

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230603001

浸水条件下树脂锚索锚固性能劣化试验研究*

钟官峰¹, 张子洋¹, 汪波¹, 刘金炜¹, 刘锦超¹, 王智佼²

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 预应力树脂锚索运用于交通/水工隧道中, 服役环境复杂、年限长, 富水围岩区段锚固系统面临潮湿环境长期侵蚀, 在浅析潮湿环境侵蚀机制基础上, 开展室内试验测试树脂锚固剂水中浸泡后力学性能变化, 研究浸水条件下树脂锚索锚固性能变化特征。研究结果表明: 树脂锚固剂试样具有弱吸水性, 水中浸泡后单轴抗压强度、弹性模量及泊松比出现不同比例下降, 试样破坏形态以垂直贯通的主裂缝为主, 周围分布数目较多的细小裂缝, 表面局部出现块状体的脱落与分离; 随着水中浸泡时间的增长, 树脂锚索锚固试件拉拔破坏模式由混凝土劈裂破坏, 出现树脂锚固剂-锚索黏结失效的索体拔出破坏, 平均极限锚固力下降, 锚索锚固性能逐渐劣化, 试件劈裂破坏时树脂锚固剂-混凝土界面产生分离, 索体拔出破坏时为树脂锚固剂-锚索界面滑移。研究揭示了隧道潮湿环境下树脂锚索锚固性能劣化规律现象, 有助于加深对预应力树脂锚固系统后期稳定性变化的认知。

关键词: 树脂锚固剂; 锚索; 潮湿环境; 锚固性能; 拉拔

中图分类号: U455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0568-11

Experimental Study on the Deterioration of Anchoring Performance of Resin Anchor Cable under Water Immersion Condition

ZHONG Guanfeng¹, ZHANG Ziyang¹, WANG Bo¹, LIU Jinwei¹,
LIU Jinchao¹, WANG Zhijiao²

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Gansu Changda Highway Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: Pre-stressed resin anchor cables are used in transportation/hydraulic tunnels, which have a complex service environment and long service life. The anchoring system in the water-rich surrounding rock section faces long-term erosion in a humid environment. Based on the analysis of the erosion mechanism in a humid environment, indoor experiments were conducted to test the mechanical properties of resin anchoring agent samples after immersion in water, and to study the characteristics of changes in anchoring performance. The results showed that resin anchoring agent samples had weak water absorption. The uniaxial compressive strength, elastic modulus and Poisson's ratio decreased to varying degrees after soaking in water. The failure modes of the samples were mainly vertically connected main cracks, with a large number of small cracks distributed around them, and local block-like detachment and separation on the surface. With the increase of soaking time, the pullout failure mode

* 收稿日期: 2023-06-03; 修回日期: 2023-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2034205, 51878571)资助

作者简介: 钟官峰(1999—), 男, 硕士。主要从事隧道与地下空间的研究。E-mail: sc_zhongguanfeng@163.com

通信作者: 汪波(1975—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事隧道方面的研究。E-mail: ahbowang@163.com

of samples changed from concrete splitting to the failure of resin anchoring agent-anchor bond, resulting in the failure of the cable body to pullout. The average ultimate anchoring force decreased, and the anchoring performance of resin anchor cable gradually deteriorated. The interface between resin anchoring agent and concrete separated during samples' splitting failure. The interface between resin anchoring agent and cable slid during cable's pullout failure. The study reveals the deterioration pattern of anchoring performance of resin anchor cables in humid tunnel environment, which helps to deepen the understanding of stability changes of pre-stressed resin anchoring systems in later stages.

Keywords: resin anchoring agent; anchor cable; humid environment; anchoring performance; pullout

0 引言

自“西部陆海新通道”高质量建设要求提出以来,我国西部地区拟在建的公路、铁路隧道数量众多,当中,开挖后围岩大变形现象频发的软岩隧道最具代表性,给施工带来极大难度和挑战。为寻求软岩隧道大变形的支护最优解,业内专家从不同设计理念出发提出各种支护模式,主要包括及时强力支护^[1]、分层多次支护^[2]、让压支护^[3]及主动支护^[4]。前两种传统支护模式在软岩隧道抑制围岩变形、预防坍塌方面取得积极作用,但忽略了强流变性下围岩变形能的释放或释放不完全,后续隧道仍面临着支护结构受力过大而破坏的风险,由此,后续两种支护模式被相继提出运用。相较于强调围岩压力和动载能量释放的让压支护,主动支护模式在隧道开挖之初就在洞室周边快速施加一圈预应力,改善洞周一定深度范围内的围岩物理力学性质,在围岩内部形成承载拱,以达到充分调动和提高围岩自承能力,实现控制大变形的目的^[5]。

该以预应力为关键控制技术的主动支护理念起源于煤矿领域,通过凝结速度快、锚固性能好的预应力树脂锚索成功支护煤矿巷道,取得良好的变形控制效果,近年来逐渐应用于交通/水工隧道中^[6]。围绕其开展支护结构受力、围岩变形量的研究^[7-8],彰显了基于快速预应力锚固支护的变形控制技术在软岩大变形隧道中的优越性。然而不可忽视的是,地下工程中预应力树脂锚索永久埋设于围岩中,长期承受高荷载,伴随潮湿环境、高温因素和爆破、车辆振动,潜在出现钢筋高应力锈蚀、树脂锚固剂弱化现象,致使锚索树脂锚固性能劣化,预应力损失情况发生。而锚索施加预应力后回弹变形趋势提供的支护力是预应力锚固的关键,锚固性能

劣化影响主动支护效应,荷载加大转移至其余结构上,随时间增长支护结构失稳风险也逐步上升,因此,预应力锚固系统的安全稳定意义重大。

针对树脂锚固性能影响因素及提升技术,国内外学者开展了大量研究:康红普等^[9-10]全面总结了影响树脂锚固性能的因素,可分为部件固有属性、锚固工艺、客观环境三类;C.Cao等^[11]、张明等^[12]向树脂锚固剂中添加钢质骨料来提升固化后的抗剪能力;贾后省等^[13]研发出一种使用方便、结构简单的锚固增效装置,能有效提高树脂锚固剂搅拌均匀程度、增加树脂药体密实性;贺德印等^[14]采用锚固剂推送限位装置约束搅拌中的锚索,保证锚索锚固居中效果良好;刘少伟等^[15]在锚杆端部外加高效搅拌装置,可有效提高搅拌运动速度,改善树脂锚固剂混合均匀性及固化效果;范世平等^[16]引入热稳定性好的交联基团耐高温原理,优化树脂锚固材料配方;更高温度下,郝佩、苏学贵等^[17-18]表明树脂锚固材料会发生热解,严重影响锚固性能;胡滨等^[19-20]通过试验佐证高温、水对树脂锚杆锚固性能的劣化特征,提出降低劣化程度的方法。

上述研究表明,业内逐渐形成优化锚索外形、调整锚固参数、改良锚固剂材质等一系列措施来提升树脂锚固性能,但重心集中在短时树脂锚固体形成阶段,关注后期锚固性能时效劣化的研究较少,随着树脂锚索在交通/水工隧道大面积、长周期的使用,开展与实际工程匹配的长期锚固性能劣化研究迫在眉睫。长大隧道水文地质环境变化明显,地下水多以基岩裂隙水、岩溶水和松散岩类孔隙水形式存在,部分围岩区段潮湿渗水,如图1所示。锚孔钻探后成为水排泄新通道,出现滴水、淋水乃至涌水的不同流量出水现象^[21],部分锚孔渗水在几小时内能完全消散,而有的持续至初支、二衬施作,使用“W”钢带、垫板和锚具完成锚索预应力施加并

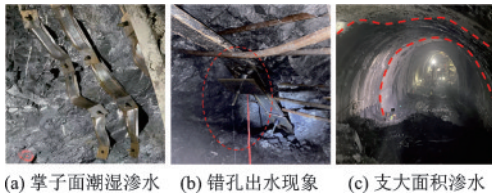


图1 隧道典型渗水区段

Fig.1 Typical seepage water sector of tunnel

进行初喷支护后,锚孔封堵存在水聚积可能性,树脂锚固体长期面临潮湿环境侵蚀。因此,本文在剖析潮湿环境侵蚀机制基础上,采用室内水中浸泡方式研究树脂锚固剂力学性能及树脂锚索锚固性能变化特征,旨在为隧道预应力树脂锚索长期安全稳定提供参考。

1 隧道树脂锚索潮湿环境侵蚀机制分析

预应力树脂锚固支护系统是由围岩、锚索、树脂锚固剂及其相关构件组合而成,其内锚固段深入围岩,依靠树脂锚固剂对索体、孔壁的握裹黏结提供剪切抗力,将作用在索体的荷载传递至稳定的岩土层中。围岩-树脂锚固剂-锚索相邻的两介质之间会形成接触界面,两界面的黏结强度大小决定了锚固质量的好坏^[22],锚索锚固后利用施加预应力的回弹变形趋势实现对加锚围岩的快速支护。然而受复杂环境影响,隧道树脂锚索锚固质量参差不齐,且在后端长期服役时会发生变化,特别是在潮湿围岩区段施作预应力锚索时,锚固质量随锚孔出水大打折扣,后期水岩化学作用下,围岩、树脂锚固剂固化体存在着的内部缺陷将被进一步放大,力学性质逐步劣化^[23],锚索服役环境如图2所示,系统面临潮湿环境多方面长期侵蚀。

软岩隧道加锚围岩以木寨岭公路隧道炭质板岩为例,具有强度低、遇水软化特点,潮湿区段浸水后强度可降低50%以上^[24],围岩-树脂锚固剂界面黏结性能会随加锚围岩弱化而弱化^[25]。此外,树脂锚固剂固化反应是存在不饱和双键的聚酯树脂分子与单体的混合物(即树脂),加入加速剂及过氧化物引发剂(及固化剂)快速分解出大量的自由基形成线性高聚物的过程,见式(1),此反应短时间内获得较高转化率与分子量,从而达到预期锚固效果^[26-27]。而隧道地下水是富含多种离子的复杂溶

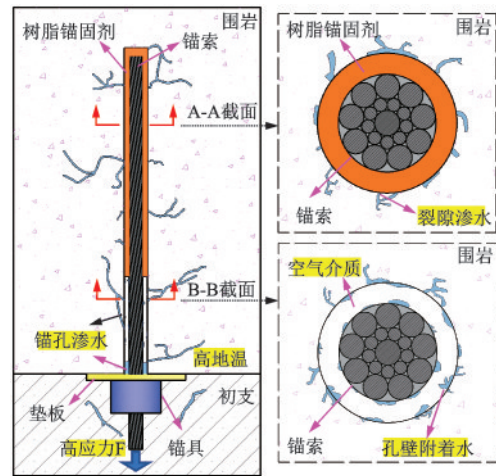
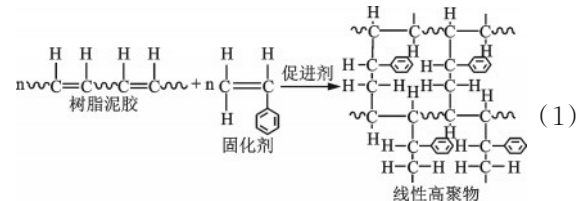


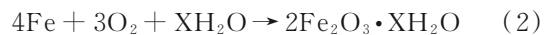
图2 隧道预应力树脂锚索服役环境示意图

Fig.2 Service condition of pre-stressed resin anchor cables in tunnels

液,树脂锚固剂固化后的线性高聚物易与之发生长期化学作用,不断侵蚀后出现弱化现象,力学性能与接触界面黏结性能产生变化。



再者,隧用锚索长度达5~10 m,每环数量多至23根,使用体量大,锚孔自由段与锚固体裂隙中夹杂腐蚀介质,在拉应力作用下,索体金属晶格产生滑移,出现溶解的腐蚀坑槽,形成腐蚀断口,潮湿环境中易发生不均匀的应力腐蚀^[28],见式(2),锈蚀产物附着在锚索表面,树脂锚固剂搅拌固化不均产生的先前裂隙在锈胀力促使下进一步发育,致使锚索-锚固剂界面黏结性能劣化加剧。索体高承载状态下受上述因素影响,预应力树脂锚索稳定性面临长久考验。



2 浸水条件下树脂锚固剂力学性能试验

2.1 试样制备及方案

为探究树脂锚固剂在浸水环境中潜在弱化问题,进行不同浸水时间后材料力学性能试验。使用标准模具制作直径50 mm、高100 mm的树脂锚固

剂圆柱体试样,如图3所示,考虑合适胶凝时间选用MSZ2350锚固剂,方式为剖开药卷包装,取出树脂胶泥与固化剂,外部混合转机均匀搅拌,搅拌时长15~20 s,然后迅速装填至标准模具中,人工振捣、击实并刮平表面,1 min后胶泥初步固化具有一定强度进行试件脱模,静置等待8 min左右,试件固化放热完全达到最高强度。为尽可能保证试验每块试样的统一性与结果可分析性,试样制作过程中严格控制搅拌时间与振捣、击实次数,并对试样端面进行打磨处理。



图3 树脂锚固剂试样

Fig.3 Resin anchoring agent samples

隧道水成分复杂多变,室内试验选用普通用水替代,将制作好的树脂锚固剂试样淹没于装水的容器箱中浸泡,浸泡过程中保持溶液箱密闭,定期取出每块树脂锚固剂试样,用干净棉布擦拭表面附着水后称取质量,同时使用pH计记录箱中水pH值。每组试样分别在水中浸泡0、15、30 d,单组数目4个,制作及浸泡过程如图3~4所示,到达设定浸泡时长后进行单轴压缩试验,采用对比分析的方法探究树脂锚固剂水中浸泡后力学指标变化,试验方案见表1。

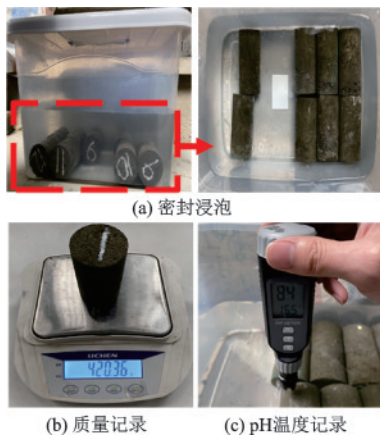


图4 树脂锚固剂试样浸泡

Fig.4 Soaking process of resin anchoring agent samples

表1 试验方案

Table 1 Experimental scheme		
组号	水中浸泡时间/d	试件编号
1	0	NS-1~4
2	15	W15-1~4
3	30	W30-1~4

2.2 单轴压缩变形试验

树脂锚固剂试样浸泡完毕后,在其四周侧面居中位置粘贴“两横两竖”应变片,使用微机控制电子万能试验机RTM305D进行标准试件的单轴压缩变形试验,闭环位移控制加载速率2 mm/min,加载中使用TST3826E静态应变测试分析系统测量树脂锚固剂竖向、横向应变,加载示意如图5所示。

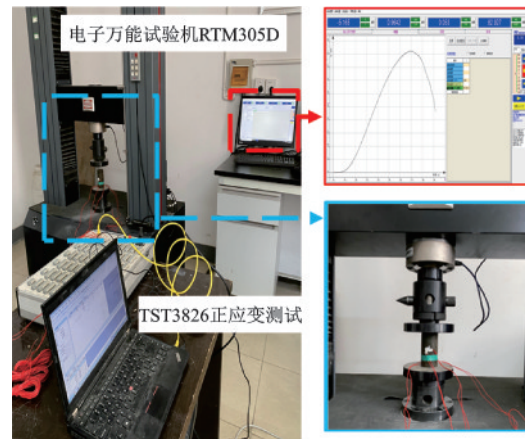


图5 树脂锚固剂试样单轴压缩系统

Fig.5 Uniaxial compression system of resin anchoring agent samples

2.3 试验结果分析

2.3.1 试样质量及水pH值变化

树脂锚固剂试样处于水中浸泡时,对其质量和容器箱中水pH值进行测量,测量频率为前7 d每天一次、7~15 d每2 d一次、15~30 d每3 d一次,变化情况如图6所示。

监测结果显示,每块树脂锚固剂试样制作完毕的起始质量略有偏差,最小为408.19 g,最大为418.33 g,最大偏差质量占比2.4%,换算密度区间为2.08~2.13 g/cm³,位于树脂锚固剂生产厂家提供性能指标范围1.9~2.2 g/cm³。单块树脂锚固剂试样质量在水中浸泡时的变化情况可分为两阶段:初始增加阶段,该阶段持续时间较短,主要集中在前

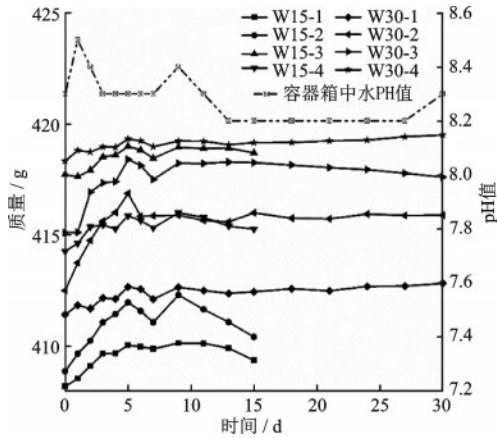


图6 树脂锚固剂试样质量和水pH变化

Fig.6 Changes in quality of resin anchoring agent samples and water pH

5 d时间内,试样质量产生幅度相对较大的增长,表明浸泡初期水通过树脂锚固剂试样孔隙逐渐浸入内部,随着时间增长也逐渐饱和;轻微下降趋于稳定阶段,该阶段树脂锚固剂试样质量减小幅度低,但持续时间较长。达到设计浸泡时长后每块试样质量相较于初始状态均整体增加,幅度从0.88 g至3.39 g不等,平均增比15 d为0.28%,30 d为0.51%,变化微小,其质量下降部分源于试样表面微小颗粒剥离脱落,封闭容器箱中的水在浸泡后期由此变得浑浊。从pH值监测结果可以看出,生活用水呈弱碱性,树脂锚固剂在该环境浸泡时水pH值无明显变化,而试样表观变化较明显,由刚制作完时的色泽黝黑、手感粗糙变得表面浅灰、光滑,如图7所示。由此可见,树脂锚固剂试样具有轻微吸水性,与水接触表面受浸水影响改观较大。

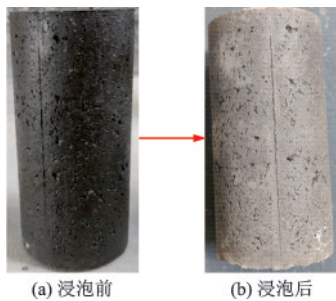


图7 树脂锚固剂浸泡前后表观对比

Fig.7 Appearance of resin anchoring agent samples before and after immersion

2.3.2 单轴压缩应力—应变曲线及特征参数

采集试样单轴压缩变形试验中的荷载、应变数据,计算绘制树脂锚固剂试样不同浸泡时间的应力—应变关系曲线如图8所示。

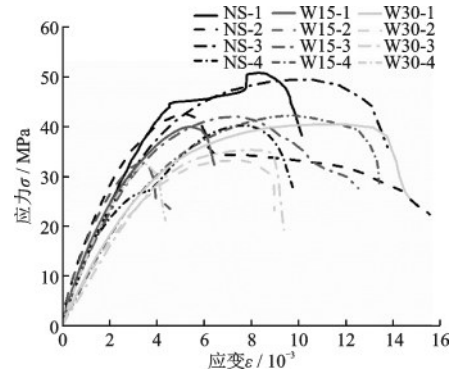


图8 树脂锚固剂试样应力—应变关系曲线

Fig.8 Stress-strain curve of resin anchoring agent samples

树脂锚固剂单轴压缩应力—应变曲线呈现常规三阶段分布特征,即初始弹性变形阶段、塑性变形阶段和峰后破坏阶段。试样在加载初期,应力与应变呈线性增长关系;随着荷载继续增长,曲线逐渐偏离原直线,斜率逐渐减小,试样进入塑性变形阶段,表面产生细微裂纹;荷载增大至峰值后,试样进入破坏阶段,细微裂纹扩展形成贯通裂缝,表面局部脱落,试样完全破坏。根据图中的特征点,提取各试样的特征参数见表2,其中弹性模量、泊松比取树脂锚固剂试样应力—应变关系曲线上直线段起始点及终点的应力应变值按式(3)、式(4)计算,单轴抗压强度及峰值应变为曲线上峰值拐点^[29];每组4个试样取平均值,得到树脂锚固剂特征参数随水中浸泡时长变化规律如图9所示。

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_{hb} - \epsilon_{ha}} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\epsilon_{db} - \epsilon_{da}}{\epsilon_{hb} - \epsilon_{ha}} \quad (4)$$

根据图表结果,树脂锚固剂试样自然状态下平均抗压强度为45.73 MPa,平均弹性模量为11.89 GPa,平均泊松比为0.36;处于极端潮湿环境中浸泡15 d后,树脂锚固剂试样平均抗压强度为39.26 MPa,平均弹性模量为11.15 GPa,平均泊松比为0.34;水中浸泡时间延长至30 d后,树脂锚固剂试样平均抗压强度为35.36 MPa,平均弹性模量为9.39 GPa,平均泊松比为0.31;相较于自然状态下的树脂锚固剂试样,水中浸泡15 d、30 d后平均抗压强度分别下降了14.1%、22.7%,平均弹性模量分别下降了6.22%、21.0%,平均泊松比变化相对较小,分别下降了5.6%、13.9%。树脂锚固剂单轴压缩应力—应变曲线弹性阶段分布较短,塑性特征明显,短时间内处于水中浸泡后,试件抗压强度下降,同等

表2 树脂锚固剂试样特征参数

Table 2 Characteristic parameters of resin anchoring agent samples

试样编号	单轴抗压强度/MPa	峰值应变/ 10^{-3}	弹性模量/GPa	泊松比
NS-1	50.76	8.34	11.36	0.31
NS-2	42.52	5.29	12.86	0.41
NS-3	49.40	10.59	11.60	0.40
NS-4	40.23	7.58	11.74	0.33
W15-1	39.99	5.39	11.93	0.34
W15-2	32.82	3.45	11.92	0.36
W15-3	42.01	7.37	11.36	0.35
W15-4	42.23	9.79	9.38	0.31
W30-1	40.42	10.84	9.42	0.30
W30-2	33.15	7.33	8.26	0.42
W30-3	35.31	7.87	7.98	0.23
W30-4	32.55	3.49	11.91	0.28

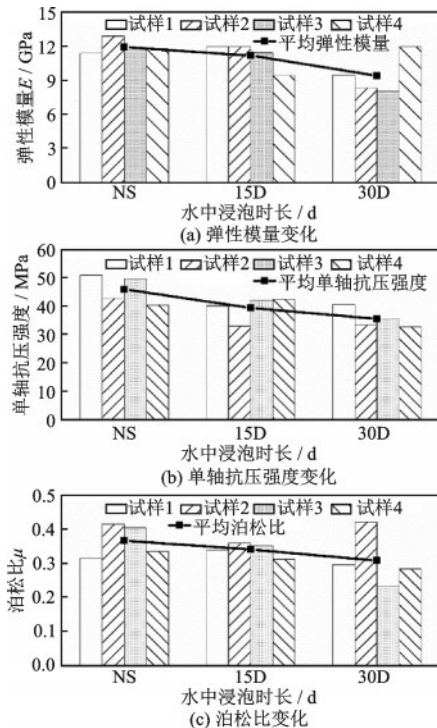


图9 树脂锚固剂试样各特征参数及水中浸泡变化

Fig.9 Different characteristic parameters of resin anchoring agent samples in water immersion

应力状态下纵向和横向应变均增大,但横向应变增量比小于纵向,呈现出弹性模量和泊松比减小结果,究其原因,树脂锚固剂固化过程中极速放热,试样内部由于温差和制作存在微裂隙,在水中浸泡过程中,水通过微裂隙浸入树脂锚固剂试样中,对试样表面和裂隙面造成侵蚀,影响了树脂与填料界面粘结性,促使树脂锚固剂力学性能改变。

2.3.3 试样破坏形态

记录单轴压缩破坏后的树脂锚固剂试样形态,绘制其裂缝扩展情况如图10所示,从图中可以看出,各工况下树脂锚固剂试样破坏以上下受压面垂直贯通的主裂缝为主,主裂缝周围集中分布数目较多的细小裂缝,伴随着细微裂缝的闭环,试样表面出现局部块状体的脱落与分离,试样轮廓线呈现横向膨胀特点;此外,树脂锚固剂试样在经过水中浸泡后,其表面颜色由黝黑逐渐过渡至浅灰,侧面粗糙细微颗粒在浸泡中分离脱落后变得光滑蜂窝状。

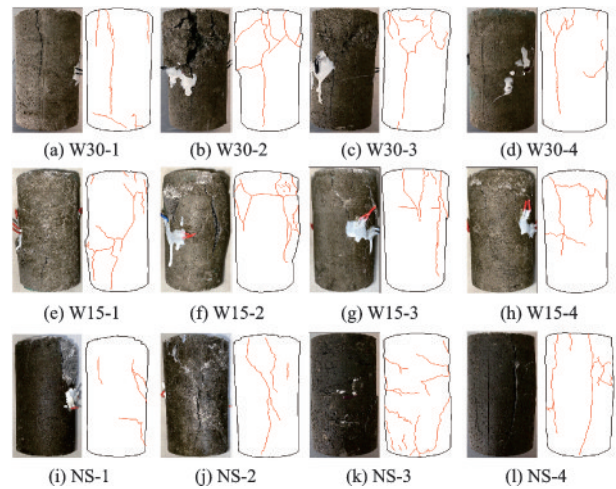


图10 树脂锚固剂试样破坏形态

Fig.10 Failure mode of resin anchoring agent samples

前述试验结果表明,处于水中浸泡后的树脂锚固剂其单轴抗压强度、弹性模量和泊松比呈比例下降,室内试验为模拟隧道潮湿环境采取了极端短时的方式,而预应力树脂锚索实际服役环境要更为复杂,是高应力承载、侵蚀区域广而不均、长时效的,作为锚固黏结材料,树脂锚固剂力学参数劣化将影响锚索锚固性能。

3 浸水条件下树脂锚索锚固试件拉拔试验

3.1 试验材料及方案

有鉴于隧道预应力树脂锚索在富水围岩区段潜在长期侵蚀问题,拟用试件水中浸泡不同时间后锚索锚固力拉拔测试方法评估锚固性能。试验锚索截面外径 21.8 mm,根据需求切割成单根 60 cm 长使用,基本力学性能见表3;室内试验锚固体约束介质常用浇筑圆柱体或立方体混凝土试件、刚度等

表 3 锚索基本力学性能

Table 3 Basic mechanical properties of the cable

直径/ mm	强度级 别/MPa	弹性模 量/GPa	规定非比例 延伸力/kN	钢绞线最 大力/kN	最大总伸 长率/%
21.8	1 860	194	537	588	3.75

效的钢管两种方法^[30],考虑水对树脂锚固体的综合影响,使用特制模具浇筑预留孔洞的立方体混凝土试件作为锚固体约束介质,试件尺寸 150 mm×150 mm×150 mm,锚孔位于一面居中处,孔深 120 mm,孔径 28 mm,浇筑配合比见表 4,测试 28 d 抗压强度为 30.16 MPa;树脂锚固剂选用 MSZ2350。

表 4 锚固体约束介质混凝土配合比

Table 4 Concrete mix proportion of anchor solid constraint medium

单位:kg/m ³					
水	P.O42.5水泥	机制砂	细石	粉煤灰	外加剂
170	265	925	925	95	6.1

锚索锚固时,单块试件树脂锚固剂用量较少,直接运用转机高速搅拌方式易形成柔性条带体造成孔口段质量较差,且药卷包装带影响相对较大^[31],因此,试验选用外部混合搅拌再置入的方式锚固锚索;即剖开过量树脂锚固剂药卷包装带,分别取出树脂胶泥及白色固化剂,置入容器内混合后用转机搅拌均匀(15~20 s),搅拌后快速装填至混凝土试件锚孔中,连接转机居中旋转插入锚索,清除上表面溢出的锚固剂,等待 8 min 后安装完毕,试验材料及锚固完成的试件如图 11 所示。

将树脂锚固试件置入装有水的溶液箱中浸泡,如图 12 所示,锚索一侧朝上,整个溶液箱长期放置于室内阴凉处,且处于开放环境当中,定期补充水量保证水面高度始终没过锚孔表面 2~3 cm。试件浸泡时长设计 0、30、60 d,同种工况下重复 3 次避免结果偶然性,最终拟定的试验方案见表 5,共计 9 块试件。

3.2 锚索拉拔过程

树脂锚索拉拔采用 WAL-600 微机控制电液伺服卧式拉力试验机进行。拉拔系统如图 13 所示,试验时伺服控制器驱动电机,加载横梁随滚珠丝杠的转动实现前后移动,其上装载的高精度负荷传感器、可夹持引伸计完成试样试验时力和变形的

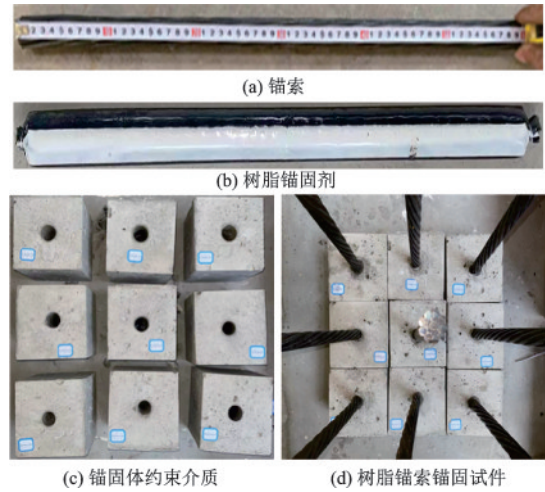


图 11 试验材料及锚固试件

Fig.11 Test materials and anchor samples

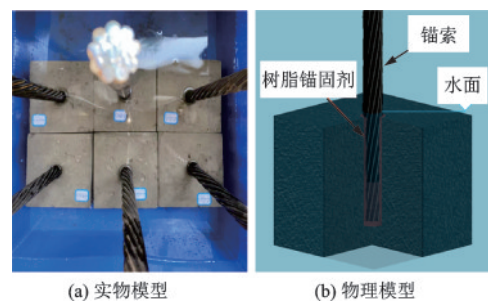


图 12 水中浸泡的锚固试件

Fig.12 Anchor samples soaked in water

表 5 试验方案

Table 5 Experimental scheme

组号	水中浸泡时间/d	试件编号
1	0	NS-1~3
2	30	D30-1~3
3	60	D60-1~3

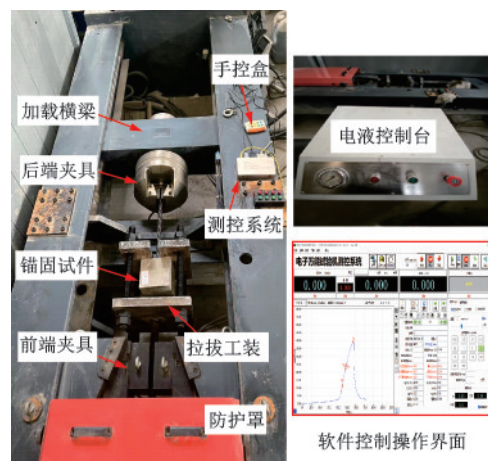


图 13 树脂锚索锚固试件拉拔系统

Fig.13 Pullout system for resin anchor cable samples

测量。

试件浸泡到设计时长后,将其从溶液箱中取出,记录表现现象,随后进行锚索拉拔。将拉拔工装调整至卧式拉拔仪夹持高度,前端夹具夹持固定工装;待拉拔的树脂锚固试件放于拉拔工装内,操作手控盒移动加载横梁、调整后端夹具松紧,使锚索尾端夹持于卧式拉拔仪后端夹具中;使用水平尺检查工装、锚索水平度并进行微调。树脂锚固试件安装完成后,采用闭环位移控制拉拔锚索,加载速率为5 mm/min,采集获得荷载一位移曲线及特殊点情况,当拉拔荷载达到峰值并降低一段幅度后停止数据采集,松开锚索尾端的后端夹具,取下树脂锚固试件记录其破坏形态。

3.3 试验结果分析

3.3.1 荷载一位移曲线特征

自然状态和浸泡不同时间的树脂锚索锚固试件拉拔采集的荷载一位移曲线如图14所示,曲线呈现出明显的阶段性特征和差异性。

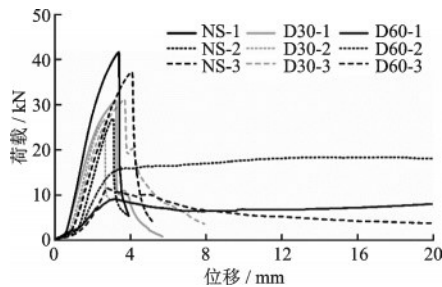


图14 树脂锚索锚固试件拉拔测试结果

Fig.14 Pullout test results of resin anchor cable samples

劈裂破坏的试件以自然状态和水中浸泡30 d的树脂锚索锚固为主,其拉拔荷载一位移曲线可划分为4阶段特性:初始密接段,荷载随位移的起始增长产生上凹式缓慢增长,是拉拔系统消除工装、试件不平整间隙原因所致;线性上升阶段,当位移产生微小增长时,荷载发生直线段增长,锚固界面黏结良好提供剪切抗力;非线性上升阶段,荷载随位移的增加持续增长,但增长的速率逐渐放缓,斜率减小时间短暂,退出该阶段时仍处于较大值;急剧下降阶段,荷载增长到峰值处后立即发生陡降,下降速率极快,曲线几乎呈垂直直线,此时混凝土已劈裂破坏,树脂锚固剂-混凝土界面黏结失效。水中浸泡60 d后,部分树脂锚索锚固试件出现索体拔出破坏现象,荷载一位移曲线特征发生较大改变:线

性上升阶段缩短或消失,初始压密后直接进入非线性上升阶段,荷载峰值低;无急剧下降阶段,以平缓缓慢下降代替,呈现出“低延性”;该阶段后续锚索被拔出,残余荷载由滑移面的摩擦阻力提供。

树脂锚索锚固试件拉拔破坏模式决定了荷载-位移曲线走势,根据曲线特征点罗列试验关键结果见表6,自然状态下树脂锚索平均极限锚固力为35.343 kN,试件处于潮湿环境水中浸泡30 d后为29.705 kN,浸泡60 d后下降到13.016 kN,仅占自然状态下的36.83%。水中浸泡后试件破坏模式的转变导致极限抗拔力下降变化突增,锚索锚固性能良好情况下其局部黏结-滑移特性与加锚介质相关^[32],在潮湿环境水中浸泡侵蚀时,混凝土-树脂锚固剂-锚索三者皆受影响,表7罗列了浇筑混凝土标准试件(100 mm×100 mm×100 mm)于水中同批浸泡的抗压强度测试结果,30 d、60 d混凝土抗压强度分别下降了8.5%、15.6%,因此尽管同为劈裂破坏,水中浸泡30 d后的试件极限抗拔力因加锚介质混凝土的弱化出现小比例下降,浸泡时间延长至60 d后,锚孔口索体锈蚀严重,锚固剂部分脱落,锚固剂-锚索界面黏结性能弱化较大,在外拉力作用下锚索沿该界面首先滑移破坏,仅剩摩擦阻力抵抗外荷载直至锚索被完全拔出。根据平均极限拉拔荷载*F*、锚索外径*d*和短锚固长度(*l*=120 mm)剪应力平均分布假设,按式5计算得到树脂锚索锚固试件浸泡前后破坏剪应力值,由自然状态下3.348 MPa下降至浸泡30 d后的2.814 MPa、浸泡60 d后的1.233 MPa,树脂锚索锚固性能发生劣化。

$$\tau = \frac{F}{\pi dl} \quad (5)$$

表6 试验关键拉拔结果

Table 6 Key pullout results of test

试件编号	极限拉拔荷载/kN	峰值滑移量/mm	锚固失效模式
NS-1	41.759	3.385	劈裂破坏
NS-2	27.037	3.079	劈裂破坏
NS-3	37.232	4.043	劈裂破坏
D30-1	30.999	3.224	劈裂破坏
D30-2	26.682	2.639	劈裂破坏
D30-3	31.434	3.704	劈裂破坏
D60-1	9.093	3.217	拔出破坏
D60-2	18.372	无明显峰值	劈裂+拔出破坏
D60-3	11.584	2.723	拔出破坏

表 7 混凝土标准试件抗压强度测试结果

Table 7 Compressive strength test results of concrete standard samples

编号	浸水时间/ d	破坏峰值 荷载/kN	峰值破坏 应力/MPa	计算结 果/MPa
W0-1	0	296.31	29.63	30.16
W0-2	0	335.96	33.60	
W0-3	0	320.14	32.01	
W30-1	30	218.61	21.86	27.59 (中间值)
W30-2	30	290.39	29.04	
W30-3	30	294.59	29.50	
W60-1	60	285.60	28.56	25.44
W60-2	60	270.25	27.02	
W60-3	60	247.44	24.74	

3.3.2 锚固试件破坏形态

将完全劈裂破坏的混凝土、拔出的锚索复位后,各试件破坏形态如图 15 所示。

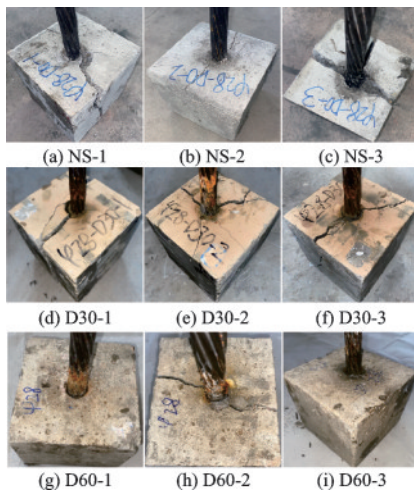


图 15 树脂锚索锚固试件破坏形态

Fig.15 Failure mode of resin anchor cable samples

劈裂破坏失效模式下的试件在持续拉拔过程中,首先在锚孔孔口表面出现裂缝,裂缝随着拉拔荷载增长逐渐向两侧贯通伸展,并在试件侧面产生纵向裂缝,纵向裂缝扩展至试件底部后混凝土完全开裂,此时混凝土-锚固剂界面黏结失效,锚索携带大部分树脂锚固剂沿着破裂面脱落。试件经过水中浸泡后,表观及破坏形态出现较大转变,水面交接处锚索出现严重锈蚀,红棕色锈蚀产物附着在孔口锚索表面,混凝土试件潮湿,颜色变深;浸泡 60 d 后出现锚索拔出失效模式,该过程中树脂锚固剂-锚索界面黏结失效滑移,索体从锚孔中不断向外位

移,停止数据采集将锚索从孔壁中完全拉出,可以观察到被拔出的锚索锚固段表面钢绞线缝隙中夹杂着剥落的树脂锚固剂,锚孔孔口携带少许红棕色锈蚀产物,孔壁潮湿粘连剩余大部分树脂锚固剂,锚固剂表面留有锚索钢绞线挤压产生的白色刻印。两种锚固破坏失效模式试件的锚孔内部情况如图 16 所示。

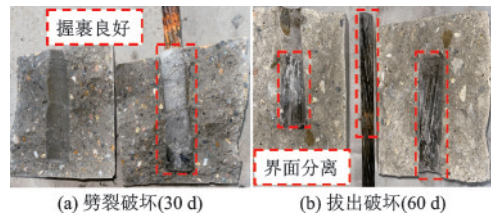


图 16 锚孔内部情况

Fig 15 Internal situation of anchor hole

4 结论与建议

(1)树脂锚固剂圆柱体试样处于水中浸泡时,其质量及水 pH 值变化较小,浸泡后单块试样质量略微增加,侧面颜色由黝黑变为浅灰,细微粗糙颗粒脱落后变得光滑,表明树脂锚固剂具有弱吸水性,与水接触面易受影响。

(2)单轴压缩变形试验结果显示,树脂锚固剂试样在水中浸泡后,力学特征参数单轴抗压强度、弹性模量及泊松比出现下降,下降比例随浸泡时间增长略有增加;试样破坏形态以垂直贯通的主裂缝为主,主裂缝周围分布数量较多的细小裂缝,局部出现块状体的脱落与分离。

(3)自然状态下和水中浸泡 30 d 的树脂锚索锚固试件拉拔破坏模式为锚固体约束介质混凝土劈裂破坏,浸泡时长延长至 60 d 后出现树脂锚固剂-锚索界面黏结失效的锚索拔出破坏。锚索拉拔荷载-位移曲线走势与破坏模式相关,试件处于水中浸泡一段时间后,锚索平均极限锚固力下降,对应破坏时索体表面剪应力下降,树脂锚索锚固性能产生劣化。

(4)劈裂破坏模式先于锚孔孔口产生裂缝,随后逐渐扩展延伸至试件两侧形成纵向裂缝,树脂锚固剂握裹着索体沿着劈裂面脱落;锚索拔出破坏模式,索体从锚固体孔中直接拔出,试件裂缝较短或完整,拔出后锚固段夹杂少许脱落的树脂锚固剂,孔壁残留绝大部分潮湿的树脂锚固剂。

(5)潮湿环境对树脂锚固系统的侵蚀影响是多方面进行的,包括加锚围岩、树脂锚固剂、锚索乃至垫板锚具,室内试验条件较为理想,试件制作、锚固工艺、尺寸大小、模拟潮湿环境与隧道现场有较大出入,因此试验结论具有一定局限性,但揭示了潮湿环境下树脂锚索锚固性能劣化的规律现象,后续应进一步展开相关研究分析预应力树脂锚固系统的力学行为变化,寻求有效整治应对措施。

参考文献:

- [1] 戴永浩,陈卫忠,田洪铭,等.大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增2):4149-4156.
Dai Y H, Chen W Z, Tian H M, et al. Study of large deformation and support measures of Daliang tunnel with soft surrounding rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup2):4149-4156. (in Chinese)
- [2] 钟祺,王小龙,何金宝.大断面软岩隧道双层初期支护分部施工技术[J].施工技术,2016,45(1):92-94.
Zhong Q, Wang X L, He J B. Construction technology of double-layer supporting measures of large section soft rock tunnel[J]. Construction Technology, 2016, 45(1):92-94. (in Chinese)
- [3] 孙钧,江宇,李宁,等.滇中引水工程海东隧洞围岩“小变形”试验段前期研究——兼及采用普通预应力锚索的风险与对策[J].隧道建设(中英文),2022,42(8):1321-1330.
Sun J, Jiang Y, Li N, et al. Preliminary study on trial section with “small deformation” surrounding rock of Haidong water conveyance tunnel of central Yunnan water diversion project: risks and countermeasures for using ordinary prestressed anchor cables[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8):1321-1330. (in Chinese)
- [4] 汪波,郭新新,何川,等.当前我国高地应力隧道支护技术特点及发展趋势浅析[J].现代隧道技术,2018,55(5):1-10.
Wang B, Guo X X, He C, et al. Analysis on the characteristics and development trends of the support technology of high ground stress tunnels in China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5):1-10. (in Chinese)
- [5] 汪波,王振宇,郭新新,等.软岩隧道中基于快速预应力锚固支护的变形控制技术[J].中国公路学报,2021,34(3):171-182.
Wang B, Wang Z Y, Guo X X, et al. Deformation control technology based on fast-prestressed anchor support in soft rock tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3):171-182. (in Chinese)
- [6] 王志坚.郑万高铁隧道大断面机械化施工关键技术研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(8):1257-1270.
Wang Z J. Research on key technology of large cross-sectional mechanized construction of Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(8):1257-1270. (in Chinese)
- [7] 陶志刚,任树林,王丰年,等.高地应力软岩隧道围岩大变形 NPR 锚索控制方法研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(增2):82-92.
Tao Z G, Ren S L, Wang F N, et al. Research on NPR anchor cable support scheme for large deformation of surrounding rock in high-ground stress soft rock tunnel[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(Sup2):82-92. (in Chinese)
- [8] 汪波,喻炜,訾信,等.软岩大变形隧道不同支护模式的合理性探讨——以木寨岭公路隧道为例[J].隧道建设(中英文),2023,43(1):36-47.
Wang B, Yu W, Zi X, et al. Rationality of various support types of Muzhailing highway tunnel in soft rocks with large deformation[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(1):36-47. (in Chinese)
- [9] 康红普,崔千里,胡滨,等.树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J].煤炭学报,2014,39(1):1-10.
Kang H P, Cui Q L, Hu B, et al. Analysis on anchorage performances and affecting factors of resin bolts[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1):1-10. (in Chinese)
- [10] 康红普,林健,吴拥政,等.锚杆构件力学性能及匹配性[J].煤炭学报,2015,40(1):11-23.
Kang H P, Lin J, Wu Y Z, et al. Mechanical performances and compatibility of rock bolt components[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1):11-23. (in Chinese)
- [11] Cao C, Ren T, Zhang Y D, et al. Experimental investigation of the effect of grout with additive in improving ground support[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 85:52-59.
- [12] 张明, Cao Chen, 张怀东,等.树脂锚固剂中添加不同钢质骨料对锚固力的影响[J].煤炭学报,2019,44(6):1690-1697.
Zang M, Cao C, Zhang H D, et al. Effect of anchoring force by adding steel aggregate in resin anchoring agent[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6):1690-1697. (in Chinese)
- [13] 贾后省,王璐瑶,刘少伟,等.巷道含水软岩顶板锚索树脂锚固增效方法[J].岩石力学与工程学报,2019,38

- (5):938-947.
- Jia H S, Wang L Y, Liu S W, et al. A method for improving the anchorage effect of the resin-anchored cable bolts in roadway roof with water-bearing soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5):938-947. (in Chinese)
- [14] 贺德印,刘少伟,贾后省,等. 锚索偏心树脂锚固特征分析及锚固剂推送限位装置设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3):708-723.
- He D Y, Liu S W, Jia H S, et al. Analysis of eccentric resin anchoring characteristics for cable bolts and the design of pushing and limiting device for resin cartridges [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3):708-723. (in Chinese)
- [15] 刘少伟,贺德印,付孟雄,等. 树脂锚固剂搅拌过程仿真及高效搅拌构件优化实验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9):3073-3086.
- Liu S W, He D Y, Fu M X, et al. Numerical simulation of mixing process of resin grout and optimization experiment of high-efficiency mixing component [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9):3073-3086. (in Chinese)
- [16] 范世平,陈越粤,崔丹,等. 耐高温树脂锚固剂的可行性研究[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(9):17-20.
- Fan S P, Chen Y Y, Cui D, et al. Feasibility study on high-temperature resistant resin anchoring agent [J]. Coal Science and Technology, 1997, 25(9):17-20. (in Chinese)
- [17] 郝佩,苏学贵,刘强,等. 高温下树脂锚固材料锚固性能研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(10):43-46.
- Hao P, Su X G, Liu Q, et al. Study on anchorage properties of resin anchorage materials at high temperature [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(10):43-46. (in Chinese)
- [18] 苏学贵,杜献杰,张锁,等. 树脂锚固材料的高温锚固特性及其受热解影响的CT分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5):964-970.
- Su X G, Du X J, Zhang S, et al. Anchoring properties and CT analysis affected by the pyrolysis of the resin anchoring material at high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5):964-970. (in Chinese)
- [19] 胡滨,康红普,林健,等. 水对树脂锚杆锚固性能影响研究[J]. 煤矿开采, 2013, 18(5):44-47, 51.
- Hu B, Kang H P, Lin J, et al. Influence of water on anchorage properties of resin bolt [J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(5):44-47, 51. (in Chinese)
- [20] 胡滨,康红普,林健,等. 温度对树脂锚杆锚固性能影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5):644-649.
- Hu B, Kang H P, Lin J, et al. Study on influence of temperature on anchorage performance of resin anchored bolt [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5):644-649. (in Chinese)
- [21] 王智佼,郭新新,于家武,等. 隧道锚孔出水下树脂锚索锚固性能与提升技术研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1):97-106.
- Wang Z J, Guo X X, Yu J W, et al. Study on anchoring performance and lifting technology of resin anchor cable when the tunnel anchor hole is flowing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1):97-106. (in Chinese)
- [22] 查文华,王京九,华心祝,等. 锚杆锚固性能及界面力学特性研究综述[J]. 人民长江, 2021, 52(11):161-168.
- Zha W H, Wang J J, Hua X Z, et al. Review on bolt anchorage system and interface mechanical properties [J]. Yangtze River, 2021, 52(11):161-168. (in Chinese)
- [23] 王艳磊,唐建新,江君,等. 水-岩化学作用下灰砂岩的力学特性与参数损伤效应[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1):227-235.
- Wang Y L, Tang J X, Jiang J, et al. Mechanical properties and parameter damage effect of malmstone under chemical corrosion of water-rock interaction [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):227-235. (in Chinese)
- [24] 于家武,郭新新. 木寨岭公路隧道复合型大变形控制技术与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(9):1565-1576.
- Yu J W, G X X. Composite large deformation control techniques for Muzhailing highway tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(9):1565-1576. (in Chinese)
- [25] 王腾. 水作用下树脂锚固界面粘结弱化机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.
- Wang T. Study on adhesion and weakening mechanism of epoxy bonded bolt system interface under the action of water [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [26] 刘小虎,姚直书,程桦,等. 高地温对锚固剂性能影响规律及配比优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2):274-283.
- Liu X H, Yao Z S, Chen H, et al. Study on the influence of high ground temperature on the properties of anchorage agent and its ratio optimization [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2):274-283. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)

(下转第 604 页)