

环氧树脂的共混增韧改性研究

袁 莉¹, 马晓燕¹, 王 颖²

(1. 西北工业大学化学工程系, 西安 710072; 2. 济南石油化工经济学校, 济南 250101)

摘要:环氧树脂是一热固性树脂, 固化后的环氧树脂的韧性较差, 针对这一不足, 详细介绍近几年来有关环氧树脂共混增韧改性的一些新的方法。

关键词:环氧树脂; 增韧; 共混改性

自 19 世纪末和 20 世纪初揭开了环氧树脂发明的帷幕至今已有很长的时间, 环氧树脂(Epoxy Resin, 简称 EP)已发展成为具有许多类型的热固性树脂。双酚 A 型的环氧树脂是最通用的具有代表性的环氧树脂, 具有粘结强度高、粘结面广、收缩率低、稳定性好、机械强度高、良好加工性等特性。但 EP 存在韧性差, 固化后其性脆, 冲击强度低, 易开裂等缺点, 故需对 EP 进行增韧改性。采用一般的填充剂和增韧剂用于 EP, 均存在增强相与树脂基体间的界面粘结性问题, EP 韧性的提高是以牺牲其强度、模量、耐热性为代价, 从而使它的物理、力学和热性能的提高受到限制。最近几年出现了一些新的共混改性方法, 这些方法在保证提高 EP 韧性的同时, 不降低其模量、耐热性等性能。

1 环氧树脂改性的方法

1.1 用橡胶弹性体改性环氧树脂

用橡胶弹性体改性 EP, 其韧性的提高受许多因素的影响, 两相结构是 EP 增韧的必要条件, 此外, 树脂的延展性、网络体的粘度、分散相的模量、改性剂与环氧树脂的界面性能均影响体系的韧性。弹性体改性增韧机理一股认为主要是塑性变形, 在改性体系中, 固化的 EP 与橡胶发生相分离, 其中橡胶以球状颗粒分散于固化的环氧连续相中, 当受外力作用时, 两相界面因橡胶颗粒的存在而发生塑性形变, 即界面处产生微小的裂纹而消耗外加功, 阻止裂纹的延伸, 从而达到增韧的目的。一些活性物质, 如低分子量、带端羧基或端氨基丁二烯-丙烯腈共聚物; 氨基封端的聚硅氧烷; 链扩展的羧基全氟聚醚类物质等聚合物橡胶弹性体常用来改性 EP, 且增韧改性的效果较好^[1]。

一般而言, 不同的增韧剂, 对 EP 会有不同的增韧效果。Chikhi 等^[2]用氨基封端的丁二烯-丙烯腈共聚物(ATBN)来改性双酚 A 型二缩水甘油醚(DGEBA), 当加入 5%(wt)的 ATBN 时, 断裂韧性 K_{IC} 从 0.91 增加到 1.49 MPa $\cdot$ m^{1/2}, 体系的悬臂梁冲击强度从 0.85 kJ/m² 增加到 2.86 kJ/m²。Ozturk 等^[3]用羟基封端的聚丁二烯(HTPB)来改性 DGEBA, 发现用 1%(wt)的 HTPB 与 2%(wt)的 SCA(一种硅氧烷剂)和固化剂预先反应, 再用于改性 EP, 改性后体系(C2 与 D2, C2:2% S 1.5% RH60'E; D2:2% S 1% R20'H60'E)(C2(2% S 1.5% RH60'E)为 1% HTPB 与固化剂及 2%的 SCA 在室温下反应 60min 的环氧体系, D2(2% S 1% R20'H60'E)为 1% HTPB 与 2%的 SCA 先在室温反应 20min, 然后再加入固化剂, 在室温下反应 60min 的环氧体系, 其中, S 为 SCA, R 为 HTPB, H 为固化剂 HY925)的冲击韧性约

作者简介:袁莉(1974—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事高分子材料的合成及其研究。

为 5.3 kJ/m^2 , 比未改性体系增加约 44%, 获得最高拉伸强度约为 76 MPa 。Jansen 等^[4]以 DGEBA、双酚 F 型二缩水甘油醚(DGEBF)等为原料在水相中制备橡胶环氧粒子, 再以这些粒子作为增韧剂去增韧 EP。发现当加入 10%(wt)改性剂时, 改性体系的断裂韧性 K_{IC} 的增加值与用 10%(wt)的 CTBN (羧端基丁腈共聚物)改性的 EP 相当。Nigam 等^[5]研究了环氧甲酚醛漆树脂(ECN)/CTBN 体系, 当 CTBN 的用量为 ECN 的 10%(wt)时, 共混材料的拉伸强度为 53 MPa , 增加值大于 13%; 抗弯强度为 43 MPa , 约增加 34%; 冲击强度约为 55 kJ/m^2 , 增加约 243%, 此时 CTBN 的用量为最佳值。

不同的树脂基体, 增韧效果也会不同。Ochi 等^[6]用活性弹性体 CTBN 增韧内消旋型环氧树脂。用 CTBN 来改性双酚 A 型的环氧树脂, 随着 CTBN 含量的增加, 体系的断裂韧性增加。当体系中加入 20%(wt)的 CTBN 时, 发现改性的双酚 A 型环氧树脂的韧性比未改性的体系的韧性增加了 2.3 倍。从实验分析中得到如下结论: 与商业化的双酚 A 型的环氧树脂相比, 用 CTBN 对带有内消旋官能团的 EP 的增韧效果更好。

用 CTBN 或 ATBN 等反应性液体橡胶改性 EP 的缺点是会导致固化后的 EP 的热稳定性下降, 而硅氧烷具有很好的热稳定性、能够在宽温度区域维持物理性能的稳定, 能降低 EP 的内应力, 增加 EP 的韧性、耐高温等性能。相容性是有机硅改性 EP 的关键。用硅氧烷改性 EP, 为的是提高两相的相容性从而提高 EP 的韧性, 通常认为硅氧烷改性 EP 时, 硅氧烷与 EP 形成共聚物的结构是“海岛”结构, 海岛的大小主要取决于硅氧烷分子量, 大小为 $0.1 \mu\text{m}$ 的海岛较为适合改性 EP。

Liu 等^[7]用硅氧烷改性 DGEBA, 当加入 20%(wt)的改性剂时, K_{IC} 值从 $0.87 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 增加到 $2.17 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 增加了 2.45 倍, 且分析表明, 改性体系有较好的热稳定性及较长的活性期。Ochi 等^[8]认为加入接枝有环氧低聚物的嵌段共聚物, 可使硅氧烷相均匀、稳定地分散在环氧基体。研究中用芳香硅氧烷嵌段共聚物作为相容剂提高 EP 的韧性, 发现硅氧烷改性的环氧体系的断裂韧性随硅氧烷相直径的降低而增加, 最大值为未改性环氧体系的 2.0 倍。增韧的机理认为是橡胶分散相的空蚀和裂纹尖端处附近环氧基体的剪切变形。通过 TEM(透射电子显微镜)研究了嵌段共聚物改性体系, 得到如下的结论: 硅氧烷相的直径随芳香-硅氧烷嵌段共聚物的加入降低很多。嵌段共聚物作为相容剂使用目的在于提高硅氧烷低聚物的分散性; 含有高浓度的嵌段共聚物的中间相的厚度随着环氧低聚物(与嵌段共聚物预反应的)的分子量的增加而降低, 这种结果意味嵌段共聚物是一种十分有效的增韧剂。

1.2 用热塑性树脂改性环氧树脂

用橡胶增韧改性 EP 会明显降低 EP 的强度, 如模量、拉伸强度等有较大幅度的降低, 用热塑性聚合物增韧 EP 则可避免这一问题。热塑性树脂增韧 EP 一般采用剪切屈服理论或颗粒撕裂吸收能量及分散相颗粒引发裂纹钉铆机理来解释^[9]。不同分子量的聚砜、聚醚砜(PES)、聚酰亚胺和聚芳醚酮均已用于 EP 的增韧研究。

芳香族聚酰亚胺有高的 T_g 和优异的耐化学稳定性。但用聚亚酰胺增韧 EP 仍存在其与 EP 的混溶性问题, Li 等^[10]用制备共聚酰亚胺来解决这一问题, 通过用四种不同的二氢化物和两种不同二元胺[1, 3-二(3-氨基苯氧基)苯, 即 APB; 2, 2'-(4-(4-氨基苯氧基)苯基)丙烷, 即 BAPP]合成一系列有机溶性的芳香族聚亚胺酯来增韧环氧树脂(EPON828), 但是只有用 3, 4-二羧酸酐苯基六氟丙烷(6FDA)或 4, 4'-氧代二苯甲酸酐(ODPA)这两种二氢化物与 APB 和 BAPP 合成的聚亚酰胺才能溶解在 EPON 828 单体中, 而且发现 6FDA-APB 和 6FDA-BAPP 这两种共聚物的溶解性比合成的其它共聚酰亚胺的溶解性好, 原因是在 6FDA 中的 CF_3 基团引起的强极性作用, 同时也可能是由于与 CF_3 基团相邻的亚苯基的扭转使共轭作用消失造成溶解性增加。通过 DSC 发现, BAPP 型聚酰亚胺的

T_g 比 APB 型聚酰亚胺约高 50°C 。可见,采用适当方法设计恰当的化学结构可获得适合于环氧树脂改性的增韧剂。

Mimura 等^[11,12]用原位聚合法制备热塑性聚合物增韧 DGEBA,以 24%(wt)的 *N*-苯基马来酰亚胺/苄基异丁酸/苯乙烯单体(摩尔比为 5/5/3)加入双酚 A 型的环氧树脂和对二甲基苯酚树脂,热塑性聚合物在 EP 固化过程中形成,避免混合时粘度增加。实验发现,固化后改性树脂的 T_g 提高约 10°C ,断裂韧性值为未改性树脂的 2.5 倍,原因在于环氧网络结构与线性热塑性聚合物形成了半互穿聚合物网络结构。他们也用 PES 来改性双酚 A 型环氧树脂,PES 在树脂中的分散状态是由温度来控制的。当在树脂中加入 10%(wt)的 PES 时,改性体系的断裂韧性比未改性树脂增加了约 60%,断裂伸长率比未改性树脂大了 1.7 倍,改性后树脂的 T_g 为 170°C ,比未改性树脂增加了约 20°C 。主要原因也是由于环氧网络与线性 PES 之间形成了半互穿聚合物网络。

1.3 用液晶聚合物改性环氧树脂

与一般的聚合物相比较,液晶聚合物(LCP)具有更高的物理力学性能和耐热性。用少量的热致液晶聚合物(TLCP)改性 EP,能大幅度提高 EP 的韧性,同时还有利于提高模量和耐热性。用 TLCP 增韧 EP 的机理主要是裂纹钉锚作用机制。

陈立新等^[13]利用原位聚合方法,用含酯类液晶基元的环氧化合物(PHBHQ)增韧双酚 A 型环氧树脂(CYD-128),当加入 10%(wt)的 PHBHQ,PHBHQ/CYD-128 体系的弯曲强度为 101MPa,增加约 12%。随着 PHBHQ 含量的增加冲击强度增大,热变形温度略有升高,弯曲强度变化不大。采用原位聚合液晶环氧改性 EP 是一种新的热固性树脂改性技术,不存在相界面的相容性问题,是一种微观层次的复合增强。Zhang 等^[14]用一系列合成的含有柔性链的和部分刚棒状的物质(LCEU_{PEG},PEG 代表聚乙二醇醚柔性间隔基的分子量,取值为 200,400,600,1000),以这些新型的活性物质来增韧双酚 A 型环氧树脂(E-51)/双氰胺(dicy)固化体系,刚棒结构部分用于维持高的模量和好的热性能,而柔性链用于提高韧性。从实验结果分析出增韧剂 LCEU_{PEG} 加入交联化的环氧网络体系,能形成相分离结构,这种结构有利于提高冲击韧性,冲击韧性的提高与 LCEU_{PEG} 的含量和柔性链的分子量有关,实验证明 LCEU₁₀₀₀、LCEU₆₀₀ 更为有效,改性剂的最佳用量值为 10%~15%,此时冲击韧性较好,当加入 10%(wt)的改性剂时,E-51/dicy/LCEU₁₀₀₀ 体系的冲击韧性为 26.8kJ/m^2 ;E-51/dicy/LCEU₆₀₀ 体系的冲击韧性为 25.9kJ/m^2 ,除 T_g 略有降低,其它性能均保持良好。

1.4 用树枝状超支化聚合物增韧环氧树脂

树枝状超分支聚合物(HBPs)具有独特的结构和良好的流体力学性能,可用作高分子的增溶剂、流变学改性剂等。用 HBPs 可增韧 EP,初始时与 EP 共混形成均相体系,固化时发生相分离,达到增韧 EP 的目的。Boogh 等^[15]用 HBPs 作为改性剂来改性茚型环氧树脂(DGEBF),当加入 5%(wt)的 HBPs 时,DGEBF 的断裂能 G_{IC} 为 720J/m^2 ,比未改性树脂增加了 6 倍,改性后的树脂的断裂韧性 K_{IC} 从纯树脂的 $0.63\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 增加到 $1.54\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,而且改性后树脂的硬度和 T_g 没有下降。在不使用溶剂的情况下,EP 能充分保持优异的加工性能。Mezzenga 等^[16]在环氧树脂(TGMDA)中加入 10 份的 HBPs,发现它能双倍增加环氧基复合材料的断裂韧性,内应力减少为原来的 80%,EP 的粘度、加工性能及 T_g 均不受影响。在研究中,他们发现带有环氧官能团的超分支聚合物有很好的增韧效果。采用纤维浸渍时,可避免过滤效应发生,能获得最优的增韧效果,用树枝状超支化聚合物增韧 EP 适合众多的复合材料加工方法如湿法铺层、预浸渍和 RTM 工艺。研究表明 HBPs 改性的环氧基复合材料是极为优异的复合材料,它能将纯 EP 的断裂韧性 G_{IC} 提高 2 倍多(不需要依靠纤维的

性能和铺层)。对于低的和高的交联基体,用 HBP_s 改性 EP 不会降低 EP 的热力学性能和加工性。

1.5 用核-壳粒子增韧环氧复合材料

核-壳结构的粒子是指有两种或两种以上单体通过乳液聚合而得到的一类聚合物复合粒子,它是具有双层或多层结构的一类弹性体,与橡胶相比,显示出特殊的功能,用它与 EP 混合可减少内应力,提高粘结强度和冲击强度,同时可避免耐热性的下降的缺点。

Day 等^[17]制备了两种类型环氧官能化的、具有三层形态结构的核-壳结构粒子增韧环氧树脂(Shell Epon 828),其中内层核是交联的聚甲基丙烯酸甲酯,中间层是交联的聚丙烯酸丁酯橡胶,外层是甲基丙烯酸甲酯-丙烯酸乙酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯三嵌段共聚物的聚合物,外层的缩水甘油基在固化过程中有利于与基体环氧树脂的化学反应。一般而言,用官能化的环氧增韧粒子所产生的性能比没有官能化的丙烯酸酯增韧粒子好。为了便于比较,将这两种新型增韧剂[GM(47/15),GM(47/37)]与没有官能化的丙烯酸酯增韧粒子(ATP)、CTBN 增韧 EP,发现增韧效果次序为 GM(47/15)>GM(47/37)>CTBN>ATP,可见这两种带有活性官能团的增韧剂 GM(47/15)和 GM(47/37)比 ATP 与 CTBN 增韧效果更好。而且发现用 GM(47/15)和 GM(47/37)增韧的复合材料的拉伸、压缩性能随着增韧剂含量的增高而提高。

1.6 用纳米粒子改性环氧树脂

近几年来,纳米复合材料已受到材料界的广泛关注,纳米粒子具有较小的尺寸和大的比表面积,能赋予 EP 好的韧性,同时也能提高 EP 体系的储存模量、热变形温度。Chen 等^[18]将蒙脱土经有机处理,加入环氧树脂(Shell Epon 862)中制备环氧纳米复合材料,研究表明蒙脱土加入树脂后,粘度或固化动力学改变不明显,改性后树脂适合液体复合材料模制备技术如 RTM 技术。张楷亮等^[19]将钠基蒙脱土(Na-MTS)进行有机处理改性,再将改性的蒙脱土加入环氧树脂(E-51),利用插层复合技术制备纳米级的环氧树脂/蒙脱土复合材料,发现当蒙脱土的含量为 3%(wt)时,冲击强度由纯树脂的 4.17kJ/m² 提高至 6.70 kJ/m²,增加了 60.67%;拉伸强度由纯树脂的 41.6MPa 提高至 46.5MPa,增加了 11.78%。可见,少量蒙脱土的加入,由于纳米尺寸效应等作用,同时能对 EP 起到增强、增韧的作用。

Cao 等^[20]采用 Al₂O₃ 改性环氧树脂(E-44),通过在 EP 中加入聚酯(聚对苯二甲酸乙二醇酯)和纳米 Al₂O₃ 粒子,改性后 EP 的冲击韧性、拉伸强度和模量都得以极大提高,冲击强度、拉伸强度、模量的最大值分别为 34.52 kJ/m²、97.34MPa、4.19GPa,比未改性体系分别增加 399%、165%、67%。Hayes 等^[21]将 Al₂O₃ 粒子和纳米纤维以树脂 5%(wt)的比例混入 EP,然后浸渍在单相碳纤维中,在预浸渍过程中,Al₂O₃ 粒子完全分散在基体,采用双向浸渍将 Al₂O₃ 粒子分散在预浸料的表面,最低限度地减少硬质 Al₂O₃ 对碳纤维的损坏。实验检测表明,Al₂O₃ 粒子的尺寸为 5~0.05μm 时不会影响复合材料的断裂韧性。

1.7 其它改性方法

在 EP 的改性方法中,改性后 EP 固化温度有时很高,反应活性很差。鉴于这些原因,He 等^[22]采用两种含有柔性间隔基扩展链的脲素,即氨基封端的扩展链脲素(ATU)和咪唑封端的扩展链脲素(ITU)来增韧改性双酚 A 型环氧树脂(E-51)/双氰胺体系,发现未改性体系的固化反应活化能从 130.2kJ/mol 降到改性体系的 75~85kJ/mol,用 ITU 改性的固化体系的冲击韧性比未改性体系的提高了 2~3 倍,而 T_g 稍有改变,所有改性体系的断裂表面表现出韧性断裂特征。从 DSC、DMA、SEM 实验分析得出:扩展链脲素能极好地促进环氧树脂 E-51/双氰胺的固化反应;含有柔性链间隔基的

扩展链脲素可作为 EP 的有效增韧改性剂。

Karger-Kocsis 等^[23]用湿热法分解聚酯型的聚胺酯(HD-PUR)来改性三官能团和四官能团的 EP, 当 HD-PUR(MY 0500)的含量为 40%(wt)时, K_{IC} 约增加 167%。Blyakhman 等^[24]采用具有高性能的苯并噁嗪改性 EP (改性体系的 T_g 超过 200℃), 这是一种新型的方法。Ratna 等^[25]采用环氧豆油(ESO)增韧 EP 等等。

2 结束语

对于 EP 的增韧改性目前仍然是研究的热点。在众多的 EP 增韧改性研究中, 采用橡胶增韧改性 EP, 橡胶增韧改性剂的选择范围狭窄, 且会明显降低 EP 的强度及树脂体系的 T_g 。高性能的热塑性聚合物具有韧性好、模量高、耐热性较高等特点, 用于增韧环氧树脂时, 一般不会明显降低树脂体系的刚度和耐热性, 改性效果虽优于橡胶, 但使用高 T_g 的热塑性聚合物会降低树脂体系的强度, 且用热塑性聚合物同橡胶改性 EP 一样, 使用量较高。因此, 此两种方法已逐步被淘汰。液晶聚合物、树枝状超支化聚合物、核-壳粒子改性环氧树脂等这类聚合物具有特殊的结构, 少量的改性剂可大幅度提高 EP 的韧性, 同时也能提高或不降低树脂体系的其它力学性能和耐热性等, 这些改性方法目前仍具有一定的实用价值。采用纳米粒子改性 EP 能赋予 EP 很好的韧性, 也能提高树脂体系的强度等其它性能, 目前, 粘土纳米改性 EP 已成为研究趋势, 用粘土改性 EP 的关键在于解决粘土在基体中的分散性问题。采用有机改性剂, 以共混方法来增韧 EP 由于操作方便, 上艺简单成为增韧改性 EP 的主要趋势; 另一方面, 合成和寻找新的具有优异力学性能的, 能与 EP 有很好相容性且在 EP 中分散性良好的增韧材料也是研究重点。随着改性技术的突破, EP 必将得到更好的利用。

参考文献:

- [1] Frigione M E, Mascia L, Acierno D, et al. Eur Polymer J, 1995, 31(11); 1021~1028.
- [2] Chikhi N, Fellashi S, Bakar M. Eur Polymer J, 2002, 38; 251~264.
- [3] Ozturk A, Kaynak C, Tincer T. Eur Polymer J, 2001, 37; 2353~2363.
- [4] Jansen B J P, Tamminga K Y, Meijer H E H, et al. Polymer, 1999, 40; 5601~5607.
- [5] Nigam V, Setua D K, Mathur G N. Polym Eng Sci, AUG 1999, 39(8); 1425~1432.
- [6] Ochi M, Morishita T, Kokufu S, et al. Polymer, 2001, 42; 9687~9695.
- [7] Liu Y Y, Martin G C, Meng Z H. ANTEC '99: Plastics Bridging The Millennia, Conference Proceedings, 1999, 1-3(VOLS I-III-VOL I; Processing; VOL II; Materials; VOL III; Special Areas); 930~934.
- [8] Ochi M, Takemiya K, Kiyohara O, et al. Polymer, 2000, 41; 195~201.
- [9] 钱军明, 李旭祥. 中国塑料, 2001, 15(5); 12~17.
- [10] Li S J, Hsu B L, Li F M, et al. Thermochimica Acta, 1999; 221~229.
- [11] Mimura K, Ito H, Fujioka H. Polymers, 2001, 42; 9223~9233.
- [12] Mimura K, Ito H, Fujioka H. Polymer, 2000, 41; 4451~4459.
- [13] 陈立新, 王汝敏, 蓝立文, 等. 材料工程, 2001, 3; 20~22.
- [14] Zhang B L, Tang G L, Shi K Y, et al. Eur Polymer J, 2000, 36; 205~213.
- [15] Boogh L, Pettersson B, Manson J-AE. Polymer, 1999, 40; 2249~2261.
- [16] Mezzenga R, Boogh L, Manson J-AE. Composites Science and Technology, 2001, 61; 787~795.
- [17] Day R J, Lovell P A, Wazzan A A. Composites Science and Technology, 2001, 61; 41~56.
- [18] Chen C G, Curliss D, et al. Materials Research Society Symposium Proceedings, 2002, 703; 3~8.

(下转第 27 页)

Polyphosphate Esters Medical Materials

WANG Zhao-yang^{1,2}, ZHAO Yao-ming^{*1}

(1. *Institute of Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;*

2. *Department of Chemistry, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)*

Abstract: Polyphosphate esters are a kind of biodegradable polymer with good biological compatibility, and their structures are easily modified and functionalized. They have extensive applications in medical field, such as drug controlled release material, tissue engineering material and developer used for creature organ. In this paper, the recent progresses in polyphosphate esters medical materials are reviewed. Especially the syntheses and applications of polyphosphate esters for drug controlled release material are introduced in detail. With the development of syntheses research on polyphosphate esters, their applications in medical field will be more wonderful and interesting.

Key words: Polyphosphate ester; Medical material; Drug controlled release; Synthesis; Application

(上接第 12 页)

- [19] 张楷亮, 王立新. 中国塑料, 2001, 15(3): 37~39.
- [20] Cao Y M, Sun J, Yu D M. Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000, 1—2(VOLS 1&2): 903~904.
- [21] Hayes B S, Nobelen M, Dharia A K, et al. International Sampe Technical Conference Series, 2001, 33: 1050~1059.
- [22] He S J, Shi B Y, Bai J, et al. Polymer, 2001, 42: 9641~9647.
- [23] Karger-Kocsis J, Gremmels J. ANTEC 2000, Society of Plastics Engineers Technical Papers, Conference Proceedings, 2000, 1—3(VOLS I—III): 840~844.
- [24] Blyakhman Y, Tontisakis A, Senger J, et al. International Sampe Technical Conference Series, 2001, 46: 533~545.
- [25] Ratna D, Banthia A K. Journal of Adhesion Science Technology, 2000, 14(1): 15~25.

Study on Development of Toughening Epoxy Resins

YUAN Li¹, MA Xiao-yan¹, WANG Ying²

(1. *Department of Chemical Engineering of Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China;*

2. *Jinan Petrochemical and Economic College, 250101, China)*

Abstract: Epoxy resin (EP) are known as brittle thermosetting polymers which need to be toughened for various applications. Many new studies on the toughness of EP have been reported in recent years, so some of them are introduced in detail in this paper for further studies of EP.

Key words: Epoxy resin; Toughening; Blending modification