

冶金渣资源化利用过程中的重金属迁移规律与控制

陈浩

金川集团镍钴股份有限公司粉体材料厂 甘肃 金昌 737100

【摘要】：冶金渣作为冶金工业过程中的重要固体副产品，在钢铁、有色冶金领域产生量巨大。随着资源循环利用体系的不断完善，冶金渣资源化利用已成为推动绿色冶金和固废减量化的重要方向。然而，冶金渣中普遍含有铅、镉、砷、锌、铬、铜等重金属元素，在资源化处置过程中可能发生迁移、转化甚至再释放，给土壤、水体及生态环境带来潜在风险。如何在资源化利用过程中实现重金属的有效固结与迁移控制，是当前研究和工程实践的重点。本文从冶金渣的物相结构、冶金过程热力学条件及资源化产品应用环境等方面，系统分析了重金属的迁移规律，探讨其在高温熔融、固化成型、碳化养护、酸碱浸出及微生物作用下的多路径迁移行为。研究指出，重金属迁移受矿物相结构稳定性、玻璃体含量、晶体结合形式、pH 条件及溶解氧等环境因子的共同影响。针对资源化利用中存在的迁移风险，本文提出优化冶金渣矿物相结构、提高玻璃相比例、采用复合固化剂、强化碳化反应、形成稳定化长效机制等控制策略。研究结论表明，冶金渣通过科学处理工艺可实现重金属的长期固结，为冶金渣规模化资源化利用提供了理论依据与工程参考。

【关键词】：冶金渣；重金属迁移；资源化利用；固化稳定化；矿物相结构

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.037

引言

我国冶金工业规模庞大，每年产生大量高炉渣、钢渣、转炉渣、电炉渣及有色冶金渣，其产生量占一般工业固废的很大比例。随着“双碳”战略及资源循环利用体系的加速构建，冶金渣作为二次资源的重要性日益凸显，其在建材、道路工程、农业改良及金属回收等领域的应用前景广阔。然而，与其资源化潜力同时存在的是冶金渣中重金属元素的不稳定性问题。在冶金渣生成、储存、应用及再利用过程中，重金属可能发生浸出、扩散、络合或氧化还原反应，导致迁移行为复杂且多样化，尤其在弱酸环境、湿干循环及长期暴露条件下更易引发潜在风险。因此，深入研究冶金渣资源化利用过程中的重金属迁移规律，探索有效的迁移控制策略，对于推动固废资源化利用、提升环境安全水平具有重要意义。

此外，冶金渣在不同应用场景中所处的物理化学环境差异显著，如道路基层长期受到雨水冲刷，土壤改良环境中有机酸含量较高，建筑材料内部则可能发生碳化反应，这些因素都会改变重金属的赋存状态和迁移速率。针对这些特征开展系统研究，有助于形成更具针对性的控制技术，实现冶金渣的安全、高效、绿色资源化利用。基于此，本文从冶金渣的化学组成、矿相结构及环境影响机理入手，对重金属迁移过程进行系统分析，并提出可操作性的控制措施，以期冶金渣绿色资源化利用提供科学依据与技术支持。

1 冶金渣中重金属赋存特征与迁移基础机制

1.1 冶金渣的矿物组成与重金属赋存形态

冶金渣的矿物组成与结构直接决定了重金属的赋存形态及其潜在迁移性。其矿相由硅酸盐、铁氧化物、钙铝硅酸盐、玻璃体以及不同价态的金属氧化物、硫化物构成，这些矿物之间在冷却过程中形成复杂的固溶体或包裹结构，使冶金渣呈现多相共存的微观特征。重金属在冶金渣中存在的固溶、包裹、吸附、离子交换以及弱结合态等多种形式，不同形态的稳定性差异明显。晶格固溶态通常最为稳定，因其重金属离子进入晶体结构内部，难以因环境变化而释放；玻璃体结构形成的三维网架也具有较强的固结能力，使重金属处于难溶解状态。而吸附态和弱结合态多分布于矿物表面，在雨水、酸性溶液或氧化还原条件变化下极易脱附。

冶金渣的冷却方式是影响矿物相结构的重要因素。水淬会产生大量玻璃体，使重金属在快速固化中被包裹于玻璃网络中，从而降低浸出风险；空气冷却或慢冷则易促使晶体长大，晶界处可能因结构松散而形成重金属的富集区域，提高迁移潜力。此外，不同冶金渣（如转炉渣、钢渣、电炉渣、有色冶金渣）的化学成分差异显著，导致重金属在矿物中的分配行为不同。例如钢渣中高 CaO 含量会引起矿物结构碱性增强，使部分重金属以弱结合形式存在；有色渣中硫化物含量高，易因氧化而形成溶解性更强的重金属氧化物。全面认识冶金渣的矿物组成与赋存特征，有助于评估其资源化利用过程中的环境风险，也为后续的重

金属迁移控制提供了材料基础。

1.2 影响冶金渣中重金属迁移的关键因子

在冶金渣资源化利用过程中，重金属的迁移受多重因素共同影响，这些因素包括环境化学条件、物理结构特性以及外界动态环境变化。其中 pH 是控制迁移最敏感的指标，酸性环境能促进硅酸盐及金属氧化物溶解，使原本处于晶体表面或弱结合态的重金属显著释放；碱性环境虽然有助于形成难溶沉淀，但某些元素如 Cr、As 在高碱环境中可能形成可溶性络合物，从而增强迁移性。在氧化还原条件变化下，重金属可能经历价态转换，例如 Cr^{3+} 被氧化成高迁移性的 Cr^{6+} ，砷由 As^{3+} 转化为 As^{5+} 时也会引起环境迁移性变化。

温度的变化会影响矿物稳定性以及扩散速率，高温环境易破坏冶金渣的部分晶体结构，使重金属更易从内部结构向表面迁移，而低温环境下结构较为稳定，但长期温度波动会引发物相微裂纹，使渗透性升高。湿干循环是资源化应用中普遍存在的环境因素，频繁循环会加剧渣体表面开裂，暴露更多吸附态金属，增加浸出速率。碳化反应也是重要影响机制， CO_2 侵入后形成碳酸盐结构，可能增强结构致密性，但也可能因 pH 下降而引发部分金属释放。此外，微生物的代谢活动会改变局部 pH 和 Eh，例如硫氧化菌可氧化硫化物矿物，使重金属从原位释放。综上，冶金渣中重金属的迁移是多因素叠加的结果，具有复杂的动态变化特征。

1.3 冶金渣资源化利用过程中的迁移风险来源

冶金渣在资源化利用过程中，其迁移风险来源覆盖材料制备、实际应用及长期环境暴露三个阶段。在材料制备阶段，高温条件可能导致部分低沸点重金属进入挥发态，使其在冷凝过程中聚集于细颗粒或表面区域，增加后期浸出概率。某些建材制备过程如再粉磨、激发剂掺入等处理步骤，会使渣体表面活性增强，使原本固定的重金属重新暴露，提升潜在风险。在道路工程中，雨水渗入材料内部并与碱性成分发生反应，会导致重金属逐步释放；车辆荷载引起的结构疲劳也能造成内部裂纹，为迁移提供通道。在土壤改良或土地利用中，如果土壤酸性较强，或植物根系分泌物呈酸性，会加速冶金渣中重金属的溶解。

长期暴露阶段的风险更为复杂，是评估冶金渣资源化安全性的重要环节。自然风化会破坏硅酸盐网络结构，使包裹态重金属逐渐暴露；持续的碳化作用虽然能增强短期致密性，但 pH 下降可能促进某些金属的再释；湿干循环、冻融循环会进一步扩大结构裂缝，

使渗透性增强。微生物参与作用可能在其代谢过程中产生酸性物质或氧化剂，加速矿物分解。此外，环境盐分、酸雨、工业废气等外界因素都可能与冶金渣发生化学反应，改变矿物稳定性，引发新的迁移路径。因而，从材料生命周期全程角度识别风险来源，是构建有效控制策略的重要前提。

2 冶金渣资源化过程中的重金属迁移规律

2.1 高温冶金过程中的重金属相变与迁移机制

冶金渣在高温熔融过程中重金属经历复杂的热力学相变。在氧化、还原、硫化等多种条件下，重金属可能发生蒸发、凝聚、固溶或析出行为。例如，铅、镉等低沸点金属在高温状态下易进入气相迁移，而 Cr、Mn 等高熔点金属则多以氧化物形式固溶于矿物晶格中。冷却速度对迁移规律也影响显著，快速水淬形成大量玻璃体，增强重金属固结；慢冷则导致晶体生长，可能促使部分重金属富集于晶界区域，增加后续浸出风险。从热力学和动力学角度理解重金属的高温迁移规律，有助于优化冶金渣的初始稳定性。

2.2 资源化建材制备中的重金属固化与潜在释放

冶金渣广泛用于生产水泥、混凝土、道路基层材料等。在此过程中，重金属的固化行为与水化产物、矿物包裹机制密切相关。例如，水泥水化产生的 C-S-H 凝胶具有较强吸附能力，能够固定铅、锌等离子；而铬在碱性水泥体系中可能形成高价态，增加迁移风险。碳化过程也是影响重金属迁移的重要环节，二氧化碳与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的反应可形成稳定碳酸盐结构，从而提高重金属固结能力。材料的孔隙率、密实度及暴露环境（如氯盐侵蚀、酸雨冲刷）均可能引发固化重金属的再释放。

2.3 环境暴露条件下重金属的长期迁移规律

冶金渣在长期应用中受到雨水淋溶、紫外照射、湿干循环等环境因素影响，其矿物结构会逐渐风化，导致重金属迁移性增强。研究表明，雨水浸泡会使渣体表面形成脱钙层，促进弱结合态重金属溶出；湿干循环则加速微裂纹形成，增加浸出速率；微生物作用可能改变局部 pH 和 Eh，引发重金属价态变化。环境暴露导致迁移规律呈现阶段性：初期快速浸出，中期稳定，后期因结构破裂出现第二次迁移峰值。深入理解长期迁移规律是评估资源化产品安全性的关键步骤。

3 重金属迁移的控制机制与工程化路径

3.1 矿物相调控与结构稳定化策略

通过改变冶金渣物相结构来控制重金属迁移是最

根本的技术途径。例如提高玻璃相比比例，通过快速冷却方式促进硅酸盐网络结构形成，可显著降低重金属迁移性；通过外加矿化剂可促进形成尖晶石、石榴石等结构稳定的矿物相，使重金属以晶格固溶形态存在，从而提升长期稳定性。此外，通过调整 Ca/Si 比例、控制氧化条件可改变矿相，使重金属更难在晶界富集。这类矿物相调控策略在钢渣、铜渣、镍渣中已取得良好效果。

3.2 固化稳定化技术及其应用效果

固化稳定化是控制迁移的核心技术之一，包括物理包裹、化学结合、吸附沉淀等多种机制。常用的固化材料有水泥基材料、地聚合物、硅酸盐体系、碳化固结体系等。水泥固化可通过水化产物包裹重金属并形成复杂络合物；地聚合物通过铝硅网络结构嵌入金属离子，具有较强稳定能力；碳化技术利用 CO₂ 与 Ca 成分反应形成致密碳酸盐层，大幅降低渗透性和溶出性。复合固化剂也可提升效果，通过物理+化学双重作用形成更稳定结构。

3.3 应用环境控制与风险管理措施

在资源化利用阶段，通过控制应用环境可有效抑制重金属迁移。例如在道路工程使用中，可通过控制基层材料的密实度、设计排水系统、避免长期水浸来减少迁移；在土壤改良中需严格控制施用量，并监测土壤 pH、温度及生物活性；在建材应用中应避免酸性环境长期侵蚀。建立重金属迁移风险评估体系，结合生命周期管理理念，可实现冶金渣资源化的全过程安全控制。

参考文献：

- [1] 王强.标准与认证助推冶金固废资源化利用[J].中国钢铁业,2024,(11):28-29+38.
- [2] 李博闻,成云海,李伟利,等.碱激发铜渣-粉煤灰复合胶凝材料的力学性能及水化机理研究[J].煤炭与化工,2024,47(10):141-148.
- [3] 王强.标准与认证助推冶金固废资源化利用[J].中国钢铁业,2024,(11):28-29+38.
- [4] 龙顺红.废旧塑料在冶金领域资源化利用的方法[J].塑料助剂,2024,(04):55-59.
- [5] 陈昭如.石膏渣铵法资源化实验研究及其应用[D].湘潭大学,2024.

4 冶金渣资源化利用的未来发展方向

(1) 重金属迁移过程的多尺度耦合机制研究：未来研究需从纳米尺度到宏观结构多层次理解重金属迁移行为，结合分子动力学模拟、矿相成像技术、浸泡试验等手段，构建迁移机理模型，更精确预测不同条件下的迁移规律。此外，环境因子的耦合作用机制需进一步研究，如酸雨—碳化—微生物共同作用下的迁移路径识别。

(2) 绿色低碳资源化技术体系构建：随着碳达峰与碳中和目标推进，低能耗、低排放的冶金渣资源化技术将更受关注，如低温激发、常温固化、原位碳化等方法。结合产业链需求，构建资源化利用一体化体系，实现“冶金渣—绿色建材—环境治理”的协同发展。

5 结语

冶金渣资源化利用既是促进循环经济发展的重要途径，也是提升工业绿色化水平的重要环节。重金属迁移问题是制约其大规模应用的核心因素。本文从矿物相结构、环境条件和资源化过程等多个维度分析了重金属迁移规律，并提出矿相调控、固化稳定化及应用环境控制等多项迁移控制策略。实践表明，通过科学工艺干预、环境管理与长期监测相结合，可有效降低冶金渣在资源化利用过程中的重金属迁移风险，为其在建材、工程及环境修复领域的推广提供技术保障。未来需进一步加强机理研究、技术创新与标准体系建设，以实现冶金渣资源化的安全性、规模化和高价值利用。