

树脂基 CFRP/金属异种材料激光连接工艺研究现状

邹鹏远^{1,2}, 张 华¹, 雷 敏¹, 程东海³, 曾遨日¹, 杨 帆¹

(1. 南昌大学, 江西 南昌 330031)

(2. 南昌航空大学 科技学院, 江西 九江 332020)

(3. 南昌航空大学, 江西 南昌 330031)

摘 要:树脂基碳纤维增强复合材料(CFRP)作为新型轻质结构复合材料,广泛应用于航空航天器件的零部件中。CFRP与航空常用金属传统连接主要有胶接和机械连接,但具有一定的局限性。激光连接技术具有能量密度高,可控性好等特点,可用于复合材料和金属的连接。本文针对当前树脂基CFRP与金属(铝合金、钛合金、钢等)激光连接接头成形机理以及接头缺陷进行了综述,同时分析了焊接工艺、组织结构优化以及焊前金属表面处理对接头成形的调控,并对CFRP/金属激光连接的发展趋势提出了展望。

关键词:CFRP; 激光搭接; 连接机理; 表面处理

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)05-1853-07

工业生产当中,碳纤维增强复合材料(CFRP)作为一种由树脂、玻璃等材料作基体,碳纤维作增强体的高性能聚合物复合材料,有很高的研究价值,其中树脂基CFRP材料以树脂为基底,具有很高的比强度和刚度,以及较好抗腐蚀能力,已经大量被用作工程材料制备高性能结构件,如战斗机机身主构架,飞行器发动机零部件等^[1-3]。常用的工程树脂基CFRP材料包括碳纤维增强聚酰胺复合材料(PA/CFRP),碳纤维增强聚醚醚酮复合材料(PEEK/CFRP)以及碳纤维增强聚亚苯基硫醚复合材料(PPS/CFRP)等,但由于其制作成本高,熔点低,且在受到冲击载荷的过程中容易发生脆断和严重的屈曲,在实际使用当中受到很大的限制^[4]。轻质金属材料,如铝合金、钛合金以及传统的结构钢材,其力学性能优良,价格适中,已广泛应用于汽车、飞行器等工业领域当中。因此,CFRP和金属材料的混合结构会大量出现在器件当中,例如,汽车的树脂基CFRP蒙皮与铝镁合金的连接,可大大减少整体的重量,同时保证车身强度;钛合金和树脂基CFRP制备的混合机身构架,已经开始用于新一代战斗机的机身当中,以增加机身的抗震能力。随着金属/CFRP混合构件的发展,2种材料的连接问题无法避免^[5],而CFRP作为非金属与常见的金属材料物理性质和化学性质相差较大,同时在传统的加工作用下难以形成牢固的接头,因此CFRP和金属材料的连接

成为当前异种材料连接的重要问题^[6]。

目前连接树脂基CFRP和金属的方式主要为机械连接和胶接。机械连接主要依靠铆接,但铆接在静载荷作用下容易产生应力集中和应力腐蚀,在动载荷作用下容易发生破坏^[7,8]。而胶接主要使用环氧胶等工业粘合剂将2种材料连接以达到牢固的连接接头,接头强度较高不易发生断裂,但是胶接固化时间较长导致制造周期增加,同时接头在复杂恶劣的条件下容易出现老化导致开裂^[9,10]。近年来搅拌摩擦焊成为异种材料连接的有效手段,Wu等人^[11]采用PA/CFRP和铝合金搭接的方法,运用搅拌摩擦焊得到牢固的接头,其加工过程热输入低,成形较好同时无污染,生产率较高,是异种材料连接的优异方法,但搅拌摩擦焊装配时间长,被焊工件需要被固定同时需要受到较大的搅拌作用力,在很多情况下会产生毛边,键空等缺陷,严重破坏接头^[12]。

激光焊接技术是近年来发展非常迅速的连接技术,它利用高能量的光束迅速熔化材料,同时快速凝固成形。由于其热输入小,焊后变形小,且焊接时间短,效率高,非常适合异种材料的连接^[13]。目前激光焊接技术已经用于绝大部分金属的焊接,且在铝/钢,铝/镁,镁/钛等异种金属的连接工艺中广泛应用,Wang等人^[14-16]对异种金属之间的焊接工艺,力学性能和连接机理已经进行了大量的研究。激光焊接技术同样在树脂

收稿日期: 2020-03-17

基金项目: 江西省省级优势科技创新团队项目(20181BCB24001); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ181568)

作者简介: 邹鹏远,男,1990年生,博士,讲师,南昌航空大学科技学院,江西九江332020, E-mai: alalbert@126.com

复合材料焊接当中有所应用, 激光利用其透光率强, 加工区域小, 可以通过熔化树脂材料和金属, 并通过物理或者化学的方法在其界面形成稳定接头。但目前对树脂基复合材料和金属之间激光连接的工艺、接头性能、接头破坏形式以及连接机理等研究较少。本文针对常用的热塑性树脂基碳纤维增强复合材料 (PPS, PA, PEEK/CFRP) 和铝合金、钛合金、钢材等常用航空材料激光焊接技术, 介绍激光搭接接头目前存在的连接机理, 同时总结树脂基 CFRP/金属激光连接的发展趋势。

1 CFRP/金属激光搭接连接机理及接头缺陷

树脂基复合材料和金属进行激光搭接主要依靠 2 种加热形式形成搭接接头, 透射焊和热传导焊接^[17]。对于大部分树脂基碳纤维增强复合材料, 由于其基体透光率较低, 一般通过热传导形式连接, 这种连接方式的原理是激光先熔化复合材料上层的金属, 金属与树脂基 CFRP 的界面温度升高, 同时熔化树脂部分, 最后与金属形成牢固的搭接接头, 这种连接方式可以充分熔化金属, 同时不会对树脂材料产生过热, 导致界面大量的气泡产生。由于 CFRP 与金属材料化学性质和物理性质相差较大, 且在高温下一般不会生成大量反应物作为过渡层, 因此激光连接 2 种材料的机理非常复杂。研究证明, CFRP 和金属连接的方式主要为化学键连接、机械互锁连接和物理键等。

1.1 化学键结合机制

1.1.1 接头化学键连接机理

由于金属和树脂材料的性能差异很大, 金属和 CFRP 不会形成明显的中间过渡层, 但会在热的作用下形成稳定的化学键, 一般为金属元素 M 和 C、O 等元素形成共价键, 在研究铝合金和钛合金与 CFRP 激光搭接焊中发现, 界面会有 Al-O-C 和 Ti-O-C, Cr-O-C 等共价键的形成, 最终形成复杂化合物, 这对接头的力学性能起到非常重要的作用^[18]。

Su 等人^[19]在 PPS/CFRP 材料表面熔覆 TC4 合金时发现, 在界面层出现了 TC4 与 CFRT 的界面反应并形成界面层如图 1 所示, 在碳纤维树脂材料表面形成反应层, 反应物为条状的 TiS 和块状的 TiC, 且在 1373 K 以上, TiC 形成倾向较大, 该反应过程为自发反应。该研究为钛合金与碳纤维增强复合材料的化学键研究提供了重要的参考价值。

研究发现, 通过金属表面改性可以促进界面的化学键的形成。Jung^[20]等人在研究镀锌钢和 PA/CFRP 激光搭接时发现, 在其界面层出现了 Zn, O, C 元素的梯度区域, 证明出现了强烈的原子或分子间结合过程。同样

Katayama^[21]在研究不锈钢和 PET 激光连接过程中, 在 HRTEM 下观测到在 2 种材料之间出现了 5 nm 厚的铬氧化物, 在热加工过程当中, 在两者界面产生了极薄的纳米层, 是金属元素与碳氧的结合物, 说明金属和树脂材料在热加工工艺过程中, 金属和树脂材料很难产生化学反应, 一般可以通过中间过渡层形成化学键。金属和树脂材料在高温下能形成牢固的化学键, 可以提高接头强度, 由于激光焊接反应时间过短, 化学键形成较少难以观测, 且目前尚无有效的手段分析结合过程, 因此, 对于化学键的演变机理需要深入研究。

1.1.2 热输入对接头化学键的调控

热输入作为激光焊接工艺的主要工艺参数, 主要包括激光功率、焊接速度和光斑直径^[13, 22]。焊接工艺参数对界面形态、反应过程以及凝固过程都起着很大的作用, 其中适当的热输入对化学键的成形起到重要的作用, 由于金属与树脂材料的连接主要依靠共价键形成, 适当的热输入提高熔池存在时间, 使得化学反应更加充分, 接头形成更多共价键, 提高焊接接头强度。

Tan 和 Su^[23,24]等人在研究钛合金和 PEEK/CFRP 材料激光焊连接时, 发现界面出现了一种新相 C-Ti-V

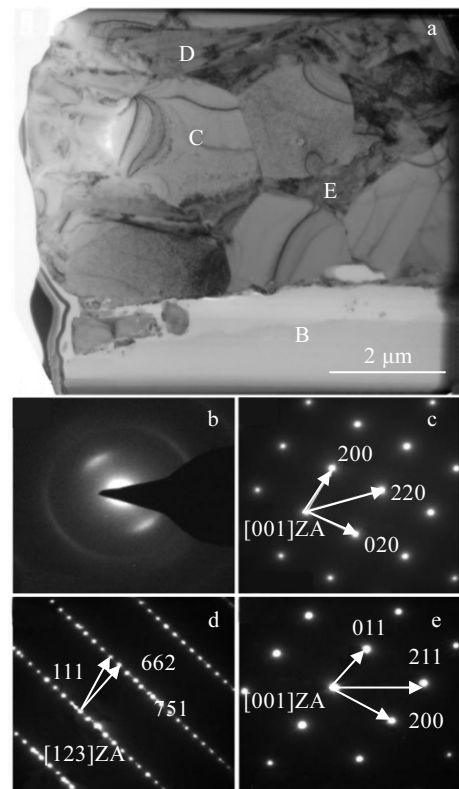


图 1 TC4 与 PPS/CFRP 搭接界面 TEM 像及对应 SAED 花样
Fig.1 TEM image (a) and SAED patterns of PPS/CFRP lap joint^[19]: (b) B zone, (c) C zone, (d) D zone, and (e) E zone corresponding to Fig.1a

作为过渡层,且通过调节激光的扫描速度和离焦量可以改变中间层的数量。EDS对界面进行线扫描发现,随着激光速度增加,中间化合物层的数量将减少,当扫描速度为0.6 m/min时,化合物层为10 μm ,而当扫描速度为1 m/min时,化合物层减小到4 μm ,且接头的抗剪切强度出现了先上升后下降的情况,证明在一定范围内激光热输入越大,熔池反应越充分,就会形成大量的共价键。

1.1.3 阳极氧化处理对化学键的调控

目前,在金属表面增加氧化层是加强金属/CFRP材料化学键形成最有效的手段,表面氧化处理是通过一定手段在表面形成一层金属氧化膜,让金属表面达到特殊性能的工艺过程,对于铝合金、镁合金、钛合金和不锈钢等,能够在表面自然形成氧化膜^[25,26]。阳极氧化是电化学反应形成氧化膜的一种方式,常见的阳极氧化有磷酸阳极氧化、硫酸阳极氧化和硼酸阳极氧化^[27]。大量研究表明^[21,28,29],金属和CFRP胶接时,Al、Ti合金在阳极表面处理之后能形成多孔表面的氧化层,该氧化层在胶接过程有助于形成复合过渡层,胶体能在界面相互渗透,降低自由能,增加化学反应界面,同时也能提高机械互锁效应,最后能够提高接头的抗剪切强度。

对于不锈钢等材料表面经过阳极氧化处理之后,不锈钢材料在阳极氧化处理后形成的氧化膜较薄,不易形成多孔材料,有研究表明,阳极氧化处理过的不锈钢和树脂材料进行激光连接后没有明显的机械互锁,阳极氧化后表面的氧化铬作为决定抗剪切强度的决定因素,EDS结果表明界面出现了Cr, O, C元素的聚集,证明可能出现了化学反应^[30]。在铝合金和钛合金阳极氧化后与树脂材料激光连接的界面同样检测到了M-O-C化学键的生成(M为金属元素)^[19,31]。

Zhang^[32]等人在研究铝合金和PA/CFRP碳纤维增强复合材料的激光连接时发现,铝合金表面阳极氧化程度与化学键的结合有直接的关系,通过XPS和EDS的结果可以推断出,铝合金的氧化层能够与PA的C=O键发生化学反应,且随着氧化时间增加,铝元素在新化学键中的占比增加,且抗剪切强度也逐渐增加,说明氧化程度可以直接影响化学键的形成,同时铝合金阳极氧化后表面对于CFRP的润湿性提高,高温下熔化的树脂进入到多孔的金属氧化物表面,凝固后形成大量的锚固点,大大提高机械互锁效应,2种方式使得接头强度明显提高。

阳极氧化后的金属表面形成多孔结构,提高了树脂基材料熔化时对金属表面的润湿性,降低了金属表面反应能,提高了金属与树脂材料的反应程度,然而

氧化层越多,表面粗糙度越大并不意味着接头的力学性能更好。Lamberti等^[33]对PA6.6和铝合金激光连接力学性能和焊接质量进行研究,试验设置了未氧化,自然氧化和阳极氧化3组作为对比,并测试了3组试样表面粗糙程度,研究发现由于表面粗糙度与表面拓扑波长的长宽比小于0.1,机械互锁效应不明显,因此机械互锁效应并不是结合的主要方式,可能存在化学键或者物理键作为连接的主要机制,因此,氧化程度会平衡化学键机制和机械互锁机制,研究已经证明,金属表面氧化程度与接头力学性能不成正比关系,表面氧化层的厚度、孔隙率、空隙尺寸等对力学性能均有影响^[34,35]。

1.2 机械互锁连接

1.2.1 机械互锁连接机制

机械互锁效应也称为锚固效应,是提高界面力学性能的主要连接机理之一,当复合材料受热熔化后进入到金属表面的沟槽或者孔洞中,在凝固后与金属形成牢固的机械互锁结构(也称为锚固状结构),由于机械互锁效应能够在很大程度上改善接头的强度,因此机械互锁连接机制成为2种材料连接的主要机理之一。从形成机理形式来看,成形效果与金属的表面形貌有关,金属表面微观尺度下越粗糙,形成的接头越稳定^[29],在很多情况下,为了提高金属与复合材料搭接接头的强度,实验会对金属表面进行特殊处理以增加表面粗糙度。但也有研究发现,过大的表面粗糙度也会造成未熔合的现象,同时由于较大的表面粗糙度使得液态树脂无法及时进入到金属沟壑中形成锚固,因此对于锚固效应的形成过程有待进一步研究。Markovits^[36]在研究钢钉与PMMA材料激光连接过程中发现,通过改变钢钉的几何形状和表面形貌,接头出现了明显的机械互锁结构,且表面形貌对互锁结构的影响较大,从而影响接头的强度。由此可见,材料表面的结构对焊后接头的互锁组织有直接的影响。

1.2.2 工艺参数对机械互锁效应的调控

虽然粗糙度会影响机械互锁效应,但有研究发现,激光工艺参数对互锁效应影响较大,树脂基材料的熔化程度不同,液态金属或者树脂的流动程度也不相同,造成锚固效应的程度发生变化,同时在界面处尤其靠近树脂材料表面,在激光的作用下形成气孔或者由气孔连成的“气孔隧道”,很大程度上影响机械互锁效应,最终对接头强度造成影响。

Hao等人^[37]研究一种新的振荡激光工艺连接PET与奥氏体不锈钢,实验未对材料表面进行预处理。研究发现激光工艺对接头的微观组织影响较大,当功率

为 300 W 振动半径为 2 mm 时出现锚固效应, 提高接头强度而当功率较小或振动半径为 1 mm 时, 在 PET 表面产生的气孔减弱了机械互锁效应, 说明工艺参数在一定程度上会影响接头的形貌或者树脂材料气孔气泡的产生, 导致接头锚固效应发生变化, 从而改变接头强度。

1.2.3 表面处理对机械互锁效应的调控

在金属/CFRP 热加工连接过程中, 为提高接头的强度, 一般对金属表面进行预处理以提高机械互锁效应, 目前, 对金属表面常见的处理方法有机械表面处理和表面刻蚀等。材料表面越粗糙, 机械互锁效应越明显。为了增强表面的粗糙度, 一般对金属进行表面处理, 目前常见的几种提高锚固效应的方式有喷丸喷砂、表面刻蚀处理等^[38-40]。

表面喷丸喷砂是金属表面处理最基本的方式, 依靠高速喷丸在金属表面形成凹坑, 增加其表面粗糙度从而提高树脂和金属的互锁效应, 其成本较低, 效率较高, 通常作为金属和树脂材料连接的预处理。Li 等人^[41]用激光焊接 PEEK/CFRP 和 6061 铝合金之前, 对铝合金表面进行喷丸处理, 在扫描电镜下观察到铝合金和树脂材料界面处有明显的机械连接, 原因是熔化的树脂进入到铝合金粗糙表面的凹槽内后停止流动, 最后凝固形成典型的锚固接头, 且接头强度较未进行表面处理的试样相比有所提高。但喷丸处理随机性较大, 导致材料表面微观下不均匀性接头强度分布不均匀, 局部可能因为熔化的树脂材料不能及时填充凹槽形成牢固接头, 同时由于喷丸的作用, 部分杂质如碳元素和氧元素进入到凹槽内阻止锚固接头的形成。因此需要更加细化的表面处理方式提高机械互锁效应。

Acherjee^[42]认为表面刻蚀是提高金属和复合材料连接效果较好的表面处理方式, 表面刻蚀技术是使用连续或脉冲激光在铝合金、钛合金等金属表面形成规则的图案, 刻蚀的图案能达到微米甚至纳米级别, 在表面形成微结构图案从而加强机械互锁的效果, 从而提高锚固效应^[43-45]。锚固效应的形成与刻蚀微观结构的形状以及刻蚀密度有关, 对接头强度有直接的影响。

Rodríguez^[46]研究了铝合金和 PA6/GF30 激光连接力学性能, 在铝合金表面分别用脉冲激光和连续激光进行表面刻蚀, 两者都在界面上产生了机械互锁但是效果及强度不同, 脉冲激光刻蚀的接头强度比连续激光刻蚀后的接头强度高, 原因是两者刻蚀的机理不同, 脉冲激光刻蚀是一种烧灼成形, 可以形成规则的长宽比凹槽并加以控制; 而连续激光刻蚀是一种喷射熔化

型, 很难得到规则的凹槽。因此, 合理控制凹槽的尺寸有助于强度的提高。

Jiao^[47]研究激光刻蚀密度对接头性能的影响, 实验以铝合金和 PA/CFRP 为连接材料, 脉冲激光在铝合金表面进行刻蚀, 图案为纵横交错的网格型, 间距为 0.04、0.08、0.1 和 0.2 mm, 如图 2 所示。研究发现, 剪切强度先增加后减少, 0.1 mm 的刻蚀时机械互锁效应最好, 接头强度最高。因此金属表面刻蚀的形貌对力学性能有很大影响。Amend^[48]等人用脉冲激光器在铝合金表面刻蚀出 2 种不同图案(网格型和凹槽型), 2 种图案的抗剪切强度不同, 直接证明金属表面刻蚀形貌对于金属和复合材料连接强度的影响。

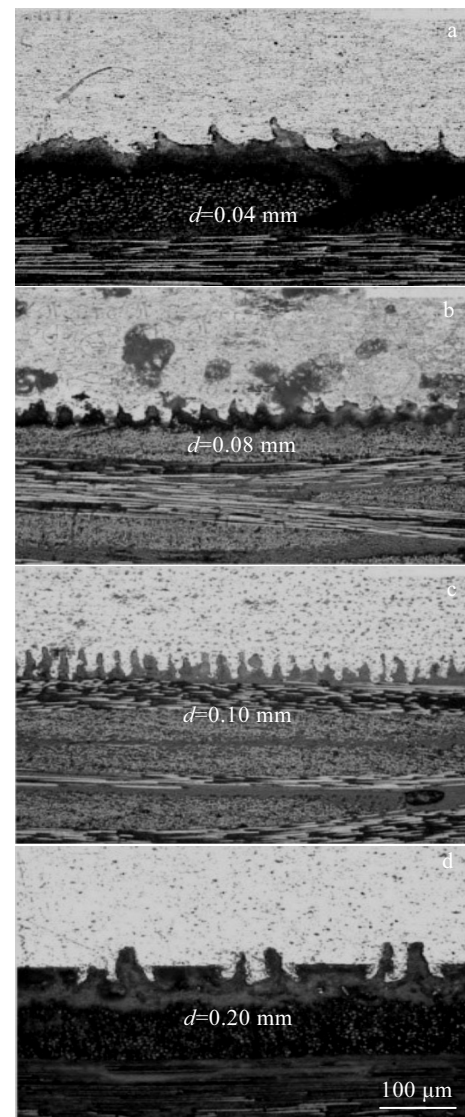


图 2 网格型激光表面刻蚀焊后接头形貌
Fig.2 Joint structure after the net-shaped laser surface etching^[47]:
(a) $d=0.04$ mm, (b) $d=0.08$ mm, (c) $d=0.10$ mm, and
(d) $d=0.20$ mm

1.3 界面气泡缺陷的成形与调控

1.3.1 接头界面气泡的成形

CFRP 和金属激光连接最主要的缺陷为界面气泡,大量研究表明,气泡的形成过程和最终形态能直接影响接头的强度,而控制激光工艺能够有效控制接头附近气泡的形成。气泡产生的主要原因有很多种,目前气泡形成的主要形成机理包括树脂材料受热分解,材料中残余水分的蒸发,以及材料熔化流动时产生的凝固气泡等^[49, 50]。树脂基复合材料在受热时有3个阶段,未熔化阶段主要是水蒸气的蒸发,在熔化阶段主要是树脂液体的流动,而在热分解阶段会导致分解气体的产生,每个阶段产生的气泡形态和分布方式都不同,过多的气泡作为缺陷可能导致接头强度下降,但也有可能提高接头强度,有研究发现,当气泡呈密集型分布在远离界面的部分时,气泡的压力导致熔化的液态材料紧密连接^[51, 52]。这意味随着热输入的改变,焊接热分布也随之发生改变,导致气泡的数量、形态、分布区域、形成机理发生改变。因此要提高金属材料 and CFRP 材料的接头强度,需要精确控制热输入,优化焊接温度场,使得生成的气泡能在理想的状态中生成。

1.3.2 热输入对气泡形成的影响

大量研究表明激光焊的热输入将直接影响界面气泡形成^[53, 54]。因此控制热输入,研究热输入与气泡成形的关系对接头连接强度的研究有很大帮助。由于金属和 CFRP 的热膨胀系数和熔化温度差异较大,一般 CFRP 材料的熔点在 300 °C 左右,分解温度在 500 °C 左右,而铝合金、钛合金和钢铁材料的熔点都高于分解温度^[55]。过高的热输入容易导致 CFRP 分解过多形成气孔,气泡等缺陷降低接头强度,而过低的热输入容易导致未熔合等宏观缺陷,而且材料熔化过少无法满足连接机理形成条件,接头强度降低。因此合理的热输入值才能获得良好的接头强度。

Tan^[56]在研究 PA6/CFRP 和低碳钢激光搭接焊时发现,接头处会产生 2 种不同类型的气泡(如图 3a 所示),影响接头性能,当热输入在 77.8 J/mm 以内时只会产生一种密集型的气泡,为气泡 II 型,气泡内壁粗糙,是凝固收缩形成;而当热输入超过 77.8 J/mm 时,除了会产生气泡 II 型,同时也会产生一种由分解气体形成的气泡 I 型聚集在界面附近,这种气泡内壁光滑,由于界面破坏通常出现在树脂中存在气泡的界面,因此这种类型的气泡会直接降低接头强度,说明过大的热输入导致 CFRP 和低碳钢的界面反应机理发生改变。除钢材之外,其他学者在研究铝合金和钛合金与 CFRP 激光连接时也发现了类似的现象。

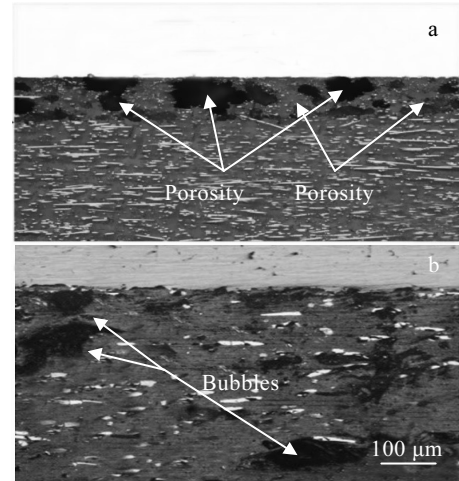


图3 低碳钢与 CFRP 激光连接 2 种气泡的形貌和 TC4/CFRP 最佳工艺下气泡形貌

Fig.3 Image of two kind of bubble style in steel/CFRP joint after laser welding (a)^[56] and the bubble profile under the best process parameter (b)^[24]

Lambiase 等^[57]研究 AISI304 钢板和 PC 板激光连接时发现,激光功率,焊接速度会直接影响焊接质量,包括宏观形貌和缺陷的形成,热输入的大小与焊接接头的强度存在直接的关系,实验证明过大的热输入会导致界面形成非常多且尺寸较大的气泡,原因是钢板的导热性较差,容易存储热量导致大量气泡在界面形成,同时接头强度下降。

Su 等人^[24]研究钛合金 TC4 和 PEEK/CFRP 激光扫描速度对接头微观组织和性能的影响,接头的抗剪切强度先增加后降低,在 0.8 m/min 时达到最大,图 3b 为该速度下微观组织形貌,合适的扫描速度能够在界面形成合适尺寸的气泡,部分气泡存在较大气压可以提高 2 种材料的结合力,另一方面残留的气孔导致接头性能下降;研究同时发现界面的气泡数量和大小随着扫描速度的变化而变化,证明热输入能影响接头微观结构,与接头的强度有直接的关系。

目前对于激光加工机械互锁连接过程的研究较浅,激光加工速度过快,区别于胶接,金属和树脂材料的熔化和凝固速度较快,其相互作用过程很短,因此一般研究终态的界面形貌,而对于热作用下树脂基在金属界面上的渗透润湿、凝固过程,其中间的作用机理非常复杂,需要大量的实验佐证。

2 CFRP/金属激光连接工艺的展望

金属和树脂基 CFRP 连接在航空航天领域应用的

越来越广泛,对接头抗剪切强度,疲劳强度,稳定性的要求则更高。通过实验研究,激光连接工艺对接头的性能影响很大,激光加工功率、连接速度、离焦量、金属表面处理等工艺参数与接头的连接机理以及接头破坏形式有直接的联系,因此控制工艺参数能够有效地提高激光焊接接头的力学性能。近年来发展了很多新型激光焊接工艺技术作用于金属/CFRP 复合材料形成接头,如复合焊接、激光震动焊接,新型表面处理技术等^[7, 37, 58, 59]。通过控制接头形成机理从而改善接头强度,对于金属/CFRP 激光焊接工艺技术及设备的发展有很大前景。在接头形成机理方面,未来研究方向可以在以下几个方面开展:

1) 热输入与接头形成过程关系比较复杂,激光瞬态热场分布测试效率低测试难度较大,结合热力学耦合仿真与微观性能进一步研究形成机理。

2) 机械互锁是一个动态过程,从熔化到流动到凝固是一个复杂物理甚至是化学现象,无论是机械表面处理或是其他表面处理方式,金属或者 CFRP 表面形貌的控制以及激光热输入对于锚固效应的影响很大,从热力学、流体力学、表面形貌等角度研究这一动态过程对于控制机械连接有很大助益。

3) 化学连接过程是形成永久性连接的基础,虽然金属和 CFRP 材料性能相差较大,但是在目前研究当中仍然发现存在化学键的形成,除 XPS、XRD 等手段检测化学键及相的形成外,更需要从原子尺度上研究两者的连接过程,包括微观下的缺陷如层错、位错以及孪晶的形成对接头的影响。金属与 CFRP 的激光连接是实现未来结构轻量化的优良工艺连接手段,具有较大的研究意义和价值。

参考文献 References

- [1] André N M, Goushegir S M, Dos Santos J F *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2016, 94: 197
- [2] Shan Zhongde(单忠德), Fan Congze(范聪泽), Sun Qili(孙启利). *China Mechanical Welding*(中国机械工程)[J], 2020, 31(2): 221
- [3] Li Bintai(李斌太), Xin Liying(邢丽英), Bao Jianwen(包建文) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2016, 36(3): 92
- [4] Meredith J, Bilson E, Powe R *et al. Composite Structures*[J], 2015, 124: 146
- [5] Pramanik A, Basak A K, Dong Y *et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*[J], 2017, 101: 1
- [6] Zuo Y, Cao Z, Cao Y *et al. Composite Structures*[J], 2018, 184: 362
- [7] Joesbury A M, Colegrove P A, Van Rymenant P *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 251: 241
- [8] He X. *International Journal of Adhesion and Adhesives*[J], 2011, 31(4): 248
- [9] Chan C W, Smith G C. *Materials & Design*[J], 2016, 103: 278
- [10] Zhang H, Wen W, Cui H. *Composites Part B: Engineering*[J], 2012, 43(8): 3310
- [11] Wu L H, Xiao B L, Nagatsuka K *et al. Composite Structures*[J], 2020, 242: 346
- [12] Zhang Hua(张华), Lin Sanbao(林三宝), Wu Lin(吴林) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2003(3): 91
- [13] Wang X, Song X, Jiang M *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2012, 44(3): 656
- [14] Wang D, Wang H, Cui H *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 237: 277
- [15] Windmann M, Röttger A, Kügler H *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 247: 11
- [16] Jiang P, Chen R. *Materials Characterization*[J], 2019, 154: 264
- [17] Hussein F I, Akman E, Genc Oztoprak B *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2013, 49: 143
- [18] Georgiev G L, Sultana T, Baird R J *et al. Applied Surface Science*[J], 2008, 254(22): 7173
- [19] Su X, Tao W, Chen Y *et al. Materials Letters*[J], 2017, 195: 228
- [20] Jung K W, Kawahito Y, Takahashi M *et al. Materials & Design*[J], 2013, 47: 179
- [21] Katayama S, Kawahito Y. *Scripta Materialia*[J], 2008, 59(12): 1247
- [22] Jung K W, Kawahito Y, Takahashi M *et al. Journal of Laser Applications*[J], 2013, 25(3): 032 003
- [23] Tan C, Su J, Zhu B *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2020(1): 129
- [24] Su J, Tan C, Wu Z *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2020(1): 124
- [25] Chiu L H, Chen C C, Yang C F. *Surface and Coatings Technology*[J], 2005, 191(2): 181
- [26] Twite R L, Bierwagen G P. *Progress in Organic Coatings*[J], 1998, 33(2): 91
- [27] Saeedikhani M, Javidi M, Yazdani A. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(9): 2551
- [28] Bjørgum A, Lapique F, Walmsley J *et al. International Journal of Adhesion and Adhesives*[J], 2003, 23(5): 401
- [29] Venables J D, Mcnamara D K, Chen J M *et al. Applications*

- of Surface Science*[J], 1979, 3(1): 88
- [30] Schrickler K, Samfa L, Grätzel M *et al. Journal of Advanced Joining Processes*[J], 2020(1): 23
- [31] Liu F C, Dong P, Lu W *et al. Applied Surface Science*[J], 2019, 466: 202
- [32] Zhang Z, Shan J G, Tan X H *et al. International Journal of Adhesion and Adhesives*[J], 2016, 70: 142
- [33] Lamberti C, Solchenbach T, Plapper P *et al. Physics Procedia* [J], 2014, 56: 845
- [34] Schrickler K, Stambke M, Bergmann J P. *Welding in the World* [J], 2015, 59(3): 407
- [35] Klaus S, Martin S, Pierre B J *et al. International Journal of Polymer Science*[J], 2016(1): 1
- [36] Markovits T, Bauernhuber A, Géczy M. *Physics Procedia*[J], 2012, 39: 100
- [37] Hao K, Liao W, Zhang T *et al. Composite Structures*[J], 2020(1): 235
- [38] Jung D J, Cheon J, Na S J. *Materials & Design*[J], 2016, 99: 1
- [39] Arai S, Kawahito Y, Katayama S. *Materials & Design*[J], 2014, 59: 448
- [40] Rodríguez Vidal E, Sanz C, Soriano C *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 229: 668
- [41] Li Y, Bu H, Yang H *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 50: 366
- [42] Acherjee B, Misra D, Bose D *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2009, 41(8): 956
- [43] Zhang Z, Shan J, Tan X *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 90(9-12): 1
- [44] Heckert A, Zaeh M F. *Physics Procedia*[J], 2014, 56: 1171
- [45] Lambiase F, Genna S. *Optics & Laser Technology*[J], 2018, 107: 80
- [46] Rodríguez Vidal E, Sanz C, Lambarri J *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2018, 104: 73
- [47] Jiao J, Jia S, Xu Z *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2019(1): 173
- [48] Amend P, Pfindel S, Schmidt M. *Physics Procedia*[J], 2013, 41: 98
- [49] Huang C, Wang X, Wu Y W *et al. Key Engineering Materials*[J], 2014, 620: 42
- [50] Jiao J, Wang Q, Wang F *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 240: 362
- [51] Amend P, Mallmann G, Roth S *et al. Journal of Laser Applications*[J], 2016, 28(2): 022
- [52] Schrickler K, Diller S, Bergmann J P. *Procedia CIRP*[J], 2018, 74: 518
- [53] Xia H, Tao W, Li L *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2020(1): 122
- [54] Li L, Xia H, Tan C *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 32: 160
- [55] Ucsnik S, Scheerer M, Zaremba S *et al. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*[J], 2010, 41(3): 374
- [56] Tan X, Zhang J, Shan J *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2015, 70: 35
- [57] Lambiase F, Genna S. *Optics & Laser Technology*[J], 2017, 88: 205
- [58] Jia Shaohui(贾少辉), Jia Jianping(贾剑平), Jiao Junke(焦俊科) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2020, 46: 1
- [59] Chen Y J, Yue T M, Guo Z N. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 31: 356

A Review: Prospect on Laser Direct Joining of Resin-based CFRP/Metal

Zou Pengyuan^{1,2}, Zhang Hua¹, Lei Min¹, Cheng Donghai³, Zeng Aori¹, Yang Fan¹

(1. Nanchang University, Nanchang 330031, China)

(2. Science and Technology College of NCHU, Jiujiang 332020, China)

(3. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Resin based carbon fiber reinforced plastics (CFRP), as the cutting-edge light-weight composite material, are widely used in the aerospace parts. The main technologies to bond CFRPs and metals are namely adhesive bonding and mechanical bonding, which includes limitation in some area. However, laser welding technology possesses the advantages of low heat input and small deformation after welding, therefore, it can be applied to the bonding of composites and metals. This paper reviews the bonding mechanisms and the joint defects of the joints between the CFRP materials and the common used metal like aluminum alloys, titanium alloys and carbon steels by laser welding process, and analyzes the effect of welding process, structural optimization and pre-surface treatment on the property of joint. Finally, the prospect of the CFRP/metal joint formed by laser welding are presented in this paper.

Keywords: CFRP; laser welding; bonding mechanism; surface treatment