



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103575769 B

(45)授权公告日 2016. 11. 16

(21)申请号 201310562045.3

(22)申请日 2013.11.13

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103575769 A

(43)申请公布日 2014.02.12

(73)专利权人 济南大学

地址 250022 山东省济南市市中区南辛庄  
西路336号

(72)发明人 徐东宇 程新 黄世峰 李兰

(51) Int. Cl.

G01N 27/04(2006.01)

G01N 17/00(2006.01)

审查员 丁丽君

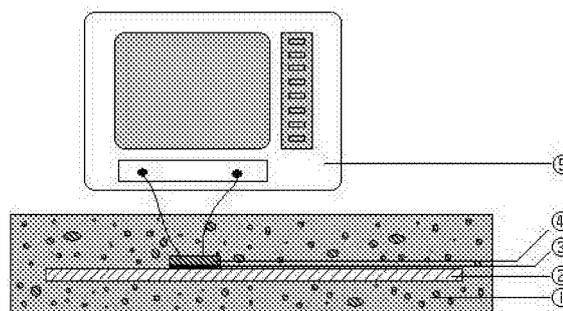
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

## (54)发明名称

一种用于钢筋锈蚀监测的压电传感器及钢筋锈蚀监测方法

## (57)摘要

本发明涉及一种用于钢筋锈蚀监测的压电传感器及钢筋锈蚀监测方法,属于钢筋混凝土结构的智能传感器监测技术领域。该传感器由压电陶瓷、电极面、水泥、环氧树脂及固化剂构成的封装层和屏蔽导线构成。基于该传感器的监测方法采用水泥、环氧树脂和固化剂的混合物作为粘结剂将压电传感器和钢筋耦合,通过测试不同时期传感器的电阻抗-频率谱图,然后进行均方根差计算,其计算结果作为判断混凝土内钢筋锈蚀状况的量化指数。本发明的压电传感器具有制备简单、使用方便、耐久性好等特点,基于该传感器的监测方法具有准确可靠、方便直观的特点。



1. 一种用于混凝土钢筋锈蚀监测的传感器,其特征是:它包括压电陶瓷、电极面、封装层和屏蔽导线构成;所述压电陶瓷的下表面电极通过侧面引伸到上表面,并和原有上表面电极分割,屏蔽导线分别焊接到压电陶瓷从下表面引伸到上表面的电极部分和原有的上表面电极部分;封装层由水泥、环氧树脂和固化剂的混合物组成,水泥为硅酸盐类水泥、硫酸盐系列水泥或磷铝酸盐系列水泥中的一种,环氧树脂为双酚A型、双酚F型或双酚S型中的一种或几种的混合物,固化剂为胺类固化剂,环氧树脂和固化剂的混合物占水泥、环氧树脂和固化剂三者混合物的质量分数为40%-80%;压电陶瓷下表面封装层厚度小于2mm,压电陶瓷上表面封装层厚度小于5mm,压电陶瓷侧面封装层厚度小于5mm。

2. 一种利用权利要求1所述的传感器对混凝土内钢筋锈蚀状况进行监测的方法,其特征在于包括以下步骤:

(1) 采用水泥、环氧树脂和固化剂的混合物作为粘结剂,将压电传感器的下表面粘贴于钢筋表面,粘接剂的配比和传感器封装层的配比相同;粘贴层厚度小于2mm,粘贴固化时间为48h;

(2) 采用阻抗测试仪对养护24h的钢筋混凝土内的压电传感器进行电阻抗-频率特性测试,获得电阻抗-频率谱图;

(3) 以24h时测得的压电传感器电阻抗为基准参考值,以符号 $R_i^0$ 表示,下标 $i=1,2,\dots,N$ ,代表测试频率区间内的频率点,上标0代表24h基准时刻,将不同时期测得的压电传感器电阻抗与其进行对比,以符号 $R_i$ 表示,

根据均方根差公式,

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [R_i - R_i^0]^2}{\sum_{i=1}^n [R_i^0]^2}}$$

计算在测试频率区间内,不同时期压电传感器的电阻抗值与24h时压电传感器的电阻抗值的均方根差,并作为量化指数;

(4) 绘制时间-量化指数柱状图,观察均方根差柱状图的变化,判断混凝土内钢筋锈蚀状况。

## 一种用于钢筋锈蚀监测的压电传感器及钢筋锈蚀监测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及钢筋混凝土结构的智能传感器监测技术领域,特别是一种混凝土中钢筋锈蚀监测的压电传感器及基于该传感器的钢筋锈蚀监测方法。

### 背景技术

[0002] 混凝土所处环境一般较为恶劣,导致其耐久性破坏的因素很多,其中钢筋腐蚀是影响其耐久性能,甚至导致混凝土结构失稳破坏的最主要原因。钢筋锈蚀将导致钢筋的有效截面减小、钢筋力学性能下降、钢筋与混凝土的粘结力下降、产生锈胀力,降低混凝土的抗压强度,引起混凝土保护层开裂剥落,从而降低了混凝土结构的承载力。尤其是对于港口、码头、跨海大桥及海洋钻井平台等沿海混凝土工程结构,因钢筋锈蚀导致的混凝土耐久性问题非常严重,严重威胁了其正常的使用寿命。因此,如何准确地掌握钢筋混凝土结构的钢筋锈蚀状况,以便及早采取预防措施防止锈蚀的进一步加剧,这对于保障重要混凝土工程结构的安全性具有重要的意义。

[0003] 近年来,采用智能传感器对混凝土钢筋腐蚀监测成为一个重要的发展方向。目前,使用智能传感器对混凝土中钢筋腐蚀状况进行评价的方法很多,主要可分为两大类,即物理法和电化学法等。物理法主要通过测定钢筋锈蚀引起电阻、电磁、热传导、声波传播等物理特性的变化来反映钢筋锈蚀情况,目前所主要使用的是布拉格光栅光纤或涂层光纤钢筋腐蚀本征光学传感器。此外,由于钢筋腐蚀本身就是一个电化学过程,因而采用电化学方法也是比较有效的手段,目前常用的电化学方法有线性极化法、交流阻抗谱法、腐蚀电流法、腐蚀电位法、混凝土电阻率法等。采用电化学方法进行钢筋腐蚀监测是目前研究较为成熟、应用广泛的一类,但由于电化学监测方法往往需要将外部测量探头或参比电极外置于混凝土构件上,测量结果易受外界因素的干扰,进而影响测量的精确性。因此,研发可永久埋设于混凝土结构中的智能传感器,使之能够适用于混凝土中钢筋腐蚀的长期监测具有良好的发展前景。

[0004] 压电陶瓷具有成本低、响应速度快、结构简单、可靠性好、既可作为传感器又可作为驱动器等优点受到了广泛重视,采用压电陶瓷制备的传感器和驱动器在土木工程结构损伤诊断与监测等方面发挥了重要的作用。目前,已有关于压电传感器声发射技术和超声技术的混凝土钢筋锈蚀监测研究,然而基于压电传感器机电阻抗技术的钢筋锈蚀监测研究未见报道。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种能够长期埋入钢筋混凝土结构中、结构简单、耐久性好且使用方便的钢筋锈蚀监测用压电传感器,同时还通过测试与钢筋粘贴耦合后的压电传感器机电阻抗谱变化,建立有效的钢筋锈蚀量化指数,最终形成一种基于该压电传感器机电阻抗技术的混凝土钢筋锈蚀监测方法。

[0006] 为了实现解决上述技术问题的目的,本发明采用如下技术方案:

[0007] 本发明提供的压电传感器由压电陶瓷、电极面,水泥、环氧树脂及固化剂混合物封装层和屏蔽导线构成。

[0008] 将压电传感器粘贴于混凝土内部的钢筋上,当钢筋发生锈蚀时,钢筋的机械阻抗也会发生相应变化,通过测定耦合于钢筋的压电传感器机电阻抗谱变化情况,并基于机电阻抗谱的这种变化建立一种量化指数,便可实现对混凝土内的钢筋锈蚀状况的长期监测。

[0009] 所述传感器所用压电陶瓷为经过极化处理后的钛酸铅、锆钛酸铅、铌镁锆钛酸铅、三元系压电陶瓷或无铅压电陶瓷中的一种,形状为方形或圆柱形陶瓷片或陶瓷块。

[0010] 所述传感器所用压电陶瓷的上下表面电极均为银电极或镍电极,其中,陶瓷的下表面电极通过侧面一端引出到上表面,并和原有上表面电极分割,屏蔽导线分别焊接到下表面引入到上表面的电极部分和原有的上表面电极部分。

[0011] 所述传感器封装层所用水泥为硅酸盐类水泥、硫铝酸盐系列水泥或磷铝酸盐系列水泥中的一种,水泥用量占水泥、环氧树脂和固化剂三者混合物的20%-60%(质量分数)。

[0012] 所述传感器封装层所用环氧树脂为双酚A型、双酚F型或双酚S型中的一种或几种的混合物,固化剂可以采用胺类固化剂,环氧树脂和固化剂的混合物用量占水泥、环氧树脂和固化剂三者混合物的40%-80%(质量分数)。

[0013] 所述传感器所用的水泥环氧树脂封装层的厚度为,压电陶瓷的下表面封装层厚度小于2mm,压电陶瓷的上表面封装层厚度小于5mm,压电陶瓷的侧面封装层厚度小于5mm。

[0014] 一种利用上述传感器对混凝土内钢筋锈蚀状况进行监测的方法,其特征在于包括以下步骤:

[0015] (1)采用水泥、环氧树脂和固化剂的混合物作为粘结剂,将压电传感器的下表面粘贴于钢筋表面,粘接剂的配比和传感器封装层的配比相同;

[0016] (2)将粘贴有压电传感器的钢筋埋于混凝土中,标准养护24h后脱模;

[0017] (3)采用阻抗测试仪对养护24h的钢筋混凝土内的压电传感器进行电阻抗-频率特性测试,获得电阻抗-频率谱图;

[0018] (4)根据电阻抗-频率谱图,找出压电传感器出现最多谐振峰时的频率段,并以该频率段为测试频率区间,再次进行电阻抗-频率特性测试,获得分辨率更高的电阻抗-频率谱图;

[0019] (5)按照步骤(4)中确定的测试频率区间对钢筋混凝土内的压电传感器进行定期电阻抗-频率特性测试,获得电阻抗-频率谱图;

[0020] (6)以24h时测得的压电传感器电阻抗为基准参考值,以符号 $R_i^0$ 表示(下标 $i=1, 2, \dots, N$ ,代表测试频率区间内的频率点,上标0代表24h基准时刻),将不同时期测得的压电传感器电阻抗与其进行对比,以符号 $R_i$ 表示,

[0021] 根据均方根差公式,

$$[0022] \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [R_i - R_i^0]^2}{\sum_{i=1}^N [R_i^0]^2}}$$

[0023] 计算在测试频率区间内,不同时期压电传感器电阻抗与24h时压电传感器的基准电阻抗值的均方根差,并作为量化指数;

[0024] (7)绘制时间-量化指数柱状图,观察均方根差柱状图的变化,判断混凝土内钢筋锈蚀状况。

[0025] 所述的基于压电传感器的混凝土内钢筋锈蚀状况监测方法,压电传感器和钢筋的粘贴层厚度小于2mm,粘贴固化时间为48h。

[0026] 所述的基于压电传感器的混凝土内钢筋锈蚀状况监测方法,所测试的压电传感器的电阻抗可以是电阻、电抗或阻抗当中的一种,所获得谱图可以是电阻-频率谱图、电抗-频率谱图或阻抗-频率谱图中的一种。

[0027] 本发明提供的混凝土钢筋锈蚀监测压电传感器和钢筋锈蚀监测方法,与现有技术相比,其机理和主要优点是:

[0028] 一、利用压电陶瓷的逆压电效应,将压电传感器和钢筋粘贴耦合,通过测试压电传感器的电阻抗-频率谱图,计算其阻抗或电阻或电抗参数的变化,便可实现对混凝土内钢筋锈蚀状况的长期监测,具有可靠性好、方便易行等特点,尤其是实现了钢筋锈蚀的长期无损监测;

[0029] 二、采用水泥、环氧树脂和固化剂的混合物作为压电传感器的封装层,既利用了环氧树脂的粘弹阻尼性能,又利用了水泥材料的颗粒增强作用,有效保护了传感器在使用过程中免受应力破坏,同时也提高了传感器的耐久性及其与混凝土间的耦合相容性;

[0030] 三、采用与压电传感器封装层相同的水泥、环氧树脂和固化剂的混合物作为压电传感器和钢筋间的粘贴层,使得传感器的电阻抗变化能够更加有效的反映钢筋机械阻抗的变化,进而更准确的反映混凝土内钢筋的锈蚀变化;

[0031] 四、本发明方法采用均方根差作为钢筋锈蚀的量化指数,具有计算简单、方便直观的特点,可准确的反映出混凝土内钢筋在不同时期的腐蚀状况。

[0032] 附图说明:

[0033] 图1为一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测用压电传感器的结构示意图,其中,①为压电陶瓷;②为水泥、环氧树脂和固化剂的混合物;③为压电陶瓷下表面引出到上表面的电极;④为压电陶瓷的上表面电极;⑤和⑥分别为屏蔽导线。

[0034] 图2为采用压电传感器对混凝土内钢筋锈蚀监测的示意图,其中①为混凝土;②为钢筋;③为水泥环氧树脂粘贴层;④为压电传感器;⑤为阻抗测试仪。

[0035] 图3为实施例1所测得的压电传感器电阻-频率谱图。

[0036] 图4为实施例2所测得的压电传感器电阻-频率谱图。

[0037] 图5为实施例3所测得的压电传感器电阻-频率谱图。

[0038] 图6为实施例4所测得的压电传感器电阻-频率谱图。

[0039] 图7为实施例5所测得的压电传感器电阻-频率谱图。

[0040] 图8为根据实施例2-5所测得的压电传感器电阻-频率谱图,通过均方根差公式计算获得的不同时期钢筋锈蚀均方根差柱状图。

## 具体实施方式

[0041] 下面通过具体实施例对本发明进行进一步的阐述,应该明白的是,下述说明仅是为了解释本发明,并不对其内容进行限定。

[0042] 实施例1

[0043] 以尺寸为 $\Phi 10 \times 1.8\text{mm}$ 的 PZT-5型压电陶瓷为传感元件,其中,压电陶瓷的下表面电极从侧面引伸到了上表面,并和原上表面电极分割成两部分。以普通硅酸盐水泥、E51型环氧树脂和聚酰胺固化剂的混合物作为封装层,铜芯RVVP屏蔽线缆为导线制备钢筋锈蚀监测压电传感器。其制备过程为:首先,将屏蔽线缆分别焊接到从压电陶瓷下表面引伸到上表面的电极部分和压电陶瓷原有的上表面电极部分;然后,将焊接导线后的压电陶瓷片固定在模具中,陶瓷片的焊接面距离模具内壁3mm,陶瓷片未焊接导线的一面距离模具内壁1.5mm,陶瓷片侧面距离模具内壁亦为3mm;按照质量比为1:1:0.25称取水泥、环氧树脂和固化剂,将三者充分混合后倒入模具中直至刚好没过整个陶瓷片。室温放置48h,待环氧树脂完全固化后,脱模后即制得压电传感器。采用阻抗测试仪对传感器的电阻-频率特性进行测试,获得传感器在40Hz-500kHz的电阻-频率谱图,结果如图3所示。由图可以看出,谐振峰数量出现最多的频率区间为40Hz-200kHz。

[0044] 实施例2

[0045] 制作一根强度等级为C30的钢筋混凝土矩形截面梁,梁的尺寸为长度 $\times$ 宽度 $\times$ 高度=500mm $\times$ 200mm $\times$ 200mm。水泥采用某公司生产的42.5级普通硅酸盐水泥,砂子为某地产细度模数为2.5的中砂,碎石为某地产连续级配5-20mm的碎石,采用的纵向受拉钢筋为二级热轧带肋钢筋。首先,将质量比为1:1:0.25的水泥、环氧树脂和固化剂的混合物混合后,均匀涂抹在钢筋表面和压电传感器下表面上;然后,将压电传感器粘贴在钢筋表面上,并按压排出空气和多余的粘结剂,空气中固化48h后;将粘贴有传感器的钢筋固定于浇注模具中,浇注混凝土原材料,标准养护24h后脱模。采用阻抗测试仪对脱模后的钢筋混凝土梁内的压电传感器进行电阻-频率特性测试,测试频率区间为40Hz-500kHz;根据传感器在40Hz-500kHz的电阻-频率谱图,找出谐振峰出现最多的频率段为50kHz-200kHz,然后以此频率段作为测试频率区间,再次进行电阻-频率特性测试,其电阻-频率谱图如图4所示。

[0046] 实施例3

[0047] 将钢筋混凝土梁养护7天后,按照实施例2的操作方法,采用阻抗测试仪测试压电传感器在50kHz-200kHz的电阻-频率特性,其电阻-频率谱图如图5所示。

[0048] 实施例4

[0049] 将钢筋混凝土梁养护14天后,按照实施例2的操作方法,采用阻抗测试仪测试压电传感器在50kHz-200kHz的电阻-频率特性,其电阻-频率谱图如图6所示。

[0050] 实施例5

[0051] 将钢筋混凝土梁养护28天后,按照实施例2的操作方法,采用阻抗测试仪测试压电传感器在50kHz-200kHz的电阻-频率特性,其电阻-频率谱图如图7所示。

[0052] 以实施例2测得的24h时压电传感器得电阻值为基准参考值,以符号 $R_i^0$ 表示(下标 $i=1, 2, \dots, N$ ,代表测试频率区间内的频率点,上标0代表基准点),分别将实施例3~实施例5所测得的压电传感器电阻值与其进行对比,以符号 $R_i$ 表示,

[0053] 采用数学统计根均方差的计算公式,

[0054] 
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [R_i - R_i^0]^2}{n}} \quad \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [R_i^0]^2}{n}}$$

[0055] 计算在50kHz-200kHz频率区间内,不同时期压电传感器与24h时压电传感器的电阻均方根差,并作为量化指数。通过计算,均方根差分别为0.184,0.218,0.257。

[0056] 以时间为横坐标,均方根差为纵坐标绘制柱状图,如图8所示。由图可以看出,随着时间的增加,量化指数呈增大的趋势,表明随着养护时间的延长,钢筋混凝土内的钢筋因锈蚀而产生机械阻抗变化,因此,通过对量化指数的长期分析,便可掌握混凝土内的钢筋锈蚀状况。

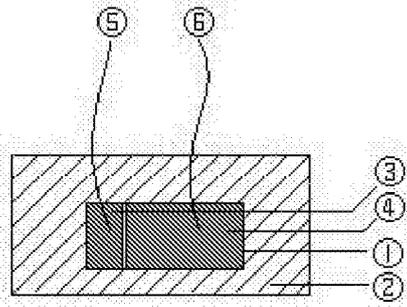


图1

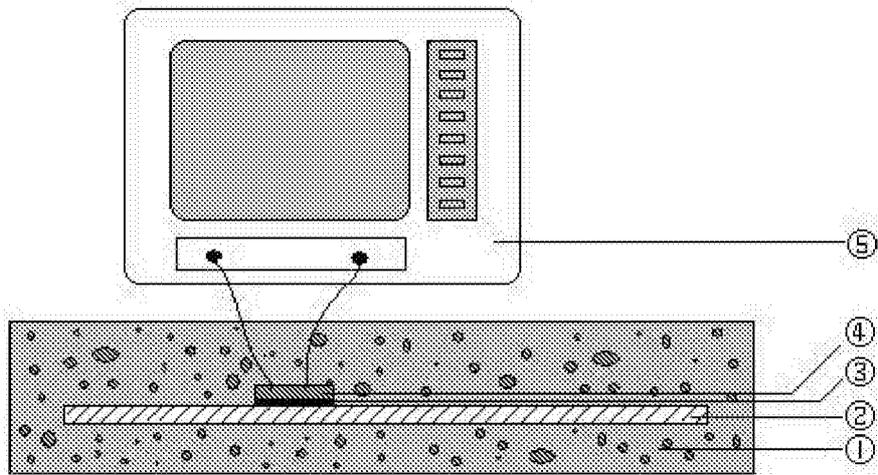


图2

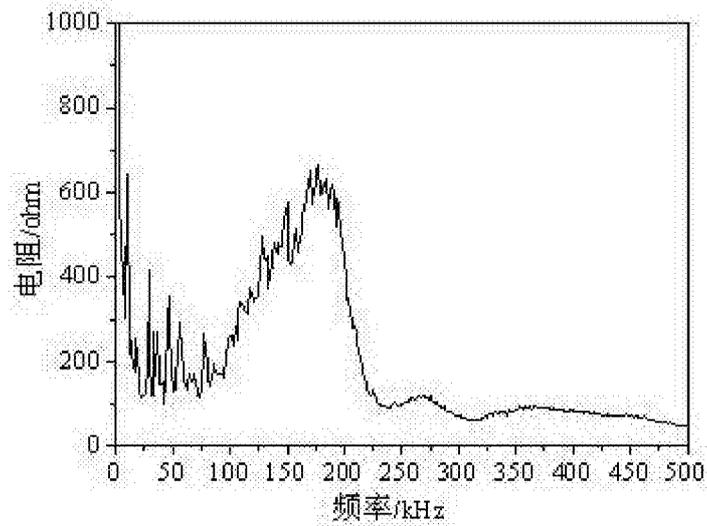


图3

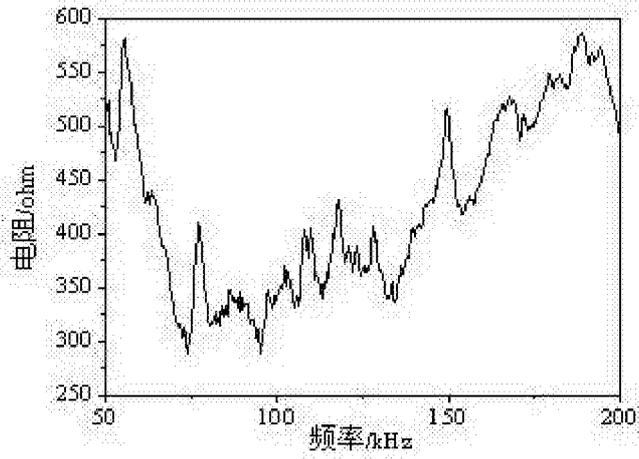


图4

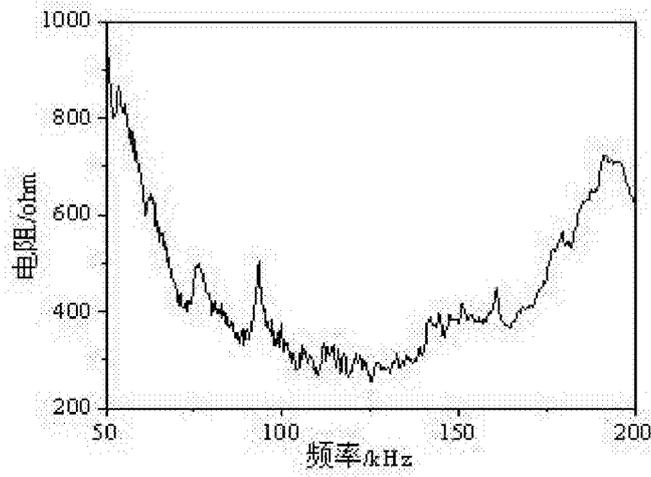


图5

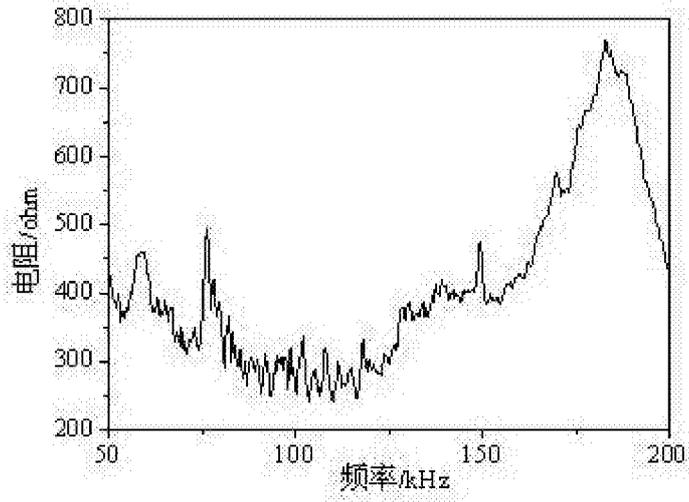


图6

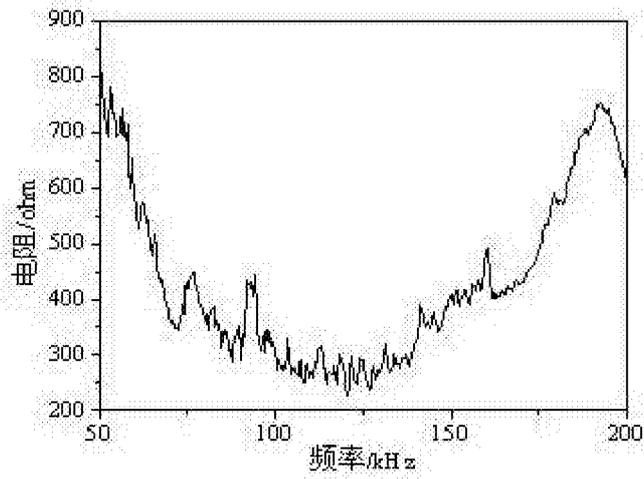


图7

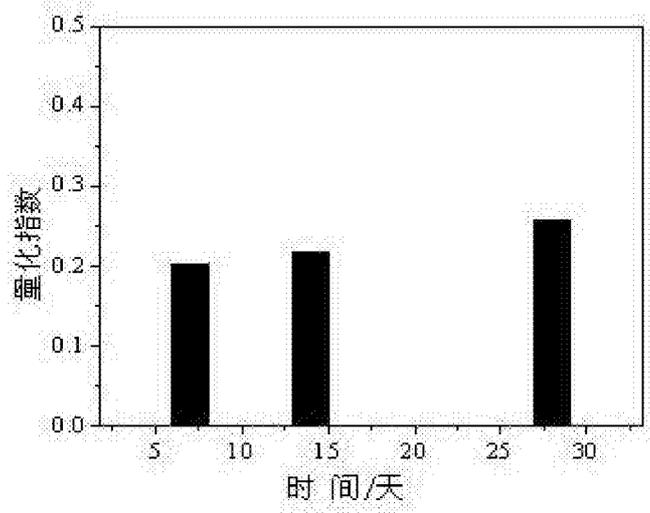


图8