

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108419

圆形钢板中声发射信号响应特征研究*

陈大庆^{1,2} 沈功田² 王强¹ 张君娇²

(1. 中国计量大学质量与安全工程学院 杭州 310018; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100013)

摘要: 声发射检测技术应用广泛,声发射仪器系统良好的灵敏度是进行声发射检测的重要保障。搭建了一套声源信号检测平台,通过实验和数值分析研究了两种不同声源在圆形钢板中声发射信号的响应特征。实验结果表明,随着与声源距离的增加,不同方向上信号的响应幅值变化趋势基本一致,不同方向间响应幅值的差异主要分布在2.1~8.8 dB。在距离声源0~350 mm时信号响应幅值整体下降速度较快,脉冲激励相较断铅激励产生的信号衰减率低3%左右。脉冲信号激励传感器产生的声源拥有更好的稳定性和再现性,本研究对声发射仪器灵敏度测试中声源的选择提供了参考。

关键词: 声发射;响应特征;灵敏度测试;有限元仿真

中图分类号: TB528 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Response characteristics of acoustic emission signal in round steel plate

Chen Daqing^{1,2} Shen Gongtian² Wang Qiang¹ Zhang Junjiao²

(1. School of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The acoustic emission detection technology has used widely, and the good sensitivity of the acoustic emission instrument system is an important guarantee for the acoustic emission detection. In this paper, a set of sound source signal detection platform is built, and the response characteristics of acoustic emission signals of two different sound sources in a circular steel plate are studied through experiments and numerical analysis. The experimental results show that with the increase of the distance from the sound source, the variation trend of the response amplitude of the signal in different directions is basically the same, and the difference of the response amplitude between different directions is mainly distributed in 2.1~8.8 dB. When the distance from the sound source is 0~350 mm, the overall decrease of the signal response amplitude is faster, and the signal attenuation rate of the pulse excitation is about 3% lower than that of the lead-break excitation. The sound source generated by the pulse signal excitation sensor has better stability and reproducibility. This study provides a reference for the selection of the sound source in the sensitivity test of the acoustic emission instrument.

Keywords: acoustic emission; propagation characteristics; sensitivity test; finite element simulate

0 引言

在固体材料中,快速瞬时位移,如裂纹、位错、腐蚀或粘滑摩擦的形成,会在超声波范围内引起小的声波。这种现象被称为声发射(acoustic emission, AE),是研究工程材料失效的有价值的无损检测方法。声发射检测技术广泛应用于石油化工、电力、航空航天、金属加工、交通运输等领域,同时声发射作为在线监测结构完整性的重要无损检测技术,也被应用于材料结构内部损伤过程监测^[1-6]。

声发射仪器系统作为声发射检测的实施载体,其良好的可靠性是检测质量的重要保障。声发射仪器系统在使用过程中易出现传感器灵敏度下降、前置放大器灵敏度漂移等现象,但声发射仪器系统的校准周期长难以满足使用需求,国内外相关测试标准规定,声发射仪器的校准周期为每年校准一次。校准需要的测试仪器复杂,一般用户不具备测试条件。如在进行声发射仪器和传感器校准时,需要一个可再现的声源用于校准传感器特性,声源可通过铅芯断裂、钢球下落或激励换能器等方法产生^[7]。在传感器校准

收稿日期:2021-11-22

* 基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2020MK175)、中国特种设备检测研究院内部项目(2020青年02)资助

标准 ISO 12714 和 ASTM E1781M-13 中所提及校准所需试块至少包括直径 400 mm, 厚 180 mm 的圆柱平面^[8-9]。这导致用户难以及时了解声发射仪器系统的具体情况, 甚至会影响检测数据的准确性。

近年来, 物理场有限元仿真被成功地应用于模拟波在板中的传播^[10-12]。Zhang 等^[13]利用多物理场数值模型和实验模型开发了压电型声发射传感器的绝对校准方法。李振等^[14]通过 COMSOL 有限元仿真和实验对 8 极板电容成像传感器的电容值进行提取分析, 发现两者的检测结果相吻合。国内学者对声源也有相应研究, 赫永梅等^[15]根据二级校准要求设计了落球、断铅和压断毛细玻璃管 3 种声源的重复性实验, 分析比较不同声源的实时特征和频谱特征, 为声发射传感器校准中的参考声源提供性能评判的依据, 但实验中涉及的 3 种声源受人为影响因素较大, 难以忽视。何龙标等^[16]对互易法校准中激励电流和接收电压波形对应特征值进行了提取, 并对其校准不确定度进行评定, 验证了互易法对于压电型声发射传感器的适用性。但目前没有研究分析声源在其他尺寸试块中的声发射信号响应特征。

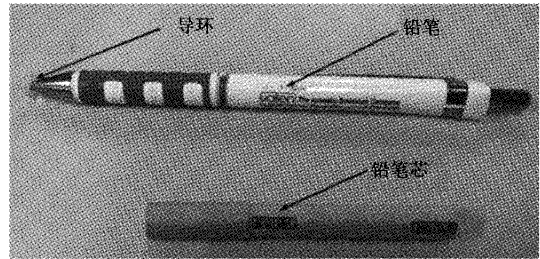
为了能够便捷进行声发射仪器系统灵敏度测试, 本文简化了校准试块的厚度, 选择了直径 $D=1\ 200\ \text{mm}$, 厚度 $d=8\ \text{mm}$ 的圆形钢板为研究对象。基于声发射传感器校准中的断铅和激励换能器两种声源产生方法, 通过实验和仿真研究了两种不同声源在圆形钢板中声发射信号的响应特征。

1 实验研究

1.1 实验平台搭建和实验过程

本实验主要研究不同声源信号在圆形钢板中声发射信号的响应特征。实验平台主要由试块、信号发生器、信号电缆、传感器及声发射信号检测系统组成。试块是经过抛光处理的圆形钢板, 直径 $D=1\ 200\ \text{mm}$, 厚度 $d=8\ \text{mm}$ 。信号采集系统是德国 Vallen 公司研制的 AMSY-6 型 12 通道数字声发射检测系统, 信号采样频率为 10 MHz, 带宽范围为 25~850 kHz, 采集门槛设置为 40 dB, 以降低电气噪声的干扰。在信号采集系统中加入示波器 DSO9404A 观测接收到的声发射信号波形。传感器选择内置前放的宽频传感器 VS900-RIC(频宽 100~900 kHz, 谐振频率 350 kHz), 内置前放增益为 34 dB。信号电缆是 BNC 接头的同轴电缆, 阻抗 50 Ω 。实验平台如图 1 所示。

实验中声源信号分别通过铅笔芯折断(简称断铅激励)和信号发生器调制脉冲信号经过传感器激发(简称脉冲激励)产生。断铅激励通过定制铅笔在目标位置折断铅笔芯产生。其中, 铅笔芯采用标准的 0.5 mm 粗 HB 铅笔芯, 断铅时伸出长度为 3 mm。定制铅笔由导环和铅笔组成, 导环设置在铅笔前端, 用以保证每次断铅时铅笔芯与试块间角度相同, 如图 1(a)所示。脉冲激励则通过函数信号发生器 33500B 调



(a) 断铅装置



(b) 信号测试平台



(c) 信号检测系统

图 1 实验测试平台

制脉冲激励信号经信号电缆传输到传感器激发产生。实验中脉冲信号重复频率为 10 Hz, 幅度为 5 Vpp, 脉冲宽度设置为 5 μs , 上升时间设置为 8.4 ns。为了确保发射传感器稳定输出信号, 在传感器和钢板间涂抹耦合剂凡士林, 用磁夹具将传感器固定在钢板的中心位置。声源设在圆形钢板的圆心位置(0,0), 信号接收点布置为十字型, 设在钢板中两条垂直的直径上, 相邻两信号接收点间间距为 50 mm, 如图 2 所示。

图 2 中信号接收点位置用空心圆表示。以声源所在位置为原点建立直角坐标系, 测试在 X 正方向、X 负方向、Y 正方向和 Y 负方向上声发射信号的响应幅值。同时, 为了减少测量误差, 对每个位置分别进行了 3 次实验, 取 3 次实验平均值作为测量数据。

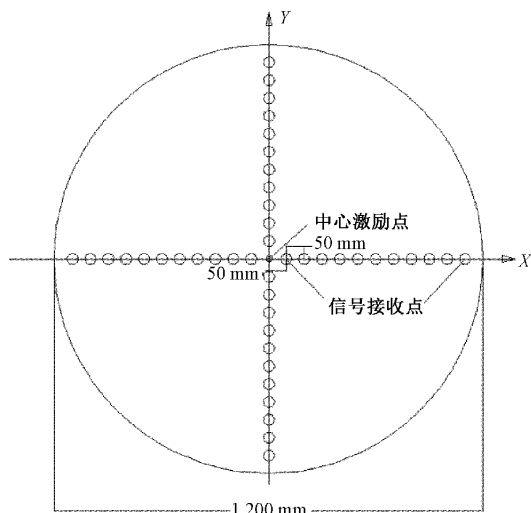


图 2 信号接收点位置示意图

1.2 实验结果分析

1) 断铅激励

当断铅激励作为声源时,在不同传播方向上随着断铅激励传播距离的增加响应幅值的变化情况如图 3 所示。

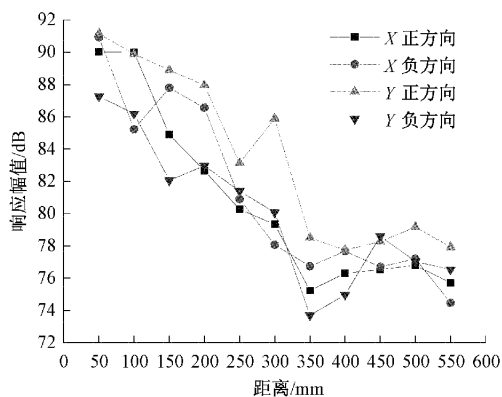


图 3 传播距离对响应幅值影响(断铅激励)

图 3 中可知随着断铅激励传播距离的增加,不同方向上声发射信号的响应幅值均整体呈下降趋势,不同方向间响应幅值的差异主要分布在 2.1~8.8 dB。其中,在距断铅激励 0~350 mm 时,不同传播方向上的声发射信号响应幅值整体下降速度较快,响应幅值衰减率达到 13% 左右。在距断铅激励 350~550 mm 时,声发射信号的响应幅值变化速度趋于缓和,整体表现为波动变化。受边界反射回波的影响,在距断铅激励 400~500 mm 时声发射信号的响应幅值出现整体的回升现象,回升幅度在 1% 左右。

2) 脉冲激励

当脉冲激励作为声源时,在不同传播方向上随着脉冲激励传播距离的增加响应幅值的变化情况如图 4 所示。

图 4 中可以看出在不同传播方向上随着脉冲激励传播距离的增加,声发射信号响应幅值整体有着一致的变化趋

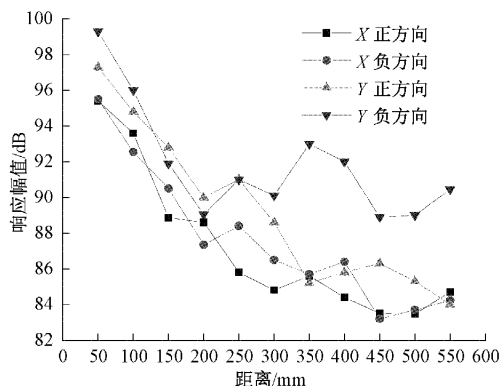


图 4 传播距离对响应幅值影响(脉冲激励)

势。随着传播距离的增加信号的响应幅值整体呈下降趋势,不同方向间响应幅值的差异主要分布在 2.6~7.9 dB。在距脉冲激励 0~350 mm 时,不同方向上声发射信号的响应幅值整体下降速度较快,响应幅值衰减率达到 10% 左右。在距脉冲激励 350~550 mm 时,声发射信号的响应幅值整体表现为波动变化,且变化速度变缓。受边界反射回波叠加影响,在距脉冲激励 450~550 mm 时声发射信号响应幅值出现小幅度回升,回升幅度在 2% 左右。

3) 两种激励方式对比分析

通过对断铅激励和脉冲激励在不同方向上的声发射响应幅值的变化情况进行对比分析,脉冲激励相较于断铅激励产生声源信号的响应幅值变化更为稳定,断铅激励易受到操作人员经验的影响出现波动。在实验中,脉冲激励较断铅激励的声发射响应幅值整体较高一些,以 X 正方向为例,脉冲激励较断铅激励的声发射响应幅值整体高出 5 dB 左右,如图 5 所示。

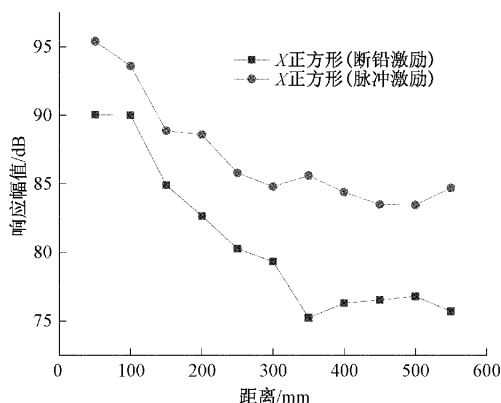


图 5 激励声源对响应幅值影响

2 COMSOL 有限元仿真

2.1 建模与参数设置

由于有限元分析法具有精度高和应用范围广的优点,本文基于 COMSOL 软件采用有限元分析方法,研究声源在圆形钢板中的声发射信号的响应特征。COMSOL 有限

元仿真采用结构力学物理场中的固体力学模块,通过模拟声发射波和固体结构材料的相互作用研究声发射信号响应特性^[17-18]。仿真中应力与应变的关系如式(1)所示。

$$S - (S_0 + S_{ext} + S_q) = C : (\epsilon - (\epsilon_0 + \epsilon_{th} + \epsilon_{hs} + \epsilon_{pl} + \epsilon_{cr})) \quad (1)$$

式中: S 为应力, S_0 为预应力, S_{ext} 为外部应力, S_q 为粘性应力, C 为弹性矩阵, ϵ 为弹性应变, ϵ_0 为预应变, ϵ_{th} 为热应力, ϵ_{hs} 为浸润膨胀, ϵ_{pl} 为塑性应变, ϵ_{cr} 为蠕变。弹性矩阵 C 为对称阵, 其中 $C_{ij} = C_{ji}$, 依据材料特性不同可进行调整。仿真模型为三维圆形钢板, 直径 $D = 1\ 200\ \text{mm}$, 高 $d = 8\ \text{mm}$ 。材料为结构钢 (structural steel), 密度 $\rho = 7\ 850\ \text{kg/m}^3$, 杨氏模量 $E = 200 \times 10^9\ \text{N/m}^2$, 泊松比 $\sigma = 0.30$ 。结构钢为各向同性材料, 弹性矩阵如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & & & \\ & C_{11} & C_{12} & & & \\ & & C_{11} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{44} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: C_{11} 为杨氏模量, C_{44} 为剪切模量。各向同性弹性矩阵仅有两个独立弹性常数, 且 $C_{12} = C_{11} - 2C_{44}$ 。因为是模拟钢板的实际情况, 钢板的边界设为自由边界条件。在对钢板进行网格划分时, 网格类型为自由四面体网格, 单元大小为极细化。声源位置与实验一致, 设置在圆心位置, 由于结构钢为各向同性材料, 选择其中任意一条半径设置信号接收点, 接收点间间隔为 $50\ \text{mm}$, 共有 11 个点, 探针位置如图 6 所示。

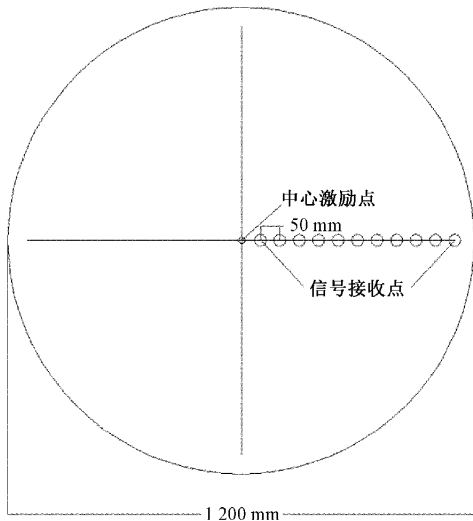


图 6 探针位置示意图

在仿真中激励源选择点源激励, 信号类型为方波信号, 下限为 0, 上限为 5×10^{-6} 。由于弹性波是一种瞬态现象, 求解设置选择瞬态求解。瞬态求解主要研究体积力与时间的变化关系, 瞬态方程如式(3)所示。

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{\sigma} = \vec{f} \quad (3)$$

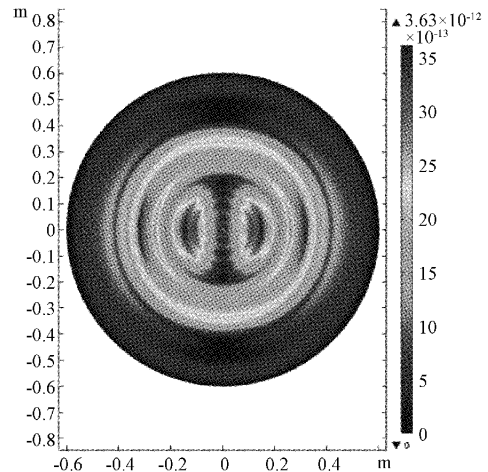
式中: $\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$ 为材料密度, d_a 为阻尼系数, $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ 为位移, $\nabla \cdot \vec{\sigma}$ 为应力, \vec{f} 为体积力。求解的时间设置越长, 得到的波形越接近真实的波形, 本次仿真求解时间设为 $10\ \text{ms}$, 采样频率设为 $1\ \text{MHz}$ 。

2.2 仿真结果分析

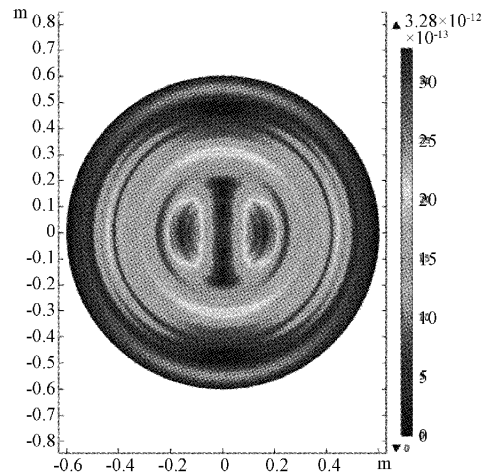
1) 表面位移分布图

通过 COMSOL 有限元仿真在中心声源激励下不同位置的声发射信号响应特性, 得到声发射信号表面位移随时间的变化情况, 选取其中 3 组变化稳定的表面位移图, 如图 7 所示。

图 7 中可以看出在中心声源激发后, 声发射信号开始向不同方向扩散开来, 表面位移值随着时间和扩散距离的增加出现下降。在 $0.566\ \text{ms}$ 时表面位移值相对稳定, 在距离钢板中心 $0 \sim 200$ 、 350 和 $550\ \text{mm}$ 附近的位移值明显偏高。



(a) 0.327 ms



(b) 0.393 ms

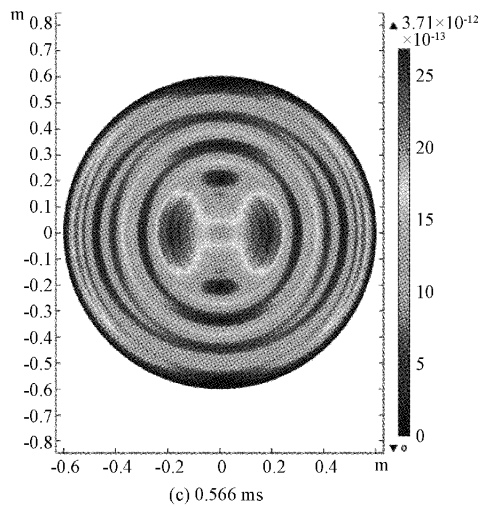


图 7 表面位移分布图

2) 相对衰减度分析

采用探针处信号和中心激励源信号的幅值相对衰减率来研究传播距离对声发射信号响应的影响,即:

$$SA_i = 20\log(A_i/A_0) \quad (4)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,11$,分别代表距离中心激励点 50、100、150、 \dots 、550 mm 的编号。其中 A_0 代表中心激励源信号的幅值,传播距离与幅值相对衰减度间关系如图 8 所示。

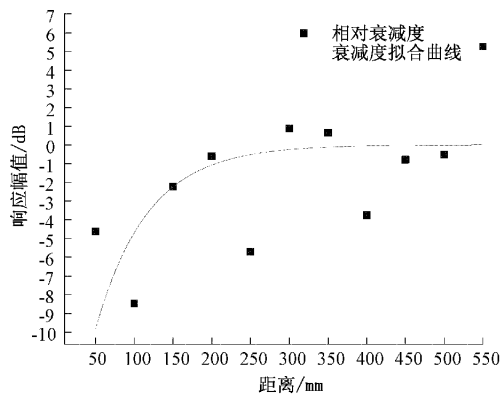


图 8 相对衰减度曲线

图 8 中可知随着声源传输距离的增加,幅值相对衰减率拟合曲线整体呈上升趋势,且上升趋势逐渐变缓。在距离中心激励 50~250 mm 时,随着中心激励传播距离增加,幅值衰减较大。在距离中心激励 50、100、250 mm 时,幅值相对衰减率分别为 -4.63、-8.47 和 -5.71 dB。在距离中心激励 250~550 mm 时,随着中心激励传播距离增加,信号衰减率出现回升。在距离中心激励 300、350 和 550 mm 时,信号衰减率分别为 0.88、0.65 和 5.25 dB,与表面位移图中位移变化情况相符。

3 结 论

本文通过仿真和实验研究了两种不同声源在圆形钢板

中声发射信号的传播特性,实验结果表明,随着声源传播距离的增加,不同方向上信号的响应幅值变化趋势基本一致,按信号衰减可将响应幅值划分为快速衰减和波动变化两个阶段。综合比较脉冲激励和断铅激励的声发射信号响应幅值发现:脉冲激励产生的声源拥有更好的稳定性和再现性。仿真结果表明,在距离中心激励 50~250 mm 时,幅值相对衰减率总体较高,相对衰减率均值为 -4.33 dB 左右。在距离中心激励 250~550 mm 时,幅值相对衰减率出现上升,相对衰减率均值为 0.29 dB 左右,与实验结果相符。由实验和仿真结果可以看出,在距声源附近时,受边界反射回波影响较小,这为进行声发射仪校准标定时信号接收点位置的选择提供了参考。

此外,本研究也存在一些不足。本研究因理论模型较为复杂,只从仿真和实验角度分析声源在圆形钢板中声发射信号响应幅值的响应特征,下一步将从理论层面分析其关系。

参考文献

- [1] LYASOTA I, SARNIAK L, KUSTRA P. Acoustic emission analysis of the plastic deformation stages of degraded low-carbon steel after long-term operation in the oil refining and petrochemical processing [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2019, 64 (1): 143-151.
- [2] BHUIYAN M Y, LIN B, GIURGIUTIU V. Acoustic emission sensor effect and waveform evolution during fatigue crack growth in thin metallic plate[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(7):1275-1284.
- [3] 范志涵,张宇,芮小博. 航天器舱壁结构碎片撞击声发射定位技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (1): 178-184.
- [4] 岳健广,夏月飞,方华. 钢纤维混凝土断裂破坏机理及受拉损伤本构试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2):93-106.
- [5] 阳能军,王新刚,王蒙. HHT 在复合材料损伤声发射信号处理中的应用[J]. 电子测量技术, 2011, 34 (8): 45-47.
- [6] 杜永刚,周伟,刘朔,等. 含夹渣缺陷 Q245R 钢的声发射特性和 DIC 研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(18): 1-6.
- [7] MCLASKEY G C, GLASERS D. Acoustic emission sensor calibration for absolute source measurements[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(2):157-168.
- [8] Non-destructive testing-acoustic emission inspection-secondary calibration of acoustic emission sensors; ISO 12714 [S]. West Conshohocken: International

- Standard, 1999.
- [9] Standard practice for secondary calibration of acoustic emission sensors: ASTM E1781M-13 [S]. West Conshohocken; ASTM International, 2003.
- [10] OUMAR I T, FAVRETTO N, CRISTINI P, et al. Impact of the test device on acoustic emission signals from nuclear safety experiments; contribution of wave propagation modeling to signal processing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(9): 2479-2489.
- [11] CHEN D, LIU X, HE W, et al. Effect of attenuation on amplitude distribution and b value in rock acoustic emission tests[J]. Geophysical Journal International, 2021, 229(1): 933-947.
- [12] XI X, WU X, GUO Q, et al. Experimental investigation and numerical simulation on the crack initiation and propagation of rock with pre-existing cracks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 129636-129644.
- [13] ZHANG L, YALCINKAYA H, OZEVIN D. Numerical approach to absolute calibration of piezoelectric acoustic emission sensors using multiphysics simulations[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2017, 256: 12-23.
- [14] 李振, 殷晓康, 李晨, 等. 基于 COMSOL 的电容成像传感器仿真研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(9): 1-5.
- [15] 郝永梅, 邢志祥, 邵辉, 等. 声发射检测灵敏度校准声源实验分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(5): 48-52.
- [16] 何龙标, 张瑞纹, 祝海江, 等. 互易法校准压电型声发射传感器的研究与实现[J]. 计量学报. 2014, 35(5): 479-483.
- [17] 王向红, 罗志敏, 胡宏伟, 等. 裂纹长度和位置影响下声发射信号传播特性[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2867-2873.
- [18] DU H, LIU Y. Application of finite element simulation on sheet plate modal acoustic emission testing[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 3744(713): 449-455.

作者简介

陈大庆, 硕士研究生, 主要研究方向为无损检测技术。

E-mail: 813355812@qq.com

张君娇(通信作者), 高级工程师, 主要研究方向为无损检测技术研究和标准修订。

E-mail: zhangjj1000@163.com