煤岩体声波波速随温度变化规律试验研究

李祥春[1,2],聂百胜[1,2],杨春丽[3],毛燕军[1,2],王龙康[1,2],孙 琦[1],努尔艾力[1]
(1. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;
3. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘 要: 为了研究温度对煤岩体中波速传播的影响,利用自制的声波参数测试系统试验研究了煤岩体波速随温度变化规律,以期为研究声波在煤岩体中的传播提供理论参考。研究结果表明: 随温度升高,煤岩体试样内纵横波波速总体表现为减小,在减小过程中会出现波动现象。试样的波阻抗大小与波速大小之间具有高度正相关特性。温度的升高将使煤岩体内各种矿物成分发生热膨胀,但由于这些矿物种类不同,其热膨胀系数也不同,导致其中的微孔隙或裂隙发生增长和扩大,煤岩体孔隙结构发生变化,煤岩体弹性模量和波速减小; 另外,温度的升高会造成煤岩体内矿物质或胶结物的变化,从而导致煤岩体弹性模量和波速的降低。

关键词: 温度; 煤岩体; 声波; 波速
中图分类号: TD313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)05-0140-05

Experiment study on acoustic wave velocity law with temperature variation in coal and rock mass

Li Xiangchun[1,2], Nie Baisheng[1,2], Yang Chunli[3], Mao Yanjun[1,2], Wang Longkang[1,2], Sun Qi[1], Nueraili[1]
(1. *School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 100083, *China*;
2. *National Key Lab of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 100083, *China*;
3. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to study the temperature affected to the wave velocity transmission in the coal and rock mass, a self developed acoustic wave parameter test system was applied to the experiment study on the wave velocity law of the coal and rock mass with the temperature variation to provide theoretical references to the study on the acoustic wave transmission in the coal and rock mass. The study reasults showed that with the temperature increased, the wave velocity of the P-wave and S-wave in the coal and rock samples would in a reduction generally and would have an undulatory phenomenon. There was a high positive correlation feature between the wave impedance size and wave velocity size of the coal samples. The temperature rose would cause heat expansion of different mineral contents in the coal and rock mass. Due to the different types of the minerals, the heat expansion coefficient would be different, the micro pores and cracks in the coal and rock mass would be increased and expanded. The porous structure of the coal and rock mass would be varied and the elastic modulus and wave velocity of the coal and rock mass would be reduced, Meanwhile, the temperature rose would cause the variation of the mineral and binding material in the coal and rock mass and thus the elastic modulus and wave velocity of the coal and rock mass would be reduced.

Key words: temperature; coal and rock mass; acoustic wave; wave velocity

0 引 言

声波测试技术应用于工程地质探测之中已经取得了很大成功,尤其在地震波的应用探测技术领域。近年来的金属探伤、物探以及声波测井技术都是声波测试技术的发展和延伸[1-4]。但是,煤岩体的声

收稿日期: 2015-11-29; **责任编辑:** 王晓珍 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.05.027
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304212); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120023120005); 北京高等学校青年英才计划资助项目(YETP0930); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QZ09)
作者简介: 李祥春(1979—),男,内蒙古阿荣旗人,副教授,博士。通讯作者: 聂百胜,教授,博士,E-mail: bshnie@163.com
引用格式: 李祥春,聂百胜,杨春丽,等.煤岩体声波波速随温度变化规律试验研究[J].煤炭科学技术,2016,44(5):140-144.
Li Xiangchun, Nie Baisheng, Yang Chunli, *et al*. Experiment study on acoustic wave velocity law with temperature variation in coal and rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 140-144.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

探测技术在应用过程中却遇到了一些问题。这主要是因为煤体作为一种特殊的岩石,它的质地松软,内部孔裂隙结构复杂,导致其声学特性有较强的衰减特征。因此,有必要对煤体中声波的传播做进一步的研究,尤其是温度、应力等因素对煤体中声波传播的影响。

国内外众多学者研究了温度对于煤岩体波速的影响。李纪汉等[5]研究了温度变化引起大理石以及辉长石的波速变化特征曲线和声发射的特征活动,试验揭示了岩石在高温条件下的波速效应,并且发现了开裂波速的记忆效应。刘祝萍等[6]研究认为温度从 16.5 ℃上升至 60 ℃时,波速下降,规律近于线性。席道瑛等[7]在-60~600 ℃对花岗岩、大理石和砂岩 3 种岩石的弹性模量和波速的变化进行研究,试验结果表明: 随着温度的升高,岩石的模量和波速逐渐减小。白利平等[8]从室温条件下加载温度到 1 100 ℃,分别采用了声波透射-反射法以及阻抗谱法测量了辉长石的纵波波速和电导率,结果表明: 680 ℃以下,纵波波速随着温度的升高处于小幅度降低趋势,在温度高于 680 ℃条件下,波速开始急剧变化,可能与岩体内的含水矿物脱水诱发的部分熔融相关。秦本东等[9]研究认为砂岩波速随温度增加而下降。周莉等[10]为了预测深部岩体的力学性质,通过脉冲透射的方法对鹤岗南山矿的深部砂岩在 18~130 ℃时进行波速测试,结果表明: 纵波波速在 30~55 ℃时,横波波速在 30~80 ℃时随温度的升高略有下降,并且下降幅度纵波较小,纵横波速比随温度的升高而逐渐上升。Kern 等[11-13]研究了高温高压条件下岩石样品波速随温度的变化,得到了波速随温度呈线性变化的系数。Tatsumi 等[14]研究了麻粒岩和角闪岩波速随温度的变化,得到了二者纵波速度随温度变化的线性关系。从这些研究可以看出,研究多针对岩石开展,而对于煤体研究相对较少。为此,笔者利用自制的试验仪器试验研究了煤岩体波速随温度的变化规律。

1　试　　验

1.1　试验系统

试验系统为煤岩声波参数测试系统,由声波发射系统、声波测量系统、数据采集系统、温度控制系统组成,其结构如图 1 所示。数据采集系统采用 DSO7012B 型号的双通道示波器,可以同时测量声波传播过程中的纵波和横波穿过煤样的时间差。声波发射系统采用西南石油大学国家重点实验室研制开发的声波发射器。温控系统采用 ES-Ⅲ型温度控制仪,可以实现温度的连续变化。

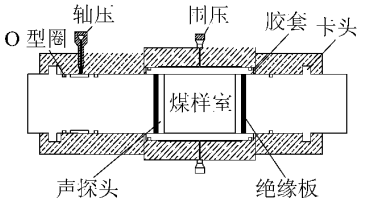


图 1　煤岩声波参数测试系统示意

Fig. 1　Schematic diagram of acoustic wave measurement system in coal and rock

1.2　煤　　样

本次试验煤样分别取自山西杜儿坪矿、官地矿、马兰矿 2 号煤层和 8 号煤层,在实验室制成 ø25 mm×50 mm 的标准煤样,煤样断面的平整度误差小于 0.02 mm。煤样的工业分析结果见表 1。

表 1　煤样工业分析基本参数

Table 1　Basic industrial analysis parameters of coal sample

煤样	M_{ad}/%	V_{ad}/%	A_{ad}/%	FC_{ad}/%
杜儿坪	0.80	14.84	8.20	76.12
官地	0.82	13.28	11.03	75.48
马兰 8 号	0.45	51.18	2.66	45.72
马兰 2 号	0.48	24.55	5.69	69.29

1.3　试验方案

为了达到比较理想的试验效果,本试验在温度变化过程中保持煤样品处于三轴应力状态,轴向压力 0.5 MPa,围压保持在 0.5 MPa(轴压、围压过大,均会导致煤岩体孔隙、裂隙闭合,不利于测试真实的煤体结构随温度变化规律) 。温度依次由常温 20 ℃增加到 60 ℃,温度梯度保持在 5 ℃,测量每个温度点下的波速变化。

2　试验结果及分析

对于声波波速的测量,常用的方法就是测量单位时间内声波通过的距离,要实现这样的过程就必须有声波信号的激发和接收装置,加上声传递介质的基本物理参数和相对应的声时测量装置,就可以确定波速,这也是声波测量的基本原理,计算公式见式(1) 。波阻抗为波速与煤岩体密度的乘积,计算公式见式(2) 。

$$V = \frac{L}{T} \tag{1}$$

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

式中: V 为煤岩体声波波速,m/s; L 为煤样长度,m; T 为声波在介质中的传播时间,s。

$$Z = \rho V \tag{2}$$

式中: Z 为波阻抗,kg/(m^2 · s); ρ 为煤岩体密度,kg/m^3。

图 2 和图 3 分别是不同煤样波速、波阻抗随温度变化试验结果。图 4 是不同煤样纵波和横波波速随温度变化对比。从试验结果可以分析得到以下 5 点。

1) 不同矿井的原煤试样在 20~60 ℃内总体表现为波速随温度升高而减小的变化规律。波速随温度升高而减小的原因主要是[15-19]: 温度升高过程,煤体发生物理热膨胀现象,体积膨胀必然导致煤体弹性模量的降低,间接导致波速的降低; 热应力的存在,使得煤体内部会发生相对错动和剪切作用,结果导致煤体裂纹、裂隙的扩张和微裂隙(裂纹)的二次发育,造成声波能量的衰减,导致波速降低; 随着温度的升高,煤体内部对温度变化敏感的矿物质或胶结物可能会出现部分脱水或者熔融等变化,增加煤体内部孔隙流体的黏滞性,增大了声波的衰减。

2) 试样的波阻抗随温度的变化与波速呈现出高度的正相关特性。由图 2 和图 3 四个矿原煤试样波速、波阻抗的变化可以直观地发现波阻抗同波速的变化规律高度一致。因此,在煤体密度变化不大的情况下,可以用波速的变化来表征波阻抗的变化规律。

3) 不同温度区间内,波速随温度的升高而变化的幅度各有差异。由图 4 可以看出,在 20~30 ℃,波速变化幅度比较大。这可能是因为低温段煤体中各矿物在受热膨胀过程中差异导致孔裂隙结构变化较明显,导致波速的变化幅度较大,而高温段微裂隙缓慢发育,波速变换幅度相对平缓。

4) 在局部温度范围内,波速出现增大反弹的现象。无论是纵波还是横波均出现了波速的反弹增大现象,这可能是由于煤体内部不同晶体结构的弹性不同,热膨胀过程沿不同的晶轴进行,膨胀过程的不同步以及围压的存在导致煤体孔隙结构变化,导致波速在不同温度梯度内增大。

5) 纵波、横波对温度的变化表现出不同的敏感度。由图 4 可知,除马兰矿试样以外,其他矿试样的横波随温度的变化幅度大于纵波的变化幅度。杜儿坪煤样横波波速变化幅度达到了 5.33%,纵波波速变化幅度只有 1.55%。官地矿煤样横波波速变化幅度达到了 20.02%,纵波波速变化幅度只有 1.95%。究其原因可能是横波对温度变化过程中的煤体内部孔隙、裂隙结构的闭合和再发育情况更加敏感; 另外一个原因可能是新发育的裂隙的方向平行于横波传播过程中质点的振动方向,导致煤体内波速减小幅度增大。

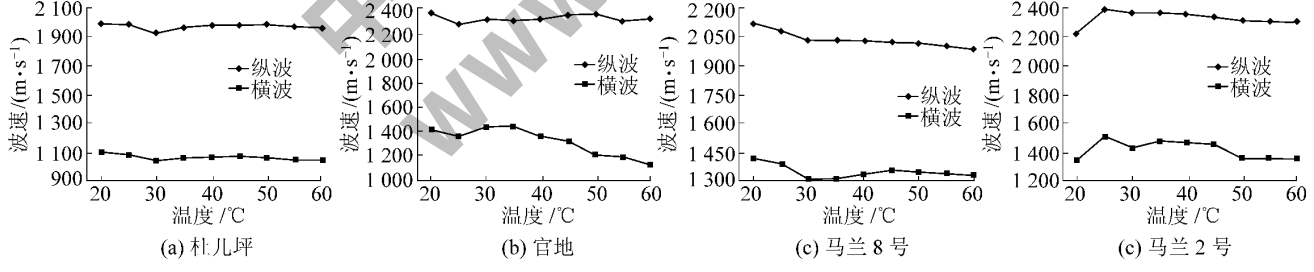


图 2　煤样波速随温度变化曲线

Fig. 2　Wave velocity change curves in coal sample with temperature

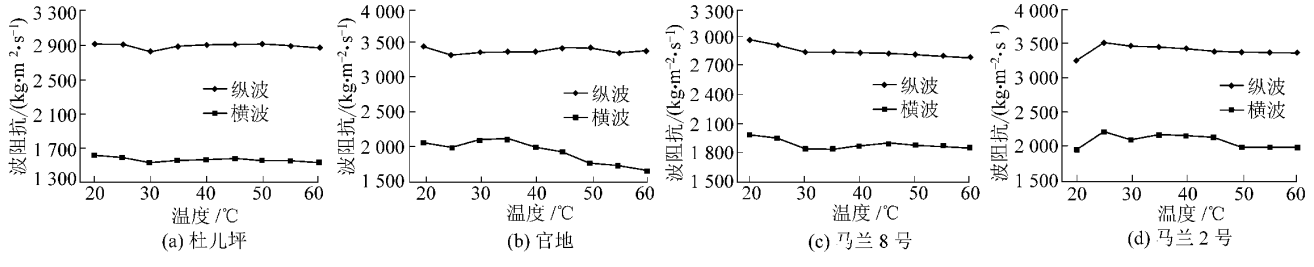
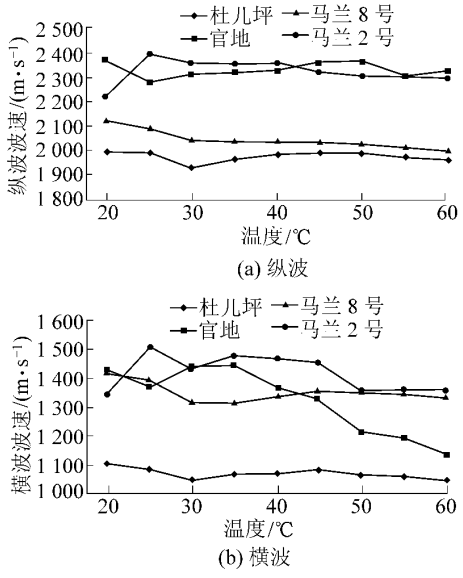


图 3　煤样波阻抗随温度变化曲线

Fig. 3　Wave impedance change curves in coal sample with temperature



(a) 纵波

(b) 横波

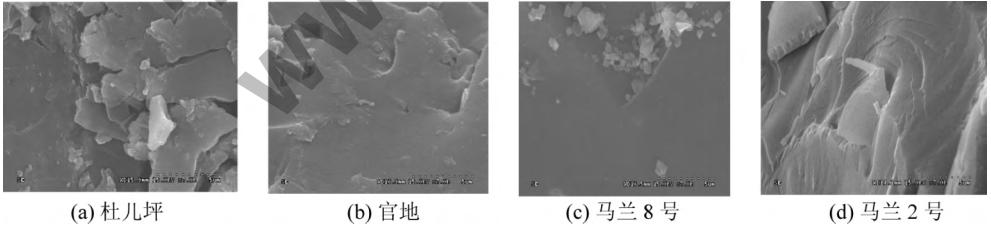
图 4　煤样纵波、横波波速变化曲线

Fig. 4　The longitudinal and transverse wave velocity change curves in coal sample

3　温度对波速影响理论分析与探讨

煤岩体作为非弹性介质，其内部的孔隙、裂隙的发育程度对煤岩体的波速影响很大[20]。当煤体受热后会发生膨胀，其孔隙裂隙结构发生变化。而且随着热应力的不断增加，煤体原生和外生裂隙和孔隙不断形成、发育和扩展，也会使煤体结构发生变化。由于煤体结构中的孔隙、裂隙以及新产生的裂隙对煤体中的波速传播有很大的影响，因此，煤体孔隙、裂隙结构特征是分析煤体受热条件下声波波速变化规律的基础。利用电镜扫描技术在室温下对煤体内部的结构进行了研究，如图 5 所示。从电镜扫描图片可以直观地看出，杜儿坪矿试样孔隙裂隙充分发育，并且孔隙裂隙之间相互交合，除此之外，还能看到试样表面含有明显的胶结物碎屑，高倍放大条件下煤体结构呈现疏松状态; 相对于杜儿坪矿煤样马兰 2 号试样表面有较少量的微孔隙发育，但却可以看到明显的层状结构特征; 官地试样相对结构完整，孔隙裂隙很少，只有微量的胶结物碎屑存在; 而马兰 8 号矿试样表面无明显的孔隙、裂隙结构特征，但有胶结物残留碎屑。

从试验结果可以看出，杜儿坪煤样纵横波波速最小，这跟杜儿坪煤样结构有很大关系。根据扫描电镜结果可知，杜儿坪煤样孔裂隙结构最发达，所以当声波在其中传播时衰减最大、波速最小。马兰 8 号煤样的纵波速度比马兰 2 号和官地小，而横波速度较接近。从煤样 SEM 测试结果可知，马兰 2 号和官地煤样的孔裂隙要多于马兰 8 号，马兰 8 号煤样的胶结物残留碎屑较多，这说明在煤体受热过程中其内部的胶结物残留碎屑对声波纵波波速的衰减起着较大的作用，而对横波波速变化相对影响较小。这可能是因为声波的传播方式不同导致的。对于马兰 2 号和官地煤样的孔隙裂隙结构相对较接近，所以其纵横波波速也较接近。



(a) 杜儿坪　(b) 官地　(c) 马兰 8 号　(d) 马兰 2 号

图 5　放大倍数为 7 000 时的 SEM 扫描测试结果

Fig. 5　SEM scanning results under the magnifying multiple of 7 000 times

根据试验结果可知，随着温度的升高，纵横声波波速总体上表现为不同程度的降低。这主要是煤岩体受热后各种矿物成分都要发生热膨胀，但由于这些矿物种类不同，其热膨胀系数也不同，导致其中的微孔隙或裂隙发生增长和扩大，煤岩体孔隙结构发生变化，煤岩体弹性模量和波速减小; 另外，温度的升高会造成煤岩体内矿物质或胶结物的不可逆变化和相位的变化，从而导致煤岩体弹性模量和波速的降低。但马兰 2 号煤样在 20~25 ℃时，表现为波速的增加。这可能是由于其结构中胶结物残留碎屑很少，其温度升高只导致了煤体内相对较单一的颗粒成分发生膨胀，进而发生了孔裂隙的闭合减小，因而，波速增加。当温度进一步升高，其煤体中的微裂隙将发生扩展，煤体损伤发生，导致波速降低。

4　结　　论

1) 随温度升高，煤岩体试样内纵横波波速总体表现为减小，在减小过程中会出现波动现象。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

2) 试样的波阻抗变化与波速变化之间具有高度正相关特性。

3) 温度的升高将使煤岩体内各种矿物成分发生热膨胀,但由于这些矿物种类不同,其热膨胀系数也不同,导致其中的微孔隙或裂隙发生增长和扩大,煤岩体孔隙结构发生变化,煤岩体弹性模量和波速减小;另外,温度的升高会造成了煤岩体内矿物质或胶结物的变化,从而导致煤岩体弹性模量和波速的降低。

参考文献(References) :

[1] 赵明阶,徐　蓉.岩石声学特性研究现状及展望[J].重庆交通学院学报,2000,19(2):79-86.
Zhao Mingjie,Xu Rong.The present situation and prospect of the acoustic properties research in rock[J].Journal of Chongqing Jiaotong Institute,2000,19(2):79-86.

[2] 格列丘欣 B B.应用地球物理方法研究含煤建造[M].北京:地质出版社,1980.

[3] 陈成宗.工程岩体声波探测技术[M].北京:中国铁道出版社,1990.

[4] 刘天放,李志聃.矿井地球物理勘探[M].北京:煤炭工业出版社,1992.

[5] 李纪汉,刘晓红,郝晋昇.温度对岩石弹性波速和声发射的影响[J].地震学报,1986,8(3):294-295.
Li Jihan,Liu Xiaohong,Hao Jinsheng.Temperature effects on the elastic wave velocity and acoustic emission of rocks samples[J].Acta Seismologica Sinica,1986,8(3):294-295.

[6] 刘祝萍,吴小薇,楚泽涵.岩石声学参数的实验测量及研究[J].地球物理学报,1994,37(5):659-666.
Liu Zhuping,Wu Xiaowei,Chu Zehan.Laboratory study of acoustic parameters of rock[J].Acta Geophysical Sinica,1994,37(5):659-666.

[7] 席道瑛,谢　端,易良坤,等.温度对岩石模量和波速的影响[J].岩石力学与工程学报,1998,17(S):802-804.
Xi Daoying,Xie Duan,Yi Liangkun,*et al*.Effects of temperature on rock's modulus and wave velocity[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1998,17(S):802-804.

[8] 白利平,杜建国,刘　巍.高温高压下辉长石纵波速度和电导率实验研究[J].中国科学,2002,32(11):960-963.
Bai Liping,Du JianGuo,Liu Wei.Longitudinal wave velocity and conductivity of gabbros under high temperature and high pressure[J].China Science,2002,32(11):960-963.

[9] 秦本东,谌伦建,罗运军,等.煤层顶板砂岩高温下超声传播特征分析[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2006,25(1):42-44.
Qin Bendong,Chen Lunjian,Luo Yunjun,*et al*.Experimental research on character of ultrasonic wave spreading in sandstone on upper plank of coal bed at high temperature[J].Journal of Liaoning Technical University:Science Edition,2006,25(1):42-44.

[10] 周　莉,李德建,王春光.温度对深部砂岩波速的影响[J].黑龙江科技学院学报,2007,17(3):178-180.
Zhou Li,Li Dejian,Wang Chunguang.Temperature effect on wave velocity of deep sandstone[J].Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technonogy,2007,17(3):178-180.

[11] Kern H,Schenk V.Elastic Wave Velocity in Rocks from a Lower Crustal Section in Northern Alabria(Italy)[J].Phys Earth Planet Inter,1985,40:147-160.

[12] Kern H,Tubia J M.Pressure and Temperature Dependence of P- and S-Wave Velocities,Seismic Anisotropy And Density of Sheared Rocks from the Alpujata Massif(Ronda Peridotites,Southern Spain)[J].Earth Planet Sci Lett,1993,119:191-205.

[13] Kern H,Liu B,Popp T.Relationship between anisotropy of P and S wave velocities and anisotropy of attenuation in serpentinite and amphibolite[J].J Geophys Res,1997,102(B2):3051-3065.

[14] Tatsumi Y,Ito K,Goto A.Elastic wave velocites in isochemical granulite and amphibolite:origin of a low-velocity layer at the slab/mantle wedge interface[J].Geophys Res Lett,1994,21(1):17-20.

[15] 张宗贤.岩石的热损伤效应[J].有色金属,1993,45(3):1-6.
Zhang Zongxian.Effects of heating damage on rock[J].Nonferrous Metals,1993,45(3):1-6.

[16] 赵洪宝,尹光志,谌伦建.温度对砂岩损伤影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2784-2788.
Zhao Hongbao,Yin Guangzhi,Chen Lunjian.Experimental study on effect of temperature on sandstone damage[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(S1):2784-2788.

[17] 曹　峰.温度对深部岩石力学性质的影响[J].重庆科技学院学报,2012,14(5):83-85.
Cao Feng.Review of temperature impact of mechanical properties of deep rock[J].Journal of Chongqing University of Science and Technology,2012,14(5):83-85.

[18] 杨金国.花岗岩的热损伤机理及可磨削性研究[D].泉州:华侨大学,2013.

[19] 王　鹏,许金余,刘　石,等.热损伤砂岩力学与超声时频特性研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1897-1904.
Wang Peng,Xu Jinyu,Liu Shi,*et al*.Mechanical properties and ultrasonic time-frequency characteristics of thermally damaged sandstone[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(9):1897-1904.

[20] 徐晓炼,张　茹,戴　峰,等.煤岩特性对超声波速影响的试验研究[J].煤炭学报,2015,40(4):793-800.
Xu Xiaolian,Zhang Ru,Dai Feng,*et al*.Effect of coal and rock characteristics on ultrasonic velocity[J].Journal of China Coal Society,2015,40(4):793-800.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net