DOI: 10.3901/JME.2020.06.125

轻量化薄壁结构点连接技术研究进展*

李永兵^{1,2} 马运五³ 楼 铭² 张国涛² 张庆鑫² 祁 麟² 邓 琳²

- (1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240;
2. 上海交通大学上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室 上海 200240;
3. 大阪大学接合科学研究所 大阪 567-0047 日本)

摘要: 汽车、机车、飞机、火箭、飞船等载运工具普遍具有薄壁结构特征,薄壁结构的轻量化是提高载运工具性能和竞争力的关键。综合考虑轻量化的成本和效果,采用多材料、多结构混用,在降低产品自重的同时为产品设计提供更多的选择,已经成为轻量化技术发展的必然趋势。电阻点焊和铆接作为典型的点连接工艺,大规模应用于载运工具薄壁结构的制造,是先进制造领域的基础工艺。然而,高强钢、高强铝合金、铸铝、镁合金、复合材料等高比强度轻量化材料以及铸件、挤压型材等轻量化结构的应用对传统点连接工艺提出巨大挑战,也促进了传统点连接工艺的技术变革和新型复合连接工艺的创新发展。为此,本文从电阻点焊、铆接以及复合点连接工艺三个方面进行综述,系统阐述了近年来各工艺的研究进展,重点分析了新工艺的机理、优势、局限性、应用现状及发展趋势,旨在为新型轻量化薄壁结构的设计与制造提供有益借鉴。

关键词: 轻量化薄壁结构; 点连接技术; 电阻点焊; 铆接; 复合点连接

中图分类号: TG44

Advances in Spot Joining Technologies of Lightweight Thin-walled Structures

LI Yongbing^{1,2} MA Yunwu³ LOU Ming² ZHANG Guotao²
ZHANG Qingxin² QI Lin² DENG Lin²

- (1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
2. Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-walled Structures, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
3. Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Osaka, 567-0047, Japan)

Abstract: Vehicles such as automobile, trains, airplanes, rockets and spacecrafts are generally thin-walled structures. Lightweighting of the thin-walled structures becomes the key to improve the competitiveness of vehicle products. Considering the cost and effect of lightweighting, mixed use of multi-materials and multi-structures provides more options for product design of the thin-walled structures while reducing their weight, and becomes an inevitable tendency during lightweight process. Typical spot joining processes, e.g., resistance spot welding (RSW) and riveting are primary processes and important methods, which have been widely used to manufacture the thin-walled structures of traditional vehicles. However, the application of high specific strength materials, e.g., high strength steel, aluminum alloy, magnesium alloy, composite materials and lightweight structures such as extruded sections poses great challenges to the traditional spot joining processes, promoting the advancement of the spot joining process and the development of novel hybrid joining process. Therefore, this paper described the state of the art for RSW process, riveting process and hybrid spot joining process in recent years, and systematically summarized the corresponding research progress, advantages and disadvantages, application status and development trend, aiming to provide references for the design and manufacture of lightweight thin-walled structures.

Key words: lightweight thin-walled structure; spot joining process; resistance spot welding; riveting; hybrid spot joining

0 前言

汽车、机车、飞机、火箭、飞船等载运工具的

承载结构普遍具有薄壁特征。为进一步提高产品的载运能力,降低制造成本,同时满足日益严苛的节能减排法规,近年来,高强钢、铝合金、镁合金、复合材料等高比强度轻量化材料(表 1)广泛应用于载运工具轻量化薄壁结构的制造。综合考虑轻量化的成本和效果,通过多材料混用,充分发挥不同材

* 国家自然科学基金汽车产业联合基金重点资助项目(U1564204, U1764251)。20191211 收到初稿,20200115 收到修改稿

料各自的性能优势,在降低薄壁结构自重的同时也为其优化设计提供更多的选择空间,已经成为现阶段薄壁结构轻量化设计的重要手段。此外,轻合金铸件、挤压型材等轻量化结构与板材相比在提高薄壁结构刚度,降低焊装线复杂程度和工艺成本方面具有显著优势,其应用比例也不断提升。多材料、多结构混用已经成为轻量化薄壁结构发展的必然趋势^[1-2]。

表 1 典型高强度钢、铝合金和镁合金力学性能比较

材料特性	高强度钢 DP1000 ^[3]	铝合金 AA5182 ^[4]	铝合金 AA6061-T6 ^[5]	铝合金 AA7075-T6 ^[6]	镁合金 AZ31B ^[7]
密度/ ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	7.87	2.66	2.71	2.83	1.74
弹性模量/ GPa	220.0	70.9	71.9	72.0	45.0
屈服强度/ MPa	690	138	285	485	169
抗拉强度/ MPa	990	276	334	540	297
延展率 (%)	14.5	25.0	13.4	7.0	8.0
比强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m/kg}$)	126	104	123	190	171

点连接工艺是先进制造领域的基础工艺。目前已大规模应用于载运工具薄壁结构制造的点连接工艺主要有电阻点焊和铆接两大类型。电阻点焊工艺主要应用于钢质汽车车身以及不锈钢机车车体的制造,一辆典型的全钢汽车车身上有 4 000~6 000 个焊点,一节不锈钢机车车体上有 2 万~3 万个焊点。火箭、飞船、飞机等铝合金薄壁结构则主要由铆接完成,一架空客 A380 飞机上有将近 300 万个铆接接头。然而,与需要预制孔的铆接工艺相比较,电阻点焊工艺因其效率高,焊点自身密封性优异,以及轻量化优势(无需铆钉、填料等),也大量应用于航空航天领域。一个火箭贮箱上有 1 000~3 000 个焊点,一艘铝合金飞船返回舱上有 2 000~3 000 个焊点,而一架战斗机上则有 2 万~3 万个焊点。薄壁结构上数量众多的点连接接头是影响载运工具安全性和可靠性的关键因素。然而,基于多材料、多结构混用的设计理念,典型薄壁结构中越来越多地采用超高强度钢、超高强度铝合金等轻量化材料,铝-钢、铝-镁、金属-非金属等异质材料匹配,以及板材-型材、板材-铸件等异种结构匹配。这些新型轻量化材料和结构组合使得传统的连接技术面临巨大挑战。

本文围绕电阻点焊、铆接以及复合连接三种类型的点连接工艺进行综述,系统总结各工艺最新的研究成果、应用现状及发展趋势,旨在为载运工具轻量化薄壁结构的设计与制造提供有益借鉴。

1 电阻点焊工艺

电阻点焊是传统钢制车身焊装制造的核心工艺,自 1877 年 THOMSON 发明电阻焊原理以来,电阻点焊技术便因其效率高、成本低等优点广泛应用于薄板结构的大批量焊接装配,尤其在汽车制造业,电阻点焊工艺完成了 90%以上的装配量^[8]。然而新型轻量化多材料车身结构的制造使得传统电阻点焊工艺面临以下难题。

(1) 高强度钢中较高含量的合金元素使其碳当量较大,在焊接热循环影响下,熔核内极易形成大量淬硬、粗大的板条状马氏体组织和缩孔、热裂纹等缺陷^[9],接头韧性差、疲劳寿命偏低,易发生界面断裂失效。而强度更高的热成型钢(Press hardened steel, PHS)因其焊接过程飞溅倾向严重,导致熔核难以长大,焊接窗口狭窄,可焊性较差。

(2) 铝合金热膨胀系数大,材料表面存在厚度不均匀的高电阻、低热导、结构疏松且含水的氧化膜,使得熔核中容易形成缩孔、热裂纹^[10]等缺陷;电极/工件界面的高电阻热使点焊过程易产生飞溅,并导致电极粘连,严重降低电极寿命^[11],工艺可控性差。因此铝合金材料在出厂前需对其表面进行镀膜处理,或在焊前通过化学清洗和/或机械打磨等方法去除其表面氧化膜,显著增加了铝合金的应用成本。

(3) 铝-钢异种金属可以通过熔钎点焊实现连接,在焊接过程中钢侧保持固态而铝侧熔化,界面两侧原子相互扩散后在界面处形成一层脆性的铁-铝金属间化合物(Intermetallic compound, IMC)。铝合金表面氧化膜的存在会使铝侧产生较多热量,导致铝侧软化、减薄,IMC 层过厚,熔核中靠近 IMC 区域形成缩孔、裂纹^[12]等缺陷,承载时容易发生界面脆性断裂。此外,铝钢间热膨胀系数的差异使二者在点焊热循环中的变形不一致,接头残余内应力较大,残余应力与界面氧化膜等缺陷的耦合会进一步降低接头服役可靠性。

(4) 复合材料等非金属材料不导电,与金属板材匹配时无法形成导电通路,因而无法通过低成本的电阻点焊工艺实现连接。

针对上述难题,近几年陆续衍生出磁控电阻点焊、多环圆顶电极电阻点焊、金属凸点辅助电阻点焊、同轴电极单边电阻点焊等新型点焊工艺,有效改善了新材料、新匹配的可焊性,并赋予电阻点焊工艺新的生命力。

1.1 磁控电阻点焊工艺

针对汽车用先进高强钢电阻点焊接头马氏体组织粗大、接头韧性差和气孔、裂纹等缺陷导致接头易发生界面断裂等挑战, 上海交通大学 SHEN 等^[13]提出基于轴对称面内磁场的磁控电阻点焊(Magnetically assisted resistance spot welding, MA-RSW)工艺, 如图 1 所示。该工艺通过在电极杆上对称安装环形永磁体装置, 利用对称磁场的互斥作用, 在熔核部位产生轴对称径向磁场, 与焊接电流相作用产生垂直于轴对称面的洛伦兹力, 使焊接过程中熔核内的液态金属从单一平面流动^[14-15]转变为三维复合流动, 从而实现对熔核宏观形貌和微观组织的调控。SHEN 等将磁控电阻点焊技术应用于 DP590^[16]、DP780^[17]和 DP980^[18]的连接, 通过与传统点焊工艺相比, 发现磁控电阻点焊工艺能够改变熔核形状, 增大熔核尺寸, 消除内部缺陷, 细化晶粒, 因而显著提升高强钢接头的韧性和疲劳性能, 改善接头的断裂模式。

图 1 磁控电阻点焊装置和基本原理

LI 等^[19]进一步将磁控技术应用于机车车体奥氏体不锈钢的焊接, 发现外部磁场能够显著细化接头组织, 在熔核中心形成全等轴晶组织, 消除熔核中心缩孔缺陷; 同时能够提高接头中 δ 铁素体含量, 降低接头的裂纹敏感性, 如图 2 所示。天津大学 LI 等^[20-21]和上海交通大学 HUANG 等^[22]将磁控电阻点

焊工艺应用于镁合金、铝合金等轻金属材料的连接, 发现外加磁场除增大熔核尺寸、细化晶粒和消除缺陷外, 还可降低熔核内熔化金属的温度梯度、提高成分均匀性, 使凝固方式由传统的层状凝固转变为同时凝固、熔核内的非枝晶转变为等轴晶, 实现了对熔核微观组织和强化相分布的调控, 如图 3、4 所示。力学测试结果表明磁控电阻点焊工艺可以显著提高轻金属的连接效果。

图 2 301L 奥氏体不锈钢传统电阻点焊与磁控电阻点焊对比

图3 6061 铝合金传统电阻点焊与磁控电阻点焊对比

图4 传统电阻点焊与磁控电阻点焊熔核成分分布比较

针对车体单边点焊的需求,徐野等^[23]发明了单侧分体式径向充磁磁控装置(图5),首次在单面电阻点焊设备上实施磁控点焊工艺,突破了长期以来磁控装置只能双侧施加的技术挑战。

图5 单侧分体式径向充磁磁控电阻点焊装置及控制效果

磁控电阻点焊工艺在汽车用高强钢、机车用奥氏体不锈钢以及铝合金、镁合金等材料上的成功应用表明:磁控工艺不仅适用于铁磁性材料的焊接,也适用于非铁磁性材料,工艺适用性好。然而,在

加装磁控电阻点焊装置前,需充分考量磁控装置与待焊工件及工装之间的干涉问题。单侧分体式磁控装置的成功应用有效拓展了磁控工艺的应用范围。

1.2 阶跃脉冲电阻点焊工艺

PHS 是保证汽车车身碰撞安全并实现其低成本轻量化的首选材料,目前已广泛应用于汽车前保险杠以及车身 A、B、C 柱和车顶横梁的内部加强件。然而,高强度 PHS 材料的碳当量较高(0.45~0.60),导致其焊接窗口窄,飞溅倾向严重,限制了熔核的长大;熔核区淬硬的板条状马氏体组织使接头韧性较差,焊后聚集在熔核边缘的 Al-Si 镀层也导致应力集中倾向增加,因此 PHS 焊点极易发生界面断裂失效,使得汽车面临安全风险^[24]。

对于 HS1300T 等热成型钢,如图 6a 所示,汽车主机厂普遍采用多段恒定脉冲电流以降低飞溅倾向。然而如图 6c、6e、6g 所示,这种工艺策略在焊接中后期则会由于电流密度下降导致热输入不足,使得焊核无法持续长大。为了解决这个问题,上海交通大学 CHEN 等^[25]提出阶跃脉冲电阻点焊工艺,如图 6b 所示,该工艺中焊接脉冲随时间推移逐步递增,以补偿塑性环扩展导致的接合面电流密度降低。如图 6d、6f、6h 所示,在初期采用较低的焊接电流可有效防止熔核过快增长,抑制飞溅;后期增大焊接电流,可为熔核的持续生长提供足够的热输入,促进熔核进一步生长。因此,采用阶跃脉冲可有效扩大焊接窗口,抑制飞溅,获得更大的熔核尺寸。同时,不断生长的熔核使 Al-Si 镀层向熔核边缘聚集,使得熔核边缘残留的超薄镀层得以消除,如图 7 所示,降低了熔核周围的应力集中。因此,采用阶跃脉冲焊工艺后,PHS 点焊接头韧性大幅提升,失效模式也由界面断裂转变为纽扣断裂,如图 6i、6j 所示。

图 6 恒流脉冲和阶跃脉冲电阻点焊工艺及效果比较

图 7 阶跃脉冲和恒流脉冲电阻点焊工艺效果比较

1.3 多环圆顶电极电阻点焊工艺

针对氧化膜导致的铝合金点焊性能不稳定、电极磨损严重等问题, 美国通用汽车公司提出基于多环圆顶电极(Multi-ring domed, MRD)的电阻点焊工艺^[26]。焊接过程中多环圆顶电极帽在板材表面产生的应变远大于传统电极帽, 氧化膜在拉压交替应变中破碎, 使得铝合金基体金属与电极帽直接接触, 继而显著降低了电极/工件界面接触电阻及焦耳热^[27], 降低了表面飞溅倾向, 使电阻热集中产生于板材界面, 从而获得了质量稳定的铝合金点焊接头。

SIGLER 等^[28]研究了具有不同硬度、软化温度和导电性的 MRD 电极在 5 系、6 系铝合金焊接过程中的磨损情况。发现 5 系铝合金焊接时电极点蚀程度几乎是 6 系铝合金的两倍, 而高电导率的电极材料能够有效减少点蚀。焊接 6 系铝合金时, 环状圆

脊发生变形最终形成点蚀, 而高硬度材料的电极能够提高环状圆脊的变形抗力。因此, 在焊接 5 系、6 系铝合金时, 应选用硬度大、导电性好的电极材料。

DENG 等^[29]研究了喷砂电极和不同 MRD 电极下 1.2 mm 厚 6022-T4 铝合金的点焊性能。发现在相同焊接参数下, MRD 电极通过改变热量生成和分布获得了直径大、厚度小的焊核, 并消除了焊核向正极偏移的现象, 如图 8 所示。三种接头拉剪强度相当, 失效模式皆为界面断裂, 但 MRD 接头表现出更高的吸能能力, 如图 9 所示。SHI 等^[30]基于 MRD 电极研究了 0.8 mm 厚 6 系铝合金接头在拉剪和剥离加载条件下的疲劳性能。发现焊点的疲劳强度主要取决于焊核尺寸, 疲劳失效模式则与载荷水平相关, 高载荷水平下接头呈纽扣断裂, 低载荷水平下则为眉状断裂。

图 8 不同电极形貌下铝合金点焊接头宏观形貌

MRD 点焊工艺不仅能实现轻质材料铝合金的连接, 也可用于钢板的焊接。SIGLER 等^[31]的研究表明, 焊接钢板并不会导致环状圆脊过度软化。在镀锌钢板和铝合金的交替焊接试验中发现, 适当的修磨可避免钢表面的锌与铁残留在电极表面。

图9 电极类型对接头尺寸和力学性能的影响规律

通用汽车公司正在将 MRD 点焊技术推广应用于铝-钢异质材料连接。CHEN 等^[32]采用铝侧 MRD 电极、钢侧普通电极研究了工况波动对铝-钢异种材料点焊接头形貌和力学性能的影响。研究发现板材初始间隙和电极倾角均会增大界面局部的电流密度,从而引起板间飞溅,严重降低熔核直径和接头强度,如图 10 所示。CHEN 等^[33]采用类似 MRD 电极的多环阶梯状电极进行铝-钢电阻胶焊。研究表明:采用多环阶梯状电极能够减轻铜电极与铝板之间的反应,提高电极寿命;与传统单段式焊接工艺相比,两段式焊接工艺所得胶焊接头的拉剪强度提升了约 20%。然而,铝-钢接头中铝板严重的减薄降低了接头的有效承载面积,且在铝/钢界面处易存在残留氧化膜缺陷和较厚的 IMC 层,接头强度较低。RAO 等^[34]基于 MRD 电极研究了 1.2 mm 6 系铝合金与 2.0 mm 无间隙原子(Interstitial-free, IF)钢电阻点焊接头的疲劳性能。试验表明,较大的焊核尺寸、适度的板材翘曲、铝侧焊核中的柱状晶,以及富铁性等微观特征使得铝-钢异质接头的拉剪疲劳强度大于同样厚度匹配下的铝合金接头。

图10 铝-钢异种材料单侧 MRD 电极点焊接头形貌及焊接工况对飞溅影响规律

目前,通用汽车公司已将 MRD 电阻点焊技术成功应用于雪佛兰科鲁兹跑车和凯迪拉克 CT6 车身的制造,也用于所有车型中铝合金行李箱内外板的批量制造。基于 MRD 电极的铝-钢电阻点焊工艺

也已经应用于车身非结构件的试制。

1.4 金属凸点辅助电阻点焊

针对铝-钢电阻点焊时母材减薄严重、界面易产生缺陷、IMC 层难以控制和接头强度弱的问题,上海交通大学 ZHANG 等^[35-36]提出了金属凸点辅助电阻点焊(Metallic bump assisted RSW, MBaRSW)工艺。如图 11 所示,该工艺主要包含两个阶段,首先借助热源和定制成分的钎料焊丝在待焊板表面预置金属凸点,随后在局部金属凸点辅助下通过电阻点焊工艺实现铝-钢的异质连接。在焊接过程中金属凸点会被压溃,因此该工艺本质上属于凸点焊。凸点的焊后残留高度 h' 可通过调整工艺参数来控制,以满足焊点对结构胶层厚度的要求。

图11 金属凸点辅助电阻点焊工艺原理

为获得所需形状和尺寸的金属凸点, ZHANG 等^[35]在研究 Fronius 冷金属过渡弧焊(Cold metal transfer, CMT)pin 工艺的基础上,开发了金属凸点预置工艺,成功实现了在铝板、钢板表面预置几何形貌可控的铝基金属凸点,如图 12 所示。研究发现由于熔融态焊丝在铝、钢板表面润湿性的差异,使铝侧金属凸点较钢侧的直径更大、高度更低,且铝侧凸点在电流为 200 A 时的直径仍明显大于钢侧在 300 A 时的凸点。铝侧金属凸点更大的直径及其与铝板间的熔化焊连接使其与基板的结合性能显著优于钢侧金属凸点(铝、钢板厚度分别为 1 mm 和 1.6 mm)。

图12 不同熔化电流下预置金属凸点的形貌

在局部金属凸点辅助下, ZHANG 等^[36]借助电阻点焊工艺实现了铝-钢连接,接头截面形貌如图 13 所示。对比传统 RSW 工艺接头, MBaRSW 工艺接头形核较慢,但长大速度更快,且接头压痕深度更小,界面无明显缺陷。区别于单一界面(铝/钢界面)的铝-钢 RSW 接头, MBaRSW 接头由铝/铝界面和

铝/钢界面组成。其中, 铝/铝界面更细的柱状晶和铝/钢界面更薄的 IMC 层及更大的熔核直径和界面无缺陷等特点使 MBaRSW 接头的强度明显优于传统 RSW 接头, 具体如图 14 所示。

图 13 不同焊接模式下焊核形貌演化规律(焊接电流: 8 kA, 其中 MBaRSW/Al 表示在铝板侧预置金属凸点, MBaRSW/St 则表示在钢板侧预置金属凸点)

图 14 不通焊接模式下接头拉剪强度

MBaRSW 工艺中金属凸点的成分可根据待焊材料的属性进行定制, 以满足不同板材匹配的连接需求; 且可借助局部金属凸点的凸焊本质降低焊接电流, 实现节能。相较于传统焊接工艺中采用分离式过渡层辅助铝-钢焊接^[37], 焊前通过熔化焊可靠预置凸点使得 MBaRSW 工艺具有更好的可行性。

德国马格德堡大学的 ZVORYKINA 等^[38]采用类似 MBaRSW 工艺的思想实现了铝-钢异质材料的连接。如图 15 所示, 该工艺首先采用超声波或凸焊工艺将长约 10 mm 的柱状焊丝焊接在待焊铝板上, 随后在部分压溃“焊丝凸台”的辅助下借助“硬规范”(大电流、短时间)实现 6016-T4 铝合金与 22MnB5 钢(含 Al-Si 镀层)的胶焊。该工艺与 MBaRSW 工艺一样可采用定制成分焊丝在板材表面预置所需的过渡层, 因而能够适应不同板材匹配的需求。但采用超声波或凸焊工艺将柱状焊丝焊接于铝板上时, 需要专用装置将焊丝可靠准确的定位于板材表面, 工艺相对复杂。

图 15 过渡层辅助电阻点焊工艺示意图

1.5 同轴电极单边电阻点焊

针对碳纤维复合材料等非金属材料不导电, 采用传统电阻点焊无法在板材中形成导电通路的问题, 德国伊尔默瑙工业大学 SZALLIES 等^[39]提出了同轴电极单边电阻点焊(Coaxial one-side resistance spot welding, COS-RSW)工艺, 其原理如图 16 所示。焊接过程中, 采用同轴设置的内、外电极在金属侧形成导电回路并产生焦耳热, 进而以金属作为热源对下层非金属材料进行加热。随着界面附近温度的升高, 复合材料中的树脂熔化并在金属表面润湿, 最终通过界面两侧分子的扩散形成化学键合, 如图 17 所示。研究发现, 单边点焊前, 通过激光在金属表面加工出微型沟槽能够在界面化学键合的基础上实现两种材料的微机械嵌合, 进一步提升界面结合强度。

图 16 同轴电极单边电阻点焊

图 17 同轴电极单边电阻点焊接头形貌与微观组织

日本大阪大学 REN 等^[40]建立了电-热-力多物理场耦合的铝合金-碳纤维复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)的 COS-RSW 过程有限元仿真模型。发现随着界面最高温度的升高, CFRP 熔化区面积增大, 接头强度也随之增加。而当界面最高温度超过 CFRP 中树脂的分解温度时, 材料分解导致铝-CFRP 的有效结合区面积减小, 接头强度降低, 如图 18 所示。因此, 保证 COS-RSW 接头强度的关键在于对界面温度的精确控制。

图 18 铝合金-CFRP 单边电阻点焊工艺焊接电流、界面温度及接头强度关系

2 铆接工艺

铆接工艺通过材料的塑性变形实现连接, 与螺栓连接同属于机械连接。螺栓连接广泛应用于承载能力较大和比较重要的静载受力构件, 然而铆接则大规模应用于航空、航天、汽车等受动荷载的薄壁

层压结构中。铆接工艺过程无热输入, 可以有效避免电阻点焊时表面氧化膜、界面硬脆相、导电性等带来的系列问题, 因此在连接轻合金、非金属材料以及异质材料方面具有明显的优势。现有典型的适用于自动化大批量生产的铆接方法主要包括不使用紧固件的无铆钉铆接工艺和需要使用紧固件的铆接工艺。其中使用紧固件的铆接工艺又可以根据工艺方便程度分为单侧连接和双侧连接两种方式。具体分类如图 19 所示。

图 19 铆接工艺分类

2.1 无铆钉铆接

无铆钉铆接(Clinching)因为无需紧固件, 工艺成本低, 在大规模生产中具有明显的优势。无铆钉铆接工艺过程中板材在冲头和模具的共同挤压作用下发生局部塑性变形并形成机械自锁, 其接头强度主要依赖于板材间的机械干涉量, 强度普遍不高, 因此传统无铆钉铆接工艺主要用于连接车身外覆盖件等非承载结构。

日本丰桥科技大学 ABE 等^[41]在传统无铆钉铆接工艺的基础上提出了预成形无铆钉铆接工艺。如图 20 所示, 在铆接前对下层板进行预成形, 从而降低接头颈部处的上层板的减薄程度, 避免开裂, 有效提高了低延展性材料的可铆性。

图 20 预成形无铆钉铆接工艺

德国帕德博恩大学 VORDERBRUGGEN 等^[42]提出了用于实现金属材料与玻璃纤维增强塑料 (Glass fiber reinforced plastic, GFRP) 连接的热辅助弹性模具无铆钉铆接工艺, 如图 21 所示。通过采用弹性组合模具代替传统的刚性模具, 既可以提高金属材料的可成形性, 又可以减少 GFRP 的损坏。同时, 通过对连接区域的 GFRP 板进行局部加热软化, 可以提高材料的延展性, 避免内部纤维破坏并获得更大的底切量。以 1.5 mm 厚 DC05 钢与 2 mm 厚 GFRP 为研究对象, 采用该弹性模具获得的接头拉剪强度比传统刚性模具提升 250%。若采用热辅助方法将 GFRP 板加热至 180 °C, 可使拉伸强度进一步提高 20%。

图 21 热辅助无铆钉铆接工艺

2.2 自冲铆接

自冲铆接 (Self-piercing riveting, SPR) 是全铝车身和多材料混合车身中应用最为广泛的一种机械连接工艺。自冲铆接工艺采用半空心铆钉, 通过冲压方式高速刺穿上层板, 并在凹模的作用下使铆钉腿部扩张, 最终与下层板形成机械自锁。

SPR 工艺实现了冲、铆一次完成, 接头强度与无铆钉铆接工艺相比具有明显优势^[43-45]。近年来, 关于 SPR 工艺的研究主要聚焦复合材料连接以及通过工艺优化提升高强度、低延展性金属材料的可铆性等方面。

上海交通大学 MA 等^[46]研究了铆钉长度、硬度和模具深度、直径以及凸起高度等工艺要素对铝钢 SPR 可铆性和力学性能的影响规律, 发现采用硬度较低的铆钉和空腔容积较大的模具能有效提升铝钢 SPR 接头的可铆性, 采用模-钉体积比略大于 1 的铆钉和模具组合能够避免接头底部开裂和钉头凸起过高等缺陷。并建立了接头拉剪强度与上层铝板厚度和底切量的关系公式。如图 22 所示, 随底切量增加, 接头拉剪强度呈近似线性增大, 当底切量增大到一定程度时, 接头失效模式由自锁失效转变为上层板拉脱失效, 此时接头拉剪强度达到极限。上层板较薄时容易出现上层板拉脱失效, 而上层板较厚时则容易出现自锁失效。

图 22 铝钢 SPR 接头拉剪强度与底切量关系
(其中 TST 表示上层板撕裂失效; ILF 表示自锁失效)

SPR 工艺实现板材可靠连接的关键在于半空心铆钉刺入被连接材料的过程中能够充分变形、张开形成机械自锁而不发生镦粗或断裂。为了实现这一目标, 现有研究大都采用优化铆钉或模具形貌的方法, 而美国科罗拉多矿业大学 HALL 等^[47]采用淬火和回火的方式对铆钉进行脱碳处理, 在不损失铆钉强度的前提下, 成功提升了铆钉的变形能力, 使铝合金 AA6111 和 PHS 的 SPR 接头底切量和强度均得到大幅提升。

采用 SPR 工艺实现 CFRP 和金属的连接近年来受到较多关注。湖南大学 JIANG 等^[48]研究了铆钉几何尺寸对 CFRP-铝合金和钢-铝合金电磁自冲铆接 (Electromagnetic self-piercing riveting, E-SPR) 接头

的影响。发现 CFRP-铝合金的 E-SPR 接头底切量随铆钉尖端倾角增加而增大,而在铆接钢-铝组合时,由于铆钉穿透钢板过程中发生了明显墩粗现象,倾角越大越不利于铆钉穿透上层板,因此底切量随铆钉尖端倾角增大而减小。德累斯顿工业大学 HIRSCH 等^[49]采用仿真的方法优化 CFRP-铝的 SPR 工艺,实现了对 SPR 接头中 CFRP 材料分层和断裂行为的准确预测,如图 23 所示。

图 23 CFRP-铝合金 SPR 工艺仿真与试验对比

2.3 流动钻铆

流动钻铆,又称流钻螺钉、热熔自攻丝技术等,该技术已经广泛应用于板材与空心/半空心结构的连接。该技术通过高速旋转的驱动头带动特制的螺钉,在下压力作用下与待连接对象进行摩擦,使待连接板材局部发生软化和塑性流动,形成大于板材总厚度的连接区域,最终与螺钉外侧螺纹通过攻丝啮合实现连接。其工艺过程包括定位热熔穿透、锥孔成形、螺钉拧入、紧固落座等步骤,如图 24 所示,整个工艺过程耗时约 2 s。目前该技术所用螺钉供应商主要包括 EJOT、ARNOLD 和 SEMBLEX,铆接设备供应商主要包括 Atlas CopCo、Deprag 和 Weber,具体如表 2 所示。因专利原因,不同供应商对该工艺的命名有所不同,但工艺基本原理一致。

图 24 流动钻铆工艺过程

表 2 流钻螺钉工艺主要供应商

供应商	产品类型	工艺名称及缩写
EJOT	螺钉	Flow Drill Screwing, FDS
ARNOLD	螺钉	Flowform
Semplex	螺钉	Flow Drill Screwing, FDS
Weber	铆接设备	Flow Drill Screwing, FDS
Atlas CopCo	铆接设备	Flow Drill Fastening, FDF
Deprag	铆接设备	Deprag Fastening System, DFS

流动钻铆工艺的适用性广,能够用于连接各种铝合金、钢-铝、复合材料与铝等多种材料组合。然而,随着轻量化需求的不断提升,被连接材料越来越强,而厚度越来越薄,该工艺面临需要预制孔的问题。美国密西根大学 HUANG 等^[50-52]研究了上层板开孔对铝合金流动钻铆接头力学性能的影响,发现在无预开孔的接头中,铝合金被螺钉挤入板材之间,最终接头中板材之间形成了间隙。而通过预开孔能够消除板材间隙,并显著提升接头的剪切强度和剥离强度,如图 25 所示。德国帕德博恩大学 NAGEL 等^[53]在采用流动钻铆工艺连接 CFRP 和铝合金时发现被切断的上层 CFRP 板的树脂碎屑残留在螺钉和铝板之间,导致二者之间无法形成完美的螺纹啮合,从而严重影响接头力学性能。美国克莱姆森大学 SKOVRON 等^[54]提出了电辅助流动钻铆工艺,与常规流动钻铆工艺相比可以大幅缩短工艺周期,但电辅助增加了工艺的复杂性。

图 25 预制孔对流动钻铆接头的影响

2.4 电磁铆接

在航空航天薄壁结构制造中,当前的技术条件还难以实现大型构件的整体成形,数以万计的零部件必须依赖连接技术实现装配。因为焊接结构易产生应力集中导致构件疲劳强度降低;螺栓连接结构可靠性较低,密封性和表面气动性能差;相比之下,干涉配合铆接连接结构牢固、可靠、密封性好,广泛应用于飞机、飞船、火箭等大型薄壁结构的制造。该工艺包括定位、制孔、放钉、墩头等步骤。传统的干涉配合铆接工艺采用气动或液压的方式实现墩头,容易导致铆钉扩张不均匀,严重影响接头的静态强度、疲劳寿命。

20 世纪 70 年代美国和俄罗斯率先开展电磁铆接(Electromagnetic riveting, EMR)技术研究,借助涡流磁场产生的冲击力,在几百 μs 到 1 ms 的时间内完成铆钉墩头,在钉杆和钉孔之间形成均匀的干涉量^[55],如图 26 所示。该技术国外理论研究基本成熟,并已应用于航空航天领域。然而,EMR 过程应变速率高,铆钉墩头形成绝热剪切带,工艺控制不当会导致微裂纹,使得传统的铆接工艺与装备在国内仍然占主导地位。

图 26 电磁铆接工艺基本原理

湖南大学 CUI 等^[56]通过建立磁-热-力耦合的有限元模型揭示了绝热剪切带是由于墩头材料的径向塑性流动不均匀所导致,而 EMR 过程的高应变速率使大变形区域局部剧烈升温,又加剧了塑性流动的不均匀化,促使微裂纹形成,并指出通过优化墩头模具形貌可以避免绝热剪切带处的裂纹。

对于火箭飞行器蒙皮、客机机身等领域中复合材料与金属的连接,EMR 技术因其干涉量均匀、冲击损伤小等特征展现出巨大优势。哈尔滨工业大学张旭^[57]发现复合材料置于铆钉圆头一侧时铆接效果明显优于置于墩头一侧,并且铆钉钉杆变形均匀干涉配合紧密,没有明显缝隙,复合材料宏观上也未出现挤压破坏现象。湖南大学 JIANG 等^[58-59]研究了 CFRP-铝合金 5182 的 EMR 接头墩头直径对接头剪切疲劳寿命的影响,发现墩头直径过小时接头刚度较差,循环加载过程中铆钉轴向拉应力增加,导致墩头附近裂纹扩展速率增加,疲劳寿命较低。而墩头直径较大时,虽然接头刚性增大避免了铆钉提前失效,但大墩头直径对应的高墩铆力导致 CFRP 层间损伤,循环加载时裂纹沿 CFRP 铆孔附近扩展,疲劳寿命也较低。只有当墩头直径为钉杆直径约 1.5 倍时,疲劳裂纹沿铆孔附近铝板扩展,接头疲劳寿命最高。

CFRP 和铝合金异质接头在服役过程中极易发生电化学腐蚀破坏,JIANG 等^[60]进一步研究了盐雾循环腐蚀对 CFRP-铝合金 EMR 接头疲劳性能的影响。研究发现接头的临界腐蚀时间为 3 周,腐蚀周期小于 3 周时接头疲劳寿命略有下降但裂纹仍沿铆孔附近铝板扩展;而腐蚀周期超过 3 周以后,疲劳裂纹在铝板中的多个腐蚀点处同时扩展,接头疲劳寿命严重降低,如图 27 所示。

2.5 摩擦铆接

干涉配合铆接工艺虽然具有优良的接头性能,但预制孔工序导致工艺复杂、周期长,且制孔工序会产生毛刺等多余物,严重影响飞行器的可靠性。德国亥姆赫兹(HZG)国家研究中心提出了摩擦铆接(Friction riveting)工艺^[61-62]用于实现热塑性复合材料连接。如图 28 所示,该工艺采用实心金属棒旋转插入待连接材料,通过摩擦热使棒料在铆入过程中

图 27 盐雾循环腐蚀周期对 CFRP-铝合金电磁铆接头疲劳寿命影响

产生墩粗大变形,从而在材料中形成自锁。图 29 所示^[63]为采用 Ti6Al4V 铆钉获得的两层复合材料 CF-PEEK(Carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone)的摩擦铆接接头形貌。

图 28 摩擦铆接工艺

图 29 CP-PEEK 摩擦铆接接头形貌

该研究中心的 BORBA 等^[64]研究了 CF-PEEK 摩擦铆接接头在经历不同能量的正向冲击和剪切疲劳循环后的剩余静态强度,如图 30 所示,发现接头在经历 0~20 J 能量的正向冲击和 1 百万次剪切疲劳循环后接头的剩余静态强度仍为原始接头静态强度的 90%以上,充分证明摩擦铆接接头具有较强的抗冲击和抗疲劳性能。

2.6 搅拌摩擦盲铆

抽芯铆接(Blind riveting, BR)工艺为实现板材与板材/型材的单面连接而设计,然而预制孔过程增加了工艺复杂性,限制了其大规模应用。美国通用汽车公司结合传统的抽芯铆接和搅拌摩擦点焊工艺提出了搅拌摩擦盲铆(Friction stir blind riveting, FSBVR)工艺^[65]。如图 31 所示,通过驱动抽芯铆钉高速旋转穿透被连接板材,消除了传统抽芯铆接工艺中的制孔和放钉工序,简化了工艺流程,最终通过回抽芯轴使钉体变形,锁住被连接材料。

图30 摩擦铆接接头在经历不同能量正向冲击和剪切疲劳循环后的剩余静态强度对比

图31 搅拌摩擦盲铆工艺

美国夏威夷大学 MIN 等^[66]开展了 6 系铝合金与 AM60 镁合金的 FSBR 工艺研究，通过工艺参数优化有效避免了穿孔过程中镁合金脆性断裂问题。FSBR 工艺过程包括铆钉的旋转、进给、回抽以及芯轴移除等步骤，过程十分复杂，为了实现 FSBR 工艺自动化，上海交通大学 MA 等^[67]采用 3 伺服驱动的机器人铆枪实现了 FSBR 工艺过程中送钉、旋转进给、回抽和芯轴移除等过程的全自动。基于该试验系统研究发现，FSBR 接头中剩余芯轴相对铆钉体的位置对接头的拉剪强度和失效模式起决定性作用；当剩余芯轴端部低于板材界面时，接头呈现为铆钉体剪切失效，强度和能量吸收相对较低；而当剩余芯轴端部高于板材界面时，在芯轴的支撑下铆钉体不容易发生剪切失效，接头转而以铆钉体拉出的形式失效，强度和能量吸收均大幅提升，如图 32 所示。

图32 FSBR 接头中剩余芯轴高度对接头性能的影响

FSBR 工艺不仅能够实现轻金属的连接，还能够实现轻金属与 CFRP 之间的连接。美国夏威夷大

学 LI 等^[68-69]成功将 FSBR 工艺应用于连接 CFRP 复合材料和轻合金。美国罗格斯大学 GUO 等^[70]通过采集 CFRP 与铝合金 FSBR 工艺过程中的力、扭矩等信号并结合工艺参数、板材搭接顺序等信息，建立了工艺过程信号与 FSBR 接头质量的对应关系，形成了 FSBR 工艺在线监测方法。

FSBR 过程中铆钉附近材料在铆钉旋转的作用下发生大塑性变形，伴随着温度的升高，材料发生动态再结晶。美国夏威夷大学 WANG 等^[71]基于有限元和粒子法建立了 FSBR 工艺过程仿真模型，对铆钉附近材料的温度历史及材料流动行为进行预测，如图 33 所示。美国爱荷华大学 SAMANRA 等^[72]基于仿真得到的温度历史并结合元胞自动机仿真方法对 FSBR 过程中材料微观组织的演化规律进行研究。通过位错密度随温度、应变和应变速率的演化规律对连接区的动态再结晶行为进行预测，预测结果与试验吻合，如图 34 所示。

图33 有限元与粒子法结合模拟 FSBR 工艺过程材料流动

图34 元胞自动机仿真模拟 FSBR 接头中铆钉附近材料微观组织形貌与试验对比

美国宾州州立大学 KHAN 等^[73-75]将 FSBR 工艺的铆钉微型化，开发了微型搅拌摩擦盲铆接(μ FSBR)工艺。FSBR 工艺通常采用钢制铆钉，直径为 5~8 mm，而 μ FSBR 工艺采用铝制铆钉，直径仅

2.0 mm,实现了1层0.2 mm厚铜箔与3层0.2 mm厚铝箔的多层异质材料连接,如图35所示。

图35 单层铜箔与3层铝箔的微型搅拌摩擦盲铆接头

3 复合连接方法

通过工艺的极致优化和创新应用能够进一步提升传统电阻点焊和铆接工艺的生命力,提升新型轻量化薄壁结构的可制造性。但是面向更加苛刻的接头质量要求,以及超强、超轻的材料或结构匹配,传统工艺则面临无法逾越的挑战。主要表现在以下三个方面。

(1) 铝钢异质材料电阻点焊的本质是通过界面金属间化合物实现铝钢的熔钎焊连接。通过热输入优化或添加中间过渡材料可以降低硬脆相厚度,提高接头韧性,但是接头性能无法达到母材强度。

(2) 镁合金、铸铝、超高强铝合金等材料在室温下延展率普遍较低(表1),铆接过程产生的塑性大变形使板材不可避免产生内部裂纹或脆性断裂,甚至导致接头底部材料脱落,严重影响接头的静动态力学性能。

(3) 超高强钢、超高强轻合金等材料铆接时铆钉会在刺穿上层板之前发生墩粗失效,无法与下层板材形成机械自锁。这些材料必须采用预制孔以实现铆接,制造成本高,效率低。

(4) 采用流动钻铆工艺可以实现板材与空心/半空心结构的连接,但是下层板刺穿引起的腐蚀风险,铆钉刺穿下层结构后凸出的较长的尖端部分,相对较重的铆钉重量,以及高成本使其应用受限。

针对以上问题,国内外学者借助焦耳热或摩擦热在软化材料方面的优势,同时充分利用熔化焊、固相焊以及机械连接的强度优势,开发了电阻单元焊、自冲摩擦铆焊、摩擦塞焊、电阻压铆等新型复合连接方法,为薄壁结构的轻量化设计与制造提供了系列使能技术。

3.1 电阻单元焊

德国帕德博恩大学 MESCHUT 等^[76]提出了电阻单元焊(Resistance element welding, REW)工艺,通过铆接与电阻点焊的复合,实现了铝合金与超高强

钢异质匹配的高强度连接。该工艺由预置铆钉、电阻点焊两个阶段组成,工艺的核心是高强度钢质空心铆钉,即 element 的引入。如图36所示,预置铆钉阶段的目的是通过冲裁工艺将钢制铆钉机械镶嵌于铝合金板材的待连接部位;而电阻点焊阶段的目的是利用高电阻热实现高强度铆钉与下层超高强钢板的焊接,在铆钉末端与钢板之间形成焊核,将铝板锁在铆钉和钢板之间,从而实现铝合金与钢之间的可靠连接^[77]。

图36 电阻单元焊工艺过程示意图

如图37所示^[76,78],REW工艺解决了传统SPR工艺中超高强钢变形抗力大与接头形成过程材料大变形需求之间不可调和的矛盾,通过钢质铆钉与下层板之间的电阻点焊实现铝钢之间的间接连接,具有较好的适应性。如表3所示,REW工艺在实现铝合金与高强钢可靠稳定连接的同时,其接头力学性能也略高于SPR接头。上海交通大学的何冠中等^[79]建立了REW工艺预置铆钉阶段冲裁过程有限元仿真模型,研究了铆钉头部和腿部形貌、落料模凸台宽度和高度,以及铆钉-落料模间隙等五个几何特征对冲裁过程及冲裁质量的影响,实现了铆钉和冲裁模具的优化。天津大学的凌展翔等^[80]研究了REW工艺参数对接头宏观形貌、微观组织、力学性能及断口形貌的影响。

图37 铝/超高强钢 SPR 和 REW 接头宏观形貌对比

表3 铝/(超)高强钢 REW 和 SPR 工艺接头拉剪性能比较

来源	工艺	拉剪搭接长度/mm	铝板类型及厚度	钢板类型及厚度	剪切强度/kN
MESCHUT 等 ^[76]	REW	16	2 mm	1.5 mm	4.8
	SPR		AA6061-T6	22MnB5	4.2
MESCHUT 等 ^[81]	REW	16	2 mm	1.5 mm	4.7
	SPR		AA6016-T6	22MnB5	4.2
LING 等 ^[82]	REW	25	2 mm	1.4 mm	7.4
	SPR		AA6061-T6	DP780	7.4
LING 等 ^[83]	REW	25	2 mm	1.8 mm	7.0
	SPR		AA6061-T6	22MnB5	7.0

与SPR工艺相比,REW工艺具有极好的柔性,能够实现铝合金与任何强度钢板的连接。但REW工艺增加了置钉工序与设备,工艺复杂,生产成本

高;同时,点焊阶段铆钉及焊枪电极帽需保持较高的同轴度,对铆钉识别和定位精度要求高,进一步增加了工艺的复杂性。

3.2 摩擦塞焊

德国帕德博恩大学 HAHN 等^[84]通过复合摩擦点焊与铆接,提出了摩擦单元焊(Friction element welding, FEW)工艺,用于连接铝合金与超高强度钢。美国克莱姆森大学 SKOVRON 等^[85]对该工艺开展了深入研究。如图 38 所示^[86],该工艺也采用了类似于 REW 工艺的实心铆钉,铆钉也放置于铝合金侧,工艺过程中钢质实心铆钉在轴向进给的同时做高速旋转,所产生的摩擦热软化上层铝合金板以提高其流动性。随着实心铆钉进给并穿透上层铝板,铝合金材料被挤出并流至铆钉头部下方的凹槽。随后实心铆钉接触下层高强度钢板,在摩擦热和轴向压力的共同作用下,铆钉墩粗变形,铆钉-钢板接触面积增加。在达到预定进给深度和能量输入后,铆钉停止旋转,驱动头持续保持压力。接头冷却后,铆钉与下层钢板形成固相连接,从而将铝板“锁”在铆钉盖与下层板之间,实现铝钢的间接连接^[87-88]。

图 38 摩擦单元焊工艺示意图

图 39 所示为典型铝-高强钢的 FEW 接头。可以看出,FEW 工艺通过实心铆钉穿透上层轻合金板材,使得钢质铆钉和下层高强度钢板之间实现连接,其工艺本质是钢与钢之间的固相摩擦焊,因此避免了铝-钢两种物理、冶金属性差异大的材料的直接焊接。

图 39 铝-高强钢摩擦单元焊接头

SKOVRON 等^[85]将 FEW 工艺分为刺穿、清理、焊接和压缩四个阶段,并进一步研究了 FEW 过程

中表面清理阶段和摩擦焊阶段关键参数(端部载荷、主轴转速和铆钉进给量)变化对摩擦单元焊接头焊后钉帽高度、固相焊区直径、钉帽下挤出金属填充面积、温度和显微硬度等质量评价指标的影响,如图 40 所示。其中表面清理阶段的目的是通过热和摩擦去除钢板表面油污和涂层,这对于镀锌高强钢或具有铝硅镀层的硼钢来说非常重要。研究发现,表面清洗参数对工艺时间和能量输入的影响最大,而摩擦焊阶段参数对实心铆钉所受最大扭矩、焊后钉帽高度和钉帽下填充面积的影响最大,两个阶段的轴向力均影响固相焊区域的直径,所有参数均影响温度^[89]。

图 40 摩擦单元焊接头典型质量评价指标

美国克莱姆森大学的 VARMA 等^[90]建立了摩擦单元焊工艺过程热-力学耦合有限元模型,采用欧拉-拉格朗日耦合方法对摩擦单元和工件的应力、塑性变形和温度演化,以及工件材料流动进行预测,揭示了焊接过程中的物理机制,如图 41 所示。RUSZKIEWICZ 等^[91]针对 6061 铝合金和 PHS 板材组合研究了摩擦单元焊过程中各工艺参数的敏感性,提出了在保证接头强度的同时精简工艺时间的方案,并通过剪切试验、十字拉伸试验和剪切载荷下的疲劳试验评估了接头强度。结果表明,通过参数优化,在仅轻微降低接头强度的条件下工艺时间可缩短 39%,并确定了控制 FEW 工艺时间、接头强度和峰值扭矩的主要参数指标。

美国杨百翰大学和橡树岭国家实验室等^[92]开发了类似 FEW 工艺的摩擦塞焊(Friction bit joining, FBJ)工艺,实现了高强度铝合金 7075-T6 与双相高强度钢 DP980 的连接。并进一步将摩擦塞焊与胶接相结合,形成了摩擦塞胶焊新工艺,显著提升了铝-钢异质接头的抗电学腐蚀性能。LIM 等^[93-94]将

FBJ 及摩擦塞胶焊工艺应用于 CFRP 与高强钢 DP980 的连接, 比较了摩擦塞焊、胶接和摩擦塞胶焊 3 种工艺的接头力学性能, 发现摩擦塞胶接头在正拉失效过程中展现出两个峰值, 分别对应胶接失效和摩擦塞焊失效, 复合接头与塞焊和胶接单一连接方式相比能量吸收分别提升了 355% 和 134%。

图 41 欧拉法和拉格朗日法摩擦单元变形网格的截面图

显然, FEW 工艺类似于 REW 工艺, 均是通过铆钉与下层超高强钢板之间的焊接避免铝钢直接焊接导致的脆性相形成, 因此都具有很好的材料适应性。但是它们存在以下差异。

(1) 热源形式和连接原理不同。REW 采用的是电阻热, 通过界面熔化实现连接, 因而其热输入高; 而 FEW 采用摩擦热, 连接原理为固相焊, 因而其热输入低, 对周围铝合金的影响较小。

(2) 对铝合金板要求不同。REW 工艺需要预置铆钉, 后续需要准确定位铆钉位置, 工艺复杂; 而 FEW 无需预开工艺孔, 因此工艺过程简单。

(3) 对铆钉头部要求不同。FEW 工艺过程中铆钉下方的铝合金材料会被挤出, 因此铆钉头部必须设置凹槽以容纳被实心铆钉挤出的金属, 导致铆钉尺寸通常会比较大, 凸出板材表面的部分会比较高; 相反, REW 工艺因为无需考虑材料挤出问题, 因此铆钉相对而言会更小、更轻。

(4) 设备不同。REW 工艺采用电阻焊设备实现焊接, 因此可以采用已有的全钢车身焊装生产线; 然而, FEW 则需要全新的设备, 设备成本也远远高于大规模使用的电阻焊设备。

3.3 自冲摩擦铆焊

针对镁合金、7 系铝合金、铸铝等低延展性材料自冲铆接时铆钉周围材料易开裂的问题, 上海交通大学 LI 等^[7]提出了自冲摩擦铆焊工艺(Friction self-piercing riveting, F-SPR)。该工艺以传统 SPR 为

基础, 结合搅拌摩擦原理, 使半空心铆钉在轴向进给的同时做高速旋转, 通过铆钉旋转产生的摩擦热软化低延展性材料并改善其成形性能, 解决 SPR 过程中低延展性材料的开裂问题。与传统 SPR 工艺相比, F-SPR 工艺能有效抑制铝合金与镁合金铆接时接头内部和底部的裂纹, 提高接头的性能。

上海交通大学 MA 等^[95]发现 F-SPR 过程中的摩擦热在软化材料抑制开裂的同时, 会大幅减小铆钉的进给阻力, 导致铆钉体张开不足, 降低了铆钉与下层板之间的机械自锁, 并针对这一问题进一步提出了分段式 F-SPR 工艺^[96]。如图 42 所示, 分段式 F-SPR 工艺在摩擦软化阶段通过铆钉高速旋转、低速进给充分软化低延展性轻合金, 有效抑制了开裂; 在进给顶锻阶段通过铆钉停转并快速进给, 避免热量在铆钉附近过度累积, 提升了铆接力, 增大了机械自锁, 并通过铆钉变形提升了铆钉下方材料的硬度, 有效改善了接头性能, 如图 43 所示。

图 42 分段式自冲摩擦铆焊工艺

图 43 单段式和分段式 F-SPR 接头中铝合金材料硬度分布

MA 等^[97]进一步通过优化分段转换深度对热输入和铆接力进行协调控制, 使接头中铆钉内、外侧形成固相焊接, 最终实现了机械-固相复合连接新原理, 如图 44 所示。得益于固相焊接对接头整体刚度、强度及韧性的提升, 铝合金 AA7075-T6 接头拉剪失效模式从机械连接的自锁失效转变为机械-固相复合连接的下层板失效, 强度和吸能均大幅提升, 突破了单一连接模式轻合金接头的强度瓶颈, 如图 45 所示。

MA 等^[98]和 XIAN 等^[99]通过变换 F-SPR 的工艺模具, 衍生出铝-钢平底模 F-SPR 和单边 F-SPR 工艺, 使得采用一种工艺方法实现不同连接需求成为可能, 分别如图 46 和图 47 所示。

图44 分段转换深度对 AA7075-T6 铝合金自冲摩擦铆焊接头中铆钉内、外侧固相连接影响

图45 机械连接、固相焊接、铆钉硬度对 AA7075-T6 铝合金自冲摩擦铆焊接头拉剪强度和失效模式影响(其中 I 型接头表示铆钉内外侧均形成固相焊接; II 型接头表示仅铆钉内侧形成固相焊接; III 型接头表示无固相连接)

图46 平模自冲摩擦铆焊工艺

图47 单边自冲摩擦铆焊工艺

美国密西根大学 LIU 等^[100]通过试验方法验证了内驱动型 F-SPR 铆钉连接铝合金和镁合金的可行性,如图 48 所示,并研究了铆钉转速与进给速度对

F-SPR 接头性能的影响规律。美国橡树岭国家实验室 LIM 等^[101]将 F-SPR 工艺成功应用于连接 CFRP 和镁合金,如图 49 所示。

图48 采用内驱动型铆钉获得的 AA6061-T6 铝合金和 AZ31B 镁合金 F-SPR 接头

图49 CFRP 和镁合金的 F-SPR 接头

F-SPR 与 FEW、FSBR、流动钻铆等工艺具有相似之处,即都引入摩擦热来软化金属,并最终实现接头的成形。但是 F-SPR 工艺与其他工艺相比存在明显的不同。

(1) 铆钉几何形貌不同。F-SPR 工艺采用了与 SPR 类似的更轻的半空心铆钉,在铆钉进给过程中铆钉空腔可以容纳部分轻金属,减少材料塑性流出,因此铆钉头部尺寸较小,且接头局部变形小。

(2) 铆钉与下层板连接机理不同。F-SPR 接头中铆钉与下层板之间存在机械自锁,同时又利用摩擦热实现了铆钉与周围金属的固相连接,属于机械-固相复合连接工艺;然而,FEW 中铆钉与下层板之间只存在固相连接。而流动钻铆与 FSBR 接头中则无固相连接。

(3) 工艺适用范围不同。F-SPR 可以实现轻金属的连接,也可以通过工艺变体实现轻合金与钢的异质连接。但是 FEW 跟 REW 工艺一样,下层板必须是与铆钉同质的钢板材料。

(4) 接头密封性能不同。F-SPR 接头中下层板没有被刺穿,而同时铆钉与周围金属之间又形成了全固相连接,因此接头具有较好的密封性和抗腐蚀、抗渗漏能力。

4 结论

本文对广泛应用于汽车、机车、飞机、火箭和飞船等运载工具薄壁结构制造的电阻点焊、铆接、复合连接等点连接工艺进行了系统梳理,重点对近

年来的研究进展进行了分析,主要结论如下。

(1) 电阻点焊因其工艺成本低、自动化程度高,是各种轻量化薄壁结构焊装的基础工艺,在传统钢制汽车、机车的制造中占有统治地位,也是战斗机、火箭贮箱、卫星返回舱等大型铝合金航天结构的关键焊装工艺。

(2) 高强钢的高界面断裂风险和狭窄的工艺窗口,铝合金的高电阻率氧化膜和易飞溅特征,铝-钢异质材料匹配时铝钢界面硬脆相形成、铝合金材料减薄,以及金属和非金属材料匹配时结合面的不导电性,使得传统电阻点焊工艺面临巨大挑战。

(3) 磁控电阻点焊、阶跃脉冲电阻点焊、多圆环项电极电阻点焊、金属凸点辅助电阻点焊以及同轴电极单边电阻点焊等新型电阻点焊工艺的提出有效改善了高强钢、铝合金以及异质材料组合的可焊性,赋予了传统电阻点焊工艺新的生命力,推动了新型轻量化薄壁结构的低成本制造。

(4) 铆接工艺因为没有热输入,可以避免材料软化、界面脆性相、导电性等问题。Clinching、SPR等工艺因无需预制孔,可以大幅提高装配效率,在轻合金以及异质材料点连接中占主导地位。流动钻铆、Friction riveting、FSBR等工艺通过引入摩擦热实现了轻合金的无预制孔、单边连接,在板材与封闭结构的连接中具有巨大优势。

(5) 电磁铆接因其加速度快、冲击力大、铆钉变形稳定等优点,并能够克服复合材料铆接时易被挤压破坏以及难变形钛合金铆钉铆接力不足等技术瓶颈,是航空航天产品装配的重要发展方向。Friction riveting工艺无需预制孔、工艺流程简单、周期短,在航空航天复合材料连接领域具有重要应用前景。

(6) SPR通过材料的塑性大变形实现机械连接,是轻量化汽车车身中应用最为广泛的机械连接工艺。然而超高强材料以及低延展性轻合金的应用使得SPR工艺面临难以逾越的挑战。电阻单元焊、摩擦塞焊、自冲摩擦铆焊等工艺借助焦耳热或摩擦热,结合熔化焊、固相焊以及机械连接各自的优势,形成了新型的复合连接原理,为新型轻量化薄壁结构的设计与制造提供了系列使能技术。

5 展望

汽车产业是制造业的典型代表,是体现国家竞争力和制造业实现创新驱动、转型升级、由大变强的标志性领域之一。航空航天是国家重点发展的战略性新兴产业,代表着未来制造业发展的最高水平。

轻量化是汽车工业和航空航天工业制造技术发展的必然趋势,而与其相适应的连接技术则是上述制造业可持续发展的关键技术支撑。

(1) 对于汽车工业而言,随着节能减排法规日趋严格,电动化战略的持续推进,以及新材料的不断涌现,车企之间的竞争将更加激烈,全钢车身将逐步退出历史舞台,未来轻量化车身中多种轻量化材料和结构的混合匹配将更加丰富和复杂,并趋于极端化,对点连接技术的挑战将进一步加剧。

(2) 点连接技术作为汽车车身薄壁结构强度、刚度和疲劳性能的基础保障,一直是我国汽车工业的弱项,核心的点连接工艺与装备长期受制于美日欧等汽车制造强国。面向多材料、多结构混合车身,尤其是钢铝混合车身,开发具有成本优势的复合点连接工艺与装备,点连接质量在线智能管控方法,以及基于多种点连接工艺的车身正向设计成套方法,将成为我国汽车工业关键技术发展的必然需求。

(3) 一代材料,一代装备。对航空航天领域而言,轻量化意味着更低的油耗、更高的运载能力、更远的射程、更灵活的机动性,以及更低的碳排放。未来新型飞机、运载火箭、战略武器等运载能力或有效射程等需求的大幅提高,将对轻量化提出更苛刻的要求,钛合金和复合材料等高强度低密度材料的应用比例将进一步增加。

(4) 飞行器飞行过程中的共振和应力变化使得干涉配合铆接技术在未来相当长时间内将仍然是航空航天产品结构件装配的首选工艺。然而,钛合金和复合材料的预制孔工序将大大降低装配效率和自动化程度,成为制约航空航天技术发展的卡脖子问题。发展无需预制孔、低铆力的新型铆接技术,将成为提升航空航天产品竞争力的重要发展方向。

参 考 文 献

- [1] 李永兵,马运五,楼铭,等.轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J].机械工程学报,2016,52(24):1-23.
LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in welding and joining processes of multi-material lightweight car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1-23.
- [2] 李永兵,李亚庭,楼铭,等.轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J].机械工程学报,2012,48(18):44-54.
LI Yongbing, LI Yating, LOU Ming, et al. Lightweighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 44-54.
- [3] PAVEEBUNVIPAK K, UTHAISANGSUK V. Micro-structure based modeling of deformation and failure of

- spot-welded advanced high strength steels sheets[J]. Materials and Design, 2018, 160: 731-751.
- [4] RASHID M, MEDLEY J B, ZHOU Y. Electrode work-sheet interface behaviour during resistance spot welding of Al alloy 5182[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(4): 295-304.
- [5] LEI Haiyang, LI Yongbing, CARLSON B E, et al. Microstructure and mechanical performance of cold metal transfer spot joints of AA6061-T6 to galvanized DP590 using edge plug welding mode[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(7): 071009.
- [6] GOULD J E, WORKMAN D, LEHMAN L R. Application of conductive heat resistance seam welding for joining a 7075-T6 alloy and a 5754 dissimilar thickness combination[J]. SAE International, 1999-01-3162, 1999.
- [7] LI Yongbing, WEI Zeyu, Wang Zhaozhao, et al. Friction self-piercing riveting of aluminum alloy AA6061-T6 to magnesium alloy AZ31B[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(6): 061007.
- [8] 林忠钦, 胡敏, 陈关龙, 等. 轿车车体装配偏差研究方法综述[J]. 机械设计与研究, 1999(3): 82-84
- LIN Zhongqin, HU Min, CHEN Guanlong, et al. Review of research methods for car body assembly deviations[J]. Mechanical Design and Research, 1999(3): 82-84.
- [9] POURANVARI M, SOBHANI S, GOODARZI F. Resistance spot welding of MS1200 martensitic advanced high strength steel: microstructure-properties relationship[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 867-874.
- [10] RASHID M. Some tribological influences on the electrode-worksheet interface during resistance spot welding of aluminum alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 20(3): 456-462.
- [11] CARLSON B, JANI AK P, SIGLER D. Improving aluminum resistance spot welding in automotive structures[J]. Welding Journal, 2013, 92(6): 64-72.
- [12] SIGLER D, CARLSON B. Impediments to developing resistance spot welding processes for joining aluminum to steel[C]//Sheet Metal Welding Conference XVIII, 2018, 10: 17-18.
- [13] SHEN Qi, LI Yongbing, LIN Zhongqin, et al. Impact of external magnetic field on weld quality of resistance spot welding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133(5): 051001.
- [14] LI Yongbing, LIN Zhongqin, SHEN Qi, et al. Numerical analysis of transport phenomena in resistance spot welding process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133(3): 031019.
- [15] LI Yongbing, WEI Zeyu, Li Yating, et al. Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65: 400-408.
- [16] SHEN Qi, LI Yongbing, LIN Zhongqin, et al. Effect of external constant magnetic field on weld nugget of resistance spot welded dual-phase steel DP590[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4116-4119.
- [17] LI Yongbing, LI Dinglong, LIN Zhongqin, et al. Review: magnetically assisted resistance spot welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(1): 59-74.
- [18] LI Yongbing, LI Yating, SHEN Qi, et al. Magnetically assisted resistance spot welding of dual-phase steel[J]. Welding Journal, 2013, 92(4): 124-132.
- [19] LI Yongbing, ZHANG Qingxing, QI Lin, et al. Improving austenitic stainless steel resistance spot weld quality using external magnetic field[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(7): 619-627.
- [20] LI Yang, LUO Zhen, YAN Fuyu, et al. Effect of external magnetic field on resistance spot welds of aluminum alloy[J]. Materials & Design(1980-2015), 2014, 56: 1025-1033.
- [21] YAO Q, LUO Z, LI Y, et al. Effect of electromagnetic stirring on the microstructures and mechanical properties of magnesium alloy resistance spot weld[J]. Materials & Design, 2014, 63: 200-207.
- [22] HUANG M, ZHANG Q, QI L, et al. Effect of external magnetic field on resistance spot welding of aluminum alloy AA6061-T6[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 456-466.
- [23] 徐野, 祁麟, 韩晓辉, 等. 不锈钢单侧磁控电阻点焊工艺研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(7): 877-881.
- XU Ye, QI Lin, HAN Xiaohui, et al. Research on single-side magnetron resistance spot welding of stainless steel[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(7): 877-881.
- [24] CHEN Ruiming, ZHANG Chaoqun, LOU Ming, et al. Effect of Al-Si coating on weldability of press-hardened steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29: 626-636.
- [25] CHEN Ruiming, LOU Ming, LI Yongbing, et al. Improving weldability of Al-Si coated press hardened

- steel using stepped current pulse schedule[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 48: 31-43.
- [26] SIGLER D R, CARLSON B E, JANIAK P. Improving aluminum resistance spot welding in automotive structures[J]. *Welding Journal*, 2013, 92(6): 64-72.
- [27] SIGLER D R, SCHROTH J, KARAGOULIS M, et al. New electrode weld face geometries for spot welding aluminum[C]//AWS Sheet Metal Welding Conference XIV, Livonia, MI, May, 2010.
- [28] SIGLER D R, CARLSON B E. Aluminum resistance spot welding electrode degradation[C]//AWS Sheet Metal Welding Conference XV. 2015. Livonia, Mich.
- [29] DENG Lin, LI Yongbing, CARLSON B E, et al. Effects of electrode surface topography on aluminum resistance spot welding[J]. *Welding Journal*, 2018, 97(4): 120-132.
- [30] SHI Liting, KANG Jidong, SIGLER D R, et al. Microstructure and fatigue behavior of novel multi-ring domed resistance spot welds for thin X626-T4 aluminum sheets[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 119: 185-194.
- [31] SIGLER D R, CARLSON B E, JANIAK P. A preliminary assessment of GM's multi-ring domed (MRD) electrode for alternately welding aluminum-to-aluminum and steel-to-steel stack-ups[C]//AWS Sheet Metal Welding Conference XVI. 2014. Livonia, Mich.
- [32] CHEN Can, KONG Liang, WANG Min, et al. The robustness of Al-steel resistance spot welding process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 43: 300-310.
- [33] CHEN Nannan, WANG Huiping, WANG Min, et al. Schedule and electrode design for resistance spot weld bonding Al to steels[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 265: 158-172.
- [34] RAO H M, KANG Jidong, SHI Liting, et al. Effect of specimen configuration on fatigue properties of dissimilar aluminum to steel resistance spot welds[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 116: 13-21.
- [35] ZHANG Guotao, ZHAO Hang, XU Xianghe, et al. Metallic bump assisted resistance spot welding (MBarSW) of AA6061-T6 and bare DP590: part II-joining mechanism and joint property[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 44: 19-27.
- [36] ZHANG Guotao, ZHAO Hang, XU Xianghe, et al. Metallic bump assisted resistance spot welding (MBarSW) of AA6061-T6 and bare DP590: part I-printing of metallic bump[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 44: 427-434.
- [37] CHEN Jianbin, YUAN Xinjian, HU Zhan, et al. Improvement of resistance-spot-welded joints for DP 600 steel and A5052 aluminum alloy with Zn slice interlayer[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 396-405.
- [38] ZVORYKINA A, SHEREPENKO O, JUTTNER S. Novel projection welding technology for joining of steel-aluminum hybrid components-part 1: technology and its potential for industrial use[J]. *Welding in the World*, 2019, 64: 1-10.
- [39] SZALLIES K, BIELENIN M, SCHRICKER K, et al. Single-side resistance spot joining of polymer-metal hybrid structures[J]. *Welding in the World*, 2019, 63(4): 1145-1152.
- [40] REN Sendong, MA Yunwu, SAEKI Shuhei, et al. Numerical analysis on coaxial one-side resistance spot welding of Al5052 and CFRP dissimilar materials[J]. *Materials & Design*, 2020, 188: 108442.
- [41] ABE Y, ISHIHATA S, MAEDA T, et al. Mechanical clinching process using preforming of lower sheet for improvement of joinability[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 15: 1360-1367.
- [42] VORDERBRUGGEN J, GROGER B, KUPFER R, et al. Phenomena of forming and failure in joining hybrid structures-experimental and numerical studies of clinching thermoplastic composites and metal[C]//AIP Conference Proceedings, 2113(1): 050016.
- [43] HE Xiaocong, ZHAO Lun, DENG Chengjiang, et al. Self-piercing riveting of similar and dissimilar metal sheets of aluminum alloy and copper alloy[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2015, 65: 923-933.
- [44] HUANG Li, MORAES J F C, SEDIKO D G, et al. Finite-element and residual stress analysis of self-pierce riveting in dissimilar metal sheets[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, 139(2): 021007.
- [45] MORI K, ABE Y, KATO T. Self-pierce riveting of multiple steel and aluminium alloy sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(10): 2002-2008.
- [46] MA Yunwu, LOU Ming, LI Yongbing, et al. Effect of rivet and die on self-piercing rivetability of AA6061-T6 and mild steel CR4 of different gauges[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 282-294.
- [47] HALL S N V, FINDLEY K O, FREIS A K. Improved

- self-pierce rivet performance through intentional decarburization[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 350-359.
- [48] JIANG Hao, GAO Song, LI Guangyao, et al. Structural design of half hollow rivet for electromagnetic self-piercing riveting process of dissimilar materials[J]. *Materials & Design*, 2019, 183: 108141.
- [49] HIRSCH F, MULLER S, MACHENS M, et al. Simulation of self-piercing rivetting processes in fibre reinforced polymers: material modelling and parameter identification[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 241: 164-177.
- [50] HUANG C P, CHEN Weining, SUNG S J, et al. Mechanical strength and failure mode of flow drill screw joints in coach-peel specimens of aluminum 6082-T6 sheets of different thicknesses and processing conditions[J]. *SAE Technical Paper*, 2018-01-0116, 2018.
- [51] HUANG C P, CHEN Weining, SUNG S J, et al. Failure mode and fatigue behavior of flow drill screw joints in lap-shear specimens of aluminum 6082-T6 sheets of different thicknesses[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2018, 11(4): 315-326.
- [52] PAN J, CHEN Weining, SUNG S J, et al. Failure mode and fatigue behavior of flow drill screw joints in lap-shear specimens of aluminum 6082-T6 sheets made with different processing conditions[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2018, 11(4): 327-340.
- [53] NAGEL P, MESCHUT G. Flow drill screwing of fibre-reinforced plastic-metal composites without a pilot hole[J]. *Welding in the World*, 2017, 61(5): 1057-1067.
- [54] SKOVRON J, RUSZJUEWUCZ B J, MEARS L, et al. Effect of electrical augmentation on the joining of Al6063-T5 using flow drill screws[C]//ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference.
- [55] ZHANG Xu, ZHANG Maoyun, SUN Liqiang, et al. Numerical simulation and experimental investigations on TA1 titanium alloy rivet in electromagnetic riveting[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18(3): 887-901.
- [56] CUI Junjia, LIN Qi, JIANG Hao, et al. Numerical and experimental investigations in electromagnetic riveting with different rivet dies[J]. *International Journal of Material Forming*, 2018, 11(6): 839-853.
- [57] 张旭. 电磁铆接过程铆钉动态塑性变形行为及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHANG Xu. Research on dynamic plastic deformation behavior and microstructure and mechanical properties of rivets in electromagnetic riveting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [58] JIANG Hao, LUO Tong, LI Guangyao, et al. Fatigue life assessment of electromagnetic riveted carbon fiber reinforce plastic/aluminum alloy lap joints using Weibull distribution[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 105: 180-189.
- [59] JIANG Hao, LI Guangyao, ZHANG Xu, et al. Fatigue and failure mechanism in carbon fiber reinforced plastics/aluminum alloy single lap joint produced by electromagnetic riveting technique[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 152: 1-10.
- [60] JIANG Hao, CONG Yanjun, ZHANG Xu, et al. Fatigue degradation after salt spray ageing of electromagnetically riveted joints for CFRP/Al hybrid structure[J]. *Materials & Design*, 2018, 142: 297-307.
- [61] CIPRIANO G P, AHIYA A, SANTOS J D, et al. Single-phase friction riveting: metallic rivet deformation, temperature evolution, and joint mechanical performance[J]. *Welding in the World*, 2020, 64(1): 47-58.
- [62] BORBA N Z, KOTTER B, FIEDLER B, et al. Mechanical integrity of friction-riveted joints for aircraft applications[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111542.
- [63] BORBA N Z, SANTO J D, AMANCIO-FILHO S T. The Influence of clamping pressure on joint formation and mechanical performance of Ti6Al4V/CF-PEEK friction-riveted joints[J]. *Materials*, 2019, 12(5): 745-762.
- [64] BORBA N Z, KOTTER B, FIEDLER B, et al. Low-velocity impact response of friction riveted joints for aircraft application[J]. *Materials & Design*, 2020, 186: 108369.
- [65] GAO D, ERSOY U, STEVENSON R, et al. A new one-sided joining process for aluminum alloys: friction stir blind riveting[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(6): 061002.
- [66] MIN Junying, LI Jingjing, CARLSON B E, et al. Friction stir blind riveting for joining dissimilar cast Mg AM60 and Al alloy sheets[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, 137(5): 051022.
- [67] MA Yunwu, LI Yongbing, CARLSON B E, et al. Effect of process parameters on joint formation and mechanical performance in friction stir blind riveting of aluminum

- alloys[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(6): 061007.
- [68] LI Shengxi, KHAN H., HIHARA L H, et al. Marine atmospheric corrosion of Al-Mg joints by friction stir blind riveting[J]. *Corrosion Science*, 2016, 111: 793-801.
- [69] LI Shengxi, KHAN H., HIHARA L H, et al. Corrosion behavior of friction stir blind riveted Al/CFRP and Mg/CFRP joints exposed to a marine environment[J]. *Corrosion Science*, 2018, 132: 300-309.
- [70] GUO Weihong, LI Jingjing, GAO Zhe. Sensor fusion and on-line monitoring of friction stir blind riveting for lightweight materials manufacturing[C]//ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2018.
- [71] WANG Weiming, WANG Kaifeng, KHAN H A, et al. Numerical analysis of magnesium to aluminum joints in friction stir blind riveting[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 76: 94-99.
- [72] SAMANTA A, SHEN Ninggang, JI Haipeng, et al. Cellular automaton simulation of microstructure evolution for friction stir blind riveting[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(3): 031016.
- [73] KHAN H A, WANG Kaifeng, LI Jingjing. Interfacial bonding mechanism and mechanical properties of micro friction stir blind riveting for multiple Cu/Al ultra-thin layers[J]. *Materials Characterization*, 2018, 141: 32-40.
- [74] KHAN H A., WANG Kaifeng, PEI Shenli, et al. Fatigue damage evolution of micro friction stir blind riveting joint through acoustic emission analysis[J]. *Materialia*, 2019, 5: 100216.
- [75] KHAN H A, PEI Shenli, CHEN Nannan, et al. Evaluation of μ FSBR joint performance by process-physics based quality criteria and online monitoring algorithm[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 278: 116508.
- [76] MESCHUT G, HAHN O, OLFERMANN T, et al. Innovative joining technologies for multi-material structures[J]. *Welding in the World*, 2013, 58(1): 65-75.
- [77] 何冠中, 楼铭, 马运五, 等. 铝钢电阻单元焊接接头力学性能模拟[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(5): 616-623.
- HE Guanzhong, LOU Ming, MA Yunwu, et al. Simulation on mechanical properties of resistance element welding of aluminum and steel[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2019, 53(5): 616-623.
- [78] MORI K, ABE Y. A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, 1(1): 1-11.
- [79] 何冠中, 楼铭, 马运五, 等. 铝钢电阻单元焊冲裁过程建模[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(7): 864-869.
- HE Guanzhong, LOU Ming, MA Yunwu, et al. Modeling of blanking processes of resistance element welding of aluminum and steels[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(7): 864-869.
- [80] 凌展翔, 罗震, 李洋, 等. 硼钢与铝合金的新型电阻单元焊技术研究[C]//第二十次全国焊接学术会议论文集. 2015.
- LING Zhanxiang, LUO Zhen, LI Yang, et al. Research on new resistance unit welding technology of boron steel and aluminum alloy[C]//Proceedings of the 20th National Welding Academic Conference, 2015.
- [81] MESCHUT G, SCHMAL C, OLFERMANN T. Process characteristics and load-bearing capacities of joints welded with elements for the application in multi-material design[J]. *Welding in the World*, 2017, 61(3): 435-442.
- [82] LING Zhanxiang, LI Yang, LUO Zheng, et al. Microstructure and fatigue behavior of resistance element welded dissimilar joints of DP780 dual-phase steel to 6061-T6 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(5-8): 1923-1931.
- [83] LING Zhanxiang, LI Yang, LUO Zhen, et al. Resistance element welding of 6061 aluminum alloy to uncoated 22MnMoB boron steel[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(16): 2174-2180.
- [84] HAHN T B. Development of the friction element welding for the use in car body manufacturing[D]. Paderborn: University of Paderborn, 2010.
- [85] SKOVRON J D, RUSZKIEWICZ B J, MEARS L, et al. Investigation of the cleaning and welding steps from the friction element welding process[C]//Manufacturing Science and Engineering Conference. 2017, ASME: Los Angeles, California, USA.
- [86] PAPADIMITRIOU I, EFTHYMIADIS P, KOTADIA H R, et al. Joining TWIP to TWIP and TWIP to aluminium: A comparative study between joining processes, joint properties and mechanical performance[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 195-207.
- [87] MESCHUT G, JANZEN V, OLFERMANN T. Innovative and highly productive joining technologies for multi-material

- lightweight car body structures[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(5): 1515-1523.
- [88] MESCHUT G, MATZKE M, HOERHOLD R, et al. Hybrid technologies for joining ultra-high-strength boron steels with aluminum alloys for lightweight car body structures[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 23: 19-23.
- [89] ABSAR S, RUSZKIEWICZ B J, SKOVRON J D, et al. Temperature measurement in friction element welding process with micro thin film thermocouples[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 26: 485-494.
- [90] VARMA A, ABSAR S, ZHAO X, et al. Thermal-mechanical numerical modeling of the friction element welding process[C]//*Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2018. College Station, TX, USA: ASME.
- [91] RUSZKIEWICZ B J, SKOVRON J, ABSAR S, et al. Parameter sensitivity and process time reduction for friction element welding of 6061-T6 aluminum to 1500 MPa press-hardened steel[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2018, 12(1): 41-56.
- [92] LIM Y C, PARK H, JANG J, et al. Dissimilar materials joining of carbon fiber polymer to dual phase 980 by friction bit joining, adhesive bonding, and weldbonding [J]. *Metals*, 2018, 8(11): 865-880.
- [93] LIM Y C, SQUIRES L, PAN T Y, et al. Study of mechanical joint strength of aluminum alloy 7075-T6 and dual phase steel 980 welded by friction bit joining and weld-bonding under corrosion medium[J]. *Materials & Design*, 2015, 69: 37-43.
- [94] LIM Y C, SQUIRES L, PAN T Y, et al. Corrosion behaviour of friction-bit-joined and weld-bonded AA7075-T6/galvannealed DP980[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 22(6): 455-464.
- [95] MA Yunwu, LI Yongbing, LIN Zhongqin. Joint formation and mechanical performance of friction self-piercing riveted aluminum alloy AA7075-T6 joints[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(4): 041005.
- [96] MA Yunwu, HE Guanzhong, LOU Ming, et al. Effects of process parameters on crack inhibition and mechanical interlocking in friction self-piercing riveting of aluminum alloy and magnesium alloy[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(10): 101015.
- [97] MA Yunwu, XIAN Xirui, LOU Ming, et al. Friction self-piercing riveting (F-SPR) of dissimilar materials[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 950-955.
- [98] MA Yunwu, YANG Bingxin, LOU Ming, et al. Effect of mechanical and solid-state joining characteristics on tensile-shear performance of friction self-piercing riveted aluminum alloy AA7075-T6 joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 278: 116543.
- [99] XIAN Xirui, MA Yunwu, SHAN He, et al. Single-sided joining of aluminum alloys using friction self-piercing riveting (F-SPR) process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 38: 319-327.
- [100] LIU Xun, LIM Y C, LI Yingbing, et al. Effects of process parameters on friction self-piercing riveting of dissimilar materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237: 19-30.
- [101] LIM Y C, WARREN C D, CHEN Jian, et al. Joining of lightweight dissimilar materials by friction self-piercing riveting[C]//*Friction Stir Welding and Processing X, The Minerals, Metals & Materials Series*, 2019: 189-195.

作者简介: 李永兵(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轻金属及异种材料先进连接技术。

E-mail: yongbinglee@sjtu.edu.cn

马运五, 男, 1990 年出生, 博士, 助理教授。主要研究方向为机械连接技术和焊接数值模拟。

E-mail: yw.ma@jwri.osaka-u.ac.jp

楼铭, 男, 1984 年出生, 博士后。主要研究方向为轻量化多材料薄壁结构铆接工艺。

E-mail: louming@sjtu.edu.cn

张国涛, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为铝-钢金属凸点辅助电阻点焊工艺。

E-mail: zgtly0723@163.com

张庆鑫, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为铝-钢异质材料胶焊。

E-mail: zhangqingxin@sjtu.edu.cn

祁麟, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为外磁场辅助电阻点焊工艺。

E-mail: LinQi_@sjtu.edu.cn

邓琳, 女, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为铝合金电阻点焊工艺。

E-mail: 5100209295@sjtu.edu.cn