DOI: 10.3901/JME.2020.10.050

基于非线性表面波检测奥氏体不锈钢应力腐蚀早期损伤的仿真研究*

石媛媛 李萍 赵杰 程从前

(大连理工大学材料科学与工程学院 大连 116024)

摘要: 为了探索利用非线性表面波检测奥氏体不锈钢应力腐蚀早期损伤的方法,应用 ANSYS 和 ABAQUS 有限元数值模拟软件,基于弹塑性变形本构关系,采用重构的方法,实现应力场与超声场的耦合,进一步探讨恒应力状态下微裂纹的宽度与深度、受力方向(拉/压)与大小对非线性超声表面波传播特性的影响。结果表明,恒载荷作用下,微裂纹宽度与非线性系数呈负相关,深度与非线性系数呈正相关;拉应力作用下,微裂纹变宽,透射表面波能量降低,界面周期性振动引发的拍击和滑移效应减弱,抑制高次谐波的产生,而且微裂纹极限宽度随着拉应力的增大而减小;压应力的作用效果与之相反。所以非线性表面波与恒应力状态下微裂纹之间交互作用的研究对应力腐蚀早期损伤的检测有重要的工程应用价值。

关键词: 非线性表面波; 奥氏体不锈钢; 应力腐蚀; 微裂纹; 恒应力; 仿真

中图分类号: TB551

Simulation Study on Early Stress Corrosion Damage Detection of Austenitic Stainless Steel Based on Nonlinear Surface Wave

SHI Yuanyuan LI Ping ZHAO Jie CHENG Congqian

(School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: In order to explore the method of detecting the early stress corrosion damage of austenitic stainless steel by nonlinear surface wave, the reconstruction method is used to realize the coupling between stress field and ultrasonic field based on the elastic-plastic deformation constitutive relation by means of ANSYS and ABAQUS finite element numerical simulation software. Furthermore, the influence of micro-crack width and depth, stress direction (tension/compressive) and magnitude on the propagation characteristics of nonlinear ultrasonic surface wave are discussed. The results show that under constant loading, the width of micro-crack is negatively correlated with the nonlinear coefficient, while the depth is positively correlated with the nonlinear coefficient. The micro-crack is widen under the tensile stress, which not only reduces the transmitted surface wave energy, but also weakens the flapping and sliding effects caused by periodic vibration of the interface, so as to inhibit the generation of higher harmonics. Moreover, the critical width of micro-crack decreases with the increase of tensile stress. Compressive stress does the opposite. Therefore, the study on the interaction between the nonlinear surface wave and the micro-crack under constant stress has important engineering application value for the detection of early stress corrosion damage.

Key words: nonlinear surface wave; austenitic stainless steel; stress corrosion; micro crack; constant stress; simulation

0 前言

奥氏体不锈钢具有优良的力学性能、抗腐蚀性能及易加工特性,在核电、化工、航空、海洋工程等多个领域得到了广泛的应用^[1]。当不锈钢构件长时间在高温、高压等高参数,尤其是在含有 Cl⁻

等侵蚀性介质的环境中运行时,很容易发生应力腐蚀^[2],引起材料性能退化,导致构件过早失效,严重威胁工程设备的安全服役以及人民生命财产安全^[3]。美国核电站蒸汽发生器传热管失效事故中,由应力腐蚀开裂导致的达到 80%以上^[4]。应力腐蚀开裂通常包含孕育、裂纹扩展以及失稳断裂三个阶段。其中,孕育阶段有微裂纹生成,约占整个寿命的 90%左右^[5],一旦进入扩展阶段,构件很快会发生脆性断裂。因此对应力腐蚀早期损伤的检测是至关重要的。

* 2016NSFC-山西煤基低碳联合基金重点(U1610256)和国家自然科学基金(51571051)资助项目。20190729 收到初稿,20191019 收到修改稿

应力腐蚀早期损伤通常会形成表面开口的微纳米缺陷^[4], 其线性超声特征不明显。鉴于非线性表面波对微缺陷检测灵敏度高, 且具有能量集中于表面及近表面、检测速度快的特点^[6-8], 因此拟利用非线性表面波超声检测技术对应力腐蚀早期损伤开展研究。另一方面, 考虑到试验过程中应力腐蚀微裂纹的尺度难以控制, 且检测频率、耦合条件与探头间距等易于引入严重干扰检测的测量误差, 故利用数值模拟来直观地再现表面波在介质中传播时, 微裂纹对其传播行为的影响作用。LEE 等^[9]关于不同深度微裂纹的非线性超声试验研究表明: 微裂纹深度与声学非线性参数有良好的相关性, 适用于实际微裂纹的检测。HIRATA 等^[10]从模拟和试验两方面研究了闭合裂纹的非线性声学响应, 发现裂纹长度与高次谐波的幅值成比例, 验证了非线性声学检测闭合裂纹的可行性。ZHOU 等^[11]利用 ABAQUS 有限元模拟, 结合试验研究了 Lamb 波与疲劳裂纹的非线性效应, 并为疲劳裂纹与特定传感路径之间的相对距离和声学非线性建立了相关性, 并用于疲劳裂纹的定量评价。

应力腐蚀早期损伤反映了材料在恒应力作用下的微裂纹变化, 前述关于微裂纹非线性的研究主要探讨自由状态下(无外力作用)材料中微裂纹深度对超声波传播行为的影响, 对恒应力状态下材料中微裂纹宽度与深度、受力方向以及大小引起的非线性超声响应却鲜有报道。应力腐蚀损伤的非线性表面波检测研究的正是声场与应力场耦合作用下的表面波传播特性, 其中, 材料在恒应力作用下的受力状态需要采用静态通用分析步来实现, 非线性表面波声场的模拟更适于用动态显式分析步完成。尽管 ABAQUS 适用于分析复杂的结构动力学问题以及高度非线性问题^[12], 但在同一个分析模型中, 利用 ABAQUS 不能同时实现上述两个分析步。此外, 利用 ABAQUS 提取模型应力场参数的操作过程也较为复杂, 而 ANSYS 在结构静力学分析方面应用广泛且操作简单。基于此, 本研究拟采用 ANSYS 与 ABAQUS, 依据弹塑性变形本构关系, 通过重构的方法实现应力场与超声场的耦合。在此基础上, 进一步探讨恒应力状态下微裂纹宽度与深度、受力方向(拉/压)与大小对非线性超声表面波传播行为的影响, 开展非线性表面波检测奥氏体不锈钢应力腐蚀早期损伤的数值模拟研究。

1 应力腐蚀损伤有限元模型的构建

1.1 有限元模型的构建

将应力腐蚀早期损伤的非线性表面波检测简

化为平面应变问题, 建立 304 奥氏体不锈钢二维有限元模型, 模型有效长度 $L=30\text{ mm}$, 有效宽度 $H=5\text{ mm}$, 微裂纹位于模型上表面的中间位置。304 不锈钢的力学材料参数如表 1 所示。

表 1 304 不锈钢力学材料参数

弹性模量 E/GPa	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	泊松比 ν	屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa
193	7 930	0.28	230	540

本文首先选用 ANSYS 有限元软件构建静态力学模型, 模拟材料在恒应力作用下的受力状态。基于 ANSYS 的应力场模型如图 1 所示, 恒应力作用于裂纹两界面上, 其中, 拉应力与压应力的具体施加方式由局部放大图可见。通过在求解器完成静力学分析后进入后处理器模块, 提取模型各单元的应力、应变以及变形后坐标等参数, 以便在 ABAQUS 中实现应力场的重构。

图 1 基于 ANSYS 的应力场模型

在 ABAQUS 中, 利用 ANSYS 提取的变形后坐标构建模型; 依据弹塑性变形本构关系, 将 ANSYS 中提取的应力、应变等应力场参数等效转换成弹性模量、泊松比^[13], 实现在 ABAQUS 中的应力场模型的重构, 如图 2 中矩形网格所示部分。距离重构模型左边界 5 mm 处设置一发射声源, 时长为 $4.8\text{ }\mu\text{s}$ 、频率为 2.5 MHz 的正弦周期性振动载荷作用于该声源处, 以产生表面波声场; 距离右边界 5 mm 处接收信号; 为了避免反射信号的干扰, 将左、右以及下边界设置为低反射边界; 此外, 裂纹两个界面之间设置为硬接触, 摩擦因数为 0.8。基于重构应力场的非线性表面波声场模型如图 2 所示。

图 2 基于重构应力场的非线性表面波声场模型

1.2 激发载荷

材料中的微裂纹在激励声波的振动作用下会发生往复的开闭,而产生明显的高次谐波^[14],即超声波非线性得以激发。若声波的激发载荷过小,不足以激发超声波非线性;若激发载荷过大,会使材料发生塑性变形,掩盖缺陷而致的非线性效应,因此选取合适的激发载荷至关重要。

激发载荷 F 作用下声源处产生的应力 σ 如表 2 所示,不同激发载荷下激励声源处的形变如图 3 所示。显然,当激发载荷过大时,声源处发生明显的塑性变形,如图 3b 所示。为了充分反映缺陷而致的非线性效应,减小材料本身的非线性影响,施加的激发载荷应确保声源处不发生塑性变形。由表 2 可知,当激发载荷 $F=340$ N 时,激励声源处产生的应力略小于屈服强度,故激发载荷 F 选为 340 N。

表 2 激发载荷作用下声源处的应力

激发载荷 F /N	50	150	250	300	340	350
应力 σ /MPa	33	100	170	200	228	231

图 3 不同激发载荷作用下声源处的形变

1.3 表面波非线性特征验证

利用第 1.1 节构建无裂纹的完整模型以及含有裂纹(65 nm×300 μm)的缺陷模型,二者均未受到恒应力作用。当激发载荷为 340 N 时,两个模型接收信号对应的频谱如图 4 所示,虚线框内为局部放大图。对比发现:无裂纹时,接收信号只有幅值较高的主频成分;有裂纹时,主频幅值显著降低,且在 5 MHz 处有明显的峰值,表明有二阶谐波分量产生,表现出明显的表面波非线性特征。

图 4 接收信号幅频图

1.4 激发载荷对微裂纹非线性超声响应的影响

根据第 1.1 节构建含有裂纹(65 nm×300 μm)的

有限元模型,声源处施加不同的激发载荷,将接收信号进行快速傅里叶变换,得到幅频曲线如图 5 所示。随着激发载荷的增加,基频信号幅值升高。由虚线框内的局部放大图可以看出:激发载荷为 340 N 时,5 MHz 以及 7.5 MHz 处均有脉冲信号分量生成,非线性特征显著;激发载荷 $F \leq 300$ N 时,5 MHz 处可见微弱的谐波分量,7.5 MHz 处几乎无谐波分量,非线性效果较差。因此,在确保声源处不发生塑性变形的前提下,激发载荷应尽可能大一些。

图 5 不同激发载荷下接收信号幅频图

综合考虑第 1.2~1.4 节所述,本文最终选取激发载荷 $F=340$ N。

2 应力腐蚀早期损伤的有限元模拟

应力腐蚀早期损伤反映了恒应力作用下微裂纹的变化,本研究首先基于弹塑性变形本构关系,利用 ANSYS 与 ABAQUS 实现应力场与超声场的耦合。在此基础上,将从恒应力状态下微裂纹的宽度与深度、受力方向(拉/压)及大小等方面进一步探讨非线性表面波在奥氏体不锈钢中的传播特性。

2.1 恒应力状态下微裂纹宽度对非线性表面波传播行为的影响

现有的研究表明自由状态下材料中微裂纹的深度对超声波传播特性影响显著,但对微裂纹宽度的影响效果报道较少。考虑到非线性超声表面波对 0.25λ 深度范围内自由状态下的微裂纹较为敏感^[15],故在本研究中着重探讨 1 MPa 的拉/压应力作用下,深度为 300 μm(约为 0.25λ),宽度不同的微裂纹对非线性表面波传播特性的影响。非线性参数随微裂纹宽度的变化如图 6~8 所示。可以看出:随裂纹宽度的增加,基频幅值均在小范围内振荡变化,受力状态对其影响很小;二阶频幅值与非线性系数均随裂纹宽度的增加单调递减,呈负相关;三种受力状态下,压应力对非线性效应的影响最显著,拉应力最弱。

图6 基频幅值随微裂纹宽度变化曲线

图7 二阶频幅值随微裂纹宽度变化曲线

图8 非线性系数随微裂纹宽度变化曲线

对自由状态下的弹性介质而言,当表面波在其中传播时,质点做纵横向复合振动。其中,横向振动使得裂纹界面发生拍击效应,纵向振动使得裂纹界面发生滑移效应,这导致裂纹表面发生周期性地开合。当横向位移幅值大于裂纹开口宽度时,裂纹将在横向振动压应力作用下闭合,此时,声波可以通过裂纹表面继续传递;若裂纹不闭合,则没有应力传递,这就将导致表面波产生谐波分量,即非线性效应^[15-17]。随着裂纹宽度的增大,周期性开合作用减弱,使得拍击和滑移而致的非线性效应也随之降低。本研究条件下,微裂纹处始终受到外加恒应力的作用。当表面波传播至微裂纹处时,拉应力使裂纹变宽,这将削弱横向振动压应力的作用,导致

非线性效应减弱;相反,压应力作用则使非线性效应增强。

2.2 恒应力状态下微裂纹深度对非线性表面波传播行为的影响

表面波的能量随深度的增加呈指数衰减,主要集中在一个波长的深度范围内^[18]。故本文探讨了1 MPa的拉/压应力作用下,宽度为30 nm,深度在一个波长范围内变化的微裂纹对非线性表面波传播行为的影响。激发载荷为340 N时,基频幅值随裂纹深度增加而减小,受力状态对基频幅值的影响甚微,如图9所示。由图10可知二阶频幅值随裂纹深度的增加均呈现先升后降的变化,即:当深度小于250 μm时,二阶频幅值随裂纹深度增加而增大;当裂纹深度超过250 μm时,二阶频幅值呈下降趋势,这与文献^[15]相似。分析认为造成这一转折的原因是表面波传播至微裂纹处发生反射,反射波与入射波叠加产生驻波^[15],使得波形不能传播,接收到的信号幅值明显降低。图11反映了非线性系数与裂纹深度呈正相关。随着裂纹深度的增加,裂纹界面的接触面积增大,拍击和滑移而致的非线性效应越发明显。相对于自由状态,随裂纹深度的增加,应力对非线性效应的响应愈加显著。这与裂纹尖端处的应力集中随裂纹深度增加而增大,如表3所示,使得表面波在裂纹尖端处因畸变而致的非线性效应随之增强有关。

图9 基频幅值与裂纹深度的关系

图10 二阶频幅值随裂纹深度的变化

图 11 非线性系数随裂纹深度的变化

表 3 1 MPa 恒应力作用(拉/压)下裂纹尖端产生的应力 σ

深度/ μm	100	150	200	250	300
应力 σ/MPa	2.087 8	2.692 54	3.261 62	3.770 35	4.237 56

2.3 受力方向(拉/压)对非线性表面波传播行为的影响

将 1 MPa 的拉应力和压应力作用于宽度为 60 nm、深度为 300 μm 的裂纹界面上, 图 12 和图 13 描述了受力方向对非线性表面波传播特性的影响。显然, 受力方向对基频幅值影响不大, 但对二阶频幅值和非线性系数的影响显著, 表现在压应力作用下的非线性效应明显高于拉应力作用。这是因为拉应力作用使得裂纹开口变大, 裂纹界面周期性振动引发的拍击和滑移效应减弱, 使高次谐波的产生受到抑制, 压应力作用则与之相反。

图 12 基频和二阶频幅值与受力方向的关联

图 13 非线性系数与受力方向(拉/压)的相关性

2.4 恒应力大小对非线性表面波传播行为的影响

由第 2.1、2.3 节可知, 超声表面波非线性效应不仅与微裂纹宽度呈负相关, 受力方向也对其产生显著影响, 其中, 拉应力削弱了非线性效应, 压应力使之增强, 但裂纹较窄时的运行时间较长, 故选择相同深度(300 μm), 宽度为 20 nm 和 60 nm 的微裂纹分别对应拉、压两种受力状态, 探讨受力大小对非线性表面波传播特性的影响。作用于裂纹界面处的拉/压应力大小均为 1~5 MPa。

不同大小应力作用下, 接收信号的基频、二阶频幅值与非线性系数的变化如图 14~16 所示。应力大小对基频幅值几乎无影响; 对二阶频幅值的影响因受力方向的改变发生显著变化, 即: 随拉应力的增加而递减, 压应力作用下则单调递增; 非线性系数则表现出与二阶频幅值相似的变化特征。图 17 反映了受力大小与归一化 Fourier 透射系数^[19]的相关性, 与拉应力呈负相关, 与压应力呈正相关。导致以上现象的原因是随着拉应力增加, 微裂纹宽度增大, 不仅导致拍击和滑移效应减弱, 还会使得反射和散射波能量增强, 以至透射波能量显著降低。压应力作用与之同理。

图 14 拉应力作用下接收信号响应

图 15 压应力作用下接收信号响应

2.5 恒应力作用下, 微裂纹极限宽度的检测

由第 2.1 节可知, 随着微裂纹宽度的增加, 表面波的非线性效应减弱。因此, 基于高次谐波法的微裂

图 16 非线性系数与拉/压应力的关系

图 17 归一化 Fourier 透射系数与拉/压应力的关系

纹非线性检测只能有效地对一定宽度的缺陷产生响应。基于此,本文开展了恒应力作用下,能够有效进行非线性检测的微裂纹极限宽度的探讨。

假设微裂纹的宽度为 $a(\text{nm})$,将接收信号进行快速傅里叶变换,5 MHz 附近可观察到明显的信号分量;增加微裂纹宽度至 $a+1(\text{nm})$,5 MHz 处无信号出现,则定义 $a(\text{nm})$ 为微裂纹的极限宽度。

激发载荷为 340 N 时,微裂纹极限宽度与受力状态的关系如图 18 所示。微裂纹极限宽度与拉应力呈指数相关,与压应力呈线性相关,且随着拉应力的增大,微裂纹极限宽度单调递减,压应力与之相反。

图 18 微裂纹极限宽度与拉/压应力的关系

为验证上述规律的准确性,另构建大小为 4 MPa 和 5 MPa 的拉/压应力作用下的有限元模型,依

据微裂纹极限宽度的定义,确定这四种受力状态下的极限宽度 W_1 ,并将其与拟合公式计算的极限宽度 W_2 对比,如表 4 所示。由此,可认为在误差允许范围内,微裂纹极限宽度与受力状态的关系符合上述规律。

表 4 4 MPa/5MPa 拉/压应力作用下的微裂纹极限宽度

极限宽度/nm	应力/MPa			
	4		5	
	拉	压	拉	压
W_1	55	117	54	129
W_2	56.50	118.50	54.40	128.30
相对误差(%)	2.73	1.28	0.74	0.54

3 结论

本文利用有限元数值模拟的方法研究并探讨了恒应力状态下微裂纹的宽度与深度、受力方向与大小对非线性表面波传播特性的影响。

(1) 恒载荷作用下,微裂纹宽度与非线性系数呈负相关;深度与非线性系数呈正相关。

(2) 拉应力作用下,微裂纹变宽,反射、散射作用增强,界面周期性振动引发的拍击和滑移效应减弱,抑制了高次谐波的产生;压应力作用则促进高次谐波的产生。

(3) 随着拉应力的增大,非线性参数及归一化 Fourier 透射系数单调递减;微裂纹极限宽度随着拉应力的增大而减小;压应力的作用效果与之相反。

本文只是对应力腐蚀早期损伤与非线性参数的关系进行了初步研究,将非线性检测方法应用到实际检测中还需要更多的理论支持与试验验证。

参 考 文 献

- [1] 聂志水. 奥氏体不锈钢薄板冷轧变形量与硬度和强度的相关性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
NIE Zhishui. Studies on the correlation of cold-rolled hardness and strength of austenitic stainless steel sheets with the cold rolling deformation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [2] 张新生. 304 不锈钢微观组织变化对应力腐蚀破裂的影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2002.
ZHANG Xinsheng. Effect of microstructure change on stress corrosion cracking of 304 stainless steel[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2002.
- [3] 张剑锋. 奥氏体不锈钢服役损伤的非线性超声检测与评价研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
ZHANG Jianfeng. Evaluation of serving damage of austenite stainless steel using nonlinear ultrasonic wave[D]. Shanghai: East China University of Science and

- Technology, 2014.
- [4] 张文谦. 奥氏体不锈钢切削表面应力腐蚀裂纹萌生的试验分析及预测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. ZHANG Wenqian. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [5] 毋玲, 陈召涛, 孙秦. 应力腐蚀损伤裂纹起始寿命计算模型[J]. 机械强度, 2004, 26(增刊 1): 58-59. WU Ling, CHEN Zhaotao, SUN Qin. Damage mechanics model for the initiation life of stress corrosion cracking[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(Suppl.1): 58-59.
- [6] 林垠. 基于非线性振动声学调制的结构损伤程度评估研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016. LIN Yin. A study on structural damage severity assessment based on the nonlinear vibro-acoustic modulation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [7] 胡海峰. 板状金属结构健康监测的非线性超声理论与关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. HU Haifeng. Research on theory and key technologies of nonlinear ultrasonics for health monitoring of plate-like metallic structures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [8] 税国双, 汪越胜, Qu Jianmin, 等. 利用直接激发 Rayleigh 表面波的方法测量材料的声学非线性系数[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 378-384. SHUI Guoshuang, WANG Yuesheng, QU Jianmin, et al. Evaluation of the acoustic nonlinearity parameter of material with Rayleigh waves excited directly[J]. Acta Acustica, 2008, 33(4): 378-384.
- [9] LEE T H, JHANG K Y. Experimental investigation of nonlinear acoustic effect at crack[J]. NDT&E International, 2009, 42(8): 757-764.
- [10] HIRATA S, SUGIURA T. Detection of a closed crack by nonlinear acoustics using ultrasonic transducers[J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 820(1), 277-282.
- [11] ZHOU Chao, HONG Ming, SU Zhongqing, et al. On quantitative evaluation of fatigue cracks: An active way using nonlinear acousto ultrasonic waves[C]// 6th European Workshop - Structural Health Monitoring, July 3-6, 2012, Dresden, Germany. EWSHM, 2012: 99-106.
- [12] 杨雄. 超声表面波及其检测管道表面缺陷的数值研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015. YANG Xiong. Numerical study of ultrasonic surface wave and defects detection of pipeline surface[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [13] 梁泽龙. 受载条件下混凝土超声传播特性的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017. LIANG Zelong. Study on the characteristics of ultrasonic propagation in concrete under loading by the numerical simulation[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [14] 常俊杰, 孙德平, 林成新, 等. 超声波的非线性对涂层材料的质量评价[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(增刊 1): 7-10. CHANG Junjie, SUN Deping, LIN Chengxin, et al. Quality evaluation of coating materials with micro damage by ultrasonic nonlinearity[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(Suppl.1): 7-10.
- [15] YUAN Maodan, ZHANG Jianhai, SONG S J, et al. Numerical simulation of Rayleigh wave interaction with surface closed cracks under external pressure[J]. Wave Motion, 2015, 57: 143-153.
- [16] KAWASHIMA K, OMOTE R, ITO T, et al. Nonlinear acoustic response through minute surface cracks: FEM simulation and experimentation[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1): 611-615.
- [17] HAFEZI M H, KUNDU T. Peri-ultrasound modeling for surface wave propagation[J]. Ultrasonics, 2018, 84: 162-171.
- [18] 陈兴长. 瑞利波法评价冲积土地基承载力的试验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2005. CHEN Xingchang. Experimental study of rayleigh wave method for evaluation of bearing capacity of impact soil foundation[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2005.
- [19] 冯若愚, 陈瑛, 李志双. R 波谱能量透射比法检测大体积混凝土裂缝研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(12): 221-225. FENG Ruoyu, CHEN Ying, LI Zhishuang. Cracks identification of mass concrete structures with R wave spectral energy transmission ratio method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12): 221-225.

作者简介: 石媛媛, 女, 1995 年出生。主要研究方向为材料无损表征与评价。

E-mail: trixieyuanyuan@163.com

李萍(通信作者), 女, 1969 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为材料无损表征与评价。

E-mail: liping69@dlut.edu.cn