



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103076246 A

(43) 申请公布日 2013. 05. 01

(21) 申请号 201310003921. 9

(22) 申请日 2013. 01. 06

(71) 申请人 北京航空航天大学  
地址 100191 北京市海淀区学院路 37 号

(72) 发明人 石多奇 骆银银 杨晓光

(74) 专利代理机构 北京慧泉知识产权代理有限公司 11232

代理人 王顺荣 唐爱华

(51) Int. Cl.

G01N 3/32(2006. 01)

G01N 3/10(2006. 01)

G01M 13/00(2006. 01)

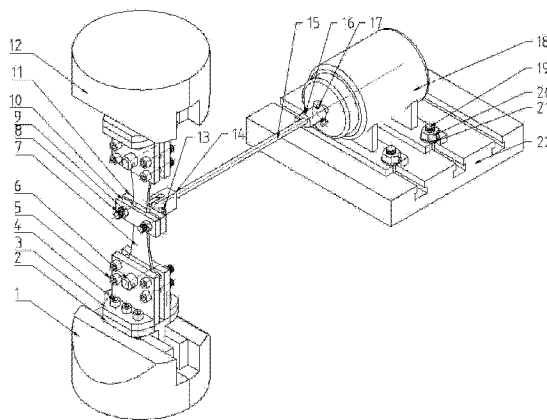
权利要求书1页 说明书5页 附图6页

## (54) 发明名称

一种双轴高低循环复合疲劳试验装置

## (57) 摘要

一种双轴高低循环复合疲劳试验装置, 该装置包括液压疲劳试验机及上、下夹头、电磁激振器、试样以及夹具和定位连接装置。电磁激振器通过定位连接装置中的柱形连接头、连接杆、U型连接头和夹具中的中间夹块 2 连接; 中间夹块 2、中间夹块 1 通过连接件夹住试样中部的方形质量块凸台, 试样两端通过连接件与夹具中的夹板连接; 夹板与夹具中连接头通过连接件中的螺栓相连; 连接头的竖直端置于液压疲劳试验机上、下夹头沟槽中与液压疲劳试验机接触, 依靠该试验机液压力夹紧。本发明结构简单, 操作方便, 解决了针对板状试样双向加载时水平和竖直方向的加载干涉和载荷协调问题, 可用来模拟燃气涡轮发动机转子叶片所承受的疲劳载荷。



1. 一种双轴高低循环复合疲劳试验装置,其特征在于:该装置包括液压疲劳试验机及上、下夹头、电磁激振器(18)、试样(7)以及夹具和定位连接装置;电磁激振器(18)通过定位连接装置中的柱形连接头(16)、连接杆(15)、U型连接头(14)和夹具中的中间夹块2(11)连接;中间夹块2(11)、中间夹块1(10)通过连接件夹住试样(7)中部的方形质量块凸台,试样(7)两端通过连接件与夹具中的夹板(3)连接;夹板(3)与夹具中连接头(2)通过螺栓相连;连接头(2)的竖直端置于液压疲劳试验机上、下夹头沟槽中与液压疲劳试验机接触,依靠该试验机液压力夹紧;

所述液压疲劳试验机是岛津 EHF—EM100K 型液压疲劳试验机,提供动态 100KN,静态 150KN 的力;其上、下夹头为该机附件;

所述电磁激振器是 JZQ—80 型激振器,提供频率为 1-1.5KHz,最大 800N 的激振力,它通过连接件固接在大质量工作台上;同时该电磁激振器配备相应的功率放大器和信号源;

所述试样,是采用对称设计,中间带有方形质量块凸台,两头呈方形并带通孔的条状件;

所述夹具包括夹板(3)、连接头(2)、中间夹块1(10)和中间夹块2(11);前二者通过螺栓连接;后二者通过螺栓夹紧试样(7)中部的方形质量块凸台;该夹板(3)是采用分半设计,外形呈 L 型结构件,其立面及平面都设置有连接孔;夹板(3)与试样之间平面接触,在连接螺栓作用下产生预定的压力,有效提高接触刚性;夹板(3)以及试样上的销孔与销钉(6)之间采用过渡配合,既便于装卸又不至于产生过大的间隙影响加载精度,同时过渡配合使得销钉(6)成为承力部件,有效避免了螺栓由于受剪力而产生破坏;该连接头(2)外形呈 T 型结构件,其水平面设有连接孔;其竖直端置于液压疲劳试验机上、下夹头沟槽中与液压疲劳试验机接触;分散的螺栓位置设计有效地提高刚度,同时通过连接相对位置的微调使试样对中;该中间夹块1(10)是中部开有沟槽、两端设有连接孔的矩形件;该中间夹块2(11)的外形呈 T 型结构件,其水平面的外形及尺寸与中间夹块1(10)相对应,其竖直端设有连接孔,通过小销钉(13)与 U 型连接头(14)连接;

所述定位连接装置包括 U 型连接头(14)、连接杆(15)和柱形连接头(16),连接杆(15)的螺纹端与 U 型连接头(14)上的螺纹螺接,连接杆(15)的球形端和柱形连接头(16)球铰连接;该 U 型连接头(14)是开有 U 形槽的矩形状件,U 形槽上设有连接孔,U 形槽下端设有螺纹连接孔;该连杆(15)是圆杆件,圆杆的一端是螺纹,另一端设置为球铰形;该柱形连接头(16)的外形是轴套状件,外圆周设有均布的三个螺纹固定孔,内孔一端加工成球铰状与连接杆(15)的球铰端铰接,内孔另一端与电磁激振器(18)的激振头相连,采用圆周方向均布的三个螺钉进行夹紧。

## 一种双轴高低循环复合疲劳试验装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种双轴高低循环复合疲劳试验装置,属于材料与结构疲劳性能试验领域。

### 背景技术

[0002] 现代燃气涡轮发动机的设计需要在高性能、高可靠性、良好经济性之间上取得综合平衡。燃气涡轮发动机的转子叶片,诸如风扇、压气机和涡轮叶片在工作时由于旋转都承受着较大的低频离心力载荷,同时还受到气流强迫振动的高频载荷,使得在发动机转子叶片中普遍存在高低循环复合疲劳破坏模式。这就意味着要想设计出性能良好、可靠的发动机必需提高部件的抗疲劳性能。

[0003] 提高部件的抗疲劳性能主要从材料性能和部件结构疲劳性能的提升来实现。而其中对于材料疲劳性能的研究就需要各种疲劳试验数据。

[0004] 在燃气涡轮发动机工作的过程中,由于转子的高速旋转使得风扇、压气机和涡轮叶片都承受较高的离心力。同时在每一级的压气机和涡轮中,都有静子叶片和转子叶片。静子叶片引导气流流过转子叶片,经过每个静子叶片时气流的压力和速度都会发生周期性的变化,体现为对转子叶片的周期性激振力。当满足一定条件时,转子叶片需要承受高频率的强迫振动载荷,造成高循环疲劳;同时,在启动-停车过程中叶片还承受以离心应力为主的低循环疲劳。当转子叶片的疲劳性能不足时将会产生复合疲劳破坏。

[0005] 本发明是为了能够良好的模拟在转子叶片工作中出现的高低循环复合疲劳载荷引起的破坏,主要针对板状试样进行高低循环复合疲劳试验。

### 发明内容

[0006] 1、发明目的

[0007] 本发明的目的是提供一种双轴高低循环复合疲劳试验装置,解决针对板状试样的双向同时加载的问题。

[0008] 2、技术方案

[0009] 本发明为一种双轴高低循环复合疲劳试验装置,见图1,该装置包括液压疲劳试验机及上、下夹头、电磁激振器(18)、试样(7)以及夹具和定位连接装置。它们之间的位置连接关系是:电磁激振器(18)通过定位连接装置中的柱形连接头(16)、连接杆(15)、U型连接头(14)和夹具中的中间夹块2(11)连接;中间夹块2(11)、中间夹块1(10)通过连接件夹住试样(7)中部的方形质量块凸台,试样(7)两端通过连接件与夹具中的夹板(3)连接;夹板(3)与夹具中连接头(2)通过螺栓相连;连接头(2)的竖直端置于液压疲劳试验机上、下夹头沟槽中与液压疲劳试验机接触,依靠该试验机液压力夹紧。

[0010] 所述液压疲劳试验机是岛津EHF-EM100K型液压疲劳试验机,可以提供动态100KN,静态150KN的力。其上、下夹头为该机附件。

[0011] 所述电磁激振器是JZQ-80型激振器,可以提供频率为1-1.5KHz,最大800N的激振

力,它通过连接件固接在大质量工作台上。同时该电磁激振器配备相应的功率放大器和信号源。

[0012] 所述试样,见图 5,是采用对称设计,中间带有方形质量块凸台,两头呈方形并带通孔的条状件;其作用为:(a)可以通过设计质量块凸台的几何尺寸来调整其质量,进而改变试样的固有频率和模态,以更好地模拟真实叶片的固有频率和模态;(b)质量块凸台与平板光滑段之间的过渡区域可以使高循环疲劳载荷造成的弯曲应力有效集中在考核部位;(c)质量块凸台正中的侧平面提供了水平激振的加载面,避免因直接加载在试样其它部位产生的表面损伤。试样采用对称设计,使得在中间凸台的侧平面加载高循环激励载荷时,在试样上下两部分造成的应力相同,同时也可以保证在试样两端固支的情况下,依然可以施加水平方向的高循环疲劳载荷。试样两端经过加厚设计,并带有销钉孔,可以通过销钉连接实现可靠定位并传递低循环疲劳载荷,同时避免低循环疲劳载荷产生附加弯矩。

[0013] 所述夹具包括夹板(3)、连接头(2)、中间夹块 1(10)和中间夹块 2(11);前二者通过螺栓连接;后二者通过螺栓夹紧试样(7)中部的方形质量块凸台;该夹板(3)是采用分半设计,外形呈 L 型结构件,其立面及平面都设置有连接孔;夹板(3)与试样之间平面接触,在连接螺栓作用下产生一定的压力,可以有效提高接触刚性。夹板(3)以及试样上的销孔与销钉(6)之间采用过渡配合,既便于装卸又不至于产生过大的间隙影响加载精度,同时过渡配合可以使得销钉(6)成为承力部件,有效避免了螺栓由于受剪力而产生破坏。该连接头(2)外形呈 T 型结构件,其水平面设有连接孔;其竖直端置于液压疲劳试验机上、下夹头沟槽中与液压疲劳试验机接触。分散的螺栓位置设计可以有效地提高刚度,同时可以通过连接相对位置的微调使试样对中。该中间夹块 1(10)是中部开有沟槽、两端设有连接孔的矩形件;该中间夹块 2(11)的外形呈 T 型结构件,其水平面的外形及尺寸与中间夹块 1(10)相对应,其竖直端设有连接孔,通过小销钉(13)与 U 型连接头(14)连接。

[0014] 所述定位连接装置包括 U 型连接头(14)、连接杆(15)和柱形连接头(16),连接杆(15)的螺纹端与 U 型连接头(14)上的螺纹螺接,连接杆(15)的球形端和柱形连接头(16)球铰连接。该 U 型连接头(14)是开有 U 形槽的矩形状件,U 形槽上设有连接孔,U 形槽下端设有螺纹连接孔。该连杆(15)是圆杆件,圆杆的一端是螺纹,另一端设置为球铰形。该柱形连接头(16)的外形是轴套状件,外圆周设有均布的三个螺纹固定孔,内孔一端加工成球铰状与连接杆(15)的球铰端铰接,内孔另一端与电磁激振器(18)的激振头相连,采用圆周方向均布的三个螺钉进行夹紧。

[0015] 试验中装好夹具和试样及定位连接装置,加载低循环疲劳载荷,之后调节激振器高度使其和试样中部激振点保持同一高度,即可以进行水平高循环疲劳载荷加载。加载的水平载荷范围应小于竖直方向疲劳试验机的最大可承受横向载荷。

[0016] 3、优点和功效

[0017] (1)有效解决了竖直和水平两个方向加载的干涉问题。对试样中部激振可以在试样两端固支的情况下实现高循环疲劳载荷的加载;激振器与试样夹具之间采用销钉和球连接,可以有效地避免因竖直方向载荷微小变化引起的位移而产生弯矩。

[0018] (2)部件少,结构简单。针对试样两端采用较为简单的夹具进行夹紧,在中间进行激振,避免了因为同时加载竖直载荷和水平载荷需要特别设计复杂夹具。同时该方案只需在普通疲劳试验机上,配备一定功率的激振器即可完成。

[0019] (3) 试样设计更有代表性。该中间带有凸台的试样设计可以很好的模拟真实叶片的固有频率和振型,双向加载的受力状态也更为接近转子叶片工作中的受力状态。同时当水平激振力的频率等于试样的一阶共振频率时,可以较好的模拟叶片在共振状态下的受力状态。

#### 附图说明

[0020] 图 1 :本发明双轴高低循环复合疲劳试验装置结构总图

[0021] 图 2 :连接头三维立体图

[0022] 图 3 :夹板三维立体图

[0023] 图 4 :试样三维立体图

[0024] 图 5 :中间夹块 1 三维立体图

[0025] 图 6 :中间夹块 2 三维立体图

[0026] 图 7 :U 型连接头三维立体图

[0027] 图 8 :柱形连接头三维立体图

[0028] 图 9 :连接杆三维立体图

[0029] 图 10 :球铰连接处剖面图

[0030] 图 11 :试样有限元分析加载示意图

[0031] 图 12 :拉伸力作用下试样应力分布有限元分析结果示意图

[0032] 图 13 :拉伸预应力作用下试样一阶振型有限元分析结果示意图

[0033] 图 14 :加载横向简谐激励试样振型响应有限元分析结果示意图

[0034] 图 15 :加载横向简谐激励试样弯曲应力分布有限元分析结果示意图

[0035] 图中符号说明如下 :

|        |                      |            |                       |
|--------|----------------------|------------|-----------------------|
| [0036] | 1 岛津 E-100K 疲劳试验机下夹头 | 2 连接头      | 3 夹板                  |
| [0037] | 4 内六角螺栓 1            | 5 内六角螺栓 2  | 6 大销钉                 |
| [0038] | 7 试样                 | 8 内六角螺栓 3  | 9 外六角螺母 1             |
| [0039] | 10 中间夹块 1            | 11 中间夹块 2  | 12 岛津 E-100K 疲劳试验机上夹头 |
| [0040] | 13 小销钉               | 14 U 型连接头  | 15 连接杆                |
| [0041] | 16 柱形连接头             | 17 紧固螺钉    | 18 电磁激振器              |
| [0042] | 19 T 型螺栓             | 20 外六角螺母 2 | 21 垫片                 |
| [0043] | 22 大质量工作台            |            |                       |

#### 具体实施方式

[0044] 见图 1——图 10,本发明为一种双轴高低循环复合疲劳试验装置,该装置主要包括液压疲劳试验机及上、下夹头(1)、(12)、电磁激振器(18)、试样(7)以及夹具和定位连接装置。它们之间的位置连接关系是:电磁激振器(18)通过定位连接装置中的柱形连接头(16)、连接杆(15)、U 型连接头(14)和夹具中的中间夹块 2 (11)连接;中间夹块 2 (11)、中间夹块 1 (10)通过内六角螺栓 3 (8)、外六角螺母 1 (9)夹住试样(7)中部的方形质量块凸台,试样(7)两端通过内六角螺栓 2 (5)、大销钉(6)与夹具中的夹板(3)连接;夹板(3)与

夹具中连接头(2)的平面端螺接;连接头(2)的竖直端置于液压疲劳试验机上、下夹头(1)、(12)沟槽中与液压疲劳试验机接触,在试验机液压力作用下夹紧。

[0045] 所述液压疲劳试验机是岛津 EHF—EM100K 型液压疲劳试验机,可以提供动态 100KN、静态 150KN 的力。

[0046] 所述电磁激振器是 JZQ—80 型激振器,可以提供频率为 1-1.5KHz,最大 800N 的激振力,它通过 T 型螺栓(19)、外六角螺母 2(20)、垫片(21)固接在大质量工作台(22)上。同时该电磁激振器配备相应的功率放大器和信号源。

[0047] 所述试样(7),见图 5,是采用对称设计,中间带有方形质量块凸台,两头呈方形并带通孔的条状件;其作用为:(a)可以通过设计质量块凸台的几何尺寸来调整其质量,进而改变试样的固有频率和模态,以更好地模拟真实叶片的固有频率和模态;(b)质量块凸台与平板光滑段之间的过渡区域可以使高循环疲劳载荷造成的弯曲应力有效集中在考核部位;(c)质量块凸台正中的侧平面提供了水平激振的加载面,避免因直接加载在试样其它部位禅师的表面损伤。试样(7)采用对称设计,使得在中间凸台的侧平面加载高循环激励载荷时,在试样(7)上下两部分造成的应力相同,同时也可以保证在试样(7)两端固支的情况下,依然可以施加水平方向的高循环疲劳载荷。试样两端经过加厚设计,并带有销钉孔,可以通过销钉连接实现可靠定位并传递低循环疲劳载荷,同时避免低循环疲劳载荷产生附加弯矩。

[0048] 所述夹具包括夹板(3)、连接头(2)、中间夹块 1(10)和中间夹块 2(11);前二者通过内六角螺栓 1(4)连接;后二者通过内六角螺栓 3(8)夹紧试样(7)中部的方形质量块凸台;该夹板(3)是采用分半设计,外形呈 L 型结构件,其立面及平面都设置有连接孔;夹板(3)与试样之间平面接触,在连接螺栓作用下产生一定的压力,可以有效提高接触刚性。夹板(3)以及试样(7)上的销孔与大销钉(6)之间采用过渡配合,既便于装卸又不至于产生过大的间隙影响加载精度,同时过渡配合可以使得销钉(6)成为承力部件,有效避免了螺栓由于受剪而产生破坏。该连接头(2)外形呈 T 型结构件,其水平面设有连接孔;其竖直端置于液压疲劳试验机上、下夹头沟槽中与液压疲劳试验机接触。分散的螺栓位置设计可以有效地提高刚度,同时可以通过连接相对位置的微调使试样对中。该中间夹块 1(10)是中部开有沟槽、两端设有连接孔的矩形件;该中间夹块 2(11)的外形呈 T 型结构件,其水平面的外形及尺寸与中间夹块 1(10)相对应,其竖直端设有连接孔,通过小销钉(13)与 U 型连接头(14)连接。

[0049] 所述定位连接装置包括 U 型连接头(14)、连接杆(15)和柱形连接头(16),连接杆(15)的螺纹端与 U 型连接头(14)上的螺纹螺接,连接杆(15)的球形端和柱形连接头(16)球铰连接。该 U 型连接头(14)是开有 U 形槽的矩形状件,U 形槽上设有连接孔,U 形槽下端设有螺纹连接孔。该连接杆(15)是圆杆件,圆杆的一端是螺纹,另一端设置为球铰形。该柱形连接头(16)的外形是轴套状件,外圆周设有均布的三个螺纹固定孔,内孔一端加工成球铰状与连接杆(15)的球铰端铰接,内孔另一端与电磁激振器(18)的激振头相连,采用圆周方向均布的三个紧固螺钉(17)进行夹紧。

[0050] 1、针对试样(7)进行有限元分析,确定低循环疲劳载荷与高循环疲劳载荷的激励频率。图 11 为有限元分析中加载示意图。图 12—图 15 为针对某种钛合金试样采用 ABAQUS 软件分析的结果:图 12 表明当低循环载荷  $F_1$  的最大值为 64KN 时,试样应力集中部位最大

应力为 844MPa, 以及其应力分布 ;图 13 为在图 12 所示应力分布基础上的一阶模态, 试样的一阶固有频率为 1410Hz ;图 14、图 15 分别为加载  $F_2=625\text{Sin}8860t$  N 时试样的振型, 以及 Z 方向的应力分布。由这些分析可以确定试验时低循环的最大力为 64KN, 高循环水平方向上的力幅值为 625N, 频率为 1410Hz, 即试样的共振频率, 预估加载高循环应力比为  $R=0.43$ 。试验中通过调节以上各参数大小实现设计应力水平和应力比的加载。

[0051] 2、将试样(7)与夹具连接好, 并在竖直方向上与疲劳试验机连接好, 通过微调连接螺栓的位置使试样(7)对中。

[0052] 3、将中间夹块用螺栓夹紧试样(7)中部, 之后在竖直方向上加载低循环疲劳载荷至最大值。加载低循环疲劳载荷时采用位移控制方式, 保证低循环载荷稳定加载。

[0053] 4、此时调整电磁激振器(18)高度, 使其激振头与试样激振点保持在同一高度, 用连接杆(15)、小销钉(13)和螺栓将电磁激振器(18)连接好。调整连接的松紧, 使其可以很好地传递激振力。

[0054] 5、设定好测振仪位置, 以便准确测量振动位移。测振仪监测点如图 11 中所示的应力集中点, 或者其对称位置。

[0055] 6、设置高循环激振载荷谱和低循环载荷谱, 进行双轴高低循环疲劳试验。

[0056] 7、试验结束后针对测得的位移, 利用有限元分析得到考核点的真实应力状态, 并进行分析得出结论。

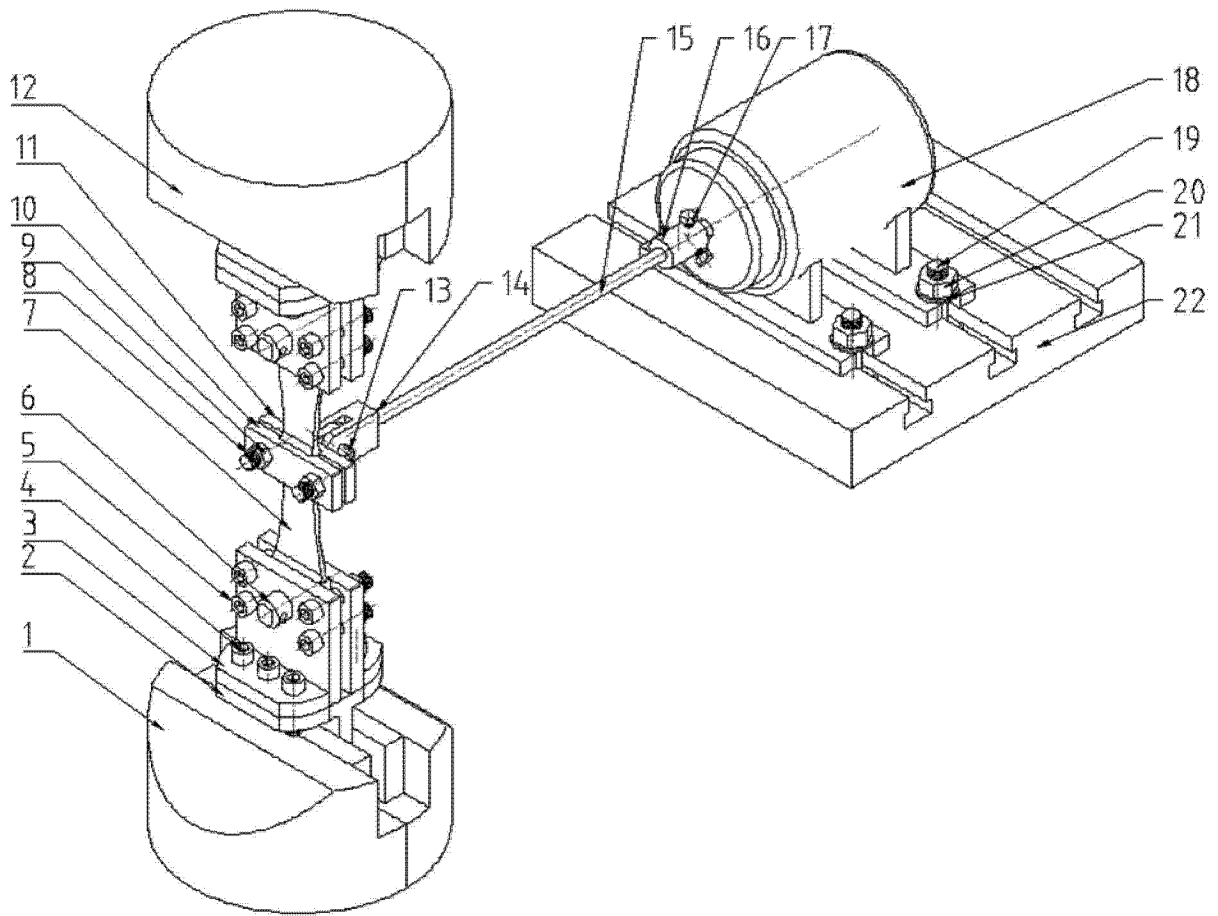


图 1

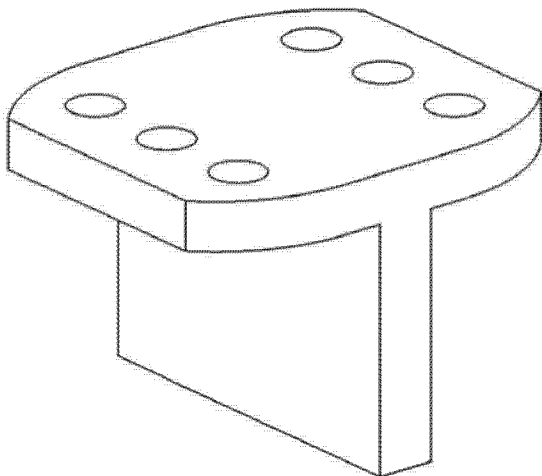


图 2

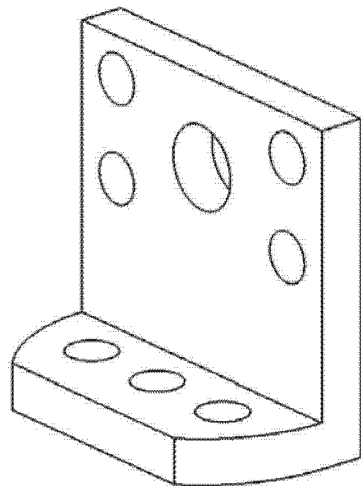


图 3



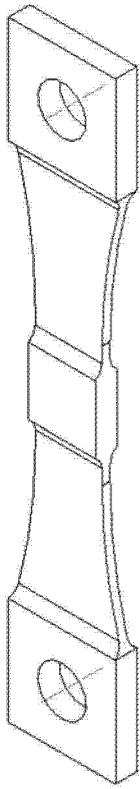


图 4

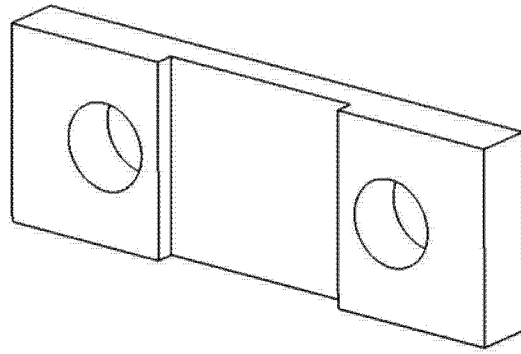


图 5

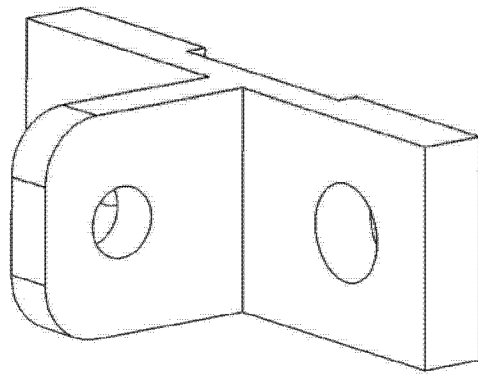


图 6

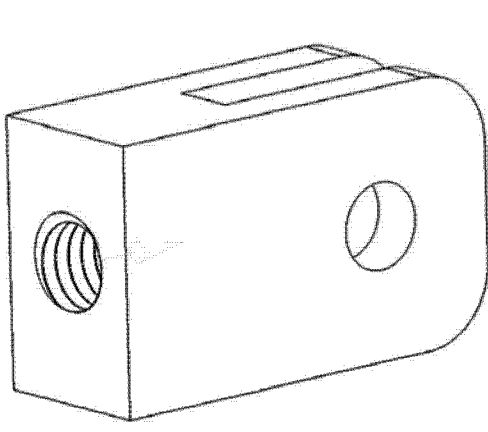


图 7

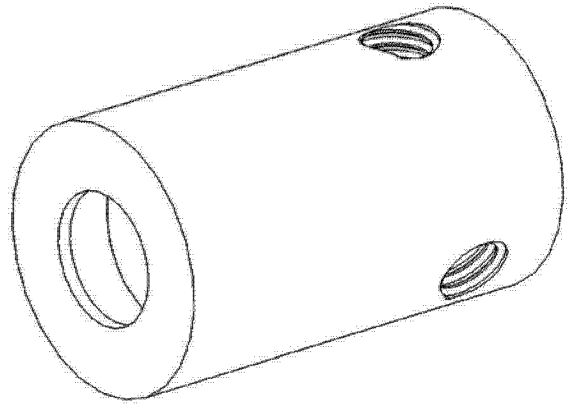


图 8

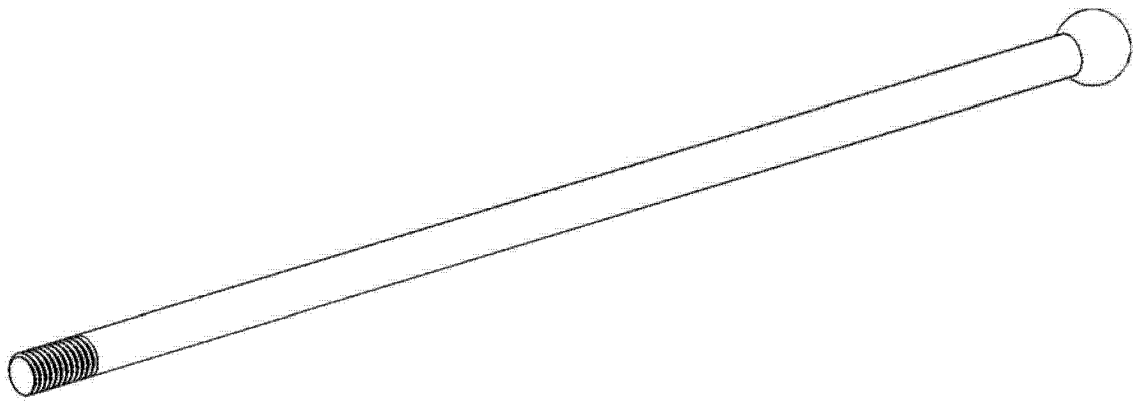


图 9

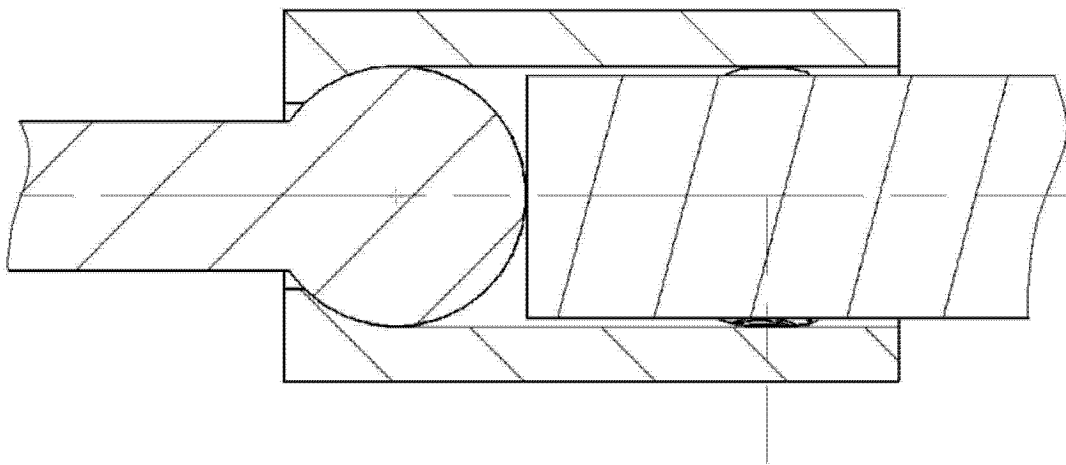


图 10

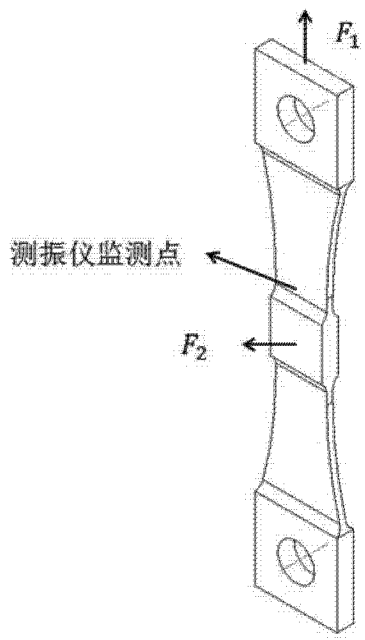


图 11

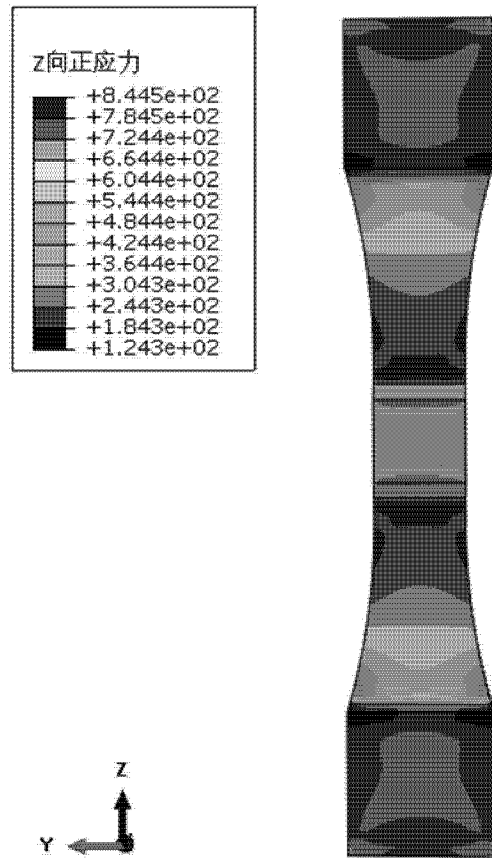


图 12

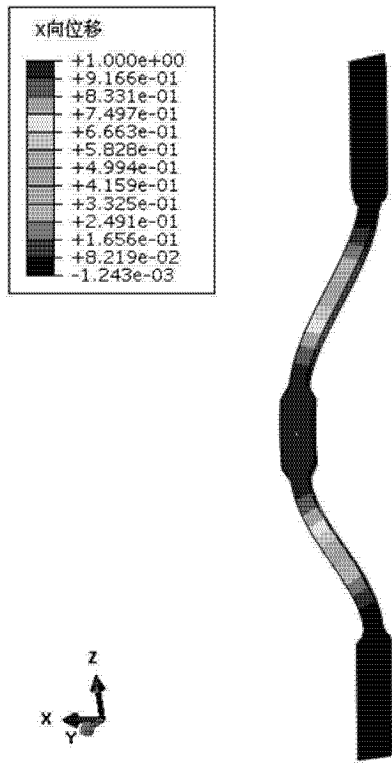


图 13

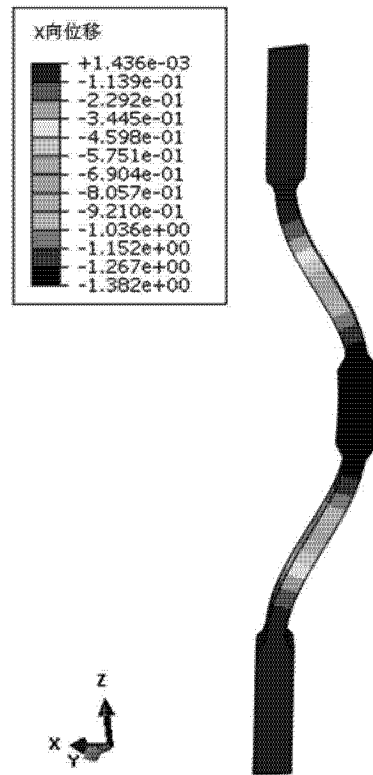


图 14

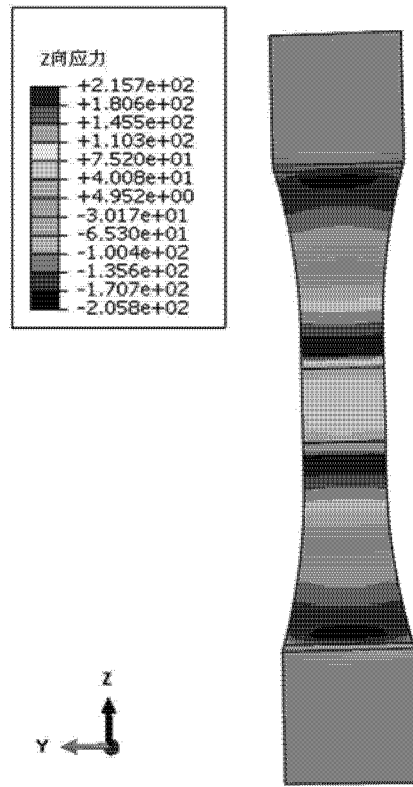


图 15