

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201910012

单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究

耿凯强, 李晓丽

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 砒砂岩水泥土受荷变形的过程中伴随着能量的积聚和耗散, 在能量的驱动下致使水泥土变形破坏。为了探寻单轴加载过程中砒砂岩水泥土的能量演化规律, 根据不同养护龄期和不同水泥掺量下砒砂岩水泥土在变形破坏过程中总能量、峰值点总能量、峰值点弹性应变能、峰值点耗散能的演化规律, 从能量的角度分析了龄期和水泥掺量对砒砂岩水泥土的影响。研究表明: 能量耗散与砒砂岩水泥土的强度衰减密切相关, 试样受荷过程中的损伤情况可以用耗散能的多少来反映, 砒砂岩水泥土单轴受压破坏的整个过程中, 破坏总能量和耗散能均呈“S”状增长, 弹性应变能呈先增加后减小的“凸”状趋势发展; 随水泥掺量的增加有效能比也随之增加, 不同龄期下各水泥掺量的砒砂岩水泥土都是以吸收弹性能为主, 而峰值点应变能可以代表水泥土试样的储能极限, 因此有效能比、峰值点应变能够很好地反映砒砂岩水泥土抵抗破坏的能力。通过利用能量分析原理对砒砂岩水泥土的变形过程进行研究, 可以打破以往仅仅利用传统的应力-应变强度来描述其破坏特征的思路, 为该类材料的受荷变形分析提供了新的方法和思路。

关键词: 砒砂岩; 水泥土; 单轴压缩; 能量机制; 耗散能

中图分类号: TU411.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0134-08

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression

GENG Kaiqiang, LI Xiaoli

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,
Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: During the process of deformation of the Pisha-sandstone cement soil under load, energy is accumulated and dissipated, and the cement soil is deformed and destroyed under the driving of energy. In order to explore the law of energy evolution of the Pisha-sandstone cement soil under uniaxial loading, according to the evolution law of total energy, peak point total energy, peak point elastic strain energy and peak point dissipative energy of Pisha-sandstone cement soil in the process of deformation and failure under different curing ages and different cement content, this paper analyzes the influence of age and cement content on the Pisha-sandstone cement soil from the angle of energy influence. The results show that the energy dissipation is closely related to the strength attenuation of the Pisha-sandstone cement soil. The damage of the specimen in the process of loading can be reflected by the amount of dissipated energy. As the cement content increases, the effective energy ratio also increases. At different ages, the Pisha-sandstone cement soil with different cement content mainly absorbs elastic energy, and the peak strain energy can represent the storage energy limit of cement soil sample. Therefore, the effective energy ratio and peak strain energy can well reflect the ability of the Pisha-sandstone cement soil to resist failure. By using the principle of energy analysis to study

收稿日期: 2019-12-23; 修订日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51869022)

第一作者: 耿凯强(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土环境力学研究。E-mail: 876669144@qq.com

通讯作者: 李晓丽(1969-), 女, 教授, 主要从事岩土环境工程及结构工程研究。E-mail: nd-lxl@163.com

the deformation process of the sandstone cement soil, it can break the previous idea of using only the traditional stress-strain strength to describe its failure characteristics, and provide new methods and ideas for the analysis of this type of material.

Keywords: Pisha-sandstone; cement soil; uniaxial compression; energy mechanism; dissipative energy

鄂尔多斯高原分布着大量的砒砂岩。近年建筑业发展进行了大量的土方开挖,开挖的土方再次用于基础、路基的回填,然而回填后的砒砂岩土体多裸露于表面。由于砒砂岩有机质含量极低,植物无法生长,且这种堆积的砒砂岩土体吸水性强,遇水如泥,极易被雨雪冲刷、掏蚀,给工程安全造成极大隐患^[1]。

砒砂岩干燥状态坚硬如石,遇水极易溃散,容易风化。利用砒砂岩制备成水泥土,具有经济环保、能够就近取材、施工方便、可以明显地改善工程特性等优点,被广泛应用于路基与地基的加固、边坡的支护和渠道衬砌等各个建筑领域^[2-3]。邬尚赞等^[4]通过添加水泥发现砒砂岩遇水溃散的性能得到了解决,而且提高了其强度。砒砂岩水泥土是按照一定的比例将砒砂岩、水泥、水混合而成的一种复合材料,这种复合材料的应力-应变具有明显的非线性特性,水泥土的变形破坏是内部微裂纹和微孔隙生成、扩展、贯通和滑移的过程,裂隙面的产生需要吸收能量,而发生的滑移摩擦需要耗散能量。谢和平等^[5-6]和孟庆彬等^[7]认为对于非均质地质材料的研究,仅仅依靠传统的应力-应变强度不能有效地描述其破坏特征,而像岩石这种非均质性材料的变形破坏过程是能量积聚和耗散的过程,从能量的角度可以很好地描述这种变形破坏过程。

国内外学者对岩石类材料的力学特性进行了大量试验,从能量演化的角度入手开展了岩石含能破坏问题的研究,并取得了丰硕的研究成果^[8-12]。张志镇等^[13]认为岩石受荷能量转化可以分为能量输入、能量积聚、能量耗散、能量释放 4 个过程。左建平等^[14]从能量角度出发,提出了脆性岩石的能量跌落系数,并研究了能量跌落系数与围压的关系。X. P. Zhou 等^[15]通过试验研究发现岩石临界应变能密度因子与加载速率的关系。杨圣奇等^[16]通过对不同尺寸的岩样进行单轴压缩试验,得出了尺寸对能量特征的影响规律。

对于水泥土而言,龄期 and 水泥掺量是影响强度的重要因素。阮波等^[17]通过不固结不排水三轴剪切试验,得到了龄期、水泥掺量与水泥土抗剪强度的关系。朱大宇^[18]、王许诺等^[19]通过室内试验得到了得到了水泥掺量和龄期与水泥土抗压强度的关系。杨有海等^[20]通过大量试验得到了水泥与粉煤灰掺入比、龄

期、有机质含量等因素对水泥搅拌饱和黄土强度的影响特性。赫文秀等^[21]研究了掺砂量和龄期对无侧限抗压强度的影响。徐超等^[22]通过对珊瑚礁砂水泥土在多种因素影响下的配比试验,发现影响水泥土抗压强度和抗渗性能的主要因素是水泥掺量。陈鑫等^[23]通过对不同尺寸、不同加载速率条件下的冻结水泥土进行单轴压缩试验,探讨了高径比、加载速率对水泥土应力应变曲线及强度的影响。目前很少有学者对水泥土的能量演化方面进行研究,仅仅停留在传统的应力-应变强度方面不能很好地诠释水泥土破坏变形过程。因此,有必要研究不同龄期和不同水泥掺量下水泥土的能量演化特性,为以后砒砂岩水泥土的工程性应用提供理论依据。

1 试样制备和试验方法

试验用土取自内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗的红色砒砂岩,将所取土样敲碎碾压自然风干后过 2.36 mm 筛备用,砒砂岩土样的粒径组成如表 1 所示,颗粒级配曲线如图 1 所示,通过对红色砒砂岩进行 XRD 物相分析(图 2),发现其主要矿物成分为石英、蒙脱石、斜长石、微斜长石、方解石、高岭石和云母,水泥选用冀东 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,水是普通的自来水。

表 1 红色砒砂岩的粒径组成

Table 1 Grain distribution of the red Pisha-Sandstone

粒径区间/ mm	<0.01	0.01 ~ 0.05	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.25	0.25 ~ 0.5	0.5 ~ 1	>1
百分含量/%	7.47	37.39	37.07	11.13	3.50	2.7	0.74

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)的有关规定,将砒砂岩、水泥、水混合搅拌均匀后,装入 $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱体试模中静力压实成型。从工程实际应用来看,当水泥掺量超过 20% 时并不经济,所以该试验以水泥掺量为 5%、10%、15%、20% 的试样进行研究,每组试样制备 3 个平行试块,计算的破坏总能量和峰值点各能量指标取 3 个试块的平均值。将脱模后的试块放入标准养护箱中分别养护 7,28,60 d。在养护龄期的前一天把试块放入 $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水中浸泡 24 h 进行饱水,水面要高于试

块 2.5 cm。使用 WDW-50 型万能试验机进行无侧限抗压强度测试,试验时以 2 mm/min 的加载速率将砒砂岩水泥土试样加载至破坏,试样加载时仪器自动实时记录其应力-应变参数。试验进行时提前将实验室内空调打开,将室温维持在 20 ℃ 之后方可进行加载试验,以此来保证或减少试验过程中试样内部与外界进行热交换。

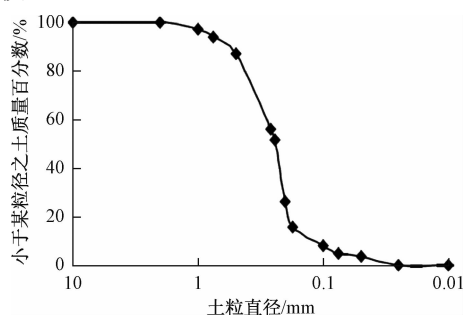


图 1 砒砂岩的级配曲线图

Fig.1 Garding curve of the Pisha-sandstone

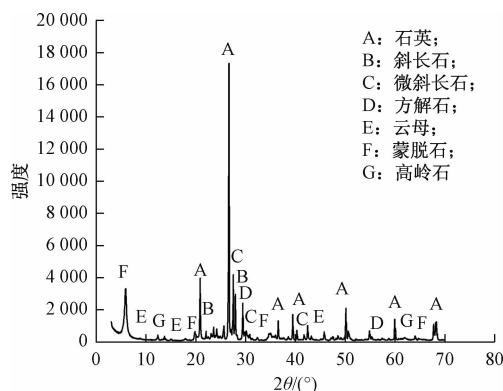


图 2 砒砂岩 X 射线衍射物相分析

Fig.2 X-ray diffraction phase analysis of the Pisha-sandstone

2 砒砂岩水泥土破坏过程的能量分析原理

假设砒砂岩水泥土试样加载过程是一个封闭系统,整个过程没有与外界进行热交换,根据热力学第一定律^[24-25],试验机对水泥土试样轴向压缩所做的功 U 为:

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

其中, U^e 为单位体积水泥土试样所储存的可释放弹性应变能,形成于水泥土试样单元的弹性变形阶段,当卸除外力后,该部分能量可以使试样变形得到一定程度的恢复。 U^d 为单位耗散能,用于形成水泥土试样单元内部损伤和塑性变形。图 3 为应力应变曲线下耗散应变能与可释放应变能之间的关系。

在主应力空间中试块单元各部分的能量和弹性应

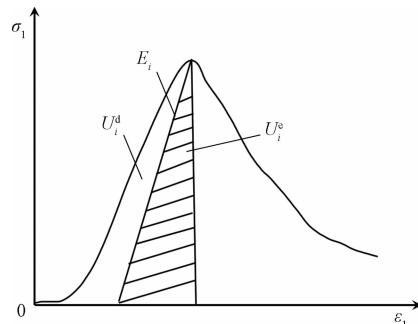


图 3 单位试块中耗散能与弹性应变能的量值关系

Fig.3 Relationship between the dissipative energy and the elastic strain energy in a unit test block

变可表示为^[26]:

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

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

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

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;

ν_i, E_i ——泊松比和卸载弹性模量。

而单轴压缩试验中不存在围压,整个加载过程只有轴向应力参与做功,所以总输入应变能 U 和弹性应变能 U^e 为:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (5)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e = \frac{1}{2 E_u} \sigma_1^2 \quad (6)$$

为了方便计算,式中的 E_u 取初始弹性模量来 E_0 代替,已有许多学者^[27-28]论证了 E_0 代替 E_u 的合理性。总输入应变能 U 为应力-应变曲线与应变轴所围成的面积,弹性应变能 U^e 即为图 3 三角形阴影部分的面积。则耗散能 U^d 可表示为:

$$U^d = U - U^e \quad (7)$$

3 砒砂岩水泥土能量演化规律

借助能量计算原理计算出砒砂岩水泥土变形破坏全过程中的总能量、弹性应变能和耗散能。以养护龄期 28 d 为例,不同水泥掺量下完整水泥土试样各能量指标与应力-应变曲线之间的关系如图 4 所示。

砒砂岩水泥土在单轴压缩过程中的能量耗散引起水泥土内部损伤,导致试块强度劣化直至丧失强度。从图 4 中可以看出,不同水泥掺量的砒砂岩水泥土单轴压缩试验得出的能量变化曲线都有相似的性质。在

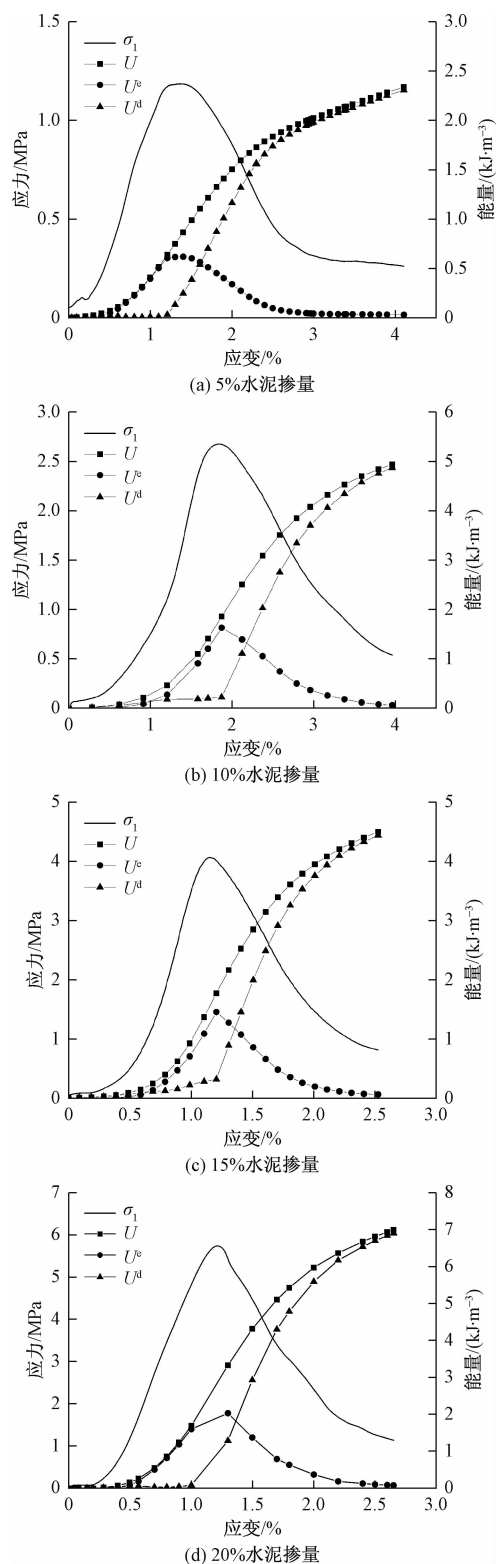


图4 砒砂岩水泥土能量转化曲线图

Fig. 4 Energy conversion curve of the Pisha-sandstone cement soil samples

应力-应变曲线的压密阶段和线弹性变形阶段,水泥土试样吸收的能量几乎都是以弹性应变能的形式储存起

来,而耗散能所占比例较少,这两个阶段的弹性变形是可逆的。当水泥土试样的应力处在屈服强度和峰值强度之间时,随着应力的增加,试样里面的微裂纹和微孔隙不断地产生并扩展(图5a、b),由于微裂纹的产生和扩展需要消耗能量,所以该阶段弹性应变能增速减缓,耗散能所占比例在增加。到达屈服平台时,弹性应变能存在一个短期的增加。而峰值过后,试样内部的弹性应变能骤降,耗散能所占比例逐步增加,这是因为试样内部微裂纹扩展并快速贯通(图5c),试样的承载能力快速降低,造成结构破坏(图5d)。当试样破坏后仍保持一定的残余强度,该阶段试样吸收的能量几乎都是以耗散能的形式存在。因此,能量耗散与砒砂岩水泥土的强度衰减密切相关,试样受荷过程中的损伤情况可以用耗散能的多少来反映。图5以水泥掺量为10%的砒砂岩水泥土为例,对试样压缩破坏过程进行展示。

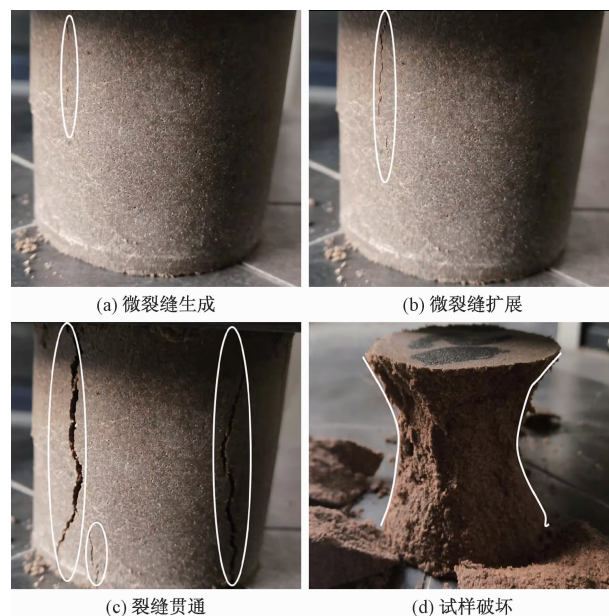


图5 试样加载破坏过程图

Fig. 5 Diagram showing the sample loading failure process

4 水泥掺量和龄期对能量演化的影响

4.1 水泥掺量对能量演化的影响

通过计算不同龄期和不同水泥掺量下砒砂岩水泥土的破坏总能量和峰值点各能量指标,发现砒砂岩水泥土的破坏总能量和峰值点各能量指标都随水泥掺量的增加呈线性增长趋势(图6)。

在单轴压缩条件下,龄期为7 d(图6a)时,4种水泥掺量的砒砂岩水泥土的破坏总能量平均值分别为

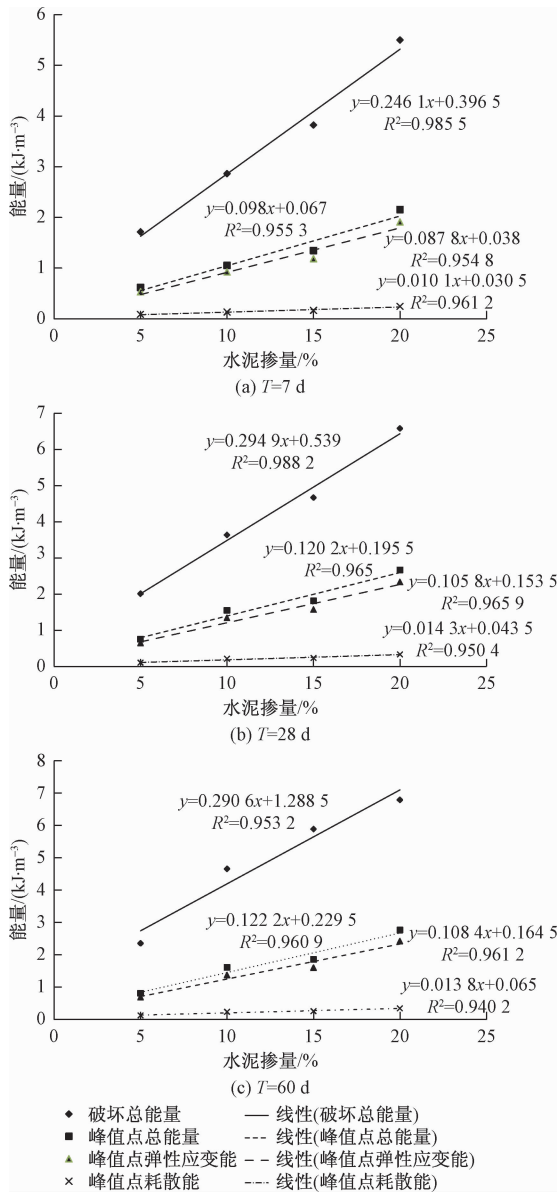


图6 破坏总能量和峰值点各能量指标随水泥掺量的变化曲线

Fig. 6 Destruction of total energy and peak point energy index with cement content

1.714, 2.862, 3.820 和 5.497 kJ/m³, 峰值点弹性应变能也随水泥掺量的增加呈增长的趋势上升, 水泥掺量为 10%、15%、20% 相比水泥掺量为 5% 的试样的峰值点弹性应变能增幅分别为 173.45%、222.6%、359.13%。龄期为 28 d (图 6b) 时, 水泥掺量为 5%、10%、15% 和 20% 的砒砂岩水泥土试样破坏总能量的平均值分别为 2.011, 3.639, 4.67 和 6.583 kJ/m³, 而峰值点弹性应变能也表现出随水泥掺量的增加而增大的趋势, 其他 3 种水泥掺量的砒砂岩水泥土相比水泥掺量为 5% 的试样的峰值点弹性应变能分别增加了 2.066, 2.426 和 3.594 倍。龄期为 60 d (图 6c) 时, 破

坏总能量和峰值点弹性应变能随水泥掺量的增加也呈现出同样的变化趋势, 水泥掺量为 10%、15%、20% 相比水泥掺量为 5% 试样的破坏总能量分别增加了 1.978, 2.5 和 2.883 倍, 而峰值点弹性应变能也分别增加了 1.99, 2.322 和 3.512 倍。从图 6 中的峰值点各能量及破坏总能量可以看出, 水泥掺量的增加可以显著地提高试件抵抗破坏的能力。

苏晓波等^[29]认为弹性能的积累容易造成岩石的冲击破坏, 并将弹性能与输入试样的总能的比值定义为有效能比。通过计算不同水泥掺量砒砂岩水泥土的峰值点有效能比, 得出龄期为 7 d 的 4 种水泥掺量的有效能比平均值分别为 0.861, 0.875, 0.879 和 0.886, 龄期为 28 d 的平均有效能比分别为 0.862, 0.865, 0.870 和 0.875, 龄期为 60 d 的平均有效能比分别为 0.853, 0.854, 0.863 和 0.876。说明不同龄期下各水泥掺量的砒砂岩水泥土都是以吸收弹性能为主, 而随水泥掺量的增加, 有效能比也随之增加。峰值点应变能够代表水泥土试样的储能极限, 能够很好地反映试样抵抗破坏的能力, 也可以看出水泥掺量对水泥土存在明显的能量强化作用。

随着水泥掺量的增加, 砒砂岩土颗粒周边越容易被水泥包裹, 水泥水化反应产生的胶结物越多, 其抵抗破坏的能力越明显, 单轴压缩过程中试件破坏吸收的总能量也就越多, 裂纹的产生、扩展需要吸收和消耗的能量也就越大, 并且裂隙面之间的摩擦需要耗散的能量也越大。

4.2 龄期对能量演化的影响

计算砒砂岩水泥土破坏总能量和峰值点各能量的指标可发现, 各水泥掺量砒砂岩水泥土的破坏总能量、峰值点各能量指标均随龄期的增加而增大 (图 7)。各水泥掺量的砒砂岩水泥土养护 28 d 时的破坏总能量比 7 d 分别增加了 1.173, 1.271, 1.223 和 1.198 倍, 而养护 60 d 比 7 d 分别增加 1.373, 1.625, 1.541 和 1.235 倍。

各水泥掺量的砒砂岩水泥土, 龄期为 7 d 时的峰值点总能量分别占龄期为 60 d 的 76.36%、65.55%、72.55%、77.91%, 28 d 占龄期 60 d 的 93.32%、96.76%、97.79%、96.67%。对于峰值点弹性应变能, 龄期 7 d 则占 60 d 的 77.07%、67.18%、73.88%、78.80%, 龄期 28 d 占 60 d 的 94.34%、97.96%、98.56%、96.53%。

对于耗散能而言, 龄期 28 d 比 7 d 时增加了 1.195, 1.614, 1.439 和 1.363 倍, 龄期 60 d 比 7 d 时增

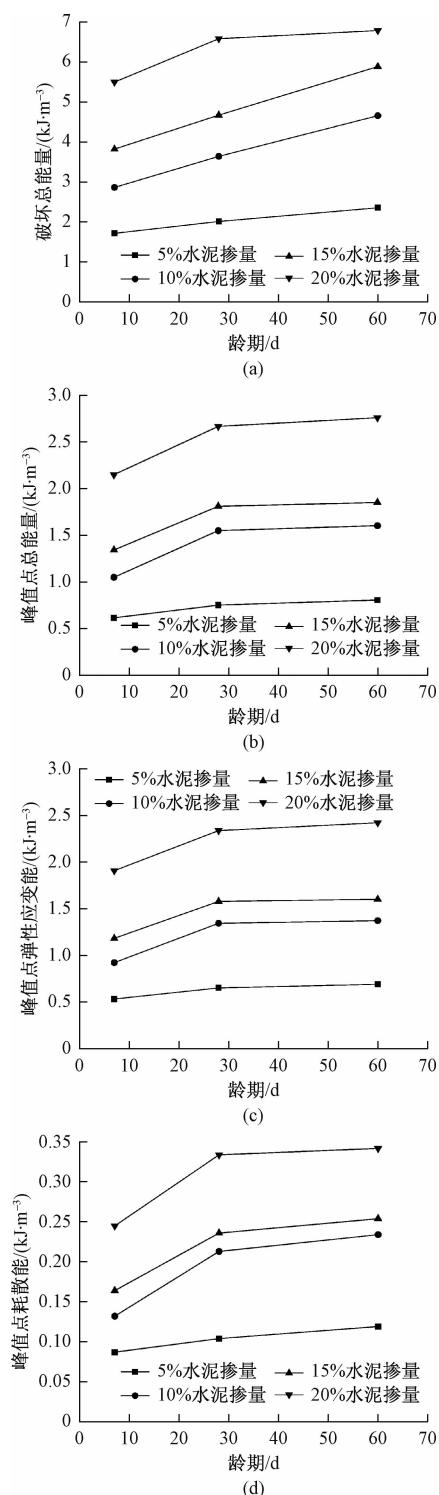


图7 破坏总能量和峰值点各能量指标随龄期的变化曲线

Fig.7 Destruction of total energy and peak point energy indicators as a function of age

加了 1.368, 1.773, 1.549 和 1.396 倍。由此可以得出, 水泥土的前期养护可较大幅度增加砒砂岩水泥土的破坏总能量和峰值点各能量指标, 而后期养护增加幅度减少。这是由于水泥的水化主要在前期进行反

应, 而后期水泥的水化反应仍在进行, 只是反应程度变得较为缓慢。

5 结论

(1) 不同水泥掺量、养护龄期下的砒砂岩水泥土在单轴压缩过程中, 其能量转化大致都可以分为 4 个过程: 能量输入、能量积聚、能量耗散、能量释放。在水泥土的压密阶段和线弹性变形阶段, 绝大部分能量以弹性应变能为主; 当水泥土处在屈服强度和峰值强度之间时, 弹性应变能增速减缓, 耗散能逐渐上升; 当强度达到峰值过后, 弹性应变能骤降, 耗散能逐步增加; 当应力到达残余强度时, 该阶段主要以耗散能形式存在, 因此能量耗散与砒砂岩水泥土的强度衰减密切相关, 试样受荷过程中的损伤情况可以用耗散能的多少来反映。

(2) 随着龄期的增加, 水泥土的破坏总能量和峰值点各能量指标均呈增长趋势, 随水泥掺量的增加有效能比也随之增加, 不同龄期下各水泥掺量的砒砂岩水泥土都是以吸收弹性能为主, 而峰值点应变能可以代表水泥土试样的储能极限, 因此有效能比、峰值点应变能够很好地反映砒砂岩水泥土抵抗破坏的能力。

参考文献 (References):

- [1] 耿凯强, 李晓丽. 冻融循环下红色砒砂岩水泥土力学性能试验研究 [J/OL]. 排灌机械工程学报: 1 - 8. [2019-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20191204.1433.003.html>. [GENG K Q, LI X L. Experimental study on mechanical properties of red Pisha-sandstone cement soil under freeze-thaw cycles [J/OL]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering: 1 - 8. [2019-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20191204.1433.003.html>. (in Chinese)]
- [2] 闫楠, 郑晨, 白晓宇, 等. 水泥土搅拌桩复合地基承载特性现场试验 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (19): 247 - 253. [YAN N, ZHENG C, BAI X Y, et al. Field test on bearing capacity of composite foundation of cement-soil mixing pile [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (19): 247 - 253. (in Chinese)]
- [3] 张经双, 段雪雷. 冻融循环下不同龄期水泥土损伤特性和能量耗散 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (7): 2144 - 2151. [ZHANG J S, DUAN X L. Effects of freeze-thaw cycles on damage characteristics and energy dissipation of soil-cement at different ages

- [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2144 – 2151. (in Chinese)]
- [4] 郭尚赞, 李晓丽, 常平, 等. 鄂尔多斯红色砒砂岩干湿循环作用下力学性能试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(7): 625 – 631. [WU S Y, LI X L, CHANG P, et al. Experimental study on mechanical properties of red Pisha-sandstone under dry-wet cycles in Ordos[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(7): 625 – 631. (in Chinese)]
- [5] 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): 3565 – 3570. [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): 3565 – 3570. (in Chinese)]
- [6] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2603 – 2608. [XIE H P, PENG R D, JU Y, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2603 – 2608. (in Chinese)]
- [7] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 应变速率和尺寸效应对岩石能量积聚与耗散影响的试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2386 – 2398. [MENG Q B, HAN L J, PU H, et al. Experimental on the effect of strain rate and size on the energy accumulation and dissipation of rock[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2386 – 2398. (in Chinese)]
- [8] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953 – 962. [ZHANG Z Z, GAO F. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953 – 962. (in Chinese)]
- [9] WENG L, WU Z J, LIU Q S, et al. Energy dissipation and dynamic fragmentation of dry and water-saturated siltstones under sub-zero temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 220: 106659.
- [10] LI X B, LOK T S, ZHAO J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(1): 21 – 39.
- [11] HAMIEL Y, LYAKHOVSKY V, BEN-ZION Y. The elastic strain energy of damaged solids with applications to non-linear deformation of crystalline rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 2011, 168(12): 2199 – 2210.
- [12] 黄达, 岑夺丰. 单轴静-动相继压缩下单裂隙岩样力学响应及能量耗散机制颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1926 – 1936. [HUANG D, CEN D F. Mechanical responses and energy dissipation mechanism of rock specimen with a single fissure under static and dynamic uniaxial compression using particle flow code simulations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1926 – 1936. (in Chinese)]
- [13] 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 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): 1198 – 1207. (in Chinese)]
- [14] 左建平, 黄亚明, 熊国军, 等. 脆性岩石破坏的能量跌落系数研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 321 – 327. [ZUO J P, HUANG Y M, XIONG G J, et al. Study of energy-drop coefficient of brittle rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 321 – 327. (in Chinese)]
- [15] ZHOU X P, YANG H Q, ZHANG Y X. Rate dependent critical strain energy density factor of Huanglong limestone[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 51(1): 57 – 61.
- [16] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 岩样单轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 固体力学学报, 2006, 27(2): 213 – 216. [YANG S Q, XU W Y, SU C D. Study on the deformation failure and energy properties of rock specimen in uniaxial compression[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(2): 213 – 216. (in Chinese)]
- [17] 阮波, 彭学先, 邓林飞. 水泥土抗剪强度参数试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 662 – 668. [RUAN B, PENG X X, DENG L F. Experimental study on shear strength parameters of cement-soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(4): 662 – 668. (in Chinese)]
- [18] 朱大宇. 水泥土力学性能的试验分析[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 291 – 296. [ZHU D Y. Test analysis on mechanical properties of soil-cement

- mixture[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 291–296. (in Chinese)]
- [19] 王许诺, 杨平, 鲍俊安, 等. 冻结水泥土无侧限抗压试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 79–83. [WANG X N, YANG P, BAO J A, et al. Test research on unconfined compressive strength of freezing cement soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 79–83. (in Chinese)]
- [20] 杨有海, 刘永河, 任新. 水泥搅拌饱和黄土强度影响因素试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 21–25. [YANG Y H, LIU Y H, REN X. Experimental research on the factors influencing strength of cement mixed saturated loess[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 21–25. (in Chinese)]
- [21] 赫文秀, 申向东. 掺砂水泥土的力学特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 392–396. [HE W X, SHEN X D. Mechanical behavior of soil-sand-cement admixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 1): 392–396. (in Chinese)]
- [22] 徐超, 李钊, 阳吉宝. 珊瑚礁砂水泥配比试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 70–74. [XU C, LI Z, YANG J B. Research on mixing proportion test of cemented coral reef sand [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 70–74. (in Chinese)]
- [23] 陈鑫, 张泽, 李东庆. 尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 74–82. [CHEN X, ZHANG Z, LI D Q. Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 74–82. (in Chinese)]
- [24] 许国安, 牛双建, 靖洪文, 等. 砂岩加卸载条件下能耗特征试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3611–3617. [XU G A, NIU S J, JING H W, et al. Experimental study of energy features of sandstone under loading and unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3611–3617. (in Chinese)]
- [25] 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 H P, JU Y, LI L Y. 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. (in Chinese)]
- [26] 李天斌, 陈子全, 陈国庆, 等. 不同含水率作用下砂岩的能量机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 229–236. [LI T B, CHEN Z Q, CHEN G Q, et al. An experimental study of energy mechanism of sandstone with different moisture contents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 2): 229–236. (in Chinese)]
- [27] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245–255. [HUANG D, HUANG R Q, ZHANG Y X. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 245–255. (in Chinese)]
- [28] 温韬, 唐辉明, 刘佑荣, 等. 不同围压下板岩三轴压缩过程能量及损伤分析[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 80–86. [WEN T, TANG H M, LIU Y R, et al. Energy and damage analysis of slate during triaxial compression under different confining pressures [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 80–86. (in Chinese)]
- [29] 苏晓波, 纪洪广, 裴峰, 等. 单轴压缩荷载下含黏结面花岗岩能量演化研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 161–167. [SU X B, JI H G, PEI F, et al. Study on energy evolution law of defective granite specimen under uniaxial compressive loading and unloading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 161–167. (in Chinese)]

编辑: 张明霞