

酸性溶液中砂岩声波特性变化规律的试验研究

霍润科¹, 王 强², 王 博¹, 辛宏伟¹, 李曙光¹

(1.西安建筑科技大学土木学院, 陕西 西安 710055; 2.海马(郑州)房地产有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 波速与岩石的物理力学参数具有较好的相关性, 超声波检测技术被越来越多的应用到岩石物理性质的研究中. 利用超声波检测技术的纵波波速、振幅以及频谱图等参数, 对砂岩在不同 HCl 溶液和 H₂SO₄ 溶液浸泡时段的波速变化规律进行了跟踪研究. 实验发现酸对砂岩的腐蚀速率呈现出一定的阶段性特征; 酸性较强时, 酸的种类对腐蚀影响较大, 酸性较弱时, 酸的浓度对腐蚀影响较大; 腐蚀后, 烘干试样孔隙率增大波速下降, 下降最高为 2.5%, 而浸泡试样孔隙被液体填充后砂岩试样趋于均匀, 从而使波速增大, 最大变化率为 16.65%; HCl 和 H₂SO₄ 溶液中试样的振幅变化规律与波速相似, 呈现一定的阶段性特性, 其中 HCl 溶液中试样的振幅下降 66.7%, 而 H₂SO₄ 溶液为 57.9%; 经腐蚀后试样波形发生畸变, 主频衰减, HCl 溶液浸泡试样波形变化和主频衰减程度较大于 H₂SO₄ 溶液浸泡试样.

关键词: 砂岩; 酸性腐蚀; 纵波波速; 幅值; 频谱

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0041-06

Acoustic properties variation analysis of the sandstone in acidic solution

HUO Runke, WANG Qiang, WANG Bo, XIN Hongwei, LI Shuguang

(1.School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an, 710055, China;

2.Haima (Zhengzhou) Real Estate Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China.)

Abstract: Velocity has a positive correlation with the physical and mechanical parameters of rock, and ultrasonic inspection techniques are increasingly applied to the study of the physical properties of rocks. The velocity variation of sandstone in different HCl solution and H₂SO₄ solution soak period was carried out in a follow-up study through longitudinal wave velocity, amplitude and spectrum parameters of ultrasonic testing techniques. It was found that the corrosion rate of acid to sandstone shows some phase characteristics. The stronger the acid is, the greater impact on corrosion of the type of acid. When the acid is weak, acid concentration shows greater impact on corrosion. The velocity decreased because of the increase of the porosity and defects after corroding decreased down to 2.5%. The sandstone tends to be uniform because the pores are filled with liquid so that the velocity increases and the maximum rate of change is 16.65%. The amplitude variation of sandstone in HCl solution and H₂SO₄ solution is consistent with the velocity showing some stage characteristics. The amplitude of sandstone in HCl solution decreased by 66.7% while it decreased by 57.9% in H₂SO₄ solution. The waveform distorted and frequency attenuated after corroding. The distortion and attenuation of the sandstone is greater in HCl solution than in H₂SO₄ solution.

Key words: ultrasonic test; sandstone; acid corrosion; longitudinal wave velocity; amplitude; spectrum

波速是岩石物理力学性质的综合反映, 且具有较好的相关性. 超声波检测是利用材料及其缺陷的声学性能差异, 对声波传播波形反射情况和穿透时间的能量变化来检验材料内部缺陷的无损检测方法. 超声波在穿透岩石后, 会携带大量信息, 如声时、声速、波幅、频率、波形等等, 这些信息能够反映出岩石内部结构和损伤的变化, 包括孔隙率和缺陷变化等^[1]. 由超声波检测仪, 可以直接得到岩样纵波波形图、频谱图、波速、首波幅值及主频; 在声波传播过程中, 动能和位能相互交替转化, 其对应的参数分别为纵波波速和振幅. 刘洋、赵明阶^[2]从超声波速、声衰减系数、频率、频谱等方面对岩石声学参数与应力相关性进行了研究, 以损伤、断裂以及分形理论为基础, 通过实测试验, 初步建

立了岩石声-应力相关性的理论模型. 邓华锋^[3]等研究了饱水度对砂岩纵波波速及强度的影响, 得出纵波波速与饱水度具有明显的非线性关系. 郭印同、杨春和^[4]对单轴和三轴压缩过程中的应力-纵波波速之间的变化规律进行了研究, 对不同围压下, 压缩过程中的波速变化规律进行了比较, 得出岩石单轴抗压强度与纵波波速之间的规律为纵波波速越大, 相应的单轴抗压强度也越大. 周文戈^[5]、岳兰秀^[6]和蒋玺^[7]等分别对粗面玄武岩、安山岩、斜长角闪岩和角闪石斜长片麻岩进行了高温高压状态下的弹性波速测量, 并通过实验中间产物观测, 研究了这些岩石中的物相变化与弹性波速的关系. 霍润科^[8-9]通过试验研究, 分析了砂岩在浸泡不同时间段的波速变化规律. 本文是在前人工作的基础上, 利

用超声波检测技术对浸泡不同时段砂岩的纵波波速、振幅以及频谱图等物理参数变化进行了实时跟踪和分析,得到了不同时段浸泡 HCl 和 H_2SO_4 溶液中砂岩的波速变化规律。

1. 岩石波速测试

1.1 岩样成份分析

试样取自陕西省某水利工程,岩样碎屑遇稀盐酸剧烈起泡,钙质含量较高,深灰色,砂状结构,岩性较致密坚硬,碎屑粒径介于 0.04~0.3 mm 之间,形状不规则,以次棱角状为主。在偏光显微镜下分析表明,碎屑成份主要为石英、长石、云母、绿泥石以及硅质岩屑、灰岩岩屑。粘土质杂基及少量方解石、硅质、铁质、绿泥石胶结物,颗粒之间以颗粒支撑为主,呈点状或线状接触,孔隙式胶结为主。如图 1 所示。

选取整块无原生节理或裂隙砂岩岩块,按试验规程要求加工、制备试样。岩样为直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱体,采用声波测试仪对岩样筛选,选取 36 块波速相近的岩样用于试验。

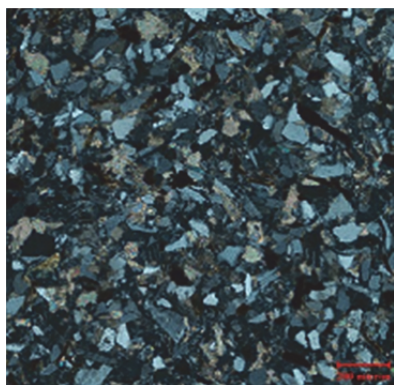


图 1 试样正交偏光图

Fig.1 Orthogonal polarizing figure of samples

1.2 实验设备及过程

实验中使用的主要仪器有 XZ-1B 型旋片真空泵(产生 0.1MPa 的真空压强)、WGL-30B 型烘箱(控温范围:室温+5~300 °C)、CP1502 型号电子天平(分度值 0.01 g),见图 2(a)所示;超声检测仪采用 RSM-SY5 超声波检测仪,主要技术指标如下:声时测度精度 0.1 μ s,测度间隔 0.1~6 553.5 μ s,发射电压 300 V,如图 2(b)所示。

将选取的 36 块试样分成两大组,第一组浸泡在 HCl 溶液中,另一组泡在 H_2SO_4 溶液中,然后每组再按 PH=2、3.5 和 5 不同浓度分成三组,每组试样数量均为 6 块。

试验步骤如下:①将两组试样烘干,测试其初始质量和波速;②将两组岩样进行抽真空饱和(真空

压力保持 100 kPa 持续抽气 4 h,然后常压静置 4 h,充分饱和),然后测试其饱和质量和波速;③将试样分别浸泡在不同浓度酸溶液中,浸泡时间分为三个阶段,每个阶段均 30 d,每个阶段结束后,更换浸泡溶液,同时,各个阶段每隔 10 d,按照步骤①②测试质量和波速,最后得出试验结果。



(a) 抽真空饱和及烘干



(b) 超声波检测和质量检测

图 2 声波测试实验过程及仪器

Fig.2 Acoustic testing laboratory processes and equipment

2. 试验结果及其分析

2.1 不同酸性溶液试样纵波波速结果对比分析

2.1.1 浸泡试样纵波波速

通过三个阶段的试验,从不同 PH 值的 HCl 溶液和 H_2SO_4 溶液中各选出一个具有代表性的试样进行分析,测得酸液浸泡试样纵波波速结果如图 3-4 所示。

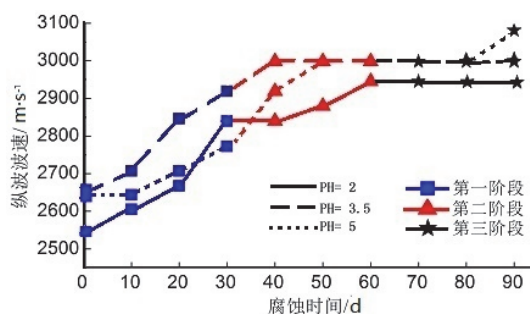


图 3 HCl 溶液中试样波速变化曲线(浸泡)

Fig.3 Velocity curve of sample in HCl solution

从图中可看出,在 HCl 溶液中,试样浸泡后,波速迅速增大,且增长速率 PH=2 大于 PH=3.5 大于 PH=5,第一阶段 30 d 结束后,波速分别增长了 265 m/s、237 m/s 和 126 m/s。第二阶段增长速率变缓,波速分别增长 99 m/s、94 m/s 和 75 m/s,增长幅度为第一阶段的 30%左右。第三阶段,波速变化基本

稳定, 仅 PH=5 溶液中试样波速增大了 79 m/s.

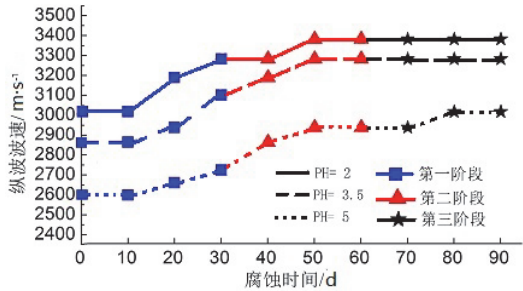


图 4 H₂SO₄ 溶液中试样波速变化曲线(浸泡)
Fig.4 Velocity curve of sample in H₂SO₄ solution

在 H₂SO₄ 溶液中, 第一阶段 0~10 d 内, 波速增长较缓慢, 10 d 后才开始增大, 增长趋势与 HCl 溶液基本一致, 第一阶段 30 d 结束后, 波速分别增长 297 m/s、278 m/s 和 132 m/s. 第二阶段波速增长速率也变缓, 波速分别增长了 105 m/s、0 m/s 和 79 m/s, 第三阶段仅 PH=5 溶液中试样波速增大了 83 m/s. 将两组溶液结果对比可以看出, HCl 溶液中试样反应速率要比 H₂SO₄ 大, 这是由于 H₂SO₄ 是具有较强氧化性, 生成的胶体化合物阻碍了硫酸溶液与未腐蚀砂岩的接触.

为了全面了解试样在不同时段和不同浓度酸液中物理性质变化, 定义了反映状态的物理量-波速变化率 b , 其为每个时段浸泡结束时, 试样的纵波波速变化量与其初始波速之比.

$$b = \frac{V_{pt} - V_{po}}{V_{po}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_{po} 和 V_{pt} 分别为试样浸泡前后的纵波波速(单位: m/s).

表 1 不同时段波速变化率成果表

溶液 PH 值	HCl			H ₂ SO ₄		
	2	3.5	5	2	3.5	5
第一阶段/%	11.67	10.52	4.99	8.83	8.33	4.88
第二阶段/%	15.80	13.51	13.51	12.13	14.72	13.17
第三阶段/%	15.80	13.51	16.65	12.13	14.72	16.23

由波速变化率成果可得出: 第一阶段 30 d 后, PH=2、PH=3.5 和 PH=5 的 HCl 溶液中砂岩试样波速变化率分别为 11.67%、10.52%和 4.99%, H₂SO₄ 溶液中试样分别为 8.83%、8.33%和 4.88%, 两组波速变化规律基本一致, 表现为酸性越强波速变化率越大, 两者呈正比关系. 第二阶段, 三种不同 PH 的 HCl 溶液中的试样波速变化率分别为 15.80%、13.51%和 13.51%, 三种不同 PH 的 H₂SO₄ 溶液中的试样波速变化率分别为 12.13%、14.72%和 13.17%. 第三阶段时, PH=5 的 HCl 溶液中试样波

速变化率达到了 16.65%, 大于 PH=2 和 PH=3.5 溶液中的试样, 同样, PH=5 的 H₂SO₄ 溶液中试样波速变化率达到了 16.23%, 大于 PH=3.5 溶液中的试样大于 PH=2 溶液中的试样, 其余试样波速变化率与第二阶段相同. 试验分析表明, 在浸泡初始阶段, 酸性越强的溶液腐蚀速率越大, 随着反应的进行, 速率逐渐变缓, 最终趋于稳定, 而酸性较弱的酸溶液腐蚀速率在第一阶段腐蚀过程比较平缓, 其第二阶段腐蚀速率要明显大于强酸溶液. 同时, 在浸泡初期砂岩与强酸剧烈反应, 而随着时间的延续, 生成了具有很强密实性和吸附能力的胶体化合物, 到后期阻碍了酸液的进一步渗透, 而弱酸溶液在整个腐蚀过程中表现为先慢后快的变化趋势, 呈现出一定的阶段性特征.

将 HCl 和 H₂SO₄ 溶液相同 PH 的溶液试样波速变化率进行对比, 可以看出, PH=2 和 PH=3.5 的酸溶液, HCl 溶液中的试样每一阶段分别比 H₂SO₄ 大 3%和 2%左右, 而 PH=5 的溶液, HCl 中的试样每一阶段均与 H₂SO₄ 溶液中试样近似相同. 这表明酸性越强即 PH 值越小时, 不同种类的酸性溶液腐蚀效果有差异, 弱酸(PH=5)溶液中, HCl 与 H₂SO₄ 的波速变化率基本相同, 说明酸浓度是影响化学反应的主要因素, 酸的种类对砂岩的腐蚀作用所占的比重已经很小了.

2.1.2 烘干试样纵波波速

将各组浸泡的试样的烘干结果进行对比分析, 纵波波速如图 5-6 所示.

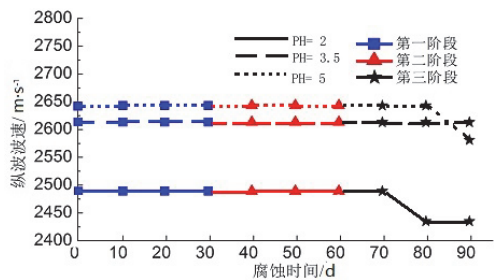


图 5 HCl 溶液中试样波速变化曲线(烘干)
Fig.5 Velocity curve of sample in HCl solution

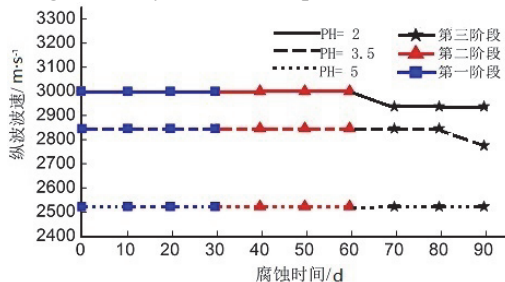


图 6 H₂SO₄ 溶液中试样波速变化曲线(烘干)
Fig.6 Velocity curve of sample in H₂SO₄ solution

对比浸泡试样和烘干试样波速变化曲线,发现两者差异较大,烘干试样在前两个阶段中波速均未发生变化,直到第三阶段酸性较强试样波速才有所下降,且下降幅度不大,两者对比结果如表 2 所示。

表 2 浸泡试样与烘干试样波速变化率对比表
Tab.2 The comparison of velocity change rate between dried sample and immersed sample

溶液 PH 值	HCl			H ₂ SO ₄		
	2	3.5	5	2	3.5	5
浸泡试样/%	15.8	13.51	16.65	12.13	14.72	16.23
烘干试样/%	-2.2	0	-2.3	-2.1	-2.5	0

从表 2 中可以看出,浸泡试样波速均呈增大趋势,试样波速增长率均在 12% 以上,最大达到 16.23%,而烘干试样波速变化较小且为负值,波速最大降低 2.5%,且部分试样波速未增加,其原因是,砂岩试样在腐蚀后,内部孔隙率增大和缺陷增多,当超声波穿过试样时,超声波遇到缺陷界面时发生了反射、散射、绕射等现象,导致波速骤降为负值。而经不同时段浸泡的砂岩试样,液体填充了孔隙,引起砂岩试样固、液、气三相比例的重新调整,而且趋于均匀,使试样后期波速呈增加到逐步稳定的趋势。

2.2 振幅及频谱分析

2.2.1 振幅

超声波的另一个重要指标是振幅,检测仪器将波动信号转换为电信号输出,得到两种不同浓酸溶液中的振幅结果如图 7-8 所示。

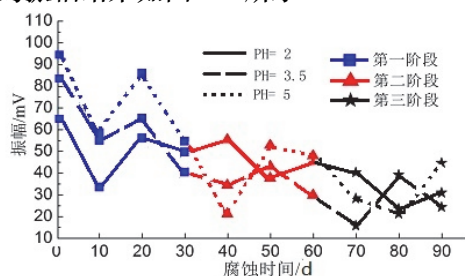


图 7 HCl 溶液中试样振幅变化曲线
Fig.7 Amplitude curve of sample in HCl solution

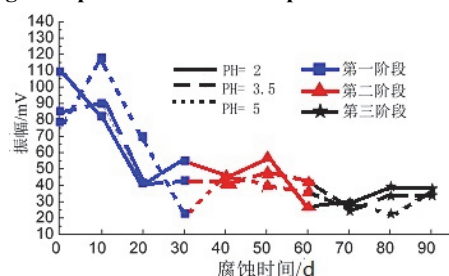


图 8 H₂SO₄ 溶液中试样振幅变化曲线
Fig.8 Amplitude curve of sample in H₂SO₄ solution

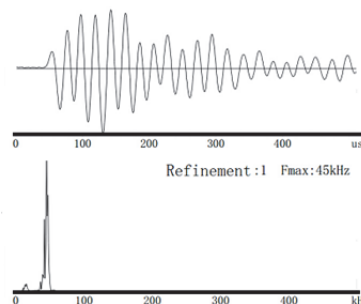
由于超声波振幅具有很强的敏感性,同时受周围的环境因素影响较大以及仪器的精确度等,所测

得的振幅离散性较大且有交错现象,但两组振幅整体都呈减小的趋势,速率均由大变小。从图中可以看出,两组不同 PH 值的酸溶液振幅变化差异性较小,H₂SO₄ 溶液的三条变化曲线比较靠拢,而 HCl 溶液则比较分散且交叉较多。其中,HCl 溶液中试样最初的平均振幅为 90 mV,第一阶段浸泡开始后振幅先下降,在浸泡 20 d 左右,振幅有一定回升,然后又继续下降,第一阶段结束后,平均振幅降至 50 mV 左右,降低了 44.4%。第二阶段和第三阶段则变化不大,振幅稳定在 30 mV 左右,整个过程振幅减小了 60 mV,降低了 66.7%。

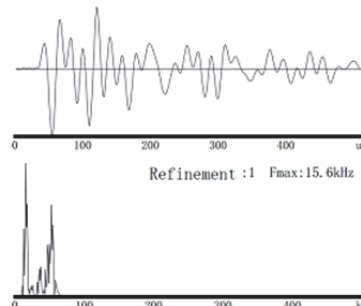
而 H₂SO₄ 溶液中试样平均振幅在第一阶段持续下降,平均振幅由最初的 95 mV 降低至 45 mV 左右,降低了 52.6%,而第二、三阶段减小了 10 mV 左右,最终稳定在 40 mV 左右,整个过程,振幅减小 55 mV,降低了 57.9%,略小于 HCl 溶液中的试样。振幅减小是由于超声波到达缺陷界面发生反射散射等现象,导致超声波能量减小,进而位能变小,振幅降低;速率由大变小与前面纵波波速变化规律基本一致。

2.2.2 频谱分析

频谱分析是将时域信号转换成以频率为参照的频域信号,通过对频域函数图谱的识别与分析,从而获得更多有用信息和规律,超声波检测仪采集到的有时域波形以及通过 FFT 转化而来的频谱图^[10]。选取 PH=3.5 的 HCl 和 H₂SO₄ 溶液中浸泡砂岩在试验初期阶段和腐蚀一定程度后得到的典型波形图和频谱图如图 9 所示。



(a) HCl 溶液试样初始频谱图



(b) HCl 溶液试样腐蚀 60 d 频谱图

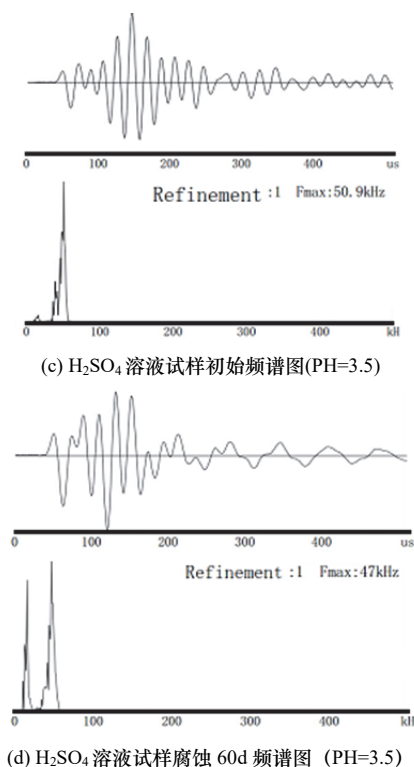


图9 试样腐蚀前后典型波形图和频谱图

Fig.9 The oscillogram and spectrogram of P-ultrasonic of typical rock specimen

由图9可以看出,未腐蚀前,两组试样波形图曲线形态规律完整,主频峰值突出,首波陡峭,振幅大.其中HCl溶液中试样波形则衰减较缓,主频为45 kHz, H_2SO_4 溶液中试样波形衰减较快,且主频较大为50.9 kHz.经腐蚀作用后,两组波形图均发生了明显的紊乱畸变,且幅值有所下降,声波主频峰值频率明显向低频漂移,并出现多峰现象,其中,HCl溶液中试样主频骤降至15.6 kHz,降低了30 kHz,且波动较大,而 H_2SO_4 溶液中试样主频降低至47 kHz,降低了3 kHz.

经分析可得出,波形发生紊乱畸变且幅值降低是由于腐蚀后孔隙率增大缺陷增多,超声波穿过试样时,超声波遇到缺陷界面时发生了反射、绕射等现象,使波的能量迅速衰减,波幅降低,同时声波在缺陷处发生波形转换及叠加,从而产生畸变.主频衰减则是由于超声波中各频率的成份在缺陷界面处衰减程度不同,其中频率较高的部分衰减比频率较低的部分更快,高频成分被大量吸收,频谱成分改变,频谱图上以低频成分为主.出现多峰现象则是由于声波脉冲在缺陷界面的反射和折射,形成波形不同的波束,这些波束由于传播路径不同,或由于界面上产生波形转换而形成横波等原因,使得到达接收换能器的时间不同,因而使接收波成为许多同相位或不同相位波束的叠加波,导致波形畸

变,频谱出现了多峰现象.

3. 结论

本文利用超声波检测技术中纵波波速、振幅以及频谱等物理力学参数,对砂岩在不同PH值的HCl溶液和 H_2SO_4 溶液中的腐蚀程度和规律进行了研究,得出了以下结论:

(1) 在浸泡初期,溶液酸性越强腐蚀速率越大,随反应进行速率逐渐变缓最终趋于稳定,腐蚀表现出一定的阶段性特征,而弱酸溶液腐蚀速率较为平缓均衡.不同的酸性溶液的腐蚀效果差异较大,酸性较弱时,酸的浓度是影响化学反应的主要因素,酸的种类对反应的影响相对较小.

(2) 浸泡试样孔隙被液体充填后,砂岩试样趋于均匀化,波速呈增加趋势,最大增长率为16.23%;烘干试样由于腐蚀后内部孔隙增大,使得波速减小了2.5%,因此干湿试样波速差别较大.

(3) 试样振幅也表现出一定的阶段性特征,HCl溶液中试样平均振幅降低了66.7%,而 H_2SO_4 溶液中试样平均振幅降低了57.9%,两组振幅差异同波速变化规律一致.

参考文献 References

- [1] 张登奇,杨慧银.信号的频谱分析及MATLAB实现[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2010,23(3):29-33.
ZHANG Dengqi, YANG Huiyin. Analysis of signal spectrum and realization based on MATLAB [J] Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2010, 23(3): 29-33.
- [2] 赵明阶,吴德伦.工程岩体的超声波分类及强度预测[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1):89-92.
ZHAO Mingjie, WU Delun. Engineering rock mass ultrasonic classification and prediction of strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 89-92.
- [3] 邓华锋,原先凡,李建林.饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(8):1625-1631.
DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1625-1631.
- [4] 郭印同,杨春和.川东北砂岩单三轴压缩过程中应力-波速变化规律的试验研究[J].矿业研究与开发,2009,29(3):17-20.
GUO Yintong, YANG Chunhe. Experimental study on the change law between stress and velocity of longitudinal wave for the sandstone from northeastern Sichuan in uniaxial and triaxial compression[J]. Mining Research and Development, 2009, 29(3): 17-20.
- [5] ZHOU Wenge, XIE Hongsen, ZHAO Zhidan, et al. Compressional wave velocity and phase transformation

- for a trachybasalt at 2.0GPa and up to 1 623K[J].Progress in Natural Science, 1999, 9(4):279-285.
- [6] 岳兰秀, 谢鸿森, 刘丛强, 等. 2.0 GPa 室温至 1 200 °C 条件下斜长角闪岩的纵波速度及其衰减[J].高压物理学报, 2002, 16(3):176-182.
YUE Lanxiu, XIE Hongsen, LIU Congqiang, et al. Plagioclase amphibolite compressional wave velocity and attenuation under conditions of 2.0 GPa room temperature to 1 200 °C[J].Chinese Journal of High Press Physics, 2002, 16(3):176-182.
- [7] 蒋玺, 周文戈, 刘丛强, 等. 1.0GPa 和常温至 1 100 °C 条件下角闪石斜长片麻岩的纵波波速变化实验测量与理论计算[J].岩石学报, 2008, 24(10):2441-2446.
JIANG Xi, ZHOU Wenge, LIU Congqiang, et al. Compressional wave velocity for hornblende plagioclase at 1.0 Gpa and up to 1 100 °C: Measured and calculated results[J].Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(10): 2441-2446.
- [8] 霍润科, 李宁, 张浩博. 酸性环境下类砂岩材料物理性质的试验研究[J].岩土力学, 2006, 27(9): 1541-1545.
HUO Runke, LI Ning, ZHANG Haobo. Experimental study on physical characteristics of mortar subjected to hydrochloric acid attack[J].Rock and Soil Mechanics 2006, 27(9): 1541-1545.
- [9] 霍润科. 酸性环境下砂浆、砂岩材料的受酸腐蚀过程及其基本特性劣化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 647-651.
HUO Runke. Experimental research on progressive and deteriorative characteristics of sandstone and mortar subjected to hydrochloric acid corrosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 647-651.
- [10] 张慧, 黄真萍, 洪儒宝. 超声波检测桩身混凝土缺陷的信号频谱分析研究[J].福州大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 731-737.
ZHANG Hui, HUANG Zhenping, HONG Rubao. Study on frequency spectrum analysis of ultrasonic wave in the defect of concrete pile[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2007, 35(5): 731-737.

(编辑 沈波)

(上接第40页)

- [5] ZUNERA Jalil, ANWAR M Mirza. An invisible text watermarking algorithm using image watermark[C]//Tarek Sobh, Khaled Elleithy. Innovations in Computing Sciences and Software Engineering. New York: Springer, 2010:147-152.
- [6] VAN der Sloot. Do privacy and data protection rules apply to legal persons and should they? A proposal for a two-tiered system[J].Computer Law & Security Review, 2015, 31(1): 26-45.
- [7] VIVEK Balachandran, SABU Emmanuel. Software protection with obfuscation and encryption[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2013, 7863: 309-320.
- [8] 李新良, 罗戈夕. 基于 Java 的代码混淆算法研究[J].湖南文理学院学报:自然科学版, 2010, 22(3): 64-69.
LI Xinliang, LUO Gexi. The study of Java code obfuscation algorithm[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science(Natural Science Edition), 2010, 22(3):64-69.
- [9] 王志. 二进制代码路径混淆技术研究[D].天津: 南开大学, 2012.
WANG Zhi. Research on binary code path obfuscation[D].Tianjin: Nankai University, 2012.
- [10] 程小刚, 郭韧. GB18030 与 Unicode 编码转换算法[J].华侨大学学报(自然科学版), 2009, 30(1):39-41.
CHENG Xiaogang, GUO Ren. Transcoding algorithm between GB18030 and unicode[J]. Journal of HuaQiao University(Natural Science Edition), 2009, 30(1):39-41.
- [11] 徐小龙, 周静岚, 杨庚. 一种基于数据分割与分级的云存储数据隐私保护机制[J].计算机科学, 2013, 40(2): 98-102.
XU Xiaolong, ZHOU Jinglan, YANG Geng. Data privacy protection mechanism for cloud storage based on data partition and classification[J]. Computer Science, 2013, 40(2): 98-102.
- [12] STEWART GW. The efficient generation of random orthogonal matrices with an application to condition estimators[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1980, 17(3): 403-409.

(编辑 沈波)