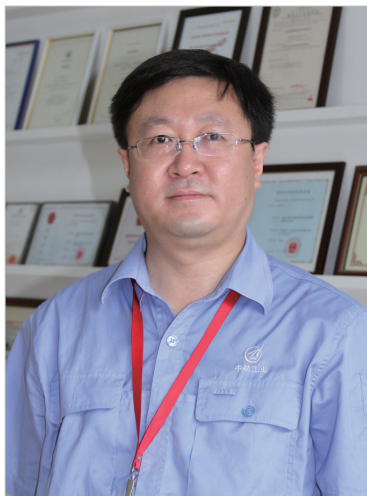


机器人搅拌摩擦焊发展 现状与趋势

Development of Robotic Friction Stir Welding Technology

中航工业北京航空制造工程研究所 董春林 李继忠 栾国红



董春林

工学博士, 自然科学研究员, 从事等离子弧焊、激光焊接及熔敷、搅拌摩擦焊等领域的基础研究及技术开发工作。先后承担 30 余项科研项目, 发明了等离子弧焊弧光传感、活性剂等离子弧焊、塑流摩擦焊等方法, 获国家发明专利 4 项, 在技术核心刊物上发表学术论文 50 余篇。曾获国防科技进步二等奖 2 项、航空科技进步一等奖及二等奖各 2 项、中国机械工业科技进步二等奖 1 项, 2012 年荣立集团公司个人二等功 1 次。

工业机器人是集机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科先进技术于一体的自动化装备, 是先进制造领域不可替代的重要装备

机器人搅拌摩擦焊是当前搅拌摩擦焊技术与装备发展的重要方向。随着重载工业机器人载荷能力的不断提高, 重载机器人搅拌摩擦焊技术和装备已经走出实验室, 正逐步进入到工业化应用阶段。工业机器人与先进搅拌摩擦焊装备的结合, 将提高焊接装备自动化程度和焊接生产效率, 并进一步提升搅拌摩擦焊作业柔性, 尤其适用于空间复杂结构产品的批量化焊接制造。

和手段, 是衡量国家科技水平和工业制造能力的重要标志之一。我国已经成为世界公认的制造大国, 但工业制造自动化水平极低, 据国际机器人联合会 (IFR) 统计, 2012 年我国工业机器人使用密度 (万名产业工人所使用的机器人数量) 仅为 23 台, 远低于世界平均水平 58 台, 而韩国和日本都达到了 300 台以上。随着劳动力成本的不断提高, 工业机器人价格的不断降低和性能的不断提升, 提高我国工业制造自动化水平, 由劳动密集型向技术密集型转变已经成为必由之路。

为加强行业管理, 推进我国工业机器人产业有序、健康发展, 2013 年

12 月 30 日, 工信部正式发布了《关于推进工业机器人产业发展的指导意见》, 确立了我国工业机器人产业发展目标, 即开发满足用户需求的工业机器人系统集成技术、设计技术和关键零部件制造技术, 以及在汽车、船舶、电子、民爆、国防军工等重要工业制造领域推进工业机器人的规模化示范应用。

全世界在役工业机器人约有一半以上用于各种焊接生产。焊接过程的柔性化、自动化、智能化已成为先进焊接装备的重要发展趋势, 焊接机器人具有高效、质量稳定且通用性强等优点, 正经历着由单机示教再现型向多传感、智能化的柔性机器人工

作站或多机器人工作群方向发展。随着重载工业机器人载荷能力的不断提升,使搅拌摩擦焊技术集成于重载机器人本体上成为可能。利用重载工业机器人于先进的搅拌摩擦焊装备的结合,将极大提升搅拌摩擦焊焊接作业的柔性,使得空间复杂结构件采用搅拌摩擦焊接技术成为可能,这为空间复杂结构产品的批量化焊接制造提供了设备基础保障。

机器人搅拌摩擦焊技术优势

随着搅拌摩擦焊技术研究的深入和工程化应用推广,越来越多的产品制造采用了这项新型焊接技术,同时产品的结构也越来越复杂,而传统的龙门式搅拌摩擦焊设备只能完成直线或平面二维焊接要求,不能满足复杂结构件的焊接。机器人搅拌摩擦焊技术与装备成为近年来搅拌摩擦焊装备的重要发展方向^[1],这是因为工业机器人具有较高的柔性,可以实现复杂轨迹运动,使复杂结构件的焊接成为可能。机器人搅拌摩擦焊技术可提升焊接自动化程度和生产效率,其技术优势和社会经济效益显著。使用机器人搅拌摩擦焊焊接时,由于机器人柔性化程度高,焊接过程稳定且无需人为干涉,因此,焊接质量可以得到显著提升,且有利于降低焊接生产成本。据国外统计,机器人搅拌摩擦焊单件焊接成本比机器人氩弧焊低 20%,而采用多轴搅拌

摩擦焊设备成本只有氩弧焊的一半。由此可见,采用机器人进行搅拌摩擦焊在大规模工业生产中具有显著的成本优势。此外,机器人搅拌摩擦焊的主要技术优势有:(1)节能、高效,焊接过程无污染;(2)适用于复杂结构焊接,如平面二维、空间三维等结构;(3)可匹配外部轴,扩展机器人工作空间;(4)可实现多模式过程控制,如压力控制、扭矩控制等;(5)接头质量良好,焊接过程稳定。

机器人搅拌摩擦焊国内外发展现状

由于机器人具有非常高的柔性,可实现空间任意轨迹的运动,自 1997 年起,国外便开始开发机器人搅拌摩擦焊系统。经过十多年的研究,国外已经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。目前多家国际著名机器人公司都已经推出机器人搅拌摩擦焊集成系统,如美国 FSL 公司基于 ABB 机器人系统开发的机器人搅拌摩擦焊系统,该机器人同时集成了压力控制、扭矩控制、位移控制和温度控制模块,并根据搅拌摩擦焊工艺开发了人性化界面^[2-3],目前主要用于科研院所,其形式结构如图 1 所示。但是,该设备搅拌摩擦焊机头体积较大且自重较高,只能满足 6mm 以内的铝合金焊接,对曲率半径较小的工件无法焊接。

欧宇航(EADS)创新工作室与德国 KUKA 机器人集团历经 10 年合作研发,研制出机器人搅拌摩擦焊系统;瑞典 ESAB 公司在 ABB 机器人本体上成功集成了搅拌摩擦焊系统,实现了空间曲面结构焊接,在国内外多家科研机构得到应用。此外,德国 IGM 公司和 KUKA 机器人集团分别开

发了重载机器人搅拌摩擦焊系统,并于 2012 年推出商业化的 KR500MT 机器人搅拌摩擦焊系统,成为近两年国际焊接工业展的亮点,得到国内外航空、航天、汽车、电力、电子等行业领域焊接工作者的普遍关注,并很快在我国电子行业得到推广应用。

此外,德国 KUKA 集团公司和日本川崎重工分别基于 KUKA KR500-M3 机器人(图 2)和 FANUC 机器人系统(图 3),针对高端汽车箱体结构开发了搅拌摩擦点焊技术。目前川崎重工已经将该技术应用于 Mazda 高端跑车 RX8 的车门结构、直升机场门结构焊接制造。

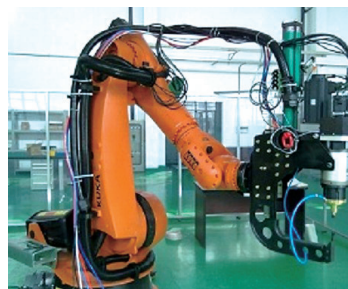


图2 KUKA KR500MT机器人



图3 FANUC机器人系统

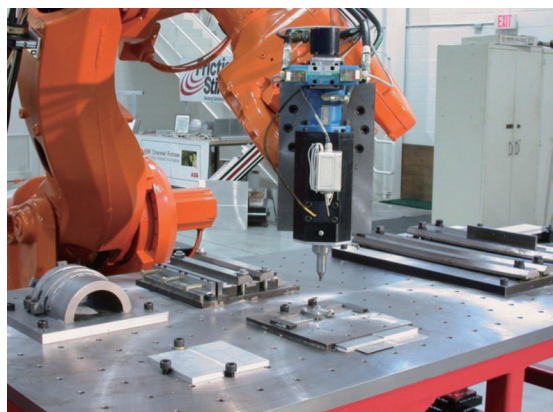


图1 ABB与FSL合作研发的机器人搅拌摩擦焊系统

在技术研发方面,由于串关节型机器人的刚度明显低于传统龙门式搅拌摩擦焊设备,因此使用机器人进行搅拌摩擦焊时,机器人手臂在焊接过程中会发生弹性变形,从而导致搅拌头偏离预定焊缝轨迹^[4]。此外,国外研究人员发现采用机器人进行搅拌摩擦焊接时,在焊接过程中存在多个方向的力(主要为轴向压力、前进力和侧向压力),其中轴向压力最

大,也是机器人手臂在焊接过程中发生变形的主要原因。

此外,使用机器人搅拌摩擦焊设备分别进行空间三维“S”形曲线试板的焊接,并对试件的不同位置进行弯曲和拉伸性能测试,发现由于焊件曲率发生变化时,搅拌头轴肩与焊件之间的接触状态差别较大,如在焊接凹面阶段,轴肩与焊件接触充分,而在凸起阶段,轴肩与焊件之间还有间隙存在,两者不能充分接触^[5]。受搅拌头与工件接触状态的影响,由凹面向凸面的过渡过程中,轴向压力也随之发生了显著变化,即在凹面焊接阶段的轴向压力略高于凸面区域。通过对比不同阶段的试件进行力学测试,结果表明在凹面阶段取样的力学性能略高于凸面焊接阶段,并且具有更高的焊接稳定性。

由于机器人刚度不足,在机器人搅拌摩擦焊接过程控制方面尤为重要。为了有效克服这点不足,机器人搅拌摩擦焊系统可以集成多种控制方法。Backer 等人^[6]通过温度控制的方法有效保证了焊接过程的热输入量,焊后焊缝表面质量稳定。此外,Backer^[7]研究认为机器人姿态也是影响焊接过程稳定性的重要因素之一,通过调整机器人各关节姿态能有效降低焊接过程轨迹偏移量,并且可保证焊接机头的稳定性。Crawford 等人^[8]通过大量试验建立了机器人搅拌摩擦焊接过程焊接作用力与机器人偏离模型,通过建立数学模型有效降低了焊接过程的偏移量,同时也保证了焊接过程的稳定性。

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较晚,远远落后于国外,近5年来国内相关院所才开始开展机器人搅拌摩擦焊工艺研发和系统集成研究,而在应用方面更是一片空白,目前还处于基础研究阶段。中航工业北京航空制造工程研究所作为国内首家从事搅拌摩擦焊技术研究的单

位,较早开始关注机器人搅拌摩擦焊技术发展,于2013年首次从国外引进了一台重载机器人搅拌摩擦焊系统。在此基础上,开始从事机器人搅拌摩擦焊技术的探索性研究,对机器人搅拌摩擦焊系统及空间曲面结构焊接有了初步认识。

机器人搅拌摩擦焊市场需求分析

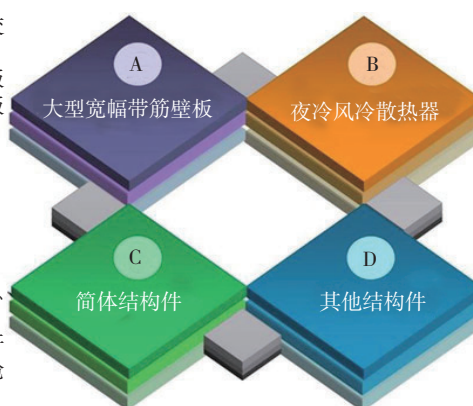
搅拌摩擦焊在我国已经历了十余年的技术和装备研发,应用技术和专机装备日渐成熟,在工程化应用方面已经取得了大量的成功案例,市场认知度越来越高。已形成了巨大的技术及装备应用市场,可以预期未来5年内,搅拌摩擦焊将迎来市场化推广及工程化应用的高潮。北京航空制造工程研究所在搅拌摩擦焊技术研发基础上,先后研制出了搅拌摩擦焊产品批量加工、系列化专机装备生产能力,至今已研制成功多种系列搅拌摩擦焊设备,先后研制出大型宽幅带筋壁板、液冷风冷散热器、筒体结构件等多类别产品,搅拌摩擦焊产品呈现出规模化发展的趋势,最终构成了完善的产品体系(图4)。

高柔性自动化搅拌摩擦焊装备将成为这些行业的关键零部件产品实现绿色轻量化、高效精益生产的关键。重载工业机器人搅拌摩擦焊装备的出现,将极大提高搅拌摩擦焊的工作柔性,拓展作业空间和适用性。据IFR统计,2011年全球工业机器人市场增长10%左右,我国增长达51%,增速位居全球第一;2014年我国将成为全球最大的工业机器人应用市场。这种“井喷式”的市场需求将有力推动我国机器人搅拌摩擦焊技术和装备产业的发展。

在飞机结构制造中,机器人搅拌摩擦焊系统有望应用于复杂曲面机身壁板焊接制造,实现长桁、隔板、框与蒙皮,以及机翼结构的焊接。欧宇航已将机器人静轴肩搅拌摩擦焊用于空客A380翼肋、翼盒、机身窗体加强结构产品的试制。日本川崎重工将机器人搅拌摩擦点焊应用于直升机舱门的研制。在汽车结构制造中,机器人搅拌摩擦焊系统有望应用于复杂曲面车体结构制造,实现复杂车体结构及不等厚裁剪板的焊接。日本川崎重工已将机器人搅拌摩擦点焊应用于汽车车门结构件的批产。

船舶、航空、轨道交通、集装箱
船舶单层带筋壁板
列车双层带筋壁板

电力、化工、航天、航空
封闭母线、高压开关、油罐及管道、舱段、燃料储箱



电力、电子、能源、交通、化工、通信、雷达
IGBT模块散热器、晶闸管散热器、液冷机箱

冶金、交通运输、电气机械、兵器
冶金电极、冶金极板、机箱、雷达基站机箱

图4 当前搅拌摩擦焊加工的主要产品系列

国家对节能减排的要求越来越高,汽车、船舶、轨道交通、民用航空、电力、冶金等行业对轻量化的要求也越来越高,先进的搅拌摩擦焊技术与

采用机器人搅拌摩擦焊也可以实现电动汽车(或混合动力汽车)电池托盘的焊接。在电力电子行业各类散热产品的制造中,机器人搅拌摩擦

焊优势更为突出,采用该项技术与装备,可以实现各类散热产品(如冷板、液冷风冷散热器、电机电池壳体、IGBT、ECU 散热器)的高效率、高质量生产制造。在消费电子行业,机器人搅拌摩擦焊的工程化应用也取得了长足发展,德国 KUKA 机器人集团与欧宇航创新工作室合作研发的机器人搅拌摩擦焊系统,已用于苹果公司 iMac 高端一体机产品壳体的焊接生产(见图 5)。



图5 采用机器人搅拌摩擦焊制造的iMac产品

机器人搅拌摩擦焊技术发展趋势浅析

机器人搅拌摩擦焊技术与装备已成为当前国际搅拌摩擦焊技术研发热点,并得到了国内外焊接工程技术人员和工业用户的广泛关注。当前机器人搅拌摩擦焊技术,亟待解决以下几方面关键技术:

(1) 适用于搅拌摩擦焊接的重载工业机器人本体设计与制造技术。搅拌摩擦焊是一种类似于锻

压—挤压的塑性加工技术。焊接过程中,搅拌工具与被焊材料直接接触,并施加很大的焊接作用力和扭矩,通过搅拌工具的摩擦搅拌作用使材料塑化,发生大塑性变形和流动,并在搅拌工具持续的顶锻作用下获得组织致密的固相焊接接头。这要求施焊过程中,机器人的各个运动轴都承受很大的作用力。实现机器人搅拌摩擦焊的基本条件是机器人本体承载能力必须很高,通常大于 500kg,而且对于机器人在高载荷作业条件下的工作稳定性、重复定位精度、空间位置和姿态规划都提出了很高的要求;

(2) 机器人搅拌摩擦焊机头需要集成复杂的测控系统,包括:压力测控系统、温度测控系统、焊缝跟踪系统、三维激光定位系统和焊接过程冷却与润滑系统等;同时为了提高机器人运动的灵活性和可达性,需要焊接机头尽可能地减小体积。因此,机器人搅拌摩擦焊机头的设计与制造是机器人搅拌摩擦焊系统集成和功能实现的关键。此外,在机头的设计与制造过程中,也要考虑在能实现传统机器人搅拌摩擦焊的基础上,通过更换机头部分功能模块可以兼容搅拌摩擦焊新技术,如机器人搅拌摩擦点焊、机器人双轴肩搅拌摩擦焊、机器人静轴肩搅拌摩擦焊;

(3) 机器人搅拌摩擦焊控制模块是保证焊接过程稳定性的重要因素,是机器人搅拌摩擦焊复杂曲面焊接可靠性的重要保障。机器人搅拌摩擦焊接过程控制传感器主要包括三维定位、压力、位移、温度、焊缝跟踪等,通过通信模块和总线将系统与传感器连接在一起,并实时采集数据由系统进行分析,再由通信模块输出进行焊接轨迹、姿态及工艺参数修正,最终达到精确控制的目的;

(4) 通过确定搅拌摩擦焊标准化流程,组织并有效协同路径规划、校准、过程模拟、过程控制、焊接工艺

模块等各子系统,实现机器人搅拌摩擦焊系统集成,开发适用于搅拌摩擦焊接的机器人软件包;

(5) 当前工业产品多具有小批量多品种特征,要求生产线具备柔性制造能力。采用工业机器人进行搅拌摩擦焊时,对焊接顺序及作业路径必须进行工艺规划,并通过离线编程实现干涉检验和指令生成,而且必须结合前序生产过程实时信息,对后续加工过程进行同步调整,以充分发挥机器人在工业高效自动化生产中的优势。

参考文献

- [1] Gibson B T, Lammleinh D H, Prater T J, et al. Friction stir welding: process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16: 56-73.
- [2] Christopher B S, Hinrichs J F, Crusan W A. Robotic friction stir welding: state of the art. *Proceedings of the 4th International Friction Stir Welding Symposium*, Park City, Utah USA, 2003.
- [3] Smith C B. Robotic friction stir welding using a standard industrial robot. *Proceedings of the 2nd International Friction Stir Welding Symposium*, Gothenburg, Sweden, 2000.
- [4] Wanjara P, Monsarrat B, Larose S. Gap tolerance allowance and robotic operational window for friction stir butt welding of AA6061. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 631-640.
- [5] Shultz E F, Fehrenbacher A, Pfefferkorn F E, et al. Shared control of robotic friction stir welding in the presence of imperfect joint fit-up. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012; 1-9.
- [6] Backer J D, Bolmsjö G, Christiansson A-K. Temperature control of robotic friction stir welding using the thermoelectric effect. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70: 375-383.
- [7] Backer J D. Robotic friction stir welding for flexible production [D]. Sweden: Lund University, 2012.
- [8] Crawford R, Cook G E, Strauss A M. Modelling of friction stir welding for robotic implementation. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2006, 1(2): 101-106.

(责编 谷雨)