

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.02.004

新型蜂窝浸渍树脂及对位芳纶纸蜂窝性能

周凯运, 轩立新, 王志强, 苏韬, 陈丽春

(航空工业济南特种结构研究所, 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南 250023)

摘要: 制备了一种适用于对位芳纶纸蜂窝的新型浸渍树脂——F·JN-5-07A/B树脂, 并对其黏度和固化特性进行了表征, 结果表明, 改性后的F·JN-5-07A/B树脂在25~70℃具有适中的对位芳纶纸蜂窝浸渍工艺黏度(11~14 Pa·s), 并且在70℃恒温1 h后的黏度升至68 Pa·s; 固化温度较改性前降低了109.7℃, 大大改善了对位芳纶纸蜂窝制备工艺。采用酚醛树脂和F·JN-5-07A/B树脂两种浸渍树脂制作了2-64和2-80两种规格的对位芳纶纸蜂窝。结果表明, 相比于浸渍酚醛树脂的对位芳纶纸蜂窝, 浸渍F·JN-5-07A/B树脂的对位芳纶纸蜂窝综合性能优异, 2-64和2-80规格的对位芳纶纸蜂窝的室温平压强度分别提高了13.3%和17%, 200℃时的平压强度保留率分别为75%和78%, 介电常数和介电损耗角正切值分别由1.14和0.005 0降低至1.09和0.002 0; 2-64规格对位芳纶纸蜂窝的 L 向剪切强度和 L 向剪切弹性模量分别提高了23.8%和9.2%, 2-80规格的对位芳纶纸蜂窝分别提高了18.5%, 13.8%。

关键词: 浸渍树脂; 对位芳纶纸蜂窝; 力学性能; 介电性能

中图分类号: V262.415 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)02-0022-07

New Impregnating Resin and Properties of Para-Aramid Paper Honeycomb

Zhou Kaiyun, Xuan Lixin, Wang Zhiqiang, Su Tao, Chen Lichun

(AVIC Research Institute for Special Structure of Aeronautical Composite,

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on High Performance Electromagnetic Windows, Jinan 250023, China)

Abstract: A new type of resin (F·JN-5-07A/B resin) suitable for para-aramid paper honeycomb was prepared. The viscosity and curing characteristics of the resin were characterized. The results show that the F·JN-5-07A/B resin has a moderate para-aramid honeycomb impregnation viscosity of 11–14 Pa·s at 25–70℃, and the viscosity rises to 68 Pa·s after 1 h of the constant temperature at 70℃. The curing temperature is 109.7℃ lower than that before modification, which greatly improved the preparation technology of para-aramid paper honeycomb. Two kinds of para-aramid paper honeycomb with 2–64 and 2–80 specifications were prepared by impregnating phenolic resin and F·JN-5-07A/B resin. The results show that, compared with the para-aramid paper honeycomb impregnated with phenolic resin, the comprehensive properties of the para-aramid paper honeycomb impregnated with F·JN-5-07A/B resin are excellent. The compressive strengths at room temperature of 2–64 and 2–80 para-aramid paper honeycomb increase by 13.3% and 17%, the retention rates of compressive strength at 200℃ is 75% and 78%, the dielectric constant and the tangent value of dielectric loss angle decrease from 1.14 and 0.005 0 to 1.09 and 0.002 0 respectively. The L -shear strength and L -shear modulus of elasticity of 2–64 para-aramid paper honeycomb increase by 23.8% and 9.2%, and the L -direction shear strength and L -direction shear elastic modulus of 2–80 para-aramid paper honeycomb increase by 18.5% and 13.8% respectively.

Keywords: impregnating resin; para-aramid paper honeycomb; mechanical property; dielectric property

芳纶纸蜂窝具有质量轻、高强度、高模量、阻燃、耐高温、低介电损耗等优良性能, 已成为飞机复合材料蜂窝夹层结构的首选芯材, 主要应用于飞机

雷达天线罩、机体次承力和舱内结构等部件^[1-6], 在降低飞机结构质量、实现功能部件透波、降噪、隔热性能以及改善相关零部件的加工性能等方面起到较

通信作者: 周凯运, 硕士, 工程师, 主要从事透波复合材料研究 E-mail: 18764085101@163.com

收稿日期: 2020-11-12

引用格式: 周凯运, 轩立新, 王志强, 等. 新型蜂窝浸渍树脂及对位芳纶纸蜂窝性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2): 22–28.

Zhou Kaiyun, Xuan Lixin, Wang Zhiqiang, et al. New impregnating resin and properties of para-aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2): 22–28.

重要的作用。

芳纶纸蜂窝可以分为间位芳纶纸蜂窝和对位芳纶纸蜂窝,国外对间位芳纶纸蜂窝和对位芳纶纸蜂窝均开展了较为深入的研究^[7-8]。而在国内,最常见并且研究最多的仍为间位芳纶纸蜂窝,使用的间位芳纶纸有杜邦的 NomexT412 芳纶纸、烟台民士达的 YT812 芳纶纸等,使用的蜂窝浸渍树脂也多为酚醛树脂^[9-14]。郝巍等^[15-16]开展了国产对位芳纶纸蜂窝的性能研究,研究结果表明,与对间位芳纶纸相比,同等规格的对位芳纶纸在比强度、比模量、耐热性方面具有显著的优势。

相比于间位芳纶纸,对位芳纶纸结构较为疏松,但是针对对位芳纶纸特点的蜂窝浸渍树脂的研究很少,在查阅的相关对位芳纶纸蜂窝研究文献中仍采用酚醛树脂。为了更好地发挥对位芳纶纸蜂窝的综合性能优势,笔者对牌号为 F·JN-5-07 的树脂进行改性,开展新型浸渍树脂流变及固化特性分析研究,制备出适用于低介电、高强度、高模量对位芳纶纸蜂窝的新型浸渍树脂,分别采用酚醛树脂和新型浸渍树脂制备了不同规格的对位芳纶纸蜂窝,对对位芳纶纸蜂窝的力学性能、介电性能等进行了表征对比,旨在满足新一代航空武器装备对高性能雷达天线罩的技术需求。

1 实验部分

1.1 主要原材料

酚醛树脂: F01-36, 重庆三峡油漆股份有限公司;

低介电热固性脘基树脂: F·JN-5-07, 航空工业济南特种结构研究所;

对位芳纶纸: PCF-45, 株洲时代新材料科技股份有限公司;

改性剂 A: 高分子量聚醚类树脂, 自制;

改性剂 B: 酚类化合物, 自制。

1.2 主要仪器与设备

差示扫描量热 (DSC) 仪: Q10 型, 美国 TA 公司;

万能材料试验机: 5885 型, 美国 Instron 公司;

电热鼓风干燥箱: 101 型, 上海魅宇仪器有限公司;

分析天平: BS600H 型, 上海精空科学有限公司;

流变仪: Gemini200 型, 英国 Malvern 公司。

1.3 试样制备

(1) 新型浸渍树脂的制备。

将适量 F·JN-5-07 树脂、改性剂 A (用量为 F·JN-5-07 树脂质量的 12%), 以及 100 mL 丙酮加

入到 250 mL 的三口烧瓶中, 采用机械搅拌方式以 300 r/min 速率搅拌 1 h, 充分溶解。然后在 40℃、真空条件下去除溶剂, 得到改性剂 A 改性的 F·JN-5-07 树脂, 称之为 F·JN-5-07A 树脂。

在此基础上再添加一定量的改性剂 B (用量分别为 F·JN-5-07 树脂质量的 1.5%, 3%, 5%), 机械搅拌均匀, 制得改性 F·JN-5-07 树脂, 称之为 F·JN-5-07A/B 树脂, 即新型浸渍树脂。

(2) 对位芳纶纸的浸胶。

将对位芳纶纸裁成 100 mm × 100 mm 的正方形纸片, 称量并记录每张纸片的质量。将纸片分别放入新型浸渍树脂和酚醛树脂中, 完全浸没, 浸泡时间分别为: 0 s (浸没后立即提起) 以及 60, 120, 180, 300, 600, 900 s 后立即提起, 晾置 1 h 后于 60℃ 烘箱中干燥 1 h, 使溶剂充分挥发, 然后称重。

将对位芳纶纸分别浸渍酚醛树脂和新型浸渍树脂, 通过适当地调整浸渍时间与浸渍次数, 使浸渍芳纶纸最终面密度均为 95 g/m² (等效于 80 kg/m³ 蜂窝孔格壁的面密度), 固化后测试对位芳纶纸的纵向和横向拉伸强度和拉伸弹性模量。

(3) 对位芳纶纸蜂窝制备。

对位芳纶纸蜂窝制备工艺如图 1 所示。按照图 1 制备工艺, 制备孔格边长为 2 mm、密度分别为 64 kg/m³ (2-64 规格) 和 80 kg/m³ (2-80 规格) 的对位芳纶纸蜂窝。将对位芳纶纸叠层板浸泡在水中后更易于拉伸, 浸泡温度为室温, 时间 3 h, 拉伸后的白蜂窝 (未浸胶的蜂窝) 于烘箱中 245℃ × 3 h 定型, 然后按照密度要求选择蜂窝浸渍次数, 一般情况下, 64 kg/m³ 浸渍 4 遍, 80 kg/m³ 浸渍 6 遍。蜂窝净化 (室温除溶剂过程) 条件为室温下净化 1 h, 烘干 (加热除溶剂) 条件为 70℃ × 2 h, 固化工艺为 180℃ × 2 h。

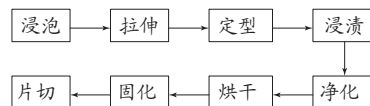


图 1 对位芳纶纸蜂窝制备工艺

1.4 性能测试

DSC 测试: 氮气气氛, 升温速率分别为 5, 10, 15, 20℃/min, 升温至 350℃。

黏度测试: 分别在 25℃ 和 70℃ 下测试, 恒温时间为 400 s; 分别在 150℃ 和 70℃ 下测试, 剪切速率为 1 s⁻¹。

按照 GB/T 22898-2008 测试对位芳纶纸的拉

伸性能,试样长 200 mm、宽 15 mm。

按照 GJB 1874-1994 测试对位芳纶纸蜂窝的格孔边长。

按照 GB/T 1464-2005 测试对位芳纶纸蜂窝的密度。

按照 GB/T 1453-2005 测试室温吸湿前后的平压强度和高温平压强度,试样厚度为 15 mm。室温吸湿后平压强度测试条件:试样在 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 水中浸泡 24 h 后测试。高温平压强度测试条件:试样在 200°C 恒温 15 min 后,在 200°C 下测试。

剪切性能按照 GB/T 1455-2005 测试,试样厚度为 12 mm。

介电性能按照 GB/T 5597-1999 测试,采用高 Q 腔法,频率 10 GHz,试样直径 50 mm,厚度 5 mm。

吸水率测试:试样尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,在 110°C 烘箱中烘干 2 h,在室温下放置一段时间后称重,记为 m_1 ,将试样完全置于 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 水中浸泡 24 h 后取出,用滤纸吸干表面水分,再浸入无水乙醇中约 1 min,然后取出,用滤纸吸干表面乙醇,称重,记为 m_2 ,按照式 (1) 计算吸水率:

$$\text{吸水率} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 对位芳纶纸蜂窝浸渍树脂黏度及固化特性分析

在对位芳纶纸蜂窝制备过程中,净化和烘干工序的温度一般选择在室温和溶剂沸点附近,所以对改性剂 A 改性后的 F·JN-5-07A 树脂在 25°C 和 70°C 下进行流变特性研究。F·JN-5-07 树脂用改性剂 A 改性前后浸渍对位芳纶纸蜂窝孔格内的流胶情况如图 2 所示。由图 2a 可以看出,浸渍未改性 F·JN-5-07 树脂的对位芳纶纸蜂窝在净化和烘干后,蜂窝孔格内树脂出现多处堵孔现象。为改善浸渍树脂的黏度,采用改性剂 A 对 F·JN-5-07 树脂进行改性,改性前后的 F·JN-5-07 树脂在 25°C 和 70°C 的黏度如图 3 所示。由图 3b 可看出,加入改性剂 A 后, F·JN-5-07A 树脂在 $25 \sim 70^\circ\text{C}$ 的黏度为 $11 \sim 14\text{ Pa}\cdot\text{s}$,远高于图 3a 未改性的 F·JN-5-07 树脂的黏度 ($\leq 0.5\text{ Pa}\cdot\text{s}$),并且浸渍后的对位芳纶纸蜂窝经过净化和烘干工序后,树脂在孔格壁上分布均匀,未发生堆胶现象,如图 2b 所示。

不同改性剂 B 含量和温度下 F·JN-5-07A/B 树脂的黏度如图 4 所示。由图 4a 可以看出,虽然

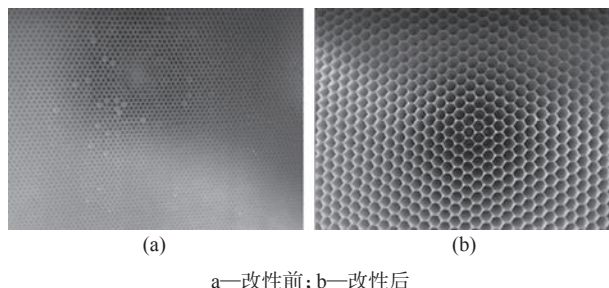


图 2 F·JN-5-07 树脂用改性剂 A 改性前后浸渍对位芳纶纸蜂窝孔格内的流胶情况

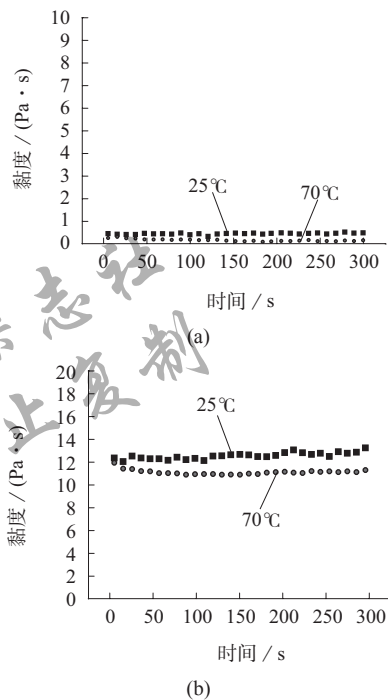


图 3 F·JN-5-07 树脂用改性剂 A 改性前后的黏度

加入改性剂 A 后可以提高 F·JN-5-07A 树脂的黏度,但树脂的反应活性较低,固化温度高,时间长, F·JN-5-07A 树脂在 150°C 恒温近 2 h 才会出现黏度增大。为降低树脂的固化温度,缩短反应时间,添加不同含量的改性剂 B 对 F·JN-5-07A 树脂进行改性。从图 4b~图 4d 可以看出,添加 F·JN-5-07 树脂质量 1.5%~5% 的改性剂 B 可以有效提高 F·JN-5-07A 在 70°C 的黏度。当改性剂 B 添加量为 1.5% 时, F·JN-5-07A/B 树脂在 70°C 恒温 3 h 后,其黏度由 $11.7\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 仅增至 $22\text{ Pa}\cdot\text{s}$;添加量为 3% 时, 70°C 恒温 1 h 后,其黏度由 $12.3\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 增至 $68\text{ Pa}\cdot\text{s}$;添加量为 5% 时, 70°C 恒温 1 h 后,其黏度由 $12.7\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 增至 $120\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。研究发现,当 F·JN-5-07A/B 树脂的黏度为 $68\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,就可以避免流胶问题,选择改性剂 B 的添加量为 3%。

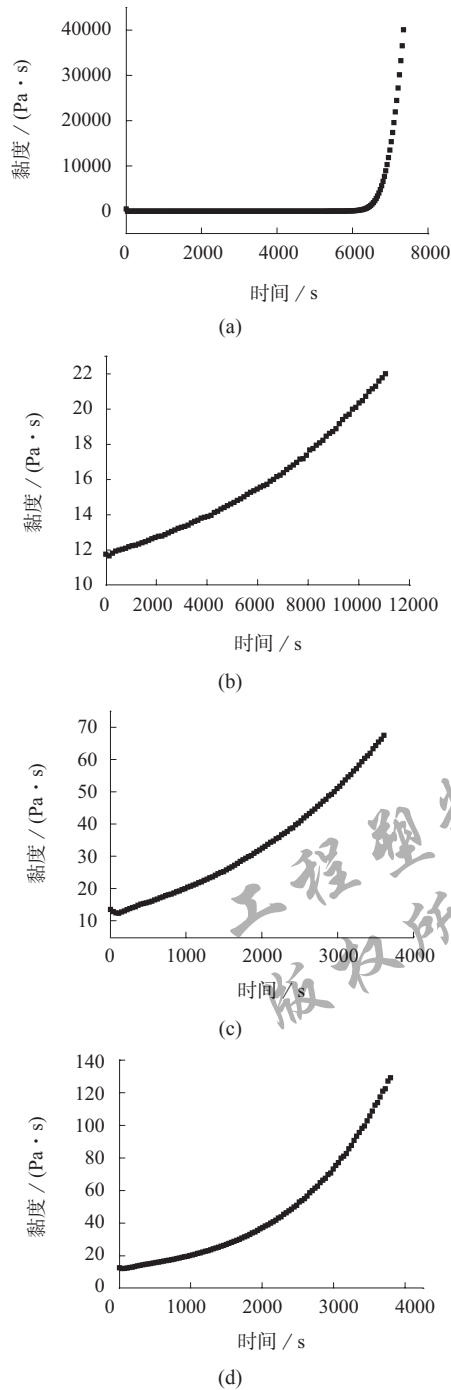
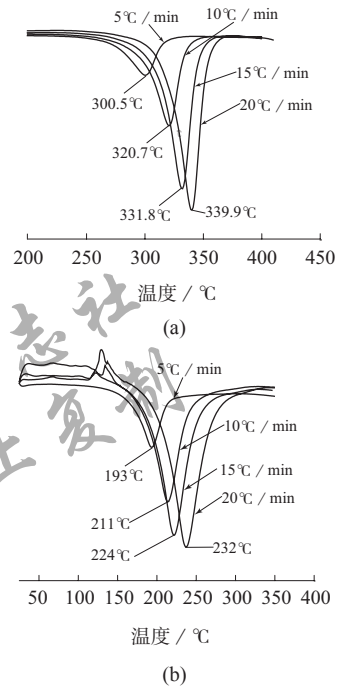


图4 不同改性剂B含量和温度下F·JN-5-07A/B树脂的黏度
改性剂B含量和温度 a—0%, 150℃; b—1.5%, 70℃;
c—3%, 70℃; d—5%, 70℃

图4 不同改性剂B含量和温度下F·JN-5-07A/B树脂的黏度

对F·JN-5-07树脂与F·JN-5-07A/B树脂的固化性能进行表征。不同升温速率下F·JN-5-07树脂和F·JN-5-07A/B树脂的DSC曲线如图5所示。从图5可以看出,F·JN-5-07A/B树脂的固化峰温度明显降低,例如升温速率为10℃/min时,F·JN-5-07A/B树脂的反应放热峰值温度由F·JN-5-07树脂的320.7℃下降至211℃,比改性

前降低了109.7℃。另外,通过四种升温速率的特征温度,作线性拟合曲线,外推出升温速率为0时对应的起始温度、峰顶温度和结束温度作为固化工工艺的前固化温度,固化温度和后固化温度,可推出F·JN-5-07树脂和F·JN-5-07A/B树脂的固化温度分别为290.9℃和181.8℃,由此可见,改性后的F·JN-5-07A/B树脂的固化温度较改性前降低109.1℃,大大改善了制备工艺。



a—F·JN-5-07树脂;b—F·JN-5-07A/B树脂

图5 不同升温速率下F·JN-5-07树脂和F·JN-5-07A/B树脂的DSC曲线

2.2 F·JN-5-07A/B树脂的浸渍工艺

对位芳纶纸浸渍树脂的吸收性对对位芳纶纸蜂窝的浸胶效果有重要影响。对位芳纶纸蜂窝浸胶后固化需达到一定的密度,因此,需要对对位芳纶纸的吸胶性进行研究,以确定浸渍树脂的密度、白蜂窝浸胶时间、浸胶次数、对位芳纶纸蜂窝在浸胶中的提升速度等重要的浸胶工艺参数。用PCF-45对位芳纶纸分别浸渍酚醛树脂和改性后的F·JN-5-07A/B树脂,研究了浸胶时间对纸张吸胶量的影响,结果如图6所示。

由图6可以看出,随着浸泡时间的增加,对位芳纶纸对酚醛树脂的吸胶量逐渐提高,当浸泡时间为600 s时,吸胶量达到最大值,为0.55 g,之后随着浸泡时间的增加,吸胶量呈现降低趋势。

由图6还可以看出,对于F·JN-5-07A/B树脂,随着浸泡时间的增加,纸张对F·JN-5-07A/B树

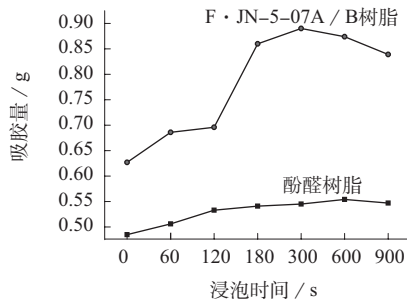


图6 不同浸泡时间下对位芳纶纸的吸胶量

脂的吸胶量逐渐提高,特别是从120 s到180 s的吸胶量上升明显,300 s时的吸胶量达到最大值,为0.89 g,300 s之后的吸胶量呈现降低趋势。

对比两种浸渍树脂可以看出,浸泡时间相同时,浸渍F·JN-5-07A/B树脂的芳纶纸吸胶量较酚醛树脂大,说明其浸润性优于酚醛树脂。从图6可以看出,制备低密度的对位芳纶纸蜂窝,浸泡时间需控制在120 s以内,控制上胶量,以保证蜂窝的目标密度。

2.3 浸渍树脂后对位芳纶纸的拉伸性能

对位芳纶纸浸渍树脂后的纵向和纵向拉伸强度、横向和纵向拉伸弹性模量分别如图7和图8所示。从图7和图8可以看出,浸渍F·JN-5-07A/B树脂后,对位芳纶纸的拉伸强度和拉伸弹性模量均高于浸渍酚醛树脂的对位芳纶纸。浸渍F·JN-5-07A/B树脂的芳纶纸的纵向和横向拉伸强度分别为98.4 MPa和94.6 MPa,纵向和横向拉伸弹性模量分别为5.1 GPa和4.6 GPa,相比于浸渍酚醛

树脂的对位芳纶纸,分别提高了45%,84%,16%和21%,说明采用新型F·JN-5-07A/B树脂可以大幅提高对位芳纶纸浸渍树脂后的拉伸性能,为制备高性能蜂窝提供了新的浸渍树脂。

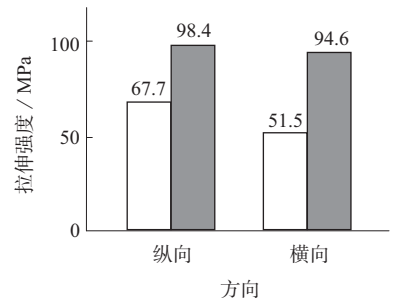


图7 浸渍树脂后对位芳纶纸的拉伸强度

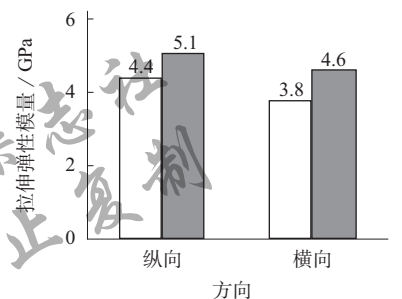


图8 浸渍树脂后对位芳纶纸的拉伸弹性模量

2.4 对位芳纶纸蜂窝力学和吸湿性能

针对2-64和2-80两种规格的对位芳纶纸蜂窝,开展了两种浸渍树脂的室温力学性能对比实验,结果列于表1。

表1 对位芳纶纸蜂窝的室温力学性能

规格	浸渍树脂种类	平压强度	L向剪切强度	L向剪切弹性模量	W向剪切强度 MPa	W向剪切弹性模量
2-64	酚醛树脂	4.5	2.1	98	1.3	58
	F·JN-5-07A/B 树脂	5.1	2.6	107	1.7	62
2-80	酚醛树脂	5.9	2.7	109	1.9	65
	F·JN-5-07A/B 树脂	6.9	3.2	124	2.3	77

注:W向表示蜂窝的拉伸方向,L向表示与W向垂直方向。

由表1可以看出,相比于浸渍酚醛树脂的对位芳纶纸蜂窝,浸渍F·JN-5-07A/B树脂的2-64规格对位芳纶纸蜂窝的平压强度提高了13.3%;L向剪切强度和L向剪切弹性模量分别提高了23.8%和9.2%;2-80规格对位芳纶纸蜂窝的平压强度提高了17%,L向剪切强度和剪切弹性模量分别提高了18.5%和13.8%。浸渍F·JN-5-07A/B树脂的对位芳纶纸蜂窝的W向剪切性能提高最为明显,2-64和2-80规格的对位芳纶纸蜂窝的W向剪切强度分别提高了31%和21%。

将浸渍两种树脂的2-80规格对位芳纶纸蜂窝

在室温蒸馏水中浸泡24 h后,测试其吸水前后的平压强度和吸水率,结果列于表2。

表2 2-80规格对位芳纶纸蜂窝吸湿前后的室温平压强度和吸水率

浸渍树脂种类	平压强度 / MPa		湿态平压强度保留率 / %	吸水率 / %
	吸湿前	吸湿后		
酚醛树脂	5.9	5.2	88	2.2
F·JN-5-07A/B 树脂	6.9	6.3	91	1.9

由表2可看出,浸渍酚醛树脂的对位芳纶纸蜂窝吸水率为2.2%,吸水前后的平压强度分别为5.9 MPa和5.2 MPa,湿态平压强度保留率为88%;与之相比,浸渍F·JN-5-07A/B树脂的对位芳纶纸蜂窝吸水率仅为1.9%,湿态平压强度保留率较

高,为91%。因此,相比于传统酚醛树脂,浸渍 F·JN-5-07A/B 树脂的对位芳纶纸蜂窝表现出较为优异的低吸水性能和高的力学性能湿态保留率。

浸渍两种树脂后,对 2-64 和 2-80 两种规格的对位芳纶纸蜂窝进行高温平压强度测试,结果列于表 3。

表 3 对位芳纶纸蜂窝的高温平压强度

规格	浸渍树脂种类	平压强度 /MPa		200℃平压强度保留率 /%
		室温	200℃	
2-64	酚醛树脂	4.5	3.1	69
	F·JN-5-07A/B 树脂	5.1	3.8	75
2-80	酚醛树脂	5.9	4.2	71
	F·JN-5-07A/B 树脂	6.9	5.4	78

由表 3 可以看出,采用 F·JN-5-07A/B 树脂浸渍的 2-64 和 2-80 规格的对位芳纶纸蜂窝,在 200℃时具有较高的平压强度保留率,分别为 75% 和 78%,较酚醛树脂浸渍的对位芳纶纸蜂窝分别提高 6% 和 7%。

2.5 对位芳纶纸蜂窝的介电性能

在雷达天线罩、电磁隐身结构等电磁功能结构中,除了考虑力学性能外,对位芳纶纸蜂窝的介电性能是电磁结构设计的另一重要因素。对于实现电磁功能结构透波或隐身性能,重要的途径就是降低夹层结构的介电常数和介电损耗,达到电磁功能结构的最大传输和最小反射。

浸渍两种树脂后,测试 2-80 规格对位芳纶纸蜂窝的介电参数,结果列于表 4。从表 4 可以看出,对位芳纶纸蜂窝的介电常数和介电损耗角正切值分别由原来的 1.14 和 0.005 0 降低至 1.09 和 0.002 0,可以满足电磁功能结构的高透波和隐身要求。

表 4 2-80 规格对位芳纶纸蜂窝的介电性能

浸渍树脂种类	介电常数	介电损耗角正切值
白蜂窝	1.05	0.001 6
酚醛树脂	1.14	0.005 0
F·JN-5-07A/B 树脂	1.09	0.002 0

3 结论

(1) 采用改性剂 A 和改性剂 B 改性后的 F·JN-5-07A/B 树脂在 25~70℃的黏度提高至 11~14 Pa·s,固化放热峰值温度降低了 109.7℃,有效解决了对位芳纶纸蜂窝制备过程中流胶和固化温度高的问题,满足对位芳纶纸蜂窝制备工艺要求。

(2) 相比于浸渍酚醛树脂,浸渍 F·JN-5-07A/B 树脂后,2-64 和 2-80 规格对位芳纶纸蜂窝的室温平压强度分别提高了 13.3% 和 17%;2-64 规格对位芳纶纸蜂窝的 L 向剪切强度和 L 向剪切弹性

模量分别提高了 23.8%,9.2%;2-80 规格对位芳纶纸蜂窝分别提高了 18.5%,13.8%。两种规格对位芳纶纸蜂窝的 W 向剪切强度提高最为明显,分别为 31% 和 21%。

(3) 相比于浸渍酚醛树脂,浸渍 F·JN-5-07A/B 树脂后,2-64 和 2-80 规格对位芳纶纸蜂窝 200℃时的平压强度保留率分别提高了 6% 和 7%。2-80 规格对位芳纶纸蜂窝湿态平压强度高达 6.3 MPa,比采用酚醛树脂的对位芳纶纸蜂窝提高了 1.1 MPa。介电常数和介电损耗角正切值分别由 1.14 和 0.005 0 降低至 1.09 和 0.002 0。

参考文献

- [1] 张明习,轩立新. 高性能雷达罩设计与制造关键技术分析[J]. 航空科学技术,2015,26(8):13-18.
Zhang Mingxi, Xuan Lixin. The key technologies in designing and fabricating high performance radome[J]. Aeronautical Science and Technology,2015,26(8):13-18.
- [2] 湛广昌,肖文萍,徐璐. 国产 NH(YT)-1 蜂窝在直升机复合材料夹层结构中的应用分析[J]. 直升机技术,2012(1):52-55.
Chen Guangchang, Xiao Wenping, Xu Lu. Application analysis of NH(YT)-1 honeycomb in composite sandwich construction of helicopter[J]. Helicopter Technigue,2012(1):52-55.
- [3] Toyoda M, Takahashi D. Sound transmission through a microperforated-panel structure with subdivided air cavities[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2008,124:3 594-3 603.
- [4] Lin Ting-Chun, Chen Ting-Jung, Huang Jong-Shin. In-plane elastic constants and strengths of circular cell honeycombs[J]. Composites Science and Technology,2012,72(12):1 380-1 386.
- [5] Taylor C M, Smith C W, Miller M, et al. The effects of hierarchy on the in-plane elastic properties of honeycombs[J]. International Journal of Solids and Structures,2011,48(9):1 330-1 339.
- [6] 扈西枝. 民用飞机声振耦合特性分析与控制[J]. 民用飞机设计与研究,2014(1):22-24.
Hu Xizhi. Study On vibro-acoustic coupling characteristic for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Reserch,2014(1):22-24.
- [7] Grediac M A. Finite element study of the transverse shear in honeycomb cores[J]. International Journal of Solids and Structures,1993,30(13):1 777-1 788.
- [8] Foo C C, Chai G B, Seah L K. Mechanical prooerties of nomex material and nomex honeycomb structure[J]. Composite Structures,2007,80(4):588-594.
- [9] 郑付来. 芳纶纸蜂窝酚醛树脂与国产芳纶纸的匹配性研究[J]. 高科技纤维与应用,2018(4):44-49.
Zheng Fulai. Study on the matching of phenolic resin and domestic YT822 aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber and Application,2018(4):44-49.
- [10] 刘文品,马建忠,杨进军,等. 大尺寸 ACCH 型芳纶纸蜂窝定型

- 工艺研究[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(3):51-54.
- Liu Wenpin, Ma Jianzhong, Yang Jinjun, et al. Study on setting process of large size ACCH aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):51-54.
- [11] 杨进军, 马建忠, 刘文品. 大尺寸 ACCH 芳纶纸蜂窝浸胶工艺研究[J]. 航空制造技术, 2015(S1):68-75.
- Yang Jinjun, Ma Jianzhong, Liu Wenpin. Study on dipping process of large size ACCH aramid paper honeycomb[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S1):68-75.
- [12] 王厚林, 王宜, 姚运振, 等. 芳纶纸结构性能及其对蜂窝力学性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(15):2 184-2 187.
- Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen, et al. Aramid paper's structure and performance and their effect on the mechanical properties of aramid paper honeycomb[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(15):2 184-2 187.
- [13] 刘文品, 杨进军, 马建忠. YT822A 型芳纶纸蜂窝性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2015, 40(1):58-61.
- Liu Wenpin, Yang Jinjun, Ma Jianzhong. Study on the properties of YT822A aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2015, 40(1):58-61.
- [14] 马科峰, 刘杰, 王萌, 等. 三种间位芳纶纸蜂窝力学性能及断口形貌分析[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(2):32-36.
- Ma Kefeng, Liu Jie, Wang Meng, et al. Mechanical properties and fracture morphology analysis of three kinds of meta-aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(2):32-36.
- [15] 郝巍, 罗玉清, 王萌. 国产对位芳纶纸蜂窝与 NH-1 蜂窝性能的对比研究[J]. 高科技纤维与应用, 2011, 36(4):17-20.
- Hao Wei, Luo Yuqing, Wang Meng. A contrast study on domestic P-aramid honeycomb and NH-1 honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2011, 36(4):17-20.
- [16] 郝巍, 罗玉清. 国产对位芳纶纸蜂窝性能的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2009, 34(6):21-25.
- Hao Wei, Luo Yuqing. Study on the properties of domestic P-aramid honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2009, 34(6):21-25.

欢迎订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》编辑部订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘, 请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊, 是中国合成树脂供销协会会刊, 荣获首届、第二届、第三届全国期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2021 年定价 20 元/期, 全年 240 元。目前编辑部尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系编辑部。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊, 荣获多项省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2021 年定价 20 元/期, 全年 240 元。目前编辑部尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系编辑部。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 编辑部已将《工程塑料应用》自创刊号 (1973 年) 至 2020 年底共 48 卷 374 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售; 同时也将《化学分析计量》自创刊号 (1992 年) 至 2020 年底

共 29 卷 142 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文, 又可根据读者自定义的关键词进行全文检索, 非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 250 元。

邮局汇款:

收款地址: 济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》编辑部

邮编: 250031

电话: (0531)85878223 85878057 85878278

传真: (0531)85947355

银行汇款:

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

账 号: 1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>