

# 基于改进的PID算法控制的注塑机注射速度系统

## An Injection Speed Tracking System Based on Improved PID Algorithm

陈黎 CHEN Li

- 重庆财经职业学院应用技术学院, 重庆 402160

- College of Applied Technology, Chongqing College of Finance and Economics, Chongqing 402160, China

● 摘要: 注塑机的注射速度是影响塑料成品品质的一个重要因素, 实现良好的注射速度控制难度较大。在现有文献研究的基础上, 提出了一种改进的PID控制器。该控制器由常规PID控制器加一个设定滤波滤波器构成。利用注塑机注射速度系统的一阶积分时滞模型, 进行了仿真实验, 结果表明, 改进的PID控制器具有良好的追踪性能和调节性能, 并且鲁棒性较好, 能够满足注塑机注射速度控制的需求。

● Abstract: The injection speed of injection molding machine is an important factor that affecting the quality of plastic products and it is hard for controlling the injection speed. A new improved PID controller based on the existing literature research was proposed which was consisted of a conventional PID controller and a set-point filter. The simulation experiment of the method was carried out under the first-order integrating time-delay model of the injection speed system of the injection molding machine. The results show that the improved PID controller has good tracking performance and adjustment performance, and has good robustness, which can meet the needs of injection speed control of injection molding machine.

● 关键词: 注塑机; 注射速度; PID控制器; 直接分析方法; 闭环系统

● 中图分类号: TP273 ● 文献标识码: A

● Key words: Injection molding machine; Injection speed; PID controller; Direct synthesis method; The closed-loop system

注塑机中控制器的设计是至关重要的环节。目前, 国内的注塑机控制器进口依赖程度高, 生产成本大<sup>[1]</sup>。因此, 研发拥有国内知识产权、性能良好的注塑机控制器具有较高的社会价值和经济价值。

注塑机的生产过程具有间歇性和重复性的特点, 且工作过程中需要温度、压力和速度等多个参数的有效且高精度控制, 注射速度是影响塑料品质的最关键的因素之一<sup>[2]</sup>。如果注射速度过高, 会造成熔融材料进入模具腔体时流动不规则, 使熔融材料在模具中排气不畅通, 从而产生塑料制品表面凹凸不平的现象。如果注射速度太慢, 会使熔融材料在模具浇筑系统中停留太久, 造成塑料成品因种种缺陷而导致品质变差, 例如成品熔接痕迹、欠注、残余应力大等<sup>[3]</sup>。因此, 研究注塑机的注射速度控制具有十分重要的意义。

注塑机中多采用PID控制器, 要求其超调量尽可能小, 且响应速度尽量快, 同时具有优良伺服性能、调节性能和鲁棒性能<sup>[4]</sup>, 以保证熔融材料的表面流速接近常数, 模腔体内分子排列取向一致, 使得

塑料成品表面光滑、没有烧焦、不会产生飞边等缺陷<sup>[5]</sup>。

很多文献提出了针对注塑机注射速度系统的PID控制器设计。文献[6]提到注塑机注射速度曲线的分时段选择准则, 文献[7]给出注塑机注射速度和伺服阀开度的传递函数, 文献[8]给出注塑机注射速度系统的四阶传递函数系统模型, 文献[9]使用线性二次高斯方法来估计状态使得控制器性能大幅度提高。虽然这些方法有各自的算法优越性, 但是注射精度还有待提高。

注塑机的注射速度系统是一个高阶时滞系统模型, 为了简化繁复的计算过程, 可使用各种系统降阶技术对高阶系统简化, 最后得到一个一阶积分时滞系统。

目前, 国外学者研究针对一阶积分系统的PID控制算法, 文献[10]中建立了一种新的串级控制结构。该结构是由PD控制器与PID控制器组成, 这种控制结构由于在前向通道使用了PD控制器, 因此响应速度较快; 但超调量失控增长和扰动抑制性能

变差。文献[11]提出使用直接分析方法结合主导极点配置方法设计常规结构的PID控制器。文献[12]提出了一种优化的并行级联控制器PCCS。这种PID控制结构由扰动抑制控制器、设定点控制器和调稳控制器3个部分组成,仿真结构表明,这种控制器各方面性能良好,但是设计过程复杂、工程适用性较差。

本文将研究注塑机注射速度的高阶系统模型,利用其简化的一阶积分时滞系统,设计一种改进的PID控制器。该控制器采用二自由度控制结构,并且可实现最小超调量,同时能够使得系统快速响应,且具有良好的伺服性能和扰动抑制性能以及鲁棒性。

本文最大的创新点在于提出一种新的二自由度PID控制结构,同时将多主极点配置法和直接分析方法结合对PID控制器参数进行求解。其中二自由度的控制结构由常规PID控制器在设定点位置增加一个超前滞后滤波器组成。控制器参数与滤波器参数分开求解。参数的整定规则由调节参数 $\lambda$ 和PID控制器参数的解析表达式的形式给出。设定点滤波器参数的求解是基于通过选择特定的设定点权值,用两个设定点滤波器模型的零点补偿所需传递函数两个极点而实现的。

## 1 方法设计

### 1.1 PID控制结构的设计

PID控制结构由式(1)描述:

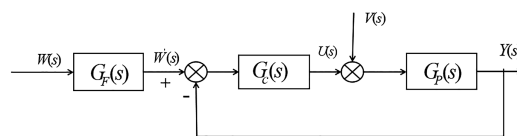
$$U(s) = r_0 \{ eW(s) - Y(s) + \frac{1}{\tau_i s} [W(s) - Y(s)] + \tau_d s [fW(s) - Y(s)] \} \quad (1)$$

式中:  $U(s)$  为过程输入量;  $W(s)$  为期望变量;  $Y(s)$  为被控变量;  $r_0$  为控制器增益;  $\tau_i$  为积分时间常数;  $\tau_d$  为微分时间常数;  $e$  为比例项的设定点权重参数;  $f$  为积分项的设定点权重参数<sup>[13]</sup>。  $e$  和  $f$  范围均在 0~1 之间。本文所设计的控制结构如图1所示。设定点滤波器  $G_F(s)$  由式(2)表示:

$$G_F(s) = \frac{W'(s)}{W(s)} = \frac{e\tau_i\tau_d s^2 + f\tau_i s + 1}{\tau_i\tau_d s^2 + \tau_i s + 1} \quad (2)$$

常规PID控制结构由式(3)表示:

$$G_C(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \frac{(\alpha s + 1)}{(\beta s + 1)} \quad (3)$$



▲ 图1 二自由度PID控制结构  
Fig.1 Control structure of 2-DOF PID controller

### 1.2 PID控制器和滤波器参数求解

一阶积分时滞系统的传递函数如式(4)所示:

$$G_P(s) = \frac{k_p e^{-Ls}}{s(\tau s + c)} \quad (4)$$

从  $W'(s)$  到  $Y(s)$  的特征方程如式(5)所示:

$$N = 1 + G_C G_P = 0 \quad (5)$$

将式(3)和式(4)同时带入式(5),结果如式(6)所示:

$$N = 1 + \frac{k_p(1 + Ps)e^{-Ls}}{s(\tau s + c)} k_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \frac{(\alpha s + 1)}{(\beta s + 1)} = 0 \quad (6)$$

使用一阶帕德近似处理方程(6)中的时滞,结果如式(7)所示:

$$1 + \frac{k_p k_c (1 + Ps)(1 - 0.5Ls)(\tau_d \tau_i s^2 + \tau_i s + 1)(\alpha s + 1)}{\tau_i s^2 (\tau s + c)(1 + 0.5Ls)(\beta s + 1)} = 0 \quad (7)$$

简化式(7)同时提取  $s^5$ ,  $s^4$ ,  $s^3$ ,  $s^2$  和  $s$  的公因式,结果如式(8)所示:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{0.5\tau_i\tau\beta L}{k_c k_p} - 0.5\alpha\tau_i\tau_d PL \right) s^5 + \\ & \left( \frac{\beta\tau\tau_i}{k_c k_p} + \frac{0.5Lc\beta\tau_i}{k_c k_p} + \frac{0.5\tau_i\tau L}{k_c k_p} - 0.5\tau_i\tau_d PL - \right. \\ & \left. 0.5\alpha\tau_i\tau_d L + \alpha P\tau_i\tau_d - 0.5\alpha\tau_i PL \right) s^4 + \\ & \left( \frac{c\beta\tau_i}{k_c k_p} + \frac{0.5Lc\tau_i}{k_c k_p} + \frac{\tau\tau_i}{k_c k_p} + \alpha\tau_i\tau_d - 0.5\tau_i\tau_d L - \right. \\ & \left. 0.5\alpha\tau_i\tau_d L + P\tau_i\tau_d - 0.5\tau_i PL + P\alpha\tau_i - 0.5PL\alpha \right) s^3 + \\ & \left( \frac{c\tau_i}{k_c k_p} + \tau_i\tau_d + \alpha\tau_i - 0.5\tau_i L - 0.5\alpha L + P\tau_i + \right. \\ & \left. \alpha P - 0.5PL \right) s^2 + (\alpha + \tau_i - 0.5L + P)s + 1 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

二自由度结构的闭环传递函数期望特征方程是由3阶主导极点和2阶非主导极点构成,结果如式(9)所示:

$$\left( \frac{\lambda}{5} s + 1 \right)^2 (\lambda s + 1)^3 = 0 \quad (9)$$

整理后,结果如式(10)所示:

$$\frac{\lambda^5}{25} s^5 + \frac{13}{25} \lambda^4 s^4 + \frac{58}{25} \lambda^3 s^3 + \frac{106}{25} \lambda^2 s^2 + \frac{17}{5} \lambda s + 1 = 0 \quad (10)$$

式(8)和式(10)中的  $s^5$ ,  $s^4$ ,  $s^3$ ,  $s^2$  和  $s$  的相关系数相等关系整理,结果如式(11)~式(15)所示:

$$\frac{\lambda^5}{25} = \frac{0.5\beta L\tau_i\tau}{k_c k_p} - 0.5\alpha PL\tau_i\tau_d \quad (11)$$

$$\frac{13}{25}\lambda^4 = \frac{\beta\tau_i}{k_c k_p} + \frac{0.5Lc\beta\tau_i}{k_c k_p} + \frac{0.5\tau L\tau_i}{k_c k_p} - 0.5PL\tau_i\tau_d - 0.5\alpha L\tau_i\tau_d + \alpha P\tau_i\tau_d - 0.5PL\alpha\tau_i - 0.5\alpha PL\tau_d \quad (12)$$

$$\frac{58}{25}\lambda^3 = \frac{c\beta\tau_i}{k_c k_p} + \frac{0.5Lc\tau_i}{k_c k_p} + \frac{\tau\tau_i}{k_c k_p} + \alpha\tau_i\tau_d - 0.5\alpha\tau_i L - 0.5\alpha\tau_d L + \alpha P\tau_i + \alpha P\tau_d - 0.5\alpha PL - 0.5\tau_i\tau_d L + P\tau_i\tau_d - 0.5\tau_i PL - 0.5PL\tau_d \quad (13)$$

$$\frac{106}{25}\lambda^2 = \frac{c\tau_i}{k_c k_p} + \alpha\tau_i + \alpha\tau_d - 0.5\alpha L + \alpha P + \tau_i\tau_d - 0.5\tau_i L - 0.5\tau_d L + P\tau_i + P\tau_d - 0.5PL \quad (14)$$

$$\frac{17}{5}\lambda = \tau_i + \tau_d + \alpha + P - 0.5L \quad (15)$$

整理式(11)~式(15)逻辑关系,得到调优参数 $\lambda$ 与PID参数呈现直接关系。尝试将不同的 $\lambda$ 值匹配特定的 $M_s$ 值,将式(11)~式(15)使用matlab可以求解出 $\tau_i$ 、 $\tau_d$ 、 $k_c$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 。

### 1.3 设定滤波器参数的求解

常规PID控制结构的期望特征方程是将三阶主导极点和二阶非主导极点构成,设置点滤波器以抵消伺服问题中的较大超调和提高响应速度,得到超前滞后滤波器的参数 $e$ 和 $f$ ,即用2个零点对阶主导极点中的其中两阶极点进行补偿,结果如式(16)所示:

$$(\lambda s + 1)^2 = e\tau_i\tau_d s^2 + f\tau_i s + 1 \quad (16)$$

### 1.4 调优参数 $\lambda$ 的选择和整定规则

调优参数 $\lambda$ 的选择,需要保证所有控制器参数都是正值,使控制器具有优良的追踪性能、扰动抑制性能和鲁棒性(以 $M_s$ 为单位)。经过大量模拟实验和分析后,确定具有良好的追踪性能和扰动抑制性能和鲁棒性的 $\lambda$ 范围为0.5~2 L<sup>[13]</sup>。本文选择调优参数 $\lambda$ ,  $M_s=2$ ,以达到控制器性能最佳。控制器参数的整定规则如式(17)~式(22)所示:

$$\lambda/L = 0.1345 + 1.003(L/\tau)^{0.9293} \quad (17)$$

$$\tau_i/\tau = -0.3964 + 3.956(\lambda/\tau)^{1.303} \quad (18)$$

$$\tau_d/\tau = 0.06032 + 0.4703(\lambda/\tau)^{1.443} \quad (19)$$

$$k_p k_c \tau = 0.0502 + 0.61402(\lambda/\tau)^{-2.033} \quad (20)$$

$$\alpha/\tau = 0.9996 - 8.087 \times 10^{-5} (L/\tau)^{11.56} \quad (21)$$

$$\beta/\tau = 0.1123 + 0.2381(\lambda/\tau)^{1.789} \quad (22)$$

## 2 鲁棒性与稳定性指标

为了充分证明该方法的有效性,本文采用了 $M_s$ (鲁棒性)、IAE(积分性能)和TV3个指标。

### 2.1 鲁棒性指标 $M_s$

将灵敏度函数振幅比 $M_s$ 的最大值作为PID控制器鲁棒性和稳定性的度量。本文方法的闭环控制系统灵敏度函数如式(23)所示:

$$S(s) = \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (23)$$

对于本文所设计的PID控制器,  $M_s$ 按式(24)计算:

$$M_s = \left| \frac{1}{1 + G_p G_c} \right|_{\text{MAX}} = \left| \frac{1}{1 + \frac{k_p(1+Ps)e^{-Ls}}{s(\tau s + 1)} k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) \left(\frac{\alpha s + 1}{\beta s + 1}\right)} \right|_{\text{MAX}} \quad (24)$$

### 2.2 积分性能指标IAE

IAE指标的大小可表征控制器性能是否优良。IAE值越小,代表响应速度越快和伺服性能和调节性能越好。IAE按式(25)计算:

$$\text{IAE} = \int_0^\infty |e| dt \quad (25)$$

### 2.3 TV指标

TV用来衡量PID控制器输出的平滑程度。TV值越小,代表控制器输出曲线更平滑,系统波动越小。在注塑机注射速系统中, TV值小表征着注射速度稳定,应力稳定。如果闭环系统的控制器输出为 $u(t)$ ,将 $u(t)$ 离散为序列 $[u_1, u_2, u_3, \dots, u_i, \dots]$ 时, TV按式(26)计算:

$$\text{TV} = \sum_{i=0}^\infty |u_{i+1} - u_i| \quad (26)$$

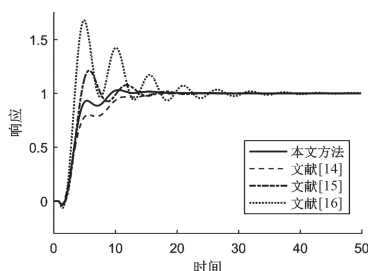
## 3 实例仿真

将本文设计的方法与Jin等<sup>[14]</sup>、Pai等<sup>[15]</sup>和Ali等<sup>[16]</sup>提出的最新方法进行了比较。由注塑机注射速度系统高阶模型简化后的一阶积分时滞系统进行控制,结果如式(27)所示:

$$G_p = \frac{0.198e^{-s}}{s(2.373s+1)} \quad (27)$$

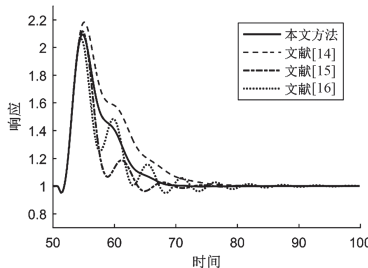
将Jin等<sup>[14]</sup>、Pai等<sup>[15]</sup>和Ali等<sup>[16]</sup>的方法中调优参数 $\lambda$ 设置成2, 闭环传递函数的二阶极点位于 $s=-0.6246$ , 三阶极点位于 $s=-0.1249$ 。表1和表2列出了所有对比方法的在伺服问题和调节问题中的IAE、TV和OS指标的数值。

图2表示所有控制器的伺服响应, 图3表示所有控制器的调节响应, 图4表示所有控制器的方波响应, 图5表示在时滞参数+5%扰动下的伺服响应, 图6表示在时滞参数+5%扰动下的调节响应。



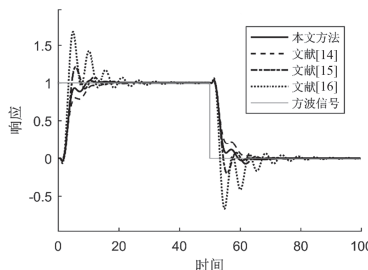
▲ 图2 闭环系统的伺服响应

Fig.2 Servo responses of closed-loop system



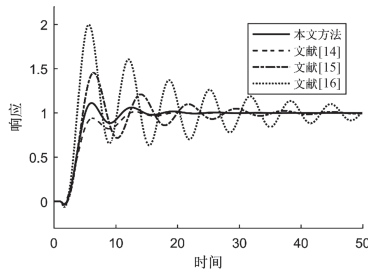
▲ 图3 闭环系统的调节响应

Fig.3 Regulatory responses of closed-loop system



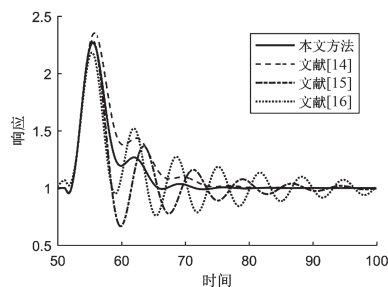
▲ 图4 闭环系统的方波响应

Fig.4 Square wave responses of closed-loop system



▲ 图5 闭环系统在参数扰动下的伺服响应

Fig.5 Servo responses of f closed-loop system in mismatch condition



▲ 图6 闭环系统在参数扰动下的调节响应

Fig.6 Regulatory responses of closed-loop system in mismatch condition

从图2可以看出, 相比于Jin等<sup>[14]</sup>、Pai等<sup>[15]</sup>和Ali等<sup>[16]</sup>的方法, 本文方法的伺服性能最好, 具有快速的上升时间和较小的超调量。Ali等<sup>[16]</sup>虽然上升时间较快, 但却具有最大的超调量和稳定时间。根据图3以及调节响应的TV指标可以观察, 本方法具有优于Pai等<sup>[15]</sup>和Ali等<sup>[16]</sup>的调节响应。由表1的调节性能的IAE和超调量(OS)指标可以出, 本方法优于Jin等<sup>[14]</sup>中的方法。由图4的方波响应图可以看出, 本方法跟随给定信号的性能最强。图5和图6均给过程模型的时滞增加5%的扰动, 以观察各种控制器在系统模型失配的情形下响应效果, 可以看出Ali等<sup>[16]</sup>没有回到稳定状态, 本方法振荡最不明显, 充分表明本文方法具有良好的鲁棒性能。

本文所述改进的PID控制器同时兼备良好的追踪性能和扰动抑制性能, 并且能够快速响应、快速稳定、鲁棒性强, 达到了注塑机注射速度控制的要求, 并能提高注塑品质。

▲ 表1 伺服性能指标对比

Tab.1 Performance comparison of servo responses

方法	IAE	TV	OS
本文方法	3.918	2.0172	0.033
Jin等 <sup>[14]</sup>	4.7622	3.3320	0.001
Pai等 <sup>[15]</sup>	4.4579	3.4514	0.241
Ali等 <sup>[16]</sup>	6.7312	10.7281	0.708

▲ 表2 调节性能指标对比

Tab.2 Performance comparison of regulation responses

方法	IAE	TV	OS
本文方法	6.7630	3.0237	1.092
Jin等 <sup>[14]</sup>	9.0023	2.7953	1.192
Pai等 <sup>[15]</sup>	4.9721	4.4298	1.127
Ali等 <sup>[16]</sup>	6.0048	7.2910	1.023

## 4 结论

本文就注塑机注射速度四阶系统模型简化后



的一阶积分时滞模型的鲁棒控制,在现有文献研究的基础上提出了一种新的改进的PID控制器。该控制器由常规PID控制器加一个设定点滤波器构成。本文方法在注塑机注射速度系统的一阶积分时滞系统进行了仿真实验,结果表明,本文方法具有良好的追踪性能和调节性能,并且鲁棒性较好,能够满足注塑机注射速度的需求。

#### 参考文献:

- [1] 张永胜,田智慧. 基于专家PID的电液混合式注塑机的智能控制[J]. 合成树脂及塑料, 2019(1): 21-27.
- [2] 罗亮,陈茂林,刘知贵,等. 基于闭环PD型迭代学习控制的注塑机注射速度轨迹跟踪控制[J]. 机械设计与制造, 2016, 303(5): 32-34.
- [3] 沈良聪. 绿色创新的高射速塑料包装注塑机的液压系统[J]. 塑料包装, 2017, 27(5): 21-26.
- [4] 袁卫明. 伺服注塑机高速响应的液压控制系统[J]. 轻工机械, 2018, 36(5): 87-91.
- [5] 林亚扁. 注塑机的变频节能控制研究[J]. 现代制造技术与装备, 2019(5): 23-31.
- [6] Nunn, R. E, Grolman, C. P. Adaptive process control for injection molding[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 9(3): 282-298.
- [7] Kamal M R, Varela A E, Patterson W I. Control of part weight in injection molding of amorphous thermoplastics[J]. Polymer Engineering & Science, 1999, 39(5): 940-952.
- [8] Liu T, Yao K, Gao F R. Identification and Autotuning of Temperature-Control System With Application to Injection Molding[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(6): 1 282-1 294.
- [9] Nunn R E, Grolman C P. Adaptive process control for injection molding[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 1990, 9(3): 282-298.
- [10] Ajmeri M, Ali A. Direct synthesis based tuning of the parallel control structure for integrating processes[J]. International Journal of Systems Science, 2015, 46(13): 2 461-2 473.
- [11] Anil C, Sree R P. PID control of integrating systems using multiple dominant poleplacement method[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2015, 10(5): 734-742.
- [12] Raja G L, Ali A. Modified parallel cascade control strategy for stable, unstable and integrating processes[J]. ISA Transactions, 2016, 65(5): 245-453.
- [13] 郑义民,王永初. 不同结构PID控制性能的分析 and 比较[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2005, 26(1): 69-71.
- [14] Jin Q B, Liu Q. Analytical IMC-PID design in terms of performance/robustness tradeoff for integrating processes: From 2-Dof to 1-Dof [J]. Journal of Process Control, 2014, 24(3): 22-32.
- [15] Pai N S, Chang S C, Huang C T. Tuning PI/PID controllers for integrating processes with deadtime and inverse response by simple calculations[J]. Journal of Process Control, 2010, 20(6): 726-733.
- [16] Ali A, Majhi S. PID controller tuning for integrating processes[J]. ISA Transactions, 2010, 49(7): 70-78.

## 行业动态

### Teknor Apex扩大了医疗级TPE产品线

该新系列由Medalist包覆成型的医用级TPE化合物组成,它们对医用级聚碳酸酯(PC)和PC合金具有很强的粘合力,并且具有可增强耐磨性的配方。

Medalist MD-34900系列化合物有50、60和70邵氏A级硬度,适用于一般医疗包覆成型应用。但是, MD-36975 TPE化合物的硬度等级是75 Shore A,专门为可穿戴设备中的过模制而设计,对通常遇到的乳液和消毒剂具有出色的抗腐蚀性。

材料巨头科思创与Teknor Apex联合进行了一个项目。在该项目中,这些材料在经过嵌件和多次注射成型等工艺后,在多种医用级Makrolon PC、Bayblend和Makroblend PC合金上进行了包覆成型。该项目评估了包括黏附性、可加工性和耐化学性等材料特性。剥离强度的结果表明, Medalist化合物与科思创的工程热塑性塑料黏合得很好。在MD&M West展会期间,科思创和Teknor Apex将共同撰写白皮书,详细介绍了实验和产品性能。

Teknor Apex高级市场经理Ross van Royen表示:“ Medalist TPE可以很好地替代注塑成型的液态有机硅。因为它们不需要使用底漆,而且生产周期更短(避免冗长的固化过程),并可以在常规注塑设备上进行处理。”

Van Royen补充说:“我们在TPE的黏合改性技术上进行了大量投资,提高了对黏合的理解,开发了更经济的配方,并提高了这些产品在复杂零件设计中的黏合能力。”

Medalist MD-34900系列和MD-36975化合物已在全球上市。但是作为医用级TPE,它们的配方受到严格的控制。它们仅使用FDA列出的食品级成分制成,符合ISO 10993-5的生物相容性要求,并符合CONEG, RoHS和加州第65号提案的要求。这些化合物在多个获得ISO 13485认证的设施中生产,以确保供应安全。