

隧道涌水段岩面快速堵水施工技术研究

沈天建

云南交投集团公路建设有限公司 云南 昆明 650200

【摘要】：山岭隧道施工中，富水破碎围岩段涌水、突泥病害频发，传统注浆堵水、普通湿喷混凝土支护工艺存在凝结滞后、抗冲蚀能力差、堵水失效复发、施工效率低下等问题，极易引发隧道塌方、支护开裂等安全隐患。针对上述工程痛点，本文依托宣威至会泽高速公路老房子隧道突泥涌水处置工程，提出一种“引流减压+双组分速凝改性+管路优化+分层挂网喷射”一体化快速堵水施工技术。该技术通过改装湿喷设备实现混凝土、速凝剂、水玻璃三物料终端均质混合，结合三级涌水工况差异化配比设计，可实现5~15s分级快速凝结，有效抵御不同强度水流冲刷。工程实践表明，该技术成型质量稳定、堵水效果持久、施工安全系数高，大幅降低支护返工率与工程成本，有效解决了富水隧道涌水段喷射混凝土溃散、支护失稳等难题，可为同类地下工程富水不良地质段施工提供技术参考。

【关键词】：山岭隧道；富水围岩；涌水病害；快速堵水；喷射混凝土；施工技术

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.050

1 引言

我国西南山区地形地貌复杂、地质构造发育，高速公路隧道多穿越断层破碎带、节理裂隙密集带及地下水富集区域，涌水、突泥是隧道施工中最常见的不良地质病害。地下水的持续渗流与冲刷会显著弱化围岩物理力学性能，降低岩体自稳能力，干扰初期支护成型，极易诱发掉块、塌方、支护结构开裂失稳等安全事故，严重制约隧道工程的施工质量、进度与施工安全。随着西南地区高速公路路网持续纵深建设，隧道埋深不断增加，富水破碎围岩施工段落占比逐年提升，传统支护工艺的局限性愈发凸显。

当前隧道涌水段主流施工工艺以“前置注浆堵水+常规湿喷支护”为主，但实际工程应用中存在诸多短板。传统注浆工艺工序繁琐、施工周期长，对突发性股状涌水、大面积裂隙散水处置针对性不足，堵水不彻底、后期渗水复发问题频发；普通湿喷混凝土凝结速度慢，在持续水流冲刷作用下，未固结混凝土易出现溃散、脱落、鼓胀等病害，导致初喷支护成型质量差、隧道超挖扩大，不仅造成原材料浪费、施工成本增加，还会降低混凝土与围岩的粘结性能，破坏初期支护整体受力体系，为隧道长期运营埋下安全隐患。此外，传统速凝剂腐蚀性较强，涌水淋漓易造成作业人员职业伤害，作业环境差、施工效率低，难以满足标准化施工要求。

宣威至会泽高速公路为滇东北关键交通枢纽工程，沿线围岩破碎、水文条件复杂，其中老房子隧道进口左幅ZK53+015掌子面突发大规模突泥涌水灾害，水流裹挟泥砂持续涌出，经洞渣反压回填临时止水后，永久支护施工面临极大技术难题，常规施工工艺无法适配现场复杂涌水工况。依托该实际工程案例，项目团队通过大量室内配比试验、设备改装优化、现场工艺迭代，研发出一套适配多工况涌水段的快速堵水支护施工技术。本文系统阐述该技术的技术原理、施工流程、关键参数及质量控制体系，通过工程应用效果分析验证其技术优势与推广

价值，为同类富水隧道病害处置与支护施工提供理论与实践支撑。

2 技术核心特点

本技术针对传统涌水段支护工艺缺陷，从材料改性、设备优化、工艺重构、工况适配四个维度完成技术升级，形成适配性强、成型质量优、安全高效、耐久性好的一体化施工技术体系，核心特点如下。

2.1 双组分改性配比，凝结速度分级可控

摒弃传统单一速凝剂改性技术，采用高性能聚羧酸液体速凝剂与工业级水玻璃双组分复合改性方案，解决单一外加剂促凝效果不足、混凝土后期强度衰减的行业问题。基于现场涌水流速差异，划分2000mL/s、5000mL/s、10000mL/s三级工况，对应设置15s、10s、5s差异化凝结参数，可在水流冲刷破坏前完成混凝土胶凝固化，从根源杜绝混凝土溃散、脱落病害。同时可根据现场温度、涌水量动态微调外加剂掺量，在保障快速止水效果的前提下，有效保留混凝土后期力学性能，保障支护结构长期稳定。

2.2 原材料精细化管控，结构抗冲蚀性能优异

从原材料源头优化混凝土综合性能，优选42.5级早强型硅酸盐水泥，提升混凝土早期强度与固结速度；严格管控粗细骨料级配、含泥量与含水率，将细骨料含泥量控制在2%以内，骨料含水率稳定维持在5%~7%，保障混凝土和易性与凝结稳定性。通过全维度原材料质量管控，大幅提升改性喷射混凝土的密实度、粘结强度与抗冲蚀、抗开裂能力，使支护结构可持续抵御围岩变形与渗水侵蚀，提升结构整体耐久性。

2.3 专用设备改装优化，物料混合均匀度高

针对传统湿喷设备外加剂混合不均、反应滞后、富水工况适配性差的问题，对湿喷机械手进行专项管路改装，新增独立液态外加剂泵送管路，构建混凝土、速凝剂、水玻璃三通合一

输送结构，将物料混合节点精准设置在喷枪口前端 1m 处。实现固态混凝土混合料与液态外加剂独立输送、终端瞬时均质融合，避免外加剂提前失效、局部凝结不均等质量缺陷，确保混合料喷射后瞬时固化，大幅提升涌水岩面混凝土附着成型质量。

2.4 闭环施工工艺，安全质量双重可控

构建“引流减压控水+钢筋网加固+分层精准喷射+标准化养护”闭环施工工艺。前期通过定点引流、盲沟集水弱化水流干扰；中期通过挂网加固提升混凝土整体抗变形能力；分层喷射工艺有效释放凝结应力，杜绝空鼓、脱落问题；后期标准化养护保障强度稳步增长。整套工序衔接紧凑、管控标准清晰，适配裂隙渗水、股状涌水、小型突泥等多种不良工况，同时改善作业环境、降低职业安全风险，综合施工效益显著。

3 适用范围

本技术适配各类地下工程富水不良地质段快速堵水与初期支护施工，主要适用场景包括高速公路山岭隧道、铁路隧道、市政地下隧道等地下水富集、围岩破碎、断层发育、节理裂隙密集的施工段落，尤其适用于岩面大面积裂隙渗水、持续性股状涌水、轻微突泥涌水等病害工况。同时，该技术既可应用于新建隧道不良地质段支护施工，也可用于既有隧道渗水病害整治、初期支护补强加固工程，技术通用性强、工程适配范围广，具备极高的推广应用价值。

4 工艺原理

本技术遵循“先控水减压、再快速固结、后加固成型、长效稳定”的综合治理理念，通过水文干预、材料改性、物理加固三重技术协同，实现涌水岩面高效堵水与稳定支护。

控水减压阶段摒弃传统被动封堵模式，采用主动引流疏导技术差异化处置涌水病害。针对大面积裂隙散水，布设密集排水孔疏导渗水；针对局部集中股状涌水，采用 PVC 引流管定点导流、开挖小型盲沟集水排水，将无序涌水有序导入隧道拱脚排水系统，大幅降低作业面涌水量与水流流速，弱化水流冲刷对混凝土凝结成型的干扰，为喷射作业创造稳定施工条件。

快速固结阶段依托双组分材料改性与设备管路优化实现瞬时止水。水玻璃中的硅酸钠可与水泥水化生成的氢氧化钙快速反应，生成不溶性硅酸凝胶，高效填充围岩裂隙与混凝土内部孔隙，实现快速止水；高性能聚羧酸速凝剂可大幅缩短水泥水化凝结周期。双重材料协同作用，配合终端均质混合的设备优势，使混凝土混合料在数秒内完成胶凝、硬化、成型，彻底解决涌水冲刷导致的混凝土溃散问题。

加固成型阶段通过铺设 A8 钢筋网片提升混凝土抗拉、抗冲蚀性能，结合分层喷射工艺，使各层混凝土紧密粘结、协同受力，有效分散围岩应力与水流胀力，避免结构局部开裂、脱落，最终实现隧道涌水段快速堵水、支护稳定、长效防渗的施

工目标。

5 施工工艺流程及关键操作要点

5.1 整体工艺流程

结合现场施工迭代优化，形成标准化闭环施工流程：施工准备→喷混配比试验优化→湿喷机设备改装→围岩表面预处理→钢筋网片铺设→分层喷射施工→常态化养护管理，全流程实现标准化、精细化、可控化施工。

5.2 关键操作要点

5.2.1 施工准备

施工准备涵盖原材料管控、骨料检测与现场勘查筹备。原材料选用 42.5 级早强型普通硅酸盐水泥、低腐蚀高性能聚羧酸速凝剂、高活性工业级水玻璃，所有材料需具备出厂合格证与检测报告，进场后抽样复检，不合格材料严禁使用。骨料严格执行规范标准，5~15mm 碎石质地坚硬、无风化杂质，中粗砂细度模数控制在 2.3~2.8，含泥量≤2%，含水率稳定在 5%~7%。施工前全面勘查掌子面涌水分布、水量及流速，清理作业面浮石、危石，加固松动岩体，完成设备调试与全员技术、安全交底，保障施工有序开展。

5.2.2 喷混配比分级优化

基于室内试验与现场试配，确定最优施工配比：水玻璃浓度控制在 30°~50°Be'，水泥浆与水玻璃体积比 0.3:1~1:1，结合三级涌水工况制定差异化配比方案。工况一（涌水流速≤2000mL/s）：每立方米混凝土掺水泥 443kg、砂 942kg、碎石 770kg、水 195kg、外加剂 4.87kg、速凝剂 22.15kg、水玻璃 8.86kg，15s 快速凝结；工况二（涌水流速≤5000mL/s）：水玻璃掺量提升至 22.15kg，10s 快速凝结；工况三（涌水流速≤10000mL/s）：水玻璃掺量提升至 35.44kg，5s 超快速凝结。所有配比均通过力学性能试验验证，施工中按需动态微调。

5.2.3 湿喷机专项改装

对 GHP2516C-II 型湿喷机械手进行管路升级，新增独立液态外加剂泵送管路，构建混凝土、速凝剂、水玻璃三通集成输送系统，物料混合点设置于喷枪口前端 1m 处。该结构可实现物料独立输送、终端瞬时均质混合，杜绝外加剂提前反应失效，保障混合料喷出后快速固化，适配高强度涌水岩面施工。

5.2.4 钢筋网片铺设

涌水引流稳压完成后，铺设 A8 光圆钢筋网片，钢筋抗拉强度≥235MPa。铺设前修整岩面凹凸部位，保证网片紧贴围岩，规范控制网片搭接长度，采用锚固筋均匀固定，杜绝悬空、松动、褶皱。钢筋网片可有效约束混凝土结构，分散施工应力与水流胀力，提升支护结构整体性与抗开裂、抗冲蚀能力。

5.2.5 岩面预处理

彻底清除围岩表面浮渣、淤泥、积水泥垢，平整凹凸岩面。

差异化处置各类涌水病害：裂隙散水采用密集排水孔疏导，集中股状涌水采用PVC管定点引流，低洼区域开挖盲沟集水排水。严格控制分层喷射间隔时间为10min，保障层间粘结强度，避免分层空鼓、脱落。

5.2.6 分层喷射施工

采用自下而上、螺旋推进、一圈压半圈的分层喷射工艺。首层喷射厚度2~3cm，快速封闭表层裂隙、阻断浅层渗水；首层初凝后逐层加厚喷射至设计厚度。施工风压稳定控制在0.4~0.8MPa，喷嘴垂直于岩面匀速移动，严控喷射距离，最大限度降低混凝土回弹量，保障支护厚度均匀、表面平整密实。

5.2.7 标准化养护管理

混凝土终凝2h后开展雾化喷水养护，养护周期不少于7d。安排专人动态调整喷水频率，保持混凝土表面持续湿润，严禁大水直冲与局部积水，防止表层砂浆脱落、收缩开裂。养护期间定期巡查结构表面，及时处置细微缺陷，养护完成后全面检测支护厚度、密实度与平整度，确保施工质量达标。

6 材料与设备配置

6.1 主要施工材料

本技术所用材料包含支护主材、改性外加剂、钢筋型材及辅助管材，所有材料进场复检合格后方可投入使用，主要施工材料参数如表1所示。

表1 主要施工材料参数

序号	材料名称	规格型号	单位	用量	进场方式
1	喷射混凝土	C25	m³	500	分批进场
2	水玻璃	工业级硅酸钠	t	30	分批进场
3	钢筋网片	A8	t	5	按需进场
4	中空系统锚杆	C25	m	2000	按需进场
5	钢拱架	I20	t	50	按需进场
6	拱架连接筋	C22	t	10	按需进场
7	各类支护小导管	A50	m	5000	按需进场

6.2 主要施工设备

根据全工序施工需求，配套配置标准化施工设备，所有设备进场前完成检修调试，保障连续稳定施工，主要施工设备配置如表2所示。

表2 主要施工设备配置

序号	设备名称	型号规格	数量	功率	用途
----	------	------	----	----	----

1	挖掘机	PC240	2台	240kW	开挖清渣
2	手风钻	YT-28	20台	/	钻孔作业
3	湿喷机械手	GHP2516C-II	1台	158kW	改性喷混作业
4	支护作业平台	定制款	1个	/	高空支护作业
5	侧卸装载机	ZLC50	1台	162kW	装渣转运
6	自卸汽车	通用型	6辆	180kW	渣土运输
7	混凝土罐车	10m³	3辆	85kW	混凝土运输
8	注浆泵	GLZ-5	1台	3kW	注浆加固
9	发电机	300KW 油动	1台	300kW	应急供电

（注：续表2）

7 质量控制体系

7.1 质量控制标准

本技术施工全过程严格遵循国家及行业现行规范标准，主要执行规范包括《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》（GB50086-2015）、《水利水电工程锚喷支护技术规范》（SL377-2007）、《水工建筑物地下开挖工程施工规范》（SL378-2007），所有施工工序、材料性能、结构指标均对标规范要求，实现质量可控、可追溯。

7.2 全过程质量保障措施

7.2.1 原材料质量管控

建立“进场验收、抽样复检、台账管理、不合格清退”全流程管控机制。所有原材料需提供完整出厂合格证与性能检测报告，进场后按规范抽样送检。外加剂使用前完成水泥相容性与净浆凝结试验，严控初凝≤5min、终凝≤10min，杜绝腐蚀性、不合格材料投入施工，从源头把控工程质量。

7.2.2 骨料与配合比管控

严格把控骨料级配与含水率，杜绝软弱颗粒、杂质混入。湿喷混凝土严格执行最优配比参数，水泥砂石质量比1.0:3.5~1.0:4.0，砂率50%~60%，水灰比0.42~0.50。配比方案经试验验证、监理审批后方可使用，严禁随意更改参数，根据工况微量动态调整，保障混凝土性能稳定。

7.2.3 拌和与运输管控

采用全自动计量设备拌和，水泥、速凝剂计量偏差≤±2%，砂石料计量偏差≤±3%，保障物料混合均质。混凝土采用密闭

罐车运输,做好防雨、防渗漏、防污染措施,严控拌和至喷射间隔时间,避免混合料初凝失效、性能衰减。

7.2.4 现场施工管控

施工前彻底清理作业面、完善引流排水系统,消除积水与集中涌水干扰。喷射施工严格控制风压、喷射距离、行走速度,保障支护厚度均匀、密实度达标。分层施工严控间隔时间,养护阶段全程动态管控,杜绝开裂、脱落等质量缺陷,完工后开展全方位质量检测。

8 工程应用效果分析

8.1 质量效果

本技术在老房子隧道涌水病害处置工程中应用效果良好,改性喷射混凝土可在高强度水流冲刷下快速固化成型,支护表面平整密实,无溃散、空鼓、开裂、渗水复发等病害。经现场检测,混凝土粘结强度、抗压强度、密实度均满足设计及规范要求,支护结构整体性与稳定性显著优于传统工艺,彻底解决了富水隧道涌水段支护成型质量差的行业难题。

8.2 安全与工期效益

技术优化后,摒弃了高腐蚀施工模式,大幅改善作业环境,降低一线人员职业伤害风险。主动引流控水+快速固结支护的施工模式,有效杜绝了涌水诱发的塌方、掉块安全隐患,施工安全系数大幅提升。同时简化了传统注浆堵水的繁琐工序,单

段涌水段支护施工效率提升40%以上,有效挽回病害处置造成的工期延误,保障项目整体施工进度。

8.3 经济效益

本技术有效降低了混凝土回弹率与原材料损耗,彻底杜绝了支护返工、病害返修等问题,大幅节约水泥、砂石、外加剂等施工材料。同时设备改装成本低、可重复利用,工序精简、人工与设备台班消耗减少,相较于传统施工工艺,单段富水涌水段施工综合成本降低25%左右,具备显著的经济效益。

9 结论与展望

针对山区隧道富水破碎围岩涌水段施工难题,本文提出的双组分改性快速堵水施工技术,通过材料配比分级优化、施工设备专项改装、施工工艺闭环升级,实现了不同工况涌水段的快速止水与稳定支护。工程实践证明,该技术凝结速度可控、抗冲刷能力强、成型质量稳定、安全高效、经济性好,有效解决了传统工艺堵水不彻底、支护易失效、施工效率低、安全隐患多等痛点。

该技术适配多种地下工程富水不良地质工况,技术成熟、可复制性强,能够为西南山区复杂地质隧道施工提供重要技术支撑。后续可结合不同地区、不同水文地质条件,进一步优化外加剂配比体系与智能化喷射施工参数,推动富水隧道堵水支护施工向智能化、标准化、绿色化方向发展,为地下工程不良地质施工技术迭代提供更多实践参考。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部.GB 50086-2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [2] 水利部.SL 377-2007 水利水电工程锚喷支护技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [3] 水利部.SL 378-2007 水工建筑物地下开挖工程施工规范[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [4] 王梦恕.隧道工程施工技术与实践[M].北京:人民交通出版社,2018.
- [5] 张顶立.隧道围岩稳定性控制与支护技术研究[J].土木工程学报,2020,53(08):112-120.
- [6] 李术才,王汉鹏.富水破碎围岩隧道涌水灾害防控技术[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2891-2900.