



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105855790 B

(45)授权公告日 2019.01.08

(21)申请号 201510026586.3

(22)申请日 2015.01.19

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105855790 A

(43)申请公布日 2016.08.17

(73)专利权人 中国科学院沈阳自动化研究所

地址 110016 辽宁省沈阳市东陵区南塔街114号

(72)发明人 王敏 朱智 张会杰 于涛 张骁

杨广新 苏琳

(74)专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限公司

公司 21002

代理人 许宗富 周秀梅

(51)Int.Cl.

B23P 9/02(2006.01)

(56)对比文件

CN 102205488 A,2011.10.05,全文.

CN 1486803 A,2004.04.07,全文.

CN 102080199 A,2011.06.01,全文.

CN 104190832 A,2014.12.10,全文.

CN 101942546 A,2011.01.12,全文.

CN 103128510 A,2013.06.05,全文.

US 2002/0174528 A1,2002.11.28,全文.

CN 103952651 A,2014.07.30,全文.

审查员 葛向兵

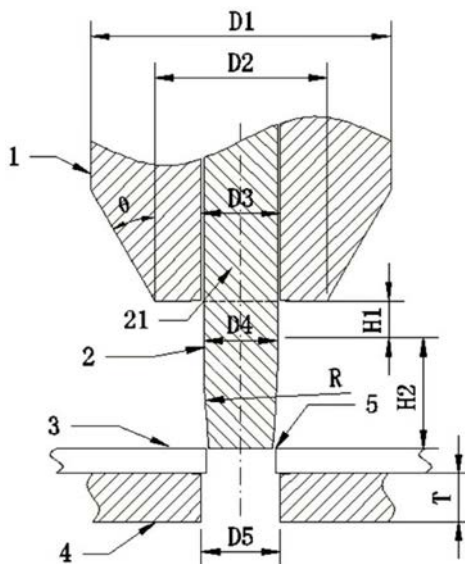
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种结构件连接孔的摩擦挤压强化工具和方法

(57)摘要

本发明公开了一种结构件连接孔的摩擦挤压强化工具和方法,属于机械加工技术领域。所述摩擦挤压强化工具包括摩擦挤压头、压肩和垫板三部分,利用该工具对结构件连接孔进行强化时,在摩擦挤压头与连接孔间保持0.02~1mm挤压过盈量的条件下,将摩擦挤压头旋转并匀速插入连接孔,静止旋转2~5s后拔出;摩擦挤压头的旋转速度100~1000rpm,插入速度0.1~2mm/s,拔出速度0.3~2mm/s;上述过程中在孔壁面附近形成残余压应力,同时孔壁面附近的材料发生塑性流动,产生晶格畸变,位错密度增加,从而实现对接孔的摩擦挤压强化。本发明主要用于航空、航天、列车及船舶等工业中重要结构件连接孔的强化。



1. 一种结构件连接孔的摩擦挤压强化工具,其特征在於:所述摩擦挤压强化工具包括摩擦挤压头、压肩和垫板三部分,其中:所述摩擦挤压头包括上部的圆柱I和下部的圆台I,圆柱I与圆台I之间平滑过渡;所述压肩由上部的圆柱II和下部的圆台II两部分组成,摩擦挤压头设于所述压肩底部的中心位置;摩擦挤压头与压肩为一体式设计或分体式设计;所述结构件放置于所述垫板上,垫板上开设圆孔;

所述摩擦挤压头与压肩为一体式设计时,摩擦挤压头与压肩通过一体成型或焊接方式连接为一体;所述摩擦挤压头与压肩为分体式设计时,摩擦挤压头与压肩为间隙配合,即在摩擦挤压头的上端设置柄部,在压肩下端的中心位置设置轴向圆孔,摩擦挤压头的柄部装入压肩的圆孔中实现间隙配合;

所述摩擦挤压头上部圆柱I的直径 $D_4$ 的范围是3~110mm,高度 $H_1$ 大于连接孔的深度,高度 $H_1$ 的范围是1~40mm;所述摩擦挤压头下部圆台I的母线为圆弧,圆台I母线的曲率半径 $R$ 的范围是10~1000mm,圆台I高度 $H_2$ 的范围是3~200mm;所述摩擦挤压头的侧表面粗糙度 $R_a \leq 0.2\mu\text{m}$ ;

所述压肩上部圆柱II的直径 $D_1$ 的范围是20~400mm,下部圆台II下端面的直径 $D_2$ 的范围是8~400mm,圆台II锥角 $\theta$ 的范围是5~90°;压肩圆台II的下端面为平面或设有凹槽;所述摩擦挤压头与压肩为分体式设计时,压肩上圆孔的直径 $D_3$ 的范围是3~110mm。

2. 根据权利要求1所述的结构件连接孔的摩擦挤压强化工具,其特征在於:所述摩擦挤压头与压肩为一体式设计时,两者是一个整体,摩擦挤压头与压肩同步运动;所述摩擦挤压头与压肩为分体式设计时,当摩擦挤压头同时做旋转和平移运动时,压肩只做平移运动而不发生旋转,或者压肩和摩擦挤压头分别按各自设定的速度旋转。

3. 根据权利要求1所述的结构件连接孔的摩擦挤压强化工具,其特征在於:所述垫板厚度 $T$ 的范围是5~250mm,垫板上的圆孔设于垫板中心,圆孔直径 $D_5$ 的范围是3~110mm;垫板上端面为平面或设有凹槽。

4. 根据权利要求1所述的结构件连接孔的摩擦挤压强化工具,其特征在於:所述摩擦挤压头、压肩和垫板所用材料的硬度应高于连接孔材料的硬度。

5. 一种利用权利要求1所述工具实现结构件连接孔的摩擦挤压强化方法,其特征在於:该方法是在摩擦挤压头与连接孔间保持0.02~1mm挤压过盈量的条件下,将摩擦挤压头旋转并匀速插入结构件上连接孔内,然后静止旋转2~5s后拔出;其中:摩擦挤压头的旋转速度为100~1000rpm,插入结构件上连接孔内的插入速度为0.1~2mm/s,从连接孔内拔出的速度为0.3~2mm/s。

6. 根据权利要求5所述的结构件连接孔的摩擦挤压强化方法,其特征在於:该方法具体包括如下步骤:

(1) 定位对中:将结构件母板置于垫板上,并使垫板上的圆孔与母板上的连接孔达到同心,将结构件母板与垫板压紧并固定,然后将摩擦挤压头对准连接孔,保证摩擦挤压头的轴线与连接孔的轴线重合;

(2) 插入:将摩擦挤压头以设定的速度旋转,再将旋转着的摩擦挤压头沿连接孔的轴线方向插入孔内,与此同时,压肩也以相同速度压向连接孔;

(3) 静止旋转:当压肩的下端面与连接孔的上表面接触或摩擦挤压头插入连接孔并达到预定深度时,停止插入,并保持摩擦挤压头继续静止旋转所需时间;

(4) 拔出:将旋转着的摩擦挤压头沿孔的轴线方向从孔内拔出,同时,压肩的下端面与连接孔的上表面分离。

## 一种结构件连接孔的摩擦挤压强化工具和方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于机械加工技术领域,具体涉及一种结构件连接孔的摩擦挤压强化工具和方法,主要用于航空、航天、列车及船舶等工业中重要结构件连接孔的强化。

### 背景技术

[0002] 近些年来,飞机因发生故障而损毁的事故时有发生,严重威胁到人们的生命安全。在飞机的各种故障中,机体损伤已占到总故障数量的30%以上。因此,飞机的总寿命主要决定于机体寿命。疲劳破坏是飞机机体丧失工作能力的根本原因,其中75~80%的疲劳破坏发生在机体结构的连接部位上。目前飞机结构件采用的主要连接手段仍然是机械连接,一架大型飞机上大约有150~200万个连接件,只有解决飞机结构件的连接疲劳寿命问题,才能保证飞机的高寿命,进而保证飞机使用的安全性和经济性。除了航空领域外,航天、列车及船舶等领域也面临着同样的问题。

[0003] 一般来说,工艺因素往往是保证连接结构具有高寿命的决定因素,包括连接孔的尺寸精度与表面质量两方面。在尺寸精度得到保证的前提下,连接孔的表面质量是影响连接件疲劳寿命的主要因素。孔的表面质量包括表面粗糙度、表面显微组织与硬度、冷作硬化及残余应力层深度等。在加工过程中,即使加工精度很高,刀具也总会在孔的内表面留下切削痕迹,这些刀痕所形成的高低不平的波纹会降低结构连接件的强度。此外,对航空、航天铝合金及钛合金等材料的壁板而言,一般是通过轧制工艺加工而成,材料内部分布着均匀的纵向流线,如果在壁板表面加工圆孔,就不可避免切断材料流线,孔的边缘形成薄弱地带,在结构服役过程中,易在该处萌生裂纹、扩展、甚至发生结构断裂。因此,需要对重要部位结构件连接孔进行有效的强化。

[0004] 目前,结构件连接孔的主要强化技术有冷挤压强化技术、机械喷丸强化技术、干涉配合连接技术及滚压强化技术。其中,冷挤压和机械喷丸是目前国内外广泛用于结构抗疲劳断裂设计的行之有效的两种强化工艺。

[0005] 冷挤压强化可以分为芯棒冷挤压和开缝衬套冷挤压。传统的冷挤压工艺使用过盈芯棒直接挤压孔壁,虽然工艺简单,但会造成孔端翻边,并严重损伤孔表面。开缝衬套冷挤压强化技术克服了传统技术的不足,其在孔壁与芯棒间增加了一个开缝的衬套,用芯棒挤压衬套,衬套再对孔壁进行挤压,从而克服了芯棒直接挤压造成的孔壁轴向擦伤及孔角突起的弊病,已在多种结构上得到了成功应用,是目前制造业中最先进的孔强化技术之一。然而开缝衬套挤压工艺相对复杂,每次强化都需消耗一个开缝衬套,而且衬套开缝处为拉应力状态,会促进裂纹的萌生与扩展。此外,经开缝衬套冷挤压后,在孔壁会留下一道线状凸台,需经铰孔才能保证孔壁面的机械要求,但铰削对孔周的残余应力分布会产生较大的影响。机械喷丸强化工艺复杂,孔径小时,难以对孔内表面强化,而且受操作空间的限制,很多关键部位的连接孔无法得到有效强化。特别是对于较小尺寸的连接孔来说,冷挤压与机械喷丸都很困难,强化效果也不理想。

[0006] 滚压强化也是一种常用的孔强化技术,根据滚压元件形状的不同,可以分为滚珠

式、滚轮式和滚柱式。通常滚轮式滚压器结构简单,易于制造,刚性较好,滚压变形区域及滚压力均较大,然而这种滚压器仅适合于滚压较大直径的孔;而滚珠式与滚柱式滚压,两者变形区域较小,一般适用于中小直径的孔,然而其相应滚压器的结构和操作也更加复杂。

[0007] 随着高功率激光器的研制和工程化应用的不断发展,激光冲击强化技术以它无污染、易控制、强化效果显著等优点有着巨大的应用前景。在飞机设计制造中,激光冲击强化技术将在提高结构抗疲劳性能、全寿命周期中的可靠性,尤其是在小孔的强化方面,发挥不可替代的作用。然而,激光冲击强化的技术成本太高,而且工艺复杂,目前,仅作为其它强化技术的补充。

[0008] 综上,现有的孔强化技术存在着强化效果不理想、操作繁琐、效率低、适用范围窄及成本高等问题。

### 发明内容

[0009] 针对现有孔强化技术中存在的上述不足之处,本发明的目的在于提供一种结构件连接孔的摩擦挤压强化工具和方法,本发明利用特定的强化工具对连接孔进行强化处理,不仅可以增强孔周边材料抗裂纹萌生与扩展的能力;而且能够消除钻孔时产生的壁面划痕,提高孔的壁面质量。本发明操作简单,效率高,适用范围广,成本低。

[0010] 为实现上述目的,本发明所采用的技术方案如下:

[0011] 一种结构件连接孔的摩擦挤压强化工具,包括摩擦挤压头、压肩和垫板三部分,其中:所述摩擦挤压头包括上部的圆柱I和下部的圆台I,圆柱I与圆台I之间平滑过渡;所述压肩由上部的圆柱II和下部的圆台II两部分组成,摩擦挤压头设于所述压肩底部的中心位置;摩擦挤压头与压肩为一体式设计或分体式设计;所述结构件放置于所述垫板上,垫板上开设圆孔。

[0012] 所述摩擦挤压头与压肩为一体式设计时,摩擦挤压头与压肩通过一体成型或焊接方式连接为一体;所述摩擦挤压头与压肩为分体式设计时,压肩与摩擦挤压头为间隙配合,即在摩擦挤压头的上端设置柄部,在压肩下端的中心位置设置轴向圆孔,摩擦挤压头的柄部装入压肩的圆孔中实现间隙配合。

[0013] 所述摩擦挤压头与压肩为一体式设计时,两者是一个整体,摩擦挤压头与压肩同步运动;所述摩擦挤压头与压肩为分体式设计时,摩擦挤压头同时做旋转和平移运动时,压肩只做平移运动而不发生旋转,或者压肩与摩擦挤压头分别按各自设定的速度旋转。

[0014] 所述摩擦挤压头上部圆柱I的直径D4的范围是3~110mm,高度H1大于连接孔的深度,高度H1的范围是1~40mm;所述摩擦挤压头下部圆台I的母线为圆弧,圆台I母线的曲率半径R的范围是10~1000mm,圆台I高度H2的范围是3~200mm;所述摩擦挤压头的侧表面粗糙度 $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ 。

[0015] 所述压肩上部圆柱II的直径D1的范围是20~400mm,下部圆台II的下端面的直径D2的范围是8~400mm,圆台II锥角 $\theta$ 的范围是5~90°;压肩圆台II的下端面为平面或设有凹槽;所述摩擦挤压头与压肩为分体式设计时,压肩上圆孔的直径D3的范围是3~110mm。

[0016] 所述垫板厚度T的范围是5~250mm,垫板上的圆孔设于垫板中心,圆孔直径D5的范围是3~110mm;垫板上端面可以是平面,也可以设有凹槽。

[0017] 所述摩擦挤压头、压肩和垫板所用材料的硬度应高于连接孔材料的硬度;所述摩

擦挤压头、压肩和垫板的材料为工具钢、镍基高温合金、钴基高温合金、高熔点金属、碳化物或金属基复合材料,三者为同质材料或异质材料。

[0018] 本发明还提供利用上述工具对结构件连接孔进行摩擦挤压强化的方法,该方法是在摩擦挤压头与连接孔间保持0.02~1mm挤压过盈量的条件下,将摩擦挤压头旋转并匀速插入结构件上连接孔内,然后静止旋转2~5s后拔出;其中:摩擦挤压头的旋转速度为100~1000rpm,插入结构件上连接孔内的插入速度为0.1~2mm/s,从连接孔内拔出的速度为0.3~2mm/s。在上述强化过程中,一方面,在摩擦挤压头的挤压作用、压肩下端面和垫板上端面的压力作用下,连接孔壁面附近形成残余压应力,在服役条件下可以抵消部分拉应力,改善连接孔周围的应力环境;另一方面,在摩擦挤压头的旋转摩擦作用下,连接孔壁面附近的材料发生塑性流动,并产生晶格畸变,位错密度增加。以上两方面共同作用增强了连接孔周边材料抗裂纹萌生与扩展的能力。此外,摩擦挤压头的旋转摩擦作用还能够消除钻孔时产生的壁面划痕,提高孔的壁面质量。

[0019] 实现上述结构件连接孔的摩擦挤压强化方法具体包括如下步骤:

[0020] (1) 定位对中:将结构件母板置于垫板上,并使垫板上的圆孔与母板上的连接孔达到同心,将结构件母板与垫板压紧并固定,然后将摩擦挤压头对准连接孔,保证摩擦挤压头的轴线与连接孔的轴线重合;

[0021] (2) 插入:将摩擦挤压头以设定的速度旋转,再将旋转着的摩擦挤压头沿连接孔的轴线方向插入孔内,与此同时,压肩也以相同速度(摩擦挤压头的插入速度)压向连接孔;

[0022] (3) 静止旋转:当压肩的下端面与连接孔的上表面接触或摩擦挤压头插入连接孔达到预定深度时,停止插入,并保持摩擦挤压头继续静止旋转所需时间;

[0023] (4) 拔出:将旋转着的摩擦挤压头沿孔的轴线方向从孔内拔出,同时,压肩的下端面与连接孔的上表面分离。

[0024] 所述挤压过盈量是指摩擦挤压头上部的圆柱I与连接孔之间的半径过盈量,即单面过盈量。

[0025] 所述结构件连接孔处的材料为铝、铝合金、镁、镁合金、铜、铜合金、钛、钛合金、高温合金、碳素结构钢、合金结构钢、超高强度钢或不锈钢。

[0026] 所述连接孔在强化处理前的尺寸为:孔径3~100mm,深度1~30mm。

[0027] 本发明具有以下优点及有益效果:

[0028] 1、本发明在进行结构件连接孔的摩擦挤压强化时,在摩擦挤压头与连接孔间保持0.02~1mm挤压过盈量的条件下,将摩擦挤压头旋转并匀速插入结构件上连接孔内对其进行摩擦挤压强化;该过程中,在摩擦挤压头的挤压作用、压肩下端面和垫板上端面的压力作用下,孔壁面附近形成残余压应力,在服役条件下可以抵消部分拉应力,改善孔周围的应力环境。在摩擦挤压头的旋转摩擦作用下,孔壁面附近的材料发生塑性流动,并产生晶格畸变,位错密度增加。以上两方面共同作用增强了孔周边材料抗裂纹萌生与扩展的能力。

[0029] 2、本发明中摩擦挤压头的旋转摩擦作用还能够消除钻孔时产生的壁面划痕,提高孔的壁面质量。

[0030] 3、本发明通过控制摩擦挤压头转速、插入速度、静止旋转时间及拔出速度,并与适当的挤压过盈量(0.02~1mm)相配合,可以使连接孔壁面附近材料的温度达到50~100℃,从而使材料产生一定程度的软化,与冷挤压强化相比,摩擦挤压头插入时需要的下压力更

小,消耗的能量更少,成本更低。

[0031] 4、本发明强化方法中,摩擦挤压头可以安装在通用的机床主轴上使用;也可以是工业上常用的机器人手臂。因此,与现有的孔强化技术相比,该方法更加灵活,其适用范围更广。

[0032] 5、本发明强化方法不需要额外的辅助器材,如冷挤压强化时需要衬套,而且操作步骤简单,效率高,适用于多种金属材料孔的强化。

### 附图说明

[0033] 图1是本发明摩擦挤压强化工具结构。

[0034] 图2是本发明摩擦挤压强化工具压肩下端面与垫板上端面的截面轮廓;其中:(a)压肩;(b)垫板。

[0035] 图3是本发明结构件连接孔的摩擦挤压强化原理;其中:(a)强化前;(b)插入及静止旋转;(c)旋转拔出。

[0036] 图4是本发明一体式摩擦挤压头与压肩实物照片。

[0037] 图5是摩擦挤压强化前后孔的对比照片;其中:(a)强化前;(b)强化后。

[0038] 图6是摩擦挤压强化后连接孔壁周围的残余应力分布;其中:(b)为(a)中区域A的残余应力分布情况。

[0039] 图中:1-压肩;2-摩擦挤压头;21-柄部;3-结构件母板;4-垫板;5-连接孔。

### 具体实施方式

[0040] 下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

[0041] 如图1所示,本发明结构件连接孔的摩擦挤压强化工具由摩擦挤压头2、压肩1和垫板4三部分组成,其中:所述摩擦挤压头2包括上部的圆柱I和下部的圆台I,圆柱I与圆台I之间平滑过渡;所述压肩1由上部的圆柱II和下部的圆台II两部分组成;所述摩擦挤压头2设于所述压肩1底部的中心位置,摩擦挤压头2与压肩1为一体式设计或分体式设计。所述结构件放置于所述垫板4上,垫板4上开设圆孔。

[0042] 利用该工具对结构件连接孔进行摩擦挤压强化的原理如图3(a)-(c)所示,在摩擦挤压头2与连接孔5间保持0.02~1mm挤压过盈量的条件下,将摩擦挤压头2旋转并匀速插入结构件母板3上的连接孔5内,静止旋转2~5s后拔出;其中:摩擦挤压头2的旋转速度为100~1000rpm,插入结构件上连接孔5内的插入速度为0.1~2mm/s,从连接孔5内拔出的速度为0.3~2mm/s。在上述强化过程中,一方面,在摩擦挤压头2的挤压作用、压肩1下端面和垫板4上端面的压力作用下,连接孔5壁面附近形成残余压应力,在服役条件下可以抵消部分拉应力,改善连接孔5周围的应力环境;另一方面,在摩擦挤压头2的旋转摩擦作用下,连接孔5壁面附近的材料发生塑性流动,并产生晶格畸变,位错密度增加。以上两方面共同作用增强了连接孔5周边材料抗裂纹萌生与扩展的能力。此外,摩擦挤压头2的旋转摩擦作用还能够消除钻孔5时产生的壁面划痕,提高孔5的壁面质量。

[0043] 利用上述强化工具,并根据上述原理实现结构件连接孔的摩擦挤压强化方法,该方法是通过以下具体步骤实现的:

[0044] 步骤一:定位对中。将结构件母板3置于垫板4上,通过预定位使垫板4上的圆孔与

连接孔5达到同心,将母板3与垫板4压紧并固定。将摩擦挤压头2对准连接孔5,保证摩擦挤压头2的轴线与连接孔5的轴线重合。

[0045] 步骤二:插入。将摩擦挤压头2以设定的速度旋转,再将旋转着的摩擦挤压头2沿着连接孔5的轴线方向匀速插入孔5内,与此同时,压肩1也以相同速度压向连接孔5。

[0046] 步骤三:静止旋转。当压肩1的下端面与连接孔5的上表面接触或摩擦挤压头2插入连接孔5达到预定深度时,停止插入,并保持摩擦挤压头2继续静止旋转所需时间。

[0047] 步骤四:拔出。将旋转着的摩擦挤压头2沿连接孔5的轴线方向从孔内拔出,同时,压肩1的下端面与连接孔5的上表面分离。

[0048] 本发明摩擦挤压头2与压肩1为一体式设计时,摩擦挤压头2与压肩1通过一体成型或焊接方式连接为一体;所述摩擦挤压头2与压肩1为分体式设计时,压肩1与摩擦挤压头2为间隙配合,即在摩擦挤压头2的上端设置柄部21,在压肩1下端面的中心位置设置轴向圆孔,摩擦挤压头2的柄部21装入压肩1的圆孔中实现间隙配合。

[0049] 本发明摩擦挤压头2与压肩1为一体式设计时,两者是一个整体,摩擦挤压头2与压肩1同步运动;所述摩擦挤压头2与压肩1为分体式设计时,摩擦挤压头2同时做旋转和平移运动时,压肩1只做平移运动而不发生旋转,或者压肩1与摩擦挤压头2分别按各自设定的速度旋转。

[0050] 本发明摩擦挤压头2上部圆柱I的直径D4的范围是3~110mm,高度H1大于连接孔5的深度,其范围是1~40mm;摩擦挤压头2下部圆台I的母线为圆弧,圆台I母线的曲率半径R的范围是10~1000mm,圆台I高度H2的范围是3~200mm;摩擦挤压头2的侧表面粗糙度 $R_a \leq 0.2\mu\text{m}$ 。

[0051] 本发明压肩1上部圆柱II的直径D1的范围是20~400mm;压肩1下部圆台II下端面的直径D2的范围是8~400mm,圆台II锥角 $\theta$ 的范围是5~90°;压肩1圆台II下端面为平面或设有凹槽,当有凹槽时,其下端面的截面轮廓如图2(a)所示,相关参数的尺寸范围如下:h1的范围是0.02~2mm,W1的范围是1~25mm,W2的范围是1~25mm,R1的范围是0.05~50mm,R2的范围是0.05~50mm;本发明摩擦挤压头2与压肩1为分体式设计时,压肩1圆台II下端面圆孔的直径D3的范围是3~110mm。

[0052] 本发明垫板4厚度T的范围是5~250mm,垫板4上的圆孔设于垫板中心,圆孔直径D5的范围是3~110mm;垫板4上端面可以是平面,也可以设有凹槽,当有凹槽时,其上端面的截面轮廓如图2(b)所示,相关参数的尺寸范围如下:h2的范围是0.02~2mm,W3的范围是1~25mm,W4的范围是1~25mm,R3的范围是0.05~50mm,R4的范围是0.05~50mm。

[0053] 本发明摩擦挤压头2、压肩1和垫板4材料的硬度应高于连接孔5处材料的硬度;所述摩擦挤压头2、压肩1和垫板4的材料为工具钢、镍基高温合金、钴基高温合金、高熔点金属、碳化物及金属基复合材料,三者可以是同质材料,也可以是异质材料。

[0054] 实施例1

[0055] 本实施例是对铝合金结构件上的连接孔进行摩擦挤压强化处理,其中,母板为2mm厚的7B04铝合金薄板,连接孔强化前的孔径为5.6mm。摩擦挤压头与压肩的材料选取In718,其硬度值远大于7B04铝合金的硬度,摩擦挤压头与压肩采用一体式设计,压肩下端面与垫板上端面为平面,该强化工具的具体尺寸参数如下:

[0056] (1) 摩擦挤压头: $D_4 = 6\text{mm}$ ,单面挤压过盈量为0.2mm, $H_1 = 5\text{mm}$ , $R = 100\text{mm}$ , $H_2 =$



10mm,摩擦挤压头的侧表面粗糙度 $Ra=0.2\mu m$ 。

[0057] (2) 压肩: $D1=24mm, D2=14mm, \theta=11.31^\circ$ ,由于采用一体式设计,忽略D3。

[0058] (3) 垫板: $T=15mm, D5=8mm$ 。

[0059] 图4所示为制造的一体式摩擦挤压头与压肩实物。

[0060] 利用上述工具对7B04铝合金母板上的连接孔进行强化,工艺参数选择如下:摩擦挤压头转速为100rpm,插入速度为0.5mm/s,静止旋转时间为2s,拔出速度为0.5mm/s。本实施例中,挤压过盈量、摩擦挤压头转速、插入速度、静止旋转时间以及拔出速度相配合可以使连接孔壁面附近材料的温度达到约70℃。

[0061] 图5所示是摩擦挤压强化前后孔的对比照片,从图中可以看到,强化后,孔的壁面更为光洁,壁面质量更高。

[0062] 结构件上连接孔在强化处理前,孔壁周围并不具有应力,本实施例对其进行摩擦挤压强化后孔壁周围出现残余应力,分布情况如图6所示。可以看到,孔壁附近绝大部分区域为残余压应力,在服役条件下能够抵消部分拉应力,改善孔周围的应力环境,增强其抗裂纹萌生与扩展的能力,从而提高孔的服役寿命。

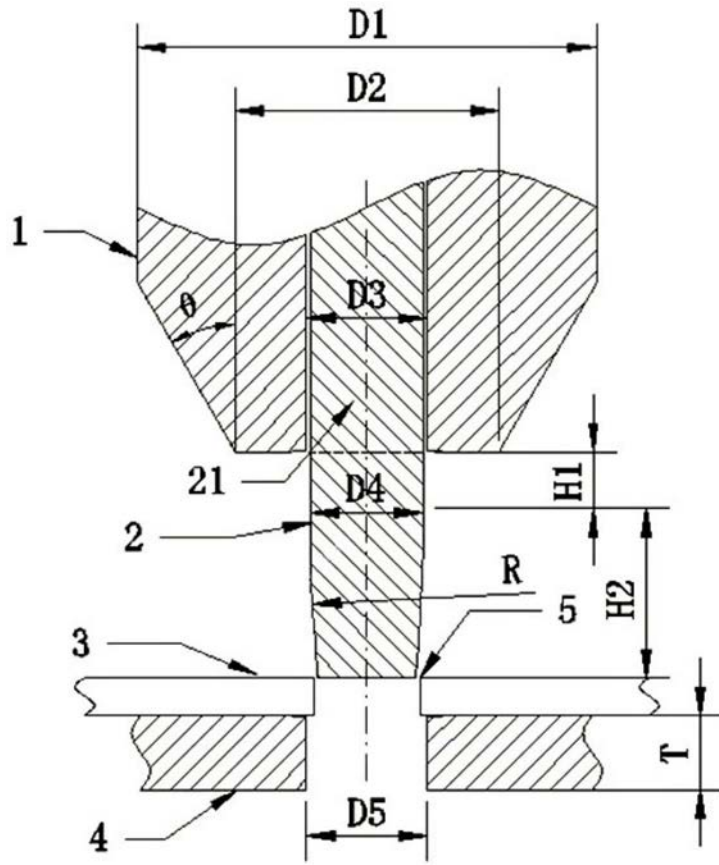


图1

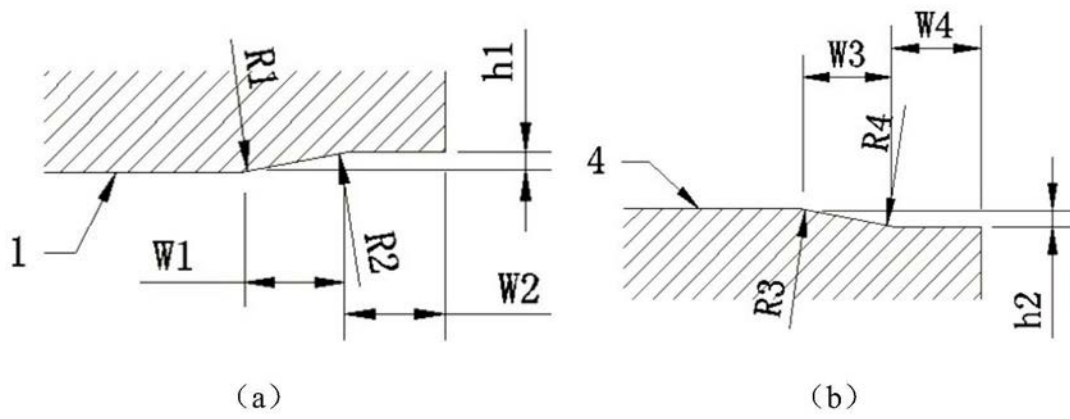


图2

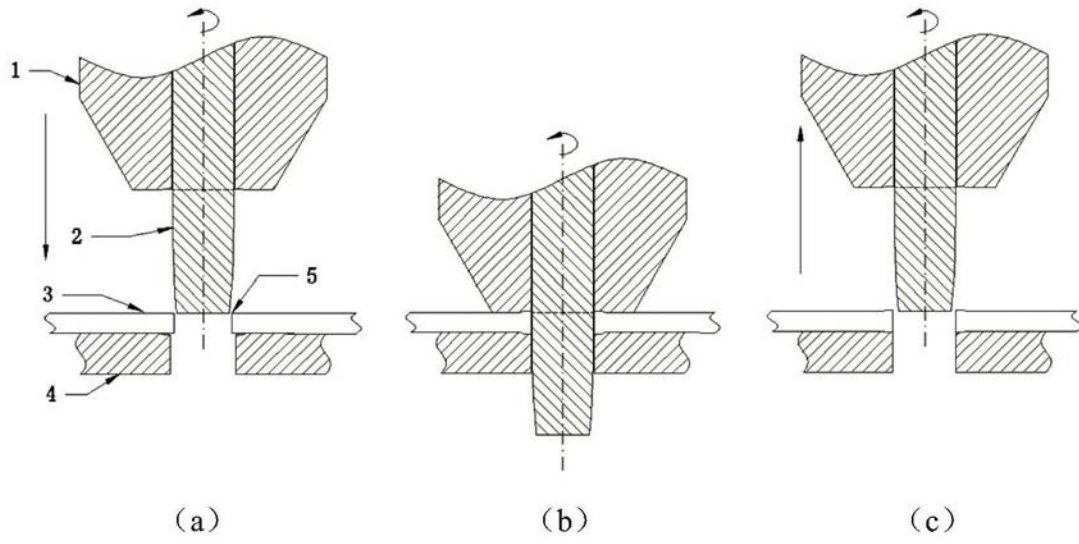


图3

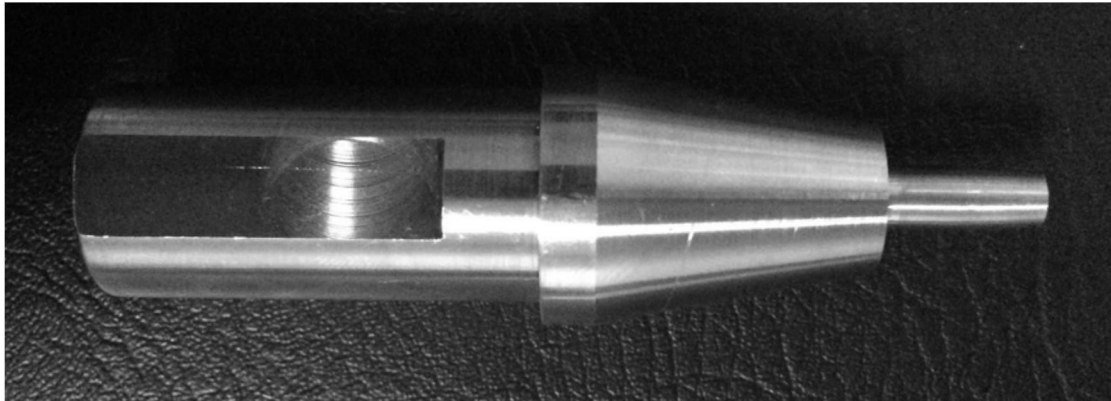


图4

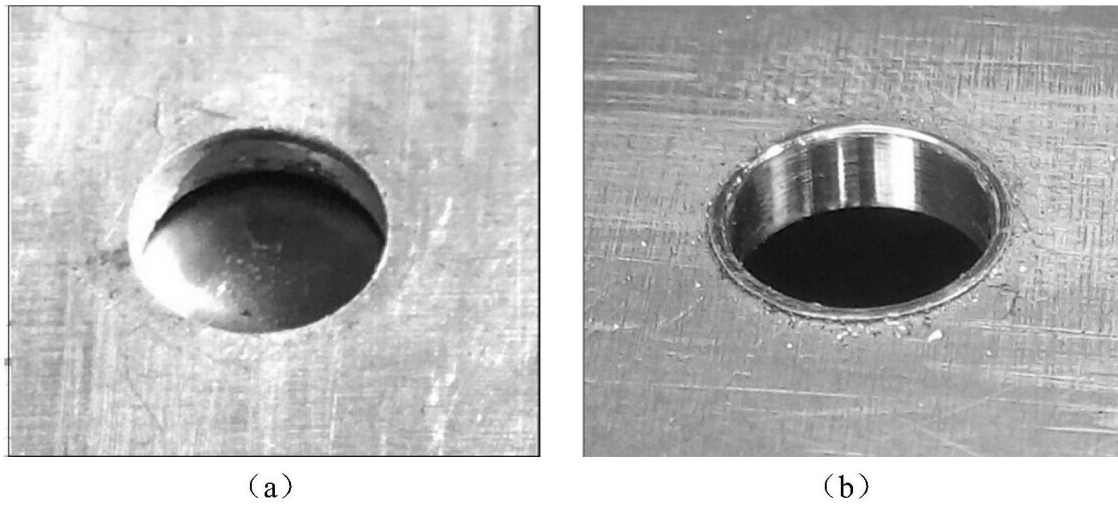


图5

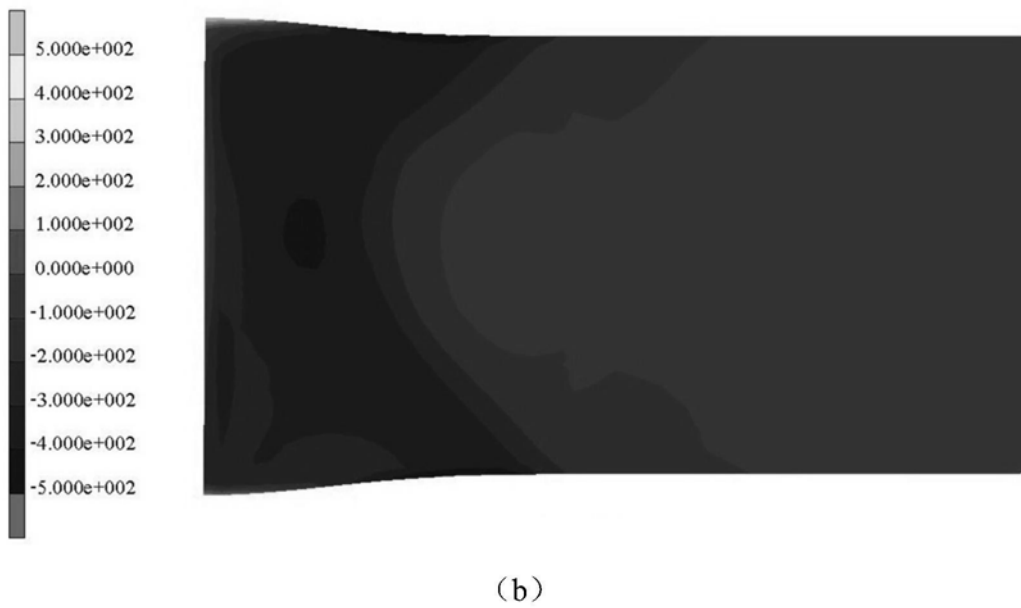
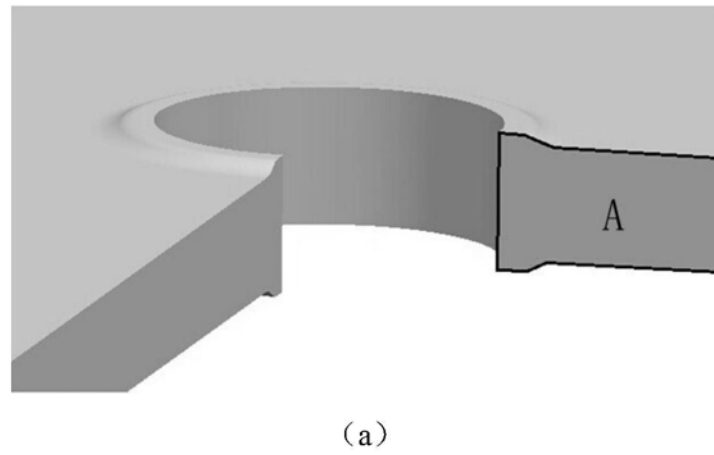


图6