

# 纤维增强热塑性塑料中纤维含量的精确调控

王小黎 汤 炜 王帮武 王立峰

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 研究了双螺杆挤出机生产纤维增强热塑性塑料时,纤维股数、双螺杆转速、塑料喂料量与纤维含量的关系,通过调节此三个参数,纤维含量可精确控制在 $\pm 0.1\text{wt}\%$ 的范围内。当主机螺杆转速和塑料喂料量,或纤维股数和塑料喂料量同时增加,挤出造粒产量将提高相同倍数,而纤维含量保持不变。本方法高效可行、精确可控,容易为操作者所掌握,特别适用于指导生产实践。

**关键词** 热塑性塑料,纤维含量,产量,调控

## Precise Control of Fiber Content in Fiber Reinforced Thermoplastic

Wang Xiaoli Tang Wei Wang Bangwu Wang Lifeng

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The relationship among the number of skein, twin screw extruder rotating speed, adding amount of plastic and fiber content was studied in the process of production of fiber reinforced thermoplastic by twin screw extruder. Fiber content could controlled precisely in the range of  $\pm 0.1\text{wt}\%$  by adjusting the three parameters forward. When the twin screw extruder rotating speed and adding amount of plastic, or the number of skein and adding amount of plastic were increased simultaneously, the output of extrusion was improved at the same multiple and the fiber content maintained invariably. These method were efficient, feasible, accurate and controllable, and could be comprehended easily by operator to direct practice.

**Key words** Thermoplastic, Fiber content, Output, Control

### 0 引言

通过向热塑性塑料中添加增强纤维或对塑料进行改性等方法制备纤维增强热塑性塑料(FRTP)是新材料发展的一条行之有效的捷径,也是实现通用塑料工程化、工程塑料功能化、特种工程塑料实用化的最佳技术路线<sup>[1-2]</sup>。大部分热塑性塑料都可作为FRTP的树脂基体,常用的增强纤维主要有玻璃纤维、碳纤维等<sup>[3-5]</sup>。树脂基体赋予FRTP优良的加工性、热性能和耐化学腐蚀性,增强纤维则主要决定FRTP的机械性能,纤维含量变化会引起材料强度、密度、耐热性能等发生改变<sup>[6-7]</sup>。纤维含量波动会影响材料性能的均一性和稳定性,大规模批生产中,纤维含量的精确控制非常重要。

采用双螺杆挤出机生产FRTP时,纤维含量调控主要是依据调整设备的各项参数以及多次测试来实现的<sup>[8]</sup>。为获得所需纤维含量和最大产量,生产初

始阶段要经过多次、反复的调整各项参数和试验测试才能满足要求,调试周期长、生产效率低、产品成本高。本文通过试验探索和理论研究,以连续玻璃纤维和尼龙610为原料,采用双螺杆挤出工艺得到了玻纤增强尼龙610中玻纤含量快速、精确调控的方法,该方法降低废品率,提高设备的利用率,使产品产量最大化,同时可以迅速调整因原材料更换批次所引起的纤维含量波动,为指导双螺杆挤出连续纤维增强热塑性塑料现场生产提供快捷有效的支持。

### 1 实验

#### 1.1 原料

尼龙610:相对黏度2.3~3.0,苏州汉普高分子材料有限公司;玻璃纤维无捻粗纱:1200 tex,中材科技股份有限公司;抗氧剂:市售。

#### 1.2 设备

同向双螺杆挤出机:SHJ-40H型,螺杆直径38

收稿日期:2012-11-05

作者简介:王小黎,1984年出生,硕士,主要从事工程塑料及其成型工艺研究。E-mail:shuihewuren@163.com

mm,长径比 40,兰州兰泰塑料机械公司;失重式计量(喂料)秤:KC-LW-T28,无锡开创卡尔麦设备有限公司;全纤维智能箱式电炉:武汉亚华电炉有限公司。

### 1.3 工艺流程

通过双螺杆挤出机采用纤维生产 FRTP 的挤出造粒工艺流程如图 1 所示。

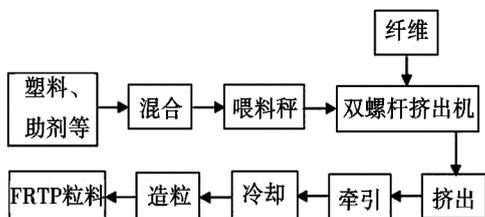


图 1 FRTP 挤出造粒工艺流程图

Fig. 1 Processing flow chart of FRTP squeezing granulation

### 1.4 纤维含量控制原理

FRTP 材料中,纤维含量 = 纤维质量 / (纤维质量 + 塑料质量),而采用双螺杆挤出造粒工艺制备 FRTP 时,纤维含量依靠单位时间内纤维和塑料的喂料量进行调控,表示为:

$$W = \frac{A}{A+B} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $W$  为纤维含量, $A$  为纤维喂料量, $B$  为塑料喂料量。

对于短切纤维,通常采用侧向喂料装置准确称量  $A$  来精确控制  $W$ ;而对于连续纤维,纤维加入方式通过双螺杆转动将连续纤维卷入料筒, $A$  不能直接得出,可表示为:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

式中, $A_i$  为第  $i$  股连续纤维的喂料量, $n$  为连续纤维股数。

当所用连续纤维的线密度  $\rho$  相同时,式(2)变为

$$A = n \cdot A' \quad (3)$$

式中, $A'$  为单股连续纤维喂料量。

### 1.5 性能测试

玻纤含量  $W$  按照 GB/T2577—2005 进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单股连续纤维喂料量的测定

当双螺杆转速固定时,单股纤维喂料量  $A'$  可直接测定,其表示一定时间内单股连续纤维被双螺杆卷入料筒内的质量:

$$A' = \frac{m_1 - m_2}{t} \quad (4)$$

式中, $m_1$  为加入螺杆前整卷连续纤维的质量, $m_2$  为加入螺杆后一定时间内整卷连续纤维的剩余质量; $t$  为连续纤维进入螺杆的时间。

在不同双螺杆转速下,测定单股纤维喂料量  $A'$

与双螺杆转速的关系,如图 2 所示。

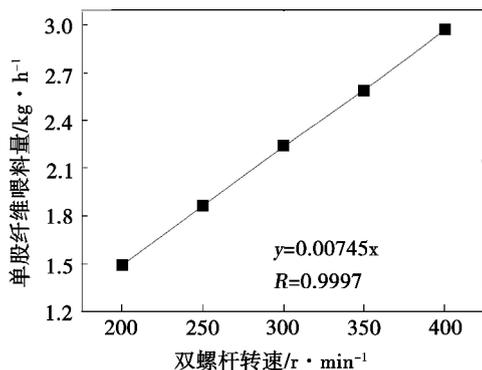


图 2 单股纤维喂料量与双螺杆转速的关系

Fig. 2 Relationship between adding amount of skein fiber and twin screw extruder rotating speed

由图 2 可见,单股纤维喂料量与双螺杆转速几乎成线性关系,通过线性拟合,其相关系数高达 0.9997,可以认为两者成正比,表示为:

$$A' = \kappa \cdot V \quad (5)$$

式中, $V$  为双螺杆转速, $\kappa$  为比例系数。

式(5)中, $\kappa$  表示单股连续纤维在单位双螺杆转速下的喂料量与连续纤维的线密度  $\rho$ 、双螺杆直径密切相关。对于同一双螺杆挤出机、同一螺杆组合、同一批次纤维原料, $\kappa$  为一个常数, $A'$  只与  $V$  相关。

### 2.2 塑料喂料量的测定

本文中,塑料喂料量  $B$  可在失重式计量(喂料)秤的控制面板上直接精确设置,无需测定。

而对于  $B$  不能直接设置的喂料秤,根据喂料螺杆转速与塑料喂料量成正比关系<sup>[9]</sup>, $B$  可表示为:

$$B = \lambda \cdot V' \quad (6)$$

式中, $V'$  为喂料螺杆转速, $\lambda$  为比例系数。

式(6)中, $\lambda$  表示单位喂料螺杆转速下的喂料量,与塑料的堆积密度、喂料螺杆的形式及直径密切相关。对于同一喂料秤、同一喂料螺杆、同一批次塑料原料而言, $\lambda$  为一个常数, $B$  只与  $V'$  相关。

### 2.3 纤维含量的影响因素

将式(3)和(6)带入式(1)中,整理后可得

$$W = \frac{1}{1 + \frac{B}{\kappa \cdot n \cdot V}} \quad (7)$$

由式(7)可知, $W$  与  $n$ 、 $V$ 、 $B$ 、 $\kappa$  四个参数相关,使用的挤出机和原材料不变时, $\kappa$  为常数, $n$ 、 $V$ 、 $B$  均可通过人为来调控。 $W$  随  $n$ 、 $V$  的增大而增大,随  $B$  的增大则减小,而与  $\kappa$  无关。对式(7)变形,可分别得到  $n$ 、 $V$ 、 $B$  的表达式:

$$n = \frac{B}{\kappa \cdot V} \cdot \frac{W}{1 - W} \quad (8)$$

$$V = \frac{B}{\kappa \cdot n} \cdot \frac{W}{1 - W} \quad (9)$$

$$B = n \cdot \kappa \cdot V \cdot \frac{1 - W}{W} \quad (10)$$

对于同一挤出机、同一螺杆组合,已知2批连续纤维的线密度分别为 $\rho, \rho'$ ,其对应的比例系数设为 $\kappa, \kappa'$ ,若已测得 $\kappa$ ,可根据比例系数与线密度成正比关系求出 $\kappa'$ ,不必再进行测定,如(11)式所示:

$$\frac{\kappa}{\kappa'} = \frac{\rho}{\rho'} \quad (11)$$

## 2.4 纤维含量调控

采用双螺杆挤出机生产FRTP,为了方便表达纤维含量 $W$ 的调控过程,将工艺参数设置表示为 $f[n, V, B]$ 。

若首次计算的 $W' = f[n, V, B]$ 与所需 $W$ 存在误差,将工艺参数分别变为 $W = f[n', V, B]$ 、 $f[n, V', B]$ 、 $f[n, V, B']$ ,通过调整对应的 $n', V', B'$ 可实现所需 $W$ 的精确调控,计算公式分别为:

$$n' = n \cdot \frac{W}{1 - W} \cdot \frac{1 - W'}{W'} \quad (12)$$

$$V' = V \cdot \frac{W}{1 - W} \cdot \frac{1 - W'}{W'} \quad (13)$$

$$B' = B \cdot \frac{1 - W}{W} \cdot \frac{W'}{1 - W'} \quad (14)$$

## 2.5 纤维含量的波动性

图3是连续挤出造粒过程中多次采样后纤维含量的实测值。

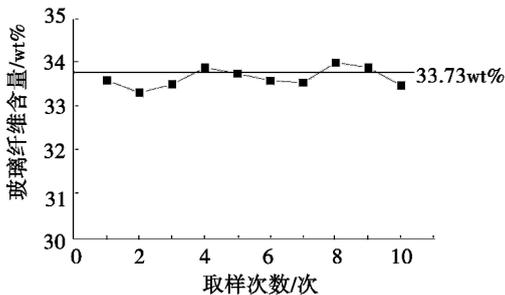


图3 纤维含量的波动性

Fig.3 Wave character of the fiber content

由图3可见,整个造粒过程中纤维含量是一直围绕均值上下波动的。纤维含量的稳定性取决于纤维喂料量和塑料喂料量,双螺杆转速恒定时纤维喂料量固定,而塑料喂料量始终围绕设定值上下波动,所以引起纤维含量在整个造粒过程中是波动的,将粒料充分混合均匀后可测得纤维含量的均值。

## 2.6 产量调控

采用连续纤维制备FRTP材料,单位时间内FRTP材料的产量 $M$ 可表示为:

$$M = A + B = \kappa \cdot n \cdot V + B \quad (15)$$

由式(15)可知,使用的设备和原材料不变时, $M$ 与 $n, V, B$ 有关, $M$ 随 $n, V, B$ 的增大而增大,而与 $\kappa$

无关。

批量生产时,纤维含量 $W$ 保持为一稳定值,为了使产量 $M$ 最大化,就要充分提高设备利用率。分析式(7)和(15),通过适当的改变 $n, V, B$ 三个值,可以有效提高产量 $M$ 。

### 2.6.1 同时调节双螺杆转速和塑料喂料量

固定纤维股数 $n$ ,同时调节双螺杆转速 $V$ 和塑料喂料量 $B$ ,使 $V$ 和 $B$ 同时乘以倍数 $x(x > 0)$ , $W$ 不变,工艺参数变为 $f[n, xV, xB]$ 。当 $x < 1$ ,说明主机电流过大,螺杆扭矩过大,为降低生产过载问题必需减小料喂和螺杆转速;当 $x > 1$ ,说明设备产能未被充分利用, $B$ 和 $V$ 同时放大 $x$ 倍后,产量 $M$ 将相应的放大 $x$ 倍,即

$$M_1 = x \cdot M = x(\kappa \cdot n \cdot V + B) \quad (16)$$

### 2.6.2 同时调节纤维股数和塑料喂料量

固定双螺杆转速 $V$ ,若主机电流仍较小,同时调节纤维股数 $n$ 和塑料喂料量 $B$ , $n$ 和 $B$ 同时乘以倍数 $y(y$ 为 $>1$ 的整数), $W$ 不变,工艺参数变为 $f[yn, V, yB]$ 。 $n$ 和 $B$ 同时放大 $y$ 倍后,产量 $M$ 也将相应的放大 $y$ 倍,即

$$M_2 = y \cdot M = y(\kappa \cdot n \cdot V + B) \quad (17)$$

## 2.7 生产应用

以尼龙610为树脂基体,线密度1200tex的连续玻璃纤维为增强纤维,采用SHJ-40H型同向双螺杆挤出造粒机生产玻璃纤维增强尼龙610材料时,玻璃纤维含量和产量的调控过程,并将理论计算结果与实测值进行分析比较。

### 2.7.1 玻璃纤维含量调控应用

已知工艺参数 $W(30\text{wt}\%) = f[n(3), V(300), B(15.708)]$ ,求玻璃纤维含量为35wt%时的工艺参数。

根据已知条件可得 $A = 6.732 \text{ kg/h}$ , $\kappa = 1.25 \times 10^{-4} \text{ kg/r}$ 。分别改变 $n, V, B$ ,可得三种工艺参数组合,经式(8)、(9)和(10)计算,分别为 $W(35\text{wt}\%) = f[n(3.8), V(300), B(15.708)]$ 、 $W(35\text{wt}\%) = f[n(3), V(300), B(12.502)]$ 、 $W(35\text{wt}\%) = f[n(3), V(377), B(15.708)]$ 。

以工艺参数 $W(35\text{wt}\%) = f[n(3), V(300), B(12.502)]$ 为例,实测玻璃纤维含量为34.2wt%,此过程为粗略计算,与35wt%目标存在误差,通过以下三种方法可对玻璃纤维含量进行更精确的调控。

#### (1) 玻璃纤维股数调控

根据式(12),调节玻璃纤维股数 $n' = 3 \times \frac{0.35}{1 - 0.35} \times$

$\frac{1 - 0.342}{0.342} = 3.11$ (股)。实际生产中连续纤维以整数

股加入,而此方法计算结果往往为小数,实际生产时不易操作。

### (2) 双螺杆转速调控

根据式(13),调节双螺杆转速  $V' = 300 \times \frac{0.35}{1-0.35} \times$

$\frac{1-0.342}{0.342} = 311$  (r/min), 工艺参数变为  $f[n(3), V(311), B(12.502)]$ , 待各参数稳定后实测玻璃纤维含量为 35.02wt%。

### (3) 尼龙喂料量调控

根据式(14),调节尼龙喂料量  $B' = 12.502 \times \frac{1-0.35}{0.35} \times \frac{0.342}{1-0.342} = 12.068$  (kg/h), 工艺参数变为  $f$

$[n(3), V(300), B(12.068)]$ , 待各参数稳定后实测玻璃纤维含量为 34.98wt%。

以上方法证实玻璃纤维含量的实测值与理论计算结果非常吻合,能在短时间将玻璃纤维含量精确控制在  $\pm 0.1\text{wt}\%$  的范围内,且可实现在开机情况下连续调节,说明该调控方法高效可行、简单易懂、精确可控,容易为操作者掌握,适用于指导实际生产。

### 2.7.2 产量调控应用

当  $n=3$  股,  $V=300$  r/min,  $B=12.068$  kg/h, 生产玻璃纤维含量为 35wt% 的玻璃纤维增强尼龙 610, 其产量  $M=A+B=6.732+12.068=18.8$  (kg/h)。若要使产量提高到 30 kg/h, 根据式(16)和(17)有以下两种方法可对产量进行调控:

(1) 固定玻璃纤维股数为 3, 同时调节双螺杆转速  $V$  和尼龙喂料量  $B$ , 使  $V$  和  $B$  同时乘以 1.6 倍, 玻璃纤维含量仍为 35wt%, 双螺杆转速变为 480 r/min, 尼龙喂料量变为 19.309 kg/h, 此时产量  $M_1 = 1.6 \times 18.8 = 30$  (kg/h);

(2) 固定双螺杆转速为 300 r/min, 若主机电流仍较小, 同时调节玻璃纤维股数  $n$  和尼龙喂料量  $B$ , 使  $n$  和  $B$  同时乘以 1.6 倍, 此时尼龙喂料量变为 19.309

kg/h, 玻璃纤维股数变为 4.8, 实际生产时此方法不适合。若玻璃纤维的线密度较小, 或要求的纤维含量公差范围较大, 则可用此法近似调控。

## 3 结论

(1) 采用双螺杆挤出机生产纤维增强热塑性塑料时, 纤维含量随塑料喂料量的增大而减小, 随纤维股数、双螺杆转速的增大而增大, 可通过调节纤维股数、双螺杆转速、塑料喂料量将纤维含量精确控制在  $\pm 0.1\text{wt}\%$  的范围内。

(2) 当主机螺杆转速和塑料喂料量, 或纤维股数和塑料喂料量同时增加, 挤出造粒产量提高相同倍数, 而纤维含量保持不变。

### 参考文献

- [1] 戚德海, 徐永军, 沈开亮, 等. 长玻璃纤维增强热塑性塑料的开发应用[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(4): 46-49
- [2] 朱月兰, 葛巧珍. 纤维增强热塑性塑料的发展及应用[J]. 化工新型材料, 1993, 21(11): 1-4
- [3] 杨淑丽. 长纤维增强热塑性塑料加工和应用的新进展[J]. 塑料加工应用, 1994(1): 12-20
- [4] 李凌, 唐龙贵, 益小苏, 等. 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料[J]. 纤维复合材料, 1994(4): 10-17
- [5] 姜润喜. 长纤维增强热塑性复合材料的开发与应用[J]. 合成技术及应用, 2007, 22(1): 24-28
- [6] 余剑英, 周祖福. 连续纤维增强热塑性复合材料的制备成型技术及其应用前景[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(4): 22-24, 31
- [7] 钱伯章. 长纤维增强热塑性塑料的发展进展[J]. 橡塑技术与装备, 2008, 34(2): 24-27
- [8] 余阿龙, 杨海洋, 肖鹏. 双螺杆挤出长玻璃纤维增强复合材料玻璃纤维含量快速调试方法[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(8): 46-49
- [9] 张向南. 玻璃纤维增强塑料中玻璃纤维含量的控制[J]. 现代塑料加工应用, 1997, 9(5): 36-39

(编辑 吴坚)