

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.02.021

纳米 SiO₂ 界面处理对 CE 基复合材料静态力学性能的影响^{*}

杜宝中¹, 祝保林^{1,2}, 王君龙²

(1. 西安理工大学理学院, 西安 710048; 2. 渭南师范学院化学化工系, 陕西渭南 714000)

摘要: 将纳米 SiO₂ 先用大分子偶联剂 SEA-171 处理, 再与偶氮二异丁腈发生接枝反应而锚固上偶氮引发剂, 并通过热失重和元素分析证明了引发剂在纳米 SiO₂ 表面的锚固。利用纳米 SiO₂ 对氰酸酯树脂(CE)进行改性, 研究了纳米 SiO₂ 的含量对 CE/纳米 SiO₂ 复合材料静态力学性能的影响; 分析了纳米 SiO₂ 复合材料界面的结构特征, 探讨了其作用机理。结果表明, 纳米 SiO₂ 的加入提高了复合材料的冲击强度和弯曲强度。当 M-1 的添加量为 3% 时, 复合材料的冲击强度增幅 56.4%; 弯曲强度增幅为 44.2%。当 M-2 的添加量为 4% 时, 复合材料的冲击强度增幅为 89.0%; 弯曲强度增幅为 53.8%。经过锚固处理后, 纳米 SiO₂ 颗粒团聚程度减小, 在有机高分子相中的分散更均匀。

关键词: 纳米 SiO₂; 氰酸酯树脂; 锚固; 偶联剂; 静态力学性能; 机理

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)02-0083-06

Effect of Anchoring of Interface Treatment Technology on Quasi-static Mechanical Property of Composite Material

Du Baozhong¹, Zhu Baolin^{1,2}, Wang Junlong²

(1. Department of Applied Chemistry, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Weinan Teacher's College, Weinan 714000, China)

Abstract : To anchor the azobisisobutyronitrile (AIBN) onto nano-SiO₂ particles, the macromolecule coupling agent SEA-171 of AIBN onto nano-SiO₂ particles was achieved by grafting onto nano-SiO₂ with AIBN. The anchoring of AIBN was confirmed by DSC and element analysis. The influence of the content of the nano-SiO₂ particles on the static mechanics performance of nanometer SiO₂ / cyanate ester resin (CE) composite material were investigated by modifying CE with nano-SiO₂ particles. On this basis, We studied the influence of the material interface structure on the static mechanics performance of nanometer SiO₂ / CE composite material and its mechanism. It showed that the impact strength and flexural strength of the composites materials obviously increased by adding the nano-SiO₂ particles (especially M-2) to them. For M-1, when the content of the nano-SiO₂ particles reached 3%, the impact strength and flexural strength of the composites materials were improved 56.4% and 44.2% respectively. For M-2, when the content of the nano-SiO₂ particles reached 4%, the impact strength and flexural strength of the composites materials were improved 89.0% and 53.8% respectively. The nano-SiO₂ particles aggregating gradually decreased, and the nano-SiO₂ particles dispersed uniformly and stably in macromolecular organic solvents after anchoring of AIBN onto the nano-SiO₂ particles.

Keywords: nano-SiO₂; cyanate ester; anchor; silane coupling agent; quasi-static mechanical property; mechanism

氰酸酯树脂(CE)由于具有优异的介电性能、耐热性能、极低的吸水率、良好的力学综合性能以及与环氧树脂相近的成型工艺,使它在航空航天承力结构件、透波及隐身材料、高性能电子印刷线路板等领域有着极其广阔的发展潜力^[1-3]。但 CE 单体聚合后交联密度大,结晶度高,固化物较脆。人们已经采用与单官能团的氰酸酯共聚、与热固性树脂共聚、与热塑性树脂共混等方法对 CE 进行增韧改性^[4-6],但这些方法都有一定的缺点,因此研究综合指数较佳的增韧改性方法具有重要的意义。纳米 SiO₂ 由于特有的小尺寸效应以及表面界面效应,可以有效

地改善树脂基体的力学性能、耐热性等^[7-8]。同时由于纳米 SiO₂ 特殊的化学物理结构,在开发功能材料方面已有一定的进展^[9]。硅烷偶联剂与锚固试剂在反应中,可以改善无机/有机两相的界面结构,增加相容性,从而影响无机相纳米粒子的数量、粒径及分

^{*} 陕西省军民融合基金项目(11JMR05)、陕西省军民融合基金项目(11JMR02)、陕西省自然科学基金项目(2010K06-07)、陕西省教育厅专项基金项目(2010JK546)、渭南师范学院大学生创新基金项目(11XK074)

联系人: 祝宝林,副教授,主要从事高分子材料改性研究

收稿日期: 2011-12-16

布,最终影响到纳米复合材料的静态力学性能。其原因在于:硅烷偶联剂的一端可与有机组分产生物理或化学作用,而另一端可与无机组分的前躯体进行水解和缩聚反应。通过硅烷偶联剂的桥梁作用,使无机组分与有机组分之间以化学键相连,从而提高无机组分与有机组分之间的结合程度,弱化界面,防止相分离。

笔者采用多种方法制备 CE/纳米 SiO₂ 复合材料,研究了不同表面处理方式下体系的静态力学性能,比较了锚固与非锚固方法对复合材料界面性能的影响,得出界面结构与性能之间的初步规律,为纳米粒子锚固引发剂改性 CE 的研究进行了初步理论探索。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

双酚 A 型 CE 单体:分析纯,白色颗粒状晶体,熔点为 74℃,浙江正大化工集团;

纳米 SiO₂:DP1,工业纯,浙江舟山明日纳米材料有限公司;

硅烷偶联剂:SEA-171(以苯乙烯、甲基丙烯酸乙酯、乙烯基三甲氧基硅烷为原料,AIBN 为引发剂通过自由基聚合反应合成的 St/EMA/A-171 三元共聚物),工业品,纯度 98.0%,浙江正大化工集团;

偶氮二异丁腈(AIBN):上海邦成化工有限公司;

二甲基亚砜、 α -甲基吡啶、丙酮、乙醇等均为分析纯。

1.2 复合材料的制备

(1) 纳米粉体的偶联剂预处理

实验前将纳米 SiO₂(初级粒径为 40~60 nm)在 120℃烘箱中烘 4 h,密封待用。

将硅烷偶联剂(SEA-171)加入到丙酮中,用乙酸调 pH 值 5.0~6.0,待硅烷偶联剂水解后,将纳米 SiO₂ 按质量分数加入含有硅烷偶联剂的丙酮溶液,利用超声震荡 20~30 min。索氏抽提 6 h,除去未反应的硅烷偶联剂和丙酮,真空干燥得到经硅烷偶联剂处理的纳米 SiO₂ 粉体(记为 M-1)^[10]。

M-1、二甲基亚砜和 α -甲基吡啶超声震荡 5 min,定量加入 AIBN,50℃下搅拌反应 5 h,高速离心分离后,用乙醇洗涤多次,常温真空干燥得表面锚固偶氮引发剂的纳米 SiO₂ 粉体(记为 M-2)^[11]。

(2) 复合材料的制备

将 CE 放于真空干燥箱中,于 -0.085 MPa 下

抽真空 3 h 以上,除去 CE 中的水分及小分子杂质,密封备用。

偶联剂处理复合材料与引发剂锚固复合材料制备的制备:在 75℃下将 CE 加热熔融,定量加入 M-1(引发剂锚固复合材料为 M-2),在不断搅拌下升温至 90℃(引发剂锚固复合材料为 80℃),并在此温度下以高速均质搅拌器断续搅拌 30 s,倒入预热好的自制模具中,放入真空干燥箱抽真空,保持温度在 90℃左右(引发剂锚固复合材料为 80℃),当模具中的混合物中只有个别大的气泡出现且气泡上升缓慢时,停止抽真空,取出模具,放入鼓风干燥箱中固化。固化工艺为:90℃/1 h→100℃/1 h→120℃/2 h→150℃/2 h→180℃/2 h→200℃/2 h→220℃/4 h。引发剂锚固复合材料固化工艺为:80℃/2 h→90℃/1 h→100℃/2 h→120℃/2 h→150℃/2 h→180℃/2 h→200℃/2 h→220℃/4 h。

用同样的固化工艺制备纯 CE 浇铸体,以比较 CE/SiO₂ 复合材料的性能。

1.3 测试与表征

采用德国 XCL-40 型材料试验机,按 GB 2571-1995 测定材料冲击强度;采用德国 ZMF1250 型材料试验机,按 GB 2570-1995 测定材料的弯曲强度;采用 SDT2960DTA-TGA 型热失重分析仪测定材料的热失重,升温速率 10℃/min,氮气氛围;将材料冲击断口试样喷金处理后,采用日本 Quanta-200 型扫描电子显微镜观察材料断口形貌;采用美国 RTM 超薄切片机对材料进行切片处理;采用日本 HITA-CHI-600 型透射电子显微镜观察材料的微观结构;采用 VECTOR33 型傅里叶红外光谱仪表征锚固前后纳米 SiO₂ 表面的红外光谱变化;采用 Thermo Quest 公司的 EA111 元素分析仪测定纳米 SiO₂ 粒子表面锚固引发剂量。

2 结果与讨论

2.1 引发剂的锚固表征

纳米 SiO₂ 表面存在—OH 基团是其能与硅烷偶联剂反应,继而锚固偶氮引发剂的基础。图 1a 为未处理纳米 SiO₂ 的红外光谱图。由图可见,在 808 cm⁻¹ 和 3412 cm⁻¹ 附近存在较强吸收峰,归属纳米 SiO₂ 表面所含—OH 基团的吸收^[12]。

图 1b 为 M-1 的红外光谱图,由图可知,用硅烷偶联剂改性后,纳米 SiO₂ 粉体出现了 2928,2851,1505 cm⁻¹ 三处吸收峰,属于 C—H 特征吸收峰^[12],

说明硅烷偶联剂已通过 SiO₂ 表面的羟基反应偶联到纳米 SiO₂ 颗粒表面。从图 1c 可知,引发剂锚固后, SiO₂ 颗粒表面新出现了 2248, 2496 cm⁻¹ 两处吸收峰,属于 C≡N 和 C—N 的特征吸收峰^[12],说明 AIBN 已通过与偶联到 SiO₂ 颗粒表面的 SEA-171 基团反应,实现了引发剂 AIBN 在纳米颗粒表面的锚固。在相同条件下,采用等量的纳米 SiO₂ 和 M-1 分别与 AIBN 进行反应,元素分析测得产物中锚固引发剂的含量见表 1。

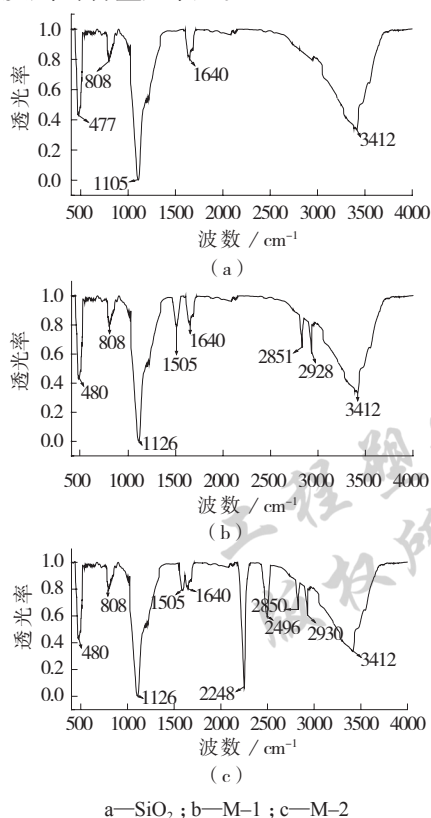


图 1 三种纳米 SiO₂ 粉体的红外光谱

表 1 纳米 SiO₂ 类型对锚固引发剂含量的影响

编号	测试方法	氮元素含量 / %	偶氮类引发剂含量 / mmol · g ⁻¹
1	SiO ₂ +AIBN (未经丙酮洗涤)	0.00240	0.0150
2	SiO ₂ +AIBN (丙酮洗涤 3 次)	0	0
3	M-1+AIBN (未经丙酮洗涤)	0.02476	0.1546
4	M-1+AIBN (丙酮洗涤 3 次)	0.02448	0.1528

由 1, 2 号洗涤前后 SiO₂ 表面的 N 元素和引发剂含量比较可知, AIBN 引发剂可以吸附到未经 SEA-171 处理的纳米 SiO₂ 表面, 但经 3 次丙酮洗涤后, 吸附的引发剂可被完全除去。由 3, 4 号实验结果可见, 采用 SEA-171 处理的纳米 SiO₂ 粉体能锚固上一定量的偶氮引发剂。

三种纳米 SiO₂ 的 DSC 曲线如图 2 所示。由图 2 可见, SiO₂ 仅发生了 AIBN 的简单物理吸附, 分解

放热峰在 120 ~ 135℃, M-2 在 120℃ 左右存在放热峰, 而 M-1 在 160℃ 以前无放热峰存在, 因此, M-2 的放热峰应由锚固的偶氮引发剂分解产生, 而锚固偶氮引发剂起始分解温度的降低可能是由偶联剂与纳米 SiO₂ 的介入引起的结果。

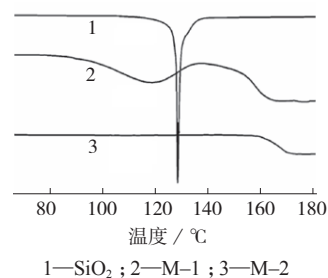


图 2 三种纳米粉体的 DSC 曲线

2.2 纳米 SiO₂ 及其表面改性对复合材料静态力学性能的影响

(1) 纳米 SiO₂ 含量的影响

图 3 示出纳米 SiO₂ 的含量对两种 CE / 纳米 SiO₂ 复合材料的弯曲强度和冲击强度的影响。从图 3 中可以看出, 随着纳米 SiO₂ 含量的增大, CE / 纳米 SiO₂ 复合材料的弯曲强度和冲击强度均出现先增大后减少的趋势。当 M-1 的含量为 3.0% 时, 弯曲强度和冲击强度达到最大值。此时, 弯曲强度为 147.55 MPa, 比纯 CE 的提高了 44.2%; 冲击强度为 15.99 kJ/m², 比纯 CE 的提高了 56.4%。对于锚固引发剂的 M-2 复合材料, 当 SiO₂ 含量达到 4% 时, 冲击强度及弯曲强度达到最大值, 弯曲强度为 157.43 MPa, 比纯 CE 的提高了 53.8%; 冲击强度为 18.65 kJ/m², 比纯 CE 的提高了 89.0%。之后随着纳米粒子的加入而逐渐下降, 但还是高于纯基体的值。由此可知, 适量的纳米 SiO₂ 粉体可以很好地改善纯 CE 的静态力学性能, 达到增强增韧的目的。

为了进一步分析纳米 SiO₂ 对 CE 的增韧机理, 利用 SEM 研究了纯 CE 和 M-1、M-2 体系的冲击断面形貌。材料的韧性越好, 在冲击过程中吸收的能量越多, 表现在微观形貌上就是断面表面粗糙, 有大量韧窝出现, 由典型的脆性断裂面转变为典型的韧性断裂面。

图 4 是纯 CE 和 M-1、M-2 体系(纳米 SiO₂ 含量 M-1 为 3%, M-2 为 4%) 冲击断面的 SEM 照片。由图可见, 纯 CE 的断裂面层为层状, 表面光滑平整, 呈河流状分布, 为典型的脆性断裂形貌; 而 M-1 的加入使冲击断面形貌出现了较大变化。加入 3% 的 M-1 体系断面开始呈现韧窝状发展, 裂纹

数目增加,纹路变深,可认为断裂开始受到 M-1 偶联纳米颗粒的限制,导致断裂面的变化。加入 4% 的 M-2 的体系断裂面完全不呈现层状发展,大量锚固后的纳米颗粒在裂纹发展方向上的弹性伸缩,使得层状结构的脆性断裂面完全消失,体现为很深鱼鳞片状韧性断裂形貌。处理后的纳米颗粒对基体树脂的力学性能存在两点作用:一是分散冲击裂纹的发展,引起多裂纹的断裂模式;二是偶联剂或锚固剂在裂纹发展方向上的弹性伸缩,阻碍了小裂纹继续发展为大裂纹,导致板材断裂。正是由于层状河流状结构脆性断裂面的完全消失,鱼鳞片状韧性断裂形貌的出现,使得复合材料的冲击、弯曲性能得到了极大提高。

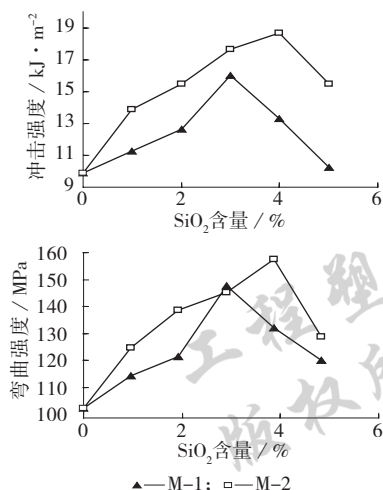
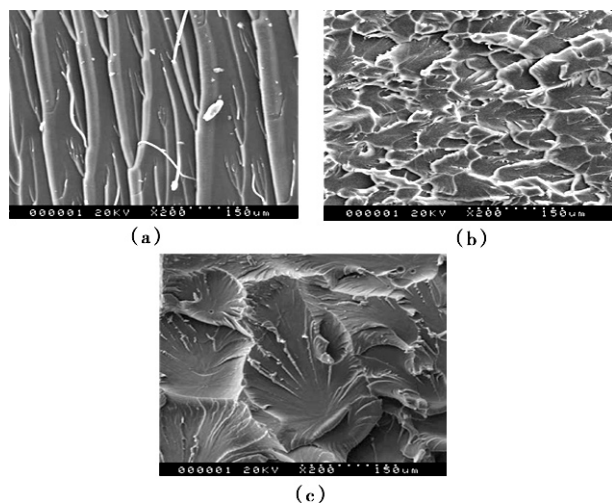


图3 纳米 SiO₂ 含量对 CE/纳米 SiO₂ 复合材料力学性能的影响



a—纯 CE; b—M-1 复合材料; c—M-2 复合材料

图4 纯 CE 和 M-1, M-2 体系冲击断面的 SEM 照片

总之, CE/纳米 SiO₂ 体系单位面积上的韧窝较纯 CE 多且深,并且河流区的细纹的长径比都

纯 CE 体系小。根据 Lange 的裂纹受阻理论^[13],当材料受到应力作用时,填充粒子可以促使银纹发生偏转和分离,导致材料的断裂能增加;另外,纳米 SiO₂ 与 CE 间由于偶联剂或锚固剂所形成特殊的界面层可以起到抑制银纹增长的作用,使银纹尖端集中的动能和应变势能大部分转化为非连续性的边界变形能,所以在研究的范围内纳米复合材料的力学性能都有提高。同时韧性的提高还与所引发的银纹数量有关,纳米 SiO₂ 含量太少不足以引发银纹,故当 SiO₂ 含量升高时(M-1 为 3.0%, M-2 为 4.0% 时),复合材料的韧性要优于 SiO₂ 含量为 1.0% 和 2.0% 的复合材料的韧性。但当 SiO₂ 含量逐渐增大,大的聚集体增多,这些大的聚集体在应力的作用下容易破坏 CE 自身的网状结构,导致材料中的薄弱环节增多;同时由于聚集体体积较大,界面缺陷增多,与基体的界面作用降低,故复合材料的冲击强度随 SiO₂ 含量增加而有所下降。

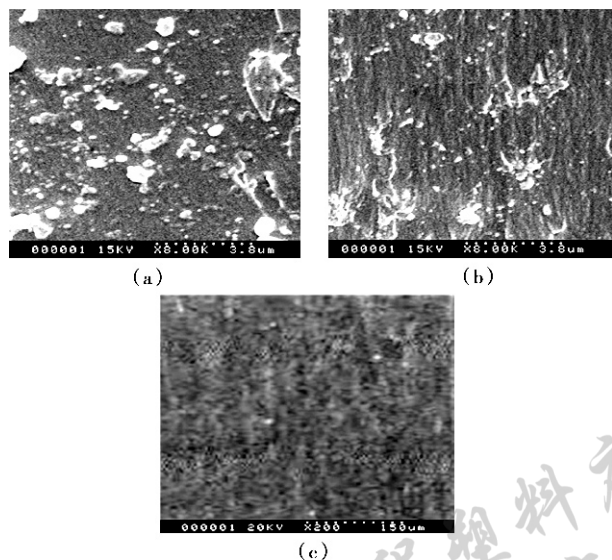
(2) 偶联剂与锚固剂的影响

界面对 CE/纳米 SiO₂ 复合材料的性能起着至关重要的作用。为了进一步研究界面对 CE/纳米 SiO₂ 复合材料的性能影响,用偶联剂 SEA-171 处理纳米 SiO₂ 后,再将引发剂 AIBN 锚固在纳米 SiO₂ 表面,研究了界面对 CE/纳米 SiO₂ 复合材料的性能影响。

为了分析偶联剂对 CE/纳米 SiO₂ 复合材料力学性能影响的原因,笔者利用 SEM 研究了纳米 SiO₂ 在基体 CE 中的分散状况。图 5 为纳米 SiO₂ 含量为 3.0% 时的 M-1 和纳米 SiO₂ 含量为 4.0% 时的 M-2 复合材料在液氮中脆断后的 SEM 照片。可以看出,未经偶联剂处理的纳米 SiO₂ 在基体 CE 中大部分以类似于“莲蓬状”的形式存在;经偶联剂 SEA-171 处理的纳米 SiO₂ 在基体 CE 中的分散性得到明显改善,但仍然存在聚集现象;而经引发剂 AIBN 锚固处理的纳米 SiO₂ 在基体 CE 中分散更均匀。

纳米粒子经偶联剂处理后,可以抑制其团聚。从理论上说,偶联剂对纳米 SiO₂ 进行表面处理,增加了颗粒间的排斥位能,可以促使颗粒均匀、稳定地分散^[7-9]。锚固引发剂 AIBN 后的纳米 SiO₂ 粉体,进一步增加了颗粒间的排斥位能,使纳米 SiO₂ 颗粒在分子基体中更加均匀、稳定地分散。借鉴高分子物质在微米级粒子表面的吸附稳定模型,可认为,吸附了偶联剂的纳米级颗粒在相互接近时产生两种

情况:一是吸附层被压缩而不发生相互渗透;二是吸附层能发生相互渗透、相互重叠。这两种情况都导致体系能量升高,自由能增大。第一种情况由于偶联剂失去结构熵而产生熵斥力位能;第二种情况由于重叠区域浓度升高导致渗透斥力位能和混合斥力位能。因而,吸附了偶联剂的纳米颗粒继续发生团聚将十分困难^[10]。



a—未处理的 SiO₂; b—M-1 复合材料; c—M-2 复合材料

图 5 CE/纳米 SiO₂ 复合材料脆断面的 SEM 照片

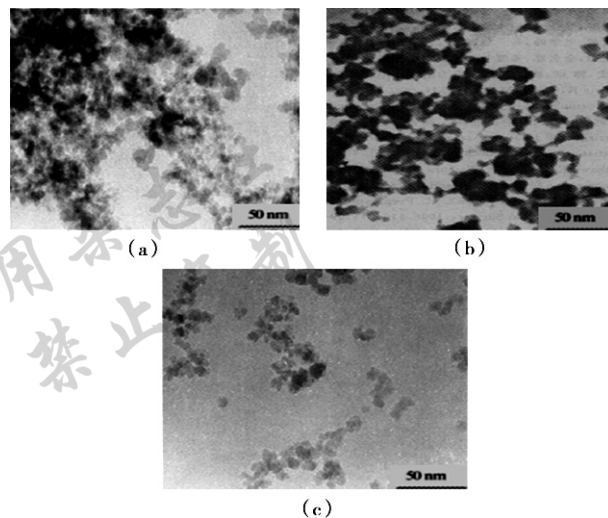
偶联剂 SEA-171 和锚固引发剂 AIBN 对分散性的影响可以用界面的化学反应机理来进行说明。M-1 表面变为含有大分子链段的有机基团,这种大分子链段的有机基团易与 CE 反应,体系的树脂黏度较低,有利于纳米颗粒的分散。但其酯基在一定条件下可水解为羧基,与 CE 进行反应,使得纳米 SiO₂ 形成特殊的具有“莲蓬状”的分散结构^[10]。

正是由于纳米 SiO₂ 经不同方法表面处理后,使得纳米 SiO₂ 在基体 CE 中的分散状况和复合材料的界面结构发生了变化,从而提高了复合材料的力学性能。

图 6 为未处理纳米 SiO₂, M-1 和 M-2 颗粒在 CE 基体中的 TEM 照片。表明经过 AIBN 锚固处理后的 M-2 在树脂基体中粒径更小,且分布更加均匀。这应该是引发剂 AIBN 引入后,被固定于 M-1 表面,延长了无机纳米颗粒表面的碳链, AIBN 两端的氰基改善了复合材料中无机/有机两相的界面结构,增加了相容性。M-2 复合材料可以引入更大量的无机纳米颗粒。

对于聚合物/无机纳米颗粒体系,材料的冲

击强度与纳米颗粒的特性、颗粒在基体中的分散以及纳米颗粒与基体界面的作用有关。对 CE/纳米 SiO₂ 体系来说,当纳米 SiO₂ 的含量很小时,纳米 SiO₂ 在 CE 中形成的交联点很少,增强作用不明显;当纳米 SiO₂ 含量适当增大时,其在基体中的交联点分布较均匀,材料在受到外力作用时,应力可以均匀分布在大多数网链上,减少整体的破坏,从而提高基体的强度;但当纳米 SiO₂ 含量过大时,由于纳米 SiO₂ 在基体中的分散性受到影响,使得其交联点分布的均匀性降低,应力集中在少数网链上,从而使材料易断裂。



a—未处理的 SiO₂; b—M-1 复合材料; c—M-2 复合材料

图 6 CE/纳米 SiO₂ 复合材料脆断面的 TEM 照片

复合材料的冲击强度除了交联密度增大外,还与纳米 SiO₂ 与 CE 间的界面作用有关。由于纳米 SiO₂ 颗粒表面上的 Si—OH 易与 CE 上的 C—O 键形成分子间氢键,从而在纳米 SiO₂ 颗粒表面上形成特殊的界面层,增强了复合材料的力学性能。另一方面,还可能与 SiO₂ 颗粒表面的 Si 原子有关, C. R. Tseng 等^[14]通过 X 射线电子谱、紫外光电子能谱及原子力显微分析等手段发现 CE 三嗪环上的 N 和 O 可以与无机粒子 Si 发生电荷相互转移,从而使 CE 与 Si 具有很好的界面粘结作用。据此,笔者推测 CE 与 SiO₂ 颗粒表面上的 Si 原子可能也会发生一定的电荷转移,使 CE 与 SiO₂ 具有良好的界面粘结作用,增强复合材料的力学性能。

3 结论

(1) 纳米 SiO₂ 可以提高 CE 的静态力学性能,特别是经锚固 AIBN 表面处理后的 M-2 效果更明显,对于 M-1,当纳米 SiO₂ 的含量为 3.0% 时,复合

材料的冲击强度和弯曲强度比纯 CE 分别提高了 56.4% 和 44.2%; 对于 M-2, 当纳米 SiO_2 的含量为 4.0% 时, 复合材料的冲击强度和弯曲强度比纯 CE 分别提高了 89.0% 和 53.8%。

(2) 纳米 SiO_2 与基体 CE 间的界面作用除了氢键作用以及 SiO_2 表面上的 Si 原子与 CE 间的电荷转移外, 还可能存在硅羟基与 CE 间的化学反应。而纳米 SiO_2 经 AIBN 表面锚固处理后, 其表面由原来含有少量的羟基更加彻底转变为能与 CE 反应的环氧基团或含有大分子链段的有机基团, 改善了纳米 SiO_2 在 CE 中的分散状态, 增加了纳米 SiO_2 与 CE 间的界面粘结作用。

(3) 锚固的引发剂、硅烷偶联剂在有机-无机杂化纳米复合材料中的作用, 概括起来主要有: 减少有机相界面与无机相界面的差异, 增强有机相和无机相的相容性; 改性纳米颗粒, 使纳米颗粒以化学键形式真正与有机体连接起来, 从根本上解决了无机纳米颗粒的软团聚现象。将引发剂 AIBN 锚固于纳米颗粒表面, 即可改善无机纳米颗粒与有机高分子基体的相容性, 增大纳米颗粒的填充量, 又可使纳米颗粒在树脂基体中分布更加均匀, 改善复合材料的综合性能。

参考文献

- [1] Kumar R Suresh, Dinakaran K, et al. Preparation and characterization of bismaleimide-modified bisphenol dicyanate epoxy matrices. [J]. Appl Polym Sci, 2003, 90 (6): 1596-1604.
- [2] Iijim A Takao, Kaise Tomohiro, Tomoi Masao. Modification of cyanate ester resin by soluble polyimides [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 88 (1): 1-11.
- [3] 王君龙, 梁国正, 祝保林. 溶胶-凝胶法制备纳米 SiO_2 / CE 复合材料的研究 [J]. 航空材料学报, 2007, 21 (1): 61-64.
- [4] Fan Jing, Hu Xiao, Yue Chee Yoon. Static and dynamic mechanical properties of modified bismaleimide and cyanate ester interpenetrating polymer networks [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 88 (8): 2000-2003.
- [5] Haris Mendy I, Eceiza A. Morphology and thermal behavior of dicyanate ester polyetherimide semi-IPNS cured at different conditions [J]. Appl Polym Sci, 2000, 76: 1037-1039.
- [6] Harismendy I, Rio M D, Eceiza A, et al. Morphology and thermal behavior of dicyanate ester-polyetherimide semi-IPNS cured at different conditions [J]. Appl Polym Sci, 2000, 76 (7): 1045-1047.
- [7] 王君龙, 梁国正, 祝保林. 纳米 SiO_2 对氰酸酯树脂的增韧改性研究 [J]. 宇航学报, 2006, 27 (4): 745-780.
- [8] Rong Minzhi, Zhang Mingqiu, Zheng Yongxiang. Improvement of tensile properties of nano- SiO_2 / PP composites in relation to percolation mechanism [J]. Polymer, 2001, 42: 3301-3304.
- [9] 黄锐, 王旭, 李忠明. 纳米塑料: 聚合物 / 纳米无机复合材料研制、应用与发展 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002: 26-29.
- [10] 祝保林. 偶联剂表面处理对纳米 SiO_2 / 氰酸酯树脂复合材料力学性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2009, 33 (2): 78-81.
- [11] 戚栋明, 包永忠, 黄志明, 等. 甲基丙烯酸甲酯 / 纳米 SiO_2 粒子分散液的细乳化 [J]. 高分子学报, 2006 (6): 774-778.
- [12] Nakanshi K, Solomon P H. 红外光谱分析 100 例 [M]. 王绪明, 译. 北京: 科学出版社, 1984: 64-85.
- [13] 张玉龙. 纳米复合材料手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2005: 237-302.
- [14] Tseng C R, Wu J Y, Lee H Y. Preparation and characterization of polystyrene/clay nano-composites by free-radical polymerization [J]. Appl Polym Sci, 2002, 85: 1370-1377.

鞍山君利工程塑料有限公司

鞍山君利工程塑料有限公司是股份制企业, 生产以工程塑料为主的改性材料。由教授级高级工程师、中国塑料加工工业协会专家委员会专家负责生产技术。可为用户提供增强、增韧、复合、阻燃、环保阻燃、抗静电、耐磨、塑料合金类系列改性工程塑料。公司竭诚为用户“量身订做个性化需求的产品, 为客户创造价值”。公司通过 ISO9001:2000 国际质量管理体系认证。公司宗旨: 信誉第一; 质量第一。

欢迎新老客户前来指导、合作!

- 改性品种: PA66、PA6、PP、PE、ABS、AS、HIPS、POM、PC、PC/ABS、PBT、PET、PVC 等系列改性塑料。
- 适用行业: 家电、汽车、机械、铁路、纺织、石油化工、煤矿、农业等。

经理: 徐长旭 13604228259, xuchangxu315@163.com

总工: 赵文聘 13804910274, zhaowenpin315@163.com

地址: 辽宁省鞍山市腾鳌镇黄县 邮编: 114225 电话: 0412-8935903 传真: 0412-8935803 网址: www.asjls.com