



## (12) 实用新型专利

(10) 授权公告号 CN 203053966 U

(45) 授权公告日 2013. 07. 10

(21) 申请号 201220615624. 0

(22) 申请日 2012. 11. 20

(73) 专利权人 郑州大学

地址 450002 河南省郑州市金水区文化路  
97 号郑州大学土木工程学院

(72) 发明人 赵卓 李大望 曾力 申磊  
郝志超

(74) 专利代理机构 郑州金成知识产权事务所  
(普通合伙) 41121

代理人 郭增欣

(51) Int. Cl.

G01N 33/38 (2006. 01)

(ESM) 同样的发明创造已同日申请发明专利

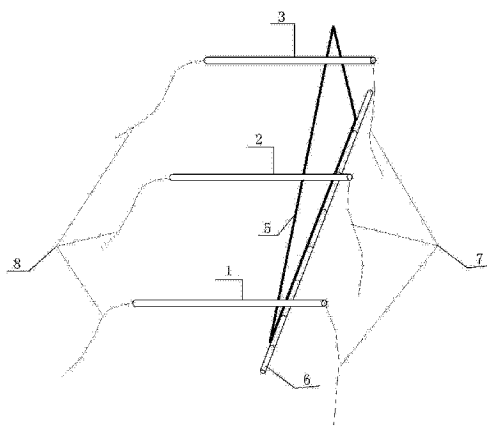
权利要求书1页 说明书7页 附图2页

### (54) 实用新型名称

混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置

### (57) 摘要

本实用新型涉及一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置。该装置包括光纤光栅应变传感器、信号处理单元、不锈钢斜面支架、至少三只光纤光栅应变传感器及导线,所述光纤光栅应变传感器依次布设在所述斜面支架的斜面上,各光纤光栅应变传感器采集所得信号经由导线送至信号处理单元;本实用新型应用特定方法布置的光纤光栅应变传感器测定混凝土保护层中由于钢筋锈蚀产物产生的锈胀力引起的拉应变,推导出钢筋锈蚀速率及钢筋锈蚀初始腐蚀时间  $t_0$ , 以实现间接的监测钢筋锈蚀状况。本实用新型钢筋锈蚀监测装置便于布设,测试结果精度更高,可靠性更好,其可以实现对普通混凝土结构的长期实时在线监控,而且是一种非破损性监测。



1. 一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置,包括光纤光栅应变传感器、信号处理单元及导线,其特征在于,还包括不锈钢斜面支架、至少三只光纤光栅应变传感器,所述光纤光栅应变传感器依次布设在所述斜面支架的斜面上,其中,离待测钢筋最近的光纤光栅应变传感器的底面与该待测钢筋的距离为 5 ~ 10mm,离混凝土保护层表面最近的光纤光栅应变传感器的顶面离该混凝土保护层表面的距离为 5 ~ 10mm,其余光纤光栅应变传感器沿所述斜面支架的斜面方向布设在离待测钢筋最近的光纤光栅应变传感器与离混凝土保护层表面最近的光纤光栅应变传感器之间,各光纤光栅应变传感器采集所得信号经由导线送至信号处理单元。

2. 根据权利要求 1 所述的混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置,其特征在于,所述光纤光栅传感器的标准量程:  $\pm 1500 \mu \epsilon$ ;非线性度:直线:  $\leq 0.5\%$  F. S.;多项式:  $\leq 0.1\%$  F. S.;灵敏度:  $0.025\%$  F. S.;温度范围:  $-20 \sim +80^{\circ}\text{C}$ ;外形尺寸:  $\Phi 10\text{mm} \times L$ , 仪器长度因量程不同而异;传递杆为不锈钢测杆。

3. 根据权利要求 1 所述的混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置,其特征在于,所述斜面支架的斜面倾角为  $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ,其由不锈钢材料制作而成。

## 混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置

### 技术领域

[0001] 本实用新型涉及分析及测量控制技术领域,具体涉及一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置。

### 背景技术

[0002] 钢筋混凝土结构是土木工程中应用最为广泛的结构类型之一。影响混凝土结构耐久性的因素较为复杂,它们之间又有相互耦合作用。大量的工程结构病害研究表明,钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的最主要因素。Mehta 教授指出:“当今世界,混凝土结构破坏的原因,按重要性递减的顺序是:钢筋锈蚀,寒冷气候下的冻害,侵蚀环境的物理、化学作用”。由钢筋锈蚀引起的混凝土结构过早破坏,已成为全世界普遍关注并日益突出的一大灾害。特别是在沿海、近海及特种桥梁等使用环境中,钢筋混凝土结构可能因为钢筋锈蚀而丧失其耐久性,并导致钢筋混凝土构件承载能力的下降和延性的降低,最终造成结构不能达到预定的服役年限而提前失效。因此及早掌握混凝土结构中钢筋的锈蚀状况,采取预防措施防止锈蚀的进一步加剧,对延长混凝土结构的使用寿命意义重大。

[0003] 传统的钢筋锈蚀现场检测技术一般分为破损检测和非破损检测两种。破损检测,方法比较直观和准确,可以定性定量判断局部区域处钢筋腐蚀程度,钢筋但比较费时,费力,对建筑物或构件会造成一定程度的破坏。非破损检测又可以分为物理法和电化学法两大类。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用于混凝土中钢筋锈蚀检测的物理方法有电阻棒法、涡流探测法、射线法、声发射探测法及红外热像法等,物理方法目前主要停留在实验室阶段,用于现场实际工程相对较少。电化学方法通过测定钢筋混凝土腐蚀体系的电化学特性来确定混凝土中钢筋锈蚀程度或速度。较常用的电化学方法有三种:自然电位法、交流抗谱法和极化测量技术。

[0004] 相对于传统的检测方法,采用光纤光栅传感器不仅精度高,输出范围宽,体积小,耐久性好,更重要的其可以实现对普通混凝土结构的长期实时在线监控。下面对应用光纤光栅技术监测钢筋锈蚀的研究现状进行简介:

[0005] 2006年,严云等基于混凝土中钢筋腐蚀后体积变化的事实,提出一种用于测量混凝土中钢筋腐蚀的新型传感器,并进行了将光纤光栅拉伸后固定在圆形钢筋的表面,放入腐蚀溶液中加速钢筋腐蚀的试验。2008年,李俊等基于光纤光栅应变中心波长会发生漂移的原理,设计了光纤 Bragg 光栅腐蚀传感器。通过将钢筋放在两不锈钢凹槽内,对其采用恒流仪通电加速锈蚀,并且布设一根光栅用 AB 胶粘贴在两不锈钢支座表面,另外单独放置一根自由状态的光栅,测量由于温度引起的应变,从而分离出钢筋锈蚀体积膨胀所引起的光栅应变。2009年,李俊等又提出了一种新型测量钢筋锈蚀的双筋腐蚀光栅传感器。该传感器将光纤布拉格光栅粘贴固定于两根紧密排列的钢筋上表面。当钢筋锈蚀后,体积膨胀而使光纤光栅产生拉伸应变,光纤光栅的反射光波长将发生变化,所以通过测量光纤光栅的波长能够间接反映钢筋锈蚀程度。2010年,李俊等再次提出了一种新的钢筋腐蚀光纤光

栅传感器及温度补偿方法。在两根紧靠的钢筋中心附近粘贴光纤光栅,钢筋腐蚀体积膨胀,致使光纤光栅产生应变,通过布设一个钢筋腐蚀光纤光栅传感器来监测由于钢筋腐蚀和温度变化引起的光栅应变,同时单独布设一个不锈钢光纤光栅传感器来测量温度引起的光栅应变,可分离出钢筋由于腐蚀所引起的体积变化,从而实现对钢筋腐蚀程度及速率的监测。2011年,刘宏月等设计了一种基于折射率测量的长周期光纤光栅钢筋锈蚀监测传感器。将钢筋固定在开有孔洞的不锈钢基座上,基座内填充酚醛树脂,长周期光纤光栅传感器探头与待测钢筋分开4~6mm的距离,避免由于锈蚀带来的钢筋体积膨胀对长周期光纤光栅传感器探头的影响,通过试验可得到长周期光纤光栅谐振峰波长与混凝土内部钢筋锈蚀程度之间的对应关系。

[0006] 相关文献提出了不同的技术方法对钢筋锈蚀进行监测,并论证了其可行性。但是,严云提出的传感器和李俊提出的双筋腐蚀光栅传感器是将光纤光栅固定在钢筋上直接进行钢筋锈蚀监测,这就对钢筋的预处理和施工过程中的钢筋保护有着更高的要求,且不利于布设传感器,同时增加了监测的难度。另外,严云和刘宏月所做的试验中钢筋锈蚀监测所处的环境并非处在混凝土中,由于所处环境的差别,可能导致钢筋锈蚀监测结果存在一定的差别。因此有待进一步从理论上研究用光纤光栅监测钢筋锈蚀的可行性和提出更方便布设与监测钢筋锈蚀的技术,并发展实时自动监测技术对于新建的混凝土结构,特别是重大工程结构是十分必要的。

## 发明内容

[0007] 本实用新型要解决的技术问题是提供一种测试结果精度高、可靠性好、长期实时在线监控且便于布设的混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置;并根据钢筋锈蚀的机理及其对混凝土结构构件的影响,建立有效的钢筋锈蚀识别方法,确定锈蚀损伤识别敏感参数,最终形成一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测方法。

[0008] 为解决上述技术问题,本实用新型采用的技术方案是:

[0009] 应用光纤光栅应变传感器通过对混凝土保护层测定其由于钢筋锈蚀产物产生的锈胀力引起的拉应变,可推导出钢筋锈蚀速率及钢筋锈蚀初始腐蚀时间 $t_0$ ,以实现间接的监测钢筋锈蚀状况:一是根据钢筋锈蚀的机理及其对混凝土结构构件的影响,建立有效的钢筋锈蚀识别方法,确定锈蚀损伤识别敏感参数;二是选用合适的光纤光栅传感器,保证准确可靠地获取识别参数。具体技术方案如下:

[0010] 设计一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置,包括光纤光栅应变传感器、信号处理单元、不锈钢斜面支架、至少三只光纤光栅应变传感器及导线,所述光纤光栅应变传感器依次布设在所述斜面支架的斜面上,其中,离待测钢筋最近的光纤光栅应变传感器的底面与该待测钢筋的距离为5~10mm,离混凝土保护层表面最近的光纤光栅应变传感器的顶面离该混凝土保护层表面的距离为5~10mm,其余光纤光栅应变传感器沿所述斜面支架的斜面方向布设在上述两光纤光栅应变传感器之间,各光纤光栅应变传感器采集所得信号经由导线送至信号处理单元。

[0011] 所述光纤光栅传感器的标准量程: $\pm 1500 \mu \varepsilon$ ;非线性度:直线: $\leq 0.5\%FS$ ;多项式: $\leq 0.1\% F.S.$ ;灵敏度: $0.025\% F.S.$ ;温度范围: $-20 \sim +80^\circ C$ ;外形尺寸: $\Phi 10mm \times L$ (仪器长度因量程不同而异);传递杆为不锈钢测杆。

[0012] 所述斜面支架的斜面倾角为  $10^\circ \sim 15^\circ$  ,其由不锈钢制作而成。

[0013] 利用上述监测装置进行混凝土结构中钢筋锈蚀监测的方法,包括如下步骤:

[0014] (1) 将上述混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置中的光纤光栅应变传感器及斜面支架预埋设于混凝土结构中,斜面支架顺主筋方向布设,且使斜面支架底边与钢筋相贴合,设置在离待测钢筋最近的光纤光栅应变传感器的底面与该待测钢筋的距离为  $5 \sim 10\text{mm}$ ,离混凝土保护层表面最近的光纤光栅应变传感器的顶面离该混凝土保护层表面的距离为  $5 \sim 10\text{mm}$ ,其余光纤光栅应变传感器沿所述斜面支架的斜面方向布设在上述两光纤光栅应变传感器之间,相邻各光纤光栅应变传感器的间距为  $50 \sim 100\text{mm}$  ;

[0015] (2) 钢筋开始锈蚀的时刻为初始腐蚀时间,记为  $t_0$  ;在离待测钢筋最近的光纤光栅应变传感器开始产生应变的时刻记为  $t_1$  ;任选一在中间部位的光纤光栅应变传感器,记录其开始产生应变的时刻  $t_2$  ;将离混凝土保护层表面最近的光纤光栅应变传感器开始产生应变的时刻记为  $t_3$  ;在  $t_1$  时刻,经由离待测钢筋最近的光纤光栅应变传感器测定出其所在位置处混凝土的拉应变  $\varepsilon_1$  ,根据下述胡克定律公式求出该处混凝土的应力  $\sigma_1$  :

[0016]  $\sigma = k\varepsilon$  ,  $k = 2.0 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4 \text{Mpa}$  ;

[0017] 同样的,分别在  $t_2$ 、 $t_3$  时刻,由对应的光纤光栅应变传感器得到对应各处的拉应变  $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  ,根据上述胡克定律公式求出对应的应力  $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  ;

[0018] (3) 根据所得各处应力  $\sigma$  ,求出对应的锈胀力  $P$  ,对于混凝土中各点来说,  $\sigma = P$  ,根据下式求得锈蚀率  $\rho$  ,即钢筋的锈蚀程度:

[0019]

$$\rho = \left[ \left( \frac{\lg(1+P)}{R \cdot \lg \alpha} + 1 \right)^2 - 1 \right] \frac{1}{n-1}$$

[0020]

$$\alpha = \frac{k_1 - nk_2}{nk_3 - k_4}$$

[0021] 式中:  $P$  ——钢筋锈胀力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) ;

[0022]  $n$  ——钢筋铁锈体积膨胀率,即钢筋锈后的体积与锈蚀前体积的比值;

[0023]  $k_1, k_2, k_3, k_4$  ——钢筋锈胀力相关参数,一般  $k_1$  取 9043.2 ;  $k_2$  取 2636.4 ;  $k_3$  取 55.62 ;  $k_4$  取 103。

[0024]  $R$  ——钢筋半径 ( $\text{mm}$ ) ;

[0025]  $\rho$  ——钢筋锈蚀率 (%) ;

[0026] (4) 从  $t_1$  到  $t_2$  时间段内钢筋锈蚀程度变化值为  $\rho_2 - \rho_1$  ,进而根据  $\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1}$  得到

钢筋的锈蚀速率;

[0027] (5) 根据下式反推出钢筋开始锈蚀的初始腐蚀时间  $t_0$  ,

[0028]  $\rho = \frac{\rho_1 - 0}{t_1 - t_0}$  ;

[0029] 在所述步骤(4)中,按照同样的方法求得从  $t_1$  到  $t_3$  时间段内钢筋锈蚀速率  $\rho_2$  和从

$t_2$  到  $t_3$  时间段内钢筋锈蚀速率  $v_3$ , 取  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  的平均值作为修正的钢筋锈蚀速率  $v$ 。

[0030] 利用上述传感器及方法还可以预测混凝土保护层中锈胀裂缝的开展情况。

[0031] 本实用新型具有积极有益的效果：

[0032] 1. 该装置主要的特点就是便于布设, 测试结果精度更高, 可靠性更好, 更重要的是其可以实现对普通混凝土结构的长期实时在线监控, 而且是一种非破损性监测。

[0033] 2. 该装置能够精确的检测出混凝土的拉应变, 进而得到该处的应力, 进一步推算出钢筋锈蚀率即钢筋锈蚀程度, 最后可求出锈蚀速率并可对其进行修正, 进而可以推导出钢筋锈蚀的初始腐蚀时间  $t_0$ 。

[0034] 3. 该装置体积小, 重量轻, 结构简单; 高灵敏度和宽线性输出范围; 抗电磁干扰, 电绝缘; 结构形式灵活; 光纤光栅在弹性范围内, 受到外力时发生弯曲, 由于弹性作用, 外力消失后能自动恢复原状, 因此可以根据实际结构需要, 制成外形各异、尺寸不同的各种光纤光栅传感器。

[0035] 4. 所用光纤传感器耐腐蚀性好, 耐久性好, 可靠性和稳定性高, 维护成本低。国外研究表明, 光纤布拉格光栅传感器埋入碳纤维复合材料, 在  $0 \sim 2000$ pc 循环 320000 次, 仍没出现劣化现象; 通过加速老化试验认为光纤布拉格光栅存活寿命大于 25 年。

[0036] 5. 本实用新型方法所得测量结果具有良好的重复性, 因此可以应用于长期监测承受反复荷载作用的结构。

#### 附图说明

[0037] 图 1 为一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置布设示意图(立面);

[0038] 图 2 为一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置布设示意图(侧面);

[0039] 图 3 为一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置的结构示意图;

[0040] 图 4 为一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置的俯视结构示意图。

[0041] 图中, 1、2、3 为光纤光栅传感器, 4 为钢筋, 5 为支架, 6 为钢筋, 7、8 为导线。

#### 具体实施方式

[0042] 以下结合具体实施例进一步阐述本实用新型。下述实施例中所涉及的方法, 如无特别说明, 均为常规方法。

[0043] 实施例 1 一种混凝土结构中钢筋锈蚀监测方法:

[0044] (1) 试件的设计与制作

[0045] 制作了一根强度等级为 C30 的钢筋混凝土矩形截面梁, 长 3000mm×宽 250mm×高 500mm, 保护层厚度为 30mm。水泥采用某公司生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥; 砂采用某地产中砂, 细度模数为 2.8, 含泥量为 1.7%; 碎石采用某地产连续级配为 5~20mm 的碎石, 含泥量为 0.1%, 堆积密度为 1540kg/m<sup>3</sup>; 混凝土配合比如表 1 所示。纵向受拉钢筋为 II 级热轧变形钢筋, 箍筋为 I 级光圆钢筋。

[0046] 表 1 C30 配合比

[0047]

水泥 (kg)	细砂 (kg)	机制砂 (kg)	碎石 (5-20) (kg)	碎石 (5-10) (kg)	水 (kg)	粉煤灰 (kg)	外加剂 (kg)	矿粉 (kg)
220	250	653	830	150	110	110	7	90

[0048] (2) 混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置及其光纤光栅的布设, 参见图 1 至图 4:

[0049] 为了准确测定钢筋混凝土保护层的拉应变, 本次试验在顺钢筋方向放置一个斜支架, 在斜支架上共布设了三根光纤光栅传感器 1、2、3, 其中, 离待测钢筋最近的光纤光栅传感器 1 的底面与该待测钢筋的距离为 8mm, 离混凝土保护层表面最近的光纤光栅传感器 3 的顶面离该混凝土保护层表面的距离为 10mm, 其余光纤光栅 2 应变传感器沿所述斜面支架的斜面方向布设在上述两光纤光栅应变传感器之间, 各光纤光栅应变传感器采集所得信号经由导线 7、8 送至信号处理单元, 混凝土结构中钢筋锈蚀监测装置中的光纤光栅在混凝土中的布设位置图和结构示意图, 如图 1 ~ 4 所示。

[0050] (3) 光纤光栅的技术参数如表 2 所示:

[0051] 表 2 光纤光栅的技术参数

[0052]

标准量程	$\pm 1500 \mu \varepsilon$
非线性度	直线: $\leq 0.5\%FS$ ; 多项式: $\leq 0.1\%FS$
灵敏度	0.025%F. S.
温度范围	- 20 ~ +80°C
外形尺寸	$\Phi 10mm \times L$ (仪器长度因量程不同而异)
传递杆	不锈钢测杆

[0053] 注: F. S. 表示满量程

[0054] (4) 试验原理和结果:

[0055] ①钢筋表面的腐蚀性介质浓度尚未达到钢筋锈蚀的临界浓度时, 钢筋尚未锈蚀。

[0056] ②一旦超过这一临界浓度值时, 钢筋开始发生锈蚀。由于钢筋混凝土材料的固有特性, 钢筋与混凝土存在一些微小孔隙, 最初生成的铁锈不断渗入钢筋周围的孔隙中, 在这些微小孔隙被填满之前, 保护层混凝土中不会产生任何应力。

[0057] ③随着锈蚀产物逐渐填满钢筋周围的孔隙后, 后续生成的铁锈只能堆积于钢筋表面, 并由于其体积增加而对钢筋周围的混凝土产生压力。显然, 随着锈蚀产物的增加, 这个锈胀压力也越大。当钢筋锈蚀产物超过一个临界值时, 铁锈体积膨胀引起的混凝土拉应力大于混凝土的抗拉强度, 故钢筋 (包括锈层) 的混凝土因此而开裂。在该阶段, 由于尚未达到保护层抵抗劈裂的极限能力, 所以混凝土内部的径向锈胀裂缝并未贯穿整个保护层厚度。

[0058] ④随着锈蚀的加剧, 混凝土内部的锈胀裂缝不断扩展、延伸, 直至贯穿整个保护层, 并在其表面形成可见裂缝。

[0059] 当钢筋开始锈蚀这一时刻是初始腐蚀时间, 记为  $t_0$ ; 当光纤光栅应变传感器 1 开始产生应变时, 此时刻记为  $t_1$ ; 当光纤光栅应变传感器 2 开始产生应变时, 该时刻记为  $t_2$ ; 当光纤光栅应变传感器 3 开始产生应变时, 该时刻记为  $t_3$ 。当  $t_1$  时刻, 通过光纤光栅应变传感器 1 可测定出该处混凝土的拉应变  $\varepsilon_1$ , 运用胡克定律 ( $\sigma = k\varepsilon$ ) 可以求出该处混凝土的应力  $\sigma_1$ ; 同样当  $t_2$ 、 $t_3$  时刻时, 光纤光栅应变传感器 2、3 也可得到对应各处的拉应变, 进而

求出应力。应力  $\sigma$  求出后,就可以求出对应的锈胀力  $P$ ,通过锈胀力和钢筋锈蚀率的关系可以反算出锈蚀率  $\rho$ ,即钢筋的锈蚀程度。从  $t_1$  到  $t_2$  这段时间,锈蚀程度变化值也可求出,

即为  $\rho_2 - \rho_1$ ,进而可得到钢筋的锈蚀速率,即为  $\frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1}$ ,  $t_3$  时刻求得的钢筋锈蚀率,可以用

作对钢筋锈蚀速率进行修正。锈蚀速率修正过后,进而反推出钢筋开始锈蚀的初始腐蚀时间  $t_0$ 。另外,该传感器还可以预测混凝土保护层中锈胀裂缝的开展情况。

[0060] 当光纤光栅应变传感器 1 产生应变时,表明钢筋已经锈蚀,钢筋锈蚀产物产生的锈胀力已经到达光纤光栅应变传感器 1。当 1 处所承受的力超过混凝土抗拉强度时,说明此处的混凝土开始出现裂缝,此时处于钢筋混凝土应力产生阶段;当光纤光栅应变传感器 3 产生应变时,说明裂缝即将达到混凝土结构表面,此时处于钢筋混凝土开裂阶段,当 3 所承受的力超过混凝土抗拉强度时,混凝土表面将很快产生裂缝。

[0061] 上述检测过程还具体涉及以下各计算公式:

[0062]

$$\rho = \left[ \left( \frac{\lg(1+P)}{R \cdot \lg \alpha} + 1 \right)^2 - 1 \right] \cdot \frac{1}{n-1}$$

[0063] 上式中的参数  $\alpha = \frac{k_1 - nk_2}{nk_3 - k_4}$

[0064] 上述各式中:  $P$  ——钢筋锈胀力 ( $N/mm^2$ );

[0065]  $n$  ——钢筋铁锈体积膨胀率,即钢筋锈蚀后的体积与锈蚀前体积的比值;

[0066]  $k_1, k_2, k_3, k_4$  ——钢筋锈胀力相关参数,  $k_1$  取 9043.2、 $k_2$  取 2636.4、 $k_3$  取 55.62、 $k_4$  取 103;

[0067]  $R$  ——钢筋半径 ( $mm$ );

[0068]  $\rho$  ——钢筋锈蚀率 (%);

[0069] 从  $t_1$  到  $t_2$  时间段内钢筋锈蚀程度变化值为  $\rho_2 - \rho_1$ ,进而根据  $\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1}$  得到钢筋

的锈蚀速率;

[0070] 根据下式反推出钢筋开始锈蚀的初始腐蚀时间  $t_0$ ,

[0071] 
$$v = \frac{\rho_1 - 0}{t_1 - t_0}$$

[0072] 具体的检测及计算结果如下述各表所示。

[0073] 当  $n=2.0, R=8mm$  时,结果如表 3 所示:

[0074] 表 3 各参数计算结果

[0075]

$t$ (a)	$\varepsilon$	$\sigma$	$P$	$\rho$	$v$
10	0	0	0	0	0
30	0.000013845	0.2769	0.2769	1%	0.05%/a
50	0.000031425	0.6285	0.6285	2%	0.05%/a
70	0.00005372	1.0744	1.0744	3%	0.05%/a



[0076] 当  $n=2.5$ ,  $R=8\text{mm}$  时, 结果如表 4 所示:

[0077] 表 4 各参数计算结果

[0078]

$t$ (a)	$\varepsilon$	$\sigma$	P	$\rho$	$v$
10	0	0	0	0	0
23.3	0.000014345	0.2869	0.2869	1%	0.075%/a
36.6	0.000032655	0.6531	0.6531	2%	0.075%/a
49.9	0.00005598	1.1196	1.1196	3%	0.075%/a

[0079] 当  $n=3.0$ ,  $R=8\text{mm}$  时, 结果如表 5 所示:

[0080] 表 5 各参数计算结果

[0081]

$t$ (a)	$\varepsilon$	$\sigma$	P	$\rho$	$v$
10	0	0	0	0	0
20	0.000012865	0.2573	0.2573	1%	0.1%/a
30	0.00002887	0.5774	0.5774	2%	0.1%/a
40	0.00004873	0.9746	0.9746	3%	0.1%/a

[0082] 虽然, 上文中已经用一般性说明及具体实施方案对本实用新型作了详尽的描述, 但在本实用新型基础上, 可以对之作一些修改或改进, 这对本领域技术人员而言是显而易见的。因此, 在不偏离本实用新型精神的基础上所做的这些修改或改进, 均属于本实用新型要求保护的范围。

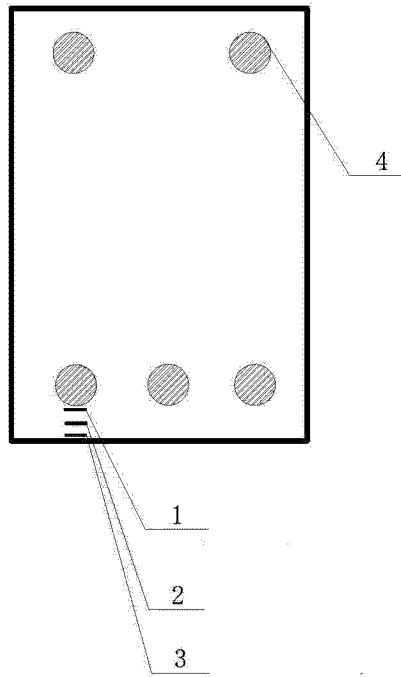


图 1

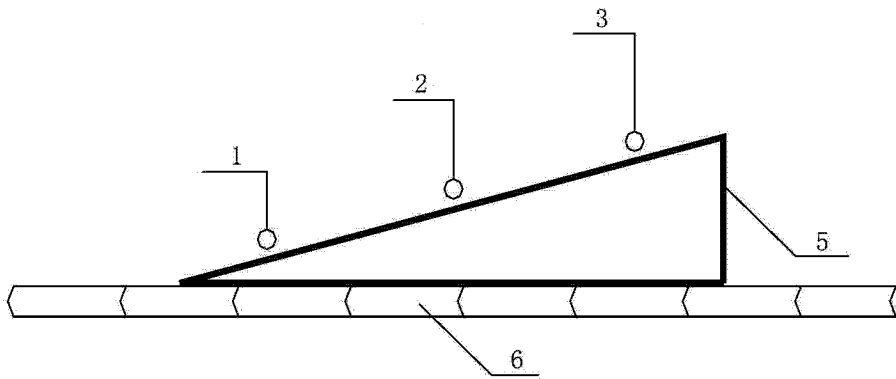


图 2

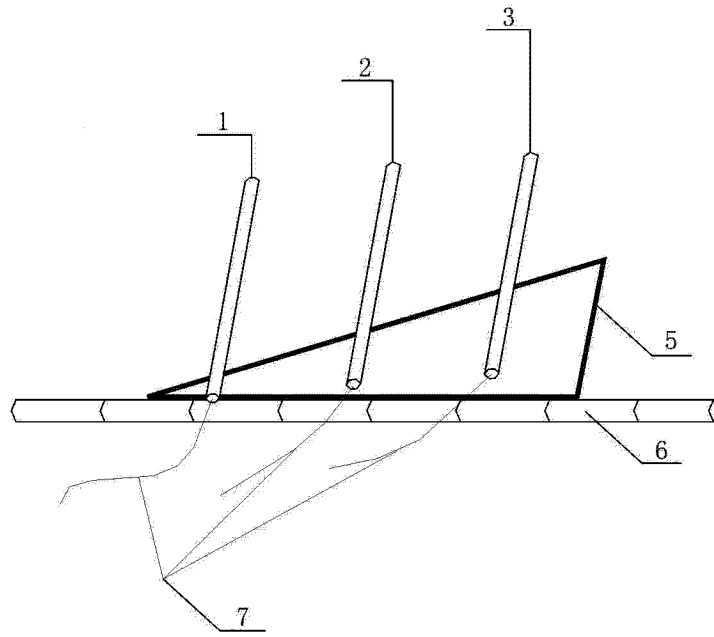


图 3

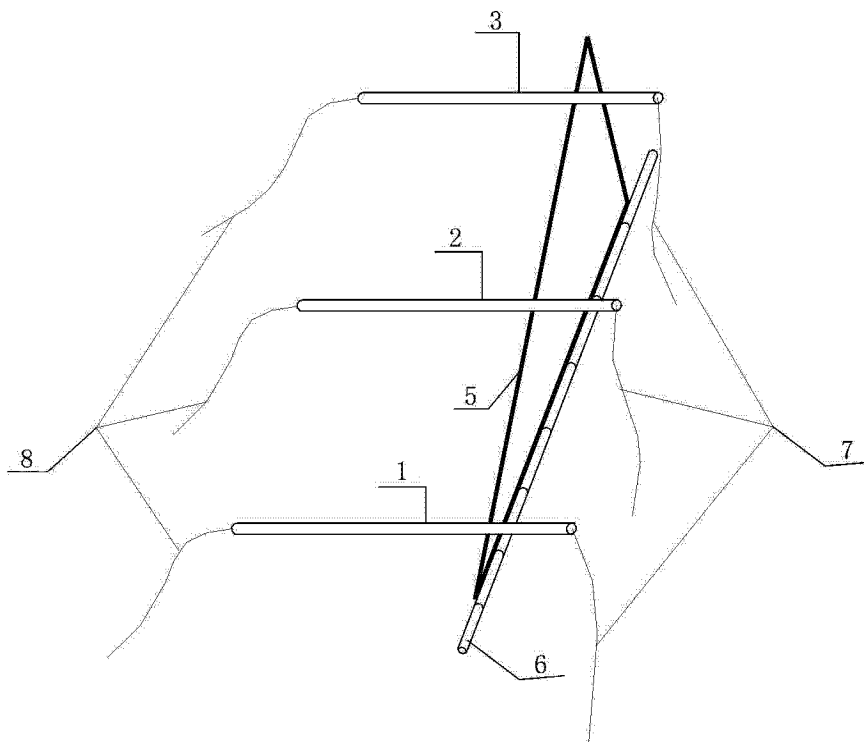


图 4