

不同节理倾角砂岩卸围压力学破坏特性试验研究

强少辉¹, 杨圣奇², 周传涛¹, 陶焱², 甄治国¹

(1. 中铁二十局集团第四工程有限公司, 山东 青岛 266061; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:经历漫长地质构造后, 岩体内存在大量的节理, 而充分认识节理岩体卸围压力学行为对保障地下工程安全开挖具有重要的理论价值。因此, 通过对预制节理砂岩试样开展卸围压试验, 分析节理倾角对砂岩强度和变形破坏特性及声发射特征的影响规律。结果表明, 卸围压对节理砂岩试样峰前应力-应变曲线特征影响较小, 导致峰后的残余强度消失; 节理砂岩试样卸围压峰值强度较常规三轴压缩低, 且随节理倾角的变化规律相同; 在倾角 $\theta = 40^\circ$ 时出现异常, 主要是节理存在导致剪切裂纹向节理偏移。压密阶段声发射事件随节理倾角增大越来越不明显, 而进入塑性段节理倾角对声发射特征影响较大。峰后声发射事件缓慢增加, 主要是卸围压导致侧向做负功, 一定程度上降低了弹性应变能释放的剧烈程度。

关键词:节理; 卸围压; 强度; 破裂特征; 声发射

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)03-0058-08

岩体经历漫长的地质构造作用后, 内部产生各种规模的结构面。随着岩体尺寸的增加, 岩体从完整岩石向节理裂隙化岩石转化。岩体中存在各种形态、大小、间距、密度和方向不同的不连续面, 使岩体具有不连续性和各向异性的特性, 成为岩体结构研究的难点之一。同时, 在深部隧道开挖等地下工程过程中, 岩体一侧约束被解除, 处于卸荷状态。卸荷易引起岩爆、大变形等工程灾害, 严重威胁地下工程的稳定, 所以充分认识节理岩体卸围压力学行为对保障地下工程安全开挖具有重要的工程实践意义。

针对节理岩体, 一些研究学者^[1-5]采用天然岩体开展了研究。Mcdermott et al^[1]描述了节理试样岩芯钻取、原位保护、分离母岩及室内加工的工艺过程, 为后来的室内试验提供了很好的借鉴。李宏哲等^[2]对取自锦屏二级水电站节理倾角为 $29.3^\circ \sim 56.0^\circ$ 的大理岩试件进行三轴压缩试验, 结果表明, 大理岩强度及变形破坏特征主要取决于节理面与最大主应力夹角大小。夏才初等^[3]开展了含贯通节理面花岗岩试件在不同加卸载应力路径下的变形特性三轴试验, 结果表明, 2 种不同主应力差卸载路径对含节理岩石试件的变形特征有明显影响。曹平等^[4]选用甘肃金川矿区节理岩石在不同法向应力下进行剪切试验, 研究其不同法向应力下抗剪强度的变化规律和剪切前后节理表面形貌特征的变化情况。刘健等^[5]开展了不同压应力条件下深部花岗岩中天然开启节理剪切性能试验研究, 结果表明, 不同压应力条件下, 天然开启节理的剪切变形特征具有一致性。鉴于获取含天然节理岩石相对困难, 国内外学者^[6-12]开始采用制备人工节理的方法来进行研究。Li et al^[7]对取自江西露天矿尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的硅化石灰岩采用巴西劈裂法得到人工节理试样, 对节理试样进行了恒定法向载荷下直剪试验。Zhang et al^[8]进行了含节理大理岩的单轴压缩试验, 表明节理试样破坏模式为单裂纹破坏和 X 型裂纹破坏。李树忱等^[9]以预制贯穿节理类岩石试件为研究对象, 研究了倾角对贯穿节理类岩石试件峰后应力-应变曲线、破坏形式和残余强度等的影响。刘泉声等^[10]探究了自然岩石材料在不同法向力及剪切力作用下的受力和变形特征, 对比分析了岩性及节理面法向应力等因素对加锚节理岩体剪切力学特性的影响规律。王桂林等^[11]研究了不同倾角节理砂岩能量演化机制, 分析了节理砂岩峰值点各能量指标和峰前、峰后能量突变幅度的倾角

收稿日期: 2022-03-15 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20220051

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2020ZDPYMS34)

作者简介: 强少辉(1983—), 男, 工程师, 研究方向为隧道及地下工程。E-mail: 451664460@qq.com

强少辉, 杨圣奇, 周传涛, 等. 不同节理倾角砂岩卸围压力学破坏特性试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022, 35(3): 58-65.

效应。苏海健等^[12]借助3D打印技术预制节理试样,研究了节理粗糙度及围压对节理岩体强度、变形模量及破裂特征的影响。

开挖卸压导致的损伤带力学行为明显区别于加载导致的损伤^[13],卸围压对岩石力学行为、破裂过程及破裂模式的影响已有不少试验研究成果^[14-15]。He et al^[16]研究了真三轴单面动态卸压过程中声发射特征,结果表明随着压力的升高,声发射信号的幅值逐渐增大。Zhao et al^[17]进行一系列不同速率卸围压试验,指出破坏过程中的强烈程度和声发射能量释放受卸围压速率的影响。Li et al^[18-19]对长方体花岗岩和砂岩试样进行真三轴卸最小主应力试验,表明试样的强度、刚度、高宽比和第二主应力的大小都会对试样最终破裂模式产生影响。Zhou et al^[20]使用核磁共振技术从细观层面研究了卸围压过程中试样的破裂演化特征,表明随着卸围压速率的升高,小孔和大孔的个数、尺寸都会有所增加。Li et al^[21]研究了花岗岩不同加载路径下能量演化特征,结果表明在卸压过程中环向应变能增加速度大于轴向应变能,同时更容易发生岩爆。Meng et al^[22]研究了层状砂岩不同高温下卸围压破裂特征,结果表明当阈值温度在120~150℃之间,其后砂岩强度迅速降低、泊松比迅速上升,而30°时为最不利倾角。Dai et al^[23]根据耗散能和切线模量定量研究卸围压过程中损伤演化,结果表明卸围压过程中损伤快速增加。李冰洋等^[24]开展不同饱水系数试样卸围压试验,研究水对页岩卸围压特性的影响。杨永杰等^[25]开展煤、砂岩不同围压和不同卸载速率三轴卸围压试验,并分析了声发射信号,探讨了波形型号的能量、频谱特征及卸荷破坏前兆。

综上所述,虽然过去针对节理岩体及完整岩体卸围压力学行为展开了不少研究,但关于节理岩体卸围压损伤破裂机理的研究不够深入。因此,使用预制节理砂岩试样,开展恒定轴向加载速率卸围压试验,探究节理倾角对岩石应力-应变曲线、强度及变形参数、破裂模式及声发射特征的影响规律。

1 节理试样制备及试验程序

1.1 节理试样制备

试验所用试样为绿砂岩,X射线衍射分析结果显示,砂岩矿物组分主要为石英32.63%、钙长石46.79%、钠长石16.25%、高岭石2.77%、伊利石1.54%(体积百分比),孔隙率为0.307%。为了减少节理张开度、延展性、粗糙度及充填度等参数对试验结果的影响,采用人工制备节理,进而突出节理倾角对砂岩卸围压力学行为的影响。首先,将砂岩岩块切分成尺寸为80 mm×50 mm×100 mm的矩形块体,并用金刚石锯在矩形块体50 mm×100 mm平面上切割出有不同角度且30 mm深的凹槽。然后,用V形锥劈裂岩石来产生贯通拉裂隙,裂隙倾角(α)分别设置为10°、20°、30°、40°及50°。最后,用金刚石锯切割矩形块体凹槽一侧获得具有单条张性节理的长方体试样(50 mm×50 mm×100 mm)。根据国际岩石力学学会标准,使用岩石研磨机抛光长方体的各个端面,加工得到含不同节理角度砂岩试样如图1所示。

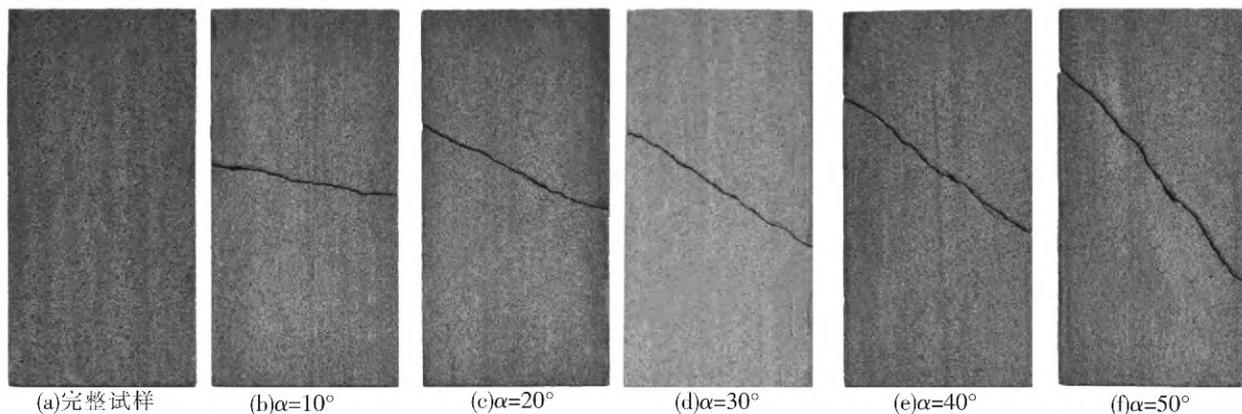


图1 不同节理角度砂岩试样

1.2 试验程序

节理砂岩力学特性试验所用仪器为GCTS RTX-4000高温高压动态岩石三轴仪。该设备可采用应力

控制或者应变控制,适用于岩石单轴、三轴、抗弯、抗拉、断裂、蠕变以及其他压缩测试。该设备轴向加载最大可达 4 000 kN,最大围压可达 140 MPa。轴向位移通过 2 个 LVDT 位移传感器的平均值测定,另外 2 个 LVDT 用于记录试验中长度和宽度方向的变形位移。同时试验过程加入 Micro- II Digital AE system 声发射监测系统实时监测试验过程中的声发射事件。

节理砂岩卸围压试验初始围压设置为 30 MPa,卸载速率设置为 3 MPa/min,砂岩试样节理角度设置为完整、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 。具体加载步骤如下:①以应力控制施加围压 σ_3 至预定水平,加载速率为 4 MPa/min,同时施加轴压使试样处于静水平衡状态($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$);②以应变控制施加轴压,加载速率 0.04%/min,保持围压 σ_3 不变,持续加载轴压至预置的卸载点;③继续加载轴向应力,采用应力控制围压卸载,以设定的围压卸载速率减小围压直到岩样破坏。

图 2 给出了卸围压试验中典型的应力、应变和围压随时间的变化曲线,其中卸载点 σ_0 为对应常规三轴 80% 峰值偏应力。

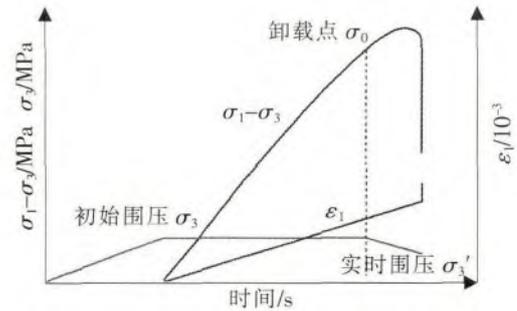


图 2 卸围压试验典型应力-应变时间曲线

2 试验结果

2.1 不同倾角节理砂岩试样卸围压三轴应力-应变曲线

图 3 给出了不同倾角节理砂岩试样常规三轴及卸围压应力-应变曲线,从图 3(a)可以看出常规三轴压缩($\sigma_3 = 30$ MPa)条件下,节理倾角对应力-应变曲线的影响主要体现在 $\theta = 50^\circ$,其强度明显降低。在 $\theta = 30^\circ$ 和 40° 时,试样发生脆性破坏。但峰后由于宏观裂纹之间的摩擦力,峰后存在明显的残余强度,且不同倾角对峰后残余强度影响较小。而卸围压条件下,节理倾角对应力-应变曲线峰前特征的影响与常规三轴相似。但在达到峰值强度后,由于围压持续下降,试样发生缓慢破坏,峰后应力缓慢降低。同时由于围压持续降低,宏观剪切裂纹之间的摩擦力逐渐降低,导致试样峰后不存在残余强度。

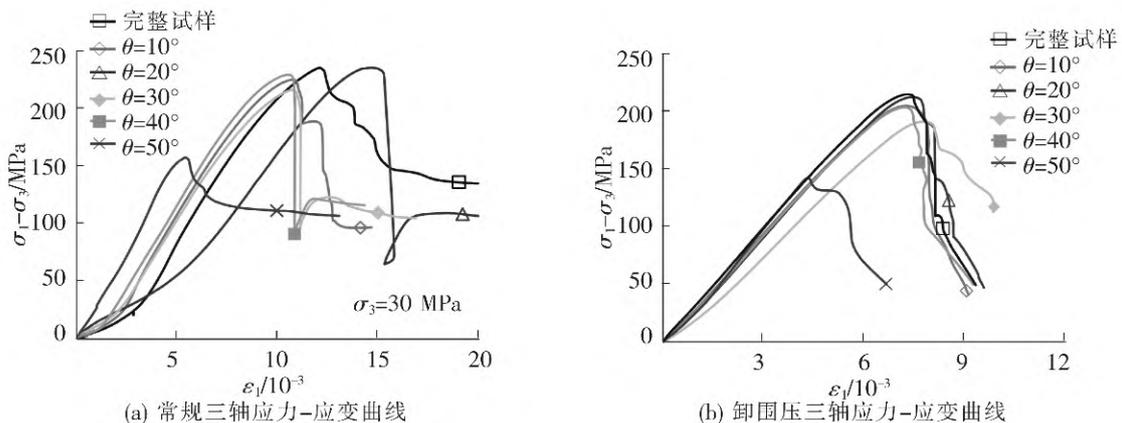


图 3 不同倾角节理砂岩试样常规及卸围压三轴应力-应变曲线

2.2 不同倾角节理砂岩试样卸围压三轴强度和变形规律

为了定量研究节理倾角对力学参数的影响,图 4~图 6 给出了节理倾角对卸围压试样强度及变形特征的影响。从图 4 可看出,峰值点对应的围压随着节理倾角的增大不断增大,一定程度上说明试样破坏对应的围压逐渐增大,试样对卸围压的抵抗能力不断降低。而峰值点对应的轴向应变随着倾角的增大呈先基本不变后逐渐降低趋势,说明沿节理面滑移增加试样承受轴向应变的能力,而当助裂纹沿节理滑动时,可能会降低试样承受轴向应变的能力。从图 5 可以看出,随着倾角增大,节理试样常规三轴及卸围压峰值强度总体呈现先升高后降低,再升高后迅速降低的趋势。卸围压峰值强度与常规三轴峰值强度随节理倾角的变化趋势相同,且不同倾角下两者之间的差距相似。一定程度上说明节理倾角对试样的峰值强

度起到主要控制作用,同时卸围压路径对不同倾角节理试样的影响相同。

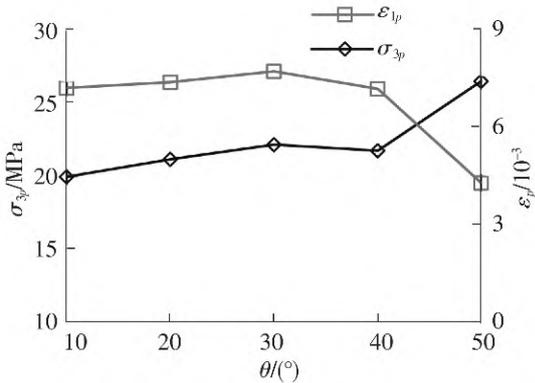


图 4 倾角对砂岩峰值点对应围压及轴向应变影响

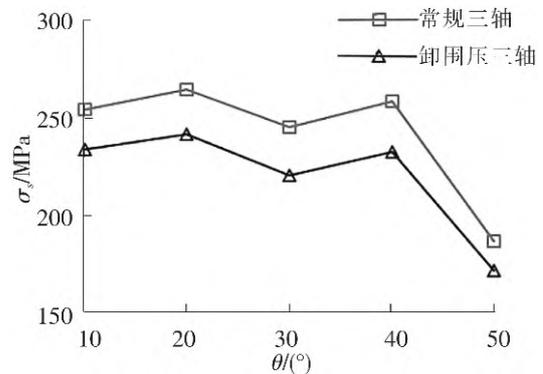


图 5 倾角对砂岩峰值强度影响

图 6 给出了侧向应变随节理倾角的变化,图 6 中 ϵ_2 及 ϵ_3 分别代表平行节理方向及垂直节理方向的峰值侧向应变。从图 6 中可以看出,平行节理方向的侧向应变明显大于垂直节理方向,说明节理一定程度上增加了平行于节理方向的横向变形。随着节理增大,峰值横向应变整体呈现先增大后降低的趋势,在 $\theta = 30^\circ$ 时达到最大值。节理倾角增大,一定程度上增加了横向变形分量,同时降低了试样的承载能力,对应的峰值轴向应变在 $\theta > 30^\circ$ 时开始降低,进而导致横向变形呈先增加后降低趋势。同时可以看出,随着节理倾角增大, ϵ_2 及 ϵ_3 差距逐渐增加,说明节理对试样的横向变形的差异性影响逐渐增加。

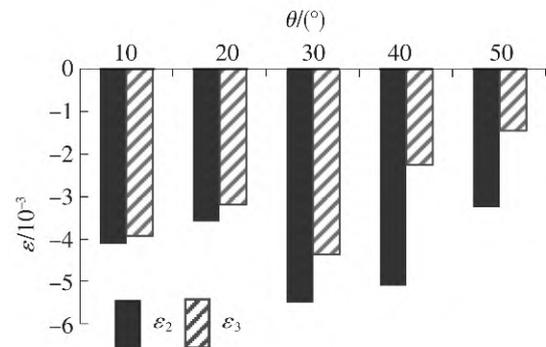


图 6 卸围压试验砂岩试样侧向各向异性变形

2.3 不同倾角节理砂岩试样卸围压三轴破坏和声发射特征

为了探究上述强度及变形参数随节理倾角的演化机理,图 7 给出了常规三轴及卸围压条件下节理砂岩试样最终破裂模式。从图 7 可以看出,完整试样主要发生剪切破坏,三轴压缩下存在 1 条主剪切裂纹,而在卸围压条件下存在 3 条剪切裂纹。常规三轴压缩剪切裂纹平均破坏角为 68° ,而卸围压剪切裂纹平均破坏角为 72.6° 。卸围压过程中,侧向变形增大,节理扩展更加复杂,同时裂纹扩展有向劈裂裂纹发展的趋势。当 $\theta \leq 30^\circ$ 时,节理的存在对试样的破裂模式影响较小,宏观剪切裂纹直接贯穿节理,沿原有方向扩展。同样常规三轴剪切裂纹平均破坏角分别为 65.72° 、 66° 、 64.5° ,卸围压剪切裂纹平均破坏角分别为 74.5° 、 70° 、 62.5° ,总体上卸围压剪切裂纹平均破坏角较三轴压缩大。卸围压条件虽然增加了裂纹分布的复杂程度,但未改变试样呈剪切破坏的现实。而当 $\theta = 40^\circ$ 时,剪切裂纹在 3、4 面的起裂点在节理处,而 2 面上的剪切裂纹穿过节理,并有一部分与节理重合。说明节理存在一定对剪切裂纹的起裂及扩展产生影响。同样,卸围压下剪切裂纹与节理重合部分更加明显。根据摩尔库仑准则,三轴压缩下试样发生剪切破坏时,剪切破坏角可以通过 $\beta = 45^\circ + \varphi/2$ 计算,其中, φ 为内摩擦角。通过计算,完整试样三轴压缩剪切裂纹破坏角为 67.5° ,与室内试验测得的结果 68° 接近。而当剪切裂纹沿 $\theta = 40^\circ$ 节理面产生滑动时,其法向应力分量明显大于 68° ,所以导致剪切滑动较困难,进而导致 $\theta = 40^\circ$ 试样峰值强度会有所升高。同样由于节理面缺失黏聚力,其轴向应变响应减小。当 $\theta = 50^\circ$ 时,三轴压缩及卸围压下试样主要产生沿节理面的滑动破坏。由于倾角增大,法向应力分量减小,切向应力分量增大,试样较容易发生剪切滑动,导致试样峰值强度明显降低。同样由于黏聚力缺失,轴向峰值应变及侧向峰值应变明显减小。

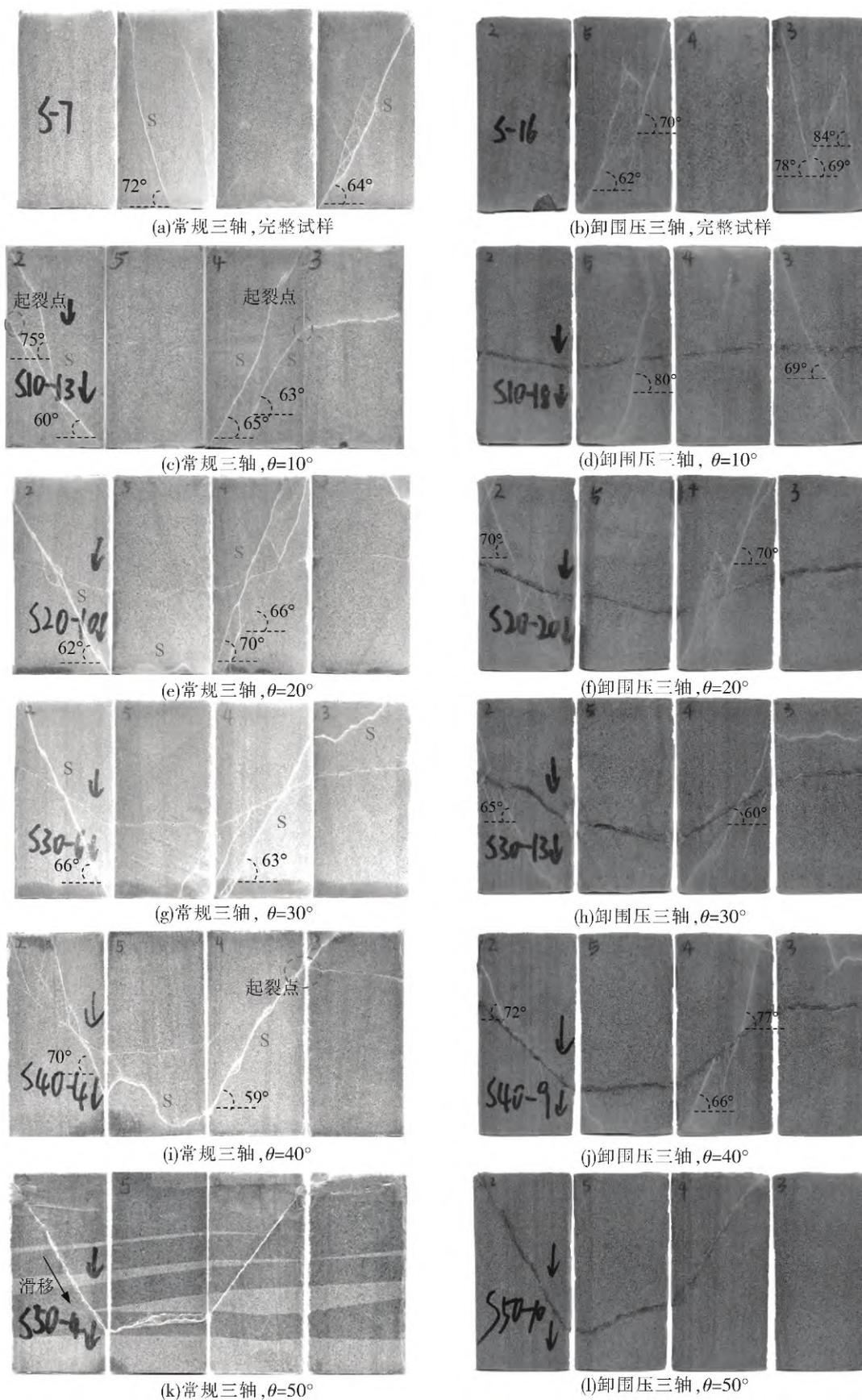


图 7 常规三轴及卸围压三轴试验条件下节理砂岩试样最终破裂模式

声发射特征可以一定程度上反映试样损伤破裂演化过程。图 8 给出了不同倾角节理砂岩试样卸围压试验声发射特征,图 8 中 $\sigma_1-\sigma_3$ 代表偏应力,AE 代表声发射事件数,AEE 代表累计声发射事件数。从图 8 可以看出,在初始压密阶段,出现了少量的声发射事件,主要是由于裂隙闭合过程晶粒调整导致的。而随着节理倾角增大,初始压密段声发射事件越来越不明显。主要由于随着倾角增大,法向应力分量逐渐降低,节理处的压缩调整更加不明显。而进入弹性阶段,声发射事件不明显,此时试样内裂纹扩展较少。而进入塑性阶段,当 $\theta \leq 30^\circ$ 时声发射事件不明显;而当 $\theta \geq 40^\circ$ 时,由于剪切裂纹会有部分沿节理滑移,峰前节理滑移同样会出现声发射事件。峰后声发射事件总体上呈现持续缓慢增加,轴向应力降低的剧烈程度相较于三轴压缩较缓,说明卸围压峰后裂纹扩展速度相对放缓。常规三轴压缩过程峰后弹性应变能主要通过裂纹扩展释放,而卸围压过程中由于侧向应变做负功,一定程度上消耗了部分弹性应变能,峰后试样应变能释放剧烈程度降低。

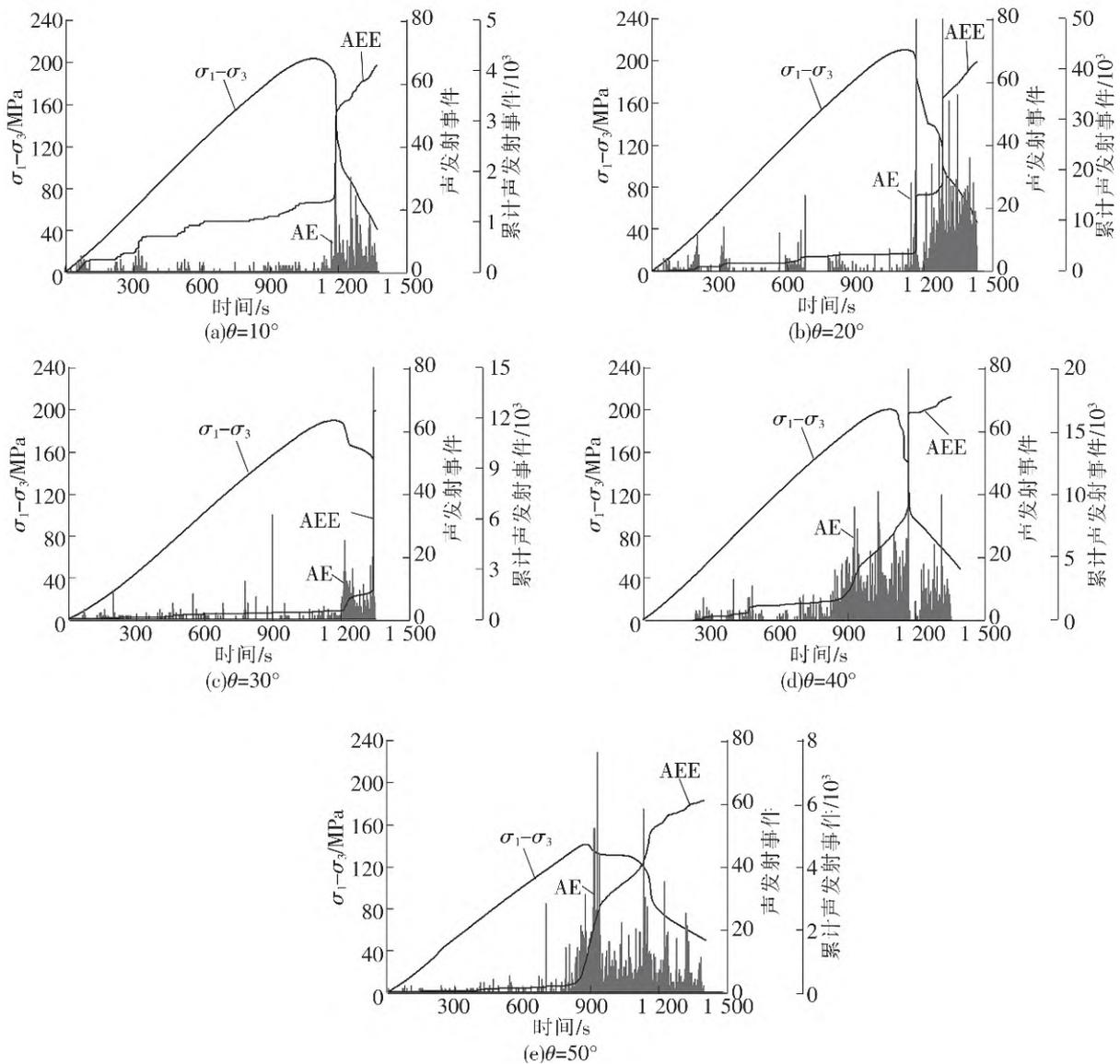


图 8 不同角度节理砂岩试样卸围压试验声发射事件

3 结论

使用预制节理砂岩试样,开展了含不同倾角节理试样卸围压三轴试验,研究了节理倾角对应力-应变曲线、强度变形参数、破裂特征及声发射特征的影响,主要得到如下结论:

(1) 卸围压对节理砂岩试样峰前应力-应变曲线特征影响较小,主要受到节理倾角控制,而峰后卸围压使得残余强度消失,应力随加载逐渐降低。

(2) 随着节理倾角增大,试样承受卸围压的能力逐渐降低;而峰值应变随着节理倾角呈先基本不变,后逐渐降低的趋势。卸围压试样峰值强度较常规三轴压缩低,且随节理倾角的变化趋势相同,在 $\theta=40^\circ$ 时出现异常,主要是节理存在导致剪切裂纹向节理偏移,而节理倾角此时明显比完整岩体剪切裂纹破坏小,剪切应力分量较小,而法向应力分量较大。

(3) 压密阶段声发射事件随节理倾角增大越来越不明显,弹性阶段声发射事件较少。而进入塑性段,当 $\theta \leq 30^\circ$ 时声发射事件不明显;而当 $\theta \geq 40^\circ$ 时,由于剪切裂纹会有部分沿节理滑移,峰前节理滑移同样会出现声发射事件。峰后声发射事件缓慢增加,主要是卸围压导致侧向做负功,一定程度上降低了弹性应变能释放的剧烈程度。

参 考 文 献

- [1] Mcdermott C I, Sinclair B, Sauter M. Recovery of undisturbed highly fractured bench scale (30 cm diameter) drilled samples for laboratory investigation[J]. *Engineering Geology*, 2003, 69(1/2): 161-170.
- [2] 李宏哲, 夏才初, 王晓东, 等. 含节理大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(10): 2118-2123.
- [3] 夏才初, 李宏哲, 刘胜. 含节理岩石试件的卸荷变形特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(4): 697-704.
- [4] 曹平, 范祥, 蒲成志, 等. 节理剪切试验及其表面形貌特征变化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(3): 480-485.
- [5] 刘健, 陈亮, 刘建锋, 等. 深部花岗岩中天然开启节理剪切性能试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(1): 63-70.
- [6] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 120-124.
- [7] Li K H, Cao P, Zhang K, et al. Macro and meso characteristics evolution on shear behavior of rock joints[J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(8): 3087-3096.
- [8] Zhang Z H, Deng J H, Zhu J B, et al. An Experimental investigation of the failure mechanisms of jointed and intact marble under compression based on quantitative analysis of acoustic emission waveforms[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2018, 51(7): 2299-2307.
- [9] 李树忱, 汪雷, 李术才, 等. 不同倾角贯穿节理类岩石试件峰后变形破坏试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 3391-3395.
- [10] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新, 等. 白砂岩、大理岩及花岗岩加锚剪切力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S2): 4007-4015.
- [11] 王桂林, 文兴祥, 张亮. 单轴压缩下节理砂岩能量演化机制倾角效应[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(7): 1913-1923.
- [12] 苏海健, 郭庆振, 靖洪文, 等. 基于 3D 打印的内置粗糙节理岩体力学特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 840-846.
- [13] Xie H Q, He C H. Study of the unloading characteristics of a rock mass using the triaxial test and damage mechanics [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 366.
- [14] Huang R Q, Wang X N, Chan L S. Triaxial unloading test of rocks and its implication for rock burst[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2001, 60(1): 37-41.
- [15] Adushkin V V, Kocharyan G G, Ostapchuk A A. Parameters determining the portion of energy radiated during dynamic unloading of a section of rock massif[C]//Doklady earth sciences. [S.l.]: Pleiades Publishing, 2016, 467(1): 275-279.
- [16] He M C, Miao J L, Feng J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(2): 286-298.
- [17] Zhao X G, Wang J, Cai M, et al. Influence of unloading rate on the strainburst characteristics of Beishan granite under true-triaxial unloading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 467-483.
- [18] Li X B, Du K, Li D. True triaxial strength and failure modes of cubic rock specimens with unloading the minor principal stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(6): 2185-2196.

- [19] Li X B, Feng F, Li D, et al. Failure Characteristics of granite influenced by sample height-to-width ratios and intermediate principal stress Under true-triaxial unloading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(5): 1321-1345.
- [20] Zhou K, Liu T, Hu Z. Exploration of damage evolution in marble due to lateral unloading using nuclear magnetic resonance[J]. Engineering Geology, 2018, 244: 75-85.
- [21] Li D, Sun Z, Xie T, et al. Energy evolution characteristics of hard rock during triaxial failure with different loading and unloading paths[J]. Engineering Geology, 2017, 228: 270-281.
- [22] Meng L, Li T, Liao A, et al. Anisotropic Mechanical properties of sandstone under unloading confining pressure at high temperatures[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(10): 5283-5294.
- [23] Dai B, Zhao G, Konietzky H, et al. Experimental and numerical study on the damage evolution behaviour of granitic rock during loading and unloading[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(9): 3278-3291.
- [24] 李冰洋, 刘建, 刘振平, 等. 不同饱水系数页岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S2): 1-11.
- [25] 杨永杰, 马德鹏, 周岩. 煤岩三轴卸围压破坏声发射本征频谱特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 1002-1008.

Experimental Study on Mechanical Failure Behavior of Sandstone with Various Joint Angles Under Reducing Confining Pressure

Qiang Shaohui¹, Yang Shengqi², Zhou Chuantao¹, Tao Yan², Zhen Zhiguo¹

(1. The 4th Engineering Co. Ltd. of the 20th Bureau Group of China Railway, Qingdao 266061, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: After a long geological structure, there are lots of joints in rock mass, and the understanding the unloading mechanical behavior of jointed rock mass is of great theoretical value to guarantee the safety of underground excavation. Therefore, the jointed sandstone specimen was adopted to conduct reducing confining pressure test. By studying the effect of joint inclination angle on strength, deformation parameters and Acoustic Emission (AE) characteristic, the following conclusions were obtained. The results show that reducing confining pressure test has slight effect on the stress-strain characteristic before the peak strength, but after the peak strength the residual strength disappears under reducing confining pressure test. The peak strength of jointed sandstone specimen under reducing confining pressure test is lower than that under conventional tri-axial compression, and they have the same variation law with the joint angle. When the joint angle θ equals to 40° , the abnormal appears due to that the presence of joint causes the shear crack migrate towards to the joint. The AE events in the compaction stage become lesser with the increase of joint angle, while the joint angle has a great influence on the AE characteristic at the plastic stage. The AE events increases slowly after the peak strength, mainly due to that reducing confining pressure depleted strain energy in the lateral specimen, and the intensity of elastic strain release is reduce to some extent.

Key words: joint; reducing confining pressure; strength; failure characteristic; AE