

# 单轴压缩条件下类岩石不同加载速率的力学特性

吴荔<sup>1</sup>, 匡文龙<sup>1\*</sup>, 陈伟<sup>2</sup>, 周彧<sup>2</sup>, 张跃权<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**通过对类岩石进行不同加载速率下的单轴压缩试验,探究加载速率变化对类岩石应力-应变曲线的影响.研究表明:在一定范围内,随着加载速率的增加,类岩石的峰值应力呈递增趋势;在恒速率试验中,不同速率所对应的应力-应变曲线不相同;在变速率试验中,当速率突然增大时,应力-应变曲线会有明显的向上突变;不同速率也会影响类岩石的裂纹发展.

**关键词:**单轴压缩;变速率;峰值应力;裂纹

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)04-0026-06

## Mechanical Properties of Quasi Rock Under Uniaxial Compression at Different Loading Rates

WU Li<sup>1</sup>, KUANG Wenlong<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>, ZHOU Yu<sup>2</sup>, ZHANG Yuequan<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Spatial Information, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Through uniaxial compression tests on quasi rock materials at varying loading rates, this paper aims to discuss the influence of rate changes on the stress-strain curves of quasi rock materials. The research results show that within a certain range, an increase in loading rate leads to a corresponding increase in the peak stress of quasi rock materials. In constant rate test, the stress-strain curves corresponding to different rates are different. In variable speed rate experiment, when the speed suddenly increases, the stress-strain curve will have obvious mutation upwards. In addition, different rates also affect the development of quasi rock cracks.

**Keywords:** uniaxial compression; variable speed; stress peak; crack

实际施工过程中,荷载的加载速率会对岩石力学性质产生显著影响<sup>[1]</sup>.例如在实际施工过程中,挖掘机开挖速率以及爆破速率均会对工作面造成不同程度的伤害.这些速率应根据实际情况而定,并非保持不变.因此,加载速率对岩石力学性质影响的研究可为实际工程提供重要参考价值.

袁康等<sup>[2]</sup>利用 SHPB 装置对花岗岩进行单轴冲击试验,发现随着岩石内孔径增大,岩石的峰值应力却减小;张天军等<sup>[3]</sup>利用声发射以及数值模拟实验研究不同加载速率对试样变形的影响,发现加载速率对岩石抗压强度有显著影响;杨文君等<sup>[4]</sup>利用 WAW-1000 装置研究不同速率条件下岩石的破坏形式,发现速率会影响砂岩累计声发射计数且呈正相关关系;在 FLAC<sup>3D</sup>数值模拟条件下,高洋等<sup>[5]</sup>对完整试件和裂

隙试件进行单轴压缩试验,揭示了试件破坏过程的发展规律;在电子显微镜条件下,张梅英等<sup>[6]</sup>观察了岩石裂纹产生、扩展等过程,进一步解释了岩石变形过程中裂缝的产生原理;基于不同速率条件,何松等<sup>[7]</sup>对黏土岩进行单轴压缩试验,发现黏土岩的加载速率与峰值应力呈线性关系。

以往大多数试验都是研究恒定速率条件下岩石应力-应变曲线,不同速率的加载方式也不多,变速率的加载方式更少.目前试验中所要求的加载速率并没有统一的标准,变速率分为低应变率,中等应变率和高应变率.基于中低应变率条件,本文对类岩石进行变速率单轴压缩试验,分析类岩石试样破裂过程。

## 1 试验设计

### 1.1 试件制备

由于岩石所处环境比较复杂且取样困难,现场原位试验难度系数很高,目前主要采用室内试验来研究岩石的力学特性.鉴于这些考虑,本试验选用水泥砂浆来做试件,与岩石相比,这类试件试验的可重复性高且试验数据更接近于岩体结构的变形.本次试验所采用模具长×宽×高=150 mm×150 mm×30 mm(如图1所示).为保证试件指标相同,所采用材料均保持一致.材料选用P.O.32.5水泥、黄沙和水,它们的配料质量比为 $m_{\text{水泥}} : m_{\text{黄沙}} : m_{\text{水}} = 26 : 25 : 10$ .先用筛子进行黄沙筛选,然后再制作试件.试件做完后需要养护9 h左右,接着进行脱模处理。

### 1.2 加载过程

类岩石单轴压缩试验是在煤矿安全开采技术重点实验室,利用三轴岩石剪切流变试验仪完成(如图2所示).本文采用恒定速率和变速率这2种单轴压缩试验.在试验开始之前,先用润滑油均匀涂抹试件上下表面,这样能够更好地削弱试件的端部效应.本次试验先采用负荷预加载方式,以恒定的加载速度200 N/s对类岩石施加500 N压力.接着以位移的加载方式,根据恒定速率单轴压缩试验要求以0.5,1.0,2.0,3.0 mm/min的速率加载并测得峰值应力 $\sigma_{\text{max}}$ ;另一组开始以恒定速率进行加载,当应力值达到该恒定速率峰值强度的40%时,快速将该加载速率调整为另一加载速率,试验加载历程分别是0.5 mm/min→1.0 mm/min,1.0 mm/min→2.0 mm/min,2.0 mm/min→3.0 mm/min.



图1 150 mm×150 mm×30 mm 试件



图2 三轴岩石剪切流变试验仪

## 2 加载速率对岩石的变化影响

### 2.1 恒速率对类岩石强度的影响

在单轴压缩和不同速率条件下,类岩石所对应的应力-应变曲线如图3所示.由图3可知:曲线前期都比较光滑,当达到峰值强度时,应力显著下降,伴随着明显的弹性变形和破坏过程,即使采用相同试件,不同速率所对应的单轴压缩曲线不相同.图4给出了不同速率类岩石的应力峰值,由图4可知:速率为1.0 mm/min时对应的峰值强度为11 MPa,相对于0.5 mm/min时增加了3.7%;速率为2.0 mm/min时对应的峰值强度为11.8 MPa,相对于1.0 mm/min时增加了7.27%;速率为3.0 mm/min时对应的峰值强度为13 MPa,相对于2.0 mm/min时增加了10.1%.由此可以发现,在一定范围内类岩石所对应的峰值强度随着

加载速率的增加而增加.同一试件在速率不相同,其所对应的单轴压缩曲线也不相同.

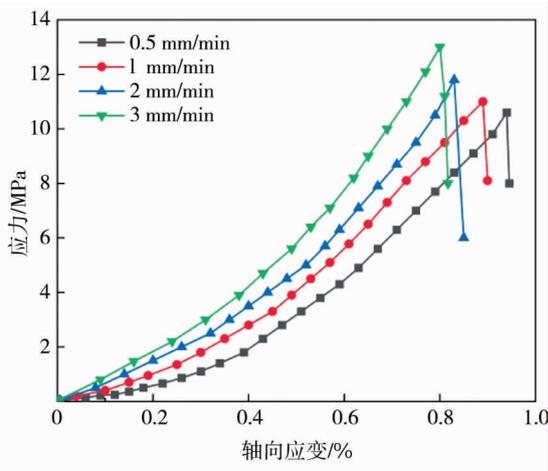


图3 不同速率条件下类岩石的应力-应变关系

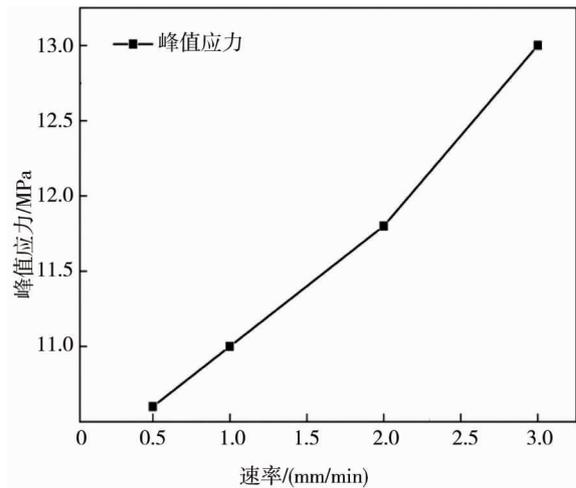


图4 不同速率条件下类岩石的应力峰值

### 2.2 变速率对类岩石强度的影响

图5给出了不同加载速率的应力-应变曲线.分别对应的速率为0.5 mm/min→1.0 mm/min,1.0 mm/min→2.0 mm/min,2.0 mm/min→3.0 mm/min.

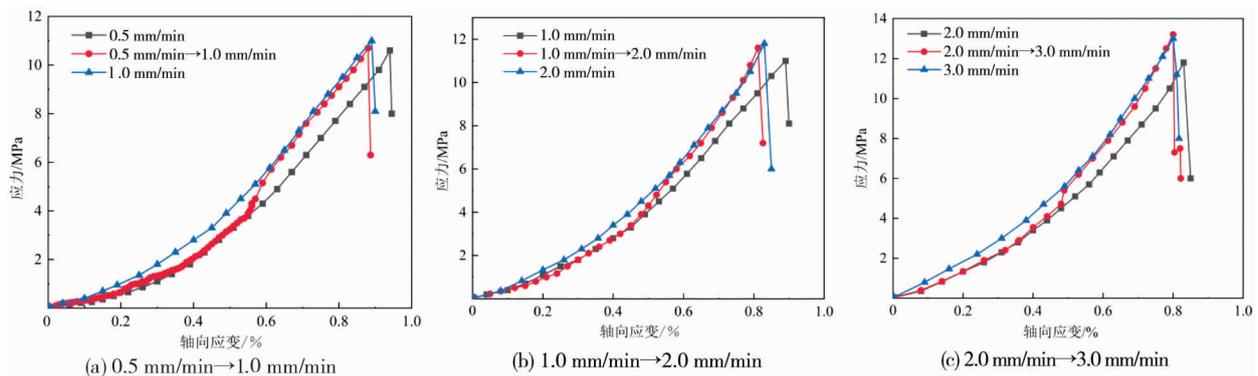


图5 变速率条件下的应力-应变曲线

图5a给出了0.5,1.0 mm/min的恒速率对应的应力-应变曲线以及0.5 mm/min→1.0 mm/min的变速率对应的应力-应变曲线.由图5a可以看出:0.5 mm/min→1.0 mm/min的变速率对应的应力-应变曲线前期与0.5 mm/min恒速率的曲线保持一致,速率发生改变时其曲线有明显的向上突变,不再保持之前恒速率曲线的轨迹,而是与1.0 mm/min恒速率应力-应变曲线保持一致;随着加载持续进行,最后0.5 mm/min→1.0 mm/min的变速率的峰值应力约等于1.0 mm/min恒速率的峰值应力.图5b和图5c中的变速率的应力-应变曲线的变化与上述基本类似.

从这些试验结果可以看出:速率改变之前的应力-应变曲线与原来速率的应力-应变曲线几乎重合;当速率发生改变时,其应力-应变的曲线会出现明显的向上突变;速率改变之后的曲线逐渐与改变之后的恒速率的应力-应变曲线重合,变速率的峰值应力也约等于改变之后的恒速率的峰值应力.

## 3 单轴压缩条件下类岩石的变形特征以及裂纹变化

### 3.1 类岩石的变形特征

在单轴压缩荷载作用下,类岩石应力-应变曲线如图6所示,揭示了类岩石变形过程中的4个关键阶段:

1) 裂隙压密阶段(OA).这一阶段表现为试件原始结构面逐渐闭合,变形速度相对较慢,表明发生了非

线性变形.随着荷载逐渐增加,岩石膨胀和体积逐渐减小.在该阶段,曲线通常呈凹型,并且其变化对于完整试件并不明显.

2) 弹性变形至稳定阶段( $AC$ ).关键点  $B$  标志着类岩石从弹性变形阶段过渡到稳定发展阶段.与  $OA$  阶段不同, $AC$  阶段的曲线几乎呈线性趋势.

3) 非稳定破裂阶段( $CD$ ). $C$  点标志着岩石从弹性阶段转变为塑性阶段,通常情况下屈服点应力约为峰值应力的  $2/3$ .在这一阶段,类岩石破裂过程与以往大不相同,该阶段的上界点被称为峰值点.

4) 破裂后阶段( $D$  点之后).岩石承载能力在达到一定值后不再上升,而是开始下降,这一点被称为峰值强度.破坏通常发生在岩石内部,但试件整体仍处于完整状态.在这一过程中,类岩石裂隙迅速扩展,形成一个相对的断裂面.裂隙的形成影响了试件承载能力,但随着应变增加,其承载能力不会陡降至最低点.这同时说明破裂后的岩石仍具有一定的承载能力,只是相对于之前较小.

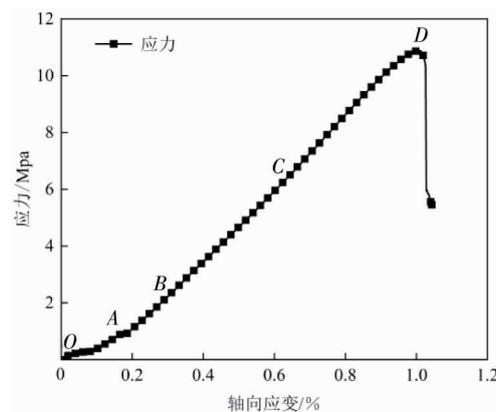


图6 类岩石的应力-应变曲线

### 3.2 单轴压缩条件下类岩石的裂纹变化情况

通常情况下,随着荷载增加,类岩石表面会出现不同程度的裂纹,并对应力-应变曲线产生影响.本文分析一些典型试件中的裂纹变化情况.

1) 图7a 为速率为  $0.5 \text{ mm/min}$  时的类岩石应力-应变曲线以及各阶段裂纹的扩展.类岩石应力-应变曲线比较光滑,前3个阶段过程中没有明显的波折点,唯一的波折点在破裂后阶段出现.当达到峰值点后,应力在上端相对集中,试件上表面首先出现细小裂纹,应力急剧下降,但此时类岩石的强度没有完全失效.裂纹在向下扩展的同时继续向侧面扩散,最终形成一条上下贯通的裂纹,试件发生宏观破坏.

2) 图7b 为速率为  $1.0 \text{ mm/min}$  时的类岩石应力-应变曲线以及各阶段裂纹的扩展.类岩石前3个阶段与速率为  $0.5 \text{ mm/min}$  的试件基本保持一致,不同之处在于速率大小不同,达到峰值点的时间缩短.达到峰值点后,试件中部先出现微小裂纹,接着迅速扩散,形成了上下贯通的裂纹.与图7a 试件相比,图7b 试件下端出现了一点小崩落,随后应力下降.

3) 图7c 为速率为  $2.0 \text{ mm/min}$  时的类岩石应力-应变曲线以及各阶段裂纹的扩展.在恒速率单轴压缩过程中,随着时间的推移,其位移也在增加,但前3个阶段同样没有出现裂纹.达到峰值后,试件的上表面先出现裂纹,然后向下延伸,与之前不同的是它没有延伸到试件的底部,但在裂纹右侧出现了一些小崩落.

4) 图7d 为速率为  $3.0 \text{ mm/min}$  时的类岩石应力-应变曲线以及各阶段裂纹的扩展.应力从  $0 \text{ MPa}$  到  $13 \text{ MPa}$  过程中,岩石表面未出现裂纹.当达到峰值点时,裂纹首先出现在试件中间偏上的位置,接着裂纹迅速在表面扩展,形成上下贯通的裂纹.与前面不同的是,侧面出现了较大程度的劈裂.

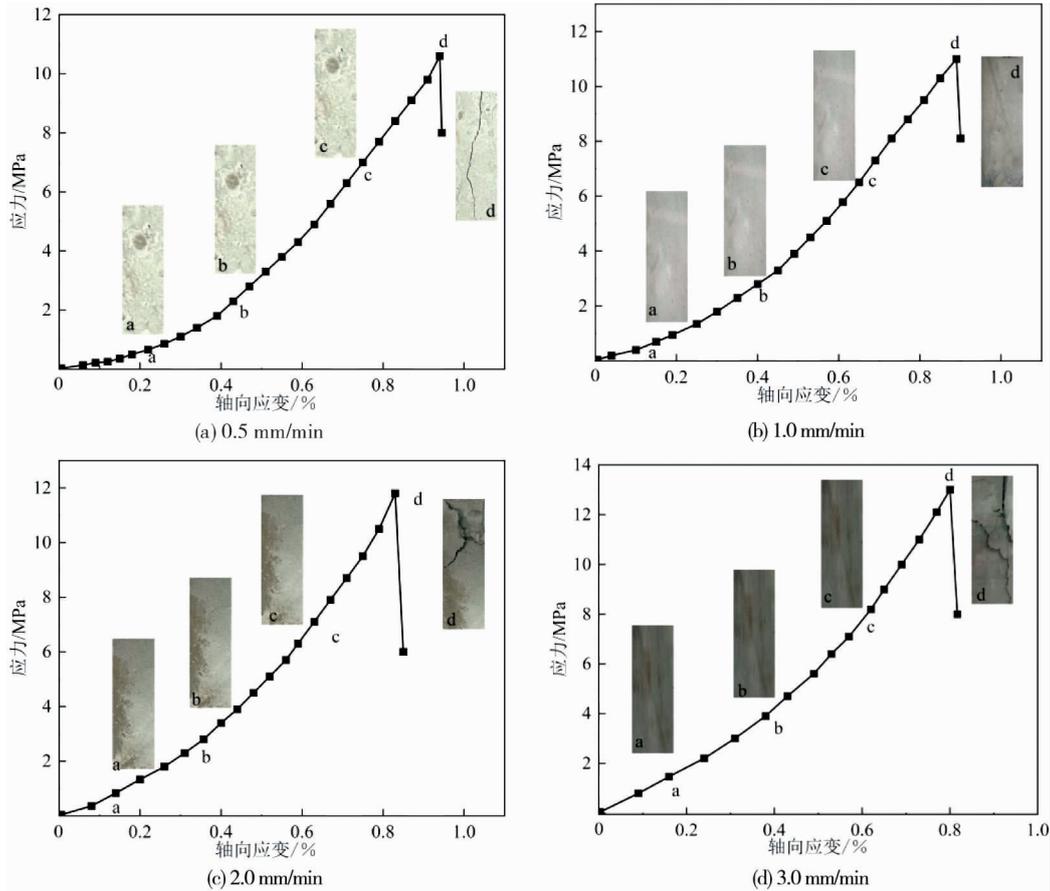


图7 恒速率条件下裂纹扩展与应力-应变曲线对应关系

图8为变速率条件下类岩石应力-应变曲线以及各阶段裂纹的扩展.在图8a中,当应力达到4.22 MPa时(即应力值达到之前速率峰值强度的40%时),速率发生改变,其曲线突然向上突变,然而在此阶段并未观察到裂纹产生.图8b和图8c中,变速率应力-应变曲线的变化与恒速率应力-应变曲线基本类似.另外,完整试件的裂纹一般在峰值点处出现,而速率的变化一般在第二阶段完成,因此速率的变化对裂纹产生的影响不大.

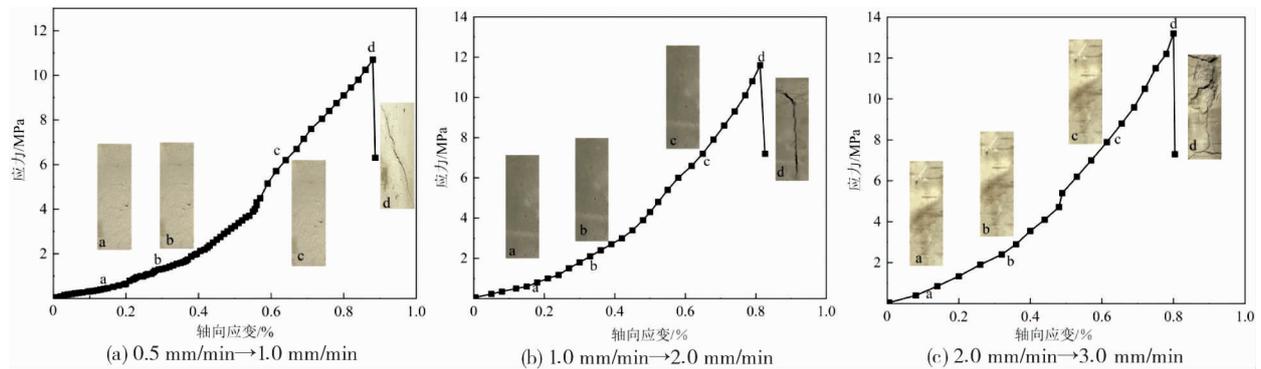


图8 变速率条件下裂纹扩展与应力-应变曲线对应关系

综合上述分析,在单轴压缩过程中,完整试件一般都会经历裂隙压密阶段,弹性变形至稳定阶段,非稳定破裂阶段和破裂后阶段.完整试件的裂纹一般在达到应力峰值处才会出现,峰值前面阶段的曲线通常较为光滑.首次出现裂纹的位置比较随机性,与裂隙试件不同,裂隙试件通常在裂隙两端先出现裂纹.但大部分完整试件出现的裂纹能够在表面上下贯通,形成宏观破坏面.另外,速率改变对裂纹产生的影响相对较小.

## 4 结论

1)在一定范围内,随着加载速率增加,类岩石的峰值应力也会增加.同一试件在不同速率下对应的应力-应变曲线也不相同.

2)速率改变之前的应力-应变曲线与原来速率下的应力-应变曲线几乎重合.然而,当速率突然变化时,应力-应变曲线会出现明显的突变.加载速率改变之后,变速率对应的峰值应力约等于改变后恒速率对应的峰值应力,其应力-应变曲线几乎一致.

3)在单轴压缩过程中,完整试件一般都会经历4个阶段:裂隙压密阶段、弹性变形至稳定阶段、非稳定破裂阶段和破裂后阶段.当达到应力峰值时,完整试件的裂纹才会出现,达到峰值之前的曲线通常较为光滑,偶尔会出现一些小波动,但并不明显.首次出现裂纹的位置没有一定的规律性,不像裂隙试件一般是在裂隙两端先出现裂纹.大部分完整试件出现的裂纹能够在表面上下贯通,形成宏观破坏面.另外,速率改变对裂纹产生的影响相对较小.

### 参考文献:

- [1] 李福林,杨健,刘卫群,等.单轴压缩条件下泥岩加载速率变化效应研究[J].岩土力学,2021,42(2):369-378.
- [2] 袁康,万文,赵延林,等.单轴冲击下填充泥体花岗岩力学特性试验[J].矿业工程研究,2018,33(2):29-34.
- [3] 张天军,景晨,王喜娜,等.不同加载速率对含孔试样变形特性影响研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(4):847-856.
- [4] 杨文君,谢强,班宇鑫,等.变加载速率砂岩声发射特征及损伤本构模型[J].地下空间与工程学报,2021,17(1):71-79.
- [5] 张晓平,王思敬,韩庚友,等.岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究:以片状岩石为例[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1772-1781.
- [6] 高洋,张保良,崔诗才,等.完整及含裂隙岩石试件单轴压缩过程数值模拟[J].能源与环保,2020,42(1):99-102.
- [7] 何松,薛凯喜,胡艳香,等.加载速率与环境温度对黏土岩力学性质的影响[J].实验力学,2018,33(5):757-768.
- [8] 刘新荣,尹志明,王艳磊.含V型相交裂隙岩体的力学特性及破坏模式试验[J].煤炭学报,2020,45(2):651-659.
- [9] 肖维民,邓荣贵,付小敏,等.单轴压缩条件下柱状节理岩体变形和强度各向异性模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):957-963.
- [10] 郑文翔,赵延林,王敏.单轴压缩条件下预制裂隙类岩石材料实验研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(4):1-6.
- [11] 汤双臣,冯鹏,赵家琛.含交叉裂隙岩石试样单轴力学特性与破坏机理[J].地下空间与工程学报,2021,17(5):1376-1383.
- [12] 赵延林,万文,王卫军,等.类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破断试验与翼形断裂数值模拟[J].岩土工程学报,2013,35(11):2097-2109.
- [13] 徐鹏飞,邓华锋,张恒宾,等.不同应力水平下砂岩时滞性单轴压缩破坏特性研究[J].岩土力学,2021,42(11):3041-3050.
- [14] WANG Y G, LONG W P. Complete stress-strain curves for pine needle fibre reinforced concrete under compression[J]. Construction and Building Materials,2021,302:124134.
- [15] ZHAO Y, DING D, BI J, et al. Experimental study on mechanical properties of precast cracked concrete under different cooling methods[J]. Construction and Building Materials,2021,301:124141.