



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102089112 B

(45) 授权公告日 2014. 11. 12

(21) 申请号 200980126422. 0
(22) 申请日 2009. 07. 09
(30) 优先权数据
61/079388 2008. 07. 09 US
(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2011. 01. 07
(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/US2009/050019 2009. 07. 09
(87) PCT国际申请的公布数据
W02010/006106 EN 2010. 01. 14
(73) 专利权人 氟石科技公司
地址 美国加利福尼亚州
(72) 发明人 B. 梅塞 D. 马基
(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001
代理人 曹小刚 林毅斌
(51) Int. Cl.
B23K 20/12(2006. 01)
B23K 37/00(2006. 01)

(56) 对比文件
CN 1144499 A, 1997. 03. 05,
US 2007/0181647 A1, 2007. 08. 09,
US 2006/0032891 A1, 2006. 02. 16,
US 2006/0163316 A1, 2006. 07. 27,
US 2006/0163328 A1, 2006. 07. 27,
US 6053391 A, 2000. 04. 25,
US 2008/000678 A1, 2008. 01. 10,
审查员 于群

权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称
高速摩擦搅拌焊接

(57) 摘要

考虑的系统和方法显著改进了硬金属且尤其是钢和不锈钢的摩擦搅拌焊接。在各因素中,本发明人发现该工具的高横向速度是获得可预测且合意的焊缝质量所关键的,其优选是通过使芯轴偏心量最小化而在这类材料中实现的。而且,该横向速度和角速度优选经选择使得在该焊缝中实现低于这类材料的相变温度和 / 或固态转变点的温度。

试验号	材料	VCT 横沟速度 (英寸/分)	基础材料		焊缝		ASTM最小要求		从基础材料到焊缝的 硬度变化	从基础材料到焊缝的 硬度变化
			抗拉 (psi)	屈服 (psi)	抗拉 (psi)	屈服 (psi)	抗拉 (psi)	屈服 (psi)		
1	A 105B	6	88,210	42,830	88,550	27,210	60,000	35,000	-15.6%	-13.1%
2	A 105B	20	71,120	43,610	74,960	44,990			-5.4%	-3.2%
3	A 333 Gr.8	6	70,830	49,870	62,570	35,150	60,690	35,000	-11.3%	-13.6%
4	A 333 Gr.8	20	75,070	41,840	76,220	44,260			-6.8%	-6.5%
5	API X42	6	75,330	50,010	68,660	45,780	60,200	42,100	-9.0%	-8.0%
6	API X42	20	72,960	49,010	76,120	52,340			-7.1%	-6.8%
7	API X52	6	76,690	60,010	66,470	53,870	66,700	52,200	-8.7%	-11.1%
8	API X52	20	77,840	60,010	81,340	62,820			-4.9%	-3.2%
9	API X60	6	86,340	69,210	80,010	62,150	76,400	60,200	-9.6%	-10.2%
10	API X60	20	86,340	62,720	72,870				-7.1%	-6.2%
11	API X70	6	92,230	76,890	86,110	71,860	82,700	70,200	-6.9%	-6.4%
12	API X70	20	94,110	77,270	99,460	80,450			-8.7%	-4.1%

1. 将第一基础材料摩擦搅拌焊接到第二基础材料的方法,其中该第一和第二基础材料中的至少一种包括钢,所述方法包括:

将非消耗性工具安装在摩擦搅拌焊接装置的芯轴中;

以允许以临界横向速度焊接的芯轴偏心量操作该装置以在该第一和第二基础材料之间形成焊缝,其中该偏心量是实际旋转轴和与该焊缝的中心垂直交叉的理论旋转轴之间的差别;

其中该焊缝具有等于或大于该第一和第二基础材料中较弱的那个的抗张强度、屈服强度和 Charpy 冲击强度的至少之一;且

其中该临界横向速度是至少 12 英寸 / 分钟。

2. 权利要求 1 的方法,其中该芯轴在零负荷时的偏心量等于或小于 5×10^{-4} 英寸。

3. 权利要求 1 的方法,其中该第一和第二材料选自碳钢、不锈钢和钢合金构成的组。

4. 权利要求 1 的方法,其中该第一和第二材料选自以下构成的组:碳钢 ASTM A106 Grade B、碳钢 ASTM A333 Grade 6、API X42 碳钢、API X52 碳钢、API X60 碳钢和 API X70 碳钢。

5. 权利要求 1 的方法,其中该工具包括多晶立方氮化硼、难熔钨-铼合金或多晶金刚石且被构造为非消耗性工具。

6. 权利要求 1 的方法,其中该工具具有 200 ~ 800rpm 的角速度。

7. 权利要求 1 的方法,其中该横向速度为 12 ~ 40 英寸 / 分钟。

8. 权利要求 6 或 7 的方法,其中该横向速度和角速度经选择使得该焊缝中的温度低于该第一和第二基础材料的相变温度或固态转变点。

9. 权利要求 1 的方法,其中该第一和第二基础材料具有圆柱形状或平面形状。

10. 在将第一基础材料摩擦搅拌焊接到第二基础材料中提高横向速度的方法,其中该第一和第二基础材料中的至少一种包括钢,所述方法包括:

提供具有允许用非消耗性工具以临界横向速度焊接以在该第一和第二基础材料之间形成焊缝的芯轴偏心量的摩擦搅拌焊接装置的芯轴;或

将该摩擦搅拌焊接装置的所述芯轴偏心量降低到允许以该临界横向速度焊接以形成该焊缝的偏心量,其中该偏心量是实际旋转轴和与该焊缝的中心垂直交叉的理论旋转轴之间的差别;

其中该焊缝具有等于或大于该第一和第二基础材料中较弱的那个的抗张强度、屈服强度和 Charpy 冲击强度的至少之一;且

其中该临界横向速度为至少 12 英寸 / 分钟。

11. 权利要求 10 的方法,其中该芯轴在零负荷时的偏心量等于或小于 5×10^{-4} 英寸。

12. 权利要求 10 的方法,其中该第一和第二材料选自碳钢、不锈钢和钢合金构成的组。

13. 权利要求 10 的方法,其中该第一和第二材料选自以下构成的组:碳钢 ASTM A106 Grade B、碳钢 ASTM A333 Grade 6、API X42 碳钢、API X52 碳钢、API X60 碳钢和 API X70 碳钢。

14. 权利要求 10 的方法,其中该工具包括多晶立方氮化硼、难熔钨-铼合金或多晶金刚石且被构造为非消耗性工具。

15. 权利要求 10 的方法,其中该工具具有 200 ~ 800rpm 的角速度。
16. 权利要求 10 的方法,其中该横向速度为 12 ~ 40 英寸 / 分钟。
17. 权利要求 15 或 16 的方法,其中该横向速度和角速度经选择使得该焊缝中的温度低于该第一和第二基础材料的相变温度或固态转变点。
18. 权利要求 10 的方法,其中该第一和第二基础材料具有圆柱形状或平面形状。

高速摩擦搅拌焊接

[0001] 本申请要求享有我们于 2008 年 7 月 9 日提交的序列号为 61/079388 的美国临时申请的优先权。

技术领域

[0002] 本发明的领域是摩擦搅拌焊接(friction stir welding)。

背景技术

[0003] 摩擦搅拌焊接(FSW)是新兴的熔合各种材料的方法,并与常规焊接方法相比具有很多优点。FSW 是概念简单的且典型地不需要使用任何填料金属或助熔剂。因此,能够获得具有最佳机械特征的全强度结合。而且,由于摩擦搅拌焊接是在该材料的熔点之下发生的固态熔合工艺,因此即使不能完全避免,也能够降低与热影响区、不希望的晶粒生长、收缩和 / 或变形相关的问题。仍进一步,在大多数情况中 FSW 不需要焊接后处理。甚至更有利地,FSW 提供了将所选的不相似金属连接起来以及将金属和热塑性聚合物连接起来的有效可靠方法。在美国专利号 5,460,317 和 5,794,835 中描述了示例性的 FSW 系统和方法。这些和此处讨论的所有其他外来材料都通过引用整体引入。

[0004] 在实施中,旋转工具(最通常是非消耗性的工具(NCT))以恒定的角速度旋转并压入由第一和第二基础材料形成的预期的焊接接头线中。在大多数情况中,该工具沿该接头线以恒定的速度横向运动,该 NCT 和该第一和第二材料之间的摩擦热将该材料塑化,所述材料然后被迫位于该工具周围。该工具的横向运动使得该混合的材料(搅拌区)形成固态接头(焊缝)。在操作过程中,待结合的该第一和第二基础材料通常相对于彼此保持在固定的位置以允许适当熔合。

[0005] 尽管 FSW 与很多常规焊接方法相比提供了很多优点,但由摩擦搅拌焊接形成的焊缝的稳定性和完整性都是数种工艺参数的函数,所述工艺参数可以显著改变该固态熔合的机械性质。由于关于一种或多种参数对于在两种材料之间形成稳定焊缝的特定贡献所知甚少,因此可靠和可复制的焊缝形成通常依赖于反复试验,并且多个可能的决定因素将通常阻碍获得基础理论工艺设计。因此,已经采取了多种不同方法以提高焊缝完整性。例如,如在美国专利号 6,050,475 中所报道的那样,已经描述了用于对该工具进入该材料的向下力的控制的系统和方法作为一种重要参数。类似地,如在美国专利号 7,216,793 中所公开的那样,将测力传感器与该工具可操作连接以使得能够监控行进负荷并将其保持恒定以有助于提高焊缝质量。在其他已知的方法中,如美国专利号 7,275,675 中所示,使用特定的工具几何形状来改进该塑化过的材料的摩擦和运动。可替代地,在美国专利号 5,829,664 和 W0 99/39861 中报道了改进的工艺和焊缝控制,其中将至少一个工件预热。不幸的是,尽管这些已知的装置和方法都往往提高 FSW 的某些方面,但通常会引起其他困难。例如,力控制系统和方法常常受困于相对低的横向焊接速度,特定的工具设计典型地限制了能够施加的横向力,这导致缓慢的焊接速度。另一方面,在用外部加热器预热或加热材料的情况中,由于膨胀、不利的过热等可能遭遇困难。

[0006] 而且,已经发现摩擦搅拌焊接通常仅对于相对软的或非铁的材料(例如铝、镁、铜、锌和铅合金)具有接受度和实际用途,因为这些材料在较低温度变成塑性的。然而,碳钢或不锈钢的摩擦搅拌焊接的应用已经受到缺乏能够承受焊接这种较硬材料所需的高的温度和压力的适合的工具材料的限制。仅最近以来,包括多晶立方氮化硼(PCBN)和/或多晶金刚石(PCD)的工具已经允许FSW用于较硬的材料。

[0007] 例如,通过降低最高温度并将冷却速度降低到低于临界冷却速度下限,如 Scripta Materialia, 第56卷, 第7期, 2007年4月, 637-640页中所述,已经使用FSW焊接了某些碳钢材料(此处是S70C碳钢)。不幸的是,横向速度过低(1~4英寸/min)。类似地,报道了使用钨工具成功FSW了某些不锈钢材料(Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 38卷第10期, 829-835页(2007)),但是在1000rpm的情况下横向速度又被限制到1.5~4英寸/min。更进一步地。

[0008] 因此,即使FSW在结合各种材料中具有光明的前景,但仍存在多种问题和担心。因此,需要确定关键的FSW工艺参数以得到并优化具有可预测的、合意的完整性和稳定性的焊缝,尤其是在焊接钢材料的情况下。

发明内容

[0009] 本发明涉及用于FSW较硬材料,尤其是钢和不锈钢材料,的改进构造和方法。在本发明主题的特别优选方面,本发明人确定并表征了在FSW中对在各种钢材料中可预测并可再现地形成稳定焊缝的关键的某些工艺参数。最重要的是,考虑的构造和方法特征在于提高了横向速度(典型地大于12英寸/min)并使用在零负荷具有接近零(典型地小于 5×10^{-4} 英寸)的偏心量(run-out)的芯轴。这种方法和构造显著提高了焊接速度,同时产生了具有高完整性和强度的可再现的焊缝。

[0010] 在本发明主题的第一方面,将第一基础材料摩擦搅拌焊接到第二基础材料的方法,其中该第一和第二材料中的至少一种包括钢,因此将包括:将工具安装在摩擦搅拌焊接装置的芯轴中的步骤,以及以允许以临界横向速度焊接的芯轴偏心量操作该装置以在该第一和第二基础材料之间产生焊缝的另一步骤。最典型地,该焊缝具有至少是该第一和第二材料中较弱的那个的抗张强度、屈服强度和/或Charpy冲击强度,且该临界横向速度至少为12英寸/分钟。

[0011] 因此并从不同的视角来看,本发明人还考虑了在将第一基础材料摩擦搅拌焊接到第二基础材料(其中该第一和/或第二基础材料包括钢)中提高横向速度的方法,其中该方法包括以下步骤:(a)提供具有允许以临界横向速度焊接以在第一和第二基础材料之间形成焊缝的芯轴偏心量的摩擦搅拌焊接装置的芯轴,或(b)将该摩擦搅拌焊接装置的芯轴偏心量降低到允许以该临界横向速度焊接以制备该焊缝的偏心量。最优选地,如此制备的焊缝具有至少是该第一和第二材料中较弱的那个的机械强度(例如抗张强度、屈服强度和/或Charpy冲击强度),该临界横向速度为至少12英寸/分钟。

[0012] 在特别优选的方面,该芯轴在零负荷时的偏心量等于或小于 5×10^{-4} 英寸,更优选等于或小于 4×10^{-4} 英寸,最优选等于或小于 2×10^{-4} 英寸。此外,优选该工具的至少一部分是由多晶立方氮化硼、难熔钨-铼合金或多晶金刚石制备的且被构造为非消耗性的工具。尽管不限制到本发明的主题,通常优选该工具具有(典型恒定的)200~800rpm的角

速度和 12 ~ 40 英寸 / 分钟的横向速度。因此,在最优选的方面,该横向速度和角速度的选择使得在该焊缝中得到低于该第一和第二基础材料的相变温度和 / 或固态转变点的温度。

[0013] 进一步通常优选该第一和第二材料中的至少一种包括钢材料,尤其是碳钢、不锈钢或钢合金。例如,尤其考虑的材料包括碳钢 ASTM A106 Grade B、碳钢 ASTM A333 Grade 6、API X42 碳钢、API X52 碳钢、API X60 碳钢和 API X70 碳钢。应当仍进一步认识到该第一和第二基础材料具有圆柱形或平面形状,且该FSW工艺可以作为线性FSW或轨道型FSW(orbital FSW)进行。

[0014] 从以下对本发明的优选实施方案的详细描述中,本发明的各种目的、特征、方面和优点将变得更加显而易见。

附图说明

[0015] 图 1A 和 1B 是显示对用常规 FSW 参数和依照本发明主题的 FSW 焊缝参数制备的焊缝的选定 FSW 条件和测试结果的表。

[0016] 图 2 是显示作为横向速度和角速度的函数的预期混合的图表。

具体实施方式

[0017] 本发明人已经发现了在摩擦搅拌焊接中在较硬金属,尤其是钢和不锈钢中,产生可预期的合意的焊缝结果的特定工艺参数。最显著的是,本发明人发现在这类材料中 NCT 的横向速度提供了对于得到可预测的合意的焊缝质量最关键的工艺参数,且能够通过确定保持该 NCT (或其他工具) 的芯轴具有接近零的偏心量来得到适合的横向速度。在正确考虑到横向速度时,本发明人发现该焊缝将表现出与该基础材料中较弱的那个至少相同且在大多数情况中甚至更好的机械性质(例如抗张强度、屈服强度、Charpy 切口冲击强度)。

[0018] 从不同视角来看,观察到该 NCT 的横向速度必须选择到低于对该 NCT 和 / 或焊缝造成损害(例如通过破坏该 NCT 和 / 或在该焊缝中留下污染物)的速度的点,而且选择到高于造成不希望的高温(例如,接近该材料的相变或转变点的温度以造成非固态熔合或能够导致固化缺陷的相变)的速度的点。因此,NCT 的横向速度也应当足够快以避免或降低该搅拌焊接的区中材料的过度均化(例如,混合大于 3 次)。

[0019] 因此,通常考虑通过使用具有接近零的偏心量的芯轴,FSW 能够进行以结合第一和第二基础材料(最典型地是钢材料,包括碳钢、不锈钢和钢合金)。应当注意的是该接近零的偏心量是用于在不显著提高工具破坏或工具材料在该焊缝中沉积的风险的情况下实现临界横向速度的重要要素。此处所用的术语“偏心量”表示理论旋转轴(其与该焊缝的中心垂直交叉)与实际旋转轴之间的差别。因此并从不同视角来看,在具有偏心量的芯轴中旋转的工具将沿圆形路径运动,其中该路径围绕着(circumscribe)该理论旋转轴。值得一提地,通常将会表征为较少量(例如在零负荷时为 $1 \times 10E-3$ 英寸)的偏心量不仅对该焊缝质量具有充分不利的影响而且还不不利地影响了将该工具以合意的横向速度前进的能力。

[0020] 一旦将该工具安装在该芯轴中,该 FSW 装置以允许以临界横向速度(见下文)焊接的芯轴偏心量操作以在该第一和第二基础材料之间制备焊缝。使用这种操作条件(优选以至少 12 英寸 / 分钟的临界横向速度)典型地并可重现地产生具有等于或大于该第一和第二

基础材料中较弱的那个的抗张强度、屈服强度和 / 或 Charpy 冲击强度。

[0021] 例如,在如下所示例性显示的用于各种钢材料的典型 FSW 条件下,在第一工作窗内进行常规 FSW,其中角速度为约 400rpm,横向速度为约 6 英寸 / 分钟。如已经显而易见的那样,这种常规条件典型地导致如能够从表中看到的那样不能令人满意的焊缝。与此相比,其中该芯轴和 / 该工具具有小于 5×10^{-4} ,且更典型地小于 4×10^{-4} 英寸的偏心量的情况中,依照本发明主题的较高的横向 NCT 速度导致抗张强度和屈服强度、延展性和断裂韧性的提高。更特别地,图 1A 和 1B 的表 1A 和 1B 显示了来自其中使用非消耗性工具以可忽略的损耗将两个所示材料的钢管焊接在一起的 FSW 工艺的典型数据。此处,将每种材料在两种不同的条件测试,一种是使用缓慢的 NCT 横向速度的常规条件,和一种是使用具有小于 4×10^{-4} 英寸的偏心量的芯轴的快速 NCT 横向速度。在该实验的整个过程中所有其他参数都保持恒定。基于各自材料的公知实践选择其余工艺因素,例如 NCT 角速度、向下推力(downward thrust)、倾斜角和俯角(plunge)。基于如表 1A 和 1B 中看到的典型结果,该焊缝抗张强度和焊缝屈服强度在任何地方分别升高 5.4% ~ 7.1% 和 3.2% ~ 6.8%。相反,在该 NCT 以缓慢速度(例如 3 ~ 8 英寸 / 分钟)运行的情况中,该焊缝的机械强度弱于基础材料(例如在任何地方抗张强度降低 -6.6% ~ -15.0%,在任何地方屈服强度降低 -6.4% ~ -13.6%,这能够从表 1A 和 1B 中得到)。当然,应当认识到该结果将根据所用的特定材料和参数变化。

[0022] 进行测试以测量该屈服强度和抗张强度、延展性和断裂韧性。分析该焊缝的机械性质以核实该熔合的接头的完整性和稳定性是重要的。该焊缝的机械性质是非常重要的,且因此需要控制输入参数,特别是 NCT 的横向速度。在测试该焊缝的断裂韧性的情况中,基于实验规格 ASTM E 1290-07 “Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement”和改进的测试程序来确定“合格 - 不合格”标准。表 1B 包含典型的测试结果并显示对于所有快速 NCT 横向速度实验,依照本发明主题的焊缝都通过了该 CTOD 测试。另一方面,该测试结果还显示对于所有缓慢 NCT 横向速度实验,该焊缝的 CTOD 实验都失败了。而且,将该基础材料的 CTOD 与该焊缝的 CTOD 进行比较。类似地,快速 NCT 横向速度实验产生等于或大于该基础材料 CTOD 的焊缝 CTOD,缓慢 NCT 横向速度实验产生了小于该基础材料 CTOD 的焊缝 CTOD。这种与现有 FSW 方法相比的改进是特别重要的,因为改进的断裂韧性对于管线和装置在苛刻操作条件下的可靠操作是重要的。使用此处考虑的 FSW 方法,显著降低或甚至完全避免了在苛刻使用情况下(例如高压、酸性气体、氢气环境)焊缝的变脆。

[0023] Charpy 冲击试验确定了此处考虑的快速 NCT 横向速度事实上优于常规 NCT 横向速度。对于所有快的 NCT 横向速度,该焊缝 Charpy 冲击试验都等于或大于基础材料试验。对于所有缓慢 NCT 横向速度,该焊缝 Charpy 冲击试验都小于基础材料试验。而且,如果该 Charpy 冲击试验等于或大于该基础材料,在该标准中该焊缝就是合格的。

[0024] 如能够从该示例性结果(和此处未示出的其他数据)中容易得到的那样,非消耗性工具的横向速度(英寸 / min) 与该焊缝的完整性和稳定性具有直接相关性。在大多数情况中,具有接近零的偏心量设置的高横向速度产生等于使用该方法结合的基础材料中较弱的那个的或与其相比甚至更好的机械强度。因此,还应当认识到依照本发明主题的 FSW 也将提供在一次通过中明显更高的材料沉积速率。因此,应当认识到:通过要么提供具有允许以

临界横向速度焊接以在该第一和第二基础材料之间产生焊缝的芯轴偏心量的摩擦搅拌焊接装置的芯轴,考虑的方法和构造也将能够实现在将第一基础材料摩擦搅拌焊接到第二基础材料(所述第一和第二基础材料的至少之一优选包含钢)中提高横向速度的方法。

[0025] 应当注意该测试结果并不限于单一钢材料,而是发现适用于表中所示的多种其他材料。其他适合的材料包括其他钢材料(例如 ASTM A106 Grade B、碳钢 ASTM A333 Grade 6、API X42 碳钢、API X52 碳钢、API X60 碳钢和 API X70 碳钢)、不锈钢、双相不锈钢、超奥氏体不锈钢、低和高合金钢和多种其他金属。仍进一步地,应当认识到依照本发明主题的 FSW 工艺包括其中将相同、相似和不相似的材料结合的工艺。因此,甚至非金属材料尤其是聚合材料也被认为适用于此中。而且,在本发明主题的更进一步考虑的方面,应当认识到尽管此处显示的数据是在轨道型 FSW 工艺中得到的,但考虑的结果和方法并不限于该轨道型焊接而是适用于所有其他类型的 FSW,尤其是平面/线性非轨道方法。

[0026] 高强度和耐冲击的工具材料的最近进展已经允许显著提高各工具上的负载。因此,特别适合的工具是可以包括工具钢、陶瓷(例如多晶金刚石(PCD)、多晶立方氮化硼(PCBN)、难熔钨-铼合金(W-Re))及其所有合理组合的非消耗性工具。应当进一步特别注意该 NCT 必须正确安装在用于该工艺的摩擦搅拌焊接机械中以具有任何成功,且安装不当能够造成致命故障。事实上,本发明人发现(除了改进的 NCT 材料之外),偏心量对于以高横向速度进行的 FSW 中获得合意性能所关键的。显然,在该横向速度提高的情况下,尤其是在该横向速度提高到超过 8~10 英寸/分钟的速度速度的情况下,偏移在迄今为止已知的 FSW 装置中典型地将导致致命故障(例如工具断裂)和/或不合意的焊缝(例如具有工具沉积物的焊缝),与此相反,在依照本发明主题的装置(其中该偏心量接近零(例如在零负载时的偏心量小于 5×10^{-4} 英寸,更优选 4×10^{-4} 英寸,最优选 2×10^{-4} 英寸))中,该工具承受充分提高的侧向负载并因此支撑 20 英寸/分钟(甚至更高)的横向速度。因此且尤其在使用最近一代工具的情况下,考虑 10~40 英寸/分钟和甚至更高的横向速度(角速度高达 1200rpm)。除了其他优点,这种操作条件避免了过度均化且因此提供了改进的机械焊缝性质。

[0027] 关于该临界横向速度,通常考虑在大多数情况中该工具的最佳横向速度典型地为 12~40 英寸/分钟以得到等于或好于该两种基础材料中较弱的那个的机械性质的该焊缝的机械性质。有趣且如表和其他实验(此处未示出)的数据中所反映的那样,该焊缝机械性质在典型在 7~12 英寸/分钟的范围内的 NCT 横向速度表现出阶梯函数。高于该阶梯函数的横向速度(临界横向速度)导致材料较少混合(且因此较少加热),而低于该功能函数的横向速度导致材料的较多混合(且因此较多加热)。在该阶梯函数处,该焊缝的机械性质大大改变,导致从不可接受的焊缝性质转变为可接受的性质。当然,应当认识到该特定的阶梯可能取决于材料的类型(和相似性)。因此,在该阶梯函数下方的一些横向速度也被认为适用于此处且典型地在下限处被产生不合意的温度(例如接近材料的相或固态转变点)的速度所限制。而且,适合的横向速度将包括将避免将 NCT 污染物留在该焊缝中的那些。因此,可替代的横向速度(例如快于 40 英寸/分钟,或小于 14 英寸/分钟)也被认为适用于此处。

[0028] 关于 NCT 的角速度,通常优选该角速度将在 200rpm~1200rpm 范围内,更典型地在 200rpm~800rpm 范围内,甚至更典型地在 300rpm~700rpm 范围内,最典型地在 400rpm~600rpm 范围内(例如参见表 1A 和 1B)。应当进一步指出在大多数试验中该角速度都保持恒定而改变该横向速度。然而,应当认识到在其他焊缝系统(例如使用不同的材料厚

度、类型等)中,这些参数可能改变,因为该焊缝是角速度和横向速度两者的函数。事实上,在至少一些情况中,可能必需提高该角速度以实现快的横向速度。因此,应当认识到考虑的FSW方法和构造能够适用于其它角速度,其中更快的角速度将允许更大的横向速度直至特定的点(在某点,该横向速度将变得如此之大以至于几乎不发生混合甚至不发生混合)。图2显示了描述作为横向速度和角速度(此处为400、800和1200rpm)的函数的预期混合的示例性图表。

[0029] 因此,应当认识到在该非消耗性工具(NCT)沿该接缝线的横向速度处于较快速率(典型地大于7~14英寸/分钟的阶梯函数)的情况中,依照本发明主题的FSW工艺将提高焊缝机械性质(例如抗张强度、屈服强度、韧性和延展性)。在通过允许管接头以高达40英寸/分钟和甚至更高的速度进行轨道焊接的装置进行FSW的情况中,该工艺是尤其适合的。然而,此处也公开考虑了其他装置(例如适用于平面焊接和其他几何形状)。

[0030] 因此,已经公开了摩擦搅拌焊接的特别实施方案和应用。然而,对本领域的技术人员应当显而易见的是在不脱离此处的本发明的概念的情况下可以有很多更多的在已经公开的那些之外的其他改进。因此,本发明的主题仅限于在后附权利要求的精神之内。而且,在该说明书和权利要求书的解释中,所有术语都应当以与上下文一致的最宽的可能方式解释。尤其,术语“包括”应当解释为以开放式方式提及要素、组分或步骤,表明所提及的要素、组分或步骤可以与其他未明确提及的要素、组分或步骤一起存在或使用或结合。进一步地,在通过引用结合到此处的参考文献中对术语的定义或使用与本文提供的该术语的定义不一致或相反的情况中,适用本文所提供的该术语的定义,且在该参考文献中该术语的定义不适用。

试验#	材料	NCT 横向速度 (英寸/ min)	基础材料		焊缝		ASTM最小要求		从基础材料到焊缝的抗张强度改变%	从基础材料到焊缝的屈服强度改变%
			抗张 (psi)	屈服 (psi)	抗张 (psi)	屈服 (psi)	抗张 (psi)	屈服 (psi)		
1	A 106B	6	69,210	42,930	58,850	37,310	60,000	35,000	-15.0%	-13.1%
2	A 106B	20	71,120	43,010	74,990	44,590			5.4%	3.7%
3	A 333 Gr 6	6	70,550	40,670	62,570	35,150	60,000	35,000	-11.3%	-13.6%
4	A 333 Gr 6	20	72,070	41,940	76,230	44,260			5.8%	5.5%
5	API X42	6	75,330	50,010	68,550	45,760	60,200	42,100	-9.0%	-8.5%
6	API X42	20	72,960	49,010	78,120	52,350			7.1%	6.8%
7	API X52	6	76,090	60,010	69,470	53,370	66,700	52,200	-8.7%	-11.1%
8	API X52	20	77,640	60,510	81,350	62,430			4.8%	3.2%
9	API X60	6	88,540	69,210	80,010	62,150	75,400	60,200	-9.6%	-10.2%
10	API X60	20	86,560	68,940	92,720	72,570			7.1%	5.3%
11	API X70	6	92,230	76,850	86,110	71,890	82,700	70,300	-6.6%	-6.4%
12	API X70	20	94,110	77,270	99,460	80,450			5.7%	4.1%

图 1A

试验#	材料	NCT 横向速度 (英寸/ min)	冲击温度 (°C)	基础材料 Charpy 冲击强度 (J), (Avg(3) / Min)	焊缝 Charpy 冲击强度 (J), (Avg / Min)	焊缝与基础 材料相比的 CTOD (不合格: <基础, 合格: >=基础)
1	A 106B	6	-20	40 / 31	35 / 29	不合格
2	A 106B	20	-20	40 / 31	42 / 33	合格
3	A 333 Gr 6	6	-40	50 / 40	45 / 39	不合格
4	A 333 Gr 6	20	-40	50 / 40	51 / 42	合格
5	API X42	6	-20	34 / 28	33 / 28	不合格
6	API X42	20	-20	35 / 28	36 / 29	合格
7	API X52	6	-20	32 / 22	29 / 21	不合格
8	API X52	20	-20	32 / 22	33 / 22	合格
9	API X60	6	-20	25 / 19	23 / 17	不合格
10	API X60	20	-20	25 / 19	28 / 20	合格
11	API X70	6	-20	18 / 14	15 / 8	不合格
12	API X70	20	-20	18 / 14	19 / 15	合格

图 1B

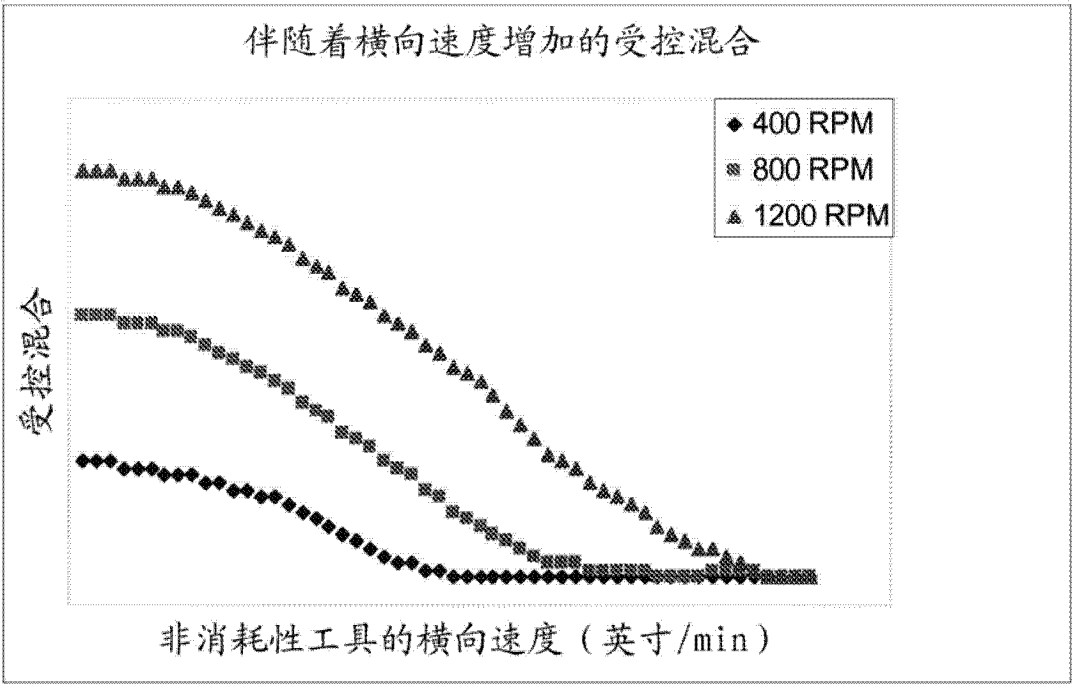


图 2