

注射成型大尺寸透明平板的应力、翘曲及收缩分析

陈宇宏¹ 袁 渊¹ 张宜生² 李 曦³ 詹茂盛³

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 华中科技大学, 武汉 430074; 3. 北京航空航天大学, 北京 100083)

摘要 根据透明平板注射成型的特点, 建立了残余应力计算模型和翘曲计算模型, 采用 HsCAE 软件的相应模块对大尺寸透明平板注射过程中的残余应力、翘曲变形及收缩进行了分析。结果表明, 平板边缘的残余应力和厚向收缩率较大; 而中间区域的残余应力和厚向收缩率小且比较均匀; 平板中间区域的翘曲变形量最大, 且沿平板平面向四周均匀递减。同时进行了平板的注射成型试验, 通过实测平板的外形尺寸进一步验证了模拟结果。

关键词 注射成型 残余应力 收缩率 翘曲

传统大尺寸透明件的成型方法一般为板材热成型, 生产周期长、产品可设计性差、难以成型出三维(3D)外形精确控制的透明件。国外从 20 世纪末开始采用注射成型方法制造大尺寸透明件。注射成型的特点是周期短, 生产效率高, 易实现自动化, 设计自由度大, 可以制造出外形复杂、尺寸精确可控的制件, 是一种高性能低成本技术。

注射成型大尺寸透明件典型的应用方向是飞机领域和汽车领域。尤其是在汽车领域, 透明件注射成型技术发展迅速^[1-2]。2006 年 6 月美国国家公路运输安全管理局批准了注射成型聚碳酸酯(PC)车窗可用于汽车^[3]。同年, 注射成型 PC 车窗首先在德国奔驰公司生产的一款 Mercedes 车型和日本本田公司的一款 Honda Civic 车型上得到使用^[4]。

光学性能是透明件最重要的性能指标之一, 其影响因素甚广, 其中与注射成型工艺有关的因素包括制件的残余应力、收缩、翘曲变形等。残余应力可能影响透明件的双折射和光学畸变, 收缩和翘曲变形则有可能影响到透明件的光学畸变和角偏差。实际上残余应力、收缩和翘曲变形三者之间是相互影响的, 残余应力会导致翘曲变形, 收缩不均也会产生翘曲变形。因此必须全面研究注射成型透明件的残余应力、翘曲及收缩特性。

笔者从“十五”期间开始进行大尺寸透明件的注射成型技术基础研究^[5-6]。现以大尺寸透明平板的注射成型为例, 通过注射成型模拟和注射成型实验, 全面分析了注射成型平板的残余应力、翘曲变形及收缩, 为获得高光学性能的注射成型大尺寸透明件奠定了基础。

1 注射成型模拟

1.1 计算模型

透明平板的翘曲变形模拟分析软件采用华塑

CAE 残余应力和翘曲变形分析模块。其中残余应力分析采用线性粘弹性模型, 翘曲分析采用基于薄壳理论的平板型壳元模型。

(1) 残余应力计算模型

应力分析采用线性粘弹性模型。该模型可以比较精确地描述注射成型过程中材料的应力应变关系和应力松弛现象。保压和冷却阶段, 线性粘弹性模型的应力可以表示为静水压力和应力偏张量之和^[7-8], 即:

$$\sigma_{ij} = -p_h \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$p_h = -\frac{1}{3} \text{tr} \sigma = -\int_{-\infty}^t [G_1 [\xi(t) - \xi(t')]] \left[\frac{\varepsilon_m}{t'} - \frac{\varepsilon_h}{t} \right] dt \quad (2)$$

式中: σ_{ij} ——线性粘弹性模型的应力;

p_h ——静水压力, 即应力球张量的负值;

δ_{ij} ——kronecker 符号;

τ_{ij} ——应力偏张量;

$\text{tr} \sigma$ ——应力张量 σ 对角线上的数值之和;

G_1 ——体积松弛模量函数;

$\xi(t)$ ——材料时间函数;

t, t' ——时间变量;

ε_m ——应变球张量;

ε_h ——温度变化引起的热应变。假设塑料为各向同性材料, 应力偏张量表示为:

$$\tau_{ij}(t) = -\int_{-\infty}^t [G_2 [\xi(t) - \xi(t')]] \frac{\varepsilon_{ij}^d}{t'} dt' \quad (3)$$

式中: G_2 ——剪切松弛模量函数;

ε_{ij}^d ——应变偏张量。

* 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA03Z534); 总装预研项目(51312020114)

收稿日期: 2008-06-30

(2) 翘曲计算模型

注射平板的长度和宽度两个方向尺寸比厚度方向尺寸大1个数量级以上,因此可以看作薄壳结构。薄壳的变形可以看作是三角形薄板的平面内变形和弯曲变形的组合。因此翘曲计算模型可以看成是平面膜元和弯曲板元组成的平板型壳元模型。

在翘曲变形模拟分析中,平面内变形计算采用平面膜元中的常应变单元(CST),协调条件易于满足。而弯曲单元采用基于 Kirchhoff 小挠度理论的 BCIZ 单元,这种单元是三角形薄板弯曲非协调单元,对于薄板计算具有良好的特性。这样,面内载荷仅由常应变三角单元的面内刚度承受,只引起面内变形,侧向载荷由 Kirchhoff 三角单元的弯曲刚度承受,只引起弯曲变形,进行线性叠加可计算注射制品的翘曲变形^[9-11]。

对于平面应力作用,单元方程为:

$$K^{ep} a^{ep} = W^{ep} \tag{4}$$

式中: K^{ep} ——平面单元刚度矩阵;

a^{ep} ——平面节点位移参数;

W^{ep} ——平面等效节点载荷矩阵。

对于弯曲作用,单元方程为:

$$K^{eb} a^{eb} = W^{eb} \tag{5}$$

式中: K^{eb} ——弯曲单元刚度矩阵;

a^{eb} ——弯曲节点位移参数;

W^{eb} ——弯曲等效节点载荷矩阵。

将两部分刚度矩阵组合,就得到局部坐标系下的平板壳元单元刚度矩阵。转换到整体坐标下,得到整体的有限元方程:

$$Ka = W \tag{6}$$

式中: K ——整体刚度矩阵;

a ——待求的整体位移分量列阵;

W ——整体载荷矩阵。

(3) 收缩率计算

为了便于与实验值进行比较,收缩率计算采用了与实验测量相同的方法。

$$S = (d_{mold} - d_{product}) / d_{mold} \times 100\% \tag{7}$$

式中: S ——收缩率;

d_{mold} ——模具尺寸;

$d_{product}$ ——成型冷却后制品实际尺寸。

1.2 数值模拟

透明平板的应力、翘曲变形和收缩率直接采用 CAE 进行计算。具体通过三维网格划分,节点配对,设置边界条件等前处理过程,实现制品应力与翘

曲的数值模拟。

透明平板外形尺寸为 400 mm ×300 mm ×12 mm。注射成型用材料为 PC,模拟需用的性能参数及推荐的工艺参数如表 1 所示。

表 1 PC 的性能数据

项 目	数 据
成型温度/℃	280 ~320
模具温度/℃	80 ~100
最大许可剪切应力/MPa	0.5
密度/kg·m ⁻³	1119.65
导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.17
比热容/J·(kg·K) ⁻¹	1700
横向热膨胀系数/K ⁻¹	0.000077
纵向热膨胀系数/K ⁻¹	0.000077
弹性模量/MPa	2446
泊松比	0.35

2 平板的注射成型

2.1 主要原料

PC:自制。

2.2 主要设备

电热鼓风干燥箱:101-3AB 型,天津泰斯特仪器有限公司;

注塑机:680 型,美国 Milacron Plastics Technology Group 公司;

平板注射模具:自制;

三坐标测量仪:global status 9128 型,美国 Brown & Sharpe 公司。

2.3 注射成型工艺

将粒料放入烘箱进行干燥处理,干燥温度为 105 ~125℃,时间为 20 ~24 h,然后用注塑机注射成型。模具温度为 80 ~120℃,注塑压力为 30 ~70 MPa,注射温度为 280 ~320℃。

3 结果与讨论

3.1 基于注射模拟的分析结果

(1) 平面应力分布

沿流动平面方向的应力(即平面应力)分布计算结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,出模残余应力区间为 7.40 ~21.24 MPa。对于平板主体(400 mm ×300 mm)部分,与扇形浇口相连的边缘部分的残余应力最小,为 7.40 MPa;其它三条边的残余应力较大,在 12 ~17 MPa 之间,4 个角的残余应力最大,约为 17 MPa;而不包括边缘的中间区域(约 380 mm ×280 mm),其残余应力较小,约为 10 MPa,而且比较均匀。这是平板边缘与平面中心部的温度差形成的冷却不同步造成的。

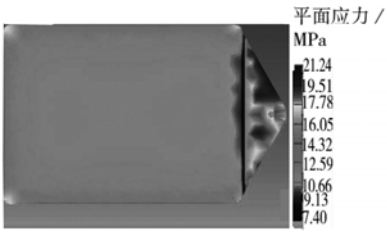


图 1 注射平板的平面应力分布

图 2 是冷却过程的平板截面平均温度分布。由图 2 可见, 四角及边缘温度较低, 冷却较快; 而中间区域的温度分布较均匀, 冷却速度一致, 因此残余应力小且均匀。说明在合理的注射工艺条件下, 如果不考虑边缘效应, 可以获得残余应力较小且分布较均匀的透明平板, 而这种残余应力分布特征对透明件十分重要, 它是获得高光学性能的重要基础。

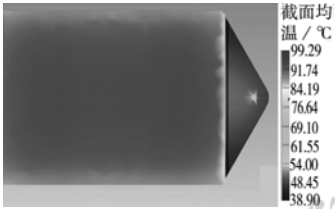


图 2 冷却过程的平板截面平均温度分布

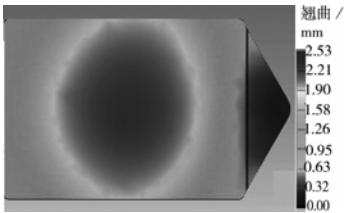


图 4 注射平板的翘曲变形量

3.3 基于平板注射成型分析结果

图 5 是实际注射成型的 PC 平板样件。通过采用三坐标测量仪, 对平板的几何尺寸进行了测量 (精度 0.01 mm), 结果见图 6。由图 6 可以看出, 最大凹陷值为 0.8 mm。平板表面中部突起但高度均匀, 为 0.02 ~ 0.40 mm, 边缘处有一个凹陷带, 深度为 -0.4 ~ -0.2 mm, 四角处的变形严重。对三坐标测量的数据点云的三维局部放大显示 (图 7), 在制品边缘的收缩、翘曲变形总体趋势呈现先凹后凸的态势。收缩和翘曲的实测结果与注射模拟结果基本一致。

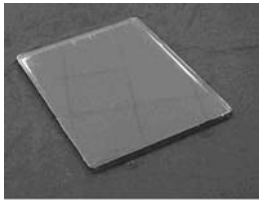


图 5 注射成型平板样件

(2) 厚向收缩率

厚向收缩率即平板沿厚度方向的收缩率, 其分布计算结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 厚向收缩率分布区间为 0.20% ~ 1.85%。对于平板主体 (400 mm × 300 mm) 部分, 边缘收缩率较大, 为 1.64% ~ 1.85%; 而中间区域的收缩率约为 1.4%, 而且比较均匀。这种收缩特点同样是由于平板边缘与平面中心部的温差形成的冷却不同步造成的。由于中间区域的厚向收缩率小, 边缘的厚向收缩率大, 所以中间的厚度应该比四周要厚, 即中部稍凸、边缘略薄。

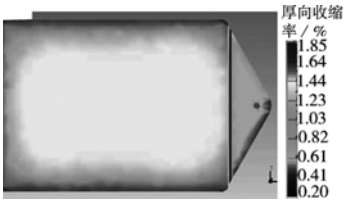


图 3 注射平板的厚向收缩率

3.2 翘曲变形量

若以浇口处为原点, 翘曲变形量预测值为 0.32 ~ 2.53 mm, 如图 4 所示。由图 4 可见, 平板中间区域的翘曲变形量最大, 对于平板的注射成型, 翘曲难以避免。从平板中心翘曲变形量最大处开始, 翘曲量基本上是均匀地沿平板平面方向向四周递减, 这

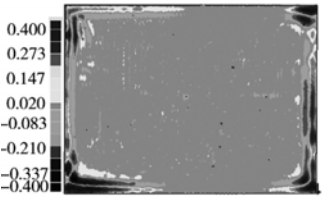


图 6 平板几何尺寸的测量结果

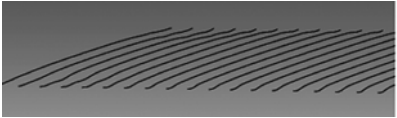


图 7 三坐标测量仪测量的数据点云的三维局部放大图

实际残余应力的定量测量受到了限制, 未能测

出准确的数值,但由于收缩和翘曲在很大程度上受到残余应力的影响,这两者的实测结果与注射模拟结果较好地吻合,也间接证实了残余应力的数值模拟。

4 结论

(1) 注射模拟表明,平板边缘的残余应力较大,尤其4个角的残余应力最大,而中间区域的残余应力较小且比较均匀;边缘的厚向收缩率大,中间区域的厚向收缩率小且均匀,这是平板边缘与平面中心部的温度差形成的冷却不同步造成的。

(2) 注射模拟表明,平板中间区域的翘曲变形量最大,从平板中心翘曲变形量最大处开始,翘曲量基本上是均匀地沿平板平面方向向四周递减。

(3) 注射成型平板的实测结果证实了注射模拟结果。几何形状测试表明,平板表面呈中部突起、边缘凹陷的形状,四角处的变形较为严重。

(4) 注射模拟和实测结果综合表明,平板的中间区域,具有较低且均匀的残余应力和厚向收缩率,同时翘曲变形量从中心沿平板平面方向向四周均匀递减。

参考文献

[1] Fuller D B, Penunuri B L, Taylor T A. Development of forming process for frameless aircraft transparencies [R]. AFWAL-TR-88-3071. [S. L.]: [s. n.], 1988.

[2] McCarty R E. Next generation transparency (NGT) program [C] // Proceedings of the 1996 34th Annual Symposium Safe Association. USA: Reno, 1996: 469-477.

[3] Plastics Technology Group. A wider window opens for PC auto glazing [J]. Plastics Technology, 2006, 52(1): 56.

[4] Mikell Knights. Auto glazing window of opportunity for molders [J/OL]. <http://www.ptonline.com/articles/200604fa1.html>.

[5] 陈宇宏. 新一代飞机透明件的直接成型技术研究 [J]. 材料工程, 2001(增刊): 230-232.

[6] 陈宇宏. 大尺寸透明件注射成型技术的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2007, 35(9): 72-75.

[7] Bushko W C, Stokes V K. Solidification of thermo-viscoelastic melts. Part I. Formulation of model problem [J]. Polymer Engineering and Science, 1995, 35(4): 351-364.

[8] 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.

[9] Guo Zhiying, Ruan Xueyu, Peng Yinghong, et al. Warpage of injection-molded thermoplastics parts: Numerical simulation and experimental validation [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(2): 138-144.

[10] Zhou Huamin, Li Dequn. Numerical simulation and experimental study of warpage of injection-molded parts [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2005, 44(4): 603-617.

[11] Li Dequn, Zhou Huamin. Modeling and simulation of residual stress and warpage in injection molding [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2004, 218(5): 521-530.

RESIDUAL STRESSES, WARPAGE AND SHRINKAGE ANALYSIS ON INJECTION MOLDED LARGE-SIZE TRANSPARENT PANEL

Chen Yuhong¹, Yuan Yuan¹, Zhang Yisheng², Li Xi³, Zhan Maosheng³

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

ABSTRACT Numerical models of residual stresses and warpage were established upon the characteristics of injection molding for transparent panel. HsCAE software modules were adopted to analyze residual stresses, warpage and shrinkage of injection molded large-size transparent panel. The results showed that residual stresses and thickness shrinkage in central zone of the transparent panel were much smaller and evenier than in the panel edge, and warpage reached its maximum in pane centre and decreased uniformly from the centre to the surroundings. Panels were injection molded, and the test results verified the numerical simulations.

KEYWORDS injection molding, residual stress, shrinkage, warpage

沙伯基础创新塑料 10 种阻燃材料获得 VDE 认证

最近沙伯基础创新塑料宣布全系列的阻燃材料通过德国测试机构 VDE(德国电气工程师协会)的认证,此举可以简化监管部门的审批程序,从而帮助家电厂商加快产品上市时间。

这 10 种材料已经成功通过了 VDE 关于智能家电的 IEC 60335 标准测试,尤其是 VDE 近期引入用于评估阻燃性的灼热丝点燃测试(GWIT),因此厂商无需耗费时间和资源来对

塑料零件进行额外的测试。获得认证的材料包括: Noryl NH6020 树脂、Noryl NH7010 树脂、Cycoloy CX7240 树脂、Cycoloy CY6110 树脂、Lexan ML6411 树脂、Lexan 945A 树脂、Starflam RF0055E 复合材料、Valox V9561 树脂、Valox 771 树脂、Valox ENH4550 树脂。这些材料适用于智能电器(与高于 0.2A 的活动连接之间的距离小于 3 mm)中的任何塑料件。目标应用包括 PCB 卡片支架、接线板、连接器、电路保护、继电器、开关、电机端盖、控制盒、控制面板、充电器和保险丝支架。(聚合物网)