

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.01.024

阻燃型 TOTA-DOPO 固化 EP 制备与性能研究^{*}

毛伟¹, 李守海^{1,2}, 杨雪娟¹, 宋健¹, 黄坤^{1,2}, 李梅¹, 夏建陵^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院林产化学工业研究所; 江苏省生物质能源与材料重点实验室; 国家林业局林产化学工程重点开放性实验室;

生物质化学利用国家工程实验室, 南京 210042; 2. 中国林业科学研究院林业新技术研究所, 北京 100091)

摘要: 利用桐马酸酐为原料进行水解制得环氧固化交联性更高的桐油三酸 (TOTA), 再以不同物质的量比的 9, 10-二氢-9-氧-10-磷杂菲-10-氧化物 (DOPO) 和 TOTA 通过 Michael 加成反应制得 TOTA-DOPO, 红外光谱和核磁共振分析结果表明目标产物已成功合成; 再将制得的阻燃固化剂 TOTA-DOPO 与 E51 环氧树脂 (EP) 固化后得到一系列刚性固化材料, 并对其各项性能进行分析。研究结果表明, 固化材料的拉伸强度随着 DOPO 加成反应量的增加逐渐降低, 而其硬度、玻璃化转变温度、阻燃性能则随着 DOPO 加成反应量的增加逐渐增加; 热重分析表明, 制得的 EP 固化材料均具有良好的热稳定性, 其热初始分解温度均在 340℃ 以上。

关键词: 桐油三酸; TOTA-DOPO; 力学性能; 热分析; 阻燃性能

中图分类号: TQ322.4+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)01-0104-06

Study on Preparation and Properties of Flame Retardant TOTA-DOPO Cured Epoxy Resin

Mao Wei¹, Li Shouhai^{1,2}, Yang Xuejuan¹, Song Jian¹, Huang Kun^{1,2}, Li Mei¹, Xia Jianling^{1,2}

(1. Institute of Chemical Industry of Forestry Products, CAF; Key Lab of Biomass Energy and Material, Jiangsu Province; National Engineering Lab for Biomass Chemical Utilization; Key and Lab on Forest Chemical Engineering, SFA, Nanjing, 210042, China; 2. Institute of Forest New Technology, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: Tung three acid (TOTA) possessing higher epoxy curing cross-linking performance was firstly synthesized using tong methyl maleic anhydride as raw material via hydrolyzation, and then TOTA-DOPO was synthesized by adding different molar ratios of 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthren-10-oxide (DOPO) to TOTA via Michael addition reaction; FTIR and ¹H-NMR analysis results showed that the target products were successfully synthesized; finally the E51 epoxy was cured by prepared retardant epoxy curing agent TOTA-DOPO and a series of rigid curing epoxy materials were obtained, and their comprehensive properties were studied. The results showed that the tensile strength of curing materials gradually decreased with the increase of DOPO reacted content, and the hardness, glass transition temperature and flame retardant performance gradually increased with the increase of DOPO reactant; thermogravimetric analysis showed that all the prepared cured epoxy materials owned good thermal stability, the heating initial decomposition temperatures were all above 340℃.

Keywords: tung three acid; TOTA-DOPO; mechanical property; thermal analysis; flame retardant property

环氧树脂 (EP) 原料来源广泛、易得, 且合成路线比较成熟, 是一类重要的热固性树脂^[1-4]。其固化物具有优异的力学性能、良好的电学性能和化学稳定性、极高的耐热性及耐湿性能, 现已广泛用于涂料、电子电器、航空航天、建筑等领域^[5]。然而, 其阻燃性较低却成为阻碍 EP 进一步发展的重大因素^[6], 目前对 EP 及其固化剂进行合理的阻燃改性是一大研究热点。现阶段, 投入使用最多的方法就是在 EP 中引入卤素, 以此达到适宜的阻燃目的^[7], 但是, 含卤素的 EP 固化物在受热燃烧过程中会产生强烈刺激性、腐蚀性的有毒气体, 并对人们的身体健康造成严重的危害^[8]。

鉴于人们对健康认识和环境保护意识的不断

提高, 现逐渐开发了各种无卤阻燃剂, 尤其是磷系阻燃剂得到了迅速发展^[9-10]。9, 10-二氢-9-氧-10-磷杂菲-10-氧化物 (DOPO) 是一种新型的磷系阻燃剂中间体, 因结构中含有 P—H 键, 对双键、环氧基和羰基极具活性, 可反应生成许多 DOPO 衍生物^[11-15]; 且制得的 DOPO 衍生物比一般的未成环的有机磷酯具有更高的热稳定性和阻燃性^[16]; 而且含磷的 EP 在使用过程中不会对环境及人们的身体造

^{*} 中国林科院基本科研专项资金项目 (CAFINT2014C08), 国家十二五科技支撑项目 (2015BAD15B04)

联系人: 夏建陵, 研究员, 硕士生导师, 主要从事天然资源化学利用的研究

收稿日期: 2015-10-10

成危害。

随着石油原料的日趋减少,采用可再生的生物基为原料制备环境友好的绿色化工产品和能源是人类实现可持续发展的必由之路。笔者采用生物基的桐油衍生物桐马酸酐为主要原料,首先制得可使 EP 固化交联性更高的桐油三酸 (TOTA),而后将其与 DOPO 反应制得阻燃型固化剂 TOTA-DOPO,此种基于桐油的固化剂制得的 EP 固化材料的刚性有望显著强于单纯的桐马酸酐固化 EP 材料。研究中制备的阻燃型生物基 EP 固化材料,具有原料价廉易得、无毒、材料刚柔性可控等优点,不仅拓展了木本油脂基材料的应用范围,而且符合当今绿色环保的主题。

1 实验部分

1.1 主要原料

桐马酸酐:化学纯,南京大自然精细化学品有限公司;

盐酸、乙醇:分析纯,南京化学试剂有限公司;

氢氧化钠:分析纯,上海展云化工有限公司;

DOPO:分析纯,阿拉丁试剂有限公司;

EP:E51,化学纯,林化所南京科技开发总公司;

DMP-30 促进剂:分析纯,林化所南京科技开发总公司。

1.2 仪器设备

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪:Nicolet IS10 型,美国 Perkin Elmer 公司;

核磁共振光谱仪:ARX300 型,德国斯派克公司;

微机控制电子万能试验机:CMT4000 型,深圳新三思仪器有限公司;

邵氏硬度计:YH210 型,上海 TIME 仪器有限公司;

热重 (TG) 分析仪:409PC 型,德国斯派克公司;

动态热力学分析 (DMA) 仪:Q800 型,美国 Perkin Elmer 公司;

氧指数测定仪:JF-3 型,青岛山纺仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1) TOTA 的制备。

将 400 mL 乙醇、400 mL 蒸馏水和 120 g 氢氧化钠加入到安装有冷凝回流装置的 2 L 四口烧瓶中,搅拌充分溶解,然后加热至 70℃。然后向烧瓶

中缓慢滴加 312 g 桐马酸酐,滴加完毕后,70℃恒温搅拌 2 h。待反应结束后,滴加 5 mol/L HCl 调节 pH 值至 2~3,并保温 1 h,然后经静置分离,取上层油状液体,而后用蒸馏水洗涤 3 次,最后经旋蒸除去多余水分即制得棕红色粘稠状的 TOTA。TOTA 的合成路线如图 1 所示。

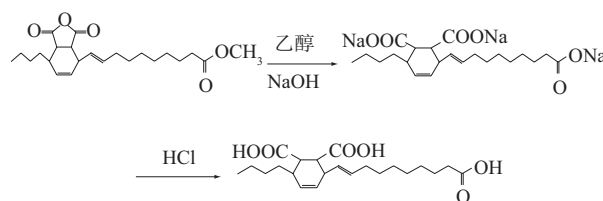


图 1 TOTA 的合成路线

(2) TOTA-DOPO 的制备。

将一定质量的 TOTA 加入至四口烧瓶中,升温至 85~90℃,然后将 DOPO 分别按照 TOTA:DOPO 为 1:1,2:1,4:1 的物质的量比加入至四口烧瓶中,至 DOPO 完全溶解后,升温至 160℃,保持恒温并持续搅拌反应 6 h,然后趁热取出,冷却后即得到不同配比 DOPO 加成改性的 TOTA-DOPO。TOTA-DOPO 的合成路线如图 2 所示。

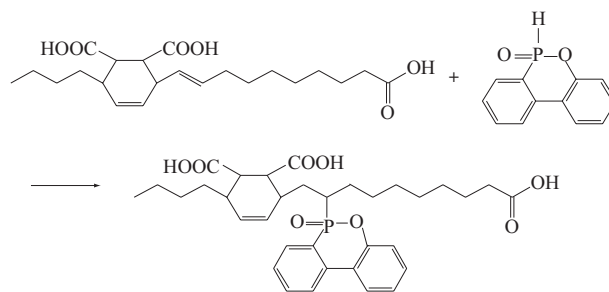


图 2 TOTA-DOPO 的合成路线

(3) TOTA-DOPO 固化 EP 制备。

将 EP, TOTA-DOPO, DMP-30 按表 1 配制完成后,混合均匀,然后将其倒入至特殊样条模具中,而后放置烘箱于 90℃预固化 2 h,再经 120℃固化 2 h,最后于 160℃下进行后固化 2 h。取出冷却后即制得 TOTA-DOPO 固化 EP 材料。

表 1 TOTA-DOPO 固化 EP 中各组分质量配比¹⁾ %

固化体系	EP	TOTA-DOPO	TOTA	桐马酸酐	DMP-30
1 [#]	48.06	50.94	0	0	1.00
2 [#]	52.27	46.73	0	0	1.00
3 [#]	55.78	43.22	0	0	1.00
4 [#]	58.48	0	40.52	0	1.00
5 [#]	32.68	0	0	66.32	1.00

注:1)1[#],2[#],3[#] 体系中 TOTA 与 DOPO 物质的量比分别为 1:1,2:1,4:1。

1.4 性能测试及表征

FTIR 分析: 采用 FTIR 仪, 衰减全反射方法对 TOTA 和 TOTA-DOPO 等样品进行分析。

核磁氢谱 ($^1\text{H-NMR}$) 分析: 采用核磁共振光谱仪, 样品用 CDCl_3 进行溶解, 对 TOTA 和 TOTA-DOPO 进行分析。

拉伸性能按 GB/T 1040.3-2006 采用微机控制电子万能试验机在室温测试, 拉伸速率为 10 mm/min 。

硬度采用邵氏硬度计在室温下测定。

动态热力学性能: 采用 DMA 仪分析, 三点弯曲方法测试, 样品尺寸为 $60\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 升温速率为 3°C/min , 频率为 1 Hz , 测试温度范围 $-70 \sim 100^\circ\text{C}$ 。

热稳定性: 采用 TG 分析仪测试, 氮气流速为 30 mL/min , 升温速率为 15°C/min , 测试温度范围 $25 \sim 600^\circ\text{C}$ 。

阻燃性能: 采用氧指数测定仪按 GB/T 2406-2009 测试极限氧指数 (LOI), 氧气、氮气流速为 10 L/min 。

2 结果讨论

2.1 TOTA 及 TOTA-DOPO 的红外光谱分析

图 3 为 TOTA 与 TOTA-DOPO 的 FTIR 谱图。由图 3 可知, 在 $3500 \sim 2500\text{ cm}^{-1}$ 之间较宽的吸收峰是分子链中 C—H 键的伸缩振动峰与 O—H 键的伸缩振动叠加吸收峰, 其中 2950 cm^{-1} 和 2850 cm^{-1} 处的强吸收峰分别为 $-\text{CH}_3$ 基团和 $-\text{CH}_2$ 基团中 C—H 键的伸缩振动吸收峰, 同时羧基中 O—H 键的面外弯曲振动吸收峰在 900 cm^{-1} 出现; 另外谱图中 1700 cm^{-1} 附近窄而强的吸收峰为羧基基团中 C=O 键的伸缩振动吸收峰与非端基 C=C 双键的叠加吸收峰, 这是因为 TOTA 分子链上的六元环的张力相对较小, 使得环内 C=C 的吸收峰强度变大, 发生了红移与羧基基团中的 C=O 缔合;

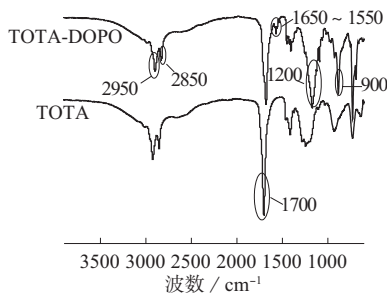
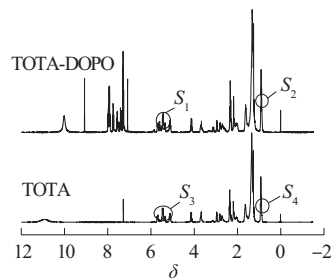


图3 TOTA 与 TOTA-DOPO 的 FTIR 谱图

双键与羧基特征峰的出现可表明 TOTA 已成功合成。TOTA-DOPO 的谱图中在 $1650 \sim 1550\text{ cm}^{-1}$ 之间的几个峰为苯环的特征吸收峰; 1200 cm^{-1} 附近窄而强的吸收峰为 P=O 的特征吸收峰; 而 2400 cm^{-1} 附近 P—H 的特征吸收峰在红外波谱图上没有出现, 说明 DOPO 成功与 TOTA 发生了 Michael 加成反应, 生成了目标产物 TOTA-DOPO。

2.2 TOTA 及 TOTA-DOPO 的 $^1\text{H-NMR}$ 检测分析

图 4 为 TOTA-DOPO 和 TOTA 的 $^1\text{H-NMR}$ 谱图。由图 4 中 TOTA 的谱图可知, 化学位移 (δ)=11 处, 对应的是羧基上的氢原子; $\delta=5 \sim 6$ 时, 对应的是 $\text{CH}=\text{CH}$; $\delta=2 \sim 4$ 时, 对应的是 $-\text{CH}$; $\delta=1.6 \sim 2$ 处, 对应的是 $-\text{CH}_2-$; $\delta=0.8$ 处, 对应的是 $-\text{CH}_3$ 。由 TOTA-DOPO 的谱图可看出, TOTA-DOPO 中 $-\text{CH}$, $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$ 的化学位移与 TOTA 的化学位移略微有所偏移, 这主要是由于分子结构中引入了大的取代基使得部分氢原子对应的化学位移发生了一定变化; $\delta=10$ 处, 对应的是羧基上的氢原子; $\delta=7 \sim 8$ 处, 对应的是芳香环结构上的氢原子; $\delta=1.5$ 处, 对应的是 P—CH。由于 $-\text{CH}_3$ 中氢原子对应的化学位移特征峰的积分面积是一个定值, 因此可作为一个固定参考值。



S_1, S_3 — $\text{CH}=\text{CH}$ 基团中氢原子对应的峰面积;

S_2, S_4 — CH_3 基团中氢原子对应的峰面积

图4 TOTA-DOPO 和 TOTA 的 $^1\text{H-NMR}$ 谱图

另由图 4 可知, $S_1 : S_2 = 1 : 1$; $S_3 : S_4 = 1.2 : 1$ 。由此可知 DOPO 与 TOTA 发生了 Michael 反应, 导致 $\text{CH}=\text{CH}$ 基团中氢原子对应的峰面积有所降低。综上所述, TOTA-DOPO 和 TOTA 的 $^1\text{H-NMR}$ 谱图与分子的结构吻合, 且红外谱图也显示了 P—H 与 C=C 发生了加成反应, 分析表明 TOTA 和 TOTA-DOPO 成功合成。

2.3 固化 EP 的物理力学性能

图 5 示出不同 EP 固化材料的应力—应变曲线, 表 2 示出拉伸性能和硬度。从图 5 及表 2 可看出, 单纯的 TOTA 固化 EP 的拉伸强度和硬度比桐马酸

酞固化 EP 高,但断裂伸长率相比较低。这主要是因为单纯桐马酸酐固化的 EP 中所含柔性链段过高,固化体系中的交联度相对较低。另外,随着 DOPO 加成反应量的增加,固化材料的拉伸强度逐渐降低,但其硬度逐渐变大。这是因为含磷单体的加入相当于在聚合物的主链上引入了大的取代基,阻碍了分子间的旋转,使得空间位阻变大,分子间的引力降低,同时降低了固化体系的交联密度从而降低了材料的拉伸强度;再者,由于固化体系 DOPO 组分中含有的苯环是刚性的,故而随着 DOPO 加成反应量的增加,材料的刚性逐渐变强,硬度变大,断裂伸长率则仍然保持在较低水平,且随着 DOPO 加成反应量的增加逐渐降低。

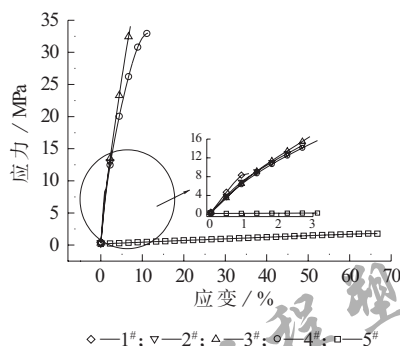


图5 EP 固化材料的应力-应变曲线

表2 固化 EP 的拉伸性能和硬度

固化体系	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %	硬度
1 [#]	8.60	1.13	60
2 [#]	14.66	2.69	55
3 [#]	34.00	7.14	52
4 [#]	33.00	11.36	49
5 [#]	1.80	65.13	20

2.4 固化 EP 的动态热力学性能

图6示出不同固化 EP 的 DMA 曲线(3[#]体系由于阻燃性能和热性能较差没有进行后续分析)。从图6可以看出,四种固化体系的 DMA 曲线都存在一个明显的玻璃化转变区域,在低温 -70℃ 时固化物的储能模量均在 2750 MPa 以上,随着温度的逐渐升高,在达到玻璃化转变温度 (T_g) 前,不同配比的 TOTA-DOPO 固化材料的储能模量相对缓慢下降,而由桐马酸酐固化材料的储能模量却加速下降,可能是因为含有柔性链段的体系分子链运动比交联密度大的体系分子链运动快,同时损耗因子也迅速增加,当损耗因子达到最大值时所对应的温度为 T_g ,此时储能模量降低到最低值。TOTA-DOPO 固化材料的储能模量显著高于桐马酸酐固化体系,这与前面的力学性能测试分析结果一致。

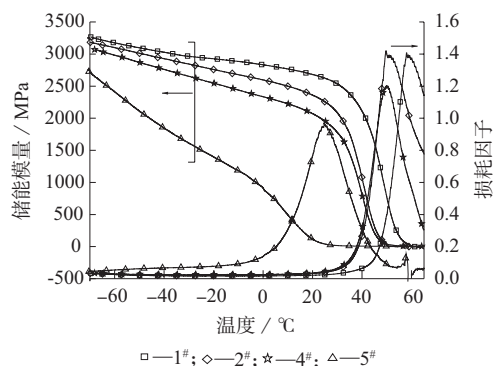


图6 固化 EP 的 DMA 曲线

从图6还可以看出,随着 DOPO 反应加成量的增加,固化材料的储能模量和 T_g 逐渐提高,这主要是因为 DOPO 中含有的苯环具有较强的刚性,随着反应加成量的增加,使得固化体系中的刚性基团数量有较大提高,其储能模量亦随之增加,另一方面,由于在固化体系的分子主链上引入了大的取代基,阻碍了链段的内旋转,使空间位阻增大,材料刚性有所提高,其对应的 T_g 亦有所提高。

2.5 固化 EP 的热稳定性

图7示出不同固化 EP 的 TG 和微分热重 (DTG) 曲线,相应数据列于表3。从图7和表3可知,阻燃型 TOTA-DOPO 固化 EP 在氮气气氛中的热分解只有一个质量损失区间,而桐马酸酐固化材料却存在两个质量损失区间且其初始热分解温度比 TOTA 基的固化材料低。桐马酸酐固化材料在 200

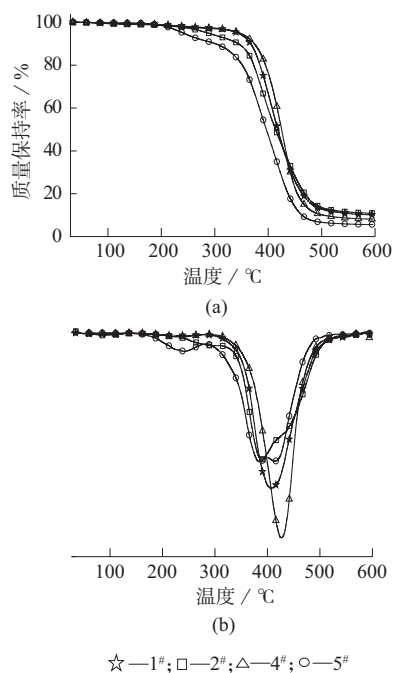


图7 固化 EP 的 TG 和 DTG 曲线

表3 固化EP材料的TG分析数据¹⁾

固化体系	第一段失重			第二段失重			600℃残炭率/%
	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_d/^\circ\text{C}$	$D_{\max}/(\%\cdot\text{min}^{-1})$	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_d/^\circ\text{C}$	$D_{\max}/(\%\cdot\text{min}^{-1})$	
1 [#]	360	390	-11.31				10.95
2 [#]	369	406	-13.88				10.20
4 [#]	388	426	-18.32				8.10
5 [#]	242	220	-1.69	340	400	-11.50	5.62

注:1) T_i 为初始分解温度; T_d 为拐点温度; $D_{\max}$ 为峰值分解速率。

~300℃区存在一个不明显的失重过程,可能是由于随着温度的升高桐马酸酐固化材料中的酯基受热易分解,故先发生失重。而阻燃型 TOTA-DOPO 固化材料的热失重过程和单纯的桐马酸酐固化材料的第二个失重过程都在 320~400℃之间。这可能是由于当温度达到 360℃左右时,材料内的碳碳键和酯基开始发生断裂,随着温度的不断升高,材料内部发生强烈的热分解反应,使得分子链几乎全部断裂,进而发生了明显的失重。

从图7还可以看出,随着 DOPO 加成反应量的增加, TOTA-DOPO 固化材料的热分解初始和峰值温度明显降低,这主要是因为 DOPO 中含有的 C—P 键,其键能要比 C—C 键低,因此在受热过程中含有 C—P 键的 TOTA-DOPO 更容易发生化学键的断裂从而导致 TOTA-DOPO 固化材料更容易分解。另外在 600℃时, TOTA-DOPO 固化材料的残炭率达到 10.95%,而未加入 DOPO 的固化材料的残炭率仅为 5.62%,这主要是由于 TOTA-DOPO 固化体系中存在较高的交联度和诸多更易成炭的苯环结构(如图8所示)。

2.6 固化EP材料的阻燃性能

表4示出不同固化EP材料的阻燃性能。从表4可知,阻燃型 TOTA-DOPO 固化EP材料的 LOI 要明显高于未加入 DOPO 的固化材料,而且随着 DOPO 含量的增加而增加,均保持在 20% 以上,确保其在暴露空气中的阻燃性。这主要是因为 DOPO 中的磷组分在高温下分解出一种可促使羟基化合物脱水的催化剂——含氧酸,羟基化合物脱水后便形成致密的炭层,一方面抑制了可燃性气体的逸出,另一方面降低了 EP 材料的热导率,故使得 EP 固化材料的阻燃性能得到了一定提高。

3 结论

成功制备了 TOTA 和阻燃固化剂 TOTA-DOPO,并将制备的 TOTA 和 TOTA-DOPO 代替桐马酸酐来制备 EP 固化材料。所得材料的刚性、阻

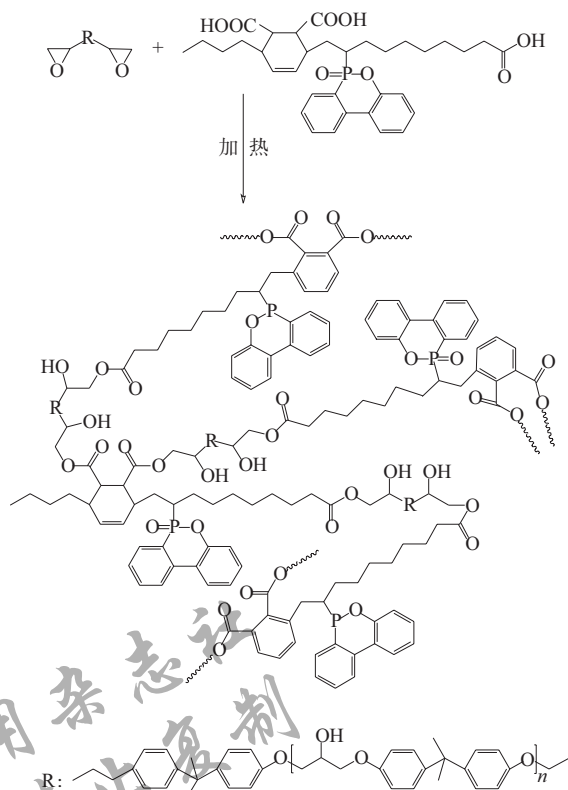


图8 TOTA-DOPO 固化 EP 的机理

表4 固化EP材料的阻燃性能

固化体系	LOI/%
1 [#]	24.50
2 [#]	22.00
4 [#]	18.50
5 [#]	19.00

燃性随着 DOPO 含量的增加逐渐增加, T_g 也逐渐提高,且均具有较好的热稳定性,其热失重的初始分解温度均在 340℃以上,这不仅为阻燃型材料的进一步研究打下了基础也扩展了 EP 的应用领域。阻燃固化剂 TOTA-DOPO 的使用有效避免了 EP 固化材料在使用过程中对环境造成的伤害,同时采用价廉易得、无毒的生物基本油脂桐油作为原料,能够为将来此类生物质材料的应用开发提供理论基础和技术支持,是当今世界科研领域的热点和发展趋势。

参考文献

- [1] 王昱,罗炎,张桢. 阻燃型 DOPO-马来酸酐改性的环氧树脂研究[J]. 绝缘材料,2010,43(3):20-23,28.
Wang Yu, Luo Yan, Zhang Zhen. Study on epoxy resin modified with flame retardant DOPO-MA[J]. Insulating Material, 2010, 43(3):20-23,28.
- [2] 胡玉明,吴良义. 环氧固化剂及添加剂[M]. 北京:化学工业出版社,2004:2-3.
Hu Yumin, Wu Liangyi. Epoxy curing agent and additives[M].

- Beijing:Chemical Industry Press,2004:2-3.
- [3] Gu Hongbo, Tadakamalla S, Zhang Xi, et al. Epoxy resin nanosuspensions and reinforced nanocomposites from polyaniline stabilized multi-walled carbon nanotubes[J]. Journal of Materials Chemistry,2013(1):729-743.
- [4] Wang Zhi, Liang Zhiyong, Wang Ben, et al. Processing and property investigation of single-walled carbon nanotube(SWNT) buckypaper / epoxy resin matrix nanocomposites[J]. Composites, 2004,35:1 225-1 232.
- [5] Roy B, Karak N. Modification of hyperbranched epoxy by vegetable oil-based highly branched polyester resin[J]. Polymer Bulletin,2012,68:2299-2 312.
- [6] 梁静,王岚清. DOPO 与邻甲酚醛环氧树脂反应特性的研究 [J]. 热固性树脂,2007,22(5):8-10.
- Liang Jing, Wang Lanqing. Study on reaction of DOPO with o-cresol formaldehyde novolac epoxy resin[J]. Thermosetting Resin,2007,22(5):8-10.
- [7] 夏建陵,聂小安. 新型聚酰胺 P 环氧固化体系性能的研究 [J]. 热固性树脂,2004,19(5):27-28.
- Xia Jianling, Nie Xiaohan. Study of new polyamide epoxy curing system performance[J]. Thermosetting Resin,2004,19(5):27-28.
- [8] Ding Jiabei, Tao Zhiqiang, Zuo Xiaobiao, et al. Preparation and properties of halogen-free flame retardant epoxy resins with phosphorus-containing siloxanes[J]. Polymer Bulletin,2009, 62:829-841.
- [9] Buczko A, Stelzig T, Bommer L, et al. Bridged DOPO derivatives as flame retardants for PA6[J]. Polymer Degradation and Stability, 2014,107:158-165.
- [10] Khalifah A, Gaan S. An overview of some recent advances in DOPO-derivatives:Chemistry and flame retardant applications[J]. Polymer Degradation and Stability,2015,113:119-134.
- [11] Bao Xiao, Cai Xufu. Synergistic effect of methyl phenyl silicone resin and DOPO on the flame retardancy of epoxy resins[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2014, 118:369-375.
- [12] Juang T Y, Liu J K, Chang C C, et al. A reactive modifier that enhances the thermal mechanical properties of epoxy resin through the formation of multiple hydrogen-bonded network[J]. Journal of Polymer Research,2011,18:1 169-1 176.
- [13] Hamciuc C, Serbezeanu D, Carja I D, et al. Effect of DOPO units and of polydimethylsiloxane segments on the properties of epoxy resins[J]. Journal of Materials Science,2013,48:8 520-8 529.
- [14] Gaan S, Liang Shugu, Mispereuve H, et al. Flame retardant flexible polyurethane foams from novel DOPO-phosphonamide additives[J]. Polymer Degradation and Stability,2015,113:180-188.
- [15] Neisius N M, Lutz M, Rentsch D, et al. Synthesis of DOPO-based phosphonamides and their thermal properties[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research,2014,53(8):2 889-2 896.
- [16] 党婧,王汝敏,程雷,等. 反应型阻燃环氧树脂的研究进展 [J]. 绝缘材料,2009,42(5):17-23.
- Dang Jing, Wang Rumin, Cheng Lei, et al. Preparation and researches progress of reactive flame retardant epoxy resins[J]. Insulating Material,2009,42(5):17-23.

威格斯 VICTREX 管路为商用飞机减重 45%

为提升新商用飞机平台的整体燃油效率和可靠性,中国商用飞机有限责任公司(COMAC)选用威格斯管路 VICTREX Pipes 作为高压电缆导管,替代金属管道。这种全新热塑解决方案最多可减重 45%。

这种解决方案由北京飞航吉达航空科技有限公司(北京飞航)和威格斯合作提供。据介绍,VICTREX PEEK 管道以优异的表现通过中国的适航性测试,该测试包括在撞击、负荷、温度波动和其他环境条件下保持操作性能。借助威格斯的专业技术知识和支持,他们成功地在极短的开发周期内设计出轻质经济的高压电缆保护系统。

VICTREX 管道通常用于替代铝、钛和不锈钢管道系统。就此特定应用而言,经 COMAC 测试和验证,与同类钛管道相比,VICTREX PEEK 管道减重高达 45%。质量减轻既可以提高燃油效率,又可以减少 CO₂ 排放。坚固耐用的管道系统还可充当减震器保护电缆。

威格斯航空大客户经理薛未表示:“威格斯帮助飞机机身制造商和各级供应商实现他们的目标。与北京飞航这样的业内领先公司合作收获非常丰厚,不仅能在组件性能方面

实现最佳效果,使 COMAC 能交付下一代轻型飞机,还能提升制造效率。”

威格斯与工程技术团队合作设计的这一系统优势在于加快制造流程,不需要金属所需的机械加工和防腐处理。通过缩短开发周期时间,公司能够降低系统总成本。

威格斯聚醚醚酮 VICTREX PEEK 解决方案在航空业的应用历史超过 25 年。在很多情况下,整个供应链的工程师们与威格斯合作,优化这些系统的设计,因为它们往往必须要能装进有限的空间。VICTREX 管道可通过使用加热和传统管道弯曲设备进行弯曲、成型和展开,以满足严格的内部设计要求和空间限制。威格斯还与许多客户在技术上通力合作,实现连续系统的设计。

PEEK 管道带来的性能优势并非只是符合航空工程师的需求。热塑管道具有卓越的阻燃/低烟/无毒性能,具有很高的延展性和抗腐蚀性,并拥有高压环境中不可或缺的高绝缘强度。这些解决方案在高温、高压和腐蚀性操作条件下经久耐用,因此也被用于能源和工业领域。此外,VICTREX 管道拥有光滑内表面,实现轻松流动,这对于液体输送来说是一项主要优势。

(中国塑料橡胶)