Moldflow在注塑成型模拟分析中的应用

The application of Moldflow in injection molding

文/ 严志云 谢鹏程 丁玉梅 杨卫民

摘 要： Moldflow公司是专业从事塑料计算机辅助工程分析(CAE)的跨国性软件和咨询公司，随着Moldflow在世界范围内不断被倍受重视及广泛使用，Moldflow的应用领域已推广到光学仪器、航空航天、半导体、医疗机械、计算机、电子通讯、玩具、家用电器、汽车等领域。本文介绍了Moldflow公司的发展历史、主要产品及Autodesk Moldflow Insight的分析模块，介绍了Moldflow双面网格和3D网格对应的充模流动数值模型，并通过三个实例介绍了Moldflow在注塑成型模拟分析中的应用，实例说明通过Moldflow可以优化注塑制品结构、浇注系统和注塑工艺参数，从而为改善注塑制品质量提供一定的参考。

关键词： 注塑成型 CAE Moldflow 数值模拟 风扇 齿轮

Abstract: Moldflow is a corporation which is specializing in plastic computer aided engineering analysis (CAE) and consulting. The applications of Moldflow has been extended to areas such as aerospace、instruments、semiconductor、medical、mechanical、computer、electronic communications、toy、automobile、household appliances. This paper introduces the history of Moldflow and its main products, and the numerical models of fusion and 3D mesh type are also included. Three examples are present to show how Moldflow is using in injection molding simulations, the examples also show that Moldflow can help to optimize the structure of product and gating system and provide a reference to the injection molding processing optimization.

Keywords: Injection molding CAE Moldflow Numerical Simulation Fan Gear

Moldflow介绍

Moldflow软件是专业从事注射成型CAE软件和咨询的Moldflow公司的系列产品。Moldflow公司创建于澳大利亚墨尔本，1975年Moldflow公司的创始人Colin Austin着手开发商业化的分析软件，1978年，他建立了Moldflow公司并发行了世界上第一套流动分析软件。2000年，Moldflow公司在美国的NASDAQ成功上市，同年，Moldflow公司合并了美国AC-Tech公司及其产品C-MOLD。2008年，Moldflow被总部位于美国加州San Rafael的设计软件开发商Autodesk（欧特克）公司收购，商标成为Autodesk Moldflow，旗下主要产品包括：Autodesk Moldflow Advisers(Moldflow塑件顾问，AMA，即原来的MPA)，Autodesk Moldflow Insight（Moldflow高级成型分析专家，AMI，即原来的MPI)；相关产品包括：Autodesk Moldflow Structural Alliance（MSA），Autodesk Moldflow Plastic Lab（MPL），Autodesk Moldflow Design Link（MDL），Autodesk Moldflow CAD Doctor。2009年4月，欧特克完成与Moldflow之整合，发布最新版Autodesk Moldflow 2010软件，这款用于模拟、分析、优化和验证塑料部件及其相关模具设计及成型工艺的软件套件引进了新的环境，可持续发展功能，并提高了模拟精度和效率。

AMA简便易用，能快速响应设计者的分析变更，因此主要针对注塑产品设计工程师，项目工程师和模具设计工程师，用于产品开发早期快速验证产品的制造可行性，AMA主要关注外观质量（熔接线、气穴等）、材料选择、结构优化（壁厚等）、浇口位置和流道（冷流道和热流道）优化等问题。

AMI用于注塑成型的深入分析和优化，是全球应用最广泛的模流分析软

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

件。AMI使用户可以对制件的几何形状、材料的选择、模具设计及加工参数设置进行优化以获得高质量的产品。

MSA可以使用户在ABAQUS或ANSYS等结构软件的分析中考虑到注塑成型的加工工艺对注塑成型的产品的结构性能的影响。通过MSA将材料的各向异性属性以及AMI或AMA分析所获得的流动特性输入到结构分析软件中，用户可更准确的获得所设计的塑胶产品的机械属性和机械性能，可以在设计初期更好的优化产品的设计并减少可能的设计变更。

Autodesk Moldflow 材料实验室(MPL)为所有Moldflow用户提供艺术级的材料测试服务，专家级的材料数据拟合服务，并持续的为Moldflow所有分析软件提供最广泛的材料数据库。

Autodesk Moldflow Design Link (MDL)是Moldflow产品系列中重要的数据链接工具。通过它Moldflow各产品不仅可轻松读取IGES、STEP、Stereo Lithography(STL)等格式的3D模型，还可直接读取Parasolid（UG）、Pro/E、I-DEAS、CATIA、Solidworks等高端CAD软件的最新版本的3D模型，同时对于其它结构分析CAE软件如Ansys、Patran、Nastran、ABAQUS、LS-DYNA、Hyper-Work等生成的网格模型也可以通过MDL导入到AMI中作进一步分析。另外在MDL6.0以后除了支持数据模型转换的传统功能外，还增加了以下的全新功能：（1）以CAD实体驱动为核心的网格生成方式；（2）多部件（装配模型）的直接导入和网格的自动划分；（3）直接划分3D实体网格；（4）狭长特征的去除。

Autodesk Moldflow CAD Doctor是一款强大的模型准备工具，可以检查，修复，调整和简化实体模型或IGES曲面模型，通过与MDL结合，CAD Doctor可导入目前所有主流的三维CAD/CAM软件所生成的3D模型。Cad Doctor生成的高质量的实体或曲面模型可以直接导入到AMI或AMA以便于快速的构建出高质量的有限元网格模型，在提高前处理的速度的同时有效的提高分析的准确性。目前最新的CAD Doctor已完全支持64位操作系统，使用户可以轻松应对超大模型的处理工作。Cad Doctor的主要功能包括：（1）对IGES曲面模型的自动修复和缝合；（2）对模型表面或几何结构的拓扑关系的调整；（3）对细小特征如圆角、斜角、凸台、凹坑、圆孔等特征的自动识别和去除；（4）对阴文或阳文等表面特征的自动识别和去除；（5）自动抽取模芯（可用于从模架中直接抽取水路或流道结构）。

一般情况下，最常用AMI（即MPI）来对注射过程进行模拟，从而得到最佳的浇口数量与位置，合理的流道系统与冷却系统，并对型腔尺寸、浇口尺寸、流道尺寸和冷却系统尺寸进行优化，并且还可以对注射工艺参数进行优化[1]。

AMI不仅可以考虑传统注塑问题，还可分析双色注塑（Over-Molding）、气体辅助注射（Gas-assistant Molding）、共注成型（Co-Injection）、注压成型（Injection-Compression）、发泡注射成型（Mucell）、光学的双折射分析（Birefringence），近期兴起的热流道动态进料系统也可在AMI中进行模拟，此外还可分析热固性材料的反应成型以及电子芯片的封装成型，AMI广泛用于汽车、医疗、3C、航空航天以及封装等所有与塑料相关的行业。AMI目前最新版本为6.2，AMI产品包括以下一些分析模块。

AMI/Synergy，它是一个前置和后置处理器，支持MPI系列产品的所有分析模块。

AMI/Flow填充和保压分析，可分析流动平衡、温度、压力、锁模力、熔接线、排气以及工艺条件优化等。

AMI/Cool优化模具冷却系统设计分析，实现均匀冷却以实现精确的产品尺寸和最小的成型周期。

AMI/Warp分析翘曲变形的形状以及翘曲变形量是否满足设计要求，也可分析产品的缩水率。

AMI/Stress整合产品成型的影响进行结构分析，从而对结构的评估更全面准确。

AMI/Fiber玻纤对产品的强度和刚度有很大影响，通过玻纤分析可准确评估玻纤排布对产品结构变形的影响。

AMI/Shrink结合工艺条件优化模具型腔尺寸的设计，分析材料实际的成型收缩率。

AMI/Gas优化气道的设计以及气辅工艺条件，确保气辅产品设计的可行性。

AMI/Co-Injection也称三明治注射，即在一种材料芯部注入另一种材料以满足质量和成本的要求。

AMI/Injection Compression对于对应力要求低的光学制品如光盘、塑料透镜，还有超薄产品有重要意义。

AMI/MuCell优化物理发泡分析，以减少产品重量，由于粘度减少提高可填充性以及减少锁模力，减少成型周期，增加产品结构性。

AMI/ Birefringence透明塑料件的双折射分析，分析各向异的残余应力对光学性能的影响。

AMI/Reactive Molding分析优化复杂的热固性交联反应成型过程。

AMI/Microchip Encapsulation分析优化电子芯片封装成型，可分析金线的漂移以及芯片架的偏移。

AMI/Underfill Encapsulation分析覆晶封装成型，可考虑反应以及焊点对填充的影响。

Moldflow充模流动数学模型

Moldflow提供三种网格类型对制品模型进行网格划分：（1）Midplane（中

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性面网格）针对薄壳件产品分析，需抽取中间面；（2）Fusion（双面网格）针对薄壳件产品分析，将需要数天抽取中间面的时间缩短为几分钟，是应用最广泛的网格类型。（3）3D（实体三维网格），可适用于所有类型产品，包括薄壳或厚壁件。

中性面网格和双面网格充模流动数学模型采用非牛顿流体在非等温下的广义Hele-Shaw流动的控制方程为[2]：

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(b\bar{u})+\frac{\partial}{\partial y}(b\bar{v})=0 \qquad (1)$$

运动方程

$$\frac{\partial P}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial z}(\eta\frac{\partial u}{\partial z})=0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y}-\frac{\partial}{\partial z}(\eta\frac{\partial v}{\partial z})=0 \qquad (3)$$

能量方程

$$\rho C_p(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y})=k\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\eta\dot{\gamma}^2 \qquad (4)$$

其中u、v分别为x、y方向的速度分量，$\bar{u}$、$\bar{v}$分别为x、y方向的平均速度，ρ为密度，c_p、k分别是比热容和热传导率，P、T分别代表熔体的压力和温度，x、y为中面坐标，z为厚度方向，$\dot{\gamma}$为剪切速率，η为剪切粘度，b为型腔半厚，t为时间。

Moldflow的3D网格基于四面体网格，塑料熔体充模流动的三维控制方程为[3]：

连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (5)$$

运动方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(2\eta\frac{\partial u}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}[\eta(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y})]+\frac{\partial}{\partial z}[\eta(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z})]-\frac{\partial P}{\partial x}=0 \qquad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}[\eta(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y})]+\frac{\partial}{\partial y}(2\eta\frac{\partial v}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}[\eta(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z})]-\frac{\partial P}{\partial y}=0 \qquad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}[\eta(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x})]+\frac{\partial}{\partial y}[\eta(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z})]+\frac{\partial}{\partial z}(2\eta\frac{\partial w}{\partial z})-\frac{\partial P}{\partial z}=0 \qquad (8)$$

能量方程

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}=\rho C_p(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z})+\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(k\frac{\partial T}{\partial z})+\eta\dot{\gamma}^2 \qquad (9)$$

其中ρ为熔体密度，x、y、z为三维坐标，u、v、w分别表示x、y、z方向的速度，P为压力，T为温度，c_p为比热容，K为热传导率，η为熔体黏度。

Moldflow默认的粘度模型为Cross-WLF模型，这一模型能在较宽剪切速率范围内反应塑料熔体流动规律，适应温度范围广，能更准确地描述伴有冷却效应的熔体流动，特别是当温度接近于玻璃花温度时，能很好拟合粘度的迅速增加，Cross-WLF粘度模型的运算式如下：

$$\eta=\frac{\eta_0}{1+(\frac{\eta_0\dot{\gamma}}{\tau})^{1-n}} \qquad (10)$$

$$\eta_0=D_1\exp[-\frac{A_1(T-\tilde{T})}{A_2+(T-\tilde{T})}] \qquad (11)$$

这也是经典的7参数模型（n，D_1，D_2，D_3，A_1，A_2），其中n是非牛顿指数，1-n表示剪切变稀曲线的斜率，D_1是剪切变稀行为开始的剪应力，D_2为对应低压下的玻璃化转变温度；D_3为压力影响系数，表征粘度对压力的依赖性，在高速高压成型分析中，比如超薄成型，必须考虑粘度的压力依赖性。A_1、A_2为模型常数；$\tilde{T}$为一个参考温度，通常被认为是材料的玻璃化转变温度。

Cross-WLF模型考虑的是剪切粘度，不考虑拉压粘度。在浇口直径变化较剧烈的情况下往往会有较明显的拉压粘度效应，造成更大的压力损失，此时需要考虑Juncture loss的Bagley修正系数C1和C2（采用3D求解器考虑Extension viscosity模型系数A和B）。如Moldflow未提供修正系数，可在Moldflow帮助中查找经验数据进行修正。如果分析时不考虑拉压粘度影响，分析的注射压力则偏低，锁模力可能会偏大。

Moldflow应用实例

Moldflow软件在注塑模设计中的主要作用包括：（1）优化塑料制品结构；（2）优化模具结构，包括最佳的浇口数量与位置等；（3）优化注塑工艺参数，确定最佳的注射压力、保压压力、锁模力、模具温度、熔体温度、注射时间、保压时间和冷却时间，以注塑出最佳的塑料制品。本文以AMI6.1（即MPI6.1）为平台介绍Moldflow在上述三方面的作用。

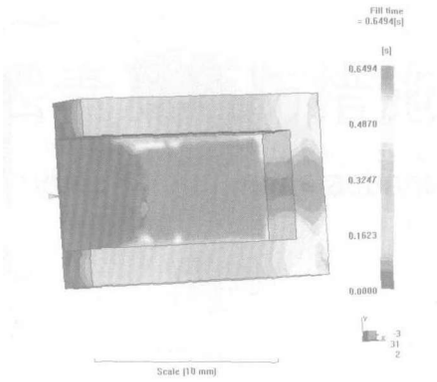


图1 壁厚不均匀模型充填结果

实例一

当制品壁厚不均匀时，通过Moldflow可以分析出其由于薄壁处阻力较大发生熔体流动迟滞现象，如图1，模型为双面网格，由填充结果可以看出其结构不合理，应通过分析填充结果使壁厚尽量均匀。

实例二

Moldflow可进行最佳浇口位置分析，如图2所示风扇模型，双面网格，最佳浇口分析结果显示在风扇中心端面。

在风扇中心端面布置单浇口，填充结果如图3所示。考虑风扇中心端面表面质量有要求，在中心端面背面筋板上布置五浇口，填充结果如图4所示，其中风扇材料为Generic PP: Generic Default，工艺参数取默认设置，进行Fill分析。

比较两种浇口方案的流动前沿温度分布结果，如图5所示，单浇口方案前沿温度范围为196.2℃-230℃，五浇口方案前沿温度范围为200.4℃-230℃，五浇口方案前沿温度分布更均匀，因此优于单

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

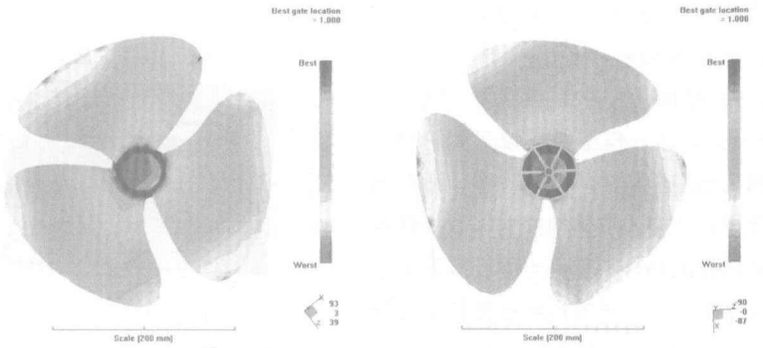


图2 风扇模型最佳浇口位置结果(左-正面,右-反面)

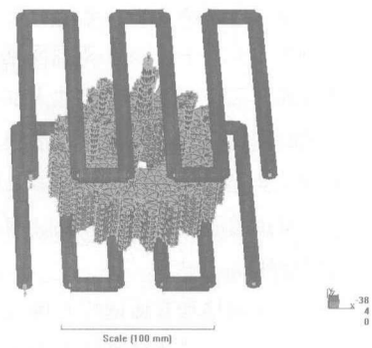


图6 齿轮模型

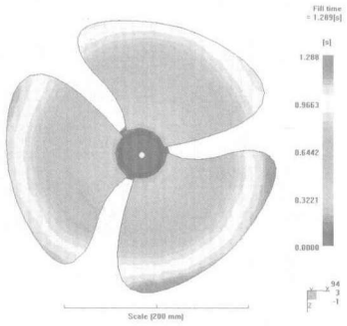


图3 单浇口填充结果

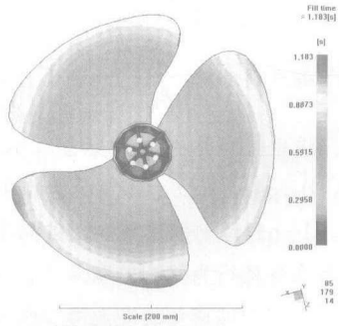


图4 五浇口填充结果

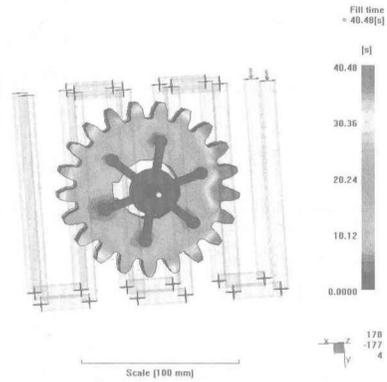
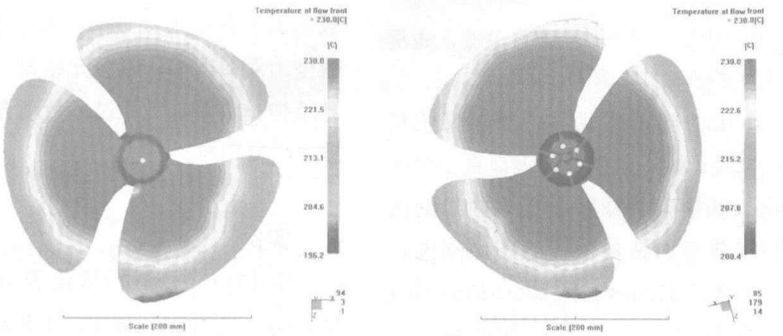


图7 齿轮模型填充结果



a b

图5 两种浇口方案的流动前沿温度结果（a-单浇口，b-五浇口）

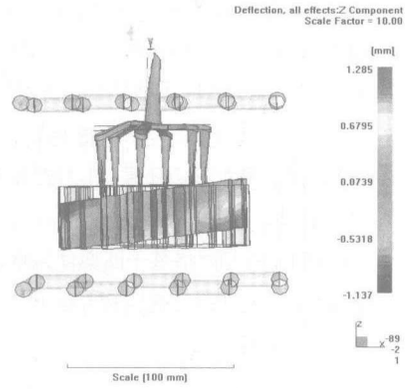


图8 齿轮模型Z向翘曲结果

浇口方案，且能保证风扇中心端面表面质量。

实例三

实例三模型为标准渐开线直齿圆柱齿轮，模数m=5，齿数z=21，分度圆压力角α=20°，齿顶高系数ha*=1，顶隙系数c*=0.25，齿宽b=40mm，中心孔直径φ40mm，键槽宽12mm，高3.3mm。齿轮材料为超高分子量聚乙烯(UHMWPE)，牌号为GUR EP4221：Ticona，推荐模具温度为106℃，推荐熔体温度为218℃。

网格类型采用3D网格，并将浇注系统与齿轮模型同时建模然后进行网格划分，主流道小端直径φ12mm，大端直径φ15mm，高80mm，分流道截面为梯形，上端宽8mm，下端宽6mm，高3mm，浇口直径φ2mm，建立冷却流道，如图6所示。采用默认工艺参数设置，进行Cool+Flow+Warp分析，填充结果如图7所示，通过分析填充结果可查看制品填充是否均衡，以供调整浇口位置和数量时参考。通过注射点压力曲线

（下转74页）

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

状形态存在，可见PP-g-MAH明显改善了无卤阻燃剂与基体树脂PP的黏结性，增强了PP与$Mg(OH)_2$之间的界面结合，使得两相界面变得模糊，在PP复合材料受到外力作用后，发生韧性断裂，大大提高PP复合材料的力学性能。

结论

a) $Mg(OH)_2$对PP阻燃抑烟效果良好，随着$Mg(OH)_2$用量的增大，PP/$Mg(OH)_2$复合材料阻燃性能增强，但力学性能和加工性能下降显著。

b) MRP加入对PP/$Mg(OH)_2$体系的阻燃性有较大幅度提高，与$Mg(OH)_2$协同作用明显。

c) PP-g-MAH的加入可改善PP/$Mg(OH)_2$/MRP复合材料的力学性能。在满足阻燃级别为FV-0的情况下，添加8份PP-g-MAH时，PP/$Mg(OH)_2$/MRP复合材料冲击性能、拉伸强度、熔融指数分别可达4.23kJ/m^2，25.6Mpa，7.13g/10min。

参考文献

[1] 陈小随，吴绍利，姚红等.无机纳米材料阻燃聚丙烯复合材料的研究进展[J].中国塑料，2008，22(9)：1-6.

[2] 陈俊，郑德，贾德民等.无卤阻燃聚丙烯的研究进展[J].中国塑料.2008，22(2)：9-13.

[3] 刘敏江，卢秀萍，冯建新.聚丙烯无卤阻燃体系的研究[J].塑料，1999，28(6)：24-28.

[4] 黄林坤，张林.聚丙烯阻燃剂的作理及其研究进展[J].国外塑料，2006，24(9)：40-43.

[5] 姚佳良，彭红瑞，张志焜等.聚丙烯/纳米氢氧化镁阻燃复合材料的性能研究[J].青岛科技大学学报，2003，24(2)：142-144.

[6] 杨明山.聚丙烯改性及配方[M].北京，化学工业出版社，2008：309-311.

[7] 鲍志素.磷腈化合物的合成及其对聚丙烯阻燃的作用[J].阻燃材料与技术，2006，16(2)：13-14.

[8] 欧育湘，李建军.阻燃剂—性能、制造及应用[M].北京，化学工业出版社，2006：338-348.

刘长胜：男，硕士研究生，研究方向为聚烯烃阻燃复合材料以及聚烯烃化学改性。

大连工业大学化工与材料学院

邮编：116034

（上接90页）

和锁模力曲线可得到最大注射压力和锁模力以供选择注射机时参考，通过分析温度结果、压力结果、冷却结果和翘曲结果来改变冷却系统和工艺参数，使得制品质量满足要求，一般流动前沿温度（Temperature at flow front）变化不应该超过2～5℃，冷却液入口与出口的温升(Circuit coolant temperature)不应超过2～3℃，冷却管壁温度(Circuit metal temperature)结果中加热的温度与入口温度不应超过5℃，翘曲量最大允许值由用户自定义。通常Z轴方向的变形被视为翘曲，而X、Y方向的变形被视为收缩。所以，在查看翘曲分析结果时，关键时查看Z轴方向上的变形量，如图8所示为齿轮模型Z向翘曲结果。从结果中可看出采用默认工艺参数设置下填充时间达到40.48s，填充时间过长，Z向翘曲量达到1.285mm，翘曲应尽量小。用户可调整工艺参数设置，重新进行Cool+Flow+Warp分析，直到分析结果满足要求，限于篇幅，这里不作详细分析和介绍。

结论

本文通过三个实例介绍了Moldflow在注塑成型模拟分析中的应用，用户可通过Moldflow分析优化制品结构、制品浇注系统和注塑工艺参数。Moldflow3D网格可得出正常充填情况下较真实的流动情况，但分析类型和分析结果较双面网格少，也不能模拟出喷射现象，因此Moldflow软件还需要进一步发展和完善。使用双面网格虽不能较真实的模拟流动情况，但分析结果较多，也可以得出较准确的熔体流场、温度场和压力场分布，对提高注塑制品质量可以提供一定的参考作用，因此建议采用双面网格分析温度场和压力场分布和缺陷分析，采用3D网格分析充填情况，根据分析结果优化制品结构、浇注系统和工艺参数。

参考文献：

[1] 谢鹏程,多田和美,杨卫民等编著. 高分子材料注射成型CAE理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社,2009.

[2] 陈立亮主编. 材料加工CAD/CAE/CAM技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社,2006.

[3] 耿铁,李德群,周华民. 三维注射成型流动模拟的研究[J]. 中国塑料,2003,17(7):78-81.

严志云：男，硕士研究生，主要研究方向为高分子材料成型加工原理与设备，注塑成型CAD/CAE/CAM。

北京化工大学机电工程学院

邮编：100029

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net