

钛合金的搅拌摩擦焊探索

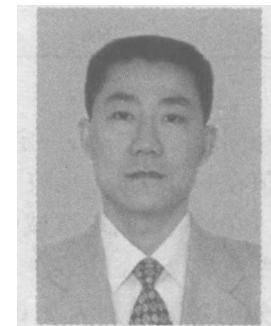
栾国红，柴鹏，孙成斌

(北京航空制造工程研究所 中国搅拌摩擦焊中心, 北京 100024)

摘要: 通过对钛合金热物理性能分析, 比较钛合金的搅拌摩擦焊特性; 针对钛合金的特点特别设计和使用了可以满足钛合金搅拌摩擦焊的搅拌头、垫板、冷却和保护装置等; 并且对 Ti6Al4V 钛合金的搅拌摩擦焊焊缝和接头进行了观察分析, 还对接头力学性能进行了测试, 初步试验结果表明搅拌摩擦焊可以实现钛合金焊接, 接头强度可以达到母材强度 90% 以上, 但是搅拌摩擦焊工艺、参数、搅拌头还需要进一步优化, 性能指标还可以进一步提高。

关键词: 搅拌摩擦焊; 钛合金; 焊接性

中图分类号: TG453 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)11-83-06



栾国红

0 序 言

自 1991 年英国焊接研究所发明搅拌摩擦焊技术以来^[1], 基于搅拌摩擦焊技术的简单、优质、高效、环保及自动化等方面的诸多优越性^[2], 经过世界范围内 10 多年的研究和开发, 搅拌摩擦焊已经在轻金属材料(如铝合金^[3,4]、镁合金^[5]及铜合金^[6]等)领域得到非常瞩目的发展和很多成功的工业化应用。随着该技术的快速发展及在工业制造领域的成功应用, 搅拌摩擦焊的发展逐渐向黑色金属及其他高熔点材料转移, 其中钛合金的搅拌摩擦焊就是其发展的一个方面。

目前由于性价比原因, 钛合金材料主要应用于航天、航空工业制造领域。基于钛合金材料具有抗腐蚀、耐高温和比强度高等优点, 目前在宇航领域, 尤其是飞机制造领域得到越来越广泛地应用。据报道国外有些型号飞机钛合金材料的使用量已经超过了整机材料使用量的 30%。

传统条件下, 钛合金材料可以采用熔焊方法^[7], 如氩弧焊(TIG)、电子束(EB)和等离子(PA)等方法进行焊接。但是由于熔焊条件苛刻、过程复杂, 并且容易产生缺陷和接头强度较低等原因, 人们开始探索利用新型的搅拌摩擦焊技术来解决和改善钛合金材料的焊接^[8]。

作者针对宇航结构中常用的 Ti6Al4V (TC4) 钛合金材料进行了搅拌摩擦焊探索性研究, 主要介绍了钛合金的焊接特性、搅拌摩擦焊焊接工

艺和对搅拌头的要求以及 Ti6Al4V 钛合金材料的搅拌摩擦焊组织性能和分析。

1 钛合金 FSW 焊接性

迄今, 搅拌摩擦焊主要针对铝、镁等轻合金金属材料进行开发和应用。在世界范围内钛合金搅拌摩擦焊研究较少, 公开发表的文献资料也非常罕见。所以针对搅拌摩擦焊的特点, 首先对钛合金的搅拌摩擦焊可焊性进行了分析。

Ti6Al4V 属于 $\alpha + \beta$ 相钛合金, 熔焊的焊接性比较好, 在焊接温度超过 980 °C 时会发生同素异构相变。材料微观组织的改变会影响到材料的性能, 因此钛合金焊接过程中的温度峰值将对接头性能产生直接影响, 需要通过焊接工艺参数优化来控制焊接热循环过程, 并控制焊接接头的质量。

钛的化学活性随温度升高而增强, 在高温条件下其表面氧化层厚度会增加, 温度高于 648 °C 时, 钛的抗氧化能力急剧下降。钛在固态下能吸收气体, 加热至 300 °C 时, 就开始吸收氢; 加热至 400 °C 时, 开始吸收氧; 在 600 °C 是开始吸收氮。纯钛中含有氧、氮、氢等气体元素会使材料的塑性下降, 因此, 钛合金搅拌摩擦焊焊接过程中应注意对焊缝的保护。

另外, 钛合金的基本热物理特性(表 1)对 Ti6Al4V 材料搅拌摩擦焊焊接的可行性和工艺难度也有重要影响。

搅拌摩擦焊焊接过程中的搅拌头对焊缝的能量输入, 一部分使焊缝区域温度升高, 另一部分则由于热传导向焊缝周围材料和工件传递。在结构、厚度

表 1 钛与几种常用金属材料的物理性能比较

Table 1 Physical features of metals

金属材料	熔点温度 $T / ^\circ\text{C}$	密度 (20°C) $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	比热容 ($0 \sim 500^\circ\text{C}$) $C / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率 (20°C) $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
钛	1668	4.5	0.54	15
钢	1579	7.8	0.46	67.4
铜	1083	8.9	0.38	384
铝	660	2.7	0.89	200.8

以及相同焊接条件下,一定材料的比热容与热导率的比值在一定程度上反映了搅拌摩擦焊过程中焊接热输入在焊缝及其它区域中的分配关系,称之为能量分配系数(S_c)。由表1可知,钛、钢、铜以及铝的能量分配系数分别为0.04、0.007、0.001、0.004。可见钛的能量分配系数最大,也即同样热输入条件下,钛合金材料更容易达到焊接温度,反之即要达到相同的焊接温度,钛合金材料需要较少的能量输入。

如果考虑不同焊接材料的密度可以知道单位体积金属材料温度升高 1°C 所需要的能量,称之为体积能。依据表1数据,钛、钢、铜以及铝合金材料的体积能分别为2.43、3.63、4和2.4。该参数可以定量地说明焊缝区材料温度升高的难度大小。钛和铝的体积能相似,均小于钢和铜,表明钛的温升难度比较小。

根据有关文献和试验经验,假设不同材料搅拌摩擦焊焊接温度分别为钛合金 1200°C 、钢合金为 1000°C 、铜合金 800°C 、铝合金 480°C ,则达到搅拌摩擦焊焊接温度,不同材料的相对难度系数分别为2.53、3.13、2.36和1(以铝为参考),可见,钛合金搅拌摩擦焊焊接的难度与铜相近,比钢合金容易。

从材料的常规物理特性分析,钛合金搅拌摩擦焊焊接的焊接性比较好、焊接难度相对较低。

2 搅拌摩擦焊试验

在研究中,被焊材料为Ti6Al4V钛合金,材料的主要成分见表2。试件尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 。试验在中国搅拌摩擦焊中心自主研制的FSW-1DB-025型悬臂式搅拌摩擦焊设备上完成(图1)。

钛合金搅拌摩擦焊所使用的搅拌头为耐高温的钨类合金,焊接过程采用气体进行动态保护,没有采取辅助加热措施等,试件焊后未经过热处理,选择典型试样进行接头微观组织及力学性能分析。接头金相试样经腐蚀后,在光学显微镜上进行观察,力学性能试验在Zwick 100 kN电子万能材料试验机上进行。

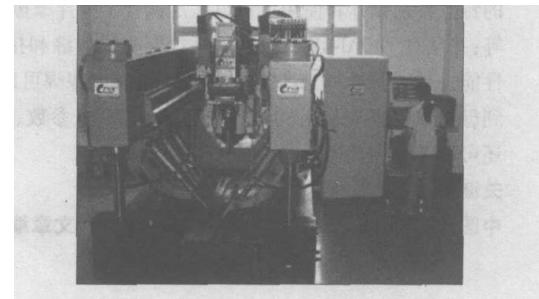


图 1 中国搅拌摩擦焊中心钛合金搅拌摩擦焊设备

Fig 1 FSW welder for titanium alloy in China FSW center

表 2 Ti6Al4V钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of Ti6Al4V

Al	V	Fe	O	H	C	N	Ti	余量
5.5~6.8	3.5~4.5	0.3	0.2	0.15	0.1	0.05	余量	

在研究试验中参考了相关文献资料所采用的搅拌摩擦焊工艺参数见表3。

表 3 焊接工艺参数及保护形式

Table 3 FSW parameters and protection

序号	旋转速度 $n / (\text{r} \cdot \text{m}^{-1})$	焊接速度 $v / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	保护形式
1	750	60	单面气体保护
2	750	60	单面气体保护
3	950	60	单面气体保护
4	950	40	单面气体保护
5	950	80	单面气体保护
6	950	120	单面气体保护
7	950	120	单面气体罩保护
8	850	120	双面气体罩保护

3 搅拌头

搅拌头是搅拌摩擦焊技术的核心,要实现钛合金的焊接,首先需要确定使用何种材料的搅拌头。从工作温度、实用性、可加工性、化学惰性和热稳定性

性等方面进行了比较, 发现高温高强工具钢、不锈钢、镍基高温合金等综合性能比较好。但是按照试验经验表明, 钛合金的搅拌摩擦焊温度可以达到近 1334°C ($0.8 T_m$)。在此温度环境条件下, 用上述材料无法提供足够的强度和刚度来满足焊接要求。而其它几种工作温度比较高的材料如金属陶瓷、高熔点金属 (W, Mo, Nb) 以及金属间化合物的可机械加工性能比较差, 并且无法提供足够的韧性来承载搅拌摩擦焊过程中的震动。

根据英国焊接研究所提供的资料和参考国外公开发表的文献资料, 钛合金和镍基高温合金搅拌摩擦焊焊接所需要的搅拌头, 最好采用纯钨、钨-铼合金、钨-铼合金或者立方氮化硼 (PCBN) 材料。但是考虑到材料的成本、可加工性以及可取性, 研究中搅拌头材料为一种粉末冶金成形的钨-铼合金材料。

试验所使用的搅拌头见图 2 搅拌头的轴肩采用了同心环状结构, 搅拌针采用了三面锥形设计, 以便减少塑流在焊接过程中的过渡抗力。该搅拌头使用效果较好, 在焊接 2 m 以后, 搅拌头形状见图 3。



图 2 搅拌头原始形貌

Fig. 2 Original profile of pin tool

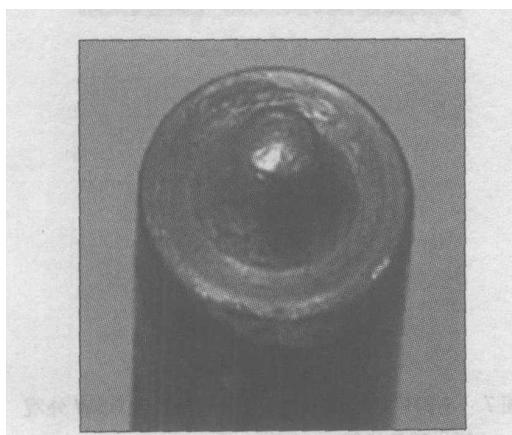


图 3 焊接 2 m 之后的搅拌头形貌

Fig. 3 Pin profile after 2 m web

图中可以看到搅拌头原始形面全部消失。仔细测量和观察发现, 搅拌头并未出现剧烈磨损, 而是完全被焊缝钛合金材料粘着和填充, 焊缝中也容易出现孔洞缺陷。这种现象与材料的超塑性、焊接工艺参数的选择等有关, 后续研究还需要对搅拌头进行改进, 如表面镀膜等。

4 焊接保护和冷却

搅拌摩擦焊焊接过程中搅拌头产生的热量, 一方面作用于被焊接材料, 另一方面通过搅拌头的夹持柄向焊接主轴扩散。尤其是高温烧结材料一般具有比普通金属材料高的热导率, 很容易由于热的积累导致焊接设备的损坏。同时钛合金材料在高温环境下具有很高的活性, 容易氧化和吸收有害气体。所以试验设计了如图 4 所示的焊接冷却和保护装置。

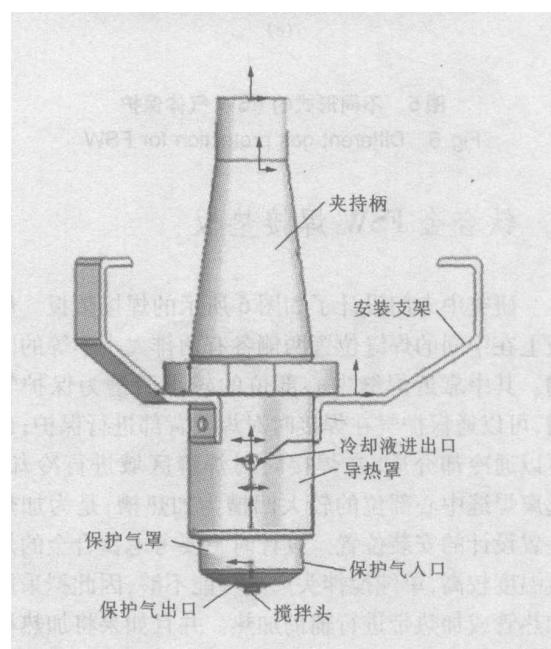


图 4 搅拌头的保护和冷却装置
Fig. 4 Protecting and cooling device for FSW pin tool

如图 4 所示, 该装置由五个组件组成, 即夹持柄、冷却罩、保护气罩、搅拌头以及悬挂件。其中夹持柄上开有冷却槽, 冷却槽与冷却罩上的冷却液进口和出口共同组成了完整的冷却通道, 以实现搅拌摩擦焊焊接过程中对搅拌头以及刀柄的动态冷却。与冷却罩相连的是保护气罩, 保护气罩可以实现搅拌头周围及焊接区域较全面的保护, 并且还可以对搅拌头和焊接材料具有一定的冷却作用。

研究还对不同形式的气体保护方式进行了对比,见图 5。图 5a 为气管直接保护,图 5b 为单面气罩保护,图 5c 为双面气罩保护,经过比较双面气罩保护效果明显,有利于钛合金的搅拌摩擦焊。

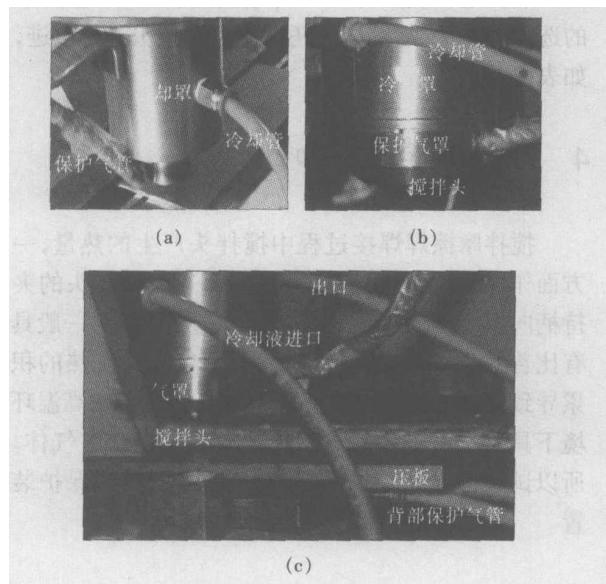


图 5 不同形式的 FSW 气体保护

Fig. 5 Different gas protection for FSW

5 钛合金 FSW 焊接垫板

研究中专门设计了如图 6 所示的焊接垫板。垫板上在中间的焊缝位置两侧各有两排大小不等的凹槽。其中靠近焊缝中心部位的较小凹槽为保护气槽,可以通保护气在焊接时对焊缝背部进行保护;也可以通冷却介质,在焊接时对焊缝区域进行冷却。远离焊缝中心部位的较大凹槽为加热槽,是为加热装置设计的安装位置。设计时主要考虑钛合金的焊接温度较高,单纯搅拌头产热可能不够,因此拟采用加热管或加热带进行辅助加热。并且如果将加热槽和冷却槽(保护气槽中如通冷却介质即变成了冷却槽)同时使用就有可能实现静态低应力无变形技术来控制焊接变形。但在试验过程中还没有考虑焊接变形控制的研究,所以对焊接垫板并没有采用特别的辅助加热及冷却手段,垫板凹槽仅仅用于实现 FSW 背面的气体保护。



图 6 钛合金 FSW 焊接垫板

Fig. 6 Anvil scheme for FS welding of Ti alloy

由于搅拌摩擦焊过程中焊接垫板承受的温度和载荷与搅拌头类似,所以针对钛合金的搅拌摩擦焊,焊接垫板也需要选用特殊的材料。试验开始时选用了 45 钢合金材料,但试验中发现焊接垫板下陷较严重,无法承受焊接载荷,后续焊接采用镍基高温合金材料作为垫板,成功完成焊接。

6 试验结果

6.1 钛合金 FSW 焊缝宏观形貌

图 7 所示为不同保护方式下, Ti 6Al 4V 钛合金搅拌摩擦焊焊缝的表面和背部外观表现。由图 7 可看出,仅采用气嘴对焊缝正面进行保护(图 7a),保护效果较差,焊缝正面和背面均被氧化变色,焊缝表面粗糙。保护气通过气罩对焊缝正面进行冷却时(图 7b),焊缝表面得到了良好保护,焊缝呈银白色,几乎没有氧化现象发生,但是焊缝背面没有采取保护措施,因氧化而变色。图 7c 显示对焊缝正面和背面同时进行保护,保护效果比较明显。

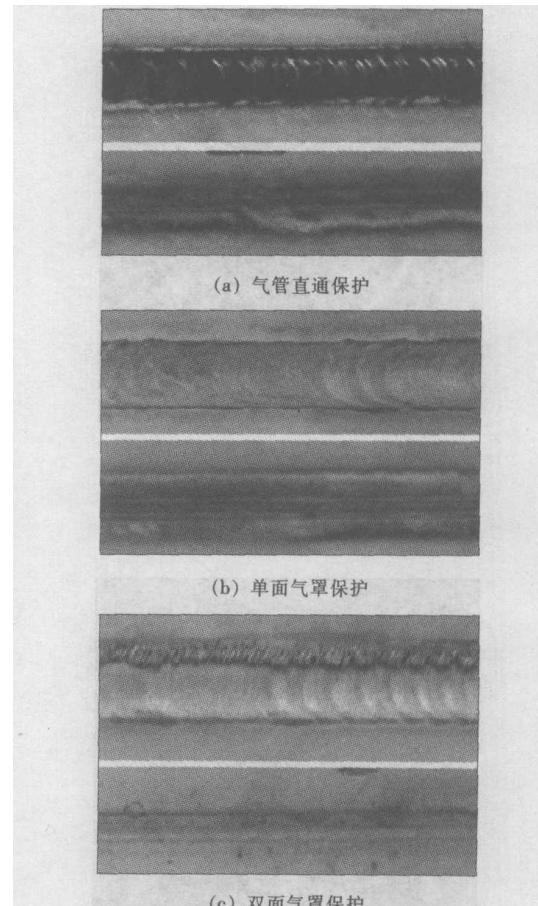


图 7 不同保护形式下 Ti 6Al 4V 钛合金 FSW 外观

氧化变色比较

Fig. 7 FS weld appearances of Ti alloy under different protection

试验中发现搅拌摩擦焊开始前, 最好预通气一定的时间, 然后才开始焊接的保护效果会更好, 必要时可以采取净化箱措施, 将钛合金零件放入相对密闭充满保护气的方箱内进行焊接, 效果也不错^[9]。另外, 焊接过程中由于搅拌头的保护和冷却装置中有冷却液循环流动, 冷却液的外漏会对高温条件下的搅拌头和钛合金造成污染, 这与铝合金的搅拌摩擦焊不同。

6.2 Ti6Al4V 钛合金 FSW 接头组织

在试件中间位置取样进行钛合金搅拌摩擦焊微观组织观察, 接头形貌及微观组织分别见图 8。图 8a 显示钛合金 FSW 接头形貌呈典型“碗”状结构, 上部为轴肩摩擦作用区(约 1.5 mm 厚); 下部为搅拌针作用区, 焊接接头整体形貌与搅拌针形状非常类似。并且整个接头形貌基本上沿焊缝中心对称, 焊缝前进侧与后退侧的形貌差别很小, 这一点与铝合金搅拌摩擦焊接头中通常观察到的非对称形貌有明显不同。原因是 FSW 工艺参数设定偏高, 接头热输入较多, 焊缝两侧的温度相对均匀, 焊缝区域的热塑化材料在该温度下(估计约 920 °C)达到了超塑性状态, 材料在焊接转移后得到均匀的扩散连接; 另一方面是由于钛合金材料的导热率较低, 搅拌头产生的热能量在搅拌头周围集聚, 导致材料厚度方向的温度梯度减小, 塑化材料更容易实现轴向运动产生材料均化结果。在钛合金接头中没有观察到像铝合金搅拌摩擦焊接头特有的“洋葱环状”结构, 这也说明以上判断是合理的。但后续试验还需要对钛合金搅拌摩擦焊温度场进行测量, 以便对钛合金搅拌摩擦焊行为做出更准确理解。

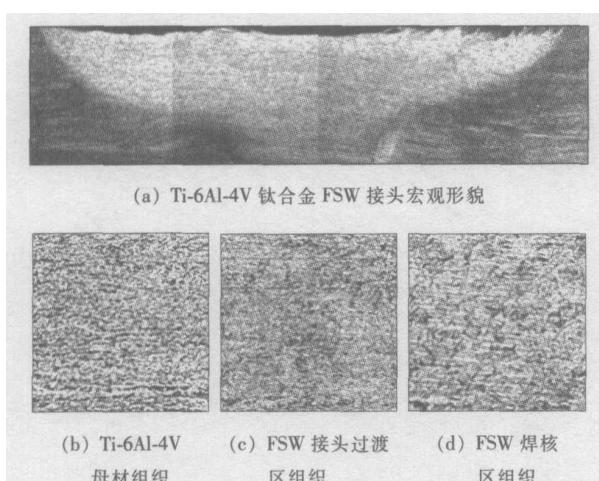


图 8 Ti6Al4V 搅拌摩擦焊微观组织结构(厚度 2.2 mm)

旋转速度为 950 r/m in 焊接速度 40 mm /m in

Fig. 8 Macrophotograph of Ti6Al4V FS Joint (thickness 2.2 mm 950 r/m in and 40mm /m in)

比较图 8b、图 8c、图 8d 中所示钛合金 FSW 接头的微观金相组织, 可以观察到 Ti6Al4V 钛合金母材组织比较均匀, 基体由等轴 α 相和肋条状 β 晶粒组成, 相间界面比较明显; FSW 焊核区 α 相增多, 并且有板状 α 相出现, 疑是焊接过程当温度超过 890 °C 时, β 相晶粒发生相变的结果。

6.3 Ti6Al4V 钛合金 FSW 力学性能

选取典型试样对 Ti6Al4V 钛合金搅拌摩擦焊接头力学性能进行了测试, 结果见表 4。

表 4 典型力学性能测试结果

Table 4 Mechanical properties of typical samples

编号	抗拉强度 σ_b MPa	接头强度系数 $\mu(\%)$	延伸率 $\delta(\%)$
4-1	823	92	1.65
4-2	818	91	1.68
5-1	898	100	2.12
5-2	743	83	2.20

Ti6Al4V 钛合金搅拌摩擦焊接头平均抗拉强度为 820 MPa, 平均延伸率达到 1.91%。其中 5-1、5-2 试样取自同一块试件, 但 5-2 试样测量结果分散度较大。研究中初步测试说明, Ti6Al4V 钛合金搅拌摩擦焊接头的强度可以达到母材强度(895 MPa)的 90% 以上, 但接头延伸率相对较低, FSW 工艺参数有待优化, 焊接过程保护有待完善。

7 结 论

(1) 通过钛合金的热物理性能分析和探索性试验结果表明, 钛合金搅拌摩擦焊的焊接性与铜合金类似, 难度大于铝合金、低于钢合金。

(2) 研究所设计的搅拌摩擦焊工艺垫板、冷却和焊缝正反面保护装置可以实现钛合金的搅拌摩擦焊接。

(3) 钨合金材料可以用来作为钛合金搅拌摩擦焊工具材料, 但容易粘着和形成焊缝孔洞。

(4) 初步试验表明钛合金搅拌摩擦焊接头强度可以达到母材强度 90% 以上, 但塑性有待提高。

致 谢:

作者得到了中国工程院关桥院士和英国焊接研究所 Mike Russell 专家的指导, 关桥院士还对论文的撰写提出了宝贵的意见, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] Friction stir welding [international patent App I S]. No PCT / GB92 02203 - 1991
- [2] 关 桥 栾国红. 搅拌摩擦焊发展现状和趋势 [A]. 第 11 届中国焊接年会论文集 [C]. 哈尔滨: 中国机械工程学会焊接学会, 2005.
- [3] Kristensen JK, Dalle Donne G, Ghidini T, et al. Properties of friction stir welded joints in the aluminum alloys 2024, 5083, 6082 / 6060 and 7075 [A]. The 5th international FSW symposium [C]. Metz, France, 2004
- [4] Luan Guohong, Wang Yajun, Ji Yajuan, et al. Friction stir welding of aluminum Cast alloy [A]. The 5th international FSW symposium [C], Metz, France, 2004
- [5] Espaiza J A, Davis W G, Murr L E. Microstructure property

studies in friction stir welded thick walled magnesium alloy AM 60 [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38: 941 - 952

- [6] Lars Cederqvist, Andrew R E. A weld that lasts for 10 000 years - FSW of copper canisters [A]. The 4th international FSW symposium [C]. Park City, Utah, USA, 2003(5): 14 - 16
- [7] American Society for Metals. Metals Handbook (Welding, Brazing and Soldering ASM) [M]. Ohio, 1983: 721 - 722.
- [8] Mary C Juhas, Viswanathan G B, Hanish LF, et al. Microstructural evolution in Ti alloy friction stir welds [A]. The 2nd international FSW symposium [C]. Gothenburg, Sweden, 2002.

作者简介: 栾国红, 男, 1969 年 4 月出生, 高级工程师。主要从事搅拌摩擦焊技术开发、设备设计和制造以及工程化应用等工作, 发表论文 20 余篇。

E-mail: luanguohong@cfsw.tj.cn

was low, changing rotation speed did not change tensile strength; with high welding speed, higher rotation speed was bad for tensile strength. When welding speed and rotation speed were both low, the mechanical properties of joints welded with non-threaded tool are better than those with threaded tool; increasing welding speed and rotation speed did not influence tensile strength.

Key words: FSW; aluminum; process parameter; mechanical properties of the joint

Spatial distribution features of weld defects in complex structure

SHI Duan-hu, GANG Tie, YUAN Yuan (State Key Lab of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p71 - 74

Abstract: X-ray real time imaging method was adopted to nondestructively test the complex structure welding parts of titanium alloys, the spatial position of tiny flaws was determined based on the line profile distribution of flaws position, and a formula which could calculate the burial depth of flaws was obtained. According to the characteristic of abnormal peak and abnormal slant-concave flaw, an automatic extraction algorithm of projection distance was presented individually. Experimental results showed that the above algorithm can figure out the projection distance very well and can determine the spatial distribution features of the flaws.

Key words: titanium alloy laser welding; ray detection; tiny flaw; line profile; spatial distribution features

Simulation of the influence of scan path on temperature field in the welding rapid prototyping

HU Rong-hua, ZHANG Hua, XU Jian-nings, WAN Ling-na (Mechanical and Electronic School, Nanchang University, Nanchang 330029, China). p75 - 78

Abstract: The part fabricated by welding rapid prototyping has excellent mechanics capability, so welding prototyping will be widely applied in the future. But welding is a processing of local high temperature, the distribution of temperature field will affect the quality and performance of welding part. In this paper, one-layer depositing of thin-wall part was studied. Numerical simulation was done by ANSYS, and the influences of scan path on temperature field and stress field were analyzed. This study will offer theoretical foundation to accurately choose the scan path in the welding rapid prototyping.

Key words: rapid prototyping based welding; scan path; temperature field; simulation

Distribution and control of residual stresses in FSW joints

Peng, LUAN Guo-hong, GUO De-lun, LI Ju (Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). p79 - 82

Abstract: Deformation of FSW structures welded with different parameters and tools was measured and analyzed in this paper. Results showed that smaller tool shoulder and lower welding energy would reduce the deformation. With optimized welding parameters, dynamic control of welding deformation (DC-LSND) which was usually used in TIG was introduced to FSW, and its effects on structure deformation and residual stresses were also studied.

Key words: friction stir welding, residual stress, dynamic control

Preliminary study on friction stir welding of titanium alloy

LUAN Guo-hong, CHAI Peng, SUN Chengbin (P. O. Box 340, China FSW Center, Beijing 100024, China). p83 - 88

Abstract: According to the analysis of the thermophysical characteristics of several conventional titanicium alloys, friction stir weldability of titanium alloy had been discussed in this paper. According to the features of Ti alloy, the pin tool, welding anvil and protecting device were designed and applied for the friction stir welding of Ti alloy. By observation of the weld appearances and microstructures of the joint, as well as the mechanical property testing, the results showed that Ti-6Al-4V alloy can be successfully welded by FSW, and tensile strength of the joint can reach up to 90% of the base metal. With optimization of the welding parameter, procedure, pin tool profile and material, the property and performance of FSW of Ti alloy shall be unproved.

Key words: friction stir welding; titanium alloy; weldability

Microstructures and phase composition of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti joint by EBW with focus on steel side

ZHANG Bing-gang, HE Jing-shan, WU Lin, FENG Ji-cai (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p89 - 92

Abstract: Electron beam welding experiments of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti dissimilar butt joint were carried out. The microstructures, elements distribution and phase composition of the joint were investigated by means of Optical Micrography, EPMA, EDX and XRD. The results showed that the microstructure of joint mostly consists of phase $\alpha + \epsilon$, and phase α was quantitatively more than phase ϵ . A few of Cu (ss. Fe) phase formed only in top weld near to copper side and any brittle phase was not generated in the whole weld. The microstructures and bonding