文章编号：1001-4632（2025）06-0099-12

引用格式：于本田，赵康康，杨玉祥，等. 铁路隧道排水盲管结晶堵塞机理及喷射混凝土钙溶蚀研究[J]. 中国铁道科学，2025，46(6)：99-110.

Citation：YU Bentian，ZHAO Kangkang，YANG Yuxiang，et al. Research on the Crystallization Blockage Mechanism of Drainage Blind Pipe and Calcium Dissolution of Shotcrete in Railway Tunnel [J]. China Railway Science，2025，46（6）：99-110.

铁路隧道排水盲管结晶堵塞机理及喷射混凝土钙溶蚀研究

于本田[1]，赵康康[1]，杨玉祥[2]，李 盛[1]，王天勇[3]，白银银[3]

（1. 兰州交通大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730070；
2. 中交第二公路工程局有限公司，陕西 西安 710061；
3. 中铁十二局集团第四工程有限公司，陕西 西安 710000）

摘 要：为解决铁路隧道排水盲管结晶堵塞病害，依托某非岩溶区黄土铁路隧道工程，首先采用滴定法以及核磁共振仪（NMR）、X射线衍射仪（XRD）、电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）、扫描电镜（SEM）及能谱仪（EDS）等设备，测试隧道排水路径不同位置水样中离子种类与浓度，结晶物的矿物组成与微观形貌，阐释其结晶机理；其次设计并开展加速溶蚀试验，分析NH_4Cl加速溶蚀作用下喷射混凝土的孔结构、水化产物及侵蚀形貌变化规律，并在此基础上计算排水盲管堵管时间及Ca^{2+}溶出率。结果表明：该隧道排水盲管结晶物主要为棱状球面、鳞片状、不规则方形及纺锤形貌的$CaCO_3$，且主要为喷射混凝土中$Ca(OH)_2$溶出的Ca^{2+}与空气中CO_2反应形成，Ca^{2+}的溶出导致喷射混凝土内部微小孔、中孔增多，从而加剧结晶物的生成和堵塞病害；计算得到的加速溶蚀试验中的加速效率为自然溶蚀的14.4倍；根据依托工程得到的喷射混凝土Ca^{2+}溶出率拟合函数能确定任意使用年限不发生堵管的临界Ca^{2+}溶出率，并可反演计算出隧道发生堵管的具体时间。

关键词：铁路隧道；排水盲管；喷射混凝土；结晶；碳酸钙；Ca^{2+}溶出率

中图分类号：U453.6 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.10

能够及时、顺畅排出地下水的隧道排水系统，是保证隧道衬砌结构安全的关键之一[1]，有研究显示，约70%的衬砌渗漏水是隧道排水管堵塞而引起的[2]。结晶物堵塞排水管后，会导致地下水的水位上升[3]、围岩孔隙的水压力增大，进而引发围岩力学性质劣化、衬砌开裂、渗漏等病害[4]，严重时甚至可引起衬砌结构变形、掉块等病害，对隧道运营安全构成重大威胁[5]。相关调研揭示，富水区的铁路、公路隧道普遍存在排水系统结晶堵塞问题[6]，如我国重庆地区隧道排水系统的结晶率高达69.3%[7]。排水盲管结晶堵塞又会对隧道运营维护带来显著负担，如奥地利铁路在隧道排水系统检查和维护上的费用占隧道总运营成本的15～20%，且这一费用还在逐年增长[8]。可以预见，随着我国高压富水、岩溶等地区隧道数量的逐年上升，排水系统结晶堵塞渗漏病害问题会愈发具有普遍性，治理难度也随之进一步加大。隧道结晶堵塞病害防治已成为保障隧道安全运营所亟待解决的难题。

堵塞物在形成上涉及物理、化学以及生物作用，在来源上包括围岩冲刷颗粒、碳酸盐结晶、泥沙和植物等[2, 9-10]，其中碳酸盐类沉淀物对排水系

收稿日期：2024-03-05；修订日期：2025-07-24

基金项目：甘肃省科技计划项目（25JRRA1161）；中央引导地方科技发展资金资助项目（22ZY1QA005）；甘肃省基础研究创新群体项目（21JR7RA347）；宁夏回族自治区重点研发计划项目（2022BEG02056）；甘肃省自然科学基金资助项目（24JRRA233）

第一作者：于本田（1979—），男，辽宁省丹东人，教授，博士研究生导师，博士。E-mail：yubentian@mail.lzjtu.cn

统的影响最为严重。深入研究岩溶区和非岩溶区的隧道排水盲管结晶物后发现：岩溶地区结晶物主要来源于可溶性碳酸盐围岩的溶解，非岩溶地区结晶物主要来自喷射混凝土的溶蚀破坏[6]；堵塞物主要为白色糊状或块状结晶物[11]，形貌多样，如方形、菱形和纺锤形等[12−13]，主要成分为$CaCO_3$，占结晶物总量的97%[14]，其中Ca^{2+}主要来源于围岩和喷射混凝土，CO_3^{2-}则来源于岩层和空气中的CO_2[4, 15]。研究表明隧道结晶物$CaCO_3$的形成与CO_2分压、pH值、温度、离子种类及浓度和地下水流速等因素有关，且上述各因素在耦合作用下影响$CaCO_3$沉淀的形成[16−17]。在现场调研基础上，包立征[18]利用饱和指数法、稳定指数法对碳酸钙结垢趋势进行预测。吴玉哲等[19]发现黄土隧道排水盲管中结晶物的主要成分包括石灰石、白云石和水镁石，其中Ca^{2+}、Mg^{2+}主要来自于隧道上覆土层中的钙质、镁质盐类，CO_3^{2-}主要来源于地下水中溶解的CO_2。但也有学者对混凝土中钙浸出机制进行了研究，发现结晶物中的Ca^{2+}主要来源于喷射混凝土中可溶性$Ca(OH)_2$，少量来源于C-S-H凝胶[20]。混凝土中钙溶蚀试验研究受时间局限，完全通过试验对水泥基材料寿命进行预测较难实现，目前只有Tragardh等[21]研究了90年内水库库区混凝土的钙溶蚀变化情况，而其他大多数关于混凝土中钙溶蚀预测的研究都基于短期试验结果，并在结合相关理论的基础上建立了不同的钙溶蚀模型。Kamali等[22]基于试验提出了硝酸铵溶液侵蚀下的钙溶出预测模型，Segura等[23]在此基础上进一步完善该预测模型；之后大量学者对此模型进行了进一步完善，考虑了$Ca(OH)_2$、C-S-H脱钙影响，提出固液平衡曲线模型[24−25]，但该模型并未考虑碳酸钙结晶体生长的动力学因素。Ye等[26]研究了铝酸钠对喷射混凝土中CH、C-S-H的脱钙影响，发现高剂量的铝酸钠能增强喷射混凝土的抗钙浸出能力，由此提出了Ca^{2+}扩散模型。Kuhl等[27]基于普通混凝土，建立了化学-机械耦合作用下Ca^{2+}输出扩散模型。周卓[9]基于DBL理论计算了$CaCO_3$沉淀结晶速率，Zhang等[28]、Li等[29]建立了碳酸钙结晶生长的动力学模型，穆松等[10]在建立隧道排水管堵塞模型的基础上，研究了加速溶蚀条件下的Ca^{2+}溶出，构建了临界钙离子溶出率函数模型。这些模型主要探讨了混凝土中Ca^{2+}溶出机制，但未对Ca^{2+}的溶出情况进行定量研究，且未开展关于非岩溶黄土地区喷射混凝土的Ca^{2+}溶出量模型的相关研究。与岩溶区隧道相比，针对黄土地区隧道排水盲管内结晶物成分和水质方面的研究较少，特别是对喷射混凝土中Ca^{2+}的溶出量鲜有研究，缺乏喷射混凝土Ca^{2+}溶蚀与盲管结晶堵塞的关系模型。

本文依托某非岩溶区黄土铁路隧道工程，采用滴定法以及核磁共振仪（NMR）、X射线衍射（XRD）、电感耦合等离子体质谱（ICP-MS），以及扫描电镜（SEM）和X射线能谱仪（EDS）等设备，对隧道排水路径不同位置的水样中离子种类、浓度，结晶物的矿物组成、微观形貌与NH_4Cl加速溶蚀作用下喷射混凝土的孔结构、水化产物、侵蚀形貌进行了测试，分析结晶物成分来源，阐释结晶机理。建立喷射混凝土Ca^{2+}溶出率函数模型，反演计算非岩溶区铁路隧道排水盲管结晶堵塞年限。

1 依托工程地质及结晶病害情况

某非岩溶区在建隧道为单洞双线铁路隧道，复合式衬砌结构，最大埋深395 m，初期支护采用喷锚支护，C25喷射混凝土，厚度40 cm；二次衬砌采用C40钢筋混凝土，厚度50 cm。环向排水盲管直径50 mm，纵向排水盲管直径80 mm。隧址区为子午岭低中山区，植被较密，坡面黄土覆盖，最大厚度130 m；年最大降雨量998.7 mm。地性岩层为第四系时期形成的坡积层、滑坡堆积层、风积层，土质主要为黏质浅黄色黄土，土质较均，夹杂有白色钙质斑点，有下伏三叠系形成的泥、钙质胶结页岩，砂岩，泥岩以及破碎程度极高的压碎岩，为典型非岩溶地区。地下水发育为黄土孔隙潜水、基岩裂隙水及构造裂隙水，裂隙水补给以大气降水为主，为弱、中等富水区。

该隧道在建设期就已出现不同程度的结晶现象，如图1所示。结晶物呈乳白色，主要分布在排水盲管内和出口处、排水沟、喷射混凝土表面等位置，盲管内的结晶物呈糊状，夹杂有泥沙，二衬表面排水盲管出口下部的结晶物失水后堆积成板状、块状，硬度较低，可用硬物轻轻刮下，且部分表面呈颗粒状，分层特征较为明显，厚度不一。分析认为该种情况是季节性地下水流速不同导致，因地下水流速较慢且水量较大，形成的结晶层厚度较大。未浇筑二衬的初支表面均附着有白色结晶物，分布较为零散。



（a）边墙墙角盲管口结晶物　（b）侧沟盲管口结晶物　（c）隧道初支边墙渗漏水结晶物　（d）隧道初支拱腰渗漏水结物晶

图 1　隧道内不同位置结晶情况

2　隧道结晶机理分析

2.1　结晶物成分及微观形貌

采用 XRD-MiniFlex 600 型对在隧道排水沟与排水管处采集的结晶物进行成分测试，结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，测试图谱为典型结晶体特征峰，峰形较为尖锐，杂峰较少，衍射角 2θ 为 29° 时峰值最高。结晶物衍射图谱特征峰与 $CaCO_3$ 晶体特征峰高度吻合，因此可推断出结晶物主要成分为 $CaCO_3$。

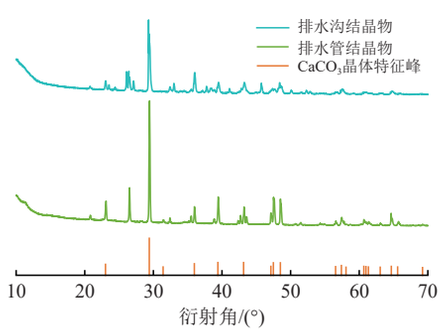
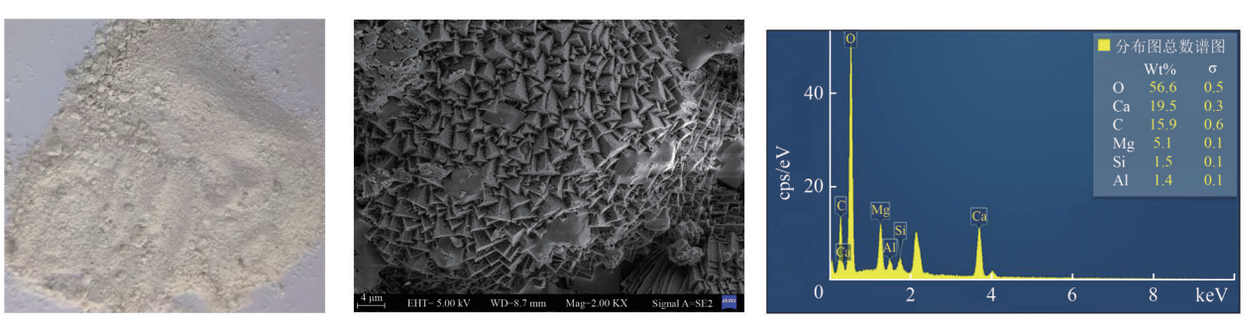
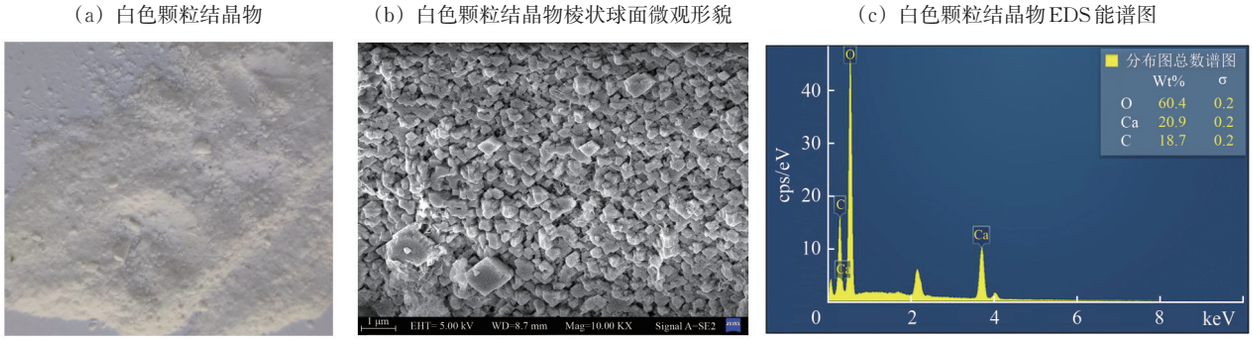


图 2　结晶物 XRD 图谱

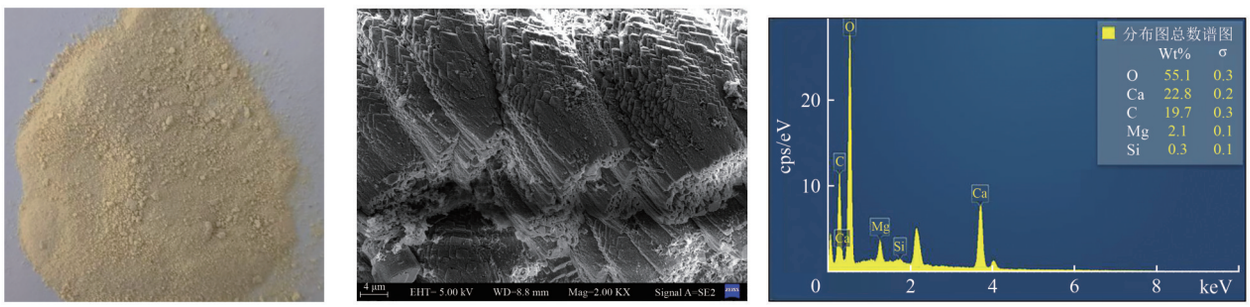
隧道不同位置采集得到的结晶物颜色与形态差别较大，有白色颗粒、乳白色颗粒、黄色粉状颗粒以及黄色片状。为分析这一原因，取不同位置的结晶物并在 80 ℃下烘干，并利用 ZEISS Gemini SEM 500 场发射扫描电镜及能谱分析仪测试其微观形貌及元素种类，如图 3 所示。由图 3 可知：宏观颜色与形态不同的结晶物不仅在微观形貌上差距较大，而且尺寸大小差距明显；微观形貌有棱状球面、鳞片状、不规则方形、纺锤形和菱形等，其中棱状球面和鳞片状结构较为紧密，而不规则方形、纺锤形和菱形等较为松散。EDS 能谱分析发现，结晶物



（a）白色颗粒结晶物　（b）白色颗粒结晶物棱状球面微观形貌　（c）白色颗粒结晶物 EDS 能谱图



（d）乳白色颗粒结晶物　（e）乳白色颗粒结晶物不规则方形微观形貌　（f）乳白色颗粒结晶物 EDS 能谱图



（g）黄色颗粒结晶物　（h）黄色颗粒结晶物鳞片状微观形貌　（i）黄色颗粒结晶物EDS能谱图

（j）黄色片状结晶物　（k）黄色片状结晶物纺锤形和菱形微观形貌　（l）黄色片状结晶物EDS能谱图

图3　结晶物宏观形态、微观形貌及EDS能谱图

元素含量为O>Ca>C，而$CaCO_3$晶体具有不同微观形态主要是受Mg^{2+}、Na^+、K^+等离子及其温度、pH值和动力学效应等的影响所致[18, 30]。

2.2　水质分析

为确定结晶物来源，分别在隧道的掌子面、喷射混凝土表面、隧道内排水沟以及隧道排水沟出口处采集水样，图4为采用滴定法、安捷伦7900型电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）及pH计测试得到水样中离子种类、质量浓度和pH值结果。由图4分析可得到如下结论。

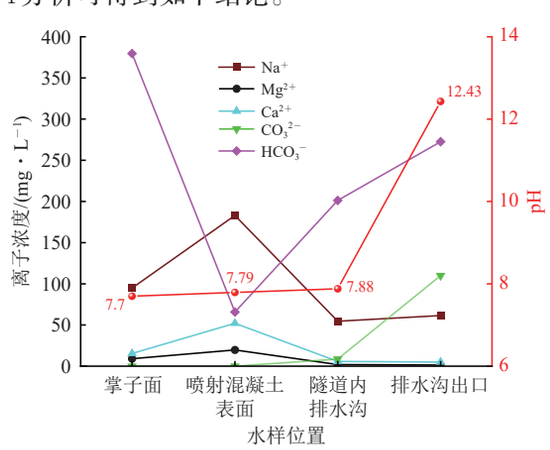


图4　不同位置处水样中离子质量浓度

（1）掌子面围岩水样中，HCO_3^-离子含量较高，可能是因为隧道开挖引起地层扰动，由此造成微生物通过生物作用释放CO_2[31]；但地下水渗透穿过喷射混凝土后，水样中的HCO_3^-含量大幅降低，这是因为水泥水化产生的OH^-、Ca^{2+}离子与HCO_3^-离子反应生成了$CaCO_3$沉淀。

（2）掌子面围岩水样中，HCO_3^-之外其他离子的含量普遍较低；地下水渗透穿过喷射混凝土后，喷射混凝土表面水样中的Mg^{2+}、Ca^{2+}和Na^+离子质量浓度明显提高，而隧道内排水沟水样中3种离子的浓度大幅下降，说明这3种离子来源于隧道喷射混凝土，且会在排水盲管中产生沉淀，导致掌子面围岩水样中相应离子的浓度降低。

（3）喷射混凝土表面水样中CO_3^{2-}离子含量为0，没有游离的CO_3^{2-}，说明可能已在隧道排水盲管中完全结晶沉淀，而水样中仍存在着Ca^{2+}和Mg^{2+}离子，说明这些阳离子有盈余，若水中引入CO_3^{2-}则可能导致结晶体的进一步增加，这与文献［32］的观点相一致。

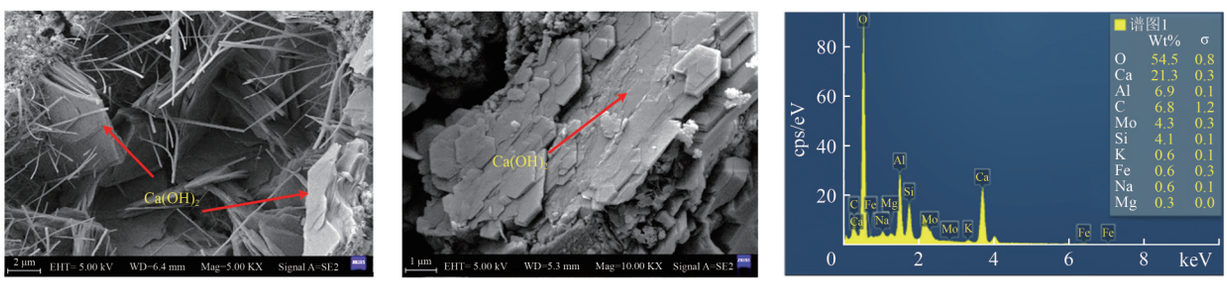
（4）隧道排水沟出口处水样中，CO_3^{2-}与HCO_3^-离子浓度显著增加，这是空气中大量CO_2融入水中并电离产生的，说明CO_2含量对结晶体的形成有重要作用。

由以上分析可判定，隧道排水系统中结晶物的Ca^{2+}主要来自喷射混凝土，CO_3^{2-}主要来自隧道开挖岩层破坏释放的和空气中的CO_2。

2.3　喷射混凝土芯样溶蚀分析

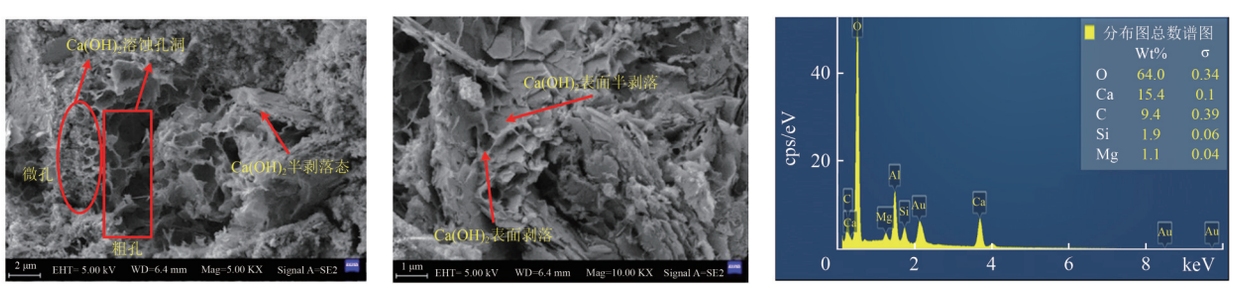
为探究喷射混凝土中Ca^{2+}来源，现场取发生

溶蚀前后的喷射混凝土芯样，利用ZEISS Gemini SEM 500场发射扫描电镜及附带的能谱仪，测试得到芯样的微观形貌与元素分析结果如图5和图6所示。溶蚀发生前，喷射混凝土中$Ca(OH)_2$有片状和层状2种堆积形态。由图5和图6可以看出：呈片状时$Ca(OH)_2$分布较为松散，而呈层状时$Ca(OH)_2$堆积致密且表面较为光滑；当$Ca(OH)_2$完全溶蚀时，喷射混凝土内部会生成大量大小不一的蜂窝状空洞，而当$Ca(OH)_2$部分溶蚀，即半溶蚀时，片状的$Ca(OH)_2$出现了剥落；溶蚀破坏后的剩余水化产物主要元素为C、O、Mg、Al、Si和Ca，其中Ca元素含量占比为15.4%，而溶蚀前Ca元素含量占比为21.3%，溶蚀的发生导致Ca元素的含量降低5.9%，同时C元素含量有所增加，推测是因为$Ca(OH)_2$分解后一部分的Ca生成了$CaCO_3$。



（a）片状$Ca(OH)_2$　　（b）层状$Ca(OH)_2$　　（c）喷射混凝土溶蚀前EDS能谱图

图5　隧道喷射混凝土溶蚀前微观形貌与元素分析



（a）片状$Ca(OH)_2$完全溶蚀　　（b）层状$Ca(OH)_2$半溶蚀　　（c）喷射混凝土溶蚀后EDS能谱图

图6　隧道喷射混凝土溶蚀后微观形貌与元素分析

3　喷射混凝土加速溶蚀试验

地下水环境中的水泥基材料会发生钙溶蚀现象，这是因为孔隙溶液与周围水之间存在钙离子浓度差，导致钙离子不断扩散到混凝土外部。为了维持钙离子平衡，水化产物中的$Ca(OH)_2$、C-S-H凝胶会溶解脱钙，从而引起混凝土的钙溶蚀[33]。这一过程可以按照侵蚀机理分为物理侵蚀和化学侵蚀2类。物理侵蚀指在软水环境中，钙离子通过溶解和扩散的方式被溶出；化学侵蚀是指水泥基材料中的水化产物与水中的腐蚀介质发生化学反应导致水化产物分解脱钙[37]。钙溶出对混凝土微观结构具有显著的劣化效应，持续脱钙在造成孔隙率增加的同时，更会导致孔隙结构粗化与连通性增强，降低混凝土耐久性。因此，有必要进一步研究钙离子流失量与溶蚀时间之间的关系，这对分析混凝土耐久性具有重要意义。

3.1　加速溶蚀试验

3.1.1　试验原理

自然条件下的混凝土溶蚀非常缓慢，在静水中浸泡100年的侵蚀深度仅为5～10 mm[26]，因此开展相关试验时通常采用加速方法，以便在有限时间内评估混凝土的脱钙行为。常用的加速方法有压力水加速法、去离子水加速、电化学加速法和化学试剂加速法等[38]，其中化学试剂加速法因高效且相对易实现的特性，成为混凝土溶蚀加速的常用方法。本次试验采用化学溶蚀加速法，侵蚀介质为6 mol·L^{-1}的NH_4Cl溶液[10, 34−35]，其原理是NH_4Cl溶于水后产生的H^+溶液呈弱酸性，可与水泥水化产物发生化学反应，从而诱导水泥石溶解，并对水泥基材料产生破坏性影响，具体反应机理为

$$Ca(OH)_2 + 2NH_4Cl \leftrightarrow Ca^{2+} + 2OH^- + 2H^+ + 2NH_3 + 2Cl^- \leftrightarrow CaCl_2 + 2NH_3aq + 2H_2O \quad (1)$$

$$NH_3 \cdot H_2O \leftrightarrow NH_3 + H_2O \quad (2)$$

考虑到隧道喷射混凝土的冲刷溶蚀特征，采用文献［10］设计的溶蚀加速方法，试验装置如图7所示，其中管道、控制阀和流量计等设备均采用PVC材质。选用的侵蚀介质为分析纯级NH_4Cl，使用蒸馏水配制。

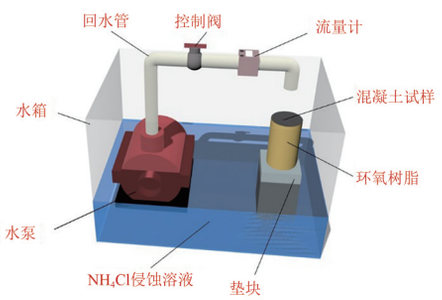


图7 加速冲刷溶蚀装置

3.1.2 芯样原材料及制备

隧道喷射混凝土强度等级为C25，配合比见表1。其中：水泥采用翼东水泥铜川有限公司生产的P·O 42.5普通酸盐水泥，化学组成见表2；粉煤灰采用宁夏马莲台电厂生产的F类Ⅱ级粉煤灰，化学组成见表3；砂采用汉中河砂，为2区中砂，含泥量2.0%，细度模数2.8；采用5～10 mm连续级配碎石，含泥量0.6%，针、片状颗粒总含量为2%；速凝剂和减水剂采用山西康特尔精细化工有限责任公司生产的KTWJS型无碱速凝剂和聚羧酸高性能缓凝型减水剂，性能分别见表4和表5。

表1 喷射混凝土配合比 kg·m^{-3}

水泥	粉煤灰	砂	碎石	速凝剂	减水剂	水
374	93	826	826	4.67	37.36	189

表2 水泥化学组成 %

CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	SO_3	Fe_2O_3	LOI
64.77	18.90	4.66	3.44	1.25	3.38	2.51

表3 粉煤灰化学组成 %

SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	SO_3	Fe_2O_3	LOI
45.60	5.99	22.50	0.65	1.38	12.70	1.06

表4 速凝剂性能

凝结时间/min		1 d抗压强度/MPa	28 d抗压强度比/%	碱含量/%	氯离子含量/%
初凝	终凝				
3	10	10.9	92	0.93	0.07

表5 减水剂性能 %

减水率	沁水率比	含气量	碱含量	氯离子含量	7 d抗压强度比
32	7	2.4	7.59	0.09	168

所用芯样均从隧道内同条件养护1年喷射成型的混凝土大板上钻取；芯样为直径100 mm、高度120 mm的圆柱体，钻取位置如图8所示。

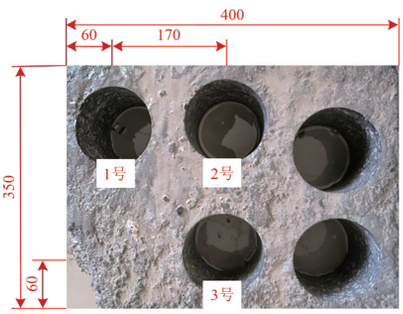


图8 加速试验试样钻取位置（单位：mm）

3.1.3 试验方法与结果表征

按照芯样位置的不同，设置3组试验并同时进行。试验时，将芯样置于液面以上，侧面涂抹环氧树脂，以模拟隧道喷射混凝土实际溶蚀过程；设置冲刷速率为4 L·min^{-1}，温度为20 ℃，pH为5.82～6.45，每3 d取溶液并采用ICP-MS进行Ca^{2+}浓度测试后，更换侵蚀溶液。

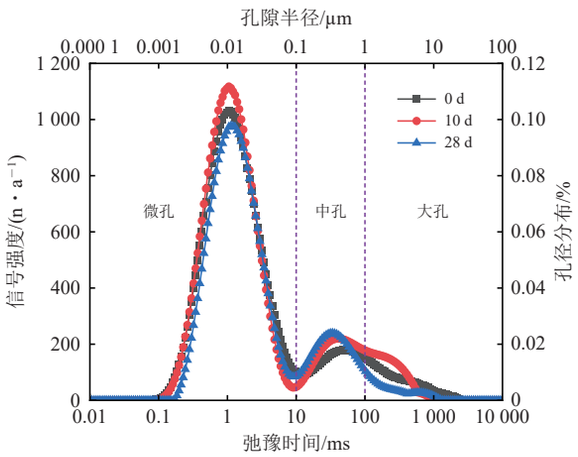
利用纽迈MacroMR12-150H-I大口径核磁共振成像分析仪（NMR），对不同侵蚀龄期的圆柱体芯样进行孔结构测试分析，H质子共振频率设置为23.320 MHz，磁感应强度为（0.3±0.05）T，重复间隔时间T_W为2 000 ms，扫描数N_S为128。

4 试验结果与讨论

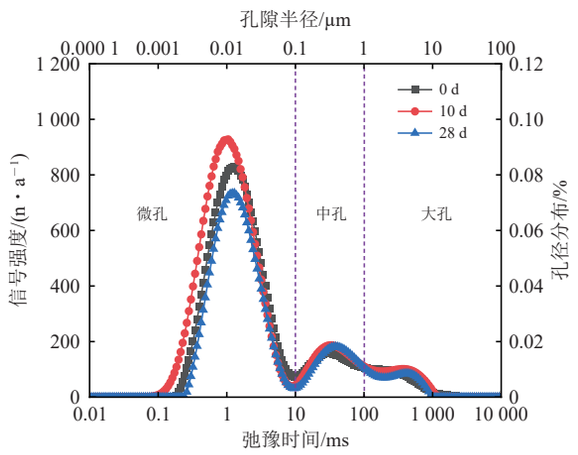
4.1 微观测试结果与分析

1）孔结构变化

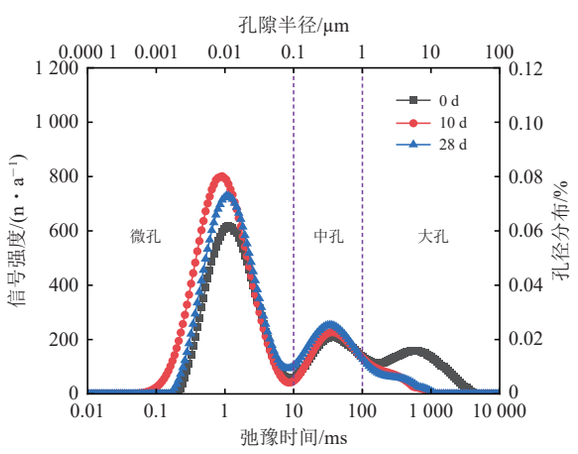
开展核磁共振测试的目的是测定混凝土横向弛豫时间T_2。弛豫时间能够反映样品内部氢质子的束缚程度及自由度，从而反映混凝土内部孔隙的结构特征。一般来说，T_2图谱中的横坐标与孔径尺寸有关，峰面积与孔隙数量有关；弛豫时间T_2越长，则孔隙半径越大，孔隙水自由度越大，受约束力越小[36]。依据孔隙分类标准[37]，按孔隙半径r分为微孔（$r<0.1$ μm，$T_2<10$ ms）；中孔（0.1 μm$\leqslant r\leqslant$1.0 μm，10 ms$\leqslant T_2\leqslant$100 ms）和大孔（$r>1.0$ μm，$T_2>100$ ms），得到不同侵蚀龄期下3组试样的孔结构特征T_2谱图如图9所示。由图9可以看出：分别侵蚀10和28 d后，T_2谱均比没有侵蚀时的偏左，说明随着NH_4Cl侵蚀液侵蚀龄期的延长，喷射混凝土钙溶蚀破坏程度逐渐加重，Ca^{2+}



（a）1号钻芯试样



（b）2号钻芯试样



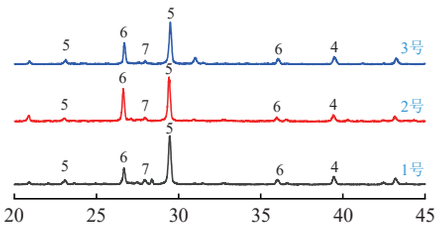
（c）3号钻芯试样

图9　不同喷射混凝土钻芯试样的 T_2 谱

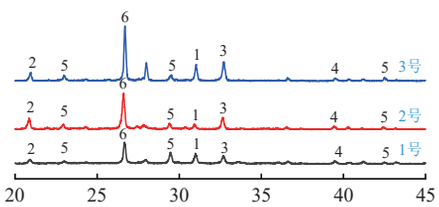
流失逐渐增多，导致微小孔不仅数量上增多，而且还会随着侵蚀龄期的延长逐渐劣化为中孔。

2）水化产物变化

图10为NH_4Cl溶液侵蚀前后，3组隧道喷射混凝土芯样的水化产物。由图10可以看出：侵蚀前，样品中$CaCO_3$的衍射峰最高，SiO_2次之，存在



（a）侵蚀前



（b）侵蚀后

1—$CaMg(CO_3)_2$　2—Al_2O_3　3—Ca_2SiO_4　4—CaO　5—$CaCO_3$　6—SiO_2　7—$Ca(OH)_2$

图10　水化产物分析图谱

$Ca(OH)_2$衍射峰；侵蚀后，样品中$Ca(OH)_2$的衍射峰消失，表明$Ca(OH)_2$发生了溶蚀破坏，Ca^{2+}流失，而$CaMg(CO_3)_2$与Ca_2SiO_4的衍射峰逼侵蚀前更为明显，说明$Ca(OH)_2$溶蚀破坏后，一部分Ca^{2+}与喷射混凝土中的水化产物结合成了新的化合物，即$Ca(OH)_2$虽然发生了溶蚀破坏，但Ca^{2+}并未完全流失。

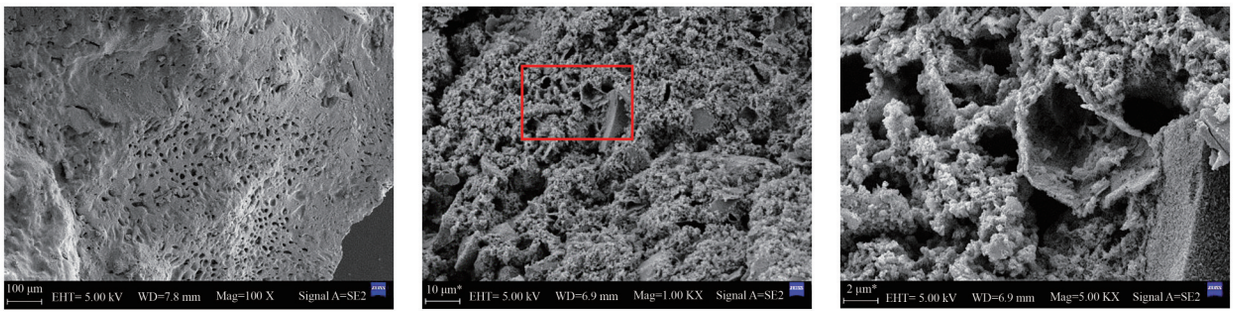
3）溶蚀后微观形貌

图11为以NH_4Cl溶液侵蚀模拟加速溶蚀作用下，隧道喷射混凝土芯样发生溶蚀破坏后的微观形貌，其中图11（c）为图11（b）中红框区域的进一步放大。由图11可以看出：$Ca(OH)_2$晶体已无法被明显观察到；喷射混凝土发生溶蚀破坏后，孔洞分布密集且孔径明显增大，孔洞数量的增加可能是$Ca(OH)_2$发生溶蚀破坏后，Ca^{2+}大量流失而导致的；孔隙直径最大约5 μm，在凝胶孔放大5 000倍下，可以看到水化产物腐蚀剥落较为严重；氯化铵溶液侵蚀、钙溶蚀不断加剧的过程中，喷射混凝土芯样侵蚀表面首先出现微小孔，后破坏情况逐渐加重，最终出现蜂窝状形态；微观形貌观测结果与核磁共振测试结果相符。

4.2　排水盲管堵管时间及Ca^{2+}溶出率计算

1）排水盲管堵塞时间计算及验证

为分析靠近围岩侧的喷射混凝土溶蚀情况，假定与防水板接触的隧道喷射混凝土表面未发生溶蚀，并将此处的深度定为0 cm，在现场钻取隧道喷射混凝土芯样，用ICP-MS方法测试不同深度处混凝土中Ca^{2+}含量，测试结果见表6。由表6可以



（a）100倍 （b）1 000倍 （c）5 000倍

图 11 NH_4Cl 溶液加速溶蚀作用下隧道喷射混凝土微观形貌

表 6 现场不同深度喷射混凝土中 Ca^{2+} 含量与溶蚀率 %

深度/cm	含量	溶蚀率
5	3.776	4.309
10	3.926	4.159
15	4.568	3.517
20	5.111	2.974
25	6.265	1.820
30	6.986	1.099
35	7.242	0.843
40	8.085	0

发现：隧道喷射混凝土芯样的 Ca^{2+} 分布规律较明显，越靠近防水板侧的喷射混凝土中的 Ca^{2+} 质量分数越高，其中与防水板接触的喷射混凝土表面的 Ca^{2+} 质量分数为 8.085%，而与围岩接触一侧的喷射混凝土表面 5 cm 处 Ca^{2+} 质量分数为 3.776%，计算可知最大钙离子溶出率为 4.309%。

根据文献［10，28—29］建立的碳酸钙结晶生长的动力学计算式计算排水盲管管堵时间，该式主要考虑了温度、流速、pH 值以及 Mg^{2+} 对碳酸钙沉积的影响。计算式为

$$R_L = K_p(S^{0.5}-1)^2 \tag{3}$$

$$\lg K_p = 0.126I^{0.5} - \frac{2\,400}{T+273} - 0.34\mathrm{pH} + 0.222 \tag{4}$$

式中：R_L 为碳酸钙增厚速率，$m \cdot s^{-1}$；S 为 $CaCO_3$ 过饱和度；I 为离子强度，$mol \cdot L^{-1}$；T 为溶液温度，℃；K_p 为反应速率常数，$m \cdot s^{-1}$。

水溶液中的 CO_3^{2-} 是 HCO_3^- 电离产生的，由此计算 $CaCO_3$ 的过饱和度为

$$S = \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{K_{sp}} \tag{5}$$

$$S = \frac{K_{a2}c_{(Ca^{2+})}c_{(HCO_3^-)}}{K_{sp}c_{(H^+)}} \tag{6}$$

式中：K_{sp} 为 $CaCO_3$ 的溶度积（25 ℃时取 3.3×10^{-9}）；$[Ca^{2+}]$ 和 $[CO_3^{2-}]$ 分别为 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 的离子活度；K_{a2} 为 HCO_3^- 电离常数，25 ℃时取值为 5.06×10^{-11}；$c_{(Ca^{2+})}$，$c_{(HCO_3^-)}$ 和 $c_{(H^+)}$ 分别为溶液中 Ca^{2+}、HCO_3^- 和 H^+ 的浓度。

由式（3）—式（6）以及地下水中离子浓度，可计算出排水盲管内 $CaCO_3$ 增厚速率。

若隧道排水盲管直径为 R_g，则 $CaCO_3$ 晶体在排水盲管内生长时间 t 为

$$t = \frac{D_g}{R_L} \tag{7}$$

根据图 4 的数据，结合式（3）—式（7）可计算得到该铁路隧道排水管的理论管堵时间为 7.3 年。

依托隧道工程所用排水盲管内直径为 4.75 cm，图 12 为采用内窥镜测试该隧道施工完成 2.6 年时排水盲管的管内结晶物沉积情况。此时盲管内直径为 3.15 cm，计算得出结晶厚度为 1.6 cm。根据图 4 数据以及实际结晶厚度，结合式（3）—式（7）反演计算得出达到该结晶厚度的时间为 2.45 年，两者基本吻合，表明该式计算得到的隧道排水盲管堵塞时间在一定程度上是合理的。

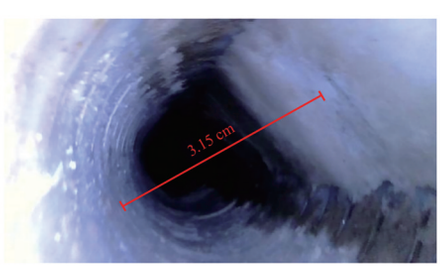


图 12 盲管内结晶物沉积情况

2）Ca^{2+} 溶出加速度效率确定

对未发生溶蚀的喷射混凝土芯样进行 NH_4Cl 冲刷加速溶蚀试验，测试其 Ca^{2+} 溶出率达到相同溶蚀程度（即达到 4.309%）所需的时间，并将其

作为冲刷溶蚀等效加速速率[10]，计算式为

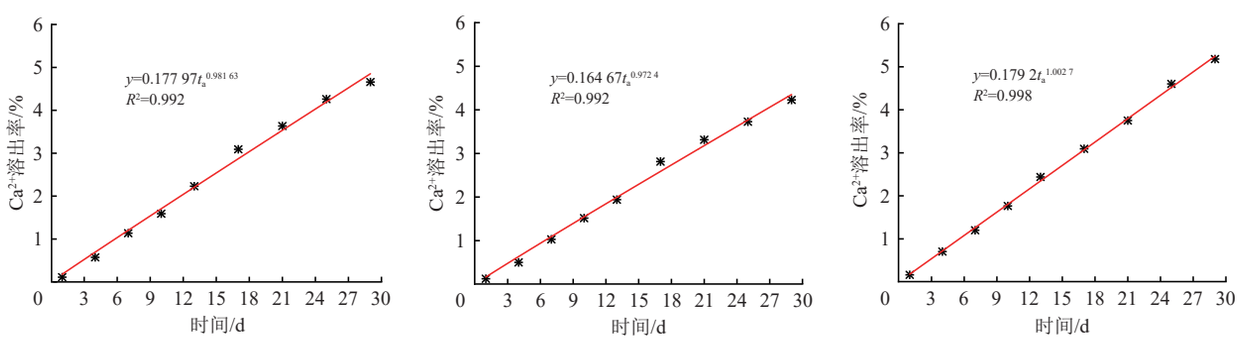
$$K=\frac{t_r}{t_a} \tag{8}$$

式中：K为加速效率；t_r和t_a分别为实际溶蚀时间和加速溶蚀时间，d。

采用多项式函数，对NH_4Cl冲刷加速溶蚀条件下3组混凝土芯样的Ca^{2+}溶出率变化情况进行拟合，结果如图13所示。图中：y和R^2分别为Ca^{2+}溶出率和拟合优度。由图13可以得出：在NH_4Cl加速溶蚀下，混凝土钙溶蚀在初期速度较快，在后期呈减缓趋势；拟合得到R^2的平均值为0.994，说明拟合效果较好。根据喷射混凝土中Ca^{2+}溶出率拟合函数计算得到加速试验中达到实际工程1年（即t_r=1）的4.309%溶蚀率所需时间为25 d。因此，按照每月30 d、依据式（8）计算得到12×30/25=14.4，即加速度效率为14.4倍。

3）临界Ca^{2+}溶出率确定

在溶蚀加速试验条件下，根据溶蚀加速效率，可计算得到喷射混凝土的临界钙离子溶出率。计算时，取溶液温度为25 ℃，HCO_3^-离子浓度为379.6 mg·L^{-1}，CO_3^{2-}浓度为0 mg·L^{-1}，pH值为7.79；排水盲管内直径D_g按实际工程取4.75 cm。由式（3）—式（7），得到不同堵管时间对应的喷射混凝土临界Ca^{2+}溶出率如图14所示。由图14可以计算得到依托隧道工程在任意使用年限不发生堵管的临界Ca^{2+}溶出率；也可以由依托隧道工程的实际Ca^{2+}溶出率反演计算该隧道发生堵管的时间。



（a）1号钻芯试样　　（b）2号钻芯试样　　（c）3号钻芯试样

图13　加速溶蚀下喷射混凝土的Ca^{2+}溶出率

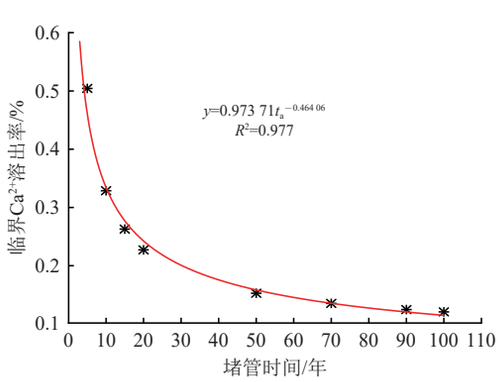


图14　喷射混凝土临界Ca^{2+}溶出率

4　结　论

（1）对于依托的非岩溶区黄土铁路隧道工程，其排水系统结晶物成分主要为$CaCO_3$，但其在宏观上的颜色、形态以及在微观上的形貌、尺寸差异明显。分析不同位置的水质发现，结晶物中Ca^{2+}主要来源于喷射混凝土中$Ca(OH)_2$的Ca^{2+}溶出，而CO_3^{2-}、HCO_3^-一部分来源于地层扰动释放的CO_2，一部分来源于空气中的CO_2。

（2）通过加速溶蚀试验模拟了喷射混凝土内部$Ca(OH)_2$的溶蚀过程，$Ca(OH)_2$的溶蚀导致喷射混凝土中微小孔的出现及数量增加，随着溶蚀时间的延长，微小孔逐渐劣化为中孔，这会加剧结晶物的生成和堵塞病害。

（3）喷射混凝土中的$Ca(OH)_2$虽然发生了溶蚀破坏，但Ca^{2+}并未完全流失。基于$CaCO_3$增厚速率和加速溶蚀试验，得到了依托隧道工程喷射混凝土中Ca^{2+}溶出率的拟合函数。该函数可确定依托隧道工程在任意使用年限不发生堵管的临界Ca^{2+}溶出率；并可反演计算出实际Ca^{2+}溶出率下该隧道发生堵管的具体时间。

（4）依托工程排水管的理论管堵时间为7.3年。结合隧道喷射混凝土芯样Ca^{2+}含量分布规律与排水盲管内结晶物厚度得到本次加速溶蚀试验的加速效率为自然溶蚀的14.4倍。

参 考 文 献

[1] 詹树高,钟祖良,陈宇波,等.岩溶隧道排水管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2):717-721.
(ZHAN Shugao, ZHONG Zuliang, CHEN Yubo, et al. Research on the Mechanism of Crystallization Blockage and Dredging Test of Drainage Pipe in Karst Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17 (Supplement 2): 717-721. in Chinese)

[2] 向立辉.富水隧道排水盲管堵塞效应分析及防治[D].重庆:重庆交通大学,2018.
(XIANG Lihui. Analysis and Prevention of Tunnel Drainage Pipe Blockage Effect in Water Rich Region [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. in Chinese)

[3] 高春君,向立辉,张学富,等.不同水位下隧道排水管结晶堵塞引起的衬砌应力分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(5):45-51.
(GAO Chunjun, XIANG Lihui, ZHANG Xuefu, et al. Lining Stress Caused by Crystallization Clogging of Tunnel Drainage Pipe at Different Water Levels [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38 (5): 45-51. in Chinese)

[4] ZHANG X F, LIU S Y, GAO F, et al. Anti Crystallization Blocking of Flocking Drainage Pipe Based on Natural Phenomenon [J]. Materials Science, 2022, 28 (4): 457-466.

[5] 张一安.峨汉高速隧道排水系统结晶堵管机理及隧道结构响应分析[D].重庆:重庆交通大学,2021.
(ZHANG Yian. Study on Crystalline Pipe Blocking Mechanism and Tunnel Structure of Emei to Hanyuan High Speed Tunnel Drainage System [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. in Chinese)

[6] 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.
(LU Guannan, WANG Peng, YANG Yun, et al. Review of Researches on Groundwater Seepage Induced Crystallization and Blockage Mechanism and Scale Inhibition Technology in the Tunnel Drainage System in Karst Areas [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58 (6): 11-20. in Chinese)

[7] ZHANG X F, ZHOU Y F, ZHANG B, et al. Investigation and Analysis on Crystallization of Tunnel Drainage Pipes in Chongqing [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018 (1): 7042693.

[8] HARER G. Measures for the Reduction of Sinter Formations in Tunnels [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 236: 012071.

[9] 周卓.岩溶地区地下水渗流结晶堵塞隧道排水管机理研究及处治建议[D].西安:长安大学,2015
(ZHOU Zhuo. Study on the Plug of the Tunnel Drainage Pipe Mechanism Caused by Groundwater Seepage Crystallization in Karst Area and the Proposal of Treatment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. in Chinese)

[10] 穆松,周莹,谢德擎,等.非岩溶地区隧道排水管堵塞模型及其应用[J].硅酸盐学报,2021,49(8):1706-1712.
(MU Song, ZHOU Ying, XIE Deqing, et al. Blockage Model and Applications of Tunnel Drainage Pipe in Non-Karst Area [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49 (8): 1706-1712. in Chinese)

[11] 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.
(GUO Xiaoxiong. Crystallization Mechanism and Countermeasures of Drainage System for Railway Tunnel [J]. China Railway Science, 2020, 41 (1): 71-77. in Chinese)

[12] CHEN C Y, RAO J Y, TAO Y H, et al. Study on the Crystallisation Formation Mechanism and Breakage of Tunnel Drainage System in Dolomite Area [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2023, 18 (3): e2897.

[13] 庄潮辉,刘禹阳,席龙龙,等.白云岩隧道排水路径结晶趋势变化及影响分析[J].隧道建设:中英文,2023,43(4):618-624.
(ZHUANG Chaohui, LIU Yuyang, XI Longlong, et al. Crystallization Trend Change and Influencing Factors of Tunnel Drainage Path in Dolomite [J]. Tunnel Construction, 2023, 43 (4): 618-624. in Chinese)

[14] LIU X F, LIU M, ZHANG X F, et al. Crystallization Blockage Damage in Tunnel Drainage System and Suggestions for Its Prevention and Control [J]. Results in Engineering, 2023, 19: 101288.

[15] 聂崇欣,饶军应,刘建浩,等.隧道排水管道结晶体成分及结晶机理研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(6):

196-202.
(NIE Chongxin, RAO Junying, LIU Jianhao, et al. Study on the Crystal Composition and Mechanism of Tunnel Drainage System [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41 (6): 196-202. in Chinese)

[16] 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):66-76,83.
(TIAN Chongming, YE Fei, SONG Guifeng, et al. On Mechanism of Crystal Blockage of Tunnel Drainage System and Preventive Countermeasures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57 (5): 66-76, 83. in Chinese)

[17] 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.
(JIANG Yajun, DU Kun, TAO Lei, et al. Investigation and Discussion on Blocking Mechanism of Drainage System in Karst Tunnels [J]. Railway Standard Design, 2019, 63 (7): 131-135. in Chinese)

[18] 包立征.公路隧道灰岩裂隙水结晶机理及堵塞规律研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
(BAO Lizheng. Study on Crystallization Mechanism and Blocking Law of Limestone Fracture Water in Highway Tunnel [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. in Chinese)

[19] 吴玉哲,李冠鹏,贾淇棋,等.黄土隧道渗漏水结晶物组分特征及来源研究[J].现代隧道技术,2020,57(6):154-159.
(WU Yuzhe, LI Guanpeng, JIA Qiqi, et al. Study on Characteristics and Sources of Crystal Components of Leakage Water in the Loess Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57 (6): 154-159. in Chinese)

[20] GÉRARD B, LE BELLEGO C, BERNARD O. Simplified Modelling of Calcium Leaching of Concrete in Various Environments [J]. Materials and Structures, 2002, 35 (10): 632-640.

[21] 杨虎,蒋林华,张研,等.基于溶蚀过程的混凝土化学损伤研究综述[J].水利水电科技进展,2011,31(1):83-89.
(YANG Hu, JIANG Linhua, ZHANG Yan, et al. Summary of Researches on Chemical Damage of Concrete Based on Leaching Process [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (1): 83-89. in Chinese)

[22] KAMALI S, MORANVILLE M, LECLERCQ S. Material and Environmental Parameter Effects on the Leaching of Cement Pastes: Experiments and Modelling [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38 (4): 575-585.

[23] SEGURA I, MOLERO M, APARICIO S, et al. Decalcification of Cement Mortars: Characterisation and Modelling [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35 (1): 136-150.

[24] WAN K S, LI Y, SUN W. Experimental and Modelling Research of the Accelerated Calcium Leaching of Cement Paste in Ammonium Nitrate Solution [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 832-846.

[25] 李林.硬化水泥浆体钙溶出研究[D].南京:东南大学,2014.
(LI Lin. The Research of Calcium Leaching of Hardened Cement Pastes [D]. Nanjing: Southeast University, 2014. in Chinese)

[26] YE F, HE B, TIAN C M, et al. Influence of Sodium Aluminate on Calcium Leaching of Shotcrete in Tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117: 104156.

[27] KUHL D, BANGERT F, MESCHKE G. Coupled Chemo-Mechanical Deterioration of Cementitious Materials Part II: Numerical Methods and Simulations [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41 (1): 41-67.

[28] ZHANG Y P, SHAW H, FARQUHAR R, et al. The Kinetics of Carbonate Scaling: Application for the Prediction of Downhole Carbonate Scaling [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001, 29 (2): 85-95.

[29] LI Y M, PANG Z H, GALECZKA I M. Quantitative Assessment of Calcite Scaling of a High Temperature Geothermal Well in the Kangding Geothermal Field of Eastern Himalayan Syntax [J]. Geothermics, 2020, 87: 101844.

[30] MARTOS C, COTO B, PEÑA J L, et al. Effect of Precipitation Procedure and Detection Technique on Particle Size Distribution of $CaCO_3$ [J]. Journal of Crystal Growth, 2010, 312 (19): 2756-2763.

[31] 陶永虎.白云岩隧道排水系统混合溶液结晶机理及结晶体性质研究[D].贵阳:贵州大学,2022.
(TAO Yonghu. Study on Crystallization Mechanism and Crystal Properties of Mixed Solution in Drainage System of Dolomite Tunnel [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022. in Chinese)

[32] 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.
(ZHANG Chunyang. Research on the Mechanism and Prevention Measures of Crystal Blockage in Northwest High-Speed Railway Tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022. in Chinese)

[33] WAN K S, LI L, XU Q, et al. Spatial Distribution of the Increased Porosity of Cement Paste Due to Calcium Leaching [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2015, 30 (4): 735-744.

[34] HEUKAMP F H, ULM F J, GERMAINE J T. Mechanical Properties of Calcium-Leached Cement Pastes: Triaxial

Stress States and the Influence of the Pore Pressures [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31 (5): 767-774.
[35] 汤玉娟,左晓宝,殷光吉,等.氯化铵溶蚀下水泥基材料的固-液平衡方程[J].硅酸盐通报,2021,40(3):741-749.
(TANG Yujuan, ZUO Xiaobao, YIN Guangji, et al. Solid-Liquid Equilibrium Equation of Cement-Based Materials under Leaching of Ammonium Chloride [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (3): 741-749. in Chinese)
[36] 陈延飞.冻融循环作用下水泥基材料劣化机理及性能提升技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
(CHEN Yanfei. Study on Deterioration Mechanism and Performance Improvement Technology of Cement-Based Materials under Freeze Thaw Cycle [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022. in Chinese)
[37] SHEN Y J, WANG Y Z, WEI X, et al. Investigation on Meso-Debonding Process of the Sandstone-Concrete Interface Induced by Freeze-Thaw Cycles Using NMR Technology [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 118962.

Research on the Crystallization Blockage Mechanism of Drainage Blind Pipe and Calcium Dissolution of Shotcrete in Railway Tunnel

YU Bentian[1], ZHAO Kangkang[1], YANG Yuxiang[2], LI Sheng[1], WANG Tianyong[3], BAI Yinyin[3]

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China;
2. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710061, China;
3. The 4th Engineering Co., Ltd. of China Railway 12th Bureau Group, Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: To address the issue of crystallization blockage of drainage blind pipes in railway tunnel, a loess railway tunnel project in non-karst area was taken as the background. First, the titration method and equipment such as nuclear magnetic resonance (NMR), X-ray diffractometer (XRD), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), scanning electron microscope (SEM), and energy dispersive spectrometer (EDS) were employed to test the types and concentrations of ions in water samples from different locations along the tunnel drainage path, as well as the mineral composition and microscopic morphology of crystalline deposits, thereby elucidating the crystallization mechanism. Secondly, the accelerated dissolution experiment was designed and conducted to analyze the variation patterns of pore structure, hydration products, and erosion morphology of shotcrete under the influence of NH_4Cl accelerated dissolution. On the basis of this experiment, the blockage time of drainage blind pipe and the dissolution rate of Ca^{2+} were calculated. The results show that crystalline deposits in drainage blind pipes of the tunnel mainly consist of $CaCO_3$ with morphologies such as prismatic spherical, scaly, irregular square, and spindle shaped, which are primarily formed from the reaction of Ca^{2+} dissolved from $Ca(OH)_2$ in shotcrete with CO_2 from the air. The dissolution of Ca^{2+} leads to the increase in the number of micro-pores and mesopores in the shotcrete, exacerbating the formation of crystalline deposits and blockage issues. The accelerated efficiency in the calculated accelerated dissolution test is 14.4 times that of natural dissolution. Based on the fitting function of the Ca^{2+} dissolution rate of shotcrete obtained from the relied project, the critical Ca^{2+} dissolution rate without pipe blockage over any service life can be determined, and the specific time at which pipe blockage occurs in the tunnel can be inversely calculated.

Key words: Railway tunnel; Drainage blind pipe; Shotcrete; Crystallization; Calcium carbonate; Ca^{2+} dissolution rate

(责任编辑 耿枢馨)