

层状灰岩各向异性力学特征及声发射演化试验分析

丁 恒¹, 刘 兵²

(1. 贵州省地质环境监测院, 贵阳 550000; 2. 贵州弘华地质工程有限公司, 贵阳 550081)

摘要:为研究层状岩体力学强度的各向异性特征,室内钻取 7 种不同层理倾角灰岩样,进行单轴压缩试验,并辅以声发射监测。试验结果表明:随着层理倾角增加,灰岩单轴抗压强度呈现先减小后增大的“V”形特征,在层理倾角为 45°时达到最小值;以 45°为界,45°以前,声发射能量累计曲线有两个明显台阶,在 $0.3\sigma_p$ (σ_p 为峰值强度) 与 $0.7\sigma_p$ 两个点存在激增现象,45°及以后,声发射能量累计曲线呈锯齿状增加,无明显台阶;声发射 b 值以 45°为界,45°以前整体呈下降趋势,在中间存在升高并保持一段台阶,45°及以后,呈“V”形,最低点出现在 $0.6\sigma_p$ 度左右。

关键词:层状岩体;各向异性;单轴压缩试验;声发射

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2021)08-0339-06

贵州层状构造灰岩体广泛发育,其力学强度表现出沿不同层理倾角的各向异性,为工程建设带来一定挑战。在边坡、隧道开挖与支护,地基承载力计算,高位地质灾害排查与处理等工程项目中,不可避免涉及到层状各向异性灰岩体力学强度方面的考量。因此对灰岩体层状各向异性的研究具有现实意义与生产价值。对此,黄春等^[1]通过室内单轴压缩试验,研究了层状各向异性灰岩峰值强度、残余强度、弹性模量等力学指标随倾角的变化规律。赵东雷等^[2]通过室内单轴压缩试验,并结合连续损伤理论,采用 weibull 分布,研究了白云岩损伤变量与累计应变、层理倾角之间的关系。姚欢迎等^[3]通过直剪试验研究了受载页岩准确的损伤演化规律和声发射特征。钟帅等^[4]通过不同角度层理灰岩巴西劈裂试验研究,分析了层理灰岩的巴西劈裂强度及拉裂损伤各向异性。张永泽等^[5]通过室内单轴压缩试验,研究了页岩的物理力学特征及其各向异性,指出当倾角为 0°时,破坏模式为张拉破坏,当倾角为 45°时,为沿着层理面的单一剪切破坏;当倾角为 90°时,为贯穿层理面的张拉破坏。在研究岩石力学性质的方法手段上,声发射技术已广泛应用到岩石损伤监测中,刘运思等^[6]基于单轴与巴西劈裂试验,结合声发射手段研究了层状砂岩抗拉压应力强度,破坏模式与声发射信号之间的关系。田勇

等^[7]研究了应用声发射特征信号判断灰岩起裂应力和损伤应力,并结合裂纹扩展特性,定义了损伤演化区间和损伤加剧期间。牟宏伟等^[8]通过室内单轴压缩试验研究了煤岩不同节理夹角力学特性及声发射关系。上述学者对岩石层状各向异性做了深入细致的研究,但是在运用声发射手段表征层状岩石应力应变破坏全过程方向上尚有一定研究空间。因此,本文在受前人研究启发的基础之上,分析了不同层理倾角声发射演化规律。

1 试验设备及试验方法

1.1 试样准备及试验设备

1.1.1 试样准备

试样(图 1)选取贵州安顺西秀区某采石场,地层为三叠系下统永宁镇组(T_1y),中风化薄—中厚层状灰岩,灰白色。将野外采集的岩块按照不同的岩理倾角,采用人工制样的方法制成直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱体标准试件,定义层面倾角为 α ,分别按照 $\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha=15^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ 、 $\alpha=75^\circ$ 、 $\alpha=90^\circ$ 进行制样,平行度及表面平度控制在误差范围内,试样符合岩石试验标准,室温下饱和纵波波速为 5.95 km/s。平均密度为 2.61 g/cm³。

1.1.2 试验设备

单轴压缩试验设备采用 WAW-1000 kN 型微

收稿日期:2021-04-13

基金项目:黔教合 KY 字[2021]108;贵州省科学技术基金([2020]1Y185)。

作者简介:丁恒(1983—),男(蒙古族),贵州石阡人,贵州省地质环境监测院,高级工程师,研究方向为水文地质、工程地质、环境地质;通信作者刘兵(1995—),男,贵州思南人,贵州弘华地质工程有限公司,总经理,助理工程师,硕士,研究方向为水文地质、工程地质、环境地质。



图 1 灰岩试样

机控制电液伺服万能试验机(图 2)。声发射系统采用美国物理声学公司的 PCI-2 E5.40 声发射检测系统(图 3)。



图 2 万能试验机



图 3 PCI2 E5.40 声发射检测系统

1.2 试验方法

考虑到层状岩体损伤模型的适用性,进行了 7 组单轴压缩试验,每组 4 个样,采用位移加载方式(图 4),加载速率为 0.1 mm/min,采用球形承压板,保证最大主应力方向平行与试样轴向方向。试验时,先对试样进行 0.5 kN 预加载,使试样端面与承压板及加载板充分接触,然后进入既定加载程序,并同时启动声发射采样系统进行数据采集,确保试验加载与声发射时处于同时开始与结束。

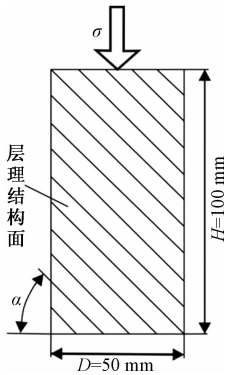


图 4 试样尺寸及加载方式

2 试验结果及分析

2.1 单轴抗压强度分析

各层理倾角灰岩应力-应变曲线如图 5 所示。

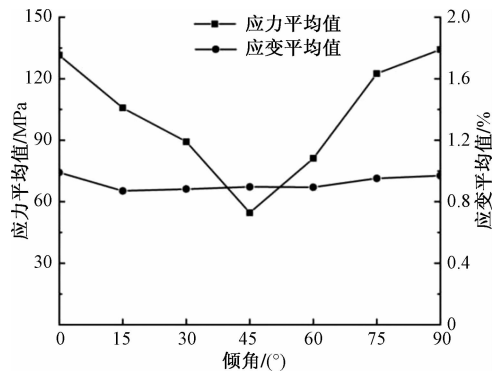


图 5 各层理倾角灰岩应力-应变曲线

由图 5 可知,试样峰值应力平均值与倾角的关系呈现出“V”字形态,在 45°之前,随着角度增加,峰值应力减小,在 45°时达到最低值,45°以后,峰值应力随角度增加而增大。而分析平均峰值应力对应的平均应变值可发现,从 0°到 15°,应变呈现陡降,表明在 0°时试样达到破坏时的应变较 15°时达到破坏的应变大,表现出较大“弹性”,而对比 0°与 90°平均应变,相较 0°,在峰值应力接近情况下,90°试样以更小应变承受了更大应力。因此在实际工程中,应当实际考虑工程岩体角度,岩体倾角为 30°~60°时较为危险,且在室内试验得到工程参数时,应当按照实际倾角情况制样,否则得到的参数相比与现场会有失真情况,在应变监测过程更是如此,0°与 15°达到破坏时的应变有较大差距。

2.2 声发射分析

2.2.1 不同层理倾角灰岩声发射响应

灰岩不同层理倾角单轴压缩曲线及声发射撞击数、能量关系如图 6 所示。灰岩在单轴压缩过程中,不同倾角的其应力降与声发射之间有着较好对

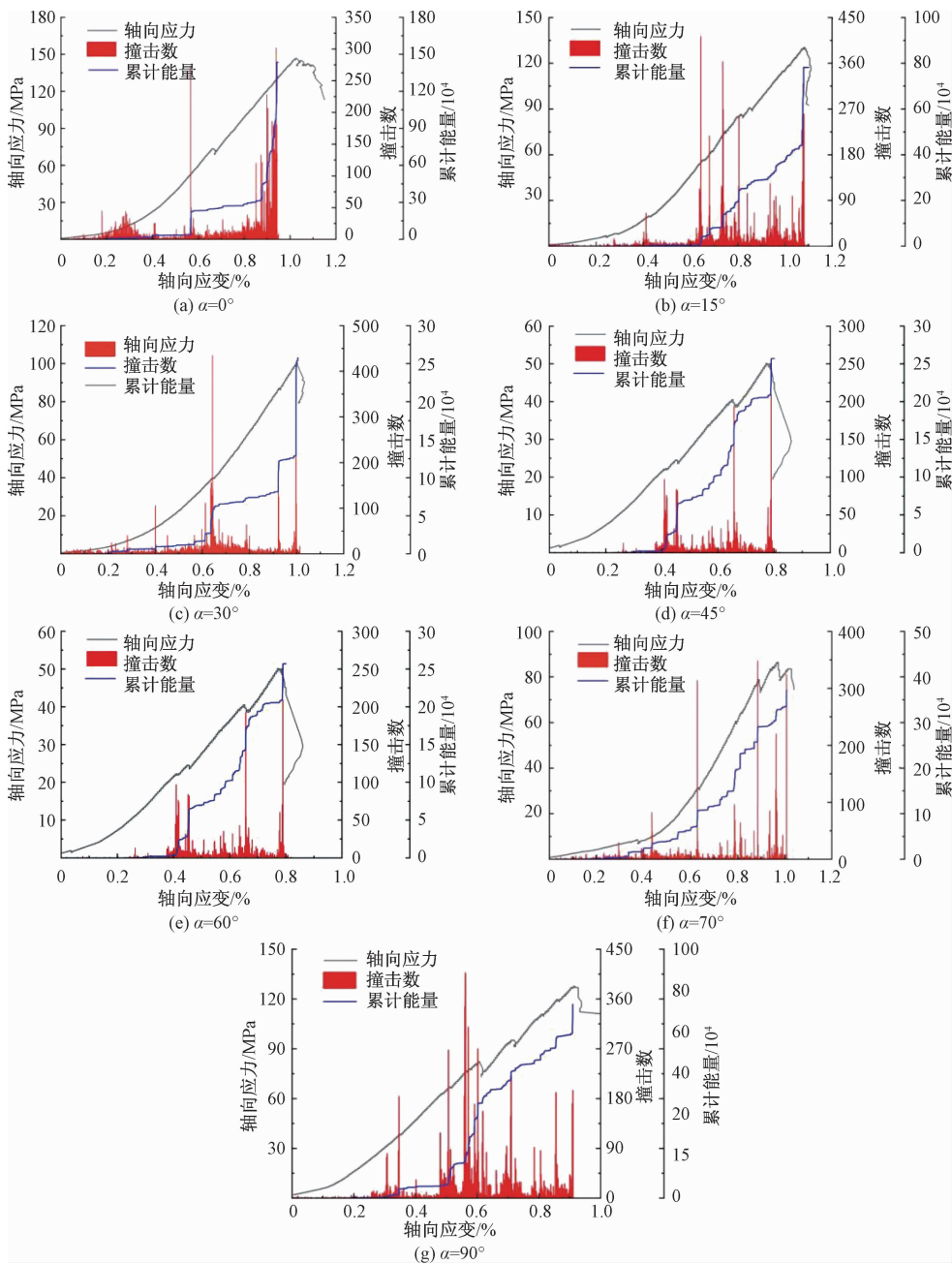


图 6 各层理倾角试件热破裂声发射演化特征

应关系,在单轴压缩曲线发生应力降之前,灰岩声发射撞击数保持在较低水平。出现应力降以后,灰岩撞击数骤增,并且伴随能量的突然增加,在 45° 以前,声发射能量增加曲线存在两个明显的水平台阶,而在 45° 以后,能量呈现出锯齿状上升,这表明在 45° 以前,灰岩在达到峰值强度之前存在两次控制性破裂,而在 45° 以后,灰岩的破坏主要是每一次小的破裂累计而来。结合声发射撞击数分析,45° 以前,灰岩应变在达到 0.3%~0.4% 时出现第一次撞击数突增,声发射能量也随之突增,随后撞击数减小,累计能量也进入到平台期;在 0.6%~0.7% 时

撞击数出现第二次激增,而累计能量值也随之增加。Martin 等^[9]结合岩石变形与强度特征,提出了起裂应力 σ_{ci} 和损伤应力 σ_{cd} 表征岩石强度的特征值,其中 σ_{ci} 对应岩石从弹性变形阶段到稳定破裂阶段的临界值, σ_{cd} 对应岩石从稳定破裂阶段到非稳定破裂阶段的临界值。Eberhardt 等^[10]结合声发射研究指出, σ_{ci} 可以对应与岩石声发射信号第一次激增时的岩石应力, σ_{cd} 对应与岩石第二次声发射信号激增点。根据不同层理倾角单轴压缩曲线及声发射撞击数、能量关系结果,0°、15°、30°、45° 的 σ_{ci} 出现点分别为 $\epsilon = 0.32\%$ 、 0.39% 、 0.40% 、 0.41% 、 0.42% 、

0.41%、0.35%， σ_{cd} 出现的点分别为 $\epsilon = 0.65\%$ 、0.69%、0.64%、0.65%、0.62%、0.63%、0.55%，可 σ_{ci} 出现阶段大致范围为0.32%~42%， σ_{cd} 出现阶段大致范围为0.55%~0.69%。结合撞击数与累计能量综合分析，在45°以前，在应变达到0.6%之后，撞击数减小，累计能量曲线出现平台期，表明在此阶段产生裂隙较少，直至破裂阶段，撞击数与能量才又出现较大增幅。而在45°以后，撞击数达到第二峰值以后，其衰减并不强烈，且累计能量还在呈锯齿状增加，表明在此阶段，灰岩仍然产生较多微裂隙，直至最后贯通阶段。

2.2.2 不同层理倾角灰岩破坏机制分析

受层理面倾角影响，将施加在微裂隙上的应力 σ 分解为平行于微裂隙的应力分量 σ_x 和垂直于原生微裂隙的应力分量 σ_y ，根据试验结果， σ_x 和 σ_y 随着 α 的变化而变化，其破坏特征如图7所示。

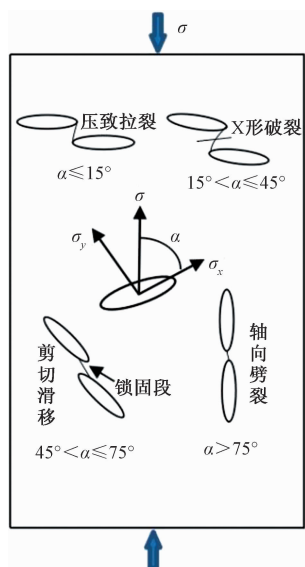


图7 不同层理倾角灰岩的破坏特征

1) 当 $\alpha \leq 15^\circ$ 时，此时最大主应力方向垂直于原生微裂隙，微裂隙被压缩，此时垂直于原生裂隙产生新裂隙而不易沿着原生裂隙破坏，原生裂隙仅仅起到充当起裂点的作用，且因为最大主应力方向垂直于原生裂隙，使得原生裂隙在最大程度上被压缩而不发生沿裂隙面的滑移破坏，结合图5可以得出，在 $\alpha = 0^\circ$ 时，灰岩样的应变相比与其他角度是最大的。由累计能量图可以看出，由于此种状态下灰岩不会发生沿着原生裂隙面的滑移错动，仅产生垂直于原生裂隙的新裂隙，因此在达到峰值强度前其累计能量保持在较低水平，而在达到峰值强度后，由于贯通性裂隙的产生，此时灰岩积聚的弹性能剧烈

释放，导致声发射累计能量的急剧上升，发生瞬时性破坏。

2) 当 $15^\circ < \alpha \leq 45^\circ$ 时，此时垂直原生裂隙的应力分量 σ_y 大于水平应力分量 σ_x ，原生裂隙较容易被压缩，但此时 σ_x 提供的应力也在破裂中起到一定作用，随着角度 α 增加，应力分量 σ_x 不断增减，新生裂隙会沿着原生裂隙垂直方向和水平方向同时扩展，形成“X”形破裂。

3) 当 $45^\circ < \alpha \leq 75^\circ$ 时，随着 α 增加，原生裂隙水平应力分量 σ_x 不断增加， σ_y 不断减小，此时灰岩沿潜在滑动面剪断破坏，岩体潜在剪断面追踪岩体原生裂隙，在 σ_x 不断增加下，岩体内部沿着垂直于原生裂隙方向产生拉张分支裂隙，随着 σ_x 进一步增加，在原生裂隙前段产生法向压碎带，最终法向压碎带突破锁固段的限制，裂隙形成贯通通道，重复上述步骤最终直至破坏。结合图6，灰岩还未突破一个锁固段，便形成一次声发射能量的突增，因而在此阶段声发射能量增加方式为锯齿状增加。

4) 当 $\alpha > 75^\circ$ 时，随着 α 增加， σ_x 进一步增加， σ_y 逐步减小至0，此时最大主应力方向平行于原生裂隙，导致原生裂隙不易被压缩，此时新生裂隙沿原生裂隙尖端扩展，破裂方式为沿着原生裂隙面张拉破裂为主。当产生控制性裂隙时，发生应力降，但是此时裂隙并未完全贯通且，还能继续承压，所以此时的应力应变曲线表现出震荡特性。峰值应力时的声发射能量激增幅度也不如 $\alpha < 75^\circ$ 时大。

2.3 声发射b值分析

1941年 Gutenberg 通过总结研究世界各地地震，提出了震级与频度经验关系式 $\lg n = a - bM$ ，其中参数 b 描述了震源尺度分布的比例，称为 b 值。与地震机理相似，岩石内部裂纹萌生、发展、贯通直至破裂，伴随着大量不同尺度事件的分布，加之声发射手段，可以得到岩石破裂过程中 b 值动态变化规律，用以研究岩石破裂特征。其公式为 $\lg N = a - (A_{db}/20)$ ，其中， A_{db} 为以分贝为单位表示的声发射事件的最大振幅，求取 b 值时以5 dB步距为基准对岩石声发射幅值数据进行统计。Lei^[11]研究发现 b 值随着岩石内部不均匀性变化而出现波动， b 值会随之下降。曾正文等^[12]在文献中指出， b 值增大意味着岩石内部小尺度事件占比增大，此时岩石以小尺度微破裂为主，而 b 值不变则说明岩石内部破裂尺度分布不变， b 值减小意味着大尺度事件所占比例增加， b 值大幅度跃迁说明岩石内部未破裂状态的突然变化。按应力水平将加载过程分为

10 个阶段,求取每一阶累计声发射 b 值,结果如图 8 所示,灰岩 b 值在 45° 以前,呈现总体下降趋势,说明在初期岩石内部小尺度微破裂事件发育,而大尺度微破裂尚未产生。在 $30\% \sim 40\%$ 峰值应力时,声发射 b 值产生一个较大幅度跌落,说明在此时岩石内部产生了较大尺度微破裂,可以表明此时岩石已经达到了起裂强度。随后 b 值上升并稳定在一定水平,表明此时岩石内部微破裂状态缓慢发展,对应与岩石的稳定破裂期,微破裂缓慢发展时间段较短,只保持 10% 峰值强度的时间,随后 b 值陡降,代表此时微破裂状态发生了变化,发生了突然的微裂纹扩展并在 $70\% \sim 80\%$ 峰值强度时达到最低值,表

明此时岩石内部已经产生了控制性微裂纹,随后岩石将沿着控制性微裂纹发生破坏。可以看出, b 值最小值并未出现在岩石最终失稳破裂时,而是发生在 $70\% \sim 80\%$ 峰值强度时。而在 45° 后包括 45° 的 b 值则呈现出“V”字形态, b 值最低点出现在约 60% 峰值强度时,说明在 45° 以后,岩石内部微破裂从加载初期稳定发育,大尺度微破裂事件占比逐渐增大,到 60% 峰值强度时形成沿着层理面的控制性裂纹,控制性裂纹形成后, b 值增加,此时大尺度微裂纹反而减小,可以推测此时控制性裂纹沿着层面发育,形成控制性裂纹后,后续微裂纹沿着控制性裂纹发育,不断突破岩桥,达到渐进性破坏。

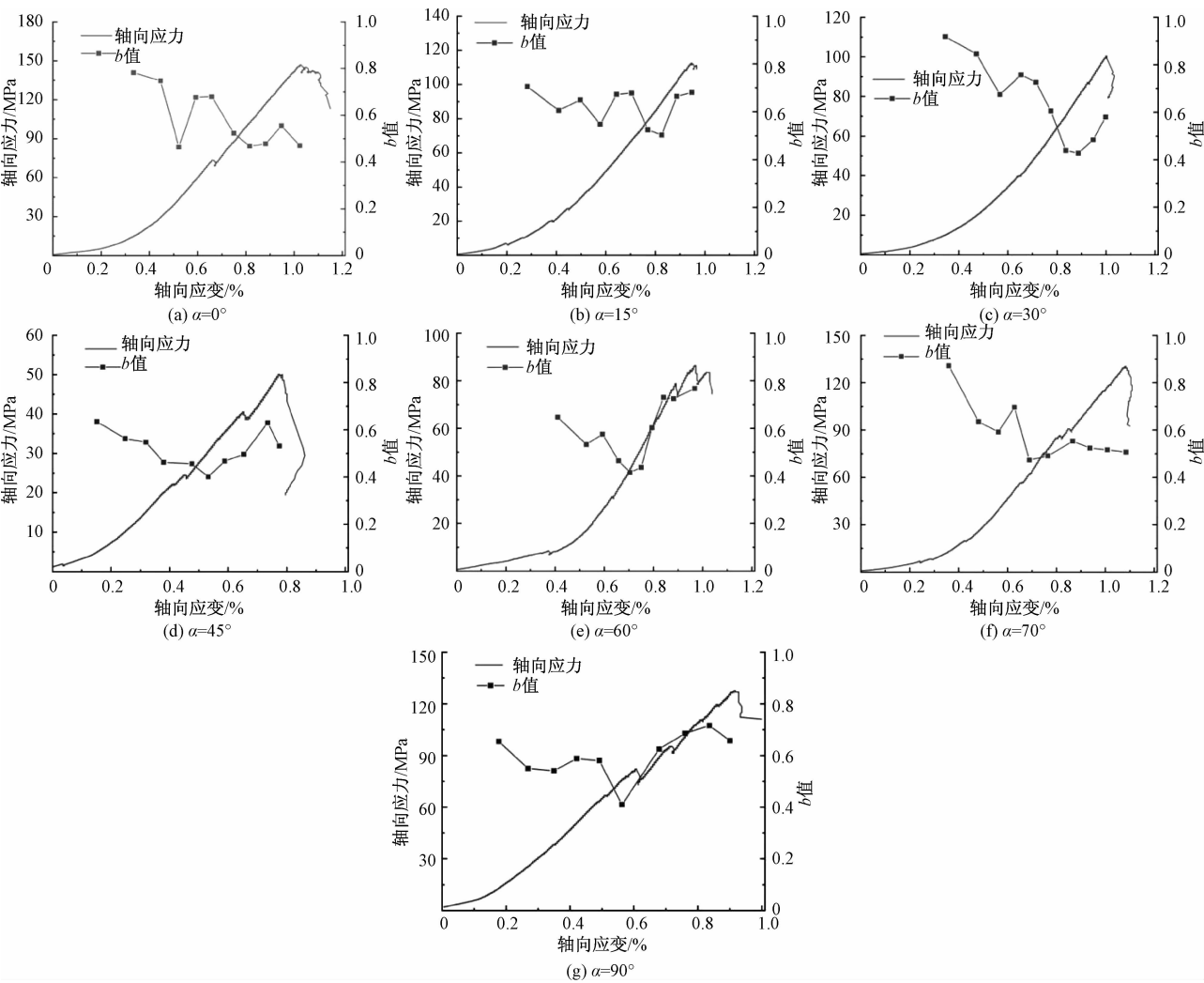


图 8 各层面倾角试件声发射 b 值分析特征

3 结论

1) 7 组不同倾角岩样单轴压缩试验应力—应变曲线表明,随着层理倾角增加,灰岩单轴抗压强度呈现先减小后增大的“V”字形特征,在层理倾角为

45° 时达到最小值。

2) 以 45° 为界, 45° 以前,应变达到 0.6% 之后,撞击数减小,声发射能量累计曲线出现两个明显台阶,在 $0.3\sigma_p$ 与 $0.7\sigma_p$ 两个点存在激增现象,此阶段

产生裂隙较少,直至破裂阶段,撞击数与能量才又出现较大增幅;45°及以后,撞击数达到第二峰值以后,其衰减并不强烈,声发射能量累计曲线呈锯齿状增加,无明显台阶,此阶段产生较多微裂隙,直至最后贯通。

3)声发射 b 值以 45°为界, b 值在 45°以前,呈整体下降趋势,岩石内部在初期时小尺度微破裂事件发育,大尺度微破裂尚未产生,在 30%~40%峰值应力时, b 值产生一个较大幅度跌落,在 70%~80%峰值强度时达到最低值;在 45°后包括 45°的 b 值则呈现出“V”字形态, b 值最低点出现在 60%峰值强度左右。

参考文献

[1] 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.
[2] 赵东雷,左双英,王嵩,等.层状岩体各向异性损伤模型及验证[J].科学技术与工程,2019,19(11):254-261.
[3] 姚欢迎,陈军斌,聂向荣,等.单轴压缩声发射试验的页岩损伤演化规律[J].科学技术与工程,2020,20(4):1581-1586.
[4] 钟帅,左双英,罗沙.含层理灰岩的巴西劈裂强度及拉裂损伤各向异性[J].科学技术与工程,2020,20(16):6578-

6584.
[5] 张永泽,刘俊新,冒海军,等.单轴压缩下页岩力学特性的各向异性试验研究[J].金属矿山,2015(12):33-37.
[6] 刘运思,王世鸣,颜世军,等.基于声发射实验层状砂岩力学特性及破坏机理[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(6):1419-1427.
[7] 田勇,俞然刚,张尹,等.声发射特征在灰岩损伤识别及定量评估中的应用[J].工程科学与技术,2020,52(3):115-122.
[8] 牟宏伟,何学秋,宋大钊,等.不同节理夹角煤单轴压缩力学和声发射响应及影响机制[J].煤炭学报,2020,45(5):1726-1732.
[9] MARTIN C D,CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1994,31(6):643-659.
[10] EBERHARDT E,STEAD D,STIMPSON B,et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(2): 222-233.
[11] LEI X. How do asperities fracture? An experimental study of unbroken asperities[J]. Earth & Planetary Science Letters,2003,213(3-4):347-359.
[12] 曾正文,马瑾,刘力强,等.岩石破裂扩展过程中的声发射 b 值动态特征及意义[J].地震地质,1995(1):7-12.

Experimental Analysis of Anisotropic Mechanical Characteristics and Acoustic Emission Evolution of Layered Limestone

DING Heng¹, LIU Bing²

(1. Guizhou Geological Environment Monitoring Institute,Guiyang 550000,China;
2. Guizhou Honghua Geological Engineering Co.,Ltd.,Guiyang 550081,China)

Abstract: In order to study the anisotropy characteristics of the mechanical strength of layered rock masses, seven kinds of limestone samples with different bedding dip angles were drilled indoors, and uniaxial compression tests were carried out, supplemented by acoustic emission monitoring. The test results show that: As the bedding dip angle increases, the uniaxial compressive strength of the limestone presents a “V”-shaped characteristic that first decreases and then increases, and reaches the minimum value when the bedding dip angle is 45°. Taking 45° as the boundary, before 45°, the acoustic emission energy accumulation curve has two obvious steps. There is a sharp increase at the two points of $0.3\sigma_p$ (σ_p is the peak intensity) and $0.7\sigma_p$. The acoustic emission energy accumulation curve is at 45° and beyond. It increases in a zigzag shape, without obvious steps. The b value of acoustic emission is bounded by 45°. Before 45°, the overall trend is downward, and there is a step in the middle that rises and maintains a step. After 45°, it is in a “V” shape, The lowest point appears at about $0.6\sigma_p$ degrees.
Key words: layered rock mass; anisotropy; uniaxial compression test; acoustic emission