

单裂隙岩石高温作用下的力学性能分析

徐 赔, 陈有亮, 王苏然, 李晓鹏, 杨振坤

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘 要: 根据相似理论,通过在模拟材料中预制裂隙的方法模拟天然裂隙岩石,在 20 ~ 800℃ 的高温下分析高温及裂隙倾角对岩体力学性能的影响,并对比白砂岩实验结果;基于 Lemaitre 应变等价原理及宏观统计分布理论建立岩石高温受荷损伤方程。研究表明:在 400℃ 之前模拟材料及白砂岩的力学性能随着温度的升高而有所改善,超过 400℃ 后,力学性能开始劣化,由此推定 400℃ 为白砂岩的应力应变曲线阈值;试块的单轴抗压强度及纵波波速随着预制裂隙倾斜角度的增大而减小,超过 45° 后,随着角度的增大而增大;岩体高温受荷损伤是高温及应力耦合的过程,总损伤相对于高温及荷载损伤之和偏小,裂隙倾斜角度及高温作用对岩石损伤的影响趋势大体和对强度的影响趋势一致。

关键词: 模拟材料; 高温; 裂隙倾斜角; 单轴压缩; 损伤演化模型

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0216-07

Analysis of mechanical property single fracture rock under action of high temperature

XU Pei, CHEN Youliang, WANG Suran, LI Xiaopeng, YANG Zhenkun

(School of Environment Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: According to similarity theory, the paper simulated natural fracture rock through prefabricating crack in simulation material, and analyzed the influence of high temperature and fissure angle on mechanical properties of rock mass under temperature of 20 – 800 °C, and compared the experimental results of white sandstone; based on the Lemaitre strain equivalence principle and macroscopic statistical distribution theory, it established the damage equation of high temperature and loading rock mass. The research results show that before 400 °C, the mechanical properties of simulation materials and white sandstone are improved with the increase of temperature, after 400 °C, the mechanical performance begin to degradate, 400 °C is presumed as the stress – strain curve threshold of white sandstone; the uniaxial compressive strength and longitudinal wave velocity of blocks decrease as the increase of prefabricated crack angle, when the angle is more than 45°, the trend is contrary. The damage of high temperature and loading rock mass is a coupled process of high temperature and stress. The total damages are smaller than the sum of high temperature and load damage. The trend of fracture inclination angle and high temperature effect on rock damage is consistent with the trend of the strength

Key words: simulation material; high temperature; fissure angle; uniaxial compression; damage evolution model

1 研究背景

岩石的损伤断裂破坏是岩石力学的科学难

题^[1-5]。天然岩体中富含大量的孔隙、裂隙,地底高温、应力通常会引起岩体裂隙的扩张,使岩石的力学性能发生劣化。随着时间的推移,这种劣化会不断加

收稿日期:2015-08-21; 修回日期:2015-11-26

基金项目:国家自然科学基金项目(10872133);上海市自然科学基金项目(14ZR1428200);上海理工大学土木工程专业学位研究生培养基地项目

作者简介:徐 赔(1990-),男,湖北鄂州人,在读硕士研究生,研究方向:岩石力学。

通讯作者:陈有亮(1966-),男,河北故城人,博士,教授,研究方向:岩石混凝土材料力学。

剧,最终岩体破坏,造成人员伤亡及经济损失。近年来出于环境保护和新能源开发的需要,一些大型的土木工程相继动工,如矿体的深部开挖、高放射性核废料的地质深埋、及裂隙性油藏的开采等。为确保开采过程中围岩的稳定性,裂隙岩体高温力学特性亟待进一步研究。因此研究裂隙岩体在高温高应力作用下的损伤劣化机制具有重大的工程实践意义。

影响岩石力学性能的因素比较多,例如,天然岩体内赋存裂隙的尺寸、倾斜角度等,随着外界温度的变化岩石力学性能往往也会发生较大的改变。国内外专家学者对此已做过许多重要研究。主要可归纳为以下几个方面:

(1) 岩体裂隙的几何特征对岩石力学性能的影响研究。在单轴作用下,林鹏等^[6]学者研究了不同角度裂隙的裂纹扩展和破坏机制,发现裂隙角度较小时裂纹萌生比较容易,试件一般呈混合破坏模式,而角度较大时,裂纹萌生比较困难,在接近峰值应力时,扩展较快,呈剪切或劈裂破坏。张平等^[7]研究了不同裂隙空间位置包括雁行和共面排列条件下两条裂隙的贯通机制。杨圣奇等^[8]通过在大理岩中预制断续裂纹分析裂隙参数(岩桥倾角、裂隙间距、裂隙长度等)对大理岩变形破坏特征。李银平等^[9]讨论了裂纹厚度、裂纹尖端曲率半径及围压对翼型裂纹起裂角的影响。

(2) 高温对岩石材料力学性能的影响研究。翟松韬等^[10]在不同高温作用下研究喜马拉雅岩盐,发现该岩盐的抗压强度和弹性模量在 120 ~ 200℃,随温度升高而增加,在 500℃ 以上,岩盐内部结构发生变化,峰值应力大大下降;尹光志等^[11]对焦作方庄煤矿煤层顶板粗砂岩进行高温后常规三轴压缩试验,分析粗砂岩强度,平均模量,内摩擦角与温度和围压的关系,发现高温对粗砂岩裂隙有一定的治愈,使其强度增加,超过 300℃ 后,随着温度的升高,粗砂岩强度、平均模量和内摩擦角等均有所减小。此外,部分学者还研究了高温对岩石内部化学成分的影响。傅国飞等^[12]利用热差分析和高温 X 射线衍射方法分析两种不同燧石中 α 石英 $\rightleftharpoons\beta$ 石英的相变,并提出从室温到 573℃ 试块体积逐渐增大,到 573℃ 达到最大值,导致岩石内部微裂纹增加。

(3) 岩石裂隙的发展规律及岩石损伤断裂力学理论及模型的研究。杨更社等^[13]将 CT 识别技术用于岩石损伤扩展研究,发现 CT 数的大小、分布规律及其变化情况与岩石损伤扩展密切相关,揭示了岩石损伤扩展过程数与应力、应变间的定量关系,为

建立岩石损伤扩展本构关系奠定了基础。朱珍德等^[14]在 SEM 图像数字化处理基础上,对微裂隙的萌生、扩展及贯通过程进行数字化定量分析,利用内变量热力学理论和摩擦弯折裂纹模型,分析微裂纹不同阶段的演化规律,建立微裂纹引起的非弹性应变与应力之间的定量关系。张岩等^[15]从断裂力学理论出发,定量分析高于常温的温度场中温度应力作用对含有单条裂隙、单组裂隙以及多组裂隙岩体强度的影响规律,从弹性力学着手,采用解析的方法以等效荷载法推导岩体裂尖处在一定温度应力作用下断续裂隙介质的细观断裂强度表达式。虽然在高温和裂隙这两方面已经有许多学者做过相关研究,但在试件中预制裂隙方面,大部分学者选择的是切割岩石、填充相似材料或者预埋铁片预制裂隙的方法^[16-19],这样处理往往缺乏准确性,且将高温和裂缝两方面作用耦合起来的文章比较少。鉴于此,本文运用特定模具制定不同倾角的闭合裂隙,研究裂隙倾角和高温对岩体强度的影响,结合岩石宏观统计力学的知识,建立岩石损伤力学模型,探讨高温和裂隙对岩体损伤扩展的影响。

2 实验方案

2.1 模型材料

由于在真实岩体中预制闭合裂缝比较困难,本文采用模拟材料制作出结构相似的岩石试块,根据相似理论,如果原型和模型相对应的各点及在时间上对应的各瞬间的一切物理量成比例,则两个系统相似。模型物理量同原型物理量之比也称相似系数,主要有几何相似比、应力、应变、位移、弹性模量、泊松比、边界应力、体积力、材料密度、容重相似比等。结合之前学者的研究^[20],最终配合比见表 1。

表 1 模拟材料配合比表				
42.5 水泥	石英砂	硅粉	蒸馏水	减水剂
20	16	2.2	5.6	0.2

根据相似理论^[21-22],模型和原型相似的依据为: $C_\sigma = C_\gamma C_l$, $C_\mu = C_\varepsilon = C_f = 1$, $C_\sigma = C_E = C_C = C_{Rl} = C_{Re}$, $C_\delta = C_l$, 这里 C_σ 、 C_γ 、 C_l 、 C_μ 、 C_ε 、 C_f 、 C_E 、 C_C 、 C_{Rl} 、 C_{Re} 、 C_δ 是指应力、密度、几何、泊松比、应变、摩擦强度、弹性模量、黏聚力、抗压强度、抗拉强度、变形相似系数。表 2 列出了白砂岩及模拟材料的一些物理力学参数。

根据表 2 可求出相似系数见表 3。

表 2 材料物理力学参数表

材料类型	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比 μ	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
模拟材料	2.24	16.5	0.12	57.5	5.25	12.6	37
白砂岩	2.20 ~ 2.70	15 ~ 32	0.02 ~ 0.20	56 ~ 112	5.00 ~ 10.00	8.0 ~ 50.0	35 ~ 50

表 3 相似系数表

C_γ	C_E	C_μ	C_{Rc}	C_{Rt}	C_C	C_f
0.9 ~ 1.2	0.9 ~ 2.0	0.2 ~ 1.2	1 ~ 1.9	1 ~ 2	0.7 ~ 3.9	1.0 ~ 1.3

白砂岩和模拟材料的物理力学参数比较相近,基本符合相似理论中的关系,由此推定模型材料与白砂岩相似。

2.2 试件制作

本文试块一律采用定制的 $\varphi = 50\text{ mm}$, $h = 100\text{ mm}$ 铸铁模具,文中所提裂隙均采用 $20\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ 的塑料薄纸片预制,将塑料薄纸片用细扎丝固定在模具中间特定位置,然后浇筑预定配合比的水泥砂浆,形成一定倾斜角度的闭合裂隙岩样,室温养护 24 h 后脱模,放入养护箱中养护 28 d 成型。为保证试块强度满足要求,文中采用 42.5 普通硅酸盐水泥,为减小试块过程中的离散性,本实验采用过 5 mm 孔径筛余部分的细砂,及 SiO_2 含量为 96% 的微硅粉。

2.3 实验方案

将养护好的试块进行晾晒至恒重,剔除表面不平整的试块,然后进行分组编号,用弹模仪测定试块的纵波波速,按照分组放入高温炉中,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率对试块进行加温,加温到指定温度后,恒温保温 6 h 打开高温炉,进行自然冷却。

冷却完毕再次测定试块的纵波波速,并进行单轴抗压试验,试验采用应力控制,以 0.8 MPa/s 的速率沿轴向施加荷载,直至试件破坏,试验数据由系统自动采集。

3 试验结果分析

3.1 纵波波速

超声脉冲法在固体力学中应用相当广泛。在固体材料中波速的传播速率依赖于该材料的弹性特性和组织结构。岩石试块高温冷却后,其内部组织结构发生变化,结构内部出现热裂纹。为了解高温作用后试块的组织结构的变化,本文采用 V-METER III 超声脉冲速度测试仪测试纵波波速,每组取平均

值,见图 1。

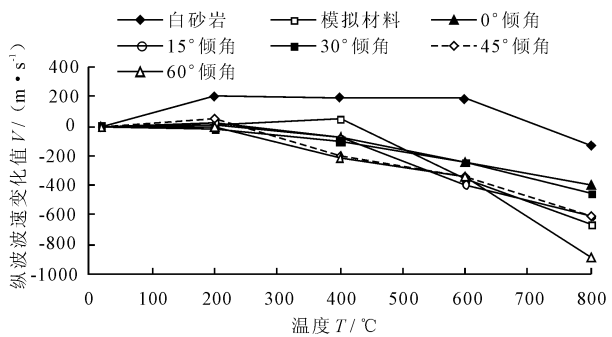


图 1 纵波波速温度变化图

由图 1 可知,白砂岩在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前纵波波速变化不大,相对常温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时纵波波速还有所增加,超过 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后,纵波波速开始下降,降幅约 5%,但对于模拟材料,纵波波速在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前,都会稍微增大,超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,随着温度升高,纵波波速开始下降,且降幅越来越大,到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,下降约 18%,不同倾角下纵波波速变化规律和模拟材料大体相当。

在相同温度,不同倾斜角度时情况下,随着倾斜角度的增大,纵波波速下降的越多,在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,纵波波速基本保持不变,在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,倾斜角度为 60° 时,纵波波速下降多达约 24%。

3.2 应力-应变关系

白砂岩试样和模拟材料试样在经历不同温度作用后,采用 SANS 微机控制电液伺服压力试验机进行单轴压缩试验。图 2 ~ 8 为不同温度作用后试样的典型全应力-应变曲线。

由图 2 ~ 图 8 可见岩石的应力-应变曲线基本经历了 4 个阶段:

- (1) 压密阶段,此时曲线呈上凹形,随着应力的增大,应变发展较快,主要是由于岩石内部孔隙的闭合,裂隙被压密造成的。该阶段的长短主要与裂隙的倾斜角以及加热的温度有关,在一定范围内,随着温度的升高,上凹段增长。
- (2) 弹性变形阶段,该阶段应力-应变关系基本呈直线,直线段的斜率就是平均切线弹性模量,随着温度的升高,直线的斜率越小,平均切线弹性模量越小。

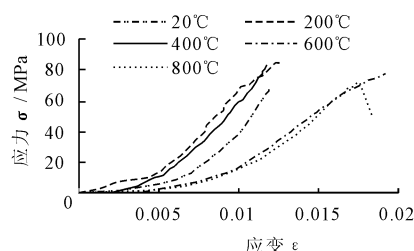


图2 白砂岩应力-应变曲线图

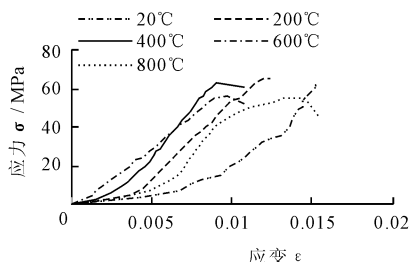


图3 模拟材料应力-应变曲线图

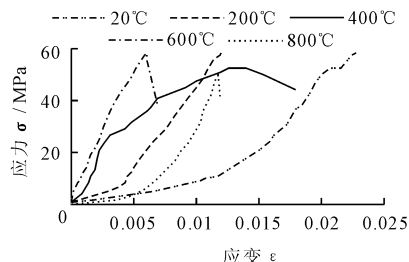


图4 0°裂隙应力-应变曲线图

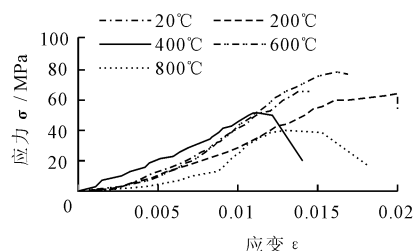


图5 15°裂隙应力-应变曲线图

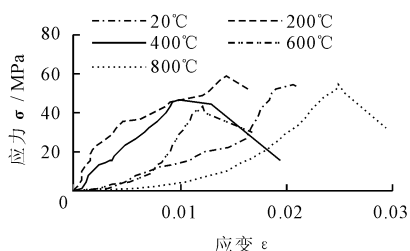


图6 30°裂隙应力-应变曲线图

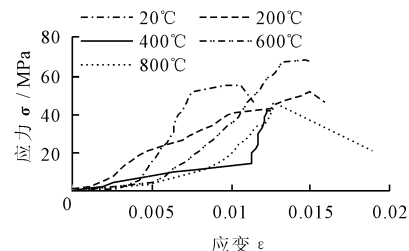


图7 45°裂隙应力-应变曲线图

(3) 塑性变形阶段,该阶段试件主要发生不可逆的塑性变形,也是试件中微裂纹的萌生、扩展及贯通的过程。该阶段曲线切线模量随着应变的增加不断下降,并随着温度的升高曲线出现明显的屈服阶段。

(4) 破坏阶段,该阶段试件强度达到最大值,应变急剧增长,最终发生脆性破坏。

从图1可知在400℃之前,白砂岩的应力-应变曲线上凹段减小,弹性变形阶段斜率增大,表明在400℃之前,白砂岩有所强化,表现出白砂岩特有的自愈性,超过400℃后,随着温度的升高,曲线上凹段不断增长,曲线越来越缓,表明试块的平均切线模量的减小,塑性变形阶段开始慢慢发展,峰值应变增加。

在600℃之前,随着温度的升高,模拟材料应力-应变关系,和白砂岩表现出来的特性大体相同,表明模拟材料在600℃之前材料性质也有所强化。这也体现了该材料与白砂岩有较高的相似性。含不同倾角的模拟材料的应力-应变图的趋势大体和模拟材料相同,但随着裂隙倾角增大,应力-应变关系图中曲线上凹段增长,曲线弹性阶段斜率下降,表明裂隙倾角对模拟材料有一定的损伤。但45°时是个转折点,超过45°后曲线上凹段又开始减小。

3.3 单轴抗压强度

图9为不同温度、不同裂隙倾角状态下试块的单轴抗压强度图。由图9可知,在400℃之前,白砂岩的单轴抗压强度随着温度的升高而增加,体现出白砂岩特有的自愈性。超过400℃后,随着温度的升高,白砂岩单轴抗压强度下降,在800℃时,单轴

抗压强度为61.1 MPa,较之常温下的70.7 MPa下降了约13.5%。

模拟材料的抗压强度在400℃之前基本保持不变,超过400℃后,随着温度的升高,试件单轴抗压强度下降,大体趋势和白砂岩基本一致。不同裂隙倾角试块的单轴抗压强度较之模拟材料均有所下降,在同一倾角的情况下,随着温度的升高,裂隙试块表现出来的规律和白砂岩大体一致。

在同一温度不同倾角的情况下,随着裂隙倾角的增大,裂隙试块单轴抗压强度下降,到45°时达到最小值。45°倾角裂隙试块在800℃时,强度为40 MPa,较之常温下的49.7 MPa下降了约23.4%,这个现象与陈新等^[23]研究的结果正好吻合。超过45°后,随着裂隙倾角的增大,裂隙试块强度有所增加,60°倾角试块的强度介于15°倾角和30°倾角之间,这个现象在应力-应变图中也有体现。

把模拟材料单轴抗压强度按照温度——对应放在坐标系中,可以发现数据点大致二次曲线规律变化,设试块单轴抗压强度随温度变化规律为:

$$F_{CR} = aT^2 + bT + c \quad (1)$$

将上述数据进行拟合得到参数 $a = -3.491 \times 10^{-5}$, $b = 0.0187$, $c = 59.96$

考虑裂隙对模拟材料单轴抗压强度的影响,可以乘以一个与角度有关的系数,即

$$F_{CR} = \theta(aT^2 + bT + c) \quad (2)$$

用常温下不同倾角的单轴抗压强度数据进行拟合可得

$$\theta = a_1 \sin^3 \alpha + b_1 \sin^2 \alpha + c_1 \sin \beta + d_1 \quad (3)$$

其中 $a_1 = 1.245, b_1 = -1.446, c_1 = 0.242, d_1 = 0.9518$

将 60° 倾角裂隙试块在不同温度下单轴抗压强度与拟合曲线对照, 见图 10。

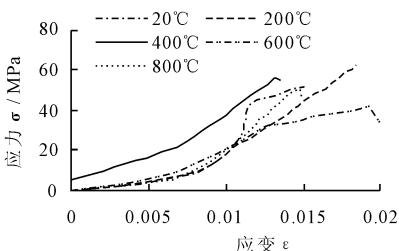


图 8 60° 裂隙应力-应变曲线图

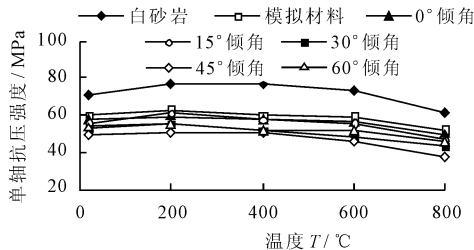


图 9 不同温度、裂隙倾角单轴抗压强度图

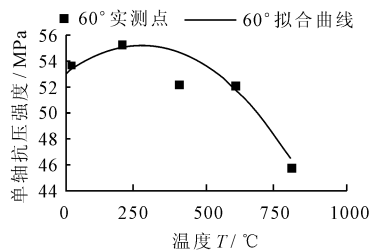


图 10 60° 裂隙倾角拟合曲线图

4 高温受荷裂隙岩体损伤演化方程

4.1 高温受荷裂隙岩石损伤本构关系

由上述实验可知, 随着温度和裂隙倾角的改变, 岩石试样的力学性能也随之改变。试块破裂的过程实际上是试块内部微裂纹的发展、聚集和贯通, 这个过程通常会导致材料力学性能的改变, 材料力学性能改变最直观的表现弹性模量的变化。因此可用试件的弹性模量来定义损伤变量, 高温引起的损伤 D_n 可表示为:

$$D_n = 1 - \frac{E_p}{E_0} \quad (4)$$

根据 Lemaitre 应变等价原理及张全胜等^[24]推广后的应变等价原理, 将岩石材料高温后的损伤状态看作第一种损伤状态, 高温荷载引起的损伤状态作为第二种损伤状态, 得到岩石材料两种损伤状态的本构关系分别为:

$$\sigma_n = E_0(1 - D_n)\varepsilon_n \quad (5)$$

$$\sigma = E_n(1 - D)\varepsilon \quad (6)$$

式中: E_n 为高温后的弹性模量。

将式代(6)入式(4), 可得到高温受荷岩体的应力-应变关系为:

$$\sigma = E_0(1 - D_t)\varepsilon \quad (7)$$

其中: $D_t = D_n + D - D_n D$

式中: D_t 为岩石高温受荷总损伤; D 为岩石受荷引起的损伤; $D_n D$ 为耦合项。

4.2 高温受荷裂隙岩石损伤演化方程

在加载过程中岩石材料的损伤不断累积, 损伤累积到一定程度就会发生破坏, 将此过程中损伤累积看作一个连续过程, 根据统计分布理论, 岩石内部细观缺陷的分布具有一定的随机性, 岩石材料在受

由图 10 可以看出, 拟合曲线和实测数据有很高的吻合度, 拟合公式基本可以反映出裂隙倾角及温度对试块单轴抗压强度的影响, 因此可以推定该公式具有一定的适用性。

到外界作用后, 内部的缺陷不断发展并萌生出新的微裂纹, 随着外界作用的加剧, 裂纹继续发展直至贯通, 进而形成宏观裂缝导致岩石破坏。由于岩石微元强度服从 Weibull 分布^[25], 因而可认为材料的损伤参量 D 也服从该统计分布。

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^m\right] \quad (8)$$

式中: ε 为材料应变; m 形状参数, 将(8)式代入(7)式有:

$$\sigma = E_0 \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^m\right] \varepsilon \quad (9)$$

在峰值应力前应力-应变关系图上有如下几何条件:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max}, \sigma = \sigma_{\max}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max}, d\sigma/d\varepsilon = 0$$

根据以上条件可求出, $m = 1/\ln\left(\frac{E\varepsilon_{\max}}{\sigma_{\max}}\right) =$

$$\frac{1}{\ln(E_0) - \ln(E_{\max})}, a = \frac{\varepsilon_{\max}}{(1/m)^{1/m}}$$

试件的本构关系为:

$$\sigma = E_0 \exp\left[-\frac{1}{m}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}\right)^m\right] \varepsilon \quad (10)$$

损伤演变方程为:

$$D = 1 - \exp\left[-\frac{1}{m}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}\right)^m\right] \quad (11)$$

进一步考虑温度对试块的损伤, 结合式(6)和式(7)有

$$D_t = 1 - \frac{E_n}{E_0} \exp\left[-\frac{1}{m}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}\right)^m\right] \quad (12)$$

由上式可以看出试件任一点的损伤值仅与试件的弹性模量、峰值应变、峰值应力和该点的应变有关, 材料的损伤形状参数 m 是弹性模量和峰值应变

对应的割线模量的函数, m 值越大, 材料趋向于弹性, m 值越小, 材料趋向于塑性。

当 $\varepsilon = 0$ 时 $D_t = 1 - \frac{E_n}{E_0} = 0$, 表示试块只受高温损伤; 当 $E_n = E_0$ 时 $D_t = 1 - \exp\left[1 - \frac{1}{m}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}\right)^m\right]$,

表示试块只受荷载损伤。
先根据实验测得的弹性模量值及最大峰值应力计算出的 m 值及最大应变见表 4。
根据以上数据可以画出这 6 组试块的高温受荷损伤曲线, 限于篇幅原因, 这里就不一一列出。

表 4 不同温度、裂隙倾角对应 m 值最大应变表

岩样编号	20℃		200℃		400℃		600℃		800℃	
	$\varepsilon_{\max}$	m 值	$\varepsilon_{\max}$	m 值	$\varepsilon_{\max}$	m 值	$\varepsilon_{\max}$	m 值	$\varepsilon_{\max}$	m 值
A	0.015	0.897	0.0106	1.327	0.0105	1.205	0.0119	1.110	0.013	0.919
B	0.0227	0.656	0.018	0.822	0.0125	1.058	0.0171	0.768	0.0157	0.720
C	0.0127	0.828	0.0129	0.989	0.0132	0.909	0.014	0.826	0.0176	0.655
D	0.0127	0.967	0.0109	1.116	0.0129	0.920	0.0136	0.767	0.0139	0.672
E	0.0164	0.780	0.016	0.819	0.013	0.877	0.0161	0.739	0.0182	0.620
W	0.0149	0.917	0.0132	1.089	0.0116	1.260	0.0129	1.033	0.0166	0.743

4.3 考虑温度及裂隙倾斜角度对损伤变量 D_n 的影响
将 W 完整模拟材料试块损伤变量按照温度对应关系放入坐标系中, 发现数据点变化规律基本符合二次曲线关系: $D_n = aT^2 + bT + c$, 将数据点进行拟合求出参数 $a = 9.776 \times 10^{-7}$, $b = -3.707 \times 10^{-4}$, $c = 9.372 \times 10^{-3}$ 。
在此基础上考虑裂隙倾角对损伤变量的影响, 在温度损伤的基础上乘一个与角度相关的系数 $D_n = \theta(aT^2 + bT + c)$ 。
将常温下各角度的损伤变量放入坐标轴中进行拟合, 发现 θ 大致与 $\sin\alpha$ 成三次曲线关系 $\theta = a_1\sin^3\alpha + b_1\sin^2\alpha + c_1\sin\beta + d_1$
这里 $a_1 = -300.6$, $b_1 = 348.1$, $c_1 = -65.43$, $d_1 = 10.57$ 。

5 结 论

本文研究了不同裂隙岩石在不同温度作用下的力学性能, 可以得出以下结论:
(1) 白砂岩及模拟材料的应力应变曲线大体分为四个阶段, 在 400℃ 之前, 升温可以改善材料的力学性能, 使得材料应力应变曲线上凹段减小, 弹性阶段曲线斜率上升, 超过 400℃ 后, 高温对材料力学性能有所劣化, 由此可以推定 400℃ 为白砂岩及模拟材料应力应变曲线的阈值。
(2) 从单轴抗压强度变化规律可以看出, 温度及裂隙倾角对材料单轴抗压强度均有一定影响, 在 400℃ 之前, 材料抗压强度有少量提高, 400℃ 以后开

始下降; 而随着裂隙倾斜角度的增大, 材料单轴抗压强度减小, 到 45° 后, 开始有所上升, 这与纵波波速测定结果相同。
(3) 根据实验测定的不同温度及倾斜角度下的单轴抗压强度值拟合的曲线, 具有比较高的吻合性, 基本可以反映裂隙倾角及温度对材料单轴抗压强度的影响, 具有一定适用性。
(4) 根据统计学原理及等效应变定理推导出高温受荷材料的损伤演化方程, 可以看出任一点的损伤值只与材料的弹性模量、峰值应力、峰值应变和改点的应变有关。
(5) 根据峰值应力、峰值应变计弹性模量计算出的材料损伤性参数可以看出, 400℃ 之前 m 值在不断增大, 反映出材料的弹性性能增强, 400℃ 之后, 随着温度的升高, m 值减小, 材料趋于塑性。

参考文献:

[1] Prudencio M, Jan M V S. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6):890-902.
[2] Park C H, Bobet A. Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: A comparison[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5):819-829.
[3] LI Yinping, CHEN Longzhu, WANG Yuanhua. Experimental research on pre-cracked marble under compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(9/10):2505-2516.

- [4] 梁正超,肖东坤,李聪聪,等. 断续节理岩体强度与破坏特征的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2086 – 2095.
- [5] 席婧仪,陈忠辉,朱帝杰,等. 岩石不等长裂纹应力强度因子及起裂规律研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 727 – 733.
- [6] 林鹏,黄凯珠,王仁坤,等. 不同角度单裂纹缺陷试样的裂纹扩展与破坏行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 5652 – 5657.
- [7] 张平,李宁,贺若兰,等. 动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1210 – 1217.
- [8] 杨圣奇,戴永浩,韩立军,等. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2391 – 2404.
- [9] 李银平,杨春和. 裂纹几何特征对压剪复合断裂的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 462 – 466.
- [10] 翟松韬,吴刚,张渊,等. 单轴压缩下高温盐岩的力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 105 – 111.
- [11] 尹光志,李小双,赵洪宝. 高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 598 – 604.
- [12] 傅国飞,徐洪武. 两种不同燧石中 α 石英 $\rightleftharpoons$ β 石英相变的研究[J]. 地质科学, 1992(1): 50 – 54.
- [13] 杨更社,谢定义,张长庆,等. 岩石损伤扩展力学特性的 CT 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 250 – 254.
- [14] 朱珍德,黄强,王剑波,等. 岩石变形劣化全过程细观试验与细观损伤力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1167 – 1175.
- [15] 张岩,李宁,于海鸣,等. 温度应力对裂隙岩体强度的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(21): 2660 – 2668.
- [16] Wong R H C, Chau K T, Tang C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock – like materials containing three flaws – Part I: experimental approach [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 909 – 924.
- [17] Tang C A, Lin P, Wong R H C, et al. Analysis of crack coalescence in rock – like materials containing three flaws – Part II: numerical approach [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 925 – 939.
- [18] 蒲成志,曹平,赵延林,等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3661 – 3666.
- [19] 赵程,鲍冲,松田浩,等. 数字图像技术在节理岩体裂纹扩展试验中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 944 – 951.
- [20] 李新平,路亚妮,王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2307 – 2315.
- [21] 李晓红,卢义玉,康勇,等. 岩石力学实验模拟技术 [M]. 北京:科学出版社, 2007, 6 – 24.
- [22] 左保成,陈从新,刘才华,等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1805 – 1808.
- [23] 陈新,李东威,王莉贤,等. 单轴压缩下节理间距和倾角对岩体模拟试件强度和变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2236 – 2245.
- [24] 张全胜,杨更社,任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30 – 34.
- [25] 吴政,张承娟. 单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 55 – 61.