

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(Ⅱ)

袁捷朝 张雅琴 罗 兵 伊大龙 任 峰

(北京化工大学机电工程学院,北京 100029)

摘要 采用响应曲面法(RSM)中Box-Behnken方法设计实验并分析,建立了啮合同向双螺杆挤出机固体输送段,单导程螺纹元件粉料输送的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,模型所预测的功率消耗和输送量与实验得到的数据误差小于10%。利用实验所得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 粉料输送 功率消耗 固体输送量 响应曲面法

面对日益增长的能源需求和地球上各种能源的迅速消耗,在工业生产和日常生活中节约能源和提高能源利用率已经成为世界共识。在工业生产中,希望以最少的能源消耗,创造最多的产量。

双螺杆挤出机自问世以来,在聚合物加工工业中的应用已经十分广泛。而其中的啮合同向双螺杆挤出机更是以其灵活的积木式组合设计,优异的分散及分布混合能力,优良的自清洁效果,较窄的停留时间分布,良好的排气性能和较高的生产能力等优点,被广泛用于聚合物配混包括共混改性、填充、纤维增强及合金化和反应挤出包括单体聚合或聚合物反应型改性等领域^[1]。

与单螺杆挤出机的挤出过程相比,啮合同向双螺杆挤出机的基础过程要复杂得多,因为影响这一过程的因素多,如加料量、螺杆构型、物料特性、操作条件等。笔者^[2-3]应用响应曲面法对双螺杆挤出机的固体输送段单导程元件的粒料输送问题进行了研究,得到了多因素的固体输送量和主机功耗的二次回归方程,并实现了对固体输送段固体输送量和主机功耗的预测。

目前对于固体输送段中粉料的输送研究还比较少,有的大多也是定性的分析,定量分析的内容不足,张沛等^[4]利用啮合同向双螺杆实验挤出机,对挤出过程中不同操作条件下粉料在螺纹元件中的输送特点、输送机理和输送能力进行了实验研究,对不同导程的螺纹元件组合在计量和溢流加料时的输送能力进行了分析。基于笔者前期对于粒料的研究方法,拟用响应曲面法进行啮合同向双螺杆挤出机固体输送段输送单导程元件粉料输送的主机功耗和输送量的研究。

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及实验结果,笔者选定螺杆转速、螺杆当量填充率、螺纹元件的平均螺旋升角作为对粉料输送的主机功耗和输送量有影响的主要参数进行研究。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方法设计实验并分析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,在研究的基础上对影响因子进行优化,为降低功率消耗,提高输送能力提供依据。

1 物料与设备

1.1 主要物料

聚丙烯(PP)粉料:物料松密度0.46 g/mL,堆砌角29.06°,北京燕山石化公司。

1.2 主要仪器及设备

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 实验步骤

实验装置如图1所示,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。实验过程中,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,输送量即为加料量。变换不同升角的螺纹元件、主机转速、螺杆填充率和加料量,得到不同工况下的输送量和功率消耗并记录,该实验均在常温下进行,机筒不加热。

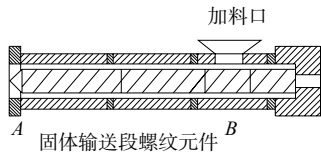


图1 实验装置简图

2 响应曲面实验设计

2.1 因素及水平的选取

实验所用因素的取值范围:主机转速为90~130 r/min,当量填充率70%~90%,螺纹元件螺旋升角17°~35°,其中,当量填充率的计算公式见式(1)。

ε = Q_w / Q_i (1)

式中:ε——当量填充率,无量纲;

Q_w——实测加料量,g/min;

Q_i——满加料量,g/min。

功率消耗值由式(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。

采用Box-Behnken设计法。选取主机螺杆转速,当量填充率,螺旋升角3个因素;主机功率、固体输送量两个响应值。每个因素取3个水平,设计为3因素3水平实验,根据相应的实验表进行实验后,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。实验辅助软件为Design-expert软件,参数及水平见表1。

表1 Box-Behnken实验设计因素水平及编码

因素	编码 ¹⁾	水平 ²⁾		
		+1	0	-1
螺杆转速 / r · min ⁻¹	A	130	110	90
当量填充率 / %	B	90	80	70
平均螺旋升角 / (°)	C	35	26	17

注:A、B、C分别表示各因素的编码值,以a、b、c表示各因素的实际值,其中A = (a - 110) / 20, B = (b - 80) / 10, C = (c - 26) / 9;水平-1、0、+1分别表示因素的最低、中间、最高水平。

2.2 实验方案、实测结果

响应曲面实验方案及实测结果如表2所示。

根据表2的实验数据,对主机功耗和输送量分别建立二次响应回归模型进行分析。

(1) 主机功耗的多元二次模型的建立和回归分析

表2 Box-Behnken实验设计内容

螺杆转速 / r · min ⁻¹	当量填充率 / %	螺旋升角 / (°)	主机功率 / W	输送量 / g · min ⁻¹
110	70	17	211.339	264
130	80	35	347.233	475
110	80	26	283.503	427
110	70	35	273.194	381
110	80	26	283.503	427
130	80	17	274.131	317
110	80	26	283.503	427
90	90	26	219.305	427
130	90	26	353.324	523
110	90	17	211.339	341
110	90	35	262.885	492
110	80	26	283.503	427
90	80	17	172.913	254
90	80	35	202.435	398
110	80	26	283.503	427
90	70	26	219.305	331
130	70	26	341.105	403

通过对表2的实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:

Y₁ = 283.50 + 62.73A + 0.24B + 27.00C + 3.05AB + 10.89AC - 2.58BC + 4.62A² - 4.87B² - 38.95C² (3)

式中:Y₁—功率值;

A、B、C—因素编码值,即+1、0、-1;

对式(3)的方差分析见表3。

表3 主机功率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	44 461.58	9	4940.18	384.32	<0.0001
失拟项	89.98	3	29.99		
误差项	0.0000	4	0.0000		
总和	44 551.56	16			

回归方程相关系数 $\hat{r}^2 = 0.9980$

由表3可以看出,式(3)的F值达到384.32, p值<0.0001,说明实验所选用的模型显著,拟合度好;相关系数 $\hat{r}^2$ 达到0.9980,说明可以使用实验得到模型进行固体输送段主机功率分析,但其可靠性还需实际实验进行检验。

式(3)的显著性检验见表4。

表4方程的回归系数显著性检验表明,线性项中A、C对主机功耗的线性效应皆显著,B对主机功耗的线性效应不显著;曲面项中C²对主机功耗影响显著,A²、B²对主机功耗的影响不显著;交互项AC

表 4 主机功率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	283.50	1.60		
A	62.73	1.27	2 448.98	<0.0001
B	0.24	1.27	0.035	0.8559
C	27.00	1.27	453.81	<0.0001
A ²	4.62	1.75	7.00	0.0331
B ²	-4.87	1.75	7.76	0.0271
C ²	-38.95	1.75	496.89	<0.0001
AB	3.05	1.79	2.90	0.1321
AC	10.89	1.79	36.94	0.0005
BC	-2.58	1.79	2.07	0.1937

对主机功耗的影响显著, *AB*、*BC* 对主机功耗的影响不显著。

图 2 为平均螺旋升角为 26°时, 螺杆转速和螺杆填充率对主机功耗的交互影响效应, 从图 3 可以看出, 两者的交互作用不显著。

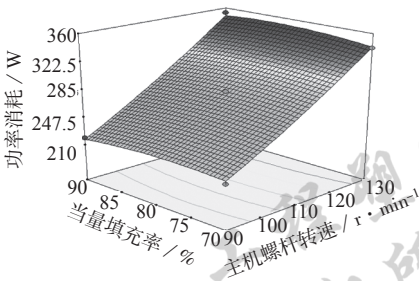


图 2 主机螺杆转速和当量填充率交互影响主机功率消耗曲面图

图 3 为当量填充率为 80% 时, 螺杆转速和螺旋升角对主机功耗的交互影响效应。从图 3 可以看出, 螺旋升角处于低水平时, 主机螺杆转速对主机功耗的影响(斜率)较小, 螺旋升角处于高水平时, 主机螺杆转速对主机功耗的影响(斜率)较大。这说明螺杆转速和螺旋升角对主机功耗有着较为明显的交互作用。

图 4 为主机螺杆转速为 110 r/min 时, 螺旋升角和当量填充率对主机功耗的交互影响效应, 从图 4 可以看出, 两者的交互作用不显著。

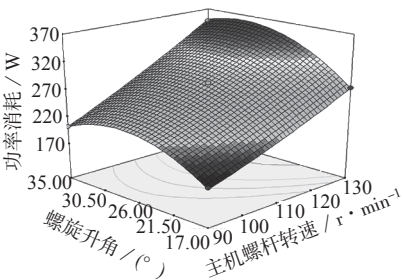


图 3 主机螺杆转速和螺旋升角交互影响主机功率消耗曲面图

(2) 固体输送量的多元二次模型的建立和回归分析

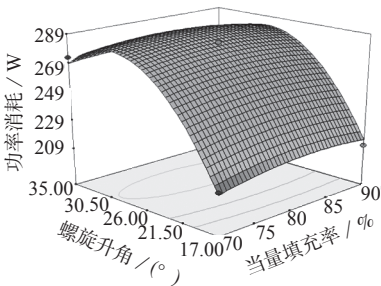


图 4 螺旋升角和螺杆当量填充率交互影响主机功率消耗曲面图

通过对表 2 中的实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:

$$Y_2 = 427.00 + 38.50A + 50.50B + 71.25C + 6.00AB + 3.50AC + 8.50BC - 7.25A^2 + 1.25B^2 - 58.75C^2 \quad (4)$$

式中: Y_2 ——固体输送量;

A, B, C ——因素编码值, 即 +1, 0, -1。

对式(4)的方差分析见表 5。

表 5 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	88 363.74	9	9 818.19	201.84	<0.0001
失拟项	340.50	3	113.50		
误差项	0.0000	4	0.0000		
总和	88 704.24	16			

回归方程相关系数 $\bar{r}^2 = 0.9962$

由表 5 可知, F 值达到 201.84, p 值 <0.0001, 说明实验所选用的模型显著, 拟合度好; 相关系数 $\bar{r}^2$ 达到 0.9962, 说明可以使用实验得到模型进行固体输送段输送量分析, 但其可靠性还需要下面的实际实验进行检验。

式(4)的显著性检验见表 6。

表 6 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	+427.00	3.12		
A	+38.50	2.47	243.78	<0.0001
B	+50.50	2.47	419.42	<0.0001
C	+71.25	2.47	834.91	<0.0001
A ²	-7.25	3.40	4.55	0.0704
B ²	1.25	3.40	0.14	0.7239
C ²	-58.75	3.40	298.77	<0.0001
AB	+6.00	3.49	2.96	0.1290
AC	+3.50	3.49	1.01	0.3490
BC	+8.50	3.49	5.94	0.0449

由表 6 可知, 线性项中 A 、 B 、 C 对固体输送量的影响显著; 曲面项中 C^2 对固体输送量影响显著, A^2 、 B^2 对固体输送量的影响不显著; 交互项中 BC 、 AB 、 AC 对固体输送量影响不显著。

图5为平均螺旋升角为26°时,主机螺杆转速和螺杆当量填充率对固体输送量的交互影响效应,从图5可以看出,两者的交互作用不显著。

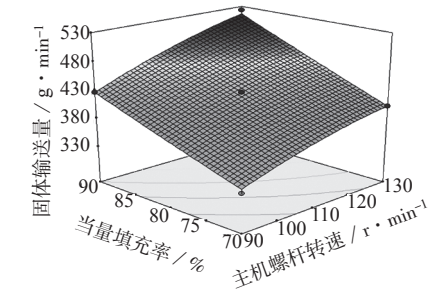


图5 主机螺杆转速和当量填充率交互影响固体输送量曲面图

图6为当量填充率为80%时,主机螺杆转速和螺旋升角对固体输送量的交互影响效应。从图6可以看出,两者交互作用不明显。

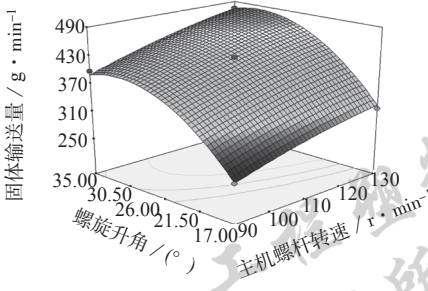


图6 主机螺杆转速和螺旋升角交互影响固体输送量曲面图

图7为主机螺杆转速为110 r/min时,螺旋升角和螺杆当量填充率对固体输送量的交互影响效应,从图7可以看出,两者的交互作用不显著。

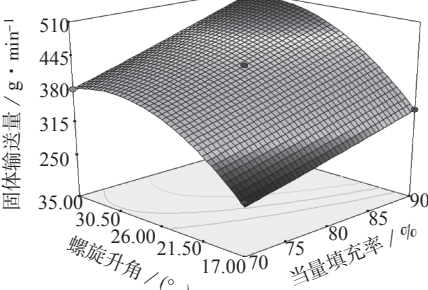


图7 螺旋升角和螺杆当量填充率交互影响固体输送量曲面图

3 方程的验证与应用

3.1 主机功率方程的验证

选取6组数据(三种因素的随机组合,并与表2中的实验数据不相同)进行固体输送实验,得到主机功率实际值,同时使用式(3)对该6组工艺条件下的主机功率进行预测,得到的主机功率的预测值和实际值对比如表7所示。

由表7可知,主机功率的理论计算值和实际值的误差在6%以下,说明利用响应曲面法得到的预

表7 主机功耗计算值与实际值之间的对比

螺杆转速 / r · min ⁻¹	当量填充 率 / %	螺旋升角 / (°)	主机功率 / W		
			计算值	实际值	误差
90	90	17	166.2918	172.9134	3.98 %
110	70	26	280.3922	278.3484	0.73 %
130	70	17	265.1694	261.9474	1.22 %
90	80	26	226.9058	215.0874	5.21 %
110	80	35	273.9890	278.3484	1.60 %
130	90	35	348.6250	359.4262	3.10 %

测公式可以对主机功率进行预测。

3.2 固体输送量方程的验证

选取6组数据(三种因素的随机组合,并与表2中的实验数据不相同),进行固体输送实验,得到固体输送量实际值,同时使用式(4)对该6组工艺条件下的固体输送量进行预测,得到的固体输送量的预测值和和实际值对比如表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 / r · min ⁻¹	当量填充 率 / %	螺旋升角 / (°)	主机功率 / W		
			计算值	实际值	误差
90	90	17	292.2559	287	1.94 %
110	70	26	378.3457	373	1.41 %
130	70	17	279.4856	277	0.89 %
90	80	26	381.2489	379	0.59 %
110	80	35	429.6320	437	0.69 %
130	90	35	541.0408	535	1.12 %

由表8可见,固体输送量的理论计算值和实际值的误差在2%以下,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。

3.3 固体输送量方程和功率方程的协调和优化

由对功率和固体输送量模型和方程的分析可知,功率消耗及输送量的参数方程都比较复杂:同一参数的增加,如主机螺杆转速增加,会造成功率消耗和输送量同时增加,希望得到较小的功率和较大的输送量,所以必须同时考虑两个方程的变化和结果。

在得到式(3)和(4)后,可用其它办法优化结果,笔者利用 Design - expert 软件的优化功能,同时结合功率消耗方程(3)和输送量方程(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,使功率消耗最小。

保证输送量达到410 g/min,对功率进行优化。参数设置:主机螺杆转速90~130 r/min,当量填充率70%~90%,螺纹元件螺旋升角17°~35°。

优化后结果为主机螺杆转速为90.03 r/min,当量填充率83.98%,螺纹元件螺旋升角35°,固体输送量为41.683 g/min,功率消耗为199.751 W, De-

sirability 函数值达到 1.00。对比实验数据表 2 的任意固体输送量为 410 g/min 及以上的数据,可以发现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,使固体输送量最大。

保证功率消耗不超过 250 W,对输送量进行优化。参数设置:主机螺杆转速为 90~130 r/min,当量填充率 70%~90%,螺纹元件螺旋升角 $17^\circ \sim 35^\circ$ 。

优化后结果为主机螺杆转速 106.07 r/min,当量填充率 90%,螺纹元件螺旋升角 34.91° ,功率消耗为 250 W,固体输送量为 490.405 g/min,Desirability 函数值达到 0.762。对比实验数据表 2 的功率消耗 250 W 及以下的数据,发现优化后的固体输送量最大。

4 结论

(1) 通过响应曲面实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,其中主机功耗方程预测误差小于 6%。固体输送量方程预测误差小于 2%。

(2) 由响应曲面实验分析得到的模型,可以实现保证达到一定输送量的条件下,使功率消耗最小;在保证不超过一定功率消耗的条件下,使固体输送量最大。即实现了提高能效,节约能源的目的。

参考文献

- [1] 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(4):8-11.
- [2] 袁捷朝,罗兵,毕超,等.响应曲面法优化同向双螺杆挤出机最大固体输送量的研究[J].中国塑料,2011(1):102-105.
- [3] 伊大龙,罗兵,袁捷朝.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[J].工程塑料应用,2010,38(11):43-48.
- [4] 张沛,耿孝正,朱林杰.同向啮合双螺杆固体输送特性的可视化研究——螺纹元件的粉料输送[J].中国塑料,1999(5):90-95.

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

Yuan Jiechao, Zhang Yaom, Luo Bing, Yi Dalong, Ren Feng

(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, a multi-factor quadratic polynomial equation mathematical model for power consumption and solid quantity delivered of solid conveying process in intermeshing co-rotating twin screw extruder with single lead screw parts was 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 power consumption and solid quantity delivered obtained by 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, powder conveying, power consumption, solid quantity delivered, response surface methodology

燕山石化 PE 专用料、管材料新品推动建材结构升级

日前,中国石化燕山石化成功生产出橡胶型氯化聚乙烯(PE-C)专用料 6600CP 和过氧化物交联聚乙烯管材料 8100XM 两个新产品,填补了国内空白。这两个新产品,不仅市场售价比普通产品每吨高出千余元,而且省去了造粒和添加剂环节,产品能耗大幅降低,推动建材结构向更加节能环保转型。

两个新产品都是在该公司低压 PE 装置上采用淤浆法聚合工艺工业化生产的高密度聚乙烯(PE-HD)粉末树脂,而此前该产品国内主要依赖进口。

橡胶型 PE-C 专用料 6600CP 适用于生产橡胶型 PE-C,

具有很好的耐候性、耐冲击性、电绝缘性,特别是与各种橡胶都有良好的相容性,可与各类橡胶掺混使用,提高橡胶的加工性能,改善橡胶的物理力学性能。橡胶型 PE-C 专用料 6600CP 也可单独使用,主要用于电线电缆、胶管、防水卷材等领域,可部分替代价格更高的氯磺化聚乙烯、乙烯-丙烯酸酯橡胶和氯醚橡胶。

而过氧化物交联聚乙烯管材料 8100XM 可做地板采暖用管材料。此外,还可广泛应用于生活用冷热水管道系统及融雪融冰管道系统等。过氧化物交联聚乙烯管材料 8100XM 产品以塑代钢,可节省大量的金属材料。(慧聪网)