

## 几种胺类固化剂对环氧树脂固化行为及 固化物性能的影响

谭家顶, 程 珏, 郭 晶, 张军营

(北京化工大学碳纤维及功能高分子教育部重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 固化剂结构对环氧树脂的固化行为和固化物性能具有重要影响, 本文研究了聚醚胺 (D-230)、异佛尔酮二胺 (IPDA) 和 3,3'-二甲基-4,4'-二氨基-二环己基甲烷 (DMDC) 3 种胺类固化剂与实验室自制的低黏度环氧树脂 A 进行固化反应。通过黏度分析、红外 (FTIR) 光谱分析、DSC 分析等手段研究了环氧树脂与固化剂反应程度随固化时间和固化温度的变化规律, 采用万能材料试验机研究了固化温度对固化物拉伸强度、断裂伸长率的影响。结果表明, 3 种树脂/固化剂体系的固化反应活化能分别为 59.6、50.9、54.9  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; 与脂肪族固化剂 D-230 相比, 脂环族固化剂 IPDA 和 DMDC 具有反应活性高, 同样固化条件下固化产物的固化程度高、强度高和断裂伸长率高的特点, 并且双环结构的 DMDC 具有更高的韧性。

**关键词:** 低黏度环氧树脂; 胺类固化剂; 固化行为; 高强度

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2011.06.037

**中图分类号:** TQ 430.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (2011) 06-1723-07

## Effect of amine curing agents on curing behavior of epoxy resin and properties of cured compounds

TAN Jiading, CHENG Jue, GUO Jing, ZHANG Junying

(Key Laboratory of Carbon Fiber and Functional Polymers, Ministry of Education, Beijing University of  
Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The structure of curing agents has an significant impact on curing behavior of epoxy resin and properties of cured compounds. Three amine curing agents, polyether amine (D-230), alicyclic amine isophorone diamine (IPDA), 3,3'-dimethyl-4,4'-diamino-dicyclohexyl methane (DMDC) were used for curing a self-made low viscosity epoxy resin A. The curing process of the epoxy resin system cured with the curing agent under different curing times and curing temperatures were monitored by viscosity analysis, infrared (FTIR) spectroscopy, and differential scanning calorimetry analysis (DSC). The influence of curing temperature on tensile strength and elongation was investigated by universal testing machine. The results showed that curing reaction activation energy ( $E_a$ ) of the three epoxy resin/hardener systems were 59.6  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 50.9  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  and 54.9  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , respectively. Compared with aliphatic amine curing agent D-230, the products cured with alicyclic curing agents IPDA and DMDC showed higher reaction activity and could result in higher degree of curing, higher tensile strength and greater elongation. Furthermore, curing agent DMDC with bicyclic structure could provide even more excellent toughness.

**Key words:** low viscosity epoxy resin; amine curing agent; curing behavior; high tensile strength

2010-10-22 收到初稿, 2010-12-29 收到修改稿。

联系人: 程珏。第一作者: 谭家顶 (1985—), 男, 硕士研究生。

生。

Received date: 2010-10-22.

Corresponding author: Prof. CHENG Jue, chengjue @ mail.

buct. edu. cn

## 引 言

环氧树脂胶黏剂有万能胶之称,具有优异的综合性能,引起了广大研究者和应用者的广泛兴趣。其中环氧树脂固化剂的种类和结构很大程度上决定着胶黏剂的固化行为、强度和韧性<sup>[1-4]</sup>。直链结构型的聚酰胺(如 D-230、D2000)具有柔性链段,链段构象多,赋予环氧树脂固化物一定的柔韧性和冲击强度,但同时会降低固化物拉伸强度<sup>[5-7]</sup>;芳香族胺类固化剂(如 DDS、DDM)具有刚性苯环结构,使环氧树脂固化物的力学性能大大提高,但是固化物的柔韧性差、较脆,表现为固化物的冲击强度低<sup>[8-10]</sup>。因此,环氧树脂体系的强度和韧性常常是相互矛盾的,这也是该领域的一个难点和热点问题<sup>[11-12]</sup>。

脂环族胺类固化剂(如异佛尔酮二胺, IPDA)具有饱和六元环结构,它具有与聚酰胺结构类似的特点——空间构象多、柔顺性好,同时又具有与芳香胺结构类似的特点——环状结构的刚性和强度,通过结构设计有望结合强度和韧性于一身。目前,关于脂环族胺固化剂的基础结构与性能的研究报道较少<sup>[13]</sup>,如脂环胺结构与固化行为、力学性能关系的报道至今没有发现。本研究对单脂环胺、双脂环胺固化剂对环氧树脂的固化行为、固化物强度、断裂伸长率等的影响进行详细研究,并与线形聚酰胺固化剂进行比较,获得该类固化剂结构对固化行为和性能的影响规律,为固化剂的结构设计提供理论基础。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验原料

环氧树脂体系 A,实验室制备,环氧值为 0.60,淡黄色至黄色透明液体,黏度为 795.4 mPa·s (25℃);聚酰胺 D-230,工业级,胺值为 315 mg KOH·g<sup>-1</sup>,黏度为 9.4 mPa·s (25℃),BASF 公司;异佛尔酮二胺(IPDA),化学名称为 3-胺甲基三甲基环己胺,相对分子质量为 170.3,胺值为 659 mg KOH·g<sup>-1</sup>,黏度为 18 mPa·s (25℃),BASF 公司;3,3'-二甲基-4,4'-二氨基二环己基甲烷(DMDC),相对分子质量为 238.41,胺值为 470 mg KOH·g<sup>-1</sup>,黏度为 120 mPa·s (25℃),BASF 公司。

### 1.2 实验分析仪器

Visco88 平板/锥板黏度仪,英国 Malvern 仪器有限公司;电热恒温鼓风干燥机 DHG-9070A,上海一恒科技有限公司;真空干燥箱 DZF-6020,上海一恒科技有限公司;万能试验机 Instron 1185,美国。差示扫描量热分析仪(DSC),美国 PERKIN ELMER 公司;红外(FTIR)测试仪 nexus FT-IR670 型光谱仪,美国 Nicolet 公司;电子扫描显微镜 JSM-5610LV,日本日立公司。

### 1.3 分析方法及条件

黏度分析:采用 Visco88 平板/锥板黏度仪,测试固化剂与树脂混合后在不同温度条件下的黏度。

红外光谱分析:将不同条件下固化的固化物研成粉末,采用压片法进行红外光谱分析,计算环氧指数( $S_1/S_2$ ,  $S_1$  为 FTIR 谱图中环氧峰 915 cm<sup>-1</sup> 的面积,  $S_2$  为环氧树脂 FTIR 中 1580~1610 cm<sup>-1</sup> 之间苯环特征峰的面积)。

差示扫描量热分析(DSC):分析树脂/固化物体系固化行为和固化物的玻璃化转变温度,在室温至 300℃扫描,升温速率为 5~20℃·min<sup>-1</sup>,液氮为冷却介质。

拉伸测试:参照 GB/T 2568—1995 进行,常温测试,跨度为 50 mm,实验速度为 2 mm·min<sup>-1</sup>。

冲击测试:参照 GB/T 2571—1995 进行,无缺口式样,常温测试,跨度为 60 mm。

### 1.4 实验方法

1.4.1 固化工艺 将树脂 A 与固化剂按照一定的配比混合均匀,放入真空干燥箱中真空脱除气泡(常温),倒入模具中,静置 12 h,放入烘箱固化。得到的样条用于测试。

1.4.2 树脂与固化剂混合配比及固化条件 根据环氧基团与活泼氢等摩尔反应计算树脂体系与固化剂理论用量比例,将固化剂比例上调 5%,得到实际用量比例,见表 1。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 固化反应动力学研究

分别测定 A/D-230、A/IPDA、A/DMDC 体系在 4 个升温速率下固化的 DSC 曲线,如图 1 所示。从图 1 可以得到各树脂/固化剂体系在不同升温速率下的起始温度  $T_0$ 、峰顶温度  $T_p$ 、终止温度  $T_i$ 。

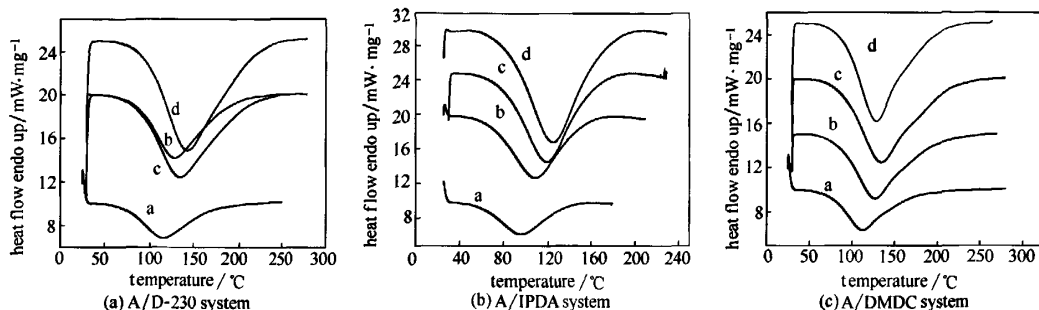


图 1 三种树脂/固化剂体系的 DSC 曲线

Fig.1 DSC curves of three epoxy resin/curing agent systems

scanning rate: a—5 K·min<sup>-1</sup>; b—10 K·min<sup>-1</sup>; c—15 K·min<sup>-1</sup>; d—20 K·min<sup>-1</sup>

表 1 基本配方

Table 1 Composition of samples

Entry	Resin system	Hardener	Proportion of resin to hardener
1	epoxy resin A	D-230	100 : 35
2	epoxy resin A	IPDA	100 : 25
3	epoxy resin A	DMDC	100 : 35

采用 Kissinger 方法 [式(1)] 计算树脂/固化剂体系的活化能  $E_a$ 。

$$\frac{d[\ln(\beta/T_p^2)]}{d(1/T_p)} = -\frac{E_a}{R} \quad (1)$$

根据式(1)，以  $-\ln(\beta/T_p^2)$  对  $1/T_p$  作图，并线性拟合取斜率  $-E_a/R$ ，可得固化反应活化能  $E_a$ ，如图 2、表 2 所示。

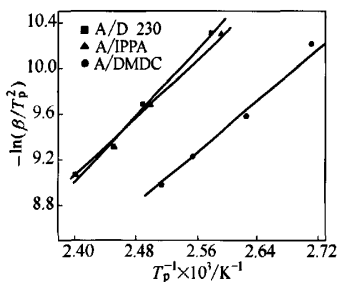


图 2 体系 A/D-230、A/IPDA 和 A/DMDC 的动力学分析

Fig.2 Kinetics analysis of system A/D-230, A/IPDA and A/DMDC

表 2 三种体系固化反应活化能

Table 2 Curing reaction activation energy ( $E_a$ ) of three epoxy resin/hardener systems

Resin/hardener system	Proportion of epoxy resin A to hardener	$E_a$ /kJ·mol <sup>-1</sup>
A/D-230	100 : 35	59.6
A/IPDA	100 : 25	50.9
A/DMDC	100 : 35	54.9

从表 2 可以看出，A/IPDA 体系固化反应活化能最低，表明反应活性最大，A/DMDC 体系居中，A/D-230 体系固化反应活化能最大，反应活性最小。这是因为，固化剂 D-230 由于其直链结构规整，存在比较明显的氢键作用，使得官能团稳定，活性低。而环状结构的固化剂 IPDA、DMDC 的规整性则相对较差，氢键作用不明显，因而官能团活性就相对较大。

由于热滞后现象，放热峰的峰顶温度随着 DSC 升温速率的增加而升高，而环氧树脂/固化剂常在恒温或阶段式升温的状态下固化，此时升温速率为 0。可以采用  $T-\beta$  图外推求得固化体系的等温固化温度，确定树脂的最佳固化程序<sup>[14]</sup>。图 3 是 3 种不同树脂/固化剂体系的  $T_o$ 、 $T_p$ 、 $T_i$  与升温速率的变化关系。

每条直线外推到  $\beta=0$ ，得到固化体系的等温固化温度，结果见表 3。

表 3 树脂/固化体系的固化温度程序

Table 3 Curing temperature program of resin/curing agent systems

Resin/hardener system	Proportion of resin and hardener	$T_i$ /°C	$T_p$ /°C	$T_o$ /°C
A/D-230	100 : 35	36.69	107.44	208.20
A/IPDA	100 : 25	30.36	87.03	145.96
A/DMDC	100 : 35	36.35	104.41	252.41

从表 3 可以看出，活性最大的 A/IPDA 体系所需固化温度最低，活性相对较小的 A/D-230 和 A/DMDC 体系固化温度高；而在固化后期 A/DMDC 体系相对于 A/D-230 体系需要更高的温度是由于环状结构的 DMDC 的分子链段位阻效应更为明显。

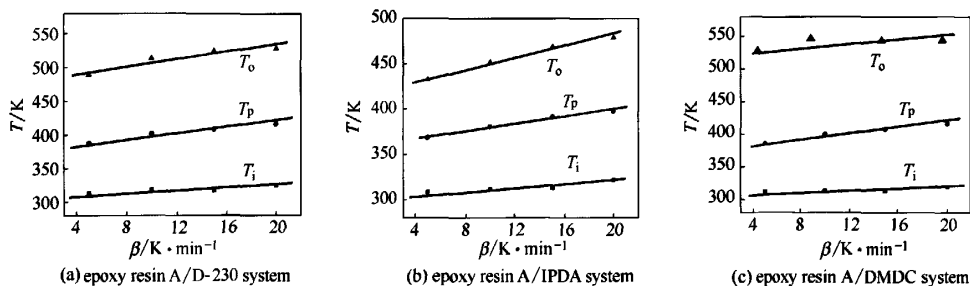


图 3 三种树脂/固化剂体系的  $T$ - $\beta$  曲线

Fig. 3  $T$ - $\beta$  curves of three epoxy resin/hardener systems

2.2 固化反应程度跟踪分析

2.2.1 反应时间对树脂/固化剂混合体系黏度的影响 树脂与固化剂按照比例在 25℃ 下混合后，随着树脂和固化剂的反应，分子量增大，形成支化结构以及三维网状结构，黏度会随着反应程度加深而逐步升高，3 种树脂/固化剂体系的黏度随反应时间的变化见图 4。

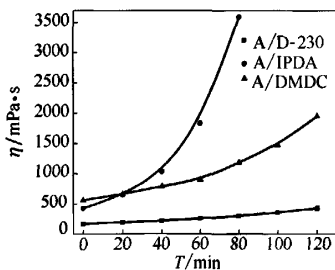


图 4 三种树脂/固化剂体系黏度随时间的变化

Fig. 4 Viscosity dependence of epoxy resin/hardener mixture on reaction time cured at 25℃

从图 4 中可以看出，活性高的 A/IPDA 体系随时间的延长快速增加，在 1 h 内黏度从初始黏度增大到 2000 mPa·s 左右；A/DMDC 体系在 2 h 内从初始黏度增大到 2000 mPa·s 左右；而活性最低的 A/D-230 体系在测试时间范围内黏度变化不明显。

2.2.2 固化温度对体系凝胶时间的影响 利用平板小刀法分析混合物凝胶时间，称取 6 g 混合均匀的树脂和固化剂倒入加热板的圆槽里，用牙签抽丝，直到能拉出细长的丝<sup>[15]</sup>。分别测试 80、100、120℃ 下的凝胶时间，结果见表 4。

从表 4 可以看出，在整个体系中，A/D-230 反应活性最低，反应缓慢，A/DMDC 居中，A/IPDA 反应活性最高，反应最快。这与前面活化能的分析数据相吻合。

表 4 三种树脂/固化剂体系在不同温度下的凝胶时间

Table 4 Gel time of three resin systems heated at different temperature

Resin/hardener system	Gel time/min		
	80℃	100℃	120℃
A/D-230	41.4	16.2	8.0
A/IPDA	10.5	7.5	2.4
A/DMDC	21.3	12.5	3.4

2.2.3 红外跟踪测试 随着固化反应的进行，树脂/固化剂体系中的环氧官能团数量逐渐减少，采用红外谱图对比固化前后树脂体系环氧基团的峰面积的变化来计算环氧指数，判定树脂体系的固化反应程度<sup>[16]</sup>。图 5 为 3 种树脂/固化剂体系在 80℃ 下固化反应 6 h 后的红外谱图。从图 5 可以看出，与未固化的环氧树脂相比，固化物曲线 b、c、d 中 915 cm<sup>-1</sup> 处的环氧基团吸收峰面积都明显减小，表明固化后环氧基团已大大减少。

图 6 是 3 种树脂/固化剂体系在 80℃ 下固化的环氧指数与固化时间的变化关系，从图 6 可以看

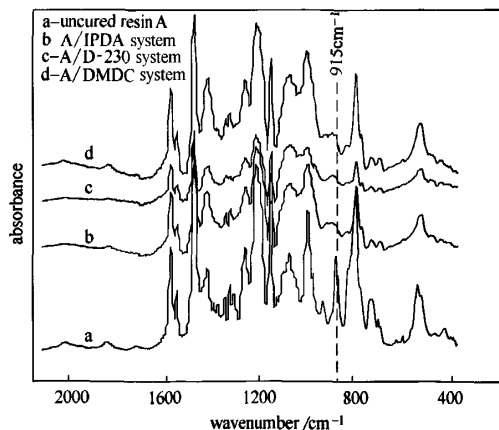


图 5 三种树脂固化剂体系固化前后的 FTIR 谱图  
Fig. 5 FTIR spectra of three resin systems before and after cured at 80℃ for 6 h

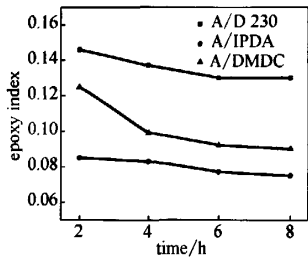


图 6 固化时间对固化物环氧指数的影响  
Fig. 6 Influence of curing time on epoxy index of cured compound (80°C)

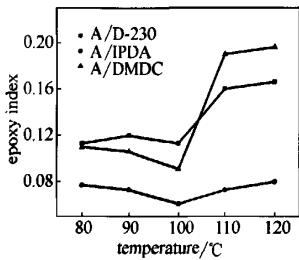


图 7 固化反应温度对固化物环氧指数的影响  
Fig. 7 Influence of curing temperature on epoxy index of cured compound (6 h)

出，随着固化时间的延长，固化物环氧指数降低，到 6 h 以后环氧指数降低趋势缓慢。固化 6 h 后的 A/D-230、A/IPDA、A/DMDC 树脂/固化剂体系的环氧指数分别为 0.130、0.077 和 0.092，对比未固化的环氧树脂 A 的环氧指数 0.590，可以计算出 A/D-230 体系环氧指数降低了 78%，A/IPDA 体系降低了 87%，A/DMDC 降低了 84%，可见后两种体系固化比较充分；图 7 是 3 种树脂/固化剂体系的环氧指数与不同固化温度（固化 6 h）的变化关系，从图 7 可以看出，在 100°C 以前，温度升高，环氧指数降低，固化越来越充分，在 100°C 以后，随着固化温度的升高，环氧指数呈现升高的趋势，固化程度反而降低。这是因为在过高温度下，链段热运动混乱加剧，会出现部分基团固化交联快于其他基团，形成交联网络结构，相当于一个网络结点，使得结点之间的一些基团来不及有效接触，进而不能进行交联固化反应。

2.2.4 固化剂结构对玻璃化转变温度 ( $T_g$ ) 的影响 树脂/固化剂体系固化越充分，交联程度越高，则  $T_g$  也越高，可以通过测定 DSC 得出固化物的  $T_g$ ，根据  $T_g$  值的变化判断固化物的固化完全程度。表 5、表 6 是各树脂体系在相同温度不同时间或相同时间不同固化温度条件下得到的固化物的

$T_g$  值。从表中可以看出，80°C 下随着固化时间的延长， $T_g$  值增大，这个规律是与环氧指数随固化时间的变化趋势相一致的；而随着固化温度升高，固化物的  $T_g$  值逐渐升高，当固化温度为 100~110°C 时，各体系固化物的  $T_g$  值分别达到最大，当固化温度继续升高时，固化物的  $T_g$  值反而有不同程度的降低，表明固化物交联体系结构反而不完全，固化程度下降，这与上述红外光谱跟踪分析固化物固化程度与固化温度的变化规律是完全一致的。

表 5 三种不同树脂/固化剂体系在相同温度不同时间固化下的  $T_g$

Table 5 Glass transition temperature ( $T_g$ ) of three resin/hardener systems being cured at different time for the same temperature

Resin/hardener system	Heating temperature/°C	$T_g$ /°C			
		2 h	4 h	6 h	8 h
A/D-230	80	45.86	48.06	48.17	48.30
A/IPDA	80	87.75	95.30	98.69	99.80
A/DMDC	80	82.47	90.30	95.02	97.56

表 6 三种不同树脂/固化剂体系在相同时间不同温度固化下的  $T_g$

Table 6 Glass transition temperature ( $T_g$ ) of three resin/hardener systems being cured at the same time for different temperature

Resin/hardener system	Heating time/h	$T_g$ /°C			
		90°C	100°C	110°C	120°C
A/D-230	6	49.60	52.67	57.55	50.13
A/IPDA	6	104.41	110.17	111.17	103.92
A/DMDC	6	98.80	105.60	48.31	50.99

### 2.3 固化物力学性能

图 8 和图 9 是 3 种体系在不同温度下分别固化 6 h 得到的固化物的拉伸强度和断裂伸长率与固化反应温度的关系。

从图 8 可以看出，3 种体系固化物的拉伸强度顺序为：A/IPDA>A/DMDC>A/D 230，且 80°C 下 A/IPDA 和 A/DMDC 体系的拉伸强度能达到 70 MPa 以上。随着固化温度的升高，A/D 230 固化物的拉伸强度基本保持不变；而 A/IPDA 和 A/DMDC 体系固化物的拉伸强度随着固化温度升高有不同程度的降低，这是由于高温下固化体系局部过交联产生的局部应力所致，与上面讨论的红外跟踪和  $T_g$  分析结果相一致。从图 9 可以看出，3 种体系固化物的断裂伸长率顺序为：A/DMDC>A/

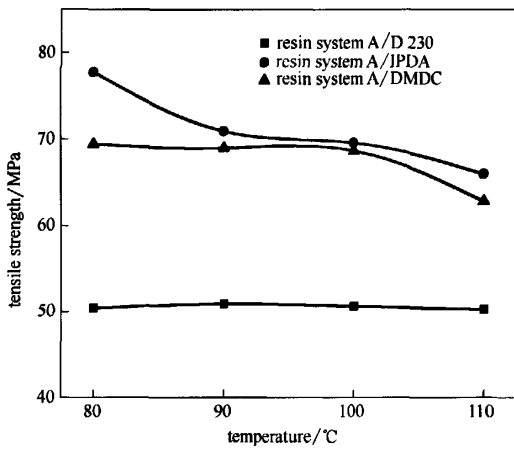


图 8 固化温度对树脂/固化物体系拉伸强度的影响  
Fig. 8 Influence of curing temperature on tensile strength of resin systems (cured for 6 h)

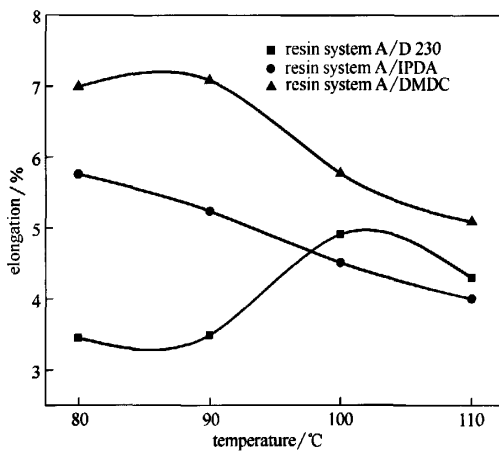


图 9 固化温度对树脂/固化物体系断裂伸长率的影响  
Fig. 9 Influence of curing temperature on elongation of resin systems (cured for 6 h)

IPDA>A/D 230; 随着固化温度升高, A/IPDA 和 A/DMDC 体系固化物的断裂伸长率逐渐下降, 其原因与强度变化同理; A/D 230 固化物则在高温阶段的断裂伸长率有个上升趋势, 这与体系反应活化能高, 在高温下具有较适合的反应活性有关。总之, 从图 8 和图 9 可以看出, 采用脂环族固化剂 IPDA 和 DMDC 固化的环氧树脂同时具有较高的强度和较好的断裂伸长率。

### 3 结 论

(1) 通过 DSC 测试分析, 得到 A/D-230、A/IPDA、A/DMDC 三树脂体系的固化反应活化能分

别为 59.6、50.9、54.9  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 结合黏度、红外跟踪分析、反应程度以及  $T_g$  的分析, 可以得到 3 种固化剂的活性顺序为 IPDA>DMDC>D-230。

(2) 与脂肪族固化剂 D-230 相比, 采用脂环族固化剂 IPDA、DMDC 固化的环氧树脂固化物同时具有高强度和高韧性, 双环结构的固化剂 DMDC 能提供更高的韧性。

### 符 号 说 明

$E_a$ ——树脂固化剂体系固化反应活化能,  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

$R$ ——摩尔气体常数,  $8.3145 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$S_1, S_2$ ——分别为 FTIR 谱图中环氧峰  $915 \text{cm}^{-1}$  的面积和  $1580 \sim 1610 \text{cm}^{-1}$  之间苯环特征峰的面积

$T_a, T_p, T_i$ ——DSC 测试中, 树脂/固化剂体系在不同升温速率下固化起始、峰顶、终止温度,  $^{\circ}\text{C}$

$\beta$ ——升温速率,  $\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$

### 下角标

o——初始

p——峰顶

i——终止

### References

- [1] Zhang Jin (张进). Current situation of epoxy resin industry and development plan [J]. *Journal of Chemical Industry & Engineering* (化学工业与工程技术), 2005, 26 (1): 38-41
- [2] Zhu Hongjun (朱红军), Wang Jianjun (王建军). Production, consumption and technology progress of epoxy resin [J]. *China Chlor-Alkali* (中国氯碱), 2002 (9): 31-34
- [3] Hou Xueguang (侯雪光), Wang Weihua (王卫华). Current situation and future of epoxy resin curing agent [J]. *Adhesion in China* (粘接), 2008, 29 (1): 49-51
- [4] Deng Xiaoqin (邓晓琴). Development of a new curing agent for epoxy resin [J]. *Adhesion in China* (粘接), 2008, 29 (11): 26-29
- [5] Zhang Junying (张军营), Fu Jing (傅婧), Zhang Xiao'e (张孝阿), Zhang Lin (张林). A study of the effect of polyetheramines on the mechanical property of high elasticity-high elongation epoxy resin adhesives [J]. *Fine Chemicals* (精细化工), 2009, 26 (2): 192-196
- [6] Ryosuke Matsuzaki, Akira Todoroki. Wireless flexible capacitive sensor based on ultra-flexible epoxy resin for strain measurement of automobile tires [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007 (140): 32-42
- [7] Chen Xiaolei (陈肖蕾), Yu Dingsheng (余鼎声).

- Research and application of new type elastic epoxy materials [J]. *Water Power* (水力发电), 2005, 31 (4): 35-39
- [8] Wang Wei (王伟). The research development of curing technology and curing agents for epoxy resin [J]. *Thermosetting Resin* (热固性树脂), 2001, 16 (3): 29-33, 37
- [9] Shich J Y, Wang C S. Synthesis and properties of novel phosphours-containing hardener for epoxy resins [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000, 78: 1636-1644
- [10] Yang Qinghai (杨青海). Study on modified liquid DDM medium temperature curing system of heat resisting for epoxy resin [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007
- [11] Tao Zhiqiang (陶志强), Chen Weiming (陈伟明), Wang Junfeng (王俊峰), Xiong Yanli (熊艳丽), Yang Shiyong (杨士勇). Novel strengthened and toughened epoxy matrix resins [J]. *Aerospace Materials & Technology* (宇航材料工艺), 2007, 37 (6): 25-28
- [12] Li Maochun (李茂春), Guan Jianguo (官建国), Liu Zhihua (刘志华), Zhao Suling (赵素玲), Tao Jianqing (陶剑青). Study on the high performance epoxy resin adhesive cured by aromatic amino-terminated polymer [J]. *Polymeric Materials Science & Engineering* (高分子材料科学与工程), 2005, 21 (2): 271-274
- [13] Shi Xuetang (石学堂), Wu Xuemei (吴雪梅), He Gaohong (贺高红), Hu Guangming (胡光明). Study on the properties of mannich modified IPDA epoxy curing agent [J]. *Chemistry and Adhesion* (化学与粘合), 2008, 30 (5): 8-11
- [14] Gan Houlei (甘厚磊), Yi Changhai (易长海), Lü Pengju (吕鹏举), Chen Jie (陈洁), Xu Weilin (徐卫林). Curing behaviors of MOCA epoxy resin system [J]. *Polymeric Materials Science & Engineering* (高分子材料科学与工程), 2009, 25 (2): 119-122
- [15] Jiang Junqing (姜俊青), Zhang Yanwu (张延武), Liu Jindun (刘金盾), Zhang Yongzhan (张永战). Effect of hydrotalcite on the gelation time of epoxy resin [J]. *Thermosetting Resin* (热固性树脂), 2006, 21 (1): 29-31
- [16] Yuan Jun (袁骏). Applications of infrared (FTIR) spectroscopy on epoxy resin/amine curing agents reaction [J]. *Shanghai Coatings* (上海涂料), 2003, 41 (2): 30-34

# 几种胺类固化剂对环氧树脂固化行为及固化物性能的影响

作者: [谭家顶](#), [程珏](#), [郭晶](#), [张军营](#), [TAN Jiading](#), [CHENG Jue](#), [GUO Jing](#), [ZHANG Junying](#)  
作者单位: [北京化工大学碳纤维及功能高分子教育部重点实验室](#), 北京, 100029  
刊名: [化工学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)  
英文刊名: [CIESC JOURNA](#)  
年, 卷(期): 2011, 62(6)  
被引用次数: 12次

## 参考文献(16条)

1. [张进](#) [Current situation of epoxy resin industry and development plan](#)[期刊论文]-[化学工业与工程技术](#) 2005(01)
2. [朱红军](#); [王建军](#) [Production, consumption and technology progress of epoxy resin](#) 2002(09)
3. [侯雪光](#); [王卫华](#) [Current situation and future of epoxy resin curing agent](#)[期刊论文]-[粘接](#) 2008(01)
4. [邓晓琴](#) [Development of a new curing agent for epoxy resin](#)[期刊论文]-[粘接](#) 2008(11)
5. [张军营](#); [傅靖](#); [张孝阿](#); [张林](#) [A study of the effect of polyether amines on the mechanical property of high elasticity-high elongation epoxy resin adhesives](#)[期刊论文]-[精细化工](#) 2009(02)
6. [Ryosuke Matsuzaki](#); [Akira Todoroki](#) [Wireless flexible capacitive sensor based on ultra-flexible epoxy resin for strain measurement of automobile tires](#) 2007(140)
7. [陈肖曹](#); [余鼎声](#) [Research and application of new type elastic epoxy materials](#)[期刊论文]-[水力发电](#) 2005(04)
8. [王伟](#) [The research development of curing technology and curing agents for epoxy resin](#)[期刊论文]-[热固性树脂](#) 2001(03)
9. [Shieh J Y](#); [Wang C S](#) [Synthesis and properties of novel phosphorus-containing hardener for epoxy resins](#)[外文期刊] 2000
10. [杨青海](#) [Study on modified liquid DDM medium temperature curing system of heat resisting forepoxy resin](#) 2007
11. [陶志强](#); [陈伟明](#); [王俊峰](#); [熊艳丽](#); [杨士勇](#) [Novel strengthened and toughened epoxy matrix resins](#)[期刊论文]-[宇航材料工艺](#) 2007(06)
12. [李茂春](#); [官建国](#); [刘志华](#); [赵素玲](#) [陶剑青](#) [Study on the high performance epoxy resin adhesive cured by aromatic amino-terminated polymer](#)[期刊论文]-[高分子材料科学与工程](#) 2005(02)
13. [石学堂](#); [吴雪梅](#); [贺高红](#); [胡光明](#) [Study on the properties of mannich modified IPDA epoxy curing agent](#)[期刊论文]-[化学与黏合](#) 2008(05)
14. [甘厚磊](#); [易长海](#); [吕鹏举](#); [陈洁](#) [徐卫林](#) [Curing behaviors of MOCA epoxy resin system](#)[期刊论文]-[高分子材料科学与工程](#) 2009(02)
15. [姜俊青](#); [张延武](#); [刘金盾](#); [张永战](#) [Effect of hydroxyl content on the gelation time of epoxy resin](#)[期刊论文]-[热固性树脂](#) 2006(01)
16. [袁骏](#) [Applications of infrared\(FTIR\) spectroscopy on epoxy resin/amine curing agents reaction](#)[期刊论文]-[上海涂料](#) 2003(02)

## 本文读者也读过(2条)

1. [白向鸽, 陈连喜, 黄世帅, BAI Xiang-ge, CHEN Lian-xi, HUANG Shi-shuai](#) [阻燃型胺类环氧树脂固化剂的研究进展](#) [期刊论文]-[粘接](#)2011(5)
2. [柴红梅, 汪鹏, 王雷, 孙超明, 薛忠民, 李鹏](#) [固化剂含量对RTM用环氧树脂体系固化性能的影响](#) [期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#)2009(6)

#### 引证文献(12条)

1. [王志鹏, 谢众, 李龙, 李瑞, 魏浩, 刘连河](#) [不同固化剂对环氧树脂的性能影响](#) [期刊论文]-[全面腐蚀控制](#) 2013(12)
2. [李明田, 杨瑞嵩, 崔学军](#) [脂肪族多胺室温固化丙烯酸改性环氧树脂研究](#) [期刊论文]-[四川理工学院学报\(自然科学版\)](#) 2013(1)
3. [贾夕曦, 何朝霞, 范焜慧, 罗炎](#) [未知环氧固化剂的色谱分析和光谱解析](#) [期刊论文]-[广州化工](#) 2014(8)
4. [张丽娟, 陆企亨, 侯一斌, 应卫勇](#) [三官能团端氨基聚醚的合成](#) [期刊论文]-[功能材料](#) 2012(24)
5. [龚妍, 龙新文](#) [双酚F及双酚F环氧树脂的研究进展](#) [期刊论文]-[精细石油化工](#) 2013(5)
6. [张天才, 王永凤, 张凯, 刘孝会, 周学梅, 邓爱明](#) [聚醚胺/酚醛胺-环氧树脂体系力学性能及其固化行为研究](#) [期刊论文]-[中国涂料](#) 2013(8)
7. [李景瑞, 刘嘉林, 张军营, 程珏](#) [TGDDM/1, 4-二\(4-氨基苯-1-氧\)正丁烷非等温固化反应动力学](#) [期刊论文]-[化工学报](#) 2013(9)
8. [亓海霞, 陈凯锋](#) [快速固化环氧固化剂的研究进展](#) [期刊论文]-[上海涂料](#) 2013(10)
9. [张天才, 张凯, 王永凤, 张小华, 谭延江, 王艳艳](#) [聚醚胺/酚醛胺-环氧树脂体系的固化动力学研究](#) [期刊论文]-[表面技术](#) 2013(1)
10. [张天才, 张凯, 王永凤, 张小华, 周学梅, 邓爱明](#) [聚醚胺/酚醛胺-环氧树脂体系的固化动力学研究](#) [期刊论文]-[中国涂料](#) 2013(11)
11. [姚明, 刘志雷, 周建萍, 杜楠, 江蕾](#) [碳纤维表面接枝纳米SiO<sub>2</sub>的工艺研究](#) [期刊论文]-[表面技术](#) 2013(3)
12. [于平, 张国亮, 张连红, 梁红玉](#) [室温快固化环氧树脂固化剂研究进展](#) [期刊论文]-[当代化工](#) 2012(2)

引用本文格式: [谭家顶, 程珏, 郭晶, 张军营, TAN Jiading, CHENG Jue, GUO Jing, ZHANG Junying](#) [几种胺类固化剂对环氧树脂固化行为及固化物性能的影响](#) [期刊论文]-[化工学报](#) 2011(6)