

【航空科学与工程研究】

航空复合材料电磁感应焊接强度试验研究

苏 洲¹, 黄晓明², 陈中傲¹, 于立国³, 游文涛²

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001;

2. 滨州学院 机电工程学院, 山东 滨州 256603;

3. 山东中恒景新碳纤维科技发展有限公司 生产部, 山东 德州 251100)

摘 要:为分析航空复合材料电磁感应焊接时焊接参数对层合板搭接接头力学性能的影响, 探究不同焊接功率、焊接时间、焊接压力对碳纤维增强复合材料层合板焊接强度的影响规律, 进行了航空复合材料电磁焊接强度试验。首先制备碳纤维复合材料层合板, 设计三因素四水平正交试验, 通过拉伸试验机获取焊接强度试验数据, 确定最优电磁焊接组合参数; 其次分别对三种焊接参数进行试验, 分析不同焊接参数对碳纤维复合材料层合板焊接强度的变化规律。结果表明: 焊接最优组合参数为焊接功率 3.0 kW、焊接时间 10 min、焊接压力 1.0 MPa; 对焊接强度影响程度最大的因素为焊接功率, 影响程度最小的因素为焊接压力; 当焊接功率为 2.5 kW、3.0 kW, 且焊接时间大于 10 min 时, 随焊接时间增大, 焊接强度逐渐减小。

关键词:航空复合材料; 焊接参数; 层合板; 正交试验

中图分类号: TG 44 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.04.003

与传统金属材料相比, 碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)因其质量轻、比强度高、耐疲劳性优、可设计性强等材料性能, 在航空制造业有着广泛的应用, 例如, 飞机前机身部段采用复合材料结构, 相比金属结构可减轻质量 31.5%, 减少紧固件 61.3%^[1-2]。CFRP 的应用促进了飞机整体化结构设计的发展, 降低了飞机重量^[3-4]。CFRP 常规机械连接方式有螺栓连接及铆接等, 但该类连接方式会产生应力集中现象, 降低连接的强度^[5]。另一种连接方式是胶接连接, 胶接有着应力分布均匀、质量轻、不占用装配空间和保持结构完整性等优点, 因此胶接成为 CFRP 连接的研究热点^[6]。胶接时使用的胶接剂在高温时熔化, 胶接剂浸入 CFRP 层合板, 低温时凝固, 完成 CFRP 层合板的胶接^[7]。此连接方式可以通过感应焊接完成, 感应焊接与电阻焊、摩擦焊、激光焊等焊接技术相比, 具有焊接速度快, 焊接过程可逆, 易调节焊接功率等优势^[8-9], 所以研究航空 CFRP 层合板感应焊接技术对推动其在航空制造和装配应用中有重大意义。

国内外学者对 CFRP 层合板的连接力学性能进行了深入研究。王云飞等^[10]制备了不同厚度的碳纤维感应元件, 探究感应元件厚度对接头强度的影响, 研究表明随着感应元件厚度的增加, 层合板搭接接头的连接质量与力学性能逐渐衰减。毛振刚等^[11]通过改变 CFRP 层合板的铺层方式研究铺层方式对搭接性能的影响, 结果表明采用 $[0_3/90_3]_2$ 铺层的层合板胶接结构的搭接剪切强度最大。王家锋等^[12]为了防止电磁感应焊接时碳纤维表面过热影响焊接表面质量, 在焊接区域放置导热板, 结果表明, 导热板散

收稿日期: 2023-02-22

第一作者简介: 苏 洲(1998—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事航空复合材料电磁感应焊接研究。

E-mail: 2442832850@qq.com

热性能优异,可以防止 CFRP 层合板焊接表面的损伤,但会延长焊接时间。Lionetto 等^[13]为提高焊接区域温度均匀性,设计使用 Double-D 型线圈进行焊接,测得的最大剪切强度为 30.1 MPa。Tijs 等^[14]通过对比焊缝损伤简化模型与板层物理失效高保真模型,认为后者能够高精度地预测焊接接头的破坏形式。

目前,国内外学者对 CFRP 层合板的铺层方式、胶接剂厚度、焊接质量等研究较多,对电磁感应焊接时的工艺参数研究较少,对感应焊接频率、焊接压力、焊接时间等研究尚不系统。因此,本文制备了 CFRP 层合板,针对焊接频率、焊接压力、焊接时间,设计三因素四水平试验,探究不同参数对航空复合材料电磁感应焊接强度的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验制备的层合板采用预浸料为 T300-3K 型碳纤维(日本东丽公司 Toray®),基体为聚醚醚酮(PEEK),通过模压成型工艺获得 CF/PEEK 层合板(热压机 YTR-50T),热压机压力为 0.5 Mpa,温度为 350 °C,制备的层合板平均厚度为 2 mm。

1.2 感应焊接试验

CFRP 层合板感应焊接过程及试样尺寸如图 1 所示。感应焊接的过程是高频交变电流在感应线圈附近形成交变磁场,通过碳纤维基体回路产生感应涡流并发热,融化放置在焊接区域的 PEEK 树脂基体,施加压力促进树脂基体的流动,PEEK 树脂冷却固化后完成感应焊接。为防止 CFRP 层合板表面杂质、油污等对焊接强度的影响,焊接试验之前使用 400 目的砂纸对层合板焊接区域进行轻微打磨,使用无水乙醇溶液擦拭后烘干。设计尺寸参照 GB/T 33334-2016 标准确定^[15],胶接剂 PEEK 层厚度为 0.5 mm。

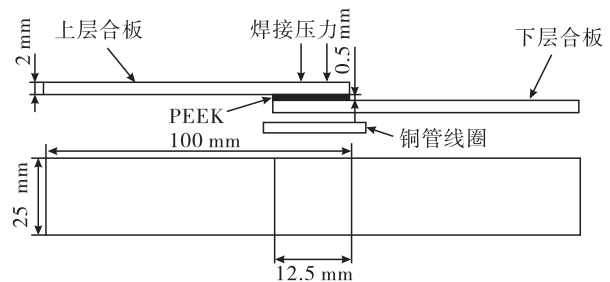


图 1 CFRP 层合板感应焊接过程及尺寸示意图

正交试验是研究多因素多水平的一种设计方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出代表性试验。正交试验是一种高效率、快速、经济的试验设计方法^[16]。在进行焊接试验时,主要改变三个焊接参数作为因子,每个因子取 4 个水平。焊接参数因子为:焊接功率、焊接时间、焊接压力。感应焊接正交试验因子如表 1 所示。

正交试验是研究多因素多水平的一种设计方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出代表性试验。正交试验是一种高效率、快速、经济的试验设计方法^[16]。在进行焊接试验时,主要改变三个焊接参数作为因子,每个因子取 4 个水平。焊接参数因子为:焊接功率、焊接时间、焊接压力。感应焊接正交试验因子如表 1 所示。

表 1 感应焊接正交试验因子表

因子	编码	1	2	3	4
功率/kW	A	1.5	2.0	2.5	3.0
时间/min	B	5	10	15	20
压力/MPa	C	0.5	1.0	1.5	2.0

在不同焊接因素下,CFRP 层合板搭接接头通过拉力试验机拉伸测试,获得不同焊接因素下的剪切强度,对数据平均值进行处理,获得各因子的最佳水平及各因素对电磁焊接强度的影响。 K_{ij} 表示 i 因素 j 水平下剪切强度的总和, K_{ij} 越大表示此水平剪切强度对此因子越有利; R_i 表示在各种因素下的极端差, R_i 越大表明此因子对剪切强度影响较大。 K_{ij} 和 R_i 的计算公式如下:

$$K_{ij} = \sum X_{ij}, R_i = \bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}。$$

式中: X_{ij} 为 i 因素 j 水平的剪切强度; \bar{X} 为剪切强度平均值; i 因素包括焊接功率、焊接时间、焊接压力; j

分为 1,2,3,4 水平。

1.3 力学性能测试

针对表 1 不同参数焊接的 CFRP 试样,采用 WAW-300 kN 万能材料试验机进行拉伸强度测试。测试参照 GB/T 33334-2016 标准,拉伸速率为 1 mm/min。每组试验重复进行 3 次,求取每组数据拉伸剪切强度的平均值。电磁焊接试样的拉伸剪切强度 $\tau = F_a / W \times L$ 。式中: F_a 为层合板拉伸断裂的最大载荷值,N; W 为试样焊接面宽度,mm; L 为试样焊接面长度,mm。

2 结果与分析

2.1 正交试验结果

拉伸试验所测得拉伸剪切强度如表 2 所示,采用直观和极差方法对试验数据进行处理,试验分析结果见表 3。

表 2 正交试验表

序号	功率/kW	时间/min	压力/MPa	剪切强度/MPa	序号	功率/kW	时间/min	压力/MPa	剪切强度/MPa
1	1.5	5	0.5	6.3	9	2.5	5	1.5	14.3
2	1.5	10	1.0	9.4	10	2.5	10	2.0	19.3
3	1.5	15	1.5	12.5	11	2.5	15	0.5	18.5
4	1.5	20	2.0	9.6	12	2.5	20	1.0	20.1
5	2.0	5	1.0	16.4	13	3.0	5	2.0	19.2
6	2.0	10	0.5	17.2	14	3.0	10	1.5	25.5
7	2.0	15	2.0	14.3	15	3.0	15	1.0	24.5
8	2.0	20	1.5	15.2	16	3.0	20	0.5	18.2

表 3 剪切强度极差分析

项	水平	A	B	C	项	水平	A	B	C
K_j 值	1	37.8	56.2	60.2	K_j 值	3	72.2	69.5	67.5
	2	63.1	71.4	70.4		4	87.4	63.1	62.4
极差 R		12.4	3.8	2.55	最优水平		3	10	1
主次水平		A>B>C			最优组合		A ₃ B ₂ C ₂		

通过正交试验,将 A、B、C 三要素的剪切强度求和,得到 K_{A_3} 、 K_{B_2} 、 K_{C_2} 数值最大,因此最佳焊接工艺参数的最优组合为 A₃B₂C₂,即焊接功率为 3.0 kW,焊接时间为 10 min,焊接压力为 1.0 MPa;极差 R_i 代表焊接因素对层合板接头剪切强度的影响,由于极差 $R_A > R_B > R_C$,在焊接试验时,焊接功率对电磁焊接剪切强度影响最大,其次是焊接时间,焊接压力对剪切强度的影响最小。

采用 A₃B₂C₂ 参数组合制备 CFRP 层合板焊接试样,经拉伸试验,获得最佳焊接因素下焊接样品的剪切强度曲线及断裂破坏图,如图 2 所示。在层合板接头拉伸断裂时,测得的剪切强度为 26.5 MPa;在剪切强度到达 23.0 MPa 之前,层合板搭接接头剪切强度随着时间的增大呈线性增加,搭接接头的焊接区域主要发生的是 PEEK 树脂基体的断裂破坏;在 23.0~26.5 MPa 时,层合板接头剪切强度随时间变化逐渐趋于平稳,剪切强度轻微增长,层合板中的碳纤维预浸料出现纤维抽离断裂,此时 PEEK 树脂发生完全破坏,直到 121 s 时,纤维完全断裂。

2.2 焊接功率对焊接强度的影响

根据文献[17],搭接接头焊接区域的温度主要受到焊接功率影响。保持焊接压力 1.0 MPa 不变,改变焊接功率进行电磁感应焊接试验。不同焊接功率下剪切强度与温度变化情况,如图 3 所示,随着焊接功率的逐渐增大,焊接温度逐渐升高,在焊接功率为 3.0 kW 时,测得的焊接温度最高为 463 °C。

由图 3 可知,随着焊接功率的上升,层合板的剪切强度呈现增大趋势,焊接功率上升,焊接温度升高;在低功率焊接时,PEEK 树脂基体熔融不充分,PEEK 树脂浸入 CFRP 层合板较少,造成搭接区域缺陷过多,电磁焊接接头剪切强度较小;低功率焊接,随着焊接总时间的延长,热量在树脂传递后,树脂基体熔融程度变高,电磁焊接接头剪切强度增大;当焊接时间为 10 min、焊接功率在 3.0 kW 时,测得的焊接温度为 PEEK 熔融的最佳温度,PEEK 树脂完全熔融,树脂充分浸入层合板,实现了界面的融合,增大了其粘接强度,此时测得的接头剪切强度最高为 26.5 MPa。当焊接时间为 20 min,焊接功率在 3.0 kW 时,层合板剪切强度出现下降趋势,分析其原因是在 3.0 kW 时,温度达到了 463 °C,临近 PEEK 的热解温度,导致了树脂不可逆的热分解,剪切强度降低。

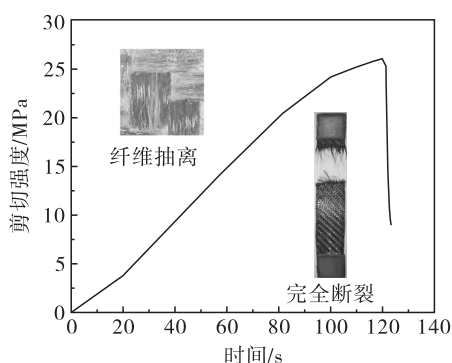


图 2 焊接样品的剪切强度曲线及断裂破坏图

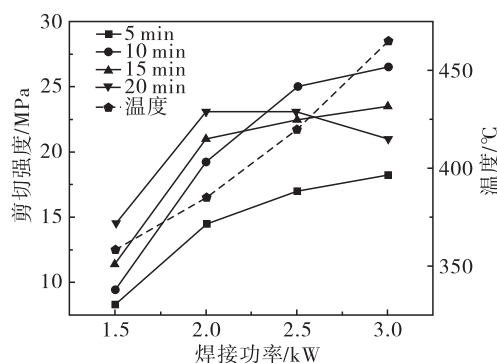


图 3 不同焊接功率下剪切强度与温度变化情况

2.3 焊接时间对焊接强度的影响

焊接时间对层合板感应焊接接头强度影响,如图 4 所示,试验使用焊接功率为 1.5~3.0 kW,焊接压力为 1 MPa,焊接时间为 5~20 min,探究焊接时间对焊接接头力学性能的影响。图中焊接强度在感应焊接 5~10 min 时,随着焊接时间的延长,热量在 PEEK 树脂传递后,树脂基体熔融程度变高,接头焊缝处 PEEK 树脂与被焊接层合板相互扩渗融合的更加充分,焊接强度逐渐增大;焊接时间为 10 min 时,在焊接功率为 2.5 kW、3.0 kW 的高功率下,最大剪切强度分别为 25.0 MPa、26.5 MPa,焊接时间大于 10 min 后,其剪切强度呈现降低趋势,究其原因是焊接功率为 2.5 kW、3.0 kW 时,焊接温度远高于 PEEK 胶接剂 343 °C 的熔点,长时间的高温焊接 PEEK 树脂发生了热分解;在低焊接功率 1.5 kW、2.0 kW 时,PEEK 树脂短时间内难以熔融充分,在焊接时间 10~20 min,随着焊接时间的增加,PEEK 树脂持续熔融浸入层合板,搭接接头剪切强度持续增大。

2.4 焊接压力对焊接强度的影响

通过 2.1 节正交试验结果极差分析可知,焊接时间、焊接功率、焊接压力这三个因素对层合板接头剪切强度影响最小的是焊接压力。试验获得的焊接压力与剪切强度如图 5 所示,选取最优焊接时间 10 min,焊接功率 3.0 kW,焊接压力分别为 0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa 进行感应焊接试验。由图 5 可知,随着焊接压力的增加,剪切强度逐渐增大,在 1.0 MPa 时获得最大剪切强度为 26.5 MPa;在焊接压力为 0.5 MPa 时,施加的焊接压力较低,上下层合板的焊接区域未能充分接触,影响焊接区域温度传递,在树脂熔融后,较低焊接压力不能为 PEEK 树脂流动提供足够的动力,树脂难以充分浸入 CFRP 层合板,未能形成稳定分子链连接,树脂的不流动造成焊接缺陷,焊接接头出现应力集中现象,此时剪切强度最小,最小为 18.5 MPa;当焊接压力为 1.5 MPa、2.0 MPa 时,较大的焊接压力造成上下层合板接触过度紧密,纤

维层的缝隙树脂难以浸入,胶接剂树脂在层合板间隙溢出,导致胶接剂 PEEK 含量较少,两个层合板的电磁焊接接头强度变低。

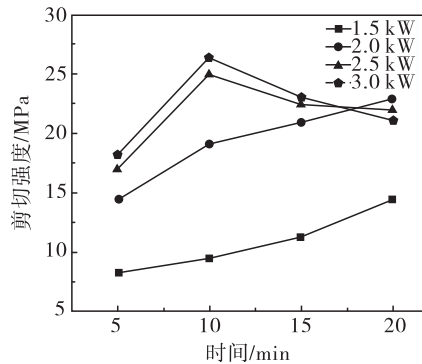


图4 焊接时间对焊接接头剪切强度的影响

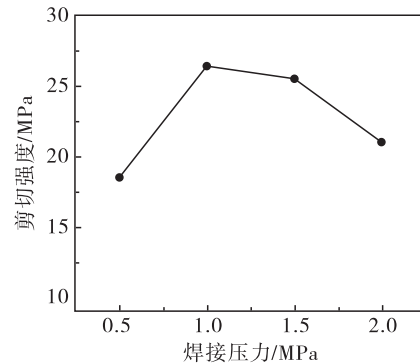


图5 焊接压力对焊接接头剪切强度的影响

3 结论

航空复合材料电磁感应中,焊接功率对焊接接头强度影响最大,其次为焊接时间,焊接压力对焊接强度影响最小。这是由于焊接功率越大,焊接温度升温越快,树脂基体熔融速率越快,熔融越充分,焊接接头剪切强度越高。在焊接功率为 3.0 kW,焊接时间为 10 min 的条件下,焊接接头的剪切强度最高,最高为 26.5 MPa,但当时间继续增加,持续的高温将会导致材料的热解,接头的力学性能降低;在 1.5 kW、2.0 kW 的焊接低功率下,焊接区树脂熔融程度随焊接时间延长而增大,焊接强度更优。航空复合材料电磁感应焊接过程中,焊接压力对焊接质量的影响最小。焊接压力为 1.0 MPa 时,获得的最优搭接接头剪切强度为 26.5 MPa,当焊接压力增大时,胶接剂 PEEK 树脂被挤压溢出,剪切强度逐渐减小。

参考文献:

- [1] 杨珍菊. 国外复合材料行业进展与应用(下)[J]. 纤维复合材料,2017,34(3):36-39.
- [2] 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.
- [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.
- [4] 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.
- [5] ZHANG H, LI C, XU M, et al. A novel method for damage analysis of CFRP single-lap bolted, bonded and hybrid joints under compression[J]. Composite structures,2020,251:112636.
- [6] 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.
- [7] 张胜玉. 塑料感应焊接技术[J]. 现代塑料加工应用,2015,27(2):34-38.
- [8] 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, 2012,4:255-265.
- [9] 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(5):99-104.
- [10] 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.

- [11] 毛振刚,侯玉亮,李成,等. 搭接长度和铺层方式对 CFRP 复合材料层合板胶接结构连接性能和损伤行为的影响[J]. 复合材料学报,2020,37(1):121-131.
- [12] 王家锋,苏佳煜,朱妹,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.
- [13] LIONETTO F,PAPPADA S,BUCCOLIERO G,et al. Finite element modeling of continuous induction welding of thermoplastic matrix composites[J]. Materials and design,2017,120:212-221.
- [14] TIJS B,DOLDERSUM M,TURON A,et al. Experimental and numerical evaluation of conduction welded thermoplastic composite joints[J]. Composite structures,2022,281:114964.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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.
- [16] 董如何,肖必华,方永水. 正交试验设计的理论分析方法及应用[J]. 安徽建筑大学学报,2004,12(6):103-106.
- [17] 于立国,黄晓明,董正宝,等. 航空碳纤维复材板电-磁-热多场联合仿真与分析[J]. 河北科技大学学报,2021,42(6):543-552.

Experimental Study on the Strength of Electromagnetic Induction Welding of Aviation Composite Materials

SU Zhou¹,HUANG Xiaoming²,CHEN Zhongao¹,YU Ligu³,YOU Wentao²

(1. *Mechatronics Engineering Department,*

Anhui University of Science and Technology,Huainan 232001,China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,Binzhou University,Binzhou 256603,China;

3. Production Department of Shandong Zhongheng Jingxin Carbon Fiber Technology Development Co.,Ltd.,Dezhou 251100,China)

Abstract: Electromagnetic induction welding strength tests is done for aviation composite materials to analyze the influence of welding parameters on the mechanical properties of laminated plate lap joints during electromagnetic induction welding, and to explore the influence of different welding power, welding time, and welding pressure on the welding strength of Carbon Fiber Reinforced Plastic laminates. First, CFRP laminate samples are prepared. Orthogonal experiment of three factor and four level is designed to obtain welding strength by tensile testing machine, and optimal combination parameters of electromagnetic welding are determined. Secondly, three welding parameters are separately tested to analyze the change rule of different welding parameters on the welding strength of CFRP laminates. The test results relating welding parameters are as follows: welding power is 3.0 kW, welding time is 10 min, welding pressure is 1.0 Mpa. The most obviously influential factor on welding strength is welding power, while the welding pressure has the least influence. When the welding power is 2.5 kW or 3.0 kW, and the welding time is greater than 10min, the welding strength gradually decreases as the welding time increases.

Keywords: aviation composite materials; welding parameters; CFRP laminate; orthogonal experiment
(责任编辑:唐立平)