**文章编号:**1007-9629(2025)04-0330-10

# 温度和剪切速率对树脂锚固界面裂隙 演化机制的影响

王佳奇,姚直书\*,刘小虎,许永杰,方玉

(安徽理工大学土木建筑学院,安徽淮南 232001)

摘要:为研究温度和剪切速率对树脂锚固界面裂隙演化机制的影响,利用变温剪切试验装置对锚固 试件进行剪切试验,并利用数字图像相关法(DIC)和扫描电镜(SEM)分析了剪切界面裂隙的演化规 律和微观破坏特征.结果表明:锚杆-锚固剂界面的峰值剪应力随着温度和剪切速率的增大而减 小;在36°~72°范围内,随着锚杆肋角的增大,锚杆-锚固剂界面的峰值剪应力逐渐增大;温度和剪切 速率对锚固剂-岩石试件的裂隙演化和锚固剂-岩石界面的峰值剪应力均有较大影响. 关键词:树脂锚固界面;高地温;剪切速率;数字相关技术;裂隙演化机制

**中图分类号:**TD353 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2025.04.006

## Influence of Temperature and Shear Rate on Crack Evolution Mechanism at Resin Anchorage Interface

WANG Jiaqi, YAO Zhishu<sup>\*</sup>, LIU Xiaohu, XU Yongjie, FANG Yu

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to study the influence of temperature and shear rate on the crack evolution mechanism of resin anchorage interface, the shear test of the anchorage specimen was carried out by using a variable temperature shear test device. The fracture evolution mechanism and micro-failure characteristics of the shear interface were analyzed using the digital correlation technique (DIC) and scanning electron microscope (SEM). The results show that the peak shear stress at the interface between the anchor and anchoring agent decreases with the increase in temperature and shear rate. In the range of  $36^{\circ}-72^{\circ}$ , with the increase of bolt rib angle, the peak shear stress of bolt-anchorage agent interface increases gradually. Temperature and shear rate have great effects on the fracture evolution of anchoring agent-rock specimens and the peak shear stress at the anchoring agent-rock interface.

**Key words:** resin anchoring interface; high ground temperature; shear rate; digital correlation technology; fracture evolution mechanism

树脂锚固材料因其固化速度快、黏结强度高等 优点而被广泛应用于岩土工程领域<sup>[1]</sup>.随着地下工程 的建设向深部发展,原岩温度不断升高.根据现场实 测数据,中国两淮矿区千米深井原岩局部温度达到 了 50 ℃,高温热害对树脂锚固支护的影响越来越明 显<sup>[2]</sup>.同时,树脂锚杆在服役期间,受巷道掘进、煤层 回采等活动影响,锚固支护系统承受准静态荷载作 用<sup>[3]</sup>.在高地温和准静态荷载作用下树脂锚杆的失锚 率增大,锚固界面作为锚固支护系统中的薄弱环节 易发生失效滑移.因此研究高地温和准静态荷载作 用下树脂锚固界面的力学特性和裂隙演化规律具有 重要意义.

收稿日期:2024-05-20;修订日期:2024-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174104,51674006);安徽理工大学引进人才基金项目(13210028);研究生创新基金(2024cx1003) 第一作者:王佳奇(1997—),男,安徽涡阳人,安徽理工大学博士生.E-mail:wjq9776@126.com

通讯作者:姚直书(1963—),男,安徽舒城人,安徽理工大学教授,博士生导师,硕士.E-mail:zsyao@aust.edu.cn

为探究准静态荷载和高地温环境下锚固界面的 力学特征和裂隙演化规律,温度和剪切速率是不可忽 视的影响因素.为此,国内外学者开展了一系列试验 研究.李海波等4和Atapour等5系用直剪试验发现岩 石和类岩石结构界面峰值剪切强度随着剪切速率的 增大而减小.Liu等<sup>[6]</sup>通过拉拔试验发现在20~70℃范 围内,随着温度的升高,锚固界面的峰值剪切强度逐 渐减小.Zhang等<sup>[7]</sup>通过直剪试验分析了高温状态下砂 岩-混凝土界面的力学衰减特征及界面损伤规律.但 是,直剪试验和拉拔试验不易观察锚固界面的裂隙演 化过程.此外,树脂锚固材料的力学性质对温度较敏 感,温度作用下岩石-混凝土界面损伤规律,不能完全 适用于树脂锚固界面.同时,针对锚固界面裂隙演化, 张农等<sup>[8]</sup>采用冲击试验发现材料间的不协调变形是加 剧锚固界面发生张拉撕裂破坏的原因;然而,冲击试 验加载速率较快,主要模拟动态荷载的作用.

综上所述,目前岩土领域对界面裂隙演化规律的研究对象多为岩石或类岩石材料的结构界面.针 对准静态荷载、高地温环境下的树脂锚固界面的研 究较少.鉴于此,本文以锚杆-树脂锚固剂-岩石界面 作为研究对象,进行不同加载条件和界面特征下的 剪切试验;然后利用扫描电镜(SEM)和数字图像相 关法(DIC),分别对锚固界面微观剪切破裂特征和剪 切变形演化规律进行分析.研究结果为分析锚固界 面的失效机理提供参考.

### 1 试验

#### 1.1 试验材料

为探究岩石单轴抗压强度( $\sigma$ ,)对锚固界面的影响,选取单轴抗压强度分别为28.6、44.6、56.8 MPa 的3组岩石(砂岩)进行试验.试验前将剪切试验的岩 石试件加工为 $\phi$ 50×50 mm半圆柱形.锚杆采用  $\phi$ 50×50 mm半圆柱铁块加工制成.为探究锚杆肋角 对锚固界面的影响,以工程中常用的精轧螺纹钢锚 杆的肋角(60°)为参考,试验制作的锚杆肋角( $\theta$ )分别 为72°、54°和36°.锚固剂选用美亚高新材料股份有限 公司生产的中速树脂锚固剂,该型锚固剂具有黏结 性能好、储存期长的特点.锚固试件的黏结强度不因 测试的先后顺序而发生较大变化.

#### 1.2 试验装置及试验方案

变温剪切试验装置由荷载加载装置、温度加载装置 和DIC系统组成(见图1).采用型号为FlexSEM1000 的扫描电子显微镜对锚固界面的微观破裂特征进行 观测,该型扫描电子显微镜的底片倍率为6~300000 倍,加速电压为0.3~20.0 kV.SEM取样及制样细节: ①选取锚固界面处剪切破碎的锚固剂碎片;②挑选 大小合适的锚固剂碎片进行干燥处理;③去除样品 表面污染物,确保样品清洁;④将样品粘在样品座 上;⑤在样品表面镀薄金属膜使样品具有导电性.试 件制作过程及试验装置如图1所示;锚固剂-锚杆界



面试验方案如表1所示;锚固剂-岩石界面试验方案 如表2所示.

表 1 锚固剂-锚杆界面试验方案 Table1 Anchoring agent-anchor interface test scheme

Number	Factor				Factor		
	t/℃	$\theta/(°)$	$v/(mm \cdot min^{-1})$	Number	t∕°C	$\theta/(°)$	$v/(mm \cdot min^{-1})$
1	30	36	0.02	19	45	54	0.50
2	30	36	0.10	20	45	54	2.50
3	30	36	0.50	21	45	72	0.02
4	30	36	2.50	22	45	72	0.10
5	30	54	0.02	23	45	72	0.50
6	30	54	0.10	24	45	72	2.50
7	30	54	0.50	25	60	36	0.02
8	30	54	2.50	26	60	36	0.10
9	30	72	0.02	27	60	36	0.50
10	30	72	0.10	28	60	36	2.50
11	30	72	0.50	29	60	54	0.02
12	30	72	2.50	30	60	54	0.10
13	45	36	0.02	31	60	54	0.50
14	45	36	0.10	32	60	54	2.50
15	45	36	0.50	33	60	72	0.02
16	45	36	2.50	34	60	72	0.10
17	45	54	0.02	35	60	72	0.50
18	45	54	0.10	36	60	72	2.50

表 2 锚固剂-岩石界面试验方案 Table2 Test scheme of rock-anchorage agent interface

Number	Factor				Factor		
	t∕°C	σ <sub>r</sub> / MPa	$v/(mm \cdot min^{-1})$	Number	t/℃	$\sigma_{\rm r}/$ MPa	$v/(mm \cdot min^{-1})$
1*	30	28.6	0.02	19*	45	44.6	0.50
2*	30	28.6	0.10	20*	45	44.6	2.50
3*	30	28.6	0.50	21*	45	56.8	0.02
4*	30	28.6	2.50	22*	45	56.8	0.10
5*	30	44.6	0.02	23*	45	56.8	0.50
6*	30	44.6	0.10	24*	45	56.8	2.50
7*	30	44.6	0.50	25*	60	28.6	0.02
8*	30	44.6	2.50	26*	60	28.6	0.10
9*	30	56.8	0.02	27*	60	28.6	0.50
10*	30	56.8	0.10	28*	60	28.6	2.50
11*	30	56.8	0.50	29*	60	44.6	0.02
12*	30	56.8	2.50	30*	60	44.6	0.10
13*	45	28.6	0.02	31*	60	44.6	0.50
14*	45	28.6	0.10	32*	60	44.6	2.50
15*	45	28.6	0.50	33*	60	56.8	0.02
16*	45	28.6	2.50	34*	60	56.8	0.10
17*	45	44.6	0.02	35*	60	56.8	0.50
18*	45	44.6	0.10	36*	60	56.8	2.50

### 2 结果及分析

#### 2.1 锚固界面剪应力-位移曲线的分析

通过改变试验的剪切速率(v)和温度(t),获得不同加载条件下锚固界面的剪应力 $\tau$ 和正应力 $\sigma^{[9]}$ .锚杆-锚固剂界面剪应力( $\tau_A$ )-位移( $\delta_A$ )曲线如图2(a)~(d)所示,锚固剂-岩石界面剪应力( $\tau_R$ )-位移( $\delta_R$ )曲线如图2(e)~(h)所示.

由图2可见:(1)相对于岩石和锚杆,树脂锚固剂 具有较明显的热软化和热膨胀特性.随着温度的升 高,锚固剂变形特征由黏弹性向黏塑性转变;并且锚 固剂的热膨胀系数与温度近似呈线性增长,锚固剂 受热膨胀后,锚固剂内部各微小单元之间的黏结力 下降.(2)基于锚固剂特性,对锚固界面剪应力-位移 曲线进行分析.锚固界面剪应力-位移曲线包括压 密、弹性变形、弹塑性和破坏阶段.由于锚固试件内 部存在孔隙,剪应力-位移曲线存在明显的压密阶 段;同时,随着温度的升高,锚固剂产生膨胀变形,锚 固剂内部孔隙被膨胀填充,锚固试件压密阶段逐渐 减弱,锚固试件的剪切刚度呈减小趋势.弹塑性阶段 锚固试件出现裂隙,随着裂隙发育延伸,剪应力逐渐 达到峰值.受温度和剪切速率影响,曲线峰后阶段的 破坏方式包括应力迅速跌落的脆性破坏和缓慢降低 的延性破坏.(3)在锚固剂横肋的约束下,不同温度和 剪切速率下的锚固剂-锚杆界面均发生延性破坏;锚固 剂-岩石界面峰后破坏方式,随着温度的升高而发生变 化:当t=30℃时,锚固界面在荷载作用下突然失稳,发 生脆性破坏;t=45、60℃时,锚固剂发生塑性软化,锚 固界面的破坏特征由脆性破坏向延性破坏转变[10].

#### 2.2 温度和剪切速率对锚固界面峰值剪应力的影响

由于锚固剂与锚杆力学性质相差较大,温度和 加载速率主要影响锚固剂的力学性质.根据锚固界 面峰值剪应力的变化规律,可分析温度和加载速率 对锚固界面力学性能的影响,锚固界面峰值剪应力 的变化如图3所示.由图3可知:(1)当剪切速率较小 时,剪切过程产生的裂纹有充足的时间发育,锚固界面 的峰值剪应力较大.随着剪切速率的增大,试件承受快 速冲击和剪切而破坏,裂纹迅速发育,锚固界面的峰值 剪应力随之下降.以 $\theta=72^{\circ}$ 、 $v=0.02\sim2.5$  mm/min的 锚固试件为例,温度在30、45、60 ℃时,随着剪切速率 的增大,锚固界面的峰值剪应力分别下降了16.71、 9.42、9.67 MPa.(2)当温度和剪切速率为定值时, 随着锚杆肋角的增大,锚固界面的峰值剪应力逐渐 增大.以 $t=30 \circ c$ 、v=0.02 mm/min的锚固试件为





例, $\theta$ =72°比 $\theta$ =54°和 $\theta$ =36°锚固界面的峰值剪应力 分别增大了2.57 MPa和7.16 MPa.

由于锚固剂-岩石试件由2种材料粘结组成,岩

石和锚固剂力学性能和锚固界面的黏结强度对界面 的峰值剪应力均有较大的影响.当剪切速率为定值 时,随着温度的升高,锚固界面的黏结强度下降,应 力增长幅度减小,锚固界面的峰值剪应力呈下降趋势.当温度为定值时,随着剪切速率的增大,锚固界面的峰值剪应力变化规律不一.以 $\sigma_t$ =44.6 MPa、v=0.02~2.50 mm/min的锚固试件为例,当t=30 °C时,剪切速率较小时,锚固界面裂纹可以充分发育延伸.随着剪切速率的增大,锚固界面的破坏伴随着岩石和锚固剂剪切破坏,而岩石和锚固剂的剪切强度大于锚固界面的黏结强度,导致剪切速率越大锚固界面的峰值剪应力越大.v=2.50 mm/min比v=0.02 mm/min 锚 固界面的峰值剪应力 增大了

18.11 MPa. 当 *t*=45 ℃时,温度的升高导致锚固剂 黏结力下降,锚固界面易发生剪切破坏.随着剪切 速率增大,锚固界面迅速被破坏.*v*=2.50 mm/min 比*v*=0.02 mm/min锚固界面的峰值剪应力减少了 9.89 MPa. 当*t*=60 ℃时,锚固剂力学性能明显下 降,在荷载作用下锚固剂发生压缩和剪切破坏,锚 固界面的峰值剪应力受锚固剂的破坏和界面黏结 力减小的影响,不同剪切速率下锚固界面峰值剪应 力波动幅度较小,仅为 2.23 MPa.锚固界面峰值剪 应力变化特征如图 3 所示.



为进一步探究温度、剪切速率与峰值剪应力的 关系,选取肋角为72°锚固试件进行分析.为消除温 度和剪切速率的相互影响,对锚杆-锚固剂界面的峰值 剪应力τ<sub>A</sub>,,进行归一化处理,并拟合归一化后τ'<sub>A</sub>,,-υ,τ'<sub>A</sub>,-t 的关系式.由拟合关系可知,锚杆-锚固剂界面的峰 值剪应力与剪切速率呈指数函数衰减关系,与温度 呈对数函数关系.锚杆-锚固剂界面峰值剪应力拟合 曲线如图4所示.



图 4 锚杆--锚固剂界面峰值剪应力拟合曲线 Fig. 4 Fitting curves of peak shear stress of bolt-anchorage agent interface

#### 2.3 锚固界面剪切破坏机制分析

通过数字图像软件,将剪切过程中采集的物理 图像转变为包含位置信息的数字图像,并以初始图 像作为参考图像,对后续图像进行相关性计算,获得 分析区域内各散斑点的位移和应变信息,并由此绘 制观测区域内的应变云图<sup>[11-13]</sup>.通过应变云图分析 锚固界面破坏特征以及剪切过程中裂隙演化规律.

2.3.1 锚固剂-岩石试件裂隙演化规律

剪切过程中锚固剂-岩石界面的失效滑移伴随 着岩石和锚固剂剪切破坏,将锚固剂-岩石试件的破 坏类型分为锚固界面破坏(Ⅱ)、岩石-锚固界面破坏 (Ⅱ)、锚固剂-锚固界面破坏(Ⅲ)、岩石-锚固界面-锚固剂破坏(Ⅳ)4种.为分析锚固剂-岩石界面的破 裂特征和裂隙演化规律,以锚固剂-岩石试件的4种 破坏类型为例进行简述.锚固剂-岩石试件主应变 (ε)云图如图5所示.

锚固界面破坏(I) 锚固试件在剪切夹具作用 下,试件右上角A点出现明显应变集中区域.试件表 面的压应变和拉应变区域相对均匀分布.随着竖向 荷载的增大,应变区域逐渐向锚固界面集中,锚固界 面出现裂纹,并逐渐延伸.裂纹贯通后,试件的剪切 应变迅速增大.

岩石-锚固界面破坏(Ⅱ) 该破坏类型的锚固 试件的岩石抗压强度较小.荷载加载初期,锚固界面 和岩石受切向和竖向应力的作用,锚固界面和岩石 的竖向压缩面出现微观裂隙.随着竖向荷载增大,锚 固界面和岩石微观裂纹逐渐演变成宏观裂纹.

锚固剂-锚固界面破坏(Ⅲ) 该破坏类型主要 出现在锚固剂的抗压强度较小情况下.当试件处于 压密阶段时,锚固剂出现明显应变集中区域.随着荷 载的增大,锚固剂和锚固界面萌生出裂隙,其中锚固 剂裂隙萌生于B点,并由B点斜向上延伸,直至贯通 试件.锚固界面剪切裂纹萌生于A点,并随着试件剪 切滑移而延伸,最终与锚固剂裂纹相交于B点.

岩石-锚固界面-锚固剂破坏(IV) 在高温和快速的剪切应力作用下,试件上下部分及锚固界面出现明显的应变集中区域.随后锚固剂从B点萌生裂隙,锚固界面和岩石裂隙萌生于A点.随着荷载增大,锚固剂和岩石试块向两侧裂开,锚固剂裂纹贯通后向岩石延伸产生次级裂纹.

2.3.2 肋角对锚杆-锚固剂界面的影响分析

不同肋角锚杆-锚固剂试件剪切应变(ε)云图如 图6所示.为探究肋角变化对锚杆-锚固剂试件裂隙 发育的影响,以*t*=30 ℃、*v*=0.50 mm/min的锚固 剂-锚杆试件为例进行描述.当θ=36°时,荷载加载 初期,试件表面拉压应变区域相对均匀分布.δ<sub>A</sub>= 1.36 mm时,受横肋的剪阻作用,锚杆外侧横肋处出 现明显的点状应变集中区域,且逐渐向内部横肋传递.  $\delta_A = 1.76 \text{ mm}$ 时,剪切裂隙贯通锚固界面,点状应变 集中区域向线形发展,并且线形应变集中区域与锚 固界面呈一定角度,界面的拉应变区域呈上下起伏 波浪形.δ<sub>A</sub>=2.26 mm时,锚固剂横肋基本剪断,锚固 试件发生了滑移,最终锚固界面形成的拉伸应变区 域为倾斜的红色线段.相较于 $\theta=36°$ 的锚固试件, $\theta=$ 54°锚固试件仅在荷载加载起始阶段出现小幅度的上 下波动应变集中带,试件的爬坡现象减弱. $\delta_{A}$ = 2.54 mm时,剪切形成的应变集中带基本水平,试件 最终形成的拉伸应变区域为倾斜的直线,未出现因 爬坡滑移造成波浪形应变区域.当θ=72°时,应变集 中区域波动幅度减小, $\delta_A$ =0.38 mm时,在横肋的剪 阻作用下,在锚固试件边缘形成明显应变集中区域. 随着剪切荷载增大, $\delta_A$ =1.41 mm时,应变区域最终 发展为倾斜的直线.随着锚固剂横肋被剪断,试件沿 剪切面摩擦滑移,应变集中区域最终呈线形.



Fig. 5 Main strain cloud diagram of anchoring agent-rock specimen shear failure process

#### 2.4 锚杆-锚固剂界面破坏特征

锚固试件剪切破坏类型可分为低正应力的爬坡 破坏和高正应力的啃断破坏.变角剪切的正应力与 竖向荷载呈正相关,锚固界面破坏方式随着正应力 变化先后经历爬坡破坏阶段、爬坡-啃断复合破坏阶 段和啃断破坏3个阶段.锚固试件处于压密阶段时, 正应力对锚固试件的爬坡约束较小,在剪切作用下 锚固试件爬坡现象较明显<sup>[14]</sup>.随着正应力增大,逐渐 进入为爬坡-啃断复合破坏阶段.当正应力增大到一 定程度,锚固界面破坏方式转变为沿横肋根部的啃 断破坏.在爬坡和啃断破坏的交替作用下,横肋逐渐 被剪断.受横肋的剪阻影响,峰后剪应力缓慢降低. 不同肋角的锚固试件,各破坏阶段占比不同.爬坡阶 段占比较多的试件,剪切面呈现出上下起伏不平整 状态.啃断破坏阶段占比较多的试件,剪切破坏面较 平整.不同肋角锚固试件剪切破坏特征如图7所示. 由图7可见,当θ=72°时,锚固试件的剪切破坏面基 本沿着锚固剂横肋根部,最终形成的剪切面较平整.

为进一步探究锚固界面的剪切失效机制,利用 扫描电镜将样品放大500倍,得到不同肋角的锚杆--锚固剂界面破坏特征如图8所示.由图7、8可见:当 θ=36°时,横肋约束锚固试件爬坡滑移的能力较小,



Fig. 6 Shear strain nephogram of bolt-anchorage agent specimens with different rib angles



(a) θ=36°

(b) θ=54° 图 7 不同肋角锚固试件剪切破坏特征 Fig.7 Shear failure characteristics of anchorage specimens with different rib angles



锚杆-锚固剂界面微观结构 图 8 Fig. 8 Microstructure of bolt-anchorage agent interface

剪切过程中,锚固界面在爬坡和啃断破坏的交替作 用下,锚固界面出现上下起伏断裂情况;当 $\theta$ =54° 时,锚固剂破裂碎片上可观察到明显的石粉颗粒,表 明锚固试件剪切过程中,仍发生了爬坡滑移,破裂碎 片爬坡滑移后承受的压剪作用较小,石粉颗粒较完 整;当 $\theta$ =72°时,锚固界面主要发生剪切破坏,剪切 破裂面较平整,锚固剂的石粉颗粒在剪切界面的碾 压下呈细小粉末状.

#### 结论 3

(1)树脂锚固剂具有热软化和热膨胀的特性,锚 固界面的剪应力-位移曲线变化趋势主要受温度的 影响.随着温度的升高,曲线的压密特征逐渐减弱, 峰后破坏特征由迅速跌落的脆性破坏向缓慢降低的 延性破坏转变.

(2) 锚固剂-岩石界面失效破坏伴随着岩石和锚 固剂的压剪破坏,温度和剪切速率造成锚固剂-岩石 界面的峰值剪应力变化规律呈现出不同结果.

(3)由锚杆-锚固剂界面峰值剪应力变化规律和 锚固界面微观变形特征可知,肋角在36°~72°范围 内,随着肋角的增大,锚固界面的爬坡现象逐渐减 弱,锚杆-锚固剂界面的峰值剪应力逐渐增大.为提 高锚固支护的强度,可将工程上常用的精轧螺纹钢 锚杆的肋角增大至72°.

(4)由于锚杆和锚固剂的力学性能相差较大,温 度和剪切速率主要影响锚固剂的力学性能.锚杆-锚固剂界面的峰值剪应力随着温度和剪切速率的增 大而减小,因此减小荷载扰动和提高锚固剂耐高温 的性能对降低锚固支护的失效滑移率具有重要 意义.

#### 参考文献:

- [1] ZHAO X W, SUN K G, HUANG Q. Research on the reasonable anchorage length and failure characteristics of resin anchorage system [J]. Construction and Building Materials, 2022, 356: 129309.
- [2] 吴基文, 王广涛, 翟晓荣, 等. 淮南矿区地热地质特征与地热资 源评价[J].煤炭学报,2019,44(8):2566-2578. WU Jiwen, WANG Guangtao, ZHAI Xiaorong, et al. Geothermal geological characteristics and geothermal resources evaluation in Huainan mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44 (8):2566-2578. (in Chinese)
- [3] 康红普,吴拥政,何杰,等.深部冲击地压巷道锚杆支护作用研 究与实践[J].煤炭学报,2015,40(10):2225-2233. KANG Hongpu, WU Yongzheng, HE Jie, et al. Rock bolting performance and field practice in deep roadway with rock burst [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2225-2233. (in Chinese)
- [4] 李海波,冯海鹏,刘博.不同剪切速率下岩石节理的强度特性研 究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2435-2440.

LI Haibo, FENG Haipeng, LIU Bo. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25

[5] ATAPOUR H, MOOSAVI M. The influence of shearing velocity on shear behavior of artificial joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 47(5):1745-1761.

(12):2435-2440. (in Chinese)

- [6] LIU X H, YAO Z S, CHENG H, et al. Experimental study and mechanism analysis of bolt anchorage interface failure under temperature and pressure coupling [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2023, 126:103488.
- [7] ZHANG Y C , HUANG M, JIANG Y J, et al. Mechanics damage and energy degradation of rock-concrete interfaces exposed to high temperature during cyclic shear [J]. Construction and Building Materials, 2023, 405: 133229.
- [8] 张农,王朋,阚甲广,等.高频低能冲击扰动下锚固结构渐进失效试验研究[J].煤炭学报,2024,49(1):309-319.
   ZHANG Nong, WANG Peng, KAN Jiaguang, et al.
   Experimental study on progressive failure of anchoring structure under high-frequency and low-energy impact disturbance [J].
   Journal of China Coal Society, 2024,49(1):309-319. (in Chinese)
- [9] 肖福坤,侯志远,何君,等.变角剪切下煤样力学特征及声发射 特性[J].中国矿业大学学报,2018,47(4):822-829.
  XIAO Fukun, HOU Zhiyuan, HE Jun, et al. Mechanical characteristics and acoustic emission characteristics of coal samples under variable angle shear [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018,47(4):822-829.(in Chinese)
- [10] 柯璐,朱夫瑞,李传习,等.CFRP板-钢黏结界面的疲劳性能[J].

建筑材料学报,2023,26(3):266-274.

KE Lu, ZHU Furui, LI Chuanxi, et al. Fatigue behavior of bonding interface between CFRP laminates and steel [J]. Journal of Building Materials, 2023,26(3):266-274. (in Chinese)

- [11] 郝贠洪,高炯,吴日根.基于DIC古建筑青砖受冻融循环作用的 损伤演化[J].建筑材料学报,2024,27(8):764-772.
  HAO Yunhong, GAO Jiong, WU Rigen, et al. Damage evolution of ancient building blue bricks under freeze-thaw cycle based on DIC [J].Journal of Building Materials, 2024, 27(8): 764-772. (in Chinese)
- [12] 孙亚楠,金祖权,逄博,等.基于DIC的混凝土嵌入式BFRP筋 拔出行为及黏结性能研究[J].建筑材料学报,2023,26(1): 45-52,70.

SUN Yanan, JIN Zuquan, JIANG Bo, et al. Pulling-out process and interfacial bonding performance of BFRP bar in concrete based on DIC [J].Journal of Building Materials, 2023, 26(1): 45-52,70. (in Chinese)

- [13] 陈徐东,石振祥,郭玉柱,等.基于DIC的花岗岩-混凝土梁抗 弯性能研究[J].建筑材料学报,2022,25(10):1040-1046.
  CHEN Xudong, SHI Zhenxiang, GUO Yuzhu, et al. Flexural performance of granite-concrete beams based on DIC technology
  [J].Journal of Building Materials, 2022, 25(10):1040-1046. (in Chinese)
- [14] 程文强,耿健,柳根金,等.界面处理对预制UHPC与现浇NC 界面抗剪性能的影响[J].建筑材料学报,2024,27(1):76-83.
  CHENG Wenqiang, GENG Jian, LIU Genjin, et al. Effect of interficial treatment on shear properties of precast UHPC and cast-in-place NC [J].Journal of Building Materials, 2024, 27(1): 76-83. (in Chinese)