



引用格式:张果,郭会师,蒋晶,等.角窗塑件注射压缩成型工艺数值模拟研究[J].轻工学报,2020,35(3):82-87.

中图分类号: TG76 文献标识码: A

DOI:10.12187/2020.03.010

文章编号:2096-1553(2020)03-0082-06

角窗塑件注射压缩成型工艺数值模拟研究

Numerical simulation research on injection-compression molding process of corner window plastic parts

张果¹,郭会师¹,蒋晶²,李倩²

ZHANG Guo¹, GUO Huishi¹, JIANG Jing², LI Qian²

1. 郑州轻工业大学 材料与化学工程学院,河南 郑州 450001;

2. 郑州大学 微纳成型技术国际联合研究中心,河南 郑州 450001

1. College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. National Center for International Joint Research of Micro-Nano Moulding Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

关键词:

注射压缩成型;残余应力;正交试验;数值模拟

Key words:

injection-compression molding; residual stress; orthogonal experiment; numerical simulation

摘要:利用 Moldflow 软件结合正交试验的数值模拟方法,研究了聚碳酸酯角窗塑件 3 处典型位置厚度方向上脱模后残余应力的分布情况,优化了角窗塑件注射压缩成型工艺,在此基础上,选取主要因素考察了主要工艺参数对制品残余应力的影响规律.结果表明:制品 3 处典型位置厚度方向上脱模后残余应力的分布呈现拉-压-拉的三区域分布规律;最佳工艺参数组合为模具温度 105 ℃,熔体温度 315 ℃,注射时间 3 s,压缩力 882 kN,压缩距离 1.0 mm,压缩速度 5 mm/s,延迟时间 0 s;熔体温度、延迟时间、压缩距离是影响制品残余应力的主要工艺参数,且塑件次表层和中心层的残余应力随熔体温度升高而减小,而塑件厚度方向各层的残余应力随延迟时间、压缩距离的增加而增大.

收稿日期:2019-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51802290)

作者简介:张果(1987—),女,河南省南阳市人,郑州轻工业大学实验师,主要研究方向注塑成型 CAE.

通信作者:李倩(1962—),女,广东省化州市人,郑州大学教授,博士,主要研究方向聚合物加工技术.

Abstract: Through numerical simulation method which combined Moldflow software with orthogonal experiment, the residual stress distribution after demoulding in the thickness direction of three typical positions of polycarbonate corner window plastic parts was studied, and the injection compression molding process of corner window plastic parts was optimized. On the basis, the main factors were selected to investigate the influence of the main process parameters on the residual stress of the product. The results showed that the residual stress distribution after demoulding in the thickness direction of three typical locations of the product conforms to the three-region distribution of tension-compression-tension. The optimum combination of process parameters was that the mold temperature was 105 °C, the melt temperature was 315 °C, the injection time was 3 s, the compression force was 882 kN, the compression distance was 1.0 mm, the compression speed was 5 mm/s, and the delay time was 0 s. Melt temperature, delay time, compression distance were the main process parameters that affect the residual stress of the product, and the residual stress of the subsurface layer and the center layer of the plastic part decreased with the increase of the melt temperature, while the residual stress of each layer in the thickness direction of the plastic part increased with delay time and compression distance.

0 引言

注射压缩成型是一种将注射成型与压缩成型两者优势相结合的新型塑料加工技术. 注射压缩成型是在模具没有完全闭合的情况下进行注射充填,待注射完成后,压缩阶段启动,模具进一步闭合,保持恒定均匀的压缩力对熔体进行保压,最后冷却顶出制品. 注射压缩成型可以降低注射压力,减小分子取向和残余应力,均匀的压缩力所提供的保压作用可以降低不均匀收缩、翘曲变形和密度分布,提高制品尺寸的精度,因此,注射压缩成型常用于生产尺寸精度要求较高和残余应力较小的塑料制品^[1-2].

角窗塑件是一类常用于局限空间的透光塑料制品,良好的力学性能和光学特性是保证该类塑件功能发挥的前提. 采用注射压缩成型工艺有助于获得残余应力小、力学性能稳定、双折射和角偏差现象弱的光学塑料制品. 众多学者采用数值模拟的方法研究了注射压缩成型工艺对角窗塑件加工性能的影响^[3-8],结果表明,注射速度、注射时间、压缩速度、充模压力、冷却时间、压缩距离等多项工艺参数均会对制品的力学性能和光学特性产生影响. 杜遥雪等^[3]对LED透镜的注射压缩成型过程进行数值模拟分

析后发现,增大压缩速度和减小注射速度可降低LED透镜内部的残余应力和折射率,从而提高其光学性能. J. O. Hwa等^[7]在不同压缩间隙条件下,对PMMA薄壁制品在注射压缩成型过程中残余应力的分布情况进行数值模拟,发现制品表面残余应力会随压缩间隙的增加而减小. 沈洪雷等^[8]利用Moldflow软件研究了厚壁塑件成型中工艺参数对制品质量的影响,获得了压缩力、熔体温度、压缩距离等主要工艺参数对制品缩痕、收缩、翘曲等质量指标的影响趋势.

上述研究对象多为平板产品,而角窗塑件因多应用于受限空间而具有一定的弧度,制品曲率的存在会对脱模后的残余应力分布产生影响. 鉴于此,本文拟以聚碳酸酯(PC)角窗塑件为研究对象,利用Moldflow软件结合正交试验的数值模拟方法,研究角窗制品在注射压缩成型过程中残余应力的分布情况,优化其注塑压缩成型工艺,考察主要工艺参数对制品残余应力的影响规律,以期提升曲面造型塑件的注塑成型工艺质量提供参考.

1 模型建立与试验设计

1.1 角窗塑件模型建立与网格划分

以拱形角窗塑件为研究对象,其壁厚均匀

(6 mm),长、高、宽的最大尺寸分别为 100 mm, 100 mm, 50 mm. 基于 UG 平台建立注塑件模型,以 STL 文件格式导入 Moldflow 软件对其进行中型面网格划分,角窗塑件几何模型如图 1 所示. 产品材料选取美国 SABIC 公司生产的 PC,牌号为 Lexan EXL 1414T, Moldflow 软件的材料数据库提供其性能参数为:熔融指数 10 g/10 min, 最大剪切应力 0.5 MPa, 固体密度 1.181 g/cm³, 熔体温度 295 ~ 315 °C, 模具温度 70 ~ 95 °C, 顶出温度 142 °C.

1.2 评价指标

根据角窗塑件残余应力与光学性能间的关系,本文采用望小特征信噪比作为制品稳健性的评价指标. 信噪比由损失函数推导而得,其形式依赖于目标函数的类型. 信噪比计算公式^[9]为

$$S/N = -10 \cdot \lg\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)$$

其中, n 为样本数, y_i 为第 i 次试验结果. 本文以网格尺寸大小对试验结果的影响为噪音,采用 2.0 mm 和 2.3 mm 两种网格尺寸对模型进行网格划分,因此 $n = 2$.

1.3 正交试验设计

根据熔体充填流动路径,选取浇口附件、塑件中部和充填末端这 3 处典型位置的残余应力为研究对象,典型位置点分布如图 2 所示,其中 3 处典型位置点依次标注为 X, Y, Z ,其对应的



图 1 角窗塑件几何模型

Fig. 1 The geometric model of corner window plastic parts

网格单元分别为 T5103, T9900, T4350. 以角窗塑件的残余应力为指标,依据 PC 成型特性和成型工艺参数范围、Moldflow 软件成型工艺窗口推荐数值范围,确定每个因素(工艺参数)所选取的水平值,据此设计 $L_{18}(3^7)$ 正交试验,考察模具温度(A)、熔体温度(B)、注射时间(C)、压缩力(D)、压缩距离(E)、压缩速度(F)、延迟时间(G)这 7 个因素对制品残余应力的影响. 正交试验因素和水平如表 1 所示.

以正交试验结果为基础,选取 3 个主要因素进行试验,以寻找、分析其对角窗塑件制品残余应力的影响规律.

2 结果与分析

2.1 角窗塑件 3 处典型位置的残余应力分布

结合脱模后塑件的应力自平衡及其自身力矩平衡,脱模后残余应力等于模内残余应力减去各层模内残余应力后的平均值^[10]. 利用 Moldflow

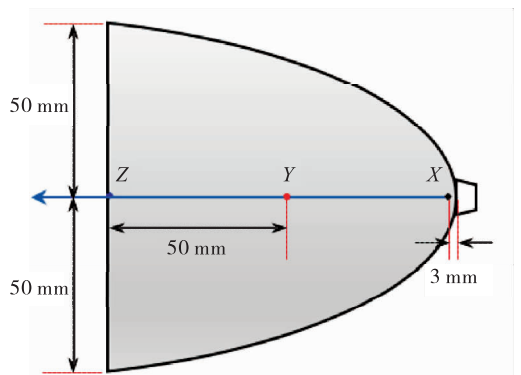


图 2 典型位置点分布

Fig. 2 Distribution of inspection point

表 1 正交试验因素和水平表

Table 1 Factors and levels table of orthogonal experiment

水平	因素						
	A/°C	B/°C	C/s	D/kN	E/mm	F/(mm · s ⁻¹)	G/s
1	85	295	2.0	686	1.0	1	0.0
2	95	305	2.5	882	1.5	3	0.5
3	105	315	3.0	1078	2.0	5	1.0

软件分析 X, Y, Z 位置点处厚度方向上脱模后残余应力的分布情况,结果如图 3 所示.由图 3 可以看出,制品在这 3 处的残余应力均表现出拉-压-拉的三区域分布规律,表层和中间层存在较小的拉应力,而次表层表现出较大的压应力,并且残余应力主要集中于制品充填末端.其原因可能是:由于熔体前沿温度随着充填过程逐渐降低,压缩阶段较低的末端温度冻结了大量的残余应力,且充填末端的翘曲变形量相对于浇口处小,残余应力释放量较小,因而末端处残余应力较大.

2.2 正交试验结果分析

根据选取的因素和水平值,采用 $L_{18}(3^7)$ 正交试验表进行试验安排,正交试验结果如表 2 所示,方差分析结果如表 3 所示.

由表 2 可知,熔体温度和延迟时间的极差

较大,表明两者对制品脱模后残余应力的影响较大,为主要影响因素.熔体温度越高,信噪比越大,制品脱模后残余应力越小;延迟时间越长,信噪比越小,制品脱模后残余应力越大.根据

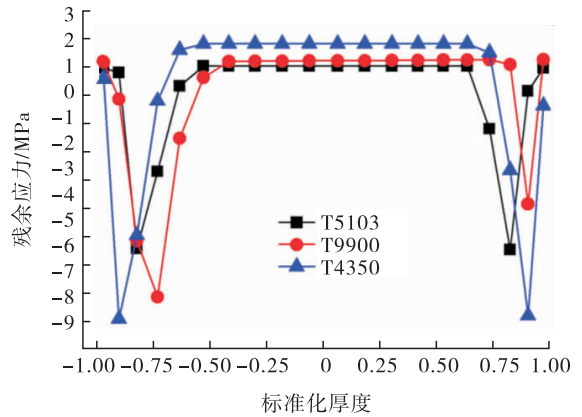


图 3 注塑件厚度方向上的残余应力分布

Fig. 3 Residual stress distribution in the thickness direction of injection molded parts

表 2 正交试验结果

Table 2 The results of orthogonal test

试验号	因素							残余应力/MPa		S/N
	A	B	C	D	E	F	G	模型 1	模型 2	
1	1	1	1	1	1	1	1	-8.020	-7.838	-17.985
2	1	2	2	2	2	2	2	-8.136	-8.014	-18.143
3	1	3	3	3	3	3	3	-6.769	-6.324	-16.326
4	2	1	1	2	2	3	3	-13.408	-13.074	-22.439
5	2	2	2	3	3	1	1	-7.439	-7.352	-17.379
6	2	3	3	1	1	2	2	-5.929	-5.794	-15.360
7	3	1	2	1	3	2	3	-8.817	-8.105	-18.556
8	3	2	3	2	1	3	1	-2.818	-2.426	-8.398
9	3	3	1	3	2	1	2	-6.193	-6.069	-15.752
10	1	1	3	3	2	2	1	-7.375	-6.755	-16.991
11	1	2	1	1	3	3	2	-7.754	-7.217	-17.490
12	1	3	2	2	1	1	3	-6.047	-5.909	-15.531
13	2	1	2	3	1	3	2	-8.060	-7.287	-17.711
14	2	2	3	1	2	1	3	-7.571	-7.442	-17.509
15	2	3	1	2	3	2	1	-5.539	-5.301	-14.682
16	3	1	3	2	3	1	2	-5.940	-8.941	-17.605
17	3	2	1	3	1	2	3	-6.586	-6.144	-16.081
18	3	3	2	1	2	3	1	-5.558	-5.689	-15.001
k_1	-17.078	-18.548	-17.405	-16.984	-15.178	-16.960	-15.072			
k_2	-17.513	-15.833	-17.053	-16.133	-17.639	-16.636	-17.010			
k_3	-15.232	-15.442	-15.365	-16.707	-17.006	-16.227	-17.740			
极差 R	2.281	3.106	2.040	0.851	2.461	0.733	2.668			

表3 方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis

因素	自由度	偏差平方和	均方	F 值	贡献率/%
A	2	17.603	8.801	2.277	14.185
B	2	34.331	17.166	4.441	27.665
C	2	14.275	7.137	1.847	11.503
D	2	2.258	1.129	0.292	1.820
E	2	19.605	9.803	2.536	15.799
F	2	1.618	0.809	0.209	1.304
G	2	22.811	11.405	2.951	18.381
误差	3	11.595	2.865		9.344
总体	17	124.097			100.000

表2中的极差大小和表3中各因素对制品残余应力的影响贡献率排序可知,各因素对制品脱模后残余应力的影响大小依次为:熔体温度 > 延迟时间 > 压缩距离 > 模具温度 > 注射时间 > 压缩力 > 压缩速度. 根据信噪比越大制品性能越稳定的规律,可得制品最优成型工艺参数组合为 $A_3B_3C_3D_2E_1F_3G_1$, 即模具温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$, 熔体温度为 $315\text{ }^\circ\text{C}$, 注射时间为 3 s , 压缩力为 882 kN , 压缩距离为 1.0 mm , 压缩速度为 5 mm/s , 延迟时间为 0 s . 对该最优工艺参数组合进行验证试验, 所得信噪比为 -7.494 , 大于表2中18组试验的信噪比, 说明采用最佳工艺参数组合可以获得残余应力最小的制品, 从而验证了正交试验设计的可行性.

2.3 主要因素对制品残余应力的影响

由上述分析可知, 熔体温度、延迟时间、压缩距离对角窗塑件残余应力贡献率较大, 为成型过程中的主要影响因素. 为进一步探讨熔体温度、延迟时间、压缩距离对角窗塑件残余应力的影响, 以最佳工艺参数组合 $A_3B_3C_3D_2E_1F_3G_1$ 为基准, 在其他工艺参数设置保持不变的条件下, 设置熔体温度 ($295\text{ }^\circ\text{C}$, $300\text{ }^\circ\text{C}$, $305\text{ }^\circ\text{C}$, $310\text{ }^\circ\text{C}$, $315\text{ }^\circ\text{C}$)、延迟时间 (0 s , 0.25 s , 0.50 s , 0.75 s , 1.00 s) 和压缩距离 (1.0 mm , 1.5 mm , 2.0 mm , 2.5 mm , 3.0 mm), 采用网格尺寸为 2.3 mm 的模型进行数值模拟试验, 结果分别如图4—6所示.

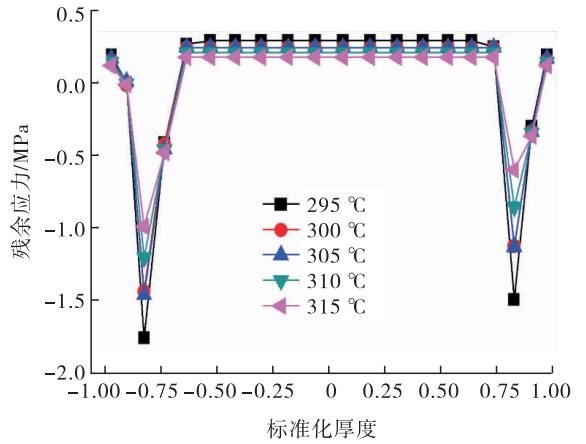


图4 熔体温度对制品残余应力的影响

Fig. 4 The effect of melt temperature on residual stress of products

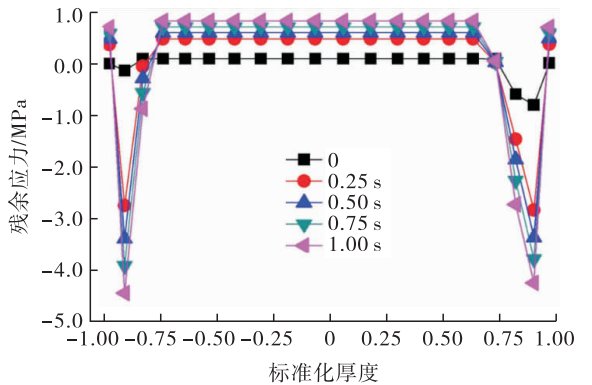


图5 延迟时间对制品残余应力的影响

Fig. 5 The effect of delay time on residual stress of products

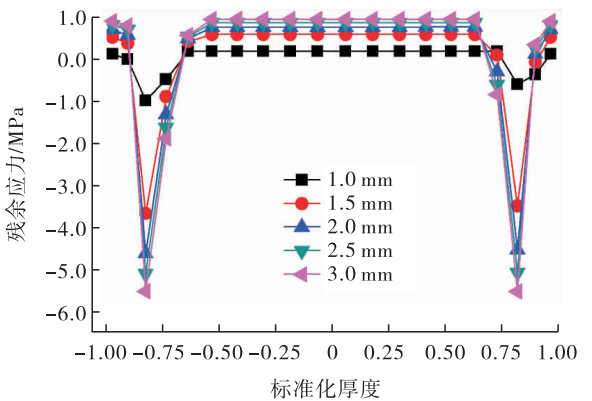


图6 压缩距离对制品残余应力的影响

Fig. 6 The effect of compression distance on residual stress of products

由图4可以看出,随着熔体温度的提高,塑件表层残余应力变化不明显,而次表层和中心层(标准化厚度介于 $-0.80 \sim 0.80$ 之间)残余应力逐渐减少.这可能是因为相同的模具温度下,熔体温度越高,带入模腔的热量越多,减弱了制品厚度方向上的温度梯度,有利于制品收缩变形的一致性,从而减小了热残余应力.另一方面,PC属于热敏性材料,熔体温度越高,黏度越小,流动性越好,分子取向程度越低,也越有利于减小残余应力.此外,熔体温度越高,冷却缓慢固化时间越长,越有利于分子链的充分解取向,能够在一定程度上减小流动残余应力.

由图5可以看出,在整个标准化厚度范围内,制品残余应力随延迟时间的增加而增大,这可能是由于延迟时间的增加导致冷凝层变厚,从而增加了充填流动阻力,使得在压缩速度控制阶段需要较大的压缩力,进而增加了熔体分子取向和内应力,最终造成残余应力增大.

由图6可以看出,在压缩距离由 1.0 mm 增加到 3.0 mm 的过程中,制品沿厚度方向上的各层残余应力逐渐增大.一般而言,当压缩速度相同时,随着压缩距离的增加,压缩力作用在熔体中的时间较长,增加了熔体的流动取向和内应力,进而引起残余应力的增大.

3 结论

本文以PC角窗塑件的残余应力为指标,利用Moldflow软件结合正交试验的数值模拟方法,考察了制品注射压缩成型工艺参数对残余应力的影响,确定了主要工艺参数和最佳工艺组合.结果表明:角窗塑件厚度方向上的残余应力分布呈现拉-压-拉三区域分布规律,制品末端残余应力较大,且压应力大于拉应力;注射压缩成型最优工艺条件为模具温度 $105 \text{ }^\circ\text{C}$,熔体温度 $315 \text{ }^\circ\text{C}$,注射时间 3 s ,压缩力 882 kN ,压缩距离 1.0 mm ,压缩速度 5 mm/s ,延迟时间 0 s ;残余应力随熔体温度的升高而减小,随延

迟时间、压缩距离的增加而增大.

本研究结果可为减小PC角窗塑件注射压缩成型过程的残余应力,以及提高角窗塑件成型质量提供参考.

参考文献:

- [1] 肖九梅. 浅述塑料注射压缩成型技术及应用[J]. 塑料包装, 2018, 28(5): 54.
- [2] 安紫娟, 何继敏, 王国俨, 等. 注射压缩模具及注射压缩成型技术研究进展[J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31(6): 60.
- [3] 杜遥雪, 史智, 周阳, 等. 注射压缩成型LED透镜光学性能分析[J]. 中国塑料, 2018, 32(5): 103.
- [4] YOUNG I K, YOUNG S S. Application of injection compression molding to thin-walled polymeric parts[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2018, 30(3): 161.
- [5] 李小林, 洪剑城. Moldflow在注射压缩成型中的应用[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(3): 49.
- [6] KABANEMI K, VAILLANCOURT H, WANG H, et al. Residual stresses, shrinkage, and warpage of complex injection molded products: Numerical simulation and experimental validation [J]. Polym Eng Sci, 2004, 38(1): 21.
- [7] HWA J O, YOUNG S S. Enhanced impact strength of injection-compression molded parts by controlling residual stress distribution [J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2019, 31(1): 35.
- [8] 沈红雷, 袁毅, 薛露. 注射压缩工艺参数对厚壁塑件成型质量的影响[J]. 机床与液压, 2018, 46(4): 9.
- [9] OLIAEI E, HEIDARI B S, DAVACHI S M, et al. Warpage and shrinkage optimization of injection-molded plastic spoon parts for biodegradable polymers using Taguchi, ANOVA and artificial neural network methods [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(8): 710.
- [10] 韩健, 李刚, 陈静波, 等. 注塑件残余应力影响因素的模拟实验研究[J]. 塑料工业, 2007(2): 23.