



移动扫码阅读

张冬冬,智奥龙,李震,等.结构性效应对层状岩体力学特性与破坏特征的影响[J].煤炭科学技术,2022,50(4):124-131.

ZHANG Dongdong, ZHI Aolong, LI Zhen, et al. Study of structural effect on mechanical properties and failure characters of layered rocks[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 124-131.

结构性效应对层状岩体力学特性与破坏特征的影响

张冬冬¹, 智奥龙², 李震^{3,4}, 张振国⁵, 李鹏¹, 秦其智¹

(1.山东能源集团有限公司,山东 济南 250014;2.西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;3.河南理工大学 土木工程学院,河南 焦作 454003;4.煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心,河南 焦作 454000;5.济宁市能源综合执法支队,山东 济宁 272000)

摘 要:煤矿地层广泛分布有层状砂岩、煤、页岩等层状岩体,层状岩体是一种沿着层面力学性质相同、垂直层面力学性质各异的各向异性岩体,基质和层面的不同组合导致层状岩体具有尺寸效应、层理密度和层面倾角效应等结构性效应,将影响层状岩体的强度和破坏特征。针对结构性效应对层状岩体力学性质和破坏特征的影响,开展了基质的尺寸效应、层状岩体的层理密度和层面倾角效应研究,分析了结构性效应对层状岩体应力-应变曲线特征、峰值强度、变形特征和破坏特征的影响。结果表明:峰值强度和弹性模量均表现出随试样高宽比增大而减小的尺寸效应;围压对尺寸效应有弱化作用,围压约束条件下,岩体结构性失稳程度减弱,延性特征逐渐显现;层面倾角为 90°时层状岩体的峰值强度和弹性模量达到最大值;围压和层面倾角影响层状岩体的脆延转化特性、损伤程度和破坏形式。研究结果可为深井巷道层状围岩力学参数标定和破坏机制分析提供重要的理论依据。

关键词:层状岩体;结构效应;尺寸效应;力学性质;破坏特征

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)04-0124-08

Study of structural effect on mechanical properties and failure characters of layered rocks

ZHANG Dongdong¹, ZHI Aolong², LI Zhen^{3,4}, ZHANG Zhenguo⁵, LI Peng¹, QIN Qizhi¹

(1. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 4. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China; 5. Jining Energy Comprehensive Law Enforcement Detachment, Jining 272000, China)

Abstract: Layered sandstone, coal, shale and other layered rocks are widely distributed in coal mine strata. The layered rock is an anisotropic rock with the same mechanical properties along the layer and various mechanical properties in the perpendicular direction. The different combinations of matrix and layers lead to the structural effects, such as size effect, as well as bedding density and inclination angle effect, which would affect the strength and failure characteristics of layered rocks. For the influence of structural effect on the mechanical properties and failure characteristics of layered rocks, the size effect, as well as bedding density and inclination angle effect were analyzed. The influence of structural effect on stress-strain curve characteristics, peak strength, deformation characteristics and failure characteristics was studied. The results were as follows. Both the peak strength and elastic modulus decrease with the ratio of height to width. The size effect is weakened by the confining pressure. Under the triaxial state, the structural instability is weakened, and the ductile characters become obvious. The peak strength and elastic modulus of the layered rock mass at the inclination angle 90° approach the maximum. The confining pressure and layer inclination would affect the brittle-ductile transition characteristics, damage degree and failure form. The results could provide important theoretical basis for the calibration of mechanical parameters and analysis of failure mechanism in layered surrounding rocks in deep mining.

Key words: layered rock; structure effect; size effect; mechanical character; failure character

收稿日期:2021-10-02

责任编辑:常琛

DOI:10.13199/j.cnki.cst.2021-0919

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704097);河南省科技攻关资助项目(202102310244);河南理工大学杰出青年基金资助项目(J2021-2)

作者简介:张冬冬(1987—),男,山东滕州人,工程师,硕士。E-mail:18678706649@163.com

通讯作者:李震(1986—),男,山东泰安人,副教授,博士。E-mail:zhenli@hpu.edu.cn

0 引言

层状岩体是一种沿着层面力学性质相同、垂直层面力学性质各异的各向异性岩体。层状岩体广泛存在于由沉积作用形成的地壳岩体中,多成水平层状分布,在构造应力作用下,也可形成倾斜层状结构^[1]。通常,煤矿地层广泛分布有层状砂岩、煤、页岩等,在不同地质环境中,可成水平层面、倾斜层面结构等^[2-3]。据统计,新疆、甘肃、宁夏、山西、贵州、重庆、淮南等地广泛分布有急倾斜煤层,急倾斜矿井约占全国矿井总数量的1/6。在西部资源开发环境下,占西部矿井数量50%以上的急倾斜煤层的安全开采具有重要的研究意义。

当在水平层状岩体中开挖巷道时,在集中应力作用下,巷顶和巷底易发生由于层面拉伸或整体塑性变形导致的冒顶、底鼓等工程问题;当在倾斜层状岩体中施工时,常发生沿层面剪切滑移、岩块崩落、巷帮失稳等工程事故^[4]。可见,不同层状结构下围岩稳定性问题具有不同的易发性和破坏特征。从岩石力学角度分析,层状岩体具有与层状结构相关的各向异性,当巷道开挖后,最大主应力通常平行于自由面方向,最大主应力与层状结构呈不同角度时岩体力学性质各异,导致巷道不同位置处损伤倾向性不同。层状结构不变时,不同位置处主应力与层面夹角不同。由于层状岩体在力学性质最弱处发生破坏,围岩破坏决定于层状岩体结构特征,不同层状结构和应力条件下破坏形式也不同。因此,进行不同倾角下层状岩体力学性质研究,对实现巷道开挖稳定和煤矿采掘安全具有重要意义。

在层状岩体方面,国内外学者开展了相关工作。破坏准则方面,JAEGER^[5]基于Mohr-Coulomb准则提出层状岩体的Jaeger破坏准则;阳友奎等^[6]在利用复合等效方法提出了层状岩体破坏准则和强度参数确定方法;余学成等^[7]建立了考虑弯曲屈服效应的屈服准则;宋建波^[8]基于单弱面理论,改进了Hoek-Brown准则预测层状岩体强度的方法;阳军生等^[9]针对基岩破坏和层面破坏,提出了一种反映其强度特性的非线性破坏准则。各向异性方面,鲜学福等^[10]通过单轴和三轴压缩试验分析了层间具有黏结力的层状岩体强度;刘殿名^[11]探讨了各向异性岩石的声学特征和影响因素;胡善超^[12]通过开展深井巷道层状岩体力学试验,研究了层状岩体各向异性力学特征,并应用于层状岩体稳定性分析;王宏图等^[13]开展了层状复合岩体力学相似模拟试验研究;李剑光等^[14]推导了夹层水平时复

合岩体界面应力表达式,分析了含弱夹层岩体的破坏形式和破坏机理;刘立等^[15]探讨了岩体的工程强度及抗变形能力与层间结合力的相互关系;孙晓明等^[16]分析了不同应力边界条件下层状底板岩层巷道变形破坏动态演化规律;邓华峰等^[17]进行了不同层理角度的单轴和三轴压缩试验,分析了层理角度对岩体力学特性和破坏模式的影响;侯志强等^[18]、李德忠等^[19]、周辉等^[20]、廖安杰等^[21]研究了不同应力等条件下层状岩体力学参数。目前,考虑围压的层状岩体基质尺寸效应研究仍未开展,不同应力条件和层面特征下层状岩体破坏机制仍不清,以上问题的研究对深井巷道稳定性分析具有重要意义。

值得注意的是,层状岩体包含岩石基质和层面,基质和层面的不同组合导致层状岩体具有尺寸效应、层理密度和层面倾角效应等结构性效应,将影响层状岩体的强度和破坏特征,因此,进行岩体稳定性分析时必须考虑层状岩体的结构性效应。笔者通过层状岩体三轴压缩数值试验,探讨了尺寸效应、层面倾角、层理密度等结构性效应对层状岩体应力-应变曲线特征、峰值强度、变形特征和破坏特征的影响,研究结果可为深井巷道层状围岩力学参数标定和破坏机制分析提供重要的理论依据。

1 数值试验

1.1 数值方法与假设条件

天然岩体具有各向异性、非连续、非弹性、非均质性等特点,而传统的有限单元法、有限差分法等数值模拟方法无法较好地分析层状岩体界面损伤破裂过程。唐春安等^[22]充分考虑了岩石破裂过程中的各向异性、非线性和非均质等特点,提出了RFPA模拟方法并开展了岩体破裂演化分析。因此,笔者基于RFPA开展层状岩体尺寸效应研究。

应用RFPA开展数值计算时,基于以下几点假设:①在计算过程中考虑材料的非均质性,单元破坏的积累导致材料宏观损伤;②单元具有脆-塑性或弹-脆性,单元的强度和弹性模量等服从均匀分布、韦伯分布、正态分布等;③当单元应力条件满足破坏准则时,破坏单元刚度降低;④声发射、损伤量与破坏单元数量成正比。

1.2 数值模型

以煤矿中常见的急倾斜岩层巷道为工程背景(图1),巷道周边不同位置处的围岩单元体主应力与岩层层面呈不同夹角,可抽象为相同主应力方向、不同层面倾角条件下的力学问题。为揭示层状岩体破坏的结构效应,可采用具有显著差异的硬岩

和软岩为基质,选取方形试样模拟单元体加载过程。其中,为研究高宽比对破坏特征的影响,试样宽度取50 mm,根据高度取值(25、50、75、100、150和200 mm)分为6组;为研究层理组数对破坏形式的影响,固定高宽比为2:1,按层理组数2组、8组、20组和30组分为4组;为研究层面倾角对试样破坏的影

响,层面倾角依次取为0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°。

层状岩体试样的基质选用硬岩材料,层面选用软岩材料,主要参数取值见表1。为了表达力学性质与围压的依赖性,均质度系数和残余强度系数取为围压的线性函数形式。

表1 岩石的主要参数

Table 1 Main parameters of rocks

岩石种类	围压及均质度系数	弹性模量/ GPa	单轴抗压强度/ MPa	泊松比	围压及残余 强度系数	抗压强度/ 抗拉强度	内摩擦角/ (°)
硬岩	围压 0,2.7 围压 40 MPa,3.2	60	600	0.25	围压 0,0.05 围压 40 MPa,0.6	10	35
层理	围压 0,1.6 围压 40 MPa,3	25	250	0.3	围压 0,0.1 围压 40 MPa,0.6	8	30

围岩破坏过程中主应力发生变化,针对应力场变化情况,由于真三轴开展难度大,通常采用常规三轴试验进行围岩力学参数研究^[23-25]。基于此,对试样开展常规三轴压缩试验,加载过程采用位移控制,加载速率为0.005 mm/步,破坏准则选取 Mohr-Coulomb 模型,基元尺寸取为1 mm×1 mm。

2.3 试验方案

考虑不同岩体介质尺寸效应的一致性,取岩石基质进行尺寸效应研究,高宽比分别取为0.5、1、1.5、2、3、4,开展了三轴压缩下力学性质与破坏特征研究。

为确定层理密度和层面倾角的影响,进行了高宽比为2,层理组数分别为2组、8组、20组和30组,以及层面倾角为0°、45°和90°的三轴压缩试验,分别研究了不同围压下层状岩体结构效应对岩体破坏性质的影响。

2 基质的尺寸效应研究

2.1 应力-应变曲线特征

不同高宽比和围压条件下岩石基质的应力-应变曲线如图1所示。可见,不同高宽比条件下峰前应力-应变($\sigma-\varepsilon$)曲线基本重合。高宽比对峰后曲线特征影响显著,10 MPa和围压20 MPa条件下,随高宽比增大,峰后应力跌落程度增强;围压30 MPa条件下,不同高宽比下岩石应力-应变曲线形态相似,应力软化程度降低。由试验结果可见,围压弱化了高宽比对峰后曲线形态的影响,高围压条件下,应力-应变曲线峰后形态对高宽比不敏感。

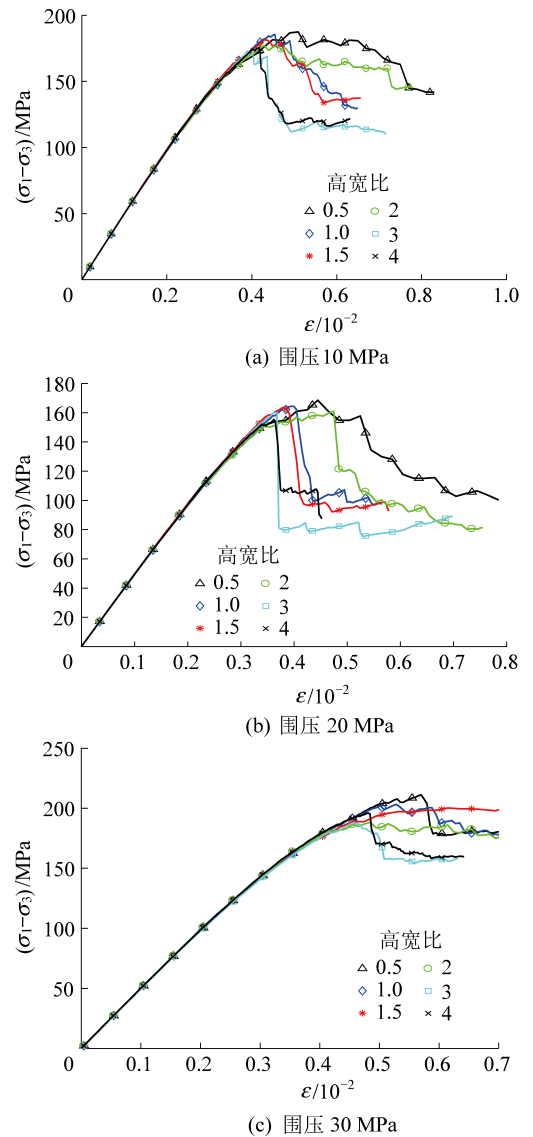


图1 不同围压、不同尺寸试样的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of samples under various confining pressure and of different size

2.2 峰值强度

根据图1的应力-应变曲线,得到不同围压下岩石基质的峰值强度与高宽比的演化关系曲线,如图2所示。整体来看,相同围压条件下的岩石试样,随高宽比增大,峰值强度逐渐减小。另一方面,相同高宽比条件下的岩石试样,随围压增加,峰值强度增大。当试样的高宽比在2~4,岩石的峰值强度随高宽比演化趋势趋于平稳。同时,围压越高,岩石峰值强度随高宽比变化越不明显,高围压弱化了高宽比对峰值强度的影响。

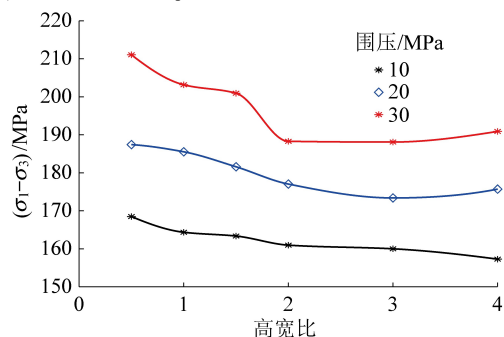


图2 不同围压下峰值强度与高宽比的关系

Fig.2 Variation of peak strength with ratio of height to width under different confining pressure

2.3 变形特征

由三轴压缩试验的应力-应变曲线,得到不同围压下试样的弹性模量与高宽比之间的演化曲线,如图3所示。在相同围压下,岩石的弹性模量 E 随着高宽比的增大呈现出逐渐较小的趋势。高宽比在0.5~3.0,岩石的弹性模量变化较大;高宽比在3~4,

岩石的弹性模量变化很小。对于同一尺寸的试样,随着围压的增大,弹性模量也逐渐增大。与强度演化规律不同,在本文试验条件下,不同围压下弹性模量随高宽比的演化趋势基本相同,高围压下并没有表现出弹性模量随高宽比变化变缓情况。综合以上分析可知,岩石的弹性模量也具有一定的尺寸效应。

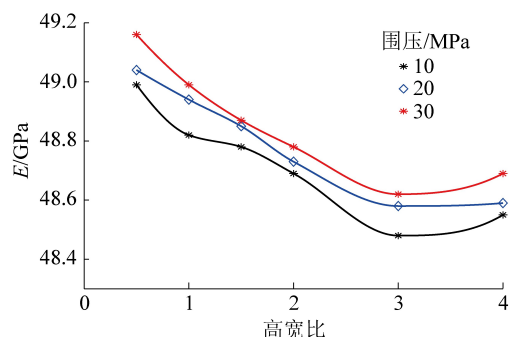


图3 不同围压下弹性模量与高宽比的关系

Fig.3 Variation of elastic modulus with ratio of height to width under different confining pressure

2.4 破坏特征

图4分别是在围压10、20和30 MPa条件下不同高宽比条件下试样破坏形态。在高宽比较小时,试样破坏越剧烈,整体破坏程度越高。同时,在低围压作用下,当高宽比增大时,整体失稳越明显;然而,当围压增大时,由于围压的侧向约束,高宽比增大时整体失稳程度减弱,强度受高宽比影响越小。因此,高围压弱化了岩石破坏特征的尺寸效应。

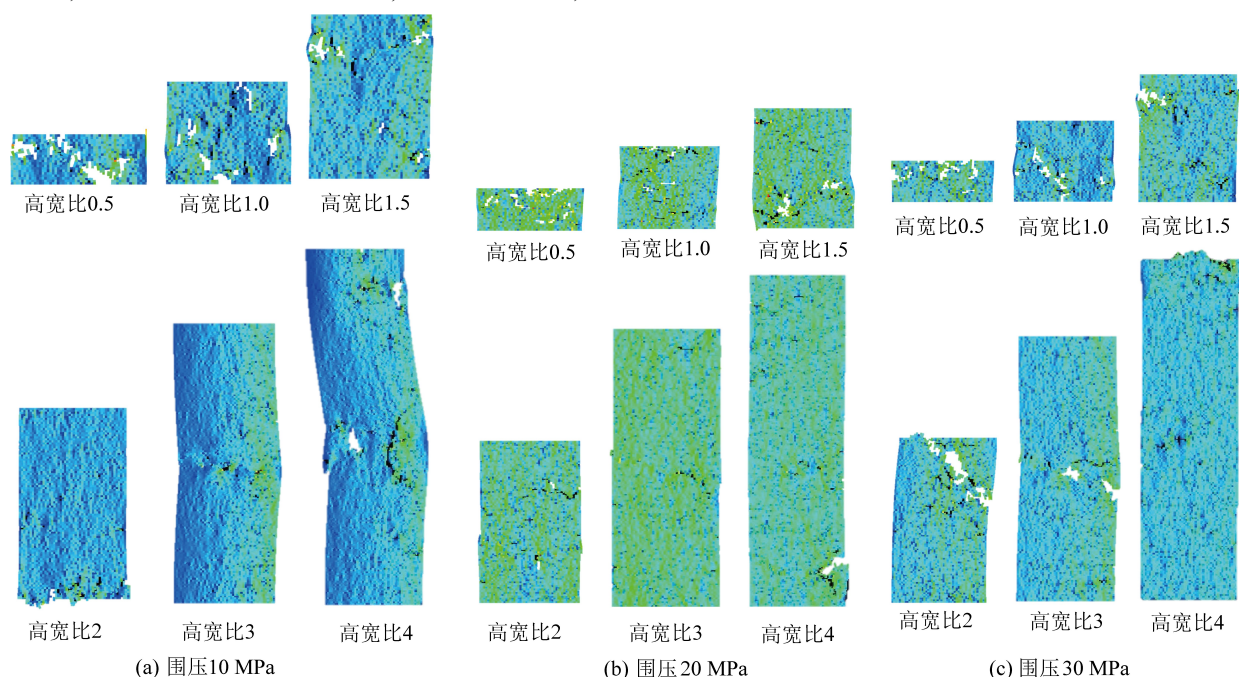


图4 不同围压下不同尺寸破坏形态

Fig.4 Failure form of samples with various sizes under different confining pressure

3 层状岩体的层理密度和层面倾角效应研究

3.1 应力-应变曲线特征

图5为不同围压、不同层面倾角和不同层理密度下试样的应力-应变曲线。可见,峰前曲线斜率随层理密度有较小的变化,同时,在层面倾角 0° 和

45° 条件下,随层理密度增加,峰后残余强度增大,峰后模量减小,岩体由脆性向延性转变;在层面倾角 90° 时,并未呈现出明显规律。另外,在围压30 MPa条件下,层面倾角 0° 和 90° 时峰后曲线均表现出明显的延性特征,说明高围压使较小或较大倾角岩体由脆性向延性转变,而中等倾角条件下围压的脆—延转化作用并不明显。

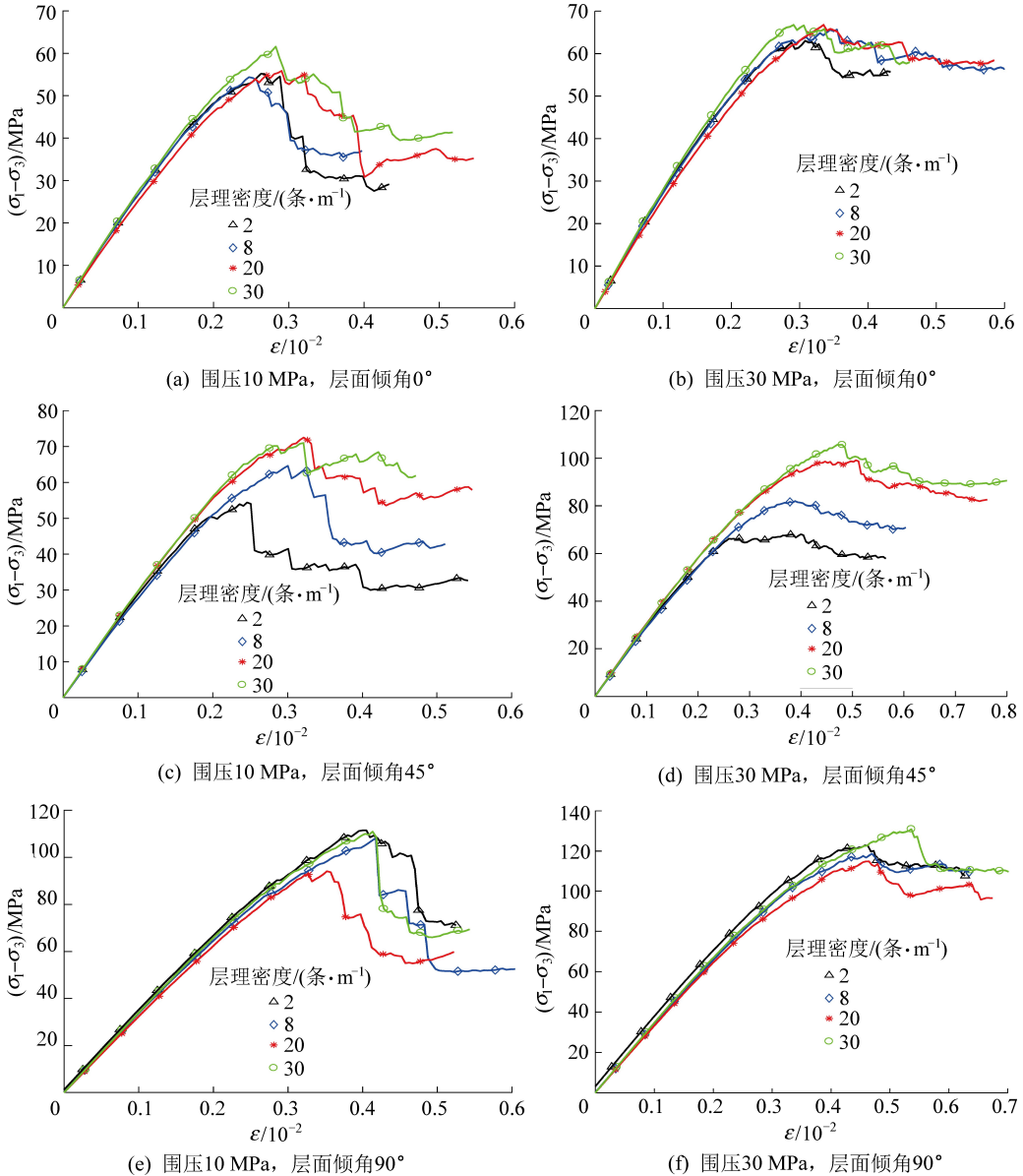


图5 围压10 MPa和30 MPa下不同层面倾角试样的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves for samples with various inclination angles under confining pressure 10 MPa and 30 MPa

3.2 峰值强度

由岩石的应力-应变曲线得到在10 MPa和30 MPa围压下岩体的峰值强度随层理密度变化规律,如图6所示。由图6可见,2组不同围压的三轴压缩试验,岩石的峰值强度变化趋势相似。当层面倾角为 0° 时,随着层理密度的增大,试样的峰值强度

变化不大;当层面倾角为 45° 时,试样的峰值强度随着层理密度增加而增大;当层面倾角为 90° 时,峰值强度随层理密度先减小后增加,且当层理密度为200条/m时,试样的峰值强度最小。在围压和层理密度相同的情况下,层面倾角 90° 时岩体的峰值强度最大。

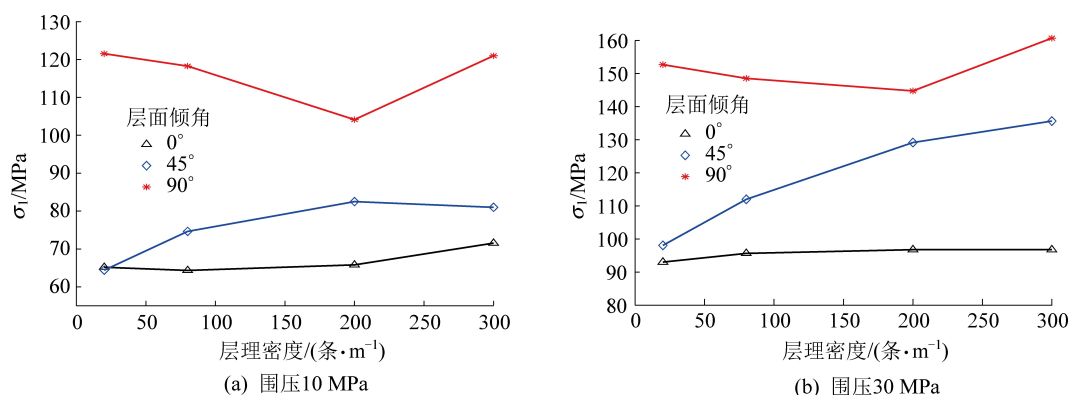


图6 不同层面倾角下峰值强度与层理密度的关系

Fig.6 Variation of peak strength and layer density under various inclination angles

3.3 变形特征

根据三轴压缩试验的应力-应变曲线,得到不同围压、不同层理密度下,岩石的弹性模量随层面倾角的变化规律(图7)。当围压为10 MPa时,层理组数为2组和8组的试样,其弹性模量随着层面倾角

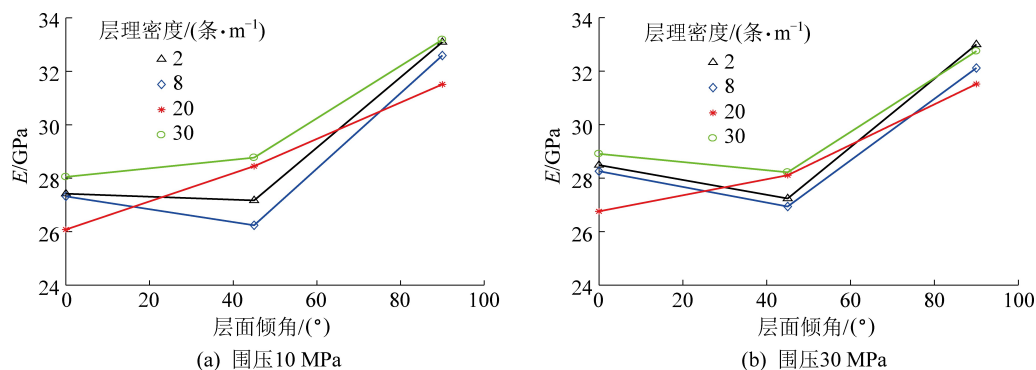


图7 不同层面倾角下弹性模量与层理组数的关系

Fig.7 Relationship between elastic modulus and layer density under various inclination angles

3.4 破坏特征

相同层面倾角下层状岩体在围压为10 MPa和30 MPa时破坏特征大致相同。图8为10 MPa围压下层面倾角0°、45°和90°时不同层理密度试样的破坏形态。

当层面倾角为0°时,随层理密度增加,试样逐渐发生沿岩体倾斜方向的穿层剪切破坏。层面倾角为45°时,破坏模式基本为层面破坏和夹层破坏。层面倾角为90°时,岩体沿倾斜方向的破坏形态并不明显,破坏形式包含基质破坏,夹层破坏和穿层破坏等。可见,在围压作用下,层状岩体的破坏程度并不剧烈,岩体内裂隙被围压压密,破裂形式随层面倾角不同发生明显变化。

4 结论

1) 岩石基质的峰值强度和弹性模量均表现出尺寸效应,二者均随试样高宽比的增大而减小,且随

的增大呈现出先减小后增大的趋势;另2组试样,其弹性模量呈现出一直增大的趋势。当围压为30 MPa时,岩层组数为2组、8组和30组的试样,其弹性模量呈现出先减小后增大的趋势;岩层组数为20组的试样,弹性模量一直增大。

着围压的增大,尺寸效应越不明显,围压对尺寸效应有弱化作用。

2) 随高宽比增大,岩石基质整体破坏程度减弱,破坏剧烈程度降低,低围压下发生局部的结构性失稳破坏,高围压下,由于围压的侧向约束,结构性失稳程度减弱,岩体延性特征逐渐显现。

3) 三轴条件下,层面倾角0°和45°条件时,随层理密度增加,峰后残余强度增大,峰后模量减小,岩体由脆性向延性转变。

4) 高围压使小倾角或大倾角岩体由脆性向延性转变,而中等倾角条件下围压的脆—延转化作用并不明显。

5) 在围压和层理密度相同的情况下,层面倾角90°时岩体的峰值强度和弹性模量最大,在围压作用下,层状岩体的破坏程度并不剧烈,岩体内裂隙被围压压密,破裂形式随层面倾角不同发生明显变化。

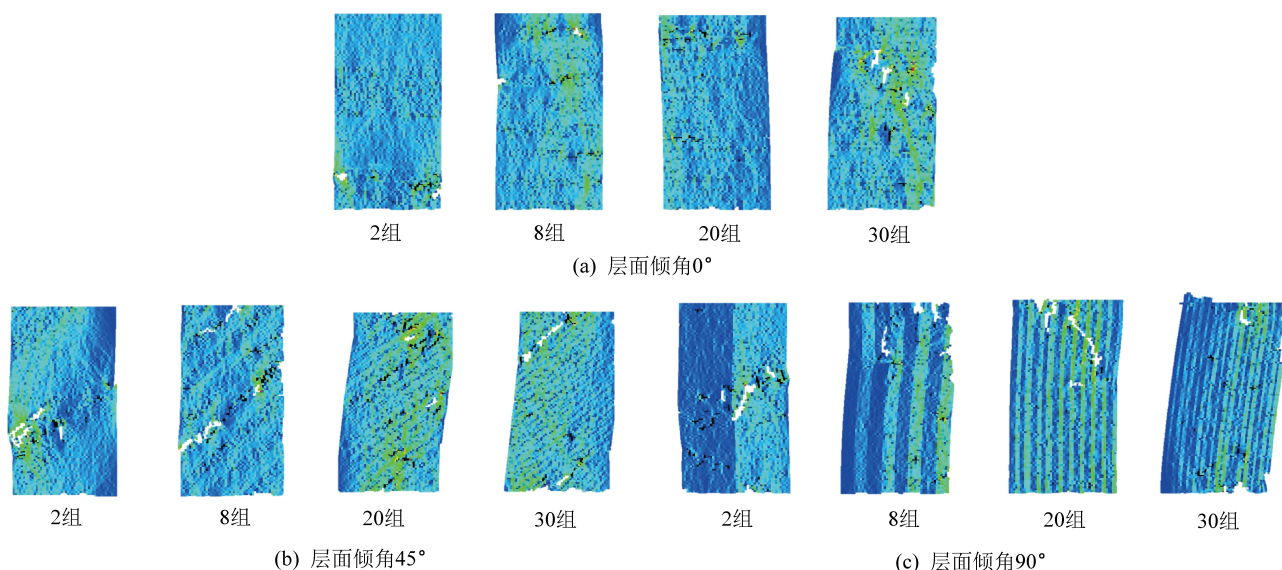


图8 不同层面倾角下试样的破坏形态
Fig.8 Failure mode under various inclination angle

参考文献 (References):

- [1] 林 军,杜涛涛,刘旭东. 近直立特厚煤层冲击危险源辨识及控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6):119-125.
LIN Jun, DU Taotao, LIU Xudong. Study on identification and control of rock burst hazard source in near vertical and extra thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6):119-125.
- [2] 李 杨,王建鹏,陈一鼎,等. 多煤层开采中间岩层对覆岩移动的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 246-255.
LI Yang, WANG Jianpeng, CHEN Yiding, et al. Study on effect of interburden on movement of overburden in multiple coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 246-255.
- [3] 冯国瑞,侯水云,梁春豪,等. 复杂条件下遗煤开采岩层控制理论与关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1):144-149.
FENG Guorui, HOU Shuiyun, LIANG Chunhao, et al. Basic theories and key technologies of rock strata control for residual coal resources mining under complex conditions[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 144-149.
- [4] LI Zhen, XU Rongchao. An early-warning method for rock failure based on Hurst exponent in acoustic emission/microseismic activity monitoring[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(10):7791-7805.
- [5] JAEGER Jc. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geological Magazine, 1960, 97(1):65-72.
- [6] 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)
- [7] 余成学,范玉祥. 具有弯曲效应的三维层状岩体屈服准则[J]. 岩土力学, 1998, 19(3):38-42.
SHE Chengxue, FAN Yuxiang. A three-dimensional yield criterion for layered rockmass with bending effect considered[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(3):38-42.
- [8] 宋建波. 用Hoek-Brown准则估算层状岩体强度的方法[J]. 矿业研究与开发, 2001, 21(6):1-3.
SONG Jianbo. Estimating the strength of stratified rockmass using the Hoek-Brown rule[J]. Mining Research and Development, 2001, 21(6):1-3.
- [9] 阳军生,张 聪,肖小文. 基于岩体层理特性的非线性抗剪强度准则研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017(1):126-131.
YANG Junsheng, ZHANG Cong, XIAO Xiaowen. Research on non-linear shear strength criterion for layered rock mass with micro-discontinuity[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017(1):126-131.
- [10] 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.
- [11] 刘殿明. 岩石声学各向异性特征研究[J]. 中国煤炭地质, 1992(3):58-64.
LIU Dianming. Study of the anisotropy characteristics of rock acoustics[J]. Coal Geology of China, 1992(3):58-64.
- [12] 胡善超. 深井巷道层状围岩变形破坏特征及机理研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
HU Shanchao. Characteristics and mechanism of deformation and failure of layered surrounding rockmass in deep roadway[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [13] 王宏图,贺建民. 层状复合岩体力学的相似模拟[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999(2):81-83.
WANG Hongtu, HE Jianmin. Similar simulation of the mechanics of a layered complex rock mass[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999(2):81-83.
- [14] 王永岩,李剑光. 含水平弱夹层岩体界面应力及破坏形式[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2015, 34(6):710-715.
WANG Yongyan, LI Jianguang. Analysis for failure modes and

- interfacial stress of rock mass with horizontal weak interlayer[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2015, 34(6):710-715.
- [15] 刘立,梁伟,李月. 岩体层面力学特性对层状复合岩体的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2):65-69.
LIU Li, LIANG Wei, LI Yue. Influence of mechanical characteristic of bedding surface on stratified composite rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(2):65-69.
- [16] 孙晓明,苗沛阳,申付新. 不同应力状态下深井水平层状软岩巷道底鼓机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6):1099-1106.
SUN Xiaoming, MIAO Peiyang, SHEN Fuxin. Study on floor heave mechanism of horizontal layered soft rock roadway in deep well under different stress states[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(6):1099-1106.
- [17] 邓华锋,王伟,李建林. 层状砂岩各向异性力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1):112-120.
DENG Huafeng, WANG Wei, LI Jianlin. Experimental study on anisotropic characteristics of bedded sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1):112-120.
- [18] 侯志强,王宇,刘冬桥. 层状大理岩破裂过程力学特性与能量演化各向异性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4):794-804.
HOU Zhiqiang, WANG Yu, LIU Dongqiao. Investigation of the anisotropic mechanical behaviors and energy evolution during uniaxial deformation of interbedded marble[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(4):794-804.
- [19] 李德忠,夏孝够,李冲. 煤矿沉积岩层的当量弹性特征探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(18):3322-3326.
LI Dezhong, XIA Xiaogou, LI Chong. Study on equivalent elastic feature of sedimentary formation in collieries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(18):3322-3326.
- [20] 周辉,宋明,张传庆. 水平层状复合岩体变形破坏特征的围压效应研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2):465-473.
ZHOU Hui, SONG Ming, ZHANG Chuanqing. Effect of confining pressure on mechanical properties of horizontal layered composite rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2):465-473.
- [21] 廖安杰,孟陆波,李天斌. 热-力作用下层状砂岩各向异性三轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1):2593-2602.
LIAO Anjie, MENG Lubo, LI Tianbin. Study on anisotropic tri-axial compression of layered sandstone under thermal force [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1):2593-2602.
- [22] 唐春安,徐曾和,徐小荷. 岩石破裂过程分析 RFPA2D 系统在采场上覆岩层移动规律研究中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999(5):456-458.
TANG Chunan, XU Zenghe, XU Xiaohe. Application of analysis system RFPA2D of rock fracture process in researching moving rules of covering workplace [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 1999(5):456-458.
- [23] LI Zhen, ZHOU Hui, HU Dawei, ZHANG Chuanqing. Yield criterion for rocklike geomaterials based on strain energy and CMP model [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(3):4020013.
- [24] LI Zhen, LIU Jiachen, XU Rongchao, *et al.* Study of grouting effectiveness based on shear strength evaluation with experimental and numerical approaches [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16:3991-4005.
- [25] LI Zhen, ZHOU Hui, JIANG Yue, *et al.* Methodology for establishing comprehensive stress paths in rocks during hollow cylinder testing [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(4):1055-1074.