

# 响应曲面法优化啮合同向双螺杆挤出机固体输送段主机功率消耗和固体输送量的研究

伊大龙 罗 兵 袁捷朝

(北京化工大学机电工程学院,北京 100029)

**摘要** 采用响应曲面法中 Box-Behnken 方法设计试验并分析,建立了啮合同向双螺杆挤出机固体输送段功率消耗和固体输送量的多因素二次多项式数学模型。探讨了主要因素对功率和输送量的影响及其交互作用。验证了模型的有效性。模型所预测的功率和输送量与试验得到的数据误差小于 10%。利用试验得到功率和固体输送量的回归方程,可实现对啮合同向双螺杆挤出机固体输送段功率消耗和固体输送量的预测和优化,提高能效,节约能源。

**关键词** 啮合同向双螺杆挤出机 固体输送 主机功率 固体输送量 响应曲面法

工业生产的能耗是巨大的,面对日益逼近的能源危机,提高能源的利用率和节能减排成为可持续发展的又一主题。即要求在生产过程中,用最少的能耗来得到最大的产值,或是在相同的产值下有最小的能耗。在聚合物加工工业中,啮合同向双螺杆挤出机凭借其优异的混合加工性能,广泛应用于聚合物的增韧、增强、填充改性和反应挤出领域<sup>[1]</sup>。聚合物在挤出过程中需经历固体输送、熔融、混合、排气和熔体输送等过程,因此将啮合型同向双螺杆挤出机的挤出过程分为固体输送、熔融、排气、混合和熔体建压等功能区段<sup>[2]</sup>。

近年来,国内外学者对啮合同向双螺杆挤出机固体输送段的输送机理以及功率消耗做了一定的研究。C. Carror 等<sup>[3]</sup>认为啮合同向双螺杆固体输送有两种机理,即沿螺槽方向的输送以及在上啮合区沿轴向的正位移输送,并认为上啮合区的正位移输送量就是全部的正位移输送量。耿孝正等<sup>[4-7]</sup>利用可视化机筒和特殊的测试方法发现,啮合同向双螺杆有两种输送机理,即正位移输送和摩擦拖曳输送;对粒料,螺槽不是完全充满,而是存在一个临界充满度;在垂直于螺杆轴线的截面内,存在三个子输送区,而物料在三个子输送区的充满情况与加料口的形状和位置及加料量、螺纹元件的导程和螺杆转速有关。孙建梅等<sup>[8]</sup>采用试验测定螺杆扭矩、输送压力,建立了锥形双螺杆固体输送的理论模型,定性分析了锥形双螺杆挤出机固体输送段影响功率消耗的因素,认为其固体输送段功率消耗与机筒设定温度、螺杆组合、螺杆转速等因素有关。

由于双螺杆挤出机固体输送机理的复杂性,目前的固体输送模型大多存在与实际情况不符的假设。对于固体输送段功率消耗的研究也只进行了定

性的分析,没有说明功率与这些影响因素的直接关系;且很少涉及各影响因素之间可能存在着的相互影响。

响应曲面法是以回归模型作为函数估算的工具,通过对函数进行分析,研究因子与响应值之间、因子与因子之间的相互关系,并进行优化,是一种优化反应条件和加工工艺参数的有效方法<sup>[9]</sup>。响应曲面回归模型的出现就是将统计、数学和计算机科学紧密联系的结果,其具有较高的可信度,应用广泛。

综合前人对啮合同向双螺杆挤出机固体输送段机理和功率消耗的研究以及实验结果,笔者选定螺杆转速( $A$ )、当量填充率( $B$ )、螺旋升角( $C$ )、物料粒径( $D$ ) 4 个参数,研究其对粒料输送主机功率( $Y$ )和输送量( $X$ )的影响。同时,为了在定性基础上实现定量研究,使数学模型更接近实际值,笔者使用响应曲面法中的 Box-Behnken 方法设计试验并分析了各因素对啮合同向双螺杆挤出机固体输送段功率消耗和固体输送量的影响,在此基础上对影响因子进行了优化,为降低功率消耗,提高输送能力提供了理论依据。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

聚丙烯(PP):粒径为 3.8 mm,北京燕山石化公司;

聚对苯二甲酸乙二酯(PET):粒径为 3.1 mm,杜邦公司;

尼龙(PA)6:粒径为 2.4 mm,北京燕山石化公司;

1.2 仪器、设备

双螺杆挤出机: LSM30/34 型, 德国 Lestritz 公司;  
台式干燥箱: DG/200 - 002 型, 重庆试验设备厂;  
天平; 上海东方衡器厂。

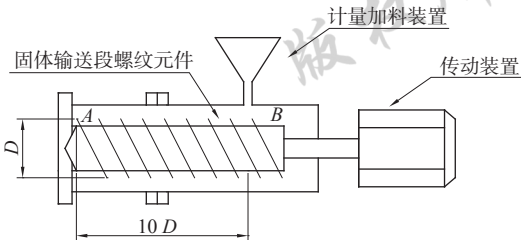
1.3 试验方法

试验所用因子的取值范围: 主机转速为 90 ~ 130 r/min, 当量填充率为 70% ~ 90%, 螺纹元件螺旋升角为 17° ~ 35°, 物料粒径为 2.4 ~ 3.8 mm。其中, 当量填充率的计算公式如式 (1):

ε<sub>r</sub> = Q<sub>w</sub>/Q<sub>i</sub> (1)

式中: ε<sub>r</sub>——当量填充率, 无量纲;  
Q<sub>w</sub>——实测加料量, g/min;  
Q<sub>i</sub>——满加料量, g/min。

试验装置如图 1 所示, 试验前先将物料干燥, 对每种物料进行加料量标定。挤出机 AB 段即为挤出机的固体输送段, 其长度为 10D (D 为螺杆外径), 可以置换不同螺旋升角的螺纹元件。试验过程中, 按照设定值调节螺杆转速, 进行计量加料, 逐渐增大加料量, 得到溢流前的加料量即为该种工况下的当量填充率 100% 的加料量。



根据质量守恒定律, 在未达到溢流时, 输送量即为加料质量。变换不同升角的螺纹元件、主机转速、螺杆填充率和物料, 得到不同工况下的输送量和功率消耗并记录, 该试验均在常温下进行, 机筒不加热。

功率消耗值由公式 (2) 得到:

P = 0.9372 I · N (2)

式中: P——主机功率, W;  
I——主机电流, A;  
N——主机螺杆转速, r/min。

2 响应曲面试验设计

笔者设计 4 因素 3 水平试验, 对数据进行二次回归拟合, 得到包括一次项、平方项和交互项的二次方程, 分析各因素的主效应和交互效应。试验辅助

软件为 Design-expert 软件。试验参数及水平见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验设计因素水平及编码

| 变量                           | 代码<br>编码值 <sup>1)</sup> | 水平 <sup>2)</sup> |     |     |
|------------------------------|-------------------------|------------------|-----|-----|
|                              |                         | 1                | 0   | -1  |
| 螺杆转速 / r · min <sup>-1</sup> | A                       | 130              | 110 | 90  |
| 当量填充率 / %                    | B                       | 90               | 80  | 70  |
| 平均螺旋升角 / °                   | C                       | 35               | 26  | 17  |
| 物料粒径 / mm                    | D                       | 3.8              | 3.1 | 2.4 |

注: 1) A、B、C、D 分别表示各因素的编码值, 以 a、b、c、d 表示各因素的实际值, 其中①A = (a - 110) / 20, ②B = (b - 80) / 10, ③C = (c - 26) / 9, ④D = (d - 3.1) / 0.7; 2) 水平 -1, 0, 1 分别表示因素的最低、中间、最高水平。相对应的响应值为固体输送量 (X), 主机功率 (Y)。

3 响应曲面法确定重要因素的水平

3.1 试验设计及结果

试验设计内容见表 2。

表 2 Box-Behnken 试验设计内容

| A / r · min <sup>-1</sup> | B / % | C / ° | D / mm | Y / W   | X / g · min <sup>-1</sup> |
|---------------------------|-------|-------|--------|---------|---------------------------|
| 90                        | 80    | 26    | 2.4    | 202.435 | 266                       |
| 90                        | 80    | 17    | 3.1    | 244.609 | 232                       |
| 110                       | 90    | 26    | 2.4    | 262.885 | 387                       |
| 110                       | 80    | 26    | 3.1    | 268.039 | 342                       |
| 110                       | 70    | 35    | 3.1    | 396.904 | 327                       |
| 110                       | 90    | 26    | 3.8    | 381.44  | 113                       |
| 130                       | 80    | 17    | 3.1    | 353.324 | 305                       |
| 130                       | 80    | 26    | 3.8    | 365.508 | 92                        |
| 110                       | 80    | 35    | 2.4    | 474.223 | 358                       |
| 110                       | 80    | 26    | 3.1    | 268.039 | 342                       |
| 130                       | 90    | 26    | 3.1    | 352.324 | 452                       |
| 90                        | 80    | 35    | 3.1    | 337.392 | 305                       |
| 130                       | 80    | 35    | 3.1    | 456.885 | 452                       |
| 110                       | 80    | 17    | 2.4    | 242.266 | 326                       |
| 110                       | 70    | 26    | 3.8    | 329.894 | 71                        |
| 110                       | 90    | 17    | 3.1    | 283.503 | 313                       |
| 110                       | 80    | 17    | 3.8    | 314.431 | 67                        |
| 110                       | 80    | 26    | 3.1    | 268.039 | 342                       |
| 110                       | 80    | 35    | 3.8    | 567.006 | 117                       |
| 130                       | 80    | 26    | 2.4    | 347.233 | 360                       |
| 110                       | 80    | 26    | 3.1    | 268.039 | 342                       |
| 130                       | 70    | 26    | 3.1    | 322.865 | 324                       |
| 110                       | 70    | 17    | 3.1    | 273.194 | 214                       |
| 110                       | 90    | 35    | 3.1    | 432.986 | 459                       |
| 90                        | 80    | 26    | 3.8    | 253.044 | 92                        |
| 90                        | 70    | 26    | 3.1    | 189.783 | 214                       |
| 110                       | 80    | 26    | 3.1    | 268.039 | 342                       |
| 110                       | 70    | 26    | 2.4    | 257.730 | 280                       |
| 90                        | 90    | 26    | 3.1    | 194     | 305                       |

3.2 主机功率

(1) 多元二次模型方程的建立及回归分析

通过对表 2 中的试验数据进行多项式回归分析建立二次响应回归模型, 拟合得到主机功率的二次方程, 如公式 (3):

$$Y = 268.04 + 64.74A + 11.40B + 79.51C + 35.38D + 6.31AB + 2.69AC - 8.08AD + 6.44BC + 11.60BD + 5.15CD - 8.09A^2 - 0.83B^2 + 86.58C^2 + 39.25D^2 \quad (3)$$

式中:Y——功率值;  
A, B, C, D——因素编码值,即 1, 0, -1。  
对回归方程(3)的方差分析见表3。

表3 主机功耗二次多项式模型方差分析

| 变异源 | 平方和       | 自由度 | 均方        | F 值   | P 值      |
|-----|-----------|-----|-----------|-------|----------|
| 模型  | 203 600   | 14  | 14 543.37 | 14.10 | <0.000 1 |
| 失拟项 | 14 442.71 | 10  | 1 444.27  |       |          |
| 误差项 | 0.0000    | 4   | 0.0000    |       |          |
| 总和  | 218 000   | 28  |           |       |          |

回归方程相关系数  $\gamma^2 = 0.9338$

由表3可知,回归方程(3)的F值达到14.10,P值小于0.000 1,说明试验所选用的模型显著,拟合度好;相关系数 $\gamma^2$ 达到0.9338,可以使用试验得到模型进行固体输送段主机功率分析,但其可靠性还需要之后的试验进行检验。方程(3)的显著性检验见表4。

表4 主机功耗回归方程显著性检验

| 模型项            | 系数估计   | 标准误差  | F 值   | P 值      |
|----------------|--------|-------|-------|----------|
| 常数项            | 268.04 | 14.36 |       |          |
| A              | 64.74  | 9.27  | 48.75 | <0.000 1 |
| B              | 11.40  | 9.27  | 1.51  | 0.2392   |
| C              | 79.51  | 9.27  | 73.53 | <0.000 1 |
| D              | 35.38  | 9.27  | 14.56 | 0.0019   |
| A <sup>2</sup> | -8.09  | 12.61 | 0.41  | 0.5316   |
| B <sup>2</sup> | -0.83  | 12.61 | 0.004 | 0.9487   |
| C <sup>2</sup> | 86.58  | 12.61 | 47.13 | <0.000 1 |
| D <sup>2</sup> | 39.25  | 12.61 | 9.69  | 0.0076   |
| AB             | 6.31   | 16.06 | 0.15  | 0.7003   |
| AC             | 2.69   | 16.06 | 0.028 | 0.8692   |
| AD             | -8.08  | 16.06 | 0.25  | 0.6225   |
| BC             | 6.44   | 16.06 | 0.16  | 0.6943   |
| BD             | 11.60  | 16.06 | 0.52  | 0.4821   |
| CD             | 5.15   | 16.06 | 0.10  | 0.7530   |

由表4可知,线性项中A、C、D对主机功耗的影响显著,B对主机功耗的影响不显著;曲面项中C<sup>2</sup>、D<sup>2</sup>对主机功耗影响显著,A<sup>2</sup>、B<sup>2</sup>对主机功耗的影响不显著;交互项中AD、BD、BC、AB、AC、BC、CD对主机功耗的影响不显著。

(2) 多元二次模型曲面图分析

图2是在任意2个因素取中间水平,其余2个因素对功率消耗的交互响应曲面图。从图2a~图2c可以看出,功率消耗随着螺杆转速的增加而增大,这与挤出机固体输送机理相符合,螺杆转速的增

加会使物料与机筒之间的摩擦增大,从而导致功率消耗增大;从图2b、图2d、图2f可以看出,功率消耗随着平均螺旋升角的增大先减小后增大,并发现在21°~30°存在一个使功率消耗最小的平均螺旋升角值;从图2c、图2e、图2f可以看出,功率消耗随着粒径的增大先减小后增大,并发现在2.4~3.0 mm存在一个使功率消耗最小的粒径值。

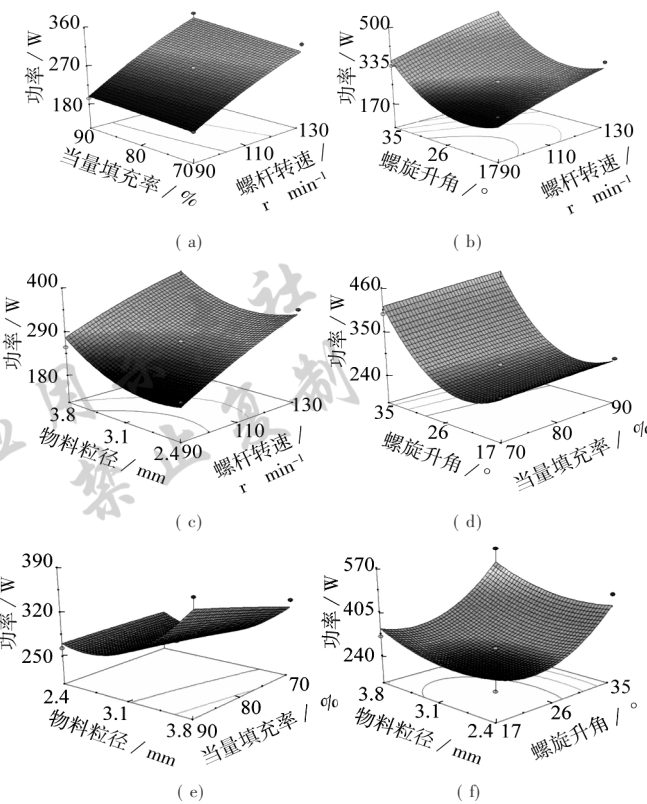


图2 固体输送段主机功耗受不同因素影响的曲面图

各参数因素之间存在一定的相互影响,功率消耗与各参数因素之间总体的函数关系比较复杂。从图2c可以看出,在粒径处于2.4 mm(低水平)时,螺杆转速对功率的影响(斜率)较大,当粒径处于3.8 mm(高水平)时,螺杆转速对功率的影响变小。由双螺杆固体输送机理,固体输送段的摩擦中包括物料与物料以及物料与机筒之间的摩擦,随着粒径的增大,物料之间摩擦消耗能量占总摩擦的比例变大;从图2e可以看出,在粒径处于低水平时,当量填充率对功率影响较小,当粒径处于高水平时,当量填充率对功率影响变大,功率随着当量填充率增大而增大。

(3) 方程的验证

选取10组数据(4种因素的随机组合,与表2

中的试验数据不相同), 进行固体输送试验, 得到主机功率实际值, 同时使用回归方程 (3) 对该 10 组工况下的主机功率进行预测, 得到的主机功率的预测值和和实际值对比如表 5 所示。由表 5 可知, 主机功率的理论计算值和实际值的误差小于 10%, 说明利用响应曲面法得到的预测公式可以主机功率进行预测。

表 5 主机功耗计算值与实际值之间的对比

| 螺杆转速/<br>$r \cdot \min^{-1}$ | 当量填充率/% | 螺旋升角/ $^{\circ}$ | 物料粒径/mm | 主机功率/W      |          |       |
|------------------------------|---------|------------------|---------|-------------|----------|-------|
|                              |         |                  |         | 计算值         | 实际值      | 误差    |
| 90                           | 70      | 17               | 3.1     | 205.5077256 | 223.5222 | 8.06% |
| 130                          | 90      | 17               | 3.8     | 412.4948204 | 426.4260 | 3.27% |
| 90                           | 70      | 17               | 3.8     | 271.4636604 | 253.0440 | 7.28% |
| 130                          | 70      | 17               | 3.1     | 316.9806856 | 328.9572 | 3.64% |
| 110                          | 80      | 26               | 3.8     | 342.6684384 | 355.6674 | 3.65% |
| 130                          | 80      | 26               | 3.1     | 324.6963866 | 335.0490 | 3.09% |
| 130                          | 90      | 26               | 2.4     | 341.9349896 | 322.8654 | 5.91% |
| 110                          | 90      | 35               | 3.8     | 542.5214564 | 577.3152 | 6.03% |
| 130                          | 90      | 35               | 3.1     | 516.8017476 | 475.1604 | 8.76% |
| 130                          | 90      | 35               | 2.4     | 512.0030936 | 542.1702 | 5.56% |

3.3 固体输送量

(1) 多元二次模型方程的建立及回归分析  
通过对表 2 中试验数据进行多项式回归分析建立二次响应回归模型, 拟合得到固体输送量的二次方程, 见式(4):

$$\begin{aligned} X = & 342.00 + 47.58A + 49.92B + 46.75C - \\ & 118.75D + 9.25AB + 18.50AC - 23.50AD + \\ & 8.25BC - 16.25BD + 4.50CD - 14.08A^2 - \\ & 6.58B^2 - 4.58C^2 - 122.83D^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $X$ ——固体输送量值;  
 $A, B, C, D$ ——因素编码值, 即 1, 0, -1;  
对回归方程 (4) 的方差分析见表 6。

表 6 固体输送量二次多项式模型方差分析

| 变异源 | 平方和      | 自由度 | 均方        | $F$ 值 | $P$ 值    |
|-----|----------|-----|-----------|-------|----------|
| 模型  | 359 500  | 14  | 25 677.04 | 37.84 | <0.000 1 |
| 失拟项 | 9 501.17 | 10  | 950.12    |       |          |
| 误差项 | 0.0000   | 4   | 0.0000    |       |          |
| 总和  | 369 000  | 28  |           |       |          |

回归方程相关系数  $\hat{r}^2 = 0.9743$

由表 6 可知, 公式 (4) 的  $F$  值达到 37.84,  $P$  值小于 0.0001, 说明试验所选用模型显著, 拟合度好; 相关系数  $\hat{r}^2$  达到 0.9743, 可以使用试验得到的模型进行固体输送段输送量分析, 但其可靠性还需检验。方程 (4) 的显著性检验见表 7。

由表 7 可知, 线性项  $A, B, C, D$  对固体输送量的影响显著; 曲面项中  $D^2$  对固体输送量的影响显著,  $A^2, B^2, C^2$  对固体输送量的影响不显著; 交互项中

$AD, BD, BC, AB, AC, BC, CD$  对固体输送量的影响不显著。

表 7 固体输送量回归方程显著性检验

| 模型项   | 系数估计    | 标准误差  | $F$ 值  | $P$ 值    |
|-------|---------|-------|--------|----------|
| 常数项   | 342.00  | 11.65 |        |          |
| $A$   | 47.58   | 7.52  | 40.04  | <0.000 1 |
| $B$   | 49.92   | 7.52  | 44.06  | <0.000 1 |
| $C$   | 46.75   | 7.52  | 38.65  | <0.000 1 |
| $D$   | -118.75 | 7.52  | 249.34 | <0.000 1 |
| $A^2$ | -14.08  | 10.23 | 1.90   | 0.1902   |
| $B^2$ | -6.58   | 10.23 | 0.41   | 0.5302   |
| $C^2$ | -4.58   | 10.23 | 0.20   | 0.6609   |
| $D^2$ | -122.83 | 10.23 | 144.21 | <0.000 1 |
| $AB$  | 9.25    | 13.03 | 0.50   | 0.4893   |
| $AC$  | 18.50   | 13.03 | 2.02   | 0.1774   |
| $AD$  | -23.50  | 13.03 | 3.25   | 0.0928   |
| $BC$  | 8.25    | 13.03 | 0.40   | 0.5367   |
| $BD$  | -16.25  | 13.03 | 1.56   | 0.2327   |
| $CD$  | 4.50    | 13.03 | 0.12   | 0.7349   |

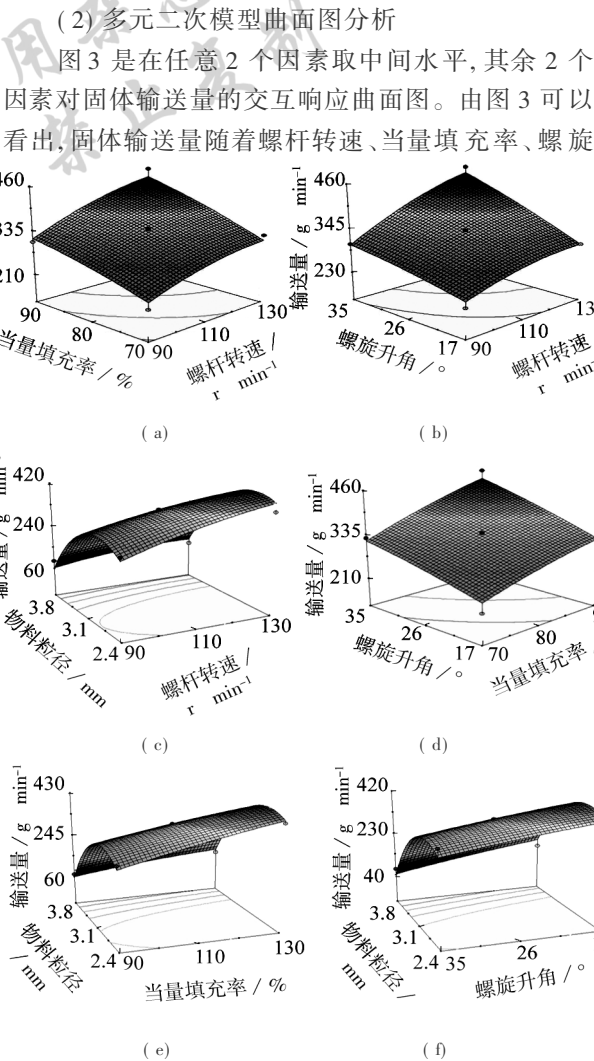


图 3 不同因素对固体输送量影响的曲面图

升角的增大而增大,这与双螺杆固体输送机理相符合,3个参数的增加均使挤出机在相同时间内运输物料的体积增大;由图3c、图3e、图3f可以看出,输送量随着粒径的增大先增大后减小,并发现在2.4~3.0 mm存在一个使固体输送量最大的粒径值。

由图3还可以看出,各参数因素之间存在一定的影响,固体输送量与各参数因素之间的函数关系比较复杂。由图3e可以看出,粒径处于低水平时,当量填充率对输送量影响较小;当粒径处于高水平时,当量填充率对输送量的影响变大;由图3c可知,在粒径处于低水平时,螺杆转速对输送量的影响较大,当粒径处于高水平时,螺杆转速对输送量的影响变小。

(3) 方程的验证

选取10组数据(4种因素的随机组合,与表2中的试验数据不同),进行固体输送试验,得到固体输送量实际值,同时使用公式(4)对该10组工况下的固体输送量进行预测,得到的固体输送量的预测值和实际值对比如表8所示。

表8 固体输送量计算值与实际值之间的对比

| 螺杆转速/<br>r·min <sup>-1</sup> | 当量填充率/% | 螺旋升角/° | 物料粒径/mm | 固体输送量/g·min <sup>-1</sup> |             |       |
|------------------------------|---------|--------|---------|---------------------------|-------------|-------|
|                              |         |        |         | 实际值                       | 计算值         | 误差    |
| 90                           | 90      | 17     | 3.1     | 280                       | 273.3435363 | 2.30% |
| 130                          | 70      | 17     | 3.1     | 251                       | 248.1803363 | 0.93% |
| 110                          | 90      | 17     | 2.4     | 377                       | 342.4289868 | 9.07% |
| 130                          | 80      | 17     | 2.4     | 358                       | 329.5974568 | 7.90% |
| 110                          | 80      | 26     | 3.8     | 92                        | 100.4312812 | 9.16% |
| 110                          | 90      | 26     | 3.1     | 397                       | 385.3484893 | 2.91% |
| 130                          | 80      | 26     | 3.1     | 397                       | 375.5173593 | 5.39% |
| 110                          | 70      | 35     | 3.8     | 92                        | 98.6001532  | 7.17% |
| 130                          | 90      | 35     | 3.1     | 525                       | 497.0212343 | 5.33% |
| 90                           | 90      | 35     | 2.4     | 353                       | 330.5148708 | 6.25% |

由表8可知,固体输送量的理论计算值和实际值的误差小于10%,说明利用响应曲面法得到的预测公式可以对输送量进行预测。

3.4 模型方程对功率消耗和固体输送量的优化

对功率消耗和固体输送量模型和方程分析可知,各参数因素之间存在相互影响,并且同一参数的增加(如螺杆转速)会造成功率消耗和输送量同时增加。为得到较小功率消耗和较大的输送量,必须同时考虑两个方程的变化和结果。笔者利用 Design-expert 软件的优化功能,结合方程(3)和方程(4),对参数进行优化,从而实现提高能效的目的。

(1) 在保证达到一定输送量的条件下,功率消耗最小。

例:保证输送量达到 350 g/min,对功率消耗进

行优化。

参数设置:主机转速 90~130 r/min,当量填充率 70%~90%,螺纹元件螺旋升角 17°~35°,物料粒径 2.4~3.8 mm。

优化后结果:主机转速 94.18 r/min,当量填充率 90%,螺纹元件螺旋升角 23.99°,物料粒径 2.73 mm 时,固体输送量为 350 g/min,功率消耗为 186.258 W。Desirability 函数值达到 0.969。对比表2中固体输送量为 350 g/min 及以上的数据,可知优化后的功率消耗最小。

(2) 在保证不超过一定功率消耗的条件下,固体输送量最大。

例:保证功率消耗不超过 300 W,对输送量进行优化。

参数设置:主机转速 90~130 r/min,当量填充率 70%~90%,螺纹元件螺旋升角 17~35°,物料粒径 2.4~3.8 mm。

优化后结果:在主机转速 121.26 r/min,螺杆填充率 90%,螺纹元件螺旋升角 25.47°,物料粒径 2.69 mm 时,功率消耗为 300 W,固体输送量为 453.884 g/min,Desirability 函数值达到 0.983。对比表2中功率消耗 300 W 及以下的数据,发现优化后的固体输送量最大。

4 结论

(1) 通过响应曲面试验得到的回归方程能够较为准确地预测同向双螺杆固体输送过程中的主机功率和固体输送量,预测误差均小于10%。

(2) 由功率模型响应曲面图可知,功率消耗随着平均螺旋升角的增加先减小后增大,21°~30°存在一个使功率消耗最小的平均螺旋升角值;功率消耗随着粒径的增加先减小后增大,在2.4~3.0 mm存在一个使功率消耗最小的粒径值。

(3) 输送量随粒径增加先增大后减小,2.4~3.0 mm 存在一个使固体输送量最大的粒径值。

(4) 由响应曲面试验分析得到的模型及回归方程,可以实现对主机功率消耗和固体输送量的优化:达到一定输送量的条件下,优化出最小功率消耗;在一定功率消耗的条件下,优化出最大固体输送量;实现了提高能效,节约能源的目的。

参考文献

[1] 王静江.同向双螺杆挤出机螺杆组合及喂料工艺在改性塑料中的应用[J].塑料工业,2007(6):338-341.

- [2] 周哲, 蔡玉华. 啮合型同向旋转双螺杆挤出机的挤出机理研究进展[J]. 合成纤维, 2003(s1): 8-10.
- [3] Carror C, Guillet J, May J F, et al. Modelling of the conveying of solid polymer in the feeding zone of intermeshing co-rotating twin screw extruders. *Polymer Engineering & Science*, 1993, 33(11): 700-708.
- [4] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 66-76.
- [5] 郭强, 耿孝正. 啮合同向双螺杆挤出机固体输送可视化研究[J]. 中国塑料, 1998(5): 73-75.

- [6] Geng Xiaozheng, Yu Quanping. Study on the visual and dynamic extrusion process in the co-rotating twin screw extruders[C]. *Proceeding of SPE, ANTEC*, 1995.
- [7] 耿孝正. 塑料混合及连续混合设备[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008: 223-245.
- [8] 孙建梅. 锥形双螺杆挤出机固体输送段和熔融段物料输送功率消耗的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2002.
- [9] Lin Y C, Chyang C S. Radial gas mixing in a fluidized bed using response surface methodology[J]. *Powder Technology*, 2003, 131(1): 48-55.

## OPTIMIZATION OF POWER CONSUMPTION AND SOLID QUANTITY DELIVERED OF SOLID CONVEYING PROCESS IN INTERMESHING CO-ROTATING TWIN SCREW EXTRUDER BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Yi Dalong, Luo Bing, Yuan Jiechao

(School of Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**ABSTRACT** Using Box-Behnken method of response surface methodology to design experiment and analyze, second order quadratic equations for power consumption and solid quantity delivered of solid conveying process in intermeshing co-rotating twin screw extruder were built. The effects of main factors on power consumption and solid quantity delivered and their corresponding relationships were discussed. The validity of model was tested. The deviation between predicted values by the model and experimental values was less than 10%. By using the regression equation of experiment, the prediction and optimization of power consumption and solid quantity delivered of solid conveying process in intermeshing co-rotating twin screw extruder could be realized, as a result, the efficiency was improved and energy consumption was decreased.

**KEYWORDS** intermeshing co-rotating twin screw extruder, solid conveying, power, solid quantity delivered, response surface methodology

### 仪征化纤 6 万 t PBT 装置拟年底投产

中国石化仪征化纤股份有限公司(简称“仪征化纤”)6 万 t/a 聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)项目装置计划于 10 月 30 日前完成安装,将于 12 月底投产。

该装置生产技术与日本日立公司合作完成。装置安装完成后,单机试车、联动试车等试车阶段的时间将持续 1 个半月左右。该公司目前已拥有一套 2 万 t/a 的 PBT 装置,项目建成后,公司将形成年产超 8 万 t PBT 生产能力,将超过星辰成为目前国内最大的 PBT 生产商。(中聚网)

### 吉林石化产出中分子量聚异丁烯

吉林石化自主技术中分子量聚异丁烯研发日前取得新突破,产品分子量可以有效控制在 4 万~8 万之间,聚合转化率高于 95% 以上,延伸了聚异丁烯产品的产业链。

该公司研发出了可进行异丁烯活性阳离子聚合的新型三氯化硼催化体系和生产工艺,并在工业生产装置上放大成功,使中分子量聚异丁烯的生产技术取得了突破性进展。此举既可以使聚合过程在相对高的温度下制备较高分子量的聚异丁烯,又提高了聚合转化率。所制备的中分子量聚异丁烯产品纯度高,外观清澈透明,采用合理的工艺可以使其质量达到医用级和食品级标准。国内中分子量聚异丁烯需求量每年正以 20%~30% 的速度递增,且高品质产品全部依

赖进口,因此新产品的市场前景十分广阔。

近年来,中空玻璃行业发展迅速,由以往只用于高档建筑的特殊产品迅速向普通建筑、空调列车、空调客车、冰箱、展示柜等领域普及。特别是随着塑钢窗的推广应用,中空玻璃已深入到普通民居,发展十分迅猛,国内市场应用前景广阔。中分子量聚异丁烯由于其优良的耐热、耐氧化、耐紫外线以及优异的防渗和粘附性,在中空玻璃胶行业扮演着独特而重要的角色。特别是随着国家对环保要求的提高,其用量将会快速增加。(工塑网)

### 拜耳聚碳酸酯板材拓展建筑应用

在近日开幕的杜塞尔多夫 2010 年国际塑料和橡胶加工展览会上,拜耳材料科技将展示以模克隆聚碳酸酯实心及多层板材用于建筑设计和解决方案等系列开发成果,其中包括低能量被动式建筑和结构以及零排放建筑等。

伴随聚碳酸酯板材在空客 A380 机场航站楼、中国武汉新火车站以及 2010 年上海世博会德国馆等富有想象力的设计之后,拜耳材料科技根据当今人们对公共空间的建筑结构不仅要时尚、透光、温馨怡人且大幅降低二氧化碳气体排放的要求,推进聚碳酸酯板材向建筑结构应用发展。聚碳酸酯板材的透光性与玻璃类似,但比玻璃更安全,设计自由度更大,且具节能和降低热量、质轻和持久耐用等特性。

(中聚网)