

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.012

注射成型方法对客舱观察窗残余应力的影响

王韬^{1,2}, 许雪婷^{2,3}, 王博伦^{1,2}, 孙琦伟^{1,2}, 葛勇^{1,2}, 郎建林^{1,2}, 颜悦^{1,2}

(1. 北京航空材料研究院股份有限公司, 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;
3. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 针对民用航空的有机玻璃, 即聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)客舱观察窗, 对比了常规注射成型(CIM)和注射压缩成型(ICM)两种方法, 研究了不同工艺参数对观察窗残余应力的影响, 其中 CIM 工艺参数包括了注射速度、熔体温度、模具温度、冷却时间、保压压力和保压时间, ICM 工艺参数包括了注射速度、熔体温度、模具温度、冷却时间、压缩行程和压缩速度。结果表明, CIM 中保压压力对残余应力的影响最大, 其次为熔体温度、保压时间和注射速率, 模具温度和冷却时间的影响最弱; ICM 中熔体温度、压缩行程和冷却时间对残余应力的影响最大, 压缩速度和注射速度次之, 模具温度最弱。随着熔体温度的升高, 不同工艺方法下观察窗的残余应力降低均超过 60%。ICM 中更多阶段的压力控制使得模腔压力更加均匀, 增大压缩行程和压缩速率可以降低注射压力、减小充填阻力和压力梯度, 进一步降低分子链取向和残余应力, 可控制应力均值在 12 nm(光程差)以下。采用优化的 ICM 工艺, 制备出残余应力低、光学性能良好的客舱观察窗, 完成并通过了充压疲劳和破损安全试验验证, 满足使用要求。

关键词: 残余应力; 常规注射成型; 注射压缩成型; 客舱观察窗; 有机玻璃

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0085-10

Effect of injection molding methods on residual stress of cabin window

WANG Tao^{1,2}, XU Xueting^{2,3}, WANG Bolun^{1,2}, SUN Qiwei^{1,2}, GE Yong^{1,2}, LANG Jianlin^{1,2}, YAN Yue^{1,2}

(1. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100095, China;
2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Structural Transparency for the Modern Traffic System, Beijing 100095, China;
3. AECC Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China)

Abstract : The two molding methods, including conventional injection molding (CIM) and injection compression molding (ICM), were conducted on polymethyl methacrylate(PMMA) cabin window. The influence of corresponding process parameters on the residual stress were studied. Injection velocity, melt temperature, mould temperature, cooling time, packing pressure and packing time were included in CIM. Injection velocity, melt temperature, mould temperature, cooling time, compression stroke and compression velocity were included in ICM. The results show the packing pressure, followed by melt temperature, holding time and injection velocity, has the greatest influence on the residual stress and the mould temperature and cooling time are weakest factors in CIM. However, the melt temperature, compression stroke and cooling time have the great influence on the residual stress in ICM, followed by compression velocity, injection velocity and mould temperature. The residual stress is markedly decreased up to 60%, with increasing melt temperature in CIM and ICM. Pressure control of more stages in ICM make the cavity pressure more uniform. Increasing the compression stroke and compression velocity can reduce the injection pressure, related to the lower filling resistance and pressure gradient, resulting in less the molecular orientation and residual stress, nearly about 12 nm(optical path difference). The cabin window, with low residual stress and good optical properties, was manufactured by the optimized parameters of ICM. The pressurized fatigue test and damage safety test for the cabin window were conducted and passed, satisfying the use requirement.

Keywords : residual stress ; conventional injection molding ; injection compression molding ; cabin window ; polymethyl methacrylate

通信作者: 王韬, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为航空透明件注射成型技术

收稿日期: 2025-03-12

引用格式: 王韬, 许雪婷, 王博伦, 等. 注射成型方法对客舱观察窗残余应力的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 85-94.

WANG Tao, XU Xueting, WANG Bolun, et al. Effect of injection molding methods on residual stress of cabin window[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 85-94.

航空透明件包括了座舱罩、光窗、灯罩等系列产品,对光学、力学以及装配等性能有着较高的要求。座舱罩作为飞机的关键件之一,其传统的制造方法是采用航空级有机玻璃板材进行热成型^[1-2],生产周期长,成本高。注射成型作为一种高效、低成本的先进成型技术,设计自由度大,已成为座舱透明件成型技术发展的重要方向^[3]。国外从20世纪80年代就开始研究座舱透明件的注射成型,制定并实施了两个透明件研制计划(FTP和NGT)^[4-5],提出了体积注射成型技术,取得了显著成效。2003年第一个光学性能符合要求的注射成型F-16透明件研制成功,并在第31届结构塑料年会上获得最高奖^[6]。飞行员面罩和无人机光窗等透明件对外形精度和光学性能的要求越来越高,传统模压成型无法满足要求,注射成型可以实现结构功能一体化制造^[7],克服了常规方法的弊端,在多个飞机的相关产品上已实现成功应用。综上所述,大至近百公斤的战机座舱罩,小至十几克的防护窗口,注射成型已成为不同透明件行业的有效竞争手段^[8-9]。

传统注射成型是依靠较大的注射压力将高黏度熔体强行挤压充填进入模具型腔,通过浇口保压补偿产品收缩,后冷却定型,会产生流动方向上的压力梯度、材料的分子链择优取向以及因熔体和模具之间温度差而产生的温度梯度,所有这些因素势必会引入较大的残余应力^[10-12],导致后期的几何变形和装配应力集中,成为产品使用与服役过程中的安全隐患。注射压缩成型通过熔体充填阶段扩大模具型腔,降低了注射压力和流动残余应力^[13],提高了补缩效果和尺寸精度^[14-15],在光盘和导光板等小型产品上已实现产业化。Cheng等^[16]采用Moldex3D和田口设计研究了双面微透镜阵列的成型,模拟和试验均显示注射压缩可以获得更高的尺寸精度和更低的应力。Michaeli等^[17]和周晓伟^[18]分别从不同的光学性能出发,进一步验证了注射压缩成型对高光学质量的适用性。郭梦丽等^[19]利用注射压缩工艺有效提高纤维取向程度,提升了取向方向上的导热效果。Chen等^[20]还从压缩力的分阶段控制上进行了翘曲变形的优化。

关于透明件的注射成型多集中在小型产品的单一成型方法及其工艺研究,较少涉及不同方法和相关工艺的比对分析,对中大型产品的性能控制缺乏系统认识。笔者选择民机用客舱观察窗作为研

究对象,基于常规注射成型与注射压缩成型的理论分析,探究不同方法下材料所经历的压力(P)-体积(V)-温度(T)历史,对两种方法不同工艺组合下的产品进行光程差测试与分析,对比方法-工艺-应力影响规律,提出残余应力的工艺优化策略,完成了客舱观察窗的低应力成型和典型试验考核验证,实现了产品低成本制造和高性能服役的良好结合。

1 实验部分

1.1 主要原材料

光学级聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA): Plexiglas®8 N,熔体流动速率为3.5 g/10 min,德国Roehm Chemical公司。

1.2 主要仪器及设备

精密注射成型设备: CX-650-7100,锁模力650T,德国KraussMaffei公司;

模具温度控制器: HB-180Z2,最高温度180°C,瑞士HB公司;

模腔压力传感器: 6159A,最高压力200 MPa,瑞士Kistler公司;

双折射测试仪: WPA 100-L,测量范围(0~4 000)nm,日本Photonic-lattice公司。

1.3 样件制备

选择客舱观察窗的内层玻璃开展成型制造,如图1所示,厚度为4 mm,产品为双曲近平面结构,边缘为装配区,结构受力集中,易出现开裂破坏风险。注射成型的浇口选择在观察窗侧面长边处,浇注系统采用单点热流道,模具采用插穿式压缩结构,如图2所示。

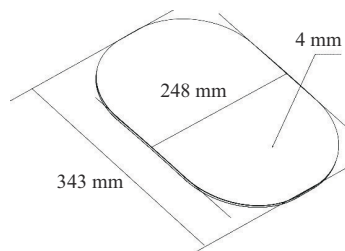


图1 客舱观察窗设计图

Fig. 1 Design of cabin window

注射成型实验包括了常规注射成型(CIM)和注射压缩成型(ICM)两部分,其中ICM采用了熔体100%注射完成后转入压缩的模式,具体的实验规划见表1,每种工艺设置三个水平,从低到高分别标识为L,M和H,考察某一工艺不同水平影响时其他工艺均处于中间水平M。每一组工艺下取样需要

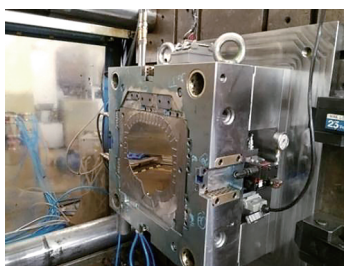


图2 注射用模具

Fig. 2 Injection mould

表1 注射成型实验参数表

Tab. 1 Parameters in injection molding

Parameters	L	M	H
Injection velocity/(mm·s ⁻¹)	5	10	20
Melt temperature/°C	240	250	260
Mold temperature/°C	70	80	90
Cooling time/s	15	30	45
Packing pressure/MPa	30	60	90
Packing time/s	1	5	9
Compression stroke/mm	1	3	5
Compression velocity/(mm·s ⁻¹)	1	5	9

在8~10模次的模腔压力和质量稳定后开展,选择稳定条件下的3件产品进行应力测试(应力结果重复性良好,后续选择其中任一结果进行比对)。

1.4 测试与表征

基于数字光弹原理以及光弹-应力定律,透明产品的双折射可以直接反映其内部的残余应力分布与量级,对应的双折射光程差与残余应力之间的关系见式(1)。

$$\delta = Cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

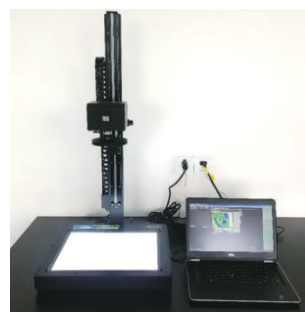
式中: δ 为光程差; σ_1 为第一方向主应力; σ_2 为第二方向主应力; $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 为残余应力; C 为应力系数; d 为待测试点厚度。

上式显示残余应力与光程差呈正比例关系,双折射测试如图3a所示。笔者选择光程差表示残余应力,重点研究其三维分布和流动方向上的二维分布,其中三维分析的 x, y 方向坐标为产品平面尺寸, z 方向为光程差,而线性分析选择产品中间沿流动方向,横坐标为产品位置,纵坐标为光程差,见图3b,其中箭头代表熔体充填方向,箭头起始位置代表了近浇口一侧。

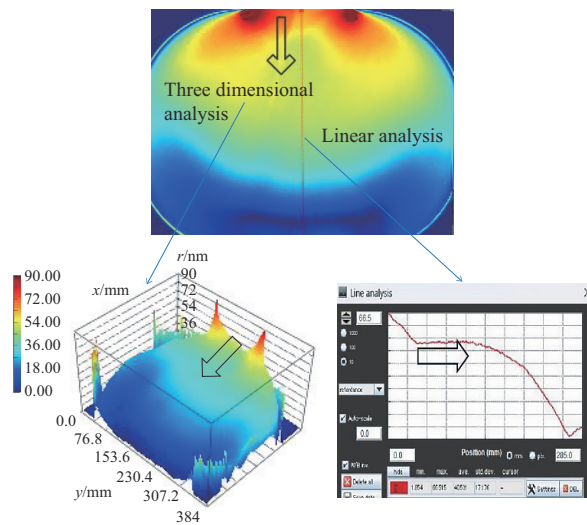
2 结果与讨论

2.1 成型过程对比分析

ICM有别于CIM,即在成型过程中由压缩阶段取代或者部分取代CIM的保压阶段,进而补偿材料在冷却过程中的体积收缩。同时,ICM注射阶段的



(a) Testing equipment



(b) Three-dimensional and linear analysis

图3 双折射测试与分析

Fig. 3 Measurement and analysis of birefringence

模具型腔间隙也大于CIM,使得材料在充填过程中的流动阻力减小,剪切力降低,一定程度减小了次表面的分子链取向程度,弱化了各向异性。

注射成型过程中聚合物熔体的 P - V - T 特性可以反映不同阶段的材料状态,该曲线是分析注射成型的主要工具,也是开展不同方法及工艺研究的重要理论前提。CIM和ICM成型的材料 P - V - T 路径如图4所示。从图4可以看出,CIM遵从1-2-3-4-5的材料演变路径,其中路径1-2代表了充填阶段,在2点达到了注射压力的峰值;路径2-3代表了压力达到峰值后的保压阶段,浇口在3点处固化封死;路径3-4代表了恒定体积下的冷却阶段,当压力降低至标准大气压后,冷却沿路径4-5继续进行,该阶段无模具约束,所以4点也称之为“脱离点”,4点之前为受限收缩,而4点之后为自由收缩。同时,该脱离点的位置也决定了产品收缩特性的控制模式,若脱离点的温度低于材料的玻璃化转变温度,则产品的尺寸受模具型腔约束而定型。反之,则后期的收缩为自由状态,其尺寸变形不可控。CIM中建议使用高压

注射和长时保压,以提高最大注射压力和延长保压结束点位置,进而使得脱离点的温度值降低,实现精密成型^[21]。

图4中ICM遵从1-2'-3'-4'-5'-6'-7'-5的材料演变路径,其中路径1-2'代表了充填阶段,其中2'点处的压力远小于传统注射成型中的2点,表明充填的流动阻力小,流动方向上的压力损失也小;路径2'-3'代表了注射阶段与保压阶段的切换滞后,反映出两个阶段的衔接过渡,而浇口在2'处封闭;路径3'-4'代表了在恒定速度下进行压缩,减小模具型腔体积至最终状态,锁模力和模腔压力均达到最大值;之后沿路径4'-5'-6'冷却定型,在该过程中锁模力和型腔压力持续作用以实现有效补缩,提高尺寸精度;路径6'-7'代表了压缩阶段和冷却阶段的结束,7'点代表了ICM过程的“脱离点”;在脱离点之后,产品继续沿7'-5路径冷却。与CIM相比,ICM拥有了更多的压力控制阶段,包括了1-2',3'-4'-5'-6'-7'-5,可以有效保证产品的几何收缩和尺寸精度,也大大降低了充填阶段的压力梯度和分子链取向,减小了材料的各向异性和残余应力。

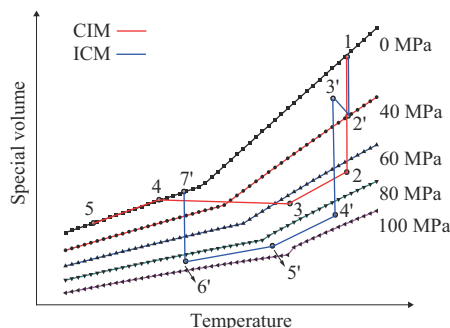


图4 CIM和ICM下的材料P-V-T演变曲线

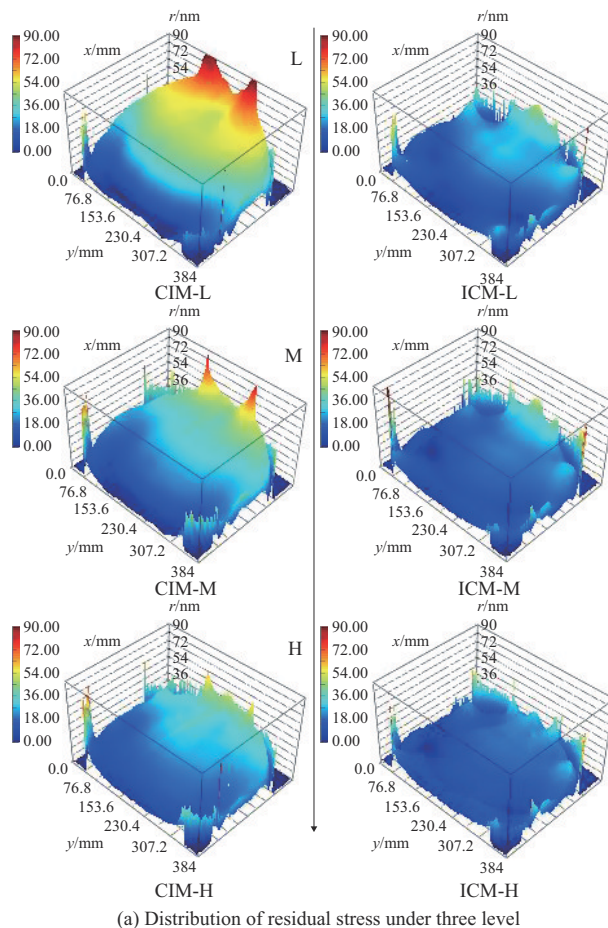
Fig. 4 P-V-T curves in CIM and ICM

2.2 残余应力分析

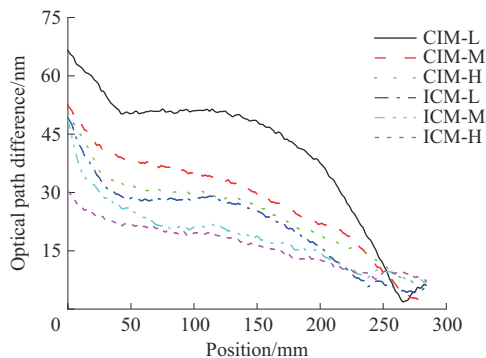
2.2.1 注射速率的影响

不同注射速度下的残余应力(光程差)分布如图5所示。从图5可以看出,CIM和ICM均表现出随注射速率增大残余应力降低的趋势,主要原因是注射速率增大使得材料充填过程的剪切作用显著,相应的剪切热增加,使得材料充填的取向程度得到松弛,明显降低了产品的残余应力。CIM在近浇口一侧的应力集中更加明显,其主要归咎于通过浇口进行保压补缩,其浇口处的压力最大,且在流动方向上存在明显的压力降,充填末端的压力极小,应力基本降至0,见图5b。ICM中模具型腔尺寸的扩大,使得材料的充填变得更加容易,不存在CIM充填方

向上的压力传递损失及梯度问题,残余应力更低,在H级注射速度下的光程差均值仅为16 nm。同时,ICM下的残余应力也表现出自浇口向末端逐渐递减的变化趋势,但较CIM显著降低,这与熔体的压缩流动相关,压缩过程会引起浇口区域的回流,进一步增大浇口区域的残余应力。



(a) Distribution of residual stress under three level



(b) Linear analysis along flow direction

图5 注射速度对残余应力的影响

Fig. 5 Influence of injection velocity on residual stress

2.2.2 熔体温度的影响

不同熔体温度下的残余应力(光程差)分布如图6所示,可以看出,熔体温度越高,观察窗的残余应

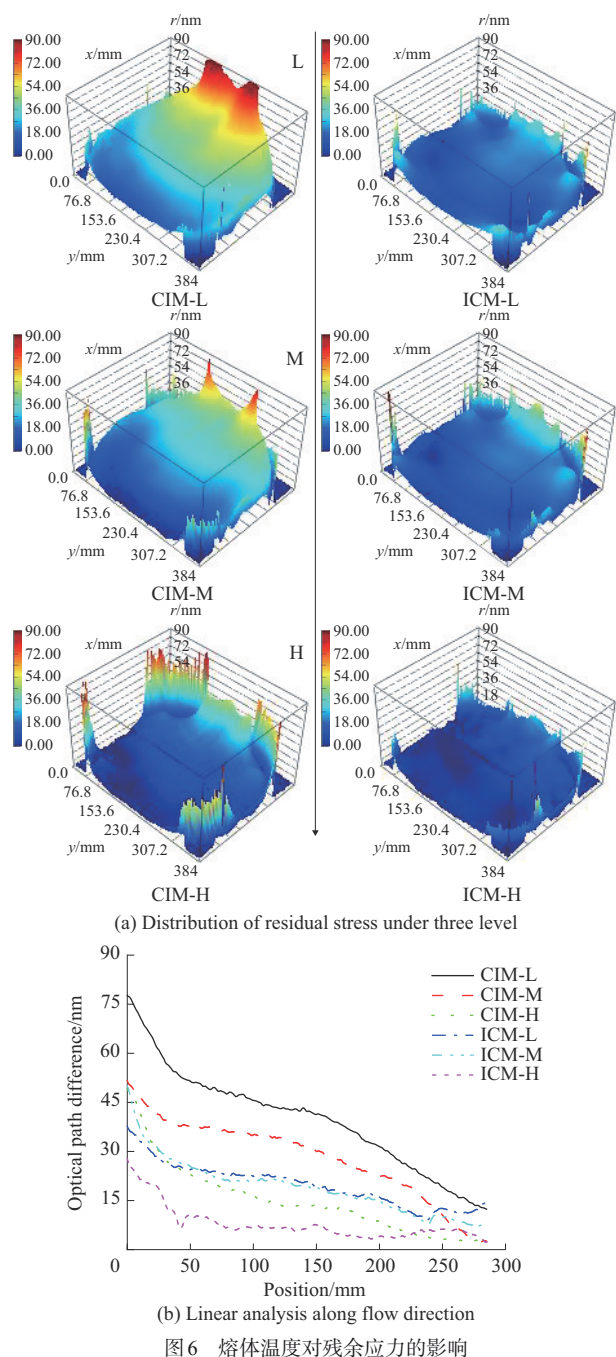


Fig. 6 Influence of melt temperature on residual stress

力越低。依据观察窗在流动方向上的线性分析和应力均值,熔体温度升高导致的残余应力降低均超过60%,其中当熔体温度达到H水平后,CIM的残余应力降低至L水平的1/3,光程差均值仅有15 nm。PMMA熔体为典型的温敏性非牛顿流体,温度升高,熔体的黏度显著降低,对应材料的流动性提高,分子链的活跃性显著,自浇口至末端的压力传递损失也减小,流动充填所导致的分子链取向明显降低,流动残余应力减小。相比之下,ICM在熔体温

度达到H水平后,光程差降低至7.5 nm左右,应力水平为CIM的一半,且更加均匀。对比发现,ICM在L和M水平下的残余应力分布较为接近,源于熔体在较低温度下的挤压流变特性相似,剪切速率较低,不存在CIM的浇口强剪切和应力集中。

2.2.3 模具温度的影响

不同模具温度下的残余应力(光程差)分布如图7所示。可以看出,模具温度越高,产品的残余应力越低,但其变化幅度较小。CIM在L水平和M水平

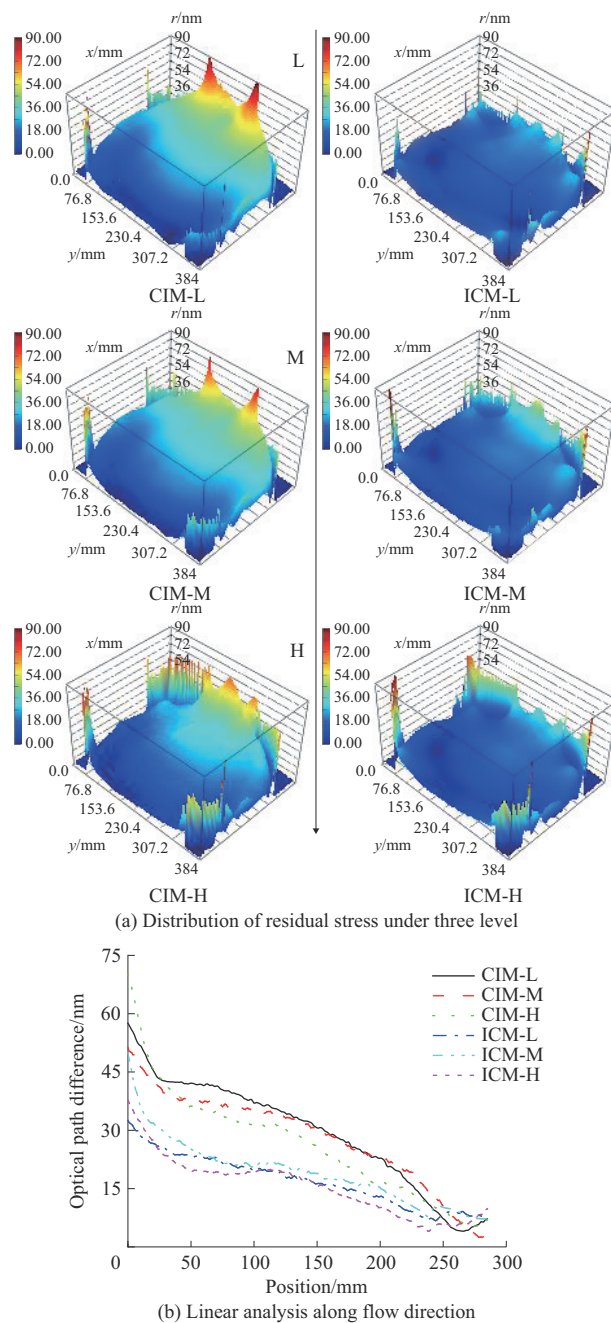


Fig. 7 Influence of mould temperature on residual stress

下的应力分布差距并不大,在H水平下则出现浇口附近应力反转增大的现象。流动残余应力与熔体充填过程压力降和熔体-模具的温度差有关,模具温度越高,则熔体-模具的温度差越小,流动过程压力传递损失也就越小,残余应力整体降低,但浇口处保压效果也愈加明显,应力更集中。与CIM相比,ICM的残余应力随模具温度变化不大,基本维持在15 nm左右,不存在浇口保压以及流动方向压力传递,但压缩回流会导致浇口区域的应力小幅增加^[15]。

2.2.4 冷却时间的影响

不同冷却时间下的残余应力(光程差)分布如图8所示。可以看出,冷却时间延长,产品中心区域的残余应力明显降低,其中CIM在M水平下的光程差从38 nm降低至H水平下的12 nm,降幅达68%。延长冷却时间,可以实现模内残余应力的再平衡,使得距离浇口较远区域的应力释放明显,但对保压引起的浇口应力集中影响甚微。冷却时间过短会导致出模后产品的收缩不可控,产生较大的不均匀收缩与翘曲变形,影响后期的装配与使用。建议冷却时间要满足产品在出模前能够达到“脱离点”,以确保产品的精密外形尺寸。相比之下,ICM随冷却时间的延长,残余应力整体降低且更加均匀,源于冷却过程中压缩动作的持续,能够进一步均化应力分布。

2.2.5 保压相关参数的影响

CIM中不同保压压力和保压时间下的残余应力(光程差)分布见图9和图10。可以看出,保压压力增大,保压时间延长,残余应力明显增大,且应力在近浇口一侧增加得更明显,从L水平的49 nm增至H水平的77 nm,幅度超过57%。主要是保压压力增大使得浇口的补缩作用愈加显著,自浇口至末端的压力梯度也相应增加,对应材料的分子链取向程度升高,流动残余应力增大。由于采用了热流道,不存在浇口冻结,保压时间越长,来自浇口的补缩作用时间也就越长,对应自浇口至末端的压力传递也就越明显,分子链取向程度增加的区域更大,表现出更大的流动残余应力。相比之下,保压时间影响程度小于保压压力,从L水平下的光程差均值23 nm增至H水平下的34 nm,幅度达48%,但充填末端光程差维持在10 nm以下,趋于稳定。

2.2.6 压缩相关参数的影响

ICM中考虑了压缩行程和压缩速度的影响,其

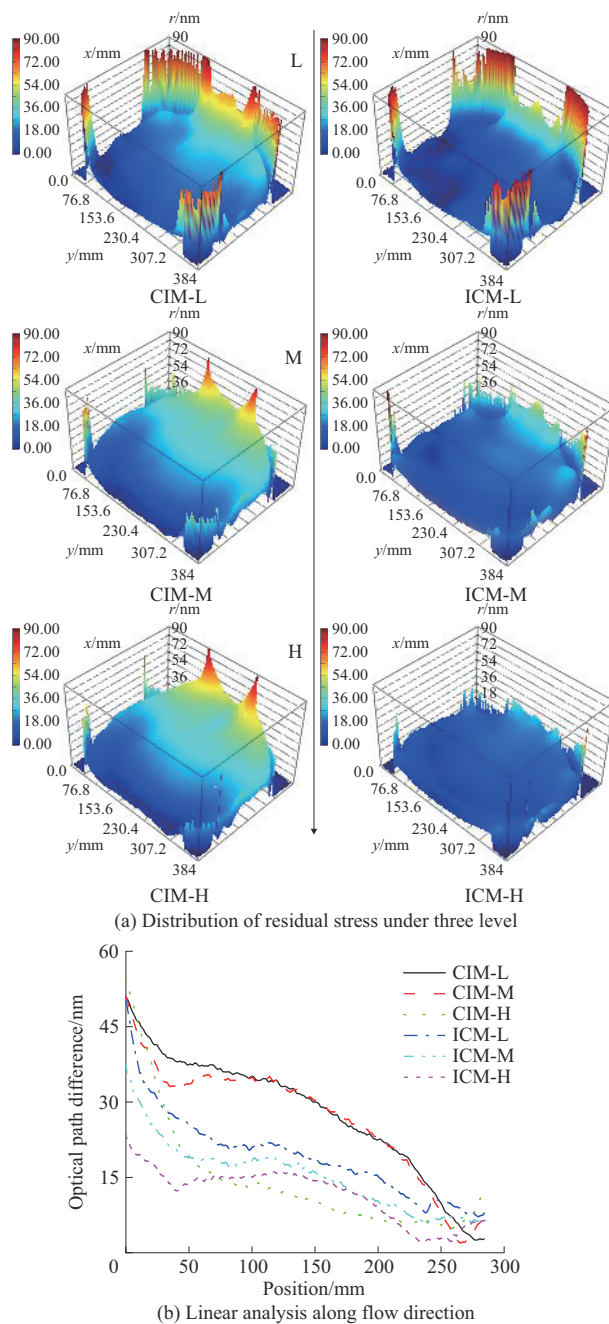


图8 冷却时间对残余应力的影响

Fig. 8 Influence of cooling time on residual stress

中不同压缩行程下的残余应力(光程差)分布见图11。从图11可以看出,压缩行程越大,产品的残余应力越低,且当压缩行程达到H水平后,残余应力均值降低至L水平的1/2,光程差仅有12 nm左右。压缩模式下模具型腔内的熔体低速流动,使得聚合物分子链的取向程度极大降低,且压缩行程越大,对应模具的初始型腔越大,模腔内熔体充填的速度越慢,仅需较小的压力下就可实现材料的充填。当启动压缩动作时,模腔短时间内被挤压并完成熔体

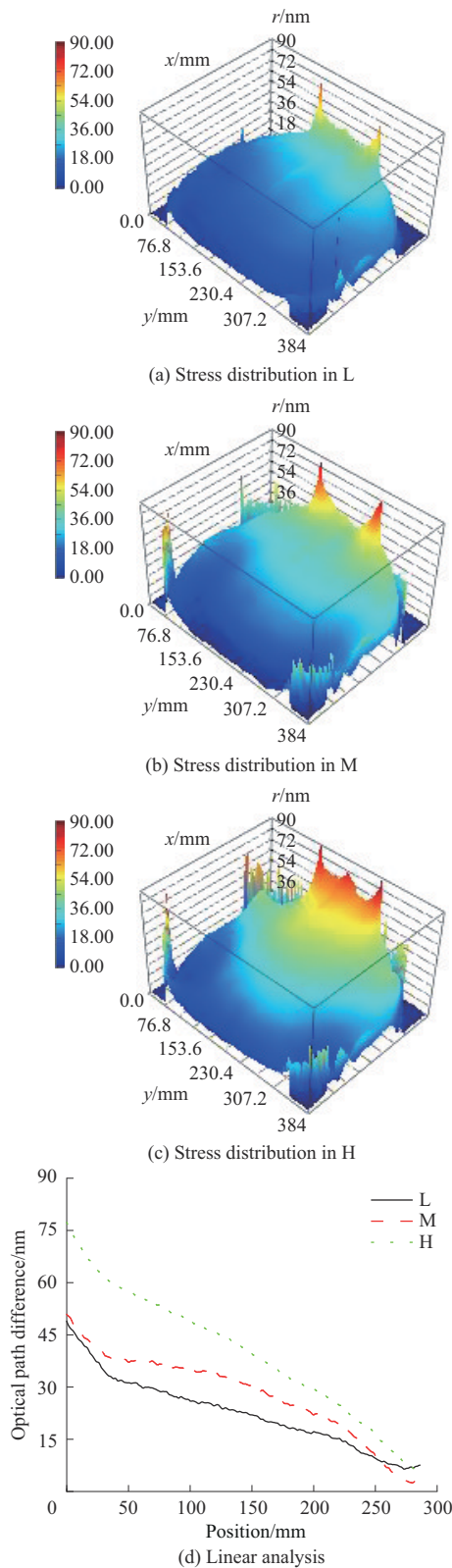


图9 保压压力对CIM中残余应力的影响

Fig. 9 Influence of packing pressure on residual stress of CIM

充填,维持压缩至最终脱模,该挤压过程的材料应变率较注射过程小,且材料的流动方向性较弱,不易产生取向应力。同时,浇口的压缩反流会导致该

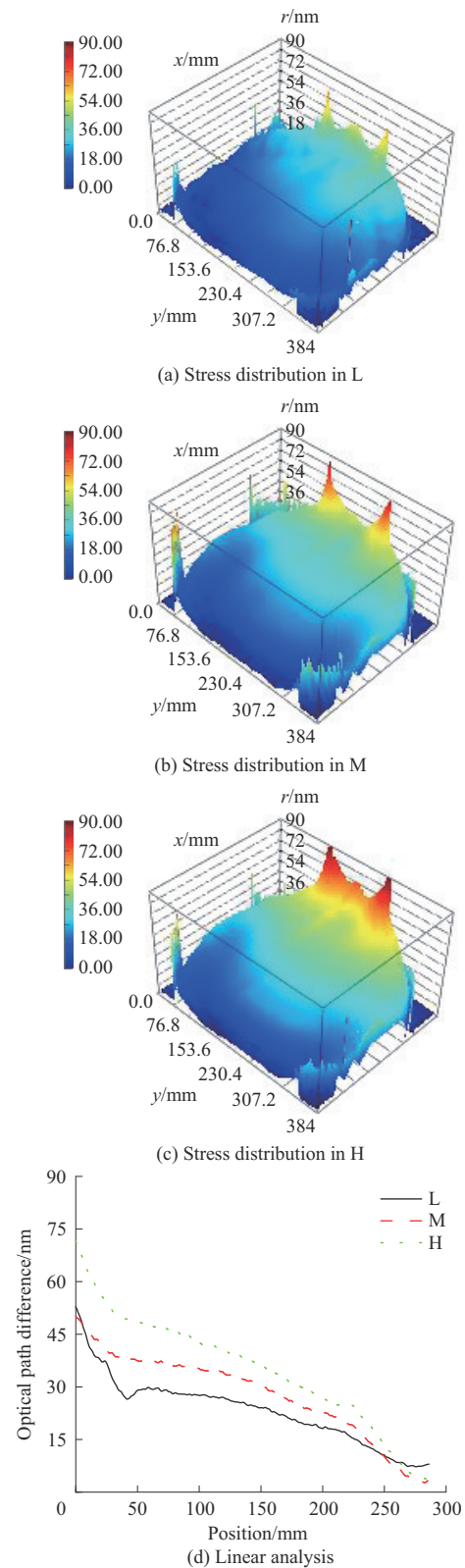


图10 保压时间对CIM中残余应力的影响

Fig. 10 Influence of packing time on residual stress of CIM

区域的应力一定程度增大,但产品大部分区域处于低应力状态,见图11。

不同压缩速度下ICM中的残余应力(光程差)分

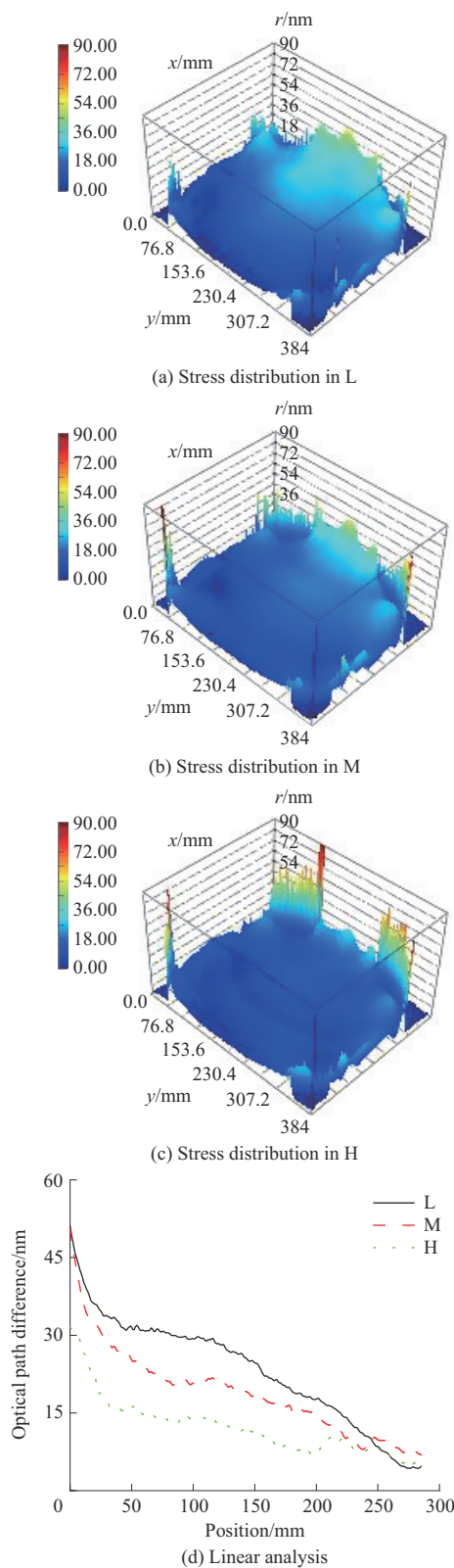


图 11 压缩行程对 ICM 中残余应力的影响

布见图 12。可以看出,压缩速率越高,残余应力越低,当压缩速度达到 H 水平后,光程差均值从 21 nm 左右降低至 16 nm 左右。与压缩行程相比,压缩速

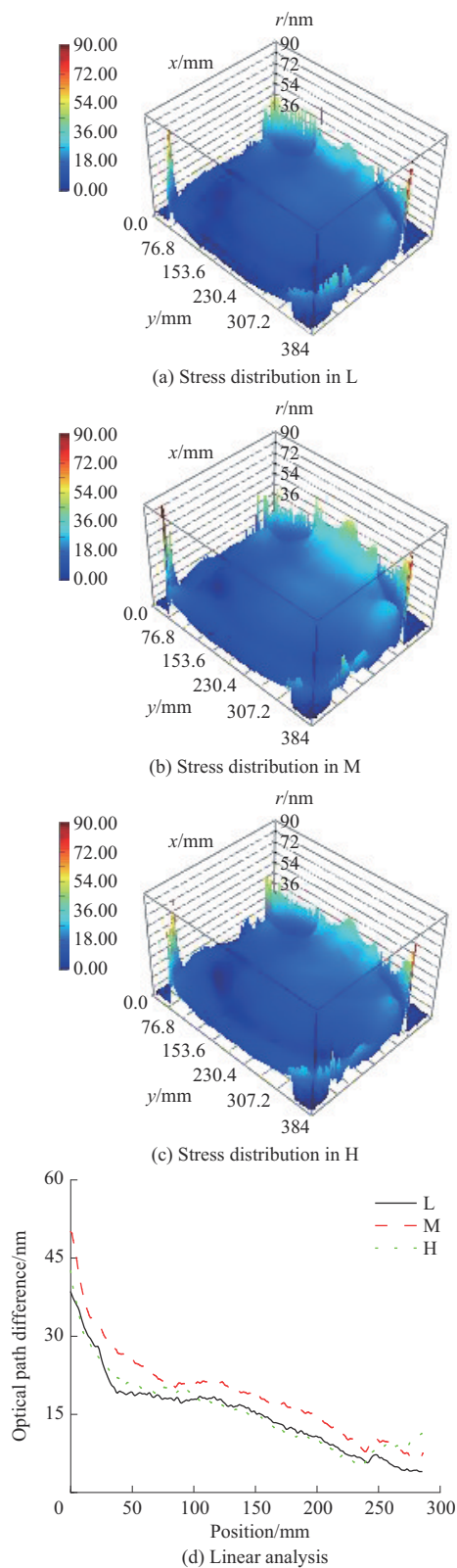


图 12 压缩速度对 ICM 中残余应力的影响

度的影响相对较小,但也反映出压缩阶段的熔体流动会直接影响其应力大小。增大压缩速度,会使材料在较短的时间内完成充填,减弱了边界固化层的

形成以及次表层的强剪切作用,进而降低了分子链的取向效应,减小了残余应力。同时,增大压缩速度,可以实现压缩阶段与注射阶段的良好匹配,尽可能减小过渡区的流动停滞或者不匹配问题,避免滞留痕等缺陷的产生。

表2给出了不同成型方法下工艺参数对光程差的影响程度统计,其中工艺水平增大导致的光程差降低值为低水平光程差减去高水平光程差,即 $(\Delta_L - \Delta_H)$,光程差降低比例为 $(\Delta_L - \Delta_H)/\Delta_L$ 。可以看出,CIM下提高注射速度、增大熔体温度和模具温度,减小保压压力,缩短保压时间,可以获得更低的残余应力;其中保压压力对残余应力的影响最大,其次为熔体温度、保压时间和注射速率,模具温度和冷却时间的影响最弱。而ICM对应的工艺参数水平升高,均有利于降低残余应力,其中熔体温度、压缩行程和冷却时间的影响最为明显。综合多种因素影响,ICM可以将观察窗的光程差控制在12 nm以下的低应力状态。表3给出了CIM和ICM两种方法不同工艺组合下的模腔压力波动,与应力对比发现,均匀的模腔压力可以获得更低的残余应力,即模腔压力可以有效预测产品应力状态,可以作为应力在线实时控制的手段。

表2 工艺参数对光程差影响统计表

Tab. 2 Statistical table of influence on birefringence from parameters

Parameters	CIM		ICM	
	$\Delta_L - \Delta_H$	$(\Delta_L - \Delta_H)/\Delta_L$	$\Delta_L - \Delta_H$	$(\Delta_L - \Delta_H)/\Delta_L$
Injection velocity	+16 nm	+40%	+6 nm	+26%
Melt temperature	+25 nm	+62%	+12 nm	+62%
Mold temperature	+3 nm	+11%	+2 nm	+12%
Cooling time	-1 nm	-2%	+5 nm	+44%
Packing pressure	-18 nm	-80%	-	-
Packing time	-11 nm	-48%	-	-
Compression stroke	-	-	+11 nm	+47%
Compression velocity	-	-	+5 nm	+25%

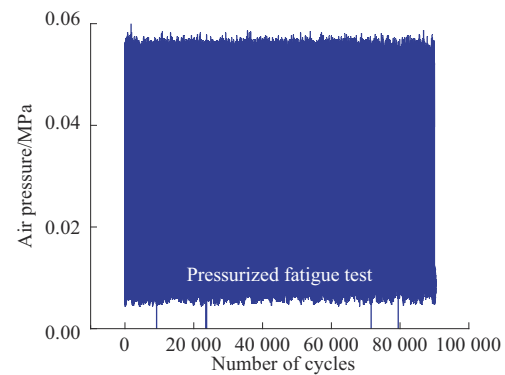
表3 不同工艺下的模腔压力波动

Tab. 3 Fluctuations of cavity pressure under different processes

Parameters		Fluctuation of cavity pressure /MPa	
		CIM	ICM
Melt temperature	L	22	9
	M	10	7
	H	6	3
Packing pressure	L	8	
	M	10	
	H	15	
Compression stroke	L		8
	M		7
	H		6

2.3 应用性能验证

选择注射压缩成型方法,采用优化的工艺参数组合(注射速度20 mm/s、熔体温度260℃、模具温度90℃、冷却时间45 s、压缩行程5 mm、压缩速度9 mm/s),成型制备出批次性能稳定的客舱观察窗内层玻璃,其厚度均匀性和型面精度优异,光学性能良好。参照民航客舱观察窗的充压疲劳与破损安全测试方法,完成了内层玻璃的90 000次充压疲劳与破损安全试验验证,见图13,试验后的产品表面及侧面未发现裂纹、银纹等缺陷,满足实际使用要求,进一步验证了注射压缩低成本制造客舱观察窗的技术可行性。



(a) Pressurized fatigue test



(b) Damage safety test

图13 充压疲劳和破损安全验证的客舱观察窗

Fig. 13 Cabin window after pressurized fatigue and damage safety test

3 结论

(1) ICM中压缩阶段的引入使得材料的注射压力降低,减小了分子链的流动取向和残余应力,更多阶段的压力控制使得模腔内材料更加均匀,有效降低了产品的残余应力。

(2) CIM工艺中保压压力对残余应力的影响最大,其次为熔体温度、保压时间和注射速率,模具温度和冷却时间的影响最弱。ICM工艺中熔体温度、压缩行程和冷却时间对残余应力的影响较大,压缩速度和注射速度次之,模具温度的影响最弱。

(3) ICM工艺中升高熔体温度和模具温度、增大压缩行程、提高注射速度和压缩速度、延长冷却时间,可以将观察窗的光程差控制在12 nm以下的低

应力状态。

(4)采用优化的ICM工艺制备出残余应力低、光学性能良好的观察窗内层玻璃,通过了破损安全和疲劳试验验证,满足使用要求。

参考文献

- [1] 颜悦,厉蕾.航空座舱透明材料应用研究新进展[M].北京:国防工业出版社,2011.
YAN Yue, LI Lei. New progress on the application study of transparent materials for aviation cockpit[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [2] 冯海兵.美国五代战斗机座舱透明件技术的应用进展[J].科技导报,2021,39(9):24-35.
FENG Haibing. Application progress for technology of American fifth generation fighter's cockpit transparency parts[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(9):24-35.
- [3] 许雪婷,王韬,王博伦,等. PC的结构性能调控及其在航空透明件上的应用[J]. 工程塑料应用,2023,51(4):160-164.
XU Xueting, WANG Tao, WANG Bolun, et al. Structure and property control of PC and its application in aerospace transparent[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4):160-164.
- [4] PINNELL W P. Development of directly for formed and frameless aircraft transparency technology[C]. Conference on Aerospace Transparent Materials and Enclosures, 1993:1 088-1 110.
- [5] FRITZ James E. Analyzing explosive of the next generation transparency(NGT) [C]. Proceedings of the 35th Annual Symposium Safe Association, 1997:138-141.
- [6] DAY F. Living it large Injection moulding aircraft canopies[J]. Materials World, 2003, 11(8):19-20.
- [7] OSSWALD T A, TURNG Lih-Sheng, GRAMANN Paul. Injection Molding Handbook[M]. Hanser Gardner Pubns, 2008.
- [8] 王少波,邓淑桦,陈安伏,等.精密注塑成型方法及数值模拟分析的新进展[J]. 塑料,2025,54(1):154-160,166.
WANG Shaobo, DENG Shuhua, CHEN Anfu, et al. New advances in precision injection molding methods and corresponding numerical simulation analysis[J]. Plastics, 2025, 54(1):154-160, 166.
- [9] WANG X Y, HUANG H X. Preparation of superhydrophobic nanowires on polypropylene surface via injection compression molding for efficient fog collection[J]. RSC Advances, 2024, 14(44):32 339-32 349.
- [10] 王韬,葛勇,郎建林,等.热力历史对PMMA残余应力和光学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2017,45(8):60-64.
WANG Tao, GE Yong, LANG Jianlin, et al. Influence of thermal-mechanical history on residual stress and optical properties of PMMA[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(8):60-64.
- [11] ESTRELLA-GUAYASAMIN M, FIGUEROA-LÓPEZ U, GUEVARA-MORALES A, et al. Effect of crystallization and packing pressure on the development of residual stresses on injection molded polypropylene samples[J]. Polymer Bulletin, 2023, 80(4):4 355-4 369.
- [12] 代战胜,蒋晶,何佳帆.聚碳酸酯气体辅助注射成型制品内应力分布及改善工艺[J]. 工程塑料应用,2024,52(1):84-88,101.
DAI Zhansheng, JIANG Jing, HE Jiafan. Distribution of residual stress and process optimization in gas-assisted injection molded polycarbonate products[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1):84-88, 101.
- [13] 陈宇宏,詹茂盛.压缩工艺参数对注射压缩成型聚碳酸酯透明件残余应力的影响[J]. 中国塑料,2021,35(12):9-15.
CHEN Yuhong, ZHAN Maosheng. Effect of compression process parameters on residual stress of injection-compression-molded polycarbonate transparencies[J]. China Plastics, 2021, 35(12):9-15.
- [14] 高若翔,焦晓龙,阮剑波,等.超厚壁聚合物光学产品多次注射-压缩成形技术研究[J]. 精密成形工程,2023,15(9):47-56.
GAO Ruoxiang, JIAO Xiaolong, RUAN Jianbo, et al. Multilayer injection-compression molding process of ultra-thick-walled polymer optical products[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(9):47-56.
- [15] 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(6):792-797.
- [16] CHENG T Y, KE K C, YANG S Y. Fabrication of wafer-level double-sided microlens array using injection compression molding [J]. Polymer Engineering & Science, 2023, 63(4):1 334-1 341.
- [17] MICHAELI W, WIELPUETZ M. Optimisation of the optical part quality of polymer glasses in the injection compression moulding process[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2000, 284/285(1):8-13.
- [18] 周晓伟.聚合物光学产品注射成形过程与成像质量的关联建模分析[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
ZHOU Xiaowei. Modeling and analysis of the correlation between injection molding process and imaging quality for polymer optics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [19] 郭梦丽,吴大鸣,张豪,等.基于Moldflow复合材料注射压缩成型纤维取向模拟[J]. 塑料,2022,51(1):36-41,105.
GUO Mengli, WU Daming, ZHANG Hao, et al. Fiber orientation simulation based on injection compression molding of moldflow composite[J]. Plastics, 2022, 51(1):36-41, 105.
- [20] CHEN C M, YOUNG W B. The effects of compression pressure on injection compression molding[J]. International Polymer Processing, 2022, 15(2):176-179.
- [21] HUANG M C, TAI C C. The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(1):1-9.