

doi:10.3799/dqkx.2014.011

浸泡作用下砂岩断裂力学特性及劣化机理

邓华锋^{1,2}, 原先凡^{1,2}, 李建林^{1,2}, 罗 骞^{1,2}, 何 明^{1,2}

1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北宜昌 443002

2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北宜昌 443002

摘要: 岩石的断裂韧度对于定量评价工程的安全及稳定具有重要意义, 而岩石的破坏常常有水参与, 在库水长期浸泡作用下, 岩石的断裂力学特性将如何变化值得深入研究。基于此, 以库岸边坡典型砂岩为研究对象, 设计了长期浸泡试验, 并基于断裂韧度、变形破坏特征和微观结构变化进行综合分析。试验结果表明: (1) 浸泡作用下, 砂岩的断裂韧度具有明显的劣化趋势, 而且劣化幅度有一个先增大后减小的趋势, 浸泡 5~6 月后, 劣化趋势逐渐减缓; (2) 砂岩三点弯曲试验的 P-CMOD 关系曲线可以比较明显地分成 3 个阶段: 弹性阶段、屈服阶段、裂纹开展及破坏阶段, 随着浸泡时间的增长, 弹性阶段逐渐变短, 屈服阶段逐渐变长, 裂纹开展阶段曲线下降趋势逐渐变缓, 而且达到开裂峰值荷载对应的切口张开位移逐渐增大, 砂岩有逐渐“变软”趋势, 脆性逐渐减弱, 塑性逐渐增强; (3) 浸泡作用导致的润滑、软化和砂岩内部微观结构的变化, 特别是微观裂纹、裂隙的发展是导致砂岩断裂韧度及其他力学参数劣化的根本原因。研究成果对于把握库水长期浸泡作用下砂岩断裂力学特性具有重要的参考价值。

关键词: 长期浸泡; 水-岩作用; 三点弯曲; 断裂韧度; 工程地质。

中图分类号: TU443

文章编号: 1000-2383(2014)01-0108-07

收稿日期: 2013-06-21

Fracture Mechanics Characteristics and Deterioration Mechanism of Sandstone under Reservoir Immersion Interaction

Deng Huafeng^{1,2}, Yuan Xianfan^{1,2}, Li Jianlin^{1,2}, Luo Qian^{1,2}, He Ming^{1,2}

1. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China

2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: The fracture toughness of rock is of great significance in quantitative evaluation of engineering safety and stability. Rocks often destruct with water, so it is worthwhile to do study on the issue as how the rock fracture toughness and associated mechanical parameters change under long-term immersion of reservoir water. In this paper, a long-term immersion test is designed and carried out and a comprehensive analysis is done in aspects such as the fracture toughness, deformation failure characteristics and microstructure change characteristics. The results show that; (1) under the water-rock interaction, the fracture toughness has a significant deterioration trend, and the deterioration rate increased in prophase and lowered in anaphase; and the deterioration rate gradually becomes slow after 5 or 6 months' immersion. (2) The P-CMOD relation curves of the sandstone three-point bending test can be divided into three stages, namely elastic stage, yield stage, and crack development and damage phases; and with the immersion time, the elastic stage gradually becomes shorter, the yield stage gradually becomes longer, and the downward trend of crack development phase gradually becomes slow, meanwhile, the incision opening displacement which is corresponding to cracking peak load gradually increases. The sandstone brittleness gradually weakens, and plasticity gradually enhances. (3) Lubrication, softening and changes of sandstone's inner microscopic structure caused by water-rock interaction, especially the micro-cracks and the development of the cracks are the basic reasons which lead to the deterioration of the sandstone fracture toughness and other mechanical parameters. The research results facilitate the understanding of

基金项目: “973”计划前期研究专项课题(No.2012CB426502); 国家自然科学基金资助项目(No.51309141); 湖北省自然科学基金资助项目(No.2012FFB03805); 三峡大学土木与建筑学院优秀硕士学位论文培育项目资助(No.PY201314)。

作者简介: 邓华锋(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

the degradation law of sandstone fracture toughness under long-term reservoir water immersion.

Key words: long-term immersion; water-rock interaction; three-point bending; fracture toughness; engineering geology.

0 引言

岩石的破坏和断裂是密切相关的,在岩土工程中,无论是普通的岩石边坡开挖、隧洞爆破掘进,还是水压致裂等,都与岩石的断裂韧度密切相关,岩石的断裂韧度对于定量评价工程的安全及稳定性具有重要的意义(左建平,2010).较多学者对此也进行了大量的理论和试验研究,一方面对岩石的静态和动态断裂韧度测试方法进行了较多研究和比较(Ciccotti *et al.*,2000;Saadaoui *et al.*,2000;崔振东等,2010;倪敏等,2010;高远等,2012);另一方面,针对一些特殊的工程环境,如高渗压条件(刘涛影等,2012)、高温处理(Lau *et al.*,1991;朱合华等,2006)等一些特殊情况下的岩石断裂韧度也进行了相关的研究.岩石的破坏常常有水的参与,而且很多地质灾害的发生往往是水-岩作用导致的岩体力学性质劣化的结果.近年来,较多学者对水-岩作用下岩石的抗压强度、弹性模量、抗剪强度等物理、力学参数损伤展开了较多的研究(Laijtai *et al.*,1987;Li *et al.*,2003;刘新荣等,2008;邓华锋,2010).但针对水-岩作用下岩石断裂韧度效应的研究相对较少,主要有汤连生等(2002)(水、化学溶液浸泡 571 h(28 d)和 2 418 h(101 d)),朱凤贤和周翠英(2009)和汪亦显等(2010)(水溶液浸泡 30 d)、曹平等(2010)(水溶液浸泡 7 d)、Freiman(1982)、Feng *et al.*(2004)、沈照理等(2012)对水-岩物理、化学作用对岩石断裂指标的影响、亚临界裂纹扩展等方面进行了研究,取得了较多的研究成果.但这些研究中,浸泡溶液通常采用的是蒸馏水或者配置的各种酸性或者碱性化学溶液,与自然界实际的库水有较大差别,浸泡时间相对较短,而且较少地对断裂韧度试验的变形破坏特征进行分析,也较少地结合岩石微观结构的变化去分析断裂力学特性的劣化机理.

基于此,以三峡库区典型库岸边坡的砂岩为研究对象,设计了长期浸泡试验.浸泡时间设计 6 个月(180 d),尽量模拟现实状况,浸泡用水溶液取自取样岩石位置长江水,通过不同时期(30 d 为 1 期)砂岩的三点弯曲断裂韧度试验、纵波波速测试和微观结构分析,综合研究库水浸泡作用下砂岩的断裂韧度力学特性变化规律及其劣化机理.

1 试验方案设计

根据《水利水电工程岩石试验规程》(SL264-2001)(中华人民共和国行业标准编写组,2001)介绍的断裂韧度试验,采用直切口圆柱梁三点弯曲法,典型试样如图 1 所示.试样直径 50 mm,试件长度 200 mm,直切口取深度 21 mm 左右(规范要求切口深度为 0.35~0.50 倍岩样直径,实际深度以实际量测为准),切口宽度 1.0 mm(规范要求不得大于 1.5 mm).

对制备好的试样测试超声波纵波波速(邓华锋等,2011),剔除明显离散的试样,共选取 28 个试样,分成 7 组,其中,1 组试样用于测试浸泡前的断裂韧度和相关力学参数,作为对照分析的初始值,其余 6 组试样进行浸泡,每满 30 d,取出一组试样首先测试纵波波速,再进行断裂韧度试验.为了更好地把握试验规律,所有物理力学参数均在饱和状态下测定.

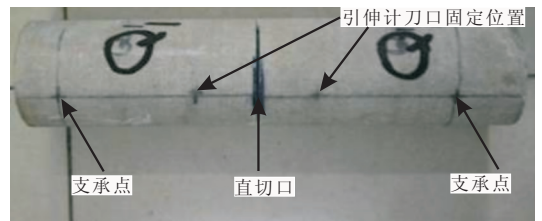


图 1 典型三点弯曲试样

Fig.1 Typical three-point bending sandstone samples

2 试验结果及分析

2.1 砂岩试样断裂韧度 K_{IC} 劣化规律分析

浸泡过程中,每个月(30 d)测得的砂岩试样断裂韧度 K_{IC} 、峰值荷载对应切口张开位移、超声波纵波波速如表 1 所示,为了更好地分析浸泡作用对砂岩断裂力学特性影响的时间效应,后面分析中把每个试验周期(30 d)称为“单次作用”.

库水浸泡作用下砂岩断裂韧度劣化曲线如图 2 所示,单次作用下砂岩断裂韧度劣化百分比的柱状图如图 3 所示,断裂韧度与纵波波速关系图如图 4 所示.

结合表 1 和图 2~4 可以看出:

(1)在库水浸泡过程中,各组试样的试验结果总体规律明显,除个别明显离散数据外,砂岩试验的断

表 1 断裂韧度 K_{IC} 试验结果

Table 1 Fracture toughness K_{IC} testing value

时间(月)	K_{IC} ($MPa \cdot m^{1/2}$)	K_{IC} 均值 ($MPa \cdot m^{1/2}$)	峰值荷载对应切口张开位移(mm)	纵波波速(m/s)
0	0.440	0.46	0.069	3 292
	0.490		0.065	3 318
	0.473		0.068	3 296
	0.437		0.071	3 180
1	0.473	0.45	0.070	3 284
	0.437		0.071	3 286
	0.461		0.071	3 344
	0.437		0.075	3 255
2	0.398	0.43	0.075	2 895
	0.445		0.074	3 141
	0.432		0.072	3 273
	0.208		0.088	2 738
3	0.341	0.39	0.078	2 811
	0.424		0.088	2 962
	0.424		0.082	3 236
	0.374		0.086	2 995
4	0.398	0.38	0.085	2 911
	0.390		0.095	2 895
	0.422		0.088	3 092
	0.328		0.093	2 758
5	0.336	0.35	0.103	2 805
	0.381		0.094	3 012
	0.324		0.090	2 705
	0.365		0.095	2 819
6	0.345	0.33	0.103	2 768
	0.328		0.098	2 611
	0.312		0.097	2 629
	0.347		0.101	2 806

裂韧度劣化趋势明显,而且具有明显的时间依赖性.浸泡 3 个月时断裂韧度劣化 15.18%,6 个月时,断裂韧度劣化 27.59%.

(2)库水浸泡对砂岩的断裂韧度损伤效应具有明显的非均匀性,单次作用下砂岩断裂韧度劣化量呈现一个先增大后减小的趋势(第 4 期个别数据偏大导致均值偏大),在试验的前期,水-岩作用呈现比较快的发展趋势,在试验后期,由于浸泡溶液离子浓度逐渐趋于平衡,水-岩物理、化学作用趋于缓慢,使得砂岩断裂力学的损伤效应趋于平缓.

(3)砂岩试样的断裂韧度劣化规律可以用函数关系式 $y = 0.462 - 0.014 \ln(1 + t^{4.681})$ (其中, t 为浸泡时间:月)较好的拟合,拟合曲线如图 2 所示.

(4)随着浸泡时间的增加,砂岩三点弯曲断裂峰值荷载对应切口张开位移逐渐增大,总体趋势明显,初始试样的为 0.065~0.071 mm 左右,3 个月后增加为 0.078~0.086 mm,6 个月后增加为 0.097~0.103 mm,说明在浸泡过程中,砂岩的脆性逐渐减

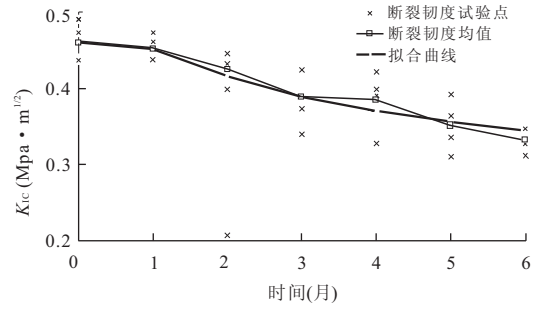


图 2 浸泡作用下砂岩断裂韧度劣化曲线

Fig. 2 Deterioration curves of fracture toughness of sandstone under immersion interaction

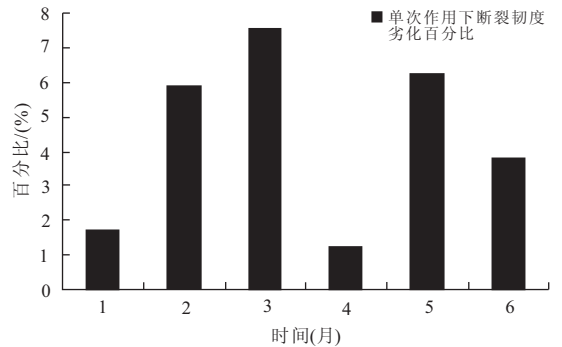


图 3 单次作用下砂岩断裂韧度劣化百分比

Fig. 3 Deterioration percentage of fracture toughness under single-time immersion interaction

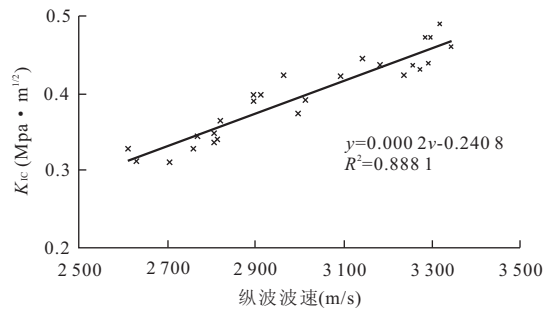


图 4 断裂韧度与纵波波速关系

Fig. 4 The relation graph of fracture toughness and longitudinal wave velocity

弱,塑性明显增强,这与以往类似水-岩作用(Lai-jtai *et al.*, 1987; LI *et al.*, 2003; 刘新荣等, 2008; 邓华锋, 2010)的变化规律是一致的.

(5)经过 6 个月的浸泡,砂岩试样纵波波速逐渐降低,从开始的 3 180~3 318 m/s 下降到 2 611~2 806 m/s 左右,降低了 20% 左右.而且,纵波波速和断裂韧度具有明显的相关性,可以近似用线性关系较好地描述.

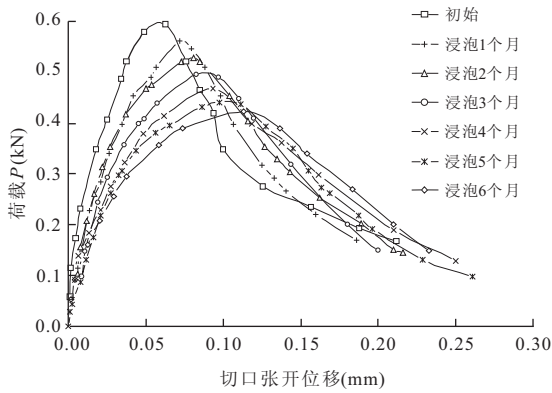


图 5 典型试样 P-CMOD 关系曲线

Fig.5 Typical P-CMOD curves of sandstone samples

2.2 砂岩试样断裂韧度变形破坏特征分析

各试验阶段典型试样的 P-CMOD 关系曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,各试验阶段砂岩三点弯曲断裂韧度试验的 P-CMOD 关系曲线形态基本一致,可以比较明显的分成 3 个阶段:

(1)弹性变形阶段,在竖向荷载施加前期,荷载与切口张开位移 CMOD 关系曲线表现为近似直线逐渐变为微弯,终点的荷载一般为峰值荷载的 2/3 左右。在这个阶段内,预制裂纹尖端处的拉应力小于砂岩的抗拉强度(I 型裂缝属于张开型),根据最大正应力判断,裂纹主要承受拉应力(于晓中,1991),岩石性质接近于弹性,所以称为弹性阶段。随着浸泡时间的增加,直线段逐渐变短。

(2)屈服阶段,随着荷载的增加,P-CMOD 关系曲线斜率逐渐减小直至接近水平,逐渐达到峰值荷载。在这个阶段内,预制裂纹尖端的微裂纹已经逐步扩展,切口张开位移发展较快,而且随着浸泡时间的增加,峰值荷载所对应切口张开位移逐渐增大,屈服阶段更加明显。

(3)裂纹开展和破坏阶段,P-CMOD 关系曲线由于试样沿切口处宏观裂纹开展而快速下降,裂纹沿着切槽平面迅速扩展直至贯穿,试样取下后用手稍用力即可沿切口掰断。在这个阶段,浸泡时间越短,曲线下降的趋势越明显,脆性特征明显;浸泡时间越长,曲线下降的趋势逐渐平缓,逐渐呈现一定的塑性特征。

3 砂岩断裂韧度劣化机理探讨

岩石是各种矿物晶体或颗粒相互粘结或胶结在一起的聚合物,存在着大量裂纹等缺陷,有宏观的,

也有微观的,而水是一种极性分子,是一种溶解能力很强的溶剂(梁祥济,1995;徐则民等,2004)。广义上讲,水-岩作用可以分为:物理、化学和力学作用(梁祥济,1995;徐则民等,2004),但是这 3 类作用通常是不可分割的,水-岩作用的效应通常是 3 类作用的综合结果。由于本文试验涉及水压力较小,由此引起的裂隙、孔隙水压变化较小,对砂岩断裂力学特性影响也较小,以下主要分析水-岩物理、化学作用对断裂力学特性的影响。

在浸泡前期,水分子沿着岩石中的微裂纹、孔隙或者矿物颗粒间接触面等逐渐向内部渗透,同时逐渐发生水-岩物理、化学作用,由于物理吸附是由于分子间的力引起的,其速率比较快,而化学吸附需要活化能,吸附速率很慢(涂光焯等,2000)。因此,这个阶段的水-岩化学作用对岩体的影响相对不是很明显,主要表现为润滑和软化作用下岩石的粘聚力和内摩擦角逐渐降低,而水对岩土介质的“弱化”作用早已被众多室内试验结果验证。

随着浸泡时间的增加,水-岩化学作用逐渐增强。经检测,浸泡试验之前,溶液中阴离子主要有硫酸根离子、氯离子和氟离子,浓度分别为 18.48 mg/L、8.61 mg/L、0.46 mg/L,阳离子主要有钙离子、钠离子、钾离子和镁离子,浓度分别为 43.30 mg/L、16.45 mg/L、3.17 mg/L、14.22 mg/L。试验所用砂岩由石英、长石与岩屑钙质胶结组成,根据前期试验经验(邓华锋,2010;邓华锋等,2012),长石矿物和钙质胶结物的溶解及反应过程中,钙离子、钠离子、钾离子等离子的浓度变化比较明显。因此,浸泡过程中,定期对浸泡溶液的 pH 值和这几种离子的浓度进行了检测,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,在浸泡过程中,浸泡溶液的 pH 值逐渐增加,但变化幅度较小。溶液中各离子浓度也逐渐增大,其中钠离子浓度先对变化幅度最大、

表 2 pH 值和离子浓度检测结果

Table 2 The detection results of pH value and ion concentration

浸泡时间(月)	pH 值	离子浓度(mg/L)		
		Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺
初始	7.26	43.30	16.45	3.17
1	7.51	50.88	18.57	3.48
2	7.75	53.52	20.78	3.79
3	7.94	54.01	22.40	4.04
4	8.11	55.43	23.39	4.17
5	8.27	56.10	24.48	4.26
6	8.29	56.68	24.84	4.28

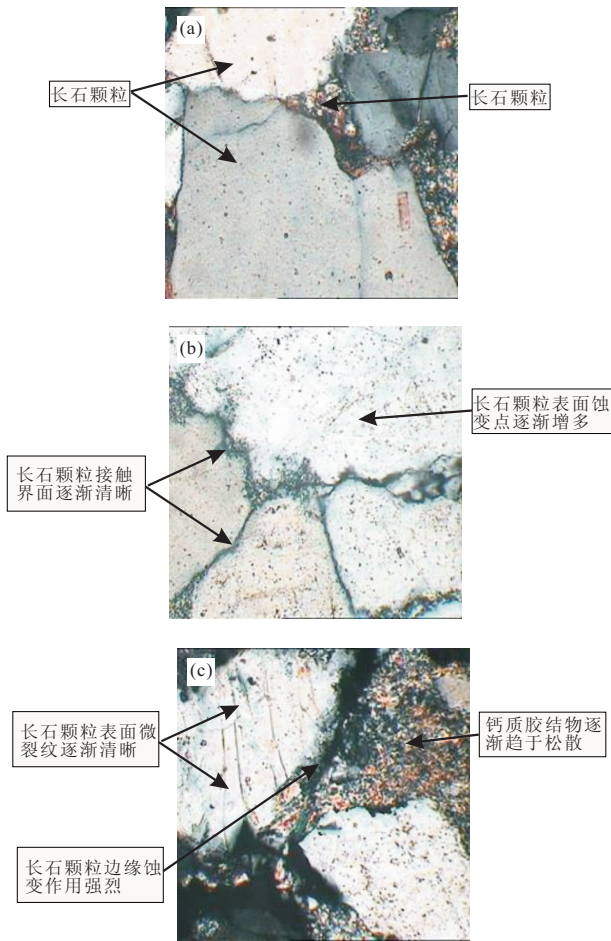


图 6 砂岩试样典型微观照片(400×)

Fig. 6 Microscopic-structure photographs of typical sandstone samples

a. 初始状态; b. 浸泡 3 个月时的状态; c. 浸泡 6 个月时的状态

钾离子和钙离子次之。浸泡 5 个月之后, pH 值和各离子浓度变化逐渐趋于缓慢。分析其原因主要有以下几个方面: ① 钠长石、钾长石和钙长石在浸泡时逐渐发生溶蚀反应, 析出各种离子, 同时生成次生矿物(高岭石), 由于次生矿物的分子量、密度是不同的, 使其所占据的空间体积变化, 进而导致岩样次生孔隙的产生(李汶国等, 2005; 邓华锋等, 2012); ② 矿物颗粒间钙质胶结物产生溶解和溶蚀等反应, 一方面使得试验初期钙离子浓度迅速增加, 另一方面使得胶结物趋于松散, 颗粒间接触面轮廓和宽度等空间分布尺寸逐渐发展, 这一点从试样典型微观照片(图 6)也可以明显看出; ③ 浸泡试验的后期, 由于各种水-岩反应逐渐趋于平衡, 水-岩物理、化学作用速率趋于平缓, 浸泡溶液中的离子浓度逐渐趋于稳定, 宏观上就表现为力学参数劣化趋势逐渐减缓。

结合图 6 所示的典型试样微观结构照片可以看

出, 在浸泡试验过程中, 水-岩作用(特别是化学作用)导致了砂岩的内部微观结构逐渐发生变化, 一方面, 矿物颗粒表面的蚀变点逐渐增多, 次生孔隙率增加; 另一方面, 矿物颗粒表面的微裂纹、裂隙逐渐清晰, 特别是矿物颗粒边缘的蚀变作用逐渐强烈, 矿物颗粒之间接触面的轮廓愈加明显, 宽度有明显变大的趋势, 而这些变化正是导致砂岩试样断裂韧度及其他力学参数劣化的根本原因。

4 结论

(1) 在库水长期浸泡作用下, 砂岩试样断裂韧度具有明显的劣化趋势, 而且, 断裂韧度损伤效应具有明显的时间非均匀性, 单次作用下砂岩断裂韧度劣化幅度呈现先增大后减小的趋势。

(2) 在浸泡过程中, 砂岩试样纵波波速逐渐降低, 而且, 纵波波速和断裂韧度具有明显的相关性, 可用近似线性关系较好的描述。

(3) 综合砂岩试样断裂韧度劣化规律、峰值荷载对应切口张开位移和典型试样 P-CMOD 关系曲线等变形破坏特征可以看出, 在浸泡过程中, 砂岩有逐渐“变软”趋势, 脆性逐渐减弱, 塑性逐渐增强。

(4) 综合浸泡溶液离子浓度分析和试样微观结构照片研究表明, 在库水浸泡作用下, 水-岩作用(特别是化学作用)导致的砂岩试样内部微观结构的变化是其断裂韧度及其他力学参数劣化的根本原因。

References

- Cao, P., Yang, H., Jiang, X. L., et al., 2010. Subcritical Crack Growth of Rock during Water-Rock Interaction. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 41(2): 649-654 (in Chinese with English abstract).
- Ciccotti, M., Gonzato, G., Mulargia, F., 2000. The Double Torsion Loading Configuration for Fracture Propagation: An Improved Methodology for the Load-Relaxation at Constant Displacement. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(7): 1103-1113. doi:10.1016/S1365-1609(00)00045-9
- Cui, Z. D., Liu, D. A., An, G. M., et al., 2010. Research for Determining Mode I Rock Fracture Toughness K_{IC} Using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc Specimen. *Rock and Soil Mechanics*, 31(9): 2743-2748 (in Chinese with English abstract).

- Deng, H. F., 2010. Study on the Mechanism and Effects of Water-Rock Interaction under Water Level Change Region (Dissertation). Wuhan University, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. F., Li, J. L., Deng, C. J., et al., 2011. Analysis of Sampling in Rock Mechanics Test and Compressive Strength Prediction Methods. *Rock and Soil Mechanics*, 32(11): 3399—3403 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. F., Li, J. L., Deng, C. L., et al., 2012. Research on Secondary Porosity Changing Law of Sandstone under Saturation-Air Dry Cycles. *Rock and Soil Mechanics*, 33(2): 483—488 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. T., Li, S. J., Chen, S. L., 2004. Effect of Water Chemical Corrosion on Strength and Cracking Characteristics of Rocks—A Review. *Key Engineering Materials*, 261—263(II): 1355—1360. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.261—263.1355
- Freiman, S. W., 1982. Effects of Chemical Environments on Slow Crack Growth in Glasses and Ceramics. *Journal of Geophysical Research*, 89(B6): 4072—4076. doi: 10.1029/JB089iB06p04072
- Gao, Y., Gong, N. P., Luo, Y. F., 2012. Experimental Study on Dynamic Fracture Toughness of Rock. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 32(1): 13—16 (in Chinese with English abstract).
- Laijtai, E. Z., Schmidtke, R. H., Bielus, L. P., 1987. Effect of Water on the Time-Dependent Deformation and Fracture of a Granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 24(4): 247—255. doi: 10.1016/0148—9062(87)90179—3
- Lau, J. S. O., Jackson, R., Gorski, B., et al., 1991. Effects of Temperature and Pressure on the Mechanical Properties of Lac du Bonnet Grey Granite. In: Balkema, A. A., ed., The 32nd U. S. Symposium on Rock Mechanics (US-RMS). American Rock Mechanics Association, Norman.
- Li, N., Zhu, Y. M., Su, B., et al., 2003. A Chemical Damage Model of Sandstone in Acid Solution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(2): 243—249.
- Li, W. G., Zhang, X. P., Zhong, Y. M., 2005. Formation Mechanism of Secondary Dissolved Pores in Arose. *Oil & Gas Geology*, 26(2): 220—223 (in Chinese with English abstract).
- Liang, X. J., 1995. Water Rock Interaction and the Ore-Forming Material Sources. Macmillan Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, T. Y., Cao, P., Zhang, L. F., et al., 2012. Study of Fracture Damage Evolution Mechanism of Compression-Shear Rock Cracks under High Seepage Pressure. *Rock and Soil Mechanics*, 33(6): 1801—1808 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. R., Fu, Y., Wang, Y. X., et al., 2008. Deterioration Rules of Shear Strength of Sand Rock under Water-Rock Interaction of Reservoir. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30(9): 1298—1302 (in Chinese with English abstract).
- Ni, M., Wang, K., Wang, Q. Z., 2010. Experimental Study on Mixed-Mode Dynamic Fracture of Four Rocks under Impact Loading Using Split Hopkinson Pressure Bar. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 27(4): 697—702 (in Chinese with English abstract).
- Saadaoui, M., Reynaud, P., Fantozzi, G., et al., 2000. Slow Crack Growth Study of Plaster Using the Double Torsion Method. *Ceramics International*, 26(4): 435—439. doi: 10.1016/S0272—8842(99)00078—4
- Shen, Z. L., Wang, Y. X., Guo, H. M., 2012. Opportunities and Challenges of Water-Rock Interaction Studies. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(2): 207—219 (in Chinese with English abstract).
- Tang, L. S., Zhang, P. C., Wang, S. J., 2002. Testing Study on Effects of Chemical Action of Aqueous Solution on Crack Propagation in Rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(6): 822—827 (in Chinese with English abstract).
- The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China, 2001. Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering (SL264—2001). China Water Power Press, Beijing (in Chinese).
- Tu, G. C., Lu, H. Z., Hong, Y. T., 2000. The Higher Geochemical. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, Y. X., Cao, P., Huang, Y. H., et al., 2010. Time-Dependence of Damage and Fracture Effect for Strain Softening of Soft Rock under Water Corrosion. *Journal of Sichuan University (Engineering Science)*, 42(4): 55—62 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. M., Huang, R. Q., Yang, L. Z., 2004. Some Problems on Chemical Water-Rock Interaction in Slopes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(16): 2778—2787 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. Z., 1991. Rock and Concrete Fracture Mechanics. Press of Central South Technology University, Changsha (in Chinese).
- Zhu, F. X., Zhou, C. Y., 2009. Forming Mechanism of Dissipa-

tive Structure in the Softening Process of Saturated Soft Rocks. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 525—532 (in Chinese with English abstract).

Zhu, H. H., Yan, Z. G., Deng, T., et al., 2006. Testing Study on Mechanical Properties of Tuff, Granite and Breccia after High Temperatures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(10): 1945—1950 (in Chinese with English abstract).

Zuo, J. P., Xie, H. P., Liu, Y. J., et al., 2010. Investigation on Fracture Characteristics of Sandstone after Thermal Effects through Three-Bending Point Experiments. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 31(2): 119—126 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹平, 杨慧, 江学良, 等, 2010. 水岩作用下岩石亚临界裂纹的扩展规律. *中南大学学报(自然科学版)*, 41(2): 649—654.

崔振东, 刘大安, 安光明, 等, 2010. V形切槽巴西圆盘法测定岩石断裂韧性 K_{IC} 的实验研究. *岩土力学*, 31(9): 2743—2748.

邓华锋, 2010. 库水变幅带水—岩作用机制和作用效应研究(博士学位论文). 武汉: 武汉大学.

邓华锋, 李建林, 邓成进, 等, 2011. 岩石力学试验中试样选择和抗压强度预测方法研究. *岩土力学*, 32(11): 3399—3403.

邓华锋, 李建林, 邓成进, 等, 2012. “饱和—风干”循环过程中砂岩次生孔隙率变化规律研究. *岩土力学*, 33(2): 483—488.

高远, 官能平, 罗裕繁, 2012. 岩石材料动态断裂韧性的实验研究. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 32(1): 13—16.

李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅, 2005. 长石砂岩次生溶孔的形成机

理. *石油与天然气地质*, 26(2): 220—223.

梁祥济, 1995. 水—岩相互作用和成矿物质来源. 北京: 学苑出版社.

刘涛影, 曹平, 章立峰, 等, 2012. 高渗压条件下压剪岩石裂纹断裂损伤演化机制研究. *岩土力学*, 33(6): 1801—1808.

刘新荣, 傅晏, 王永新, 等, 2008. (库)水—岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究. *岩土工程学报*, 30(9): 1298—1302.

倪敏, 汪坤, 王启智, 2010. SHPB冲击加载下四种岩石的复合型动态断裂实验研究. *应用力学学报*, 27(4): 697—702.

沈照理, 王焰新, 郭华明, 2012. 水—岩相互作用研究的机遇与挑战. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(2): 207—219.

汤连生, 张鹏程, 王思敬, 2002. 水—岩化学作用之岩石断裂力学效应的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 21(6): 822—827.

中华人民共和国行业标准编写组, 2001. 水利水电工程岩石试验规程(SL264—2001). 北京: 中国水利水电出版社.

涂光炽, 卢焕章, 洪业汤, 2000. 高等地球化学. 北京: 科学出版社.

汪亦显, 曹平, 黄永恒, 等, 2010. 水作用下软岩软化与损伤断裂效应的时间相依性. *四川大学学报(工程科学版)*, 42(4): 55—62.

徐则民, 黄润秋, 杨立中, 2004. 斜坡水—岩化学作用问题. *岩石力学与工程学报*, 23(16): 2778—2787.

于晓中, 1991. 岩石和混凝土断裂力学. 长沙: 中南工业大学出版社.

朱凤贤, 周翠英, 2009. 软岩遇水软化的耗散结构形成机制. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 525—532.

朱合华, 闫治国, 邓涛, 等, 2006. 3种岩石高温后力学性质的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 25(10): 1945—1950.

左建平, 谢和平, 刘瑜杰, 等, 2010. 不同温度热处理后砂岩三点弯曲的断裂特性. *固体力学学报*, 31(2): 119—126.