文章编号: 1002-2082(2007) 06-0684-05

自由曲面光学透镜注射成型误差因素研究

杜 雪, 王尔祺, 李荣彬, 张志辉
(香港理工大学 工业与系统工程学系先进光学制造中心, 香港 九龙)

摘 要: 自由曲面光学透镜注射成型误差对其光学性能将产生直接影响。注射成型过程中,注射工艺参数组合的优劣,直接影响成型误差的大小。为了获得高精密度的光学元件,就热塑性塑料的注射温度、模具温度、注射压力、保压压力及保压时间等主要工艺参数,对注射成型误差的影响进行综合研究,并且进行了实验验证。研究结果表明: 适当提高注射温度与模具温度,同时采用高压注射、高压保压以及快速保压工艺,可显著降低注塑工件的体积收缩率,显著提高面形精密度,其光学表面面形误差小于 0.1μm。可为注射工艺设计提供合理的依据。

关键词: 光学技术与仪器; 自由曲面光学; 塑料透镜; 注射成型误差因素
中图分类号: TH74-34 文献标志码: A

Investigation on error factor of injection molding plastic for freeform optics

S. TO, Er-qi WANG, W. B. LEE, C. F. CHEUNG
(Advance Optics Manufacturing Centre, Department of the Industrial and System Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract The error factor of injection molding has a direct effect on the quality of a plastic freeform optics. In the process of injection molding, the combination of injection parameters and the injection process control significantly affects the error of molded plastics. In order to obtain higher precision plastic optical components, this paper focused on some key parameters such as the temperature of mold and injected material, injection pressure, holding pressure and holding time, and analyzed their effect on the quality of injected part. The theoretical research was proved by the experiments. The result indicates that, the shrinkage rate of volume is reduced, and the form and surface accuracy is improved by increasing the temperature of injection and mold, the pressure of injection and holding pressure. Thus, the precision plastic optical components can be obtained with the error of less than 0.1μm.

Key words optical technology and instrument; freeform optics; plastic lens; error factor of injection molding

引言

随着信息技术与多媒体技术的迅速发展,近十几年来,光学塑料元件在光电装置、数码照相机、手机、光碟以及投影物镜等方面的应用需求迅猛增加。由于光学塑料元件的制造技术与产品质量的进步与提高,使其应用范围迅速扩展到许多原先被光学玻璃元件占统治地位的领域。未来的大规模应用将包括: 光通信、高分辨率微显示器以及更远期的

收稿日期: 2007-05-17; 修回日期: 2007-09-13
作者简介: 杜雪,女,英国布尼尔大学硕士,香港理工大学博士,助理教授,长期从事超精密加工技术及精密注塑技术与材料科学研究。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高速光学计算机。因此,迫使人们重视注塑光学元件设计和制造策略的研究,尤其是在提高塑料光学元件制造的精密度方面进行深入的研究。

高精密度自由曲面光学塑料透镜制造质量取决于光学系统及其元件的设计、精密注射模具的设计制造、注射设备的选择、注射工艺参数组合匹配的优化技术以及模具与注塑工件的精密测量等关键工艺技术。

在热塑性光学塑料透镜注射成型过程中,需要控制的工艺参数较多。本文重点考虑对收缩率与残余应力影响较大的几个主要因素,即注射温度、模具温度、注射压力、保压压力以及保压时间等工艺参数。通过理论分析,研究它们对注射工件收缩率与残余应力的影响及其相互间的制约关系。同时,对实际光学系统进行注射成型实验。通过反复实验,结果表明理论分析研究结果是正确的。因此,该结果可作为模具设计与工艺过程控制的指导原则。

1　光学透镜注射成型的工艺参数及其相互间的制约关系与优化组合

1.1　注射温度

在注塑产品结构尺寸一定的情况下,所需注射压力和注射时间不仅与浇注系统的结构和尺寸有关,而且还与熔料温度和模具温度有关。适当地提高注射温度和模具温度,对快速充模是有利的。随着注射温度的提高,熔体的表观粘度呈指数关系下降。粘度降低,熔体易于充模。但是,注射温度越高,熔体注入型腔后的温差也越大。注入型腔后的熔料温度分布不均,极易造成注射工件的收缩不均匀,产生残余内应力及双折射现象,使工件的光学性能恶化,面形精度也达不到要求。为了提高塑料注射成型透镜的光学性能和表面光洁度,在提高注射温度的同时,也要适当提高注射压力,把高分子聚合物熔料挤到模具的光学表面,以减少充模流动的痕迹,从而复制出表面光洁度与模具的光学表面相同的塑料透镜。

1.2　模具温度

模具温度升高,冷却周期加长,会使生产效率下降。但是,模具温度越高,在型腔同一截面内的熔料温差越小。冷却时间增长,可使注入模腔中的高分子聚合物大分子的深度取向得到松弛,从而获得折射率均匀一致的高质量光学透镜。同时,适当地提高模具温度,对改善光学透镜产品的表面光洁度也是非常有利的。由于模具温度高,高分子聚合物颗粒保持熔化状态的时间较长,产品的致密性较好,表面光洁度也相应地得到了提高。

属于自由曲面类型的光学透镜品种众多。为了验证上面分析的正确性,设计了以下典型的光学系统进行实验。

如图 1所示,选取自由曲面中回转对称的光学系统(即非球面光学系统),将该光学组件反复进行注射成型实验。

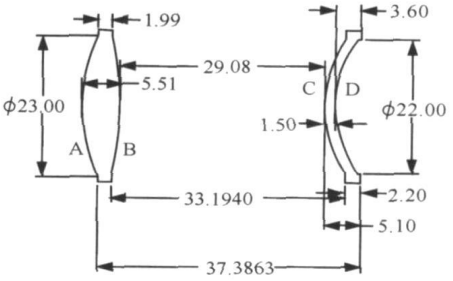

图 1　注射成型实验的非球面光学系统光学组件

Fig. 1　Optical module of aspheric optical system for injection molding experiment

图 1中,字母 A, B, C和 D分别表示光学系统的 4个光学表面。光学透镜的面形误差用 Form Talysurf Series 2 PGI 1240非球面测量系统检测,其分辨率为 10 nm。

实验设计 1: 改变模温

表 1　模温的变化范围从 80℃至 115℃

Table 1　Mold temperature between 80℃ and 115℃

模具温度/℃	注射压力/kgf	注射速度/(mm/s)	冷却时间/s	表面形状误差/nm			
				A	B	C	D
80	800	3-4-5	30	20.9	120.0	4.1	14.3
85	800	3-4-5	30	19.0	118.0	4.6	6.7
90	800	3-4-5	30	12.0	76.0	4.3	4.9
95	800	3-4-5	30	6.4	12.4	2.8	3.7
100	800	3-4-5	30	6.0	20.8	1.7	1.4
105	800	3-4-5	30	14.0	37.0	2.4	2.1
110	800	3-4-5	30	38.1	47.2	11.0	13.2
115	800	3-4-5	30	40.0	51.7	31.0	37.8

实验结果: 模具温度变化对注塑透镜光学表面形状误差的影响如图 2曲线所示。

实验结果表明: 模具温度上升至 90℃～100℃时,体积收缩率降到最小值;进一步提高模温,其体积收缩率随之上升。实验证明了前述理论分析的正确性。

1.3　注射压力与保压压力

注射到模具型腔中的高温熔体,在模具壁的冷

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

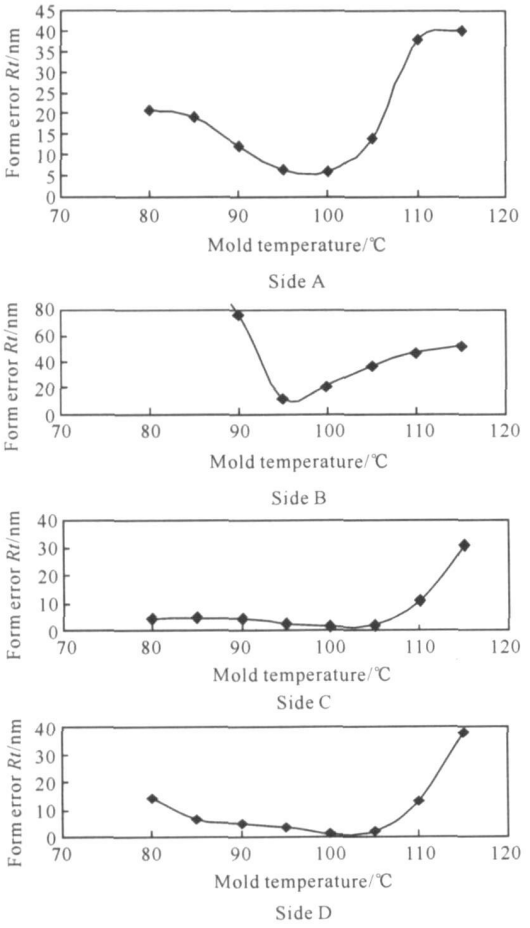

图 2　模具温度变化对注塑透镜表面形状误差的影响曲线

Fig. 2　Effect of mold temperature on apparent shape error of the plastic lens

却作用下, 由液体转变为固态, 其体积收缩率高达 25%。因此, 在熔体充满型腔的瞬间, 仍然需要保持较高的压力。在保压之下, 继续向型腔内注料, 即产生保压流动, 以弥补因冷却造成的体积收缩。

可压缩性是塑料熔体在保压过程中所表现出来的最重要的性质, 保压流动的过程就是利用熔体的可压缩性, 来解决工件注射过程中过量收缩的问题。

保压流动和充模的压实流动都是在高压下的熔体致密流动。该流动的特点是熔体的流速小, 不起主导作用, 而压力却是影响过程的主导因素。在保压阶段, 模内的压力和比容不断地变化。研究表明: 热收缩形成的原因, 在于高分子聚合物的比容 V_m 是一个随温度变化的函数。当高分子聚合物在模具型腔内由熔融温度下降到脱模温度时, 其比容减少, 因此产生热收缩现象。塑料在常温、常压下的比容与浇口封闭时的温度、压力条件下的比容之差称为体积收缩率, 其关系用以下公式表示:

$$S_v = (V_m - V_s)/V_m \, 100\% \tag{1}$$

式中: S_v 为体积收缩率; V_m 为浇口封闭时的温度、压力条件下的比容 (cm^3/g); V_s 为常温、常压下的比容 (cm^3/g)。

由 (1)式得知, 只要控制浇口封闭时的比容值 V_m, 即能达到控制成型的体积收缩率 S_v 之目的。而控制比容值, 就是要控制注射和保压过程中的熔料温度和压力。

由 Spencer 和 Glimore 所推荐的状态方程可知温度、压力、和比容之间的关系[1]:

$$(P + {}^{C})(V_m - w) = R' T \tag{2}$$

式中: P 为外加压力 (N/cm^2); ^{C} 为内压力 (N/cm^2); V_m 为比容 (cm^3/g); w 为在绝对温度为 0℃ 时的比容 (cm^3/g); R' 为修正的气体常数 (N cm/g K); T 为绝对温度 (K)。

由 (2)式可知, 比容 V_m 随温度 T 上升而增大, 随压力的上升而缩小。因此, 只要恰当地提高注射温度、注射压力和保压压力, 就可使关系式两边达到平衡, 从而使体积收缩率大大降低, 获得高精密度的注射成型光学元件之最佳结果。

实验设计 2 改变注射压力

表 2　压力变化范围从 400 kgf 到 1000 kgf

Table 2　Injection pressure between 400 kgf and 1000 kgf

模具温度 /℃	注射压力 /kgf	注射速度 /(mm/s)	冷却时间 /s	表面形状误差 /nm			
				A	B	C	D
95	400	3-4-5	30	54.5	74.0	4.21	3.60
95	300	3-4-5	30	252	76.0	2.90	7.50
95	350	3-4-5	30	55.4	53.2	2.13	10.90
95	450	3-4-5	30	46	86.0	6.10	5.20
95	500	3-4-5	30	48	47.0	5.24	4.47
95	550	3-4-5	30	168	48.0	4.40	2.30
95	600	3-4-5	30	130	39.0	2.90	1.40
95	650	3-4-5	30	27	13.0	22.00	1.03
95	700	3-4-5	30	71	18.0	2.90	4.70
95	750	3-4-5	30	17	75.0	1.90	1.90
95	800	3-4-5	30	6.4	12.4	2.80	3.70
95	850	3-4-5	30	5.6	13.0	3.20	4.20
95	900	3-4-5	30	5.8	10.6	7.20	4.60
95	950	3-4-5	30	5.7	10.5	5.00	5.80
95	1000	3-4-5	30	5.4	8.5	6.10	7.00

实验结果: 注射压力变化对注塑透镜表面形状误差的影响如图 3曲线所示。

实验结果表明: 增加注射压力将导致体积收缩率显著下降。因此, 在保压工艺实施过程中, 完全可以利用塑料熔体的可压缩性, 确保浇口封闭时熔料

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的比容与常温、常压下的比容相等,尽量降低或者避免体积收缩率对塑料透镜面形质量产生不良的影响,从而获得高精密度的光学透镜。

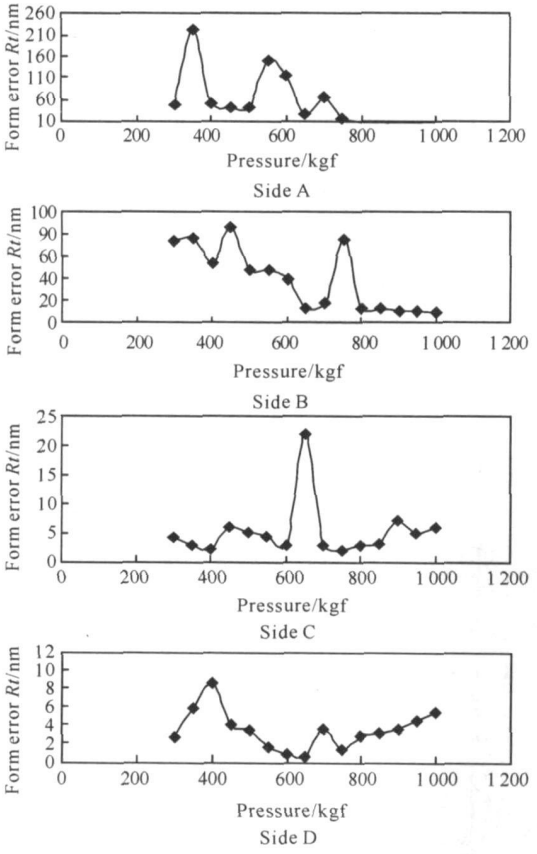

图 3　注射压力变化对注塑透镜表面形状误差的影响曲线

Fig. 3　Effect of injection pressure on apparent shape error of the plastic lens

1.4　工艺参数组合匹配的优化策略

适当提高注射温度与模具温度,同时采用高压注射、高压保压以及快速保压工艺,可以使注射工件的体积收缩率大大降低,面形精度大大提高,误差达到 0.1μm以下,从而获得高精密度的塑料光学元件。

2　注射模具设计的指导原则

2.1　合理的浇注系统

型腔内塑料熔体的体积收缩率分布不均匀与型腔压力分布不均匀有直接关系。对尺寸较小的透镜,设计模具时,应考虑各型腔的流道长度、截面积和浇口尺寸。只有这样才能使各个型腔在注射时,保持压力分布一致,以保证各型腔注射成型的透镜质量的一致性和稳定性。对于尺寸较大的透镜,由于其直径和厚度较大,塑料熔体在经过浇口快速注入型腔时,高分子聚合物易产生分子取向,从而在透镜内,尤其是在浇口附近产生较大的内应力,出现双折射现象。因此,在设计模具时,应当采用"二次浇口"等特种浇口的设计方案。

2.2　模具温度的控制系统

光学塑料透镜的注射模具通常是一模多腔的。为使各个型腔注射的工件收缩率相一致,应当严格保证各个型腔的温度均匀一致性。对大直径的透镜,应当特别注意:除了要严格保证各个型腔的温度均匀一致性之外,还应当考虑并力求做到同一个型腔的各个点之间的温度严格保持均匀一致。为此,应当采取多点测温、温度自动控制、自动调节的方法与措施,立体控温管道的设计方案是行之有效的。

2.3　透镜模芯面型设计的特殊要求

1) 透镜光学表面应比有效(清晰成像)的孔径大,压边应比玻璃透镜大,以适应边缘不同的热力性能;

2) 注射光学元件压边的厚度不能像传统光学玻璃透镜那样,其横截面薄厚不均匀。应将(凸)透镜边缘(有效孔径之外)的薄边,设计得与透镜中心区域一样厚,以防止注射成型收缩不均匀。

3　结束语

塑料光学元件注射技术是个复杂的系统工程,为了获得亚微米面形精度与纳米量级的表面粗糙度,在注射过程中应当克服体积收缩、塑流线、应力双折射以及变形等主要工艺缺陷。

前面理论分析与实验研究结果表明:适当提高注射温度与模具温度,同时采用高压注射、高压保压以及快速保压工艺,可以使注射工件的体积收缩率大大降低,面形精密度大大提高。注射光学表面面形误差达到 0.1μm以下,从而获得高精密度的塑料光学元件。

由于注射过程需要控制的工艺参数较多,用理论分析与实验相结合来预测模具结构和控制各种误差因素对光学透镜质量的影响,这种方法相当有效,然而比较复杂。为了进一步解决上述存在的问题,可以通过塑料注射成型工艺条件的计算机仿真。首先,获得最佳的模具结构和工艺参数最佳的组合匹配,然后再有针对性地进行实验验证,以缩短实验与试制周期,降低生产成本,并且进一步提

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

高自由曲面光学塑料透镜的精密度。

致谢: 本文的工作得到香港理工大学研究资助委员会资助。

参考文献:

[1] 勾治践, 樊仲维, 卢锷, 等. 光学塑料透镜注射成型关键技术的研究 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(6): 526-531.
GOU Zhi-jian, FAN Zhong-wei, LU E, et al. Injection molding method for optical plastics lens [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(6): 526-531. (in Chinese)

[2] FUKUSHIMA A, KAWAZU M, ITO M, et al. Development of ultra-precise injection molding method for thermoplastic lenses [J]. SPIE, 1992, 1720: 50-59.

[3] OSSWALD T A, TURNG L, GRAMANN P J. Injection molding handbook [M]. Germany: Spinger-Verlag, 2000.

[4] 田守信, 郎小龙. 塑料透镜的注射成型 [J]. 长春光学精密机械学院学报, 1995, 18(3): 64-66.
TIAN Shou-xin, LANG Xiao-long. Shot foiming of the plastic lens [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1995, 18(3): 64-66. (in Chinese)

[5] 杨相利. 塑料光学元件制造 [J]. 光学仪器, 2000, 22(4): 27-34.
YANG Xiang-li. Fabrication of optical plastic component [J]. Optical Instrument, 2000, 22(4): 27-34. (in Chinese)

[6] 徐之海. 光学塑料注射成型的状态分析 [J]. 光学技术, 1995, 21(4): 32-35.
XU Zhi-hai. Analysis of states in optical plastic injection [J]. Optical Technique, 1995, 21(4): 32-35. (in Chinese)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net