

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.11

天然和饱水状态下泥岩力学性质及损伤 变形能量特征分析

谢吉尊, 冯文凯, 胡云鹏, 吴 刚, 乔莹莹

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 为研究三溪村滑坡滑带泥岩的力学性质和滑带的形成机制, 进行天然和饱水状态下单轴和常规三轴压缩试验。结果表明: 饱水状态对泥岩的变形强度、破坏形式和围压效应具有显著影响, 饱水使泥岩的应力应变曲线由应变软化型转化为“弹-塑-蠕变”型, 破坏形式由剪断破坏变成塑性破坏, 围压敏感性减弱, 而似软化系数随围压的增加而减小。从能量角度分析表明: 两种状态下能量的变化规律相似, 但天然状态能量以弹性应变能储存, 饱水以耗散能释放, 且饱水使总应变能 U 、峰前弹性应变能 U^e 及二者的变化速率均小于自然状态, 而耗散能 U^d 则相反; 试样峰值点和残余点处各应变能具有围压效应, 呈线性递增关系。饱水导致各应变能的累积、转化、耗散和释放的差异, 使得弹性应变能急剧降低, 耗散能增加, 力学强度也伴随着滑带的损伤变形而产生衰减效应。

关键词: 泥岩; 能量特征; 损伤变形; 饱水三轴

中图分类号: P642.11⁺6; TU458⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)03-0066-07

An analysis of the mechanical properties and energy characteristics of damage deformation of mudstone under natural and saturated states

XIE Jizun, FENG Wenkai, HU Yunpeng, WU Gang, QIAO Yingying

(State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environmental Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of the mudstone in the sliding zone and the formation mechanism of the sliding zone of the Sanxi landslide, uniaxial and triaxial compression tests are carried out under natural and saturated states. Experimental results show that deformation, intensity, failure mode and the confining pressure effect of the mudstone are influenced seriously when saturated. The saturated condition makes the stress strain curves of the mudstone convert from strain softening to “elastic - plastic - creep”, the damage modes convert from shear damage to plastic collapse, and the confining pressure sensitivity abate, and the softening coefficient decrease with the increasing confining pressure. From the perspective of energy, it is found that the change in the energy rule of two kinds of states of energy is similar. Under the natural state, the energy stores in the form of the elastic strain energy, but it releases in the form of dissipation. The total absorbed energy U and the releasable strain energy U^e before the peak stress and their increasing rates in axial strain under the saturated conditions are less than the corresponding values of the natural specimen, but the dissipation U^d process is opposite. The peak point strain energy and the residual point strain energy are both in linear relation with the confining pressure. The differences in the strain energy accumulation, transformation

收稿日期: 2015-08-28; 修订日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41172278, 41572291)

第一作者: 谢吉尊(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害评价与防治研究。E-mail: 1765061394@qq.com

通讯作者: 冯文凯(1974-), 男, 教授, 主要从事区域与岩体稳定及地质灾害防治方面的教学与研究工作。E-mail: fwkhyll@163.com

process, dissipation and release of the mudstone are caused when saturated. The U^e of the saturated mudstone decreases greatly, but its U^d increases. As a result, its mechanical strength will be damped with the sliding zone out of shape and damaged.

Keywords: mudstone; energy characteristic; damage deformation; saturated triaxial tests

红层是指以红色为主色调的碎屑沉积岩层,广泛分布在我国西南、西北、中南及东南地区,一般由红色砾岩、砂岩、粉砂岩、砂质页岩和泥质岩等交互组成,因成岩时间短、固结程度差,其颗粒易破碎、强度低、遇水后易崩解与软化^[1]。在各种地质营力作用下,岩体完整性被破坏,岩层结构面强度持续软化,逐渐演化为滑面,从而形成红层软岩滑坡。红层泥岩特别是软弱夹层,存在着取样、制样的困难,而这些夹层又是滑坡易发生的位置,因此研究这些部位的泥岩变形破坏特性对于进一步指导红层滑坡的防治具有重要意义。

国内外地质和工程领域的学者对泥岩开展了广泛的研究。何蕾等^[2]通过不同空隙水化学成分及 pH 值下的风化泥岩的快剪试验,探讨水与岩土相互作用。吴道祥等^[3]针对红层软岩遇水易软化、崩解的特性,进行室内崩解试验,表明泥岩的矿物成分、胶结物类型及黏土矿物的含量对其崩解性起着决定作用。张志沛等^[4]通过泥岩的三轴压缩蠕变及数值模拟,研究不同围压状态下、时间等因素对岩体蠕变变形和破坏特征的影响规律。周翠英等^[5]进行了饱水泥岩力学性质软化试验,研究得出泥岩饱水后其抗压强度、抗拉强度及抗剪强度变化的定量表征关系一般服从指数衰减变化规律。吴钟腾等^[6]利用土工离心机模型试验模拟泥岩软弱基座滑坡的形成和破坏运动过程。从上述文献来看,目前关于红层泥岩的研究多集中在变形强度特征和物理特性的研究,而热力学定律表明,能量转化是物质物理、力学特征变化过程的内在本质,物质的破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象^[7]。鉴于此,本文利用都江堰市三溪村“7·10”滑坡软弱夹层的滑带泥岩试样,进行天然和饱水状态下单轴和常规三轴压缩试验,从能量角度探讨泥岩的损伤、变形破坏过程中耗散应变能与可释放弹性应变能的累积与转化,能量与围压、应力、变形破坏的内在关系,以及滑带的形成机制。

1 试验方法

1.1 试样的制备和试验方法

试验所用试样为白垩系灌口组(K_2g)的紫红色、砖红色泥岩,表面分布有细微裂纹和少量被砂粒充填的孔洞,手捏较软,有滑腻感。矿物成分分析显示泥岩

中蒙脱石含量为 15%、伊利石为 30%,绿泥石为 18%,石英为 29%,方解石为 8%。泥岩岩块强度低,遇水软化崩解,水钻取样成型度低,因此将岩块切割成长方体,然后利用工具刀成型,磨石片、打磨纸加工成直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱体。

试样饱水采用 NX-BHG 型真空饱水装置,抽气 4 h,饱水 48 h。试验均在地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的 MTS-815 刚性伺服系统上进行,围压选取 0 MPa、1 MPa、2 MPa、3 MPa,各围压均重复 2 个试样。试验采用位移控制,轴向加载速率为 0.005 mm/s,试样用热缩管包裹,安装在三轴室内进行充油排气后,先按静水压力条件逐步施加 $\sigma_1 = \sigma_3$ 至预定围压值,然后连续施加轴压直至岩样发生破坏。

1.2 试验结果与分析

图 1 为天然和饱水状态下泥岩单轴压缩和常规三轴压缩的应力应变全过程曲线。两种状态下,单轴压缩应力应变曲线与常规三轴压缩相比,其曲线的总塑性应变小,峰值强度低,峰后应力降小。由图 1(a)可知,随围压的增加,天然泥岩的峰值、残余强度和塑性应变均逐渐增大,峰后由应变软化逐渐向理想的塑性过渡。由图 1(b)可见,饱水状态下的单轴压缩有明显的峰值强度,而常规三轴应力应变曲线开始为线弹性,过渡到塑性变形之后应力随应变的增加有上升的趋势,逐渐变为蠕变,为典型的“弹-塑-蠕变”型,表明饱水泥岩屈服后,其残余强度仍然可抵抗较大的荷载。试验结束后,发现试样的热缩管整体鼓胀、剪切缝处凸起,且围压与竖向应力差较小,而形成热缩管和围压的侧限作用,泥岩中的孔隙水来不及消散,随着应变的增加,孔隙水压力累积成为超孔隙水压力,使得其抗压强度增大。

无论是天然状态还是饱水状态,试样峰值强度随围压的增加都有一定程度的提高,具有明显的压硬性,进行强度与围压的拟合(注:三轴饱水泥岩的强度取同围压下天然状态峰值强度对应的应变值的强度,下文饱水强度取值同理),发现有很好的线性关系(图 2)(σ_{1p} 为峰值强度, σ_{1r} 为残余强度, σ_1 为饱水应变对应的强度)。天然状态泥岩峰值强度和残余强度与围压的回归关系线的斜率均大于饱水状态,说明天然状态

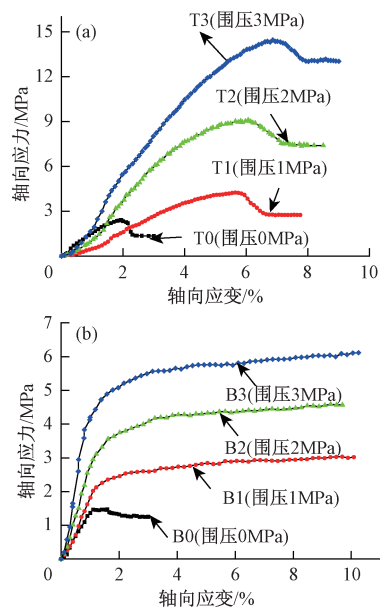


图1 泥岩单轴和常规三轴压缩应力-应变关系

Fig. 1 Stress-strain curves of mudstone under natural and saturated states in uniaxial compression

(a) 天然状态; (b) 饱水状态

下试样的峰值强度较饱水状态下的围压效应显著。

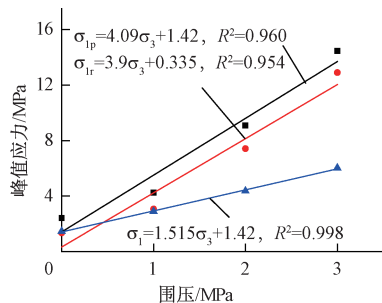


图2 天然和饱水状态下试样强度与围压关系

Fig. 2 Relationship between peak strength and confining pressure of specimens under natural and saturated states

泥岩的软化性对其强度和斜坡的稳定性有重大影响,本文将饱水与天然状态下试样峰值强度的比值定义为似软化系数 K' 。图3给出了本次试验的似软化系数变化规律,随围压的增大似软化系数先增大后减小,表明围压改变了其受力状态,从而影响其强度,但随围压增大天然状态试样峰值强度对围压的敏感性强于饱水状态试样。其原因主要是天然状态试样峰值强度对围压的敏感性强于饱水状态,且天然状态试样峰值强度随围压增加快,而饱水试样峰值强度随围压增长相对较慢,因此造成两种状态下峰值强度比值即似软化系数随围压增加而降低的规律。

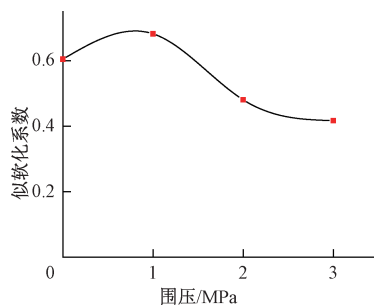


图3 似软化系数与围压关系

Fig. 3 Relationship between the similar softening coefficient of mudstone and the confining pressure

2 能量特征与损伤变形机制

2.1 能量与损伤变形关系

能量耗散是岩石变形破坏的内在原因,岩石材料中产生新裂缝需要消耗能量,裂隙面之间的贯通、滑移也要消耗能量,它反映了岩石原有微裂隙的不断压密闭合、新裂隙形成发展、破裂面的贯通、材料强度不断弱化并最终致丧失的过程,因此能量的耗散表明岩石的损伤和材料强度的衰减弱化,岩石受载变形破坏的过程实质就是能量耗散的全过程^[7]。依据热力学第一定律^[8],一个封闭系统内岩石复杂应力状态下变形过程中能量的转化满足下式:

$$U = U^d + U^e \quad (1)$$

式中: U ——外力做功输入的总应变能/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$);

U^d ——耗散能,代表试样产生塑性变形消耗的能量/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$);

U^e ——可释放的弹性应变能,即为弹性变形所储存的能量/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)。

U^d 和 U^e 之间的关系见图4。

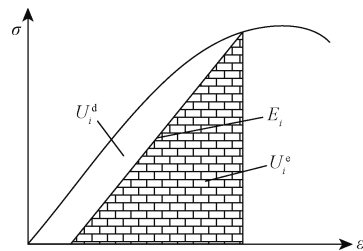
图4 单位体积岩石中 U^d 和 U^e 的量值关系

Fig. 4 Quantitative relationship between dissipated energy and releasable strain energy of unit rock

应力-应变曲线和卸荷弹性模量 E_i 围成的面积为 U^d ,即为单位体积岩石内部发生损伤和塑性变形所消耗的能量;阴影面积为 U^e ,表示单位体积岩石卸载

后释放的弹性应变能;两者之和为 U , 表示压缩过程中对单位岩石所做的功。

主应力空间中岩体单元各部分能量^[8]可表示为:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3^e \quad (3)$$

由广义 Hooker^[7]定律得:

$$\varepsilon_i^e = \frac{1}{E_i} [\sigma_i - v_i (\sigma_j + \sigma_k)] \quad (4)$$

式中: $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k (i, j, k = 1, 2, 3)$ ——主应力;

$\varepsilon_i, \varepsilon_i^e$ ——主应力方向上的应变和弹性应变;

v_i ——泊松比, 假设为定值。

则复杂应力条件下可释放的弹性为:

$$U^e = \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1^e + \sigma_2 \varepsilon_2^e + \sigma_3 \varepsilon_3^e) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5), 可释放弹性应变能 U^e 可以写成如下形式:

$$U^e = \frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2v(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3)] \quad (6)$$

式中: E_0 ——试样初始弹性模量。

由泊松比效应可知:

$$v = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (7)$$

考虑到常规三轴压缩试验时试样的应力状态和静水压力加载过程中的输入的应变能情形, 由式(2)和式(7)可得:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 + U^0 = \int_0^{\varepsilon_1} (\sigma_1 + 2v\sigma_3) d\varepsilon_1 + \left(\frac{3}{2} \frac{1-2v}{E_0} \sigma_3^2 \right) \quad (8)$$

式中: U^0 ——施加围压对试验所产生的变形而消耗的能量/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)。

2.2 基于能量特征的单轴压缩损伤变形分析

对于受载岩石系统, 压缩过程中其能量转化大致分为能量输入、能量积聚、能量耗散、能量释放4个过程^[9], 以泥岩的单轴压缩能量演化过程分析岩石的变形阶段特征(图4), 依据天然状态下泥岩的单轴压缩应力应变全过程曲线, 将图5(a)中能量变化过程可以分为5个阶段。

①压密阶段(OA): 输入的应变能 U 和可释放的弹性能 U^e 随应变缓慢增加, 但变化幅度不大, 说明输入能量因岩石原有的微裂隙逐渐压密闭合而消耗少部

分能量, 耗散能 U^d 微量增加, 而大部分能量转化为可释放的弹性应变能 U^e 而随之逐渐的累积。

②线弹性阶段(AB): 岩石继续不断吸收能量 U , 主要发生弹性变形而转化为可释放的弹性应变能 U^e 进行能量的积聚, 而耗散能 U^d 几乎维持不变, 这与该阶段只发生弹性变形相符合。

③稳定破裂发展阶段(BC): 岩石在外荷载作用下微裂纹、微空隙逐渐萌生、发展而发生少量的塑性变形消耗部分能量, 因此该阶段的耗散能 U^d 逐渐增加, 但是外界输入的能量仍然以可释放的弹性应变能 U^e 的形式储存。在峰值强度附近, 可释放的弹性应变能 U^e 达到最大, 而耗散能 U^d 增加的幅度增强, 说明此时岩石的强度达到最大。

④不稳定破裂发展阶段(CD): 轴向应力达到峰值强度后, 外界的输入能量 U 增加的速率减缓, 由于可释放的弹性应变能 U^e 是可逆的, 弹性变形能储存到一定极限, 超过岩石系统所能负载的极限, 便会使岩石发生大的塑性变形、微观裂纹贯通、宏观裂纹面的滑移^[10], 因此耗散能 U^d 急剧增加, 占总输入能量 U 的比例幅度增大, 而可释放的弹性应变能 U^e 急剧降低, 岩石的强度降低。

⑤峰后软化阶段(DE): 由于泥岩属于软岩, 峰值之后有明显的塑性流动, 主要为贯通面的滑移、摩擦、运动, 因此外界输入的能量 U 主要转化为耗散能 U^d , 可释放的弹性应变能 U^e 几乎减小不变。

由图5(b)可知, 饱水状态下的应变能-应变全曲线压密阶段与天然状态下的各能量变化规律相近, 但因试样饱水状态的差异致使两种状态试样单轴压缩变形破坏全过程的能量实时演化特征仍有较明显的差别^[9]。因为在单轴压缩下泥岩中的孔隙水来不及消散, 孔隙水压力随应变的增大而逐渐增高成为超孔隙水压力, 输入的应变能 U 主要转化为超孔隙水压力和用于塑性变形而耗散。两者之间的差异说明饱水程度不同导致应变能的累积、转化过程和损伤变形破坏机制及能量实时演化特征的差异。

天然状态时峰值点处 U^d/U , U^e/U 分别为 0.217 和 0.782, 表明泥岩单轴压缩在峰值点前吸收的应变能 U , 以可释放的弹性应变能 U^e 的方式储存起来, 而岩石内部的塑性变形所消耗的 U^d 只占一小部分。而饱水状态下泥岩的峰值点处 U^d/U , U^e/U 分别为 0.539 和 0.461, 饱水后可释放的弹性应变能 U^e 降低 67%, 耗散能 U^d 增高 38%, 说明饱水使得泥岩能量耗散增加, 从而软化强度降低, 也很好的解释高地应力条

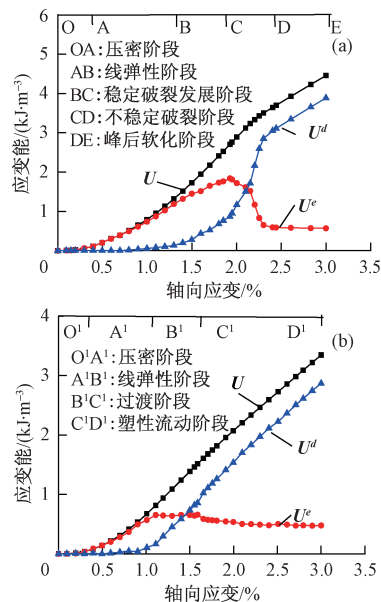


图5 泥岩单轴压缩应变能与应变关系曲线

Fig. 5 Strain energy-strain curves of mudstone under natural and saturated states in uniaxial compression

(a) 天然状态; (b) 饱水状态

件下超前注水和岩石洒水能降低岩爆发生的原因。

由图6可知,天然状态下的耗散能 U^d 在应变为 2.2% 之前小于饱水状态,之后相反,可释放的弹性应变能 U^e 天然状态均大于饱水状态,两者都在峰值前能量积聚,峰值之后天然状态可释放弹性应变能急剧降低。

分析表明泥岩饱水会发生软化、溶解、膨胀而使得微观的裂纹易于贯通而消耗能量,此外孔隙水压力消耗能量和对原生有缺陷、局部萌发的微裂纹附近岩石产生附加应力^[10],同时考虑到水对裂纹断裂韧度等岩石强度参数的软化效应^[11];而天然泥岩接近连续介质,线弹性特征十分明显,可释放的应变能急剧增加,在峰值之后天然泥岩裂纹迅速劈裂贯通、形成贯通面,并沿贯通面滑动摩擦,可释放的弹性应变能急剧释放转化为耗散能。

2.3 三轴压缩能量特征与破坏形式

图7为围压 2 MPa 下泥岩的三轴压缩应变能随应变的关系曲线。对比图5和图6可知,常规三轴和单轴压缩下泥岩的各能量变化规律基本相似,且各能量均大于单轴压缩;天然状态试样吸收的总应变能、储存的可释放弹性应变能(峰前)大于饱水状态试样相应的应变能,且天然状态下两种应变能变化速率均大于饱水状态,而耗散能小于饱水状态,这与单轴压缩相似,说明 U 和 U^e 在天然状态下敏感性

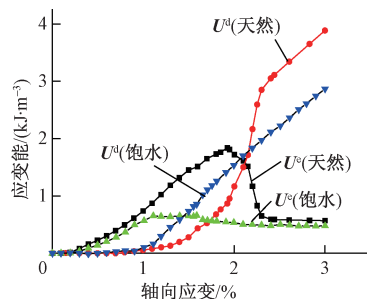


图6 天然和饱水状态试样变形破坏全过程能量特征比较

Fig. 6 Energy comparisons of rock specimens in deformation and failure process under natural and saturated states

强于饱水状态,符合前文似软化系数 K' 随围压的增加而降低的原因。

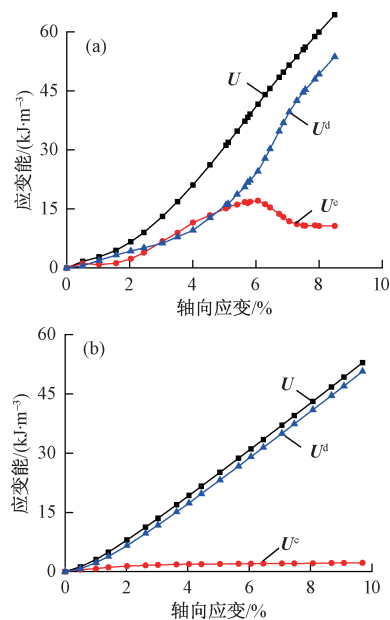


图7 围压为 2MPa 变形能量-应变关系曲线

Fig. 7 Energy variations of specimens in deformation process at $\sigma_3 = 2$ MPa

(a) 天然状态; (b) 饱水状态

天然状态下常规三轴压缩试验输入的总应变能和可释放的弹性应变能随围压的增加而增大,峰值之前随围压的增加应变能的变化速率增加,峰值之后释放速率相差不大;饱水状态可释放的弹性应变能随围压增加的变化幅度较小,在进入蠕变阶段后几乎维持稳定,说明饱水状态下泥岩对围压的敏感性弱(图8)。

图9给出了两种状态下的峰值点和残余点处的总应变能 U 、可释放的弹性应变能 U^e 及耗散能 U^d 随围压的变化关系,并进行线性拟合,发现两种状态下的各应变能随围压的增加而增大,且有很好的线性递增关系。

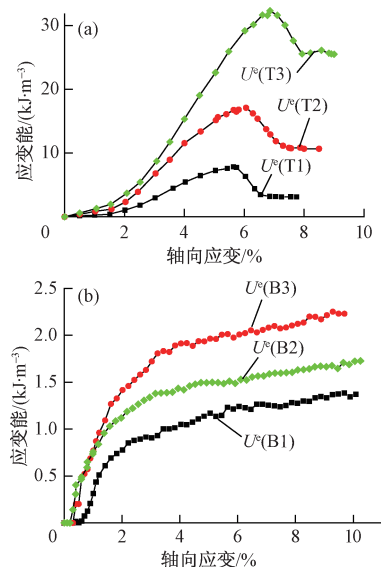


图8 不同围压下试样可释放弹性应变能-应变曲线

Fig. 8 Releasable strain energy of specimens under different confining pressures

(a) 天然状态; (b) 饱水状态

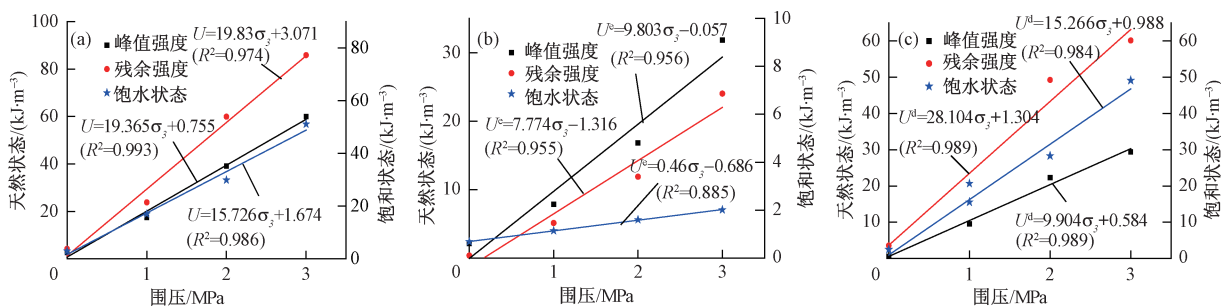


图9 峰值点处和残余强度点处试样各应变能与围压之间的关系

Fig. 9 Relationship between strain energy of the specimens and confining pressure at the peak point and residual strength points of the sample

(a) 总应变能 U ; (b) 可释放的弹性应变能 U^e ; (c) 耗散能 U^d

从能量角度分析,峰值前储存的可释放的弹性应变能越多,破坏后瞬间释放的能量越大,岩石直接被剪断,则表现为剪断破坏;而可释放的弹性应变能低,塑性变形中伴随着能量的耗散,压缩过程中无较大的弹性应变能释放,因此压缩以环向鼓胀为主,表现为塑性破坏。

综合上述分析可知:泥岩的强度主要依赖于弹性应变能的储存,而泥岩在长期的饱水软化和剪切流变作用下,能量主要以耗散能的形式消耗,从而导致岩石发生损伤变形而逐渐丧失强度,泥岩的强度衰减弱化,滑带弱化而发生剪切滑动。

3 结论

(1) 天然泥岩应力应变曲线为应变软化型,而饱

总应变能和弹性应变能增加是由于围压效应,耗散能增多是因为试样损伤变形而丧失强度的过程中产生的塑性变形变大,峰后高围压也使弹性应变能的释放率较低,致使试样经历较长时间的塑性流动破坏^[12]。随着围压的增大,试样在峰值强度时能量损伤值 U^d/U^e 有所提高,可见在高围压下岩样可承担更大的损伤变形,因而高围压可提高试样的强度^[13]。

从能量驱动试样破裂的本质来看,天然和饱水状态下试样耗散应变能的差异,必然会导致试验剪切破坏形式的不同。如图10所示,单轴压缩,由于加压板与试样接触面易滑动,试样的破坏形式表现为拉断破坏,形成多条近竖向拉裂缝,最终破坏^[14]。而在常规三轴压缩下,天然试样受围压影响表现为剪断破坏,为一条约45°的贯通剪切面(图中红色线条),而饱水试样受水和围压的影响表现为塑性破坏,试样有破裂纹的形成(图中黑色线条),但没有明显的贯通和滑移,当裂缝形成宏观裂缝后,试样的变形以环向膨胀为主。

水泥岩为典型的“弹-塑-蠕变”型,饱水状态对泥岩的抗压强度、变形破坏形式、围压效应具有显著的影响,饱水后的试样由于软化性其承载能力降低,对围压的敏感性降低,从而导致似软化系数随围压增加而减小。

(2) 单轴压缩时天然泥岩试样峰值点前吸收的应变能主要以可释放应变能的方式储存起来,峰值后主要用于破裂面的贯通、滑移和摩擦而转化为耗散能,而饱水泥岩总应变能大部分以塑性变形和超孔隙水压力形式耗散,说明饱水程度不同导致应变能的累积、转化过程和损伤变形机制及能量实时演化特征的差异。

(3) 常规三轴压缩条件下,试样的各应变能变化

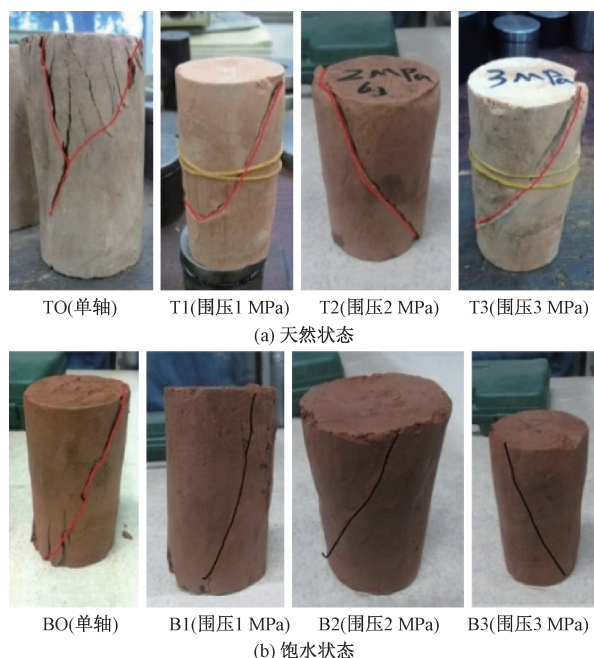


图 10 单轴和三轴压缩试样破坏形式

Fig. 10 Damage forms of uniaxial and triaxial compression test specimen

规律与单轴相似,且均大于单轴压缩,随围压的增加而增大;同围压下天然状态吸收的总应变能、峰前储存的弹性应变能均大于饱水状态试样的情况,耗散能却相反,究其原因饱水试样因热缩管和围压的侧限作用,致使加压过程耗散能以试样的塑性变形和超空隙水压力形式消散。

(4)试样的峰值点和残余点处各应变能具有围压效应,呈线性递增关系,天然状态总应变能和弹性应变能及其变化速率均大于饱水试样,而耗散能相反,说明饱水导致围压效应敏感性降低。单轴试样破坏形式为拉断破坏,天然状态试样储存弹性应变能高、释放快,表现为剪断破坏,而饱水状态能量以环向膨胀的塑性变形而消耗,表现为塑性破坏。

(5)能量转换是泥岩力学特征变化的内在本质,通过对能量的输入、积聚、耗散、释放的计算,分析输入的总应变能、可释放的弹性应变能和耗散能随应变的转化关系,可以从能量的角度合理地解释泥岩的损伤、变形和破坏的内在机制,并从能量的变化特征分析滑带的形成。

参考文献:

- [1] 郭永春,谢强,文江泉.我国红层分布特征和主要工程地质问题[J].水文地质工程地质,2007,33(6): 67-71. [GUO Y C, XIE Q, WEN J Q. Red beds

distribution and engineering geological problem in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 33(6): 67-71 (in Chinese)]

- [2] 何蕾,文宝萍.水在兰州地区红层风化泥岩抗剪强度中的综合效应[J].水文地质工程地质,2010,37(3): 48-52. [HE L, WEN B P. Effects of pore water in shear strength of weathered red mud stone in Lanzhou area, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 48-52. (in Chinese)]
- [3] 吴道祥,刘宏杰,王国强,等.红层软岩崩解性室内试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2): 4 173-4 179. [WU D X, LIU H Q, WANG G Q, et al. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Sup2): 4 173-4 179. (in Chinese)]
- [4] 张志沛,王芝银,彭惠.陕南泥岩三轴压缩蠕变试验及其数值模拟研究[J].水文地质工程地质,2011,38(1): 53-58. [ZHANG Z P, WANG Z Y, PENG H. Study on triaxial compression creep test and numerical simulation about mud rock in southern Shaanxi [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1): 53-58. (in Chinese)]
- [5] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等.饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1): 33-38. [ZHOU C Y, DENG Y M, TAN X S, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 33-38. (in Chinese)]
- [6] 吴钟腾,冯文凯,朱继良.云南省彝良县麻窝后山滑坡变形破坏机理离心机模拟试验[J].水文地质工程地质,2014,41(4): 87-91. [WU Z T, FENG W K, ZHU J L. Centrifuge simulation test on deformation mechanism of landslide in the Mawo Mountain in Yiliang County, Yunnan Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 87-91. (in Chinese)]
- [7] 谢和平,彭瑞东,鞠杨.岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21): 3 565-3 570. [XIE H P, PENG R D, JU Y. Energy dissipation of rock deformation and fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 565-3 570. (in Chinese)]

(下转第 78 页)

- [5] 郑颖人. 有限元极限分析在隧洞工程中的应用 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30 (2): 1127 - 1137. [ZHENG Y R. The application of FEM limit analysis in tunnel engineering [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30 (2): 1127 - 1137. (in Chinese)]
- [6] 孙文杰, 孔亮, 郑颖人, 等. 基于安全系数的地铁车站衬砌优化设计探讨 [J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8 (1): 116 - 121. [SUN W J, KONG L, ZHENG Y R, *et al.* Discussion on lining optimization design of subway station based on safety factor [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8 (1): 116 - 121. (in Chinese)]
- [7] 黄生文, 邓超荣, 王小明. 大跨径隧道二次衬砌优化分析 [J]. 中外公路, 2010, 8 (12): 201 - 204. [HUANG S W, DENG C R, WANG X M. Analysis of optimization of lining for the second time of large-span tunnel [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30 (1): 201 - 204. (in Chinese)]
- [8] 长江水利委员会长江科学院. GB 50218—2014 工程岩体分级标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. [Changjiang River Scientific Research Institute. GB 50218—2014 Standard for classification of Engineering rock mass [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)]
- [9] GB 50086—2011 岩土锚固与喷射混凝土支护工程技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011. [GB 50086—2011 Technical code for engineering of ground anchoring and shotcrete support [S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese)]
- [10] 铁道第二勘察设计院. TB1003—2005 铁路隧道设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. [The Second Railway Survey and Design Institute. TB1003—2005 Code for design of railway tunnel [S]. Beijing: China Railway Press, 2005. (in Chinese)]
- [11] Hoek E, Marinos P, Benissi M. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens Schist Formation [J]. Bull Engg Geol Env, 1998, 57 (2): 151 - 160.
- [12] 朱汉华, 尚岳全, 杨建辉, 等. 公路隧道设计与施工新法及其应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010: 5 - 17. [ZHU H H, SHANG Y Q, YANG J H, *et al.* Highway tunnel design and construction of the new law and its application [M]. Beijing: China Communications Press, 2010: 5 - 17. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华

(上接第 72 页)

- [8] Solecki R, Conant R J. Advanced Mechanics of Materials [M]. London: Oxford University, 2003.
- [9] 郭佳奇, 刘希亮, 乔春生. 自然与饱水状态下岩溶灰岩力学性质及能量机制试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (2): 296 - 308. [GUO J Q, LIU X L, QIAO C S. Experimental study of mechanical properties and energy mechanism of karst limestone under natural and saturated states [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (2): 296 - 308. (in Chinese)]
- [10] 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): 1 201 - 1 207. [ZHANG Z Z, GAO F. Research on nonlinear characteristics of rock energy evolution under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (6): 1 201 - 1 207. (in Chinese)]
- [11] 朱敏, 邓华锋, 周时, 等. 水岩作用下砂岩断裂韧度及抗拉强度的试验研究 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2012, 34 (5): 34 - 38. [ZHU M, DENG H F, ZHOU S, *et al.* Experimental research on fracture toughness and tensile strength of sandstone under water-rock interaction [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2012, 34 (5): 34 - 38. (in Chinese)]
- [12] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究 [J]. 工程力学, 2007, 24 (1): 136 - 142. [YANG S Q, XU W Y, SU C D. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (1): 136 - 142. (in Chinese)]
- [13] 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, 36 (6): 1 106 - 1 112. [CHENG X Z, HE J D, XIAO M L, *et al.* Dilatancy and energy properties of marble under triaxial unloading condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (6): 1 106 - 1 112. (in Chinese)]
- [14] 张倬元, 黄润秋, 王士天, 等. 工程地质分析原理 [M]. 北京: 地质出版社, 2009. [ZHANG Z Y, HUANG R Q, WANG S T, *et al.* Analysis principles of engineering geology [M]. Beijing: Geology Press House, 2009. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华