

# 固废资源在矿山充填采矿中的综合利用研究

尚 轩

陕西陕煤黄陵矿业有限公司一号煤矿 陕西 延安 727307

**摘要：**本文聚焦固废资源在矿山充填采矿中的综合利用，概述矿山充填采矿技术及其发展，分类介绍矿山充填用固废资源并分析其关键理化特性。阐述固废资源应用技术，包括预处理、配比设计与工艺适配性。研究表明，固废资源综合应用于矿山充填采矿，在环境上能解决固废处置难题，减少污染；经济上可降低采矿与充填成本，创造效益；安全上可保障矿山高效开采，减少事故。该研究对推动矿山绿色转型、实现资源循环利用具有重要意义。

**关键词：**固废资源；矿山充填采矿；资源综合利用

引言：矿山开采在推动经济发展的同时，也产生了大量固废，如废石、尾矿等，其处置不当会引发环境污染、地质灾害等诸多问题。传统采矿方式在固废处理和资源利用上存在不足。而矿山充填采矿技术凭借控制地压、保护环境等优势，成为矿山绿色转型核心技术。其中，固废资源的综合利用是关键突破口。通过合理利用固废进行矿山充填，不仅能解决固废处理难题，还能降低采矿成本、保障开采安全。本文将深入探讨固废资源在矿山充填采矿中的综合利用情况。

## 1 矿山充填采矿技术概述

矿山充填采矿技术是指将特定材料（如尾砂、废石、胶凝材料等）按一定配比制备成充填体，通过管道或溜井输送至井下采空区，以实现控制地压、保护地表环境、回收矿产资源等目标的采矿方法。该技术最早起源于19世纪末期的欧洲，经过百余年的发展，已从传统的干式充填、水砂充填，逐步演进为现代的胶结充填、膏体充填等高效充填技术，在有色金属矿山、黑色金属矿山及煤矿等领域得到广泛应用。相较于空场采矿法、崩落采矿法等传统采矿方式，矿山充填采矿技术具有显著的技术优势：一方面，充填体可有效支撑采空区围岩，避免围岩垮塌引发的地压灾害，减少地表沉陷，保护矿区周边的耕地、建筑及生态环境；另一方面，通过充填采矿可实现残矿回收，提高矿产资源利用率，尤其适用于矿体赋存复杂、地表保护要求高的矿山。例如，在我国铜陵有色金属集团冬瓜山铜矿，采用高浓度胶结充填技术后，采空区稳定性显著提升，地表沉陷量控制在50mm以内，资源回收率提高了15%以上<sup>[1]</sup>。近年来，随着国家对矿山生态环境保护与资源循环利用要求的不断提高，矿山充填采矿技术已成为推动矿山绿色转型的核心技术之一，其发展方向也逐渐向“高效化、低成本化、绿色化”转变，而固废资源的综合利用正是实现这

一方向的关键突破口。

## 2 矿山充填用固废资源分类与特性

### 2.1 典型充填用固废资源类型

矿山充填采矿中，固废资源主要分三类：矿山自身固废、工业固废及建筑固废。矿山自身固废是主要来源，包括尾矿和废石。尾矿是选矿产生的细粒废弃物，粒度多小于0.074mm，成分以脉石矿物为主，我国年产量超15亿吨，堆存占用土地且存在溃坝风险；废石是开采剥离的围岩或夹石，粒度大于50mm，成分与围岩一致，如煤矸石、花岗岩废石等，部分矿山废石产量超矿石。工业固废包括钢渣、高炉矿渣、粉煤灰、脱硫石膏等，钢渣和矿渣具胶凝活性，可替代部分水泥；粉煤灰改善流动性；脱硫石膏调节凝结时间。建筑固废如废混凝土块、废砖块等，经破碎筛分后可用于采空区充填。实际应用中需根据充填工艺和采空区条件选择适宜固废，以实现高效利用与性能稳定。

### 2.2 固废资源关键理化特性分析

固废理化特性决定其充填适用性，需分析粒度组成、化学成分、密度与孔隙率、胶凝活性及有害成分含量。粒度影响流动性、强度与稳定性：细粒固废（如粒径<0.01mm）易致浆体黏度大、流动性差，引发堵塞；粒度不均则降低密实度与强度。化学成分决定稳定性与胶凝活性：钢渣、矿渣含CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，激发后生成胶凝产物提升强度；煤矸石需预处理才能使用。密度与孔隙率影响体积稳定性与抗渗性：密度大的固废（如废石）收缩率小；孔隙率高的（如粉煤灰）需调整配比以抗渗。有害成分含量关乎生态安全：部分工业固废含重金属或有毒有机物，需检测并符合标准，必要时固化处理以降低环境风险<sup>[2]</sup>。

## 3 固废资源在矿山充填采矿中的应用技术

### 3.1 固废资源预处理技术

固废资源用于矿山充填前需预处理以改善性能。破碎与筛分处理大粒度固废，如废石原始粒度常超300mm，用颚式、圆锥破碎机破碎至50mm以下，再筛分出不同粒级骨料，细粒级用于胶结充填，粗粒级用于干式或膏体充填；建筑固废要先分拣杂质，再破碎筛分。研磨提升细粒级固废胶凝活性，像煤矸石、低活性矿渣，经球磨机等研磨减小粒径、增大比表面积，使活性成分易反应，研磨煤矸石至比表面积400m<sup>2</sup>/kg以上，可替代30%水泥且满足强度要求。干燥处理含水率高的固废，湿排尾矿含水率25%-35%，用压滤机等降至15%以下；脱硫石膏含水率高易结块，用回转烘干机控制含水率在10%以内。激发处理激活固废胶凝活性，对钢渣、高炉矿渣，用化学（添加激发剂）或物理（蒸汽、高压养护）激发，如钢渣加5%-8%石膏，水化反应速率提高2-3倍，28d强度提升30%以上。有害成分固化稳定化处理含重金属或有毒有机物固废，加水泥等固化剂固定重金属，高温热解或化学氧化分解有机物，确保充填体环境安全。

### 3.2 固废基矿山充填材料配比设计与性能优化

固废基矿山充填材料配比设计决定充填体性能与成本，目标是满足性能要求下提高固废掺量、降低胶凝材料用量。配比设计依固废类型、充填工艺和采空区需求确定各成分比例。以尾砂-煤矸石胶结充填为例，尾砂填充煤矸石间隙、改善流动性，占固废40%-60%；煤矸石提高强度，占30%-50%；胶凝材料用量依强度要求定，井下采空区顶板支护，28d强度需3-5MPa，水泥用量80-120kg/m<sup>3</sup>，用矿渣水泥加激发剂可降至60-100kg/m<sup>3</sup>；水灰比控制在0.6-0.8。添加外加剂可优化性能，减水剂降低用水量、提高密实度与强度，掺量0.5%-1.0%；缓凝剂延长凝结时间，适用于长距离输送，掺量0.1%-0.3%；早强剂加快早期强度发展，掺量1%-3%。配比完成后经室内试验验证，不满足要求则调整比例或加外加剂。如某煤矿用尾砂-煤矸石胶结充填，加0.8%减水剂后，水泥用量降、强度升、流动性提高，降低成本<sup>[3]</sup>。

### 3.3 固废资源与矿山充填工艺的适配性研究

#### 3.3.1 固废资源特性与主流充填工艺适配机制

矿山充填工艺的适配性需基于固废的物理化学特性展开分析。主流充填工艺可分为胶结充填、膏体充填、干式充填及水砂充填四大类，其与固废资源的匹配关系呈现显著差异化特征。胶结充填工艺以固废（尾砂、煤矸石、钢渣）与胶凝材料、水的混合浆体为输送介质，要求固废粒度分布均匀且细粒级含量较高。例如，尾砂因粒径小（通常 < 0.074mm 占比超60%）、流动性佳，与水泥混合后可制备75%-80%浓度的胶结浆体，适用于深

井高应力环境（如江西德兴铜矿采用该工艺后，充填体28d抗压强度达3.5MPa，有效控制地压）。煤矸石经破碎筛分后，细粒级（< 5mm）部分可与尾砂按3 : 7比例复合，形成低成本高强度充填材料，降低胶凝材料用量20%以上；膏体充填工艺通过高压泵输送宾汉流体特性的膏体（浓度 > 78%），对固废粒度级配要求严苛，需控制 < 0.037mm 细粒含量占比30%-40%以保障抗离析性。全尾砂膏体充填可实现固废利用率超95%（如山东黄金三山岛金矿案例），其泌水率低于5%，体积收缩率较传统水砂充填降低60%，显著提升采空区稳定性。钢渣粉经磁选除铁后，可作为微集料优化膏体流变性能，替代15%-20%的水泥用量。

#### 3.3.2 固废-工艺组合的工程实践与多模式协同

实际应用中需综合地质条件、经济性及环保目标选择适配方案。干式充填工艺适用于处理大粒度惰性固废（如废石、建筑混凝土块），通过溜井或皮带直接输送至采空区，工艺成本较胶结充填降低40%-50%。我国中小型铁矿采用废石干式充填后，地表沉陷率控制在3‰以内，满足浅部开采安全需求。水砂充填工艺以50%-60%浓度的尾砂浆体自流输送，虽充填体强度较低（0.2-0.5MPa），但可作为浅部采空区临时支护手段。例如，某煤矿采用“水砂初充+胶结加固”双阶段工艺，首期水砂充填快速形成支撑，二期胶结充填（灰砂比1 : 4）将整体强度提升至1.5MPa，综合成本较纯胶结充填减少18%。多工艺协同模式可突破单一技术局限，皖南某铅锌矿针对深部开采（埋深 > 800m）与复杂矿体条件，设计“上部废石干式充填（处理量占比45%）+下部尾砂胶结充填（强度 ≥ 2MPa）”的立体化方案，实现固废利用率82%的同时，降低采场支护成本31%。数值模拟表明，该组合工艺可使地表最大沉降量控制在规范要求的60%以内，验证了多模式适配的技术经济优越性。

## 4 固废资源在矿山充填采矿中综合利用的优势

#### 4.1 环境效益：解决固废处置难题

在矿山开采过程中，会产生大量的固体废弃物，如废石、尾矿等。这些固废若得不到妥善处理，不仅会占用大量土地资源，还会对周边生态环境造成严重破坏。废石随意堆放可能引发山体滑坡、泥石流等地质灾害，威胁周边居民的生命财产安全；尾矿中含有的重金属等有害物质，会随着雨水冲刷渗入土壤和地下水，造成土壤污染和水污染，影响生态平衡和人类健康；而将固废资源综合应用于矿山充填采矿中，能有效解决这些难题。通过将废石、尾矿等加工成合适的充填材料，回填到采空区，既减少了固废的堆存量，降低了其对土地的

占用和环境的潜在威胁，又能避免因固废长期暴露在自然环境中而引发的各种污染问题。同时，这种处理方式实现了固废的资源化利用，符合可持续发展的理念，有助于改善矿区的生态环境质量，促进矿山与周边环境的和谐共生，为矿区的生态修复和绿色发展奠定基础<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 经济效益：降低采矿与充填成本

在传统采矿模式下，处理固废需要投入大量资金用于建设尾矿库、废石场等设施，以及后续的维护和管理。而且，随着环保要求的日益严格，固废处理的成本还在不断攀升。同时，购买传统的充填材料也需要耗费大量资金，这无疑增加了采矿企业的生产成本。将固废资源综合应用于矿山充填采矿中，可显著降低这些成本。一方面，利用废石、尾矿等作为充填材料，减少了购买传统充填材料的费用，降低了充填成本。另一方面，省去了建设大规模固废处理设施的费用以及后续长期的维护管理成本。此外，固废资源化利用还能创造一定的经济效益，例如通过对尾矿中有价元素的回收利用，可增加企业的收入。综合来看，固废资源在矿山充填采矿中的综合利用，能够有效提高企业的经济效益，增强企业在市场中的竞争力，为企业的可持续发展提供有力支持。

#### 4.3 安全效益：保障矿山高效开采

在矿山开采过程中，采空区的存在会引发一系列安全问题。随着开采深度的增加和范围的扩大，采空区面积不断增大，地压活动加剧，容易导致顶板冒落、地表塌陷等事故的发生，严重威胁井下作业人员的生命安全和矿山的正常生产。采用固废资源进行充填采矿，能够

及时有效地对采空区进行充填，增强围岩的稳定性，控制地压活动。充填体可以承受上覆岩层的压力，减少顶板的变形和位移，降低顶板冒落的风险。同时，充填还能限制围岩的破裂扩展，防止地表塌陷等地质灾害的发生，为井下作业人员提供一个安全的工作环境。此外，稳定的充填体有助于维持矿山的生产秩序，减少因安全事故导致的停产整顿时间，保障矿山能够高效、连续地进行开采作业，提高矿山的生产效率和经济效益，实现安全与生产的良性互动。

#### 结束语

固废资源在矿山充填采矿中的综合利用具有显著优势与广阔前景。从环境、经济、安全等多方面看，该技术有效解决了固废处置难题，降低了企业成本，保障了矿山高效开采。未来，应进一步加强固废资源特性研究，完善充填材料配比设计，推动工艺创新，以实现固废资源在矿山充填采矿中的更高效利用，促进矿山行业的可持续发展，实现经济效益与生态效益的双赢。

#### 参考文献

- [1]杜后谦,张灿.固废资源在矿山充填采矿中的综合利用研究[J].生态与资源,2023(8):78-80.
- [2]郭慧高,武拴军,高谦,等.我国大型镍矿充填采矿固废资源化利用研究进展[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2021,36(2):46-52.
- [3]闫晶晶,毛芝英.工业固废处理现存问题及应对措施[J].造纸装备及材料,2023,52(06):194-196.
- [4]杜建磊,杜根杰,高建勇等.我国大宗工业固废综合利用产业发展问题及建议[J].现代矿业,2023,39(02):23-26.