

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.01.011

变模温注塑成型对超薄导光板品质的探析与实践

殷素峰¹, 阮育煌¹, 阮锋²

(1. 东莞理工学院城市学院, 智能制造学院, 广东东莞 523419; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘要: 超薄导光板高速高压注射成型具有残余应力集中、厚度不均、微特征转写效果差等缺陷。简述了导光板注射成型缺陷原因, 重点分析了注塑成型工艺对超薄导光板残余应力、厚度均匀性、微特征转写性的影响, 并根据导光板设计要求选择最佳工艺方案进行实验, 结果显示, 与注射工艺相比, 注塑工艺使导光板样本点应力集中均值从 9.46 MPa 降为 7.98 MPa、厚度均匀性均值从 0.428 mm 降为 0.391 mm、微特征高度均值从 0.022 mm 提升为 0.0388 mm, 导光板综合性能显著提高。鉴于微特征转写性是导光板光学性能的关键因素, 且其受模温影响显著, 进一步将变模温技术与注塑工艺相结合, 使微特征高度均值进一步从 0.0388 mm 提升至 0.0394 mm, 更加接近设计值 0.04 mm。

关键词: 超薄注塑; 导光板; 注塑成型; 变模温

中图分类号: TQ320.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)01-0056-07

Analysis and Practice on Quality of Ultra-Thin Light Guide Plate by Dynamic Mold Temperature Injection Compression Molding

Yin Sufeng¹, Ruan Yuhuang¹, Ruan Feng²

(1. Institute of Intelligent Manufacturing, City College of Dongguan University of Technology, Dongguan 523419, China;

2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The high-speed and high-pressure injection molding of ultra-thin light guide plate has the defects of residual stress concentration, uneven thickness, poor micro-feature transcribability. The reasons for the defects in the injection molding of the light guide plate were briefly described and the influence of the injection compression molding process on the residual stress, thickness uniformity and micro-feature transcribability of the ultra-thin light guide plate was emphatically analyzed. According to the design requirements of the light guide plate, the best technology scheme was selected for experiments. The results show that compared with the injection molding process, at the sample points of the light guide plate by the injection molding process, the average stress concentration was reduced from 9.46 MPa to 7.98 MPa, the average thickness uniformity decreased from 0.428 mm to 0.391 mm, the average micro feature height increased from 0.022 mm to 0.0388 mm, the comprehensive performance of the light guide plate improved significantly. In view of the fact that the micro-feature transcribability is the key factor of the optical performance of the light guide plate, and it is significantly affected by the mold temperature, dynamic mold temperature technology with the injection compression molding is further combined, so that the average value of the micro-feature height is further increased from 0.0388 mm to 0.0394 mm, which is closer to the design value of 0.04 mm.

Keywords: ultra-thin injection molding; light-guide-plate; injection compression molding; dynamic mold temperature

超薄导光板是手机背光源的重要零件, 其功能是利用表面微特征将侧置点光源均匀反射为面光源, 其射出成型流长厚度比 L/T (L : 流动长度; T : 塑件厚度) 往往大于 150 以上, 需要采用专用

的高速高压成型工艺, 射压、射速可达 300 MPa、1000 mm/s 以上。

超薄导光板注射成型在型腔近浇口与远浇口之间形成很大压力差, 使导光板近浇口处残余应力

基金项目: 广东省特色创新科研项目 (2015KTSCX180), 院级重大科研培育项目 (2017YZD001Z)

通讯作者: 殷素峰, 博士, 副教授, 主要从事模具计算机技术及特种塑性成型研究 E-mail: 1042784725@qq.com

收稿日期: 2019-11-07

引用格式: 殷素峰, 阮育煌, 阮锋. 变模温注塑成型对超薄导光板品质的探析与实践 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):56-62.

Yin Sufeng, Ruan Yuhuang, Ruan Feng. Study on properties of the basalt fiber reinforced polypropylene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):56-62.

集中、脱模厚度常大于设计厚度、微特征转写性相对较好,远浇口残余应力小、脱模厚度常小于设计厚度、微特征转写性差。

张娜等^[1]研究了导光板的注射压缩成型缺陷对导光板性能的影响,认为模具温度和压缩距离对导光板的性能影响较大。孙琦伟等^[2]认为模具温度的升高,模内不对称冷却加剧,会使平板件的残余应力逐渐增大。王鑫等^[3]认为在变模温条件下,流动速率是微特征转写性的关键因素,合适的模具温度会提升微特征转写质量。Li Jiquan 等^[4]研究认为在较高模具高温下模塑件中的剪切层厚度减小,并随着填充压力降低更为显著。M. Sortino 等^[5]通过注塑压缩工艺控制和参数优化,提升了高深宽比几何结构的成型质量。李锴等^[6]研究了导光板微透镜结构尺寸及其加工方式对导光板光学性能及其成型质量的影响。王鑫等^[7]依据不同的复制程度特征指标,发现熔体温度、进胶流率和模具温度对微透镜特征阵列的复制程度影响较大。B. Fan 等^[8]通过分析光盘射出压缩成型工艺,认为热残余应力对制品的光学性能有着很大影响。Y. B. Lee 等^[9]研究发现射出压缩成型模具温度与保压压力对光盘表层热残余应力影响很大,而 Su Lijuan 等^[10]研究发现制件内部热残余应力对制件的光学性能有显著的影响。国内外文献主要集中在导光板注射成型中残余应力、微特征转写性影响因素的研究,但对导光板注塑压缩成型品质缺陷综合性分析比较少见。笔者通过超薄导光板注射和注塑成型对比,详细分析了注塑成型工艺对导光板成型残余应力、制件厚度、微特征转写性的影响,进一步将变模温技术与注塑成型相结合,极大展现了注塑成型工艺在改变超薄导光板综合品质的优越性。

1 实验部分

1.1 残余应力光学双折射测量方法

由于残余应力的存在,光线经过导光板会形成明暗相间双折射应力纹,如图 1 为双折射光弹应力仪,从应力纹级数只能计算出应力第一主方向、第二主方向之差 $\sigma_1 - \sigma_2$,如果要计算出导光板某点等效应力需要如下步骤:

(1) 将导光板置于测量平台上,取下光弹仪的两块四分之一波片,将两偏振镜轴线正交放置,在平面正交偏振光场下,逆时针同步旋转起偏镜 $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8$,共取四张。

(2) 在正交平面偏振场加入两片四分之一波片,即得双正交偏振光场。此时等倾线消除,只显示等差线,在第一主应力方向 $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8$ 四

个方向分别进行相应方向的等差线相移,再把四个方向获得的相移图拼接为全场的等差线相移图像,共取 16 张图像。

(3) 利用前两步获得的等倾线图与等差线图,可得导光板上任一点的第一主方向应力 (σ_1) 与第二主方向应力 (σ_2),该点等效应力由式 1 求出。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

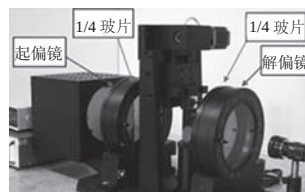


图1 光弹应力仪

1.2 主要设备及仪器

注塑成型机: ARBURG370S 型,德国 ARBURG 公司;

多功能模温控制机: TSW-1205 型,拓斯达公司;
传感器测量模腔压力: PRIAMUS6001B 型,瑞士 PRIAMUS 公司;

螺旋测微仪: Hitachi S4800 型,美特斯公司;

扫描电子显微镜: S480 型,日本 Hitachi 公司。

1.3 实验试样与方法

导光板试样尺寸: $114 \text{ mm} \times 63 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$,表面微特征设计尺寸为直径 $80 \mu\text{m}$ 、高度 $40 \mu\text{m}$ 的微透镜,材料为聚碳酸酯 (PC) AD-5503,具体如图 2 所示。

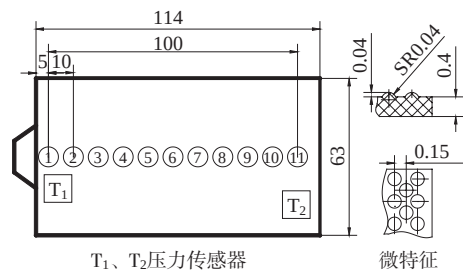


图2 导光板试样

为对比不同工艺对导光板成型品质的影响,沿导光板中线取 11 个样本点^[11],样本点间距 10 mm,利用应力仪、螺旋测微仪、电镜分别测量计算样本点残余应力、试样厚度、微特征高度。型腔近浇口、远浇口处设置压力传感器,测量模具型腔压力。

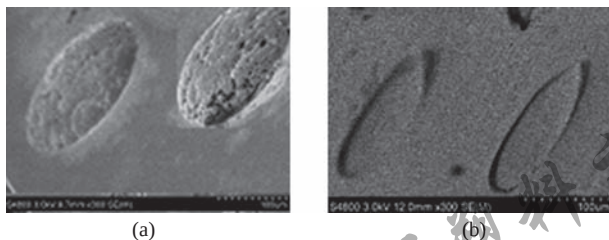
2 超薄导光板射出成型中导光板成型缺陷

超薄导光板高速高压注射成型^[12],使熔体高分子高度取向形成流动残余应力,实验表明,射出过程由于模腔近浇口、远浇口处形成较大压力差,近浇口

处由于补缩残余应力集中,脱模收缩率呈负值,使脱模厚度常大于设计尺寸,但表面微特征因保压压力较大而转写性较好。远浇口处由于冷却速度快,保压压力传递效率差,熔体补缩困难,试件脱模收缩大,脱模厚度常小于设计厚度,微特征由于模腔压力、温度不足转写性差,但由于压力传递效率差残余应力较小。图3为导光板双折射应力纹,从图中可知,近浇口处残余应力高度集中。图4为导光板近浇口、远浇口微特征电镜扫描形貌,从图中可知,微特征转写性近浇口明显好于远浇口。



图3 注射成型双折射应力纹



a—近浇口处; a—远浇口处

图4 注射成型近、远浇口处微特征形貌

进行注射试验,熔体温度 290℃,模具温度 100℃,射出速度 800 mm/s,射出压力 160 MPa,锁模力 65 t, P/V 切换设置为 90%,保压压力分别取 60% 与 30%。测量图 3 样本点残余应力、试件厚度、微特征高度,如图 5、图 6、图 7 所示。

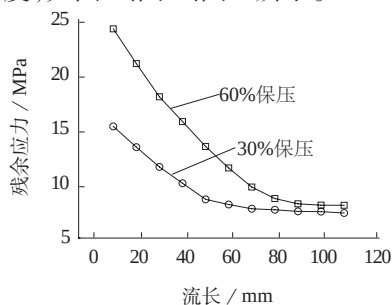


图5 样本点残余应力

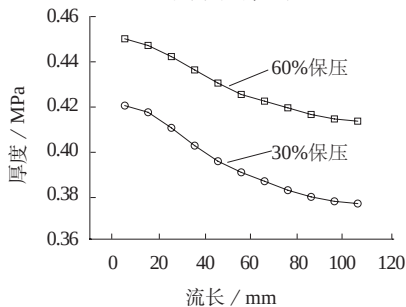


图6 样本点厚度

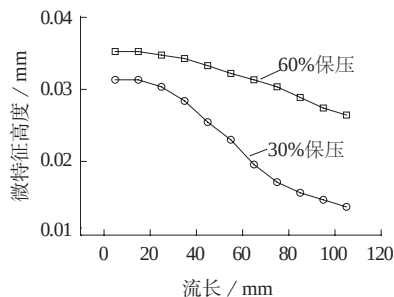


图7 样本点微特征高度

从图 5 可知,注射成型导光板近浇口处残余应力明显高于远浇口,降低保压压力可以有效降低近浇口处残余应力。从图 6 可知,由于保压补缩,试件近浇口厚度高于远浇口厚度,降低保压压力,样本点厚度呈整体下移趋势,难以保证近浇口、远浇口样本点厚度同时达到设计要求。从图 7 可知,近浇口微特征转写性好于远浇口,当降低保压压力时,远浇口微特征转写性明显变差。

从以上分析可知,超薄导光板在注射成型中残余应力大,厚度不均匀、微特征转写性差,其成型工艺很难提升超薄导光板综合品质。

3 超薄导光板注压成型工艺对其品质的影响

注塑压缩成型是将熔融塑料注入略微打开的型腔中,然后闭合模具、压缩熔料充满型腔。设计 $L_9(4^3)$ 正交实验,选择压缩距离 (A)、压缩延迟 (B)、模具温度 (C)、压缩力 (D) 作为设计参数,每参数设置 3 水平如表 1。将残余应力、样本点 1 和样本点 11 处厚度差、微特征高度作为设计目标,共做 9 次实验如表 2。设计期望前两个目标越小越好,后一个目标越大越好。通过计算,得设计参数对设计目标效应图 8、图 9、图 10。

表1 正交试验设计参数

工艺参数	模具温度 / °C	压缩距离 / mm	压缩延迟 / s	压缩力 / kN
水平 1	80	0.4	0.5	50
水平 2	90	0.6	1.0	60
水平 3	100	0.8	1.5	70

表2 正交试验结果

序号	A	B	C	D	残余应力 / MPa	厚度差 / mm	微特征高度 / mm
1	1	1	1	1	29.4	0.031	0.028
2	1	2	2	2	21.1	0.017	0.034
8	3	2	1	3	14.2	0.026	0.039
9	3	3	2	1	18.7	0.022	0.036

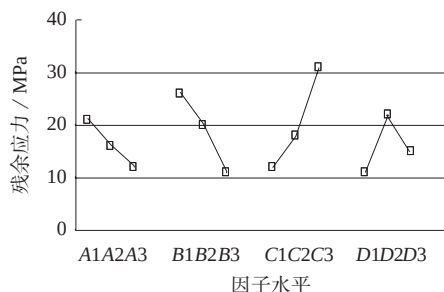


图8 残余应力效应图

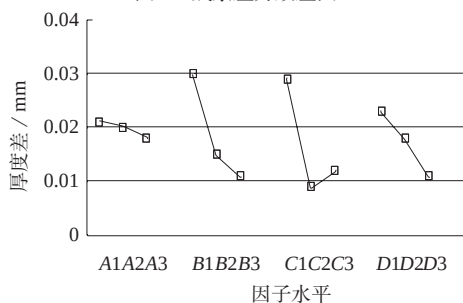


图9 厚度差效应图

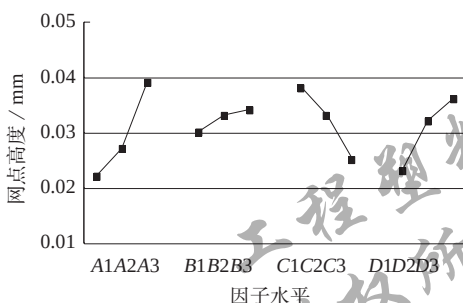


图10 微特征高度效应图

从图8可知,对残余应力影响极差大小顺序为 $C > B > A > D$ 。超薄型腔中熔体冷却快,压缩延迟过大,熔体冷却凝固,压缩难度增加,使残余应力较大;压缩距离越大,熔体易进入型腔,高分子流动剪应力降低,残余应力也随之降低;模具温度较高,使高分子更易松弛,有助于降低残余应力;压缩力过大,流动残余应力不易释放,压缩力过小,压缩速度低,易形成凝固层,都会引起较大残余应力,因此,适当的压缩力有助于残余应力降低^[13]。

从图9可知,对近浇口、远浇口厚度差影响极差大小顺序为 $C > B > D > A$ 。压缩延迟过小,熔体尚未充满型腔,压缩延迟过大,熔体冷却凝固,都会使近、远浇口厚度差变大,适当的延迟时间有利于近、远浇口厚度一致;压缩距离增大,熔体易进入型腔,熔体流动剪应力小,近、远浇口脱模收缩较为一致,厚度差减小;压缩力增大,有助于熔体腔内压实,厚度差较小;模温升高,有助于熔体腔内流动,厚度差较小。

从图10可知,对微特征高度影响极差大小顺序为 $A > D > C > B$ 。模具温度较高,腔壁熔体不易冷却,微特征转写性好;压缩力大,微特征成型完整饱满,转写性较好;压缩延迟过大,熔体冷却凝固,微特征转写性差。压缩距离增大,熔体进入型腔较多,微特征转写性相对较好^[14]。

由于导光板为光学元件,微特征成型、残余应力对光的反射、投射至关重要,因此,参考图8、图9、图10效应图,选择 $A3B3C2D1$ 作为最佳工艺组合进行实验,得图3样本点残余应力、厚度、微特征高度如图11、图12、图13所示。

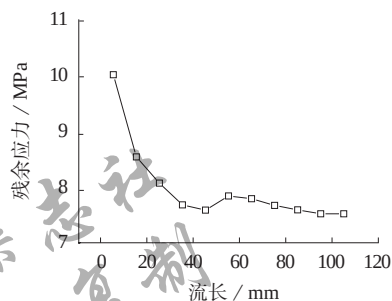


图11 最佳工艺组合样本点残余应力

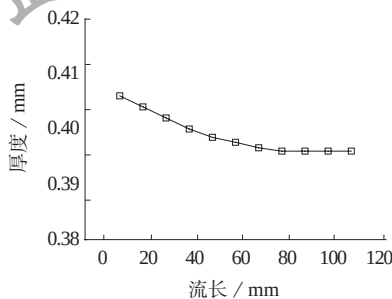


图12 最佳工艺组合样本点微特征高度

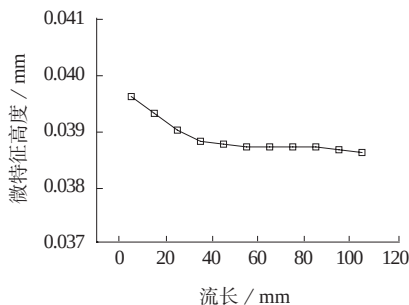


图13 最佳工艺组合样本点厚度

从图11可知,注压成型残余应力整体偏小,近浇口样本点1残余应力为10.01 MPa,远浇口样本点11残余应力为7.52 MPa,其差值仅2.49 MPa。样本点6处残余应力略为凸显,是因为中间收缩较慢,热应力较为集中。

从图12可知,注压成型近浇口厚度略高于远浇口,样本点1厚度为0.406 mm,样本点11厚度为

0.396 mm,其差值仅 0.010 mm。

从图 13 可知,注压成型微特征高度近浇口略高于远浇口,样本点 1 高度为 0.039 mm,样本点 11 高度为 0.038 mm,其差值仅 0.001 mm,整体转写性较好。

图 14 为注塑压缩双折射应力条纹,图 15 为样本点 11 位置微特征转写形貌,从图 11~图 15 可以看出,与射出成型相比,残余应力更小、近浇口和远浇口厚度偏差更小,注塑压缩微特征转写性更好。



图 14 注塑成型双折射应力纹

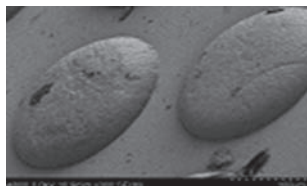


图 15 注塑成型微特征形貌

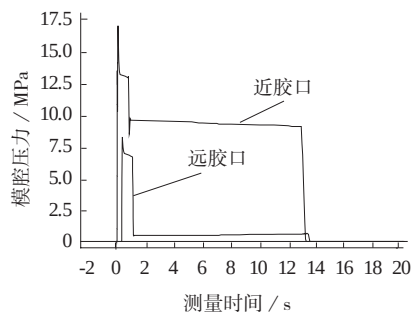
4 超薄导光板变模温注压成型

从以上分析可以了解到,模具温度对微特征转写质量影响显著,为了进一步改善微特征转写性,增强导光板光学特性。在注压成型中结合变模温技术,通过模具温度控制提升微特征转写质量。

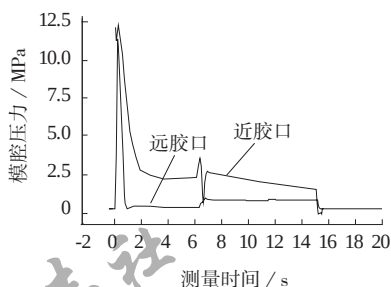
在注压最佳工艺组合 A3B3C2D1 基础上,结合变模温进行实验。导光板材料 PC AD-5503 的顶出温度为 133℃,设定动态变模温为 140~90℃,采用 PRIAMUS 6001B 压电测器测量图 2 中 T1、T2 位置压力,测量结果与定模温成型结果对比如图 16a、图 16b。

从图 16a、图 16b 可知,注压成型工艺结合变模温技术能够有效地缩减制件型腔近浇口、远浇口压力差^[15],能够获得较小且分布均匀的残余应力,制件微特征成型更为饱满且表面较为光滑,成型质量高。如图 17、图 18 为变模温注压成型导光板双折射应力纹及微特征转写形貌。

变模温注压工艺能够将初始模具温度设定更高,如试验中设定为 140℃,高于顶出压力 133℃。通过模具温度控制,熔体初始进入型腔后腔壁冷却慢,更利于表面微特征转写成型。且初始模温高,能够使高分子充分松弛,熔体流动充分,压力传递效果



(a)



(b)

a—定模温 100℃; b—变模温 140~90℃

图 16 固定模温与动态模温模内压力测量

好,型腔内近浇口、远浇口压力分布更趋一致,导光板成型残余应力更小、分布更均匀,随着压力的降低,应力释放充分,微特征定型质量好。



图 17 变模温注压成型双折射应力纹

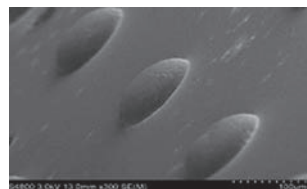


图 18 变模温注压成型微特征形貌

将注射成型、注压成型、变模温注压成型三种工艺方案对比,计算测量图 3 中样本点 1~11 位置处的残余应力、厚度、微特征高度均值和标准差,如图 19a、图 19b、图 19c 所示。从图 19a 可知,三种工艺方案中,注射成型残余应力均值最大,且标注差最大,注压成型次之,而变模温注压成型残余应力均值最小,且标注差也最小,显示了注压成型工艺对减小导光板残余应力、提高残余应力分布均匀性更有效果,而变模温技术会进一步降低残余应力均值,且其分布均匀性也有一定提升。

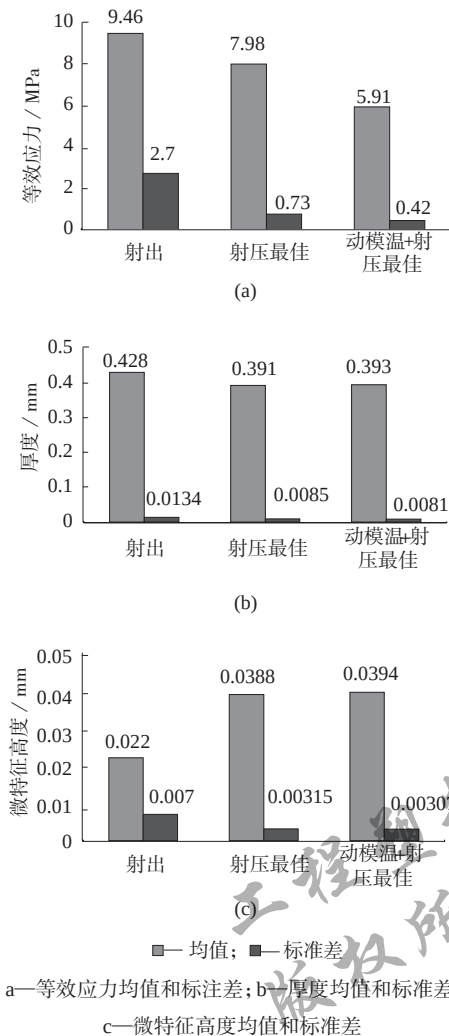


图 19 不同工艺方案导光板品质对比

从图 19b 可知,三种工艺方案中,射出成型样本点厚度均值超出设计尺寸,标准差大,尺寸分布分散。注压工艺与变模温注压工艺样本点厚度均接近设计值,标准差均较小,尺寸分布集中,变模温注压工艺略好但差距不大,说明变模温技术对厚度影响不太显著。

从图 19c 可知,三种工艺方案中,注射成型微特征高度均值最小,且标准差最大,说明射压成型微特征转写性最差。注压成型和变模温注压成型工艺微特征转写均较好,二者标准差相近,但变模温注压成型微特征高度均值更接近设计值。说明变模温注压成型工艺对微特征转写作用显著。

5 结论

针对超薄导光板射出成型、注压成型、变模温注压成型工艺的对比得出如下结论:

(1) 超薄导光板注射成型熔体冷却快,熔体在高保压作用下集中于浇口附近,导致导光板应力集中,

型腔前、后端厚度不均、微特征转写较差。

(2) 注压成型型腔厚度较大,熔体易进入型腔,分子取向弱,残余应力小。合适的压缩力与延迟时间是保证应力分布、制品厚度均匀的重要因素。

(3) 注压成型中模具温度是影响微特征转写质量的主要因素,模温高,熔体冷却慢、易流动,高分子松弛效果好,有利于减小残余应力、提升制品厚度均匀性。

(4) 变模温注压成型能明显地减小型腔近浇口、远浇口压力差,通过模温控制,使导光板平面内残余应力趋于更小且分布均匀、微特征转写性更佳。

参考文献

- [1] 张娜,吴大鸣,郑秀婷,赵中里. 导光板的注射压缩模拟及实验[J]. 塑料,2013,42(6):88-89.
- [2] 孙琦伟,陈宇宏,陈昊,等. 注塑压缩成型工艺对聚甲基丙烯酸甲酯-聚碳酸酯复合平板残余应力的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2018,34(11):101-107.
- [3] 王鑫,杜林芳. 变模温条件下工艺参数对注射成型微结构充填率的影响[J]. 塑料,2015,44(5):35-38.
- [4] Li Jiquan, Zheng Wei, Jiang Shaofei, et al. An experimental study of skin layer in rapid heat cycle molding[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2014, 53(5):488-496.
- [5] Sortino M, Totis G, Kuljanic E. Comparison of injection molding technologies for the production of micro-optical devices[J]. Procedia Engineering, 2014, 69:1 296-1 305.
- [6] 李楷,吴大鸣,孙靖尧,等. 模具微结构及其加工方式对导光板性能的影响[J]. 塑料科技,2019,47(1):72-77.
- [7] 王鑫,王静,李立尧. 注射成型薄壁导光板微透镜特征阵列复制

- 程度分析[J]. 中国塑料, 2018, 32(3):122-12
- Wang Xin, Wang Jing, Li Liyao. Feature array replication fidelity analysis of microlens on of injection molded thin-wall light guide plates[J]. China Plastics. 2018, 32(3):122-12
- [8] Fan B, Kazmer D O, Bushko W C, et al. Birefringence prediction of optical media [J]. Polym Eng Sci, 2004, 44 (4):814-824.
- [9] Lee Y B, Kwon T H, Yoon K. Numerical prediction of residual stresses and birefringence in injection/compression molded center-gated disk. Part II: Effects of processing conditions[J]. Polym Eng Sci, 2002, 42 (11):2 273-2 292.
- [10] Su Lijuan, Allen Yi Y. Finite element calculation of refractive index in optical glass undergoing viscous relaxation and analysis of the effects of cooling rate and material properties[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2012, 3(3): 263-274.
- [11] 蒋丰泽, 刘义伦, 陈磊, 等. 工艺参数对注射压缩成型微透镜阵列基板双折射率的影响 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(8):2 610-2 616.
- Jiang Fengze, Liu Yilun, Chen Lei, et al. Effects of compression parameters on birefringence of injection compression molded microlens array substrate[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(8):2 610-2 616.
- [12] 刘水星, 庄俭, 杨于光, 等. 聚碳酸酯在高注射速度下成型超薄导光板的仿真试验分析 [J]. 中国塑料, 2015, 29(11):78-82.
- Liu Shuixing, Zhuang Jian, Yang Yuguang et al. Simulation analysis of thin-walled light guide plates of polycarbonate at high injection speed[J]. China Plastics, 2015, 29(11):78-82.
- [13] 陈宇宏, 袁渊, 李曦, 等. 注射成型和注射压缩成型角窗的残余应力比较 [J]. 航空材料学报, 2010, 30(3):48-54.
- Chen Yuhong, Yuan Yuan, Li Xi, et al. Residual stress of injection molded and injection compression molded autoglazing[J]. Journal of Aeronautical Materials. 2010, 30(3):48-54.
- [14] 孙磊磊, 蒋炳炎, 陈磊, 等. 微透镜阵列注射压缩成型的残余应力 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(10):2 635-2 640.
- Sun Leilei, Jiang Bingyan, Chen Lei, et al. Residual force of microlens array by injection compression molding[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(10):2 635-2 640.
- [15] 王韬, 葛勇, 郎建林, 等. 注射压缩成型与常规注射成型的模腔压力对比分析 [J]. 材料工程, 2018, 46(4): 127-133.
- Wang Tao, Ge Yong, Lang Jianlin, et al. Comparison and analysis on cavity pressure of conventional injection molding and injection compression molding[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(4):127-133.
-
- (上接第 50 页)**
- of HDPE and LDPE at the low-frequency range under supercritical CO₂[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2017, 123:67-75.
- [7] Lan Hung-Yu, Tseng Hsieng-Cheng. Study on the rheological behavior of PP / supercritical CO₂ mixture[J]. Journal of Polymer Research, 2002, 9(3):157-162.
- [8] Lee M, Park C B, Tzoganakis C. Measurements and modeling of PS / supercritical CO₂, solution viscosities[J]. Polymer Engineering & Science, 1999, 39(1):99-109.
- [9] Lee M, Tzoganakis C, Park C B. On-line measurement of PS / CO₂ solution viscosities[J]. Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, Materials, 1997, 2:1 991-1 995.
- [10] Royer J R, Gay Y J, Desimone J M, et al. High-pressure rheology of polystyrene melts plasticized with CO₂: experimental measurement and predictive scaling relationships[J]. Polym. Sci. B 38 (2000):3 168-3 180.
- [11] Royer J R, DeSimone J M, Khan S A. High - pressure rheology and viscoelastic scaling predictions of polymer melts containing liquid and supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2001, 39(23):3 055-3 066.
- [12] 王文凌, 黄兴元, 王都阳, 等. 一种测量超临界 CO₂ 在聚合物中溶解行为的新装置 [J]. 中国塑料, 2019, 33(2):97-102.
- Wang Wenling, Huang Xingyuan, Wang duyang, et al. A new measuring device for solubility of supercritical carbon dioxide in polymers[J]. China Plastics, 2019, 33(2):97-102.
- [13] 梁基照. 聚合物材料加工流变学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- Liang Jizhao. Polymer material processing rheology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [14] Han Chang Dae. Rheology in polymer processing[M]. New York: Academic Press, 1976:89-109.