



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104062181 A

(43) 申请公布日 2014. 09. 24

(21) 申请号 201410271252. 8

(22) 申请日 2014. 06. 17

(71) 申请人 西安建筑科技大学

地址 710055 陕西省西安市雁塔路 13 号

(72) 发明人 李玲 蔡安江 阮晓光 褚巍

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

代理人 蔡和平

(51) Int. Cl.

G01N 3/08 (2006. 01)

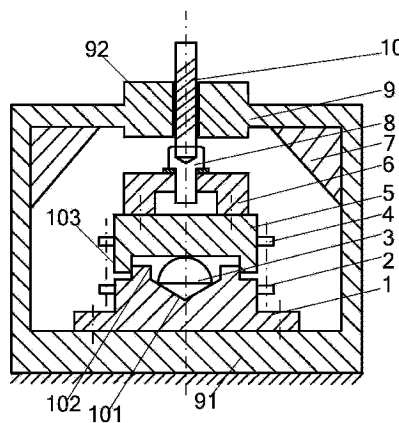
权利要求书4页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

一种获取结合面法向接触刚度的测试装置与建模方法

(57) 摘要

本发明公开一种获取结合面法向接触刚度的测试装置与建模方法,所述装置包括下试件放置平台,下试件放置平台设置于底座上,下试件放置平台顶部设有下小上大的倒锥形凹陷;下试件放置平台顶部设有第一环形凸起,第一环形凸起中心与倒锥形凹陷中心重合;下试件放置于倒锥形凹陷中,下试件球面一侧朝上且高出第一环形凸起,下试件的顶部与上试件底部相接触;上试件底部设有与第一环形凸起相配合的第二环形凸起;上试件上固定有三向力传感器,三向力传感器与内六角头螺钉连接;螺杆的一端与内六角头螺钉连接,另一端穿过测试平台的横梁。本装置结构简单、装卸方便、易于重复试验,解决了结合面法向接触刚度难以测试和准确建模的问题。



1. 一种获取结合面法向接触刚度的测试装置,其特征在于,包括下试件放置平台(1)、电涡流传感器支架(2)、下试件(3)、上试件(5)、感应支架(4)、三向力传感器(6)、内六角头螺钉(8)、测试平台(9)、螺杆(10)、电涡流传感器;

测试平台(9)包括底座(91)和位于底座上部的横梁(92);

下试件放置平台(1)设置于底座(91)上,下试件放置平台(1)顶部设有下小上大的倒锥形凹陷(101);下试件放置平台(1)顶部设有第一环形凸起(102),第一环形凸起(102)中心与倒锥形凹陷(101)中心重合;

下试件(3)放置于倒锥形凹陷(101)中,下试件(3)球面一侧朝上且高出第一环形凸起(102),下试件(3)的顶部与上试件(5)底部相接触;

上试件(5)底部设有与第一环形凸起(102)相配合的第二环形凸起(103);上试件(5)上固定有三向力传感器(6),三向力传感器(6)与内六角头螺钉(8)连接;螺杆(10)的一端与内六角头螺钉(8)连接,另一端穿过测试平台(9)的横梁(92),螺杆(10)与测试平台(9)的横梁(92)通过螺纹连接。

2. 根据权利要求1所述的获取结合面法向接触刚度的测试装置,其特征在于,上试件(5)与下试件(3)通过螺杆(10)在轴向力下相互接触;上试件(5)、下试件(3)、内六角头螺钉(8)、三向力传感器(6)与下试件放置平台(1)在同一轴对称线上。

3. 根据权利要求1所述的获取结合面法向接触刚度的测试装置,其特征在于,三向力传感器(6)用于获取和调整三个方向上的力,使得结合面仅受轴向力,而其他方向的力为零。

4. 根据权利要求1所述的获取结合面法向接触刚度的测试装置,其特征在于,上试件(5)上安装有感应支架(4),下试件放置平台(1)上安装有电涡流传感器支架(2),电涡流传感器支架(2)上安装有电涡流传感器,用于获得上试件(5)和下试件(3)接触时的相对变形量。

5. 根据权利要求1所述的获取结合面法向接触刚度的测试装置,其特征在于,下试件(3)上半部分为半圆球,下半部分为与倒锥形凹陷(101)相配合的圆锥体。

6. 根据权利要求4所述的获取结合面法向接触刚度的测试装置,其特征在于,还包括信号采集系统和计算机,所述三向力传感器(6)和电涡流传感器连接所述信号采集系统,所述信号采集系统连接计算机。

7. 一种获取结合面法向接触刚度的建模方法,其特征在于,包括:应用权利要求1至6中任一项所述的获取结合面法向接触刚度的测试装置测量单个刚性光滑平面与球面接触的力-位移关系,根据该关系建立单个微凸体的法向接触刚度模型,然后通过微分链式法则建立整体结构的结合面法向接触刚度模型。

8. 根据权利要求7所述的建模方法,其特征在于,单个微凸体的接触行为在弹性区域和完全塑性区域内利用 Hertz 接触理论来描述,而介于两者之间的弹塑性区域的接触行为根据边界条件建立弹塑性变形时接触载荷与变形量之间的关系:

1) 微凸体弹性接触变形机制

假设微凸体顶端为半圆球状,根据 Hertz 接触理论分析微凸体的变形行为,由 Hertz 接触理论的结果,曲率半径为 R 的圆球与平面接触时,微凸体在纯弹性区域的变形量 ω 与接触载荷 f_c 的关系如下:

$$f_e = \frac{4}{3} ER^{1/2} \omega^{3/2} \quad (1)$$

式中, R 表示曲率半径, E 表示两接触材料的复合弹性模量, $\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$, E_1 和 E_2 分别表示两接触材料的弹性模量, ν_1 和 ν_2 分别表示两接触材料的泊松比;

2) 微凸体完全塑性接触变形机制

当微凸体的平均接触压载荷超过材料的硬度值 H 时, 此时微凸体处于完全塑性变形区域, 其接触载荷 f_p 与变形量 ω 之间的关系为:

$$f_p = 2\pi HR\omega \quad (2)$$

式中, H 表示两接触面中较软材料的硬度;

3) 微凸体弹塑性接触变形机制

假设微凸体进入弹塑性变形区间后的接触半径为 r, 其平均接触压力 P_{ave} 与变形量 ω 之间关系为:

$$P_{ave} = b_1 + b_2 \ln \frac{\omega}{r} \quad (3)$$

式中, b_1 和 b_2 为常量;

考虑微凸体接触半径 r 与变形量 ω 关系:

$$\begin{cases} r = (R\omega)^{1/2} & (\omega \leq \omega_e) \\ r = (2R\omega)^{1/2} & (\omega \geq \omega_p) \end{cases} \quad (4)$$

式中, ω_e 表示弹性临界变形量, $\omega_e = \left(\frac{\pi k H}{2E}\right)^2 R$; ω_p 为完全塑性临界点, $\omega_p = 110 \omega_e$;

所以, 假设微凸体接触半径 r 在弹塑性区域内的表达式为:

$$r = (bR\omega)^{1/2} \quad (5)$$

式中, b 表示变系数, $1 < b < 2$;

由式 (3) 和式 (5) 将平均接触压力变为:

$$P_{ave} = b_3 + b_4 \ln \omega \quad (6)$$

式中, $b_3 = b_1 + b_2 \ln b - 0.5 b_2 \ln R$, $b_4 = 0.5 b_2$;

由于在完全弹性临界点和完全塑性临界点上, 接触载荷是连续和光滑的变化, 所以当 $\omega = \omega_e$ 时,

$$b_3 + b_4 \ln \omega_e = kH \quad (7)$$

式中, k 为硬度系数, 与较软材料的泊松比 ν 有关, $k = 0.4645 + 0.3141 \nu + 0.1943 \nu^2$;

当 $\omega = \omega_p$ 时,

$$b_3 + b_4 \ln \omega_p = H \quad (8)$$

联立式 (7) 和式 (8), 得在弹塑性区间平均接触压力 P_{ave} 为:

$$P_{ave} = H \left[1 - (1-k) \frac{\ln \omega_p - \ln \omega}{\ln \omega_p - \ln \omega_e} \right] \quad (9)$$

根据在变形状态转变的临界点处微凸体真实接触面积与接触载荷转化均满足连续和

光滑条件：

(i) 当 $\omega = \omega_e$ 时，

$$a_{ep} = a_e, \quad \frac{da_{ep}}{d\omega} = \frac{da_e}{d\omega} \quad (10)$$

式中， a_{ep} 表示弹塑性接触时的接触面积， a_e 表示弹性接触时的接触面积， a_p 表示塑性接触时的接触面积；

(ii) 当 $\omega = \omega_p$ 时，

$$a_{ep} = a_p, \quad \frac{da_{ep}}{d\omega} = \frac{da_p}{d\omega} \quad (11)$$

根据上述边界条件，构造以 ω 为自变量的弹塑性变形区间的接触面积 a_{ep} 多项式

$$a_{ep} = a_1 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^3 + a_2 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^2 + a_3 \frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} + a_4 \quad (12)$$

式中， a_1, a_2, a_3, a_4 为待定系数；

由式 (10)、式 (11) 和式 (12) 可求得 $a_1 = 3 - 2\omega$ ， $a_2 = 3\omega - 4$ ， $a_3 = 1$ ， $a_4 = \omega$ ；所以，弹塑性变形的接触面积为

$$a_{ep} = \pi R \varphi_1(\omega) \quad (13)$$

$$\text{式中，} \varphi_1(\omega) = (3 - 2\omega) \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^3 + (3\omega - 4) \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^2 + \frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} + \omega;$$

所以，接触载荷

$$f_{ep} = \pi R H \left[1 - (1 - \mu) \frac{\ln \omega_p - \ln \omega}{\ln \omega_p - \ln \omega_e} \right] \varphi_1(\omega) \quad (14)$$

式中， μ 为平均接触压力系数，与较软材料的泊松比 ν 有关， $\mu = 0.4645 + 0.3141\nu + 0.1943\nu^2$ ；

4) 结合面法向接触刚度模型

单个微凸体法向接触刚度表示为：

$$k = \frac{df}{d\omega} \quad (15)$$

设单个微凸体在完全弹性、弹塑性、完全塑性三个变形阶段的接触刚度分别为 k_e 、 k_{ep} 、 k_p ，其表达式分别为：

$$k_e = 2ER^{1/2} \omega^{1/2} \quad \omega < \omega_e \quad (16)$$

$$k_{ep} = \pi R H \left(\kappa_2(\omega) + \frac{\varphi_3 \varphi_1(\omega)}{\omega} - \ln \frac{\omega_p}{\omega} \varphi_3 \varphi_2(\omega) \right) \quad \omega_e \leq \omega \leq \omega_p \quad (17)$$

$$k_p = 2\pi R H \quad \omega > \omega_p \quad (18)$$

式中，

$$\varphi_2(\omega) = -2 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^3 + 6(2 - \omega) \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^2 + 2(3\omega - 4) \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right) + 2, \quad \varphi_3 = \frac{(1 - \mu)}{\ln \omega_p - \ln \omega_e};$$

所以,总的接触刚度为

$$K_t = K_e + K_{ep} + K_p = \eta A_n \int_d^{d+\omega_e} k_e g(z) dz + \int_{d+\omega_e}^{d+\omega_p} k_{ep} g(z) dz + \int_{d+\omega_p}^{\infty} k_p g(z) dz \quad (19)$$

式中, A_n 表示名义接触面积; η 表示微凸体分布密度; $g(z)$ 表示微凸体高度分布的概率密度函数, $g(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\theta)^2}{2\sigma^2}}$, z 表示微凸体的高度, σ 表示螺栓结合面高度分布的标准偏差, θ 表示螺栓结合面的平均高度; d 表示微凸体两表面的平均距离, $d = z - \omega$ 。

9. 根据权利要求 8 所述的建模方法,其特征在于,如果在名义接触面积 A_n 上有 N 个微凸体,则结合面上微凸体数量的期望为 $n = N \int_d^{\infty} g(z) dz = \eta A_n \int_d^{\infty} g(z) dz$ 。

10. 根据权利要求 8 所述的建模方法,其特征在于,根据 ω_e 和 ω_p 判断试件是处于弹性、弹塑性或塑性变形中的哪一种,针对不同的接触状态分别选用式 (1)、式 (2)、式 (10) 计算上下试件所受到的法向力;然后根据式 (11) 求得不同阶段的刚度,最终建立结合面法向接触刚度模型。

一种获取结合面法向接触刚度的测试装置与建模方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械结构的结合面技术领域,涉及一种获取结合面法向接触刚度的测试装置与建模方法。

背景技术

[0002] 由于结合面丰富和复杂的动力学特性主要来源于微观接触表面上无数个微凸体间的相互影响、相互制约和相互依赖。这种相互作用在动力学系统中的表现就是系统状态变量之间的相互耦合,使得在结合面上既有大量数目的局部接触单元构成,又有复杂的能量耗散行为出现,这种接触和能量耗散行为对机械结构系统的初始条件有敏感的依赖性,它的变化过程有不稳定的随机性以及时间和空间的不规则性。所以,需从微观角度上,通过对粗糙表面的三维表征和对微凸体间相互影响机理的揭示来研究结合面的动态特性,建立具有通用性的结合面刚度模型。

[0003] 为研究结合面的动态特性,通过微观接触理论建立具有通用性的结合面刚度模型,通常结合面单个微凸体的接触可简化为一个刚性光滑平面与一个等同粗糙表面接触,而获取单个微凸体在接触时的相关参数极为困难。同时,由于弹性变形机制和塑性变形机制可通过 Hertz 接触理论来描述,而介于两者之间的弹塑性区域的接触行为极其复杂,难以准确揭示弹塑性变形时接触载荷与变形量之间的关系。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种获取结合面法向接触刚度的测试装置与建模方法,解决了现有技术难以准确测试结合面法向接触刚度的问题。

[0005] 为了实现上述目的,本发明采取了如下技术方案:

[0006] 一种获取结合面法向接触刚度的测试装置,包括下试件放置平台、电涡流传感器支架、下试件、上试件、感应支架、三向力传感器、内六角头螺钉、测试平台、螺杆、电涡流传感器;测试平台包括底座和位于底座上部的横梁;下试件放置平台设置于底座上,下试件放置平台顶部设有下小上大的倒锥形凹陷;下试件放置平台顶部设有第一环形凸起,第一环形凸起中心与倒锥形凹陷中心重合;下试件放置于倒锥形凹陷中,下试件球面一侧朝上且高出第一环形凸起,下试件的顶部与上试件底部相接触;上试件底部设有与第一环形凸起相配合的第二环形凸起;上试件上固定有三向力传感器,三向力传感器与内六角头螺钉连接;螺杆的一端与内六角头螺钉连接,另一端穿过测试平台的横梁,螺杆与测试平台的横梁通过螺纹连接。

[0007] 本发明进一步的改进在于:上试件与下试件通过螺杆在轴向力下相互接触;上试件、下试件、内六角头螺钉、三向力传感器与下试件放置平台在同一轴对称线上。

[0008] 本发明进一步的改进在于:三向力传感器用于获取和调整三个方向上的力,使得结合面仅受轴向力,而其他方向的力为零。

[0009] 本发明进一步的改进在于:上试件上安装有感应支架,下试件放置平台上安装有

电涡流传感器支架,电涡流传感器支架上安装有电涡流传感器,用于获得上试件和下试件接触时的相对变形量。

[0010] 本发明进一步的改进在于:下试件上半部分为半圆球,下半部分为与倒锥形凹陷相配合的圆锥体。

[0011] 本发明进一步的改进在于:还包括信号采集系统和计算机,所述三向力传感器和电涡流传感器连接所述信号采集系统,所述信号采集系统连接计算机。

[0012] 本发明进一步的改进在于:根据下试件放置平台结构设计,下试件可选用不同半径的球体,从而满足不同曲率半径下的球面与刚体平面接触。

[0013] 本发明进一步的改进在于:所述上试件和下试件可选用相同或不同热处理方式、加工方法以及材料进行配对。

[0014] 一种获取结合面法向接触刚度的建模方法,包括:应用所述的获取结合面法向接触刚度的测试装置测量单个刚性光滑平面(上试件)与球面(下试件)接触的力-位移关系,根据该关系建立单个微凸体的法向接触刚度模型,然后通过微分链式法则建立整体结构的结合面法向接触刚度模型。

[0015] 本发明进一步的改进在于:单个微凸体的接触行为在弹性区域和完全塑性区域内利用 Hertz 接触理论来描述,而介于两者之间的弹塑性区域的接触行为根据边界条件建立弹塑性变形时接触载荷与变形量之间的关系:

[0016] 1) 微凸体弹性接触变形机制

[0017] 假设微凸体顶端为半圆球状,根据 Hertz 接触理论分析微凸体的变形行为,由 Hertz 接触理论的结果,曲率半径为 R 的圆球与平面接触时,微凸体在纯弹性区域的变形量 ω 与接触载荷 f_e 的关系如下:

$$[0018] \quad f_e = \frac{4}{3} ER^{1/2} \omega^{3/2} \quad (1)$$

[0019] 式中, R 表示曲率半径, E 表示两接触材料的复合弹性模量, $\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$, E_1 和 E_2 分别表示两接触材料的弹性模量, ν_1 和 ν_2 分别表示两接触材料的泊松比;

[0020] 2) 微凸体完全塑性接触变形机制

[0021] 当微凸体的平均接触压载荷超过材料的硬度值 H 时,此时微凸体处于完全塑性变形区域,其接触载荷 f_p 与变形量 ω 之间的关系为:

$$[0022] \quad f_p = 2 \pi HR \omega \quad (2)$$

[0023] 式中, H 表示两接触面中较软材料的硬度;

[0024] 3) 微凸体弹塑性接触变形机制

[0025] 假设微凸体进入弹塑性变形区间后的接触半径为 r, 其平均接触压力 P_{ave} 与变形量 ω 之间关系为:

$$[0026] \quad P_{ave} = b_1 + b_2 \ln \frac{\omega}{r} \quad (3)$$

[0027] 式中, b_1 和 b_2 为常量,由微凸体接触半径 r 决定;

[0028] 考虑微凸体接触半径 r 与变形量 ω 关系:

$$[0029] \quad \begin{cases} r = (R\omega)^{1/2} & (\omega \leq \omega_e) \\ r = (2R\omega)^{1/2} & (\omega \geq \omega_p) \end{cases} \quad (4)$$

[0030] 式中, ω_e 表示弹性临界变形量, $\omega_e = \left(\frac{\pi kH}{2E}\right)^2 R$; ω_p 为完全塑性临界点, $\omega_p =$

110 ω_e ;

[0031] 所以, 假设微凸体接触半径 r 在弹塑性区域内的表达式为:

$$[0032] \quad r = (bR\omega)^{1/2} \quad (5)$$

[0033] 式中, b 表示变系数, $1 < b < 2$;

[0034] 由式 (3) 和式 (5) 将平均接触压力变为:

$$[0035] \quad P_{ave} = b_3 + b_4 \ln \omega \quad (6)$$

[0036] 式中, $b_3 = b_1 + b_2 \ln b - 0.5b_2 \ln R$, $b_4 = 0.5b_2$;

[0037] 由于在完全弹性临界点和完全塑性临界点上, 接触载荷是连续和光滑的变化, 所以当 $\omega = \omega_e$ 时,

$$[0038] \quad b_3 + b_4 \ln \omega_e = kH \quad (7)$$

[0039] 式中, k 为硬度系数, 与较软材料的泊松比 ν 有关, $k = 0.4645 + 0.3141\nu + 0.1943\nu^2$;

[0040] 当 $\omega = \omega_p$ 时,

$$[0041] \quad b_3 + b_4 \ln \omega_p = H \quad (8)$$

[0042] 联立式 (7) 和式 (8), 得在弹塑性区间平均接触压力 P_{ave} 为:

$$[0043] \quad P_{ave} = H \left[1 - (1-k) \frac{\ln \omega_p - \ln \omega}{\ln \omega_p - \ln \omega_e} \right] \quad (9)$$

[0044] 根据在变形状态转变的临界点处微凸体真实接触面积与接触载荷转化均满足连续和光滑条件:

[0045] (i) 当 $\omega = \omega_e$ 时,

$$[0046] \quad a_{ep} = a_e, \quad \frac{da_{ep}}{d\omega} = \frac{da_e}{d\omega} \quad (10)$$

[0047] 式中, a_{ep} 表示弹塑性接触时的接触面积, a_e 表示弹性接触时的接触面积, a_p 表示塑性接触时的接触面积;

[0048] (ii) 当 $\omega = \omega_p$ 时,

$$[0049] \quad a_{ep} = a_p, \quad \frac{da_{ep}}{d\omega} = \frac{da_p}{d\omega} \quad (11)$$

[0050] 根据上述边界条件, 构造以 ω 为自变量的弹塑性变形区间的接触面积 a_{ep} 多项式

$$[0051] \quad a_{ep} = a_1 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^3 + a_2 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^2 + a_3 \frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} + a_4 \quad (12)$$

[0052] 式中, a_1, a_2, a_3, a_4 为待定系数;

[0053] 由式 (10)、式 (11) 和式 (12) 可求得 $a_1 = 3 - 2\omega$, $a_2 = 3\omega - 4$, $a_3 = 1$, $a_4 = \omega$;

所以,弹塑性变形的接触面积为

[0054]

$$a_{ep} = \pi R \varphi_1(\omega) \quad (13)$$

[0055] 所以,接触载荷

[0056]

$$f_{ep} = \pi R H \left[1 - (1 - \mu) \frac{\ln \omega_p - \ln \omega}{\ln \omega_p - \ln \omega_e} \right] \varphi_1(\omega) \quad (14)$$

[0057] 式中, μ 为平均接触压力系数,与较软材料的泊松比 ν 有关, $\mu = 0.4645 + 0.3141 \nu + 0.1943 \nu^2$;

[0058] 4) 结合面法向接触刚度模型

[0059] 单个微凸体法向接触刚度表示为:

$$[0060] \quad k = \frac{df}{d\omega} \quad (15)$$

[0061] 设单个微凸体在完全弹性、弹塑性、完全塑性三个变形阶段的接触刚度分别为 k_e 、 k_{ep} 、 k_p ,其表达式分别为:

$$[0062] \quad k_e = 2ER^{1/2} \omega^{1/2} \quad \omega < \omega_e \quad (16)$$

[0063]

$$k_{ep} = \pi R H \left(\kappa_2(\omega) + \frac{\varphi_3 \varphi_1(\omega)}{\omega} - \ln \frac{\omega_p}{\omega} \varphi_3 \varphi_2(\omega) \right) \quad \omega_e \leq \omega \leq \omega_p \quad (17)$$

$$[0064] \quad k_p = 2 \pi R H \quad \omega > \omega_p \quad (18)$$

[0065] 式中,

$$\varphi_2(\omega) = -2 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^3 + 6(2 - \omega) \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^2 + 2(3\omega - 4) \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right) + 2, \quad \varphi_3 = \frac{(1 - \mu)}{\ln \omega_p - \ln \omega_e};$$

[0066] 所以,总的接触刚度为

[0067]

$$K_t = K_e + K_{ep} + K_p = \eta A_n \int_d^{d+\omega_e} k_e g(z) dz + \int_{d+\omega_e}^{d+\omega_p} k_{ep} g(z) dz + \int_{d+\omega_p}^{\infty} k_p g(z) dz \quad (19)$$

[0068] 式中, A_n 表示名义接触面积; η 表示微凸体分布密度; $g(z)$ 表示微凸体高度分布

的概率密度函数, $g(z) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\theta)^2}{2\sigma^2}}$, z 表示微凸体的高度, θ 表示螺栓结合面的平均高

度; d 表示微凸体两表面的平均距离, $d = z - \omega$ 。

[0069] 本发明进一步的改进在于:如果在名义接触面积 A_n 上有 N 个微凸体,则结合面上

微凸体数量的期望为 $n = N \int_d^{\infty} g(z) dz = \eta A_n \int_d^{\infty} g(z) dz$ 。

[0070] 本发明进一步的改进在于:根据 ω_e 和 ω_p 判断试件是处于弹性、弹塑性或塑性变形中的哪一种,针对不同的接触状态分别选用式 (1)、式 (2)、式 (10) 计算上下试件所受到的法向力;然后根据式 (11) 求得不同阶段的刚度,最终建立结合面法向接触刚度模型。

[0071] 结合面法向接触刚度的建模方法,包括:首先确定完全弹性临界点和完全塑性临界点;其次根据 Hertz 接触理论,建立单个微凸体在弹性区域和完全塑性区域内接触载荷与变形量之间的函数关系;然后建立单个微凸体弹塑性区域内,接触载荷与变形量之间的函数关系;接着建立单个微凸体在弹性、弹塑性与塑性区域内的法向接触刚度;最后建立结合面法向接触刚度。

[0072] 本建模方法进一步的改进在于:包括:微观上结合面单个微凸体的研究,采用宏观思维将其等效为刚性光滑平面与球面接触进行实验研究;建立弹塑性区间内单个微凸体的接触载荷与变形量之间的函数关系;从微观角度建立了具有通用性的结合面法向接触刚度模型。

[0073] 相对于现有技术,本发明的优点在于:

[0074] (1) 从实验装置可看出,测试出来的特性参数仅仅是上下试件之间结合面的法向受力与法向变形,减少了测量的物理量的个数,而且采用的是直接测量法。

[0075] (2) 为了便于对影响结合面特性的各基本影响因素进行研究,本实验装置结构简单、易于更换、易于定位,能够进行重复试验。

[0076] (3) 由于仅仅是测试上下试件之间结合面的法向受力与法向变形,所以保证相关结合面数据能够从实验装置系统的动特性中较容分离出来。

[0077] (4) 通过将螺杆对结合面施加压力,可以方便设置结合面所受力的大小,从而便于控制整个实验过程与结果。

[0078] (5) 由于弹塑性区域的接触行为极其复杂,通过分析在完全弹性临界点和完全塑性临界点上,接触载荷具有连续和光滑的特点,建立接触载荷与变形量之间的函数关系,从而能够揭示微凸体在接触过程中的复杂行为机制。

[0079] (6) 通过分形理论和接触力学所建立的结合面法向接触刚度模型更具有通用性和工程实用性。

[0080] 本装置的设计是基于分形思想,将结合面的接触等效为无数个刚性平面与球体接触的和,为研究单个微凸体的接触机理,搭建平面与球体接触的法向刚度测试装置,从而能够求得不同热处理方式、不同加工方法以及不同材料相互接触时的法向接触刚度。本装置的有益效果是,较方便的将被测对象的特性从实验系统的特性中分离出来,排除其他因素对研究对象的影响;本装置结构简单、装卸方便,易于重复试验。另外,利用本建模方法解决了建立通用性的法向接触刚度模型的问题。

附图说明

[0081] 图 1 是本发明测试结合面法向接触刚度的测试装置的原理图。

[0082] 图 2 是单个微凸体接触变形示意图。

[0083] 图 3 是本测试装置上试件俯视图。

[0084] 图 4 是本测试装置下试件放置平台俯视图。

[0085] 图 5 是感应支架与放置电涡流传感器支架图;其中图 5(a) 为主视图,图 5(b) 为俯视图。

[0086] 图中,1. 下试件放置平台,2. 电涡流传感器支架,3. 下试件,4. 感应支架,5. 上试件,6. 三向力传感器,7. 肋板,8. 内六角头螺钉,9. 测试平台,10. 螺杆。

具体实施方式

[0087] 以下结合工作原理和结构附图对本发明的结合面法向接触刚度测试装置与建模方法作进一步详细说明。

[0088] 如图 1 至图 5 所示,本发明一种获取结合面法向接触刚度的测试装置,包括下试件放置平台 1、电涡流传感器支架 2、下试件 3、上试件 5、感应支架 4、三向力传感器 6、内六角头螺钉 8、测试平台 9、螺杆 10、电涡流传感器、信号采集系统和计算机。

[0089] 测试平台 9 包括底座 91 和位于底座上部的横梁 92。

[0090] 下试件放置平台 1 设置于底座 91 上,下试件放置平台 1 顶部设有下小上大的倒锥形凹陷 101,该倒锥形凹陷 101 内可放置不同大小的半圆球形下试件 3;下试件放置平台 1 顶部设有第一环形凸起 102,第一环形凸起 102 中心与倒锥形凹陷 101 中心重合。

[0091] 下试件 3 上半部分为半圆球,下半部分为与倒锥形凹陷 101 相配合的圆锥体;这种设计的优点:(i) 下试件 3 自身刚度增大;(ii) 与下试件放置平台 1 接触面积增大,使得利用电涡流传感器测试上下试件相对位移量准确;(iii) 具有自定位功能,使得整个装置沿同一轴线对称布置。所述上试件 5 和下试件 3 可选用相同或不同热处理方式、加工方法以及材料进行配对。另外可选用不同大小的下试件 3,获取不同曲率下刚性平面与球面接触时的力-位移关系,从而提高本实验平台的适用范围。

[0092] 上试件 5 底部设有与第一环形凸起 102 相配合的第二环形凸起 103,用以保证上试件 5 与下试件 3 接触时同轴度相同,下试件 3 的球面朝上且高出第一环形凸起 102,下试件 3 的顶部与上试件 5 底部相接触;上试件 5 与三向力传感器 6 通过两个螺钉固定,三向力传感器 6 顶部中心与内六角头螺钉 8 连接;螺杆 10 的一端与内六角头螺钉 8 连接,另一端通过测试平台 9 的横梁 92 与力矩扳手连接,螺杆 10 与测试平台 9 的横梁 92 通过螺纹连接。螺杆 10 一端为光杆,与内六角头螺钉 8 接触,起到传动法向力的作用;另一端为六边形,可方便与力矩扳手配合;中间为螺纹,与测试平台 9 配合,使得预紧力的传递仅沿轴向,而其他方向的分力为零。

[0093] 下试件放置平台 1 外周设有电涡流传感器支架 2,电涡流传感器支架 2 上安装有电涡流传感器;上试件 5 外周设有与电涡流传感器支架 2 位置相对的感应支架 4。通过调节螺杆 10 的预紧力大小,利用三向力传感器 6 和电涡流传感器获取结合面法向力与位移关系。

[0094] 将上述试件从下向上逐一装配好后,利用力矩扳手对螺杆 10 施加力,根据力的传递性质,使得上试件 5 与下试件 3 充分接触,通过三向力传感器 6 可获得结合面法向力的大小,为保证整个装置始终处于同一轴线上,调节螺杆 10 和内六角头螺钉 8 的连接,使得从三向力传感器 6 中显示除法向受力外,其他受力均为零。

[0095] 本发明一种获取结合面法向接触刚度的建模方法,是基于分形理论将结合面等效为刚性光滑平面与球面接触,进而研究建立结合面法向接触刚度模型。首先研究单个刚性光滑平面与球面接触的力-位移关系,根据该关系建立单个微凸体(本发明中下述微凸体即为上述下试件)的法向接触刚度模型,然后通过微分链式法则建立整体结构的结合面法向接触刚度模型。本方法所利用测试装置结构简单、装卸方便、易于重复试验,解决了结合面法向接触刚度难以测试和准确建模的问题。

[0096] 单个微凸体的接触行为在弹性区域和完全塑性区域内利用 Hertz 接触理论来描

述,而介于两者之间的弹塑性区域的接触行为极为复杂;但是在完全弹性临界点和完全塑性临界点上,接触载荷的变化是连续和光滑的变化,所以根据边界条件建立弹塑性变形时接触载荷与变形量之间的关系:

[0097] 1) 微凸体弹性接触变形机制

[0098] 假设微凸体顶端为半圆球状,根据 Hertz 接触理论分析微凸体的变形行为,由 Hertz 接触理论的结果,曲率半径为 R 的圆球与平面接触时,微凸体在纯弹性区域的变形量 ω 与接触载荷 f_e 的关系如下:

$$[0099] \quad f_e = \frac{4}{3} ER^{1/2} \omega^{3/2} \quad (1)$$

[0100] 式中, R 表示曲率半径, E 表示两接触材料的复合弹性模量, $\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$, E_1

和 E_2 分别表示两接触材料的弹性模量, ν_1 和 ν_2 分别表示两接触材料的泊松比;

[0101] 2) 微凸体完全塑性接触变形机制

[0102] 当微凸体的平均接触压载荷超过材料的硬度值 H 时,此时微凸体处于完全塑性变形区域,其接触载荷 f_p 与变形量 ω 之间的关系为:

$$[0103] \quad f_p = 2\pi HR\omega \quad (2)$$

[0104] 式中, H 表示两接触面中较软材料的硬度;

[0105] 3) 微凸体弹塑性接触变形机制

[0106] 假设微凸体进入弹塑性变形区间后的接触半径为 r ,其平均接触压力 P_{ave} 与变形量 ω 之间关系为:

$$[0107] \quad P_{ave} = b_1 + b_2 \ln \frac{\omega}{r} \quad (3)$$

[0108] 式中, b_1 和 b_2 为常量,由微凸体接触半径 r 决定;

[0109] 考虑微凸体接触半径 r 与变形量 ω 关系:

$$[0110] \quad \begin{cases} r = (R\omega)^{1/2} & (\omega \leq \omega_e) \\ r = (2R\omega)^{1/2} & (\omega \geq \omega_p) \end{cases} \quad (4)$$

[0111] 式中, ω_e 表示弹性临界变形量, $\omega_e = \left(\frac{\pi kH}{2E}\right)^2 R$; ω_p 为完全塑性临界点, $\omega_p =$

$110\omega_e$;

[0112] 所以,假设微凸体接触半径 r 在弹塑性区域内的表达式为:

$$[0113] \quad r = (bR\omega)^{1/2} \quad (5)$$

[0114] 式中, b 表示变系数, $1 < b < 2$;

[0115] 由式 (3) 和式 (5) 将平均接触压力变为:

$$[0116] \quad P_{ave} = b_3 + b_4 \ln \omega \quad (6)$$

[0117] 式中, $b_3 = b_1 + b_2 \ln b - 0.5b_2 \ln R$, $b_4 = 0.5b_2$;

[0118] 由于在完全弹性临界点和完全塑性临界点上,接触载荷是连续和光滑的变化,所以当 $\omega = \omega_e$ 时,

$$[0119] \quad b_3 + b_4 \ln \omega_e = kH \quad (7)$$

[0120] 式中, k 为硬度系数, 与较软材料的泊松比 ν 有关, $k = 0.4645 + 0.3141\nu + 0.1943\nu^2$;

[0121] 当 $\omega = \omega_p$ 时,

$$[0122] \quad b_3 + b_4 \ln \omega_p = H \quad (8)$$

[0123] 联立式 (7) 和式 (8), 得在弹塑性区间平均接触压力 P_{ave} 为:

$$[0124] \quad P_{ave} = H \left[1 - (1-k) \frac{\ln \omega_p - \ln \omega}{\ln \omega_p - \ln \omega_e} \right] \quad (9)$$

[0125] 根据在变形状态转变的临界点处微凸体真实接触面积与接触载荷转化均满足连续和光滑条件:

[0126] (i) 当 $\omega = \omega_e$ 时,

$$[0127] \quad a_{ep} = a_e, \quad \frac{da_{ep}}{d\omega} = \frac{da_e}{d\omega} \quad (10)$$

[0128] 式中, a_{ep} 表示弹塑性接触时的接触面积, a_e 表示弹性接触时的接触面积, a_p 表示塑性接触时的接触面积;

[0129] (ii) 当 $\omega = \omega_p$ 时,

$$[0130] \quad a_{ep} = a_p, \quad \frac{da_{ep}}{d\omega} = \frac{da_p}{d\omega} \quad (11)$$

[0131] 根据上述边界条件, 构造以 ω 为自变量的弹塑性变形区间的接触面积 a_{ep} 多项式

$$[0132] \quad a_{ep} = a_1 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^3 + a_2 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^2 + a_3 \frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} + a_4 \quad (12)$$

[0133] 式中, a_1, a_2, a_3, a_4 为待定系数;

[0134] 由式 (10)、式 (11) 和式 (12) 可求得 $a_1 = 3 - 2\omega$, $a_2 = 3\omega - 4$, $a_3 = 1$, $a_4 = \omega$;

所以, 弹塑性变形的接触面积为

[0135]

$$a_{ep} = \pi R \varphi_1(\omega) \quad (13)$$

[0136] 所以, 接触载荷

[0137]

$$f_{ep} = \pi R H \left[1 - (1-\mu) \frac{\ln \omega_p - \ln \omega}{\ln \omega_p - \ln \omega_e} \right] \varphi_1(\omega) \quad (14)$$

[0138] 式中, μ 为平均接触压力系数, 与较软材料的泊松比 ν 有关, $\mu = 0.4645 + 0.3141\nu + 0.1943\nu^2$;

[0139] 4) 结合面法向接触刚度模型

[0140] 单个微凸体法向接触刚度表示为:

$$[0141] \quad k = \frac{df}{d\omega} \quad (15)$$

[0142] 设单个微凸体在完全弹性、弹塑性、完全塑性三个变形阶段的接触刚度分别为 k_e 、 k_{ep} 、 k_p , 其表达式分别为:

$$[0143] \quad k_e = 2ER^{1/2} \omega^{1/2} \quad \omega < \omega_e \quad (16)$$

[0144]

$$k_{ep} = \pi RH \left(\kappa_2(\omega) + \frac{\varphi_3 \varphi_1(\omega)}{\omega} - \ln \frac{\omega_p}{\omega} \varphi_3 \varphi_2(\omega) \right) \quad \omega_e \leq \omega \leq \omega_p \quad (17)$$

$$[0145] \quad k_p = 2 \pi RH \quad \omega > \omega_p \quad (18)$$

[0146] 式中,

$$\varphi_2(\omega) = -2 \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^3 + 6(2 - \omega) \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right)^2 + 2(3\omega - 4) \left(\frac{\omega - \omega_e}{\omega_p - \omega_e} \right) + 2, \quad \varphi_3 = \frac{(1 - \mu)}{\ln \omega_p - \ln \omega_e};$$

[0147] 所以,总的接触刚度为

[0148]

$$K_t = K_e + K_{ep} + K_p = \eta A_n \int_d^{d+\omega_e} k_e g(z) dz + \int_{d+\omega_e}^{d+\omega_p} k_{ep} g(z) dz + \int_{d+\omega_p}^{\infty} k_p g(z) dz \quad (19)$$

[0149] 式中, A_n 表示名义接触面积; η 表示微凸体分布密度; $g(z)$ 表示微凸体高度分布

的概率密度函数, $g(z) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, z 表示微凸体的高度, θ 表示螺栓结合面的平均高

度; d 表示微凸体两表面的平均距离, $d = z - \omega$ 。

[0150] 研究微凸体在接触时发生的弹塑性变形机理,从而建立结合面法向接触刚度模

型,需要明确完全弹性临界点 $\omega_e = \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 R$ 和完全塑性临界点 $\omega_p = 110 \omega_e$ 。

[0151] 如果在名义接触面积 A_n 上有 N 个微凸体,则结合面上微凸体数量的期望为

$$n = N \int_d^{\infty} g(z) dz = \eta A_n \int_d^{\infty} g(z) dz。$$

[0152] 结合面法向接触刚度模型的建立是基于如下假设:(1) 结合面的微观形貌各向同性;(2) 结合面上各微凸体之间的相互作用忽略不计;(3) 所有微凸体的顶部是球形,并且曲率半径相同;(4) 微凸体的高度为随机分布;(5) 接触时仅考虑微凸体发生变形,而宏观基体不变形。

[0153] 根据电涡流传感器测试感应支架 4 可获得上、下试件在力的作用下发生的相对位移 ω 。已知材料的弹性模量 E 和泊松比 ν ,根据 $k = 0.4645 + 0.3141 \nu + 0.1943 \nu^2$;可求得

k 值,根据 $\omega_e = \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 R$ 和 $\omega_p = 110 \omega_e$ 可求得弹性临界点和完全塑性临界点。所以根据

ω_e 和 ω_p 可判断试件是处于弹性、弹塑性或塑性变形中的哪一种,针对不同的接触状态选用式 (1)、式 (2)、和式 (10) 计算上下试件所受到的法向力。然后根据式 (12) 求得不同阶段的刚度,最终建立结合面法向接触刚度模型。

[0154] 法向接触刚度模型 (16) 是通过分形理论,获得结合面上微凸体数量的期望值

$$n = N \int_d^{\infty} g(z) dz = \eta A_n \int_d^{\infty} g(z) dz$$

后,根据建立的单个微凸体的刚度模型,从而建立整个结合面上的法向接触刚度模型。在求解式 (16) 时, d 为下试件接触前半径 R 减去接触后产生的

变形量 ω 。

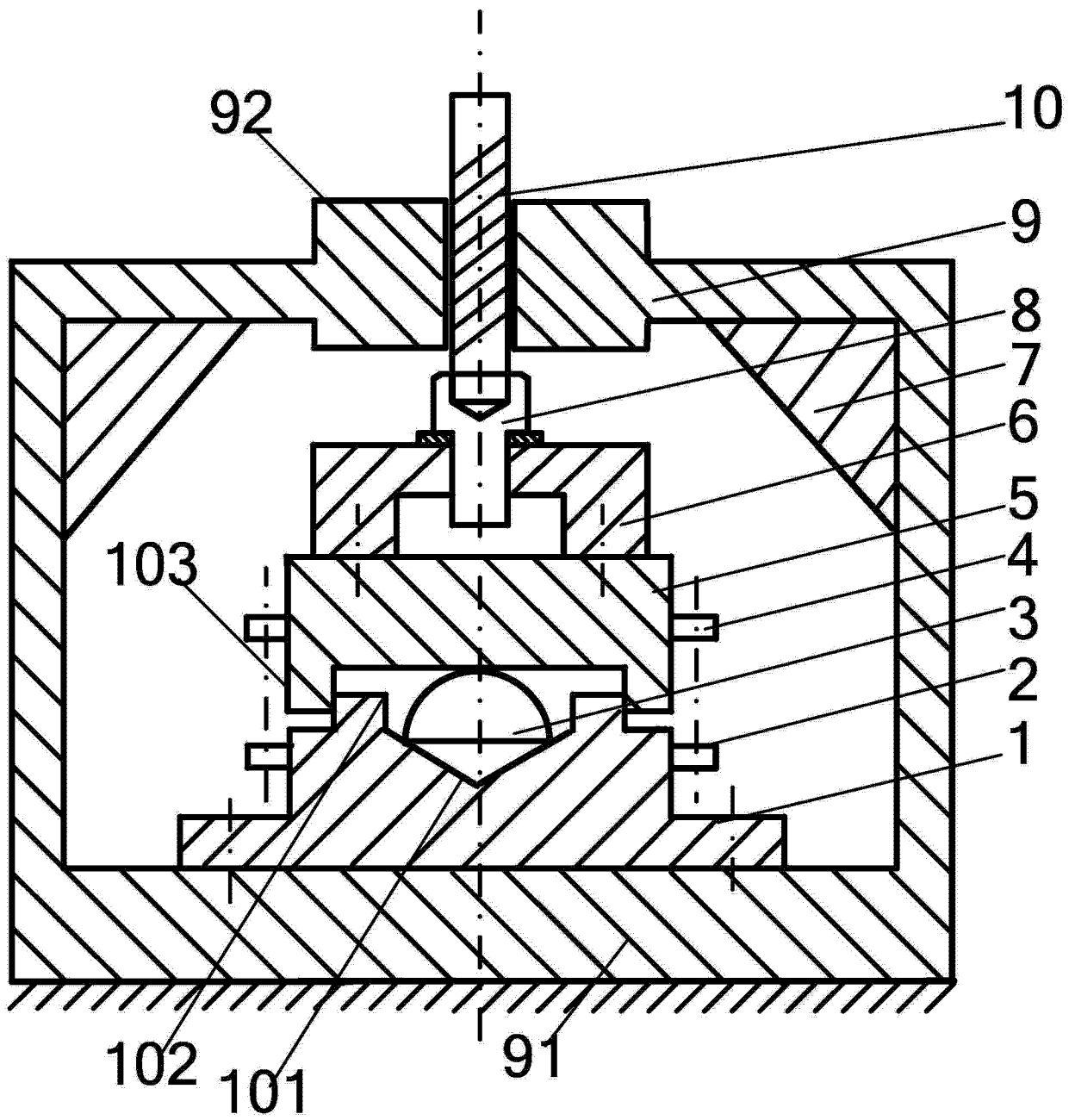


图 1

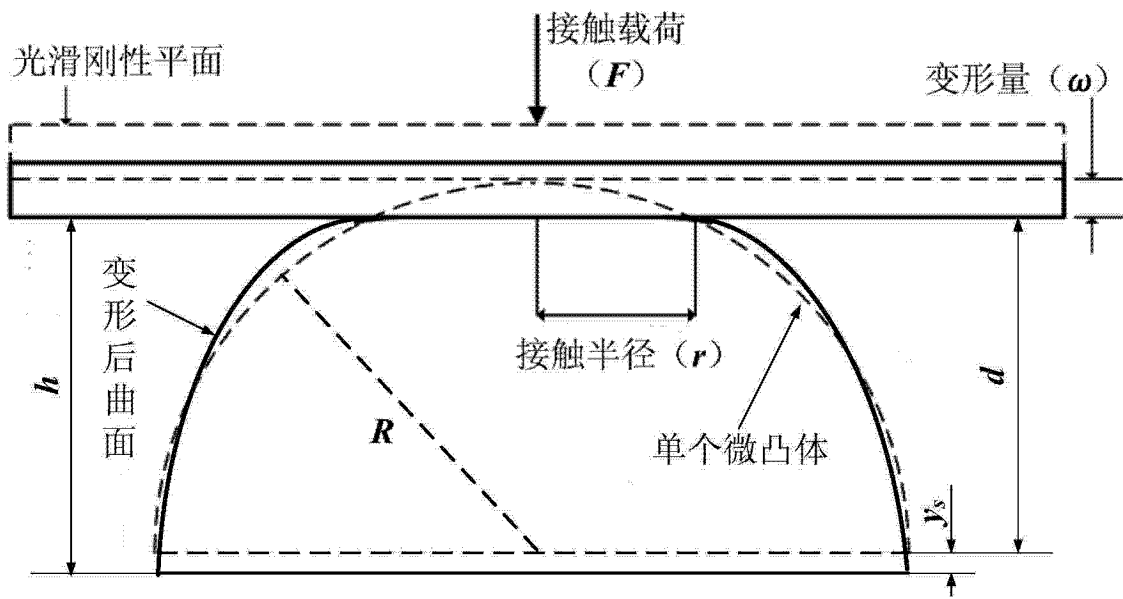


图 2

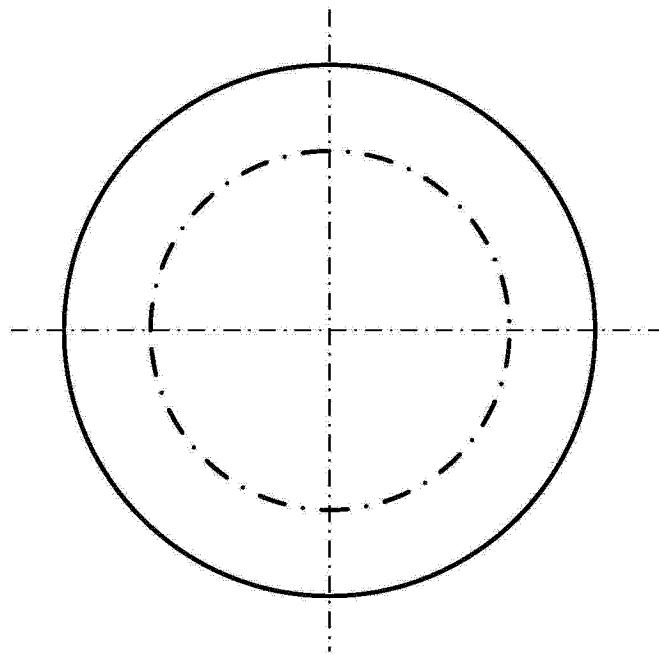


图 3

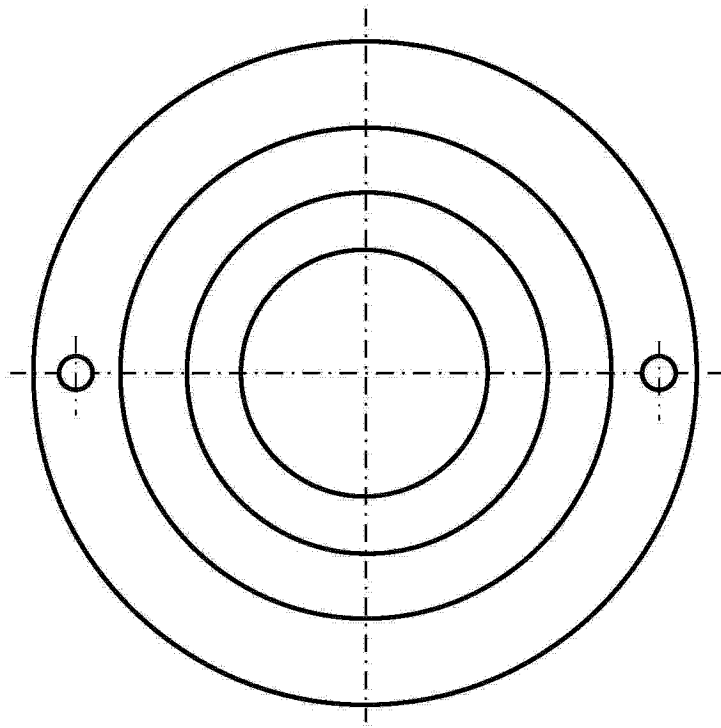


图 4

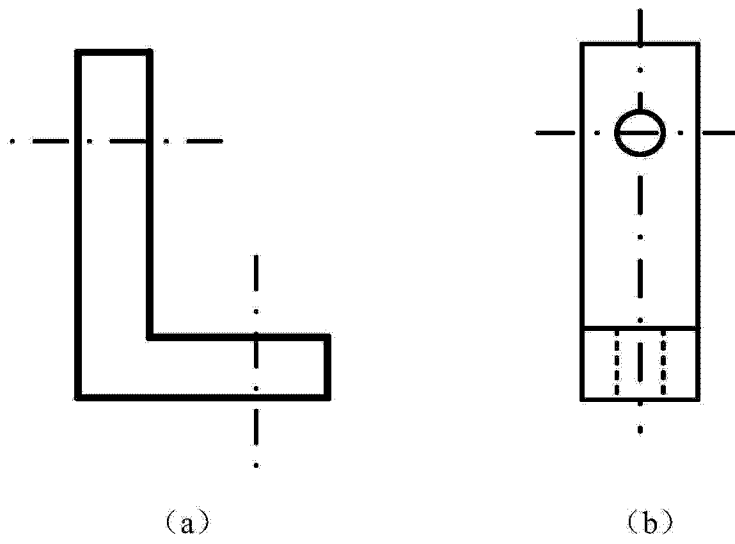


图 5