

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.009

车灯塑件退火状态下应力松弛规律研究^{*}

刘 红¹, 杨哲人¹, 蒋兰芳²

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江工业大学 之江学院, 浙江 杭州 310024)

摘要:针对注塑件中普遍存在残余应力这一问题,以材料为聚碳酸酯(PC)的车灯塑件为例,对注塑件在退火工艺下的应力松弛规律进行了研究,对工业玻璃在退火状态下的应力松弛计算公式进行了分析,提出了一种针对聚碳酸酯(PC)材料在退火状态下的应力松弛的数学模型。采取实验的方法,利用钻孔法对3种不同退火状态下得到的车灯塑件的残余应力进行了检测,根据其中测得的两组残余应力数据计算出了应力松弛数学模型中的待定参数,建立起了退火时间、退火温度、退火前残余应力以及退火后残余应力四者之间的关系,并将由该数学模型计算得到的残余应力与第3组测得的残余应力数据进行了对比。研究表明,通过由模型和实验得到的结果两者的误差非常小,因此说明该数学模型具有较高的可靠性与准确性。

关键词:聚碳酸酯;残余应力;退火;注塑件

中图分类号:TQ320.63;TH145.4⁺2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0551-05

Stress relaxation law of plastic part of automotive lamp under annealing

LIU Hong¹, YANG Zhe-ren¹, JIANG Lan-fang²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China)

Abstract: Aiming at the problem of injection molding-part was full of residual stress, taking the plastic part of automotive lamp made by Polycarbonate (PC) as an example, the stress relaxation law of plastic part under annealing process was investigated, and the formula of relaxation stress used in industry glass under annealing process was analyzed. A mathematical model of stress relaxation for the material of Polycarbonate (PC) under annealing process was presented. Adopting the experimental as a method, the residual stress of the plastic part of automotive lamp from three different annealing processes were measured by drilling hole method. According to the two sets of data from the experiment, the undetermined parameters in the mathematical model of stress relaxation were calculated, and the relationship between the annealing time, annealing temperature, residual stress before annealing and residual stress after annealing was established. And the residual stress calculated by the mathematical model was compared with the third data from the experiment. The result indicates that the error between these two sets of data is very small and the mathematical model has high accuracy and reliability.

Key words: polycarbonate (PC); residual stress; annealing; injection molding-part

0 引 言

随着现代工业的发展,塑料制品被越来越广泛地应用于工业生产中。但是,由于注塑工艺及某些注塑产品的形状不可避免地会导致注塑件残余应力的产

生。而这些残余应力不仅影响产品的几何形状,同时也影响着力学、光学等性能,还可能使产品在使用过程中发生开裂等后果,是影响塑料产品质量不可忽视的重要因素^[1]。因此,如何降低注塑件的残余应力一直都是一项重要的研究课题。

收稿日期:2016-01-05

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2014M561786);浙江省自然科学基金资助项目(LQ13A020003)

作者简介:刘 红(1960-),男,浙江杭州人,博士,教授,主要从事现代设计理论与方法,CAD/CAE技术方面的研究。E-mail:hliu@zjut.edu.cn

注塑件的残余应力主要分为流动残余应力和热残余应力。流动残余应力主要是在注射过程当中形成的,与成型工艺有关;热残余应力是由冷却时注塑件的温度不均匀引起收缩不均匀造成的^[2]。目前降低注塑件残余应力的方法主要包括调整注塑阶段的工艺参数和通过退火后处理的方法来实现。国内外学者都针对注塑件的残余应力进行了许多研究。王鑫等^[3]针对退火对 PC 制品的力学性能的影响进行了研究,证明 PC 制品在进过退火之后,拉深强度得到了提升,断裂延伸率得以降低。陈静波等^[4]建立了可压缩黏弹性聚合物熔体的数学模型研究了熔体温度、模具温度和注射速率等工艺条件对分子冻结取向的影响。Wang Tonghong 等^[5]研究了 ABS 薄壁方板的注塑成型工艺对其残余应力的影响,结果表明模具温度对于接近注塑件表层的残余应力大小有较大的影响,而在较高保压压力范围内保压压力对于残余应力的影响较小。Chen C S 等^[6]在对薄壁注塑件熔接痕的研究中发现,注塑成型中,设定较高的熔体温度和模具温度可以大幅降低注塑件残余应力;但过高的保压压力将导致残余应力过大。

Zhang H M 等^[7]研究了保压曲线对残余应力的影响,保压曲线分两段,第一段保压压力为常数,第二段线性减小,通过优化各段保压时间及压力使残余应力降低。施飞等^[8]通过对注塑件残余内应力的影响因素的分析,发现熔体温度和模具温度对残余内应力的产生较大的影响,并通过静液压测试验证了这一结果。王韬等^[9]对注塑件厚度方向的残余应力分布规律进行了研究,并通过正交实验进行分析,得出残余应力受保压压力影响最大,其次影响因素为注射时间与熔体温度。

本研究针对注塑件的退火工艺,参考工业玻璃在退火状态下的应力松弛理论,以材料为聚碳酸酯(PC)的车灯灯罩为例,提出一种计算退火后注塑件残余应力的数学模型,并通过实验的方法确定数学模型中的待定参数,之后通过实验验证该数学模型的可行性。

1 数学模型

玻璃退火过程中的应力松弛是一个相对复杂的情况,Preston 在 1952 年提出了一个玻璃在恒定温度下应力松弛的经验计算公式^[10],即:

$$\frac{e_0}{e} - 1 = Bt \quad (1)$$

式中: e_0/e —经时间 t 之后玻璃中未松弛部分的应力 e

与初始应力 e_0 之比的倒数; B —只与玻璃成分及温度有关的参数。

式(1)反映了在恒定温度退火过程中,应力随着时间的一个变化规律。有如下关系:

$$\ln B = -\frac{A}{T} + C \quad (2)$$

式中: T —绝对温度; A, C —与材料相关的参数。

由于玻璃在退火状态下表现为粘弹性的状态,存在应力松弛的现象,这一点与 PC 材料类似,故可应用式(1)来研究 PC 材料的应力松弛状态。

2 实验检测

2.1 几何特征

本研究以车灯灯罩为例,已知其材料为 PC,弹性模量为 2.5×10^9 Pa,泊松比为 0.4,最大长度为 517 mm,最大宽度为 240 mm,厚度为 2 mm。因此可以将其作为薄壁件进行研究,即用钻孔法检测应力时可钻通孔。车灯灯罩如图 1 所示。



图 1 车灯灯罩

2.2 参数确定

根据式(1)可知, B 为待定参数, B 又由 A 与 C 确定。所以本研究通过实验的方法对参数 B, A, C 加以确定。由式(1)可知, B 的取值与初始应力 e_0 、退火后的应力 e 以及退火时间 t 相关,故首先需要确定退火前后灯罩的应力大小。为了保证获得应力大小的可靠性,本研究采用钻孔法对灯罩的残余应力进行检测。

2.2.1 退火前应力

钻孔法的基本原理是在有残余应力的区域钻一小孔使残余应力释放,通过应变实验可以检测这一释放量,从而得到残余应力。设各向同性的构件某一区域内存在残余应力,其最大、最小主应力分别为 σ_1 和 σ_2 。

任一点处应力状态如图 2 所示。

本研究在该区域表面上粘贴一 45° 应变花,并在应变花中心打一小孔,进行释放应变的检测,应变片分布图如图 3 所示。

计算残余应力的公式如下^[11]:

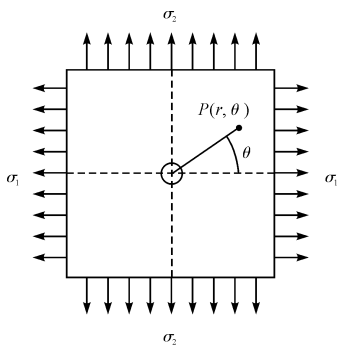


图2 任一点处应力状态

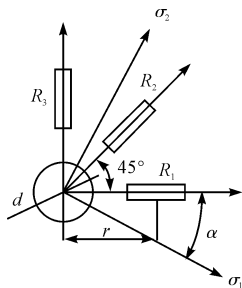


图3 应变片分布图

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{4M}(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}) - \frac{\sqrt{2}E}{4N} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{45})^2} \\ \sigma_2 = \frac{E}{4M}(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}) + \frac{\sqrt{2}E}{4N} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{45})^2} \\ \lg 2\alpha = \frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\varepsilon_{90} - \varepsilon_0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_0, \varepsilon_{45}, \varepsilon_{90}$ —应变花3个不同方向的应变变化值;
 ε_0 —与 x 轴线平行的 R_1 应变片的应变测量值; $\varepsilon_{45}, \varepsilon_{90}$ —与 x 轴线成 45° 和 90° 的应变测量值; α —主应力 σ_1 与应变片 R_1 的夹角; M, N —钻孔为通孔时的释放系数。

M, N 如下式所示:

$$\begin{cases} M = -\frac{(1 + \mu)}{2} \frac{a^2}{r^2} \\ N = \frac{1}{2} (3(1 + \mu) \frac{a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: μ —泊松比, $a=d/2, r$ —钻孔中心到应变片中心距离。

为了减小误差,本研究在灯罩表面选取3个检测点 C_1, C_2, C_3 。检测点分布图如图4所示。

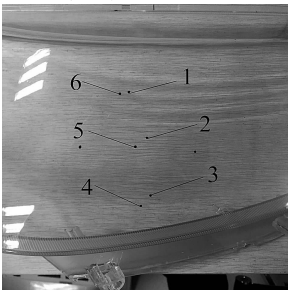


图4 检测点分布图

1— C_2 ; 2— C_3 ; 3— C_1 ; 4— C_{1X} ; 5— C_{3X} ; 6— C_{2X}

为了保证在实验过程中,灯罩不会发生偏移从而影响检测结果的精度,故本研究针对该灯罩制作了专用的固定装置,该装置如图5所示。



图5 固定装置

本研究在灯罩表面 C_1, C_2, C_3 处粘贴 45° 应变花,保证应变片 R_1 粘贴的方向与图4中点 C_1 和点 C_{1X} 所指的方向重合,应变花与应变仪采用1/4桥路法进行连接,温度补偿采用动态补偿法,即在另一个相同的零件上贴一个温度补偿片,连接到应变仪当中。桥路连线示意图如图6所示。

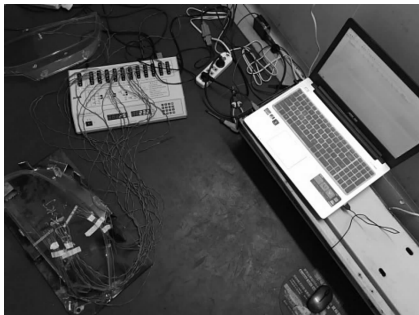


图6 桥路连线示意图

本研究沿着垂直于灯罩表面的方向缓慢将检测点钻穿,钻孔的直径为2.5 mm,钻孔中心至应变片中心距离为5 mm。钻孔示意图如图7所示。



图7 钻孔示意图

之后记录应变仪的读数,即钻孔导致的应力释放,得到应变的数据如表1所示。将表1中的应变量代入式(3),得到主应力大小如表1所示。

表 1 退火前实验数据

检测点	应变分量			主应力大小	
	$\varepsilon_0/\mu\varepsilon$	$\varepsilon_{45}/\mu\varepsilon$	$\varepsilon_{90}/\mu\varepsilon$	σ_1/MPa	σ_2/MPa
C_1	30	-20	25	-0.27	-1.29
C_2	33	45	30	-0.75	-1.05
C_3	-47	38	-31	1.94	0.29

2.2.2 退火后应力

本研究根据经验选取 3 组退火参数,分别为实验一(115 ℃、20 min),实验二(90 ℃、30 min),实验三(100 ℃、25 min)。调整热烘道的温度为 115 ℃,退火时间为 20 min,选取一个刚注塑成型的同型号的车灯面罩,并将其放入热烘道中进行退火处理,退火示意图如图 8 所示。



图 8 退火示意图

退火完成之后,笔者将灯罩取出,采用与之前相同的方法采用钻孔法对灯罩表面 3 个检测点 C_1 、 C_2 、 C_3 的应力进行检测。重复上述步骤,将灯罩分别在 100 ℃ 和 90 ℃ 下进行退火实验,并对 C_1 、 C_2 、 C_3 3 个检测点位置处的应力大小进行检测,得到的应力大小如表 2 所示。

表 2 退火后实验数据

实验序号	检测点	应变分量			主应力大小	
		$\varepsilon_0/\mu\varepsilon$	$\varepsilon_{45}/\mu\varepsilon$	$\varepsilon_{90}/\mu\varepsilon$	σ_1/MPa	σ_2/MPa
实验一 (115 ℃、 20 min)	C_1	15	-12	13	-0.12	-0.68
	C_2	17	23	16	-0.41	-0.53
	C_3	-20	13	-10	0.92	0.16
实验二 (90 ℃、 30 min)	C_1	21	-12	13	-0.17	-0.8
	C_2	25	32	20	-0.56	-0.73
	C_3	-30	20	-15	1.16	0.19
实验三 (100 ℃、 25 min)	C_1	23	-13	13	-0.18	-0.85
	C_2	28	30	16	-0.52	-0.74
	C_3	-35	24	-16	1.27	0.19

本研究将表 1 和表 2 中实验二的数据联立计算,即:

$$\begin{aligned} C_1: & \begin{cases} \frac{-0.27}{-0.17} - 1 = B_{c11} \cdot 30 \\ \frac{-1.29}{-0.8} - 1 = B_{c12} \cdot 30 \end{cases}, \\ C_2: & \begin{cases} \frac{-0.75}{-0.56} - 1 = B_{c21} \cdot 30 \\ \frac{-1.05}{-0.73} - 1 = B_{c22} \cdot 30 \end{cases}, \\ C_3: & \begin{cases} \frac{1.94}{1.16} - 1 = B_{c31} \cdot 30 \\ \frac{0.29}{0.19} - 1 = B_{c32} \cdot 30 \end{cases}。 \end{aligned}$$

得到:

$$B_2 = \frac{\frac{B_{c11} + B_{c12}}{2} + \frac{B_{c21} + B_{c22}}{2} + \frac{B_{c31} + B_{c32}}{2}}{3} \approx 0.018。$$

同理,采用同样的方法将表 1 和实验一中的数据联立求解,得到:

$$B_1 = \frac{\frac{B_{c11} + B_{c12}}{2} + \frac{B_{c21} + B_{c22}}{2} + \frac{B_{c31} + B_{c32}}{2}}{3} \approx 0.049$$

将 B_1 、 B_2 代入式(2),可以得到:

$$\begin{cases} \ln B_1 = -\frac{A}{T_1} + C = \ln 0.049 = -\frac{A}{115 + 273} + C \\ \ln B_2 = -\frac{A}{T_2} + C = \ln 0.018 = -\frac{A}{90 + 273} + C \end{cases},$$

得到待定参数 $C \approx 11.5$, $A \approx 5\,633.8$,故得到:

$$\begin{cases} \frac{e_0}{e} - 1 = Bt \\ \ln B = -\frac{5\,633.8}{T} + 11.5 \end{cases} \quad (5)$$

3 数据验证及结果分析

本研究根据式(5)可知, B 的取值取决于退火的温度 T ,故采用实验三的数据对式(5) 进行验证。已知退火温度为 100 ℃,故可以得到:

$$\ln B = -\frac{5\,633.8}{373} + 11.5 \approx -3.6,$$

从而得到: $B \approx 0.027$ 。

所以:

$$\frac{e_0}{e} - 1 = 0.027 \cdot t \quad (6)$$

式中: e_0 — 初始应力, t — 退火时间。

结合表 1 中的数据,可以根据式(6) 计算得到退火之后的应力大小,并与实验三中所获得的测量值进行对比。

各检测点主应力 σ_1 的计算值与测量值如图 9 所示。

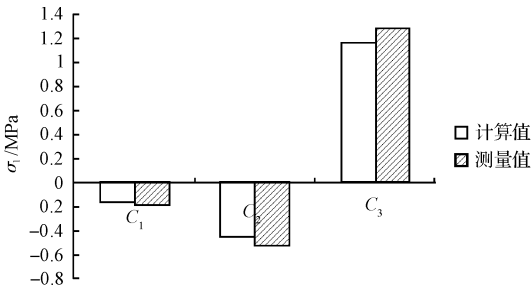


图9 各检测点主应力 σ_1 的计算值与测量值
各检测点主应力 σ_2 的计算值与测量值如图10所示。

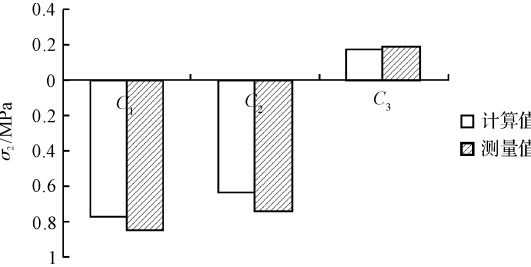


图10 各检测点主应力 σ_2 的计算值与测量值
各检测点主应力测量值与计算值误差百分比如图11所示。

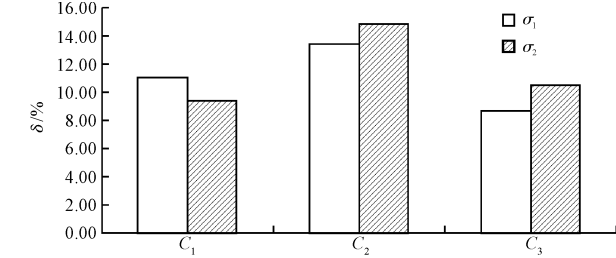


图11 各检测点主应力测量值与计算值误差百分比
实验数据与计算结果对比如表3所示。

表3 实验数据与计算结果对比

检测点	主应力	计算值/MPa	测量值/MPa	误差 δ /%
C_1	σ_1	-0.16	-0.18	11.11
	σ_2	-0.77	-0.85	9.41
C_2	σ_1	-0.45	-0.52	13.46
	σ_2	-0.63	-0.74	14.86
C_3	σ_1	1.16	1.27	8.66
	σ_2	0.17	0.19	10.53

由图9、图10可以看出,检测点 C_1 、 C_2 、 C_3 点处两个主应力 σ_1 和 σ_2 的测量值与计算值非常接近。又根据图11可知,主应力测量值与计算值之间的误差均保持在10%左右,故可以判断式(5)具有一定的可信度与准确度,其描述了退火温度、退火时间及退火前后残余应力之间的数学关系。

4 结束语

笔者研究了塑件在退火状态下应力松弛的规律,参考了玻璃材料退火状态下应力松弛的计算公式,采用钻孔法对塑件残余应力进行检测,根据测得的残余应力数据确定了应力松弛公式中的待定参数,得出了以下结果:

(1) 针对聚碳酸酯材料,提出了一种该材料在退火状态下应力松弛的数学模型。

(2) 通过实验测量数据与数学模型计算结果进行对比,发现两者误差很小,说明了该数学模型具有一定的可靠性与准确性。

所以,研究人员在实验之前可以通过该数学模型确定出最佳的工艺参数,之后再进行退火实验,由此简化了实验过程,因此在工程上具有一定的应用价值。

参考文献(References):

[1] 刘红,陈先立,蒋兰芳,等. 注塑件去应力过程数值模拟[J]. 塑料工业,2013,41(9):60-63.

[2] 蒋兰芳,刘红,姜少飞,等. 注塑件去应力退火热处理仿真及实验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(10):83-85.

[3] 王鑫,李海梅,申长雨,等. 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.

[4] 陈静波,申长雨,刘春太,等. 聚合物注射成型流动残余应力的数值分析[J]. 力学学报,2005,37(3):272-278.

[5] WANG Tong-hong, YOUNG W B. Study on r-esidual stresses of thin-walled injection moldin-g[J]. **European Polymer Journal**,2005(41):2511-2517.

[6] CHEN Chun-sheng, CHEN T J, CHIEN R D, et al. Investigation on the weld line strength of thin-wall injection molded ABS parts [J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**,2007(34):448-455.

[7] ZHANG Hui-min, LI Meng, YANG Lu-lu. Optimization of packing pressure curve in injection molding based on numerical simulation [J]. **Advanced Materials Research**,2011(211):522-527.

[8] 施飞,朱宇明. 基于 moldflow 的注塑件残余内应力的研究[J]. 中国塑料,2013,27(11):100-104.

[9] 王韬,颜悦. 注塑件残余应力数值模拟分析及工艺优化[J]. 塑料工业,2012,40(12):42-45.

[10] 林亢. 普通工业玻璃退火与应力的几个问题[J]. 玻璃,2000,27(2):10-14.

[11] 印兵胜,赵怀普,王晓洪. 残余应力测定的基本知识[J]. 理化检验——物理分册,2007,43(12):642-645.

[编辑:李辉]

本文引用格式: