

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.07.026

# TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 制备及其分子量的控制<sup>\*</sup>

王雅珍,赵宇,祖立武,兰天宇,陈瑞

(齐齐哈尔大学化学与化学工程学院,黑龙江齐齐哈尔 161006)

**摘要:**将 TiO<sub>2</sub>(KH-570) 接枝丙烯腈 (AN) 制备 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN, 并通过加入链转移剂控制分子量。通过实验, 探讨出链转移剂用量、引发剂用量、反应时间、反应温度对接枝率及分子量的影响。并利用 HF 刻蚀处理 TiO<sub>2</sub>, 测试 PAN 黏均分子量大小。结果表明, 反应温度为 65℃, 引发剂用量为单体 AN 质量的 1.6%, 链转移剂用量为单体 AN 质量的 4% 时分子量控制在 8000 左右。

**关键词:** 纳米 TiO<sub>2</sub>; 丙烯腈; 链转移剂; 分子量

**中图分类号:** TQ317.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)07-0118-05

## Producing Method for TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN and Molecular Weight Control

Wang Yazhen, Zhao Yu, Zu Liwu, Lan Tianyu, Chen Rui

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN was prepared by TiO<sub>2</sub>(KH-570) grafted with acrylonitrile(AN), molecular weight of PAN on the TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN was controlled by the chain transfer agent. The impact of reaction time, reaction temperature, the dosage of the initiator and the chain transfer agent for grafting rate and molecular weight of TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN were confirmed by experiments. TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN was dealt with HF to test viscosity-average molecular weight of PAN. The results show that PAN molecular weight is controlled to 8000 when the reaction temperature is 65℃, the dosage of initiator is 1.6% of AN mass, the dosage of chain transfer agent is 4% of AN mass.

**Keywords:** nano-TiO<sub>2</sub>; acrylonitrile; chain transfer agent; molecular weight

TiO<sub>2</sub> 作为目前研究最为广泛的材料之一, 在光学、化学乃至力学领域都受到了广泛的关注<sup>[1]</sup>。而其中金红石型 TiO<sub>2</sub> 具有独特的紫外线屏蔽能力, 作为抗紫外添加剂, 具有效率高、稳定性好、环保等特点。

目前, 向聚合物中添加无机纳米粒子, 制备复合材料以达到改善老化性能的方法引起了研究者的关注, 周健等<sup>[2]</sup>研究了纳米 TiO<sub>2</sub> 与 PP 的简单共混物, 结果表明, PP/TiO<sub>2</sub> 纳米复合材料的耐老化性有较大的提高。但无机纳米 TiO<sub>2</sub> 很难均匀地分散在聚合物机理中, 由于其比表面积过高导致纳米粒子结块影响到性能发挥。目前, 最有效的方法是对纳米粒子进行有机化改性, 可以很好地解决 TiO<sub>2</sub> 在聚合物中易团聚的问题<sup>[3-9]</sup>。王雅珍等<sup>[10]</sup>在对 PP 的抗老化改性研究中, 利用硅烷偶联剂对 TiO<sub>2</sub> 进行包覆并与聚丙烯腈 (PAN) 进行接枝, 在与 PP 共混时分散性的问题得到了很好的解决, 但由于接枝物 PAN 不熔融的特性, 高分子量的 PAN 在与其它聚合物共混时会影响到聚合物的自身性能, 故笔

者采用添加链转移剂的方法降低 PAN 的分子量使其更好地提高 TiO<sub>2</sub> 在聚合物中的分散性和聚合物性能。目前, 关于低分子量的 TiO<sub>2</sub> 抗老化剂的制备和研究还未见报道。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

硅烷偶联剂 (KH-570) 改性纳米 TiO<sub>2</sub> [TiO<sub>2</sub>(KH-570)]: 金红石型, 宣城晶瑞新材料有限公司;

十二烷基苯磺酸钠 (LAS): 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司;

偶氮二异丁腈 (AIBN): 分析纯, 上海试四赫维化工有限公司;

丙烯腈 (AN): 分析纯, 天津市福晨化学试剂厂;

3-巯基丙酸异辛酯: 分析纯, 阿拉丁试剂公司。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 (21376127)

联系人: 王雅珍, 教授, 主要研究方向为高分子材料的改性研究

收稿日期: 2015-04-16

## 1.2 主要仪器及设备

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Spectrum one 型, 江苏金坛市荣升仪器制造公司;

热重 (TG) 分析仪: STA449F3 型, 德国 Netzsch 公司;

高速离心机: TGL-16G 型, 江苏金坛市中大仪器厂;

元素分析仪: 2400 型, 美国 PerkinElmer 公司;

透射电子显微镜 (TEM): H-7650 型, 日本 Hitachi 公司。

## 1.3 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 的制备

称取 TiO<sub>2</sub>(KH-570) 粉末 1.5 g, 在 30 mL 乙醇中超声分散, 加入到 250 mL 的三口瓶内搅拌升温; 称取适量 LAS 和 AIBN 配制成水溶液, 加入适量的 AN 和 LAS 水溶液, 待反应温度达到 65℃ 时, 用蠕动泵滴加引发剂 AIBN, 并开始计时。待达到反应时间后, 将产物置于 *N,N*-二甲基甲酰胺中并在 6000 r/min 离心条件下去除均聚 PAN。并用丙酮洗去杂质, 得到 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 产物, 烘干备用。

## 1.4 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 刻蚀

将烘干得到的 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 研成粉末状, 加入到耐腐蚀容器中, 添加浓度 30% 的 HF 溶液中, 40℃ 下在超声波清洗仪中超声处理 3 h 左右, 结束后用大量去离子水和丙酮混合溶液洗涤至中性, 将清洗后产物放入真空干燥箱内干燥完全, 得到接枝在 TiO<sub>2</sub>(KH-570) 表面的 PAN。

## 1.5 性能测试与表征

FTIR 测定: 将需要表征的试样研碎压片, 置于 FTIR 仪中分析。

TG 分析: 温度 1000℃, 升温速度 10℃/min。

元素分析: 测试待测试样中的 N 含量, 计算出 PAN 的含量, 用接枝率来表示接枝 AN 的含量。其接枝率 (*G*) 的计算方法为:

$$G = \frac{W}{M_1} \times M_2 \quad (1)$$

式中: *W*——N 元素质量分数;

*M*<sub>1</sub>——N 元素原子质量, 14;

*M*<sub>2</sub>——丙烯腈分子质量, 53。

TEM 测试: 用 TEM 在一定放大倍数下观察复合粒子的分散性及表面形貌。

黏均分子量测试: 用乌氏黏度计测量 PAN 溶液的乌氏黏度, 根据简化后的增比黏度计算公式:

$$\eta_{sp} = (\eta - \eta_0) / \eta_0 \approx (t - t_0) / t_0 \quad (2)$$

根据上海合成纤维研究所的经验, PAN 的分子量采用如下公式计算:

$$[\eta] = 2.78 \times 10^{-4} M^{0.76} \quad (3)$$

式中:  $\eta_{sp}$ ——聚合物增比黏度;

$\eta$ ——溶液的黏度;

$\eta_0$ ——溶剂的黏度;

*t*, *t*<sub>0</sub>——溶液和纯溶剂流出的时间;

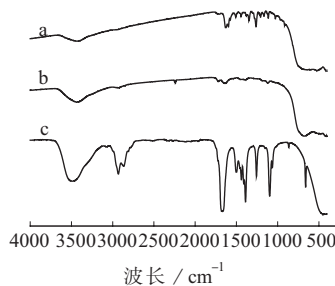
*M*——黏均分子量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 的表征

#### (1) FTIR 分析。

图 1 为产物制备各阶段的 FTIR 谱图, 图 1a 为 TiO<sub>2</sub> 包覆 KH-570, 其中 1717 cm<sup>-1</sup> 和 1620 cm<sup>-1</sup> 处为 KH-570 中的 C=O, C=C 键, b 曲线为 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN, 在 2242 cm<sup>-1</sup> 处出现了丙烯腈中 CN 三键的特征吸收峰。1453 cm<sup>-1</sup> 为 C—H 振动峰, 证明 PAN 已成功接枝到 TiO<sub>2</sub>(KH-570) 表面上。c 曲线为 *N,N*-二甲基甲酰胺上清液特征峰, 在 2242 cm<sup>-1</sup> 处未发现 C—N 特征峰。说明均聚 PAN 已去除。

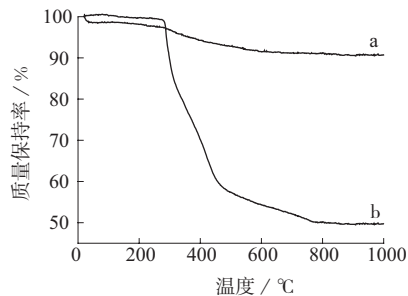


a—TiO<sub>2</sub>(KH-570); b—TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN  
c—*N,N*-二甲基甲酰胺洗涤产物的上清液

图 1 TiO<sub>2</sub>(KH-570) 和 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 及上清液 FTIR 谱图

#### (2) TG 分析。

图 2 为 TiO<sub>2</sub>(KH-570) 和 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 的 TG 曲线。



a—TiO<sub>2</sub>(KH-570); b—TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN

图 2 TiO<sub>2</sub>(KH-570) 和 TiO<sub>2</sub>(KH-570)-g-AN 的 TG 曲线图

从图2可以看出,在0~100℃由于水分蒸发造成了1%左右的失重。随着温度的继续升高, $\text{TiO}_2(\text{KH-570})$ 失重10%左右,可得出包覆在纳米 $\text{TiO}_2$ 的偶联剂质量分数为9%。而 $\text{TiO}_2(\text{KH-570})\text{-g-AN}$ 在350℃后发生明显失重,这是由于接枝在 $\text{TiO}_2$ 表面的PAN热分解引起,说明PAN已经成功接枝 $\text{TiO}_2$ 表面。

### (3) TEM 分析。

图3为 $\text{TiO}_2(\text{KH-570})$ 和 $\text{TiO}_2(\text{KH-570})\text{-g-AN}$ 的TEM照片。由图3a可以看出,图像界限分明,可以明显看出 $\text{TiO}_2$ 颗粒形状为较规则的条状颗粒,粒径分布较均匀,粒径在60 nm左右。由图3b通过对比可以明显看出接枝前后 $\text{TiO}_2$ 颗粒的形状变化,接枝后颗粒粒径明显增大,且发生交联,颗粒形状由条状变为不规则状。

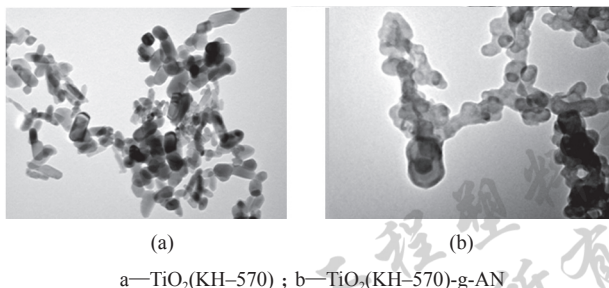


图3  $\text{TiO}_2(\text{KH-570})$ 和 $\text{TiO}_2(\text{KH-570})\text{-g-AN}$ 的TEM照片

## 2.2 反应条件对接枝率的影响

### (1) 反应时间对接枝率的影响。

图4是反应时间对接枝率的影响。从图4可以看出,在初期的几个小时以内,接枝率上升较快,在8 h左右时,接枝率达到最大值,之后随着反应时间的延长,聚合反应中自由基逐渐减少导致接枝率趋于平稳。

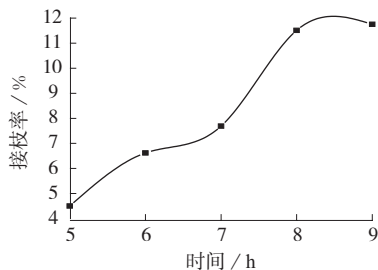


图4 反应时间对接枝率的影响

### (2) 反应温度对接枝率的影响。

图5示出反应温度对接枝率的影响。从图5可以看出,随温度的升高,接枝逐渐升高,当反应温度达到65℃时,接枝率达到最大值,反应温度超过65℃后,接枝率反而降低。可能因为,AN聚合反应

随着温度的增加引发剂活性降低,自由基反应停止,导致接枝率降低,得出最佳反应温度为65℃。

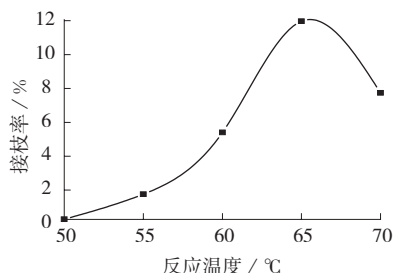


图5 反应温度对接枝率的影响

### (3) 单体用量对接枝率的影响。

图6为AN用量对接枝率的影响。从图6可以看出,随着单体AN用量的不断增加,产物的接枝率不断上升,当AN :  $\text{TiO}_2$  (质量比)=8 : 1时,接枝率基本不再增加,这是因为 $\text{TiO}_2(\text{KH-570})$ 表面接枝的PAN量达到最大值,所以KH-570对 $\text{TiO}_2$ 包覆率也是提高接枝率的关键因素。

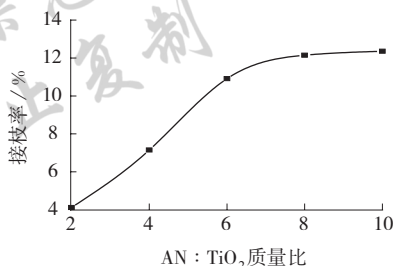


图6 AN用量对接枝率的影响

### (4) 引发剂用量对接枝率的影响。

图7为引发剂用量对接枝率的影响。由图7可以看出,随着引发剂质量分数的增加,接枝率随之提高,在引发剂质量分数为1.2%时接枝率达到峰值,而后出现接枝率下降的现象。增加引发剂用量,可以产生更多的活性自由基,从而有利于提高转化率,但当引发剂浓度过高,导致自由基的浓度过大,使得自由基相互碰撞而失去活性,最终导致接枝率的下降。

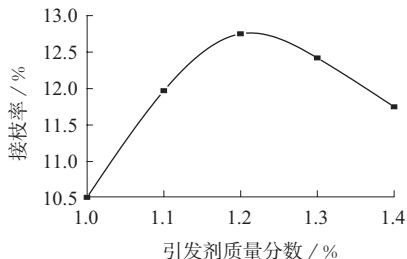


图7 引发剂用量对接枝率的影响

## 2.3 反应条件对PAN分子量的影响

### (1) 反应温度对分子量的影响。

图8示出反应温度对分子量的影响。由图8

可以看出,随着反应温度的提高, PAN 的分子量逐步降低。当温度由  $55^\circ\text{C}$  增加至  $65^\circ\text{C}$  时,分子量由 19000 左右降为 18400 左右,  $65^\circ\text{C}$  到  $75^\circ\text{C}$  之间分子量降幅不明显。这可能因为温度升高导致引发剂活性降低所致。

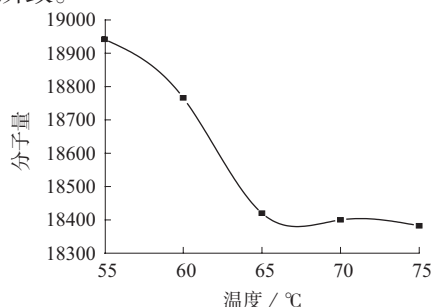


图8 反应温度对 PAN 分子量的影响

### (2) 引发剂用量对 PAN 分子量的影响。

图9示出引发剂用量对 PAN 分子量的影响。由图9可以看出,随着引发剂用量的提高, PAN 分子量逐步降低。当引发剂含量从单体质量的 1% 提高到 1.6% 时,分子量下降明显,从 18500 降低到 16600 左右,由于引发剂用量的增加会使自由基聚合速率增加,链增长在短时间内结束导致分子量的降低。而后随着引发剂含量的继续增加,分子量降低不明显。

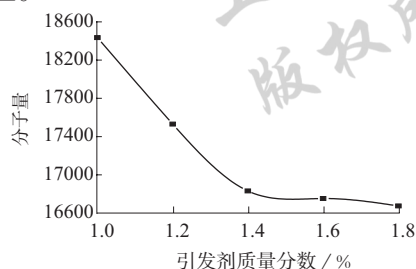


图9 引发剂用量对 PAN 分子量的影响

### (3) 链转移剂对 PAN 分子量的影响。

图10示出链转移剂用量对 PAN 分子量的影响。

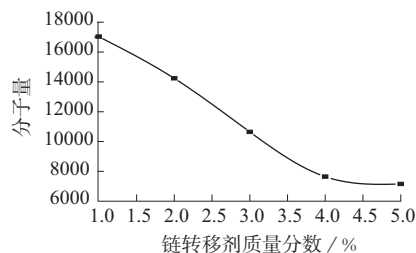


图10 链转移剂用量对 PAN 分子量的影响

由图10可以看出,链转移剂对 PAN 分子量的调节具有明显作用,当添加的链转移剂的含量占单体质量的 1%~4% 时,分子量显著降低,分子量由 17000 左右降低到 8000 左右,但随着链转移剂含

量的继续增加,分子量的降低逐渐趋于缓慢。链转移剂可以有效地控制聚合物的分子量的大小。

## 3 结论

(1) 通过 FTIR 测试、TG 分析、TEM 测试等表征,可以证明 PAN 成功地接枝在  $\text{TiO}_2(\text{KH-570})$  表面。通过对反应条件的控制得到最佳接枝率条件为,反应温度  $65^\circ\text{C}$ ,反应时间 8 h, AN 单体用量为 AN :  $\text{TiO}_2$  (质量比)=1 : 8,引发剂质量分数为 1.2% 时接枝率可以达到最大值 12.75%。

(2) 通过对链转移剂(3-巯基丙酸异辛酯)用量,引发剂用量和反应温度的控制,得到最低分子量产物的实验条件为:链转移剂用量为单体质量的 4%,引发剂用量为单体质量的 1.6%,反应温度  $65^\circ\text{C}$ ,分子量控制在 8000 左右。

## 参考文献

- [1] 朱艳,陆涛. 纳米  $\text{TiO}_2$  研究进展 [J]. 钛工业进展, 2009, 26(3): 13-16.  
Zhu Yan, Lu Tao. Research progress of nano  $\text{TiO}_2$  [J]. Titanium Industry Progress, 2009, 26(3): 13-16.
- [2] 周健,俞进见. PP/ $\text{TiO}_2$  纳米复合材料耐老化性能的研究 [J]. 工程塑料应用, 2004, 32(5): 50-53.  
Zhou Jian, Yu Jinjian. Study on ageing resistance property of PP/ $\text{TiO}_2$  nanocomposite [J]. Engineering Plastics Application, 2004, 32(5): 50-53.
- [3] 马立群,孙兆洋,何子健,等. 纳米  $\text{TiO}_2$  表面接枝 PAN 及其对抗老化紫外性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2014, 42(6): 69-73.  
Ma Liqun, Sun Zhaoyang, He Zijian, et al. Nano  $\text{TiO}_2$  grafted with polyacrylonitrile and its effects on anti UV aging properties of PP [J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(6): 69-73.
- [4] Mowery D M, Assink R A, Derzon D K, et al. Solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR investigation of the oxidative degradation of selectively labeled polypropylene by thermal aging and  $\gamma$ -irradiation [J]. Macromolecules, 2005, 38(12): 5035-5046.
- [5] 李娟,伍玉娇,何辉. 微波辐照对 PP/纳米  $\text{TiO}_2$  复合材料相容性的影响 [J]. 塑料工业, 2010, 38(5): 27-31.  
Li Juan, Wu Yujiao, He Hui. The influence of microwave radiation to the compatibility of PP/nano  $\text{TiO}_2$  materials [J]. China Plastics Industry, 2010, 38(5): 27-31.
- [6] Islam N M, Othman N, Ahmad Z, et al. Effect of pro-degradant additives concentration on aging properties of polypropylene films [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2010, 49(3): 272-278.
- [7] Li Se, Wang Kuan. Synthesis of  $\text{TiO}_2$ /poly(styene-co-divinylbenzene) nano-composite microspheres by grafting copolymerization [J]. Chinese Journal of Chemistry, 2008, 26: 781-786.

- [8] 徐立新,李为立,杨慕杰. 纳米  $\text{TiO}_2$  表面接枝聚苯乙烯及其抗紫外老化研究[J]. 化学学报,2007,65(17):1917-1921.  
Xu Lixin, Li Weili, Yang Mujie. Study on nano  $\text{TiO}_2$  grafted with polystyrene and its resistance to UV Aging[J]. ACTA Chimica Sinica,2007,65(17):1917-1921.
- [9] Park J T, Koh J H. Surface-initiated atom transfer radical polymerization from  $\text{TiO}_2$  nanoparticles[J]. Applied Surface Science, 2009,255:3739-3744.
- [10] 王雅珍,陈国力,孙兆洋,等. PP 用抗老化剂纳米  $\text{TiO}_2$  接枝丙烯酸酯的制备与表征[J]. 工程塑料应用,2013,41(12):94-97.  
Wang Yazhen, Chen Guoli, Sun Zhaoyang, et al. Preparation and characterizations of nanometer  $\text{TiO}_2$  grafting acrylonitrile anti-aging agent for PP[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(12):94-97.

### 天津石化超低密度聚乙烯 TJVL-1210 销售获突破

经过化工销售华北分公司 MPRC(产销研用)市场开发小组近 2 年的努力,天津石化新产品超低密度聚乙烯 TJVL-1210 销售取得突破,在下游聚丙烯改性行业成功替代部分 POE 弹性体,国内知名合金生产企业天津某公司已开始批量采购,在该行业中的示范效应正逐步显现。

超低密度聚乙烯属第 4 代聚乙烯,具有优良的抗冲击性、抗刺穿性、透明性和自黏性,适用于聚丙烯产品改性等领域。长期以来该类产品全部依赖进口,且进口渠道少、数量有限,不能满足市场需求。天津石化于 2013 年开始研发线型超低密度聚乙烯 TJVL-1210,2014 年实现工业化生产,成为国内首家生产密度小于  $0.912 \text{ g/cm}^3$  聚乙烯产品的企业。MPRC 小组克服种种困难,积极进行推广,终于与天津某公司成功实现了合作,2015 年 3 月首批销售 20 t。经过产品试用,部分替代 POE 弹性体产品的效果良好,近期客户将追加采购 30 t。在此示范效应下,浙江等地的塑料改性企业纷纷要求产品试用,产品销售有望取得新的突破。

(中国聚合物网)

### 亿元 PET 包装生产线,实现二十倍效率提升

宜兴市首条 PET 材料生产线在位于开发区的光辉包装材料有限公司内投入使用。该条生产线总投资 1 亿元,预计可年产热收缩膜 5 500 t,与过去传统的吹膜技术相比,生产效率提高了近 20 倍。

据宜兴市光辉包装材料有限公司资料显示,该公司是目前国内主要的 PVC 热收缩薄膜(吹膜工艺)系列产品制造商,旗下包括无锡久滕塑料包装材料有限公司、重庆久滕包装材料有限公司与天津久滕包装材料有限公司。公司自 1999 年生产 PVC 热收缩薄膜产品以来,不断探索创新,努力提高产品性能,产品通过 ISO9001:2000 认证,并经 SGS 按美国 FDA 标准检测合格。现已成为众多国内外知名品牌 PVC 商标印刷膜的主要协作供应商。

目前公司 4 个工厂占地面积约  $8.7 \text{ 万 m}^2$ ,主要产品包括 PVC 热收缩薄膜和 PVC 套管膜,月产能可达到 5 000 t,在质量、产量和销售量上连续多年居国内同行前列。

(中国塑料机械网)

### 聚乳酸复合纤维制备获进展

中国科学院宁波材料技术与工程研究所,近来取得了聚乳酸及其改性纤维制备与应用的系列突破。为提高聚乳酸的强度和高温尺寸稳定性,研究人员采用液相恒温浴(LIB)

技术并调控立构复合晶,制备出包含纳米尺度立构复合晶微纤的聚乳酸复合纤维,并初步阐明了立构复合晶纳米微纤的形成和结构演变机制。

受改性塑料领域广泛应用的“合金化”技术启发,宁波材料所研究人员将聚乳酸与聚羟基丁酸戊酸共聚酯反应性共混,再经熔融纺丝制得品质优异的新型生物基化学纤维——禾素纤维。禾素纤维不仅具有从原料、生产到废弃物处理的全过程绿色环保优势,而且在风格与手感等方面与真丝、铜氨等高档纤维品种相媲美,因而获得国内外多个纺织与制衣专业机构和企业的高度评价,被列入《中国生物基纤维及其原料科技与产业发展(30 年)路线图》。经过 5 年的研产合作攻关,宁波材料所于近期协助企业实现了禾素纤维的产业化,并从高分子聚集态结构角度建立了其优越特性的理论基础。

(工程塑料网)

### 和县年产 25 kt 废旧塑料颗粒项目正式投产

日前,废旧塑料颗粒项目落户到县经济开发区的和县泓盛塑料有限公司,该项目现已正式投产,预计年产 25 000 t 废旧塑料颗粒。和县泓盛塑料有限公司研发的废旧塑料颗粒项目产品规模效益显著,市场需求旺盛,具有广阔的应用领域和市场前景。项目实施后能产生较好的经济效益和社会效益。2015 年底,整个项目将完成安装调试,项目建成后,正常年份将实现年产量 25 kt 废旧塑料颗粒,预计年收入 2 亿元。

(马鞍山市政府网)

### 鸿塑公司成功研发导热 PA66 和导热 PPS

广东顺德鸿塑高分子材料有限公司成功开发了以尼龙(PA)66、聚苯硫醚(PPS)为基体树脂的高导热型复合材料(型号为 HS-PA66-TR40 和 HS-PPS-TR40)投入市场并取得良好的效果。以 PA66 为基体的高导热复合材料(HS-PA66-TR40)的密度为  $(1.5 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3(23^\circ\text{C})$ ,以 PPS 为基体的高导热复合材料(HS-PPS-TR40)的密度为  $(1.73 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3(23^\circ\text{C})$ ,远低于铝合金材料的密度( $2.70 \sim 3.03 \text{ g/cm}^3$ ),可以满足大功率 LED 散热器的要求(7 W 功率的 LED 灯,质量  $< 85 \text{ g}$ ),HS-PA66-TR40 和 HS-PPS-TR40 热导率在室温( $25^\circ\text{C}$ )状态下达到  $6.53 \sim 8.65 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ,远高于纯 PA66 的热导率 [ $0.243 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ],以及纯 PPS 的热导率 [ $0.3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ]。

LED 灯在使用温度达到  $80^\circ\text{C}$  时,灯杯材料的热导率要求为  $5.910 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。因此以上两种材料完全符合使用要求。

(工程塑料网)