双轴肩搅拌摩擦焊接方法 研究进展

温 泉¹,李文亚¹,王非凡²,杨夏炜¹

(1. 西北工业大学陕西省摩擦焊工程技术重点实验室, 西安 710072; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

[摘要] 双轴肩搅拌摩擦作为搅拌摩擦焊的一个重要变体,通过增加下轴肩实现自支撑,使搅拌摩擦焊技术应用于 封闭结构(管或中空型材)的焊接。目前,双轴肩搅拌摩擦焊技术的研究与应用仍处于初始阶段,其相关理论研究尚 不成熟。针对双轴肩搅拌摩擦焊的研究现状,从双轴肩搅拌摩擦焊方法分类综述了其发展概况,为双轴肩搅拌摩擦 焊技术的发展和实际工程应用提供参考。

关键词:双轴肩搅拌摩擦焊;搅拌头;温度场;显微组织;力学性能 DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.12.016



西北工业大学材料学院博士研究 生,主要从事搅拌摩擦焊接过程中的冶 金行为与结合质量控制、温度场与应力 场数值模拟等研究。

搅 拌 摩 擦 焊(Friction Stir Welding, FSW)是英国焊接研究所 (TWI)于1991年发明的一项新型

16 航空制造技术·2017 年第 12 期

固相连接技术^[1-3]。在FSW 过程中, 旋转的搅拌头与焊件摩擦生热,将材 料加热到塑性状态(温度低于材料熔 点)。同时,塑性材料在搅拌头旋转 作用下发生迁移且受到轴肩的顶锻 作用,最终形成致密焊缝。与传统熔 化焊相比,FSW 具有无烟雾、弧光、 飞溅,无需填丝和保护气等优点,且 易于操作、自动化程度高、连接质量 好^[4]。尤其对铝合金的焊接而言, FSW 具有无可比拟的优势,进而在 航空航天、轨道车辆、舰船等领域得 到广泛应用。

尽管如此, FSW 仍存在一些弊端, 例如:(1) 难以实现复杂空间无 支撑曲面结构的焊接;(2) 接头厚 度方向易产生组织不均匀性;(3) 接 头根部易产生未焊透缺陷。双轴肩 搅拌摩擦焊(Bobbin Tool FSW, BT-FSW)是 FSW 的一个重要变体, 其 下轴肩取代了 FSW 的背部垫板, 使 FSW 技术能够成功应用于中空及 空间无支持结构的焊接^[5-6]。此外, BT-FSW 降低了接头厚度方向温度 梯度,减小了接头组织不均匀性,彻 底避免了根部缺陷的发生。鉴于此, BT-FSW 有望在航空航天和高速列 车等领域具有广阔的应用前景^[7]。 周利等^[8]曾对 BT-FSW 技术研究现 状进行了综述。在此基础上,本文结 合近几年 BT-FSW 技术的研究新发 展,对不同 BT-FSW 焊接方法的研 究进展进行了总结。

固定间隙式 BT_FSW

固定间隙式是最简单的一种方 式,其搅拌头(见图1)采用一体式设 计,对焊接设备要求低。因此,固定 间隙式 BT-FSW 方法的研究也最广 泛。张忠科等^[9]、Thomas 等^[10]、陈书 锦等^[11]均采用固定间隙式搅拌头焊 接了不同种类的铝合金,获得了正面 及背面均成形良好的接头。

目前,固定间隙式搅拌头^[12]的 研究进展主要集中在搅拌针形貌的 优化设计。Sued 等^[13]研究了6种不 同搅拌针形状对 4mm 厚 6082-T6 铝 合金接头形貌的影响(见图 2)。结 果发现,四平面圆柱和三平面圆柱螺 纹搅拌头所焊接头的表面成形较好, 无任何缺陷。力学性能对比发现,四 平面圆柱搅拌头所焊接头承受的拉 伸载荷和拉伸强度最大。

对 BT-FSW 而言, 热量由旋转的上下轴肩及搅拌针与焊件摩擦产生,其分布特征直接决定了界面金属流动、焊缝组织演变、焊接缺陷等冶金行为,进而影响整个接头的力学性能和残余应力分布^[14-15]。最近,安丽等^[16]研究了固定间隙式 BT-FSW 温度场分布规律。发现上下轴肩与焊件接触面处温度最高,高温区以焊缝为长轴呈椭圆形分布,且搅拌头前方温度变化比后方快,该分布特征与常规 FSW 相似。BT-FSW 厚度方向的温度分布与常规 FSW 差别较大,如



图1 固定间隙式双轴肩搅拌头 Fig.1 Fixed gap bobbin tool



Fig.2 Probes with different characteristics

图 3 所示。BT-FSW 温度场关于板 厚中心呈对称分布,上下表面的高温 区比中间层高温区宽。这是因为焊 接过程中轴肩与焊件摩擦产热大于 搅拌针产热。李敬勇等^[17]发现接头 后退侧温度均显著高于前进侧。同 时由于采用螺纹型搅拌头促使塑性 材料向下轴肩流动,导致下轴肩焊件 温度较上轴肩焊件的温度高。

BT-FSW 过程涉及温度与力两 种变量之间的相互作用,属于非线性 热力耦合问题。和子程序相比,热力 耦合模型更能准确模拟其温度分布 规律。王非凡^[18]采用欧拉 – 拉格朗 日热力耦合模型研究了焊接过程中 搅拌针前方、中间和后方位置的温度 分布规律(见图 4)。从图 4 中可知, 搅拌头后方温度高于前方和中间位 置。在搅拌头作用区内,焊接温度 接近 469 °C (0.93 T_m),比常规 FSW (0.8~0.9 T_m)热输入略高。对比前进 侧(AS)和后退侧(RS)温度曲线发 现,距离焊缝中心线相同位置处,后 退侧温度稍高于前进侧。

众所周知,塑性材料的流动行为 对接头形貌有着重要影响。目前关 于固定间隙式 BT-FSW 材料流动行 为的相关研究非常少,且主要涉及水 平和垂直两方向材料流动行为。

胡晓晴^[19]研究了水平方向上材 料流动行为,得到了塑性材料流动二 维模型迹线随时间变化规律(见图 5)。可以看出,随着搅拌头旋转,示 踪材料被撕裂,在前进侧示踪材料碎 片随着旋转前移运动,被甩到轴肩后 方;在后退侧示踪材料碎片被带动 着继续运动,随着搅拌头前移,最终 在前进侧后部停留下来。总体而言, 水平方向上材料流动行为与 FSW 相 似。

Hilgert 等^[20] 建立了 BT-FSW 中 流体动力学模型,并预测了接头厚度 方向材料流动速度分布规律,如图 6 所示。可以看出模拟预测与试验接 头形貌吻合度较高。在上下轴肩外 缘处材料流动速度最大,向焊缝中心 处流动速度逐渐减小。厚度方向材 料流动速度云图呈对称分布。

此外,胡晓晴^[19]根据示踪材料 流动特征也建立了BT-FSW厚度方 向塑性材料运动模型,如图7所示。 各示踪材料在搅拌头旋转摩擦作用



Fig.4 Temperature distribution of weld center line

下,沿搅拌针螺纹线旋向与搅拌头一 起做旋转运动,且呈现从焊缝上下表 面向焊缝中心流动的趋势。焊缝上 下表面处材料与搅拌头接触时间长 于其他位置,因此在搅拌头作用下获 得的能量最高,脱离搅拌头后,其运 动的位移越大(如示踪小球6和7)。 同时可以看出,厚度方向材料流动呈 对称分布趋势。

王非凡^{118]}采用热力耦合模型分 析了水平 - 垂直两方向材料流动行 为(见图 8)。可以看出,塑性金属材 料在焊缝上下表面处材料流动速度 最大,这是因为轴肩外缘具有更高的 切向线速度。焊缝中间厚度区受轴 肩影响较弱,材料流动速度下降。最 终,材料流动特征在空间呈上下对称 的"沙漏"形,这与接头截面形貌一 致。在前进侧搅拌针后方工件中心 厚度位置材料流动速度最小,形成流 动弱区,该区的形成对接头成形会产 生重要影响。

温度场分布特征及材料流动行 为直接影响了接头组织形态,进而决 定了接头性能。Wang等^[21]分析了 AA2198 铝合金接头组织特征。发



图5 二维模型迹线随时间变化 Fig.5 Pathline variations of the 2D model with time



(a)后退侧接头形貌 (b)速度云图

图6 预测剪切层与组织对比 Fig.6 Comparison between a predicted shear layer (red colour indicates high velocity) and the microstructure

18 航空制造技术·2017年第12期

现接头由搅拌区(SZ)、热力影响区 (TMAZ)、热影响区(HAZ)和母材 (BM)构成,如图9所示。沙漏形的 温度场与流场使接头搅拌区形貌呈 现沙漏状。在搅拌头的强烈搅拌和 焊接热循环双重作用下,搅拌区发生 了动态再结晶,从而形成细小的等轴 晶。热力影响区位于搅拌针边缘,受 机械搅拌作用较弱,发生不完全动态 再结晶,其主要由弯曲拉长的板条状 晶粒组成。前进侧热力影响区与搅

拌区的过渡界面较后退侧更加清晰。

BT-FSW 的旋转速度、焊接速度 和上下轴肩的下压量等焊接参数对 接头的成形有明显影响。Zhou 等^[22] 研究了转速对 5mm 厚的 6061-T6 铝 合金接头形貌的影响(见图 10)。发 现在低转速下,由于材料塑化程度不 够,材料流动性降低,容易出现孔洞 缺陷。缺陷均位于前进侧中间位置, 其正好对应了图 8 (b)中材料流动 弱区的位置。增加旋转速度有利于



得到无缺陷的接头。

Zhang 等^[23]研究了6mm厚的 2A14-T6 铝合金接头显微组织特征, 发现焊核区(WNZ)上层晶粒尺寸小 于中层和下层,如图11所示。分析 认为该现象主要是由两方面散热条 件差异导致的:(1)焊缝上表面与空 气对流散热作用优于焊缝下表面(焊 缝背部少部分处于悬空);(2)搅拌 头与钢制主轴相连,利于上表面散 热。增强散热能力减小了晶粒在高 温下的停留时间,有利于得到较小尺 寸的晶粒。增加焊接速度,减小单位 长度内的热输入,因此WNZ上下层 等轴晶尺寸均减小。

为探究厚度方向晶粒尺寸的变 化对接头力学性能的影响,张会杰 等^[24]分析了接头厚度方向的显微硬 度变化(见图 12)。发现接头硬度分 布趋势与 FSW 相同,均为"W"形。 不同的是 BT-FSW 接头的各层硬度 分布没有明显的差别,说明各层力学 性能相当。因此, BT-FSW 能够提升 接头性能均匀性。在赵衍华等^[25]、 董继红等^[26]的研究中也发现了类似 的现象。

张健等^[27]对比研究了6mm厚 2219-T4铝合金BT-FSW与FSW 接头性能。结果表明BT-FSW接 头的显微硬度和力学性能普遍低于 FSW接头,其抗拉强度为FSW接头 的90%。分析认为,上、下轴肩同时 旋转摩擦产热,热输入较高,接头软 化程度更严重,进而降低了接头强 度。

Lafly 等^[28]也对比分析了 6mm 厚 6056 铝合金不同热处理状态下常 规 FSW 和 BT-FSW 接头性能。在 T4 状态下,常规 FSW 和 BT-FSW 接头抗拉强度分别为 308.5MPa 和 231.5MPa;在T6 状态下,常规 FSW 和 BT-FSW 接头抗拉强度分别为 300.5MPa 和 248.5MPa;在T8 状态 下,常规 FSW 和 BT-FSW 接头抗拉 强度分别为 298.0MPa 和 272.5MPa。



可以看出, BT-FSW 接头性能均小 于常规 FSW, 最高达到其 91.44%。 与以上研究相反, 一些研究者发现 BT-FSW 晶粒尺寸和力学性能更优。 Esmaily 等^[29] 对比分析了 10mm 厚 AA6005-T6 铝合金在 FSW 和 BT-FSW 条件下的热循环数据。在工艺 参数相同情况下, BT-FSW 和 FSW 的温度峰值相差较小, 但 BT-FSW 所消耗的能量明显小于 FSW。在两 种焊接条件下, BT-FSW 接头的极限 拉伸强度和屈服强度均优于 FSW 接 头(见图 13)。

分析认为,对薄板而言,常规 FSW 接头厚度方向组织不均匀性现 象不明显,且 BT-FSW 热输入较大, 使得接头软化程度严重。两者共同 导致薄板 BT-FSW 接头的力学性能 差于 FSW 接头。若对厚板进行 FSW 焊接,沿接头厚度方向易产生组织不 均匀性,受力后易造成应力集中,进 而影响接头质量。而厚板 BT-FSW 接头较薄板而言,接头软化程度弱 化,且 BT-FSW 接头厚度方向组织均 匀性较好。在两者共同作用下,使得 厚板 BT-FSW 接头的性能优于 FSW 接头。

一般来说,在焊接过程中搅拌头 与工件受热均会发生一定的热膨胀, 工件厚度可能发生不均匀变形,致使 搅拌头与工件之间的接触条件发生 改变。而固定间隙式搅拌头无法对 其进行调节,从而导致焊缝表面或者 内部出现缺陷,甚至造成搅拌工具失 效。

可调间隙式 BT-FSW

鉴于固定间隙式搅拌头的缺点, Huang等^[30-33]设计了可适应工件厚 度小范围变化的搅拌头(上轴肩内凹 下轴肩外凸)。使用该搅拌头实现了 5mm厚6082-T6和6005A铝合金的 焊接,接头成形质量较好。但该搅拌 头不适于厚度变化较大工件的焊接, 导致其应用范围相对较窄。

20 航空制造技术·2017 年第 12 期

针对此问题,TWI发明了一种新 采用位移传感器和压力传感器来随型"可调间隙式"搅拌头。该搅拌头 时调节轴肩间隙以消除热膨胀引起



的工件厚度变化(见图 14)^[34]。但由 于其控制较复杂,关于该技术的详细 报道极少。

直到最近,王非凡^[18]对可调间 隙式 BT-FSW 的控制方式进行了报 道,其示意图如图 15 所示。搅拌头 上轴肩与搅拌针分离,而下轴肩与搅 拌针固定在一起。采用两个独立驱 动分别对上轴肩和搅拌针进行驱动。 在上下轴肩处均安装了位移传感器 和压力传感器。为了验证该系统的 稳定性,研究者对 2mm 厚 AZ31 镁合 金进行了焊接。结果发现,焊缝表面 光滑,仅有少量飞边和减薄量,无孔 洞缺陷出现。显然,压力与位移协同 控制焊接方法具有良好焊接稳定性。



图16 逆向旋转式BT-FSW示意图 Fig.16 Schematic view of counterrotating BT-FSW







Fig.18 Bobbin tool with a static upper shoulder

与常规 FSW 相比,固定间隙和 可调间隙双轴肩搅拌头不仅要承受 高温条件下的扭转和弯曲等载荷,还 要承受下轴肩旋转所产生的扭矩。 因此搅拌头更容易发生断裂,进而限 制了 BT-FSW 技术的发展。

逆向旋转式 BT-FSW

为了降低焊接过程中搅拌头承 受的总扭矩,提高搅拌针的使用寿 命。美国 NASA 马歇尔空间飞行中 心曾提出逆向 BT-FSW 接方法^[35], 其特点是上、下两个轴肩的转速相 同,但方向相反,驱动方式如图 16 所 示。

基于逆向旋转 BT-FSW 的优点, Chen 等^[36]对比研究了常规 FSW、 上下轴肩同向旋转(CCW)和上下 轴肩逆向旋转(CW)条件下 4mm 厚 AZ31B 接头的力学性能,如图 17 所 示。可以看出,上下轴肩同向旋转 所得接头的力学性能最好,其极限 拉伸强度和延伸率可达到 244MPa 和 27.7%;上下轴肩逆向旋转所得接 头的极限拉伸强度和延伸率可达到 235MPa 和 24%;两种条件下的性能 均明显优于常规 FSW 接头性能。

轴肩静止式 BT-FSW

为了进一步减小搅拌针承受的 扭矩和以较小的热输入完成焊接。 德国 HZG 中心 Dos Santos 等^[37]发明 了轴肩静止式 BT-FSW。依据轴肩 静止方式可将其分为单轴肩静止与 双轴肩静止。

最近, Goebel 等^[38] 采用上轴肩 静止的双轴肩搅拌头(见图 18)对 3mm 厚的 AA2198-T851 铝合金进行 了焊接,并对接头形貌和力学性能进 行了分析。结果发现,接头上下表面 成形较好,上表面无弧纹缺陷,接头 横截面形貌呈明显非对称分布(见图 19)。力学性能测试结果发现,在较 大轴肩压力作用下,采用相同转速, 静止 BT-FSW 接头的拉伸强度优于

2017 年第 12 期・航空制造技术 21



(b)上轴肩静止的 BT-FSW 图19 接头宏观形貌 Fig.19 Macrographs of BT-FSW joints

常规 BT-FSW 接头。

结束语

BT-FSW与常规FSW具有相同 的工作原理,能够实现自支撑,成功 用于管或中空型材的焊接,而且能够 解决常规FSW出现未焊透缺陷的隐 患。总体而言,薄板BT-FSW接头的 抗拉强度低于常规FSW接头。少量 文献报道厚板BT-FSW接头的抗拉 强度要优于常规FSW。由于固定间 隙式和可调间隙式BT-FSW不能够 很好发挥轴肩对于温度场和流场的 有效调控。因此,逆向旋转BT-FSW 和静止BT-FSW将成为先进制造领 域的关键技术。

参考文献

[1] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50(1): 1–78.

[2] CAM G. Friction stir welded structural materials: beyond Al-alloys [J]. International Materials Reviews, 2011, 56(1): 1–48.

[3] 吴安如,夏长清,王少武,等.搅拌摩 擦焊接技术的研究现状及其展望[J].材料导 报,2005,19(4):85-88.

WU Anru, XIA Changqing, WANG Shaowu, et al. Process and new development of friction stir welding[J]. Materials Review, 2005, 19(4): 85–88.

[4] 任淑荣,马宗义,陈礼清.搅拌摩擦 焊接及其加工研究现状与展望[J].材料导报, 2007, 21(1): 86–92.

REN Shurong, MA Zongyi, CHEN Liqing. Research status and prospect of friction stir welding and friction stir processing[J]. Materials Review, 2007, 21(1): 86–92.

[5] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Improvements relating to friction welding: EP19940120385[P]. 1995–07– 05.

[6] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction Stir Butt Welding: US5460317 [P]. 1995–10–24.

[7] FRATINI L, ZUCCARELLO B. An analysis of through-thickness residual stresses in aluminium FSW butt joints[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006, 46(6): 611–619.

[8] 周利,刘朝磊,王计,等.双轴肩搅 拌摩擦焊技术研究现状[J].焊接,2015(6):14-18.

ZHOU Li, LIU Chaolei, WANG Ji, et al. Research progress in self-reacting friction stir welding technology[J]. Welding & Joining, 2015(6): 14-18.

[9] 张忠科,廖蕴博,王希靖,等.LF21 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊组织与性能[J].电 焊机,2016,46(11):26-30.

ZHANG Zhongke, LIAO Yunbo, WANG Xijing, et al. Microstructure and property of bobbin tools friction stir welding for LF21 aluminum sheet[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46 (11): 26-30.

[10] THOMAS W M, WIESNER C S, MARKS D J, et al. Conventional and bobbin friction stir welding of 12% chromium alloy steel using composite refractory tool materials[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(3): 247–253.

[11] 陈书锦,曹福俊,刘彬,等.6061 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接扭矩特征 [J]. 焊 接学报,2016,37(8):50-54.

CHEN Shujin, CAO Fujun, LIU Bin, et al. Torque feature in bobbin tool FSW of 6061 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(8): 50–54.

[12] TWI. Assessment of bobbin friction stir welding for the Joining of aluminium alloys[EB/OL]. (2008-09). http://www.twi-global. com/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=5540 2&type=full&servicetype=Attachment.

[13] SUED M K, PONS D, LAVROFF J, et al. Design features for bobbin friction stir welding tools: Development of a conceptual model linking the underlying physics to the production process[J]. Materials and Design, 2014, 54(2): 632–643.

[14] ARORA A, NANDAN R, REYNOLDS A P, et al. Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments[J]. Scripta Materialia, 2009, 60(1): 13–16.

[15] ARORA A, DE A, DEBROY T. Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter[J]. Scripta Materialia, 2011, 64(1): 9–12.

[16] 安丽,钱炜,邹青峰,等.2A14-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接温度场研究[J]. 热加工工艺,2015,44(5):225-229.

AN Li, QIAN Wei, ZOU Qingfeng, et al. Research of temperature field in bobbin tool friction stir welding for 2A14–T6 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(5): 225–229.

[17] 李敬勇,周小平,董春林,等. 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板温度场研 究[J]. 航空材料学报,2013,33(5):36-40.

LI Jingyong, ZHOU Xiaoping, DONG Chunlin, et al. Temperature fields in 6082 aluminum alloy samples bobbin-tool friction stir welded[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(5): 36-40.

[18] 王非凡. Al-Li 合金双轴肩搅拌摩 擦焊成形机制及性能研究 [D]. 西安:西北工 业大学, 2016.

WANG Feifan. Investigation on joint formation mechanism and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al-Li alloys[D]. Xi' an: Northwestern Polytechnical University, 2016.

[19] 胡晓晴.基于示踪材料的双轴肩搅 拌摩擦焊流场研究[D].镇江:江苏科技大学, 2015.

FFATURE

HU Xiaoqing. Research on the flow field of bobbin tool friction stir welding based on tracer material[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.

[20] HILGERT J, DOS SANTOS J F, HUBER N. Shear layer modelling for bobbin tool friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(6): 454–459.

[21] WANG F F, LI W Y, SHEN J, et al. Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al-Li alloy[J]. Materials and Design, 2015, 86: 933-940.

[22] ZHOU L, LI G H, LIU C L, et al. Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded Al-Mg-Si alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89 (9): 3509–3516.

[23] ZHANG H J, WANG M, ZHANG X, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded 2A14–T6 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2015, 65: 559–566.

[24] 张会杰,王敏,张骁,等.2A14-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊特征及接头组织性 能分析[J].焊接学报,2015,36(12):65-68.

ZHANG Huijie, WANG Min, ZHANG Xiao, et al. Characteristics and joint microstructure– property analysis of bobbin tool friction stir welding of 2A14–T6 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(12): 65–68.

[25] 赵衍华,李延民,郝云飞,等. 2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性 能分析 [J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(6): 70-75.

ZHAO Yanhua, LI Yanmin, HAO Yunfei,

et al. Microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welding of 2219 aluminiumalloy[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(6): 70-75.

[26] 董继红,董春林,孟强,等. 铝合金 浮动式双轴肩 FSW 接头组织性能分析 [J]. 焊 接学报, 2013, 34 (10): 43-46.

DONG Jihong, DONG Chunlin, MENG Qiang, et al. Microstructure and mechanical properties of floating bobbin friction stir welded joints in aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(10): 43–46.

[27] 张健,李光,李从卿,等.2219-T4 铝合金双轴肩 FSW 与常规 FSW 接头性能对 比研究 [J]. 焊接, 2008(11): 50-52.

ZHANG Jian, LI Guang, LI Congqing, et al. Comparison of joint properties of AA2219–T4 between conventional FSW and bobbin-tool FSW[J]. Welding & Joining, 2008(11): 50–52.

[28] LAFLY A L, ALLÉHAUX D, MARIE F, et al. Microstructure and mechanical properties of the aluminiumalloy 6056 welded by friction stir welding techniques[J]. Welding in the World, 2006, 50(11): 98–106.

[29] ESMAILY M, MORTAZAVI N, OSIKOWICZ W, et al. Bobbin and conventional friction stir welding of thick extruded AA6005–T6 profiles[J]. Materials and Design, 2016, 108: 114–125.

[30] HUANG Y X, WAN L, LV S X, et al. Novel design of tool for joining hollow extrusion by friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(3): 239–246.

[31] WAN L, HUANG Y X, LV Z L, et al. Effect of self-support friction stir welding on microstructure and microhardness of 6082-T6 aluminum alloy joint[J]. Materials and Design, 2014, 55:197-203.

[32] WAN L, HUANG Y X, LV Y, et al. Friction stir welding of aluminium hollow extrusion: weld formation and mechanical properties[J]. Materials Science and Technology, 2015, 31(2): 1433-1442.

稿

ŧ

[33] WAN L, HUANG Y X, GUO W Q, et al. Mechanical properties and microstructure of 6082–T6 aluminum alloy joints by self-support friction stir welding[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2014, 30(12): 1243– 1250.

[34] CARTER R, LAWLESS K. Gimballedshoulders for friction stirwelding[EB/ OL]. (2008-01-01). http://www.techbriefs.com/ component/content/article/ntb/tech-briefs/ manufacturing-and-prototyping/2553.

[35] NUNES A CJ. Counterrotatingshoulder mechanism for friction stirwelding[EB/ OL](2007-04-01). http://www.techbriefs.com/ component/content/article/1475.

[36] CHEN J, FUJII H, SUN Y F, et al. Fine grained Mg-3Al-1Zn alloy with randomized texture in the double-sided friction stir welded joints[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 580(37): 83-91.

[37] DOS SANTOS J F, HILGERT J. Apparatus for friction stir welding: US20120248174A1[P]. 2012-09-22.

[38] GOEBEL J, REIMANN M, NORMAN A, et al. Semi-stationary shoulder bobbin tool friction stir welding of AA2198–T851[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 37–45.

通讯作者:李文亚,博士,教授,博士生导师,研 究方向为摩擦焊接技术与热喷涂技术,E-mail: liwy@nwpu.edu.cn。

Research Progress on Bobbin Tool Friction Stir Welding

WEN Quan¹, LI Wenya¹, WANG Feifan², YANG Xiawei¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] Bobbin tool friction stir welding (BT–FSW) is a significant variant of friction stir welding (FSW). The self-support function is achieved by the lower shoulder of bobbin tool, making FSW easier to join closed structures such as pipes or hollow extrusions. At present, the research and application of BT–FSW are still in the initial stage, and studies on it are limited. The state-of-the-art of BT–FSW is reviewed based on the realized welding methods. This review provides reference for the further development and engineering applications of BT–FSW.

Keywords: Bobbin tool friction stir welding; Stir tool; Temperature field; Microstructure; Mechanical property

(责编 玲犀)

2017 年第 12 期·航空制造技术 23