

注塑机塑化参数对能耗的影响研究

李 福 程 珩 王国宝 白 瑞 路 亮

(太原理工大学机械电子工程研究所, 太原 030024)

摘要 通过对料筒平均温度、背压、转速建立正交试验表, 模拟计算这些因素对能耗的影响程度, 得到注塑一个产品在不同参数下需要消耗的功率和各参数对能耗的影响程度, 然后通过实验验证模拟结果, 证实了该研究方法的正确性及可靠性, 该方法为注塑节能和塑化参数方案的确定提供一定依据。

关键词 注塑机 塑化参数 能耗

随着可再生能源日益短缺造成的能耗成本的增加, 节能减排越来越受到人们的重视, 也成为政府衡量企业的标准之一。由此节能技术也成为注塑机目前的发展方向之一。注塑机的工作性能参数是以最大负荷来设计和标定的, 但在实际生产中, 注塑机一般都不是在满负荷的工作状态下工作; 注塑机生产一个产品的各步骤所需的能耗差别很大, 有的时段电机处在空载状态, 而且注塑机都是不断重复一个周期的动作规律, 工作状态平稳^[1]。所以研究注塑机节能具有很大的可行性。

伺服电机凭借其自身能根据负载自动调整转速、高速高响应和低振动的特点有逐步取代传统异步电机的趋势, 其特点为: 异步电机的输出是恒定的, 在低负荷时, 包括待机状态, 浪费了很大一部分做功; 而伺服电机的转速可降低甚至可以停止, 因此使用伺服电机可作为注塑机节能的重点研究方向^[2]。将伺服电机作为注塑机的动力系统后, 其能耗指标对其影响因素也提出了新要求, 包括螺杆的结构参数、料筒平均温度(T)、转速(n)、背压(p)、动力系统构成、物料等, 各因素对注塑机各工作性能指标的影响相互制约, 较复杂。注塑机节能一是从注塑机生产厂家研发新型节能型注塑机; 二是注塑机的用户通过选择合适的塑化参数达到节能减排的目的, 可操作性较强, 但由于用户一般是通过“试凑”方法来确定塑化参数方案, 既不能达到能耗最低又不具有推广性。笔者选择注塑机可以设定的对能耗有较大影响的 T 、 p 和 n 3 个主要塑化参数对注塑机能耗的影响进行研究, 找到这 3 个因素对能耗的影响程度并从中选择一个最合理的塑化参数方案, 以达到降低能耗的目的。该研究结果对确定注塑节能和塑化参数方案提供一定理论和实验依据。

采用 Cross 黏度模型表示聚氯乙烯 (PVC) 熔体流动黏度特征, 根据现有实验条件对 T 、 p 、 n 三个因

素分别取三个不同的水平值建立正交试验表^[3], 首先建立注塑机螺杆计量段和流道模型, 应用粘弹性材料流动模拟软件 Polyflow 进行模拟计算得出驱动螺杆的转矩^[4], 再通过公式计算得到螺杆的驱动功率和能耗。将模拟结果通过极差分析、综合比较找出在 T 、 p 、 n 分别取不同值下所有试验中的最节能方案和各塑化参数对能耗的影响程度^[5], 最后再通过实验验证模拟结果的正确性和可靠性。

1 塑化系统参数正交表的建立

利用 T 、 p 、 n 的三个水平值建立正交表, 分析其对螺杆驱动功率和能耗的影响。由于螺杆温度由喷嘴温度、前段温度、中段温度、后端温度、加料段温度 5 段组成, 首先考虑其平均温度, 调整温度时对每段温度值都调整相同的变化量。塑化系统取 3 个因素, 每个因素取 3 个水平值, 塑化参数如表 1 所示。

表 1 计量段塑化参数水平表

水平	$T/^\circ\text{C}$	p/MPa	$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$
水平 1	175	0.5	50
水平 2	180	0.55	55
水平 3	185	0.6	60

根据所考察的试验因素的个数和水平, 选择正交试验表 $L_9(3^3)$ 来确定试验方案, 如表 2 所示。

表 2 塑化参数正交表

试验号	塑化参数		
	$T/^\circ\text{C}$	p/MPa	$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$
M-1	175	0.5	50
M-2	175	0.55	55
M-3	175	0.6	60
M-4	180	0.5	55
M-5	180	0.55	50
M-6	180	0.6	60
M-7	185	0.5	60
M-8	185	0.55	50
M-9	185	0.6	55

2 注塑机螺杆计量段及流道几何建模与网格划分

根据螺杆运动实际情况,机筒静止螺杆在旋转的同时水平向后退,应用 Pro/E 建立螺杆计量段及流道三维几何模型,螺杆的计量段 $L=200\text{ mm}$,将模型导入 GAMBIT 中进行网格划分和设定边界类型。为了提高计算精度和降低计算量,螺杆内部挖空并由四面体网格划分,流道采用六面体网格划分。图 1 为螺杆和流道在 GAMBIT 中的模型。



a—螺杆计量段; b—流道
图 1 螺杆和流道模型

3 数学模型的建立和边界条件的设定

根据螺杆运动的实际情况和流体在注射螺杆中运动的复杂性,现对螺杆计量段流体特征作如下假设:

- (1) 流体属于稳态层流状态;
- (2) 考虑到 PVC 熔体黏度较大,忽略流体质量和惯性;
- (3) 熔体为不可压缩的流体;
- (4) 流道内熔体没有发泡,漏流;
- (5) 机筒内壁和螺杆表面无滑移。

根据以上假设,熔体在计量段流动的流体连续性方程如下。

动量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

x 分量:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho F_y + \frac{\partial p_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial z}$$

y 分量:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho F_x + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial z}$$

z 分量:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho F_z + \frac{\partial p_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z}$$

式中: ρ ——密度;

t ——塑化时间, s;
 F ——单位质量上的质量力;
 $u、v、w$ ——质点在 $x、y、z$ 方向的速度分量。
根据 PVC 熔体的流动特征,选择 Cross 模型表示 PVC 熔体的黏度特征, Cross 方程为:

$$\eta = \eta_0 / [1 + (\lambda \dot{\gamma})^m]$$

式中: η ——剪切黏度;
 η_0 ——零剪切黏度;
 $\dot{\gamma}$ ——剪切速率;
 λ ——自然时间;
 m ——指数。

整个模拟计算过程参数由具体实验参数确定,注塑机型号 WK400,注塑产品体积 453 cm^3 , PVC 熔体的物性参数为 $\eta_0=3.3 \times 10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda=0.2288\text{ s}$, $m=0.7438$ 。

4 模拟结果及其数据处理

通过 Polyflow 的模拟计算,可以得到螺杆塑化的转矩,根据螺杆式注塑机的工作原理,螺杆只有沿着料筒方向的运动,不考虑加热所需功率,螺杆塑化能耗只有驱动螺杆的转矩 M_n ,所以螺杆转动时所消耗的功率及能耗见式(1)、(2):

$$N_m = 2 \pi n M_n / 60 \tag{1}$$

式中: N_m ——螺杆转动时消耗的功率, W;

n ——螺杆转速, r/min;

M_n ——螺杆转矩, N/m。

$$W = N_m t \tag{2}$$

式中: W ——塑化能耗, J。

根据以上计算公式能够求出注塑一个产品时螺杆计量段塑化过程消耗的功率和能耗,如表 3 所示。根据正交试验表 3 分别计算背压、转速、能耗三个因素在不同水平下对能耗的极差 R , R 数值的大小能

表 3 模拟正交试验结果分析表

试验编号	$T/^\circ\text{C}$	p/MPa	$n/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	能耗/J
M-1	175	0.5	50	1432.1
M-2	175	0.55	55	1962.7
M-3	175	0.6	60	1756.2
M-4	180	0.5	55	1732.4
M-5	180	0.55	50	1599.8
M-6	180	0.6	60	1743.3
M-7	185	0.5	60	1803.8
M-8	185	0.55	50	1486.4
M-9	185	0.6	55	1566.2
I	1717	1656.1	1506.1	
II	1691.8	1683	1753.8	
III	1618.8	1688.6	1767.8	
R	98.2	32.5	261.7	

够反映试验中各因素对目标值作用的大小。 R 值大, 则说明该因素对目标值影响大, R 值小, 则说明该因素对目标值影响小。

通过表 3 可以得知, 随着 T 的升高, PVC 物料黏度下降, 螺杆所需要消耗的功率下降, 即能耗降低, 当物料温度超过玻璃化转变温度时, 物料会由玻璃态转化为高弹态, 当温度进一步升高, 物料温度超过熔化温度时, 物料由熔融态转化为粘流态, 所以随着温度的升高物料黏度变化趋势不同, 螺杆消耗的功率变化趋势也不同; 由于 p 的升高物料被压实, 所以需要的螺杆消耗的功率增大, 能耗相应增大, 由于螺杆与料筒之间有一定的间隙, 所以 p 的增加还会导致粘流态的物料漏流增加, 塑化效率降低, 能耗相应增加; 从式(1)可以得出, 随着 n 的增加螺杆转动时消耗的功率增加, 能耗也在增加, 但由于物料是通过料筒加热装置加热和螺杆剪切发热来升高温度的, 所以螺杆转速的增加会引起螺杆螺棱对物料的剪切增大, 物料的温度会大幅增加, 黏度下降, 驱动功率也降低, 故相同的 n 增加幅度会引起不同的能耗变化幅度。

为了能够更直观地表达各塑化参数与能耗之间的关系, 绘制了以 T 、 p 、 n 为横坐标, 能耗为纵坐标的关系图, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, 螺杆转速的纵向变化最大, 即螺杆转速对能耗影响较大, 而背压影响较小。

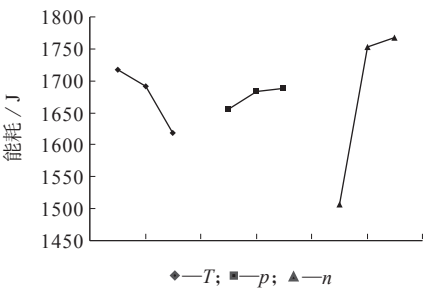


图 2 模拟塑化参数与能耗的关系

5 试验方案及试验结果分析

本试验利用力士乐伺服电机上自带传感器, 通过 Indraworks 软件采集伺服电机的输出功率。试验所用注塑机为汾西重工集团所生产的 WK400 型注塑机, 物料为硬质 PVC, 料筒加热功率为 14.5 kW。试验是在不同的 T 、 p 和 n 下记录伺服电机的输出功率, 然后将功率数据导入 Matlab 里对时间积分, 可以得到生产一个产品即一个生产周期内伺服电机所需的能耗, 根据各个方案塑化周期和料筒的加热功率, 就可以得到料筒的加热能耗。伺服电机的能耗

与加热装置的能耗构成注塑机的总能耗。如表 4 所示。

表 4 试验结果分析表

试验编号	$T/^{\circ}\text{C}$	p/MPa	$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	能耗/J
M-1	175	0.5	50	9 819
M-2	175	0.55	55	13 338
M-3	175	0.6	60	11 736
M-4	180	0.5	55	12 503
M-5	180	0.55	50	9 947
M-6	180	0.6	60	11 606
M-7	185	0.5	60	12 998
M-8	185	0.55	50	9 728
M-9	185	0.6	55	10 336
I	11 631	11 773	9 831	
II	11 352	11 004	12 059	
III	11 021	11 226	12 113	
R	610	769	2 282	

通过表 4 计算得到 T 对目标值的极差值 $R = 610$, 是三个极差值中最小的一个, 即是次要因素, p 的作用次之, n 对目标值的影响最大, 极差值 $R = 2 282$, 即是主要影响因素。

通过表 4 分析可知, M-8 是能耗最优模型, 即 T 为 185°C , p 为 0.55 MPa, n 为 50 r/min。

此外, 为了直观表达各因素对目标值的影响程度大小, 绘制了参数与能耗的关系, 如图 3 所示。将各因素设为横坐标, 能耗作为纵坐标, 可以直观地表达各因素对目标值影响趋势和大小。随着 T 的升高, 由于 PVC 的黏度降低, 所以驱动螺杆的转矩降低, 能耗也降低, 但是变化不大; 随着 p 的升高, 由于塑化时间减少, 所以能耗降低, 但随着 p 进一步的增加, 由于物料被压实而引起驱动物料旋转的转矩增大, 即能耗又有所增加; 随着 n 的增加, 能耗一直在增加, 而且图像的纵向变化较大, 即影响程度也是最大。

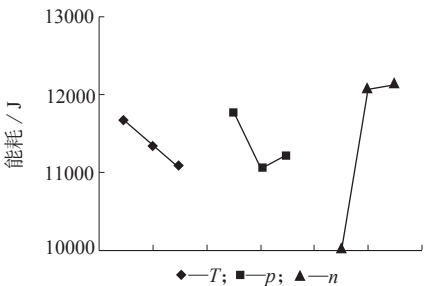


图 3 实验塑化参数与能耗的关系

试验结果与模拟结果对比中, 料筒平均温度对能耗的影响趋势基本一致, 但在模拟结果中料筒平均温度对能耗影响较大, 这是由于模拟过程温度是指物料的温度而在试验过程中温度是指传感器采集

的物料最外层温度,所以试验结果更符合实际情况;背压对能耗的影响趋势有一定的区别,这是由于背压的增加会减少塑化时间,而且由于背压增大,剪切力增大,由于剪切发热增加而导致物料黏度的下降,这都会引起伺服电机输出能耗的降低,这些在模拟过程中并不能体现,所以试验结果是正确的;螺杆转速对能耗的影响试验结果与模拟结果趋势完全相同,而且是影响能耗的最重要因素。

6 结语

(1) 在不影响产品性能的前提下适当增加料筒的温度可以降低物料的黏度,驱动螺杆的功率减小,能耗相应降低。

(2) 由于背压的增加物料被压实,需要的驱动扭矩增加,但同时塑化时间减少,能耗也会降低,在实验验证中,在低背压值下能耗却很高,所以背压要在适当的范围内调整。

(3) 随着螺杆转速的增加,驱动螺杆所需功率相应增加,但随着螺杆转速的增加,塑化时间会有所

降低,能耗略有下降。

(4) 由于计算机模拟干扰小,周期短,节约成本,具有普遍性,所以模拟结果对生产实验有很强的指导意义。

综上所述,各因素对能耗的影响相互制约,这需要在实际生产中根据实际生产条件调整各因素。以上的分析结果为塑化参数的调整提供了一定的理论支持。

参考文献

- [1] 梁锦雄,欧阳渺安.注塑机操作与成型工艺[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 王兴天.注塑技术与注塑机[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [3] 陈魁.试验设计与分析[M].2版.北京:清华大学出版社,2009.
- [4] 钱欣,许王定,金杨福.POLYFLOW 基础及其在塑料加工中的应用[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [5] 任峰.螺杆参数对注射机单产能耗影响的数值模拟分析[J].橡塑技术与装备,2008,34(10):1-4.

THE EFFECT OF PLASTICIZING PARAMETERS ON THE ENERGY CONSUMPTION OF INJECTION MOLDING MACHINE

Li Fu, Cheng Hang, Wang Guobao, Bai Rui, Lu Liang

(Taiyuan University of Technology Machinery and Electronics Engineering Institute, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT The influence degree of energy consumption was simulated which based on establishing a orthogonal table through the barrel temperature, back pressure and rotational speed, and the demand consumption of power at different parameters and the influence degree of parameters on the energy consumption when producing a product were got, and then correct and reliability of research method were proved through simulation results being verified by experiment. The method could provide certain basis for the injection energy saving and confirmation of plasticizing parameters scheme.

KEYWORDS injection molding machine, plasticizing parameter, energy consumption

陶氏推出适用于汽车行业热塑性聚烯烃材料的全新聚烯烃弹性体产品

陶氏化学公司推出了适用于汽车内饰及外饰零件中所采用的热塑性聚烯烃(TPO)材料的新牌号聚烯烃弹性体-ENGAGE™ XLT。与聚丙烯复合后,这一全新的材料带来了使用其它TPO抗冲改性剂时所无法获得的性能优势。

ENGAGE™ XLT能为复合材料生产商、模制品生产商、汽车生产商以及消费者带来多种性能优势。得益于更为卓越的抗冲效率,复合材料生产商能在TPO生产过程中减少弹性体的用量,并确保卓越的抗冲性能。弹性体用量的减少有助于增加TPO的强度与熔体流动性,同时还能降低零件壁厚,减少成品零件的质量,进而使汽车的燃油经济性得到改善。电脑模拟显示,采用ENGAGE™ XLT打造零件可使其总质量减少多达10%。模拟试验还证明了零件壁厚的减少

有助于缩短铸造周期。实际的零件成型实验证明了更为卓越的脱模属性与成品质量。(陶氏)

国内最大汽车专用改性塑料项目年内达产

哈尔滨晟通工程塑料有限责任公司20万t塑料改性新材料建设项目一期工程将于年底在哈尔滨市平房区达产。其产品被应用于60多种车型,其中汽车空调壳体专用料被一汽大众、上汽通用等主机厂指定为独家供货商。

哈尔滨晟通工程塑料有限责任公司于去年落户哈南工业新城,专门从事塑料改性新材料生产及研发,其20万t塑料新材料项目,是目前中国高品质汽车专用改性塑料投资规模最大的项目。目前公司90%产品主要应用于汽车领域,完全达到进口产品技术要求。

该项目总投资14.4亿元。项目全部达产后,年可新增销售收入31.58亿元,利润总额7.03亿元。(工塑网)