

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.001

有限元网格质量和材料黏度模型 对注塑件翘曲分析的影响

虞俊波¹, 周小林², 邓常乐², 刘 军¹, 王 骥^{1*}

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波富佳实业有限公司, 浙江 余姚 315400)

摘 要:利用 Moldflow 分析了吸尘器轴承座的成型过程,通过细化构件的有限元网格和对比网格质量,检验了有限元分析结果收敛性,确认需要结合网格质量来改进计算过程。构件变形的有限元分析结果与实测数据进行比较,在最大翘曲的估计方面效果较好,显示了对注塑过程和构件进行精确分析的重要性。文中也尝试采用不同的黏度模型对注塑件翘曲进行分析,保证分析方法的一致和完整,为基于有限元分析的模具设计和加工过程优化积累经验。

关 键 词:注塑成型;有限元;翘曲;网格质量;黏度模型

中图分类号:TQ320.66

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)02-0001-05

Effects of Mesh Quality and Viscosity Models on Warpage Analysis of Plastic Injection Parts

YU Junbo¹, ZHOU Xiaolin², DENG Changle², LIU Jun¹, WANG Ji^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. Ningbo Fujia Industrial Co., Ltd., Yuyao, Zhejiang 315400, China)

Abstract: Moldflow was used to analyze the injection moulding process of a vacuum bearing stand, and we checked the convergence of the results of finite element analysis was checked by refining mesh and examining the mesh quality, and mesh quality was confirmed that it was the key for the improvement of computing process. Through comparing finite element analysis results and measured data, we can obtain confidence in estimating maximum warpage, showing the importance of accurate analysis. We have also tried using different viscosity models in warpage analysis to accumulate experience for analysis of the mold design and process optimization based on the finite element analysis.

Key words: injection molding; finite element; warpage; mesh quality; viscosity model

注塑件的精确分析是一个复杂过程,限制因素包括不太完整的材料参数、塑料的相变过程、温度效应、初始应力效应、材料黏性等,也需要合理的计算模型和计算技术的熟练应用^[1]。而文中主要讨论有限元网格和材料黏性对最大翘曲的影响,根据分析结果,正在进行工艺优化和模具改进方面的研究,有望产生更多的实际效果。文中使用的主要软件包括 Moldflow 和 ProE,这些软件和材料库都经过广泛工程验证,完全可以满足选定的工件和工艺过程的分析。在实验方面,加工技术资源和模拟环境都经过确认,保证了实际测试数据和计算结果验证的可靠基础。在这项研究中,

宁波大学和富佳公司对研究方案、产品选择、工艺过程等进行了反复论证和确认,最终选择了本文的分析方式 and 研究计划^[2-4]。

1 工件有限元模型和网格划分实验

1.1 工件有限元模型

根据塑料模具设计和工件形状的精确分析的目标,需要考虑的是:①工件形状和加工过程要便于建模;②选用的工件容易产生明显的翘曲缺陷,便于比较不同因素对翘曲分析的影响;③工件有适当的特征尺寸作为评判翘曲量的标准;④工件经过注塑加工后产生的翘曲能较为方便地用工具测量^[5]。综合以上考

收稿日期:2013-10-09;修回日期:2013-10-22

作者简介:虞俊波(1989),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为注塑成型的工艺优化。E-mail:yujunbo21@163.com

虑,选用的注塑件模型为塑料轴承座,如图 1 所示。该塑件属于板类塑料件,翘曲是其最重要的指标,不合理的翘曲会导致塑件的装配问题及其在实际工况下的应力集中。塑料轴承座在吸尘器结构中起承重的作用,需要较大的刚性和硬度,同时要有高耐热稳定性和非常好的尺寸稳定性。塑料轴承座的小尺寸结构比较多,所以必须在完全填充这些小尺寸结构的前提下,缓解该塑料件的翘曲问题。制件尺寸大约为 300 mm × 200 mm × 15 mm,壁厚约为 2.5 mm。使用的材料为 ABS PA-747,材料及其参数由台湾奇美实业有限公司提供。

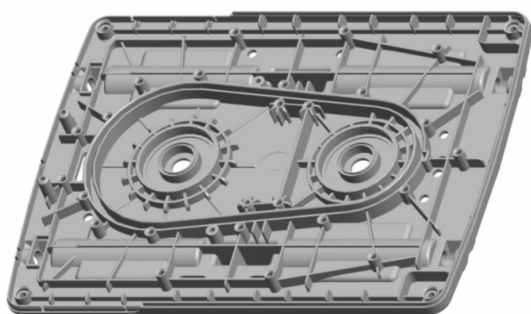


图 1 塑料轴承座三维模型

Figure 1 3D model of plastic bearing stand

为了让模拟能够尽量接近真实工艺过程,必须考虑注塑过程冷却不均对翘曲的影响,所以我们建立相应的冷却系统如图 2 所示。所用的冷却液为纯水,入口处冷却液温度为 25 ℃。浇口方案选择直接浇口,浇口数为 1,流道系统选择热流道。熔体温度为 215 ℃,注塑周期为 55 s(开模时间为 5 s,注射 + 保压 + 冷却时间为 50 s)。

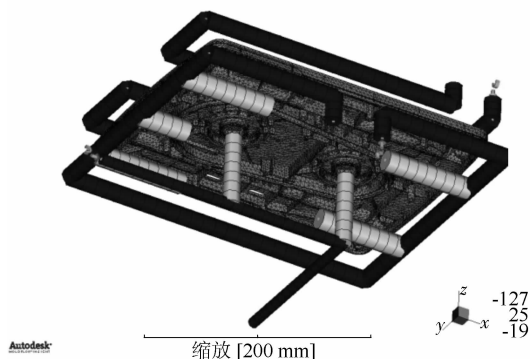


图 2 塑料构件网格划分和冷却系统的设计

Figure 2 Meshing of plastic component and design of the cooling system

1.2 工件网格划分

为了研究构件网格对翘曲分析结果的影响,并且

验证分析结果的收敛性,分别将模型网格全局边长设置为 10 mm,5 mm,3.5 mm,3 mm 和 2.5 mm 建立模型。网格边长越小,网格就越密,计算精度可以得到改善,但后续的计算量也就越大。文中用 Moldflow 模拟 5 组实验,从计算结果中提取了 z 轴方向上的翘曲。采用 5 mm 网格边长的翘曲分析结果如图 3 所示。一般来说,网格的优劣的评判主要看网格纵横比,在许多有限元软件中都有相应的简单网格评价功能, Moldflow 三角形网格的纵横比范围为 1.16 到无穷大,纵横比越小,单元形状越接近正三角形,网格质量就比较高。而 Moldflow 有自己特定的评判标准,即网格匹配率。上述实验组的纵横比低于 3,匹配率高于 85%,符合计算模拟的基本要求。

在实际测量翘曲时难以测量产品脱模前后的全局翘曲变化,为了研究分析结果和实测结果的差异,必须另外选取合适的特征尺寸作为指标,从而比较网格密度对翘曲结果的影响^[6]。在各组模拟结果中,最大翘曲发生在左侧两个端角,是因为这两处离浇口最远,中间孔洞结构阻碍熔体的流动,加上压降较大,使之收缩不均匀导致最大翘曲。长边中间部分的翘曲变化比较平稳,趋向于水平,所以选取左侧最大翘曲处到长边中点这条路径上的翘曲值作为衡量指标^[7]。根据五组计算模拟结果绘图,如图 3 所示。

从图 3 的翘曲分布中可以看出,在翘曲值较小的区域内,5 组模拟结果曲线基本重合,也就是说对变形的预测较为准确。在翘曲较大的区域内,5 组模拟翘曲量存在着程度不同的差异。并且,可以看出 3 mm,5 mm 和 10 mm 3 组网格计算模拟结果对最大翘曲值的预测相差较大,说明网格密度极大地影响了最大翘曲的计算结果。2.5 mm,3 mm,3.5 mm 3 组实验的曲线基本重合,在最大值差位于 0 mm 处,约为 0.011 6 mm,仅为计算模拟最大翘曲值的 1%,此时模拟计算结果已经不会随着网格密度产生明显变化了,继续细化网格已无实际意义。由此可见,模拟计算结果会随着网格密度改变而改变,但是计算结果的变化率随着网格加密而趋于平稳,最后计算结果达到收敛。

为了进一步研究模拟结果与实测结果的差异,用相同的模具结构和工艺参数生产产品实物,并对产品进行测绘。使用的注塑机型号为海天塑机公司 SA3200/1700u。对构件实物进行测绘时,以翘曲变化不明显区域的垂直方向作为法线方向,使用 Faro-PT8 便携式三坐标激光扫描测量臂采集变形后的制件曲面的数据点,测量臂如图 4 所示。由于激光扫描技术是

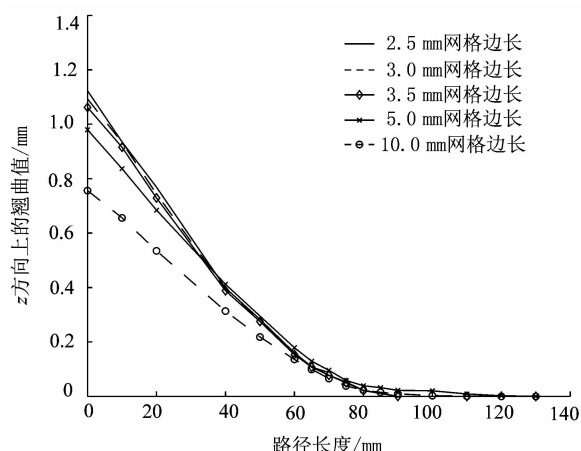


图3 不同网格密度下选定路径上的翘曲结果

Figure 3 Warpage results on the selected path in different mesh density

非接触式测量,可以避免接触形变造成的误差,从而得到较为可靠的数据。选取 2.5 mm, 5 mm 和 10 mm 的模拟结果与实测结果进行比较,结果如图 5 所示。

由图 5 可见,翘曲的实测值略大于各组模拟值,并且随着网格密度的增加,模拟结果向实测结果靠近。由轴承座的例子可知, Moldflow 翘曲分析在这个实例中或多或少地低估了塑件翘曲变形的程度,这是因为实际生产中还存在许多干扰因素,例如注塑机老化导致的保压压力偏低、工艺过程控制不准、材料参数不精确或不全面等。模拟结果在 2.5 mm 网格边长下基本收敛,收敛时的最大翘曲模拟值与实测值的最大误差约为 0.1 mm,不到最大翘曲值的 10%。当计算结果收敛时, Moldflow 的计算误差在工程上是可以接受的。这为 Moldflow 进行注塑成型的精确分析提供了有力支持,也是模具结构优化和工艺参数优化的先决条件。由上述分析可知,网格密度越高, Moldflow 对流动和保压的分析越接近实际过程,翘曲分析的精度也越高。

有限元分析精度随着网格密度提高而提高,但是随着网格细化,分析所需的时间明显增长,10 mm 网格的分析需要 22 min, 5 mm 网格的分析需要 65 min, 而 2.5 mm 网格的分析需要 273 min。网格加密虽然提高了翘曲分析的精度,但必然会造成计算分析时间延长,对计算机硬件设施要求也提高。并且,当网格密度足够大时,细化网格所带来的模拟结果精度的提升程度并不大,计算结果已基本收敛。在网格划分的时候,可以选择性地细化复杂结构的网格,在精度和计算效率之间取一个平衡点。现有的许多软件都具备在先进并行计算机上完成计算的功能,但是能否对结果带来改



图4 Faro-PT8 便携式三坐标激光扫描测量臂

Figure 4 Faro-PT8 portable three-dimensional laser scanning measuring arm

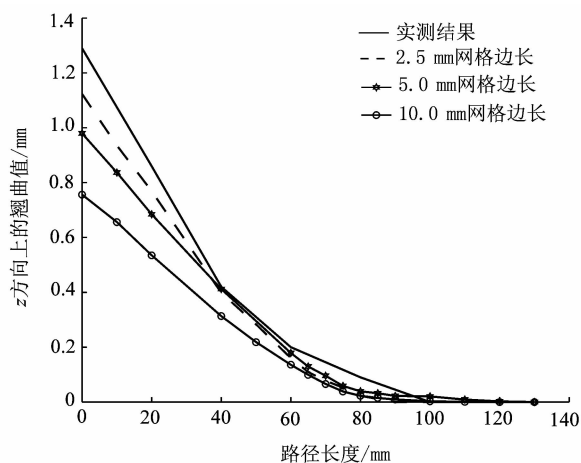


图5 选定路径上实测翘曲值和模拟翘曲值的比较

Figure 5 Actual warpage and simulation results on the selected path

善,需要作进一步研究,并考虑实际应用环境和需求。

2 黏度模型对翘曲分析的影响

在塑料熔体充模过程中,熔体的流动速率和黏度以及型腔壁厚在不断改变,对于成型有显著影响。这里流动速率的改变归因于熔体的可压缩性、可能采用的多级注射、熔体黏度和流道厚度等因素。在求解流动过程时,弹性和可压缩性对流动的影响通常被忽略,因为假设其影响很小。流动状态最明显的影响因素是熔体黏度和流道厚度。幂律模型是工程计算中广泛应用的黏度模型,但是其表达有剪切速率的限制,它不能预测在很低和很高剪切速率时的塑料熔体流动特性。在注塑的保压阶段,聚合物熔体流动缓慢,剪切速率较

低,幂律模型不适合用于此时的流动特性。

熔体黏度模型是描述剪切速率对聚合物熔体黏度的影响的数学模型,是模拟熔体流动所必需的。在 Moldflow 中有 2 种黏度模型,分别是 Cross-WLK 模型和二次多项式模型^[8-10],在实际应用中也很普遍。

Cross-WLK 黏度模型的表达式为

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 - \left(\frac{\eta_0 \gamma}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (1)$$

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[\frac{-A_1 (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad (2)$$

其中

$$T^* = D_2 + D_3 \cdot P \quad (3)$$

$$A_2 = A_2^* + D_3 \cdot P$$

这是一个七参数黏度模型, $n, \tau^*, D_1, D_2, D_3, A_1, A_2^*$ 为数据拟合系数。其中 T^* 是一个参考温度,通常被认为是材料的玻璃化温度, D_1, A_1 为模型常数, A_2 为简化模型的中间参数, D_2 则对应低压下的玻璃化温度, D_3 是压力影响系数。 T 为温度, η 为黏度, γ 为剪切速率, P 为压力。

二次多项式模型的表达式为

$$\ln(\eta) = A + B \ln(\dot{\gamma}) + CT + D[\ln(\dot{\gamma})]^2 + E \ln(\dot{\gamma})T + FT^2 \quad (4)$$

其中, T 为温度, η 为黏度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, A, B, C, D, E 和 F 为数据拟合系数。二次项模型还需要定义最小剪

切速率和最大剪切速率,用于确定黏度计算中使用的剪切速率值的下限和上限。如果局部剪切速率小于下限,将使用下限来计算黏度,而不使用实际值。同理,任何高于上限的主要剪切速率都将被截断为等于上限,这样会在黏度曲线中创建平顶区域。

利用台湾奇美公司提供的 ABS PA-747 黏度模型参数,分别定义 Cross-WLK 黏度模型和二次项黏度模型,保持其他条件相同,使用 Moldflow 计算 z 轴方向上的翘曲结果,如图 6 所示。从这里可以发现,图 6(a) 中的最大翘曲发生在左侧 2 个端角,中间部分下凹不明显。利用二次多项式黏度模型计算得到的结果如图 6(b),最大翘曲发生在右侧 2 个端角,中间部分有严重的下凹。为了分析 2 个黏度模型的合理性,需要将翘曲分析结果与实际结果进行比较。实际产品中间部分平整,未出现下凹缺陷,且最大翘曲出现的位置与图 6(a) 相同,显示出 Cross-WLK 黏度模型的计算结果稍优。究其原因,是因为二次多项式模型只考虑黏度对温度和剪切速率的依赖性,没有考虑压力对黏度的影响,这在 55 MPa 的注射压力下并不合适。Cross-WLK 模型则引入了压力参数,在注射压力较大的情况下,能更准确地描述 ABS PA-747 的黏度特性。由此可见,我们可以在后续的研究中结合实验对 Cross-WLK 模型进行必要的修正,并考虑工艺过程的特点,最终保证分析结果的可靠性。

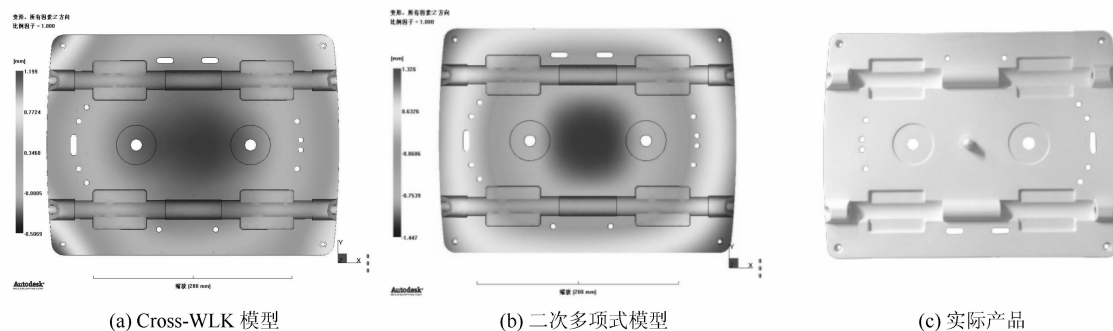


图 6 翘曲分析结果与实际塑件翘曲的比较

Figure 6 Comparing simulation results with the actual warpage

3 结论

网格划分是有限元分析的基础,网格质量和 Moldflow 翘曲分析结果有密切的关联性,网格质量直接影响后者的准确性,网格缺陷更会导致计算不收敛。黏度模型直接影响流动分析和保压分析的结果,进而对翘曲分析造成影响。结合上述计算结果可知:

1) 网格适当加密,数值模拟就越接近实际注塑过程,需要将网格加密到足够程度,保证模拟结果收敛。

然而网格密度增大势必增加计算量,所以须要灵活地细化网格,使翘曲分析兼具精确性和计算效率。

2) 由轴承座的例子可知, Moldflow 翘曲分析会或多或少地低估塑件翘曲变形的程度,这是因为实际生产中还存在许多干扰因素,例如注塑机老化导致的保压压力低于设定值、材料参数不精确或不全面等。但如能建立在一定的误差下准确预测翘曲的模式,在产

(下转第 8 页)