

金属/CFRP 异种材料连接技术的研究进展及界面结合机理分析

张婷婷^{1,2}, 朱凯航^{1,2}, 许振波^{1,2}, 王艳^{1,2}, 安栋财^{1,2}, 张体明³

(1. 太原理工大学, 先进成形与智能装备研究院, 太原, 030024; 2. 太原理工大学, 先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心, 太原, 030024; 3. 南昌航空大学, 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌, 330063)

摘要: 碳纤维复合材料 (CFRP) 具有质轻高强、高模量和低膨胀优势, 在“陆海空天”等领域应用潜力和需求极大. 其中热塑性碳纤维复合材料 (CFRTP) 近年来快速发展, CFRP 和 CFRTP 与金属结构件的连接技术受到国内外学者和工业界的广泛关注. 文中综述了金属材料与 CFRP 连接的主要技术及界面的结合机理; 对比分析了不同连接工艺的成形原理, 总结了金属与 CFRP 连接界面的不同作用效果; 结合发展现状及未来工程应用需求, 对金属/CFRP 高质量连接技术瓶颈的突破方向进行了展望.

创新点: (1) 综述分析了不同连接技术对金属/CFRP 结合强度的影响.
(2) 在不同连接技术基础上系统归纳了金属/CFRP 界面的结合机理.
(3) 展望了金属/CFRP 高质量连接技术在工程应用上的突破方向.

关键词: 金属/碳纤维复合材料; 黏接; 机械紧固; 异种材料连接; 界面结合机理

中图分类号: TG 401 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20220610001

0 序言

碳纤维复合材料 (CFRP) 具有质轻、比强度高、模量高、线膨胀系数低、尺寸稳定性良好等一系列优异性能, 被认为是 21 世纪最有可能取得突破性进展的新材料, 在航空航天和机械运载等领域的轻量化需求巨大. 空客公司研制的世界最大民用客机 A380, 仅机身壁板采用碳纤维复合材料就达 30 多吨^[1]; 第五代战斗机 F-35 大部分外表面均由碳纤维复合材料制成, 复合材料的结构达飞机质量的 35%^[2]; 宝马 i3 电动车采用全碳纤维车体设计, 整车质量相比传统电动车减轻 250 kg ~ 350 kg^[3]. 2017 年宝马又推出了“碳芯”技术, 在整车的单体结构中使用 CFRP; 2018 年, 江苏恒神材料有限公司与中车长春轨道客车有限公司合作, 成功试制全

CFRP 地铁车体^[4]; 同年, 中车青岛四方机车车辆有限公司研发的新一代碳纤维地铁车辆“CETROVO”也在德国柏林国际轨道交通技术展上正式发布.

金属与碳纤维复合材料的复合连接可以很好地发挥金属材料与碳纤维复合材料的各自优势, 同时也是复杂工程构件制造和产品结构功能一体化的重要需求. 如日本铁道综合技术研究所用 CFRP 制成高速列车车顶, 该车顶通过胶粘与铝合金车体连接, 然后再采用焊接与车体上铝合金侧壁装配^[5]; 雪佛兰 C8 的车架主要是铝合金与 CFRP 的复合材料, 几乎所有的车身部件都是复合材料, 通过电泳防锈涂装后, 与车架黏接或者用螺栓连接成型^[6].

显然, 金属与复合材料连接接头的性能直接影响着产品结构质量. 因此, 文中跟踪国内外金属/CFRP 连接技术的研究动态, 对其主要连接制备技术及连接界面的结合机理进行综述, 对比分析不同制备工艺的成形原理, 概述总结金属与 CFRP 连接界面的不同结合效果, 指出金属/CFRP 连接技术发展尚存在的关键问题, 以期对复合材料研究和工程应用提供参考价值.

收稿日期: 2022 - 06 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275360, 51805359); JKW 基础加强重点项目子课题; 江西省航空构件成形与连接重点实验室开放基金资助项目 (EL202180258); 山西浙大新材料与化工研究院研发资助项目 (2022SX-TD021).

1 金属与 CFRP 的连接技术

1.1 黏接技术及基本原理

1.1.1 黏接连接技术

黏接的原理是借助胶黏剂在固体表面产生的黏合力,将金属和 CFRP 牢固地连接在一起,黏接常用的接头形式如图 1 所示.金属/CFRP 黏接连接的优点是黏接比机械紧固连接成本低、质量轻;其不足是黏接前对材料表面质量要求高,黏接固化过程时间长,黏接强度对湿度、温度等工作环境敏感.

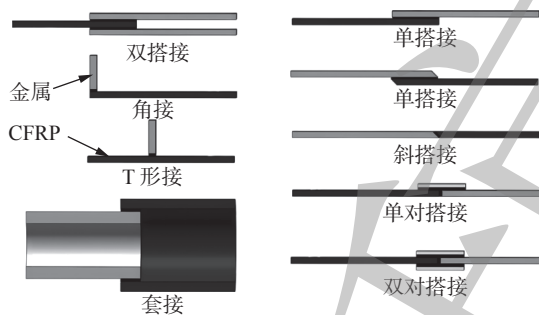


图 1 金属/CFRP 黏接接头形式

Fig. 1 The form of metal/CFRP adhesive-bonded joint

金属与 CFRP 黏接接头强度一般较低^[7],可通过调整黏接长度、黏接表面状态和材料表面质量等参数适当改善其性能,且通过设计黏接界面的机械结构(如凹槽)可以明显提高黏接强度^[8].

金属与 CFRP 黏接接头静载和动载冲击性能还与环境温度、黏接剂类型及厚度有直接关系.朱德举等人^[9]对钢与 CFRP 在不同温度下胶接接头抗冲击荷载性能进行研究,发现钢/CFRP 单搭接接头的黏接强度和界面断裂能随着温度的升高先增大后降低.李传习等人^[10]研究不同黏接剂类型对 CFRP 板/钢板性能的影响,发现使用复合黏接剂(GY-34)相比单一黏接剂可以提高黏接接头剪切强度.同时,赵汉清等人^[11]的研究也证明了,黏接接头的强度很大程度上取决于黏接剂本身的强度.崔永鹏等人^[12]的研究进一步证实了胶层厚度对接头质量的影响,发现适当厚度的黏接剂能够提高黏接强度.

因此,所有对黏接材料表面粗糙度和表面性能有影响的物理方法和化学方法,均可以在一定程度上改善其黏接强度^[13-17].材料黏接强度提高的原理:通过增大界面粗糙度和增加黏接面积来增强机

械咬合强度;另一方面,采用化学方法改变待连接界面的活性,即化学键合状态或官能团类型,以达到提高黏接强度的目的.常用的机械方法有:机械打磨和喷丸处理.强脉冲光线(IPL)表面处理方法^[18]和低能电子束辐射(HLEBI)处理^[19]在一定程度上也能提高黏接强度.

此外,材料本身的物理属性对黏接质量有一定的影响.Al-Mosawe 等人^[20]的研究证实了材料模量对黏接强度有影响,其中低模量和正常模量的黏接试样具有相同破坏形式,均为钢和黏合剂之间的脱黏;但对于超高 CFRP 模量的试样,破坏模式为纤维层的脱黏和断裂.外加能场对材料黏接质量也有一定的影响^[21-22],其中超声的作用主要是通过促进待连接材料之间的缝隙填充和界面润湿来改善接头性能.

1.1.2 黏接连接界面的接合机理

综上所述,金属与 CFRP 黏接接头强度较低,其连接界面接合强度主要取决于选择的黏接剂性能和金属表面的质量.由于 CFRP 的聚合物特性,黏接的界面性能受到基体树脂与黏接剂主体树脂相容性的影响,如果黏接剂类型匹配不当,很容易造成 CFRP 与金属间界面分离.大多数研究采用环氧树脂黏接剂进行黏接,或使用改性后的环氧黏接剂连接 CFRP 与铝合金等金属,改性后的环氧胶能够提高韧性和耐老化性,不同黏接剂连接金属/CFRP 的情况见表 1.

根据黏接形成的过程:(1)液态黏接剂分子向黏接物表面扩散;(2)当黏接剂分子和黏接物表面分子间距离小于 1 nm 时,两者间产生范德瓦耳斯力和氢键力;(3)除了分子间相互作用力外,有时黏接界面还有化学键产生;(4)液态黏接剂完成固化.可将该制备技术的接合机理归纳为黏接剂中分子链与金属表面的物理吸附以及化学键合作用,如图 2 所示.现今,金属/CFRP 的黏接连接技术多用于金属结构加固和零件修复等领域,在机械、建筑、航天及汽车轻量化等领域均占有十分重要的地位.

1.2 机械紧固连接技术及基本原理

机械紧固连接技术的基本原理是借助螺纹紧固件、销、键、螺钉等将所需构件连接.金属与 CFRP 的机械紧固连接技术主要包括螺栓连接和铆接两种,如图 3 所示.机械连接过程涉及人工步骤,如预钻孔和置入紧固件,因此会增加生产时间成本和结构质量.

表 1 不同黏接剂连接金属/CFRP 复合材料性能
Table 1 Properties of different adhesives bonding of metal/CFRP composite materials

黏接剂名称	黏接剂类型	金属材质	CFRP材质	最优黏接强度 τ /MPa
TGJ[7]	环氧树脂	Q235钢	UT70-30	3.36
DP 490[8]	环氧树脂	7075铝合金	CFRP	—
Sikadur 330[9]	双组份环氧树脂	Q235钢	EP/CF	10.4
J-241[11]	改性环氧树脂	铝合金	EP/CF	16.5
J133[12]	改性环氧树脂	钛合金	CFRP	19.83
SY-300K[13]	改性环氧树脂	铝合金	BMI/CF	21.9
EA E-20HP[18]	双组份环氧树脂	A6061-T6铝合金	CFRP	16
Araldite 420[20]	环氧树脂	低碳钢	CFRP	35
DP 460[21]	增韧环氧树脂	7075铝合金	3K-T700	11.49
DP 460[22]	增韧环氧树脂	7075铝合金	EP/CF	23.63

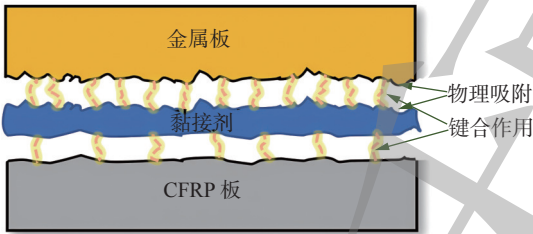


图 2 金属/CFRP 黏接界面结合机理
Fig. 2 Mechanism of Metal/CFRP bonding

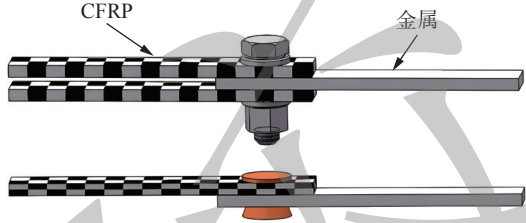


图 3 金属/CFRP 螺栓连接技术和铆钉连接技术
Fig. 3 Metal/CFRP bolting technology and riveting technology

1. 2. 1 螺栓连接技术

螺栓连接是金属/CFRP 复合结构的主要连接形式,同时也是结构的薄弱环节,决定着整体的承载能力,故保证螺栓连接的安全性和可靠性至关重要。同时,金属/CFRP 螺栓连接接头性能受材料属性、纤维铺层方式和装配参数等因素影响^[23-24]。

1. 2. 2 铆接技术

目前,金属与 CFRP 铆接连接技术有:立式盲铆技术、激光铆接技术、自冲铆接技术、搅拌摩擦盲铆技术和热铆技术。

其中,金属/CFRP 立式盲铆连接技术的连接原理是将空心铆钉和铆钉芯轴组成的抽芯体放入钻

孔中,拉出铆钉芯轴形成另一个空心铆钉头,然后断开铆钉芯轴。一般而言,盲铆接头易受热膨胀发生损伤^[25],其损伤原因主要是受热膨胀引起的相对位移,初始裂纹进一步扩展。

激光铆接技术是利用激光热源作用将金属铆钉与金属板材进行连接^[26]。该技术的连接原理可归纳为机械连接与金属焊接的综合作用,其接头性能取决于铆钉的铆接强度和激光焊接的连接强度。

自冲铆接技术是一种纯机械互锁的连接方式,其原理是利用铆钉的自身结构特点刺穿金属板与 CFRP 板,形成一个机械互锁,得到的接头强度一般取决于铆钉的性能^[27]。目前,为了提高接头性能,往往采用黏接与铆接技术复合的方法^[28]。

搅拌摩擦盲铆 (FSBR) 是在立式盲铆技术基础上改进的,并在 CFRP 与金属材料连接应用上进行了拓展,该技术原理如图 4^[29]所示。在 FSBR 过程中,抽芯铆钉通过摩擦旋转并刺穿软化后的金属和 CFRP 板材,铆钉的末端也受到摩擦加热,然后拉紧铆钉芯轴紧固板材并断裂。搅拌摩擦盲铆技术属于

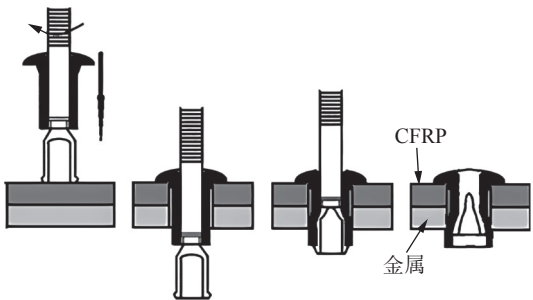


图 4 金属/CFRP 搅拌摩擦盲铆连接技术^[29]
Fig. 4 Metal/CFRP friction stir blind riveting technology

自冲铆接技术的一种,并对金属或CFRP的相对位置没有特殊要求。

一般而言,在FSBR制备过程中,CFRP材料的脆性是制约金属/CFRP接头性能的主要因素^[29]。此外,铆钉的尺寸也是影响接头性能的因素之一。Altmeyer等人^[30]开展了相关工作,研究发现变形金属铆钉的尺寸与接头的力学性能相关,铆钉尖端的加宽越大,抗拉强度越高;当抗拉强度达到最大值后,失效模式从铆钉拔出变为铆钉破坏。

热铆接技术原理是采用螺柱将金属与CFRTP板材预铆,再通过加热软化螺柱,在一定的压力和模具作用下使得螺柱发生塑性变形,冷却后形成铆钉帽,以起到固定连接的目的。崔旭等人^[31]提出碳纤维增强聚醚酰亚胺(CF-PEI)与轻质合金(铝合金、钛合金)的热铆连接方法,通过电加热熔融CFRTP并填充入轻质合金的预制孔中,冷却获得金属/CFRTP高效接头。

金属/CFRP铆接构件在服役过程中,可能会伴随材料腐蚀情况的出现,接头的腐蚀性能除了与连接区域状态相关外,还与选用的原始材料种类有关。Li等人^[32]将Mg/CFRP和Al/CFRP接头的腐蚀性能对比,发现镁合金基体较后者铝合金基体的腐蚀程度更严重。

1.2.3 其它机械紧固连接技术

“z-pin”连接技术借鉴了缝合技术中“不连续缝线的方法”,利用细微杆“钉扎桥连”的作用。该技术起初主要用于碳纤维复合材料层间增强,其原理是在层合板预浸料中植入z-pin,之后通过特定固化工艺进行共固化处理,使得z-pin与层合板形成一个整体,z-pin与层合板之间依靠机械连接与化学反应结合,使得z-pin像钉子一样牢牢将复合材料层合板各个子层之间结合在一起。

Carvalho等人^[33]提出超声波辅助z-pin连接技术,超声波振动在材料界面处产生摩擦热,使聚合物基质软化,在压力作用下使金属表面销钉穿透到复合材料中,其原理示意图如图5所示。该技术为金属/CFRP连接提供新思路。

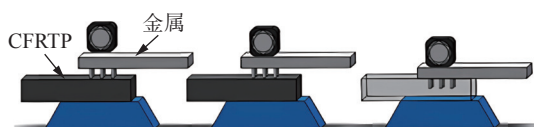


图5 金属/CFRP的z-pin连接技术

Fig. 5 z-pin bonding technology of metal/CFRP

1.2.4 机械紧固连接界面的结合机理

综上所述,机械紧固获得金属与CFRP连接界面是依靠各类紧固件机械锁合实现的,如图6所示,其界面各材料之间属于物理接触。接头强度依赖于紧固件的力学性能,其主要影响因素有:连接形式、紧固件的几何参数(板宽、端距、间距、钉孔直径和板厚等)、连接结构^[34];另外,复合板材的破坏形式还与其几何参数和纤维铺叠方式有关。

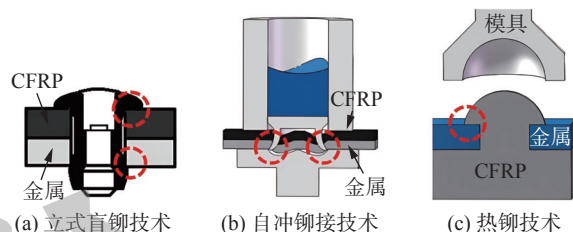


图6 金属/CFRP制备技术中的机械锁合效果

Fig. 6 The mechanical locking of metal/CFRP. (a) vertical blind riveting; (b) self-punch riveting; (c) hot riveting

金属与CFRP机械紧固连接技术在工业中应用广泛,包括航空航天、汽车和轮船等领域。如F-16垂尾、F-18机翼、阵风后机身、B-1水平安定面、F-35机体蒙皮和F-22机翼等复合材料结构均采用以机械连接为主的连接方式。

金属/CFRP连接件在服役过程中主要存在以下几种破坏形式:剪劈、拉伸、拉脱和挤压破坏。值得注意的是,机械紧固连接金属/CFRP技术,由于需要使用铆钉或螺栓,会增加复合板材的质量^[35];同时,螺栓孔或铆钉孔会产生应力集中现象,降低接头的连接强度;并且一些金属与CFRP采用机械紧固连接时,会在连接件上产生电偶腐蚀,影响连接强度,如铝合金。

1.3 焊接连接技术及基本原理

综述的焊接技术主要针对金属与热塑性碳纤维复合材料(CFRTP)的连接。由于热固性碳纤维复合材料不存在加热软化温度区间,所以无法通过焊接原理实现连接。且相比黏接和机械紧固连接技术,金属和CFRTP的上、下相对位置在焊接连接技术中受到较大限制。CFRTP常用的树脂基体材料有聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、尼龙(PA)、聚苯硫醚(PPS)、聚醚酰亚胺(PEI)、聚醚酮酮(PEKK)、聚醚醚酮(PEEK)等。

1.3.1 钎焊技术

金属/CFRTP钎焊技术的原理是将熔点低于金

属和 CF RTP 熔点的钎料加热到熔化温度,并使液态钎料充满金属与 CF RTP 之间的间隙,冷却后实现金属与 CF RTP 连接。

钎焊接头的强度主要与材料表面状态及钎料成分相关。郭义等人^[36]和牛红伟等人^[37]分别进行了 CF RTP 与铝合金的钎焊连接试验。研究发现,在复合前对 CF RTP 板材做必要的预处理至关重要;当采用 Al-10Si-4Cu 钎料时,CF RTP/Al 接头抗剪强度达到 75 MPa;其钎料的润湿铺展性对强度提升起着重要作用。另一项研究证实,含 Ti 元素钎料在钛合金表面润湿铺展性好,能够得到优良的连接接头;而其在钛合金表面润湿性差,导致熔化的钎料在钛合金表面迅速流失,获得的接头效果差^[38]。

钎焊温度对接头强度也具有重要影响, Hu 等人^[39]采用 Ti-Zr-Ni-Cu 填料实现了不同温度下, CFRP 和钛合金的真空钎焊;当焊接温度为 980 °C 时,接头强度达到最高的 38.13 MPa。

1.3.2 电阻焊技术

传统电阻焊连接金属/CF RTP 的原理是:利用电流通过金属和 CF RTP 时,产生的电阻热作为热源将焊件局部加热,同时加压进行焊接。但由于 CF RTP 绝缘树脂基体的存在,其导电性能较差,传统的电阻焊接技术并不高效^[40]。因此,基于传统电阻点焊技术开发了串联电阻点焊和单边电阻点焊新技术。

尽管如此,串联电阻点焊技术并不适用于金属和所有 CF RTP 的连接。Nagatsuka 等人^[41]将 SUS304 不锈钢和 CF RTP 通过串联电阻点焊实现连接。研究发现, SUS304 可以直接与 CF-PA6 和 CF-PP 接合,但不能与 CF-PPS 连接, PPS 中不具有极性官能团,无法与金属表面氢氧化物层形成氢键;通过增大焊接电流和焊接时间以及进行硅烷偶联剂处理,都能够有效提高不锈钢/CF RTP 连接强度,最高达到 70 MPa。

由于 CF RTP 导热系数低,在传统双侧电阻点焊工艺中,CF RTP 侧的电极难以发挥作用,单侧电阻点焊连接技术^[42](图 7)是基于金属与 CF RTP 异种材料的物理属性差异发明的,其创新原理是充分利用金属的导电和导热性,仅依靠金属侧电极产生热量,通过金属传导至连接界面处,CF RTP 导热系数低,热量聚集,在熔合区发生金属与 CF RTP 的冶金结合。研究发现,硅烷偶联剂与板材之间共价键的形成是界面连接的主要结合机理。

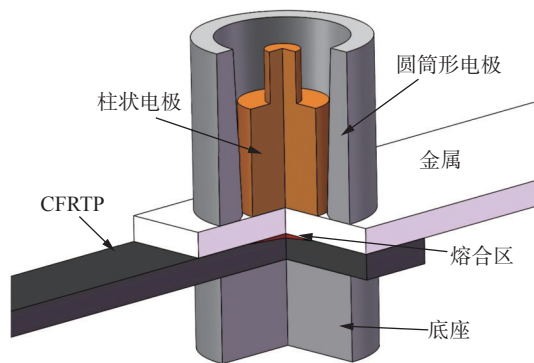


图 7 金属/CF RTP 单侧电阻点焊连接技术

Fig. 7 Metal/CF RTP one-sided resistance spot welding technology

1.3.3 超声波焊接技术

超声波焊接金属/CF RTP 的原理与金属/金属焊接、CF RTP/CF RTP 的焊接原理相似,都是利用超声波的高频振动使得金属和 CF RTP 表面产生冲击摩擦,利用结合处温度升高使表面迅速熔化并黏接,从而实现连接的目的。值得注意的是,材料的物理属性和连接机理的不同,会造成超声波作用方式的不同以及界面结合形式的多样性。

超声波焊接金属与 CF RTP 的明显优势是短时、无损,接头强度高^[43],其主要原因是超声波焊接能够实现金属和碳纤维增强体之间的冶金结合^[44]。

超声振动辅助热压技术^[45]和超声波扭转焊接技术^[46]均是在超声波焊接技术基础上开发的,其显著特点是接头性能明显提高,其原因是金属材料与 CF RTP 界面除了冶金结合外,还有纤维和树脂嵌入铝合金中产生了机械互锁效果。

1.3.4 激光焊接技术

金属/CF RTP 的激光焊接制备原理如图 8 所示。通过激光热传导的方式将金属表层的热量传至金属与 CF RTP 连接处,金属与 CF RTP 局部发生熔融,并在一定压力作用下金属和 CF RTP 板材在融合区实现连接。激光焊接技术过程中,金属与 CF RTP 基体树脂能够形成化学键合是其重要的结合机制^[47-48]。

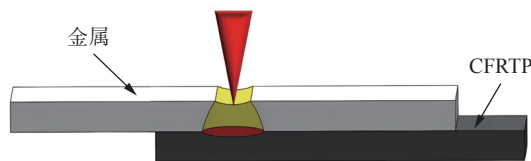


图 8 金属/CF RTP 激光焊接技术

Fig. 8 Metal/CF RTP laser welding technology

一些学者研究了激光功率、离焦量、光斑形状

以及焊接速度等工艺参数对金属/CFRTP 连接接头性能的影响。Tao 等人^[49]采用激光焊接技术实现了 SCF-PPS/TC4 合金的连接。研究发现,随着激光功率的增加,接头拉剪强度先增大后减小;当接头强度达到最高时,接头形貌呈现内聚破坏和黏附破坏的混合失效特征。此外,离焦量和光斑形状也能够直接影响接头性能。当离焦量过大时,易引起烧损等缺陷^[50];矩形光斑与传统高斯热源光束相比,能量密度更均匀,接头强度更高^[51]。

同时,利用激光作为热源诱导,与其它焊接方法结合也是金属与 CFRTP 连接的方法之一。周健等人^[52]采用激光诱导 Al-Ti-C 粉末中间层自蔓延反应的方法,实现了 SCF-PA 与 1060 铝合金的异种材料连接。激光焊接技术与机械紧固连接复合的制备技术也是提高接头性能的主要研究方向之一^[53-54],其原理是接头实现机械紧固连接与焊接连接的综合作用。

此外,对金属表面处理也是激光焊接接头性能改善的主要措施之一,其目的是增加金属与 CFRTP 连接界面的表面积和机械咬合效果,如在金属板表面激光加工凹槽^[55]及其他复杂网格^[56]等。

1.3.5 搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊 (FSW) 技术原理是利用高速旋转的搅拌头摩擦产生热量,使金属/CFRTP 接触界面局部软化,被软化的材料在搅拌头的转动摩擦力作用下,由搅拌头的前部流向后部,并在搅拌头的挤压下形成致密的固相接头。

搅拌头转速、压力、焊接时间,以及能耗等参数^[57-58]对接头性能具有明显影响。搅拌摩擦点焊 (FSSW) 技术^[59]在焊接过程中温度相对较低,接头不容易发生热变形;随着焊接时间的增加,结合面积增大,使接头的静载强度和疲劳强度得到提高。

回填式搅拌摩擦点焊 (FSPJ)^[60]的原理是通过控制搅拌头各部分相对运动实现金属/CFRTP 的摩擦点焊。其中,提高或改善接头中黏接效果的方法,均可一定程度的改善接头性能,其原因可归纳为提高了金属与 CFRTP 中树脂基体的黏接强度。Andre 等人^[61]通过添加 PPS 树脂过渡层,其接头性能提高 20%~55%,主要通过增大接头黏结面积来提高强度,接头抗剪强度达到 50 MPa。Amancio-Filho 等人^[62]则制备得到强度为 28 MPa 的 CF-PPS/AZ31 接头。

焊接技术与机械紧固连接技术复合的方法,是

目前提高接头性能的思路之一。Pabandi^[63]等提出摩擦点焊与螺纹紧固相复合的连接技术,即用熔化的 SCF-PP 填充预螺纹孔,再固化后能产生平整的高质量焊接接头;接头性能提高的原理是在冶金结合的基础上增加了螺纹孔和再固化 SCF-PP 之间的机械锁合。

此外,一些研究表明,在搅拌摩擦焊过程中,通过改变金属表面元素,能够使 CFRTP 基体树脂与金属表面发生化学键合,提高金属/CFRTP 连接性能。

2 界面连接机理及性能

2.1 焊接连接界面的结合机理

综合分析,CFRTP 与金属焊接接头性能明显优于黏接接头和机械紧固接头的性能,连接界面结合强度主要取决于焊接材料、焊接方式、焊接工艺参数(焊接时间、焊接能量、压力等)。其连接技术的结合机理可归纳为金属、CFRTP 以及中间层两者或三者间的原子键合或冶金结合,如图 9 所示。

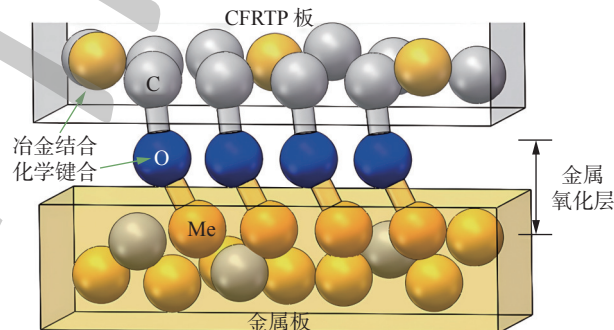


图9 金属/CFRTP 异质界面的化学键合以及冶金结合原理

Fig.9 Chemical bonding and metallurgical bonding principles at the metal/CFRTP heterogeneous interface

金属/CFRTP 的冶金结合是依靠界面上的原子向对方基体中扩散而形成的, C 原子向金属层扩散, 金属原子向树脂层扩散, 这一过程常伴随化合物的生成, 常见的有铝合金和树脂生成 Al_4C_3 , 镁合金和树脂形成 MgCO_3 , 从而实现冶金结合。与冶金结合相比, 化学键合通常需要借助化学处理来实现。其中, 参与化学反应的 C 原子主要来源于树脂基体, 与金属原子和 C 原子直接反应相比, 金属表面氧化物更易与树脂中极性键发生反应, 形成 C—O—Me 化学键: 例如一些研究指出, CP-PEEK 中 C—O 化学键易与镁合金表面氧化物中 Mg—O

化学键相结合;CF-PA6 中 C—O 化学键易与铝合金表面氧化物发生化学反应,生成 C—O—Al 化学键;PA66 树脂易与不锈钢表面氧化物反应生成 C—O—Cr 化学键^[64-67]. 在金属表面偶联剂处理后,生成的过渡层也更容易形成化学键合,如硅烷偶联剂能够与铝合金表面羟基和 PPS 中巯基分别形成 Al—O—Si、C—O—S 化学键,从而实现铝合金/CFRTP 化学键合的结合机理^[68].

根据金属/CFRTP 复合材料服役过程中连接界

面断裂形式,可以将焊接破坏类型分为两种,层间失效(纽扣剥离失效)、界面脱黏失效(熔核界面失效). 纽扣剥离失效所用的时间比起熔核界面失效更长,发生的塑性变形量更多,断裂过程中吸收的能量也较多,是工程应用上更为理想的断裂模式.

2.2 金属/CFRP 不同连接技术的性能

表 2 为综述中 CFRP 与金属连接材料的组合类别. 图 10 为不同连接技术金属/CFRP 连接界面的接合强度分布.

表 2 CFRP 与金属连接材料的组合类别
Table 2 The combining forms of CFRP/metal bonding

连接方式	钛合金	铝合金	镁合金	铝合金	钢	不锈钢
黏接	参考文献[12, 16]	—	—	参考文献[8, 11, 13-15, 17-19, 21-22]	参考文献[7, 9, 10, 20]	—
螺栓连接	—	—	—	参考文献[23-24]	—	—
铆接	参考文献[26, 30-31]	—	参考文献[32]	参考文献[28-29]	参考文献[25]	—
钎焊	参考文献[38-39]	参考文献[38]	—	参考文献[35-37]	—	—
电阻焊	—	—	—	参考文献[40, 42]	—	参考文献[41]
超声波焊	—	—	参考文献[45]	参考文献[43, 44, 46]	—	—
激光焊	参考文献[49, 50, 56]	—	—	参考文献[48, 51-52]	参考文献[55]	参考文献[53-54]
搅拌摩擦焊	—	—	参考文献[62]	参考文献[57-61, 63-64, 68]	参考文献[69]	—

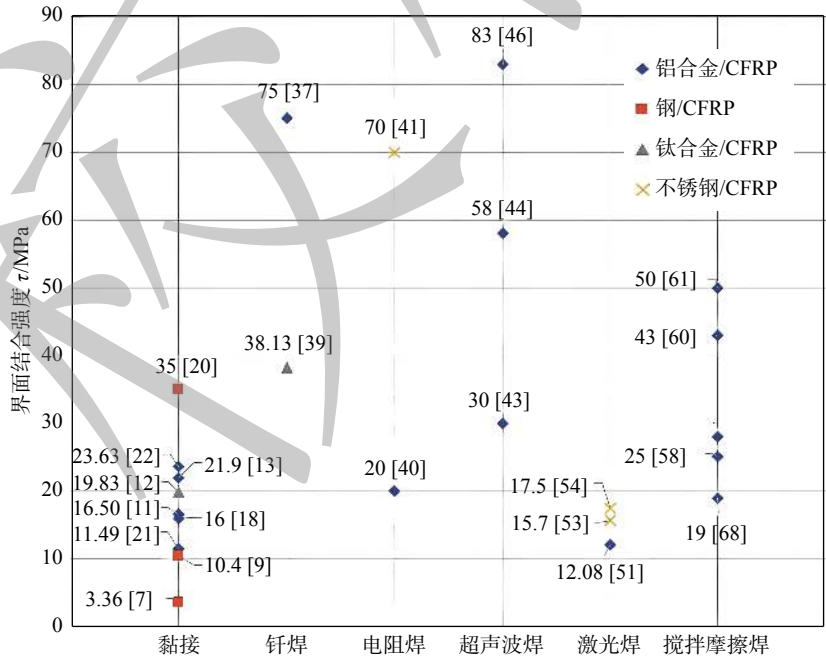


图 10 采用不同连接技术 CFRP/金属连接界面的结合强度分布

Fig. 10 The bonding strength distribution of CFRP/metal connection interface of different bonding technologies

综合分析表 2 和图 10 数据,比较不同连接技术对金属/CFRP 连接界面性能的影响,发现铝合金在不同连接技术下都可以和 CFRTP 产生良好的界

面结合;在焊接技术下,能够得到较高的 Al/CFRTP 连接强度,其中超声波焊接强度达到 83 MPa,其次在该连接技术下不同工艺参数对界面连接强度影

响较大;机械紧固适用绝大部分金属/CFRP连接;黏接也适用于大部分金属/CFRP连接,但得到的界面连接强度相对较低。

3 结束语

不难发现,基于CFRP轻质高强的自身性能及其与金属材料的互补优势,金属/CFRP的连接势必成为“陆海空天”等领域不可或缺的结构形式,而CFRP与金属连接界面的有效性和可靠性是保障异质材料联合协调服役时最大潜能发挥的关键。为此,研究CFRP与金属连接界面结合机理,获得高质量CFRP与金属构件的主要发展方向可归纳为以下两个方面。

(1) 金属与CFRP连接界面结构形状和表面质量的设计。目前大量研究表明在金属或者CFRP表面进行预处理能够提高界面结合强度。例如在金属表面加工微孔,增大结合面积,增加机械锁合效果,从而提高界面连接强度。因此,通过改变界面结构形状和表面质量来提高金属/CFRP结合强度预计具有良好的发展前景。

(2) 金属与CFRP连接界面成分和组织性能的设计。连接界面作为金属与CFRP两者间的纽带,其成分和组织性能影响着界面结合强度,是两者间载荷传递效果的关键。三种连接技术中,金属与CFRP的焊接连接技术机制以冶金结合和化学键合为主,对界面成分和组织性能的研究能够进一步揭示其界面结合机制。目前的研究对金属/CFRP连接界面组织成分的调控,主要手段是通过改变材料表面元素成分,增加金属与CFRP中树脂的反应,包括硅烷偶联剂处理和表面氧化处理等,而关于界面化学键形成的问题有待进一步研究。因此研究连接界面成分以及组织性能同样具有重要意义。

参考文献

- [1] 王军照. 碳纤维复合材料在航空领域中的应用现状及改进[J]. 今日制造与升级, 2020, 128(8): 48-49.
Wang Junzhao. The application status and improvement of carbon fiber composite materials in the aviation field[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2020, 128(8): 48-49.
- [2] 陈亚莉. F-35战斗机复合材料蒙皮的切削加工技术[J]. 航空制造技术, 2010(15): 34-36.
Chen Yali. Cutting technology for F-35 composites skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(15): 34-36.
- [3] 于跃. 碳纤维复合材料/铝合金冲铆接合研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
Yu Yue. Research on riveting joint of carbon fiber-reinforced plastic/aluminum alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [4] 罗益锋. 碳纤维及其复合材料在主要应用领域的突破方向与技术进展[J]. 高科技纤维与应用, 2019, 44(6): 1-12.
Luo Yifeng. Breakthrough direction and technical progress of carbon fiber and its CFRP in main application areas[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2019, 44(6): 1-12.
- [5] 王明猛. 碳纤维复合材料在高速列车上的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
Wang Mingmeng. Research on the application of carbon fiber composites on high-speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [6] Malnati P. Composites-intensive masterwork: 2020 Corvette, Part 1[J]. Composites World, 2004.
- [7] 葛宏伟. CFRP 粘结钢板复合构件的剥离性能试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
Ge Hongwei. Experimental study on the peeling capability of steel plate strengthened with carbon fiber reinforced plastics[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [8] 莫丽蓉, 陆湘贤, 封进, 等. FSAE 赛车碳纤维悬架黏接件拉伸强度改进分析[J]. 桂林航天工业学院学报, 2018, 23(3): 329-333.
Mo Lirong, Lu Xiangxian, Feng Jin, et al. Improved analysis of the stretch strength of racing carbon fiber suspension adhesives[J]. Journal of Guilin University of Aerospace Technology, 2018, 23(3): 329-333.
- [9] 朱德举, 姚明侠, 张怀安, 等. 动态拉伸荷载下温度对 CFRP/钢板单搭接剪切接头力学性能的影响[J]. 土木工程学报, 2016, 49(8): 28-35.
Zhu Deju, Yao Mingxia, Zhang Huaian, et al. Temperature effect on the mechanical properties of CFRP/Steel single-lap shear joints under dynamic tensile loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(8): 28-35.
- [10] 李传习, 李游, 贺君, 等. 固化剂对室温胶黏 CFRP 板/钢板界面性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 339-347.
Li Chuanxi, Li You, He Jun, et al. Effect of curing agent on interfacial performance of adhesively bonded CFRP laminate/steel plate cured at room temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 339-347.
- [11] 赵汉清, 赵玉宇, 于昕, 等. J-241 室温固化耐 150 ℃ 胶黏剂的制备与性能[J]. 化学与粘合, 2016(4): 272-275.
Zhao Hanqing, Zhao Yuyu, Yu Xin, et al. Preparation and performance of 150 ℃ heat resistant adhesive J-241 curing at room temperature[J]. Chemistry and Adhesion, 2016(4): 272-275.
- [12] 崔永鹏, 何欣, 张凯. 钛合金和碳纤维的黏接技术[J]. 光学技术,

- 2012, 38(1): 125 – 128.
- Cui Yongpeng, He Xin, Zhang Kai. Technique of cementation between the titanium alloys and carbon fibers[J]. Optical Technique, 2012, 38(1): 125 – 128.
- [13] 乔海涛, 邹贤武. 碳纤维复合材料的胶接工艺与性能 [J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(1): 66 – 77.
- Qiao Haitao, Zou Xianwu. Process and performance of carbon fiber composites bonding[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009, 39(1): 66 – 77.
- [14] 韩江义, 陈力. 碳纤维管与铝合金的胶接强度试验研究 [J]. 现代制造工程, 2014(12): 64 – 67.
- Han Jiangyi, Chen Li. Study on bonding strength test between carbon fiber pipe and aluminium alloy[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(12): 64 – 67.
- [15] Arenas J M, Alia C, Narbon J J, *et al.* Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium-composite material bonding[J]. Composites Part B-Engineering, 2013, 44(1): 417 – 423.
- [16] Wang W, Poulis J A, Freitas S T D, *et al.* Surface pretreatments on CFRP and titanium for manufacturing adhesively bonded bi-material joints[C]. //ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials, Athens, 2018.
- [17] Zhou Q, Ma Q, Zhou T, *et al.* The effects of interfacial connection condition on the characteristics of aluminum/CFRP hybrid tube under transverse quasi-static loading[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22(6): 1761 – 1773.
- [18] Kim J H, Lee C J, Min K D, *et al.* Intense pulsed light surface treatment for improving adhesive bonding of aluminum and carbon fiber reinforced plastic (CFRP)[J]. Composite Structures, 2021, 258: 113364.
- [19] Okada T, Kanda M, Faudree M C, *et al.* Shear strength of adhesive lamination joint of aluminum and CFRP sheets treated by homogeneous low energy electron beam irradiation prior to lamination assembly and hot-press[J]. Materials Transactions, 2014, 55(10): 1587 – 1590.
- [20] Al-Mosawe A, Al-Mahaidi R, Zhao X L, *et al.* Effect of CFRP properties, on the bond characteristics between steel and CFRP laminate under quasi-static loading[J]. Construction & Building Materials, 2015, 98(15): 489 – 501.
- [21] 郝旭飞. 超声振动强化碳纤维铝材胶接工艺研究及应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- Hao Xufei. Research and application of the process of ultra-sonic vibration strengthened adhesive bonding of CFRP-to-aluminum joints[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [22] Wu M, Tong X, Wang H, *et al.* Effect of ultrasonic vibration on adhesive bonding of CFRP/Al alloy joints grafted with silane coupling agent[J]. Polymers, 2020, 12(4): 947 – 965.
- [23] 张冠彪. 碳纤维层合板与铝合金板机械连接钉载分配研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Zhang Guanbiao. Study on the pin load distribution of multiple bolted between alloy plate and carbon fiber laminates[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2013.
- [24] 袁青祥. 碳纤维复合材料螺栓连接结构的力学性能分析 [D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- Yuan Qingxiang. Mechanical properties analysis of carbon fiber composites bolted joints[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- [25] Wagner J, Wilhelm M, Baier H, *et al.* Experimental analysis of damage propagation in riveted CFRP-steel structures by thermal loads[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75: 1103 – 1113.
- [26] Kashaev N, Ventzke V, Riekehr S, *et al.* Assessment of alternative joining techniques for Ti-6Al-4V/CFRP hybrid joints regarding tensile and fatigue strength[J]. Materials & design, 2015, 81: 73 – 81.
- [27] 钟丽慧, 孔淑华, 刘志钢. 冲铆技术在汽车行业上的应用与控制 [J]. 电焊机, 2013, 43(2): 111 – 116.
- Zhong Lihui, Kong Shuhua, Liu Zhigang. Application and controlling of punch riveting technology in auto production[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(2): 111 – 116.
- [28] Franco G D, Fratini L, Pasta A. Analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single-lap joints between CFRP panels and aluminum blanks[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 41(1): 24 – 32.
- [29] Min J, Li Y, Li J, *et al.* Friction stir blind riveting of carbon fiber-reinforced polymer composite and aluminum alloy sheets[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5-8): 1403 – 1410.
- [30] Altmeyer J, Santos J F D, Amancio-Filho S T. Effect of the friction riveting process parameters on the joint formation and performance of Ti alloy/short-fibre reinforced polyether ether ketone joints[J]. Materials & Design, 2014, 60: 164 – 176.
- [31] 崔旭, 田琳, 王道晨, 等. 一种热塑性材料与轻质合金的热铆连接方法: CN202011371747[P], 2021-03-30.
- Cui Xu, Tian Lin, Wang Daosheng, *et al.* A thermal riveting connection method between thermoplastic materials and lightweight alloys: CN202011371747[P], 2021-03-30.
- [32] Li S X, Khan H A, 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 the Journal on Environmental Degradation of Materials & Its Control, 2018, 132: 300 – 309.
- [33] Carvalho W S, Schwemberger P, Haas F, *et al.* Investigation on the feasibility of joining additively manufactured metals and engineering thermoplastics by ultrasonic energy[Z]//XVI-1005-20. 2020.
- [34] 孙洋. 碳纤维复合材料连接结构的强度分析及其影响因素 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

- Sun Yang. Failure strength and main factors analysis of carbon fiber composites bolted joints[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2016.
- [35] Wang Y, Chai P, Guo X J, *et al.* Effect of connection processes on mechanical properties of 7B04 aluminum alloy structures[J]. China Welding, 2021, 30(2): 50 – 57.
- [36] 郭义, 刘鹏, 何治经. Al-C 纤维复合材料微结构钎焊连接[J]. 焊接学报, 1993, 14(4): 233 – 240.
- Guo Yi, Liu Peng, He Zhijiang. Investigation on microstructure brazing of Al/C fiber composite[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1993, 14(4): 233 – 240.
- [37] 牛红伟, 赵宇, 刘多, 等. 碳纤维增强复合材料与金属钎焊研究[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 442 – 448.
- Niu Hongwei, Zhao Yu, Liu Duo, *et al.* Development of metal brazing and carbon fiber reinforced composites[J]. Journal of Changchun University of Technology(Natural Science Edition), 2016, 37(5): 442 – 448.
- [38] 田英超, 曲文卿, 张智勇, 等. 碳纤维复合材料与金属的钎焊试验研究[J]. 航空制造技术, 2011(9): 82 – 84.
- Tian Yingchao, Qu Wenqing, Zhang Zhiyong, *et al.* Research of vacuum brazing of carbon fiber reinforced composites with metal[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(9): 82 – 84.
- [39] Hu S P, Feng D D, Xia L, *et al.* Joints of continuous carbon fiber reinforced lithium aluminosilicate glass ceramics matrix composites to Ti60 alloy brazed using Ti-Zr-Ni-Cu active alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019(3): 715 – 722.
- [40] Ageorges C, Ye L. Resistance welding of metal/thermoplastic composite joints[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2001, 14: 449 – 475.
- [41] Nagatsuka K, Xiao B, Wu L H, *et al.* Resistance spot welding of metal/carbon-fibre-reinforced plastics and applying silane coupling treatment[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(3): 181 – 187.
- [42] Ren S D, Ma Y W, Saeki S H, *et al.* Fracture mechanism and strength evaluation of Al5052/CFRP joint produced by coaxial one-side resistance spot welding[J]. Composite Structures, 2020, 252: 112766.
- [43] Balle F, Wagner G, Eitler D. Ultrasonic spot welding of aluminum sheet/carbon fiber reinforced polymer - joints[J]. Materials Science & Engineering Technology, 2007, 38(11): 934 – 938.
- [44] Wagner G, Balle F, Eifler D. Ultrasonic welding of aluminum alloys to fiber reinforced polymers[J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15(9): 792 – 803.
- [45] Zhou X, Zhao Y T, Chen X C, *et al.* Fabrication and mechanical properties of novel CFRP/Mg alloy hybrid laminates with enhanced interface adhesion[J]. Social Science Electronic Publishing, 2021, 197: 109251.
- [46] Staab F, Balle F. Ultrasonic torsion welding of ageing-resistant Al/CFRP joints: Properties, microstructure and joint formation[J]. Ultrasonics, 2019, 93: 139 – 154.
- [47] 夏佩云, 李颖, 张婧, 等. 聚酰胺-不锈钢激光透射焊接工艺特性[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 155 – 161.
- Xia Peiyun, Li Ying, Zhang Jing, *et al.* Characteristics of laser transmission welding polyamide-stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 155 – 161.
- [48] 徐洁洁, 王栋, 肖荣诗, 等. 纤维增强热塑性树脂基复合材料与金属激光连接研究进展[J]. 焊接学报, 2021, 42(10): 73 – 86.
- Xu Jiejie, Wang Dong, Xiao Rongshi, *et al.* Laser joining of fiber reinforced thermoplastic composites and metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(10): 73 – 86.
- [49] Tao W, Su X, Chen Y B, *et al.* Joint formation and fracture characteristics of laser welded CFRP/TC4 joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 1 – 8.
- [50] Su J H, Tan C W, Wu Z L, *et al.* Influence of defocus distance on laser joining of CFRP to titanium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 124: 106006.
- [51] Wang D, Xu J J, Huang T, *et al.* Effect of beam shaping on laser joining of CFRP and Al-Li alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107336.
- [52] 周健, 刘双宇, 张福隆. 激光自蔓延连接 CFRTP/铝接头微观形貌及形成机理[J]. 激光技术, 2019, 43(2): 147 – 153.
- Zhou Jian, Liu Shuangyu, Zhang Fulong. Microstructure and formation mechanism of CFRTP/Al joints by laser induced self-propagating bonding[J]. Laser Technology, 2019, 43(2): 147 – 153.
- [53] Wang F Y, Jiao J K, Wang Q, *et al.* A research on CFRP and stainless steel joining with fiber lasers [C]. //International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Laser Institute of America, 2015, 709–715.
- [54] Jiao J K, Wang Q, Wang F Y, *et al.* Numerical and experimental investigation on joining CFRTP and stainless steel using fiber lasers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 362 – 369.
- [55] Kam D H, Jeon N K, Jeong T E, *et al.* Pre-inscribed laser surface patterning for increased joining strength in laser fusion bonding of CFRP and zinc-coated steel[J]. Applied Sciences, 2019, 9(21): 4640 – 4648.
- [56] Tan C W, Su J H, Feng Z W, *et al.* Laser joining of CFRTP to titanium alloy via laser surface texturing[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 103 – 114.
- [57] Nagatsuka K, Xiao B, Atsuki T, *et al.* Dissimilar materials joining of Al alloy/CFRTP by friction lap joining[J]. Transactions of JWRI, 2015, 44(1): 9 – 14.
- [58] Lambiasi F, Paoletti A, Durante M. Mechanism of bonding of AA7075 aluminum alloy and CFRP during friction assisted joining[J]. Composite Structures, 2021, 261(1): 113593.
- [59] Ogawa Y, Akebono H, Tanaka K, *et al.* Effect of welding time on

- fatigue properties of friction stir spot welds of Al to carbon fibre-reinforced plastic[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2019, 24(3): 235 – 242.
- [60] Goushegir S M, Santos J F, Amancio-Filho S T. Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composite single lap joints: Microstructure and mechanical performance[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 196 – 206.
- [61] Andre N M, Goushegir S M, Santos J F, *et al.* Friction spot joining of aluminum alloy 2024-T3 and carbon-fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) laminate with additional PPS film interlayer: Microstructure, mechanical strength and failure mechanisms[J]. *Composites Part B Engineering*, 2016, 94: 197 – 208.
- [62] Amancio-Filho S T, Bueno C, Santos J F, *et al.* On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528: 3841 – 3848.
- [63] 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.
- [64] 姜春阳, 吴利辉, 常云龙, 等. 铝合金与树脂基复合材料的铆接/搅拌摩擦搭接复合焊接 [J]. *航空学报*, 2022, 43(2): 145 – 155.
- Jiang Chunyang, Wu Lihui, Chang Yunlong, *et al.* Hybrid welding of riveting/friction stir lap joining of aluminum alloy to resin based composite[J]. *Acta Aeronautica Astronautica Sinica*, 2022, 43(2): 145 – 155.
- [65] Liu Y F, Su J H, Ma G L, *et al.* Effect of the laser texturing width on hot-pressing joining of AZ31B and CFRTP[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107350.
- [66] Liu F C, Dong P, Lu W, *et al.* On formation of Al-O-C bonds at aluminum/polyamide joint interface[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 466: 202 – 209.
- [67] 廖伟. 304 不锈钢与塑料异种材料激光振荡扫描焊接工艺及机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- Liao Wei. Laser oscillating welding of 304 stainless steel to plastic[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [68] Nagatsuka K, Tanaka H, Xiao B, *et al.* Effect of silane coupling treatment on the joint characteristics of friction lap joined Al alloy/CFRP[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2015, 33(4): 317 – 325.
- [69] 李红, 刘旭升, 张宜生, 等. 新能源汽车异种材料连接技术的挑战、趋势和进展 [J]. *材料导报*, 2019, 33(23): 3853 – 3861, 3881.
- Li Hong, Liu Xu Sheng, Zhang Yisheng, *et al.* Current research challenges in innovative technology of joining dissimilar materials for electric vehicles[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(23): 3853 – 3861, 3881.

第一作者: 张婷婷, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师; 主要从事异质材料连接技术及接头性能的研究; Email: tyzt88@163.com.

(编辑: 王娇)