

陈亮, 孙晨, 王雷雨, 等. 引水隧洞超前预处理灌浆材料研究与应用进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1181-1188.
CHEN L, SUN C, WANG L Y, et al. Research and application progress of grouting materials for advance pretreatment of headrace tunnel[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1181-1188. (in Chinese)

引水隧洞超前预处理灌浆材料研究与应用进展

陈亮^{1,2}, 孙晨¹, 王雷雨¹, 邵晓妹^{1,2,3}, 胡靖宇⁴

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 武汉长江科创科技发展有限公司, 武汉 430010;
3. 华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室, 武汉 430074;
4. 中国南水北调集团中线有限公司河南分公司, 郑州 450000)

摘要: 采用灌浆材料对引水隧洞施工中不良地质体进行超前预处理, 是突涌水等地质灾害预防和治理的有效手段, 然而在高压大流量动水条件下, 超前预处理灌浆材料无法满足现场需求, 迫切需要提高其动水工作性能。作为常用的超前预处理灌浆材料, 水泥基多从抗分散能力、力学性能和可灌性等方面进行改进, 如在水泥中添加抗分散剂和矿物掺和料, 研发新型水泥等; 聚氨酯材料多从提高其动水留存率和材料力学性能与微观结构演变关系等方面改进; 环氧灌浆材料的研究着重于提高其对低渗性岩体的浸润渗透性, 近年来超吸水聚合物也引起研究者的兴趣。本文综述近年来引水隧洞施工中针对突涌水处理常用的超前灌浆材料最新研究成果, 从特种水泥灌浆材料的开发、遇水发泡聚氨酯力学强度的提升、在动水条件下环氧浆液的固化等方面展望引水隧洞超前预处理灌浆材料未来的发展方向。

关键词: 引水隧洞; 不良地质体; 突涌水地质灾害; 灌浆材料; 超前预处理

中图分类号: TV44 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0117

引水隧洞施工常穿越深山峡谷地带, 不可避免地遭遇到不良地质体, 在工程扰动力和致灾构造的共同作用下, 易引发涌水突泥等地质灾害, 严重威胁隧洞施工安全, 造成人员伤亡和财产损失^[1-2]。采用灌浆材料对不良地质体进行超前预处理是预防和治理突涌水等地质灾害的有效手段之一。然而, 在高压、大流量和急流速动水条件下, 材料易被水流冲刷、稀释和分散, 浆液凝结困难, 固结体的力学强度较低, 在水压和水溶蚀等长期作用下易发生二次灾害。鉴于这类材料在使用中存在的问题, 引水隧洞超前预处理灌浆材料的性能提升已引起国内外学术界、工程界的普遍关注。本文超前预处理常用的水泥基、聚氨酯和环氧树脂灌浆材料以及近年来开发的超吸水聚合物的研究进展, 分析突涌水灌浆处理相关工程案例, 并在此基础上展望超前预处理灌浆材料未来的研究方向。

1 引水隧洞超前预处理灌浆材料研究进展

1.1 水泥基灌浆材料

水泥基灌浆材料具有成本低、无污染、耐久性好等优点, 是最常用的灌浆材料。引水隧洞超前预处理灌浆施工中, 面对高压、大流量和急流速动水环境, 普通硅酸盐水泥存在易被动水冲刷稀释、浆液凝结困难、结石体力学强度低的缺陷, 不利于工程安全。为提高动水条件下水泥基灌浆材料的工作性能, 科研工作者通过在配方中添加抗分散剂以提升浆液抗冲刷能力、添加矿物掺和料和纳米粒子等以优化结石体内部微观结构、通过研发磷酸镁水泥、掺入速凝剂等以达到速凝快硬效果。

聚丙烯酸、纤维素醚和多糖等常用于提高水泥浆液抗分散能力。Cui等^[3]分别将聚丙烯酰胺和纤维素醚组合、多糖与膨润土组合制备出2种抗冲刷

收稿日期: 2024-03-03 修回日期: 2024-10-08 网络出版时间: 2024-10-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241010.1619.004>

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2023325/TG2); 水利部重大科技项目(SKS-2022106); 水利技术示范项目(SF-202301); 南方电网储能股份有限公司科研项目(0295002024030301GC00010)

作者简介: 陈亮(1981—), 男, 湖北保康人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水工新材料开发与应用研究。E-mail: chenliang@mail.crsri.cn

水泥基灌浆材料,开展灌浆模拟试验,研究水泥浆液在不同流速动水条件下的工作性能,分析认为聚丙烯酰胺与纤维素醚试验组适用于大流速涌水环境,多糖与膨润土试验组适用于小流速涌水环境。除常用抗分散剂外,超吸水聚合物^[4]、可再分散乳胶粉^[5-6]、高性能多功能添加剂^[7]、膨润土和黏土等^[8-10]掺入水泥浆液亦可有效提高动水条件下浆液的抗冲刷性能。

针对水泥结石体内部微孔隙、裂隙和界面过渡区等严重影响结石体力学强度和抗渗性能,科研工作者^[11-12]研究发现在普通水泥和超细水泥浆液中掺入纳米 SiO₂,可有效填充材料内部孔隙和微裂隙,达到结石体早期力学强度升高、后期体积收缩率降低的效果。不同学者^[13-16]系统研究了水泥浆液中掺入碳纤维、碳纳米管、氧化石墨烯、纳米 Al₂O₃ 和纳米 SiO₂ 后的材料性能,设计裂隙型动水灌浆装置^[14]并开展裂隙堵水试验研究,发现掺入合适的纳米粒子可提升水泥浆液动水条件下工作性能。此外,科研人员^[17-20]还发现粉煤灰和硅灰等掺入水泥浆液可在水泥水化过程中起到填充、成核或火山灰效应,优化界面过渡区,降低结石体孔隙率,达到提升力学强度和抗渗性能的目的。

为提高水泥浆快速封堵突涌水的能力,可在浆液中掺入速凝剂以加快水泥凝结硬化速度。水玻璃是水泥基中应用最广泛的速凝剂,具有价格低、绿色环保等优点。对于水泥-水玻璃这种速凝早强灌浆材料,其结石体后期易发生体积收缩,动水冲刷致使结石体抗压强度和抗渗性降低,耐久性不佳,影响长期堵水效果。为使水泥-水玻璃浆液更好地应用于不良地质体超前预处理,不同学者在水泥-水玻璃浆液中掺入黄原胶和瓜尔豆胶,开展抗分散性能试验,发现水溶性植物胶可提高浆液动水抗分散性能^[21-24]。科研工作者^[25-28]还研究了粉煤灰、偏高岭土、膨润土等对水泥-水玻璃结石体力学强度的影响,分析认为膨润土无法提高结石体的后期强度,掺入粉煤灰和偏高岭土有利于结石体强度的增长。Lin 等^[29]在水泥-水玻璃浆液中掺入矿渣粉和硫铝酸盐水泥,发现钙矾石等水化产物可填充结石体内部孔隙,有助于减少流动水冲刷对材料强度和抗渗性能的不利影响。

除此以外,Zhang 等^[30]研究了磷酸盐水泥作为涌水封堵材料的可行性,发现以 KH₂PO₄ 和 MgO 等为原料制备的磷酸盐水泥浆液的水灰比达到 1.0 时,

浆液仍能速凝快硬,但过快的浆液凝胶速度以及结石体中 Mg(OH)₂ 的生成将影响灌浆处理效果,故还需进一步调控浆液凝胶时间,降低 MgO 对结石体力学强度的潜在负面影响。

水泥基灌浆材料是最基本、应用最早且最广泛的超前预处理材料,目前的研究主要通过掺入抗分散剂、速凝剂、矿物掺和料和纳米材料等方式,提高普通水泥灌浆材料综合性能。基于涌水突泥地质灾害治理的特性需求,未来应充分考虑现场环境条件和不同水力梯度条件,研发以硫酸盐水泥等为胶凝材料的特种水泥灌浆材料。在开展模拟灌浆试验^[31-32]的基础上,缩短研发周期,开发成本经济、动水条件下灌浆工作性能好、固结体强度高、耐久性优异的超前预处理水泥基灌浆材料。

1.2 聚氨酯灌浆材料

聚氨酯灌浆材料分为水溶性和油溶性 2 大类,多用于渗漏水处理中^[33-34]。聚氨酯材料作为化学灌浆材料的一种,其渗透性较好,遇水发泡后堵水效果明显,也存在着成本高、发泡后强度低、受水流冲刷易分散等缺点。为进一步推动聚氨酯在突涌水治理工作中的应用,近年来科研工作者采用在浆液中掺入抗分散剂以提高其抗冲刷性能、开展材料力学性能与微观结构关系研究以及基于材料密度建立强度预测模型、通过在分子链中引入富含无机 Si-O 键的水玻璃以获得低成本的改性聚氨酯。

水溶性聚氨酯的反应机理是遇水发生化学反应产生体积膨胀,实现封堵效果,但动水冲刷会影响其浆液凝胶过程。为解决此问题,Liu 等^[35]将羟丙基甲基纤维素 (HPMC) 掺入水溶性聚氨酯,将改性前后的聚氨酯浆液分别进行动水灌浆试验,发现 HPMC 有助于提高聚氨酯的抗分散能力,相比于未改性聚氨酯,改性聚氨酯凝胶体内部孔隙减少,密实度提高。

研究^[36-40]表明聚氨酯密度对材料弹塑性或脆性影响较大,为此科研工作者研究了不同密度聚氨酯的力学强度与微观结构的关系。高翔等^[41-42]、Wei 等^[43]通过对 0.08~0.50 g/cm³ 区间的聚氨酯开展单轴/循环压缩测试和微观分析,在单轴压缩条件下,高密度聚氨酯的抗压强度是低密度聚氨酯的 10 倍以上;在循环压缩条件下,相比于低密度聚氨酯,高密度聚氨酯更易发生疲劳破坏。微观分析发现随着材料密度增大,泡孔会由多边形转变为圆球形,导致泡孔间接触面积减小,内部孔隙和可压缩变形

空间减小,由此解释不同密度聚氨酯从弹塑性到脆性的演变机理。为提高聚氨酯强度可预测能力,近年来关于通过材料密度建立数学模型以拟合材料强度已有相关研究^[44-47]。

聚氨酯灌浆材料在引水隧洞涌水封堵处理中具有显著优势,但成本较高。科研工作者^[48-49]通过将水玻璃中的无机硅氧键引入聚氨酯,开发出的水玻璃改性聚氨酯灌浆材料成本低,综合性能较好。为优化原材料配比以更好地指导工程应用,王雷雨等^[50]研究了多苯基多亚甲基多异氰酸酯(PAPI)、水玻璃和催化剂添加量对材料抗压强度的影响,分析表明PAPI、水玻璃和催化剂添加量对试样强度影响大小顺序为水玻璃>催化剂>PAPI;当 $m(\text{PAPI}) : m(\text{水玻璃}) : m(\text{催化剂}) = 20 : 20 : 1$ 时,纯固化体抗压强度达到 49.5 MPa,结石体抗压强度达到 16.5 MPa。Zhang 等^[51]研究了胺类催化剂和有机锡类催化剂对浆液凝结时间和固结体压缩强度的影响,认为相比于使用单一催化剂,采用组合催化剂制备的改性聚氨酯的流动性和力学性能更好,但这些催化剂对浆液的环保性能有不利影响。

未来聚氨酯灌浆材料应朝着低成本化方向,研发发泡体强度高、水流冲刷不分散的材料。一是采用价格低廉的无机材料如水玻璃等对聚氨酯改性,二是综合利用水泥价格低廉和结石体强度较高、聚氨酯遇水反应发泡等优势,制备水泥-聚氨酯复合灌浆材料,降低使用成本,提高复合灌浆材料处理涌水突泥的效果。

1.3 环氧树脂灌浆材料

环氧树脂灌浆材料主要由环氧树脂主剂和固化剂组成,国外自二战后即开始使用,广泛应用于地基补强加固和混凝土裂缝修补工程中,国外环氧树脂灌浆材料因稀释剂少、黏度大,加之成本较高,限制了其使用。我国自 20 世纪 50 年代后期,针对三峡工程建设地基加固和混凝土裂缝处理的需要,经国家科学技术委员会批准立项,将环氧树脂灌浆材料用于三峡工程固结灌浆作为一个重要的研究课题。几十年来,随着化学工业和水利水电事业的发展,生产的环氧树脂灌浆材料具有黏度低、渗透性好,可在低温、有水潮湿条件下固化。国内从事环氧树脂灌浆材料研究和应用的单位主要有:长江水利委员会长江科学院、中国科学院广州化学研究所、中国水利水电科学研究院、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司和中国水电基础局有限

公司等。

在高水头动水条件下对低渗性不良地质体如断层破碎带、泥质夹层等的处理,是环氧树脂灌浆材料研究与应用的难题,在动水条件下主要存在浆液胶结难度大、扩散规律复杂和渗透能力不足等难题^[52]。近年来科研工作者主要研究如何提高环氧在不良地质体中的渗透性。

通常认为浆液黏度直接影响其渗透性,为降低环氧浆液的黏度,Wang 等^[53]分别将丙酮稀释剂和两种醚类反应型稀释剂组合,研究组合稀释剂对浆液的黏度、固化物力学性能的影响,发现丙酮稀释剂可降低环氧浆液的黏度,反应型稀释剂中柔性醚键的引入有利于提高固化物的韧性。进一步的研究^[54-55]主要从环氧树脂化学灌浆材料的黏度、表面张力和接触角随时间的变化规律出发,基于灌浆理论研究了环氧浆液渗透性的时变效应。在此基础上,魏涛等^[56]研究了表面活性剂对 CW 环氧树脂灌浆材料的渗透性和理化性能的影响,分析认为表面活性剂对浆液黏度和固化物的力学强度等无明显影响,有助于降低浆液的表面张力和接触角,提高浆液在黏土地质中的渗透性。在工程应用方面,环氧灌浆材料在溪洛渡水电站层间层内错动带和向家坝水电站挤压破碎带等高水头动水条件下不良地质体防渗加固处理中的应用取得了较好的效果^[52,57]。

环氧树脂材料成本高、固化时间相对缓慢的缺点,限制了其在引水隧洞超前预处理灌浆工程中的应用。今后应着力解决环氧树脂成本高的问题,充分发挥环氧树脂灌浆材料对低渗透性岩体的渗透性能好、固结体强度高优点,研发新型固化剂,突破有水条件下快速固化等技术瓶颈,解决引水隧洞不良地质洞段低渗透性岩体强度偏低的问题。

1.4 超吸水聚合物灌浆材料

水溶性聚氨酯因遇水发生化学反应产生体积膨胀而在涌水治理中得以较多应用,但浆液凝胶仍受水流冲刷影响。基于此,科研工作者开发出物理吸附涌水的超吸水聚合物。Zhou 等^[58]通过理论分析和试验测试,研究了某超吸水聚合物的堵水机理,发现相比于水泥基和常用的化学灌浆材料,超吸水聚合物受动水稀释和冲刷的影响较小,颗粒通过物理吸附涌水产生体积膨胀,发挥填充裂隙和封堵涌水的效果,适合封堵高压急速涌水。山东大学研究团队^[59-60]采用管道突涌水模拟装置研究了某超吸水聚合物的堵水能力。基于当前试验条件,初步认为

200 和 800 g 的超吸水聚合物分别可以封堵 0.3 和 0.6 m/s 的管道涌水。

2 引水隧洞超前预处理灌浆材料应用情况

地下工程突涌水治理案例众多,在此仅针对引水隧洞突涌水治理的相关案例开展分析,通过对锦屏二级水电站、小浪底引黄工程、引汉济渭工程等引水隧洞施工过程中遭遇的突涌水工况、主要技术难题、处理方案和灌浆效果开展分析,旨在促使超前预处理灌浆材料和技术能更好地应用于突涌水治理工程。

2.1 锦屏 II 级水电站水工隧洞突涌水处理

锦屏 II 级水电站位于雅砻江干流锦屏大河湾上,地下洞室群由引水隧洞和辅助洞构成,隧洞埋深一般为 1 500~2 000 m,最大达 2 525 m。5 km 长勘探试验洞最大外水压力实测值近 10 MPa,洞室群施工期间遭遇多次高压大流量突涌水,隧洞群建造综合难度极大。在施工过程中,面对高压突发涌水点,传统浇筑止水墙等工序十分复杂,经过一系列开创性研究和涌水防治处理实践,采用分流减压封堵和底板沉箱封堵等突涌水治理成套技术,结合速凝灌浆材料和模袋灌浆成功完成了突涌水封堵^[61]。

2.2 小浪底引黄工程涌水粉细砂层处理

小浪底引黄工程某引水隧洞施工期间遭遇不良地质体,砂层颗粒松散,土体破碎,在涌水条件下形成泥沙流堆积于掌子面。施工人员采用普通硅酸盐水泥灌浆材料对隧洞开挖轮廓线周围进行超前水平高压旋喷,单次循环长度为 15 m,开挖长度 10~11 m,预留 4~5 m 作为循环搭接长度,水灰比为 (0.8~1.0) : 1,灌浆压力 45~50 MPa,再利用水泥-水玻璃灌浆材料对掌子面进行超前帷幕灌浆,水灰比为 (0.8~1.0) : 1,水泥浆液和水玻璃体积比为 1 : 1,注浆压力 1~2 MPa,有效治理了该洞段粉细砂层涌水^[62]。

2.3 引汉济渭工程高压富水裂隙处理

引汉济渭工程秦岭引水隧洞岭南某工程区域地表水和地下水发育,施工过程中遭遇高压富水破碎带,多处掘进段涌水量达 46 000 m³/d,超过设计最大涌水量(12 226 m³/d)。根据隧洞出水点情况,科研工作者开展了掺入抗分散剂、聚合物纤维和速凝剂等不同外加剂的特种水泥灌浆材料的性能比选试验。根据普通面状渗水、小股状出水和较大流量主通道涌水等工况,将纯水泥浆和 3 种特种水泥灌浆

料组合,注浆压力控制为裂隙水压力+(1~2 MPa),最终实现了对高压富水裂隙的有效封堵^[63]。

3 引水隧洞超前预处理灌浆材料研究展望

本文综述应用于引水隧洞超前预处理的水泥基、聚氨酯、环氧树脂以及超吸水聚合物等灌浆材料的研究进展,介绍相关典型工程案例。为进一步提高引水隧洞超前预处理灌浆材料的性能,保障国家水网工程建设安全,未来研究可重点关注以下几个方面:

相比于普通硅酸盐水泥,速凝快硬型硫铝酸盐水泥等可快速封堵涌水,未来应进一步通过优化配方设计以研发适应于涌水突泥地质灾害的特种水泥灌浆材料,结合现场环境条件开展多因素耦合灌浆模拟试验,加快研发进度,开发成本经济、高压急流速突涌水工况下灌浆工作性能好、固结体强度高、耐久性优异的超前预处理水泥基灌浆材料。

未来应注重开发低成本、发泡体强度高、抗水流冲刷能力强的聚氨酯灌浆材料,充分考虑水玻璃和水泥等无机材料价格低廉、聚氨酯遇水反应发泡和快速起强的特点,制备低成本、综合效果较好的超前预处理无机-有机复合灌浆材料。

环氧树脂灌浆材料成本高、固化时间相对较长、有水条件下快速固化困难,应用于引水隧洞超前预处理灌浆工程具有一定限制。未来研究应朝着环氧树脂材料大幅降低成本,研发水下环境环氧专用快速固化剂,则其有望成为引水隧洞有水低渗透不良地质洞段超前灌浆处理的重要材料。

超吸水聚合物通过物理吸附涌水发挥止水效果,受水流冲刷影响程度小,未来超吸水聚合物应加强工程应用,深入研究超吸水聚合物在不同突涌水工况下的适应性,充分考虑灌浆材料粒径对膨胀应力和膨胀倍数的影响,优化设计突涌水注浆封堵工艺。

参考文献:

- [1] XUE Y G, KONG F M, LI S C, et al. Water and mud inrush hazard in underground engineering: Genesis, evolution and prevention[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 114: 103987. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103987.
- [2] 李术才,许振浩,黄鑫,等.隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1041-1069. DOI: 10.

- 13722/j.cnki.jrme.2017.1332.
- [3] CUI W, HUANG J Y, SONG H F, et al. Development of two new anti-washout grouting materials using multi-way ANOVA in conjunction with grey relational analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156: 184-198. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.126.
- [4] GUO H D, TANG Z Q, LIU Q, et al. Ultra-stable anti-washout cement grout achieved by super water absorbing villus-like nanocomposite hydrogel[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124035. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124035.
- [5] LIU J Q, LI X F, SAFFARI P, et al. Developing a polypropylene fabric, silica fume, and redispersible emulsion powder cementitious composite for dynamic water environment[J]. *The New Phytologist*, 2018, 11(1): 47. DOI: 10.3390/polym11010047.
- [6] 李小飞, 孙江涛, 陈卫忠, 等. 纤维硅灰水泥石强度与浆液抗冲刷特性 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(9): 3157-3163. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2844.
- [7] SONG B D, PARK B G, CHOI Y, et al. Determining the engineering characteristics of the Hi-FA series of grout materials in an underwater condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 144: 74-85. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.101.
- [8] ZHANG C, FU J Y, YANG J S, et al. Formulation and performance of grouting materials for underwater shield tunnel construction in Karst ground[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 327-338. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.054.
- [9] ZHANG C, YANG J S, FU J Y, et al. A new clay-cement composite grouting material for tunnelling in underwater Karst area[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(7): 1863-1873. DOI: 10.1007/s11771-019-4140-5.
- [10] YANG J S, ZHANG C, FU J Y, et al. Pre-grouting reinforcement of underwater karst area for shield tunneling passing through Xiangjiang River in Changsha, China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 100: 103380. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103380.
- [11] REN J L, ZHAO Z D, XU Y S, et al. High-fluidization, early strength cement grouting material enhanced by nano-SiO₂: formula and mechanisms[J]. *Materials*, 2021, 14(20): 6144. DOI: 10.3390/ma14206144.
- [12] LI W S, SHAIKH F U, WANG L G, et al. Experimental study on shear property and rheological characteristic of superfine cement grouts with nano-SiO₂ addition[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 228: 117046. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117046.
- [13] YANG P, LIU Y H, GAO S W, et al. Experimental investigation on the diffusion of carbon fibre composite grouts in rough fractures with flowing water[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 95: 103146. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103146.
- [14] LIU Y H, YANG P, KU T, et al. Effect of different nanoparticles on the grouting performance of cement-based grouts in dynamic water condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118663. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118663.
- [15] LIU Y H, ZHANG L, YANG P, et al. Experimental investigation on sealing efficiency of CNT composite grouts in inclined fractures with flowing water[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121494. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121494.
- [16] YANG P, LIU Y H, GAO S W, et al. Experiment on sealing efficiency of carbon fiber composite grout under flowing conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 182: 43-51. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.270.
- [17] SHA F, LI H Y, PAN D, et al. Development of steel slag composite grouts for underground engineering [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 2793-2809. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.014.
- [18] LI S C, SHA F, LIU R T, et al. Properties of cement-based grouts with high amounts of ground granulated blast-furnace slag and fly ash[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(11): 4017219. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002083.
- [19] SHA F, LIN C J, LI Z F, et al. Reinforcement simulation of water-rich and broken rock with portland cement-based grout[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 221: 292-300. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.094.
- [20] SHA F, JIN Q, LIU P. Development of effective microfine cement-based grouts (EMCG) for porous and fissured strata[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120775. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120775.
- [21] LI S C, ZHANG J, LI Z F, et al. Investigation and practical application of a new cementitious anti-washout grouting material[J]. *Construction and*

- Building Materials*, 2019, 224: 66-77. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.07.057](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.057).
- [22] QI Y H, LI S C, LI Z F, et al. Hydration effect of sodium silicate on cement slurry doped with xanthan[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 976-985. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.07.327](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.327).
- [23] 李召峰, 高益凡, 张健, 等. 水溶性植物胶改性水泥-水玻璃封堵材料试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(7): 1312-1321. DOI: [10.11779/CJGE202007015](https://doi.org/10.11779/CJGE202007015).
- [24] QI Y H, LI S C, LI Z F, et al. Effect of xanthan on pore structure of cement slurry doped with sodium silicate[J]. *Materials Letters*, 2019, 257: 126736. DOI: [10.1016/j.matlet.2019.126736](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126736).
- [25] SHA F, LI S C, LIU R T, et al. Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 282-291. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.034](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.034).
- [26] ZHOU Y, WANG G H, YUAN Y F. Basic properties and engineering application of bentonite-cement-water glass grouting[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(9): 2742-2750. DOI: [10.1007/s12205-020-1928-7](https://doi.org/10.1007/s12205-020-1928-7).
- [27] ZHANG Y J, WANG S G, ZHANG B, et al. A preliminary investigation of the properties of potassium magnesium phosphate cement-based grouts mixed with fly ash, water glass and bentonite[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237: 117501. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.117501](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117501).
- [28] ZHANG Y J, WANG S, LI L P, et al. A preliminary study of the properties of potassium phosphate magnesium cement-based grouts admixed with metakaolin, sodium silicate and bentonite[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 119893. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119893](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119893).
- [29] LIN R F, YANG L, PAN G M, et al. Properties of composite cement-sodium silicate grout mixed with sulphoaluminate cement and slag powder in flowing water[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 308: 125040. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.125040](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125040).
- [30] ZHANG Y J, WANG J, LI L P, et al. Basic properties and mechanism of high activity phosphate-based slurry for dynamic water blocking: A feasibility research[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 275: 122040. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.122040](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122040).
- [31] BALUCH K, BALUCH S Q, YANG H S, et al. Non-dispersive anti-washout grout design based on geotechnical experimentation for application in subsidence-prone underwater karstic formations[J]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(7): 1587. DOI: [10.3390/ma14071587](https://doi.org/10.3390/ma14071587).
- [32] BALUCH K, KIM J G, KIM J G, et al. Anti-washout grouts for underwater sealing of karst cavities and construction research tendencies[J]. *Explosives & Blasting*, 2020, 38(04): 46-52. DOI: [10.22704/ksee.2020.38.4.046](https://doi.org/10.22704/ksee.2020.38.4.046).
- [33] 王复明, 范永丰, 郭成超. 非水反应类高聚物注浆渗漏水处治工程实践 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(10): 1-11. DOI: [10.11660/slfdx.20181001](https://doi.org/10.11660/slfdx.20181001).
- [34] 聂亚楠, 于福, 叶守杰, 等. 双组分聚氨酯注浆止水加固材料的制备及应用 [J]. *热固性树脂*, 2018, 33(5): 38-41. DOI: [10.13650/j.cnki.rgxs.2018.05.009](https://doi.org/10.13650/j.cnki.rgxs.2018.05.009).
- [35] LIU X F, WANG J G, HUANG K, et al. Experimental study on dynamic water grouting of modified water-soluble polyurethane[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(9): 3897-3906. DOI: [10.1007/s12205-019-0086-2](https://doi.org/10.1007/s12205-019-0086-2).
- [36] 王娟, 方宏远, 余自森, 等. 高聚物碎石混合料单轴受压性能试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(2): 320-326. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9629.2019.02.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2019.02.024).
- [37] 郑勇, 王超杰, 张曦君, 等. 高聚物注浆材料剪切性能试验研究 [J]. *人民黄河*, 2021, 43(10): 139-143. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2021.10.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.10.027).
- [38] 石明生, 于冬梅, 王复明. 高聚物注浆材料的弯曲性能 [J]. *材料科学与工程学报*, 2010, 28(4): 514-517. DOI: [10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2010.04.007](https://doi.org/10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2010.04.007).
- [39] 郑新国, 李书明, 谢永江, 等. 高聚物注浆材料密度与力学行为关系研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(4): 44-47. DOI: [10.3963/j.issn.1671-4431.2014.04.009](https://doi.org/10.3963/j.issn.1671-4431.2014.04.009).
- [40] LIN Z Z, GUO C C, CAO D F, et al. An experimental study on the cutting failure of polymer grouting[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 119582. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119582](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119582).
- [41] 高翔, 黄卫, 魏亚, 等. 聚氨酯高聚物注浆材料抗压强度测试与模拟 [J]. *复合材料学报*, 2017, 34(2): 438-445. DOI: [10.13801/j.cnki.fhclxb.20160413.002](https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160413.002).
- [42] 高翔, 魏亚, 王复明, 等. 聚氨酯注浆材料在循环压

- 缩加载下疲劳性能与微观结构演化 [J]. *复合材料学报*, 2017, 34(3): 550-556. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160426.001.
- [43] WEI Y, WANG F M, GAO X. Microstructure and fatigue performance of polyurethane grout materials under compression[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(9): 4017101. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001954.
- [44] WANG J, LI X, FANG H Y, et al. Statistical characteristics of polymer grouting material microstructure[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8847494. DOI: 10.1155/2020/8847494.
- [45] LIU K, LIANG W, REN F M, et al. The study on compressive mechanical properties of rigid polyurethane grout materials with different densities[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206: 270-278. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.012.
- [46] XU S J, WANG S J, ZHONG Y H, et al. compression characteristics and constitutive model of low-exotherm modified polyurethane grouting materials [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1958473. DOI: 10.1155/2020/1958473.
- [47] LI X X, WAN J C, ZHENG D, et al. Compressive mechanical properties of self-expanding grouting materials with different densities[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 332: 127308. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127308.
- [48] YANG Z P, ZHANG X F, LIU X, et al. Flexible and stretchable polyurethane/waterglass grouting material[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 138: 240-246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.113.
- [49] 单长兵, 刘元雪. 水玻璃改性聚氨酯注浆料的性能研究 [J]. *建筑科学*, 2011, 27(9): 48-51. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2011.09.022.
- [50] 王雷雨, 邵晓妹, 胡靖宇, 等. 水玻璃改性聚氨酯灌浆材料制备与性能研究 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1152-1158. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0113.
- [51] ZHANG Q, HU X M, WU M Y, et al. Effects of different catalysts on the structure and properties of polyurethane/water glass grouting materials[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(27): 46460. DOI: 10.1002/app.46460.
- [52] 汪在芹. 高水头下不良地质体防渗补强技术研究与应用 [J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(5): 1-5. DOI: 10.11988/ckyyb.20180237.
- [53] WANG W Z, ZHAO W Q, ZHANG J J, et al. Epoxy-based grouting materials with super-low viscosities and improved toughness[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267: 121104. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121104.
- [54] WEI T, ZHANG D, WANG Z Q. Study on the viscosity and affinity of epoxy resin chemical grouting material considering time variation[J]. *Materials Science Forum*, 2019, 956: 317-323. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.956.317.
- [55] SU Z H, WANG Z Q, ZHANG D, et al. Study on rheological behavior and surface properties of epoxy resin chemical grouting material considering time variation[J]. *Materials*, 2019, 12(20): 3277. DOI: 10.3390/ma12203277.
- [56] 魏涛, 张健, 张达. 炔属二醇表面活性剂在环氧树脂灌浆材料中的作用 [J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(7): 163-167. DOI: 10.11988/ckyyb.20230240.
- [57] 魏涛, 张健. 水泥环氧复合灌浆技术研究及应用 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(12): 1-5. DOI: 10.11988/ckyyb.20210560.
- [58] ZHOU M M, LI S C, ZHENG Z, et al. Theoretical and experimental study on the rheological properties of WIS grout and the dispersion and sealing mechanism[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(4): 669-684. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.05.005.
- [59] MA C Y, LI S C, LIU R T, et al. Evaluation of a superabsorbent polymer for plugging karst pipe type water inrushes[J]. *Mine Water and the Environment*, 2022, 41(1): 252-264. DOI: 10.1007/s10230-021-00802-1.
- [60] LI S C, MA C Y, LIU R T, et al. Super-absorbent swellable polymer as grouting material for treatment of karst water inrush[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(5): 753-763. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.06.004.
- [61] 张春生, 周垂一, 刘宁. 锦屏二级水电站深埋特大引水隧洞关键技术 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2017, 37(11): 1492-1499. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2017.11.021.
- [62] 张园园. 引水隧洞涌水粉细砂层洞段施工方案比选 [J]. *水科学与工程学报*, 2018(3): 66-69. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2018.03.022.
- [63] 孙振川, 游金虎. 高压富水隧洞硬岩地层径向注浆堵水施工技术及应用 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2017, 37(11): 1455-1461. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2017.11.015.

Research and application progress of grouting materials for advance pretreatment of headrace tunnel

CHEN Liang^{1,2}, SUN Chen¹, WANG Leiyu¹, SHAO Xiaomei^{1,2,3}, HU Jingyu⁴

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Wuhan Changjiang Kechuang Science and Technology Development Limited Company, Wuhan 430010, China; 3. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Henan Branch of China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Most headrace tunnels are in high mountains and valleys with complex hydrological and special geological conditions. During the construction of the headrace tunnel, water inrush often occurs when suffering from unfavorable geological bodies. Pre-grouting is a significant technical means to prevent such occurrence of geological disasters. However, under the condition of high pressure and large flow dynamic water, the pre-treatment grouting materials can not meet the needs of the site, therefore it's of absolute importance to improve its dynamic water performance.

Various inorganic grouting materials have been developed to realize high-performance pre-grouting, such as cement, microfine cement, and water glass, or organic grouting materials, such as polyurethane and epoxy. However, among the aforementioned grouting materials, cement hardening requires a long time, and epoxy and polyurethane are expensive. Besides, due to the high pressure, large flow rate, and rapid velocity water inrush environment, grouting materials face the issues of being washed out, diluted, and dispersed, resulting in difficulty of slurry condensation, low mechanical strength, and poor long-term water plugging effect of consolidated body.

Therefore, improving the performance of pre-grouting materials under dynamic water conditions is urgent. Cement, polyurethane, and epoxy grouting materials have been commonly used for advanced pretreatment. Researchers have recently tried to improve the anti-scouring ability, mechanical properties, and durability of cement grouts by adding anti-washout admixtures, nanomaterials, and mineral admixtures to grout mix constituents. In addition, phosphate cement grouting materials have been developed to plug water quickly. Therefore, to promote the application of polyurethane grouting materials in ultra-high velocity dynamic water environments, hydroxypropyl methylcellulose has been added to water-soluble polyurethane slurry to improve its retention rate in flowing water. The relationship between density, mechanical behavior, and microstructure evolution of polyurethane has been researched. The time-varying effect of the permeability of epoxy slurry has become a focus when facing high-pressure and low-permeability geological bodies. In addition to commonly used pre-grouting materials, a superabsorbent polymer grouting material based on self-volume expansion by physical water adsorption has been developed.

The latest research on cement, polyurethane, epoxy resin, and superabsorbent polymer grouting materials was reviewed. Based on this, the main problems requiring deep exploration in the future are recommended from three aspects: the development of special cement grouting materials, the development of polyurethane, which is low cost, foaming body with high strength, strong resistance to water inrush, and polyurethane-modified by inorganic materials.

Key words: headrace tunnel; unfavorable geological body; geological disaster of water inrush; grouting material; advance pre-grouting