DOI：10. 16285/j.rsm.2017.06.007

卸荷条件下横观各向同性岩体扩容与能量特性分析

杨以荣[1, 2]，谢红强[1, 2]，肖明砾[1, 2]，刘建锋[1, 2]，何江达[1, 2]

（1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，四川 成都 610065；2. 四川大学 水利水电学院，四川 成都 610065）

摘 要：丹巴水电站引水隧洞围岩主要为石英云母片岩，位于高应力区，层状特征显著，属于典型的横观各向同性岩体，其扩容和能量特性问题突出。针对平行片理和垂直片理方向的试件，基于 MTS815 岩石力学试验平台，研究三轴卸荷条件下石英云母片岩的扩容特性及能量变化规律。研究表明：（1）平行组与垂直组试件的特征应力均随围压的增大而增大，两者间具有良好的线性关系；（2）平行组试件裂纹闭合应力、损伤扩容应力及峰值应力均大于垂直组，起裂应力低于垂直组；（3）平行组试件扩容参数（扩容指标及剪胀角）大于垂直组，且随着围压的增大，两组试件扩容特征相继减弱，试件扩容指标与围压呈良好的指数型分布，特征剪胀角与偏应力比呈良好的线性分布；（4）平行组与垂直组试件峰值点和残余点处能量值均随围压增加而增大，且与围压呈良好指数型分布，相同围压下，平行组试件峰值点处能量特征值及残余可释放应变能均大于垂直组，残余耗散能低于垂直组；（5）无论是峰值点还是残余点处，两组试件耗散能量值与剪胀角以及能量特征值与扩容指标间均呈现良好指数型关系。

关 键 词：石英云母片岩；横观各向同性；三轴卸荷；扩容；能量特征；相关性分析

中图分类号：TU 458 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 06－1589－11

Dilatancy and energy characteristics analysis of transverse-isotropic rock mass under triaxial unloading condition

YANG Yi-rong[1, 2], XIE Hong-qiang[1, 2], XIAO Ming-li[1, 2], LIU Jian-feng[1, 2], HE Jiang-da[1, 2]

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;
2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The surrounding rock of diversion tunnel in Danba Hydropower Station is mainly composed of quartz mica schist at the high-stress zone, which is typical transversely isotropic rock mass and has distinct layered characteristics with apparent dilatancy and high energy. Based on the MTS815 system, triaxial unloading tests were conducted to investigate the characteristics of dilatancy and energy change, and the loading direction was parallel and perpendicular to the schistosity of rock samples, respectively. The results demonstrate that the characteristic stress of both groups increased with confining pressure, which exhibited a good linear relationship with confining pressure. The crack closing stress, damage and expansion stress and peak stress of the parallel group were superior to those of the vertical group, whereas the crack stress was inferior to that of the vertical group. The dilatancy parameters of the parallel group were higher than vertical group. However, expansion characteristics of these two groups were weakened with the increase of confining pressure. Moreover, the index of expansion showed great agreement with confining pressure by an exponential distribution, and dilatancy angles had a linear relationship with the partial stress ratio. At the peak point and the residual point, the energy values of these two groups enhanced with confining pressure, and the energy values revealed good exponential distribution with confining pressure. Furthermore, under the same confining pressure, the energy characteristic value at the peak point and the residual released energy of the parallel group were greater than those of the vertical group. However, the residual dissipated energy of the parallel group was lower than that of the vertical group. For both groups, the relationship between the dissipated energy value and the dilatancy angle, together with the energy characteristic value and the dilatancy index, demonstrated good exponential distribution, which

收稿日期：2016-07-09
基金项目：国家重点基础研究发展计划（973 计划）（No.2015CB057903）；国家自然科学基金资助项目（No.51079092）。
This work was supported by the National Key Basic Research and Development Program of China (973 Program) (2015CB057903) and National Natural Science Foundation of China (51079092).
第一作者简介：杨以荣，男，1993 年生，硕士研究生，主要从事岩体力学参数及岩土工程数值模拟研究。E-mail: yangyirong99@163.com
通讯作者：肖明砾，男，1981 年生，博士，讲师，主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: xiaomingl@scu.edu.cn

fit at the peak point as well as the residual point.

Keywords: mica-quartz schist; characteristics of transversely isotropic; triaxial unloading; dilatancy; energy property; correlation analysis

1 引 言

岩体扩容是岩石破坏过程中所表现出的体积变化特征，是岩体在受载环境下内部裂纹压密、萌生张裂以及剪切滑移等多重组合而引发的体积非线性增加现象，是岩体力学性质一个重要方面，对岩土工程的设计、施工及运营都有着十分重要的意义。目前，国内外许多学者就此开展了相关研究[1−6]，Yuan 等[1]采用双直线来概化了岩石轴向与体积应变的关系，并提出了扩容指数的概念来表征岩体的扩容特征；汪斌等[2]通过双参数非线性函数拟合的方法，提出了一种同时考虑围压作用和塑性变量的非线性剪胀角模型，认为岩石的扩容特性与围压和塑性参量息息相关，并随着塑性参量的提高表现出先增加后减小的非线性演化规律；Mahmutoglu 等[3]研究了低围压下断裂的大理岩峰后强度与非弹性体积应变的相关性，认为峰后的扩容曲线（应力−体积）可以用直线来代替，并且曲线的斜率随围压的增大而减小。

尽管岩石变形和破坏在宏观上表现为体积地扩容膨胀以及材料破裂，但其实质是能量驱动下的失稳破坏[7]，整个受载过程伴随着能量吸收、汇聚、释放和耗散[8]，以及能量间的相互交换[9−10]。国内外许多学者也对此做了深入的研究，周辉等[11]通过对岩石材料屈服时相关能量的分析，并结合不同性质的岩石试验结果，构建了岩石的统一能量屈服准则。苏承东等[12]、Tsouthrelis 等[13]通过室内单轴、三轴压缩试验，研究了岩石破坏屈服前能量耗散与塑性变形之间的相关性。杨凡杰等[14]通过对裂纹动态扩展的研究，提出新的能量指标来判别岩爆。

岩石的破坏过程总是伴随着体积扩容和复杂的能量转换，上述研究涉及到岩石的损伤扩容、能量特性及岩爆预判等诸多研究领域且成果颇丰，但这些研究大多集中于均质岩体且多为硬岩，对于以高应力卸荷条件下石英云母片岩为代表的横观各向同性岩体的扩容特性、能量特征变化及二者的相互关系研究鲜见报道。

丹巴水电站引水隧洞围岩主要为石英云母片岩，片理结构发育明显，属于典型的横观各向同性岩体，其片理主要由白云母和黑云母片状矿物平行排列构成，具有强度低、吸水性强，易崩解以及膨胀性显著等特点，揭示围岩扩容和能量特征是工程研究的基本内容之一。基于此，分别对丹巴水电站云母片岩的平行和垂直片理组试件开展三轴卸荷试验，并结合塑性力学和热力学理论，研究云母片岩在卸载条件下的扩容特性、能量耗散特征及其相互关系，揭示了扩容特征指数与塑性参变量的关系、能量耗散特征与围压的关系，为类似工程研究提供参考。

2 试验方案

2.1 试验设备与制样

试验采用四川大学 MTS815 岩石力学试验系统（见图 1）。试验机可进行三轴压缩、卸荷全过程测试，最大围压可达到 140 MPa，轴向、横向变形采用引伸计测量，其量程分别为−2.5～5.0 mm、−2.5～8.0 mm。



图 1 岩石力学试验系统

Fig.1 MTS815 Rock mechanics testing system

石英云母片岩试件取自丹巴水电站试验洞，外观为灰～灰黑色，有闪光的矿物质，呈薄层状，试件钻取方向按平行于片理与垂直于片理方向分别采集，试件均按照 50 mm×100 mm（直径×高度）圆柱体进行制备，见图 2，试件的片理构造非常明显。为保证测试状态的一致性，测试试件均为风干状态，其岩性为石英云母片岩。



(a) 平行于片理方向 (b) 垂直于片理方向

图 2 石英云母片岩典型试样

Fig.2 Typical samples of mica-quartz schist

2.2　试验方法

本次试验方案是模拟工程开挖引起岩体应力变化的过程，即大主应力σ_1增高，小主应力σ_3降低的力学过程，其初始围压设定为 30、40、50、60 MPa。具体试验过程分为 4 个阶段[15]：① 与常规三轴试验相同，首先对试样施加静水压力，使得$\sigma_1=\sigma_3$至目标值；② 稳定σ_3，逐步增高σ_1至试件破坏前的某一应力状态，其σ_1的应力水平大致在比例极限附近；③σ_1以 10 MPa/min 的速率缓慢升高，同时σ_3以 3 MPa/min 的速率缓慢降低，这个过程非常关键，除了要揭示岩石的卸载特性，还要求顺利越过峰值进入软化阶段；④ 这个阶段是试件破坏后效应的测试，试件一旦破坏后即停止卸围压σ_3，并使之保持恒定，同时继续以变形控制加载，直到应力差$\sigma_1-\sigma_3$不随应变的增加而降低时结束试验。

3　云母片岩卸荷扩容特征分析

3.1　应力-应变关系的特征点描述

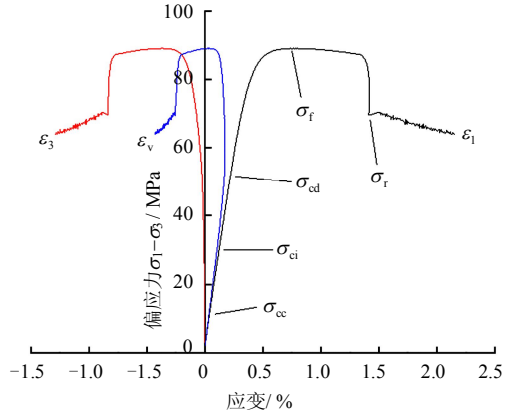
图 3(a)给出了卸荷条件下云母片岩的典型应力-应变关系曲线，其中ε_1、ε_3及ε_v分别为轴向、径向和体积应变。结合曲线特点，给出了裂纹演化特征曲线（见图 3(b)）。

与三轴压缩曲线相同，卸荷条件下云母片岩的全程应力-应变曲线可以划分为如下 5 个阶段，对应 5 个应力特征点[16]：裂纹闭合（裂纹闭合应力σ_{cc}）、线弹性变形（起裂应力σ_{ci}）、裂纹起裂和稳定发展（损伤扩容应力σ_{cd}）、裂纹加速损伤和不稳定扩展（峰值应力σ_f）、峰后破坏阶段（残余应力σ_r）。损伤扩容应力σ_{cd}作为耗散能急剧增加的转折点，宏观上表现为体积应变由压缩为主转变为膨胀，之后试件损伤逐步累积扩展，形成不可逆的损伤；裂纹闭合应力、起裂应力作为线弹性阶段的控制点，可以由裂隙体积的演化曲线来确定，如图 3(b)。假设岩体的体积由内部裂隙（孔洞）和基体材料组成，岩体的塑性变形来自于内部裂纹压密、萌生张裂以及基体间的剪切滑移等多重组合，基体材料仅发生弹性变形，邱士利等[17]建议，利用卸荷过程中弹性变形阶段的弹性模量E和泊松比ν来计算，假定卸荷过程中弹性参数为常数，由弹性理论计算弹性轴向应变ε_1^e和弹性体积应变ε_v^e。相应地用实测的总应变减去弹性应变即可得到塑性轴向应变ε_1^v和塑性体积应变ε_v^v，如下式

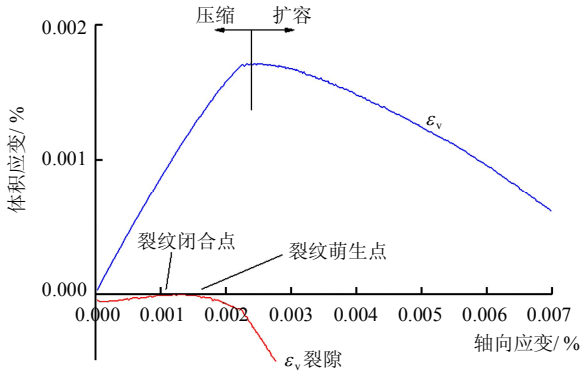
$$\varepsilon_1^e=\frac{\sigma_1-2\nu\sigma_3}{E} \tag{1}$$

$$\varepsilon_v^e=\frac{(1-2\nu)\sigma_1-2(1-\nu)\sigma_3}{E} \tag{2}$$

$$\varepsilon_1^p=\varepsilon_1-\varepsilon_1^e、\quad \varepsilon_v^p=\varepsilon_v-\varepsilon_v^e \tag{3}$$



(a) 偏应力-应变全程曲线



(b) 裂纹演化特征曲线

图 3　卸荷条件下云母片岩应力特征点表征图

Fig.3　Characterization of characteristic stress under unloading

不同围压条件下卸荷应力-应变曲线见图 4（应变以压缩为正，膨胀为负），其扩容特征曲线见图 5。

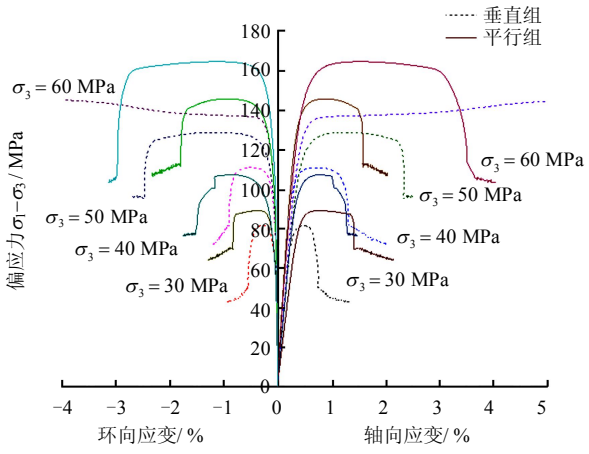


图 4　卸荷条件下偏应力-应变关系

Fig.4　Deviatoric stress-strain curves under unloading

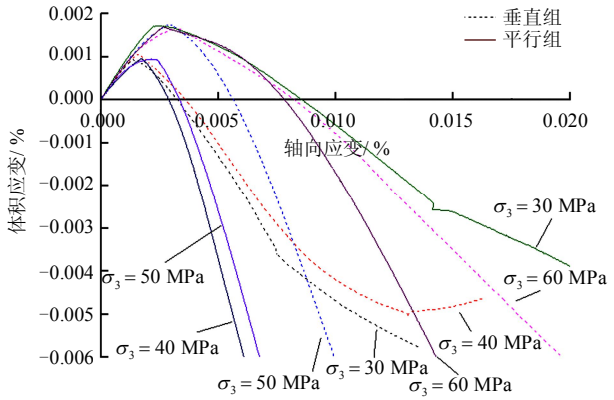


图 5 卸荷条件下轴向应变-体积应变关系

Fig.5 Axial strain-volumetric strain curves under unloading

由图可知，各阶段应力特征点随围压的增大而增大，云母片岩试件脆性特征逐步减弱，延性特征显著增强，破坏前均出现一定的塑性流动，且平行组试件延性明显大于垂直组，这是当片理面与轴向荷载的方向平行时，片理构造对岩样结构完整性的弱化效应；另外，卸荷条件下云母片岩试样表现出较为明显的扩容现象；同时，随着围压增大，损伤扩容点延迟出现，即对应轴向变形愈大，转折点处的体积应变随围压增大而增大，在轴向应变相同的情况下，试件的扩容应变越小，说明围压的存在能有效地抑制扩容的发展。

同围压水平下，平行组试件与垂直组相比，体积应变由压缩转变为膨胀的转折点（损伤扩容点）大致相当，但越过该点后，在轴向应变相同的情况下，平行组的扩容应变较垂直组大，说明围压对垂直组岩样的抑制作用更为显著。

3.2 特征点应力与围压的关系

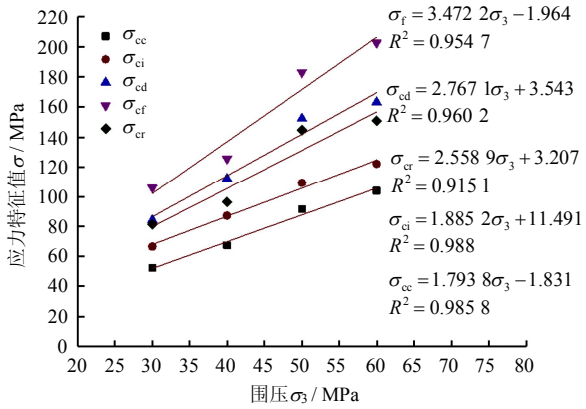
不同围压下平行组和垂直组特征点应力如表 1 所示，特征点应力与围压的相关性见图 6。

表 1 平行组、垂直组特征点应力值

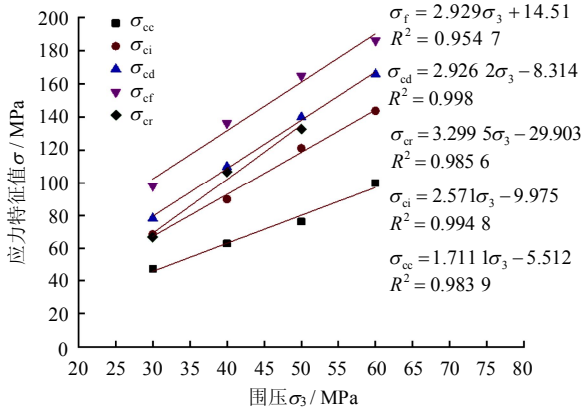
Table 1 Characteristic stress values of the parallel group

试样	围压/MPa	特征应力/ MPa				
		σ_{cc}	σ_{ci}	σ_{cd}	σ_f	σ_r
平行组	30	52.32	66.54	84.32	106.01	81.56
	40	67.52	87.38	112.34	125.55	96.43
	50	91.65	109.31	152.38	182.97	144.66
	60	104.07	122.07	163.21	202.61	150.78
垂直组	30	47.22	68.36	78.12	98.09	66.78
	40	62.77	89.82	109.87	136.19	106.68
	50	76.17	121.05	139.78	164.19	132.77
	60	99.79	143.65	165.69	186.19	

注：垂直组围压 60 MPa 下的残余强度，由于岩样延性较强，后段试验数据系统采集缺失，故在表中并未统计出。



(a) 平行组



(b) 垂直组

图 6 特征应力与围压的关系

Fig.6 Relationship between characteristic stress and confining pressures

从图、表中可以看出，随着围压的增加，平行组和垂直组各特征点应力也呈现增加的趋势，二者之间具有较好的正线性关系（拟合系数均达到 0.91 以上）；从拟合曲线斜率上看，两组试件损伤扩容应力、峰值应力及残余应力对围压效应的敏感性较高，即高围压作用下，达到损伤扩容（膨胀）破坏和峰值破坏的应力也较高。其主要的原因是随着围压的增大，试件内部裂纹压密闭合程度加大，使得裂隙接触面之间的抗剪能力更高，有效抑制了内部裂纹的发展、扩容破坏和试件承载能力，从而得到延迟及提高；即随着围压的增高，试件的凝聚力将有所提高，此与文献[20]的研究结论是相吻合的。

从表 1、2 中的裂纹闭合应力 σ_{cc} 和起裂应力 σ_{ci} 值可知，平行组的裂纹闭合应力较垂直组高，但起裂应力较垂直组低，当施加的大主应力 σ_1 垂直于片理面，小主应力 σ_3 平行于片理面时，岩体内部微裂纹所受的正应力较大，更有助于微裂纹的闭合；相反地，当大主应力 σ_1 平行于片理面时，微裂纹接触面所受的正应力减小，抗剪能力降低，但所受的剪应力相对增大。

另外，平行组试件损伤扩容应力和峰值应力均高于垂直组，这是由于三轴条件下，围压限制了试样的径向位移。对于平行片理组试件片理间不会轻易断裂开，而是沿着片理间的软质颗粒滑移产生较长塑性屈服区，致使相对扩容区（$\sigma_{ci}\sim\sigma_{cd}$）及绝对扩容区（$\sigma_{cd}\sim\sigma_{f}$）加长；相反地，垂直组加载时层理受压闭合，层理骨架结构受力，脆性较强，塑性屈服区较短；故同理，平行组试件残余应力大于垂直组。

3.3　扩容参数与围压的关系

为了表征围压对岩石峰后剪胀效应的影响，文献[1]提出了扩容指标为

$$I_{\mathrm{d}}=\frac{\theta_{\mathrm{p}}}{\theta_0}=\frac{\arctan(\Delta\varepsilon_{\mathrm{vp}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{1p}})_{\mathrm{p}}}{\arctan(\Delta\varepsilon_{\mathrm{vp}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{1p}})_0} \tag{4}$$

式中：θ 为表观膨胀角，o、p 分别表示单轴及围压卸荷情况；$\Delta\varepsilon_{\mathrm{vp}}$ 和 $\Delta\varepsilon_{\mathrm{1p}}$ 分别为体积和轴向塑性应变增量，对于三轴卸荷试验 $\Delta\varepsilon_{\mathrm{vp}}=\Delta\varepsilon_{\mathrm{1p}}+2\Delta\varepsilon_{\mathrm{3p}}$，塑性应变等于总应变减去弹性应变，其中弹性应变 ε_{e} 可表示为 $\varepsilon_{\mathrm{e}}=\sigma/E$，$E$ 为卸载弹性模量，参考文献[18−19]可近似取全应力−应变关系曲线中弹性变形区模量。对于单轴条件下 $I_{\mathrm{d}}=1$，当高围压时，没有扩容时 $I_{\mathrm{d}}=0$。三轴卸荷条件下，石英云母片岩扩容指标 I_{d} 见表 2，扩容指标与围压的关系见图 7。

表 2　扩容指标统计

Table 2　Statistics of dilatancy indices

平行组			垂直组		
围压 / MPa	表观膨胀角 θ / (°)	扩容指标 I_{d}	围压 / MPa	表观膨胀角 θ / (°)	扩容指标 I_{d}
0	73.36	1.00	0	80.58	1.00
30	21.88	0.30	30	42.04	0.52
40	60.34	0.82	40	37.43	0.46
50	53.84	0.73	50	34.45	0.43
60	47.08	0.64	60	25.67	0.32

注：由于在围压 30 MPa 处，岩样脆性特征较为明显，其平行组的表观剪胀角计算可能不准确，具有离散性，故舍去。

从图 7、表 2 可以看出：平行组与垂直组扩容指标 I_{d} 与围压 σ_3 有良好的指数关系，这与文献[21]大理岩特性相类似；随着围压的增大，扩容指标逐步减小，试件的体积扩容特征逐渐减弱；在同一围压水平下，平行组扩容指标均大于垂直组（除 $\sigma_3=30$ MPa），表现出更强烈的扩容特征。

为了进一步探讨石英云母片岩的扩容特性，本文参考文献[2, 17]以最常用的塑性剪应变 γ^{p} 为塑性参数，即 $\gamma^{\mathrm{p}}=\varepsilon_1^{\mathrm{p}}-\varepsilon_3^{\mathrm{p}}$，以剪胀角为扩容参数对其进行量化，参照文献[21]推导出的剪胀角计算公式为

$$\psi=\arcsin\left(\frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{vp}}}{\Delta\varepsilon_{\mathrm{vp}}-2\Delta\varepsilon_{\mathrm{1p}}}\right) \tag{5}$$

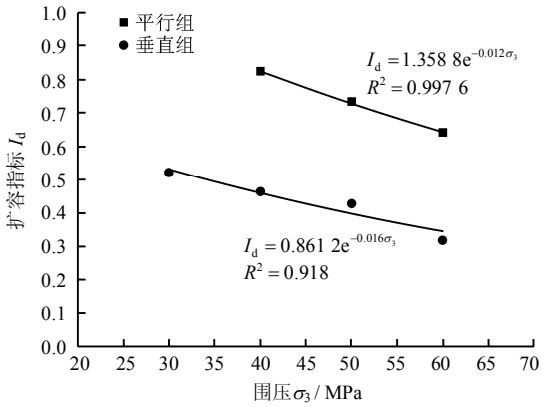


图 7　扩容指标与围压的关系

Fig.7　Relationship between dilatancy index and confining pressures

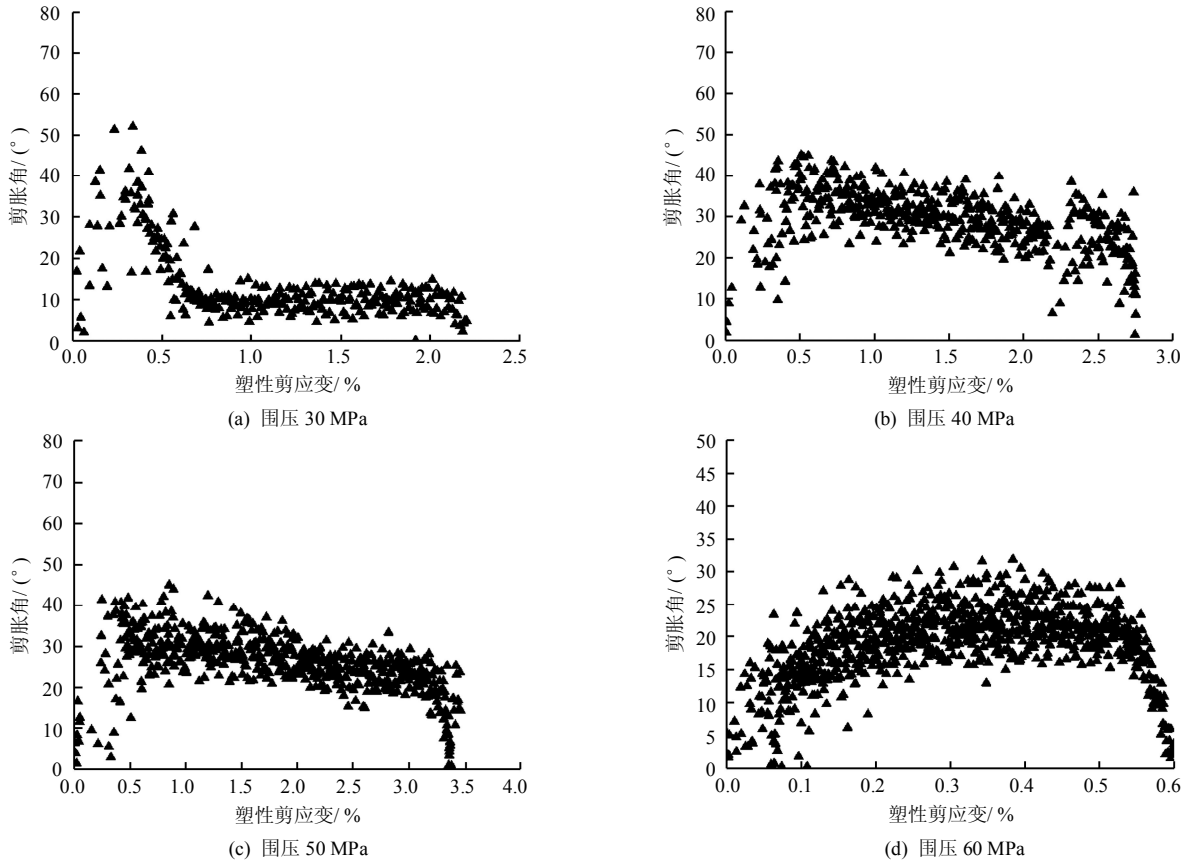
图 8、9 给出了平行组、垂直组剪胀角的演化过程：

（1）试件在卸荷过程中，平行组和垂直组剪胀角并非恒定值，随着塑性剪应变的增大，试件剪胀角表现出先增加后减小变化趋势。

（2）两组试件峰值剪胀角量值随着围压增大而减小，围压较低时（30、40 MPa），剪胀角达到峰值后随塑性剪应变的增加快速衰减，其衰减速率明显大于高围压（50、60 MPa）情况，表明围压对试件剪胀行为影响较大。低围压下，试件一旦进入塑性屈服区，其剪胀角随着塑性剪应变增加迅速增大至峰值，但峰值后期快速衰减跌落，峰值剪胀角出现在塑性屈服段初始部位；高围压下，由于围压的抑制作用，进入塑性屈服区后，剪胀角呈现出持续增长的趋势，需要经历更多的塑性剪应变才达到峰值，其峰值后期缓慢衰减至某一值，并呈现出一定的延性，直到塑性剪应变增加到足够大量值时，试件进入残余强度阶段，试件发生破坏，剪胀角迅速衰减至 0，这与实际情况相符。

（3）从表 2 可看出，与三轴条件下不同，单轴情况下，垂直组试件表观剪胀角大于平行组，这是由于垂直组试件原生裂纹分布几乎沿片理间软弱夹层分布，当加载方向垂直于片理时，原生裂纹压密闭合，造成损伤程度低于平行组，后期加载引发的新损伤破坏增多，即原生裂纹和新生裂纹生成、扩展和贯通形成了更为强烈的扩容现象。

（4）表 3 表明，平行组试件峰值剪胀角和残余剪胀角均大于垂直组（除 $\sigma_3=30$ MPa），这种差异

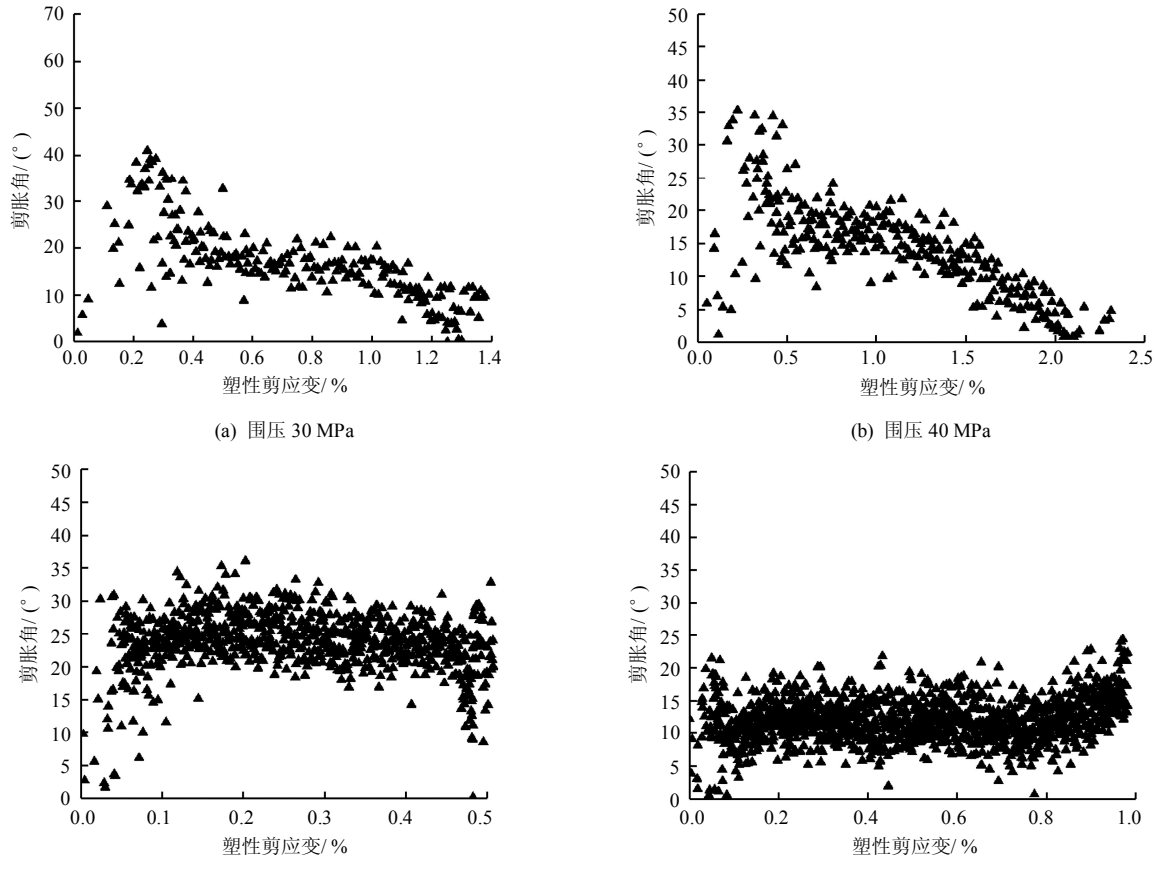


(a) 围压 30 MPa (b) 围压 40 MPa

(c) 围压 50 MPa (d) 围压 60 MPa

图 8 平行组剪胀角与塑性剪应变关系

Fig.8 Relationship between dilatancy angle and plastic shear strain of the parallel group



(a) 围压 30 MPa (b) 围压 40 MPa

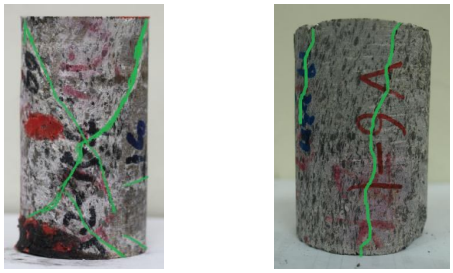
(c) 围压 50 MPa (d) 围压 60 MPa

图 9 垂直组剪胀角与塑性剪应变关系

Fig.9 Relationship between dilatancy angle and plastic shear strain of the vertical group

实质上是试件内部初始裂纹分布、片理结构方向和破坏模式造成的。

由图 10 可知，平行组试件沿片理面间软弱夹层发生典型的斜面剪切破坏；而垂直组试件剪断片理面，产生锯齿状剪切破坏，破坏模式与刘志勇等[20]的分析一致的。

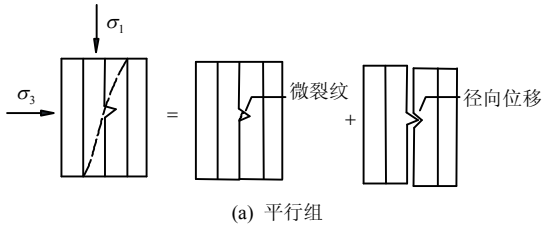


(a) 垂直于片理方向　　(b)平行于片理方向

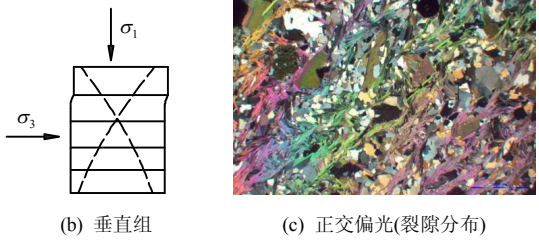
图 10　石英云母片岩典型破坏模式

Fig.10　Typical failure modes of mica-quartz schist

由图 11 可知，对于平行组试件，加载方向平行于片理方向，片理间软质颗粒受力之后便失去咬合力，沿层间的凸台产生剪切滑移，在凸台剪断形成裂纹的同时沿凸台向上移动形成径向位移分量，形成的裂纹较为显著，扩容量由裂纹和径向位移组成。相反地，对于垂直组试件，围压作用限制了试样的径向位移，加载后层理受压闭合，片理骨架结构受力，硬质颗粒破坏，致使多处微裂隙发展而破坏，形成的裂纹相对不明显。



(a) 平行组



(b) 垂直组　　(c) 正交偏光(裂隙分布)

图 11　石英云母片岩破坏过程示意图

Fig.11　Progress of Failure of mica-quartz schist

根据图 8、9 中剪胀角与塑性剪应变的演化规律，可统计出不同围压情况下石英云母片岩特征剪胀角见表 3。由于卸荷条件下剪胀角演化与试件破坏息息相关，且峰值剪胀角与峰值偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 与围压 $(\sigma_3)_f$ 状态有关，残余剪胀角亦与偏应力台阶 $(\sigma_1-\sigma_3)_f-(\sigma_1-\sigma_3)_r$ 与围压台阶 $(\sigma_3)_f-(\sigma_3)_r$ 有关（下标 f、r 分别表示峰值点和残余阶段），通过量纲分析，引入峰值偏应力比 $(\sigma_1-\sigma_3)_f/(\sigma_3)_f$ 和偏应力台阶比 $\{(\sigma_1-\sigma_3)_f-(\sigma_1-\sigma_3)_r\}/\{(\sigma_3)_f-(\sigma_3)_r\}$ 来表征。

表 3　特征剪胀角统计

Table 3　Statistics of characteristic dilation angles

平行组			垂直组		
围压 /MPa	峰值剪胀角 θ/(°)	残余剪胀角 θ/(°)	围压 /MPa	残余剪胀角 θ/(°)	峰值剪胀角 θ/(°)
30	53.37	12.39	30	40.97	16.26
40	45.11	25.36	40	35.34	13.46
50	41.47	19.89	50	31.22	11.34
60	31.89	14.12	60	21.42	10.37

注：由于在围压 30 MPa 处，岩样脆性特征较为明显，其平行组的剪胀角计算可能不准确，具有离散性，故舍去。

峰值偏应力比、偏应力台阶比与剪胀角的关系见图 12、13。从图中可看出：石英云母片岩在卸荷

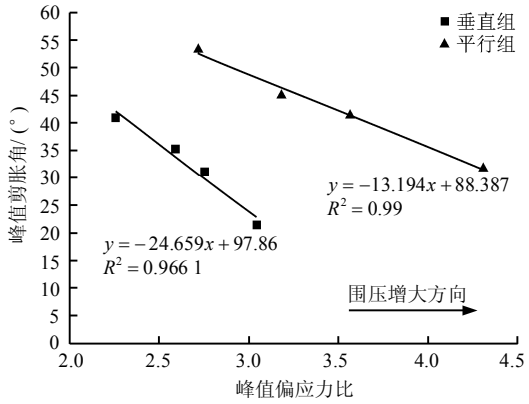


图 12　峰值剪胀角与峰值偏应力比的关系

Fig.12　Relationship between dilation angle and deviator stress ratio at peak strength

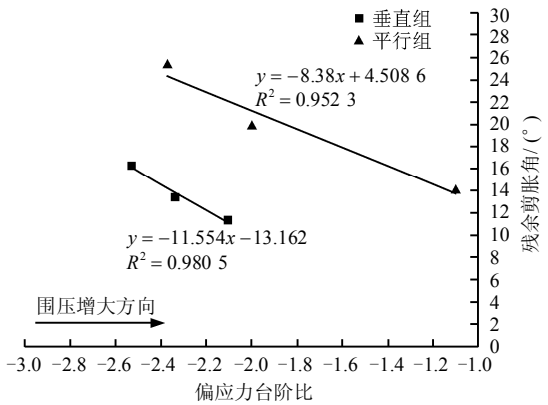


图 13　残余剪胀角与偏应力台阶比的关系

Fig.13　Relationship between dilation angle and deviator stress ratio at residual strength

条件下的特征剪胀角与应力比之间存在较好的线性关系；峰值与残余剪胀角表现出随围压增加而减小的趋势。由拟合曲线斜率可知，垂直组剪胀角对围压的敏感性高于平行组，这与前文得出的垂直组试件的脆性高于平行组情况相符合。

4 石英云母片岩卸荷能量特征分析

根据文献[19]，石英云母片岩卸荷过程吸收总能量 U_0 转化为两部分，即单位体积内的可释放应变能 U_e 和耗散能 U_d，其中

$$U_0 = \int \sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon_1 + 2\int \sigma_3 \mathrm{d}\varepsilon_3 = U_e + U_d \tag{6}$$

$$U_e = \frac{1}{2\bar{E}}[\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\bar{\nu}\sigma_3(2\sigma_1 + \sigma_3)] \tag{7}$$

式中：$\bar{E}$ 和 $\bar{\nu}$ 分别为三轴卸荷条件下的弹性模量和泊松比，可近似取应力-应变曲线弹性段变形参数。

4.1 能量特征与体积变形的关系

石英云母片岩卸荷条件下能量演化规律与体积变形之间的关系曲线见图 14、15，由图可知：

（1）两组试件均表现出加载初期耗散能量值较小，可释放应变能迅速增长，直到损伤扩容点后，试件耗散能迅速增加，占主导地位，试件内部形成损伤，产生裂纹和塑性变形，直至试件破坏；

（2）由于垂直组裂纹闭合应力 σ_{cc} 小于平行组且刚度较小（由图 3 可知），故垂直组试件可释放应变能曲线增长速率大于平行组；平行组试件峰值可释放应变能均大于垂直组，这是由于平行组试件的损伤扩容应力、峰值强度高于垂直组，到达峰值强度时，平行组储存的可释放应变能较高。另外，随着围压的增加，耗散能随体积应变增加的增长速率越快，除了平行组试件在 30 MPa 下脆性较为明显，导致内部损伤累积较快，耗散能增长迅速，破坏呈现出脆性，在同一围压水平下，垂直组试件的耗散能增长速率均大于平行组。

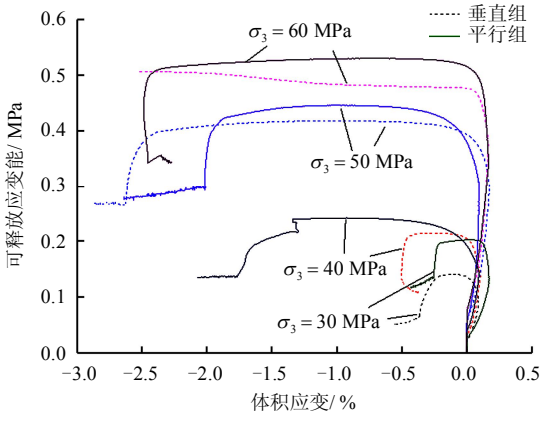


图 14 可释放应变能-体积应变关系曲线

Fig.14 Relationship between volumetric strain and released energy

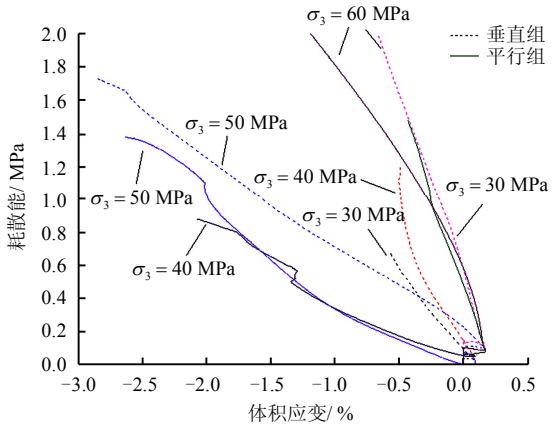


图 15 耗散能-体积应变关系曲线

Fig.15 Relationship between volumetric strain and dissipation energy

4.2 特征点能量与围压的关系

表 4 给出了平行组和垂直组试件在卸荷条件下的峰值能量和残余能量特征值，与围压的关系曲线见图 16、17，由图、表可知：

（1）随着围压的增大，峰值点处和残余点处的能量特征值均有所提高，与围压存在较好的指数型关系，这与文献[21]大理岩特性相类似，表明了高围压环境下，试件承受损伤累积和塑性变形的能力变强，从而提高了试件的极限承载能力和残余强度。

（2）平行组峰值点处能量特征值均大于垂直组，这与前文得出的平行组峰值强度和峰值剪胀角均大于垂直组结论相符合；平行组残余可释放应变能 U_e 大于垂直组，这与前文得出的平行组残余强度大于垂直组结论相符合；垂直组残余耗散能 U_d 大于平行组，破坏时可释放应变能释放量较大，试件破坏程度较高，这与前文得出的平行组残余剪胀角大于垂直组结论相符合。

表 4 平行组、垂直组能量特征统计表

Table 4 Statistics of energy eigenvalue of the parallel and vertical group

试样	围压	峰值 U_e/ MPa	峰值 U_d/ MPa	残余 U_e/ MPa	残余 U_d/ MPa
平行组	30	0.204	0.246	0.134	0.742
	40	0.243	0.329	0.163	0.889
	50	0.448	0.741	0.297	1.383
	60	0.588	1.168	0.365	3.332
垂直组	30	0.142	0.186	0.063	0.688
	40	0.216	0.298	0.111	1.108
	50	0.417	0.632	0.261	1.659
	60	0.478	0.913		

注：垂直组围压 60 MPa 下，垂直组岩样延性较强，后段试验数据系统采集缺失，故并未统计出残余能量值。

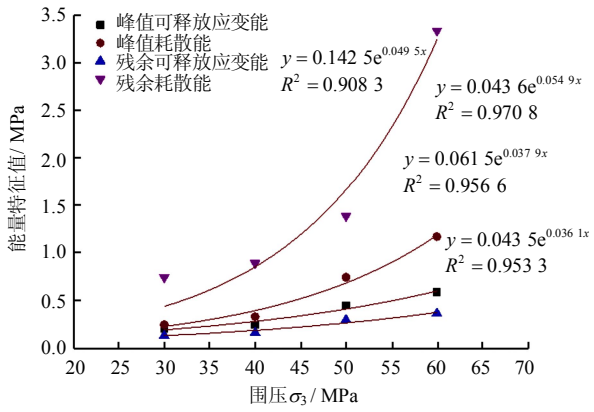


图 16　平行组围压-能量特征值关系曲线

Fig.16　Relationship between confining pressure and energy eigenvalue of the parallel group

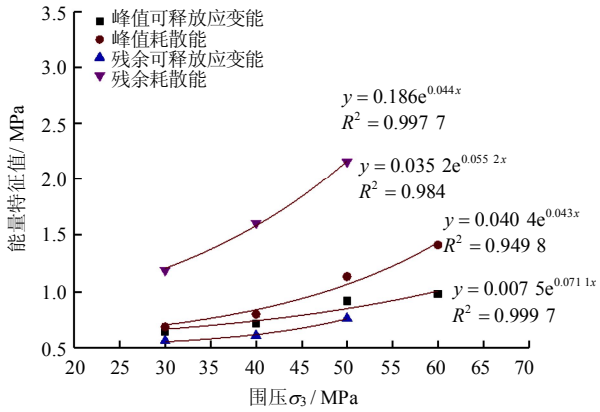


图 17　垂直组围压-能量特征值关系曲线

Fig.17　Relationship between confining pressure and energy eigenvalue of vertical group

5　石英云母片岩卸荷能量特征与扩容特性关系

由前文分析可知，试件的剪胀角发展与破坏程度有关，而破坏程度又与试件内部耗散能吸收、累积有关，故可建立特征点处耗散能与剪胀角的关系曲线，如图 18、19 所示，峰值耗散能-峰值剪胀角

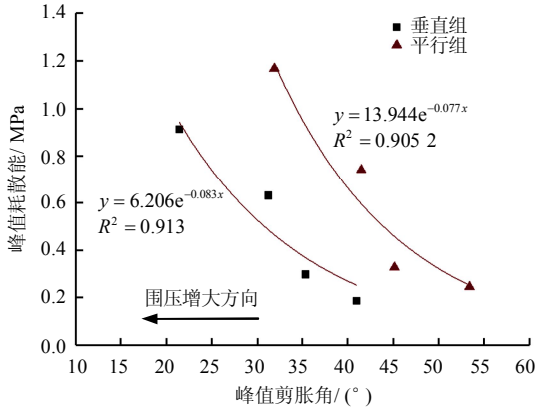


图 18　峰值耗散能-峰值剪胀角关系曲线

Fig.18　Relationship between dissipation energy and dilation angles at peak strength

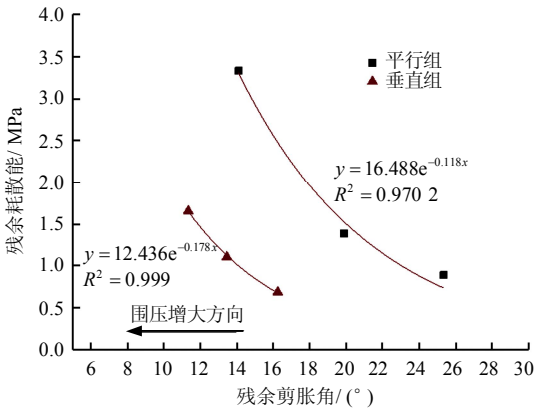
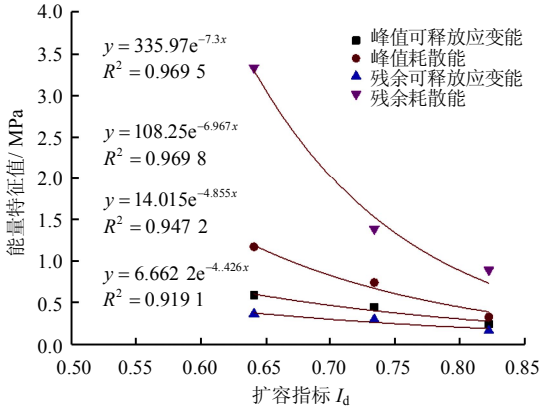


图 19　残余耗散能-残余剪胀角关系曲线

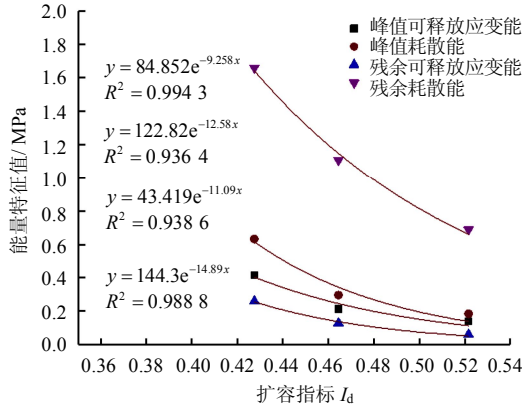
Fig.19　Relationship between dissipation energy and dilation angles at residual strength

和残余耗散能-残余剪胀角均存在良好的指数型关系，且随着围压的增大试件的剪胀角逐步减小，相应地能量耗散值随之增大。

考虑到试件扩容指标 I_d 与围压存在良好的指数型关系，同时，能量与围压之间亦存在良好的指数型关系，故可建立特征点处能量特征值与扩容指标的关系曲线，如图 20 所示，能量特征值与扩容指



(a)　平行组



(b)　垂直组

图 20　扩容指标-能量特征值关系曲线

Fig.20　Relationship between dilatancy index energy eigenvalue

数之间存在较好的指数型关系，这与文献[21]大理岩特性相类似，且扩容指标随着围压增大而减小，能量特征值随之增大。

6 结 论

（1）三轴卸荷条件下，平行组和垂直组试件各特征点应力随着围压σ_3增大而增加，且呈现较好的正线性关系，表现出显著的围压效应；损伤扩容应力、峰值应力及残余应力对围压敏感性较高，表明增加围压有助于岩体抑制内部裂纹发展，提高了岩体的承载能力。

（2）相同围压下，平行组裂纹闭合应力、损伤扩容应力和峰值应力均高于垂直组，但起裂应力低于垂直组，这种差异与试件片理发育方向有关。

（3）随着围压的增加，平行组和垂直组试件扩容指标、剪胀角等扩容特征逐步减弱；同围压水平下，平行组试件扩容指标与峰值剪胀角均大于垂直组；扩容指标与围压呈良好的指数型分布，特征剪胀角与偏应力比呈良好的线性分布；另外，垂直组剪胀角对围压的敏感性高于平行组;与高围压相比，低围压下的剪胀角峰后衰减速率较快。

（4）随着围压的增大，平行组与垂直组试件的峰值点和残余点处能量值均随之增加，且与围压呈现良好的指数型分布；同一围压水平下，平行组试件峰值点处能量特征值及残余可释放应变能均大于垂直组，但残余耗散能小于垂直组；另外，相同围压下,垂直组试件的耗散能增长速率均大于平行组。

（5）随着围压的增大，无论是峰值点还是残余点处，平行组和垂直组试件的耗散能量值均有所增加，表明在高围压的环境下试件承受损伤和塑性变形的能力提高；并且峰值点和残余点处的耗散能值与剪胀角以及能量特征值与扩容指数均呈现良好的指数型关系。

参 考 文 献

[1] YUAN Shih-che, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41: 679－686.

[2] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 基于损伤控制方法的大理岩非线性剪胀特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 981－988.
WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental study of nonlinear dilatancy characteristics based on the damage-controlled method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 981－988.

[3] MAHMUTOGLU Y, VARDAR M. Effects of inelastic volume increase on fractured rock behaviour[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2003, 62: 117－121.

[4] 王凯, 郑吉玉, 朱奎胜. 两种应力路径下无烟煤的变形破坏特征及能量分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 259－267.
WANG Kai, ZHENG Ji-yu, ZHU Kui-sheng. Analysis of deformation failure characteristics and energy of anthracite under two kinds of stress paths[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 2015, 36(Supp.2): 259－267.

[5] 蔡燕燕, 张建智, 俞缙, 等. 考虑围岩蠕变全过程与扩容的深埋隧洞非线性位移解[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1831－1840.
CAI Yan-yan, ZHANG Jian-zhi, YU Jin, et al. Nonlinear displacement solutions for deep tunnels considering whole process of creep and dilatation of surrounding rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(7): 1831－1840.

[6] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 基于损伤控制方法的大理岩非线性剪胀特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 981－988.
WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental study of nonlinear dilatancy characteristics based on the damage-controlled method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 981－988.

[7] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003－3010.
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3003－3010.

[8] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1198－1207.
ZHANG Zhi-zhen, GAO Feng. Research on nonlinear characteristics of rock energy evolution under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(6): 1198－1207.

[9] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729－1740.

XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(9): 1729－1740.

[10] 郑在胜. 岩石变形中的能量传递过程与岩石变形动力学分析[J]. 中国科学: B 辑, 1990, (5): 524－537.
ZHENG Zai-sheng. Energy transfer process and dynamic analysis during rock deformation[J]. **Science in China: Series B**, 1990, (5): 524－537.

[11] 周辉, 李震, 杨艳霜, 等. 岩石统一能量屈服准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 2171－2186.
ZHOU Hui, LI Zhen, YANG Yan-shuang, et al. Unified energy yield criterion of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(1): 2171－2186.

[12] 苏承东, 张振华. 大理岩三轴压缩的塑性变形与能量特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 273－280.
SU Cheng-dong, ZHANG Zhen-hua. Analysis of plastic deformation and energy property of marble under pseudo-triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 273－280.

[13] TSOUTHRELIS C E, EXADAKTYLOS G E. Effect of rock discontinuities on certain rock strength and fracture energy parameters under uniaxial compression[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 1993, 11(2): 81－105.

[14] 杨凡杰, 周辉, 卢景景, 等. 岩爆发生过程的能量判别指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 2706－2715.
YANG Fan-jie, ZHOU Hui, LU Jing-ing, et al. An energy criterion in process of rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 2706－2715.

[15] 刘志勇, 肖明砾, 卓莉, 等. 石英云母片岩加卸荷力学特性及其卸荷本构研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(32): 85－91.
LIU Zhi-yong, XIAO Ming-li, ZHUO Li, et al. Study of loading and unloading characteristics and its unloading constitutive model of mica-quartz schist[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(32): 85－91.

[16] 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.
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): 2188－2198.

[17] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究岩石[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807－1818.
QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(9): 1807－1818.

[18] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 70－76.
XU Zhi-ying. Rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 70－76.

[19] 朱泽奇, 盛谦, 肖培伟, 等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 2675－2682.
ZHU Ze-qi, SHENG Qian, XIAO Pei-wei, et al. Analysis of energy dissipation in process of unloading confining pressure failure of rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 2675－2682.

[20] 卓莉, 何江达, 谢红强, 等. 基于 Hoek-Brown 准则确定岩石材料强度参数的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 2773－2783.
ZHUO Li, HE Jiang-da, XIE Hong-qiang, et al. Study of new method to determine strength parameters of rock material based on Hoek-Brown criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 2773－2783.

[21] 陈学章, 何江达, 肖明砾, 等. 三轴卸荷条件下大理岩扩容与能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 6(6): 1106－1113.
CHEN Xue-zhang, HE Jiang-da, XIAO Ming-li, et al. Dilatancy and energy properties of marble under triaxial unloading condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 6(6): 1106－1113.