

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.11.009

塑料流变性能对注塑机塑化能耗的影响^{*}

林晓楷¹, 蔡国强², 晋刚¹, 王蒙蒙¹

(1. 华南理工大学聚合物成型加工教育部重点实验室, 广州 510640; 2. 东华机械有限公司, 广东东莞 523118)

摘要: 分别对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚苯乙烯(PS)、聚丙烯(PP)进行转速、背压、温度三个工艺参数的单因素实验,用以研究三种物料的塑化功率、塑化时间和塑化能耗随工艺参数的变化规律。结果表明:物料黏度值的大小和黏度对剪切和温度的敏感性会导致塑化能耗对工艺参数的敏感性不同。黏度值越小,塑化能耗对背压越敏感;非牛顿指数越小,塑化能耗对转速越敏感;流动活化能越高,塑化能耗对温度越敏感。此外,对于低黏度的PP来说,其不适于在低转速或者高背压工艺参数下生产,不然会造成低效率和能源浪费。

关键词: 工艺参数; 塑化功率; 塑化时间; 塑化能耗

中图分类号: TQ320.66+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)11-0039-05

Influence of Plastic Rheology on Energy Consumption of Plasticizing Stage in Injection Molding

Lin Xiaokai¹, Cai Guoqiang², Jin Gang¹, Wang Mengmeng¹

(1. The Key Laboratory of Polymer Processing Engineering of Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Donghua Machinery Co. Ltd., Dongguan 523118, China)

Abstract: Single-factor analysis experiments of process parameters such as rotating speed, back pressure and temperature for polystyrene(PS), acrylonitrile-butadiene-styrene plastic(ABS), polypropylene(PP) has been conducted respectively to study the variation law of three kinds of material's plastic power, plastic time and energy consumption changed with the process parameters. The results show that the viscosity value and viscosity sensibility of different materials to shear as well as temperature would lead the energy consumption to behave differently to process parameters. The smaller the viscosity value, the more sensitive of energy consumption to back pressure, the lower the Non-Newtonian index, the more sensitive of energy consumption to rotating speed, the bigger the flow activation energy, the more sensitive of energy consumption to temperature. Besides, it is not suitable for PP with low viscosity value to be produced in low rotating speed or high back pressure, or it would result in low efficiency and energy waste.

Keywords: process parameter; plasticizing power; plasticizing time; plasticizing energy consumption

塑料作为一种通用的材料,被广泛应用于各种各样的产品当中,注塑成型是塑料加工行业中最常见的成型方法之一,随着不可再生能源的日益短缺,能耗成本如电力成本不断上升,如何衡量注塑成型过程中的能耗并以低能耗来进行生产,已成为国内外研究的重点^[1-5]。

在注塑成型过程中,塑化能耗和塑化时间均占据较大的比重,怎样降低塑化能耗和减少塑化时间具有重要研究价值。物料、工艺参数和螺杆参数是影响塑化能耗和塑化时间的三大因素,任峰等^[6-7]分析螺杆构型对塑化能耗的影响,实验结果表明,螺杆计量段长度和螺距两个因素对塑化能耗影响程度最大,李福^[8]对注塑机塑化过程中工艺参数对塑化能耗的影响进行了研究,发现转速和背压对能耗均有较大的影响。上述的研究未对塑化过程中的功率和时间进行分析,并且都只是基于一种塑料,未考

虑物料本身对塑化能耗造成的影响,而实际上不同塑料对螺杆构型和工艺参数的响应是不一样的。对于一般的注塑机用户而言,主要是通过对加工物料进行工艺参数的改变来实行低能耗、高效生产的,因此,研究物料以及工艺参数对塑化功率、塑化时间和塑化能耗的影响具有明显的现实意义。

笔者通过单一螺杆来研究物料和工艺参数对塑化过程的影响,利用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚苯乙烯(PS)、聚丙烯(PP)三种物料分析在转速、背压、温度单因素实验下,塑化功率、塑化时间和塑化能耗的变化规律,并基于三种物料的流变信息来解释塑化功率、塑化时间、塑化能耗变化的

^{*} 广东省高等学校学科与专业建设专项资金项目(2013CXDC005)

联系人: 晋刚,副教授,主要从事聚合物加工过程中的实时测量与表征方面的研究

收稿日期: 2015-09-03

原因,从而为研究注塑成型制品能耗提供一定的指导作用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PS: 158K, 扬子石化—巴斯夫有限责任公司;
ABS: 8434, 上海高桥石油化工股份有限公司;
PP: CJS700, 广州石油化工股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

注塑机: 130SeII 型, 东华机械有限公司;
直浇口圆盘模具: 型腔尺寸为 181 mm × 2.7 mm;
毛细管流变仪: RHEOLOGIC 5000 型, 意大利 Ceast 公司;

高精度功率计: Norma 5000 型, 美国 Fluke 公司。

2 实验方案与数据采集

2.1 实验方案

注塑机塑化阶段的影响因素主要包括转速、背压、温度三个工艺参数, 通过对每个工艺参数分别进行单因素分析, 来研究 ABS, PS, PP 三种物料的塑化功率、塑化时间和塑化能耗随其变化的规律。工艺参数设置如表 1 所示, 其中序号 1~7, 8~13, 14~18 分别为转速、背压和温度单因素实验, 由于料筒分为喷嘴、温区 1、温区 2、温区 3 四个温度区, 因此对温度取平均值, 温度调整时对每个温区均以相同变化量进行调整。

表 1 工艺参数

序号	转速 / %	背压 / MPa	温度 / °C
1 [#]	20	1	210
2 [#]	30	1	210
3 [#]	40	1	210
4 [#]	50	1	210
5 [#]	60	1	210
6 [#]	70	1	210
7 [#]	80	1	210
8 [#]	50	0.5	210
9 [#]	50	1	210
10 [#]	50	1.5	210
11 [#]	50	2	210
12 [#]	50	2.5	210
13 [#]	50	3	210
14 [#]	50	1	190
15 [#]	50	1	200
16 [#]	50	1	210
17 [#]	50	1	220
18 [#]	50	1	230

2.2 数据采集与处理

通过功率计 Norma 5000 自带的 Norma View 软件能够实时采集伺服电机在一个周期内的功率曲

线如图 1 所示。横坐标为时间, 纵坐标为伺服电机的实时功率。在每个工序阶段之间设置 1 s 延时时间, 以便区分注塑机不同工序阶段, 利用 Matlab 软件对功率曲线进行时间数值积分即可计算能耗, 图 1 中阴影部分的面积, 即为塑化阶段的能耗。可以看出, 塑化过程的能耗是最大的, 时间也最长 (未计冷却时间)。从图 1 中塑化过程的实时功率曲线可以看出, 塑化功率先增加然后缓慢下降, 塑化开始时, 由于螺杆前端压力比较小, 起始功率较低, 随着塑化熔体向前推进, 压力增加, 塑化功率相应增加, 当螺杆前段的熔体压力积累达到背压, 螺杆开始后退, 此时实时功率增长到最大, 随后螺杆前端压力不变, 但有效螺杆长度随着螺杆后移而变短, 所以实时功率缓慢下降, 但下降幅度很小。由于塑化过程中的实时功率随时间变化, 因此笔者研究的功率都为对实时功率曲线进行平均得到的平均功率。

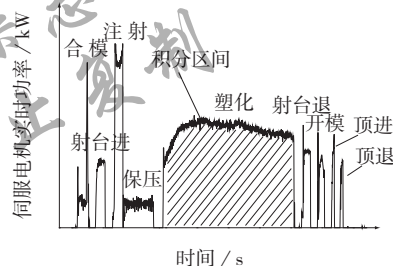


图 1 塑化过程能耗积分原理图

3 结果与讨论

3.1 物料流变参数测量

用高压毛细管流变仪分别测量三种物料在 210 °C, 剪切速率范围为 100~10 000 s⁻¹ 的条件下的流变曲线, 其结果见图 2, 利用幂律方程即公式 (1) 进行拟合, 可以得出 ABS, PS, PP 的非牛顿指数 n 分别为 0.285, 0.257, 0.342。

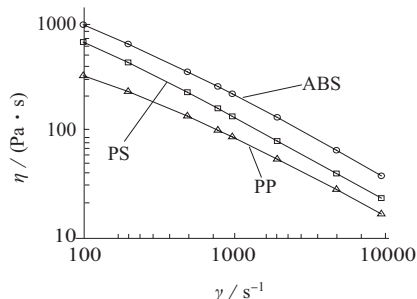


图 2 剪切速率—黏度曲线

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

式中, η 为剪切黏度, k 为稠度系数, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, n 为非牛顿指数。

在剪切速率为 500 s⁻¹, 温度分别为 190, 210,

230℃时,测量三种物料的黏度值,黏度随温度的变化曲线见图3。

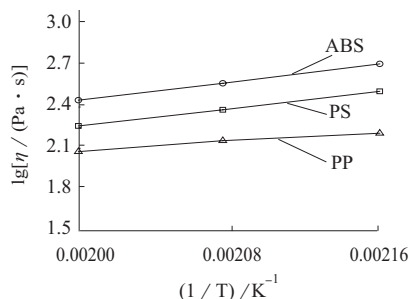


图3 温度-黏度曲线

通过 Arrhenius 方程,即公式(2)进行拟合,可以得出 ABS, PS, PP 的斜率 E/R 分别为 1539, 1469, 778。

$$\ln \eta = \ln A + \frac{E}{RT} \quad (2)$$

式中, η 为剪切黏度, A 为给定剪切速率或者剪切应力下与高分子特征有关的常数, E 为流动活化能, R 为气体常数, T 为热力学温度^[9]。

3.2 工艺参数对塑化功率和塑化时间的影响

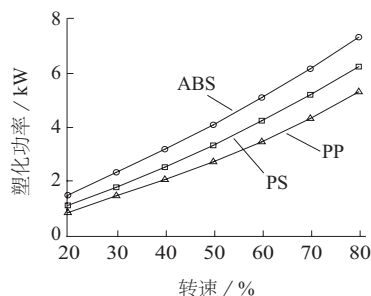
利用功率计按照表1分别对三种物料进行数据采集,每个序号下的实验都进行5次重复,测量取平均值,塑化功率和塑化时间随工艺参数的变化曲线分别见图4、图5。

从图4可见,在单因素实验中,不管加工哪种材料,塑化功率都会随转速的增加而增加,随背压的增大而增加,随温度的升高而减小,并且都基本呈现出线性变化规律。同样地,从图5可见,三种物料的塑化时间随转速的增加而减小,随背压的增大而增加,随温度的升高而增加。塑化功率和塑化时间变化的原因可利用公式(3)的螺杆功率 P 和公式(4)的螺杆计量段单位时间塑化量 Q 进行解释说明^[10]。当转速 n 增加时, P 和 Q 必定增大,在塑化量一定的前提下,塑化时间必定减小;当背压 P_b 升高时,螺杆转矩 M_n 增大, P 增加,同时,压力流 Q_p 和漏流 Q_L 会增大,造成 Q 减小,因而加长了塑化时间;当温度 T 升高时,黏度减小, M_n 减小,所以 P 减小,同时,黏度的降低同样会导致 Q_p 和 Q_L 增大,使 Q 减小,从而使得塑化时间变长。

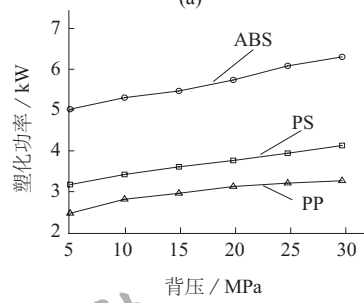
$$P = \frac{2\pi n M_n}{60} \quad (3)$$

式中: P 为螺杆塑化功率, n 为转速, M_n 为螺杆转矩。

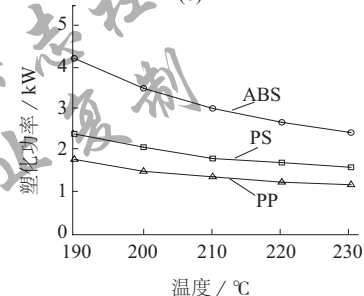
$$Q = Q_d - Q_p - Q_L = a \times n - \left(\frac{b}{\eta_1} + \frac{c}{\eta_2} \right) P_b \quad (4)$$



(a)



(b)



(c)

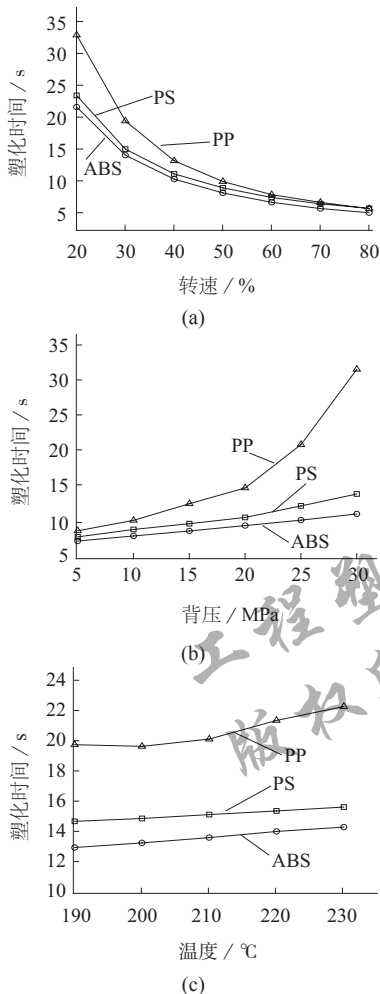
a—转速; b—背压; c—温度

图4 塑化功率随工艺参数的变化规律

式中, Q 为螺杆计量段单位时间塑化量, Q_d , Q_p , Q_L 分别为正流、压力流和漏流; a , b , c 是与螺杆结构相关的参数; n 为螺杆转速, η_1 , η_2 分别为螺槽以及螺杆与机筒间隙中的熔体黏度, P_b 为螺杆背压^[9]。

此外,在图4中,功率最大的都为ABS,其次是PS,最后是PP。在图5中,塑化所用时间最长的都是PP,其次是PS,最后才是ABS,究其原因,是由于熔体黏度的不同引起的。从图3可见,在任意剪切速率下,剪切黏度都为 $\eta_{PP} < \eta_{PS} < \eta_{ABS}$,在相同条件下,黏度小,意味着螺杆转动时受到的阻力小,即 M_n 小,所以有 $P_{ABS} > P_{PS} > P_{PP}$; 相反地,黏度小,意味压力流和漏流大,因此 $Q_{ABS} > Q_{PS} > Q_{PP}$,从而导致塑化时间 $t_{PP} > t_{PS} > t_{ABS}$ 。此外,虽然塑化时间的变化趋势相同,但是PP塑化时间变化的速度明显要高于ABS和PS,这是由于PP的黏度相对较低造成的。对比图3中的黏度发现,PP的黏度值是PS的60%左右,是ABS的40%左右,相应地会造

成PP的压力流和漏流是PS的1.7倍左右,是ABS的2.5倍左右,所以当工艺参数改变时,PP压力流和漏流变化大,造成PP的塑化量增大或者减小的幅度比ABS和PS大。因此,在塑化量一定的前提下,PP的塑化时间随工艺参数变化的速度也就比ABS和PS快得多。



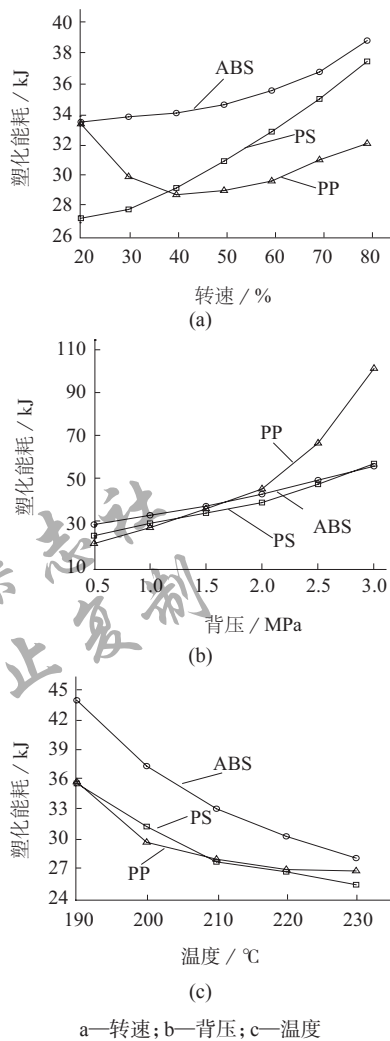
a—转速; b—背压; c—温度

图5 塑化时间随工艺参数的变化规律

3.3 工艺参数对塑化能耗的影响

因为塑化能耗等于塑化功率和塑化时间的乘积,所以工艺参数发生变化时,首先会对塑化功率和塑化时间产生影响,并通过两者进一步影响塑化能耗。图6为三种物料的塑化能耗分别随转速、背压和温度的变化规律。其中,ABS和PS的变化趋势基本是一致的,而除了温度实验外,PP塑化能耗则呈现出不同的变化趋势。在图6a中,ABS和PS塑化能耗随转速的增加而增加,而PP的塑化能耗则呈现出先减小后增加的趋势,这同样是由于PP的低黏度值造成的。对比图5a 20%转速时三种物料

的塑化时间发现,PP的塑化时间比ABS和PS大得多,说明此时较低的黏度值已经严重影响到螺杆的工作效率,从而导致低转速时反而需要更多的能耗。



a—转速; b—背压; c—温度

图6 塑化能耗随工艺参数的变化规律

在图6b中,因为背压的增大会导致塑化功率和塑化时间同时增大,所以必定会使塑化能耗随背压的增大而变大。前面分析指出,低黏度的PP会引起高背压情况下塑化时间的急剧增加,即使这时螺杆受到的阻力仍然比ABS和PS小,但是长的塑化时间会致使PP塑化需要的能耗比其他两种物料要高。对比图5b和图6b可以看到,PP的塑化能耗基本呈现与塑化时间一致的变化规律,在背压为1.75 MPa时,PP的塑化能耗已经超过了ABS和PS,此后差距迅速拉大。这从侧面说明,对于低黏度的塑料,其不适合在高背压工艺条件下进行塑化,否则会造成低效率和能源浪费。

在图6c中,随着温度升高,塑化能耗减小。从前面分析可知,温度升高会使塑化功率减小,塑化时

间增加,但分析图 4c 和图 5c 发现,塑化功率降低的幅度比塑化时间增加的幅度要大,以 ABS 为例,在温度从 190℃变化到 230℃过程中,塑化功率降低了大约 40%,塑化时间增加了大约 13%,因此随着温度的升高,塑化过程中需要的能耗会降低。

对比图 4 和图 5 中三种物料在转速、背压和温度单因素实验下的塑化功率和塑化时间发现,改变转速和温度时,塑化功率和塑化时间的变化趋势是相反的,而在改变背压时,塑化功率和塑化时间是同向变化的,说明背压的增大必定会导致塑化时间和塑化能耗增大,所以在保证塑化质量的前提下,应该以尽可能低的背压来进行生产。

分析图 6 可以看出,ABS,PS,PP 在转速、背压、温度影响下的塑化能耗的增幅是不同的。改变转速时,PS 的增幅最大;改变背压时,PP 的增幅最大;改变温度时,ABS 的增幅最大,这主要是由物料黏度值的大小和黏度对剪切和温度的敏感性不同造成的。改变背压时,因为 PP 的黏度较小,背压增高会快速降低螺杆输送效率,从而导致塑化能耗变化幅度大。改变转速时,即剪切速率变化较大时,非牛顿指数越小,表明黏度对剪切速率变化越敏感,因而塑化能耗变化幅度也就越大,PS 的非牛顿指数在三种物料之间是最小的,所以其塑化能耗对转速的变化更为敏感。从前面分析可知,ABS 在三种物料中的流动活化能是最大的,而流动活化能越大表明物料黏度对温度变化越敏感,即温度改变时,塑化能耗变化幅度也就更大。

4 结论

物料黏度值的大小和黏度对剪切和温度的敏感性会影响塑化能耗对转速、背压和温度的敏感性,总的来说,物料的黏度值越小,塑化能耗对背压越敏感;物料的非牛顿指数越小,塑化能耗对转速越敏感;物料的流动活化能越大,塑化能耗对温度越敏感。

对于低黏度物料,在低转速或者高背压工艺参数下,螺杆的输送效率低下,需要的塑化时间很长,导致塑化能耗大,要避免在此条件下进行生产。

背压的增高使塑化功率和塑化时间同时增大,必定消耗更多的能量,故在保证塑化质量的前提下,应该以尽可能用低的背压来进行生产。

参考文献

- [1] Müller E, Schillig R, Stock T, et al. Improvement of injection moulding processes by using dual energy signatures[J]. *Procedia Cirp*, 2014, 17:704–709.
- [2] Lu Ningyun, Gong Guixia, Yang Yi, et al. Multi-objective process parameter optimization for energy saving in injection molding process[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering)*, 2012, 13(5):382–394.
- [3] 张友根. 注塑机节能技术的分析研究 (上)[J]. *橡塑技术与装备*, 2008, 34(3):52–60.
Zhang Yougen. Analysis of energy-saving technique for injection molding machine (Part one)[J]. *China Rubber / Plastics Technology and Equipment*, 2008, 34(3):52–60.
- [4] 张友根. 注塑机节能技术的分析研究 (下)[J]. *橡塑技术与装备*, 2008, 34(4):57–65.
Zhang Yougen. Analysis of energy-saving technique for injection molding machine (Part two)[J]. *China Rubber / Plastics Technology and Equipment*, 2008, 34(4):57–65.
- [5] Ribeiro I, Pécas P, Henriques E. Assessment of energy consumption in injection moulding process[J]. *International Conference on Life Cycle Engineering*, 2012, 19:263–267.
- [6] 任峰. 注塑螺杆构型对塑化能耗影响的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
Ren Feng. Study of the effect of screw parameters on plasticizing uniproducing energy consumption of the injection molding machine[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [7] 张振然. 注塑机塑化过程的数值模拟及参数优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Zhang Zhenran. Research on numerical simulation and parameters optimization on plasticizing process of injection molding screw[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [8] 李福. 注塑机塑化参数对能耗的影响 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
Li Fu. Research on the impact of injection parameters to the energy consumption of the injection molding machine[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [9] 史铁钧, 吴德峰. 高分子流变学基础 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
Shi Tiejun, Wu Defeng. Basic concepts for macromolecule rheology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [10] 刘延华, 魏丽乔, 吴世干, 等. 聚合物成型机械 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
Liu Yanhua, Wei Liqiao, Wu shigan et al. Polymer molding machinery[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2005.