

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 9 月 10 日 (10.09.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/177402 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 33/38 (2006.01) **G01L 5/00** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/120501
- (22) 国际申请日: 2019 年 11 月 25 日 (25.11.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910159067.2 2019年3月4日 (04.03.2019) CN
- (71) 申请人: 青岛理工大学(**QINGDAO UNIVERSITY OF TECHNOLOGICAL**) [CN/CN]; 中国山东省青岛市市北区抚顺路 11 号, Shandong 266000 (CN)。
- (72) 发明人: 陈凡秀(**CHEN, Fanxiu**); 中国山东省青岛市抚顺路 11 号, Shandong 266000 (CN)。 张彬

(ZHANG, Bin); 中国山东省青岛市抚顺路 11 号, Shandong 266000 (CN)。 郭鹏飞(**GUO, Pengfei**); 中国山东省青岛市抚顺路 11 号, Shandong 266000 (CN)。 金祖权(**JIN, Zuquan**); 中国山东省青岛市抚顺路 11 号, Shandong 266000 (CN)。

- (74) 代理人: 青岛高晓专利事务所 (普通合伙) (**QINGDAO GAOXIAO PATENT OFFICE (GENERAL PARTNERSHIP)**); 中国山东省青岛市市南区宁夏路 308 号青岛大学博观楼 533 室于正河, Shandong 266000 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) **Title:** METHOD FOR MEASURING CORROSION EXPANSION FORCE CAUSING CONCRETE CRACKING DURING CORROSION EXPANSION OF REBAR

(54) 发明名称: 一种钢筋锈胀引起混凝土开裂锈胀力的测量方法

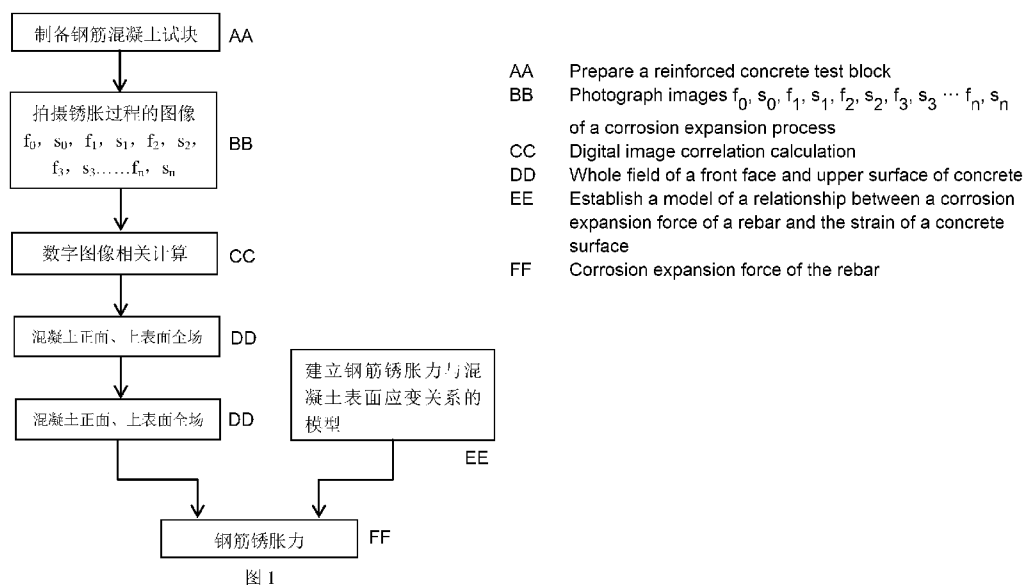


图 1

(57) **Abstract:** Disclosed is a method for measuring a corrosion expansion force causing concrete cracking during corrosion expansion of a rebar. The method comprises: photographing deformation of a reinforced concrete surface based on a digital image correlation method; analyzing and calculating whole-field displacement and strain of the concrete surface; by means of an established theoretical model, discovering a relationship between a corrosion expansion force and the strain of the concrete surface; and calculating the corrosion expansion force of a rebar, and analyzing a change rule thereof. The method for measuring a corrosion expansion force causing concrete cracking during corrosion expansion of a rebar is simple, is safe and reliable in operation, and has a scientific principle and low costs, and changes in a corrosion expansion force during corrosion expansion of reinforced concrete can be monitored in real time.

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

— 关于发明人身份(细则4.17(i))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种钢筋锈胀引起混凝土开裂锈胀力的测量方法, 基于数字图像相关方法拍摄钢筋混凝土表面变形, 分析计算混凝土表面的全场位移及应变, 通过建立完成的理论模型, 找到锈胀力与混凝土表面应变的关系, 计算出钢筋锈胀力并分析其变化规律; 钢筋锈胀引起混凝土开裂锈胀力的测量方法简便, 操作安全可靠, 原理科学, 成本低, 能实时监测钢筋混凝土锈蚀膨胀过程中锈胀力的变化。

一种钢筋锈胀引起混凝土开裂锈胀力的测量方法

技术领域:

本发明属于混凝土锈蚀技术领域,涉及一种通过无损监测实现混凝土内钢筋锈蚀过程中锈胀力的测量方法,特别是一种钢筋锈胀引起混凝土开裂锈胀力的测量方法,采用数字图像相关方法,对钢筋混凝土表面的位移及应变等信息进行实时监测,并通过建立的理论模型推导出混凝土内部钢筋锈胀力,从而分析出钢筋在锈蚀过程中的锈胀力变化规律。

背景技术:

19 世纪初期,钢筋混凝土材料在建筑领域引起了一场革命,越来越多的建筑物采用钢筋混凝土材料进行建造。钢筋有着良好的抗拉性能,混凝土则有着良好的抗压性和可塑性。并且两者具有优良的粘结性,使得混凝土和钢筋的结合成为可能。钢筋混凝土材料充分发挥了混凝土和钢筋的优点并弥补了对方的不足,钢筋嵌入混凝土中可以增加混凝土的抗拉强度和抗弯强度,混凝土则为钢筋提供碱性环境,防止钢筋发生腐蚀,混凝土保护层还能起到很好的隔热作用,能够有效的防止钢筋由于受热导致性能下降,这些特点使得钢筋混凝土材料成为工业和民用中最常见的建筑材料。混凝土水化物所形成的碱性环境以及钢筋表面存在的钝化膜能使钢筋免于腐蚀,因此一般认为钢筋混凝土结构不会因为自然原因发生锈蚀,导致混凝土保护层开裂。但是随着钢筋混凝土材料应用场景的增多,服役于沿海港口等湿润潮湿环境下的钢筋混凝土结构,受到氯盐侵蚀使混凝土产生的碱性环境失效、钢筋钝化膜破裂,导致钢筋发生锈蚀,最终钢筋锈蚀产物引起混凝土保护层开裂。因此近年来钢筋锈蚀问题受到了众多学者的广泛关注和重视,成为国内外研究者关心的热点话题。

目前针对钢筋锈胀力的研究,获取钢筋锈胀力的途径主要有三种方法:一是通过钢筋锈蚀产物厚度、混凝土碳化深度等钢筋混凝土结构内部数据获取锈胀力;二是在试件内部预埋仪器获得钢筋电流或应变的形式来计算锈胀力;三是通过建立模型获得开裂瞬时的锈胀力。但是这些现有方法不能实时监测锈胀力的变化,而且实施起来难度较大,成本也比较高。因此,亟待设计一种操作简单、成本低的由于钢筋锈胀引起混凝土开裂过程中锈胀力的测量方法。而数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)的非接触无损监测的特点,有效的弥补现有方

法的不足，能够实时监测变化过程，使得无损监测混凝土开裂过程中的锈胀力成为一种可能。

发明内容：

本发明目的在于克服现有技术存在的缺点，试图提供一种简便、易操作的方法测量钢筋混凝土锈蚀膨胀过程中锈胀力的大小，基于数字图像相关方法拍摄钢筋混凝土表面变形，分析计算混凝土表面的全场位移及应变，通过建立完成的理论模型，找到锈胀力与混凝土表面应变的关系，计算出钢筋锈胀力并分析其变化规律。

为了实现上述目的，本发明测量钢筋混凝土锈蚀膨胀过程中锈胀力的具体步骤为：

(1) 先将钢筋固定在 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{ mm}$ 模具中间位置，同时将一根不锈钢钢筋作为电加速的电极使用，再浇筑搅拌好的混凝土，使钢筋的截面与混凝土的表面齐平后放到振动台上振动 5 min，静置 24 h 后脱模并放入蒸汽养护室进行养护两个月得到混凝土试块，在制作好的混凝土试块两个侧面、底面和背面上黏贴应变片；

(2) 配备两台 CCD 相机以及一台与相机相连接的电脑，其中 CCD 相机包括机身和镜头，调整好两台 CCD 相机的位置，使 CCD 相机正好拍摄到混凝土试块未黏贴应变片的正面和上表面，同时调整 CCD 相机镜头的焦距使镜头与混凝土试块的距离保持在合适范围内，以获得更清晰有效的图像；并减弱室内光强，外加一个光源，调节外加光源的光强使得混凝土试块表面散斑处于既不能过饱和又不能过暗，满足数字图像相关方法中对散斑的要求，混凝土试块完全由外加光源提供光线，以降低昼夜交替带来的光线强度影响；

(3) 在开始实验前，先分别用两台 CCD 相机拍摄两张初始图片作为参考图像，命名为 f_0 ， s_0 ，保存图片格式为 bmp 格式；

(4) 随着钢筋的锈蚀，锈胀力不断发生变化，混凝土试块表面位移和应变也不断发生着变化，两台 CCD 相机每间隔一段时间 t_0 自动采集一张图片，从 0 时刻开始实验，在 t_0 时刻自动采集两幅图像 f_1 ， s_1 ；

(5) 随着实验的进行，锈胀力不断增大，混凝土试块表面的应变不断增大，采集到的图像也越来越多，在 $2t_0$ 、 $3t_0$ 、 $4t_0$ 、…… nt_0 时刻自动采集图像为 f_2 、 s_2 、 f_3 、

s_3 、 f_4 、 s_4 、...、 f_n 、 s_n ，将这些采集的图像作为计算时的目标图像；

(6) 利用自行编制的数字图像相关方法进行计算，获得每一幅图像的全场位移值及全场应变值；

(7) 根据弹性力学及混凝土变形理论，建立理论模型，从而求出钢筋锈胀力和混凝土表面的应变关系；

(8) 最后根据建立的理论模型以及数字图像相关方法得出的全场位移值和全场应变值，计算出钢筋锈胀力的大小并总结钢筋锈胀力的变化规律。

本发明所述自行编制的数字图像相关方法工作原理为：在变形前后采集两幅变形场图像，对变形前后采集图像上的散斑点进行相关匹配计算，跟踪点的运动，获得物体表面的位移信息，具体为：在变形前的图像中选择待测点 $P(x,y)$ 为中心的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 大小的计算子区 S ，让该计算子区 S 在变形后的目标图像中移动，按归一化的最小平方距离相关函数进行相关计算，寻找相关系数 C 出现极值时所对应的点 $P'(x+u,y+v)$ 为中心的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 大小的目标子区 S' ，则 u 、 v 分别为点 $P(x,y)$ 沿 x 方向和 y 方向的位移；归一化的最小平方距离相关函数公式：

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N \left[\frac{A(x_i, y_j) - A_m}{\Delta A} - \frac{B(x'_i, y'_j) - B_m}{\Delta B} \right]^2$$

$$\Delta A = \sqrt{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [A(x, y) - A_m]^2}$$

$$\Delta B = \sqrt{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [B(x', y') - B_m]^2}$$

$$A_m = \frac{1}{(2N+1)} \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [A(x, y)]^2$$

$$B_m = \frac{1}{(2N+1)} \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [B(x', y')]^2$$

其中， $A(x,y)$ 是变形前计算子区 S 的中心点 $P(x,y)$ 的灰度值， $B(x,y)$ 是变形后目标子区 S' 中心点 P' 的灰度值； A_m 和 B_m 是变形前子区和变形后目标子区的灰度平方的平均值； N 是正整数， N 的具体数值可以在计算过程中自行设置。 ΔA 是变形前各点灰度与平均灰度的差的平方和， ΔB 是变形后各点灰度与相应平均灰度的差的平方和， C_{ZNSSD} 代表归一化的最小平方距离相关函数公式。

本发明建立理论模型的具体过程为：先以钢筋截面圆心为坐标原点建立坐标系，其中 x 轴和 y 轴与钢筋混凝土试件的正方形截面的两条边平行，根据弹性力学半逆解法，设应力分量的函数形式为 $\sigma_y = f_1(y)g_1(x)q$ ，

带入应力公式 $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = f_1(y)g_1(x)q$ 及相容方程 $\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} = 0$ ，得

$$\frac{\partial^4 [f_1(y)g_3(x)]}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 [f_1(y)g_3(x)]}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 [f_1(y)g_3(x) + xf_2(y) + f_3(y)]}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

考察边界条件，在上下两个边界上，应力条件必须完全得到满足；考虑正面上的边界条件，该模型满足弹性力学完全接触问题，即上下两部分既不相互脱离也不相互滑动，最终得应力函数与应力分量为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \left[\left(\frac{0.2r^2}{d(d^2 - r^2)(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})} y^3 + \frac{1.2r^2}{(d^2 - r^2)} y^2 \right) \left(-2\frac{1}{d^2} x \right) \right] q \\ \sigma_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \left[\left(6\frac{0.2r^2}{d(d^2 - r^2)(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})} y + 2\frac{1.2r^2}{(d^2 - r^2)} \right) \left(-\frac{1}{d^2} x^2 + 1 \right) - \right. \\ \left. \left(-4\frac{1}{d^2} \frac{0.2r^2}{d(d^2 - r^2)(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})} y^3 - 4\frac{1}{d^2} \frac{1.2r^2}{(d^2 - r^2)} y^2 \right) \right] q \\ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial x} = -\left[\left(3\frac{0.2r^2}{d(d^2 - r^2)(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})} y^2 + 2\frac{1.2r^2}{(d^2 - r^2)} y \right) \left(-2\frac{1}{d^2} x \right) \right] q \end{array} \right. \quad (2)$$

代入弹性力学物理方程如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x) \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1 + \mu)}{E} \tau_{xy} \end{array} \right.$$

得到混凝土表面应变与钢筋锈胀力关系模型：

$$q = \frac{\varepsilon_x}{\frac{1}{E_c} \left(\frac{2.4r^2}{d^2 - r^2} \right) \left(-\frac{1}{d^2} x^2 + 1 \right)} \quad (3)$$

其中， E_c 是混凝土弹性模量，为减小不同混凝土试块对模型的影响，对上述模型进行修正，得到：

$$q = \frac{k \varepsilon_x}{\frac{1}{E_c} \left(\frac{2.4r^2}{d^2 - r^2} \right) \left(-\frac{1}{d^2} x^2 + 1 \right)} \quad (4)$$

式中, k 为修正系数, E_c 是混凝土弹性模量; d 为混凝土表面边长; r 为钢筋外半径, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ 分别为点的 x 方向应变、 y 方向应变和剪切应变; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 分别为点的 x 方向应力、 y 方向应力和剪切应力, E 为弹性模量, μ 为泊松比, $f_1(y)$ 为关于 y 的待定函数, $g_1(x)$ 为关于 x 的待定函数; 这样根据数字图像相关方法得到的钢筋混凝土试件表面应变值 ε_x 可以计算得到任一时刻钢筋锈胀力大小 q 。

本发明与现有技术相比, 其方法简便, 操作安全可靠, 原理科学, 成本低, 能实时监测钢筋混凝土锈蚀膨胀过程中锈胀力的变化。

附图说明:

图 1 为本发明的工作原理流程示意框图。

图 2 为本发明实施例所述钢管 (a) 及其剖面图 (b)。

图 3 为本发明所述混凝土试块及拍摄系统示意图。

图 4 为本发明所述混凝土试块正面的拍摄示意图。

图 5 为本发明实施例所述参考锈胀力与测点锈胀力对比图。

具体实施方式:

下面通过实施例并结合附图对本发明做进一步说明。

实施例:

本实施例所述钢筋选用中空结构的钢管, 钢管的内径为 10mm, 外径为 16mm, 在钢管内部黏贴应变片 1, 用来测量钢筋内壁的应变, 利用弹性力学理论推导出钢筋表面锈胀力, 以便与本实施例所述方法获取的锈胀力进行对比以验证测量结果的有效性, 具体操作步骤如下:

(1) 先将钢管沿轴线纵向剖开, 根据实际需要在钢管内部环贴数个应变片 1, 用于测量钢管内部应变;

(2) 制作中间位置嵌有钢管 3 的方形混凝土试块 2, 钢管 3 的截面与混凝土试块的表面齐平, 养护养护两个月后, 将混凝土试块 2 左右两个侧面、下表面和后端部都黏贴应变片, 只保留混凝土试块 2 正面和上表面不黏贴应变片, 用于 CCD 采集变形图像;

(3) 将混凝土试块 2 放在实验台上, 在混凝土试块 2 的正面放置第一 CCD 相机 4, 使第一 CCD 相机 4 刚好能够拍摄混凝土试块 2 的正面全场, 如图 4 所示, 在混凝土试块 2 的正上方放置第二 CCD 相机 5, 使第二 CCD 相机 5 刚好能

够拍摄混凝土试块 2 的上表面, 由于混凝土开裂的周期比较长, 需要昼夜不间断的拍照, 为降低昼夜交替带来的光线强度的影响, 减弱实验室的光强, 外加一个光源 6; 调节外加光源的光强使得试件表面散斑处于既不能过饱和又不能过暗, 满足数字图像相关方法中对散斑的要求即可;

(4) 用外接的应变采集仪连接所有应变片, 以便在实验开展过程中采集应变片数据并实时保存;

(5) 开始进行实验, 在开始实验之初, 用第一 CCD 相机 4 和第二 CCD 相机 5 拍摄两张初始图片作为参考图像, 命名为 f_0, s_0 , 保存图片格式为 bmp 格式;

(6) 随着钢筋的腐蚀, 锈胀力不断发生变化, 混凝土试块 2 的表面位移和应变也不断发生着变化, 为了能够拍摄混凝土开裂的整个过程, 第一 CCD 相机 4 和第二 CCD 相机 5 每间隔一段时间 $t_0=0.5s$ 采集一张图片, 从 0 时刻开始实验, 在 0.5s 时两台 CCD 相机自动采集两幅图像 f_1, s_1 ;

(7) 随着实验的进行, 锈胀力不断增大, 混凝土试块的表面应变不断增大, 采集到的图像也越来越多, 在 $2t_0, 3t_0, 4t_0, \dots, nt_0$ 时刻 CCD 相机分别自动采集图像, 命名为 $f_2, s_2, f_3, s_3, f_4, s_4, \dots, f_n, s_n$ 作为计算的目标图像;

(8) 利用自行编制的数字图像相关方法相关软件进行计算, 获得每一幅图像的全场位移值及全场应变值;

(9) 根据弹性力学及混凝土变形理论, 建立理论模型, 从而求出钢筋锈胀力和混凝土表面的应变关系;

(10) 根据建立的理论模型以及数字图像相关方法得出的全场位移值及全场应变值, 计算出钢筋锈胀力的大小并总结钢筋锈胀力的变化规律;

(11) 将得出的锈胀力实验结果与钢管内壁应变片推导得到的锈胀力进行对比, 以验证结果的有效性, 具体实验结果如下:

将混凝土表面应变数据代入公式 4, 其中 $E_c=3 \times 10^4 \text{MPa}$, $k=0.6$, $\mu=0.3$, $d=500 \text{mm}$, 结果如图 5 所示, 其中由钢管内部环贴的应变片计算得到的钢管表面锈胀力作为参考锈胀力混凝土出现裂缝前, 混凝土出现由测点 a、b、c 的应变推导出的锈胀力与参考锈胀力基本一致, 一致性良好, 其中 a,c 测点受到混凝土边界的影响, 计算出的锈胀力与参考锈胀力有一定的出入, 而位于混凝土表面中间的测点 b 则与参照锈胀力吻合较好。混凝土出现裂缝后, 模型失效不能够再继续使用

拉梅解答进行简化,因此混凝土表面应变推导的锈胀力开始逐渐脱离参考锈胀力,直到混凝土完全开裂后,混凝土不再受到环向的拉应力,此时测点得到的锈胀力完全脱离参考锈胀力,属于正常现象,由此可见本实施例提出的方法在钢筋混凝土结构出现裂缝前具有较好的适用性。

权 利 要 求 书

1、一种钢筋锈胀引起混凝土开裂锈胀力的测量方法,其特征在于具体步骤为:

(1) 先将钢筋固定在 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{ mm}$ 模具中间位置,同时将一根不锈钢钢筋作为电加速的电极使用,再浇筑搅拌好的混凝土,使钢筋的截面与混凝土的表面齐平后放到振动台上振动 5 min ,静置 24 h 后脱模并放入蒸汽养护室进行养护两个月得到混凝土试块,在制作好的混凝土试块两个侧面、底面和背面上黏贴应变片;

(2) 配备两台 CCD 相机以及一台与相机相连接的电脑,其中 CCD 相机包括机身和镜头,调整好两台 CCD 相机的位置,使 CCD 相机正好拍摄到混凝土试块未黏贴应变片的正面和上表面,同时调整 CCD 相机镜头的焦距使镜头与混凝土试块的距离保持在合适范围内,以获得更清晰有效的图像;并减弱室内光强,外加一个光源,调节外加光源的光强使得混凝土试块表面散斑处于既不能过饱和又不能过暗,满足数字图像相关方法中对散斑的要求,混凝土试块完全由外加光源提供光线,以降低昼夜交替带来的光线强度影响;

(3) 在开始实验前,先分别用两台 CCD 相机拍摄两张初始图片作为参考图像,命名为 f_0 , s_0 ,保存图片格式为 bmp 格式;

(4) 随着钢筋的锈蚀,锈胀力不断发生变化,混凝土试块表面位移和应变也不断发生着变化,两台 CCD 相机每间隔一段时间 t_0 自动采集一张图片,从 0 时刻开始实验,在 t_0 时刻自动采集两幅图像 f_1 , s_1 ;

(5) 随着实验的进行,锈胀力不断增大,混凝土试块表面的应变不断增大,采集到的图像也越来越多,在 $2t_0$, $3t_0$, $4t_0$, ..., nt_0 时刻自动采集图像为 f_2 , s_2 , f_3 , s_3 , f_4 , s_4 , ..., f_n , s_n , 将这些采集的图像作为计算时的目标图像;

(6) 利用自行编制的数字图像相关方法进行计算,获得每一幅图像的全场位移值及全场应变值;

(7) 根据弹性力学及混凝土变形理论,建立理论模型,从而求出钢筋锈胀力和混凝土表面的应变关系;

(8) 最后根据建立的理论模型以及数字图像相关方法得出的全场位移值和全场应变值,计算出钢筋锈胀力的大小并总结钢筋锈胀力的变化规律。

2、根据权利要求 1 所述钢筋锈胀引起混凝土开裂锈胀力的测量方法，其特征在于所述自行编制的数字图像相关方法工作原理为：在变形前后采集两幅变形场图像，对变形前后采集图像上的散斑点进行相关匹配计算，跟踪点的运动，获得物体表面的位移信息，具体为：在变形前的图像中选择待测点 $P(x,y)$ 为中心的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 大小的计算子区 S ，让该计算子区 S 在变形后的目标图像中移动，按归一化的最小平方距离相关函数进行相关计算，寻找相关系数 C 出现极值时所对应的点 $P'(x+u,y+v)$ 为中心的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 大小的目标子区 S' ，则 u 、 v 分别为点 $P(x,y)$ 沿 x 方向和 y 方向的位移；归一化的最小平方距离相关函数公式：

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N \left[\frac{A(x_i, y_j) - A_m}{\Delta A} - \frac{B(x'_i, y'_j) - B_m}{\Delta B} \right]^2$$

$$\Delta A = \sqrt{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [A(x_i, y_j) - A_m]^2}$$

$$\Delta B = \sqrt{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [B(x'_i, y'_j) - B_m]^2}$$

$$A_m = \frac{1}{(2N+1)} \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [A(x_i, y_j)]^2$$

$$B_m = \frac{1}{(2N+1)} \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [B(x'_i, y'_j)]^2$$

其中， $A(x,y)$ 是变形前计算子区 S 的中心点 $P(x,y)$ 的灰度值， $B(x,y)$ 是变形后目标子区 S' 中心点 P' 的灰度值； A_m 和 B_m 是变形前子区和变形后目标子区的灰度平方的平均值； N 是正整数， N 的具体数值可以在计算过程中自行设置。 ΔA 是变形前各点灰度与平均灰度的差的平方和， ΔB 是变形后各点灰度与相应平均灰度的差的平方和， C_{ZNSSD} 代表归一化的最小平方距离相关函数公式。

3、根据权利要求 1 所述钢筋锈胀引起混凝土开裂锈胀力的测量方法，其特征在于建立理论模型的具体过程为：先以钢筋截面圆心为坐标原点建立坐标系，其中 x 轴和 y 轴与钢筋混凝土试件的正方形截面的两条边平行，根据弹性力学半逆解法，设应力分量的函数形式为 $\sigma_y = f_1(y)g_1(x)q$ ，

带入应力公式 $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = f_1(y)g_1(x)q$ 及相容方程 $\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} = 0$, 得

$$\frac{\partial^4 [f_1(y)g_3(x)]}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 [f_1(y)g_3(x)]}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 [f_1(y)g_3(x) + xf_2(y) + f_3(y)]}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

考察边界条件, 在上下两个边界上, 应力条件必须完全得到满足; 考虑正面上的边界条件, 该模型满足弹性力学完全接触问题, 即上下两部分既不相互脱离也不相互滑动, 最终得应力函数与应力分量为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \left[\left(\frac{0.2r^2}{d(d^2 - r^2)(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})} y^3 + \frac{1.2r^2}{(d^2 - r^2)} y^2 \right) \left(-2\frac{1}{d^2} x \right) \right] q \\ \sigma_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \left[\left(6\frac{0.2r^2}{d(d^2 - r^2)(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})} y + 2\frac{1.2r^2}{(d^2 - r^2)} \right) \left(-\frac{1}{d^2} x^2 + 1 \right) - \right. \\ \left. \left(-4\frac{1}{d^2} \frac{0.2r^2}{d(d^2 - r^2)(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})} y^3 - 4\frac{1}{d^2} \frac{1.2r^2}{(d^2 - r^2)} y^2 \right) \right] q \\ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial x} = -\left[\left(3\frac{0.2r^2}{d(d^2 - r^2)(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})} y^2 + 2\frac{1.2r^2}{(d^2 - r^2)} y \right) \left(-2\frac{1}{d^2} x \right) \right] q \end{array} \right. \quad (2)$$

代入弹性力学物理方程如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x) \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1 + \mu)}{E} \tau_{xy} \end{array} \right.$$

得到混凝土表面应变与钢筋锈胀力关系模型:

$$q = \frac{\varepsilon_x}{\frac{1}{E_c} \left(\frac{2.4r^2}{d^2 - r^2} \right) \left(-\frac{1}{d^2} x^2 + 1 \right)} \quad (3)$$

其中, E_c 是混凝土弹性模量, 为减小不同混凝土试块对模型的影响, 对上述模型进行修正, 得到:

$$q = \frac{k\varepsilon_x}{\frac{1}{E_c} \left(\frac{2.4r^2}{d^2 - r^2} \right) \left(-\frac{1}{d^2} x^2 + 1 \right)} \quad (4)$$

式中, k 为修正系数, E_c 是混凝土弹性模量; d 为混凝土表面边长; r 为钢筋外半径, ε_x , ε_y , γ_{xy} 分别为点的 x 方向应变、 y 方向应变和剪切应变; σ_x , σ_y , τ_{xy}

分别为点的 x 方向应力、 y 方向应力和剪切应力， E 为弹性模量， μ 为泊松比， $f_1(y)$ 为关于 y 的待定函数， $g_1(x)$ 为关于 x 的待定函数；这样根据数字图像相关方法得到的钢筋混凝土试件表面应变值 ε_x 可以计算得到任一时刻钢筋锈胀力大小 q 。

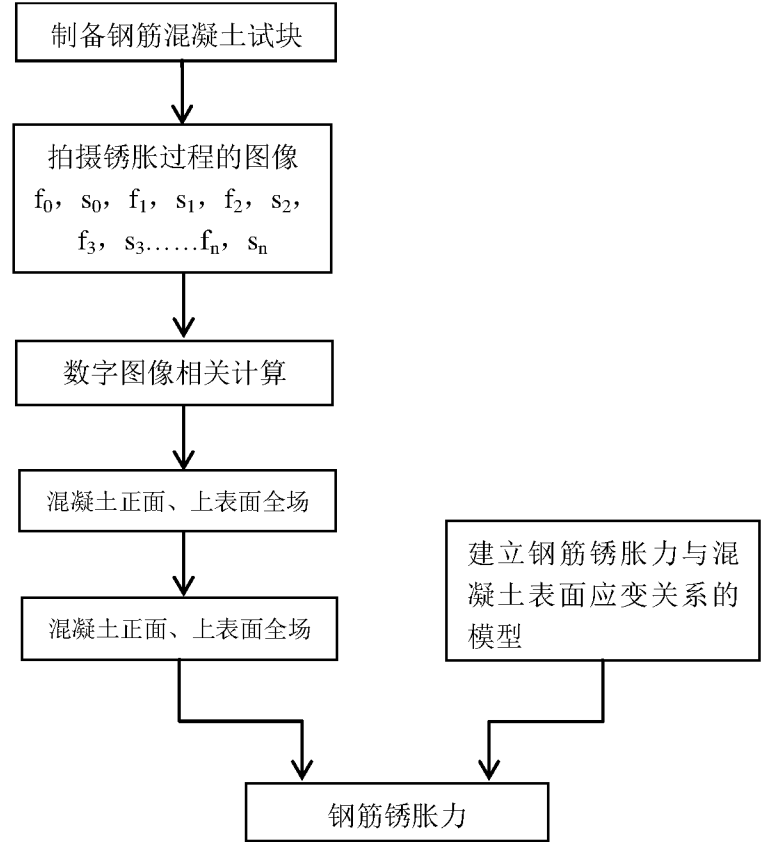


图 1

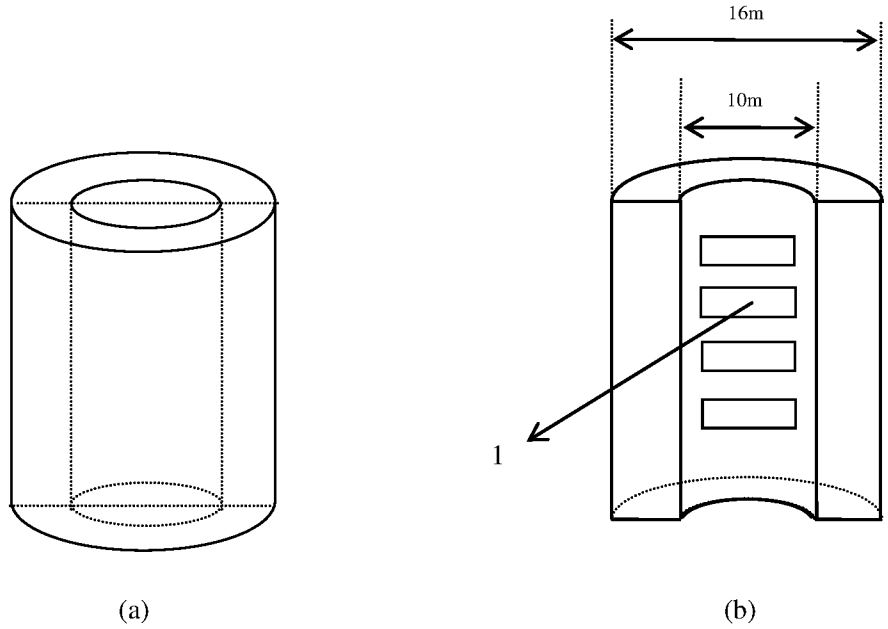


图 2

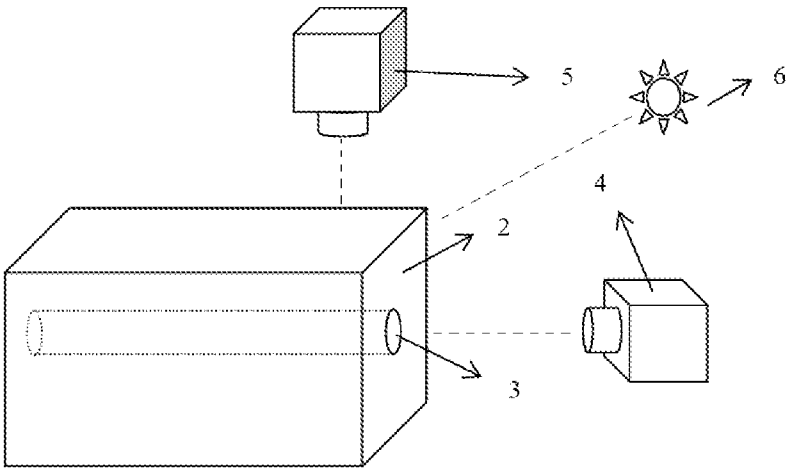


图 3

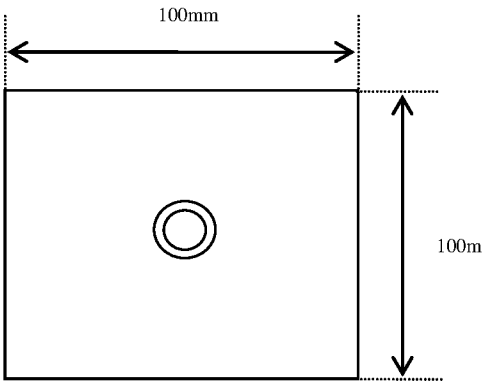


图 4

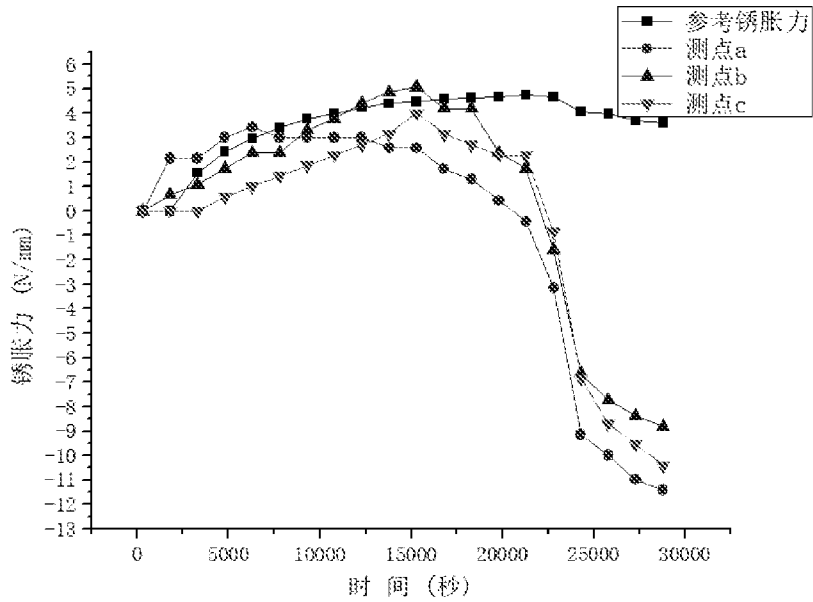


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/120501

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 33/38(2006.01)i; G01L 5/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N33/-;G01L5/-;G01B11/-;G01N17/-;G01N21/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI: 青岛理工大学, 陈凡秀, 张彬, 郭鹏飞, 金祖权, 钢筋, 混凝土, 锈胀力, 锈胀应力, 锈蚀, 腐蚀, 应变, 膨胀, 开裂, 模型, 推导, 数字图像相关, DIC, steel, concrete, rust expansion, corrosion, stress, strain, crack+, model, induc+, digital image correlation

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 108332891 A (QINGDAO TECHNOLOGICAL UNIVERSITY) 27 July 2018 (2018-07-27) description, paragraphs [0048]-[0071], and figures 1-7	1-2
PX	CN 109669028 A (QINGDAO TECHNOLOGICAL UNIVERSITY) 23 April 2019 (2019-04-23) description, paragraphs [0005]-[0032], and figures 1-5	1-3
A	CN 104330023 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 04 February 2015 (2015-02-04) entire document	1-3
A	CN 106770360 A (CHONGQING JIAOTONG UNIVERSITY) 31 May 2017 (2017-05-31) entire document	1-3
A	CN 108489413 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 04 September 2018 (2018-09-04) entire document	1-3
A	JP 2008268123 A (ORIENTAL SHIRAISHI CORP.) 06 November 2008 (2008-11-06) entire document	1-3



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 February 2020

Date of mailing of the international search report

25 February 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/120501

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	高红俐 等 (GAO, Hongli et al.). "基于DIC谐振载荷作用下疲劳裂纹尖端位移应变场测量 (Measurement of Displacement and Strain Fields of Fatigue Crack Tip under Resonant Loading Based on DIC Method)" <i>兵器材料科学与工程 (Ordnance Material Science and Engineering)</i> , Vol. 39, No. (1), 31 January 2016 (2016-01-31), pp. 16-22	1-3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/120501

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	108332891	A	27 July 2018	None			
CN	109669028	A	23 April 2019	None			
CN	104330023	A	04 February 2015	CN	104330023	B	08 February 2017
CN	106770360	A	31 May 2017	None			
CN	108489413	A	04 September 2018	None			
JP	2008268123	A	06 November 2008	JP	5095258	B2	12 December 2012

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/120501

A. 主题的分类 G01N 33/38(2006.01)i; G01L 5/00(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																										
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G01N33/-;G01L5/-;G01B11/-;G01N17/-;G01N21/- 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNPAT, CNKI, EPDOC, WPI; 青岛理工大学, 陈凡秀, 张彬, 郭鹏飞, 金祖权, 钢筋, 混凝土, 锈胀力, 锈胀应力, 锈蚀, 腐蚀, 应变, 膨胀, 开裂, 模型, 推导, 数字图像相关, DIC, steel, concrete, rust expansion, corrosion, stress, strain, crack+, model, induc+, digital image correlation																										
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>CN 108332891 A (青岛理工大学) 2018年 7月 27日 (2018 - 07 - 27) 说明书第[0048]-[0071]段, 图1-7</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109669028 A (青岛理工大学) 2019年 4月 23日 (2019 - 04 - 23) 说明书第[0005]-[0032]段, 图1-5</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104330023 A (浙江大学) 2015年 2月 4日 (2015 - 02 - 04) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106770360 A (重庆交通大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108489413 A (华南理工大学) 2018年 9月 4日 (2018 - 09 - 04) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2008268123 A (ORIENTAL SHIRAIISHI CORP.) 2008年 11月 6日 (2008 - 11 - 06) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>高红俐 等. “基于DIC谐振载荷作用下疲劳裂纹尖端位移应变场测量” 兵器材料科学与工程, 第39卷, 第1期, 2016年 1月 31日 (2016 - 01 - 31), 第16-22页</td> <td>1-3</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	X	CN 108332891 A (青岛理工大学) 2018年 7月 27日 (2018 - 07 - 27) 说明书第[0048]-[0071]段, 图1-7	1-2	PX	CN 109669028 A (青岛理工大学) 2019年 4月 23日 (2019 - 04 - 23) 说明书第[0005]-[0032]段, 图1-5	1-3	A	CN 104330023 A (浙江大学) 2015年 2月 4日 (2015 - 02 - 04) 全文	1-3	A	CN 106770360 A (重庆交通大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文	1-3	A	CN 108489413 A (华南理工大学) 2018年 9月 4日 (2018 - 09 - 04) 全文	1-3	A	JP 2008268123 A (ORIENTAL SHIRAIISHI CORP.) 2008年 11月 6日 (2008 - 11 - 06) 全文	1-3	A	高红俐 等. “基于DIC谐振载荷作用下疲劳裂纹尖端位移应变场测量” 兵器材料科学与工程, 第39卷, 第1期, 2016年 1月 31日 (2016 - 01 - 31), 第16-22页	1-3
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																								
X	CN 108332891 A (青岛理工大学) 2018年 7月 27日 (2018 - 07 - 27) 说明书第[0048]-[0071]段, 图1-7	1-2																								
PX	CN 109669028 A (青岛理工大学) 2019年 4月 23日 (2019 - 04 - 23) 说明书第[0005]-[0032]段, 图1-5	1-3																								
A	CN 104330023 A (浙江大学) 2015年 2月 4日 (2015 - 02 - 04) 全文	1-3																								
A	CN 106770360 A (重庆交通大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文	1-3																								
A	CN 108489413 A (华南理工大学) 2018年 9月 4日 (2018 - 09 - 04) 全文	1-3																								
A	JP 2008268123 A (ORIENTAL SHIRAIISHI CORP.) 2008年 11月 6日 (2008 - 11 - 06) 全文	1-3																								
A	高红俐 等. “基于DIC谐振载荷作用下疲劳裂纹尖端位移应变场测量” 兵器材料科学与工程, 第39卷, 第1期, 2016年 1月 31日 (2016 - 01 - 31), 第16-22页	1-3																								
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																										
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																										
国际检索实际完成的日期 2020年 2月 15日		国际检索报告邮寄日期 2020年 2月 25日																								
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 赵士祯 电话号码 86-(10)-53962374																								

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/120501

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	108332891	A	2018年 7月 27日	无	
CN	109669028	A	2019年 4月 23日	无	
CN	104330023	A	2015年 2月 4日	CN 104330023	B 2017年 2月 8日
CN	106770360	A	2017年 5月 31日	无	
CN	108489413	A	2018年 9月 4日	无	
JP	2008268123	A	2008年 11月 6日	JP 5095258	B2 2012年 12月 12日