

引文格式:付鹏,亓宪寅,王胜伟,等.高温作用后层状复合岩石单轴压缩试验损伤机理研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(4):139-150.
FU Peng, QI Xianyin, WANG Shengwei, et al. Study on damage law of layered composite rock under uniaxial compression test after high temperature[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(4): 139-150.

DOI:10.19815/j.jace.2022.08002

高温作用后层状复合岩石单轴压缩试验损伤机理研究

付鹏¹, 亓宪寅^{1,2}, 王胜伟¹, 耿殿栋¹, 柯婷¹

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要:为研究深部环境中高温对层状复合岩石物理特性、变形破坏机制及损伤演化规律的影响,在层状复合岩石经过30、60、90、120、150、180℃高温后开展单轴压缩试验,同时采用声发射仪器监测岩石的破坏过程;以累计振铃计数为损伤变量,考虑高温引入初始损伤,利用复合等效方法得到层状复合岩石的弹性模量,依据裂纹轴向应变、累计振铃计数推导得到全过程应力-应变本构模型。结果表明:层状复合岩石经历高温后,在岩石的初始压密阶段,温度越高,岩石的延性越强;层状复合岩石峰值强度与温度呈负相关关系;声发射中的振铃计数与岩石损伤破坏过程中裂纹的萌生、延伸、扩展到贯通都有很好的对应关系;随着温度的升高,层状复合岩石由脆性向弹塑性转化,破坏模式由垂直劈裂破坏过渡为Y型剪切破坏;建立的全过程应力-应变本构模型可以较好地反映层状复合岩石的损伤演化规律,研究成果可为高温环境下的岩体工程研究提供参考。

关键词:层状复合岩石;高温;单轴压缩试验;声发射;本构模型

中图分类号:TU452

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)04-0139-12

Study on damage law of layered composite rock under uniaxial compression test after high temperature

FU Peng¹, QI Xianyin^{1,2}, WANG Shengwei¹, GENG Diandong¹, KE Ting¹

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: In order to study the effect of high temperature in deep environment on the physical properties, deformation and failure mechanism and damage evolution law of layered composite rocks, uniaxial compression tests were carried out on layered composite rock after high temperature of 30, 60, 90, 120, 150, 180 °C, and the failure process of rock was monitored by acoustic emission instrument. Taking the cumulative ringing count as the damage variable, considering the initial damage introduced by high temperature, the elastic modulus of layered composite rock was obtained by composite equivalent method. The whole-process stress-strain constitutive model was derived according to the axial strain of crack and the cumulative ringing count. The results show that after the layered composite rocks undergoes high temperature, the

higher the temperature, the stronger the ductility of the rocks in the initial compaction stage of the rock. The peak strength is negatively correlated with the increase of temperature after high temperature. The ringing count in acoustic emission is well corresponded with the initiation, extension, and coherence of cracks in the process of rock damage and failure. With the increase of temperature, the layered composite rock changes from brittle to elastic-plastic, and the failure mode changes from vertical splitting failure to Y-type shear failure. The established whole-process stress-strain constitutive model can well reflect the damage evolution law of layered composite rock. The research findings can provide reference for rock engineering in high temperature environment.

Key words: layered composite rock; high temperature; uniaxial compression test; acoustic emission; constitutive model

Author resume: QI Xianyin(1986-), male, PhD, associate professor, E-mail: qixianyin001@163.com.

0 引言

深部地下工程往往处于高温高压的环境,与常温状态相比,其岩石力学性能有较大差异^[1-2]。深度地层中以沉积岩为主的层状复合岩体是常见的岩体之一,油气开发和隧道开挖等工程活动广泛涉及这些深部地层,因此有必要针对温度作用下层状复合岩石力学性能开展试验与理论研究。

近年来,国内外学者针对层状复合岩石做了大量的研究工作,主要涉及试验研究^[3-6]、理论分析^[7-9]、数值模拟^[10-12]等方面。闫立宏等^[3]用胶水将3种单一岩石黏结成复合岩石,通过开展单轴压缩试验,分析单一岩石和层状复合岩石力学性能的差异。腾俊洋等^[4]将取自现场的页岩和泥岩加工成层状复合岩石,开展单轴压缩试验并结合声发射技术,探究组合方式对破坏模式的影响。刘立等^[5-6]采用声发射技术监测层状复合岩石的损伤演化过程,研究交界面对层状复合岩石整体力学特性的影响。阳友奎等^[7]利用复合等效方法将层状复合岩石等效为一种均质岩石,假设层状复合岩石的各层岩石是均质且各向同性,Jaeger^[8]建立了层状复合岩石破坏准则,Duveau等^[9]在Jaeger研究的基础上,提出广义Jaeger准则。王学滨^[10]采用拉格朗日元法,以弹性岩石和弹性-应变软化煤体为原型,建立煤岩两体模型,研究岩石高度对模型及煤体应力-应变曲线、煤体变形速率的影响,模拟煤体的变化过程。梁正召等^[11]使用RFPA2D软件对软硬互层模型开展单轴压缩模拟试验,研究软硬互层岩石的力学特性。Li等^[12]依据现场数据,开展物理模型试验和DEM数值模拟,分析了层状岩体开挖时的力学特性及损伤规律,为工程设计与后期施工提供了理论支撑。

上述学者大多考虑组合方式、交界面等对层状复合岩石物理力学特性的影响。事实上,高温环境的影响也是不可忽略的。陈国飞等^[13]研究发现大理岩在经历常温至800℃高温后,峰值强度及弹性模量随着温度增大而减小,而峰值应变则呈现相反的规律,随着温度增大而增大。朱合华等^[14]研究了3种不同岩石经历常温至800℃高温后力学性能的差异以及峰值应变、峰值应力与纵波波速的关系。

可以看出,已有研究的高温多设置在800℃,但地下工程埋深在1~6 km时,地温为40~180℃。靳军等^[15]在准噶尔盆地南缘西端的研究中表明,深度在3~6 km时,地温为92.9~137.4℃。任战利等^[16]以渭河盆地为研究对象,发现深度在1~6 km时,地温为40~180℃。因此,本文模拟实际岩层最高温度为180℃,并以30℃的温度梯度递减,共6个温度梯度,填补模拟岩层180℃以内高温试验研究的空缺。

本文在单轴试验的基础上结合声发射试验,观察高温前后岩石的外观特征变化规律,分析不同高温后岩石的强度特征、声发射参数等,探究层状复合岩石破坏阶段与声发射振铃参数之间的规律,以累计振铃计数为损伤变量,建立高温后层状复合岩石在单轴压缩下的本构关系,分析复合岩石损伤变化规律。

1 试验概况

1.1 试样准备

本次试验的研究对象是吉木萨尔盆地复合地层岩石,由于取材不便,本文先进行相似配比试验^[17],依据模型试验得到的试验结果分析工程实体的稳定性、安全性。原岩及相似材料参数如表1所示。

表 1 原岩及相似材料参数

Table 1 Raw rock and similar material parameters

材料	抗压强度/MPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
砂岩	188.20	0.27	2.63
相似砂岩	42.31	0.23	2.15
泥岩	151.30	0.31	2.51
相似泥岩	34.02	0.30	2.04

依据相似理论原理^[18],除几何尺寸满足相似外,还要求边界及应力条件、物理力学特性满足相应的相似规律。在不考虑围岩自重的情况下,原岩与模型试样的相似关系为

$$\left. \begin{aligned} C_L &= \frac{C_\sigma}{C_\gamma} \\ C_f &= C_\epsilon = C_\mu = C_\varphi = 1 \\ C_c &= C_\sigma = C_{\sigma_t} = C_{\sigma_c} = C_E \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: C_L 、 C_σ 、 C_γ 、 C_f 、 C_ϵ 、 C_μ 、 C_φ 、 C_c 、 C_{σ_t} 、 C_{σ_c} 、 C_E 分别为几何、应力、容重、内摩擦角、应变、泊松比、摩擦因数、黏聚力、抗拉强度、抗压强度、弹性模量相似比尺,其中 $C_L=3.2$, $C_\gamma=1.39$, $C_\sigma=4.448$ 。

相似材料一般包括骨料、胶凝材料和其他添加剂,骨料一般包括石英砂、铁粉等,胶凝材料包括水泥、石膏等,添加剂包括减水剂、消泡剂等。层状复合岩石是两种不同岩性的岩石胶结而成,考虑到深部底层岩石具有强度高、密度大等特点,参考前人的研究经验^[19-20],将水泥、石英砂、硅粉作为砂岩的相似材料,使其具有较高的强度和弹性模量;通过减小水泥和石英砂用量来模拟泥岩材料,使其具有相对较低的强度和弹性模量,从而达到模拟软硬层强度差异的效果。

相似模型试验要求模型材料与原岩拥有类似的结构和破坏特征,还要求主要的力学及变形性质与模拟岩石的岩性或结构相似。经历多次相似配比试验后,得到 6 种近似符合两类岩石的配合比,具体参数见表 2。综合分析后,与上述相似理论最相符的配比方案是 3 号和 6 号,3 号为类砂岩配比,6 号为类泥岩配比。

相似模型试验主要利用 150 mm×150 mm×300 mm 的长方体模具(图 1),定制 150 mm×0.8 mm×300 mm 规格钢片。在模具中部插入定制钢片将两类相似材料分层,此模具制作简单便捷且可操作性较高,便于脱模,适合批量制作层状复合岩石试件。层状复合岩石的制作过程如图 2 所示。制作的试样加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准试件,软、硬岩分别为泥岩、砂岩,编号为 S-30-1~

表 2 相似材料配比方案及力学性能参数

Table 2 Similar material ratio scheme and mechanical properties parameters

编号	配合比	单轴强度/MPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
1	1 : 0.8 : 0.1 : 0.30 : 0.002 : 0.003	51.04	0.19	2.17
2	1 : 0.8 : 0.1 : 0.30 : 0.003 : 0.003	49.76	0.20	2.15
3	1 : 0.8 : 0.07 : 0.30 : 0.003 : 0.003	43.37	0.22	2.14
4	1 : 0.7 : 0 : 0.35 : 0 : 0.003	41.69	0.25	2.09
5	1 : 0.7 : 0 : 0.4 : 0 : 0.003	39.62	0.26	2.07
6	1 : 0.7 : 0 : 0.5 : 0 : 0.003	34.26	0.30	2.04



图 1 定制模具

Fig. 1 Customized mold

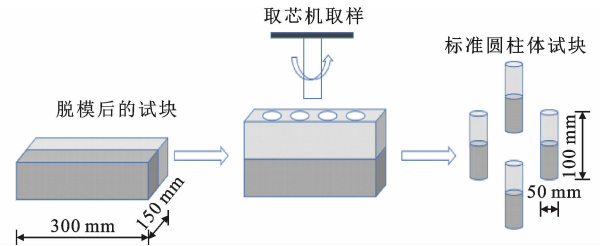


图 2 层状复合岩石制作过程

Fig. 2 Manufacturing process of layered composite rock

S-180-3,温度梯度为 30、60、90、120、150、180 °C,每个温度梯度为一组,一组有 3 个试件。在开展高温试验前,使用电子秤和游标卡尺分别称量层状复合岩石的质量、直径和高度,并观察高温前试件的颜色,具体试样见图 3。

1.2 试验方法

试验过程分为两步:一是高温处理试样,二是对高温加热后的层状复合岩石试样结合声发射系统进行单轴压缩试验。

高温处理时,首先分别将准备好的试样放进高



图3 复合岩石试样

Fig. 3 Composite rock sample

温炉。该高温炉工作室尺寸为 1 200 mm × 800 mm × 800 mm, 额定功率为 75 kW, 额定电压为 380 V, 加热速率为 5 °C · h⁻¹, 当温度达到设定值时, 为了保证试样的稳定性, 在高温炉内保温 2 h 后取出。取出试件后, 需要重新测量岩石的质量、直径和高度。

单轴压缩试验采用 HYAS-1000C 岩石三轴仪, 控制方式为位移控制, 控制值为 0.01 mm · s⁻¹。采用北京软岛科技 DS5 全波型声发射分析仪对试样的破坏过程进行实时监测。为了保证试验数据的准确性, 采用 8 个传感器采集信号。单轴试验和声发射仪器同步开始, 应力-应变数据及声发射参数数据被实时记录。试验操作系统具体见图 4。

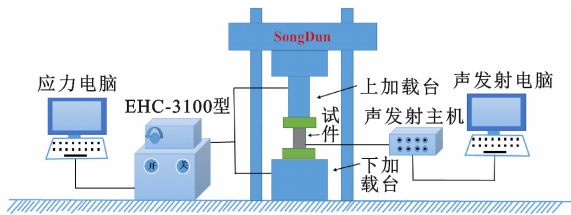


图4 试验操作系统

Fig. 4 Experimental operating system

2 试验结果及分析

2.1 高温作用后峰值强度的变化规律

类砂岩和类泥岩在经过高温作用后, 峰值强度与温度呈现负相关的关系。高温后 3 类岩石峰值强度-温度关系曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出, 层状复合岩石峰值强度的下降速度处于类砂岩和类泥岩之间。在低温时, 类砂岩内部原生孔隙较多, 此时类砂岩峰值强度下降速度较快; 随着温度升高, 类泥岩内部矿物颗粒黏结作用减弱, 孔隙随之扩展, 岩石抵抗变形的能力减弱。

图 6 为高温后层状复合岩石峰值强度变化趋势曲线。可以看出, 在同一温度下, 复合岩石的峰值强

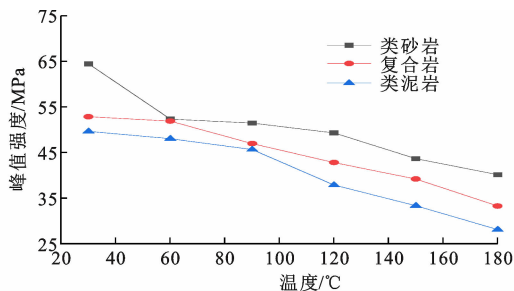


图5 高温后 3 类岩石峰值强度-温度关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of peak strength and temperature of three types of rocks after high temperature

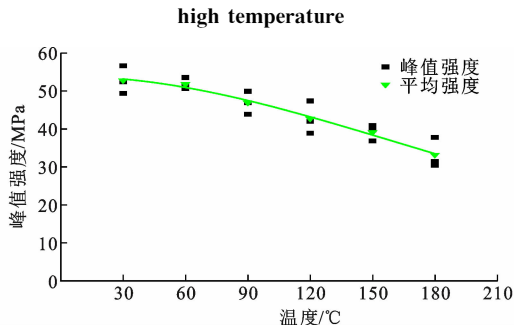


图6 高温后层状复合岩石峰值强度变化趋势曲线

Fig. 6 Trend curves of peak strength of layered composite rock after high temperature

度及峰值应变具有离散性, 但从整体出发, 复合岩石的峰值强度变化趋势十分明显, 峰值强度与温度变化呈负相关关系。在 30~60 °C 时, 峰值强度的变化不明显, 峰值强度下降 1.89%。历经高温后, 岩石内部的矿物颗粒不断发生碰撞、挤压, 新生裂纹不断产生。在 90 °C 时, 峰值强度变化幅度较大, 峰值强度降低了 10.49%。由此可知, 在高温作用下岩石内部的气体 and 岩石本身的骨架颗粒受热膨胀后产生热应力, 促使岩石颗粒产生延伸裂纹, 且高温作用后的岩石发生软化, 使塑性性能增强, 导致岩石的强度降低。高温作用会使复合岩石的延性增强, 随着温度的增加, 复合岩石内部的热粒子活动强烈, 减弱了矿物颗粒之间的内聚力, 使得复合岩石的晶粒面发生滑移的可能性增大。温度增高, 复合岩石内部裂纹扩展的可能性增大, 岩石的应变增加。

根据单轴试验得到的试验数据, 对高温后层状复合岩石的峰值强度与温度的关系进行拟合分析, 从图 6 可以看出, 两者指数关系十分明显, 由此得到拟合关系式为

$$y = -16.98 + 70.9 / [1 + (\frac{x}{280.98})^2] \quad (2)$$

2.2 高温作用后层状复合岩石全应力-应变曲线

高温后 3 类岩石全应力-应变关系曲线如图 7

所示。从图7(a)、(b)可知:单一类泥岩经历初始压密的时间长于单一类砂岩,单一类泥岩经历高温后,岩样内部的原生裂纹及孔隙不断压密闭合,延性增强;弹性阶段,单一岩石应力-应变曲线几乎呈直线;进入弹塑性阶段,岩样内部的微裂纹不断扩张、发展直至贯通;进入破坏阶段,单一岩样的承载力达到峰值,内部裂纹贯通形成宏大裂纹;随着温度的升高,单一岩样的塑性越来越明显,但应力达到峰值强度后依然具有一定的承载能力,阻止单一岩样极速破坏,使岩样从外部依然保证完整,表现出单一岩石软化特性。

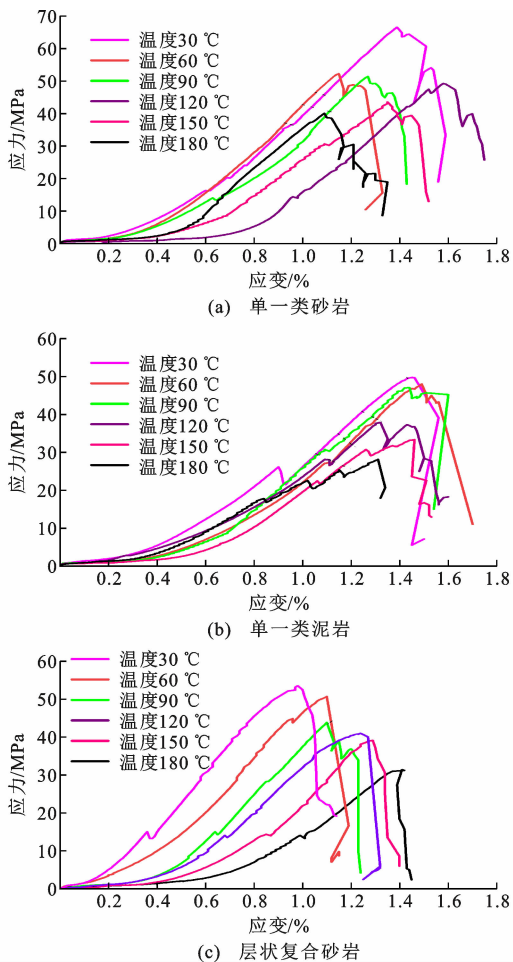


图7 高温后3类岩石全应力-应变关系曲线

Fig.7 Total stress-strain relationship curves of three types of rocks after high temperature

由图7(c)可知,历经高温后,复合岩石的全应力-应变曲线大致经历了初始压密、弹性变形、弹塑性变形和破坏4个阶段。首先是初始压密阶段,全应力-应变曲线整体呈上凹型,岩石的原生孔隙在荷载的作用下迅速紧闭,温度越高,层状复合岩石的延性越强,表现为曲线的压密阶段越长,岩石历经高温后温度越高,岩石内部的微裂纹越多;在弹性阶段,

应力-应变曲线近似呈线性关系,直线段的斜率即为层状复合岩石的弹性模量,直线的斜率随着温度的升高而降低,表明层状复合岩石弹性模量与温度呈反比关系;随后进入弹塑性阶段,岩石的应力-应变曲线呈现下凹状,并产生不可逆塑性变形,此时应力的变化幅度较小,而应变的增加幅度较大,温度越高,复合岩石的塑性特征越突出;最后是破坏阶段,复合岩石的峰值强度达到最大,岩石内部发生破坏,但破坏后的复合岩石仍然具有一定的承载能力,阻止岩样极速破坏,使岩样从外部依然保持完整。

2.3 高温作用后层状复合岩石声发射特征

声发射的振铃计数是岩石阶段性活动与整体性活动的良好指标,可以很好地反映岩石损伤破坏过程中裂纹萌生、扩张到贯通的几个阶段,因此本文选用振铃计数对岩石的破坏过程进行分析。

图8为历经高温后层状复合岩石全应力-应变-时间-振铃计数关系曲线。可以看出,层状复合岩石全应力-应变曲线与声发射振铃计数曲线有很好的对应关系。在压密阶段,声发射振铃计数比较少,这是因为在试验初期,复合岩石正处于能量累计阶段,复合岩石的原生微裂纹在压力作用下产生的微裂隙逐渐闭合,声发射信号极少。随着压力逐渐增大,复合岩石进入弹性阶段,声发射信号不断增强,并且有持续增强的趋势。此时,复合岩石的原生微裂纹闭合过程在压密阶段已经完成,新裂纹和孔隙继续萌生、扩展,并释放相应的能量。在弹塑性阶段,复合岩石应力的增长速率变慢,但声发射信号的增长迅速,且信号极强的声发射计数并不止一条,这是由于复合岩石内部持续出现裂纹并不断向四周扩展,表面出现十分明显的裂纹,并且伴随着声发射能量的迅速释放,所以应力逐渐到达峰值,声发射出现极强的振铃计数。破坏阶段,复合岩石抗压强度迅速减小,相应的声发射振铃计数也减小,此时复合岩石出现肉眼可见的破坏,裂纹由扩展到贯通,但依旧具有一定的承载能力应对变形,使岩样保持一定的完整性。

由图8还可知,复合岩石的声发射振铃计数与应力-应变曲线总是十分吻合,每一次振铃计数的突增,都表明岩石内部破坏的一次突变,且随着温度的升高,声发射振铃计数的峰值在逐渐减小。在常温时,振铃计数出现峰值的时间是84 s,在60 °C时,峰值时间是105 s,而在90 °C时,振铃计数出现峰值的时间是111 s,表明随着温度增加,层状复合岩石振铃计数到达峰值的时间逐渐后移。

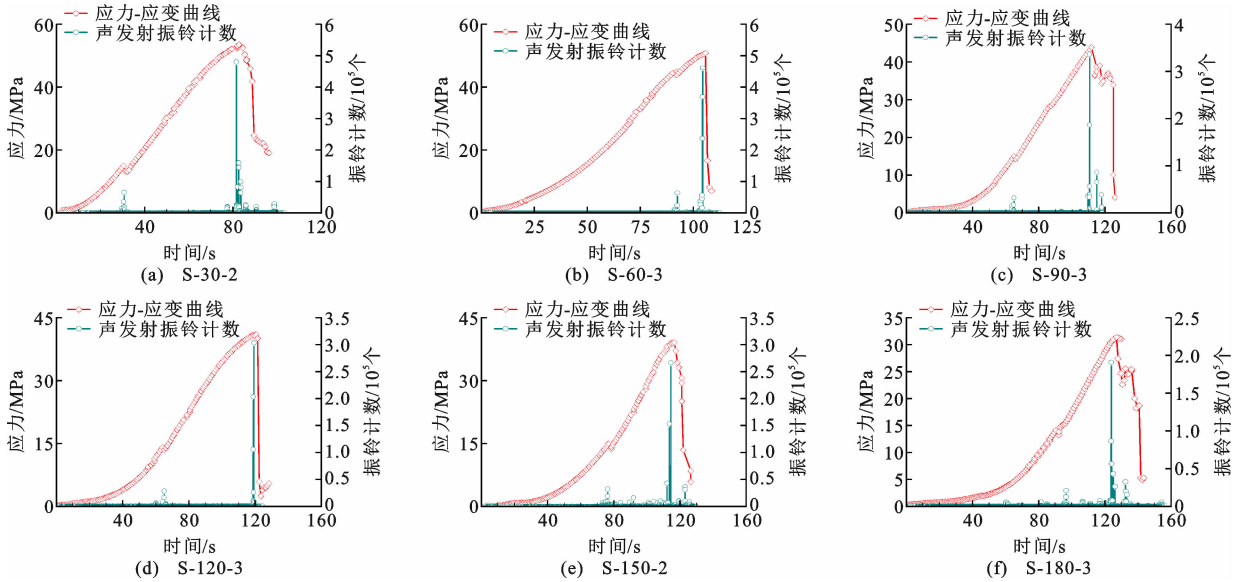


图 8 历经高温后层状复合岩石全应力-应变-时间-振铃计数关系曲线

Fig. 8 Total Stress-strain-time-ringing count relationship curves of layered composite rock after high temperature

历经高温后层状复合岩石累计振铃计数与时间的关系曲线如图 9 所示。由图 9 可知:常温下,初始压密阶段大概在 30 s 内,而在 120 °C 时,同为层状复合岩石的初始压密阶段,60 s 内声发射累计振铃计数依旧在缓慢增长,表明在经过高温作用后,岩石的延性增强,初始压密阶段延长;进入弹性阶段后,累计振铃计数依旧在增长,但增长幅度较小;进入弹塑性阶段后,累计振铃计数快速增长,可以与弹性阶段区分开来,但是声发射累计振铃计数的增长趋势比常温状态下小;进入破坏阶段,尽管经过高温后的岩石依旧有很少的声发射活动,但累计振铃计数表现不明显,增长十分缓慢。

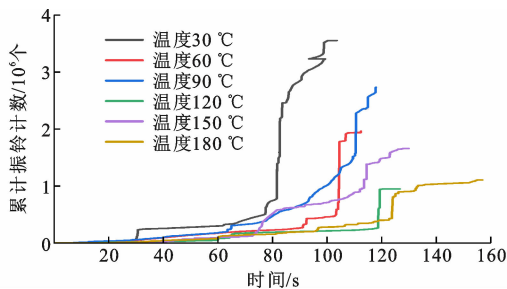


图 9 历经高温后层状复合岩石累计振铃计数与时间的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between accumulated ringing count and time of layered composite rock after high temperature

2.4 高温作用后层状复合岩石的破坏特征

层状复合岩石在历经高温后,岩石的性质发生了一定程度的改变,内部颗粒组合方式的改变造成

复合岩石破坏规律的差异。本文通过相似模型试验制作了大量的试样,单一岩石和层状复合岩石共 200 个试样。经历单轴压缩试验后发现同一温度的试件具有典型的破坏特征,因破坏规律相似且论文篇幅有限,所以本文未能列出所有岩样的破坏模式图,每个温度只选取一张图片来分析单一岩石及复合岩石的破坏特征,如图 10 所示。

从图 10 中看出,复合岩石历经高温的破坏模式以穿越界面层的轴向劈裂为主的脆性破坏和剪切破坏为主,并非沿着交界面发生破坏。复合岩石经过高温作用后,岩石的脆性减弱,延性增强。在较低温度时,温度产生的热应力造成主应力改变,应力集中使岩样内部聚集和释放更多能量,脆性破坏程度明显增强,3 类岩石的破坏形式均以垂直劈裂为主,纵向裂缝周围很少有横向的微小裂纹,岩石内部的孔隙结构在历经高温作用后产生的热应力可以阻止裂纹的进一步扩展。随着温度升高,岩样内部的热分子愈加活跃,矿物颗粒黏结能力减弱,晶粒面更容易产生滑移,岩石由脆性向弹塑性转换,复合岩石内部出现较多裂纹,岩样破坏主要以 Y 状剪切破坏为主。

3 高温后复合岩石的损伤本构方程

3.1 损伤变量及其演化规律

研究表明,累计振铃计数的变化幅度与岩石内部裂纹的产生、分散、延展直至贯通等演化过程有一定的关联^[21],因此以累计振铃计数为切入点,分析岩石损伤破坏过程。刘保县等^[22]基于振铃计数和

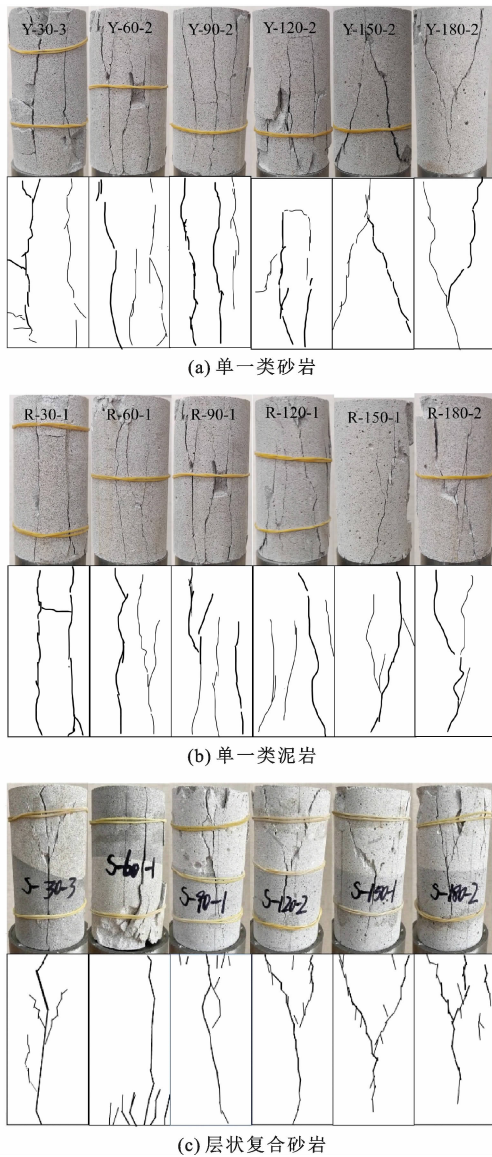


图10 历经高温后3类岩石在单轴压缩试验中的破坏模式

Fig. 10 Failure modes of three types of rocks under uniaxial compression test after high temperature

累计振铃计数建立损伤变量,本文考虑层状复合岩石经历过高温作用,引入初始损伤计算损伤变量,如式(3)、(4)所示。

$$D = D_i + D_u \frac{C_d}{C_o} = \frac{\sigma_k}{\sigma_n} + (1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p}) \frac{C_d}{C_o} \quad (3)$$

$$\sigma_k = \sigma_m - \sigma_n \quad (4)$$

式中: D 为损伤变量; D_i 为层状复合岩石经历不同高温后的初始损伤值; D_u 为损伤临界值; C_d 为加载过程中各个阶段的累计振铃计数; C_o 为单轴试验中整个加载过程的累计振铃计数; σ_p 为峰值强度; σ_c 为残余强度; σ_k 为常温下与高温后复合岩石的峰值强度差值; σ_m 为常温下复合岩石的峰值强度; σ_n 为高温作用后复合岩石的峰值强度。

由式(3)得到单轴压缩下层状复合岩石轴向应变-轴向应力和轴向应变-损伤变量的关系曲线,如图11所示。从图11可以看出,层状复合岩石在单轴压缩试验下,损伤破坏过程所经历的4个阶段与岩石渐进破坏的4个阶段基本相似。在初始损伤阶段,复合岩石的损伤变量极小,岩石原生裂纹处于紧闭状态,微小作用力无法造成裂纹的分散扩张,并没有产生新生裂纹;进入损伤稳定增长阶段,岩样的原生裂纹逐渐扩展,并萌发新的裂纹,损伤变量随着轴向应变的增长而稳定增长;进入损伤加速增长阶段,声发射急剧增加,在荷载的作用下,层状复合岩石不断萌生新的裂纹,并与原生孔隙不断交汇,最终贯通,形成贯通性主裂纹,弹性能急速释放,声发射活动十分激烈,表现为岩石的损伤变量上升速度极快;最后进入损伤破坏阶段,复合岩石出现贯通性主裂纹后进入残余变形阶段,与岩石的破坏阶段相对应,损伤变量进入一个平静期,增长十分缓慢。图11中损伤变量的演化过程与层状复合岩石初始阶段原生裂纹的紧闭、弹性阶段裂纹的稳定扩展、弹塑性阶段裂纹的非稳定扩展到出现宏观裂纹直至破坏的整个过程有一个很好的呼应。

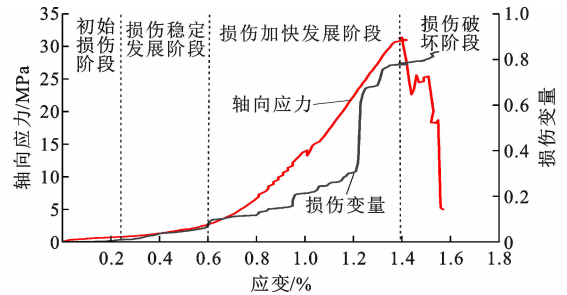


图11 单轴压缩下层状复合岩石轴向应变-轴向应力和轴向应变-损伤变量的关系曲线

Fig. 11 Relationship curves of axial strain-axial stress and axial strain-damage variable of layered composite rock under uniaxial compression

历经不同温度后层状复合岩石轴向应变与损伤曲线如图12所示。从图12可知,经历过高温的层状复合岩石的初始压密阶段延长,并且温度越高,压密阶段越长,表明经过高温作用后,岩石的延性作用增强。同时,温度越高,复合岩石损伤变量快速增长时的轴向应变越大,随着轴向应变的增大,岩石的破坏过程变得缓慢。高温会对岩石造成不同程度的初始损伤,温度越高,对初始损伤的影响越大。

3.2 基于声发射的层状复合岩石损伤本构模型

本文研究对象是层状复合岩石,其变形特征与各层岩石的岩性相关,因此不能简单将单一岩石本

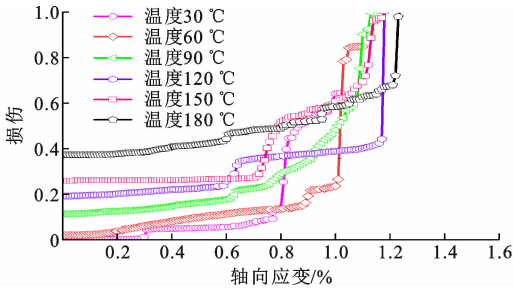


图 12 历经不同温度后层状复合岩石轴向应变与损伤曲线
Fig. 12 Curves of axial strain and damage of layered composite rock after different temperatures

构模型直接运用到层状复合岩石本构模型中,但是鲜学福等^[23-24]指出,层状复合岩石的交界面厚度非常小,可以忽略不计,并且交界面两侧岩样岩性均匀,应力、应变在层状复合岩石中具有连续性,因此可通过弹性模量反映层状复合岩石力学特性,以此为基础建立层状复合岩石损伤本构模型。依据 Jean^[25]提出的应变等效假说,利用复合等效方法对层状复合岩石进行等效处理,基于广义胡克定律,建立层状复合岩石应力-应变损伤本构方程,此方法中层状复合岩石的力学特征以复合弹性模量的形式来体现,层状复合岩石的弹性模量计算如式(5)所示。

$$\frac{\sigma}{E}L = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{E_i}\sigma \quad (5)$$

$$\frac{1}{E} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{E_i L} = \frac{L_1}{E_1 L} + \frac{L_2}{E_2 L} + \frac{L_3}{E_3 L} + \dots + \frac{L_n}{E_n L} \quad (6)$$

式中: σ 为主应力; E 为弹性模量; L 为层状复合岩石的高度; L_i 为层状复合岩石中第*i*层岩石的高度; E_i 为层状复合岩石中第*i*层岩石的弹性模量。

层状复合岩石的弹性模量 E_β 为

$$\frac{1}{E_\beta} = \frac{L_1}{E_1 L} + \frac{L_2}{E_2 L} \quad (7)$$

$$E_\beta = \frac{E_1 E_2 L}{E_1 L_2 + E_2 L_1} \quad (8)$$

式中: L_1 、 L_2 为层状复合岩石中类砂岩、类泥岩的高度; E_1 、 E_2 为层状复合岩石的类砂岩、类泥岩的弹性模量。

依据式(3)和连续损伤力学建立的单轴压缩试验下的复合岩石本构模型为

$$\sigma = (1-D)E_\beta \varepsilon = [1-D_0 - (1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p}) \frac{c_d}{c_o}] E_\beta \varepsilon \quad (9)$$

刘保县等^[22]建立的损伤本构方程在一定程度上能反映岩石的损伤演化过程,但在试验与理论应力-应变曲线对比中发现,岩石在到达峰值强度前期

理论曲线呈现线性关系,与试验曲线经历初始压密、开始增长、稳定增长呈线性关系等渐进性破坏有所不同。因为在初始压密阶段,声发射信号数极少,导致 σ_c 与 σ_p 的比值极小,从而使 $1-D$ 的值几乎无变化。由式(9)可知,岩石处于初始压密阶段时,轴向应力与轴向应变存在线性关系,且随应变增大而增大,与实际的试验结果不符。因此,为了更好地描述岩石初始阶段的损伤破坏过程,本文将采用分段函数的方式建立损伤本构方程,在初始压密阶段采用基于有效介质理论建立负指数模型,在初始压密阶段后建立基于累计振铃参数的本构模型。

3.2.1 初始压密阶段的负指数模型

在岩石的初始压密阶段,基于有效介质理论^[26],基质轴向应变 ε^m 和裂纹轴向应变 ε^c 共同组成岩石的轴向应变,如式(10)所示。

$$\varepsilon = \varepsilon^m + \varepsilon^c \quad (10)$$

依据胡克定律,岩石的基质轴向应变、裂纹轴向应变分别为

$$\varepsilon^m = \frac{\sigma}{E_\beta} \quad (11)$$

$$\varepsilon^c = a[1 - \exp(-\frac{\sigma}{b})] \quad (12)$$

式中: a 、 b 为拟合常数。

依据式(10)~(12)求出历经不同高温后复合岩石的裂纹轴向应变、轴向应力与裂纹轴向应变的关系曲线,如图 13 所示。可以看出,复合岩石的裂纹轴向应变随着应力的增加而增加,且温度越高时,岩石的裂纹轴向应变的增长幅度越大,曲线最终趋向稳定,与负指数模型的特征十分符合。

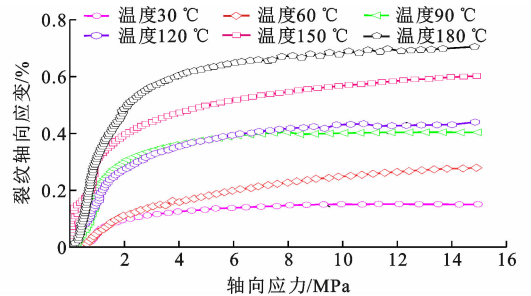


图 13 层状复合岩石轴向应力与裂纹轴向应变的关系曲线
Fig. 13 Relationship curves between axial stress and crack axial strain of layered composite rock

运用式(12)进行拟合,得到历经高温后复合岩石的力学参数,如表 3 所示。可以看出 a 值与温度的增长呈正相关关系,温度越高, a 值越大, a 值反映复合岩石的延性作用;随着温度的增加,岩石初始压密阶段的脆性有一定的减弱,延性特性愈加

表 3 历经不同高温后复合岩石的力学参数

Table 3 Mechanical parameters of composite rocks after different high temperatures

温度/℃	a	b	R^2
40	0.150 899	2.466 686	0.98
60	0.286 596	1.891 125	0.99
90	0.407 548	1.812 479	0.97
120	0.426 044	2.104 279	0.99
150	0.551 560	1.514 194	0.97
180	0.687 998	1.847 662	0.99

突出,这与第 2.3 节分析结果是一致的。从模型的拟合系数来看,该模型的拟合效果极好。

ϵ^c 与岩石的密度有一定的关联,假设轴向应力的函数为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_\beta} + \epsilon^c \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)得到初始压密阶段的应力-应变关系为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_\beta} + a[1 - \exp(-\frac{\sigma}{b})] \quad (14)$$

将数据代入式(14),可以得到历经高温后复合岩石初始压密阶段的理论结果与试验结果的对比,如图 14 所示。可以看出,试验结果与理论模型的拟合结果极为相似,表明初始压密阶段的理论模型具有一定的参考意义。

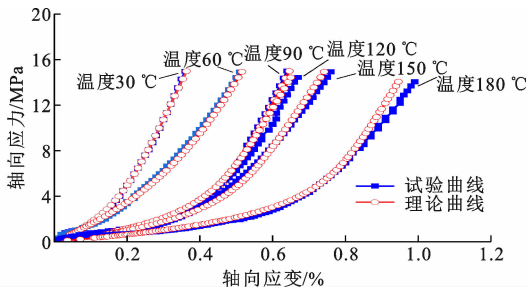


图 14 层状复合岩石初始压密阶段试验结果与理论结果的对比

Fig. 14 Comparison of experimental results and theoretical results in initial compaction stage of layered composite rock

3.2.2 初始压密阶段后基于累计振铃参数的本构模型

依据第 2.3 节的分析,在岩石的初始压密阶段,岩石正处于能量累计的阶段,声发射信号数极少;进入弹性阶段后,声发射信号不断增强,并且有持续增强的趋势。因此以轴向应力持续增加时的应变开始计算岩石的振铃计数,从而得到初始压密阶段后以累计振铃参数为损伤变量的本构模型,如式(15)所示。

$$\sigma = (1 - D) E_\beta (\epsilon - \epsilon^c) = [1 - D_0 - (1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p}) \frac{C'_d}{C'_0}] E_\beta (\epsilon - \epsilon^c) \quad (15)$$

式中: C'_d 为从裂纹轴向应变 ϵ^c 开始计算各阶段的累计声发射振铃计数; C'_0 为岩石全过程中的累计声发射振铃计数; ϵ^c 为裂纹闭合阶段末端点作切线交与 x 轴的切点。

利用式(15),就可以得到初始压密阶段后试验曲线与理论曲线的对比,如图 15 所示。可以看出,试验曲线与理论曲线拟合较好,说明以累计振铃计数为损伤变量的本构模型可以表征复合岩石的破坏特征。

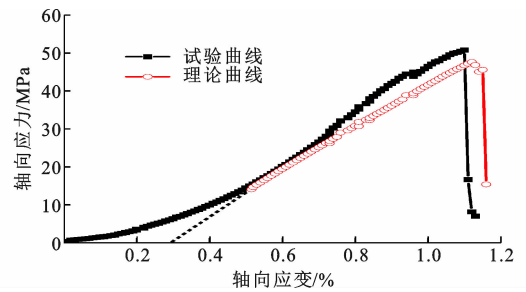


图 15 层状复合岩石初始压密阶段后试验结果与理论结果的对比

Fig. 15 Comparison of experimental results and theoretical results of layered composite rock after initial compaction stage

3.3 全过程应力-应变本构模型

结合上文,通过岩石的原生裂纹压密特征以及以累计振铃计数为损伤变量的本构模型,得到层状复合岩石的全过程应力-应变本构模型,如式(16)所示。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma}{E_\beta} + a[1 - \exp(-\frac{\sigma}{b})] & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ \sigma &= [1 - D_0 - (1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p}) \frac{C'_d}{C'_0}] E_\beta (\epsilon - \epsilon^c) & \epsilon > \epsilon_0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

通过式(16)可以得到历经不同高温后全应力-应变试验曲线与理论曲线的对比,如图 16 所示。可以看出,试验曲线与理论曲线拟合较好,表明该模型可以反映层状复合岩石经历高温后的损伤演化过程,例如岩石在加载过程中经历初始损伤阶段、损伤稳定发展阶段、损伤加速发展阶段、损伤破坏阶段,尤其是可以较好地反映高温使层状复合岩石初始压密阶段延性增强的特征,可用于高温作用后层状复合岩石损伤特性研究,从而为层状复合岩石的研究提供依据。但在此模型中,破坏阶段依旧具有一定承载力的特征并没有很好的反映出来,主要是既有

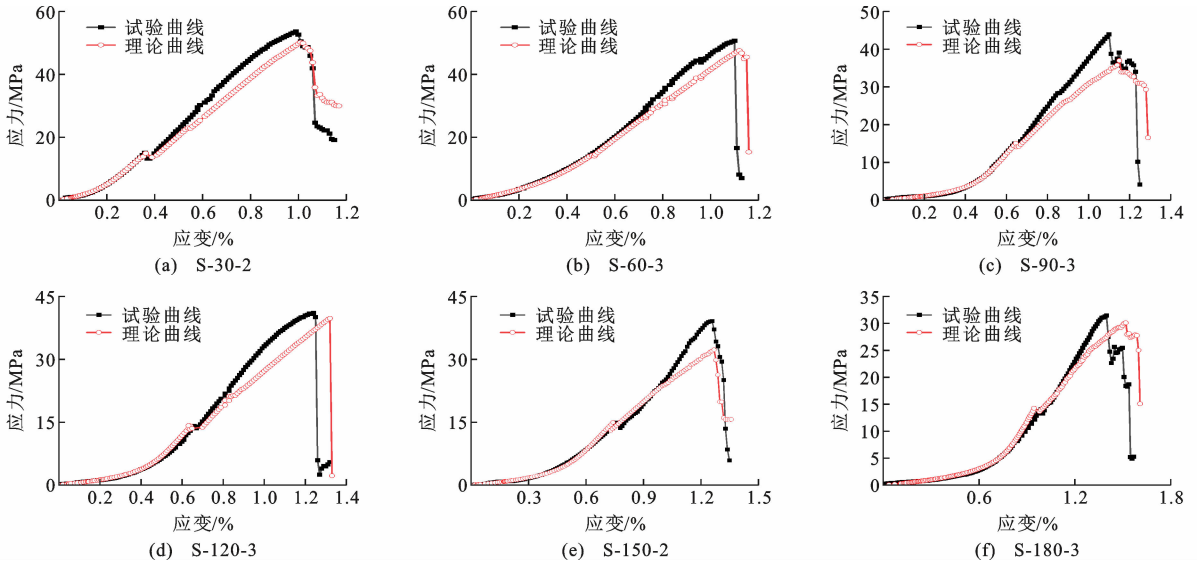


图 16 历经不同高温后全应力-应变关系的试验曲线与理论曲线对比

Fig. 16 Comparison of experimental and theoretical curves of total stress-strain relationship after different high temperatures

试验本身的缺陷,也有模型本身的不足,为了提高模型的准确性和适用性,后期将对模型的改进作进一步的研究。

4 结语

(1)层状复合岩石经历高温后,在单轴压缩过程中表现出初始压密、弹性变形、弹塑性变形和破坏 4 个阶段,且温度越高,岩石的延性越强,主要体现在岩石的初始压密阶段。

(2)历经高温后,峰值强度与温度呈负相关关系,高温使层状复合岩石内部的矿物颗粒受热后发生膨胀,并产生若干裂纹。

(3)在较低温度时,热应力集中导致应力集中,使岩样聚集更多能量,脆性破坏程度增强,层状复合岩石以轴向劈裂为主的脆性破坏为主,形成上下贯通的主裂缝,随着温度的升高,岩石由脆性破坏向弹塑性破坏转换,破坏模式为 Y 型剪切破坏。

(4)建立基于累计振铃计数的损伤变量,考虑岩石的温度作用,在此基础上引入温度初始损伤,同时对复合岩石进行等效复合处理,得到层状复合岩石弹性模量,由裂纹轴向应变、累计振铃计数推导得到了全过程应力-应变本构模型,该模型可以较好地反映层状复合岩石的力学性能。

参考文献:

References:

[1] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Mechanical behaviour of Australian Strathbogie

granite under in-situ stress and temperature conditions; an application to geothermal energy extraction [J]. *Geothermics*, 2017, 65: 44-59.

[2] BAI F T, SUN Y H, LIU Y M, et al. Evaluation of the porous structure of Huadian oil shale during pyrolysis using multiple approaches [J]. *Fuel*, 2017, 187: 1-8.

[3] 闫立宏, 李正伦. 复合层状岩石力学性质试验研究 [J]. *阜阳师范学院学报(自然科学版)*, 1997, 14(4): 9-11.

YAN Lihong, LI Zhenglun. Mechanical properties test and study on composite layer rock [J]. *Journal of Fuyang Normal University (Natural Sciences)*, 1997, 14(4): 9-11.

[4] 腾俊洋, 唐建新, 王进博, 等. 层状复合岩体损伤演化规律及分形特征 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增 1): 3263-3278.

TENG Junyang, TANG Jianxin, WANG Jinbo, et al. Damage evolution law and fractal characteristics of layered composite rock mass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3263-3278.

[5] 刘立, 邱贤德, 黄木坤, 等. 层状复合岩石损伤破坏的实验研究 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 1999, 22(4): 28-32.

LIU Li, QIU Xiande, HUANG Mukun, et al. Experimental study on damage and breakage of bedded composite rock [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 1999, 22(4): 28-32.

[6] 刘立, 王辉, 王泽云. 层状复合岩石的层面与整体力学特性研究 [C] // 中国岩石力学与工程学会. 第八

- 次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 成都:科学出版社,2004:171-175.
- LIU Li, WANG Hui, WANG Zeyun. Research on mechanical characteristics between layers and whole of stratified composite rock [C]//Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering. Proceedings of the 8th Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering Annual Academic Conference. Chengdu: Science Press, 2004:171-175.
- [7] 阳友奎, 蒋为民. 复合岩石的破坏准则[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1990, 13(6):19-25.
- YANG Youkui, JIANG Weimin. A failure criterion of composite rock[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1990, 13(6):19-25.
- [8] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geological Magazine, 1960, 97(1):65.
- [9] DUVEAU G, SHAO J F. A modified single plane of weakness theory for the failure of highly stratified rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(6):807-813.
- [10] 王学滨. 煤岩两体模型变形破坏数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(7):1066-1070.
- WANG Xuebin. Numerical simulation of deformation and failure for two bodies model composed of rock and coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7):1066-1070.
- [11] 梁正召, 唐春安, 李厚祥, 等. 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1):57-62.
- LIANG Zhengzhao, TANG Chunan, LI Houxiang, et al. Numerical simulation of fracture process of trans-versely isotropic rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1):57-62.
- [12] LI Y, QI T Y, LEI B, et al. Deformation patterns and surface settlement trough in stratified jointed rock in tunnel excavation[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(7):3188-3199.
- [13] 陈国飞, 杨圣奇. 高温后大理岩力学性质及其破坏规律研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8):189-196.
- CHEN Guofei, YANG Shengqi. Study on failure mechanical behavior of marble after high temperature [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8):189-196.
- [14] 朱合华, 闫治国, 邓涛, 等. 3种岩石高温后力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10):1945-1950.
- ZHU Hehua, YAN Zhiguo, DENG Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, granite and breccia after high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10):1945-1950.
- [15] 靳军, 刘明, 刘雨晨, 等. 准噶尔盆地南缘下组合现今温压场特征及其控制因素[J]. 地质科学, 2021, 56(1):28-43.
- JIN Jun, LIU Ming, LIU Yuchen, et al. Present-day temperature-pressure field and its controlling factors of the lower composite reservoir in the southern margin of Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2021, 56(1):28-43.
- [16] 任战利, 刘润川, 任文波, 等. 渭河盆地地温场分布规律及其控制因素[J]. 地质学报, 2020, 94(7):1948-1949.
- REN Zhanli, LIU Runchuan, REN Wenbo, et al. Distribution of geothermal field and its controlling factors in the Weihe Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):1948-1949.
- [17] 刘永莉, 周文佐, 郭斌, 等. 相似模型实验中泥灰岩相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增1):2795-2803.
- LIU Yongli, ZHOU Wenzuo, GUO Bin, et al. Study on similar materials of marl in similar model experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1):2795-2803.
- [18] 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.
- LI Xiaohong, LU Yiyu, KANG Yong, et al. Simulation technology of rock mechanics experiment [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [19] 贾宝新, 苑文雅, 马超义, 等. 白砂岩相似材料配比试验及特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2):503-512.
- JIA Baoxin, YUAN Wenya, MA Chaoyi, et al. Ratio test and characteristic analysis of similar materials in white sand rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2):503-512.
- [20] 刘合, 王素玲, 姜民政, 等. 基于数字散斑技术的垂直裂缝扩展实验[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4):486-491.
- LIU He, WANG Suling, JIANG Minzheng, et al. Experiments of vertical fracture propagation based on the digital speckle technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4):486-491.
- [21] 翟松韬, 吴刚, 孙红, 等. 高温下大理岩的声发射特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2):177-183.
- ZHAI Songtao, WU Gang, SUN Hong, et al. Experi-

- mental study on acoustic emission characteristics of marble at high temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):177-183.
- [22] 刘保县,黄敬林,王泽云,等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1):3234-3238.
LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission characteristics of uniaxial compression coal and rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1):3234-3238.
- [23] 鲜学福,谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆:重庆大学出版社,1989.
XIAN Xuefu, TAN Xueshu. Failure mechanism of layered rock mass [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989.
- [24] 邱传传. 静载条件下层状复合岩石力学特性及本构模型研究[D]. 南昌:华东交通大学,2021.
QIU Chuanchuan. Study on mechanical properties and constitutive model of layered composite rock under static load[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [25] JEAN L. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2):233-245.
- [26] 郭清露,荣冠,姚孟迪,等. 大理岩热损伤声发射力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12):2388-2400.
GUO Qinglu, RONG Guan, YAO Mengdi, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics and mechanical behaviours of thermally damaged marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12):2388-2400.