高分子材料科学与工程
POLYMER MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING

http://pmse.scu.edu.cn

高韧性阻燃环氧树脂复合材料的制备与性能

李戈晖[1,2]，刘富坤[1,2]，赵昱闰[1,2]，刘世龙[1,2]，郭湘川[1,2]，徐艺[1,2]

（1. 中国民用航空飞行学院 民航安全工程学院，四川 广汉 618307；2. 中国民航飞行学院 民机火灾科学与安全工程四川省重点实验室，四川 广汉 618307）

摘要：提高环氧树脂（EP）复合材料的阻燃性能对于降低火灾危害至关重要，针对环氧树脂基复合材料阻燃与力学改性难以兼顾的问题，本研究选用壳聚糖（CS）同时作为成炭剂和交联剂，并引入碳纳米纤维（CNF）作为协效阻燃剂和增强体，通过简单有效的低温固化工艺（40 ℃，4 h）制备了不同环氧树脂含量的棉纤维增强环氧树脂基复合材料（CS/CNF/EP）。通过傅里叶变换红外光谱（FT-IR）证实了壳聚糖和环氧树脂之间的交联聚合。在 EP 含量为 35%时，CS/CNF/EP 复合材料表现出优异的性能，包括机械柔韧性（拉伸强度为 7.09 MPa，断裂伸长率为 129.05%）和出色的阻燃性（LOI 为 32.3%，UL-94 达到 V-0 等级）。结果表明，CS/CNF/EP 复合材料成功实现了机械柔韧性与高效阻燃性的平衡，在航空航天内饰材料、柔性防护层等安全领域展现出潜在的应用价值。

关键词：高韧性；阻燃性能；环氧树脂；复合材料；壳聚糖；碳纳米纤维

复合材料以其质量轻、强度高和耐腐蚀等优异特性，已成为航空航天、交通运输等高端装备制造领域不可或缺的关键材料[1]。特别是在民用航空领域，为追求更高的燃油效率和性能，先进宽体客机如空客 A350 和波音 B787 的机身结构大量采用复合材料，其应用比例已超过 50%[2]。环氧树脂因其出色的粘接性能、机械强度和尺寸稳定性，被广泛用作复合材料基体，应用于飞机升降舵、方向舵及前后缘等次承力结构部位[3]。

尽管环氧树脂具有上述优异性能，但其本征易燃性（极限氧指数通常在 19-21%）已成为限制其在安全关键领域更广泛应用的主要瓶颈。其在燃烧时易释放大量热和有毒烟雾，对机舱等密闭环境构成严重威胁[4]。因此，对环氧树脂基复合材料进行阻燃改性，对于提升航空器的主动防火安全水平具有重大现实意义。目前，传统的阻燃改性方法，如引入卤系、磷系阻燃剂，往往在提升阻燃性的同时，导致材料的力学性能下降，“阻燃-力学”性能难以兼顾的矛盾[5]。在固化工艺方面，传统的环氧树脂固化需要较高的温度（通常>100°C），能耗大[6]。低温固化体系主要包括胺类、酸酐类、咪唑及硫醇类固化剂，在 40–80°C 固化，能够有效降低能耗[7]。胺类固化剂虽能实现室温快速固化，但存在毒性大且耐热性差的弊端[8]。酸酐类固化放热平缓、产物耐热性好，但低温下反应速率慢，固化周期长[9]。咪唑类固化剂具有潜伏性，但其固化温度通常较高[10]。而硫醇类在低温下固化速度最快，却因强烈的气味和较差的耐热性而应用受限[11]。

针对上述问题，本研究从分子设计角度出发，提出一种低温固化、多组分协同的策略。选用天

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0149
收稿日期：2025-10-23
基金项目：国家重点研发计划（2024YFC3014400）；国家自然科学基金项目（52673119）；军委科技委基础加强计划领域基金（2025-JCJQ-LB-042-3）；四川省重点研发项目（2024YFTX0064）；四川省科技厅项目（2024YFHZ0342，2025YFHZ0054）；中央高校基本科研业务费专项资金（ZJ2023-006，25CAFUC04085，25CAFUC10133）；中国民航飞行技术与飞行安全重点实验室（FZ2025ZX27）
通讯联系人：徐艺，主要从事民机材料设计与功能化研究，E-mail: xuyi99@cafuc.edu.cn

然高分子壳聚糖同时作为成碳剂和交联剂，利用其分子链上丰富的氨基与羟基，在温和条件（40ºC）下催化环氧树脂开环交联，构建刚柔并济的网络结构。同时，引入碳纳米纤维作为增强体与阻燃协效剂，并与棉纤维复合，旨在制备一种集优异机械柔韧性与高效阻燃性于一体的环氧树脂基复合材料，以期为开发新一代高性能、环境友好的民机用阻燃复合材料提供新的设计思路与理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

壳聚糖（脱乙酰度≥95.0%、粘度 100～200mpa·s）和环氧树脂（DGEBA、E44）购自上海麦克林生化科技有限公司；乙酸（>99.5%）购自沈阳新华试剂厂。碳纳米纤维（管径 10-20 nm、管长 2-8 μm、比表面积 270-310 m^2/g、堆积密度 0.04-0.09 g/cm^3、纯度>98%）购自成都佳材科技有限公司；1,3-双（3-氨基丙基）-1,1,3,3-四甲基二硅氧烷（BAPTMD，99.0%）购自苏州齐天新材料有限公司；丙酮（>99.5%）购自上海泰坦科技有限公司；棉纤维布（CF，100%棉、纤维长度 25-35 mm、纤维直径 15-20 μm）购自宿迁画眉生物科技有限公司；去离子水由实验室自制。

1.2 实验过程

首先将环氧树脂（EP）和 BAPTMD 溶解在 2ml 丙酮中，其中 EP 与 BAPTMD 的质量比为 5：1。接着将壳聚糖（CS）在 25℃下溶解于 0.5v/v%乙酸溶液中。然后，将 CS 溶液、EP 溶液和 CNF 混合，在室温下磁力搅拌 0.5h，得到 CS/CNF/EP 胶液。然后使用涂覆法，按照统一方向和力度均匀涂附在棉纤维布上，得到 CS/CNF/EP 预浸料，固含量为 60wt%。然后将预浸料在 40℃的鼓风烘箱中固化 4h，得到 CS/CNF/EP 复合材料。壳聚糖/环氧树脂固化交联机理如 Fig.1 所示,复合材料的配比如 Tab.1 所示。将裁剪好的棉布真空吸附于涂布机平台，并设置恒定涂布速度（如 15 mm/s）。在棉布前端滴加定量胶液后，启动设备自动刮涂，然后水平静置 5min。

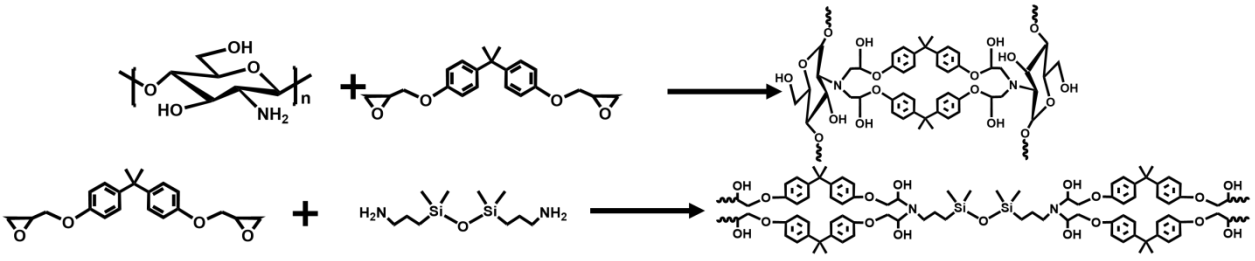


Fig. 1　Curing and cross-linking mechanism of chitosan/epoxy resin

Tab. 1　Formulation of CS/CNF/EP composites

Sample	CS(g)	EP(g)	BAPTMD(g)	CNF(g)
CS/CNF/EP-0	0.5	0.000	0.000	0.5
CS/CNF/EP-20	0.5	0.130	0.026	0.5
CS/CNF/EP-35	0.5	0.300	0.060	0.5
CS/CNF/EP-50	0.5	0.625	0.125	0.5

1.3 测试与表征

1.3.1 傅里叶变换红外光谱分析：采用衰减全反射红外光谱（ATR-FTIR）法进行分析。首先从涂覆好的棉布上剪取一小块样品，将其涂层面朝下，平整地覆盖在 ATR 附件的晶体上。然后旋紧压臂施加足够压力，确保样品与晶体表面紧密贴合无气隙。测试以 4 cm^{-1}的分辨率扫描 32 次，波数范围 4000-400 cm^{-1}。

1.3.2 X 射线光电子能谱分析：使用单色化 Al Kα射线源，结合能以 C 1s (284.8 eV)进行校准。拉伸样条尺寸为 80mm×10mm×0.05mm，按照 ASTM D882 标准拉伸速度为 2mm/min，标距为 30mm。

1.3.3 热失重分析：取 5-10 mg 样品在氮气气氛（流速 20 mL/min）下，以 10 °C/min 的升温速率从 30 °C 加热至 800 °C，记录热量曲线。

1.3.4 极限氧指数分析：使用 JF-3 型氧指数仪按 ASTM D2863 标准测定极限氧指数（LOI）；垂直燃烧测试采用 CZF-3 型垂直燃烧仪按 UL-94 标准进行。

1.3.5 锥形量热测试：使用 CCT-34 锥形量热仪（CCT，ISO 5660 标准），在 50 kW/m^2的热辐射强度下进行，记录热释放速率（HRR）、总热释放量（THR）等关键参数。

1.3.6 扫描电子显微镜表征：本实验使用美国 Thermo Fisher Scientific 的 Apreo 2C 扫描电子显微镜（SEM）对复合材料和残炭用金溅射涂覆，观察其表面的微观形貌，用于探究复合材料的阻燃机理。

2 结果与讨论

2.1 结构和形态分析

使用 FT-IR 技术分析 CS/CNF/EP 固化物的化学结构。如 Fig.2 所示，CS/CNF/EP-0 在 3453cm^{-1}处的特征峰归因于壳聚糖中 O-H 基团的拉伸振动[12]；2924cm^{-1}和 2855cm^{-1}处的峰值分别对应于亚甲基的不对称和对称拉伸振动；壳聚糖中氨基的拉伸振动峰在 1640cm^{-1}处[4]。随着环氧树脂含量的增加，壳聚糖中 O-H 拉伸振动的特征峰从 3453cm^{-1}红移到 3432cm^{-1}，这可能是由于壳聚糖的羟基与环氧树脂开环后形成的羟基/醚键之间形成了新的分子间氢键（O-H···O），改变了原有壳聚糖分子内氢键的振动环境。EP 和 BAPTMD 的加入使红外图谱在 1385cm^{-1}处出现异丙基的特征峰，在 800cm^{-1}处出现 Si-O 的对称拉伸振动峰[13]，同时在 914cm^{-1}处未出现环氧基团的特征峰[13]。以上结果表明，环氧树脂在低温下被催化开环。为了进一步研究壳聚糖与环氧树脂之间的反应机理，计算了 CS 在 1640cm^{-1}处氨基的特征峰面积与 EP 中 1385cm^{-1}处异丙基的峰面积之比，并将这些峰面积比与 CS 和 EP 之间的实际质量之比做了比较。结果表明，CS/CNF/EP-20、CS/CNF/EP-35 和 CS/CNF/EP-50 的峰面积比分别为 7.07、2.48 和 1.13，而质量比分别为 8.16、3.52 和 1.68。对比发现，红外峰面积比均小于质量比，这说明氨基与环氧基团之间发生交联聚合，形成壳聚糖/环氧树脂交联网络。

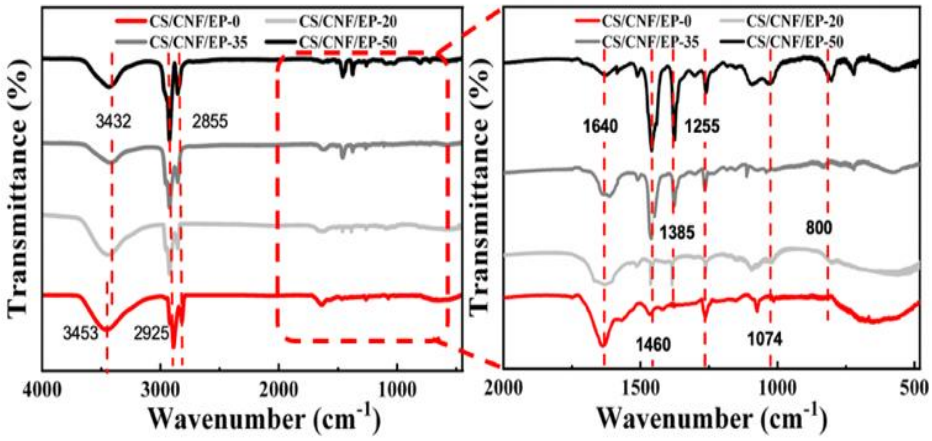


Fig. 2　FT-IR spectra of CS/CNF/EP composites

采用 FT-IR 对 CS/CNF/EP-35 固化前后的结构演变进行了定量表征，具体如 Fig.3 所示。为消除样品厚度及测试环境的干扰，实验选取环氧树脂骨架中性质稳定的异丙基特征峰 1385 cm^{-1} 作为内标，对目标峰面积进行归一化处理。通过对 CS/CNF/EP-35 固化后的光谱进行积分分析，结果显示，固化前壳聚糖氨基弯曲振动峰（1640 cm^{-1}）面积与异丙基特征峰的面积比值为 4.37，固化后的面积比值降至 0.24。这一趋势有力证明了壳聚糖分子链上的活性氨基与环氧基团发生了深度开环交联。而归属于含硅二胺固化剂（BAPTMD）中 Si-O 对称拉伸振动的特征峰（800 cm^{-1}）面积与异丙基特征峰固化前的面积比值为 2.01，固化后的面积比为 0.97。这说明在 CS/CNF/EP 体系中，壳聚糖具有更强的反应活性。

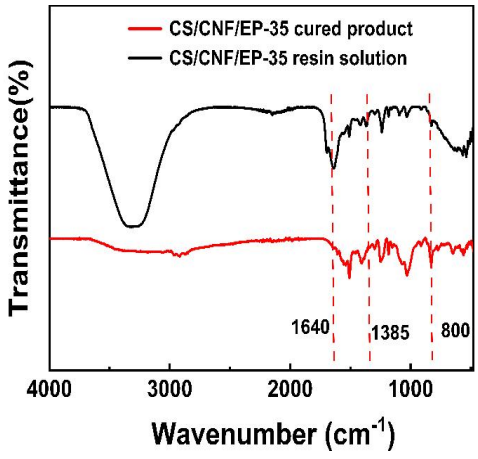


Fig. 3　FT-IR spectra of CS/CNF/EP-35 cured product and adhesive solution

同时使用 X 射线光电子（XPS）技术对 CS/CNF/EP 复合材料的表面能进行测定，结果如 Fig.4（a-e）所示。扫描全谱显示复合材料存在 C、N、O 和 Si 元素。在 C 1s 谱图中，检测到 C-C（284.8 eV）、C-O（286.3 eV）和 C=O（288.6 eV）键的三个峰。在 N 1s 光谱中，C-N 和 N-H 键的存在分别位于 401.2 eV 和 399.2 eV。O1s 光谱中，531.5 eV、532.3 eV 和 533.4 eV 处的特征峰分别对应-OH、C-O 和 Si-O 键。此外，由于 BAPTMD 的存在，在 Si2p 光谱中检测到 C-Si（102.1 eV）、C-Si-O（103.0 eV）和 Si-O（103.7 eV）键三个峰[13]。以上结果可以证明壳聚糖/环氧树脂交联网络成功构筑。Fig.3

（f）为 CS/CNF/EP 复合材料的光学图像。与此同时， CS/CNF/EP 复合材料可以折叠成多种复杂形状，例如千纸鹤和飞机，表现出优异的力学柔韧性。

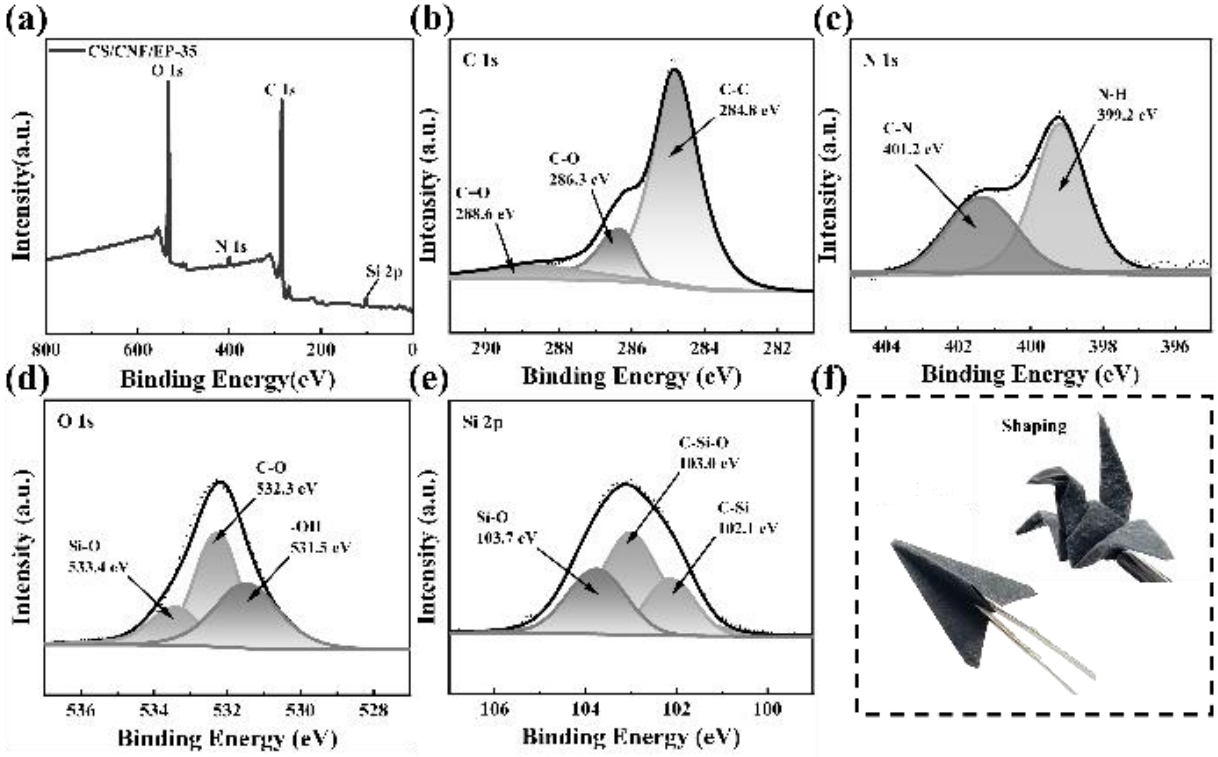


Fig. 4 (a) XPS survey spectrum of CS/CNF/EP-35; (b~e) high-resolution spectra of C 1s, N 1s, O 1s, and Si 2p for CS/CNF/EP-35; (f) digital photograph of the CS/CNF/EP composite

2.2 拉伸性能分析

使用万能试验机对 CS/CNF/EP 复合材料的拉伸性能进行了评估，结果如 Fig.5 所示。CS/CNF/EP-0、CS/CNF/EP-20、CS/CNF/EP-35、CS/CNF/EP-50 的拉伸强度分别为 3.79MPa、5.57MPa、7.09MPa、8.57MPa，随着环氧含量的增加，CS/CNF/EP 复合材料的拉伸强度也随之增加。CS/CNF/EP-0、CS/CNF/EP-20、CS/CNF/EP-35 和 CS/CNF/EP-50 复合材料的断裂伸长率分别为 15.85%、50.57%、129.05%和 135.47%，与 CS/CNF/EP-0 复合材料相比，CS/CNF/EP-35 复合材料的断裂伸长率提高 734%。这种改善归因于 CS 和 EP 的交联聚合，CS 中的柔性链段与 EP 中的刚性结构被连接起来形成交联网络。当复合材料被拉伸时，CS 中的柔性链段沿方向移动，表现出良好的韧性。

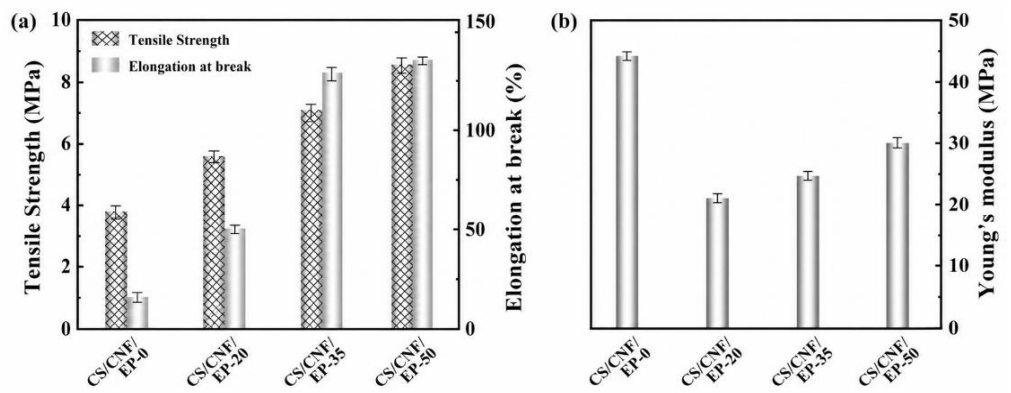


Fig. 5　(a) Tensile strength and elongation at break, and (b) Young's modulus of CS/CNF/EP composites

CS/CNF/EP 复合材料的杨氏模量随 EP 含量的增加由 CS/CNF/EP-20 的 20.89MPa 增加到 CS/CNF/EP-50 的 30.28MPa。CS/CNF/EP-0 复合材料的杨氏模量达到 44.48MPa，造成这种“反常”现象的原因有可能是：CS 中存在大量的氢键供体，例如羟基（-OH）和氨基（-NH_2）基团，这些基团的存在促进了 CS 分子链之间形成强分子间氢键（O-H···N 和 O-H···O）[14]，而 EP 的加入会破坏 CS 分子链内的分子间氢键，这也和 FTIR 和 XRD 的结果相一致。而后续模量的回升，则是因为 EP 与 CS 发生交联反应，形成了具有更高刚性的共价交联网络。

2.3 热稳定性分析

首先使用模拟燃烧测试手段对 CS/CNF/EP 固化物的热稳定性通过热失重进行了测试，结果如 Fig.6 和 Tab.2 所示。测试在氮气气氛中以 20°C/min 的速率从 30°C 加热至 800°C，流速为 20mL/min。随着环氧树脂含量上升，CS/CNF/EP 复合材料的 $T_{5\%}$从 81.0°C 增加到 260.7°C。除 CS/CNF/EP-0 观察到两个失重峰温度外，其余含有环氧树脂的固化物均出现三个失重峰。第一次热降解主要是由于100℃以下残留水的挥发。第二次热降解主要是壳聚糖的热解和硅氧烷的部分分解[15]。第三次热解主要为环氧树脂在 300℃至 400℃之间发生分解[16]。同时，CS/CNF/EP-0、CS/CNF/EP-20、CS/CNF/EP-35 和 CS/CNF/EP-50 固化物的残碳率分别达到 62.5、62.0、57.3 和 47.4%。表现出良好的热稳定性。

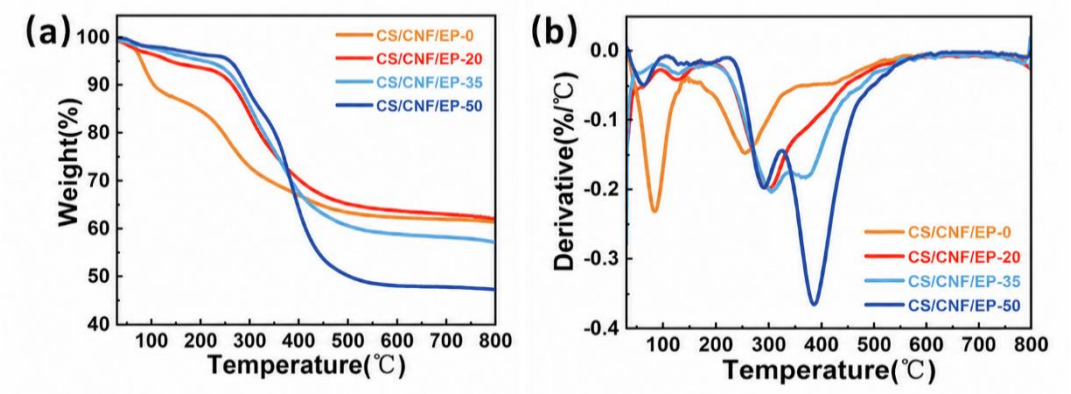


Fig. 6　(a) TGA and (b) DTG curves of CS/CNF/EP composite

Tab. 2　TGA results of CS/CNF/EP composites

Sample	$T_{5\%}$(°C)	T_1(°C)	T_2(°C)	T_3(°C)	T_{max}(°C)	Y_c(wt.%)
CS/CNF/EP-0	81.0	83.9	253.7	-	83.9	62.5
CS/CNF/EP-20	140.4	55.4	125.1	302.0	302.0	62.0
CS/CNF/EP-35	215.2	121.7	303.5	363.1	303.5	57.3
CS/CNF/EP-50	260.7	62.3	290.1	383.8	383.8	47.4

T_5%: temperature at 5% mass loss; T_1, T_2 and T_3: temperature corresponding to the first, second and third decomposition peaks, respectively; T_{max}: temperature at the maximum mass-loss rate; Yc: char yield at 800 °C

2.4 燃烧行为分析

分别使用锥形量热（CCT）、垂直燃烧（UL-94）和极限氧指数（LOI）测试对 CS/CNF/EP 复合

材料的阻燃性进行分析。CCT 的测试结果如 Fig.7 和 Tab.3 所示。CS/CNF/EP 复合材料随着 EP 含量的增加，峰值热释放率（PHRR）从 40.07kW/m^2 增加到 127.41kW/m^2，但都处于较低的热释放水平。并且当 EP 含量低于 35%时，总烟雾产生量（TSP）保持在 0.5m^2 以下，抑烟性能优异。但 EP 含量为 50%时激增至 1.39m^2，阻燃性明显降低。

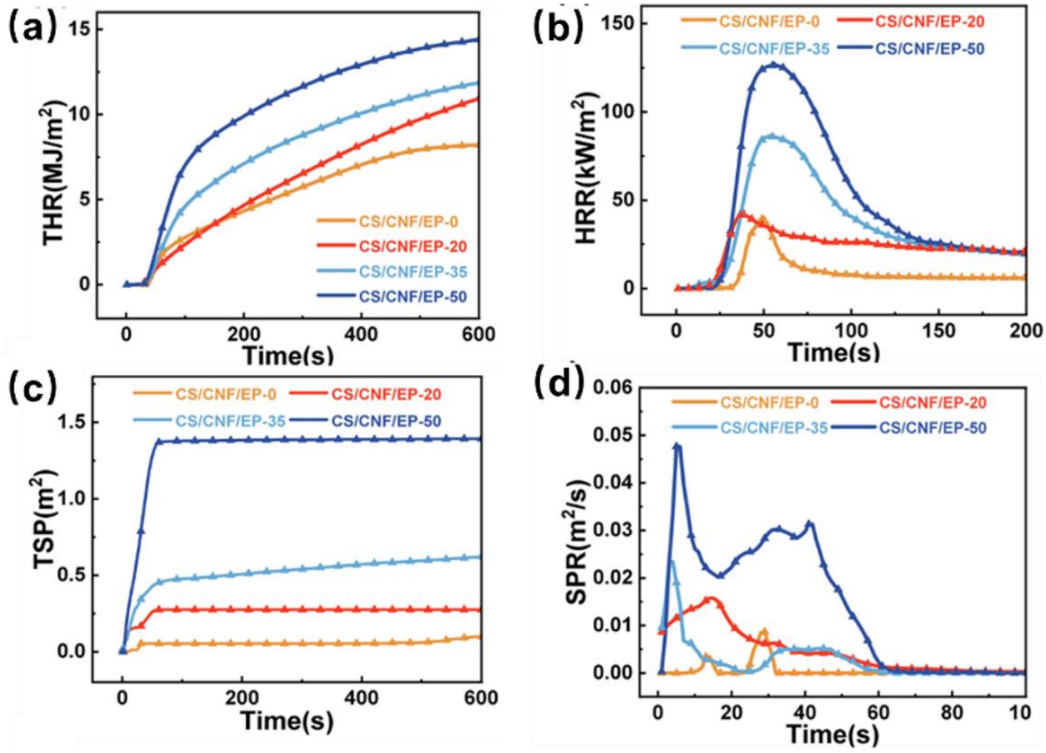


Fig. 7　(a) Total heat release (THR), (b) heat release rate (HRR), (c) total smoke production (TSP), and (d) smoke production rate (SPR) curves of CS/CNF/EP composites

Tab. 3　Cone calorimetry data of CS/CNF/EP composites

Sample	CS/CNF/EP-0	CS/CNF/EP-20	CS/CNF/EP-35	CS/CNF/EP-50
TTI (s)	8	1	3	2
PHHR (kW/m^2)	40.07	44.26	86.58	127.41
THR (MJ/m^2)	8.21	10.93	11.85	14.40
PSPR (m^2/s)	0.009	0.018	0.023	0.047
TSP (m^2)	0.098	0.275	0.620	1.393
av-ECH (MJ/kg)	4.76	6.44	9.59	10.27
FIGRA (kW·m^{-2}·s^{-1})	0.80	1.20	1.57	2.09

TTI: time to ignition; PHRR: peak heat release rate; THR: total heat release; PSPR: peak smoke production rate; TSP: total smoke production; av-EHC: average effective heat of combustion; FIGRA: the fire growth rate index

2.5 阻燃性能分析

LOI 和 UL-94 测试结果如 Fig.8 和 Tab.4 所示。CS/CNF/EP-0、CS/CNF/EP-20 和 CS/CNF/EP-35 复合材料在 UL-94 测试中两次点然后火焰总熄灭时间在 10 秒以下，均达到 V-0 级别。而 CS/CNF/EP-50 复合材料在第一次和第二次点火后分别燃烧了 30 秒和 16 秒(Fig.8(d))，同时释放出大量烟雾，但阻燃等级也达到 V-1 级别。这表明 CS/CNF/EP 复合材料的阻燃性能随着 EP 含量的增加而下降。另外当 EP 含量保持在 50%以下时，LOI 值均超过 30.5%，表明它们是阻燃材料。

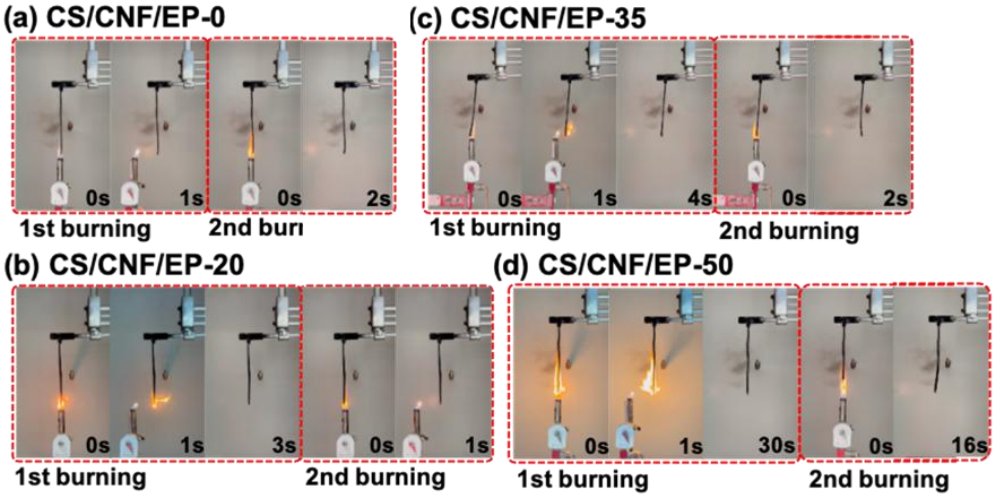


Fig. 8　Digital pictures from UL-94 vertical burning test of CS/CNF/EP composites: (a) CS/CNF-EP-0; (b) CS/CNF/EP-20; (c) CS/CNF-EP-35; (d) CS/CNF/EP-50

Tab. 4　LOI and UL-94 data of CS/CNF/EP composites

Sample	LOI(%)	UL-94			
		T_1(s)	T_2(s)	Drops	Rating
CS/CNF/EP-0	39.4	1	1	No	V-0
CS/CNF/EP-20	35.2	3	1	No	V-0
CS/CNF/EP-35	32.3	4	2	No	V-0
CS/CNF/EP-50	30.5	30	16	No	V-1

T_1: afterflame time after the first flame application; T_2: afterflame time after the second flame application

为了探究 CS/CNF/EP 复合材料的阻燃机理，通过 SEM 分析了经过 CCT 测试后残碳的微观结构，结果如 Fig.9 所示。CS/CNF/EP-0 的残碳中存在许多孔洞和坍塌和松散的结构(Fig.9(a))。而随着 EP 含量的增加，CS/CNF/EP-35 和 CS/CNF/EP-50 的残碳变得更致密。

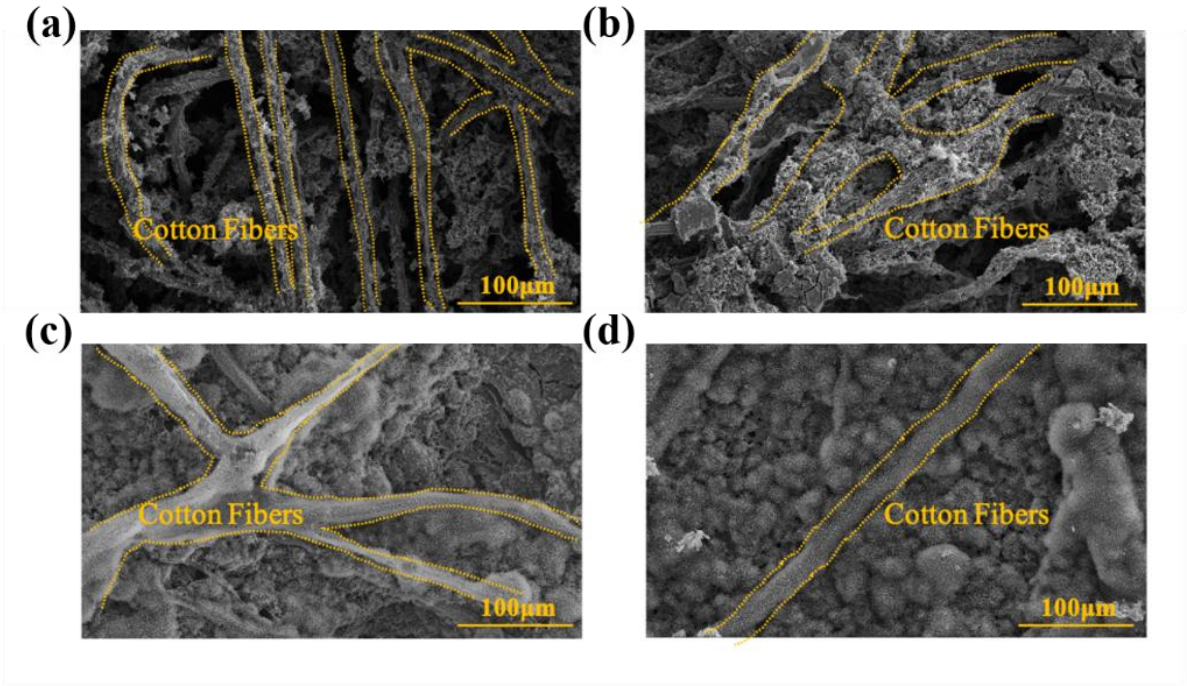


Fig. 9　SEM images of (a) CS/CNF/EP-0, (b) CS/CNF/EP-20, (c) CS/CNF/EP-35 and (d) CS/CNF/EP-50 chars

根据 SEM 结果，同时结合 CS/CNF/EP 复合材料的结构特点，总结了 CS/CNF/EP 复合材料的阻燃机理：优异的阻燃性能主要源于 CS 与 CNF 在气相和凝聚相的协同作用。在气相中，CS 热分解产生 NH_3、H_2O 等不燃性气体，有效稀释了可燃气体浓度和氧气浓度。在凝聚相中，CS 作为优异的成炭剂，与 CNF 共同构建了连续、致密的炭层，该炭层能有效隔绝热量和氧气向内传递，并保护内部的棉纤维骨架，从而抑制燃烧的继续进行[17-18]。

2.6 阻燃机理分析

在凝聚相阻燃中，壳聚糖能够发挥显著的促炭作用。当其与环氧树脂构建形成交联结构后，在燃烧过程中可促进环氧树脂发生炭化反应，在材料表面形成连续且致密的炭层结构。该炭层能够作为有效的隔离屏障，阻碍火焰向材料内部扩散，同时降低热量向基体及增强纤维的传递，从而减少内部结构受到进一步热破坏的可能性。此外，碳纳米纤维的引入能够进一步增强炭层的结构完整性和高温稳定性，使形成的炭层在高温环境下仍能保持良好的阻隔性能。由于碳纳米纤维本身具有不燃特性和较大的比表面积，其加入还能够提升复合材料的耐热性能，并在一定程度上减缓热量的传导，从而有助于提高材料整体的阻燃效果。

在气相阻燃方面，壳聚糖分子中含有丰富的氨基和羟基官能团，在受热分解时能够释放出 NH_3 和水蒸气等不可燃气体。这些气体能够稀释燃烧区域中的氧气浓度，并降低可燃气体的含量，从而形成相对缺氧的燃烧环境，抑制基体进一步热裂解产生可燃挥发物，进而减缓燃烧反应的进行并降低燃烧强度。

3 结论

本研究通过壳聚糖与碳纳米纤维的多组分协同设计，采用 40 ℃低温固化工艺制备了 CS/CNF/EP

复合材料，成功解决了环氧树脂复合材料阻燃性与力学韧性难以兼顾的关键问题。FTIR 和 XPS 结果表明，壳聚糖中的氨基、羟基与环氧树脂发生开环交联反应，形成稳定的交联网络。环氧树脂含量对材料性能具有显著影响：随着 EP 含量增加，复合材料的拉伸强度和断裂伸长率明显提高，热稳定性增强，但过高 EP 含量会导致热释放和烟释放增加，阻燃性能下降。其中，CS/CNF/EP-35 表现出较优综合性能，拉伸强度为 7.09 MPa，断裂伸长率为 129.05%，LOI 达到 32.3%，UL-94 达到 V-0 级。其优异阻燃性能主要源于 CS 在气相释放不可燃气体、凝聚相促进成炭，以及 CNF 增强炭层致密性和稳定性的协同作用。该复合材料实现了柔韧性、热稳定性与阻燃性的良好平衡。

参考文献：

［1］ 徐林, 刘传军, 赵崇书. 复合材料在民用飞机应用与发展趋势[J]. 复合材料科学与工程, 2024(9): 98-104.
Xu L, Liu C J, Zhao C S. Application and development trend of composite materials in civil aircraft[J]. Composite Materials Science and Engineering, 2024(9): 98-104.

［2］ 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 L M, Zhang J Z, Yue G Q, et al. Application of composite materials in a new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322.

［3］ Gebrehiwet L, Abate E, Negussie Y, et al. Application of composite materials in aerospace & automotive industry[J]. International Journal of Advances in Engineering and Management, 2023, 5: 697-723.

［4］ Kandola B K, Magnoni F, Ebdon J R. Flame retardants for epoxy resins: application-related challenges and solutions[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2022, 28: 17-49.

［5］ 石延超, 王国建. 有机磷阻燃剂的合成及在阻燃高分子材料中的应用研究进展[J].高分子材料科学与工程, 2016, 32(5): 167-175.
Shi Y C, Wang G J. Research progress on synthesis of organophosphorus flame retardants and their application in flame retardant polymer materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(5): 167-175.

［6］ Liu B W, Zhao H B, Wang Y Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials[J]. Advanced Materials, 2022, 34: 2107905.

［7］ Liu T, Chen Z, Ma Y, et al. Preparation and properties of epoxy adhesives with fast curing at room temperature and low-temperature resistance[J]. ACS Omega, 2024, 9: 22186-22195.

［8］ Huang Z, Zhu H, Jin G, et al. Thiourea modified low molecular polyamide as a novel room temperature curing agent for epoxy resin[J]. RSC Advances, 2022, 12: 18215-18223.

［9］ Marotta A, Faggio N, Brondi C. Curing kinetics of bioderived furan-based epoxy resins: study on the effect of the epoxy monomer/hardener ratio[J]. Polymers, 2022, 14: 5322.

［10］ Li H, Li Y Q, You Y, et al. High-performance one-component epoxy adhesive based on the synergistic effect of lignin-derived triaryl-imidazole and phytic acid[J]. ACS Macro Letters, 2024, 13: 775-780.

［11］ Kim Y H, Baek J J, Chang K C, et al. Effect of synthetic low-odor thiol-based hardeners containing hydroxyl and

methyl groups on the curing behavior, thermal, and mechanical properties of epoxy resins[J]. Polymers, 2023, 15: 2947.

［12］ Liu F, Liu Y, Guo Y, et al. FTIR determination of the degree of molar substitution for hydroxypropyl chitosan[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 339: 122229.

［13］ Aziz T, Mehmood S, Haq F, et al. Synthesis and modification of silica-based epoxy nanocomposites with different sol-gel process enhanced thermal and mechanical properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: 51191.

［14］ Jia Y T, Gong J, Gu X H, et al. Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/chitosan blend nanofibers produced by electrospinning method[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 67: 403-409.

［15］ Zeng X L, Lan X S, Wang Y, et al. Highly transparent fire-resistant coatings with intumescent three-source integration[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2024, 42: 907-915.

［16］ 陈斌, 左佳, 张英, 等. 剥离型环氧树脂/粘土纳米复合材料热/力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(11): 37-40.

Chen B, Zuo J, Zhang Y, et al. Thermal/mechanical properties of peeled epoxy resin/clay nanocomposites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(11): 37-40.

［17］ Kundu C K, Wang X, Rahman M Z, et al. Application of chitosan and DOPO derivatives in fire protection of polyamide 66 textiles: towards a combined gas phase and condensed phase activity[J]. Polymer Degradation and Stability, 2020, 176: 109158.

［18］ Chen R, Luo Z, Yu X, et al, Synthesis of chitosan-based flame retardant and its fire resistance in epoxy resin[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 245: 116530.

Preparation and Properties of Flexible Flame-Retardant Epoxy Resin-Based Cotton Fiber Composites

Gehui Li[1,2], Fukun Liu[1,2], Yurun Zhao[1,2], Shilong Liu[1,2], Xiangchuan Guo[1,2], Yi Xu[1,2]

(1. College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 2. Civil Aircraft Fire Science and Safety Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

ABSTRACT: Improving the flame retardancy of epoxy resin (EP) composites is crucial for reducing fire hazards. To address the challenge of balancing flame retardancy and mechanical properties in EP-based composites, in this study chitosan (CS) was selected as both a char-forming agent and crosslinker, while introducing carbon nanofibers (CNF) as a synergistic flame retardant and reinforcing agent. A simple and efficient low-temperature curing process (40 °C, 4 h) was applied to prepare cotton fiber-reinforced epoxy composites (CS/CNF/EP) with different contents of EP. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) confirm the cross-linking polymerization between CS and EP.

When the EP content is 35 %, the CS/CNF/EP composite exhibits excellent mechanical flexibility (tensile strength of 7.09 MPa, elongation at break of 129.05 %) and outstanding flame retardancy (LOI of 32.3 %, UL-94 V-0 rating). The results demonstrate that the CS/CNF/EP composite successfully achieves a balance between mechanical flexibility and high flame retardancy, showing potential for applications in safety–critical fields such as aerospace interior materials and flexible protective layers.

Keywords: high toughness; flame retardancy; epoxy resin; composites; chitosan; carbon nanofiber