

文章编号:0559-9350(2021)01-0042-09

## 层状岩体在三轴加载下的扩容及塑性应变特性

唐克东, 王甲亮, 管俊峰, 李列列

(华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045)

**摘要:** 为研究层状岩体在三轴加载下的扩容及塑性应变特性, 选取具有典型层理构造的千枚岩为研究对象, 制作倾角为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 标准岩样, 采用MTS815试验系统进行三轴加载试验, 定义了塑性应变比以研究轴向与环向裂隙的发展速度。结果表明: 千枚岩应力-应变曲线5个典型区段及特征应力与围压和层理倾角存在明显的相关性; 千枚岩扩容起点对应的体应变随着围压的升高而减小, 扩容起点对应的轴向应变和体应变随着倾角的增大而减小; 不同层理倾角千枚岩长期黏聚力普遍大于峰值黏聚力, 长期摩擦角普遍小于峰值摩擦角; 较低围压水平下轴向裂隙的发展速度比环向裂隙的发展速度更快, 较高围压水平下环向裂隙的发展速度随着偏应力增大而显著变快。

**关键词:** 千枚岩; 扩容; 三轴加载; 试验研究; 塑性变形

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20200283

### 1 研究背景

岩石的扩容现象于1949年由Bridgman<sup>[1]</sup>通过试验首先发现, 其将该现象描述为断裂前的体积增大。Handin等<sup>[2]</sup>在石灰岩、砂岩等岩石的三轴压缩试验中也观察到了这一现象, 并指出其产生原因是颗粒间错动导致了孔隙率的增大。Brace等<sup>[3]</sup>在高围压下对大理石、花岗岩的扩容特性进行了系统研究, 详细描述了岩石破裂前微裂纹的发展过程。随后, 国内外众多学者就岩石扩容机理等方面进行了更深入地研究: Lama等<sup>[4]</sup>对岩石扩容现象的微观机理进行研究, 认为岩石的体积膨胀性可视为内部裂隙发展的指标。许东俊等<sup>[5]</sup>开展了真三轴试验, 对大理岩、花岗岩等不同种类岩石进行了扩容特性研究, 指出扩容现象产生与否取决于其应力状态和岩石物性条件。姜德义等<sup>[6]</sup>开展了单轴压缩和三轴卸载试验, 对盐岩的扩容特性进行研究, 结果表明, 加载方式和温度对岩石的扩容特性均存在影响。Bésuelle等<sup>[7]</sup>对砂岩进行了三轴试验, 结果表明, 随着围压的增大其体积膨胀率有减小的趋势。杨圣奇等<sup>[8]</sup>对断续预制裂隙大理岩进行了三轴加载试验, 研究了裂隙分布形式对扩容特性的影响机理。侯文诗等<sup>[9]</sup>、王宇等<sup>[10]</sup>通过开展岩石三轴试验, 证明岩石扩容应力与峰值应力以及弹性模量、泊松比等参数之间存在关联, 并以此建立了岩石扩容应力的预测模型。

层状岩体在自然界广泛存在。由于其层理之间含有黏结力较小的原生软弱面, 其力学特性随层理走向的不同呈现出显著的各向异性, 也带来了一系列的工程问题: 如反倾层岩边坡倾倒<sup>[11]</sup>, 围岩稳定性<sup>[12]</sup>等。针对层状岩体的力学和变形特性, 许多学者已进行了相关研究, 如何忠明等<sup>[13]</sup>、邓华锋等<sup>[14]</sup>、Nasseria等<sup>[15]</sup>、高春玉等<sup>[16]</sup>、杨以荣等<sup>[17]</sup>。千枚岩是我国西部地区常见的工程岩体, 鉴于千枚岩层间结合差, 节理裂隙发育, 不连续性和各向异性等特点, 应着重防范工程中可能出现的大变

收稿日期: 2020-04-28; 网络首发时间: 2020-10-29

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201029.0956.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779095); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(20HASTIT013)

作者简介: 唐克东(1963-), 教授, 主要从事力学研究。E-mail: tangkd@ncwu.edu.cn

通讯作者: 管俊峰(1980-), 教授, 主要从事岩石与混凝土材料与结构研究。E-mail: junfenguan@ncwu.edu.cn

形问题<sup>[18]</sup>。为此，本文以具有典型层理构造的千枚岩为研究对象，开展了不同层理倾角的三轴加载试验，深入研究不同层理倾角和围压下千枚岩的扩容和塑性应变特性，可为岩石扩容特性的研究提供科研依据。

## 2 试样制备与试验方案

**2.1 试样制备** 本次试验所用的千枚岩取自阿坝州理县谢溪沟泥石流堆积扇覆盖层，呈灰色，层间厚度约0.5~1 mm，层理面结合不完全紧密，层间充填有绢云母、石英、绿泥石等。该千枚岩在电子显微镜下的微观结构如图1所示。其中，绢云母含量58%，呈细小的鳞片状，定向分布；石英含量35%，粒状变晶，粒径0.1 mm左右，呈长条状，定向分布；并含少量绿泥石和钠长石及微量的金属矿物、钠/黝帘石等。

本次试验设计，按取芯方向与层理法向间的夹角，制备了0°、30°、45°、90°岩样。自然风干3 d后测得平均含水率为1.6%，容重约为27.43 kN/m<sup>3</sup>。参考国际岩石力学学会(ISRM)试验规程<sup>[19]</sup>的建议，将岩样制成直径5 cm、高10 cm的圆柱体标准试件，如图2所示。剔除存在表面缺陷和平整度不符合要求的岩样，用超声波对岩体的完整性进行评价，测得0°、30°、45°、90°岩样的纵波波速平均值分别为2011、2501、3047和5357 m/s，剔除波速存在明显异常的岩样。

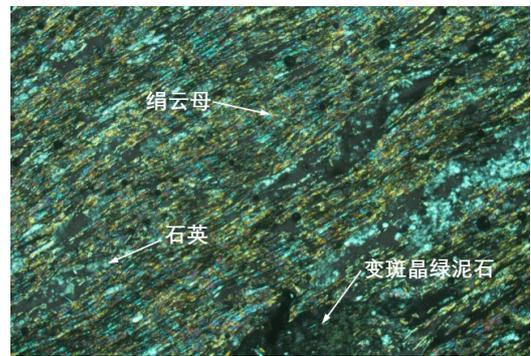


图1 千枚岩镜下偏光图像

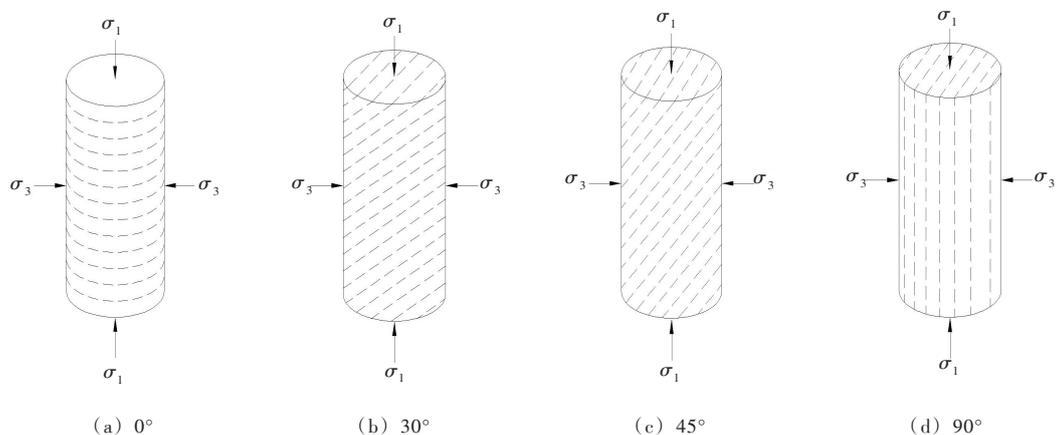
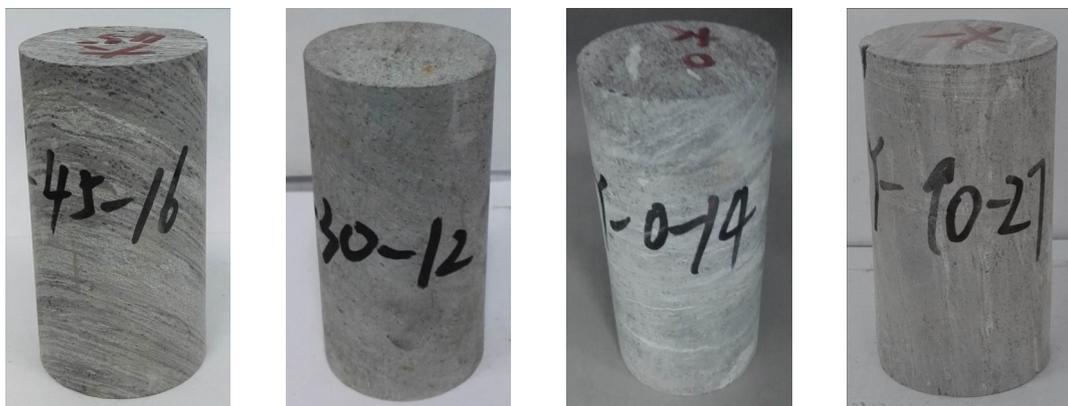


图2 千枚岩试件示意

**2.2 试验方案** 采用MTS815岩石力学试验系统开展试验,对层理倾角为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 的千枚岩岩样分别进行围压为5、10、20、30 MPa的三轴加载试验,每组试验做2个样,当两次试验结果离散较大时补充一组试验,采用MTS引伸计对试验过程中的轴向、环向变形进行测量。加载方法如下:(1)采用应力控制,以0.1 MPa/s的速率施加静水压力至目标值(5、10、20、30 MPa);(2)保持围压不变,轴向采用0.02 mm/s的位移速率施加轴向荷载,直至岩样破坏;(3)岩样破坏后,围压依然保持不变,继续采用0.02 mm/s的轴向位移速率施加轴向荷载,直到轴向应力不再随着应变的增加而降低。

### 3 扩容及塑性应变特性

**3.1 特征应力点** 不同层理倾角千枚岩三轴加载应力-应变关系及典型破坏模式如图3所示。已有文献指出:根据应力-应变曲线可将千枚岩压缩全过程划分为5个阶段<sup>[14]</sup>,每阶段结束点对应一特征应力:裂纹闭合阶段(裂纹闭合应力 $\sigma_{cc}$ );弹性变形阶段(起裂应力 $\sigma_{ci}$ );裂纹稳定拓展阶段(损伤扩容应力 $\sigma_{cd}$ );裂纹损伤和失稳拓展阶段(峰值应力 $\sigma_f$ );峰后破坏阶段(残余应力 $\sigma_y$ )。

裂纹闭合阶段:加载初期,岩样内部的微裂隙、空洞闭合,应力-应变曲线上凹,曲线上各点切线模量逐渐增加,即微裂隙闭合使岩样的弹性模量提高。倾角为 $0^\circ$ 的岩样压密段最为显著,在应力-应变曲线上表现为明显的上凹,倾角为 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 的岩样次之,倾角为 $90^\circ$ 的岩样几乎没有压密段,这与岩样三轴加载下的受力模式有关。 $90^\circ$ 岩样沿轴向分布的层状岩柱承受了绝大部分轴向应力,这种沿轴向分布的基质具有相当高的强度和刚度,故其压密效应最不显著。而层理倾角越小,弱面参与受压的程度越大,由于裂纹闭合阶段的轴向变形主要与弱面的压密有关,故倾角越小,裂纹闭合现象愈明显。与通常对各向同性岩体的认识<sup>[8]</sup>相似,不论何种倾角岩样随着围压的增加压密段均逐渐缩短,在高围压下几乎没有压密段,认为在高静水压力下岩样内部的微裂隙已早期闭合,所以不存在压密段。

弹性变形阶段:过裂纹闭合应力 $\sigma_{cc}$ 后,应力-应变曲线近似为直线,进入弹性变形阶段。这一阶段虽然存在着内部裂隙的闭合和张开,但弹性变形仍主导这一过程,从图3可以看出,这一阶段轴向、环向变形与应力成明显的线性关系。层理倾角为 $90^\circ$ 岩样因其受力模式类似于压杆失稳,弹性变形阶段最长;倾角为 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ 岩样的弹性变形阶段与围压表现出较强的离散性,主要原因是 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ 岩样弱面颗粒和基质骨架按一定比例共同受力,弱面颗粒在剪切应力的作用下,可能产生局部微裂纹,微裂纹引起的应力集中会使基质发生局部破裂,使得起裂应力 $\sigma_{ci}$ 并不稳定。

裂纹稳定拓展阶段:由于岩样内部介质并非完全均质,加载造成局部应力集中,过起裂应力 $\sigma_{ci}$ 后,微裂纹开始发育、扩散,岩样由压缩到膨胀的过程也即将发生,一般认为这一过程是可以控制的,这个阶段的终点即损伤扩容应力 $\sigma_{cd}$ 。在本组试验中,扩容应力在倾角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 左右最小,在倾角为 $90^\circ$ 时最大。层理倾角为 $0^\circ$ ,坚硬基质和软弱层面的受力比较均匀,最大剪应力面贯穿坚硬基质和软弱层面,在岩体内部应力集中程度和最大剪应力面上应力集中程度较低,使得岩体扩容偏应力相对较高。随着倾角的增加,最大剪应力面逐渐向软弱层面倾角逼近,软弱层面上的剪应力水平逐渐增大,由于软弱层面强度相对较低,在较小的应力水平下岩样内部就能造成微裂纹的发育,这些微裂纹的发育反过来又会加剧岩样内部的应力集中效应,这种效应在倾角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 左右表现最为明显,对应的扩容应力也就较低。

裂纹损伤和失稳拓展阶段:过损伤扩容应力 $\sigma_{cd}$ 后,环向应变迅速增大,试件的体应变由负变正,体积发生膨胀,与上个阶段不同,这一阶段发生的裂纹扩展是不可逆的,这个阶段的终点即峰值应力 $\sigma_f$ 。受层理面的影响,不同围压下千枚岩峰值应力普遍在倾角为 $45^\circ$ 时最小,在倾角为 $90^\circ$ 时最大,这与岩样的破坏模式相对应:当倾角为 $0^\circ$ 时,破裂模式是穿切层面的剪切破坏,强度取决于岩石基质本身,故强度较高;当倾角为 $45^\circ$ 时,破裂模式是沿层理弱面的剪切滑移破坏,抗压强度取决于弱面,故强度最低;当倾角为 $90^\circ$ 时,破裂模式类似于压杆失稳,强度由基质本身的强度决定,

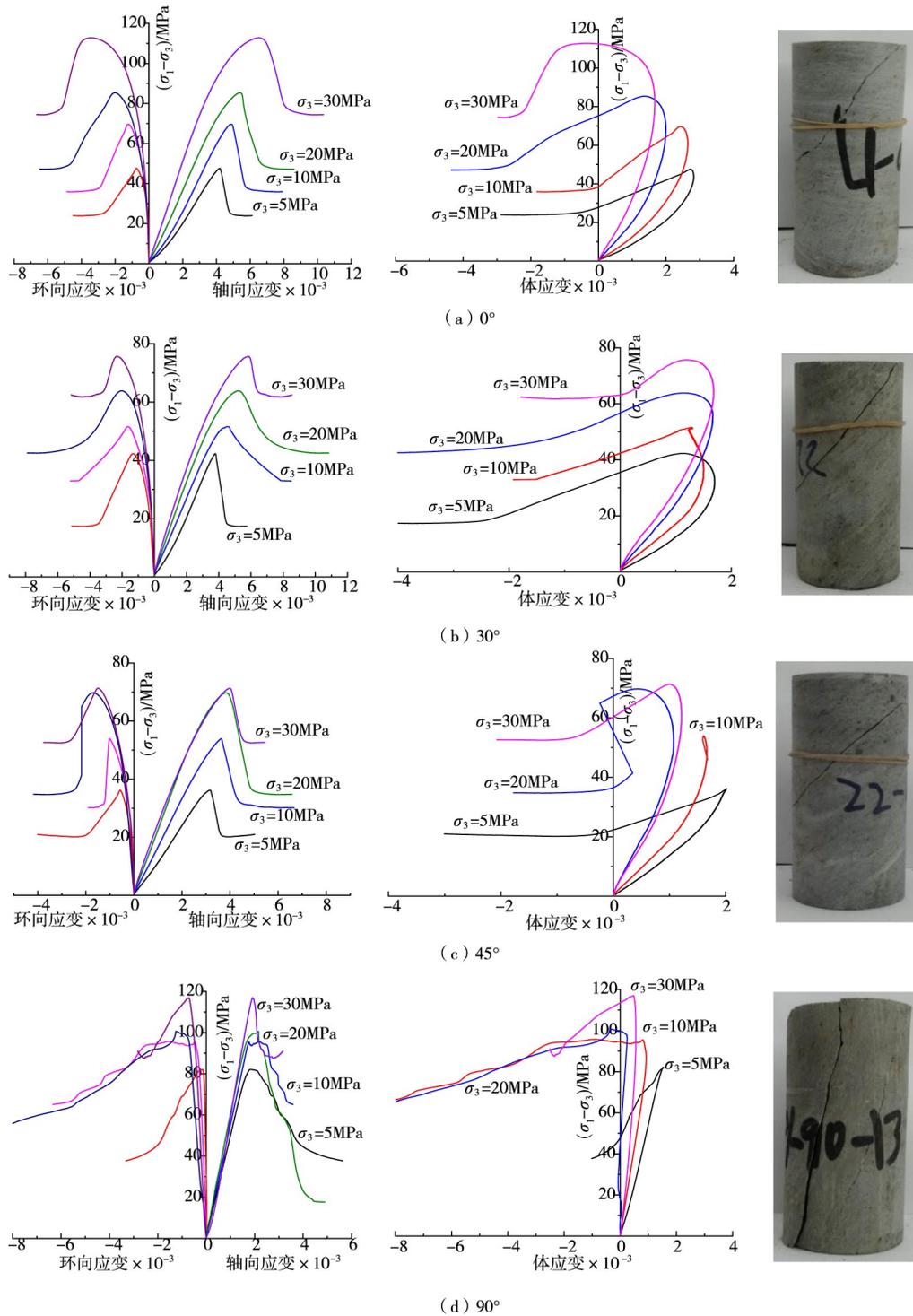


图3 千枚岩三轴加载应力-应变曲线及典型破坏模式

反映的是基质本身的抗压能力，故强度最高。

峰后破坏阶段：过峰值应力  $\sigma_f$  后，岩样承载力大幅度降低，各点的切向弹性模量为负，岩样的微裂隙不断扩展并贯通，软化现象显著。随着轴向应力的增大，岩样内部的裂隙扩展至贯通并呈块状结构，在围压的作用下，不同块体之间的摩擦力使岩样仍具有一定的承载能力，并且随着围压升高，残余阶段的承载力提高。

图4给出了加载条件下不同倾角岩样扩容应力，图5给出了加载条件下不同倾角岩样峰值应力。

可以看出，扩容应力和峰值应力与围压均具有良好的线性关系，这主要是由于围压的存在限制了岩样内部损伤的发展。

根据摩尔库伦破坏准则，最大主应力和最小主应力的关系，可用下式表示：

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_3 + \frac{2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (1)$$

式中： $c$  为材料的黏聚力； $\varphi$  为材料的摩擦角。

Martin 等<sup>[20]</sup>将损伤扩容应力定义为岩体的长期强度。将岩样的损伤扩容应力与围压通过最小二乘法线性拟合，通过式(1)根据直线的斜率和截距，可得到不同层理倾角岩样的长期力学参数。千枚岩三轴加载力学参数如表 1 所示。

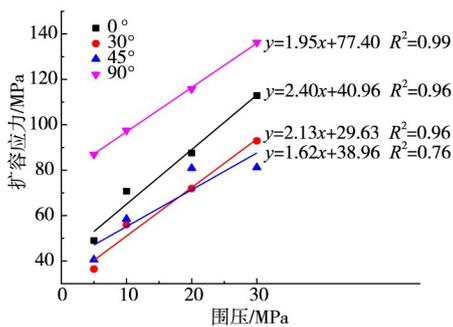


图 4 千枚岩扩容应力与围压的关系

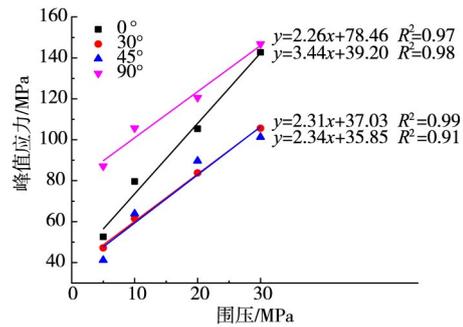


图 5 千枚岩峰值应力与围压的关系

表 1 千枚岩三轴加载强度参数

倾角/(°)	黏聚力/MPa		摩擦角/(°)	
	扩容	峰值	扩容	峰值
0	13.2	10.6	24.4	33.3
30	10.1	12.2	21.2	23.3
45	15.3	11.7	13.7	23.8
90	27.7	26.1	18.8	22.6

本次试验发现，如表 1 所示不同层理倾角千枚岩三轴加载下长期黏聚力普遍大于峰值黏聚力。究其原因，扩容损伤应力点既是加载过程中的损伤发展的起始点，也是内部裂纹稳定发展和迅速拓展的交界点。当到达峰值应力时，由于经过了裂纹损伤阶段和失稳拓展阶段的发展，岩样内部裂隙已趋于贯通，黏聚力出现下降，故长期黏聚力普遍大于峰值黏聚力。

从表 1 还可以看出，不同层理倾角千枚岩三轴加载下长期摩擦角普遍小于峰值摩擦角。由于围压的存在，峰值点相较于扩容点提供了更高的轴向应力，岩样损伤块体之间更紧密的咬合使摩擦效应得到了更充分发挥，故长期摩擦角小于峰值摩擦角。

**3.2 体应变-轴应变特性** 图 6 给出了不同倾角岩样各围压下体积应变与轴向应变的相互关系。与各向同性岩体<sup>[21]</sup>相似，不论何种倾角岩样，随着围压增大，岩样扩容起点对应的体积应变逐渐减小，表明施加围压的过程中，岩体内部裂隙闭合、软弱介质压缩，使得岩样在偏应力作用下可压缩性逐渐减弱。

随着围压增大，岩样由压缩向扩容的过渡逐渐平缓，某些倾角岩样还在高围压下出现短暂的水平段，即径向应变速率与轴向应变速率相当，说明围压限制了岩体内部裂隙的发展，破坏形式表现为一定程度的塑性破坏。在实际工程中，高地应力地区开挖隧道容易发生大变形破坏，对其分析时应考虑到高地应力下岩体延性增强，在扩容点附近即可发生较大的侧向变形。

扩容起始点是岩体由压缩到膨胀的转折点，故扩容起始点对应的体积应变即为岩样的最大压缩应变。随着岩样倾角的增大，扩容起始点对应的轴向应变和体应变均逐渐减小，这与不同层理倾角下岩样受力特点有关：当岩样倾角为 0° 时，荷载垂直于层理弱面，岩样的可压缩量较大，因此能产

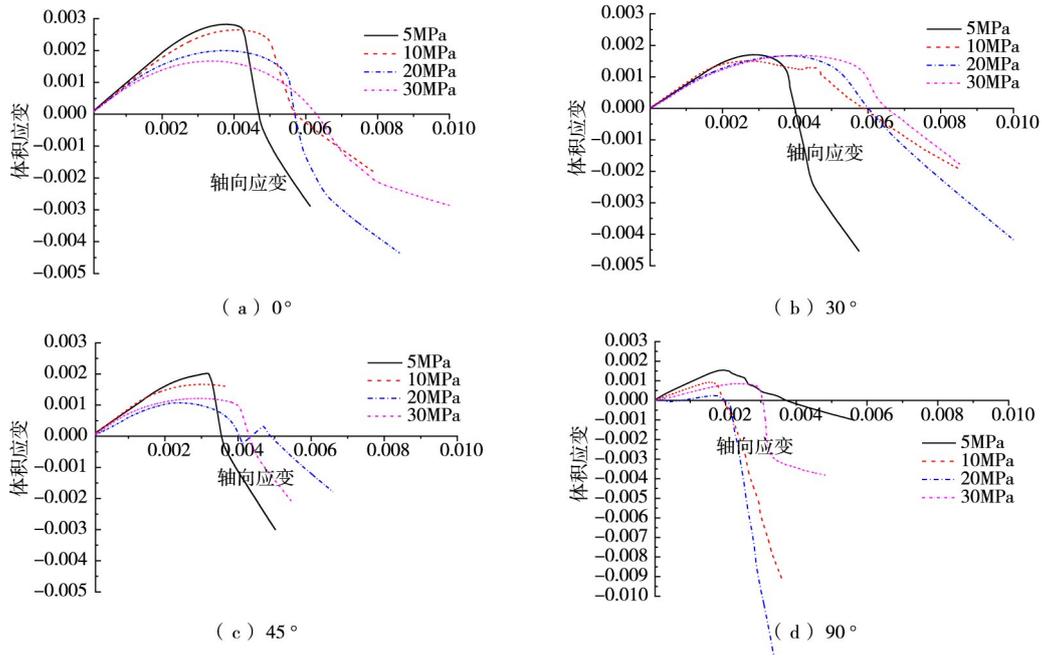


图6 千枚岩三轴加载轴向应变-体应变

生较大的体积变形；随着倾角的增大，岩样的变形模量不断增大，使得岩样的可压缩性不断减小，当倾角为 $90^\circ$ 时，岩样的变形模量达到最大，其轴向变形量达到最小，同时围压在一定程度上限制了岩样的体积变形，最终使得岩样的体积变形量达到最低。

**3.3 塑性应变比** 为获得塑性变形指标，参考杨以荣等<sup>[17]</sup>的建议，假定试验过程中弹性常数不变，利用弹性变形阶段得到的弹性常数，根据弹性计算方法可得到轴向弹性应变 $\varepsilon_1^e$ 和环向弹性应变 $\varepsilon_3^e$ ，再用总应变减去弹性应变即得到对应的塑性应变，如式(2)一式(3)所示：

$$\varepsilon_1^e = \frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}{E}, \quad \varepsilon_3^e = \frac{\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)}{E} \quad (2)$$

$$\varepsilon_1^p = \varepsilon_1 - \varepsilon_1^e, \quad \varepsilon_3^p = \varepsilon_3 - \varepsilon_3^e \quad (3)$$

式中： $\sigma_1$ 为轴向应力； $\sigma_3$ 为环向应力； $E$ 为弹性模量； $\mu$ 为泊松比； $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_1^p$ 分别为轴向的总应变和塑性应变； $\varepsilon_3$ 和 $\varepsilon_3^p$ 分别为环向的总应变和塑性应变。

通常认为，岩体的塑性变形源自于原生裂隙拓展、新裂隙萌生和基质间的剪切滑移，因此塑性变形可视为岩体内部节理发展的宏观表现。试验获得的应力-应变曲线实质上是由不同时刻记录的应力-应变点组成的，采用式(2)一式(3)可以获得加载过程中每微段的轴向塑性应变增量 $d\varepsilon_1^p$ 和环向塑性应变增量 $d\varepsilon_3^p$ ，式(4)定义了某一应力水平下轴向与环向塑性应变变化量的比值 $\eta$ ，以反映轴向与环向内部节理发展的相对程度。通常认为轴向应力小于起裂应力时，岩样发生弹性变形，故仅绘制了裂纹稳定拓展阶段与裂纹损伤和失稳拓展阶段。图7给出了不同层理倾角岩样在不同围压下塑性应变比 $\eta$ 与偏应力的关系，其中裂纹稳定拓展阶段采用黄色或红色三角形散点进行绘制，裂纹损伤和失稳拓展阶段采用绿色或蓝色矩形散点进行绘制。

$$\eta = \frac{d\varepsilon_1^p}{d\varepsilon_3^p} \quad (4)$$

有学者认为可以采用扩容应力表征岩体的长期强度<sup>[20]</sup>，由于扩容点后节理发育迅速导致岩体的应变显著增大，所以裂纹损伤和失稳拓展阶段可作为防止岩体破坏的重要阶段。从图7可以看出，不同层理倾角岩样的裂纹损伤和失稳拓展阶段存在明显差异，倾角为 $0^\circ$ 岩样该阶段随围压增大应力历

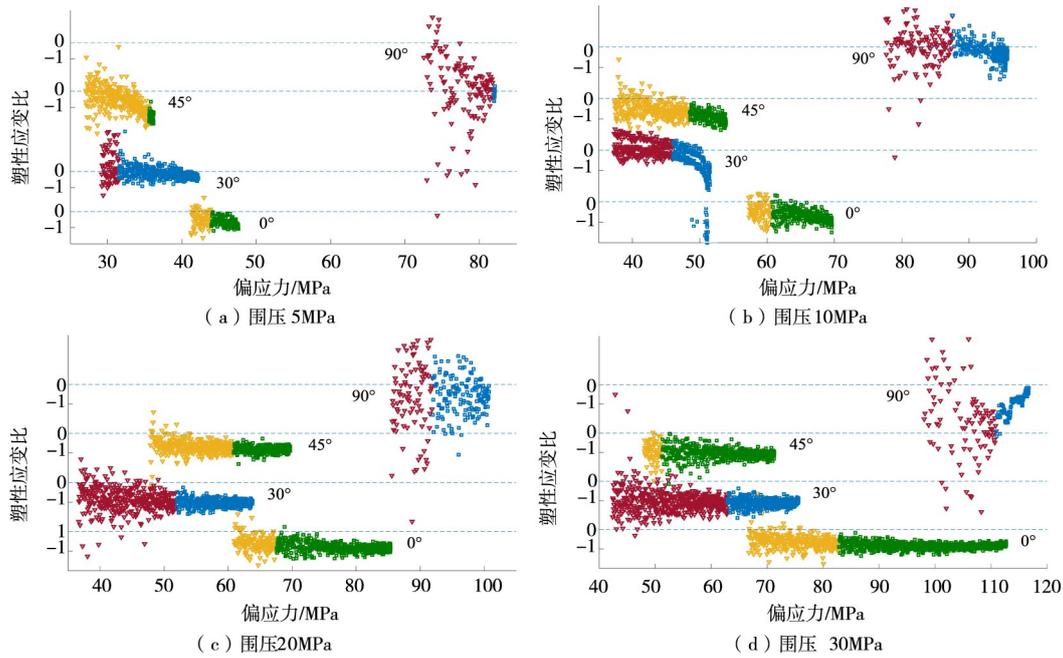


图7 千枚岩塑性应变比与偏应力关系

程变长, 究其原因, 在轴向应力的作用下基质层首先发生破裂, 过扩容点后基质的剪切裂纹逐渐贯通形成宏观剪切面, 达到峰值点时剪应力分量的作用使岩样发生锯齿形剪切破坏, 围压的增大使该阶段应力历程显著变长。倾角为 $30^\circ$ 的岩样的应力历程随围压的增大并未出现明显变化, 观察破坏后的岩样发现破坏面十分粗糙, 岩样发生弱面和基质共同受剪的复合型破坏, 岩样在裂纹稳定拓展阶段形成微裂纹引起应力集中切穿基质, 直至裂纹连通形成宏观剪切面。倾角为 $45^\circ$ 岩样低围压试验中该阶段应力历程较短, 但随着围压的提高显著增长。低围压下试件过扩容点后即发生沿层理弱面滑移的剪切破坏, 观察破坏后的岩样发现断面光滑, 表明 $45^\circ$ 岩样在低围压下层理弱面产生裂纹后, 裂纹沿层理面迅速发展, 最终贯穿整个层理面并使岩样发生沿层面的剪切滑移破坏, 但围压可对这种剪切破坏产生较为显著的抑制作用。该阶段在 $90^\circ$ 倾角岩样的试验中不存在较为普遍的规律, 这是由于试件在低围压下发生类似于压杆失稳的张拉破坏, 并以层理面为破坏面; 但在高围压下试件的破裂模式转化为共轭剪切破坏。

在一次加载中, 偏应力小于起裂应力时试件发生弹性变形, 测得轴向塑性应变和环向塑性应变为0, 由于试验设备并非完全刚性, 应力应变曲线在小邻域内存在毛刺在较大区间光滑, 轴向塑性应变增量 $d\varepsilon_1^p$ 和环向塑性应变增量 $d\varepsilon_3^p$ 在0点附近跳动。进入裂纹稳定拓展阶段及裂纹损伤和失稳拓展阶段后, 试件开始发生塑性变形, 随着微裂纹的发育、扩散, 轴向和环向的塑性应变增量之比即塑性应变比 $\eta$ 逐渐发生变化。

从图7可以看出, 不同围压作用下塑性应变比走势存在明显差异。低围压下塑性应变比多呈下坠趋势, 表明在偏应力接近峰值应力的过程中轴向塑性应变的变化率大于环向塑性应变的变化率, 提示轴向裂隙的发展速度比环向裂隙的发展速度更快。中围压下塑性应变比普遍呈水平形式, 表明轴向和环向的塑性应变变化率持平。高围压下塑性应变比呈先下降后上升的趋势, 表明随着偏应力的增大, 塑性应变的变化率由轴向大于环向逐渐转变为环向大于轴向, 提示环向裂隙的发展速度随着偏应力增大而显著变快。

#### 4 结论

千枚岩层间结合差, 其力学特性具有显著各向异性的特点。在工程建设中, 如对千枚岩力学特

性认识不足, 极易诱发灾害。因此, 本文开展了不同层理倾角的千枚岩三轴加载试验, 分析了千枚岩的扩容和塑性应变特性, 得出如下结论: (1)千枚岩三轴加载下应力-应变5个区段及其对应的特征应力随围压大小和层理倾角的变化具有显著差异, 并与其受力机理吻合。不同层理倾角千枚岩长期黏聚力普遍大于峰值黏聚力, 长期摩擦角普遍小于峰值摩擦角。(2)千枚岩扩容起点对应的体应变随着围压的升高而减小; 随着倾角的增大, 扩容起点对应的轴向应变和体应变逐渐减小。(3)裂纹损伤和失稳拓展阶段可作为防止岩体发生破坏的重要阶段, 该阶段在不同层理倾角岩体中表现出明显差异。(4)在轴向应力超过起裂应力逐渐接近峰值点的过程中, 较低围压水平下轴向裂隙的发展速度比环向裂隙的发展速度更快, 较高围压水平下环向裂隙的发展速度随着偏应力增大而显著变快。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] BRIDGMAN P W . Volume changes in the plastic stages of simple compression[J] . Journal of Applied Physics, 1949, 20(12): 1241-1251 .
- [ 2 ] HANDIN J, HAGER R V J, FRIEDMAN M, et al . Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: pore pressure tests[J] . AAPG Bulletin, 1963, 47(5): 717-755 .
- [ 3 ] 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 .
- [ 4 ] LAMA R D, VUTUKURI V S . Handbook on mechanical properties of rocks [M] . Clausthal, Germany: Trans-Tech Publications, 1978 .
- [ 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 .
- [ 6 ] 姜德义, 范金洋, 陈结 . 盐岩在围压卸荷作用下的扩容特征研究[J] . 岩土力学, 2013, 34(7): 1881-1886 .
- [ 7 ] BÉSUELLE P, DESRUES J, RAYNAUD S . Experimental characterisation of the localisation phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell[J] . International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(8): 1223-1237 .
- [ 8 ] 杨圣奇, 刘相如 . 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性试验研究[J] . 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2188-2198 .
- [ 9 ] 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, 2013, 35(8): 1478-1486 .
- [ 10 ] 王宇, 李晓, 贲雨星, 等 . 脆性岩石扩容起始应力预测——以花岗岩和闪长岩为例[J] . 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 737-746 .
- [ 11 ] 吴昊, 赵维, 年廷凯, 等 . 反倾层状岩质边坡倾倒破坏的离心模型试验研究[J] . 水利学报, 2018, 49(2): 223-231 .
- [ 12 ] 李磊, 谭忠盛, 郭小龙, 等 . 高地应力陡倾互层千枚岩地层隧道大变形研究[J] . 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1611-1622 .
- [ 13 ] 何忠明, 彭振斌, 曹平, 等 . 层状岩体单轴压缩室内试验分析与数值模拟[J] . 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1906-1912 .
- [ 14 ] 邓华锋, 王伟, 李建林, 等 . 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 .
- [ 15 ] NASSERI M H B, RAO K S, RAMAMURTHY T . Anisotropic Strength and Deformational Behavior of Himalayan Schists[J] . International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 3-23 .
- [ 16 ] 高春玉, 徐进, 李忠洪, 等 . 雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J] . 岩土力学, 2011, 32(5): 1360-1364 .
- [ 17 ] 杨以荣, 谢红强, 肖明砾, 等 . 卸荷条件下横观各向同性岩体扩容与能量特性分析[J] . 岩土力学, 2017, 38(6): 1589-1599 .
- [ 18 ] 王思敬 . 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J] . 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433-450 .
- [ 19 ] 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):

281–289 .

- [ 20 ] MARTIN C D, CHANDLER N A . The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J] . International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1994, 31(6): 643–659 .
- [ 21 ] HAIMSON B C, CHANG C . A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of westerly granite[J] . International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(1): 285–296 .

### **Dilatancy and plastic strain characteristics of layered rock mass under triaxial compressive test**

TANG Kedong, WANG Jialiang, GUAN Junfeng, LI Lielie

*(School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power,  
Zhengzhou 450045, China)*

**Abstract:** In order to study the dilatancy and plastic strain characteristics of layered rock, the phyllite was made into samples with bedding angle of 0 degree, 30 degree, 45 degree, and 90 degree. The experiments were conducted on MTS815 servo-controlled test machine, a coefficient is defined for qualitative analysis of the axial and circumferential crack named plastic strain ratio, the results show that the five typical sections and characteristic stresses of the phyllite stress-strain curve change with the change of confining pressure and loading direction, which is determined by the force mechanism of phyllite. The volumetric strain corresponding to the dilatancy point of the phyllite is reduced as the confining pressure increases. Besides, as the inclination increases, the axial strain and volumetric strain corresponding to the dilatancy point decrease. Regardless of any bedding angle, the long-term cohesion of phyllite is generally greater than the peak cohesion, and the long-term friction angle is generally less than the peak friction angle. The development speed of axial fracture is faster than that of circumferential fracture under low confining pressure, and the development speed of circumferential fracture under high confining pressure is significantly faster with the increase of deviatoric stress.

**Keywords:** phyllite; dilatancy; triaxial compressive; experimental study; plastic deformation

(责任编辑: 耿庆斋)