

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2489

不同加载方位角下单轴压缩千枚岩扩容特性

吴永胜¹, 谭忠盛¹, 余贤斌², 喻 渝³, 朱 勇³

(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 4 种典型千枚岩开展不同加载方位角的单轴压缩扩容特性试验研究, 研究表明: 千枚岩一般在峰前产生扩容现象, 加载方位角和各向异性程度影响其扩容行为。扩容前后纵、横向应变速率明显不同, 扩容前轴向应变率大于横向, 扩容后则反之; 千枚岩体积应变正负转换点相对峰值点有 3 种出现情况: 峰前、峰后和不出现, 不同出现概率与加载过程中原生裂纹的参与程度、形式以及对破坏模式的影响有关。千枚岩扩容率最大值出现在轴向应变最大瞬间, 高方位角对扩容更敏感; 千枚岩扩容起始应力普遍较低, 不同方位角和岩性差别较大; 弹性模量、泊松比显著地反映了千枚岩加载中的变形破坏过程, 扩容对其产生重要影响。

关 键 词: 千枚岩; 扩容; 单轴压缩试验; 弹性模量; 泊松比

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)08-2747-08

Dilatancy behavior of phyllite in uniaxial compressive tests under different loading azimuths

WU Yong-sheng¹, TAN Zhong-sheng¹, YU Xian-bin², YU Yu³, ZHU Yong³

(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, Yunnan 650093, China;

3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Uniaxial compressive tests were carried out to investigate the dilatation behaviour of phyllite samples under different loading azimuths. There were four types of samples taken from the Chengdu-Lanzhou railway. The results showed that the samples generally expanded before the peak stress reached, and the dilatation behaviour was influenced by the loading azimuth and degree of anisotropy. The vertical strain rate was greater than the horizontal one before the dilatation occurred, and vice versa after expansion. When the volumetric strain of phyllite samples converted from a positive value to a negative one, three conditions existed: pre-peak stress, post-peak stress and not-converted. Besides, the probability of the conversion was related to the participation degree, the form, and the failure mode of the original cracks during the loading process. The maximum dilatation rate appeared at the moment when the axial strain reached its maximum value, and the high azimuth angle was more sensitive to the dilatation capacity. The initiation stress of the dilatation was usually low, and the difference between the loading azimuth and lithology was large. The deformation and failure process of phyllite under loading was significantly reflected by the elastic modulus and Poisson ratio which were greatly affected by the dilatancy.

Keywords: phyllite; dilatancy; uniaxial compressive test; elastic modulus; Poisson ratio

1 引 言

岩石在受压变形、起裂直至破坏过程中, 扩容是一个重要现象。Cook^[1]已经用试验表明了扩容是岩石的一种普遍的体积内性质, 而非表面变形现象, 宏观扩容本质是岩石内新微裂隙的产生与扩展, 以

及结晶颗粒界面的滑动等塑性变形共同引起的, 反映了岩石介质不可逆变形与金属材料的本质差别。近年来, 随着矿产资源开发、交通和城市轨道等地下工程向纵深发展, 穿越复杂岩层、巷道和边坡稳定等是非常突出的工程问题, 岩石扩容是引起巷道底鼓的重要因素。在实践中, 扩容也是地震、大变

收稿日期: 2016-10-24

基金项目: 铁道部自然科学基金项目资助 (No. 2010G018-G-1)。

This work was supported by the Natural Science of the Ministry of China Railway (2010G018-G-1).

第一作者简介: 吴永胜, 男, 1974 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土力学与地下空间开发利用方面的研究工作。E-mail: wyskmust@126.com

形和岩爆等地质现象的先兆信息^[2]。开展岩石扩容特性研究,对于理解地质构造、地震成因等地壳运动过程,保障地下或边坡岩石工程的稳定性具有重要意义。

陈宗基^[3-4]、金济山^[5]等采用自行研制的8000 kN多功能三轴仪,研究了房山花岗岩、济南辉长岩等脆性岩石扩容对外部环境和时间的规律,提出了考虑扩容特性的岩石黏弹性本构方程,并成功预测了地震发生和地壳隆起现象中与时间相关的扩容特性;Alejano^[6]、Yuan^[7]等通过理论推导,分别建立了考虑岩石(体)扩容角的本构模型和扩容指数与围压之间的经验理论模型,并将提出的模型成功应用于岩体工程实践中。杨圣奇等^[8]对断续预制大理岩进行不同围压三轴试验,研究了围压以及裂隙分布对大理岩扩容特性的影响规律,揭示扩容与裂纹演化的内在联系;王宇^[9]、侯文诗^[2]等着眼于峰值强度与扩容起始应力之间的关系,研究了岩石单轴或三轴压缩的扩容特性,建立扩容应力预测模型,为预测岩石扩容应力提供新思路。赵星光等^[10]通过三轴循环加、卸载声发射监测试验,研究了花岗岩破坏过程中声发射变化规律,揭示其损伤演化机制,岩石扩容特性强烈依赖于围压的变化,并对低围压(0~5 MPa)条件更为敏感。

已有研究成果多集中于宏观均质或硬质岩石的扩容特性研究,考虑不同加载方位角和矿物成分差异的各向异性软岩扩容特性的研究鲜有报道。有鉴于此,本文基于在建成兰铁路龙门山隧道群千枚岩各向异性力学特性试验结果,重点研究各向异性千枚岩不同加载方位角下单轴压缩扩容特性,分析扩容过程中特征应力与变形参数的变化规律,为该类及相关岩石大变形机制研究、工程设计和数值模拟等提供有益的参考。

2 试样情况及试验方案

试验选用的4种千枚岩试样分别取自相邻隧道发生大变形的典型段落,作者已有研究表明^[11-12],千枚岩具有不同的各向异性特征。

试验采用美国MTS815Teststar程控伺服岩石力学试验机。为更客观地反映层理结构千枚岩各向异性变形特性,单轴压缩试验采用50 cm×50 cm×100 cm长方体试样,并根据主控层理面与加载方向相互关系,试样分别加工为层理倾角 α 为0°、30°、45°和90°,加载方位角 $\theta=90^\circ-\alpha$ 。试验时在长方体相邻侧面中央纵横向粘贴应变片测量试样变形,每种岩性千枚岩每个角度有效试验不少于4个试样。

3 千枚岩扩容特性

3.1 体积应变-轴(横)向应变

图1、2分别给出了不同加载方位角下千枚岩单轴压缩体积-轴(横)向应变的关系曲线。已有文献表明^[13],基于应力-应变关系的岩石全过程体

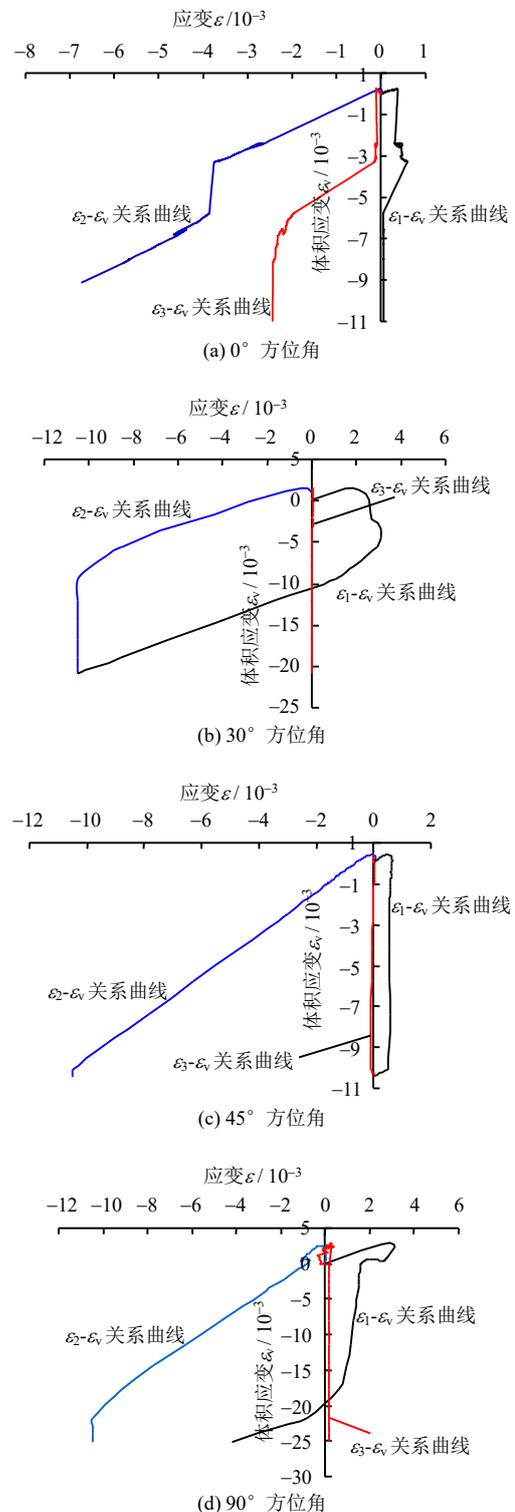


图1 绿泥石千枚岩单轴压缩体积-轴(横)向应变全过程曲线

Fig.1 Complete volumetric- uniaxial compressed curves of Chlorite phyllite sample in uniaxial compression test

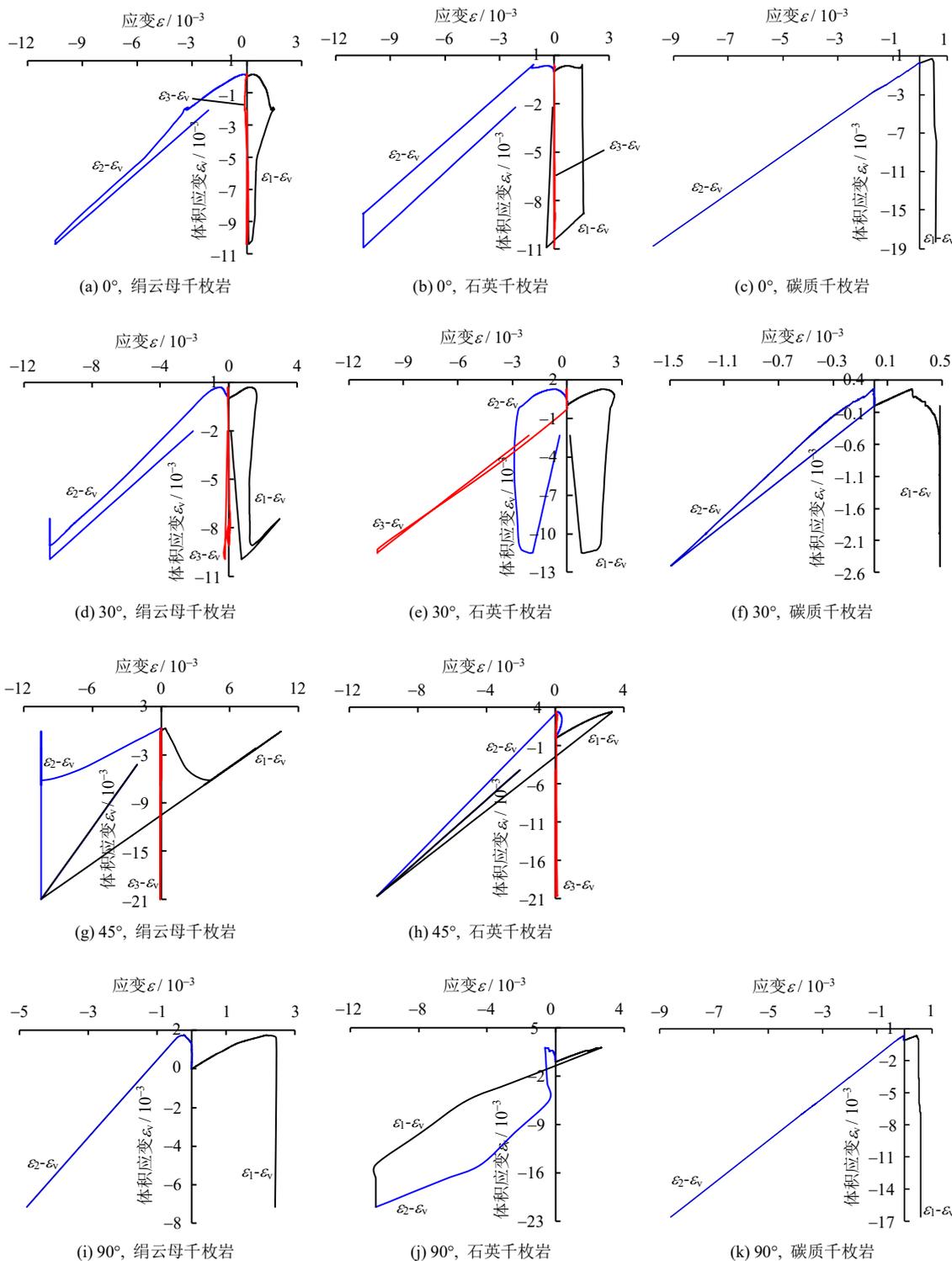


图 2 不同加载方位角下千枚岩单轴压缩体积-轴（横）向应变全过程曲线

Fig.2 Complete volumetric-uniaxial compressed curves of phyllite under different loading azimuths

积应变曲线可划分为如下 5 个阶段，分别对应着加载过程中的 5 个特征应力点。由于篇幅所限，本文以绿泥石千枚岩为例，简要分析千枚岩不同加载方位角下扩容过程中纵横向变形特性，及其与方位角和矿物成分响应规律。为客观反映岩石变形过程中体积变化情况，定义体积应变为轴向应变与相邻侧面两横向应变之和，压缩为正，膨胀为负，即：

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3。$$

裂纹闭合阶段：千枚岩随体积压缩过程，纵、横向变形表现为短暂而细微的压缩状，变形曲线为不明显的上凸。这主要是由于 0° 方位角加载时，纵向排布岩柱加载一开始便承担了轴向偏应力，导致加载过程中沿层理方向展布扁平裂隙发生轴方向挤压，仅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,表现为体积压缩过程中出现轴向压缩应变,同时伴随着一定横向膨胀;随着加载方位角增大,层理间裂隙更大程度地参与压缩,扁平裂隙易被短轴方向压密,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,变形曲线陡直,几乎沿轴向坐标轴发展;方位角为 90° 时,扁水平分布裂隙在垂直向载荷和岩柱的共同作用下被充分压密,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。

弹性变形阶段:原生裂隙被压密后,试样进入暂时理论各向同性状态,应变曲线表现为可恢复的线弹性变形。从裂纹闭合阈值开始弹性变形主宰了应变全过程。在该阶段,虽然仍有内部裂纹闭合或张开,但变形曲线特征几乎没有发生变化。因裂隙参与引起的结构效应使不同方位角加载试样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。横向则因试样中岩石颗粒翻转、位置调整以及新裂纹开始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。

裂纹稳定扩展阶段:随着轴向偏应力增加,岩石内部原生裂隙闭合,因应力集中或试样中的缺陷部位原生裂纹萌生新裂纹并稳定扩展^[4],多数试样出现偏离线弹性的塑性变形。方位角为 0° 时,极低的层间凝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,代表着千枚岩不同加载方位角下变形各向异性特性的典型阶段。 0° 方位角加载时,试样经历了剧烈的拐折损伤后力学性能迅速降低,纵、横和体积变形均产生连续小幅震荡,垂直层理面的横向更

发生剧烈的膨胀变形,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。

根据图1给出的不同方位角下千枚岩体积应变-轴(横)向应变全过程曲线,可以发现对层理发育绿泥石千枚岩而言,方位角严重影响着岩石扩容过程和形式。 0° 方位角试样因发生严重的横向拐伤使扩容现象更加显著,扩容后横向变形较大,轴向变形较小。变形曲线各阶段分界不明显,试样呈脆性破坏;随着加载方位角增大,千枚岩脆性变形逐渐减弱,延性变形逐渐加强,破坏模式逐渐由脆性向延性破坏转变。 30° 、 45° 方位角受结构面和综合受力影响,试样大多发生沿层理面滑移,扩容现象总体偏低。后者较前者扩容后纵、横向应变曲线更加平顺,这可能是两个方位角下千枚岩表现出的裂纹扩展特征差异所致; 90° 方位角试样扩容前轴向压缩过程明显,并伴随有较大的横向变形。扩容发展过程中横向应变速率大于纵向应变速率,扩容体积普遍较大。在相同轴向应变条件下,方位角越大,试样体积扩容越小,且方位角越大的试样扩容前轴向变形越大。

图2为本次研究其他千枚岩不同加载方位角下体积应变-轴(横)向应变单轴压缩全过程试验曲线,试验结果及对比分析表明:①千枚岩一般在峰前产生扩容现象,方位角严重影响其扩容行为,并与千枚岩各向异性程度有关。层理发育绿泥石千枚岩在 0° 方位角加载时,多在峰值强度50%以前发生横向拐伤扩容。随着方位角增加,扩容起始应力逐步提高,横向和体积表现为延性扩容;绢云母千枚岩因含大量绢云母成分,强度极低,不同方位角加载试样均出现延塑性扩容,扩容前后纵、横向应变相差不大,表明以压至拉导致的剪胀是这类软岩的主要扩容形式。并与各向异性硬岩明显不同,加载方位角对其影响程度小得多;石英或碳质千枚岩因含大量石英、碳质成分,并与穿插、充填其间的绢云母胶结或共生,岩石结构性减弱,强度增强。扩容起始应力明显提高,试样多发生外层剥落或崩裂,脆性张拉使体积存在扩容现象,横向变形远大于纵向。②从单位时间应变的快慢(应变速率)来看,扩容前后纵、横向明显不同,并与加载方位角和岩性有关。扩容前轴向应变率大于横向,体积应变以压缩为主,并随加载方位角增大而增大,扩容后则相反。

这说明尽管加载方位角不同，单轴压缩下千枚岩的变形破裂一般遵循：轴向压短、横向缓慢扩张→裂纹萌生与发展→轴向缓慢压缩、横向急剧增大→主破裂面形成→宏观破裂。

3.2 扩容过程中特征应力

图 3 为单轴压缩下的千枚岩体积-轴向应变关系曲线。可以看出，尽管不同方位角下千枚岩应变曲线形状完全不同，但并不影响应变曲线总的发展趋势，千枚岩一般在经历了压密、弹性变形和裂纹稳定扩展后出现扩容现象。扩容率（轴向应变-体积应变曲线的切线斜率）最大值出现在轴向应变最大瞬间，在此前后，扩容率随轴向压力先增大后减小，呈不规则 V 型变化。此外，在本次试验中，千枚岩均表现出不同程度的扩容前体积与轴向压缩，压缩量和加载方位角与岩性有关。综合比较而言，方位角为 90° 压缩量最大，0° 最小。石英千枚岩最大，碳质千枚岩最小。如图 3 所示，方位角的变化严重影响着千枚岩的扩容行为，并呈非线性变化趋势。随着方位角的增大，千枚岩峰值体积应变的变化梯度一般逐步增大。例如：绿泥石千枚岩在方位角从 0° 增加至 30°，峰值点体积应变值减小 59.37%；而方位角从 30° 增加至 45°，峰值点体积应变值减小 50.02%，表明扩容对高方位角更敏感。这与某些地下工程开挖后洞壁变形相吻合，即层理发育岩石的体积变形随层理面方向不同而不同。高地应力条件下陡倾薄层隧道围岩开挖不久，在没有支护的情况下，洞壁附近的岩石由于应力集中形成类似于单轴压缩状态^[13]。开挖导致围岩卸荷，势必引起最大程度的体积膨胀，表现为围岩凌空面向洞内产生更大的收敛或沉降。从圆形或近圆形隧道拱脚至拱顶洞壁，受压方位角不断增大，围岩收敛或沉降变形量也随之增大，试验结果证实了这一现象。

岩石在单轴应力作用下能抵抗的最大轴向应力即为峰值破坏应力。Martin 等^[14]认为扩容起始点的应力为裂纹损伤应力，可称之为真强度，也就是长期抗压强度。岩石由压缩转向膨胀的扩容拐点，即扩容起始点的应力值作为岩石的长期强度^[2]。表 1 给出了不同方位角千枚岩单轴压缩过程中变形特征点应力值。由表可知，本次研究的不同加载方位角下千枚岩扩容起始应力普遍较低，不同千枚岩差别较大。其中，绿泥石千枚岩变化幅度最大，与峰值破坏应力的比值一般在 0.40~0.77 之间，明显低于其他岩石，其比值随方位角变化大小对比关系为：45° > 30° > 90° > 0°；碳质和绢云母千枚岩变化平稳， σ_{cd} / σ_f 分别在中值 0.9 和 0.6 左右波动。其次，

千枚岩不同变形阶段的特征应力随加载方位角呈相似的变化趋势，轴向压力对其产生重要影响。裂纹起始应力 (σ_{cc}) 随方位角变化差别不大，其值在低应力水平随方位角小幅波动。随着变形阶段逐步递进，千枚岩阶段间、不同方位角特征点应力差距

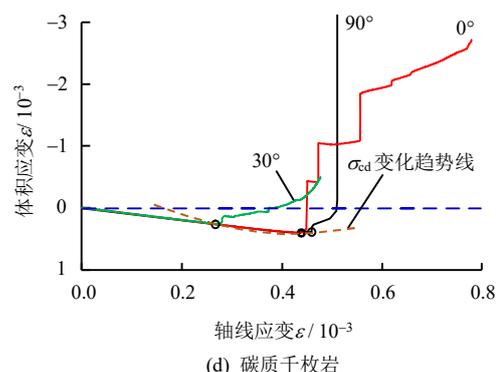
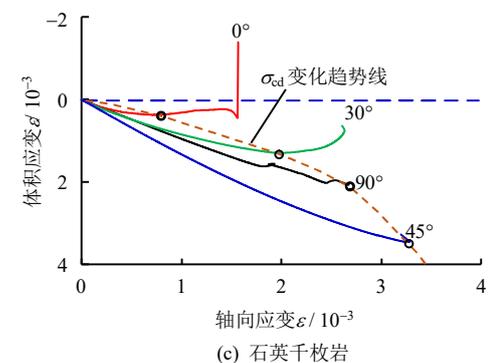
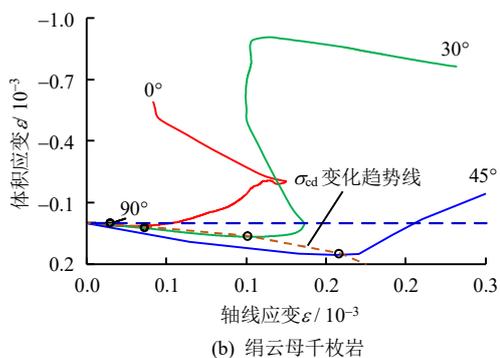
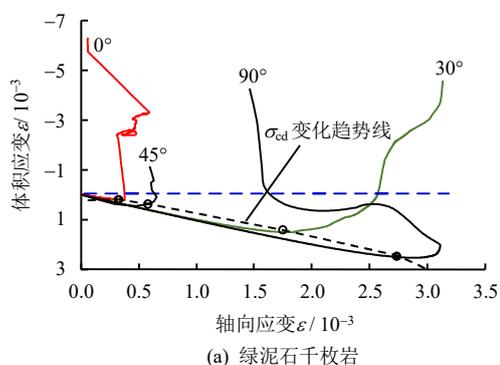


图 3 不同方位角 σ_{cd} 变化趋势线
Fig.3 σ_{cd} curves of phyllite under different azimuths

增大, 并保持相似的变化趋势, 表明方位角影响千枚岩变形损伤过程, 特征变形阶段越高影响越大。从损伤力学角度来看, 0° 方位角加载有利于发挥层间岩柱纵向抗压能力, 但不利于微裂纹的闭合, 千枚岩压密过程不明显。随着轴向偏应力增大, 压密、闭合状态不良, 裂纹周边易形成应力集中, 恶化千枚岩受力环境, 导致试样前期阶段变形较小, 强度较低; 但岩柱逐级依次断裂分散消散岩石内部损伤能量, 延缓岩石屈服时间, 提高了千枚岩峰值强度;

调高加载方位角有利于增加原生裂隙所受正应力, 促进岩石内部微裂纹的压实闭合, 有效抑制了微裂纹的产生与发展, 提高岩石整体刚度, 减少其内部损伤能量的耗散, 使岩石扩容破坏得以延缓, 岩石各阶段应力水平普遍偏高; 30° 加载方位角下由于试样综合受力与层理面或原生裂纹展布方向基本一致, 受力过程中有利于原生裂纹沿层理面扩展、贯通, 降低了千枚岩整体抗载荷能力, 使千枚岩各阶段应力水平总体偏低。

表 1 不同方位角下千枚岩单轴压缩试验得到的应力阈值

Table 1 Stress thresholds of phyllite obtained by uniaxial compressive test under different azimuths

方位角 $/ (^\circ)$	绿泥石千枚岩				绢云母千枚岩				石英千枚岩				碳质千枚岩			
	σ_{cc}	σ_{ci}	σ_{cd}	σ_f												
0	2.35	9.18	12.11	29.97	0.76	1.26	1.58	2.50	4.32	11.47	21.98	24.45	22.94	45.32	52.19	52.19
30	1.72	3.46	4.81	8.32	0.27	0.58	0.86	1.26	1.05	4.64	5.92	15.60	8.12	14.68	26.00	41.17
45	2.24	12.61	19.74	25.55	0.25	0.67	0.79	1.59	2.23	8.77	13.66	14.12				
90	7.36	11.02	17.67	31.82	0.68	1.06	1.44	2.23	7.08	13.82	21.11	25.86	20.99	37.02	49.55	67.35

在理想质固体里面, 初始起裂与裂纹接合贯通将是同时产生的 ($\sigma_{ci} = \sigma_{cd}$)。因为一旦达到裂纹起始应力门槛值, 裂纹将瞬间产生并贯通, 达到裂纹接合贯通的临界水平。而在非均质材料中, 需要超过裂纹起始应力水平 σ_{ci} , 以形成更多的裂隙积聚或裂纹长度延伸, 最终达到不稳定裂纹发展阶段^[15]。因此, σ_{ci} 和 σ_{cd} 关系与岩性有关。千枚岩由于矿物成分差异及其赋存状态不同, $\sigma_{ci} / \sigma_{cd}$ 各不同, 但总体随方位角增大呈降低的趋势。碳质千枚岩由于碳质成分高, 与其他矿物成分胶结程度高, 裂隙不发育, $\sigma_{ci} / \sigma_{cd}$ 值最高; 而绿泥石千枚岩裂隙发育, $\sigma_{ci} / \sigma_{cd}$ 值普遍偏低, 表明加载方位角也影响岩石 $\sigma_{ci} / \sigma_{cd}$ 的关系。

3.3 扩容过程中弹性模量、泊松比

岩石的扩容现象与岩石内部细观结构特征, 如岩石颗粒和裂隙的大小、展布方向和接触情况等有关, 而岩石的物理力学指标如弹性模量 E 、泊松比 μ 等实质上是细观结构特征在宏观上的反映。为研究千枚岩扩容过程中弹性模量、泊松比等参数的变化规律, 定义应力-应变关系曲线中任意时刻轴向应力与其对应轴向应变的比值为那一时刻岩石的割线弹性模量, 即: $E_{割} = \sigma_{割} / \varepsilon_{1-割}$, 简称弹性模量; 同理: 定义应力-应变关系曲线中任意时刻应力对应横向应变与轴向应变的比值为那一时刻岩石的割线泊松比, 即: $\mu_{割} = -\varepsilon_{2-割} / \varepsilon_{1-割}$, 简称泊松比。

弹性模量曲线很好地表现千枚岩扩容过程中的几个典型阶段, 客观上反映岩石内部结构变化的动

态过程。 ε_{cc} 之前的初始压密阶段, 千枚岩弹性模量随体积压缩逐步增大。 0° 方位角试样弹性模量曲线在强烈的震荡中持续上升, 其他方位角试样则经历了短暂下降后缓慢回升, 表明岩石体积减小, 刚度增强, 加载初期弹性模量在低载荷作用下随方位角变化复杂; 在 ε_{cc} 至 ε_{cd} 之间的弹性变形和裂纹稳定扩展阶段, 岩石内部基质颗粒被压密并伴有新裂纹稳定产生, 试样体积继续减小, 千枚岩弹性模量继续增大, 增大速率逐渐提高, 呈递增型增大特征, 弹性模量曲线阶段分界并不明显。 0° 方位角试样在进入扩容状态前弹性模量曲线突然跌落, 反映了岩石内部因岩桥脆性断裂对轴向应变产生显著影响; 经过 ε_{cd} 特征点后, 试样进入扩容后的裂纹损伤和不稳定裂纹扩展阶段, 弹性模量曲线因体积膨胀反向发展, 总体呈递减型增长趋势。 0° 方位角试样在损伤扩容后, 弹性模量迅速减小, 弹性模量曲线向左下侧剧烈发展, 表明岩石内部发生离层损伤, 体积迅速膨胀。之后曲折攀升至试样破坏, 在峰值点弹性模量达到最大值。其他方位角试样扩容后弹性模量曲线比较平滑, 弹性模量曲线上的短暂起伏较灵敏, 反映了岩石内部新裂纹发展的复杂过程。

泊松比曲线除压密阶段略有下降外, 其他阶段均保持增长的发展势头。并以扩容点为界, 扩容前正向增长, 扩容后为反向。增长速率后者大于前者, 表明扩容后岩石损伤对横向变形产生更大影响。比较扩容后不同加载方位角泊松比的增长速率, 由大至小分别为: $0^\circ > 45^\circ > 30^\circ > 90^\circ$, 这与不同方位角

下千枚岩加载过程中不稳定裂隙的发展模式不同有关。千枚岩扩容后泊松比持续增大,且峰值点不是其最大值,前后也无明显变化,这说明泊松比虽然能很好地反映试样纵横向变形的实时情况,但该参数对岩石微弱的裂纹扩展是迟钝的^[15]。

通过比较和分析表明:①弹性模量、泊松比显著地反映了千枚岩加载过程中的变形破坏过程,扩容对其产生重要影响。扩容后弹性模量迅速降低,并随载荷增加呈减小趋势,绿泥石千枚岩和碳质千枚岩在 45° 或 90° 方位角加载时反而增加,这可能与发育裂隙或致密岩柱耗散了更大应变能有关;泊松比则普遍增大,增长模式与不稳定裂纹发展或拐伤对纵横向应变的影响程度有关,强度较低或高方位角加载千枚岩因纵横向应变均受到较大影响,泊松比曲线以非线性形式增长,局部可能存在小幅震荡;强度较高或小方位角加载千枚岩则多表现为突变式或台阶状增长,表明横向因扩容产生连续拐伤,而纵向影响较小。②对千枚岩不同加载方位角特征点泊松比值进行比较,一般为: $\mu_f > \mu_{cd} > \mu_{ci}$,且 $\mu_f - \mu_{cd}$ 远大于 $\mu_{cd} - \mu_{ci}$,进一步说明千枚岩的破碎和松散程度随着轴向压力的增加而增加,扩容更加剧了裂隙不稳定发展。

4 结 论

(1) 千枚岩一般在峰前产生扩容现象,方位角变化影响其扩容行为,并与千枚岩的各向异性程度有关。扩容前后纵、横向应变速率明显不同,扩容前轴向应变率大于横向,体积应变以压缩为主,压缩量随加载方位角的增大而增大,扩容后则相反。

(2) 千枚岩体积应变正负转换点相对峰值点有3种出现情况:峰前、峰后和不出现,不同出现情况概率与加载过程中原生裂纹的参与程度、形式以及对破坏的影响作用有关。转换点无论出现在峰值前、后,都意味着试样横向应变对体积应变的贡献开始大于纵向,这时试样体积的增加以横向扩容为主,不出现则可能由于试样内部缺陷或薄弱面控制破坏过程使轴向压缩过大或主破裂面滑动较小。

(3) 千枚岩扩容率最大值出现在轴向应变最大瞬间,在此前后,扩容率随轴向载荷先增大后减小,呈不规则V型变化。不同方位角千枚岩峰值体积应变的变化梯度一般呈非线性增大趋势,扩容对高方位角更敏感。

(4) 不同加载方位角下千枚岩扩容起始应力普遍较低,千枚岩岩性不同差别较大,其中,绿泥石千枚岩变化幅度最大,与峰值破坏应力的比值一般

在 $0.40 \sim 0.77$ 之间,明显低于其他岩石, σ_{cd} / σ_f 值随方位角变化大小对比关系为: $45^\circ > 30^\circ > 90^\circ > 0^\circ$ 。碳质和绢云母千枚岩变化平稳, σ_{cd} / σ_f 分别在在中值 0.9 和 0.6 左右波动。

(5) 弹性模量、泊松比显著地反映了千枚岩加载过程中的变形破坏过程,扩容对其产生重要影响。扩容后弹性模量迅速降低,并随载荷增加呈减小趋势;泊松比则普遍增大,增长模式与不稳定裂纹发展或拐伤对纵横向应变的影响程度有关。

参 考 文 献

- [1] COOK N G W. An experiment proving that dilatancy is a pervasive volumetric property of brittle rock loaded to failure[J]. *Rock Mechanics*, 1970, 2(4): 181—188.
- [2] 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.
HOU Wen-shi, LI Shou-ding, LI Xiao, et al. Comparison between dilatancy onset and peak of different rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1478—1486.
- [3] 陈宗基, 康文法. 在岩石破坏和地震之前与时间有关的扩容[J]. *岩石力学与工程学报*, 1983, 2(1): 11—21.
TAN Tjiong-kie, KANG Wen-fa. Time dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1983, 2(1): 11—21.
- [4] 陈宗基, 石泽全, 于智海, 等. 用8 000 kN多功能三轴仪测量脆性岩石的扩容、蠕变及松弛[J]. *岩石力学与工程学报*, 1989, 8(2): 97—118.
TAN Tjiong-kie, SHI Ze-quan, YU Zhi-hai, et al. Dilatancy creep and relaxation of brittle rocks measured with the 8 000 kN multipurpose triaxial apparatus[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1989, 8(2): 97—118.
- [5] 金济山. 岩石扩容性质及其本构模型的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1993, 12(2): 162—172.
JIN Ji-shan. Study of the dilatancy behavior of rocks and its constitutive model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1993, 12(2): 162—172.
- [6] ALEJANO L R, ALONSO E. Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(4): 481—507.
- [7] YUAN Shih-che, HARRISON J P. A empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining*

- Sciences**, 2004, 41: 679—686.
- [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): 2988—2997.
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): 2988—2997.
- [9] 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.
WANG Yu, LI Xiao, BEN Yu-xing, et al. Prediction of ignition stress of dilation of brittle rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(4): 737—746.
- [10] 赵星光, 李鹏飞, 马利科, 等. 循环加、卸载条件下北山深部花岗岩损伤与扩容特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1740—1748.
ZHAO Xing-guang, LI Peng-fei, MA Li-ke, et al. Damage and dilation characteristics of deep granite at amage and dilation Beishan under cyclic loading-unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1740—1748.
- [11] 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—402.
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(Supp.1): 398—402.
- [12] 吴永胜, 谭忠盛, 喻渝, 等. 川西北茂县群千枚岩各向异性力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 207—216.
WU Yong-sheng, TAN Zhong-sheng, YU Yu, et al. Anisotropically mechanical characteristics of Maoxian group phyllite in northwest of Sichuan province[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 207—216.
- [13] 张晓平, 王思敬, 韩庚友, 等. 岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究——以片状岩石为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1772—1781.
ZHANG Xiao-ping, WANG Si-jing, HAN Geng-you, et al. Crack propagation study of rock based on uniaxial compressive test—A case study of schistose rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(9): 1772—1781.
- [14] MARTIN C D, READ R S. Strength of massive granite around underground excavations[C]//Proceedings of the 16th Canadian Rock Mechanics Symposium. Sudbury: [s. n.], 1992: 1—11.
- [15] 刘维国, 单钰铭, 孟祥豪, 等. 石灰岩扩容过程中的物理参数实验研究[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(10): 281—287.
LIU Wei-guo, SHAN Yu-ming, MENG Xiang-hao, et al. The researh on rock physies paraeters in the process of calcareous roek dilatancy by triaxial compression[J]. **Research and Exploration in Laboratory**, 2007, 26(10): 281—287.

上接第 2746 页

- [10] 叶飞, 陈治, 贾涛, 等. 盾构隧道管片注浆幂律流型浆液渗透扩散模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 890—897.
YE Fei, CHEN Zhi, JIA Tao, et al. Penetration diffusion model of exponential fluid for backfill grouting through segments of shield tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(5): 890—897.
- [11] 朱大同. 关于 Dupuit 公式和 Forchheimer 公式的讨论[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 502—504.
ZHU Da-tong. Discussion on Dupuit formula and Forchheimer formula[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2012, 43(4): 502—504.
- [12] HERZIG J P, LECLERC D M, GOFF P LE. Flow of suspensions through porous media-application to deep filtration[J]. **Industrial & Engineering Chemistry**, 1970, 62(5): 8—35.
- [13] 张伟, 陈文义. 流体力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2009.
ZHANG Wei, CHEN Wen-yi. Fluid mechanics[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2009.
- [14] 曾祥熹. 泥浆流变学与黏度测量[M]. 长沙: 湖南地质学会, 1981.
ZENG Xiang-xi. Mud rheology and viscosity measurement[M]. Changsha: Geological Society of Hunan, 1981.
- [15] 杨坪. 砂卵(砾)石层模拟注浆试验及渗透注浆机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
YANG Ping. Study on simulation grouting experiment in gravel & mechanism of permeating grouting[D]. Changsha: Central South University, 2005.