

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02821695.4

[51] Int. Cl.

B23K 31/02 (2006.01)

B23K 37/08 (2006.01)

B23K 20/12 (2006.01)

B24B 39/00 (2006.01)

C21D 7/08 (2006.01)

[45] 授权公告日 2008 年 7 月 30 日

[11] 授权公告号 CN 100406190C

[22] 申请日 2002.11.1 [21] 申请号 02821695.4

[30] 优先权

[32] 2001.11.2 [33] US [31] 60/335,739

[86] 国际申请 PCT/US2002/035214 2002.11.1

[87] 国际公布 WO2003/039804 英 2003.5.15

[85] 进入国家阶段日期 2004.4.29

[73] 专利权人 波音公司

地址 美国伊利诺斯州

共同专利权人 朗达研究公司

[72] 发明人 迈克尔·罗斯顿·詹姆士

默里·W·马哈里

道格拉斯·J·瓦尔登

保罗·S·普雷维三世

[56] 参考文献

CN1190037A 1998.8.12

JP2001138086A 2001.5.22

US6238187B1 2001.5.29

EP1057575A2 2000.12.6

US5826453A 1998.10.27

审查员 丁江平

[74] 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司

代理人 陈 坚

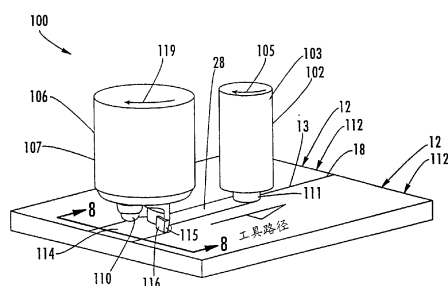
权利要求书 4 页 说明书 15 页 附图 6 页

[54] 发明名称

形成具有残余压应力分布形式的焊接接头的装置和方法

[57] 摘要

提供一种焊接装置及其方法。该焊接装置包括焊接工具，该焊接工具用于沿至少一个工具的表面形成焊接接头。焊接装置还包括压缩工具，用于在焊接接头的至少部分表面中和至少一个工件的至少部分表面中，有选择性地诱生残余压应力层，由此提高工件的材料性能，包括耐腐蚀性和疲劳强度。



1. 一种形成焊接接头的方法，包括：
沿预定路径焊接至少一个工件，以形成焊接接头；以及
在焊接接头的至少部分表面中和至少一个工件靠近焊接接头的至少部分表面中，诱生残余压应力层，该残余压应力层的深度为大约 0.5mm 至大约 1.5mm，并且该残余压应力层具有低于 12% 的相关冷作量。
2. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，还包括：控制所述焊接接头的部分表面中和所述至少一个工件靠近焊接接头的至少部分表面中的冷作和表面硬化量。
3. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述冷作量低于 2%。
4. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述冷作量低于 5%。
5. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述诱生步骤包括抛光。
6. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述诱生步骤包括使压缩工具以预定形式移过焊接接头，由此形成基本不交迭的残余压应力区。
7. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，还包括：进行 X 射线衍射，以确定在所述焊接接头表面内和所述至少一个工件靠近所述焊接接头的表面内待诱生的需要的压应力分布形式。
8. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述诱生步骤包括：控制一压缩工具通过所述焊接接头的运动方向和运动速度中的至少一个。
9. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述诱生步骤包括：调节通过一压缩工具施加在所述焊接接头上和所述至少一个工件靠近所述焊接接头的表面上的力。
10. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述焊接步骤包括从以下组中选择的焊接过程：气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激

光焊和电子束焊。

11. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述焊接步骤包括搅拌摩擦焊。

12. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 还包括: 从所述焊接接头去除灼伤。

13. 一种形成焊接接头的方法, 包括:

沿至少一个工件的表面形成搅拌摩擦焊接接头; 以及

在所述形成步骤的同时, 抛光所述焊接接头的至少部分表面和至少一个工件靠近所述焊接接头的至少部分表面, 从而在其中选择性地诱生残余压应力层, 该残余压应力层的深度为大约 0.5mm 至大约 1.5mm。

14. 如权利要求 13 所述的方法, 其特征在于, 还包括: 控制在所述搅拌摩擦焊接接头的部分表面中和在所述至少一个工件靠近搅拌摩擦焊接接头的部分表面中的冷作和表面硬化量。

15. 如权利要求 14 所述的方法, 其特征在于, 所述冷作量低于大约 2%。

16. 如权利要求 14 所述的方法, 其特征在于, 所述冷作量低于大约 5%。

17. 如权利要求 13 所述的方法, 其特征在于, 所述抛光步骤包括使一压缩工具以预定形式移过搅拌摩擦焊接接头, 由此形成基本不交迭的残余压应力区。

18. 如权利要求 13 所述的方法, 其特征在于, 还包括: 进行 X 射线衍射, 以确定在所述搅拌摩擦焊接接头表面内和所述至少一个工件靠近所述搅拌摩擦焊接接头的表面内待诱生的需要的压应力分布形式。

19. 如权利要求 13 所述的方法, 其特征在于, 所述抛光步骤包括: 控制一压缩工具通过所述焊接接头的运动方向和运动速度中的至少一个。

20. 如权利要求 13 所述的方法, 其特征在于, 所述抛光步骤包括: 调节通过一压缩工具施加在所述搅拌摩擦焊接接头上和所述至少

一个工件靠近所述搅拌摩擦焊接接头的表面上的力。

21. 如权利要求 13 所述的方法, 其特征在于, 还包括从所述搅拌摩擦焊接接头去除灼伤。

22. 一种焊接装置, 包括:

焊接工具, 用于沿至少一个工件的表面形成焊接接头; 以及

压缩工具, 用于在焊接接头的至少部分表面中和至少一个工件的至少部分表面中, 有选择性地诱生残余压应力层, 该残余压应力层的深度为大约 0.5mm 至大约 1.5mm, 并且该残余压应力层具有低于 12% 的相关冷作量。

23. 如权利要求 22 所述的装置, 其特征在于, 所述焊接工具构造成执行从以下组中选择的焊接过程: 气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊和电子束焊。

24. 如权利要求 22 所述的装置, 其特征在于, 所述焊接工具包括: 旋转轴和与所述轴可旋转连接的搅拌摩擦焊接工具。

25. 如权利要求 22 所述的装置, 其特征在于, 所述压缩工具包括单点抛光工具。

26. 如权利要求 22 所述的装置, 其特征在于, 还包括: 与所述压缩工具可操作连接的控制器, 将所述控制器构造成这样, 即, 自动控制所述压缩工具移过所述焊接接头的运动方向和运动速度中的至少一个。

27. 如权利要求 22 所述的装置, 其特征在于, 还包括至少一个传感器, 将所述传感器构造成这样, 即, 测量通过所述压缩工具施加在所述焊接接头上和所述至少一个工件靠近所述焊接接头的表面上的力。

28. 如权利要求 27 所述的装置, 其特征在于, 还包括一控制器, 该控制器与所述至少一个传感器电连接并与所述压缩工具可操作连接, 将所述控制器构造成这样, 即, 自动调节通过所述压缩工具施加在所述焊接接头上和所述至少一个工件靠近所述焊接接头的表面上的力。

29. 如权利要求 27 所述的装置, 其特征在于, 还包括切削工具,

用于从所述焊接接头去除灼伤，所述切削工具附连在所述压缩工具上。

30. 一种结构组件，包括：

至少一个工件；

焊接接头，沿所述至少一个工件的至少部分表面布置；并且

其中，所述焊接接头的至少部分表面和所述至少一个工件靠近焊接接头的表面包括：选择性形成的残余压应力层，该残余压应力层的深度为大约 0.5mm 至大约 1.5mm，并且该残余压应力层具有低于 12% 的相关冷作量，由此提高所述焊接接头的所述部分表面和所述至少一个工件的所述部分表面的耐腐蚀性和疲劳强度。

31. 如权利要求 30 所述的结构组件，其特征在于，所述残余压应力层具有预定分布形式。

32. 如权利要求 30 所述的结构组件，其特征在于，通过从以下的组中选取焊接过程来形成所述焊接接头：气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊和电子束焊。

33. 如权利要求 30 所述的结构组件，其特征在于，所述焊接接头包括搅拌摩擦焊接接头。

34. 如权利要求 30 所述的结构组件，其特征在于，包括所述选择性形成的残余压应力层的，所述焊接接头的所述部分表面和所述至少一个工件的所述部分表面显示出低于大约 2% 的冷作量。

35. 如权利要求 30 所述的结构组件，其特征在于，包括所述选择性形成的残余压应力层的，所述焊接接头的所述部分表面和所述至少一个工件的所述部分表面显示出低于大约 5% 的冷作量。

36. 如权利要求 30 所述的结构组件，其特征在于，构成所述至少一个工件的材料是从以下组中选取的：铝、铝合金、铜、铜合金、钛、钛合金。

37. 如权利要求 30 所述的结构组件，其特征在于，还包括第一和第二工件，所述第一和第二工件包括不同的金属。

形成具有残余压应力分布形式的焊接接头的装置和方法

技术领域

本发明涉及一种用于形成焊接接头的装置和方法，该焊接接头具有改良的材料性能，本发明特别涉及一种形成焊接接头的方法，该方法诱生残余压应力分布形式，从而改善焊接接头的材料性能。

背景技术

在制造和建造多种类型结构中，焊接，如气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊、电子束焊，已经减少或取代了各种紧固方法的使用，这些紧固方法如螺栓连接、铆钉连接等。这样的焊接技术包括使焊接接头附近的材料完全熔化，由此形成液态，随后使其固化而产生改变的微观结构和性能，或者该技术包括固态焊接过程，也产生高度改变的金相状态。最适于连接两金属件的特定焊接过程取决于金属的物理性能、其所应用的特殊用途以及可利用的生产设备。

搅拌摩擦焊是比较新的一种焊接方法，用于将金属材料工件连接起来，并已经应用于航空、车辆、航海、建筑和其它行业的设备、结构等的制造中。如图1所示，搅拌摩擦焊包括将旋转的搅拌摩擦焊接工具（搅拌摩擦焊工具）1的带螺纹探头1a插入一对工件2、4的相对面之间，同时将这两工件推压在一起。搅拌摩擦焊也能用于修复单个工件中的裂纹或其它缺陷。带螺纹探头1a在工件2、4的相对面之间或单个工件内的旋转产生摩擦，摩擦产生足够的热能，而使焊接区6内的工件材料塑化。搅拌摩擦焊接工具1还包括肩部，肩部具有各种合适的结构，当搅拌摩擦焊接工具沿工件之间的界面3移动或移过单个工件时，这些肩部的结构适于使塑化的工件材料在焊接区6内固化。当工件2、4的塑化区域在焊接区6内流动到一起并冷却时，形成搅拌摩擦焊接接头8，这对工件被连接在一起而使其呈单个组件的形式。参见对搅拌摩擦焊进行全面讨论

的 Thomas 等人的美国专利 No. 5460317, 本申请通过引用而结合其全部内容。

搅拌摩擦焊的一个特别优点在于, 焊接接头 8 的形成是自己生成的, 并且是通过塑化的母材的冷却而形式的, 而不是象通常用于普通焊接过程中那样通过填料的冷却来形成的。此外, 搅拌摩擦焊接接头 8 包括具有细化晶粒结构的熔核, 晶粒呈等轴形状, 晶粒尺寸范围按量级次序大致为 0.0001 至 0.0002 英寸 (大约 3 至 5 微米)。改善晶粒结构的结果是, 搅拌摩擦焊接接头 8 抵抗微裂纹的形成和增长, 并呈现高的强度、延展性和韧性以及改善的耐腐蚀性和抗疲劳性。

遗憾的是, 几个重要的问题限制了焊接应用于某些制造过程。一个通常与焊接有关的问题是, 熔化或塑化母材所需的温度通常会降低材料的材料性能。例如, 如图 1 所示, 在搅拌摩擦焊中, 由旋转搅拌摩擦焊接工具 1 产生的摩擦热由焊接区 6 通过工件 2、4 释放到周围环境中, 在焊接区 6 周围产生热影响区 7。与搅拌摩擦焊过程有关的高温能够降低母材的材料性能, 包括工件 2、4 的强度、刚度和延展性。此外, 在搅拌摩擦焊过程中, 在工件中产生的热瞬变能够导致焊接区 6 对于腐蚀破坏更为敏感。

另一个与焊接有关的共同问题是焊接过程中在工件中形成拉伸残余应力。该拉伸残余应力是工件或工件靠近焊接接头的区域膨胀并接着收缩所导致的。已知这样的拉伸残余应力不但会降低疲劳寿命, 而且提高了很多种材料中的腐蚀疲劳和应力腐蚀开裂的敏感性。还已经发现, 在有些通常用于航空业的某些铝合金中发现的显微偏析 (micro-segregation) 运动足够迅速, 这使得即使在短暂热瞬变之后, 也会降低耐应力腐蚀性。此外, 如果将具有不同尺寸或包括不同材料的两个不同工件焊接在一起, 则由于两工件之间的比热不同, 因此任何残余应力都会被增大。

与许多熔化和固体状态焊接过程有关的另一个问题是, 在焊接接头边缘产生“灼伤 (flash)”或过多的材料。由于在焊接接头边缘的机械不连续性, 因而在该区域以外引发疲劳裂纹。事实上在所有类型焊接中,

已经发现该边缘成为出现最大拉伸残余应力的区域。

已经提出了几种方法，以便使熔化状态和固体状态焊接接头的材料性能的降低最小化。例如，尽管通过焊后热处理，按预定温度计划表的溶液处理并按第二预定温度计划表老化能够获得可接受的耐腐蚀性，但焊后热处理除了几何形状最小和最简单的工件外，对于几乎所有的工件在经济上和技术上讲都是不实用的。此外，局部加热会导致变形，并增大工件中其它地方的拉伸残余应力。

其它用于改善焊接接头耐腐蚀性的技术包括，在具有焊接接头的成品组件的所有易受影响表面施加涂层，如油漆，以及电镀。但是，这样的涂层需要二次操作，该操作增加了人工和材料成本并延长了成品组件的生产时间。此外，这样的涂层仅提供了最上层的保护层，而没有保护组件不可达到的表面。此外，如果在使用过程中涂层破裂或老化，则组件表面就会失去保护。

沿工件表面诱生压应力的方法已经应用于提高疲劳寿命和工件表面的耐腐蚀性。但是，由于诱生压应力的过程会导致焊接接头损坏或变脆弱，因此，沿焊接接头诱生或沿最终焊接组件表面诱生的呈规定分布形式的压应力诱生方法还没有被使用或没有作为焊接过程的一部分。抛光是一种在工件表面诱生压应力层从而延长其疲劳寿命并提高耐腐蚀性的方法。可接受的抛光应用利用了零件表面的反复变形，为的是在材料表面进行有意识的冷作（cold working），以提高屈服强度。通过使呈张紧状态的材料表面屈服而形成压应力，使其恢复到变形后的压缩状态。但是，过度冷作会产生拉伸表面残余应力或剥落损坏，并使表面易于过载和热弛豫（thermal relaxation）。

其它通常用于诱生工件表面中压应力的方法包括射击式喷丸处理，由此以机械方式或通过气压，将多个金属或陶瓷小球射出而撞击工件表面；以及重力式喷丸，由此使小球从预定距离通过滑槽落到工件表面上。尽管射击式喷丸和重力式喷丸可用于沿焊接接头表面诱生残余压应力，但是遗憾的是，射击式喷丸和重力式喷丸所给予的冷作量是不受控制的，因此难于优化焊接接头的材料性能。此外，通过射击式喷丸和重力式喷

丸对材料进行的冷作程度较高，这对于许多应用来说是不合要求的。此外，射击式喷丸和重力式喷丸诱生的残余压应力较浅，由于在使用中会因磨损或腐蚀而损失浅压缩层，由此几乎没有带来好的效果，因此对于抑制疲劳或应力腐蚀裂纹几乎没有有利之处。射击式喷丸和重力式喷丸还会形成很差的表面光洁度，使得在许多应用中不能接受该加工。还已经知道，当压缩分布形式随时间弛豫时，特别是在使用中当受高温影响时，通常会失去通过射击式喷丸和重力式喷丸获得的有益效果。

除了降低材料性能和形成拉伸残余应力外，与采用固态和熔化焊接技术形成的组件有关另一问题是，形成较粗糙的表面光洁度。例如，搅拌摩擦焊接工具肩部沿工件表面的摩擦和旋转通常会产生具有周期性圆形分布形式的较粗糙的表面光洁度。对于在疲劳加载应用中使用的结构，通常不允许表面很粗糙。因此，为了降低表面粗糙度，常常降低旋转的搅拌摩擦焊接工具的运动速度。但是，降低焊接工具的运动速度会显著延长焊接时间。通过焊后机加工也能降低工件的表面粗糙程度。但是，焊后机加工会使焊接接头变薄，并且需要花费更多人工和时间的二次加工操作，这将提高成品组件的成本并延长加工时间。此外，由于由软熔影响区导致了焊接接头附近材料硬度的差异，因此在进行导致疲劳起始位置的焊后机加工时，难于防止局部底切（undercutting）。

现在应该明白，直到目前，除了上述已经认识到的问题外，所有焊后过程都要求二次操作，该操作通常增加成品组件的人工和/或材料成本以及生产时间。因此，仍然需要提供改进的方法和装置，用于在形成焊接接头时，减小材料性能的降低、拉伸残余应力和表面粗糙度。这样的制造方法和装置应该比普通方法花费更低的人工成本和更短的生产时间，并且应该提供具有改良机械性能和化学性能的焊接接头，这些性能包括耐腐蚀性、屈服强度、硬度、延展性、疲劳寿命和表面光洁度。

发明内容

本发明提供包括焊接接头和工件并具有改良的材料性能和表面光洁度的结构组件，以及用于形成该结构组件的方法和装置。根据本发明一

个实施例，提供一种结构组件，包括至少一个工件和沿工件的至少部分表面布置的焊接接头。在一个实施例中，焊接接头由气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊或电子束焊形成。在另一实施例中，焊接接头包括搅拌摩擦焊接接头。有利的是，焊接接头的至少部分表面和工件靠近焊接接头的至少部分表面包括：选择性形成的残余压应力层，由此提高焊接接头的部分表面和工件表面的耐腐蚀性和疲劳强度。在一个实施例中，残余压应力层具有预定的分布形式。在另一实施例中，包括选择性形成的残余压应力层的焊接接头部分表面和工件表面呈现的冷作量低于大约 5%，更优选是低于大约 2%。工件可以由各种材料构成，包括但不限于铝、铝合金、铜、铜合金、钛或钛合金。在另一实施例中，结构组件包括由不同金属构成的第一和第二工件。

本发明还提供一种形成焊接接头的方法。根据本发明一个实施例，该方法包括：沿预定路径焊接至少一个工件，以形成焊接接头。该焊接步骤可以包括气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊、电子束焊或搅拌摩擦焊。在焊接接头的至少部分表面中和工件靠近焊接接头的至少部分表面中，诱生残余压应力层。在一个实施例中，同时完成焊接和诱生步骤。在另一实施例中，该方法包括控制焊接接头的部分表面中和工件靠近焊接接头的部分表面中的冷作和表面硬化量。例如，在一个实施例中，冷作量低于大约 5%，更优选是低于大约 2%。在另一实施例中，诱生步骤包括抛光。在另一实施例中，诱生步骤包括使压缩工具以预定形式移过焊接接头，由此形成基本不交迭的残余压应力区。在另一实施例中，该方法包括：进行 X 射线衍射，以确定在焊接接头表面内和工件靠近焊接接头的表面内待诱生的需要的压应力分布形式。在另一实施例中，诱生步骤包括：控制压缩工具通过焊接接头的运动方向和/或运动速度。在另一实施例中，诱生步骤包括：调节通过压缩工具施加在焊接接头上和工件靠近焊接接头的表面上的力。在另一实施例中，该方法包括从焊接接头去除灼伤。

本发明还提供一种焊接装置。根据本发明的一个实施例，焊接装置包括用于沿至少一个工件的表面形成焊接接头的焊接工具。该焊接工具

被构造成可执行气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊和电子束焊。在另一实施例中，焊接工具包括：旋转轴和与该轴可旋转连接的搅拌摩擦焊接工具。该焊接装置还包括压缩工具，该压缩工具用于在焊接接头的至少部分表面中和工件的至少部分表面中，有选择性地诱生残余压应力层。在一个实施例中，压缩工具包括单点抛光工具。该焊接装置可以包括与压缩工具可操作连接的控制器，其中将该控制器构造成这样：即，自动地控制压缩工具移过焊接接头的运动方向和/或运动速度。在另一实施例中，该焊接装置还包括至少一个传感器，将传感器构造成这样：即，测量通过压缩工具施加在焊接接头上和工件靠近焊接接头的表面上的力。该焊接装置还包括一控制器，该控制器与传感器电连接并与压缩工具可操作地连接，其中将该控制器构造成这样：即，自动地调节通过压缩工具施加在焊接接头上和工件靠近焊接接头的表面上的力。在另一实施例中，焊接装置包括用于从焊接接头去除灼伤的切削工具，其中将切削工具附连在压缩工具上。

因此，本发明提供一种结构组件，该结构组件具有改良材料性能和表面光洁度的焊接接头，以及形成该结构组件的方法和装置。与普通方法相比，本发明的制造方法和装置所需的人工成本低而且生产时间短，并提供具有改良机械和化学性能的焊接接头，这些性能包括耐腐蚀性、屈服强度、疲劳寿命和表面光洁度。

附图说明

通过下面结合附图对本发明进行的详细说明，将更容易理解本发明的上述和其它优点和特征以及实现本发明的方式，附图给出了某些示例性的实施例，而不必按比例表示，其中：

图 1 是现有技术中使用搅拌摩擦焊的两结构件或工件连接的透视图；

图 2 是根据本发明一个实施例实施形成焊接接头的方法的焊接装置示意图；

图 3 是根据本发明一个实施例的焊接装置的透视图；

图 4 是图 2 所示焊接装置的正视图；

图 5 是根据本发明方法在已焊工件表面诱生的表面残余应力分布与采用普通焊接在工件表面诱生的表面残余应力分布进行对比的曲线图；

图 6 是根据本发明方法焊接的工件的百分比冷作分布与采用普通焊接焊接的工件的百分比冷作分布进行对比的曲线图；

图 7 是根据本发明一个实施例形成焊接接头的方法的流程图；

图 8 是沿图 3 中线 8-8 的局部横截面图，表示根据本发明一个实施例的焊接接头和一个结构组件的工件；以及

图 9 是与在采用 4 点弯曲测试的具有和不具有选择性形成的残余应力层的搅拌摩擦焊铝样本在腐蚀和非腐蚀环境中的疲劳寿命进行比较的曲线图。

具体实施方式

下面参照附图，更全面地描述本发明，其中示出了本发明的一些但不是所有的实施例。可以以多种不同形式实施本发明，而不应该将本发明限定在这些实施例中；更确切地说，给出这些实施例是为了充分而完全地公开本发明，并使本领域的技术人员充分理解本发明的范围。在整个说明中，相同的标号表示相同的元件。

参照附图，特别是参照图 8，图中示出了根据本发明第一实施例的结构组件 112。结构组件 112 可以使用在各种应用，这些应用包括但不限于车辆、宇航飞行器、建筑应用、航海应用等。结构组件 112 包括一个或多个工件 12 和至少一个焊接接头 28，该至少一个焊接接头沿工件之一的至少一部分表面设置。采用任何普通焊接法形成焊接接头 28，这些焊接法包括但不限于气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊、超声焊、电子束焊、金属极惰性气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、搅拌摩擦焊、惯性焊或线性搅拌摩擦焊。

如图 3 和 8 所示，结构组件 112 可以包括一对工件 12，这对工件 12 彼此靠近，从而在其间形成连接界面 13，其中焊接接头 28 沿至少一部分界面设置，由此将工件连接起来。在另一实施例（未示出）中，可以使

三个或三个以上的工件 12 连接起来，或者可以在单个工件 12 中形成焊接接头 28，以修补裂纹或其它缺陷。如发明名称为“结构件的搅拌摩擦晶粒细化 (Friction Stir Grain Refinement of Structural Members)”的美国专利 No. 6398883 中所描述的，焊接接头 28，特别是搅拌摩擦焊接接头，也可以被形成为这样，即，在具有较高工作应力的工件第二区域内产生细化晶粒结构的区域，该专利已转让给本发明的受让人之一，这里通过引用而结合其内容。

可以通过已知制造方法机加工每个工件 12，按照特定设计载荷和规格的需要，将单个工件加工成预定的形状和厚度。例如，可以使用数控铣床根据需要加工每个工件 12。可以将工件 12 制造成各种结构，包括板、块、管状件和曲线形件，这些结构仅为了示范而不是为了限制。类似地，每个工件 12 可按照特定设计载荷和规格的需要由各种材料构成。工件 12 优选是由高强度重量比的材料构成，包括铝、铝合金、钛和钛合金，这些材料仅是为了示范而不是为了限制。

当使用两个或两个以上工件 12 时，工件可以由相同或不同金属构成，有利的是，由于可以通过搅拌摩擦焊来连接工件 12，工件可以由通过普通熔焊技术不可焊接或焊接很不经济的不同金属构成。不可焊接材料在通过普通熔焊技术连接时产生较弱的焊接接头，在焊接接头凝固过程中趋于产生裂纹。这样的材料包括铝和一些铝合金，特别是 AA 系列 2000 和 7000 合金。搅拌摩擦焊的使用使由不可焊的材料构成的工件 12 得以可靠地连接。搅拌摩擦焊还能用于使可焊接材料与其它可焊接和不可焊接材料可靠地连接。因此，本发明方法使构成工件 12 的材料可以从很宽范围的多种重量轻、强度高的金属和合金中选择，由此便于减小最终焊接结构的总重量。重量和强度是航空业中极关注的问题。

如图 8 所示，下面作更全面的描述，结构组件 112 以这样的方式构成，使焊接接头 28 的至少部分表面和工件 12 靠近焊接接头的至少部分表面包括，选择性形成的残余压应力层 114。根据一个实施例，选择性形成的残余压应力层 114 的深度为大约 0.5mm 至大约 1.5mm。这里使用的术语“工件”可以指一个或多个工件 12。优选是，工件 12 靠近焊接接头

28 的并包括具有选择性形成的残余压应力层 114 的部分表面大体包括工件的热影响区，这些热影响区是由形成焊接接头时产生的热量所导致的。焊接接头 28 穿透工件 12 的整个厚度，可在工件的双侧诱生残余压应力层 114。

参照图 5，示出了根据本发明一个实施例的在通过搅拌摩擦焊焊接的工件 12 表面选择性诱生的表面残余应力分布与采用普通搅拌摩擦焊焊接在工件 12 表面诱生的表面残余应力分布进行对比的曲线图。有利的是，本发明人已经发现，残余压应力层 114 显著地改善了工件 12 表面和焊接接头 28 表面的相应部分的耐腐蚀性和疲劳强度，由此解决了与普通焊接技术有关的问题，即材料性能降低以及拉伸残余应力，材料性能降低包括耐腐蚀性和疲劳强度的降低。例如，如图 9 所示，具有选择性形成的残余压应力层的搅拌摩擦焊铝测试取样在图 9 中表示为测试取样“+LPB”，其在腐蚀性（3.5% NaCl 溶液）和非腐蚀性环境中具有的疲劳寿命均高于没有选择性形成的残余压应力层的取样。

参照图 3 和 4，示出了根据本发明一个实施例用于形成结构组件 112 的焊接装置 100。焊接装置 100 包括一个或多个焊接工具 102 和压缩工具 106。每个焊接工具 102 具有用于进行任何传统焊接操作的焊头，这些焊接操作包括但不限于气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊、超声焊、电子束焊、金属极惰性气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、搅拌摩擦焊、惯性焊或线性搅拌摩擦焊。如图 2 示意性所示，焊接工具 102 优选是安装在定位装置 104 上，如机器人臂（未示出）。

在一个实施例中，如图 4 所示，定位装置 104 包括具有旋转轴 103 的数控机床或铣床（未示出），旋转轴绕轴线旋转，如图 3 中的箭头 105 所示。焊接工具 102 可以包括搅拌摩擦焊接工具 111，其与轴 103 转动相连。如上所述，搅拌摩擦焊接工具 111 包括肩部和探头 111a，其构造成用于塑化并锻造工件 12 靠近探头的部分，由此形成固态焊接接头 28。在一个实施例中，在形成焊接接头 28 之前和之中，使用一个或多个加热器（未示出）加热搅拌摩擦焊接工具 111，以便向探头 111a 传递热量。申请号为 10/035865、发明名称为“高强度搅拌摩擦焊（High Strength

Friction Stir Welding)”的美国专利申请中描述了对流、传导、辐射或感应来加热搅拌摩擦焊接工具 111 的方法和装置，该专利申请转让给了本发明的受让人之一，这里通过引用而结合其内容。

焊接装置 100 还包括压缩工具 106，用于沿着焊接接头 28 的表面和靠近焊接接头的工件 12 表面选择性产生变形区或残余压应力层 114，如图 8 所示。尽管已经研制了各种压缩工具，以便在工件表面形成残余压应力层 114，但是，优选是压缩工具 106 是抛光工具 107。例如，抛光工具 107 可包括单点抛光工具，如在发明名称为“用于在工件表面形成残余压应力层的抛光方法和装置 (Burnishing Method and Apparatus for Providing a Layer of Compressive Residual Stress in the Surface of a Workpiece)”的美国专利 No. 5826453 中公开的一种单点抛光工具，这里通过引用而结合其内容。如图 3 和 4 所示，单点抛光工具 107 包括抛光球 110，使其最前端 108 在滚动过程中在焊接接头 28 上和工件 12 靠近焊接接头的部分上移过以诱发深层压缩，如图 2 示意性所示，压缩工具 106 优选是安装在普通定位装置 104 上，如机器人臂或铣床（未示出）。

焊接装置 100 还包括切削工具 115，将其构造成从焊接接头 28 和工件 12 靠近焊接接头的表面去除灼伤，由此提供具有较光滑表面的结构组件 112。根据一个实施例，如图 3 和 4 所示，切削工具 115 包括附连在压缩工具 106 上的截齿 116、当压缩工具 106 旋转时，如图 3 中的箭头 119 所示，切削工具 115 绕焊接接头 28 的表面和工件 12 的表面旋转，去除灼伤。

焊接工具 102 和压缩工具 106 沿着由连接界面 13 形成的焊接线 18 的运动方向和速度，将取决于沿着工件 12 表面和残余压应力层 114 需要的深度所形成的焊接接头 28 的类型。通过压缩工具 106 施加在焊接接头 28 表面和工件 12 靠近焊接接头的表面的力，将同样取决于残余压缩应力层 114 需要的深度。此外，如果焊接接头 28 是搅拌摩擦焊接接头，由搅拌摩擦焊接工具 111 施加在工件 12 上的力将取决于工件的材料成分、材料性能和尺寸。

可以以手动或自动方式操作本发明的焊接装置 100。如图 2 示意性所

示, 焊接装置 100 可以包括控制器 116, 用于自动控制定位装置 104, 由此控制焊接工具 102 和压缩工具 106 的运动方向和速度。控制器 106 也可用于控制由压缩工具 106 施加在焊接接头 28 表面上和工件 12 靠近焊接接头的表面上的力。同样地, 如果焊接接头 28 包括搅拌摩擦焊接接头, 控制器 116 可用于控制由搅拌摩擦焊接工具 111 施加在工件 12 上的力。控制器 116 可以包括微处理器, 如受计算机软件控制的计算机操作。在一个实施例中, 如本领域公知的, 定位装置 104 包括由伺服电动机 (未示出) 驱动的带传动和/或齿轮传动组件 (未示出)。控制器 116 可通过合适的接线 (未示出) 与定位装置 104 的伺服电动机可操作地连接。

一个或多个传感器 (未示出), 包括但不限于线性可变差动变压器或激光、电容、电感或超声位移传感器, 它们通过合适的接线与控制器 116 电连接, 可用于测量工具在工件 12 表面上的间距, 由此测量焊接工具 102 和压缩工具 106 的运动。同样地, 伺服系统中的轴编码器、步进电动机驱动、线性可变差动变压器、或者电阻或光定位传感器可以用于确定工具沿工件 12 表面的位置。一个或多个压力传感器 (未示出) 包括但不限于结合有电阻、压电或电容元件的测压元件, 这些测压元件通过合适接线与控制器 116 电连接, 可以用于测量压缩工具 106 施加在在焊接接头 28 表面和工件 12 靠近焊接接头的表面上的力。同样地, 如果焊接工具 102 是搅拌摩擦焊接工具 111, 则通过合适接线与控制器 116 电连接的一个或多个压力传感器 (未示出) 可用于测量通过焊接工具施加在工件 12 表面上的力。例如, 压力传感器可以用于监控通过活塞施加的液压力, 以便确定工具上的法向力。通过运动和压力传感器获得的测量值传递给控制器 116。控制器 116 比较测量值和预编程序参数, 如果必要的话, 向定位装置 104 的伺服电动机 (未示出) 发出指令, 对运动方向、运动速度和/或由焊接工具 102 和/或压缩工具 106 施加的力进行校正或调整。

为了连接两个或两个以上工件 12, 工件彼此之间进行相对定位, 使得工件之间形成连接界面 13。该界面形成焊接装置 100 的预定路径或焊接线 18。当修补单个工件 12 中的裂纹或其它缺陷时, 裂纹或缺陷将形成预定路径或焊接线 18。优选是固定工件 12, 以防工件彼此相对移动。例

如,可以通过本领域所公知的点焊或采用夹具将工件 12 彼此固定。接着可通过夹具或类似装置(未示出)将工件 12 固定工作台上。当在单个工件 12 中形成焊接接头 28 时,工件优选是通过夹具或类似装置固定在工作台上。焊接装置 100 相对于工件 12 定位,使得焊接工具 102 和压缩工具 106 靠近焊接线 18。焊接工具 102 接合焊接线 18 并沿其移动,从而焊接工件 12。根据另一实施例(未示出),焊接工具 102 固定,而使工件 12 相对于焊接工具移动。

之后,压缩工具 106 使得焊接接头 28 表面和工件 12 靠近焊接接头的表面接合,并沿这两个表面移动,以便诱生残余压应力层 114。根据另一实施例(未示出),压缩工具 106 固定,而工件 12 相对于压缩工具移动,如上所述,优选是工件 12 靠近焊接接头 28 的表面大体包括由焊接过程产生的工件热影响区。根据图 3 和 4 所示的实施例,通过使抛光球 110 压靠焊接接头 28 表面和工件 12 靠近焊接接头的表面来操作压缩工具 106,从而产生变形区并诱生残余压应力层 114。

根据本发明另一实施例,普通 X 射线衍射技术用于分析焊接接头 28 和工件 12 靠近焊接接头的区域,以便确定需要的压应力分布形式,以及确定,优化焊接接头和工件区域的材料性能所必需的冷作和表面硬化量。接着,抛光球 110 以预定分布形式和变化的压力并以手动方式或采用控制器 116 移动通过焊接接头 28 和工件 12 靠近焊接接头的表面,从而诱生具有需要的冷作和表面硬化量的需要的残余压应力分布形式。

参照图 7,示出了根据本发明一个实施例的形成焊接接头的操作。该方法包括沿预定路径焊接至少一个工件,以形成焊接接头。见方框 200。焊接步骤可包括气体焊、电弧焊、电阻焊、热剂焊、激光焊、电子束焊或搅拌摩擦焊。在焊接接头的至少部分表面和工件靠近焊接接头的至少部分表面诱生残余压应力层。见方框图 202。在一个实施例中,焊接和诱生步骤同时进行。在另一实施例中,该方法包括,控制焊接接头部分表面和工件靠近焊接接头的部分表面中的冷作和表面硬化量,见方框 204。例如,在一个实施例中,冷作量低于大约 5%,并更优选是低于大约 2%。在另一实施例中,诱生步骤包括抛光。在另一实施例中,诱生步骤包括,

使压缩工具以预定形式通过焊接接头，由此形成基本不交迭的残余压应力带。见方框 206。在另一实施例中，该方法包括进行 X 射线衍射，以确定在焊接接头表面和工件靠近焊接接头的表面内待诱生的需要的压应力分布形式。见方框 208。在另一实施例中，诱生步骤包括控制压缩工具通过焊接接头的运动方向和/或运动速度。见方框 210。在另一实施例中，诱生步骤包括调整由压缩工具施加在焊接接头和工件靠近焊接接头的表面上的力。见方框图 212。在另一实施例中，该方法包括从焊接接头上去除灼伤。见方框 214。

应用于单程或多程低压力中的单点抛光方法可在工件拉伸变形之后有效产生残余压应力，并到达焊接接头 28 和工件 12 靠近焊接接头的区域内的一定深度，并以最小程度的冷作产生深的压缩。已经发现，该单点抛光方法生产的零件的冷作和表面硬化低于受普通喷丸处理或重力式喷丸处理的零件。而且还已经发现，根据本发明形成的残余压应力层 114 穿透的深度大于由普通喷丸表面处理所形成的深度。冷作和表面硬化的量也能作为部分处理工艺来改变，以便优化焊接接头 28 和工件 12 靠近焊接接头的区域的材料性能。冷作和表面硬化的最佳量将取决于焊接的特定材料和在零件使用寿命中所处的环境。但是，已经发现，通过对焊接接头表面和工件 12 靠近焊接接头的表面，进行低于大约 5% 并且更优选是低于大约 2% 的冷作，将导致焊接接头 28 具有在高温下更耐久的残余压应力层，并且其在拉伸或压缩过载中的残余应力场的变化小于采用普通冷作和表面硬化工艺所形成的焊接接头。但是应该明白，可以通过提高表面冷作量而提高在高温下的屈服强度。这对于某些应用可能是需要的。

因此，本发明方法和装置是一种成本低而有效的焊接手段，它提供了沿焊接接头的压力，从而通过受控的冷作和表面硬化的量，在适当限定的局部区域引起压应力。图 5 示出了在焊接操作（在本实例中是搅拌摩擦焊操作）后处于残余张力状态的零件表面与在焊接后接着通过本发明抛光方法处理的处于残余压应力状态的零件表面的比较曲线图。如图 5 所示，焊接后，表面在焊接区中呈现具有较高程度拉伸的区域，由此显著缩短零件的疲劳寿命并降低零件的耐应力腐蚀性。

通过使冷作和表面硬化量达到最小,已经发现,本发明的方法会沿着焊接接头 28 的表面和工件 12 靠近焊接接头的表面诱生残余压应力层 114,其大体包括工件的热影响区,导致零件的材料性能(如疲劳强度)提高,特别是在高温下,以及使拉伸或压缩过载时残余应力场的变化达到最小。图 6 示出了搅拌摩擦焊操作之后零件表面中的冷作百分率与焊接后接着由本发明抛光方法处理的零件表面中的冷作百分率的曲线对比图。对于特定的应用,零件表面的冷作百分率可以超过 5%,如图 6 所示冷作量大约为 12%。但是,可以根据特定应用的材料性能需要改变冷作量。就这点来说,已经发现冷作百分率减小可以提高零件的疲劳强度,而冷作百分率增大可以提高零件在高温下的屈服强度。对于需要较高疲劳强度的应用,已经发现,冷作百分率低于大约 5%,更优选是低于大约 2%。

如上所述和图中所示,本发明形成焊接接头 28 的方法优于现有焊接方法之处在于,本发明方法能使加工好的焊接接头获得高的疲劳强度和耐应力腐蚀性,如图 9 所示,同时形成很高的表面光洁度。此外,通过使焊接过程与以最小冷作和表面硬化量诱生深残余压应力层 114 的过程组合,实现了焊接处理后的低成本过程,该过程费用低和/或耗时少。特别是对于本发明采用搅拌摩擦焊过程形成焊接接头 28 更是如此,且不需要降低搅拌摩擦焊接工具 111 的旋转速度。此外,还改善了表面粗糙度,而不需要费用较高而且耗时的二次操作。

本领域的技术人员应该明白,形成焊接接头的方法和实现主题发明方法的装置大大增加了通过焊接而不是通过使用螺栓和铆钉而经济地制造的零件的类型。这样的零件尤其出现在航空工业中,如在飞机机身的制造和机翼蒙皮和支承的制造中,在其中重量的考虑是最重要的。通过在这样的结构中不使用或较少使用螺栓和铆钉,能够显著降低重量,因此降低燃料的耗费,以及降低总的制造和维护时间。此外,去除或减少螺栓和铆钉将改善飞机周围的气流,由此减降飞机噪声和并减小其空气动力阻力。

本发明所属领域的技术人员可以根据上述说明和相关附图的教导,作出本发明的许多修改和其它实施例。因此应理解,本发明不限于所公

开的这些特定实施例，而是包括落入所附权利要求范围内的多种修改和其它实施例。尽管这里采用了特定的术语，但是这些术语仅是一般描述性意义上使用的术语，并不是为了进行限定。

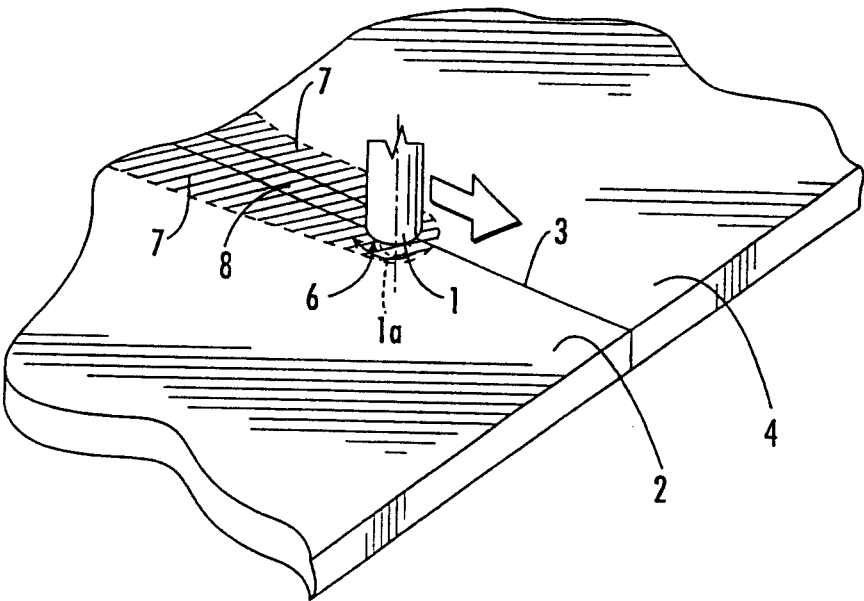


图 1

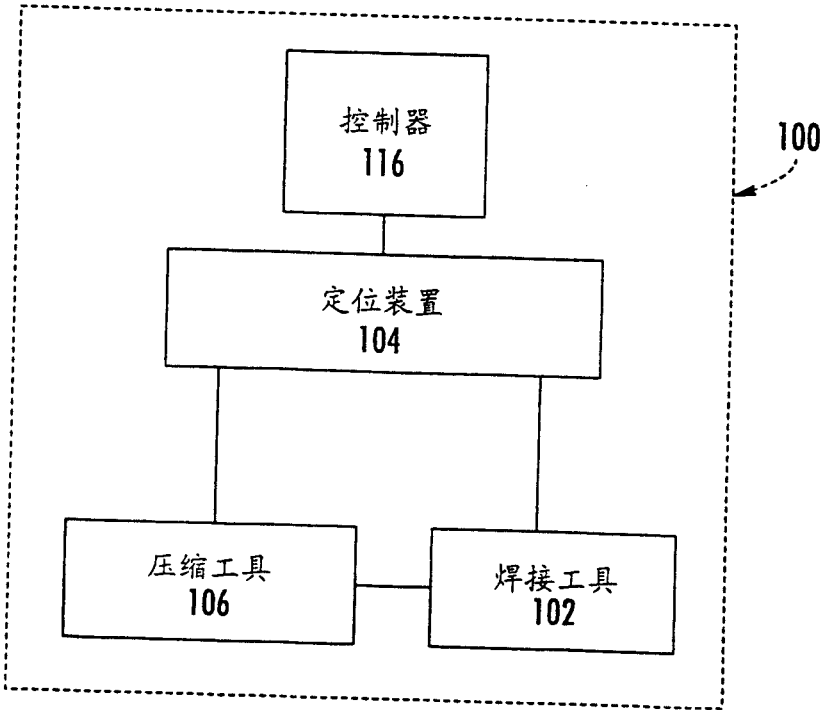


图 2

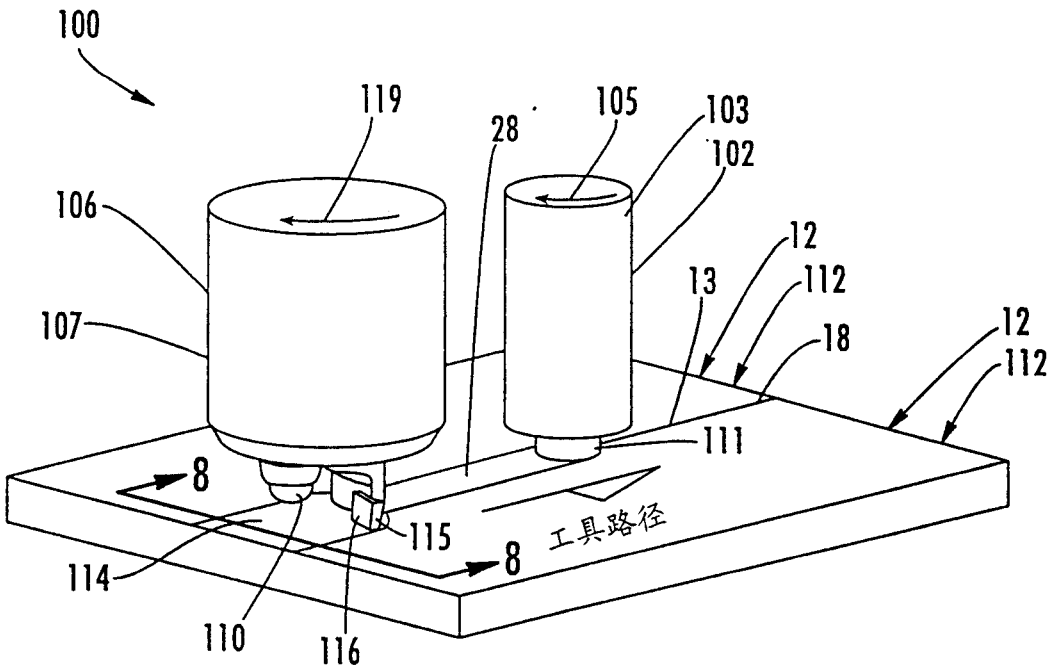


图 3

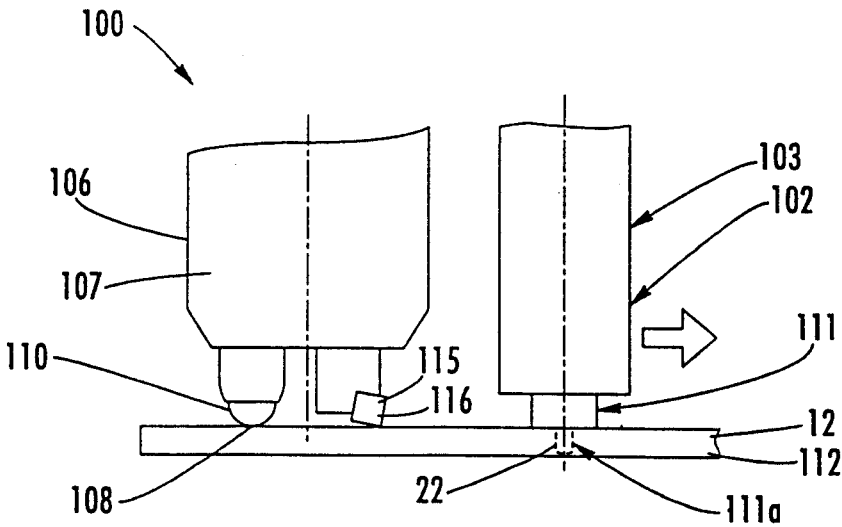
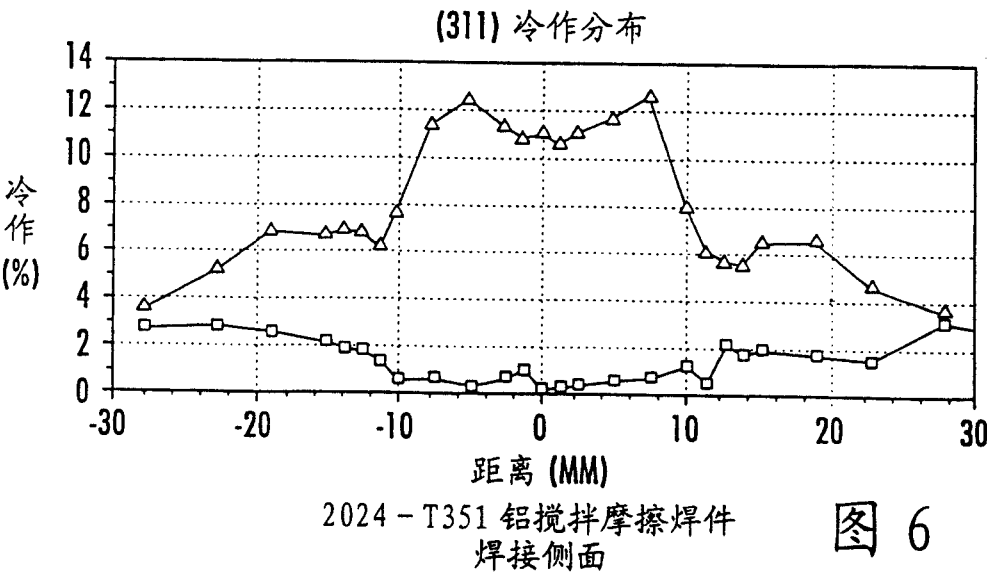
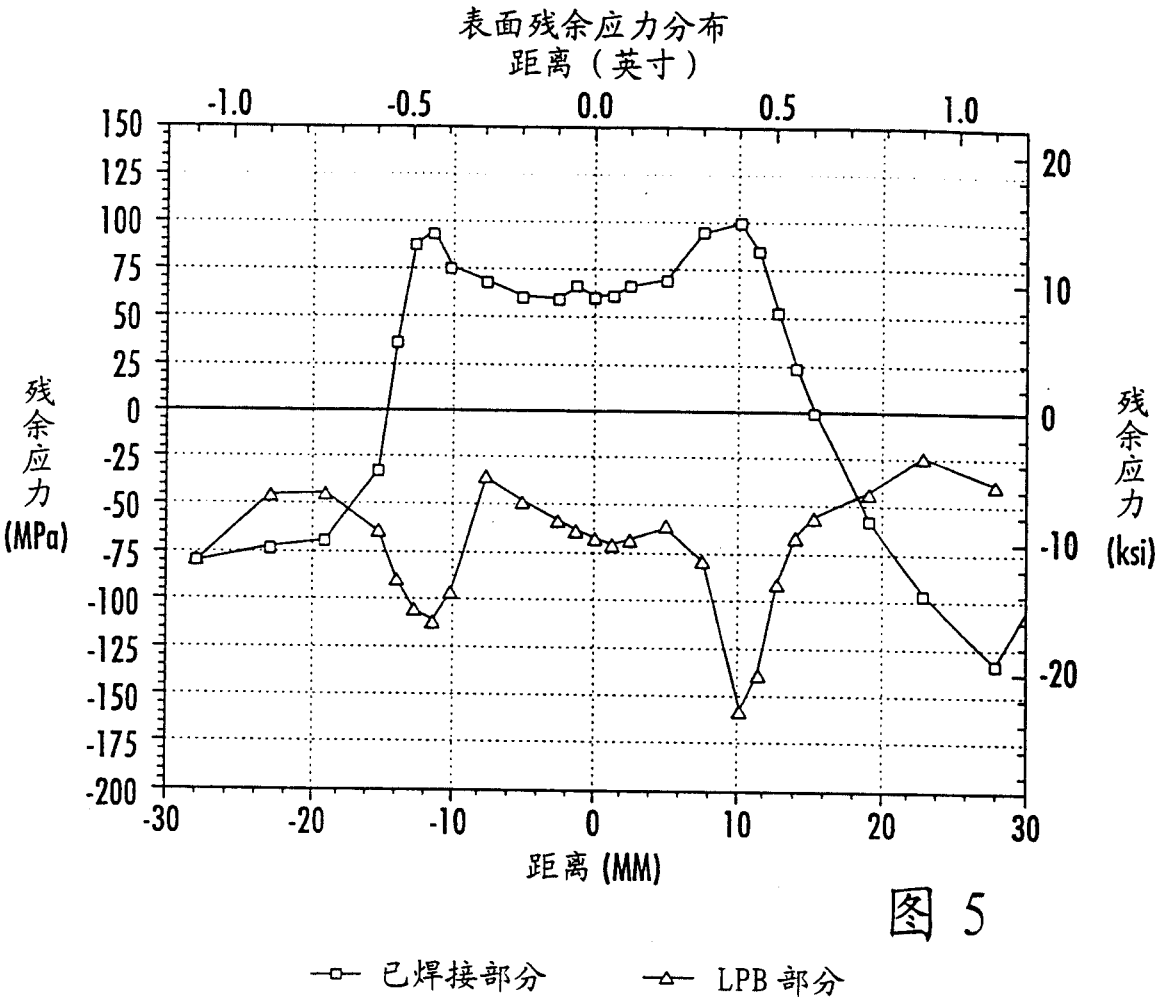


图 4



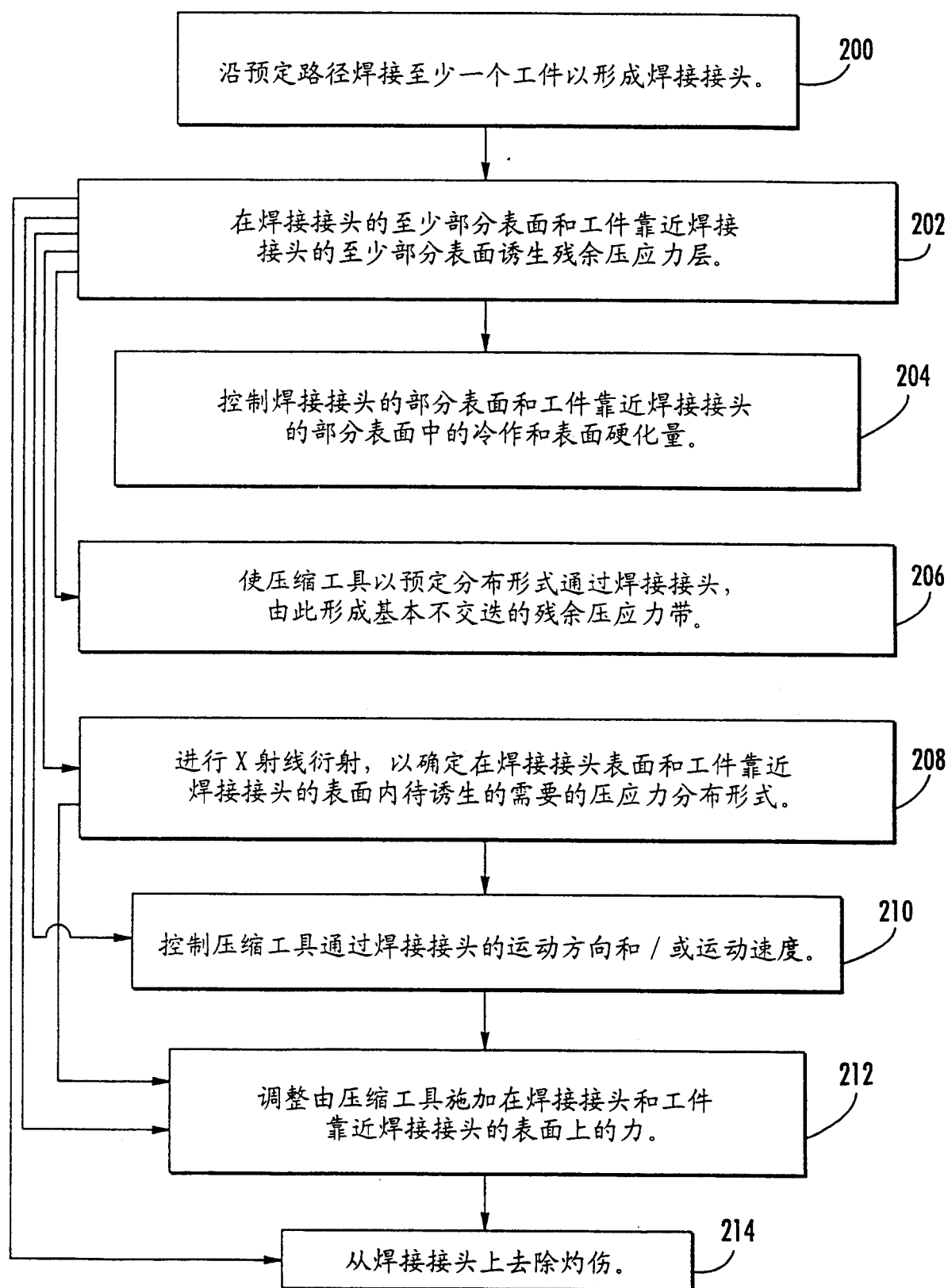


图 7

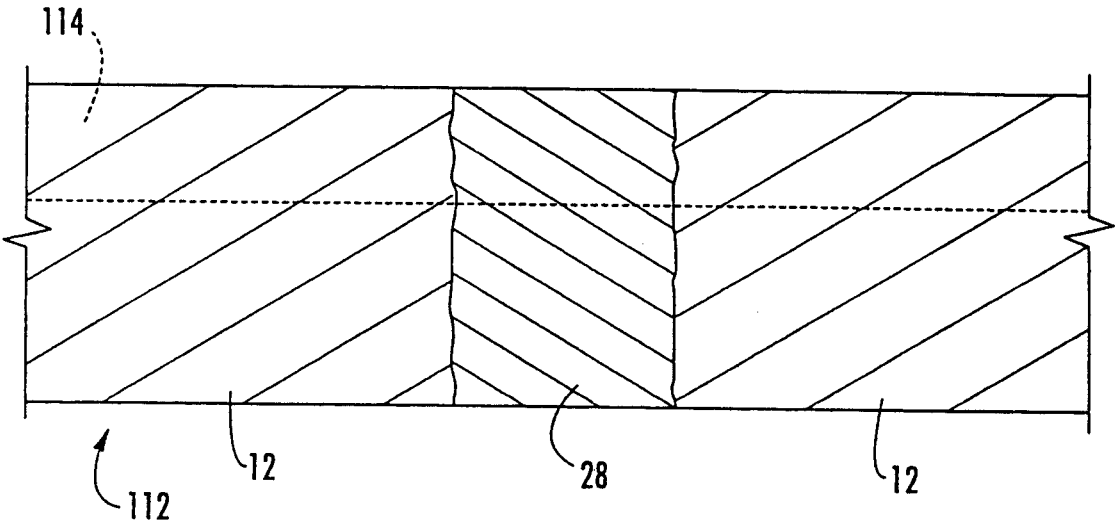
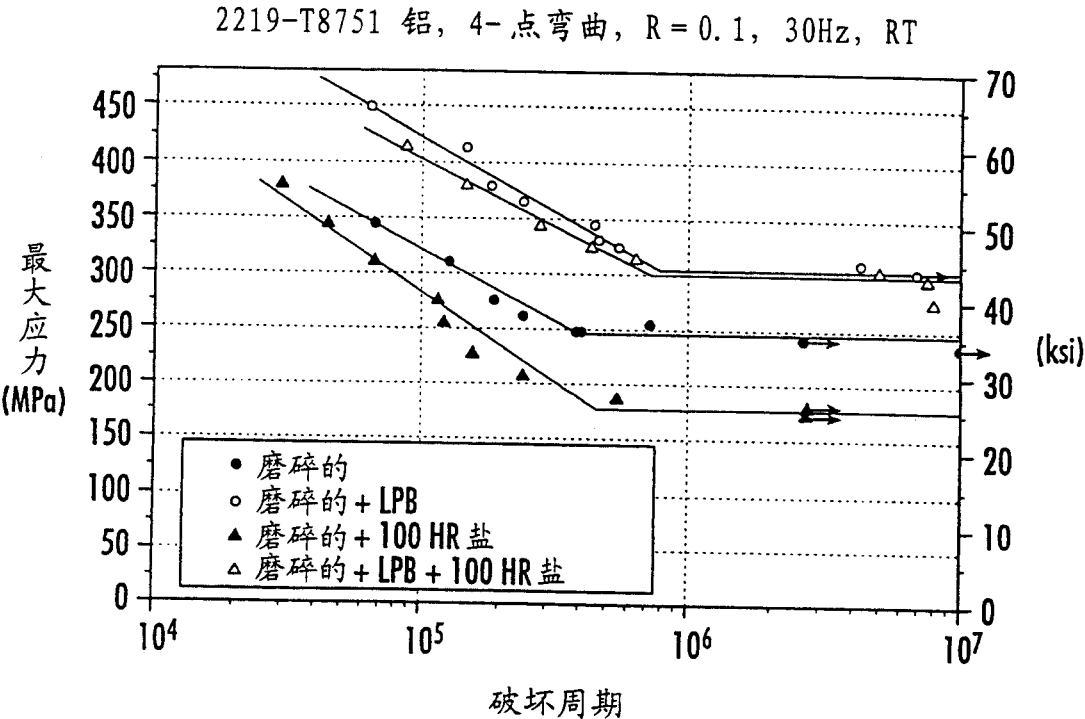


图 8



对于 2219 T8751 铝搅拌焊抽样的高循环疲劳

图 9