

基于磁性颗粒感应加热原位固化的碳纤维增强复合材料加筋板力学性能

许玉荣 胡夏芬 孙澳 梁纪秋 武丹 郝磊 魏俊杰 李毅超

Mechanical performance of stiffened CFRP panel cured via magnetic particle-induced in-situ heating

XU Yurong, HU Xiafen, SUN Ao, LIANG Jiqiu, WU Dan, HAO Lei, WEI Junjie, LI Yichao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240824.006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

熔融沉积成形锰锌铁氧体/聚乳酸复合材料的力学和吸波性能

Mechanical and microwave absorbing properties of Mn-Zn ferrite/polylactic acid composites formed by fused deposition modeling

复合材料学报. 2023, 40(5): 2759–2771 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220727.002>

不同厚度碳纤维布/环氧树脂复合材料孔隙率超声衰减模型

Ultrasonic attenuation model of porosity of carbon fiber cloth/epoxy resin composites with different thicknesses

复合材料学报. 2020, 37(4): 877–885 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190620.001>

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

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

复合材料学报. 2023, 40(4): 2405–2414 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220618.001>

3D打印连续纤维增强聚碳酸酯复合材料预浸丝制备与性能

Preparation and properties of 3D printing continuous fiber reinforced polycarbonate composite prepreg filaments

复合材料学报. 2023, 40(10): 5654–5665 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230213.003>

孔隙率对碳纤维/尼龙6复合材料湿热性能影响的数值模拟研究

Numerical study on the effect of void content on hygrothermal performances of carbon fiber reinforced polyamide 6 composites

复合材料学报. 2023, 40(2): 1154–1166 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220318.001>

孔隙对碳纤维/环氧树脂复合材料剪切性能和破坏模式的影响

Effects of voids on shear properties and failure mode of carbon fiber/epoxy resin composites

复合材料学报. 2024, 41(9): 4966–4979 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240722.004>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

基于磁性颗粒感应加热原位固化的碳纤维增强复合材料加筋板力学性能



分享本文

许玉荣¹, 胡夏芬², 孙澳¹, 梁纪秋², 武丹², 郝磊¹, 魏俊杰¹, 李毅超^{*1}

(1. 华中科技大学 航空航天学院, 武汉 430074; 2. 湖北航天技术研究院总体设计所, 航天动力先进技术湖北省重点实验室, 武汉 430040)

摘要: 随着碳纤维增强复合材料结构呈现出大型化、复杂化的发展趋势, 常规的烘箱或热压罐成型工艺暴露出尺寸受限、成型周期长、能量利用率低、固化不均匀等问题, 亟需探寻新型的复合材料成型工艺。本文以锰锌铁氧体作为加热载体, 探究了一种基于电磁感应原位加热的碳纤维增强复合材料固化成型新工艺。着重研究了 T 字型与工字型两种复杂铺层的碳纤维增强复合材料加筋板的加热特性、力学性能与孔隙率, 并与经烘箱固化的试样件进行了对比分析。结果显示: 电磁感应方法对两种结构加筋板均可以实现原位、均匀、温度可控、且不受铺层角度影响的加热与固化成型。在添加 13wt% 锰锌铁氧体电磁加热 5.5 h 条件下, T 字型加筋板的弯曲刚度较相同固化时间下烘箱成型试样件提升了 5.2%, 最大承载载荷提升了 11.2%。工字型加筋板的屈曲载荷较烘箱成型试样件提升了 3.3%。然而两种加筋板的孔隙率却略微增加了 0.4% 与 0.3%。本文获得的研究结果为电磁感应固化工艺在复合材料结构成型方面的工程化应用提供了重要依据。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 锰锌铁氧体; 固化; 力学性能; 孔隙率

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2025)05-2538-09

Mechanical performance of stiffened CFRP panel cured via magnetic particle-induced in-situ heating

XU Yurong¹, HU Xiafen², SUN Ao¹, LIANG Jiqui², WU Dan², HAO Lei¹, WEI Junjie¹, LI Yichao^{*1}

(1. School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei

Key Laboratory of Advanced Aerospace Propulsion Technology, System Design Institute of Hubei Aerospace Technology Academy, Wuhan 430040, China)

Abstract: With the development trend of large and complexity of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) structures, the conventional oven or autoclave molding method exposes problems such as size limitation, long fabrication time, low energy utilization, uneven curing, etc., and there is an urgent need to explore new composite molding method. In this paper, a new fabrication method to cure CFRP based on electromagnetic induction in-situ heating was investigated by using Mn-Zn ferrite as a heating carrier. The heating characteristics, mechanical properties and porosity of stiffened CFRP panels with two kinds of complex layups, T-shape and I-shape, were investigated, and comparative analyses were carried out with the counterpart specimens cured by an oven. The results show that the induction method can achieve in-situ, uniform, temperature-controlled and lay-up angle independent heating and curing for both two types panels. Under the condition of 13wt% Mn-Zn ferrite addition and 5.5 h induction heating, the flexural stiffness of the T-shaped panel is increased by 5.2% and the maximum load is increased by 11.2% compared to the oven-formed specimen under the same curing time. The buckling load of the

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-14; 录用日期: 2024-07-27; 网络首发时间: 2024-08-26 11:43:19

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240824.006>

基金项目: 2023 年湖北省重大攻关项目 (JD) (2023BAA004)

Major Program (JD) of Hubei Province (2023BAA004)

通信作者: 李毅超, 博士, 副教授, 研究方向为航空航天复合材料的多功能化与制备成型 E-mail: liyichao@hust.edu.cn

引用格式: 许玉荣, 胡夏芬, 孙澳, 等. 基于磁性颗粒感应加热原位固化的碳纤维增强复合材料加筋板力学性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(5): 2538-2546.
XU Yurong, HU Xiafen, SUN Ao, et al. Mechanical performance of stiffened CFRP panel cured via magnetic particle-induced in-situ heating[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(5): 2538-2546(in Chinese).

I-beam reinforced panel increases by 3.3% compared to the oven-molded specimen. However, the porosity of the two types of panels increase slightly by 0.4% and 0.3%. The results obtained in this paper provide important guidance for the engineering application of electromagnetic induction curing process in the fabrication of CFRP composite structures.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer (CFRP); Mn-Zn ferrite; cure; mechanical property; porosity

碳纤维增强复合材料 (CFRP) 因其优异的比强度、比刚度、可设计性、化学与尺寸稳定性等特点被广泛应用于航空航天结构件的制造^[1-2]。而这些优异的材料特性与复合材料的固化成型工艺密切相关。目前碳纤维增强复合材料主要通过烘箱和热压罐两种设备进行成型,即将设备内的空气加热后通过热传导和热对流的方式将热量传递给结构件对其进行固化成型^[3]。然而这两种成型方法均存在一定的不足: (1) 为了控制复合材料零件加热固化的均匀性,设备内的升温速率通常设置较小,这样会导致零件的成型周期较长,特别是对于大尺寸的复合材料零件^[4]; (2) 随着复合材料零件的尺寸、厚度、复杂度逐步提高,不可避免的会在结构内部产生不均匀的热传导,不仅极大浪费能量,而且会引发复合材料零件的局部过热和非均匀固化,从而在结构内部产生显著的残余应力与变形,严重影响复合材料零件的成型质量与结构性能。因此,近年来大量研究工作聚焦于探寻新型的非烘箱/非热压罐复合材料固化成型工艺方法。

微波加热、电阻加热、感应加热是目前 3 种广泛研究的新型复合材料固化成型方法。微波加热基于电磁波的介电加热效应实现对碳纤维增强复合材料的快速加热固化,但这种方法的加热特性与微波频率、模具及被加热件的形状和介电特性存在复杂关系,导致该方法较难控制材料的加热与固化均匀性^[5-6];电阻加热同样是一种加热效率较高的固化成型方法。然而这种方法需要在被加热件的两端连接电极,产生接触电阻问题,同时该方法的加热均匀性易受复合材料铺层角度的影响,导致非均匀加热^[7-9];感应加热基于感应线圈产生交变电磁场对复合材料件进行焦耳加热和磁滞加热。这种非接触式的加热方法可以高效的将电磁能转换为热能对复合材料进行原位固化,是一种很有前景的新型成型方法^[10-16]。但这种方法也需要克服碳纤维增强复合材料的铺层角度引起的涡流效应对感应加热均匀性造成的影响^[10-11,17]。

本课题组前期提出了一种基于磁性颗粒 (MPs)

锰锌铁氧体的电磁感应原位加热方法并将其应用于环氧树脂的固化成型,获得了加热均匀、温度可控且力学性能优异的试样件^[18]。而后进而将该方法推广到碳纤维增强复合材料层合板的电磁感应原位固化成型,通过研究 3 种不同铺层角度 ($[0]_8$ 、 $[0/90]_{4s}$ 、 $[0/45/90/-45]_{2s}$) 层合板的磁感应加热特性发现电磁加热工艺可以不受铺层角度的影响均匀加热并固化试样件。在力学性能方面,添加 13wt% 磁性材料电磁加热 5 h 固化得到的试样件力学性能相比烘箱固化工艺 (30 h) 显著提升,同时固化时间显著降低。本文在前述工作的基础上,探索将该工艺进一步应用于形状更复杂、并且结构形式更接近工程化应用的 T 字型与工字型复合材料加筋板的一体化固化成型的可行性,并重点对比研究了基于该工艺与烘箱成型工艺条件下复合材料结构件的力学性能。本文的研究结果将为基于磁性颗粒电磁感应原位加热的碳纤维增强复合材料 (MPs-CFRP) 结构件的固化成型提供新途径并提供有益的数据支撑。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

单向碳纤维布 (T700-12K) 作为制造复合材料加筋板的纤维材料从日本东丽公司购买。锰锌铁氧体 (Mn : Zn 质量比 >3 : 1) 从 Aladdin 购买,平均粒径为 1~10 μm 。双酚-A 环氧树脂 (M03 GCC135) 和固化剂 (M03 GCC137) 从 PRF Composite Materials 公司购买,环氧树脂和固化剂之间的质量比是 10 : 3。

1.2 锰锌铁氧体/环氧树脂基体材料制备

采用课题组前期提出的生物蛋白改性法对锰锌铁氧体进行表面处理改善其分散性^[19-20],其中大豆分离蛋白与锰锌铁氧体的质量比为 1 : 4。将 13wt% 直径约为 5~10 μm 的圆球状锰锌铁氧体加入环氧树脂中在研钵中手动研磨 30 min 使二者均匀混合。随后将固化剂加入上述树脂中均匀搅拌,再真空抽气 30 min 得到黏度为 620 MPa·s 的锰锌铁氧体/环氧树脂基体材料。

1.3 锰锌铁氧体/环氧树脂基碳纤维增强复合材料加筋板制备

由于金属模具会导致磁场屏蔽，本实验采用玻璃纤维模具制作加筋板。在模具表面均匀涂覆脱模剂，然后将单向碳纤维布与上述得到的磁性颗粒增强环氧树脂充分浸润制成碳纤维预浸料。本文研究 T 字型 and 工字型两种截面形状的碳纤维增强复合材料加筋板的制造，铺层角度与截面尺寸如图 1 所示。按图 1 设计将预浸料从下而上层叠铺放于模具表面，需要注意的是为了定形中间的腹板结构，在其两侧放置两根长方形亚克力棒进行夹紧，如图 2 所示。预浸料上方再依次覆盖剥离布、有孔分离膜、透气毡，最后用耐高温真

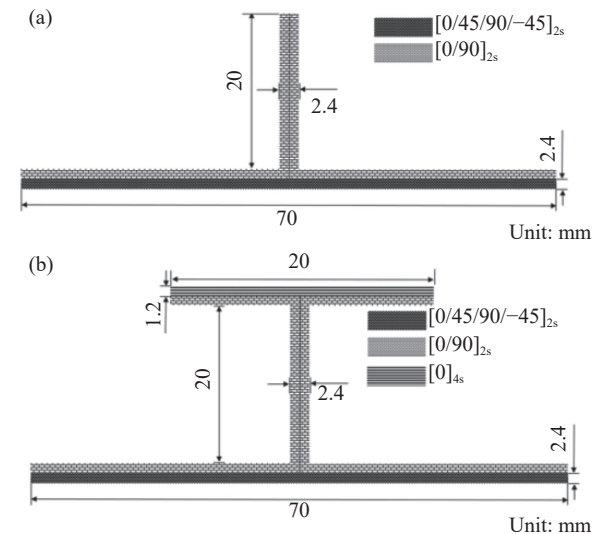


图 1 T 型结构加筋板 (a) 和工字型加筋板 (b) 的横截面尺寸及铺层角度
Fig. 1 Cross-section geometry and ply sequence of T-shaped (a) and I-shaped (b) stiffened panel

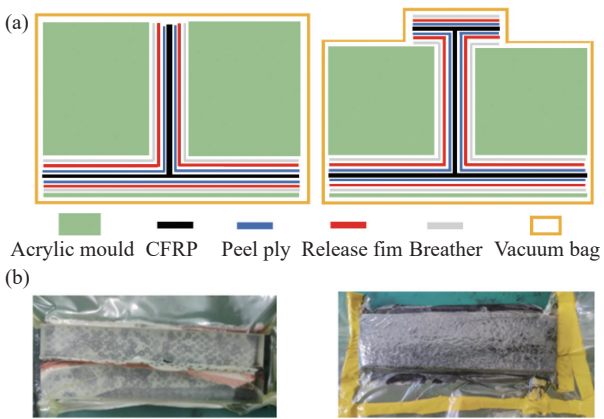
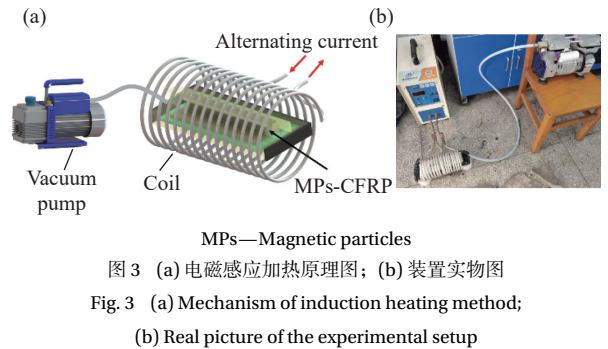


图 2 碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加筋板制作过程铺层方法示意图 (a) 和实物图 (b)
Fig. 2 Stacking sequence for the fabrication of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) stiffened panel (a) and prepared real picture (b)

空袋密封，从袋中开孔引出一条导管连接抽真空装置用于成型过程中的气泡清除。

1.4 电磁感应加热工艺

本文提出的电磁感应加热工艺主要由一台高频 (30~80 kHz) 感应加热器 (BTG-20kW, 中山市贝特精密科技有限公司) 外接直径为 110 mm、长度为 200 mm 的圆环形铜线圈、真空泵、被加热试样组成，如图 3 所示。试样与模具共同包裹于真空袋中并将其整体放置于线圈当中。由高频感应加热机产生的高频交变电流在线圈中产生交变磁场以此原位加热试样中的锰锌铁氧体磁性颗粒，实现试样件的原位固化。为了避免交变磁场在试样件中产生感应涡流，干扰试样件的均匀平稳加热，实验中将试样件水平放置于线圈中使磁感应线平行于试样表面，最大限度抑制感应涡流的产生^[10-11, 17]。同时，将试样真空袋中引出的导管与真空泵相连实现整个加热过程的不间断抽真空，达到排气与压实的作用。通过调节磁感应加热机的磁场强度可以调控试样的加热温度，本实验中首先将磁场强度调节为 0.74 mT 维持 4 h，使碳纤维试样件以 1.3℃/min 的速率升温，然后稳定在 70℃ 加热 4 h；随后提高磁场强度到 0.86 mT 使碳纤维试样件以 0.8℃/min 的速率二次升温，然后稳定在 120℃ 加热 1.5 h 完成整个固化过程。作为对照组，相同条件下的试样件采用烘箱 (WHL-125T, 天津泰斯特仪器有限公司) 固化方式进行成型，成型工艺为首先以 1.2℃/min 的速率升温到 70℃ 保温 4 h，然后以 0.7℃/min 的速率升温到 100℃ 加热 1.5 h 完成固化，相关参数见表 1。



1.5 力学性能测试

按照 ASTM-D7264^[21] 标准对碳纤维增强复合材料试样进行三点弯曲力学性能测试。将试样切割打磨到标准尺寸，在万能实验机 (WDW-100E, 时代试金) 上调整夹具的跨距为 160 mm，加载速

表 1 实验相关参数

Table 1 Parameters used in the experiment

Sample	Type	Loading	Curing time	Curing method
MPs-CFRP	T	13wt%	5.5 h	Induction heating: 0.7 mT (4 h)-0.9 mT (1.5 h) Oven heating: 70℃ (4 h)-120℃ (1.5 h)

度为 2 mm/min，记录载荷-位移曲线。复合材料加筋板的弯曲刚度采用下式计算：

$$E_1 = \frac{l^3 \Delta P}{48 \Delta S}$$

(1)

式中： E_1 为弯曲刚度 (N·mm²)； ΔP 为载荷-挠度曲线上初始直线段的载荷增量 (N)； ΔS 为与载荷增量 ΔP 对应的跨距中点处的挠度增量 (mm)； l 为跨距 (mm)。

1.6 加筋板孔隙率测试

复合材料的孔隙率是指材料中孔隙体积与总体积的比值，通常用百分比表示。而碳纤维增强复合材料主要由环氧树脂基体部分与碳纤维增强部分组成，因此孔隙率的计算公式为

$$V_v = 1 - \frac{m_m / \rho_m + m_f / \rho_f}{V_t} \times 100\%$$

(2)

式中： V_v 为孔隙率 (%)； m_m 为基体材料制作所用质量 (g)； ρ_m 为基体材料密度 (g/cm³)； m_f 为纤维增强体制作所用材料质量 (g)； ρ_f 为纤维增强体材料密度 (g/cm³)； V_t 为试样的体积 (cm³)。

2 结果与讨论

2.1 电磁感应加热升温性能

图 4(a) 所示为烘箱固化过程中的升温曲线设置，首先升温到 70℃ 保温 4 h，再升温到 120℃ 保温 1.5 h，完成固化过程。为了研究电磁加热工艺对复合材料加筋板的力学性能，本文将试样在电磁加热条件下的升温曲线与烘箱加热工艺设定为一致。由于 Mn-Zn 铁氧体是典型的居里温度材料，通过调控其含量、分散性及磁场强度发现当铁氧体的添加量为 13wt%，同时磁场强度分别设置为 0.7 mT 与 0.9 mT 时可以将试样的加热温度控制在 70℃ 与 120℃，因此在实际的电磁加热过程中设置其固化工艺为 0.7 mT 场强下 4 h、0.9 mT 场强下 1.5 h。此外，需要注意的是碳纤维本身在交变电场作用下也会发生感应加热，为了验证本方法中磁性颗粒的作用，对未加入磁性颗粒的 CFRP 试样件在 0.9 mT 场强下的电磁加热特性也进行了

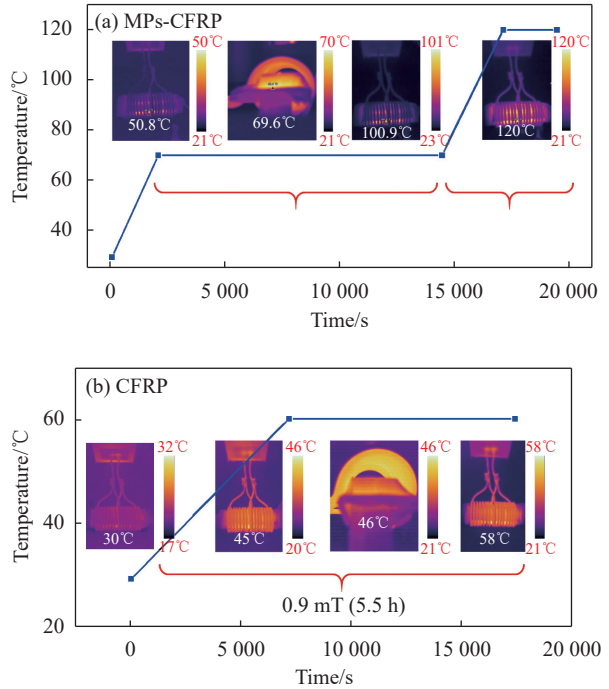


图 4 在有 (a)、无 (b) 磁性颗粒条件下 T 字型试样件电磁加热升温曲线及不同升温时刻试样表面温度场分布

Fig. 4 Induction heating curves and temperature fields of T-shape sample with (a) and without (b) magnetic particles

研究。

如图 4(a) 所示，通过热像仪可以观察到试样件在加热过程中的温度场变化。以 T 字型加筋板为例，分别捕捉其表面平均温度达到 50.8℃、69.6℃、100.9℃、120℃ 时刻的温度场分布图。虽然复合材料加筋板表面的大部分加热区域被线圈和亚克力棒所遮挡，但从线圈的缝隙和端面可以清晰地看出在交变磁场的作用下试样件的内部发生了自发性的原位加热现象，并且加热温度可以随着磁场强度的变化而改变。通过监测试样件在加热全过程中沿长度方向纵切线上的最大温差可以发现结果均未超过 10℃，表明温度场始终呈现出较好的均匀性。另一方面，图 4(b) 为 T 字型加筋板在未添加磁性颗粒条件下的电磁加热升温曲线图，可以看出试样确实产生了缓慢的加热现象，但加热温度均未超过 60℃。这一结果表明在交变磁场作用下 CFRP 内部的确产生了涡流加热现象，但由于工件沿着磁感线的方向放置使纤维自加热现象并不明显。相比之下，当磁性颗粒分布于工件内部时，工件的温度可以很快提升到超过 100℃，并且在磁性颗粒居里温度点的限制下实现了长时间的保温，体现出磁性颗粒方法的优势。工字型加筋板同样呈现出类似的加热特性。以上

这些结果证明了所提出的基于磁性颗粒感应加热方法的可行性与有效性。

2.2 T 字型加筋板力学性能

2.2.1 理论弯曲刚度

T 字型复合材料加筋板可以拆分为 1 个腹板结构和 2 个缘条结构，如图 5 所示，整个加筋板的弯曲刚度计算式为

$$E_1^{eq} = \sum_i (E_1)_i \tag{3}$$

其中， $(E_1)_i$ 为加筋板 3 个子结构的弯曲刚度，由下式确定：

$$(E_1)_i = E_b \left[\frac{b_i t_i^3}{12} + A_i d_i^2 \right] \tag{4}$$

式中： A_i 为第 i 个元件的面积 ($b_i t_i$)； d_i 为整个横截面中性轴与第 i 个元件中心轴之间的距离，如图 5 所示。基于加筋板的铺层角度、材料特性与几何尺寸可以计算得到如表 2 结果。

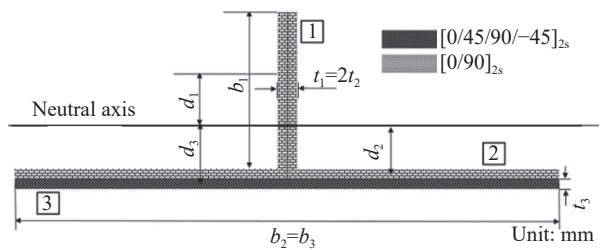


图 5 T 字型加筋板单元切分法及相关参数标注
Fig. 5 Segmentation of T-shaped stiffened panel and related parameter labeling

表 2 T 字型加筋板不同分割单元相关参数

Table 2 Parameters of different segments of T-shaped stiffened panel				
No.	b/mm	t/mm	d/mm	E_b/GPa
1	20	2.4	9.6	75.5
2	70	1.2	1	13.35
3	70	2.4	2.8	62.1

Note: E_b —Flexural modulus of component i .

由式 (3)、(4) 及表 2 中各个单元元的相关参数，计算得到 T 形梁的弯曲刚度理论计算结果为 542 844 GPa·mm⁴。

2.2.2 力学性能分析

图 6 为对烘箱固化和电磁感应加热固化条件下得到的 T 型加筋板进行三点弯曲实验获得的弯曲载荷-位移曲线。由式 (1) 可进一步计算得到电磁感应固化与烘箱固化对应的平均弯曲刚度分

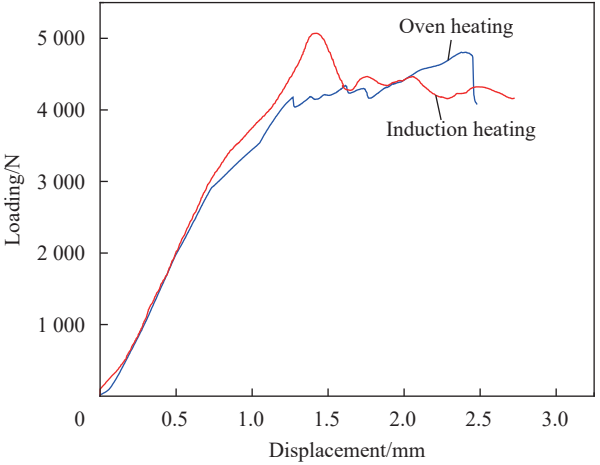


图 6 经烘箱固化和电磁感应加热固化的 T 型加筋板三点弯曲载荷-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of three-points bending of T-shaped stiffened panel cured by oven heating and induction heating

别为 558 333 GPa·mm⁴、530 363 GPa·mm⁴，如图 7 所示。电磁固化结果比烘箱工艺提升了 5.2%。同时，实验得到的最大载荷平均值及载荷对应的最大变形量平均值绘制柱状图如图 8 所示。通过对比这几项数据可以发现，电磁感应加热固化与烘箱加热固化得到的 T 型加筋板的弯曲刚度与理论计算值相近 (542 844 GPa·mm⁴)，说明两种固化工艺均可以较好的成型加筋板。而两种固化条件下得到的结构最大载荷分别为 5 268.48 N 与 4 695.26 N，电磁感应工艺比烘箱固化工艺提升了 11.2%。同时在载荷最大时的变形位移为 1.51 mm 与 2.26 mm，表明电磁加热固化工艺增加了结构件的脆性。这一现象的原因可能是磁性颗粒在试样件内部的原位加热效应使树脂基体产生了更剧

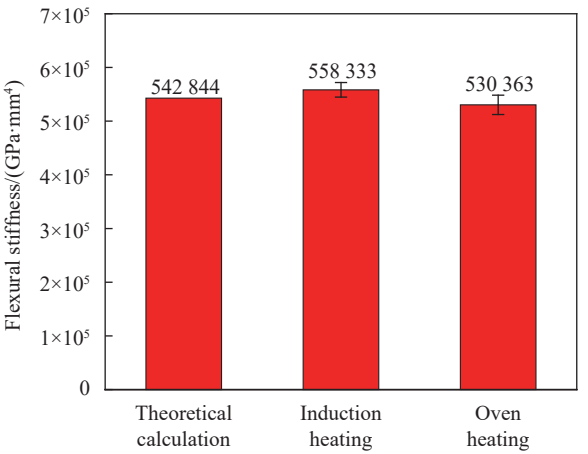


图 7 T 型加筋板在烘箱固化与电磁固化条件下弯曲刚度
Fig. 7 Flexural stiffness of T-shaped stiffened panel cured by oven heating and induction heating

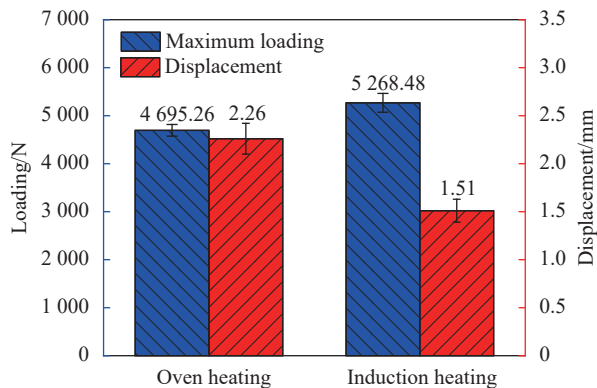


图8 经烘箱固化和电磁感应加热固化的T型加筋板弯曲最大载荷与载荷最大处对应位移

Fig.8 Maximum bending load and displacement of T-shaped stiffened panel cured by oven heating and induction heating

烈的固化交联反应。后续应该适当调控磁性颗粒的含量、分散及磁场频率以此控制树脂的稳定固化。此外可以发现，电磁加热工艺获得的结构件的载荷-位移曲线在出现破坏以后，仍然承受了很久的载荷作用，证明零件底部的纵向加强腹板在压缩部分破坏以后仍然承受了大量载荷，维持了结构的稳定性。烘箱固化得到的T型加筋板的弯曲模量稍小于理论计算值，可能是制作过程带来的缺陷等问题带来的影响，而电磁感应加热固化通过从材料内部原位加热提升了T形梁的力学性能，使其抗弯性能获得一定的提升。在复杂铺层条件下的电磁感应加热固化工艺仍较烘箱固化加热表现出了更优越的性能。

2.2.3 损伤特征分析

图9为两种固化工艺下T型加筋板弯曲破坏后的失效特征对比图。结果显示，两种固化条件

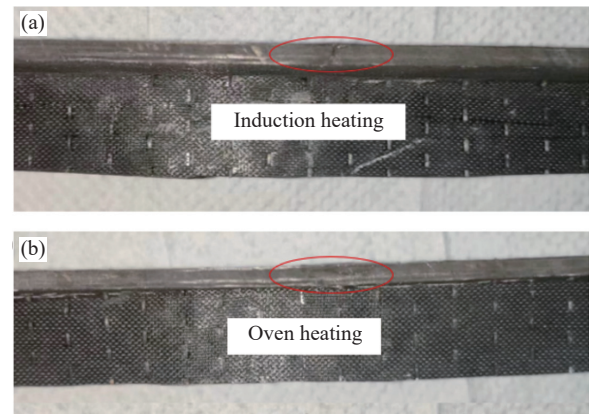


图9 经电磁感应加热固化(a)和烘箱固化(b)的T字型加筋板试样失效特征

Fig.9 Failure characteristics of T-shaped stiffened panel cured by induction heating (a) and oven heating (b)

下的复合材料加筋板失效损伤形式类似，均在缘条处出现了挤压断裂，当压缩部分的碳纤维断裂持续增加时，其内部均出现层间分层现象。在弯曲挠度持续增大的过程中，中央的腹板会在很大程度上提升结构件的抗弯性能，从图中可以看出两种成型工艺条件下的中央腹板均出现了一定程度的屈曲损伤，但较上部缘条损伤不明显，两者在图6所示的载荷-位移曲线也始终维持在一个稳定的载荷附近，直到整体试样失稳。以上结果显示采用电磁感应加热方法制造的复合材料加筋板的力学承载能力并不弱于烘箱加热方法。

2.3 工字型加筋板力学性能

2.3.1 理论屈曲强度

将工字梁按照铺层角度与位置分为5个部分单元，如图10所示。采用工程弯曲应变理论，可计算得到工字梁的最大承受载荷为

$$F = \frac{2\sigma_c^u I}{ly_{\max}} \tag{5}$$

式中： F 为承受载荷(N)； σ_c^u 为对应单元的最大压缩应力(MPa)； y_{\max} 为中性轴上方距离中性轴最远位置(mm)； I 为整个横截面的惯性矩(mm⁴)。

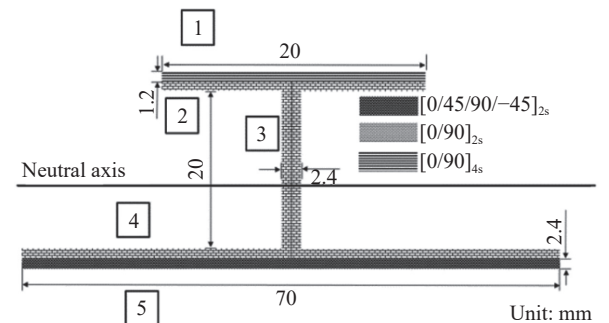


图10 工字型加筋板单元切分法及相关参数标注
Fig.10 Segmentation of I-shaped stiffened panel and related parameter labeling

对上下缘条而言，作为一边自由边的局部失稳，屈曲载荷与缘条的极限压缩强度经验关系式为

$$\frac{\sigma_{\text{crip}}}{\sigma_c^u} = \frac{2.137}{(b/t)^{0.717}} \tag{6}$$

式中： b 、 t 为加筋板宽度和厚度； σ_{crip} 为临界屈曲载荷；当 $b \geq 2.91t$ 时上式有效；当 $b < 2.91t$ 时， $\sigma_{\text{crip}} = \sigma_c^u$ 。

对中央腹板而言，作为无自由边的局部失稳，屈曲载荷与缘条的极限压缩强度经验关系式为

$$\frac{\sigma_{\text{crip}}}{\sigma_c^u} = \frac{14.92}{(b/t)^{1.124}} \tag{7}$$

当 $b \geq 11.07t$ 时上式有效；当 $b < 11.07t$ 时， $\sigma_{crip} = \sigma_c^u$ 。

对于本文的三点弯曲实验，主要支撑结构为中央腹板，对3号腹板而言， $b < 11.07t$ ，因此屈服强度即为压缩强度本身，对 $[0/90]_{4s}$ 铺层的层合板结构，纯弯曲情况下 y 方向的弯曲强度与 x 方向上的弯曲强度之比大致对应其刚度矩阵中的加筋板弯曲刚度系数比 D_{11}/D_{22} ，由式 (6)、(7) 及表 3 中各个单元件的相关参数，可以计算得到中央腹板开始发生屈曲的载荷为 5 059.23 N。

表 3 工字型加筋板不同分割单元相关参数

Table 3 Parameters of different segments of I-shaped stiffened panel				
No.	b/mm	t/mm	d/mm	E_b/GPa
1	20	1.2	18.1	91.64
2	20	1.2	16.9	13.35
3	20	2.4	6.3	75.5
4	70	1.2	4.3	13.35
5	70	2.4	6.1	62.1

2.3.2 力学性能分析

对电磁感应加热固化与烘箱固化成型得到的工字型加筋板进行三点弯曲实验，得到的载荷-位移曲线如图 11 所示，屈服载荷平均值与载荷处对应的位移平均值结果如图 12 所示。

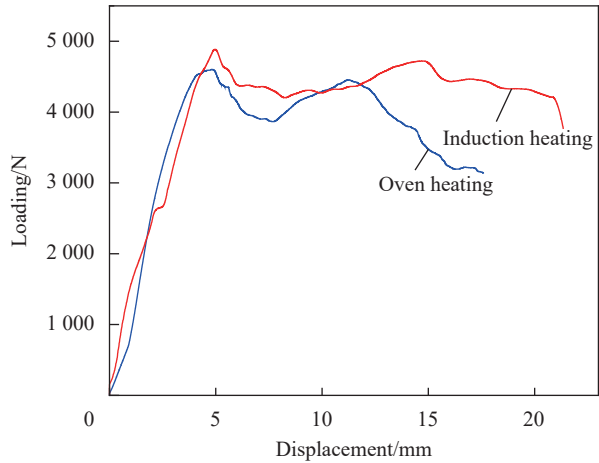


图 11 经烘箱固化和电磁感应加热固化的工字型加筋板三点弯曲载荷-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of three-points bending of I-shaped stiffened panel cured by oven heating and induction heating

由实验结果可知，烘箱固化与电磁感应加热固化得到的弯曲屈服载荷分别为 4 581.46 N、4 736.13 N，电磁感应工艺得到的试样件屈服载荷较烘箱成型试样件提升了 3.3%，弯曲载荷处的位

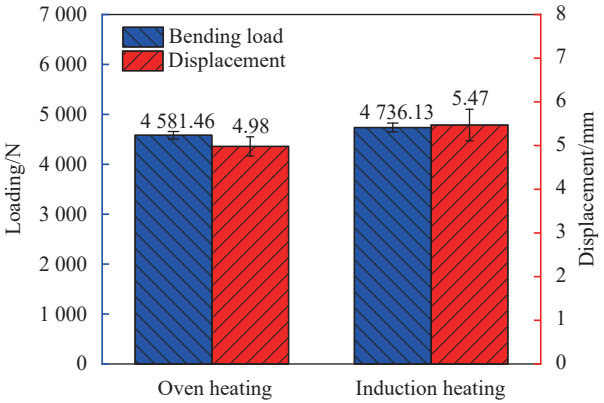


图 12 经烘箱固化和电磁感应加热固化的工字型加筋板弯曲最大载荷与载荷最大处对应位移

Fig. 12 Maximum bending load and displacement of I-shaped stiffened panel cured by oven heating and induction heating

移分别为 4.98 mm、5.47 mm，电磁感应加热固化得到的工字型试样力学性能表现出了一定的优越性。烘箱固化加热的载荷-位移曲线在发生明显屈曲现象之前，并未出现明显的波动位置，这表明烘箱固化加热的上部分缘条在受压过程中并未承受过多载荷即发生了屈曲失效，载荷绝大部分的作用区域位于中央腹板处，腹板的屈服载荷为 4 601.4 N。电磁感应加热固化得到的试样三点弯曲位移-载荷曲线在 2 500 N 附近发生了第一次明显波动，这是上方缘条在受压过程中的屈服载荷。这种波动现象可能来源于磁性颗粒在复合材料中的不均匀分散或者团聚效应，由此引起的材料内部缺陷所导致，后续需要重点改善磁性颗粒在复合材料内部的分散性及和树脂的界面接合特性。在上方缘条完全失效后，中央缘条继续增加载荷承受量，最终在 4 880.6 N 出现较明显的屈曲现象。

以上结果显示，烘箱固化加热试样的上缘条由于紧贴亚克力固定棒，一定程度阻碍了热量的传导，同时由于热膨胀系数的不同，导致上部分缘条结构存在一定的缺陷问题，缺少了明显的第一阶段屈服点，也影响了最终的力学测试结果。相比之下，电磁感应固化方法是从试样内部原位加热固化试样，减少了热传导不均及热膨胀率不同带来的影响，上缘条在载荷-位移曲线上出现一个小的屈服平台，且最后在整体屈曲上表现出了更好的力学性能结果。

2.3.3 损伤特征分析

图 13 为两种固化工艺下工字型加筋板弯曲破坏后的失效特征对比图。结果显示，两种固化方式得到的结构件均出现了类似的屈服行为，在承

压后上缘条首先出现纯弯承压下的局部屈曲，但是在继续施加荷载之后，烘箱固化成型的工字型加筋板在中性面以上出现了很明显的竖向裂纹，这表明在上缘条出现弯曲屈服后，中央腹板紧接着出现了屈曲行为，这个过程由于纵向板之间出现的明显分层现象，导致了力学性能的降低，而这个现象也反映到了载荷-位移曲线中。而电磁感应加热固化试样的工字型加筋板在弯曲过程中，虽然也发生了明显的腹板屈曲行为，但是腹板之间并未出现明显的裂纹扩展。

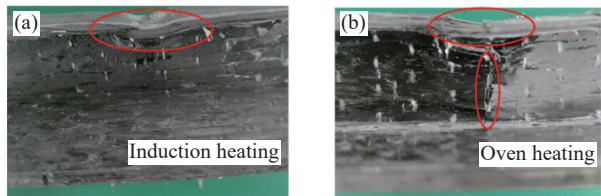


图 13 经电磁感应加热固化 (a) 和烘箱固化 (b) 的工字型加筋板试样失效特征

Fig. 13 Failure characteristics of I-shaped stiffened panel cured by induction heating (a) and oven heating (b)

通过以上两种结构加筋板的力学性能研究，发现基于电磁感应加热固化方法获得的复合材料结构表现出更优越的性能，显示了该方法在制造复杂碳纤维结构方面的潜在优越性与可行性。

2.4 加筋板孔隙率研究

图 14 为两种固化工艺下 T 字型 and 工字型加筋板孔隙率对比图。可以看出电磁感应加热固化方法成型的试样件孔隙率稍微高于烘箱固化工艺。对 T 型加筋板，电磁感应加热固化的孔隙率仅高出烘箱固化工艺 0.39%；对工字型加筋板，电磁感应加热固化的孔隙率也仅高出烘箱固化工艺 0.29%。电磁感应加热工艺产生的孔隙率偏高的原因可能源于两方面：(1) 试样制作方面的问题。由于是人工采用手糊法制作试样，在试样底部 90°拐角处铺层可能并未完全粘合模具，产生的桥接现象引入了空隙；(2) 磁性颗粒自身发热。磁性颗粒的原位发热会导致树脂局部发生剧烈固化交联反应产生一定气体。由于成型过程中真空泵施加的压力不够，使气体未能完全排除产生孔隙。如何解决以上两个问题将是后续研究的重点。

虽然孔隙率的增加会严重影响复合材料结构件的力学性能，但采用电磁感应固化方法反而获得了力学性能更优的结构件，这一现象的原因可能也有两点：(1) 磁性颗粒自身对结构件的增强作

用；(2) 磁性颗粒的自发热显著提高了复合材料的固化度与固化均匀性。以上结果充分证明了电磁感应固化加热在复杂铺层复材构件制作上的优势性，后续如果能够通过增加加压强度等方法抑制孔隙的产生，该成型工艺将成为一种非常具有潜力的复合材料非烘箱固化成型方法。

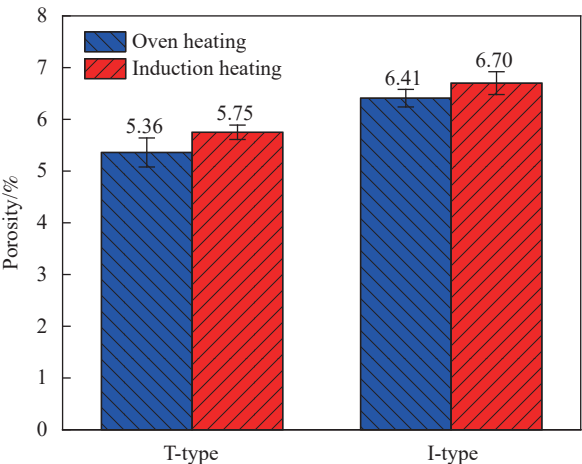


图 14 T 字型加筋板与工字型加筋板在两种固化工艺后的孔隙率

Fig. 14 Porosity of T-shaped and I-shaped stiffened panel cured by oven heating and induction heating

3 结论

研究了一种基于磁性颗粒感应加热原位固化的碳纤维增强复合材料加筋板的力学性能。对比分析了复杂铺层条件下 T 字型加筋板和工字型加筋板在电磁感应加热固化和烘箱加热固化两种成型方法下的弯曲特性，得出以下结果：

(1) 电磁感应加热方法可以实现复合材料加筋板的固化成型，基于该工艺获得的碳纤维层合 T 字型加筋板的弯曲刚度为 558 333 GPa·mm⁴，在相同固化时间下较烘箱成型工艺获得的加筋板弯曲刚度提升了 5.2%。最大承载载荷为 5 268.48 N，较烘箱成型工艺提升了 11.2%；

(2) 电磁感应加热固化得到的工字型加筋板的屈曲载荷为 4 736.13 N，在相同固化时间下较烘箱成型工艺获得的加筋板屈曲载荷提升了 3.3%；

(3) 电磁感应加热固化得到的 T 型与工字型加筋板的孔隙率分别为 5.75%、6.7%，较烘箱固化工艺得到的两种结构板的孔隙率分别提高了 0.39%、0.29%。

以上结果可以看出，提出的电磁感应原位固化方法可以实现对铺层较复杂的碳纤维增强复合材料加筋板的固化成型，虽然该方法会导致一定

的孔隙增加,但对比传统烘箱固化工艺在复合材料结构力学性能方面的提升是十分显著的,电磁加热固化方法使用的锰锌铁氧体磁性颗粒及感应加热设备的成本低、可便携,便于快速搭建与布置。目前研究显示磁性颗粒可实现的最高加热温度可达到 120~150℃ 范围,适合大部分热固性树脂的成型。后期需要突破的两个关键技术是:(1)磁性颗粒的高分散与界面接合技术;(2)孔隙的抑制技术。如果能解决如上两个问题,基于磁性颗粒的原位加热方式,能够很好地解决大型构件加热不均引起的温度梯度与固化残余应力的问题,非常适合于大型或厚质构件的制造成型,是一种具有潜力的全新复合材料成型方法。

参考文献:

- [1] LIN K Y. Composite materials: Materials, manufacturing, analysis, design and repair[M]. California: Createspace Independent Publishing Platform, 2015: 135-140.
- [2] BARBERO E J. Introduction to composite materials design [M]. Third Edition. New York: CRC Press, 2017: 462-466.
- [3] COLLINSON M G, BOWER M P, SWAIT T J, et al. Novel composite curing methods for sustainable manufacture: A review[J]. *Composites Part C: Open Access*, 2022, 9: 100293.
- [4] YANG Z L, LEE S. Optimized curing of thick section composite laminates[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2001, 16(4): 541-560.
- [5] ZHOU J, LI Y G, ZHU Z X, et al. Microwave heating and curing of metal-like CFRP laminates through ultrathin and flexible resonance structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 218: 109200.
- [6] LI S P, LI Y G, ZHOU J, et al. Improvement of heating uniformity by limiting the absorption of hot areas in microwave processing of CFRP composites[J]. *Materials*, 2021, 14(24): 7769.
- [7] COLLINSON M G, SWAIT T J, BOWER M P, et al. Development and implementation of direct electric cure of plain weave CFRP composites for aerospace[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 172: 107615.
- [8] LIU Y, VAN VLIET T, TAO Y P, et al. Sustainable and self-regulating out-of-oven manufacturing of FRPs with integrated multifunctional capabilities[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 190: 108032.
- [9] LIU S T, LI Y G, SHEN Y, et al. Mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites cured by self-resistance electric heating method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(9-12): 3479-3493.
- [10] LUNDSTRÖM F, FROGNER K, ANDERSSON M. A numerical model to analyse the temperature distribution in cross-ply CFRP during induction heating[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 202: 108419.
- [11] LUNDSTRÖM F, FROGNER K, ANDERSSON M. Numerical modelling of CFRP induction heating using temperature-dependent material properties[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 220: 108982.
- [12] SEGRETO T, BOTTILLO A, PALMIERI B, et al. Ultrasonic evaluation of induction heat treatment applied to thermoplastic matrix CFRP[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 88: 467-472.
- [13] GROUVE W, VRUGGINK E, SACCHETTI F, et al. Induction heating of UD C/PEKK cross-ply laminates[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 47: 29-35.
- [14] KIDANGAN R T, UNNIKRISHNAKURUP S, KRISHNAMURTHY C V, et al. The influence of interlaminar microstructure on the induction heating patterns of CFRP laminates[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 104338.
- [15] BAYERL T, DUHOVIC M, MITSCHANG P, et al. The heating of polymer composites by electromagnetic induction—A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 57: 27-40.
- [16] LIU C W, QU C Y, HAN L, et al. Preparation of carbon fiber-reinforced polyimide composites via in situ induction heating[J]. *High Performance Polymers*, 2017, 29(9): 1027-1036.
- [17] 付天宇, 许家忠, 赵辉, 等. CFRP 感应加热线圈中心区域温度场 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3314-3322.
FU Tianyu, XU Jiazhong, ZHAO Hui, et al. Temperature field in the central area of CFRP induction heating coil[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(10): 3314-3322(in Chinese).
- [18] LI Y C, SUN A, HU X F, et al. An out-of-oven curing technique for epoxy resin via magnetic particle-induced in situ heating[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(16): 6765-6777.
- [19] HUANG X R, LI R F, ZENG L J, et al. A multifunctional carbon nanotube reinforced nanocomposite modified via soy protein isolate: A study on dispersion, electrical and mechanical properties[J]. *Carbon*, 2020, 161: 350-358.
- [20] LI Y C, JI J Y, WANG Y, et al. Soy protein-treated nanofillers creating adaptive interfaces in nanocomposites with effectively improved conductivity[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(11): 8653-8665.
- [21] ASTM. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials: ASTM D7264/D7264M—2007[S]. West Conshohockens: ASTM International, 2007.