

异种铝合金环形构件的搅拌摩擦焊接工艺

马建波 周庆 刘西伟 马帅 王凯

(首都航天机械有限公司,北京 100076)

文 摘 为实现异种铝合金环形构件的高精度装配与连接,文中设计一种卧式串联型轴向移动转径向伸缩的搅拌摩擦焊接工装。结果表明,采用此工装成功实现铝铜系/铝镁系异种铝合金环形构件的高精度装配与高质量焊接,接头内部质量达到了 I 级接头要求,接头的抗拉强度高于 245 MPa,延伸率高于 16%,且所有接头均断裂在铝镁系铝合金母材一侧,说明该接头的整体性能要优于铝镁系铝合金母材性能,解决了铝铜系/铝镁系异种铝合金熔焊易出现焊接裂纹的工程难题。

关键词 异种铝合金环形构件,卧式串联型工装机构,楔盘结构,运动时序,搅拌摩擦焊

中图分类号:TH16

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.05.012

Friction Stir Welding Technology for Different Aluminum Alloy Ring Parts

MA Jianbo ZHOU Qing LIU Xiwei MA Shuai WANG Kai

(Capital Aerospace Machinery Company Limited, Beijing 100076)

Abstract In order to assemble and connect the dissimilar aluminum alloy ring parts accurately, a horizontal friction stir welding tool which can change axial movement into radial expansion was designed. The results show that the Al-Cu/Al-Mg dissimilar aluminum alloy ring parts can be assembled and connected with high precision and high quality. The internal quality of the joint meets the requirement of grade I. The tensile strength and elongation of the joint are higher than 245 MPa and 16%, respectively. Besides, all the joints are broken on the side of Al-Mg based aluminum alloy. It can be concluded that the overall performance of the joint is better than that of Al-Mg based aluminum alloy. Finally, the engineering problem of welding cracks during the Al-Cu/Al-Mg dissimilar aluminum alloy welding is solved.

Key words Dissimilar aluminium alloy ring members, Horizontal series tool mechanism, Wedge structure, sequence of movement, Friction stir welding

0 引言

贮箱设计为实现贮箱内隧道管与贮箱箱底连接面的高密封性要求,将机械螺接方式改为焊接方式(图 1)。贮箱本体材料为铝铜系铝合金,箱内隧道管为铝镁系铝合金,但是铝铜系与铝镁系异种铝合金采用传统熔化焊接时易产生热裂纹等焊接缺陷,因此文中拟制造一种异种材料过渡接头(图 2),进而实现过渡接头与两侧结构件的同种材料连接。

采用搅拌摩擦焊这种固相连接技术,得到可靠、致密的固相焊缝^[1-4],可以实现铝、镁、铜、钛等多种合金材料的焊接,接头外观平整、性能优良,并且特别

适合于异种材料的连接。但是搅拌摩擦焊接的焊前装配质量要求高,需要特定工装夹具来保证焊接前装配质量,以及支撑焊接过程中的轴向顶锻力^[5-7]。过渡接头的结构见图 2,其中法兰盘材料为铝铜系铝合金,圆筒材料为铝镁系铝合金,焊接区厚度为 5 mm,基于过渡接头的小直径、强刚性特点,文中研制了一种基于卧式串联形式的“将轴向螺旋运动转换为轴向运动和径向运动”的内撑机构,进行了异种铝合金搅拌摩擦焊接工艺研究,实现了异种铝合金部件对接环缝的高精度装配及焊接,为贮箱箱内隧道管与箱体的连接方式改为焊接提供了坚实的技术基础。

收稿日期:2017-08-14

第一作者简介:马建波,1986 年出生,硕士,主要从事搅拌摩擦焊接工艺及装备研究。E-mail:544836402@qq.com

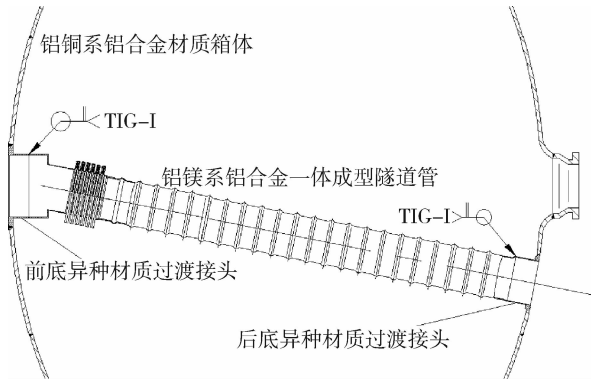


图1 贮箱内部隧道管与贮箱连接示意图
Fig.1 Diagram of rocket tank internal structure

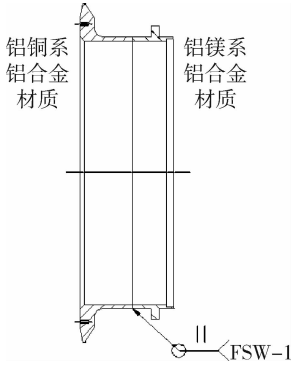


图2 过渡接头简图
Fig.2 A simplified transition joint

1 总体结构方案设计

为达到异种材料圆筒型结构件的搅拌摩擦焊接装配要求,鉴于结构件装配操作空间的开敞性要求,需将轴向移动转换为径向伸缩运动形式的内支撑机构,现采用一种基于卧式串联轴向平移转径向伸缩运动的机构构型,实现零件的搅拌摩擦焊接装配工装的机构传动要求^[8-9]。

基于卧式串联轴向平移转径向伸缩机构的构型,为能够较好的实现搅拌摩擦焊的焊前装配,该机构主要由伺服电机驱动机构,轴向压盘机构,盘式螺旋解耦机构、径向撑紧机构和轴向支撑机构组成,其主要工作目标为,将异种材料圆筒型结构件(图3中被焊工件1、2)实现对接面的对中对接,能够实现焊缝背部的径向撑紧和轴向压紧作用。其机构传动原理如图3所示,其中图中各符号如表1所示。

原动机旋转带动整套机构的旋转运动,旋转副 R_1 及 P_4 实现与基体的连接支撑;手动旋转螺旋副 H_1, H_2 的旋转运动传递给旋转副 R_2 的外层构件, H_1 的轴向运动传递给旋转副 R_2 的内层构件,该内层构件通过移动副 P_1 的导向作用实现楔盘机构平行移动,楔盘机构的平移带动 P_3 在楔盘斜面上移动,由于 P_2 将撑紧机构导向,因此撑紧机构将楔盘的斜面运

动转化为了撑紧机构的径向伸缩运动,从而将被焊接工件径向撑紧,为更好的实现被焊工件的轴向夹紧,通过机架本体和螺旋副 H_2 带动的轴向压紧机构的相对夹紧完成焊接件的对接夹紧。

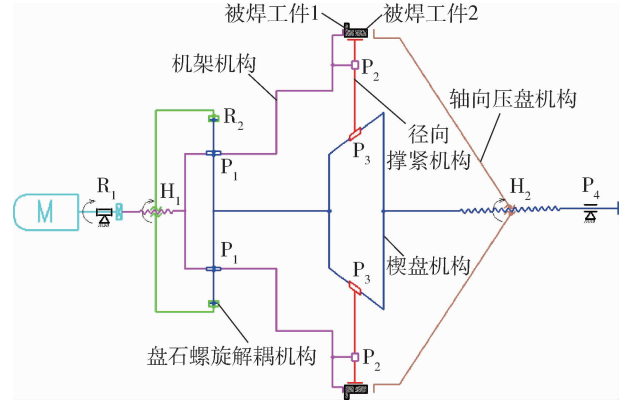


图3 机构传动原理图
Fig.3 Schematic diagram of mechanism transmission

表1 机构原理符号

Tab.1 Mechanism symbol

符号	名称	简图	作用
M	原动机		提供机构驱动力
R_1	转动副		提供回转轴支撑固定
H_1, H_2	螺旋副		提供螺旋运动,径向进给和周向旋转耦合
R_2	转动副		实现 H_1 的径向进给与周向旋转运动解耦
P_1, P_2, P_3	移动副		实现平移
P_4	移动副		实现旋转和平移滑动

该机构装置能够较好的保证两被焊接零件焊接区的间隙,并且能够撑紧零件保证焊缝不存在错缝,在撑紧状态下,能够抵抗焊接时搅拌头的顶/锻压力,焊接完毕后该装置能够收缩使被焊接工件取下,其工装的具体结构如图4所示。

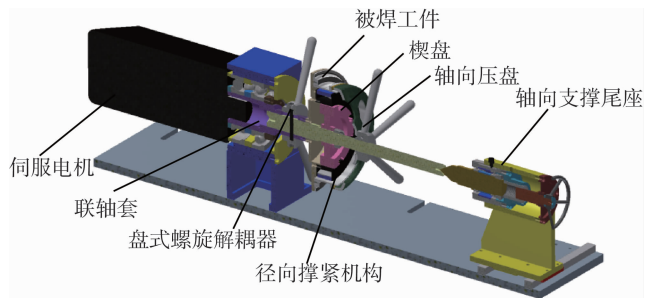


图4 工装模型剖视示意图
Fig.4 Cutaway view of the tool model

2 关键部件机构分析

撑紧装置的径向撑紧机构为执行元件,实现焊接区的撑紧,该撑紧机构采用的为8块弧形撑块的撑紧,该撑紧机构采用的为8块弧形撑块的撑紧
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018年 第5期

结构形式,该结构形式能够实现撑块间的有序运动而不发生构件间发生干涉和运动卡滞的现象发生,结构如图5所示。

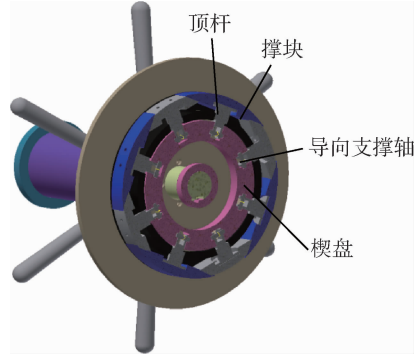


图5 撑紧装置模型结构图
Fig. 5 Schematic diagram of the bracing device

2.1 撑紧装置的运动分析

建立图6所示的运动结构示意图,弧块共计8块,令弧块组成的圆的圆心为原点O,OA为弧块A的中心对称线,OB为弧块B的中心对称线,弧块A及B的运动方向分别沿着OA及OB的中心对称线方向,过两撑块的接触面的线MM,垂直于线MM的公法线NN,两线相交于O'点,OA与OB之间的夹角为 α ,线MM与OA之间的夹角为G, v_{OA} 及 v_{OB} 分别为撑块i沿OA、OB方向的速度,将两速度分别合成至公法线NN方向后为 v_{AK} 和 v_{BK} 。

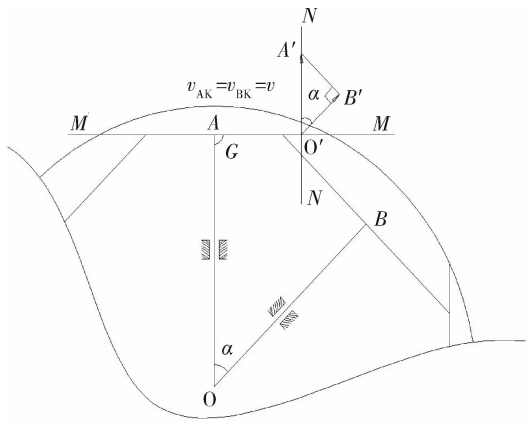


图6 撑块运动示意图
Fig. 6 Schematic diagram of block movement

若要实现径向撑紧装置的有序伸缩,需要满足撑块伸缩速度在接触面公法线方向的速度相等,即 $v_{AK}=v_{BK}=v$ 。当俩速度相等后,接触面之间的相对位置恒定,实现俩构件之间不会发生干涉和运动卡滞的现象。

由 $G=90^\circ$,得 $v_{AK}=v_{OA}=v$, $v_{BK}=v_{OB}/\cos\alpha$,该机构由八块撑块组成一个圆,并分为内外撑块,内外相邻的排布形式进行组装, $\alpha=360^\circ/Z=360^\circ/8=45^\circ$ 。

$v_{OA}/v_{OB}=1/\cos\alpha=\sqrt{2}$ 。当径向撑紧机构的弧块为8块时,为实现弧块间不发生运动卡滞及构件间干涉

涉,需满足相邻弧块A的速度大于弧块B的速度且其值大小之比为 $\sqrt{2}$ 。

2.2 楔盘几何参数对径向撑紧机构的运动时序性影响

径向撑紧机构的运动时序性指撑紧机构在伸涨(或收缩)运动过程中,相邻弧块运动速度大小能够保持一定比例恒定,在撑紧后能够形成一个无间隙的整圆,且运动过程中不发生构件干涉和运动卡滞的先后有序顺序。

撑紧装置为了能够实现轴向运动转换为径向伸缩运动形式,同时亦能保证在伸缩至预定位置,所有撑块能够组装成一个无间隙的整圆,因此撑块的升降需要满足时序性的要求,即相邻的撑块升降的速度大小呈一定比例,若速度大小相等后相邻的撑块出现干涉和运动卡滞的问题,具体结构如图7所示。因此楔盘的相邻导向槽的斜角角度需满足一定条件才能实现撑紧机构运动时序性的要求,将该顶杆撑块的运动过程简化如图8所示。

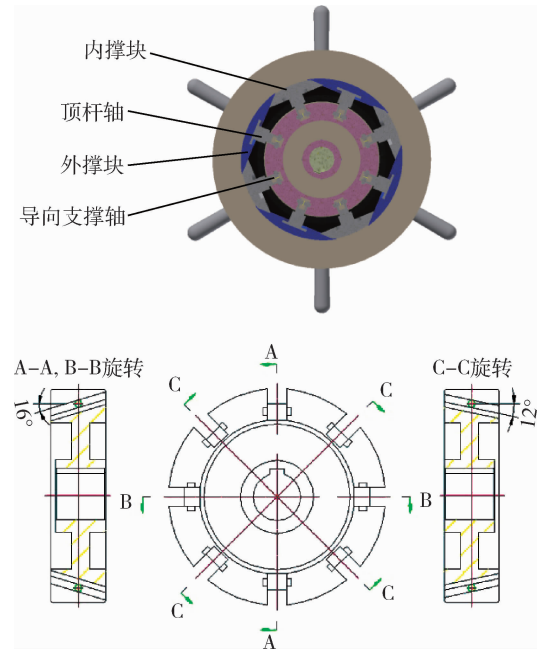


图7 楔盘结构图
Fig. 7 Wedge diagram

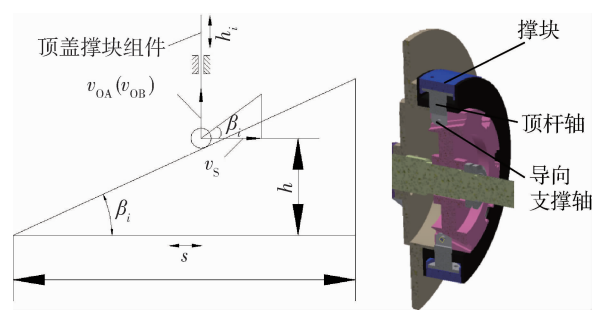


图8 顶杆撑块组件在楔盘导槽的运动路径简图
Fig. 8 A schematic diagram of the motion path of a block assembly

图 8 中 s 为楔盘的厚度, 顶杆撑块组件 h 点位置为所有顶块组成圆形垫板的位置, β_i 为楔盘上 T 型导槽的角度, h_i 为顶杆顶块组件的伸缩位移。当顶杆顶块组件沿着楔盘导槽运动时可简化为凸轮机构运动, 其位移方程为 $h_i = \frac{s}{2} \tan\beta_i$, 速度方程为 $v_i = dh_i/dt = d(\frac{s}{2} \tan\beta_i)/dt$ (i 为 a、b, 其中为 a 时为外撑块位移, b 时为内撑块位移) 即外撑块位移方程为 $h_a = \frac{s}{2} \tan\beta_a$, 内撑块位移方程为 $h_b = \frac{s}{2} \tan\beta_b$, 外、内撑块伸缩速度方程分别为 $v_a = dh_a/dt = d(\frac{s}{2} \tan\beta_a)/dt$, $v_b = dh_b/dt = d(\frac{s}{2} \tan\beta_b)/dt$ 。

(1) 当 $\beta_a > \beta_b$ 时, $h_a > h_b$ 且 $v_a > v_b$, 则内、外撑块能够按照外撑块运动的位移大于内撑块的位移并且移动速度大于内撑块的, 不会出现运动构件之间的运动干涉问题, 具有运动的时序性。

(2) 当 $\beta_a = \beta_b$ 时, $h_a = h_b$ 且 $v_a = v_b$, 则内、外撑块能够按照内撑块运动的位移等于外撑块的位移并且移动速度也与外撑块相等, 运动构件之间发生运动干涉, 出现构件运动卡滞现象。

(3) 当 $\beta_a < \beta_b$ 时, $h_a < h_b$ 且 $v_a < v_b$, 则内、外撑块运动过程为: 外撑块运动的位移小于内撑块的位移并且移动速度也大于外撑块的, 运动构件之间发生运动干涉, 出现构建的运动时序的颠倒导致构件运动停滞。

综上所述三种情况, 只有在满足(1)种情况下楔盘倾角能够实现径向撑紧机构运动的时序性, 由 $v_{OA}/v_s = \tan\beta_a$ 及 $v_{OB}/v_s = \tan\beta_b$, 其中 v_s 为楔盘的移动速度, 得 $\tan\beta_a/\tan\beta_b = v_{OA}/v_{OB} = 1/\cos\alpha = \sqrt{2}$, 因此在设计楔盘导槽的斜度时应该遵循外撑块对应的斜角大于与内撑块对应的斜角, 且其斜角正切值之比为 $\sqrt{2}$ 。

2.3 顶杆轴重要件的力学仿真分析

由于在焊接过程中, 焊缝的背面需要撑紧并且牢靠, 搅拌摩擦焊接过程中由于搅拌头在焊接过程中需要一定的顶锻力, 顶锻力的大小约为 30 ~ 40 kN (最大约为 40 kN), 对重要的零件的结构强度要求较高, 若发生形变会引起整个支撑机构的卡滞失效。在撑紧装置中相对结构强度较为薄弱的部位为顶杆轴和导向支撑轴, 其结构如图 9 所示。

将顶杆轴撑块组件的受力简化为一个单个组件的受力分析, 并设为撑块的中心位置受力, 经力的传递和分解, 主要对顶盖轴和导向支撑轴的受力位移和应变情况进行 ANSYS 分析。通过设定软件中的各参照量,

零件材料为 45# 钢, 网格选用三角形网格为基础网格单元对三个零件进行网格划分, 设定外部最大载荷为 40 kN, 经仿真得到相应的结果, 如图 10 所示。

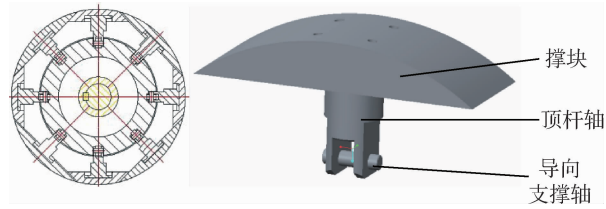
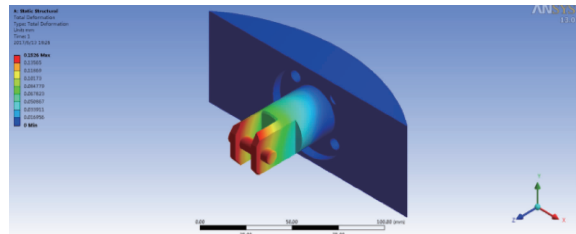
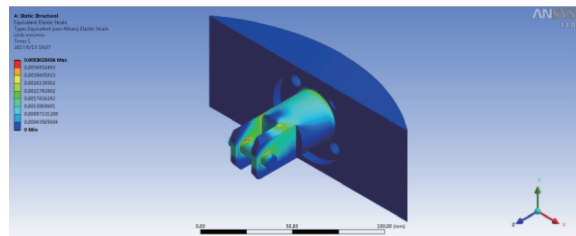


图 9 顶杆轴撑块组件

Fig. 9 Support rod shaft block assembly



(a) 顶杆轴力-位移仿真



(b) 顶杆轴力-应变仿真

图 10 顶杆轴撑块组件力学仿真

Fig. 10 Mechanical simulation of the ejector rod and support block assembly

通过仿真结果图 10(a) 所示, 零件在受到外部载荷的作用下, 顶杆轴和导向支撑轴的结合部位的位移较大, 整个机构的最大位移 (即型变量) 为 0.15, 零件能够通过自身的行为尺寸的冗余将该变形量屏蔽, 实现零件的正常使用。零件在受到外部载荷的作用下, 通过图 10(b) 所示结果可以看出, 力-应变云图中顶杆轴与导向支撑轴接触部位为应变较大的部位, 最大数值约为 0.005, 该应变值位于两零件的接触部位, 不影响整个零件的机构运动及实现撑紧作用。

3 异种过渡接头的焊接工艺试验结果

本部分工作将主要开展铝铜系/铝镁系铝合金异种接头的搅拌摩擦焊焊接, 试片规格为 400 m × 150 m × 5 m, 平板对接接头方式。由于两者为异种材料, 因此影响接头力学性能的因素除 ω 、 v 以外, 还包括前进侧位置选择。试验过程中 $\omega = 800$ /min, $v = 120 \sim 220$ m/min, 分别将铝铜系和铝镁系置于焊缝前进侧, 接头形貌见图 11。

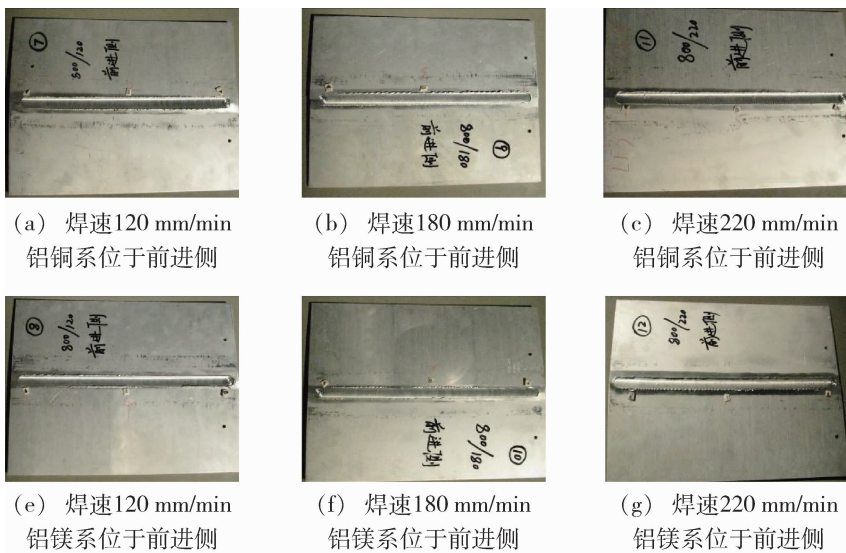


图 11 不同焊接参数及前进侧位置的铝铜系/铝镁系异种材料接头

Fig. 11 Al-Cu/Al-Mg dissimilar aluminum alloy joint under different welding parameters and forward positions

从图 11 可以看出,焊接速度在 120 ~ 220 mm/min 范围内,无论铝铜系铝合金位于焊缝前进侧,还是铝镁系位于焊缝前进侧,焊缝表面成型良好,光滑平整,两侧飞边量均匀,表面鱼鳞纹均匀明显。另外,由于铝铜系铝合金和铝镁系铝合金对 X 射线的吸收率存在差异,这直接导致对异种铝合金搅拌摩擦焊接头进行 X 射线探伤时,焊缝偏铝铜系铝合金一侧较为明亮,偏铝镁系铝合金一侧较为暗淡,见图 12 所示,而铝镁系铝合金一侧的 X 射线影像容易对体积类缺陷信号造成掩盖,从而引起误判。因此不建议采用 X 射线探伤对异种铝合金接头内部质量进行评判。而超声波信号在铝铜系铝合金和铝镁系铝合金中的传导系数差异不大,因此可以采用超声相控阵检测技术进行异种铝合金接头的检测。经检测,上述参数范围内的试片接头内部质量均符合 QJ20045—2011 的要求,见图 13 所示。

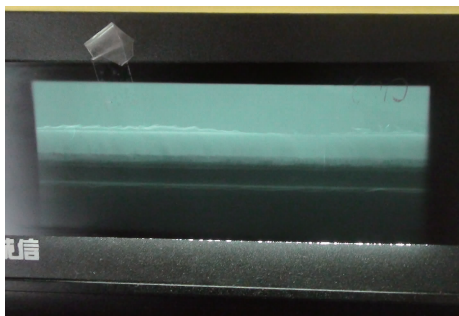


图 12 异种接头的 X 射线探伤结果

Fig. 12 Result of X-ray detection of dissimilar joint

在较大的差异,经过搅拌摩擦焊后,两种材料在焊核中进行了充分的混合,但是富铝镁系区域与富铝铜系区域有较为明显的界限,焊缝与两端母材的过渡均比较平滑。

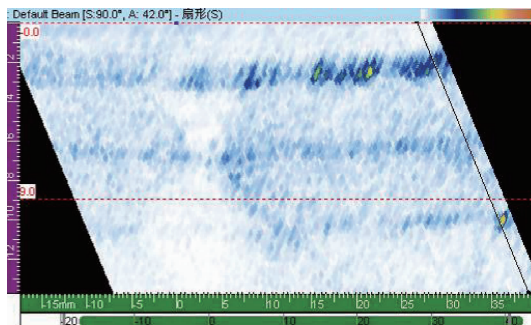


图 13 异种铝合金接头的超声相控阵检测结果

Fig. 13 Ultrasonic phased array detection results of joints

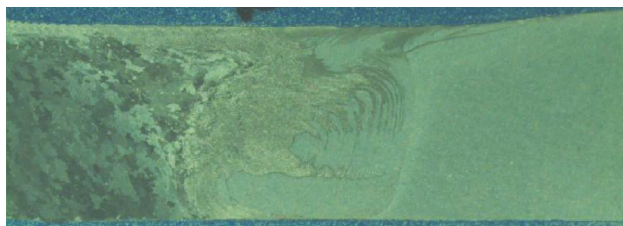


图 14 异种铝合金接头宏观组织形貌 6.5×

Fig. 14 Dissimilar joint macroscopic morphology

铝铜系/铝镁系异种材料搅拌摩擦焊接头的宏观形貌见图 14 所示,可以看出:铝镁系母材与铝铜系存宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 5 期

对上述不同参数组合下的异种材料接头进行力学性能测试,具体的拉伸试验性能结果为 σ_b : 245 ~ 260 MPa, $\delta_5 > 16\%$; 弯曲试验性能为: 正弯 180° 无裂纹, 背弯 180° 无裂纹。可以看出接头的抗拉强度高 于 245 MPa, 延伸率高于 16%, 前进侧选择不影响焊接头的力学性能。

观察拉伸子样的断裂位置:所有拉伸试样均断裂在铝镁系母材一侧,断裂面与焊缝横截面呈 45°,为典型的韧性断裂。这也充分说明铝铜系/铝镁系异种铝合金搅拌摩擦焊接头的整体性能要优于铝镁系母材的性能。



图 17 异种铝合金部件对接环缝的可回抽搅拌摩擦焊接
Fig. 17 Reversible friction stir welding of butt joint of dissimilar aluminum alloy components



图 15 铝铜系/铝镁系异种铝合金接头拉伸试样断裂位置
Fig. 15 Fracture positions of Al-Cu/Al-Mg dissimilar aluminum alloy tensile specimen

4 异种铝合金部件对接环缝的装配与焊接验证

4.1 产品装配验证

工装使用时,首先将压盘组件和撑紧机构组装在系统主轴上,将撑紧机构初步支撑到位;然后将试验件分别安装在撑紧机构上,正式装配撑紧,保证焊接装配质量,装配压环,完成焊接部分的装配;最后将顶紧机构装配到系统上,顶紧到位,完成试验件的装配,装配效果见图 16 所示。从实际装配效果来看,在没有外压紧机构的条件下,异种铝合金部件对接环缝的错边和间隙均可以控制在 0.3 mm 以下。



图 16 组装完成的工装及产品实物
Fig. 16 Assembly completed tooling and products

4.2 产品焊接验证

进行焊接时,首先用小搅拌头进行定位焊接一圈。然后更换可回抽搅拌头进行正式的焊接,焊接完成后剔除焊接飞边,清理打磨焊缝区背部,进行超声相控阵检测,焊接完成的试验件见图 17 所示。超声相控阵检测结果显示,焊缝内部质量完全符合 QJ20045—2011 要求。

5 结论

(1)设计了一款用于圆筒对接搅拌摩擦焊的工装设备,较好的保证被焊接零件焊前的装配和焊接过程中对搅拌头顶锻力的支撑作用;

(2)该套工装设备能够完成将轴向移动的运动形式转化为径向的伸缩运动,有效的提高了装配精度和操作者的装配效率;

(3)通过分析计算有效的控制 8 块弧型顶块的撑紧圆的运动干涉问题,由楔盘上的不同角度的楔盘导向槽结构实现,并且在楔盘上滑动时能够同步伸缩到达撑紧圆的运动特性;

(4)通过焊接试验件及焊缝的外观和理化分析结果,该套工装设备能够较好的满足异种材料圆筒对接搅拌摩擦焊的焊接要求,其力学性能均达到 $\sigma_b \geq 245 \text{ MPa}$, $\delta_5 \geq 16\%$;

(5)采用搅拌摩擦焊工艺成功实现了铝铜系/铝镁系异种铝合金对接接头的高质量焊接,解决了 2219/LF3 异种铝合金熔焊焊接易出现焊接裂纹的问题。

参考文献

- [1] 封小松,徐萌,钱纪红. 载人航天器结构件 FSW 制造工艺及应用[J]. 载人航天, 2011(1):52-57.
- [2] 王国庆,赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京:中国宇航出版社, 2010.
- [3] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering, 2005, R50: 1-78.
- [4] 刑美源,姚君山,刘杰. 新一代运载贮箱搅拌摩擦焊应用研究. 上海航天,2007(4):39-43.
- [5] 韩义,李清潮. 焊接工装夹具的应用与研究[J]. 科技创新与应用,2015(20):124.
- [6] 白书清,侯劲松,李燕. 一体化工程计算机辅助夹具设计系统[J]. 航天工艺, 2001(04):34-36.
- [7] 卞洪元. 机械制造工艺与夹具[M]. 北京:北京理工大学出版社:66-73.
- [8] 余建军,任治军,王辉. 先进焊接工装夹具及其在机械装备制造业中的应用[J]. 机床与液压,2011(12):115-121.
- [9] 李善芝,李书新,董康英. 二元同步胀缩无侧隙环缝焊接装置的应用[J]. 制造技术研究,2016(3):20-23.