

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.08.022

EP/SiO₂/CF 复合材料的动态热力学分析^{*}

王定,王利军,王春红,王瑞

(天津工业大学纺织学部,天津 300387)

摘要: 为了研究纳米级 SiO₂、碳纤维 (CF) 对环氧树脂 (EP) 基复合材料动态热力学性能的影响,制备了不同用量 (分别为 EP 质量的 0% 和 4%) 纳米 SiO₂、不同体积分数 (分别为 5%, 10%, 15%, 20%) CF 增强 EP 基复合材料弯曲试样,对试样进行了多频扫描动态热力学分析 (DMA),研究了纳米 SiO₂ 和 CF 对复合材料玻璃化转变温度 (T_g)、储能模量、表观活化能和最大损耗因子的影响。结果表明,总体上添加 4% 的纳米 SiO₂ 后复合材料的 T_g 下降 2~6℃; 100℃ 之前,测试频率对复合材料的储能模量影响较小,且未含 SiO₂ 的试样储能模量曲线比含 SiO₂ 的试样较为平坦;当 CF 体积分数分别为 10%, 15%, 20% 时,添加 4% 纳米 SiO₂ 的 EP/CF 复合材料的在 40℃ 下的储能模量较未加纳米 SiO₂ 时提升 31.2%, 135.5%, 13.6%, 表明纳米 SiO₂ 和 CF 展现出很好的协同效应从而提升了复合材料储能模量,而最大损耗因子分别下降 3.7%, 6.5%, 14.8%, 表明纳米级 SiO₂ 有助于增强复合材料的刚性;当纳米 SiO₂ 用量为 EP 质量的 4%, CF 体积分数为 15% 时,复合材料内部作用力最大,表观活化能达到 569 kJ/mol, 呈现了很好的协同效果。

关键词: 碳纤维; 二氧化硅; 动态热力学分析; 环氧树脂; 活化能

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)08-0101-05

Dynamic Thermomechanical Analysis of Epoxy Resin / Silica / Carbon Fiber Composites

Wang Ding, Wang Lijun, Wang Chunhong, Wang Rui

(School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract : In order to investigate the effects of nano-silica (SiO₂) and carbon fiber (CF) on the dynamic thermomechanical performances of epoxy resin (EP) based composites, the composite bending specimens with different contents of nano-SiO₂ (respectively 0% and 4% of EP mass) and different volume percentage of carbon fibers (respectively 5%, 10%, 15% and 20%) were prepared. The DMA with multi-frequency scanning were conducted for the specimens, the effects of nano-SiO₂ and CF on the glass transition temperature (T_g), storage modulus, apparent activation energy and maximum loss factor of the composites were studied. The results show that, T_g of the composites added with nano-SiO₂ decrease by 2~6℃ as a whole. Before 100℃, the test frequency has less impact on the storage modulus of the composites, and the storage modulus curves of the composites without nano-SiO₂ sample are relatively more flat than those containing nano-SiO₂. When the volume fraction of CF is 10%, 15 % and 20%, adding 4% nano-SiO₂, the storage modulus of the composite at 40℃ increases by 31.2%, 135.5%, 13.6% respectively compared with the composites without nano-SiO₂, which indicates that nano-SiO₂ and CF exhibit good synergistic effect for promoting the storage modulus, moreover, the maximum loss factor decreases by 3.7%, 6.5%, 14.8% respectively, which shows that nano-SiO₂ can help to enhance the rigidity of the composites. When the content of nano-SiO₂ is 4% of EP mass and the volume fraction of CF is 15%, the internal force of the composite reaches maximum and the apparent activation energy is 569 kJ / mol, which shows a good synergistic effect.

Keywords : carbon fiber ; silica ; dynamic thermomechanical analysis ; epoxy resin ; activation energy

碳纤维 (CF) 增强环氧树脂 (EP) 基复合材料具有质轻、高强、抗疲劳性好等优点,在航天航空领域的应用越来越广泛,但是 EP 固化产物存在天然的脆性大、抗冲击性弱等不足,所以使用纳米粒子改性 EP 基体,提高其固化后的力学性能以适用不同场合的使用要求一直是行业内关心的问题。常见的用于改性 EP 的纳米粒子为纳米 SiO₂,其具有尺寸效应、巨大的比表面积以及强的界面作用,可使纳米粒子

的刚性、尺寸稳定性和热稳定性与 EP 的韧性相结合^[1]。已有研究表明^[2-4]: 质量分数为 4% 的纳米 SiO₂ 对 EP 的力学性能、热稳定性提升效果显著。动态热力学分析 (DMA) 能够对材料内部物质

^{*} 国家自然科学基金项目 (51303131)

联系人: 王定, 硕士, 主要研究方向为高性能纤维增强树脂基复合材料

收稿日期: 2016-06-02

的变化进行表征,能够反映材料在不同温度场、变力场条件下的使用情况。对纳米 SiO_2 改性 EP/CF 复合材料进行热力学测试,一方面依靠储能模量、损耗因子等测试指标能够表征材料的直观改性效果,也可依靠活化能计算定量地表征界面内部结合力;另一方面,玻璃化转变温度 (T_g) 指标可以反映材料的热稳定性,对于评估材料的短、长期力学性能很有帮助。利用 DMA 系统性地研究 SiO_2 和 CF 对 EP 基复合材料热力学影响的相关文献较少,因此笔者在大量阅读有关 DMA 测试分析文献的基础上,参考已有文献研究无机粒子增强增韧 EP 的研究结果,选定纳米 SiO_2 的用量为 EP 质量的 4%,CF 体积分数为 5%,10%,15% 和 20%,测试频率低于 10 Hz^[5],研究纳米 SiO_2 和 CF 对复合材料的储能模量、活化能等指标的影响,有助于后续无机粒子与树脂在结合机理、效果等方面的应用。

1 实验部分

1.1 实验原料

EP: HT-723A, 惠柏新材料科技(上海)股份有限公司;

EP 固化剂: HT-723B, 惠柏新材料科技(上海)股份有限公司;

CF: T300(K), T700S, 日本东丽公司;

SiO_2 : 纳米级, 经硅烷偶联剂 KH550 处理, 天津纳美纳米科技有限公司。

1.2 实验设备

电子天平: STPFA2004 型, 上海上平仪器有限公司;

电热真空干燥箱: ZK-1S 型, 天津市中环实验电炉有限公司;

超声波清洗器: KQ2200E 型, 昆山市超声仪器有限公司;

电热恒温干燥箱: DHG-9240A 型, 巩义市予华仪器有限公司;

数显搅拌机: 威海宏程机电设备有限公司;

DMA 仪: 242E 型, 德国耐驰有限公司。

1.3 试样制备

将扁平片状的 CF 统一裁剪到 60 mm 的长度, 宽度为 2.8 mm 左右, 捋平后按照一定的纤维体积分数均匀地平铺于弯曲试样钢模中, 以备后续注入树脂。将相对于 EP 质量 4% 的纳米级 SiO_2 加入到流动性较好的固化剂中, 用数显搅拌机 (转速 500 r/min) 搅拌 20 min 后, 超声波常温处理 30 min, 以

便分散均匀。

将上述处理好的固化剂溶液以及未添加纳米级 SiO_2 的固化剂溶液分别加入到已经加热 (80℃) 2 h 的 EP 中 (EP 与固化剂的质量比为 100:30), 用数显搅拌机 (转速 1500 r/min) 搅拌 20 min 后, 常温抽真空 20 min, 最后静置 60 min。

借助天平, 用医用注射器将混合好的 EP 精确地按照设计的纤维体积分数 (分别为 5%, 10%, 15%, 20%) 注射到规格为 60 mm × 12 mm × 3 mm 的钢模中, 抹平钢模上表面后静置 60 min, 在 130℃ 下固化 2 h 后自然冷却, 备用。

1.4 DMA 实验

采用弯曲模式, 支架跨距 40 mm, 试样的尺寸为 60 mm × 12 mm × 3 mm, 测试温度范围 30 ~ 160℃, 升温速度 2℃/min, 最大振幅 40 μm, 动态力 2.182 N, 静态力 0.05 N, 比例因子 1.1, 测试频率分别为 1, 2.5, 10 Hz, 每组测试 2 个试样, 测试结果取均值。

2 结果与讨论

2.1 复合材料在不同频率下的 DMA 谱图

固定 CF 体积分数为 15%, 对添加纳米 SiO_2 前后的复合材料试样进行 DMA 分析, 图 1 为多频扫描下试样的储能模量-温度曲线, 图 2 是 1 Hz 条件下试样的损耗因子-温度曲线。

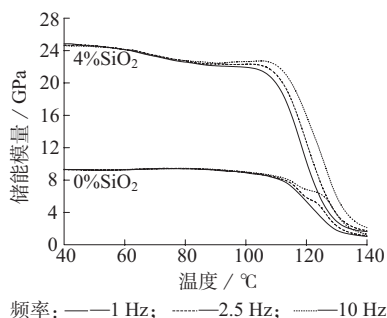


图 1 试样在多频扫描下的储能模量-温度曲线

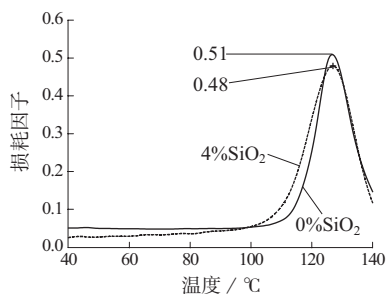


图 2 试样在 1 Hz 下的损耗因子-温度曲线

利用仪器自带的分析软件, 对选定检测温度范围为 40 ~ 70℃, 90 ~ 140℃ 的 1 Hz 下不同 CF 体积

分数下的试样储能模量-温度曲线进行转变温度检测,检测统计结果如表 1 所示。

表 1 不同检测温度范围内的试样转变温度 /℃

CF 体积分 数 / %	检测温度范围 /℃			
	40~70		90~140	
	未加 SiO ₂	添加 SiO ₂	未加 SiO ₂	添加 SiO ₂
5	42.0	40.8	114.4	110.3
10	48.5	48.1	116.6	110.2
15	46.1	54.3	115.9	112.8
20	40.9	51.3	114.5	112.4

表 2 为不同频率下不同 CF 体积分数的试样 T_g 。

表 2 不同频率下试样的 T_g /℃

CF 体积分 数 / %	未加 SiO ₂			添加 SiO ₂		
	1 Hz	2.5 Hz	10 Hz	1 Hz	2.5 Hz	10 Hz
5	114.4	115.2	115.8	110.3	111.4	112.4
10	116.6	117.8	119.3	110.2	110.9	113.2
15	115.9	117.8	119.3	112.8	114.4	116.8
20	114.5	116.0	116.1	112.4	117.4	119.7

由图 1 可以看出,在约 100℃之前,测试频率对试样的储能模量影响较小,且未加 SiO₂ 的试样测试曲线比添加 SiO₂ 的试样较为平坦,但是 100℃之后,随着测试频率的增加,储能模量也相应增加,且在 T_g 之前,添加 SiO₂ 的试样储能模量会有一个略微抬升的过程。

在 T_g 之前,聚合物的大分子由于能量不够,只发生键角、键长的小形变,同时形变能够跟上外力的变化,属于弹性形变,因此内耗很小,试样表现出完全弹性性质,储能模量很大。从表 1 的结果可知,在 40~55℃内,试样有个较小的转变过程,但此处的分子运动机理尚未形成定论^[6],猜测可能与试样中的水分有关^[7]。添加 4% 纳米 SiO₂ 的试样储能模量在 T_g 之前有一次略微上升的过程,推测这可能与经偶联剂 KH-550 处理的 SiO₂ 带入较多的极性水分子有关,当温度升高后,水分子吸热蒸发,分子间距减小,氢键结合紧密从而导致储能模量略有上升。

如表 2 所示,总体上添加 SiO₂ 后试样的 T_g 下降了 2~6℃,分析认为 SiO₂ 的加入在一定程度上阻碍了 EP 的固化过程,加之纳米级 SiO₂ 颗粒有可能存在团聚现象,导致约在 100℃前储能模量-温度曲线的不平坦。随着频率的增加,试样的 T_g 均提升了 2℃左右,分析认为这可能是由于测试频率增加导致试样的应变滞后增大造成的。同理,升温速率的提高也会使 DMA 曲线的转变点向高温移动^[8]。

当温度高于 T_g 时试样储能模量急剧下降,出现了松弛内耗峰,此温度范围内出现的 α 松弛过程是由于材料无定形区中的聚合物发生热软化,聚合

物分子产生的微布朗运动引起的^[9],同时材料大分子的链段、部分支链在获得足够能量后,运动非常活跃,产生较多的热量,材料的损耗模量逐渐增大,材料的损耗因子(损耗模量与储能模量的比值)也达到峰值,其值的大小代表了材料的阻尼特性。如图 2 所示,添加纳米 SiO₂ 后试样的最大损耗因子由 0.51 降到 0.48,表明纳米 SiO₂ 可降低 EP/CF 复合材料的粘性,能够起到一定的增强增韧作用。

2.2 纳米 SiO₂ 和 CF 对复合材料储能模量的影响

选取储能模量-温度曲线中 40℃时的储能模量,得到添加纳米 SiO₂ 前后不同 CF 体积分数的 EP 基复合材料的储能模量,如图 3 所示。从图 3 可知,添加 4% 的纳米 SiO₂ 后,纯 EP 的储能模量从 4 GPa 提升为 4.17 GPa,提升幅度仅为 4.3%;而加入不同体积分数的 CF 后,随着体积分数由 5% 增加到 20%,未加 SiO₂ 的材料储能模量也呈现不断增加的趋势,较纯 EP 分别增加 51%,122.5%,145%,318.8%,增加幅度较大,这是由于 CF 为刚性纤维,其含量的增加必然会增加材料的刚性,限制 EP 分子链段的运动^[10],从而使得材料的储能模量不断增加;而添加 4% 纳米 SiO₂ 后,EP/CF 复合材料的储能模量较纯 EP 分别提升了 48%,192%,477%,375.8%,较未加 SiO₂ 的提升-2%,31.2%,135.5%,13.6%。可以发现,在 CF 体积分数为 10%,15%,20% 处时,纳米 SiO₂ 和 CF 呈现出很好的协同作用,可大幅提升复合材料的储能模量。

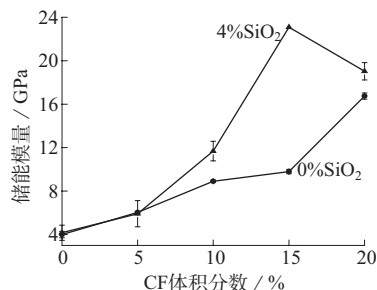


图 3 纳米 SiO₂ 和 CF 对复合材料储能模量的影响

2.3 纳米 SiO₂ 和 CF 对复合材料活化能的影响

根据 Arrhenius 方程^[11]:

$$f = f_0 e^{-(E_a/RT)} \quad (1)$$

式中: f ——速率常数;

f_0 ——指前因子;

E_a ——表观活化能;

R ——气体常数,其值为 8.314 ;

T ——温度。

因此不同频率下的 T_g 变化可以用式 (2) 表示:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{e^{-(E_a/RT_{g1})}}{e^{-(E_a/RT_{g2})}} \quad (2)$$

式中 T_{g1} 和 T_{g2} 分别是在频率为 f_1 和 f_2 时的 T_g , f_1/f_2 可以表征为水平位移因子,所以频率与 T_g 的关系可以简单表示为:

$$E_a = -R \left[\frac{d(\ln f)}{d(1/T_g)} \right] \quad (3)$$

由 $\ln f$ 和 $1/T_g$ 作图,由斜率求得添加纳米 SiO_2 前后不同 CF 体积分数的 EP 基复合材料的 E_a ,如图 4 所示。从图 4 可知,随着 CF 体积分数的增加,未添加 SiO_2 的材料 E_a 先减小后增大,但变化幅度很小,不超过 3%;而添加 SiO_2 后材料的 E_a 先增大后减小,在 CF 体积分数为 5%,15%,20% 处,较未添加 SiO_2 时增加了 -11%,7%, -9%。 E_a 可以用于表示一个化学反应发生所需要的最小能量,从计算得到的 E_a 上可以定量地表征其内部结合作用力^[12]。分析认为,未添加 SiO_2 时,材料的内部结合力主要由 CF 与 EP 提供,且在一定范围内与 CF 的含量关系不大,但是因为纳米 SiO_2 的加入,材料的界面发生了变化,且当 CF 体积分数为 15% 时,添加用量为 EP 质量 4% 的纳米 SiO_2 ,可使复合材料内部作用力最大, E_a 达到 569 kJ/mol,呈现了很好的协同效果。

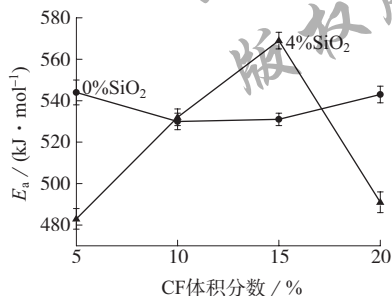


图4 纳米 SiO_2 和 CF 含量对复合材料 E_a 的影响

2.4 纳米 SiO_2 和 CF 对复合材料最大损耗因子的影响

添加纳米 SiO_2 前后不同 CF 体积分数的 EP 基复合材料的最大损耗因子如图 5 所示。从图 5 可知,随着 CF 体积分数的增加,未添加纳米 SiO_2 的复合材料的最大损耗因子先增大后减小,在 CF 体积分数为 15% 时达到最大。分析认为,这是由于 CF 与 EP 间存在一定的界面作用力。CF 含量较少时,CF 对 EP 分子链的运动主要起阻碍作用,体系的内耗增大,因此损耗因子增大。但当 CF 含量较高时,这种作用可能变小,损耗因子也随之减小。同时可以看到,纳米级 SiO_2 加入后,随 CF 体积分数的增加,复合材料的最大损耗因子逐渐下降,当 CF 体

积分数分别为 10%,15% 和 20% 时,分别下降 3.7%,6.5%,14.8%,表明纳米级 SiO_2 颗粒有助于增强材料的刚性。

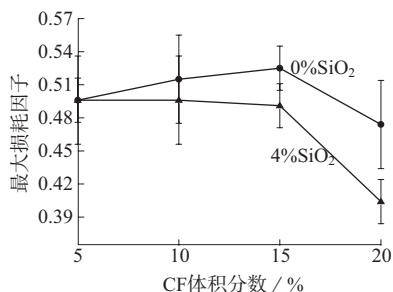


图5 纳米 SiO_2 和 CF 含量对复合材料最大损耗因子的影响

3 结论

(1) 向 EP/CF 复合材料添加用量为 EP 质量的 4% 的 SiO_2 后,其 T_g 总体上下降 2~6℃;100℃之前,测试频率对复合材料的储能模量影响较小,且未含 SiO_2 的试样测试曲线比含 SiO_2 的试样较为平坦,随着测试频率的增加,材料的 T_g 提升了 2℃左右。

(2) 当 CF 体积分数分别为 10%,15% 和 20% 时,添加纳米 SiO_2 后,EP/CF 复合材料在 40℃ 下的储能模量较纯 EP 提升 192%,477%,375.8%,较 EP/CF 复合材料提升 31.2%,135.5%,13.6%,表明纳米 SiO_2 和 CF 呈现很好的协同效应,提升了复合材料的储能模量。

(3) 未添加 SiO_2 时,材料的内部结合力主要由 CF 与 EP 提供,且在一定范围内与 CF 的含量关系不大;纳米 SiO_2 加入后,随着 CF 含量增加,复合材料的表观活化能先增大后减小,当纳米 SiO_2 用量为 EP 质量的 4%,CF 体积分数为 15% 时,复合材料内部作用力最大,表观活化能达到 569 kJ/mol,呈现了很好的协同效果。

(4) 当 CF 体积分数分别为 10%,15% 和 20% 时,添加纳米 SiO_2 的 EP/CF 复合材料的最大损耗因子较未加 SiO_2 时分别下降了 3.7%,6.5%,14.8%,表明纳米级 SiO_2 有助于增强 EP/CF 复合材料的刚性。

参考文献

- [1] 高朋召,林明清,林海军,等. 纳米二氧化硅改性环氧树脂复合材料的性能研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2015(6):1-6.
Gao Pengzhao, Lin Mingqing, Lin Haijun, et al. Study on the properties of nano- SiO_2 modified epoxy composites[J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2015(6):1-6.
- [2] 田超,杨莉,马寒冰. 纳米二氧化硅增韧改性环氧树脂的性能研究[J]. 西南科技大学学报,2012,27(4):11-14.
Tian Chao, Yang Li, Ma Hanbing. Properties of epoxy resin toughened by adding nano- SiO_2 [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2012, 27(4):11-14.

- [3] 郝胜强,张云仲,王永利,等. 环氧树脂/纳米 SiO₂ 复合材料的制备[J]. 合成树脂及塑料,2014,31(4):36-39.
Hao Shengqiang, Zhang Yunzhong, Wang Yongli, et al. Preparation of epoxy resin / nano-SiO₂ composites[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2014, 31(4):36-39.
- [4] 刘蓬,焦剑,蔡宇. 纤维增强介孔 SiO₂/环氧树脂复合材料的研究[J]. 粘接,2014(7):68-70.
Liu Peng, Jiao Jian, Cai Yu. Study on fiber-reinforced mesostructured silica / epoxy resin hybrid materials[J]. Adhesive, 2014(7):68-70.
- [5] 狄海燕,吴世臻,杨中兴,等. 各种因素对动态热机械分析结果的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2007,23(4):188-191.
Di Haiyan, Wu Shizhen, Yang Zhongxing, et al. Analysis of factors influencing the result of dynamic mechanical analysis[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2007, 23(4):188-191.
- [6] 蒋佳荔. 木材动态黏弹性的温度、时间、与频率的响应机理研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.
Jiang Jiali. Response mechanism of temperature, time and frequency on dynamic viscoelastic properties of wood[D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [7] Nakano T, Honma S, Matsumoto A. Physical properties of chemically-modified wood containing metal I. Effects of metals on dynamic mechanical properties of half-esterified wood[J]. Journal of the Japan Wood Research Society, 1990, 36(12):1 063-1 068.
- [8] 胡够英,姚迟强,杜兰星,等. 毛竹动态黏弹性研究[J]. 浙江林业科技,2012,32(4):24-27.
Hu Gouying, Yao Chiqiang, Du Lanxing, et al. Study on dynamic mechanical properties of bamboo culm[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2012, 32(4):24-27.
- [9] 何立平. 基于 DMA 方法的橡胶沥青粘弹特性和高温性能研究[D]. 西安:长安大学,2014.
He Liping. Research on the iscoelastic characteritistic and high temperature properties based DMA of rubber asphalt[D]. Xi'an:Chang'an University, 2014.
- [10] 易增博. 碳纤维增强环氧树脂基复合材料的制备及力学性能研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
Yi Zengbo. Study on preparation and mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composites[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [11] 周遗品,赵永金,张延金. Arrhenius 公式与活化能[J]. 石河子农学院学报,1995,13(4):76-80.
Zhou Yipin, Zhao Yongjin, Zhang Yanjin. Arrhenius equation with activation energy[J]. Journal of Shihezi Agricultural College, 1995, 13(4):76-80.
- [12] 王怡. 偶联剂改性木粉/聚丙烯复合材料的应力松弛[D]. 北京:北京林业大学,2011.
Wang Yi. Stress relaxation of the wood / polypropylene composite modified with coupling agent[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2011.
- [13] 尹翔宇. PPS/CF 混杂复合材料热力学及机械性能研究[D]. 济南:山东大学,2012.
Yin Xiangyu. Investigation on thermodynamics and mechanical properties of carbon fiber reinforced PPS hybrid composite material[D]. Jinan:Shandong University, 2012.

赢创携手惠普加速 3D 打印市场跑马圈地

赢创工业集团正在极具吸引力的 3D 打印市场中开疆拓土。这家特种化工企业将加入惠普公司的 Open Platform 项目,为惠普的多射流熔融技术提供全新的定制粉末材料。

积极参与惠普的 Open Materials 项目之后,赢创有望在增材制造领域取得进一步的成果,实现汽车及飞机制造等行业用部件的大规模生产。因此,集团计划为惠普的 Open Platform 项目推出用于创新 3D 打印技术的特种粉末材料。

“惠普的多射流熔融技术开辟了全新的 3D 打印应用领域,为未来的新材料研究奠定了基础。”赢创高性能聚合物业务线负责人 Matthias Kottenhahn 博士表示。

多年以来,赢创一直致力于为高科技 3D 打印组件的工业化制造开发特种聚合物材料。基于聚酰胺 12 的 VESTOSINT 粉末能赋予材料出众的加工品质,满足了 3D 打印技术对于材料特性的应用需求。

VESTOSINT 是经过改性的聚酰胺粉末,在赢创德国的马尔生产基地中采用特殊工艺制造而成。目前,集团正扩大 VESTOSINT 的年产能,以满足 3D 打印等应用领域不断上升的需求。新生产线预计将于 2017 年底正式投入运行。

(CPRJ 中国塑料橡胶)

俄罗斯开发出制备超高分子量聚乙烯新技术

俄罗斯西伯利亚分院催化研究所最近开发出一种非熔融法制备超高分子量聚乙烯材料的新技术。

该研究所开发超高分子量聚乙烯材料的主要目的是应用于北极地区极端条件,聚合物材料要耐受 -70~-75℃ 的低温。

当聚乙烯分子量超过 100 万时,就会出现一些独特的性质:高耐冲击性、耐寒性、耐腐蚀、耐磨损和低摩擦系数。超高分子量聚乙烯纤维还具有独一无二的轻质特性,其制品比水还轻。

目前,每年全世界聚乙烯产量约 1 亿 t,其中超高分子量聚乙烯材料产量只有 30 万 t (占 0.3%),其中仅 1.7 万 t 被加工成纤维。产量低的原因是工艺复杂和资源、能源消耗高,要先将粒料溶解在沸腾的有机溶剂中得到凝胶,凝胶中能用于制成纤维的物质含量不超过 2%~5%,接下来再进行干燥和拉丝,造成整个工艺能耗高、产品成本高。

西伯利亚分院催化研究所开发的这种新型催化剂,采用非熔融法制备超高分子量聚乙烯材料,开辟了一条降低产品制备成本的新路,产品可应用于医疗产品、各种纺织制品及寒冷地区加固起降跑道的材料等。

(科学技术部网)