

引用格式: 叶璐, 张代军, 李军, 等. 热塑性复合材料电阻焊接技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3): 19-31.

YE Lu, ZHANG Daijun, LI Jun, et al. Research progress in resistance welding technology of thermoplastic composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3): 19-31.

热塑性复合材料电阻焊接技术研究进展

叶 璐^{1,2}, 张代军^{1,2*}, 李 军^{1,2}, 栗付平¹, 陈祥宝^{1,2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

摘要: 热塑性复合材料因其优异的韧性、可焊接、可回收性和短成型周期, 在航空航天领域展现出广阔的应用前景。然而, 其高熔点树脂的加工难度限制了复杂构件的制造。电阻焊接技术通过焦耳热效应实现界面熔融连接, 避免了机械连接和胶接的缺点, 成为热塑性复合材料连接的重要方法。本文综述了电阻焊接的基本原理、关键工艺参数的优化策略, 加热元件的改进方法, 以及大尺寸焊接技术(顺序电阻焊接和连续电阻焊接)的应用进展。研究表明, 通过优化工艺参数和改进加热元件, 可显著提高焊接接头强度。为了实现电阻焊接技术的工程化应用, 还需要进一步对工艺稳定性、焊接接头可靠性、大尺寸焊接等问题进行研究。

关键词: 热塑性复合材料; 电阻焊接; 工艺优化; 电阻加热元件; 大尺寸焊接

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000058

中图分类号: V258; TB332

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)03-0019-13

Research progress in resistance welding technology of thermoplastic composites

YE Lu^{1,2}, ZHANG Daijun^{1,2*}, LI Jun^{1,2}, LI Fuping¹, CHEN Xiangbao^{1,2}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing 100095, China)

Abstract: Thermoplastic composites (TPCs) have exhibited immense potential in aerospace applications, attributed to their exceptional toughness, weldability, recyclability, and efficient processing cycles. However, the manufacturing of complex structures is hindered by the high melting points and viscosities of their constituent resins. Resistance welding, leveraging Joule heating to induce interfacial melting and bonding, emerges as a viable alternative to mechanical fastening and adhesive bonding. This review delves into the fundamental principles underlying resistance welding, strategies for optimizing key process parameters, recent advancements in heating elements, and large-scale welding techniques, such as sequential and continuous resistance welding. The findings indicate that optimizing process parameters and improving heating elements can significantly enhance joint strength. To achieve engineering application of resistance welding technology, further research should be focused on process stability, reliability of welded joints, large-scale welding, and other issues.

Key words: thermoplastic composites; resistance welding; process optimization; resistance heating elements; large-scale welding

与传统热固性复合材料相比, 热塑性复合材料展现出出色的性能优势。热塑性复合材料具有优异的冲击韧性和损伤容限能力, 其成型加工周期可缩短 50%~70%, 且废料可回收再利用。其预浸料在常温环境下具有极长的存储稳定性, 大大降低了储藏和运输成本, 为工程应用提供了极大的便

利^[1-3]。航空航天领域常用热塑性复合材料的树脂基体有低熔点聚芳醚酮 (LMPAEEK)、聚醚醚酮 (PEEK)、聚醚酮酮 (PEKK)、聚醚酰亚胺 (PEI)、聚苯硫醚 (PPS) 等。但这些材料具有高的熔融温度和熔体黏度, 给复杂构件的成型带来严峻挑战。为突破这一技术瓶颈, 工程实践中普遍采用“分体制

造-整体组装”的策略。该策略的实施关键取决于可靠的连接技术。传统的连接方式包括机械连接和胶接,机械连接虽然工艺成熟,但存在增重和应力集中的问题。钻孔导致的纤维断裂会使连接处强度降低 20%~30%。胶接的优势在于应力分布均匀,但面临三个技术难题:(1)固化周期长,通常需要 2~8 h;(2)环境敏感,湿热环境下胶接强度可能衰减 40% 以上;(3)胶黏剂的选择要注重其与热塑性复合材料热膨胀系数匹配性、耐高温等级匹配性、韧性匹配性等问题^[4-6]。焊接技术作为热塑性复合材料的特色连接技术,在保持结构强度、减重、降低成本等方面具有显著优势,是最具发展潜力的连接技术^[7-9]。

热塑性复合材料的焊接技术主要包括感应焊接^[10]、超声焊接^[11]、激光焊接^[12]和电阻焊接^[13]。电阻焊接具有设备简单灵活、费用低廉、不需表面处理、适应性强等特点,适用于单次大面积区域的焊接。

电阻焊接技术在国外已经实现工程化应用。Fokker 公司采用 TenCate 的 GF/PPS 制备 A380 机翼前缘,以替代传统的铝合金材质,实现大幅减重的目标。A380 机翼前缘肋与蒙皮的连接是采用电阻焊接技术完成的,电阻焊料由金属网与 PPS 膜复合而成^[14-15]。A320 后压力舱壁全尺寸演示件由 8 个瓣型 CF/PPS 壁板组成,壁板之间的连接通过弯曲金属夹具旋转施压,采用碳纤维电阻焊接工艺。相比于传统铆接的铝合金制件,减重 10%~15%,制造周期缩短 50%,同时降低了制造成本^[16]。多功能机身演示器(multifunctional fuselage demonstrator, MFFD)作为欧洲清洁天空 2 号研究计划中大型客机计划的一部分,是世界上最大的由纤维增强热塑性塑料制成的飞机部件,该机身长 8 m,直径 4 m^[17],其上半部分机身中 C 形框与蒙皮的连接是通过电阻焊接完成的。为此,DLR-ZIP 开发“焊接桥”,电阻加热元件采用东丽 5HS, T300JB 碳纤维织物预浸料(面密度为 277 g/m²),绝缘膜采用玻纤织物增强预浸料(GF/LMPAEK, 105 g/m²)。对于角片与长桁、角片与 C 形框的连接,德国航空航天中心开发出一种基于机器人的 cobot 焊接系统,以适应高度受限的空间^[18-19]。

目前,国内热塑性复合材料电阻焊接技术的研究多处于实验室级别,尚未有工程应用的报道。本文将从电阻焊接的基本原理出发,系统分析影响焊接质量的关键因素,重点探讨工艺参数优化和加热元件改进的研究进展,并介绍大尺寸焊接技术的最

新发展。最后,总结当前面临的技术挑战,并对未来发展方向提出展望。

1 电阻焊接过程及原理

电阻焊接过程是将电阻元件布置在被焊接的界面处,通电后电阻的焦耳热效应使得界面处的温度超过一定温度(如树脂的熔点、软化点)时,树脂熔融,在压力作用下完成熔融焊接的过程^[20-22]。界面温度是由电阻产生的焦耳热与界面处耗散的热量共同决定的。电阻元件在焊接过程中产生的焦耳热 Q 用式(1)表示,其与电阻 R 、电流 I 、通电时间 t 成正比。耗散的热量以热传导形式为主,与电阻毗邻的复合材料、隔热块的材质有关^[23]。

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

电阻焊接质量与焊接界面的温度分布密切相关。界面温度分布不均匀主要有两个因素:边缘效应和漏电。焊接件端部与空气接触,由于空气导热系数极低,焊接端部温度高于中部温度,因此,焊接件端部树脂优先熔融,然后熔融区域向焊接面的中部扩展,接着,熔融区域会扩展到焊接界面的侧部边缘^[24]。也就是说,焊缝边缘往往是树脂最后熔融并被焊接的区域,因此,焊接的薄弱区域易出现在焊缝边缘处。图 1 展示了焊接样品的焊缝界面与数值模拟得到的界面温度分布^[21, 25]。漏电现象是当植入电阻与复合材料中的碳纤维接触,在复合材料中形成新的电流通路。漏电进一步加剧了温度的不均匀分布。鉴于边缘效应,焊接件端部优先达到树脂熔融温度,熔融的树脂在压力作用下被挤出,致使植入电阻与复合材料件中的碳纤维接触,大量能量耗散在焊接件的基体中,发生电流泄漏,没有足够的能量使焊接界面的树脂充分熔融,造成焊接强度极低。

为了实现温度均匀分布,需要解决漏电和边缘效应等问题。采用“埋入式”电极布置方式可有效避免电阻焊接过程中因加热元件裸露而产生的“边缘效应”现象^[26-27]。在植入电阻与碳纤维复合材料之间布置绝缘层(如树脂膜或玻纤织物增强树脂膜等)可以阻止漏电。玻纤织物增强树脂膜虽然能够起到很好的绝缘作用,但异质材料和较厚焊缝会降低碳纤维复合材料的焊接强度^[27]。相比于玻纤织物增强树脂膜,纯树脂膜能够提高焊接性能,但树脂膜的绝缘作用有限,尤其是对于较大的焊接面积。焊接区域的局部过热会导致树脂熔融

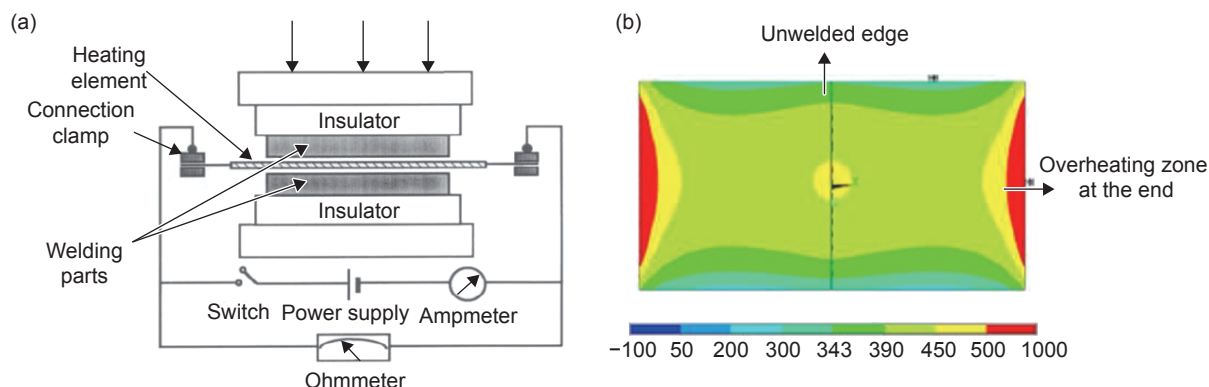


图1 电阻焊接示意图(a)^[21]和边缘效应引起的焊接表面温度分布(b)^[25]

Fig. 1 Schematic diagram of resistance welding(a)^[21] and temperature distribution of the welding surface caused by edge effect(b)^[25]

并被挤出,使绝缘屏障失效。解决的方法是先施加一个较小的压力,以防熔融的树脂被挤出焊接界面造成电流泄漏,待树脂充分熔融后,再增大焊接压力,使得焊接界面实现紧密连接^[17]。Dube等^[24]提出斜坡电压法也可以减弱边缘效应,斜坡电压是通过逐渐增加电压到目标焊接功率,而不是一开始就施加较高的电压。在焊接开始时施加的初始电压较低,不会像恒定电压方案那样导致加热元件端部暴露区域过热。

另一个阻止漏电的方法是在加热元件上喷涂耐高温惰性材料。Dube等^[28]将TiO₂纳米粒子喷涂在不锈钢金属网表面用于APC-2/AS4复合材料的电阻焊接,TiO₂纳米粒子在金属网表面形成绝缘层,能够有效避免焊接过程中的电流泄漏。而且,TiO₂纳米粒子具有良好的保温效果,可以缩短焊接时间,提高焊接界面温度均匀性。此外,TiO₂纳米粒子的存在也不会对复合材料的力学性能造成影响。

在电阻焊接过程中引入超声波是提高温度分布均匀性和焊接质量的有效手段之一。焊缝边缘

是树脂最后熔融并被焊接的区域,当其他区域实现完好融合的时候,边缘区域往往由于聚合物熔体流动不足导致融合不充分或未融合的现象。在电阻焊接最后阶段引入超声波,超声振动降低熔体黏度,促进熔体在侧部边缘的流动,使熔融前沿在更短的时间内扩展到侧部边缘,甚至超出焊接界面的范围,从而改善焊接效果。此外,超声振动还可以减少中心和边缘之间的温度差异,提高焊接界面温度均匀性,如图2。当电阻焊接过程未引入超声波时,玻璃纤维增强聚苯硫醚(GF/PPS)复合材料的单搭接剪切强度(LSS)最高为18.4 MPa,焊接时间为150 s。当电阻焊接过程引入超声波后可大幅降低焊接时间,当电阻焊接时间为90 s,超声振动时间为7.5 s时,GF/PPS复合材料的LSS提高至21.9 MPa,比未使用超声波时焊接性能提高了19%,焊接时间减少了40%^[29]。

2 焊接参数的影响与调控

电阻焊接是受多因素影响的动态温升过程。

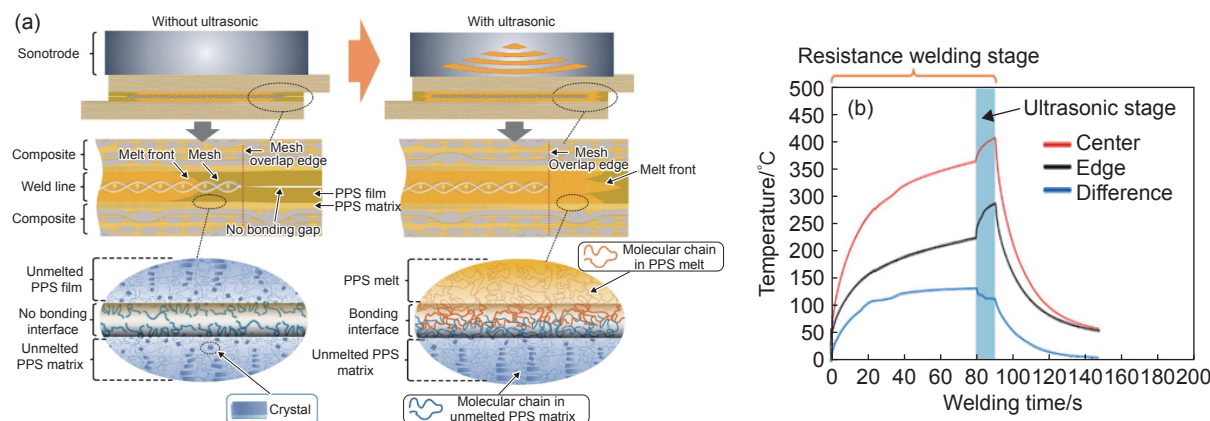


图2 电阻焊接过程引入超声波的融合机制(a)和温度变化曲线(b)^[29]

Fig. 2 Schematic of bonding mechanisms(a) and temperature evolution curves during resistance welding with ultrasonic(b)^[29]

输入功率、焊接时间、施加压力、电极夹持方式等工艺参数均对电阻焊接接头性能产生重要影响。

2.1 功率密度与时间

焊接功率和焊接时间是热塑性复合材料电阻焊接过程中两个至关重要的工艺参数。焊接界面温度的升高可通过大电流(高功率)短时间实现,也可通过小电流(低功率)长时间实现。然而,实际焊接过程中,小电流长时间会将更多的热量传导给焊接件的主体,降低热利用效率。而过高的电功率容易造成局部过热,造成界面树脂降解,并引发电流泄漏,导致低的焊接性能。

焊接时间对焊接接头性能的影响与焊接功率类似,时间过短,热量无法充分传递到界面处,导致焊接不充分;时间过长,则可能引起材料过热降解,降低焊接接头性能。为了获得最佳的焊接接头性能,需要综合考虑焊接功率和焊接时间的交互影响^[30-31]。

2.2 焊接压力

压力控制对焊接质量的影响也是至关重要的。压力施加方式一般有两种:恒压法和恒位移法。恒位移法是焊接过程中焊堆的位移保持稳定,而压力会根据焊接过程动态变化。恒压法是焊接过程中焊堆的压力保持恒定,而位移会根据焊接过程动态变化。压力在整个焊接过程中保持稳定,避免了恒位移控制中因压力变化导致的焊接缺陷。表 1 给出恒压控制和恒位移控制的优缺点。

焊缝位移曲线,即恒压力模式下,热塑复合材料焊接接头处焊缝位移随时间的变化曲线,能够有效反映焊接过程中的物理现象,包括材料的热膨胀、收缩、孔隙形成和树脂流动等行为。图 3(a)是碳纤维增强聚醚酰亚胺(CF/PEI)复合材料的典

型焊缝位移曲线^[32]。整个过程分为 5 个阶段。第一阶段:无显著位移。这一阶段中,焊堆升温导致的热膨胀与焊接界面紧密接触导致的间隙减小相互抵消。当界面温度达到树脂的玻璃化转变温度时,树脂变软,可通过表面变形实现界面的紧密接触。此时,进入第二阶段:位移曲线快速上升,直到达到一个峰值。主导原因是焊堆的热膨胀,尤其是当 PEI 树脂的温度超过其玻璃化转变温度后,热膨胀系数增加。此外,焊接过程中残余水分或杂质的分解等会在焊接界面形成孔隙,也会导致厚度增加。第三阶段:位移下降。这一阶段的主要现象是焊接界面处的树脂挤出流动。尽管热膨胀和孔隙形成仍然会导致一定的正位移,但树脂挤出流动引起的负位移占主导地位。第四阶段:通电结束后位移持续下降。主导因素是焊接堆叠因冷却而发生体积收缩。第五阶段:位移曲线趋于稳定,几乎不再变化。

热塑性复合材料焊接接头性能随着焊接压力的增大先增大后减小。例如,对于 CF/PEI 复合材料,以不锈钢金属网为加热元件,在焊接功率为 69 kW/m²、焊接时间为 90 s 时,将焊接压力设在 0.2~1.6 MPa 范围内,焊接后的厚度整体减少在可接受范围内,减少量为 0.2~0.8 mm,焊接接头的搭接剪切强度(LSS)可达 24 MPa 以上。当焊接压力低至 0.1 MPa 时,试样有明显的热膨胀,焊接过程中产生的孔隙无法排出界面,树脂也不能充分浸润母材表面并进行高分子链的交互扩散,导致焊接强度低。当焊接压力超过 1.6 MPa 时,会导致试样过度变形,出现显著的树脂挤出和纤维运动,从而使厚度减少超过 1 mm,焊接性能显著下降^[31]。

图 3(b)是恒位移模式下半结晶热塑复合材料的典型载荷变化曲线^[33]。该过程分为 6 个阶段:第一

表 1 焊接过程中的压力控制方式
Table 1 Pressure control method in welding process

Pressure control mode	Control method	Advantages	Disadvantages
Constant pressure method	During the welding process, the pressure of the weld stack remains constant, while the displacement changes dynamically according to the welding process	The compaction control during the welding process can better ensure the welding quality. The pressure remains stable throughout the welding process, avoiding welding defects caused by pressure change	The final thickness of the welded joint cannot be precisely controlled. During the welding process, the resin may be extruded, forming a “dry joint”, which can cause fiber slippage and other issues
Constant displacement method	During the welding process, the displacement of the weld stack remains stable, while the pressure changes dynamically according to the welding process	The final thickness of the welded joint can be precisely controlled	The pressure of the weld stack during the welding process cannot be precisely controlled. During the cooling process, the pressure will decrease, which may lead to a decline in the welding quality

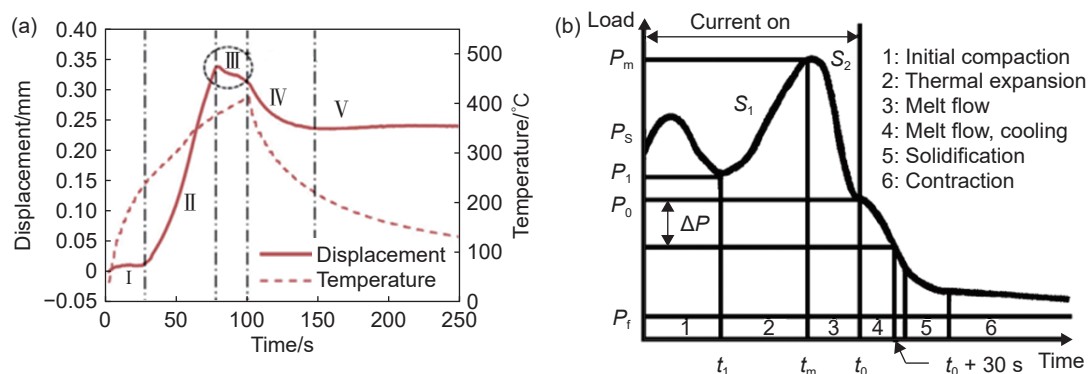


图3 恒压力模式下典型焊缝位移曲线(a)^[32]和恒位移模式下典型载荷变化曲线(b)^[33]

Fig. 3 Typical weld displacement curve(a)^[32] and typical load change curve (b)^[33]

阶段有热膨胀引起的载荷增加,以及压实和结晶引起的载荷下降;第二阶段主要由体积膨胀主导,当接近最大载荷时,树脂局部熔化和流动开始发生;第三阶段,由于焊接区域发生宏观熔化和挤出流动,载荷急剧下降;第四阶段,电流被切断,开始冷却,熔融的树脂会继续流动;第五阶段,由于压力减小或黏度增大,树脂停止流动,材料开始固化,载荷曲线的斜率减小;第六阶段,焊堆冷却收缩^[11]。

无定形聚合物的载荷曲线与 PEEK 焊接曲线类似,但在第一阶段没有明显的载荷下降。无定形聚合物的载荷曲线从电流接通开始就逐渐上升,直至达到载荷峰值,之后的变化路径与图 3(b)中的曲线一致。

2.3 降温速率

聚芳醚酮是半结晶聚合物,横晶有利于提高纤维与树脂的界面强度,但是,一般电阻焊接的降温速率很快,高达成百上千度每分钟,相比于模压的降温速率,前者是后者的几十到几百倍。如此高的降温速率很难在焊接界面处形成结晶区域,从而影响焊接性能^[34]。Li 等^[35]研究了焊接过程中的降温速率对焊接接头处的结晶度、形貌及力学性能的影响。通过控制电流下降速率,实现了从 320 °C/min 到 43 °C/min 的不同冷却速率,低冷却速率提高了焊接接头的结晶度,结晶度从 16.40% 提高到 28.38%。研究表明,冷却速率低于 40 °C/min 时,PEEK 倾向于形成二维生长的晶体(即穿晶);而冷却速率高于 60 °C/min 时,PEEK 主要形成三维的球晶。穿晶的形成有利于实现强界面结合,焊接接头表现出较高焊接强度和疲劳性能。低冷却速率接头的搭接剪切强度比未控制冷却过程的接头提高了约 28%,疲劳寿命也显著提高。

2.4 夹持距离

电极夹持位置到试样边缘的距离为夹持距离,

对焊接性能也有显著影响。因为裸露在空气中的电阻加热元件会加剧边缘效应,往往界面处还未达到焊接温度,试样边缘已经发生烧蚀现象。端部过热的原因是焊缝边缘的传热机制发生从对流和辐射到传导的变化。Dube 等^[24]采用不锈钢金属网焊接 CF/PEEK 复合材料桁条和蒙皮典型试样,考察了夹持距离和输入功率对焊接性能的影响。研究表明,夹持距离对焊接温度分布有显著影响。较大的夹持距离可能导致加热元件暴露区域更多,从而增加局部过热的风险。在恒定电压 9.0 V 和夹持距离 1.5 mm 的条件下,焊接中心和边缘的温度梯度较小(7 °C);而夹持距离 2.0 mm 时,温度梯度较大(35 °C)。夹持距离为 1.5 mm 的焊接试样的层间剪切强度在 87.0~88.9 MPa 之间,试样的最大弯曲力矩为 14918 N·mm,优于其他条件。

Talbot 等^[25]通过二维(2D)和三维(3D)有限元模型模拟了热塑性复合材料的电阻焊接过程,并探讨了焊接过程中的热传递机制,以及如何通过控制焊接参数(如夹持距离和输入功率)改善焊接质量和力学性能。通过 2D 模型发现,改善焊接界面的温度均匀性,并扩大加工窗口,可提高焊接质量。高焊接功率使得加工窗口狭窄,而且会导致焊接边缘的聚合物降解。模型优化的夹持距离为 0.65 mm,在该条件下,即使焊接功率高达 2.5 GW/m³,仍然有较宽的加工窗口。通过实验验证了模型的准确性,对于 APC-2/AS4 碳纤维增强 PEEK 单向层合板,当焊接功率为 2.5 GW/m³,焊接温度为 440 °C,夹持距离为 0.8 mm 时,获得最优的焊接性能,LSS 达到 47.4 MPa。

2.5 夹持力

夹持力直接影响铜电极与焊接元件连接的紧密程度,这关系到二者之间的接触电阻和传热效率。增大夹持力能降低接触电阻并提高热传递效

率。根据 Shi 等^[36]的研究结果,当接触电阻减小或热传递效率提高时,能明显减少热量在焊接试样端部的聚集,降低端部温度,从而改善温度分布均匀性,提高焊接性能。

2.6 绝缘层

绝缘层一般有玻纤增强预浸料或树脂膜,前者具有更好的绝缘性能,但是玻纤织物的存在会影响焊接性能。叶璐等^[27]考察了 GF/PAEK 预浸料、PAEK 树脂膜和 PEI 树脂膜作为绝缘层对焊接性能的影响。对于 CF/PAEK 复合材料焊接,不锈钢金属网为加热元件,以玻纤预浸料作为绝缘层,LSS 为 25 MPa 左右,界面失效形貌以玻纤分层为主。以 PAEK 或 PEI 树脂膜为绝缘层,LSS 能够超过 30 MPa。以 PEI 树脂膜为绝缘层,反而比与基体树脂同材质的 PAEK 树脂膜具有更宽的焊接窗口和更高的焊接性能。这是因为在焊接温度附近,PAEK 树脂流动性好,极易被挤出,致使金属网与复合材料板中的碳纤维接触,引发漏电。而 PEI 树脂的黏度远高于 PAEK,焊接时能够留在焊缝中而不会被轻易挤出,能够有效避免电流泄漏的发生。

电阻焊接参数存在多重关联制约关系,需要协同调控。例如,当界面树脂黏度小时,应适当减小压力,防止压力过大使界面树脂过度挤出而引发漏电,造成无效焊接。而焊接压力过低,会使得固化在界面的树脂含量偏高,同样会对焊接性能造成影响^[27]。

2.7 复合材料铺层

纤维铺层和取向对复合材料性能影响显著^[37],同样,复合材料表层纤维取向对焊接接头的强度也有影响,纤维取向与载荷方向垂直时,焊接接头的强度较低。对于 8HS 编织玻璃纤维增强 PEI 复合材料,相比于玻璃纤维主要取向与负载方向一致的情况,玻璃纤维主要取向与负载方向垂直时,焊接接头的 LSS 降低,降幅在 13% 到 20% 之间^[38]。

3 电阻加热元件

3.1 不锈钢金属网

不锈钢金属网电阻率适中、电阻均匀,且兼具优异的力学性能、柔韧性、耐温性能和耐化学腐蚀等性能,是应用最广泛的金属加热元件。不锈钢金属网的线径和密度决定了其电阻值,不同电阻金属网的焊接工艺不同,焊接性能也会有所差异。Dube 等^[39]研究不同规格不锈钢金属网对电阻焊接强度的影响,当线径为 0.04 mm、开孔宽度为

0.09 mm 时,焊接性能最为优异,CF/PEKK、CF/PEI 和 GF/PEI 的 LSS 分别为 52、47 MPa 和 33 MPa。

为了提高复合材料的焊接性能,大量研究人员致力于对金属网表面进行改性处理,以提高金属网与树脂之间的结合力或树脂对金属网的浸渍性能。金属网表面处理方法有刻蚀、涂层、接枝、等离子体处理等。

金属网表面刻蚀可增大其表面粗糙度,能够提高金属网与树脂的相互作用力。Xiong 等^[40]采用化学刻蚀的方法对金属网表面处理,将不锈钢金属网在 7 mol/L 的 HCl 溶液中浸泡 30 min 后用于电阻焊接,GF/PEI 复合材料的 LSS 达到 35.44 MPa,比未处理的不锈钢金属网提高 27.7%。但是,表面刻蚀虽然能有效提高焊接性能,但会损害金属网的力学性能。

有机硅烷对金属网表面处理,能够有效改善树脂与金属网之间的黏附性能,提高焊接强度^[41-42]。Li 等^[41]考察了喷砂、芳基重氮接枝和硅烷接枝等不锈钢金属网表面处理方法对 CF/PEEK 复合材料焊接性能的影响。研究表明,硅烷接枝处理的效果优于其他表面处理手段。硅烷接枝处理的金属网电阻焊接试样的 LSS 为 45 MPa,相比于未改性的金属网提高了 23%,层间剪切强度为 38 MPa,相比于未改性的金属网提高了 36%。

等离子体表面处理技术用于处理金属网,能有效减少金属网表面微孔等缺陷,增加表面羟基等极性基团,促进树脂的浸渍,从而增强金属网与复合材料之间的机械互锁和黏附性能。Zhao 等^[43]通过旋转滑动电弧等离子体技术对不锈钢金属网进行表面处理,使 CF/PEEK 复合材料焊接试样的 LSS 达到 51.7 MPa,比未处理的不锈钢金属网加热元件高出 14.6%。然而,不锈钢金属网表面亲水性增强可能导致吸收空气中的水分,这可能在某些情况下降低焊接接头的强度。

石墨烯、碳纳米管等拥有诸多优良的特性,如大的比表面积、褶皱结构以及超高的强度,在复合材料改性方面展现出独特的优势^[44-45]。石墨烯、碳纳米管等改善界面性能的机制主要体现在:通过在纤维表面沉积或生长纳米粒子来增加纤维与树脂的黏附性^[46-48]。熊需海等^[49]通过在不锈钢金属网表面包裹氧化石墨烯(RGO)改善 PEI 树脂对不锈钢金属网的浸润性,提高界面处金属网与 PEI 树脂的界面结合力。经 RGO 改性的金属网电阻焊接性能从 26.6 MPa 提高至 41 MPa,但是,过量的 RGO 会导致金属网网孔堵塞,从而影响 PEI 分子的

扩散和渗透,导致焊接接头强度较低。Xiong等^[50]通过火焰合成方法在钛合金表面生长了CNT,以不锈钢金属网为电阻加热元件,提高了钛合金与GF/PEI的焊接强度,CNT的加入使Ti-GF/PEI焊接接头的LSS提高了146%,达到17.28 MPa。

Zhao等^[51]提出一种通过静电纺丝技术在不锈钢加热元件上制备纳米纤维膜的方法,以实现加热元件的孔隙预填充,可改善树脂浸渍效果,减少焊接接头中的空隙,提高焊接质量。通过田口方法和ANOVA分析,确定最优焊接参数:焊接电流50 A、焊接时间15 s、焊接压力1.5 MPa、金属网网目数为200目和静电纺丝时间4 h。获得的焊接接头的LSS达到36.98 MPa,相比无纳米纤维膜的接头提高了2.3倍。在最优焊接参数下,焊接接头在20%静态LSS的负载水平下表现出无限疲劳寿命。

此外,在焊接界面处添加短切纤维等增强材料也可以实现界面强化^[52]。

焊接接头的耐环境性能也是研究人员关注的重点。Rohart等^[53]研究了温度和湿度对CF/PPS热塑性复合材料电阻焊接接头LSS的影响。LSS随测试温度升高而线性下降,82℃时下降26%,150℃时下降61%。湿热老化对LSS的影响不显著,PPS的半结晶特性使其对水分吸收具有良好的耐受性。图4^[53]失效模式,Type A是轻度的纤维撕裂,失效发生在纤维与基体之间,部分纤维仍然附着在加热元件上,这种失效模式表明纤维与基体之间的黏附力较弱。Type B的失效为加热元件的内聚破坏,被焊接复合材料表面粘有加热体。Type C的失效模式为界面脱粘,表明加热体与被焊复合材料之间弱的结合力。从焊接失效界面的微观形貌来看,室温干态试样的失效模式以Type B为主,高温使Type C失效模式增加,湿热老化试样的失效模式表现出更多的Type A和Type C的失效模式,表明高温和湿热老化条件下,纤维与基体、加热元件与基体之间的界面黏附性显著下降。

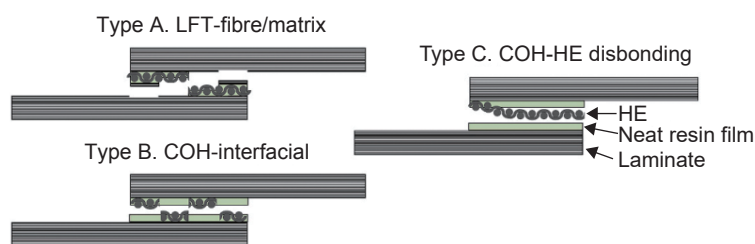


图4 单搭接剪切破坏后焊接界面的失效模式^[53]

Fig. 4 Failure mode of welded interface after single lap shear failure^[53]

3.2 碳基加热元件

3.2.1 碳纤维

尽管金属网焊接质量稳定,工艺窗口宽泛,但由于金属网与母材非同质材料,焊接接头残余应力大,且有电偶腐蚀的风险,这些问题会削弱接头的耐久性和力学性能。采用与母材同质的碳基加热元件能够有效避免上述问题,界面相容性要远高于金属与树脂之间形成的界面^[54]。目前研究比较多的碳基加热元件有碳纤维加热元件^[55-56]和碳纳米管膜加热元件^[57-58]。

碳纤维加热元件分为单向碳纤维加热元件和织物碳纤维加热元件。单向碳纤维加热元件能够为焊接接头提供较高的搭接剪切强度。然而,单向碳纤维的纤维束容易发生位移和断裂,导致加热元件出现局部短路和断路,进一步影响焊接区域的温度分布均匀性。碳纤维织物加热元件在温度分布均匀性和焊接时间敏感性方面表现更好,但碳纤维

织物中编织结构不利于热塑性树脂向纤维束间渗透,导致加热元件中出现干斑等缺陷,结合强度波动性较大^[31,59]。

欧洲洁净空天计划2的MFFD演示件中,采用电阻焊连接将C型框架上19个不同长度的法兰连接到机身蒙皮上。采用的加热元件是东丽的一款T300碳纤维织物预浸料,面密度为277 g/m²,绝缘层为GF/LMPAEK,面密度为105 g/m²。焊接工艺采取二步法。第一步:电压为26.6 V,通电时间为30 s;第二步:电压为18.5 V,通电时间为15 s。采取二步法工艺的原因是为了降低焊接界面冷却速率,从而提高界面结晶含量^[17]。

Sun等^[60]考察了碳纤维织物面密度对焊接性能的影响。研究表明,当加热元件中碳纤维织物面密度为90 g/m²时,CF/PEI复合材料的焊接强度最高。这是因为90 g/m²碳纤维织物网格尺寸适中,能够有效促进焊接过程中的热传递和树脂流动,

相比之下, 50 g/m^2 碳纤维织物的网格尺寸过大, 导致加热元件在电阻焊接过程中产热不足, 热传递均匀性变差。而 100 g/m^2 碳纤维织物的网格尺寸过小, 阻碍了树脂在加热元件中的渗透, 进一步影响了焊接质量。为了提高焊接质量均匀性, 在 PEI 膜中添加六方氮化硼(h-BN)填料, 并与碳纤维织物复合形成 CFF/h-BN/PEI 复合加热元件用于焊接。h-BN 粒子具有高导热、绝缘的特性, 经过酸和氧化处理后, 其表面官能团更丰富, 在 PEI 树脂中分布更均匀, 可以有效提高焊接过程中的温度分布均匀性, 减少焊接缺陷和电流泄漏, CF/PEI 的 LSS 达到 20.5 MPa , 比未添加 h-BN 的加热元件高出 31.4% 。

相比于碳纤维织物, 碳纤维展宽布是通过展纱工艺将碳纤维面密度减薄, 可以改善树脂对纤维的浸润性。姚鑫等^[61]以碳纤维展宽布为电阻, 研究两种不同的碳纤维加热元件制备工艺(粉末悬浮浸渍和熔融浸渍)对焊接接头性能的影响。熔融浸渍工艺是直接将碳纤维展宽布与 PEEK 树脂膜复合制备加热元件。粉末悬浮浸渍工是将碳纤维展宽布浸入 PEEK 悬浮液中, 烘干后与 PEEK 树脂膜复合制备加热元件, 该方法制备的加热元件比熔融浸渍工艺制备的加热元件具有更好的浸润性和更高的焊接接头强度, LSS 为 28.1 MPa 。

碳纤维表面嫁接 CNT 可以提高纤维/基体界面剪切强度, 进而提高焊接强度^[62-64]。Tanaka 等^[65]通过化学沉积的方法在碳纤维表面接枝 CNT, 以表面接枝 CNT 的碳纤维展宽带为电阻加热元件, 聚酰胺(PA)为绝缘膜, 用于 CF/PA 复合材料的焊接。CNT 垂直于碳纤维表面生长, 可改善碳纤维/基体界面结合强度, 提高了焊接试样的拉伸剪切强度和弯曲强度。但是当 CNT 沉积时间过长, 过量的 CNT 导致树脂难以充分浸润到碳纤维之间, 从而在焊接区域产生空隙, 削弱了纤维与基体之间的结合^[66]。

3.2.2 碳纳米管膜

相比于碳纤维, 碳纳米管膜电阻分布均匀, 作为电阻焊接植入体通电时发热更均匀, 能提高焊接质量^[67-69]。碳纳米管膜厚度极薄, 对焊接界面影响较小^[70]。

Zhao 等^[51]以 CNT 膜为电阻植入体, 实现对 CF/PEI 层压板的焊接, 同时探究了焊接时间对接头形貌以及焊接性能的影响。焊接时间为 5 s 时, PEI 绝缘膜未充分熔融, PEI 与 CNT 膜界面处存在缝隙, 焊接强度仅为 2.1 MPa , 失效模式为界面

脱粘。焊接时间为 10 s 时, PEI 与 CNT 膜界面性能有所改善, 但缝隙未完全消除, 焊接试样的失效模式为 CNT 膜内聚失效。当焊接时间为 15 s 时, CNT 薄膜与 PEI 树脂、PEI 树脂与层压板之间形成紧密的结合, 焊接强度提高至 14.8 MPa , 失效模式为复合材料板表层纤维破坏。

Brassard^[71]提出一种新型的纳米复合材料加热元件, 即 PEI 和多壁碳纳米管(MWCNT)的导电纳米复合材料, 并将其应用于 CF/PEEK 复合材料的电阻焊接。将 PEI 聚合物颗粒与 MWCNT 混炼, 混炼后的挤出物被切成颗粒, 接着将颗粒热压成 0.5 mm 厚的膜作为电加热元件, 当加热元件中 MWCNT 含量为 10% 时, CF/PEEK 复合材料的 LSS 达到 19.6 MPa , 失效模式为纳米复合材料加热元件的内聚失效。高含量的 MWCNT 会导致加热元件韧性较低。

4 大尺寸复合材料的焊接

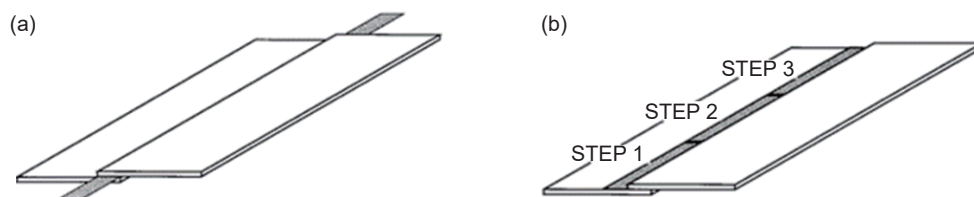
4.1 顺序电阻焊接技术(SRW)

上述大多数研究都是基于试样或小型的制件, 对于大尺寸焊接接头, 需要较大的电功率和压力, 显然, 不能通过无限增大电功率和压力实施大面积焊接。大尺寸焊接接头的单步焊接工艺存在焊接界面温度场和压力场均匀性差的问题, 导致焊接性能低。采用顺序电阻焊接的方法可以解决上述问题, 即将大的焊接面积分成若干段小面积, 逐段通电实施电阻焊接, 在不需要大功率电源条件下也能够获得焊接所需温度, 同时保证焊接区域温度场更均匀^[72]。

Steven 等^[73]对比了单步法和多步法对焊接接头的影响, 见图 5。对于焊接面积为 $30.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 的搭接试样, 单步法指一次完成 $30.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 的焊接, 电阻加热元件为碳纤维预浸料, 碳纤维垂直于焊接试样载荷加载方向排布。多步法是将焊接接头分为连续的三部分, 对每部分分别焊接, 加热元件中的碳纤维平行于焊接试样载荷加载方向排布。采用多步法提高了界面温度均匀性, 焊接试样具有更好的质量一致性。单步法焊接试样的 LSS 为 $(16.0 \pm 1.4) \text{ MPa}$, 多步法焊接试样的 LSS 为 $(27.5 \pm 0.9) \text{ MPa}$, 多步法焊接强度显著高于单步法, 除了焊接质量好之外, 碳纤维排布方向平行于焊接试样载荷加载方向也利于获得高的焊接强度。

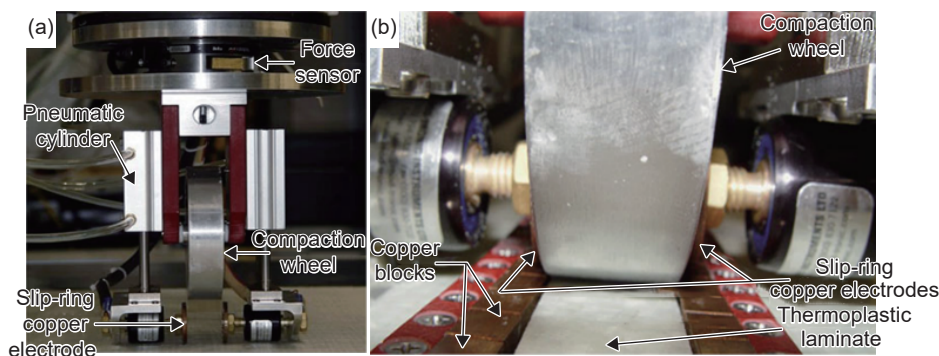
4.2 连续电阻焊接技术(CRW)

为了实现连续电阻焊接, 加拿大国家研究委员

图5 焊接示意图^[73] (a)单步法; (b)多步法Fig. 5 Schematic of the weld configurations^[73] (a)large-scale single-step; (b)large-scale multiple-step

会(NRC)研制了一种末端执行器,如图6^[74]。这个末端执行器与工业机器人(如 KUKA KR 210)结合,可以实现焊接过程的自动化,减少人工干预,提高焊接质量和一致性。末端执行器由铜滑环、铜轨道和压实滚组成。焊接过程中,铜滑环是焊接过程中用于传递电流的关键部件,可以自由转动,确保将电流连续稳定地传递给铜轨道。铜轨道用于引

导铜滑环的运动,并确保电流能够均匀地传递到加热元件。铜轨道由一系列电隔离的铜块组成,而不是一个连续的长铜条。这种设计可以有效减少电流泄漏,提高焊接效率,并且通过分段控制电流,可以更好地控制焊接过程中的热量分布。压实轮用于在焊接过程中对焊接界面施加压力,确保焊接材料在加热后能够紧密接触并形成牢固的焊接接头。

图6 连续电阻焊接装置的末端执行器^[74] (a)整体视图; (b)焊堆的特写视图Fig. 6 Custom end-effector of welding setup^[74] (a)overall view; (b)closeup view with weld stack

在电阻焊接过程中,直接测量焊接界面的实际温度是一个难题,因为焊接界面被夹在两个材料之间,且受到压力作用,无法直接接触温度传感器。此外,在大规模焊接中,焊接区域通常是连续移动的,这使得在线温度测量更加困难。为了解决这一问题,通过建立有限元模型模拟热传递过程,并基于此模型开发了一个线性观测器来估计焊接界面的温度。设计出模糊逻辑控制器(FLC)控制焊接温度,根据估计温度与目标温度的差异调整焊接速度和过程电压。通过同时控制焊接速度和过程电压这两个参数,可以更好地调节焊接过程中的热量输入,确保焊接温度的一致性和稳定性^[74]。

5 结束语

电阻焊接技术具有设备简单、成本低、适应性强等优势,是热塑性复合材料连接的重要手段,在国外已经实现了工程化应用,如 A380 机翼前缘, A320 后压力舱壁以及洁净空天计划机身上框与蒙

皮的连接等。而该技术在国内起步晚,缺乏型号牵引,相关研究多局限于实验室级别,尚未有工程应用的报道。要解决工程化问题,热塑性复合材料电阻焊接技术需要解决以下问题:

(1)需要进一步对电阻焊料和焊接工艺进行优化,获得均匀分布的温度场和压力场,提高焊接质量,避免虚焊或过焊。

(2)电阻焊接技术在实际应用中的可靠性尚不明确,有必要加强对电阻焊接试验件抗疲劳、抗腐蚀以及稳定性等方面的研究。

(3)电阻焊接技术目前多应用于小面积的焊接,若要实现工程化应用,需要突破顺序电阻焊接和连续电阻焊接等技术,并开发相关的自动化设备。

参考文献:

- [1] MURRAY R E, ROADMAN J, BEACH R, Fusion joining of thermoplastic composite wind turbine blades: lap-

- shear bond characterization[J]. *Renew Energy*, 2019, 140: 501-512.
- [2] 周冰洁, 张代军, 张英杰, 等. 高性能热塑性复合材料在航空发动机短舱上的应用[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(7): 86-91.
- ZHOU J B, ZHANG D J, ZHANG Y J, et al. Application of high performance thermoplastic composites in aero engine nacelle[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(7): 86-91.
- [3] ZHANG X, LU C, LIANG M. Preparation of thermoplastic vulcanizates based on waste crosslinked polyethylene and ground tire rubber through dynamic vulcanization[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 122(3): 2110-2120.
- [4] CHAVES F J P, DA SILVA L F M, De MOURA M. Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review[J]. *The Journal of Adhesion*, 2014, 90(12): 955-992.
- [5] BUDHE S, BANEJA M D, De BARROS S, et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017, 72: 30-42.
- [6] HOSSEIN A R, REFAH T A, MOHAMMADALI Z F A, et al. Fracture characteristics of mixed-mode toughness of dissimilar adherends cohesive and interfacial fracture[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, 34(6): 599-615.
- [7] LARSEN L, ENDRASS M, JARKA S, et al. Exploring ultrasonic and resistance welding for thermoplastic composite structures: process development and application potential[J]. *Composites Part B*, 2025, 289: 111927.
- [8] YOUSEFPOUR A, HOIJATI M, IMMARIGION J P. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2004, 17(4): 303-341.
- [9] XIONG X, WANG D, WEI J, et al. Resistance welding technology of fiber reinforced polymer composites: a review[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2021, 35(15): 1593-1619.
- [10] AHMED T J, STAVROV D, BERSEE H E N, et al. Induction welding of thermoplastic composites —an overview[J]. *Composites Part A*, 2006, 37(10): 1638-1651.
- [11] JONGBLOED B, TEUWEN J, BENEDICTUS R, et al. On differences and similarities between static and continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites[J]. *Composite Part B*, 2020, 203: 108466.
- [12] JAESCHKE P, HERZOG D, HAFERKAMP H, et al. Laser transmission welding of high-performance polymers and reinforced composites —a fundamental study[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, 29(20): 3083-3094.
- [13] PANNEERSELVAM K, ARAVINDAN S, HAQ A N. Study on resistance welding of glass fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Material and Design*, 2012, 41: 453-459.
- [14] JEC. New thermoplastic composite design concepts and their automated manufacture [EB/OL]. (2011-02-26) [2025-02-19]. https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/new-thermoplastic-composite-design-concepts-and-their-automated-manufacture/?end_use_application=aerospace&process=fiber-placement&tax_product=carbon-fiber,robots-automation-hardware.
- [15] NINO G F, AHMED T J, BERSEE H E N. Thermal NDI of resistance welded composite structures [J]. *Composites Part B*, 2009, 40: 237-248.
- [16] JEC. A full-scale A320 pressure bulkhead demonstrator JEC [EB/OL]. (2018-05-02) [2025-02-19]. https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/a-full-scale-a320-pressure-bulkhead-demonstrator/?news_type=announcement,applications&end_use_application=aerospace&tax_product=carbon-fiber,thermoplastic-resins.
- [17] JEC. New architecture for automated production of the world's largest thermoplastic aircraft fuselage demonstrated on a 1:1 scale [EB/OL]. (2024-05-07) [2025-02-19]. https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/new-architecture-for-automated-production-of-the-worlds-largest-thermoplastic-aircraft-fuselage-demonstrated-on-a-1-1-scale/?news_type=applications,process-manufacturing,product-technology&end_use_application=aerospace&process=autoclave&tax_product=carbon-fiber,other-carbon-fiber,thermoplastic-resins&exceptionaltags=sustainability.
- [18] ENDRASS M, THOME A, GADLETZ V, et al. Resistance welding of low-melt polyaryletherketone: process definition and optimization[C]//ECCM2022-Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials: Composites Meet Sustainability. Augsburg: Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie, 2022.
- [19] DLR. Welding bridge tool in operation [EB/OL]. (2023-07-18) [2025-02-19]. <https://www.dlr.de/en/latest/news/2023/03/mffd-thermoplastics-instead-of-aluminium-in-aircraft-construction/welding-bridge-tool-in-operation>.
- [20] YANG F, PITCHUMANI R. Interlaminar contact development during thermoplastic fusion bonding[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42(2): 424-438.
- [21] HOU M, FRIEDRICH K. Resistance welding of continuous glass fiber-reinforced polypropylene composites[J]. *Composites Manufacturing*, 1992, 3(3): 153-163.
- [22] HOU M, YE L, MAI Y W. An experimental study of

- resistance welding of carbon fiber fabric reinforced polyetherimide (CF fabric/PEI) composite material[J]. *Applied Composite Materials*, 1999, 6(1): 35-49.
- [23] STAVROV D, BERSEE H E N. Resistance welding of thermoplastic composites—an overview[J]. *Composites Part A*, 2005, 36: 39-54.
- [24] DUBE M, HUBERT P, YOUSEFPOUR A, et al. Resistance welding of thermoplastic composites skin/stringer joints[J]. *Composites Part A*, 2007, 38(12): 2541-2552.
- [25] TALBOT E, HUBERT B, DUBÉ M, et al. Optimization of thermoplastic composites resistance welding parameters based on transient heat transfer finite element modeling[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2015, 26(5): 699-711.
- [26] 姚鑫, 霍红宇, 安学锋, 等. 碳纤维加热元件的制备及其对热塑性复合材料电阻焊接接头性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(6): 2900-2908.
- YAO X, HOU H Y, AN X F, et al. Preparation of carbon fiber heating element and its effect on properties of resistance welded joints of thermoplastic composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2024, 41(6): 2900-2908.
- [27] 叶璐, 张代军, 李军, 等. 碳纤维增强聚芳醚酮热塑性复合材料电阻焊接工艺研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2024(8): 45-52.
- YE L, ZHANG D J, LI J, et al. Research on resistance welding technology of carbon fiber reinforced polyaryl ether ketone thermoplastic composites[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2024(8): 45-52.
- [28] DUBE M, HUBERT P, YOUSEFPOUR A, et al. Current leakage prevention in resistance welding of carbon fiber reinforced thermoplastics[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68: 1579-1587.
- [29] MA Z, XU Z, LI Z, et al. Improving the quality of resistance welded thermoplastic composite joints by applying ultrasonic[J]. *Composites Part B*, 2024, 277: 111398.
- [30] HOU M, YANG M, BEEHAG A, et al. Resistance welding of carbon fiber reinforced thermoplastic composite using alternative heating element[J]. *Composite Structures*, 1999, 47: 667-672.
- [31] AGEORGES C, YE L, HOU M. Experimental investigation of the resistance welding of thermoplastic-matrix composites part II: optimum processing window and mechanical performance[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60: 1191-1202.
- [32] SHI H, VILLEGAS I F, BERSEE H E N. A displacement-detection based approach for process monitoring and processing window definition of resistance welding of thermoplastic composites[J]. *Composites Part A*, 2015, 74: 1-9.
- [33] BASTIEN L, DON R C, GILLESPIE J J W. Processing and performance of resistance welded thermoplastic composites[C]//45th Annual Conference, Composites Institute, Session, 1990, 20: 1-9.
- [34] DUBE M, HUBERT P, GALLET J N, et al. Fatigue performance characterisation of resistance-welded thermoplastic composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68: 1759-1765.
- [35] LI X, ZHANG T, LI S, et al. The effect of cooling rate on resistance-welded CF/PEEK joints[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 12: 53-62.
- [36] SHI H, VILLEGAS I F, OCTEAU M, et al. Continuous resistance welding of thermoplastic composites: modelling of heat generation and heat transfer[J]. *Composites Part A*, 2015, 70: 16-26.
- [37] SUPPAKUL P, BANDYOPADHYAY S. The effect of weave pattern on the mode- I interlaminar fracture energy of E-glass/vinyl ester composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(5): 709717.
- [38] SHI H, VILLEGAS I F, BERSEE H E N, et al. Strength and failure modes in resistance welded thermoplastic composite joints: effect of fibre-matrix adhesion and fibre orientation[J]. *Composites Part A*, 2013, 55: 1-10.
- [39] DUBE M, HUBERT P, GALLET J N, et al. Metal mesh heating element size effect in resistance welding of thermoplastic composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2011, 46(8): 911-919.
- [40] XIONG X, ZHAO P, REN R, et al. Effect of chemical etching of resistance wire surface on the strength and failure mechanism of the resistance-welded joint of polyetherimide composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(34): 47879.
- [41] LI X, SUN M, SONG J, et al. Enhanced adhesion between PEEK and stainless-steel mesh in resistance welding of CF/PEEK composites by various surface treatments[J]. *High Performance Polymers*, 2021, 33(8): 892-904.
- [42] 王涣翔, 赵刚, 徐剑. 硅烷偶联剂改性金属加热元件提高碳纤维/聚苯硫醚热塑性复合材料电阻焊接强度[J]. *复合材料科学与工程*, 2024(5): 76-84.
- WANG H X, ZHAO G, XU J. Improvement of resistance welding strength of Carbon fiber/polyphenylene sulfide thermoplastic composites modified by silane coupling agent[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2024(5): 76-84.
- [43] ZHAO G, LI M, ZHAO Y, et al. Rotating gliding arc plasma: Innovative treatment for adhesion improvement between stainless steel heating elements and thermoplastics in resistance welding of composites[J]. *Composites Part B*, 2024, 272: 111210.
- [44] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al.

- Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [45] BAI Y, ZAHNG R, YE X, et al. Carbon nanotube bundles with tensile strength over 80 GPa[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(7): 589-595.
- [46] 时双强, 和玉光, 陈宇滨, 等. 石墨烯改性树脂基复合材料力学性能研究进展[J]. 化学研究, 2021, 32(1): 1-16.
- SHI S Q, HE Y G, CHEN Y B, et al. Research progress on mechanical properties of graphene-modified resin matrix composites[J]. Chemical Research, 2021, 32(1): 1-16.
- [47] RAFIEE M A, RAFIEE J, SRIVASTAVA I, et al. Fracture and fatigue in graphene nanocomposites[J]. Small, 2010, 6(2): 179-183.
- [48] QIN J, WANG C, WANG Y, et al. Preparation carbon nanotube-decorated carbon fibers under low pressure for epoxy-based unidirectional hierarchical composites with enhanced interlaminar shear strength[J]. Polymer Testing, 2021, 93: 106892.
- [49] 熊需海, 张忠宝, 任荣, 等. 还原氧化石墨烯对复合材料电阻焊接头强度的增强作用[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 253-258.
- XIONG X H, ZHANG Z B, REN R, et al. Effect of reduced graphene oxide on strengthening of resistance welding joints of composite materials[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 253-258.
- [50] XIONG X, ZHAO P, REN R, Enhanced resistance-welding hybrid joints of titanium alloy/thermoplastic composites using a carbon-nanotube lamina[J]. Diamond & Related Materials, 2020, 101: 107611.
- [51] ZHAO P, ZHANG Z, LI Y, et al. Resistance welding of thermoplastic composites *via* a novel carbon nanofilm implant[J]. Materials Letters, 2022, 328: 133216.
- [52] 崔旭, 赵普, 熊需海, 等. 短切纤维对复合材料焊接强度的增强作用[J]. 材料工程, 2019, 47(12): 151-156.
- CUI X, ZHAO P, XIONG X H, et al. Effect of stub fiber on welding strength of composite materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(12): 151-156.
- [53] ROHART V, LEBEL L L, DUBE M. Effects of environmental conditions on the lap shear strength of resistance-welded carbon fibre/thermoplastic composite joints[J]. Composites Part B, 2020, 198: 108239.
- [54] 王宏洋. CF/PPS 复合材料的碳纤维电阻热连接技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
- WANG H Y. Research on Carbon fiber resistance thermal connection technology of CF/PPS composites[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018.
- [55] 路鹏程, 陈栋, 王志平. 碳纤维/聚苯硫醚热塑性复合材料电阻焊接工艺[J]. 复合材料学报, 2020, 37(5): 1041-1048.
- LU P C, CHEN D, WANG Z P. Resistance welding process of carbon fiber/polyphenylene sulfide thermoplastic composites[J]. Chinese Journal of Composites, 2020, 37(5): 1041-1048.
- [56] 秦明. 热塑性聚芳醚酮类树脂基复合材料的制备及连接技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- QIN M. Study on preparation and connection technology of thermoplastic polyaryl ether ketone resin matrix composites [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [57] 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.
- [58] ZHAO P, XIONG X, LIU S, et al. Resistance welded thermoplastic composites joint strengthened *via* carbon nanotubes from flame: interface strength, mechanical properties and microstructure[J]. Materials Research Express, 2019, 6(10): 105061.
- [59] AGEORGES C, YE L, HOU M. Experimental investigation of the resistance welding of thermoplastic-matrix composites part I: heating element and heat transfer[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 1027-1039.
- [60] SUN L, YANG M, ZHANG M, et al. Synergy of carbon fiber fabric-based heating element and h-BN modified insulated film on resistance welding of thermoplastic composites[J]. Materials Letters, 2023, 349: 134685.
- [61] 姚鑫, 白钰, 安学峰, 等. 连续碳纤维增强聚醚醚酮热塑性复合材料电阻焊接加热元件材料优选研究[J]. 纤维复合材料, 2023, 40(3): 44-48.
- YAO X, BAI Y, AN X F, et al. Study on material optimization of heating element for resistance welding of continuous carbon fiber reinforced polyether ether ketone thermoplastic composite[J]. Fiber Composite Materials, 2023, 40(3): 44-48.
- [62] DE LUCA H G, ANTHONY D B, GREENHALGH E S, et al. Piezoresistive structural composites reinforced by carbon nanotube-grafted quartz fibers[J]. Composites Science and Technology, 2020, 198: 108275.
- [63] DUONGTHIPTHEWA A, SU Y, ZHOU L. Electrical conductivity and mechanical property improvement by low temperature carbon nanotube growth on carbon fiber fabric with nanofiller incorporation[J]. Composites Part B, 2020, 182: 107581.
- [64] LI L, LIU W, YANG F, et al. Interfacial reinforcement of hybrid composite by electrophoretic deposition for vertically aligned carbon nanotubes on carbon fiber[J]. Composites Science and Technology, 2020, 187: 107946.
- [65] TANAKA K, NISHIKAWA T, AOTO K, et al. Effect of carbon nanotube deposition time to the surface of carbon

- fibers on flexural strength of resistance welded carbon fiber reinforced thermoplastics using carbon nanotube grafted carbon fiber as heating element[J]. *Journal of Composites Science*, 2019, 3(1): 9-20.
- [66] TANAKA K, AOTO K, KATAYAMA T, et al. Effects of carbon nanotube deposition time to carbon fiber on tensile lap-shear strength of resistance welded CFRTP[J]. *Journal of the Society of Materials Science*, 2016, 65: 727-732.
- [67] XU X, ZHANG Y, JIANAG J, et al. *In-situ* curing of glass fiber reinforced polymer composites via resistive heating of carbon nanotube films[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 149: 20-27.
- [68] ZHANG Q, YU Y, YANG K, et al. Mechanically robust and electrically conductive graphene-paper/ glass-fibers/ epoxy composites for stimuli-responsive sensors and joule heating deicers[J]. *Carbon*, 2017, 124: 296-307.
- [69] TARFAOUI M, EL MOUMEN A, BOEHLE M, et al. Self-heating and deicing epoxy/glass fiber based carbon nanotubes buckypaper composite[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(2): 1351-1362.
- [70] 张代军, 叶璐, 王成博, 等. 一种基于碳纳米管薄膜的热塑性复合材料焊接方法: CN202210807474.1 [P]. 2024-06-18.
- ZHANG D J, YE L, WANG C B, et al. A welding method for thermoplastic composites based on carbon nanotube films: CN202210807474.1 [P]. 2024-06-18.
- [71] BRASSARD D, DUBE M, TAVARES J R, et al. Resistance welding of thermoplastic composites with a nanocomposite heating element[J]. *Composites Part B*, 2019, 165: 779-784.
- [72] LAMBING C L T, ANDERSEN S M, HOLMES S, et al. Apparatus and method for resistance welding. US5225025 [P]. 1993-07-06.
- [73] MCKNIGHT S H, HOLMES S T, GILLESPIE J W, et al. Scaling issues in resistance welded thermoplastic composite joints[J]. *Advances in Polymer Technology*, 1997, 16(4): 279-295.
- [74] ZAMMAR I A, MANTAGH I, HUQ M S, et al. Intelligent thermal control of resistance welding of fiberglass laminates for automated manufacturing[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(3): 1069-1078.

收稿日期: 2025-04-15; 录用日期: 2025-04-30

基金项目: 重点研发计划项目(2022YFB3709403); 工信部民机专项(MJZ1-11N22); 稳定支持项目(KZ0C230599)

通讯作者: 张代军(1985—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为树脂基复合材料制备及其应用技术, 联系地址: 北京市海淀区温泉镇环山村8号(100095), E-mail: 15810534483@139.com

(本文责编: 张 琴)