

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.015

叶片转子对塑料熔体挤压输送作用及其分析

王涵, 黄兴元, 潘留雯, 李华延

(南昌大学机电工程学院, 江西省轻质高强结构材料重点实验室, 南昌 330031)

摘要: 在分析废旧塑料回收现状及传统塑料回收工艺的基础上, 为完善热风循环熔融塑料回收造粒工艺, 结合叶片转子结构, 设计出新型热风熔融塑料回收造粒机。新型造粒机新增叶片转子式塑料熔体加压输送室。使用 Polyflow 对熔体在加压输送室输送过程进行了数值模拟, 得出了当叶片转子转速不同时, 熔体压力与速度变化的情况。结果表明, 叶片转子转速提高时, 能有效提高螺杆机筒入口处熔体的速度与压力。

关键词: 塑料熔体; 叶片转子; 压力; Polyflow; 数值模拟

中图分类号: TH145.4+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0075-07

The Role of Blade Rotor on Plastic Melt Extrusion Conveying and Its Analysis

Wang Han, Huang Xingyuan, Pan Liuwen, Li Huayan

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanchang University, Jiangxi Key Laboratory of Lightweight High Strength Structural Materials, Nanchang 330031, China)

Abstract: Based on the analysis of the domestic current situation of the waste plastics recycling and the basis of traditional plastic recycling technology, the hot air molten plastic recycling granulators is improved and combined with the blade rotor structure. The molten plastic pressurized transport room was designed. The new granulator was increased the molten plastic pressurized transport room with the type of rotor blade. The numerical simulation was carried out by Polyflow, which emulated the molten plastic conveying process in the pressurized conveying room. When the blade's angular velocity was changed, the differences between the molten plastic's pressure and velocity were compared and analyzed. The results show that the molten plastic's velocity and pressure at the screw barrel inlet can be effectively increased when the blade's angular velocity is increased.

Keywords: molten plastic; rotor blade; pressure; Polyflow; numerical simulation

塑料自 20 世纪问世以来, 由于其具有成本低、质量轻、强度高、耐腐蚀、加工方便等特点, 塑料制品被广泛应用于家电、汽车、建筑、包装等各个方面^[1]。但是, 塑料制品在为生产和生活提供便利的同时, 塑料难以自然降解的特点, 也带来了不可忽视的环境污染。目前, 废旧塑料的处理办法主要有以下 3 种方式^[2]: 填埋、焚烧和再生利用。填埋法是目前大量采用的处理方法, 但该方法不仅占用大量土地资源, 塑料中的添加剂如增塑剂等意外溶出至土壤中, 还会严重地污染地下水^[3]。焚烧法直接焚烧废旧塑料回收热能, 成本低, 效率高。但废旧塑料在焚烧过

程中会产生二噁英、呋喃等有害物质^[4], 不经处理排放, 将造成严重的大气污染。与焚烧法相似的, 还有热裂解法^[5], 在无氧或缺氧条件下, 将已清除杂质的废旧塑料通过热裂解或催化剂热裂解等方式, 转化为低分子化合物或低聚物, 具体产物为可燃气体、焦油和煤炭。但该方法工艺复杂, 设备要求高, 难以普遍推广使用。再生利用法主要包括两类, 一类是简单再生, 主要是通过将废旧塑料经过分离、清洗、破碎、熔融、造粒后, 直接用于成型加工^[6-7]。其造粒工艺过程复杂, 清洗和粉碎过程产生的污水和粉尘会引发二次污染。另一类是改性再生, 是指将废旧塑料

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51863014)

通信作者: 黄兴元, 教授, 主要从事聚合物成型理论与装备研究 E-mail: huangxingyuan001@126.com

收稿日期: 2021-02-14

引用格式: 王涵, 黄兴元, 潘留雯, 等. 叶片转子对塑料熔体挤压输送作用及其分析 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 75-81.

Wang Han, Huang Xingyuan, Pan Liuwen, et al. The role of blade rotor on plastic melt extrusion conveying and its analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 75-81.

通过化学接枝^[8]或者机械共混^[9-10]的方式进行改性后再成型加工,也可改性后生产新型材料^[11-12]。但此技术工艺复杂,需要专用的机械设备,成本较高。

本研究团队经研究后提出热风循环加热废旧塑料回收造粒工艺。该工艺是对废旧塑料进行热风循环加热,使废旧塑料达到其熔点温度而成熔融状,再将熔融状塑料通过螺杆挤出造粒。该工艺利用循环热风融化废旧塑料,热风循环运行,热量循环利用,节约电能。工作过程中热风始终循环于封闭机箱内,无废气等排出,无空气污染。同时该工艺流程较为简单,无需特地对废旧塑料进行破碎操作,不产生粉尘污染,具有很好的研发前景与应用前景。

周献华^[13]、熊秋亮^[14]、乐建晶^[15]等,遵循热风循环熔融塑料回收造粒工艺,设计制造出了不同的热风熔融塑料回收造粒机,并通过实验发现问题,对样机结构不断进行改进。目前已生产出功能较为完善的样机,其原理图如图1所示。现有样机目前虽然能实现废旧塑料熔融回收造粒功能,但在实验中发现,在熔融塑料流入挤出螺杆机筒的过程中,会出现熔融塑料积聚在挤出螺杆机筒入口处导致流动困难的情况,致使机器的生产效率低,生产物料量远小于投入物料量。若能解决此问题,将有利于完善热风循环熔融塑料回收造粒工艺,提升热风熔融塑料回收造粒机的工作效率。

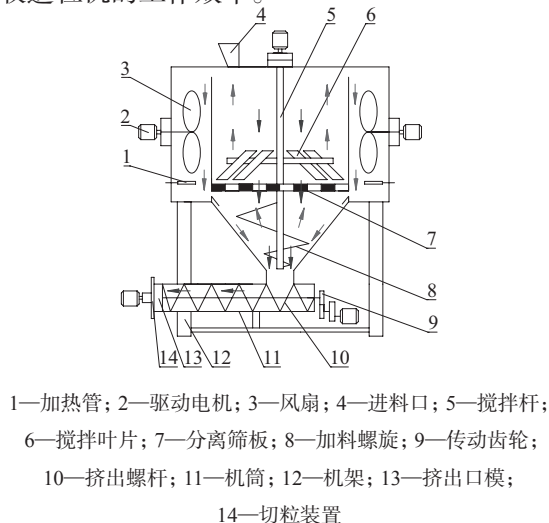


图1 热风熔融塑料回收造粒机原理图

笔者基于提高机器工作效率的主要目的,遵循塑料物性的特点,改进熔融塑料在流入螺杆机筒时较为困难的问题,在现有的机器中,新增设计了熔体聚拢加压输送室。

改进后的热风熔融塑料回收造粒机结构原理图如图2所示,其主要结构组成是:加热熔融室、熔体聚拢加压输送室及螺杆挤出机构。工作时,将废旧塑料投入至加料口当中,废旧塑料进入熔融室,在热风的作用下受热熔融。此室中具有旋转圆盘和叶片转子,叶片转子在圆盘中心槽内相对移动,同时也随圆盘作转动。叶片转子的循环转动,可以将分离筛板上的塑料熔体刮下聚拢并压入挤出螺杆的进料口,随后,塑料熔体在螺杆的作用下挤出至口模进行造粒。

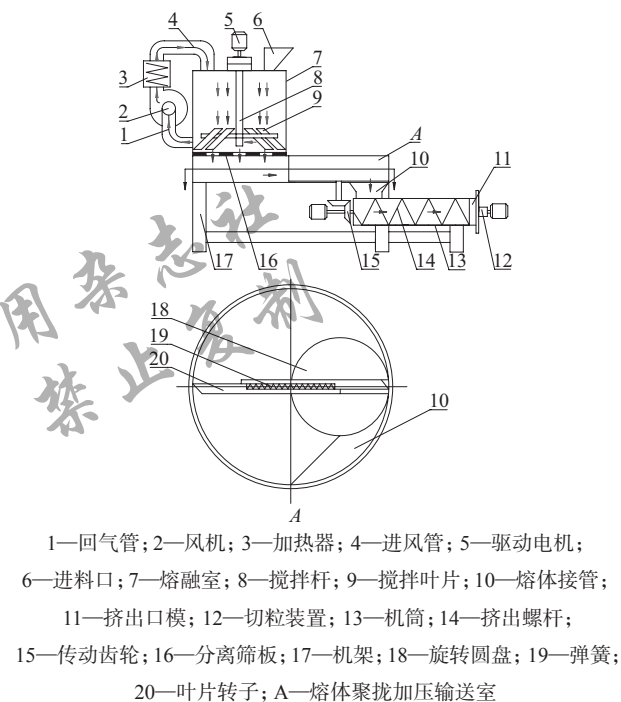


图2 新型热风熔融塑料回收造粒机原理图

由图2可见,熔体聚拢加压输送室的组成主要包括外圆盘、旋转圆盘、叶片转子、弹簧。两片叶片转子相对布置在旋转圆盘之中,工作时,在旋转圆盘槽内相对滑动同时随旋转圆盘做圆周运动。在安装时,两叶片转子内装有一根弹簧,用于存储及释放叶片转子运动时产生的弹力。从图2位置,叶片转子转动时,受外圆盘内壁面的约束,两片叶片转子顶端相对距离减小,弹簧受压,存储弹力。当运动至两片叶片转子顶端相对距离增大时,弹力释放,两片叶片转子始终紧贴外圆盘内壁面运动,避免塑料熔体漏流的产生。

工作时,塑料熔体从分离筛板缓慢落入输送室,被叶片转子直接刮下。叶片转子运动时,加压输送室内容腔体积逐渐减小,在叶片转子推动及容腔体积缩小的作用下,被刮下的塑料熔体不断被推

动、聚拢,塑化程度得到了提升。最后,充分塑化的熔体经出口处被挤压至挤出螺杆入口。

在熔体聚拢加压输送过程中,叶片转子的挤压作用决定了塑料熔体在此室中的压力及速度,而该压力和速度会影响熔体输送的效率,故针对叶片转子的挤压作用研究是本次研究的关键。针对叶片转子在不同转速下工作,模拟塑料熔体受到的压力及流动速度,并对结果进行分析,能够有效指导后续制作样机时,电机扭矩、叶片转子的选材与转速等参数的选定。因此,对熔融输送加压室中熔体的模拟分析,有利于后续选材和样机制作。

1 熔体输送加压室中熔体的模拟分析

1.1 熔体输送加压室模型尺寸

熔体聚拢加压输送室,其二维模型与尺寸参数如图3所示,各个参数见表1。

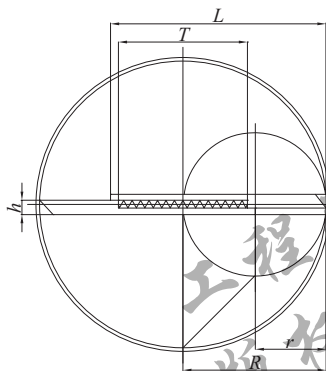


图3 熔体输送加压室模型

表1 熔体输送加压室模型尺寸参数

R	r	L	T	h	H
200	100	300	180	20	30

1.2 数学模型的选用

(1) 基本假设。

为了使数值分析模型简化,需要对流体进行如下基本假设:

①流体充满熔体聚拢输送加压室内,且不可压缩。

②流场的温度分布情况稳定,为等温流场。

③雷诺数较小,流动为层流,且壁面无滑移。

④忽略惯性力及重力的影响。

⑤流体为纯黏性非牛顿流体。

(2) 本构方程。

选用的流体模型为 Bird-Carreau law 纯黏性模型^[16]。

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\xi})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (1)$$

式中: η ——表观黏度;

η_0 ——零剪切黏度;

η_{∞} ——无穷剪切黏度;

λ ——松弛时间;

$\dot{\xi}$ ——剪切速率;

n ——非牛顿指数。

1.3 工艺参数及物性参数

采用的塑料材料为高密度聚乙烯(PE-HD),牌号 5000S,密度为 954 kg/m^3 ,中国石油天然气股份有限公司兰州石化分公司生产。在 200°C ,熔融状态时测得的所用流体模型中的聚合物物性参数为: $\eta_0=9125 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\lambda=1.24 \text{ s}$; $n=0.515$ 。

1.4 熔体网格及熔体-叶片组合模型

熔体及叶片网格的划分,在 Gambit 中进行。针对需要精细划分的熔体网格,对部分区域进行了分块处理,最后生成了如图4所示符合要求的结构化六面体网格。而对于叶片,作为运动部件,网格质量要求不高,直接采取生成六面体网格的方式。随后在 Polyflow 中,按照实际运动情况,调整叶片初始位置后,将网格与叶片组合好,如图5所示。

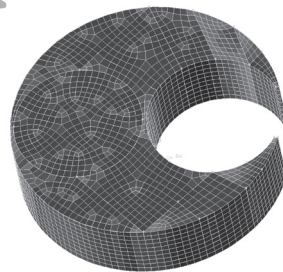


图4 熔体网格的划分

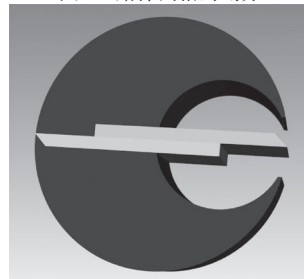


图5 熔体-叶片组合模型

1.5 边界条件的设置

以 f_n, f_s 分别表示边界面上的法向力及切向力, v_n, v_s 分别表示边界面上的法向速度及切向速度,根据图6设置边界条件如下:

(1) 入口边界(面1): 塑料熔体入口处,图中箭头为塑料熔体进入方向,设置 $f_n=0, f_s=0$;

(2) 流体出口(面2): 塑料熔体出口处,图中箭头为塑料熔体被挤压运出口方向,设置 $f_n=0, f_s=0$;

(3) 旋转圆盘外表面(面3): 图中箭头为旋转圆盘外表面旋转方向,其旋转角速度 ω 的大小根据需求设置;

(4) 外圆盘内壁面(面4): 塑料熔体接触的壁面,在壁面处无滑移,设置为 $v_n=0, v_s=0$ 。

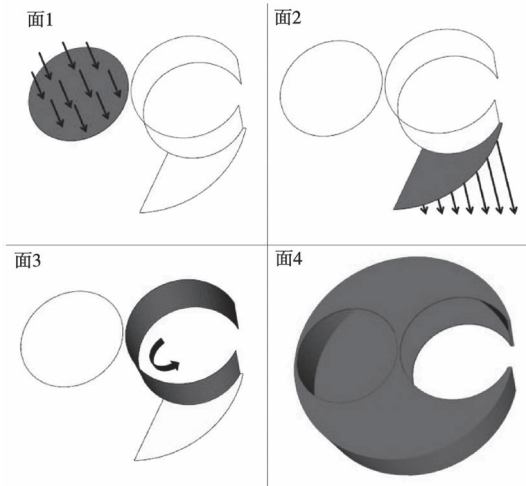
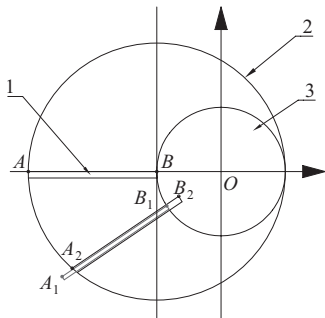


图6 熔体-叶片组合模型流体区域边界条件

1.6 叶片转子转速的设置

在叶片转子的运动过程中,由于受到内部弹簧及外圆盘内壁面的共同约束,致使叶片一直紧贴外圆盘内壁面运动。同时,叶片的转动由旋转圆盘带动,叶片同时沿旋转圆盘内槽的方向作相对移动。叶片运动分解示意图如图7所示,选取外圆盘中心点 B 处的点为参考点,以旋转圆盘与外圆盘之间的叶片长段 AB 为研究对象。



1—叶片转子;2—外圆盘;3—旋转圆盘

图7 叶片运动分解示意图

叶片初始时刻,处于 AB 处,当运动 t 时刻后,叶片伸出段由 AB 处运动至 A_2B_2 处。由此可见,进行运动分解后,叶片运动的产生,是 AB 段绕点 O 进行了一个旋转运动至 A_1B_1 处,因为外圆盘内壁面的约束作用,在参考点 B 处进行了一个平移运动,达到最终位置 A_2B_2 处。故叶片在运动过程中的角速度,从始至终,实质上便是对参考点 B 点设置的旋转角

速度。至此,可以确定旋转角速度的设置:叶片旋转角速度的运动参考点为 B 点,其角速度数值为恒定的值,根据具体需求具体设置。旋转角速度已知,接下来求解叶片在运动过程中的平移速度。

平移速度的求解方法,如图8所示,对叶片转子模型进行适当简化,使用线段 MN 来表示 t 时刻叶片所在位置。点 P 为叶片运动中的参考点。通过求解参考点 P 点的极坐标,随后通过对极坐标求导,进而得出平移速度。

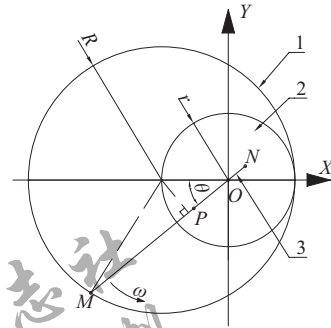


图8 叶片参考点平移速度求解示意图

设置叶片转子旋转角速度为 ω ,初始时刻叶片位于 x 轴, t 时刻后,叶片由 x 轴处运动至 MN 处,且运动过的相位角 $\theta=\omega t$,设置参考点 P 的极径为 $\rho_1(\theta)$ (即线段 OP 的长度), P 点坐标为 $[x_1(\theta), y_1(\theta)]$,设置点 P 在 x 方向和 y 方向的平移速度分别为 $v_{x1}(t), v_{y1}(t)$ 。建立如图8所示两条虚线辅助线,根据计算可得:

$$\rho_1(\theta) = r \cos \theta + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \theta} - R \quad (2)$$

$$x_1(\theta) = -\rho_1(\theta) \cos \theta = -[r \cos \theta + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \theta} - R] \cos \theta \quad (3)$$

$$y_1(\theta) = -\rho_1(\theta) \sin \theta = [r \cos \theta + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \theta} - R] \sin \theta \quad (4)$$

$$v_{x1}(t) = \frac{dx_1(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \left[\frac{r^2 \sin(\omega t) \cos(\omega t)}{\sqrt{R^2 - r^2 \sin^2(\omega t)}} + r \sin(\omega t) \right] \omega \cos(\omega t) + [r \cos(\omega t) + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2(\omega t)} - R] \omega \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$v_{y1}(t) = \frac{dy_1(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \left[\frac{r^2 \sin(\omega t) \cos(\omega t)}{\sqrt{R^2 - r^2 \sin^2(\omega t)}} + r \sin(\omega t) \right] \omega \sin(\omega t) - [r \cos(\omega t) + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2(\omega t)} - R] \omega \cos(\omega t) \quad (6)$$

由于叶片呈两个叶片相对布置,根据以上原理,同理可得另一叶片的参考点极径 $\rho_2(\theta)$,坐标 $[x_2(\theta), y_2(\theta)]$, X 方向和 Y 方向的平移速度 $v_{x2}(t), v_{y2}(t)$ 。

式中: R ——外圆盘内壁面半径;

- r ——旋转圆盘半径;
 θ —— t 时刻叶片所在相位角;
 ω ——旋转圆盘角速度。

在后续模拟中,旋转圆盘角速度根据需求设置。在求得两个叶片的平移速度后,将其编辑成 UDF 函数,导入至 Polyflow 进行模拟计算。

2 模拟结果分析

2.1 模拟结果测试点的设置

图 9 为测试点示意图。将熔体模型划分为第一输送室与第二输送室。第一输送室位于坐标系三、四象限,第二输送室位于坐标系一、二象限。塑料熔体的输送加压过程主要发生在第一输送室内,后续分析中,主要分析第一输送室内的塑料熔体的压力及速度情况。在第一输送室周向进行取点,根据叶片转子初始位置及转过的弧度,分别选取点:0 处, $\pi/4$ 处, $\pi/2$ 处, $3\pi/4$ 处, π 处(五处黑色点),模拟结果测试点设置在熔体出口面中心处。

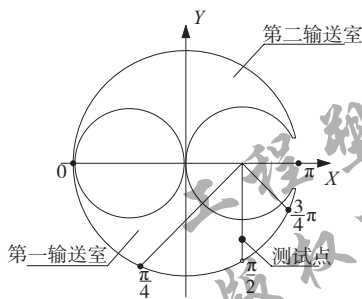


图 9 测试点示意图

2.2 叶片转子转速对熔体压力脉动幅值的影响

图 10 为转速为 7.5 r/min 时的熔体压力图。

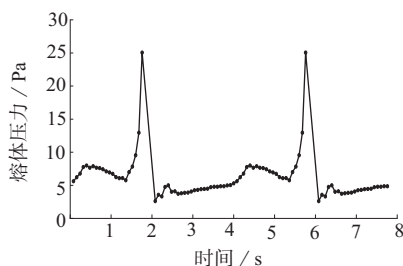


图 10 转速 7.5 r/min 时的熔体压力图

当叶片转子转速为 7.5 r/min 时,叶片转子旋转一圈需要 8 s,以 8 s 为研究时间总长。设置叶片转子转速为 7.5 r/min,得出模拟结果。可以看出,熔体压力脉动的频率为叶片转子角速度频率的 2 倍。这是由熔体聚拢加压输送室的结构特点而决定的。由结构可知,叶片转子、旋转圆盘、外圆盘及上下挡板组成的几何空间,将塑料熔体分成了两个空间。当旋转圆盘带动叶片旋转时,2 个空间的容积

将产生周期性变化:旋转圆盘每转动 1 圈,将完成 2 次的排料动作,故熔体压力脉动的频率为旋转圆盘角速度频率的 2 倍。

不同转速时熔体压力对比图如图 11 所示,选取第一输送室进行研究,以叶片转子旋转弧度为横坐标,得到当叶片转子转速分别为 7.5,15,22.5,30 r/min 时观测点处熔体压力的变化曲线。

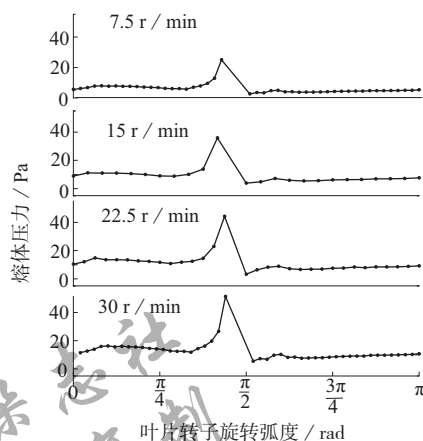


图 11 不同转速时熔体压力对比图

不同转速时熔体压力平均脉动幅值对比图如图 12 所示。当旋转圆盘的转速增加时,熔体压力的平均脉动幅值也随之提高。这是因为当转速增加时,在单位时间内,熔融室内空间体积改变的速率便会随之增加。当朝着空间体积加快减小的方向进行时,会使塑料熔体内部受到更大的挤压应力,从而造成熔体平均脉动幅值增加。

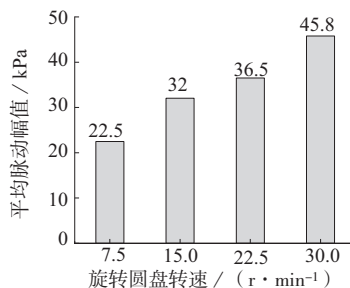


图 12 不同转速时熔体压力平均脉动幅值对比图

2.3 观测点位置对熔体压力的影响

点 1、点 2、点 3 压力测试点示意图如图 13 所示。这是根据距离熔体出口面的不同距离,设置不同测试点:点 1、点 2、点 3,且点 1、点 2、点 3 距离出口处距离逐渐增加。

设置叶片转子转速为 7.5 r/min,以叶片转子旋转弧度为横坐标,得到点 1、点 2、点 3 位置处熔体压力随时间变化的曲线对比图如图 14 所示。从图中可以看出,距离出口处越近,熔体压力越小,脉动的

幅值也越小。这主要是因为越靠近出口处,距离出口处熔体压力释放越近,同时在叶片旋转挤压的过程中,塑化效果也相对得到了提升,熔体的流动性增加。

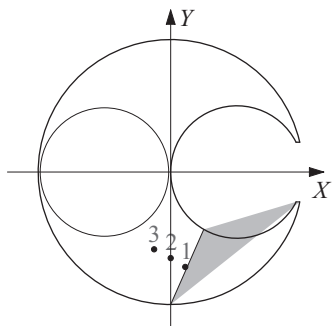


图13 点1、点2、点3压力测试点示意图

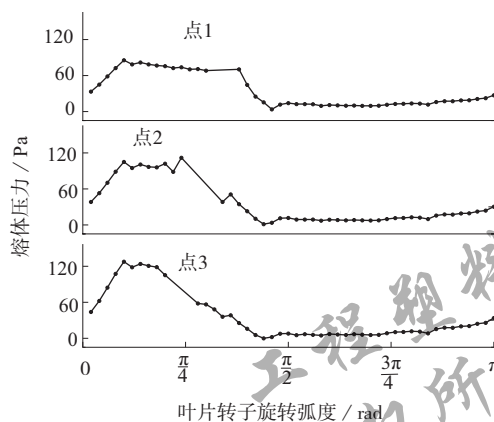


图14 设定转速7.5 r/min时不同测试点处熔体压力对比图

2.4 转子轴转速对熔体出口处速率的影响

选取第一输送室进行研究,以叶片转子旋转弧度为横坐标,得到当叶片转子转速分别为7.5,15,22.5,30 r/min时观测点处熔体速率的变化曲线如图15所示。

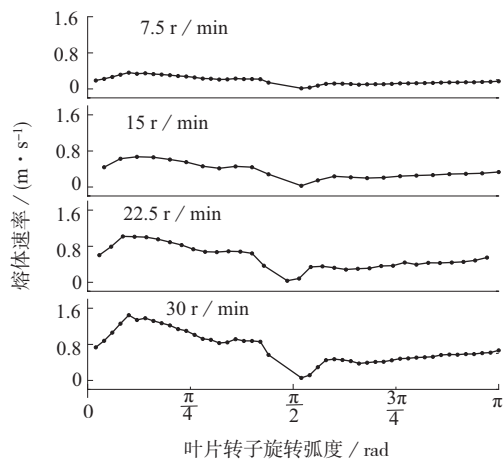


图15 不同转速时熔体速率对比图

由图15可见,当旋转圆盘的转速提高时,熔体出口处的熔体速率也随之提高。熔体速度频率的提

高与熔体压力频率的提高有异曲同工之处。熔体速率增加是因为当转速增加时,在单位时间内,熔融室内空间体积加快减小的速率便随之增加,熔体在空间体积加快减小时,在出口处自然也会获得更快的速率,易于将熔体传输至螺杆入口处。同时,旋转圆盘转速的提高,与熔体出口处的熔体速率提升的程度基本相同,在提升转速时,能实现较好的提速出料情况。

3 结论

针对熔体聚拢加压输送室中塑料熔体输送过程的模拟,模拟的结果表明:

(1) 由于熔体聚拢加压输送室的特殊结构,导致熔体输送过程中熔体压力脉动的频率为旋转圆盘角速度频率的2倍,并且当叶片转子的角速度增加时,压力脉动幅值提高。

(2) 当叶片转子的转速提高时,熔体出口处的熔体压力及速度提高,叶片转子转速的提升加快了塑料熔体输送至挤出螺杆这一过程。

(3) 塑料熔体受叶片转子的挤压作用,在熔体出口处具有一定的压力,该压力是解决熔融塑料在流入螺杆机筒时较为困难的关键所在,相较于以往依赖熔体在挤出螺杆入口处自由落下的结构,该熔体聚拢加压输送室能加压输送塑料熔体至挤出螺杆处进行挤出造粒。

以上模拟的结果,能够有效指导后续制作样机时,电机扭矩、叶片转子的选材与转速等参数的选定,有利于后续样机成品的实现及实验。

参考文献

- [1] 李晓,崔燕,刘强,等.我国废塑料回收行业现状浅析[J].中国资源综合利用,2018,36(12):99-102.
Li Xiao, Cui Yan, Liu Qiang, et al. Analysis on situation of waste plastics recycling industry in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(12):99-102.
- [2] 高涛,章煜君,潘立.我国废旧塑料回收领域的现状与发展综述[J].机电工程,2009,26(6):5-8.
Gao Tao, Zhang Yujun, Pan Li. Review of present status and development on recycling in field of waste plastics in China[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2009, 26(6):5-8.
- [3] 朱俊.废旧塑料的循环利用[J].化学工业,2013,31(Z1):28-31.
Zhu Jun. The recycling of waste plastic[J]. Chemical Industry, 2013, 31(Z1):28-31.
- [4] 汪海,杨松伟,陈庆华.简析废旧塑料回收现状[J].中国资源综合利用,2009,27(7):11-13.
Wang Hai, Yang Songwei, Chen Qinghua. Analysis the status of wasted plastics recycling[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2009, 27(7):11-13.

- Utilization, 2009, 27(7):11-13.
- [5] 吴自强, 张季. 废旧塑料的处理工艺 [J]. 再生资源研究, 2003(2):10-13.
- Wu Ziqiang, Zhang Ji. Thermal cracking technique for waste plastics[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2003(2):10-13.
- [6] 黄海滨, 刘锋, 李丽娟. 塑料回收利用与再生塑料在建材中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2009, 37(7):56-59.
- Huang Haibin, Liu Feng, Li Lijuan. Reutilization of plastic and application of recycled plastic in construction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(7):56-59.
- [7] 杨融. 废弃 PET 瓶的循环使用研究及其在聚氨酯中的应用 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Yang Rong. Study on the recycling of packaging waste PET Bottles and its application in polyurethane[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [8] 钟鑫, 薛平, 丁筠. 改性木粉/PVC 复合材料的性能研究 [J]. 中国塑料, 2004(3):64-68.
- Zhong Xin, Xue Ping, Ding Jun. Properties of modified wood-fiber/PVC composite[J]. China Plastics, 2004(3):64-68.
- [9] Marzouk O Y, Dheilly R M, Queneudec M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites[J]. Waste Managment, 2007, 27(2):310-318.
- [10] 陈庆, 曾军堂. 一种复合再生塑料及其制备方法 :CN, 102690460A[P]. 2012-09-26.
- Chen Qing, Zeng Juntang. A kind of composite recycled plastic and its preparation method:CN, 102690460A[P]. 2012-09-26.
- [11] 宋学君, 孙挺, 武士威, 等. 利用废弃聚苯乙烯泡沫塑料生产涂料的研究 [J]. 中国塑料, 2005(4):92-94.
- Song Xuejun, Sun Ting, Wu Shiwei, et al. Study on Production of Coatings from Polystyrene Foam Waste[J]. China Plastics, 2005(4):92-94.
- [12] 莫志深. 再生塑料粉煤灰复合材料井盖 [J]. 再生资源与循环经济, 2008(1):24-26.
- Mo Zhishen. Composite materials manhole cover of regenerated plastics and flyash[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2008(1):24-26.
- [13] 周献华. 热风熔融塑料回收造粒机及其控制系统研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- Zhou Xianhua. Study on hot air heating molten plastic recycling extruder and control system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [14] 熊秋亮. 卧式热风熔融废旧塑料挤出造粒机研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- Xiong Qiuliang. Study on horizontal hot melt extrusion granulator of recycling waste plastics[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [15] 乐建晶. 新型热风熔融废旧塑料挤出造粒机研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- Le Jianjing. Study on new type of hot melt extrusion granulator of recycling waste plastics[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- [16] 汤邦. 叶片挤出机中熔体压力及挤出特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- Tang Bang. Research on melt pressure and extrusion characteristics in vane extruder[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

(上接第 62 页)

- [11] Gao P, Cheung M K, Leung T Y. Effects of compaction pressure on cohesive strength and chain mobility of low-temperature compacted nascent UHMWPE[J]. Polymer (Guilford), 1996, 37(15):3 265-3 272.
- [12] 李志良, 穆成哲. 超高分子量聚乙烯 (UHMW-PE) 的压制、挤出及注射成型 [J]. 塑料科技, 1984(2):51-56.
- Li Zhiliang, Mu Chengzhe. UHMW-PE pressing, extrusion and injection molding[J]. Plastics Science and Technology, 1984(2):51-56.
- [13] Gamboni O C, Riul C, Billardon R, et al. On the formation of defects induced by air trapping during cold pressing of PTFE powder[J]. Polymer, 2016, 82:75-86.
- [14] 陈旭, 回素彩. 聚四氟乙烯烧结成型的制备工艺 [J]. 塑料工业, 2005(10):38-40.
- Chen Xu, Hui Sucai. Molding and sintering process of PTFE bulk sample[J]. China Plastics Industry, 2005(10):38-40.
- [15] 吴成义, 张丽英. 粉体成形力学原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003:28-34.
- Wu Chengyi, Zhang Liying. Mechanical principle of powder molding[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003:28-34.
- [16] 黄培云. 粉末冶金原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997:183-187.
- Huang Peiyun. Powder metallurgy principle[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997:183-187.