

不同应力加载速率下深埋泥岩力学特性与扩容特征试验研究

李 可^{1,2,3}, 余伟健^{1,3}, 廖 泽¹, 郭涵潇¹, 潘 豹¹, KHAMPHOUVANH Viengvilay¹, 杨 杰¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 贵州理工学院 矿业工程学院, 贵州 贵阳 550003; 3. 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: 岩石工程的损伤破坏过程和其扩容现象密不可分, 扩容是岩石在偏应力超过屈服极限后表现出的体积增大的现象。为了进一步研究深埋泥岩扩容现象, 对矿山现场钻取的埋深近 1 300 m 的岩石试样做了系列试验, 包括 XRD 衍射试验、SEM 电镜扫描试验和不同加载速率下 (0.1、0.5、2.0 和 5.0 kN/s) 的单轴压缩变形试验等。结果表明: 泥岩成分以长石为主, 岩石内部各矿物成分分布不均匀, 长石呈条带状分布, 其间填充其他矿物, 填充物以绿泥石为主。在不同的加载速率下, 各试样轴向应力-应变曲线属典型的塑-弹-塑性曲线, 有明显的压密过程, 加载速率越小, 压密过程越明显, 即曲线越平缓。进入弹性阶段后, 加载速率越大, 曲线斜率越大, 即平均弹性模量越大。采用单因素方差分析方法对各组数据进行了差异显著性检验, 结果显示试验加载速率 (V_{load}) 和泥岩岩石单轴抗压强度 (σ_c)、平均弹性模量 (E)、最大轴向应变 ($\epsilon_{a,max}$)、最大径向应变 ($\epsilon_{d,max}$)、扩容起始应力 (f^*)、扩容起始应力与单轴抗压强度比值 (f^*/σ_c) 有关联关系, 和试样最大体积应变 ($\epsilon_{V,max}$)、扩容起始体积应变与最大体积应变比值 ($\epsilon_{V,d}/\epsilon_{V,max}$) 无关联关系。加载速率越大, 测试得到的泥岩岩石单轴抗压强度、平均弹性模量越大, 加载速率由 0.1 kN/s 增大 50 倍至 5.0 kN/s 时, 测得单轴抗压强度均值由 26.8 MPa 增大至 36.5 MPa, 平均弹性模量均值由 3.5 GPa 增大至 5.9 GPa。加载速率越大, 最大轴向应变和最大径向应变均越小, 轴向和径向应变率均越大, 即加载速率越大, 泥岩岩石在未充分变形的情况下发生破坏的可能性越大。加载速率越大, 试样扩容起始应力、试样扩容起始应力与单轴抗压强度比值越小, 即试样加载速率越大, 越容易进入体积扩容阶段。认为泥岩强度参数、变形与扩容参数有显著的应力加载速率依赖性。

关键词: 应力加载速率; 深埋泥岩; 力学强度; 扩容特征

中图分类号: TD315 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)09-3360-12

A laboratory-testing-based study on mechanical properties and dilatancy characteristics of deeply buried mudstone under different stress loading rates

LI Ke^{1,2,3}, YU Weijian^{1,3}, LIAO Ze¹, GUO Hanxiao¹, PAN Bao¹, KHAMPHOUVANH Viengvilay¹, YANG Jie¹

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Institute of Mining Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 3. Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, Xiangtan 411201, China)

收稿日期: 2022-10-18 修回日期: 2022-12-31 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1501

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51974117, 52174076); 贵州省科技计划资助项目 (黔科合基础-ZK[2022] 一般 176)

作者简介: 李 可 (1986—), 男, 河南周口人, 副教授, 博士研究生。E-mail: 20120016@git.edu.cn

通讯作者: 余伟健 (1978—), 男, 江西都昌人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: ywjlah@163.com

引用格式: 李可, 余伟健, 廖泽, 等. 不同应力加载速率下深埋泥岩力学特性与扩容特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3360-3371.

LI Ke, YU Weijian, LIAO Ze, et al. A laboratory-testing-based study on mechanical properties and dilatancy characteristics of deeply buried mudstone under different stress loading rates[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3360-3371.



移动阅读

Abstract: The damage and failure process of rock engineering is inseparable from rock dilatancy. Dilatancy is the phenomenon of rock volume increase after the differential stress exceeds the yield limit. X-ray diffraction, scanning electron microscope, and uniaxial compression tests under different stress loading rates (0.1, 0.5, 2.0, 5.0 kN/s) were carried out on mudstone specimens from drill holes in the mine site with a depth of nearly 1 300 m. The results demonstrate that the mudstone is mainly composed of plagioclase. The distribution of various minerals in the rock is not uniform. The main component plagioclase is distributed in strips, filled with other minerals, the filling material is mainly chlorite. Under different stress loading rates, the axial strain curves are typical plastic-elastic-plastic curves, and each specimen has an obvious micro-crack compaction process. The lower the stress loading rate, the more pronounced the compaction process, that is, the smoother the curve. In the elastic stage, the slope of the curve increases as the stress loading rate increases, indicating that the rock's elastic modulus rises. The one-way analysis of variance method was used to test the significance of the differences in each analysis item's data. The results indicate that the stress loading rate (V_{load}) is related to the uniaxial compressive strength (σ_c), elastic modulus (E), maximum axial strain ($\varepsilon_{a,max}$), maximum radial strain ($\varepsilon_{d,max}$), the initial dilatancy strength (f^*), and the ratio of the initial dilatancy stress to the uniaxial compressive strength (f^*/σ_c) of mudstone. It does not correlate with the maximum volumetric strain value ($\varepsilon_{V,max}$), and the ratio of the initial dilatancy volumetric strain to the maximum volumetric strain ($\varepsilon_{V,d}/\varepsilon_{V,max}$). As the V_{load} increases, σ_c and E increase, when V_{load} increases 50 times from 0.1 kN/s to 5.0 kN/s, the measured σ_c increases from 26.8 MPa to 36.5 MPa, and E increases from 3.5 GPa to 5.9 GPa. The $\varepsilon_{a,max}$ and $\varepsilon_{d,max}$ decrease with increasing V_{load} while axial and radial strain rates increase. Hence, the likelihood of failure of mudstone rock under insufficient deformation increases with increasing V_{load} . The f^* and f^*/σ_c decrease as V_{load} increases, meaning that it is easier to enter the dilatancy stage with higher V_{load} . It is considered that the strength parameters, deformation and dilatancy parameters of mudstone are significantly dependent on V_{load} .

Key words: stress loading rates; deeply buried mudstone; mechanical strength; dilatancy characteristics

西南地区是我国南方的重要赋煤区和煤炭资源产地,从下古生界到新生界都有聚煤地层,以晚二叠世龙潭期—长兴期的煤最为重要,占总资源量的85%以上^[1]。通过现场调研和钻取岩心观察发现,深部龙潭组地层岩性以泥岩为主,不同层位的泥岩主要成分差异也较大,主要有炭质泥岩、钙质泥岩、铁质泥岩等^[2]。陈宗基和康文法^[3]认为,地下工程开挖致使围岩部分应力解除即卸荷发生,岩石在偏应力作用下体积产生非线性增长的力学过程即为扩容。根据康红普^[4]分析,巷道围岩扩容引起的底臃量约占巷道总底臃量的1/3^[4]。因此,需要对深部泥岩的力学行为特性和扩容特征进行研究。

岩石的力学扩容产生与否,既取决于岩石介质物理性质,也取决于应力状态,主要是偏应力的作用^[5]。近年来,针对岩石扩容现象,陈宗基和康文法^[3]推导了与时间有关及无关的扩容本构方程,并给出了相关扩容参数测试方法。康红普^[4]推导了瞬时扩容引起的底臃位移量计算式,并进行了实例计算验证。一些学者^[6-13]研究了脆岩、硬岩、弱胶结、盐岩等各种岩石扩容变形本构模型和扩容判据等。YUAN等^[14]提出了剪胀扩容指数的概念,定义为任何特定围压下的表观扩容角与单轴条件下扩容角之比。之后其他学者^[15-19]在YUAN的理论基础提出了适用于不同类

型岩石和不同荷载条件的扩容角模型。ZHAO等^[20]建立了考虑围压和塑性剪切应变影响的扩容角模型。荣浩宇等^[21]试验后认为三轴压缩条件下,岩石变形表现为轴向压缩以及沿最小主应力方向扩容。TRIVEDI^[22]详细分析了平面应变和轴对称情况下的剪胀扩容对强度的影响。也有一些学者^[23]研究了单轴压缩试验中扩容弹性/黏塑性本构模型。

荷载加载速率对岩石试样的力学强度参数和变形参数测试结果有很大的影响^[24-26]。通常,岩石强度和平均弹性模量随着应力加载速率的增加而增加^[27-29],也有一些学者提出不同的观点,认为对于不同强度等级的岩石,随着应力加载速率的增加,单轴抗压强度的增加并不具有普遍性^[30-32]。ALKAN^[33]认为扩容起始强度取决于应力加载速率和孔隙压力,随着应力加载速率的增加,扩容起始强度减小。尹小涛等^[34]认为随着应变率的提高,岩石的峰值强度提高,变形参数也提高。何松等^[35]试验后认为黏土岩峰值强度与加载速率近似线性相关。王云飞等^[36]分析了不同加载速率下砂岩试样的强度、应变能、微观损伤和宏观破裂特征的变化规律。

上述研究在理论研究和工程应用中发挥了重要的指导作用。然而,不同位置的泥岩性质有很大差别^[37-38],目前对埋深较大的泥岩,特别是在我国西南

地区广泛分布的二叠系龙潭组泥岩的力学特性研究以及其扩容特征的研究较少,笔者对矿山现场钻取的埋深近 1 300 m 的岩石试样做了系列试验,包括 XRD 衍射试验、SEM 岩石断口形貌电镜扫描试验和不同加载速率下的单轴压缩试验等,以期揭示深埋泥岩力学特性与扩容特征。

1 试样来源与试样特征

1.1 试样来源

试样来源于我国西南地区贵州省盘州市某煤矿,矿井生产规模 240 万 t/a,该矿含煤岩系为二叠系龙潭组,属海陆过渡相沉积地层,含煤 26~38 层,其中可采煤层 14 层,样品取自该煤矿龙潭组中部的 17 号煤层与 22 号煤层之间的岩层中,2 层煤的平均间距是 37.7 m,取样位置地层倾角为 33°,样品的埋深是 1 289~1 294 m,取样直径为 50 mm,主要岩性为灰褐色薄层钙质泥岩。现场钻取的岩心如图 1 所示。本试验采用岩石切割机将图 1 中试样切割后,采用 TX-SHM200C 型程控双端面磨石机将岩样打磨成长度 100 mm、直径 50 mm 的标准试样。在烘干机中 105 °C 下干燥 24 h 后,采用型号为 RSMSY5 的声波检测仪测试各试样纵波波速,选择波速差 5% 以内的 8 个试

样,如图 2 所示。本文试样加工标准和力学试验过程均依据 ISRM 发布的“测定岩石材料在单轴压缩下变形性质的方法”^[39]。

测量得到加工完成后试样参数见表 1。

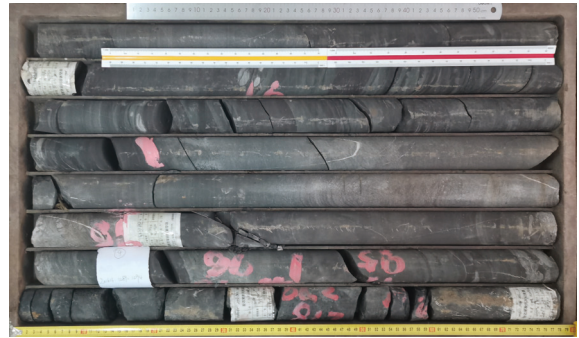


图 1 现场钻取的岩石试样

Fig.1 Samples obtained from the mine site drilling

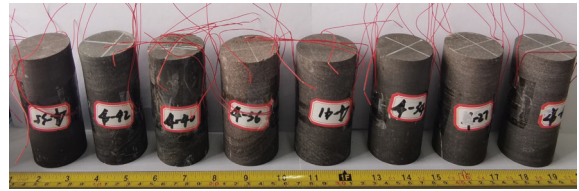


图 2 实验室加工完成的试样

Fig.2 Specimens processed in the laboratory

表 1 加工制备完成的试样参数

Table 1 Specimen parameters after processing

序号	试样编号	长度/mm	直径/mm	质量/g	密度/(kg·m ⁻³)	波速/(m·s ⁻¹)
1	A1	101.29	48.95	512.6	2 689.2	2 842
2	A2	101.36	48.73	514.6	2 722.2	2 916
3	B1	101.72	48.51	516.0	2 744.7	2 841
4	B2	101.35	48.89	511.4	2 687.9	2 882
5	C1	101.54	48.88	514.8	2 701.8	2 818
6	C2	100.98	48.91	512.8	2 702.9	2 879
7	D1	101.40	48.61	510.6	2 713.3	2 866
8	D2	101.56	48.55	510.6	2 715.8	2 963
均值		101.40	48.75	512.9	2 709.7	2 876

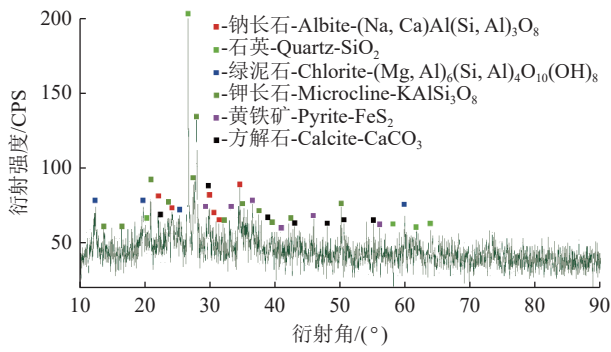
1.2 XRD 衍射试验

为了分析泥岩试样的矿物组成,采用型号为 Uitima IV 的 X 射线衍射仪对试样进行检查,检查结果如图 3 所示。依据“多晶体 X 射线衍射方法通则”(JY/T 0587—2020),采用绝热定量法对试验结果进行处理,可知该泥岩主要含有长石(钠长石质量分数为 29.8%、钾长石质量分数为 13.3%)、石英质量分数为 25.0%、绿泥石质量分数为 16.7%、黄铁矿质量分数为 9.6%、方解石质量分数为 5.6% 等 6 种矿物,其中

以斜长石为主,质量分数达 43.1%。

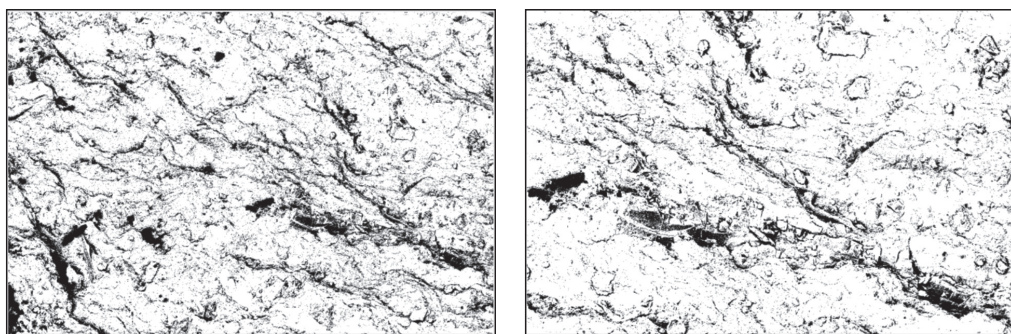
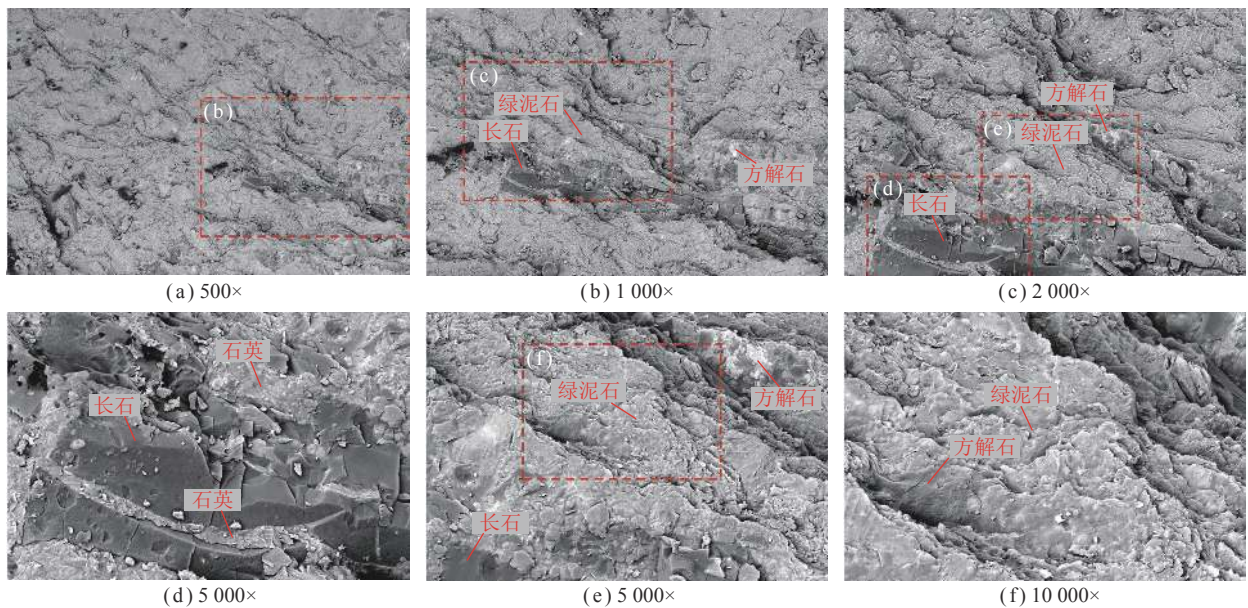
1.3 岩石断口形貌观察

为了观察岩石细部结构,采用 Nova Nano SEM 450 型热场电镜扫描仪对岩石断口进行扫描,得到不同放大倍数的 SEM 图片,如图 4 所示。从图 4 可以看出,泥岩岩石内部各矿物成分的分布是不均匀的,主要成分长石(钠长石和钾长石)呈条带状分布,长石间填充其他矿物,填充物以绿泥石为主,绿泥石中夹杂点状分布的石英,黄铁矿和方解石颗粒状夹杂赋存



在绿泥石中。各种矿物的分布表现出强烈的非均质性, 该性质也是岩石表现出各向异性的主要原因。

从图 4 中的 SEM 图片可以看出, 岩石表面延伸到内部的微裂隙是非常发育的, 采用 PCAS 软件读取 500 倍和 1 000 倍 SEM 图片中孔隙数据, 结果如图 5 所示, 计算得到其表面孔隙率分别为 4.48% 和 3.63%。孔隙的多少直接影响岩石的力学性能, 孔隙越多, 岩石的力学强度越低。泥岩岩石孔隙和裂隙的广泛分布以及其非均质性在很大程度上降低了它的强度, 这也是现场取样时, 难以取得完整岩心的重要原因。



2 岩石力学试验方案

本试验加载设备为 RMT-150C 型岩石压力试验机, 采用 DH3816N 型静态应变测试仪和丝绕式电阻片进行变形监测。试验系统如图 6 所示。

实验室加工长度 100 mm、直径 50 mm 试样 8 个,

2 个试样一组分为 4 组, 4 组试样分别采用不同的加载速率线性递增力加载控制, 加载速率分别为 0.1、0.5、2.0 和 5.0 kN/s, 即 0.05、0.25、1.00 和 2.50 MPa/s, 加载至试件破坏, 加载系统压头自动退回, 试验完成后, 试样如图 7 所示。每个试样粘贴 4 个应变片, 2 个



图 6 单轴压缩试验系统

Fig.6 Uniaxial compression testing system

监测轴向变形, 2 个监测径向变形, 加载过程中实时监测变形数据。

3 泥岩岩石力学特性

3.1 试验结果

本试验在 0.1、0.5、2.0 和 5.0 kN/s 等 4 种不同加载速率下 8 个泥岩试样的单轴压缩试验结果见表 2。由表 2 可知, 各组泥岩岩石试样单轴抗压强度均值最小为 26.8 MPa, 均值最大为 36.5 MPa。平均弹性模量值最小为 3.5 GPa, 最大为 5.9 GPa。

3.2 应力-应变曲线

图 8 为不同加载速率下各试样轴向与径向应力-

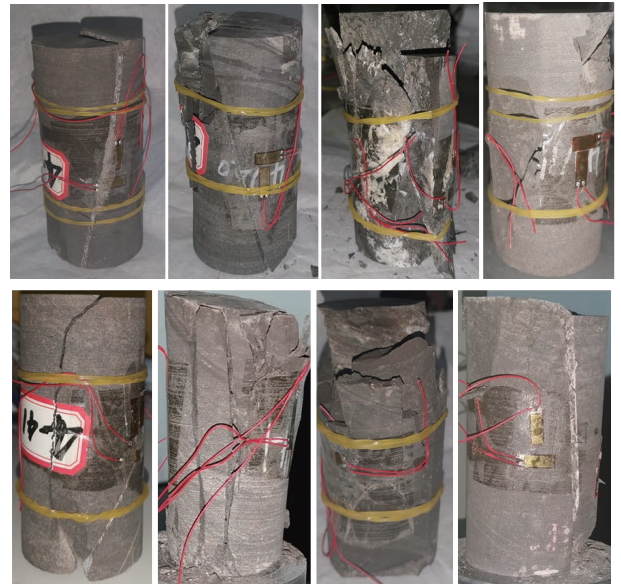


图 7 单轴压缩试验后试样形态

Fig.7 Damaged shape of specimens after UCS test

应变曲线及其局部放大, 由图 8 可知, 在不同的加载速率下, 各试样轴向应变曲线属典型的塑-弹-塑性曲线, 各试样有明显的微裂隙压密过程, 加载速率越小, 压密过程越明显, 即曲线越平缓。进入弹性阶段后, 加载速率越大, 曲线斜率越大, 即平均弹性模量越大。进入塑性变形阶段后, 加载速率越大, 塑性越不明显, 加载速率为 2.0、5.0 kN/s 的 4 个试样屈服点不明显。

表 2 不同加载速率下泥岩岩石强度测试结果

Table 2 UCS test results of mudstone specimens under different stress loading rates

分组	试样编号	$V_{load}/(kN \cdot s^{-1})$	P/kN	σ_c/MPa	E/GPa
A (0.1 kN/s)	A1	0.1	51.9	27.6	3.2
	A2	0.1	48.3	25.9	3.9
	均值	—	50.1	26.8	3.5
B (0.5 kN/s)	B1	0.5	53.8	29.1	4.0
	B2	0.5	57.6	30.7	4.3
	均值	—	55.7	29.9	4.1
C (2.0 kN/s)	C1	2.0	59.1	31.5	5.6
	C2	2.0	59.9	31.9	4.5
	均值	—	59.5	31.7	5.0
D (5.0 kN/s)	D1	5.0	67.1	36.2	6.1
	D2	5.0	68.1	36.8	5.7
	均值	—	67.6	36.5	5.9

注: V_{load} 为荷载加载速率; P 为荷载峰值; σ_c 为单轴抗压强度; E 为平均弹性模量。

3.3 强度特征

图 9 为试验得到的单轴抗压强度 σ_c 、平均弹性模量 E 与试验加载速率 V_{load} 的关系曲线, 由图 8 和图 9(a) 可知, 试验单轴加载速率与泥岩岩石单轴抗压

强度有关联关系, 加载速率越大, 测试得到的泥岩岩石单轴抗压强度越大。加载速率由 0.1 kN/s 增至 50 倍至 5.0 kN/s 时, 试验得到的平均单轴抗压强度由 26.8 MPa 增大至 36.5 MPa, 强度增加了 36.2%。由

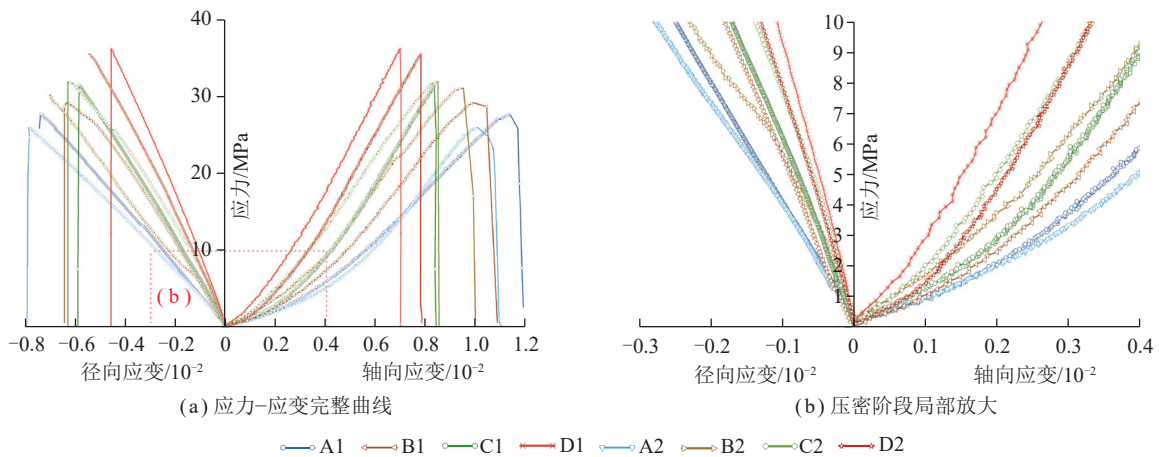


图 8 不同加载速率下轴向与径向应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves under different stress loading rates

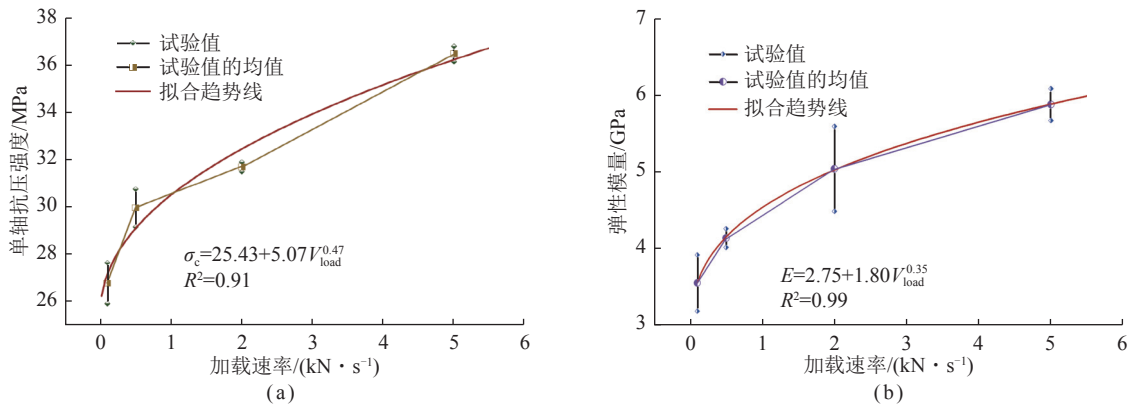


图 9 单轴抗压强度、平均弹性模量与加载速率关系曲线

Fig.9 Relationship curves between σ_c , E and V_{load}

图 8 和图 9(b) 可知, 试验单轴加载速率和测试得到的岩石平均弹性模量有关联关系, 加载速率越大, 测试得到的岩石平均弹性模量越大。加载速率由 0.1 kN/s 增至 50 倍至 5.0 kN/s 时, 试验得到的平均弹性模量由 3.5 GPa 增大至 5.9 GPa, 增大了 65.6%。由此可知, 泥岩岩石强度参数有应力加载速率依赖性。由图 9 可知, 单轴压缩强度、平均弹性模量与试验加载速率均为幂函数关系, 荷载加载速率越大, 单轴压缩强度、平均弹性模量变化率越小, 数值越趋于稳定, 即加载速率越大, 其对 2 者的影响越小。

3.4 轴向与径向应变特征

表 3 为试验得到的不同加载速率下 4 组试样轴向与径向应变特征 (表中 $\epsilon_{a,max}$ 为试样轴向应变最大值, $\epsilon_{d,max}$ 为试样径向应变最大值)。图 10 为试验得到的单轴压缩最大轴向应变、最大径向应变与试验加载速率的关系曲线, 由图 10 可知, 泥岩岩石的轴向、径向应变和试验加载速率有关联关系, 加载速率越大, 测试得到的最大轴向应变和最大径向应变均越小, 轴

向和径向应变率均越大, 即加载速率越大, 泥岩岩石在未充分变形的情况下即发生破坏的可能性越大。

表 3 不同应力加载速率下轴向与径向应变特征

Table 3 Axial and radial strain characteristics under different stress loading rates

分组	试样编号	σ_c /MPa	$\epsilon_{a,max}$	$\epsilon_{d,max}$
A (0.1 kN/s)	A1	27.6	0.011 3	-0.007 4
	A2	25.9	0.010 1	-0.007 8
	均值	26.8	0.010 7	-0.007 6
B (0.5 kN/s)	B1	29.1	0.010 0	-0.006 4
	B2	30.7	0.009 2	-0.007 0
	均值	29.9	0.009 6	-0.006 7
C (2.0 kN/s)	C1	31.5	0.008 3	-0.005 8
	C2	31.9	0.008 5	-0.006 3
	均值	31.7	0.008 4	-0.006 1
D (5.0 kN/s)	D1	36.2	0.007 0	-0.004 6
	D2	36.8	0.008 2	-0.005 5
	均值	36.5	0.007 6	-0.005 0

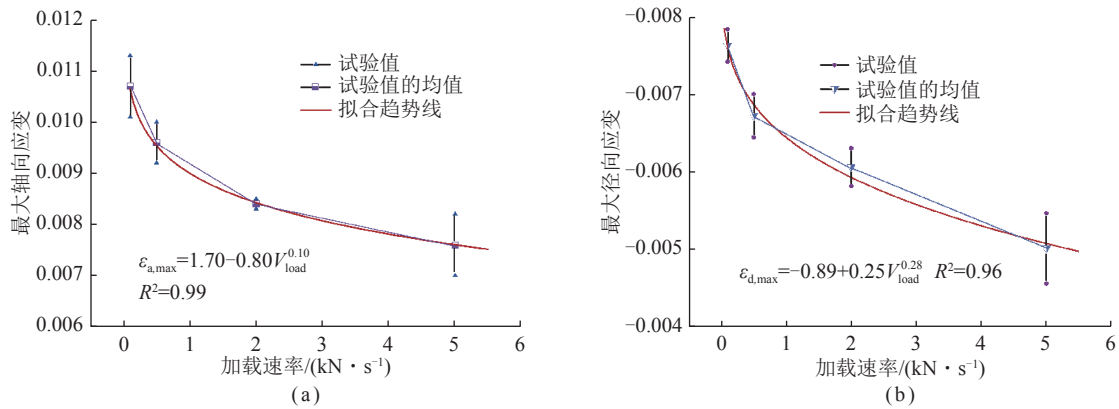


图 10 最大轴向应变、最大径向应变与加载速率关系曲线

Fig.10 Relationship curve between $\epsilon_{a,max}$, $\epsilon_{d,max}$ and V_{load}

当试验加载速率由 0.1 kN/s 增大至 0.5、2.0、5.0 kN/s 时,即增大 5、20、50 倍时,最大轴向应变分别减小了 0.071、0.203、0.313,最大径向应变分别减小了 0.119、0.206、0.344,两者之间并非线性关系。轴向、径向应变值与试验加载速率均为幂函数关系,荷载加载速率越大,应变变化率越小,数值越趋于稳定,其对轴向、径向应变的影响越小。

4 体积扩容特征

4.1 试验结果

根据 ISRM 推荐方法“测定岩石材料在单轴压缩下变形性质的方法”^[39],在给定应力水平情况下,体积应变由式 (1) 计算

$$\epsilon_V = \epsilon_a + 2\epsilon_d \quad (1)$$

式中, ϵ_V 为体积应变; ϵ_a 为轴向应变,一般压缩为正值; ϵ_d 为径向应变,径向膨胀一般为负值。

本试验在 0.1、0.5、2.0 和 5.0 kN/s 等 4 种不同加载速率下 8 个泥岩试样体积扩容测试计算结果见表 4,由表 4 可知,4 组泥岩岩石试样最大体积应变均值为 -0.004 6,最大体积应变均值最小为 -0.002 7,扩容起始应力与单轴抗压强度比值均值最大为 0.205,均值最小为 0.123。

4.2 应力-体积应变曲线

各试样不同加载速率下应力-体积应变曲线如图 11 所示,可知在不同的加载速率下,各试样均表现出了体积扩容特性,试样在加载初期体积减小,体积在短时稳定后,即进入扩容阶段,扩容现象直至试样破坏方才结束。由图 11 可知,荷载加载初期,试样在

表 4 不同应力加载速率下试样体积扩容特征
Table 4 Characteristics of dilatancy under DSLR

分组	试样编号	σ_c /MPa	f^* /MPa	f^*/σ_c	$\epsilon_{V,max}$	$\epsilon_{V,d}$	$\epsilon_{V,d}/\epsilon_{V,max}$
A (0.1 kN/s)	A1	27.6	5.41	0.196	-0.003 5	0.001 3	0.371
	A2	25.9	5.54	0.214	-0.005 6	0.001 5	0.268
	均值	26.8	5.48	0.205	-0.004 6	0.001 4	0.320
B (0.5 kN/s)	B1	29.1	5.11	0.176	-0.003 0	0.001 3	0.433
	B2	30.7	4.90	0.160	-0.005 1	0.001 0	0.196
	均值	29.9	5.01	0.168	-0.004 1	0.001 2	0.315
C (2.0 kN/s)	C1	31.5	4.73	0.150	-0.003 3	0.001 1	0.333
	C2	31.9	4.82	0.151	-0.003 9	0.000 9	0.231
	均值	31.7	4.78	0.151	-0.003 6	0.001 0	0.282
D (5.0 kN/s)	D1	36.2	4.39	0.121	-0.002 3	0.000 6	0.261
	D2	36.8	4.61	0.125	-0.003 1	0.000 9	0.290
	均值	36.5	4.50	0.123	-0.002 7	0.000 8	0.276

注: f^* 为扩容起始应力; f^*/σ_c 为试样扩容起始应力与单轴抗压强度的比值; $\epsilon_{V,max}$ 为最大体积应变; $\epsilon_{V,d}$ 为扩容起始时体应变; $\epsilon_{V,d}/\epsilon_{V,max}$ 为扩容起始时体应变与最大体积应变比值。

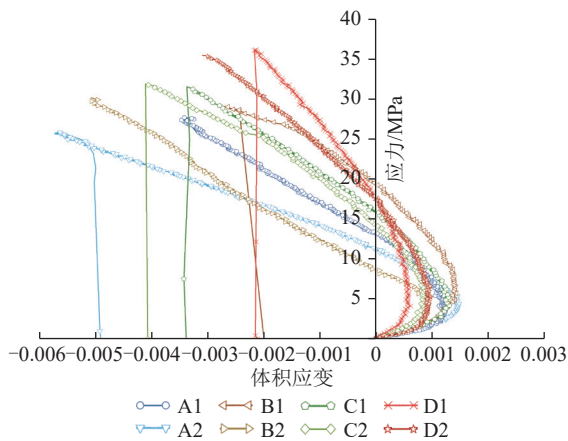


图 11 不同加载速率下体积应变曲线

Fig.11 Volume strain curves at different loading rates

压密阶段时,各试样应力-体积应变曲线的斜率均很小,试样的体积应变急剧增大,即试样的体积处于急剧收缩阶段,此阶段试样体积收缩的主要原因是试样内容孔隙闭合,而径向应变较小。此阶段岩石应力-体积应变关系是近似线性的,岩石表现出黏-弹性性状。压密阶段后期,随着径向应变的增大,应力-体积应变曲线进入非线性阶段,各试样的体积进入到短时稳定阶段,即体积稳定的阶段。进入弹性阶段后,荷载应力达到一定的极限即扩容起始应力后,应力-

体积应变曲线开始反转,泥岩岩石此时体积开始膨胀,即发生扩容现象。进入塑性变形阶段后,应力-体积应变曲线斜率减小,即试样处于加速扩容阶段,加载速率越大,线性斜率减小越明显,直至试样破坏。

4.3 体积扩容特征与加载速率关系

图 12(a) 为 8 个试样最大体积应变与加载速率关系曲线,图 12(b) 为扩容起始体应变与最大体积应变比值与加载速率关系曲线。由表 4 可知,4 组试样的扩容起始时体积应变与最大体积应变比值 $\epsilon_{V,d}/\epsilon_{V,max}$ 均值最大为 0.32(0.1 kN/s),最小比值为 0.276(5.0 kN/s),最大比值是最小比值的 1.16 倍。为了分析各组数据之间的差异显著性,分别选择置信区间为 95% 和 90%,采用单因素方差分析的方法对各组最大体积应变数据、扩容起始体应变与最大体积应变比值数据进行了差异性分析,分析结果为各组数据差异性不显著。据此认为,试样最大体积应变、扩容起始体应变与最大体积应变比值和加载速率无关联关系。

图 12(c) 为各试样扩容起始应力 f^* 与加载速率关系曲线,图 12(d) 为各试样扩容起始应力与单轴抗压强度比值 f^*/σ_c 与加载速率关系曲线,由图 12(c)、(d) 可知,扩容起始应力、试样扩容起始应力与单轴抗压强度比值和加载速率有关联关系,加载速率越大,扩

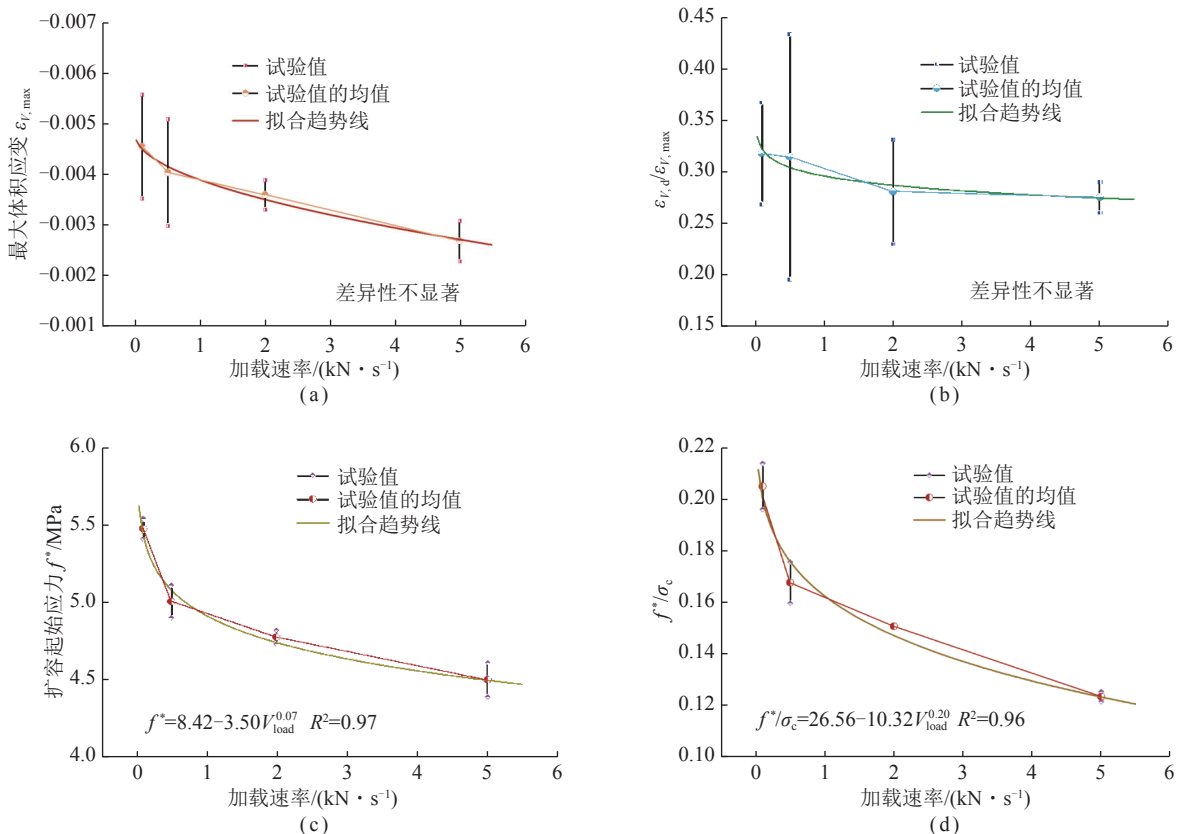


图 12 体积扩容特征与加载速率关系曲线

Fig.12 Relationship curves between volume dilatancy characteristics and V_{load}

容起始应力越小, 试样扩容起始应力与单轴抗压强度比值也越小, 即试样加载荷载速率越大, 越容易进入体积扩容阶段。

5 讨 论

5.1 加载速率影响下扩容本构模型

TAN T 等^[40]提出了与时间有关、考虑岩石扩容影响的岩石本构模型:

$$e(t)_{ij} = e_{cij} + e_c(t)_{ij} + e_{dij} + e_d(t)_{ij} \quad (2)$$

式中, $e(t)_{ij}$ 为与时间有关的总应变; e_{cij} 为弹性应变; $e_c(t)_{ij}$ 为蠕变应变; e_{dij} 为瞬时扩容应变; $e_d(t)_{ij}$ 为与时间有关的扩容应变; i, j 为应变方向, 取值为 1、2、3, 1 为竖向, 2 为竖平面法线横向, 3 为竖平面横向。

若不考虑时间的影响, 式 (2) 可改写为

$$e_{ij} = e_{cij} + e_{dij} \quad (3)$$

岩石压缩试验时, 体积总应变 e 、弹性体积应变 e_e 和扩容体积应变 e_d 可表示为

$$e = e_e + e_d \quad (4)$$

$$e_e = e_{e1} + 2e_{e3} \quad (5)$$

$$e_d = e_{d1} + 2e_{d3} \quad (6)$$

式中, e_{e1} 和 e_{e3} 分别为竖向弹性应变和径向弹性应变; e_{d1} 和 e_{d3} 分别为竖向扩容应变和径向扩容应变。

竖向总应变 e_1 可表述为竖向弹性应变和竖向扩容应变和, 径向总应变 e_3 可表述为径向弹性应变和径向扩容应变和:

$$e_1 = e_{e1} + e_{d1} \quad (7)$$

$$e_3 = e_{e3} + e_{d3} \quad (8)$$

根据虎克定律, 式 (3) 中弹性应变 e_{cij} 分解为 e_{e1} 和 e_{e3} , 可表述为

$$e_{e1} = \frac{1-\mu^2}{E} \left(\Delta\sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_x \right) \quad (9)$$

$$e_{e3} = \frac{1-\mu^2}{E} \left(\Delta\sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_y \right) \quad (10)$$

$$e_e = \frac{1-\mu^2}{E} \left(\frac{2-3\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_x + \frac{1-3\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_y \right) \quad (11)$$

式中, E 为平均弹性模量; μ 为岩石泊松比; $\Delta\sigma_x$ 和 $\Delta\sigma_y$ 分别为 x 方向和 y 方向应力变化量。

将瞬时扩容应变 e_{dij} 的表达式进行简化后, 得到

$$e_{d1} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f^*} \right)^n \left(D^* - \frac{2}{\sqrt{3}} C \right) \quad (12)$$

$$e_{d3} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f^*} \right)^n \left(D^* + \frac{1}{\sqrt{3}} C \right) \quad (13)$$

$$e_d = 3D^* \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f^*} \right)^n \quad (14)$$

式中, D^* 、 C 、 n 为扩容常数, 由试验获得; f^* 为扩容起始应力; σ_1 和 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力。

由上文分析可知, 试样的加载速率对岩石的平均弹性模量 E 和扩容起始应力 f^* 均有影响, 由式 (9)~(14) 可知, 平均弹性模量是弹性应变的计算因子, 扩容起始应力是扩容应变的计算因子, 加载速率对弹性应变和扩容应变均有影响。加载速率和平均弹性模量 E 、扩容起始应力 f^* 均为幂函数关系, 其关联函数表达式为

$$E = a_E + b_E V_{\text{load}}^{c_E} \quad (15)$$

$$f^* = a_f - b_f V_{\text{load}}^{c_f} \quad (16)$$

其中, a_E 、 b_E 、 c_E 为拟合加载速率和平均弹性模量关联方程式常数参数; a_f 、 b_f 、 c_f 为拟合加载速率和扩容起始应力关联方程式常数参数, 上述常数参数均为正值, 均由试验数据回归分析时非线性曲线拟合得到。

将式 (15) 代入式 (9)~(11), 得到应力加载速率影响下的弹性本构模型:

$$e_{e1} = \frac{1-\mu^2}{a_E + b_E V_{\text{load}}^{c_E}} \left(\Delta\sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_x \right) \quad (17)$$

$$e_{e3} = \frac{1-\mu^2}{a_E + b_E V_{\text{load}}^{c_E}} \left(\Delta\sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_y \right) \quad (18)$$

$$e_e = \frac{1-\mu^2}{a_E + b_E V_{\text{load}}^{c_E}} \left(\frac{2-3\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_x + \frac{1-3\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_y \right) \quad (19)$$

将式 (16) 代入式 (12)~(14), 得到加载速率影响下的瞬时扩容本构模型:

$$e_{d1} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{a_f - b_f V_{\text{load}}^{c_f}} \right)^n \left(D^* - \frac{2}{\sqrt{3}} C \right) \quad (20)$$

$$e_{d3} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{a_f - b_f V_{\text{load}}^{c_f}} \right)^n \left(D^* + \frac{1}{\sqrt{3}} C \right) \quad (21)$$

$$e_d = 3D^* \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{a_f - b_f V_{\text{load}}^{c_f}} \right)^n \quad (22)$$

将式 (17)~(22) 中对应的轴向应变、径向应变、总应变分别相加, 得到应力加载速率影响下岩石变形本构模型:

$$e_1 = \frac{1-\mu^2}{a_E + b_E V_{\text{load}}^{c_E}} \left(\Delta\sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_x \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{a_f - b_f V_{\text{load}}^{c_f}} \right)^n \left(D^* - \frac{2}{\sqrt{3}} C \right) \quad (23)$$

$$e_3 = \frac{1-\mu^2}{a_E + b_E V_{load}^{c_E}} \left(\Delta\sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_y \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{a_f - b_f V_{load}^{c_f}} \right)^n \left(D^* + \frac{1}{\sqrt{3}} C \right) \quad (24)$$

$$e = \frac{1-\mu^2}{a_E + b_E V_{load}^{c_E}} \left(\frac{2-3\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_x + \frac{1-3\mu}{1-\mu} \Delta\sigma_y \right) + 3D^* \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{a_f - b_f V_{load}^{c_f}} \right)^n \quad (25)$$

5.2 加载速率与强度参数、变形参数关系

笔者将试验荷载加载速率与试样试验单轴抗压强度、平均弹性模量等强度特征参数及轴向与径向应变、体积扩容等应变特征参数进行拟合, 拟合形式采用下述幂函数表达式:

$$k = a + bv^c \quad (26)$$

式中, k 为各试验结果计算得到的参数; v 为试验荷载加载速率, kN/s; a 、 b 、 c 为拟合方程式常数参数。

对方程式 (26) 两侧取对数, 可得

$$\ln(k - a) = \ln b + c \ln v \quad (27)$$

由式 (27) 可知, 荷载加载速率对数值与各强度参数和应变特征参数对数值为线性关系。

在对上述试验数据进行拟合之前, 采用单因素方差分析方法对每个分析项目各组数据进行了差异显著性检验, 选择置信区间为 95%, 若差异显著则对数据进行拟合。差异显著性分析结果和拟合计算结果见表 5。

表 5 试验荷载加载速率与试验参数拟合结果
Table 5 Fitting results of V_{load} and test parameters

序号	项目	差异显著性	拟合方程式	R^2
1	$V_{load} \sim \sigma_c$	显著	$\sigma_c = 25.43 + 5.07V_{load}^{0.47}$	0.91
2	$V_{load} \sim E$	显著	$E = 2.75 + 1.80V_{load}^{0.35}$	0.99
3	$V_{load} \sim \varepsilon_{a,max}$	显著	$\varepsilon_{a,max} = 1.70 - 0.80V_{load}^{0.10}$	0.99
4	$V_{load} \sim \varepsilon_{d,max}$	显著	$\varepsilon_{d,max} = -0.89 + 0.25V_{load}^{0.28}$	0.96
5	$V_{load} \sim f^*$	显著	$f^* = 8.42 - 3.50V_{load}^{0.07}$	0.97
6	$V_{load} \sim f^*/\sigma_c$	显著	$f^*/\sigma_c = 26.56 - 10.32V_{load}^{0.20}$	0.96
7	$V_{load} \sim \varepsilon_{V,max}$	不显著	—	—
8	$V_{load} \sim \varepsilon_{V,d}/\varepsilon_{V,max}$	不显著	—	—

由表 5 中差异显著性计算结果可知, 试验加载速率和泥岩岩石单轴抗压强度、平均弹性模量、最大轴向应变、最大径向应变、试样扩容起始应力与单轴抗压强度比值有关联关系, 和试样最大体积应变、扩容起始体积应变与最大体积应变比值无关联关系。

由以上分析可知, 试验荷载加载速率与强度特征

参数及应变特征参数之间为幂函数关系, 幂函数的特点是在自变量较小时, 因变量随自变量变化而发生较大变化, 即相应的关系曲线斜率较大。随自变量持续增大, 因变量斜率变缓。针对本文各试验而言, 加载速率在 1 kN/s 及以下时, 加载速率越小, 试验得到的数据变化速率越大, 加载速率越大, 数据稳定性越好。

6 结 论

(1) 试验发现泥岩以主要含有长石、石英、绿泥石等矿物, 以长石为主, 占比达到 43.1%, 岩石内部各矿物成分分布不均匀, 长石呈条带状分布, 其间填充其他矿物, 各种矿物的分布表现出了强烈的非均质性, 该性质是岩石表现出各向异性的主要原因。

(2) 各试样在不同的加载速率下, 轴向应力-应变曲线均属典型的塑-弹-塑性曲线, 各试样均有明显的微裂隙压密过程, 加载速率越小, 压密过程越明显, 即曲线越平缓。进入弹性阶段后, 加载速率越大, 曲线斜率越大, 即平均弹性模量越大。

(3) 采用单因素方差分析方法对每个分析项目各组数据进行差异显著性检验, 结果为试验加载速率和泥岩单轴抗压强度、平均弹性模量、最大轴向应变、最大径向应变、扩容起始应力与单轴抗压强度比值有关联关系, 和最大体积应变、扩容起始体积应变与最大体积应变比值无关联关系。加载速率越大, 试样在未充分变形的情况下发生破坏的可能性越大, 扩容起始应力越小, 试样扩容起始应力与试样强度比值也越小, 越容易进入体积扩容阶段。

(4) 各试样在不同的加载速率下, 均表现出明显的体积扩容特性。荷载加载初期, 各试样在压密阶段时, 应力-体积应变曲线的斜率较小, 即试样的体积快速减小。进入弹性阶段后, 荷载应力达到扩容起始应力后, 应力-体积应变曲线开始反转, 试样体积开始膨胀。进入塑性变形阶段, 曲线斜率减小, 试样处于加速扩容阶段至试样破坏。

参考文献(References):

[1] YU W, WU G, PAN B, et al. Laboratory and field investigations of different bolting configurations for coal mine roadways in weak coal strata[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(12): 8995-9013.
 [2] YU W, WU G, PAN B, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of sandstone-coal-bolt specimens with different angles under conventional triaxial compression[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(6): 4021067.
 [3] 陈宗基, 康文法. 在岩石破坏和地震之前与时间有关的扩容[J]. *岩石力学与工程学报*, 1983, 2(1): 11-21.

- CHEN Zongji, KANG Wenfa. Time dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1983, 2(1): 11–21.
- [4] 康红普. 岩石扩容与巷道底臃[J]. *阜新矿业学院学报(自然科学版)*, 1992, 11(3): 41–45.
- KANG Hongpu. Rock dilatancy and opening floor heave[J]. *Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science)*, 1992, 11(3): 41–45.
- [5] 许东俊, 李小春, 蔡忠理, 等. 应力状态与岩石扩容特性[J]. *岩土力学*, 1992, 13(2): 37–44.
- XU Dongjun, LI Xiaochun, CAI Zhongli, et al. Stress states and dilatancy characteristics of rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1992, 13(2): 37–44.
- [6] HUANG X, LIU Q, BO Y, et al. An elasto-plastic and viscoplastic damage constitutive model for dilatancy and fracturing behavior of soft rock squeezing deformation[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(3): 826–848.
- [7] VAN OOSTERHOUT B G A, HANGX S J T, SPIERS C J. Mechanisms of dilatancy in rock salt at the grain-scale and implications for the dilatancy boundary: The mechanical behavior of salt X[C]. BoCa Raton: CRC Press, 2022.
- [8] ABEN F M, BRANTUT N. Dilatancy stabilises shear failure in rock[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 574: 117174.
- [9] 李桂臣, 李菁华, 孙元田, 等. 泥岩多尺度模型与水岩作用特性研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1138–1154.
- LI Guichen, LI Jinghua, SUN Yuantian, et al. Advance of multi-scale study on both analytic models and water-rock interaction characteristics of mudstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1138–1154.
- [10] 郭建强, 黄武峰, 刘新荣, 等. 基于可释放应变能的岩石扩容准则[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 2094–2102.
- GUO Jianqiang, HUANG Wufeng, LIU Xinrong, et al. Rock dilatation criteria development based on releasable strain energy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 2094–2102.
- [11] 孟庆彬, 王杰, 韩立军, 等. 极弱胶结岩石物理力学特性及本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S1): 19–29.
- MENG Qingbin, WANG Jie, HAN Lijun, et al. Physical and mechanical properties and constitutive model of very weakly cemented rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S1): 19–29.
- [12] 侯文诗, 李守定, 李晓, 等. 岩石扩容起始特性与峰值特性的比较[J]. *岩土工程学报*, 2014, 35(8): 1478–1485.
- HOU Wenshi, LI Shou ding, LI Xiao, et al. Comparison between dilatancy onset and peak of different rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 35(8): 1478–1485.
- [13] 文志杰, 卢建宇, 肖庆华, 等. 软岩回采巷道底臃破坏机制与支护技术[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 1991–1999.
- WEN Zhijie, LU Jianyu, XIAO Qinghua, et al. Failure mechanism of floor heave and supporting technology of soft rock roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 1991–1999.
- [14] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(4): 679–686.
- [15] AIEJANO L R, AIONSO E. Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(4): 481–507.
- [16] JAVIER A, AIEJANO L R. Dilation in granite during servo-controlled triaxial strength tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 61: 43–56.
- [17] SALEHNIYA F, COLLIN F, ROBERT C. On the variable dilatancy angle in rocks around underground galleries[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(3): 587–601.
- [18] HAMED M, MARZIDH R. Dilation angle variations in plastic zone around tunnels in rocks-constant or variable dilation parameter[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(10): 2550–2566.
- [19] ZHAO R, LI C. A new dilation angle model for rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(9): 5345–5354.
- [20] ZHAO X, CAI M. A mobilized dilation angle model for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(3): 368–384.
- [21] 荣浩宇, 李桂臣, 赵光明, 等. 不同应力路径下深部岩石真三轴卸荷特性试验[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3140–3149.
- RONG Haoyu, LI Guichen, ZHAO Guangming, et al. True triaxial test study on mechanical properties of deep rock mass in different stress paths[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3140–3149.
- [22] TRIVEDI A. Strength and dilatancy of jointed rocks with granular fill[J]. *Acta Geotechnica*, 2010, 5(1): 15–31.
- [23] CRISTESCU N. Rock dilatancy in uniaxial tests[J]. *Rock Mechanics*, 1982(15): 133–144.
- [24] MA H, SONG Y, CHEN S, et al. Experimental study on effects of loading rate and sample size on the mechanical and failure characteristics of mudstone[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38(3): 2735–2744.
- [25] WANG X, WANG E, LIU X, et al. Failure mechanism of fractured rock and associated acoustic behaviors under different loading rates[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 247: 107674.
- [26] 宫凤强, 叶豪, 罗勇. 低加载率范围内煤岩组合体冲击倾向性的率效应试验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(11): 2852–2860.
- GONG Fengqiang, YE Hao, LUO Yong. Rate effect on the burst tendency of coal-rock combined body under low loading rate range[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 2852–2860.
- [27] HASHIBA K, FUKUI K. Index of loading-rate dependency of rock strength[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(2): 859–865.
- [28] CAO A, JING G, DING Y, et al. Mining-induced static and dynamic loading rate effect on rock damage and acoustic emission characteristic under uniaxial compression[J]. *Safety Science*, 2019, 116: 86–96.
- [29] 李桂臣, 孙长伦, 何锦涛, 等. 软弱泥岩遇水强度弱化特性宏观模拟研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(5): 935–942.
- LI Guichen, SUN Changlun, HE Jintao, et al. Macro and meso scalesimulation study of the strength-weakening property of soft mudstone affected by water[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(5): 935–942.
- [30] 秦楠, 张金龙, 王永岩. 不同加载方式和速率对类软岩单轴抗压强度影响的实验研究[J]. *应用力学学报*, 2018, 35(5): 1158–1163.
- QIN Nan, ZHANG Jinlong, WANG Yongyan. The experimental

- study on the uniaxial compressive strength under different loading ways and rates of soft rock[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(5): 1158–1163.
- [31] 张连英, 茅献彪. 高温状态下加载速率对石灰岩力学效应研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3511–3515.
ZHANG Lianying, MAO Xianbiao. Experimental study of the mechanical effects of loading rates on limestone at high temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3511–3515.
- [32] 左建平, 刘连峰, 周宏伟, 等. 不同开采条件下岩石的变形破坏特征及对比分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(8): 1319–1324.
ZUO Jianping, LIU Lianfeng, ZHOU Hongwei, et al. Deformation failure mechanism and analysis of rock under different mining condition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(8): 1319–1324.
- [33] ALKAN H, CINAR Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(1): 108–119.
- [34] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 2610–2615.
YIN Xiaotao, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 2610–2615.
- [35] 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.
HE Song, XUE Kaixi, HU Yanxiang, et al. On the influence of loading rate and ambient temperature on the mechanics properties of clay rock[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(5): 757–768.
- [36] 王云飞, 刘晓, 王立平, 等. 加载速率和饱水对砂岩力学行为和微观损伤特征的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 421–428.
WANG Yunfei, LIU Xiao, WANG Liping, et al. Coupling effect of loading rate and saturated water on mechanical behavior and micro damage property of sandstone[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(2): 421–428.
- [37] 何满潮, 杨晓杰, 孙晓明. 中国煤矿软岩黏土矿物特征研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- [38] LI D, ZHOU A, WANG L, et al. Strength characteristics and in situ stress measurement of rock cores from a large section underground station: A case study[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(21): 10873.
- [39] ULUSAY R, HUDSON J A. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006[M]. Ankara, Turkey: ISRM Turkish National Group, 2007.
- [40] TAN T, SHI Z, YU Z, et al. Dilatancy, creep and relaxation of brittle rocks measured with the 8000 kN multipurpose triaxial apparatus[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1989, 55(3): 335–352.