

# 煤矸石井下充填材料配比优化与强度演化规律研究

叶志超

黔东南苗族侗族自治州天柱县兴达矿业公司 贵州黔东南州

**【摘要】**煤矸石在井下充填中的合理利用已成为实现矿山绿色开采与资源综合利用的重要途径。本研究以煤矸石为主要原料，结合不同配比方案对充填材料的力学性能进行系统分析，重点探讨了其强度演化规律。通过室内试验与数据对比，明确了水泥掺量、煤矸石颗粒级配及添加剂用量对充填体早期和长期强度的影响，并建立了较为合理的配比优化模型。合理的配比不仅能有效提升充填体的整体稳定性，还能改善井下采空区的承载性能，为矿山开采安全和固废资源化利用提供科学依据。该研究为煤矸石的工程应用提供了可行路径，对推动煤炭行业绿色低碳发展具有现实意义。

**【关键词】**煤矸石；井下充填；配比优化；强度演化规律

**【收稿日期】**2025 年 8 月 17 日

**【出刊日期】**2025 年 9 月 20 日

**【DOI】**10.12208/j.jccr.20250068

## Research on proportion optimization and strength evolution law of coal gangue-based underground backfilling materials

Zhichao Ye

Xingda mining company, Tianzhu County, Qiandongnan Prefecture, Qiandongnan, Guizhou Province

**【Abstract】**The rational application of coal gangue in underground backfilling has emerged as a crucial approach to achieving green mining and comprehensive utilization of resources in mines. This study takes coal gangue as the primary raw material, conducts a systematic analysis of the mechanical properties of backfilling materials under different proportion schemes, and focuses on investigating their strength evolution law. Through laboratory experiments and data comparison, the influences of cement content, coal gangue particle gradation, and additive dosage on the short-term and long-term strength of backfill bodies are identified, and a relatively sound proportion optimization model is established. A reasonable proportion can not only effectively enhance the overall stability of backfill bodies but also improve the load-bearing performance of underground goafs, providing a scientific basis for mine mining safety and the resource utilization of solid wastes. This research offers a feasible path for the engineering application of coal gangue and holds practical significance for promoting the green and low-carbon development of the coal industry.

**【Keywords】**Coal gangue; Underground backfilling; Proportion optimization; Strength evolution law

### 引言

煤矸石作为煤炭开采过程中产生的大宗固体废弃物，长期堆存不仅占用大量土地，还可能引发环境污染和生态破坏。将煤矸石应用于井下充填，不仅能够实现固废资源化利用，还能有效控制地表沉陷，具有显著的环境与经济效益。近年来，相关研究不断深入，但在配比优化与强度演化规律方面仍存在一定的研究空白。本研究旨在通过系统试验和规律分析，揭示煤矸石井下充填材料在不同配比条件下的强度变化特征，提出优化配比方案，为矿山充填实践提供理论指导。通过这

一研究，不仅能够提升井下充填的工程性能，还能推动煤炭行业在绿色、安全、可持续方向上的发展。

### 1 煤矸石井下充填的研究背景与工程问题提出

煤矸石作为煤炭开采过程中不可避免的大宗固体废弃物，其堆存量逐年上升，已成为矿区环境治理和土地利用的重要负担。传统堆放方式往往伴随酸性渗滤液、粉尘扩散和自燃等问题，对生态系统和居民健康构成威胁。在矿山深部开采不断推进的背景下，地表沉陷、采空区稳定性和地下水系统破坏等问题日益突出。如何将煤矸石高效利用并转化为具有工程承载能力的井

下充填材料,既能实现固废资源化利用,又能有效提升井下采场稳定性,已成为煤炭行业可持续发展的关键课题。

针对煤矸石井下充填工程,目前存在的主要问题包括充填材料力学性能不足、配比设计缺乏系统性以及现场施工适应性较差。部分工程中,充填体早期强度不足导致顶板支撑效果有限,后期强度衰减又引发采空区变形与渗漏隐患。此外,煤矸石颗粒级配复杂,若未进行合理筛分与级配设计,往往导致充填体孔隙率过大,浆体流动性不足,影响充填效果<sup>[1]</sup>。这些工程问题凸显了配比优化研究的重要性,需要从材料组成、固化机理和力学演化规律等方面展开深入探讨。

在研究背景下,煤矸石井下充填不仅是废弃物处置的技术途径,更是实现绿色开采与生态修复的战略措施。通过对煤矸石充填材料特性进行系统分析,建立符合矿山工程需求的配比优化方案,并揭示充填体在复杂地下环境中的强度演化规律,不仅能够提升井下充填体的整体承载力,还能延长其服役周期,保证采场稳定与矿井安全。这一研究方向兼具理论意义与工程应用价值,为推动煤炭行业绿色转型和循环发展奠定基础。

## 2 煤矸石充填材料的配比优化试验与参数分析

煤矸石充填材料的性能取决于多因素耦合作用,其中水泥掺量、颗粒级配和外加剂配比是决定充填体力学性质与流动性的关键参数。通过室内试验设计,可以建立不同配比组合下的强度演化曲线和流变特征,为实际工程提供可靠依据。在试验中,通过控制煤矸石与胶结材料的质量比,采用单因素与正交试验相结合的方式,系统研究不同配比对充填体抗压强度、劈裂强度和渗透性能的影响,进而筛选出兼顾力学性能与经济性的最佳组合。

在参数分析过程中,水泥用量的增加能够显著提升充填体的早期强度,使其在初始阶段具备较高的承载能力。然而,其对长期强度的贡献存在边际递减效应,若掺量过高,不仅会导致工程成本上升,还可能因水化产物分布不均而产生微裂缝,影响后期稳定性<sup>[2]</sup>。煤矸石颗粒的级配则对密实度与孔隙率起关键作用,粗细颗粒合理搭配能够构建稳定骨架结构,减少浆液分层和离析现象,从而提高整体致密性与耐久性。外加剂如减水剂、膨胀剂及矿物掺合料的使用,可以在改善流动性的基础上,促进充填体后期强度的进一步发展。尤其在深部井下复杂环境中,这类掺合料的作用表现尤为突出,不仅增强了泵送性能和抗渗能力,还显著改善了

充填体在长期服役过程中的稳定性和安全性。

试验结果表明,配比优化不仅是提升充填体强度的重要手段,更是实现可施工性和长期稳定性的关键环节。通过开展参数敏感性分析,可以明确水泥掺量、颗粒级配和外加剂等因素在不同龄期对性能的影响程度,并据此提出差异化的配比设计思路。对于高压应力集中区域,适当增加胶结材料比例能够显著提升早期承载力,保证顶板支护效果;而在低渗透水文环境中,则需优化粗细颗粒比例以增强致密性,避免渗漏通道形成。这种因地制宜的优化模式,使煤矸石充填技术能够在多样化地质条件下保持良好适应性和稳定性,进一步提升了其工程应用价值。

## 3 煤矸石充填体强度演化规律的机理探讨

煤矸石充填体的强度演化是一个多阶段、多机制耦合的过程,其主要受水泥水化反应、煤矸石颗粒活性以及外界环境条件的共同影响。在早期阶段,水泥水化产物逐渐填充孔隙,使充填体获得初始承载力,但此时内部结构尚未完全致密,强度增长速度较快而波动性较大。随着龄期延长,二次水化反应和矿物掺合料的活性释放逐步增强,充填体结构趋于稳定,强度曲线呈现出明显的持续增长趋势。

从微观机理角度分析,煤矸石中部分活性矿物成分能够参与二次反应,生成更多的水化硅酸钙和水化铝酸钙,这些凝胶产物填充孔隙、胶结颗粒,使材料密实性和力学性能显著提升。颗粒间骨架效应与胶结层的相互作用,构成了充填体的承载体系。当配比不合理或外部环境恶劣时,充填体内部易形成微裂纹与应力集中,导致强度增长停滞甚至下降。揭示强度演化规律不仅要依靠宏观试验数据,还需结合微观结构分析,建立材料行为与工程性能之间的联系。

在工程应用层面,强度演化规律直接决定了充填体在井下复杂环境中的服役安全性与长期可靠性。若早期强度不足,容易造成顶板下沉和采空区二次塌落,进一步威胁巷道及地表稳定;若后期强度衰减,则可能导致充填体内部裂隙扩展,形成渗透通道,进而引发渗漏与结构失效,影响充填体的整体承载力与密封性<sup>[3-7]</sup>。通过深入研究不同龄期下强度演化的控制机理,可以明确水化反应速率、矿物活性释放和外界环境条件等关键因素,从而提出合理的材料改性思路与配比优化措施。此举不仅能确保充填体在早期具备可靠的支撑能力,也能在长期保持稳定性,为矿山工程设计与安全生产提供科学、量化的力学参数支持。

## 4 基于试验结果的配比优化模型与工程应用价值

在大量试验与参数分析的基础上,建立煤矸石充填材料配比优化模型成为提升工程效率与可靠性的有效途径。该模型通过引入多目标优化方法,将强度、流动性、经济性和环境效益纳入综合评价指标,形成系统化的配比选择框架。在数学建模过程中,利用回归分析、灰色关联度分析及多元回归方程等方法,建立配比参数与力学性能之间的函数关系,为不同矿井条件下的材料设计提供科学依据。模型应用的核心在于实现理论与实践的有效衔接。在井下充填工程中,优化模型能够结合地质条件、开采深度及水文环境等多因素,快速给出适宜的配比方案,避免单纯依赖经验判断,从而显著减少试验周期和资金投入,提高设计与施工的科学与高效性。该模型具备动态调整功能,能够针对不同阶段的强度需求和外部环境条件,灵活修正配比参数,保证充填体性能的持续稳定。

在高温高湿环境中,适当增加矿物掺合料比例可改善结构致密性并减缓强度衰减;在深部高应力区,通过优化颗粒级配和胶结材料比例,则能形成更合理的骨架结构,确保充填体具备足够的抗压与抗剪能力,从而满足复杂工况下的长期安全需求。该研究成果的工程应用价值体现在多个方面。其一,推动煤矸石资源化利用,减少堆存带来的生态与安全风险。煤矸石在井下充填中的再利用,不仅能够有效削减地表矸石山的规模,缓解土地资源紧张问题,还能减少酸性渗滤液和有害气体的排放,从而实现对周边生态环境的保护。其二,显著改善井下充填体的力学性能,保障采空区稳定和矿井安全生产。通过配比优化后的充填材料,能够在早期提供可靠的支撑能力,在长期服役阶段保持较高的结构稳定性,进而降低顶板垮落和地表沉陷的风险,确保矿山生产的连续性与安全性。其三,降低工程成本,实现经济与环境效益的统一<sup>[8]</sup>。合理的配比方案能够减少高价水泥的用量,增加低成本煤矸石的利用比例,从而在满足强度需求的前提下显著降低工程支出。通过配比优化模型的推广应用,可以建立标准化、可复制的设计与施工体系,使不同矿区在充填方案选择上具备可借鉴性和普适性,为煤炭行业绿色低碳发展提供坚实支撑。这一成果不仅是单一工程问题的解决方案,更是矿山可持续开采的重要技术路径,对于推动能源行

业实现节能减排和循环发展目标具有深远意义。

## 5 结语

本研究围绕煤矸石井下充填材料的配比优化与强度演化规律展开系统分析,结合试验与机理探讨,提出了切实可行的优化方案与评价模型。研究结果表明,合理控制水泥用量、优化颗粒级配并辅以适宜外加剂,能够显著提升充填体的早期和长期力学性能,同时降低工程成本,实现固废资源化利用与矿山安全开采的双重目标。该研究不仅为煤矸石在井下充填中的工程应用提供了理论依据和实践路径,也为煤炭行业绿色低碳发展与矿山可持续开采提供了重要技术支撑。

## 参考文献

- [1] 朱磊,古文哲,何志伟,等. 煤矸石综合利用现状及高值化利用途径探索—以中国中煤为例[J/OL].煤炭科学技术,1-20[2025-08-19].
- [2] 王军. 井下煤矸石分离和固体回填技术在采煤中的应用研究[J].山西化工,2024,44(11):230-232.
- [3] 梁永生. 斜沟煤矿煤矸石处置与综合利用研究[J].山西化工,2024,44(10):182-183+186.
- [4] 汪天宇,徐万茹,刘衡秋,等. 山西斜沟煤矿煤矸石基础性质与综合利用途径研究[J].中国煤炭地质,2024,36(07):55-62.
- [5] 陈继旺.不同来源煤矸石协同植物改良铜尾矿效应研究[D].安徽理工大学,2024.
- [6] 朱磊,古文哲,袁超峰,等. 煤矸石浆体充填技术应用与展望[J].煤炭科学技术,2024,52(04):93-104.
- [7] 梁卫国,郭凤岐,于永军,等. 煤矸石井下原位智能分选充填技术研究进展[J].煤炭科学技术,2024,52(04):12-27.
- [8] 陶冉.加快煤矸石减量化无害化资源化利用[N].中国煤炭报,2024-03-12(005).

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**