

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.250752

山区公路隧道排水系统结晶探析及处置

万里达¹, 黄峰², 赵晖¹, 厉健晖¹, 周利君², 张坤¹

(1. 杭州交通投资建设管理集团有限公司, 浙江 杭州 310030; 2. 杭州公路工程监理咨询有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 隧道渗水结晶问题是一种新型隧道病害, 为保障隧道排水系统正常运行, 不仅需要研究非岩溶隧道的排水系统的结晶现象和机理, 还需要有针对性的防治及处理方案。首先详细阐述目前常见的物理处理、化学处理等结晶处理方法, 并以浙江某高速公路隧道的排水结晶案例进行研究, 通过对水溶液、土体易溶盐、CO₂含量等参数的检测分析, 分析了非岩溶隧道排水结晶的成因, 包括水质特性、环境因素、水流条件等, 研究发现结晶体主要是由隧道围岩中游离的碳酸氢根离子与隧道支护混凝土的钙离子结合而形成的碳酸钙, 二氧化碳是重要的外部因素。考虑隧道所处地为环保敏感区、水源保护地的特点, 研发了可控流速的高压水冲洗装置并优化了原排水系统, 并成功地解决了排水系统结晶问题。结果表明: 该案例的研究分析和处置方法, 可为非岩溶地区隧道结晶病害的机理研究提供参考, 并为类似问题的处置方案提供借鉴。

关键词: 隧道排水; 结晶; 成因分析; 处置方法; 预防措施

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0258-06

Analysis and Disposal of Crystallization in Drainage System in Mountainous Highway Tunnels

WAN Lida¹, HUANG Feng², ZHAO Hui¹, LI Jianhui¹, ZHOU Lijun², ZHANG Kun¹

(1. Hangzhou Transportation Investment and Construction Management Group Co., Ltd., Hangzhou 310030, China; 2. Hangzhou Highway Engineering Supervision and Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: The problem of tunnel seepage crystallization is a new type of tunnel disease. To ensure the normal operation of the tunnel drainage system, it is not only necessary to study the crystallization phenomenon and mechanism of the drainage system of non-karst tunnels, but also to have the targeted prevention and treatment schemes. Firstly, the common crystallization treatment methods such as physical and chemical treatments are expounded in detail, and a case study of drainage crystallization in a highway tunnel in Zhejiang is conducted. Through the detection and analysis of parameters such as water solution, soil soluble salts, CO₂ content, etc., the causes of drainage crystallization in the non-karst tunnel are analyzed, including water quality characteristics, environmental factors, water flow conditions, etc. The study result shows that the crystals are mainly calcium carbonate formed by the combination of free bicarbonate ions in the surrounding rock of the tunnel and calcium ions in the tunnel support concrete. And the carbon dioxide is an important external factor. Considering the characteristics of the tunnel located in an environmentally sensitive area and a water source protection zone, a high-pressure water flushing device with controllable flow rate is studied and developed, and the original drainage system is optimized, successfully solving the problem of crystallization in the drainage system. The results indicate that the research analysis and disposal methods of this case can provide reference for the mechanism study of tunnel crystallization diseases in non-karst areas, and provide a reference for disposal schemes of similar problems.

Keywords: tunnel drainage; crystallization; cause analysis; treatment method; preventive measures

0 引言

目前,我国已是世界上隧道总量最多、建设规模最大的基建国家,其建成运营的公铁路隧道已超

50 000 km^[1],隧道工程已进入了建设与养护并重的时期。近些年,隧道出现渗水结晶问题已成为了一个较为典型的新型隧道病害。结晶物将排水系统隧道堵塞后,容易对隧道造成一定的影响,轻则使隧道衬砌裂损,影响隧道的外观效果,严重的将造成隧道路面渗水、涌水,影响行车安全,更严重的会使水压增加,致使岩体的力学性能发生劣化,威胁隧道支护

收稿日期: 2025-07-25

基金项目: 杭州市交通运输学会科研项目(Hzjt202447)

作者简介: 万里达(1989—),男,学士,高级工程师,从事交通工程建设管理工作。

结构稳定。

结晶物中主要构成为钙盐物质,其中 Ca^{2+} 的主要来源于以下几个途径^[2]:一是地下水流过富含碳酸钙矿质的岩层时,会携带 Ca^{2+} 流出;二是施工材料采用普通硅酸盐水泥作为胶凝材料,其中的氧化钙(CaO)、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)都含有大量的 Ca^{2+} ;三是喷射混凝土速凝剂中 CaCO_3 的存在同时增加了 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 。此外,水中的 SO_4^{2-} 与混凝土中 Ca^{2+} 结合反应将生成的硫酸钙(CaSO_4),当达到一定浓度时,部分 CaSO_4 也会以白色晶体形式析出。

结晶的影响因素众多,其中最为主要的影响因素包括水动力因素、岩层水酸碱度、温度、岩层水二氧化碳浓度、离子种类和浓度等,并且各因素之间存在一定的耦合性^[3-4]。隧道结晶堵塞病害的已有研究中,大多数采用模型试验、数值模拟、理论分析以及现场试验等方法,对排水系统结晶因素、结晶来源、结晶机理以及结晶预防处治措施等方面进行了分析。

关于岩溶地区的结晶机理研究包括:卢冠楠^[5]对结晶堵塞过程环节中的各因素进行了系统性的探究,建立了理想的岩溶隧道排水管水动力-化学反应耦合模型。周伟^[6]侧重对隧道排水系统结晶速率进行了分析,通过对动力因素研究,发现排水管道内壁摩擦系数、液体流速以及液面高度影响着结晶物沉淀速率。詹树高^[7]为了深入分析隧道排水系统结晶产生的微观机理,采用了显微镜、X射线衍射仪等科技手段。翟明^[8]为了探析隧道排水系统堵塞结晶物的产生机理,也从微观的角度作了分析。

关于非岩溶地区的结晶机理研究包括:同月苹^[9]聚焦于探究喷射混凝土与隧道排水系统结晶病害的关联性,研发了一套室内模型装置对隧道喷射混凝土渗流到结晶产生的全过程进行了客观模拟。而叶飞^[10]采用正交试验和极差分析方法对防排水设计、喷射混凝土配合比进行了研究,发现混凝土中钙离子存在流失的结论。庞佳玮^[11]结合广东某隧道结晶案例进行了研究,得出掺加矿物掺合料和疏水密实材料RS均可以提升初支喷射混凝土性能,其中疏水密实材料RS的提升效果更好。黄靖凯^[12]研究了不同UEA膨胀剂掺量下管道结晶量的变化情况。

在计算理论方面,曾祥纪^[13]采用定量化研究,构建了考虑“水动力(湍流)-溶质弥散-化学反应”的多场耦合数值模型。研究得出在实际应用中可采取局部降温或者增加排水管道内水流流速的方式实现

对管道结晶问题的预防及治理。黄骤屹^[14]结合水动力学在DBL理论的基础上,推导出结晶沉淀速率函数关系式。周卓^[15]利用经验公式以及DBL理论计算了隧道排水管内结晶物的结晶速率。徐筱^[16]提出了结晶物质量预测模型,研究过程中对基于溶解-沉积理论的隧道排水系统晶体质量预测函数进行了优化修正。

关于结晶问题的预防和处理,主要分为机械法、物理法、化学法、生物法等。最为常见且方法采用最多的隧道排水系统堵塞疏通方法是机械法^[3],顾名思义就是利用机械设备(高压水射流清洗技术以及管道机器人)直接对管壁结晶物进行处置。物理法主要包括:(1)施工改造提升排水系统,现有的物理手段可以采用波形纵向排水管代替一般的纵向排水管^[15],也可采用分层排水系统^[17],或边沟底部打设降水井,用明沟排水沟替代原有的侧式暗沟^[18];(2)采用降低结晶沉淀附着率的思路,改进隧道排水管内壁镀层或内壁粗糙程度,让新产生的结晶物难以附着挂壁沉淀^[19];(3)在隧道排水管周围加入电场或磁场作用^[20],可有效防止水中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 等离子的结合而产生结晶体;(4)管壁植绒技术^[21]。化学法是指通过加入酸性溶液^[22]或者高性能阻垢剂^[23],改变水中环境的pH度。一方面可以抑制 CaCO_3 、 BaSO_4 、 CaSO_4 等结晶物的生成;另一方面也可以通过化学反应溶解结晶物。生物法是指可在排水管内加入可以产生CA(碳酸酐酶)的细菌,它可以迅速催化掉水中 CO_2 ,减少形成 CO_3^{2-} ,这样可很大程度上加速碳酸盐的溶解速率^[24]。

目前,隧道结晶问题的机理研究主要以模拟试验入手,常规的处理手段是改造原排水系统,工程量较大。本文以浙江省某隧道的结晶处置为例,基于现场实测数据研究分析了结晶的形成机理和病害发展过程,特别是设计了可控流速的冲洗系统植入原排水系统,工艺简单,确保了结晶病害得到有效处理,并便于后期维护。

1 隧道概况

该隧道属越岭隧道,处于低山丘陵区,最大埋深约390 m,隧址区地面最高点高程约为550 m,地形坡度为 $15^\circ \sim 40^\circ$ 。根据区域地质资料、工程地质调绘,隧址区揭露3条断层见图1,其中Fc9断层宽度大,Fc7、Fc8宽度较小,与隧道大角度相交,呈压碎岩状,岩体破碎,对隧道影响较大,节理裂隙很发育,岩石

破碎,水文地质条件较复杂,稳定性差。

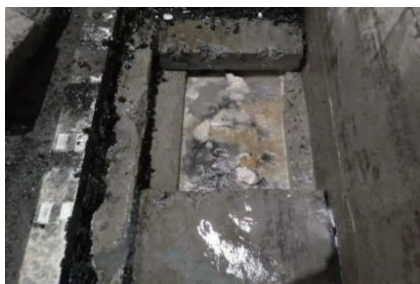


图1 路侧排水沟堵塞

隧道围岩地层主要是白垩系黄尖组(K_1h)的晶屑凝灰岩,进口段部分白垩系劳村组(K_1l)的粉砂岩,出口段部分奥陶系印渚埠组(O_1y)的钙质泥岩。隧道纵坡设计为单向坡,坡率为 -1.25% 。

2 结晶渗水情况和处置分析

2.1 第一次渗水

2021年3月4日,隧道右洞YK12+950~YK12+975段,路侧排水水沟内有大量白色结晶物凝结,导致水沟堵塞,地下水经铸铁盖板流出。长度范围约25 m,路面伴有渗水,并有较多白色结晶物(见图1)。

2.2 第二次渗水

2021年6月7日,隧道右洞(约YK12+800处),左洞(约ZK12+840处),路面出现集中渗水。经排查发现隧道(YK12+800~YK13+100、ZK12+840~ZK13+050段)侧式水沟内有大量白色及黄白色结晶物。

相应的处理措施包括:观察路面渗水处,划定出水区域,附近找出中央排水沟检查井。采用小型风镐机对沥青路面进行破除,掀开检查井盖板,利用高压水枪对中央排水沟进行清理(见图2)。清理完成后,采用机器人对中央排水沟进行检查,确保管道畅通后恢复检查井盖板和顶上路面对出水段落两侧路面排水沟进行开槽清理。

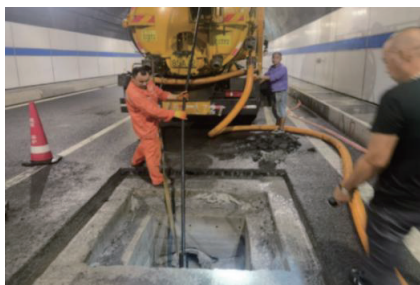


图2 中央排水沟检查井处理

2.3 第三次渗水

2021年11月3日,隧道右洞(约YK11+730处),左洞(约ZK11+630处),路面出现集中渗水,渗水处路面有白色结晶物(见图3)。隧道二衬施工缝及沉

降缝处有白色及黄白色结晶物,见图4。隧道ZK11+667人行横洞有积水,且有较多白色及黄白色结晶物。



图3 隧道路面渗水

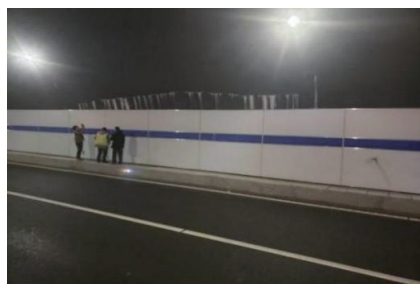


图4 隧道侧壁结晶渗水

3 隧道结晶问题原因分析

3.1 水质分析

取结晶处地下水化验与勘察期间地下水对比分析。

(1)pH值和碱度:pH值平均从7.43提高为10.89,总碱度从0.78提高为4.35。通过数据对比可以看出水质pH值明显提高,可见水质PH值在隧道排水系统中结晶过程发挥着作用^[25]。

(2) HCO_3^- 浓度:从平均47.28下降至12.97。可见地下水中的 HCO_3^- 在结晶过程中通过化学反应而消耗减少了,低 HCO_3^- 浓度的环境水是导致混凝土腐蚀的重要外因^[26]。

(3) Ca^{2+} 浓度:从平均15.0提高至35.84,因为喷射混凝土水化过程中 Ca^{2+} 含量高,地下水通过混凝土渗流,把 Ca^{2+} 带出到排水管中。

(4)其他离子浓度: Na^+ 和 K^+ 从平均10.38提高至130.69, SO_4^{2-} 从7.20提高至34.01, Cl^- 从32.83下降至16.10,说明这些离子浓度对隧道排水系统中的结晶沉积有间接影响^[27]。

通过对原始地下水检测,地下水平均酸碱度值为7.43, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度平均值为10.38 mg/L,而 CO_2 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 均在正常范围内,且该些离子并不具侵蚀性。因此通过检测分析可以排除本隧道结晶是岩溶水中析出^[28]。因为该隧道排水系统中的水质与岩溶

地下水水质明显不同。

3.2 结晶体检测分析

对隧道排水管中结晶体成分进行检测分析,结晶物的主要成分为 CaCO_3 ,其质量分数达 80%~90%。在对该隧道的地下水水质分析检测得出的数据结果中, Ca^{2+} 浓度质量为 35.8 mg。因此可以排除 CaCO_3 晶体中 Ca^{2+} 来源于地下水,因此进一步可以推断结晶体中 Ca^{2+} 主要来源于隧道初支喷射的混凝土,这也与叶飞等人的文献^[10, 29]结论吻合。

截止目前,大量的研究充分证实了 CaCO_3 中 Ca^{2+} 来源于施工过程中隧道初支喷射混凝土,地下水渗流喷射混凝土过程中将其中的游离 Ca^{2+} 带出,地下水富含 HCO_3^- ,结合成 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 发生反应。 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = 2\text{CaCO}_3 \downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$ 。在这个化学反应过程中, Ca^{2+} 不断的析出被消耗,将更进一步的加剧地下水对隧道初支混凝土的侵蚀。

在高浓度的碳酸盐水质条件里,隧道初支喷射混凝土中的化学物质与水中的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等离子产生相互作用,主要包括:溶蚀作用、结晶作用、干湿循环作用。最终导致其内部结构溶解,剥蚀与孔隙结构改变,从而导致喷射混凝土整体宏观上物理力学性质发生改变^[30]。

3.3 时间发展变化分析

该隧道结晶体在形态上可分为软絮状、粉末块状和硬质结石状 3 种形态^[31]。在其他文献研究中一致判定由于形成时间较短,故为软絮状、粉末块状,并且在隧道施工期或运营初期最常见^[32],现场将排水管道打开后,和空气接触面加大,可以观察到有新的软絮状结晶出现,可以判断主要是 CO_2 和 Ca^{2+} 的反应,也反应了 CO_2 在碳酸钙结晶过程中起着至关重要的作用^[33-34]。

4 隧道排水系统结晶问题处理

4.1 总体原则

根据前阶段的初步处理验证、地下水水质分析等成果,考虑到水流速度越大,对结晶的剥蚀作用越显著,结晶物越不易在排水管壁黏附沉积。方案的基本思路就是保持排水出口的通畅,增大水流速度。考虑到本隧道位于水源保护地,环保要求高,遵循“以排为主,防排结合,因地制宜,综合治理”的原则,首先排除化学法和生物法;其次物理法中的“隧道排水管内壁镀层或改变内壁粗糙程度”、“隧道排水管周围加入电场或磁场作用”、“管壁植绒技术”等可参

考的案例不多;最终采用的是机械冲洗并修复改造排水系统的方案^[2]。若整体改造排水管路,造价较大,约 1 000 万元,考虑到结晶来源为隧道初支混凝土,结晶量将越来越小,设计了可控流速的冲洗系统植入原排水系统,其工艺简单,工程量较小,造价约 300 万元,后期维护和使用成本也较低。处理流程技术路线见图 5。

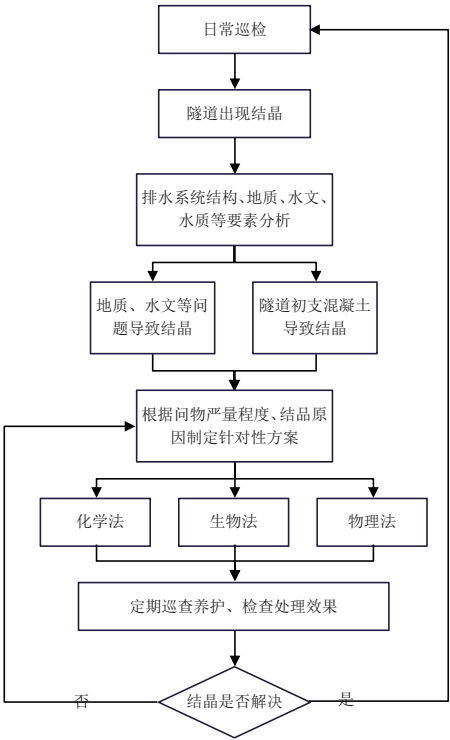


图5 处理流程技术路线图

4.2 中央排水沟疏通处理

左右洞全线逐个凿开中央检查井顶部路面沥青层、打开井盖,进一步了解中央排水管水位情况和结晶堵塞情况,以确定具体堵塞段落或堵塞点。采用高压水枪(必要时用管道机器人或定向钻等设备)对堵塞点进行疏通。

隧道中央排水沟检查井原设计纵向间距为 100 m,由于前两次中央排水管疏通冲洗过程中,发现高压冲洗车的水枪冲洗能力有限,不能完全可靠地疏通两检查井之间的 100 m 长排水管,因此要求在原设计检查井之间增设一处检查井,使检查井间距调整为 50 m。

管道疏通后在恢复路面前应用管道内窥镜等设备,探查管内结晶是否清除干净且无其他明显附着物,确保中央水管排水通畅。

沥青面层恢复前应确保检查井盖板放置准确以后需要时方便打开,然后盖回井盖盖板、施工路面、清理杂物恢复通行条件。

由于本隧道结晶物主要为碳酸钙,长期沉积后变致密坚硬,普通高压冲洗难以清除,困难路段可采用以下专业设备:

(1)脉冲地热疏通机,将水和气分段注入管道,在高压气体的作用下,介质水产生空爆效应,对管路内的淤泥、挂垢进行剧烈冲刷,以达到疏通扩径的目的。

(2)管道切割机器人(见图6),磨削头部件与风镐部件自由组合搭配,可切割C60以下混凝土,去除管壁结垢、水泥注浆块堵塞。



图6 管道冲洗机器人终端界面

4.3 隧道侧壁排水减压处理

为解决环向排水管堵塞问题,需要对隧道侧壁排水进行处理并对已有裂缝进行修复。施工工序如下:(1)在渗漏水施工缝部位离盖板顶10~20 cm高度,打泄水孔深度35 cm左右,不宜打穿防水板,通过逐段取芯查看孔内情况验证;(2)在泄水孔内埋设 $\phi 50$ mm的PVC引水管,管身设进水孔,见图7、图8;隧道侧壁临时拆下装饰板在二衬表面刻槽,电缆沟和沥青路面层打孔埋设引水管通过转接头,通往暗埋侧沟内;(3)打孔范围为墙身和施工缝有结晶的段落,并向两侧延伸1条施工缝,水量较大时,在施工缝中间增设泄水孔;(4)引水管内水流持续稳定后,清洗上纵向裂缝处下挂结晶体,用环氧树脂结构胶封闭裂缝。对二衬渗水其他

段落同样采用此方案将水引至路缘排水沟。



图7 隧道侧壁排水减压处理

4.4 增设高压冲洗装置

为避免今后管道再次堵塞,在中央检查井处预

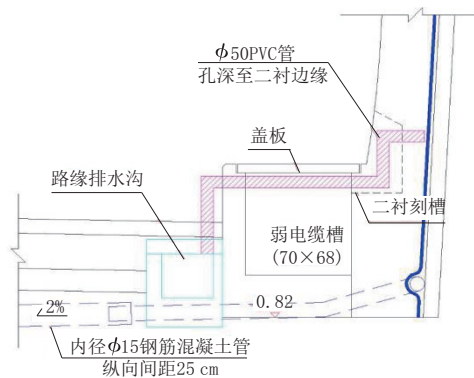


图8 隧道侧壁排水设计图

埋一根路面下横向DN65高压钢管(间距50 m),见图9、图10,连接到旁边的沉砂井内,作为以后日常冲洗的作业点,端部预留与高压钢管连接的卡口,平时封闭,清洗时通过接高压冲洗车接入清水。



图9 DN65高压水管埋设

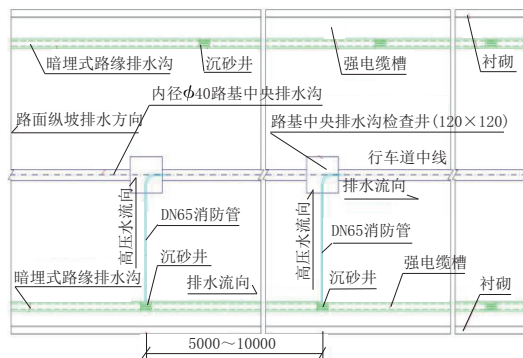


图10 高压水管设计图(单位:mm)

前2个月每周1次,第2个月时用隧道洞口出水量的观测,如果第2个月检测结果理想,可每半个月冲洗一次;定时用中央排水管充水试验,或者用工业内窥镜等设备进行观察中央排水管结晶情况,是否存在减少管径的结晶、泥沙或其他杂物等。至6个月根据总结经验,如果结果理想,可每逐渐延长冲洗周期,直至无明显的结晶发生。

5 结语

(1)本文针对某隧道出现的结晶体堵塞排水系统的病害情况,通过水质分析,结晶体扫描等手段,针对性的优化了原排水系统,增设了可调流速的高

压水冲洗装置,并取得较好效果。

(2)本文从现场实测数据入手,考虑到环保要求、结晶的成因,采用的是主流的物理法进行处理。但并没有新建整个排水系统,而是在原排水系统中植入高压冲洗装置,并结合工后定期冲洗和观测。本文的高压水冲洗装置造价较低,操作简单,无环境影响,可供类似工程参考使用。

(3)本文仅基于现场实测数据进行了分析,而隧道排水系统结晶堵塞过程复杂,内因主要包括:地下水水质类型、围岩类型、喷射混凝土特性。外因主要包括:溶液中 CO_2 含量、酸碱度、水流流速、含盐量、温度等。受到条件限制,并没有进行各个因素的综合分析。

(4)目前关于隧道排水系统结晶问题的理论研究并不完善,主要是由于其影响因素较多,相互耦合后导致结晶机理的不确定性。理论研究主要是依据室内试验,而处理方法又相对单一。建议综合现场实测和室内模拟试验进行数据分析,并综合水动力学、工程地质学、建筑材料学等进行理论研究。

参考文献:

- [1] 隧道建设. 2024年我国交通运输行业发展统计公报发布[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(6): 1101.
- [2] 柴天佑. 当金山隧道排水盲管结晶物形成原因分析及治理措施的探讨[J]. 甘肃科技, 2020, 36(10): 90-92.
- [3] 龙杰, 胡鸿川, 等. 岩溶地区隧道排水系统结晶及处治技术现状分析[J]. 公路交通科技, 2023, 40(5): 162-169.
- [4] 蒋雅君, 杜坤, 陶磊, 等. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 131-135.
- [5] 卢冠楠, 王鹏, 杨蕴, 等. 岩溶区隧道排水系统地下水渗流结晶堵塞机理及阻垢技术研究综述[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 11-20.
- [6] 周伟, 王永东, 李元飞, 等. 岩溶区隧道排水管道结晶沉淀水动力影响因素试验研究[J]. 公路, 2021, 66(3): 347-352.
- [7] 詹树高, 钟祖良, 陈宇波, 等. 岩溶隧道排水管道结晶堵塞机理及疏通试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊2): 717-721.
- [8] 翟明. 灰岩区隧道排水系统结晶堵塞规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [9] 同月苹, 田崇明, 叶飞, 等. 不同龄期隧道喷射混凝土渗流结晶规律研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(1): 272-282.
- [10] 叶飞, 王坚, 田崇明, 等. 预防隧道排水系统结晶病害的喷射混凝土配合比优化试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1634-1643.
- [11] 庞佳玮, 周莹, 等. 隧道表面结晶和排水管道堵塞原因分析及防治措施[J]. 混凝土, 2024(1): 186-192.
- [12] 黄靖凯. 灰岩地区公路隧道仰斜排水管道结晶致塞机理与处治方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2024.
- [13] 曾祥纪, 刘华, 党悦, 等. 铁路隧道排水系统结晶堵塞量化研究[J]. 铁道勘察, 2022, 48(6): 144-151.
- [14] 黄骅屹, 王永东, 徐仁华, 等. 基于DBL理论的隧道排水管道岩溶结晶规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1638-1645; 1670.
- [15] 周卓. 岩溶地区地下水渗流结晶堵塞隧道排水管道机理研究及处治建议[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [16] 徐筱, 张胤, 李杰, 等. 岩溶区隧道排水管道结晶规律模型试验[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 133-139.
- [17] 王庆龙, 武东阳, 赵兴春, 等. 南腊隧道排水系统结晶堵塞机理与处置措施[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(11): 89-93.
- [18] 张兴华, 钟文健, 王辉, 等. 公路隧道排水系统结晶堵塞治理[J]. 广东公路交通, 2023, 49(1): 61-66.
- [19] 郭小雄. 铁路隧道排水系统结晶机理及应对措施研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 71-77.
- [20] 陈昱池, 陈相阁, 张学富, 等. 基于磁处理法的隧道永磁体排水管道防结晶试验[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12): 2105-2111.
- [21] 刘士洋, 张学富, 吕获印, 等. 植绒PVC管对隧道排水管道防除结晶的作用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(21): 313-319.
- [22] 蒋雅君, 杜坤, 周睿, 等. 隧道排水盲管结晶有机酸清洗剂溶解效果试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊2): 137-143.
- [23] 汪志良. 公路隧道排水管道结晶堵塞影响因素及防治对策研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [24] 雷林, 华永利, 李冠鹏, 等. 兰渝铁路胡麻岭隧道盲管堵塞病害分析与处理[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 149-153.
- [25] 向坤, 周杰, 张学富, 等. 碱性环境隧道排水管道结晶规律室内试验研究[J]. 隧道建设, 2019, 39(2): 207-212.
- [26] 胡明玉, 徐旺敏, 何害, 等. 江西省大中型混凝土水库大坝溶出性侵蚀调查研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(4): 54-59.
- [27] 叶飞, 王坚, 田崇明, 等. 隧道排水管道结晶堵塞病害研究现状与防治技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(3): 13-22.
- [28] 田崇明, 叶飞, 宋桂锋, 等. 隧道排水系统结晶堵塞机理及防治措施初探[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5): 66-76.
- [29] RINDER T, DIETZEL M, STAMMEIER JA, et al. Geochemistry of coal minedrainage, groundwater, and brines from the Germany mine: A coupled elemental-isotopic approach[J]. Applied Geochemistry, 2020, 121: 104693.
- [30] 王亚奇. 白云岩隧道喷射混凝土碳酸盐结晶致损机理[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [31] 刘禹阳, 席龙龙, 来弘鹏, 等. 富钙围岩隧道排水系统结晶物与水环境时空变化规律及结晶路径分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 217-226.
- [32] 马文镇, 张豹, 张彦龙. 公路隧道排水系统结晶堵塞机理及处治措施[J]. 广东公路交通, 2021, 47(5): 52-56.
- [33] 张春洋. 西北高铁隧道盲管结晶堵塞机理及防治措施研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [34] 董朝阳, 朱耀璋, 张亮, 等. CO_2 对隧道盲管水体结晶的影响及控制措施研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(1): 20-22.
- [35] 穆松, 周莹, 谢德擎, 等. 非岩溶地区隧道排水管道堵塞模型及其应用[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1706-1712.