

张晓悟,徐金海,刘智兵,等.层状岩石力学特性及能量演化各向异性规律[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(2):1-9. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.001

ZHANG X W, XU J H, LIU Z B, et al. On Mechanical Properties and Energy Evolution Anisotropy of Layered Rocks[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(2):1-9. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.001

层状岩石力学特性及能量演化各向异性规律

张晓悟,徐金海*,刘智兵,孙垒

(中国矿业大学 矿业学院,江苏 徐州 221116;中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:为研究层状岩石在不同倾角条件下的力学特性及能量演化各向异性规律,设计 6 种不同倾角大理石试样的单轴压缩试验,分析层状岩石特征应力点的力学特征和能量的倾角效应,揭示层状岩石的破坏特征各向异性机理.研究表明:随着倾角的增大,层状岩石单轴抗压强度先减后增,弹性模量则逐渐降低;在层状岩石的受压过程中,能量分布存在明显的各向异性,且倾角较小时,弹性能占比较大,相反,耗散能占比较大;受载方向和层理面倾角的不同使得层状岩石的承载破坏方式不同,这是导致层状岩石的力学特性和能量规律出现差异的主要原因.研究结果可为矿井灾害发生机理和防治研究提供理论指导.

关键词:层状岩石;能量演化;特征应力;各向异性

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)02-0001-09

On Mechanical Properties and Energy Evolution Anisotropy of Layered Rocks

ZHANG Xiaowu, XU Jinhai, LIU Zhibing, SUN Lei

(School of Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To study the mechanical properties and energy evolution anisotropy of layered rocks under different inclination angles, six types of uniaxial compression experiments on marble samples with inclination angles are designed, and the mechanical characteristics of the characteristic stress points of layered rocks and the inclination effect of energy are analyzed. The anisotropy mechanism of failure characteristics of layered rocks is described. The research results show that as the inclination angle increases, the uniaxial compressive strength of layered rocks first decreases and then increases, while the elastic modulus gradually decreases. During the compression process of layered rock, the energy distribution has obvious anisotropy. When the inclination angle is small, the elastic energy accounts for a larger proportion. On the contrary, the dissipated energy accounts for a larger amount. The loading direction and the angle of the bedding plane make the layered rock load-bearing failure mode different, which is the main reason for the difference in the mechanical properties and energy laws of the layered rock. The research results have provided theoretical guidance for the research on the occurrence mechanism and prevention of mine disasters.

Keywords: layered rock; energy evolution; characteristic stress; anisotropy

收稿日期:2021-04-15

基金项目:煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLCRSM2020X05)

*通信作者,E-mail:471131584@qq.com

长期的沉积效应使得岩体呈现出层状结构^[1-3].大量研究^[4-6]表明:复杂地应力条件下,层状岩石物理和力学属性的各向异性特征在互层结构薄弱处造成的能量积累和释放是导致岩体失稳、破坏和诱发矿井灾害的主要原因.因此,研究不同倾角层状岩石的力学特性和能量演化各向异性,对矿井灾害的分析和预防非常必要.

近些年,不少学者对层状岩石各向异性进行了大量的研究.陈天宇等^[7]通过对不同层理角度的页岩进行三轴压缩试验,研究不同层理面倾角和不同围压条件下页岩的力学特性的各向异性,随着层理面倾角的增加,页岩波速逐渐降低而力学强度先减后增;侯振坤等^[8]研究发现页岩的微观特性和单轴压缩力学特征各向异性明显,提出随着层理面倾角的增加,岩石的弹性模量和波速都减小;黄春等^[9]研究7种不同倾角条件下灰岩的力学特性各向异性,发现随着倾角的增加,灰岩的弹性模量、峰值强度和残余强度先减后增;胡杰等^[10]研究不同倾角层状砂岩应变岩爆各向异性特征,发现层理面倾角越小,越容易发生岩爆,且岩爆能量较低,但破坏程度更明显;邓华锋等^[11]研究不同倾角砂岩的声学 and 力学特征各向异性,发现砂岩的波速和弹性模量随着层理面倾角的增加而增大,但抗压强度先减后增,并指出层状岩石承载能力的大小和破坏特性主要受载荷方向的影响;宋斌^[12]通过对围岩进行原位变形测试,认为不同倾角岩石强度的差异较大,但内聚力基本不变;储超群等^[13]研究单轴压缩条件下砂岩的力学特性和声发射特征,指出层状砂岩受倾角影响的力学特性和破坏特征变化明显;张伯虎等^[14]通过对5种不同倾角的页岩进行单轴、三轴压缩和超声波试验,发现随着层理面倾角的增加,页岩抗压强度先减后增,而波速持续增加.

层状岩石受外载荷作用时,岩石内部存在能量的输入和释放,受载过程会对岩石造成损伤,因此,单纯地从力学特性和变形特征角度开展层状岩石各向异性研究具有一定的局限性.基于此,本文设计6种不同倾角条件下的层状大理石单轴压缩试验,分析不同倾角层状岩石的单轴抗压强度和弹性模量变化特征,研究不同倾角层状岩石受载过程中的总能量、弹性能和耗散能的演化特性,深入探究各特征应力点的总能量、弹性能和耗散能的分布规律,为矿井灾害发生机理和防治研究提供理论指导.

1 试验方案

试验所用的大理石试样取自山西某矿工作面顶板,该大理石岩层总厚度为5.2 m.为保证所取岩块的匀质性,距离岩层上下层面400 mm以上取3 m×3 m×3 m立方体原生岩块.所取岩石试样岩体内层理面清晰,由基质和夹质交替构成,其中,基质的主要成分为石英、方解石和赤铁矿,呈细粒晶状结构,粒度为0.8~1.2 mm,约占试样含量的70%,夹质由白云石构成,呈粉粒结构,粒度为0.1~0.3 mm,约占试样含量的30%.

为研究不同层状岩石的各向异性特征,将矿井原生岩体所取回的完整岩块分别钻取倾角为0°, 15°, 30°, 45°, 60°和90°的6组圆柱体岩样,并严格按照国际岩石力学学会规范要求^[15-17]进行加工,制作成50 mm×100 mm的标准试件.层理面倾角 θ 定义为试件轴向与层理面的夹角.试验所用试件如图1所示.



图1 试验试件

采用GCTS RTX-4000型岩石伺服实验系统对试件进行单轴压缩试验.试验加载过程采用轴向位移控制,加载速率为0.05 mm/s,采用LVDT变形量测试系统实时记录试样受载过程中的轴向和径向变

形量.为减少试验过程中误差的影响,每组试件试验 3 次取平均值进行分析.图 2 为不同倾角层状岩石的破坏情况.

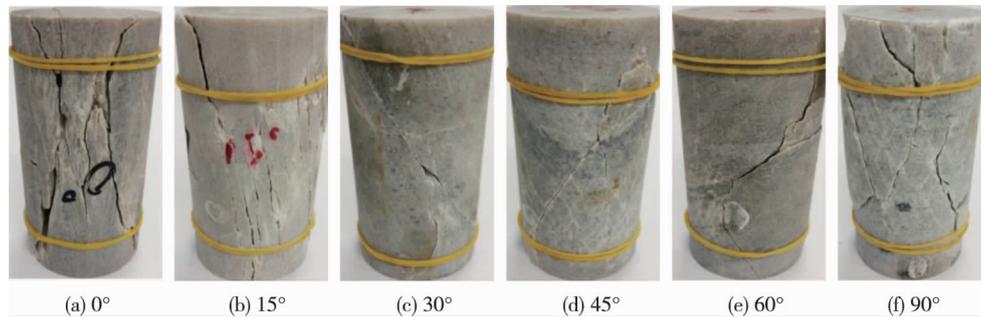


图 2 不同倾角层状岩石破坏情况

2 力学特征响应各向异性规律

2.1 应力-应变曲线分析

图 3 为单轴压缩条件下,不同倾角层状岩石的全应力-应变曲线.

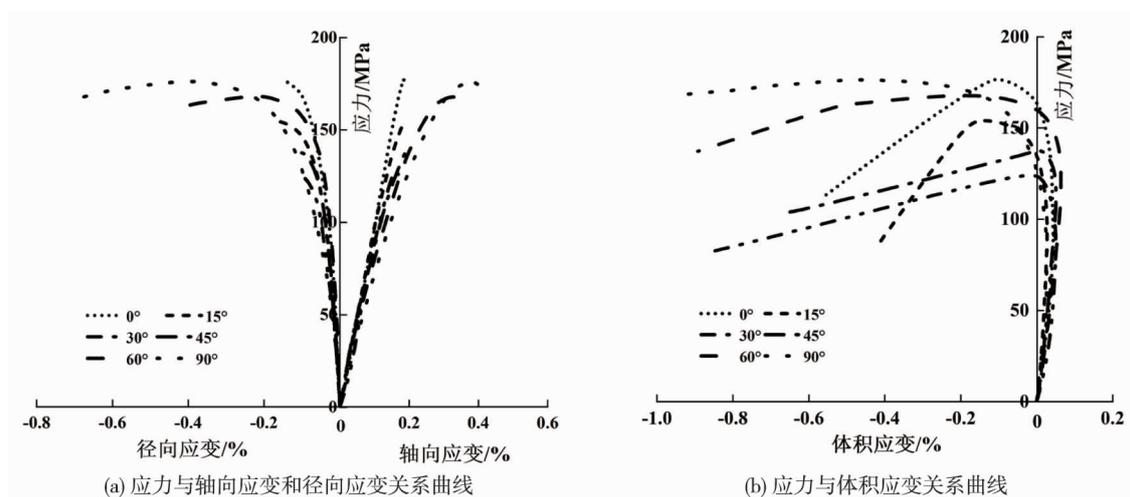


图 3 全应力-应变曲线

由图 3a 可知:不同倾角层状岩石受载时,应力-应变曲线主要可以分为 2 类.第一类曲线,即 0° , 15° , 30° 和 45° 倾角的应力-应变曲线,该类曲线具有 3 种特征:(1) 受载初期,无明显裂隙压密下凹部分;(2) 曲线线弹性部分较长;(3) 载荷接近峰值应力时,岩石瞬间破坏,无峰后应力-应变曲线;(4) 曲线整体呈近直线状,岩石表现出明显的脆性特征.第二类曲线,即 60° , 90° 倾角的应力-应变曲线,该类曲线与第一类曲线有 2 个不同之处:(1) 载荷在邻近峰值应力时,曲线呈下凸状,表现出一定的塑性特性;(2) 载荷超过峰值应力后,出现峰后阶段,但该阶段很快消退,因此,层状岩石整体仍表现为脆性特征.

由图 3b 可知:不同倾角层状岩石的应力与体积应变曲线的直线段较长,体积应变小,同时,当体积应变较小时,岩石即出现扩容现象,此时应力值约为岩石峰值抗压强度的 80%,表现出明显的脆性特征.

2.2 脆性岩石特征应力分析求解

脆性岩石峰前阶段各特征应力点如图 4 所示.脆性岩石峰前应力-应变曲线可以分为 4 个阶段^[18-19]: 裂隙闭合阶段 I, 线弹性阶段 II, 裂隙稳定扩展阶段 III 和裂隙非稳定扩展阶段 IV. 以上 4 个阶段依次对裂纹闭合应力 σ_b , 裂纹起裂应力 σ_q , 扩容应力 σ_k 和峰值应力 σ_f .

根据文献[20-21],起裂应力约为峰值应力的 30%~50%,其大小由体积应变曲线的拐点确定,而扩容应力则由体积应变曲线的反弯点来确定.

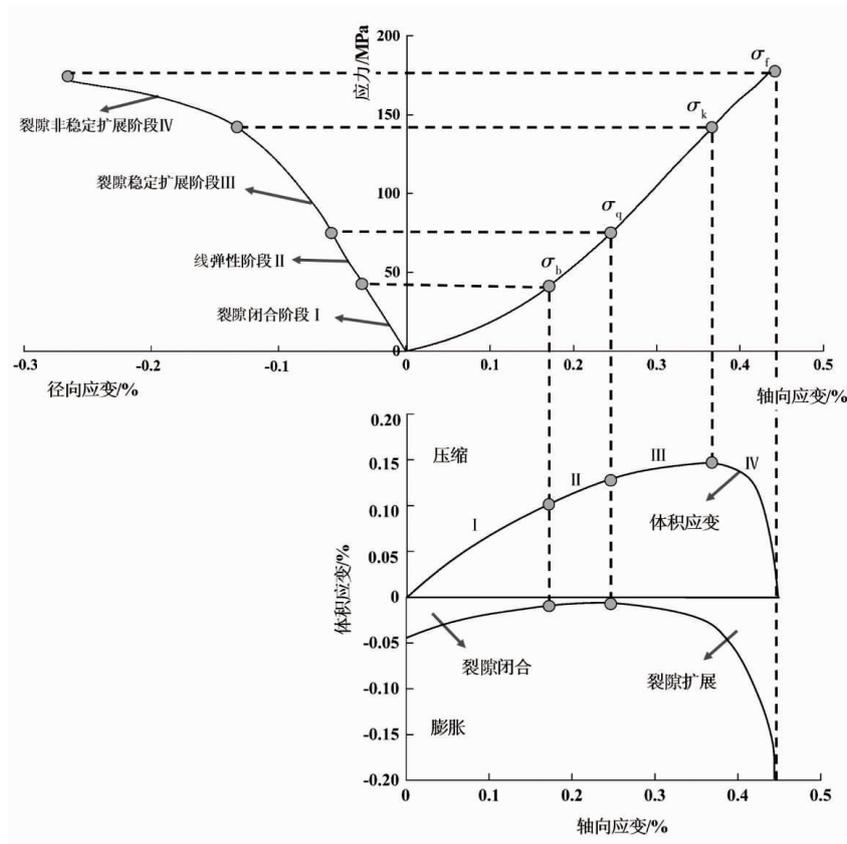


图4 脆性岩石峰前阶段各特征应力点

2.3 力学特征各向异性变化

2.3.1 单轴抗压强度和弹性模量各向异性规律

表1为不同倾角层状岩石的特征参数.图5为不同倾角层状岩石单轴抗压强度和弹性模量各向异性规律.

表1 岩石应力-应变特征参数

倾角	起裂应力 σ_q/MPa	扩容应力 σ_k/MPa	峰值应力 σ_r/MPa	起裂应变 $\epsilon_q/\%$	扩容应变 $\epsilon_k/\%$	峰值应变 $\epsilon_r/\%$	平均弹性模 量 E/GPa	平均泊 松比 λ
0°	63.82	118.65	179.69	0.065 7	0.135 4	0.206 9	98.20	0.35
	61.45	107.85	167.56	0.062 0	0.129 8	0.203 1		
	59.30	108.42	175.98	0.060 3	0.114 5	0.216 7		
15°	73.05	105.39	156.54	0.075 6	0.125 7	0.146 3	96.35	0.34
	78.92	97.75	158.97	0.079 8	0.146 3	0.210 8		
	70.89	107.35	159.69	0.075 8	0.103 2	0.186 3		
30°	84.69	96.85	127.65	0.092 3	0.146 8	0.170 3	92.00	0.35
	77.05	99.78	130.35	0.086 7	0.139 6	0.196 3		
	80.97	97.96	129.45	0.084 9	0.123 4	0.172 5		
45°	73.56	112.69	138.62	0.086 5	0.142 1	0.201 6	86.30	0.33
	74.69	106.35	140.26	0.089 8	0.121 2	0.225 4		
	74.65	110.03	142.16	0.082 4	0.138 7	0.236 9		
60°	65.32	126.32	167.84	0.075 2	0.150 2	0.340 5	80.44	0.25
	60.25	117.96	158.74	0.081 6	0.173 2	0.293 4		
	58.69	113.92	164.79	0.072 8	0.160 8	0.310 8		
90°	46.89	128.97	175.83	0.063 2	0.210 6	0.389 4	79.27	0.35
	44.65	119.76	172.24	0.057 9	0.203 1	0.376 5		
	53.98	120.36	169.06	0.062 4	0.226 8	0.359 1		

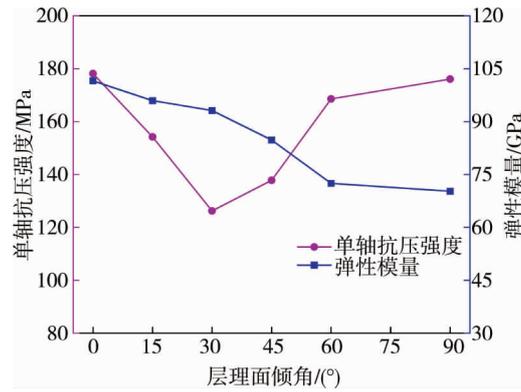


图 5 单轴抗压强度和弹性模量各向异性规律

由图 5 可知:层状岩石的单轴抗压强度随层层面倾角的增加呈 V 型分布特征,即当层层面倾角为 0° 和 90° 时,层状岩石的单轴抗压强度达到最大,分别为 174.41 和 172.38 MPa,而当层层面倾角为 30° 时,层状岩石的单轴抗压强度最低,为 129.15 MPa;相反,层状岩石的弹性模量随层层面倾角的增加持续降低,当层层面倾角为 0° 时,层状岩石的弹性模量最大,为 98.2 GPa,当层层面倾角为 90° 时,层状岩石的弹性模量最小,为 79.27 GPa.当层层面倾角为 0° 和 90° 时,岩石的单轴抗压强度基本相同,但弹性模量却相差较大,这是因为岩石内部的基质组分为细粒晶状结构,力学性能较好,而夹质组分为粉粒结构,力学性能较弱.当层层面倾角为 0° 时,岩石受外载荷作用,此时分层组分平行于加载方向,外载荷主要由力学性能较好的基质组分承受,层状岩石的变形量小,导致弹性模量较大;相反,当层层面倾角为 90° 时,岩石受外载荷作用,此时分层组分垂直于加载方向,外载荷主要由力学性能较弱的夹质组分承受,层状岩石的变形量大,导致弹性模量较小.

2.3.2 特征应力和特征应变各向异性规律

图 6 为不同倾角层状岩石的特征应力和层层面倾角的变化规律.图 7 为不同倾角层状岩石的特征应变和层层面倾角的变化规律.

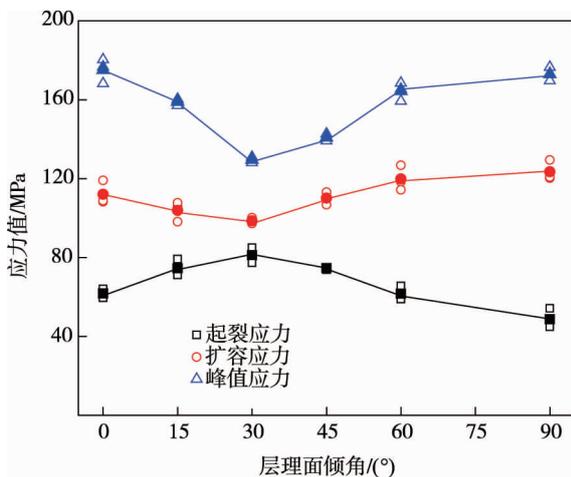


图 6 特征应力与层层面倾角变化规律

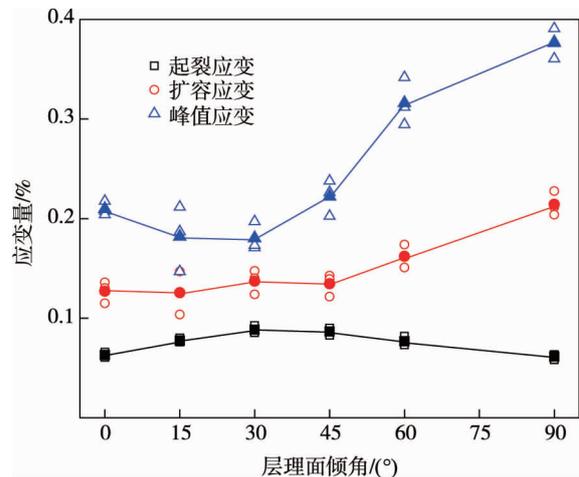


图 7 特征应变与层层面倾角变化规律

由图 6 和图 7 可知:随着层层面倾角的增大,层状岩石的峰值应力和峰值应变先减后增,当层层面倾角为 30° 时,峰值应力和峰值应变最小,即该倾角条件下层状岩石最易破坏.同样,随着层层面倾角的增大,层状岩石的扩容应力和扩容应变先减后增.然而,层状岩石的起裂应力和起裂应变却随层层面倾角的增大而先增后减,当层层面倾角为 30° 时,层状岩石的起裂应力和起裂应变最大,即在该倾角条件下,层状岩石损伤产生裂纹需要的应力更大,相对于其他倾角条件,岩样更难产生损伤裂纹.

2.3.3 应力水平各向异性规律

单轴压缩试验中,起裂应力 σ_q 与峰值应力 σ_r 的比值、扩容应力 σ_k 与峰值应力 σ_r 的比值能够反映层

状岩石在不同损伤阶段其裂纹起裂与扩展的相对难易程度,可将这2个比值定义为起裂应力水平 K_q 和扩容应力水平 K_k , 具体为

$$K_q = \frac{\sigma_q}{\sigma_f}; \quad (1)$$

$$K_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_f}. \quad (2)$$

图8为层状岩石起裂应力水平、扩容应力水平与层理面倾角的变化规律.

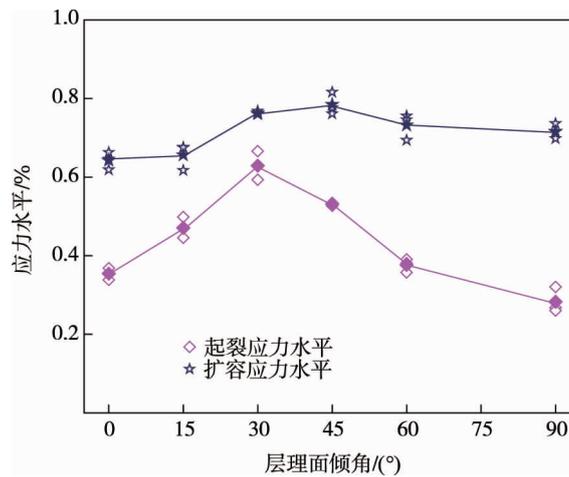


图8 应力水平与层理面倾角变化规律

由图8可知:不同倾角条件下,层状岩石的起裂应力水平、扩容应力水平曲线表现为上凸型.当层理面倾角为 0° 和 90° 时,起裂应力水平较小,分别为0.36和0.27,此时层状岩石容易发生裂纹起裂损伤;当层理面倾角为 30° 时,起裂应力水平最大,达到0.62,此时层状岩石发生起裂裂纹损伤相对滞后.同样,扩容应力水平表现出相同的变化规律.因此,应力水平的大小能表征层状岩石的非均质性和结构性差异,即在组分及颗粒大小相同的条件下,层状岩石结构倾向是岩石力学特性与损伤破坏的决定因素.

3 能量演化各向异性规律

3.1 能量损伤计算原理

由热力学第一定律,外载荷对岩石的输入能 U 可以分为2个部分:一部分为载荷卸载后,可释放、恢复的弹性应变能 U_e ;另一部分为施加外载荷导致岩石内部的微裂隙不断生成、扩展和贯穿的不可逆的耗散能 U_d [22-24].

图9为单轴压缩条件下应力-应变曲线中弹性应变能和耗散能的关系.输入能 U 为加载曲线下方的区域面积,弹性能 U_e 为卸载曲线下方的区域面积,耗散能 U_d 为加卸载应力曲线之间的区域面积.

因此,加卸载过程中,单位岩石总能量、弹性能以及耗散能(即岩石总能量密度、弹性能密度和耗散能密度)可由式(3)~式(5)计算.

$$U = \int_0^{\varepsilon_2} f_1(\varepsilon) d\varepsilon; \quad (3)$$

$$U_e = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} f_2(\varepsilon) d\varepsilon; \quad (4)$$

$$U_d = U - U_e = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_2} f_1(\varepsilon) d\varepsilon - \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} f_2(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (5)$$

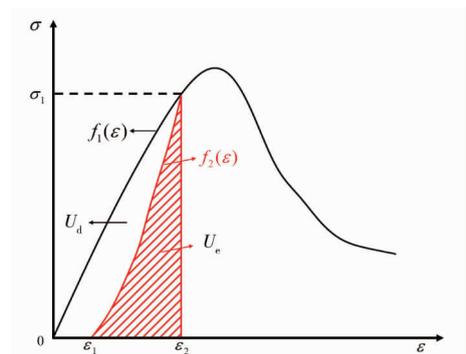


图9 弹性应变能和耗散能关系

式中: ε_1 为卸载后岩石的应变变量; ε_2 为加载时岩石的应变变量; $f_1(\varepsilon)$ 为岩石的应力-应变加载曲线; $f_2(\varepsilon)$ 为岩石的应力-应变卸载曲线.

3.2 能量演化各向异性规律

图 10 为不同倾角条件下,层状岩石随轴向应变增长的能量演化规律.

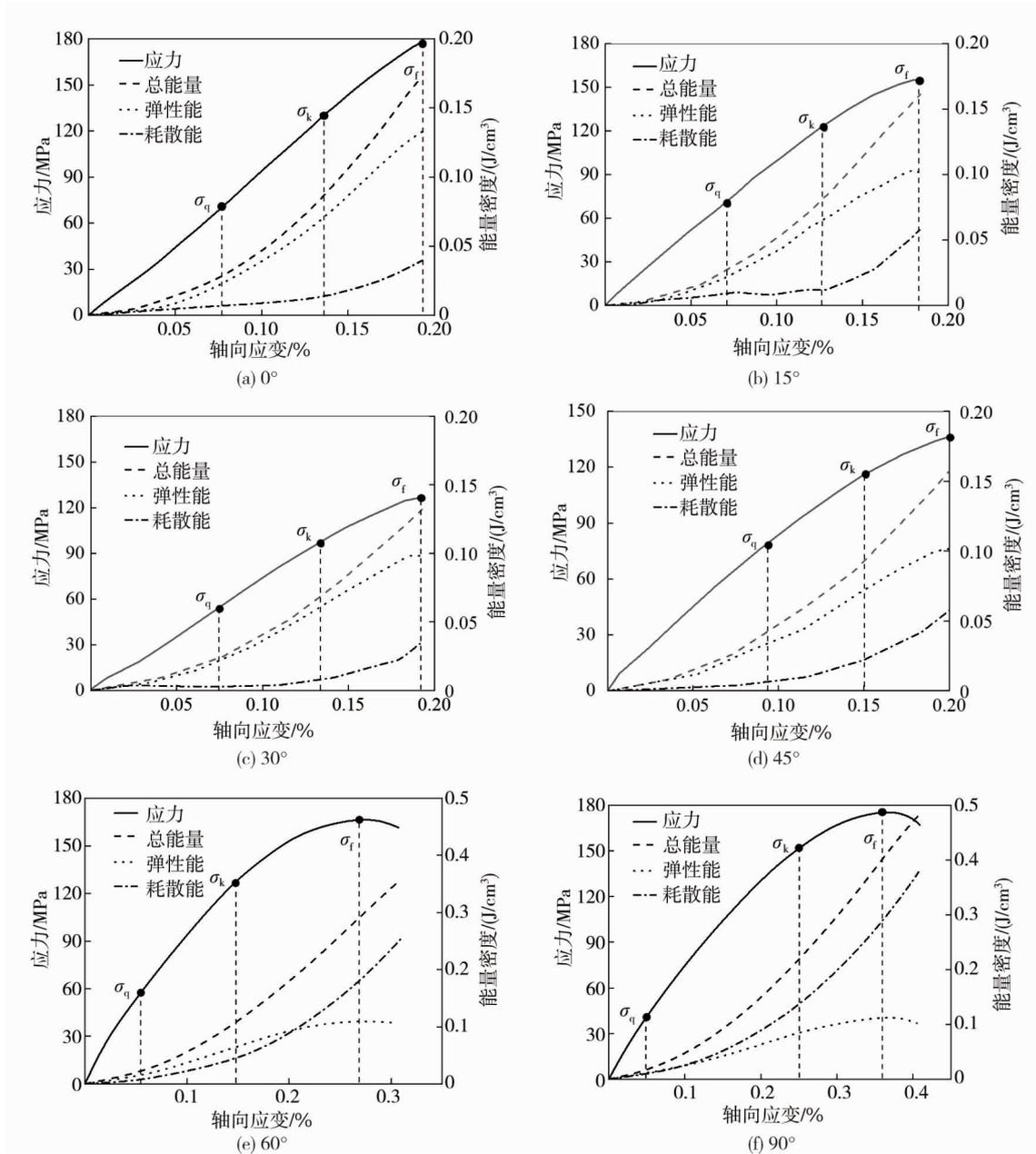


图 10 层状岩石能量与轴向应变关系

由图 10 可知:外载荷作用下,层状岩石的总能量密度、弹性能密度和耗散能密度均持续增加.在不同倾角条件下,弹性能密度和耗散能密度占比明显分为 2 类:第一类,即当层理面倾角为 0° , 15° , 30° 和 45° 时,单位岩石受到的总能量主要表现为弹性能,耗散能占比较低;第二类,即当层理面倾角为 60° 和 90° 时,单位岩石受到的总能量主要表现为耗散能,弹性能占比较低.这是因为当层理面倾角为 0° , 15° , 30° 和 45° 时,层状岩石的受载方向与层理面倾角较小,此时岩石主要表现为可恢复的压缩承载,而沿层理面发生的不可恢复的剪切滑移承载则相对较少,相反,当层理面倾角为 60° 和 90° 时,层状岩石的受载方向与层理面倾角较大,此时岩石主要表现为沿层理面发生的不可恢复的剪切承载,而可恢复的压缩承载则相对较少.

图 11 为不同倾角条件下层状岩石特征点的能量分布规律.由图 11 可知:各特征点受层理面倾角影响呈

现的规律各不相同.对于起裂点,耗散能密度对层理面倾角的敏感性低,曲线基本水平,而总能量密度和弹性能密度受层理面倾角影响的变化幅度较大,当层理面倾角为 30° 时,单位岩石的总能量密度和弹性能密度达到极值,分别为 0.051 和 0.047 J/cm^3 .对于扩容点和峰值点,弹性能密度对层理面倾角的敏感性较低,曲线基本水平,而总能量密度和耗散能密度受层理面倾角影响的变化幅度较大.当层理面倾角为 90° 时,扩容点和峰值点的总能量密度和耗散能密度均达到极值,其中,扩容点的总能量密度和耗散能密度分别为 0.202 和 0.121 J/cm^3 ,单位岩石峰值点的总能量密度和耗散能密度分别为 0.433 和 0.320 J/cm^3 ,因此可以看出,层状岩石特征点处的能量密度呈现出明显的各向异性特征.此外,由图10c可以看出:层状岩石破坏所需要的能量随倾角的变化不完全相同,当层理面倾角为 30° 时,层状岩石破坏所需的能量密度最小,为 0.131 J/cm^3 ,此时岩石最易受到破坏,而当层理面倾角为 90° 时,层状岩石破坏所需的能量密度最大,为 0.433 J/cm^3 ,此时岩石最难受到破坏.这是因为当层理面倾角为 90° 时,层状岩石破坏主要表现为剪切破坏,所需要的能量较多,相反,当层理面倾角为 30° 时,层状岩石破坏主要为层理面的滑移破坏,所需要的能量较少.

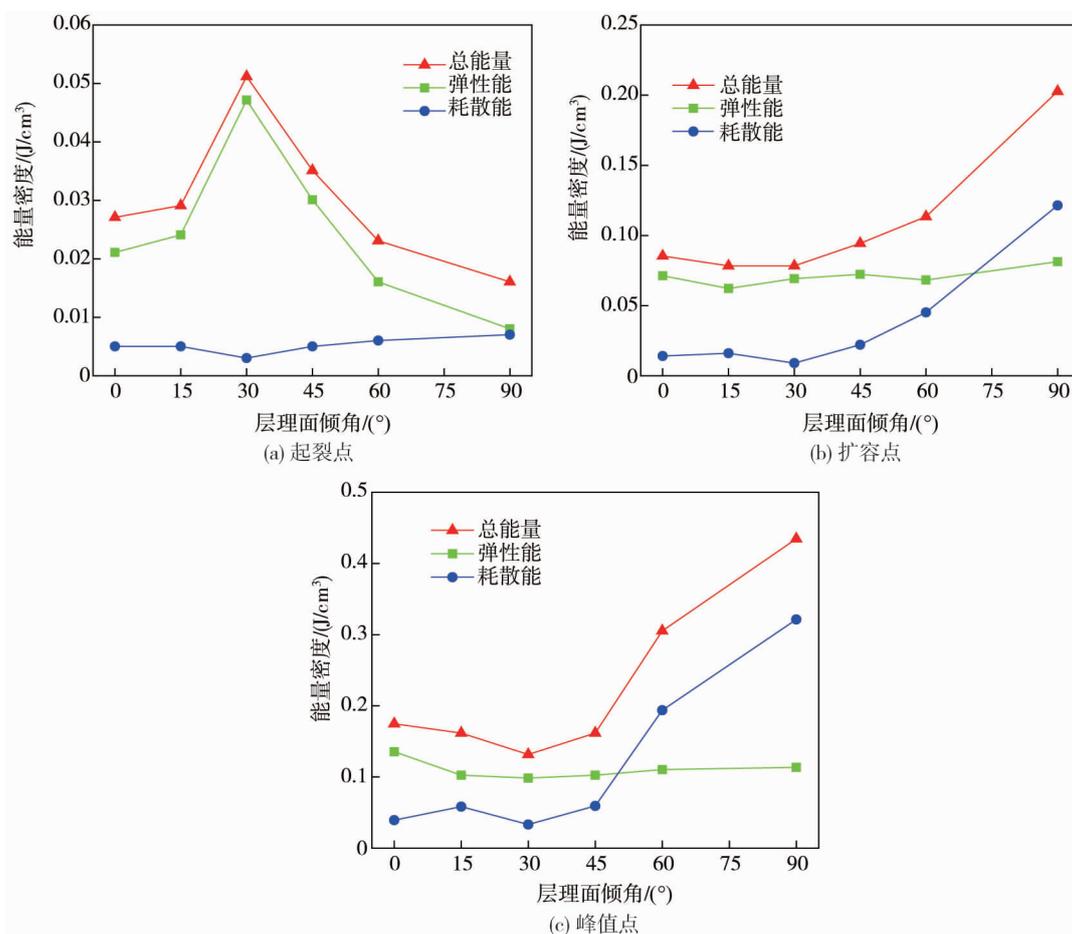


图11 层状岩石特征点能量分布规律

4 结论

1) 层状岩石存在较强的力学特征各向异性,主要表现为单轴抗压强度和弹性模量随层理面倾角的不同而变化.其中,随着层理面倾角的增大,单轴抗压强度呈现先减后增的趋势,而弹性模量则逐渐降低.

2) 在层状岩石受压过程中,能量分布存在明显的各向异性,且层理面倾角较小时,弹性能占比较大,相反,耗散能占比较大.

3) 受载荷方向和层理面倾角的不同,使得层状岩石的承载破坏方式不同,这是导致层状岩石力学特性和能量规律差异的主要原因.

4) 当层理面倾角为 30° 时,层状岩体最易发生破坏,释放能量,导致围岩失稳发生灾害.

参考文献:

- [1] 杨孟达. 煤矿地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- [2] 刘小洪, 石章俊, 冯明友, 等. 旺苍地区灯影组层状硅质岩类孔洞充填特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 1-11.
- [3] 丁恩理, 刘越, 吴继敏, 等. 软硬互层状类岩石试样力学特性的三轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1): 39-46.
- [4] 夏才初, 孙宗颀. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版, 2002.
- [5] 翟鸿宇, 常旭, 朱维, 等. 基于水力压裂实验的龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(3): 380-397.
- [6] 刘运思, 何楚韶, 傅鹤林, 等. 层状板岩动静拉伸力学特性及破坏模式研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2789-2797.
- [7] 陈天宇, 冯夏庭, 张希巍, 等. 黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1772-1779.
- [8] 侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2541-2550.
- [9] 黄春, 左双英, 王嵩, 等. 层状各向异性岩体的室内单轴压缩试验分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5): 58-62.
- [10] 胡杰, 何满潮, 李兆华, 等. 各向异性层状砂岩应变岩爆试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(4): 735-741.
- [11] 邓华锋, 李涛, 李建林, 等. 层状岩体各向异性声学和力学参数计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 2725-2732.
- [12] 宋斌. 巷道层状围岩各向异性工程力学特性研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(8): 58-62.
- [13] 储超群, 吴顺川, 张诗淮, 等. 层状砂岩力学行为各向异性与破裂特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2232-2246.
- [14] 张伯虎, 马浩斌, 田小鹏, 等. 层状页岩力学参数的各向异性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 634-638.
- [15] 孟涛, 胡耀青, 付庆楠, 等. 层状盐岩石膏夹层在腐蚀条件下断裂韧度试验及其弱化机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1933-1942.
- [16] 康亚明, 贾延, 罗玉财, 等. 三轴压缩时岩石破裂面方位角理论值与实验值研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(5): 665-670.
- [17] FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(3): 279-289.
- [18] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[D]. Canada: University of Manitoba, 1993.
- [19] 朱泽奇, 盛谦, 冷先伦, 等. 三峡花岗岩起裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(12): 2570-2575.
- [20] BRACE W F, PAULDING B W, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(16): 3939-3953.
- [21] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6): 643-659.
- [22] XIE H P, LI L Y, PENG R D, et al. Energy analysis and criteria for structural failure of rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 1(1): 11-20.
- [23] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [24] ZHOU H W, WANG Z H, WANG C S, et al. On acoustic emission and post-peak energy evolution in Beishan granite under cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(1): 283-288.