

# 回填式搅拌摩擦点焊技术 研究新进展\*

周灿丰,焦向东,高 辉

(北京石油化工学院能源工程先进连接技术北京市高等学校工程研究中心,北京 102617)

**[摘要]** 回填式搅拌摩擦点焊与传统搅拌摩擦点焊相比,焊缝表面平整、焊点中心没有退出凹孔,具有突出的技术优势,在搅拌摩擦焊尾孔修补等场合尤其具有应用前景。对近年来回填式搅拌摩擦点焊技术研究新进展进行了评述,包括焊接设备开发、焊接过程和成形机理研究、焊缝组织与力学性能分析以及异种材料连接研究,指出焊接机器人、匙孔封闭工艺、焊缝疲劳性能以及铝合金与其他材料之间的连接应该作为重要发展方向。

**关键词:** 回填式搅拌摩擦点焊;匙孔封闭维修;焊缝组织;疲劳

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.048



周灿丰

工学博士,教授,能源工程连接技术研究中心常务副主任,主要从事水下焊接、焊接自动化研究;分别主持国家、北京市自然科学基金项目3项,协助主持国家863项目4项、国防科工委项目1项,并完成横向项目多项;2014年入选北京市属高等学校长城学者,获得省部级科技奖特等奖1项、一等奖1项、二等奖3项、三等奖1项,获发明专利授权8项、实用新型专利授权30项,发表学术论文100余篇,出版学术专著3部。

当今社会在日新月异的飞速发展,节能环保轻量化设计是现在社会发展的主要基调,在航空航天、工业、汽车等行业属于发展的方向。实际生产中使用铝镁合金能够有效减轻设备的重量,是目前轻量化生产的重要方法之一。传统的电阻点焊、铆接焊接的质量不尽如人意,所以说研究开发适用于轻合金点焊技术是非常重要的。搅拌摩擦点焊(Friction Stir Spot Welding, FSSW)技术也就因此产生,它是在搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)技术的基础上研究和衍生开发出来的能够适用于轻型合金的新型的焊接技术。原来比较传统的焊接会在焊点的中心留一个匙孔,这样的情况不仅影响外观还会影响其力学性能。而回填式搅拌摩擦点焊的出现成功解

决了传统搅拌摩擦点焊存在的问题,国内对回填式搅拌摩擦点焊技术的研究重点还停留在原理、工艺方面,对设备的设计和研发很少,现在应该增加对焊接设备的研究,从而促进该技术在工程领域的应用,推动汽车、航空航天等领域的轻量化发展。

回填式搅拌摩擦点焊(Refill Friction Stir Spot Welding, RFSSW)过程如图1所示,大致可以分为4个阶段。第1阶段:夹套固定于上板表面,袖套和搅拌针经过一段时间的旋转摩擦,使材料软化;第2阶段:袖套和搅拌针分别向下和向上运动,塑性化材料在袖套作用下迁移挤入搅拌针向上运动形成的空腔;第3阶段:达到预期扎入深度之后,袖套和搅拌针同时改变运动方向,塑性化材料在袖套作用下挤回空腔;第4阶段:焊接完成、工具撤回。因为与传统搅拌摩擦点焊相比,焊缝表面平整,焊点中心没有退出凹孔,所以成

\*基金项目:北京市自然科学基金(3122016);北京市属高等学校长城学者(CIT&TCD20140316)。

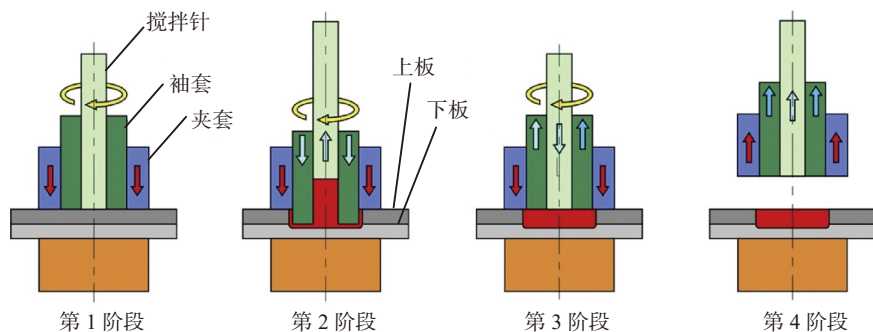


图1 回填式搅拌摩擦点焊过程  
Fig.1 Welding process of RFSSW

为研究热点。近年来, RFSSW 的研究主要集中在以下几个方面: 焊接设备开发、焊接过程和成形机理研究、焊缝组织与力学性能分析、异种材料连接。

### 自动焊接和机器人焊接设备开发

图 2 为 Harms-Wende 公司的 RPS100 SK, 是在 Riftec 公司 RFSSW 原型设备基础上发展来的, 已经成为目前 RFSSW 研究和应用中表现突出的一款优秀产品, 其关键的 RFSSW 工具(图 3)通过由里而外的搅拌针、袖套、夹套组件构成<sup>[1]</sup>。RPS100 SK 完整的 C 型焊钳系统采用全模块化设计, 易于使用, 设计简洁, 灵活度高, 尤其是对于普通焊钳无法焊接到的位置, 它都可以轻松到达并完成焊接。RFSSW 工具中的搅拌针和袖套具有精密的尺寸, 并且配备了大功率的动力装置, 无论锻造还是铸造的铝材料, 从 1××× 到 7××× 铝合金, 无论相同材料或者混合材料, 均可以获得平整的高质量焊点。

北京赛福斯特技术有限公司在机器人本体基础上集成点焊机头, 研制成功了搅拌摩擦点焊机器人, 可以用于铝合金搅拌摩擦焊搭接、尾孔修复等功能<sup>[2]</sup>。该搅拌摩擦点焊机器人具有突出的柔性化特征, 通过程序调用, 可以较大程度贴合焊件, 从而实现复杂结构件的搅拌摩擦点焊焊

接要求, 大幅度提高了搅拌摩擦点焊设备的适应性。图 4 和图 5 分别是搅拌摩擦点焊机器人及其用于铝板点焊。

### RFSSW 焊接过程和技术特点

文献 [3] 为了消除搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 的尾孔、空隙等体积缺陷, 采用 RFSSW 进行匙孔封闭维修。匙孔封闭过程在 3mm 铝锂合金 AA 2198-T851 上完成, 结论表明直径 7.5mm 双轴肩搅拌摩擦焊 (Bobbin Tool Friction Stir Welding, BT-FSW) 产生的匙孔可以成功地回填修复。为了研究回填过程的特征, 对位置、力、力矩等过程参数进行了监控, 对焊缝微观组织、力学性能以及回填过程的热循环等进行了分析。采用 RFSSW 对 BT-FSW 焊缝进行焊接, 研究其力学性能, 与母材匙孔封闭焊缝相比, 能够达到 78% 的拉伸强度。图 6 为采用 RFSSW 进行 BT-FSW 焊缝匙孔封闭的过程; 对 BT-FSW 焊缝使用 RFSSW 来进行焊接和焊缝拉伸性能分析(图 7)。

文献 [4] 采用 RFSSW 对 7075-T6 铝合金进行了成功焊接, 对焊缝中与材料流动相关的缺陷包括飞边、空洞和层状结合等进行了研究, 同时对焊缝力学性能进行了研究, 包括硬度、拉伸、剪切和交叉拉伸试验, 并采用扫描电镜 (Scanning Electron

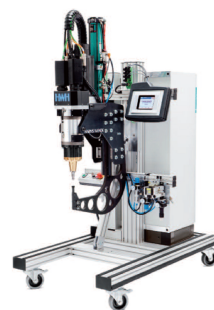


图2 RFSSW自动焊机 RPS100 SK  
Fig.2 Automatic welding machine of RPS100 SK

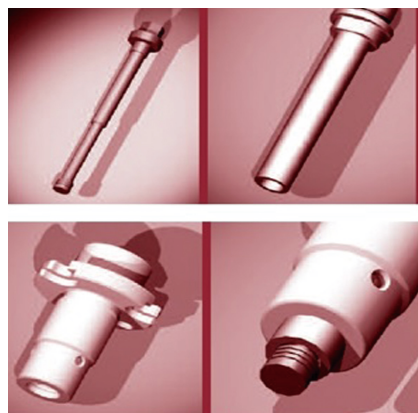


图3 RFSSW工具  
Fig.3 RFSSW tools

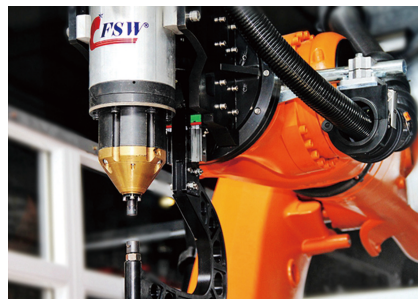


图4 FSSW机器人  
Fig.4 FSSW robot

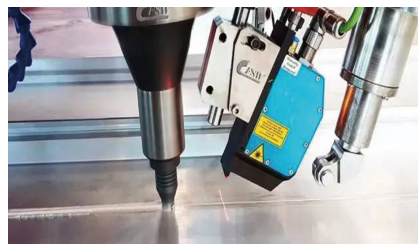


图5 铝板FSSW机器人点焊  
Fig.5 Aluminum plate spot welding by FSSW robot

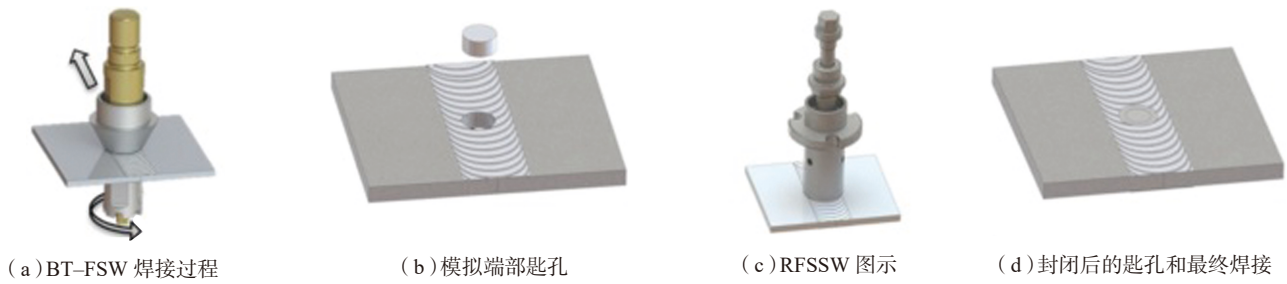


图6 采用RFSSW进行BT-FSW焊缝匙孔封闭过程  
Fig.6 BT-FSW termination hole closure using RFSSW

Microscope, SEM)进行了断裂机理研究,图8为焊接参数对飞边和空洞的影响,图9为焊缝缺陷特征。

文献[5]为了对RFSSW参数进行估计,采用三维有限元软件进行了仿真分析,获得了有助于减少AA2024铝板焊接试验次数的优化工艺参数,包括转速、扎入速度和扎入深度,图10为采用有限元软件进行RFSSW仿真分析的3个操作阶段,分别为搅拌针扎入、凸形轴肩形成和轴肩平整完成填充。

### RFSSW 焊缝组织与力学性能分析

文献[6]进行了6061-T6铝合金FSSW焊缝、RFSSW焊缝剪切试样疲劳行为对比试验,通过对疲劳试验后的焊缝进行显微光学观察研究疲劳裂纹扩展和疲劳失效模式,试验表明在所有载荷条件下,RFSSW焊缝疲劳强度均高于FSSW焊缝,此外对断裂表面采用扫描电镜SEM进行了分析。图11为5.4kN载荷下经历 $1.9 \times 10^3$ 次循环后失效的RFSSW焊缝剪切试样交叉区域显微光学照片,图12为2.2kN载荷下经历 $1.5 \times 10^5$ 次循环后失效的RFSSW焊缝剪切试样交叉区域显微光学照片。图13为断裂表面SEM照片,其中图13(a)为2.5kN载荷下经历 $1.5 \times 10^5$ 次循环后失效的下板上表面,图13(b)~(d)分别为对位置

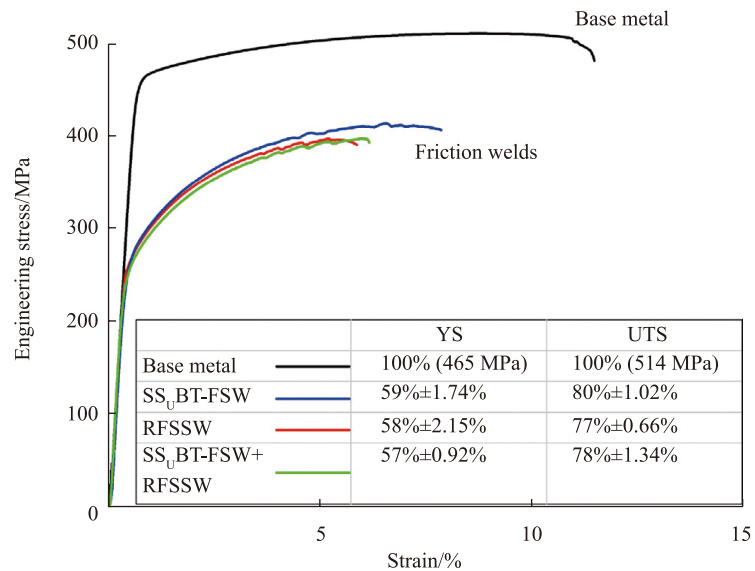


图7 RFSSW焊缝拉伸性能  
Fig.7 Tensile characteristic of RFSSW

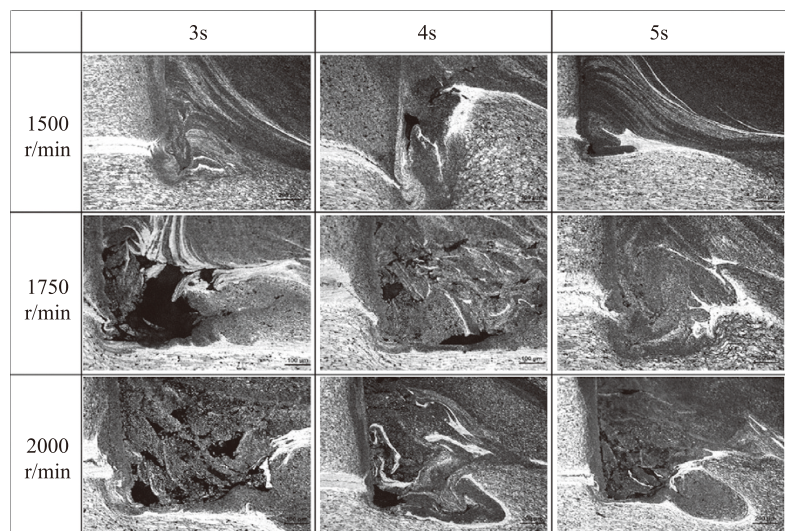


图8 焊接参数对飞边和空洞的影响  
Fig.8 Characteristics of hooks and voids at different processing parameters

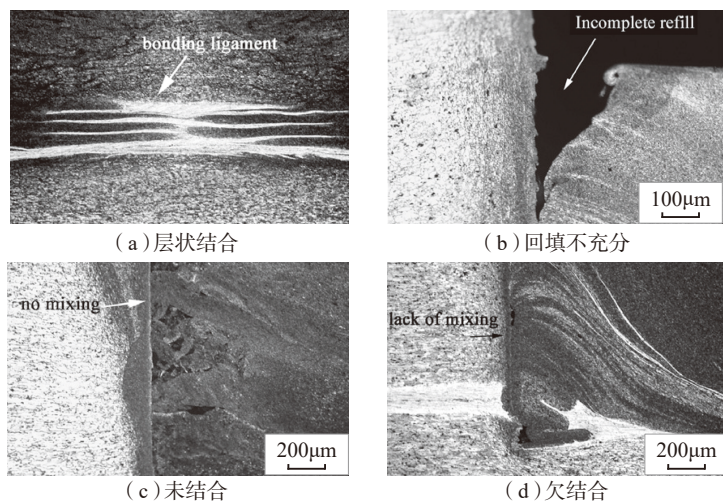


图9 焊缝缺陷特征  
Fig.9 Characteristics of joint defects

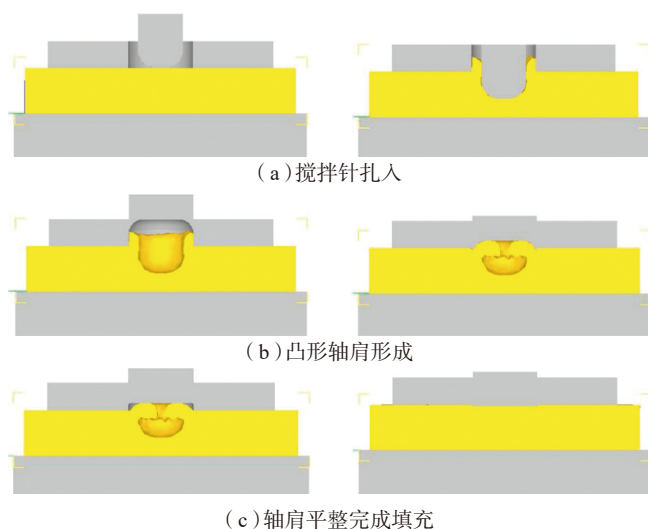


图10 RFSSW仿真分析的3个操作阶段  
Fig.10 Three operation stages of RFSSW simulation analysis

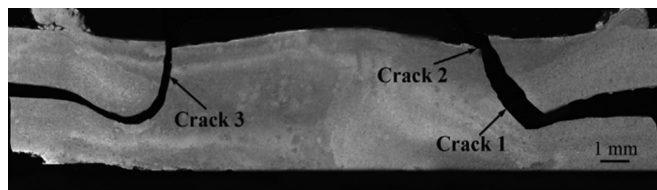


图11 5.4kN载荷失效RFSSW焊缝显微照片  
Fig.11 Micrograph of a failed RFSSW weld under 5.4kN

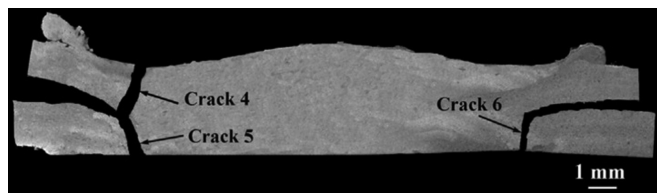


图12 2.2kN载荷失效RFSSW焊缝显微照片  
Fig.12 Micrograph of a failed RFSSW weld under 2.2kN

$B_1$ 、 $C_1$  和  $D_1$  的放大。

文献[7]采用RFSSW进行高强度AlZnMg(Cu)合金匙孔封闭,成功地完成了6mm板厚AA 7075-T651铝合金直径7.5mm匙孔的焊缝维修,研究表明RFSSW焊缝硬度分布呈W型、热影响区最低硬度值为母材的70%,分析了RFSSW焊缝组织演变过程和失效模式。其中,图14为RFSSW匙孔封闭焊缝微观组织;图15为RFSSW匙孔封闭焊缝拉伸试验。

此外,文献[8-10]等也研究了RFSSW的焊缝微观组织和力学性能问题,包括焊接参数的影响,涉及的铝合金材料包括5042、6061-T6和7075-T6等。

### RFSSW 异种材料连接研究

文献[11]进行了镁/镁同种材料、镁/钢异种材料RFSSW焊接,比较了微观结构、化学成分、界面作用、拉伸剪切和疲劳断裂等行为。研究表明,袖套扎入深度位于镁/钢界面之上0.05mm时,能够获得可以接受的镁/钢异种材料RFSSW焊缝强度。双相不锈钢DP600上的锌涂层能够加强镁/钢界面结合,镁/钢焊缝剪切性能、疲劳性能优于镁/镁焊缝。扫描电镜SEM和断裂分析表明,疲劳裂纹起源于镁板侧多个区域,然后扩展到母材。当最大应力 $<1.450$ kN时,镁/钢异种材料RFSSW焊缝断裂全部发生在镁板侧。事实上,当最大应力位于1.097kN和1.812kN之间时,镁/钢异种材料RFSSW焊缝多数发生在钢板侧。图16为镁/600双相不锈钢RFSSW焊缝SEM照片。图17为镁/镁、镁/600双相不锈钢疲劳断裂试样宏观形貌。

使用回填式搅拌摩擦点焊,既能进行Mg/Mg相同材质点焊,也能进行Mg/钢异种材质点焊。为了对二者进行比较,观察它们的显微组织,进行微观化学分析,通过界面反应和

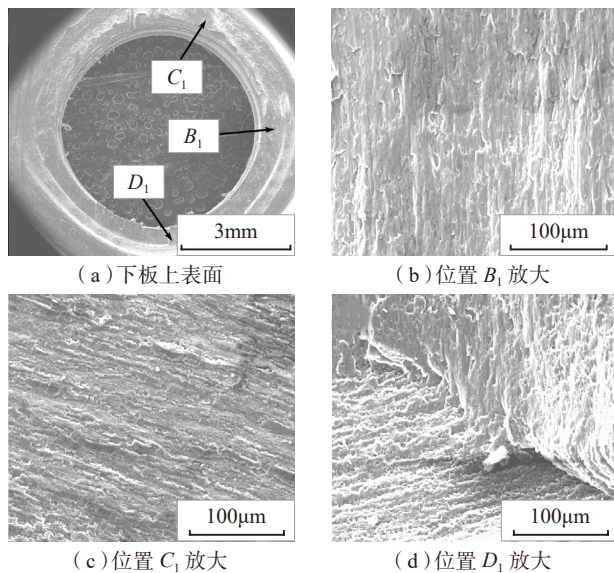


图13 RFSSW接头断裂表面SEM照片

Fig.13 SEM micrographs of fractured surfaces in RFSSW joint

一定的拉伸剪切和疲劳断裂来对 Mg/Mg 和 Mg/ 钢材料的焊缝进行评估判断。与 Mg/Mg 这样的点焊相比较, Mg/ 钢这样的异种材料的焊接表现出优越的重叠剪切静态和疲劳性能。当应力在 61450N 时,所选材料的焊缝在 Mg 母材板处断裂。而镁/钢焊缝的实际测试中的大多数疲劳断裂发生在钢板界面,然而当压力达到 61812N 时, Mg/ 钢焊缝有时会通过镁母材断裂。当在 Mg/ 钢焊缝中通过母材镁片发生疲劳断裂传播时,观察到优良的疲劳行为,并且归因于在周围焊接界面处的锌钎焊。扫描电镜和断口分析表明,母材镁片上的疲劳裂纹从位于镁一侧的多个位点开始,然后被固化到基体材料中。

在航空航天领域,减轻结构质量和降低制造成本是需要重点关注的问题。因为比较传统的铆接紧固连接工艺存在很大的局限性,焊接工艺又是结构组装部分的关键点所在,普遍受到工程技术人员的重视。而回填料搅拌摩擦点焊具有接头质量高、变形小以及节省能源等一系列优点,这些在航空航天制造领域具有极大的优势。

汽车工业中的应用,因为汽车的车身主要是铝合金材料,而对于铝合金车身焊接,相比电阻点焊,搅拌摩擦焊可以节省 40% 的对于设备方面的投资,与此同时减少了 99% 的

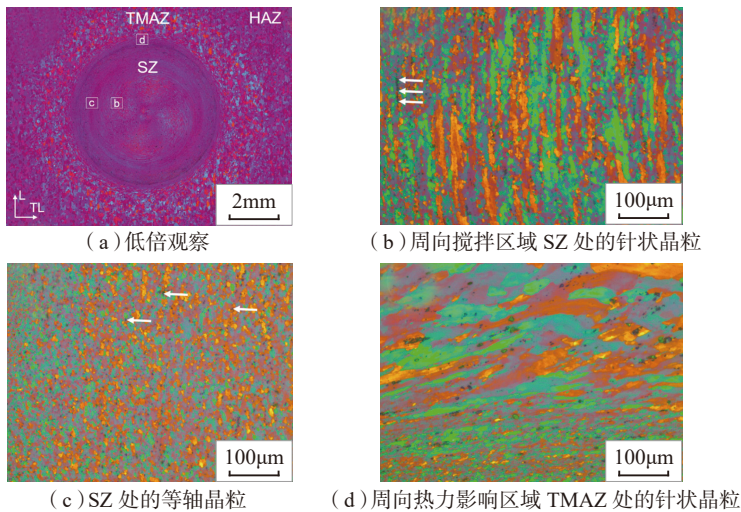
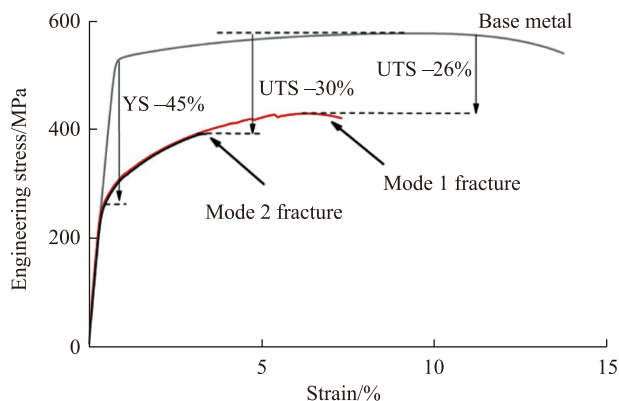
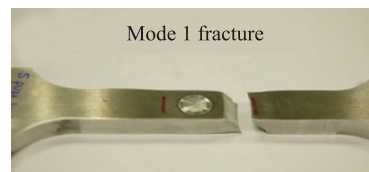


图14 RFSSW匙孔封闭焊缝微观组织

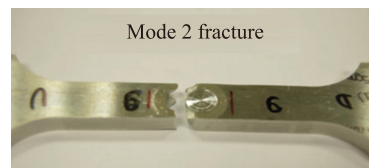
Fig.14 Microstructures of keyhole closure welds by RFSSW



(a) 应力-应变曲线



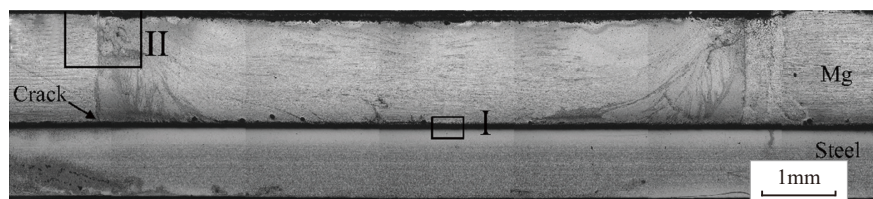
(b) 搅拌区域 SZ 处的断裂模式 1



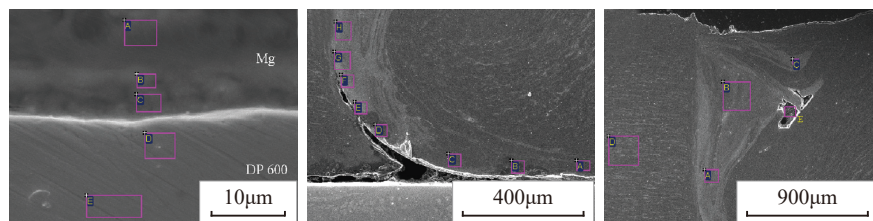
(c) 热力影响区 TMAZ 处的断裂模式 2

图15 RFSSW匙孔封闭焊缝拉伸试验

Fig.15 Tensile test results of keyhole closure welds



(a) 宏观照片



(b) 位置 I 的放大

(c) 裂纹的放大

(d) 位置 II 的放大

图16 镁/600双相不锈钢RFSSW焊缝SEM照片

Fig.16 SEM micrograph of Mg/DP600 dissimilar spot weld

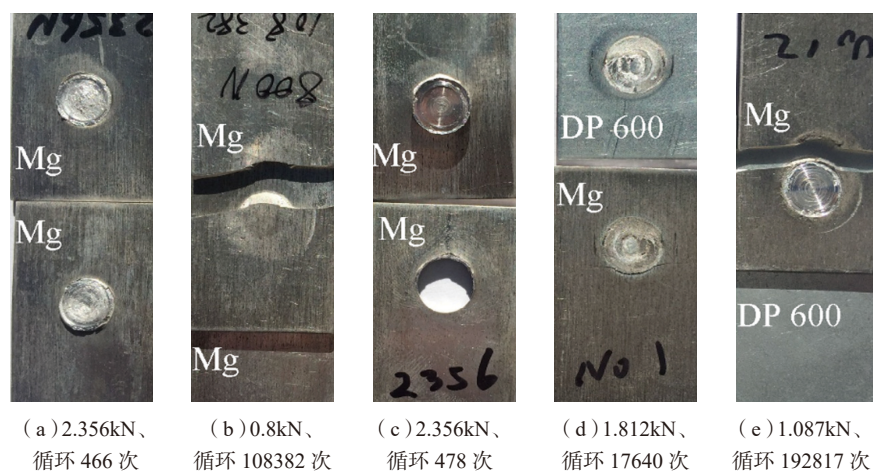
(a) 2.356kN、  
循环 466 次(b) 0.8kN、  
循环 108382 次(c) 2.356kN、  
循环 478 次(d) 1.812kN、  
循环 17640 次(e) 1.087kN、  
循环 192817 次

图17 镁/镁、镁/600双相不锈钢疲劳断裂试样宏观形貌

Fig.17 Macroscopic appearance of fractured fatigue specimens in Mg/Mg similar and Mg/DP600 dissimilar welds

能源。2005年, OAK RIDGE 国家实验室 FORD 汽车公司等采用回填料式搅拌摩擦点焊技术进行了 AHSS 薄板焊接的可行性研究。研究表明, 采用 RFSSW 技术对 600 MPa 的双相钢和 1310 MPa 的马氏体钢进行焊接试验, 可获得良好的冶金连接接头。

此外, 文献 [12-17] 等也研究了 RFSSW 异种材料连接问题, 包括铝 / AlSi 涂层钢板、铝 / 镀锌钢板、铝 / 高强钢板、异种铝合金、铝 / 碳纤维增强聚合物等的连接, 研究内容包括

焊接过程、焊缝组织、焊缝疲劳性能等力学性能。

## 讨论

RFSSW 焊接机器人是自动化焊接设备的重要发展方向之一, 对于机器人开发而言, 不只是点焊机头与重载工业机器人的简单集成, 而是一方面既需要优化点焊机头结构设计, 使之具有更好的可达性, 其目的是提升机器人对于复杂构件的适应能力; 另一方面需要结合 RFSSW 焊接工艺来开发与之相适应的机器人控制

程序, 为最终实现焊接过程的完全自动化奠定基础。

RFSSW 焊接过程的研究目前多数采用工艺试验, 深入的理论研究和数值模拟较少, 建议采用类似电弧焊的数值分析手段, 从 RFSSW 热源模型的建立出发, 对焊接热循环、应力、变形进行计算机模拟。

RFSSW 焊缝组织与性能分析除了常规力学性能试验, 建议考虑采用超声检验等无损探伤手段重点检测结合界面缺陷, 此外, 对于 RFSSW 焊缝疲劳性能研究应该加强疲劳性能水平与焊接工艺之间的关系研究。

## 结论

(1) RFSSW 焊接设备目前在试验研究中已经取得成功, 今后需要大力开发生产应用设备, 对于 RFSSW 焊接机器人而言, 需要着重解决点焊机头体量偏大、运动控制与焊接工艺结合程度不够等问题。

(2) RFSSW 焊接过程的研究已经积累了比较丰富的焊接工艺数据, 除了作为 FSW 尾孔消除的有效手段, 可以对 RFSSW 焊接用于连续焊缝焊接的可行性进行更多的研究, 重点与搅拌摩擦焊 FSW 进行技术经济综合性能对比。此外, 可以考虑对 RFSSW 焊接过程进行系统的计算机数值模拟研究。

(3) RFSSW 焊缝组织与性能能够满足产品焊接的基本需求, 但是可以考虑采用超声检验等更多的检验手段, 并加强焊缝疲劳性能的影响因素研究, 最终建立可供焊接设计之用的与焊接工艺对应的疲劳寿命曲线。

(4) 通过拉伸试样、断口观察等建立了 RFSSW 焊缝断裂模式, 可以考虑从更小的尺度如纳米尺度进行断裂过程的详细研究, 对于 RFSSW 异种材料连接的焊缝可以考虑并采取 X 射线衍射仪进行更细致的结合

界面材料成分分析。

### 参考文献

- [1] Harms-wende.30960-00-000-de\_RPS100\_Proспект[EB/OL]. [2017-11-27]. [https://www.harms-wende.de/fileadmin/hwh/HWH\\_brochures/30960-00-000-de\\_RPS100\\_Proспект.pdf](https://www.harms-wende.de/fileadmin/hwh/HWH_brochures/30960-00-000-de_RPS100_Proспект.pdf).
- [2] 中国铝业网. 机器人搅拌摩擦焊装备首次亮相北京·埃森展[EB/OL] [2017-11-27]. [https://www.alu.cn/aluNews/NewsDisplay\\_991538.html](https://www.alu.cn/aluNews/NewsDisplay_991538.html).
- [3] REIMANN M, REIMANN J, THOMAS M, et al. Refilling termination hole in AA 2198-T851 by refill friction stir spot welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 245: 157-166.
- [4] SHEN Z K, YANG X Q, ZHANG Z H, et al. Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints[J]. *Materials and Design*, 2013, 44: 476-486.
- [5] MALIK V, SANJEEV N K, SURESH H, et al. Finite element simulation of exit hole filling for friction stir spot welding—a modified technique to apply practically[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97: 1265-1273.
- [6] VENUKUMAR S, MUTHUKUMARAN S, SWAROOP G, et al. Failure modes and fatigue behavior of conventional and refilled friction stir spot welds in AA 6061-T6 sheets[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 61: 93-100.
- [7] REIMANN M, GOEBEL J, JORGE F, et al. Microstructure and mechanical properties of keyhole repair welds in AA 7075-T651 using refill friction stir spot welding[J]. *Materials and Design*, 2017, 132: 283-294.
- [8] TIER M D, ROSENDO T S, SANTOS D J F, et al. The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 997-1005.
- [9] CAO J Y, WANG M, KONG L, et al. Microstructure, texture and mechanical properties during refill friction stir spot welding of 6061-T6 alloy[J]. *Materials Characterization*, 2017, 128: 54-62.
- [10] KUBIT A, KLUZ R, TRZEPIECIŃSKI T, et al. Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18: 235-244.
- [11] SHEN Z, DING Y, CHEN J, et al. Comparison of fatigue behavior in Mg/Mg similar and Mg/ steel dissimilar refill friction stir spot welds[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 92: 78-86.
- [12] DING Y, SHEN Z, GERLICH A.P, et al. Refill friction stir spot welding of dissimilar aluminum alloy and AlSi coated steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 353-360.
- [13] DONG H G, CHEN S, SONG Y, et al. Refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to galvanized steel sheets[J]. *Materials and Design*, 2016, 94: 457-466.
- [14] CHEN K, LIU X, NI J. Keyhole refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to advanced high strength steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 452-462.
- [15] SHEN Z, DING Y, GOPKALO O, et al. Effects of tool design on the microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welding of dissimilar Al alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252: 751-759.
- [16] PABANDI H K, MOVAHEDI M, KOKABI A H. A new refill friction spot welding process for aluminum polymer composite hybrid structures[J]. *Composite Structures*, 2017, 174: 59-69.
- [17] GOUSHEGIR S M, SANTOS D J F. Influence of process parameters on mechanical performance and bonding area of AA2024carbon-fiber-reinforced poly (phenylene sulfide) friction spot single lap joints[J]. *Materials & Design*, 2015, 83: 431-442.

通讯作者: 高辉, 博士, 副教授, 研究方向为搅拌摩擦焊、海洋工程自动化, E-mail: gaohui@bipt.edu.cn。

## New Research Progress of Refill Friction Stir Spot Welding

ZHOU Canfeng, JIAO Xiangdong, GAO Hui

(Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Energy Engineering Advanced Joining Technology, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

**[ABSTRACT]** Compared with traditional friction stir spot welding, refill friction stir spot welding can produce perfect weld without exit hole, so it has bright future in some cases including termination hole repair of friction stir welds. New research progress of refill friction stir spot welding in the recent years has been reviewed, such as development of welding equipment, study of welding process and forming mechanism, analysis of weld microstructure and mechanical performance, and exploration of dissimilar materials, in addition, several important fields are indicated which include welding robot, keyhole closure process, weld fatigue and bonding between Al with other material.

**Keywords:** Refill friction stir spot welding; Keyhole closure repair; Weld microstructure; Fatigue

(责编 古系)