

## 基于压电超声传感器的水泥水化原位监测

刘燕云<sup>1</sup>, 秦磊<sup>1\*</sup>, 赵鹏<sup>1,2</sup>, 孙杰<sup>3</sup>

(1. 济南大学 土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 故宫博物院 科研处, 北京 100009;  
3. 济南一建集团有限公司, 山东 济南 250100)

**摘要:** 水泥水化进程对水泥基材料后期性能起着至关重要的作用, 因此有必要对水泥水化进程进行深入研究。基于超声波技术设计并制备了一种驱动接收一体化的埋入式压电超声传感器并进行性能测试, 可将其应用于对水泥水化的连续原位监测中。实验结果表明, 通过对传感器多维度的性能测试可以确保其在水泥水化进程的监测中提供可靠、准确的数据, 基于该传感器的超声波最大幅值的变化趋势可以反映水泥水化凝结程度, 最大幅值变化阶段与维卡仪测得初终凝时间基本符合。该研究不仅为混凝土凝结检测提供一种新的角度与方法, 还可以为优化混凝土的性能提供科学依据。

**关键词:** 传感器; 压电; 水泥水化; 无损检测

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025025

**引用格式:** 刘燕云, 秦磊, 赵鹏, 等. 基于压电超声传感器的水泥水化原位监测[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 148-154.

LIU Yanyun, QIN Lei, ZHAO Peng, et al. In situ monitoring of cement hydration based on piezoelectric ultrasonic sensors[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 148-154.

## In Situ Monitoring of Cement Hydration Based on Piezoelectric Ultrasonic Sensors

LIU Yanyun<sup>1</sup>, QIN Lei<sup>1\*</sup>, ZHAO Peng<sup>1,2</sup>, SUN Jie<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China;  
2. Scientific Research Office, The Palace Museum, Beijing 100009, China;  
3. Jinan First Construction Group Co., Ltd., Jinan 250100, China)

**Abstract:** The hydration process of cement plays a crucial role in the later performance of cementitious materials, so it is necessary to carry out an in-depth discussion and research on the hydration process of cement. Based on ultrasonic technology, a buried piezoelectric ultrasonic transducer with an integrated driver and receiver was designed and prepared, its performance was tested, and it was applied to the continuous in situ monitoring of cement hydration. The experimental results show that the multidimensional performance test of the transducer can ensure that it can provide reliable and accurate data in monitoring the hydration process of cement, and the trend of the ultrasonic maximum magnitude based on the transducer can reflect the degree of cement hydration and coagulation, and the stage of the change of the maximum magnitude is basically in line with the initial and final coagulation time measured by the Vickers instrument. This study not only provides a new perspective and method for concrete coagulation detection but also provides a scientific basis for optimizing the performance of concrete.

收稿日期: 2024-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108214)

作者简介: 刘燕云(1996-), 女, 硕士生, 主要从事水泥基材料无损检测研究。E-mail: 734134789@qq.com。

\*通信作者: 秦磊(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事防灾减灾工程及防护工程研究。E-mail: cea\_qinl@ujn.edu.cn。

**Key words:** sensor; piezoelectric; cement hydration; non-destructive testing

## 0 引言

水泥是应用最广泛的建筑材料之一,国家统计局发布 2023 年全国水泥产量 20.23 亿吨<sup>[1]</sup>。水泥水化进程对水泥基材料力学性能及耐久性等起着至关重要的作用<sup>[2]</sup>,水化进程监测已成为工程中不可或缺的一个项目。由于新拌水泥浆体易流动、不能承受荷载等特点,对于早龄期水化、硬化的研究很难使用传统的用于硬化水泥浆体等一系列的研究方法,对此国内外学者做了大量的研究,形成了许多比较成熟的理论和研究方法,例如水化热法<sup>[3]</sup>、化学结合水法<sup>[4]</sup>、氢氧化钙定量测定法<sup>[4]</sup>、水化动力学法<sup>[5]</sup>、图像分析法<sup>[6]</sup>、贯入阻力法<sup>[7]</sup>等。然而,现有的一些方法存在局限性,需要在标准实验室条件下进行,而施工现场的环境因素难以控制,混凝土在浇筑后处于水化、温度、湿度以及约束等多重耦合作用的环境下<sup>[8]</sup>,上述方法难以满足实际工程需求<sup>[9]</sup>,因此必须发展新型的测试技术与方法。

超声监测技术作为一种实时、在线、动态连续的无损监测技术,在水泥水化进程监测中发挥着重大作用<sup>[10-11]</sup>。超声波技术一般采用外贴或埋入的方式进行检测<sup>[12]</sup>。外贴式传感器易受环境温度、粘贴层厚度、人为因素的干扰,难以长时间工作。而埋入式传感器对声波传播界面的变化感知更加灵敏,其基于超声波参数执行量化,分析界面的透射系数与反射系数,捕捉水化进程实时变化,实现水泥水化进程的评估,极大提高了混凝土服役过程中质量的时效性和能动性,对保障结构安全具有重要意义。埋入式传感器在混凝土内部也减少了外部环境和人为因素引起的噪音对监测信号造成的干扰,扩展了监测的深度。然而,在早期水化过程中,埋入独立驱动器与接收器容易改变相对位置,导致信号不稳定。因此,本文针对水泥水化进程健康检测的需求,基于埋入式传感单元的概念,制作驱动器与接收器一体化的传感器作为智能骨料埋入到主体介质中,推进传感器的制作方法及在水泥水化进程监测的应用。建立超声信号变化与水泥水化进程的相关性,并通过最大幅值变化进行实时解读,以期望为混凝土的性能优化提供科学依据。

## 1 基本原理

### 1.1 超声波传播基本原理

超声波作为一种弹性波,在界面处产生部分反射和部分透射,根据弹性波动理论可知,两介质交界处垂直入射波的透射系数( $T$ )和反射系数( $R$ )可分别表示为<sup>[13-14]</sup>

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (1)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (2)$$

式中: $Z$ 为声阻抗,下角标 1 和 2 分别表示声波传播经过的第 1 种介质和第 2 种介质。

### 1.2 压电超声传感器的监测原理

在水泥水化主动监测过程中,随着水化反应的进行,水泥水化凝结逐渐从液态向固态转变,水泥浆的声阻抗逐渐增大,密度逐渐增加,超声波在其中的传播速度也随之变快,导致环氧树脂复合材料与水泥浆界面间的超声波透射系数升高,反射系数降低,即超声波透射率与反射率会随着水泥物理性质变化而变化。通过对传感器接收的不同水化进程的超声波信号对比分析,可侧面反应水泥水化凝结程度,最终实现基于压电超声传感器的主动健康监测。

## 2 压电超声传感器

### 2.1 传感器制备

PZT-5 型锆钛酸铅压电陶瓷(中国保定新威电子科技有限公司生产)因其显著的压电应变系数与高灵敏度特性,展现出集感知与响应特性于一体的独特优势<sup>[15]</sup>,故本文将其作为驱动器和接收器的核心元件。压电片性能参数如表 1 所示。

表 1 压电片的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of piezoelectric sheet

压电系数/(pC·N <sup>-1</sup> )	相对介电常数 $\epsilon_r$	密度/(10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa
$d_{15} \approx 670, d_{31} = -185, d_{33} = 700$	2 100	7.5	117

大理石作为一种天然石材具有很高的密度与强度,可以确保底座稳固不变形,减少测量误差;良好的热稳定性保证了其在不同温度条件下传感

器性能的稳定性;非磁性特性有效隔绝了外部磁场干扰,提升了测量精度;耐腐蚀性延长了传感器在恶劣环境下的使用寿命。其物理特性参数如表2所示。由此可见,大理石底座为传感器提供了理想的工作平台,进而成为了确保传感器性能卓越的关键组件之一。

表2 大理石物理特性参数

Tab. 2 Marble physical properties parameters

体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	热膨胀系数/(°C <sup>-1</sup> )
2.68	101.5	6.8×10 <sup>-6</sup>

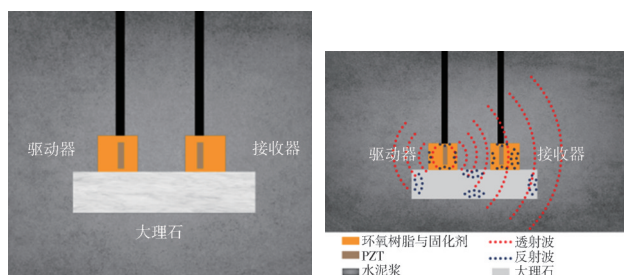
以PZT-5(10 mm\*10 mm\*2 mm)为功能相,采用E206S低粘度环氧树脂与固化剂(日本小西株式会社生产)混合(2:1)为封装材料,大理石块(50 mm\*50 mm\*16 mm)为固定底座(材料的物理特性如表3所示),制备压电超声传感器,制作完成的压电超声传感器如图1(a)所示。

表3 材料的物理参数

Tab. 3 Physical parameters of materials

材料	弹性模量/GPa	泊松比
PZT	60.6	0.289
环氧树脂	2.5	0.3
大理石	51.5	0.3

超声波在布置了埋入式压电超声传感器的水泥浆中的传播过程部分路径示意图如图1(b)所示,接收器接收的信号包括三部分:1)超声波从驱动器发出后,一些超声波经过水泥浆透射后直接到达接收器,这部分波称为透射波;2)超声波根据阻抗差发生界面反射后到达接收器,这部分波称为反射波;3)部分透射波与反射波通过大理石界面到达接收器,这部分波称为表面波。



(a) 外观示意图

(b) 信号传播路径图

图1 压电超声传感器信号传播路径及外观示意图

Fig. 1 Signal propagation path and appearance diagram of piezoelectric ultrasonic sensor

## 2.2 传感器测试

### 2.2.1 线性度与灵敏度测试

将传感器部署于空气环境中,研究其在不同频

率的正弦脉冲波作用下,驱动器与接收器间电压输入与输出量的变化。图2呈现了压电超声传感器在不同激发频率下,输出电压随输入电压幅值不断变化的散点图与拟合直线。横轴的输入电压分别为5、7.5、10、12.5、15、17.5、20 V,纵轴记录了经40 dB增益后置信号放大器处理的输出电压幅值。实测数据点用来构造散点图,并对其进行了线性拟合分析,明确了拟合直线的数学表达式 $y$ 与线性回归相关系数 $R^2$ 。分析图2可知,在不同激发频率的条件下,本监测系统中的输入电压与输出电压幅值依然保持着清晰的线性关联趋势。线性回归分析展现出的 $R^2$ 值皆大于0.98,表示了该模型的线性拟合高度精确,证实了输入与输出变量间稳定的线性相关性。

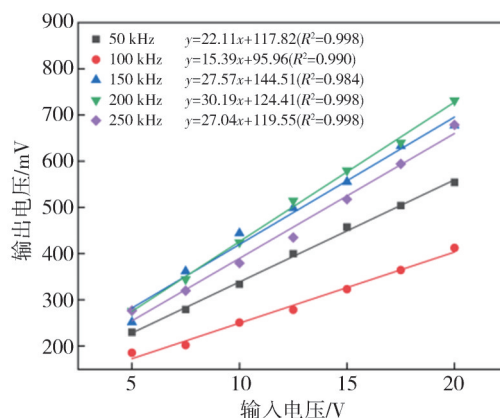


图2 不同激发频率下传感器输入与输出电压线性响应图

Fig. 2 The linear response diagram of the input and output voltage of the sensor at different excitation frequencies

拟合直线的斜率表示压电超声传感器的灵敏度,通过拟合直线的斜率 $K$ 来量化不同频率下系统信号幅值的灵敏度,明显可见,系统频率的调整对灵敏度产生了显著影响。

### 2.2.2 信噪比测试

信噪比(SNR)测试是衡量传感器性能的重要指标之一。信噪比是指传感器在信号传输或处理过程中,信号与噪声之间的比值,可表示为

$$SNR = 20 \lg \left( \frac{S_s}{S_n} \right), \quad (3)$$

式中: $S_s$ 为传感器在接收到有用信号时输出的电压; $S_n$ 为仅存在噪声输出的电压。

图3为将压电超声传感器埋入水泥浆中所接收到的波形信号,经过计算,压电超声传感器的信噪比为44.17 dB。

### 2.2.3 频率响应测试

频率响应是指传感器对不同频率输入信号的响

应能力。在动态监测中,传感器的频率响应决定了其能否准确捕捉到快速变化的信号。将传感器放置在空气中,输入频率为100~600 kHz的正弦信号,所接收到的波形信号对比图如图4所示。输入信号的激励频率由100 kHz增加至600 kHz所接收到的输出信号波形基本保持一致,说明自制的压电传感器可以在整个测试的频率范围内保持恒定的响应。图中频率从100 kHz增加至150 kHz时,幅值随频率增加而变大,从150 kHz增加至600 kHz时,幅值逐渐变小,外部介质相同时超声波的衰减系数也相同,随着频率增加,信号衰减也增加。

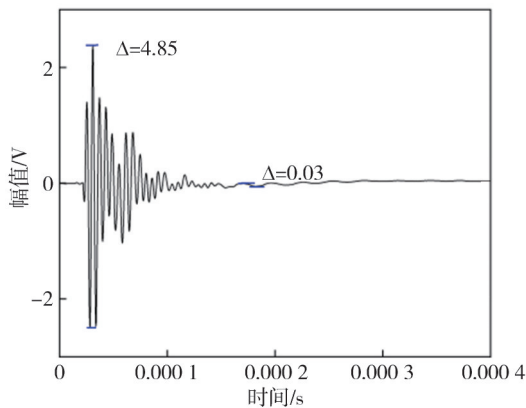


图3 压电超声传感器信噪比测试波形图

Fig. 3 Signal-to-noise ratio test waveform of piezoelectric ultrasonic sensor

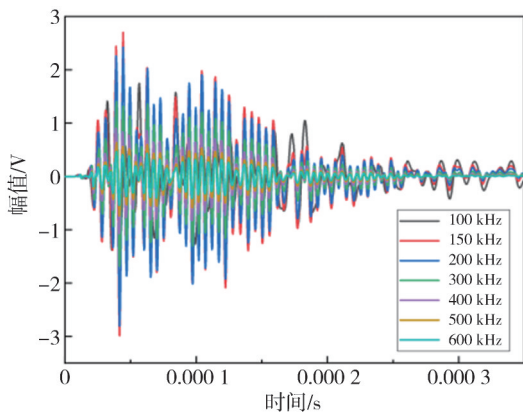


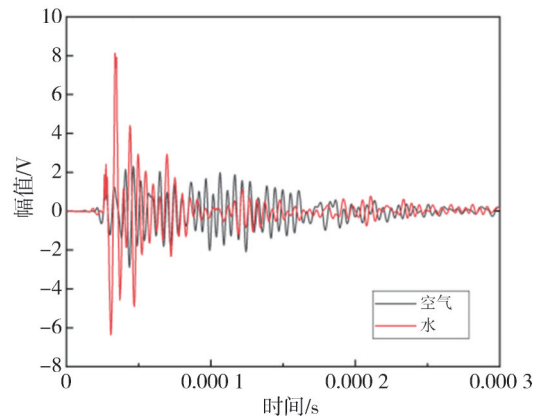
图4 不同激发频率下的波形信号对比图

Fig. 4 Comparison of waveform signals at different excitation frequencies

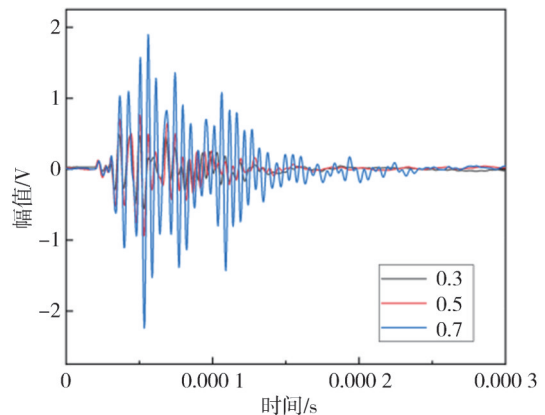
### 2.2.4 对不同介质的辨别能力

为验证传感器对外部介质声阻抗变化的辨别能力,对同一传感器在空气、水、不同水灰比水泥浆的不同声阻抗介质中进行波形信号采集,并对信号进行对比,如图5所示。通过波形对比可以看出外部介质的改变对超声波形的变化有较大影响,这说明影响系统响应能力的因素也包括超声波的传播介质

和路径等。图5(a)所示为空气中与水中波形对比,由于树脂复合材料/大理石与空气的声阻抗差异大,接收器所接收到的信号为经过大理石传播的表面波,与水中所接收到的波形相比幅值较低;图5(b)所示为传感器在不同水灰比(0.3、0.5、0.7)刚拌合水泥浆中的波形对比,可明显看出0.3、0.5水灰比水泥浆中所接收到的波形变短,幅值较低,这是由于0.3、0.5水灰比水泥浆密度更大,其对声能的吸收和散射更剧烈。不同介质中所采集到波形信号的幅值与波形有很大区别,可以说明此压电超声传感器具有不同介质的区分与量化能力。



(a) 空气、水中波形对比图



(b) 不同水灰比水泥浆中波形对比图

图5 不同介质中的波形信号对比图

Fig. 5 Comparison of waveform signals in different media

### 2.2.5 稳定性测试

监测系统稳定性是指在特定的时间区间内,系统的参数特性能够被持续且稳定地捕获,而其输出数据在较小范围内保持相对的恒定性或仅有轻微波动。这种稳定性是获取精确和可靠实验结果的关键要素。

为了检验实验监测系统在一定条件下一段时间范围内的稳定性,本文设计了以下测试方案:

将传感器放置在空气中,以时间作为唯一变量,实验设置输入电压为20 V,正弦信号频率分别为50、100、150、200、250 kHz,每隔3 min测试一次,连续采集20次。图6为传感器在上述方案下测试得到的接收器信号幅值数据组成的点线图。

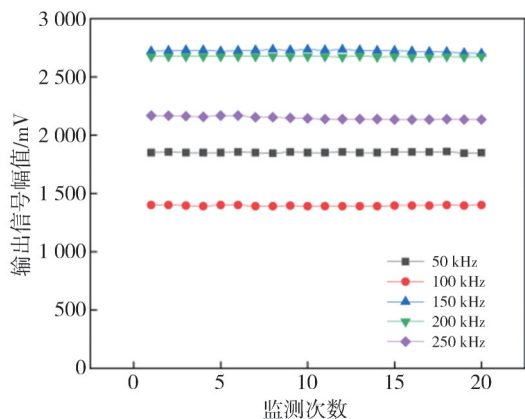


图6 不同激发频率下接收信号幅值点线图

Fig. 6 The amplitude point diagram of the received signal at different excitation frequencies

对接收数据进行统计分析,获取每组的均值、标准偏差及变异系数(即标准差与均值之比),具体数值列于表4中。分析表中的数据,监测系统重复测量的数据存在小范围的波动,但变异系数均低于1%,表明数据波动有限,完全符合系统稳定性标准。根据表4中不同激发频率下接收信号幅值平均值可知,最优激发频率为150 kHz,其次为200 kHz。

表4 监测系统稳定性测试统计学参数

Tab. 4 Monitoring system stability test statistical parameters

激发频率/kHz	平均值	标准差	变异系数/%
50	1 852.27	3.66	0.1
100	1 395.99	4.16	0.3
150	2 723.63	9.32	0.3
200	2 674.80	2.55	0.1
250	2 147.71	13.47	0.6

### 3 水泥水化进程监测实验

#### 3.1 超声监测系统

本实验监测系统的组成除了自制的驱动接收一体化压电超声传感器和被监测的水泥试样外,还包括北京软岛时代科技有限公司生产的DS5-8A全信息信号采集仪及北京软岛时代科技有限公司生产的40 dB增益后置信号放大器、普源(Rigol)生产的DG1022函数/任意波形发生器以及适配软件和电脑终端等仪器设备。监测系统如图7所示。

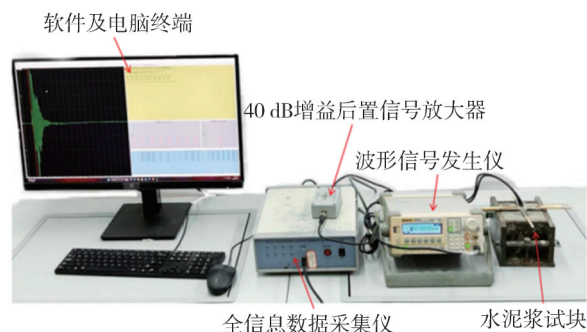


图7 监测系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of monitoring system

#### 3.2 实验方案

选取3组水灰比(0.4、0.5、0.6)水泥净浆分别做凝结时间的测定与水化进程的超声监测实验。使用山水集团生产的PO.42.5普通硅酸盐水泥与济南市自来水用于试件成型。

1) 水泥凝结时间的测定:将水泥与水充分拌合(手动混合2 min),然后将拌合好的水泥浆倒入维卡仪模具中,养护一段时间后进行第一次针入度测量,头部针入至试样底部( $4 \pm 1$ ) mm距离时为初凝时间,头部针入至试样的深度 $\leq 0.5$  mm的距离时为终凝时间。

2) 水泥水化进程的超声监测:将拌合好的水泥浆倒入 $100 \times 100 \times 100$  mm的钢模中,埋入式压电超声传感器提前固定于钢模内与水泥浆充分接触,立即开展测试,如图8所示。研究水化进程的主要监测系统技术指标为:①输入信号设置为幅值20 V,频率150 kHz的经过汉宁窗调制的五周期正弦波脉冲信号;②相邻脉冲信号触发时间间隔为180 s;③信号采集仪器的采样频率为3 MHz。

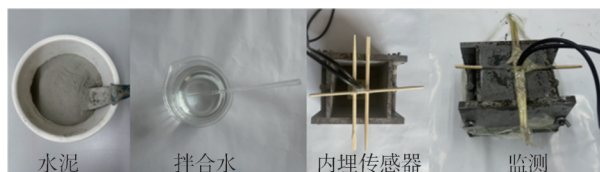


图8 监测过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of monitoring process

### 4 实验结果与分析

由于声阻抗的不同,水灰比的变化将直接影响水化过程。在水化的初始阶段,水泥浆主要由少量水化产物和大量离子溶液组成,超声波的波速很低,只有每秒几百米,小于在水中的传播速度(约1 480 m/s)。然而,随着水化反应的进行,

水化产物随之生成,水泥浆经历了工程中关键的初凝和终凝阶段。水化进程中水泥浆不断从液相转化为固相,导致超声波的传播速度逐渐超过在水中的传播速度。最终,随着水化速度减慢,声速的增加也会减慢。在整个过程中,不仅波速会发生变化,传感器和水泥之间的界面状态也会不断变化。这导致超声波的透射和反射系数发生变化,从而使最大幅值能够响应界面变化。超声波的幅值大小能够精准地反映其在介质中的衰减程度,这种衰减程度能够衡量水泥浆粘塑性能,从而可以间接地反映水泥的水化程度。

图 9 展示了不同水灰比水泥净浆水化监测最大幅值随时间变化结果,可清晰观察到随着水灰比的增大,幅值突变的时间节点明显滞后,0.4 水灰比下的幅值约在 4 h 上升,10 h 后趋于稳定,而 0.5 水灰比幅值上升阶段约在第 5~11 h,0.6 水灰比幅值突变点在接近第 8~13 h。

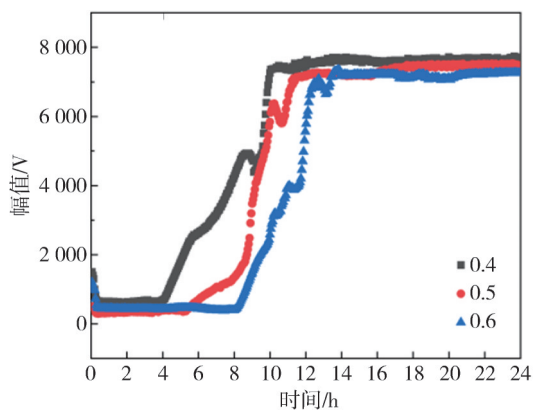


图 9 不同水灰比水泥净浆最大幅值变化结果

Fig. 9 The results of the maximum amplitude change of cement paste with different water cement ratio

根据图中幅值的上升趋势可以将水化的前 24 h 划分为 3 个阶段:第 1 阶段从水泥浆拌合完成至幅值上升前,这个阶段水泥浆中存在大量空气且未水化的水泥浆处于流体状态,对超声波的传播造成强烈的折射和衰减,接收器所接收到的幅值较低;第 2 阶段为幅值上升阶段,这个阶段水化反应加快,水化产物逐渐增多,水泥浆体逐渐由粘塑性向弹塑性发展,超声波穿透率增大,幅值发生明显的增长,在幅值上升过程中均出现短暂波动起伏现象,这是由于在水泥水化凝结过程中会产生一定的收缩现象,在试块与传感器接触界面可能出现空隙,超声波传播受到扰动,从而导致出现幅值小幅度波动现象;第 3 阶段为上升后的平稳阶段,此阶段水泥浆完全失去塑性状态,

固相物质的连通性基本建立,超声波的传播通道基本稳定,进而超声波幅值趋于稳定状态。

根据表 5 中维卡仪测定的水泥凝结时间,水灰比为 0.4 的水泥初凝时间为 256 min,终凝时间为 393 min,水灰比为 0.5 的水泥初凝和终凝时间分别为 328 min 和 485 min,而水灰比为 0.6 的水泥初凝和终凝时间延长至 492 min 和 620 min,将其与图 9 中幅值变化趋势进行对比,发现两种测试方法所测出的不同水灰比水泥初凝时间基本一致,而终凝时间不一致的原因主要是由两种实验方法对混凝土凝结时间的测量原理不同。超声波法测得的是水泥的固化特性,维卡仪法测得的是水泥水化生成的固相网络保持自身结构不被破坏而能够抵抗外力作用的性能,即为混凝土的硬化。

表 5 维卡仪测定的水泥凝结时间

Tab. 5 Cement setting time measured by Vicat apparatus

水灰比	初凝时间/min	终凝时间/min
0.4	256	393
0.5	328	485
0.6	492	620

实验结果表明自制的压电超声传感器可以监测和量化液体介质,揭示不同水灰比水泥浆对超声信号演变的影响。本研究扩展了以最大幅值来追踪水化参数,这一设计将有助于驱动接收一体式的埋入式压电超声传感器的进步。

## 5 结 论

本文设计并制备了一种驱动接收一体化的埋入式压电超声传感器,并进行了线性度、灵敏度、信噪比、频率响应、对不同介质的区分能力、稳定性测试,通过多维度的性能测试能够确保该传感器在水泥水化进程的监测中提供可靠、准确的实验数据。之后,对 3 种水灰比水泥的水化监测结果进行了最大幅值变化分析,并对比维卡仪测定的水泥凝结时间,说明本文传感器对不同水灰水泥浆水化比监测的有效性,具有良好工程潜在应用价值。

## 参考文献:

[ 1 ] 国家统计局. 2023 年 12 月份规模以上工业增加值增长 6.8%[EB/OL]. [2024-01-16]. [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202401/t20240116\\_1946621.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202401/t20240116_1946621.html).  
 [ 2 ] 陈军. 早龄期混凝土水化进程及宏观与微观性能相关性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014

- [3] HAN S W, ZHONG J, DING W J, et al. Strength, hydration, and microstructure of seawater sea-sand concrete using high-ferrite Portland cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 295: 123703.
- [4] CHU D C, KLEIB J, AMAR M, et al. Determination of the degree of hydration of Portland cement using three different approaches: scanning electron microscopy (SEM-BSE) and Thermogravimetric analysis (TGA) [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00754.
- [5] ZHAI M Y, ZHAO J H, WANG D M, et al. Hydration properties and kinetic characteristics of blended cement containing lithium slag powder [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 39: 102287.
- [6] LIU Y N, CHEN S J, SAGOE-CRENTSIL K, et al. Evolution of tricalcium silicate (C3S) hydration based on image analysis of microstructural observations obtained via Field's metal intrusion [J]. *Materials Characterization*, 2021, 181: 111457.
- [7] 陈浩, 李世六, 黄艳玲, 等. 全自动维卡仪原理及关键技术 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(6): 92-96.  
CHEN Hao, LI Shiliu, HUANG Yanling, et al. Principle and key technology of full automatic vicat apparatus [J]. *Journal of Chongqing Architecture University*, 2005, 27(6): 92-96. (in Chinese)
- [8] 王庆珍, 钱觉时, 秦继辉, 等. 环境温度对磷酸镁水泥凝结时间和强度发展的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(11): 1493-1498.  
WANG Qingzhen, QIAN Jueshi, QIN Jihui, et al. Effect of ambient temperature on setting time and strength development of magnesia-phosphate cement [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(11): 1493-1498. (in Chinese)
- [9] 费晓春, 李明, 王方刚, 等. 实体结构混凝土早期温度发展特征与凝结时间关系 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(1): 56-60.  
FEI Xiaochun, LI Ming, WANG Fanggang, et al. Relationship between early age temperature development characteristics of entity structure concrete and setting time [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(1): 56-60. (in Chinese)
- [10] 丁沙, 水中和, 袁新顺. 无损检测法评判早龄期混凝土内部结构特征的研究 [J]. *混凝土*, 2010(6): 12-15.  
DING Sha, SHUI Zhonghe, YUAN Xinshun. Study on the characteristics of the internal structure of early age concrete using non-destructive testing method [J]. *Concrete*, 2010(6): 12-15. (in Chinese)
- [11] 陈雨, 文玉梅, 李平, 等. 混凝土中压电陶瓷在变载荷作用下的特性研究 [J]. *压电与声光*, 2005, 27(6): 700-703.  
CHEN Yu, WEN Yumei, LI Ping, et al. A characterization of piezoelectric ceramic embedded in concrete with variable loading [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2005, 27(6): 700-703. (in Chinese)
- [12] 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.  
XUE Zifan, XING Zhiguo, WANG Haidou, et al. A review of piezoelectric sensors for structural health monitoring [J]. *Materials Reports*, 2017, 31(17): 122-132. (in Chinese)
- [13] 金长善. 超声工程 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
- [14] 马大猷. 现代声学理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [15] 张传忠. 压电材料的发展及应用 [J]. *压电与声光*, 1993, 15(3): 64-70.  
ZHANG Chuanzhong. Development of piezoelectric materials and their applications [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 1993, 15(3): 64-70. (in Chinese)