

采矿工程废弃物资源化利用途径与环境效益评价

宋晓彬

河南省新郑煤电有限责任公司 河南 新郑 451100

摘要: 随着全球矿产资源需求的持续增长, 采矿活动产生的工程废弃物(主要包括废石、尾矿和煤矸石等)数量急剧攀升, 已成为制约矿业可持续发展的关键瓶颈。本文系统梳理了采矿工程废弃物的主要类型及其环境风险特征, 深入探讨了当前主流的资源化利用技术路径, 包括在建筑材料、充填采空区、有价值元素回收、土壤改良与生态修复以及新兴高值化利用等领域的应用。在此基础上, 构建了一个涵盖资源节约、污染减排、生态修复和经济效益四个维度的综合环境效益评价体系。科学、高效的资源化利用不仅能显著降低废弃物的环境足迹, 还能创造可观的经济价值, 是实现矿业绿色低碳转型的核心策略。本文研究旨在为我国乃至全球矿业的可持续发展提供理论参考与实践指导。

关键词: 采矿工程废弃物; 资源化利用; 环境效益; 生命周期评价

引言

矿业作为国民经济的基础产业, 为现代工业社会提供了不可或缺的原材料。然而, 其“高投入、高消耗、高排放”的生产模式也带来了严峻的生态环境问题。传统的废弃物处理方式, 如简单堆存或填埋, 已无法满足新时代生态文明建设和“双碳”目标的要求。在此背景下, “无废矿山”和“循环经济”理念应运而生, 将采矿工程废弃物视为“放错位置的资源”, 通过技术手段对其进行资源化、高值化利用, 成为破解这一困局的根本出路。这不仅是减轻环境压力、修复受损生态的迫切需要, 更是推动矿业产业链延伸、提升企业核心竞争力的战略选择。本文旨在系统性地回答以下核心问题: 采矿工程废弃物有哪些主要的资源化利用途径? 这些途径分别能带来哪些具体的环境效益? 如何科学、全面地评价这些效益?

1 采矿工程废弃物的类型与环境风险

采矿工程废弃物是指在矿产资源勘探、开采、选矿及冶炼等过程中产生的、未被有效利用的固态或半固态物质。其主要类型包括废石、尾矿和煤矸石。

1.1 废石

废石是在矿床开采过程中, 为揭露和采出有用矿石而剥离出来的、品位低于工业开采指标的围岩和夹石。其特点是产生量大、粒径粗、成分复杂, 通常含有少量有价值矿物, 但也可能伴生硫化物(如黄铁矿)等有害成分。

1.2 尾矿

尾矿是原矿经过破碎、磨矿、分选等选矿工艺后, 其中有用目标组分富集于精矿中, 剩余的、以细粒为主的、基本无经济价值的产物。尾矿通常呈浆状排出, 经沉淀后形成尾矿库。其颗粒极细(多数小于0.074mm), 比表面

积大, 化学活性高, 常含有残留的选矿药剂(如氰化物、黄药等)以及重金属离子(如As, Cd, Pb, Hg等)。

1.3 煤矸石

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中排出的含碳量较低、比煤坚硬的黑色或灰黑色岩石。它既是废石(掘进矸石)也是尾矿(洗选矸石)的混合物, 具有一定的发热量, 但同时也含有硫、砷等有害元素。

1.4 主要环境风险

上述废弃物若处置不当, 将引发一系列连锁性的环境问题: (1)土地资源占用与景观破坏: 巨大的排土场和尾矿库直接覆盖并破坏原始地表植被和土壤结构, 造成不可逆的土地功能丧失。(2)水体污染: 尾矿和废石中的重金属及有毒化学物质在雨水淋滤作用下, 会形成高浓度的渗滤液, 污染地表水和地下水。特别是含硫废石, 在空气和微生物作用下会产生强酸性的矿山排水(AMD), pH值可低至2-3, 溶解并携带大量重金属, 对水生生态系统造成毁灭性打击^[1]。(3)大气污染: 干燥的废石堆和尾矿库表面易产生扬尘, 其中可能含有放射性物质(如铀、钍系列)或重金属微粒, 对人体健康构成威胁。(4)地质灾害风险: 尾矿库一旦发生溃坝, 将造成灾难性的泥石流, 对下游居民生命财产安全构成巨大威胁。此外, 不稳定的排土场也易发生滑坡和崩塌。因此, 对采矿工程废弃物进行资源化利用, 是从源头上消除或削减这些环境风险的根本途径。

2 采矿工程废弃物资源化利用的主要途径

2.1 用于建筑材料

这是目前技术最为成熟、消纳量最大的利用途径。采矿废弃物, 尤其是尾矿和煤矸石, 其主要化学成分为二氧化硅、三氧化二铝、氧化钙、三氧化二铁等, 与水

泥、混凝土、陶瓷、玻璃等传统建筑材料的原料成分高度相似，为其替代天然资源提供了物质基础。尾矿经过适当的煅烧或粉磨处理后，可作为活性或非活性掺合料部分替代水泥熟料，用于生产混凝土，此举不仅能有效降低水泥生产的高能耗和高二氧化碳排放，还能在一定程度上改善混凝土的工作性能和耐久性。煤矸石则因其具有一定热值，可直接用于烧制多孔砖、空心砖等墙体材料；而尾矿则可通过添加胶凝材料（如水泥、石灰）和激发剂，在常温常压下压制成型，生产免烧砖，从而实现更低的能耗^[2]。此外，粒径较大的废石和部分处理后的尾矿还可直接用作公路、铁路的路基骨料或建筑回填材料，实现大规模、低成本的消纳，有效缓解天然砂石资源的开采压力。

2.2 充填采空区

地下采矿活动会形成巨大的采空区，若不及时进行有效处理，极易引发地表沉降、塌陷等地质灾害，严重威胁矿区及周边地区的安全。利用采矿废弃物，特别是尾矿，制备成膏体或高浓度充填料，回填至这些采空区，是一项兼具安全保障、环境保护与经济效益的先进技术。该技术一方面能够有效控制地压，维持矿柱稳定，从而保障矿山的安全生产；另一方面，它大幅减少了对地表尾矿库的建设需求，从源头上规避了尾矿库溃坝和由此引发的环境污染风险。同时，充填后的采空区整体稳定性得到显著提高，甚至可以起到支撑上覆岩层的作用，有效保护地表建筑物、水系和生态环境。近年来，膏体充填技术因其泌水率低、早期强度高、对井下作业环境影响小等优点，正逐渐成为该领域的主流发展方向。

2.3 有价元素与矿物的综合回收

许多历史堆存的尾矿并非真正的“废物”，而是在当时的技术经济条件下未能充分回收的“复合矿”或“呆矿”。随着现代选冶技术的飞速进步，对这些老尾矿中有价元素（如金、银、铜、稀土元素等）和非金属矿物（如长石、石英、云母等）进行二次回收，已成为一条重要的资源化路径。通过采用更先进的浮选、磁选、重选或多种工艺联合的再选技术，对老尾矿库进行系统性再处理，不仅可以提取出可观的经济价值，还能从根本上减少尾矿库的存量和环境风险。对于某些特定类型的尾矿，例如石英含量极高的石英脉型金矿尾矿，还可以通过深度提纯技术制备出高纯度石英砂，用于光伏、半导体等高端制造产业，从而实现价值的巨大倍增，变“包袱”为“财富”。

2.4 土壤改良与生态修复

部分理化性质相对适宜的采矿废弃物，经过科学处理后，可用于退化土地的改良和受损矿区生态系统的重建。煤矸石在自然风化或人工加速风化后，其形成的物质具有一定的团粒结构和保水保肥能力，可作为一种客土材料，用于改良沙化、盐碱化等贫瘠土壤，增加土壤的有机质和矿物质含量。更为系统的方法是将尾矿、废石与有机质（如城市污泥、农业秸秆）、微生物菌剂等按科学配比进行混合，构建出适合植物生长的人工土壤基质^[3]。这种方法被广泛应用于矿山复垦和植被恢复工程中，不仅能将废弃物进行原位固定，阻断其污染物的迁移路径，还能通过植被的生长加速生态系统的正向演替，最终实现矿区的生态功能恢复。

2.5 新兴高值化利用途径

为了进一步突破传统利用途径的价值天花板，科研人员正积极探索一些前沿的高值化利用技术。其中，地质聚合物（Geopolymer）的制备备受关注。该技术利用富含硅铝的尾矿或煤矸石作为主要原料，在碱性激发剂的作用下合成一种新型的无机聚合物胶凝材料。地质聚合物不仅具有早强、耐高温、耐腐蚀等优异的工程性能，其生产过程几乎不产生二氧化碳，是一种极具潜力的绿色低碳建材。此外，功能材料的开发也是一个重要方向，例如利用赤泥（铝土矿提炼氧化铝后的残渣）制备催化剂载体、高效吸附剂或陶瓷膜；利用特定成分的尾矿制备微晶玻璃、发泡陶瓷等高性能保温隔热材料。对于高热值的煤矸石，送入循环流化床锅炉进行发电，也是一种成熟的能源化利用方式，实现了“变废为宝”的能源循环。

3 资源化利用的环境效益评价体系构建

科学评价资源化利用的环境效益，是衡量其成功与否、优化技术路线的关键。本文提出一个基于“资源-污染-生态-经济”四维框架的综合评价体系。

3.1 资源节约效益

资源节约效益是评价资源化利用最直接的指标。它主要体现在对原生资源的替代上，例如，利用尾矿砂替代天然河砂用于混凝土生产，可以直接量化所节约的河砂开采量。同样，将煤矸石用于制砖，可以减少对粘土资源的消耗。此外，能源节约也是核心内容之一，通过比较资源化产品的生产能耗与传统同类产品的能耗差异，可以评估其节能效果。例如，用地质聚合物替代普通硅酸盐水泥，可节省约80%的能源。水资源的节约同样不容忽视，例如，采用充填技术可以大幅减少尾矿库的建设和维护，从而避免了尾矿库因蒸发和渗漏造成的水资源损失。

3.2 污染减排效益

污染减排效益直接关系到环境质量的改善。在应对气候变化的背景下，温室气体（GHG）减排是重中之重。通过计算因替代高碳排产品（如水泥）和减少废弃物长距离运输、堆存等环节而减少的二氧化碳、甲烷等温室气体排放量，可以量化其对减缓全球变暖的贡献^[4]。除了温室气体，对有毒有害污染物的减排同样关键。资源化利用，特别是将废弃物固化于建材基质中，能有效锁闭其中的重金属和残留药剂，极大地阻断了这些污染物向水、土、气等环境介质迁移和释放的路径，从而显著降低其对生态系统和人体健康的潜在风险。

3.3 生态修复效益

生态修复效益着眼于长期的、系统性的环境改善。首先，通过资源化利用减少废弃物的地表堆存量，可以直接增加可用于复垦的土地面积，提高土地复垦率。其次，在利用废弃物进行生态修复的区域，通过长期监测植被覆盖率、物种丰富度、土壤微生物活性等指标的变化，可以客观评估生物多样性指数的恢复情况，衡量生态系统的健康程度。最后，修复后的区域其水土保持能力是否得到增强，例如土壤侵蚀模数是否显著降低、水源涵养功能是否逐步恢复，这些都是评价生态修复效益的重要方面。

3.4 经济效益

尽管本文侧重于环境效益，但经济效益是驱动技术从实验室走向大规模工程应用的核心动力，因此必须纳入综合考量。经济效益可分为直接和间接两个层面。直接经济效益包括资源化产品（如建材、电力）的销售收入，以及从废弃物中回收有价值元素所带来的额外收益。间接经济效益则体现在多个方面，例如，企业通过资源化利用大幅节省了废弃物的征地、堆存、维护以及未来可能发生的环境治理费用；同时，合规的资源化行为有助于企业避免因环境污染而遭受的罚款，并能显著提升其绿色、负责任的社会形象，从而带来品牌溢价和市场竞争力的提升。

3.5 生命周期评价（LCA）方法的应用

为了实现上述效益的量化和比较，生命周期评价（LCA）是最为科学和系统的方法。LCA遵循ISO 14040/44标准，对资源化利用方案从“摇篮到坟墓”（即

从原材料获取、生产、使用到最终处置）全过程的资源消耗和环境排放进行清单分析，并通过影响评价模型（如ReCiPe, TRACI）将其转化为对全球变暖、酸化、富营养化、人体毒性等具体环境影响类别的贡献值。例如，新郑煤电生产过程中产生的煤矸石进行制砖方案进行LCA，需要收集的数据包括：矿井煤矸石年产生量、运输能耗、粉磨能耗、制砖与运输能耗、砖服役期间的性能表现、以及废弃后的处置方式等。通过与“传统粘土砖”方案的LCA结果进行对比，即可清晰地揭示前者在资源消耗、能源消耗、温室气体排放、耕地保护、固废资源化等方面显著优于传统粘土砖，是环境友好型、低碳型、循环经济型建材，具有明显的LCA优越性。

4 结语

采矿工程废弃物的资源化利用，是实现矿业绿色、低碳、可持续发展的必由之路。本文系统梳理了其在建筑材料、采空区充填、有价值元素回收、生态修复及新兴高值化等领域的多元化利用途径，并构建了一个融合资源节约、污染减排、生态修复和经济效益的四维环境效益评价体系。通过引入生命周期评价（LCA）方法，能够对不同技术路径的环境影响进行科学、客观的量化比较，为决策提供坚实依据。研究表明，成功的资源化利用不仅能有效化解废弃物带来的环境风险，还能创造显著的经济和社会价值，实现“一举多得”的协同效应。未来，需通过强化政策驱动、突破技术瓶颈、完善标准体系和创新商业模式等多措并举，系统性地解决当前面临的障碍，加速推动采矿工程废弃物从“负担”向“财富”的根本性转变，为建设人与自然和谐共生的现代化矿业强国贡献力量。

参考文献

- [1]许勇.采矿废弃物也是资源，要利用起来[N].中国黄金报,2025-03-14(002).DOI:10.38298/n.cnki.nzghj.2025.000238.
- [2]曾继军.煤矿开采引发的环境问题及其治理技术研究[J].农业灾害研究,2024,14(12):260-262.
- [3]孙令超.采矿工程中绿色开采技术的运用分析[J].冶金与材料,2024,44(10):187-189.
- [4]王长铭.露天金属矿山采矿工程中的资源回收与利用[J].湖南有色金属,2024,40(02):5-7+27.