

振动力场对销钉螺杆挤出机混炼过程的影响^{*}

柳天磊 杜遥雪^{**}

(五邑大学机电工程学院, 江门 529020)

摘要 利用流体动力学软件 POLYFLOW 对销钉螺杆挤出机的混炼段进行三维等温数值模拟。通过引入振动力场, 采用粒子示踪分析方法对比分析不同振动力场参数对销钉螺杆挤出机混炼过程的影响。结果表明, 振动力场对销钉的混炼性能有着明显的改善作用, 但存在最佳的振动频率和振幅范围。该结论为寻求最优振动力场参数从而提高塑料混炼质量提供了参考。

关键词 销钉螺杆挤出机 振动力场 混炼性能 数值模拟

混合是聚合物加工工艺中必不可少的阶段, 混合效果在很大程度上决定着制品的最终使用性能^[1]。根据“聚合物动态成型加工技术”新概念研制的塑料电磁动态塑化挤出机, 在挤出的全过程中引入周期性振动力场, 改善了挤出时的混合性能, 对填充体系的分散起到了较好的促进作用^[2]。其原因是振动力场能够促进聚合物材料的熔融塑化过程, 甚至在外加热的情况下, 单纯使用振动力场也能使聚合物材料达到熔融塑化状态^[3]。因此, 振动力场改变了聚合物熔体的流变行为, 使聚合物熔体的流变特性发生改变, 而聚合物熔体的流变特性又直接影响到材料加工工艺参数的确定和产品的物理力学性能^[4]。

单螺杆销钉挤出机是目前较为成熟的连续混炼装备之一^[5], 但对其研究主要侧重于试验研究。试验方法虽然可以使人们深入认识聚合物共混的过程, 但这种方法成本高, 从配型、加热、正常混炼、制备试样到清理混炼机、测试数据, 整个过程要耗费大量的人力和物力, 采用计算机模拟对设备的混合特性进行分析不失为一种有效的手段^[6]。笔者运用流体动力学分析软件 POLYFLOW 对销钉螺杆挤出机的混炼过程进行三维等温数值模拟, 对比分析叠加振动力场的振动参数对混合效果的影响, 从而为研究销钉螺杆挤出机的混炼特性及提高其混炼效果提供借鉴。

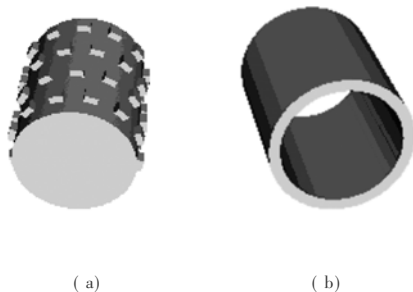
1 模型及方法

1.1 物理模型

销钉螺杆挤出机的核心部件是销钉混炼段, 因而笔者的研究对象是对该段进行无振动稳态及叠加振动力场动态模拟分析。为了简化分析, 聚合物物料在销钉混炼段的流动可近似看作等温流动, 销钉、螺杆和机筒内壁的曲率影响可以忽略, 并作如下假

设: (1) 熔体的流动为连续、等温的层流; (2) 熔体是不可压缩的, 即其密度不变; (3) 熔体沿机筒和螺杆表面无滑移; (4) 忽略重力的影响, 忽略界面的表面张力。

简化模型如图 1 所示。图 1a 为销钉螺杆模型, 在螺杆上配置有四排销钉, 每排销钉数为 12 个, 销钉轴向长度 37 mm, 销钉截面边长 3 mm, 螺杆直径 27 mm, 销钉高度 1.5 mm; 图 1b 为流道模型, 流道轴向长度 39 mm, 外径 17.65 mm, 内径 17 mm。



a—销钉螺杆; b—流道

图 1 销钉螺杆及流道几何模型

叠加振动场为正弦场, 销钉螺杆作轴向振动, 设轴向振动位移(S)为:

$$S = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中: A ——销钉螺杆轴向振动振幅, mm;

f ——销钉螺杆轴向振动频率, Hz。

对上式两边求导, 得到销钉螺杆轴向振动速度(v)为:

$$v = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

1.2 数学控制方程及方法

由物理模型及假设, 可得到描述流场的连续性

* 广东省自然科学基金项目(9151063101000021)

** 通讯作者

收稿日期: 2010-12-30

方程、运动方程和本构方程为:

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot p + \nabla \cdot \bar{\tau} = 0 \quad (4)$$

$$\bar{\tau} = 2\eta\dot{\gamma}D \quad (5)$$

式中: $\bar{v}$ ——速度向量, m/s;

p ——压力, Pa;

$\bar{\tau}$ ——应力张量, Pa;

η ——剪切黏度, Pa·s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} ;

D ——形变速率张量, s^{-1} 。

模拟采用 Cross Law 本构模型来表征混炼熔体的黏度:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^m} \quad (6)$$

式中: η_0 ——零剪切黏度, Pa·s;

λ ——松弛时间, s;

m ——Cross 定律指数, 无量纲。

模拟采用的聚合物为线性低密度聚乙烯 (PE-LLD), 其物性参数为 $\eta_0 = 8000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $m = 0.75$, $\lambda = 0.12 \text{ s}$, $\rho = 924 \text{ kg/m}^3$, 入口流量 $Q = 5848 \text{ mm}^3/\text{s}$, 销钉螺杆转速 $N = 60 \text{ r/min}$ 。

2 结果与讨论

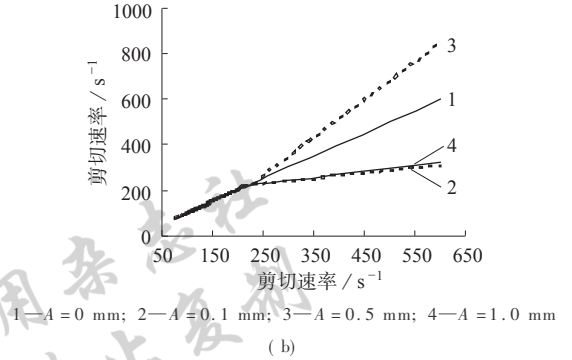
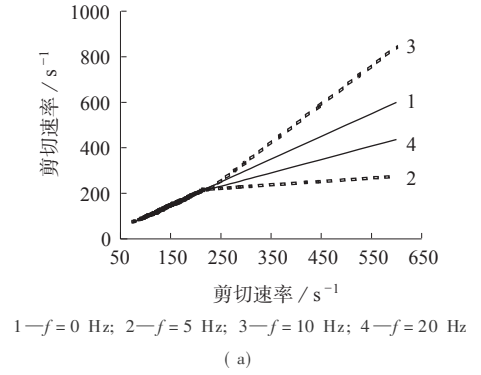
2.1 剪切速率

对比分析时无振动稳态条件取 $f = 0 \text{ Hz}$, $A = 0 \text{ mm}$; 叠加振动动态加工条件取两组参数: $A = 0.5 \text{ mm}$ 时, $f = 5, 10, 20 \text{ Hz}$; $f = 10 \text{ Hz}$ 时, $A = 0.1, 0.5, 1 \text{ mm}$ 。图 2 为稳态与不同振动参数时的剪切速率关系曲线。

由图 2a 可知, 在剪切速率小于 214 s^{-1} 时, 动态和稳态的剪切速率曲线基本重合; 当剪切速率大于 214 s^{-1} 时, $f = 10 \text{ Hz}$, $A = 0.5 \text{ mm}$ 条件下剪切速率大于稳态条件下的剪切速率, 其它两种动态条件下的剪切速率则小于稳态条件下的剪切速率。图 2b 的情况和图 2a 基本相似, 区别之处在于图 2a 中频率增大到 20 Hz 时剪切速率有明显增大, 而图 2b 中振幅增大到 1 mm 时剪切速率无明显改变。以上分析说明, 要提高剪切速率, 提高销钉螺杆混合效果, 振动参数有一定的最佳值范围。

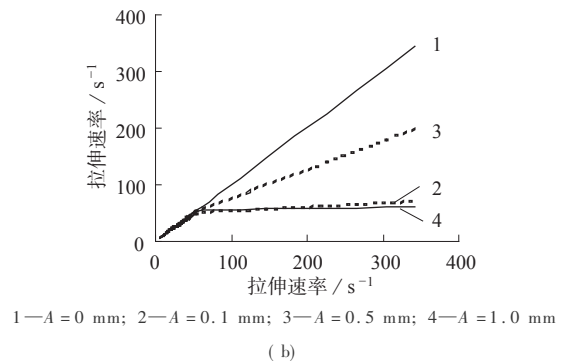
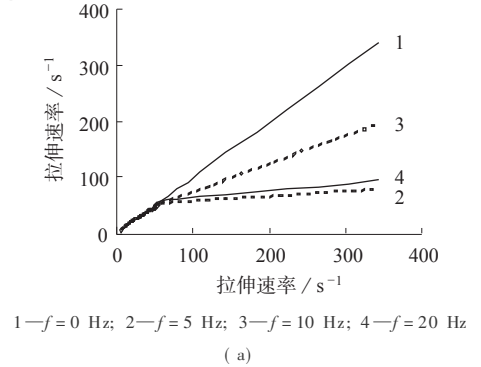
2.2 拉伸速率

相对剪切流场而言, 拉伸流场是进行分散更有效的流场, 对填充体系的适应性更好^[1]。图 3 为稳态及动态条件下拉伸速率随振动参数变化的关系曲线。从图 3 可以看到, 拉伸速率小于 48.8 s^{-1} 时动



a—稳态及振动频率变化; b—稳态及振动振幅变化

图 2 剪切速率随振动参数的变化关系



a—稳态及振动频率变化; b—稳态及振动振幅变化

图 3 拉伸速率随振动参数的变化关系

态与稳态情况下的曲线基本重合, 当拉伸速率大于 48.8 s^{-1} 时, 动态条件下的曲线均低于稳态条件, 其中 $f = 10 \text{ Hz}$, $A = 0.5 \text{ mm}$ 时拉伸速率大于其它两种

动态条件下的拉伸速率。这说明动态加工降低了销钉螺杆拉伸速率, 不利于物料的混炼和塑化。

2.3 混合指数

物料的分散混合是通过流场施加的剪切作用和拉伸作用实现的^[7], 许多学者对流场的剪切速率进行了计算, 通过对简单的剪切和拉伸流动中颗粒破碎过程的研究表明, 拉伸流动对分散混合更有效, 特别是对于具有高黏度比和低界面张力熔体的分散混合。Cheng Hongfei 等在研究这一问题时, 为了使拉伸流动和旋转流动定量化, 引入混合指数 λ_{Mz} , 即:

$$\lambda_{Mz} = \frac{|D|}{|D| + |W|} \tag{7}$$

式中: $|D|$ ——形变速率张量;

$|W|$ ——旋度张量。

λ_{Mz} 的范围为 0 ~1, 对于纯旋转运动, $\lambda_{Mz} = 0$; 对于简单剪切运动, $\lambda_{Mz} = 0.5$; 对于纯拉伸流动, $\lambda_{Mz} = 1$ 。

图 4 为混合指数随振动频率和振动振幅变化的关系曲线。从图 4a 可知, 稳态及动态混炼时混合指数曲线均呈现波动趋势, 其中 $A = 0.5\text{ mm}$ 时, $f = 5\text{ Hz}$ 和 $f = 20\text{ Hz}$ 两种情况的混合指数曲线波动较大, 忽略出入口的脉动, 其在轴向位置 21 mm 处取得最大值 0.639; $f = 10\text{ Hz}$ 时其混合指数曲线波动不大,

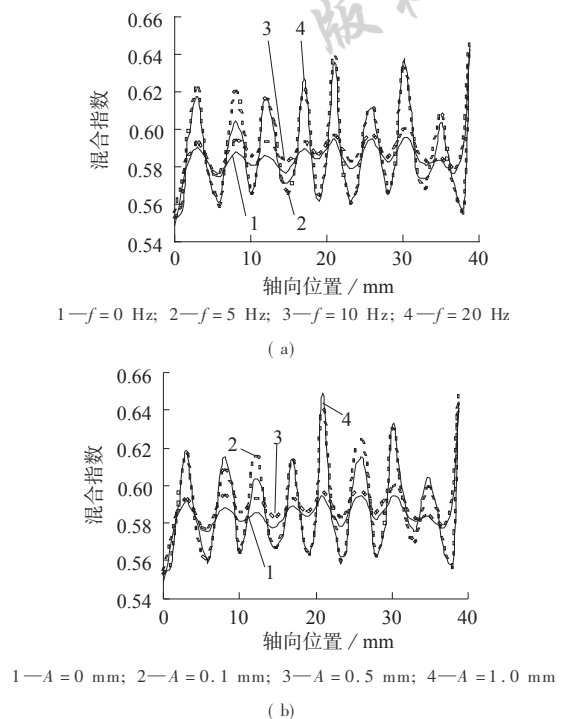
其值趋近于 0.588, 平均值是 3 种动态混炼条件中最大的。图 4b 中曲线变化的波动情况和图 4a 相似, $f = 10\text{ Hz}$ 时, $A = 0.1\text{ mm}$ 和 $A = 1.0\text{ mm}$ 时的曲线波动较大, 后者在轴向位置 21 mm 处取得最大值 0.649; $A = 0.5\text{ mm}$ 时混合指数相对于稳态条件时的混合指数曲线波动不大, 但其平均值仍是 3 种动态混炼中最大的。

总体来看, 动态条件下混合指数值均大于稳态条件下的值, 在 0.548 ~ 0.649, 即介于简单剪切流动和纯拉伸流动之间, 说明无论改变振动频率或振动振幅, 振动力场均强化了销钉螺杆内熔体流动受到的剪切作用和拉伸作用, 使熔体受到更强的分散混合作用, 从而获得比稳态加工更好的混炼效果。应当注意的是, 在应用振动来改善销钉螺杆挤出机塑化时, 不同振幅和频率对熔体流动的影响不同。

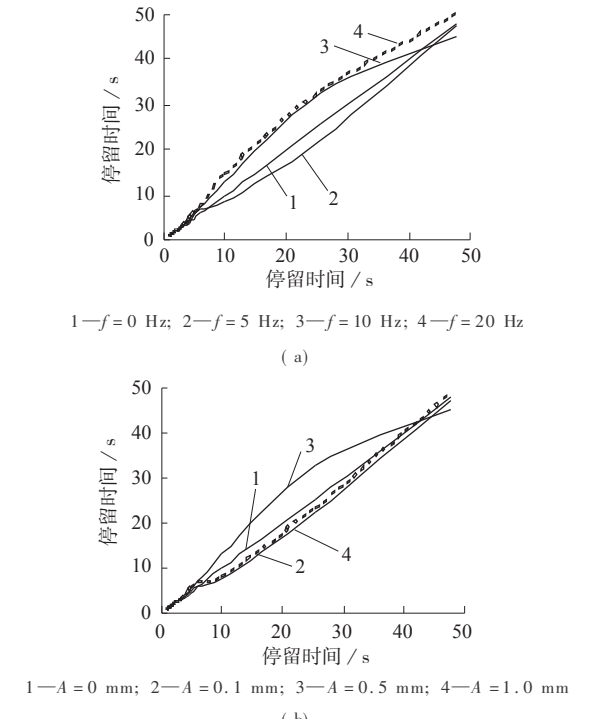
2.4 停留时间

物料在混炼设备中的停留时间越短, 流动得越快, 越不利于物料更好地混合混炼; 相反, 在温度和压力等加工参数适当的情况下, 物料在混炼设备中的停留时间越长, 越有利于获得良好的塑化效果。

不同振动频率和振幅时停留时间的对比关系如图 5 所示。



a—稳态及振动频率变化; b—稳态及振动振幅变化
图 4 混合指数随振动参数的变化关系



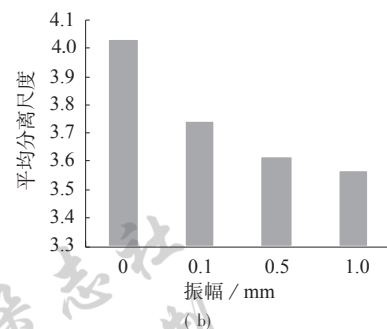
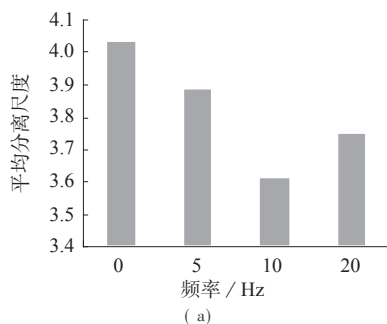
a—稳态及振动频率变化; b—稳态及振动振幅变化
图 5 停留时间随振动参数变化关系

由图 5a 可知, $A=0.5\text{ mm}$ 时, $f=5\text{ Hz}$ 的停留时间大部分均小于稳态条件下的停留时间, $f=10\text{ Hz}$ 和 $f=20\text{ Hz}$ 时停留时间大部分大于稳态条件下的停留时间。由图 5b 可知, $f=10\text{ Hz}$ 时, $A=0.1\text{ mm}$ 和 $A=1.0\text{ mm}$ 的停留时间均小于稳态条件下的停留时间, $A=0.5\text{ mm}$ 时停留时间大于稳态条件下的停留时间。这说明振动参数对于停留时间分布的影响是不一样的, 存在一个最佳振幅和振动频率的值, 使得销钉螺杆内熔体的停留时间增加, 从而有利于其混合混炼。

2.5 分离尺度

分离尺度是混合物中同组分区域平均尺寸的度量, 即少组分的粒度。对于完美的混合, 其分离尺度应当减小到最终粒子的尺度^[8]。图 6 为分离尺度随振动频率和振动振幅变化的关系曲线, 图 7 为不同振动参数下的平均分离尺度。

由图 6 可知, 无论稳态还是动态混炼加工, 分离尺度均沿轴向位置逐渐减小。由图 7 可知, 引入振动力场均减小了平均分离尺度。 $A=0.5\text{ mm}$ 时, $f=10\text{ Hz}$ 的分离尺度小于稳态混炼时的分离尺度, 为 3 种振动频率中的最小值, 其平均值为 3.62; $f=10\text{ Hz}$ 时, $A=1.0\text{ mm}$ 的分离尺度较 $A=0.5\text{ mm}$ 时更小, 其平均值为 3.57。可见, 分离尺度并不是随着振动



a—稳态及振动频率变化; b—稳态及振动振幅变化

图 7 平均分离尺度随振动参数变化

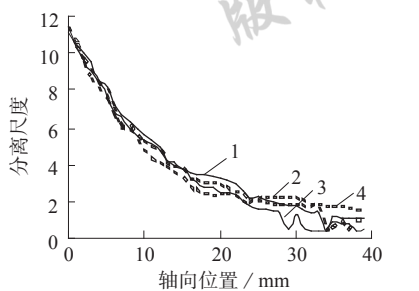
频率的增大而减小, 有一个最佳振动频率, 其随着振动振幅的增大而逐渐减小。

3 结语

动态混炼加工可以改变销钉螺杆挤出机的混炼性能, 但是存在最佳振动参数值。销钉螺杆挤出机因其不同于普通单螺杆挤出的结构特点决定了其在动态加工条件下呈现新的特点, 不同的振动频率及振动振幅对其混炼性能的影响出现了相似但有差别的结果。由于本研究仅在较低频率和振幅范围内的选定值进行数值研究, 进行更大振动参数范围内的连续性研究将是未来引入振动力场研究混炼设备混炼性能的方向。

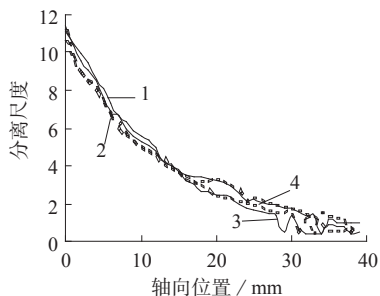
参考文献

- [1] 黄磊. 拉伸流场对聚烯烃/纳米 CaCO_3 填充体系的分散混合作用[D]. 成都: 四川大学, 2007: 1-3.
- [2] 卿艳梅, 周南桥, 彭响方. 电磁动态塑化挤出机熔体混合性能的研究[J]. 塑料工业, 2003, 31(3): 49-53.
- [3] 张绍华, 翟金平, 曾广胜, 等. 纯振动场作用下聚合物的熔融塑化过程[J]. 塑料科技, 2009, 37(5): 45-48.
- [4] 刘跃军, 江太君, 曾广胜. 振动力场下圆管内聚合物熔体速度场的数值模拟[J]. 塑料工业, 2009, 37(10): 37-40.
- [5] 毕超, 闫新华, 付志峰, 等. 连续混炼装备混合性能的对比研究[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(6): 74-79.
- [6] 柳天磊, 杜通雪. 基于 POLYFLOW 双转子连续混炼机混炼形态模拟[J]. 现代塑料加工应用, 2010, 22(5): 22-24.
- [7] 钱欣, 许王定, 金杨福. POLYFLOW 基础及其在塑料加工中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 317-319.



1— $f=0\text{ Hz}$; 2— $f=5\text{ Hz}$; 3— $f=10\text{ Hz}$; 4— $f=20\text{ Hz}$

(a)



1— $A=0\text{ mm}$; 2— $A=0.1\text{ mm}$; 3— $A=0.5\text{ mm}$; 4— $A=1.0\text{ mm}$

(b)

a—稳态及振动频率变化; b—稳态及振动振幅变化

图 6 分离尺度随振动参数变化关系

[8] 沈新元. 高分子材料加工原理[M]. 2版. 北京: 中国纺织出版社, 2009: 49-50.

EFFECT OF VIBRATION FORCE FIELD ON MIXING PROCESS OF PIN SCREW EXTRUDER

Liu Tianlei, Du Yaoxue

(Department of Electromechanical Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

ABSTRACT By using CFD software POLYFLOW, 3-D isothermal numerical simulation is performed on the mixing section of a pin screw extruder. With the introduction of vibration force field and the adoption of particle tracking analysis, comparative study is carried out on the mixing behavior of this section under different vibration parameters. The results showed that vibration force field can remarkably improve the mixing efficiency of the pin mixing section, but this is only for some vibration frequency and amplitude range. The result gives references for researching and optimizing the polymer mixing quality with best vibration parameters.

KEYWORDS pin screw extruder, vibration force field, mixing efficiency, numerical simulation

拜耳与蒂森克虏伯开发“三明治”板

德国拜耳与蒂森克虏伯钢铁欧洲公司密切合作, 成功开发出具有高效隔热性能的多功能“三明治”板。新产品可满足仓库、冷库、办公楼等建筑的保温需求。

这些板材由两块金属层和中间的硬泡芯组成, 内芯为拜耳材料科技研发生产的聚氨酯原材料, 整板由蒂森克虏伯公司以先进工艺实现规模化生产。为客户量身定制的以钢材包夹聚氨酯硬泡的面板, 适用于墙体、外立面、天花板和屋顶。除承重功能外, 该夹层构件还能满足可持续设计和人性化设计的严格需求, 如优良的隔热、隔音、防火性能和最佳空间利用。由于安装简易, 该方案的成本也较低。(化工报)

珠海将成 BP 全球最大 PTA 生产基地

BP 正在积极推动旨在大幅提高广东省珠海 BP 化工有限公司(BP 珠海)工厂的精对苯二甲酸(PTA)产能项目, 同时正计划在同一厂址新建一座世界级的 PTA 装置。这将使珠海成为 BP 全球最大的 PTA 生产基地。

珠海 BP 化工有限公司是 BP 与上市公司珠海港成立的合资企业。计划中的珠海扩建改造将使其二期工程年生产能力增加 20 万 t, 使珠海的 PTA 总产能达到每年 170 万 t。目前, BP 已完成二期工程扩建项目的工程设计, 预计扩建项目于 2012 年第一季度落成投产。

珠海三期 PTA 装置正处于工程初步设计阶段, 装置设计年产能 125 万 t。这将是首座采用 BP 最新一代 PTA 技术的装置。如果获得股东和中国相关部门的批准, 三期装置预计最早将于 2014 年投产, 以满足中国 PTA 不断增长的需求。这将使珠海成为 BP 全球最大的 PTA 生产基地。

BP 表示, 此次采用新技术将极大改善环保效益, 特别是能够大大降低温室气体和其它废弃物排放。与市场上其它 PTA 技术相比, 新技术能大大提高装置的规模 and 成本效益, 从而大幅降低投资成本和单位生产成本。(工塑网)

帝人植物纤维适用于多聚酯产品

日本帝人纤维有限公司宣布将在 2012 年 4 月开始正式生产和销售新的以植物为基础的聚对苯二甲酸乙二酯(PET)纤维, 这是世界上第一个商业化生产的来源于生物的聚酯纤维。

这一新产品被命名生态圈植物纤维, 这种新产品将成为帝人纤维公司的核心, 它的应用范围从服装、汽车座位和内部装饰到个人卫生产品。帝人纤维预计在第一个财政年度销售 3 万 t 生态圈植物纤维, 到第三年销售数量达到 7 万 t。

生态圈植物纤维的构成 30% 来源于生物燃料, 例如甘蔗生物质。传统的 PET 通常是由聚合乙二醇(EG), 对苯二甲酸二甲酯(DMT)或对苯二甲酸(PTA)生产的, 其中 EG 大约占 30%。生态圈植物纤维中的 EG 来源于生物, 而不是石油, 因此, 它有助于保护化石资源, 降低温室气体的排放。同时, 生态圈植物纤维具有与油源聚酯相同的特征和质量, 适用于许多聚酯产品。

生态圈植物纤维还可以利用帝人纤维公司的生态圈闭环聚酯回收系统进行回收利用。(复材在线)

道恩超高耐磨 PA66 材料通过鉴定

道恩超高耐磨 PA66 材料研发及应用、高流动性热塑性硫化橡胶制备技术两项科技成果顺利通过省级鉴定。专家认为, 这两个项目技术先进, 工艺合理可行, 质保体系健全, 生产过程符合环保要求, 具有广阔的市场前景。

其中, 超高耐磨 PA66 材料研发及应用项目选用纳米氧化硅作耐磨助剂, 采用特殊表面改性剂对其表面进行处理, 研制出超高耐磨 PA66, 产品通过经兵器工业非金属材料理化检测中心的检测。实际应用表明, 该产品耐磨性高, 力学性能好, 质量稳定, 可替代进口产品应用于汽车制造等行业。

(橡胶化工网)

3A 推出 PET 泡沫芯材新产品

作为结构聚酯泡沫芯材的代表生产商, 3A 复合材料公司宣布推出一种新型 AIREX® T92.200 泡沫芯材。

为满足高负荷的应用要求, AIREX® T92.200 具有非常高的强度和刚度以及优良的耐疲劳性, 在热压成型时具有耐高温和耐化学性。针对芯材的容易使用和高性能的特点, 3A 复合材料公司对结构力学性能的要求非常高, 如汽车应用中的地板、船舶中使用的横梁和舱壁、风机叶片中使用的高负荷型材。

AIREX® T92.200 的密度范围和性能水平完美地满足了各项应用的具体要求。(中金在线)