

基于KUKA重载机器人的柔性搅拌摩擦焊接系统开发与试验研究

张新棋 董传杰 谢冬 孙丹 毕煌圣

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)

文 摘 为实现铝合金复杂结构产品的高效率高质量搅拌摩擦焊接成形,开展了基于KUKA重载机器人与新型搅拌摩擦焊技术结合的柔性焊接系统研究,通过自主研发多功能搅拌摩擦焊主机单元和试验工装,开发机器人柔性焊接专用控制系统实现集成控制,以此为基础开展了平板焊接试验试片接头组织性能研究及空间曲线轨迹的搅拌摩擦焊试验验证。研究表明:该重载机器人搅拌摩擦焊系统可稳定实现6 mm厚2219 C10S铝合金平板试片和3 mm厚S形空间曲线焊接试验件的焊接,当搅拌头为转速 $n=800$ r/min,焊接速度 $v=200$ mm/min时,试片接头抗拉强度和延伸率等力学性能较好,对试样焊缝进行超声相控阵及X光检测,未发现焊缝内部存在孔洞、裂纹等超标缺陷,验证了机器人搅拌摩擦焊系统和工艺方法的适用性。

关键词 重载机器人,搅拌摩擦焊,柔性焊接系统,空间曲线轨迹,焊接试验验证

中图分类号: TG453.9

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.01.010

Development and Experimental Research of Flexible Friction Stir Welding System Based on KUKA Heavy Duty Robot

ZHANG Xinqi DONG Chuanjie XIE Dong SUN Dan BI Huangsheng

(Capital Aerospace Machinery Co. Ltd., Beijing 100076)

Abstract In order to achieve high efficiency and high quality friction stir welding of complex-structured aluminum alloy products forming, the research on flexible welding systems was carried out based on the combination of KUKA heavy duty robot and new friction stir welding technology. Through self-developing multifunctional friction stir welding host unit and test equipment, the robot flexible welding dedicated control system was developed to realize integration control. Based on this research, the research on microstructure and properties of the joint in the plate welding test piece and the friction stir welding test verification of the space curve trajectory were carried out. The results show that the heavy-duty robot friction stir welding system can stably weld 6 mm thick 2219 C10S aluminum alloy plate test piece and 3 mm thick S-shaped space curve welding test piece. When the stir head rotation speed n is 800 r/min, the welding speed v is 200 mm/min, the mechanical properties of the test piece joint such as tensile strength and elongation are good. Ultrasonic phased array and X-ray inspection are carried out on the welding seam of the sample, and no excessive defects such as holes and cracks are found in the weld, which verified the applicability of the robot friction stir welding system and process method.

Key words Heavy duty robot, Friction stir welding, Flexible welding system, Space curve trajectory, Welding test verification

0 引言

搅拌摩擦焊(FSW)是1991年由英国焊接研究所(TWI)发明的一项新型焊接技术^[1-4],与其他焊接方法相比,它具有以下优点:固相连接,焊接温度较低,

没有明显的熔焊焊接缺陷;无需保护气体,工具损耗较小;焊缝及其周围残余变形和焊接残余应力相对较小;搅拌摩擦焊不产生弧光、烟尘、噪声等污染,节省能源,对环境和人损害更小^[5-10]。工业领域越来越

收稿日期:2022-10-26

第一作者简介:张新棋,1977年出生,本科,高级工程师,主要从事航天智能装备研发及工程应用的研究工作。E-mail:zhangxq@lvet.cn

通信作者:毕煌圣,1988年出生,硕士,高级工程师,主要从事搅拌摩擦焊工艺技术研究 and 非标装备研制的工作。E-mail:bihuangsheng@163.com

越多的产品制造采用了这项新技术,包括航空航天产品、高铁列车、雷达面板和新能源电池板焊接等^[11-16]。与专用搅拌摩擦焊装备相比,将具有较高柔性的工业机器人技术与先进搅拌摩擦焊技术结合,会显著提高搅拌摩擦焊接的自动化水平、生产效率及作业柔性,以较低成本有效解决空间复杂结构产品的批量化焊接制造问题,成为近年来搅拌摩擦焊技术和智能装备发展的重点方向^[17-19]。

国外开展机器人搅拌摩擦焊接装备起步较早,已经成功地将机器人搅拌摩擦焊技术应用于航空航天等复杂结构的焊接中。美国FSL公司基于ABB机器人系统开发的机器人搅拌摩擦焊系统,可满足6 mm以内的铝合金常规焊接^[20-21]。GRENZBACH、欧空局和KUKA公司共同研制出了机器人静止轴肩搅拌摩擦焊SSFSW系统,该系统成功应用于欧空局航空航天薄板铝合金产品的制造中,包括空间曲面结构、翼肋和翼盒、高真空密封腔等^[22]。TWI在2011年研制了世界上首台机器人双轴肩搅拌摩擦焊接系统,并成功实现了3 mm厚6082-T6铝合金带曲率工件的焊接,焊接质量良好,其接头性能达到母材的75%^[23]。此外德国、日本等都开发了机器人搅拌摩擦焊系统,并应用于工业生产中^[24]。我国在机器人搅拌摩擦焊系统集成研发及工程化推广应用等方面起步相对较晚,中航工业赛福斯特公司、广东省中乌研究院等科研机构近年来开展了机器人搅拌摩擦焊工艺试验研究并对机器人搅拌摩擦焊技术工程应用进行了相关探索^[19],我国在机器人搅拌摩擦焊技术研究与应用领域正在逐步缩小与发达国家的差距。

本文将高柔性工业重载机器人与新型搅拌摩擦焊技术结合,开展集“绿色焊接、柔性制造和可批量化生产”等优势于一身的重载机器人搅拌摩擦焊接系统开发,通过自主研发多功能搅拌摩擦焊主机单元和试验工装,开发机器人柔性焊接专用控制系统实现集成控制,突破机器人搅拌摩擦焊接装备集成技术,通过平板焊接试验试片接头组织性能研究及空间曲线轨迹的搅拌摩擦焊试验验证,解决重载机器人模式下的搅拌摩擦焊接技术应用难题,拟为后续实现铝合金复杂结构产品的高效率高质量自动化搅拌摩擦焊接提供装备和技术保障。

1 系统研制

1.1 总体构成

机器人搅拌摩擦焊系统集成制造主要包括重载机器人、多功能搅拌摩擦焊主机单元、重载机器人与焊接主机集成控制系统,如图1所示,该系统可实现3~6 mm厚铝合金常规及可回抽式搅拌摩擦焊。

为研究机器人系统在高载荷作业条件下的工作

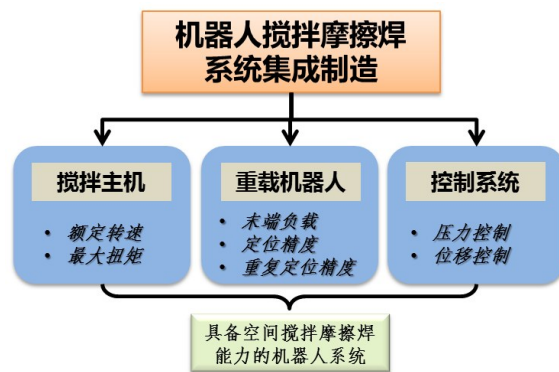
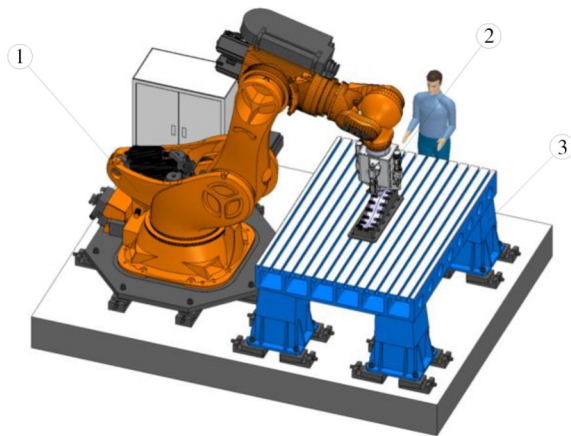


图1 机器人搅拌摩擦焊系统集成制造组成图

Fig. 1 The diagram of robot friction stir welding system integrated manufacturing

稳定性及焊接试验效果等,根据试验需求设计了专用的焊接试验平台及工装,重载机器人搅拌摩擦焊系统机械部分总体布局,如图2所示。



注:1—重载机器人;2—搅拌摩擦焊主机单元;3—试验平台及工装。

图2 重载机器人搅拌摩擦焊系统组成图

Fig. 2 Heavy duty robot friction stir welding system composition

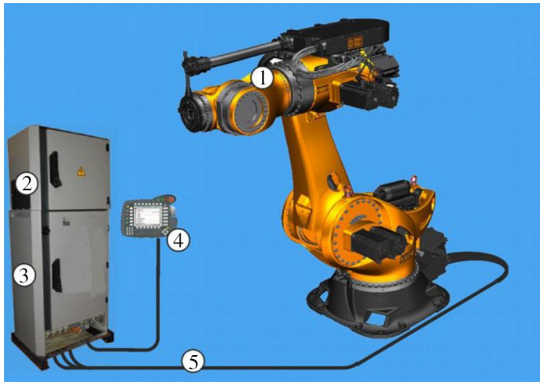
1.2 重载机器人系统

搅拌摩擦焊过程中设备要承受很大的载荷,搅拌系统会受到轴向力、前进抗力、侧向力以及旋转扭矩等。根据产品对象不同,搅拌头的转速和焊接速度对轴向力和前进抗力都有较大影响^[25],机器人容易偏离预定轨迹,从而产生焊接缺陷^[26]。为获得良好的焊接试验效果,系统基于工业应用较为成熟的KUKA KR1000重载机器人作为系统执行部件,该重载机器人具有工作空间大、自由度高和安装方便等优点,基本参数和结构见表1和图3。

表1 KUKA KR1000基本参数

Tab. 1 Basic parameters of KUKA KR1000

运动轴数	运动包络体积/m ³	重复精度/mm
6	79.8	-0.1~+0.1
总质量/kg	端部额定负载/kg	工作环境温度/℃
4 690	800~1 000	10~55



注:1—KUKA KR1000 机器人本体;2—机器人控制系统;3—电控柜;4—手持控制器;5—电源通讯线。

图3 KUKA KR1000重载机器人系统组成图

Fig. 3 The system diagram of KUKA KR1000 heavy duty robot

1.3 搅拌摩擦焊主机单元

如图4所示为自主研发的适用于重载机器人的专用搅拌摩擦焊主机单元,主要由主轴壳体、电机壳体、机器人过渡连接件、主轴电机、搅拌针回抽装置、轴承组和主轴冷却系统等组成。

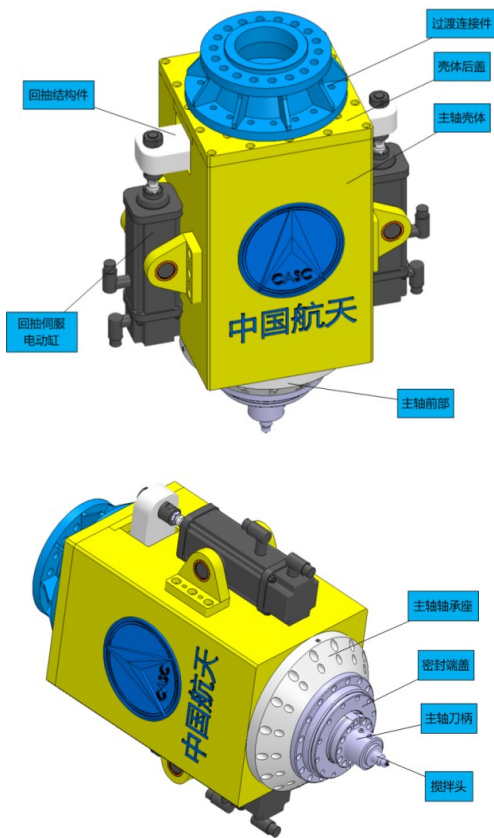


图4 搅拌摩擦焊主机单元

Fig. 4 The main engine unit of friction stir welding

为实现铝合金无匙孔可回抽搅拌焊,搅拌摩擦焊主机内部设计搅拌针回抽装置,如图5所示,驱动方式为“伺服电动缸(带绝对值编码器)+回抽结构

件+导向装置”。该方式运动精度高,且对称布置形式可以保证回抽力量的均衡。此外,回抽驱动装置集成角度旋转传感器,可实时采集位置信号并反馈至控制系统,以实现全自动位移调节。

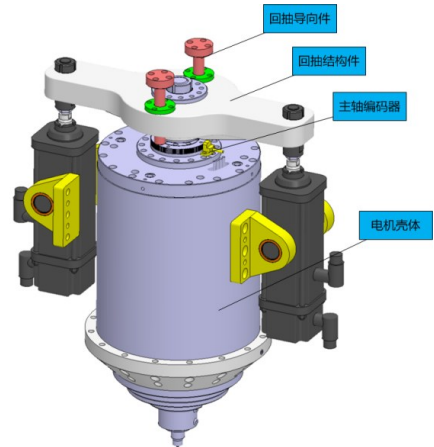


图5 搅拌摩擦焊主机回抽装置

Fig. 5 The retractable device of friction stir welding main engine

搅拌摩擦焊主机单元能够实现多种搅拌摩擦焊接工艺。主机端部的搅拌头加持接口,采取标准化设计,不同规格不同厚度的搅拌头能够互换安装使用,可满足3~6 mm常规搅拌焊、可回抽搅拌焊、双轴肩搅拌焊和静止轴肩搅拌焊等多项加工工艺需求,如图6所示。

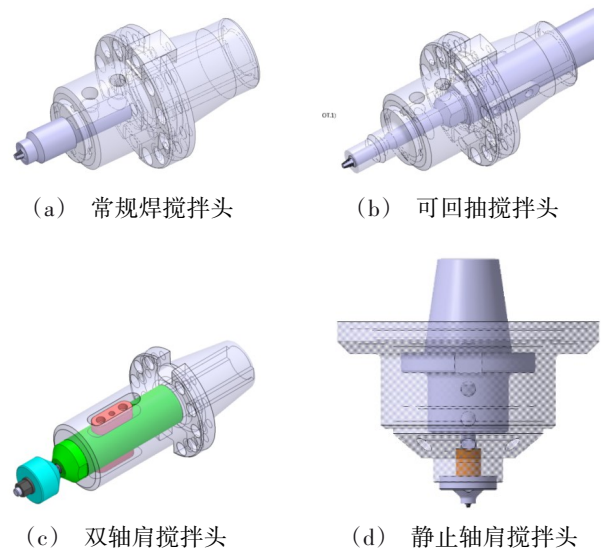


图6 搅拌摩擦焊主机各类搅拌头示意图

Fig. 6 The schematic diagram of various stirring heads for friction stir welding host

1.4 集成控制系统开发

控制系统采用集中控制的方式,控制器通过实时以太网与机器人控制器相连,进行数据的交换和

启停控制,机器人进行搅拌摩擦焊接的轨迹控制,搅拌主轴进行搅拌摩擦焊的回抽装置轴向伸缩控制。

图7为机器人搅拌摩擦焊系统控制架构图。逻辑控制器PLC与搅拌主轴、回抽轴力传感器、电推杆回抽机构通过Ethercat总线通信,在PLC上挂载Profinet从站模块,可实现与机器人的Profinet实时通信。通过总线控制,运行时PLC可实时获取机器人的坐标位置等状态信息和搅拌主机单元数据,然后将获取的信息经过逻辑运算,向机器人下发控制指令,从而实现机器人与主机的集成控制。

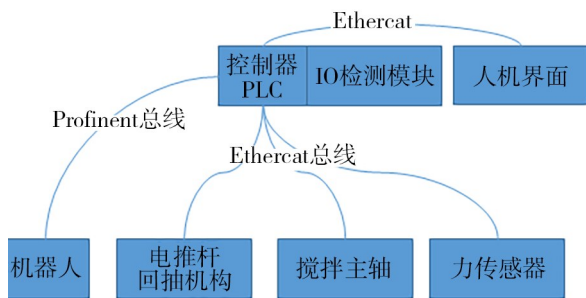


图7 机器人焊接系统控制架构图

Fig. 7 The control architecture diagram of robot welding system

图8为开发的机器人搅拌摩擦焊系统人机控制界面,可以实现参数设定、数据采集反馈。控制系统在焊接过程中,可随时采集数据并进行焊接轨迹、机器人姿态及工艺参数的修正。

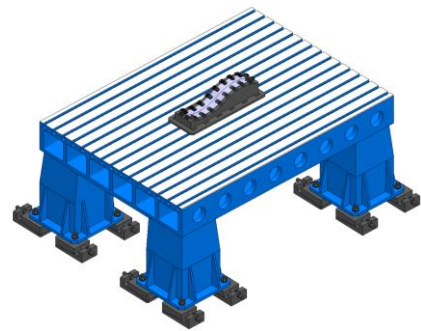


图8 机器人搅拌摩擦焊系统人机控制界面

Fig. 8 Human-machine control interface of robot friction stir welding system

1.5 搅拌摩擦焊试验系统

搅拌摩擦焊试验系统主要包括试验平台、搅拌摩擦焊平板试验工装、曲面试验焊接工装和试片压板等,如图9所示。



(a) 试验平台及曲面试验焊接工装模型



(b) 试验平台及曲面试验焊接工装实物

图9 重载机器人搅拌摩擦焊接试验系统

Fig. 9 The test system of heavy duty robot friction stir welding

2 工艺试验验证

2.1 焊接试验参数研究

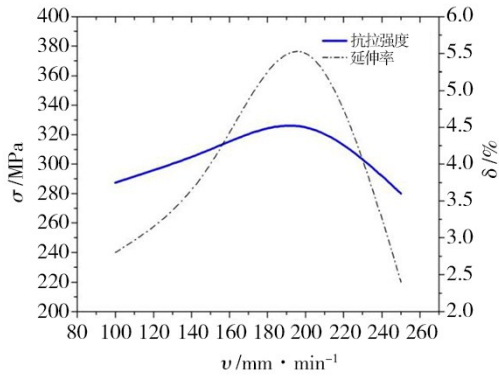
在平板试样上进行试焊,研究能够将平板对接试片焊接成表面成形及接头力学性能良好,内部缺陷少的合理参数范围(搅拌头旋转速度 n 、焊接速度 v)。设计正交试验表如表2所示,试验结果如图10所示。焊接试验材料为2219 C10S(固溶处理后经10%冷加工,然后人工时效)高强铝合金板材,抗拉强度 $\sigma_b=440$ MPa,延伸率 $\delta_{10}=7%$,板材形状尺寸根据试验需求进行加工。

表2 6 mm 2219 C10S 铝合金平板FSW焊接参数水平选择
Tab. 2 Level selection table of FSW welding parameters of 6 mm 2219 C10S aluminum alloy plate

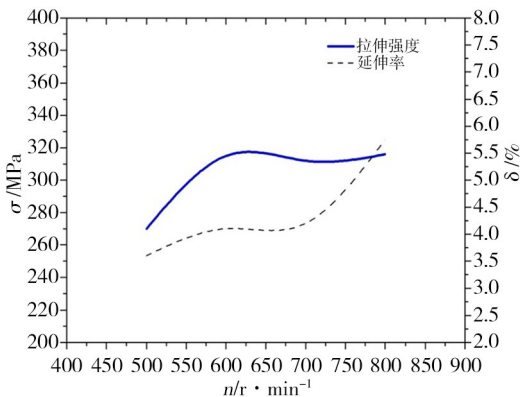
因素水平	搅拌头转速 n /rpm	焊接速度 v /min
水平1	500	100
水平2	600	150
水平3	700	200
水平4	800	250

通过图10分析可以得出转速 $n=800$ r/min,焊接速度 $v=200$ mm/min为适用于重载机器人焊接系统的优化焊接参数,此时焊接头力学性能最好。为验证上述结论,按此工艺参数进行重复验证试验,结果如表3所示。

表3结果表明,采用优化的焊接工艺参数焊接的6宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第1期



(a) 焊接速度对6 mm试片力学性能的影响



(b) 搅拌头旋转速度对6 mm试片力学性能的影响

图10 焊接参数对6 mm常规接头力学性能的影响

Fig. 10 Influence of welding parameters on mechanical properties of 6 mm conventional joint

表3 6 mm 2219 C10S 铝合金优化工艺参数接头力学性能表
Tab. 3 The mechanical properties table of joints with optimized process parameters for 6 mm 2219 C10S aluminum alloy

试样编号	σ/MPa	$\delta/\%$	试样编号	σ/MPa	$\delta/\%$
1-1	320	5.5	2-1	325	6.5
1-2	325	6.0	2-2	325	6.0
1-3	320	6.5	2-3	320	5.5
1-4	315	6.0	2-4	325	6.0
1-5	320	6.5	2-5	325	6.0
3-1	325	6.5	4-1	325	6.5
3-2	330	6.5	4-2	330	6.0
3-3	325	6.0	4-3	345	7.0
3-4	330	6.5	4-4	325	6.5
3-5	325	6.0	4-5	325	6.0

mm 2219 C10S 铝合金试片接头抗拉强度相对稳定,为 315~345 MPa,延伸率为 5.5%~7.0%,接头抗拉强度达到母材 70% 以上,延伸率大于 5%,满足《铝合金中厚板搅拌摩擦焊技术要求》。

2.2 焊接接头组织分析研究

图 11 为机器人焊接试片 6 mm 焊缝接头剖切组织形貌。图 11 左侧为搅拌头后退侧,右侧为搅拌头前进侧,从图中可以看到,前进侧和后退侧相对于焊核区中心存在一并不对称的扁平椭圆形洋葱圆环结构。图 12 为机器人焊接试片 6 mm 焊缝接头前进侧及后退侧热机影响区与焊核区的交界处组织微观形貌。

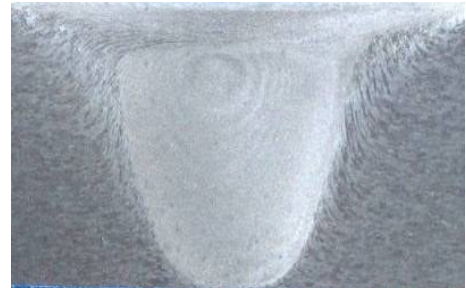
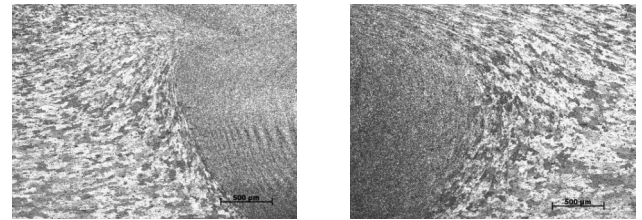


图 11 机器人焊接试片接头宏观形貌

Fig. 11 The macroscopic morphology of robot welding test joint



(a) 前进侧热机影响区

(b) 后退侧热机影响区

图 12 机器人焊接试片接头热机影响区微观形貌

Fig. 12 The micro morphology of heat engine influence zone of robot welding test joint

从图 12 中可以发现,无论是前进侧还是后退侧的热机影响区其组织特点均发生弯曲拉伸变形,这是由于该区域的塑性金属位于搅拌针边缘,受到的机械搅拌作用较弱,并且受热循环影响而发生动态恢复,比较两者可以发现前进侧热机影响区和焊核区界面过渡相对急剧,而后退侧两者之间则要平滑,符合搅拌摩擦焊正常焊缝组织形貌^[27]。

2.3 机器人搅拌摩擦焊空间曲线工艺研究及验证

在机器人搅拌摩擦焊接系统的焊接参数及焊接能力得到验证后,对机器人搅拌摩擦焊系统进行空间曲线试板的焊接进行研究,通过焊接主机压力及位移控制、机器人姿态调整,实现空间曲线焊接线速度的稳定控制,进一步验证机器人焊接系统空间运行能力。

焊接材料为 3 mm 厚 2219 C10S 铝合金,试片加工成与焊接垫板一致的 S 形曲面,利用机器人搅拌摩擦焊系统进行 S 形空间曲线焊接试验件的焊接,焊接转速为 800 r/min,焊接速度为 200 mm/min,焊接过程及焊后试样如图 13、图 14 所示。对试样焊缝进行超声相控阵及 X 光检测,未发现焊缝内部存在孔洞、裂

纹等超标缺陷,满足《铝合金搅拌摩擦焊超声相控阵检测方法》的相关要求。



图13 机器人搅拌摩擦焊系统进行S形空间曲线焊接过程
Fig. 13 The S-shaped space curve welding process of robot friction stir welding system



图14 S形焊接试片实物

Fig. 14 The S-shaped welding test piece

曲面焊接试验验证了焊接主机压力及位移控制、机器人姿态调整,实现了空间曲线焊接线速度的稳定控制,通过航天产品试验件的焊接与考核,确定了机器人搅拌摩擦焊接系统和工艺方法的适用性,为该系统在航天型号产品上的推广应用奠定了基础。

3 结论

(1)通过自主研发多功能搅拌摩擦焊主机单元,开发机器人柔性焊接专用控制系统实现了基于KUKA重载机器人搅拌摩擦焊系统研制,以此为基础开展了平板焊接试验试片接头组织性能研究及空间曲线轨迹的搅拌摩擦焊试验验证。

(2)重载机器人搅拌摩擦焊系统可稳定实现6 mm厚2219 C10S铝合金平板试片搅拌摩擦焊接,当搅拌头转速 $n=800$ r/min、焊接速度 $v=200$ mm/min时,试片接头力学性能较好,抗拉强度为315~345 MPa,

延伸率为5.5%~7.0%,接头抗拉强度达到母材70%以上,延伸率大于5%,满足《铝合金中厚板搅拌摩擦焊技术要求》。

(3)3 mm厚S形空间曲线焊接试验件验证了焊接主机压力及位移控制、机器人姿态调整,实现了空间曲线焊接线速度的稳定控制,通过航天产品试验件的焊接与考核,确定了机器人搅拌摩擦焊接系统和工艺方法的适用性。

(4)实现工业机器人技术与先进搅拌摩擦焊技术结合,提高了搅拌摩擦焊加工作业柔性和自动化水平,为铝合金复杂结构产品的高效率高质量自动化搅拌摩擦焊制造提供了装备和技术保障,具有较大的推广应用价值。

参考文献

[1] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 50(1-2): 1-78.

[2] 赵衍华,林三宝,吴林,等. 搅拌摩擦焊应用及焊接设备简介[J]. 电焊机, 2004, 34(1): 7-11.

ZHAO Y H, LIN S B, WU L, et al. Introduction of friction stir welding and welding equipment [J]. Electric Welding Machine, 2004, 34(1): 7-11.

[3] 姚君山,张彦华,王国庆,等. 搅拌摩擦焊技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(4): 24-29, 52.

YAO J S, ZHANG Y H, WANG G Q, et al. Progress in friction stir welding technology [J]. Aerospace Materials & Technology, 2003, 33(4): 24-29, 52.

[4] 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.

WANG G Q, ZHAO Y H. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy[M]. Beijing: China Astronautic Publishing Press, 2010.

[5] 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 A R, XIA C Q, WANG S W, et al. Progress and new development of friction stir welding[J]. Material Reports, 2005, 19(4): 85-88.

[6] 宋东福,王海艳,戚文军,等. 铝合金搅拌摩擦焊的研究现状与展望[J]. 电焊机, 2011, 41(3): 50-54.

SONG D F, WANG H Y, QI W J, et al. Prospects and research status of friction stir welding on aluminum alloy [J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(3): 50-54.

[7] ZHANG H, LIN S B, WU L, et al. Current progress and prospect of friction stir welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 75-79

[8] 杨坤玉,袁朝桥,彭彬,等. 搅拌摩擦焊近20年研究与发展情况概述[J]. 焊接, 2020(1): 21-28.

YANG K Y, YUAN Z Q, PENG B, et al. Overview of research and development of friction stir welding in the past 20 years[J]. Welding and Joining, 2020(1): 21-28.

- [9] 郝云飞,白景彬,田兵,等. 熔焊填充+FSW 修补搅拌摩擦焊缝匙孔型缺陷的接头组织性能研究[J]. 航空制造技术, 2014,57(10): 83-87.
- HAO Y F, BAI J B, TIAN B, et al. Study on properties of repaired joint with keyhole defect repaired by composite process of fusion filling and FSW repairing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014,57(10): 83-87.
- [10] 陈杰,张海伟,刘德佳,等. 我国搅拌摩擦焊技术的研究现状与热点分析[J]. 电焊机, 2014, 41(10): 92-97.
- CHEN J, ZHANG H W, LIU D J, et al. Research progress and focus of friction stir welding in China [J]. Electric Welding Machine, 2014, 41(10): 92-97.
- [11] WANG G Q, ZHAO Y H, HAO Y F. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 73-91.
- [12] 郝云飞,王国庆,周庆,等. 运载火箭铝合金贮箱全搅拌摩擦焊接工艺及应用[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(6): 11-20.
- HAO Y F, WANG G Q, ZHOU Q, et al. Application of all friction stir welding technology of the launch vehicle tank [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016,46(6): 11-20.
- [13] 陈玉芳,余凯. 铝合金搅拌摩擦焊接头研究[J]. 科学技术创新, 2021(25): 141-142.
- CHEN Y F, YU K. Study on friction stir welding joint of aluminum alloy [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(25): 141-142.
- [14] 盛建辉,彭家仁,李光,等. 搅拌摩擦焊工艺及其在地铁铝合金车体上的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2009, 32(3): 28-31.
- SHENG J H, PENG J R, LI G, et al. Friction stir welding technology and its application on metro aluminum alloy car body [J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2009, 32(3): 28-31.
- [15] 董春林,栾国红,关桥. 搅拌摩擦焊在航空航天工业的应用发展现状与前景[J]. 焊接, 2008(11): 25-31.
- DONG C L, LUAN G H, GUAN Q. Application development status and prospect of friction stir welding application in aerospace industry[J]. Welding and Joining, 2008(11): 25-31.
- [16] 巫飞彪,周博俊. 搅拌摩擦焊在新能源汽车电池下壳体焊接工艺中的应用[J]. 机电工程技术, 2021, 50(11): 231-235.
- WU F B, ZHOU B J. Application of friction stir welding in the welding process of battery under shell of new energy automobile [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2021, 50(11): 231-235.
- [17] 谭锦红,赵运强,王春桂,等. 机器人搅拌摩擦焊应用发展现状[J]. 金属加工, 2020(1): 8-11.
- TAN J H, ZHAO Y Q, WANG C G, et al. Application and development status of robot friction stir welding [J]. Metal Cutting, 2020(1): 8-11.
- [18] 毕树生,宗光华,梁杰. 机器人技术与航空制造业[J]. 机器人技术与应用, 2009(3): 25-31.
- BI S S, ZONG G H, LIANG J. Robot technology and aerospace manufacturing [J]. Robot Technique and Application, 2009(3): 25-31.
- [19] 董春林,李继忠,栾国红. 机器人搅拌焊发展现状与趋势[J]. 航空制造技术, 2014,57(17): 76-79.
- DONG C L, LI J Z, LUAN G H. Development of robotic friction stir welding technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014,57(17): 76-79.
- [20] CHRISTOPHER B S, HINRICHS J F, CRUSAN W A. Robotic friction stir welding: state of the art [C]//Proceedings of the 4th International Friction Stir Welding Symposium, Park City, Utah USA, 2003.
- [21] SMITH C B. Robotic friction stir welding using a standard industrial robot [C]//Proceedings of the 2nd International Friction Stir Welding Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000.
- [22] 赵峰. 机器人静轴肩搅拌摩擦焊技术研究[J]. 现代焊接, 2016(1): 32-33.
- ZHAO F. Research on friction stir welding technology of robot stationary shoulder [J]. Modern Welding Technology, 2016(1): 32-33.
- [23] WEI X. Further development of the fsw floating-bobbin technique [OL]//TWI Proposal PR19130, 2011.11. <https://www.twi-global.com/pdfs/GSPs/2012-22335-Further-Development-of-the-FSW-Floating-Bobbin-Technique.pdf>
- [24] 王月,王海瑞,郭晓娟,等. 搅拌摩擦焊接机器人的研究现状与发展趋势[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(4): 1-8.
- WANG Y, WANG H R, GUO X J, et al. Research status and development trend of friction stir welding robot [J]. Techniques of Automation and Application, 2021, 40(4): 1-8.
- [25] 陈树君,孔德兵,董建涛,等. 工艺参数对机器人搅拌摩擦焊轴向力和前进抗力的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(4):956-967.
- CHEN S D, KONG D B, DONG J T, et al. Influence of process parameters on axial force and transverse force of robot friction stir welding [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(4): 956-967.
- [26] 张昊,黄永德,郭跃,等. 适用于机器人焊接的搅拌摩擦焊技术及工艺研究现状[J]. 材料导报A, 2018, 32(1): 128-134.
- ZHANG H, HUANG Y D, GUO Y, et al. Technological and process advances in robotic friction stir welding [J]. Material Reports A, 2018, 32(1): 128-134.
- [27] 郝云飞,李延民,周庆,等. 铝合金可回抽搅拌摩擦焊接头组织和性能[J]. 宇航材料工艺, 2014,44(2): 42-48.
- HAO Y F, LI Y M, ZHOU Q, et al. Retractable friction stir welding technology of 2219 aluminium alloy [J]. Aerospace Materials & Technology, 2014,44(2): 42-48.