(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 119935379 A
(43)申请公布日 2025.05.06

(21)申请号 202510443014.9

(22)申请日 2025.04.10

(71)申请人 中北大学
地址 030051 山西省太原市尖草坪区学院路3号

(72)发明人 李国栋 沈兴全 辛志杰 文志浩 翟鹏远

(74)专利代理机构 太原科卫专利事务所(普通合伙) 14100
专利代理师 王二红

(51)Int.Cl.
G01L 5/00(2006.01)
G01L 5/16(2020.01)
B25B 11/00(2006.01)

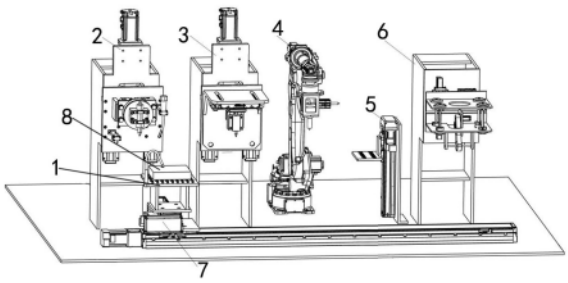
权利要求书4页 说明书10页 附图14页

(54)发明名称

基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备及方法

(57)摘要

本发明涉及工件的残余压应力检测技术领域,具体为基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备及方法。其为了解决现有技术中缺乏一种粘贴应变片和高速钻削盲孔一体的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备及对应的引入残余压应力研究方法的问题,故提供了一种新的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备及方法,包括双轴移动平台、吸附机构、清洁机构、上胶机构、六轴机器人、按压机构,实现了基于表面强化后工件引入残余压应力的研究,通过对残余压应力计算值进行修正,提高了对表面强化后工件进行残余压应力检测的准确性。



CN 119935379 A

1.基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备,其特征在于,包括:

吸附机构(1),其用于吸附固定表面强化后工件(8),吸附机构(1)上还设有用于对表面强化后工件(8)进行冷却喷油的喷油组件(101);

清洁机构(2),其用于实现表面强化后工件(8)的无死角清洁;

上胶机构(3),其用于对表面强化后工件(8)表面需要粘贴应变片(501)的位置进行上胶;

上料机构,其包括六轴机器人(4)和应变片储存台(5),应变片储存台(5)用于储存应变片(501),六轴机器人(4)的末端执行器有两个且分别为气浮主轴(401)、应变片吸嘴(402),应变片吸嘴(402)用于吸附应变片储存台(5)上的应变片(501),气浮主轴(401)上配设有钻头(403);

按压机构(6),其用于对粘贴于表面强化后工件(8)上的应变片(501)进行按压;

采集仪,用于与应变片(501)连接以采集应变值;

双轴移动机构(7),吸附机构(1)固定于双轴移动机构(7),双轴移动机构(7)用于带动吸附机构(1)进行前后、左右方向的移动并将其移动至清洁机构(2)、上胶机构(3)、六轴机器人(4)、应变片储存台(5)、按压机构(6)的对应位置;

PLC控制器,用于控制双轴移动机构(7)、清洁机构(2)、上胶机构(3)、六轴机器人(4)、按压机构(6)进行相应动作。

2.根据权利要求1所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备,其特征在于,按压机构(6)包括固定架(609)以及固定于固定架(609)上的导轨(601)、滑块(602)、按压组件,导轨(601)与滑块(602)均沿上下方向布置且二者适配连接,按压组件位于滑块(602)的一侧,按压组件包括固定板(603)、两个支撑板(605)、下连接板(606)、主动齿轮(607)、从动齿轮、电机、按压滚轮(610)、按压转轴(614)、固定轴、防粘纸带(611)、传送滚轮(612)、收集滚轮(613),下连接板(606)水平布置且固定于滑块(602)的侧面,下连接板(606)上开有按压孔(615),固定板(603)竖直布置且插固于按压孔(615)内,电机固定于固定板(603)右侧面的上端部,电机转轴转动连接于固定板(603)并伸于上连接板(604)的左侧,主动齿轮(607)和传送滚轮(612)均位于固定板(603)左侧且均套固于电机转轴,固定轴垂直固定于固定板(603)左侧面的下端部,固定轴上转动套设有收集滚轮(613)以及与主动齿轮(607)啮合的从动齿轮,从动齿轮与收集滚轮(613)固定,两个支撑板(605)左右分布且均垂直固定于下连接板(606)的底面,按压转轴(614)的两端分别转动连接于两个支撑板(605),按压转轴(614)的中部套固有按压滚轮(610),按压滚轮(610)、传送滚轮(612)、收集滚轮(613)适配布置且其上均设有与防粘纸带(611)适配的线槽,防粘纸带(611)的一端固定于传送滚轮(612),防粘纸带(611)的另一端绕过按压滚轮(610)后固定于收集滚轮(613)。

3.根据权利要求2所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备,其特征在于,按压组件还包括与下连接板(606)平行布置的上连接板(604),上连接板(604)位于下连接板(606)上方且固定于滑块(602)侧面,上连接板(604)与下连接板(606)之间的四个角处均固定有导向杆(608)。

4.根据权利要求3所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备,其特征在于,六轴机器人(4)末端配设有六维力传感器(404),六维力传感器(404)的输出端与PLC控

制器连接。

5.根据权利要求4所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备,其特征在于,吸附机构(1)、清洁机构(2)、上胶机构(3)、六轴机器人(4)、应变片储存台(5)、按压机构(6)沿左右方向依次放置且均位于双轴移动机构前侧。

6.基于表面强化后工件引入残余压应力研究的方法,该方法采用如权利要求1所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备实现,其特征在于,包括如下步骤:

1)将表面强化后工件(8)吸附固定于吸附机构(1);

2)PLC控制器控制双轴移动机构(7)带动吸附机构(1)移动至清洁机构(2)的对应位置,清洁机构(2)对表面强化后工件(8)进行无死角清洁;

3)PLC控制器控制双轴移动机构(7)带动吸附机构(1)移动至上胶机构(3)的对应位置,PLC控制器控制上胶机构(3)对表面强化后工件(8)需要粘贴应变片(501)的位置实现胶水的涂抹并控制上胶机构(3)的出胶量;

4)PLC控制器控制双轴移动机构(7)带动吸附机构(1)移动至上料机构的对应位置,六轴机器人(4)从应变片储存台(5)通过应变片吸嘴(402)吸附应变片(501)并将吸附的应变片(501)贴附到表面强化后工件(8)指定位置,然后对应变片(501)进行初步按压,完成应变片(501)的初粘贴;

5)PLC控制器控制双轴移动机构(7)带动吸附机构(1)移动至按压机构(6)的对应位置,PLC控制器控制按压机构(6)对粘贴于表面强化后工件(8)上的应变片(501)进行按压,完成应变片(501)的最终粘贴;

6)将采集仪与应变片(501)连接,PLC控制器控制双轴移动机构(7)带动吸附机构(1)移动至六轴机器人(4)钻头(403)的对应位置,PLC控制器控制六轴机器人(4)的气浮主轴(401)运动,气浮主轴(401)带动钻头(403)对表面强化后工件(8)进行梯度式高速钻削盲孔加工,同时配合吸附机构(1)上的喷油组件(101)对表面强化后工件(8)进行喷油冷却,并通过采集仪采集对应的x方向实测应变值和y方向实测应变值;

7)根据步骤6)获得的x方向实测应变值和y方向实测应变值计算得出对应的残余压应力值,具体计算方法如下:

a、设置与步骤6)中的梯度式高速钻削盲孔加工适配的单轴拉伸应力有限元仿真,通过单轴拉伸应力有限元仿真采集获得对应的x方向仿真应变值和y方向仿真应变值,通过公式①计算得出应力标定常数A和应力标定常数B,

$$\begin{cases} A=\dfrac{E\left(\varepsilon_{x1}+\varepsilon_{y1}\right)}{2\sigma_{仿真}} \\ B=\dfrac{E\left(\varepsilon_{x1}-\varepsilon_{y1}\right)}{2\sigma_{仿真}} \end{cases} \quad ①$$

其中,A为应力标定常数,B为应力标定常数,E为弹性模量,ε_{x1}为x方向仿真应变值,ε_{y1}为y方向仿真应变值,$\sigma_{仿真}$为单轴拉伸应力仿真值;

b、根据公式②计算形状改变比能,建立关于盲孔深度与单轴拉伸应力仿真值、形状改变比能关系的第一曲线图,建立关于盲孔深度与形状改变比能、应力标定常数A关系的第

二曲线图，建立关于盲孔深度与形状改变比能、应力标定常数B的第三曲线图，

$$S=\left(1+\mu^2-\mu\right)\left(\varepsilon_{x1}^2+\varepsilon_{y1}^2\right)-\left(1+\mu^2-4\mu\right)\times\varepsilon_{x1}\varepsilon_{y1} \quad ②$$

其中，S为形状改变比能，μ为泊松比；

c、标定单轴拉伸应力仿真值等于0.6倍的表面强化后工件(8)屈服强度所对应的应力标定常数A和应力标定常数B分别为应力标定常数定值$A_{定}$和应力标定常数定值$B_{定}$，利用应力标定常数定值$A_{定}$、应力标定常数定值$B_{定}$和x方向仿真应变值根据公式③反求对应的单轴拉伸应力理论值，建立关于盲孔深度与单轴拉伸应力仿真值、单轴拉伸应力理论值关系的第四曲线图，

$$\sigma_{理论}=\frac{\varepsilon_{x1}(B_{定}+A_{定})+\varepsilon_{y1}(B_{定}-A_{定})}{4A_{定}B_{定}} \quad ③$$

其中，$\sigma_{理论}$为单轴拉伸应力理论值；

d、利用步骤6)所采集的x方向实测应变值、y方向实测应变值和步骤c中所标定的应力标定常数定值$A_{定}$、应力标定常数定值$B_{定}$，根据公式④计算得到x方向的第一残余压应力值，将计算得到的x方向的第一残余压应力值作为单轴拉伸应力理论值并将其放在步骤c建立的第四曲线图中去匹配对应的单轴拉伸应力仿真值，

$$\sigma_{x1}=\frac{\varepsilon_{x2}(B_{定}+A_{定})+\varepsilon_{y2}(B_{定}-A_{定})}{4A_{定}B_{定}} \quad ④$$

其中，σ_{x1}为x方向的第一残余压应力值，ε_{x2}为x方向实测应变值，ε_{y2}为y方向实测应变值；

e、将步骤d中匹配的单轴拉伸应力仿真值放在第一曲线图中去匹配对应的形状改变比能，然后将匹配的形状改变比能放在第二曲线图和第三曲线图中分别去匹配对应的应力标定常数A和应力标定常数B，最后利用匹配的应力标定常数A和应力标定常数B以及步骤6)得到的x方向实测应变值和y方向实测应变值，根据公式⑤计算得出x方向的第二残余压应力值和y方向的第二残余压应力值，将计算得出的x方向的第二残余压应力值和y方向的第二残余压应力值分别作为最终的残余压应力值，

$$\begin{cases}\sigma_{x2}=\dfrac{\varepsilon_{x2}(B+A)+\varepsilon_{y2}(B-A)}{4AB}\\ \sigma_{y2}=\dfrac{\varepsilon_{x2}(B-A)+\varepsilon_{y2}(B+A)}{4AB}\end{cases} \quad ⑤$$

其中，σ_{x2}为x方向的第二残余压应力值，σ_{y2}为y方向的第二残余压应力值。

7.根据权利要求6所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的方法，其特征在于，步骤c中，采用通过增应力单轴拉伸试验确定的标定屈服应力作为表面强化后工件(8)屈服强度，增应力单轴拉伸试验中的单轴拉伸应力多次增加，单轴拉伸应力每增加一次，停

留一个应变数据采集时间,当某一个应变数据采集时间内的应变数据第一次出现持续增加时,确定此时对应的单轴拉伸应力为表面强化后工件(8)的标定屈服应力。

8.根据权利要求7所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的方法,其特征在于,在步骤a中的单轴拉伸应力有限元仿真中,按照应变片(501)的实际采集区域划分有限元仿真网格。

9.根据权利要求8所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的方法,其特征在于,单轴拉伸应力有限元仿真中的表面强化后工件(8)的仿真模型中分布有多个其深度分别与步骤6)中的梯度式高度钻削盲孔加工深度匹配的盲孔。

10.根据权利要求9所述的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的方法,其特征在于,第一曲线图、第二曲线图、第三曲线图、第四曲线图的建立均是利用MATLAB编程进行曲线光滑拟合而成的。

基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及工件的残余压应力检测技术领域,具体为基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备及方法。

背景技术

[0002] 超声滚压、激光冲击和喷丸强化是提高材料表面性能的关键技术,它们通过在材料表面引入残余压应力来增强材料的疲劳强度和抗腐蚀性,尤其在航空、航天等关键领域中发挥着重要作用。过度强化可能导致材料表面粗糙度增加和产生非均匀残余压应力,从而引入裂纹,影响工件的完整性和可靠性,而强化不足则可能导致残余压应力引入不足,降低工件的疲劳寿命和抗裂能力,从而影响其服役性能,而引入残余压应力研究能够揭示工件内部的应力状态,帮助识别其潜在问题,通过优化工艺参数来平衡强化效果,以确保强化后工件在服役过程中的性能与安全。

[0003] 目前,引入残余压应力研究的方法有X射线衍射技术、中子衍射技术、盲孔法、超声波技术以及轮廓法、裂纹柔度法,X射线衍射技术适用于表面残余压应力检测,测量0-2mm的应力分布时,需进行逐层腐蚀,腐蚀深度控制难度大,周期长,且X射线衍射技术和中子衍射技术操作昂贵,实验和应用成本高;超声波技术测量难以实现0-2mm应力的分布检测,不适用于对表面强化后工件的残余压应力研究;轮廓法和裂纹柔度法适用于距离工件表面一定距离的应力检测,对工件表面应力的表征能力差;而盲孔法由于其对工件的损伤小、不影响工件的性能、简单易行等优点而被广泛应用。

[0004] 常规的盲孔法为在工件表面测量部分粘贴应变片,然后钻削一个盲孔,引起周围应力场发生变化,通过采集仪采集得到该处x方向和y方向的应变值,最后根据该应变值求解x方向和y方向的残余压应力,该方法现在主要用于非表面强化后工件的残余压应力研究,而针对表面强化后工件,其需采集的为梯度式钻削盲孔所对应的应力值分布(如进行0-2mm的梯度式钻削盲孔加工,设每次钻削盲孔的深度为0.05mm,即其共需要0.05-0.1-……-1.95-2mm共40个盲孔深度且每次钻削盲孔后均需采集对应的应力值),但采用常规的盲孔法对表面强化后工件的残余压应力研究的适用度较差,准确性较低。

[0005] 如现有技术中其公开号为CN108457948A,专利名称为电阻三轴电阻应变片全自动粘贴装置中所述的装置,其针对的是非表面强化后工件,该装置中还包括打磨、除尘工位,而表面强化后工件的表面是不需要打磨、除尘加工的,但需要对其进行清洁;同时,现有技术中常规的盲孔钻削部分一般是单独的装置完成的,且现有技术中的盲孔钻削均为低速钻削,易产生机械加工应力和切削热应力,易影响表面强化后工件内部残余压应力的释放,故现在急需一种粘贴应变片和高速钻削盲孔一体的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备及对应的引入残余压应力研究的方法。

发明内容

[0006] 本发明为了解决现有技术中缺乏一种粘贴应变片和高速钻削盲孔一体的基于表

面强化后工件引入残余压应力研究的设备及对应的引入残余压应力研究方法的问题,故提供了一种新的基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备及方法。

[0007] 本发明是采用如下技术方案实现的:

[0008] 一种基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备,包括:

[0009] 吸附机构,其用于吸附固定表面强化后工件,吸附机构上还设有用于对表面强化后工件进行冷却喷油的喷油组件:

[0010] 清洁机构,其用于实现表面强化后工件的无死角清洁;

[0011] 上胶机构,其用于对表面强化后工件表面需要粘贴应变片的位置进行上胶;

[0012] 上料机构,其包括六轴机器人和应变片储存台,应变片储存台用于储存应变片,六轴机器人的末端执行器有两个且分别为气浮主轴、应变片吸嘴,应变片吸嘴用于吸附应变片储存台上的应变片,气浮主轴上配设有钻头;

[0013] 按压机构,其用于对粘贴于表面强化后工件上的应变片进行按压;

[0014] 采集仪,用于与应变片连接以采集应变值;

[0015] 双轴移动机构,吸附机构固定于双轴移动机构,双轴移动机构用于带动吸附机构进行前后、左右方向的移动并将其移动至清洁机构、上胶机构、六轴机器人、应变片储存台、按压机构的对应位置;

[0016] PLC控制器,用于控制双轴移动机构、清洁机构、上胶机构、六轴机器人、按压机构进行相应动作。

[0017] 进一步地,按压机构包括固定架以及固定于固定架上的导轨、滑块、按压组件,导轨与滑块均沿上下方向布置且二者适配连接,按压组件位于滑块的一侧,按压组件包括固定板、下连接板、两个支撑板、主动齿轮、从动齿轮、电机、按压滚轮、按压转轴、固定轴、防粘纸带、传送滚轮、收集滚轮,下连接板水平布置且固定于滑块的侧面,下连接板上开有按压孔,固定板竖直布置且插固于按压孔内,电机固定于固定板的右侧面的上端部,电机转轴转动连接于固定板并伸于上连接板的左侧,主动齿轮和传送滚轮均位于固定板左侧且均套固于电机转轴,固定轴垂直固定于固定板左侧面的下端部,固定轴上转动套设有收集滚轮以及与主动齿轮啮合的从动齿轮,从动齿轮与收集滚轮固定,两个支撑板左右分布且均垂直固定于下连接板的底面,按压转轴的两端分别转动连接于两个支撑板,按压转轴的中部套固有按压滚轮,按压滚轮、传送滚轮、收集滚轮适配布置且其上均设有与防粘纸带适配的线槽,防粘纸带的一端固定于传送滚轮,防粘纸带的另一端绕过按压滚轮后固定于收集滚轮。

[0018] 按压时,启动电机,电机转轴转动带动主动齿轮和传送滚轮转动,主动齿轮转动带动从动齿轮转动,从动齿轮转动带动收集滚轮转动,通过防粘纸带使得按压滚轮被迫转动,从而通过按压滚轮对应变片进行滚动按压,其中,传送滚轮用于传送新的防粘纸带,收集滚轮用于收集使用过的防粘纸带,防止按压滚轮上粘连胶水,影响下次使用;同时通过PLC控制滑块控制按压滚轮的上下位置,保证按压力。

[0019] 进一步地,按压组件还包括与下连接板平行布置的上连接板,上连接板位于下连接板上方且固定于滑块侧面,上连接板与下连接板之间的四个角处均固定有导向杆,提高了该按压机构的稳定性,保证了按压滚轮垂直按压。

[0020] 进一步地,六轴机器人末端配设有六维力传感器,六维力传感器的输出端与PLC控制器连接,一来用于检测六轴机器人粘贴应变片时的初步按压力,防止初步按压力过大时

对应变片造成损坏,同时也便于实现初步按压力的恒定,提高粘贴应变片的一致性,二来用于进行切削力采集,便于钻削零位设置,即当钻头未切削到表面强化后工件时,切削力为0,当钻头刚切削到表面强化后工件时,切削力发生变化,此时的切削位置即为钻削零位。

[0021] 进一步地,吸附机构、清洁机构、上胶机构、六轴机器人、应变片储存台、按压机构沿左右方向依次放置且均位于双轴移动机构前侧,布局规范化且更合理。

[0022] 采用上述设备实现基于表面强化后工件引入残余压应力研究的方法,包括如下步骤:

[0023] 1)将表面强化后工件吸附固定于吸附机构;

[0024] 2)PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构移动至清洁机构的对应位置,清洁机构对表面强化后工件进行无死角清洁;

[0025] 3)PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构移动至上胶机构的对应位置,PLC控制器控制上胶机构对表面强化后工件需要粘贴应变片的位置实现胶水的涂抹并控制上胶机构的出胶量;

[0026] 4)PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构移动至上料机构的对应位置,六轴机器人从应变片储存台通过应变片吸嘴吸附应变片并将吸附的应变片贴附到表面强化后工件指定位置,然后对应变片进行初步按压,完成应变片的初粘贴;

[0027] 5)PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构移动至按压机构的对应位置,PLC控制器控制按压机构对粘贴于表面强化后工件上的应变片进行按压,完成应变片的最终粘贴;

[0028] 6)将采集仪与应变片连接,PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构移动至六轴机器人钻头的对应位置,PLC控制器控制六轴机器人的气浮主轴运动,气浮主轴带动钻头对表面强化后工件进行梯度式高速钻削盲孔加工,同时配合吸附机构上的喷油组件对表面强化后工件进行喷油冷却,并通过采集仪采集对应的x方向实测应变值和y方向实测应变值;

[0029] 7)根据步骤6)获得的x方向实测应变值和y方向实测应变值计算得出对应的残余压应力值,具体计算方法如下:

[0030] a、设置与步骤6)中的梯度式高速钻削盲孔加工适配的单轴拉伸应力有限元仿真,通过单轴拉伸应力有限元仿真采集获得对应的x方向仿真应变值和y方向仿真应变值,通过公式①计算得出应力标定常数A和应力标定常数B,

[0031] $$\begin{cases} A=\dfrac{E\left(\varepsilon_{x1}+\varepsilon_{y1}\right)}{2\sigma_{仿真}} \\ B=\dfrac{E\left(\varepsilon_{x1}-\varepsilon_{y1}\right)}{2\sigma_{仿真}} \end{cases} \quad ①$$

[0032] 其中,A为应力标定常数,B为应力标定常数,E为弹性模量,ε_{x1}为x方向仿真应变值,ε_{y1}为y方向仿真应变值,$\sigma_{仿真}$为单轴拉伸应力仿真值;

[0033] b、根据公式②计算形状改变比能,建立关于盲孔深度与单轴拉伸应力仿真值、形

状改变比能关系的第一曲线图，建立关于盲孔深度与形状改变比能、应力标定常数A关系的第二曲线图，建立关于盲孔深度与形状改变比能、应力标定常数B的第三曲线图，

[0034] $$S=\left(1+\mu^2-\mu\right)\left(\varepsilon_{x1}^2+\varepsilon_{y1}^2\right)-\left(1+\mu^2-4\mu\right)\times\varepsilon_{x1}\varepsilon_{y1} \quad ②$$

[0035] 其中，S为形状改变比能，μ为泊松比；

[0036] c、标定单轴拉伸应力仿真值等于0.6倍的表面强化后工件屈服强度所对应的应力标定常数A和应力标定常数B分别为应力标定常数定值$A_{定}$和应力标定常数定值$B_{定}$，利用应力标定常数定值$A_{定}$、应力标定常数定值$B_{定}$和x方向仿真应变值根据公式③反求对应的单轴拉伸应力理论值，建立关于盲孔深度与单轴拉伸应力仿真值、单轴拉伸应力理论值关系的第四曲线图，

[0037] $$\sigma_{理论}=\frac{\varepsilon_{x1}(B_{定}+A_{定})+\varepsilon_{y1}(B_{定}-A_{定})}{4A_{定}B_{定}} \quad ③$$

[0038] 其中，$\sigma_{理论}$为单轴拉伸应力理论值；

[0039] d、利用步骤6)所采集的x方向实测应变值、y方向实测应变值和步骤c中所标定的应力标定常数定值$A_{定}$、应力标定常数定值$B_{定}$，根据公式④计算得到x方向的第一残余压应力值，将计算得到的x方向的第一残余压应力值作为单轴拉伸应力理论值并将其放在步骤c建立的第四曲线图中去匹配对应的单轴拉伸应力仿真值，

[0040] $$\sigma_{x1}=\frac{\varepsilon_{x2}(B_{定}+A_{定})+\varepsilon_{y2}(B_{定}-A_{定})}{4A_{定}B_{定}} \quad ④$$

[0041] 其中，σ_{x1}为x方向的第一残余压应力值，ε_{x2}为x方向实测应变值，ε_{y2}为y方向实测应变值；

[0042] e、将步骤d中匹配的单轴拉伸应力仿真值放在第一曲线图中去匹配对应的形状改变比能，然后将匹配的形状改变比能放在第二曲线图和第三曲线图中分别去匹配对应的应力标定常数A和应力标定常数B，最后利用匹配的应力标定常数A和应力标定常数B以及步骤6)得到的x方向实测应变值和y方向实测应变值，根据公式⑤计算得出x方向的第二残余压应力值和y方向的第二残余压应力值，将计算得出的x方向的第二残余压应力值和y方向的第二残余压应力值分别作为最终的残余压应力值，

[0043] $$\begin{cases}\sigma_{x2}=\dfrac{\varepsilon_{x2}(B+A)+\varepsilon_{y2}(B-A)}{4AB}\\ \sigma_{y2}=\dfrac{\varepsilon_{x2}(B-A)+\varepsilon_{y2}(B+A)}{4AB}\end{cases} \quad ⑤$$

[0044] 其中，σ_{x2}为x方向的第二残余压应力值，σ_{y2}为y方向的第二残余压应力值。

[0045] 进一步地，步骤c中，采用通过增应力单轴拉伸试验确定的标定屈服应力作为表面强化后工件屈服强度，增应力单轴拉伸试验中的单轴拉伸应力多次增加，单轴拉伸应力每

增加一次,停留一个应变数据采集时间,当某一个应变数据采集时间内的应变数据第一次出现持续增加时,确定此时对应的单轴拉伸应力为表面强化后工件的标定屈服应力。该部分的标定屈服应力的确定方法是基于单轴增应力拉伸试验现象确定的,即当屈服阶段出现单轴拉伸应力达到一定值后,单轴拉伸应力不再增加而应变值持续增加,表明此时表面强化后工件开始发生塑性变形,所以将此时对应的单轴拉伸应力确定为表面强化后工件的标定屈服应力,避免使用国标中的屈服强度对结果的误差水平。

[0046] 进一步地,在步骤a中的单轴拉伸应力有限元仿真中,按照实际应变片的采集区域划分有限元仿真网格,使计算得出的应力标定常数A和应力标定常数B与应变片的实际工作原理更加符合,从而进一步提高最后计算得出的残余压应力值的准确性。

[0047] 进一步地,单轴拉伸应力有限元仿真中的表面强化后工件的仿真模型中分布有多个其深度分别与步骤6)中的梯度式高度钻削盲孔加工深度匹配的盲孔,以减少仿真次数。

[0048] 进一步地,第一曲线图、第二曲线图、第三曲线图、第四曲线图的建立均是利用MATLAB编程进行曲线光滑拟合而成的,减少工作量且误差小。

[0049] 本发明所产生的有益效果如下:1)在六轴机器人上设置两个末端执行器且分别为应变片吸嘴和气浮主轴,利用气浮主轴实现高速钻削,配合喷油组件对表面强化后工件进行冷却,从而减小了常规的盲孔法低速钻削过程中产生的机械加工应力和切削热应力对表面强化后表面强化后工件内部残余压应力释放的影响,同时利用应变片吸嘴实现了应变片的抓取,结构紧凑且易于实现;2)通过在按压机构中设置收集滚轮、按压滚轮、传送滚轮、防粘纸带实现了对粘贴于表面强化后工件上的应变片的滚动按压以及防粘纸带的实时更换;3)通过增加清洁机构实现了表面强化后工件的清洁;4)通过PLC控制器实现了设备的自动化;5)提供了基于表面强化后工件引入残余压应力研究的一种可行性方法,通过对残余压应力值进行修正,提高了对表面强化后工件进行残余压应力检测的准确性;6)首次提出通过增应力单轴拉伸试验确定屈服强度,避免使用国标中的屈服强度对结果的误差影响。

附图说明

[0050] 此处的附图被并入说明书中并构成本说明书的一部分,表示出了符合本发明的实施例,并与说明书一起用于解释本发明的原理。

[0051] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,对于本领域普通技术人员而言,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0052] 图1为本发明所述设备的整体结构示意图;

[0053] 图2为吸附机构的结构示意图;

[0054] 图3为清洁机构的结构示意图;

[0055] 图4为六轴机器人的结构示意图;

[0056] 图5为应变片储存台的结构示意图;

[0057] 图6为按压机构的结构示意图;

[0058] 图7为按压机构的局部放大示意图;

[0059] 图8为按照实际应变片的采集区域划分的有限元仿真网格示意图;

[0060] 图9为单轴拉伸应力有限元仿真中的仿真表面强化后工件模型示意图;

[0061] 图10为步骤b中所建立的关于盲孔深度与单轴拉伸应力仿真值、形状改变比能关系的第一曲线图；

[0062] 图11为步骤b中所建立的关于盲孔深度与形状改变比能、应力标定常数A关系的第二曲线图；

[0063] 图12为步骤b中所建立的关于盲孔深度与形状改变比能、应力标定常数B的第三曲线图；

[0064] 图13为步骤c中所建立的关于盲孔深度与单轴拉伸应力仿真值、单轴拉伸应力理论值关系的第四曲线图；

[0065] 图14为通过本发明所述的检测方法得出的残余压应力值与盲孔深度的关系示意图和通过ABAQUS超声滚压有限元仿真方法测得的残余压应力值与盲孔深度的关系示意图。

[0066] 图中：1-吸附机构，101-喷油组件，2-清洁机构，201-高压清洗头，202-气枪，3-上胶机构，4-六轴机器人，401-气浮主轴，402-应变片吸嘴，403-钻头，404-六维力传感器，5-应变片储存台，501-应变片，6-按压机构，601-导轨，602-滑块，603-固定板，604-上连接板，605-支撑板，606-下连接板，607-主动齿轮，608-导向杆，609-固定架，610-按压滚轮，611-防粘纸带，612-传送滚轮，613-收集滚轮，614-按压转轴，615-按压孔，7-双轴移动机构，8-表面强化后工件。

具体实施方式

[0067] 为了能够更清楚地理解本发明的上述目的、特征和优点，下面将对本发明的方案进行进一步描述。需要说明的是，在不冲突的情况下，本发明的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0068] 在描述中，需要说明的是，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性。需要说明的是，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或一体地连接；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语的具体含义。

[0069] 在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明，但本发明还可以采用其他不同于在此描述的方式来实施；显然，说明书中的实施例只是本发明的一部分实施例，而不是全部的实施例。

[0070] 下面结合附图对本发明的具体实施例进行详细说明。

[0071] 如图1-7所示，一种基于表面强化后工件引入残余压应力研究的设备，包括：

[0072] 吸附机构1，其用于吸附固定表面强化后工件8，吸附机构1上还设有用于对表面强化后工件8进行冷却喷油的喷油组件101：

[0073] 清洁机构2，其用于实现表面强化后工件8的无死角清洁；

[0074] 上胶机构3，其用于对表面强化后工件8表面需要粘贴应变片501的位置进行上胶；

[0075] 上料机构，其包括六轴机器人4和应变片储存台5，应变片储存台5用于储存应变片501，六轴机器人4的末端执行器有两个且分别为气浮主轴401、应变片吸嘴402，应变片吸嘴402用于吸附应变片储存台5上的应变片501，气浮主轴401上配设有钻头403；

[0076] 按压机构6,其用于对粘贴于表面强化后工件8上的应变片501进行按压;

[0077] 采集仪,用于与应变片501连接以采集应变值;

[0078] 双轴移动机构7,吸附机构1固定于双轴移动机构7,双轴移动机构7用于带动吸附机构1进行前后、左右方向的移动并将其移动至清洁机构2、上胶机构3、六轴机器人4、应变片储存台5、按压机构6的对应位置;

[0079] PLC控制器,用于控制双轴移动平台、清洁机构2、上胶机构3、六轴机器人4、按压机构进行相应动作。

[0080] 具体实施时,按压机构6包括固定架609以及固定于固定架609上的导轨601、滑块602、按压组件,导轨601与滑块602均沿上下方向布置且二者适配连接,按压组件位于滑块602的一侧,按压组件包括固定板603、下连接板606、两个支撑板605、主动齿轮607、从动齿轮、电机、按压滚轮610、按压转轴614、固定轴、防粘纸带611、传送滚轮612、收集滚轮613,下连接板606水平布置且固定于滑块602的侧面,下连接板606上开有按压孔615,固定板603竖直布置且插固于按压孔615内,电机固定于固定板603的右侧面的上端部,电机转轴转动连接于固定板603并伸于上连接板604的左侧,主动齿轮607和传送滚轮612均位于固定板603左侧且均套固于电机转轴,固定轴垂直固定于固定板603左侧面的下端部,固定轴上转动套设有收集滚轮613以及与主动齿轮607啮合的从动齿轮,从动齿轮与收集滚轮613固定,两个支撑板605左右分布且均垂直固定于下连接板606的底面,按压转轴614的两端分别转动连接于两个支撑板605,按压转轴614的中部套固有按压滚轮610,按压滚轮610、传送滚轮612、收集滚轮613适配布置且其上均设有与防粘纸带611适配的线槽,防粘纸带611的一端固定于传送滚轮612,防粘纸带611的另一端绕过按压滚轮610后固定于收集滚轮613。

[0081] 按压时,启动电机,电机转轴转动带动主动齿轮607和传送滚轮612转动,主动齿轮607转动带动从动齿轮转动,从动齿轮转动带动收集滚轮613转动,通过防粘纸带611使得按压滚轮610被迫转动,从而通过按压滚轮610对应变片501进行滚动按压,其中,传送滚轮612用于传送新的防粘纸带611,收集滚轮613用于收集使用过的防粘纸带611,防止按压滚轮610上粘连胶水,影响下次使用;同时通过PLC控制滑块602控制按压滚轮610的上下位置,保证按压力。

[0082] 具体实施时,按压组件还包括与下连接板606平行布置的上连接板604,上连接板604位于下连接板606上方且固定于滑块602侧面,上连接板604与下连接板606之间的四个角处均固定有导向杆608,提高了该按压机构6的稳定性,保证了按压滚轮610垂直按压。

[0083] 具体实施时,六轴机器人4末端配设有六维力传感器404,六维力传感器404的输出端与PLC控制器连接,一来用于检测六轴机器人4粘贴应变片501时的初步按压力,防止初步按压力过大时对应变片501造成损坏,同时也便于实现初步按压力的恒定,提高粘贴应变片501的一致性,二来用于进行切削力采集,便于钻削零位设置,即当钻头403未切削到表面强化后工件8时,切削力为0,当钻头403刚切削到表面强化后工件8时,切削力发生变化,此时的切削位置即为钻削零位。

[0084] 本具体实施方式中,吸附机构1、清洁机构2、上胶机构3、六轴机器人4、应变片储存台5、按压机构6沿左右方向依次放置且均位于双轴移动平台前侧,布局规范化且更合理。

[0085] 本具体实施方式中,清洁机构2包括高压清洗头201、气枪202,高压清洗头201用于对表面强化后工件8进行清洗,气枪202用于对表面强化后工件8表面进行吹气干燥,提高对

表面强化后工件8的清洁效率。

[0086] 采用上述设备实现基于表面强化后工件8引入残余压应力研究的方法,包括如下步骤:

[0087] 1)将表面强化后工件8吸附固定于吸附机构1;

[0088] 2)PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构1移动至清洁机构2的对应位置,清洁机构2对表面强化后工件8进行无死角清洁;

[0089] 3)PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构1移动至上胶机构3的对应位置,PLC控制器控制上胶机构3对表面强化后工件8需要粘贴应变片501的位置实现胶水的涂抹并控制上胶机构3的出胶量;

[0090] 4)PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构1移动至上料机构的对应位置,六轴机器人4从应变片储存台5通过应变片吸嘴402吸附应变片501并将吸附的应变片501贴附到表面强化后工件8指定位置,然后对应变片501进行初步按压,完成应变片501的初粘贴;

[0091] 5)PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构1移动至按压机构6的对应位置,PLC控制器控制按压机构6对粘贴于表面强化后工件8上的应变片501进行按压,完成应变片501的最终粘贴;

[0092] 6)将采集仪与应变片501连接,PLC控制器控制双轴移动机构带动吸附机构1移动至六轴机器人4末端的钻头403的对应位置,PLC控制器控制六轴机器人4的气浮主轴401运动,气浮主轴401带动钻头403对表面强化后工件8进行0-2mm的梯度式高速钻削盲孔加工,0-2mm的梯度式高速钻削盲孔分为40个盲孔深度即分别为0.05-0.1-…-1.95-2mm,同时配合吸附机构1上的喷油组件101对表面强化后工件8进行喷油冷却,并通过采集仪采集对应的x方向实测应变值和y方向实测应变值;

[0093] 7)根据步骤6)获得的x方向实测应变值和y方向实测应变值计算得出对应的残余压应力值,具体计算方法如下:

[0094] a、设置与步骤6)中的梯度式高速钻削盲孔加工适配的单轴拉伸应力有限元仿真,单轴拉伸应力有限元仿真中的单轴拉伸应力设置为0-5-10-…100MPa共20个单轴拉伸应力,通过单轴拉伸应力有限元仿真采集获得对应的x方向仿真应变值和y方向仿真应变值,通过公式①计算得出应力标定常数A和应力标定常数B,

[0095]
$$\begin{cases} A=\dfrac{E\left(\varepsilon_{x1}+\varepsilon_{y1}\right)}{2\sigma_{仿真}} \\ B=\dfrac{E\left(\varepsilon_{x1}-\varepsilon_{y1}\right)}{2\sigma_{仿真}} \end{cases} \quad ①$$

[0096] 其中,A为应力标定常数,B为应力标定常数,E为弹性模量,ε_{x1}为x方向仿真应变值,ε_{y1}为y方向仿真应变值,$\sigma_{仿真}$为单轴拉伸应力仿真值;

[0097] b、根据公式②计算形状改变比能,建立关于盲孔深度与单轴拉伸应力仿真值、形状改变比能关系的第一曲线图如图10所示,建立关于盲孔深度与形状改变比能、应力标定常数A关系的第二曲线图如图11所示,建立关于盲孔深度与形状改变比能、应力标定常数B的第三曲线图如图12所示,

[0098] $$S=\left(1+\mu^2-\mu\right)\left(\varepsilon_{x1}^2+\varepsilon_{y1}^2\right)-\left(1+\mu^2-4\mu\right)\times\varepsilon_{x1}\varepsilon_{y1} \quad ②$$

[0099] 其中，S为形状改变比能，μ为泊松比；

[0100] c、标定单轴拉伸应力仿真值等于0.6倍的表面强化后工件8屈服强度所对应的应力标定常数A和应力标定常数B分别为应力标定常数定值$A_{定}$和应力标定常数定值$B_{定}$，利用应力标定常数定值$A_{定}$、应力标定常数定值$B_{定}$和x方向仿真应变值根据公式③反求对应的单轴拉伸应力理论值，建立关于盲孔深度与单轴拉伸应力仿真值、单轴拉伸应力理论值关系的第四曲线图如图13所示，

[0101] $$\sigma_{理论}=\frac{\varepsilon_{x1}(B_{定}+A_{定})+\varepsilon_{y1}(B_{定}-A_{定})}{4A_{定}B_{定}} \quad ③$$

[0102] 其中，$\sigma_{理论}$为单轴拉伸应力理论值；

[0103] d、利用步骤6)所采集的x方向实测应变值、y方向实测应变值放和步骤c中所标定的应力标定常数定值$A_{定}$、应力标定常数定值$B_{定}$，根据公式④计算得到x方向的第一残余压应力值，将计算得到的x方向的第一残余压应力值作为单轴拉伸应力理论值并将其在步骤c建立的第四曲线图中去匹配对应的单轴拉伸应力仿真值，

[0104] $$\sigma_{x1}=\frac{\varepsilon_{x2}(B_{定}+A_{定})+\varepsilon_{y2}(B_{定}-A_{定})}{4A_{定}B_{定}} \quad ④$$

[0105] 其中，σ_{x1}为x方向的第一残余压应力值，ε_{x2}为x方向实测应变值，ε_{y2}为y方向实测应变值；

[0106] e、将步骤d中匹配的单轴拉伸应力仿真值放在第一曲线图中去匹配对应的形状改变比能，然后将匹配的形状改变比能放在第二曲线图和第三曲线图中分别去匹配对应的应力标定常数A和应力标定常数B，最后利用匹配的应力标定常数A和应力标定常数B以及步骤6)得到的x方向实测应变值和y方向实测应变值，根据公式⑤计算得出x方向的第二残余压应力值和y方向的第二残余压应力值，将计算得出的x方向的第二残余压应力值和y方向的第二残余压应力值分别作为最终的残余压应力值，

[0107] $$\begin{cases}\sigma_{x2}=\dfrac{\varepsilon_{x2}(B+A)+\varepsilon_{y2}(B-A)}{4AB}\\ \sigma_{y2}=\dfrac{\varepsilon_{x2}(B-A)+\varepsilon_{y2}(B+A)}{4AB}\end{cases} \quad ⑤$$

[0108] 其中，σ_{x2}为x方向的第二残余压应力值，σ_{y2}为y方向的第二残余压应力值。

[0109] 具体实施时，步骤c中，采用通过增应力单轴拉伸试验确定的标定屈服应力作为表面强化后工件屈服强度，增应力单轴拉伸试验中的单轴拉伸应力多次增加，单轴拉伸应力每增加一次，停留一个应变数据采集时间，当某一个应变数据采集时间内的应变数据第一次出现持续增加时，确定此时对应的单轴拉伸应力为表面强化后工件8的标定屈服应力。该

部分的标定屈服应力的确定方法是基于单轴增应力拉伸试验现象确定的,即当屈服阶段出现单轴拉伸应力达到一定值后,单轴拉伸应力不再增加而应变值持续增加,表明此时表面强化后工件8开始发生塑性变形,所以将此时对应的单轴拉伸应力确定为表面强化后工件8的标定屈服应力,避免使用国标中的屈服强度对结果的影响。

[0110] 具体实施时,如图8所示,在步骤a中的单轴拉伸应力有限元仿真中,按照实际应变片501的采集区域划分有限元仿真网格,使计算得出的应力标定常数A和应力标定常数B与应变片501的实际工作原理更加符合,从而进一步提高最后计算得出的残余压应力值的准确性。

[0111] 具体实施时,如图9所示,单轴拉伸应力有限元仿真中的表面强化后工件8的仿真模型中分布有多个其深度分别与步骤6)中的梯度式高度钻削盲孔加工深度匹配的盲孔,以减少仿真次数。

[0112] 具体实施时,第一曲线图、第二曲线图、第三曲线图、第四曲线图的建立均是利用MATLAB编程进行曲线光滑拟合而成的,减少工作量且误差小。

[0113] 为验证通过本发明中所述的方法获得的最终的残余压应力值的准确性,现通过两个实验验证:

[0114] 实验一:通过X射线衍射技术所获得的表面强化后工件8的表层x方向的残余压应力值为-120MPa±15,而通过本发明所述的方法所获得表层强化后工件的表面x方向的残余压应力值为-106MPa,二者基本吻合,符合残余压应力值所允许的误差值;

[0115] 实验二:将通过本发明中所述的方法获得的x方向的第二残余压应力值σ_{x2}和y方向的第二残余压力值σ_{y2}与通过ABAQUS单轴拉伸有限元仿真方法获得的X方向的残余压应力值σ_{x3}和Y方向的残余压应力值σ_{y3}进行比较,如图14所示,可得出通过本发明中所述的方法获得的x方向的第二残余压应力值σ_{x2}和y方向的第二残余压力值σ_{y2}与通过ABAQUS单轴拉伸有限元仿真方法获得的X方向的残余压应力值σ_{x3}和Y方向的残余压应力值σ_{x3}基本吻合,其二者的残余压应力值相差在±20MPa以内,符合残余压应力值所允许的误差值,证明本发明所述的方法确实可行,通过本发明所述的方法获得残余压力值的准确性高。

[0116] 以上所述仅是本发明的具体实施方式,使本领域技术人员能够理解或实现本发明。尽管参照前述各实施例进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离各实施例技术方案的范围,其均应涵盖权利要求书的保护范围中。

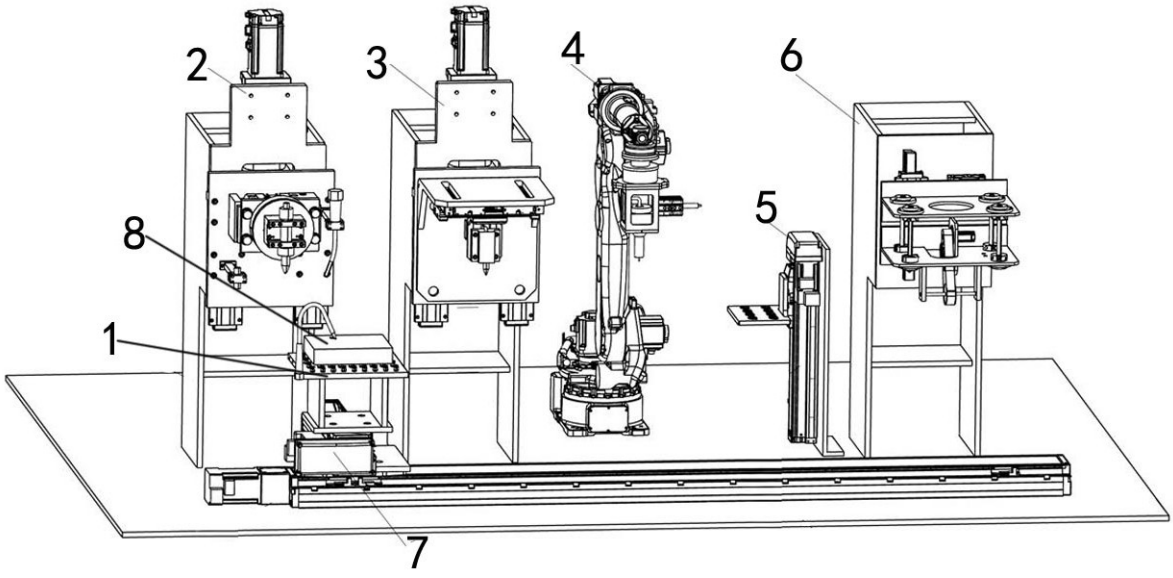


图 1

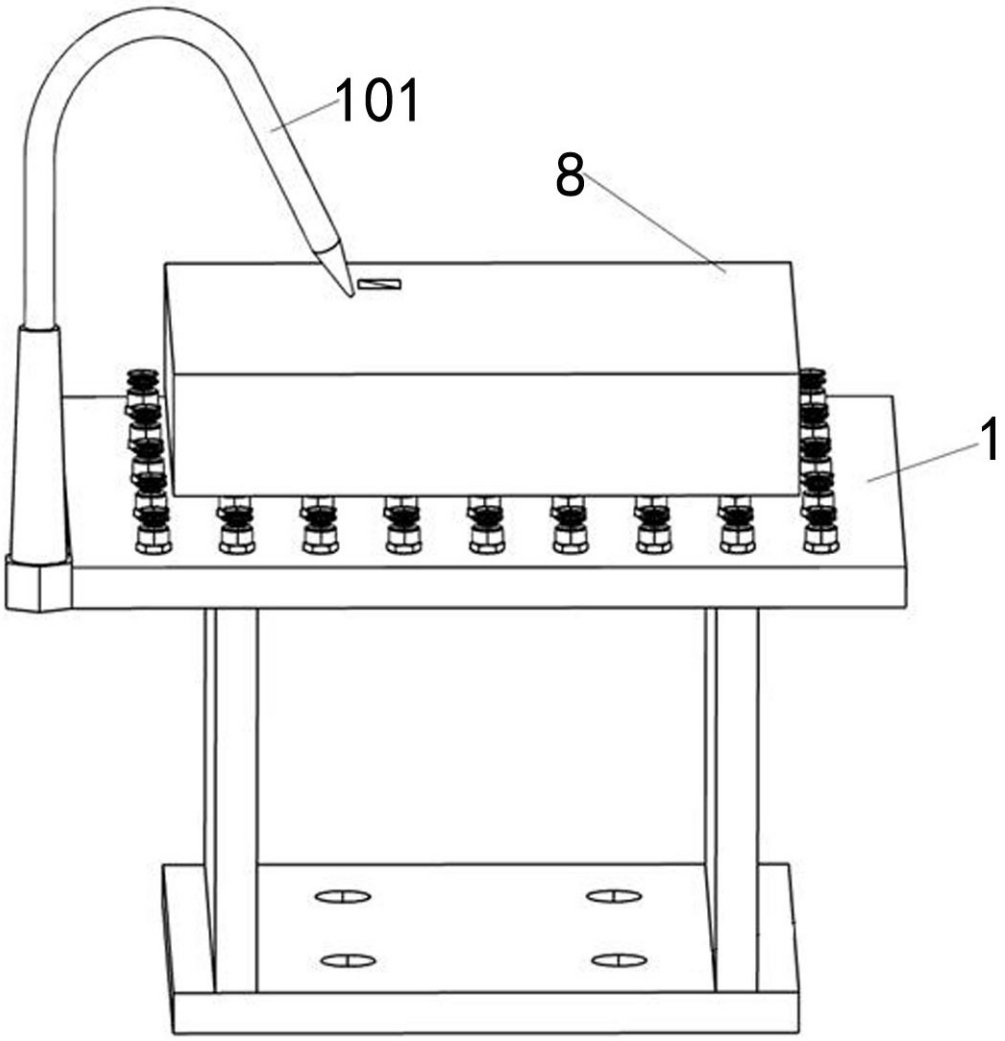


图 2

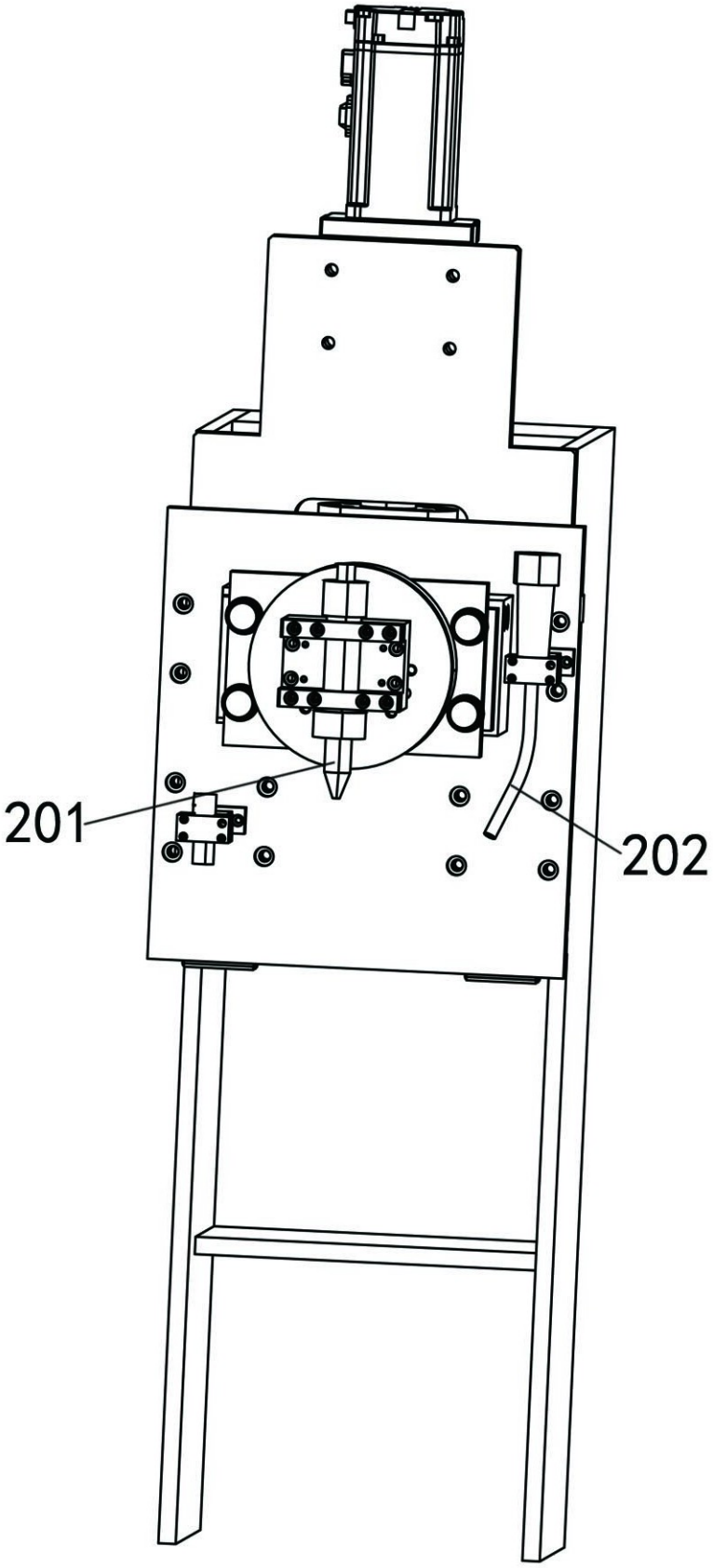


图 3

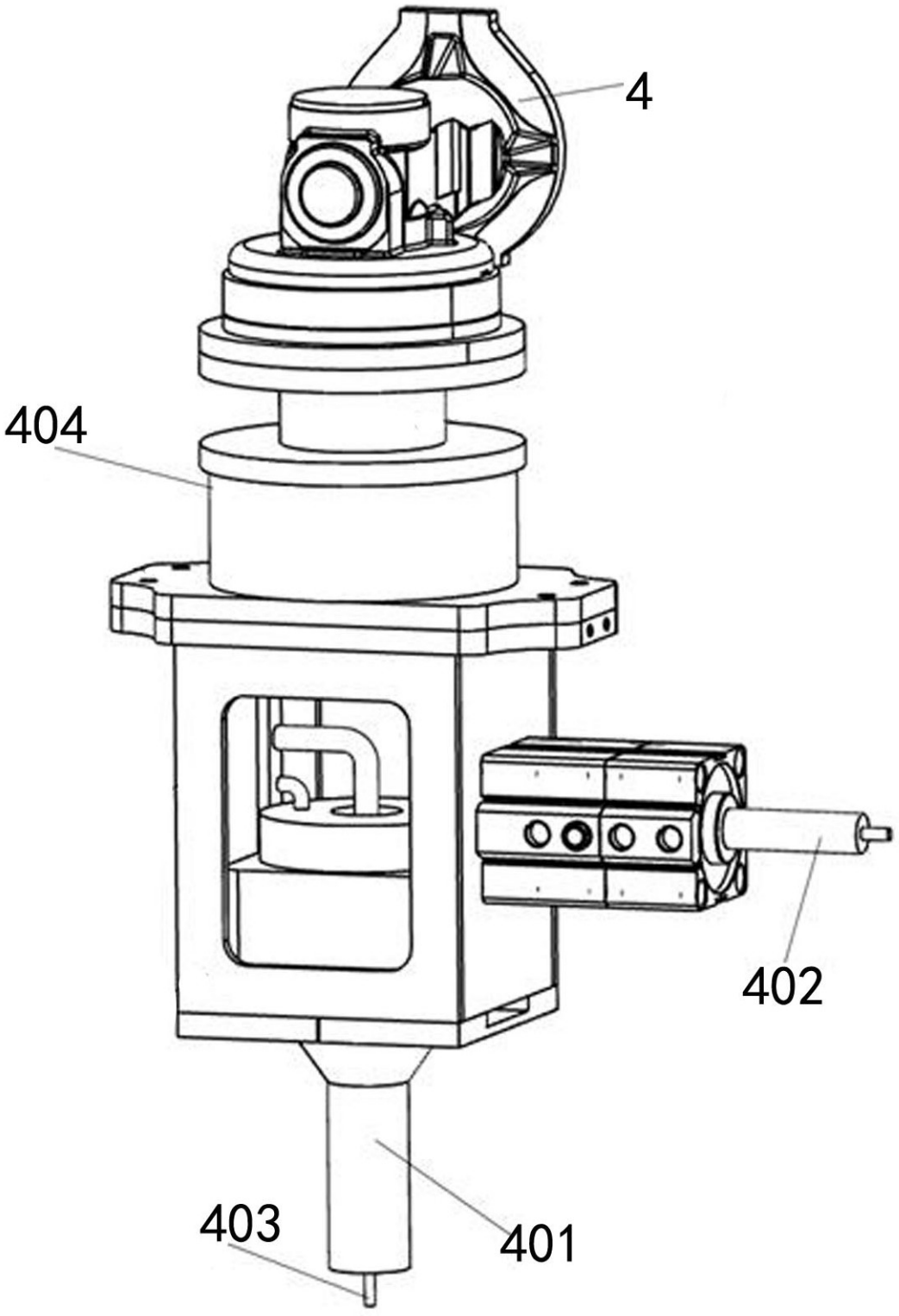


图 4

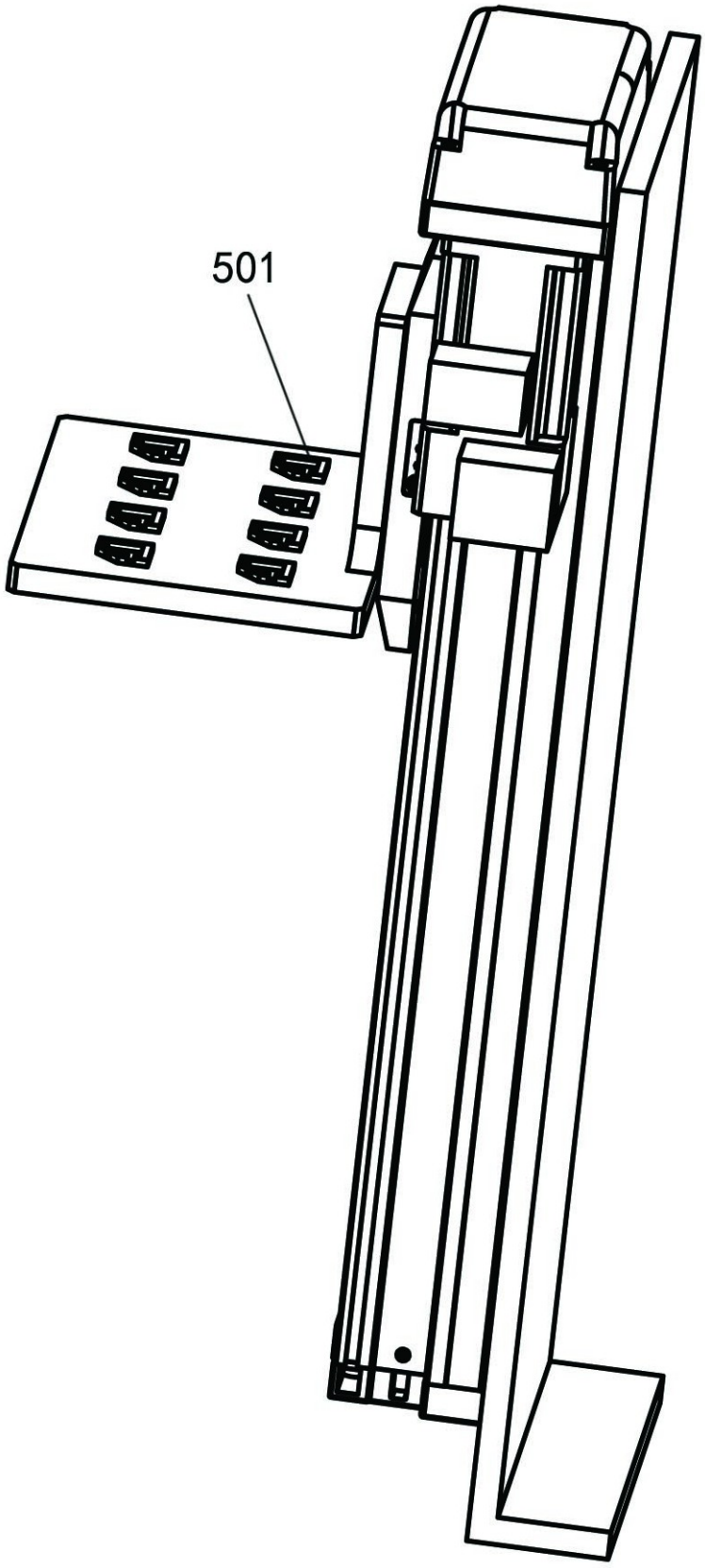


图 5

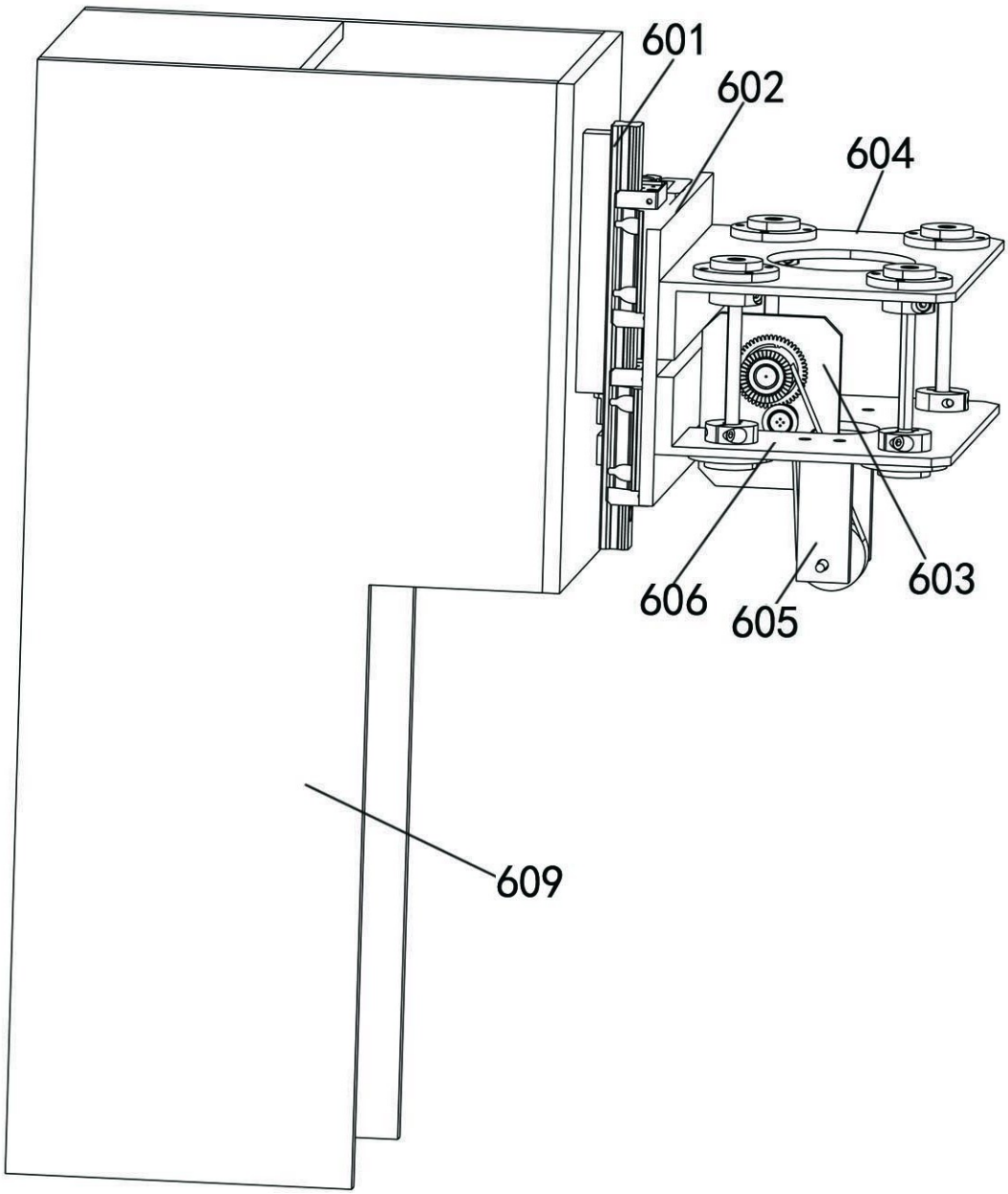


图 6

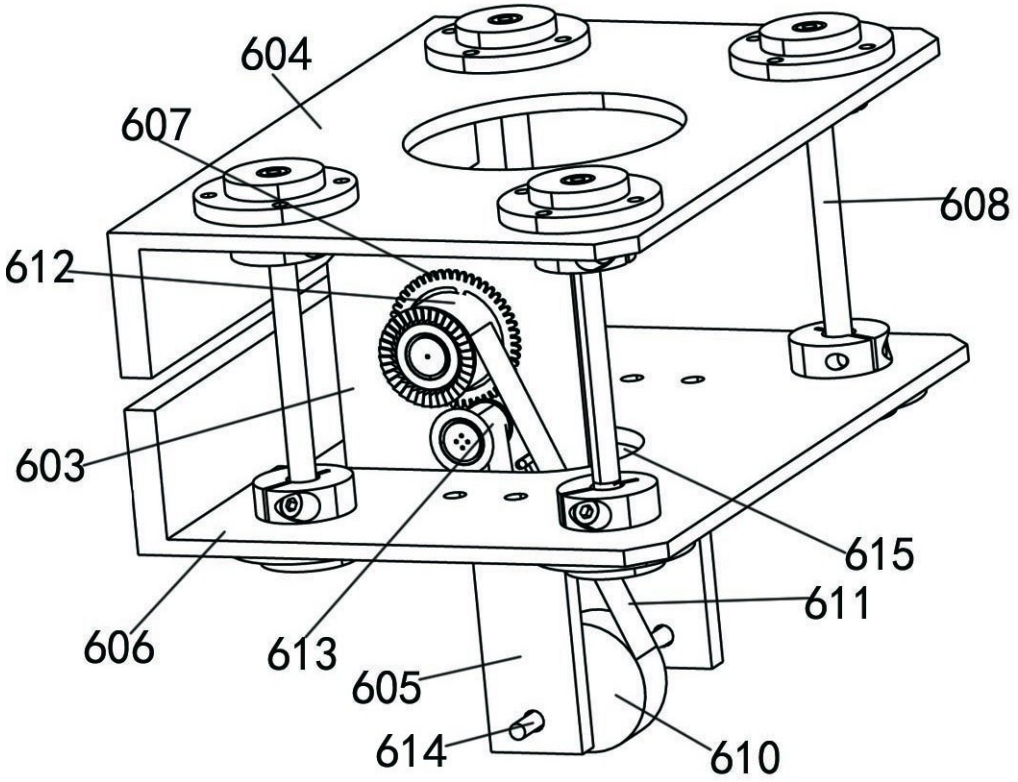


图 7

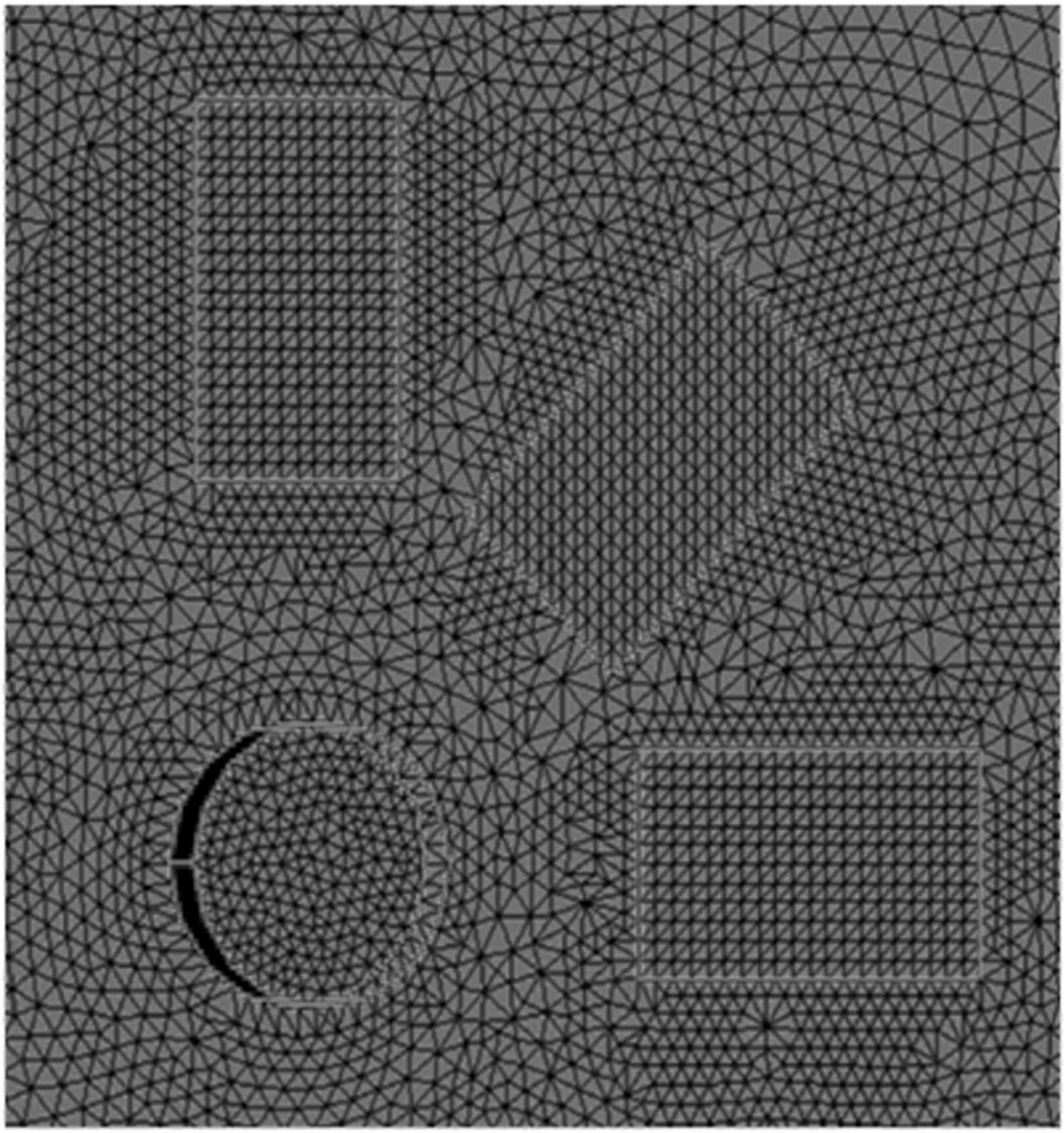


图 8

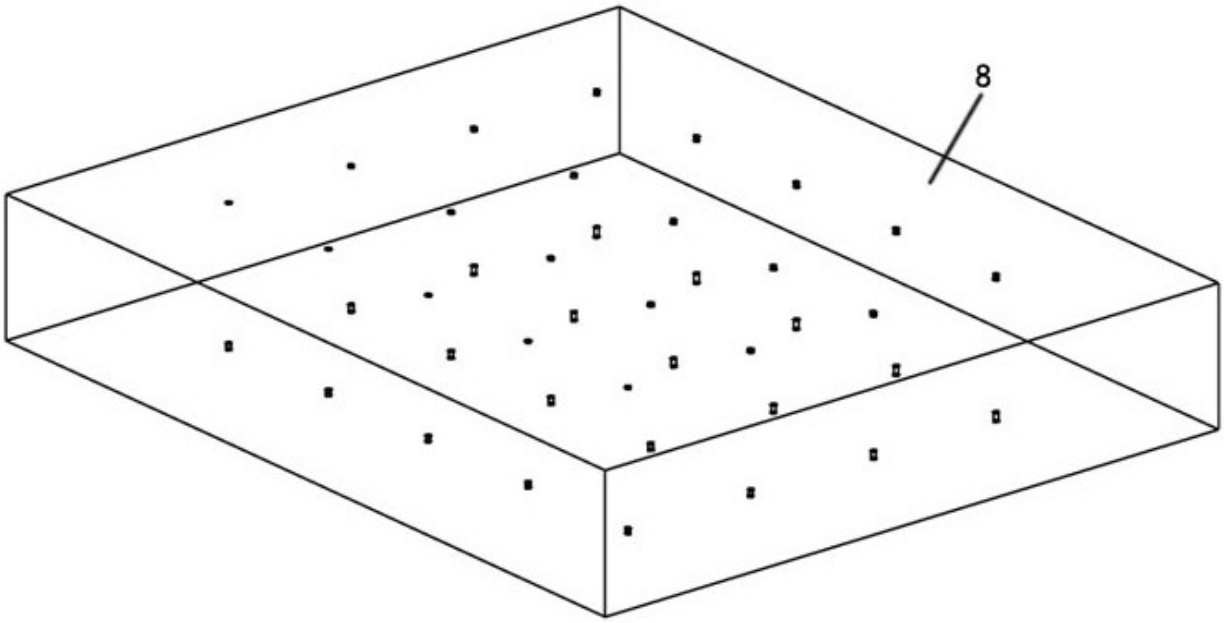


图 9

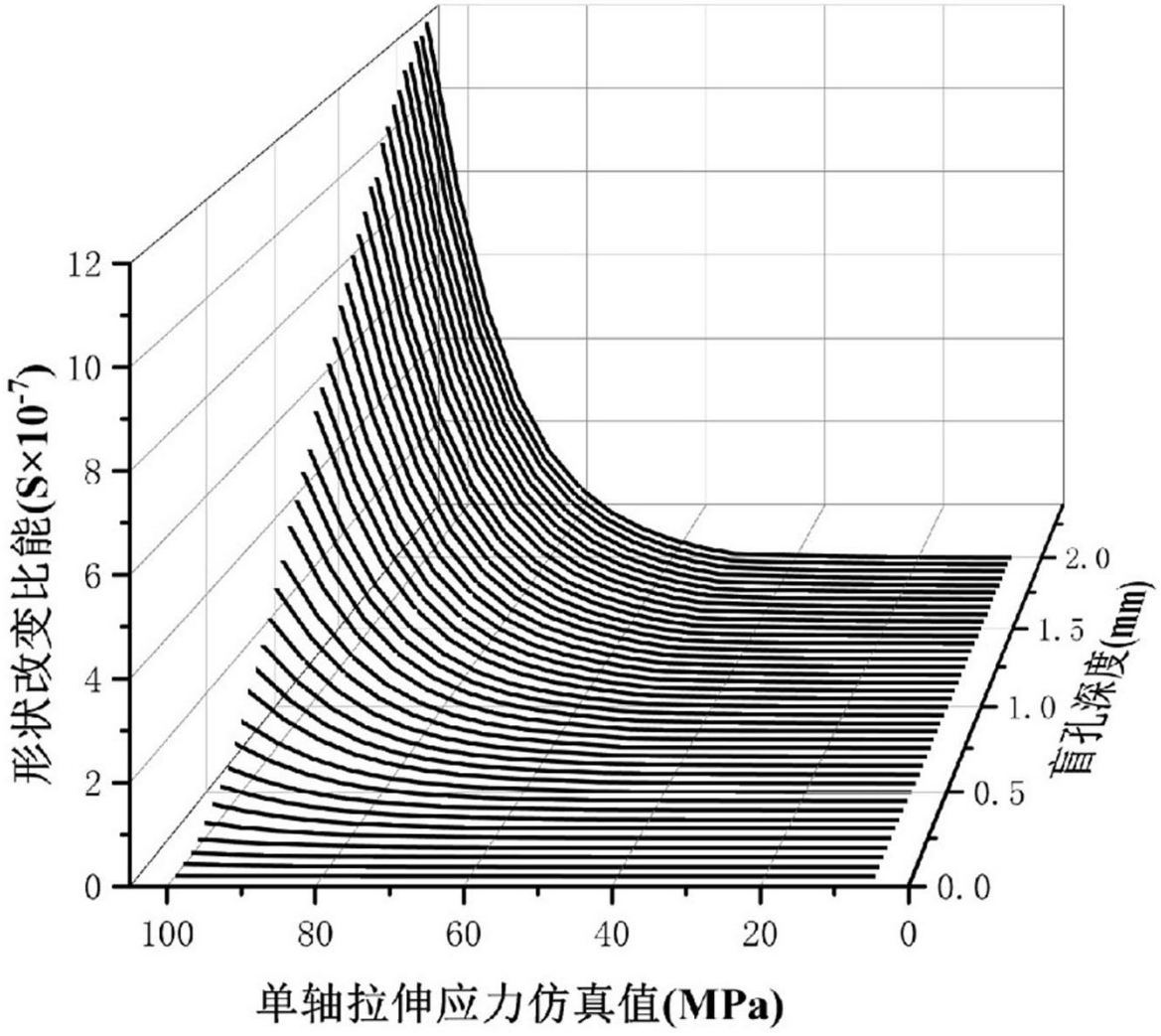

形状改变比能(S×10⁻⁷)
12
10
8
6
4
2
0
100
80
60
40
20
0
单轴拉伸应力仿真值(MPa)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
盲孔深度(mm)

图 10

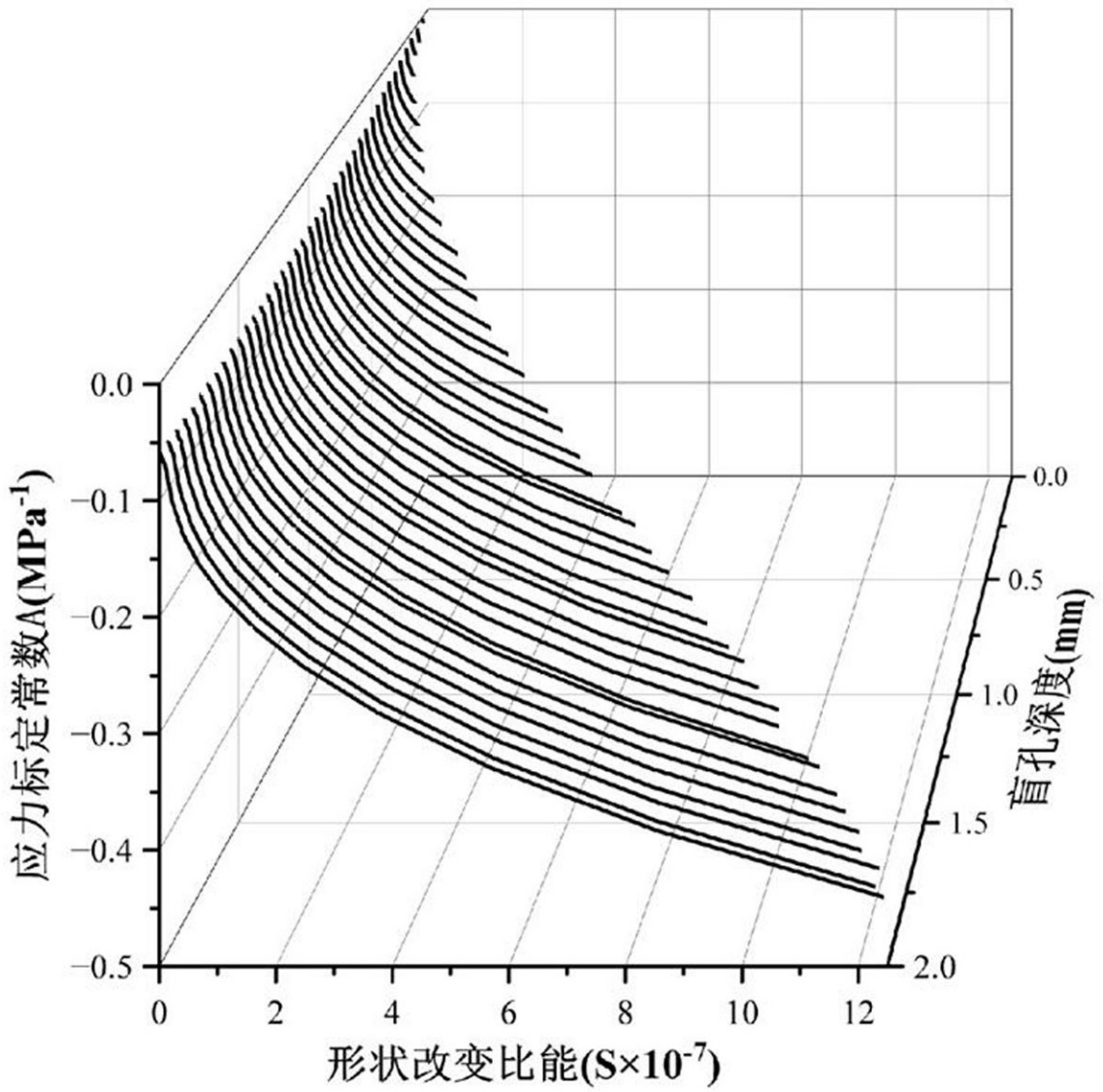

0.0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
−0.5
应力标定常数A(MPa-1)
0
2
4
6
8
10
12
形状改变比能(S×10-7)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
盲孔深度(mm)

图 11

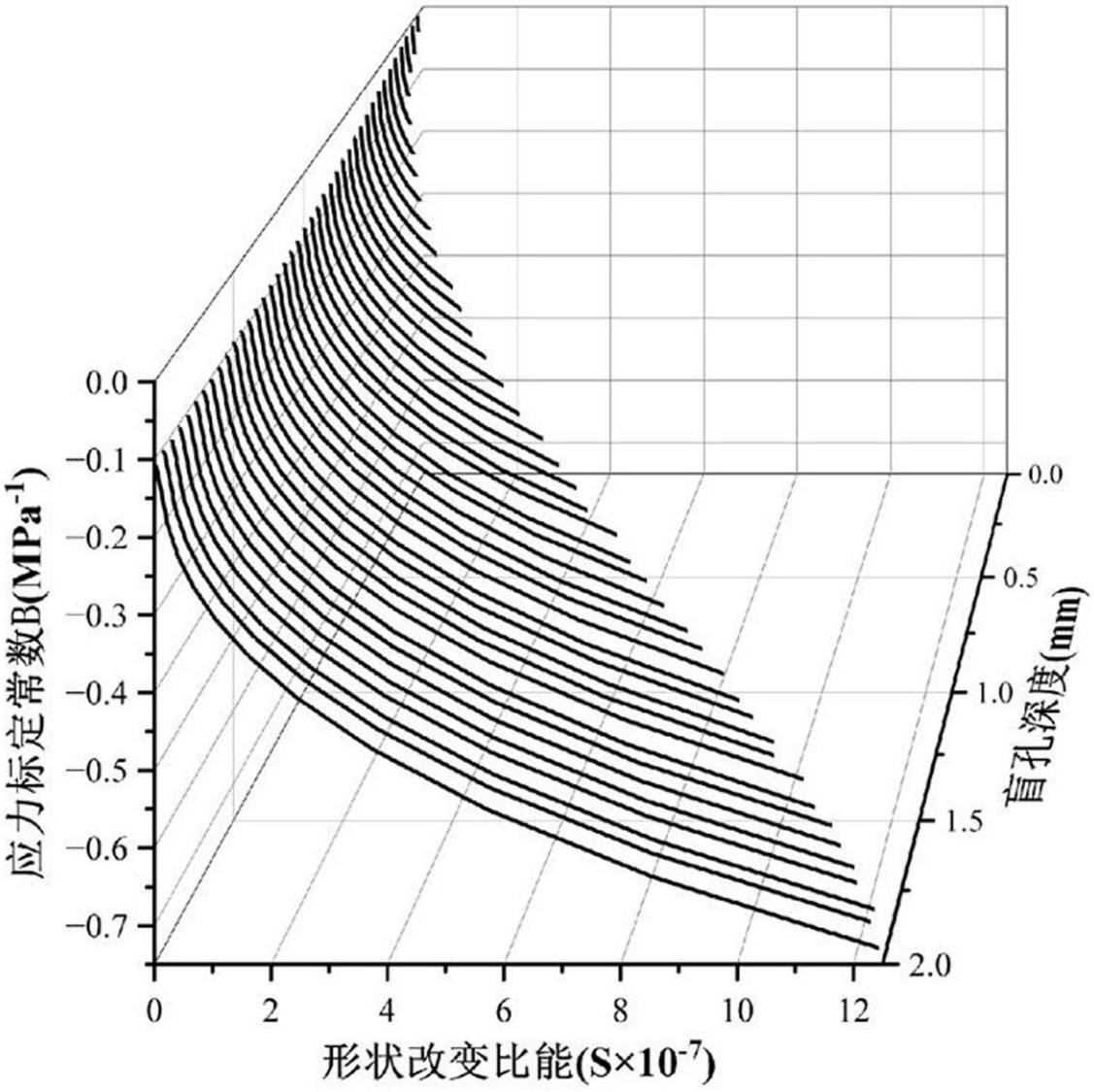

0.0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
−0.5
−0.6
−0.7
应力标定常数B(MPa-1)
0
2
4
6
8
10
12
形状改变比能(S×10-7)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
盲孔深度(mm)

图 12

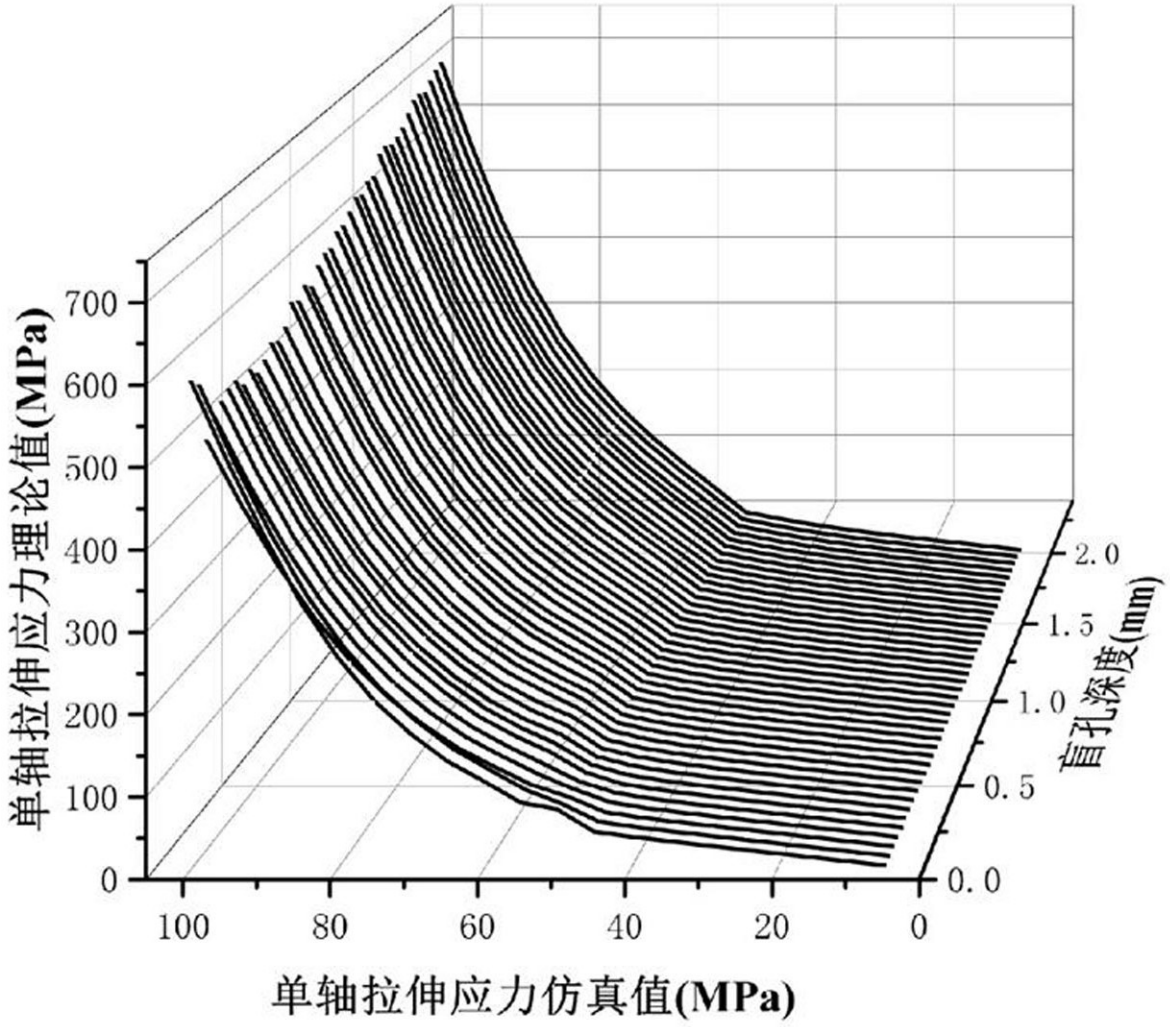

单轴拉伸应力理论值(MPa)
700
600
500
400
300
200
100
0
100
80
60
40
20
0
单轴拉伸应力仿真值(MPa)
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
盲孔深度(mm)

图 13

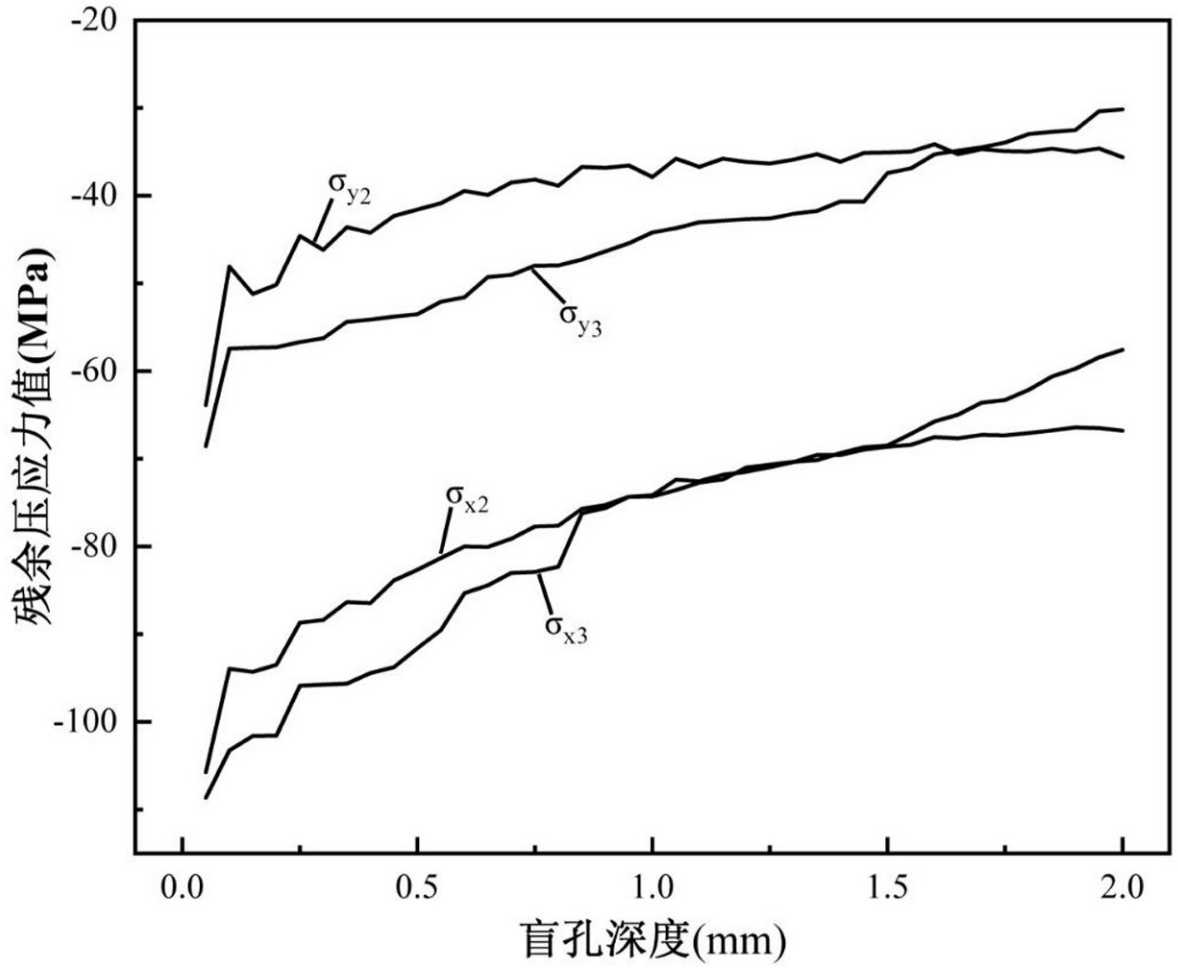


图 14