

注塑制品残余应力的研究进展

李廷健*, 朱 辉, 樊 利, 阳 立, 张 杰

(四川大学 高分子科学与工程学院, 成都 610065)

摘要: 由于实际工艺条件往往与理想值存在一定偏差, 制品在成形后通常会存在一些难以避免的缺陷, 而残余应力正是最为常见的一种。注塑制品的残余应力是在注塑成形过程中, 外界约束去除后, 仍存在于塑件内部的应力, 在后期使用过程中容易引起塑件的翘曲、变形、乃至断裂破损, 多数情况下对制品不利。因此, 在塑料制品设计时应充分考虑到残余应力的影响。本文较为全面地介绍了注塑制品残余应力的产生、检测、减小残余应力的措施及残余应力的计算机模拟等内容。

关键词: 残余应力; 残余应力检测方法; MOLDFLOW

引言

通常, 注塑过程分为三个阶段: 充填, 保压, 冷却。而残余应力则是脱模后制品内部未完全松弛而残留在其中的各部分应力之和, 常带来翘曲、变形等潜在危害。一般认为残余应力有两个来源: 一是在充填, 保压成型过程中由分子取向而形成, 称为流动残余应力; 一是在固化冷却过程中受热胀冷缩限制, 由于各部分收缩不均匀而形成, 称为热残余应力。一般来说, 热残余应力比流动残余应力大一个数量级。

1 残余应力产生的原因及其对制品的影响

熔体的流动情况、温度场变化、以及高分子内部结构形态上的变化是引起残余应力的几种主要因素^[1]。在一个完整的成形周期中, 热塑性树脂要经历从粘流态、高弹态到玻璃态的内在结构变化, 每一阶段的材料特性参数都有明显的差别。另外, 成形过程中, 高分子材料的松弛特性通常会引起内应力的松弛现象, 这使得内应力的排除十分困难。

在充模流动过程中, 由于材料所受剪切力不均, 随流动剪切发生的分子取向度分布通常存在一个梯度。同时由于取向过程的热力学不稳定性, 取向和解取向往往同时发生。通常快速冷却使解取向进行得不充分, 这样仍有自由蜷曲趋势的取向分子被冻结在制品之中, 处于热力学不稳定状态, 在后期使用过程中容易引发制品缺陷。对于结晶性树脂还必须考虑到结晶带来的影响, 制件表层与芯层温度、冷却速度的差异导致了结晶度的不均匀。与芯层相比, 表层冷却较快、结晶不充分、结晶度较低, 这便导致了芯层的体积收缩率较表层大, 内部受力变得不均匀。同时, 在讨论温度对结晶行为的影响时, 由于高温的聚合物熔体与低温的模具之间存在热变换, 高分子材料在凝固时有吸热效应而在结晶时有放热效应, 再加之成形过程中的各种热量损失, 这便使得成形过程中的温度场分布不均匀且为瞬态变化的^[2]。在降温过程中, 所经历的收缩变形不一样, 从而产生残余应力。

综合考虑残余应力的形成机理, 在残余应力对制品品质的影响上, 可分别对流动残余应力和热残余应力进行讨论。流动残余应力主要造成光弹性、双折射、各方向强度不均、加热收缩不均等影响, 而热残

10.14028/j.cnki.1003-3726.2017.01.007

收稿: 2016-06-22; 修回: 2016-10-21;

基金项目: 2015 年四川大学创新创业计划;

作者简介: 李廷健(1994—), 男, 四川大学高分子学院 2013 届本科生;

* 通讯联系人, E-mail: 1073490045@qq.com.

余应力直接造成产品翘曲、变形、乃至开裂。

2 残余应力的测定方法

2.1 机械法测定

穿孔法:穿孔法是世界上用于测量残余应力最为广泛的方法之一。给试样穿孔后,孔周围的残余应力就会释放出来,释放量与孔的直径和深度有关,于是可以利用这一关系评估试样的残余应力大小。其核心在于应用应变测量计测得穿孔后的应变大小,再通过进一步分析计算得到应力的方向和大小。穿孔法的步骤和后续分析一般都按照国际标准 ASTM E837 进行^[3~4]。此外,还需注意应力场是否均一的问题。当应力场均一时,可直接按照现有公式进行推导计算;但若应力场不均一时,残余应力不再随深度方向均一分布,则需修正各项系数,此时便该考虑到应力释放率的问题。具体公式可参考三上隆男^[5,6]的相关论述。

逐层去除法:将残余应力沿板厚方向分布的平板状试样去除一薄层后,部分残余应力将被释放并重新分布达到新的平衡,此时便会产生翘曲或表面应变的变化,如图 1 所示,通过测得翘曲量或表面应变的变化量便可推测厚度方向上残余应力的大小。Tong-Hong 等^[7]就利用铣床对薄壁注塑成型制件进行逐层去除,利用弹性和粘弹性模型,研究了不同工艺条件下制件残余应力的大小。

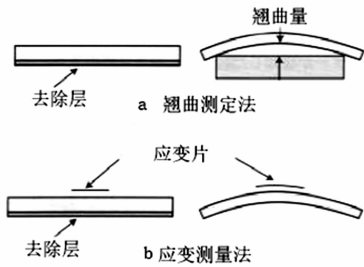


图 1 逐层去除法原理
Figure 1 Principle of layer-by-layer removal

2.2 化学测定

环境应力龟裂法(溶剂浸泡法):有些高分子材料当浸润在某些溶剂中时易产生裂纹,利用这一性质测量材料残余应力的方法叫环境应力龟裂法(溶剂浸泡法)。将试样浸泡在事先知道应力检测范围的特定溶剂中,通过观察裂纹发生的有无、多少,便可大致估计残余应力的大小。此外,只要能事先做出残余应力校正曲线也能定量表征残余应力大小。关于该法的具体实施步骤、校正曲线的制作方法和过程中应注意的问题可参考本间精一^[8]的相关文献。

1/4 椭圆法:这种方法原理如图 2 所示,将一薄片试样贴合安装在一 1/4 椭圆台上后,薄片试样会产生应变。若令贴合位置与 1/4 椭圆短轴之间的距离为 X ,则可设法求得试样产生应变与其对应贴合位置 X 的对应关系。此时在已发生应变的试样上涂抹一些溶剂,放置一段时间后,超过某贴合位置时就会产生裂纹。这样便能读取不发生裂纹时的应变 ϵ_x ,并能借此求出其极限应力范围 $\sigma_{\max}$ 。不过,需要注意的是,这种方法求得的应力是没有考虑应力释放初期应力^[9]。

其应变计算公式为:

$$\epsilon = [0.02 \times (1 - 0.0084X^2)]t^2$$

式中 t 为试样薄片厚度, X 为贴合位置与短轴间距离

而根据应变即可由虎克弹性定律求得其相应的应力 σ :

$$\sigma = E \times \epsilon$$

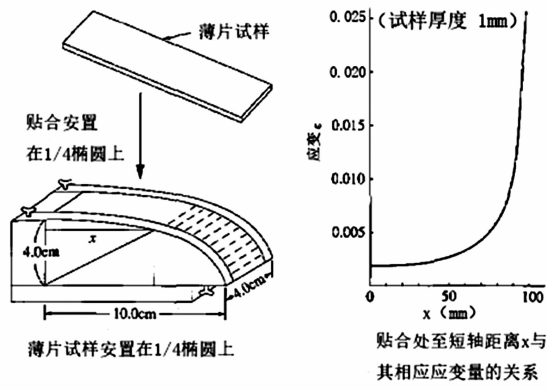


图2 1/4椭圆法测量原理

Figure 2 1/4 Ellipse measurement principle

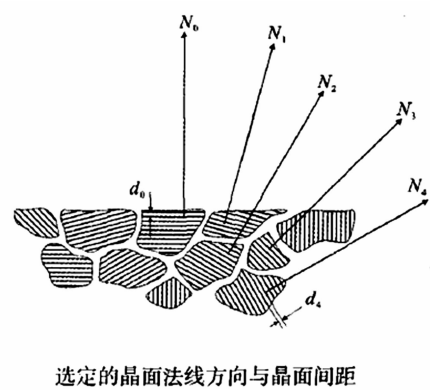


图3 X射线衍射法原理

Figure 3 X-ray diffraction method

2.3 光学测定

光弹性是某些透明材料在承受载荷出现应变的状态下由各向同性变成各向异性并展现出对光的双折射的现象的一种性质。利用这一性质,可以表征这些材料内部应力的存在情况。例如 PC(聚碳酸酯)、PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)这类材料,由于分子取向导致各向异性,光在透过时会产生相位差,通过偏光镜可以观察到等色线和等倾线这两种不同的干涉条纹。通常,等色线是试样上两个主应力差值相同的点组成的轨迹,而等倾线是试样上主应力方向相同的点组成的轨迹。经作图分析这两种性质各异的干涉条纹便能推知应力的存在情况^[10]。对于不透明的材料则可以利用近红外光弹性法进行表征测量。

2.4 X射线测定

根据布拉格定律 $2d\sin\theta=n\lambda$,通过测定衍射角 2θ 便能得出晶面间距 d 的大小。如图 3 所示,在选定晶面后,按倾角大小确定晶面法线 $ON_0, ON_1 \cdots ON_4$,这组法线相对应的晶面间距 $d_0, d_1 \cdots d_4$ 便可通过衍射分别测定。这些间距可以反应应力状态,若间距相等则无残余应力,若间距呈现递增或递减则表明存在拉应力或压应力。有关残余应力的计算、详细推导等,可参考于康^[11]的相关论述。

3 残余应力的减小对策

从残余应力的产生机理入手,可从以下两个方面来考虑残余应力的减小措施。

(1)对于流动残余应力,应设法减小型腔内树脂流动过程中的剪切力,或让已经由取向产生的应力在冷却过程中得到缓和、释放。树脂温度和熔融粘度对其有很大的影响。

- 选用流动性较好的牌号材料,可以降低熔融粘度,有利于解取向;
- 提高树脂温度和注塑速度,这样可以在较低熔融粘度下充填,改善取向;
- 减小保压压力可以减小剪切力;
- 提高模具温度以促进流动残余应力在型腔内缓和释放。

(2)对于热残余应力,通过 PVT 曲线可发现比容积与树脂温度和压力有明显依存关系,且随冷却速度不同,冷却固化会产生比容积的差异。在模温低的情况下,制品迅速冷却固化,残余应力受保压影响较小。而在模温高的情况下,保压越高残余应力有增大的倾向,保压压力的影响占据主导地位。为此,便需要抑制比容积差异的产生,并设法提高材料性能。

- 对材料而言,应改良材料应力开裂、溶剂浸泡龟裂的性质,如可设法提高分子量,利用纤维强化等;
- 在设计上,塑料制品设计应尽量做到厚薄均一,设计有斜度、倒角过渡结构。模具设计应优化浇口位置、冷却水道、顶出方式及顶针位置的设计等;
- 在成型过程中,可适当提高模具温度,和理设置注塑时间、冷却时间,并优化保压参数;

- 可进行退火等后处理。

通常树脂复杂的结晶行为会使残余应力更难以避免。不过结晶提高了材料强度,结晶树脂一般不会发生应力开裂,而更多的是在长时间使用后发生尺寸变化或翘曲等缺陷。因此,虽然可以通过改进工艺条件设法调节树脂的结晶度,但同时必须考虑到制品所需满足的使用强度要求,在两者之间做出适当权衡。

此外,近来研究人员还发现与传统加热方式加热相比,通过添加碳纳米管助剂,使得在外场作用下树脂内部即能产热的新型加热方式可以带来更加均一的固化过程并有效降低残余应力^[12]。而改进传统注塑方式,以获取有别于普通注塑成形制件凝聚态结构的制品也可能有效减小残余应力。

4 残余应力的计算机模拟

随着计算机技术的发展,利用 CAE 等辅助工具事先对制品可能发生缺陷进行预判和分析已成为一种趋势。目前,已有不少研究者将计算机模拟运用到了残余应力的分析上,并根据其相关结果做出了相应理论解释。其中值得注意到的几点是:

(1) 由于实验可调控参数较多(注塑时间、保压压力、模具温度、熔体温度等),若采用单一的控制变量法进行模拟分析,需要处理的数据会变得非常庞大,十分耗费时间和精力。所以,应设计正交实验,优化筛选出最具代表性的实验参数组合,从而得出各因素影响的大小,以得到更加可靠的结果、做出更加合理的分析;

(2) 由于保压过程的复杂性,要准确地确定保压压力和保压时间等工艺参数是人工无法完成的,通常凭借经验、直觉和反复的尝试来确定。Bandreddi 等^[13]最先开展了对保压曲线研究,他们利用仿真结果比较了恒压曲线、递增阶跃曲线和递减阶跃曲线对制品收缩的影响。结果表明,递减阶跃曲线可以形成最均匀的压力分布;

(3) 通常情况下残余应力在半厚方向上呈三区域分布,即拉-压-拉。Zhou 等^[14]通过 Moldflow 模拟与逐次去除法结果比较,也发现了两实验结果基本吻合,在半厚方向上都呈现拉-压-拉的应力分布形式。针对这一现象,可将试样半厚划分为表层、次表层、中间层三层,通过其相互影响、协调收缩作用来进行解释。表层和中间层的固化压力很小,而次表层固化压力较大,由此造成塑件表层和中间层的实际收缩量小于自由收缩量,产生拉应力;而次表层的实际收缩量大于自由收缩量,产生压应力^[15]。拉压应力的大小由各层自由收缩量与实际收缩量的差值决定。此外,其它一些参数的影响有:①升高熔体温度,有利于压力的传递,使得表层和中间层的自由收缩量与实际收缩量的差值随温度升高而变小,从而表层和中间层拉应力随温度升高而变小,残余应力将随之下降^[16];②缩短注射时间,采用比较快的速度注塑时,产生的剪切热较多^[17],流动前沿温度下降较慢,实际生产中可以提高注射速度来避免短射,总体的温降也得到改善;③适当延长保压时间和降低保压压力有利于减少分子取向和制品成形时收缩,从而减小残余应力;④当模具温度升高时,熔体延迟凝固和进入蠕变状态,从而有更长的时间发展蠕变,抵消热应变,使等效弹性应变减小,残余应力降低^[18]。从上述几点可以看出注塑件的残余应力并不单一由某个工艺条件主导,而是受温度分布、固液界面位置和压力历史共同决定;

(4) 软件模拟得到的是型腔内残余应力的大小,考虑到脱模后塑件应力自平衡及自身力矩平衡的影响,脱模后残余应力应为模内残余应力减去各层模内残余应力平均值^[19]。

5 结语

通过加工工艺的优化改进确实可以有效地减小残余应力,很大程度的降低其对制品的影响。不过目前对残余应力的产生、发展及相互作用的精确物理图景还不很明确,由于聚合物本身复杂的取向、结晶等行为,残余应力的理论计算变得十分困难,就目前提出的推算模型都尚有待完善的地方。或许,促进实

验与仿真模拟结合,深入分析材料在成形过程中的蠕变历程、结构发展、受力状态,全面把控材料微观状态和宏观性质,既有的放矢又掌控全局,能为更好的解决残余应力这一问题提供一条新途径。

致谢 四川大学 2013 届本科生创新实验优秀项目。

参考文献:

[1] 黄峡宏,余敏强,周持兴.力学进展,2000,37(3):272~282.
[2] 徐千军,余寿文.力学学报,1998,30(2):157~166.
[3] Kim C H, Youn J R. Polym Testing, 2007,26:862~868.
[4] Annual Book of ASTM E837-01, Determining residual stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, 2001.
[5] 三上隆男. Iic Rev, 2012, 48: 53~65.
[6] 三上隆男. Iic Rev, 2013, 49: 39~45.
[7] Wang T H, Young W B. Eur Polym J, 2005, 41: 2511~2517.
[8] 本间精一. プラスチック, 2003, 55(6): 87~97.
[9] 本间精一. プラスチック, 2003, 55(11): 86~96.
[10] 夏目寛子, 小川和雄. J Nat Fisheries Univ, 2011, 59: 265~272.
[11] 于康, 孙亚非, 陈晓江. 火箭推进, 2015, 41(2): 102~107.
[12] Matsuzaki R, Hatori S. eXPRESS Polym Lett, 2016, 10: 15~24.
[13] Bandreddi M, Nunn R, Malloy R. SPE Annual Technical Conference Paper. San Francisco, CA: University of Massachusetts, 1994.
[14] Xi G D, Liu F, Zhou H M. J Mater Eng Perform, 2008, 17: 422~427.
[15] 韩健, 李刚, 陈静波等. 塑料工业, 2007, 35: 23~26.
[16] 施飞, 朱宇明. 中国塑料, 2013, 27 (11): 100~104.
[17] 邓潮玉, 邱逊, 齐永杰. 模具制造, 2013, 3: 21~37.
[18] 周大路. 现代制造工程, 2012, 1: 96~99.
[19] 邱庆军, 蒋炳炎, 陈磊, 楚纯, Kirchberg S. 塑料工业, 2012, 40(7): 35~39.

Research Progress of Residual Stresses of Injection Products

LI Ting-jian* , ZHU Hui, FAN Li, YANG Li, ZHANG Jie

(Sichuan University, College of Polymer Science & Engineering, Chengdu 610065, China)

Abstract: As there is often a certain deviation between actual process conditions and the ideal conditions, after shaping the product there are usually some unavoidable defects, and the residual stress is the most common one. Residual stresses of injection products are the still remained inner stresses even though the outer restrictions have been removed, easily causing warpage, deformation or even crack that will mainly do harm to the parts in many cases when the products get used. So it is important to pay attention to the influence of residual stresses when designing plastic products. This article is mainly to give a relatively detailed introduction to residual stresses, surrounding by their generating, measuring, and decreasing as well as computer simulating.

Key words: Residual stress; Measurement of residual stress; Moldflow