

# 白砂岩试件初始损伤后 再加载力学特性试验分析

任恒<sup>1</sup>, 朱永建<sup>1,2\*</sup>, 王平<sup>1,2,3,4</sup>, 余伟健<sup>1,2</sup>, 黄钟<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 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;

4. 湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 针对巷道开挖以及回采过程中围岩应力平衡-卸压二次平衡引起的巷道大变形问题, 利用应变测试仪及红外热像仪对白砂岩三轴加载-卸载后单轴再加载的破坏过程进行监测。实验结果表明: 试件单轴加载破坏形态与初始损伤程度有关, 白砂岩三轴加载超过 57.5% 峰值强度后卸载, 单轴再加载破坏形态发生了改变; 岩石单轴加载过程中环向应变速率与岩石裂隙大小有关, 裂隙越大, 环向应变速率越大, 反之, 应变速率则越小; 单轴再加载损伤后的岩石, 存在张裂变形与剪切滑移变形, 破坏时以剪切滑移为主。试件剪切破坏时滑移面温度急剧升高。

**关键词:** 三轴加载-卸载; 单轴再加载; 损伤弱化; 初始损伤; 力学特性

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2019)01-0023-07

## Experimental Analysis of Mechanical Properties of Reloading After Initial Damage of White Sandstone Specimens

Ren Heng<sup>1</sup>, Zhu Yongjian<sup>1,2</sup>, Wang Ping<sup>1,2,3,4</sup>, Yu Weijian<sup>1,2</sup>, Huang Zhong<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

4. Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large deformation caused by stress balance-pressure relief-secondary balance of surrounding rock during tunnel excavation and mining, the failure process of white sandstone under triaxial loading-unloading and uniaxial reloading is monitored by strain tester and infrared thermal imager. The experimental results show that the failure modes of the specimens under uniaxial loading are related to the initial damage degree. When the triaxial loading exceeds the peak strength of 57.5%, the uniaxial re-loading failure modes will be changed. The circumferential strain rate is related to the size of the rock cracks during uniaxial loading. On the contrary, the strain rate is smaller, and the rock after uniaxial re-loading has tension crack deformation and shear slip deformation, and shear slip is the main failure mode. The temperature of the slip surface will be increased sharply during shear failure.

收稿日期: 2018-09-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51774130; 51804114); 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室开放基金(962-E21703)

\* 通信作者, E-mail: yjzhu@hnust.edu.cn

**Keywords:** three axis loading unloading; uniaxial reloading; damage weakening; initial damage; mechanical properties

我国每年新掘进的巷道总长度达2万 km 左右,其中埋深在600~800 m 的巷道超过1 000 km,绝大多数深埋巷道出现大变形失稳破坏特征,影响巷道正常使用.煤矿井工开采中,巷道一旦开挖就会存在应力重新分布的特点,在开挖前处于三向应力平衡状态,开挖后三向应力平衡状态被破坏,围岩应力重新分布,对围岩强度产生一定程度的损伤,损伤弱化后的围岩强度对于巷道服务年限具有十分重要的影响.许多学者从能量的角度<sup>[1-3]</sup>、应用红外辐射<sup>[4,5]</sup>的方法,对岩石损伤弱化的卸荷效应做了很多研究.如王平<sup>[6]</sup>等通过对砂岩进行不同速率的单轴加载、不同围压的三轴加载,三轴加载-卸载-单轴加载下的损伤弱化机理进行研究;陈忠辉<sup>[7]</sup>等利用连续介质损伤力学方法,证明卸载破坏比加载破坏表现得更为脆性、更突然;邱士利<sup>[8]</sup>等对大理岩进行不同卸荷速率的三轴卸围压试验,研究扩容过程的演化规律和强度特征的差异;杨永杰<sup>[9]</sup>等利用 MTS815 岩石伺服实验系统和 AE21C 声发射监测仪,对灰岩进行三轴压缩试验并用声发射辅助,筛选合理的声发射参数,分析研究三轴压缩条件下岩石的损伤演化特性;李地元<sup>[10]</sup>等开展3种不同应力路径下的花岗石三轴加载卸载试验,得到花岗石在不同加载卸载路径下的应力-应变曲线,分析它的破坏特征、变形特征及其强度特征;张平阳<sup>[11]</sup>等基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型进行拓展,并用内变量疲劳本构模型描述每个循环的初始模量和卸载模量的变化,进而得到循环加-卸载作用下的岩石本构模型.

总体来看,前人主要研究加载-卸载后岩石的力学机理及破坏特征,对初始损伤岩石再加载过程的力学机理及破坏特征研究不是很多.在井工开采过程中,巷道围岩经历了开挖前的三向压缩平衡状态、开挖后的卸载及再双向或单向压缩过程,巷道围岩稳定对于矿井生产尤为重要,因此研究巷道围岩损伤后的受力情况及破坏机理,对巷道的有效支护具有重要意义.

## 1 基于连续损伤力学岩石损伤原理

岩石在巷道开挖过程中,应力状态发生改变,从原始的三向平衡转化为两向平衡状态,在此过程中,岩石的力学性质必然会发生变化,为了研究岩石损伤后的破坏机制,根据连续力学理论,研究岩石从初始损伤到宏观裂隙的动态演化过程,我们定义损伤变量  $D_n$ :

$$D_n = \frac{S_D}{S}. \quad (1)$$

式中:  $D_n$  为相对于法线  $n$  方向局部的损伤变量;  $S_D$  为法线  $n$  方向上的损伤面积;  $S$  为法线  $n$  方向上体元面的面积.

由式(1)可以看出,  $D_n = 0$  时,岩石为原始状态或无损状态;  $D_n = 1$  时,岩石失去承载能力.

直接测量损伤力学变量在现实中存在难度,因此从应变等效性假说可知:

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E_0}. \quad (2)$$

式中:  $E_0$  是原始状态下的杨氏模量;  $\bar{E}$  是岩石的有效割线模量.

$$\bar{E}(D) = \frac{\sigma(D)}{\varepsilon(D)}. \quad (3)$$

式中:  $\sigma(D)$  是岩石在一定损伤  $D$  下的应力;  $\varepsilon(D)$  为岩石在一定损伤  $D$  下的应变.

由式(2)得到:

$$D_{ini} = 1 - \frac{\bar{E}_{ini}}{E_0}. \quad (4)$$

式中:  $D_{ini}$  为岩石初始损伤下的有效割线模量;  $\bar{E}_{ini}$  岩石原始状态下的杨氏模量.

如果  $D_{ini}$  已知,将式(4)代入式(2),得到式(5):

$$D = 1 - (1 - D_{ini}) \frac{\bar{E}}{\bar{E}_{ini}}. \quad (5)$$

其中  $D_{ini}^{(0)}$  值可通过式(6)得到:

$$D_{ini}^{(0)} = K\beta_{ini} \quad (6)$$

式中:  $K$  是比例因子;  $\beta_{ini}$  是岩石初始状态下的表面裂损度,由式(7)可知:

$$\beta = \frac{L_{cr}}{L_{cr}^I} \quad (7)$$

式中:  $L_{cr}$  为损伤过程中对应应变下裂纹的总长度;  $L_{cr}^I$  为峰值应力下裂纹的总长度.

## 2 试验研究

### 2.1 试验方案

1) 本实验加载仪器为 RMT-150 岩石力学实验系统,以白砂岩为研究对象,取 3 个标准试件进行三轴压缩试验,围压终点设置为 15 MPa,轴压终点设置为 300 kN,轴压加载速率为 0.02 kN/s,围压加载速率为 0.02 MPa/s,待围压加载至预设值时将轴压加载速率调整为 0.1 kN/s,直至试件破坏.取 3 个试件强度峰值的平均值作为峰值应力.

2) 考虑到深井巷道围岩处于低围压状态,以 15 MPa 围压下的峰值强度为基准,对标准试件进行轴压终点为 50.0%,52.5%,55.0%,57.5%,60.0%峰值强度三轴压缩试验,加载速率同步骤(1),轴向压力加载至预设值,稳定 1min 后进行轴压和围压的卸载,围压卸载速率大于轴压卸载速率.

3) 对步骤(2)中每一个损伤试件进行单轴再加载试验,使用 DH3816N 静态应变测试分析系统对损伤试件的环向应变进行测量,使用 FLIR SC325 红外热像仪对损伤试件再加载过程中的表面温度进行监测.

### 2.2 试件破坏形态分析

#### 2.2.1 三轴加载试验

白砂岩试件在围压为 15 MPa 的平均峰值强度为 235.04 kN.三轴压缩下的试件以块状破坏形态为主,上下两端出现“锥”形块体,中间部分块体破坏较为均匀,形成两端完整,中部破碎的块状结构.试件在三轴压缩条件下,主要表现为压剪破坏.三轴压力下,试件破坏形态如图 1 所示.

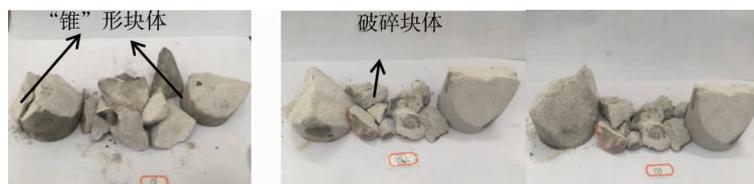


图 1 三轴加载试件破坏形态

#### 2.2.2 三轴加载-卸载试验

基于白砂岩试件在围压为 15 MPa 的平均峰值强为 235.04 kN,对标准试件进行 50.0%,52.5%,55.0%,57.5%,60.0%峰值强度轴压加载及卸载试验,试验中出现 3 种破坏情况:(1)轴压为 50.0%和 52.5%峰值强度的标准试件未发生破坏;(2)轴压为 55.0%峰值强度的标准试件出现了细微的倾斜裂纹;(3)轴压为 57.5%和 60.0%峰值强度的标准试件出现了比较明显的倾斜裂隙.实验结果如图 2 所示.

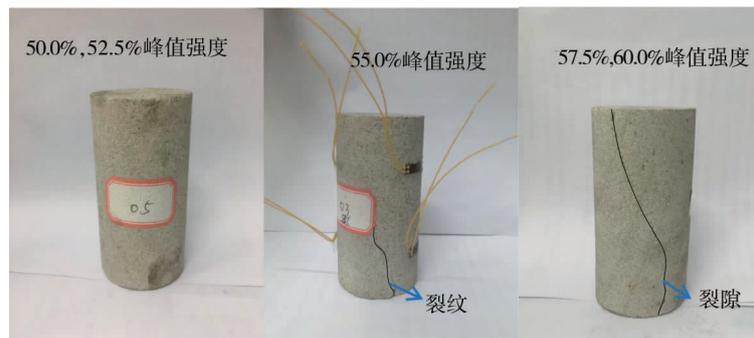


图 2 卸载后试件形态

### 2.2.3 单轴再加载试验

对标准试件进行50.0%、52.5%、55.0%、57.5%、60.0%峰值强度轴压加载及卸载试验,试件发生了不同程度的损伤,对损伤试件进行单轴再加载试验,50.0%、52.5%、55.0%峰值强度试件出现了破坏形态一致的规律,呈“X”状共轭斜面剪切破坏形态,上下端为倒“锥”型,两侧岩块剥落,呈两端薄中间厚的形态,试件以剪切破坏为主.破坏面法线与荷载轴线存在一个夹角,此夹角与岩石的内摩擦角有关.这种破坏是由破坏面上的剪应力超过极限引起的.57.5%、60.0%峰值强度试件沿裂隙发生剪切破坏,破坏呈现2个完整块状结构.试验结果如图3所示.



图3 初始损伤试件单轴再加载破坏形态

对比直接三轴加载试件与单轴加载不同损伤程度试件破坏形态,三轴加载试件直至破坏,其破坏形态较为破碎,呈端部“锥”型,中部碎块状;单轴加载初始损伤程度不同的试件,其破坏形态也存在差异,小于55%峰值强度试件表面出现2条微裂隙,对试件的结构整体性影响不大,与直接单轴加载未损伤试件的破坏形态相似,说明小于55%峰值强度试件虽然出现了损伤,但初始损伤度不影响其破坏形态的改变,破坏形态与加载历史无关,只与加载方式有关.大于55%峰值强度试件表面出现2条贯通的宏观裂隙,初始损伤严重,单轴加载此试件,出现2个完整块状结构,对比不同初始损伤试件单轴加载破坏形态,说明试件破坏形态与初始损伤程度有关.基于本实验,可以设定一个门槛值,岩石三轴加载至55%峰值强度后卸载,再单轴加载试件,试件破坏形态会发生改变.

## 3 力学参数分析

### 3.1 损伤弱化对岩石强度的影响

为研究不同初始损伤程度下岩石强度特征,绘出其应力-应变曲线(如图4所示),由图4可以看出不同程度三轴加载卸载后的岩石单轴抗压强度不同,随着三轴加载轴向应力的增大,岩石强度降低,50.0%、52.5%、55.0%、57.5%、60.0%峰值强度卸载后岩石强度分别为75.04、50.68、44.92、16.54、14.72 kN,三轴加载轴向应力越大,岩石损伤弱化程度越高.50%峰值强度岩石卸载后宏观上没有明显破坏,单轴抗压强度与原岩抗压强度相差不大,甚至高于原岩抗压强度,说明砂岩内部本来存在细微的裂隙,在一定的压力下,裂隙闭

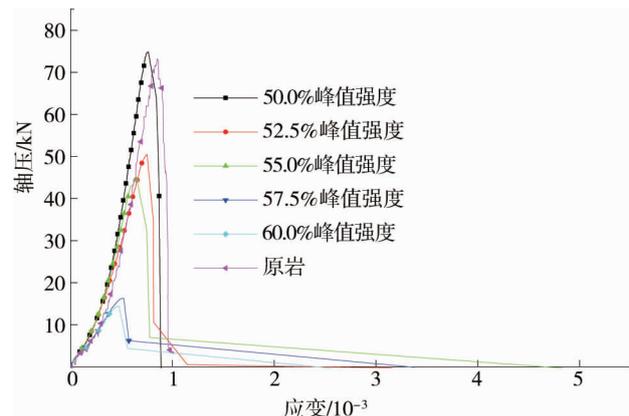


图4 不同初始损伤岩石单轴再加载应力-应变曲线

合,压实后的岩石强度会有一定程度的提高.52.5%、55.0%峰值强度加载处于岩石弹性变形阶段,为微破裂稳定发展阶段,57.5%、60.0%峰值强度应力为岩石屈服点,微裂隙发展出现质的变化,出现宏观断裂面.岩石单轴抗压强度与裂隙的发展程度密切相关,微小裂隙会降低岩石抗压强度,宏观断裂面会导致岩石强度急剧下降,白砂岩加载至57.5%峰值强度时,单轴再加载的抗压强度会出现大幅度降低.由图4可以看出:白砂岩受到损伤后表现为类脆性特性,损伤后的岩石单轴加载直至峰值强度,试件承载力迅速下降,下降到0,说明原岩破坏后不具有承载能力,单轴加载原岩试件至峰值强度,试件承载力下降,但并不下降到

0,说明破裂的岩石仍具有一定的承载力.对比可以得出,受损后的岩石表现出脆性特征.

### 3.2 损伤弱化对岩石弹性模量、变形模量的影响

为了研究弹性模量和变形模量与损伤弱化程度的关系,根据实验结果,可以拟合不同程度三轴加载卸载后对弹性模量和变形模量的影响曲线.如图 5 所示.

由图 5 可以看出:损伤弱化程度越高,岩石弹性模量越低.50%峰值强度卸载后岩石损伤弱化程度比较小,内部结构比较完整,与标准试件弹性模量相比相差不大,甚至高于标准试件,其原因在于原岩本身就是不连续体,内部存在微裂隙,在一定的加载条件下,岩石内部裂隙被压密,表现出弹性模量的略微升高特点.加载程度大于 50%峰值强度卸载后岩石出现微观或宏观裂隙,这些裂隙是原始裂隙被压密,重新扩展的新的裂隙,这种损伤是不可恢复的,岩石内部裂隙数量增多,裂隙面积增大,损伤弱化程度更高,弹性模量显著降低.变形模量趋势与弹性模量相似,其原因与弹性模量影响因素一致.

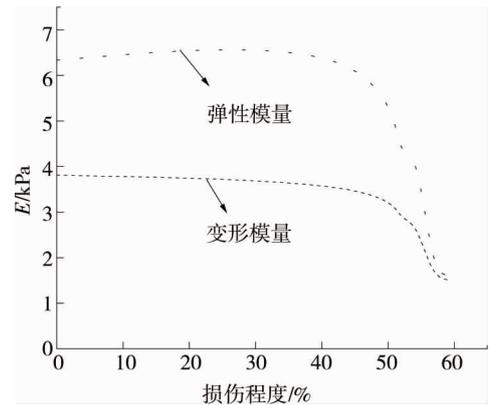


图 5 不同损伤弱化岩石弹性模量与变形模量

### 3.3 损伤弱化对岩石环向应变的影响

图 6 为不同损伤程度岩石单轴压缩过程试件环向应变与时间的关系,原岩与受损岩石在单轴加载过程中环向应变均呈现增大趋势.岩石呈现出比较明显的张裂破坏,不同损伤程度岩石环向应变速率不同,从图中可以判断岩石单轴加载过程中环向应变速率与岩石内部及外部结构同时相关.原岩内部原本存在少量裂隙,在 50%与 52.5%峰值强度三轴加载后的岩石原有裂隙闭合,岩石被压实,内部结构更为完整,外部未发生明显裂隙,表现出完整结构,从而岩石三轴加载至 50%与 52.5%峰值强度时岩石结构更为紧密,在单轴加载过程中,环向应变速率缓慢,而三轴加载至 55.0%,57.5%,60.0%峰值强度岩石在重压实之后产生二次裂隙,损伤程度较大,岩石结构松散,环向应变速率在加载过程中急剧增加.事实证明,岩石环向应变增长速率受内部与外部紧密程度共同作用,与原岩相比,不同程度的三轴加载过程对环向变形速率不同,说明岩石单轴加载过程中环向应变速率与加载历史有关.

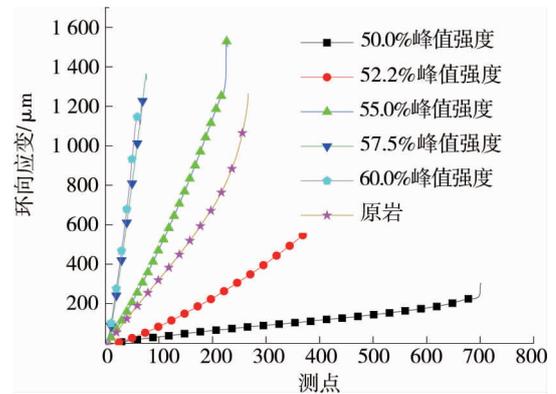


图 6 试件单轴压缩环向应变速率

## 4 岩石破裂红外辐射特性分析

为了研究不同损伤程度下岩石的破坏过程,使用 FLIR SC325 红外热像仪对试件加载过程进行实时拍照.实验表明:50.0%峰值强度岩石未发生明显的破坏,52.5%,55.0%峰值强度岩石出现细微裂隙,未发生明显破坏,这种情况下,单轴再加载岩石会发生 X 型破坏,为剪切破坏,剪切破坏带温度急剧升高,岩石表面的温度升高主要取决于沿剪切破坏带相对运动中摩擦生热,岩石在峰值后沿剪切破坏带温度急剧升高.如图 7 所示.

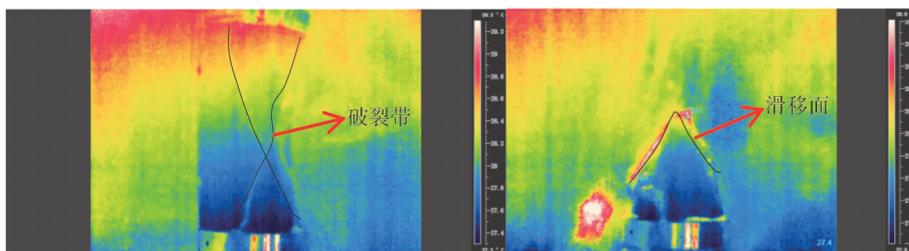


图 7 50.0%,52.5%,55.0%峰值强度岩石破坏过程温度变化

57.5%,60.0%峰值强度岩石出现明显的裂纹、裂隙,岩石首先在裂隙处发生破坏,沿剪切破坏带温度急剧升高,岩石破坏主要是沿裂隙剪切滑移破坏,剪切面峰值后温度急剧升高.如图 8 所示.

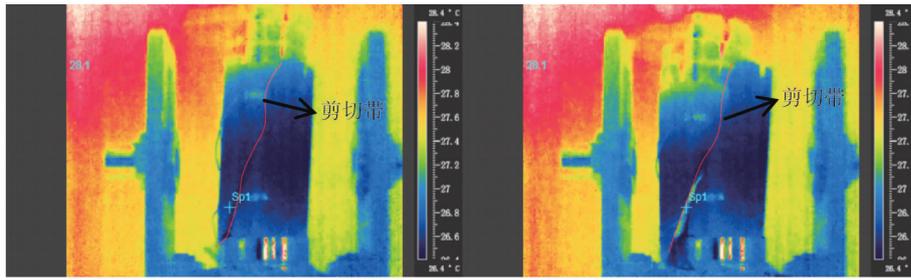


图 8 57.5%,60.0%峰值强度岩石破坏过程温度变化

岩石破坏过程中,岩石沿剪切破裂带辐射温度升高,而在应力松弛或张性区,辐射温度会有所降低<sup>[4]</sup>.图 9 为初始损伤岩石裂隙温度与时间的关系,从图 9 可以看出,原岩与 50%峰值强度岩石在单轴压缩过程中温度先降低后急剧升高,与此岩石破坏过程相关,单轴压缩过程中试件中部应力集中,产生拉应力,出现四个块状结构,温度降低,继续加压,岩块之间沿张开面剪切滑移,剪切滑移面温度急剧升高.三轴加载至 57.5%,60.0%峰值强度岩石产生宏观裂隙,较完整岩块而言,温度变化幅度比较大,说明岩块在单轴压缩过程中张开与滑移同步存在,直至破坏,破坏的同时温度升高至最高点.三轴加载至 52.5%,55.0%峰值强度岩石内部损伤,未出现宏观裂隙,较完整岩块温度变化幅度不大,压缩过程张裂降温与剪切滑移升温抵消,在破坏之前,温度变化不明显,岩石破坏的同时,岩块之间相对滑移,摩擦生热,温度急剧升高.

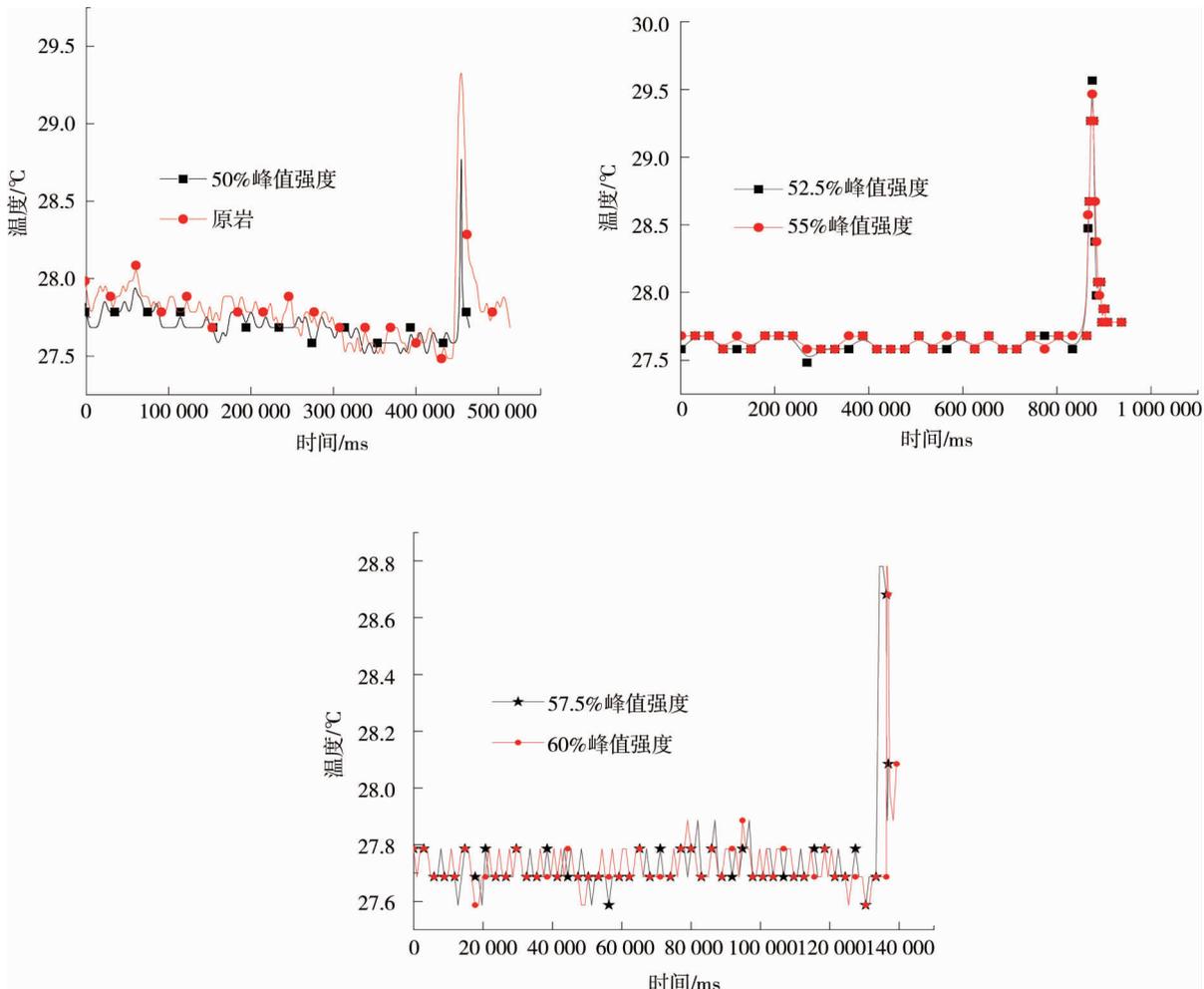


图 9 初始损伤岩石裂隙温度与时间的关系

## 5 结论

1) 岩石三轴加载-卸载后单轴再加载直至破坏,破坏形态与初始损伤程度有关,大于57.5%峰值强度产生初始损伤的岩石会沿裂隙张开,形成2个完整块状结构。

2) 岩石在单轴再加载过程中环向应变速率与岩石加载历史有关,三轴加载小于52.5%峰值强度时,岩石环向应变速率缓慢;大于52.5%峰值强度时,岩石环向应变速率急剧增加。

3) 岩石弹性模量与变形模量与损伤程度有关,三轴加载程度大于52.5%峰值强度,随损伤程度增高,弹性模量与变形模量减小。

4) 单轴再加载存在初始损伤的白砂岩,加载至岩石单轴抗压峰值强度,岩石剪切面温度急剧升高,说明岩石破坏时以剪切滑移变形为主。

### 参考文献:

- [1] 戴兵,赵国彦,杨晨,等.不同应力路径下岩石峰前卸荷破坏能量特征分析[J].采矿与安全工程学报,2016,33(2):367-374.
- [2] 陈卫忠,吕森鹏,郭小红,等.基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1530-1540.
- [3] 朱泽奇,盛谦,肖培伟,等.岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(s1):2675-2681.
- [4] 刘善军,吴立新,吴焕萍,等.多暗色矿物类岩石单轴加载过程中红外辐射定量研究[J].岩石力学与工程学报,2002(11):1585-1589.
- [5] 马立强,李奇奇,曹新奇,等.煤岩受压过程中内部红外辐射温度变化特征研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(3):331-336.
- [6] 王平,朱永建,冯涛,等.砂岩试件加载-卸荷-加载损伤弱化试验分析[J].煤炭学报,2016,41(12):2960-2967.
- [7] 陈忠辉,林忠明,谢和平,等.三维应力状态下岩石损伤破坏的卸荷效应[J].煤炭学报,2004(1):31-35.
- [8] 邱士利,冯夏庭,张传庆,等.不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1807-1817.
- [9] 杨永杰,王德超,郭明福,等.基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):98-104.
- [10] 李地元,孙志,李夕兵,等.不同应力路径下花岗岩三轴加卸载力学响应及其破坏特征[J].岩石力学与工程学报,2016,35(s2):3449-3457.
- [11] 张平阳,夏才初,周舒威,等.循环加-卸载岩石本构模型研究[J].岩土力学,2015,36(12):3354-3359.