

注浆加固对软弱地层巷道中稳定性的提升效果分析

刘创 贺鹏非 李志明

禹州枣园煤业有限公司 河南 禹州 461670

摘要：本文探讨了注浆加固技术在提升软弱地层巷道稳定性中的应用与效果，注浆加固通过充填、胶结、置换和加筋等作用机制，显著改善软弱地层的力学性能和承载能力。详细分析了注浆材料性能、注浆参数设计以及施工工艺与质量控制对加固效果的关键影响，并构建了包含围岩应力、应变、位移及物理力学参数在内的评估指标体系。通过理论分析与数值模拟，结合现场监测与试验验证，科学评估了注浆加固对巷道稳定性的提升效果，为注浆加固技术在软弱地层巷道工程中的应用提供了理论依据和实践指导。

关键词：注浆加固；软弱地层；巷道稳定性；提升效果；作用机制

1 注浆加固技术基本原理与分类

1.1 注浆加固基本原理

注浆加固是通过注浆泵将具有流动性的浆液按一定压力注入软弱地层的裂隙、孔隙或空洞中，浆液在压力作用下扩散、渗透、充填，并经过化学反应或物理固化，形成具有一定强度和整体性的结石体。其核心原理包括：一是充填作用，浆液填充岩土体中的空隙，减少地层的渗透性，提高其密实度；二是胶结作用，浆液固化后将松散的岩土颗粒胶结在一起，增强岩土体的整体性和黏聚力；三是置换作用，对于含水性强的软弱地层，浆液可置换其中的水分，降低孔隙水压力，提高地层的有效应力；四是加筋作用，部分浆液（如水泥浆）固化后形成的结石体可与岩土体共同承担载荷，起到类似“骨架”的加筋作用，提高地层的承载能力。

1.2 注浆材料分类与特性

1.2.1 无机注浆材料

无机注浆材料以水泥为主要成分，包括普通硅酸盐水泥浆、超细水泥浆、水泥-水玻璃双液浆等。普通硅酸盐水泥浆来源广泛、价格低廉，适用于裂隙较大的软弱地层，但凝结时间较长，流动性较差，对微细裂隙的渗透性不足。超细水泥浆颗粒直径小（通常小于 $10\mu\text{m}$ ），可渗透到微细裂隙中，加固效果更好，但成本较高。水泥-水玻璃双液浆由水泥浆和水玻璃按一定比例混合而成，凝结时间可通过配比调节（从几秒到几十分钟），早期强度高，适用于需要快速止水和加固的工程，如断层破碎带注浆。

1.2.2 有机注浆材料

有机注浆材料主要包括聚氨酯类、环氧树脂类、丙烯酸盐类等。聚氨酯浆液分为水溶性和油溶性两种，具有良好的膨胀性和止水性能，适用于处理涌水地层，但

其强度和耐久性相对较低。环氧树脂浆液黏结力强，固化后强度高，适用于对加固强度要求较高的软弱地层，但价格昂贵，且对施工环境要求较严。丙烯酸盐浆液流动性好、凝结时间可控，适用于微细裂隙的注浆加固，但其耐水性和抗老化性有待提高。

1.2.3 复合注浆材料

复合注浆材料是由无机材料与有机材料混合而成，兼具两者的特点。例如，水泥-聚氨酯复合浆液既保留了水泥的高强度，又具备聚氨酯的良好渗透性和止水性能；水泥-环氧树脂复合浆液则综合了水泥的低成本和环氧树脂的高黏结力，适用于复杂软弱地层的加固。

1.3 注浆方式与工艺

1.3.1 按注浆目的分类

按注浆目的可分为加固注浆和止水注浆。加固注浆以提高地层强度和整体性为主要目标，通常采用强度较高的浆液（如水泥浆、环氧树脂浆），注浆压力相对较高；止水注浆旨在封堵地下水通道，降低地层透水性，多采用速凝、膨胀性浆液（如水泥-水玻璃双液浆、聚氨酯浆），注重浆液的充填和封堵效果。

1.3.2 按注浆位置分类

按注浆位置可分为超前注浆、壁后注浆和底板注浆。超前注浆在巷道开挖前进行，通过在掌子面前方或巷道轮廓线外一定范围注浆，形成加固圈，防止开挖时地层失稳，适用于地质条件极差的软弱地层；壁后注浆在巷道开挖并支护后进行，浆液注入巷道支护结构与围岩之间的空隙，填充空隙并加固围岩，减少后期变形；底板注浆主要针对巷道底板鼓起问题，通过向底板地层注浆，提高底板强度和刚度，控制底板变形^[1]。

1.3.3 注浆工艺

注浆工艺包括钻孔、注浆设备安装、浆液制备、注

浆施工、封孔等环节。钻孔需根据注浆范围和地层条件确定孔位、孔深和孔径；注浆设备主要有注浆泵、搅拌机、压力表等，需根据浆液类型和注浆压力选择；浆液制备应严格控制配比和搅拌时间，保证浆液性能稳定；注浆施工时需控制注浆压力和注浆量，避免压力过高导致地层劈裂或注浆不足影响效果；注浆结束后及时封孔，防止浆液倒流。

2 软弱地层巷道稳定性特征与注浆加固作用机制

2.1 典型软弱地层地质特征

2.1.1 泥质页岩层

泥质页岩层主要由黏土矿物组成，具有强度低（单轴抗压强度通常小于10MPa）、遇水易软化、可塑性强等特点。该地层透气性差，巷道开挖后，水分不易扩散，黏土矿物吸水膨胀，导致围岩产生较大变形，且变形具有时间效应（流变特性），易出现持续的顶板下沉和两帮内移。

2.1.2 砂卵石层

砂卵石层由砂粒和卵石组成，颗粒间黏聚力小，孔隙率大，透水性强。该地层结构松散，稳定性差，巷道开挖时易发生坍塌，且地下水易携带砂粒流失，形成管涌，进一步加剧地层失稳。砂卵石层的变形主要表现为整体性流动，对支护结构的冲击力较大。

2.1.3 断层破碎带

断层破碎带是地壳运动形成的断裂构造带，由破碎岩块、断层泥和裂隙组成，其强度极低，透水性不均。该地层整体性差，巷道开挖后，破碎岩块易发生垮落，且断层活动可能导致应力集中，引发巷道突发性变形或坍塌，同时断层破碎带往往是地下水的通道，水的作用会进一步降低其稳定性。

2.2 软弱地层巷道稳定性问题表现

软弱地层巷道的稳定性问题主要表现为变形和破坏两类。变形方面，包括顶板下沉（最大下沉量可达数十厘米甚至数米）、两帮收敛（收敛速度快，累计收敛量大）、底板鼓起（在砂卵石层和软岩地层中尤为常见）等；破坏方面，表现为顶板冒落、两帮片帮、支护结构变形破坏（如锚杆断裂、支架扭曲）等。

这些问题的产生主要源于：一是软弱地层自身承载能力不足，难以承受开挖后的应力重分布；二是水的作用，地下水软化地层、降低其强度，同时产生孔隙水压力，削弱地层的有效应力；三是时间效应，软弱地层的流变特性导致变形随时间持续发展，即使初期变形较小，后期也可能因累积变形过大而失稳。

2.3 不同软弱地层中注浆加固作用机制

2.3.1 泥质页岩层中注浆加固机制

针对泥质页岩层的特点，注浆加固的主要作用机制为：一是浆液填充页岩层中的微裂隙，阻断水分进入路径，减少页岩遇水软化的可能性；二是浆液固化后与页岩体胶结，提高其黏聚力和内摩擦角，增强地层的抗剪强度；三是通过注浆压力挤压页岩层，减少其孔隙率，提高密实度，降低其流变特性。例如，注入水泥-水玻璃双液浆可快速凝固，在页岩层表面形成止水帷幕，同时胶结浅层岩体，控制初期变形^[2]。

2.3.2 砂卵石层中注浆加固机制

砂卵石层注浆加固以充填和胶结为主要机制：浆液在压力作用下渗透到砂卵石颗粒间的孔隙中，固化后将松散的颗粒胶结形成整体，提高地层的整体性和内聚力；对于透水性强的砂卵石层，浆液可形成止水帷幕，阻断地下水流动，降低孔隙水压力，防止管涌发生；注浆后的结石体可增强地层的刚度，减少其流动性变形，使砂卵石层能够承受巷道开挖后的应力。

2.3.3 断层破碎带中注浆加固机制

断层破碎带的注浆加固机制包括：一是浆液填充破碎岩块间的空隙，胶结破碎岩体，提高其整体性和强度；二是封堵断层中的裂隙通道，切断地下水补给，降低水对破碎带的软化作用；三是通过注浆形成的结石体在断层带中构建“承载拱”，分散应力集中，减少断层活动对巷道的影响。对于活动性断层，注浆加固还可提高断层带的抗剪强度，限制断层错动。

3 影响注浆加固效果的关键因素分析

3.1 注浆材料性能的影响

注浆材料的性能是决定加固效果的基础要素。材料的黏度、凝结时间以及结石体强度，对最终加固成效起着直接且关键的作用。低黏度浆液，像化学浆，具有良好的可注性，能够轻松地渗透到微小的裂隙和孔隙中，但它的结石体强度相对较低，在承受较大荷载时可能无法提供足够的支撑。而高黏度浆液，例如水泥浆，其扩散范围相对较小，不过结石体强度高，能为围岩提供坚实的支撑。不同软弱地层具有独特的地质特性，因此需要合理选择注浆材料。在砂土地层中，由于砂土颗粒间的孔隙较大，浆液需要具备良好的渗透性才能有效填充，所以应优先保证浆液的渗透性；而在黏土地层中，黏土的透水性差，浆液容易流失，此时需侧重控制凝结时间，确保浆液在流失前能够充分凝固，达到加固目的。

3.2 注浆参数设计的影响

3.2.1 注浆压力

注浆压力是影响浆液扩散和加固效果的重要参数。

压力过小，浆液无法充分扩散到需要加固的区域，导致加固范围不足；压力过大，则可能使地层过度劈裂，引发巷道附加变形，甚至破坏原有的地层结构。通常，注浆压力需根据地层的埋深与强度来确定。在软弱土层中，注浆压力一般为0.5-2.0MPa；对于破碎岩体，注浆压力则为2.0-5.0MPa。

3.2.2 注浆量与注浆半径

注浆量要根据地层的孔隙率与加固范围进行精确计算。注浆量过少，无法填满地层中的空隙，不能形成有效的加固体；注浆量过多，不仅会造成浆液浪费，增加工程成本，还可能对周围环境产生不良影响。注浆半径需通过现场试验确定，一般控制在1.5-3.0m，以确保在巷道周边形成有效的加固圈^[3]。

3.2.3 注浆孔布置

注浆孔的布置方式对加固效果有着重要影响。孔位通常呈梅花形或环形布置，间距需与注浆半径相匹配，一般为1.0-2.0m，这样可以避免出现加固盲区。对于富水地层，由于水的存在会影响注浆效果，需先布置排水孔降低水压，再进行注浆作业。

3.3 施工工艺与质量控制的影响

施工工艺和质量控制是保证注浆加固效果的关键环节。钻孔精度要求孔位偏差小于50mm，以确保注浆孔能够准确到达预定位置。注浆顺序一般采用从外围到中心的“围封注浆”方式，有利于控制浆液的扩散范围。压力稳定控制也至关重要，压力波动范围不超过±0.1MPa，以保证加固的均匀性。在施工过程中，若出现串浆、漏浆等问题，需及时采取封堵措施，否则会导致局部加固效果失效，影响整个巷道的稳定性。

4 注浆加固对巷道稳定性的提升效果评估

4.1 评估指标体系构建

构建科学合理的评估指标体系是准确衡量注浆加固对巷道稳定性提升效果的关键。从力学性能角度，可选取围岩应力、应变、塑性区范围等指标，它们能直观反映注浆加固后围岩力学状态的改变；位移指标也不可或缺，包括顶底板位移、两帮位移等，直接体现巷道在加固前后的变形情况。此外，围岩的物理力学参数变化，如内摩擦角、黏聚力等，对稳定性有着重要影响，也应纳入评估范畴。通过综合考量这些指标，从不同维度、不同层面全面评估注浆加固效果，确保评估结果准确、客观、全面，为后续的工程决策和优化提供可靠依据。

4.2 理论分析与数值模拟方法

基于弹塑性力学理论，深入剖析注浆加固后巷道围

岩的力学特性，建立精准的应力-应变关系模型。通过该模型，推导出塑性区半径与位移计算公式，从理论上明确注浆加固对围岩塑性区发展和位移变化的量化影响。同时，借助先进的数值模拟软件，如FLAC3D或ANSYS，模拟不同注浆方案下巷道的稳定性。在模拟过程中，精确设置材料参数、边界条件等，确保模拟环境与实际情况高度契合。对比加固前后围岩的应力云图，可清晰看到应力分布的改善情况；位移矢量图能直观呈现位移方向和大小的变化；塑性区分布图则能准确反映塑性区范围的缩小程度^[4]。通过这些量化分析，科学评估不同注浆方案的加固效果，为实际工程选择最优方案提供理论支持。

4.3 现场监测与试验验证

通过在巷道周边精心布设多点位移计、应力传感器、渗压计等监测设备，构建全方位、多层次的监测网络，实时、精准地采集加固前后的各类数据。以某煤矿软弱煤层巷道注浆工程为例，监测数据显示，注浆后顶底板位移量从150mm显著降至60mm，两帮位移从120mm大幅降至45mm，这直观地表明巷道变形得到了有效控制。同时，围岩内摩擦角从18°提升至28°，意味着围岩的力学性能得到明显改善，抗剪强度增强。这些实际监测数据与理论分析和数值模拟结果相互印证，充分验证了注浆加固对巷道稳定性的显著提升作用，为注浆加固技术在类似工程中的推广应用提供有力的实践依据。

结束语

综上所述，注浆加固技术作为软弱地层巷道稳定性的有效手段，其加固效果受多方面因素共同影响。通过科学合理的注浆材料选择、精确的注浆参数设计与严格的施工工艺控制，可以显著提升巷道的稳定性。未来，随着注浆材料的不断创新与注浆技术的持续优化，注浆加固技术将在更多领域展现出其独特的优势与价值，为软弱地层巷道工程的安全稳定提供有力保障。

参考文献

- [1] 张启元.玉溪煤矿井底车场巷道底板加固技术研究[J].山东煤炭科技,2022,40(3):7-9,15.
- [2] 邵刚.高水压巷道底板加固设计[J].建筑工程技术与设计,2020(9):766-767.
- [3] 肖红菊,孙玉永.上软下硬复合地层中盾构隧道开挖面稳定性分析[J].中国铁道科学,2022,43(05):70-77.
- [4] 刘朝钦.软弱地层超大矩形顶管盾构隧道开挖面稳定性研究[J].高速铁路技术,2022,13(06):36-40.