑材料或土壤改良剂的使用,不仅提升铍冶炼渣的经济价值,而且有利于环境的可持续管理,进而实现环境保护与资源再利用的双重目标。

参考文献:

- [1] 雷湘,吴海国,郭庆,等.铍冶炼厂铝铵矾处理工艺研究[J].有色金属,2015,31(5):26-28.
- [2] 曾志彦,王磊,孔令兵,等.含铍冶炼废渣回收铍生产氟化镁[J].有色金属(冶炼部分),2022(7):144-149.
- [3] 张金山,韩俊钢,崔书辉.铍布袋粉废料电渣熔炼制备铍青铜用母合金工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2023,43(6):821-824.
- [4] 鲁春艳,廖衡峰,周正伟,等.铅冶炼退役场地土壤污染状况调查与风险评估[J].有色冶金节能,2022,38(3):61-68.
- [5] 张金山,任海强,葛大明.铍铜废渣回收处理工艺及其回收料应用的研究[J].稀有金属与硬质合金,2022,50(4):7-11.

作者简介:章媛媛(1985-),女,中国山东菏泽人,硕士,高级工程师,从事固体废物处理处置及资源化利用、清洁生产与环境标准研究。

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发任务项目《新疆有色金属行业典型固废高值化技术环境和经济效应评价研究》(项目编号:2023B03007-3)。