

底板注浆加固对巷道结构稳定性的影响分析

赵亮

安阳永安贺驼煤矿有限公司

DOI: 10.12238/ems.v6i4.7262

[摘要] 本文旨在探讨底板注浆加固技术在巷道工程中的应用, 重点分析其对巷道结构稳定性的影响。通过对地质条件、注浆材料性能、注浆工艺参数等因素的综合考量, 结合理论分析与数值模拟计算, 本研究揭示了底板注浆加固如何有效提升巷道的结构稳定性和长期安全运行能力。研究结果表明, 合理的底板注浆加固策略能够显著改善巷道结构的受力状态, 降低施工和运营期间的安全风险, 为巷道工程的建设与维护提供科学依据。

[关键词] 底板注浆加固; 巷道工程; 结构稳定性; 地质条件; 数值模拟

Analysis of the influence of bottom plate grouting reinforcement on the stability of tunnel structure

Zhao Liang

Anyang Yong'an Hetuo Coal Mine Co., Ltd

[Abstract] This article aims to explore the application of bottom plate grouting reinforcement technology in tunnel engineering, with a focus on analyzing its impact on the stability of tunnel structures. By comprehensively considering factors such as geological conditions, grouting material properties, and grouting process parameters, combined with theoretical analysis and numerical simulation calculations, this study reveals how bottom plate grouting reinforcement can effectively improve the structural stability and long-term safe operation ability of tunnels. The research results indicate that a reasonable bottom plate grouting reinforcement strategy can significantly improve the stress state of the tunnel structure, reduce safety risks during construction and operation, and provide scientific basis for the construction and maintenance of tunnel engineering.

[Key words] Bottom plate grouting reinforcement; Tunnel engineering; Structural stability; Geological conditions; numerical simulation

一、引言

在当今时代, 随着全球交通网络体系的迅速扩张, 巷道工程在复杂多变的地质环境中频繁开展, 随之而来的是对巷道结构稳定性与安全性前所未有的重视。作为一种被广泛认可的地下结构强化方法, 底板注浆加固技术通过精确向巷道底部注入特制固化材料来有效填补空隙、增强地层的承重能力和整体稳定性, 对于确保巷道工程的长期安全运营及结构可靠性起到了至关重要的作用。本研究致力于深入探索底板注浆加固技术的奥秘, 细致剖析其对巷道结构稳定性产生的深远影响, 旨在为巷道建设与维护提供科学的理论依据和技术支持。

二、底板注浆加固技术概述

底板注浆加固技术是一项系统性工程, 它不仅涉及基础的钻孔操作, 还包括了从灌浆材料的精心选择到注浆过程的精细控制, 以及后续的质量检测等多个关键环节。首先, 钻孔作业需依据地质勘查结果精准定位, 确保钻孔深度、角度满足设计要求, 为浆液的有效渗透创造条件。灌浆材料的选择尤为关键, 需根据地层特性选择适宜的材料, 如水泥基浆液适用于大多数情况, 而对于特殊地质条件, 则可能选用化学浆液以增强渗透性和凝固强度。注浆过程中, 压力控制是核心技术之一, 需通过专业设备实时监测并调节, 以保证浆液既能充分填充空隙, 又不致引起地表异常隆起或周围结构受损。最后, 质量检测环节包括了现场试验与实验室分析, 确保加固效果达到设计预期, 为巷道安全运营提供坚实保障。

三、底板注浆加固对巷道结构稳定性影响因素分析

3.1 地质条件对注浆效果及巷道稳定性的影响

地质条件作为巷道工程中一个复杂而关键的自然变量，深刻影响着注浆加固技术的应用效果与巷道结构的稳定性。鉴于地质条件的多样性，其对注浆材料的性能需求各不相同，要求在软土地层与硬岩区域采取差异化策略，以确保加固措施的针对性与有效性。

在软土地层中，面对颗粒细小、高含水量和强透水性的特点，浆液扩散虽广但固结缓慢，这对初期结构稳定构成挑战。策略上，采用快速凝固的材料，如早强型水泥浆液或含速凝剂混合浆液，是关键所在，旨在缩短凝固时间，迅速增强软土支撑力，减少沉降威胁。同时，调整浆液流动性以确保既能渗入微小裂隙又能提供必要的支撑，是软土地层注浆的核心要求。

相比之下，硬岩区域的地质环境更为复杂，特别是在存

在裂隙、断层及岩溶发育的地段，注浆需精确且谨慎。此时，注浆材料需具备高粘度和可控凝固时间，如树脂类化学浆液，它们在低压力下即可有效渗透并快速固化，减少对周围坚固岩体的干扰及潜在的结构破坏。

为适应不同地质条件，定制化设计与施工策略显得尤为重要。这涉及到前期详尽的地质勘探，基于地质结构、地下水水位和岩石力学性质的精确分析，来个性化调整浆液配比、优化注浆压力和设计注浆孔位布局，旨在实现高效且均匀的加固效果。预注浆或同步注浆技术的运用，更是针对预计复杂地质问题的前瞻性解决方案，有助于提前化解风险，提升整体加固成效。

综上所述，地质条件的细致分析与针对性策略定制，对确保注浆加固技术的有效实施和巷道结构长期稳定性起到了决定性作用，体现了工程实践中科学决策与技术创新的重要性。

表1 地质条件对巷道注浆加固策略与材料选择的影响

地质条件	特点	注浆策略	材料选择
软土地层	颗粒细小、高含水量、透水性强	快速凝固材料	使用早强型水泥浆液或含速凝剂混合浆液；调整浆液流动性以确保渗入微小裂隙并提供支撑
硬岩区域	存在裂隙、断层、岩溶发育	高粘度、可控凝固时间	树脂类化学浆液；低压力下渗透并快速固化，减少岩体干扰
通用策略		定制化设计与施工策略	地质勘探、精确分析；个性化调整浆液配比、注浆压力、孔位布局；预注浆/同步注浆技术

3.2 注浆材料性能对巷道结构稳定性的贡献

注浆材料作为巷道底板加固技术的核心，其物理化学性能直接影响工程的成败与巷道结构的长期稳定耐久性。理想化的注浆材料需在流动性、凝固时间、最终强度、耐久性、环保性及经济性等多个关键性能间取得微妙平衡，确保在多变的地质条件下发挥高效的加固效能。

具体而言，材料的流动性与渗透性是渗透至细微裂隙的基础，需恰当调整粘度以保证既易于渗透又能在目标区域有效聚集形成稳固支撑。凝固时间的选择需权衡效率与效果的双重需求，既要防止浆液流失，又要确保充分填充，故而依据巷道地质特性选择适宜凝固速度的材料显得尤为关键。最终强度与耐久性是评价加固效果的直接标准，要求材料能长期承受结构荷载并抵御环境侵蚀，高强、耐久的材料如改性水泥浆液、环氧树脂等是优选。

在注重性能的同时，注浆材料的环保性和经济性也不容忽视。环保材料有助于减少施工对环境的影响，符合可持续发展理念；经济性考虑则确保项目成本控制，性价比高的材料对工程成功至关重要。综上所述，注浆材料的综合性能对巷道结构稳定性贡献巨大，需综合考量各方面因素，科学选材，以确保加固工程的高效与巷道的长久安全。

3.3 注浆工艺参数的选择对巷道稳定性的影响

注浆工艺参数的精准设定与优化，是确保底板注浆加固

效果、提升巷道结构稳定性的关键所在。合理的工艺参数不仅能提高加固效率，还能有效避免不良后果，确保施工安全与环境保护。

注浆压力是推动浆液渗透至预定位置的主要动力，其设定需基于详细的地质勘察资料和结构分析。压力过高，浆液可能沿地层中阻力较小的路径前进，绕过需要加固的薄弱区域，导致加固不均匀，甚至引起地面隆起，对周边环境和建筑物造成影响。相反，压力过低，则无法克服地层阻力，浆液渗透深度不足，无法有效封闭空隙，影响加固效果。因此，应根据地层渗透性、孔隙率及加固深度，通过试注浆确定最适压力范围，确保浆液均匀分布于设计加固区域内。

注浆速率影响着浆液的扩散形态和凝固过程。过快的注浆速率可能导致浆液内部剪切力增大，引发浆液离析，即浆液中的固体颗粒与液体分离，影响浆液的均匀性和凝固后的整体性。此外，高速注浆还可能加剧地层压力，增加地面隆起风险。而注浆速率过慢，则会延长施工周期，增加成本，且不利于浆液在未完全凝固前的有效扩散。因此，应根据浆液类型、地质条件和注浆压力，通过试验确定适宜的注浆速率，以平衡效率与质量。

钻孔的位置和间距直接影响加固的均匀性和效率。钻孔布置需综合考虑巷道的受力状况、地层结构特征及注浆范围，确保钻孔能够覆盖所有关键区域，避免加固盲区。合理的钻

孔布局还能减少对巷道结构的干扰, 避免因钻孔作业引起的附加应力集中。此外, 钻孔深度和方向的控制也需精确, 以确保浆液能按照设计意图有效渗透并达到预定加固深度。

注浆加固是一个多因素交互作用的过程, 除上述主要参数外, 还包括浆液配比、环境温度、注浆顺序等众多细节。这些因素相互影响, 共同决定了注浆加固的最终效果。因此, 施工前应进行周密的规划和模拟, 施工中实施严格的监控与调整, 确保各工艺参数处于最优状态, 从而有效避免地面隆起、减少环境污染, 确保巷道结构的长期稳定性和安全性。

3.4 底板注浆加固对巷道结构受力状态改善的作用分析

底板注浆加固技术在巷道工程中扮演着至关重要的角色, 其对巷道结构受力状态的改善体现在多个维度, 不仅增强了结构的整体性, 还有效提升了巷道的耐久性和安全性。

底板加固通过向软弱地层注入高强材料, 如水泥浆液或特殊化学浆液, 形成了一个强度远高于原地层的人造结石体, 显著增强了底板区域的承载力。这种加固方式改变了巷道底部的受力格局, 使得底板能更均匀地传递上部荷载, 减少了由于底板薄弱导致的局部应力集中现象, 有效抑制了巷道结构的过量变形, 提升了整体的抗变形性能。

在软弱地层中, 底板加固尤为重要。由于此类地层自身强度低、压缩性大, 容易导致巷道底板沉降不均, 进而引发上部结构的应力重分布和裂缝形成。通过注浆加固, 增强了底板的刚度, 均衡了巷道的垂直与侧向支撑力, 显著减轻了因不均匀沉降造成的结构应力集中, 有效控制了巷道的总沉降量, 减少了因沉降差异产生的结构损伤, 提升了长期稳定性。

注浆加固形成的结石体不仅增强了地层的力学性能, 同时也是一种有效的防水屏障。它能有效阻塞地下水的渗透路径, 减少地下水对巷道结构的侵蚀, 避免因水分侵入引起的钢筋锈蚀、混凝土劣化等问题, 从而延长了巷道的使用寿命。在富含水的地质条件下, 这一防水功能尤为重要, 能够显著降低维护成本, 提高巷道的经济性和实用性。

随着巷道所处环境的变化, 如季节性冻融循环、地震等自然灾害, 底板加固能够增强结构对这些外部因素的抵抗力, 减少自然灾害对巷道结构的损害。此外, 良好的底板加固还能提高巷道在突发情况下的安全性, 比如在遭遇意外事故时, 坚固的底板结构能更好地维持巷道的完整性和通行安全。

四、底板注浆加固对巷道结构稳定性影响的理论分析与模拟计算

4.1 基于力学模型的理论分析

理论分析是评估底板注浆加固效果的基础。在这一阶段, 研究人员通常会运用弹性理论、塑性理论及流体力学原理, 构建包含巷道结构与周围地层相互作用的复合力学模型。通过解析方法或数值解法, 如有限元法(FEM)、边界元法(BEM), 可以详尽地分析注浆前后的应力场、位移场变化, 以及地下

水压力分布的改变。特别地, 有限元分析能够模拟复杂的地质结构和注浆过程, 展示注浆材料如何逐步填充裂缝、空洞, 以及其凝固后如何改变地层的力学性质, 从而定量评估加固后结构的稳定性和承载力提升程度。此外, 通过比较加固前后巷道结构的变形模态和频率特性, 可以进一步验证加固措施的有效性。

4.2 结构稳定性数值模拟计算

为了更加准确地预测和优化加固方案, 采用专业的地质力学软件(如 PLAXIS、ABAQUS、FLAC3D 等)进行三维数值模拟显得尤为重要。这些软件能够处理复杂的地质与工程问题, 通过设置不同的地质模型、注浆材料属性、施工工艺参数(如注浆压力、速率、时间序列)等, 模拟不同工况下的巷道结构响应。模拟过程不仅考虑即时的力学效应, 还纳入时间效应, 如蠕变、松弛等, 以全面评估长期稳定性。通过对比分析多种加固方案下的巷道变形、应力集中程度及潜在失效模式, 工程师可以优选出最经济、最安全的加固策略。此外, 数值模拟还能帮助识别和预防潜在的风险点, 如局部应力过度集中区域, 为施工前的方案优化和风险控制提供科学依据。这种理论与实践紧密结合的方式, 极大提高了巷道加固工程的科学性和可靠性, 确保了地下空间的安全利用。

结束语

底板注浆加固技术作为强化巷道结构稳定性的关键策略, 其成效显著且深远, 但实现这一目标需细致考量多方面因素, 包括但不限于地质背景的复杂性、注浆材料的特质与施工过程中的精确调控。通过融合理论分析的严谨逻辑与数值模拟的直观展现, 我们能够对巷道加固工程勾勒出一条科学指引之路, 确保巷道结构的稳固与安全, 进而推动地下空间资源的高效、可持续开发与利用, 为未来城市基础设施建设奠定坚实的基础。

[参考文献]

- [1] 童丹丹. 煤层注浆加固技术在底板破碎区域的应用[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(05): 131-132+135.
- [2] 董跃清. 天安煤矿 50601 工作面煤层底板注浆加固技术分析与应用[J]. 煤炭与化工, 2023, 46(03): 59-61+66.
- [3] 关鹤伟. 复杂条件下工作面底板注浆加固技术研究[J]. 技术与市场, 2022, 29(09): 117-118+121.
- [4] 朱斌, 倪惠宁. 鹤煤九矿陷落柱注浆加固技术探究[J]. 煤炭科技, 2022, 43(04): 178-182.
- [5] 何东旺, 苗利伟, 葛会乾. 煤层底板注浆加固效果检验及评价方法[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(07): 54-56.
- [6] 李飞, 孔德中, 汪洋, 等. 我国煤层底板突水机理与防治研究现状及展望[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 200-206.
- [7] 韩云春, 刘朝伟, 李宁, 等. 煤层底板注浆前后采动效应数值模拟对比分析[J]. 采矿技术, 2021, 21(03): 77-79.