

碳纤维感应元件厚度对碳纤维增强热塑性复合材料感应焊接接头力学性能及断裂形式的影响

王飞云 罗杰帮 张平则 刘星 占小红

Effect of thickness of carbon fiber susceptor on mechanical property and fracture mode of carbon fiber reinforced thermoplastic composite induction welded joint

WANG Feiyun, LUO Jiebang, ZHANG Pingze, LIU Xing, ZHAN Xiaohong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220618.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湿热环境对碳纤维增强聚苯硫醚层合板感应焊接接头性能的影响

Effect of hygrothermal environment on properties of induction welding joint of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide laminate

复合材料学报. 2021, 38(9): 2814–2820 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201030.007>

基于导热板的碳纤维增强聚醚醚酮复合材料感应焊接温度调控

Temperature control for induction welding of carbon fiber reinforced polyetheretherketone (CF/PEEK) composite material via thermal conduction plate

复合材料学报. 2021, 38(8): 2625–2634 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201019.001>

碳纤维/聚苯硫醚热塑性复合材料电阻焊接工艺

Resistance welding technology of carbon fiber/polyphenylene sulfide thermoplastic composites

复合材料学报. 2020, 37(5): 1041–1048 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190807.002>

连续碳纤维/尼龙6热塑性复合材料的吸湿及力学性能

Water absorption and mechanical property of continuous carbon fiber/polyamide 6 composites

复合材料学报. 2019, 36(1): 114–121 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180322.002>

热塑性复合材料自动铺放工艺参数分析与优化

Analysis and optimization of the processing parameters for automated fiber placement of thermoplastic composites

复合材料学报. 2018, 35(5): 1149–1157 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170712.003>

纤维增强树脂基复合材料拼接结构拉伸性能

Tensile properties of fiber reinforced epoxy resin composite with ply splice structures

复合材料学报. 2017, 34(11): 2473–2478 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170307.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220618.001

碳纤维感应元件厚度对碳纤维增强热塑性
复合材料感应焊接接头力学性能及
断裂形式的影响



分享本文

王飞云, 罗杰帮, 张平则, 刘星, 占小红*

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: 利用碳纤维织物与树脂薄膜制备了 0.2 mm、0.3 mm 与 0.5 mm 3 种不同厚度的碳纤维感应元件, 并开展碳纤维增强热塑性复合材料 (Carbon fiber reinforced thermoplastic composite, CF RTP) 感应焊接建模仿真与工艺试验。观察 CF RTP 感应焊接接头成形形貌, 开展接头拉伸剪切强度测试与断口形貌分析, 着重探究感应元件厚度对接头力学性能与断裂形式的影响。研究结果表明: 碳纤维感应元件能在不引入异质材料的前提下实现 CF RTP 的高质量感应焊接, 但接头界面温度分布具有明显的不均匀性; 随着感应元件厚度的增加, 过量的树脂会降低接头的成形效果、连接质量与力学性能, 同时界面的有效连接面积也随之减小; 当感应元件厚度为 0.2 mm 时, 焊接接头的拉伸剪切强度最高可达 23.77 MPa; 焊接接头的断裂形式包括感应元件内聚破坏、母材表层自破坏、界面破坏和混合破坏, 造成接头失效的断裂机制根据感应元件厚度的改变而发生变化。

关键词: 热塑性复合材料; 感应元件厚度; 感应焊接; 力学性能; 断裂形式

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)04-2405-10

Effect of thickness of carbon fiber susceptor on mechanical property and fracture mode of
carbon fiber reinforced thermoplastic composite induction welded joint

WANG Fei Yun, LUO Jie bang, ZHANG Ping ze, LIU Xing, ZHAN Xiaohong*

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China)

Abstract: The carbon fiber susceptors with different thicknesses of 0.2 mm, 0.3 mm and 0.5 mm were prepared based on carbon fabric and resin film by the hot moulding process, and the temperature simulation and process experiment of induction welding for carbon fiber reinforced thermoplastic composite (CF RTP) were carried out. The fusion morphologies of welded joints with carbon fiber susceptors of different thicknesses were observed. To investigate the effect of thickness of carbon fiber susceptor on the mechanical property and fracture mode of CF RTP induction welded joint, the fracture morphologies and fracture modes of welded joints with different susceptors thicknesses were analyzed after the tensile-shear test. The results show that carbon fiber susceptor enables high quality induction welding of CF RTP without introducing heterogeneous materials, but a significant inhomogeneity in temperature distribution exists at the joining interface. As the thickness of the susceptor, not only the effective joining area at the interface is reduced but also the forming effect, joining quality and mechanical property of welded joint deteriorate due to the excessive melted resin. The maximum tensile-shear strength of the welded joint is 23.77 MPa when the thickness of the susceptor is 0.2 mm. The fracture modes of welded joints include cohesive

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-05-24; 录用日期: 2022-06-03; 网络首发时间: 2022-06-20 17:17:30

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220618.001>

基金项目: 先进复合材料国防科技重点实验室开放基金 (6142904180105)

Open Subject of the National Key Laboratory of Advanced Composites (6142904180105)

通信作者: 占小红, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为激光焊接与增材制造技术、复合材料先进连接技术等 E-mail: xiaohongzhan_nuaa@126.com

引用格式: 王飞云, 罗杰帮, 张平则, 等. 碳纤维感应元件厚度对碳纤维增强热塑性复合材料感应焊接接头力学性能及断裂形式的影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2405-2414.

WANG Fei Yun, LUO Jie bang, ZHANG Ping ze, et al. Effect of thickness of carbon fiber susceptor on mechanical property and fracture mode of carbon fiber reinforced thermoplastic composite induction welded joint[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2405-2414(in Chinese).

failure of the susceptor, self failure of base material, mixed failure and interface failure, which change according to the thickness of added susceptor.

Keywords: thermoplastic composite; thickness of susceptor; induction welding; mechanical property; fracture mode

碳纤维增强热塑性复合材料 (Carbon fiber reinforced thermoplastic composite, CF RTP) 是一种比强度高、比模量高、可设计性强、可回收的轻量化材料,在航空航天制造领域受到广泛的关注^[1-4]。目前,CF RTP 较为常见的连接方法主要包括机械连接和胶接^[5-7]:机械连接具有稳定可靠、便于维修的优点,但制孔环节会破坏基材并造成应力集中,同时额外的连接件会增加结构重量,不符合轻量化的设计制造要求^[8];胶接虽然能克服结构增重和应力集中的不利影响,但其工艺流程复杂、生产周期长且会对环境造成污染^[9-10]。由于 CF RTP 具有“加热熔化、冷却凝固”的可多次成形特性,因此可以利用焊接的方法实现连接,如超声焊接、电阻焊接和感应焊接等^[11-12]。其中,感应焊接具有接头质量好、生产效率高、工艺灵活、易于实现自动化等优点,是实现 CF RTP 高质量高可靠焊接的理想工艺之一^[13-14],目前国外已进行感应焊接技术型号应用验证,但国内的相关研究仍较为匮乏。

近年来,国内外学者采用工艺试验与数值模拟的技术手段对不同类型的 CF RTP 感应焊接工艺窗口进行了优化,研究了焊接电流、焊接时间、耦合距离、装夹压力等参数对接头连接质量的影响^[15-16]。Gouin 等^[17]获得了 CF RTP 感应焊接过程中的“温度-时间”曲线,研究结果表明较低的加热速率可显著提高焊接接头的力学性能。Wang 等^[18]发现合适的感应电流有利于获得高质量的焊接接头,但过量的热输入会造成树脂基体热损伤并产生大量缺陷。此外,焊接过程中产热区域温度的精准调控是目前该领域的研究焦点之一。理想的情况是将感应产热集中在接头的连接界面区域,同时避免母材的过热损伤^[19-20]。焊接前在连接界面预置感应元件是实现界面温度调控的方法之一,即在同一交变磁场环境中,感应元件能够快速产生大量焦耳热,而母材碳纤维基本不产热。金属作为一种良好的导体能够被迅速感应加热,因而诸多学者开展了基于不锈钢网、镀锌铁网等金属感应元件的 CF RTP 感应焊接仿真与试验研究,发现该类型感应元件产热效果良好,但容易造成接头应力集中和电化学腐蚀^[21-23]。此外,也有学

者开发了新型感应元件,希望能进一步提高接头质量与力学性能。2018 年, Farahani 等^[24]利用银纳米导电膜作为感应元件实现了碳纤维增强聚苯硫醚复合材料的焊接,并发现该感应元件的加热速率大于不锈钢网感应元件。2020 年, Russello 等^[25]验证了碳纳米管网作为感应元件的可行性,同时证实该类型感应元件有利于接头强度的提高。

目前大部分报道的感应元件与母材为异质材料,而异质感应元件的引入容易对接头的性能产生不利影响。为解决这一问题,本文设计并制备了不同厚度的碳纤维感应元件,开展了 CF RTP 感应焊接建模仿真与工艺试验,探究了感应元件的厚度对焊接接头力学性能的影响规律,并着重分析了感应焊接接头的断口形貌与断裂形式。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

试验用 CF RTP 为东华大学先进低维材料中心提供的碳纤维增强聚醚醚酮 (CF/PEEK) 复合材料,其中聚醚醚酮 (Polyetheretherketone, PEEK) 为树脂基体, T300 碳纤维为增强体。层合板由热熔预浸料热压成型,厚度为 2 mm,碳纤维体积含量为 52 vol%。为了改善 CF/PEEK 的焊接效果,增加接头熔融树脂含量,在层合板表面制备约 0.2 mm 的富树脂层。

1.2 感应元件制备

使用扬州德瑞仪器设备有限公司生产的 DR-25 B 型平板硫化机,利用模压工艺将 T300 碳纤维织物与 PEEK 薄膜/片材制备成厚度分别为 0.2、0.3 和 0.5 mm 的碳纤维感应元件。其中,碳纤维织物厚度约为 0.2 mm,编织方式为平纹,纤维规格为 3K,克重为 200 g·m⁻²。PEEK 薄膜厚度约为 0.01 mm, PEEK 片厚度约为 0.05 mm。0.2 mm 感应元件由单层碳纤维织物与 2 层 PEEK 薄膜压制而成;0.3 mm 感应元件由单层碳纤维织物与 2 层 PEEK 片材压制而成;0.5 mm 感应元件则由单层碳纤维织物与 6 层 PEEK 片材压制而成。为了精确控制感应元件厚度,将片状原材料放置于 3 种相应厚度的“回字型”模具中完成热压,压力设置为 5.0 MPa。感应元件的制备过程如图 1(a) 所示。

图 1(b) 展示了不同厚度感应元件的实物样品, 随着其厚度增加、树脂含量提高, 感应元件的表层颜色发生由深至浅的变化。

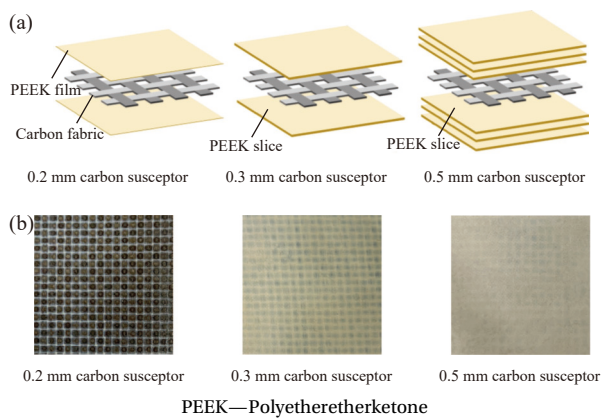


图 1 不同厚度的碳纤维感应元件: (a) 感应元件制备过程示意图; (b) 感应元件实物样品图

Fig. 1 Carbon susceptors with different thicknesses: (a) Schematic diagram of the manufacturing process for susceptors; (b) Actual picture of susceptors

1.3 感应焊接试验

CF/PEEK 感应焊接原理如图 2(a) 所示。超高频感应焊机在感应线圈处产生交变磁场, 碳纤维感应元件在交变磁场中产生涡流并发热熔化连接界面处的树脂, 随后在夹具提供的外部压力 (F) 作用下, 熔融树脂冷却固化并形成牢固的焊接接头。图 2(b) 为 CF/PEEK 感应焊接过程中接头的连接成形过程。图 3 为 CFRTP 感应焊接试验设备, 其中感应焊机为苏州宏创高频感应加热设备有限公司生产的 CGP-30 kW 超高频感应焊机, 设备控制面板可以对输入电流、加热时间等参数进行设置。为避免金属夹具被感应加热从而对焊接过程造成影响, 试验采用不导电的云母厚板和塑料螺栓紧固件进行装夹。图 3(b) 中的盘式感应线圈可以提供范围较广、均匀性较好的交变磁场, 更适合平板搭接结构的焊接。

为防止油污、杂质等对焊接接头产生不良影响, 焊接试验前使用 $38\text{ }\mu\text{m}$ 的砂纸对试样表面连接区域进行轻微打磨, 然后使用无纺布蘸取无水乙醇溶液擦拭后立即烘干。

CF/PEEK 感应焊接试样尺寸如图 4 所示, 搭接区域宽度为 12.5 mm 。感应焊接试验采取单一因素变量法, 即使用不同厚度感应元件的 CF/PEEK 感应焊接试验均保持相同的焊接工艺参数, 以探究感应元件厚度对焊接接头成形效果及力学性能的影响。

感应元件裁剪至与搭接区域相同的尺寸 ($12.5\text{ mm}\times 25\text{ mm}$), 将其放置于两块 CF/PEEK 母材中间的搭接区域并完成装夹。采用斯巴拓 SBT951 柔性薄膜压力传感器对装夹压力进行测量, 调整夹具紧固件将焊接装夹压力控制为 0.5 MPa 后进行焊接试验。根据前期试验优化结果, 采用的焊接工艺参数为: 电流频率 200 kHz , 输入电流 20 A , 焊接时间 40 s , 保压时间 30 s 。

1.4 感应焊接有限元模型建立

为了更好地讨论接头感应产热及焊接界面的

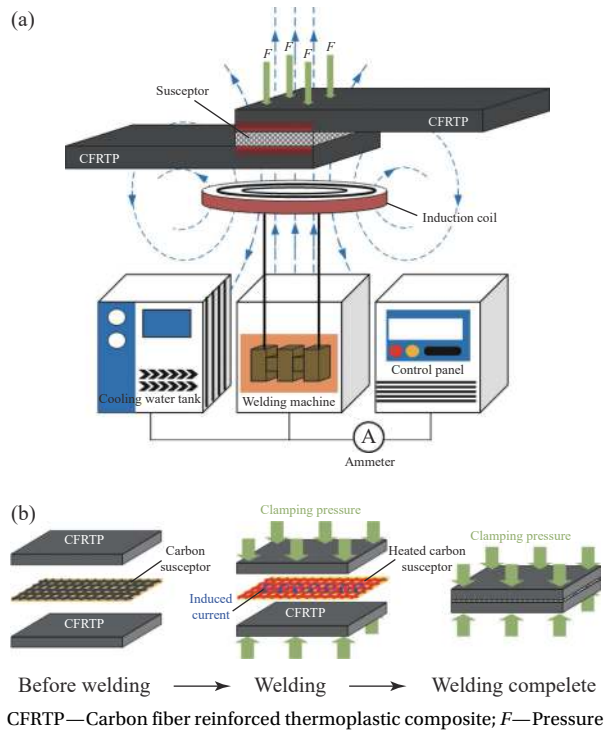


图 2 碳纤维增强聚醚醚酮 (CF/PEEK) 感应焊接过程示意图: (a) 设备组成及焊接原理; (b) 焊接接头的连接成形过程

Fig. 2 Schematic diagram of carbon fiber reinforced PEEK (CF/PEEK) induction welding process: (a) Equipment composition and fundamentals of welding; (b) Formation of welded joint

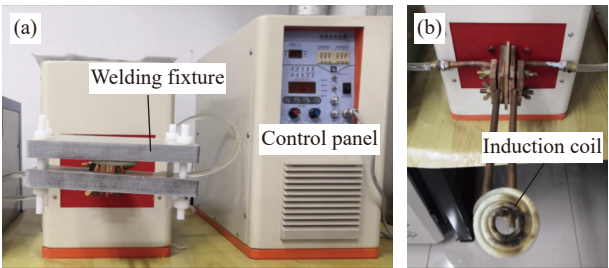


图 3 CF/PEEK 感应焊接试验设备: (a) 超高频 (UHF) 感应焊机及专用焊接夹具; (b) 盘式感应线圈

Fig. 3 Experimental equipment for CF/PEEK induction welding: (a) Ultra-high frequency (UHF) induction power supply and special fixture; (b) Pancake induction coil

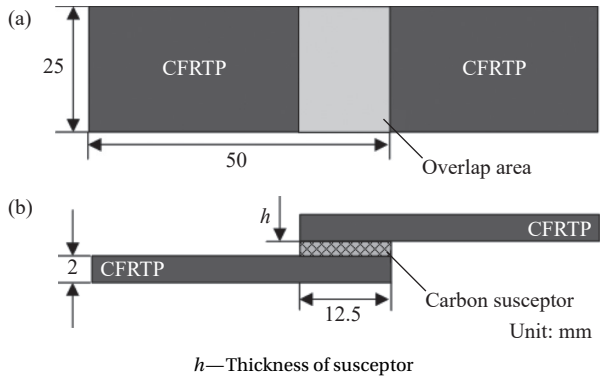


图4 CF/PEEK 感应焊接试样尺寸: (a) 俯视图; (b) 正视图
Fig. 4 Size of CF/PEEK induction welded sample:
(a) Top view; (b) Front view

温度分布规律，建立了 CF/PEEK 感应焊接过程有限元仿真模型，如图 5 所示。图 5(a)、图 5(b) 为根据实际试验尺寸建立的几何模型，并采用自由

四面体对焊接试样、感应线圈及空气域进行网格划分，如图 5(c)~5(e) 所示。与感应元件相比，母材层合板在焊接过程中产热较少且主要是表面富树脂熔化参与焊接，因而母材区域加载 PEEK 的参数。求解过程中所需的材料电磁参数与热塑性参数在表 1 列出，其中 k_X 、 k_Y 、 k_Z 分别为 X、Y、Z 3 个方向的热导率； σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z 为 X、Y、Z 3 个方向的电导率。

仿真采用的焊接参数与试验工艺参数保持一致，获得 CF/PEEK 感应焊接过程中温度场计算结果。当感应元件厚度为 0.2 mm、焊接时间为 10 s 时，接头截面温度分布仿真结果与红外测试结果的对比如图 6(a) 所示。图 6(b) 为焊接时间分别为 5 s、10 s 和 15 s 时仿真与实测获得的接头截面最高温度。结果表明该模型的温度计算结果准确度较好，与试验的最大误差不超过 3.8%。

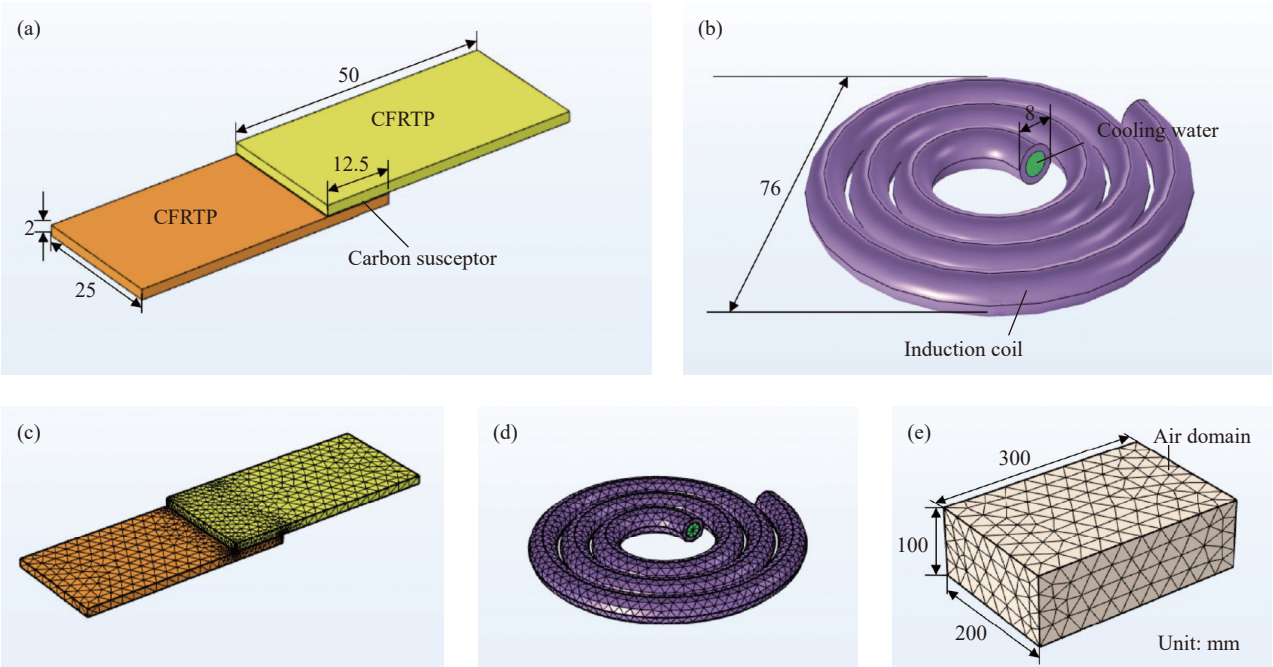


图5 CF/PEEK 感应焊接过程有限元模型: ((a)、(b)) 几何模型; ((c)-(e)) 网格划分

Fig. 5 Finite element model of CF/PEEK induction welding process: ((a), (b)) Geometric models; ((c)-(e)) Mesh division

表 1 材料电磁性能参数与热物性参数

Table 1 Material parameters of electromagnetic performance and thermal property					
Material	Density/ (g·cm ⁻³)	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Specific heat capacity/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Conductivity/ (S·m ⁻¹)	Relative dielectric constant
Carbon susceptor	1.53	$k_X=5.4$ $k_Y=5.4$ $k_Z=0.5$	1 088	$\sigma_X=4\ 000$ $\sigma_Y=4\ 000$ $\sigma_Z=0.33$	3.70
Base material	1.30	0.25	1 387	1×10^{-14}	4
Copper	8.70	400	385	6×10^7	1

Notes: k_X , k_Y , k_Z —Thermal conductivity in the X, Y and Z directions; σ_X , σ_Y , σ_Z —Conductivity in the X, Y and Z directions.

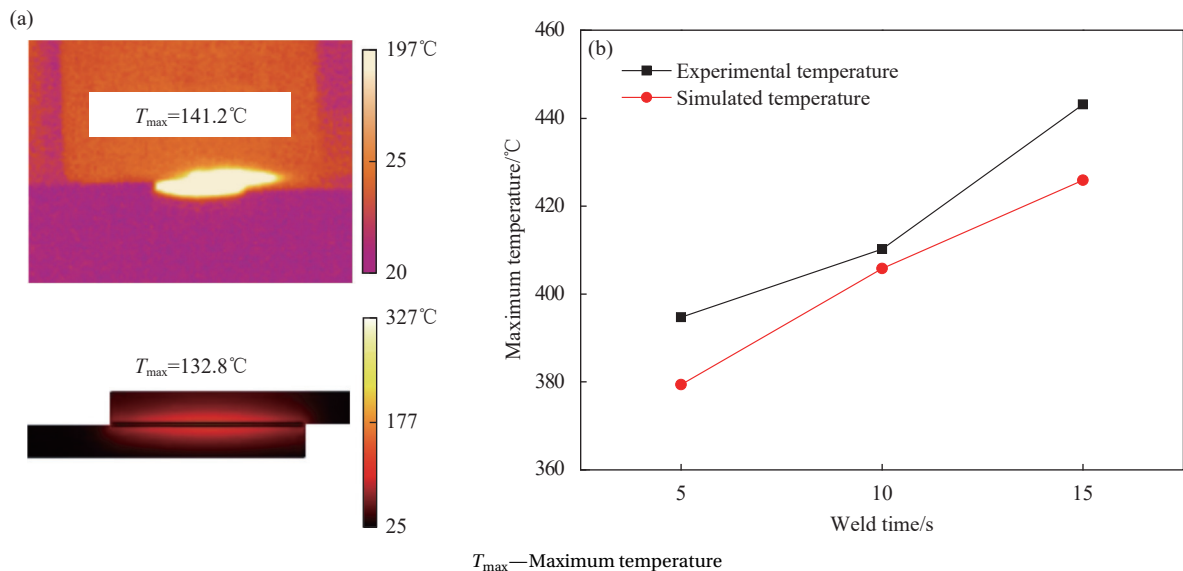


图 6 CF/PEEK 感应焊接过程温度场仿真结果验证: (a) 截面温度分布; (b) 截面最高温度

Fig. 6 Verification of temperature simulation results of CF/PEEK induction welding: (a) Temperature distribution in cross-section; (b) Maximum temperature in cross-section

1.5 力学性能测试

目前暂无针对复合材料感应焊接搭接接头拉伸剪切强度测试标准，因此本文选择参照 GB/T 33334—2016^[26] 标准设计力学性能试验并对感应焊接接头的拉伸剪切强度进行测试。试验设备为北京大地科宇机械设备有限公司生产的 UTM5105 型万能电子试验机，拉伸速率为 0.5 mm/min。每组试验重复进行 5 次，求取平均值作为接头的拉伸剪切强度。焊接试样的拉伸剪切强度 τ 由下式计算：

$$\tau = \frac{F_{\max}}{BL} \tag{1}$$

式中： B 为搭接区域宽度 (mm)； L 为搭接区域长度 (mm)； $F_{\max}$ 为最大拉伸剪切力 (N)。

拉伸剪切试验后对断口的宏观形貌进行观测，同时使用日本日立公司 S-4800 型场发射扫描电子显微镜对断口的微观形貌进行观察，并对接头的断裂失效形式进行讨论分析。

1.6 接头变形测量

利用 Digimar-816 CL 高度测量仪测量感应焊接接头的厚度，并与未焊接的焊接试样厚度进行对比，从而获得焊接前后变形量。图 7 为焊接接头变形测量位置示意图。沿焊接区域中心线测量 5 个位置的厚度，取平均值作为该试样的厚度测量结果。

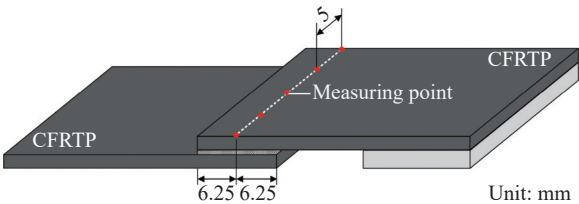


图 7 CF/PEEK 感应焊接接头变形测量

Fig. 7 Deformation measurement of CF/PEEK induction welded joint

PEEK 感应焊接接头的宏观形貌如图 8 所示。不同厚度的碳纤维感应元件均能够实现热塑性复合材料层合板的有效焊接。当感应元件厚度为 0.2 mm 时，接头界面区域连接紧密，接头表面及侧面的成形均较为优异，且无明显的宏观缺陷；当感应元件厚度为 0.3 mm 时，接头表面成形相对良好，但能够发现少量的粘瘤缺陷；当感应元件厚度增加至 0.5 mm 时，熔融树脂从焊接界面区域挤出，接头四周均存在较多的粘瘤缺陷，且界面熔合情况不均匀，这严重影响了焊接接头的成形质量。分别对不同厚度感应元件的 CF/PEEK 焊接接头在焊接前后的厚度进行测量，其平均值及变形量如表 2 所示。可以发现焊接后的接头厚度均小于原始尺寸，这是由于在装夹压力的作用下，焊接过程能够消除母材及感应元件之间的空隙，形成紧密连接；同时部分熔融树脂被挤出接头连接区域形成粘瘤，从而使得焊接后的试样厚度进一步减小。随着元件厚度的增加，接头成形质量变差，粘瘤缺陷增多，厚度方向变形量增大。

2 结果与讨论

2.1 CF/PEEK 感应焊接接头宏观形貌

基于不同厚度碳纤维感应元件所获得的 CF/

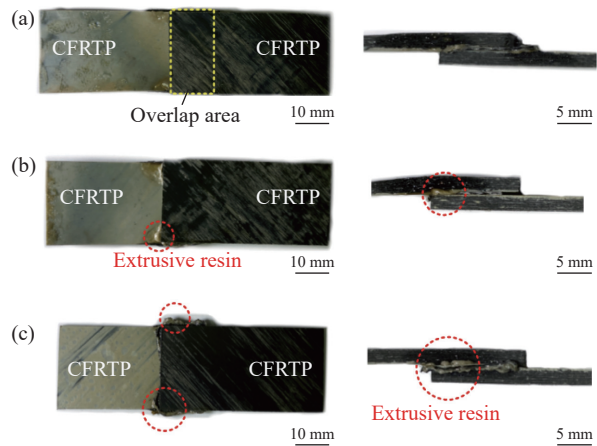


图 8 不同感应元件厚度下 CF/PEEK 焊接接头宏观形貌：
(a) 0.2 mm；(b) 0.3 mm；(c) 0.5 mm

Fig. 8 Macro morphologies of CF/PEEK induction welded joints using susceptors with different thicknesses: (a) 0.2 mm; (b) 0.3 mm; (c) 0.5 mm

表 2 CF/PEEK 感应焊接接头变形测量结果

Table 2 Deformation measurement results of CF/PEEK induction welded joints

Thickness of susceptor/mm	Average thickness/mm	Original thickness/mm	Deformation/mm
0.2	4.325	4.488	-0.163
0.3	4.338	4.596	-0.268
0.5	4.410	4.801	-0.361

感应元件中的碳纤维织物是焊接过程中的主要加热元件，与其相比单向交叉铺层的层合板母材的产热相对较少，特别是对于熔合界面处的热输入贡献更加微弱。本文中不同厚度感应元件中的碳纤维织物的类型、厚度、尺寸基本相同，树脂则在交变磁场中不产热。随着感应元件厚度的增加，线圈与感应元件的耦合距离增加，感应元件产热相对减少。但由于使用不同厚度的感应元件时耦合距离变化很小(与使用 0.2 mm 厚感应元件相比，随着感应元件厚度增加，耦合距离增量仅为 0.05 mm 和 0.15 mm)，因此感应元件在熔合界面区域的产热差异较小。感应元件中碳纤维产热首先熔化感应元件自身的树脂，并通过热传导熔化连接界面附近母材的表层富树脂。当感应元件厚度为 0.2 mm 时，其树脂含量适中，能够恰好补充焊接过程中界面所需熔融树脂，促进界面熔合，但又不会被挤出接头形成粘瘤缺陷。随着感应元件厚度的增加，一方面线圈与感应元件耦合距离的增加会一定程度上降低产热，另外感应元件中增多的树脂不利于碳纤维织物所产生的热量向母材传递，会进一步减少母材表面树脂的熔化，

这不利于 CF/PEEK 母材与感应元件的熔合，降低接头连接质量。此外，由于感应元件的树脂含量高，导致其自身熔融树脂过多，在外加焊接装夹压力的作用下很容易被大量挤出接头从而形成明显的粘瘤缺陷，劣化接头的成形效果。

2.2 CF/PEEK 感应焊接接头力学性能及断口形貌

使用不同厚度 (0.2 mm、0.3 mm、0.5 mm) 感应元件的 CF/PEEK 感应焊接接头平均强度如表 3 所示。随着感应元件厚度的增加，接头的平均拉伸剪切强度呈下降趋势。当感应元件厚度为 0.2 mm 时，CF/PEEK 感应焊接接头的拉伸剪切强度最高为 23.77 MPa。

表 3 CF/PEEK 感应焊接接头拉伸剪切强度

Table 3 Tensile-shear strength of CF/PEEK induction welded joint

Thickness of susceptor/mm	Average tensile-shear strength/MPa	Standard deviation
0.2	23.77	1.39
0.3	16.34	1.20
0.5	10.31	1.19

图 9 为不同感应元件厚度下的 CF/PEEK 焊接接头拉伸剪切断口形貌。当感应元件厚度为 0.2 mm 时，接头断口区域被裸露的碳纤维所覆盖，但是根据断裂形态可以发现碳纤维的种类有所不同。其中大部分为感应元件中断裂的碳纤维织物，仍旧基本保持±90°交叉编织的形貌；同时在焊接区域的边缘位置，也可以发现沿 45°方向排布的单向碳纤维(CF)，这是由母材(BM)的表层碳纤维与 PEEK 树脂基体分离而形成的。相应地，可以在另一侧对应的断口位置处发现残留的 CF/PEEK 母材表层树脂，如图 9(a) 所示。当感应元件厚度为 0.3 mm 时，拉伸剪切断口基本未发现母材的单向碳纤维，仅发现感应元件中的碳纤维织物，同时部分感应元件保持相对完整，可以观察到感应元件表层树脂，如图 9(b) 所示。当感应元件厚度进一步增加至 0.5 mm 时，断口处可以观察到光滑平整的被完整剥离的感应元件，而裸露的碳纤维织物的面积占比较小，如图 9(c) 所示。断口处相对完整的感应元件意味着此位置未能形成有效的连接。因此，随着感应元件厚度的增加，焊接接头的有效连接区域面积逐渐减小。

2.3 CF/PEEK 感应焊接接头断裂形式

感应焊接接头界面连接区域的温度分布直接影响接头的断口形貌。由于感应线圈尺寸大于焊

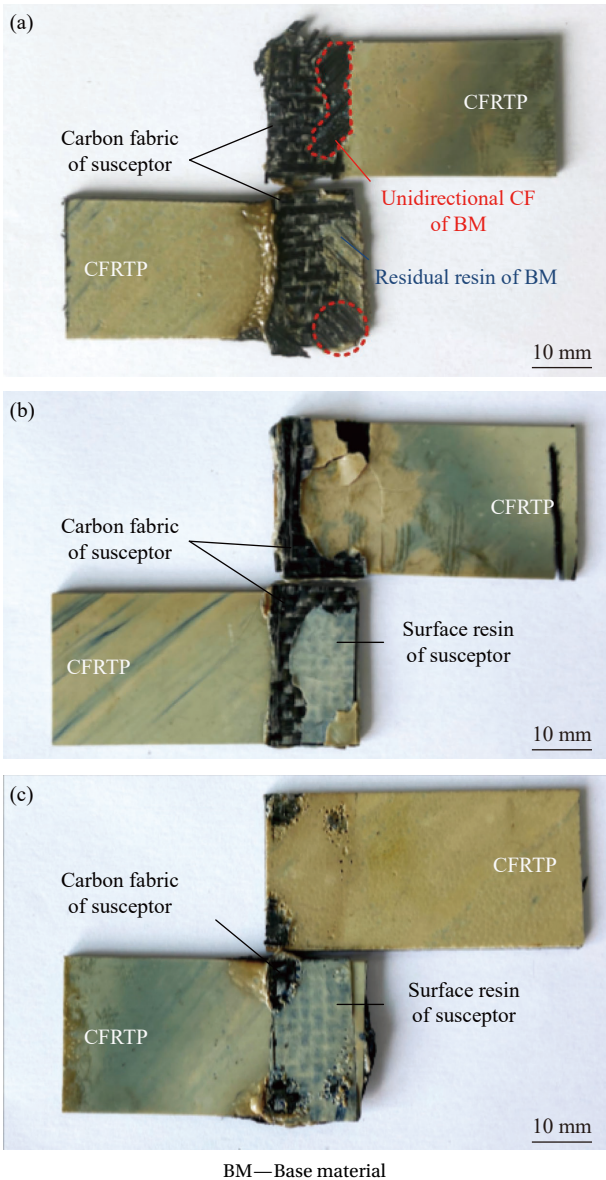


图9 不同感应元件厚度下CF/PEEK焊接接头断口形貌：
(a) 0.2 mm；(b) 0.3 mm；(c) 0.5 mm

Fig. 9 Fracture morphologies of CF/PEEK induction welded joints using susceptors with different thicknesses: (a) 0.2 mm; (b) 0.3 mm; (c) 0.5 mm

接试样的宽度，在CF/PEEK层合板搭接区域靠近线圈的边缘位置，感应电流密度明显大于中部。焊接温度与电流密度呈正相关，因而导致了焊接界面温度的不均匀分布。当焊接时间为30 s时，CF/PEEK感应焊接接头中心位置XY、XZ和YZ 3个切面的温度分布仿真结果如图10所示。可以观察到在不同方向的切面，边缘区域的温度均高于中部区域，即CF/PEEK感应焊接温度呈现出明显的“边缘效应”。图10(b)中感应元件XY方向的界面温度分布结果与图9中接头断口的熔合形貌

基本符合。

基于接头力学性能测试结果与拉伸剪切断口形貌，对不同感应元件厚度下的CF/PEEK焊接接头的断裂失效形式进行分析。CF/PEEK感应焊接接头的断裂形式主要包括感应元件的内聚破坏、母材表层的自破坏、混合破坏、母材与感应元件之间的界面破坏。图11为4种断裂形式示意图，图12为不同断裂形式所对应的典型微观形貌特征。感应元件的内聚破坏指的是其自身的碳纤维织物和树脂发生断裂，从而导致整个接头的最终失效。此时感应元件自身的内聚结合力小于接头的界面结合力，感应元件本身为接头的薄弱连接区域。如图12(a)所示，发生感应元件内聚破坏的区域可以观察到被撕裂的碳纤维织物，碳纤维束呈正交编织排布，部分碳纤维束被拉断呈碎屑状散落分布，部分碳纤维完整地树脂中被剥离。当感应元件自身强度较高且与母材熔合十分紧密时，母材表层则发生自破坏，即母材表层的单向碳纤维从树脂基体中被剥离，此时在断口表面可以发现呈45°排布的单向碳纤维和残留的基体树脂，如图9(a)中虚线区域所示。图12(b)为CF/PEEK母材表层发生自破坏的微观形貌，可以发现表层树脂被整体从母材上剥离而造成失效，因而母材的单向碳纤维基本保持完整。在实际的接头失效过程中，感应元件的内聚破坏和母材的自破坏可能会同时发生，此时断口形貌呈现如图12(c)所示的混合破坏特征。从图中可以发现感应元件中的碳纤维织物与母材的单向碳纤维共同存在于同一断口区域，残余树脂不均匀分布于纤维间隙中。此外，从图9(b)、9(c)中可以观察到接头断口存在大片光滑平整的区域，该区域感应元件与母材的界面结合效果较差，甚至由于界面焊接温度分布的不均匀而未与母材形成有效连接，从而导致感应元件倾向于被完整剥离，此时便发生母材与感应元件之间的界面破坏。图12(d)为界面破坏的典型微观形貌，感应元件表面被树脂所覆盖，部分区域可以看到树脂下层的碳纤维织物。

当感应元件厚度为0.2 mm时，由于厚度较小，碳纤维织物产热能够较充分地熔化母材表层树脂，从而参与连接过程，此时两者的界面熔合效果良好，局部的碳纤维织物与母材表层的碳纤维在压力的作用下甚至可直接接触。但由于感应元件自身树脂含量较少，其在制备过程中树脂对碳纤维织物的浸渍相对不充分，感应元件自身的强度较

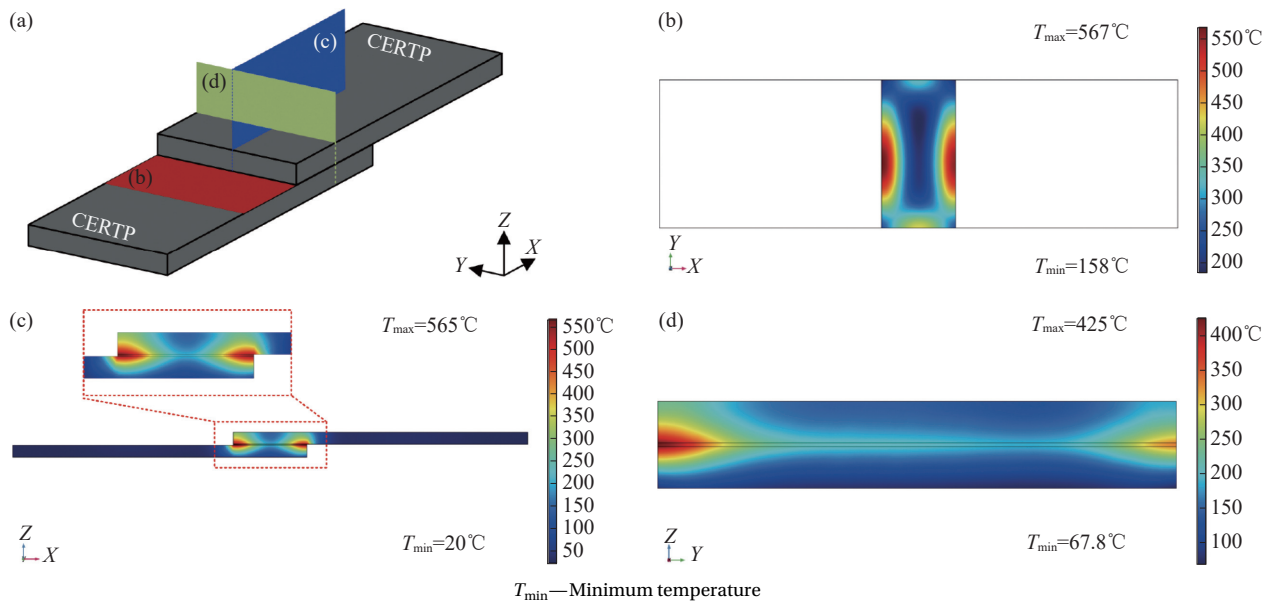


图 10 CF/PEEK 焊接接头温度分布仿真结果: (a) 切面位置; (b) XY 切面; (c) XZ 切面; (d) YZ 切面

Fig. 10 Temperature distribution simulation of CF/PEEK induction welded joint: (a) Tangent plane position; (b) XY plane; (c) XZ plane; (d) YZ plane

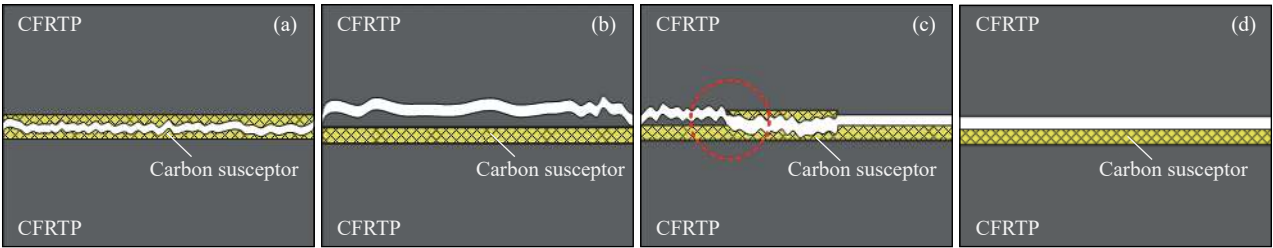


图 11 CF/PEEK 感应焊接接头的断裂形式: (a) 感应元件的内聚破坏; (b) 母材表层的自破坏; (c) 混合破坏; (d) 母材与感应元件的界面破坏

Fig. 11 Fracture modes of CF/PEEK induction welded joints: (a) Cohesive failure of susceptor; (b) Self failure of base material; (c) Mixed failure; (d) Interface failure between base material and susceptor

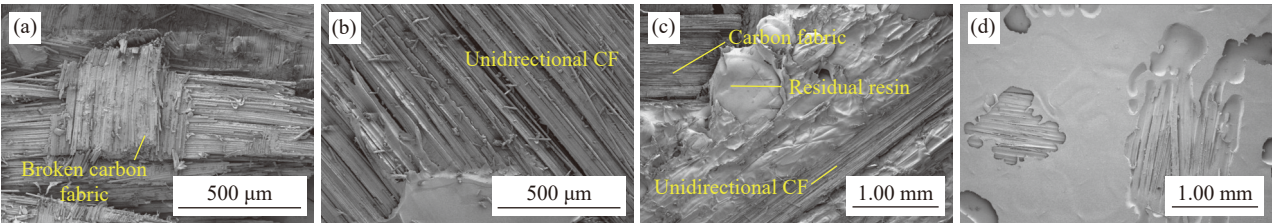


图 12 4 种 CF/PEEK 感应焊接接头断裂形式的典型微观形貌特征: (a) 感应元件的内聚破坏; (b) 母材表层的自破坏; (c) 混合破坏; (d) 母材与感应元件的界面破坏

Fig. 12 Typical micro morphologies corresponding to four fracture modes of CF/PEEK induction welded joints: (a) Cohesive failure of susceptor; (b) Self failure of base material; (c) Mixed failure; (d) Interface failure between base material and susceptor

差。因此，断口同时存在感应元件内聚破坏形貌与母材表层自破坏形貌，过渡区域呈现混合破坏特征。随着感应元件厚度及其自身树脂含量的增加，焊接区域中母材熔融树脂的占比减小，接头界面结合变差，此时基本不存在母材表层的自破坏，而是部分区域发生感应元件的内聚破坏，同时部分区域开始发生界面破坏，焊接接头强度有

所下降。当厚度进一步增加至 0.5 mm，感应元件中树脂对碳纤维织物的浸渍过程充分，感应元件自身强度较高，但是碳纤维织物产生的热量减少且向母材的热量传递过程受到较厚树脂层的阻碍，从而造成接头较大面积的未有效连接，此时接头的拉伸剪切强度最低，接头的主要断裂形式为界面破坏。

3 结论

(1)在感应焊接过程中,由碳纤维织物与树脂薄膜制备的感应元件能够在焊接界面高效集中产热,并且不将异质材料引入接头,从而实现碳纤维增强热塑性复合材料(Carbon fiber reinforced thermoplastic composite, CF RTP)的高质量焊接,但感应加热的“边缘效应”会造成焊接界面温度的不均匀分布。

(2)感应元件的厚度越大,焊接接头的宏观成形效果越差。当感应元件厚度较小时(0.2 mm),接头成形较好且界面熔合紧密,无明显宏观缺陷;随着感应元件厚度的增加,接头四周的“粘瘤”缺陷增多,连接质量降低。

(3)随着感应元件厚度的增大,碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)感应焊接接头的有效连接面积减小,接头的拉伸剪切强度逐渐降低。当感应元件厚度为0.2 mm时,母材表层熔融树脂含量较大且充分参与界面熔合过程,此时接头力学性能最优,强度可达23.77 MPa。

(4)CF/PEEK感应焊接接头的主要断裂形式为感应元件的内聚破坏、母材表层的自破坏、混合破坏、母材与感应元件之间的界面破坏。当感应元件厚度为0.2 mm时,内聚破坏、母材自破坏和混合破坏形式同时存在;当感应元件厚度为0.3 mm时,接头以内聚破坏和界面破坏为主;当感应元件厚度为0.5 mm时,接头的主要断裂形式为界面破坏。

参考文献:

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 97-103.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Comositae Sinica, 2007, 24(1): 97-103(in Chinese).

[2] 刘彬, 安卫龙, 倪楠楠. 国外热塑性复合材料工程应用现状[J]. 航空制造技术, 2021, 64(22): 80-90.
LIU bin, AN Weilong, NI Nannan. Application status of thermoplastic composite materials in foreign engineering[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(22): 80-90(in Chinese).

[3] 陈吉平, 李岩, 刘卫平, 等. 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放原位成型技术的航空发展现状[J]. 复合材料学报, 2019, 36(4): 784-794.
CHEN Jiping, LI Yan, LIU Weiping, et al. Aerospace development status of continuous fiber-reinforced thermo-

plastic resin matrix composite material automatic placement and in-situ molding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(4): 784-794(in Chinese).

[4] LIU G, XIONG Y, ZHOU L. Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications[J]. Composites Communications, 2021, 27: 100907.

[5] 周利, 秦志伟, 刘杉, 等. 热塑性树脂基复合材料连接技术的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3177-3183.
ZHOU Li, QIN Zhiwei, LIU Shan, et al. Progress on joining technology of thermoplastic resin matrix composites[J]. Materials Review, 2019, 33(19): 3177-3183(in Chinese).

[6] PRAMANIK A, BASAK A K, DONG Y, et al. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys—A review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 101: 1-29.

[7] 初明越, 阳玉球, 赵德方, 等. 接头尺寸对玻璃纤维/热塑性树脂复合材料机械连接性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1353-1363.
CHU Mingyue, YANG Yuqiu, ZHAO Defang, et al. Effect of joint dimension on the mechanically fastened joint properties of glass fiber/thermoplastic resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1353-1363(in Chinese).

[8] 陈超. 复合材料连接静动态力学性能实验与数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
CHEN Chao. Experimental and numerical study on static and dynamic mechanical properties of composite joint[D]. Changsha: Hunan University, 2020(in Chinese).

[9] 胡春幸, 侯玉亮, 铁瑛, 等. 不同胶接参数对CFRP层合板单搭接胶接结构强度的影响及优化设计[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 154-165.
HU Chunxing, HOU Yuliang, TIE Ying, et al. Influence of different bonding parameters on the strength of CFRP laminates with single lap bonding structure and optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 154-165(in Chinese).

[10] WANG F, BU H, MA W, et al. Influence of the different surface treatments on fracture property of CFRP adhesive joint[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(6): 961-975.

[11] COSTA A P, BOTELHO E C, COSTA M L, et al. A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications[J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2012, 4(3): 255-265.

[12] 张增焕, 刘红兵. 航空领域热塑性纤维复合材料焊接技术发展研究[J]. 航空制造技术, 2015, 483(14): 72-75.
ZHANG Zenghuan, LIU Hongbing. Research on the development of welding technology of fiber reinforced thermo-

- plastics in the aviation field[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 483(14): 72-75(in Chinese).
- [13] 袁协尧, 杨洋, 见雪珍, 等. 感应焊接技术在民用飞机热塑性复合材料中的应用[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017, 280(5): 99-104, 127.
- YUAN Xieyao, YANG Yang, JIAN Xuezheng, et al. Application of induction welding technology in thermoplastic composites of civil aircraft[J]. *Composites Science and Engineering*, 2017, 280(5): 99-104, 127(in Chinese).
- [14] CHOUDHURY M R, DEBNATH K. A review of the research and advances in electromagnetic joining of fiber-reinforced thermoplastic composites[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2019, 59(10): 1965-1985.
- [15] LIONETTO F, PAPPADÀ S, BUCCOLIERO G, et al. Finite element modeling of continuous induction welding of thermoplastic matrix composites[J]. *Materials & Design*, 2017, 120: 212-221.
- [16] NELE L, PALMIERI B. Electromagnetic heating for adhesive melting in CFRTP joining: Study, analysis, and testing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(11): 5317-5331.
- [17] GOUIN O, DUBE M, FERNANDEZ V I. Modeling and experimental investigation of induction welding of thermoplastic composites and comparison with other welding processes[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(21): 2895-2910.
- [18] WANG F, MA W, ZHAN X, et al. Comparative study on the morphology and mechanical strength of induction welding joint of polyetheretherketone under different currents[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(11): 2908-2917.
- [19] STAVROV D, BERSEE H. Induction welding of thermoplastic composites—An overview[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(1): 39-54.
- [20] 王家锋, 苏佳煜, 朱姝, 等. 基于导热板的碳纤维增强聚醚醚酮复合材料感应焊接温度调控[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(8): 2625-2634.
- WANG Jiafeng, SU Jiayu, ZHU Shu, et al. Temperature control for induction welding of carbon fiber reinforced polyetheretherketone (CF/PEEK) composite material via thermal conduction plate[J]. *Acta Materialia Compositae Sinica*, 2021, 38(8): 2625-2634(in Chinese).
- [21] 陈栋. 碳纤维增强聚苯硫醚复合材料感应焊接技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- CHEN Dong. Research on induction welding technology of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composite[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020(in Chinese).
- [22] 路鹏程, 李志歆, 邱运朋, 等. 湿热环境对碳纤维增强聚苯硫醚层合板感应焊接接头性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(9): 2807-2813.
- LU Pengcheng, LI Zhixin, QIU Yunpeng, et al. Effect of hygrothermal environment on properties of induction welding joint of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide laminate[J]. *Acta Materialia Compositae Sinica*, 2021, 38(9): 2807-2813(in Chinese).
- [23] MA W, ZHAN X, YANG H, et al. Study on the interface morphology in the induction welding joint of PEEK plate at low power[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2020, 40(5): 432-439.
- [24] FARAHANI R D, JANIER M, DUBÉ M. Conductive films of silver nanoparticles as novel susceptors for induction welding of thermoplastic composites[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(12): 125701.
- [25] RUSSELLO M, CATALANOTTI G, HAWKINS S C, et al. Welding of thermoplastics by means of carbon-nanotube web[J]. *Composites Communications*, 2020, 17: 56-60.
- [26] 中国国家标准化管理委员会. 胶粘剂单搭接拉伸剪切强度试验方法(复合材料对复合材料): GB/T 33334—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Standardization Administration of China. Test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap-joint laminated assemblies (composite and composite): GB/T 33334—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016(in Chinese).