

# 预应力管道波纹管压浆密实性压电监测试验研究

姚明星<sup>1</sup>, 李聪<sup>1,2</sup>, 晏中华<sup>1</sup>, 何缘<sup>1</sup>, 陈冠<sup>3</sup>, 赵杰<sup>4</sup>

(1. 长沙市公共工程建设中心, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200;  
3. 湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004; 4. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为解决预应力管道波纹管压浆质量的检测问题, 该文提出一种基于压电陶瓷波动法的波纹管密实度检测方法, 试验设计一个带有波纹管和预应力筋的混凝土试件, 采用压电波动法对其压浆密实性进行监测试验研究, 在预应力筋上固定1个嵌入式压电驱动器用以发射信号, 传感器使用3个压电陶瓷PZT片分别布置在波纹管上下表面用以接收信号。试验设计了4种工况: 灌浆0%、50%、90%及灌浆饱满。利用时域分析和小波包能量分析的方法判定波纹管的灌浆密实度。结合该文试验可以得到: 随着试验的进行, 波纹管的灌浆程度提高, 信号幅值不断增加, 即波纹管灌浆密实度越小, 时域信号幅值和小波包能量值越小。

**关键词:** 压电陶瓷; 小波包能量; 波纹管密实性; 结构损伤监测

**中图分类号:** U445.57

**文献标志码:** A

近年来, 预应力混凝土梁在公路桥梁施工中得到了广泛应用, 同时如何有效检测预应力管道压浆密实度也渐渐得到了业界的重视<sup>[1-3]</sup>。由于灌浆不密实导致预应力管道内钢绞线锈蚀和预应力的提前丧失, 将会大大降低桥梁的耐久性, 甚至引起结构失效或垮塌<sup>[4-7]</sup>。因此, 解决预应力波纹管压浆密实度的检测问题也对桥梁结构健康评估的发展具有重要意义。

为此, 中国相关学者对波纹管密实度的无损检测方法展开了一系列的研究。目前, 预应力波纹管密实度的检测方法主要包括冲击回波法<sup>[8-9]</sup>、超声波法<sup>[10-11]</sup>以及地质雷达法<sup>[12-13]</sup>。近几年, 陈媛等<sup>[14]</sup>提出基于递归奇异熵方法的波纹管压浆超声检测的方法, 结果表明: 缺陷横向尺寸与递归奇异熵值具有单调对应关系; 黎碧波等<sup>[15]</sup>提出基于冲击回波法的波纹管孔道密实性评估方法, 用Abaqus对检测过程进行了数值模拟分析, 结果表明: 有限元模型与实际模型结果吻合较好, 验证了冲击回波法的有效性; 郑豪等<sup>[16]</sup>提出了基于EEMD-SVM的波纹管压浆超声检测方法, 利用总体平均经验模态分解(EE-MD)方法将信号分解成多个频带的本征模态分量(IMF), 此方法在判断波纹管是否出现严重脱浆时具有可行性。

上述方法各有适用条件及其优缺点, 检测结果会由于检测人员的检测水平不同而产生较大的差异, 结果也会受到诸多其他因素干扰, 同时, 检测成本相对较

高<sup>[17]</sup>。对此, 该文提出一种基于压电波动法的预应力波纹管压浆密实度检测方法。相比于其他方法, 该文提出的方法不仅具有操作便捷、反应灵敏和成本低廉的优势, 同时也是一种可应用于其他结构的健康监测方法。

## 1 监测原理

采用基于压电波动法, 利用压电陶瓷的双重性将压电陶瓷PZT作为驱动器和传感器, 粘贴在波纹管和预应力筋的表面与混凝土试件共同构成压电智能结构监测系统。试验监测原理如图1所示。嵌入式压电陶瓷SA作为驱动器发射激励信号, 而粘贴在波纹管表面的3个压电陶瓷PZT-a、PZT-b和PZT-c作为传感器接收信号。当试验处于灌浆0%的工况时, 波纹管内部没有灌浆料, 信号无法传播, 导致PZT片接收不到SA发射的激励信号。当达到灌浆50%的工况时, 波纹管下半部分被灌浆料填满, 由SA发出的激励信号能够通过灌浆料传播到粘贴在波纹管底端的PZT-a, 此时由于SA与粘贴在波纹管顶端的PZT-b和PZT-c之间没有传播介质, 因此PZT-b和PZT-c几乎接收不到应力波信号。随着管道内灌浆料的增加, 由管壁传播到波纹管顶部的激励信号也不断增加, 此时PZT-b和PZT-c接收到的信号也会增强, 当灌浆达到100%

收稿日期: 2020-10-25

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2019JJ40301)

作者简介: 姚明星, 男, 硕士, 工程师, E-mail: 155044739@qq.com

时,灌浆料填满整个波纹管,此时位于波纹管顶部的PZT-b和PZT-c能够直接接收到SA发射的激励信号。即应力波在波纹管内部不密实处会由于介质的变化而产生散射或者绕射,使得应力波的传播路径发生改变,从而导致PZT接收到的信号会出现较为明显的差异。因此,通过监测不同位置的PZT接收到的信号情况,并且对监测信号进行分析,就可以大概判断波纹管内部灌浆料的填充情况。

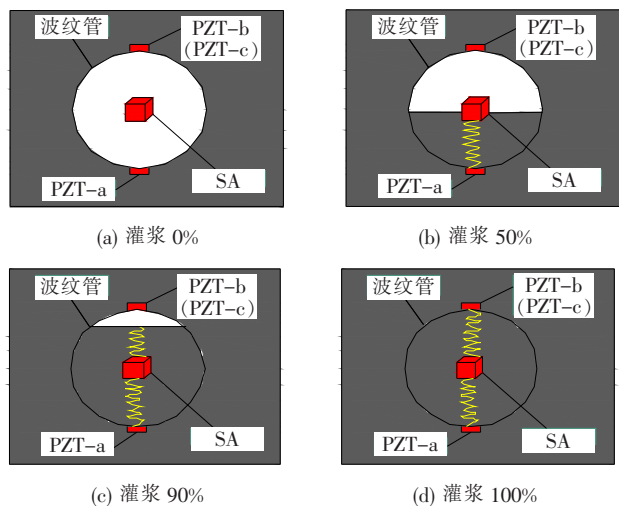


图1 波纹管密实度监测原理图

## 2 试验内容

### 2.1 试验试件

在实际施工过程中,预应力波纹管压浆存在缺陷的现象通常出现在波纹管顶部,于是此次试验在某路快速化改造的一座桥梁上对波纹管密实性进行监测。该桥梁孔道采用的是塑料波纹管,其尺寸为外径70 mm,内径60 mm。首先在预应力筋上固定1个嵌入式压电陶瓷SA;然后在波纹管外壁底部粘贴1个压电陶瓷PZT,并将其编号为PZT-a;在波纹管外壁顶部粘贴2个压电陶瓷PZT,分别编号为PZT-b和PZT-c;最后向波纹管内部灌浆开始试验。嵌入式压电陶瓷SA和PZT片的具体布置,如图2所示。

布置在波纹管外表面的传感器采用粘贴式压电陶瓷PZT片传感器,将PZT片的正负极分别与两芯屏蔽线相连,再对其进行防水与绝缘处理,最后在波纹管表面用环氧树脂胶把PZT片黏牢即可。

固定在预应力筋上的驱动器采用提前制作好的智能骨料,主要是由于压电陶瓷PZT片具有较脆的物理特性,因此必须将其制作成智能骨料后再固定在预应

力筋上以保证PZT片在波纹管内部不被破坏。此次试验采用的智能骨料SA主要由PZT片、混凝土外包层、屏蔽导线等组成,尺寸为25 mm×25 mm×25 mm。通过外包混凝土将PZT片包裹起来,再固定在波纹管内部,这种形式的压电传感器在延长PZT片使用寿命的同时不会对结构造成影响。

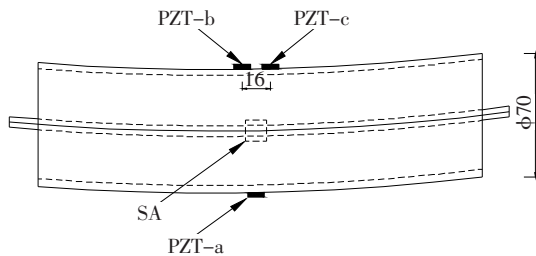


图2 压电陶瓷布置图(单位:mm)

### 2.2 试验设备

测试仪器采用NI USB-6363,用USB数据线与笔记本电脑端相连,通过BNC接头分别连接PZT传感器和智能骨料SA,其中发射端连接嵌入式压电陶瓷SA,接收端连接PZT传感器。

### 2.3 试验工况

试验共设4个工况:灌浆0%、50%、90%以及灌浆100%,依次对应为工况1、2、3、4,通过不同程度的灌浆工况来模拟波纹管内部缺陷情况。不同工况之间需要有5 d的灌浆间隔,各个工况的试件实物图。

### 2.4 应力波信号加载

试验采用扫频正弦波信号作为驱动激励信号,该信号扫频范围为100~150 kHz,扫弦波的振幅和持续时间分别为10 V和1 s。在测试中,将预先确定的输入信号(激励信号)由NI USB-6363发送到粘贴在预应力筋上一侧的嵌入式压电陶瓷SA,然后再通过数据采集器NI USB-6363收集记录粘贴在波纹管上的压电陶瓷PZT片接收到的信号。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 时域分析

根据实际试验中压电陶瓷PZT采集到的响应信号,通过LabVIEW和Matlab分析,可得出相应的时域信号图,将压电陶瓷传感器PZT-a、PZT-b和PZT-c在不同灌浆程度下接收到的时域信号绘制成波形图,如图3所示。对图3进行时域分析可以看出:时域幅值在-0.01~0.01 V之间变化,随着灌浆程度的增大,时域幅值也发生着相应的变化。其中压电陶瓷

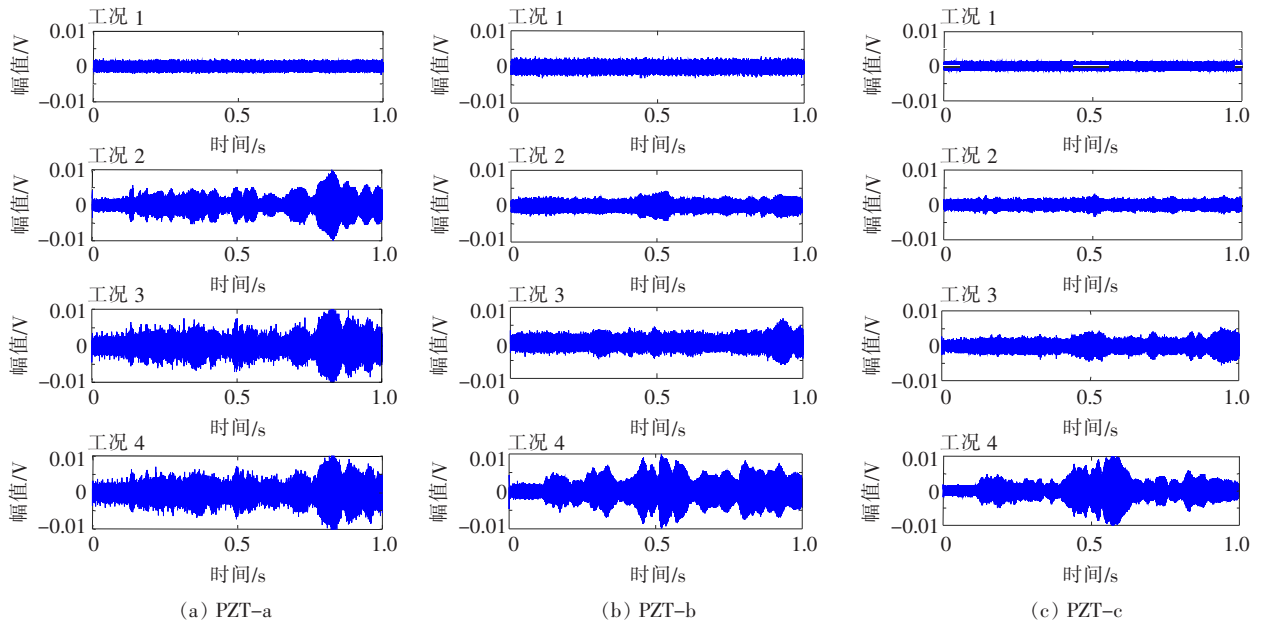


图 3 压电陶瓷传感器在不同工况下的时域图

PZT-b 和 PZT-c 的变化规律具有一致性。当灌浆为 0% 时,波纹管内没有灌浆料,因此激励信号无法传播,嵌入式压电陶瓷 SA 发出的信号不能被压电陶瓷传感器所接收,所以压电陶瓷 PZT-a、PZT-b 和 PZT-c 都接收不到信号;当波纹管灌浆为 50% 时,PZT-a 的时域信号幅值最大值达到 0.01 V,而 PZT-b 和 PZT-c 的时域信号幅值只有相对小幅度的上升。这是由于当灌浆达到 50% 时,粘贴在波纹管下方的 PZT-a 传感器有了灌浆料这个传播介质,能够直接接收嵌入式压电陶瓷 SA 发出的激励信号,而粘贴在波纹管上方的 PZT-b 和 PZT-c 只能收到部分沿波纹管壁传播的信号;当波纹管灌浆为 90% 时,PZT-a 的信号幅值基本上看不出什么变化,这是因为应力波的传播基本稳定。同时,PZT-b 和 PZT-c 也随着灌浆的增加,其幅值继续小幅度上升;当波纹管灌浆为 100% 时,此时波纹管已经被灌浆料所充斥,PZT-a 的信号幅值继续保持稳定,无明显变化,而此时 PZT-b 和 PZT-c 的信号幅值峰值到达 0.01 V,说明 PZT-b 和 PZT-c 已经可以直接接收智能骨料 SA 发出的应力波信号。

### 3.2 小波包能量分析

在进行结构动力分析时,能量是损伤识别的一项重要指标。在外部激励的作用下,结构发生损伤必定会引起结构动力响应的能量变化,此时输出信号在不同频段的某些频率被抑制,另一些频率被增强<sup>[18]</sup>。由此可知:若波纹管内存在缺陷将会使其动力响应能量在不同频段的能量重分布。小波变换是一个时间和频

率的局域变换,根据小波分析理论,经小波变换后的信号能在时域和频域局部表征能量,因此小波包能量具有良好的时-频特性,可以聚焦信号的任何细节,是信号在时域和频域范围内的综合体现。小波分析适用于处理局部或暂态信号,因而能有效地从信号中提取信息。利用小波包能量分析的方法对波纹管灌浆过程的动力响应信号进行分析,可得到信号在各个工况下的能量分布情况,并以此作为预应力波纹管灌浆质量识别的依据。

压电陶瓷 PZT-a、PZT-b 和 PZT-c 在不同工况下的小波包能量图如图 4 所示。对图 4 进行小波包能量分析可知:小波包能量与灌浆程度存在着密切的关系,即波纹管内压浆密实度越高,小波包能量越大。当灌浆程度为 0% 时,压电陶瓷 PZT-a、PZT-b 和 PZT-c 接收到的小波包能量几乎都为 0,这是因为应力波的传播没有合适的介质而导致传播受阻;当灌浆程度为 50% 时,压电陶瓷 PZT-a 的能量值突然升高,数值达到  $1.78 \times 10^5 \text{ V}^2$ ,这是因为应力波传播到 PZT-a 的途中有了混凝土这个合适的介质,而压电陶瓷 PZT-b 和 PZT-c 的能量无明显变化;当灌浆程度为 90% 时,压电陶瓷 PZT-a 的能量值增长了 15%,增幅不大,这是因为波纹管下部混凝土已基本密实,PZT-a 接收到的应力波信号也趋于稳定。同时,位于波纹管上方的 PZT-b 和 PZT-c 的小波包能量值有一个小幅增长,这是因为随着灌浆程度的增加,PZT-b 和 PZT-c 接收到的散射和绕射能量有一定的增加,同时波纹管壁也会

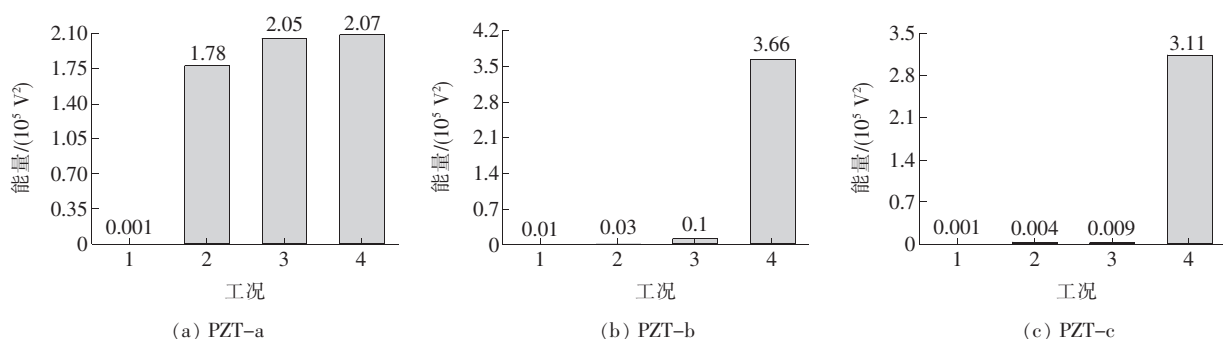


图4 压电陶瓷传感器在不同工况下的能量图

传播一部分能量;当灌浆程度为100%时,压电陶瓷PZT-a的小波包能量值基本保持稳定,而PZT-b和PZT-c的能量值有一个大幅上升,PZT-b由 $0.1 \times 10^5 \text{ V}^2$ 上升到 $3.66 \times 10^5 \text{ V}^2$ ,PZT-c由 $0.009 \times 10^5 \text{ V}^2$ 上升到 $3.11 \times 10^5 \text{ V}^2$ ,这是因为混凝土在波纹管中已经密实,波纹管上部的压电陶瓷传感器也能直接接收到智能骨料SA发出的应力波信号。

## 4 结论

为解决预应力波纹管压浆质量的检测问题,试验设计了一个带有预应力波纹管的混凝土试件,在预应力筋上固定嵌入式压电陶瓷SA作为驱动器,在波纹管顶端和底端外表面布置压电陶瓷PZT片作为传感器,通过控制灌浆程度模拟不同程度的缺陷,对比不同工况下PZT接收到的信号特征参数的变化,同时利用时域分析和小波包能量分析方法对预应力波纹管压浆质量进行评估分析,得到以下主要结论:

(1) 利用压电陶瓷PZT检测预应力波纹管压浆密实时,展现出了良好的敏感特性,波纹管灌浆缺陷越大,PZT接收到的时域信号幅值就越小。

(2) 利用小波包能量分析的方法对PZT接收到的信号进行分析,得出压电陶瓷PZT在不同工况下的能量图,可以看出随着波纹管内灌浆程度的增大,小波包能量值也会增大。

(3) 压电波动法对于预应力波纹管压浆密实度的检测具有可行性与有效性。

## 参考文献:

[1] 密士文,朱自强,彭凌星,等. T梁预应力波纹管压浆密实度超声检测试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013,44(6):2 378—2 384.

[2] 王茜,韩庆邦,赵胜永,等. 波纹管注浆缺陷超声检测方法[J]. 实验技术与管理,2014,31(2):53—56.

[3] 奉武贵. 后张预应力桥梁孔道压浆问题探讨[J]. 公路, 2012,57(4):152—154.

[4] 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.

[5] WANG Feng, ZHANG Feng. Experimental Research on Detection of Duct Grouting Quality of Prestressed Corrugated Pipe with Ultrasonic [J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2015(2):73—77.

[6] GUO Rong, ZHEN Zhichao, ZHAO Shaowei, et al. Effects of Grouting Defects in a Duct on the Bonding of Prestressing Strands [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2020,24(4):1 268—1 275.

[7] 蒋庆,徐嵩基,李涛,等. 钢绞线张拉后48 h内锚下预应力随时间衰减效应研究[J]. 中外公路,2020,40(4):105—109.

[8] 王智丰,周先雁,晏班夫,等. 冲击回波法检测预应力束孔管道压浆质量[J]. 振动与冲击,2009,28(1):166—169.

[9] 王伟,水中和,王桂明,等. 冲击回波法检测波纹管灌浆质量的研究及工程实践[J]. 混凝土,2010(5):134—137.

[10] 黎碧波,徐向锋,曹原,等. 波纹管孔道密实性的超声波对测法评估[J]. 公路与汽运,2018(5):124—126.

[11] 徐义标,张峰,曹原,等. 波纹管孔道压浆密实度定量检测的试验研究[J]. 中外公路,2015,35(3):89—92.

[12] 黄炜,李荣. 三维地质雷达检测桥梁预应力孔道压浆密实度的应用[J]. 建筑技术开发,2018,45(21):95—96.

[13] 密士文,彭凌星,张家松. 地质雷达在桥梁预应力管道注浆质量检测中的应用[J]. 湖南交通科技,2018,44(1):134—137.

[14] 陈媛,韩庆邦,姜学平,等. 基于递归奇异熵方法的波纹管压浆超声检测[J]. 声学技术,2016,35(1):44—48.

[15] 黎碧波,齐广志,高华睿. 基于冲击回波法的波纹管孔道密实性评估[J]. 公路与汽运,2018(6):125—130.

[16] 郑豪,韩庆邦,王鹏. 基于EEMD\_SVM的波纹管压浆超声检测[J]. 无损检测,2018,40(6):38—42.

[17] 谭少海,刘德坤. 预应力管道压浆质量无损检测方法对比研究[J]. 中外公路,2018,38(6):157—161.

[18] 朱劲松,孙雅丹. 基于小波包能量的桥梁损伤识别指标[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(4):715—721.