DOI：10. 16285/j.rsm.2017.09.015

不同围压下深井煤岩短时蠕变试验的细观损伤机制分析

刘传孝[1]，王　龙[2]，张晓雷[1]，李茂桐[1]，周　桐[1]

（1.山东农业大学 水利土木工程学院，山东 泰安 271018； 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所，湖北 武汉 430071）

摘　要：分析深井煤岩试验断口上矿物、结构、构造等的细观特征，追溯围压对其蠕变损伤机制的影响及调节作用，得到了围压分别为 0、10 和 20 MPa 的深井煤岩短时分级加载蠕变试验破坏断口的细观构造，分别对应解理断裂-节理裂隙、沿晶界断裂、沿晶界断裂-穿晶断裂。围压为 0 MPa 的单轴蠕变试验破坏断口，是煤岩受简单应力环境直接作用的结果，因此，其解理断裂和节理裂隙构造清晰、方向明确、内部新鲜且无夹杂。围压为 10 MPa 三轴蠕变破坏断口的沿晶界断裂间隙较宽、内部不干净、充填碎屑类夹杂，表明较强环向约束下的晶界较易于克服，且矿物结构以晶粒间的切向运动及力矩作用下的晶粒转动方式调整。围压为 20 MPa 的三轴蠕变试验，环向强约束使得晶界与晶粒的强度难以克服，最终破坏断口上的沿晶界断裂主要呈现弧形转动，穿晶断裂以剪切位移为主要特征，所以沿晶界断裂构造不太干净、内部充填围压先期作用时原生构造闭合后新产生的少量碎屑类夹杂，穿晶断裂间隙极小、新鲜、干净无夹杂。

关　键　词：断口；细观损伤机制；围压；解理断裂；沿晶断裂；穿晶断裂

中图分类号：TU 452　　**文献识别码：**A　　**文章编号：**1000－7598 (2017) 09－2583－06

Mesoscopic damage mechanism of coal seam and rock mass in deep field under different confining pressures by short period creep tests

LIU Chuan-xiao[1], WANG Long[2], ZHANG Xiao-lei[1], LI Mao-tong[1], ZHOU Tong[1]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: This paper is to investigate mesoscopic features of coal seam and rock mass in the deep field, which includes the mineral, configuration, and structure of the fractured surface of specimens. The effect of confining pressure on creep damage mechanism and its regulation were also studied. Under short period creep loading, the observed mesoscopic features were classified into cleavage fracture-joint fractures, intergranular fracture, and intergranular-transgranular fractures under confining pressures of 0, 10, and 20 MPa, respectively. Under the confining pressure of 0 MPa (i.e., the uniaxial creep test), the failure fracture was caused by the simple stress acting on coal seam and rock masses directly. As a result, its cleavage fracture and joint fissure had distinct structure, clear orientation, and fresh interior without inclusions. Under the confining pressure of 10 MPa, the interface of intergranular fracture was found to be relatively wide, and the interior was not clear and filled with inclusions. It indicated that the grain boundary was easily broken under the higher confining pressure, and the mineral structure was changed by adjusting both the tangential movement among grains and the grain rotation under the action of torque. Under the confining pressure of 20 MPa, since the grain boundary was restricted and grain itself was difficult to be destroyed, the ultimate destruction of the fracture along the grain boundary fracture mainly showed the arc rotation. Besides, the siginificant feature of transgranular fractures was characterized by the shear displacement. Under strong restrictions, intergranular fracture structure was not clean and filled with little new inclusion caused by the earlier period of confining pressure. In contrast, the transgranular fracture was tiny, fresh, and pure without inclusions.

Keywords: fracture; mesoscopic damage mechanism; confining pressure; cleavage fracture; intergranular fracture; transgranular fracture

收稿日期：2015-09-26
基金项目：山东省自然科学基金项目（No.ZR2014DM019）；国家自然科学基金项目（No.51574156，No.51004098）。
This work was supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2014DM019) and the National Natural Science Foundation of China (51574156, 51004098).
第一作者简介：刘传孝，男，1970 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事非线性动力学、计算力学、岩土工程方向的研究与教学工作。E-mail: Lchuanx@163.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1 引 言

随着矿井开采深度的不断增加，地应力水平大幅度提高，岩土工程的稳定性主要受到岩石（体）的流变特性控制[1−5]。流变是岩土工程中遇到的普遍现象，而由于试验的难度大，当前国内外对岩石（体）流变规律的研究仍存在一定的延伸空间[6−9]。工程支护等措施的作用效果，主要反映了围压改变对岩土工程围岩流变特性的调节作用。在细观尺度层次上研究深井煤岩体蠕变破坏与围压变化之间的关系，是探究其试验损伤机制的重要途径[10−11]。

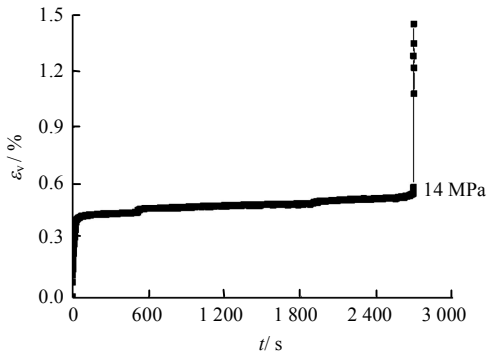
严格意义上，对应微米（10^{-6} m）或忽米（10^{-5} m）等不同空间尺度条件下的断裂力学研究方法，具体包括细观力学、微结构计算力学、塑性理论和细观损伤力学等，研究目标涵盖了位错交互、界面、微结构、局部化剪切、韧脆性转变、滑移、织构、微孔洞、微裂纹、多相介质及晶体等[12]。实际应用中，岩石（体）力学界界定了比较实用的微、细、宏观空间尺度：细观尺度范围为 10^{-5}～10^{-3} m，微观尺度范围小于 10^{-5}m，宏观尺度范围大于 10^{-3} m[13]。本文在细观尺度层次上、应用细观损伤力学方法研究深井煤岩蠕变试验的损伤机制。

2 煤岩分级蠕变试验设计及成果

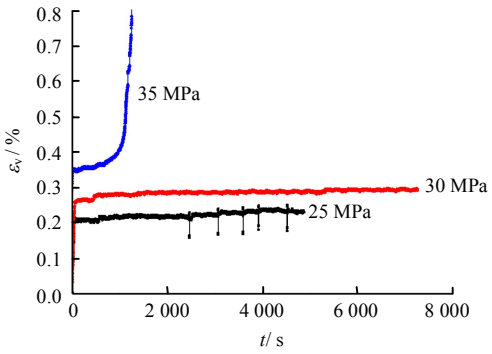
枣庄矿业（集团）公司田陈煤矿位于山东省滕州市南部，$3_{下}$ 煤的采深为 770 m，属于深埋煤层。$3_{下}$ 煤层厚度为 3.17～9.35 m，平均为 5.0 m；煤为黑色，半亮度，似玻璃光泽，由镜煤、暗煤和丝炭等组成；煤层结构复杂，含一层泥岩夹矸，普氏硬度系数约为 2.0。其上 $3_{上}$ 煤层的直接底以下即为 $3_{下}$ 煤的基本顶，$3_{上}$ 煤层的基本顶为中细粒长石石英砂岩，赋存深度为 670 m。本试验煤岩试样取自 $3_{下}$ 煤煤块和中细砂岩岩块，按照岩石力学试验标准[14−17]，将 $3_{下}$ 煤煤块加工成 ϕ48 mm×79 mm 和 ϕ48 mm×97 mm 的标准试件，应用于围压分别为 0 MPa 和 10 MPa 的短时分级加载蠕变试验；将中细砂岩岩块加工成 ϕ48 mm×103 mm、ϕ48 mm×100 mm 和 ϕ48 mm×101 mm 的标准试件，应用于围压 σ_3 分别为 0、10、20 MPa 的短时分级加载蠕变试验。煤岩试件强度的尺寸效应主要受长度指标的影响，本煤岩试件高度对试验结果基本无影响。深部矿井内的地下工程服务年限短，本研究主要关注其围岩−煤岩（细砂岩等）在围压作用下于服务年限内的蠕变特性，应用短时蠕变试验方法开展研究，满足围岩破坏过程与工程服务年限的关系，且试验效率较高。

试验采用长春科新试验仪器有限公司研制的 SAW−2000 型微机控制电液伺服岩石三轴压力试验机，该试验机主要用于岩石、混凝土等材料的压缩、蠕变、松弛及低周脉动等试验，机架刚度达 2×10^7 kN/m，最大试验力为 2 000 kN，满足研究需要。

$3_{下}$ 煤及中细砂岩的蠕变试验曲线如图 1、2 所示，反映了轴向应变 ε_v 与时间 t 的关系。及时并妥善保存破坏后试件的宏观断口，用作细观破坏机制的探讨。固体的宏观破坏对材料细观结构和损伤形态敏感，试验断口是岩石断裂后留下的关于断裂过程的记录，蕴涵着丰富的断裂过程信息，可以应用于研究岩石的微观破坏机制。



(a) 围压为 0 MPa



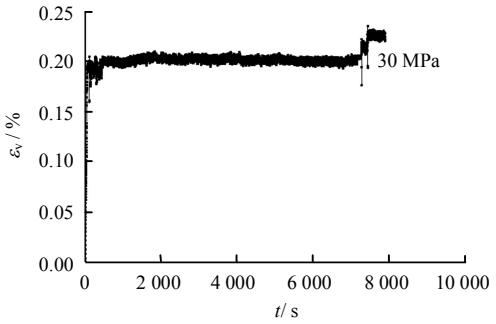
(b) 围压为 10 MPa

图 1 煤样分级加载短时蠕变试验曲线

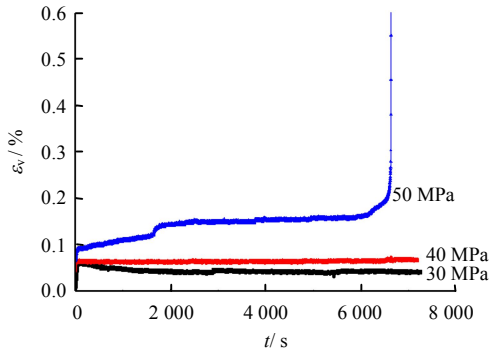
Fig.1 Short-term creep curves of different loading levels on coal specimens

煤样的短时蠕变试验如下：在围压为 0 MPa 时的轴向压力分级加载级别为 14 MPa（1 级）；围压为 10 MPa 时的分级加载级别为 25、30、35 MPa（3 级）。中细砂岩的短时蠕变试验：在围压为 0 MPa 时的轴向压力分级加载级别为 30 MPa（1 级）；围压为 10 MPa 时的分级加载级别为 30、40、50 MPa（3 级）；围压为 20 MPa 时的分级加载级别为 30、40、50、60、70 MPa（5 级）。统计 $3_{下}$ 煤及中细砂岩短时分级加载蠕变试验的破坏结果见表 1。

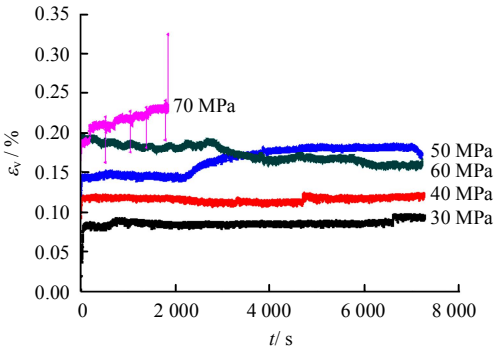
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 围压为 0 MPa



(b) 围压为 10 MPa



(c) 围压为 20 MPa

图 2　中细砂岩短时分级加载蠕变试验曲线

Fig.2　Short-term creep curves of different loading levels on fine sandstone

表 1　$3_{下}$煤及中细砂岩分级加载短时蠕变试验破坏荷载

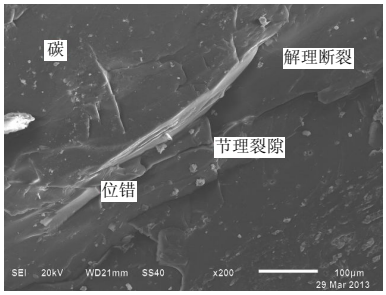
Table 1　Ultimate strengths of coal and fine sandstone by short-term creep tests at different loading levels

岩性	蠕变破坏荷载σ_u / MPa		
	σ_3 = 0 MPa	σ_3 = 10 MPa	σ_3 = 20 MPa
$3_{下}$ 煤	14	35	
中细砂岩	30	50	70

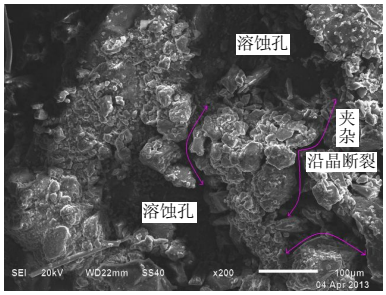
3　煤岩蠕变试验断口的细观特征

采用日本电子株式会社 JSM-6510LV 高低真空扫描电子显微镜，能够进行岩石、金属、混凝土等材料的放大试验，主要包括电子光学系统、扫描系统、信号检测放大系统、图象显示和记录系统、电源和真空系统等。用细聚焦的电子束轰击样品表面，通过电子与样品相互作用产生的二次电子、背散射电子等对样品表面或断口形貌进行观察和分析。

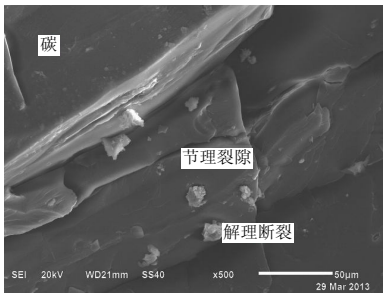
将蠕变破坏后煤岩试件的宏观断口进行喷金处理，置于扫描电镜中摄取放大 200、500 倍的扫描图片，如图 3、4 所示，其属于细观尺度层次。



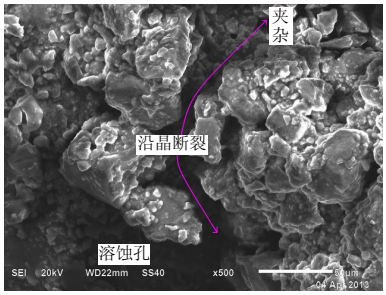
(a) 围压为 0 MPa (200 倍)



(b) 围压为 10 MPa (200 倍)



(c) 围压为 0 MPa (500 倍)

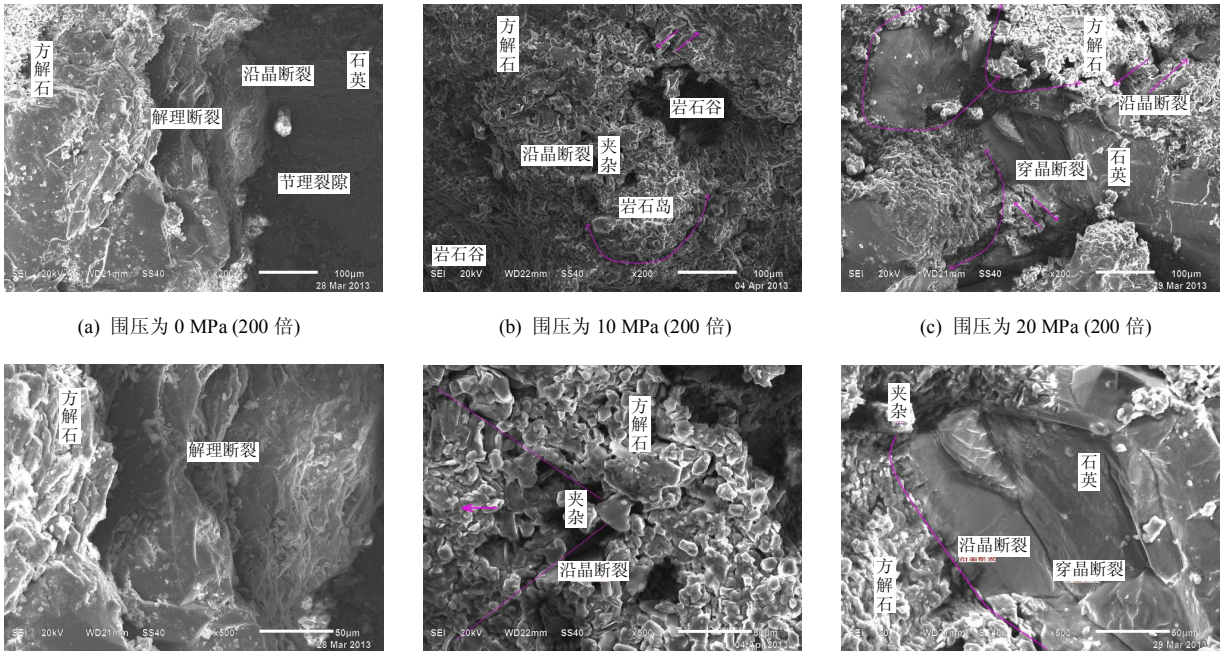


(d) 围压为 10 MPa (500 倍)

图 3　煤样蠕变试验断口的细观特征

Fig.3　Mesoscopic images of creep fracture on coal specimens

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 围压为 0 MPa (200 倍) (b) 围压为 10 MPa (200 倍) (c) 围压为 20 MPa (200 倍)

(d) 围压为 0 MPa (500 倍) (e) 围压为 10 MPa (500 倍) (f) 围压为 20 MPa (500 倍)

图 4 中细砂岩蠕变试验断口的细观特征

Fig.4 Mesoscopic images of creep fracture on fine sandstone

由图可见，煤岩蠕变试验断口主要包含矿物、断口、解理断裂、岩石岛、岩石谷、溶蚀沟、溶蚀孔、裂纹、节理裂隙、位错、沿晶断裂、夹杂及穿晶断裂等细观构造特征。其中，沿晶断裂是指裂纹沿着晶界扩展；穿晶断裂是指裂纹穿过晶粒内部扩展；解理断裂是指在正应力作用下产生的一种特殊的穿晶断裂。

4 围压调节煤岩蠕变细观破坏机制

4.1 围压提高后的煤岩蠕变细观构造演化

煤岩蠕变试验断口随围压变化的细观特征统计，见表 2。

表 2 煤岩蠕变试验断口的细观特征统计

Table 2 Mesoscopic features of creep fracture on coal seam and rockmass

岩性	放大倍数	不同围压下的细观特征		
		σ_3 = 0 MPa	σ_3 = 10 MPa	σ_3 = 20 MPa
煤	200	解理断裂、节理裂隙、位错	沿晶断裂、溶蚀孔	
煤	500	解理断裂、节理裂隙	沿晶断裂、溶蚀孔	
中细砂岩	200	解理断裂、节理裂隙、沿晶断裂	沿晶断裂、岩石岛、岩石谷	沿晶断裂、穿晶断裂
中细砂岩	500	解理断裂	沿晶断裂	沿晶断裂、穿晶断裂

由表 2 可见，围压为 0 MPa 的煤岩单轴蠕变破坏试验断口，其细观构造以解理断裂和节理裂隙发育为主；随着围压提高到 10 MPa，其蠕变破坏试验断口的细观构造特征主要演化为沿晶界断裂；对中细砂岩围压提高到 20 MPa 之后的岩石蠕变破坏试验断口，其细观构造特征是新生了典型的穿晶断裂构造。

4.2 围压调节煤岩蠕变细观破坏机制

4.2.1 围压为 0 MPa 的单轴蠕变破坏

在细观尺度层次上，煤岩蠕变破坏面上的解理断裂清晰、方向明确、近乎平行（见图 3(a)、3(c)，图 4(a)、4(d)）；节理裂隙内部新鲜、无夹杂，且扩展方向确定（见图 3(a)、3(c)及图 4(a)）；存在沿晶断裂构造时，虽然晶界间隙宽，但内部发育干净、新鲜、无夹杂（见图 4(a)）。煤岩蠕变破坏面上的构造状态表明，其为新生或次生，是简单应力环境的直接作用结果。

追溯煤岩蠕变细观破坏的原因，其单轴压缩状态下的受力条件简单，试件发生简单的直接破坏，导致破坏面的有序性增强。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4.2.2 围压为 10 MPa 的三轴蠕变破坏

围压提高至 10 MPa 的煤岩三轴蠕变试验破坏断口上，其细观构造均为沿晶界断裂，且$3_{下}$煤发育有溶蚀孔，中细砂岩发育有岩石岛和岩石谷。晶体颗粒比较圆滑，沿晶界断裂的间隙较宽，且晶界间不干净、其中充填有碎屑类夹杂（见图 3(b)、3(d)和图 4(b)、4(e)）。

对$3_{下}$煤及中细砂岩而言，因其单轴蠕变的破坏加载级别分别仅为 14、30 MPa，围压为 10 MPa 的作用已经在环向对其构成了较强的约束，致使原生裂隙闭合甚至产生了新的损伤。分级施加轴向荷载至破坏级分别为 35、50 MPa，围压作用下的晶界约束相对易于克服，矿物结构的主要调整方式为晶粒间的相对位移，包括切向运动及力矩作用下的晶粒转动（见图 3(b)、3(d)和图 4(b)、4(e)）。因此，其细观构造均为沿晶界断裂，且晶体颗粒形态浑圆、晶界间隙较宽，会充填围压作用时产生的损伤碎屑类夹杂。

4.2.3 围压为 20 MPa 的三轴蠕变破坏

围压达到 20 MPa 的中细砂岩蠕变破坏加载级别为 70 MPa，试验断口在沿晶界断裂的基础上出现了穿晶断裂细观构造。其中沿晶界断裂构造不太干净，内部充填少量碎屑夹杂；穿晶断裂间隙极小、新鲜、干净无夹杂，晶粒之间接触紧密（见图 4(c)、4(f)）。

20 MPa 的高围压对中细砂岩形成了环向强约束，已经使其原生裂隙闭合并产生了新的损伤，晶界约束如同晶体颗粒一样难以克服。随着蠕变试验轴向加载水平逐级提高至破坏级别，矿物晶体颗粒间发生剪切位移及转动，但由于环向约束强，沿晶界断裂构造主要呈现弧形转动特征（见图 4(c)）。同样，由于高围压的作用，沿晶界断裂间隙较小，仅充填少量围压作用时产生的损伤碎屑类夹杂。在高应力克服强约束晶界的同时，剪切破坏了晶体颗粒，从而新生穿晶断裂构造，因此，穿晶断裂间隙极小、新鲜且干净、无夹杂（见图 4(f)）。

5 结　论

（1）深井煤岩围压分别为 0、10、20 MPa 的短时分级加载蠕变试验结果表明，随着围压的增加，其破坏断口的细观构造由以解理断裂和节理裂隙发育为主，演化为沿晶界断裂为主，乃至呈现沿晶界断裂和穿晶断裂并存的特征。

（2）围压为 0 MPa 的单轴蠕变破坏断口，其解理断裂和节理裂隙有序性强、无夹杂，表明简单应力环境的直接作用是煤岩蠕变细观破坏的原因。

（3）围压为 10 MPa 的三轴蠕变破坏断口，晶粒较圆滑，其沿晶界断裂的间隙较宽，内部不干净，充填碎屑类夹杂。证明较强环向约束下的晶界相对晶粒易于克服，矿物结构的主要调整方式为晶粒间的切向运动及力矩作用下的晶粒转动，充填物为围压作用时产生的碎屑类夹杂。

（4）围压为 20 MPa 的三轴蠕变破坏断口，其沿晶界断裂构造不太干净，内部充填少量碎屑夹杂，穿晶断裂间隙极小、新鲜、干净无夹杂，即环向强约束使得晶界与晶粒同样难以克服，沿晶界断裂主要呈现弧形转动，穿晶断裂以剪切位移为主要特征，充填物为围压作用时产生的少量碎屑类夹杂。

参 考 文 献

[1] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
SUN Jun. Geotechnical material rheology and its engineering application[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999.

[2] 谢和平. 非线性力学理论与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1997.
XIE He-ping. Nonlinear mechanics and practice[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1997.

[3] 周德培. 流变力学原理及其在岩土工程中的应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.
ZHOU De-pei. Rheological mechanics and its application in geotechnical engineering[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995.

[4] 张立俊, 刘传孝. 流变围岩巷道支护技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.
ZHANG Li-jun, LIU Chuan-xiao. Supporting technology for roadway surrounding with rheological rock mass[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2008.

[5] 张尧, 熊良宵. 岩石流变力学的研究现状及其发展方向[J]. 地质力学学报, 2008, 14(3): 274－285.
ZHANG Yao, XIONG Liang-xiao. Rock rheological mechanics: Present state of research and its direction of development[J]. **Journal of Geomechanics**, 2008, 14(3): 274－285.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[6] 刘传孝, 贺加栋, 张美政, 等. 深部坚硬细砂岩长期强度试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 581－584.
LIU Chuan-xiao, HE Jia-dong, ZHANG Mei-zheng, et al. Long-term strength test and application of hard fine sandstone in deep site[J]. **Journal of Mining & Safty Engineering**, 2010, 27(4): 581－584.

[7] 李铀, 朱维申, 彭意, 等. 某地红砂岩多轴受力状态蠕变松弛特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1248－1252.
LI You, ZHU Wei-shen, PENG Yi, et al. Multi-axial experimental study on creep and relaxation properties of red sandstone from somewhere[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1248－1252.

[8] 高延法, 曲祖俊, 牛学良, 等. 深井软岩巷道围岩流变与应力场演变规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1244－1252.
GAO Yan-fa, QU Zu-jun, NIU Xue-liang, et al. Rheological law for soft rock tunnel and evolution law for stress field in deep mine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(12): 1244－1252.

[9] 于怀昌, 周敏, 刘汉东, 等. 粉砂质泥岩三轴压缩应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 803－811.
YU Huai-chang, ZHOU Min, LIU Han-dong, et al. Experimental inverstigation on stress relaxation properties of silty mudstone under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 803－811.

[10] 赵小平, 左建平, 裴建良. 锦屏层状大理岩断裂机制的细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 534－542.
ZHAO Xiao-ping, ZUO Jian-ping, PEI Jian-liang. Meso-experimental study of fracture mechanism of bedded marble in Jinping[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 534－542.

[11] 倪骁慧, 李晓娟, 朱珍德. 不同温度循环作用后大理岩细观损伤特征的定量研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 248－254.
NI Xiao-hui, LI Xiao-juan, ZHU Zhen-de. Quantitative test on meso-damage characteristics of marble after different temperatures[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(2): 248－254.

[12] 杨卫. 宏微观断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
YANG Wei. Macro and micro fracture mechanics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.

[13] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 混凝土细观力学研究进展及评述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(2): 124－130.
MA Huai-fa, CHEN Hou-qun, LI Bao-kun. Review on micro-mechanics studies of concrete[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2004, 2(2): 124－130.

[14] 国际岩石力学学会试验室和现场标准化委员会. 岩石力学试验建议方法[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.
Laboratory and Field Standardization Committee of International Society for Rock Mechanics. Rock mechanics experiments suggested method[S]. Beijing: Coal Industry Publishing House,1982.

[15] 中华人民共和国煤炭工业部. MT38-87 煤和岩石物理力学性质测定的采样一般规定[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 1987.
Coal Industry Ministry of the People's Republic of China. MT38-87 General determination for specimen of coal and rock physical and mechanical properties[S]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 1987.

[16] 中华人民共和国水利部. SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL264-2001 Rock testing regulation for water resources and hydropower engineering[S]. Beijing: China Standard Press, 2001.

[17] 中华人民共和国建设部. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Construction Ministry of the People's Republic of China. GB50021-2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net