



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102426085 B

(45) 授权公告日 2014. 06. 04

(21) 申请号 201110238569. 8

(22) 申请日 2011. 08. 19

(73) 专利权人 西安理工大学

地址 710048 陕西省西安市金花南路 5 号

(72) 发明人 黄玉美 刘耀 张隆义 张广鹏

(74) 专利代理机构 西安弘理专利事务所 61214

代理人 李娜

(51) Int. Cl.

G01M 5/00(2006. 01)

审查员 李石馨

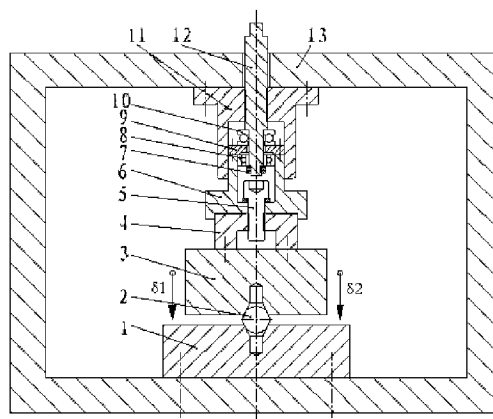
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

球面 - 回转面结合面接触刚度测试装置及方法

(57) 摘要

本发明的球面 - 回转面结合面接触刚度测试装置, 包括在框形测试台架中设置有下列试件、球体试件、上试件和加载组件, 加载组件中的三向力传感器上连接有套筒, 套筒的上端口连接有挡圈, 套筒的外圆套装有法兰套, 法兰套的上表面与框形测试台架顶板固定连接; 穿过框形测试台架顶板及挡圈设置有一加载螺杆, 在上试件上安装有多个位移传感器。本发明还公开了利用上述的装置进行各种球面 - 回转面结合面接触刚度测试的方法, 使用加载组件加载, 由三向力传感器测出该 Z 向载荷, 通过各个位移传感器测出 Z 向位移, 通过相应公式得到球面 - 回转面结合面的接触刚度。本发明装置使得球面 - 回转面接触刚度测试的准确性显著提高。



1. 一种球面-回转面结合面接触刚度测试装置,其特征在于:包括在框形测试台架(13)中,沿框形测试台架(13)竖轴方向,从框形测试台架(13)底板至框形测试台架(13)顶板之间依次设置有上端具有回转面的下试件(1)、球体试件(2)、下端具有回转面的上试件(3)和加载组件,上试件(3)的回转面压在球体试件(2)上,球体试件(2)压在下试件(1)的回转面上,下试件(1)固定在框形测试台架(13)底板上,

所述的加载组件包括安装在上试件(3)上表面的三向力传感器(4),三向力传感器(4)上通过连接螺钉(5)连接有套筒(6),套筒(6)的下端凸圆台套装在三向力传感器(4)的外圆上,套筒(6)的上端口固定连接有挡圈(9),套筒(6)的上端外圆上套装有法兰套(11),套筒(6)的外径与法兰套(11)的内孔配合,法兰套(11)的上表面与框形测试台架(13)顶板固定连接;穿过框形测试台架(13)顶板、法兰套(11)的上端、挡圈(9)设置有一加载螺杆(12),加载螺杆(12)与连接螺钉(5)和三向力传感器(4)同轴设置,在挡圈(9)两边的加载螺杆(12)上分别安装有止推轴承(10)和径向轴承(8),所述的加载螺杆(12)与法兰套(11)螺纹连接,止推轴承(10)的上端与加载螺杆(12)轴肩紧压,止推轴承(10)的下端压紧挡圈(9);径向轴承(8)套装在加载螺杆(12)下部,其外径与套筒(6)内孔配合,加载螺杆(12)下部伸出径向轴承(8)的端头安装有螺母(7),

在上试件(3)上安装有多个位移传感器,每个位移传感器测头对准下试件(1),沿平行于Z轴且对称于球体试件(2)球心的周围布置。

2. 一种球面-回转面结合面接触刚度的测试方法,其特征在于,利用一套测量装置,包括在框形测试台架(13)中,沿框形测试台架(13)竖轴方向,从框形测试台架(13)底板至框形测试台架(13)顶板之间依次设置有上端具有回转面的下试件(1)、球体试件(2)、下端具有回转面的上试件(3)和加载组件,上试件(3)的回转面压在球体试件(2)上,球体试件(2)压在下试件(1)的回转面上,下试件(1)固定在框形测试台架(13)底板上,

所述的加载组件包括安装在上试件(3)上表面的三向力传感器(4),三向力传感器(4)上通过连接螺钉(5)连接有套筒(6),套筒(6)的下端凸圆台套装在三向力传感器(4)的外圆上,套筒(6)的上端口固定连接有挡圈(9),套筒(6)的上端外圆上套装有法兰套(11),套筒(6)的外径与法兰套(11)的内孔配合,法兰套(11)的上表面与框形测试台架(13)顶板固定连接;穿过框形测试台架(13)顶板、法兰套(11)的上端、挡圈(9)设置有一加载螺杆(12),加载螺杆(12)与连接螺钉(5)和三向力传感器(4)同轴设置,在挡圈(9)两边的加载螺杆(12)上分别安装有止推轴承(10)和径向轴承(8),

在上试件(3)上安装有多个位移传感器,每个位移传感器测头对准下试件(1),沿平行于Z轴且对称于球体试件(2)球心的周围布置,

利用上述的装置,该方法按照以下步骤实施:

①首先调整各部件使Z向载荷 F_z 的作用线平行于Z轴并通过球体试件(2)的球心,用三向力传感器(4)的读数进行调整监视,监视调整至三向力传感器(4)其他分力近似为零,只有沿三向力传感器(4)的轴向分力,即为Z向载荷 F_z ;

②将多个位移传感器固定在上试件(3)上,测头对准下试件(1),且安装点及测量点靠近球体试件(2),然后调整各个位移传感器的安装,沿平行于Z轴且对称于球体试件(2)球心的周围布置多个位移传感器,用位移传感器的读数进行调整监视,使在施加Z向载荷 F_z 时各个位移传感器的读数值变化近似一致,以保证测量的位移 δ_z 与Z向载荷 F_z 的方向一

致；再使用有限元方法计算上试件(3)、球体试件(2)和下试件(1)的变形，将其影响从检测结果中扣除，使测量值 δ_z 中只包含回转面-球面-回转面的双结合面接触变形；

③使用加载组件进行加载，转动加载螺杆(12)向下对上试件(3)施加 Z 向载荷 F_z ，由三向力传感器(4)测出该 Z 向载荷 F_z ，同时通过各个位移传感器测出上试件(3)与下试件(1)之间的 Z 向相对位移，取各个位移传感器测量值的平均值作为 δ_z ，最后通过相应公式得到球面-回转面结合面的接触刚度。

3. 根据权利要求 2 所述的球面-回转面结合面接触刚度的测试方法，其特征在于，所述的上试件(3)的下端分别设置为圆锥面回转面、球窝回转面、平面回转面、直形沟道回转面、环形内沟道回转面或环形外沟道回转面之一，分别用于进行相应的球面-回转面结合面接触刚度的测试。

4. 根据权利要求 2 所述的球面-回转面结合面接触刚度的测试方法，其特征在于，所述的下试件(1)的上端分别设置为圆锥面回转面或球窝回转面之一，分别用于进行相应的球面-回转面结合面接触刚度的测试。

5. 根据权利要求 2 所述的球面-回转面结合面接触刚度的测试方法，其特征在于，所述的上试件(3)的下端分别设置为圆锥面回转面、球窝回转面、平面回转面、直形沟道回转面、环形内沟道回转面或环形外沟道回转面之一，

所述的下试件(1)的上端分别设置为圆锥面回转面或球窝回转面之一，

通过搭配选定上试件(3)的类型和下试件(1)的类型，实现球面-圆锥面接触刚度、球面-球窝接触刚度、平面-球面结合面接触刚度、直形沟道-球面结合面接触刚度、环形内沟道-球面结合面接触刚度或环形外沟道-球面结合面接触刚度的获取试验和并行试验验证。

球面 - 回转面结合面接触刚度测试装置及方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械结构的结合面测试技术领域,涉及机械结构中典型的球面与圆锥面、球面与球窝、球面与平面、球面与直形沟道、球面与环形内沟道、球面与环形外沟道等球面与回转面的结合面接触刚度测试,具体涉及一种球面 - 回转面结合面接触刚度测试装置,本发明还涉及利用该装置进行球面 - 回转面结合面接触刚度的测试方法。

背景技术

[0002] 机械结构中典型的重转面主要有球面(双自由度重转面,外球面)、球窝(内球面)、平面(半径无穷大的单自由度重转面)、圆锥面(直母线与重转轴线成一定夹角且共面的单自由度重转面)、直形沟道(内圆柱面,直母线与重转轴线平行的单自由度重转面)、环形沟道重转面(圆弧母线与重转轴线共面的单自由度重转面,又分为环形内沟道重转面和环形外沟道重转面)。由球体的球面与重转体的重转面接触而组成的结合面称为球面 - 重转面结合面,主要类型包括:球面 - 圆锥面结合面、球面 - 球窝结合面、球面 - 平面结合面、球面 - 直形沟道结合面、球面 - 环形内沟道结合面、球面 - 环形外沟道结合面六种类型。

[0003] 球面 - 重转面结合面的接触刚度一般采用基于基础检测数据的解析方法获取,解析方法及解析结果的可靠性必须用测试进行验证,但由于球面 - 重转面结合面是存在于测试系统之中,特别是球体的位移直接检测困难,如果测试方法获取的球面 - 重转面结合面的接触刚度不准确,就不能可靠地用它去验证球面 - 重转面结合面的接触刚度解析方法的正确性,也不能用测试方法获取和积累准确的球面 - 重转面结合面接触刚度数据资源,因此测试技术方案、测试装置和具体实施的测试方法对保证测试的准确性非常关键。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种球面 - 重转面结合面接触刚度测试装置,解决了现有技术中存在的,进行球面 - 重转面结合面的接触刚度测试的准确性难以保证的问题。

[0005] 本发明的另一目的是提供一种球面 - 重转面结合面接触刚度的测试方法。

[0006] 本发明所采用的技术方案是,一种球面 - 重转面结合面接触刚度测试装置,包括在框形测试台架中,沿框形测试台架竖轴方向,从框形测试台架底板至框形测试台架顶板之间依次设置有上端具有重转面的下试件、球体试件、下端具有重转面的上试件和加载组件,上试件的重转面压在球体试件上,球体试件压在下试件的重转面上,下试件固定在框形测试台架底板上,

[0007] 所述的加载组件包括安装在上试件上表面的三向力传感器,三向力传感器上通过连接螺钉连接有套筒,套筒的下端凸圆台套装在三向力传感器的外圆上,套筒的上端口固定连接有机圈,套筒的上端外圆上套装有法兰套,套筒的外径与法兰套的内孔配合,法兰套的上表面与框形测试台架顶板固定连接;穿过框形测试台架顶板、法兰套的上端、机圈设置有一加载螺杆,加载螺杆与连接螺钉和三向力传感器同轴设置,在机圈两边的加载螺杆上

分别安装有止推轴承和径向轴承，

[0008] 在上试件上安装有多个位移传感器，每个位移传感器测头对准下试件，沿平行于 Z 轴且对称于球体试件球心的周围布置。

[0009] 本发明所采用的另一技术方案是，一种球面 - 回转面结合面接触刚度的测试方法，利用一套测量装置，

[0010] 包括在框形测试台架中，沿框形测试台架竖轴方向，从框形测试台架底板至框形测试台架顶板之间依次设置有上端具有回转面的下试件、球体试件、下端具有回转面的上试件和加载组件，上试件的回转面压在球体试件上，球体试件压在下试件的回转面上，下试件固定在框形测试台架底板上，

[0011] 所述的加载组件包括安装在上试件上表面的三向力传感器，三向力传感器上通过连接螺钉连接有套筒，套筒的下端凸圆台套装在三向力传感器的外圆上，套筒的上端口固定连接挡圈，套筒的上端外圆上套装有法兰套，套筒的外径与法兰套的内孔配合，法兰套的上表面与框形测试台架顶板固定连接；穿过框形测试台架顶板、法兰套的上端、挡圈设置有一加载螺杆，加载螺杆与连接螺钉和三向力传感器同轴设置，在挡圈两边的加载螺杆上分别安装有止推轴承和径向轴承，

[0012] 在上试件上安装有多个位移传感器，每个位移传感器测头对准下试件，沿平行于 Z 轴且对称于球体试件球心的周围布置，

[0013] 利用上述的装置，该方法按照以下步骤实施：

[0014] ①首先调整各部件使 Z 向载荷 F_z 的作用线平行于 Z 轴并通过球体试件的球心，用三向力传感器的读数进行调整监视，监视调整至三向力传感器其他分力近似为零，只有沿三向力传感器的轴向分力，即为 Z 向载荷 F_z ；

[0015] ②将多个位移传感器固定在上试件上，测头对准下试件，且安装点及测量点靠近球体试件，然后调整各个位移传感器的安装，沿平行于 Z 轴且对称于球体试件球心的周围布置多个位移传感器，用位移传感器的读数进行调整监视，使在施加 Z 向载荷 F_z 时各个位移传感器的读数值变化近似一致，以保证测量的位移 δ_z 与 Z 向载荷 F_z 的方向一致；再使用有限元方法计算上试件、球体试件和下试件的变形，将其影响从检测结果中扣除，使测量值 δ_z 中只包含回转面 - 球面 - 回转面的双结合面接触变形；

[0016] ③使用加载组件进行加载，转动加载螺杆向下对上试件施加 Z 向载荷 F_z ，由三向力传感器测出该 Z 向载荷 F_z ，同时通过各个位移传感器测出上试件与下试件之间的 Z 向相对位移，取各个位移传感器测量值的平均值作为 δ_z ，最后通过相应公式得到球面 - 回转面结合面的接触刚度。

[0017] 本发明的有益效果是，通过回转面 - 球面 - 回转面的双结合面测试方案，获得球面 - 圆锥面接触刚度、球面 - 球窝接触刚度、平面 - 球面结合面刚度、直形沟道 - 球面结合面刚度、环形内沟道 - 球面结合面刚度及环形外沟道 - 球面结合面刚度六种类型球面 - 回转面的单结合面接触刚度；通过并行测试验证，提高了上述球面 - 回转面的单结合面接触刚度测试值的准确性、可靠性。另外，采用本发明的测试装置，还能够进行回转体回转面半径与球体球面相等和不等球面 - 回转面接触刚度测试。

附图说明

- [0018] 图 1 是本发明测试装置的结构示意图；
- [0019] 图 2 是本发明方法进行圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图；
- [0020] 图 3 是本发明方法进行球窝 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图；
- [0021] 图 4 是本发明方法进行球窝 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图；
- [0022] 图 5 是本发明方法进行平面 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图；
- [0023] 图 6 是本发明方法进行平面 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图；
- [0024] 图 7 是本发明方法进行直形沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图,图 a 是截面示意图,图 b 是图 a 中的 A-A 截面示意图；
- [0025] 图 8 是本发明方法进行直形沟道 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图,图 a 是截面示意图,图 b 是图 a 中的 B-B 截面示意图；
- [0026] 图 9 是本发明方法进行环形内沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图,图 a 是截面示意图,图 b 是图 a 中的 C-C 截面示意图；
- [0027] 图 10 是本发明方法进行环形内沟道 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图,图 a 是截面示意图,图 b 是图 a 中的 D-D 截面示意图；
- [0028] 图 11 是本发明方法进行环形外沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图,图 a 是截面示意图,图 b 是图 a 中的 E-E 截面示意图；
- [0029] 图 12 是本发明方法进行环形外沟道 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试的试件结构示意图,图 a 是截面示意图,图 b 是图 a 中的 F-F 截面示意图。
- [0030] 图中,1. 下试件,2. 球体试件,3. 上试件,4. 三向力传感器,5. 螺钉,6. 套筒,7. 螺母,8. 径向轴承,9. 挡圈,10. 止推轴承,11. 法兰套,12. 加载螺杆,13. 框形测试台架, $\delta 1$ 和 $\delta 2$ 是位移传感器。

具体实施方式

- [0031] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。
- [0032] 如图 1,本发明的球面 - 回转面结合面刚度测试的装置结构是,包括在框形测试台架 13 中,沿框形测试台架 13 竖轴方向,从框形测试台架 13 底板至框形测试台架 13 顶板之间依次设置有上端具有回转面的下试件 1、球体试件 2、下端具有回转面的上试件 3 和加载组件,上试件 3 的回转面压在球体试件 2 上,球体试件 2 压在下试件 1 的回转面上,下试件 1 固定在框形测试台架 13 底板上。
- [0033] 上述的加载组件包括加载螺杆 12、法兰套 11、止推轴承 10、挡圈 9、径向轴承 8、螺母 7、套筒 6、连接螺钉 5 和三向力传感器 4 组成。
- [0034] 加载组件结构是,包括安装在上试件 3 上表面的三向力传感器 4,三向力传感器 4 上通过连接螺钉 5 连接有套筒 6,套筒 6 的下端凸圆台套装在三向力传感器 4 的外圆上,套筒 6 的上端口固定连接挡圈 9,套筒 6 的上端外圆上套装有法兰套 11,套筒 6 的圆环外径

与法兰套 11 的圆环内孔配合,法兰套 11 的上表面与框形测试台架 13 顶板固定连接;穿过框形测试台架 13 顶板、法兰套 11 的上端、挡圈 9 设置有一加载螺杆 12,加载螺杆 12 与连接螺钉 5 和三向力传感器 4 同轴设置,在挡圈 9 两边的加载螺杆 12 上分别安装有止推轴承 10 和径向轴承 8。

[0035] 在上试件 3 上安装有多个位移传感器 δ ,每个位移传感器测头对准下试件 1,沿平行于 Z 轴且对称于球体试件 2 球心的周围布置。位移传感器 δ 设置有多个,由于受视图的限制,图 1 中仅显示出两个位移传感器 ($\delta 1$ 和 $\delta 2$)。

[0036] 加载螺杆 12 与法兰套 11 螺纹连接,止推轴承 10 的上端与加载螺杆 12 轴肩紧压,止推轴承 10 的下端压紧挡圈 9;径向轴承 8 套装在加载螺杆 12 下部,其外径与套筒 6 圆环内孔配合,加载螺杆 12 下部伸出径向轴承 8 的端头安装有螺母 7。

[0037] 利用上述的本发明装置进行球面-各种回转面结合面接触刚度测试原理是,采用一个球体同时与上、下回转体同时接触的回转面-球面-回转面的双结合面测试方式,以解决球体位移直接检测困难的问题;并采用对球面-各种回转面结合面接触刚度进行获取测试和并行验证测试的测试方案,以提高测试的准确性。

[0038] 所有测试方法采用的球体试件 2 相同,针对不同球面-各种回转面结合面,具体的测试方法分别是,

[0039] 1) 球面-圆锥面结合面接触刚度的获取测试方法

[0040] 参照图 2,采用上试件 3 的下端为圆锥面,下试件 1 的上端为圆锥面,且上试件 3 的圆锥面与下试件 1 的圆锥面表面特性相同(即决定圆锥面表面特性的尺寸和锥度、材质、加工方法及精度等条件相同),球体试件 2 置于上试件 3 的圆锥面和下试件 1 的圆锥面之间,上试件 3 的圆锥面与球体试件 2 的球面组成一个球面-圆锥面结合面,下试件 1 的圆锥面与球体试件 2 的球面组成另一个相同的球面-圆锥面结合面,构成圆锥面-球面-圆锥面的双结合面。使用加载组件进行加载,通过位移传感器测出在 Z 向载荷 F_z 作用下由于圆锥面-球面-圆锥面的双结合面接触变形而产生的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 $\delta_z = 2\delta_{\text{球锥}}$,则球面-圆锥面结合面的接触刚度为

$$[0041] \quad K_{j\text{球锥}} = F_z / \delta_{\text{球锥}} = 2F_z / \delta_z \quad (1)$$

[0042] 式中,一个球面-圆锥面结合面接触变形 $\delta_{\text{球锥}} = \delta_z / 2$, F_z 和 δ_z 为测试测量值,具体的测试方法是:①首先调整各部件使载荷 F_z 的作用线平行于 Z 轴通过球体试件 2 的球心,用三向力传感器 4 的读数进行调整监视,监视调整至三向力传感器 4 其他分力近似为零,只有沿三向力传感器 4 的轴向分力,即为 Z 向载荷 F_z ;然后调整位移传感器的安装,沿平行于 Z 轴且对称于球体试件 2 球心的周围布置多个位移传感器,用位移传感器的读数进行调整监视,使在施加 Z 向载荷 F_z 时各个位移传感器的读数值变化近似一致,以保证测量的位移 δ_z 与 Z 向载荷 F_z 的方向一致,②位移传感器固定在上试件 3 上,测头对准下试件 1,且安装点及测量点尽量靠近球体试件 2,同时用有限元计算上试件 3、球体试件 2 和下试件 1 的变形,将其影响从检测结果中扣除,使测量值 δ_z 中只包含圆锥面-球面-圆锥面的双结合面接触变形,③使用加载组件进行加载,转动加载螺杆 12 向下微动,对上试件 3 施加 Z 向载荷 F_z ,由三向力传感器 4 测出 Z 向载荷 F_z ,由各个位移传感器测出上试件 3 与下试件 1 之间的 Z 向相对位移,取各个位移传感器测量值的平均值作为 δ_z ,则可由式 1) 求出球面-圆锥面接触刚度 $K_{j\text{球锥}}$ 。

[0043] (2) 球面 - 球窝结合面接触刚度的获取测试方法

[0044] 参照图 3, 采用球窝 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试方案和上述测试装置, 其中上试件 3 的下端为球窝 (即内球面), 下试件 1 的上端为球窝, 且上试件 3 的球窝与下试件 1 的球窝表面特性相同, 球体试件 2 置于上试件 3 的球窝和下试件 1 的球窝之间, 上试件 3 的球窝与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 球窝结合面, 下试件 1 的球窝与球体试件 2 的球面组成另一个相同的球面 - 球窝结合面, 构成球窝 - 球面 - 球窝的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 的圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移为 $\delta_z = 2\delta_{\text{球窝}}$, 则得到球面 - 球窝结合面接触刚度,

$$[0045] \quad K_{j\text{球窝}} = F_z / \delta_{\text{球窝}} = 2F_z / \delta_z \quad (2)$$

[0046] 式中, $\delta_{\text{球窝}} = \delta_z / 2$, 球体试件 2 的球面外径与球窝球面的内径能够相等、或不等, 或进行半径不等的球面 - 球窝接触刚度测试。

[0047] (3) 球面 - 圆锥面和球面 - 球窝的接触刚度的验证测试方法

[0048] 参照图 4, 采用球窝 - 球面 - 圆锥面的双结合面形式, 其中上试件 3 的下端为球窝 (与测试 (2) 的上试件 3 相同), 下试件 1 的上端为圆锥面 (与测试 (1) 的下试件 1 相同), 球体试件 2 置于上试件 3 的球窝和下试件 1 的圆锥面之间, 上试件 3 的球窝与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 球窝结合面, 下试件 1 的圆锥面与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 圆锥面结合面, 构成球窝 - 球面 - 圆锥面的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了球体试件 2 与下试件 1 之间的球面 - 圆锥面结合面接触变形 $\delta_{\text{球锥}}$ 和球体试件 2 与上试件 3 之间的球面 - 球窝结合面接触变形 $\delta_{\text{球窝}}$, $\delta_z = \delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球窝}}$, 则球窝 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度,

$$[0049] \quad K_{j\text{窝球锥}} = F_z / (\delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球窝}}) = F_z / \delta_z \quad (3)$$

[0050] 式中, $\delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球窝}} = \delta_z$, F_z 和 δ_z 为测试测量值, 用上述测试方法可由本测试得到球窝 - 球面 - 圆锥面双结合面接触刚度的测试值 $K_{j\text{窝球锥}}$, 对由测试 (1) 得到的球面 - 圆锥面的接触刚度 $K_{j\text{球锥}}$ 和由测试 (2) 得到的球面 - 球窝的接触刚度 $K_{j\text{球窝}}$ 进行并行测试验证, 由式 1)、2)、3) 得,

$$[0051] \quad \delta_{\text{球锥}} = F_z / K_{j\text{球锥}} \quad (1-1)$$

$$[0052] \quad \delta_{\text{球窝}} = F_z / K_{j\text{球窝}} \quad (1-2)$$

$$[0053] \quad \delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球窝}} = F_z / K_{j\text{窝球锥}} \quad (1-3)$$

[0054] 由式 1-1)、1-2)、1-3) 得,

$$[0055] \quad K_{j\text{窝球锥}} = K_{j\text{球锥}} K_{j\text{球窝}} / (K_{j\text{球锥}} + K_{j\text{球窝}}) \quad (4)$$

[0056] 由测试 (1) 得到的球面 - 圆锥面的接触刚度测试值 $K_{j\text{球锥}}$ 和由测试 (2) 得到的球面 - 球窝的接触刚度测试值 $K_{j\text{球窝}}$, 用式 4) 可间接得 $K_{j\text{窝球锥}}$; 将由测试 (1) 和测试 (2) 间接得的 $K_{j\text{窝球锥}}$ 与由本测试 (3) 球窝 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试直接得到的球窝 - 球面 - 圆锥面的接触刚度测试值 $K_{j\text{窝球锥}}$ 进行比较, 通过并行测试从而验证、提高 $K_{j\text{球锥}}$ 、 $K_{j\text{球窝}}$ 测试值的准确性、可靠性。

[0057] (4) 球面 - 平面结合面接触刚度的获取及验证测试方法

[0058] 采用平面 - 球面 - 圆锥面和平面 - 球面 - 球窝两种双结合面测试方案和上述测试装置, 进行球面 - 平面结合面接触刚度的获取测试和验证测试,

[0059] (A) 平面 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度的测试方法

[0060] 参照图 5, 采用上述测试方案和测试装置, 其中上试件 3 的下端为平面, 下试件 1 的上端为圆锥面 (与测试 (1) 的下试件 1 同), 球体试件 2 置于上试件 3 下端的平面和下试件 1 上端的圆锥面之间, 上试件 3 的平面与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 平面结合面, 下试件 1 的圆锥面与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 圆锥面结合面, 构成平面 - 球面 - 圆锥面的双结合面。具体的测试方法是: 与测试 (1) 圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了上试件 3 与球体试件 2 之间的球面 - 平面结合面接触变形 $\delta_{球平}$, 球体试件 2 与下试件 1 之间的球面 - 圆锥面结合面接触变形 $\delta_{球锥}$, $\delta_z = \delta_{球锥} + \delta_{球平}$, 则平面 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度 $K_{j平球锥}$

$$[0061] \quad K_{j平球锥} = F_z / (\delta_{球锥} + \delta_{球平}) = F_z / \delta_z \quad 5)$$

[0062] 式中, $\delta_{球锥} + \delta_{球平} = \delta_z$, 与式 4) 同样的方法可得,

$$[0063] \quad K_{j平球锥} = K_{j球锥} K_{j球平} / (K_{j球锥} + K_{j球平}) 6)$$

[0064] $K_{j平球锥}$ 通过本测试得到, $K_{j球锥}$ 通过测试 (1) 得到, 因此用式 6) 能够得到 $K_{j球平}$ 。

[0065] (B) 平面 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试方法,

[0066] 参照图 6, 采用上述测试方案和测试装置, 其中上试件 3 的下端为平面 (与测试 (4) (A) 的上试件 3 相同), 下试件 1 的上端为球窝 (与测试 (2) 的下试件 1 相同), 球体试件 2 置于上试件 3 下端的平面和下试件 1 上端的球窝之间, 上试件 3 的平面与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 平面结合面, 下试件 1 的球窝与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 球窝结合面, 构成平面 - 球面 - 球窝的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了上试件 3 和球体试件 2 之间的球面 - 平面结合面接触变形 $\delta_{球平}$, 球体试件 2 和下试件 1 之间的球面 - 球窝结合面接触变形 $\delta_{球窝}$, $\delta_z = \delta_{球窝} + \delta_{球平}$, 则平面 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度 $K_{j平球窝}$

$$[0067] \quad K_{j平球窝} = F_z / (\delta_{球窝} + \delta_{球平}) = F_z / \delta_z \quad 7)$$

[0068] 式中, $\delta_{球窝} + \delta_{球平} = \delta_z$, 与式 4) 同样的方法可得,

$$[0069] \quad K_{j平球窝} = K_{j球窝} K_{j球平} / (K_{j球窝} + K_{j球平}) 8)$$

[0070] $K_{j平球窝}$ 通过本测试得到, $K_{j球窝}$ 通过测试 (2) 得到, 因此用式 8) 能够得到 $K_{j球平}$ 。

[0071] 将本测试 (B) 得到的 $K_{j球平}$ 与由测试 (A) 得到的 $K_{j球平}$ 进行比较, 通过并行测试从而验证、提高 $K_{j球平}$ 测试值的可靠性。

[0072] (5) 球面 - 直形沟道结合面接触刚度的获取及验证测试方法

[0073] 采用直形沟道 - 球面 - 圆锥面和直形沟道 - 球面 - 球窝两种双结合面测试方案和上述测试装置, 进行球面 - 直形沟道结合面接触刚度的获取测试和验证测试,

[0074] (A) 直形沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度测试方法

[0075] 参照图 7, 其中上试件 3 的下端为直形沟道, 下试件 1 的上端为圆锥面 (与测试 (1) 的下试件 1 相同), 球体试件 2 置于上试件 3 的直形沟道和下试件 1 的圆锥面之间, 上试件 3 的直形沟道与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 直形沟道结合面, 下试件 1 的圆锥面与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 圆锥面结合面, 构成直形沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测

得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了上试件 3 和球体试件 2 之间的球面 - 直形沟道结合面接触变形 $\delta_{\text{球直沟}}$, 球体试件 2 和下试件 1 之间的球面 - 圆锥面结合面接触变形 $\delta_{\text{球锥}}$, $\delta_z = \delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球直沟}}$, 则直形沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度 $K_{j\text{直沟球锥}}$

沟球锥

$$[0076] \quad K_{j\text{直沟球锥}} = F_z / (\delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球直沟}}) = F_z / \delta_z \quad (9)$$

[0077] 式中, $\delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球直沟}} = \delta_z$, 与式 4) 同样的方法可得,

$$[0078] \quad K_{j\text{直沟球锥}} = K_{j\text{球锥}} K_{j\text{球直沟}} / (K_{j\text{球锥}} + K_{j\text{球直沟}}) \quad (10)$$

[0079] $K_{j\text{直沟球锥}}$ 通过本测试得到, $K_{j\text{球锥}}$ 通过测试 (1) 得到, 因此用式 10) 能够得到 $K_{j\text{球直沟}}$ 。

[0080] (B) 直形沟道 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试方法

[0081] 参照图 8, 其中上试件 3 的下端为直形沟道 (与测试 (5) (A) 的上试件 3 同), 下试件 1 的上端为球窝 (与测试 (2) 的下试件 1 同), 球体试件 2 置于上试件 3 的直形沟道和下试件 1 的球窝之间, 上试件 3 的直形沟道与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 直形沟道结合面, 下试件 1 的球窝与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 球窝结合面, 构成直形沟道 - 球面 - 球窝的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了上试件 3 和球体试件 2 之间的球面 - 直形沟道结合面接触变形 $\delta_{\text{球直沟}}$, 球体试件 2 和下试件 1 之间的球面 - 球窝结合面接触变形 $\delta_{\text{球窝}}$, $\delta_z = \delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球直沟}}$, 则直形沟道 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度 $K_{j\text{直沟球窝}}$

$$[0082] \quad K_{j\text{直沟球窝}} = F_z / (\delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球直沟}}) = F_z / \delta_z \quad (11)$$

[0083] 式中, $\delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球直沟}} = \delta_z$, 与式 4) 同样的方法可得,

$$[0084] \quad K_{j\text{直沟球窝}} = K_{j\text{球窝}} K_{j\text{球直沟}} / (K_{j\text{球窝}} + K_{j\text{球直沟}}) \quad (12)$$

[0085] $K_{j\text{直沟球窝}}$ 通过本测试得到, $K_{j\text{球窝}}$ 通过测试 (2) 得到, 因此用式 12) 能够得到 $K_{j\text{球直沟}}$ 。

[0086] 将本测试 (B) 得到的 $K_{j\text{球直沟}}$ 与由测试 (A) 得到的 $K_{j\text{球直沟}}$ 进行比较, 通过并行测试从而验证、提高 $K_{j\text{球直沟}}$ 测试值的可靠性。

[0087] (6) 球面 - 环形内沟道结合面接触刚度的获取及验证测试方法

[0088] 采用环形内沟道 - 球面 - 圆锥面和环形内沟道 - 球面 - 球窝两种双结合面测试方案和上述测试装置, 进行球面 - 环形内沟道结合面接触刚度的获取测试和验证测试,

[0089] (A) 环形内沟道 - 球面 - 圆锥面双结合面接触刚度测试方法

[0090] 参照图 9, 其中上试件 3 的下端为环形内沟道, 下试件 1 的上端为圆锥面 (与测试 (1) 的下试件 1 同), 球体试件 2 置于上试件 3 的环形内沟道和下试件 1 的圆锥面之间, 上试件 3 的环形内沟道与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 环形内沟道结合面, 下试件 1 的圆锥面与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 圆锥面结合面, 构成环形内沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了上试件 3 和球体试件 2 之间的球面 - 环形内沟道结合面接触变形 $\delta_{\text{球内沟}}$, 球体试件 2 和下试件 1 之间的球面 - 圆锥面结合面接触变形 $\delta_{\text{球锥}}$, $\delta_z = \delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球内沟}}$, 则内环形沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度 $K_{j\text{内沟球锥}}$

$$[0091] \quad K_{j\text{内沟球锥}} = F_z / (\delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球内沟}}) = F_z / \delta_z \quad (13)$$

[0092] 式中, $\delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球内沟}} = \delta_z$, 与式 4) 同样的方法可得,

[0093] $K_{j \text{ 内沟球锥}} = K_{j \text{ 球锥}} K_{j \text{ 球内沟}} / (K_{j \text{ 球锥}} + K_{j \text{ 球内沟}}) 14)$

[0094] $K_{j \text{ 内沟球锥}}$ 通过本测试得到, $K_{j \text{ 球锥}}$ 通过测试 (1) 得到, 因此用式 14) 能够得到 $K_{j \text{ 球内沟}}$ 。

[0095] (B) 环形内沟道 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度测试方法

[0096] 参照图 10, 其中上试件 3 的下端为环形内沟道 (与测试 (6) (A) 的上试件 3 同), 下试件 1 的上端为球窝 (与测试 (2) 的下试件 1 同), 球体试件 2 置于上试件 3 的环形内沟道和下试件 1 的球窝之间, 上试件 3 的环形内沟道与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 环形内沟道结合面, 下试件 1 的球窝与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 球窝结合面, 构成环形内沟道 - 球面 - 球窝的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了上试件 3 和球体试件 2 之间的球面 - 环形内沟道结合面接触变形 $\delta_{\text{球内沟}}$, 球体试件 2 和下试件 1 之间的球面 - 球窝结合面接触变形 $\delta_{\text{球窝}}$, $\delta_z = \delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球内沟}}$, 则环形内沟道 - 球面 - 球窝的双结合面接触刚度 $K_{j \text{ 内沟球窝}}$

[0097] $K_{j \text{ 内沟球窝}} = F_z / (\delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球内沟}}) = F_z / \delta_z 15)$

[0098] 式中, $\delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球内沟}} = \delta_z$, 与式 4) 同样的方法可得,

[0099] $K_{j \text{ 内沟球窝}} = K_{j \text{ 球窝}} K_{j \text{ 球内沟}} / (K_{j \text{ 球窝}} + K_{j \text{ 球内沟}}) 16)$

[0100] $K_{j \text{ 内沟球窝}}$ 通过本测试得到, $K_{j \text{ 球窝}}$ 通过测试 (2) 得到, 因此用式 16) 能够得到 $K_{j \text{ 球内沟}}$ 。

[0101] 将本测试 (B) 得到的 $K_{j \text{ 球内沟}}$ 与由测试 (A) 得到的 $K_{j \text{ 球内沟}}$ 进行比较, 通过并行测试验证、提高 $K_{j \text{ 球内沟}}$ 测试值的可靠性。

[0102] (7) 球面 - 环形外沟道结合面接触刚度的获取及验证测试方法

[0103] 采用环形外沟道 - 球面 - 圆锥面和环形外沟道 - 球面 - 球窝两种双结合面测试方案和上述测试装置, 进行球面 - 环形外沟道结合面接触刚度的获取测试和验证测试,

[0104] (A) 环形外沟道 - 球面 - 圆锥面双结合面接触刚度测试方法

[0105] 参照图 11, 其中上试件 3 的下端为环形外沟道, 下试件 1 的上端为圆锥面 (与测试 (1) 的下试件 1 同), 球体试件 2 置于上试件 3 的环形外沟道和下试件 1 的圆锥面之间, 上试件 3 的环形外沟道与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 环形外沟道结合面, 下试件 1 的圆锥面与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 圆锥面结合面, 构成环形外沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 圆锥面 - 球面 - 圆锥面的双结合面刚度测试方法相同, 测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了上试件 3 和球体试件 2 之间的球面 - 环形外沟道结合面接触变形 $\delta_{\text{球外沟}}$, 球体试件 2 和下试件 1 之间的球面 - 圆锥面结合面接触变形 $\delta_{\text{球锥}}$, $\delta_z = \delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球外沟}}$, 则环形外沟道 - 球面 - 圆锥面的双结合面接触刚度 $K_{j \text{ 外沟球锥}}$,

[0106] $K_{j \text{ 外沟球锥}} = F_z / (\delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球外沟}}) = F_z / \delta_z 17)$

[0107] 式中, $\delta_{\text{球锥}} + \delta_{\text{球外沟}} = \delta_z$, 与式 4) 同样的方法可得,

[0108] $K_{j \text{ 外沟球锥}} = K_{j \text{ 球锥}} K_{j \text{ 球外沟}} / (K_{j \text{ 球锥}} + K_{j \text{ 球外沟}}) 18)$

[0109] $K_{j \text{ 外沟球锥}}$ 通过本测试得到, $K_{j \text{ 球锥}}$ 通过测试 (1) 得到, 因此用式 18) 能够得到 $K_{j \text{ 球外沟}}$ 。

[0110] (B) 环形外沟道 - 球面 - 球窝的双结合面刚度测试方法

[0111] 参照图 12, 其中上试件 3 的下端为环形外沟道 (与测试 (7) (A) 的上试件 3 同), 下试件 1 的上端为球窝 (与测试 (2) 的下试件 1 同), 球体试件 2 置于上试件 3 的环形外沟道和下试件 1 的球窝之间, 上试件 3 的环形外沟道与球体试件 2 的球面组成一个球面 - 环

形外沟道结合面,下试件 1 的球窝与球体试件 2 的球面组成一个球面-球窝结合面,构成环形外沟道-球面-球窝的双结合面。具体的测试方法与测试 (1) 圆锥面-球面-圆锥面的双结合面刚度测试方法相同,测得的下试件 1 与上试件 3 之间的 Z 向相对位移 δ_z 包括了上试件 3 和球体试件 2 之间的球面-环形外沟道结合面接触变形 $\delta_{\text{球外沟}}$,球体试件 2 和下试件 1 之间的球面-球窝结合面接触变形 $\delta_{\text{球窝}}$, $\delta_z = \delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球外沟}}$,则环形外沟道-球面-球窝的双结合面接触刚度 $K_{j\text{外沟球窝}}$,

$$[0112] \quad K_{j\text{外沟球窝}} = F_z / (\delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球外沟}}) = F_z / \delta_z \quad (19)$$

[0113] 式中, $\delta_{\text{球窝}} + \delta_{\text{球外沟}} = \delta_z$,与式 4) 同样的方法可得,

$$[0114] \quad K_{j\text{外沟球窝}} = K_{j\text{球窝}} K_{j\text{球外沟}} / (K_{j\text{球窝}} + K_{j\text{球外沟}}) \quad (20)$$

[0115] $K_{j\text{外沟球窝}}$ 通过本测试得到, $K_{j\text{球窝}}$ 通过测试 (2) 得到,因此用式 20) 计算得到 $K_{j\text{球外沟}}$ 。

[0116] 将本测试 (B) 得到的 $K_{j\text{球外沟}}$ 与由测试 (A) 得到的 $K_{j\text{球外沟}}$ 进行比较,通过并行测试验证、提高 $K_{j\text{球外沟}}$ 测试值的可靠性。

[0117] 综上所述,本发明利用上述的测试装置,能够实现上述的七种类型球面-回转面结合面接触刚度测试,获得球面-圆锥面接触刚度 $K_{j\text{球锥}}$ 、球面-球窝接触刚度 $K_{j\text{球窝}}$ 、平面-球面结合面刚度 $K_{j\text{球平}}$ 、直形沟道-球面结合面刚度 $K_{j\text{球直沟}}$ 、环形内沟道-球面结合面刚度测试值 $K_{j\text{球内沟}}$ 及环形外沟道-球面结合面刚度测试值 $K_{j\text{球外沟}}$ 等六种类型球面-回转面的单结合面接触刚度;还能够进行回转体回转面半径与球体球面相等和不等的球面-回转面接触刚度测试,准确性、可靠性显著提高。

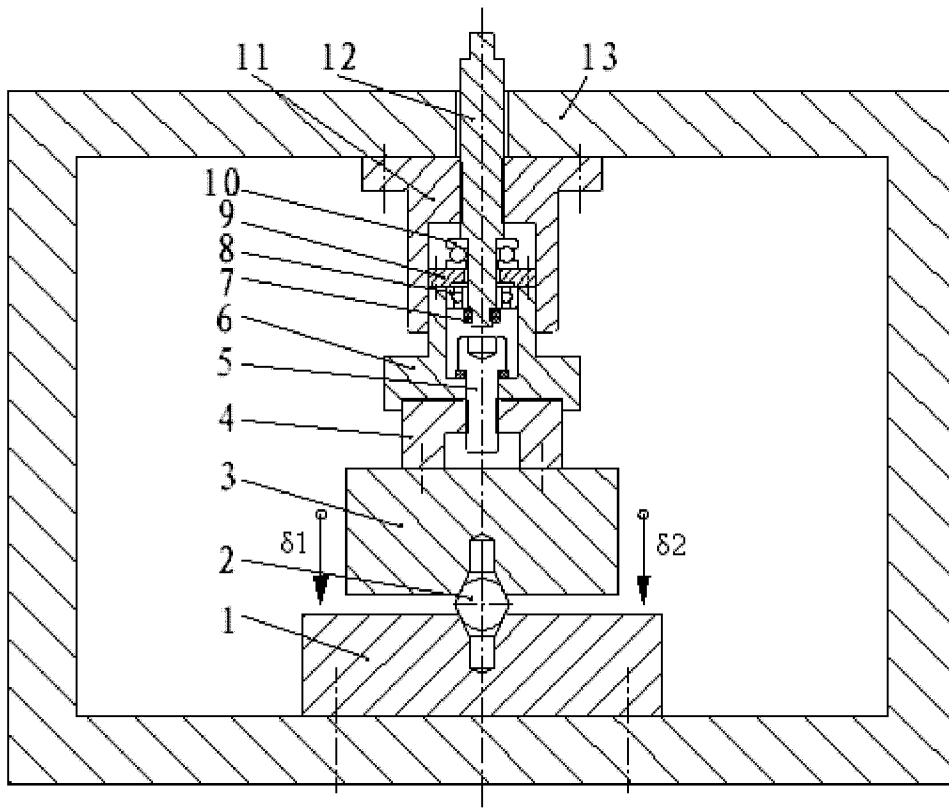


图 1

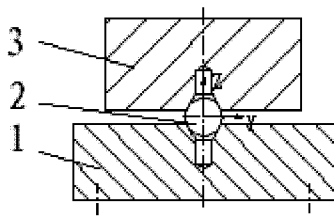


图 2

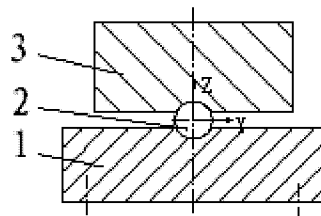


图 3

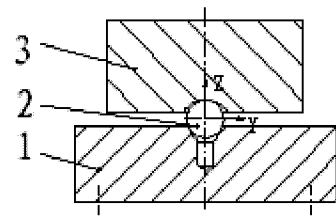


图 4

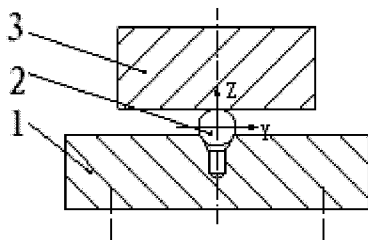


图 5

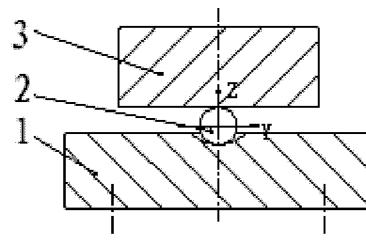


图 6

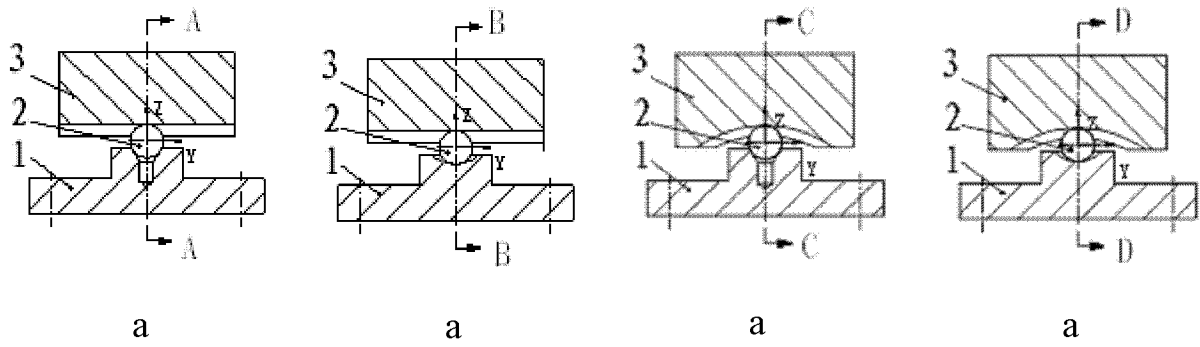


图 7

图 8

图 9

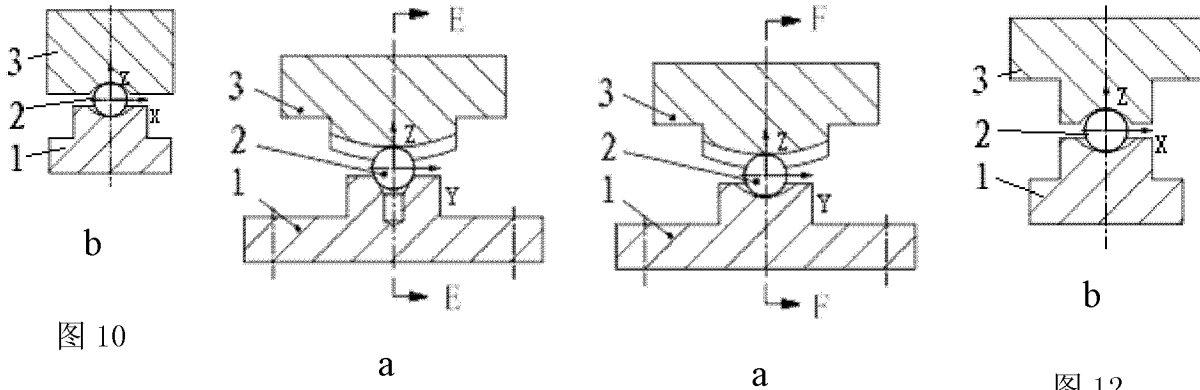


图 10

图 11

图 12