

# 公路隧道排水管防结晶措施室内试验探究

田崇明<sup>1</sup>, 姜寅<sup>1</sup>, 叶飞<sup>1</sup>, 宋桂锋<sup>2</sup>, 王庆龙<sup>2</sup>, 张俊元<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 云南腊满高速公路有限公司, 云南西双版纳 666300)

**摘要:** 为了探究排水管内的结晶行为和差异, 结合现场调研和结晶堵塞理论, 采用室内模型试验, 探究了 6 种排水管材、纳米涂层及硅磷晶阻垢剂在排水管内的结晶规律。结果表明: 流量是影响管材改善效果的主要因素, 小流量条件下, 不同排水管材、纳米涂层防结晶的效果不明显, 结晶量均很大; 大流量条件下, 各工况结晶量均很低, 结晶量从小到大依次为: 纳米涂层 < 聚四氟乙烯(PTFE) < 聚乙烯(PE) < 聚丙烯(PPR) < 双壁波纹管(HDPE) < 聚氯乙烯(PVC) < 钢管 < 硅磷晶, 表面能低、接触角大的排水管材在较大流量条件下具有一定的预防结晶作用; 小流量条件下排水管内结晶物以重力沉积为主导, 并促进异相成核作用, 而大流量条件下的沉积作用与管材的材料特性密切相关, 且剥蚀作用占绝对主导。

**关键词:** 隧道工程; 排水管材; 流量; 排水管沉积机理  
**中图分类号:** TU452 **文献标志码:** A

## Model Tests for Anti-Crystallization Measures of Highway Tunnel Drainage Pipe

TIAN Chongming<sup>1</sup>, JIANG Yin<sup>1</sup>, YE Fei<sup>1</sup>, SONG Guifeng<sup>2</sup>, WANG Qinglong<sup>2</sup>, ZHANG Junyuan<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Yunnan Laman Expressway Co., Ltd., Xishuangbanna 666300, China)

**Abstract:** In order to explore the crystallization behavior and differences in the drainage pipe, this paper, in combination with field research and the crystallization blockage theory conducted physical model tests to explore the crystallization law in the drainage pipe of six drainage pipe materials, nano-coating and silica phosphorus crystal scale inhibitor. The results show that the flow rate is the dominating factor in pipe

improvement. At a small flow rate, there is little difference in improvement between different materials and nano-coating, thus the crystallization amount are very large. When it comes to the high flow rate, the crystallization of each condition is pretty low, and the order of crystallization amount from small to large is nano-coating, polytetrafluoroethylene (PTFE), polyethylene (PE), polypropylene (PPR), double-wall corrugated pipe (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), steel pipe and silicon phosphorus crystal. The material with a low surface energy and a large contact angle has a certain preventive effect on crystallization under the high flow rate condition. Gravity deposition dominates the crystalline material under the low flow rate condition and promotes heterogeneous nucleation, while deposition under the high flow rate condition is closely related to the material properties of the pipe, and the exfoliation effect is absolutely dominant.

**Key words:** tunnel engineering; drainage pipe material; flow rate; drainage pipe deposition mechanism

随着交通强国战略、西部大开发战略的逐步实施, 我国公路隧道行业已经进入到一个快速发展的阶段。由于隧道所处环境愈加复杂、运营年限不断增长, 在建及运营隧道均出现了不同程度的病害问题, 如渗漏水、衬砌裂缝等<sup>[1-2]</sup>。除此之外, 近几年隧道排水管结晶堵塞病害越来越严重, 国内外大量隧道出现了排水管被结晶体堵塞的现象。隧道排水管结晶病害会导致一系列结构安全问题, 一方面, 地下水的渗流作用会不断侵蚀隧道初支喷射混凝土, 富含侵蚀性离子时, 甚至会导致“豆腐渣”混凝土的产生; 另一方面, 排水管内有效过水面积减小, 隧道周围地下水不能及时排出, 进而引起

收稿日期: 2023-02-04

基金项目: 云南省交通运输厅科技创新示范项目(云交科教便[2019]59号); 中央高校基本科研业务费专项资金——长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(300102212706)

第一作者: 田崇明(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为隧道防排水系统结晶堵塞机理及防治措施。

E-mail: xiantcm@chd.edu.cn

通信作者: 叶飞(1977—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为地下结构绿色和安全设计。

E-mail: xianyefei@126.com



论文  
拓展  
介绍

衬砌背后水压的增加,引发衬砌渗漏水甚至衬砌开裂等病害,影响隧道结构安全。

近几年隧道排水管结晶堵塞问题已经引起了很多学者的关注,大多文献表明,结晶体的主要成分是碳酸钙,主要形态为方解石、文石、霏石,隧道排水系统结晶是由于隧道衬砌结构受到周围地下水长时间侵蚀浸泡,衬砌混凝土中的钙化物将会溶解至排水系统中,其将与地下水中碳酸根或碳酸氢根离子、空气中的二氧化碳发生化学反应,生成碳酸钙结晶<sup>[3-4]</sup>。Chen等<sup>[3]</sup>通过对法国结晶病害隧道调研,发现衬砌材料和隧道尺寸是影响结晶体产生的重要因素;叶飞等<sup>[5]</sup>通过室内模型试验,发现不同水质、不同速凝剂种类对排水管内结晶产生的差异性很大;田崇明等<sup>[6]</sup>通过现场调研,将排水管结晶堵塞的影响因素分为地下水类型、喷射混凝土特性、排水管溶液析晶的物理化学条件、排水管沉积条件4类。

隧道排水管结晶堵塞病害的处治方法主要包括机械法、物理法、化学法、生物法4类<sup>[7]</sup>,目前我国隧道处治常采用机械法,具体包括高压水流冲射、吸淤等方式,但由于防排水系统暗埋于隧道结构中,导致检测和清理工作异常困难,需耗费大量的人力、物力、财力,且横、纵向排水管、中央排水沟边角处难以彻底清理,清理工作完成后仍会产生二次结晶。化学酸液处治主要包括浸泡清洗、循环清洗、冲刷等方

式,但是液体酸液如何在隧道流动水条件下持续发挥效果仍需进一步探索<sup>[8-9]</sup>。关于预防措施:Wei等<sup>[10]</sup>表明对于全流管道,输出电压为5 V的平行板电场呈现出较好的效果,阻垢率为47.25%;蒋雅君等<sup>[11]</sup>针对轨道交通区间隧道排水沟结晶淤积问题,发现涂刷防结晶涂料可以减少排水沟内碳酸钙的结晶,同时便于排水沟内的结晶清理;Liu等<sup>[12]</sup>设计了一种新型植绒排水管结构,通过室内试验表明植绒排水管具有较好的防结晶效果;Yee等<sup>[13]</sup>通过改善基材和涂层的方式,发现PTFE涂层预防排水管结晶堵塞效果最佳。

本文从预防结晶的角度出发,选取了6种常见的排水管材质:聚乙烯(PE)排水管、聚氯乙烯(PVC)排水管、聚丙烯(PPR)排水管、钢管、双壁波纹管(HDPE)排水管、聚四氟乙烯(PTFE)排水管;1种涂层(纳米涂层);1种阻垢剂(硅磷晶阻垢剂)作为试验工况,通过室内模型试验,探究8种工况在小流量和大流量条件下的结晶行为和差异,为隧道防结晶措施研究提供一定的参考。

## 1 理论背景

隧道排水管结晶堵塞主要包含三个过程,如图1所示。

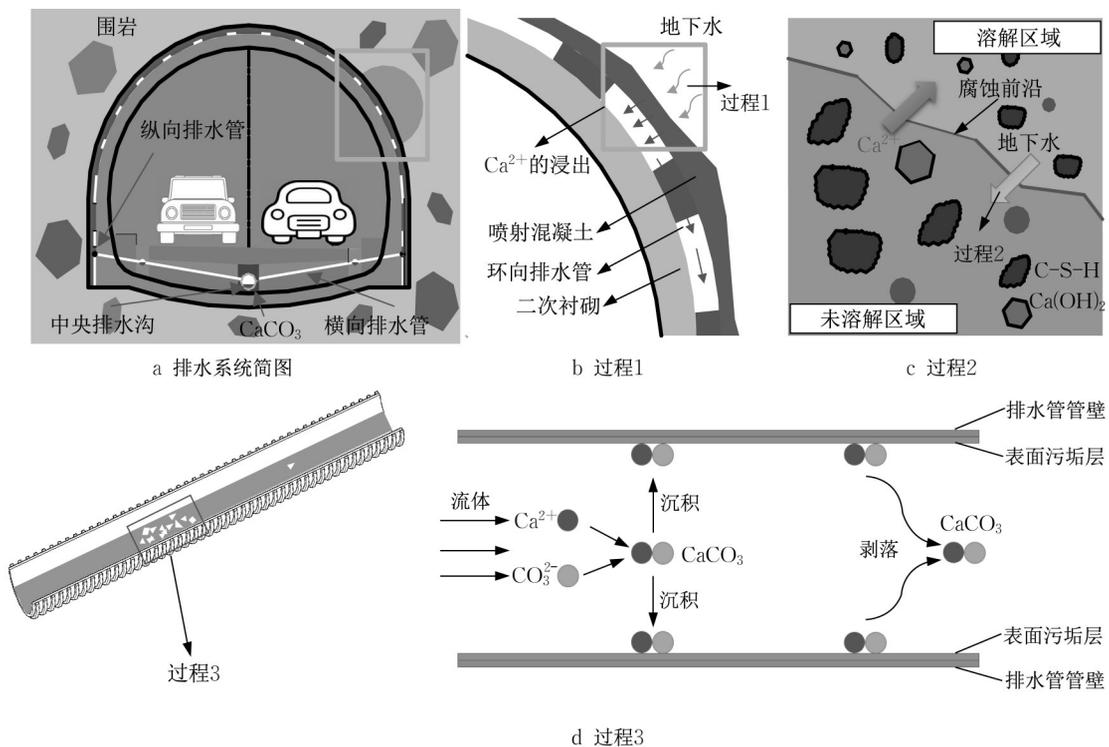


图1 隧道排水管结晶堵塞过程示意图<sup>[6, 14-16]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of crystal blocking process of tunnel drainage pipe

我国公路隧道常见的排水系统设置方式如图1a所示,隧道排水系统由“环向排水管-纵向排水管-横向排水管-中央排水沟”组成。地下水从围岩中流出,流经初支喷射混凝土并沿防水板流入纵向排水管道中,再通过三通流入横向排水管,最终通过中央排水沟排出隧道。

过程1:地下水与喷射混凝土中水泥水化产物发生化学反应直接生成碳酸钙结晶体,如图1b所示。过程1主要发生在地下水中富含碳酸氢根或者碳酸根的地区,水泥水化产生的钙化物将与地下水中的碳酸根或碳酸氢根离子直接生成碳酸钙结晶体。这些碳酸钙晶体可能滞留在混凝土孔隙内,也可能随地下水进入到隧道排水管道中。

过程2:地下水对混凝土的侵蚀过程,如图1c所示。地下水在隧道初支喷射混凝土渗流过程中,持续不断地对混凝土产生溶解侵蚀作用,发生条件主要是离子扩散作用,低浓度的地下水会源源不断地将高浓度水泥水化溶液中的钙化物带入到排水管道中。

过程3:排水管溶液中析出结晶和沉积过程,如图1d所示。当溶液中碳酸钙的离子积一旦超过其溶度积,溶液将由不稳定状态向稳定状态转换,碳酸钙晶体从排水管溶液中析出。过程1、2生成的碳酸钙晶体与析出碳酸钙晶体会慢慢聚集成大颗粒,从而黏附至排水管道管壁。在排水管中溶液的持续作用下,管壁上的碳酸钙晶体不断沉积生长。

## 2 依托工程概况

南腊隧道为云南省勐腊至勐满口岸高速公路的控制性工程,全长3 285.11 m,为特长隧道。隧道穿越地段位于地壳次稳定区,断层均为弱活动性断裂。受构造影响严重,岩体呈碎裂状结构,褶皱发育,完整性普遍较差。地层岩性以泥岩、砂岩、粉质黏土为主,地下水以碎屑岩裂隙水为主,次为松散岩类孔隙水。

该隧道地处西双版纳原始森林地带,水量丰富,隧道建设过程中,衬砌渗漏水严重(图2a),大量排水管出现结晶体堵塞现象(图2b),纵向检查井(图2c)、侧沟(图2d)均有结晶体流出。通过对现场横向排水管结晶情况调研,发现隧道所使用的双壁波纹管(HDPE)易堆积泥沙、结晶体,造成隧道排水系统排水不畅,从而引发更严重的渗漏水。

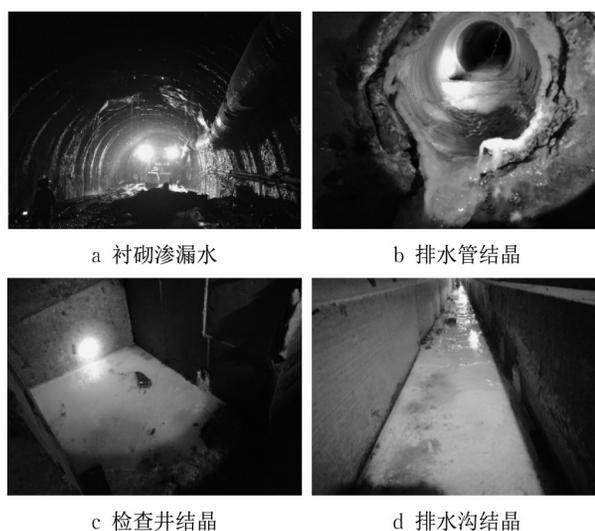


图2 依托工程渗水结晶情况

Fig. 2 Water seepage and crystallization of supporting project

## 3 室内模型试验

### 3.1 试验装置

本文采用自制的室内模型模拟了不同排水管内的结晶现象,通过试验现象和试验结果的分析,对比不同工况的防结晶效果。如图3、图4所示,试验装置主要由供水装置、初支渗流装置、排水装置、集水装置4部分组成:①供水装置为一个高程大于初支渗流装置的塑料水箱,可配制特定的溶液存储在供水装置中;②初支渗流装置用来模拟隧道周围地下水在隧道喷射混凝土中的渗流过程,其由渗流箱、进水管、球阀开关(图4a)、渗流箱支撑架、流量控制阀(图4b)组成。其中:渗流箱是由塑料箱改制而来,长×宽×高为30 cm×40 cm×80 cm;球阀开关通过进水管与供水装置相连,球阀可维持渗流箱内的液面高度保持不变;流量控制阀安装在渗流箱底部中心位置,用于调节不同流量条件;③排水装置由半开形排水管、伸缩支架(图4c)组成;④集水装置用于收集排水装置流出的废弃渗滤液。

试验装置的工作原理:地下水通过供水装置流入初支渗流装置,然后经过流量控制阀到达排水管,最后流入集水装置,后经处理后排放。

### 3.2 试验材料

试验水泥采用华新普通硅酸盐水泥P·O 42.5,其化学组成见表1(表中LOI为烧失量);试验粗集料采用西安尚熙牌5~10 mm碎石,其性能指标见表2;减水剂为山西某外加剂厂提供的聚羧酸系高效减水剂,减水率为25%,掺量为1%;速凝剂为陕西科之



图3 试验装置总体图

Fig. 3 Diagram of test device

杰新材料公司提供的无碱液体速凝剂,固含量为

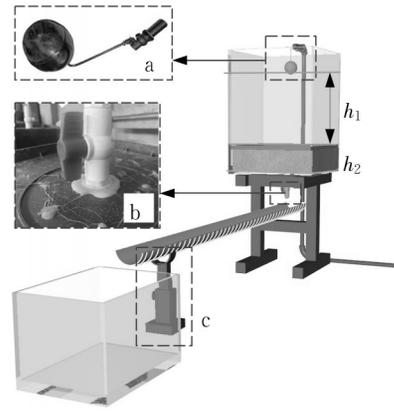


图4 试验装置细部图

Fig. 4 Detailed diagram of test device

20%,掺量为6%,化学组成见表3;试验用水均为试验室地下水,pH为7.04。

表1 试验水泥的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of test cement

	$w(\text{CaO})$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{LOI})$
含量/%	63.6	22.7	7.7	4.2	0.62	0.05	0.14	2.7	1.78

表2 试验碎石技术要求

Tab. 2 Technical requirements for test gravel

项目	颗粒尺寸/mm	堆积密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	表观密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含泥量/%	压碎值/%	吸水率/%
指标要求	5~10	1.45	2.83	0.75	5	1.02

表3 速凝剂化学组成

Tab. 3 Chemical composition of accelerator

	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SO}_4^{2-})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$\frac{w(\text{Al}_2\text{O}_3)}{w(\text{SO}_4^{2-})}$
含量/%	11.7	25.6	—	0.46

### 3.3 配合比设计及试验方法

实际隧道工程中,初期支护采用喷射混凝土,但预试验过程中发现喷射混凝土渗水性较差,渗滤液流量会持续减小,影响试验周期,因此本次试验采用透水混凝土作为试验混凝土。透水混凝土一方面可加速水泥水化产物中钙化物的溶出,缩短排水管上生成碳酸钙的时间,起到加速试验的目的,另一方面可控制渗滤液流量,确保试验顺利完成。混凝土试件按照 JGJ / T372 — 2016 标准成型,具体配合比见表4。

表4 混凝土配合比

Tab. 4 Proportion of concrete

原材料	水泥	碎石	水	速凝剂	减水剂
含量	318	1 622	96.5	19.08	3.18

### 3.4 试验方案

为了探究不同排水管预防措施对结晶预防的效果,选取了6种常见的排水管材质、1种阻垢剂、1种涂层作为试验对象。具体包括PE排水管、PVC排水管、PPR排水管、钢管、HDPE排水管、PTFE排水管、纳米涂层、硅磷晶阻垢剂。试验通过模拟8种排水管类型在小流量( $2.5 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ )和大流量( $30 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ )条件下的渗流结晶,探究不同排水管内壁和硅磷晶阻垢剂对结晶的预防效果,排水管坡度为1.5%。不同排水管材料参数如表5所示。

试验过程中,每隔一定时间对排水管流出溶液的pH值、 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度进行测定;试验结束后自然晾干排水管,进行称重测定、X射线衍射测定(X-ray diffraction, XRD)、微观分析。其中:排水管内溶液pH值采用pH计测定; $\text{Ca}^{2+}$ 浓度采用乙二胺四乙酸(EDTA)化学滴定法测定;排水管内结晶体质量采用称重法测定;XRD采用Bruker D8 Advance X射线衍射仪测定;结晶体微观形貌采用ZEISS Sigma 300电子显微镜测定。

表5 不同管材参数

Tab. 5 Parameters of different pipes

编号	种类	表面能/( $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )	接触角/( $^{\circ}$ )
1 <sup>#</sup>	PE	30	93
2 <sup>#</sup>	PVC	41	78
3 <sup>#</sup>	PPR	30	88
4 <sup>#</sup>	钢管	47	55
5 <sup>#</sup>	HDPE	36	85
6 <sup>#</sup>	PTFE	19	119
7 <sup>#</sup>	硅磷晶	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 含量: 56%±1%; pH: 7.0±0.5; 相对密度: 1.7±0.1	
8 <sup>#</sup>	纳米涂层	20	137

## 4 试验结果与分析

### 4.1 排水管内pH值、Ca<sup>2+</sup>浓度分析

小流量条件下排水管内溶液pH变化曲线、Ca<sup>2+</sup>质量浓度变化曲线如图5、图6所示,大流量条件下排水管内溶液pH变化曲线、Ca<sup>2+</sup>质量浓度变化曲线如图7、图8所示。

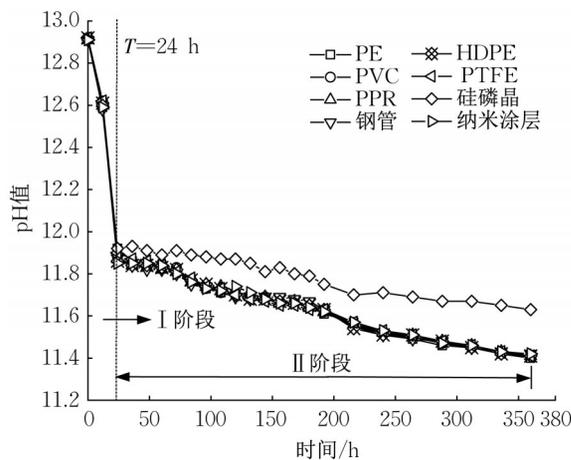


图5 小流量下pH值变化图

Fig. 5 Variation of pH at low flow

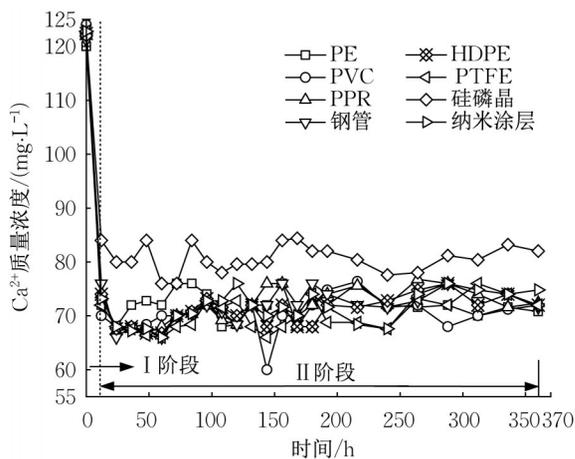


图6 小流量下Ca<sup>2+</sup>质量浓度变化图

Fig. 6 Ca<sup>2+</sup> concentration at low flow

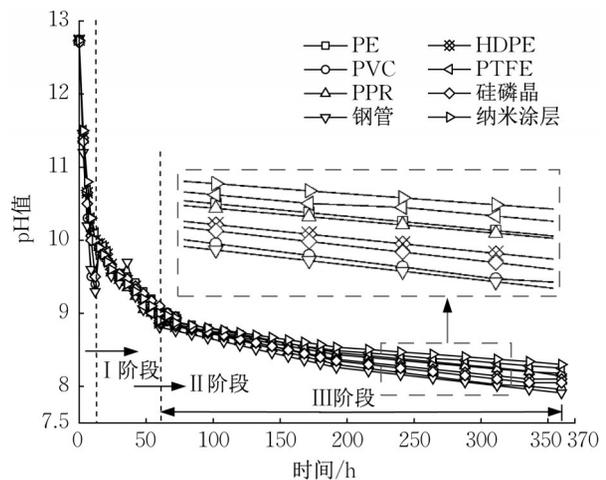


图7 大流量下pH值变化图

Fig. 7 Variation of pH at high flow

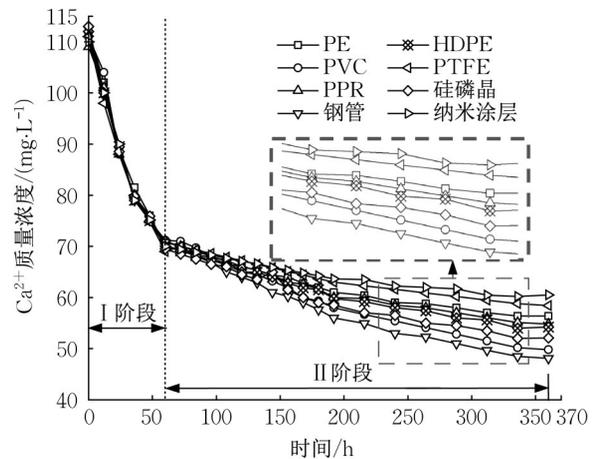


图8 大流量下Ca<sup>2+</sup>质量浓度变化图

Fig. 8 Ca<sup>2+</sup> concentration at high flow

小流量条件下:如图5所示,各排水管内溶液pH值变化可以分为两个阶段:阶段I为迅速下降阶段,初始pH值在12.91~12.92之间,然后迅速下降,24 h内下降到11.92以下;阶段II为缓慢下降阶段,7种管材内溶液pH值日下降速率稳定在0.030~0.037之间。根据Ca<sup>2+</sup>质量浓度曲线(图6)可以看出,7种管材(除硅磷晶外)Ca<sup>2+</sup>质量浓度在12 h内迅速下降,由120 mg·L<sup>-1</sup>左右下降至70 mg·L<sup>-1</sup>左右,后续一直在70 mg·L<sup>-1</sup>上下波动。值得关注的是,硅磷晶在第II阶段的pH值、Ca<sup>2+</sup>质量浓度略高于其他7种工况,其原因是小流量状态下,硅磷晶分子与渗滤液中的Ca<sup>2+</sup>充分整合,从而导致排水管溶液中的Ca<sup>2+</sup>增多;此外,由于溶液中的Ca<sup>2+</sup>已转化为整合物,故水中的CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度将会增大,从而其电离的OH<sup>-</sup>随之增多,溶液偏碱性,导致pH值略高。

大流量条件下:如图7所示,pH值变化可以分为

三个阶段:阶段 I 为迅速下降阶段,初始 pH 值在 12.70~12.75 之间,8 种工况的 pH 值在 12 h 内下降到 10 左右;阶段 II 为快速下降阶段,截至 60 h, pH 值由 10 下降到 9 左右;阶段 III 为缓慢下降阶段,该阶段曲线出现了微小的分段情况, pH 值由高到低依次为:纳米涂层>PTFE>PE>PPR>HDPE>硅磷晶>PVC>钢管。根据  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度曲线(图 8)可以看出,大流量条件下  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度分为两个阶段:阶段 I 为迅速下降阶段,8 种工况变化规律基本一致,截至到 60 h,  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度下降到  $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右;阶段 II 为缓慢下降阶段,各工况曲线在该阶段逐渐出现分段情况,从图中 200 h 后可清晰分辨出  $\text{Ca}^{2+}$  浓度从高到低依次为:纳米涂层>PTFE>PE>PPR>HDPE>硅磷晶>PVC>钢管,这与 pH 值缓慢下降阶段规律一致,也从侧面证明不同排水管材在大流量下有一定的改善效果。

#### 4.2 结晶物质质量分析

试验结束后,自然晾干称重得到小流量  $2.5 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$  和大流量  $30 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下 8 种工况排水管内结晶体质量,如表 6 所示。

表 6 不同流量条件下排水管内结晶质量

Tab. 6 Crystallization quality in drainage pipe under different flow conditions

	mg	
	试验工况	
	$2.5 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件	$30 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件
PE	1536.89	54.15
PVC	1548.98	55.08
PPR	1552.52	54.93
钢管	1755.83	58.21
HDPE	1570.12	54.95
PTFE	1519.82	54.12
硅磷晶	1327.32	66.17
纳米涂层	1520.50	53.50

小流量条件下:8 种工况排水管内结晶量都很高,如图 9 所示,其中钢管内结晶量最大,为  $1755.83 \text{ mg}$ ;PE 排水管、PVC 排水管、PPR 排水管、HDPE 排水管、PTFE 排水管、纳米涂层 6 种排水管结晶量均较多,且结晶量相差不大,结晶量值介于  $1519.82\sim 1570.12 \text{ mg}$  之间;硅磷晶阻垢剂结晶量相较于其他工况较少,为  $1327.32 \text{ mg}$ ,相较于一般管材平均结晶量(除钢管外,平均质量为  $1541.47 \text{ mg}$ )阻垢效率为  $13.9\%$ 。

大流量条件下:8 种工况排水管内结晶量均很低,结晶量值介于  $53.50\sim 66.17 \text{ mg}$  之间,结晶质量从小到大依次为:纳米涂层<PTFE<PE<PPR<

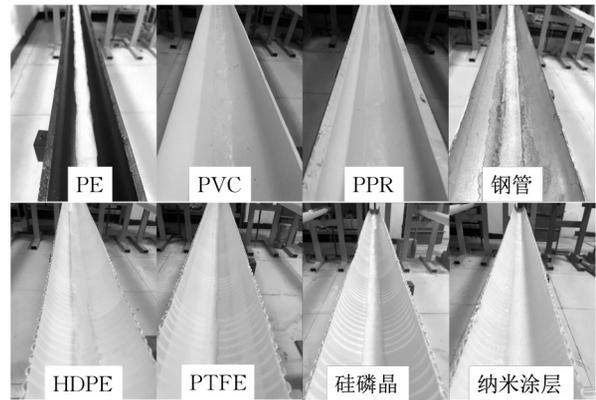


图 9 低流速下排水管表面沉积图

Fig. 9 Surface deposition map of low flow rate drainage pipe

HDPE<PVC<钢管<硅磷晶。硅磷晶结晶量相较于其他工况略大( $66.17 \text{ mg}$ ),其原因可能是水量过大,有效阻垢成分还未来得及发挥作用就被冲走,且阻垢剂本身无效组分可能会为结晶成核创造条件。其余 7 种管材平均结晶量为  $54.99 \text{ mg}$ ,为小流量条件(除硅磷晶外)结晶量的  $3.5\%$ 。值得注意的是,除去硅磷晶,结晶质量变化规律(纳米涂层<PTFE<PE<PPR<HDPE<PVC<钢管)与 pH 值和  $\text{Ca}^{2+}$  浓度变化曲线缓慢下降段规律(纳米涂层>PTFE>PE>PPR>HDPE>PVC>钢管)呈现出相反的变化趋势,原因是结晶体生成率越高,成核作用越明显,水质中需提供的碱性物质越多,因此相应工况下的 pH 值和  $\text{Ca}^{2+}$  浓度就会更小。

#### 4.3 结晶物形貌分析

从表观来看,8 种工况下结晶体形状类似,自然晾干后均为层状结构。由于结构类似,试验结束后选取 HDPE 和硅磷晶两种工况下排水管内结晶体进行微观测试,测试结果如图 10 所示,结晶体主要成分是方解石,由斜方体颗粒组成,从图中可以看出其微观结构具有明显的层状分布特征。

#### 4.4 结晶物 XRD 分析

从 XRD 结果(图 11)可以看出,不同工况下排水管内生成的结晶体  $95\%$  以上为碳酸钙,成分基本相同,这与扫描电子显微镜(SEM)的分析结果是吻合的。

#### 4.5 排水管内沉积机理分析

根据污垢种类分类<sup>[17]</sup>,隧道排水管中的污垢属于混合污垢,主要包含了析晶污垢和颗粒污垢。析晶污垢主要是排水管溶液中析出作用产生的污垢,析出物一般为碳酸钙结晶体;颗粒污垢主要是重力沉积作用产生的堆积体,沉积物一般为泥沙颗粒、水泥水化产物颗粒等。结合流体动力学、碳酸钙成核理论,将结晶体

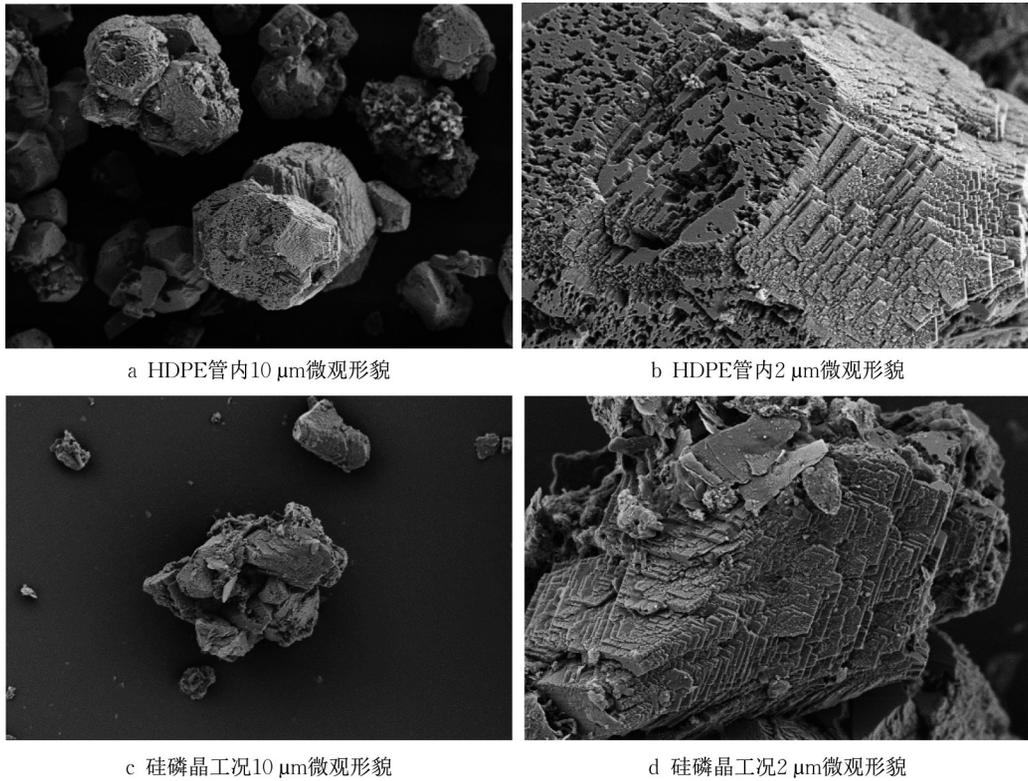


图10 结晶体微观形貌

Fig. 10 Morphology of crystal

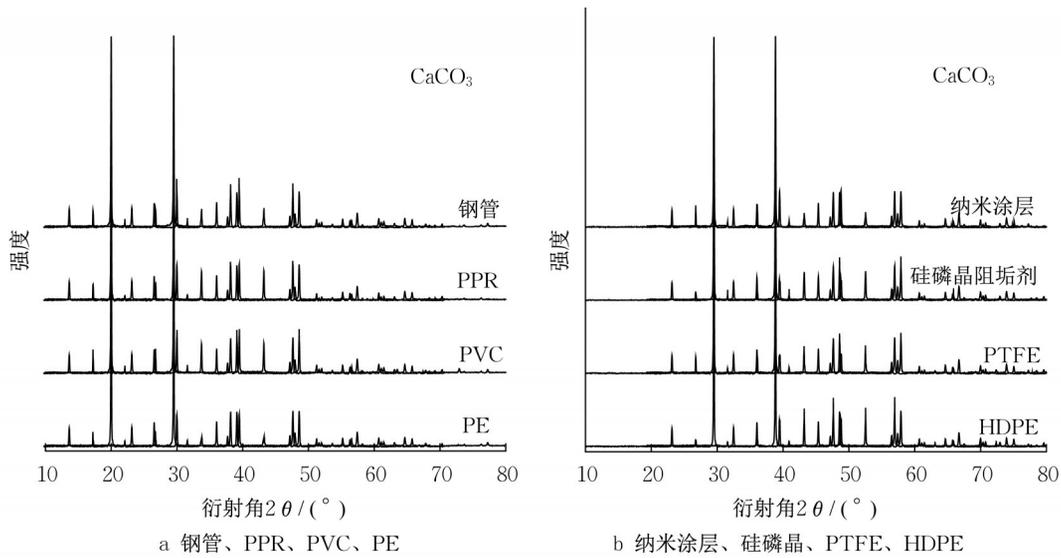


图11 结晶体XRD图

Fig. 11 XRD pattern of crystal

在隧道排水管内的形成分为三个过程:过程1为排水管内颗粒沉积过程,过程2为排水管溶液晶体析出过程,过程3为结晶物的沉积-剥蚀过程。

#### 4.5.1 排水管内颗粒沉积过程

颗粒沉积过程主要为隧道排水管中的泥沙颗粒、水泥水化产物颗粒等固相颗粒发生碰撞聚集,进

而沉积至排水管上,如图12所示。颗粒受力示意图如图13所示,固体颗粒在水中主要受到重力、浮力、推力、碰撞力、黏附力等力,颗粒的运动方程<sup>[18]</sup>见式(1):

$$\frac{m_p du_p}{dt} = F_z + F_n + F_p + F_t + F_s + F_f \quad (1)$$

式中: $m_p$ 为颗粒质量; $u_p$ 为颗粒运动速度; $F_z$ 为重力;

$F_n$ 为黏附力; $F_p$ 为碰撞力; $F_t$ 为推力; $F_s$ 为Saffman升力; $F_f$ 为浮力。

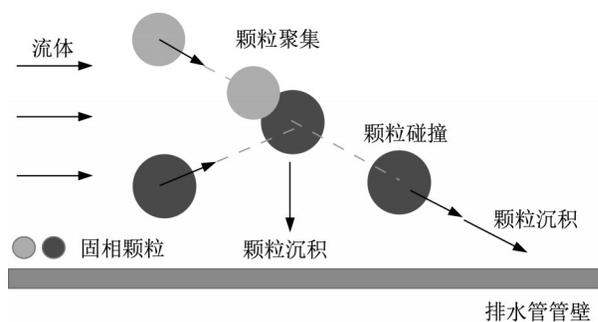


图12 颗粒碰撞聚集沉积示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 12 Particle collision, accumulation, and deposition

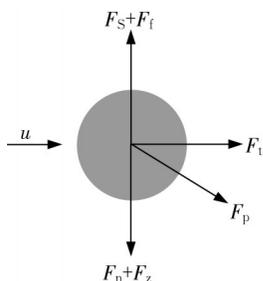


图13 颗粒受力示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 13 Particle stress

隧道排水管溶液中的固相颗粒,一部分随水流行走,剩余颗粒则会在重力、碰撞力、黏附力等力的作用下,向排水管管壁运动,进而附着至管壁上。排水管内的剩余颗粒一方面会为新晶体的析出提供异相成核条件,另一方面会结合析出晶体形成新的结晶物,结晶物不断累积叠加,因此更容易呈现层状或“鱼鳞状”结构,这与SEM测试结果吻合。

#### 4.5.2 排水管溶液晶体析出过程

当隧道排水管内溶液的碳酸钙离子积达到过饱和状态时,体系将由不平衡状态转化为平衡状态,析出碳酸钙晶体,具体包括晶核的生成、晶核的生长、晶体的形成三个阶段<sup>[19-20]</sup>。

(1)阶段Ⅰ:晶核的生成分为一次成核和二次成核,若排水管溶液中存在能够作为成核位点的碳酸钙晶体则为二次成核,反之则为一次成核。一次成核分为均相成核和异相成核两类,如图14所示。隧道排水管溶液中的钙离子与碳酸根离子之间不断碰撞聚集,形成分子簇,最终形成具有一定大小的晶核,发生均相成核,一般情况下,排水管溶液过饱和时才会发生均相成核;当排水管溶液流经管壁附着的杂质微粒或排水管表面缺陷时,这些位置易提

供成核点,发生异相成核,异相成核发生条件简单,非饱和溶液中即可发生,隧道排水管内的晶体成核过程基本都是异相成核。二次成核一般存在于已经生成晶体的排水管溶液,发生在晶体表面或其附近的溶液层,其所需跃迁的能量较低,因此比一次成核更为容易。

(2)阶段Ⅱ:晶核的生长即排水管溶液中的分子簇不断与晶核结合、晶核生长变大成为晶粒的过程。

(3)阶段Ⅲ:晶体的形成即众多晶粒共同组成晶体的过程,隧道实际工程中,阶段Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ并不是严格按照顺序发生的,一般是同步、交叉进行。

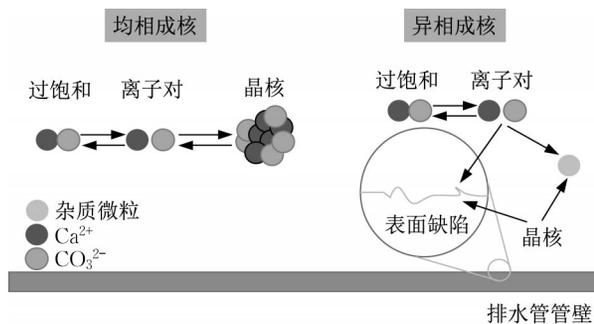


图14 均相成核和异相成核示意图

Fig. 14 Homogeneous nucleation and heterogeneous nucleation

#### 4.5.3 结晶物的沉积—剥蚀过程

由过程1、2可以看出,隧道排水管内溶液在颗粒沉积和晶体析出的共同作用下形成结晶物。而隧道排水管内形成的结晶物势必会受到水流的冲刷剥蚀作用,从宏观角度来看,排水管内结晶物的形成包括动态水流条件下的沉积过程和剥蚀过程,过程3主要对排水管内结晶物的沉积、剥蚀平衡过程进行阐述。

排水管管壁上结晶物沉积速率模型<sup>[21]</sup>,见式(2)~(3):

$$m_d = h_m \left\{ \frac{1}{2} \frac{h_m}{k_R} + \Delta c - \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{h_m}{k_R} \right)^2 + \frac{h_m}{k_R} \cdot \Delta c \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

$$k_R = k_{R0} \exp \left( - \frac{E}{RT_F} \right) \quad (3)$$

式中: $m_d$ 为沉积速率; $h_m$ 为对流传质系数; $k_R$ 、 $k_{R0}$ 为反应速率常数; $\Delta c$ 为碳酸钙饱和浓度与管内碳酸钙浓度差; $E$ 为活化能; $R$ 为摩尔气体常数; $T_F$ 为结晶物表面温度。

排水管管壁上结晶物剥蚀速率模型<sup>[22]</sup>,见式(4):

$$m_r = 0.012u^{1.46}m_f(1 + \delta\Delta T)d_p(\rho^2\mu g)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: $m_r$ 为剥蚀速率; $u$ 为流速; $m_f$ 为单位面积结晶物质量; $\delta$ 为线膨胀系数; $\Delta T$ 为管壁温度与流体温度差; $d_p$ 为晶体粒径。

因此,排水管内结晶物的净沉积率 $m$ 见式(5):

$$m = m_d - m_r \quad (5)$$

综上所述,隧道排水管内结晶物的形成过程如图15所示。

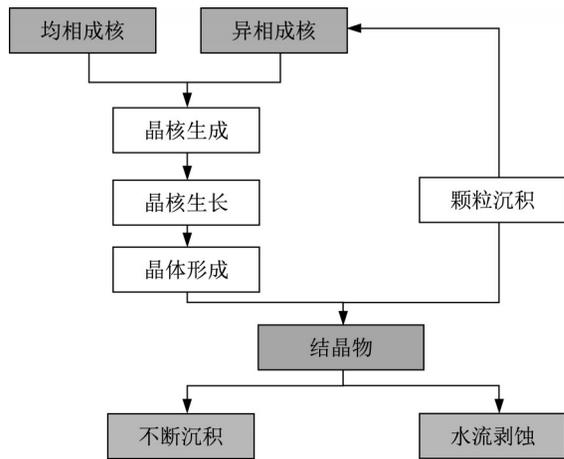


图15 隧道排水管内结晶物形成示意图

Fig. 15 Crystal formation in tunnel drainage pipe

根据试验结果,发现低流速条件下,除钢管外,PE排水管、PVC排水管、PPR排水管、HDPE排水管、PTFE排水管、纳米涂层6种排水管材结晶量均较多,且结晶量相差不大;与之相反,高流速情况下,排水管上结晶沉积物质量较流速下大幅降低,不同管材上结晶物的沉积情况则存在差异,排水管内溶液pH值、 $Ca^{2+}$ 浓度变化曲线在缓慢下降阶段出现分段情况。产生此类现象的原因如下:

小流量条件:①水泥水化过程中会产生大量的微小颗粒,其充填于混凝土孔隙之中,将会随水流流至排水管中,而在低流速情况下,重力沉积作用占主导,这些微小颗粒物大部分将会沉积至排水管上,且这些微小颗粒物会迅速促进异相成核的产生,导致更多晶体的产生;②低流速情况能够提供更大的成核空间,成核速率增大,成核数目更多,最终导致产生结晶体量更多;③根据沉积-剥蚀理论,低流速情况下,水流在排水管壁上的停留时间长,结晶物沉积速率增大,因此结晶物不断变厚,与此同时,水流与结晶物表面的剪切力作用将迅速减弱,结晶物剥蚀速率将会减小(式(4)),因此结晶物净沉积速率更大。

大流量条件:①高流速导致大部分微小颗粒无法沉积至排水管上,而是随水流流走,只有较大颗粒才会发生沉积现象,极大地降低了颗粒沉积过程;②根据沉积-剥蚀理论,流速越大,水流对结晶物的剥蚀作用愈加明显,如式(4)所示,溶液中的部分晶核或晶体来不及生长,便被水流带走;③高流速条件下排水管材对结晶的预防效果与管材的接触角、表面能等材料特性密切相关。

## 5 结语

本文以南腊隧道为依托,通过室内模型试验,对6种常见的排水管材、1种涂层、1种阻垢剂进行了渗流结晶模拟,探究了8种工况在小流量和大流量条件下预防结晶的适用性,具体结论如下:

(1)结晶体主要成分是碳酸钙,由斜方体颗粒组成,具有明显的层状分布特征。

(2)小流量条件下,不同排水管材、纳米涂层预防结晶效果不明显,结晶量均很大,其中钢管结晶量最大,硅磷晶工况结晶量较少,但相较于一般管材阻垢效率仅为13.9%。

(3)表面能低、接触角大的排水管材在较大流量条件下具有一定的预防结晶作用。大流量条件下,各工况结晶量均很低,结晶量值介于53.50~66.17 mg之间,结晶沉积质量从小到大依次为:纳米涂层<PTFE<PE<PPR<HDPE<PVC<钢管<硅磷晶。

(4)结晶物在隧道排水管内的形成主要包括颗粒沉积、晶体析出、结晶体沉积-剥蚀三个过程,低流速条件下以重力沉积居主导,并促进异相成核作用,而高流速条件下的沉积作用与不同种类管材的材料特性密切相关,且剥蚀作用占绝对主导。

(5)由于试验条件限制,试验过程中并未考虑温度、 $CO_2$ 分压、微生物、水泥水化时间等重要参数对结晶物的影响,后续应精进试验条件;本次试验两种试验流量的选取仅仅是根据现场粗略确定,后续试验应划分更细致的流量区间进行研究;试验未考虑渗流液对排水管材本身的影响,该研究点也值得关注。

### 作者贡献声明:

田崇明:试验设计、试验过程、论文撰写。

姜寅:试验过程、论文撰写。

叶飞:学术指导、资金支持。

宋桂锋:提供依托工程,论文修改。

王庆龙:调研配合,试验指导。

张俊元:试验过程、论文修改。

## 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering (2022) [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1.
- [2] 刘德军, 仲飞, 黄宏伟, 等. 运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 178.  
LIU Dejun, ZHONG Fei, HUANG Hongwei, *et al.* Present status and development trend of diagnosis and treatment of tunnel lining diseases [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 178.
- [3] CHEN Y, CUI Y, BARRETT A G, *et al.* Investigation of calcite precipitation in the drainage system of railway tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 45.
- [4] DIETZEL M, RINDER T, LEIS A, *et al.* Koralm tunnel as a case study for sinter formation in drainage systems—Precipitation mechanisms and retaliatory action [J]. Geomechanik und Tunnelbau: Geomechanik und Tunnelbau, 2008, 1(4): 271.
- [5] 叶飞, 田崇明, 何彪, 等. 在建隧道排水系统结晶堵塞试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 159.  
YE Fei, TIAN Chongming, HE Biao, *et al.* Experimental study on scaling and clogging in drainage system of tunnels under construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 159.
- [6] 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.  
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.
- [7] 叶飞, 王坚, 田崇明, 等. 隧道排水管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.  
YE Fei, WANG Jian, TIAN Chongming, *et al.* Research progress and control techniques of crystal blockage disease of tunnel drainpipe [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(3): 13.
- [8] 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(S2): 137.  
JIANG Yajun, DU Kun, ZHOU Rui, *et al.* Experimental study on dissolution effect of organic acid cleaning agent for crystal in tunnel drainage blind pipe [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 137.
- [9] 洪英维, 钱夏清, 李俊辉, 等. 疏通岩溶隧道排水系统堵塞的清洗溶剂效能研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 160.  
HONG Yingwei, QIAN Xiqing, LI Junhui, *et al.* On scabebgping performances of cleaning solvent for the clogging in the drainage system of karst tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6): 160.
- [10] WEI L, GUO J, ZHANG X, *et al.* Study of electric field impact on crystallization in tunnel drainage pipes in hard water area[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1.
- [11] 蒋雅君, 刘世军, 肖华荣, 等. 轨道交通区间隧道排水沟结晶淤积处置技术[J]. 隧道与轨道交通, 2021(S2): 102.  
JIANG Yajun, Liu Shijun, Xiao Huarong, *et al.* Treatment technology of crystal deposition in drainage ditch of rail transit tunnel[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S2): 102.
- [12] LIU S, GAO F, ZHANG X, *et al.* Experimental study on anti-crystallization law of tunnel transverse flocking drainpipe at different velocities [J]. Asia - Pacific Journal of Chemical Engineering, 2020, 15: e2470.
- [13] YEE E, JANG Y, CHUN B. Substrate modification and magnetic water treatment on the maintenance of tunnel drainage systems. I: Feasibility tests [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(3): 04014076.
- [14] YE F, HE B, TIAN C, *et al.* Influence of sodium aluminate on calcium leaching of shotcrete in tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117: 104156.
- [15] 程咏春, 曾祥纪, 王振佳, 等. 岩溶隧道排水管结晶堵塞试验与数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 159.  
CHENG Yongchun, ZENG Xiangji, WANG Zhenjia, *et al.* Experimental study and numerical simulation of crystallization induced blockage in drainage pipes in karst tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 159.
- [16] ROMER M, HOLZER L, PFIFNER M. Swiss tunnel structures: concrete damage by formation of thaumasite [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(8): 1111.
- [17] EPSTEIN N. Fouling in heat exchangers [J]. Heat Transfer, 1979, 6: 235.
- [18] 刘岩, 秦攀, 洪文鹏. 基于计算流体力学-离散单元法耦合的粗糙壁面颗粒趋壁沉积过程的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5216.  
LIU Yan, QIN Pan, HONG Wenpeng. Numerical simulation on process of particle deposition on a rib-roughened surface using CFD-DEM[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5216.
- [19] 崔红艳. 基于成核动力学理论的EDTA对不同种类水垢形成的影响及机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.  
CUI Hongyan. The study of the effect and mechanism of EDTA on the formation of different forms scale based on nucleation kinetics theory[D]. Huhehaote: Inner Mongolia University, 2021.
- [20] 李素芳. 光管内CaCO<sub>3</sub>结垢特性及其与雷诺数的关系[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.  
LI Sufang. The characteristics of CaCO<sub>3</sub> fouling in smooth tube and their relations with Reynolds number [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [21] HASSON D, AVRIEL M, RESNICK W, *et al.* Mechanism of calcium carbonate scale deposition on heat-transfer surfaces [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1968, 7(1): 59.
- [22] BRAHIM F, AGUSTIN W, BOHNET M. Numerical simulation of the fouling process [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42(3): 323.