

热固性树脂及 树脂基复合材料的固化

——动态扭振法及其应用



何平笙
金邦坤 著
李春娥

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学

校友文库

热固性树脂及
树脂基复合材料的固化
——动态扭振法及其应用

Curing Behavior of Thermoset and Resin-Based Composite:
Dynamic Torsional Vibration Method and Its Applications

何平笙

金邦坤 著

李春娥

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是作者二十多年科研工作的总结,介绍了动态扭振法在热固性树脂及树脂基复合材料固化研究中的应用,某些成果已在实践中体现出相对于传统方法的优越性,省时省力,获得了工业界的广泛认可。

图书在版编目(CIP)数据

热固性树脂及树脂基复合材料的固化:动态扭振法及其应用/何平笙,金邦坤,李春娥著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2011.1

ISBN 978-7-312-02761-1

I. 热… II. ①何… ②金… ③李… III. ①热固性树脂 ②树脂—纤维增强复合材料—固化 IV. ①TQ323 ②TB332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 244639 号

出版发行 中国科学技术大学出版社
地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
网址 <http://press.ustc.edu.cn>
印 刷 合肥晓星印刷有限责任公司
经 销 全国新华书店
开 本 710 mm×1000 mm 1/16
印 张 19
字 数 360 千
版 次 2011 年 1 月第 1 版
印 次 2011 年 1 月第 1 次印刷
印 数 1—2500 册
定 价 58.00 元

序

热固性树脂的固化是黏合剂胶接工艺的关键之一,也是树脂基复合材料加工工艺的关键之一。但固化历程复杂,交联树脂又不溶不熔,致使固化过程的研究十分困难。传统上采用化学分析、光谱分析和量热等手段来确定反应官能团的转化率,从而了解热固性树脂的固化过程。然而在固化的最后阶段,官能团消耗的增加已不明显,致使这些分析技术的灵敏度和功能大为减小。而正是在这固化的最后阶段,固化程度对固化产物的性能有很大影响,在很大程度上决定了固化树脂的最佳性能。因此,把固化研究与热固性树脂的性能(光学性能、介电性能、声学性能以及力学性能等)直接联系起来,是一个既实用又简便的方法。

从使用角度来看,我们最终使用的是固化交联树脂的力学性能。固化过程是树脂模量逐渐增加的过程,在某些分析技术灵敏度急剧下降的固化最后阶段,其在力学强度上却有很好的反映。不同的固化程度可以通过它们的力学性能,如(本体)黏度、扭矩、模量的变化反映出来,因此用力学的方法可以很好地研究热固性树脂的固化过程。像动态扭辫法、动态弹簧法和动态扭振法等动态力学方法都已成功地应用于环氧树脂等固化过程的研究。就是最普通的形变-温度法也可用来研究不饱和聚酯的固化。使用动态力学方法可以用一个单独的试验来监测树脂从液态到固态转变的全过程,全真地模拟

整个工艺过程,并反映树脂力学性能随温度变化的规律,得到一些固化反应表观动力学的参数。在筛选配方和固化条件时,它与力学破坏试验相比,省力省时,颇受工业界的欢迎。

本书着重介绍我们实验室研制的 HLX 型树脂固化仪以及与此相关创立的动态扭振法及其在热固性树脂和树脂基复合材料、蒙脱土纳米复合材料以及其他纳米复合材料固化过程研究中的应用。

本工作最早始于 1988 年的国家自然科学基金课题“动态扭振法及其在热固性树脂及树脂基复合材料固化研究中的应用”(58701223)。课题结束后,我们一直坚持开展有关的科学研究,不但把动态扭振法推广到了液态橡胶、有机硅橡胶、蒙脱土纳米复合材料和其他纳米复合材料的固化研究,乃至热塑性树脂有机玻璃本体聚合的研究,并且还把当初设计制作的仪表式树脂固化仪(HLX-I 型)升级为计算机全自动控制的装置(HLX-II 型)。在热固性树脂和复合材料的固化与用力学的实验技术来研究化学反应的结合点上有了一些新的体会。本书就是我们长达二十多年科研工作的总结。参加本工作的有博士生周慧琳、徐卫兵、陈大柱、邹纲、潘力佳、周志强,硕士生黄飞鹤、姚远、王政、鲍素萍,以及程义云等众多的本科生,没有他们的出色工作和实验结果,就不可能有本书的出版。

具体编写分工为:何平笙编写了第 1、4、6、7、8 章,金邦坤编写了第 2、5 章,李春娥编写了第 3 章。全书由何平笙统稿。

何平笙

2010 年 7 月于中国科学技术大学

目 次

总序	(I)
序	(III)
第 1 章 概论	(1)
1.1 线形高分子链的交联	(2)
1.2 高聚物的交联理论	(4)
1.3 通用热固性树脂简介	(8)
1.4 复合作用原理和树脂基复合材料	(22)
1.5 热固性树脂固化研究的重要性	(26)
1.6 本实验室的工作	(27)
参考文献	(28)
第 2 章 固化过程的常用研究方法	(32)
2.1 基于波谱分析的方法	(33)
2.2 基于电学性能的方法	(39)
2.3 基于热学性能的方法	(45)
2.4 基于光纤测量的方法	(51)
2.5 基于超声的方法	(55)
2.6 基于力学性能的方法	(60)
2.7 不同方法的比较	(68)
参考文献	(69)
第 3 章 动态扭振法	(72)
3.1 概述	(72)

3.2	动态扭振法——树脂固化仪的原理和构造	(76)
3.3	固化仪的计算机化改造——HLX-Ⅱ型树脂固化仪	(89)
3.4	等温固化曲线的分析	(102)
	参考文献	(104)
第4章	动态扭振法在热固性树脂黏合剂固化中的应用	(106)
4.1	“安徽一号”环氧树脂黏合剂的固化	(106)
4.2	环氧树脂-三乙醇胺体系的固化	(114)
4.3	环氧树脂-咪唑体系的固化	(117)
4.4	环氧树脂-T31体系的固化	(120)
4.5	单组分环氧树脂黏合剂7-2312的固化	(124)
4.6	环氧树脂-三氟化硼·乙胺体系的固化	(128)
4.7	高压互感器不饱和树脂胶的配方改进	(131)
4.8	四溴双酚A环氧树脂的固化	(133)
	参考文献	(134)
第5章	树脂固化过程的理论预估	(136)
5.1	Flory凝胶化理论	(138)
5.2	Hsich非平衡态动力学涨落理论	(143)
5.3	Avrami理论	(147)
5.4	WLF方程在热固性树脂固化预估中的应用	(156)
5.5	基于DSC方法的动力学模型	(161)
	参考文献	(169)
第6章	动态扭振法在树脂基复合材料固化中的应用	(172)
6.1	粉状填料对热固性树脂固化反应的影响	(172)
6.2	环氧树脂-聚酰胺及其SiO ₂ 填充体系的固化	(182)
6.3	环氧树脂E44-聚酰胺-玻璃微珠体系的固化	(201)
6.4	玻璃纤维增强不饱和聚酯复合材料的固化	(205)
	参考文献	(209)
第7章	动态扭振法在树脂基蒙脱土纳米复合材料固化中的应用	(212)
7.1	环氧树脂-有机蒙脱土-2-己基-4-甲基咪唑纳米复合材料的固化行为	(212)
7.2	环氧树脂-有机蒙脱土-二乙烯三胺纳米复合材料的固化	(223)

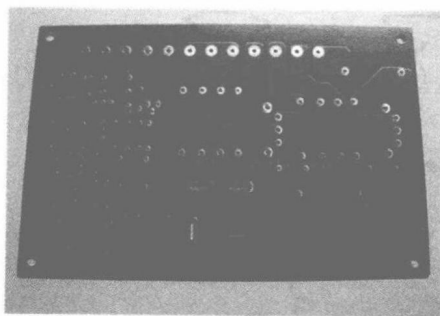
7.3	环氧树脂-有机蒙脱土-聚酰胺树脂的二次固化	(229)
7.4	在位制备环氧树脂-CdS 纳米复合材料的固化行为	(232)
7.5	不饱和聚酯-有机蒙脱土-过氧化甲乙酮纳米复合材料体系的 固化	(237)
	参考文献	(240)
第 8 章	动态扭振法的其他应用	(242)
8.1	液态聚氨酯橡胶的固化	(242)
8.2	甲基丙烯酸甲酯的本体聚合	(245)
8.3	有机硅橡胶的选择优化及弹性印章的制备	(251)
8.4	(环氧树脂-聚酰胺)/聚(丙烯酸丁酯-苯乙烯-丁二烯)互穿 网络体系的研究	(257)
8.5	环氧树脂-MP-酸酐-促进剂复合阻燃材料的固化动力学	(263)
8.6	环氧树脂-树状形大分子聚酰胺体系的固化	(268)
	参考文献	(285)

第 1 章 概 论

人类很早就学会使用黏合剂和复合材料了。开始是利用成熟谷物的水基糊糊、树木分泌的胶汁(图 1.1(a))、骨胶等天然高聚物和无机矿物胶泥的高黏度来黏合木材、石头、砖块、兽皮等有关材料,以及用稻草增强泥土黏性制作墙体等。在我国就有用糯米浆水黏合砖块,砌成了异常坚固、上千年不倒的万里长城。到 20 世纪出现了合成高聚物,人类也观察到了合成高聚物熔体或其溶液(不管是浓溶液还是稀溶液)的非常高的黏度,并用来黏合木材、皮革、纸张、布匹、石材和金属等材料。



(a) 天然黏合剂——桃胶粉



(b) 玻璃纤维增强的环氧树脂电路板

图 1.1

但一般的热塑性树脂黏合剂,由于本身就是通过加热熔融或混有溶剂成溶液来实现黏合的,所以黏合部位不耐热,也不耐溶剂,限制了它们的进一步应用。后来,人们又开始应用热固性树脂作为黏合剂,从而大大提高了黏合剂的使用温度(耐热性)和使用范围。特别是人们利用无机材料(玻璃、金属等)与树脂基体复合在一起,制得了树脂基复合材料(图 1.1(b)),乃至树脂基纳米复合材料,开创了一个全新材料的时代。像玻璃纤维增强的玻璃钢就是玻璃纤维不饱和聚酯的复合材料。

1.1 线形高分子链的交联

高聚物通常具有链式的结构,但其几何形状也可以是很复杂的,即重复结构单元可以通过共价键连成线形、支化和网状三种基本的分子形态,细分又可以有线形、短支链支化、长支链支化、星形、梳形、树枝形、梯形和网状形高分子链(图 1.2)。不同的分子形态会在它们的性能上有所反映,其中特别是网状结构和非网状结构(线形、短支链支化、长支链支化、星形、梳形、树枝形、梯形)在性能上有所差异。非网状结构的高聚物是热塑性树脂(或热塑性塑料),而具有网状结构的高聚物是热固性树脂,它是由线形高分子链交联而成的^[1]。

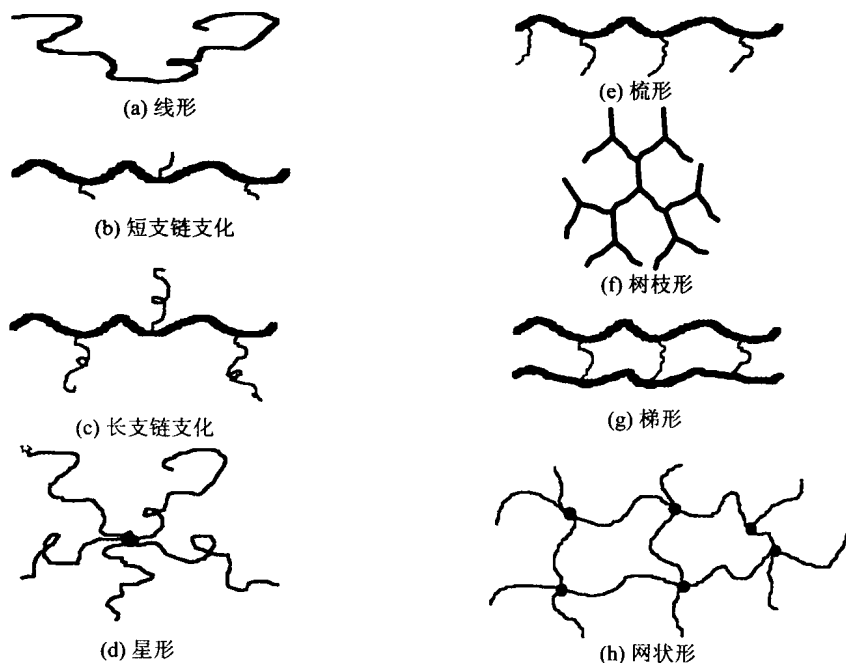


图 1.2 高分子链的形态

高分子链的交联呈现典型的软物质特性——小影响,大效应^[2]。高分子链一旦存在有交联的网状结构,即使是很少的一点交联(小影响),其物理力学性能也会有很大的变化。整块高聚物变成了一个“巨大”分子,高聚物变得既不能被溶剂所溶解(图 1.3),也不能通过加热使其熔融(大效应)。网状高分子是高聚物分子结构上的一个飞跃,按结构与性能关系的一般规律,结构上的飞跃一定会导致性能上的飞跃,具有交联结构的热固性树脂比线形结构的热塑性塑料在力学强度、耐热、耐溶剂等性能方面都有了很大提高,尺寸稳定性也好。

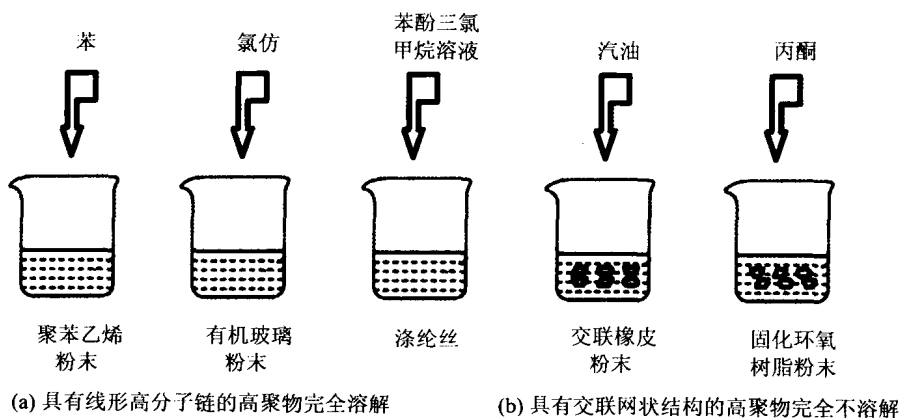


图 1.3 像聚苯乙烯、有机玻璃、涤纶等具有线形高分子链的高聚物能溶于溶剂中,也能被加热熔融,而像交联橡皮和固化环氧树脂等具有交联网状结构的高聚物不溶于任何溶剂,加热也不熔融,物理力学性能有很大的提高

热塑性塑料的缺点是明显的,如永久形变(蠕变)较大,尺寸不稳定,不耐热和不耐溶剂,不能作为工程材料来使用。而像环氧树脂、不饱和聚酯等热固性树脂却具有优异的物理力学性能。特别要提到的是,正是具有交联网状结构的环氧树脂、不饱和聚酯等热固性树脂的出现,才导致了新型树脂基复合材料的兴起^[3]。

交联网状结构反映在硫化橡胶上,就是橡胶硫化前后表现出非常典型的性能变化。未硫化的橡胶分子链是线形的,高分子链长久受力会发生滑移,产生永久形变,使用温度也不高,实用价值不大。经过硫化交联,橡胶的高分子链由硫桥 $-S_x-$ 相连,整块物料变成了硫化橡胶的高分子链网状结构(图 1.4),有很好的可逆弹性形变,高聚物特有的高弹性才进入了实用阶

段。橡胶的硫化是现代汽车工业发展的一个里程碑,橡胶是现代工业必不可少的材料之一^[4]。

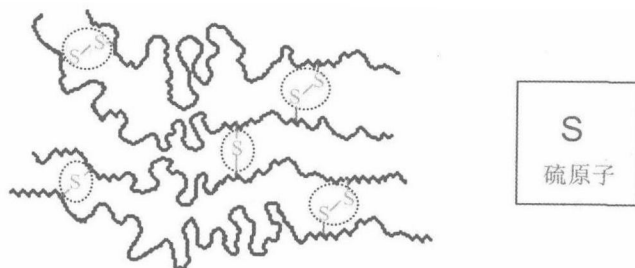


图 1.4 硫化橡胶的交联结构:橡胶高分子链之间由硫原子 S 或短硫桥 $-S_x-$ 相连

1.2 高聚物的交联理论^[5]

线形高分子交联链一般为 2~3 个单元长,比起两交联点间的长链段来说是很短很短的,可以近似把它看成是一个点——交联点。所以说每个交联点上有四条链。显然,交联点数目大于交联前的分子链数目,即每条分子链上有多于一处的交联。并且,这些交联点在链上的分布是无规则的。

描述交联分子结构的参数有:

(1) 交联点密度。

有如下几种表示方法:

- ① 单位体积内交联点的数目 ν_c/cm^3 ;
- ② 具有交联键的链结构单元数在总的结构单元数中的分数

$$\rho_c = \frac{\text{具有交联键的链结构单元数}}{\text{结构单元总数}} \quad (1.1)$$

- ③ 两相邻交联点间的数均分子量 $\langle M_c \rangle_n$;
- ④ 交联结构的链数 N/cm^3 (交联点之间的链叫一个链数)。

在具体应用时,哪一个方便就用哪一个参数。如在研究交联反应时用 ρ_c 较方便,而在力学性能的讨论中一般用 $\langle M_c \rangle_n$ 或者 N 更方便些。

(2) 链末端的数目 ν_t , 即自由端点的数目。

(3) 交联点官能度 f_c , 即每个交联点所有的链数。

显然 f_c 总大于 2, 一般以 $f_c = 4$ 最为普遍。

若交联前有 N_0 条高分子链, 每条分子链有两个末端, 计有 $2N_0$ 个末端。因为交联点并不改变总端点数, 所以

$$\nu_t = 2N_0 \quad (1.2)$$

高分子链两端要么都是交联点, 要么一端交联另一端仍是自由端。因此, 交联结构中总的链数

$$N = \frac{f_c \nu_c + \nu_t}{2} = \frac{4\nu_c + 2N_0}{2} = 2\nu_c + N_0 \quad (1.3)$$

根据相邻交联点间数均分子量 $\langle M_c \rangle_n$ 的定义

$$\langle M_c \rangle_n = \frac{\text{总重量}}{\text{总链数} / \tilde{N}} \quad (1.4)$$

这里 \tilde{N} 是 Avogadro 常数, (总链数/ \tilde{N}) 相当于摩尔数, 如果认为因交联而引起的重量很小, 可忽略不计, 则

$$\begin{aligned} \text{总重量} &= \text{交联前数均分子量} \times \text{分子总链数} \\ &= \langle M_c \rangle_n \times N_0 / \tilde{N} \end{aligned} \quad (1.5)$$

代入即得

$$\langle M_c \rangle_n = \frac{\langle M \rangle_n \cdot N_0 / \tilde{N}}{(2\nu_c + N_0) / \tilde{N}} = \frac{\langle M \rangle_n \cdot N_0}{2\nu_c + N_0} = \frac{\langle M \rangle_n}{1 + \frac{2\nu_c}{N_0}} \quad (1.6)$$

微观理论总是从实际结构出发, 通过一定的假设把复杂的真实结构简化为另一个易于处理的理想结构。下面根据一定的实验事实, 对交联分子网的统计理论做如下假定:

(1) 交联点固定不动。

由于交联点间高分子链是处在不断运动(热运动)之中的, 所以交联点在空间的位置也会随之在某一平衡位置附近涨落。统计理论忽略了这种由于热运动而引起的交联点位置的涨落, 而假定无论在应变状态还是在未应变状态, 交联网络的每个交联点都是固定不动的。

(2) 微观和宏观按比例形变。

试样在受到外力作用而发生形变时, 假定它的交联结构中每个链末端长度的形变与整个试样外形尺寸的变化有相同的比例。这通常称作为“仿

射形变”(affine deformation assumption)假定。

这是两个基本的假定,此外还有:

(3) 交联结构中每个链的构象统计仍沿用自由联结链的构象统计——高斯统计,即

$$\Omega(x, y, z) dx dy dz = \left(\frac{\beta}{\sqrt{\pi}}\right)^3 e^{-\beta^2(x^2 + y^2 + z^2)} dx dy dz \quad (1.7)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{3}{2\bar{h}_0^2}} \quad (1.8)$$

这里 \bar{h}_0^2 是高斯链的均方末端距。

考虑试样为一个单位立方体。在形变前它是各向同性的,形变后,由于三个方向上的形变不同,它变成了长方体,其边长就是主拉伸比 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ (图 1.5)。设这个单位立方体橡胶试样中有 N 条链,每条链的形态可用参数 β 来表征。对于任何一条链,如果形变前的末端矢量为 $\mathbf{h}(x, y, z)$,形变后末端矢量为 $\mathbf{h}'(x', y', z')$,取应变主轴平行于 x, y 和 z 三个坐标轴。根据假定(2), x' 和 x, y' 和 y, z' 和 z 有如下关系

$$x' = \lambda_1 x, \quad y' = \lambda_2 y, \quad z' = \lambda_3 z \quad (1.9)$$

则形变前的构象熵

$$S_{\text{形变前}} = \text{常数} - k\beta^2(x^2 + y^2 + z^2) \quad (1.10)$$

形变后的构象熵变为

$$S_{\text{形变后}} = \text{常数} - k\beta^2(\lambda_1^2 x^2 + \lambda_2^2 y^2 + \lambda_3^2 z^2) \quad (1.11)$$

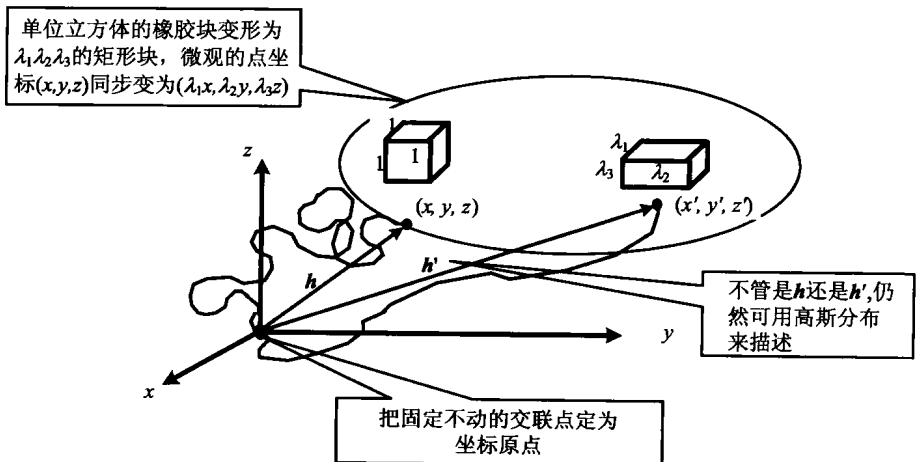


图 1.5 交联高聚物形变统计理论三个假定图解

两式相减,得到形变过程中构象熵的改变为

$$\Delta S_{\text{形变}} = -k\beta^2 [(\lambda_1^2 - 1)x^2 + (\lambda_2^2 - 1)y^2 + (\lambda_3^2 - 1)z^2] \quad (1.12)$$

在这 N 条链中,它们的形态是不同的,即有不同的 β 。如果在这中间末端距为 $\overline{h_j^2}$ 的链有 N_j 条

$$\sum_j N_j = N \quad (1.13)$$

它们的末端矢量为 $\mathbf{h}'_i(x_i, y_i, z_i)$,则对这 N_j 条链,形变引起的熵变为

$$\Delta S_{\text{形变}}^{(j)} = -k\beta_j^2 [(\lambda_1^2 - 1) \sum_{i=1}^{N_j} x_i^2 + (\lambda_2^2 - 1) \sum_{i=1}^{N_j} y_i^2 + (\lambda_3^2 - 1) \sum_{i=1}^{N_j} z_i^2] \quad (1.14)$$

根据假定(3),有

$$\sum_{i=1}^{N_j} x_i^2 + \sum_{i=1}^{N_j} y_i^2 + \sum_{i=1}^{N_j} z_i^2 = \sum_{i=1}^{N_j} (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) = \sum_{i=1}^{N_j} h_{0i}^2 = N_j h_{0j}^2 \quad (1.15)$$

又因为自由联结的高斯链末端距矢量在空间任何方向上同样可几,那么它们的分量平均应相等

$$\sum_{i=1}^{N_j} \overline{x_i^2} = \sum_{i=1}^{N_j} \overline{y_i^2} = \sum_{i=1}^{N_j} \overline{z_i^2} = \frac{1}{3} N_j \overline{h_{0j}^2} \quad (1.16)$$

代入式(1.14),并利用 $\beta_0^2 = \frac{3}{2 \overline{h_{0j}^2}}$,得

$$\Delta S_{\text{形变}} = -\frac{1}{3} k N_j h_{0j}^2 \cdot \beta_j^2 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) = -\frac{k}{2} N_j (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1.17)$$

则该单位立方体交联高聚物试样由于形变而引起的总熵变为

$$\Delta S_{\text{形变}} = \sum \Delta S_{\text{形变}}^{(j)} = -\frac{Nk}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1.18)$$

在等温等容下因形变引起的试样自由能改变为

$$\Delta F_{\text{形变}} = \Delta U_{\text{形变}} - T \Delta S_{\text{形变}} \quad (1.19)$$

作为一级近似,一般认为在形变中能量的改变是很小的,可以忽略,则可取 $\Delta U_{\text{形变}} = 0$,有

$$\Delta F_{\text{形变}} = -T \Delta S_{\text{形变}} = \frac{NkT}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1.20)$$

在等温等容时,体系自由能的变化即是外力对体系做的功 W

$$W = \Delta F_{\text{形变}}$$

因为没有分子链的滑移,外力对体系做的功全部变成交联高聚物储存的能量,所以

$$W = \frac{NkT}{2}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1.21)$$

通常称上式为储能函数(energy function)。一般把储能函数写成以下形式

$$W = \frac{G}{2}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1.22)$$

这里

$$G = NkT \quad (1.23)$$

式(1.23)中的 G 就是剪切模量,它正比于交联网的结构参数 N ,即交联网中的总链数。显然, N 取决于交联程度。为统一使用两相邻交联点间的数均分子量 $\langle M_c \rangle_n$ 这个结构参数,注意到 N/\tilde{N} 相当于摩尔数,即

$$\frac{N}{\tilde{N}} = \frac{\text{总重量}}{\langle M_c \rangle_n} = \frac{1 \times \rho_p}{\langle M_c \rangle_n} \quad (1.24)$$

这里 ρ_p 是密度, $1 \times \rho_p$ 即是单位立方体的重量,则

$$N = \frac{\tilde{N}\rho_p}{\langle M_c \rangle_n} \quad (1.25)$$

代入式(1.24),得到剪切模量 G 为

$$G = \frac{\tilde{N}\rho_p kT}{\langle M_c \rangle_n} = \frac{\rho_p RT}{\langle M_c \rangle_n} \quad (1.26)$$

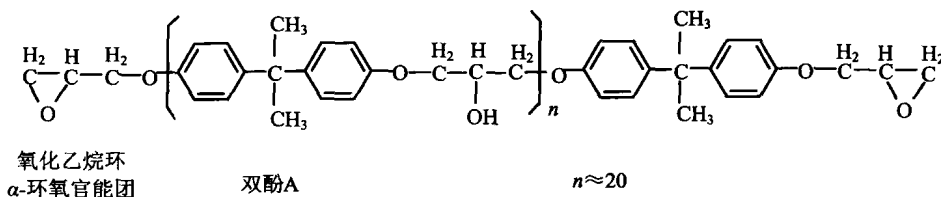
1.3 通用热固性树脂简介

1.3.1 环氧树脂


1. 环氧树脂的一般介绍

环氧树脂(epoxy)与不饱和聚酯树脂、酚醛树脂以及乙烯基酯树脂都是

通用的热固性树脂,是热固性树脂中用量最大、应用最广的品种^[6]。用作黏合剂和复合材料基体的环氧树脂可分为缩水甘油基型和环氧化烯烃型两大类。占环氧树脂总产量 90% 的双酚 A 环氧树脂就是缩水甘油基型环氧树脂的代表,其中商品名为 E44 和 E51 的液体环氧树脂最为常用^[7]。它们的结构如下所示:



双酚 A 环氧树脂中含有独特的环氧基以及羟基、醚键等活性基团和极性基团,因而具有许多优异的物理力学性能。并且在固化过程中,伴随着与固化剂的化学作用,双酚 A 环氧树脂还能进一步生成羟基和醚键,内聚力强,

与被黏物表面有很强的黏附力。特别是环氧树脂固化时打开了  环,使得原来因范德华距离变为化学键距离而引起的空间距离缩短,被这一环氧环打开又归还给了一个范德华距离,这样,环氧树脂固化时的体积收缩大为减小,从而与被黏物界面之间的内应力最小。与其他热固性树脂相比,环氧树脂的种类和牌号最多,性能各异,环氧树脂固化剂的种类更多,再加上众多的促进剂、改性剂、添加剂等,可以进行多种多样的组配,从而获得各种各样性能优异、各具特色的环氧树脂固化体系和固化物,几乎能适应和满足各种不同使用性能和工艺性能的要求,这是其他热固性树脂所无法相比的。

2. 环氧树脂的固化剂

固化前,环氧树脂本身是一种在分子中含有两个(或两个以上)活性环氧基的低分子量化合物,相对分子质量在 300~2000 之间,在常温和一般加热条件下不会固化(所以环氧树脂保存期达到了年的量级),必须加入固化剂,组成配方树脂,在一定条件下进行固化反应,生成三维立体网状结构的产物,才会显现出各种优良的性能,成为具有真正使用价值的环氧材料。一般环氧树脂在酸性和碱性固化剂的作用下都可以固化。按化学结构,可以把固化剂分为酸性和碱性两类:酸性固化剂包括有机酸、酸酐、三氟化硼及其络合物;碱性固化剂包括脂肪族二胺和多胺,以及含氮化合物双氰双胺,