

文章编号: 1005-0523(2024)01-0046-08



峨汉高速隧道排水系统结晶规律室内模拟试验

冷浩¹, 刘士洋², 李宗意², 张一安², 张佳瑞¹

(1. 四川乐汉高速公路有限责任公司, 四川乐山 614000; 2. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:【目的】为探索隧道排水系统在地下水渗流作用下排水管道内结晶堵塞分布规律, 提出峨汉高速隧道排水系统结晶规律室内模拟试验。【方法】依托峨汉高速廖山隧道工程, 建立1:5隧道排水系统室内模拟试验, 同时结合现场取样地下水分析结果配置相同离子成分的试验溶液开展室内试验。【结果】结晶堆垛方式主要是大量堆垛, 属于同分异构晶体类型, 主要成分为方解石型碳酸钙; 随着水流量增加, 结晶量提高, 结晶速率越快, 其中横向排水出口的266.8 mL/s水流量工况下的累积结晶总量最高; 缓和的排水管坡度有利于隧道排水管道内结晶物的生成; 排水管接头处结晶总量(30%)>横向排水出口(27%)>横向排水管(19%)>纵向排水管(15.2%)>环向排水管(8.3%), 隧道排水系统中结晶堵塞的关键位置是排水系统接口处和横向排水管出口处。【结论】研究有效分析出了排水管道内结晶堵塞分布规律, 对保障隧道排水系统通畅有效运行具有重要意义。

关键词: 隧道工程; 排水系统; 结晶堵管; 模拟试验

中图分类号: U45

文献标志码: A

本文引用格式: 冷浩, 刘士洋, 李宗意, 等. 峨汉高速隧道排水系统结晶规律室内模拟试验[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 46-53.

Research of Indoor Simulation Test on Crystallization Law of Drainage System in Emeishan-Hanyuan High-Speed Tunnel

Leng Hao¹, Liu Shiyang^{2*}, Li Zongyi², Zhang Yi'an², Zhang Jiarui¹

(1. Sichuan Lehan Expressway Co., Ltd., Leshan 614000, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: 【Objective】 In order to explore the distribution law of crystallization blockage in tunnel drainage system under the action of groundwater seepage, a laboratory simulation test of crystallization law of Emeishan-Hanyuan high-speed tunnel drainage system was put forward. 【Methods】 Based on the Liaoshan tunnel project of Emeishan-Hanyuan High-speed, a 1:5 indoor simulation test of tunnel drainage system was established, and a test solution with the same ionic composition was configured according to the analysis results of in-situ groundwater sampling. 【Result】 The crystal stacking mode is mainly a large amount of stacking, which belongs to the isomeric crystal type, and the main component is calcite type calcium carbonate; With the increase of water flow, the crystallization amount increases, and the crystallization rate is faster, among which, the cumulative total crystallization under the condition of 266.8 mL/s water flow at the lateral drainage outlet is the highest; The moderate slope of the drainage pipe is conducive to the formation of crystals in the tunnel drainage pipe; The total amount of crystallization at the drainage pipe joint (30%) > horizontal drainage outlet (27%) > horizontal drainage pipe

收稿日期: 2023-03-08

基金项目: 四川省铁路产业投资集团公司科技计划项目(SRIG2019GG0004); 重庆市教育委员会在渝高校与中科院所属院所合作项目(HZ2021009)

(19%) > vertical drainage pipe (15.2%) > circumdirectional drainage pipe (8.3%). The key positions of crystallization blockage in the tunnel drainage system are the drainage system interface and horizontal drainage pipe outlet. **【Conclusion】** The distribution law of crystal blockage in drainage pipe is effectively analyzed, which is of great significance for ensuring smooth and effective operation of tunnel drainage system.

Key words: tunnel engineering; drainage system; crystallization law; simulation test

Citation format: LENG H, LIU S Y, LI Z Y, et al. Research of indoor simulation test on crystallization law of drainage system in Emeishan-Hanyuan high-speed tunnel[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41 (1): 46–53.

【研究意义】我国岩溶地层分布广泛,约占国土面积的三分之一。岩溶地下水从围岩进入隧道排水系统,环境条件变化巨大,地下水容易在隧道排水系统中发生复杂的化学反应,形成 CaCO_3 、 MgCO_3 等堵塞物。

【研究进展】针对隧道排水系统内结晶形成的原因及机理,国内外专家已经开展了部分研究。谢小龙等^[1]分析了深层隧道排水系统在武汉污水传输工程中的应用;聂崇欣等^[2]通过研究隧道排水系统中产生结晶体物质成分和成晶机理,提出有效的隧道排水系统结晶处置方案;程咏春等^[3]开展了与现场1:1等比例的排水系统堵管室内试验,探讨了仿真现场水动力、水化学和干湿循环条件下管道结晶沉淀量的变化规律;詹树高等^[4]通过试验研究了超声波结合有机酸处置排水系统结晶的效果;蒋雅君等^[5]对排水管道结晶清洗效果的关键因素进行了探讨,选用一种复合型环保清洗剂,在实验室环境下进行3种不同的结晶溶解试验。钱振宇等^[6]借助模型试验对隧道结晶淤堵过程及变化规律进行探究,得出 CaCO_3 结晶体纯度高且水流速低时,结晶沉淀物有充分时间停留在排水管壁且易粘附在管壁内表面,结晶体更加容易堆积并堵塞。黄骤屹等^[7]在DBL理论的基础上结合水动力学,分别讨论了层流、紊流两种流态下的流速分布并推导出结晶沉淀速率函数表达式。卢冠楠等^[8]探讨了可能的阻垢工程措施。Zhang等^[9]基于室内正交试验研究了交变电场对隧道排水管结晶的影响。通过上述分析可以看出,隧道排水系统相关研究主要集中在优化设计、堵塞的短期治理、结晶堵塞的成因及影响因素,但对结晶规律的研究较为缺乏^[10],并且分析不够全面,分析的工况较少,未同时分析水流量、坡度等,也未给出结晶规律的详细原因。

【创新特色】为解决上述方法中出现的问题,本文依托峨汉高速廖山隧道,通过现场取样测试分析,结合施工图纸,建立等比例缩小的室内隧道实验排水系统,模拟排水系统内结晶的生成过程,针对得到的结晶规律进行解释。**【关键问题】**以前的研究未充分考虑水流量、坡度等因素对隧道排水系统结晶的影响,从而导致排水系统堵塞未得到有效解决。针对该问题,进行峨汉高速隧道排水系统结晶规律室内模拟试验,以期在一定程度上解决上述问题。

1 试验设计

1.1 试验准备

1.1.1 试验材料与仪器

实验所需的主要材料及其规格参数见表1。实验所需的主要仪器及其规格参数如表2。

1.1.2 试验装置

峨汉高速公路隧道全长122.882 km,选择其排水系统为研究对象,研究对象如图1所示。该排水系统在隧道变轻及拱墙背后设置环向排水管,将背墙水引排至边墙纵向排水管内,环向排水管采用FH50软式透水管,纵向间距10 m,有集中股水流处根据水流量大小采用透水管直接引排至中央排水沟内,集中股水引排按每100 m环向FH50和FH100软式透水管各1道计量,两侧边墙底背面各设置一道纵向排水管,将环向排水管中的地下水集中汇流,引排至隧道低横向排水管,采用HDPE DN/ID100打孔双壁波纹管,外裹无纺布,其纵坡与路线纵坡一致,隧道路面面层下设置横向排水管,将边墙纵向排水管汇集的地下水引排至隧道中央纵向排水沟,横向排水管采用HDPE DN/ID100打孔双壁波纹管,外裹无纺布,管间距10 m,并且隧道中线

表1 材料规格参数

Tab.1 Material specifications

Serial number	Material name	Specification and model	Parameter or indicator
1	Aluminium alloy	2 cm×2 cm	-
2	Anhydrous calcium chloride (CaCl ₂)	Analytically pure	500 g/bottle
3	Sodium bicarbonate (NaHCO ₃)	Analytically pure	500 g/bottle
4	Magnesium sulfate anhydrous (MgSO ₄)	Analytically pure	500 g/bottle

表2 仪器规格参数

Tab.2 Instrument specification parameters

Serial number	Material name	Specification and model	Parameter or indicator
1	Plastic water tank	140 L	740 mm×535 mm×415 mm
2	Variable frequency water pump	HG-4501	Lift 3.0 m
3	PVC tube	Φ20	External diameter 50 mm
4	PVC transformer joint	Φ20×50	Internal diameter 20 mm×50 mm
5	DC power supply	JC POWER	5 V、9 V、12 V、24 V
6	Electronic balance	RZ-2000	500 g, accuracy 0.01 g
7	HDPE corrugated pipe	Φ50	External diameter 50 mm
8	Variable frequency pump	CR15-4	12 V

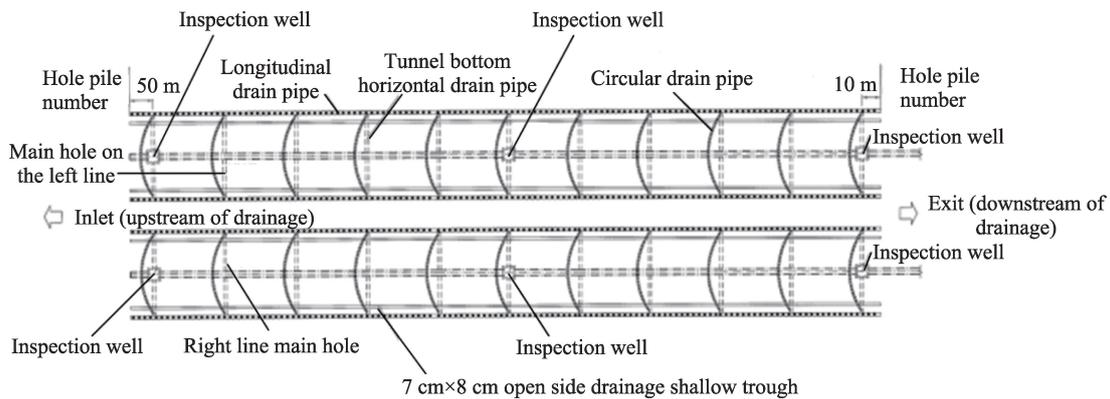


图1 排水系统

Fig. 1 Drainage system

路面下 60 cm 设置纵向矩形排水沟(宽×高=50 cm×60 cm),将汇集的地下水引排至洞外,每隔 300 m 设置一个检查井,排水下游洞内距洞口 10 m 处和排水上游洞内距洞口 50 m 处设置检查井,纵向、横向、环向排水管之间均采用三通或四通连接。

本次室内试验以上述排水系统为研究对象,构建 1:5 比例的自制循环系统,主要由钢支架、塑料水箱、水循环装置组成。其中水循环装置由变频水泵、HDPE 波纹管、PVC 水管、PVC 转接头组成^[11]。试验采用的试验钢架,总长 2 m,宽 1.5 m,高 2 m。钢架上部分主要模拟隧道轮廓线,为半径为 1 m 的圆形钢架,分为 4 条,间隔 0.5 m 设置一条,依附于钢

架设置环向排水管、横向排水管和纵向排水管。环向排水管、纵向排水管与横向排水管以四通接头相连接。钢架下部为高 1 m 的支座,留出足够的空间安放循环装置。

1.1.3 试验溶液配置

地下水中主要存在的阳离子是 Ca²⁺、Mg²⁺,主要的阴离子是 SO₄²⁻、OH⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻。但是不同标段的水样成分及其含量并不相同,在实际实验中应将各主要元素成分都考虑在内,故此次试验试验液主要采用的化学溶质为无水氯化钙、碳酸氢钠分析纯、无水硫酸镁分析纯^[12]。

考虑到配置试验溶液的用水量较大,忽略地下

水中其他杂质成分的影响,采用纯净水作为溶剂配制溶液。在实验装置清洗后在两个储水箱中各注入40 L水,同时为使试验溶液达到过饱和状态,按照CaCl₂,NaHCO₃,MgSO₄为1:1:1的比例配制成过饱和溶液,其中溶质的溶解顺序依次为:CaCl₂,MgSO₄,NaHCO₃。试验溶液的配制过程如下:

- 1) 将塑料水箱清洗干净,避免其他杂质对试验用液的影响;
- 2) 加注纯净水;
- 3) 按照1:1:1的比例依次溶解各项溶质,溶解过程中不断搅拌,保证溶解过程的均匀性。

1.2 试验方案

从现场不同标段取得渗流水样和结晶样本,对现场渗流水样进行水分分析,根据其主要离子成分配置室内试验用水,对结晶样本进行SEM微观电镜扫描,分析晶体类型和堆垛方式^[13]。试验排水系统依据实际施工的1:5比例等比例缩小,水流量设定为266.8,200.1,133.4,66.7 mL/s流量4种,隧道横向排水管坡度值取0%和3%两种情况,隧道纵向排水管的坡度值取3%。试验工况见表3。

表3 试验工况
Tab.3 Test conditions

Working condition	Transverse drain slope/%	Longitudinal drain slope/%	Discharge/(mL/s)
1	0	3	266.8
2	3	3	266.8
3	0	3	200.1
4	3	3	200.1
5	0	3	133.4
6	3	3	133.4
7	0	3	66.7
8	3	3	66.7

- 1) 取10 d为一个周期,每组工况试验6个周期。
- 2) 每周期结束将各管段拆解测量结晶量,计算各管段每延米的结晶程度,分段测量排水系统各部分的结晶情况,通过对比得出隧道排水系统内易结晶的关键位置。

随着试验的进行,结晶沉淀物会出现在环向排水管、横向排水管、纵向排水管、排水管接头甚至部分出现在水箱中,结晶沉淀物的出现消耗了试验用液中的各种离子,为了保持溶液的过饱和性,每两天向储水箱中添加一定的溶质。

2 试验结果分析

2.1 结晶的成分确定

渗流水样水分检测结果如表4所示。结晶样本SEM微观电镜扫描结果如图2所示。从SEM微观电镜扫描图片可以看出,其堆垛方式主要是大量堆垛,晶体的结构类型主要为不规则形和正方形,属于方解石类典型的同分异构晶体类型^[14]。综合渗流水样分析出结晶样本的主要成分为方解石型碳酸钙。

表4 水样成分分析表

Sample delivery	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	OH ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Total hardness
K29+400	7.5	97.1	7.4	60	0	0	240	272
K29+900	9	12	<0.3	16	0	7.92	28.5	32
K30+400	8.8	45.2	22.3	52	0	0	208	204
K30+900	11	39	<0.3	19	29	25	0	97.6

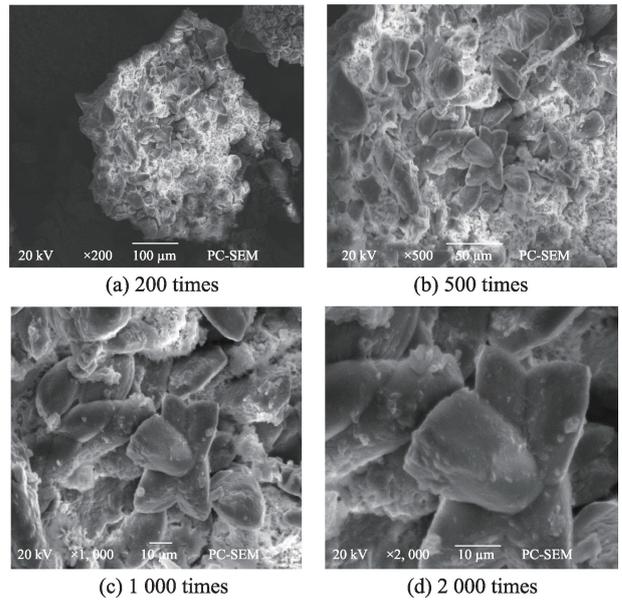


图2 SEM电镜扫描

Fig.2 Experimental apparatus

2.2 水流量对不同位置结晶速率的影响

试验过程中,每个周期对排水系统各部分进行分段干重称量,相邻两个周期之间的差值即为一个周期内结晶的增长量,并根据测量管段实际长度换算成对应部分每延米结晶量,部分数据见图3。从图3可以得出以下结论。

- 1) 在实验进行的初期阶段由于流量的不同导

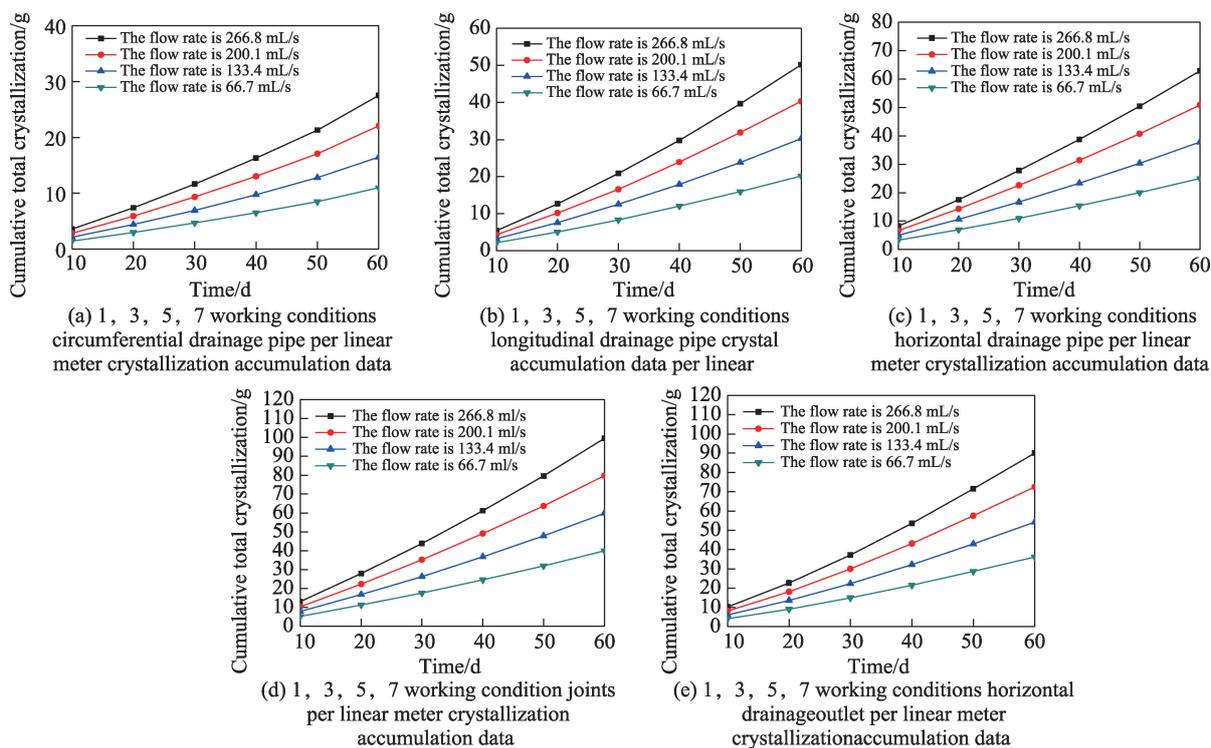


图3 隧道排水系统各部位每延米结晶累计量数据图

Fig. 3 Data graph of crystallization accumulation per linear meter in each part of the tunnel drainage system

致各工况下的结晶量有所差异,表现出的规律有随着流量的增加,结晶量也有所提高。其中,接头的266.8 mL/s水流量工况下的累积结晶总量最高,达到了99.55 g,而其他位置的不同水流量工况下的最高累积结晶总量分别为27.52, 50.20, 62.90, 90.05 g。对比分析可知,266.8 mL/s水流量的累积结晶总量高出9.5 g。由此可知,接头位置的266.8 mL/s水流量的结晶速率最高,表明水流量越高,结晶速率越快。分析其原因,一方面是流量的增加给了过饱和溶液在排水系统内更多结晶析出的机会;另一方面流量的增加也加大了溶液与排水管壁的接触面积,提高了结晶附着在排水管壁的可能,为更多的结晶生成提供了有利条件。

2) 随着时间的推移,各工况的结晶量差距逐渐增大,其中接头位置的累积结晶总量随着流量的增加变化最大,并且工况1的累积量增加最多。一方面这是因为在初期晶核和微结晶的形成量上本就存在差异,后期随着晶核等的生长发育,使得原本的结晶量差距更为明显,另一方面也是由于流量的不同,不同位置的接触面积增加,导致结晶速率有所差异,流量越大结晶速率越快。

3) 结晶量的增长在实验时间范围内增速较为

稳定。这是由于实验过程中及时补足了由于结晶形成而导致的实验液中各项离子的消耗,将溶液保持在过饱和状态,因此试验过程中可以保证结晶较为稳定地析出。

2.3 不同方向的排水管坡度对结晶速率的影响

实验的横向排水管坡度设置为两种,分别是0和3%,分别对应图中带方形的曲线和带圆形的曲线,部分试验数据见图4。从图4可以得出以下结论。

1) 通过对横向排水管内和横向排水管出口部分的结晶量的研究可以发现,横向排水管坡度的变化对这两处的结晶规律产生了影响,坡度的增加使得结晶量减少,其中,水流量为266.8 mL/s的横向排水管在达到60 d时,0坡度和3%坡度的每延米结晶累积量分别为65.4 g和62.6 g,坡度增加后,结晶累积量降低了2.8 g,而水流量为266.8 mL/s的横向排水出口在达到60 d时,0坡度和3%坡度的每延米结晶累积量分别为86.9 g和84.3 g,坡度增加后,结晶累积量降低了2.6 g。这是因为横向排水管坡度的变化并不能改变在流经横向排水管之前的水力条件,而只是影响了横向排水管段以及之后的水力条件,因此坡度的改变对于后者的结晶规律具有更明显的影响。

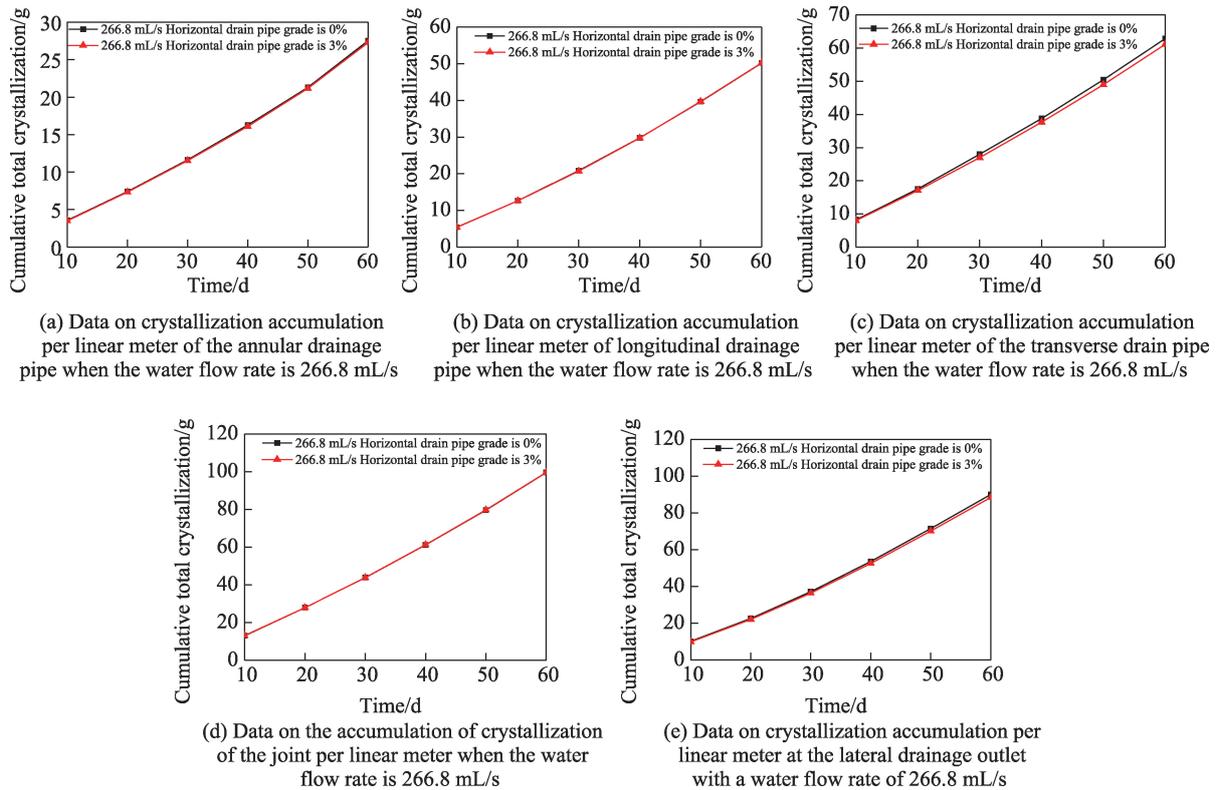


图4 流量为266.8 mL/s时隧道排水系统各部位每延米结晶累积量数据图

Fig. 4 Data graph of crystal accumulation per linear meter in each part of the tunnel drainage system when the flow rate is 266.8 mL/s

2) 试验结果可知,坡度影响的是结晶速率,随着时间的推移可以明显观察出,0坡度的管道结晶速率明显慢于3%坡度的管道结晶速率,但是坡度的改变对于初期结晶的影响不是很明显,其影响效果低于水流量的影响,水流量的影响使结晶累积量变化达到了10 g 以上,而坡度使结晶量变化在2 g 左右。同时,在初期阶段,结合上述水流量试验分析结果,水流量是影响结晶的关键因素,不同坡度对于初期结晶的影响不是很显著,然而,在结晶发生的后期阶段,坡度对结晶的影响变得更加明显。这是因为随着时间的推移,坡度改变流体水力条件的效果逐渐显现,较小的坡度利于结晶附着在管壁上,从而加速了结晶的累积,促进结晶的产生。相反,较大的坡度使得水流对管壁的冲刷作用增大,抑制了管壁结晶的生长速度,从而影响了结晶量的产生。

2.3 隧道排水系统不同位置的堵塞情况

隧道排水系统各部分每延米结晶量实验数据见图5。从图5结果可以得出以下结论。

1) 从试验中隧道排水系统不同部分每延米的结晶总量可以看出,隧道各个部分的结晶概率有高

有低,环向排水管的结晶率占8.3%,纵向排水管的结晶率占15.2%,横向排水管的结晶率占19%,接头处的结晶率占30%,横向排水管出口的结晶率占27%。这是由于隧道排水系统各个部分所处的水力条件和环境不同,因此对结晶概率的影响程度也不尽相同,其中水力条件的影响主要是排水管坡度影响了流速从而影响结晶速率,这是因为不同位置对水流的阻力和接触面积不同,环境的影响主要是隧道排水系统部分与环境接触,使得外界环境的温度、湿度、浓度等因素影响了部分排水管内结晶的析出。

2) 在各种工况下按照每延米结晶总量从大到小依次排序为:接头处结晶总量(30%)>横向排水出口处结晶总量(27%)>横向排水管结晶总量(19%)>纵向排水管结晶总量(15.2%)>环向排水管结晶总量(8.3%)。分析原因:环向排水管内结晶总量较少的原因是环向排水管的坡度较大,流速较快,水力条件不利于结晶的形成;纵向排水管的结晶总量较环向排水管多,这是由于纵向排水管坡度较小水流速度较慢有利于结晶形成,但是较横向排水管的结晶量又较少,这是因为横向排水管与外加

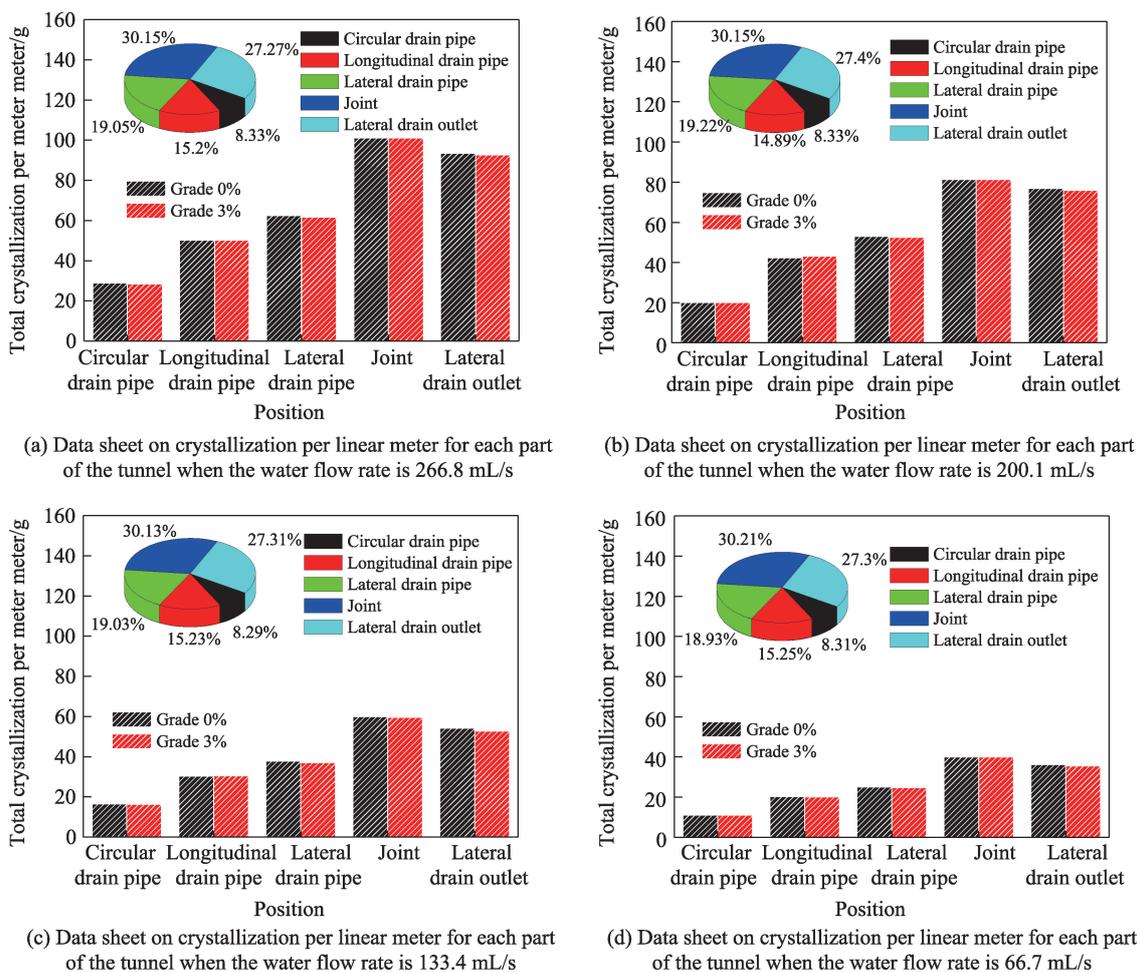


图5 隧道排水系统各部分每延米结晶量数据图

Fig. 5 Data plot of crystallization per linear meter for each part of the tunnel drainage system

环境直接接触,溶液所处环境发生变化导致在横向排水管内更易析出结晶;在接头处结晶总量最大这是因为接头处流速降低且来自环向排水管与纵向排水管的水流交汇,水力条件复杂容易形成溶液的滞留,加上与外界环境有接触因此在接头处的结晶量较大;横向排水管出口处结晶量略低于接头处结晶量,在出口处溶液暴露在外界环境中,由于外界环境的影响最容易析出结晶,但是溶液在径流过程中不断析出结晶而导致溶液中各离子发生消耗,因此结晶量有所降低。

3 结论

1) 随着隧道排水系统内水流量的增大结晶量也会增大;

2) 横向排水管坡度的增大会减少横向排水管内结晶量,但对隧道排水系统的其他部分不产生影响;

3) 隧道排水系统不同部位根据每延米的结晶量可以确定出易产生结晶的位置是排水系统接口处和横向排水管出口处。

参考文献:

- [1] 谢小龙, 杨涛, 胡晓彬, 等. 深层隧道排水系统在武汉污水传输工程中的应用[J]. 给水排水, 2022, 48(1): 132-136.
XIE X L, YANG T, HU X B, et al. Application of deep tunnel drainage system in the wastewater transmission engineering of Wuhan[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(1): 132-136.
- [2] 聂崇欣, 饶军应, 刘建造, 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 C X, RAO J Y, LIU J H, et al. Study on crystal composition and crystal mechanism of tunnel drainage pipeline [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 41(6): 196-202.

- [3] 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): 159-166.
CHENG Y C, ZENG X J, WANG Z J, et al. Experimental study and numerical simulation of crystallization-induced blockage in drainage pipes in karst tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59 (2): 159-166.
- [4] 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(2): 717-721.
ZHANG S G, ZHONG Z L, CHEN Y B, 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 (2): 717-721.
- [5] 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(2): 137-143.
JIANG Y J, DU K, ZHOU R, et al. Experimental study on dissolution effect of organic acid cleaning agent for crystal in tunnel drainage blind pipe[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 137-143.
- [6] 钱振宇, 彭海华, 吕建兵, 等. 华南地区灰岩隧道排水管化学结晶淤堵试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 143-149.
QIAN Z Y, PENG H H, LYU J B, et al. Experimental study on chemical crystallization and siltation in drainage pipe of limestone tunnel in south China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58 (1): 143-149.
- [7] 黄骤屹, 王永东, 徐仁华, 等. 基于DBL理论的隧道排水管岩溶水结晶规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1638-1645.
HUANG J Y, WANG Y D, XU R H, et al. Research on the crystallization law of karst water in tunnel drainage pipeline based on DBL theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17 (5): 1638-1645.
- [8] 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 G N, WANG P, YANG Y, 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.
- [9] ZHANG J R, WANG B, LIU S Y, et al. Influence of alternating electric field on crystallization of tunnel drainage pipes based on indoor orthogonal test[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2022, 22(3): 737-747.
- [10] 贾能, 钱会, 柴少波, 等. 铁路排水系统结晶水化学成因及土工影响[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 166-177.
JIA N, QIAN H, CHAI S B, et al. Hydrochemical and geotechnical causes of calcite precipitation in railway drainage facility[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(8): 166-177.
- [11] 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): 159-170.
YE F, TIAN C M, HE B, 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): 159-170.
- [12] WANG Z L, SHANG Y Q, SUN H Y. Optimal location and effect judgment on drainage tunnels for landslide prevention[J]. Journal of Central South University of Technology, 2013, 20(7): 2041-2053.
- [13] 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 C J, XIANG L H, ZHANG X F, et al. Lining stress caused by crystal lization clogging of tunnel drainage pipe at different water levels[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2019, 38(5):45-51.
- [14] LI L Y, YANG J S, FU J Y, et al. Experimental investigation on the invert stability of operating railway tunnels with different drainage systems using 3D printing technology[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(5): 1470-1485.



第一作者:冷浩(1981—),男,高级工程师,研究方向为地下工程与岩土工程。E-mail:lenghao345@163.com。



通信作者:刘士洋(1989—),男,博士,讲师,研究方向为隧道及地下工程。E-mail:zxcvbnm@126.com。

(责任编辑:姜红贵)