

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.08.014

注射工艺参数对聚碳酸酯制品弯曲性能的影响机理

孙琦伟,陈宇宏,王韬,葛勇,厉蕾,颜悦

(北京航空材料研究院,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)

摘要: 研究了不同注射成型工艺参数对聚碳酸酯 (PC) 弯曲性能的影响,包括保压压力、模具温度、熔体温度及注射速度,通过分析工艺参数对 PC 残余应力的影响,揭示了注射工艺影响 PC 弯曲性能的机理。结果表明,工艺参数是通过影响 PC 制品内部残余应力从而影响 PC 制品的弯曲强度。随保压压力的增大,PC 制品内部残余应力下降,使得制品弯曲强度增加;升高模具温度和熔体温度会使制品内部残余应力下降,从而提高制品的弯曲强度;注射速度对 PC 制品的残余应力影响较小,对 PC 制品弯曲强度的影响相应地较弱。在研究的工艺参数中,保压压力对 PC 制品的弯曲强度影响最为显著。

关键词: 聚碳酸酯;弯曲性能;注射成型;工艺参数;机理

中图分类号: TQ323.4+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)08-0067-06

Influence Mechanism of Injection Molding Parameters on Flexural Properties of Polycarbonate Parts

Sun Qiwei, Chen Yuhong, Wang Tao, Ge Yong, Li Lei, Yan Yue

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing Engineering Research Center of Advanced Structural Transparency for the Modern Traffic System, Beijing 100095, China)

Abstract : The influence of injection molding parameters such as packing pressure, mold temperature, melt temperature and injection speed on mechanical properties of polycarbonate (PC) parts was investigated. The effect of these parameters on residual stress in PC parts was also discussed and the influence mechanism was analyzed. The results show that the residual stress of PC parts increases resulting in decrease of the flexural strength of PC with the rise of packing pressure, mold temperature and melt temperature. The result also indicates that injection speed has little effect on the residual stress and thus shows little influence on the flexural strength of PC specimen. Among the parameters above, packing pressure show the most significant effect on the flexural strength of PC parts.

Keywords : polycarbonate ; flexural property ; injection ; molding parameter ; mechanism

聚碳酸酯 (PC) 作为一种高性能工程塑料,具有优异抗冲击强度和良好光学性能,被广泛地应用于光盘、光学透镜及导光板等光学领域,近年来开始向飞机透明件和宇航员面窗等航空航天领域渗透^[1-2]。PC 在上述应用中采用的最重要成型方法是注射成型,注射成型是一个复杂的动态热成型过程,例如在熔体的充填、保压和冷却过程中涉及非牛顿流体的流动场、高温熔体和低温模具间的传热及高温熔体的冷却固化,且在过程中会产生剪切生热、分子链取向和收缩不均等现象,从而对制品的力学性能产生影响。考虑到注射成型的工艺复杂并且与制品性能关联紧密,因此研究工艺参数对注射成型 PC

力学性能的影响是十分必要的^[3-4]。

国内外学者和研究机构广泛地研究了针对注射成型工艺对制品力学性能的影响,主要工艺包括保压压力、模具温度、熔体温度及注射速度等^[5-7]。郎建林等^[8]通过 Taguchi 分析法研究了注射成型工艺参数对 PC 力学性能的影响,结果发现,工艺参数对拉伸性能影响较大,其中模具温度对拉伸强度影响最大,熔体温度对拉伸强度影响最小。T. A. P. Engels 等^[9]研究了注射成型工艺对 PC 拉伸性能的影响,结果发现升高模具温度会导致 PC 的屈服强度提高。Lin Xiang 等^[10]研究了微注射成型工艺参数对高密度聚乙烯 (PE-HD) 力学性能的影响,发现

通讯作者: 陈宇宏,博士,研究员,主要从事透明材料研究 E-mail: cyhcdj@163.com.

收稿日期: 2019-06-03

引用格式: 孙琦伟,陈宇宏,王韬,等. 注射成型工艺参数对聚碳酸酯制品弯曲性能的影响机理 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(8):67-72.

Sun Qiwei, Chen Yuhong, Wang Tao, et al. Influence mechanism of injection molding parameters on flexural properties of polycarbonate parts[J].Engineering Plastics Application, 2019, 47(8):67-72.

结晶型材料的拉伸性能与工艺参数诱导结晶息息相关,提高注射速度和升高模具温度可以使制品内部结晶度增加,从而提高 PE-HD 制品的拉伸屈服强度。M. R. Kamal 等^[11]通过研究微注射成型聚甲醛制品,发现工艺参数对制品内部的皮芯结构层厚度产生影响,从而影响制品的拉伸性能,其中注射速度和模具温度对拉伸性能影响最大。

虽然许多学者针对工艺参数对注射成型制品力学性能的影响进行了研究,但大多集中在研究工艺参数对结晶型材料拉伸性能的影响规律和机理,极少考虑工艺参数对非晶型材料力学性能的影响机理,还未见到注射成型工艺参数对非晶型材料弯曲性能的影响机理报道。笔者选择非晶型 PC 作为研究对象,采用四因素五水平分析方法考察了成型工艺参数对 PC 的弯曲性能的影响,分析工艺参数影响 PC 弯曲性能和残余应力的规律,并建立了二者之间的联系,获得了工艺参数影响 PC 弯曲性能的内在机理,为研究工艺对其它非晶型材料力学性能的影响机理提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PC: OQ2720, 熔体流动速率为 7.1 g/(10 min), 沙特 Sabic 公司。

1.2 主要设备及仪器

注射成型机: CX130-750 型, 德国克劳斯玛菲公司;

万能试验机: Instron 5982 型, 美国 ITW 集团英斯特朗公司;

双折射测定仪: WPA-100-L 型, 日本 LUCEO 公司。

1.3 试样制备及正交试验方法

(1) PC 弯曲试样制备。

将 PC 粒料在 120℃ 下干燥 4 h, 通过注射成型, 制备出 PC 弯曲性能试样, 弯曲性能试样尺寸如图 1 所示。

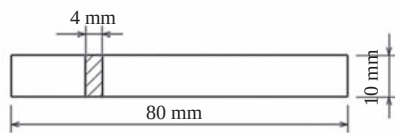


图 1 PC 弯曲试样尺寸

(2) 正交试验方法。

采用四因素五水平的试验方法, 选择研究因素分别为注射速度 (A)、保压压力 (B)、熔体温度 (C)、

模具温度 (D)。工艺基准点为熔体温度 300℃、注射速度 15 mm/s、模具温度 100℃ 以及保压压力 70 MPa, 考察的四个工艺参数的水平值见表 1。锁模力为 1300 kN, 保压时间 5 s, 冷却时间 30 s。

表 1 注射成型工艺参数及水平

因素	水平				
	1	2	3	4	5
A/ (mm · s ⁻¹)	5	10	15	20	25
B/MPa	0	30	50	70	90
C/℃	280	290	300	310	320
D/℃	80	90	100	110	120

1.4 性能测试

(1) 弯曲性能测试。

弯曲强度采用万能试验机按 GB/T 9341-2008 进行测试, 测试速率为 2 mm/min, 当测试仪器显示的应力-应变曲线达到最大值时, 停止测试, 记录此时应力最大值。测试温度为 23℃。

(2) 试样残余应力测试。

采用光弹法测试力学试样的残余应力, 测试结果以光程差 (δ) 表示。光程差与残余应力之间的关系符合应力-光学定律, 表达形式为:

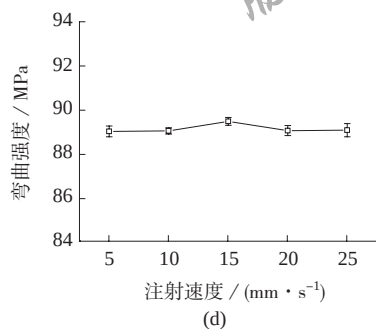
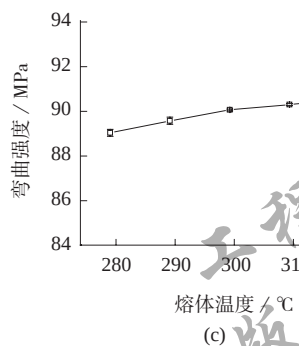
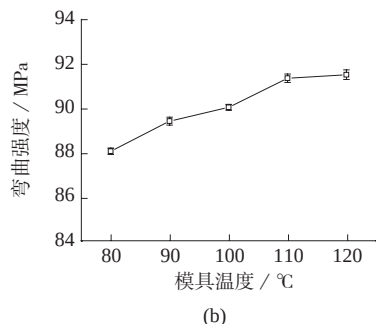
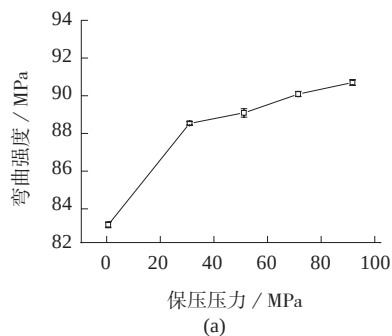
$$\delta = Cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

其中 δ 为光程差; C 为应力光学系数, 与材料本身有关; d 为试样厚度; σ_1 和 σ_2 为试样中的应力。考察的 PC 材料的 $C = 80 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$, 弯曲试样厚度 $d = 4 \text{ mm}$, C 与 d 均为常数, 所以试样的残余应力与光程差呈线性相关。

2 结果与讨论

2.1 工艺参数对 PC 弯曲强度的影响

图 2 是注射成型工艺参数对 PC 弯曲强度的影响规律, 图 2a~图 2d 分别表示保压压力、模具温度、熔体温度和注射速度对 PC 弯曲强度的影响。从图 2 可看出, 保压压力、模具温度和熔体温度对 PC 的弯曲强度有一定程度的影响。随着保压压力的增大, PC 的弯曲强度首先快速增长后增长幅度减缓, 当保压压力从 0 MPa 升至 90 MPa 时, 弯曲强度增长了 7.7 MPa。随着模具温度升高, PC 的弯曲强度也呈现较大程度上升, 当模具温度在 80℃ 时, 弯曲强度最低; 模具温度升至 120℃ 时, 弯曲强度最大, 增长幅度为 2.5 MPa。熔体温度的升高也有利于 PC 弯曲强度的提高, 从图 2c 可以看出, 升高熔体温度, PC 弯曲强度缓慢升高, 增长幅度为 1.5 MPa。从图 2d 可以看出 PC 的弯曲强度受注射速度的影响较小, 注射速度加快, PC 制品弯曲强度基本不变。



a—保压压力; b—模具温度; c—熔体温度; d—注射速度

图2 不同注射成型工艺参数时 PC 的弯曲强度

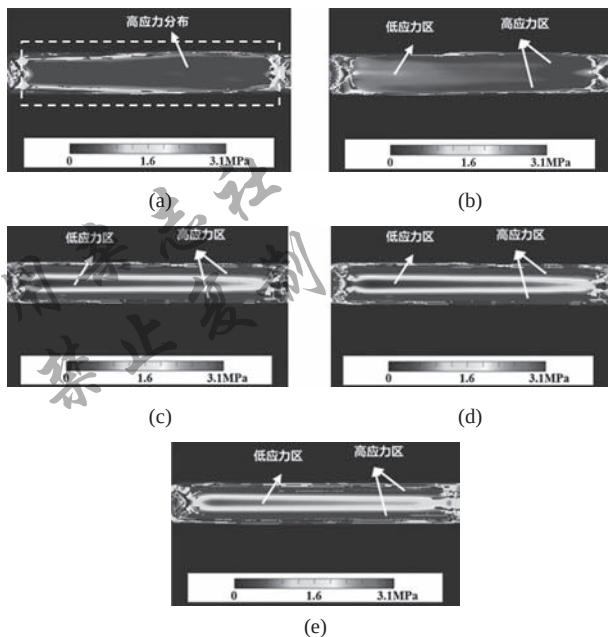
2.2 工艺参数对 PC 弯曲强度影响机理

聚合物材料的破坏是由高分子主链的化学键断裂或者链间相互作用力降低而导致的,而导致高分子主链化学键断裂或链间作用力破坏的原因包括测试材料内部结构缺陷和内应力等。结晶型高聚物可通过调整注射成型工艺参数改变材料内部的结晶行为,从而影响其力学性能^[12-13]。然而笔者研究的 PC 属于非晶型高聚物,不存在结晶,笔者从制品内

部残余应力的角度去分析注射成型工艺参数对 PC 弯曲性能的影响规律,揭示其影响机理。

注射成型制品内部的残余应力根据产生原因的不同主要分为流动应力和热应力,流动应力是由熔体流动剪切和分子取向而产生的,分子链取向状态是影响流动应力最主要的因素,分子链取向越严重,导致的流动应力就越大;热应力是因为制品在冷却过程中传热不均导致不能同步冷却而产生的,制品内部温度分布越不均匀,热应力就越大^[14]。

研究了不同保压压力对 PC 制品的残余应力的影响,结果如图 3 所示。



a—0 MPa; b—30 MPa; c—50 MPa; d—70 MPa; e—90 MPa

图3 不同保压压力时 PC 试样平面残余应力分布

从图3可以看出,随着保压压力的增加,制品芯部附近低应力区面积逐渐扩大,高应力区逐渐缩小至上下表层,当保压压力为零时,PC 制品整体呈一个高应力分布状态。选取制品的有效测试区域(图3a 白色虚线框围成的区域,下同)进行分析,得到该区域的最大应力值和平均应力值,如图4所示。

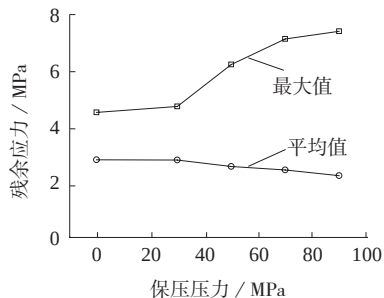
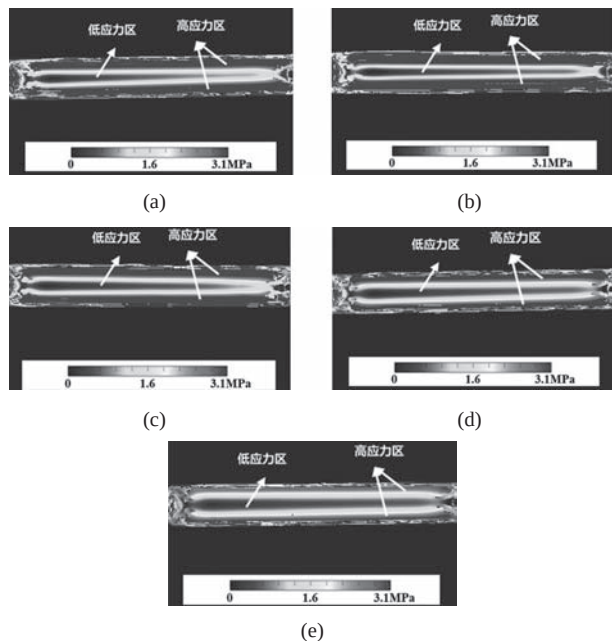


图4 不同保压压力时 PC 试样残余应力

从图4可以看出,制品的最大残余应力随着保压压力的增加而上升,而区域内的平均残余应力随着保压压力的增加而下降,保压压力为0 MPa时,平均应力最大,数值为2.8 MPa,保压为90 MPa时,平均应力最小,数值为2.2 MPa,下降幅度为0.6 MPa。分析该现象的原因可知,当保压压力等于0 MPa时,没有熔体弥补制品冷却过程中产生的收缩变形,形成热应力。收缩的位置发生在制品内各个部分,导致制品内部均呈现高应力状态,加入保压压力后,制品的收缩减少,降低了制品内部的残余应力,实验中测量最终冷却后的PC试样厚度发现,当保压压力为30 MPa和50 MPa时,制品的厚度平均值分别为3.83 mm和4.01 mm,这说明保压在50 MPa就可以基本消除制品的收缩。继续增大保压压力,会加剧分子链的取向,取向形成的流动应力随保压压力增大而逐渐增大^[15],所以当保压压力大于50 MPa时,流动应力为主并且逐渐升高,分子链取向加剧导致的最大残余应力增大,但保压弥补收缩的作用显然大于加剧分子链取向的作用,所以制品整体的平均残余应力仍然呈现下降趋势。当制品内的残余应力(表现为平均残余应力)降低时,不易引起制品内部应力集中,提高了制品力学性能。

研究了不同模具温度对PC制品的残余应力的影响,结果见图5。从图5可以看出,升高模具温度,制品表层高应力区宽度逐渐减小,芯部附近的低应力区面积逐渐扩大并且分布均匀。选取制品的有效



a—80℃; b—90℃; c—100℃; d—110℃; e—120℃

图5 不同模具温度时PC试样平面残余应力分布

测试区域进行分析,有效测试区域位置如图5a,得到该区域的最大应力值和平均应力值,如图6所示。

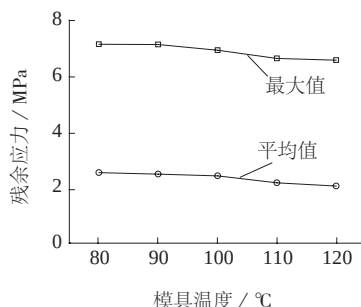
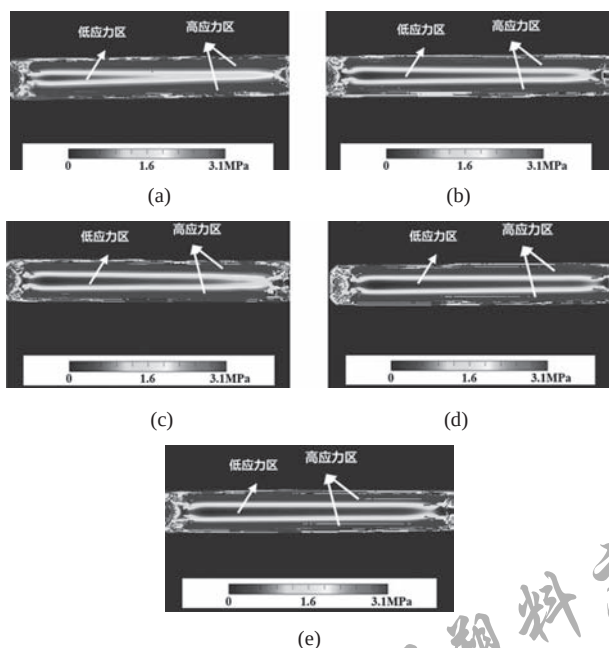


图6 不同模具温度时PC试样残余应力

从图6可以看出,PC弯曲制品的最大残余应力和平均残余应力都是随着模具温度的升高而下降,模具温度为80℃时,PC制品平均残余应力为2.53 MPa,当模具温度为120℃时,PC制品平均残余应力为最小值2.05 MPa,下降了约0.5 MPa。分析该规律的原因可知,模具温度主要影响制品内部热应力大小,模具温度升高,降低了熔体和模具表面的温度差,减缓了熔体进入型腔后表层的冷却速度,减小了冷凝层厚度和制品的收缩,从而降低了热应力。并且,提高模具温度有利于减少制品表层和芯部的冷却时间差,有利于制品各部分冷却的一致性,进一步降低热应力。此外,模具温度升高有利于分子链段的松弛,降低其残余应力^[16],从而减小了制品边缘出现的最大残余应力值。所以,模具温度的升高有效降低了PC制品内部的残余应力,尤其是平均残余应力,有利于PC弯曲强度的提高。

图7示出PC制品内部残余应力分布随熔体温度的变化规律。从图7可以看出,随着熔体温度的升高,制品表层高应力区域面积减小,芯部附近低应力面积扩大,选取制品的有效测试区域进行分析,有效测试区域位置如图7a,得到该区域的最大应力值和平均应力值,如图8所示。从图8可以发现,升高熔体温度后,PC制品的最大残余应力和平均残余应力均略有下降,熔体温度280℃下的制品平均残余应力最大,为2.70 MPa,在熔体温度320℃时的平均残余应力最小,为2.42 MPa,下降幅度为0.28 MPa,可见熔体温度的变化对制品内残余应力影响较小,平均残余应力大小和分布基本一致。分析该规律的原因可知,升高熔体温度会降低因流动而产生的残余应力。当熔体温度较低时,熔体进入型腔后受到的阻力较大,不利于分子链的运动和回复,使制品内产生较大的流动残余应力,当熔体温度升高,这种效应减弱,有利于降低制品内的残余应

力,但高的熔体温度会使得制品芯部与表层温差增加,产生热应力,这两种效应综合作用导致制品内平均残余应力下降幅度不大。所以,熔体温度的升高略微降低了 PC 制品的最大残余应力和平均残余应力,使得 PC 弯曲强度缓慢提高。



a—280℃; b—290℃; c—300℃; d—310℃; e—320℃

图7 不同熔体温度时 PC 试样平面残余应力分布

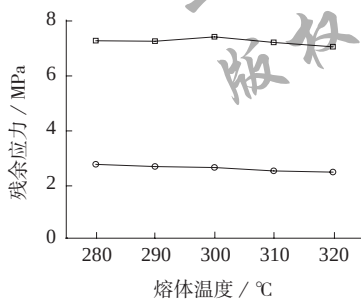
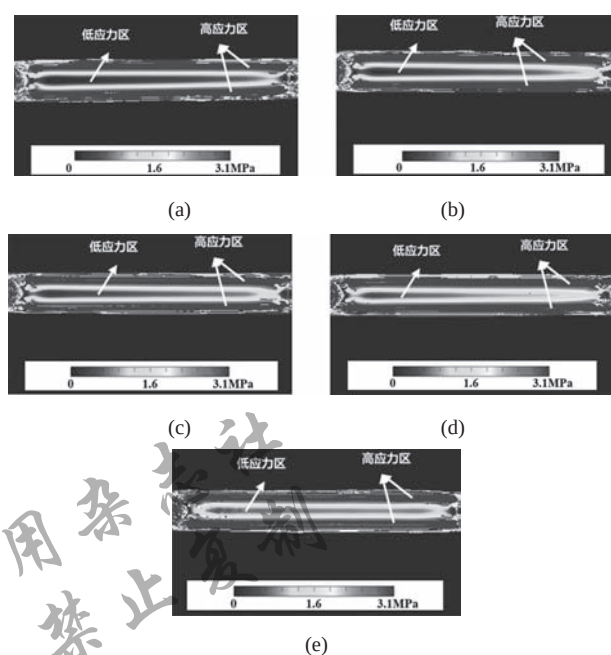


图8 不同熔体温度时 PC 试样残余应力

图9所示为 PC 制品内残余应力分布随注射速度的变化规律。从图9可以看出,随着注射速度的增加,PC 制品残余应力分布基本一致,对制品的有效测试区域进行进一步分析,有效测试区域位置如图9a所示,得到图10。从图10可以发现,PC 制品的最大残余应力随着注射速度的增加呈缓慢升高,平均残余应力基本不变略有升高,变化幅度仅为0.16 MPa,可见注射速度的变化对 PC 残余应力影响也很小。出现这种现象的原因是,改变注射速度也会导致 PC 内部流动应力和热应力之间的竞争效应。一方面提高注射速度会缩短注射时间,相当于延长了熔体在模具内的冷却时间,这有利于 PC 分

子链的松弛和减少冷却收缩,降低制品内部的热应力;然而另一方面,注射速度增加会导致熔体分子链取向,产生的剪切生热也会加剧,导致 PC 内部流动应力增大^[17]。PC 最大残余应力和平均残余应力受到这两种竞争效应的作用但变化不大。



a—5 mm/s; b—10 mm/s; c—15 mm/s;

d—20 mm/s; e—25 mm/s

图9 不同注射速度时 PC 试样平面残余应力分布

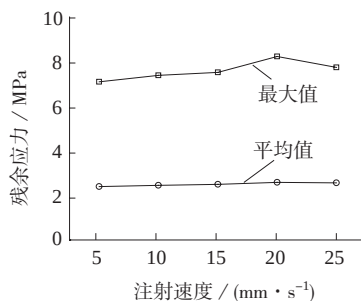


图10 不同注射速度时 PC 试样残余应力

3 结论

(1) PC 制品的弯曲强度随保压压力、模具温度和熔体温度的增加而增大,受注射速度的影响较小。比较不同工艺参数下 PC 弯曲强度的变化幅度,保压压力对制品弯曲强度影响最为显著。

(2) PC 制品的平均残余应力随保压压力的增加而降低,随模具温度和熔体温度的升高而降低。改变注射速度对 PC 制品平均残余应力影响不明显,因为这种变化会导致 PC 内部流动应力和热应力之间的竞争效应。比较不同工艺参数下 PC 平均残余应力的变化幅度,保压压力对制品平均残余应力影

响最为显著。

(3) 对比成型工艺参数对弯曲强度和残余应力的影响规律表明,注射成型工艺参数是通过影响 PC 制品内部平均残余应力而影响 PC 制品的弯曲强度。

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,2011:5-8.
Yan Yue, Li Lei. New progress in application of transparent materials in aviation cockpit[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011:5-8.
- [2] 颜悦,王晓丽,张官理,等.聚碳酸酯透明板材的高温力学行为实验研究[J].材料工程,2005(8):7-9.
Yan Yue, Wang Xiaoli, Zhang Guanli, et al. Experimental study on mechanical behavior of polycarbonate at high temperature[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(8):7-9.
- [3] Kurt M, Kaynak Y, Kamber O S, et al. Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(5-8):571-578.
- [4] 王鑫,李海梅,申长雨.退火对注射成型 PC 制品力学性能的影响[J].化工学报,2010,61(6):1555-1559.
Wang Xin, Li Haimei, Shen Changyu. Effects of annealing on mechanical properties of injection mold poly carbonate parts [J]. CIESC Journal, 2010, 61(6):1555-1559.
- [5] 乔刚.工艺参数对聚碳酸酯注射压缩成型制品性能影响的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
Qiao Gang. Study on the effect of technological parameters on the properties of polycarbonate injection compression molded products[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [6] 范小利.注塑模具冷却系统与注塑制品性能关系的研究[D].北京:北京化工大学,2003.
Fan Xiaoli. Study on the relation between cooling system of injection mold and properties of injection molded products[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003.
- [7] 张杨,刘晓东,孟杏,等.工艺参数对微注射成型等规聚丙烯拉伸性能的影响[J].工程塑料应用,2014,42(2):47-51.
Zhang Yang, Liu Xiaodong, Meng Xing, et al. Influence of processing conditions on tensile properties of micro injection molded isotactic polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(2):47-51.
- [8] 郎建林,葛勇,厉蕾,等.聚碳酸酯注射成型制品力学性能的 Taguchi 分析[J].工程塑料应用,2017,45(9):67-70.
Lang Jianlin, Ge Yong, Li Lei, et al. Analysis of mechanical properties of injection molded polycarbonate parts using taguchi method[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9):67-70.
- [9] Engels T A P, Govaert L E, Meijer E H. The influence of molecular orientation on the yield and post-yield response of injection-molded polycarbonate[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2009, 294(12):821-828.
- [10] Lin Xiang, Fin Caton-Rose, Ren Dongyun, et al. Shear-induced crystallization morphology and mechanical property of high density polyethylene in micro-injection molding[J]. Journal of Polymer Research, 2013, 20(4):1-12.
- [11] Kamal M R, Chu J, Dergouri S, et al. Morphology of microinjection moulded polyoxymethylene[J]. Plastics Rubber & Composites, 2010, 39(7):332-341.
- [12] Jungmeier A, Ehrenstein G W, Drummer D. New aspects of process induced properties of microinjection moulded parts[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2010, 39(7):308-314.
- [13] Rizvi S J A, Ankit K S, Gopala R B. Optimization of tensile properties of injection molded α -nucleated polypropylene using response surface methodology[J]. Polymer Testing, 2017, 60:198-210.
- [14] Li Meng, Zhang Huimin, Nie Yong. Simulation analysis of residual stress of the plastic gear based on moldflow[J]. Key Engineering Materials, 2012, 501:339-343.
- [15] Kim N H, Isayev A I. Birefringence in injection-compression molding of amorphous polymers:simulation and experiment[J]. Polymer Science and Engineering, 2013, 1 787-1 808.
- [16] 王韬,葛勇,郎建林,等.热历史对 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.
- [17] 葛勇,王韬,厉蕾.注射成型工艺参数对聚碳酸酯残余应力的影响[J].材料工程,2014(1):24-29.
Ge Yong, Wang Tao, Li Lei. Effect of injection molding parameters on residual stress of polycarbonate[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(1):24-29.