

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.01.017

Banbury 和 Roller 转子密炼机局部和全局混合特性^{*}

王春雷¹, 王天书^{1,2}, 朱向哲¹, 何延东¹

(1. 辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁抚顺 113001; 2. 湖南石化工业职业技术学院, 湖南岳阳 414012)

摘要: 采用有限元法, 利用 Polyflow 软件计算了 Banbury 和 Roller 两种转子密炼机检测线的速度、剪切速率和混合指数分布, 对比分析了两种转子的局部混合特性。通过计算停留时间分布、对数拉伸率、平均混合效率和粒子束分布指数等混合参数, 对比分析了两种转子密炼机的全局混合特性。在此基础上, 研究了具有典型运动规律流体粒子的动力学特性, 分析了密炼机流体的位移和速度突变产生的受力和混合突变特征, 为深入理解密炼机流体的复杂混合机理提供了一定的理论参考。

关键词: 密炼机; Roller 转子; Banbury 转子; 混合效率; 数值模拟

中图分类号: TQ320.5+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)01-0075-06

Study on Local and Global Mixing Characteristics of Internal Mixers with Banbury and Roller Rotors

Wang Chunlei¹, Wang Tianshu^{1,2}, Zhu Xiangzhe¹, He Yandong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;

2. Hunan Petrochemical Vocational Technology College, Yueyang 414012, China)

Abstract: Based on finite element method, the velocity, shear rate and mixing index in the detection lines of mixers with Banbury and Roller rotors were calculated with Polyflow software. The local mixing characteristics of two kinds of mixers were compared. By calculating residence time distribution, logarithmic stretch index, average efficiency, cluster distribution index and other mixing parameters in the two kinds of rotor mixers, the global mixing characteristics were compared and analyzed. On this basis, the dynamic characteristics of the fluid particles with typical motions were studied, and the mechanism of the stress and the mixed mutation caused by the displacement and the velocity of the fluid were analyzed, in order to provide a theoretical reference for further understanding the complex mixing mechanism of the fluid in the mixers.

Keywords: internal mixer; Roller rotor; Banbury rotor; mixing efficiency; numerical simulation

密炼机是聚合物加工业的重要设备, 广泛应用于聚合物的塑炼和混炼等聚合物加工中。密炼机内聚合物流体经历着变形、破裂、混合、合并等一系列行为, 其流动和混合机理非常复杂。密炼机内的压力、温度、流场强度和混合效率等众多因素决定所加工产品的质量^[1-6]。转子系统是密炼机的核心部件, 是引发密炼机流体混合的主要动力来源; 转子的几何构型和加工运行条件是控制混合强度的主要因素。因此, 以密炼机转子系统为核心, 研究聚物流体的混合机制, 是调控混炼设备参数和加工参数、实现混炼过程精密控制的重要理论基础。

Banbury 和 Roller 转子是异步转子密炼机常用的转子系统, 两种转子密炼机的流动和混合机理既有相同之处, 也有一定的差别。笔者采用有限元法, 利用 Polyflow 软件, 计算了两种模型检测线的速度、剪切速率和混合指数, 对比分析了两种转子的局部

混合特性。通过计算两种转子停留时间分布、对数拉伸率、平均混合效率和粒子束分布指数等混合参数, 对比分析了两种转子的全局混合特性。在此基础上, 研究了具有典型运动规律流体粒子的动力学特性, 分析了密炼机流体的位移和速度突变产生的受力和混合突变机理, 为深入理解密炼机流体的复杂混合机理提供了一定的理论参考。

1 物理模型

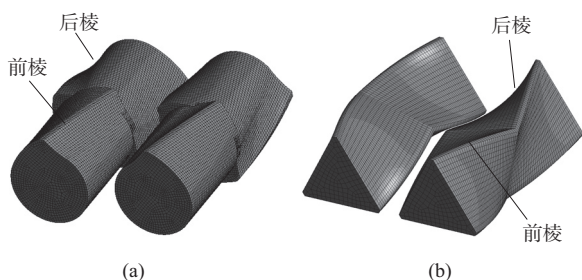
图1为 Banbury 和 Roller 转子三维有限元模型, 两种转子密炼机的几何参数如表1所示。利用前处理软件 Gambit 对密炼机机筒与转子进行建模, 为了有效反应流场内的瞬时变化, 利用网格叠加技术 (MST) 划分网格。三维模型中的尖角部分均作了平

^{*} 国家自然科学基金项目 (51303075, 51473073)

联系人: 朱向哲, 教授, 主要研究方向为计算流体力学和固体力学

收稿日期: 2015-10-22

滑处理,以提高计算的收敛性^[7]。



a—Banbury 转子; b—Roller 转子

图1 两种转子有限元模型

表1 两种转子密炼机几何参数

几何参数	Banbury 转子	Roller 转子
转子棱的宽度/mm	2	2
棱与机筒壁间隙/mm	1	1
转子根径/mm	30	20
转子最大回转直径/mm	38	38
前棱螺旋角/(°)	30	60
后棱螺旋角/(°)	45	60
前棱长度/mm	35	37.5
后棱长度/mm	45	37.5
棱长/mm	80	75
转子中心距/mm	41	41
机筒长度/mm	75	75
机筒内径/mm	40	40

网格划分对流场模拟结果有着显著的影响,对于三维密炼室流场若网格划分太细,虽然可以保证计算精度,但会消耗大量运算时间,为了合理有效地进行网格划分,笔者进行了网格无关性验证,即对流动道10层密度网格和7层密度网格的计算速度进行对比后发现,两种不同密度的网格对检测线上的速度大小影响很小,因此,采用7层密度网格划分流动道可以保证计算精度,流动有限元模型如图2所示。流场采用八节点的六面体和四节点的四面体划分,左右两转子异向旋转,转速比为4/3(其中左转子转速为10 r/min,右转子转速为7.5 r/min)。

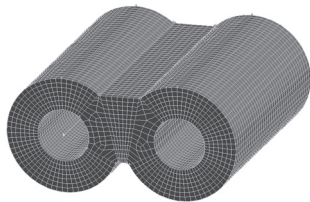


图2 流动有限元模型

2 数学模型

计算过程中的基本假设如下:流体等温流动;流体充满整个流动;雷诺系数较小,流动方式为层流流动;忽略惯性力、重力等体积力;流体为不可压缩流体,机筒内壁和螺杆表面无滑移。基于网格重

叠技术(MST)的三螺杆挤出机流体的控制方程如下^[8]:

连续方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f} = \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \cdot \mathbf{v} \right) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为速度矢量; ρ 为流体密度; $\mathbf{f}$ 为单位质量的体积力; $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量。

应力张量 $\boldsymbol{\sigma}$ 可表示为:

$$\boldsymbol{\sigma} = -P\mathbf{I} + \mathbf{T} \quad (3)$$

式中: P 为压力; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{T}$ 为偏应力张量,可定义为:

$$\mathbf{T} = 2\eta\boldsymbol{\gamma} \quad (4)$$

式中: η 为局部剪切黏度; $\mathbf{D}$ 为应变速率张量, $\boldsymbol{\gamma}$ 为剪切速率, $\boldsymbol{\gamma} = \sqrt{2\text{tr}(\mathbf{D}^2)}$ 。

Carreau-Yasuda 黏度模型为^[2]:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda\boldsymbol{\gamma})^a]^{(n-1)/a} \quad (5)$$

式中: η_0 为零剪切粘度; η_{∞} 为极限剪切粘度; n 为幂率指数; a 为Carreau常数; λ 为松弛时间, $\lambda = \sqrt{2\prod \mathbf{D}}$, $\prod \mathbf{D}$ 为形变速度张量第二不变张量。其中,聚物流体的物性参数为: $\eta_0=1500 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\eta_{\infty}=0$, $\lambda=5.5 \text{ s}$; $n=0.34$; $a=2$ 。

3 计算结果与分析

3.1 局部混合特性

为了研究两种转子密炼机的局部混合特性,选取三条检测线,如图3所示。三条线检测线的轴截面形状相同,轴向位置不同。分别计算两种模型检测线的速度、剪切速率和混合指数,每个数值记录转子转过 10° 时的计算结果。

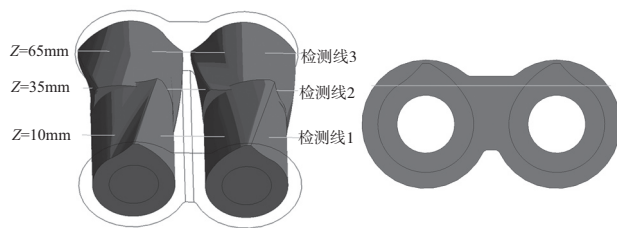
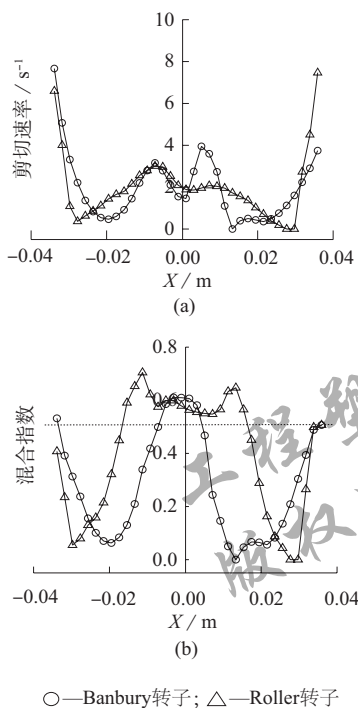


图3 三条检测线位置示意图

图4为两种转子密炼机在第1条检测线上的剪切速率和混合指数对比。从图4a可以看到,在靠近机筒内壁和转子棱锋之间的区域,两种转子密炼机流体均出现了最大的剪切速率。这是因为当流体经过该狭小区域时,受到转子强烈挤压作用,产生较大

剪切速率。同理在靠近混合区,两种转子密炼机流体也出现了较大的剪切速率。相应在上述两个区域,两种转子密炼机流体也呈现出较大的混合指数,如图 4b 所示。然而,在靠近混合区流体的混合指数最大,其原因是混合区流体受到了一定的拉伸作用,改变了流体的剪切流动状态。而在靠近机筒和转子棱锋之间的区域,密炼机流体以剪切流动为主,混合指数相对较小。比较发现, Roller 转子密炼机流体的混合指数峰值较大,说明 Roller 转子密炼机具有较好的局部分布混合能力。



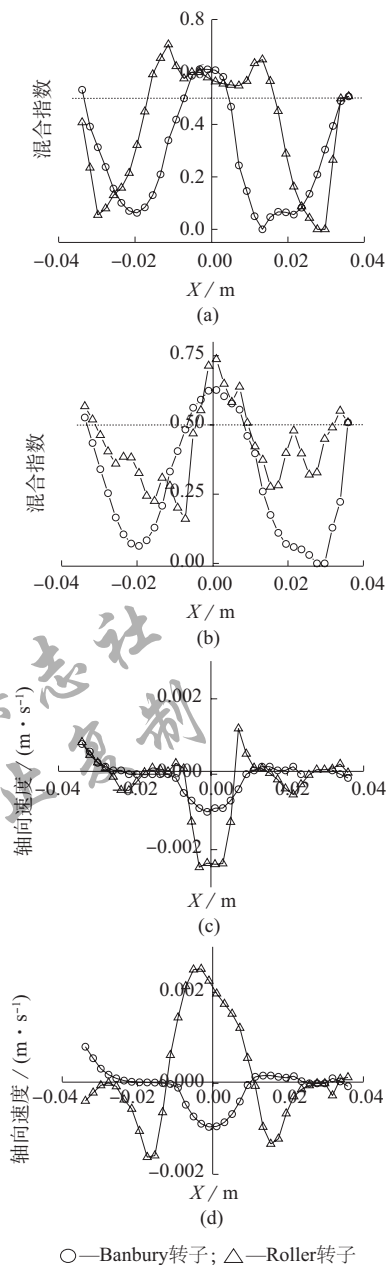
a—剪切速率; b—混合指数

图4 第1条检测线数据

图 5 为两种转子密炼机在第 2 条和第 3 条检测线上的混合指数和轴向速度对比。从图 5a 可以看出,在第 2 条检测线上,靠近混合区的两种转子密炼机流体出现了较大的混合指数。而在第 3 条检测线上(见图 5b),在混合区的中心位置,两种转子密炼机流体呈现出较大的混合指数,且以拉伸流动为主。此外, Roller 转子密炼机流体的混合指数峰值较大,表现出较好的局部分布混合能力。Roller 转子密炼机还表现出较高的轴向流动速度和轴向回流速度。

3.2 全局混合特性

通过计算两种转子的平均对数拉伸率、平均时间混合效率、粒子束分布指数和停留时间分布等混合参数,对比分析了两种转子的全局混合特性。图



a—第2条检测线混合指数; b—第3条检测线混合指数;
c—第2条检测线轴向速度; d—第3条检测线轴向速度

图5 第2条和第3条检测线数据

6 为两种转子密炼机对数拉伸率对比。从图中可以看到, Roller 转子密炼机的平均对数拉伸率大于 Banbury 转子,说明 Roller 转子密炼机具有较高的拉伸混合效率,这和局部混合规律一致。

根据聚合物混合理论,平均混合效率值越大,密炼机的混合效果就越好。图 7 为 Banbury 和 Roller 转子密炼机在不同时刻平均混合效率曲线图。从图中可以看出在混合初期平均混合效率值几乎呈直线增加,随着时间的增加,混合效率曲线趋

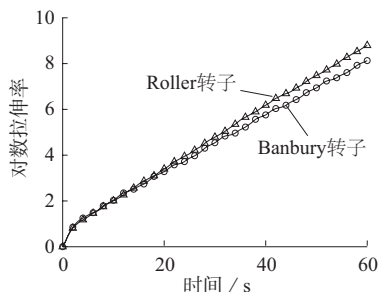


图6 对数拉伸率对比

于平缓且大于0,表明密炼机已开始进行有效混合。在15~60 s阶段, Roller 转子密炼机的混合效率已经明显大于 Banbury 转子密炼机,由此表明 Roller 转子密炼机混合更加高效。

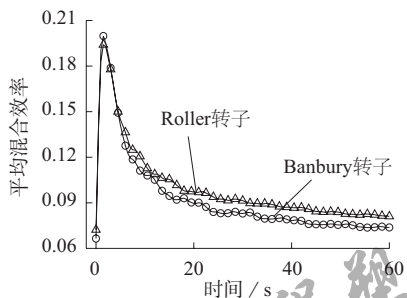


图7 不同时刻平均混合效率对比

粒子束分布指数是衡量密炼机分布混合效果的重要参数,当粒子束分布指数较小时,说明流场内混合效果较好。图8为在流道中心入口位置释放3000个虚拟粒子,不同时刻两种密炼机内粒子束分布指数。从图中可以看出,在混合初期的0~15 s内,两种密炼机内的粒子束分布指数相对较大,但总体上呈明显下降的趋势,随着混合的持续进行,粒子束分布指数呈逐渐减小到稳定趋势,说明密炼机混合已比较充分,且 Roller 转子密炼机的粒子束分布指数明显小于 Banbury 转子密炼机,说明 Roller 转子密炼机的分布混合能力强于 Banbury 转子密炼机。此外,值得注意的是,两种密炼机在混合过程中均出现了粒子束分布指数的波动情况,且 Roller 转子密炼机的波动情况更加显著,这是因为 Roller 转子具有相对较多的棱锋,对流体的扰动作用更加频繁,使流体粒子分布波动更加频繁。

停留时间也是评价密炼机混合能力的重要指标。图9为不同转子密炼机停留时间分布曲线图。从图中可以看到, Roller 转子密炼机物料流出出口端的开始时间(t_0)大于 Banbury 转子,这是因为 Roller 转子具有较大的轴向回流速度,聚合物流体

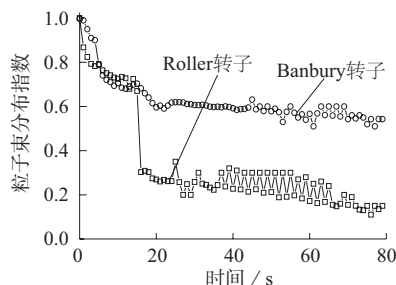


图8 粒子束分布指数对比

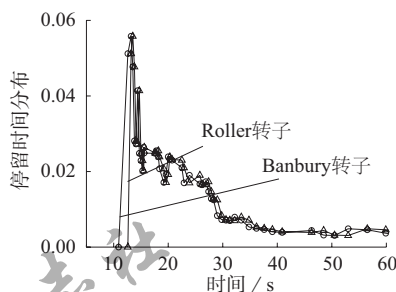
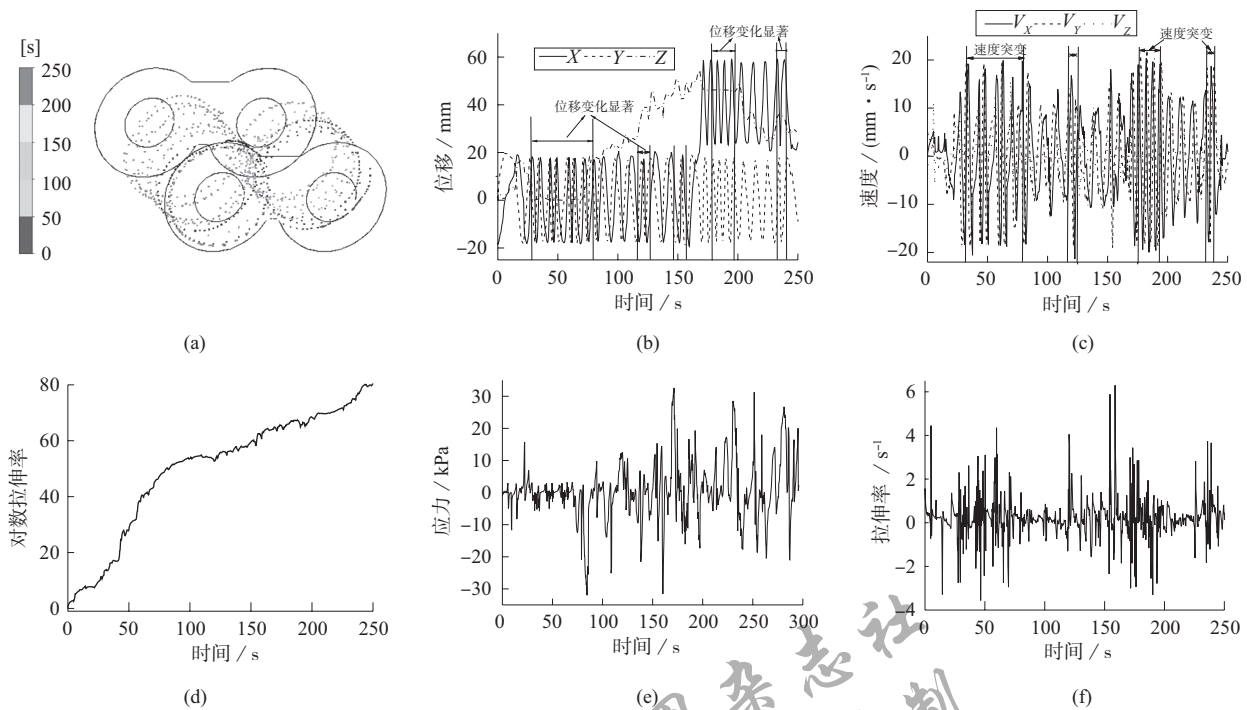


图9 停留时间分布对比

流出密炼机出口的时间相对滞后。因为 t_0 值大时,前期刚进入的物料在密炼机内会有足够的时间进行混合。Roller 转子停留时间略大于 Banbury 转子,主要是由于 Roller 转子密炼机的卷轴结构不利于物料轴向的流动,使物料有充足的时间停留在流道内,有利于物料的充分混合。

3.3 局部流动的动力学特性

通过对单个流体粒子(流体质点)在密炼机中的运动轨迹分析,有助于了解密炼机混合器内物料的运动及混合规律,深入理解密炼机流体的位移和速度突变产生的受力和混合突变机理。图10为典型的流体粒子绕 Roller 转子运动特性曲线。该流体粒子在流道内共流动了250 s,如图10a所示。在170 s时,该流体粒子从左转子流道流入右转子流道。其中,该流体粒子在28~72 s,117~125 s,172~195 s和233~239 s范围内产生较快的位移变化频率,如图10b所示。同时,由于位移变化频率的突变,在相应的时间段内产生了相对较大的速度变化,如图10c所示。在0~250 s内,对数拉伸率随时间增加逐渐增大,且呈指数形式增长,表现出良好的混合性能,见图10d。此外,由于位移和速度频率变化突变,在28~72 s,117~125 s,172~195 s和233~239 s范围内,该流体粒子均产生了相对较大的应力响应和拉伸率响应幅值,强化了流体的分布混合,如图10e和图10f所示。流体粒子的位移大小



a—粒子轨迹; b—位移响应曲线; c—速度响应曲线; d—对数拉伸率; e—应力响应曲线; f—拉伸率响应曲线

图10 典型绕两转子运动粒子特性曲线

和变化频率的突变,均导致了流体粒子受力状态突变进而产生流体粒子剪切、拉伸等受力状态的突变,以及分散混合、分布混合状态改变。

4 结论

(1) 局部混合特性方面: 在靠近混合区, Roller 和 Banbury 两种转子密炼机内流体均出现了较大的剪切速率和混合指数。混合区流体受到了一定的拉伸作用,改变了剪切流动状态。在靠近机筒和转子棱锋之间的区域,密炼机流体以剪切流动为主,混合指数相对较小。Roller 转子密炼机具有较大的轴向流动速度和轴向回流速度。

(2) 全局混合特性方面: Roller 转子密炼机的对数拉伸率和平均时间混合效率大于 Banbury 转子密炼机,同时 Roller 转子密炼机粒子束分布指数小于 Banbury 转子密炼机,因此整体上 Roller 转子密炼机具有较高的混合效率。

(3) 在局部流动的动力学特性方面: 由于流体粒子的位移突变,产生了相应的速度突变以及拉伸速率和应力响应突变。另一方面,流体粒子的位移频率的突变,也会导致流体粒子剪切、拉伸等受力状态的突变,以及分散混合、分布混合状态改变。值得注意的是,虽然粒子运动一段时间后,停留在机筒内壁无相对运动,但仍在机筒内壁的压力作用下产生

了一定剪切、拉伸应力。

参考文献

- [1] Salahudeen S A, Elleithy R H, AlOthman O, et al. Comparative study of internal batch mixer such as cam, banbury and roller: Numerical simulation and experimental verification[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(12): 2502–2511.
- [2] Wang G, Zhu X Z, He Y D, et al. Effects of screw clearance and blend ratio on the flow and mixing characteristics of tri-screw extruders in the cross section with CFD[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2013, 7(1): 74–89.
- [3] Connelly R K, Kokini J L. Examination of the mixing ability of single and twin screw mixers using 2D finite element method simulation with particle tracking[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3): 956–969.
- [4] 郝永辉, 陈立, 何延东, 等. 螺杆构型对三螺杆挤出机混合效率的影响[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2015, 35(3): 47–50.
Hao Yonghui, Chen Li, He Yandong, et al. Numerical simulation of tri-screw extruder with different rotors[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2015, 35(3): 47–50.
- [5] 孙大鹏, 朱向哲, 程志飞, 等. 同步转子密炼机混合效率数值模拟研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(10): 33–37.
Sun Dapeng, Zhu Xiangzhe, Cheng Zhifei, et al. Study on numerical simulation of mixing efficiency in synchronous internal mixers[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(10): 33–37.
- [6] 籍延磊, 王阁, 陈立, 等. 啮合块错列角对三螺杆混合段混合效率

- 的影响[J]. 石油化工高等学校学报, 2014, 27(4):87-90.
- Ji Yanlei, Wang Ge, Chen Li, et al. Effect of stagger angles of mixing sections on the mixing efficiency in intermeshing tri-screw extruders[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2014, 27(4):87-90.
- [7] 马昆, 丁玉梅, 邵剑波, 等. 楔形角对连续混炼机新型转子混合性能的影响[J]. 中国塑料, 2014, 28(4):103-107.
- Ma Kun, Ding Yumei, Shao Jianbo, et al. Influence of wedge angle on the mixing performance of new-type rotors in a continuous mixer[J]. China Plastics, 2014, 28(4):103-107.
- [8] Rathod M L, Kokini J L. Effect of mixer geometry and operating conditions on mixing efficiency of a non-Newtonian fluid in a twin screw mixer[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(3):256-265.

利用秸秆制备 3D 打印材料

传统的 3D 打印材料主要以聚苯乙烯塑料和尼龙为主, 应用在工业熔模铸造上, 有易变形且价格昂贵的缺点。日前, 由东北林业大学机械电子工程学院郭艳玲教授带领的科研团队研发出了一种利用稻壳、秸秆等农林废弃物制成的新型复合材料, 通过激光 3D 打印技术可制作出强度高、精度准的 3D 模型, 这种新型 3D 打印复合材料的生产企业已接到北京、上海等机械制造及 3D 打印企业的订单。

郭艳玲教授告诉记者, 传统的机器设备生产企业在研发试制新部件时, 都是先通过手工制作设备模型进行试验, 但这种手工制作的模型在精确度和抗磨损程度上都不高。目前, 哈飞、东安等大型工业制造企业在制作机械部件模型时, 都已尝试 3D 打印技术。但在研究激光 3D 打印过程中, 郭教授的团队发现, 目前主要应用于 3D 打印的聚苯乙烯塑料及尼龙, 在用于工业的熔模铸造领域时, 不是易变形就是造价昂贵。经过几年的研发试验, 团队研究出利用木粉、竹粉、玉米棒粉及稻壳秸秆粉与塑料按比例混合的一种新型 3D 打印复合材料。这种复合材料利用的主要是农林废弃物, 造价低, 经过调整添加比例, 还可调节材料最终达到的强度, 在激光烧结过程中性能稳定、易成型, 成型件尺寸精度高, 其力学强度可与木材、聚合物、陶瓷等材料相媲美。

目前, 除了这种利用农林废弃物制成的木塑复合材料, 郭艳玲团队还研制出了石塑、玉石塑、陶塑等多种复合 3D 打印材料, 不但可通过激光 3D 打印技术应用于工业的熔模铸造, 还可用于工艺品制作等方面。郭教授告诉记者, 他们的项目团队目前已入驻省科技厅下属的科服汇众创空间, 希望借助孵化器的力量使企业快速成长。 (哈尔滨日报)

赢创聚酰胺转向角传感器齿轮保证车辆行驶安全

赢创工业集团生产的 VESTAMID L1930 聚酰胺 12, 被总部位于德国的 Valeo Schalter und Sensoren GmbH 公司选择用于转向角传感器齿轮传动机构材料, 以保证车辆能够平稳安全地行驶在漆黑、蜿蜒或湿滑的路面上。

转向角传感器测量方向盘转度, 并持续地将驾驶员行进方向传递给动态稳定性控制系统——即电子稳定控制系统或 ESC。ESC 将驾驶员的预期行进方向与车辆实际的方向进行比较, 利用对各个车轮的定向制动对方向做出必要调整。这样做有诸多好处, 比如可以防止车辆在弯道上加速,

以确保驾驶员对车辆的控制。

传感器安装在转向柱上, 转向柱驱动包含一个大齿轮的转子, 而转子带动两个齿数不同的小齿轮 (游标卡尺原理)。嵌在齿轮里的磁铁能够利用霍尔或磁阻角度传感器检测出齿轮的旋转方位。角度传感器提供的电子信号进而能够帮助计算出车辆的绝对转向角。用于齿轮传动装置的材料必须满足严格的要求, 以确保转向角传感器的高准确性和耐用性, 并维持必要的角度准确性。

VESTAMID L1930 产品恰恰具备这些特性: 作为一种聚酰胺 12, 它可在较大的温度范围内 (-40 ~ 125 °C) 保持稳定, 其物性随着环境湿度不同仅有细微变化; 模制件几乎不发生尺寸改变。该材料即使在冰点以下也具有非常高的抗冲击性和切口 (缺口) 冲击强度, 并且具有良好的耐油脂、燃油、液压油及盐溶液性, 堪称汽车应用的理想选择。它出色的耐磨性和低滑动摩擦系数对于转向角传感器的齿轮来说非常重要, 同时它还能够减噪减震。 (雅氏橡塑网)

欧洲公司获得关于纳米金刚石聚合物的美国专利

欧洲公司 Carbodeon 获得一项美国专利, 该专利是关于金刚石颗粒和聚合物结合的技术, 用于个人电子产品、LED 灯、汽车和机械工具等。

钻石是自然界最坚硬的材料, 同时也是最好的导热材料之一, 因此当纳米金刚石和热塑性聚合物混合的时候, 这种混合材料可以使得塑料以很高的速率导热, 同时其耐磨性也非常好。纳米金刚石混合物可以导热, 从而对于很多产品都非常有利, 包括 LED 照明、移动装置等如手机等。同时这种耐磨性能也意味着它们可以用于航天领域和汽车部件, 从而可以延长装置的使用寿命。

“这项专利的授予代表的是我们纳米金刚石聚合物材料的很重要的一部分。这项专利的授予会进一步加强我们在该行业的位置, 以及巩固我们在很多应用领域的客户心中的形象, 这些领域包括用于热能管理的聚合物材料, 耐磨损和耐腐蚀纳米金刚石金属材料以及耐摩擦纳米金刚石氟碳涂料等。” Carbodeon CTO Vesa Myllymaki 说。“最新的成就表明, 我们将会促进我们公司的纳米金刚石材料的市场。其应用包括电子产品、电子包装、LED 照明等, 也包括汽车领域、航天领域和移动装置领域等。” 公司业务拓展经理表示。

(新材料在线)