



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 106404553 B

(45) 授权公告日 2023. 06. 30

(21) 申请号 201610446568.5

CN 103926153 A, 2014.07.16

(22) 申请日 2016.06.21

JP H0518877 A, 1993.01.26

(65) 同一申请的已公布的文献号

JP H05322723 A, 1993.12.07

申请公布号 CN 106404553 A

CN 104568605 A, 2015.04.29

(43) 申请公布日 2017.02.15

CN 204330501 U, 2015.05.13

(73) 专利权人 中国船舶重工集团公司第七二五研究所

李远睿, 黄荣, 黄本多, 邱绍宇, 李卫军. Ti-Al-Zr 钛合金锻材的断裂韧性测定及分析. 核动力工程. 2003, (第05期), 全文.

地址 471000 河南省洛阳市洛龙区滨河南路169号

张亚军. 柔度法测量三点弯曲试样弹性模量的影响因素. 材料开发与应用. 2005, (第05期), 全文.

(72) 发明人 郑国华 张利娟 赵阳

姜风春, 刘瑞堂, 张晓欣, 沙桂英. 动态弹塑性断裂韧性  $J_{IC}$  测试方法研究. 机械强度. 2002, (第03期), 全文.

(74) 专利代理机构 北京市中联创和知识产权代理有限公司 11364

专利代理师 李向阳 王铮

(51) Int. Cl.

G01N 3/20 (2006.01)

G01N 3/02 (2006.01)

三点弯曲单试样测定高强高韧钢断裂韧性  $J_{IC}$  的柔度方法. 东北大学学报(自然科学版). 1997, (第05期), 全文.

(56) 对比文件

CN 101694436 A, 2010.04.14

审查员 陈雨露

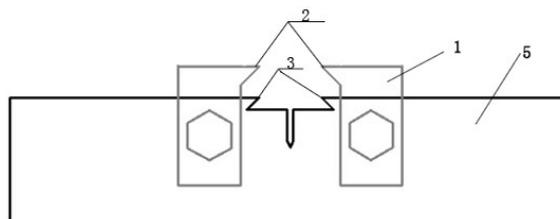
权利要求书1页 说明书5页 附图6页

(54) 发明名称

三点弯曲试样延性断裂韧性  $J_{IC}$  辅助测试装置以及测试方法

(57) 摘要

三点弯曲试样延性断裂韧性  $J_{IC}$  辅助测试装置以及测试方法, 该方法借助刀口辅助装置获得不同高度的COD规张开位移, 计算得到三点弯曲试样的施力点位移, 进而获得三点弯曲试样的延性断裂韧性  $J_{IC}$ , 使得高强高韧合的安全评价工作可以有效的开展。



1. 一种三点弯曲试样延性断裂韧性JIC辅助测试装置的测试方法,其特征在于:所述辅助测试装置设有两组对两个COD规分别夹紧的刀口刃组(8),两个刀口刃组(8)呈不同高度设置,下刀口刃组(3)的两个刀口刃对称设在三点弯曲试样缺口(4)的两侧,并开设在三点弯曲试样(5)上,上刀口刃组(2)的两个刀口刃分别设置在两个对称设置的三点弯曲试样缺口两侧的刀口辅助装置(1)上,刀口辅助装置(1)的两侧的卡臂(101)分别通过螺栓(102)夹设在三点弯曲试样(5)上,在测试前,上刀口刃组(2)的两个刀口刃和下刀口刃组(3)的两个刀口刃在水平方向上对齐,在同一侧的两个刀口刃组(8)的两个刀口刃在竖直方向上对齐;

所述测试方法包括以下步骤:

步骤一、将两个刀口辅助装置分别对称安装在三点弯曲试样缺口的两侧,在三点弯曲试样的三点弯曲试样缺口的两侧开设相对称的刀口刃组,两个刀口辅助装置组成的刀口刃组高于三点弯曲试样的刀口刃组,上刀口刃组的两个刀口刃和下刀口刃组的两个刀口刃在水平方向上对齐,在同一侧的两个刀口刃组的两个刀口刃在竖直方向上对齐,两个刀口刃组分别夹紧一个COD规;

步骤二、利用三点弯曲试验机对三点弯曲试样施加载荷,两个COD规给两个刀口刃组施加张力,使刀口辅助装置相对三点弯曲试样不发生滑动,测试上刀口刃组的张开位移 $V_1$ 和下刀口刃组的张开位移 $V_2$ ,由公式

$$\text{式中: } q = \frac{S}{2} \tan \left[ \arcsin \left( \frac{V_2 - V_1}{2(Z_2 - Z_1)} \right) \right] \quad (2)$$

q-施力点位移;

S-三点弯曲试样跨距;

V1-上刀口刃组的两个刀口刃的张开位移;

V2-下刀口刃组的两个刀口刃的张开位移;

Z1-下刀口和三点弯曲试样表面之间的距离;

Z2-上刀口和三点弯曲试样表面之间的距离;

即可获得三点弯曲试样的施力点位移q,采用多试样法获得三点弯曲试样的 $\Delta a$ -J阻力曲线、延性断裂韧性 $J_{IC}$ 和平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 。

2. 如权利要求1所述的三点弯曲试样延性断裂韧性JIC辅助测试装置的测试方法,其特征在于:所述的螺栓(102)和三点弯曲试样(5)之间设有垫片(7)。

3. 如权利要求2所述的三点弯曲试样延性断裂韧性JIC辅助测试装置的测试方法,其特征在于:所述的螺栓(102)的螺栓头(1021)为弧面,垫片(7)的中心设有与螺栓头(1021)相匹配的凹槽(701)。

## 三点弯曲试样延性断裂韧性J<sub>IC</sub>辅助测试装置以及测试方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于金属材料断裂力学性能检测技术领域,具体涉及一种三点弯曲试样延性断裂韧性 $J_{IC}$ 测试装置及其测试方法。

### 背景技术

[0002] 随着冶金质量的提高,高强高韧合金作为结构材料在工程上应用的越来越多,经常需要对其进行安全评价。平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 是重要的安全评价指标和结构件设计指标,因此通过测试获得高强高韧合金的平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 就显得尤为重要。但是对于高强高韧合金,直接测试平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 通常是不可行的,这是由于在测试中若采用较小尺寸的断裂韧性试样,通常不满足平面应变 $K_{IC}$ 的判定条件 $B \geq 2.5 (K_{IC}/R_{p0.2})^2$ 和 $P_{max}/P_Q \leq 1.1$ ;在测试中若采用较大尺寸的断裂韧性试样,试验机的容量通常达不到。目前对于高强高韧合金平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 的测试是通过测试延性断裂韧性 $J_{IC}$ ,由转化公式获得 $K_{IC}$ 。三点弯曲试样由于形式简单、加工快捷、代表性强等优点成为金属材料断裂力学性能检测领域中试样形式的首选,尤其三点弯曲试样的缺口位于上表面,使得COD规可以置于低温液体外,从而可以有效的保护COD规,这使得三点弯曲试样成为低温延性断裂韧性 $J_{IC}$ 测试中试样形式的唯一选择。在延性断裂韧性 $J_{IC}$ 试验过程中,需要获得施力点位移 $V$ -载荷 $F$ 曲线,而对于三点弯曲试样,由于COD规只能测得水平方向的缺口张开位移,不能直接得到竖直方向的施力点位移,如图1所示,继而试验不能获得有效的延性断裂韧性 $J_{IC}$ 。目前,大多数测试者都是直接利用试验机机架位移近似代替施力点位移,由于试验机机架位移包括施力点位移、设备位移、横梁位移、试样弹性位移及试验卡具弹性位移,这就导致试验得到的试验机机架位移远远大于施力点位移,从而造成测试误差。

### 发明内容

[0003] 为了解决延性断裂韧性 $J_{IC}$ 试验中三点弯曲试样施力点位移无法测试的问题,本发明提供了一种三点弯曲试样延性断裂韧性 $J_{IC}$ 测试装置及其测试方法。该方法借助刀口辅助装置获得不同高度的COD规张开位移,计算得到三点弯曲试样的施力点位移,进而获得三点弯曲试样的延性断裂韧性 $J_{IC}$ ,使得高强高韧合金的安全评价工作可以有效的开展。

[0004] 为实现上述技术目的,所采用的技术方案是:三点弯曲试样延性断裂韧性JIC辅助测试装置,设有两组对两个COD规分别夹紧的刀口刃组,两个刀口刃组呈不同高度设置,下刀口刃组的两个刀口刃对称设在三点弯曲试样缺口的两侧,并开设在三点弯曲试样上,上刀口刃组的两个刀口刃分别设置在两个对称设置的三点弯曲试样缺口两侧的刀口辅助装置上,刀口辅助装置的两侧的卡臂分别通过螺栓夹设在三点弯曲试样上,在测试前,上刀口刃组的两个刀口刃和下刀口刃组的两个刀口刃在水平方向上对齐,在同一侧的两个刀口刃组的两个刀口刃在竖直方向上对齐。

[0005] 本发明所述的螺栓和三点弯曲试样之间设有垫片。

[0006] 本发明所述的螺栓的螺栓头为弧面,垫片的中心设有与螺栓头相匹配的凹槽。

[0007] 三点弯曲试样延性断裂韧性JIC辅助测试装置的测试方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤一、将两个刀口辅助装置分别对称安装在三点弯曲试样缺口的两侧,在三点弯曲试样的三点弯曲试样缺口的两侧开设相对称的刀口刃组,两个刀口辅助装置组成的刀口刃组高于三点弯曲试样的刀口刃组,上刀口刃组的两个刀口刃和下刀口刃组的两个刀口刃在水平方向上对齐,在同一侧的两个刀口刃组的两个刀口刃在竖直方向上对齐,两个刀口刃组分别夹紧一个COD规;

[0009] 步骤二、利用三点弯曲试验机对三点弯曲试样施加载荷,两个COD规给两个刀口刃组施加张力,使刀口辅助装置相对三点弯曲试样不发生滑动,测试上刀口刃组的张开位移

$$V_1 \text{ 和下刀口刃组的张开位移 } V_2, \text{ 由公式 } q = \frac{S}{2} \tan \left[ \arcsin \left( \frac{V_2 - V_1}{2(Z_2 - Z_1)} \right) \right] \quad (2)$$

[0010] 式中:

[0011]  $q$ -施力点位移;

[0012]  $S$ -三点弯曲试样跨距;

[0013]  $V_1$ -上刀口刃组的两个刀口刃的张开位移;

[0014]  $V_2$ -下刀口刃组的两个刀口刃的张开位移;

[0015]  $z_1$ -下刀口和三点弯曲试样表面之间的距离;

[0016]  $z_2$ -上刀口和三点弯曲试样表面之间的距离;

[0017] 即可获得三点弯曲试样的施力点位移 $q$ ,采用多试样法获得三点弯曲试样的 $\Delta a$ - $J$ 阻力曲线、延性断裂韧性 $J_{IC}$ 和平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 。

[0018] 本发明有益效果是:

[0019] 该方法借助刀口辅助装置,通过测试不同高度的COD规张开位移,利用几何原理计算得到三点弯曲试样的施力点位移,继而得到试样的延性断裂韧性 $J_{IC}$ ,得到的数据准确性高、误差低。这使得高强高韧合金的安全评价工作可以有效的开展。同时该装置具有拆卸方便,可以重复使用等优点。

## 附图说明

[0020] 图 1为现有技术中COD规测缺口张开位移示意图;

[0021] 图2为本发明施力点位移测试原理图;

[0022] 图3为本发明刀口辅助装置装配平面示意图;

[0023] 图4为本发明刀口辅助装置的侧视结构示意图;

[0024] 图5为本发明刀口辅助装置装配立体示意图;

[0025] 图6为本发明刀口辅助装置的立体结构示意图;

[0026] 图7 为本发明实施例X70管线钢断裂韧性 $J_{IC}$ 试样正视形式及尺寸;

[0027] 图8为本发明实施例X70管线钢断裂韧性 $J_{IC}$ 试样俯视形式及尺寸;

[0028] 图9为本发明1#试样COD规张开位移 $V_1/V_2$ -载荷 $F$ 曲线;

[0029] 图10为本发明1#试样施力点位移 $q$ -载荷 $F$ 曲线;

[0030] 图11为本发明X70管线钢 $J$ 积分与裂纹扩展量 $\Delta a$ 的关系曲线图;

[0031] 图12为本发明螺栓的结构示意图;

[0032] 图13为本发明垫片的立体结构示意图；

[0033] 图中：1、刀口辅助装置，101、卡臂，102、螺栓，1021、螺栓头，2、上刀口刃组，3、下刀口刃组，4、三点弯曲试样缺口，5、三点弯曲试样，6、COD规，7、垫片，701、凹槽，8、刀口刃组。

### 具体实施方式

[0034] 三点弯曲试样延性断裂韧性JIC辅助测试装置及其测试方法，通过测试不同高度的COD规张开位移，利用几何原理计算得到三点弯曲试样的施力点位移，测试原理见图2，施力点位移 $q$ 可由公式(2)计算获得。

$$[0035] \quad \tan \frac{\theta}{2} = \tan \left[ \arcsin \left( \frac{V_2 - V_1}{2(Z_2 - Z_1)} \right) \right] = \frac{q}{S/2} \quad (1)$$

$$[0036] \quad q = \frac{S}{2} \tan \left[ \arcsin \left( \frac{V_2 - V_1}{2(Z_2 - Z_1)} \right) \right] \quad (2)$$

[0037] 式中：

[0038]  $q$ -施力点位移；

[0039]  $S$ -三点弯曲试样跨距；

[0040]  $V_1, V_2$ -两个刀口的张开位移；

[0041]  $z_1, z_2$ -两个刀口和试样表面之间的距离；

[0042] 施力点位移的测试借助刀口辅助装置来实现。刀口辅助装置包括一对刀口刃、垫片和螺栓等。一对刀口刃分别对称置于三点弯曲 $J_{IC}$ 试样缺口的两侧，由四个垫片和四个螺栓分别从前、后、左、右固定刀口辅助装置，另一对刀口刃开设在三点弯曲试样上，保证试样缺口两侧的刀口在同一个水平线上，如图3、4、5所示，并且在COD规给两个刀口刃组施加张力时保证其相对试样不发生滑动。

[0043] 采用辅助装置间接测试三点弯曲试样的施力点位移时存在以下问题：1. 三点弯曲试样缺口每一侧的两个刀口刃在竖直方向上需对齐，如图2所示，A1和B1需在一条线上，A2和B2也需在一条线上，这样才能保证根据相似三角形转化得到的施力点位移是正确的。2. 三点弯曲试样缺口两侧的刀口在水平方向上需对齐，如图2所示，A1和A2需在一条水平线上，B1和B2也需在一条水平线上，同理也才能保证根据相似三角形转化得到的施力点位移是正确的。3. 在COD规对刀口施加向缺口两侧的张力时，刀口相对试样不能发生相对滑动，这样才能保证在试验过程中采集的所有数据，经相似三角形转化的施力点位移是有效的。综上，1. 本发明中的刀口辅助装置采用线切割一次成型，保证两个对称设置的刀口辅助装置的两个刀口刃在一条线上；2. 两个刀口辅助装置采用左右匹配设计，对应尺寸均一样，而且螺栓定位尺寸也一样，这样就可以保证缺口两侧的刀刃在同一条水平线上；3. 采用螺栓定位，在螺栓和试样之间采用垫片大面积接触受力，可以保证刀口辅助装置和试样不发生相对滑动。

[0044] 如图6、12、13所示，三点弯曲试样延性断裂韧性JIC辅助测试装置。借助的刀口辅助装置包括用于安装一个COD规的上刀口刃组，以及用于定位和安装刀口辅助装置的带有中心凹槽的垫片和带有弧面螺栓头的螺栓。

[0045] 如图5所示，刀口辅助装置的安装顺序为：将左刀口辅助装置和右刀口辅助装置分

别安装在距离三点弯曲试样缺口5mm的左右两侧,在前左、前右、后左、后右四个位置加上带有中心凹槽的垫片,并从四个位置同时安装螺栓,将螺栓头压设在垫片上,安装过程中保证左右两侧的刀口辅助装置保持水平状态。

[0046] 实施例1

[0047] 一种三点弯曲试样延性断裂韧性 $J_{IC}$ 测试装置发明成功后,对多种牌号及不同厚度管线钢材料,进行了空气与海水环境下的延性断裂韧性 $J_{IC}$ 试验。下面以一个管线钢材料的试验作为实施例。

[0048] 1、试验材料:X70管线钢

[0049] 2、热处理状态:调质

[0050] 3、试验温度:23~25℃ 环境相对湿度:40~50%

[0051] 4、试样类型:SE(B)试样,其形状尺寸见图7、8。

[0052] 5、试验项目:延性断裂韧性 $J_{IC}$ 试验

[0053] 6、试验方法:将刀口辅助装置安装在X70管线钢SE(B)试样上,在缺口两侧开设下刀口刃组,采用两个COD规测试两个刀口刃组的张开位移 $V_1$ 和 $V_2$ ,由公式(2)即可获得试样的施力点位移 $q$ ,采用多试样法获得X70管线钢的 $\Delta a$ - $J$ 阻力曲线、延性断裂韧性 $J_{IC}$ 和平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 。

[0054] 7、试验结果:

[0055] 7.1、施力点位移 $q$

[0056] 由于各试样获得施力点位移 $q$ 的方法一样,以下只给出1#试样施力点位移 $q$ 的试验结果。试验机自动采集的1#试样COD规张开位移 $V_1/V_2$ -载荷 $F$ 曲线见图9,经由公式(1)处理得到的1#试样施力点位移 $q$ -载荷 $F$ 曲线见图10。

[0057] 7.2、试验数据

[0058] 由施力点位移 $q$ -载荷 $F$ 曲线可以得到各试样停机点载荷 $F_s$ 和塑性分量 $U_p$ ,通过测量可以得到各试样的厚度 $B$ 、宽度 $W$ 、初始裂纹长度 $a_0$ 和裂纹扩展量 $\Delta a$ ,通过公式计算可以得到各试样的 $J$ 值。试验数据见表1。

[0059] 表 1 试验数据

试样尺寸 试样编号	$B$ /mm	$W$ /mm	$a_0$ /mm	$\Delta a$ /mm	$F_s$ /kN	$U_p$ /J	$J$ /kJ·m <sup>-2</sup>
1#	4.70	9.20	4.49	0.77	2.0347	3.2413	280.09
2#	4.66	9.22	4.39	0.86	2.0904	3.1917	269.45
3#	4.66	9.20	4.20	0.40	2.2103	3.0281	260.61
4#	4.64	9.18	4.41	0.61	2.1867	1.7125	157.58
5#	4.64	9.24	4.87	0.27	1.6063	1.3628	139.34
6#	4.66	9.18	4.70	0.36	1.8140	2.2492	217.41

[0061] 7.3、X70管线钢 $\Delta a$ - $J$ 阻力曲线(见图11)

[0062] 7.4、X70管线钢 $\Delta a$ - $J$ 阻力曲线方程

[0063]  $J=312.07 \times \Delta a^{0.5784}$  ( $R=0.9893$ )

[0064] 7.5、试验结果(见表2)

[0065] 表 2 试验结果

[0066]

试验材料	$J_{0.2BL}$ /kJ·m <sup>-2</sup>	$J_{IC}$ /kJ·m <sup>-2</sup>	$K_{IC}$ /MPa·m <sup>1/2</sup>
X70 管线钢	153.03	153.03	186.12

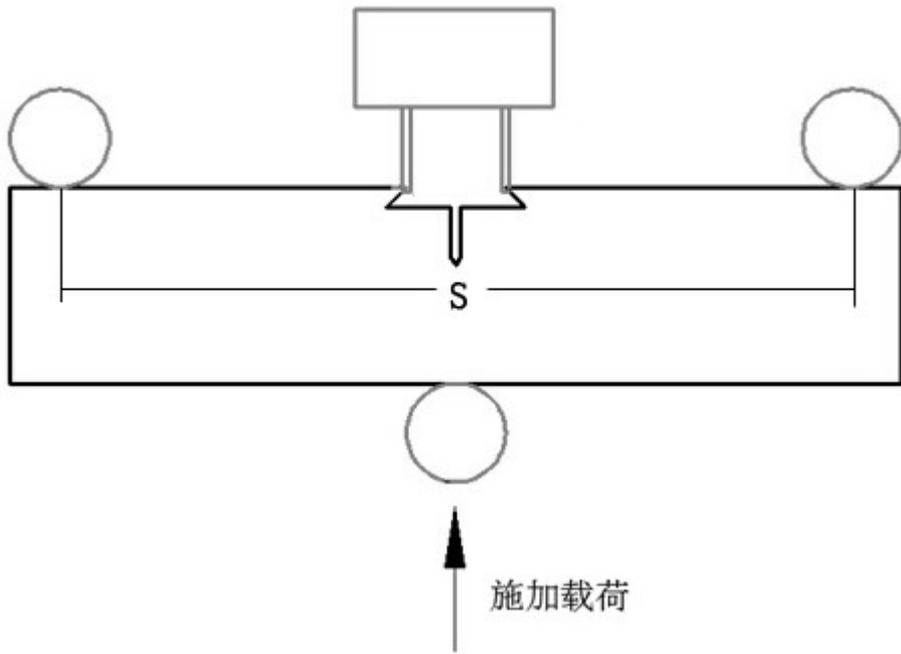


图1

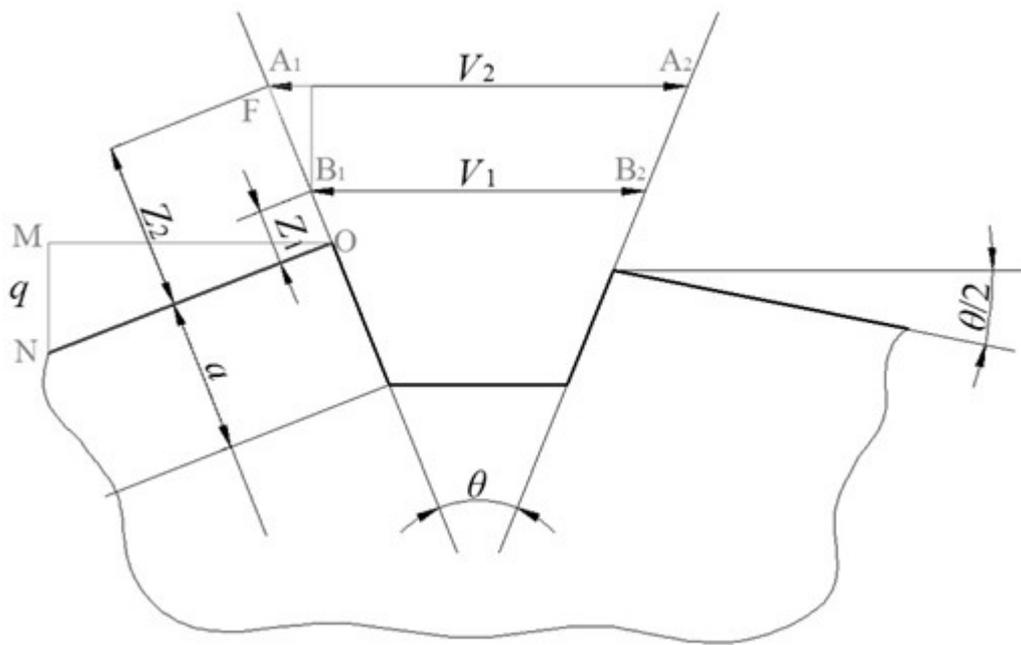


图2

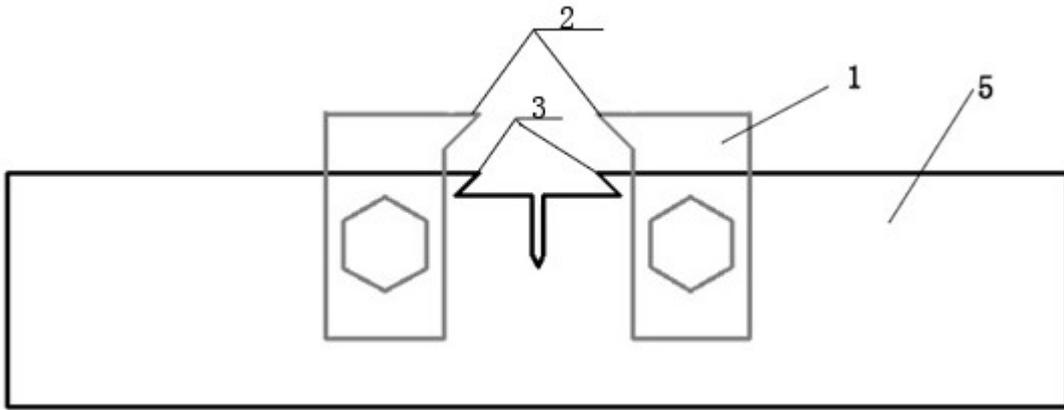


图3

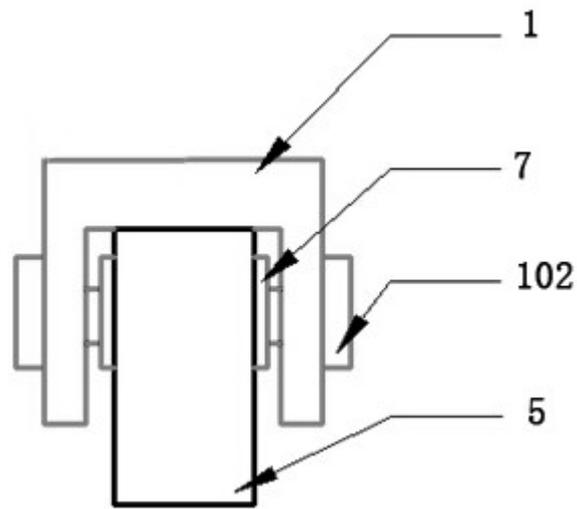


图4

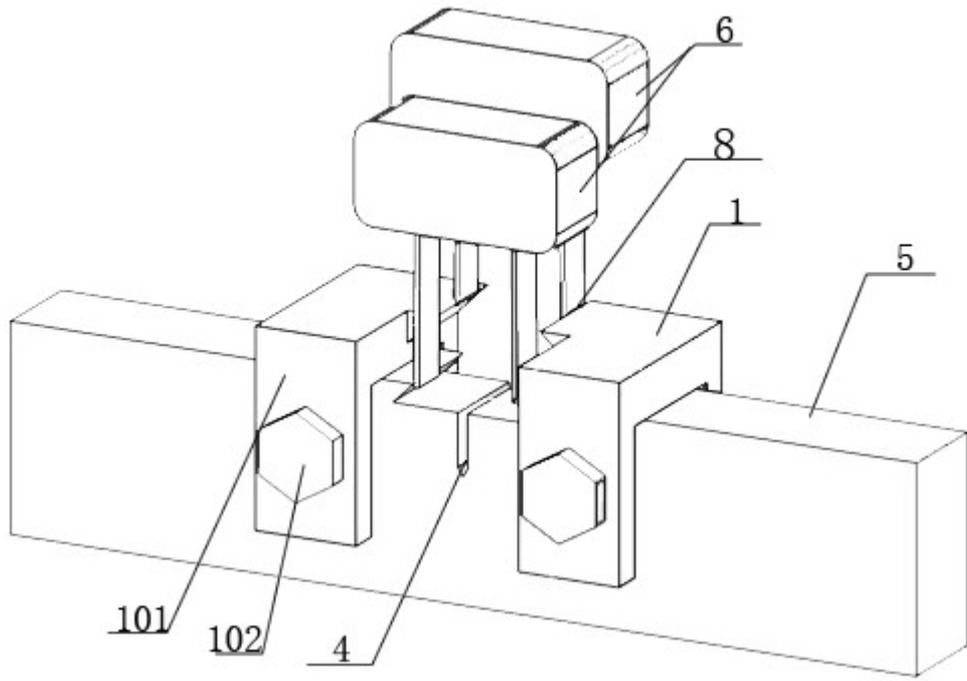


图5

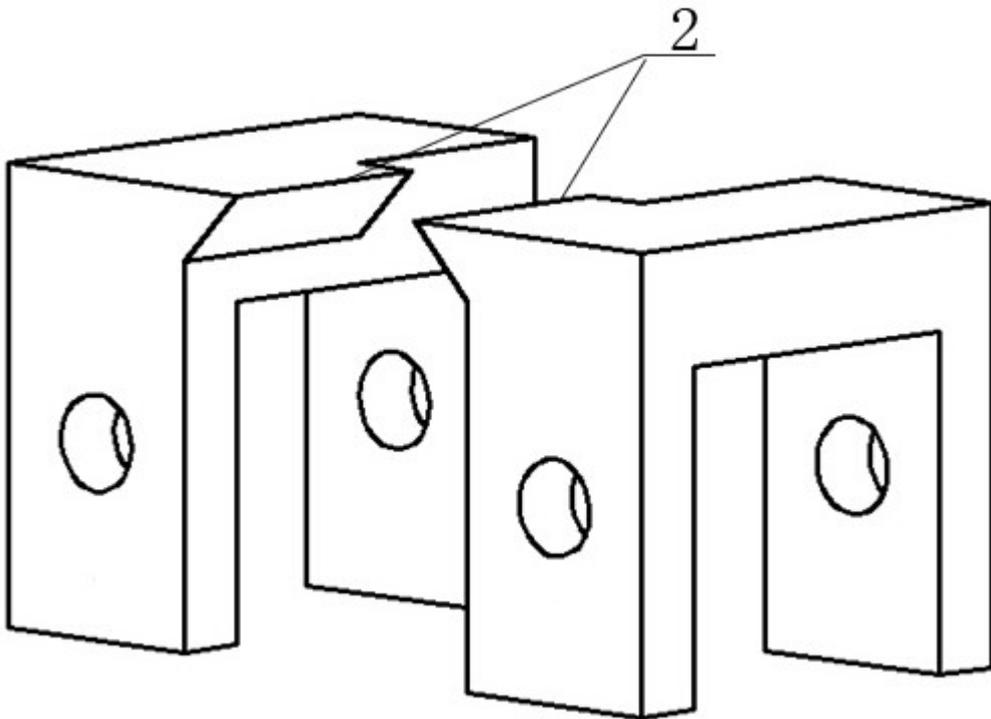


图6

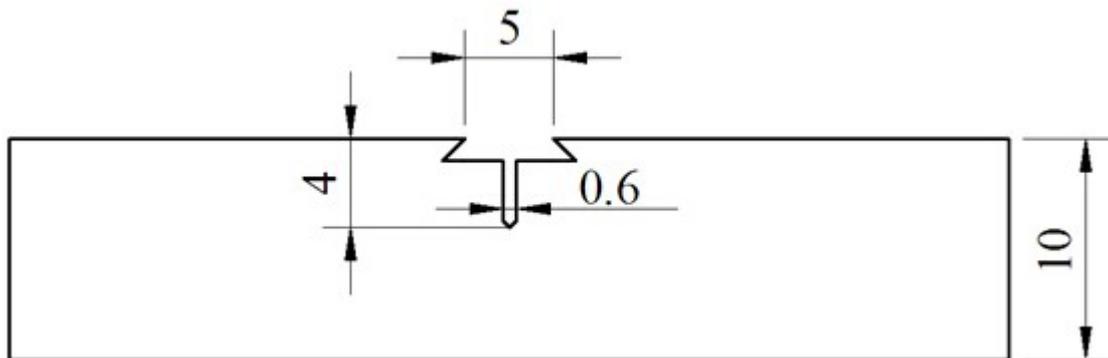


图7

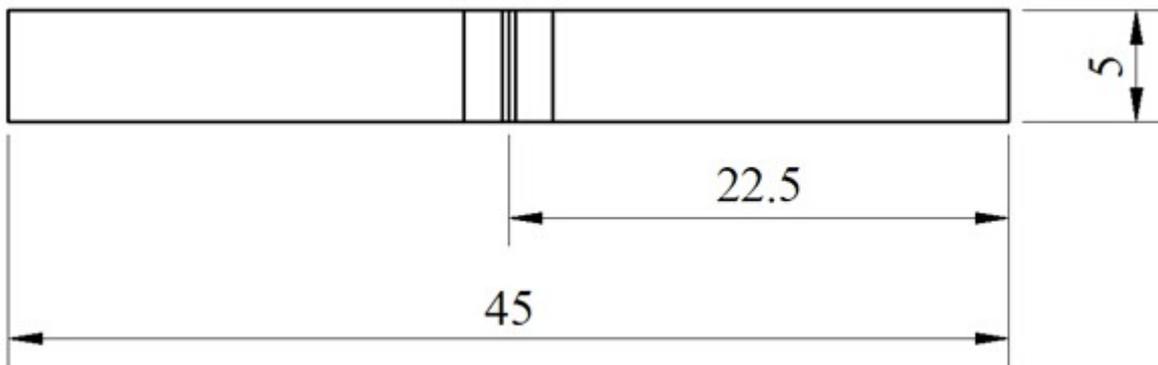


图8



图9

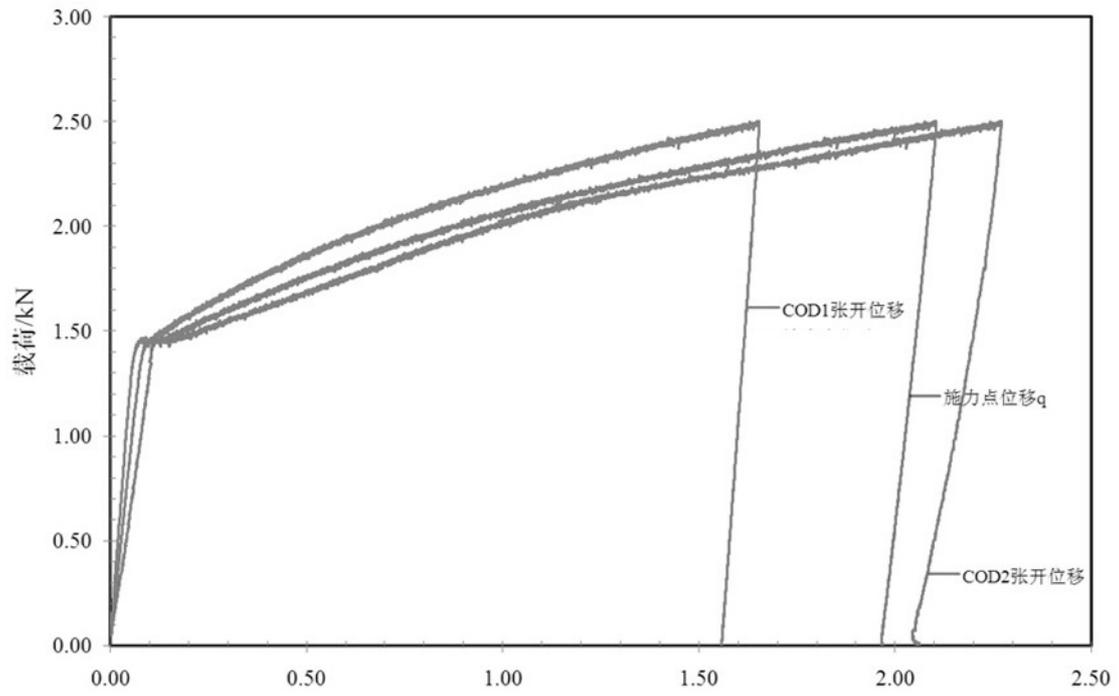


图10

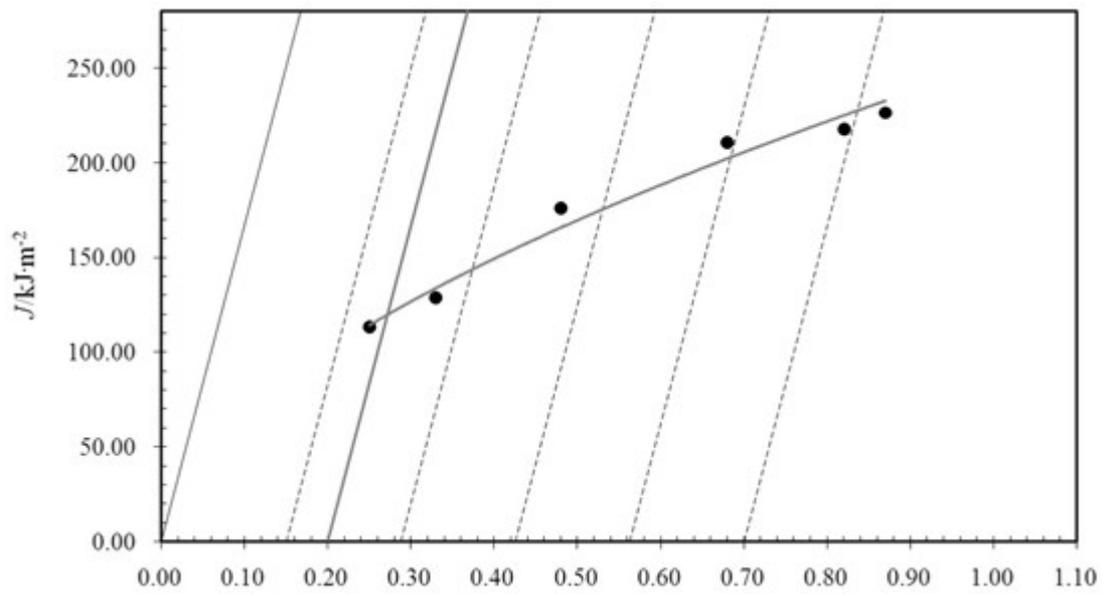


图11

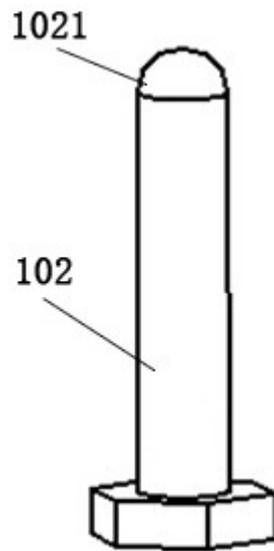


图12

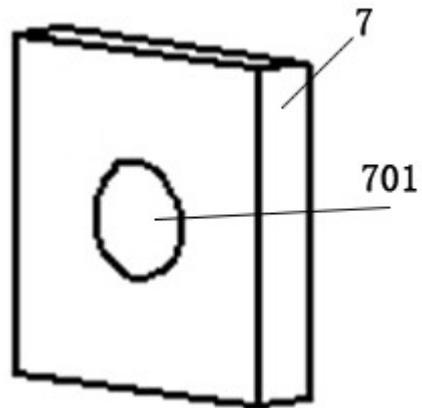


图13