

# 光学塑料透镜注射成型关键技术的研究

勾治践<sup>1</sup>, 樊仲维<sup>1</sup>, 卢 铿<sup>1</sup>, 吴清文<sup>2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021;

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 传统的塑料模具设计及注射成型工艺参数对经验的依赖性较强, 难以满足高精度光学塑料元件的成型需求。采用 CAD/CAE 技术对光学塑料透镜注射成型的充模及保压过程进行了计算机动态模拟, 研究了不同注射温度、压力、时间和保压温度、压力、时间对透镜面形质量的影响规律。

**关键词:** 光学塑料透镜; 注射成型; 充模分析; 保压分析

中图分类号: TP391.72 文献标识码: A

光学塑料透镜的注射成型, 注射温度、压力、时间以及保压压力、保压时间、模具温度等工艺条件的选择是注射成型技术的关键。传统上, 注射模具设计及注射工艺制定主要依赖于工程师的经验和技巧, 实际的缺陷也只靠反复试模给予修正, 缺乏理论依据和科学计算方法。由于光学塑料透镜的壁厚不均性, 使得用普通注射方法成型的塑料透镜密度及折射率分布不均, 透镜产生残余内应力及双折射现象, 面形精度无法满足使用要求。模具设计人员及工艺师如能预先知道熔料在流经浇注系统和型腔时的剪切速率、温度、压力及时间等, 就能合理确定模具结构和注射工艺, 提高产品的一次成功率。本文采用计算机模拟分析方法, 对光学塑料透镜的注射成型过程进行动态模拟, 研究注射温度、注射压力、注射时间、保压压力、保压时间、模具温度对透镜质量的影响规律, 为注射工艺确定提出具有理论依据的建议。

## 1 充模流动的计算机辅助分析

为了全面了解充模过程中的熔料温度、压力与时间的分布规律, 本文使用 MOLDFLOW 公司的 3D 流动分析模块进行了充模流动分析<sup>[1]</sup>。在进行多层分析时, 使用注射材料的 PVT 数据来分析高温熔料充模后的压缩与产品脱模后的收缩之间的关系。输入注射温度、注射压力、锁模力、模具温度等工艺参数后即可对透镜注射填充过程进行数值模拟。由于本模具结构采用的是一模四腔,

在输入有限元模型后, 对主流道、分流道、浇口、型腔及相应的重复系数等边界条件依次定义, 主流道的重复次数为 1, 分流道、浇口及型腔的重复次数为 4。

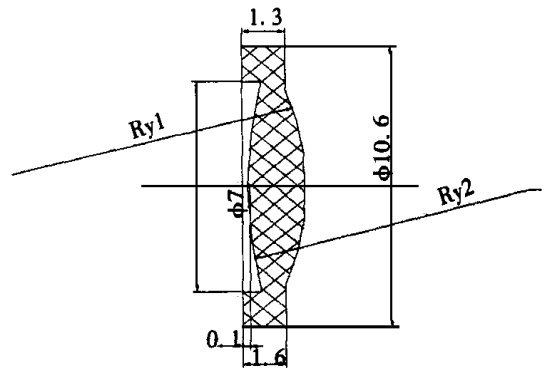


Fig. 1 Sketch of optical plastics product

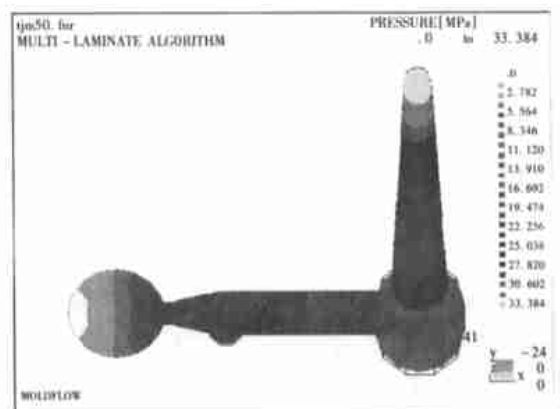


Fig. 2 Result of injecting pressure

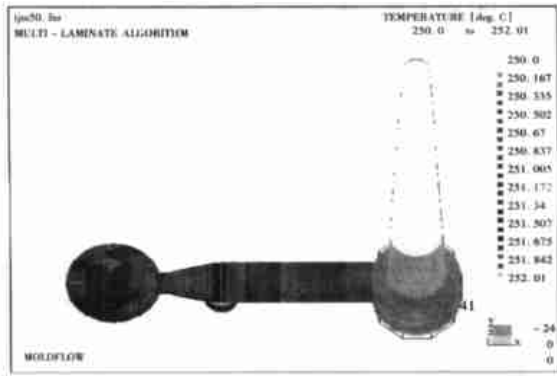


Fig. 3 Result of injecting temperature

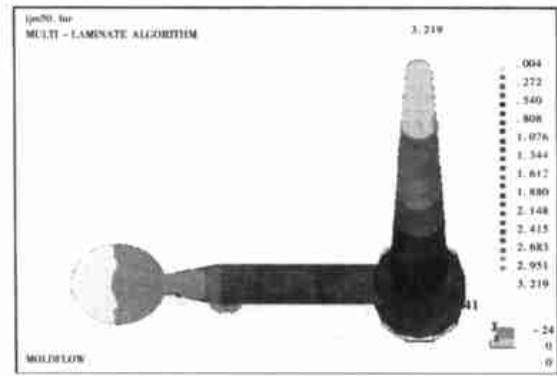


Fig. 4 Result of injecting time

图 1 是录音录像读写头中的非球面塑料光学透镜零件图。为了便于有限元模型的建立, 用  $R13.83$  和  $R14.46$  分别代替图中  $Ry1$  和  $Ry2$  非球面方程。图 2、图 3 及图 4 分别是注射结束时的压力分布、充模温度及充模时间分布结果。模拟条件: 模具温度  $70^\circ\text{C}$ , 熔料注射温度  $250^\circ\text{C}$ , 注射压力  $100\text{MPa}$ ; 浇口宽度为  $2.5\text{mm}$ , 浇口厚度为  $2.0\text{mm}$ , 浇口台阶为  $1.8\text{mm}$ 。注射材料为 ASAHI 公司的型号为 DE101 的 PMMA, 其传导率为  $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 比热容为  $2050.00\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , 密度为  $1015.00\text{kg}/\text{m}^3$ , 顶出温度为  $118.00^\circ\text{C}$ , 不流动温度为  $170.00^\circ\text{C}$ 。

从图 2 和图 4 可以看出, 将  $250^\circ\text{C}$  的熔体注满整个模腔需  $3.219\text{s}$  的时间, 所需压力为  $33.384\text{MPa}$ , 同时透镜内部存在  $10\text{MPa}$  的压力差, 该压力差的存在, 将导致透镜内部收缩不均。分析图 3 可知, 熔料经主流道、分流道、浇口充满型腔时, 熔料温度不但没有降低, 反而略有升高, 熔料温度分布在  $250\sim 252.01^\circ\text{C}$  之间, 透镜的温度分布范围在  $250.837\sim 251.675^\circ\text{C}$  之间。

在注射产品结构 and 尺寸一定的情况下, 所需注射压力和注射时间不仅和浇注系统的结构和尺寸有关, 而且还和熔料温度及模具温度有关。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。但注射温度越高, 注入型腔后的温差也越大; 而注入型腔中的高温熔料需在模具中经冷却后方可开模顶出制品, 注入型腔后的熔料温度分布不均, 极易造成产品收缩不均, 透镜产生残余内应力及双折射现象, 使面形精度无法满足使用要求。

为了提高塑料光学透镜的表面光洁度, 也可适当提高注射压力。注射压力过低, 注射时间长, 融化的高聚物在挤压到型腔表面上时可能冷却、凝固, 复制不出象模具型腔抛光表面的光洁度。增加注射压力, 把高聚物熔料挤到模具表面, 减少充模流动痕迹, 就能复制出与模具的光洁度一样的塑料透镜。

一般来讲, 模具温度提高, 冷却周期加长, 生产效率低, 但是, 模具温度越高, 在型腔同一截面内的熔料温度也越小; 冷却时间也越长, 也可使注入模腔中的高聚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产品。同时, 适当地增加模具温度对提高透镜产品的表面光洁度也是非常有效的。模具温度高, 高聚物颗粒保持熔化的时间较长, 产品的致密性好, 表面光洁度也就提高了。

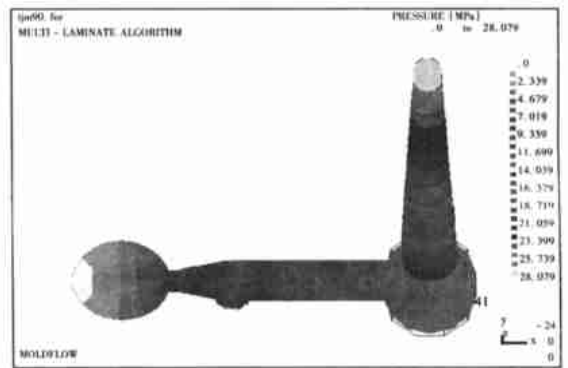


Fig. 5 Result of injecting pressure (process parameters and gate dimension modified)

图 5、图 6 和图 7 分别是上述模拟条件不变, 仅改变注射温度、注射压力、模具温度和浇口厚度的分析结果。注射温度为  $260^\circ\text{C}$ , 注射压力为  $100\text{MPa}$ , 模具温度为  $90^\circ\text{C}$ , 浇口厚度为  $1.5\text{mm}$ 。从图 5、图 6 和图 7 的分析结果可知, 由于提高了注射温度, 熔料的表观粘度下降, 充模阻力降低, 所需充模压力由  $33.384\text{MPa}$  降至  $28.079\text{MPa}$ , 充模时间由  $3.219\text{s}$  缩短为  $3.181\text{s}$ , 温度分布不均匀性小于  $1^\circ\text{C}$  ( $260.48\sim 261.462^\circ\text{C}$ )。

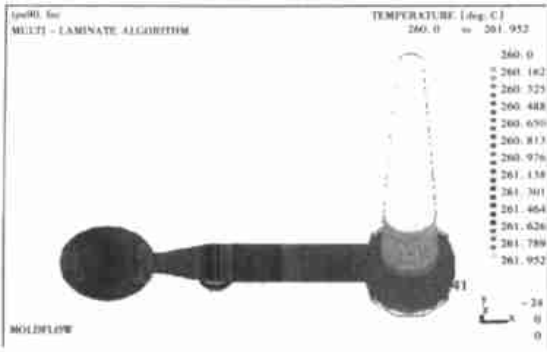


Fig. 6 Result of injecting temperature (process parameters and gate dimension modified)

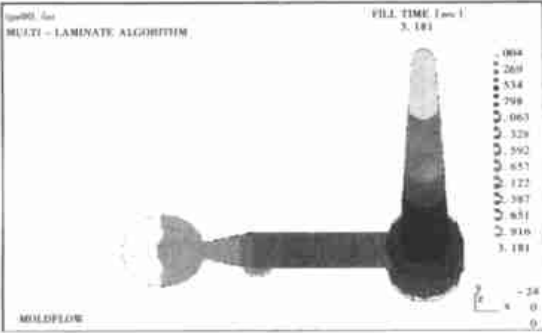


Fig. 7 Result of injecting time (process parameters and gate dimension modified)

## 2 保压过程的计算机辅助分析

注射到模具型腔中的高温熔体,在模壁的冷却作用下由液态转变为固态,其体积变化率高达25%<sup>[1]</sup>,因此在充模结束后仍需在较高压力下向模腔内继续注料以弥补由于冷却所造成的体积收缩。在保压过程中,型腔内熔体温度、压力变化较大,造成型腔内的熔体密度发生变化。可压缩性是塑料熔体在保压过程中所表现出的最重要的性质,保压过程就是利用熔体的可压缩性来解决产品过量收缩的问题。图8是保压结束时的产品体收缩分析结果。保压压力为28.079MPa,保压时间为3s。从图8分析结果可知,透镜中心区域为产品的有效区域,其体收缩为2.412~4.291%,体收缩分布明显不均。这是因为该透镜为双凸非球面镜,镜中心厚度较镜边缘厚度大,这种厚度不均将引起体收缩分布不均,以致造成透镜的密度分布不均,面形精度降低。

热收缩的形成原因在于高聚物的比容 $V_m$ 是一个随温度变化的函数。当高聚物在模具型腔内由熔融温度降低到脱模温度时,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温度、压力条件下的比容之差就是其体积收缩率,即

$$S_v = (V_m - V_s) / V_m \times 100\% \quad (1)$$

式中: $S_v$ ——体积收缩率(%)

$V_s$ ——常温常压下的比容( $\text{cm}^3/\text{g}$ );

$V_m$ ——浇口封闭时温度、压力条件下的比容( $\text{cm}^3/\text{g}$ )。

由于该透镜的尺寸较小,假设塑料各向同性,最大成型收缩率 $S_L$ (线形收缩率)约为体收缩率 $S_v$ 的三分之一。因此,控制在浇口封闭下的比容值,即能达到控制成型收缩率的目的,而控制比容值就是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<sup>[2]</sup>,绝对温度 $T$ 和高聚物比容 $V_m$ 之间具有如下的表达形式:

$$(P + \pi)(V_m - \omega) = R T \quad (2)$$

式中: $P$ ——外加压力( $\text{N}/\text{cm}^2$ );

$\pi$ ——内压力( $\text{N}/\text{cm}^2$ );

$V_m$ ——比容( $\text{cm}^3/\text{g}$ );

$\omega$ ——在绝对温度为零时的比容( $\text{cm}^3/\text{g}$ );

$R$ ——修正的气体常数( $\text{N} \cdot \text{cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{g} \cdot \text{K})$ );

$T$ ——在绝对温度(K)。

由式(2)可知,当压力 $P$ 一定时,光学塑料的比容 $V_m$ 与温度 $T$ 成正比,既温度的升高将导致 $V_m$ 线形增长;而当温度 $T$ 为一定时,光学塑料的比容 $V_m$ 与压力 $P$ 成反比,即外加压力的增加将使比容减小。



Fig. 8 Volumetric shrinkage after holding process

型腔内塑料熔体体收缩率分布不均与型腔压力分布有关。熔体所受压力越低,体收缩越大,而随着型腔压力增高,体收缩也越小。在保压压力一定的情况下,保压压力越高,体收缩越小,但收缩分布不均的现象也愈严重。这是因为随着保压压

力的增加,透镜的较薄处已逐渐开始冷凝,熔料的流动性变差,保压效果明显降低。

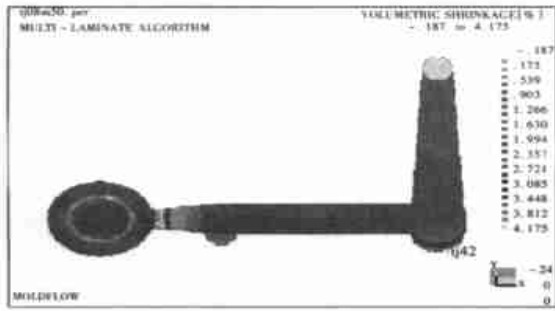


Fig. 9 Volumetric shrinkage (high holding pressure employed)

通过以上分析,本设计采用高压、快速保压工艺,以补偿由于温度变化而导致的体收缩分布不均。图9是保压压力为90 MPa的保压分析结果。保压时间为1.5s,其余条件不变。从图9的结果可知,采用快速保压工艺,可使体收缩值大大降低。

### 3 工艺参数与体收缩之间的关系

光学塑料透镜的注射成型过程中,注射成型的工艺参数主要有注射温度、注射压力、保压压力、保压时间及模具温度等,这些工艺参数对高聚物的收缩及收缩不均问题等均有不同程度的影响,研究注射成型过程中工艺参数与制品成型收缩率及其波动规律,是保证形成高质量非球面光学塑料透镜产品的关键。

#### 3.1 注射温度对体收缩及其波动的影响

为了考察不同注射温度对体收缩及其波动的影响,本文做了注射温度分别为230、240、250、260、270及280的六组模拟试验。其它模拟条件:保压压力为80 MPa,保压时间为1.5s,模具温度为90。表1列出了不同注射温度时的收缩波

Table 1 Average shrink rate and shrink fluctuate

Injection temp. (°C)	230	240	250	260	270	280
Volume shrink (%)	0.310-1.158	0.258-1.191	0.229-1.244	0.313-1.273	0.235-1.344	0.2950-1.405
Shrink fluctuate (%)	0.8485	0.8330	1.0107	1.0597	1.1088	1.1097
Average shrink rate (%)	0.7342	0.7245	0.7333	0.7428	0.7891	0.8143

#### 3.2 模具温度对体收缩及其波动的影响

为了考察不同模具温度对体收缩及其波动的影响,本文分别做了模具温度为50、60、70、80、90及100的六组模拟试验。其它模拟条件:保压压力为70 MPa,保压时间为1.5s,

动值及平均收缩率。图10、图11是根据表1所列数据画出的体收缩波动范围随注射温度变化曲线和平均收缩率随注射温度变化曲线。由图10、图11可知,随着注射温度的增加,体收缩波动范围和平均收缩率略有增加,但变化不大。由高分子材料性质可知,熔体加热温度越高,熔体膨胀越大,冷却后的收缩量也越大。但从另一方面考虑,随着熔体温度的提高,熔体的粘度按指数规律下降,在保压压力及模具温度不变的情况下,保压时传递到模腔内的熔料量增加,从而增大了熔体密度,减少了塑料收缩,所以塑料的收缩波动值和平均收缩率随着温度的增加变化不大。

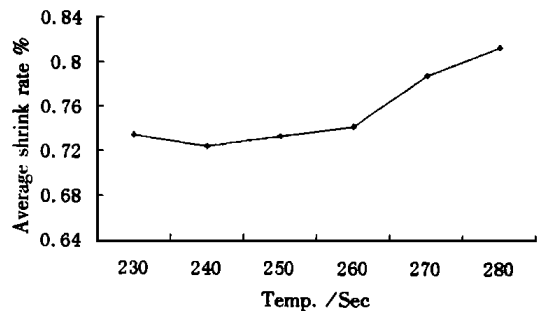


Fig. 10 Relationship between average shrink rate and injection temperature

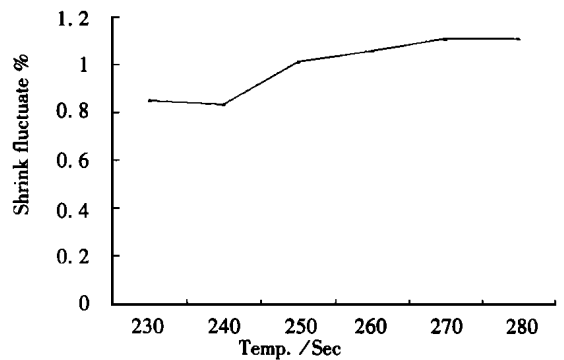


Fig. 11 Relationship between shrink fluctuate and injection temperature

注射温度为260。表2列出的是不同模具温度条件下收缩波动值及平均收缩率的变化情况。图12、图13是根据表2所列数据画出的体收缩波动范围随模具温度变化曲线和平均收缩率随模具温度变化曲线。

**Table 2 Average shrink rate and shrink fluctute**

Mould temp. ( )	50	60	70	80	90	100
Volume shrink (%)	0.108- 1.356	0.195- 1.426	0.278- 1.496	0.396- 1.538	0.531- 1.638	0.705- 1.744
Shrink fluctuate (%)	1.248	1.231	1.218	1.142	1.107	1.039
Average shrink rate (%)	0.7323	0.7605	0.8370	0.9670	1.0845	1.2245

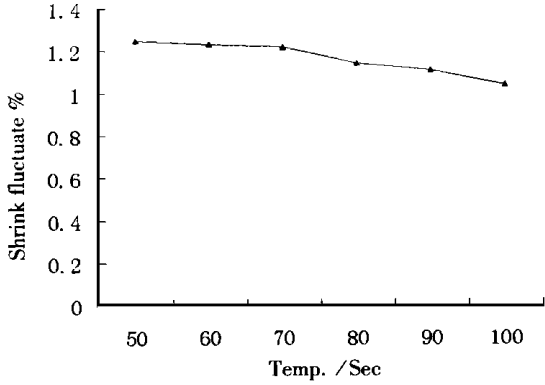


Fig. 12 Relationship between shrink fluctuate and mold temperature

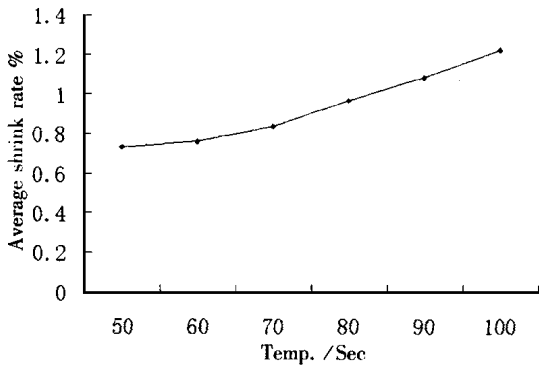


Fig. 13 Relationship between average shrink rate and mold temperature

分析图 12 曲线可知,随着模具温度的增高,充模后的透镜各个部分温差及同一型腔截面上的温差也越小,注入型腔中的高聚物大分子的深度取向得到松弛,各个部分收缩程度趋于一致,因此产品的收缩率波动范围减小。

由图 13 可以看出,塑料透镜的平均收缩率随着模具温度的升高而增加。这是因为模具温度是控制注入模具型腔中的高温熔料冷凝硬化的主要因素,模具温度低,高温熔体与模壁接触时迅速冷却,模具型腔表面冻解层加厚,从而制品脱模后的热收缩量下降,透镜产品的平均收缩率随着模具温度的降低而减小。

### 3.3 保压压力对体收缩及其波动的影响

为了考察不同保压压力对体收缩及其波动的影响,本文分别做了保压压力为 30MPa、50MPa、70MPa、80MPa、90MPa 及 100MPa 的六组模拟试验。其它模拟条件:注射温度为 260,保压时间为 1.5s,模具温度为 90。表 3 列出的是不同保压压力条件下收缩波动值及平均收缩率的变化情况。图 14、图 15 是根据表 3 所列数据画出的体收缩波动范围随保压压力变化曲线和平均收缩率随保压压力变化曲线。

**Table 3 Average shrink rate and shrink fluctuate**

Pressure(MPa)	30	50	70	80	90	100
Volume shrink (%)	1.963- 3.359	1.186- 2.424	0.532- 1.641	0.219- 1.275	0.064- 0.926	0.354- 0.591
Shrink fluctuate (%)	1.396	1.238	1.110	1.056	0.990	0.945
Average shrink rate (%)	2.161	1.805	1.086	0.747	0.431	0.109

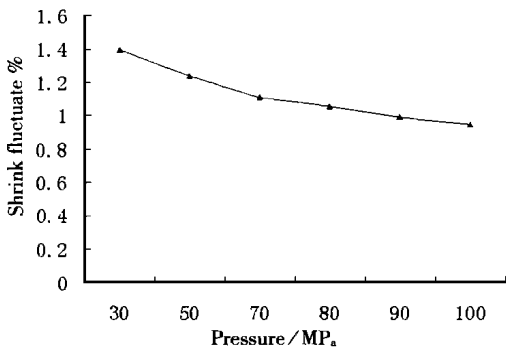


Fig. 14 Relationship between shrink fluctuate and holding pressure

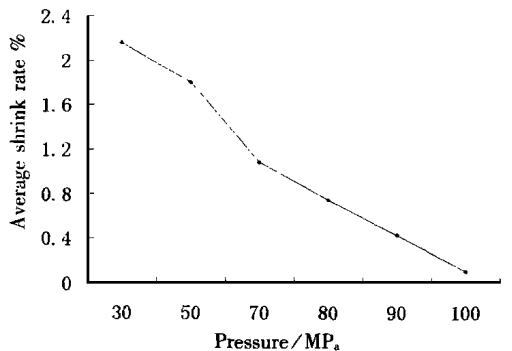


Fig. 15 Relationship between average shrink rate and holding pressure

从图 14 和图 15 曲线可以看出,塑件的收缩率波动范围和平均收缩率随着保压压力的增高而显著下降。因此,在保压工艺的实施过程中,完全可以利用塑料熔体的可压缩性,确保浇口封闭时的熔料比容等于常温、常压下的比容;最后均匀冷却型腔内熔料直至脱模顶出制品,可以降低或尽量避免体收缩对光学塑料透镜面形质量的影响。

## 4 结 论

(1) 在充模过程中,透镜内部存在 10MPa 的压力差,该压力差的存在,将在透镜内部产生收缩不均,使透镜产生残余内应力及双折射现象,面形精度无法满足使用要求。

(2) 熔料经浇注系统充满型腔时,熔料温度略有升高,且存在有温差;透镜的温差分布范围在 250.837~251.675 之间,适当地提高模具温度,

可以使透镜内部温差缩小。同时,模具温度越高,在型腔同一截面内的熔料温差也越小,冷却时间也越长,也可使注入型腔中的高聚物大分子的深度取向得到松弛产品变形小,尺寸稳定,致密程度均匀。

(3) 为了减少体收缩,充模结束后采用高压(90MPa)、快速(保压时间为 1s)保压工艺,可使体收缩值大大降低,其体收缩由 1.942%~4.291% 减小到 0.0004%~1.05%,收缩分布不均问题得到显著改善。

(4) 高压快速保压结束后,采用逐渐降低保压压力的策略进行保压冷却,直至浇口封闭,最后冷却开模顶出制品。浇口封闭以后,型腔内既不补料也不泄料,透镜在型腔内沿一恒密度线随着温度的降低型腔压力逐渐减小,脱模时控制型腔压力等于大气压,使透镜内部残余压力减小。

## 参考文献:

- [1] Austin Colin. Moldflow design principles[M]. Austria: Moldflow Pty Ltd, 1998.
- [2] 唐志国. 塑料模流变学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [3] Fukushima A, Kawazu M, Ito M, et al. Development of ultra-precise injection molding method for thermoplastic lenses[J]. Proc. SPIE, 1992, 1720: 50-59.
- [4] Pasco Ian K. Single-element plastics aspherics: the economical approach to precision optics[J]. Proc. SPIE, 1993, 1780: 474-485.

## Injection molding method for optical plastics lens

GOU Zhi-jian<sup>1</sup>, FAN Zhong-wei<sup>1</sup>, LU E<sup>1</sup>, WU Qing-wen<sup>2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China;

2. School of Mechatronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** It is difficult to meet the requirement of molding high precision optics plastic lens because the experience play an important role in the traditional plastic mold design and molding process. The dynamic process of injection and holding for optical plastic lenses is simulated by means of CAD/CAE technology. The effect of pressure, temperature and cycle on the surface figure of the lenses during injection and holding process is discussed.

**Key words:** optical plastic lens; injection molding; injection analysis; holding analysis

作者简介: 勾治践(1958-),男,天津人,教授。1998年1月毕业于吉林工业大学机械工程学院并取得博士学位,现在长春光学精密机械与物理研究所CAD应用技术研究室从事博士后研究工作。主要研究方向是机械加工系统动力学和塑料模具设计与制造技术。