

钢管混凝土内部孔洞缺陷监测试验

马进宝¹, 刘学静², 武中华², 张伟², 刘闵², 刘燕云³, 秦磊³

(1. 山东三箭建设工程管理有限公司, 济南 250100; 2. 山东三箭建设工程股份有限公司, 济南 250100;
3. 济南大学 土木建筑学院, 济南 250022)

摘要:开展了钢管混凝土内部孔洞缺陷监测试验,提出了将压电材料制成埋入式压电传感器,通过布置监测系统,利用波动分析法的原理对钢管混凝土内部孔洞缺陷进行测量和分析的监测方法。设计了具有不同直径内部孔洞的钢管混凝土试件和间距不同的传感器监测组,从基于幅值和声时的时域分析角度和基于小波包能量的频域分析角度对应力波测量结果进行了对比分析。结果表明,提出的监测方法可以识别钢管混凝土内部孔洞缺陷的情况。

关键词:压电陶瓷;钢管混凝土;缺陷监测;应力波;波动分析法;小波包能量

中图分类号: TN384; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)07-0075-08

Testing research on defect monitoring of CFST internal holes

MA Jinbao¹, LIU Xuejing², WU Zhonghua², ZHANG Wei², LIU Min², LIU Yanyun³, QIN Lei³

(1. Shandong Sanjian Construction Engineering Management Co., Ltd, Ji'nan 250100, China;
2. Shandong Sanjian Construction Engineering Co., Ltd, Ji'nan 250100, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, University of Ji'nan, Ji'nan 250022, China)

Abstract: The monitoring test of internal hole defects of concrete filled steel tube was carried out. A monitoring method was proposed for measuring and analyzing the hole defects in the concrete filled steel tube, in which manufacturing embedded piezoelectric sensor by using piezoelectric material, by arranging the monitoring system and using the principle of wave analysis. Concrete filled steel tubular specimens with internal holes of different diameters and sensor monitoring groups with different spacings were designed experimentally. The stress wave measurement results were compared and analyzed from the perspective of time-domain analysis based on amplitude and wave velocity and frequency-domain analysis based on wavelet packet energy. The results showed that the proposed monitoring method can accurately identify the internal hole defects of concrete filled steel tube.

Key words: PZT; CFST; defect monitoring; stress wave; wave analysis method; wavelet packet energy

钢管混凝土构件是将混凝土灌注在钢管中形成的,其钢管和内部核心混凝土可以共同承受外部荷载的作用。相较于单混凝土构件和单钢管构件,钢管混凝土构件具有承载力强、延展性好、抗震性能优越、防火耐腐蚀性好、施工方便的优点被广泛应用于建筑结构中^[1]。然而由于钢管内部横隔板的存在和混

凝土振捣不到位,钢管内部混凝土容易出现孔洞、裂缝、与钢管界面剥离等缺陷,这些缺陷的存在会影响结构的力学性能,进而影响结构安全^[2],因此提出针对钢管混凝土内部灌浆质量进行监测的方法具有重要意义。常规的混凝土内部缺陷无损检测方法有很多,如超声法,声发射法,光纤检测法,电测法等,但这些检测方法都有不同程度的局限性,例如有的监测设备不适宜现场检测,逐点检测过程繁琐,检测范围小,隐蔽结构不易接近,定位困难等^[3]。目前,监测用智能材料取得了较大的发展,其中以压电陶瓷(Piezoelectric ceramic transducer, PZT)为代表的压电智能材料由于具有正逆压电效应,同时具备驱动

收稿日期: 2023-10-04

作者简介: 马进宝(1974—), 男, 主要从事房屋建筑工程施工, 734134789@qq.com

通信作者: 秦磊(1974—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为防灾减灾工程及防护工程, cea_qinl@ujn.edu.cn

和接收信号的能力,且具备反应迅速、灵敏度高、频域带宽宽、制作成本低等优点,被广泛应用于工程结构的健康监测与损伤识别中^[4]。近年来,许多学者利用PZT激励和接收应力波信号,结合应力波传播与测量原理,在压电传感器的制作、激励信号的选取、压电复合材料与混凝土材料的耦合、缺陷定量分析与定位研究等多个方面做了大量研究^[5-7]。文章针对钢管混凝土内部孔洞缺陷监测问题,将PZT制成压电传感器来激励和接收应力波信号,设计了具有不同尺寸内部孔洞缺陷的钢管混凝土构件,并将压电传感器埋入钢管混凝土中进行监测,通过对测量到的信号进行时域及小波包能量分析,给出评估混凝土内部孔洞缺陷的损伤指标,验证了用PZT做波动测量分析方法监测钢管混凝土结构内部孔洞的可行性。

1 基本原理

1.1 压电效应

PZT作为压电材料具有压电效应,即PZT表面受到力的作用,内部晶体出现极化现象,导致对应的表面聚集符号相反的电荷,从而形成有电势的带电状态,随着外力消失,PZT恢复到不带电状态。相反的,当在PZT的极化方向上施加电场,结构内部晶体会发生运动,表现为PZT结构表面的变形,当施加高频变化的电场时,PZT会发生高频振动,振动的大小与施加电场的幅值正相关,电场去除后,变形也随之消失。上述现象分别被称为压电材料的正、逆

压电效应,其原理示意如图1所示^[8]。

1.2 波动分析法及监测系统组成

基于PZT的波动分析法的原理是将PZT制成的传感器粘贴在构件表面或埋入混凝土内部,利用PZT同时具有发射和接收应力波信号的功能,将PZT作为驱动器和接收器分别布置在构件的相应位置,一端作为发射端,利用交流电激励驱动端发射应力波,应力波扫描监测结果到达信号接收端后会转换为电信号。根据波动理论,应力波在传播中经过裂缝或孔洞等缺陷时会发生衰减、波形与传播路径的变化,通过对比分析结构损伤前后所获取信号的变化,并结合时域及小波包能量分析的损伤指标等方法来识别结构中存在的缺陷,实现对结构的缺陷评估与健康监测。波动分析法原理及监测系统的组成示意如图2所示^[9-10]。

2 钢管混凝土内部孔洞缺陷监测试验

2.1 试件设计

PZT、孔洞与钢管相对位置示意如图3所示,试验在每种工况的试件监测截面设置了4个埋入式PZT传感器S1~S4, S1、S3为一组测量组,其中S1作为激励端,S3作为接收端;S2和S4为一组测量组,其中S2作为激励端,S4作为接收端。设计了高度为40 cm的无盖无底的方形钢管,方形钢管构件截面长度为42 cm,钢管壁厚为10 mm,内部浇筑型号为C50混凝土并养护超过28 d,分别在钢管内部布置无孔洞的混凝土和在混凝土内部布置直径为20,

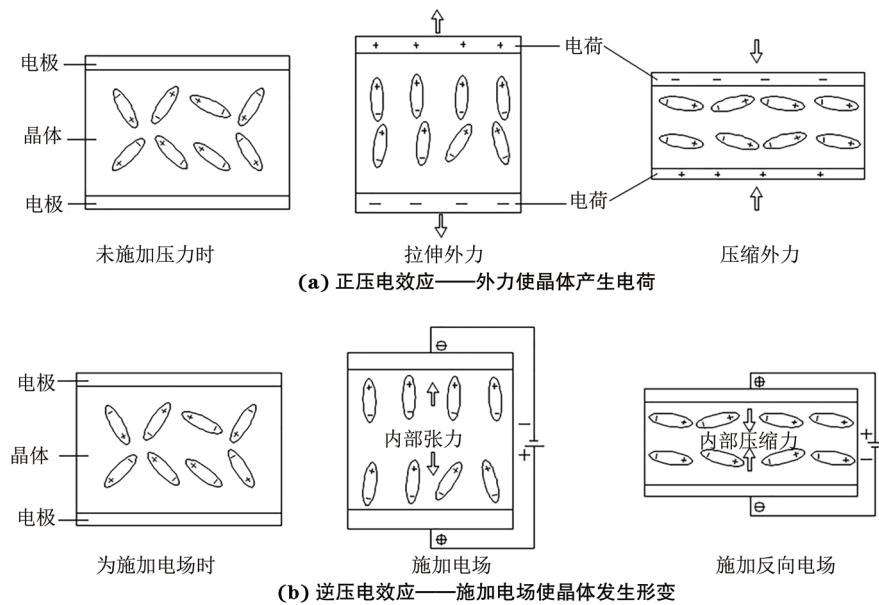


图1 压电效应原理示意

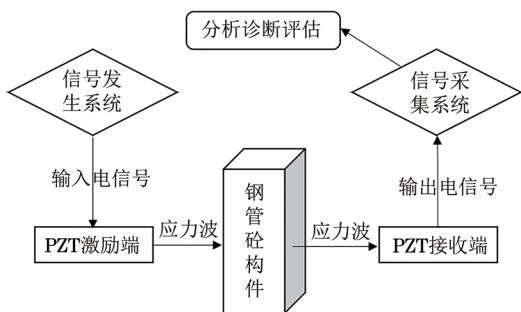


图 2 波动分析法原理及监测系统组成示意

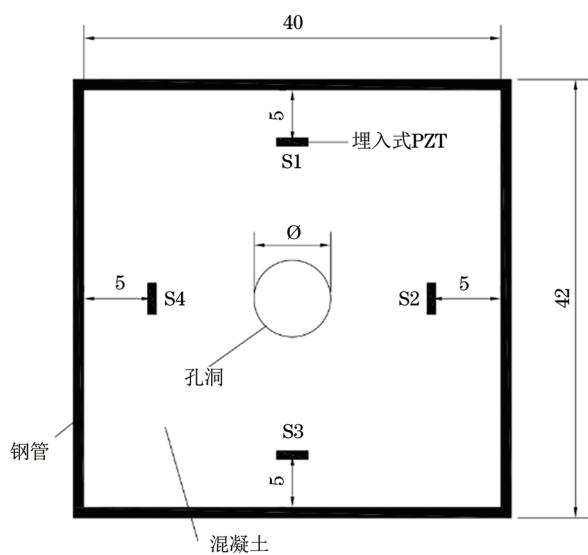


图 3 PZT、孔洞与钢管相对位置示意

32, 55, 75, 95 mm 的孔洞, 试验孔洞布置实物如图 4 所示。

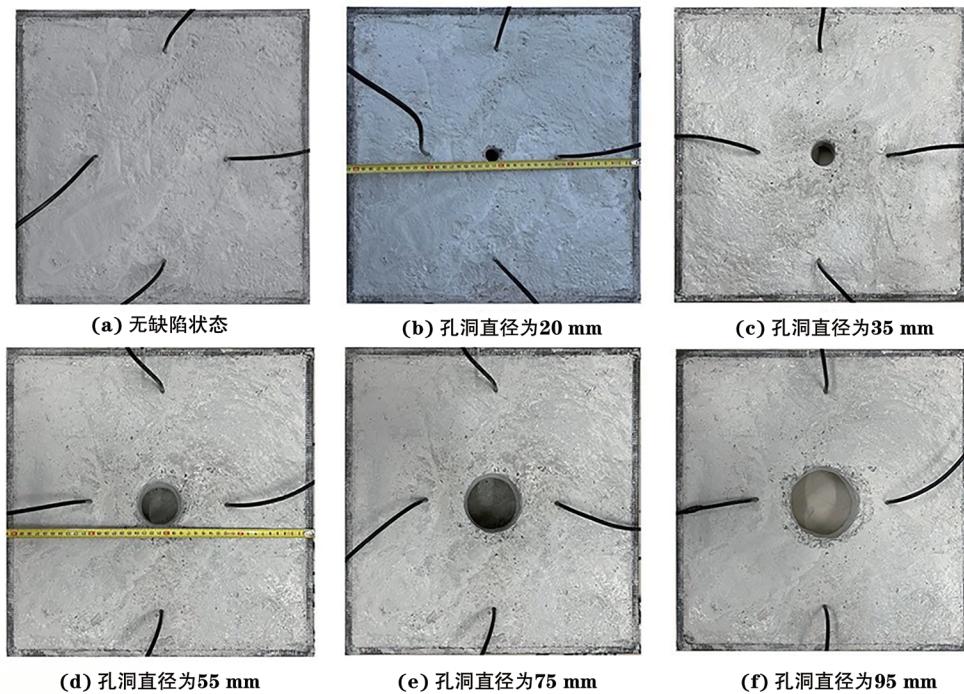


图 4 钢管混凝土缺陷布置实物

2.2 试验监测系统

试验所使用的仪器实物如图 5 所示, 监测系统由 DG1022 任意波函数信号发生器、PZT-4 型压电传感器(包括驱动器和接收器)、前置高压放大器、40 dB 增益后置信号放大器、全信息信号采集仪、计算机及波形采集软件组成。试验选取频率为 115 kHz、峰值为 ± 10 V、周期为 50 ms 的经过汉宁窗调制的五周期正弦波信号作为激励信号。激励信号由信号发生器发出, 激励驱动端传感器产生应力波扫描构件后, 将带有结构缺陷信息的应力波信号传递到接收端传感器, 接收端传感器感应到应力的变化后, 将应力波转化为电信号经过放大器放大后传输给波形数据采集系统, 一次采集过程就此完成。试验时, 每种工况监测数据重复采集三次, 取三次数据的平均值作为最终监测数据, 监测数据经过带通 80~150 kHz 数字滤波器降噪处理后进行数据分析。

3 试验监测结果分析

利用试验监测系统对上述试验工况进行监测, 对接收的数据进行滤波处理, 得到每种工况下 S1-S3 监测组的信号波形如图 6 所示。

同一工况下两监测组 S1-S3 与 S2-S4 的时域信号波形在细节上略有区别, 但在反映应力波随缺陷情况而变化的特征参数如首波波峰到达时间和首波峰值上, 两监测组所得数据十分相近, 文章在此不

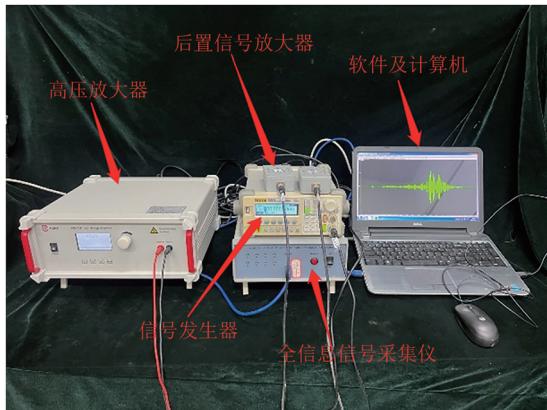


图 5 试验监测系统实物

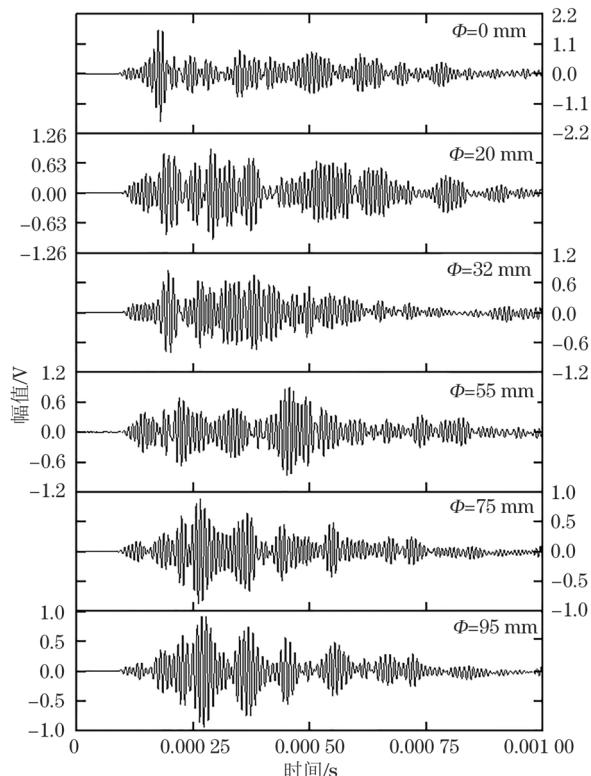


图 6 S1-S3 监测组的各缺陷工况波形

一一列出。所设置的两个相互验证的对照监测组可以得出相同的应力波信号关于内部孔洞缺陷特征参数的变化规律,从而避免了单一监测组由于传感器制作、布置和传播路径方面缺少参照而引起的偶然和误差。

3.1 基于幅值和声时的时域信号分析

应力波在布置了埋入式PZT的钢管混凝土构件中的传播路径示意如图7所示。应力波从PZT激励端发出后,一部分经过混凝土传播后直接到达PZT接收端,这部分波称为直达波;另外一部分波经过钢管壁反射后到达或重新回到PZT接收端,这部分波称为反射波。从传播路径来看,直达波先于反射波

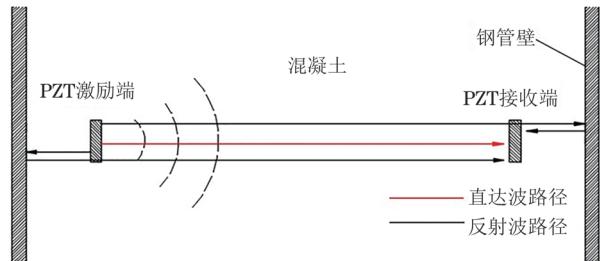


图 7 直达波和反射波传播路径示意

到达PZT接收端被记录,前者在时域信号波形图上表现为最先出现的波包,文章称之为“首波”。直达波传播路径清晰,当混凝土内部不含孔洞缺陷时,直达波的最短传播路径为沿PZT激励端和接收端之间的直线传播,而当混凝土内部含有孔洞缺陷时,直达波的传播路径延长,传播受到阻碍,表现为接收信号首波到达时间的延迟和首波幅值的降低。反射波由于传播路径复杂,波形相互叠加干扰,其幅值和声时对内部孔洞缺陷缺乏敏感性。因此,文章选取时域信号波形图中的首波部分作为幅值和声时分析的对象。

为了考察不同直径大小的孔洞缺陷对传感器接收信号的幅值和声时的影响,绘制不同工况下S3传感器接收的前200 μs的时域信号图(见图8),该时间范围内的波形包含了用于分析的首波信号部分。从图8中提取出的相应状态下的信号首波波峰的幅值和到达时间如表1所示。

从图8与表1中可以看出,与无缺陷的情况相比,接收到的信号峰值在损伤情况下均有所下降,且峰值衰减幅度随着缺陷尺寸的增大而增大。在应力波的传播声时方面,传感器接收到的首波到达信号幅值较低,找到首波到达的准确时间比较困难,各工况下的首波到达时间无明显区别,但从接收到的信号波峰到达时间来看,随着缺陷尺寸的增大,信号波峰到达时间逐渐向后推迟,波速随缺陷程度的增加而变小,表现出一定的规律性。分析得出,利用PZT传感器监测到的信号波峰幅值和声时对于钢管混凝土内部孔洞缺陷出现的程度有较好的响应。

传感器接收信号的幅值和钢管混凝土内部缺陷尺寸直接相关,文章通过定义基于幅值的缺陷判断指标 D_{I_i} ,对这种相关性做更加直观的判断。

$$D_{I_i} = \frac{a_i}{\max(a_1, a_2, \dots, a_6)} \quad (1)$$

式中: i 为具有不同孔洞缺陷直径的工况, $i=1$ 代表无缺陷状态, $i=2$ 代表孔洞直径为 20 mm 状态, 以此

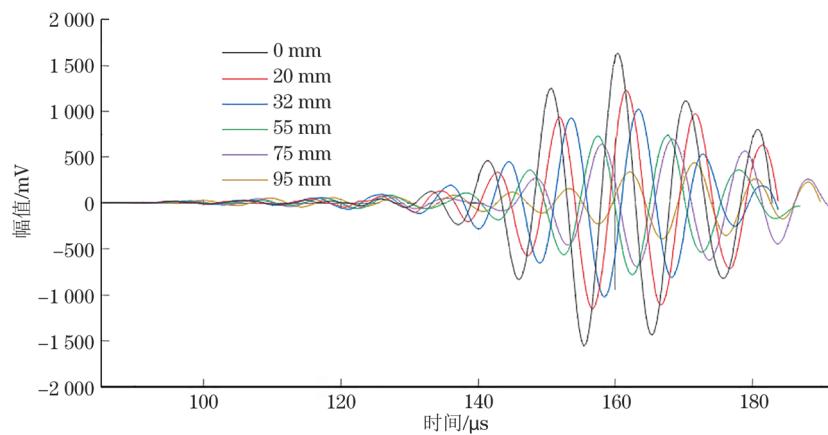


图 8 S3 传感器接收的前 200 μs 时域信号波形

表 1 各工况下 S3 传感器接收的波峰幅值和到达时间

直径/mm	幅值/mV	声时/ μs
0	1 620.5	160.3
20	1 221.4	161.7
32	1 021.1	163.3
55	728.2	166.7
75	682.7	168.2
95	428.6	171.8

类推; a_i 代表相应工况下的采集信号峰值。

S1-S3 监测组在不同程度缺陷工况下的 D_l 变化情况如图 9 所示, 可以看出, 监测组的 D_l 值随着缺陷程度的增加而不断减小。根据测量数据的分析结果, 基于幅值的缺陷判断指标能够准确地判断缺陷的存在及其程度。

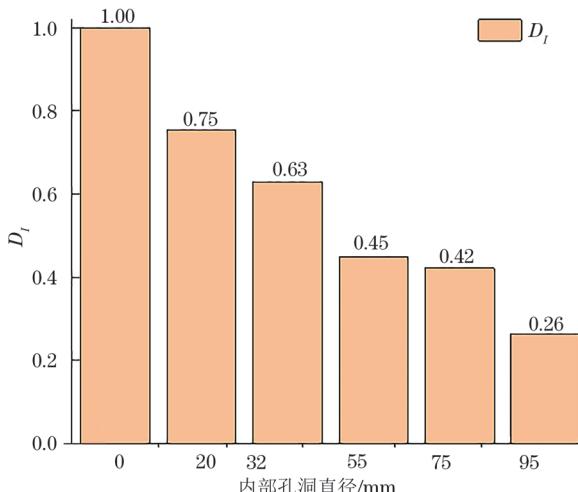


图 9 S1-S3 监测组各工况下的 D_l 值变化情况

3.2 基于频域分解的小波包能量参数分析

3.2.1 小波包分解

信号分析方法中经常用到小波包分解方法。小波包分析方法是将信号频带经过多层次的划分之

后, 根据信号本身的特征, 自适应地选择最优的小波基函数, 让信号通过一系列中心频率不同但带宽相同的滤波器, 得出信号的频率特征参数。小波包分解克服了小波分析方法在高频区域分辨率较差的缺点, 通过对信号进行连续的小波包变换, 可以聚焦到信号的任意细节, 故该方法在信号分析和工程结构健康监测领域应用非常广泛^[12]。

小波包分解将初始信号经过 N 层分解后得到末层有 2^N 个从低频到高频分布的等宽度频带的组分信号, 经过三层小波包分解的频带编号示意如图 10 所示, 其中 $(3, j)$ 表示第 3 层从低频到高频分布的共 8 个频带的信号 ($j=0, 1, \dots, 7$)。

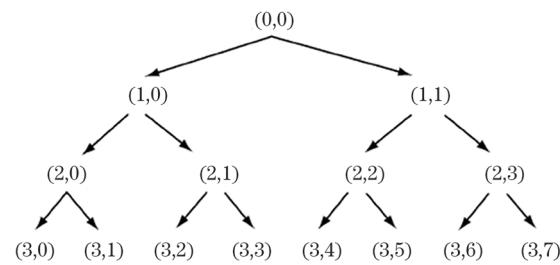


图 10 小波包信号分解示意

原始信号 S 和经过 N 层小波包变换得到的 2^N 个末层信号 $s_{(N,j)}$ 满足

$$S = \sum_{j=0}^{j=2^N-1} s_{(N,j)} \quad (2)$$

定义末层信号的各频带信号分量 $s_{(N,j)}$ 对应的能量 $e_{(N,j)}$ 为

$$e_{(N,j)} = \int |s_{(N,j)}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_k|^2 \quad (3)$$

式中: n 为末层信号各频带的采样点数; x_k 为对应离散信号采样点的电压值; t 为时间。

最后, 定义原始信号全部能量为

$$E = \sum_{j=0}^{j=2^N-1} e_{(N,j)} \quad (4)$$

各频带的能量在总能量中的占比可以表示为

$$E_j = \frac{e_{(N,j)}}{E} \times 100\% \quad (5)$$

3.2.2 小波包能量特征参数分析结果

本节在小波包分解理论的基础上, 对由汉宁窗五周期正弦波激励的结构监测系统在不同工况下接收到的信号波形进行小波包分解和能量参数提取。选取‘db3’小波基函数, 利用Matlab算法实现对采集信号的小波包分解, 将信号进行6层小波包分解, 末层共有 $2^6=64$ 个节点满足 $(6, j)$, 其中 $j=0, 1, 2, \dots, 63$ 。85~148 kHz频率内的频带及其节点分布如表2所示, 并为每个频带进行了编号。

表2 6层小波包分解部分节点频带分布

编号	频带范围/kHz	节点号
K1	[85.937 5~93.75]	(6, 14)
K2	[93.75~101.562 5]	(6, 10)
K3	[101.562 5~109.375]	(6, 11)
K4	[109.375~117.187 5]	(6, 9)
K5	[117.187 5~125]	(6, 8)
K6	[125~132.812 5]	(6, 24)
K7	[132.812 5~140.625]	(6, 25)
K8	[140.625~148.437 5]	(6, 27)

由于带通频率范围外的信号被滤波处理了, 故忽略不计。各工况采集信号经过小波包分解后的各频带能量值 V^2 及总能量 E 的分布如表3所示。

同时为了更加方便地对比每种工况各个频带的占比情况和不同工况下相同频带的占比变化规律, 将信号不同频带能量占该信号总能量的百分比绘制成曲线, 如图11所示。

由图11和表3可以看出, 在各个工况中, 节点K4

对应的频带[109.375~117.187 5] kHz始终占比最大, 为主频带, 这是因为原始信号是通过接收激励频率为115 kHz的信号得到的, 所以接收信号的频率在该频率附近范围内分布占比最大, 接收信号的主频没有明显的偏移; 此外在各个工况中, 偏离激励信号频率较大的频带, 如K1、K8对应的频带[85.937 5~93.75] kHz、[140.625~148.437 5] kHz均占比很小, 且随着缺陷程度的不断加大, 上述频带的能量占比变化不大, 说明低于或高于主频较大范围的信号较为微弱且不随内部孔洞缺陷程度变化而发生明显变化。从主频带随缺陷程度的增加而发生相对变化的角度来看, 节点K4对应的主频带能量占比随着缺陷程度的加大逐渐降低, 与之相对的是随着缺陷程度的加大, 各工况K2, K3, K5, K6, K8频带能量占比总量分别为63.17%, 64.60%, 66.58%, 65.34%, 70.26%, 74.26%, 占比呈现越来越大的趋势, 可以看出在无缺陷工况下, 主频带能量较为集中, 随着缺陷程度的不断加大, 主频带能量占比不断减小, 能量逐渐变得分散, 向偏离主频带两侧方向移动, 这可能是因为应力波的传播受到缺陷变化的影响, 波形由于反射和散射等因素发生了叠加和变形, 使频率产生了重新的分布, 因此通过对比主频带和其他频带能量在信号总能量中的占比情况, 可以实现对不同孔洞缺陷工况的频带能量特征参数的提取和对比, 实现对钢管混凝土内部孔洞缺陷的监测与判别。对于小波包分析的能量总量 E 来说, 随着缺陷程度的逐渐加大, 小波包分解后得到的总能量 E 的数值逐渐降低, 且降低的速率呈现出随缺陷增大逐渐变缓的特点, 指标 E 在较大尺寸缺陷范围内的变化程度较小。

为了更加直观地研究小波包能量值随着构件内部缺陷程度加大的变化规律, 文章提出了基于小波包能量的归一化缺陷判断指标 E_I

表3 各工况频带能量分布

编号	内部孔洞缺陷直径/mm						kHz
	0	20	32	55	75	95	
K1	1.5	2.5	3.1	2.5	0.6	0.6	
K2	30.8	5.8	8.3	5.6	2.6	9.2	
K3	35.5	24.4	11.2	11.1	8.2	8.9	
K4	88.9	54.1	34.2	21.3	15.8	12.4	
K5	45.8	30.9	28.2	15.8	13.7	9.9	
K6	41.9	37.3	20.0	9.5	13.7	8.1	
K7	1.6	5.2	6.8	3.2	0.9	1.4	
K8	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	
E	246.3	160.2	111.8	69.1	55.6	50.5	

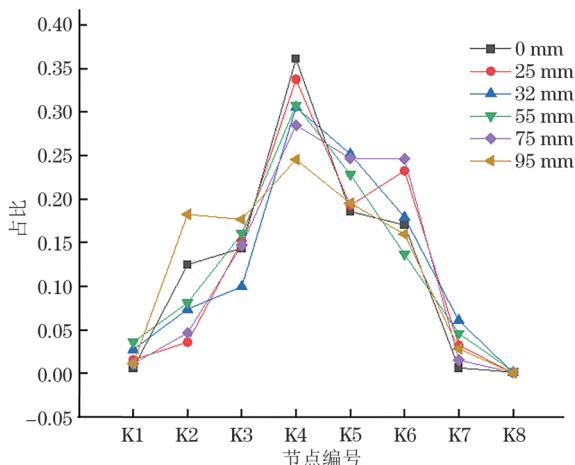


图 11 各工况频带能量占比情况

$$E_{I_i} = \frac{E_i}{\max(E_1, E_2, \dots, E_6)} \quad (6)$$

将不同工况下的基于幅值的缺陷归一化判断指标 D_I 与基于小波包分析能量归一化缺陷判断指标 E_I 对比, 结果如图 12 所示, 可以看出, D_I 和 E_I 值在变化趋势上相同, 各工况判断指标的具体数值十分接近, 说明两种分析方式得出的结论可以相互验证, 试验提出的监测方法和分析方法是正确有效的。

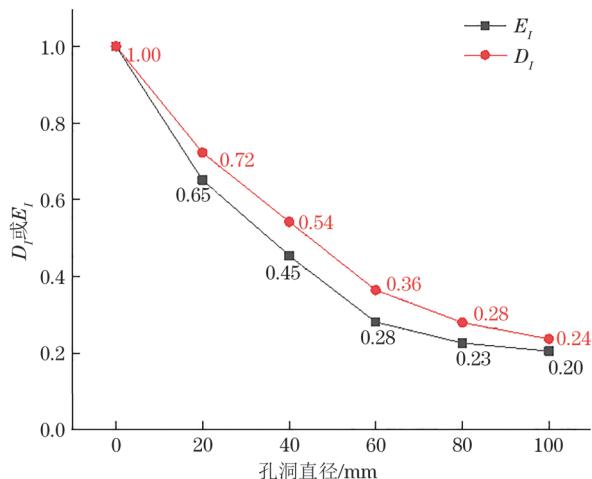


图 12 E_I 与 D_I 指标变化曲线

4 结论

文章针对钢管混凝土内部孔洞缺陷监测问题, 提出了利用压电传感技术和波动分析理论对钢管混凝土进行应力波测量分析的方法。通过布置压电传感结构健康监测系统成功进行了钢管混凝土内部不同缺陷尺寸的孔洞监测试验, 并对试验数据分别从基于幅值、声时的时域角度和基于小波包能量的频域角度进行了分析, 得出以下结论。

(1) 对测量结果进行时域信号分析, 通过提取首波波峰幅值和到达时间, 发现与无缺陷工况相比, 随着内部孔洞缺陷程度的不断加大, 首波波峰幅值不断变小, 到达时间逐渐延迟。通过定义基于幅值的归一化缺陷判断指标 D_I , 得出 D_I 随着缺陷程度的加大而不断降低, 且 D_I 值下降速度逐渐变慢, 指标敏感性随着缺陷尺寸的增大逐渐降低的结论。

(2) 对测量结果进行了基于小波包频域分解的能量特征参数分析, 通过分析小波包分解得到的各频带的能量分布情况, 得到在无缺陷工况下, 主频带能量较为集中, 随着缺陷程度的不断加大, 总能量不断衰减, 主频带能量占比不断减小, 能量逐渐变得分散, 向偏离主频带两侧方向移动。通过定义基于小波包分析能量归一化缺陷判断指标 E_I , 得出 D_I 和 E_I 值在变化趋势上相同的结论, 验证了试验监测方法和分析方法的正确有效性。

参考文献:

- 陈宝春, 李莉, 罗霞, 等. 超高强钢管混凝土研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 1-21.
- 郝兆峰, 张戎令, 李志杨, 等. 钢管混凝土构件不同缺陷率注浆补强前后承载能力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增1): 241-250.
- LIU H, XIA H Y, ZHUANG M W, et al. Reverse time migration of acoustic waves for imaging based defects detection for concrete and CFST structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 210-220.
- 薛子凡, 邢志国, 王海斗, 等. 面向结构健康监测的压电传感器综述[J]. 材料导报, 2017, 31(17): 122-132.
- 张浩, 李俊杰, 康飞. 基于压电智能骨料的混凝土梁裂缝损伤监测研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21): 215-222.
- KOCHERLA A, DUDDI M, SUBRAMANIAM K V L. Embedded PZT sensors for monitoring formation and crack opening in concrete structures[J]. Measurement, 2021, 182: 109698.
- 张佳奇, 陈铎, 郑跃滨, 等. 基于压电传感器的树脂基复合材料固化过程监测[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 2776-2781.
- 赵程, 蒋春燕, 张学伍, 等. 压电传感器测量原理及其敏感元件材料的研究进展[J]. 机械工程材料, 2020, 44(6): 93-98.
- 雷素素, 刘宇飞, 段先军, 等. 复杂大跨空间钢结构施工过程综合监测技术研究[J]. 工程力学, 2018, 35(12):

203-211.

[10] ABBAS M, SHAFIEE M. Structural health monitoring (SHM) and determination of surface defects in large metallic structures using ultrasonic guided waves[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3958.

[11] LUO Y Z, SHEN Y B, FU W W, et al. Implementation of SHM system for Hangzhou East Railway Station using a wireless sensor network[J]. Smart Structures and Systems, 2021, 27: 19-33.

[12] 梁凯, 韩庆邦. 小波包能量谱和BP神经网络在波纹管压浆超声检测中的应用[J]. 声学技术, 2020, 39(2): 151-156.