http://pmse.scu.edu.cn

感应加热元件对热塑性复合材料感应焊接接头性能的影响

路鹏程, 安俊龙, 祖浩轩, 苏景新
(中国民航大学 航空工程学院 天津市民用航空器适航与维修重点实验室,天津 300300)

摘要:针对航空结构用碳纤维增强聚苯硫醚热塑性复合材料(CF/PPS)结构连接问题,采用热压法制备了 SS-250,SS-300 和 SS-3253 种金属丝网与热塑性树脂复合感应加热元件,并对其温度场与产热特性进行了测试分析;同时,采用感应焊接对 CF/PPS 层板进行了焊接,通过单搭接剪切强度测试与断口形貌分析,探究了感应加热元件对焊接接头性能的影响。结果表明,感应加热元件中金属丝网孔径越小,产热效率越高,SS-325 热效率最佳(平均升温速率可达 15 ℃/s);采用 SS-300 感应元件焊接的接头剪切强度最大,为 19.95 MPa,单搭接剪切失效模式为 CF/PPS 层板和感应加热元件撕裂混合失效断裂;SS-250 焊接接头强度次之,为 18.07 MPa;SS-325 焊接接头强度为 16.01 MPa,失效模式转变为感应加热元件与 CF/PPS 层板间界面脱黏失效。

关键词:感应加热元件;热塑性复合材料;感应焊接;失效模式
中图分类号:TB332 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-7555(2025)09-0001-09

热塑性复合材料具有可塑性强、再加工性好、易于成型、生产周期短和可焊接性好等特点,在航空航天、国防、能源、电子和汽车工业领域得到广泛应用[1,2]。其中以聚苯硫醚(PPS)、聚醚醚酮(PEEK)和聚醚酰亚胺(PEI)等为基体的热塑性复合材料(Thermoplastic composites,TPC)已经应用于制备加强筋、角片、机身壁板和方向舵等飞机结构[3,4]。随着 TPC 在航空领域的应用,不可避免地会遇到将各零件组装成整体部件的连接问题。复合材料结构传统的连接技术有机械连接和胶接。机械连接是一种在航空领域中常见的连接技术,具有拆装方便、受环境影响小与可靠性高等优点,但钻孔、垫片和紧固件安装会造成一些缺陷,如应力集中、热膨胀系数不匹配和电化学腐蚀等[5]。胶接虽可以避免应力集中,但需要对母材表面进行大量处理,并且胶黏剂固化时间长,还容易受环境影响[6,7]。相较于传统连接技术,基于热塑性树脂可塑性强的特点,衍生的 TPC 焊接具有应力集中小、成本低、周期时间短和表面处理少等优点,有利于提高生产效率,降低生产成本。超声波焊接、感应焊接和电阻焊接 3 种焊接技术是在航空领域中常用的 TPC 焊接技术[8,9]。其中感应焊接以其效率高、灵活性强和发热精准等特点被认为是最具发展前途的 TPC 焊接技术之一[10]。

感应加热元件作为感应焊接的热源,其加热效率是影响感应焊接接头质量的关键因素。金属丝网具有升温速率快,产热均匀,制备工艺简单,经济成本低等优点,成为 TPC 感应焊接常用的感应加热元件。目前,国内外学者对采用金属丝网作为感应加热元件的 TPC 焊接进行了一些研究。韩志勇等[11]使用不锈钢网感应加热元件研究了碳纤维增强聚苯硫醚热塑性复合材料(Carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide, CF/PPS)层合板的感应焊接工艺参数对焊接接头性能的影响机制,并获得了最佳工艺参数。Mattheß 等[12]分别以碳纤维织物和金属丝网为感应加热元件进行了感应焊接试验,结果显示,金属丝网比碳纤维织物的加热速率快,界面温

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0151
收稿日期: 2024-07-26
基金项目: 天津市教委科研计划(2021KJ051); 国家重点研发计划(2023YFB4302400)
通讯联系人: 路鹏程, 主要从事复合材料研究, E-mail: pclu@cauc.edu.cn

度分布更均匀。Wang 等[13]以不锈钢金属丝网为感应加热元件,进行了 CF/PEEK 层板的焊接,发现不锈钢金属丝网具有较高的热分散性,有利于焊缝区域的温度均匀分布。Ahmed 等[5]研究了以金属网作为感应加热元件的感应焊接工艺,结果表明,焊接前在金属网两面添加纯树脂薄膜,有利于增加焊缝处的树脂含量,减少孔隙等缺陷,提高焊接质量。

近年来关于 TPC 植入金属丝网感应加热元件焊接报道中指出,当金属丝网作为感应加热元件时,焊缝容易出现孔隙和界面结合强度低等共性问题,呈现出较低的焊接强度。并且相关研究主要集中于金属丝网产热特性和焊接工艺开发,关于金属丝网参数(丝径、孔径、厚度等)对 TPC 感应焊接接头性能的影响研究较少。因此,本文针对航空结构用 CF/PPS 层板,采用热压法制备了不锈钢金属丝网/PPS 感应加热元件,对 CF/PPS 层板进行感应焊接,探究了不同感应加热元件对 CF/PPS 焊接接头性能的影响,分析了焊接试样失效模式。

1 实验部分

1.1 实验原料

AS4 3K 5HS CF 织物/PPS 树脂预浸料:加拿大 Barrday 公司,CF 体积分数为 54%,如 Fig.1 所示;PPS 树脂薄膜:日本东丽公司,厚度为 0.1 mm,其 DSC 分析结果如 Fig.2 所示,熔融峰值为 286.54 ℃,熔融温度(T_m)在 269.84~295.51 ℃范围内;304 平纹编织不锈钢金属丝网:安平县瀚澳金属丝网制品有限公司,250 目(丝直径 0.04 mm,孔径 0.060 mm)、300 目(丝直径 0.04 mm,孔径 0.049 mm)、325 目(丝直径 0.04 mm,孔径 0.038 mm)。

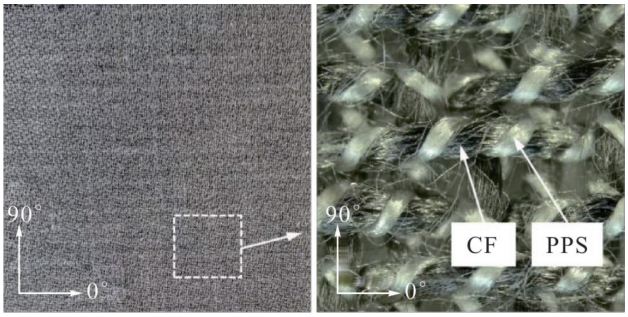


Fig. 1 Carbon fiber/polyphenylene sulfide (CF/PPS) mixed woven fabric

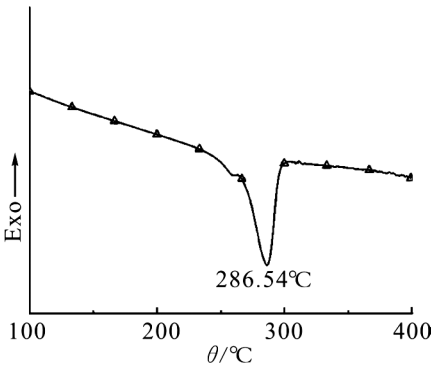


Fig. 2 DSC curve of PPS resin film

1.2 实验过程

1.2.1 CF/PPS 层板制备:CF/PPS 预浸料铺层顺序为[(0,90)$_6$],按照铺层顺序依次放入模具,采用上海齐才液压机械有限公司生产的 XLB-660.660.3 型平板硫化机制备 CF/PPS 层板。热压工艺:温度为(300±10) ℃,保温时间为 30 min,压力为 2 MPa,保压自然冷却至室温。将 CF/PPS 层板机加工为 100 mm(0°方向)×80 mm(90°方向)的试板。

1.2.2 感应加热元件制备:感应加热元件作为感应焊接的热源,其影响着焊接接头性能。在制备感应加热元件前,用丙酮擦洗不锈钢金属丝网,去除表面污渍。之后分别将 250 目、300 目和 325 目不锈钢金

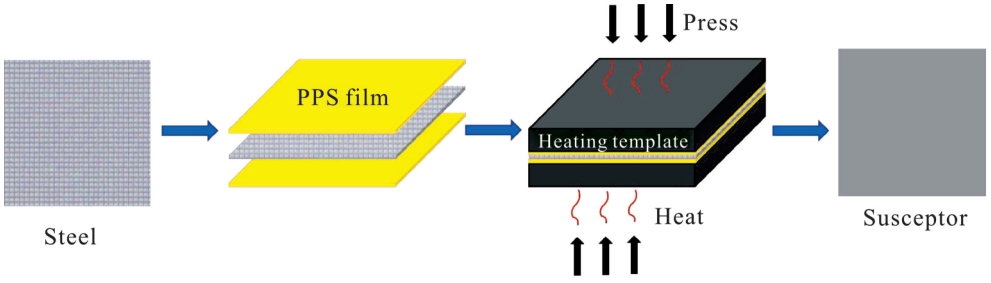


Fig. 3 Preparation flow chart of heating element

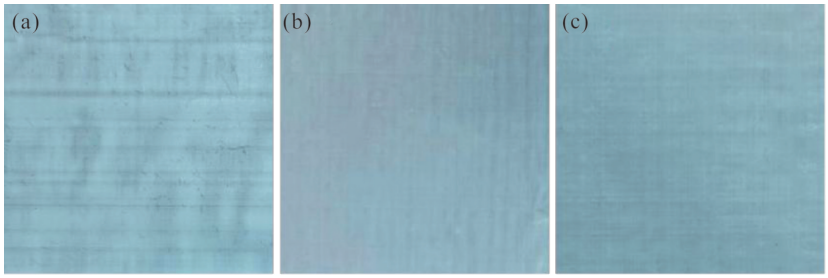


Fig. 4　Actual picture of the induction heating elements: (a) SS-250; (b) SS-300; (c) SS-325

属丝网与 PPS 树脂膜通过平板模具热压制备成金属丝网/PPS 感应加热元件,记为 SS-250,SS-300 和 SS-325,厚度为 0.10 mm,制备流程如 Fig.3 所示。该感应加热元件由单层不锈钢金属丝网与 4 层 PPS 树脂薄膜热压而成。热压工艺参数:温度 280 ℃,成型压力 2 MPa,保温时间 20 min,保压自然冷却至室温。Fig.4 和 Fig.5 分别为 3 种感应加热元件实物图和截面微观形貌。宏观观察显示,3 种感应加热元件表面树脂分布均匀;微观观察则表明金属丝网与树脂结合紧密,界面无空洞或孔隙等缺陷。

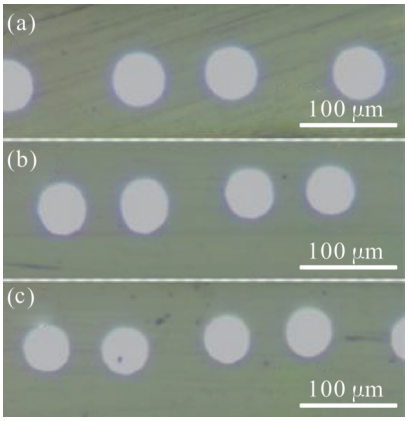


Fig. 5　Cross-section images of the induction heating elements: (a) SS-250; (b) SS-300; (c) SS-325

1.2.3　CF/PPS 层板感应焊接:采用中国民航大学自制的热塑性复合材料焊接设备(CAUC-CW100)进行 CF/PPS 层板的连续感应焊接实验。选取单匝圆形线圈作为感应线圈(线圈粗细 6 mm,直径 30mm)。在焊接实验前,采用无纺布蘸取丙酮擦拭待焊接试样并置于 60 ℃真空干燥箱烘干,去除水分、焊接试样表面油污和杂质等,避免对焊接接头造成不良影响。CF/PPS 感应焊接试样尺寸如 Fig.7 所示,搭接区域尺寸为 80 mm×25 mm。将感应加热元件剪裁为 100 mm×25 mm,比搭接区域略大,然后将感应加热元件放置于 2 块 CF/PPS 层板中间的搭接区域并用高温胶带在两端固定,进行连续感应焊接。焊接工艺参数为:电流频率 555 kHz,焊接温度 300 ℃,线圈移动速率 0.17 mm/s,焊接压力 0.75 MPa,保压时间 270 s。

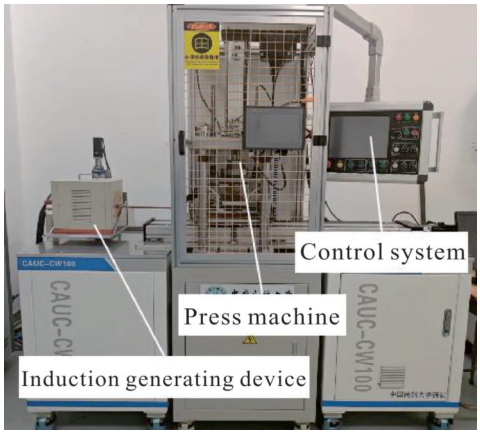


Fig. 6　Welding equipment for thermoplastic composite material

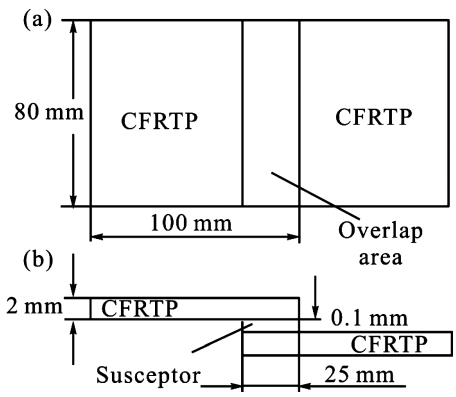


Fig. 7　Size of CF/PPS induction welded sample: (a) top view; (b) front view

1.3　测试与表征

1.3.1　感应加热元件产热分析:在相对湿度 50%、温度 20 ℃环境下,采用红外热成像仪(Fotric-628CH-L25,上海热像科技股份有限公司)记录 3 种感应加热元件在感应加热过程中 40~300 ℃温度场的变化,与测量对象距离为 27 cm。

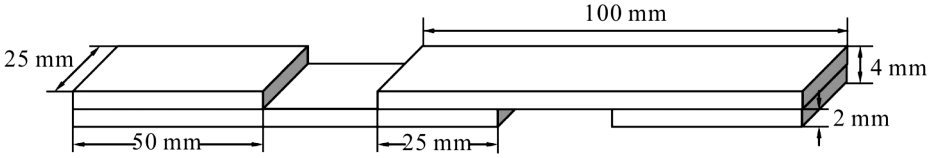


Fig. 8 Single lap shear specimen size of CF/PPS composite

1.3.2 化学结构分析：使用傅里叶变换红外光谱仪（Nicolet-10，美国赛默飞世尔科技公司）对纯 PPS 树脂膜和感应加热元件中 PPS 树脂基体的化学结构进行测试分析。测试范围为 400~4000 cm^{-1}。

1.3.3 超声波 C 扫描无损检测：使用超声探伤仪（Epoch600，日本奥林巴斯公司）对 CF/PPS 层板和单搭接试样焊接接头进行无损检测，观察焊接接头有无缺陷。

1.3.4 力学性能测试：根据 ASTM D5868-2014 单搭接剪切测试标准切割焊接试样[14]，如 Fig.8 所示，采用电子万能材料试验机（Instron-5982，美国英斯特朗公司）对焊接试样进行单搭接剪切测试。加载速度为 1.3 mm/min，每组试验件数量为 3 个，单搭接剪切强度计算公式如式(1)所示

$$\mathrm{SLSS}=\frac{F_{\max}}{L\times b} \tag{1}$$

式中：SLSS——单搭接剪切强度，MPa；L——搭接长度，mm；b——搭接宽度，mm；$F_{\max}$——最大拉力，N。

1.3.5 形貌表征：采用场发射扫描电子显微镜（ZEISS-Sigma300，德国卡尔·蔡司股份公司）观察 CF/PPS 层板焊接接头截面的微观形貌，同时对焊接接头的剪切断口进行观察和分析。

2 结果与讨论

2.1 感应加热元件产热分析

感应加热元件的产热量和热效率影响着焊缝最终达到的温度、焊缝温度的均匀性和树脂熔融状态，关乎着焊接接头质量。因此，采用红外热成像仪记录了在感应加热过程中 3 种感应加热元件的温度场分布情况，对感应加热元件的产热情况进行了研究。在感应加热过程中，3 种感应加热元件的温度-时间曲线如 Fig.9 所示。通过对比可以发现，在 3 种感应加热元件中，SS-325 达到热塑性树脂熔融温度（300 ℃）所需时间最短（17 s），平均升温速率为 15 ℃/s；其次为 SS-300，其达 300 ℃所需时间为 33 s，平均升温速率为 8 ℃/s；SS-250 达到 300 ℃所需时间最长（41 s），平均升温速率为 6 ℃/s。在感应加热过程中，感应涡流产生的焦耳热是主要的产热机制，随着金属丝网孔径的减小，总的电阻路径增多，导致更多的焦耳热生成，进而加速升温，因此，SS-325 的热效率最高。

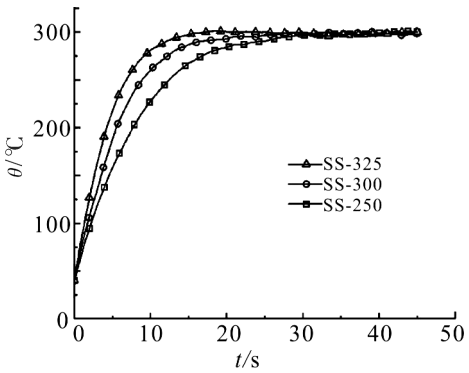


Fig. 9 Temperature-time curves of the three induction heating elements

在感应焊接中，3 种感应加热元件产生的温度场分布与线圈形状相同，线圈中心位置均存在小的圆形低温区，如 Fig.10 所示。为了深入探究感应加热元件温度场的温度分布情况，在 3 种感应加热元件的 300 ℃稳态温度场中，沿 X 轴方向设置温度测量线 Li1。温度测量线 Li1 上的温度分布曲线呈“M”型，如 Fig.11 所示。这是因为单匝圆形线圈的磁场主要集中在其导线周围，越靠近感应线圈的区域感应磁场越密集，感应涡流越大，温度越高[10]。因此，该圆型温度场从边缘到圆心温度呈先上升后下降的趋势。另外，在 Fig.11 中还可以发现，在感应加热过程中，SS-325 以最低的焊接功率（5412 W）达到 300 ℃，并且其温度曲线的峰谷温差最小，仅为 20 ℃；相比之下，SS-300 达到 300 ℃所需焊接功率为 5500 W，其温度曲线峰谷的温差为 26 ℃；而 SS-250 达到 300 ℃所需焊接功率最大，为 5566 W，其温度曲线峰谷的温差最大，达到 38 ℃。这说明在 3 种感应加热元件中，SS-325 不仅产热量最高，而且温度分布最均匀。

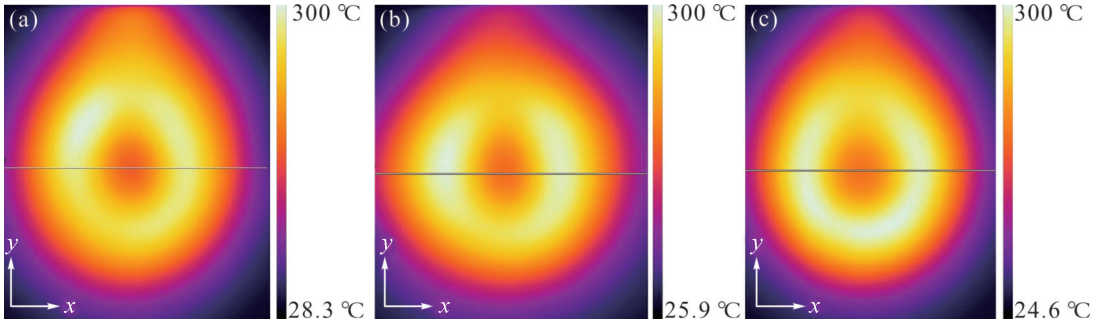


Fig. 10　Temperature distribution of different induction heating elements with a welding temperature of 300 ℃: (a) SS-250; (b) SS-300; (c) SS-325

此外,感应加热元件的圆型温度场中心的圆形低温区温度低于 PPS 树脂熔融峰温度(286.54 ℃),可能会导致焊缝树脂熔融不完全,不能形成有效连接。为了解决这种情况,可以均匀移动感应线圈,通过连续感应焊接方式实现 CF/PPS 层板的有效连接。

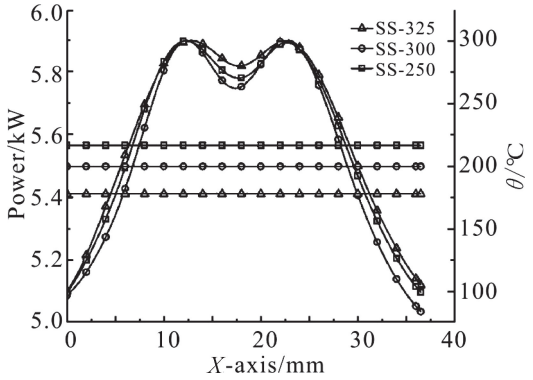


Fig. 11　Temperature distribution profiles of different induction heating elements along the temperature measurement line Li1

为了探究焊接温度为 300 ℃时焊缝处感应加热元件 PPS 树脂基体是否发生热降解变性,对纯 PPS 树脂和感应加热后的感应加热元件 PPS 树脂基体的化学结构进行测试分析,红外光谱如 Fig.12 所示。图中 3065 cm^{-1} 处组峰是 C—H 伸缩振动峰,1574 cm^{-1},1470 cm^{-1} 和 1390 cm^{-1} 为苯环 C—C 面内伸缩振动峰,1295 cm^{-1} 处是 C—CH 面变形振动吸收峰,1100 cm^{-1} 处是 C—S 面内伸缩振动吸收峰,961 cm^{-1} 处是苯环 C—H 面外变形振动峰[15],803 cm^{-1},742 cm^{-1} 和 706 cm^{-1} 是对位二取代苯的 C—H 吸收峰。苯环中 C—C 的伸缩振动吸收通常在 1600 cm^{-1} 处,而在图中,吸收峰向低波数方向移动,可能是硫原子与苯环上碳原子间相互作用键合,并存在一定程度双键化的结果。从图中可以看出,纯 PPS 树脂和 3 种感应加热元件中 PPS 树脂基体红外光谱图主要官能团无明显变化,并且特征峰的强弱即相应官能团浓度相差不大,这表明焊接温度为 300 ℃时,感应加热元件中 PPS 树脂基体没有发生热降解,在该温度能够形成性能良好的 CF/PPS 焊接接头。

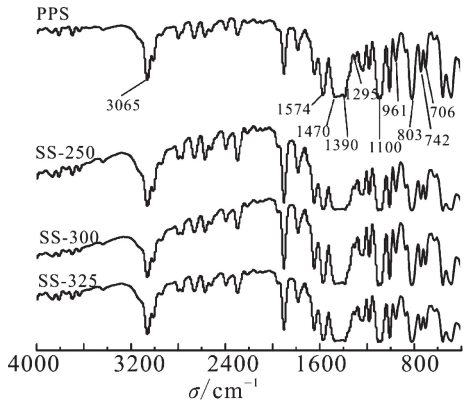


Fig. 12　Infrared spectra of PPS resin and induction heating element

2.2　感应加热元件对焊接性能的影响

为了探究不同感应加热元件对焊接接头力学性能的影响,分别采用 3 种感应加热元件进行感应焊接试验。由于焊缝质量在整个焊缝区域普遍不均匀,因此,使用电子显微镜观察焊缝截面。Fig.13 为 3 种感应加热元件在焊接温度 300 ℃、线圈移动速率 0.17 mm/s、焊接压力 0.75 MPa 的焊接工艺条件下焊接接头截面 SEM 图像。从 Fig.13 中可以观察到,接头中感应加热元件与接触的 CF/PPS 层板结合紧密,焊缝没有空隙和孔洞等缺陷。此外,还可以观察到 3 种焊接接头焊缝宽度不相同,SS-325 接头焊缝宽度最大(0.118 mm),其次为 SS-300 接头(0.113 mm),

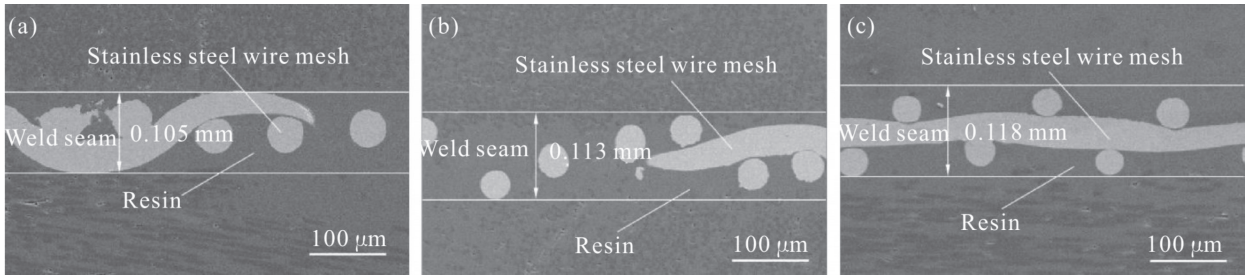


Fig. 13 Cross-section images of CF/PPS welded joints: (a) SS-250; (b) SS-300; (c) SS-325

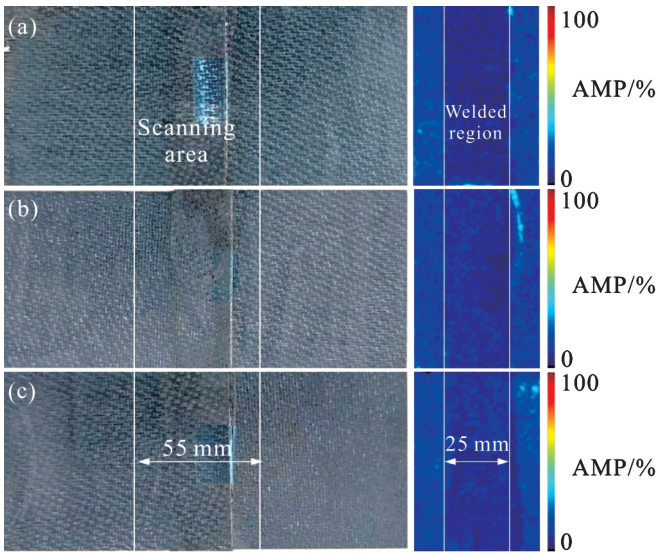


Fig. 14 Ultrasonic C-scan picture of CF/PPS welded joints: (a) SS-250; (b) SS-300; (c) SS-325

SS-250 接头焊缝宽度最小(0.105 mm)。感应加热元件热传导速率越快,其周围树脂熔融范围越大,焊缝宽度越大,所以 SS-325 接头的焊缝宽度最大。为了进一步确定单搭接试样在焊缝处是否存在缺陷,对焊缝进行超声波 C 扫描,扫描结果如 Fig.14 所示。在超声波 C 扫描图中,焊缝处几乎观察不到黑色区域,即缺陷,表明在焊接接头中感应加热元件中 PPS 树脂与层板 PPS 基体充分熔融、扩散和结合,实现了 CF/PPS 层板的有效连接。

焊缝的品质在很大程度上依赖于感应加热元件。不锈钢金属丝网/PPS 感应加热元件不仅增加了焊缝处的树脂含量,有效地填充了金属丝网之间的空隙,减少了孔洞和间隙等缺陷,同时还缩短了树脂热熔流动的距离,提升了树脂对金属丝网的浸润性。

3 种感应加热元件的 CF/PPS 感应焊接接头剪切强度如 Fig.15 所示。感应加热元件 SS-300 接头的剪切强度最高,剪切强度为 19.95 MPa,其次为 SS-250(剪切强度为 18.07 MPa),SS-325 接头的剪切强度最低(16.01 MPa)。感应加热元件中金属丝网孔径越小,金属丝网开孔面积越小,高分子聚合物结合空间越小,聚合物所承受的剪切力减小,接头的剪切性能越差[16,17],因此,SS-325 接头剪切性能最差。焊接接头的剪切性能还受焊接界面温度分布的影响。

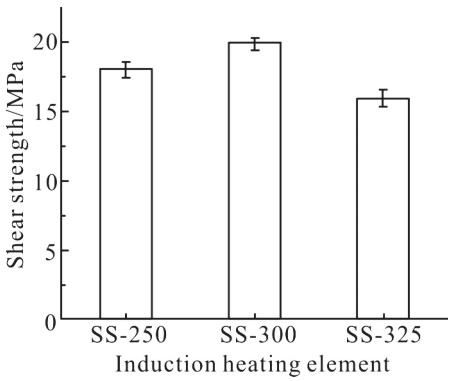


Fig. 15 Shear strength of CF/PPS welded joints for different induction heating elements

感应加热元件温度分布越均匀,高分子聚合物之间越容易发生扩散和交联,接头的剪切性能越强,因此,SS-250 接头的剪切性能比 SS-300 接头差。

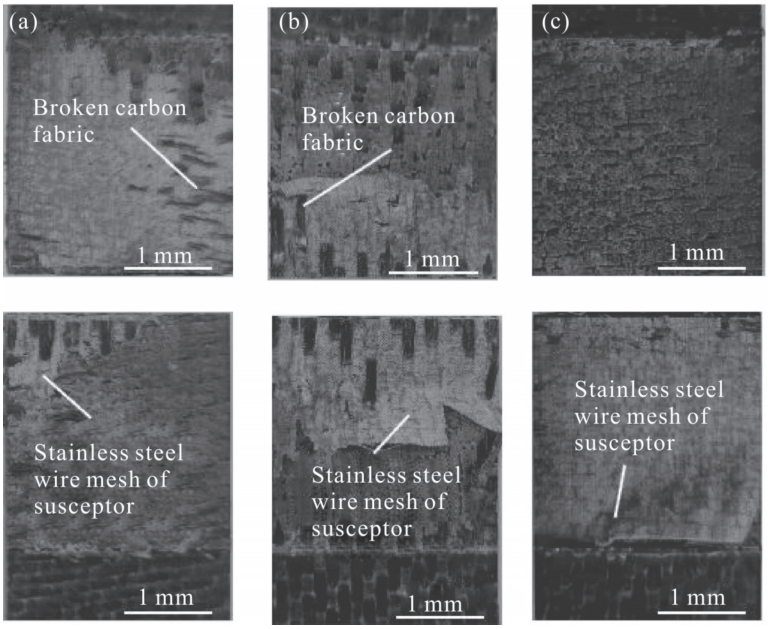


Fig. 16　Shear fracture morphology of CF/PPS composite induction welding single lap: (a) SS-250; (b) SS-300; (c) SS-325

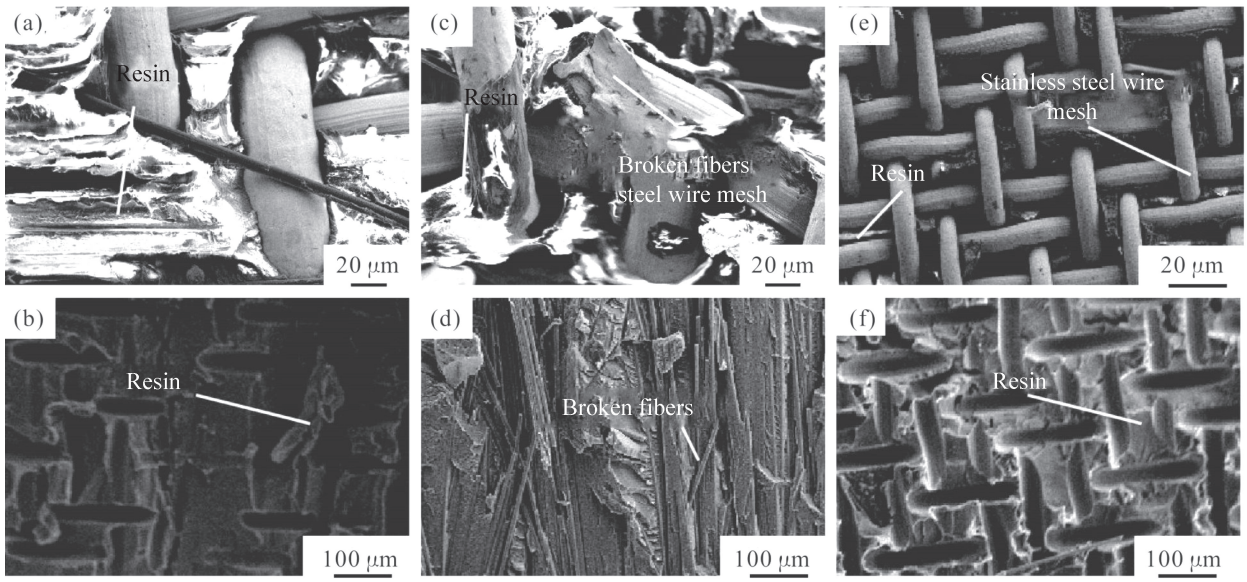


Fig. 17　SEM images of welded joint fracture of induction heating element: (a, b) SS-250; (c, d) SS-300; (e, f) SS-325

2.3　焊接断口分析

Fig.16 和 Fig.17 分别为 3 种感应加热元件的 CF/PPS 焊接接头宏观和微观剪切断口形貌。SS-250 接头断口处仅小部分不锈钢金属丝网断裂,不锈钢金属丝网保存相对完整(Fig.16(a)),在其表面附着较多的树脂(Fig.17(a)),另一侧对应的位置树脂基体出现破碎和塑性变形(Fig.17(b)),表明 SS-250 接头的主要失效模式是感应加热元件与 CF/PPS 层板之间树脂断裂。SS-300 接头剪切断口处不锈钢金属丝网断裂,其上还附着焊接母材表面撕脱的纤维(Fig.16(b)),表明 SS-300 接头失效模式是 CF/PPS 层板和感应加热元件撕裂混合失效断裂[18]。此外,

断裂的不锈钢金属丝网表面附着少量 PPS 树脂(Fig.17(c)),另一侧对应的位置母材表层碳纤维拔出和断裂(Fig.17(d)),表明焊接接头中不锈钢金属丝网在剪切力作用时增强了焊缝,同时也表明,在焊接界面处树脂充分熔融并扩散缠结,树脂对不锈钢金属丝网充分浸渍,感应加热元件与母材界面结合良好。SS-325 接头剪切断口处不锈钢金属丝网保存完整,没有发生破坏(Fig.16(c)),其表面几乎没有附着 PPS 树脂,出现明显的界面脱黏现象(Fig.17(e)),另一侧对应的位置树脂基体出现凹坑(Fig.17(f)),表明感应加热元件与 CF/PPS 层板间界面脱黏是焊接接头主要的失效模式。随着金属丝网孔径减小,焊接界面树脂流动空间减小,树脂承受的剪切力减小,树脂与不锈钢金属丝网结合界面受力增大,焊接接头剪切性能变差,SS-325 焊接接头断口出现界面剥离的现象。

3 结论

本文制备了 3 种不锈钢金属丝网/PPS 感应加热元件,实现了 CF/PPS 层板的高质量焊接,探究了不同感应加热元件对焊接接头剪切性能的影响,对植入金属丝网的热塑性复合材料感应焊接技术的研究和应用具有参考意义。

(1)不锈钢金属丝网/PPS 感应加热元件不仅加热速率快,而且焊缝处的树脂含量高,减少了孔隙等缺陷,为改善焊接质量提供了一个新思路。

(2)在 3 种感应加热元件中,随着金属丝网孔径的减小,感应加热元件的产热速率增加,且温度分布更均匀,SS-325 产热性能最优(平均升温速率 15 ℃/s);在感应焊接中,3 种感应加热元件产生的温度场分布与线圈形状相同,线圈中心位置均存在小的圆形低温区,导致线圈中心处 PPS 树脂不能完全熔融,而采用连续感应焊接则可以使焊接区域树脂完全熔融。

(3)在 3 种感应焊接接头中,SS-300 接头剪切强度最高(19.95 MPa),失效模式为 CF/PPS 层板和感应加热元件撕裂混合失效断裂;SS-250 焊接接头强度次之,为 18.07 MPa;SS-325 焊接接头强度为 16.01 MPa,失效模式转变为感应加热元件与 CF/PPS 层板间界面脱黏失效。

参考文献:

[1] Ozturk F, Cobanoglu M, Ece R E. Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2024: 37.

[2] Vaidya U K, Chawla K K. Processing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. International Materials Reviews, 2008, 53: 185-218.

[3] 马全胜, 李俊含, 田思饾. 热塑性复合材料的成型工艺及其在航空器中的应用[J]. 化工新型材料, 2022, 50(6): 263-266.
Ma Q S, Li J H, Tian S Q. Forming technology of thermoplastic composite its application in aircraft[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(6): 263-266.

[4] 罗云烽, 姚佳楠. 高性能热塑性复合材料在民用航空领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2021, 64(16): 93-102.
Luo Y F, Yao J N. Application of high performance thermoplastic composites in civil aviation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(16): 93-102.

[5] Ahmed T J, Stavrov D, Bersee H E N, *et al*. Induction welding of thermoplastic composites-an overview[J]. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, 2006, 37: 1638-1651.

[6] Chen C, Zhang W, Li Y, *et al*. The influence of moisture absorption-drying of composite materials on the bonding performance of the joints[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2022, 308: 2200463.

[7] Modi V, Bandaru A K, Ramaswamy K, *et al*. Repair of impacted thermoplastic composite laminates using induction welding[J]. Polymers, 2023, 15: 3238.

[8] Reis J P, De M M, Samborski S. Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: a review[J]. Materials, 2020, 13: 5832.

[9] 苏景新, 卞文熙, 路鹏程. 热塑性复合材料连接技术综述[J]. 中国塑料工业, 2022, 50(7): 17-25.
Su J X, Bian W X, Lu P C. A review of joining technology for thermoplastic composites[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(7): 17-25.

[10] 任荣, 李文强, 陈浩, 等. 热塑性复合材料感应植入焊技术研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(7): 22-32.
Ren R, Li W Q, Chen H, *et al*. Research progress in induction implant welding of thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(7): 22-32.

[11] 韩志勇, 陈栋, 路鹏程. 碳纤维增强聚苯硫醚复合材料感应焊接研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(11): 134-140.
Han Z Y, Chen D, Lu P C. Study on induction welding of carbon fiber reinforced polyphenylenesulfide composites[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(11): 134-140.

[12] Mattheß D, Landgrebe D, Drossel W G. Inductive heating of glass fibre-reinforced thermoplastics using fibre-and wire-shaped

stainless steel susceptors[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2016, 30: 67-87.

[13] 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 and Science, 2020, 60: 2908-2917.

[14] American Society for Testing and Materials. ASTM D5868—01, Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International, 2014.

[15] 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 P C, Li Z X, Qiu Y P, *et al*. Effect of hygrothermal environment on the performance on properties of induction welding joint of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide laminate[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 38(9): 2807-2813.

[16] Gouin O'S haughnessey P, Dubé 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: 2895-2910.

[17] Dubé 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: 911-919.

[18] 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, Huo H Y, An X F, *et al*. Preparation of carbon fiber heating elements and their effects on the properties of resistance welding joints in thermoplastic composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 2024, 41(6): 2900-2908.

Effect of Induction Heating Elements on the Properties of Induction Welded Joints of Thermoplastic Composites

Pengcheng Lu, Junlong An, Haoxuan Zu, Jingxin Su

(*Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

ABSTRACT: In response to the structural connection problem of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide thermoplastic composites for aerospace structure, SS-250, SS-300 and SS-325 composite induction heating elements with metal wire mesh and thermoplastic resin were prepared by hot pressing method, and their temperature field and heat production characteristics were measured and analyzed. At the same time, the CF/PPS laminates were welded by induction welding, and the influence of induction heating elements on the properties of welded joints was investigated by single lap shear strength test and fracture morphology analysis. The results show that the smaller the diameter of wire mesh in the induction heating element, the higher the heat production efficiency, and the thermal efficiency of SS-325 is the best (average heating rate can reach 15 ℃/s). The shear strength of the joint welded with SS-300 induction element is 19.95 MPa, and the shear failure mode of the single lap joint is CF/PPS laminates and induction heating element tear and mixed failure fracture. The strength of SS-250 welded joint is 18.07 MPa; the strength of the SS-325 welded joint is 16.01 MPa, and the failure mode changes to the interface disbonding failure between the induction heating element and the CF/PPS laminates.

Keywords: induction heating elements; thermoplastic composite; induction welding; failure mode1