

# 自制压电陶瓷传感器性能测试及其 辨识混凝土开裂损伤试验

李 萌<sup>1</sup>, 任 杰<sup>2</sup>

(1. 江苏省水利厅 机关后勤服务中心, 江苏 南京 210029;

2. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210000)

**摘要:**压电陶瓷作为一种灵敏度高、频响范围宽的传感器,在混凝土结构开裂损伤辨识中使用广泛。传统多采用水泥作为封装材料,存在传感器表面不平以致影响响应信号识别性能的缺陷,加之传统辨识方法存在无法准确辨识混凝土开裂损伤程度的问题。选用 PZT-4 型号压电陶瓷制成环氧树脂基压电陶瓷传感器,并对其谐振频率、稳定性和灵敏度进行了性能测试,开展基于小波包能量法的混凝土梁开裂损伤辨识模型试验。成果表明,自制环氧树脂基压电陶瓷传感器和所建能量评价指标具备辨识混凝土开裂损伤程度的可行性,可为应用压电陶瓷检测混凝土开裂损伤的相关技术提供借鉴。

**关键词:**混凝土结构; 开裂; 损伤辨识; 压电陶瓷

中图分类号:TV4

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2020)12-0048-04

## Performance test of self-made piezoelectric ceramic sensor and its experimental study on identifying crack damage of concrete

LI Meng<sup>1</sup>, REN Jie<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Water Resources Department Rear - Service Center, Nanjing 210029, China;

2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** As a sensor with high sensitivity and wide frequency response range, piezoelectric ceramics are widely used in the identification of cracking damage of concrete structures. Traditionally, cement was often used as the encapsulation material, which had the defect that the uneven surface of the sensor affected the identification performance of the response signal. In addition, the traditional identification method couldn't accurately identify the degree of concrete cracking damage. The PZT-4 type piezoelectric ceramic was used to make epoxy resin based piezoelectric ceramic sensor, and its resonance frequency, stability and sensitivity were tested. A model test of concrete beam crack damage identification based on wavelet packet energy method was carried out. The results showed that the self-made epoxy resin based piezoelectric ceramic sensor and the constructed energy evaluation index were feasible to identify the crack damage degree of concrete, which could provide a reference for the application of piezoelectric ceramics to detect concrete cracking damage.

**Key words:** concrete structure; crack; damage identification; piezoelectric ceramic

收稿日期:2020-05-24

作者简介:李萌(1992—),女,硕士,研究方向为水工结构安全监控。E-mail: 1538406080@qq.com

## 1 概 述

水利枢纽工程广泛采用混凝土结构,其服役年限长达几十年甚至上百年,由于服役环境的复杂性,浇筑材料自身性能劣化以及设计、施工和运行管理过程中可能存在的不合理因素等<sup>[1]</sup>,混凝土结构难免会产生一定程度的损伤。对混凝土结构来说,开裂是损伤的主要表现形式之一<sup>[2]</sup>。选择合适的监测方法对混凝土结构进行健康监测,尽早识别结构损伤,对保证结构正常运行、减小经济社会效益损失以及保障人民生命财产安全都具有重要意义。传统的方法主要包括目测法、超声波法、渗透法、电涡流探伤法、磁粉检测法、射线法等<sup>[3]</sup>,但在实际应用中存在一些局限性,如:需要事先知道损伤的大概位置,对隐蔽部位损伤无法准确评估,或在检测损伤时,需要结构停止运作,造成了经济损失等。自压电效应<sup>[4]</sup>发现以来,利用压电陶瓷制成传感器,对结构进行损伤监测在很多领域都得到应用<sup>[5]</sup>。压电陶瓷集感知和驱动功能于一体,具有反应灵敏、频响范围宽、价格低廉、体积小、易剪裁等特点,将其制成传感器用于结构损伤监测,不仅可以识别结构局部损伤,还可以对结构整体损伤进行识别。同时,还可以对结构进行长期、连续、实时监测,因此,研究压电陶瓷传感技术在辨识混凝土结构开裂损伤中的应用具有重要的意义。

本文选用 PZT-4 型压电陶瓷制成环氧树脂基压电陶瓷传感器(epoxy resin based piezoelectric ceramic sensor, ERPS),对其谐振频率、波形稳定性等指标进行了性能测试。基于此,开展了基于环氧树脂基压电陶瓷传感器的钢筋混凝土梁开裂损伤辨识试验,建立了基于小波包能量法的开裂损伤程度辨识指标,验证了环氧树脂基压电陶瓷传感器和能量指标应用于混凝土开裂损伤辨识的可行性。

## 2 压电陶瓷传感器的制作及其性能测试

### 2.1 压电陶瓷的制作

#### 2.1.1 压电效应

压电陶瓷是人工制作的多晶压电材料,晶体具备介电性质和弹性性质,这两者之间的耦合效应称作机电耦合效应,而机电耦合效应的线性部分即是压电效应<sup>[4]</sup>。压电效应包含正压电效应和逆压电效应<sup>[6]</sup>,基于正、逆压电效应原理,可分别将压电陶瓷制成感知器和驱动器。感知器即感知结构的变

形,继而通过表面电荷的积累产生电流信号。驱动器即通过控制外加电场的强度来控制结构的变形。

#### 2.1.2 型号选用

常用压电陶瓷型号主要有 PZT-4、PZT-5 和 PZT-8<sup>[7]</sup>。其中 PZT-8 是大功率发射型压电陶瓷,在医学领域使用广泛,如超声波手术刀、超声波美容等;PZT-5 是接收型压电陶瓷,灵敏度高,主要用于传感器、加速度计等;PZT-4 是接发两用型压电陶瓷,具备高机电耦合系数和高介电常数。由于本文将压电陶瓷作为接受信号和发射信号的传感器,并考虑到发射功率和传感器敏感度等因素,故选择 PZT-4 型号。

#### 2.1.3 制作过程

压电传感器封装材料对其性能特性有一定影响,为使压电陶瓷传感器在混凝土结构裂缝损伤识别中发挥更好的效果,需选择合适的封装材料。采用水泥作为封装材料,制成的水泥基压电陶瓷传感器强度高,且与混凝土结构相容性好,使用最为广泛。但存在封装过程中水泥浆凝固快、传感器体积小不易搅拌振捣、封装过程中气泡使得传感器表面凹凸不平以致影响耐久性和信号识别性能等的缺陷。环氧树脂胶流动性好、凝固慢,凝固后强度较大,一定比例的环氧树脂胶和水泥浆混合制成的封装材料,既保留了水泥的强度以及与原混凝土结构的相容性,又具备环氧树脂胶流动性好的优点,使封装制成的传感器具备气泡少、耐久性好、强度高且防水的特点。基于此,制作环氧树脂基压电陶瓷传感器。其中,环氧树脂基原料质量比为固化剂:树脂胶:水泥浆=1:1:3,并加入少量的消泡剂以减少气泡的产生。

### 2.2 性能测试

测试混凝土梁的尺寸为 150 mm × 150 mm × 550 mm,将 ERPS 传感器按图 1 所示埋入到混凝土梁里,压电陶瓷片极化方向沿混凝土梁长度方向。借助压电智能测试系统进行信号发射、采集与处理。压电智能测试系统由 Dspace 实时仿真系统、数字滤波器和 Agilent33250A 任意波形发生器组成。Dspace 实时仿真系统为信号采集系统,是一套基于 Matlab/Simulink 的控制系统开发与结构测试平台,可同时做到数字信号的产生和系统的控制。数字滤波器可通过低通滤去高频噪声或通过高通滤去低频交流电信号,同时起增益放大信号的作用。Agilent 任意波形发生器用于发射正弦波、方波、脉冲波等任意测试波形。

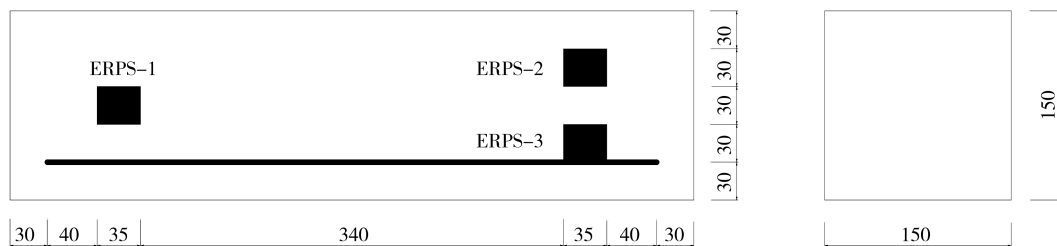


图1 传感器埋设位置(单位:mm)

### 2.2.1 谐振频率点分析

压电传感器收到不同频率的电信号激励,产生的振幅不同。在特定频率激励下,混凝土梁内压电陶瓷会出现最大振动强度,进而接收振幅达到最大<sup>[8]</sup>。为采集到更明显的信号,需对埋入混凝土梁的传感器做谐振频率点测试。理论研究表明,频率超过 150 kHz 的声波在混凝土结构中会急剧衰减,经过初步测试 ERPS-2 和 ERPS-3 的接收幅值都在激励频率为 90 ~ 120 kHz 时达到最大值区域。为了找出更精确的谐振频率,从 90 ~ 120 kHz 每隔 1 kHz 发射一个正弦波信号,记录下 ERPS-2 和 ERPS-3 的接收信号。定义幅值指标  $A = \sum_{i=1}^n A_i^2 / n$ , 其中  $n$  为各频率下接收信号的个数,  $A_i$  为信号幅值。ERPS-2 和 ERPS-3 幅值指标随频率的变化如图 2 所示。

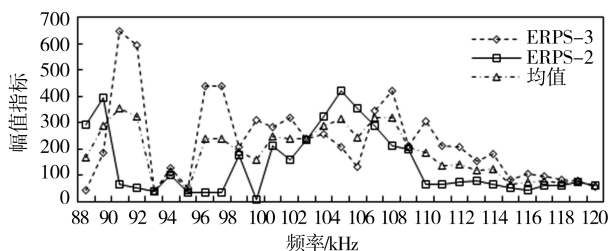


图2 ERPS-2 和 ERPS-3 幅值指标和指标平均值

从图 2 可以看出在发射频率为 92 kHz 时,幅值指标达到最大值。因此,ERPS 谐振频率为 92 kHz,后续试验中将信号发射频率定为 92 kHz。

### 2.2.2 频率和波形稳定性测试

ERPS-1 作为驱动传感器,ERPS-2 作为感知传感器,进行频率和波形测试。ERPS-1 发射频率为 92 kHz、幅值为 10 V<sub>pp</sub> 的正弦波,ERPS-2 分别在 25 kHz 和 1 000 kHz 采样频率下接收的信号如图 3 所示。

从图 3 可以看出,采样频率越大,接收的信号数据点越多,波形图越精细。发射频率为 92 kHz 时,不同采样频率下 0.1 ms 内接收到的波峰都为 9 个,不同采样频率对接收到的波形及其稳定性影响

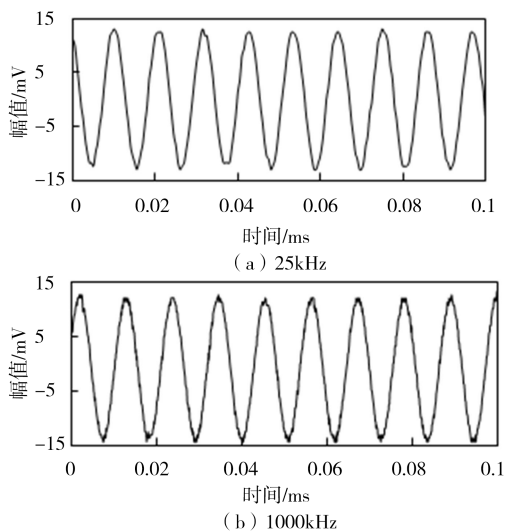


图3 不同采样频率下接收信号

较小。

## 3 混凝土梁开裂损伤辨识试验

### 3.1 方案设计

混凝土梁及传感器布置位置、方式同图 1。钢筋混凝土梁切缝位置和实物图如图 4 所示。将 ERPS-1 作为驱动传感器,与 Agilent 波形发生器相连接,ERPS-2 和 ERPS-3 为接收器,与 dspace 信号采集装置相连接。波形发生器发射 92 kHz、10 V<sub>pp</sub> 的正弦波,分别测定梁在无损状态和梁正中位置存在 5 mm、10 mm、20 mm、30 mm 深裂缝时的接收信号,探究响应信号与裂缝深度间的关系。



图4 混凝土梁开裂损伤辨识试验梁切缝位置(单位:mm)

### 3.2 损伤辨识能量指标

当混凝土结构存在损伤时,压电驱动器通过逆

压电效应激发出应力波在传播的过程中经过损伤部位就会被吸收或是被散射,导致压电感知器接收到的信号产生能量衰减或变化,故通过分析压电感知器接收的信号所含能量的变化可探测被测结构是否存在损伤以及损伤程度。由于响应信号具有非线性非平稳特点,信号高频和低频部分均可能包含重要特征分量,借鉴已有研究成果<sup>[9]</sup>,通过小波包多分辨率分析方法进行响应信号频带划分和能量计算。

假设压电陶瓷传感器采集的结构响应信号为  $X(t)$ , 利用小波包  $\psi_{j,i}(t)$  对其进行  $j$  层小波包多分辨率分解, 第  $j$  层可得到  $2^j$  个等宽度的频带  $X_i(t)$  ( $i=1,2,\dots,2^j$ ) 和小波包分解系数  $c_{j,i}$ 。利用小波包分解系数和小波包重构各个频带信号, 以  $E_i$  表示第  $i$  个频带的能量, 则

$$E_i = \int_{-\infty}^{\infty} X_i(t)^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} [\sum c_{j,i} \psi_{j,i}(t)]^2 dt \quad (1)$$

响应信号所含总能量等于其分解所得各频带信号所含能量之和, 总能量指标  $E$  表示为

$$E = \sum E_i \quad (2)$$

### 3.3 成果分析

#### 3.3.1 响应信号对比分析

图5为钢筋混凝土梁无损伤、裂缝深度为5 mm和10 mm时 ERPS-2 接收的信号, 信号的采样频率为1 000 Hz。

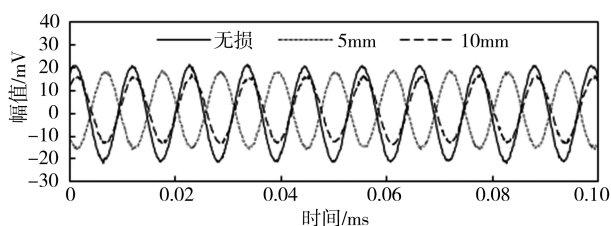


图5 不同损伤程度 ERPS-2 接收信号

从图5可以看出有损伤时的信号幅值比无损工况信号幅值小, 并且随着裂缝深度增大, 信号幅值减小。试验结果表明, 压电传感器接收信号幅值随损伤程度的增加而减少, 由信号幅值的变化可初步诊断结构损伤存在与否。

#### 3.3.2 能量谱损伤识别

对无损工况和6种损伤工况下 ERPS-2 传感器接收的信号进行小波包能量谱分析。无损工况的能量谱如图6所示, 对比能量谱图可知, 5 mm 裂缝和无损工况下的能量谱基本相同, 随着裂缝深度加大, 各频带上能量开始发生较大变化, 大致规律为开裂损伤较小时能量谱分布较平均, 随着开裂损

伤的变大, 能量谱向第一频带集中。

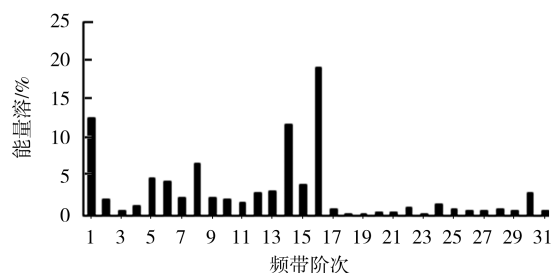


图6 梁无损情况下能量谱

#### 3.3.3 小波包能量指标损伤识别

将 ERPS-2 和 ERPS-3 的响应信号的总能量随裂缝深度的变化过程绘于图7。

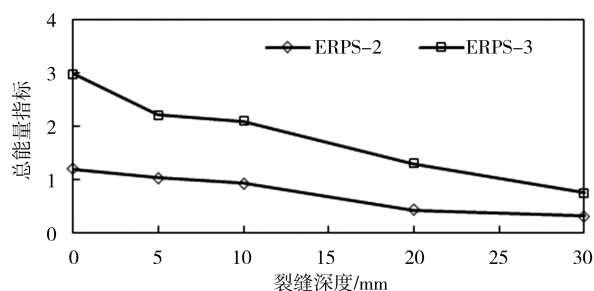


图7 总能量指标

从图7可以看出, 随着裂缝深度加大, 总能量指标减少, 符合开裂损伤程度越高, 应力波能量衰减越多的规律; 由于 ERPS-2 埋设位置更靠近裂缝, 响应信号能量衰减程度越高, 故总能量小于 ERPS-3, 该指标可用于损伤的初步定位。

## 4 结 语

(1) 在研究压电陶瓷基本性质的基础上, 制作了一种环氧树脂基压电陶瓷传感器, 并对其进行了性能测试, 获得了传感器谐振频率点, 测试结果表明自制环氧树脂基压电陶瓷传感器频率和波形稳定性好, 响应灵敏度高。

(2) 开展了基于环氧树脂基压电陶瓷的钢筋混凝土梁的开裂损伤辨识试验, 对响应信号进行小波包多分辨率分析, 建立了响应信号衰减能量指标, 对混凝土开裂损伤程度进行了较准确辨识。

(3) 压电陶瓷传感器封装材料和传感器形状有待进一步优化, 研究出适用于不同工程结构的多样性压电陶瓷传感器。同时, 实际混凝土结构体积庞大, 需进一步研究传感器优化布置, 以获得能反应结构整体状态的完备振动信息。

(下转第55页)

对应的水体重量  $F_G = 2.13 \times 10^4 \text{ N}$ 。

不同方案下的启门力如表1所示( $H = 1.65 \text{ m}$ )。

表1 闸门不同方案下的启门力对比 单位:  $10^4 \text{ N}$

方案	$G$	$F_G$	$F_y$	$F_m$	$F_t$
原方案	18.62	0	12.76	1.35	32.73
方案(1)	19.79	2.13	4.51	1.23	27.66
方案(2)	20.96	2.13	1.97	1.28	26.34

由表1可见,原方案水流产生的垂直作用力约占启门力的39%,而对于方案(1),下部梁格的封闭使水流垂直作用力下降约65%,方案(2)则下降约85%。2种方案的水流垂直作用力下降比例不同的原因在于,方案(1)尽管阻止了水流对底部主梁的冲击,但对中部主梁的壅高产生了额外的垂直作用力;方案(2)封闭了全部梁格,基本消除了水流冲击作用,因此水流垂直作用力主要为下吸力引起。

对比不同方案下的启门力可知,方案(1)相比原方案降低了约15.5%,方案(2)相比原方案降低约19.5%。由此可见,封闭梁格方案可有效降低启门力,且封闭全部梁格方案效果更好。

## 4 结 论

本文针对垂直提升式平面钢闸门反向挡水时启门力增大的问题,采用CFD方法模拟闸孔过流流动,提出封闭梁格方案,并分析了不同方案下的启门力,得到如下主要结论:

(1)闸门底部主梁上下表面压差形成的垂直作用力占水流总垂直作用力的85%~97%,且其变化

规律与启门力的变化规律一致,开高1.65 m时达到最大。

(2)封闭下部梁格与封闭全部梁格均可有效降低启门力,原因在于避免了水流对底部主梁的冲击,降低了水流的垂直作用力。

## 参考文献:

- [1] 杨艳军. 某双向挡水节制闸工程的方案设计分析[J]. 水科学与工程技术, 2011(5):43-44.
- [2] 刘国瑞. 广西郁江调水工程大雾坪输水渠双向挡水工作闸门设计[J]. 水电站设计, 2011(2):29-34.
- [3] 罗灿, 刘超. 多机组泵站侧向进水特性模拟和改进研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1):207-214.
- [4] 林伟栋, 赵西增, 叶洲腾, 等. 涌潮运动的CFD模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017(6):696-703.
- [5] HUANG X B, YANG W, LI Y J, et al. Review on the sensitization of turbulence models to rotation/curvature and the application to rotating machinery[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 341:46-69.
- [6] DEMIREL E. Measured and simulated flow downstream of the submerged sluice gate[J]. Water and Environment Journal, 2015(29):446-455.
- [7] 黄先北, 郭婧, 仇宝云. FBM模型在典型分离流动预测中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7):52-56.
- [8] ALBADAWI A, DONOGHUE D B, ROBINSON A J, et al. Influence of surface tension implementation in volume of fluid and coupled volume of fluid with level set methods for bubble growth and detachment[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 53:11-28.

(上接第51页)

## 参考文献:

- [1] DE SORTIS A, PAOLIANI P. Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring[J]. Engineering Structures, 2007, 29(1):110-120.
- [2] 潘家铮. 断裂力学在水工结构设计中的应用[J]. 水利学报, 1980(1):45-59.
- [3] 晏良佳. 基于压电陶瓷的多腔钢管混凝土柱损伤监测研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- [4] 秦婧文. 基于压电陶瓷传感器的震动防盗报警电路的应用[J]. 科技经济导刊, 2016(9):60.
- [5] 张兢, 徐霞, 张志文. 基于压电陶瓷的结构损伤检测技术[J]. 压电与声光, 2006(3):350-352.
- [6] 张东, 吴科如, 李宗津. 水泥基压电机敏复合材料的逆压电效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(3):312-317.
- [7] 张瑜琰, 王本民, 陈桂馨, 等. 锆钛酸铅(PZT)陶瓷的应用与发展[J]. 化学进展, 1992(2):37-45.
- [8] 林书玉. 双激励源压电陶瓷超声换能器的共振频率特性分析[J]. 电子学报, 2009, 37(11):2504-2509.
- [9] 赵晓燕, 李宏男. 基于压电陶瓷的混凝土裂缝损伤监测[J]. 压电与声光, 2009, 31(3):437-439.