

隧道裂隙突涌水过程中注浆技术研究进展及展望

许增光, 熊伟, 柴军瑞, 线美婷, 王彦召

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:我国隧道建设数量逐年增加,隧道掘进过程中常会遇到突涌水等地质灾害,注浆是解决隧道裂隙突涌水的常用技术措施,对地下工程堵漏以及加固都具有重要意义。在回顾隧道工程注浆技术发展历程的基础上,系统总结了目前关于模型试验、注浆材料、超前预报技术、注浆控制系统以及注浆效果评价方法等研究现状,并且对其优缺点进行了梳理,展望了各方面的发展趋势,最后在对以往工程经验分析的基础上结合当下智能注浆领域总结了一套隧道智能注浆控制系统,以期为我国注浆领域的研究以及隧道工程建设提供参考。

关键词:隧道;裂隙突涌水;注浆技术;反馈调节;智能注浆系统

中图分类号:TV543+.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)02-0185-09

Research progress and prospect of grouting techniques in tunnel fissure water inrush process

XU Zengguang, XIONG Wei, CHAI Junrui, XIAN Meiting, WANG Yanzhao

(State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The number of tunnels constructed in China has been increasing year by year; however, geological disasters of water inrush often occur in the process of tunnel excavation. Grouting is a common approach to solving this problem, it also plays an important role in the plugging and reinforcement of underground engineering. Based on the review of the grouting technique development in tunnel engineering, we summarized the research status of model tests, grouting materials, advanced forecast technology, grouting control system and grouting effect evaluation methods, sorted out the advantages and disadvantages of different techniques, and looked into the development trends in all aspects. Finally, a set of tunnel intelligent grouting control system was put forward based on the analysis of past engineering practice and the development of current intelligent grouting field, in the hope of providing reference for the research of grouting field and tunnel construction in China.

Key words: tunnel; fissure water inrush; grouting technique; feedback control; intelligent grouting

1 研究背景

改革开放以来,我国隧道及地下工程领域取得了辉煌成就,对国民经济发展起到了重要的促进作用。据统计,近10年来我国公路隧道平均每年新增1 100 km以上,目前正在修建的高速铁路共计41条,穿越隧道共计1 331座,长度累计达2 560 km。在隧道建设过程中会面临诸多挑战^[1-3],突水是隧道掘进常遇的灾害之一,国内隧道工程建设重大事故中各类灾害占比如图1所示,图1中数据显示,在国内隧道工程建设期间所发生的重大安全事故里,

因突水所导致的事故约占其77%。研究发现,地质断层、岩溶等是隧道建设过程中常遇的不良地质,我国长岩溶隧道超过40%,中南和西南地区则高达65%^[4-6]。据调查和以往报道表明,国内隧道工程50%都是在岩溶地区修建的,并且发生了多次由突水引发的重大事故,突水灾害往往会导致围岩失稳从而降低隧道整体稳定性,同时易造成设备仪器淹没及人员伤亡等,对生态环境也会产生重大影响^[7]。另一方面,若对突涌水等灾害治理不到位、不彻底,后续在运营阶段将会出现渗漏、塌方、断裂和结构失稳等问题,严重威胁隧道正常运营,因此对

收稿日期:2020-08-31; 修回日期:2020-12-14

基金项目:国家优秀青年科学基金项目(51922088)

作者简介:许增光(1982-),男,陕西富平人,博士,教授,博士生导师,研究方向为隧道突涌水灾害治理。

突水等灾害的治理日益受到重视。

注浆作为隧道突水治理的主要措施,在治理隧道突水等灾害中一直发挥着重要作用,例如,福建泰宁隧道^[8]采取了超前预测手段以及帷幕注浆、模袋和索囊封堵注浆等技术,有效治理了隧道大流量突水;野三关隧道^[9]施工时采取了上部排水引流降压、下部注浆封堵加固等措施成功穿越了 F18 断层,并充填了溶腔及暗河等不良地质;龙厦铁路象山隧道^[10]在面临突水突泥以及地表沉降时,结合灾害段水文地质情况在隧道洞身关键部位开孔注浆,封堵溃口固结溶腔,并在掌子面处进行帷幕注浆,最终有效治理了这次突水灾害;国外例如韩国索兰隧道^[11]施工时,运用了多种超前探测技术,如 TSP 技术、电阻率测定法等,最终通过注浆穿越了喀斯特地区,有效避免了岩溶突水,以上案例均通过注浆避免或治理了突水等灾害。

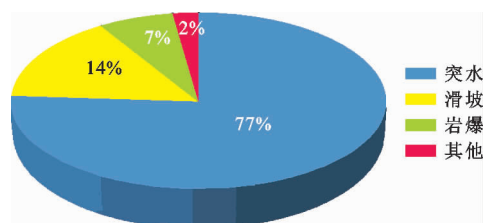


图1 国内隧道工程建设重大事故中各类灾害占比

进入 21 世纪以来,我国地下工程建设的重心向地形地质更加复杂的西部转移,隧道建设过程中更易遭遇突水等重大灾害,注浆作为突水灾害治理中的主要措施,对加固软弱岩体、增强围岩稳定性有良好效果。注浆技术发明于 1802 年,如今已有 200 余年的发展历史^[12-13]。早些年,隧道建设以及注浆施工主要依靠人力,效率和质量均难以保证。随时代的进步和生产力水平的提高,推动了相关领域的发展,注浆施工由机械取代了人力,再到后来各类电子设备,比如传感器、探测器的加入,使施工的自动化程度和效率均得到进一步提高。总体来讲,目前注浆技术已步入智能时代,智能注浆是指基于互联网等相关技术,利用数据挖掘、智能分析等对注浆过程的信息进行实时感知与深度分析,为基础注浆动态智能调控提供决策支持^[14]。

注浆施工属于多学科交叉领域,为了便于工程技术人员更好地掌握目前关于注浆的最新研究成果,本文拟从目前隧道工程注浆技术的相关内容进行分析,并结合现代化智能注浆领域进行评述,以期对隧道建设提供一些借鉴。

2 裂隙注浆扩散模型

裂隙注浆扩散模型是近几年的研究热点,由于裂隙岩体注浆具有较大的非可控性,基于注浆参数、地质参数以及浆液性能指标等建立的扩散模型与计算机技术相结合,能有效预测浆液扩散的范围和规律,进而综合考虑各参数对扩散距离的影响权重,可有效加强对注浆施工的控制。

刘人太等^[15]在考虑浆液黏度时变性的前提下建立了动水条件下裂隙注浆扩散的数值模型,总结了浆液扩散规律,并且分析了不同黏度时变性、动水速度和注浆速率对浆液扩散过程的影响效果。孙小康^[16]基于单裂隙研发了一套可视化注浆试验系统,推导了浆液在一维平板裂隙内的扩散模型和方程,对裂隙开度、注浆速度、粗糙度等参数和浆液扩散半径之间的关系进行了总结。王丽娟等^[17]基于广义达西定律及相关力学理论推导出考虑膏浆自重的浆液扩散方程,并进行室内试验对扩散公式进行验证,最后以地铁车站基坑堵漏工程为背景,验证了扩散方程的合理性。李晓龙等^[18]以一种密度随时间变化的自膨胀浆液为注浆液,考虑了浆液初始扩散半径、裂隙开度、注浆压力等因素,建立了浆液在单裂隙中的扩散模型,并通过 CFD 软件 Fluent 模块建立了轴对称分析模型,而且对模型的合理性与正确性进行了验证。Zhang 等^[19]考虑了浆液黏度时变性,应用质量守恒方程和径向灌浆流动特性规律推导得出水泥-水玻璃(C-S)浆液在平面裂隙中扩散的表达式,揭示了 C-S 浆液的流变性与其他参数(如注入压力、注入速率和裂缝孔径宽度)和浆液扩散距离的关系。裴启涛等^[20]将 C-S 浆液看成是具有黏度时变性的宾汉流体,搭建倾斜裂隙模型进行室内试验,最终建立了浆液扩散模型,并且推导了注浆压力与注浆时间及浆液扩散距离的关系式。Hu 等^[21]针对裂隙含水层注浆进行研究,建立了浆液在倾斜管状裂缝中扩散的理论模型,针对流变系数、裂缝宽度、注浆压力、裂缝倾角和水流速度等参数对浆液扩散距离的影响规律进行分析,最后给出了含各参数的扩散方程。

国外学者如 Hirokazu 等^[22]提出了含有有限几何参数的平行板浆液径向流动模型,并且基于非牛顿流体探讨了临界雷诺数和扩散半径、注浆压力等之间的关系,给出了在低临界雷诺数情况下将湍流-层流传递半径调整为目标注浆半径时的注入条件,该模型对智能化注浆施工具有一定的参考价

值。Rafi 等^[23]基于弹性顶升机理建立了注浆扩散模型,针对注浆压力及裂缝孔径变化对浆液扩散距离和注浆封堵效率的影响进行了研究。Mohajerani 等^[24]提出了浆液在岩石节理中传播的完全显式算法模型,该模型能够模拟孔隙流体压力,与以往的方法相比该算法模型几乎适用所有类型的流体,在不同流动状态下进行计算可有效提高评估的准确性。

以上研究多数基于水平单裂隙、倾斜单裂隙,推导浆液分别在静水和动水条件下的扩散模型和方程,考虑的参数包括裂隙粗糙度、注浆压力、浆液粘度、模型裂隙开度和注浆时间等。但实际工程中,地下裂隙是一个十分复杂的网络系统,对其扩散规律和扩散模型进行研究时面对的困难很大,目前可将网络裂隙视为多个单裂隙组合的情况分别进行研究和计算。已有学者对复杂裂隙注浆的扩散规律进行了初步研究,刘滨等^[25]开发的可视化网络裂隙注浆试验系统,可模拟在不同注浆压力、浆液黏度和裂隙开度情况下的浆液流动过程。另外还有依托国家自然科学基金展开的课题:天津城建大学主持的三维裂隙网络岩体动水注浆扩散及封堵机理研究,以及郑州大学主持的多因素作用下高聚物岩体裂隙动水注浆扩散机理研究等,目前均处于研究阶段。

未来在三维裂隙、平面网络裂隙注浆方面需要多做研究,考虑粗糙度、倾角和注浆压力等参数,在动水条件下建立裂隙网络注浆扩散模型是下一步努力的方向,同时也要加强对岩体结构面的细观研究,岩体裂隙的不规则程度对浆液扩散有很大影响,而裂隙结构面的分布情况具有较大的随机性,这些方面未来还需做进一步分类。建立高压强、高地应力条件下的注浆扩散模型需依托大型实验设备进行,进而综合构建更加符合实际地质情况的注浆理论模型。总体来看,今后需基于动态水流、三维裂隙、平面网络裂隙、高压环境、不规则结构面等,展开室内理论研究和模型推导,以便更加真实地指导实际注浆施工。再者,目前基于数学算法建立注浆扩散模型的研究较少,未来需作进一步探索。

3 注浆材料现状

注浆材料的各方面性能均对工程质量起决定性作用。目前除了继续研发新的浆材外,在对现有材料性能的改进方面也做了大量研究。例如近几年依托国家自然科学基金开展的课题:非水反应类高聚物注浆材料强度机理的多尺度模拟与试验研究、底泥转化型地质聚合物聚合及注浆加固机理研究、冻

融环境下纳米增强水泥基注浆材料物性演化微观机理等。

随着各类生物技术和化学技术的进步,带动了注浆材料的研发和应用,各类新型注浆材料已进入到了工程建设中,有效解决了传统水泥基浆液黏度大且颗粒性较强,难以进入细微裂缝的难题。

3.1 高分子类注浆材料

近年来我国研发了各类高分子浆材,如聚氨酯(PU)、环氧树脂等。李雅迪等^[26]制备了纳米二氧化硅增强亲水性聚氨酯注浆材料,经过井下堵水试验后发现该注浆材料具有较高的堵水效率,注浆封堵效果良好。曾娟娟等^[27]研制的环氧树脂浆液固化速度快,可在动水条件下直接注浆堵漏,同时也可对整体结构等进行加固。裴须强等^[28]研发的改性聚氨酯浆液初始黏度小于 50 mPa·s,凝胶时间约为 4.5 min,具有黏度低、固化时间短的特点,可保证注浆液具有良好的施工性能,在某高铁轨道板离缝修补工程中取得了良好效果。周磊等^[29]研发的改性聚氨酯类浆材具有无颗粒性、可注性强的优点,能进入围岩体中的细小裂隙,在对滇黔隧道破碎岩体注浆堵水及加固中发挥了良好的治理效果。

研究表明,高分子类浆液普遍具有收缩变形小、轻度高、稳定性高、反应可调节等特点,很适合处理断层等微细裂缝,高分子类注浆材料在国内工程中也有不少应用,如:广州珠江隧道治理贯穿性裂缝和江汉航线新城船闸的 13 条贯穿性涌水裂缝治理工程,经 CW 环氧树脂灌注处理后均取得了良好效果^[30]。图 2 展示了高分子类注浆材料(改性脲醛树脂浆液)在岩体裂隙中形成的浆脉。

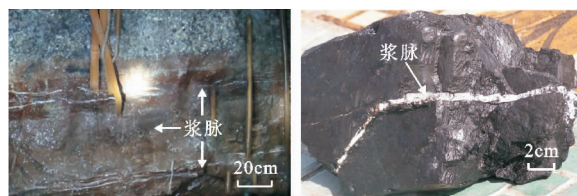


图2 裂隙岩体高分子浆液注浆实例^[31]

目前研发各类新型高分子类浆材属于热点,但多数处于实验室等小规模试用阶段,大型注浆工程实例多数仍然选用水泥基浆材,采用高分子浆材的案例较少。考虑到我国“绿色健康可持续发展方针”,对于高分子类浆材的成本、运输和环保性等问题未来需要进行更加精细化地研究和改进。根据不同灾害类型,有针对性地研发专用高分子浆材是下一步努力的方向。

3.2 非水反应类高聚物

目前,高聚物注浆材料在工程领域应用较为广泛,主要分为膨胀型和渗透型两种。膨胀型高聚物注浆材料在注浆后体积会迅速膨胀并且生成高强度和高韧性的泡沫状高分子固体,从而快速充填裂隙空洞,达到防渗堵漏和稳定加固的目的。王复明等^[32]将非水反应类高聚物运用到多个工程中,均取得了良好的效果,并且提出了针对施工期突水的膜袋封闭反压注浆法(可防止浆液在动水环境下被冲走)以及针对运行期渗漏的导管注浆处治方案,有效解决了隧道渗漏问题。Sun 等^[33]以亲水性氨基树脂为基料,研制了一种新型聚合物发泡灌浆材料,在充填节理面、胶结裂隙等方面获得了良好效果。Zhang 等^[34]自行研制的聚合物泡沫(PF)注浆材料,对围岩变形具有很强的适应性,有利于围岩长期加固。相关研究表明,渗透型高聚物黏度可低至 $5 \sim 10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,该种浆材普遍具有黏度低、施工便捷、造价低和对环境无污染的优点^[35],图 3 为某实际隧道工程采用高聚物处理前后的效果对比。目前针对非水反应类高聚物的研究已取得许多成果,但其材料具有一些特殊性,最直观的是注浆后体积迅速膨胀,材料对岩体的作用机理未来还需研究。同时需要针对具有特殊性能的改性高聚物多做研究,结合材料和化学等领域,将其运用到更多的工程实例中。

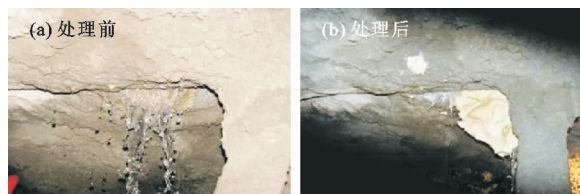


图 3 宜万铁路某隧道采用高聚物处理前后效果对比^[32]

3.3 微生物浆液

微生物注浆加固技术(MICP)是近些年新发展起来的一种新型注浆加固方法,它是指利用一些特定的微生物(如脲酶菌、球式芽孢杆菌),通过为之提供丰富的营养盐使其生成碳酸盐、硫酸盐等物质来胶结岩土体,从而达到加固的目的。2001 年报道了第 1 例微生物加固岩体的实例^[36],Dworatzek 等^[37]在矿区进行了微生物表面胶结固化实验,其实验现场如图 4 所示。微生物注浆材料具有较强的流动性和渗透性,同时具备灌注压力小、环境污染小等优点^[38],是一种可持续发展的绿色浆材,在实际工程中应用于加固软弱地基、裂缝修复等。王敬奎等^[39]以巴氏芽孢杆菌为原料,尿素做营养液,氯化

钙为钙源溶液,在室内进行裂隙岩体注浆实验,注浆实验后岩样渗透系数减小率均达到 90%,表明了微生物诱导碳酸钙沉淀技术对裂隙的封堵及防渗具有良好的效果。国外已有微生物注浆工程实例,我国在这方面还需要多做研究。微生物注浆技术目前属于全新的研究领域,主要应用于土体加固,对于封堵突水等动态水流的适用性还需工程实例验证,例如地下裂隙水流的温度通常较低,对微生物的活性影响如何、水流速度与微生物反应固结速度能否匹配以及经济成本 and 环境影响等问题,目前还没有统一论,这些问题后续还需要通过大量实验和案例来验证,但可以预见其具有巨大的潜在研究价值和实际使用价值。



图 4 微生物胶结砂土实验现场^[37]

在注浆材料研发方面我国紧跟世界步伐。传统水泥浆材可注性较差,但是固结后强度较高,化学浆液普遍可注性好,但价格方面除了脲醛树脂外其他化学浆液的价格较昂贵,同时在毒性方面,虽然已进行了许多低毒甚至无毒的改进,但仍远远不够。总的来看,传统水泥浆材的超细化以及化学浆液的廉价性和环保性改进仍是未来主要方向,而微生物浆液还处于实验室阶段,未来还需要做大量研究。同时也要注重对现有材料的改进,如超细水泥浆就是在以往水泥浆材基础上改进成功的,并且在工程中发挥着重要作用,再例如改性脲醛树脂、改性环氧树脂等均是以往材料的改进产品,其性能相较于以往得到了很大提高。因此研发新材料和改进现有材料是当下研究的首要课题。不同注浆材料的特点和适用范围均不一样,在实际工程施工中应根据工程质量需要并结合环保等其他因素选取合适的浆材及相应的注浆工艺。同时也要完善各类注浆材料的施工工艺和方法,制定相应的规范,便于新材料、新技术的推广和使用。

4 超前探测技术及注浆控制系统

4.1 超前探测技术

近年来,我国在建隧道穿越地质更加复杂西部地区,掘进时由于对掌子面前方地质情况和周围岩体

特征信息掌握不足而导致的事故常有发生,同时,注浆堵水和加固也需要掌握前方地质信息,不能盲目进行注浆。因此对掌子面前方进行超前预报,关乎施工人员和设备的安全以及隧道的施工进度,超前预报已成为隧道建设过程中一个不可或缺的关键环节。国家自然科学基金在这方面也支持了许多项目,如山东大学主持的隧道掘进机施工期三维地震波超前探测理论研究项目、施工期超长跨海隧道不良地质体的精细超前探测与防灾技术项目以及北京航空航天大学主持的大数据驱动的不良地质段跨海隧道结构灾变预报与控制项目等,目前这些项目均处于研究阶段,未来可大大推动超前探测领域的进步。

超前探测技术较为常用的方法有 TSP 探测法、TRT 预报系统、红外超前探水法、地质雷达探测法和激发极化法等^[6,40-44]。本文对每种方法的探测距离、特点和待改进点等进行总结与对比,如表 1 所示。各种超前探测技术方法的原理、适用范围和优缺点均不相同,目前大多集中于采取单一的探测技术,这样只能获得地质体的某一性质,导致单一探测方法对地质预报的准确度较低,同时不同探测技术对不同的地质缺陷预报效果也不尽相同,目前还没有任何一种预报方法能准确预报各种地质灾害。这就需要对各种探测方法的优缺点进行比较,将不同探测技术合理结合使用并相互验证,以提高探测结果的准确性。周东等^[45]依托岭脚隧道在洞内将陆地声纳法、瞬变电磁法和地质雷达法组合使用,在洞外则采用陆地声纳法、微分电测法和瞬变电磁法进行综合探测,最终准确地确定了不良地质体的位置和范围。杨继华等^[46]基于厄尔多瓜电站水工隧洞,将地质分析法、物探法、超前钻探等综合使用,探测结果相对于仅使用单一探测技术明显更加准确。戴世鑫等^[47]将地质雷达法、瞬变电磁法、TST 技术相结合,成功探测到桃园隧道掌子面前方岩溶的存在。上述综合超前地质预报方法均为多种单一超前预报方法组合,最后将每个方法探测的结果进行综合对比分析,可显著提高预报结果的准确性和可靠性。本文总结了以下两点原则:

(1)长、短距离结合探测。从表 1 可以看出不同方法的可探测距离均不相同,探测时应远距离模糊探测,近距离精确探测,例如首先采取 TSP 法(100~150 m)进行整体初步探测,然后逐步采取地质雷达法(20~25 m)进行近距离探测,组合使用以提高结果精确性。

(2)分区探测。该原则要求对掌子面前方水文

地质首先有大致判断,在面临断层、溶洞等不良地质时,分别选择对此地质较为敏感的探测技术。例如采用瞬变电磁法确定溶洞等位置、采用激发极化法估算含水量。针对断层区则采用 TSP 法,充分发挥每一种探测技术的特点。

综合使用探测技术超前探测隧道地质已成必然趋势,如何更好地处理勘探数据资料,改进探测结果模糊性和不可靠性是下一步应努力的方向。近几年,国内外研究热点集中于多元地球物理信息的联合反演。刘斌等^[48]对约束联合反演理论进行了研究,通过数值模拟和实际探测结果验证了约束联合反演的显著作用和良好的应用前景。Li 等^[49]在这方面也做了大量研究,提出了一种结构约束反演的广义联合反演方法。何展翔等^[50]基于人工鱼群算法实现了对 TFEM 勘探水平电场和垂直磁场的联合约束反演,并且提出了分布反演方案,最终结果表明人工鱼群算法和分步反演方案能够很好地克服反演的非唯一性并且提高了探测精度,有较强的实用性。总体来看,目前基于联合参数反演的隧道综合超前地质预报技术的相关研究仍较少,未来需要针对这方面开展更多研究,形成基于联合参数反演的隧道综合超前地质预报系统,提高预测结果的精度和可靠性。同时,预报结果的准确性受操作人员综合素质影响较大,今后也要注重操作人员和数据分析人员的技能培训及管理。总之,对各个环节进行优化,降低外界因素的干扰,提高探测技术实施的规范性,进而提高预测精度。

4.2 注浆控制系统

控制系统掌控注浆施工的每个环节,对施工质量的优劣以及施工安全等起着控制性作用。随着科技的进步,在注浆系统方面,日本熊谷组公司开发了一套隧道注浆可视化系统^[51],该系统可以根据工作面地质资料和预注浆资料等施工资料生成三维模型,大大提高了注浆的可控性。Still 等^[52]提出了一种实时注浆控制方法,该方法对注浆材料进入岩体的过程进行控制,可以通过对注浆过程的在线监测来预测浆液扩散和流动的轨迹,并且可以评估隆起和顶升的风险,最后通过瑞典的 4 个隧道工程验证了此方法可适用于实际注浆设计和控制。韩国索兰隧道通过注浆治理突水事故时取得了良好的效果^[12],在总结工程经验的基础上开发了一套降低隧道风险的系统,可为类似工程提供借鉴。闫福根等^[53]基于 Struts 和 Hibernate 技术,依托注浆分析系统,将这些注浆数据转化为三维注浆孔模型,实际工

程表明,该方法可对注浆工作进行有效指导,并且能对注浆效果做到及时、有效的反馈。冯晓琳^[54]从流量控制、双液注浆比例控制和流量稳定实现 3 个方面开发了基于互联网的注浆监控系统,并且研发了注浆监控设备对注浆过程中的数据进行记录,最后通过网络将注浆数据传送给上位机进行室内监控。新疆大学主持的基于地铁隧道立体变形监测与动态可视化系统项目,目前也正在研究阶段。

以上控制系统的加入均可提高注浆施工的效率和质量,并且可以看出以互联网技术为载体研发控制系统是当下的大趋势。目前在三维地质模型方面

的研究还不够精细,未来还需依托三维模型制定方案并结合计算机技术,尽可能以三维画面显示钻孔照片、周边地质情况、实时注浆效果图以及各向位移等参数,以便对注浆施工进行更加自动化和智能化的控制。本文根据以往工程经验结合智能注浆系统总结了一套隧道智能控制施工方案,首先超前探测获得地形地质信息,并且确定不良地质状况,然后有针对性地制定分区治理方案,选择关键钻孔并注浆,期间智能监测和动态反馈调节机制实时监测动态参数(如注浆量、围岩变形参数等),最后进行注浆效果评定,其具体流程如图 5 所示。

表 1 超前探测技术几种常用方法对比

探测方法	可探测距离/m	使用地质	特点	待改进点
瞬变电磁法	50 ~ 60	岩溶、断层破碎带、溶洞	对含水地质敏感,可探测掌子面前方溶洞、断层或含水体	含水体位置定位还不精确,且易受隧道环境影响
TSP	100 ~ 150	节理面、断层破碎带、溶洞	预报距离较长,对断层破碎带敏感	对潜在的水源只能粗略判别
TRT	120	富水断层、岩溶管道水及富水地层	可形成三维立体图,观测结果直观	对于含水体的预报准确性待提高;软岩地区的波速不易确定
地质雷达法	20 ~ 25	含水带、破碎带、岩溶发育地层	对含水地质敏感	探测距离较短,易受环境干扰
激发极化法	30 ~ 40	均可	对水量较为敏感,可估算水量信息	技术尚不成熟;通过经验判断水量与激电参数之间的相关关系,缺乏理论支持
超前钻探法	根据需要定	均可	结果直观,可直接揭示隧道前方情况	成本高,孔与孔间的地质无法探测
红外探水法	25 ~ 30m	均可	不占用隧道掌子面,成本低,可全程随开挖进行探测	无法揭示不良地质具体位置

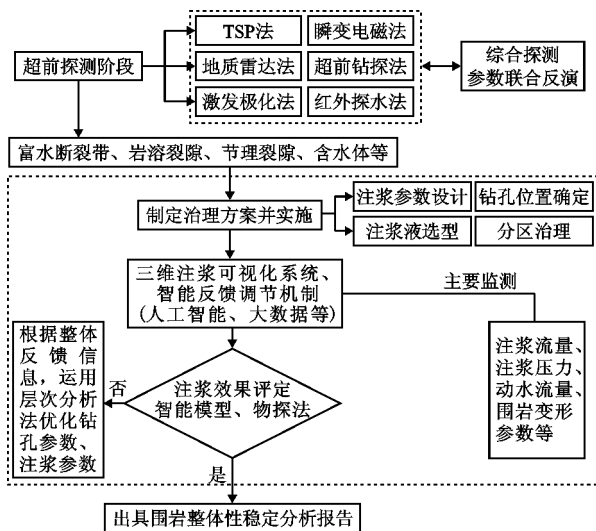


图 5 隧道智能控制施工方案流程图

5 注浆效果评价技术

注浆效果的评定属于收尾性工作,同时对整个施工环节起到反馈作用,对注浆施工质量的检验具有重要意义。由于注浆施工具有较强的隐蔽性,导致注浆效果难以得到精确掌控,因此,为了保证隧道正常掘进以及后续安全运营,对其进行准确评价显得尤为重要。目前注浆效果的评定方法已形成 5 大体系,分别为分析法($P-Q-t$ 曲线法、注浆量分布特征法、涌水量对比法、浆液填充率反算法)、检查孔法(检查孔观察法、检查孔取芯法、检查孔 $P-Q-t$ 曲线法、渗透系数测试法)、开挖取样法(加固效果观察法、注浆机制分析法、力学指标测试法)、变位推测法(水位推测法、变形推测法)和物探法。

关于注浆效果评价体系的研究主要集中在对以上各方法的具体使用^[55],但往往只能得到初步的定性分析结果,缺乏定量的标准,而且单一方法的评价结果比较片面且难以得到不同方法综合使用下的结果,具有较大的盲目性和不准确性,因此应组合运用。王德明等^[56]将传统方法及物探法综合使用,利用层次分析法针对断层带隧道注浆提出了一种新的评价方法,并且依托永莲隧道得到了验证。周海强等^[57]将钻孔取芯、标准贯入实验和瞬态面波法等检测方法结合,对高速铁路地基注浆效果进行了评价。Bai 等^[58]和 Huang 等^[59]结合工程实例,将分析法、开挖取样法和物探法组合运用检测注浆质量。以上案例结合多种评价方法使用均提高了评价结果的精确性,目前关于不同评价方法的组合方案还没进行归纳整理,今后应结合大量实例进行总结。

目前流行的物探法具有无损探测、快速便捷等优势,表 2 总结了部分物探技术方法及其评定标准。物探技术评价的准确性相较于传统方法得到了提高,但受周围地理环境影响较大,大部分物探技术仅对水体比较敏感,对浆液的变化情况则相对模糊,在隧道施工中应用还不够成熟,未来还需要研发新型物探技术,减少环境对探测结果的影响。

表 2 部分物探技术方法及其评定标准

分类	方法	评定标准
物探法	电磁波 CT 法	通过电磁波 CT 图可得到吸收系数 β 值彩色分布, β 值越小,介质的性状越好; β 值越大,介质的性状越差
	瑞雷面波法	裂隙、空洞被浆液充填后,面波相速度上升明显,而未填充区速度较低
	电测探法	经注浆覆盖后的部位,其电阻率会有明显的提高

随着科技和生产力的进步,注浆效果评价方法也越来越智能化。以往关于注浆评价的研究大多只考虑单一因素,针对注浆质量和效率的综合评价研究较少,既没有考虑指标间复杂关系带来的模糊性问题,也没有考虑主观意识造成的随机性问题。为此,Zhu 等^[60]提出了一种考虑评价过程不确定性的灌浆评价方法,其主要包括 3 个部分:在常规灌浆效率评价指标的基础上,引入可灌性作为新的评价指标;提出一种基于云模型的模糊综合评价方法;计算模糊熵来表征注浆效率水平的复杂性,最终综合提

高了评价结果的科学性和客观性。Li 等^[61]提出了一种基于自适应神经模糊推理系统的注浆效果预测与评价方法,以地质因素(断裂强度、LU 值、灌浆前 RQD)、有效灌浆作业因素(有效灌浆压力、有效灌浆时间和有效灌浆体积)等作为预测模型的输入参数,以注浆后的 LU 值、RQD 和 FF 作为评价注浆质量的输出参数,最终验证了该方法在预测注浆效果和评价注浆施工质量方面具有较高的准确性。Lin 等^[62]采用时域有限差分方法(FDTD)对探地雷达探测正演模拟和反投影成像进行了数值实验,建立了基于典型衬砌病害的探地雷达检测解释准则,并且根据隧道衬砌注浆前后的介电差异,将探地雷达引入隧道衬砌注浆渗漏评价中,结果表明,探地雷达成像能很好地识别注浆前后介质的变化,更直观地评价注浆加固效果。Zadhesh 等^[63]为评价注浆质量,采用人工神经网络(ANN)和线性回归方法对二次渗透性进行预测,用统计学方法建立了试验变异函数及其数学模型,结果表明人工神经网络可用于固结灌浆质量评价。后钱峰等^[64]基于 GRE 模糊评价方法选取 11 个指标建立了针对运营隧道的注浆堵漏效果评价体系,该评价体系与单一评价方法相比计算效率和计算结果的精确度均有所提高,还弥补了人为主观评判的缺点。然而,上述模型和方法均具有一定的局限性,室内试验无法完全模拟实际工程情况,故评价结果的可靠性不足;再者,目前理论方面研究还不够,数值模拟和室内理论分析受制于此,使其适用性有所降低,这些问题未来还需进行深入研究和改进。

如今在隧道注浆材料以及施工方法等方面的研究较为深入,但是对注浆加固效果的评价稍显片面,还需要开发新的评价体系,将传统方法、物探法以及智能评价方法进行有效地结合,并且边注浆边评价,提高评价的精确性和施工质量,还需有针对性地开发新的评价技术和指标。今后首先应结合工程质量要求选择合理的评定技术,其次不能只停留于表面现象,例如突水和裂隙等是否已经堵漏无渗水等,应结合整个工程,进一步进行整体性探测,并出具围岩支护等稳定性报告,防止注浆破坏内部结构致其失稳失效,影响到整个工程。

6 结论与展望

我国岩石裂隙注浆领域的部分研究已取得巨大进步,室内理论方面,基于单裂隙建立的各类注浆扩散模型和方程已对注浆施工产生重要指导意义,目

前高分子类浆材和非水反应类高聚物在工程中逐渐获得广泛应用,微生物浆液也逐渐进入实际工程,各类超前探测技术的发展极大提高了对不良地质预测的准确性,以互联网技术为载体开发的注浆控制系统可有效提高注浆施工的效率和质量,随着科技和生产力的进步,注浆效果评价方法也更加智能化,物理方法和数学模型的结合使用保证了评价结果的可靠性。总的来说,可系统总结为注浆前的超前地质预报、注浆中的实时监控和智能反馈,以及注浆后的效果评价。本文在对目前研究成果总结的基础上,结合各方面的现状展望了未来的发展趋势,今后应在以下几个方面多做研究:

(1)基于网络裂隙建立在动水条件和高压条件下的注浆扩散模型是未来需要研究的问题。结合我国绿色环保和可持续发展的方针,工程建设需要一种性能更优,且经济、环保、可再生的浆材,微生物浆液作为目前新型材料应多做研究,其次应针对不同地质灾害研发具有针对性的高效注浆材料,如复合材料、沥青浆材等,同时也要注意对已有材料的改进。

(2)利用电子信息技术和远程操控技术建立信息反馈调节机制和更加智能化的控制系统。并且开发机械化、智能化、数字化程度更高的超前探测设备和注浆设备,同时也要注意操作人员的素质提升,综合提高注浆施工的精准度和可操作性。

(3)关于注浆质量评价指标目前仍没有统一标准,大多凭借工程经验和理论分析来评价,需要确定统一、定量的指标。目前物探技术较为先进,但仍然受地质环境的影响较大,后续需继续研究改进。由于地下结构的复杂性,建议传统方法和智能模型结合使用,综合提高对注浆质量控制的精准度。同时要优化对探测信息的计算分析,进行参数联合反演,提高信息的可靠度。

(4)注浆领域无论是施工技术还是监测控制等,都应向智能化方向发展,结合大数据、云计算和互联网等技术,智能调控各个环节,综合提高注浆施工质量。同时,注浆属于一个多学科交叉领域,涉及生物化学、机械设备、数字智能和优化管理等,需要多关注其他领域的研究成果,结合自身领域共同进步。

参考文献:

[1] 罗刚. 中国 10 km 以上超长公路隧道统计[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 9(8): 1380-1383.
[2] 田四明, 巩江峰. 截至 2019 年底中国铁路隧道情况统计[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(2): 292-297.
[3] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].

隧道建设, 2017, 37(2): 123-134.

- [4] CHEN Luwang, ZHANG Shilei, GUI Herong. Prevention of water and quicksand inrush during extracting contiguous coal seams under the lowermost aquifer in the unconsolidated cenozoic alluvium: A case study [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(6): 2139-2149.
[5] LI Shucui, LIU Rentai, ZHANG Qingsong, et al. Protection against water or mud inrush in tunnels by grouting: a review [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(5): 753-766.
[6] 薛翊国, 李术才, 张庆松, 等. 隧道信息化施工岩溶裂隙水超前地质预报[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3360-3364.
[7] LV Yuxiang, JIANG Yongjun, HU Wei, et al. A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology, and environment in karst areas: Current status, challenges, and perspectives [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124891.
[8] ZHANG Guohua, JIAO Yuyong, WANG Hao. Outstanding issues in excavation of deep and long rock tunnels: A case study [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(9): 984-994.
[9] 黄鑫, 林鹏, 许振浩, 等. 岩溶隧道突水突泥防突评判方法及其工程应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2018, 49(10): 2533-2544.
[10] ZHANG Guohua, JIAO Yuyong, CHEN Linbiao, et al. Analytical model for assessing collapse risk during mountain tunnel construction [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(2): 326-342.
[11] SONG K I, CHO G C, CHANG S B. Identification, remediation, and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in south korea [J]. *Engineering Geology*, 2012, 135-136: 92-105.
[12] ALMER E C, VAN D S. Pile foundation improvement by permeation grouting [C] // *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, 2003, 12: 728-739.
[13] CHUAQUI M, BRUCE D A. Mix design and quality control procedures for high mobility cement based grouts [J]. *Geotechnical Special Publication*, 2003, 120: 1153-1168.
[14] 钟登华, 时梦楠, 崔博, 等. 大坝智能建设研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 38-52+61.
[15] 刘人太, 张连震, 张庆松, 等. 速凝浆液裂隙动水注浆扩散数值模拟与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3297-3306.
[16] 孙小康. 深部裂隙岩体注浆浆液扩散机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
[17] 王丽娟, 李凯, 张金接, 等. 膏浆平面裂隙动水注浆扩散模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3404-3411.

- [18] 李晓龙,金笛,王复明,等.一种理想自膨胀浆液单裂隙扩散模型[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1207-1217.
- [19] ZHANG Weijie, LI Shucui, WEI Junchuan, et al. Grouting rock fractures with cement and sodium silicate grout[J]. Carbonates and Evaporites, 2017,32(2):211-222.
- [20] 裴启涛,丁秀丽,黄书岭,等.速凝浆液岩体倾斜裂隙注浆扩散模型研究[J].长江科学院院报,2019,36(12):83-90.
- [21] HU Yang, LIU Weiqun, SHEN Zhen, et al. Diffusion mechanism and sensitivity analysis of slurry while grouting in fractured aquifer with horizontal injection hole[J]. Carbonates and Evaporites, 2020,35(2):1-16.
- [22] HIROKAZU K, KAORU K, TOSHIKI K. A consideration based on the grouting-model for fractured rock mass[J]. Japanese Geotechnical Journal, 2018,13(4):359-378.
- [23] RAFI J Y, STILLE H. Basic mechanism of elastic jacking and impact of fracture aperture change on grout spread, transmissivity and penetrability[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015,49:174-187.
- [24] MOHAJERANI S, BAGHBANAN A, BAGHERPOUR R, et al. Grout penetration in fractured rock mass using a new developed explicit algorithm[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015,80:412-417.
- [25] 刘滨,桑昊旻,康永水,等.岩体裂隙网络注浆模拟试验系统研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):540-549.
- [26] 李雅迪,李嘉晋,陈丁丁,等.纳米二氧化硅原位增强亲水性聚氨酯注浆材料的制备与性能研究[J].岩土工程学报,2016,38(S1):83-86.
- [27] 曾娟娟,陈海基.快速固化型环氧树脂灌浆材料的制备及性能[J].中国塑料,2020,34(4):6-11.
- [28] 裴须强,张帅,朱玉雪.低黏度、快固化聚氨酯注浆液的研制[J].中国胶粘剂,2019,28(11):20-24+43.
- [29] 周磊,蒋云飞.破碎围岩隧道高分子材料注浆加固技术研究[J].新型工业化,2019,9(11):133-136.
- [30] 李嘉祥,魏涛,汪在芹. CW 环氧树脂灌浆材料的固化动力学研究[J].长江科学院院报,2017,34(4):131-135.
- [31] SUI Wanghua, LIU Jinyuan, Hu Wei, et al. Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with flowing water[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015,50:239-249.
- [32] 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.
- [33] SUN Zhidong, ZHANG Junxiang, SUN Yuning. Feasibility of a polymer foaming agent as a grouting material for broken coal masses[J]. Advances in Civil Engineering, 2019,2019:9084861.
- [34] ZHANG Junxiang, SUN Yuning. Experimental and mechanism study of a polymer foaming grouting material for reinforcing broken coal mass[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019,23(3):346-355.
- [35] 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.
- [36] VAN PAASSEN L A. Bio-mediated ground improvement: From laboratory experiment to pilot applications[C]// Geo-Frontiers Congress, 2011:4099-4108.
- [37] DWORATZEK S M, GOMEZ M G, MARTINEZ B C, et al. Field-scale bio-cementation tests to improve sands[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement, 2014,168(3):1-11.
- [38] 钱春香,王安辉,王欣.微生物灌浆加固土体研究进展[J].岩土力学,2015,36(6):1537-1548.
- [39] 王敬奎,杨萌,宋庆明,等.微生物注浆封堵岩石裂隙试验研究[J].石化技术,2020,27(1):366-367.
- [40] 彭炎,方慧,吕琴音.隧道反射波层析成像正反演模拟与 TRT 反演的对比分析[J].现代隧道技术,2020,57(1):105-114.
- [41] 智刚.煤层瓦斯隧道中开展 TSP 探测工作的研究与探索[J].物探化探计算技术,2019,41(1):47-54.
- [42] 李尧,李术才,徐磊,等.隧道衬砌病害地质雷达探测正演模拟与应用[J].岩土力学,2016,37(12):3627-3634.
- [43] 秦良,张庆朝.瞬变电磁法隧道超前地质预报物理模拟[J].现代隧道技术,2019,56(6):47-51+62.
- [44] 田明祺,李术才,刘斌,等.多同性源激发极化法超前预报仪的设计与实验[J].济南大学学报(自然科学版),2016,30(4):263-269.
- [45] 周东,刘宗辉,吴恒,等.综合超前地质预报技术在岭脚隧道的应用研究[J].现代隧道技术,2015,52(5):171-177.
- [46] 杨继华,闫长斌,苗栋,等.双护盾 TBM 施工隧洞综合超前地质预报方法研究[J].工程地质学报,2019,27(2):250-259.
- [47] 戴世鑫,谭小丰,钟威.综合地质超前预报在核桃园隧道施工中的应用[J].山西建筑,2018,44(24):144-145.
- [48] 刘斌,聂利超,李术才,等.三维电阻率空间结构约束反演成像方法[J].岩石力学与工程学报,2012,31(11):2258-2268.
- [49] LI Shucui, LIU Bin, XU Xinji, et al. An overview of ahead geological prospecting in tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017,63:69-94.

(下转第201页)

- [7] 刘江,张荣堂,严东方. 高液限粘土压实性能的试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2007,28(3):316-319.
- [8] 戴良军,朱大勇. 高液限土路基填筑技术研究[J]. 长安大学学报(自然科学版),2016,36(1):44-50.
- [9] 莫秋旭,陈家闯,许会生,等. 湛江大道2种高液限土水泥改良试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(7):1728-1733.
- [10] 李秉宜,宣剑裕,郑文斌,等. 改良高液限黏土水稳定性试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(4):54-60.
- [11] 赵英爱,王远明,吴天前,等. 复合固化高液限黏土的筑堤性能试验[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(7):581-586.
- [12] 璩继立,孙中明. 纤维素纤维和石灰粉对上海黏土抗压强度的影响[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):211-215.
- [13] 陈晓平,周秋娟,蔡晓英. 高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性[J]. 岩土工程学报,2011,33(6):902-908.
- [14] 余自立,刘奔江. 高液限花岗岩残积土及水泥稳定土填料的研究[J]. 路基工程,2006,125(2):29-31.
- [15] 胡焕校,孙端阳,周丁. 花岗岩残积土路用性能影响因素研究[J]. 水文地质工程地质,2017,44(5):92-99.
- [16] 周训华,廖义玲. 红粘土颗粒之间结构连结的胶体化学特征[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2004,33(1):26-29.
- [17] 张先伟,孔令伟. 氧化铁胶体与黏土矿物的交互作用及其对黏土土性影响[J]. 岩土工程学报,2014,36(1):65-74.
- [18] 汤连生,桑海涛,宋晶,等. 非饱和花岗岩残积土粒间联结作用与脆弹塑性胶结损伤模型研究[J]. 岩土力学,2013,34(10):2877-2888.
- [19] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.

(上接第193页)

- [50] 何展翔,胡祖志,王志刚,等. 时频电磁(TFEM)技术:数据联合约束反演[J]. 石油地球物理勘探,2020,55(4):898-905+705.
- [51] 程绍磊. 熊谷组开发出隧道注浆可视化系统[J]. 隧道建设(中英文版),2017,37(11):1416.
- [52] STILLE B, STILLE H, GUNNAR G, et al. Experience with the real time grouting control method [J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2010,2(5):447-459.
- [53] 闫福根,缪正建,李明超,等. 基于三维地质模型的坝基灌浆工程可视化分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(3):567-572.
- [54] 冯晓琳. 基于物联网技术的注浆监控系统设计[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017.
- [55] 张民庆,张文强,孙国庆. 注浆效果检查评定技术与应用实例[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3909-3918.
- [56] 王德明,张庆松,张霄,等. 隧道及地下工程注浆效果模糊评价方法的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S1):3431-3439.
- [57] 周海强. 高速铁路路基注浆加固效果评价方法研究[J]. 铁道建筑技术,2019(11):117-120+144.
- [58] BAI Huiren, LI Jingjing. Evaluation of grouting effect detection in goaf [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013,438-439:1080-1083.
- [59] HUANG Xiaoguang, YANG Xiaolin, FANG Yuzhong. Study on grouting effect evaluation of F4 weathered llot in Xiamen Xiang'an submarine tunnel [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012,256-259:1217-1220.
- [60] ZHU Yushan, WANG Xiaoling, DENG Shaohui, et al. Evaluation of curtain grouting efficiency by cloud model-based fuzzy comprehensive evaluation method [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019,23(7):2852-2866.
- [61] LI Xiaochao, ZHONG Denghua, REN Bingyu, et al. Prediction of curtain grouting efficiency based on ANFIS [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019,78(1):281-309.
- [62] LIN Chunjin, WANG Xintong, LI Yao, et al. Forward modelling and GPR imaging in leakage detection and grouting evaluation in tunnel lining [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020,24(1):278-294.
- [63] ZADHESH J, RASTEGAR F, SHARIFI F, et al. Consolidation grouting quality assessment using artificial neural network (ANN) [J]. Indian Geotechnical Journal, 2015,45(2):136-144.
- [64] 后钱峰,陈颖辉,欧明喜,等. 运营隧道注浆堵漏效果的GRA模糊综合评价[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(5):755-761.