

文章编号:1001-4888(2006)04-0497-05

# ABS 注塑制品的模内蠕变试验研究<sup>\*</sup>

赵振峰, 陈政, 吴海宏, 申长雨, 王静

(郑州大学 橡塑模具国家工程研究中心, 河南 450002)

**摘要:** 不同于传统的热残余应力分析, 本文着眼于注塑制品的模内蠕变研究。通过测试 ABS 注塑薄板在不同工艺条件下的收缩变形, 比较基于弹性理论的热收缩, 进而得到了模内蠕变量。分析结果表明, 模内蠕变对于降低制品最终的收缩变形起着重要的作用。在研究了各种工艺条件对制件模内蠕变的影响后, 发现较低的模腔表面温度或较长的成型周期会导致蠕变增大, 而制件在模内的蠕变(或应力松弛)主要发生在固化后的高温区。本文同时探讨了保压压力对蠕变的影响。高注塑保压压力通常会减小注塑件的收缩, 但同时会减小制件模内蠕变。

**关键词:** 蠕变; 残余应力; ABS; 注塑成型; 收缩

**中图分类号:** TB302      **文献标识码:** A

## 0 引言

高聚物在注塑加工过程中, 制件的最终尺寸比之模内的大小总会发生一定的收缩和翘曲。准确预测这个变形, 是制品质量控制的一个重要环节。制品收缩的根本原因, 在于固化后的制品随温度下降而收缩, 但是在开模之前, 模具通常又限制这种收缩, 从而产生了拉伸应力。在拉伸应力的作用下, 制品会发生蠕变(永久变形)。伴随这个蠕变, 则会发生制件在模内残余应力松弛。一般说来, 蠕变与模内残余应力的松弛是对同一现象问题的不同描述方式。如果已知蠕变量, 借助于弹性系数可以求得模内残余应力; 反之亦然。

制件的收缩变形可分为两个阶段。在注塑加工过程中, 熔体固化之前很小的力就可以使之随意变形, 因而总可以保持模具所赋予的形状, 内应力可以忽略不计。熔体固化之后, 随温度的降低而产生收缩, 但又受到模具约束, 从而产生内应力。如果不计蠕变作用, 内应力产生的弹性应变会与热应变相互抵消。然而正如前面所述, 内应力的存在必然导致蠕变或应力松弛, 从而开模时内应力的突然消失而导致的制件收缩总是小于纯粹的温度收缩。此为制件收缩的第一阶段。开模后, 制件承受的平均应力为零, 内部即或有残余应力, 其量值也很低, 因此不必再考虑蠕变, 可认为热收缩过程完全符合弹性假定。

制件模具内的蠕变或应力松弛直接影响制件的最终变形。长期以来, 人们已经意识到基于弹性模型预测的制品模内残余应力总是明显偏大, 因此已经发展出一些基于粘弹性理论的残余应力的研究<sup>[1-6]</sup>, 我国的学者对此也进行了许多有益的探讨<sup>[7-11]</sup>。这些工作无一例外, 均采用了应力松弛积分方程作为本构方程。然而, 模具内的制件应力松弛是在急剧变温条件下在很短的时间内发生的, 实际观察和定量测定松弛过程极为困难, 松弛参数的确定一直缺乏有效的手段。本文的试验将避开残余应力的讨论, 而关注其等价的变形表达: 模内蠕变。比之残余应力, 后者更易于实测。为了对制件模内的蠕变有完整的认识, 我们对 ABS 材料进行了一系列试验测量。本文通过制件的最终变形和理想弹性状态下

\* 收稿日期: 2005-08-24; 修订日期: 2006-07-08

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(10590352)资助

通讯作者: 赵振峰(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 材料加工和计算力学。

的热变形之差,得到了多组制件模内蠕变数据,并分析了加工条件对蠕变的影响。其结论对其他高聚物成型加工也具有一定的指导意义。

## 1 试验

### 1.1 原材料和试样

本研究选用 ABS 工程塑料,型号 PA-707k,密度  $1.05\text{g/cm}^3$ ,镇江奇美塑料有限公司生产。在震德捷霸 CJ80E 注塑机上,按照表 1 的工艺将 ABS 注射成型为如图 1 所示长方形薄板。模具为一模两腔布局,平缝式浇口,薄板尺寸为:长  $140.0\text{mm}$ ,宽  $60.0\text{mm}$ ,厚  $2.5\text{mm}$ 。在薄板的端部,沿板宽方向有  $1\text{mm}$  的凸起,以防止制件冷却时在模内自由收缩。

### 1.2 注射工艺

ABS 的分子结构和微观结构复杂,使它不容易结晶而呈无定形状态,具有低的熔体粘度、低收缩率和良好的成型性。ABS 熔化温度为  $210^\circ\text{C}$ ,分解温度为  $250^\circ\text{C}$ 。试验中注射工艺参数如表 1 所示。其中的注射压力为机器设定,浇口的实际压力可能低于此值。

表 1 注射工艺参数

Tab. 1 Injection process setting

熔体温度(°C)	注射压力(MPa)	保压压力(MPa)	模具温度(°C)	注塑周期(s)
230	100	0/50	42/51/60	5/15/30/60

### 1.3 试验装置

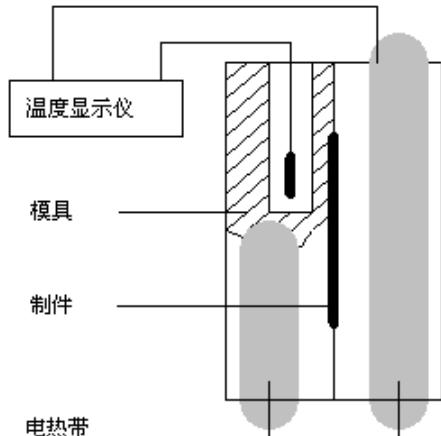


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Sketch map of test system

试验装置主要包括试样模具、加热装置、数显仪等,见图 2。加热和数显系统包括电加热圈、热电偶、温度控制仪、红外扫描仪和数显仪。注塑过程中,由热电偶和红外扫描仪测量型腔及制品表面温度,在数显仪上直接显示;然后通过计算机程序进行数据的采集和记录,并且反馈给加热装置,从而控制模具型腔温度。

### 1.4 试验测量

对于在不同工艺条件下的产生的试件,测量其在常温下的实际长度,并用下面公式计算其收缩率:

$$\epsilon = \frac{L_{mold} - L_{product}}{L_{mold}} \times 100\% \quad (1)$$

其中  $L_{mold}$  代表制件在模具内的长度,而  $L_{product}$  代表制件在室温条件下的长度。然后,根据制件的热膨胀系数  $\alpha$ ,计算其基于弹性变形的理论收缩率:

$$\epsilon_e = \alpha(T_g - T_0) \quad (2)$$

式中的  $T_g$  为材料的固化温度,取为  $98^\circ\text{C}$ ;  $T_0$  为室温,取为  $25^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  为热膨胀系数,取为  $0.00012$ 。式(1)、(2)之差即制件在模内的蠕变量:

$$\epsilon_r = \epsilon_e - \epsilon \quad (3)$$

## 2 结果及讨论

### 2.1 无保压压力试验

在实际生产中,均有保压过程。保压的存在,会极大影响制件的收缩,而且它的影响会和制件模内应变混杂在一起。为了了解制件模内蠕变情况,我们做了无保压试验,以排除制件收缩中的保压因素。

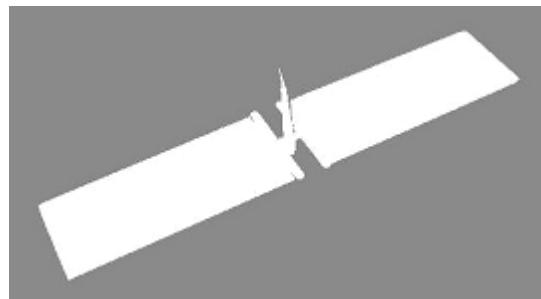


图 1 试验试样

Fig. 1 Specimen of test

根据多次相同工艺条件下的制件收缩平均值,用式(1)计算得到 ABS 试样在不同模具温度和成型周期下成型流动方向的应变折线图,如图 3 所示。图 4 为根据式(3)计算得到的制件相应的模内蠕变。

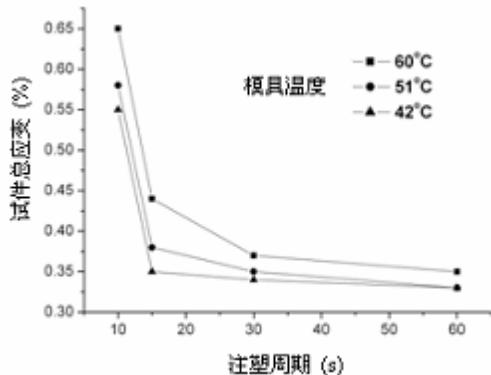


图 3 流动方向试样总应变(无保压)

Fig. 3 Total strain in flow direction  
(without packing pressure)

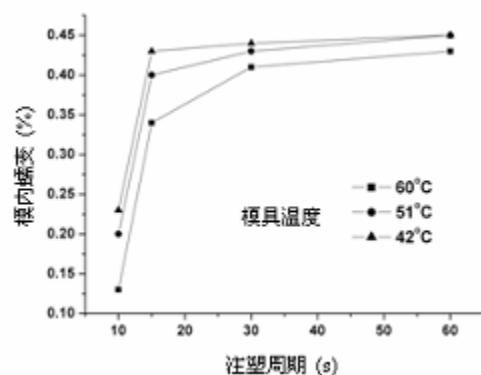


图 4 流动方向模内蠕变

Fig. 4 In-mold creep in flow direction

通过此试验,可以得到如下结论:

- 1) 在相同的成型周期下,制件的模内蠕变量随模具温度的降低而升高。这是因为低模温导致高聚物熔体更早进入固化阶段,从而制件在开模前有较长的固态模内存在时间,即较长的蠕变时间。
- 2) 随着成型周期的延长,制品模内蠕变量增加。这是因为制品在模具内的增长,从而得以有充裕的时间发展蠕变。
- 3) 在本试验中,成型周期对制件模内蠕变的影响,主要体现在 30 秒之内,而后的蠕变增加变得极小,甚至可以忽略。同时可以注意到,当成型周期足够大时,模具温度对模内蠕变不再起决定性作用。这种现象的唯一解释,就是制件的蠕变或应力松弛主要发生在熔体固化后的高温区段内,而当温度降至一定值,蠕变变得极为缓慢。正如在图 4 中所看到的,当成型周期大于 30 秒时,由于在不同模温下的制件均基本完成了其在高温区的蠕变,因此尽管有 20℃ 模温差异,但它们的模内蠕变量已经很接近了。对于不同的材料,此显著蠕变温度区会不尽相同。对于本试验材料,似乎此温度区的下界在 60℃ ~ 70℃ 之间。

## 2.2 有保压压力试验

在此项试验中,所设机器保压压力为 50MPa。需指出的是,这并不意味着制件熔体在模内任何时候都一定受到此压力,在某些部位、某些时刻,熔体所受到的保压压力可能远小于此设定。在这里,我们将用式(3)计算所得到的应变称之为模内永久应变,意为开模后不按弹性假设收缩的部分,它来自于保压和蠕变的双重贡献。在没有有效的分析计算模型情况下,二者是难以分开的,这里只能给出一个定性的分析。

- 1) 与无保压的试验相似,制件的模内永久应变随模具温度的降低和成型周期的增加而升高。
- 2) 与无保压相比,此时的模内永久应变明显高于前者的蠕变。因此,有保压对于减少制件的最终收缩总是有利的。
- 3) 不能简单地认为图 6 和图 4 的差别就是来自保压的贡献。事实上,只有当制件在模内受到拉伸时才会发生蠕变。由于保压压力的存在,会在不同程度上抵消温度降低引起的收缩,制件的蠕变开始时间将会推迟,保压压力越大,推迟时间越长。其结果,当蠕变开始时,温度可能已经降到低蠕变区域;至少,蠕变时间程度不同的减少了。基于以上认识,可以粗略的认为图 6 中成型周期为 10 秒时的永久应变量基本来自于保压的贡献,因为此时能留给蠕变的时间实在是太短了。之后永久应变的增加大体来自于蠕变。
- 4) 一般说来,保压压力的贡献对于不同的模温是相似的。因此,不同模温下的模内永久应变的差

异,基本是蠕变造成的。如前所述,较低的模温总是能提供较长的蠕变时间,从而也就易于理解为何图6中低模温有较大的模内永久应变了。

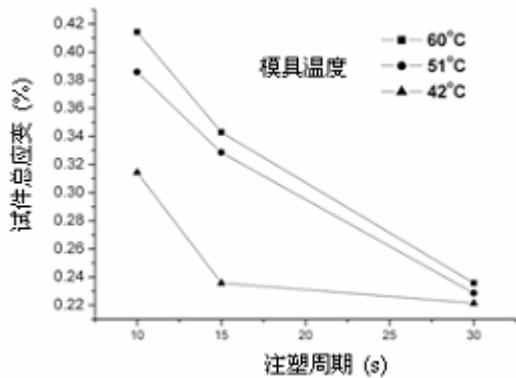


图5 流动方向试样总应变(保压压力为50MPa)

Fig. 5 Total strain in flow direction  
(Packing pressure: 50 MPa)

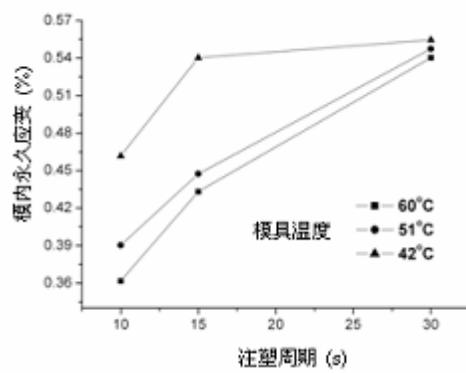


图6 流动方向模内永久应变

Fig. 6 In-mold permanent strain in flow direction

### 3 结论和展望

在CAE技术使用日益广泛的今天,通过控制加工工艺或修正模具型腔以赋予制件精确的尺寸,一直是人们所关心的研究课题。为达此目的,必须定量地了解制件在模内的应力应变发展规律。迄今为止,这方面的工作已有很多,但结果并不理想,已经成为注塑过程计算机模拟中最薄弱的一环。为此,本文就ABS材料固化后在模内的蠕变进行了试验研究。试验所用模具只在长度方向对制件有约束,因此本试验可以认为是在单向拉伸时的蠕变研究。至于制件的宽度和厚度的变化,本试验未予考虑。这主要由于本试验制件在一定条件下可以沿宽度自由收缩,分析起来比较复杂,同时此种情况在实际生产中并不常见;而厚度要受到补料的影响,与长(宽)方向是否有蠕变关系不大。

试验表明,制件在模内的应力松弛或蠕变,主要发生在固化后的一段高温区内,换言之,应力松弛或蠕变模量强烈依赖于温度。尽管具体的量值尚有待于深入研究,但显然这是一个材料特有的物性,与制件几何形状无关。本试验所得到的定性结论适用于大多数高聚物注塑成型过程。目前基于材料时间的应力松弛积分方程是否足以描述这种材料特性,是否需要建立新的数学计算模型,尚需深入研究。无论如何,就像用Cross-WLF模型描述熔体粘度一样,建立一套高聚物固态随温度变化的、考虑了蠕变或应力松弛效应的、可在试验室测定参数的广义应力应变本构方程,对于本领域的研究是至关重要的。在这两个环节的进展,将有力推动注塑成型数值模拟的发展,对于质量控制具有重要的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Jansen K M B, Titomanlio G. Effect of pressure history on shrinkage and residual stresses-injection molding with constrained shrinkage[J]. Polymer Engineering and Science, 1996, 36(15):2029~2040.
- [2] Zoetelief W F, Douven L F A, Housz A J. Residual thermal stresses in injection molded products[J]. Polymer Engineering and Science, 1996, 36(14):1886~1896.
- [3] Titomanlio G, Jansen K M B. In-mold shrinkage and stress prediction in injection molding[J]. Polymer Engineering and Science, 1996, 36(15):2041~2049.
- [4] Choi D S, Im Y T. Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding[J]. Composite Structures, 1999, 47(1):655~665.
- [5] Liu S J. New viscoelastic phase-transformation model to simulate the injection-molding residual stress[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 62(10):1537~1550.
- [6] Chen M, Yao D, Kim B. Eliminating flow induced birefringence and minimizing thermally induced residual stresses

- in injection molded parts[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2001, 40(4):491~503.
- [7] Shen C Y, Li H M. Numerical simulation for effects of injection mold cooling on warpage and residual stresses[J]. Polymer - Plastics Technology and Engineering, 2003, 42(5):971~982 .
- [8] 陈静波,申长雨,刘春太,王利霞. 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):272~279  
(Chen Jingbo, Shen Changyu, Liu Chuntai, Wang Lixia. Niumerical analysis of flow-induced residual stress in injection molding for polymer. Acta Mechanica sinica, 2005, 37(3):272~279 (in Chinese))
- [9] 李海梅,顾元宪,申长雨. 注塑件残余热应力的数值计算[J]. 化工学报,2000,51(3):308~312 ( Li Haimei, Gu Yuanxian, Shen Changyu. Numerical Calculation of Thermal residual Stress of Injection Molded Parts. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2000, 51(3):308~312 (in Chinese))
- [10] Chen X, Lam Y X, Li D Q. Analysis of thermal residual stress in plastic injection molding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101(1):275~280.
- [11] Zhou H M, Li D Q. Residual stress analysis of the post-filling stage in injection molding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25(7):700~704.

## Test and Study on In-Mold Creep of ABS Injection Molded Part

ZHAO Zhen-feng, CHEN Zheng, WU Hai-hong, SHEN Chang-yu, WANG Jing

(National Engineering Research Center for Advanced Polymer Processing Technology, Zhengzhou University, Henan 450002, China)

**Abstract:** Different from the traditional thermal residual stress research, the in-mold creep of injection molded part is studied. The shrinkages of the injection-molded thin plate of ABS material under different process conditions are tested, and then the in-mold creep of the part is obtained by comparing the tested shrinkage with theoretical shrinkage based on elasticity. It is shown that the in-mold creep plays very important role in reducing final shrinkage of the part. The influence of the various process conditions to the creep is investigated. It is found that the lower mold wall temperature and the longer cycle time lead to more creep, and in-mold creep or residual stress relaxation of the part mainly happens in high temperature after the melt is solidified. The effect of packing pressure to the in-mold creep is also analyzed. The high injection packing pressure generally reduces the part shrinkage, but also reduces the in-mold creep at same time.

**Key words:** creep; residual stress; injection molding; shrinkage