

注射压缩成型与常规注射成型的 模腔压力对比分析

Comparison and Analysis on Cavity Pressure
of Conventional Injection Molding and
Injection Compression Molding

王 韬^{1,2}, 葛 勇^{1,2}, 郎建林^{1,2}, 孙琦伟^{1,2}, 厉 蕾^{1,2}, 颜 悦^{1,2}

(1 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095;

2 北京市先进运载系统结构透明件工程技术研究中心, 北京 100095)

WANG Tao^{1,2}, GE Yong^{1,2}, LANG Jian-lin^{1,2},

SUN Qi-wei^{1,2}, LI Lei^{1,2}, YAN Yue^{1,2}

(1 AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095,

China; 2 Beijing Engineering Research Center of Advanced Structural

Transparence for the Modern Traffic System, Beijing 100095, China)

摘要: 在自主开发的注射压缩模具上安装模腔压力传感器,从工艺角度出发,对常规注射成型和注射压缩成型的模腔压力进行了工艺相关性的对比与分析。结果表明,注射压缩可有效降低注射压力和模腔压力,使模腔压力场更加均匀。常规注射成型中模腔压力受模具温度的影响最大,其次为熔体温度、保压时间和保压压力,而注射压缩成型中压缩速率对模腔压力的影响最大,其次为熔体温度和模具温度,压缩行程最弱。低残余应力与低翘曲变形进一步验证了注射压缩的技术优势和压力场特征,表明了模腔压力具有重要的工艺性能指导作用。

关键词: 注射压缩成型;常规注射成型;模腔压力;工艺参数

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2017.000644

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)04-0127-07

Abstract: The cavity pressure sensors were mounted in the self-developed injection compression mold. Comparison and analysis on cavity pressure of conventional injection molding and injection compression molding were conducted by changing process parameters. The results show that injection compression molding can greatly decrease the injection pressure and cavity pressure, and make the cavity pressure field more uniform. During the conventional injection molding, the influence of mold temperature on the cavity pressure is the most significant factor, followed by melt temperature, pressure holding time and holding pressure. During the injection compression molding, the compression speed influences the most, followed by melt temperature, mold temperature and compression stroke. The technological advantages and pressure field characteristic of injection compression molding were further validated with the low residual stress and small warpage, indicating the cavity pressure plays a major role in guiding processing properties.

Key words: injection compression molding; conventional injection molding; cavity pressure; processing parameters

注射压缩技术是将传统注射成型与压缩成型进行有效的工艺组合,该成型过程分成了两个阶段,初始注射阶段,高温熔体充填进入不完全闭合的模具,由于该过程模具的模腔尺寸大于最终产品,所以驱动充填的注射压力低^[1];待熔体充填达到一定程度时进入二次

压缩阶段,模具型腔闭合至最终产品尺寸,压缩熔体实现完整充填。与常规注射成型相比,注射压缩成型具有注射压力低、整体质量控制均匀、残余应力低和几何尺寸精度高等特点,特别适用于具有高光学品质要求的产品。Martin 等^[2]最早提出了将注射与压缩工艺

复合的概念,其目的是提高材料的充填能力,已满足成型复杂结构薄壁产品的需求,Spector等^[3]则成功将该技术推广到光学透镜的研制上,随后注射压缩成型被Engel、Demag、KraussMaffei、三菱重工、Battenfield等厂商竞相开发并整合入注塑机中。尽管成型技术本身具有诸多优势,但是压缩阶段的引入使得注射压缩成型的过程更加复杂,相关工艺控制与模具技术成为限制其应用的关键。Yang等^[4-5]开展了光盘注射压缩成型的系统实验研究,发现注射压缩可以极大提高样件的尺寸精度,特别是垂直于压缩方向的平面尺寸,但由于注射和压缩导致的聚合物取向不同,厚度均匀性相对略差。Guan等^[6]和葛勇等^[7]分别从薄壁和厚壁两个角度对注射压缩成型的样件厚度均匀性控制进行了研究,发现薄壁产品的厚度更多受熔体温度和压缩相关参数的影响,而厚壁产品厚度则主要与注射量及压缩起始位置有关。Michaeli等^[8]研究了注射压缩成型塑料透镜的光学性能,发现注射压缩成型中注射速率和压缩速率对样件的光学畸变和灰色度影响最大,而常规注射成型中注射速率和保压压力影响最大。周明勇等^[9]阐述了聚合物纳米/亚微米结构零件的不同注射成型方法,强调了注射压缩成型在表面微纳结构成型上的巨大潜力。陈宇宏等^[10]开展了注射压缩与常规注射的对比实验,结果表明注射压缩成型可显著减小制件的双折射现象,是制造中大型透明产品的有力工具。

注射成型中材料经历了复杂的P-V-T历史,且模腔不同区域的多物理场演变也存在很大差别,如何实时监控成型过程,进而反向优化设计与工艺,已成为控制产品综合性能的关键。模腔压力作为成型过程中可实时监测的重要参数,直接反映了不同方法和工艺下材料的P-V-T变化特征^[4-5, 11],能够有效识别次品的产生和指导工艺优化,受到国内外很多研究机构和企业关注^[12-18]。Kurt等^[12]研究了注射成型工艺对产品尺寸精度的影响,发现模腔压力和温度才是直接决定最终产品几何收缩的因素,而工艺参数只是表观控制变量。Hassan^[14]开展了注射成型工艺对模腔压力 and 产品质量影响的研究,针对PS和LDPE两种材料,发现模腔压力与产品质量随工艺的变化规律相似,但模腔压力变化的剧烈程度与材料性能直接相关。Guan等^[15]将应变传感器应用在注射压缩成型的压力监控上,通过与模腔压力传感器对比分析发现,表面应变传感器可有效表征成型过程的不同阶段和预测产品的质量及厚度。曹伟等^[16]和王韬等^[17]充分考虑熔体挤压引起的三维流动,对压缩过程的材料本构关系进行了重建,重点分析了注射压

缩成型过程的模腔压力平台区与工艺的关系,对厚壁透明产品的工艺研究与开发试制提供了理论基础。目前,关于常规注射成型模腔压力的研究较多,针对注射压缩成型的较少^[15, 18],而关于模腔压力与不同成型方法及其工艺之间关系的系统研究也鲜见报道。

本工作在自主开发的注射压缩成型模具上安装模腔压力传感器,对常规注射成型和注射压缩成型的模腔压力进行系统性对比分析,考察熔体温度等工艺参数对模腔压力及其分布的影响,比对不同成型方法下样件的残余应力和翘曲变形,进一步验证注射压缩成型的优势和模腔压力的重要指导意义。

1 实验材料与方法

1.1 原材料和实验设备

实验所用材料为Saudi Basic Industries Corp生产的光学级聚碳酸酯(PC),牌号为OQ-2720,材料熔融指数为8.90g/10min。

注射成型实验在KraussMaffei生产的CX-130注射机上完成,利用HB-THERM生产的HB-180Z2模温机进行成型模具温度控制,利用恩德克生产的NDD-250干燥输送机进行原料的除湿与上料。采用Stress Viewer偏光仪对实验样件的残余应力进行定性测量,采用精度为0.01mm的高度尺对样件的平面翘曲挠度进行定量测量。

1.2 实验模具与模腔压力测试系统

实验模具为侧浇口形式的热流道平板模具,平板的设计尺寸为550mm×280mm×4mm,该模具由定模、动模、模内镶块及压缩机构等部分组成,可实现常规注射成型和注射压缩成型等多种工艺,见图1(a)。模具模腔压力传感器安装在定模镶件上(见图1(b)),一个距离浇口40mm,定义为位置1(压力为 P_1),另一个距离充填末端30mm,定义为位置2(压力为 P_2),两监控点的间距为480mm。通过6159A型传感器和CoMo Injection 2869信号放大器对模腔压力进行测量、采集与分析。

1.3 实验规划

成型实验包括了常规注射成型和注射压缩成型两部分,为了充分对比两种工艺过程的模腔压力演变规律和获得模腔压力和性能的有效控制路线,需要开展相应的工艺影响研究,具体的实验规划见表1和表2,考察同一工艺不同水平影响时选择表中带有下划线的工艺组合不变,后续以表中的字母与数字代表具体工艺参数。

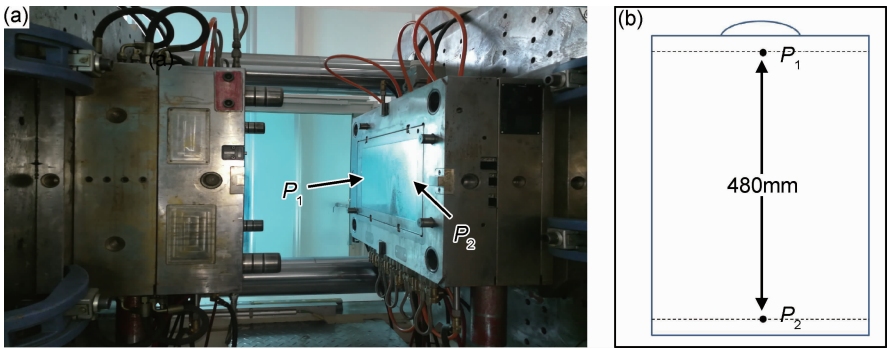


图 1 注射成型实验用模具(a)及模腔压力监控点布置(b)

Fig. 1 Mold (a) and distribution of cavity pressure monitor (b) for injection molding

表 1 常规注射成型实验参数表

Table 1 Process parameters for conventional injection molding

| Level | Melt temperature (A)/℃ | Mold temperature (B)/℃ | Holding pressure (C)/MPa | Holding time(D)/s |
|-------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 1 | 300 | 80 | 60 | 3 |
| 2 | 310 | 90 | 70 | 5 |
| 3 | 320 | 100 | 80 | 7 |
| 4 | | 110 | 90 | 9 |
| 5 | | 120 | 100 | 11 |

表 2 注射压缩成型实验参数表

Table 2 Process parameters for injection compression molding

| Level | Melt temperature (A')/℃ | Mold temperature (B')/℃ | Compression stroke(C')/ mm | Compression speed(D')/ (mm·s ⁻¹) |
|-------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|---|
| 1 | 300 | 100 | 1 | 1 |
| 2 | 310 | 110 | 2 | 3 |
| 3 | 320 | 120 | 3 | 5 |
| 4 | | | 4 | 7 |
| 5 | | | 5 | 9 |

2 结果与分析

2.1 注射压缩成型与常规注射成型的模腔压力特征

从成型过程材料所经历的 P-V-T 路径可以发现^[11],压缩阶段的引入使得模腔内的高温熔体经历更长时间的壓力控制,压缩动作由整个模腔运动产生,不同区域的材料温度和压力梯度较小,可成型出高精度、高表面质量的制件。选择 $A_1B_5C_3D_2$ 和 $A'_1B'_3C'_3D'_3$ 两组工艺进行实验样件的注射成型,监控模腔压力随时间的变化曲线分别见图 2 和图 3。

对比图 2 和图 3 可以看出,常规注射下不同位置处的模腔压力演变规律相近,表现为达到最大值之后迅速下降,但 P_1 与 P_2 之间的时间间隔接近 7s,压力最大值相差 23MPa(见图 2(b)),这一现象归因于常规注射成型是通过浇口进行单向注射充填与保压补缩,自浇口至充填末端存在极大的压力梯度。而注射压缩成型的模腔压力曲线的衰减程度较为缓慢,有效的压缩补缩时间延长,使得材料的压力场和性能更加均匀,

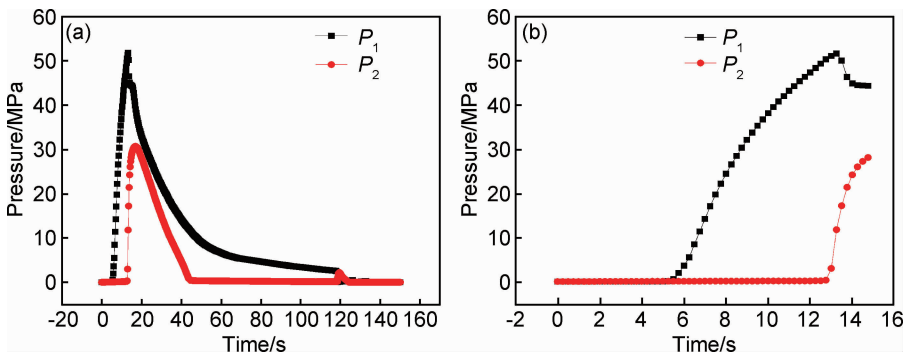


图 2 常规注射成型 $A_1B_5C_3D_3$ 的模腔压力演变曲线 (a)单个成型周期;(b)局部放大

Fig. 2 Cavity pressure curves for conventional injection molding with $A_1B_5C_3D_3$ (a)single molding cycle;(b)partial view

P_1 与 P_2 的曲线基本重叠(见图 3(b)),压力最大值相差仅为 5.4MPa。同时,图 3(b)中 P_1 曲线的拐点处模腔压力为 14.4MPa,代表注射阶段的最大注射压力,

相比较图 2 中的 51.8MPa 降低了 70%,说明注射压缩可有效降低成型的注射压力。考虑到监控点最大值和监控点差值的重要性,后续部分选择 P_1 和 P_2 的最

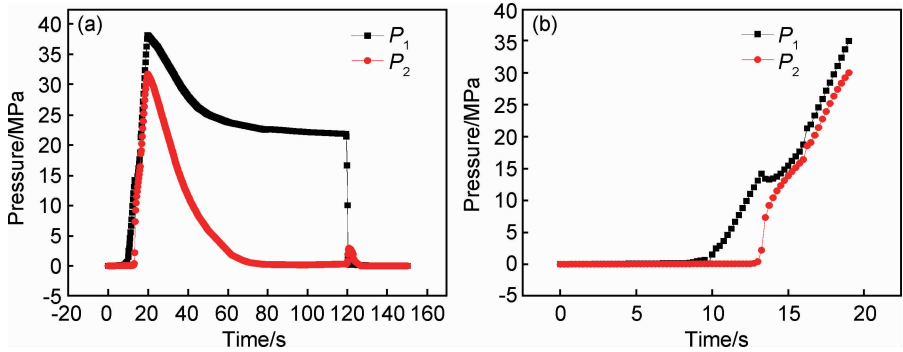


图 3 注射压缩成型 $A'_1B'_3C'_3D'_3$ 的模腔压力演变曲线 (a)单个成型周期;(b)局部放大

Fig. 3 Cavity pressure curves for injection compression molding with $A'_1B'_3C'_3D'_3$ (a)single molding cycle; (b) partial view

大值及两点的差值(简写为 $(P_1 - P_2)$)作为评价目标,对比不同成型方法下模腔压力的工艺相关性。

2.2 工艺参数对常规注射模腔压力的影响

在其他工艺参数不变的情况下,通过改变熔体温度、模具温度、保压压力和保压时间,得到模腔压力随成型时间的演变曲线,对其最大值进行对比,如图 4 所

示。从图中可以看出,随着熔体温度和模具温度的升高,模腔压力 P_1 逐渐降低,而 P_2 逐渐上升,整体的压力均匀性得到明显改善;随着保压压力增大和保压时间延长,模腔压力 P_1 升高, $(P_1 - P_2)$ 压力差变大,熔体充填方向上的压力梯度增加,易引起样件的翘曲变形与应力集中^[12]。

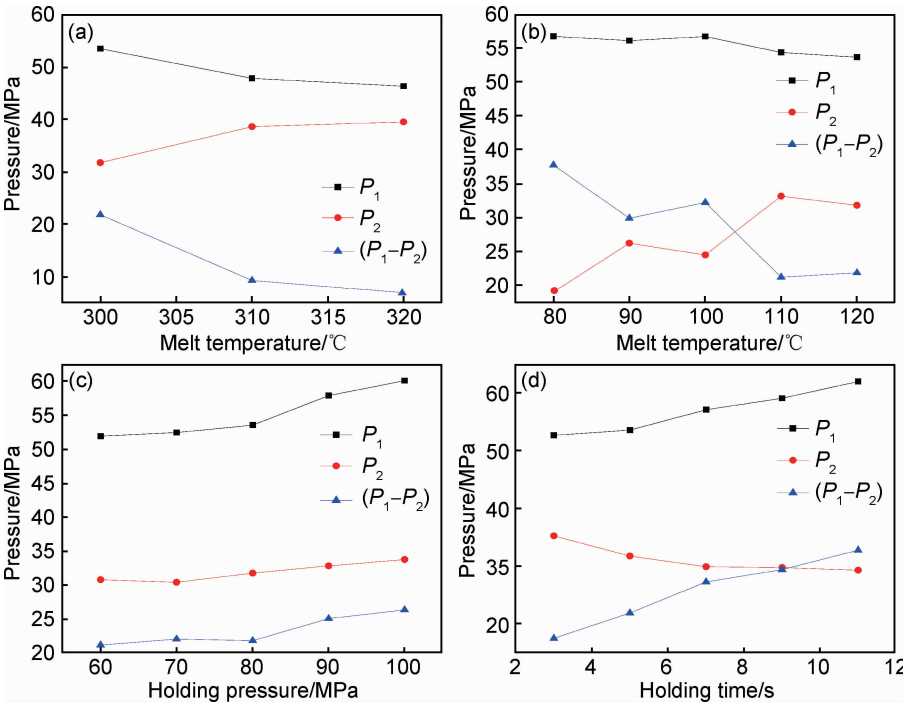


图 4 常规注射成型熔体温度(a)、模具温度(b)、保压压力(c)和保压时间(d)对模具型腔压力的影响

Fig. 4 Effects of process parameters on the cavity pressure curves for conventional injection molding

(a)melt temperature;(b)mold temperature;(c)holding pressure;(d)holding time

从图 4(a)可以看出,熔体温度从 300℃ 升至 320℃,模腔压力 P_1 从 53.5MPa 降低至 46.3MPa,压力差 $(P_1 - P_2)$ 降低至 6.9MPa。聚碳酸酯材料对温度极其敏感,温度越高,对应黏度越低,压力传递损耗越低。模具温度升高,可以减小边缘凝固层厚度,有利于熔体流动的压力传递,表现出更加均匀的模腔压力

场^[14],如图 4(b)所示,120℃ 模温下的压力差 $(P_1 - P_2)$ 为 21.7MPa,但对近浇口处 P_1 的影响较小。升高模温还会引起局部的熔体二次流动,特别是压力相对较低的位置 2 处,容易产生压力场的波动,如 100℃ 时的曲线偏离。从图 4(c)可以看出,保压压力从 60MPa 升高 100MPa,模腔压力 P_1 从 51.9MPa 增大至

60.1MPa, P_2 上升缓慢, $(P_1 - P_2)$ 升高至 26.4MPa。而保压时间从 3s 延长至 11s, 模腔压力 P_1 逐渐增加, P_2 则略有降低, 压力差 $(P_1 - P_2)$ 可达到 32.7MPa。常规注射成型的保压是通过注射螺杆进行单向的压力填充, 保压压力越大, 保压时间越长, 补缩效果越明显, 对应浇口的模腔压力越大。由于压力传递损失, 充填末端的模腔压力增幅较小, 或者因保压时间过长引起浇口和充填截面的半封闭, 进而导致末端的压力出现下降趋势, 整个模腔的压力场愈加不均匀。从上述结果对比可以发现, 在常规注射成型中, 模具温度对模腔压力的影响最大, 其次为熔体温度和保压时间, 保压压

力最弱。合理的工艺窗口范围内, 增大熔体温度和模具温度, 降低保压压力和保压时间, 都会使模腔压力更加均匀。

2.3 工艺参数对注射压缩的型腔压力影响

在其他工艺参数不变的情况下, 通过改变熔体温度、模具温度、压缩行程和压缩速率, 得到模腔压力随成型时间的演变曲线, 对其最大值进行对比, 如图 5 所示。从图中可以看出, 注射压缩成型的模腔压力分布更为均匀, $(P_1 - P_2)$ 基本都在 10MPa 以下。同时, 工艺参数的影响规律也表现出异于常规注射成型, 这主要与压缩阶段的引入有关。

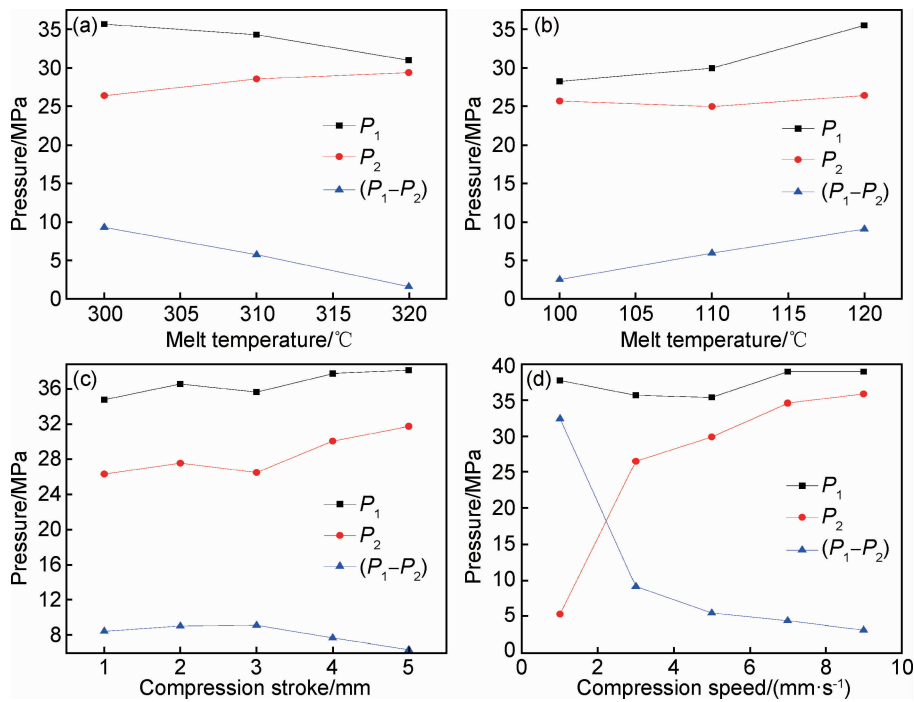


图 5 注射压缩成型的熔体温度(a)、模具温度(b)、压缩行程(c)和压缩速率(d)对模具型腔压力的影响
Fig. 5 Effects of process parameters on the cavity pressure curves for injection compression molding
(a) melt temperature; (b) mold temperature; (c) compression stroke; (d) compression speed

从图 5(a)可以看出, 熔体温度升高, 模腔压力 P_1 降低, P_2 升高, 当熔体温度达到 320℃ 时, $(P_1 - P_2)$ 仅有 1.4MPa, 模腔压力场更加均匀。图 5(b) 显示, 模具温度升高, 模腔压力 P_1 升高, P_2 基本不变, 压力差 $(P_1 - P_2)$ 上升, 模温 120℃ 时可达 9.1MPa, 与常规注射恰恰相反。注射压缩成型的模腔压力更多反映的是高温熔体在压缩阶段受到模具挤压时的响应, 位置 1 区域在注射阶段完成充填, 而位置 2 区域在压缩阶段完成充填, 压缩过程熔体反向挤压致使位置 1 的密实度明显大于位置 2, 对应模腔压力 P_1 大于 P_2 。模具温度越高, 位置 1 区域的冷凝层越薄, 熔体反压效应越明显, 模腔压力也就越大, 但熔体温度升高、压缩行

程增大、压缩速率加快会弱化这种反压不均现象。从图 5(c) 和图 5(d) 可以看出, 压缩行程增加, 模腔压力 P_1 和 P_2 缓慢增大, $(P_1 - P_2)$ 降低至 6.3MPa; 压缩速率增加, P_2 模腔压力急剧增大, 压力场趋于均匀, 压力差 $(P_1 - P_2)$ 最小可达 3.1MPa。压缩阶段是模具挤压熔体并补偿冷却收缩的重要过程, 压缩行程越大、压缩速率越快, 模腔内会有更多的区域和材料经历该过程, 对应压力场更加均匀^[18]。从上述结果对比可以发现, 在注射压缩成型中, 压缩速率对模腔压力的影响最大, 其次为熔体温度和模具温度, 压缩行程最弱。在合理的工艺窗口范围内, 可以通过增大熔体温度, 降低模具温度, 增大压缩行程和压缩速率, 使得模腔压力更加均

匀,有利于成型出尺寸精度高、质量均匀的样件。

2.4 不同成型方法的样件性能对比验证

基于 Brewster's 光弹定律,利用 Stress Viewer 对不同工艺方法成型出的样件进行残余应力无损定性分析,通过彩色条纹的疏密判断应力大小,彩色条纹越集中,对应应力越大。选择工艺优化后的 $A_1B_5C_3D_2$ 和 $A'_1B'_3C'_3D'_5$ 两组实验样件进行残余应力对比,结果如图 6 所示。可以看出,常规注射成型样件在浇口附近存在较大范围的应力集中区域,表现出沿充填方向逐渐递减的趋势,而注射压缩成型样件无明显彩色条纹集中,大部分区域的颜色接近为背景色,表明残余应力很低。上述残余应力的分布趋势与模腔压力密切相关, $A_1B_5C_3D_2$ 下模腔压力 P_1 为 53.6MPa, P_2 为 31.9MPa, 压力差 ($P_1 - P_2$) 为 21.7MPa, 而 $A'_1B'_3C'_3D'_5$ 下模腔压力 P_1 为 39.1MPa, P_2 为 35.9MPa, 压力差 ($P_1 - P_2$) 为 3.1MPa, 如图 4 和图 5 所示。对比发现,模腔压力的梯度变化越大,残余应力越大,其分布也越宽。注射压缩成型中的压缩过程取代了常规的保压过程,降低了充填和保压引起的取向应力,同时模腔的整体压缩减小了不同区域的压力和温度差异,使得热应力更加均匀,整体表现出残余应力小且分布均匀。

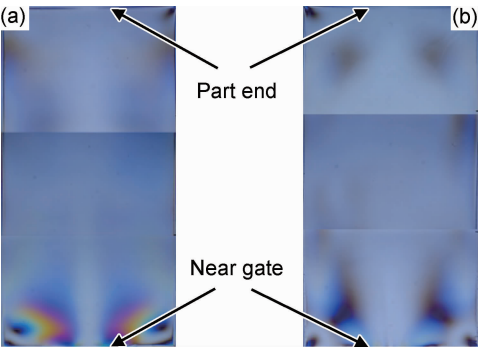


图 6 常规注射成型 $A_1B_5C_3D_2$ (a) 和注射压缩成型 $A'_1B'_3C'_3D'_5$ (b) 的残余应力对比

Fig. 6 Comparison on the residual stress of conventional injection molding with $A_1B_5C_3D_2$ (a) and injection compression molding with $A'_1B'_3C'_3D'_5$ (b)

翘曲变形是注射成型样件的重要尺寸精度技术指标,直接影响到样件的光学性能、可装配性和结构强度等。图 7 对比了不同工艺方法 $A_1B_5C_3D_2$ 和 $A'_1B'_3C'_3D'_5$ 成型样件的翘曲变形情况,可以看出,常规注射成型的样件翘曲达到 0.837mm,而注射压缩的最大翘曲度仅有 0.517mm,降低了接近 40%。与模腔压力进行联立分析发现,模腔压力直接影响样件的翘曲变形,模腔压力梯度越大,翘曲变形越大,样件的光

学质量和几何外形也就越难保证。

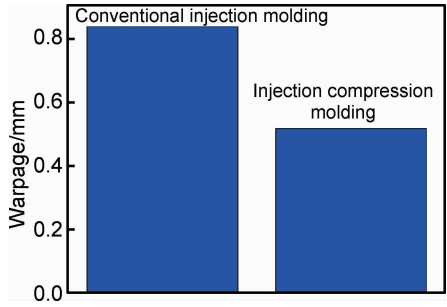


图 7 常规注射成型 $A_1B_5C_3D_2$ 和注射压缩成型 $A'_1B'_3C'_3D'_5$ 的翘曲变形对比

Fig. 7 Comparison on warpage of conventional injection molding with $A_1B_5C_3D_2$ and injection compression molding with $A'_1B'_3C'_3D'_5$

3 结论

- (1) 注射压缩成型有效降低了成型的注射压力,其模腔压力衰减程度较为缓慢,压缩补缩时间延长,使得材料在模腔内的压力场更加均匀。
- (2) 常规注射成型中,模具温度对模腔压力的影响最大,其次为熔体温度和保压时间,保压压力最弱。通过增大熔体温度和模具温度,降低保压压力和保压时间,都会使模腔压力更加均匀。
- (3) 注射压缩成型中,压缩速率对模腔压力的影响最大,其次为熔体温度和模具温度,压缩行程最弱。通过增大熔体温度,降低模具温度,增大压缩行程和压缩速率,使得模腔压力更加均匀,有利于成型出尺寸精度高、质量均匀的样件。
- (4) 注射压缩成型样件的热残余应力均匀,流动残余应力减小,整体残余应力呈现低且分布均匀的趋势,注射压缩成型样件的翘曲变形更小,模腔压力可明显反应这一现象。

参考文献

[1] CHEN S C, CHEN Y C, CHENG N T, et al. Simulation of injection-compression mold-filling process[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1998, 25(6): 907-917.

[2] MARTIN F A, CANTON N. Combined injection and compression molding: US2938232 [P]. 1957-06-21.

[3] SPECTOR D P, KINGSBURY J M. Fabrication of thermoplastic optical components by injection/compression molding: US4836960 [P]. 1987-10-05.

[4] YANG S Y, KE M Z. Influence of processing on quality of injection-compression-molded disks[J]. Polymer Engineering & Science, 1995, 35(15): 1206-1212.

[5] YANG S Y, CHEN Y C. Experimental study of injection-charged

- compression molding of thermoplastics[J]. *Advances in Polymer Technology*, 1998, 17(4): 353-360.
- [6] GUAN W S, HUANG H X. Back melt flow in injection-compression molding: effect on part thickness distribution[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, 39: 792-797.
- [7] 葛勇, 王韬, 郎建林, 等. 注射压缩成型工艺参数对厚壁聚碳酸酯制件厚度的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2015, 31(4): 117-120.
- GE Y, WANG T, LANG J L, et al. Effects of injection compression molding parameters on thickness of thick polycarbonate parts[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2015, 31(4): 117-120.
- [8] MICHAELI W, WIELPUETZ M. Optimization of the optical part quality of polymer glasses in the injection compression moulding process[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2000, 284/285: 8-13.
- [9] 周明勇, 蒋炳炎, 鲁立君, 等. 聚合物纳米/亚微米结构零件注射成型的研究进展[J]. *材料工程*, 2014(4): 95-100.
- ZHOU M Y, JIANG B Y, LU L J, et al. Progress in research on polymer nano/sub-micro structure by injection molding[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014(4): 95-100.
- [10] 陈宇宏, 袁源, 刘小艳, 等. 注射成型和注射压缩成型透明件的光学性能对比与分析[J]. *航空材料学报*, 2011, 31(2): 55-60.
- CHEN Y H, YUAN Y, LIU X Y, et al. Comparison on optical properties of injection molded and injection compression molded transparencies[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(2): 55-60.
- [11] WANG T, YAN Y, LI L. Numerical simulations and experiments on the injection molding of aircraft transparencies[C]// 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, St Petersburg, Russia; ICAS, 2014.
- [12] KURT M, KAMBER O S, KAYNAK Y, et al. Experimental investigation of plastic injection molding: assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products[J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 3217-3224.
- [13] WU H W, ZHANG S D, QU J P, et al. Measurement and analysis of cavity pressure and melt filling capacity during injection molding[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2007, 46: 123-127.
- [14] HASSAN H. An experimental work on the effects of injection molding parameters on the cavity pressure and product weight[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(1): 675-686.
- [15] GUAN W S, HUANG H X. A proposed technique to acquire cavity pressure using a surface strain sensor during injection-compression molding[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135: 021003.
- [16] 曹伟, 张世勋, 王韬, 等. 聚碳酸酯熔体压缩过程流变特征及型腔压力演化规律[J]. *精密成形工程*, 2016(1): 32-36.
- CAO W, ZHANG S X, WANG T, et al. Polycarbonate melt rheological characteristics and evolutionary regularity of cavity pressure in compression process[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2016(1): 32-36.
- [17] 王韬, 曹伟, 颜悦, 等. 聚碳酸酯熔体挤压流变研究[J]. *材料工程*, 2013(5): 73-77.
- WANG T, CAO W, YAN Y, et al. Rheological behavior of polycarbonate melt under squeeze flow[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013(5): 73-77.
- [18] LEE H S, YOO Y G. Effects of processing conditions on cavity pressure during injection-compression molding[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(12): 2155-2161.

收稿日期: 2017-05-22; 修订日期: 2017-12-18

通讯作者: 颜悦(1966—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为透明件成型制造及功能镀膜, 联系地址: 北京市海淀区 81 信箱 83 分箱(100095), E-mail: yue.yan@biam.ac.cn

(本文责编: 解 宏)