

# 水泥注浆法在山体地表裂缝处理中应用研究

黄宜敏

湖南省工程地质矿山地质调查监测所 湖南长沙 410007

**摘要：**矿山巷道和采空区上覆岩层山体地表裂缝问题日益成为影响矿井开发生产积水涌水来源的关键因素，矿山顶部地表裂缝发展往往成为大气降水、地表水渗向矿井优势通道，矿区积水严重影响开采安全及排放环境污染。水泥注浆技术凭借材料来源广泛与力学性能可靠等优势，已成为修复治理各类裂缝的主流方法。本文聚焦材料配方改良与工艺参数优化方向，旨在建立适用于不同工况的精细化注浆技术体系。通过深入解析浆液在裂缝介质中的流动传质特性与胶结固化机制，系统解决现有技术存在的填充不均与修复耐久性不足等核心问题，为矿山涌水治理工程结构长效维护提供科学支撑。

**关键词：**水泥注浆法；裂缝处理；工艺参数；注浆材料

## 引言

裂缝修复领域长期面临着修复材料与原结构协同工作性能不足的实践瓶颈，传统填充材料往往难以适应动态荷载与环境温湿度变化导致的反复形变。水泥基注浆材料因其水化产物的矿物相容性及可设计性较强的流变特性，逐步发展为结构性裂缝修复的技术首选。当前研究重心转向材料性能优化与工艺控制精度的协同提升，需着重探索浆液渗透路径控制方法与固化体微结构形成规律。技术发展要求构建涵盖材料遴选、参数设计及工艺实施的全流程技术框架，切实保障裂缝修复体系服役期的结构整体性与耐久性目标达成。

## 一、水泥注浆法的基本原理与材料特性

### 1. 水泥注浆法的基本原理

水泥注浆法的核心机制依赖于压力驱动下浆液的物理迁移与化学固化过程。当浆体在裂缝内部流动时，其首要行为表现为对不规则裂缝空间的渗透填充，这种行为受浆液黏度与裂缝宽度的双重约束。随着注浆压力持续作用，浆液逐步挤压裂缝壁面产生压密效应，有效消除原有空隙结构缺陷。关键在于水泥水化反应引发胶结作用，浆液从流体态过渡到固态的过程中形成三维网络结构，该结构将破碎的基材重新键合为连续整体。整个修复效果本质上由浆液在复杂裂缝通道内的扩散均匀性与固化完整性共同决定，而控制这两项因素需要精确匹配裂缝形态特征与注浆动力参数。

### 2. 水泥注浆材料的种类与特性

工程实践中水泥基注浆材料已形成梯度化产品体系，

各自具备明确的适用范围。普通硅酸盐水泥凭借较高抗压强度与较低成本成为常规裂缝修复的首选，其不足在于粒径限制导致微裂缝渗透能力有限。超细水泥通过优化颗粒级配显著提升可注入性，对于宽度低于0.1毫米的裂缝仍保持良好穿透效果，但需注意其早期强度发展速度相对缓慢的弱点。改性水泥则通过掺入聚合物或膨胀组分突破传统材料的性能边界，例如聚合物乳液增强的复合体系可提供柔性抗裂能力，适用于承受动态荷载的变形裂缝修复。材料选择必须兼顾裂缝几何特征与环境侵蚀因素，微裂缝场景中优先考量超细水泥的流动性能，矿山体岩土裂缝一般较宽（达3-30CM）可使用P.O普通硅酸盐水泥或P.P粉煤灰硅酸盐水泥，而处于化学腐蚀环境的工程则需采用耐蚀改性配方保障修复耐久性。

## 二、注浆方案设计

### 1. 注浆材料的选择与配比设计

注浆材料的选取必须呼应裂缝特征与结构服役环境。普通硅酸盐水泥适用于宽度超过0.2毫米的静态裂缝修复，这种材料的基准配比通常以水灰比0.6至0.8为基础配制，过高水灰比虽然改善流动性却削弱最终固化强度。当修复微裂缝或活动裂缝时，超细水泥与改性水泥更具优势，超细水泥颗粒中值粒径接近5微米可渗透0.15毫米细缝，其配比需掺入减水剂控制泌水率，防止浆液分层离析影响填充效果。对于受震动荷载的桥梁伸缩缝，聚合物改性水泥的弹性模量调整为3至5吉帕更为适宜，此时需要测试乳胶粉掺量对凝结时间的延迟效应，保障施工窗口期满足实际需求。设计阶段应当通过流变试验测试初始流动度与120分钟保留值，避免浆液过早稠化

堵塞注浆通道。

## 2. 注浆压力与浆液扩散半径的确定

压力参数设定直接影响浆液的有效扩散与裂缝填充密度。实验数据证实裂缝宽度为1毫米时，常压注浆扩散半径多限制在0.5米范围内，因此压力必须提升至0.3至0.5兆帕才能实现超过1米的预定扩散目标。压力值并非无上限递增，因为当岩体裂缝承受超过1.2兆帕注浆压力时可能导致次生劈裂破坏，故施工前需结合地质物探探测数据评估岩性及岩土结构抗压阈值。扩散半径的精确估算依赖裂缝连通性模型，根据注浆现场示踪剂测试结果，浆液在网状裂缝中的有效扩散通常遵循椭圆分布规律，长轴方向扩散距离可达到短轴方向的三倍以上。建议根据首孔注浆的吸浆量动态调整相邻孔位压力值，比如前序注浆孔吸浆量低于设计值百分之六十时，后续孔位压力应当增加百分之二十以保证整体填充率。

## 三、水泥注浆工艺参数研究

### 1. 注浆压力

注浆压力作为核心驱动力，直接调控浆液的渗透分布状态。较低压力水平下浆液仅填充主要裂缝通道，致使分支裂缝遗留未处理区域影响整体加固效果。压力提升至0.2兆帕时可使浆液突破裂缝表面张力屏障进入微裂隙体系，某地铁隧道衬砌修复工程实测数据显示该压力阈值能显著提升裂缝带填充完整度。岩层裂缝处理应格外关注压力上限约束，砂岩地层注浆压力建议控制在0.7兆帕以内，否则容易诱发新裂缝系统产生破坏性水力劈裂。实际操作需采用分阶段升压模式，初始注浆时维持低压浸润裂缝壁面，当排气管溢出浆液后逐步增压至设计值（山体地表裂缝设计压力值0.2-0.4兆帕）四分之三，最终稳压阶段保持时间需超过10分钟确保浆液充分渗透。

### 2. 注浆速度

浆液流动速度关系着填充过程的均匀性与连续性。实验室裂缝模拟装置证实15厘米/分钟流速能使浆液在宽度变化裂缝中保持稳定铺展，当速度超过20厘米/分钟时浆液易绕过狭窄区形成空洞。工程应用中需配置变频注浆泵实现精确调控，水利工程深孔注浆案例表明注浆泵应以每分钟5升基准流量启动并动态调整。特别在连通性复杂的裂缝网络中应当实施梯度降速策略，比如首阶段每分钟灌注8升快速建立主通道，后续每分钟降至3升渗透分支裂隙。若注浆管路压力计读数每分钟上升超过0.05兆帕应当立即限流，这种预警机制可防止浆液过早凝固造成的堵管事故。

## 3. 注浆量

合理注浆量计算需整合裂缝几何参数与浆液损失系数。经典理论公式将注浆量表达为裂缝体积的1.5至2.2倍，桥梁墩身裂缝修复实践验证该系数能有效补偿浆液向混凝土毛细孔的渗漏损失。岩土结构注浆更需考虑裂隙发育联通贯穿的泄漏风险，建议增加百分之三十预备量应对损失。实时注浆量监控宜采用电磁流量计与压力传感器联动系统，某高层建筑基础注浆数据显示当单位孔段吸浆量突降超过四成时应终止注浆，这表明裂缝体系已达到饱和填充状态。施工过程应当建立孔间注浆量均衡档案，相邻注浆孔吸浆量差值大于四分之一即需复核裂缝连通性避免遗漏处理区域。

## 四、施工工艺流程

### 1. 施工准备

施工准备是确保注浆工程顺利推进的基础性环节，现场需依据裂缝物探勘察报告制定针对性技术方案，明确材料配比参数和设备调试标准。人员必须接受安全交底与操作培训，掌握应急处理流程。设备包括空压机、注浆泵和搅拌装置需提前校验压力表精度与管路气密性，材料进场后核验水泥标号及添加剂保质期，同时清理作业面障碍物并设置警戒标识。电力供应与临时支护措施的完备性直接影响后续工序衔接效率。

### 2. 裂缝处理与表面封闭

山体地表裂缝表面处理的质量直接决定浆液渗透效果。以裂缝中轴线为中心，清除约1.5米范围内地表附着物，裂缝两端各外延1米。沿裂缝走向开凿深度约0.6米，宽约1米V型槽，裂缝面清理无填充，边缘修整成斜坡状避免应力集中。封闭材料选用防渗土工布，缝槽两侧各外延0.3米范围，铺设搭接宽度0.3米。土工布回填均质颗粒土方，夯实压紧，与原地面高度一致，压实度大于92%。

### 3. 埋设注浆管

注浆管布置需兼顾灌注压力传导与浆液扩散覆盖。在裂缝直线段间距按2米布设。采用轻便钻机打孔至裂缝底部进入岩层，清孔后植入不同长度（一般2-6米）无缝金属注浆管，管体按设计要求开梅花式喷浆眼，管端螺纹接口与注浆管路紧固防止振脱。

### 4. 浆液配制与注浆施工

浆液性能参数需匹配裂缝工况动态调整，采用P.O42.5级水泥按水灰比0.6基准值配制，掺入0.03%三乙醇胺改善流动性。机械搅拌时间不少于180秒直至浆液呈均质悬浊态。注浆遵循“由外至内、先深后浅、自

下而上” 隔开跳孔原则，初始压力保持0.2兆帕待邻近注浆嘴溢浆后封堵转管。压力阶梯提升至设计值上限的80%，先稀后浓，相邻注浆管串通时立即降压闭阀。久注渗漏点采用双组分水玻璃水泥膏体外封堵。

## 五、水泥注浆法在裂缝处理中的应用分析

### 1. 山体地表裂缝处理

山体地表裂缝的修复，需重点保障机械设备交通、场地、管路远近、植被树木、环境保护整体协同工作性能。山体贯通裂缝处理应采用分段分序注浆工艺，从裂缝终端向中部隔孔推进可避免气体滞留形成空腔。不同岩土裂缝需关注修复材料的收缩匹配性，低弹性模量环氧改性水泥能够适应温度应力导致的周期性变形。山体地表距地下巷道隧道低于50米裂缝处理必须考虑沉重，可在浆液加入280目粉煤灰、一定比例的发泡剂、稳泡剂、渗透剂、早强剂、水玻璃等添加材料。先实验其流动性，防渗性，容重等效果，再依最佳效果配比现场动态调整施工。裂缝修复需严格控制注浆压力在0.4兆帕以下，某岩土维修案例证实该压力阈值可避免对脆弱基体的挤压破坏而形成新的裂缝。修复后需监测区域振动频率及沉降变化，当基频提升百分之八以上表明结构连续性得到有效恢复。

### 2. 其它工程裂缝处理

#### 2.1 建筑工程裂缝处理

建筑结构裂缝的修复，需重点保障承重体系的整体协同工作性能。地下室渗水裂缝处理必须构建三重防护体系，先在迎水面设置化学注浆帷幕阻断水源，再于混凝土本体灌注超细水泥填充微裂隙，最终在背水面施作结晶防水层实现闭环治理。

#### 2.2 桥梁工程裂缝处理

承受动荷载的桥体裂缝处理首要解决疲劳荷载传递问题。箱梁腹板斜裂缝注浆需预埋阵列式应变传感器，通过监测主筋应力变化确定最佳稳压时间，实践表明保持最终注浆压力15分钟能使浆液渗入钢筋-混凝土界面区域。桥墩环向裂缝修复应采用径向钻孔交叉注浆技术，钻孔轴线与裂缝面保持55度交角使浆液沿剪切破坏路径渗透。特别在昼夜温差显著地区，弹性恢复率超过百分之九十五的聚氨酯复合水泥可适应梁体毫米级伸缩变形。施工阶段必须同步实施交通振动监测，当车载激励导致

裂缝开合幅度超过0.15毫米时应暂停注浆直至振动衰减。后期检验需进行两千次以上荷载循环试验，振幅增量控制在初始值一成内视为合格。

### 2.3 隧道巷道工程裂缝处理

隧道巷道衬砌裂缝处理面临地下水渗流与围岩压力的双重挑战。拱顶纵向裂缝注浆应配置触变型水泥浆液，该材料在静态状态下粘度提升三倍有效抵抗重力流淌。环向施工缝渗漏治理需采用分段栓塞注浆法，每两米设置橡胶膨胀止水塞形成独立注浆区间。富水区段裂缝处理关键在精细调控浆液凝胶时间，添加占水泥重量千分之三的缓凝剂可延长操作窗口至45分钟应对涌水干扰。断层破碎带区域注浆压力需控制在1兆帕以下以防围岩扰动，某深埋隧道工程监测数据显示该压力值既确保填充密实度又防止初支变形。修复效果需结合收敛计量检测，九十天后收敛速率衰减至每日0.02毫米以下即表明结构恢复稳定。

## 结语

水泥注浆技术需进一步融合智能监测与材料科学领域的新成果，重点突破微缝精准探测与自修复浆料开发等技术难点。工艺创新需向数字化控制方向发展，结合实时传感网络构建注浆参数动态反馈系统。基础理论研究应深化多物理场耦合模型构建，阐明温度湿度耦合作用下浆体与岩土或混凝土界面的传质机制。材料研发方向需着力开发低收缩高抗裂的改性水泥体系，匹配超高层建筑与大跨度结构的特殊需求。

## 参考文献

- [1] 李晓健, 宋建学. 传统民居地基注浆加固技术研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(03): 123-128+136.
- [2] 王宇辉, 张冬灵. 地基加固中的水泥深层搅拌和劈裂注浆法[J]. 土工基础, 2010, 24(04): 4-6.
- [3] 张宗强, 田华. 水泥注浆法在桩基基础加固中的应用[J]. 江西建材, 2021, (07): 23-24.
- [4] 务亚飞. 水泥注浆法在工程地基加固中的应用研究[D]. 郑州大学, 2014.
- [5] 王晋芳. 既有建筑地基注浆加固应用研究[D]. 石家庄铁道大学, 2019.