

混凝土声发射损伤监测中波导杆的选取与分析*

霍林生¹, 任亮¹, 李宏男¹, 王靖凯²

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 大连, 116024)

(2. 海洋石油工程股份有限公司 天津, 300461)

摘要 针对声发射技术用于混凝土结构损伤监测时如何选取波导杆的问题, 基于声发射波在波导杆中传播的基本理论, 提出了波导杆材料选择的阻抗匹配原则以及波导杆的优化选择方法。首先, 基于 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件, 建立了二维有限元模型, 讨论声发射波由混凝土结构传播至不同波导材料发生的信号衰减, 验证阻抗匹配原则的正确性; 然后, 选用 4 种不同材料、6 种不同直径、7 种不同长度的圆杆作为波导杆, 对比分析不同波导杆参数对传导混凝土损伤声发射信号的影响, 获取不同参数下波导杆的导波特性。结果表明: 波导杆材料的阻抗与混凝土的阻抗越接近, 声信号传递到波导杆时衰减越小; 声信号在合金材料波导杆中传播的频散现象明显弱于钢材材料波导杆; 声信号在波导杆中传播时幅值呈指数衰减规律。该研究揭示了波导杆参数对声信号传播的影响规律, 为声发射技术应用于恶劣环境中钢筋混凝土结构的损伤监测提供参考。

关键词 声发射; 波导杆; 导波特性; 损伤监测; 混凝土结构

中图分类号 TU375; TU317; TH707

引言

声发射技术具有动态、实时和在线监测的特点, 在铁路、船舶、建筑及军事等领域得到广泛应用^[1-2]。钢筋混凝土结构普遍用于民用建筑、工业设施以及水利工程等领域^[3], 其在服役过程中内部会产生损伤。如果这些损伤不能被及时发现和预防, 将会导致安全事故发生。因此, 须采用动态监测技术对混凝土材料进行全面实时监测。由于声发射技术可以对结构进行全面且长期的连续监测^[4], 故其在混凝土结构健康监测领域显示出巨大潜力^[5]。

在实际工程和工业生产中, 许多混凝土结构长期处于高温、高压和辐射等恶劣环境中, 此时声发射传感器无法直接布设到钢筋混凝土结构上, 导致声发射监测工作面临困难。为了应对该挑战, 提出采用波导杆以弥补监测工作方面的不足。目前, 已有文献证明波导杆在高温和辐射等恶劣环境下仍能保持良好的监测效果^[6]。

常用的波导工具包括金属棒或金属管, 通常一端通过焊接或机械连接固定在被监测对象表面, 另一端通过耦合剂连接到传感器^[7]。在声发射监测中, 声发射信号在波导杆内传播后被传感器接收, 但在传播过程中信号会衰减^[8]。因此, 在使用波导杆

时, 如何选择合适的材料、直径和长度等参数、以减少声发射信号的衰减并确保其特征依然能够表征损伤, 一直是声发射监测工作中比较关注的问题。目前, 已有学者通过在波导杆表面上人工产生声发射信号, 研究声发射信号沿波导杆的导波特性。Wang 等^[9]建立了弹性波在波导杆中传播的理论公式, 并基于波导杆进行了管道泄露的声发射监测。孙国豪等^[10]对不同直径的圆钢波导杆的端部和侧面进行断铅试验, 分析了波导杆尺寸变化对声发射信号特征参数的影响。刘兵等^[11]研究了声波通过水中不同材料波导杆的传播特性。Guo 等^[12]研究了声发射信号在置于油液环境中的波导杆上的传播特性。

笔者在混凝土结构上利用信号发生器发射声信号, 考虑不同传播介质的影响, 研究了不同材料、直径及长度的波导杆对声发射信号特征参数的影响, 得到了适用于混凝土结构声发射监测的波导杆材料与尺寸。

1 波导杆中声发射信号的传递

1.1 声发射信号衰减的因素

声发射信号通过弹性介质时会产生能量的衰减^[13-14], 造成声发射波产生衰减的原因可以概括为 3

* 国家自然科学基金资助项目(5217082572)

收稿日期: 2024-05-06; 修回日期: 2024-11-20

个方面,即扩散衰减、散射衰减和吸收衰减。

平面应力波在介质中沿着 x 方向传播时,能量会产生衰减,这种与传播距离相关的衰减称为扩散衰减。声压的幅值与应力波传播距离之间的关系^[15]可以表示为

$$m(x) = m_0 e^{-\beta x} \quad (1)$$

其中: x 为声发射波的传播距离; m_0 为声发射波源处的声压; β 为扩散衰减系数; m 为声发射信号传播距离 x 后的幅值。

对于 x_1 和 x_2 , 若 $x_1 > x_2$, 则扩散衰减系数^[14]为

$$\beta = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left(\frac{m(x_1)}{m(x_2)} \right) \quad (2)$$

在固体介质中,应力波传播时受到固体内部晶粒界面的影响,导致应力波发生散射,这种散射也称为瑞利散射。晶粒的瑞利散射衰减系数^[15]为

$$\gamma_s = \xi D^3 f^4 \quad (3)$$

其中: γ_s 为瑞利散射衰减系数; ξ 为瑞利散射系数; f 为声发射波的频率; D 为晶粒的平均直径。

声辐射波在介质中传播时,介质的黏度和热传导会导致声能损失,这种衰减称为吸收衰减。介质对弹性波的总吸收系数 λ ^[15] 的表达式为

$$\lambda = \frac{\omega^2}{2\rho_0 v^3} \left[\left(\frac{4}{3} \varphi + \varphi' \right) + T \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] \quad (4)$$

其中: ω 为圆频率; ρ_0 为声发射波传播的介质密度; v 为声发射波的波速; φ 为介质的切变黏滞系数; φ' 为体积黏滞系数; T 为导热系数; c_v 为定压比热容; c_p 为定容比热容。

在实际中,总衰减系数 α 为以上 3 个衰减系数之和^[16],即

$$\alpha = \beta + \gamma_s + \lambda = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left(\frac{m(x_1)}{m(x_2)} \right) + \xi D^3 f^4 + \frac{\omega^2}{2\rho_0 v^3} \left[\left(\frac{4}{3} \varphi + \varphi' \right) + T \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] \quad (5)$$

1.2 声阻抗匹配原则

材料声阻抗率 n 的计算公式^[17]为

$$n = \rho v \quad (6)$$

其中: ρ 为材料密度; v 为弹性纵波波速。

弹性纵波波速的表达式为

$$v = \sqrt{E/\rho} \quad (7)$$

其中: E 为弹性模量。

当声发射信号通过 2 种不同的传播介质时,传

播介质的声阻抗将会影响界面处声发射信号的传播特性。若 2 种传播介质的声阻抗相同,则声发射信号通过这 2 种介质的界面时将不会发生反射现象^[18],这种情况称之为阻抗匹配。根据 2 种介质的声阻抗值,可以得到二者的声阻抗比 N 为

$$N = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2} \quad (8)$$

N 越接近于 1, 2 种介质的声阻抗越匹配。图 1 为声发射波在不同介质中的传播示意图。

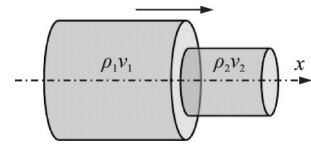


图1 声发射波传播示意图

Fig.1 Schematic of acoustic wave propagation

1.3 声阻抗匹配数值模拟

利用波导杆传导声发射信号进行混凝土损伤监测,需要选择合适的波导杆材料。根据声匹配原则可知,应选择与被测结构的声阻抗比较接近的波导杆材料。

根据 4 种材料的 E 和 ρ 计算波速,由式(6)计算声阻抗率,不同材料的声阻抗率如 1 所示。

表 1 不同材料的声阻抗率

Tab.1 The magnitude of acoustic impedance values for different materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	声阻抗率/ ($10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$)
混凝土	2 360	2 160	5.10
6061 铝合金	2 750	6 305	17.34
TC4 钛合金	4 500	6 096	27.43
304 不锈钢	7 930	5 664	44.92
45 号钢	7 850	5 918	46.46

为验证声阻抗匹配原则的正确性,计算 4 种材料和混凝土的声阻抗比 N ,不同材料的声阻抗比如图 2 所示。可见,合金材料的声阻抗与混凝土材料的声阻抗更加匹配。

笔者基于 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件,建立了二维有限元模型,进一步讨论声发射波由混凝土结构传播至波导材料发生的反射与透射对波导材料选择的影响。

模拟在某一时刻被监测结构产生的突发型声发射信号,有限元模型包括一个被监测结构体、波导板

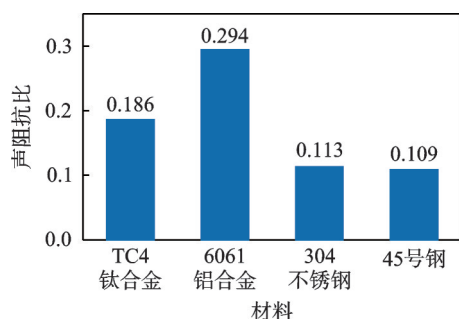


图2 不同材料的声阻抗比

Fig.2 Acoustic impedance ratio of different materials

和压电片。被测结构的材料分别为混凝土、6061 铝合金、TC4 钛合金、304 不锈钢和 45 号钢。波导板材料分别为 6061 铝合金、TC4 钛合金、304 不锈钢和 45 号钢。模型尺寸示意图及有限元模型图分别如图 3、4 所示。

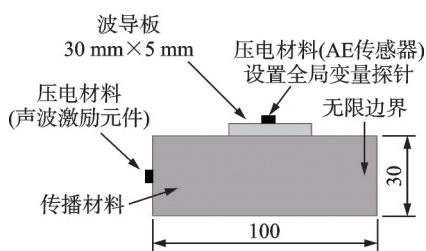


图3 模型尺寸示意图(单位:mm)

Fig.3 Dimension of the analytical model (unit: mm)

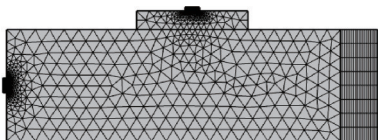


图4 有限元模型图

Fig.4 Finite element model diagram

不同传播材料终端电压的幅值如图 5 所示。由图 5 可知,当被测结构的材料为 6061 铝合金时,采用 6061 铝合金的波导板接收到的声发射信号电压幅

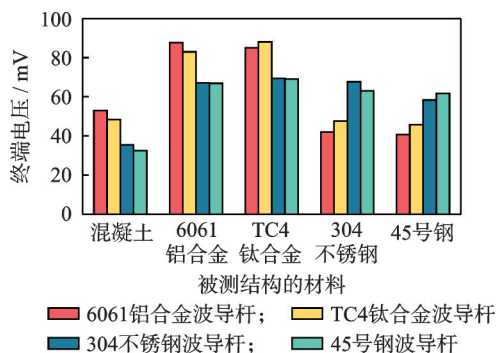


图5 不同传播材料终端电压的幅值

Fig.5 Amplitude of terminal voltage for different propagation materials

值最大。其他结构材料的结果类似,当 2 种相同声阻抗的传播介质连接在一起时,波导板接收到的终端电压幅值最大,声发射信号衰减最小。因此,2 种传播介质材料的声阻抗值越接近,终端电压的幅值越大,声发射信号衰减越小,从而验证了阻抗匹配原则的正确性。

2 试验方案

2.1 试件设计与装置

在本试验中,采用的钢筋混凝土梁的尺寸为 900 mm×120 mm×80 mm。混凝土配合比为水泥:砂子:石子:水为 1:1.13:2.76:0.41,混凝土梁的设计强度为 C40。试验用钢筋混凝土梁的尺寸如图 6 所示。

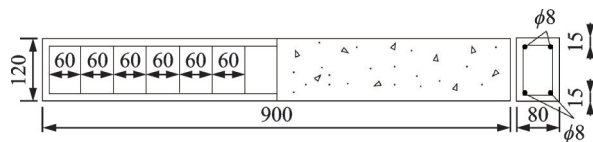


图6 试验用钢筋混凝土梁的尺寸(单位:mm)

Fig.6 Dimensional details of reinforced concrete beams used in the tests (unit: mm)

预先在混凝土表面粘贴带有螺纹孔的底座,将波导杆的一端加工螺纹使其配合固定,另一端连接信号发生器。信号发生器产生的模拟声发射源经钢筋混凝土梁传播后,由声发射传感器通过波导杆接收,再经前置放大器放大,由 8 通道 PCI-2 采集设备采集、存储。声发射监测系统参数设置如表 2 所示。图 7 为试验装置图。

表2 声发射监测系统参数设置

Tab.2 Parameterization of AE monitoring systems

参数	数值	参数	数值
阈值/dB	45	峰值时间/ μ s	200
前置放大器/dB	40	撞击时间/ μ s	800
采样频率/MHz	1	撞击闭锁时间/ μ s	1 000

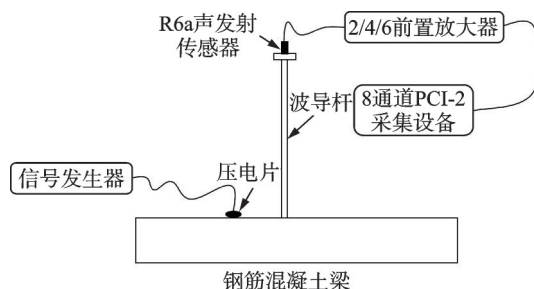


图7 试验装置图

Fig.7 Diagram of test setup

2.2 试验步骤

在声发射源的模拟中,模拟源需要具备信号稳定性和宽频谱性这 2 个特征。混凝土材料产生的损伤声发射信号源的频率范围一般为 40 kHz~100 kHz,为了确保本次试验的精确性,消除试验误差中的随机因素,采用信号发生器统一发射频率为 50 kHz、幅值为 10 V 的脉冲信号,以获得统一的声发射源。通过 3 组试验研究不同材料、直径和不同长度波导杆的导波特性和导波特性,具体步骤如下:

1) 连接声发射设备,将波导杆接入声发射采集系统,依次采用材料为 304 不锈钢、45 号钢、TC4 钛合金和 6061 铝合金的波导杆完成试验,依次记录试验数据;

2) 按照同样的方法,使用直径分别为 6、8、10、12、14 和 16 mm、长为 500 mm 的 TC4 钛合金波导杆完成上述试验,依次记录试验数据;

3) 采用直径为 14 mm,长度分别为 0.5、1、1.5、2、2.5、3 和 3.5 m 的 TC4 钛合金波导杆完成上述试验,依次记录试验数据;

4) 对采集的数据进行处理与分析。

3 试验结果与分析

3.1 不同材料波导杆导波特性和导波特性试验研究

为了避免试验误差,本次试验发射 10 次脉冲信号,将接收到的声发射信号的幅值与能量分别取平均值,得到不同材料波导杆的幅值及能量直方图如图 8 所示。

根据图 8 可知,声发射信号均能通过 304 不锈钢、45 号钢、TC4 钛合金和 6061 铝合金的波导杆传至传感器,不同材料波导杆对应的声发射信号的幅值和能量等参数有所不同。由图 8(a)可知,在声发射源强度相同的情况下,几种材料传导声发射信号的幅值差别不大,其中 TC4 钛合金比其他材料略好。

从理论分析可知,影响声发射信号幅值衰减的主要因素包括信号频率、传播距离、波导杆材料和波速等,其声发射信号幅值的计算公式^[19]为

$$A = A_0 \exp\left(\frac{-\pi\varphi fL}{v}\right) \quad (9)$$

其中: A_0 为原始振幅; φ 为材料衰减系数; f 为信号频率; L 为传播距离; v 为波速。

本试验 4 种材料传导统一频率的声发射信号且

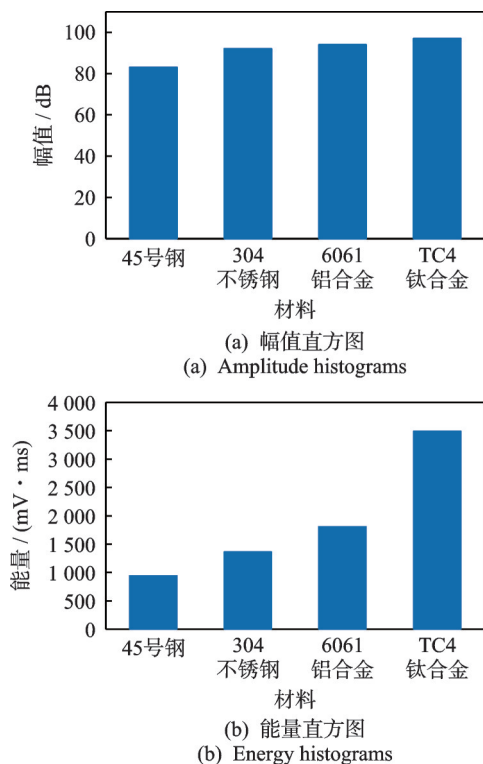


图 8 不同材料波导杆的幅值及能量直方图

Fig.8 Amplitude and energy histograms of waveguide rods of different materials

传播距离相同,波速和波导杆材料决定声发射信号幅值的衰减程度。由于合金材料中弹性纵波的波速略大于钢材,且铝合金的晶体结构和材料组成会导致内部能量耗散较为显著,所以铝合金相对于钛合金会表现出稍高的声发射信号幅值衰减。

由图 8(b)可知,在声发射源强度相同的情况下,使用 TC4 钛合金波导杆的能量显著优于其他材料,与 45 号钢波导杆相比,能量是其 3.7 倍。从声发射能量参数与幅值的对比来看,声发射能量参数更能有效地反映钢筋混凝土梁的损伤破坏^[20]。因此,能量参数比幅值更能表现不同声发射信号的特征,会出现更加显著地衰减。

图 9 为不同材料波导杆中声发射信号的频谱图。可以看出,声发射波在经过不同材料的波导杆传播后,出现明显的频率分散现象。钛合金和铝合金材料波导杆中声发射信号的频率范围为 0~250 kHz,304 不锈钢和 45 号钢波导杆中声发射信号的频率范围为 0~350 kHz,在频域内 TC4 钛合金的幅值最大。可见,304 不锈钢和 45 号钢材料的波导杆频散范围大,合金材料的波导杆频散范围小,这说明声发射波由混凝土结构传至波导杆时,合金材料的波导杆呈现的频散现象明显弱于钢材材料的波导杆。因此,声发射波通过不同材料波导杆后呈现不

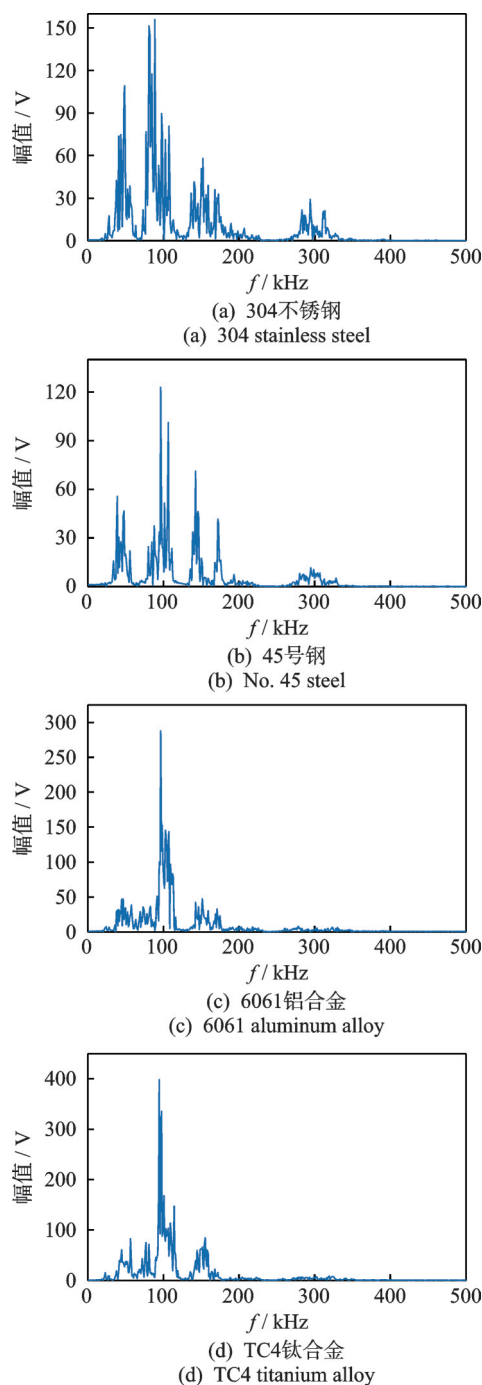


图9 不同材料波导杆中声发射信号的频谱图

Fig.9 Spectrograms of AE signals in waveguide rods of different materials

同频散范围,这一差异主要受材料属性的影响,特别是与材料内部的晶界密集程度有关^[21]。

综上所述,采用TC4钛合金的波导杆辅助进行混凝土结构声发射损伤监测效果更佳。因此,后续试验中的波导杆材料均采用TC4钛合金。

3.2 不同直径波导杆导波特性的试验研究

图10为TC4钛合金波导杆直径与幅值、能量、

计数以及上升时间的关系曲线。可以看出,声发射信号的特征参数随着波导杆直径的变化而发生改变,幅值、能量、计数和上升时间等参数随着波导杆直径的增大而增大。这说明波导杆直径影响信号的能量损耗,直径较大的波导杆通常具有较低的能量损耗,直径较小的波导杆具有较高的能量损耗,能量损耗的大小影响信号的幅度和频谱特性。

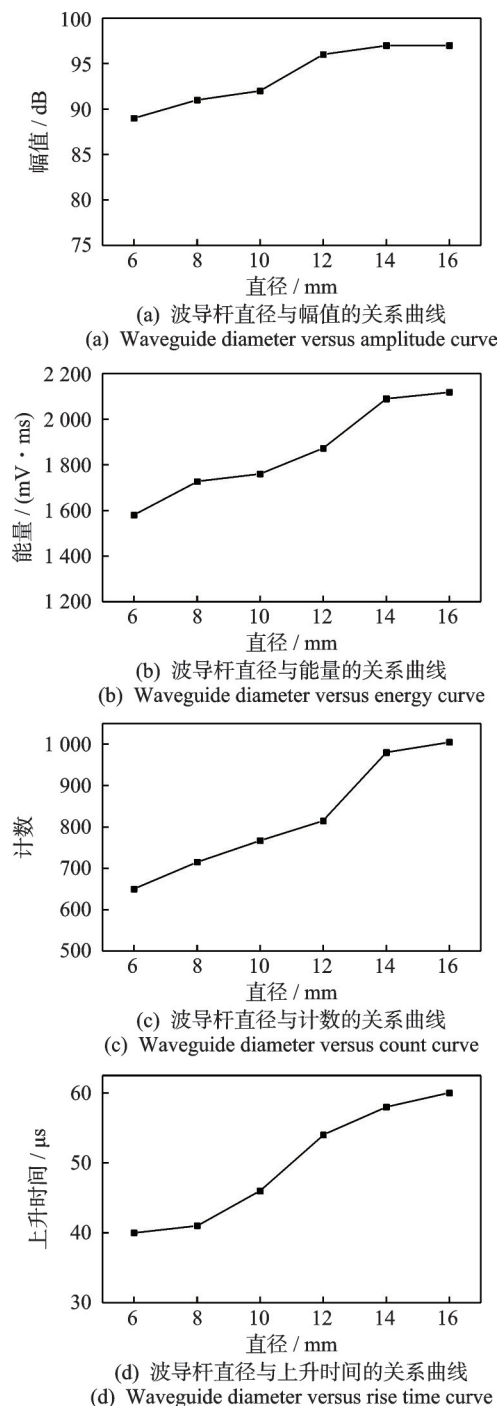


图10 TC4钛合金波导杆直径与幅值、能量、计数以及上升时间的关系曲线

Fig.10 Curves of TC4 titanium alloy waveguide rod diameter versus amplitude, energy, count and rise time

根据图 10 中的端点数值,取声发射波通过 6~16 mm 的波导杆传播后将各参数进行比较,发现波导杆直径对各参数的影响程度不同:当直径为 14 mm 以下时,随着直径的增加,波导杆的能量、幅值、计数关系以及上升时间不断增加,并在 8~14 mm 时增速较大;当直径为 14~16 mm 时,波导杆的能量、幅值、计数关系以及上升时间开始缓和或者保持较为稳定的状态。因此,在选择波导杆直径时,需综合考虑多方面因素,且在合理范围内尽量选择较大直径的波导杆,笔者建议选择 14 mm 的波导杆较为合适。

3.3 不同长度波导杆导波特性试验研究

波导杆的长度也会影响声发射波的衰减。根据应力波的最大幅值与传播距离之间近似指数衰减关系^[22],存在

$$V = Me^{-\alpha x} + C \quad (10)$$

其中: V 为 x 处的应力波幅值; α 为总衰减系数; M 和 C 为常数。

笔者以直径为 14 mm 的 TC4 钛合金波导杆为例,研究声发射波幅值与波导杆长度之间的关系。图 11 为声发射波在波导杆传播过程中的衰减示意图。由图可知,声发射波在波导杆中传播时,声发射信号的最大幅值随着传播距离的增大而不断减小。这表明在声发射波传播过程中存在衰减现象,且随着传播距离的增大,衰减效应变得更为显著。

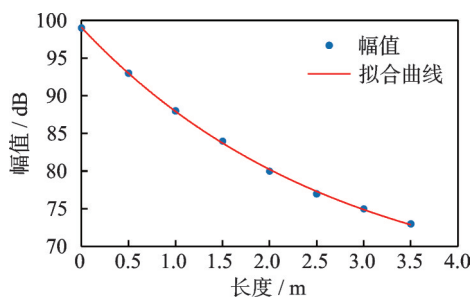


图 11 声发射波在波导杆传播过程中的衰减示意图

Fig.11 Schematic of the attenuation of AE waves during waveguide rod propagation

声发射波在波导杆传播过程中的指数衰减特性的拟合公式为

$$y = 36.12e^{-x/2.71} + 62.94 \quad (11)$$

随着声发射波在波导杆中传播距离的增大,声发射波的最大振幅呈现指数衰减的趋势,这与文献[22]中的应力波衰减理论一致。根据式(11),可采用波导杆接收到的声发射信号幅值,反演出混凝土

结构中的声发射信号幅值,从而实现更精确的损伤评估。

4 结 论

1) 研究不同材料波导杆的导波特性,发现被监测结构材料与所使用波导杆材料声阻抗越匹配,声发射信号衰减越小。

2) 声发射波由混凝土结构传至不同材料波导杆后呈现不同的频散范围,合金材料的波导杆呈现的频散现象明显弱于钢材材料的波导杆,频域内 TC4 钛合金的最大幅值最大。

3) 波导杆直径越大,声发射信号衰减越小。波导杆直径对各参数的影响程度不同,对幅值影响最小。

4) 声发射波在波导杆中传播存在指数衰减现象,笔者推导了直径为 14 mm 的 TC4 钛合金波导杆中声发射波幅值随着波导杆长度变化的拟合公式,可将波导杆接收到的信号幅值反演出原始信号的幅值,从而实现对混凝土损伤的准确评估。

参 考 文 献

- [1] 申景诗,曾晓东,姜明顺. 基于FBG和BP神经网络的声发射定位方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4): 816-820.
SHEN Jingshi, ZENG Xiaodong, JIANG Mingshun. Acoustic emission localization method based on FBG and BP neural network[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 816-820. (in Chinese)
- [2] 张晓涛,唐力伟,王平,等. 轴承故障声发射信号多频带共振解调方法[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(2): 363-368.
ZHANG Xiaotao, TANG Liwei, WANG Ping, et al. Multi-frequency band resonance demodulation method for acoustic emission signal of bearing fault[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2): 363-368. (in Chinese)
- [3] PUCINOTTI R. Reinforced concrete structure: non-destructive in situ strength assessment of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 331-341.
- [4] 童国炜,徐华伟,黄林轶,等. 基于声发射定位算法的故障检测技术研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(5): 997-1001.
TONG Guowei, XU Huawei, HUANG Linyi, et al. Research on fault detection technology based on acous-

- tic emission localization algorithm[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(5): 997-1001. (in Chinese)
- [5] COLOMBO I S, MAIN I G, FORDE M C. Assessing damage of reinforced concrete beam using "b-value" analysis of acoustic emission signals[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(3): 280-286.
- [6] 宫永辉,武小峰,尹晓峰,等. 高温条件下波导杆的在线损伤检测[J]. *无损检测*, 2019, 41(9): 70-74.
GONG Yonghui, WU Xiaofeng, YIN Xiaofeng, et al. Online damage detection of wave guiding rods under high temperature conditions[J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(9): 70-74. (in Chinese)
- [7] 沈功田,刘时风,戴光. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 31-32.
- [8] 蒋仕良. 波导杆对声发射信号的影响[J]. *无损检测*, 2006, 28(1): 51-52.
JIANG Shiliang. Effect of waveguide rods on acoustic emission signals[J]. *Nondestructive Testing*, 2006, 28(1): 51-52. (in Chinese)
- [9] WANG X H, JIAO Y L, NIU Y C, et al. Study on the acoustic emission features of leakage detection assisted by wave guide rods[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2015, 33(2): 143-150.
- [10] 孙国豪,柏明清,张春江,等. 圆形波导杆中两种情况下声信号的传播特性[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 36(6): 851-858.
SUN Guohao, BO Mingqing, ZHANG Chunjiang, et al. Propagation characteristics of acoustic signals in circular waveguide rods in two cases[J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 36(6): 851-858. (in Chinese)
- [11] 刘兵,王凤,傅辉,等. 不同材料波导杆在水中的声波传播特性[J]. *无损检测*, 2017, 39(1): 24-27, 31.
LIU Bing, WANG Feng, FU Hui, et al. Propagation characteristics of acoustic waves through different material waveguide rods in water[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(1): 24-27, 31. (in Chinese)
- [12] GUO F P, WANG D C, LIU W, et al. Experimental research of acoustic emission features of waveguide rod in the oil[C]//*Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: [s.n.], 2013: 231-235.
- [13] 刘松平, MICHAEL G, 陈积懋. 模态声发射检测技术[J]. *无损检测*, 2000, 22(1): 38-41.
LIU Songping, MICHAEL G, CHEN Jimao. Modal acoustic emission detection technique[J]. *Nondestructive Testing*, 2000, 22(1): 38-41. (in Chinese)
- [14] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 135-138.
- [15] 宋美萍. 波导杆的导波特性及散热效果研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- [16] 郭福平. 波导杆声发射特性试验研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
- [17] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 12-15.
- [18] 高光发. 固体中的应力波导论[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 175-179.
- [19] 门进杰,郭昌灵,王应生,等. 钢筋混凝土板声发射波传播特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(1): 243-250.
MEN Jinjie, GUO Changling, WANG Yingsheng, et al. Experimental study of acoustic emission wave propagation characteristics of reinforced concrete slabs[J]. *Vibration and Shock*, 2019, 38(1): 243-250. (in Chinese)
- [20] 王举国. 钢筋混凝土梁受弯破坏过程的声发射能量特性分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [21] 陈冲,刘相鹏,吕震,等. 声发射模拟信号在水介质中传播的波形特征[J]. *无损检测*, 2012, 34(12): 58-60.
CHEN Chong, LIU Xiangpeng, LÜ Zhen, et al. Waveform characteristics of acoustic emission simulated signal propagation in aqueous media[J]. *Nondestructive Testing*, 2012, 34(12): 58-60. (in Chinese)
- [22] 王秉相,程普锋,郑宇轩,等. 应力波在散体颗粒中的传播规律[J]. *高压物理学报*, 2020, 34(4): 98-105.
WANG Bingxiang, CHENG Pufeng, ZHENG Yuxuan, et al. Stress wave propagation in bulk particles[J]. *Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(4): 98-105. (in Chinese)



第一作者简介:霍林生,男,1975年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构振动控制与健康监测。曾发表《Vibration acoustic modulation for bolt looseness monitoring based on frequency-swept excitation and bispectrum》(《Smart Materials and Structures》2023, Vol.23, No.3)等论文。

E-mail: lshuo@dlut.edu.cn