

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.02.017

化学腐蚀作用下层状复合岩石的性能研究^①

刘永胜, 邹家宇, 吴秋兰, 李 进

华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013

摘要: 选取红砂岩、青砂岩和大理岩为原材料, 制作成不同组合、不同界面层倾角的层状复合岩样, 并在 pH=2 和 pH=4 的酸性环境下养护 30 d. 将养护后的试件进行单轴抗压试验, 测定试件的抗压强度并观察其破坏模式. 试验结果表明: 经过酸性溶液的养护, 不同岩石组合、不同界面层倾角的复合层状岩石的单轴抗压强度均有一定的降低, 且酸性越强, 岩样抗压强度下降越大; 当界面层倾角增大时, 酸性环境的影响减小, 随着界面层倾角的增大, 复合岩石的抗压强度有较大幅度的降低, 且破坏模式发生改变.

关键词: 层状复合岩石; 酸性环境; 界面层; 破坏模式

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)02-0128-07

层状复合岩石在自然界普遍存在, 尤其是深部地下工程. 在长期的地幔活动中该岩石由于不同的构造环境形成了明显的层状构造^[1]. 无论从宏观还是从微观的角度来看, 界面可以说在自然岩石中无处不在, 界面问题已经成为研究岩石性能必须攻克的技术难关之一^[2-3]. 不同构造岩石之间形成的界面是影响岩石性能的重要因素, 在建设工程中, 导致复合岩石破坏的主要因素就是在施工过程中, 软弱界面层受人为扰动, 岩体的应力场发生改变, 从而导致界面层发生局部或整体的破坏, 进而影响整个岩体的性能. 因此, 对复合层状岩石的力学性能及裂纹扩展规律进行深入研究具有举足轻重的意义.

地下水在深部环境中对复合岩石的影响极为重要, 地下水是一种复杂溶液, 诸多岩石例如花岗岩、石灰岩等常见岩石中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子会被地下水中的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等酸性离子长期侵蚀和潜蚀^[4], 这种作用一般是不可逆的, 会影响岩石结构, 从而对岩石的性能产生一定影响^[5-7].

为研究不同层状复合岩石在深部地下环境的性能, 本文选取不同岩性岩石作为研究对象, 并考虑界面层的方位角对岩石性能的影响, 制作水平 0° 倾角、 30° 及 60° 倾角的层状复合岩石. 为模拟深部地下不同酸性环境, 配置 pH=2 及 pH=4 的酸性溶液对岩样进行为期 30 d 的养护, 养护完成后, 进行干燥处理, 并将处理后的岩样进行静态抗压试验, 来探究不同岩性组合、不同界面层倾角及不同养护条件对层状复合岩石性能的影响.

1 试件制作及养护

分别选取大理岩、红砂岩、青砂岩 3 种岩石为研究对象, 两两组合上述的 3 种岩石, 考虑到复合层状岩石在实际地质条件下的复杂情况, 分别设置了 0° 、 30° 、 60° 3 种不同的界面层倾角, 制作成直径 50 mm, 高 100 mm 的标准圆柱体试样, 制作好的部分岩石样本如图 1 所示.

^① 收稿日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51664014); 江西省教育厅科技项目(GJJ160474).

作者简介: 刘永胜(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩石动力学研究.

将制作好的岩石样本分别浸入准备好的 pH 值为 2 和 4 的酸性溶液中, 养护时间为 30 d, 对 pH=2 的酸性溶液每隔 24 h 测定一次 pH 值的变化, pH=4 的酸性溶液每隔 12 h 测定一次, 每次测定后再滴加高强度酸以确保溶液的 pH 值稳定在试验设定值, 试件化学腐蚀情况如图 2 所示。

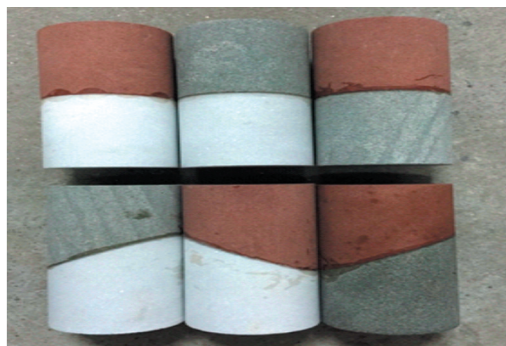


图 1 制作好的部分岩样



图 2 试件的养护

2 酸性腐蚀下层状岩石的物理化学性能

由于不同 pH 值的溶液酸性离子的浓度不同, 因此反应的速率亦有所不同。随着养护时间的增加, pH 值较低的溶液反应更为迅速, 但后期趋于稳定, 如图 3 所示。而 pH 值为 4 的溶液反应稍慢, 但后期同样趋于稳定, 最终其 pH 值稳定在 4 左右。图 3 给出了不同养护条件下 pH 值与测定次数的关系。

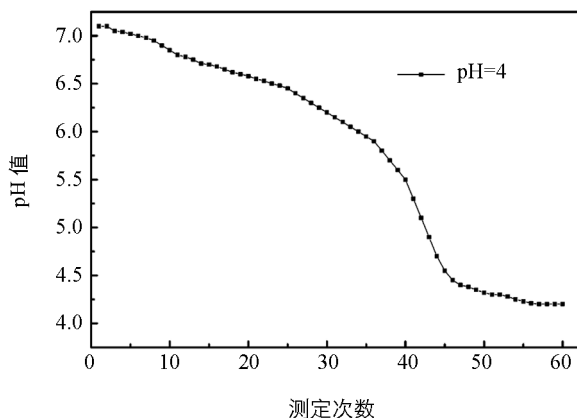
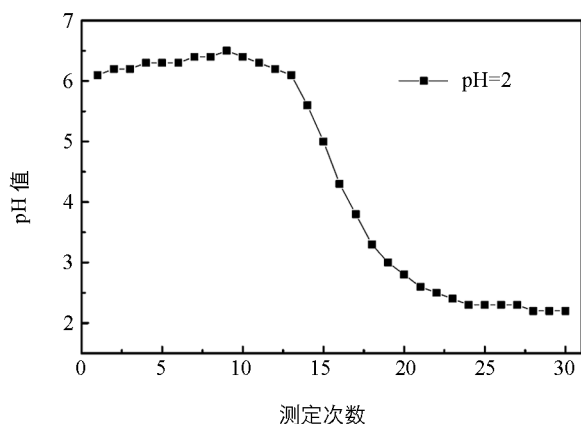


图 3 pH=2 和 pH=4 养护条件下 pH 值与测定次数的关系

由图 3 可知, 刚开始养护时, 岩样与酸性溶液反应剧烈, pH 值迅速变化, 说明酸性离子在反应中大量减少, 究其原因是因为刚开始养护时, 酸性离子破坏了岩石表皮, 在腐蚀岩石表皮的同时进入岩石内部与内部岩石进行反应消耗了大量酸性溶液中的酸性离子, 尤其是进入界面层中与界面层部分和界面层两侧的岩样发生了大面积的化学反应。其中岩石中大多数矿物的溶解反应可以用以下形式概括^[8]:



硅酸盐是地壳岩石最主要的造岩矿物, 岩石当中的硅酸盐与溶液中的氢离子发生反应得到了质地较为松散的氧化硅, 另一方面岩石中的金属成分也会溶解一部分进入酸性溶液当中, 从而使岩样质量发生改变。

pH=2 的溶液反应在第 24 d 逐渐趋于稳定, pH=4 的溶液反应在第 22 d 逐渐趋于稳定, 基本维持在略高于前一天的稳定状态, 证明此时的溶液与岩样的反应已经基本趋于稳定, 反应基本结束。因此可以认为, 酸性养护 30 d 后的岩样基本符合自然状态下酸性地下水中复合岩石的真实情况。

将养护后的岩样清洗后进行烘干处理, 观察岩样在不同酸性条件下的腐蚀情况。养护后的岩样如图 4 所示。



图 4 养护 30 d 后岩样对比图

可以看出此时的岩样表皮颜色变得有些暗淡, 且表皮与之前相比有些粗糙不平, 这是酸性离子腐蚀岩样并产生了新的化学物质所导致的。而且一些岩样表皮可以见到明显的破损剥落, 这与上面酸性离子破坏岩石表皮从而进入岩石内部而消耗大量的酸性离子的结论相吻合, 可以得知, 酸性环境下的复合层状岩石不仅表面遭到了腐蚀, 且内部同样被严重腐蚀。

将岩样清洗烘干后, 测得其养护后的质量变化。通过测量对比发现, 经过不同酸性溶液养护后的试件质量均有不同程度的下降。图 5 和图 6 分别给出了 pH=2 和 pH=4 酸性溶液养护条件下的质量损伤变化对比图。

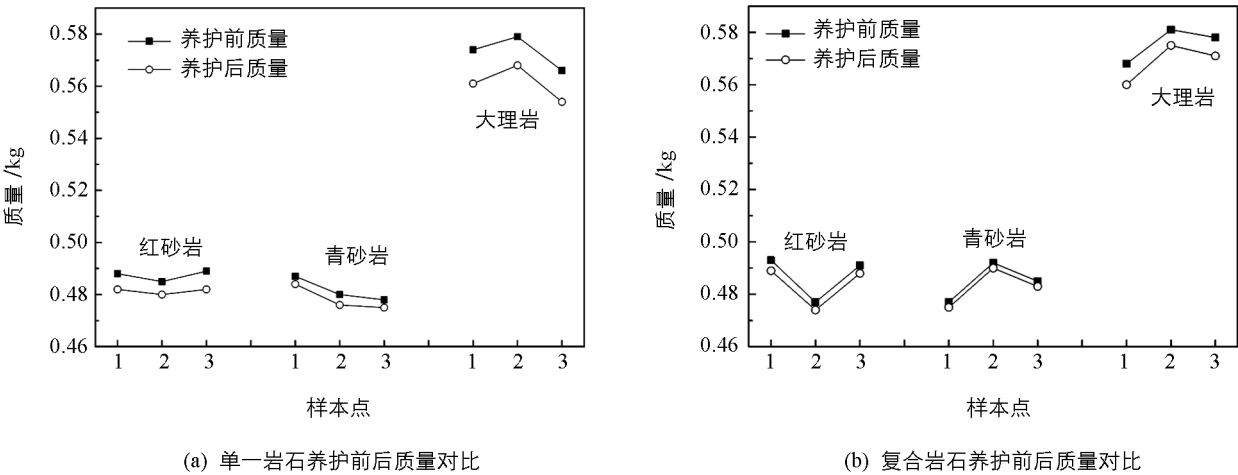


图 5 pH=2 养护条件下岩样质量损伤对比图

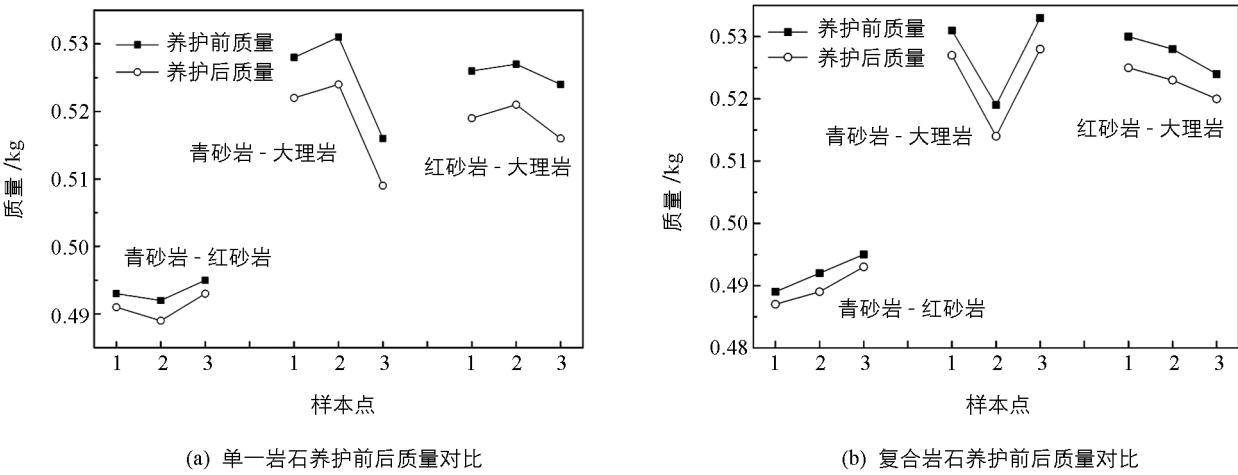


图 6 pH=4 养护条件下岩样质量损伤对比图

从图 5 和图 6 可以看出, 养护后的岩样质量均有不同程度下降, 其中单一岩石中红砂岩和青砂岩质量损伤不明显, 大理岩质量损伤较为严重, 同样复合层状岩石中, 不含大理岩的岩样质量损伤较少, 含大理岩的岩样损伤较为严重. 这说明质量的损伤和上述表征变化及岩样的反应速率规律保持一致, 大理岩表征变化明显, 反应较为剧烈, 故质量损失得较为严重. 对比 pH=2 和 pH=4 两种酸性条件下的养护, 可以发现 pH=2 条件下的岩样质量损伤均较 pH=4 时严重, 且大理石的质量损伤更加明显, 说明酸性溶液浓度的强弱对岩石的性能有较大的影响.

3 化学腐蚀下静态压缩试验及结果分析

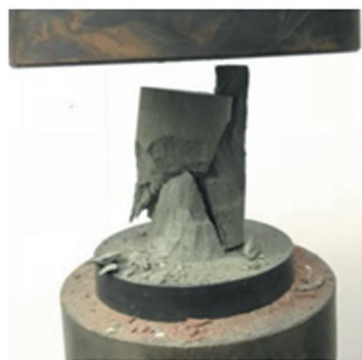
试验在华东交通大学实验室进行, 控制加载速率为 0.5 kN/s, 试验过程中连续加载至试件破坏, 并记录最大破坏荷载, 使用公式 $\sigma_c = P_{\max} / A$ 计算出对应的抗压强度, 试验测得试件抗压强度如表 1 所示, 试件的破坏模式如图 7 所示.

表 1 试件单轴抗压强度

单轴抗压强度/MPa	岩样组合	自然状态	pH=2	pH=4
单一岩样的抗压强度平均值	红砂岩	79.73	50.63	72.73
	青砂岩	67.73	52.96	63.42
	大理岩	130.34	64.96	90.74
界面层倾角为 0°的岩样抗压强度平均值	红砂岩-青砂岩	66.27	55.36	59.79
	红砂岩-大理岩	78.74	31.95	50.46
	青砂岩-大理岩	73.41	46.36	62.91
界面层倾角为 30°的岩样抗压强度平均值	红砂岩-青砂岩	66.1	55.09	69.28
	红砂岩-大理岩	58.89	44.76	72.82
	青砂岩-大理岩	85.39	39.94	67.83
界面层倾角为 60°的岩样抗压强度平均值	红砂岩-青砂岩	50.57	43.99	45.86
	红砂岩-大理岩	42.35	33.64	36.16
	青砂岩-大理岩	30.98	24.83	29.30

试验结果表明, 层状复合岩样强度普遍低于单一岩样, 并且与粘结界面层倾角有关, 这说明试样强度受界面层粘结的影响, 当界面层倾角较大时, 界面粘结强度是决定岩样强度的主要因素. 对比试验结果可以发现, 界面层倾角为 0°时, 复合岩石的单轴抗强度与岩石的组合密切相关. 在自然状态下, 大理岩的抗压强度最高, 红砂岩其次, 青砂岩最低. 因此自然状态下, 在倾角为 0°时, 红砂岩-大理岩组合单轴抗压强度最高, 青砂岩-大理岩其次, 而青砂岩-红砂岩组合单轴抗压强度最低. 当界面层倾角为 30°时, 3 种层状复合岩石的单轴抗压强度的试验数据离散度较大, 没有明显的规律. 当界面层倾角为 60°时, 相比于 0°的界面层倾角, 复合岩石的单轴抗压强度平均下降了 32.72%, 这是因为此时岩样的破坏发生在较为软弱的界面层, 而岩石部分并未达到其破坏应力.

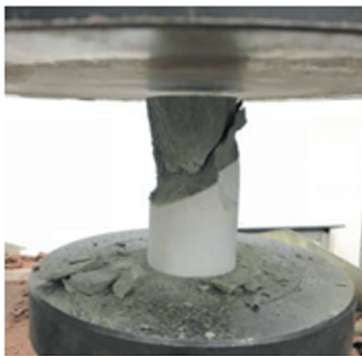
经过酸性溶液的腐蚀后, 大部分单一岩样的单轴抗压强度都有明显的下降. 其中, 在 pH 值为 4 的溶液中养护 30 d 后的大理岩单轴抗压强度下降了 30.38%, 红砂岩下降了 8.78%, 青砂岩下降了 6.36%. 在 pH 值为 2 的溶液中各个岩石单轴抗压强度分别下降了 50.16%, 36.50% 和 21.81%. 随着酸性的提高, 由大理岩为组成部分的复合岩石单轴抗压强度下降得最为明显. 可以看出, 虽然岩样的抗压强度与岩样的组合关系不大, 但是在 pH 值为 2 的溶液中养护的岩样相比于 pH 值为 4 的溶液中养护的岩样单轴抗压强度下降得更为明显. 值得一提的是, 界面层倾角为 60°时, 酸性环境对其单轴抗压强度的影响不大, 这主要是因为此时岩样的破坏模式发生了改变.



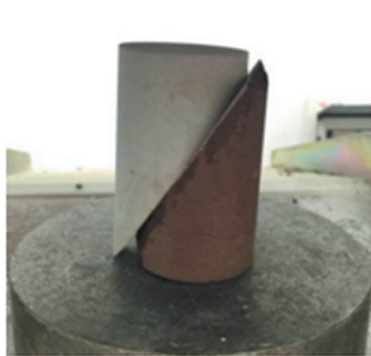
(a) 单一岩样破坏状态



(b) 倾角 0° 层状复合岩样破坏状态



(c) 倾角 30° 层状复合岩样破坏状态



(d) 倾角 60° 层状复合岩样破坏状态

图 7 试件破坏形态

4 层状岩石破坏的理论分析

本次试验岩样的破坏主要分为两种形式:

1) 脆性破坏: 脆性破坏是大多数岩石呈现的破坏形式, 岩石的质地往往较为坚硬, 这些坚硬的岩石在压力的作用下往往没有发生明显的形变就突然破坏了. 如图 7(a)、(b)、(c) 所示, 产生这种破坏形式的主要原因是岩石中裂隙的产生和迅速扩张的结果.

2) 弱界面层剪切破坏: 由于复合岩石中存在较为软弱的结构面, 岩体所受外力作用大小一旦超过界面层的剪切强度时, 软弱界面层两侧的岩石就会沿着界面层发生剪切破坏, 表现为两侧基岩顺着界面层滑动, 如图 7(d) 所示.

把界面层考虑为理想的弹塑性体, 屈服条件采用 Mohr-Coulomb 准则, 界面层与最大主应力 σ_1 的夹角为 β , 受 σ_1 、 σ_3 作用, 如图 8(a) 所示. 从图 8(b) 可知, 当 β 满足 $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ 时, 在如图所示的应力状态下, 作用在界面层上的法向及切向应力已满足屈服条件, 岩体将沿界面层发生剪切破坏; 当 $\beta < \beta_1$ 或 $\beta > \beta_2$ 时, 如果作用在岩石上的应力达到屈服条件, 则复合岩石将在岩石中发生破坏, 此时界面层对复合岩石整体强度影响不大. β_1 、 β_2 的大小与界面层的内摩擦角 φ_j 、粘聚力 c_j 以及岩体的应力状态有关, 根据图中的几何关系可以得到:

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2c_j \operatorname{ctg} \varphi_j + \sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \sin \varphi_j \right) + \frac{\varphi_j}{2} \quad (2)$$

$$\beta_2 = 90^\circ + \frac{\varphi_j}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2c_j \operatorname{ctg} \varphi_j + \sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \sin \varphi_j \right) \quad (3)$$

当界面层处于极限应力平衡状态时, 根据 Mohr-Coulomb 准则, 有:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2c_j + 2\sigma_3 \operatorname{tg} \varphi_j}{(1 - \operatorname{tg} \varphi_j c_j \operatorname{tg} \beta) \sin 2\beta} \quad (4)$$

上式中, c_j , φ_j 分别为界面层的粘结力与内摩擦角, 为已知常数. 假设试验中 σ_3 的大小为 0, 则上式中 σ_1 的大小则随着界面层倾角 β 的变化而变化. 所以, 可以将上式看作当 σ_3 为 0 时造成破坏的应力 σ_1 随界面层倾角 β 变化而变化的方程式. 当 $\beta \rightarrow 90^\circ$ 或 $\beta \rightarrow \varphi_j$ 时, $\sigma_1 \rightarrow \infty$. 表明当界面层平行于 σ_1 或界面层法线与 σ_1 成 φ_j 角时, 在 σ_3 的大小为 0 情况下, σ_1 可以无限增大, 界面层不至破坏. 但事实上, σ_1 不可能无限增大, 当 σ_1 达到某种特定的条件复合岩石材料就破坏了. 只有当界面层倾角 β 满足 $\varphi_j < \beta < 92^\circ$ 的条件下, 复合岩石才有可能沿着界面层发生剪切破坏, 并且发生在式(4)给出的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的情况, 当 β 不满足上述条件时, 破坏沿着岩石材料内部发生.

对比试验结果, 当界面层倾角 β 为 0° 时, 岩样破坏时的应力与强度较低的单一岩样接近, 破坏主要发生在强度较低的岩石中. 当界面层倾角 β 为 30° 时, 岩样的破坏形式与界面层倾角为 0° 的岩样接近, 且破坏时的应力也接近于倾角 0° 的岩样. 当界面层倾角 β 为 60° 时, 对比 0° 与 30° 倾角的岩样, 界面层为 60° 倾角的岩样抗压强度平均下降 32.72%, 破坏形式为弱界面层剪切破坏.

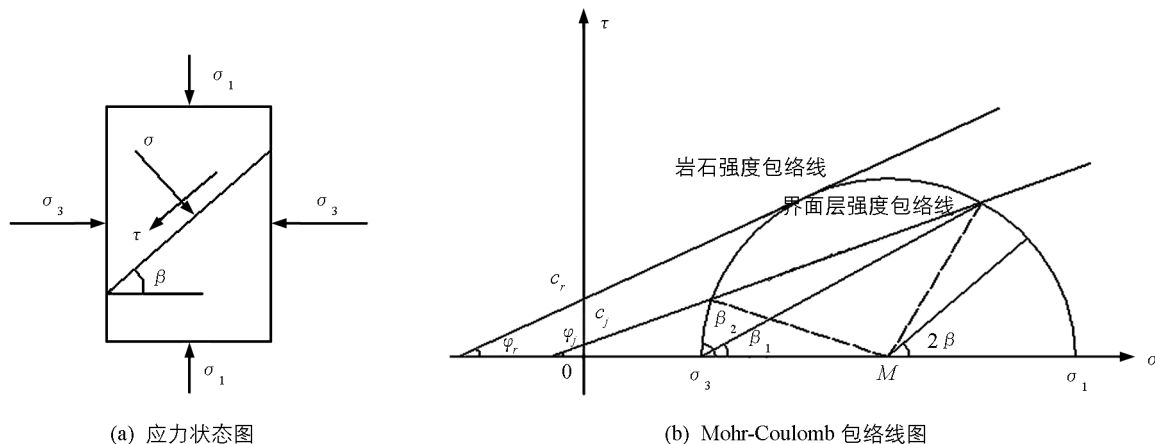


图 8 复合岩石的破坏准则

5 结 论

通过研究不同界面层倾角的层状复合岩石在不同浓度的酸性溶液中养护一个月后的抗压强度以及破坏形式, 主要研究内容及结论性成果如下:

- 1) 通过对红砂岩、大理岩、青砂岩取芯, 通过云石胶作为粘结剂, 制作了不同界面层倾角的标准圆柱体试样, 并在不同 pH 值的酸性条件下养护了 30 d.
- 2) 将制作好的岩样进行单轴抗压强度测试, 结果发现化学腐蚀下的层状复合岩石的力学性能随养护溶液的 pH 值的降低总体呈下降趋势.
- 3) 对酸性环境的敏感度最高的是大理岩, 其次为红砂岩, 最后为青砂岩. 大理岩的抗压强度经酸性溶液腐蚀后下降最大, 在 pH 为 2 时下降高达 50.16%, 而青砂岩则为 21.81%.
- 4) 通过观察各不同界面层倾角的层状复合岩石的单轴压缩破坏, 发现层状复合岩石的单轴压缩破坏形式随着界面层倾角的改变而改变, 当界面层倾角变大时, 主要破坏面越趋近于界面层. 当界面层倾角为 60° 时, 岩样在界面层处发生弱界面层剪切破坏.

参考文献:

- [1] 鲜学福. 层状岩体破坏机理 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [2] 刘 立, 邱贤德, 阎宗岭. 三维层状复合岩石损伤本构关系的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 621-625.
- [3] 刘 立, 朱文喜, 路军富, 等. 层状岩体损伤演化与应变关系的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2):

350—354.

[4] 王晓晓, 任 坤, 沈立成. 基于高分辨率数据的地下水化学变化研究——以重庆市雪玉洞地下河为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(2): 96—102.

[5] KARFAKIS M G, AKRAM M. Effects of Chemical Solutions on Rock Fracturing [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 1993, 30(7): 1253—1259.

[6] 刘永胜, 杨猛猛. 化学腐蚀下深部巷道高强围岩力学性能的实验研究 [J]. 煤炭工程, 2013, 45(3): 108—110.

[7] 刘永胜, 刘 旺, 董新玉. 化学腐蚀作用下岩石的动态性能及本构模型研究 [J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 72—75.

[8] 杨 慧, 曹 平, 江学良. 水-岩化学作用等效裂纹扩展细观力学模型 [J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2104—21.

Properties of Layered Composite Rock Under Chemical Corrosion

LIU Yong-sheng, ZOU Jia-yu, WU Qiu-lan, LI Jin

School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

Abstract: Red sandstone, bluish sandstone and marble were selected as raw materials to make layered composite rock samples with different combinations and different interfacial dip angles. After the maintenance of 30d in an acid environment ($\text{pH}=2$ or $\text{pH}=4$), uniaxial compressive tests were carried out on the cured specimens. The compressive strength of the specimens was measured, and the failure mode was observed. The test results demonstrated that after the curing with the acid solution, the uniaxial compressive strength of the composite rock with different rock combinations and different interfacial dip angles showed a certain decrease, and the stronger the acidity, the greater the decrease of the compressive strength of the rock sample. As the angle of the interfacial layer was increased, the influence of the acid environment was considerably reduced. The rock samples were affected by the inclination angle of the interfacial layer, and the compressive strength was greatly reduced, then the failure mode changed.

Key words: layered composite rock; acid environment; interfacial layer; failure mode

责任编辑 汤振金