

DOI: 10.11779/CJGE201706017

# 龙门山北段千枚岩强度及变形特性对比试验研究

吴永胜<sup>1</sup>, 谭忠盛<sup>1</sup>, 余贤斌<sup>2</sup>, 喻渝<sup>3</sup>, 李磊<sup>1</sup>, 郭小龙<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;  
3. 中铁二院工程集团有限公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 对成兰铁路龙门山北段隧道群 4 种典型千枚岩进行不同加载方位角的强度和变形特性对比试验研究, 研究结果表明: 加载方位角和岩石矿物成分严重影响千枚岩变形特性, 并与围压水平有关。千枚岩单轴抗压强度随方位角变化呈“U”型的各向异性特征, 所试验的 4 种千枚岩各向异性率由大至小对比关系为: HP>MP>QP>CP。试样一般在峰值应力前产生扩容现象, 扩容起始应力和形式与加载方位角或层理发育程度相关。三轴压缩试验中, 千枚岩垂直层理加载时的峰值强度、长期强度和残余强度比平行层理加载明显偏高, 并随围压水平增加而增大。千枚岩不同加载方位角下单轴压缩试验破坏模式归纳为 4 种: 层理面滑移剪切破坏、压拉剪切破坏、张拉破坏、复合破坏。

**关键词:** 千枚岩; 强度; 变形特性; 加载方位角

中图分类号: TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)06-1106-09

作者简介: 吴永胜(1974-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: wyskmust@126.com。

## Comparative tests on strength and deformation of phyllite of northern tunnels of Longmen Mountains

WU Yong-sheng<sup>1</sup>, TAN Zhong-sheng<sup>1</sup>, YU Xian-bin<sup>2</sup>, YU Yu<sup>3</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, GUO Xiao-long<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., LTD, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The experimental tests are carried out on the strength and deformation characteristics of four typical rock samples of phyllite taken from the northern tunnels of Longmen Mountains of the Chengdou-Lanzhou Railway. The results show that the deformation of the phyllite is strongly influenced by the loading angles related to the beddings and the mineral components of the rocks as well as the confining pressure in 3-D compression. The uniaxial compressive strength of the phyllite changes with the changing of the loading angles, showing a “U” type and typical anisotropic behaviour. The anisotropic intensity of the four phyllite samples can be queued as follows: HP>MP>QP>CP. Dilation appears in the rock samples generally before the peak stress of the loading, and the starting stress and the formation of rock dilatancy are related with the loading angle as well as the development degree of the beddings. In the triaxial compressive tests, both the peak strength and the residual strength of the samples along the loading axis perpendicular to the beddings are remarkably higher than those parallel to the beddings, and the differences increase with the increase of the confining pressure. The failure modes of phyllite samples with different loading angles are classified into 4 types: bedding plane slip shear failure, tension shear failure, tensile failure and composite failure.

**Key words:** phyllite; strength; deformation property; loading angle

## 0 引言

岩石在长期的成岩、后期造岩及次生演变过程中形成了诸如裂隙、空洞、节理和断层等不连续结构面, 岩石的这些微观的“劣化”结构严重影响其宏观力学和变形行为, 综合表现为岩体力学特性的各向异性和不均一性<sup>[1-2]</sup>。自 20 世纪 50 年代, 国内外学者对这些问题进行了广泛研究。Talercio 等<sup>[3]</sup>、王林等<sup>[4]</sup>通过现场试验方法, 分别研究了层状岩面与层面方位角关系

的表达式; Ramamurthy 等<sup>[5]</sup>研究千枚岩的工程力学性能, 揭示了千枚岩强度特征和变形特性的各向异性规律, 并分析其内在机制; 高春玉等<sup>[6]</sup>、刘胜利等<sup>[7]</sup>、郭富利等<sup>[8]</sup>结合在建重大工程, 通过常规室内试验方法, 分别对雪峰山隧道砂板岩、武当群绿泥石片岩和堡镇隧道炭质页岩进行不同加载方向、不同含水率和

围压水平的力学性质和变形特性研究, 研究果表明砂板岩、片岩和页岩等层状结构岩石的强度和变形具有显著各向异性, 各向异性率与岩石加载路径、含水情况和围压大小有关。田象燕等<sup>[9]</sup>就不同加载应变速率对饱和南京砂岩、大理汉白玉大理岩等进行垂直和平行层理方向的单轴压缩变形与强度各向异性的对比试验, 两种岩石在饱水情况下各向异性显著不同, 与岩石的矿物成分、原生结构等密切相关。

已有文献多侧重于软岩或样本岩石某一状态或加载条件下力学特性及其各向异性的研究, 而依托重大工程、基于矿物成分差异对同种岩石不同岩性岩石强度和变形特性对比分析的相对较少。为此, 本文以在建成(成都)兰(兰州)铁路龙门山北段隧道群已发生大变形段落的4种典型千枚岩为研究对象, 进行不同加载方位角或围压水平的单轴和三轴压缩试验, 对比分析千枚岩强度和变形特性各向异性变化规律, 探讨其力学响应机制, 为岩土工程设计、模拟和力学参数的选取提供一些有益的参考。

## 1 试验设备、方案及试样情况

试验在昆明理工大学国土资源工程学院岩石力学实验室MTS815Teststar程控伺服岩石力学试验机上进行, 分常规单轴和三轴压缩试验, 采用位移控制加载速率(图1)。单轴试验以0.1 mm/min的速率施加轴向应力, 在比例极限后、峰值应力前改变加载控制方式为环向(横向)应变控制, 速率为 $9 \times 10^{-6}/\text{min}$ , 超过峰值后逐级提高至1~2倍, 直至试验结束。三轴试验以0.5 MPa/s的加载速度同时施加侧压力和轴向压力至预定围压, 使围压在试验过程中始终保持为常数; 三轴试验围压分别取5, 15, 20 MPa。以0.1 mm/min的加载速度施加轴向荷载, 至试样峰值荷载的70%左右转为环向引伸计控制, 直至试件破坏, 得到全过程曲线。

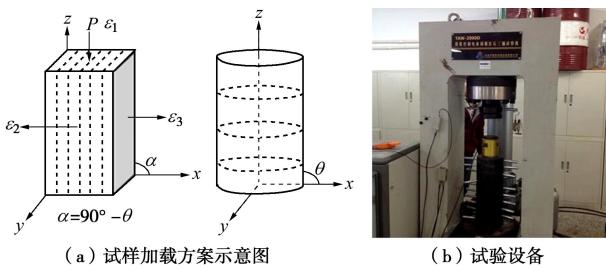


图1 试验方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tests

为更客观地反映层理结构千枚岩各向异性变形情况, 按国际力学学会( ISRM) 试验规程的建议, 单轴压缩试验采用50 mm×50 mm×100 mm长方体试样,

并根据主控层里面与加载方向相互关系, 试样分别加工为层理倾角0°, 30°, 45°, 90°; 三轴试验采用φ50 mm×100 mm的标准圆柱样, 层理面倾角分别为0°和90°。千枚岩矿物成分和基本物理特性见笔者相关研究内容<sup>[10]</sup>。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 单轴压缩试验

#### (1) 变形特性对比分析

根据上述试验方案, 成功地获得了4种千枚岩不同方位角单轴压缩典型应力-应变的关系曲线, 如图2所示。由于篇幅所限, 本文先以绿泥石千枚岩为例, 系统描述千枚岩不同加载方位角下变形的4个阶段, 再进行不同千枚岩之间的对比分析。

0°方位角下千枚岩压密阶段短暂而细微, 应变曲线非线性并不显著。这主要是由于加载时, 纵向排布岩柱加载一开始就承担了轴向偏应力, 导致加载过程中沿层理方向展布扁平裂隙发生长轴方向挤压, 并伴随有局部岩柱逐步压短, 泊松效应使裂隙优先沿层理面侧向伸展, 表现为加载过程中出现轴向压缩应变同时伴随着一定横向膨胀应变; 随着加载方位角的增大层理间裂隙更大范围地参与压缩过程, 椭圆形裂隙易发生短轴方向压密, 变形量增大, 轴向应变曲线表现为下凸; 横向因不利于能量积累而变形减弱, 应变曲线陡直, 几乎沿轴向坐标轴发展。方位角为90°时, 扁平分布裂隙在正向载荷和岩柱的共同作用下充分压密, 下凸最为厉害, 轴向应变主宰应变过程, 体积应变追踪轴向应变而使试样产生较大压缩变形。

原生裂隙被压密后, 试样进入理论上的各向同性状态, 应变曲线表现为可恢复的线弹性变形。因裂隙参与引起的结构效应使试样不同方位角变形表现出显著差异。轴向变形在经历了压密后, 线弹性状态较好, 以此表征的平均弹模与加载角有关, 大小依次为0°>30°>45°>90°; 横向则因试样中岩石颗粒翻转、位置调整以及新裂纹的萌生等使变形更加复杂, 加载方位角增大, 结构效应增强, 岩石效应减弱, 岩石横向经过短暂的弹性变形后, 由于有少量不可逆新裂隙产生而多发生了偏离线性的塑性变形, 使千枚岩迅速结束弹性变形阶段, 45°方位角时两者综合效应达到最大, 弹性变形阶段时间最短。

随着轴向偏应力增加, 岩石内部原生裂隙闭合, 原生裂纹因应力集中或试样中的缺陷部位萌生新裂纹, 并稳定扩展, 试样进入裂纹稳定扩展阶段<sup>[11]</sup>, 多数试样出现偏离线弹性的塑性变形。方位角为0°时,



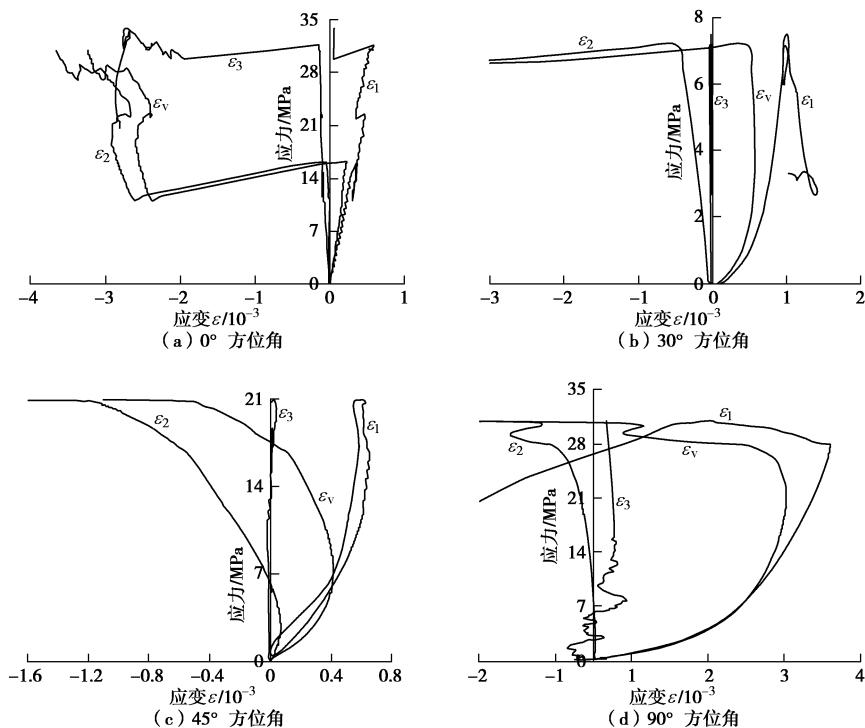


图 2 绿泥石千枚岩单轴压缩试验典型应力应变全过程曲线

Fig. 2 Complete stress-strain curves of samples of chlorite phyllite under uniaxial compression tests

极低的层间黏聚力使新旧裂隙迅速连接而形成与加载方向一致的贯通面, 千枚岩早早进入裂纹加速扩展阶段并产生扩容, 岩石被层理切割成薄片状, 强度较低的岩柱因承载力不足会产生“压杆断裂”, 表现为试样的横向拐伤, 拐伤导致体积变形曲线跟随横向变形偏离原有轨迹, 向左迅速发展而出现“台阶状”变形, 千枚岩表现出大变形特征; 受结构效应影响最大的30° 方位角试样因裂隙中岩桥断裂或岩粒翻转等产生小幅“跌宕式”变形, 试样表现出强烈软岩特性。45° 和 90° 方位角试样因轴向或横向发生有压缩时体积应变曲线更加平缓, 经历时间较短, 该阶段的终点通常被称为裂纹损伤应力阈值。

裂纹损伤和失稳扩展阶段是试样裂隙全面发展阶段, 代表了千枚岩不同加载角变形各向异性特性的典型阶段。0° 方位角加载试样经历了剧烈的拐折损伤后力学性能减弱, 纵、横及体积变形均产生连续小幅震荡, 平行层理面横向变形更发生剧烈的侧向膨胀, 表明垂向岩柱面多发生离层“压杆”破坏; 综合受力及新裂隙优势发展使30° 方位角试样易发生沿层理面滑移、张拉, 试样扩容后体积迅速增长, 弹塑性变形破坏特征明显; 45°, 90° 方位角试样因受岩石效应影响, 强度普遍较高, 纵、横向变形则具有显著延性特征。

试验结果和对比分析表明, 龙门山北段千枚岩变形特性与其他软岩明显不同, 并受岩类和加载方位角

影响, 主要为: ①随着加载方位角增大, 轴向变形增加, 横向变形则减小, 试样破坏时, 横向变形值已远大于纵向变形, 破坏模式由脆性逐渐向延塑性过渡, 石英千枚岩因云母和石英成分含量较高表现最为突出; ②峰值强度和层理结构是影响千枚岩变形特征的重要因素, 强度最低绢云母千枚岩在不同加载方位角下纵、横向变形数值均较大, 最大纵、横向应变达到2.0%以上, 表现出强烈的大变形特征。③由于层理面的存在, 横向变形显示出显著的各向异性。表现为: 在整个加载过程中, 平行层理面的横向变形( $\varepsilon_3$ ), 一直保持为很低的数值, 受方位角影响不大; 垂直层理面的横向变形值( $\varepsilon_2$ )则要大得多, 并与载荷与方位角呈不同的变化规律: 随载荷的升高而增大, 随方位角增大而降低。

## (2) 强度及变形参数对比分析

图3给出了不同方位角下千枚岩单轴压缩应力-应变全过程曲线。由不同方位角下千枚岩压缩试验得出的强度及变形参数见表1。为了定量描述和对比分析岩石的强度各向异性特征, 本文引入“各向异性率”这一概念, 定义为同一状态下90° 方位角千枚岩的抗压强度与0° ~ 90° 之间测得最小抗压强度的比值<sup>[5]</sup>, 即 $\sigma_{c-90^\circ}/\sigma_{c-\min}$ 。4种千枚岩的单轴抗压强度随方位角的变化现绘于图4中。

由图4可以发现, 4种千枚岩单轴抗压强度随方位角变化呈“U”型的各向异性特征, 任何方位角相比, 90° 方位角时强度最大, 同样, 最小强度发现在 $\theta =$

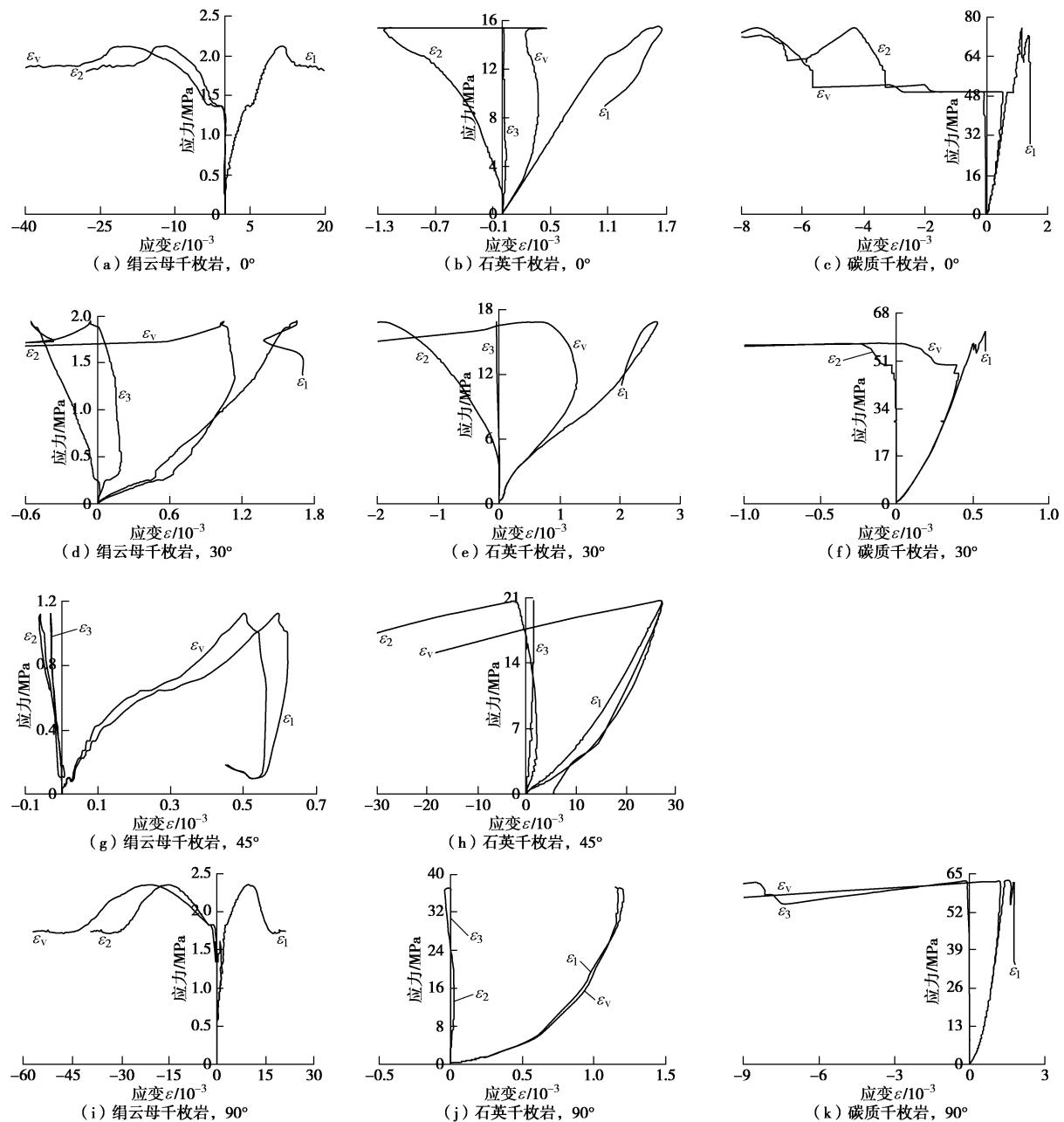


图3 不同加载方位角下千枚岩单轴压缩应力-应变全过程曲线

Fig. 3 Complete stress-strain curves of phyllite with different loading angles in uniaxial compression tests

表1 不同方位角下千枚岩单轴压缩强度及变形参数表

Table 1 Strength and deformation parameters of phyllite with different loading angles in uniaxial compression tests

方位角 (°)	绿泥石千枚岩 (HP)						绢云母千枚岩 (MP)						石英千枚岩 (QP)						炭质千枚岩 (CP)					
	$\sigma_f$ /MPa	$\sigma_{cd}$ /MPa	$E_{50}$ /GPa	$E_A$ /GPa	$\mu_{50}$	$\mu_A$	$\sigma_f$ /MPa	$\sigma_{cd}$ /MPa	$E_{50}$ /GPa	$E_A$ /GPa	$\mu_{50}$	$\mu_A$	$\sigma_f$ /MPa	$\sigma_{cd}$ /MPa	$E_{50}$ /GPa	$E_A$ /GPa	$\mu_{50}$	$\mu_A$	$\sigma_f$ /MPa	$\sigma_{cd}$ /MPa	$E_{50}$ /GPa	$E_A$ /GPa	$\mu_{50}$	$\mu_A$
0	27.71	2.86	30.34	45.59	0.41	0.47	1.73	1.1	2.72	1.3	0.2	0.44	24.45	21.73	8.85	11.53	0.07	0.13	62.1	37.52	51.86	61.46	0.14	0.16
30	8.30	5.11	8.29	8.24	0.24	0.19	1.06	0.78	0.66	0.71	0.26	0.34	13.6	5.06	12.76	11.25	0.66	0.46	58.34	44.73	37.58	50.65	0.13	0.26
45	11.89	7.27	18.38	20.64	0.07	0.10	1.59	0.79	0.26	1.39	0.31	0.09	14.42	13.92	6.18	6.75	0.12	0.14	—	—	—	—	—	—
90	37.79	15.84	30.87	33.24	0.09	0.13	2.23	1.44	2.03	1.97	0.11	0.15	18.40	12.77	7.31	9.98	0.07	0.03	67.2	45.08	30.74	39.04	0.2	0.15

注: 表中  $\sigma_f$ 、 $\sigma_{cd}$ 、 $E_{50}$  和  $\mu_{50}$  分别为载峰值强度、扩容起始应力、50%弹性模量和泊松比, 平均弹模后泊松比。

30° ~ 40° 之间。CP、HP、MP 和 QP 各自的  $\sigma_{c-30}$  分别为 58.34, 7.02, 1.26, 15.6 MPa。通过前文对千枚

岩“各向异性率”的定义, 4种千枚岩中, 绿泥石千枚岩各向异性率最强, 为 5.38, 各向异性率由大至小对

比关系为:  $HP > MP > QP > CP$ , 这与千枚岩层理发育程度基本一致, 说明层理结构是影响千枚岩各向异性的主要因素。

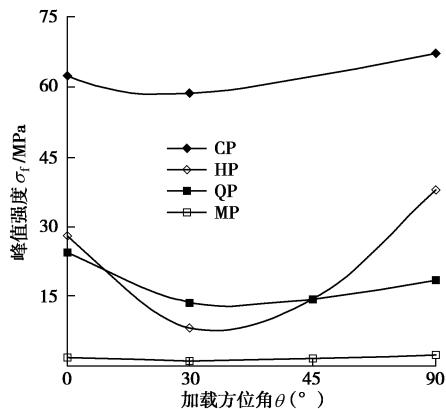


图 4 千枚岩峰值强度随方位角变化趋势图

Fig. 4 Change trend of peak compression strength of phyllite with loading angle

大多数千枚岩试样变形曲线的线性度都很差, 因此, 试样的50%峰值强度处的割线弹模 $E_{50}$ , 与“直线段平均弹模” $E_A$ 相差多在10%以上; 而且,  $E_{50}$ 和 $E_A$ 在数值上孰大孰小, 未见明显的规律。

垂直于层理加载(方位角90°)时, 千枚岩试样两个相互垂直方向上的横向变形相差不太大, 大体可视为各向同性。但在平行于层理加载(方位角0°)时, 试样表现出强烈的各向异性: 加载过程中, 各向同性面内的横向应变 $\varepsilon_2$ 一直保持为很小的数值; 另一方向的横向应变 $\varepsilon_3$ 则随载荷的升高而增大, 甚至出现远大于0.5的情况。取两个横向变形的平均值来计算的泊松比, 不少试样仍出现了泊松比远大于0.5的现象, 如表1中3种岩石0°方位角时的情形。而且, 许多试样的 $\varepsilon_3$ 还表现出早期就加速增长的特点, 致其在峰值应力的50%~60%, 甚至40%左右就出现扩容现象。而且, 扩容发生往往伴随着横向变形的迅猛增长, 形成横向变形曲线的一个拐折平台, 如表1中碳质千枚岩加载方位角0°时的情形。

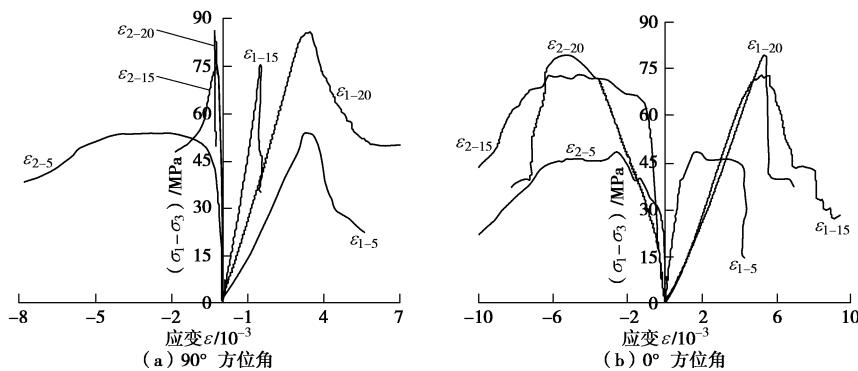


图 5 三轴压缩典型应力-应变曲线

Fig. 5 Typical complete stress-strain curves of triaxial compression tests

千枚岩试样的力学参数具有较大的分散性, 各组试样的抗压强度和弹模、泊松比的偏差系数(均方差与平均值之比)大于40%的, 分别占试样总组数的50%, 65.6%和78.2%。

## 2.2 常规三轴压缩全过程试验

### (1) 变形特性对比分析

对千枚岩进行0°与90°方位角下的三轴压缩试验全过程应力-应变曲线如图5, 6所示, 根据围岩赋存条件和层理发育情况, 围压分别设定为5, 15, 20 MPa。与单轴压缩试验研究相同, 先以绿泥石千枚岩为例, 简要介绍千枚岩不同加载角和围压水平下的三轴压缩变形特性, 再进行千枚岩间的对比分析。

由于层理和内部微缺陷的影响, 不同加载角和围压水平下绿泥石千枚岩试验结果存在一定差异, 但整体规律基本一致。两个加载方位角下绿泥石千枚岩均表现出硬岩特性, 强度较高, 有明显的破坏荷载, 纵向应变明显大于横向, 体积主要为压缩, 存在扩容现象。

围压作用下应力-应变曲线呈明显的5阶段变形特征, 压密阶段曲线呈短暂的下“凸”型非线性增长, 0°方位角加载时, 压密初期便出现一定的横向应变; 接着呈线弹性增长, 从图中可以发现两种方位角加载时, 围压都显著延长千枚岩弹性变形时间并提高弹性总变形比例; 偏应力增大, 纵向应变增加, 曲线上凸且斜率开始减小, 应力-应变曲线出现偏离线性的塑性屈服。屈服初期, 横向应变速率明显大于纵向, 低围压时还出现应变硬化特征, 说明该阶段平行偏应力方向延伸的张拉裂纹集中发育; 达到峰值强度, 应力随应变增加急剧下降, 在降低到残余强度阶段以后, 绿泥石千枚岩试样依靠破裂面以及岩石颗粒之间的摩擦滑移来承载轴向应力, 宏观上呈现压缩为主的脆性扩容破坏。且围压较低时, 纵、横向应变同步增大, 0°方位角加载试样甚至出现类似单轴压缩的变形特征, 体积呈减小趋势, 试样处于压缩状态; 围压增大,

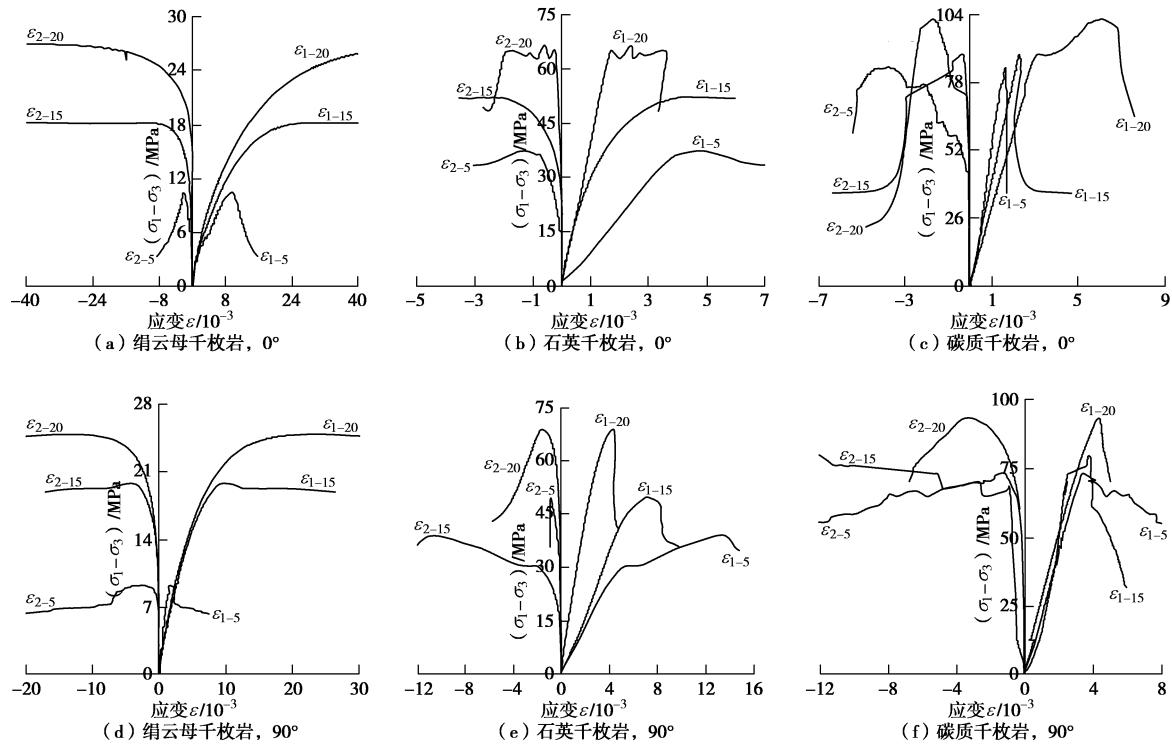


图6 不同加载方位角下千枚岩三轴压缩应力-应变全过程曲线

Fig. 6 Complete stress-strain curves of triaxial compression tests on phyllite with different loading angles

表2 不同围压状态下千枚岩常规三轴试验强度及变形参数表

Table 2 Strength and deformation parameters of triaxial compression tests on phyllite under different confining pressures

岩性	5 MPa				15 MPa				20 MPa			
	90°		0°		90°		0°		90°		0°	
	$\sigma_f$	$\sigma_{cd}$	$\sigma_r$									
HP	53.64	44.18	22.34	48.23	19.92	14.43	75.15	70.12	34.92	72.77	60.75	28.18
MP	11.01	10.08	3.07	9.25	7.6	6.25	18.22	17.19	18.19	20.91	16.74	19.99
CP	83.84	54.63	33.16	73.14	62.31	54.68	88.12	85.91	35.31	79.53	64.31	31.67
QP	46.86	34.03	17.38	37.14	36.11	17.38	66.58	56.28	39.68	45.44	33.18	44.68

横向应变与纵向应变同步增长, 体积压缩趋缓并转为扩容, 且扩容随应力增大而增大<sup>[14]</sup>, 两个方位角加载变形曲线也趋向一致。说明围压限制了千枚岩横向变形, 削弱了方位角对变形的影响。

## (2) 峰值强度、真强度<sup>[12]</sup>及残余强度对比分析

表2为按照上节2.2 (1) 论述中体积变形特征点的计算流程, 得到不同加载方位角和围压水平下的千枚岩三轴压缩峰值强度 $\sigma_f$ 、真强度 $\sigma_{cd}$  (扩容起始点的应力为裂纹损伤应力, 称之为真强度) 和残余强度 $\sigma_r$ 的平均值, 并计算三者之间的比值, 比值随围压水平变化趋势见图7。

4种千枚岩规律性比较显著, 垂直层理( $\theta=90^\circ$ )加载时峰值强度、真强度和残余强度比平行层理( $\theta=0^\circ$ )加载明显偏高, 并随围压水平增加而增大。这一结果与已有的千枚岩、片岩三轴压缩强度规律基本一致<sup>[13-15]</sup>。这可能与本次试验的千枚岩内部结构和破坏

模式有关, 由磨片镜下照片显示千枚岩矿物成分分布情况与存在状态。在平行层理面加载时, 微裂纹会优先在抗拉强度低的云母层理面间发育, 致使整个试样体积应变的 $\sigma_{cd}$ 值总体偏低。继续加载到峰值强度, 试样沿片理面发育的裂纹易与既有裂纹交互贯通形成宏观破坏, 在张拉应力作用下逐层剥离、压断, 应力-应变曲线表现非连贯的突变, 导致平行层理面加载峰值强度偏低, 峰值后应力迅速跌落, HP和CP脆性破坏特征显著, 仅靠错落岩柱接触面间的摩擦力支撑, 残余强度较低; 而垂直片理面加载时, 微裂纹以强度较高的石英、碳质胶结体之间的拉裂为主, 致使整个试样体积应变的 $\sigma_{cd}$ 值比平行加载时稍高。继续加载到峰值强度, 随着围压水平不断提高, 千枚岩呈斜交层理面的纯剪切破裂, 峰值强度较高; 由于试样内部已形成大量沿纵向发展或贯通裂纹, 峰值后多形成平缓屈服平台, 应力软化现象突出, 残余强度应力较高。

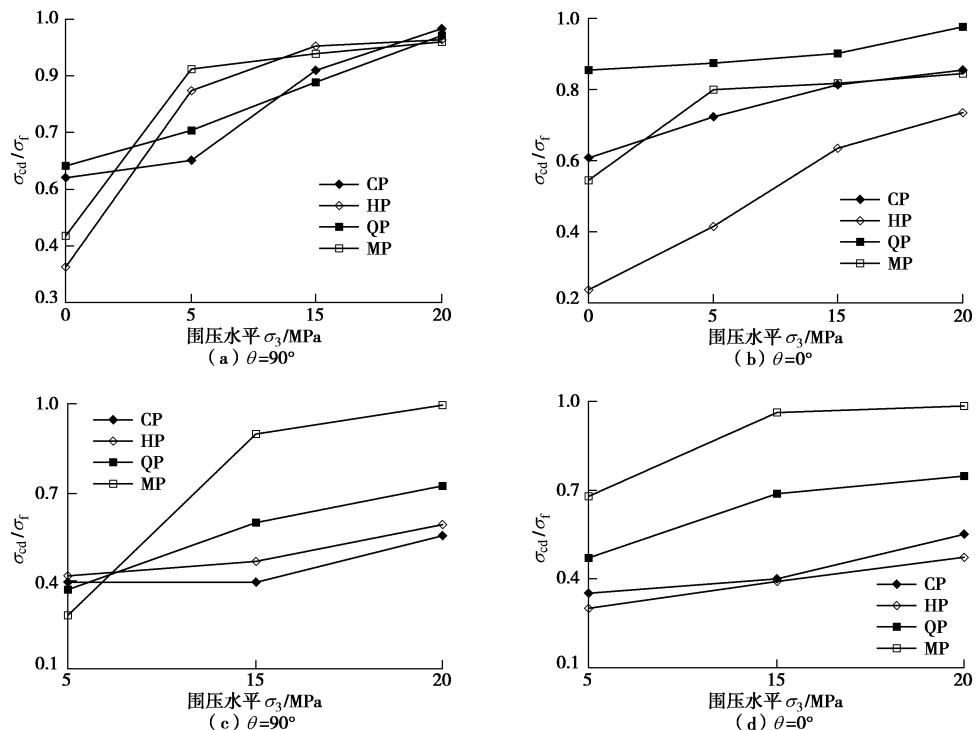


图 7 常规三轴压缩应力门槛值比值随围岩水平变化趋势图

Fig. 7 Change trend of stress threshold ratios of triaxial compression under different confining pressures

表 3 试样破坏后破坏形态

Table 3 Typical failure modes of rock samples after tests

岩类	0°		30°		45°		90°	
	破坏机制	试样照片	破坏机制	试样照片	破坏机制	试样照片	破坏机制	试样照片
绿泥石千枚岩	离层张拉破坏		沿层理面剪切破坏		剪切滑移及张拉复合破坏		压剪和张剪联合型破坏	
绢云母千枚岩	压缩为主张拉破坏		剪切滑移破坏		张拉剪切破坏		剪切破坏	
石英千枚岩	张拉兼剪切滑动破坏		剪切及张拉破坏		岩层理面剪切破坏		剪切破坏	
碳质千枚岩	压致拉裂的拉张破裂		压剪联合破坏				压剪张拉复合破坏	

对千枚岩不同层理加载和围压水平下的  $\sigma_{cd}/\sigma_f$  采用趋势线拟合, 求得对比关系如下, 垂直层理加载: HP : MP : CP : QP = 1.67 : 1.36 : 1.23 : 1; 平行层理加载: HP : MP : CP : QP = 4.44 : 2.38 : 2.14 : 1。其中层理发育绿泥石千枚岩单轴或低围压下平行加载时  $\sigma_{cd}/\sigma_f$  极低, 仅为 0.24, 围压使其迅速增大, 增长速率最快, 这与围压限制了张拉作用横向裂纹发展有关; 同理, 对千枚岩不同层理加载和围压水平下的  $\sigma_r/\sigma_f$  采用趋势线拟合, 求得对比关系如下, 垂直层理加载: HP : MP : CP : QP = 0.5 : 2.05 : 0.45 : 1; 平行层理加载: HP : MP : CP : QP = 7.23 : 1.1 : 0.72 : 1。绢云母千枚岩绢云母成分含量较高, 强度最低, 高围压使其内部同质化, 不稳定裂纹发展后期岩石向延塑性发展, 试样峰值强度、真强度和残余强度明显增高, 导致其不同方位角下  $\sigma_{cd}/\sigma_f$ ,  $\sigma_r/\sigma_f$  值偏高。

### 3 变形破坏模式

载荷作用下, 岩石试样破坏模式是岩石破坏机制的重要特征, 这不仅表现为受力过程中应力分布情况, 同时也间接反映了矿物组成和层理发育程度等差异对强度的影响。根据千枚岩不同加载方位角下单轴压缩试验过程中试样的破坏模式, 总结出 4 种破坏模式: 层理面滑移剪切破坏、压拉剪切破坏、张拉破坏、复合破坏, 前两种与层理结构发育程度或矿物成分等有关, 石英或碳质含量较高且层理发育绿泥石千枚岩、石英千枚岩在 30° 或 45° 方位角加载时, 层理结构控制了岩石破坏模式, 多发生沿结构面滑移剪切破坏; 绢云母千枚岩因绢云母含量较高, 大大削弱了试样抗压强度, 客观上减弱了层理面对破坏模式的影响程度, 大角度一般发生压张剪切破坏。张拉破坏多发生在层理发育平行层理加载试样, 如绿泥石千枚岩, 表现为硬岩的脆性离层拐伤破坏。复合破坏多以压剪和张拉联合破坏为主, 一般发生在岩石内部成分胶结度较高的碳质千枚岩试样中, 如表 3 所示。

### 4 结 论

(1) 加载方位角和岩石矿物成分等严重影响千枚岩单轴压缩变形特性, 随着加载方位角增大, 千枚岩轴向变形增加, 横向变形则减小, 试样破坏时, 横向变形值已远大于纵向变形, 破坏模式由脆性逐渐向延塑性过渡。

(2) 千枚岩单轴抗压强度随方位角变化呈“U”型的各向异性特征, 4 种千枚岩中, 绿泥石千枚岩各向异性率最强, 为 5.38, 各向异性率由大至小对比关系为 HP > MP > QP > CP, 这与千枚岩层理发育程度基本一

致, 说明层理结构是影响千枚岩各向异性的主要因素。

(3) 与峰值强度随方位角变化相反, 各向异性显著千枚岩在方位角为 0° 的 50% 弹模  $E_{50}$  大于方位角为 90° 时, 但各向异性不太突出的岩石如碳质千枚岩, 两方向所获弹模数值相差较小。大多数千枚岩试样变形曲线的线性度都很差, 因此, 试样  $E_{50}$  与  $E_A$  相差多在 10% 以上, 数值上孰大孰小, 未见明显的规律。

(4) 千枚岩垂直层理加载时三轴抗压峰值强度、真强度和残余强度比平行层理加载明显偏高, 并随围压水平增加而增大。两种加载状态下  $\sigma_{cd}/\sigma_f$  值对围压水平的敏感程度由大到小对比关系分别为, 垂直层理加载 HP : MP : CP : QP = 1.67 : 1.36 : 1.23 : 1, 平行层理加载 HP : MP : CP : QP = 4.44 : 2.38 : 2.14 : 1; 同理, 千枚岩  $\sigma_r/\sigma_f$  值对围压水平的敏感程度由大到小对比关系分别为: 垂直层理加载 HP : MP : CP : QP = 0.5 : 2.05 : 0.45 : 1; 平行层理加载 HP : MP : CP : QP = 7.23 : 1.1 : 0.72 : 1。

(5) 千枚岩不同加载方位角下单轴压缩试验破坏模式归纳为 4 种: 层理面滑移剪切破坏、压拉剪切破坏、张拉破坏、复合破坏, 破坏模式与层理结构发育程度、矿物成分及其胶结方式等有关。

### 参 考 文 献:

- [1] 王思敬. 论岩石的地质本质及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433 - 450. (WANG Si-jing. Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 433 - 450. (in Chinese))
- [2] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (XU Zhi-ying. Rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002. (in Chinese))
- [3] TALIERCIO A, LANDRIAN G S. A failure condition for layered rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, 1988, 25(5): 299 - 305.
- [4] 王林, 龙冈文夫. 关于沉积软岩固有各向异性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 894 - 898. (WANG Lin, TATSUOKA F. Exammining anisotropy of sedimentary soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 894 - 898. (in Chinese))
- [5] RAMAMURTHY T. 千枚岩的工程性能[J]. 国外科技, 1994, 25(12): 48 - 52. (RAMAMURTHY T. The engineering property of phyllite[J]. Overseas Technology, 1994, 25(12): 48 - 52. (in Chinese))
- [6] 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. (GAO Chun-yu, XU Jin, LI Zhong-hong, et al. Experimental study of anisotropically mechanical characteristics of sandy slate in Xuefeng mountain tunnal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1360 - 1364. (in Chinese))

[7] 刘胜利, 陈善雄, 余 飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(12): 3616 - 3623. (LIU Sheng-li, CHENG Shan-xiong, YU Guang, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(12): 3616 - 3623. (in Chinese))

[8] 郭富利, 张顶立, 苏 洁, 等. 地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(11): 2324 - 2332. (GUO Fu-li, ZHANG Ding-li, SU Jie, et al. Experimental study on influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(11): 2324 - 2332. (in Chinese))

[9] 田象燕, 高尔根, 白石羽. 饱和岩石的应变率效应和各向异性的机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(11): 1789 - 1792. (TIAN Xiang-yan, GAO Er-gen, BAI Shi-yu. Discussout about mechanism of strain-rate effect and anisotropy of saturated rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1789 - 1792. (in Chinese))

[10] 吴永胜, 谭忠盛, 李少孟. 挤压性大变形隧道围岩基本特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(增刊 1): 398 - 443. (WU Yong-sheng, TAN Zhong-sheng, LI Shao-meng. Experimental study on the basic characteristics of tunnel in squeezing surrounding rock with large deformation[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(S1): 398 - 443. (in Chinese))

[11] ALKAN H, CINAR Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, **44**: 108 - 119.

[12] MARTIN C D, READ R S. Strength of massive granite around underground excavations[C]// Proceedings of the 16th Canadian Rock Mechanics Symposium. Sudbury, 1992: 1 - 11.

[13] SZCZEPANIK Z, MILNE D, KOSTAKIS K, et al. Long term laboratory strength tests in hard rock[C]// ISRM2003–Technology Roadmap for Rock Mechanics. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003: 1179 - 1184.

[14] 张 玉, 徐卫亚, 赵海斌, 等. 碎屑砂岩三轴压缩下强度和变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **35**(3): 666 - 674. (ZHANG Yu, XU Wei-ya, ZHAO Hai-bin, et al. Experimental investigation on strength and deformation properties of classic sandstone under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **35**(3): 666 - 674. (in Chinese))

[15] 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 - 2197. (YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru. Experimental investigation on dilatancy behavior of marble with pre-existing fissures under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2188 - 2197. (in Chinese))