



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114985896 B

(45) 授权公告日 2023. 08. 18

(21) 申请号 202210752312.2

(22) 申请日 2022.06.29

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 114985896 A

(43) 申请公布日 2022.09.02

(73) 专利权人 中国科学院金属研究所  
地址 110016 辽宁省沈阳市沈河区文化路  
72号

(72) 发明人 刘峰超 马宗义 肖伯律 倪丁瑞  
薛鹏

(74) 专利代理机构 北京煦润律师事务所 11522  
专利代理师 赵姣姣 梁永芳

(51) Int. Cl.  
B23K 20/12 (2006.01)  
B23K 20/26 (2006.01)

(56) 对比文件

- CN 111745286 A, 2020.10.09
- CN 102513691 A, 2012.06.27
- CN 113231753 A, 2021.08.10
- CN 110653479 A, 2020.01.07
- CN 103846542 A, 2014.06.11
- US 2020398369 A1, 2020.12.24
- US 2011104515 A1, 2011.05.05

审查员 刘媛媛

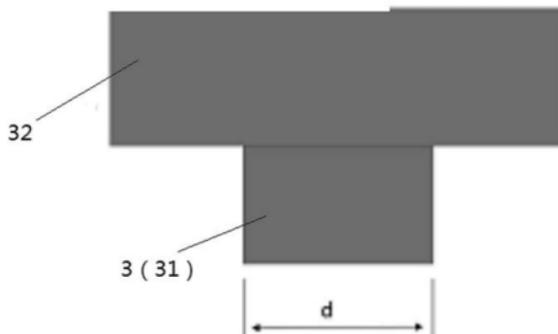
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件

(57) 摘要

本申请提供一种用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,包括第一金属结构和第二金属结构,第一金属结构与第二金属结构通过搅拌摩擦焊方法连接,且第一金属结构与第二金属结构通过在连接界面形成纳米过渡层实现连接;纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%。根据本申请的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,能够提高界面结合强度。



1. 一种用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,包括:

第一金属结构(1)和第二金属结构(2),所述第一金属结构(1)与所述第二金属结构(2)通过搅拌摩擦焊方法连接,且所述第一金属结构(1)与所述第二金属结构(2)通过在连接界面形成纳米过渡层实现连接;所述纳米过渡层在所述连接界面中的面积占比高于80%;所述纳米过渡层的厚度低于100nm;

在采用所述搅拌摩擦焊进行焊接之前,第一金属结构(1)与所述第二金属结构(2)的第一表面相接触,所述第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.8;

所述搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:

采用旋转的搅拌针(31)插入所述第一金属结构(1)内并沿焊接方向行走,以对所述第一金属结构(1)与所述第二金属结构(2)进行焊接;所述搅拌针(31)的最小横截面直径为d, $d>9\text{mm}$ ;所述搅拌针(31)的底部具有防滑结构(311);

在所述搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针(31)的底部距离所述第二金属结构(2)的距离为a, $1\text{mm}>a>0.01\text{mm}$ 。

2. 根据权利要求1中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述第一金属结构(1)和所述第二金属结构(2)的连接界面抗拉强度大于180MPa。

3. 根据权利要求1中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.2。

4. 根据权利要求3中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.1。

5. 根据权利要求1中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述搅拌针(31)的底部粗糙度 $Ra>3$ 。

6. 根据权利要求1中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述防滑结构(311)包括条形凹槽,各个条形凹槽交错形成格状。

7. 根据权利要求6中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述条形凹槽的宽度 $>0.1\text{mm}$ 。

8. 根据权利要求7中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述条形凹槽的深度 $>0.1\text{mm}$ 。

9. 根据权利要求1中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,

在所述搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针(31)的转速为100rpm-5000rpm;

在搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针(31)的行进速度为200mm/min-5000mm/min。

10. 根据权利要求9中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,在搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针(31)的转速为500rpm-4000rpm。

11. 根据权利要求9中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,在搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针(31)的行进速度为500mm/min-5000mm/min。

12. 根据权利要求9中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,在搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针(31)的行进速度为1000mm/min-5000mm/min。

13. 根据权利要求1中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:采用搅拌摩擦焊方法对所述第一金属结构(1)和第二金属结构(2)进行至少一次焊接。

14. 根据权利要求13中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,在进行两次及以上焊接时,每相邻两次焊接的重叠宽度为 $b$ ,其中 $0.1\text{mm} < b < 5\text{mm}$ 。

15. 根据权利要求1中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:

步骤S1:采用搅拌摩擦焊方法对所述第一金属结构(1)和第二金属结构(2)进行第一次焊接;

步骤S2:采用搅拌摩擦焊方法对所述第一金属结构(1)和第二金属结构(2)进行第二次焊接。

16. 根据权利要求1中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述第一金属结构(1)与所述第二金属结构(2)由不同材质制成。

17. 根据权利要求16中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述第一金属结构(1)的熔点低于所述第二金属结构(2)的熔点。

18. 根据权利要求17中所述的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,其特征在于,所述第一金属结构(1)与所述第二金属结构(2)的熔点相差大于 $100^{\circ}\text{C}$ 。

## 用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件

### 技术领域

[0001] 本申请金属加工技术领域,具体涉及一种用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件。

### 背景技术

[0002] 目前,高界面结合强度异种金属构件在车辆、舰船、航空航天和高端装备制造等领域具有广阔的应用前景;而搅拌摩擦焊接和搅拌摩擦增材制造具有热输入低、成本低、可自动化生产等优点,是制备异种金属构件的优选方法之一。

[0003] 但是,传统的搅拌摩擦焊接和搅拌摩擦增材制造需要将搅拌针插入界面,界面金属间化合物极难控制,造成界面结合强度低,限制了异种金属构件的使用范围。

[0004] 因此,如何提供一种能够提高界面结合强度的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件成为本领域技术人员急需解决的问题。

### 发明内容

[0005] 因此,本申请要解决的技术问题在于提供一种用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,能够提高界面结合强度。

[0006] 为了解决上述问题,本申请提供一种用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,包括:

[0007] 第一金属结构和第二金属结构,第一金属结构与第二金属结构通过搅拌摩擦焊方法连接,且第一金属结构与第二金属结构通过在连接界面形成纳米过渡层实现连接;纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%。

[0008] 进一步地,纳米过渡层的厚度低于100nm;

[0009] 进一步地,第一金属结构和第二金属结构的连接界面抗拉强度大于180MPa。

[0010] 进一步地,在采用搅拌摩擦焊进行焊接之前,第一金属结构与第二金属结构的第一表面相接触,第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.8;优选的,第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.2;再优选的,第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.1。

[0011] 进一步地,搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:

[0012] 采用旋转的搅拌针插入第一金属结构内并沿焊接方向行走,以对第一金属结构与第二金属结构进行焊接;

[0013] 搅拌针的最小横截面直径为d,d>9mm。

[0014] 进一步地,搅拌针的底部具有防滑结构。

[0015] 进一步地,搅拌针的底部粗糙度Ra>3。

[0016] 进一步地,防滑结构包括条形凹槽,各个条形凹槽交错形成格状;

[0017] 进一步地,条形凹槽宽度>0.1mm;进一步地,条形凹槽深度>0.1mm。

[0018] 进一步地,在搅拌摩擦焊过程中,搅拌针的底部距离第二金属结构的距离为a,1mm>a>0.01mm。

[0019] 进一步地,在搅拌摩擦焊过程中,搅拌针的转速为100rpm-5000rpm。

[0020] 优选的,在搅拌摩擦焊过程中,搅拌针的转速为500rpm-4000rpm。

- [0021] 进一步地,在搅拌摩擦焊过程中,搅拌针的行进速度为200mm/min-5000mm/min。
- [0022] 进一步地,在搅拌摩擦焊过程中,搅拌针的行进速度为500mm/min-5000mm/min。
- [0023] 进一步地,在搅拌摩擦焊过程中,搅拌针的行进速度为1000mm/min-5000mm/min。
- [0024] 进一步地,搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构和第二金属结构进行至少一次焊接;进一步地,每相邻两次焊接的重叠宽度为 $b$ ,其中 $0.1\text{mm} < b < 5\text{mm}$ 。
- [0025] 进一步地,搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:
- [0026] 步骤S1:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构和第二金属结构进行第一次焊接;
- [0027] 步骤S2:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构和第二金属结构进行第二次焊接;
- [0028] 第二次焊接与第一次焊接的重叠宽度为 $b$ ,其中 $0.1\text{mm} < b < 5\text{mm}$ 。
- [0029] 进一步地,搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:
- [0030] 步骤S1:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构和第二金属结构进行第一次焊接;
- [0031] 步骤S2:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构和第二金属结构进行第二次焊接;
- [0032] 步骤S3:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构和第二金属结构进行第三次焊接;
- [0033] 相邻焊接的重叠宽度为 $b$ ,其中 $0.1\text{mm} < b < 5\text{mm}$ 。
- [0034] 进一步地,第一金属结构与第二金属结构由不同材质制成。
- [0035] 进一步地,第一金属结构的熔点低于第二金属结构的熔点。
- [0036] 进一步地,第一金属结构与第二金属结构的熔点相差大于 $100^{\circ}\text{C}$ 。
- [0037] 进一步地,纳米层界面的强度大于 $180\text{MPa}$ 。
- [0038] 进一步地,纳米层界面的强度大于 $200\text{MPa}$ 。
- [0039] 本申请提供的用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件;本申请能够提高界面结合强度。

#### 附图说明

- [0040] 图1为本申请实施例搅拌摩擦结构的结构示意图。
- [0041] 图2为本申请实施例搅拌针的结构示意图。
- [0042] 图3为本申请实施例采用搅拌摩擦结构的结构示意图。
- [0043] 图4为本申请实施例采用搅拌摩擦结构的结构示意图。
- [0044] 图5为本申请实施例采用搅拌摩擦结构的结构示意图。
- [0045] 图6为本申请实施例采用搅拌摩擦结构的结构示意图。
- [0046] 图7为本申请实施例采用的搅拌针。
- [0047] 图8为本申请实施例所制备的高强度铝钢构件。
- [0048] 1、第一金属结构;2、第二金属结构;3、搅拌摩擦结构;31、搅拌针;311、防滑结构;32、轴肩。

#### 具体实施方式

- [0049] 结合参见图1-8所示,一种用搅拌摩擦焊方法制备的金属构件,包括第一金属结构1,和第二金属结构2,第一金属结构1与第二金属结构2通过搅拌摩擦焊方法连接,且第一金属结构1与第二金属结构2通过在连接界面形成纳米过渡层实现连接,纳米过渡层在连接界

面中的面积占比高于80%。本申请第一金属结构1与第二金属结构2在连接界面形成纳米过渡层,且纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%,进而能够有效的提高连接界面的结合强度。

[0050] 本申请还公开了一些实施例,纳米过渡层的厚度低于100nm,这样可以使得界面结合强度高,高于180MPa。

[0051] 本申请还公开了一些实施例,第一金属结构1和第二金属结构2的连接界面抗拉强度大于180MPa;进一步地,第一金属结构1和第二金属结构2的连接界面抗拉强度大于200MPa。可以使得第一金属结构1与第二金属结构2更牢固的连接。

[0052] 本申请第一金属结构1与第二金属结构2的连接界面通过在连接界面形成厚度低于100nm的纳米过渡层实现连接。本申请采用搅拌摩擦焊方法连接,第一金属结构1与第二金属结构2的连接界面处形成了厚度低于100nm的纳米过渡层,纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%,能够有效的提高界面结合强度,使得异种金属构件的使用范围更广。

[0053] 本申请还公开了一些实施例,第一金属结构1与第二金属结构2的第一表面相接触,第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.8。当第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.8时,本申请能够在界面处形成厚度低于100nm的纳米过渡层,纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%,实现异种金属高强度结合,比采用低粗糙度结合面实现了更高强度界面连接。如果第一表面的表面粗糙度不在上述范围内,即使其能够形成纳米层,纳米层在连接界面的占比也很小,结合强度低,比如,当第一表面的表面粗糙度过大时,能够形成纳米层,但纳米层只在凸起部分形成,在界面占比小,结合强度低。本申请限定的粗糙度高,能够使得纳米层在界面占比高,高于80%,界面强度高。

[0054] 传统焊接理论认为异种金属表面粗糙,结合界面可增加机械互锁和接合面积,有利于提高结合强度,因而一般使得金属表面更粗糙。

[0055] 优选的,所述第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.2;再优选的,所述第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.1。

[0056] 本申请还公开了一些实施例,搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:

[0057] 采用旋转的搅拌针31插入第一金属结构1内并沿焊接方向行走,以对第一金属结构1与第二金属结构2进行焊接;搅拌针31和轴肩32形成搅拌摩擦结构3。

[0058] 搅拌针31的横截面直径为d,d>9mm。可以加大搅拌针31到结合界面的距离,提高工艺裕度。相比于现有焊接技术无法在异种界面形成较均匀的纳米过渡层,结合强度低,本申请通过综合调节搅拌针31相对焊接工件位置、搅拌针31尺寸、界面粗糙度,可在异种金属界面形成较均匀的厚度低于100nm的纳米过渡层,可成倍提高界面结合强度。例如本申请通过综合调节拌针的底部距离第二金属结构2的距离为a,1mm>a>0.01mm,搅拌针31的横截面直径为d,d>9mm,第二金属第一表面的表面粗糙度为Ra0.005-Ra0.8,可在异种金属界面形成较均匀的厚度低于100nm的纳米过渡层,纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%,可成倍提高界面结合强度。

[0059] 本申请还公开了一些实施例,搅拌针31的底部具有防滑结构311,这样使得搅拌针31在界面处产生足够的摩擦,可以带动搅拌针31底部更多的材料随其一起旋转,进而加大搅拌针31到结合界面的距离,提高工艺裕度。

[0060] 本申请还公开了一些实施例,搅拌针31的底部粗糙度Ra>3。

[0061] 本申请还公开了一些实施例,防滑结构311包括条形凹槽,各个条形凹槽交错形成格状。能够有效的控制搅拌针31底部的粗糙度。

[0062] 所述条形凹槽的宽度 $>0.1\text{mm}$ ;进一步地,所述条形凹槽的深度 $>0.1\text{mm}$ ,能够加大搅拌头到刚表面的距离,增加工艺裕度。

[0063] 相比于现有技术中的搅拌摩擦搭焊技术焊接异种金属仍需要非常严格控制搅拌针31距第二层金属板的距离在 $0.01\text{mm}$ 至 $0.1\text{mm}$ 左右,操控难度大,工艺裕度小。本申请中综合采用较大搅拌针31尺寸和顶部防滑凹痕手段,在某些工况下,搅拌针31底层界面 $0.01\text{mm}$ 至 $1\text{mm}$ 范围内,均能获得高强度连接,显著降低了操控难度,增加了工艺裕度。

[0064] 本申请还公开了一些实施例,在搅拌摩擦焊过程中,搅拌针31的底部距离第二金属结构2的距离为 $a, 1\text{mm}>a>0.01\text{mm}$ 。

[0065] 本申请还公开了一些实施例,在搅拌摩擦焊过程中,搅拌针31的转速为 $100\text{rpm}$ - $5000\text{rpm}$ 。

[0066] 本申请还公开了一些实施例,在搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针31的转速为 $500\text{rpm}$ - $4000\text{rpm}$ ;

[0067] 本申请还公开了一些实施例,在搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针31的行进速度为 $200\text{mm}/\text{min}$ - $5000\text{mm}/\text{min}$ 。

[0068] 本申请还公开了一些实施例,在搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针31的行进速度为 $500\text{mm}/\text{min}$ - $5000\text{mm}/\text{min}$ 。

[0069] 本申请还公开了一些实施例,在搅拌摩擦焊过程中,所述搅拌针31的行进速度为 $1000\text{mm}/\text{min}$ - $5000\text{mm}/\text{min}$ 。

[0070] 本申请还公开了一些实施例,搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构1和第二金属结构2进行至少一次焊接,每相邻两次焊接的重叠宽度为 $b$ ,其中 $0.1\text{mm}<b<5\text{mm}$ 。

[0071] 本申请还公开了一些实施例,每相邻两次焊接的重叠宽度为 $b$ ,其中 $0.1\text{mm}<b<5\text{mm}$ 。

[0072] 本申请还公开了一些实施例,搅拌摩擦焊方法包括如下步骤:

[0073] 步骤S1:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构1和第二金属结构2进行第一次焊接;

[0074] 步骤S2:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构1和第二金属结构2进行第二次焊接;

[0075] 第二次焊接与第一次焊接的重叠宽度为 $b$ ,其中 $0.1\text{mm}<b<5\text{mm}$ 。

[0076] 本申请还公开了一些实施例,搅拌摩擦焊方法还包括如下步骤:

[0077] 步骤S3:采用搅拌摩擦焊方法对第一金属结构1和第二金属结构2进行第三次焊接;

[0078] 第三次焊接与第二次焊接的重叠宽度为 $b$ ,其中 $0.1\text{mm}<b<5\text{mm}$ 。

[0079] 本申请通过工艺创新,在界面处形成的高强纳米层,不仅可以提高结合强度,还显著提高了界面热稳定性,因而第二道次加工与第一道次加工重叠宽度大于 $0.1\text{mm}$ 低于 $5\text{mm}$ ,并不会降低第一道次的界面结合强度,解决了传统搅拌摩擦焊接所制备的异种金属界面含有粗大金属间化合物,热稳定性差,第二道次加工与第一道次加工重叠会造成第一道次界面金属间化合物严重粗化,显著降低结合强度的问题。相比于传统单道次搅拌摩擦焊接,结

合区域窄,无法完全满足工业需求,并且所制备的异种金属界面含有粗大的金属间化合物,热稳定性差,再次搅拌摩擦焊接,会严重降低界面接合强度,不适合于多道次搅拌摩擦焊接。本申请所制备的异种金属界面由高热稳定的纳米层构成,再次搅拌摩擦焊接,不会降低界面接合强度,适合于多道次搅拌摩擦焊。

[0080] 第一金属结构1和第二金属结构2均为金属板。

[0081] 本申请搅拌摩擦焊方法还包括如下步骤:

[0082] 1) 将熔点相对低的A金属板置于B金属板之上;

[0083] 2) 与A金属板接触的B金属板表面粗糙度介于Ra0.005至Ra0.8之间;

[0084] 3) 使用由轴肩32和特殊搅拌针31组成的搅拌工具进行加工,搅拌针31顶部直径大于9mm,搅拌针31顶部刻有防滑凹痕;

[0085] 4) 将搅拌针31旋转至100rpm至5000rpm的转速区间;

[0086] 5) 将搅拌针31插入A金属板中后,沿着需加工路径行走,完成一道次加工,加工过程中搅拌针31顶部不接触B金属表面,相距0.01mm至1mm。

[0087] 6) 完成一道次加工后,进行第二道次加工,第二道次加工与第一道次加工重叠宽度大于0.1mm低于5mm,加工过程中搅拌针31顶部不接触B金属表面,相距0.01mm至1mm。

[0088] 本申请还公开了一些实施例,第一金属结构1与第二金属结构2由不同材质制成。

[0089] 本申请还公开了一些实施例,第一金属结构1的熔点低于第二金属结构2的熔点。;进一步地,所述第一金属结构1与所述第二金属结构2的熔点相差大于100℃

[0090] 本申请金属构件可以为大尺寸高强度异种金属构件制备工艺。本申请搅拌摩擦焊方法基于异种金属界面纳米剪切局部化诱导非晶合金化新理论,由通过综合调节搅拌针31相对焊接工件位置、搅拌针31形状、搅拌针31尺寸、界面粗糙度,可在异种金属界面形成较均匀的纳米过渡层,可成倍提高界面结合强度。新工艺在获得高界面结合强度的同时,还提高了工艺裕度,改善了界面的热稳定性,本申请更适合于低成本制备大尺寸高强异种金属构件。

[0091] 实施例

[0092] 实施例1

[0093] 1) 将Al-Mg-Si铝合金板置于高强钢板之上;

[0094] 2) 与铝合金接触的高强钢表面的粗糙度介于Ra0.01至Ra0.1之间;

[0095] 3) 使用由轴肩32和特殊搅拌针31组成的搅拌工具进行加工,搅拌针31顶部直径9mm,搅拌针31顶部刻有防滑凹痕;

[0096] 4) 将搅拌针31旋转至500rpm至5000rpm的转速区间;

[0097] 5) 将搅拌针31插入铝合金板中后,沿着需加工路径行走,速度0.3m/min至5m/min,完成一道次加工,加工过程中搅拌针31顶部不接触高强钢表面,相距0.01mm至0.3mm。

[0098] 6) 完成一道次加工后,进行第二道次加工,第二道次加工与第一道次加工重叠宽度大于0.1mm低于2mm,加工过程中搅拌针31顶部不接触高强钢表面,相距0.01mm至0.3mm。

[0099] 7) 所制备接头界面形成较均匀的厚度低于100nm的纳米过渡层,纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%。

[0100] 8) 所制备接头界面结合强度通过在所制备样品中取一些列狗骨头形状拉伸样品进行测试,结合界面位于狗骨头样品标距段中心,所测试的抗拉强度均大于180MPa。

## [0101] 实施例2

[0102] 1) 将7050铝合金板置于高强钢板之上；

[0103] 2) 与铝合金接触的高强钢表面的粗糙度介于Ra0.005至Ra0.025之间；

[0104] 3) 使用由轴肩32和特殊搅拌针31组成的搅拌工具进行加工,搅拌针31顶部直径15mm,搅拌针31顶部刻有防滑凹痕；

[0105] 4) 将搅拌针31旋转至100rpm至2000rpm的转速区间；

[0106] 5) 将搅拌针31插入铝合金板中后,沿着需加工路径行走,速度0.1m/min至2m/min,完成一道次加工,加工过程中搅拌针31顶部不接触高强钢表面,相距0.05mm至1mm。

[0107] 6) 完成一道次加工后,进行第二道次加工,第二道次加工与第一道次加工重叠宽度大于0.5mm低于5mm,加工过程中搅拌针31顶部不接触高强钢表面,相距0.05mm至1mm。

[0108] 7) 所制备接头界面形成较均匀的厚度低于100nm的纳米过渡层,纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%。

[0109] 8) 所制备接头界面结合强度通过在所制备样品中取一些列狗骨头形状拉伸样品进行测试,结合界面位于狗骨头样品标距段中心,所测试的抗拉强度均大于200MPa。

## [0110] 实施例3

[0111] 1) 将钛合金板Ti6Al4V置于钢板之上；

[0112] 2) 与钛合金接触的钢板表面的粗糙度介于Ra0.025至Ra0.1之间；

[0113] 3) 使用由轴肩32和特殊搅拌针31组成的搅拌工具进行加工,搅拌针31顶部直径12mm,搅拌针31顶部刻有防滑凹痕；

[0114] 4) 将搅拌针31旋转至100rpm至1000rpm的转速区间；

[0115] 5) 将搅拌针31插入钛合金板中后,沿着需加工路径行走,速度0.1m/min至1m/min,完成一道次加工,加工过程中搅拌针31顶部不接触钢表面,相距0.02mm至1mm。

[0116] 6) 完成一道次加工后,进行第二道次加工,第二道次加工与第一道次加工重叠宽度大于0.1mm低于2mm,加工过程中搅拌针31顶部不接触钢表面,相距0.02mm至1mm。

[0117] 7) 所制备接头界面形成较均匀的厚度低于100nm的纳米过渡层,纳米过渡层在连接界面中的面积占比高于80%。

[0118] 8) 所制备接头界面结合强度通过在所制备样品中取一些列狗骨头形状拉伸样品进行测试,结合界面位于狗骨头样品标距段中心,所测试的抗拉强度均大于220MPa。

## [0119] 对比例1

[0120] 1) 将Al-Mg-Si铝合金板置于高强钢板之上；

[0121] 2) 与铝合金接触的高强钢表面的粗糙度Ra1.5至Ra3.4；

[0122] 3) 使用由轴肩32和特殊搅拌针31组成的搅拌工具进行加工,搅拌针31顶部直径8mm,搅拌针31顶部刻无防滑凹痕；

[0123] 4) 将搅拌针31旋转至500rpm至5000rpm的转速区间；

[0124] 5) 将搅拌针31插入铝合金板中后,沿着需加工路径行走,速度0.3m/min至5m/min,完成一道次加工,加工过程中搅拌针31顶部不接触高强钢表面,相距0.05mm至0.3mm。

[0125] 6) 完成一道次加工后,进行第二道次加工,第二道次加工与第一道次加工重叠宽度大于0.1mm低于2mm,加工过程中搅拌针31顶部不接触高强钢表面,相距0.01mm至0.3mm。

[0126] 7) 所制备接头界面形成了厚度低于100nm的纳米过渡层,但纳米过渡层在连接界

面中的面积占比低于60%，界面存在很多未焊合孔洞缺陷。

[0127] 8) 所制备接头界面结合强度通过在所制备样品中取一些列狗骨头形状拉伸样品进行测试，结合界面位于狗骨头样品标距段中心，所测试的抗拉强度均低于100MPa。

[0128] 对比例2

[0129] 1) 将7050铝合金板置于高强钢板之上；

[0130] 2) 与铝合金接触的高强钢表面的粗糙度介于Ra0.005至Ra0.025之间；

[0131] 3) 使用由轴肩32和特殊搅拌针31组成的搅拌工具进行加工，搅拌针31顶部直径15mm；

[0132] 4) 将搅拌针31旋转至100rpm至2000rpm的转速区间；

[0133] 5) 将搅拌针31插入铝合金板中后，沿着需加工路径行走，速度0.1m/min至2m/min，完成一道次加工，加工过程中搅拌针31顶部插入高强钢表面0.1mm。

[0134] 6) 完成一道次加工后，进行第二道次加工，第二道次加工与第一道次加工重叠宽度大于0.5mm低于5mm，加工过程中搅拌针31顶部不接触高强钢表面，相距0.05mm至1mm。

[0135] 7) 所制备接头界面全部形成厚度高于300nm的脆性金属间化合物过渡层。

[0136] 8) 所制备接头界面结合强度通过在所制备样品中取一些列狗骨头形状拉伸样品进行测试，结合界面位于狗骨头样品标距段中心，所测试的抗拉强度均低于70MPa。

[0137] 综上所述，本申请中制备的金属构件，结合界面的抗拉强度大，本申请能够提高界面的结合强度。

[0138] 本领域的技术人员容易理解的是，在不冲突的前提下，上述各有利方式可以自由地组合、叠加。

[0139] 以上仅为本申请的较佳实施例而已，并不用以限制本申请，凡在本申请的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本申请的保护范围之内。以上仅是本申请的优选实施方式，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本申请技术原理的前提下，还可以做出若干改进和变型，这些改进和变型也应视为本申请的保护范围。

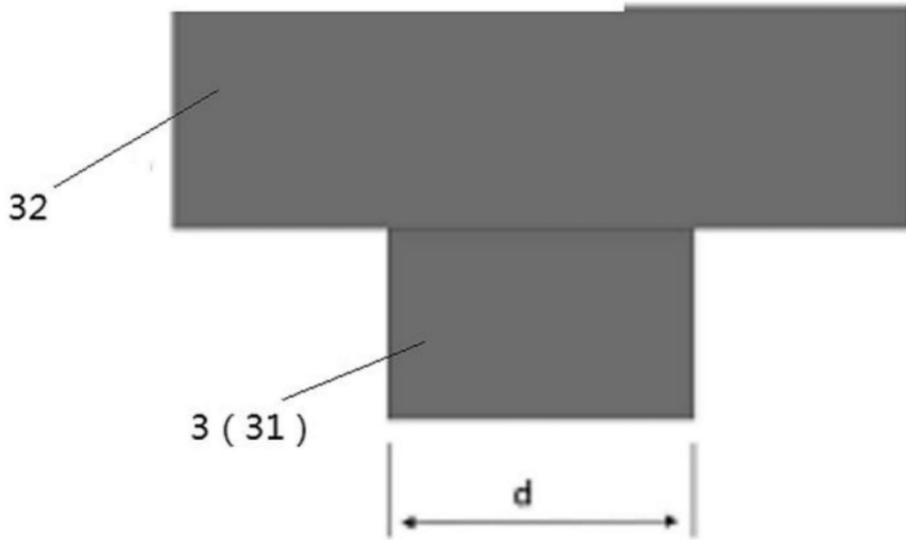


图1

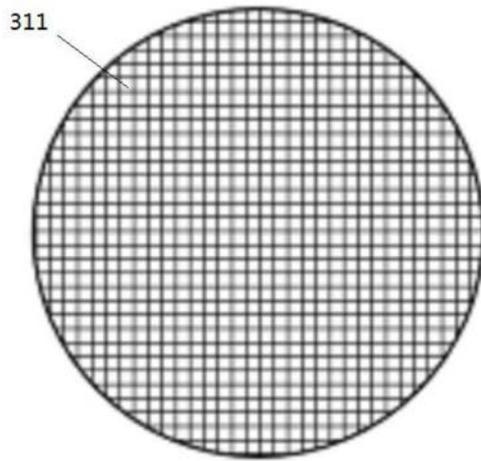


图2

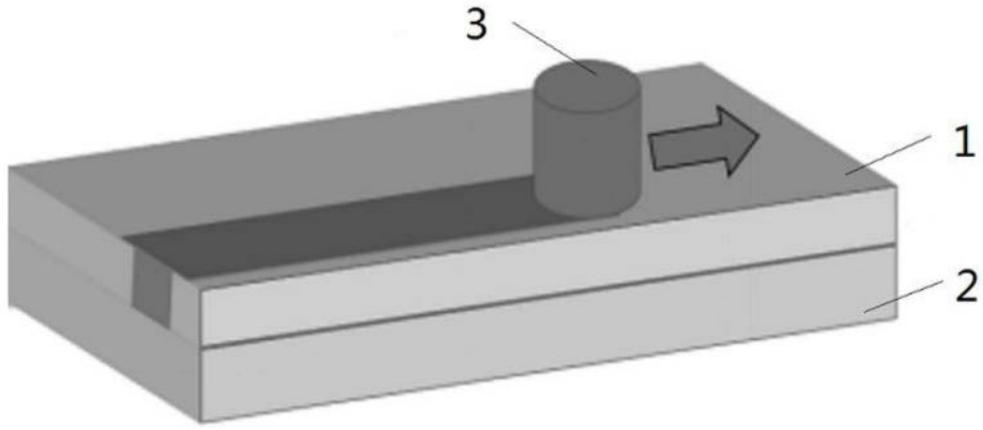


图3

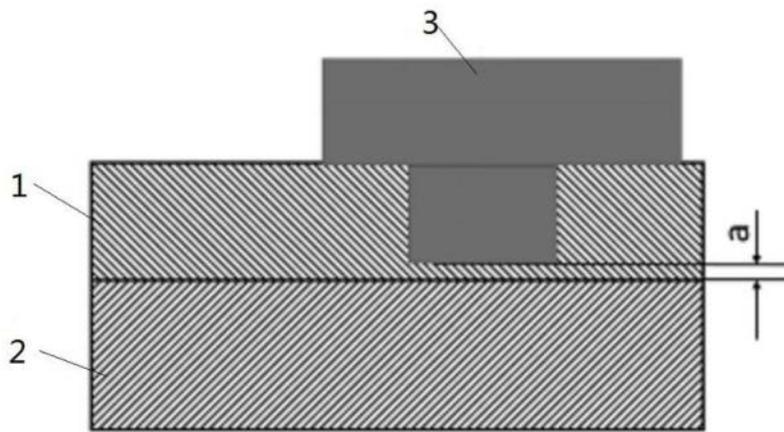


图4

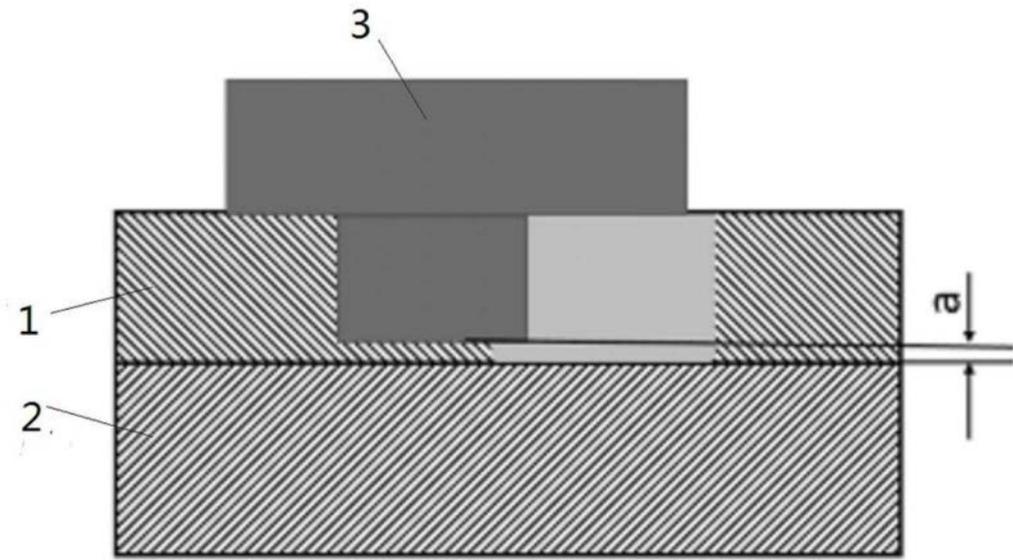


图5

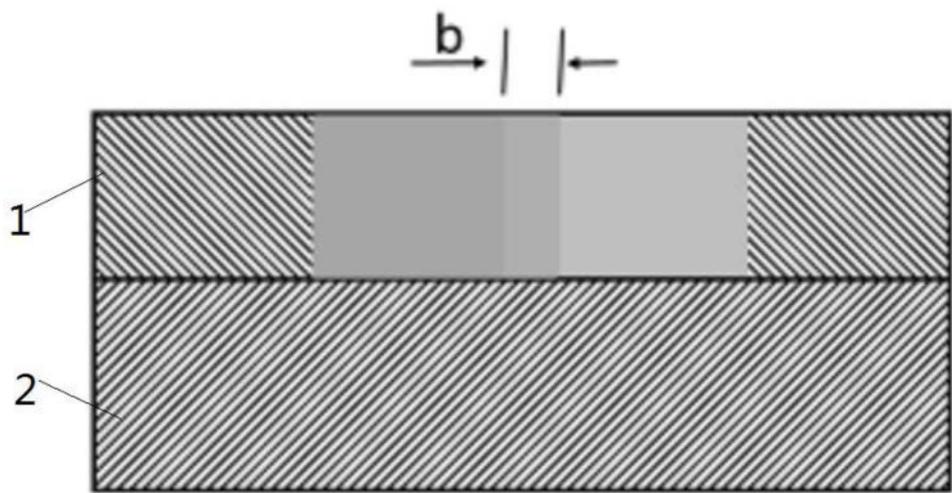


图6



图7

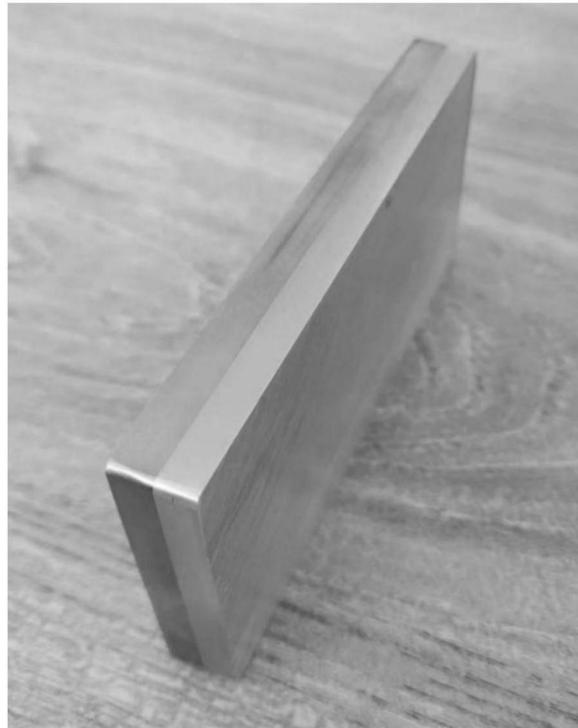


图8