



移动扫码阅读

廉玉广,马志超,李江华,等.岩石单轴加载破坏全过程波速变化特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8): 64-69. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.08.006

LIAN Yuguang, MA Zhichao, LI Jianghua, et al. Study on variation characteristics of wave velocity in whole process of rock uniaxial loading failure [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 64-69. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.08.006

岩石单轴加载破坏全过程波速变化特征研究

廉玉广^{1,2,3}, 马志超^{1,2,3}, 李江华^{1,2,3}, 牟义^{1,2,3}, 王国库^{1,2}, 崔金亮^{1,2,3}, 樊林林³

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 山西晋煤集团技术研究院有限责任公司, 山西 晋城 048006)

摘要:岩石力学性质是声波监测技术的基础,可通过观测声波在岩石内部传播变化过程判别岩石的稳定性和发育状况。为了解赵庄二号井岩石载荷受力下声波于介质传播过程中变化状况,单轴加载试验采用岩石力学试验机和声波测试系统,对晋城赵庄二号井典型层位的砂岩、泥岩、灰岩加工成标准试样,在单轴加载条件下,采用不同加载方法进行比较,获取方法适用性。然后,利用观测声波对岩石裂隙发育程度、不同岩性的纵、横波波速及应力-应变全过程的变化特征进行了研究。研究结果表明:选用位移控制法可以更好获取全应力-应变曲线;在加载过程中,试样压密、弹性阶段波速呈线性上升的趋势;到达应力峰值后,试样破损,承受力降低并出现软化特征,应力与波速呈非线性变化;波速变化趋势与应力-应变曲线基本一致,不同的应力-应变阶段均发生不同的波速响应特征。通过对岩石加载声波变化特性的测试观察,可对岩体的稳定性或内部裂隙发育程度做出预测预判。

关键词:单轴加载;超声波;波速;应力-应变

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)08-0064-06

Study on variation characteristics of wave velocity in whole process of rock uniaxial loading failure

LIAN Yuguang^{1,2,3}, MA Zhichao^{1,2,3}, LI Jianghua^{1,2,3}, MU Yi^{1,2,3}, WANG Guoku^{1,2,3}, CUI Jinliang^{1,2,3}, FAN Linlin³

(1. Mine Safety Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean

Utilization, Beijing 100013, China; 3. Jincheng Anthracite Mining Group Technology Research Institute Co., Ltd., Jincheng 048006, China)

Abstract: Mechanical properties of rock is the basis of the acoustic wave monitoring technology. The stability and development of rocks can be studied by observing the propagation process of sound waves inside the rock. In order to understand the variation of acoustic waves in the medium propagation process under the rock load of No. 2 Zhaozhuang Mine, the uniaxial loading test adopted the rock mechanics experimental machine and the acoustic testing system to test the sandstone, mudstone and limestone of the typical strata of No. 2 Zhaozhuang Mine in Jincheng under the condition of uniaxial loading, different loading methods were used to compare and obtain the applicability of the method. Then, the observed acoustic waves were used to study the development of rock fissures, the longitudinal and transverse wave velocities of different lithologies and the changes of stress-strain processes. The test results show that the displacement control method can obtain the full stress-strain curve better. During the loading process, the sample velocity is linear and the wave velocity increases linearly; when the stress peak is reached, the specimen is damaged and the bearing capacity is reduced, the softening characteristics appear, and the stress and the wave velocity change nonlinearly. The variation trend of wave velocity is basically consistent with the stress-strain curve, and different wave velocity response characteristics occur in different stress-strain stages. Through the test observation of the acoustic wave loading characteristics of rock loading, the stability of rock mass or the development of internal fractures can be predicted, which has important guiding significance for the response characteristics analysis of acoustic emission monitoring technology.

Key words: uniaxial loading; ultrasonic; wave velocity; stress-strain

收稿日期:2019-04-18;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045001-004);天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目资助(2018-TD-MS005);煤炭科学研究总院基金资助项目(2017JC07)

作者简介:廉玉广(1980—),男,黑龙江宁安人,助理研究员,博士。E-mail:31304336@qq.com

0 引 言

井下煤矿开采过程中,地质异常体常常给矿井生产衔接和安全带来较大影响,提前精准预测地质异常体的分布意义重大。煤矿开采一般要进行地面勘探,常采用高分辨率的地震勘探方法以勘探几百米深度范围内大型断层,为采区布置、巷道开拓、机械化开采相关的地质条件分析提供可靠依据^[1],但是小型断层并不能准确探测。为此,细化了解岩石内部力学的变化,可提高裂隙发育区的解析精度。岩石力学性质是声波监测技术的基础,可通过观测声波在岩石内部传播变化过程判别岩石的稳定性和发育状况。声波监测技术由于其距离目标体较近,分辨率较高,近年受到许多专家关注。然而无论是地面还是井下声波监测技术,波速的精准分析是数据处理的关键,目前井下声波监测技术难以获得准确的声波信息。声波传递过程中,随岩石岩性、孔隙度、裂隙发育和应力等因素的变化而变化^[2-3],为此有必要通过试验室声波测试等方法获得勘探区的声波特征。

声波在岩石内部传播可以反应其内部结构的完整性。然而常压下对岩石样本进行的声波测试结果与实际地质条件下的真实声波差异较大。为此,诸多专家学者,通过岩石材料的加载试验,对加载过程中,岩石材料内部变化过程进行了研究^[4]。例如,压密、弹性阶段、塑性阶段、峰值破坏后、残余变形,5种不同阶段的应力与声波变化呈现不同特征规律^[5]。另外,通过研究声波在岩石内部传播过程,分析岩石在受压过程中声波的变化规律,发展了利用声波监测煤岩体稳定性的方法^[6-7]。基于此,通过对晋城地区赵庄二号井不同岩石单轴加载全过程中的超声波传播速度变化规律进行研究,分析了岩石裂隙在各个阶段的发育情况及波速响应特征,便于进一步精细化分析声波监测技术在勘探过程中的响应特征。

岩石力学参数是声波监测及成果解释的基础,晋城赵庄二号井在岩体力学参数方面研究数据较少,此次试验针对井田内 3 号煤层相邻的砂岩、泥岩、灰岩进行了加工制样,在 RMT-301 压力机上对 3 种岩性做了单轴抗压试验,测得了完整的破坏全过程物性参数数据,分析比对了 3 种岩性的破坏形态在单轴加载下应力、应变和声波曲线特征,对岩石的抗压强度、破坏过程和裂隙发育程度评价与声波监测响应特征提供了参考依据。

1 地质概况

赵庄二号井位于晋城—获鹿褶断带南段的韩店至高平间褶断带西侧,武乡—阳城凹褶带东侧。井田构造主要为新华夏构造体系,整个矿区总体为北东走向,倾向北西,倾角大约为 5°的单斜构造,受整体构造影响常伴有从属宽缓褶曲和小型断裂,断层周围地层倾角可达 15°以上。西北部褶曲后期受到构造运动影响由西偏转为北东东向。井田中主采 3 号煤层,备采 15 号煤层。3 号煤巷道顶板为泥岩,厚度约为 0.9 m,为深灰色,薄层状,均匀层理,见植物碎屑化石;3 号煤巷道底板为砂岩,厚度约 4.8 m,为浅灰色,薄层状,水平纹理,含白云母片,垂直裂隙未充填。15 号煤顶板为灰岩,厚度约 12.9 m,表现为灰色与浅灰色中厚层状石灰岩,层差状断口,裂隙发育。3 号煤巷道受构造影响掘进速度较为缓慢。

2 试验设计

2.1 试样加工

通过赵庄二号井水文地质钻孔现场取样,选取 3 号煤顶、底板不同深度较完整的灰岩、砂岩、泥岩岩心制成标准岩样,进行加载条件下的超声波波速测试。按照岩石力学标准,试样加工制作成直径 50 mm、长度 100 mm 的圆柱体试件。制作泥岩、砂岩、灰岩各 3 个试样尺寸见表 1,岩石试样共计 9 个,均进行单轴压缩波速测试试验。

表 1 单轴岩石试样尺寸
Table 1 Uniaxial rock sample size

编号	岩性	直径/mm	长度/mm
S-1	砂岩	49.97	99.91
S-2		49.90	99.85
S-3		50.03	99.96
N-1	泥岩	49.88	99.82
N-2		50.01	99.93
N-3		49.98	99.89
O-1	灰岩	50.02	99.90
O-2		49.96	99.95
O-3		49.91	99.85

2.2 试验设备

单轴加载试验使用 RMT-301 型号岩石和混凝土力学试验机。该仪器可进行单轴、三轴等各项力学试验,为岩石和混凝土类等材料力学性能测试而设计,相应条件符合国家标准。该设备控制性能稳定,测控精准度灵敏,操作便捷等特点,能够满足试

验需求。

波速测试选用 HS-YS4A 型岩石声波测试系统,主要包括超声波发射装置、接收装置和能量转换传感器、数据采集器等。该系统具有多通道采集模块,发射电压为 160 V 或 1 000 V,可调节放大器多级衰减,数据的采集可控性强。

2.3 测试方法

圆柱体岩心试件测试之前,如图 1 所示,先把超声波发射和接收换能器相互耦合测得原位数据,获得无试样时超声波脉冲信号初至时间。之后在岩心试件两端均匀涂抹黄油,置于超声波发射和接收换能器正中间,并保持良好耦合。试件的上下两端、左右两侧 4 个方向安装 2 套不同量程的位移伸引器,将位移传感器信号直接传达计算机系统。

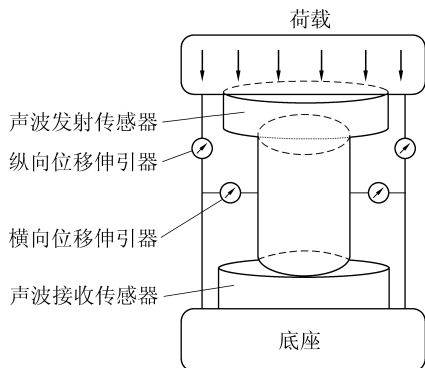


图 1 试验构架示意

Fig.1 Experimental framework

整体试验开始前,首先选取一组同岩性的 2 个岩样,利用力和位移 2 种控制方法进行单轴加载试验,之后提取数据拟合曲线分析比较方法的适用性,选取最佳方法进行后续试验。选取同一岩层内距离相近的 2 个灰岩试件,采用不同方法进行加载后的应力、应变曲线如图 2 所示。O-1 试件加载过程中采用位移控制方法,经历了初始压密阶段-弹性变形-塑性变形-峰值后破裂-残余变形 5 个阶段,可获取岩样破裂的完整应力-应变曲线;O-2 采用力加载方式,未能获取岩石破裂后残余变形阶段。因此,后续单轴加载试验过程中,采用位移的控制方式进行应力-应变全过程波速测试。

岩石单轴压缩试验中,波形采用斜坡,载荷量程最大设置为 400 kN,横向最大位移设置为 3 mm,轴向加载速率设置为 0.000 5 mm/s,试验加载直到试件完全破坏无法进行波速测试为止。轴向位移每增加 0.01 mm,利用声波测试系统采集一次数据,如图 3 所示,某 n 点拾取脉冲信号初至时间 t_n ,未加试件时的换能器间脉冲信号初至时间为 t_0 。

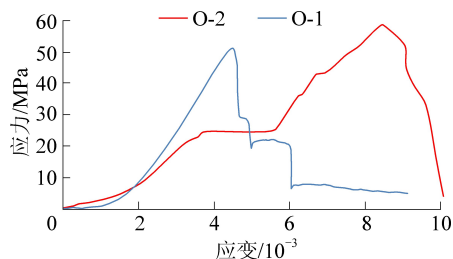
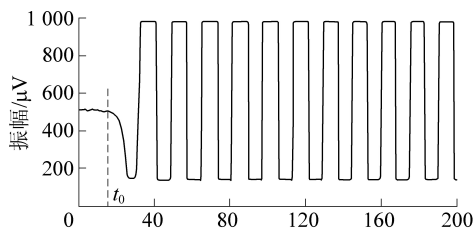
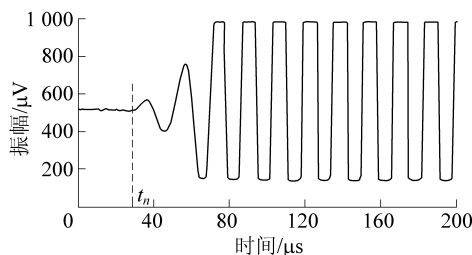


图 2 加载方式对比曲线

Fig.2 Loading mode comparison curves



(a) 原位



(b) 加载某一时刻

图 3 超声波信号

Fig.3 Ultrasonic signal

根据岩石试件的长度和脉冲信号在试件中的旅行时,可计算不同应力条件下超声波在岩样中的传播波速^[8-9]为

$$V_n = L / (t_n - t_0) \quad (1)$$

式中: V_n 为某 n 点受应变条件时岩石波速, km/s; L 为岩样长度, mm; t_n 为岩石试件测试时的声波脉冲信号初至时间, μ s; t_0 为仪器原位时间, μ s。

3 岩石单轴加载过程波速变化特征

3.1 岩石应力-应变曲线特征

载荷条件下岩样的内部结构变化过程如图 4 所示,大致可分为压密、弹性变形、塑性变形、峰值后破裂和残余变形 5 个不同阶段^[10-13]。① OA 段随着应力逐渐增加,岩石试件内部孔隙裂隙被压密,为压密阶段;② AB 段随着应力持续加载,曲线呈无明显弯曲呈直线上升状态,卸压后恢复正常,为弹性变形阶段;③ BC 段随应力的增加,试件内部微裂隙开始扩展,并产生新的裂隙,曲线呈非线性上升变化,裂隙方向与力的加载方向平行,为塑性变形阶段;④ CD

段随着应力的增大,岩心内部裂隙的生成速度变快,岩样内部裂隙逐渐贯通,岩石试件发生破裂,为峰值后破裂阶段,其中峰值C点为岩石试件的最大承载力;⑤DE段岩样残余强度趋于平缓,形变不断增大,为残余变形阶段^[14-15]。

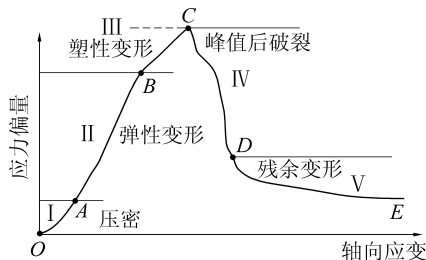


图4 应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve

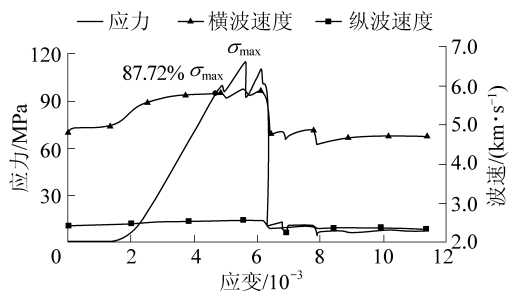
3.2 应力-应变全过程波速特征

砂岩、泥岩、灰岩岩样加载条件下纵、横波波速随岩石变形的曲线变化特征如图5所示。由此看从图5a试样在单轴加载下抗压强度的峰值大约为118 MPa,岩样经历了2次应力峰值震动点。岩样加载初期压密阶段和弹性阶段纵、横波波速变化较大;纵波波速突变点为最大应力的87.72%,标志进入塑性变形阶段,试件内部孕育产生小范围的裂隙,纵波波速逐渐增大且发生一些跳跃现象,而横波波速较小,在塑性转折点波速变化不明显。随后纵波波速继续增大,当载荷增大至岩样最大承载能力后,岩样发生破裂,应力峰值发生二次波动,波速随应力峰值的波动而波动,应力峰值后波速急剧下降;横波波速在残余变形阶段发生波动,二次破坏中使裂隙加剧发育、贯通至破坏;最后阶段出现残余变形特征,残余强度趋于平缓,岩样变形增大,波速缓慢下降。整个加载过程中,岩样经历了典型的应力、应变5个阶段。

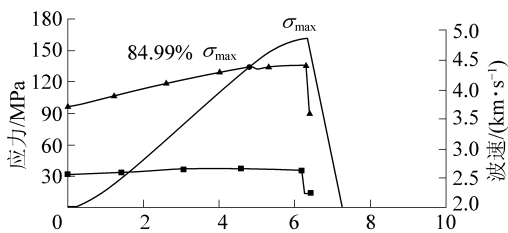
从图5b波速特征曲线看,纵、横波波速曲线特征与应力应变曲线高度相关,随着应力加载,岩样孔隙、裂隙逐渐弥合,纵、横波波速增大,纵波波速更为明显;当纵波波速突变点应当为最大应力的84.99%时,岩石处于塑性变形阶段;应力升至极大值破裂后,纵、横波波速同时骤降,曲线特征明显。

从图5c峰值抗压强度为52.5 MPa,前期随着应力增加,岩样内部裂隙逐渐压实,纵、横波波速逐渐增加,呈现了典型的初始压密阶段特征;随着应力逐渐增大,进入弹性变形阶段,纵、横波波速同时增大,整个弹性阶段与压密阶段相比,纵、横波波速相对于前一阶段波速变化速率降低;当纵波波速出现短暂向下波动时,为岩石加载进入塑性阶段的标志,此时

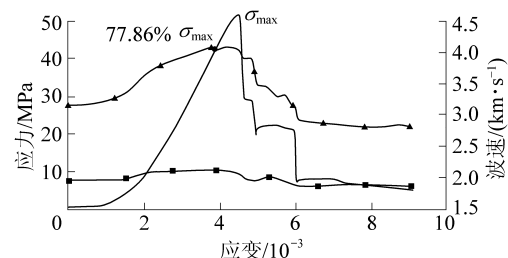
纵波波速突变点对应最大应力的77.86%;当岩样破裂后,纵、横波波速同时下降,此时塑性变形增大,内部的裂隙发展并贯通,承载力下降呈现软化特征,残余强度趋于平缓,变形增大。



(a) 泥岩



(b) 砂岩



(c) 灰岩

图5 岩样波速、应力应变曲线

Fig.5 Wave velocity, stress and strain curves of rock samples

4 应用效果分析

目前,声波监测技术探测应用较多^[16-18],但采用的反演速度多是根据探测区域岩性特征或相关资料人为估算的误差较大。通过单轴加载条件下的超声波波速测试,可以获得不同应力条件下的岩石波速特征,为不同深度和应力条件下的声波监测技术提供更为准确的波速信息。当波速精度提高20%时,探测100 m外的地质异常体深度误差减少20 m以上,能够有效提高矿井声波监测技术解释精度。

利用声波监测技术层析成像方法,可以实现矿井采动应力的动态监测,通过声波反演获得的波速变化特征反映应力集中区及其变化规律^[19-21]。然而,不同岩性、裂隙等地质条件下,波速和应力常常呈现非线性变化关系,无法通过波速值准确解析应力值。通过采取监测区域典型岩样进行试验室加载

条件下的波速测试试验,可获得波速与应力的对应关系,从而为采动应力的动态监测提供可靠依据。通过试验室测试,还可获得不同裂隙发育条件下煤岩样的波速特征。对于煤层顶板导水裂缝带和煤层底板破坏带的裂隙发育监测,也可以利用试验室获得的裂隙发育与波速关系进行校正,从而提高裂隙发育区的解析精度。

另外,通过试验室波速的测试,可为地震波场正演模拟等理论研究提供更为准确的物性参数,建立符合实际地质条件的模型,使理论研究和实际工程结合的更加紧密。

5 结 论

1)对赵庄二号井3种不同种类岩样进行单轴加载过程中,利用力和位移2种控制方法进行比对,选择方法的适用性,发现采用位移控制法可以更好获得全应力-应变曲线,通过观测位移控制法获取的全应力-应变曲线,便于直观分析试样加载变化全过程。

2)试样单轴加载过程中,压密、弹性阶段波速呈线性上升的趋势;到达应力峰值后,岩石破损,承受力降低并出现软化特征,应力与波速呈非线性变化。试样波速曲线突变与岩石内部裂隙发育程度紧密相关,波速变化趋势与应力-应变曲线基本一致,不同的应力-应变阶段均发生不同的波速响应特征。从弹性形变、塑性形变的不同阶段,试样波速变化反应了其微观损伤机理与过程。

3)通过试验室应力条件下的波速测试,获得了赵庄二号井地区不同岩性最大应力和裂隙条件下的波速特征,从而为矿井地震超前探测、采动应力监测和采动裂隙发育监测等实际探测工程提供必要的参考信息,能够有效地提高探测精度,对于声波监测技术有重要意义。

需要注意的是,得出的结论还需更多的试验数据检验,要考虑到加载控制方法、加载速率、围压、含水率、孔隙程度等一系列的影响因素,进一步研究总结不同状态下的波速变化规律。

参考文献(References):

[1] 刘天放,潘东明,李德春,等.槽波地震勘探[M].徐州:中国矿业大学出版社,1994.

[2] 梁天成,葛洪魁,郭志伟,等.利用声发射和波速变化判定岩石损伤状态[J].中国地震,2012,28(2):154-166.

LIANG Tiancheng, GE Hongkui, GUO Zhiwei, *et al.* Determination of rock damage state by acoustic emission and wave velocity change[J].Earthquake Research in China,2012,28(2):

154-166.

- [3] 刘向军,刘洪,徐晓雷,等.低孔低渗砂岩加载条件下的声波传播特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):560-567.
- LIU Xiangjun, LIU Hong, XU Xiaolei, *et al.* Experimental research on acoustic wave propagation characteristic of low porosity and permeability sandstone under loading conditions[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(3):560-567.
- [4] 许延春,谢小峰,李昆奇,等.基于超声波检测的岩体裂隙及注浆影响的试验研究[J].煤矿开采,2016,21(2):60-63.
- XU Yanchun, XIE Xiaofeng, LI Kunqi, *et al.* Experimental studying on rock fractures and grouting influence based on ultrasonic testing[J].Coal Mining Technology,2016,21(2):60-63.
- [5] 张晓君,林芊君,宋秀丽,等.裂隙岩体损伤破裂演化超声波量化预测研究[J].采矿与安全工程学报,2017,24(2):378-383.
- ZHANG Xiaojun, LIN Qianjun, SONG Xiuli, *et al.* Quantitative ultrasound prediction on damage and fracture evolution of fractured rock mass[J].Journal of Mining and Safety Engineerin,2017,24(2):378-383.
- [6] 张玉军,张华兴,陈佩佩.覆岩及采动岩体裂隙场分布特征的可视化探测[J].煤炭学报,2008,33(11):1216-1219.
- ZHANG Yujun, ZHANG Huaxing, CHEN Peipei. Visual exploration of fissure field of overburden and rock[J].Journal of China Coal Society,2008,33(11):1216-1219.
- [7] 孔令海,李峰,欧阳振华,等.采动覆岩裂隙分布特征的微震监测研究[J].煤炭科学技术,2016,44(1):109-113,143.
- KONG Linghai, LI Feng, OUYANG Zhenhua, *et al.* Study on microseismic monitoring and measuring of fracture distribution features in mining overburden strata[J].Coal Science and Technology,2016,44(1):109-113,143.
- [8] 李浩然,杨春和,刘玉刚,等.花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(10):1915-1923.
- LI Haoran, YANG Chunhe, LIU Yugang, *et al.* Experimental research on ultrasonic velocity and acoustic emission properties of granite under failure process[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(10):1915-1923.
- [9] 赵兴东,刘建坡,李元辉,等.岩石声发射定位技术及其试验验证[J].岩土工程学报,2008,30(10):1472-1476.
- ZHAO Xingdong, LIU Jianpo, LI Yuanhui, *et al.* Experimental verification of rock locating technique with acoustic emission[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(10):1472-1476.
- [10] 王媛媛,孙强,薛雷,等.岩石脆性临界破坏的波速特征分析[J].岩土力学,2014,35(2):529-535.
- WANG Yuanyuan, SUN Qiang, XUE Lei, *et al.* Analysis of wave velocity characteristics of critical rock brittle failure[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(2):529-535.
- [11] 王玉川,巨能攀,赵建军.马达岭滑坡室内岩石力学试验研究[J].水文地质工程地质,2013,40(3):52-57.
- WANG Yuchuan, JU Nengpan, ZHAO Jianjun. Testing studies of rock mechanics in lab for the Madaling Landslide[J].

- Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(3):52-57.
- [12] 刘希亮,刘少峰,秦本东.纤维混凝土三轴抗压强度及破坏特征的试验研究[J].河南理工大学学报,2013,32(2):225-229.
- LIU Xiliang, LIU Shaofeng, QIN Bendong. Experimental Study on deformation feature of hybrid fiber high-strength concrete under conventional triaxial compression[J].Journal of Henan Polytechnic University, 2013, 32(2):225-229.
- [13] 秦四清,徐锡伟,胡平,等.孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索[J].地球物理学报,2010,53(4):1001-1004.
- QIN Siqing, XU Xiwei, HU Ping, *et al.* Brittle failure mechanism of multiple locked patches in a seismic-organic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction[J].Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4):1001-1004.
- [14] 薛雷,孙强,王媛媛,等.岩体脆性破裂失稳临界应力特征重正化群研究[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(4):710-724.
- XUE Lei, SUN Qiang, WANG Yuanyuan, *et al.* Study on the critical stress state of brittle failure of rock based on renormalization group theory[J].Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(4):710-724.
- [15] 秦四清,王媛媛,马平.崩滑灾害临界位移演化的指数率[J].岩石力学与工程学报,2010,29(15):873-800.
- QIN Siqing, WANG Yuanyuan, MA Ping. Exponential laws of critical displacement evolution for landslides and avalanches[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(15):873-800.
- [16] 刘忠远.矿井地震超前探测技术在龙东矿的应用[J].中国煤炭地质,2011,22(1):51-54.
- LIU Zhongyuan. Application of mine advance seismic prediction technology in Longdong Coalmine[J].Coal Geology of China, 2011, 22(1):51-54.
- [17] 胡运兵.矿井地震反射超前法探测煤层冲刷带的应用[J].煤炭科学技术,2010,38(11):116-119.
- HU Yunbing. Application of mine seismic reflection prediction to detect scouring zone[J].Coal Science and Technology, 2010, 38(11):116-119.
- [18] 段天柱,赵洪月,胡运兵.煤矿掘进巷道地震反射波超前探测技术及应用[J].矿业安全与环保,2013,40(2):80-82.
- DUAN Tianzhu, ZHAO Hongyue, HU Yunbing. Advance detection technology with seismic reflection wave and its application in coal mine roadway excavation[J].Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(2):80-82.
- [19] 姚姚,奚先.随机介质模型正演模拟及其地震波场分析[J].石油物探,2002,41(1):31-36.
- YAO Yao, XI Xian. Modeling in random medium and its seismic wave field analysis[J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(1):31-36.
- [20] 窦玉坛,郭常升,毛中华,等.井间地震波动方程正演数值模拟及其应用[J].地球物理学进展,2007,22(6):1867-1872.
- DOU Yutan, GUO Changsheng, MAO Zhonghua, *et al.* The wave equation forward numerical simulation and application in cross well seismic[J].Progress in Geophysics, 2007, 22(6):1867-1872.
- [21] 刘良琼,刘江,张英德,等.井间地震射线走时层析成像数值模拟[J].工程地球物理学报,2004,1(5):441-446.
- LIU Liangqiong, LIU Jiangping, ZHANG Yingde, *et al.* The numerical simulation of cross hole seismic travel time computerized tomography[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(5):441-446.