

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0082-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.016

灰岩单轴抗压特性的浸水效应研究

曾朝辰¹, 白海波², 何世鑫²

(1. 河南龙宇能源股份有限公司, 河南 永城 476600; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为了考察软岩浸水后软化行为对单轴抗压特性的影响, 取河南陈四楼煤矿二₁煤底板太原组灰岩为试验材料, 在三种不同的加载速率下, 对不同浸水时间下试样进行单轴压缩试验, 得到关于灰岩抗压特性的浸水效应。试验结果表明: 在一定的加载速率下, 随浸水时间增加, 抗压强度和弹性模量逐渐减小, 且降低幅度越来越小; 随浸水时间增加, 试样逐渐由弹性变形转变为塑性变形, 但极限应变基本不变; 试样内部不可逆的损伤破坏加剧, 总应变能和弹性能与浸水时间呈指数关系, 耗散能随浸水时间的变化可以用线性关系拟合。

关键词: 灰岩; 单轴压缩; 浸水时间; 加载速率; 能量

中图分类号: TD322

文献标志码: A

Research on immersion effect of uniaxial compressive strength of limestone

ZENG Zhaochen¹, BAI Haibo², HE Shixin²

(1. Henan Longyu Energy Co., Ltd, Henan, Yongcheng, 476600, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Jiangsu, Xuzhou, 221008, China)

Abstract: In order to investigate the effect of soft rock softening behavior on uniaxial compressive properties, the limestone of Taiyuan formation of No. 1 coal floor in Chensilou Coal Mine, Henan Province is selected as experimental materials. Under three different loading rates, uniaxial compression tests were carried out on the samples under different soaking times, and the soaking effects on the compressive properties of limestone were obtained. The results of the study are as follows: at a certain loading rate, the compressive strength and elastic modulus decrease gradually with the increase of soaking time, and the decreasing extent is smaller and smaller. With the increase of soaking time, the specimen changes gradually from elastic deformation to plastic deformation, but the limit strain is basically unchanged. The total strain energy and elastic energy are exponentially reduced, and the variation of dissipation energy with immersion time can be fitted by linear relation.

Key words: limestone; uniaxial compression; soaking time; loading rate; energy.

地下煤矿开采中的水岩耦合现象是影响工程安全和稳定的重要问题。例如煤层顶底板饱水后导致围岩强度降低, 进而导致的突水问题不胜枚举。近年来研究表明, 对于煤层周围富含地下水的饱和岩体, 水的作用会引起岩石物理、化学、力学性质的改变, 引起强度和力学参数的弱化^[1-2]。关于水岩相互作用的研究主要有以下几个方面: 宏观和微观角

度分析岩石强度和孔隙率等随含水量、矿物成分、裂隙率等的变化^[3-7]; 岩石在水化学溶液中的损伤效应研究^[8-10]; 关于岩石饱水状态下的时间效应研究, 主要集中在对强度的影响方面^[11-13]。目前关于不同加载速率下的岩石浸水后力学特性的研究鲜有报道。本文以三种不同加载速率为组别, 对不同浸水时间下的石灰岩进行单轴压缩试验, 分析不同饱水状态

收稿日期: 2018-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51074166)

作者简介: 曾朝辰 (1975-), 男, 河南商丘人, 高级工程师, 主要从事煤矿安全生产管理工作。

对灰岩单轴抗压强度、极限应变、弹性模量以及能量的影响,研究对于煤层周围顶板、底板岩层含水状态下的安全性和稳定性评估以及水灾害防治具有一定的指导意义。

1 试样制备与试验方法

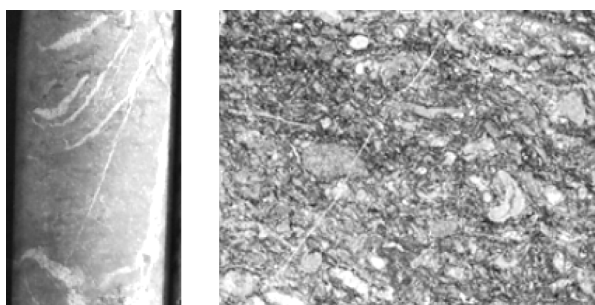
1.1 试样制备

试样均为灰岩,取自河南永城陈四楼煤矿区南翼地表下 150 m。灰岩结构致密、强度较高,矿物成分主要为方解石,按《水利水电工程岩石试验规程》制作成高 100 mm,直径 50 mm 圆柱形试样,如图 1 所示。

1.2 试验方法

本次试验以饱水状态为前提,首先将自然状态下的试样用真空抽气法进行饱和处理,然后分别在水中浸泡 0、30、60、90 d。仪器采用中国矿业大学 TATW-2000 岩石伺服三轴试验机,在不同的加载速率(0.005、0.01、0.05 mm/s)下进行单轴压缩试验。试样分为 4 组,每组 2 个,数据结果取平均值。

2 试验结果及分析



(a) 试样形状 (b) 灰岩显微镜下照片

图 1 试样规格和矿物成分

Fig.1 Sample size and mineral composition

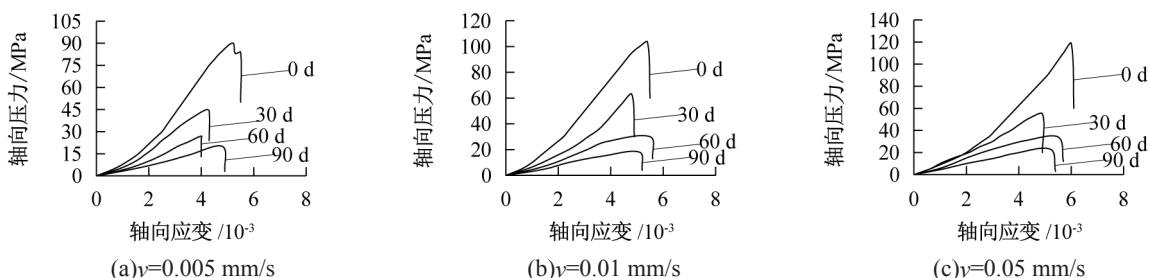


图 2 不同浸水时间的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of different immersion time

2.1 应力-应变曲线

图 2 为在一定的加载速率下,不同浸水时间的灰岩应力-应变关系的全过程曲线。可以看出,在相同的加载速率下,不同浸水时间试样的应力-应变曲线变化趋势大体一致,主要可以分为压密,弹性变形,塑性变形 3 个阶段。但是不同浸水时间下弹性变形和塑性变形所占的比重不同。短时间浸水条件下,试样主要为弹性变形,曲线斜率较大,随着浸水时间的延长,应变速率增大,曲线斜率逐渐减小。塑性变形成为主要变形。在一定程度上说明灰岩在饱水状态下,软化变形行为随浸水时间的增长逐渐增大。同时,在实验中所取得加载速率($v=0.005$, $v=0.01$, $v=0.05$ mm/s)下,应力应变曲线并没有出现明显得差异。

2.2 浸水时间对抗压强度的影响

将每组试样得到的轴向抗压强度(即应力-应变曲线峰值强度)取平均值,得到抗压强度与浸水时间的关系如图 3 所示。

图中可以看出,在本文采用的不同加载速率下,相同浸水时间下抗压强度的降低幅度基本相同,试验中每 30 d 的平均衰减变化率分别为 47.8%、40.1% 和 28.8%。说明在低速率加载条件下($v=0.005$, $v=0.01$, $v=0.05$ mm/s),加载速率对浸水效应的影响较小。另一方面,抗压强度随浸水时间的延长而衰减,

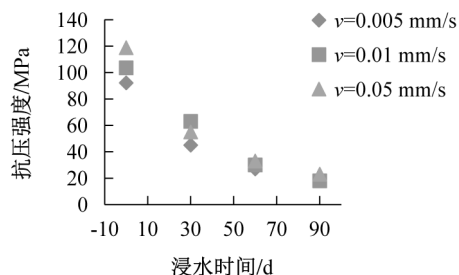


图 3 不同浸水时间下的抗压强度值

Fig.3 Compressive strength under different soaking time

衰减速度逐渐减小,从图中可以预测抗压强度最终会趋于稳定值。强度的变化可以用反粘聚力和内摩擦角两方面反映,由已有的试验研究结果表明,虽然随着浸水时间对不同岩石的摩擦角影响略有差异,但浸水后岩石的黏聚力 c 值将出现大幅下降,然后逐渐趋于稳定^[12-13],可以很好地解释灰岩单轴抗压强度的减小的原因。

2.3 浸水时间对极限应变影响

试验中极限应变取自单轴抗压强度对应的应变,反映试样最大变形程度。得到的平均极限应变与不同浸水时间关系图如图4所示。

从图4可以看出,在一定的加载速率下,极限应变值基本相同,没有明显的变化趋势。而且加载速率的影响也很微小。浸水时间延长会使灰岩的塑性变形不断增大,但由强度影响试验得知,灰岩抗压强度值是不断衰减的。综合影响的后果就是,虽然浸水时间较长的试样在加载过程中变形速度较快、变形程度较大,但在相对较小的荷载下即发生破坏,导致试样能发挥的塑性变形较小。在本试验中,最终试样破坏时的极限应变相差并不大。下面通过计算模量,进一步分析不同浸水时间对试样刚度的影响。

2.4 浸水时间对弹性模量影响

弹性模量是试验中试样的应力与应变之比值,是本文取应力-应变关系曲线的弹性段切线模量为弹性模量。图5为绘制的弹性模量关于浸水时间的柱状关系图。

可以看出,弹性模量随浸水时间呈减小趋势,模量每30 d的平均衰减变化率为36.5%、29.8%和20.2%,弹性模量参数反映了灰岩随浸水时间的本构特点。结合图4,虽然破坏应变没有太大变化,但试样的刚度是逐渐减小的。且在不同的加速速率下,变化趋势基本相同。

2.5 试样的能量特征

热力学定律表明,能量转化是物质物理过程的内在本质^[14],假设试样在单轴受力变形过程中与外界没有热交换。由热力学第一定律可知:

$$\begin{aligned} U &= U^d + U^e \\ U &= \int_0^e \sigma d\varepsilon \\ U^e &= \frac{1}{2} \sigma \varepsilon^e \\ U^d &= \int_0^e \sigma d\varepsilon - \frac{\sigma^2}{2E_u} \end{aligned}$$

式中, U 为轴向压力所做的功,即试样试验过程中产生的总应变能; U^d 为耗散应变能,促使岩石发生内部损伤和塑性变形; U^e 为储存的弹性应变能,在岩石卸载过程中可完全释放, E_u 为卸荷弹性模量,可用初始弹性模量 E_0 代替^[15]。以上各能量的关系可以用下图6表示。

依据上式,得到试样在试验过程中峰值应力点对应的能量值,见表1。

据表1中的数据,绘制 U 、 U^d 、 U^e 与浸水时间的关系曲线如图7所示。从图7可以看出,随着浸水时间的延长,总应变能和弹性应变能呈减小趋势,它们之间的关系可以用负指数关系拟合,耗散能和浸水时间的关系可以用线性关系拟合,拟合关系式如下表2所示。对于浸水0 d的饱水试样,在轴向受力过程中,外力功主要转化为弹性应变能,耗散

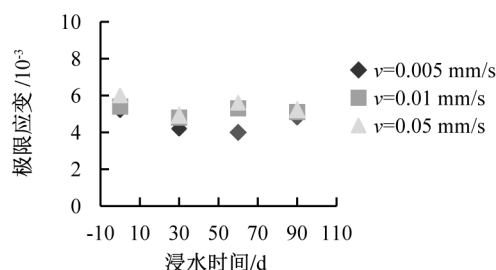


图4 不同浸水时间下极限应变值

Fig.4 Limit strain value under different immersion time

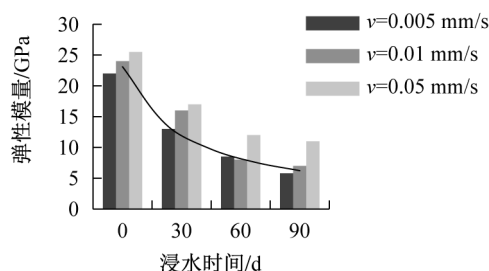


图5 不同浸水时间下的弹性模量

Fig.5 Elastic Modulus of different soaking time

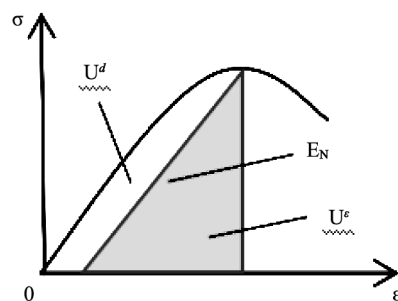


图6 耗散能和可释放应变能的关系

Fig.6 Relationship between dissipation energy and releasable strain energy

表 1 试验结果
Tab.1 Test results

浸水 时间 /d	0.005 mm/s			0.01 mm/s			0.05 mm/s		
	总应变能 $U/(kJ \cdot m^{-3})$	弹性能 $U^e/(kJ \cdot m^{-3})$	耗散能 $U^d/(kJ \cdot m^{-3})$	总应变能 $U/(kJ \cdot m^{-3})$	弹性能 $U^e/(kJ \cdot m^{-3})$	耗散能 $U^d/(kJ \cdot m^{-3})$	总应变能 $U/(kJ \cdot m^{-3})$	弹性能 $U^e/(kJ \cdot m^{-3})$	耗散能 $U^d/(kJ \cdot m^{-3})$
0	200.1	193.3	7.0	238.2	223.4	14.5	275.1	256.0	19.1
30	83.2	77.8	5.3	138.3	118.0	20.0	127.2	88.9	38.2
60	51.5	42.6	8.6	80.8	56.2	23.7	80.7	45.3	35.3
90	45.3	34.4	10.5	50.4	23.1	26.8	64.5	21.0	43.5

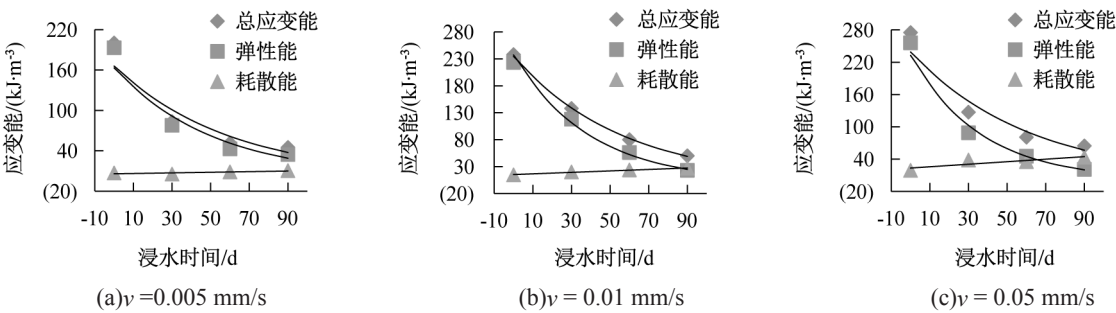


图 7 不同加载速率下应变能与浸水时间的关系
Fig.7 Relationship between strain energy and immersion time at different loading rates

表 2 数据拟合表
Tab.2 Data fitting

岩石能量	加载速率 $v/(mm \cdot s^{-1})$		
	0.005	0.01	0.05
总应变能 $U/(kJ \cdot m^{-3})$	$y = 165.82e^{-0.017x}$ $R^2 = 0.899\ 1$	$y = 163.06e^{-0.019x}$ $R^2 = 0.933$	$y = 0.045x + 5.835$ $R^2 = 0.643\ 7$
弹性能 $U^e/(kJ \cdot m^{-3})$	$y = 234.46e^{-0.017x}$ $R^2 = 0.998\ 8$	$y = 237.29e^{-0.025x}$ $R^2 = 0.994\ 5$	$y = 0.135x + 15.202$ $R^2 = 0.983\ 3$
耗散能 $U^d/(kJ \cdot m^{-3})$	$y = 238.88e^{-0.010x}$ $R^2 = 0.938\ 7$	$y = 232.65e^{-0.027x}$ $R^2 = 0.990\ 5$	$y = 0.235x + 23.492$ $R^2 = 0.746\ 3$

应变能所占比例最高只有 7.42%。在浸水时间从 0 d 增加到 90 d 的过程中,耗散应变能不断增大,甚至超过了弹性能 ($v=0.05\text{ mm/s}$, 90 d),这将导致岩石本身性质不断劣化,最终在破坏面上形成新的滑移或开裂面。试验中加载速率都相对较小,这可以近似反映开采煤体的顶底板静态荷载作用下,岩层饱水状态下随时间变化的能量变化特征。为岩石浸水效应的损伤理论提供理论参考。

3 结论

1) 在一定的加载速率下,随试样浸水时间增长,灰岩单轴压缩应力 - 应变关系的斜率逐渐减小,变形逐渐由弹性变形向塑性形转变。不同的加载速率

下,灰岩应力 - 应变关系随浸水时间的增长具有相似的变化规律。

2) 随试样浸水时间的增长,抗压强度值和弹性模量(刚度)逐渐减小,降低的幅度逐渐减小,最后趋于稳定。随试样浸水时间的增长,峰值应力处的极限应变基本没有变化。

3) 随浸水时间的延长,总应变能和弹性应变能呈负指数关系变化,释放能呈增长的线性关系变化。能量特征可以近似模拟地下水中饱水岩体在静态荷载下损伤变化特征。

参考文献:

[1] 周平根. 地下水与岩土介质相互作用的工程地质学研究 [J]. 地学前缘, 1996, 3(1-2): 176. (下转第 105 页)

参考文献:

- [1] 戴庆辉, 方俊元. 基于响应面法的液压机机架可靠性设计[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(1): 30-32.
 - [2] 刘忠伟, 刘少军, 邓英剑, 等. 巨型模锻水压机主工作缸的可靠性分析[J]. 锻压技术, 2007, 32(2): 82-86.
 - [3] 王正. 零部件与系统动态可靠性建模理论与方法[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
 - [4] PECHT M G, KAPUR K C, 康锐, 等. 可靠性工程基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
 - [5] 杨振民. 45 MN 快锻液压机本体关键部件结构设计与分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
 - [6] 宫恩祥, 黄铭科, 叶娟, 等. 基于 ANSYS 的液力透平轴可靠性分析[J]. 石油机械, 2011, 39(1): 39-42.
 - [7] 彭翠玲, 艾华宁, 刘青松, 等. 基于 ANSYS 的压力容器可靠性分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(1): 109-111.
 - [8] SOBEY A J, BLAKE J I R, SHENOI R A. Monte Carlo reliability analysis of tophat stiffened composite plate structures under out of plane loading[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 110: 41-49.
 - [9] 叶勇, 郝艳华, 张昌汉. 基于 ANSYS 的结构可靠性分析[J]. 机械工程与自动化, 2004 (6): 63-65.
 - [10] 张爱华, 任工昌. 基于 ANSYS 的概率设计的高速电主轴抗共振的可靠性分析[J]. 机械设计与制造, 2010 (7): 112-114.
 - [11] GOU Tong, LI Aiqun, MIAO Changqing. Monte Carlo numerical simulation and its application in probability analysis of long span bridges[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2005, 21(4): 469-473.
 - [12] 张洪才, 何波. 有限元分析: ANSYS13.0 从入门到实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第 85 页)
- [2] 汤连生, 周翠英. 渗透与水化学作用之受力岩体的破坏机理[J]. 中山大学学报, 1996, 35(6): 95-100.
 - [3] ERGULAR Z A, RUGLAR R, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rock[J]. International Journal of Rock Mechanics Sciences, 2009, (46): 355-370.
 - [4] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394-400.
 - [5] 孙强, 姜春露, 朱术云, 等. 饱水岩石水稳试验及力学特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 236-240.
 - [6] 张春会, 赵全胜. 饱水度对砂岩模量及强度影响的三轴试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 951-958.
 - [7] 郭军, 冯国瑞, 郭玉霞, 等. 饱和水煌斑岩单轴压缩力学特性变化及其微观机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 323-330.
 - [8] 王伟, 刘桃根, 吕军, 等. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(31): 3607-3617.
 - [9] 丁梧秀, 冯夏庭. 化学腐蚀下灰岩力学效应的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3571-3576.
 - [10] 刘建, 乔丽苹, 李鹏. 砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应 - 试验研究与本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 20-29.
 - [11] 滕宏伟, 任松, 姜德义, 等. 共和隧道页岩饱水软化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(21): 2657-2661.
 - [12] 夏冬, 袁雪涛. 浸水时间对饱水岩石抗剪强度参数影响的试验研究[J]. 2015, 35(12): 65-69.
 - [13] 金成, 王芳, 石崇. 泥页岩浸水力学特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 122-126.
 - [14] 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.
 - [15] 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.
- (责任编辑 王利君)