

钟祖良,罗玮坤,刘新荣,等.基于核磁共振技术的酸性环境下灰岩力学特性劣化试验[J].煤炭学报,2017,42(7):1740-1747.

doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1557

Zhong Zuliang, Luo Weikun, Liu Xinrong, et al. Experimental study on mechanical properties deterioration of limestone in acid environment based on nuclear magnetic resonance[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1740-1747. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1557

基于核磁共振技术的酸性环境下灰岩力学特性劣化试验

钟祖良^{1,2}, 罗玮坤^{1,2}, 刘新荣^{1,2}, 李皓^{1,2}, 陈结³, 胡翔翔^{1,2}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:为研究灰岩在酸性环境下宏观力学性质的劣化度及微观结构的损伤规律,以重庆某采区的灰岩为研究对象,对经酸性溶液(pH=3,5)和蒸馏水(pH=7)浸泡前后的试件进行核磁共振测量(NMR),并对浸泡后的试件进行三轴压缩试验,分析了灰岩浸泡前后孔隙度及力学参数的劣化规律。试验结果表明:酸性环境作用下,灰岩内部孔隙呈整体变大的趋势,pH=3时次生大孔隙的生成率较高;在pH=3,5,7条件下,试件孔隙度分别增加12.15%,6.67%,3.43%;随pH值的降低,灰岩的延性特征更明显,峰后应力降进一步减小;除弹性模量的劣化度呈二次减小外,其它力学参数(单轴峰值应力、泊松比、内摩擦角、黏聚力)均呈线性减小的规律。此外,酸性环境对灰岩变形参数的影响大于强度参数,而强度参数中,对黏聚力的影响大于内摩擦角。

关键词:酸性环境;核磁共振;力学特性;劣化试验;灰岩

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)07-1740-08

Experimental study on mechanical properties deterioration of limestone in acid environment based on nuclear magnetic resonance

ZHONG Zu-liang^{1,2}, LUO Wei-kun^{1,2}, LIU Xin-rong^{1,2}, LI Hao^{1,2}, CHEN Jie³, HU Xiang-xiang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to discuss the deterioration degree of macroscopic mechanic properties and damage rule of micro structure of limestone under the condition of acidic environment, the limestone of a mine roadway in Chongqing was selected for study. The limestone specimens were immersed in solutions of pH=3,5,7 at the same time and then measured by NMR system to obtain the change rule of porosity. Compared with the dried limestone, the deterioration rule of mechanical properties of pre-immersion specimens were obtained from conventional triaxial experiments. The results of NMR measurements show that the porosity of limestone have a tendency to become larger in acid environment with the high formation rate of secondary macroporosity in pH=3. Compared with the initial state, the porosity of specimens increases 12.15%, 6.67%, 3.43% respectively in pH=3,5,7. The results of mechanical test shows that the ductility of limestone is more obvious under the acidic conditions and a smaller stress drop after peak is observed with the increase of pH value. Except elastic modulus exhibits a secondary decrease, mechanical parameters (uniaxial peak stress, Pois-

收稿日期:2016-11-01 修回日期:2017-04-26 责任编辑:常琛

基金项目:重庆市基础与前沿研究计划资助项目(cstc2013jcyjA30005);国家自然科学基金资助项目(51108485)

作者简介:钟祖良(1980—),男,福建武平人,副教授,博士生导师。E-mail:haiou983@126.com

son's ratio, internal friction angle, cohesion) exhibits a linear decrease basically with the decrease of the pH value. In addition, the effect on deformation parameters is greater than the strength parameters of limestone with the deterioration of porosity under the acidic environment. And the influence degree of cohesive is greater than internal friction angle.

Key words: acidic environment; NMR; mechanical properties; deterioration test; limestone

在我国,以西南部及湘、鄂部分地区为代表的岩溶地区占国土总面积的1/3。在这些地区进行矿产开发、地下工程修建时经常涉及灰岩地层。地表水和地下水对石灰岩等易溶性岩石会产生以化学过程为主,机械过程为辅的破坏和改造作用^[1]。为此,学者们对化学腐蚀下灰岩的物理力学特性进行了一些研究。陈四利等^[2]通过对灰岩在化学腐蚀下单轴压缩破裂过程的细观力学试验,探讨了不同化学溶液对灰岩单轴抗压强度的腐蚀效应。丁梧秀等^[3]结合三轴压缩试验结果,分析了不同化学溶液对灰岩全应力-应变过程曲线各阶段的影响特征,获得了不同化学溶液对灰岩变形及强度腐蚀效应的影响规律。姚华彦^[4]开展了不同pH值及不同水化学溶液浸泡后的常规三轴试验,分析了受化学腐蚀作用的灰岩在不同围压下的变形及特性,发现酸性环境较中性及碱性环境对灰岩力学特性的影响大,并初步分析了化学溶液对灰岩力学性质影响的机制和规律。从前人的研究中可知,灰岩受酸性环境影响较大且针对灰岩在酸性环境下内部细观结构损伤情况的研究相对较少。然而,在含有硫铁矿的采区,由于煤炭的开采破坏了煤层原有的环境,提供了氧化还原态硫化物所需的氧,地下水的渗出与煤柱及煤层顶、底板接触后,促使煤层或者顶板中的还原态的硫化物氧化成硫酸,进而使这类采区的矿井水呈酸性^[5-6]。岩柱/墙、隧洞围岩在酸性环境的长期作用下,其稳定性将受到较大影响。本文拟通过室内试验手段研究酸性溶液浸泡对灰岩内部细观结构及力学特性的影响。

核磁共振技术是在无损条件下对完全饱和的岩石的弛豫时间 T_2 谱曲线和孔隙度进行测量,可对岩石的细观损伤进行定量化分析,广泛应用于储层岩石裂隙孔隙内液体流动特性研究等方面^[7-9]。近年来该技术逐渐应用于岩石孔隙结构测量,周科平等^[10]进行了一定围压、不同轴压下大理岩的核磁共振测试试验,测得大理岩在三轴压缩后的弛豫时间 T_2 谱分布和孔隙度,建立了孔隙度与损伤度之间的关系。朱和玲等^[11]也利用核磁共振检测技术,以测得的岩石孔隙度等参数为判据,以及核磁共振成像技术定量确定岩体的爆破损伤范围。

综上所述,本文以重庆地区某巷道内灰岩为研究对象,利用核磁共振技术NMR(Nuclear Magnetic Res-

onance)测量系统对酸性环境下灰岩浸泡前后的孔隙特征进行了测定,并对经中性和酸性水环境作用后的饱水灰岩试件进行室内单轴压缩和三轴压缩试验。以酸性环境作用前后试件孔隙度的相对劣化度为桥梁,对2种试验条件下岩溶灰岩力学性质的劣化规律进行了探讨。

1 试验原理及方案

1.1 核磁共振原理

核磁共振技术基于氢(H)核的磁性与外加磁场相互作用的特性进行。原子半数以上具有自旋,自旋的原子在静磁场中吸收射频而被极化,当射频终止后,被极化的原子吸收的射频脉冲会被释放出来,用特定的脉冲序列可以检测到1个磁化矢量的衰减信号,信号大小与氢(H)核的数量成正比,其中横向磁化矢量的衰减时间即为 T_2 时间。

岩石孔隙中的流体存在3种弛豫机制,即自由弛豫、表面弛豫和扩散弛豫。其中,自由弛豫和扩散弛豫与表面弛豫相比非常小,因此,岩石的 T_2 弛豫由表面弛豫决定,即

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_2'} \quad (1)$$

而表面弛豫和介质的表面积有关,介质比表面(孔隙介质孔隙表面积 S 与孔隙体积 V 之比)越大,弛豫越强,反之亦然。 T_2' 表示为

$$\frac{1}{T_2'} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)' \quad (2)$$

式中, ρ_2 为 T_2 表面弛豫强度; $(S/V)'$ 为孔隙表面积与流体体积的比值。

通常,弛豫时间 T_2 越小,孔隙的尺寸越小,测得的 T_2 谱分布通过合理的换算可以得到岩样孔隙的尺寸分布,曲线与横轴围成的面积代表岩样的孔隙度^[12]。

1.2 矿物成分分析

在重庆某矿井巷道内取得岩样,为鲕粒微-粉晶结构,主要由方解石、生物碎屑、石英及金属矿物等组成。其矿物成分方解石为98.8%,生物碎屑为1%,石英偶见,金属矿物偶见。

1.3 试件制备及筛选

现场钻孔取芯后进行编号和密封处理,送至实验

室后严格按照标准^[13]对试样进行加工制样。根据室内试验要求,试样规格为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体,并将试件的两端磨平,使得不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm ,端面垂直于试样轴线,最大偏差超过 0.25° ,达到国际的技术要求。

针对岩样离散性较大的问题,本文采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室的 AniMR-150 核磁共振系统(图 1)对制得的灰岩试样进行核磁共振弛豫测量,以期选出初始孔隙度相近、 T_2 谱分布相似的试件。该系统的主磁场为 0.3 T ,试验温度为室温 $18\sim 22\text{ }^\circ\text{C}$ 。在进行 NMR 测试以前,利用真空饱和装置对制得的灰岩岩样在水中饱和 12 h ,然后持续浸泡 48 h 。所得部分 T_2 谱曲线如图 2 所示。

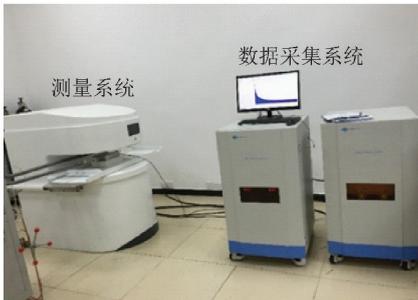


图 1 AniMR-150 核磁共振系统

Fig. 1 AniMR-150 NMR analysis system

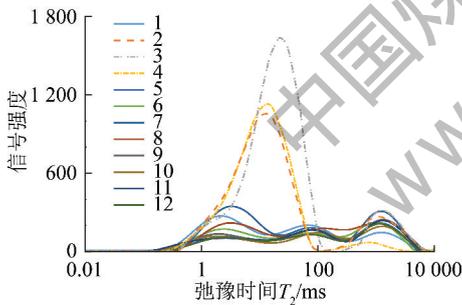


图 2 待挑选试件 T_2 谱曲线

Fig. 2 T_2 spectrum curves of specimens to be picked

由于图 2 中 2,3,4 号试件在第 1 个波峰和第 2 个波峰附近的信号强度明显大于其他试件,这意味着其孔隙分布和其余试件差异较大,因此,将这类试件剔除。

1.4 试验方案

通过实地多次测量,本文中取样处裂隙水的 pH 值约为 5。相关文献^[14]中煤矿的实测数据表明,酸性矿井水的 pH 值范围在 $2.5\sim 7$ 。因此,本文选用 pH=3,5 两种条件,开展灰岩在酸性环境下的微观结构及力学性质劣化试验研究。

对选出的 80 个试件分为 4 组,按组统一编号,编号 D 为干燥组,S 为中性环境即 pH=7 浸泡组,T 和 F

分别为 pH=3 和 pH=5 溶液浸泡后的试件组。

对 T 和 F 组试件分别在 pH=3 和 pH=5 的等体积 HNO_3 溶液中浸泡,每个试件对应的浸泡溶液为 300 mL ,并密封好。每隔 5 h 测一次 pH 值,并维持 pH 设定值,为了对比分析,3 组试件都浸泡 30 d 。由于整个浸泡过程中温度变化不大,可以不考虑温度对化学反应速度及岩石力学性质的影响^[3]。

对浸泡后的试件进行如下试验:

(1) 采用 AniMR-150 核磁共振系统对浸泡后的 3 组灰岩试件进行核磁共振弛豫测量。

(2) 采用 Rock 600-50 HT PLUS 型多功能岩石三轴测试系统(图 3)分别对 4 组试件(T, F, S 组以及干燥组)进行单轴试验。试验方法:设定轴向应变控制加载,加载位移变化率 0.002 mm/s ,沿轴向加载至试件破坏。

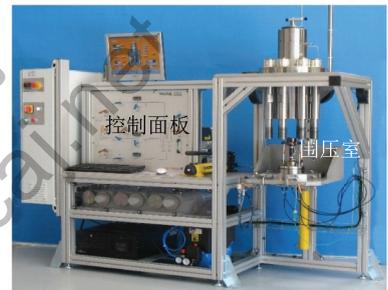


图 3 Rock 600-50 HT PLUS 型多功能岩石三轴测试系统

Fig. 3 Rock 600-50 HT PLUS multifunctional rock triaxial testing system

(3) 采用 Rock 600-50 HT PLUS 型多功能岩石三轴测试系统对 4 组试件进行常规三轴试验。结合实际采样区域的地应力分布,本文三轴压缩试验的围压选用 4 个应力级别:5,10,20,30 MPa。试验方法:按照静水压力条件以 0.05 MPa/s 的加载速率施加围压至预定值,然后采用位移控制,以 0.005 mm/s 的加载速率连续施加轴压至试件完全破坏。

2 试件浸泡前后核磁共振测量结果对比分析

2.1 弛豫时间 T_2 谱曲线特征分析

根据核磁共振基本原理,弛豫的速率取决于孔隙的表面与体积之比(S/V)¹,因此, T_2 谱曲线特征反映了试件的孔隙大小及分布。具体体现为,试件孔径尺寸与谱峰的位置相对应,小孔隙组分别对应较小的 T_2 值,大孔隙组对应较大的 T_2 值,且相应尺寸的孔径数量与峰面积的大小呈正相关。综上,核磁共振 T_2 谱分布能反映岩石的孔隙结构,因此本文采用横向弛豫时间 T_2 来分析岩石经不同酸性溶液浸泡前后孔隙大小和孔径分布的变化是可行的^[15]。

经 NMR 测量得不同 pH 值溶液浸泡下灰岩试件的 T_2 谱曲线如图 4 所示,相应的谱参数见表 1。

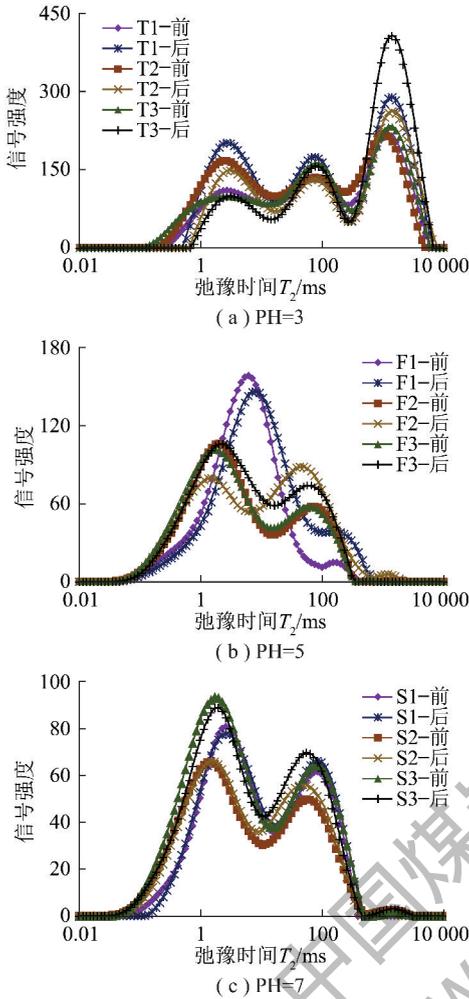


图 4 不同酸性酸性环境浸泡前后部分灰岩试样的 T_2 谱变化情况

Fig. 4 Change of T_2 spectrum curves of limestone specimens before and after soaking in different acidic environments

由图 4 看出,试样的 T_2 谱曲线整体有不同程度的右移,且由图 4(a), (b), (c) 对比可见, pH=3 下右移量最大, pH=5 次之, pH=7 下最小(几乎不移动)。说明,酸性环境以及中性作用下,岩石内部的孔隙尺寸均有整体变大的趋势,且变化程度随酸性条件的强化而增加。

3 组试验对应第 1 峰的信号均有不同程度的减弱,即所占谱面积的百分比减小,说明酸性环境主要作用于灰岩试件中已经存在的孔隙,使其向大孔隙转化。尤其是, pH=5 组中的 F2 试件含有部分微小裂隙,在酸性溶液浸泡后,小孔隙向大孔隙转化的更加明显。

由表 1 可知,在 pH=3 的试验组中,第 3 峰所占谱面积的百分比增大较多,在原来的基础上涨幅为

表 1 不同环境下灰岩试件的 T_2 谱参数
Table 1 T_2 spectrum parameters of limestone specimens under different conditions

作用环境	编号	峰总面积	各峰面积所占百分比/%		
			第 1 峰	第 2 峰	第 3 峰
pH=3	T1-前	7 513.44	28.87	31.25	39.88
	T1-后	8 210.72	23.85	25.45	50.70
	T2-前	8 721.08	38.81	25.83	35.36
	T2-后	9 882.71	30.08	24.72	45.20
	T3-前	8 131.03	29.37	33.29	37.34
	T3-后	8 995.89	17.22	24.36	58.42
pH=5	F1-前	3 409.15	96.91	3.04	0.05
	F1-后	3 620.55	89.91	10.01	0.09
	F2-前	3 128.45	71.23	28.63	0.14
	F2-后	3 267.09	47.84	51.15	1.01
	F3-前	3 225.70	70.78	29.07	0.15
	F3-后	3 326.23	67.33	32.61	0.06
pH=7	S1-前	2 575.52	63.10	36.80	0.10
	S1-后	2 606.41	60.33	39.37	0.30
	S2-前	2 350.58	60.91	38.26	0.83
	S2-后	2 418.69	56.17	43.43	0.40
	S3-前	3 225.41	66.01	33.64	0.35
	S3-后	3 335.43	58.89	40.34	0.77

10% ~ 20%, pH=5, 7 的两组则在第 2 峰增长的较为明显。说明 pH=3 条件下岩石中的次生大尺寸孔隙的增长较多。

2.2 浸泡前后灰岩试件孔隙度特征分析

谱面积及相应试件孔隙度的变化情况见表 2。

由表 2 可以看出,经 pH=7, 5, 3 的水溶液浸泡后,相对各自的初始孔隙度,灰岩试件的孔隙度的劣化程度平均为 3.43%, 6.67%, 12.15%, 呈指数增长的趋势。且初始孔隙度越大的岩石,其对应的孔隙的劣化程度也越大,比如同为 pH=3 作用环境下的 T2 试件与 T1 相比, T2 试件的初始孔隙率为 1.600%, 大于 T1 试件的 1.369%, 经过相同作用条件后,孔隙度的劣化度分别为 14.56% 和 10.23%。

综上所述,灰岩对酸性环境是比较敏感的,这与其矿物组成有关。酸性环境作用破坏了岩石颗粒或晶体间的连接,灰岩的微细观结构组织发生了改变,岩石孔隙度明显增大,其主要矿物(方解石)与 H^+ 的反应方程式如式(3)所示。而对于蒸馏水,则主要是通过润滑岩石内的颗粒界面使其连接力减小,并溶解裂隙中填充物质使孔隙、裂隙的形态发生改变来劣化灰岩的性质。

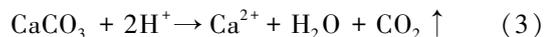


表2 不同环境浸泡前后灰岩试件的 T_2 谱面积以及孔隙度劣化情况Table 2 Deterioration of porosity and the change of T_2 spectrum before and after soaking in acidic environment

酸性环境	试件编号	T_2 谱面积		换算孔隙度/%		孔隙度劣化度/%	孔隙度平均劣化度/%
		前	后	前	后		
pH=3	T1	7 513	8 211	1.359	1.498	10.23	12.15
	T2	8 721	9 883	1.600	1.833	14.56	
	T3	8 131	8 996	1.482	1.655	11.67	
pH=5	F1	3 409	3 620	0.538	0.580	7.81	6.67
	F2	3 128	3 267	0.482	0.509	5.60	
	F3	3 226	3 391	0.501	0.534	6.59	
pH=7	S1	2 576	2 606	0.371	0.377	1.62	3.43
	S2	2 351	2 419	0.326	0.340	4.29	
	S3	3 225	3 335	0.501	0.523	4.39	

注:孔隙度劣化度计算公式 $\frac{n-n_0}{n_0} \times 100\%$; n_0 为材料初始孔隙度; n 为材料损伤后的孔隙度。

3 酸性环境对灰岩力学参数的影响

3.1 酸性环境对灰岩单轴压缩力学性质的影响

经 pH=3, pH=5, 蒸馏水浸泡后 (pH=7) 及干燥状态下的灰岩单轴压缩应力-应变曲线如图 5(a) 所示。典型试件破坏模式如图 5(b) 所示。

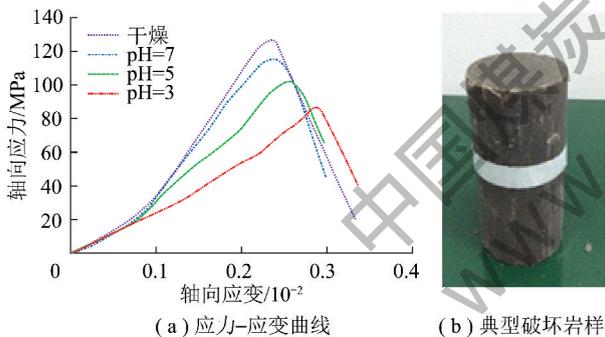


图5 不同作用环境下灰岩试件单轴压缩应力-应变曲线及破坏岩样

Fig. 5 Uniaxial compression stress-strain curve of limestones under different conditions and broken sample

由图5可知,不同pH值下的单轴压缩曲线具有相似的特征,各曲线在加载初期均呈现下凹型,且达到应力峰值后均迅速跌落。说明无论是干燥状态下或是经酸性环境作用后的岩石在单轴条件下均存在孔隙压密段,且峰后均有脆性破坏的特征。从图5中可以看出,在干燥条件,pH=3,5,7四种条件下峰值应力对应的峰值轴向应变分别为0.241%,0.248%,0.257%,0.293%,峰值应变以及总应变在酸性环境作用下均有逐渐增大的趋势。

表3给出了不同条件下灰岩试件的单轴峰值应力 σ 、弹性模量 E 和泊松比 ν 的大小。其中,弹性模量 E 和泊松比 ν 根据《水利水电工程试验规程》计算

得出^[16]。

表3 不同酸性环境作用后及干燥状态下灰岩试件的单轴压缩力学参数

Table 3 Mechanical parameters of uniaxial compression under different conditions

作用环境	峰值应力 σ/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
pH=3	84.6	34.21	0.36
pH=5	101.9	40.43	0.30
pH=7	113.1	65.50	0.26
干燥状态	125.3	77.96	0.21

相对于灰岩干燥条件下的力学参数值,酸性环境下力学参数的劣化度可定义为

$$S_n = \frac{|D_n - D_0|}{D_0} \times 100\% \quad (4)$$

其中, $n=3,5,7$ 分别代表 pH=3,5,7 的作用环境, $n=0$ 表示干燥状态; S_n 为各力学参数($E, \sigma, \nu, c, \varphi$)相对于干燥状态下的劣化度; D_n 为各环境下力学参数的绝对数值。

相对于干燥条件下灰岩试件的单轴峰值强度 σ 在不同作用环境条件 (pH=3,5,7) 下的劣化度分别为 32.48%, 18.68%, 9.74%; 弹性模量 E 为 56.12%, 48.14%, 15.98%, 71.43%; 泊松比 ν 分别为 42.86%, 23.81%。

由图6中单轴压缩试验力学参数相对于干燥状态下的劣化规律可知,单轴峰值强度 σ 和泊松比 ν 的劣化度与环境 pH 值呈线性相关,如式(5),(7); 弹性模量 E 与环境 pH 值呈二次相关,如式(6):

$$S_\sigma(n) = -5.685n + 48.725 (R^2 = 0.985) \quad (5)$$

$$S_E(n) = -3.0325n^2 + 20.29n + 22.543 (R^2 = 1) \quad (6)$$

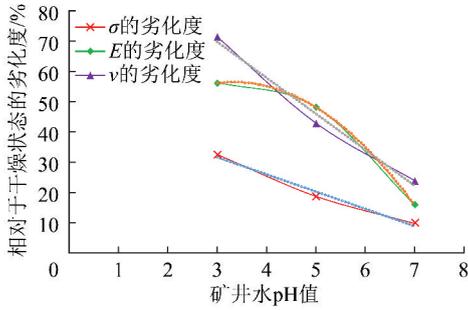


图 6 不同作用环境下单轴试验力学参数的劣化规律
Fig. 6 Deterioration rule of uniaxial compression mechanical parameters under different conditions

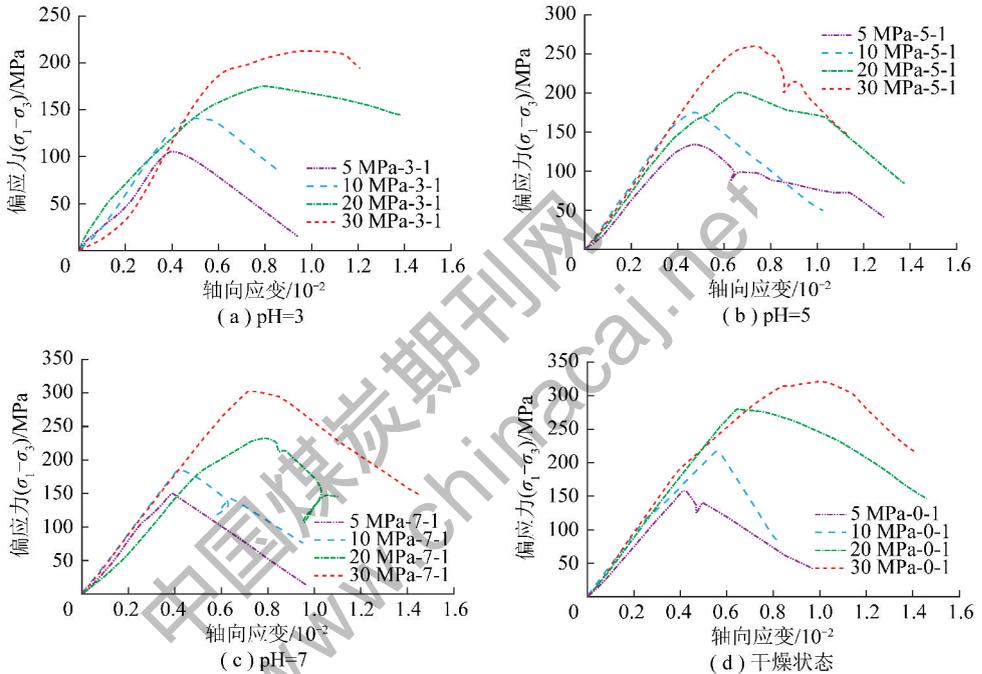


图 7 不同条件下灰岩试件的三轴压缩曲线

Fig. 7 Triaxial compression stress-strain curve of limestones under different conditions



图 8 三轴压缩典型破坏模式

Fig. 8 Typical failure mode of limestone in triaxial compression
峰值应变逐渐增大,如 10 MPa 下, pH=7,5,3 对应的峰值轴向应变分别为 0.416%, 0.480%, 0.560%, 其他围压下,也大致同样呈现了相同的趋势。特别地, pH=5 条件下,围压分别为 5,30 MPa, pH=7 条件下,

$$S_v(n) = -11.905n + 105.96 (R^2 = 0.9869) \quad (7)$$

3.2 酸性环境对灰岩三轴压缩力学参数的影响

对经不同酸性环境浸泡后的灰岩试件进行三轴压缩试验,得到在不同围压(5,10,20,30 MPa)条件下的三轴压缩曲线如图 7 所示。

试验过程中,干燥状态下的灰岩试件在加载过程中易发生脆性破坏,伴随破裂声,典型的破坏模式如图 8 所示。

图 7 的应力-应变曲线表明饱水以及经酸性溶液浸泡后的灰岩试件存在不同程度的软化,其变形有脆性转延性的趋势。相同围压下,随着 pH 值减小,

围压分别 10,20 MPa,以及干燥条件下围压为 5 MPa 时的轴向偏应力值出现了回落再上升现象,主要原因为岩石达到峰值强度后内部各裂缝贯通发生破坏,随着加载的持续,试块间发生咬合作用,使得试件的偏应力值有轻微的提升。

受酸性环境浸泡后的试件破坏较缓慢,脆性明显减弱,灰岩在低围压时就表现出峰后延性特征,且随着围压的增大,峰后应力降明显减小,表明其破坏后还具有较大承载和变形能力。其中以 pH=3 条件下的应力-应变曲线的延性特征最为明显。

需要注意的是,岩石的非均质性造成了其力学性质存在一定的差别,且由于其初始结构及矿物成分存在非均质性,酸性环境下水-岩相互作用也存在一定的离散性^[17]。

由图 7 容易得到不同条件(干燥, pH=3,5,7)

及围压(5, 10, 20, 30 MPa)条件下的峰值应力 σ' , 见表4。

表4 不同条件下灰岩三轴压缩试验峰值应力 σ'

Table 4 Triaxial compression strength values of limestone in different conditions MPa

围压	不同环境		
	pH=3	pH=5	天然状态(pH=7)
0	84.6	101.9	113.1
5	105.1	134.2	149.3
10	142.3	176.5	186.4
20	176.5	201.2	233.2
30	212.4	261.7	303.6

注:0 MPa 即为单轴压缩试验。

根据摩尔-库伦强度准则公式,可计算出不同酸性环境作用后灰岩试件的黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 见表5。

表5 不同条件下灰岩的黏聚力 c 和内摩擦角 φ

Table 5 Internal friction angle and cohesive under different condition

作用环境	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /(°)	平均孔隙度劣化/%
pH=3	5.38	28.34	12.15
pH=5	6.11	31.36	6.67
pH=7	6.95	34.99	3.43
干燥状态	7.44	36.81	

根据式(4)计算得黏聚力 c 和内摩擦角 φ 相对于灰岩干燥条件的劣化度如图9所示。

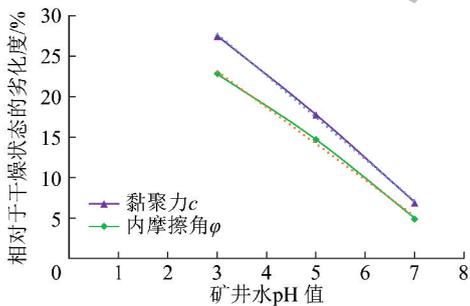


图9 不同作用环境灰岩试件的剪切强度参数的劣化规律

Fig. 9 Deterioration rule of shear mechanical parameters of limestone specimens under different condition

在 pH=3, 5, 7 的作用环境下,灰岩试件的黏聚力 c 相对于干燥状态的劣化度为 27.69%, 17.88%, 6.59%, 内摩擦角 φ 为 23.01%, 14.81%, 4.94%。由三轴试验结果(图9)表明,酸性环境对灰岩黏聚力的劣化程度要大于内摩擦角。两者均呈线性劣化,相对劣化度与矿井水 pH 值的之间的拟合公式如

式(8),(9)所示:

$$S_c(n) = -5.185n + 43.432 (R^2 = 0.999) \quad (8)$$

$$S_\varphi(n) = -4.5175n + 36.841 (R^2 = 0.9972) \quad (9)$$

3.3 酸性环境下灰岩孔隙度劣化度与力学参数劣化度之间的关系

图10为灰岩试件的孔隙度劣化度以及各个力学参数劣化度之间的关系。可以看出,酸性环境下,孔隙度增大后,对灰岩试件的变形参数(弹性模量 E , 泊松比 ν)影响要大于其强度参数。另外,酸性环境对黏聚力的劣化程度要大于对内摩擦角 φ 的影响。随着孔隙度劣化程度的增大,灰岩试件的各个力学参数的劣化度与孔隙度的劣化程度大致呈线性关系。

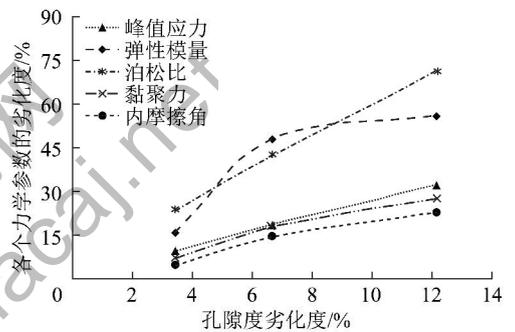


图10 酸性环境下灰岩各力学参数劣化度与孔隙度劣化度之间的关系

Fig. 10 Relationship between degradation degree of porosity and mechanical parameters of limestone in acidic environment

4 结 论

(1)在酸性环境作用下,灰岩试件的内部孔隙有整体变大的趋势。酸性越强,孔隙尺寸变化的范围越大,次生大尺寸孔隙的生成率越高;相对初始孔隙率,经 pH=3, 5, 7 作用后的灰岩试件的平均孔隙率的增长率分别为 12.15%, 6.67%, 3.43%;初始孔隙率大的岩石,其孔隙度的劣化程度也越大。

(2)酸性环境越强,灰岩试件的延性特征越明显;经 pH=3, 5, 7 作用后,除弹性模量随 pH 值增大呈二次减小,其余各力学参数相对于干燥条件下的劣化度呈线性减小的趋势;相对于干燥灰岩试件,弹性模量 E 为 56.12%, 48.18%, 15.98%;泊松比 ν 的劣化度依次为 71.43%, 42.86%, 23.81%;峰值强度 σ 的劣化度依次为 32.48%, 18.68%, 9.74%;黏聚力 c 的劣化度依次为 27.69%, 17.88%, 6.95%;内摩擦角 φ 的劣化度依次为 23.01%, 14.81%, 4.94%。

(3)由孔隙度劣化度和各个力学参数劣化度的

关系曲线可以看出,经酸性环境作用后,孔隙度增大,对灰岩试件的变形参数的影响要大于其对强度参数的影响,对黏聚力 c 的影响要大于对内摩擦角 φ 的影响。

参考文献(References):

- [1] 李利平,李术才,陈军,等.基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制机器应用研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1345-1355.
Li Liping, Li Shucai, Chen Jun, et al. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7):1345-1355.
- [2] 陈四利,冯夏庭,李邵军.岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J].岩石力学与工程学报,2003,22(4):547-551.
Chen Sili, Feng Xiating, Li Shaojun. Effects of chemical erosion on uniaxial compressive strength and meso-fracturing behaviors of rock [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4):547-551.
- [3] 丁梧秀,冯夏庭.化学腐蚀下灰岩力学效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3571-3576.
Ding Wuxiu, Feng Xiating. Testing study on mechanical effect for limestone under chemical erosion [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21):3571-3576.
- [4] 姚华彦,冯夏庭,崔强,等.化学侵蚀下脆硬性灰岩变形和强度特性的试验研究[J].岩土力学,2009,30(2):338-344.
Yao Huayan, Feng Xiating, Cui Qiang, et al. experimental study of effect of chemical corrosion on strength and deformation of hard brittle limestone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2):338-344.
- [5] Saikia Binoy K, Khound Kakoli, Sahu Om P, et al. Feasibility studies on cleaning of high sulfur coals by using ionic liquids [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(3):202-210.
- [6] 尹国勋,王宇,许华,等.煤矿酸性矿进水的形成及主要处理技术[J].环境科学与管理,2008,33(9):100-102.
Yin Guoxun, Wang Yu, Xu Hua, et al. The formation mechanism and major treatment technology of acidic mine water [J]. Environment Science and Management, 2008, 33(9):100-102.
- [7] Coates G, 肖立志, Prammer M. 核磁共振测井原理与应用[M].孟繁莹,译.北京:石油工业出版社,2007:6-7.
- [8] 石强,潘一山.煤体内部裂隙和流体通道分析的核磁共振成像方法研究[J].煤矿开采,2005,10(6):6-9.
Shi Qiang, Pan Yishan. A method of nuclear magnetic resonance imaging analyzed in the crack and fluid pass way of coal body [J]. Coal Mining, 2005, 10(6):6-9.
- [9] Ju Yiwen, Luxbacher Kray, Li Xianshi, et al. Micro-structural evolution and their effects on physical properties in different types of tectonically deformed coals [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3):364-375.
- [10] 周科平,胡振襄,高峰,等.基于核磁共振技术的大理岩三轴压缩损伤规律研究[J].岩土力学,2014,35(11):3117-3122.
Zhou Keping, Hu Zhenxiang, Gao Feng, et al. Study of marble damage laws under triaxial compression condition based on nuclear magnetic resonance technique [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11):3117-3122.
- [11] 朱和玲,周科平,张亚民,等.基于核磁共振技术的岩体爆破损伤试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1410-1416.
Zhu Heling, Zhou Keping, Zhang Yamin, et al. Experimental study of rock damage by blasting based on nuclear magnetic resonance technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7):1410-1416.
- [12] 李杰林.基于核磁共振技术的寒区岩石冻融损伤机理试验研究[D].长沙:中南大学,2012.
Li Jielin. Experiment study on deterioration mechanism of rock under the conditions of freezing-thawing cycles in cold regions based on NMR technology [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S].北京:中国计划出版社.
- [14] 简文彬.酸性矿井水 pH 值的回归分析模型[J].煤矿环境保护,1992,6(2):47-50.
- [15] 王萍,屈展.基于核磁共振的脆硬性泥页岩水化损伤演化研究[J].岩土力学,2015,36(3):687-693.
Wang Ping, Qu Zhan. NMR technology based hydration damage evolution of hard brittle shale [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3):687-693.
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [17] 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(自然科学版),1996,35(6):95-100.
Tang Liansheng, Zhou Cuiying. Analysis on mechanism of permeation and hydrochemical action resulting in failure of loaded rock mass [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1996, 35(6):95-100.