

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.05.006

引用格式:周文才,李超,刘新荣,等.不同pH混合液与碎屑共存条件下岩石顶管摩擦特性研究[J].重庆大学学报,2026,49(5):78-93.



## 不同 pH 混合液与碎屑共存条件下岩石顶管 摩擦特性研究

周文才<sup>1</sup>,李超<sup>1,2</sup>,刘新荣<sup>2</sup>,钟祖良<sup>2</sup>

(1. 贵州大学土木工程学院,贵阳 550025; 2. 重庆大学土木工程学院,重庆 400045)

**摘要:**观景口岩石顶管顶力突增和卡管与碎屑磨碎后形成的泥饼存在直接关系。现场为解决该问题使用酸碱溶液对泥饼进行腐蚀,尝试恢复顶管。但由于雨季的存在,雨水携带酸碱溶液向后倒灌,影响后续管节的顶进。为探究雨季施工期间,岩溶水与酸碱清洗液共存是否对后续顶管摩擦特性产生影响,通过室内直剪试验、电镜扫描和现场监测等手段,研究了后续管节在不同酸碱环境及碎屑混合条件下的管-岩接触面摩擦特性,分析各个因素对摩擦系数的影响。将试验预测模型与实际监测数据对比,验证了试验结果的准确性,为解决岩溶环境下顶管施工中的摩阻力控制和卡管问题提供了重要工程指导。

**关键词:**岩石顶管;岩溶水;顶力突增;混合比;粒径级配

中图分类号:TU458

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)05-078-16

## Frictional behavior of rock pipe jacking in mixed solutions of varying pH with coexisting debris

ZHOU Wencai<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1,2</sup>, LIU Xinrong<sup>2</sup>, ZHONG Zuliang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Previous studies have indicated that the sudden increase in jacking force and pipe sticking in the Guanjingkou rock pipe jacking project is closely associated with mud cake formation from crushed debris. To address this issue, acidic and alkaline solutions are applied on-site to corrode the mud cake and restore jacking progress. However, during the rainy season, these solutions may be transported backward by rainwater, potentially affecting subsequent pipe sections. To investigate whether the coexistence of karst water and acid and alkaline

收稿日期:2025-03-02

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52208391);国家自然科学基金面上项目(52474092);贵州大学博士基金项目(2021-78)。

Supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (52208391), the National Natural Science Foundation of China General Program(52474092), Doctoral Foundation of Guizhou University(2021-78).

作者简介:周文才(2000—),男,硕士研究生,主要从事地下工程研究,(E-mail)2040453256@qq.com。

通信作者:李超,男,副教授,硕士生导师,(E-mail)chaolilcee@163.com。

cleaning solutions influences the frictional characteristics of subsequent pipe sections, this study combines indoor direct shear tests, scanning electron microscopy (SEM), and field monitoring. The frictional characteristics at the pipe-rock interface under different pH conditions and debris mixing scenarios are systematically investigated, and the effects of key factors on the friction coefficient are analyzed. By comparing predictions from the experimental model with field monitoring data, the reliability of the results is verified. The findings provide a theoretical foundation and practical guidance for friction control and pipe sticking mitigation in karst environments.

**Keywords:** rock pipe jacking; karst water; pipe sticking; solid liquid ratio; particle size distribution

顶力突增与“饼状膨润土”(膨润土泥浆、岩石碎屑与岩溶水的混合物)的形成直接相关<sup>[1-5]</sup>。针对卡管问题,强酸或强碱可通过溶蚀膨润土泥浆<sup>[6-10]</sup>和碎屑层<sup>[11-13]</sup>,但现有研究多基于静态水化学环境<sup>[14-16]</sup>,未考虑岩溶水动态冲刷导致的酸碱稀释与碎屑迁移。此外,石灰岩作为典型可溶性岩石,其长期水-气循环作用(如CO<sub>2</sub>溶解、干湿交替)会引发显著的溶蚀效应<sup>[17-19]</sup>,溶蚀过程不仅生成大量细颗粒碎屑,还因水流冲刷通过力学分选与化学溶解的耦合作用,显著影响颗粒级配的时空分布。然而,化学腐蚀-碎屑迁移-界面形貌的多因素耦合机制尚未被系统揭示,尤其是酸碱混合液与岩溶水共存条件下的动态摩擦特性仍属空白。

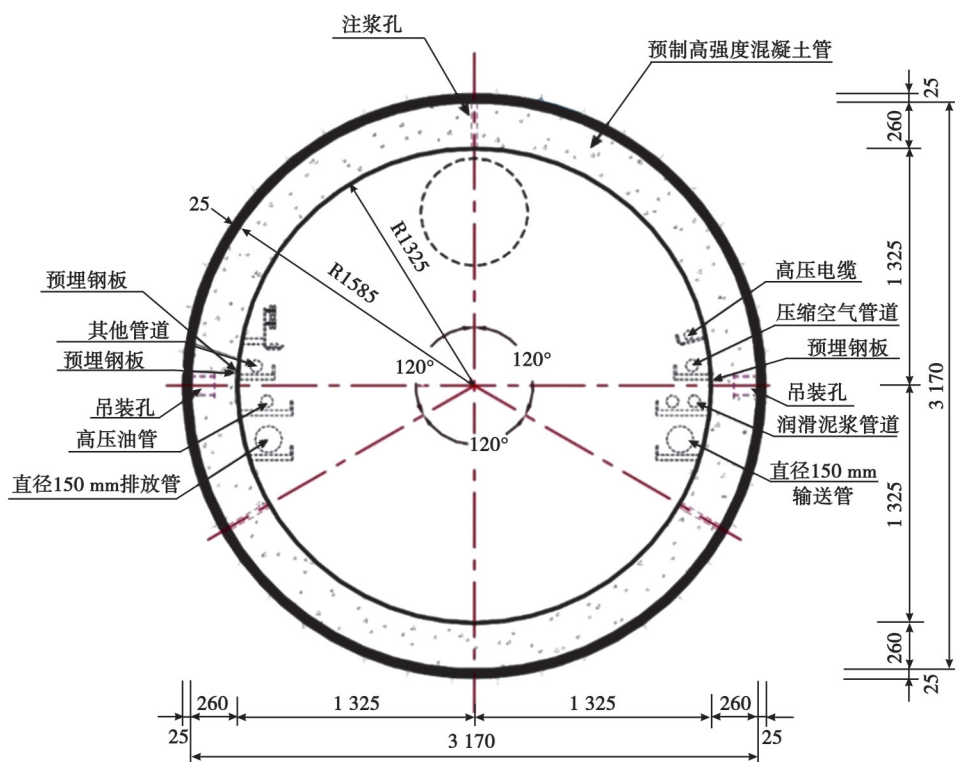
因此,施工现场在缺乏经验情况下,尝试使用强酸或强碱对“饼状膨润土”进行快速处理,从而使管节顺利推进。由于施工期间在5月—7月,重庆正逢雨季,且背景工程7、8号线的地质条件较差,岩溶裂隙发育,较多地下水流入管外超挖间隙与酸碱溶液混合(简称混合液),并向后方的管外流去,导致管-岩接触面由最初的膨润土泥浆接触条件逐渐转变为混合液与碎屑的摩擦条件,改变后续管节摩擦特性。目前,纯膨润土条件下和膨润土与碎屑条件下的摩擦特性已较明确,但当酸碱冲洗液与岩溶水混合后的后续管节影响特征研究较少,因此,迫切需要分析后方的工程问题,避免因处理不当导致的潜在风险。

综上所述,文中利用室内直剪试验,研究不同pH混合液与不同粒径级配碎屑,在不同混合比条件下岩石顶管的摩擦特性,特别是酸碱环境对后续管节摩擦系数的影响规律,并利用扫描电子显微镜(SEM)和表面粗糙度仪(SRM)对比不同条件下接触物和接触面的变化。最后,利用改进后的顶力预测公式与现场监测数据对比,验证试验的正确性。研究结果不仅为顶管施工中卡管问题的解决提供理论依据,还为超长距离岩石顶管工程的设计和施工提供有效的技术支持。

## 1 项目概况及试验开展工程背景

观景口水库位于重庆市巴南区五布河干流,地处青藏高原与长江中下游平原的过渡带,是重庆市重点水源项目之一。水库距离重庆市中心约55 km,总库容达 $1.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,调节库容 $1.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,负责调节和供应水源。该项目包括水库调节工程和长达25.03 km的输水管道,设计供水流量为 $5.09 \text{ m}^3/\text{s}$ 。输水线路主要包括:1号有压隧洞、1号无压隧洞、1号埋涵、2号无压隧洞、3号无压隧洞、4号无压隧洞、6号有压隧洞、7号无压隧洞、8号无压隧洞。输水线路沿线主要穿越地层地质情况为泥岩、砂岩、泥质砂岩和灰岩,文中研究重点为7、8号无压隧洞,其中,7号隧洞埋深15~34 m,该洞段围岩为灰岩、粉砂岩,岩体微风化,岩层倾角近于水平,围岩初步分类为Ⅲ类,局部Ⅳ类。8号隧洞埋深为13~63 m,地处广福寺向斜核部,该洞段围岩为灰岩、粉砂岩,岩体微风化-弱风化,岩层倾角近于水平,围岩初步分类为Ⅲ类,局部Ⅳ类。

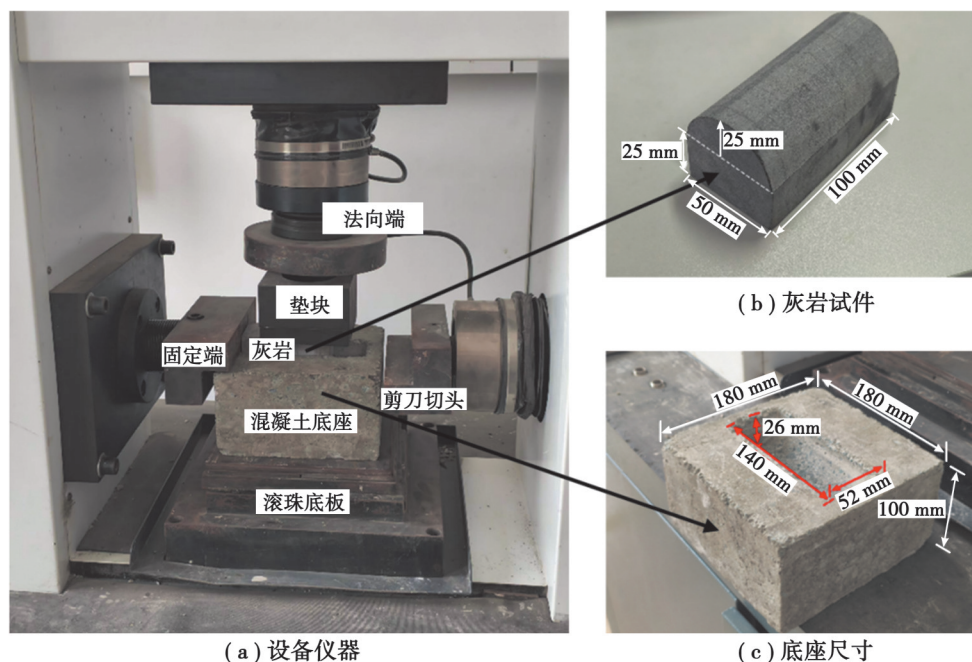
本次施工最大开挖直径为3 220 mm,配套钢筋混凝土顶管外径为3 170 mm,内径为2 650 mm,管壁厚为260 mm,如图1所示。单节管长2.5 m,由预制场预制,材料为钢筋混凝土,混凝土强度等级为C50。每节管节纵向配2层主筋,每层共60根直径为12 mm的HRB335带肋热轧钢筋,间距为150 mm,且对称布置。环向钢筋规格与纵向钢筋相同,间距为100 mm。

图1 管节尺寸图<sup>[1]</sup>(单位:mm)Fig. 1 Pipe section size<sup>[1]</sup>

## 2 灰岩—混凝土管节摩擦特性试验

### 2.1 试验仪器与试件制备

试验采用YZW-30 A型微机控制双路伺服直剪仪,如图2(a)所示。试验上盘采用灰岩半圆柱体试件作为研究对象,其上半部矩形截面尺寸为25 mm×50 mm;下半部为半圆形截面,半径为 $R=25$  mm,总长度为



(a) 设备仪器

(b) 灰岩试件

(c) 底座尺寸

图2 仪器与试件尺寸图

Fig. 2 Instrument and specimen size

100 mm,文中采用此种异型接触方案对摩擦特性进行研究<sup>[20-22]</sup>,试验下盘为按照工程现场管节配合比的混凝土底座,为研究岩-管接触面摩擦特性,混凝土底座不设配筋。其强度等级为 C50,几何尺寸为 180 mm×180 mm×100 mm(长×宽×高),并在顶部开设 140 mm×52 mm×26 mm(长×宽×深)的弧形凹槽,如图 2(b)和图 2(c)所示。以模拟管节表面与灰岩试件之间的接触特性。试件的力学参数如表 1 所示。

表 1 试验试件力学参数

Table 1 Materials properties in the direct shear test

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	弹性模量/GPa
灰岩	2 750	0.3	28	0.6	34.5
混凝土底座	2 550	0.2	—	—	4.0

### 2.2 试验条件

由于现场施工环境复杂,岩体节理裂隙发育,且雨季地下水极为丰富,从破开的管节外发现,膨润土泥浆因地下岩溶水的冲刷,已沿裂隙完全流失,导致大量岩溶水与围岩碎屑在管节外表面囤积,如图 3 所示。通过对现场 1、2 号无压隧洞管节破开处采集的岩溶水试样,经实验室分析现场地下岩溶水 pH 偏弱碱性(pH≈7.4)。

已知“饼状膨润土”是导致顶力突增及卡管的根本原因。现场在缺乏经验的情况下采用酸碱溶液对泥饼进行腐蚀试图恢复顶管施工。分别对 7、8 号无压隧洞卡管处使用场采用盐酸(HCl)溶液与火碱(NaOH)溶液腐蚀泥饼,由于岩溶水的稀释与冲刷,使管节外侧沿顶进反方向的 pH 值呈现衰减,改变后方管节外侧接触特性,对后续管节摩擦特性产生影响。经现场对冲洗处管节 pH 值实地测量可知,初始为 pH=10 和 pH=4,并对后续管节不同管节开孔处进行 pH 值实测,其 pH 值衰减如图 4 所示。故设置不同 pH 值情况下,使用强酸与强碱过后,后方管节经历的 pH 值变化过程。为配制不同 pH 值的溶液,试验选取与实际工程相同酸碱溶液,即稀盐酸与火碱稀溶液作为缓冲溶液,通过不断稀释达到目标所需值。



图 3 现场接触物照片

Fig. 3 Photographs of on-site contact objects

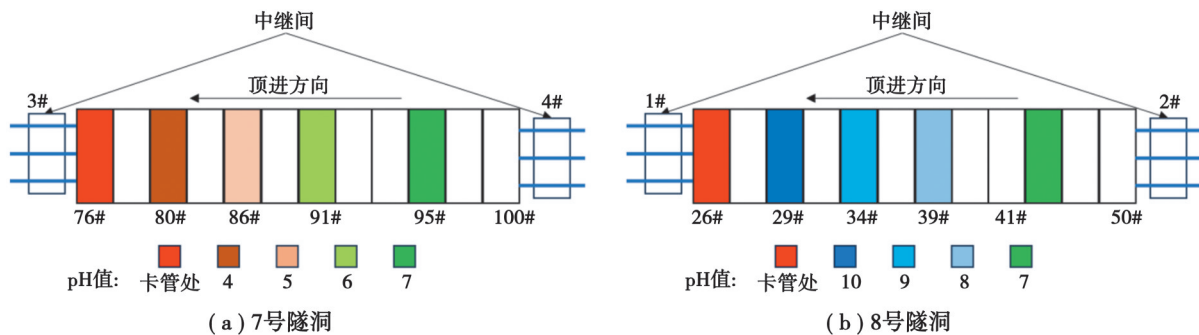


图 4 管外 pH 衰减示意图

Fig. 4 Schematic of pH decrease outside the pipe

试验溶液配制步骤:1)选用纯净水作为溶剂;2)在烧杯中加入适量稀盐酸或火碱稀溶液充分搅拌混合溶液,直至所有溶液完全混合;3)使用 pH 笔初步测量出溶液的 pH 值,通过逐步加入纯净水进行稀释,精确调节至目标 pH 值,如图 5 所示。在每次试验开始前立刻配制完成,加入凹槽中。

管节外直径为 3 170 mm,通过对管外清理出的碎屑测量,其最大碎石粒径为 300 mm,几何尺寸比为 10:1,粒径低于 10 mm 的碎屑物占据 91.7% 的比例,其中粒径小于 5 mm 的又占据 79.4% 的比例<sup>[23]</sup>。而试验灰岩试件直径为 50 mm,结合几何尺寸比和粒径占比,选用小于 5 mm 的碎屑来保持现场几何比例。为精确模拟现场环境,所有碎屑均采集自现场施工环境中,所有样品通过真空干燥处理保存,以减少外界污染因素的

影响,并对碎屑进行粒径划分。碎屑为天然集料,属于中国标准 GB/T14685 2022 中的 I 类集料<sup>[24]</sup>,使用中国标准粒径筛分器对 500 g 碎屑样品进行筛分,通过预试验阶段发现,随着摩擦试验的进行,各阶段碎屑的占比不同。按照筛分结果大致可以将小于 5 mm 的粒径划分为以下 4 个范围:岩粉(粒径小于 1 mm)、细粒径(1~2 mm)、中粒径(2~4 mm)和粗粒径(4~5 mm)。然而,由于小于 1 mm 的碎屑呈岩粉状,易在试验前与岩溶水形成浑浊液,改变接触面摩擦特性,进而影响试验结果。因此,试验将最小粒径设为 1 mm,如图 6 所示。

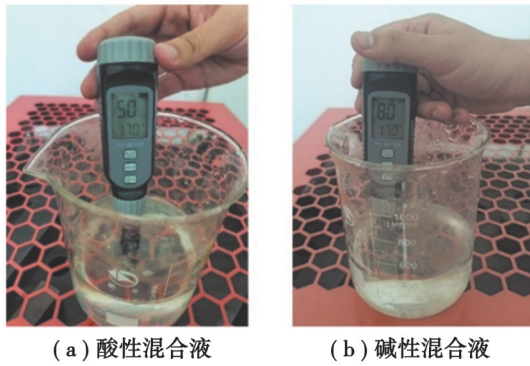


图 5 酸碱溶液 pH 配制图

Fig. 5 Diagram of pH preparation for acid-base solutions

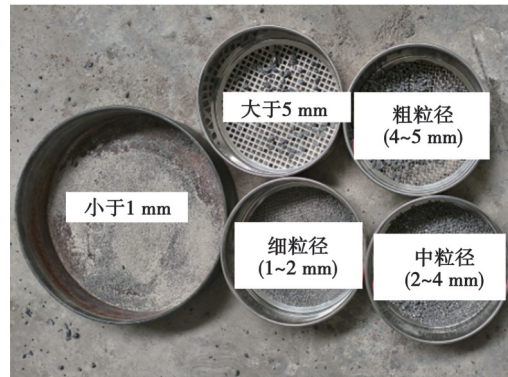


图 6 标准粒径筛分

Fig. 6 Standard particle size sieve analysis

试验条件为灰岩-管节接触面存在不同粒径级配碎屑与固定 pH 岩溶水以及不同 pH 值酸碱性溶液的混合液的摩擦试验,试验条件如表 2 所示。为研究混合液的酸碱度对管-岩接触面摩擦特性的影响,岩溶水 pH 分别设置为 4、5、6、7、8 和 9;为分析不同碎屑级配(简称 PSD)对摩擦系数的影响,粒径按上述定义的细:中:

表 2 摩擦试验条件正交表

Table 2 Friction tests orthogonal table

试验编号	PSD	SLR	pH	试验编号	PSD	SLR	pH
1	1:1:5	4:1	4	19	1:15:1	4:1	7
2	1:1:5	3:1	5	20	1:15:1	3:1	8
3	1:1:5	2:1	6	21	1:15:1	2:1	9
4	1:1:5	1:2	7	22	1:15:1	1:2	4
5	1:1:5	1:3	8	23	1:15:1	1:3	5
6	1:1:5	1:4	9	24	1:15:1	1:4	6
7	1:1:15	4:1	5	25	5:1:1	4:1	8
8	1:1:15	3:1	6	26	5:1:1	3:1	9
9	1:1:15	2:1	7	27	5:1:1	2:1	4
10	1:1:15	1:2	8	28	5:1:1	1:2	5
11	1:1:15	1:3	9	29	5:1:1	1:3	6
12	1:1:15	1:4	4	30	5:1:1	1:4	7
13	1:5:1	4:1	6	31	15:1:1	4:1	9
14	1:5:1	3:1	7	32	15:1:1	3:1	4
15	1:5:1	2:1	8	33	15:1:1	2:1	5
16	1:5:1	1:2	9	34	15:1:1	1:2	6
17	1:5:1	1:3	4	35	15:1:1	1:3	7
18	1:15:1	1:4	5	36	15:1:1	1:4	8

粗,分别设置为1:1:5、1:1:15、1:5:1、1:15:1、5:1:1和15:1:1。同时,还考虑固体与液体的多种组合,尽可能反映出现场的实际情况,故混合比(简称SLR)分别设置为4:1、3:1、2:1、1:2、1:3和1:4。试验为三因素(pH、PSD和SLR)设计的试验,若进行全面试验共有216种试验条件,导致试验周期和工作量成倍增加,因此试验采用正交试验设计。

### 2.3 试验方案

接触面的摩擦特性与接触物表面的初始粗糙度密切相关,在试验前需通过粗糙度检测仪检查筛选合格的试件。通过粗糙度检测仪对现场顶管的测量,其外表面平均粗糙度( $S_a$ )为18.7  $\mu\text{m}$ ,而室内制作的混凝土底座凹槽内的平均表面粗糙度为19.13  $\mu\text{m}$ ,误差为2.25%,控制在5%以内。对于灰岩试件,还需进行打磨处理,以减小其表面平均粗糙度,利用粗糙度检测仪测量岩石表面粗糙度时,测量区域面积为0.5 mm×0.5 mm,随机选择50个区域,其表面粗糙度范围为3.91~4.36  $\mu\text{m}$ ,而在加工前平均表面粗糙度为4.15  $\mu\text{m}$ ,其离散误差未超过15%,故所有试件粗糙度均满足要求。

硬岩地段顶管的超挖间隙不会闭合,顶管主要依靠自重向前滑动<sup>[5,15-16]</sup>。由于每根顶管的规格与材料相同,其摩擦特性可视为法向恒载摩擦,故法向荷载需始终保持恒定。为确保所选法向荷载处于测试机的稳定有效工作范围内,防止试样和基座在试验过程中破碎并避免因偶然因素导致的试验误差。经预试验阶段后发现,仪器的工作状态在1~5 kN最为稳定、精度最高,但过大的法向荷载会过早地使碎屑被碾压、摩擦成为岩粉,故综合确定选择1 kN为法向荷载。

在预试验阶段,过多的岩溶水在施加法向荷载时易从凹槽中溢出,尤其是在SLR为1:4时,显著影响试验条件。因此,为确保试验的准确性,将岩溶水的总质量恒定为25 g,保证试验全过程中,接触物不会溢出凹槽而导致试验误差。

试验步骤:1)选择合适的剪切头。根据试件的尺寸和机器的最大位移量,选择合适的剪切头进行安装。2)安装试件。将混凝土底座作为试验的下盘,灰岩试件作为上盘,并在混凝土底座下方放置一滚珠盘,以确保仪器测量的剪切力主要来自接触面。随后,调整台座高度至适合的剪切位。3)准备试验接触面。将混合物均匀地铺在混凝土试件的凹槽中,再将灰岩试件置于接触物上,使其紧靠凹槽的最左端和固定端,在灰岩的上表面放置垫块,以保证两接触物之间的接触面积一致,便于法向力均匀传递。4)施加法向荷载。缓慢施加法向荷载,待法向荷载值稳定在设定范围内后,启动水平切向荷载。5)启动剪切控制器。试验采用位移控制法,位移速率设置为20 mm/min,与现场顶管的顶进速度保持一致,待剪切力进入残余阶段后停止试验。

## 3 试验结果分析

Li等<sup>[25]</sup>在试验中设定50次循环摩擦为1组,随着剪切次数的增加,接触物也因摩擦作用产生较大变化,致使摩擦系数发生较大改变。根据试验数据发现,前12次摩擦接触物状态相对稳定,只有部分碎屑被磨损,而12~30次期间接触面处于复杂过渡期,结果离散性大,不利于数据的分析与统计。在第31~50次,经过一段时间的充分摩擦后,碎屑在宏观角度下基本全部磨损成岩粉,此时,试验结果也相对稳定,所以将试验分为碎屑部分磨损结果(简称试验前期)和碎屑完全磨损结果(简称试验后期)。

为更好地分析不同条件下的试验结果,采用李超等<sup>[1]</sup>提出的摩擦系数法进行分析,具体公式为

$$\tau = \sigma' \tan \varphi' = \mu \sigma', \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为切向力; $\sigma'$ 为法向力; $\varphi'$ 为灰岩与混凝土的有效摩擦角; $\mu$ 为接触面残余动摩擦系数。

### 3.1 方差分析

为研究pH值、PSD和SLR对摩擦系数的影响,采用三因素方差分析(three-way ANOVA)检验各因素对前期摩擦系数和后期摩擦系数的影响。其中,涉及36组不同的试验条件和结果,如表3所示。

由表4可知,PSD对试验前期摩擦系数表现出显著影响( $F = 25.634, p = 0.000 < 0.05$ )。而pH与SLR对试验后期摩擦系数表现出显著影响( $F = 18.292, p = 0.000 < 0.05; F = 33.607, p = 0.000 < 0.05$ )。

表3 不同试验条件下摩擦系数汇总表

Table 3 Summary table of friction coefficients under different test conditions

试验编号	前期摩擦系数	后期摩擦系数	试验编号	前期摩擦系数	后期摩擦系数
1	0.806	0.711	19	0.646	0.580
2	0.781	0.709	20	0.517	0.610
3	0.824	0.592	21	0.692	0.558
4	0.838	0.612	22	0.728	0.687
5	0.765	0.609	23	0.558	0.620
6	0.731	0.559	24	0.628	0.553
7	0.758	0.706	25	0.619	0.612
8	0.855	0.643	26	0.472	0.634
9	0.818	0.525	27	0.556	0.615
10	0.813	0.624	28	0.633	0.671
11	0.817	0.674	29	0.615	0.620
12	0.697	0.568	30	0.544	0.502
13	0.597	0.652	31	0.576	0.638
14	0.682	0.617	32	0.497	0.693
15	0.558	0.549	33	0.561	0.624
16	0.642	0.649	34	0.546	0.608
17	0.650	0.669	35	0.604	0.581
18	0.608	0.545	36	0.496	0.524

表4 方差分析结果

Table 4 Results of ANOVA

试验阶段	差异源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>p</i>
碎屑部分磨损结果	SLR	0.026	5	0.005	1.903	0.139
	pH	0.014	5	0.003	1.021	0.431
	PSD	0.345	5	0.069	25.634	0.000**
	误差	0.054	20	0.003	—	—
碎屑完全磨损结果	SLR	0.061	5	0.012	33.607	0.000**
	pH	0.033	5	0.007	18.292	0.000**
	PSD	0.004	5	0.001	1.966	0.128
	误差	0.007	20	0	—	—

注:\*\*为显著性

### 3.2 PSD对摩擦系数的影响规律

为研究不同PSD对摩擦系数的具体影响与摩擦特性,利用摩擦系数与竖向位移过程曲线分析同一SLR下不同PSD条件对摩擦系数的影响。为突出试验结果的差异性与规律,选取SLR=4:1与SLR=1:3这2种极

端工况进行对比分析。

如图 7 所示,在 PSD=1:1:5 和 PSD=1:1:15 条件下,摩擦系数与竖向位移值均达到峰值,表明碎屑破碎程度较高。此时,粗粒径碎屑比例较高,颗粒数量减少,接触面积减小,导致显著的应力集中效应。粗颗粒碎屑渗透入灰岩试件表面,形成如图 8 所示的犁沟效应,显著增大了摩擦系数。粗颗粒主导的接触面粗糙度增高,使摩擦系数主要由粗糙度主导。相反,在 PSD=5:1:1 和 PSD=15:1:1 条件下,细颗粒碎屑占比增大,碎屑空隙率(VR)减小,接触面积增加,导致摩擦系数降低。尤其在 SLR 条件较小时,岩溶水含量较高,碎屑表面形成润滑膜,进一步削弱了摩阻力。

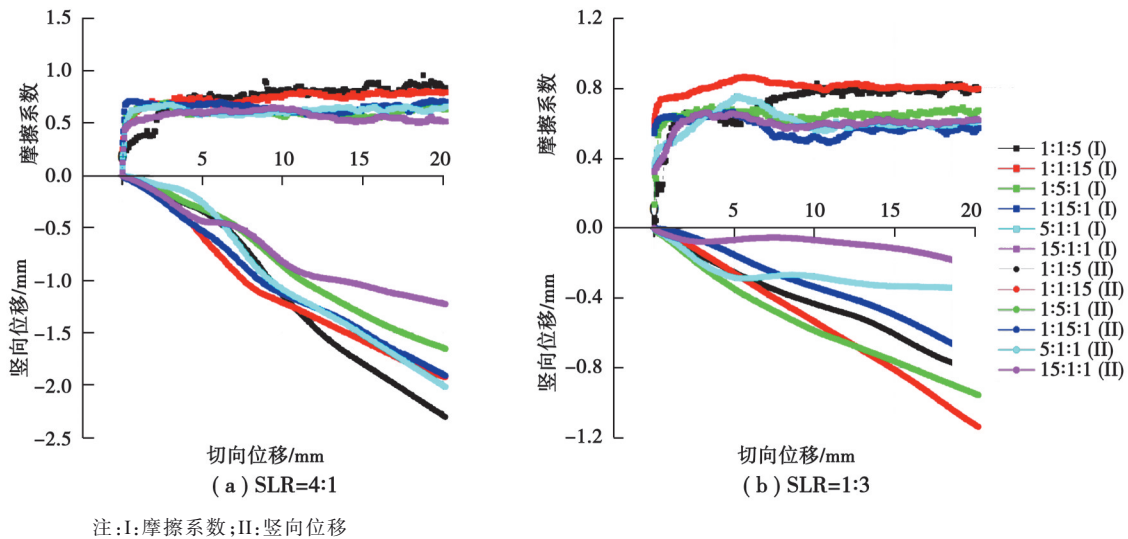
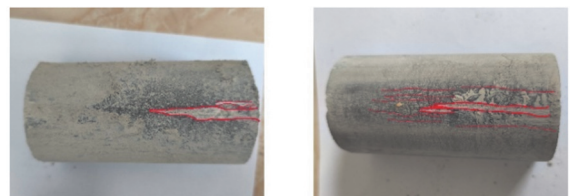


图 7 室内摩擦试验结果汇总

Fig. 7 Summary of indoor friction test results

竖向位移曲线显示,初始阶段的高斜率表明碎屑在压缩作用下破裂并增加接触面积。随着试验进行,颗粒可能会发生嵌锁现象<sup>[20]</sup>,如图 7(b)中 5:1:1(II)曲线和 7(a)中 1:1:15(II)曲线,导致曲线斜率减小。少数竖向位移曲线中观察到局部膨胀现象:初始阶段斜率较大,随着剪切位移增加,颗粒压密至一定程度后斜率减小,如图 7(a)中 15:1:1(II)曲线。由于颗粒嵌锁效应和接触界面发生变化促使颗粒移动或旋转,引发局部应力重新分布;当颗粒重新排列并形成新的嵌锁结构时,曲线斜率再次增大。然而,大部分竖向位移曲线中未出现显著嵌锁现象,因岩溶水在颗粒表面形成润滑层,抑制了膨胀效应。



(a) 犁沟1 (b) 犁沟2

图 8 灰岩试件表面犁沟效应照片

Fig. 8 Photographs of ploughing effect on the surface of limestone specimens

综上所述,PSD 对摩擦系数整体规律呈现出:(PSD=1:1:5~PSD=1:1:15)>(PSD=1:5:1~PSD=1:15:1)>(PSD=5:1:1~PSD=15:1:1),当粗颗粒占比较大时,摩擦系数主要由接触面粗糙度控制;在细颗粒占比较大时摩擦系数由空隙率控制;当颗粒占比在两者之间时,摩擦系数受到粗糙度和空隙率的共同影响,但影响较为复杂,处于两者之间的过渡区间。

### 3.3 SLR 对摩擦系数的影响规律

如图 9 所示,摩擦系数随碎屑质量增加呈现先增后降再增的变化趋势。当 SLR=1:4 时,摩擦系数接近最小值,此时,碎屑几乎完全浸泡在水中。尽管磨损过程中产生一定的岩粉,但丰富的岩溶水能迅速稀释岩粉并使其悬浮,对摩擦系数的影响较小,如图 10 所示。

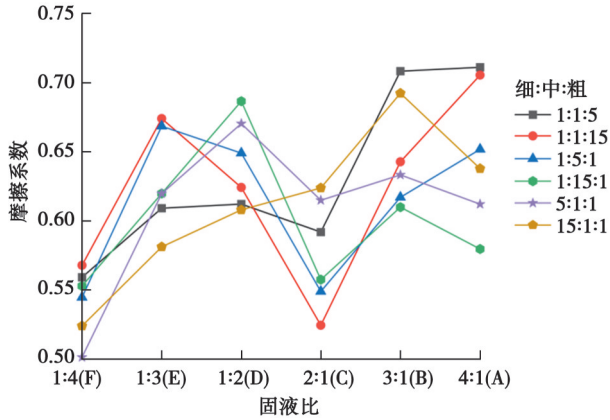


图 9 不同碎屑级配随总质量变化规律图

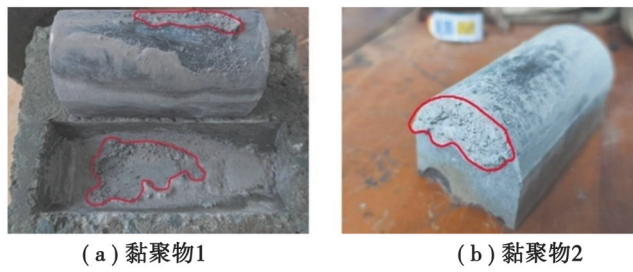
Fig. 9 Diagram of the variation of different rock debris gradations with total mass



图 10 岩粉浑浊液

Fig. 10 Turbid rock powder suspension

随着 SLR 的增大(从 1:4 向 1:2 过渡),碎屑质量和数量显著增加,局部应力集中现象愈加明显。粗颗粒逐渐破碎成更细小的颗粒,同时生成更多岩粉,导致接触面粗糙度显著变化。当 SLR 接近 1:2 时,试验过程中水分蒸发与碎屑粉化使水中岩粉浓度增加,生成的岩粉无法完全稀释,与岩溶水混合形成高黏度“饼状膨润土”。紧贴在灰岩与混凝土凹槽接触表面,如图 11(a)所示,并堆积在灰岩试件前端,如图 11(b)所示,导致摩擦系数达到局部最大值。



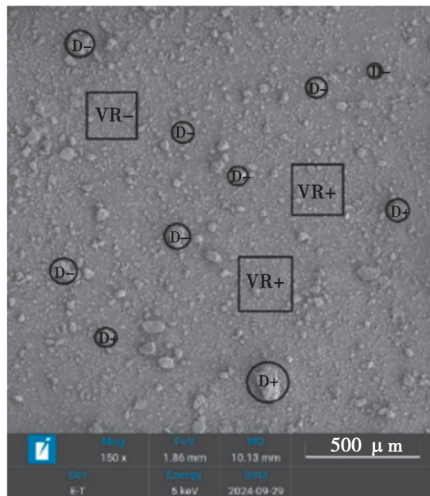
(a) 黏聚物1

(b) 黏聚物2

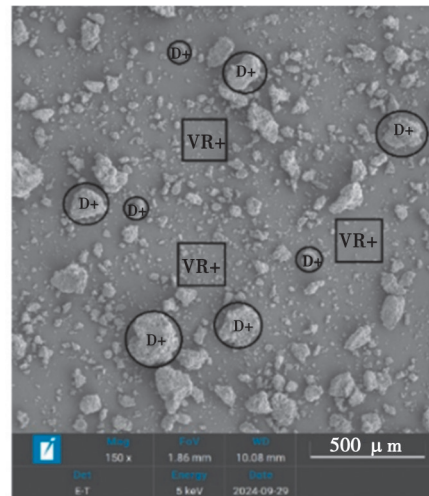
图 11 高黏度“饼状膨润土”

Fig. 11 The high viscosity “cake-like bentonite”

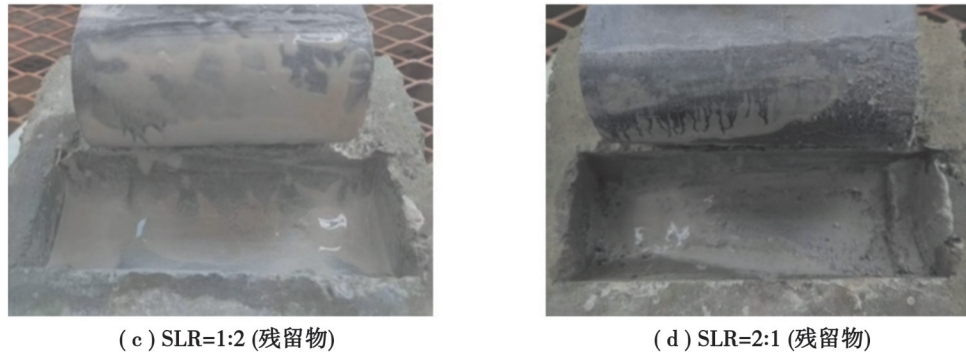
碎屑质量进一步增加(从 2:1 向 4:1 过渡),水的含量不足以维持润滑薄膜,根据边界润滑的原理,水层厚度需要达到一定的临界值才能有效减少摩擦系数,由于水量减少,有效应力降低,摩擦系数再次上升,如图 9 所示。此外,在较小 SLR 条件下,易于在重力作用下沉积并与凹槽表面形成稳定接触,使碎屑破碎较为完整,如图 12(a)和(c)所示。而在较大 SLR 条件下,更多碎屑在法向力作用下移动,有效接触应力减小,碎屑被进



(a) SLR=1:2 (SEM)



(b) SLR=2:1 (SEM)



注:D+为大尺寸碎屑;D-为小尺寸碎屑;VR+为较大空隙率;VR-为较小空隙率

图 12 试验后接触物宏观对比图

Fig. 12 Macroscopic and microscopic comparison diagram of contact objects after the experiment

一步研磨成更小颗粒。这些小颗粒填充接触空隙,增加实际接触面积,进一步降低有效接触应力。因此,在较大 SLR 条件下,碎屑难以完全破碎,如图 12(b)和(d)所示,摩擦系数相对较高。

### 3.4 pH 对摩擦系数的影响规律

如图 13 所示,摩擦系数随 pH 增加呈现出从最大值逐步下降到极小值,再小幅度上升的变化趋势。这一现象可能与酸蚀作用对灰岩微观结构和力学性能的破坏密切相关。酸蚀会在灰岩表面形成软化层,显著降低抗压强度和弹性模量,从而改变应力分布<sup>[27-28]</sup>。尤其在 pH=4 时,酸蚀作用显著降低了灰岩碎屑的抗压强度,碎屑破裂程度加剧。在试验中发现,与 Li 等<sup>[25]</sup>设定 50 次循环摩擦为 1 组的试验相比,酸蚀作用对碎屑软化的影响尤为突出,在 35 次循环摩擦后,灰岩碎屑已经磨损成岩粉状,显现出明显的软化特征,加剧了碎屑的破裂与磨损。此外,SLR 的大小也会显著影响凹槽内摩擦残留物的状态,为更清晰地展示酸碱溶蚀对凹槽内接触物状态,选择 SLR=1:3 条件下不同 pH 利用 SEM 进行分析,如图 14 所示,结果显示,酸性条件下,碎屑颗粒的破碎程度更为严重。

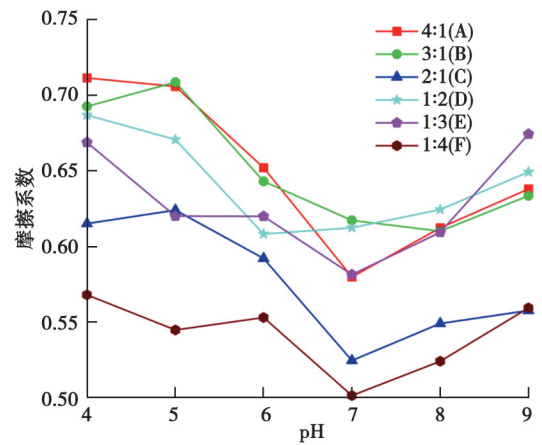


图 13 pH 变对摩擦系数影响规律图

Fig. 13 Effect of pH variation on friction coefficient

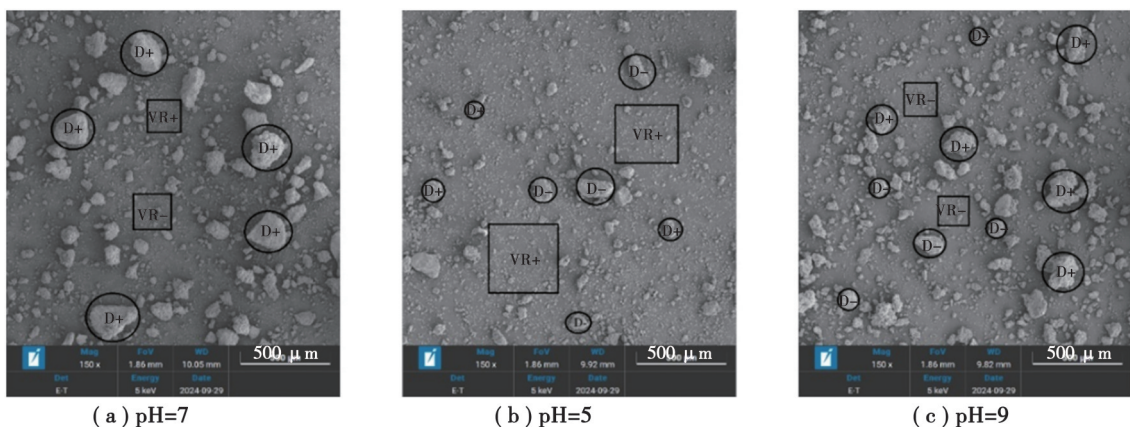


图 14 不同 pH 条件下接触物的电镜扫描图

Fig. 14 SEM Images of contact objects under varying pH conditions

在酸性环境下,酸性溶液与水泥中的氢氧化钙及其他水化产物反应生成可溶性化合物,经岩溶水冲刷后,混凝土表面形成多孔腐蚀层<sup>[29]</sup>。随着酸腐蚀的持续,混凝土的孔隙率逐渐增大<sup>[30]</sup>,导致其表面粗糙度显

著提高。同时,灰岩中的矿物质分解,使灰岩试件表面粗糙度增大并形成细小凹痕。接触面粗糙度的增加减少了有效接触面积,导致摩擦力增大。在恒定法向力下,切向力逐渐增大,粗糙表面被磨平。然而,持续的酸腐蚀作用使接触面粗糙度再次增大,形成反复循环,导致灰岩表面粗糙度显著变化。此外,PSD也会显著影响表面粗糙度,为避免PSD由粗颗粒碎屑主导时产生较大的犁沟,选取SLR=1:3条件下PSD=15:1:1(细颗粒主导)的灰岩试件测量表面粗糙度,如图15(b)和(c)所示。尽管宏观视角下酸碱溶蚀的凹痕相似,但SRM测量结果显示,酸性条件下的表面粗糙度显著大于碱性条件,如图15(e)和(f)所示。因此,摩擦系数在pH=4时达到最大值,随着酸性减弱,酸蚀作用下降,摩擦系数曲线呈下降趋势,并在pH=7时达到最小值。

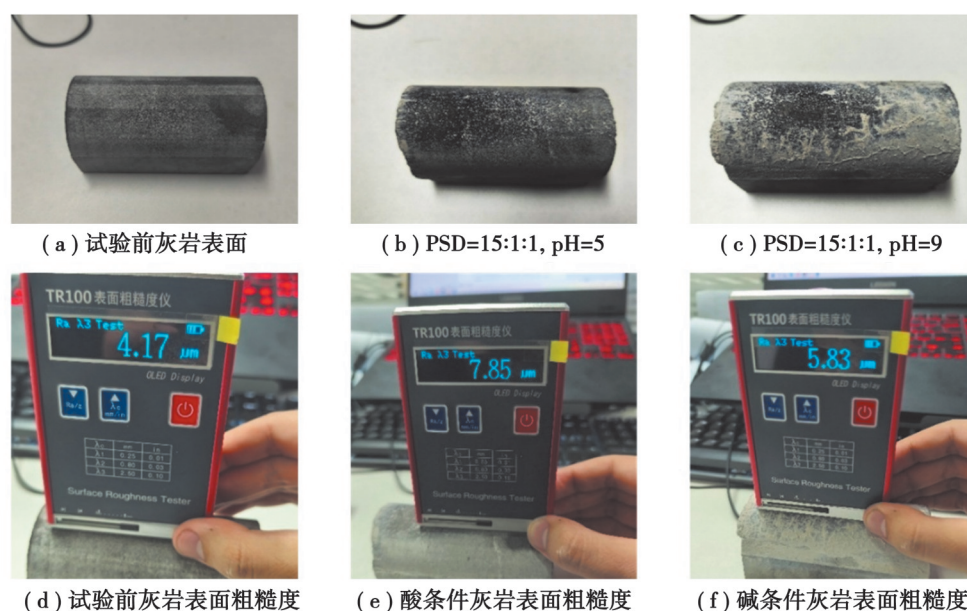


图15 不同pH条件下灰岩表面宏观对比图

Fig. 15 Macroscopic and microscopic comparison of limestone surface at different pH levels

在碱性条件下(pH>7),摩擦系数从极小值逐渐增加,但增幅较酸性条件小。由于混凝土的主要成分包括硅酸盐水泥和Ca(OH)<sub>2</sub>,对碱性溶液具有较好的耐受性。因此,在高碱性条件下,混凝土的结构和表面性质相对稳定,不会发生明显的化学腐蚀和强度降低。与酸性条件相比,碱性环境对混凝土结构完整性的影响较小。然而,碱性环境中仍可能发生局部现象,例如,碱与某些水化产物反应生成溶解性较低的沉积物,从而改变混凝土表面粗糙度,但这些变化的程度远不及酸性条件下的腐蚀作用。另一方面,灰岩表面的矿物成分(如CaCO<sub>3</sub>)与OH<sup>-</sup>发生反应生成可溶性产物(Ca(OH)<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>),导致灰岩表面粗糙度增加。随着摩擦作用的持续,粗糙表面可能逐渐被磨平,但在持续的碱性环境下,表面粗糙度再次增大。与酸性条件相比,酸性环境下灰岩和混凝土的粗糙度均发生变化,而碱性条件下仅灰岩表面粗糙度显著增加。因此,如图15(f)所示,碱性条件下的表面粗糙度小于酸性条件。

综上所述,虽然酸性环境更有利于处理“饼状膨润土”,使泥饼中膨润土泥浆改性并腐蚀灰岩碎屑,但同时会导致后方管节摩擦系数增大,并腐蚀混凝土管节,改变其表面粗糙度。若管节长时间处于酸性环境,可能危及管节安全。由于混凝土对碱性环境的耐受性较强,碱性环境对灰岩和混凝土的影响较酸性环境温和。因此,使用强碱处理“饼状膨润土”更具优势。

#### 4 顶管摩阻力预测

为提高摩阻力预测的准确性,结合室内试验的结果和现场数据的校核显得尤为重要。通过室内试验得到不同条件下的摩擦系数,将最大摩擦系数和最小摩擦系数通过改进李超<sup>[5]</sup>提出的一种重力接触模型,进行顶力预测以获得摩阻力的上下限,并通过与现场实际测得的顶力数据进行对比验证,形成一个完整的摩阻力

预测流程,如图 16 所示。

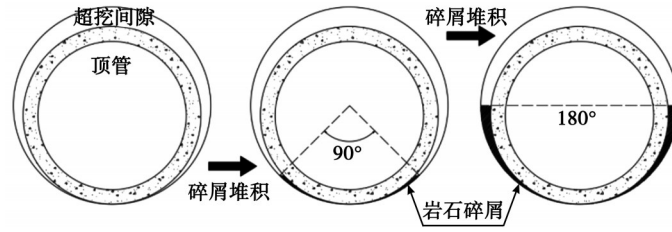


图 16 重力接触角度变化示意图

Fig. 16 Degree of change in contact angle

其中,重力接触模型公式为

$$P(x) = \frac{4P_u}{\pi b} \left( 1 - \frac{4x^2}{b^2} \right)^{0.5}, \tag{2}$$

式中: $P_u$ 为单位长度内的接触力,N; $b$ 为顶管-围岩间有效接触长度,m; $x$ 为接触面积中心线到两侧的距离。

为了提高顶力预测的准确性,将接触力表达式和法向接触合力进行极坐标转换,表达式为

$$P(\theta) = \frac{2P_u}{\pi R} |\cos \theta|, \tag{3}$$

式中: $R$ 为顶管外径,m; $\theta$ 为接触角度的1/2, $\theta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right]$ 。

因顶管的对称性可选取1/2进行研究。根据竖向力的平衡条件,竖向接触合力等于单位长度上的重力,表达式为

$$F_v = 2 \int_0^\theta P(\theta) \cos \theta R d\theta = \frac{G}{L}, \tag{4}$$

式中, $G$ 为顶管重力,表达式为

$$G = \pi(R^2 - r^2) \cdot L \cdot \rho \cdot g, \tag{5}$$

式中: $R$ 为顶管外径,m; $r$ 为顶管内径,m; $L$ 为顶管长度,m; $\rho$ 为混凝土顶管密度, $\text{kg/m}^3$ , $\rho = 2\,550 \text{ kg/m}^3$ ;  $g$ 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

可得出  $P_u$  表达式为

$$P_u = \frac{G\pi}{2L(\theta + \cos \theta \sin \theta)}. \tag{6}$$

将式(6)代入式(3)解出  $P(\theta_1)$  表达式为,  $\theta_1 \in [0, \theta]$ :

$$P(\theta_1) = \frac{G \cos \theta_1}{RL(\theta + \sin \theta \cos \theta)}. \tag{7}$$

根据文献[5]提出的垂直于管道的接触合力表达式,将其转换为极坐标下的表达式。再代入式(7),得到法向合力为

$$F_n = 2 \int_0^\theta P(\theta_1) R d\theta_1 = \frac{2G \sin \theta}{L(\theta + \sin \theta \cos \theta)}, \tag{8}$$

式中: $F_n$ 表示顶管轴向每米的法向接触合力,m。

为了验证式(8)的正确性。取极限状态,当  $\theta$  无限趋近于  $0^\circ$  时,此时  $\cos \theta \approx 1$ ,  $\sin \theta \approx \theta$ ,可得到:

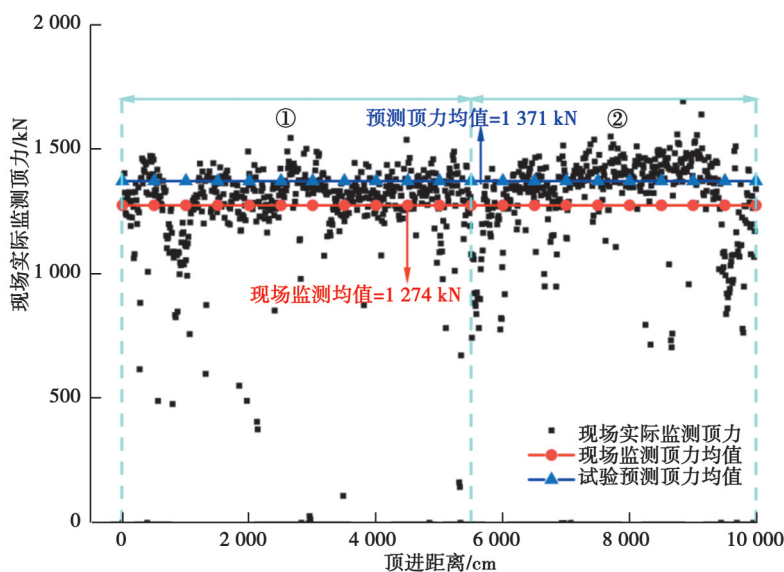
$$F_n \approx \frac{G}{L}. \tag{9}$$

式(9)为弹性力学经典接触理论,成功验证式(8)的正确性。

在重力作用下,管外接触物与顶管的接触角度可归纳为4种典型情况:  $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ 和  $180^\circ$ ,且接触角度因碎屑堆积由前方管节向后方管节逐步增大。根据式(8)的初步计算,最小和最大顶力分别对应接触角度

为90°和180°情况下,即摩擦系数为室内试验中所得的最小值和最大值。根据现场pH变化过程,将试验所得结果分别对应现场2号、7号和8号隧洞相似工况下两中继间之间40根管节(总长100 m)监测的数据,观察其是否符合现场监测数据的范围。

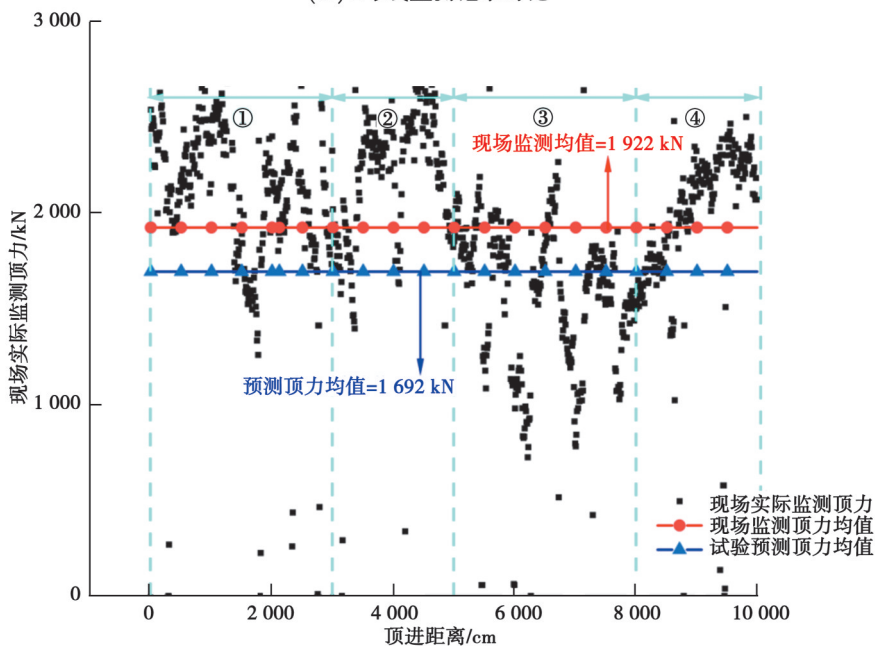
如图17与表5所示,预测值均包含在现场监测数据的范围内。表明室内测试的条件与实际现场条件具有高度的对应性,使试验测试结果可靠。虽然,现场监测数据存在部分顶力突增的问题,但施工大部分时间内的顶力波动保持在预测均值范围内,一定程度上验证了模型对pH影响规律的有效性,为工程应用提供了理论支持。



注:

阶段	SLR	PSD	$f$	管长/m	接触角度/(°)	pH	计算顶力/kN
1	1:4	5:1:1	0.502	55	90	7	722
2	1:3	15:1:1	0.581	45	90	7	649

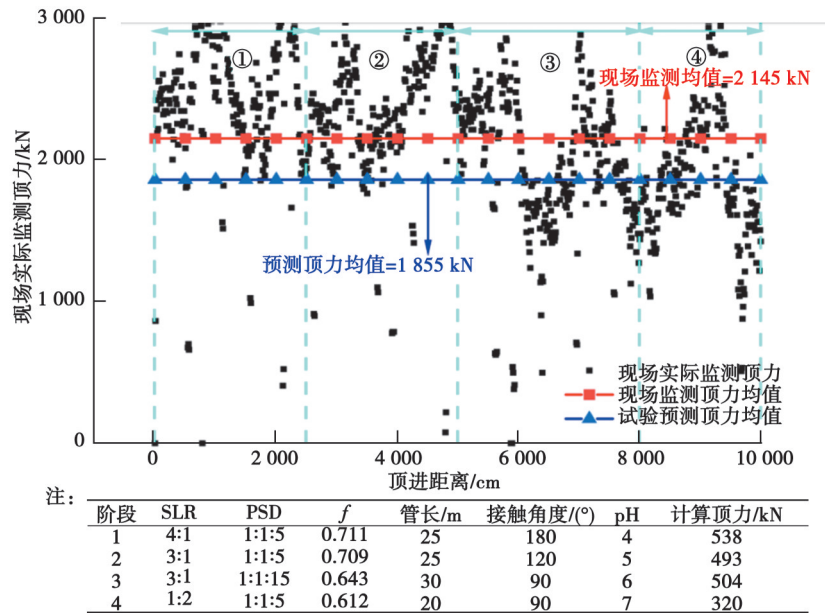
(a) 2号线监测记录对比



注:

阶段	SLR	PSD	$f$	管长/m	接触角度/(°)	pH	计算顶力/kN
1	1:3	1:1:15	0.674	30	90	9	529
2	1:2	1:1:15	0.624	20	120	8	347
3	1:4	5:1:1	0.502	30	150	7	443
4	3:1	1:5:1	0.617	20	180	7	373

(b) 8号线监测记录对比



(c) 7号线监测记录对比

图 17 预测顶力均值与现场监测顶力均值对比

Fig. 17 Comparison chart of predicted mean jacking force and field measured mean jacking force

表 5 预测顶力与监测顶力比较

Table 5 Comparison of simulated and monitored jacking force results

工况	计算顶力均值/kN	监测顶力均值/kN	误差/%
2号隧洞(中性)	1 371	1 274	7.61
7号隧洞(酸性)	1 855	2 145	13.52
8号隧洞(碱性)	1 692	1 922	11.97

## 5 结 论

1)碎屑 PSD 对试验前期摩擦系数影响具有显著性,整体规律呈现出为(PSD=1:1:5~PSD=1:1:15)>(PSD=1:5:1~PSD=1:15:1)>(PSD=5:1:1~PSD=15:1:1)在粗粒径占比大的组合中,碎屑发生应力集中现象导致平均表面粗糙度改变较大,此时摩擦系数主要由粗糙度控制;在细粒径占比大的组合中,颗粒数量相对更多,有效接触面积的增加降低了接触应力,但因碎屑增加有利于碎屑颗粒间的互锁形成,此时摩擦系数主要由空隙率控制;在中粒径占比大的组合中,处于二者控制的过渡区间。

2)摩擦系数随着碎屑质量的增加呈现先增后降再增的变化趋势。在 SLR=1:2 时,摩擦系数达到小峰值,更容易形成“饼状膨润土”,使摩擦阻力显著增大。此外,在混合液碎屑条件下摩擦系数(0.502~0.711)与纯泥浆条件摩擦系数(0.3)相比,该范围增加了 1 倍,说明接触面碎屑的存在必然会导致顶力突增。

3)对比酸碱环境下接触面的表面粗糙度与磨损程度可知,强碱处理“饼状膨润土”更具可行性。相较之下,强酸处理不仅显著腐蚀“饼状膨润土”,还会严重影响混凝土管节的结构完整性,导致混凝土表面粗糙度和孔隙率大幅增加。此外,由于膨润土泥浆通常呈弱碱性,强酸的使用可能破坏泥浆的润滑特性,进一步影响施工效果。因此,从材料兼容性和施工效率角度看,强碱处理更具优势。

4)后续研究应增加更多试验数据对模型进行校正,同时考虑岩溶水流场与顶管摩擦特性的耦合作用,探索动态工况下摩擦特性的变化规律。通过构建更贴近实际工况的综合预测模型,为岩溶复杂地层顶管工程的设计与施工提供精准的理论依据和技术支持。

## 参考文献

- [ 1 ] 李超, 钟祖良, 刘新荣, 等. 复杂接触条件下超长距离混凝土顶管—围岩摩擦特性及现场卡管处置验证研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1197-1208.  
Li C, Zhong Z L, Liu X R, et al. Experimental study on the complex contact frictional property of an ultra-long distance large section concrete pipe jacking with the verification of on-site solution of pipe stuck[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(6): 1197-1208. (in Chinese)
- [ 2 ] 邓志云, 刘新荣, 钟祖良, 等. 长距离岩石顶管工程管节摩阻力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3): 750-759.  
Deng Z Y, Liu X R, Zhong Z L, et al. Study on pipe friction resistance of long-distance rock pipe jacking engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(3): 750-759. (in Chinese)
- [ 3 ] Chen P, Liu X R, Deng Z Y, et al. Study on the pipe friction resistance in long-distance rock pipe jacking engineering[J]. Underground Space, 2023, 9: 173-185.
- [ 4 ] Zhong Z L, Li C, Liu X R, et al. Assessment of experimental friction parameters and contact property of pipe string for the estimation and verification of a solution for pipe stuck in the China's first rock pipe jacking[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103671.
- [ 5 ] 李超. 复杂接触条件下超长距离岩质地层顶管施工力学效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
Li C. Experimental and analytical study of construction mechanics effect of an extra-long distance rock pipe jacking through rock strata under complex contact condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [ 6 ] Zeng L, Peng T J, Sun H J, et al. Dissolution process and mechanism of montmorillonite in oxalic acid and sulfuric acid media at various pH levels[J]. Applied Clay Science, 2024, 261: 107573.
- [ 7 ] Bendou S, Amrani M. Effect of hydrochloric acid on the structural of sodic-bentonite clay[J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2014, 2(5): 404-413.
- [ 8 ] Krupskaya V, Zakusin S, Tyupina E, et al. Experimental study of montmorillonite structure and transformation of its properties under treatment with inorganic acid solutions[J]. Minerals, 2017, 7(4): 49.
- [ 9 ] Anh H N, Ahn H, Jo H Y, et al. Effect of alkaline solutions on bentonite properties[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(10): 374.
- [ 10 ] Gates W P, Bouazza A. Bentonite transformations in strongly alkaline solutions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(2): 219-225.
- [ 11 ] Othman S. Gypsum and limestone dissolution within fatha formation (middle Miocene) at various pH solutions: a laboratory study[J]. Iraqi Geological Journal, 2020, 53(2B): 71-88.
- [ 12 ] Alkattan M, Oelkers E H, Dandurand J L, et al. An experimental study of calcite and limestone dissolution rates as a function of pH from  $-1$  to  $3$  and temperature from  $25$  to  $80$  °C[J]. Chemical Geology, 1998, 151(1/2/3/4): 199-214.
- [ 13 ] 丁梧秀, 陈建平, 徐桃, 等. 化学溶液侵蚀下灰岩的力学及化学溶解特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1825-1830.  
Ding W X, Chen J P, Xu T, et al. Mechanical and chemical characteristics of limestone during chemical erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1825-1830. (in Chinese)
- [ 14 ] Li H, Zhong Z L, Eshiet K I, et al. Experimental investigation of the permeability and mechanical behaviours of chemically corroded limestone under different unloading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(4): 1587-1603.
- [ 15 ] Luo T, Fan G W, Guo B H, et al. Experimental study on the influence of hydro-chemical erosion on morphology parameters and shear properties of limestone fractures[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(12): 3867-3880.
- [ 16 ] Ding C Y, Zuo S Y, Mo Y C. Study on the mechanical and damage properties of laminated limestone under acid mine drainage dissolution[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2024, 10: 97.
- [ 17 ] Dong W S, Li Z, Shen L F, et al. Study on the process of mass transfer and deterioration of limestone under dynamic dissolution of  $\text{CO}_2$  solution[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 5278.
- [ 18 ] Yao H Y, Liu G, Zhang Z H, et al. Slaking behavior of tuffs under cyclic wetting-drying conditions in aqueous solutions of different pH values[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(20): 2139.

- [19] 董武书. 干湿循环及化学溶蚀作用下灰岩的劣化机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.  
Dong W S. Study on the deterioration mechanism of limestone under dry-wet cycle and chemical dissolution[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [20] 李超, 钟祖良, 周小涵, 等. 岩石顶管曲形充填接触面摩擦力学性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(6): 1913-1927.  
Li C, Zhong Z L, Zhou X H, et al. Study on the frictional mechanical properties of curved filling interface of rock pipe jacking [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(6): 1913-1927. (in Chinese)
- [21] 陈秀. 超长距离岩石顶管管-岩异形接触面纯干摩擦试验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.  
Chen X. Experimental study on pure dry friction of irregular contact surface between pipe and rock in ultra-long-distance rock pipe jacking[D]. Guiyang: Guizhou University, 2024. (in Chinese)
- [22] 何冠男. 大断面长距离混凝土顶管管节卡管机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.  
He G N. The mechanism of long distance & large section concrete pipe sticking[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [23] Li C, Zhong Z, Liu X, et al. Challenging in frequent jacking force surge in rock pipe jacking project: A case study in Guanjingkou, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(7): 4559-4578.
- [24] GB/T 14685-2022 建设用卵石、碎石[S].  
GB/T 14685-2022 Pebble and crushed stone for construction[S]. (in Chinese)
- [25] Li C, Zhong Z L, Liu X R, et al. Numerical simulation for an estimation of the jacking force of ultra-long-distance pipe jacking with frictional property testing at the rock mass-pipe interface[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 205-221.
- [26] Peerun M I, Ong D E L, Choo C S, et al. Effect of interparticle behavior on the development of soil arching in soil-structure interaction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103610.
- [27] 齐宁, 马世鑫, 章泽辉, 等. 灰岩酸蚀裂缝软化区域力学特性与微观特征[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(3): 147-155.  
Qi N, Ma S X, Zhang Z H, et al. Mechanical properties and microscopic characteristics of acid etching softening layer in limestone fractures[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(3): 147-155. (in Chinese)
- [28] Lai J, Guo J C, Ma Y X, et al. Effect of acid-rock reaction on the microstructure and mechanical property of tight limestone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(1): 35-49.
- [29] Shen M X, Zhao Y, Bi J, et al. Microstructure evolution and damage mechanisms of concrete-rock-composite corrosion in acid environment[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108336.
- [30] Zivica V, Bajza A. Acidic attack of cement based materials: a review. Part 1. Principle of acidic attack[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(8): 331-340.

(编辑 陈移峰)