

引文格式: 王攀, 郭嘉炜, 周靖, 等. 多频能量分散的 CFRP 层合板微波固化温度场控制方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(17): 96–102.

WANG Pan, GUO Jiawei, ZHOU Jing, et al. Temperature field control method for microwave curing of CFRP laminates with multi-frequency energy dispersion[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(17): 96–102.

多频能量分散的 CFRP 层合板微波固化温度场控制方法*

王攀, 郭嘉炜, 周靖, 郝小忠

(南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)轻质高强, 已成为航空航天领域减重增效的优选材料。固化是制造兼具几何外形与承载性能的 CFRP 构件的关键。与传统的传导加热固化/修补方法相比, 微波加热固化/修补方法具有控温灵敏、周期短、能耗低等优势。然而微波会在腔体内谐振形成驻波, 使得 CFRP 层合板面内存在大量冷、热点, 温度不均匀, 构件易变形, 严重时甚至发生局部烧蚀或固化不完全。本研究提出了多频能量分散的 CFRP 层合板微波固化温度场控制方法, 通过将加热所需能量分散到多种频率的微波以弱化单一频率驻波的影响, 同时利用多种频率驻波间的叠加效应, 提升 CFRP 层合板微波固化过程中的温度均匀性。试验结果表明, 在仅采用 915 MHz 和 2.45 GHz 两种频率微波进行加热的情况下, CFRP 层合板的最大温差相比单频微波加热降低了 26%。

关键词: CFRP 层合板; 微波固化; 温度场控制; 多频能量分散; 超表面

Temperature Field Control Method for Microwave Curing of CFRP Laminates With Multi-Frequency Energy Dispersion

WANG Pan, GUO Jiawei, ZHOU Jing, HAO Xiaozhong

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has become the preferred material for weight reduction and efficiency improvement in the aerospace field due to its light weight and high strength. Curing is the key to manufacture CFRP components with both geometry and load-bearing properties. Compared with the traditional conduction heating curing/repairing method, the microwave heating curing/repairing method has the advantages of sensitive temperature control, short period, and low energy consumption. However, microwave resonates to form standing waves in the cavity, which makes a large number of cold and hot spots exist in the CFRP laminated plates, and the temperature is not uniform. The components are easy to deform, and even partial ablation or incomplete curing occurs in serious cases. In this paper, a temperature field control method for microwave curing of CFRP laminates with multi-frequency energy dispersion was proposed. By dispersing the energy required for heating into microwaves of various frequencies, the influence of the standing wave of a single frequency was weakened. Meanwhile, the superposition effect between standing waves of various frequencies was utilized to improve the temperature uniformity of CFRP laminates during microwave curing. The experimental results show that the maximum temperature difference of CFRP laminates was reduced by 26% compared with single-frequency microwave heating when only 915 MHz and 2.45 GHz microwave heating were used.

Keywords: CFRP laminates; Microwave curing; Temperature field control; Multi-frequency energy dispersion; Metasurface

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.17.096

* 基金项目: 国家自然科学基金(51875288, 52105364, 52090052)。

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)因其比强度高、比模量大、耐腐蚀等一系列优越性能,一经问世就受到各行各业尤其是航空航天领域的广泛关注^[1-4]。自1980年F-18使用复合材料机翼以来,国内外新研制的歼击机机翼甚至机身段全部采用先进复合材料,占结构重量的25%~50%^[5],代表我国先进战机的歼-20复合材料用量也达到了20%。当代民用客机的代表,波音787和空客A350客机的复合材料用量比例分别达到了50%和52%^[6-7],复合材料用量逐渐增大使得新型大飞机的重量减轻,综合性能提升。可见复合材料的用量已成为评价飞机先进性和国家科技发展水平的重要标志^[8-9]。

CFRP构件的制造过程包括赋形、固化、加工和装配等,其中固化是影响零件成型质量和力学性能的关键^[10]。与传统的传导加热固化方法相比,微波加热固化方法具有控温灵敏、固化周期短、能量利用率高等优势。作为一种新型固化手段,近30年来,在复合材料领域发展迅速,被越来越多的研究者重视^[11]。然而,微波固化技术也面临若干挑战。如多向CFRP层合板与空气阻抗不匹配,使其对微波全反射,能量无法馈入,在这个方面,课题组提出了超表面馈能的多向CFRP层合板微波加热方法,使得采用微波加热固化多向CFRP层合板成为了可能^[12]。又如,微波在封闭腔体中反射必然形成驻波^[13],处在波腹和波节位置的材料由于能量密度的高低分布,导致被加热材料会形成冷、热点,温度不均匀,构件易变形,严重时甚至发生烧蚀或固化不完全。围绕复合材料微波固化温度场控制,国内外学者开展了大量研究。Plaza-Gonzalez等^[14]提出了在微波馈口处加模式搅拌器分散微波束,Geedipalli等^[15]引入了周期性运动的旋转托盘增加微波场与被加热物体的相对运动,Tang等^[16]利用选频的方法获得较优频率以改善温度场分布,上述方法均属于温度场随机补偿方法,在腔体内加入模式搅拌器或旋转托盘提高了在圆周方向的温度均匀性,选频的方法对于固定的加热物体有较好的效果,但对于旋转的径向以及不同的物体其随机程度还有待提高。2018年,Zhou等^[17]发现在温度和固化度不变时,同一微波加热系统的微波控制策略与CFRP层合板表面的加热模式间存在固定对应关系,从而提出了加热模式互补的思想。Li等^[18]进一步提出了基于历史数据和深度学习的复合材料微波固化温度场控制方法,采用数据驱动的方法拟合加热模式和微波控制策略间的固定对应关系。针对固化过程中温度或固化度时刻变化,加热模式和微波控制策略间对应关系不断演变的问题,Zhou等^[19]于2019年提出了在线学习和在线决策的微波固化温度场智能控制方法。上述方法属于温度

场定向补偿方法,取得了较好的温度场控制效果,但受复合材料固化条件的制约,还需伴随高精度接触式面测温方法一起发展。

本研究针对CFRP预制件微波加热固化温度场不均匀的问题,结合超表面馈能的特点,提出了多频能量分散的CFRP层合板微波固化温度场控制方法,并基于915 MHz和2.45 GHz两种频率进行了微波加热试验验证。通过分析不同频率微波作用下CFRP层合板温度场的分布规律,利用超表面的可设计性,设计了双频超表面,验证了双频微波加热下CFRP层合板的温度均匀性,并与现有单频加热方法进行了对比。

1 不同频率分别作用下温度场的分布规律

CFRP作为一种典型的非磁性材料,在微波加热的过程中会吸收大量的电场能量,并将其转化为热能,实现内热源加热的目的。然而,驻波带来的加热不均匀的问题,导致微波加热固化CFRP的技术一直难以工业应用。驻波与频率相关,因此不同频率微波源作用下温度场的分布规律不同,本节通过2.45 GHz(高频)和915 MHz(低频)的微波源分别对CFRP层合板进行加热,探索高频和低频微波加热温度场的分布规律。

试验设备为八边形双频高性能微波加热系统,如图1(a)所示。该系统集成了915 MHz与2.45 GHz两种频率的微波源,其功率范围分别为0~1000 W和0~1500 W。此外,还配备了光纤测温系统(北京东方锐择有限公司)和红外测温系统(FLIR A300)。图1(b)和(c)分别为915 MHz和2.45 GHz的超表面实物。

采用的材料为碳纤维增强环氧树脂基复合材料CFRP层合板,尺寸为250 mm×250 mm×2 mm(UIN10000,威海光威复合材料股份有限公司),铺层方式为 $[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$,边缘用铝箔包裹防止打火,如图2(a)所示,辅助材料的位置和铺放顺序见图2(b),超表面放置在CFRP平板件下方。

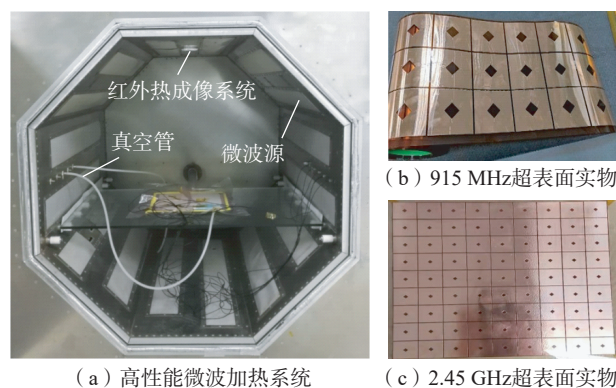


图1 试验装置及超表面实物材料

Fig.1 Experimental apparatus and metasurface material

两种微波源分别以 1 °C/min 加热 CFRP 平板件。915 MHz 的超表面铺设如图 3 (a) 所示,图 3 (b),(c) 和 (d) 为该微波频率下分别加热 5 min、10 min 以及 20 min 后的 CFRP 构件表面温度场,可明显观察到在整个升温过程中,面内冷、热点的位置始终未发生变化,冷点和热点的光斑较大且分布集中。图 4 (a) 为 2.45 GHz 的超表面,令其在 2.45 GHz 微波频率下分别加热 5 min、10 min 和 20 min,整个过程中面内冷、热点的位置分布基本无变化,冷、热点的光斑较小且相对分散。

根据试验得到不同频率微波源作用下 CFRP 层合板温度场的分布规律为:(1) 给定微波源频率下,整个加热过程中冷、热点的位置保持不变;(2) 低频微波加热时,冷、热点位置相对集中且光斑较大,高频微波加热时,冷、热点位置相对分散且光斑较小。

2 多频微波能量分散的温度场控制思路

微波加热 CFRP 构件的过程中,由于驻波的存在,波腹和波节的位置能量密度高低分布,加热过程中冷、热点始终存在且位置基本不发生改变,对于高频的微波源加热时冷、热斑点小且相对分散,低频冷、热点大而集中。因此,将一个频率的微波能量分散到多个频率上,弱化单个频率下驻波的影响,利用多个频率驻波间的叠加效应,结合 CFRP 构件的传热特点,进行冷、热点之间的温度场自动补偿,是一种潜在的面内温度均匀性控制方法。

由于双向或多向铺层的 CFRP 层合板进行微波加热时,需要通过超表面将微波能量馈入到 CFRP 内部,且一种超表面结构仅会在对应频率的微波下有较强的

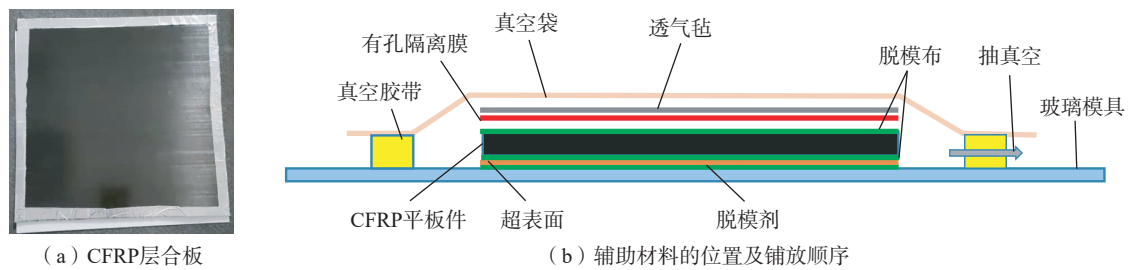


图 2 试验材料及辅助材料
Fig.2 Experimental materials and auxiliary materials

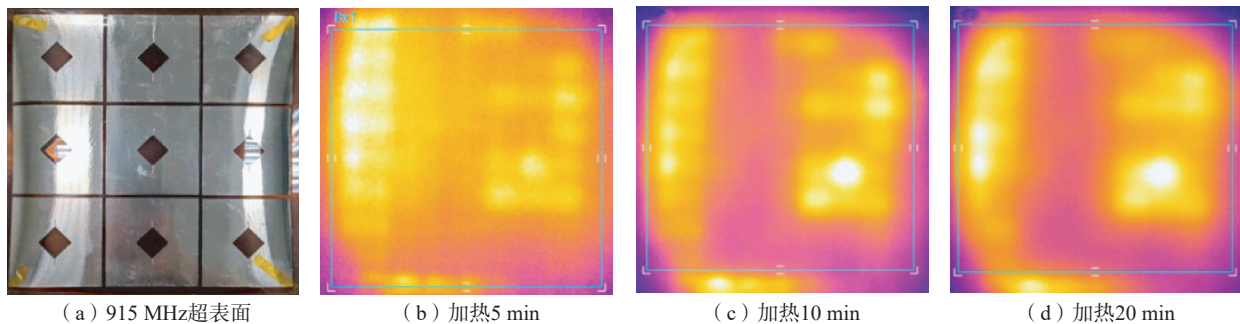


图 3 915 MHz 微波加热 CFRP 层合板表面的温度场
Fig.3 Temperature field on surface of CFRP laminates heated by 915 MHz microwave

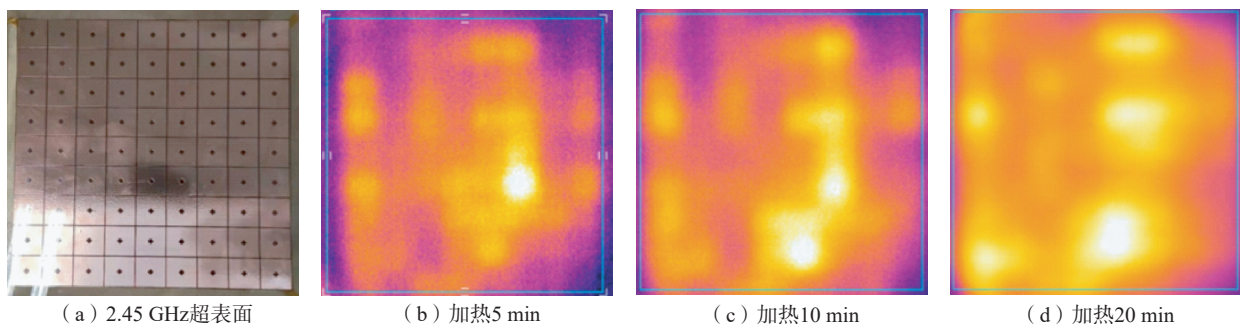


图 4 2.45 GHz 微波加热 CFRP 层合板表面的温度场
Fig.4 Temperature field on surface of CFRP laminates heated by 2.45 GHz microwave

加热效果。因此,利用超表面的可设计性以及不同频率微波加热的温度场分布特点,可以设计一种多频超表面将分散后的微波能量馈入到 CFRP 层合板用以加热,实现多频能量分散的 CFRP 构件微波固化的温度场均匀性控制,如图 5 所示。

3 多频超表面的设计

利用超表面的可设计性,可以将不同频率的超表面按一定的规律组合,形成多频超表面,实现对多个频率微波能量的响应。设计多频超表面时,需要考虑不同频率微波能量的分散程度,也就是同一频率超表面结构单元被其他频率结构单元分散的程度,从而使得多种频率间因驻波产生的冷、热点得到充分的叠加和补偿。

本研究主要利用 915 MHz 和 2.45 GHz 两种频率对应的超表面在纵向和横向的不同排布来探究这种能量分散程度的关系,以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 加热 10 min 后 CFRP 层合板红外图像的温度场分布来表征加热效果。如图 6 所示,其中图 6 (a)、(c) 和 (e) 分别是在横向利用 2.45 GHz 的超表面将 915 MHz 的超表面逐渐分散开;图 6 (b)、(d) 和 (f) 中冷、热区域分布明显,叠加效应不足,冷、热点之间的补偿效果不够充分。图 6 (a) 中的温度均匀性甚至不及 2.45 GHz 的单频加热效果,但从图 6 (a) 到图 6 (c) 再到图 6 (e) 的排布中,温度均匀性有一定的改善;图 6 (g) 进一步将 2.45 GHz 的超表面进行分散,图 6 (h) 中冷、热点的区域有明显的改善,但仍存在大片的冷、热区域;图 6 (i) 和 (k) 增加了 2.45 GHz 超表面在纵向的排布,将 915 MHz 的超表面逐渐分散为 1

个单元;图 6 (j) 和 (l) 中温度场分布得到较好的改善,冷、热点区域得到有效的叠加和补偿,使得温度均匀性提高,且图 6 (l) 中的温度均匀性更好。

根据以上试验结果可得,微波能量的分散程度对冷、热点之间的叠加效果存在较大的影响,随着不同频率微波能量分散程度的增加,温度均匀性也有所提升。为验证在 CFRP 层合板固化过程中该方法的有效性,选择了图 6 (c)、(i) 和 (k) 中 3 种典型的结构,设计了“回”型(图 7 (a))、“U”型(图 7 (b))和“田”型(图 7 (c)) 3 种不同的排布方式分别作为双频超表面的一个结构单元,其不同频率微波能量分散程度依次提高,进行对比验证。根据超表面的特点,对于尺寸更大的 CFRP 构件只需要将该结构单元进行周期性排列。对照方案为常用的 2.45 GHz 单频微波加热方法,其超表面如图 7 (d) 所示。

4 双频微波加热温度均匀性验证

本节对 3 种不同能量分散形式的双频超表面设计方案进行了微波加热验证,以 CFRP 层合板面内温度的最大温差和整个加热过程的面内均方差为评价标准,分析了不同方案下的温度均匀性,并与 CFRP 层合板单频微波加热方法的效果进行了对比。

4 组试验均从室温升到 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 30 min,升温工艺曲线如图 8 所示,控温基准是面内平均温度。选取 CFRP 层合板面内均匀分布的 9 个点,通过提取整个升温以及保温过程中 9 个点的实际温度值,并计算其温差和均方差,对微波固化过程的温度均匀性进行分析。

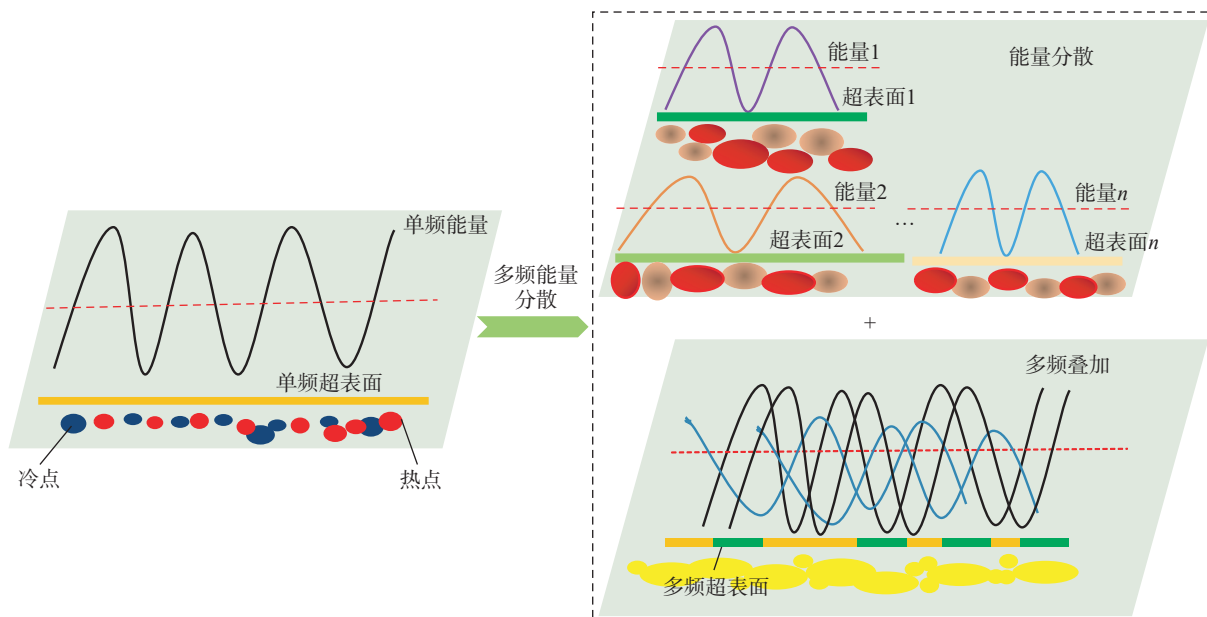


图 5 多频能量分散的温度场控制思路

Fig.5 Idea of temperature field control with multi-frequency energy dispersion

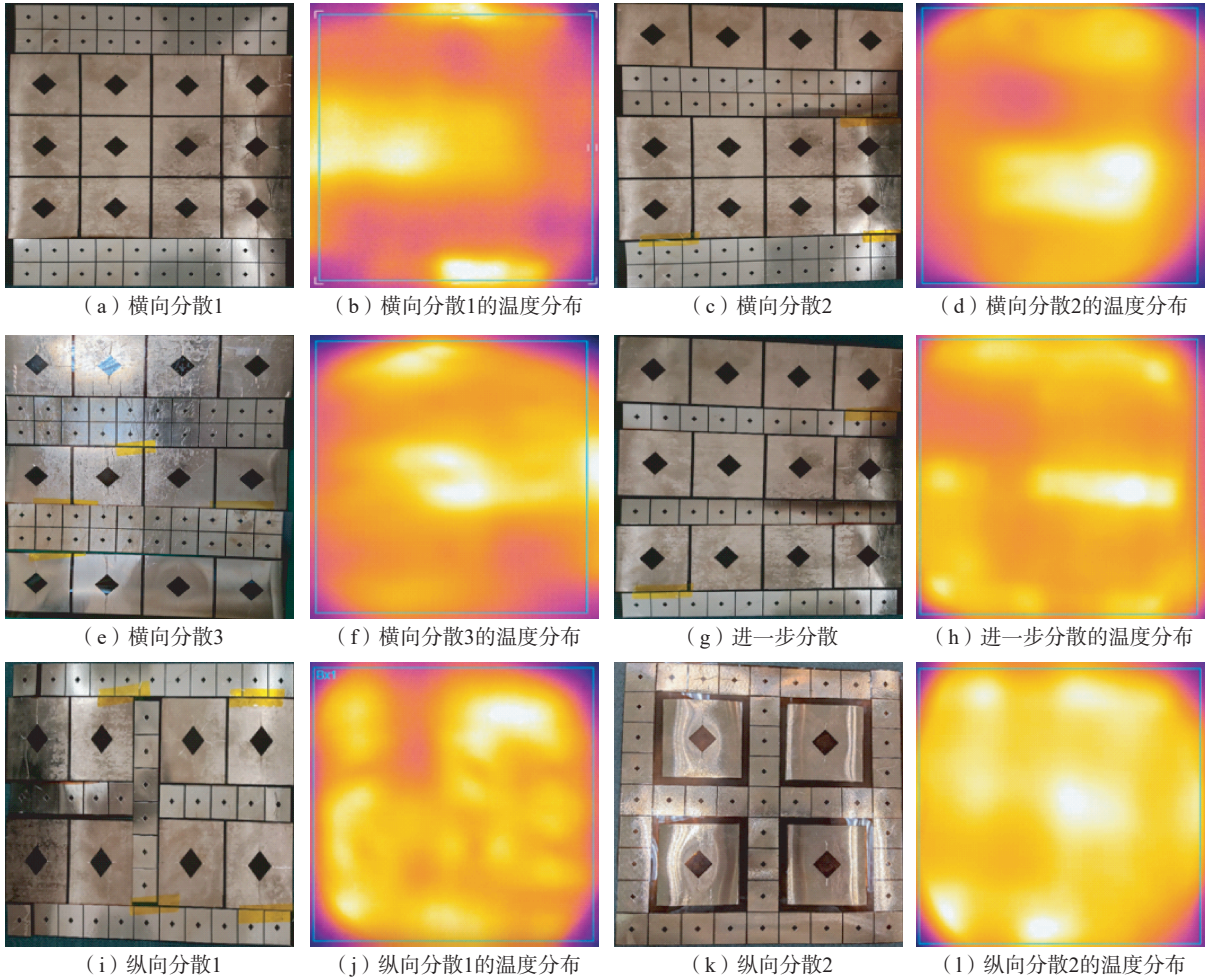


图6 双频超表面的不同排布方案以及温度场分布

Fig.6 Different arrangement schemes and temperature field distribution of dual-frequency supersurface

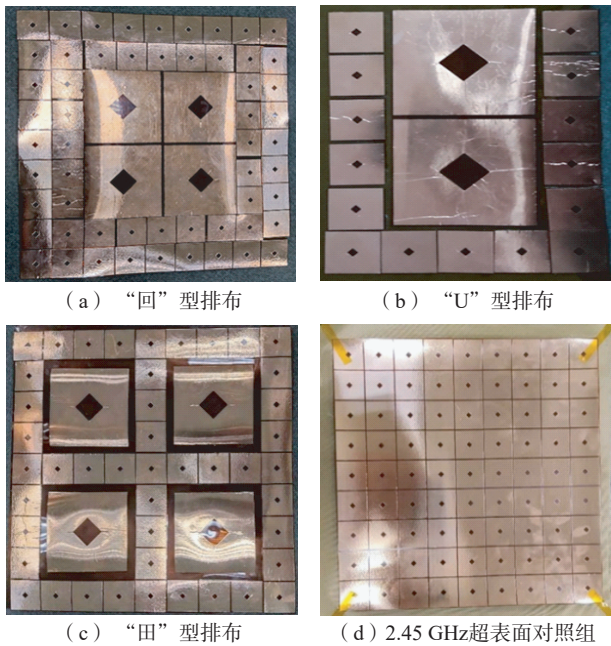


图7 3种典型的双频超表面设计方案及对照

Fig.7 Three typical dual-frequency metasurface designs and comparison

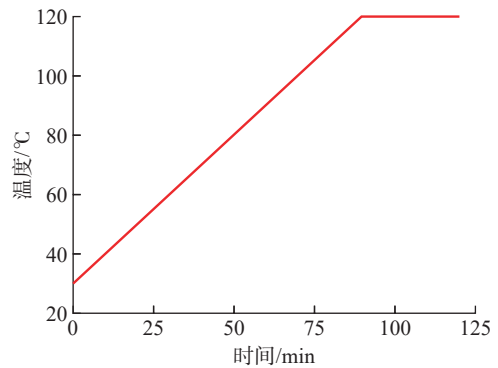


图8 各组试验的升温工艺曲线

Fig.8 Heating process curve of each experiment

图9展示了不同方案在整个微波加热过程中CFRP层合板面内9个采温点的实际温度曲线,温度采样周期为0.1s,以表示面内温度分布。从图9(a)中可以看出,单频微波加热过程中面内各处的温度曲线明显比图9(b)、(c)和(d)中的间距更大,即温差更大,且加热过程中还存在较大的波动。

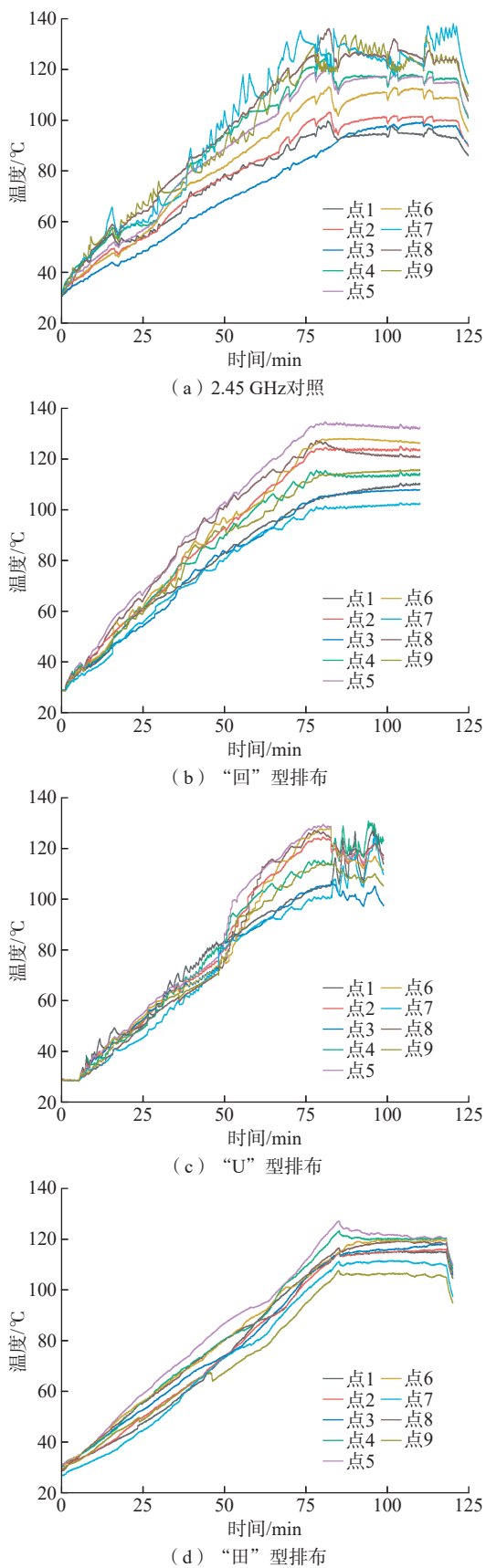


图9 不同方式下的实际加热温度曲线

Fig.9 Actual heating temperature curves under different methods

图 10 (a) 和 (b) 分别为加热过程中 CFRP 层合板的面内温差和均方差随时间的变化图。由 10 (a) 可知, 随着温度的逐渐上升, 材料面内温差被迅速拉大。而利用 3 种不同形式双频微波能量分散方案的温差比对照组的单频加热方法明显降低, 温度均匀性显著提高, 并且 3 种排布方案中在较高的温度下“田”型的温度均匀性略优于“U”型, “回”型的效果相对较差, 产生这种差异的原因与微波能量的分散程度有关, 且能量越分散对微波加热的温度均匀性越好; 随着保温过程的进行, 温差逐渐缩小, 这是由于热点与冷点之间传热效果的影响使得温度均匀性有所提高。图 10 (b) 中的温度均方差曲线与温差曲线具有类似的趋势, 多频能量分散加热的方法相对于单频加热方法温度均匀性有显著提升。图 11 为整个过程中温差最大值的统计图, 采用双频能量分散方法得到的最大温差小于 CFRP 构件单频微波加热方法, 且最大温差降低了 26%。

5 结论

(1) 提出了多频能量分散的 CFRP 层合板微波固化

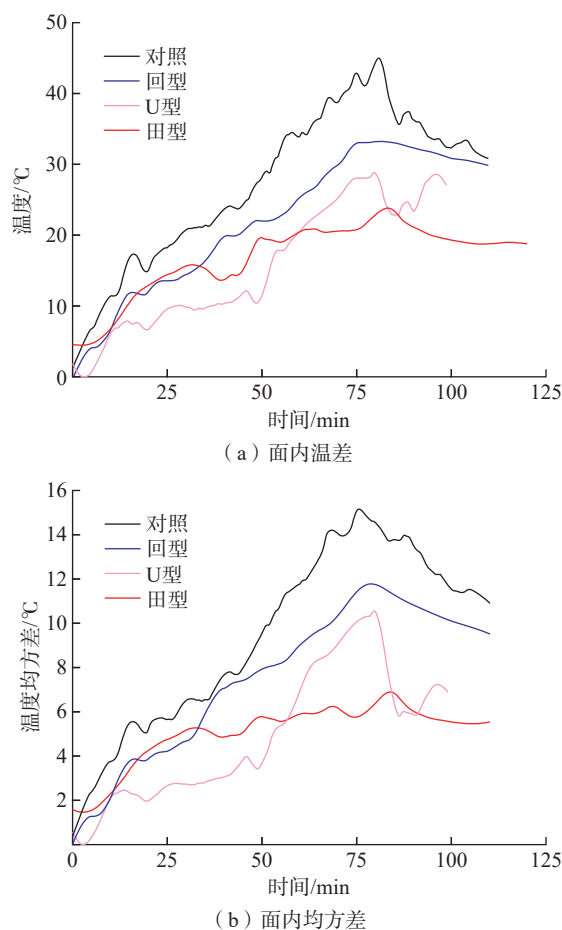


图 10 整个过程中 CFRP 层合板面内温度均匀性对比

Fig.10 Comparison of in-plane temperature uniformity of CFRP laminates during whole process

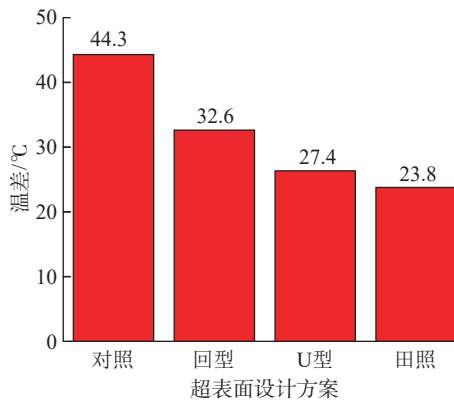


图 11 整个过程中不同方案的最大温差统计图

Fig.11 Statistical diagram of maximum temperature difference of different schemes in whole process

温度场控制方法,利用多种频率驻波间的叠加效应,将加热所需能量分散到多种频率的微波以弱化单一频率驻波的影响,提升 CFRP 层合板微波固化过程中的温度均匀性。

(2) 探究了高频(2.45 GHz)和低频(915 MHz)微波加热过程的温度场分布规律,低频加热时冷、热点位置相对集中且光斑较大,高频微波加热时,冷、热点位置相对分散且光斑较小。

(3) 设计了双频超表面并利用 915 MHz 与 2.45 GHz 双频微波源进行试验验证,结果表明,采用多频能量分散方法有助于提高微波加热的温度均匀性,加热过程最大温差降低了 26%,且这种均匀性差异还与微波能量的分散程度有关,也充分证明了本研究方法的可行性。

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): 1-12.
 DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
 [2] GIBSON R F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures[J]. Composite Structures, 2010, 92(12): 2793-2810.
 [3] CAI H W, AREF A J. On the design and optimization of hybrid carbon fiber reinforced polymer-steel cable system for cable-stayed bridges[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 68: 146-152.
 [4] LOU T J, LOPES S M R, LOPES A V. Factors affecting moment redistribution at ultimate in continuous beams prestressed with external CFRP tendons[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 66: 136-146.
 [5] 刘善国. 国外飞机先进复合材料技术[J]. 航空制造技术, 2014, 57(19): 26-31.
 LIU Shanguo. Advanced composite technology of foreign aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(19): 26-31.
 [6] 朱亮, 蓝友泽, 徐志伟. 复合材料层合板及机翼格栅结构的动态特性优化设计[J]. 复合材料学报, 2012, 29(5): 184-190.
 ZHU Liang, LAN Youze, XU Zhiwei. Optimal design of dynamic characteristics for composite laminates and grid-structures of wing[J].

Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 184-190.
 [7] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.
 MA Limin, ZHANG Jiazhen, YUE Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322.
 [8] 王军照. 碳纤维复合材料在航空领域中的应用现状及改进[J]. 今日制造与升级, 2020(8): 48-49.
 WANG Junzhao. Application status and improvement of carbon fiber composites in aviation field[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2020(8): 48-49.
 [9] DORA J, HINRICHSEN J. Material and technology developments for the A380[C]//Proceedings of the 22nd International SAMPLE Europe Conference. Paris, 2001: 123-134.
 [10] CAMPBELL F C, MALLOW A R, BROWNING C E. Porosity in carbon fiber composites: An overview of causes[J]. Journal of Advanced Materials, 1995, 26(4): 18-33.
 [11] 张青, 常新龙, 张有宏, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料微波固化试验[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(6): 58-62.
 ZHANG Qing, CHANG Xinlong, ZHANG Youhong, et al. Experiment microwave curing of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(6): 58-62.
 [12] 李迎光, 周靖, 郝泽鑫, 等. 一种强反射材料的微波高效加热方法: ZL202011325099.4[P]. 2021-03-09.
 LI Yingguang, ZHOU Jing, ZHU Zexin, et al. Microwave high efficiency heating method for strong reflection materials: ZL202011325099.4[P]. 2021-03-09.
 [13] STURM G S J, VERWEIJ M D, VAN GERVEN T, et al. On the effect of resonant microwave fields on temperature distribution in time and space[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(13-14): 3800-3811.
 [14] PLAZA-GONZALEZ P, MONZO-CABRERA J, CATALA-CIVERA J M, et al. New approach for the prediction of the electric field distribution in multimode microwave-heating applicators with mode stirrers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(3): 1672-1678.
 [15] GEEDIPALLI S S R, RAKESH V, DATTA A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(3): 359-368.
 [16] TANG Z M, HONG T, LIAO Y H, et al. Frequency-selected method to improve microwave heating performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 642-648.
 [17] ZHOU J, LI Y G, LI N Y, et al. A multi-pattern compensation method to ensure even temperature in composite materials during microwave curing process[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 107: 10-20.
 [18] LI D, LI Y G, ZHOU J, et al. A novel method to ensure even temperature in polymer composites microwave curing process through deep learning with historical data[J]. Applied Composite Materials, 2020, 27: 1-17.
 [19] ZHOU J, LI Y G, LI D, et al. Online learning based intelligent temperature control during polymer composites microwave curing process[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 370: 455-465.

通讯作者: 郝小忠, 教授, 博导, 研究方向为先进复合材料构件新原理固化技术与装备及智能数控加工理论、技术与装备。

(责编 古东)