

复合地质 FRP 锚杆改性及瓦斯封堵施工工艺

乔江

(四川公路桥梁建设集团有限公司大桥工程分公司, 四川 成都 610031)

摘要 复合地质隧道施工面临围岩稳定性差、瓦斯逸散风险高等难题, 传统锚杆存在耐久性不足、瓦斯封堵协同性差等问题。本文针对复合不良地质(含瓦斯、断层、滑坡体)的工程特性, 开展 FRP 锚杆改性技术与瓦斯封堵施工工艺研究。通过优化 FRP 锚杆材料配方, 添加抗腐蚀剂、黏结增强剂及瓦斯封堵剂, 提升锚杆力学性能与抗腐蚀能力; 设计“钻孔—清孔—注浆—锚固—密封”一体化施工流程, 优化钻孔直径、注浆压力等关键参数, 旨在为相关人员提供参考。

关键词 复合地质; FRP 锚杆; 材料改性; 瓦斯封堵; 协同施工技术

中图分类号: TD353.6; TU753

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.037

0 引言

复合地质隧道在公路建设中日益增多, 其施工过程中面临围岩承载能力弱、瓦斯逸散易引发安全事故等突出问题。锚杆支护作为隧道围岩加固的核心技术, 直接影响工程安全与耐久性。传统钢制锚杆在潮湿、腐蚀性复合地质中易锈蚀, 使用寿命短, 且无法兼顾围岩加固与瓦斯封堵需求^[1]; 普通 FRP 锚杆虽具备轻质、耐腐蚀优势, 但在复合地质中力学适配性不足, 与瓦斯封堵协同效果差, 制约其推广应用。

当前国内外针对 FRP 锚杆的研究多集中于单一性能提升, 缺乏对复合地质下“力学强化—抗腐蚀—瓦斯封堵”一体化改性技术的系统研究; 瓦斯封堵施工多独立于支护工序, 存在工序脱节、封堵效果不佳等问题^[2]。基于此, 本文以昭普高速红星隧道复合地质为工程依托, 研发适配复合地质的改性 FRP 锚杆, 优化瓦斯封堵与支护协同施工工艺, 实现围岩加固与瓦斯防控双重目标, 为复合地质隧道施工提供全新技术路径。

1 工程概况

昭普高速红星隧道全长 4 860 m, 穿越复合不良地质区域, 涉及 3 条断层破碎带、2 处滑坡体及低瓦斯区段, 瓦斯浓度 0.08%~0.35%, 隧道最大埋深 320 m。围岩以粉质黏土、砂质页岩为主, 部分区段含石膏夹层, 遇水易软化, 抗压强度 3~8 MPa, 属于 V 级软弱围岩^[3]。

隧道原设计采用普通 FRP 锚杆支护, 锚杆直径 25 mm, 长度 3.5 m, 间距 1.2 m×1.2 m。施工过程中出现锚

杆与围岩黏结力不足、瓦斯沿锚杆孔逸散、锚杆表面腐蚀等问题, 导致围岩变形量达 120 mm, 瓦斯浓度局部超标, 严重影响施工安全。为解决上述问题, 项目采用改性 FRP 锚杆及配套瓦斯封堵施工工艺, 施工区段长度 1 200 m, 重点针对断层破碎带与瓦斯富集区段开展技术应用。

2 FRP 锚杆改性技术研究

2.1 改性材料选型

基于复合地质潮湿、腐蚀性及瓦斯封堵需求, 筛选核心改性材料。基体材料选用无碱玻璃纤维与环氧树脂, 无碱玻璃纤维抗拉强度 $\geq 3\ 000$ MPa, 环氧树脂固含量 $\geq 98\%$, 保障锚杆基体力学性能; 抗腐蚀剂选用胺类固化剂与纳米二氧化硅复合体系, 胺类固化剂可提升树脂耐酸碱性能, 纳米二氧化硅粒径 50~100 nm, 增强材料致密性; 黏结增强剂采用硅烷偶联剂 KH-550, 改善纤维与树脂界面结合力; 瓦斯封堵剂选用水溶性聚氨酯, 固化后体积膨胀率 $\geq 300\%$, 具备良好的裂隙填充与瓦斯阻隔能力。

2.2 配方优化设计

采用正交试验设计优化 FRP 锚杆改性配方, 选取玻璃纤维含量、抗腐蚀剂掺量、黏结增强剂掺量、瓦斯封堵剂掺量 4 个因素, 每个因素设 3 个水平, 以抗拉强度、弹性模量、抗腐蚀率及瓦斯封堵率为评价指标。

正交试验结果表明, 最佳配方为: 玻璃纤维含量 65%、抗腐蚀剂掺量 5%、黏结增强剂掺量 1.5%、瓦斯封堵

作者简介: 乔江(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁施工。

剂掺量8%。该配方下,FRP锚杆抗拉强度达680 MPa,弹性模量28 GPa,满足复合地质支护力学需求;在质量分数5%的盐溶液中浸泡90 d后,抗腐蚀率仅2.3%,显著优于普通FRP锚杆(抗腐蚀率8.7%);瓦斯封堵率达95.2%,可有效阻断瓦斯沿锚杆孔逸散通道^[4]。

2.3 改性工艺优化

采用拉挤成型工艺制备改性FRP锚杆,优化工艺参数以保障产品质量。纤维浸渍温度控制在80~90℃,浸渍时间15~20 min,确保纤维与树脂充分结合;拉挤速度设定为0.8~1.0 m/min,避免速度过快导致锚杆内部缺陷;固化温度分三段控制,第一段120℃、第二段140℃、第三段160℃,总固化时间4 h,确保树脂完全固化。

锚杆锚固段采用螺纹结构设计,螺纹深度3 mm,螺距15 mm,增强锚杆与注浆体的机械咬合力;杆体表面涂刷界面处理剂,进一步提升黏结性能;锚杆端部设置密封帽,防止瓦斯从杆体端部逸散,实现支护与封堵功能一体化。

2.4 改性性能验证

通过室内试验验证改性FRP锚杆性能。力学性能测试显示,改性FRP锚杆抗拉强度680 MPa,弹性模量28 GPa,断裂伸长率2.1%,均优于普通FRP锚杆(抗拉强度550 MPa,弹性模量25 GPa,断裂伸长率1.8%);抗腐蚀性能测试中,在酸性、碱性及盐溶液中浸泡90 d后,锚杆力学性能损失率均小于5%,远低于普通FRP锚杆(损失率15%~20%);瓦斯封堵试验采用自主设计的模拟装置,在0.5 MPa瓦斯压力下,改性FRP锚杆锚固后瓦斯渗透率仅0.02 mD,较普通FRP锚杆(0.15 mD)降低86.7%,封堵效果显著。

3 瓦斯封堵协同施工工艺优化

3.1 施工流程设计

针对复合地质特性,设计“钻孔—清孔—注浆—锚固—密封—监测”一体化施工流程,实现FRP锚杆支护与瓦斯封堵协同作业。

钻孔采用气动凿岩机,按设计孔位、角度施工,钻孔直径42 mm,深度较锚杆长度长100 mm,避免孔底残留岩屑影响锚固效果;清孔采用高压风与高压水交替冲洗,风压0.6~0.8 MPa,水压1.0~1.2 MPa,确保孔内岩屑清理干净;注浆采用高压注浆泵,注入掺加瓦斯封堵剂的专用注浆材料,注浆压力1.5~2.0 MPa,注浆量按孔体积的1.2倍控制,确保注浆饱满;锚杆安装采用机械推送方式,将改性FRP锚杆缓慢推入孔内,

确保杆体居中,安装完成后拧紧端部螺母;密封处理采用水溶性聚氨酯封堵孔口,封堵深度50~80 mm,固化后形成密封层;施工后开展瓦斯浓度与围岩变形监测,及时调整施工参数^[5]。

3.2 关键参数优化

通过现场试验优化施工关键参数。钻孔角度根据围岩倾角调整,断层破碎带区段钻孔与围岩层面夹角 $\geq 75^\circ$,提升锚杆抗滑能力;注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆,掺加8%瓦斯封堵剂与2%减水剂,凝结时间控制在3~5 min,早期强度达10 MPa/24 h,满足快速支护与瓦斯封堵需求;注浆压力按地质条件调整,瓦斯富集区段采用2.0 MPa高压注浆,确保浆液渗透至围岩裂隙;锚杆间距在断层破碎带加密至1.0 m \times 1.0 m,增强围岩整体性;密封层厚度根据瓦斯浓度调整,瓦斯浓度 $\geq 0.3\%$ 时,封堵深度增至80 mm,确保封堵效果。

3.3 协同施工技术

构建“开挖—支护—瓦斯封堵”一体化协同施工机制,实现各工序无缝衔接与风险闭环管控。开挖环节采用短台阶法施工,上台阶先行开挖,下台阶跟进距离控制在3~5 m,循环进尺严格限定在1.5~2.0 m,减少爆破或机械开挖对围岩的扰动。支护施工必须在开挖完成后2 h内启动,优先采用喷射混凝土封闭围岩表面,再同步安装改性FRP锚杆与钢筋网,缩短围岩暴露时间。瓦斯封堵与支护作业同步推进,注浆过程中通过分布式瓦斯传感器实时监测浓度,当数值超过0.3%时立即暂停施工,调整注浆压力至1.8~2.2 MPa或增加封堵剂掺量至10%,待浓度降至安全阈值后再复工。施工区段按“拱顶—拱腰—一边墙”三点布设瓦斯监测点,间距5 m,数据实时上传智能平台,异常时自动触发补强指令。

针对断层破碎带与瓦斯富集叠加区段,优化“注浆帷幕+FRP锚杆”联合支护方案。先沿开挖轮廓线布设环形注浆孔,孔距0.8 m、孔深3.5 m,注入高标号水泥—水玻璃双液浆,注浆压力控制在2.0~2.5 MPa,形成厚度不小于1.2 m的注浆帷幕,阻断瓦斯沿裂隙逸散通道。待帷幕固化24 h后,按设计参数安装改性FRP锚杆,锚杆间距加密至1.0 m \times 1.0 m,注浆材料掺入8%瓦斯封堵剂,实现“帷幕宏观封堵+锚杆微观加固”的双重防护。施工中严格遵循“先封瓦斯、后固围岩”的顺序,同步监测围岩变形与瓦斯浓度,动态调整施工参数,确保叠加区段施工安全。

3.4 质量控制措施

建立全流程质量控制体系。在原材料检验方面,改性 FRP 锚杆进场时核查出厂合格证与性能检测报告,随机抽样进行抗拉强度与抗腐蚀性能测试,不合格产品严禁进场;注浆材料进场时检测凝结时间、强度及封堵性能,确保满足设计要求。在施工过程控制方面,采用全站仪定位钻孔位置,偏差控制在 ± 50 mm;钻孔深度采用测绳测量,偏差 $\leq \pm 50$ mm;注浆过程中记录注浆压力、注浆量,采用超声波检测仪检测注浆饱满度,饱满度 $\geq 95\%$;锚杆安装后采用拉拔试验检测黏结力,黏结力 ≥ 15 MPa,不合格区段及时补打锚杆。在成品检测方面,施工完成后采用瓦斯检测仪检测孔口瓦斯浓度,浓度 $\leq 0.08\%$ 为合格;通过位移计监测围岩变形,拱顶下沉速率 ≤ 2 mm/d,收敛速率 ≤ 1.5 mm/d;定期检测锚杆受力状态,采用应力计监测锚杆轴力,轴力控制在设计值的 $80\% \sim 120\%$ 。

4 工程应用与效果验证

4.1 应用情况

该改性 FRP 锚杆及瓦斯封堵施工工艺在昭普高速红星隧道 K3+200 ~ K4+400 区段应用,区段长度 1 200 m,涵盖 2 条断层破碎带与 1 处瓦斯富集区。施工过程中累计使用改性 FRP 锚杆 12 000 根,完成注浆量 860 m^3 ,施工效率达 30 根/工日,较传统工艺提升 20%。

施工期间未发生瓦斯浓度超标及围岩失稳事故,现场监测数据显示,瓦斯浓度稳定在 $0.02\% \sim 0.06\%$,远低于规范限值 0.5% ;围岩拱顶下沉量最大 35 mm,水平收敛量最大 28 mm,变形速率均满足设计要求;锚杆受力均匀,最大轴力 120 kN,未出现断裂或失效现象。

4.2 效果对比

与传统施工工艺相比,改性 FRP 锚杆及瓦斯封堵施工工艺优势显著,具体对比结果如表 1 所示。

表 1 工艺对比结果表

对比指标	传统工艺	本文工艺	提升效果
锚杆抗拉强度	550 MPa	680 MPa	提升 23.6%
瓦斯封堵率	75%	95.2%	提升 20.2%
围岩最大变形量	120 mm	35 mm	减少 70.8%
锚杆腐蚀率 (1 年)	15%	2.3%	降低 84.7%
施工效率	25 根/工日	30 根/工日	提升 20%
瓦斯超标频次	6 次/km	0 次/km	完全消除

4.3 经济与社会效益

在经济效益方面,改性 FRP 锚杆使用寿命达 30 年,较传统钢制锚杆(使用寿命 10 年)延长 2 倍,减少后期更换成本;施工效率提升 20%,缩短工期 30 d,节约工期成本 180 万元;瓦斯封堵效果提升,避免因瓦斯超标导致的停工整改,减少经济损失 200 万元以上。

在社会效益方面,该工艺有效控制瓦斯逸散风险,保障施工人员的生命安全;减少围岩变形,提升隧道结构稳定性,降低运营期维护成本;改性 FRP 锚杆为环保材料,可回收利用,减少环境污染;技术成果可为同类复合地质隧道施工提供参考,推动隧道支护技术升级。

5 结束语

本文针对复合地质隧道施工中 FRP 锚杆耐久性不足、瓦斯封堵协同性差等问题,开展 FRP 锚杆改性技术与瓦斯封堵施工工艺研究,取得以下成果:通过添加抗腐蚀剂、黏结增强剂及瓦斯封堵剂,优化 FRP 锚杆材料配方与制备工艺,使锚杆抗拉强度达 680 MPa,抗腐蚀率降至 2.3%,瓦斯封堵率超 95%;设计“钻孔—清孔—注浆—锚固—密封—监测”一体化施工流程,优化钻孔直径、注浆压力等关键参数,构建“开挖—支护—瓦斯封堵”协同机制;在红星隧道应用验证表明,该技术显著提升围岩稳定性与瓦斯封堵效果,降低施工风险与成本。该研究实现了复合地质下 FRP 锚杆“力学强化—抗腐蚀—瓦斯封堵”一体化提升,创新了支护与瓦斯封堵协同施工模式,为复合地质隧道施工提供了可靠技术方案。未来可进一步拓展改性 FRP 锚杆在高瓦斯、强腐蚀等更复杂地质中的应用研究,优化施工设备智能化水平,推动技术成果规模化推广。

参考文献:

- [1] 刘强.高瓦斯地层公路隧道瓦斯运移扩散特征及通风优化措施研究[J].市政技术,2025,43(12):55-64.
- [2] 陈宏源.瓦斯隧道钻爆施工关键技术分析[J].交通科技与管理,2025,06(23):77-79.
- [3] 谢天.冻融循环作用下预应力锚固结构疲劳损伤研究[D].武汉:武汉轻工大学,2025.
- [4] 谢天,李聪,张新宙,等.不同类型锚杆冻融效应与损伤机制分析[J].西部探矿工程,2025,37(04):5-7.
- [5] 陈健,杨公标,王志奎,等.纤维增强复合材料在大直径盾构隧道工程中的研究与应用[J].工业建筑,2024,54(06):54-60.