

摘 要

近年来,随着注塑制品的广泛使用和注塑工业的飞速发展,人们对于塑料制品的外观质量和使用性能要求越来越高。翘曲变形是注塑成型中最主要的缺陷之一,它会影响产品的外观和使用性能,翘曲程度严重的制品甚至无法使用,变成不合格品。因此,对翘曲变形缺陷的控制一直受到工程师们的重视。

目前对于翘曲变形的研究主要集中在对翘曲变形的形成理论研究和对注塑工艺参数的优化控制上。而在实际生产过程中,如果制品出现了严重的翘曲变形,仅仅通过调整注塑工艺参数往往是不能取得良好的效果的。这时,一种有效的解决办法是在发生严重翘曲的部位进行反向的修改模具,即进行变形补偿设计。利用变形补偿来抵消翘曲。但是对变形补偿量的把握是件棘手的问题,仅仅凭借经验有时候效果并不好。

本文以一个出现严重翘曲变形的制品作为研究对象,借助 Moldflow 模拟分析软件对塑料件的翘曲变形进行了计算机模拟分析,并结合实际生产的情况,找出了 Moldflow 软件预测的参考翘曲变形量与实际变形量的关系。在此基础上,确定了变形补偿量的大小。根据变形补偿量对制品进行反变形设计,然后在 Moldflow 软件中进行翘曲变形分析,验证了变形补偿量是可以接受的。为了让变形补偿量更安全一些,结合制品在使用过程中的配合情况,将制品的变形补偿量又适当的增加了一些,作为最终的变形补偿量,并依此对制品再次进行反变形设计,经过 Moldflow 软件的再次翘曲分析发现,最终的变形补偿量是可以接受的。依据最终的变形补偿量对模具进行相应的修改,并进行实际生产。生产出的产品经测量表明,变形补偿的设计是成功的。

在实验过程中发现,Moldflow 软件对于制品的翘曲变形量的预测与实际生产的变形量是有一些差别的,但是对翘曲变形的位置和趋势的预测与实际生产是相符的。因此,在翘曲变形的控制上,Moldflow 软件还是有一定的指导意义的。

关键词: 塑料件; 翘曲变形; 变形补偿; 数值模拟

Research on Deformation Compensation and Numerical Simulation of Plastics Warpage

Abstract

In recent years, with the widely use of plastics, customers put forward higher requirements to quality of plastics products. Warpage is one of the most basically flaws in the injection process. It can affect appearance and using performance. Severe warpage can make plastics useless. Engineers have paid attention to control warpage of plastics.

At present the researches on warpage mainly concentrate on warpage theory and adjusting of injection process parameters. However, in production process, if warpage occurs, it is difficult to eliminate warpage only by adjusting injection process parameters. An effective method to control warpage is to modify mold structure where warpage occurs. The deformation compensation can counteract the warpage. But how to get the compensation value is difficult. Sometimes it doesn't work only by reference of experience.

In this paper, the research object is a piece of plastic which warpes badly during its injection process. Warpage was simulated in Moldflow software. Combined with the experimentation, the relationship between simulated warpage and experimental warpage was found. Then the value of deformation compensation was predicted according to this relation. Subsequently the plastic was anti-deformed and the warpage was simulated again in Moldflow. In this simulation the deformation compensation is proved acceptable. In order to make the compensation more secure, combined the assembly of the plastic, the compensation was adjusted moderately to get the final compensation value. According to the final data, the plastic was anti-deformed again and the warpage was simulated again. From the simulation, the final compensation was proved acceptable. Then the mold was modified according to the final compensation and an experiment was made again. This experiment indicated that the deformation compensation is successful.

In the progress of the experiments and simulations, there is difference between values of simulated warpage and experimental warpage. But Moldflow can exactly predict the warpage situation and warpage trend. So, Moldflow has strong guidance function to control warpage during the plastics products forming.

Key words: Plastics; Warpage; Deformation compensation; Numerical simulation

独创性说明

作者郑重声明：本硕士学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含为获得大连理工大学或者其他单位的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

作者签名： 黄强 日期： 2008.1.8

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连理工大学硕士、博士学位论文版权使用规定”，同意大连理工大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

作者签名： 黄强

导师签名： 李瑞乞

2008 年 1 月 8 日

1 绪论

近年来,随着塑料工业的飞速发展,通用与工程塑料在强度和精度等方面的不断提高,塑料制品应用的范围在不断的扩大,工业产品和日用产品塑料化明显,逐渐形成了以塑代钢、以塑代木的趋势。塑料制品的强劲发展势头,极大地带动了整个塑料模具工业的发展。由于高效率、高精度和低成本显著特点,注塑成型成为批量生产塑料制品的首选方法。但是,注塑成型常常出现各种质量问题,例如,短射、飞边、翘曲、熔接痕和尺寸误差等。如何防止制品翘曲是经常困扰工程师的一个难题。与此同时,随着经济的快速发展和人们生活水平的提高,人们对塑料制品外观质量和使用性能的要求越来越高,翘曲变形程度作为衡量产品质量的主要指标之一越来越多地受到产品设计师、用户的关注和重视。针对生产中急需解决的问题,迫切需要对翘曲变形进行深入的研究。因此,本课题具有较大的理论意义和实际价值。

1.1 国内外塑料模具的发展概况

模具工业是国民经济各部门发展的重要基础,世界上工业发达的国家无不把发展模具工业放在优先地位。公认为:“模具工业是现代工业发展的基石”,“模具是促进社会繁荣富裕的动力”。据国际生产协会统计,近年来工业品零件粗加工的70%、精加工的50%是由模具成型来完成的。模具工业的设计水平、加工质量、技术含量、模具材料等的状况将直接影响着许多相关行业或产业的发展;影响着行业企业新产品的开发和更新换代;影响着产品质量企业的经济效益;影响着行业企业的技术进步和创新发展。因此,模具工业作为国民经济发展的基础工业,具有重要的地位^[1]。

二十世纪八十年代以来,在国家产业政策和与之配套的一系列国家经济政策的支持和引导下,我国模具工业发展迅速,年均增速均为13%,在未来的模具市场中,塑料模具在模具总量中所占的比例还将逐步提高。我国塑料模工业起步到现在,历经半个多世纪,有了很大发展,模具水平有很大提高,但和国外相比还有很大的一段距离。这些年来,我国自主开发的塑料模CAD/CAM系统有了很大的发展,提高了模具的质量和生产的效益。但是遗憾的是,由于诸多原因,模具CAD/CAE/CAM技术在中国普及不够,尤其是跨多学科的CAE技术更是应用较少。目前我国模具标准化和商品化程度在30%以下,和国外工业先进国家70%-80%相比,差距是明显的^[2]。

1.2 注塑模 CAE 的发展概况及发展趋势

1.2.1 注塑模 CAE 的国内外发展概况

由于注塑模 CAE 技术具有重要的实际意义,国外和国内的科研机构、高等院校等都投入大量的人力、物力和财力进行研究。塑料注塑成型 CAE 软件的发展大概经历了四个阶段^[3]。

二十世纪七十年代以前,由于计算机条件的限制,对充模过程和冷却过程分析都是采用一维模拟。主要是计算塑料熔体在等直径圆管、中心浇口的圆盘以及端部浇口的矩形型腔中的流动过程。

二十世纪七十年代中期到八十年代中期,随着计算机技术的发展,充模流动模拟和冷却模拟采用二维模拟技术,在二维流动分析中,除数值流动模拟方法本身的难点外,另外一个难点是对移动边界的处理,即如何确定新时刻的熔体流动前沿位置。

二十世纪八十年代后期,开展了三维流动和冷却模拟研究,三维模拟主要采用两种方法:其一,流动路径法实现了对三维制品的流动分析;其二,有限元与有限差分混合法,求解压力场、温度场和速度场。

二十世纪九十年代以后,已将研究重点转向材料的粘弹性、复杂三维模拟以及取向、残余应力和固化现象的研究。另外,计算方法在双螺杆挤出、热成型、薄膜吹塑、反应注射成型和气体辅助成型的工艺条件设定方面的应用也成为研究热点。同时,为了提高 CAE 系统的实用化程度,提高系统几何模型的生产速度,进行了广泛地 CAD/CAE/CAM 集成化研究,人工智能在 CAE 中的应用也取得了一系列的发展。

我国注塑模 CAE 技术的研究起步比较晚,至到二十世纪八十年代后期才逐渐有研究成果发表。早期的研究仅限于注塑模具 CAD 系统和二维 CAE 的研究,到二十世纪九十年代受国外引进的先进的注塑模具 CAE 技术的影响,才开始复杂三维成型的 CAE 研究。经过各科研院所的十多年不懈努力,我国的注塑模 CAE 技术取得了长足的进步,相关软件的国有化比重在不断增加。但是目前国内自行开发的注塑模 CAE 软件都是基于一定的平台基础上,而自行开发的图形系统软件较少,没有统一的标准,开发系统的实用性和局限性较大。因而,国产注塑模 CAE 系统软件还不成熟,和国外的系统具有一定差距,有待进一步技术研究和完善。

1.2.2 注塑模 CAE 的发展趋势

二十世纪九十年代以来,注塑模 CAE 技术从理论研究到实际应用取得了飞速的进步。模型建立、数值方法上日趋完善,数学模型对成型过程的描述更准确、真实。注塑模 CAE 技术的运用范围已经渗透到塑料模具的设计和制造的各个环节。但是注塑模

CAE 商品化软件的功能和精度还有一定的缺陷。例如，目前 CAE 技术不能代替人的创造性工作，只能作为一种辅助性工具帮助设计人员去判断设计方案是否合理，需要通过反复交互（分析—修改—分析），才能将设计人员的正确方案体现到模具设计中去，而设计方案的确实在很大程度上仍依靠设计人员的经验和水平。随着科学技术的进步和研究的深入，注塑模 CAE 技术将得到进一步的完善和提高，其发展趋势主要表现在如下几个方面：

(1) 注塑模 CAE 软件的完善和模拟精度的研究

注塑模 CAE 软件目前包括注塑流动模拟、保压模拟、冷却模拟、塑件应力及翘曲模拟等。一方面，这些软件的数学模型及算法还有待进一步完善并扩大其适应范围；另一方面，这些独立的分析软件还需要有机地结合起来，才能获得更为符合实际情况的分析结果，这是因为在注塑过程中，流动与冷却、保压与冷却都是交织在一起互相影响的。如熔体充模过程中，模壁温度的变化对塑料熔体的粘度影响显著，如何使模温变化设置与周期性重复的注塑成型过程、流动充模过程、以及制品成型顶出的全过程吻合，是模拟模型与模拟精度研究有待深入的问题。另外，用三维有限元分析模型取代目前的二维有限元与有限差分的耦合算法，来分析流动过程的压力场和温度场，也是日后注塑成型 CAE 算法研究的发展趋势。注塑成型过程是个连续重复的过程，将各独立的模块进行耦合计算分析，可以提高分析软件的模拟精度，扩大适用范围。

(2) 智能化注塑模 CAE 技术研究

在现有的 CAE 技术上，优化就是反复的交互，最终设计方案的确立仍依靠设计者的经验和技巧。将人工智能技术，如专家系统、神经网络等加入设计计算中，使模拟程序能智能化地选择注塑工艺参数，提供修正制品尺寸、冷却管道布置方案，减少人工对程序的干涉，改变目前 CAE 分析仍被动依靠人的经验提供设计方案的局面，实现注塑工艺参数、浇注系统、冷却系统的自动优化设计，以达到注塑 CAE 技术应用的广泛性。

(3) 注塑模具 CAD/CAE/CAM 的集成化研究

CAE 软件可以模拟塑料在不同工艺条件下注塑情况，从而确定其合理的注塑条件，并对制品成型后的质量参数做出预测。工程技术人员利用 CAE 软件可以对注塑制品的各种性能进行全面分析，修改优化模具的设计参数和制造工艺。但是目前出售的商品化 CAE 软件与 CAD、CAM 软件之间的数据传递主要依靠文件的转换，这容易造成数据的丢失和错误，使得 CAE 图形处理工作加重，从而降低了工作效率。因此在设计制造过程中采取单一模型，建立 CAD/CAE/CAM 系统的统一数据库，加强三者之间的联系并最终实现“设计—仿真—制造”一体化是今后的发展方向。

(4) 注塑成型新工艺及其模拟研究

随着注塑成型设备和成型工艺的不断发展,出现了气体辅助注塑成型的新工艺。该工艺将注塑成型与结构发泡成型结合在一起,降低了模具型腔内熔体的压力,所需注射压力下,制品成型后翘曲变形小,表面质量好,成型周期短。这项工艺在日本、欧美已被广泛用于汽车和家电行业的塑料生产。气体辅助注射成型比普通注射成型多了气体注射阶段,气体推动塑料熔体充满模具型腔,塑料熔体在高压气体作用下的流变行为及其复杂程度,直接影响塑件能否成型以及成型制品的质量和性能。因此,该新工艺对 CAE 技术要求较高。目前,美国的 C-Mold 公司、澳大利亚的 Moldflow 等公司正在进行该类软件的研制开发工作^[4]。

1.2.3 注塑模 CAE 商品化软件

从二十世纪八十年代开始,注塑模 CAE 技术从实验室阶段进入了实用化阶段,目前国际上具有代表性的商品化软件有^[5]:

美国 Ac-Tech 公司最新推出的注射模 CAE 软件 C-MOLD。该软件具有三个层次的解决方案。第一层次的软件 Process Solution 用于初始阶段的设计。第二层次软件 Productivity Solution 包括三维流动模拟 C-Flow、三维冷却模拟 C-Cool 和保压分析软件 C-Pack。第三层的软件 Performance Solution 基于第二层的流动、保压、冷却分析结果,进行了纤维定向分析、塑料制品的应力和翘曲分析。

美国 SDRC 公司的 I-DEAS 软件。该软件原为通用的机械 CAD/CAM 软件,二十世纪九十年代初,公司开发注射成型流动和冷却分析软件,并与 I-DEAS 集成,推出了适合注射模的 I-DEAS。

德国 IKV 研究所的 CAD/CAE 软件 CADMOULD。该软件主要包括模具方案构思与设计软件 Layout&Design、二维流动模拟 Flow Pattern Lay_flat、三维流动分析 MEFISTO、二维冷却分析 Thermal layout 和模具强度、刚度分析 Mechanical Layout of Moulds 等。

澳大利亚 MOLDFLOW 公司的注射模 CAE 软件 MPI。该软件包括流动模拟程序 (MF/Flow)、冷却分析程序 (MF/Cool)、翘曲分析程序 (MF/Warp) 和应力分析程序 (MF/Stress) 等。2000 年 4 月 MOLDFLOW 公司收购了美国的 Ac-Tech 公司,并与 2001 年发布了集 MPI2.0 和 C—MOLD2000 优点于一体的 MPI3.0,而后又推出了 MPI4.0。MPI 软件一直主导塑料注射成型 CAE 软件市场,在世界上拥有较多的用户。

此外,还有美国 GRAFTEK 公司、PRIME-CV 公司、PRIME-CALMA 公司、意大利 P&C 公司和英国的 Delta CAM 公司的注射模设计制造软件包。

国内的高等院校和研究所对塑料成型模拟研究起步较晚,但是经过对国外软件开发经验和技术的吸收和研究,也取得了一定的成果。如郑州大学模具研究所的模具优化设

计软件—Z-MOLD, 华中理工大学模具技术国家重点实验室自行开发的国内第一个注射模 CAD/CAE/CAM 集成系统 HSC2.0。

塑料成型数值模拟技术在实际应用中取得了飞速发展, 但是商品化的软件无论在功能上还是精度上, 还未达到尽善尽美的程度, 如三维模拟, CAE 与 CAD/CAM 的集成, AUTO-CAE 的引入等都是今后的研究重点^[6]。

1.3 国内外研究概况及发展趋势

自 20 世纪中叶以来, 塑料流变学、材料学、数值计算方法和计算机技术的突飞猛进为塑料模 CAE 技术发展创造了有力条件。塑料模 CAE 研究经历了从初级到高级、从简单到复杂、从理论研究到实际应用的发展历程。流动过程的研究早在二十世纪五十年代开始, 至二十世纪八十年代已经发展到实用化程度。保压过程和冷却过程研究比流动过程研究要晚十年, 直到二十世纪九十年代才开始研制实用化软件, 而纤维定向至今仍然集中于理论研究。残余应力研究从二十世纪七十年代开始, 现正向实用化方向努力。相比之下, 翘曲变形的研究工作远不及流动、保压、冷却、应力等模拟研究那么早, 而且进展较慢^[7]。

1.3.1 国外发展现状

目前对于翘曲变形的研究, 主要集中在两个方面: 一是对成形原因的分析模拟; 二是对各工艺参数的优化控制。

Hasan Kurtaran 和 Tuncay Erzurumlu^[8]利用响应曲面法和基因算法对薄壳件的注塑工艺参数进行了优化控制。为了对薄壳件的翘曲变形进行有效的控制, 他们使用了有限元分析、实验方法的统计设计、响应曲面法以及基因算法等多种方法。通过这些方法, 他们得出了模温、熔体温度、保压压力、保压时间和冷却时间这些工艺参数最佳组合。首先利用基于方差分析的有限元分析确定出对翘曲变形最有影响的工艺参数; 然后利用响应曲面法模拟出翘曲变形的模型; 最后用基因算法来对模拟出的模型进行处理得出最佳的工艺参数组合。

B A Mlekusch^[9]利用非线性粘弹性模型来计算注塑过程中的残余应力, 从而控制翘曲变形。他把冷却过程分成两个阶段: 保压阶段和自由冷却阶段。对每个阶段都做了粘弹性模型的仿真模拟。首先, 确定出一个层状的组分上的一个物质点的应力图, 在这些计算中, 考虑了不同的工艺条件, 如注射时间, 保压压力, 模温等等。然后, 为了能计算更多复杂的几何体, 这个模型用了一个商业化的有限元程序, 可以对任意形状的几何体, 进行残余应力、翘曲和收缩的预测。最后, 实验验证预测的结果。

Chiaming Yena, J C Lin, A Wujeng Lia 和 M F Huanga^[10]利用有限元和神经网络设计流道的尺寸来控制翘曲变形量。他们主要是控制流道的直径和长度。在建模阶段,有限元仿真数据用来生成精确的网格模型,用这个模型来预测不同控制参数下的翘曲变形量。在优化处理阶段,使用到了模拟退火法,这个方法可以在最优化过程和有限元仿真之间不用进行复杂的迭代就可以高效的找到一组最优化参数。

B Ozcelik 和 T Erzurumlu^[11]对方差分析法、神经网络法和基因算法在注塑模的翘曲优化处理上做了比较。他们结合设计经验和 Taguchi 正交实验矩阵和 Moldflow 软件确定薄壳件的注塑工艺参数。用基于方差分析方法的有限元分析来确定对翘曲影响最大的工艺参数。用神经网络和基因算法寻找翘曲的最小值。

1.3.2 国内研究现状

与国外翘曲变形的研究状况相比,国内的研究起步很晚,直到二十世纪九十年代初期,国内学者才开始关注翘曲变形问题。郑州大学申长雨早于 1993 年讨论翘曲变形问题,提出翘曲变形系数概念,以研究温度不均匀分布所引起的翘曲变形。后来,他们基于弹性小变形理论和有限元计算温度应力,利用大连理工大学机构分析程序计算翘曲变形。大连理工大学李海梅则从减少流动应力角度,提出一种减少翘曲变形的办法。也有学者从分析注射制品残余应力入手,探讨减少残余应力及翘曲变形的对策。西北工业大学吴建军等人用一维粘弹性本构方程计算残余应力,用悬臂梁理论计算翘曲变形。华中科技大学卢义强则尝试采用薄板理论的有限元法研究翘曲变形。

陈静波、申长雨^[12]等人建立了可压缩粘弹性聚合物熔体在薄壁型腔中充模/保压过程中非等温、非稳态流动的数学模型,用数值方法实现了注射成型过程中流动应力和取向建立及松弛过程的模拟,研究了熔体温度、模具温度和注射速率等工艺条件对分子冻结取向的影响,取得了与实验相符的结果。

董斌斌^[13]等人介绍了薄壁注射成型的充填、保压、冷却和残余应力的数值模型,并将集成的模拟程序对收缩翘曲问题进行定量地模拟分析。采用 Taguchi 实验优化设计理论,用正交表设计实验并进行了统计分析。研究了因素如熔体温度、模具温度、保压时间、保压压力、浇口尺寸和注射速率对收缩与翘曲的影响的显著性。得出优化工艺参数如熔体温度、模具温度、保压时间和压力能减少残余热应力;保压压力和熔体温度是影响收缩与翘曲的最显著因素。

郭志英^[14]等人基于板壳理论和有限元方法对翘曲变形进行 CAE 分析,提出翘曲变形有限元模拟数学模型,并对模拟结果进行实验验证,证明了翘曲变形模型及分析软件的正确性。

康俊远^[15]等人用有限元方法研究了温度场、压力场对注塑件残余应力及翘曲变形的影响。以空调器风门叶片为例，给出翘曲变形的分析步骤，提出收缩不均、冷却不均及分子取向不一致是翘曲变形产生的原因，并给出相应的改进措施，改进措施应用于工厂后取得较好的效果。

连昌伟^[16]等人通过模拟注塑成型过程，并结合田口实验设计法，研究了工艺参数与注塑制品翘曲变形的关系，得到了优化的工艺参数。在此基础上，进一步研究了模具温度、熔体温度、注射时间和保压压力等各工艺参数对变形的影响。

1.4 课题的提出以及研究内容和方法

国内外的学者和研究人员虽然在塑料件成型过程中的翘曲变形方面做了很多研究，但是大多停留在对注塑工艺参数的控制上，对于变形补偿的研究很少。本课题的目的就是要通过变形补偿的方法，彻底解决翘曲变形的影响，并从中找出可以指导生产实践的规律。

本课题选用了一副以往设计好的并曾经投入生产的模具作为研究对象，该模具一模一腔，哈夫结构。生产过程中，对于翘曲变形的控制的不很理想。导致在开模后，在制品残余应力的作用下，产生很大的翘曲变形。

对于翘曲的控制，如果通过调整注塑工艺参数，仍不能达到满意的效果，一个有效的方法是修改模具。当然修模是很复杂和繁琐的工作。有一些的修改是很难实现的。这就加大了模具的成本，而且也延长了生产时间。因此，我们希望在最短的时间内，尽可能的一次修模就能对其翘曲变形进行补偿抵消。

本课题的研究流程如图 1.1 所示。主要内容如下：

- (1) CAD 建模与 CAE 分析；
- (2) 确定初始变形补偿量并进行反变形设计；
- (3) 对初始变形补偿量进行分析验证，得出可接受的初始变形补偿量；
- (4) 在初始变形补偿量的基础上，结合制品的结构及配合情况，确定安全变形补偿量；
- (5) 对安全变形补偿量进行分析验证，得出最终的可接受的安全变形补偿量；
- (6) 根据最终的安全变形补偿量对模具进行修改，并注塑成型，验证修模是否成功。

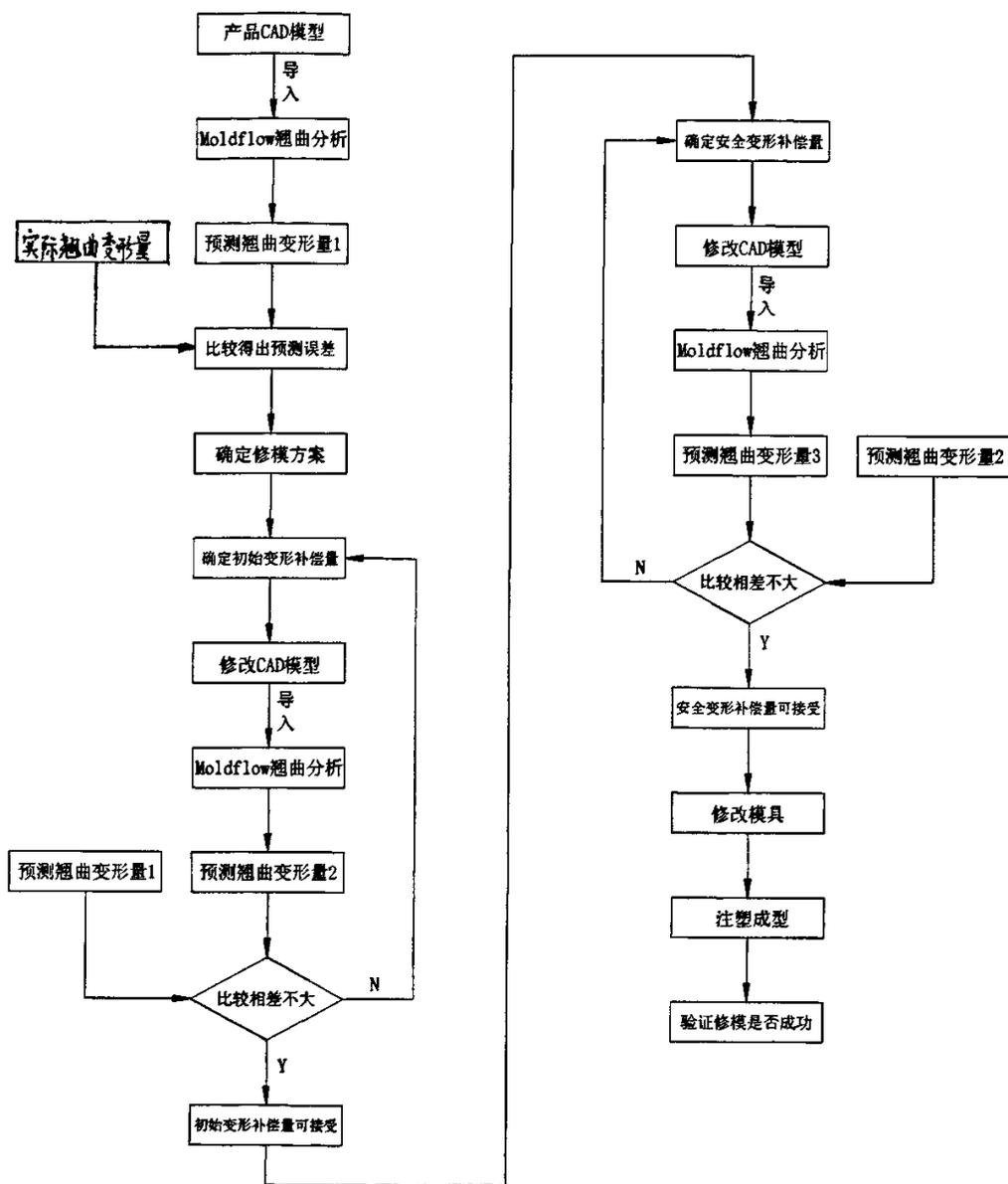


图 1.1 研究流程图
Fig.1.1 Flowchart of study

2 塑料制品翘曲变形的理论研究

自 20 世纪中叶以来,塑料流变学、材料学、数值计算方法和计算机技术的突飞猛进为塑料模 CAE 技术发展创造了有力条件。塑料模 CAE 研究经历了从初级到高级、从简单到复杂、从理论研究到实际应用的发展历程。流动过程的研究早在二十世纪五十年代开始,至二十世纪八十年代已经发展到实用化程度。保压过程和冷却过程研究比流动过程研究要晚十年,直到二十世纪九十年代才开始研制实用化软件,而纤维定向至今仍然集中于理论研究。残余应力研究从二十世纪七十年代开始,现正向实用化方向努力。相比之下,翘曲变形的研究工作远不及流动、保压、冷却、应力等模拟研究那么早,而且进展较慢。

纵观整个注塑成型研究历程,翘曲变形的研究已成为了注塑成型 CAE 技术发展的当务之急。从查阅大量文献可以看出,翘曲变形研究可归纳为三个方面:(1)从产品设计方法学角度研究翘曲变形,以优化注塑制品设计和成型工艺条件设置。(2)采用试验方法,分析翘曲变形与塑料材料、产品及模具结构、成型工艺参数等之间关系。(3)从理论上对翘曲变形进行定性和定量的研究。

2.1 注塑件翘曲变形简介

随着塑料工业的发展,人们对塑料制品的外观质量和使用性能要求越来越高,因此,塑件的翘曲变形问题越来越多地受到生产制造商和模具设计者的关注与重视。翘曲变形是指注塑制品的形状偏离了模具型腔的形状,它是塑料制品常见的缺陷之一。模具设计者希望在设计阶段预测出塑料件可能产生翘曲的原因,以优化设计方案,从而提高注塑品生产的质量和效率。

分析翘曲问题有两个重点,一是研究如何提高翘曲变形模拟的准确性,二是研究采用何种方法减小或补偿翘曲变形造成制品的几何误差。在工业实践中,通常采用调整和控制工艺参数来减小翘曲变形量,而对于较大的翘曲变形采用模具补偿方法或修改制品的几何形状来保证几何精度。一般来说,当提出一件新制品的使用性能和其它有关要求后,首先应在经济合理和技术可行的原则下,选择最合适的原材料、生产工艺、设备和模具结构。在这些条件确定后,工艺条件的选择和控制在主要考虑的因素^[17]。

了解注塑件翘曲的理论,对深入研究如何采用恰当的工艺参数以及采用何种模具补偿的方式或正确修改制品的几何形状以减小翘曲量有着重要的理论指导意义。

2.2 翘曲变形产生的原因

注塑成型有三个关键的环节：产品设计、模具设计、注塑工艺设计。较前的环节直接影响较后的环节；较后的环节往往只能在一定程度上优化前一环节的不足，而不能彻底消除前一环节所固有的缺陷。注塑件变形是实际生产中常常遇到的一个问题。产品设计结构不合理造成壁厚不均匀；注塑工艺选择不恰当，如温度、压力、时间等参数设置不合理，都可能造成注塑件明显的变形，模具设计作为中间环节，为兼顾两头，要考虑的因素往往最多。注塑件由于其本身在各个尺寸方向上的收缩不均匀而产生翘曲变形。收缩不均匀表现在：制品不同部位的收缩不均匀；制品壁厚方向的收缩不均匀；材料取向不同造成的收缩不均匀。影响注塑件收缩的因素从本质上可以归结为三个：注塑件残余应力；注塑件冷却过程；材料的取向。从模具设计的角度，则要考虑模具型腔的预变形、模具冷却系统的设计以及浇口的数量和位置的安排^[18]。

2.2.1 注塑件收缩不均对变形的影响

注塑件收缩不均匀是注塑成型过程不可避免的问题。型腔内塑料熔体 PVT 特性(P 为压力, V 为体积, T 为温度)的不均匀决定了这一点。注塑过程中,型腔内各部位不同的压力和温度变化使塑料在不同部位的收缩各不相同。增加浇口的数量可以使型腔内温度、压力相对均匀。当然,由于熔接线的增多,浇口并不是越多越好。

另一方面,当注塑件在模具型腔内冷却成型过程中发生收缩时,由于受模具型腔的限制,它并不能完全自由均一地收缩。这种不均一的收缩在塑件内形成残余应力,塑件顶出以后将在残余应力的作用下进一步收缩,残余应力分布不均匀的时候便发生变形。

在尺寸变化不均匀的情况下,可以通过在模具设计时对 x 、 y 方向取不同的收缩率来达到产品的尺寸要求。更为复杂的情况是产品的形状发生了改变,如直边或直面变成了弧形。这时,增加一些辅助的筋或将模具型芯型腔相应的边或面作成反方向的弧形可以起到补偿的作用。

2.2.2 冷却过程对注塑件变形的影响

注塑件冷却不均匀是其翘曲变形的一个重要原因。产品结构变化,如局部结构复杂导致局部冷却困难,将造成产品各部位的温度差异。动定模两侧也往往由于产品的壁厚不均匀或模具冷却系统设计得不完美而温度不一致。

注塑件冷却到室温的过程中,由于温度的差异,温度高的部位会有相对更大的收缩。在动定模两侧温度不一致的情况下,产品变形会凸向温度较低的一侧。这里有两个因素促成这样的变形:材料的热胀冷缩和结晶。在冷却过程中,通常是温度高的部位收缩大。对于结晶的材料来说,其结晶度随冷却速度的差异而不同。缓慢的冷却为高分子链的应

力松弛提供了更为充足的时间,有益于分子链的晶相排列,使其具有更高的结晶度。急速的冷却则使杂乱的分子链较早固定下来,因而使其结晶度较低。结晶过程使分子链规整排列,也是体积收缩的过程。结晶度的不同也就造成了制品收缩的不同,从而导致变形。

2.2.3 材料取向对注塑件变形的影响

塑料熔体在流动过程中受剪切力的作用发生分子和纤维取向。冷却过程中,制品在取向方向和非取向方向表现各向异性,其收缩是不同的。纤维填充的材料虽然整体收缩较小,但在纤维取向的情况下,纤维非取向方向的收缩率可以达到取向方向收缩率的3~6倍。非填充材料收缩率较大,但其各向异性收缩却没有这么明显。材料的取向度受产品结构、注塑工艺等因素的影响。产品壁越薄,冷却速度越快,注塑速度越高,材料的取向度越高。这里并不是说材料的取向度越高,产品变形越大。很多情况下,产品的变形是由于分子取向不均一而造成的。此时,浇口位置的选择尤为重要。

2.3 翘曲变形的研究方法

2.3.1 翘曲变形的产品设计方法学研究

翘曲变形的产品设计方法学研究,最开始是根据实际生产经验,从定性角度分析影响注塑制品翘曲变形的因素,探讨减少翘曲变形的办法。后来才发展到将工程优化设计方法用于注塑成型工艺中,力图设计出优化的塑料产品和模具,选用合适的成型工艺条件,以达到最大程度减少翘曲变形的目的。从二十世纪七十年代开始, N C Baldwin^[19]从产品、模具设计及注塑成型工艺角度,定性探讨减少翘曲变形的办法。他指出,不正确的产品设计所导致的翘曲是最严重的,几乎不可能通过成型工艺条件来修正,不均匀壁厚、筋板、浮雕等都能引起不均匀收缩,从而导致制品翘曲;在模具设计中,无论是对何种材料,最重要的影响因素是模具浇口大小和位置;在成型工艺条件选取方面,不均匀压力分布和温度分布也能导致翘曲变形。二十世纪八十年代中期, K B Spatola^[20]在实际生产中发现,塑料材料的结晶程度越高,越容易发生翘曲变形,而无定型塑料材料如 PC 等在成型过程中则不易发生翘曲;在流动过程中,平行于流动方向取向比垂直于流动方向的取向要大,从而导致各向异性收缩和翘曲变形,并根据这些原则对塑料进行改性,以减少翘曲变形程度。二十世纪九十年代初, MOLDFLOW 公司的 C Austin 分析了注塑制品产生翘曲变形的原因,并从塑料材料选择、注塑产品设计、注塑模具设计、注塑成型工艺条件选取等方面探讨减少翘曲变形的办法。

二十世纪九十年代末,有学者开始采用工程优化设计思想来设计塑料产品和选择成型工艺。B H Lee^[21]在设计注塑制品时,首次打破制品壁厚应尽可能均匀的不成文规矩。他认为,在预定的尺寸误差范围内,有意改变壁厚,是减少翘曲的一种方法,并利用基于正交试验和信噪比分析原理 TAGUCHI 方法,将不同壁厚看作可控制的设计因素,而将注塑时间、熔体温度、冷却问题等工艺变量看成噪声因素,得到不同壁厚因子组合的制品壁厚,且对每种壁厚模型,采用差异分析法,获得最优壁厚和最佳工艺设置。在此基础上,R Sahu, Dongang Y 和 B Kim^[22]突破了传统设计方法中先给定产品几何形状,通过反复试验,在一定范围内选择变量的定性思维。为了研究不均匀收缩而产生的翘曲变形,他们将壁厚、充模时间、保压时间、熔体温度、模具温度、保压压力作为优化设计的设计变量,采用基于优化的基因算法和 TAGUCHI 法求解减少翘曲变形的优化问题,并给出注塑制品的理想厚度和体积。

2.3.2 翘曲变形的试验研究

与产品设计方法学研究不同,翘曲变形的试验研究是通过大量试验,获取原始试验数据,分析试验现象,从中挖掘试验规律,以了解塑料材料、产品和模具机构以及注塑成型工艺参数对翘曲变形的影响程度与趋势。

从二十世纪九十年代开始,许多学者陆续采用试验方法研究结晶型和无定型塑料、注塑成型工艺条件与翘曲变形之间的关系。W Discipio, A Wagle 和 S P Mccarthy 研究了塑料冷却、分子取向松弛和结晶性能(对结晶材料)所造成的收缩,将收缩/翘曲特性与材料热膨胀系数联系起来,并认为收缩/翘曲结果依赖于分子和纤维取向、压力和温度分布、残余应力等的正确预测。C S Lee, A Dubin 和 K sarkar 等试验研究了不同材料和壁厚平板的收缩和翘曲特征。试验表明,无论采用何种材料,薄板的翘曲比厚板要大得多,而厚板的翘曲相对较小;并且玻璃增强塑料薄板的翘曲比各向同性塑料薄板的翘曲大。D W Radford 和 R J Diefendorf^[23]研究了复合材料在成型和使用过程中的变形,发现了结晶型复合材料薄板,在成型过程中会发生翘曲变形,在使用过程中随着环境温度变化,将会继续变形;并提出基于层状薄板理论预测制品形状变化的数学模型。V Leo 和 C Curelliez^[24]试验研究了浇口几何形状、保压参数和模具弹性对制品最终尺寸的影响。

后来,试验研究拓宽到研究材料的纤维定向对制品翘曲的影响。H Kikuchi 和 K Koyama^[25]重点研究了 33%玻璃增强纤维 PA66 注塑磁盘增强比率、线性热膨胀系数各向异性、制品厚度与翘曲之间关系,并发现:线性热膨胀系数各向异性决定了注塑磁盘翘曲模式,也是控制翘曲变形的重要参数。薄壁磁盘翘曲明显而厚壁磁盘不易翘曲,且

翘曲大小与测量翘曲时的温度有关。同时,还提出了材料力学参数与各向异性之间的线性关系经验公式。E J Fahy 则基于相似理论,构造相似试验模型,研究增强塑料圆形翘曲变形机理,他们认为磁盘发生拱形或马鞍形变形的原因是由于平面内热膨胀系数的各向异性(由磁盘在径向和切向上纤维不同取向程度所引起的),并提出相应的试验公式。

2.3.3 翘曲变形的理论研究

随着注塑成型工艺基础研究的不断发展,研究人员开始注意从理论上研究翘曲变形机理及预测方法。从现有已发表的文献来看,比较成熟的理论是:翘曲变形与不均匀的收缩有关,由于收缩的不均匀而导致应力分布的不均匀,从而导致翘曲的发生。因而许多学者从研究不同塑料在不同工艺条件下的收缩行为入手,分析收缩与制品翘曲之间的关系。

早期的研究工作主要集中于研究各种工艺条件与注塑制品收缩之间的关系。二十世纪七十年代后期,W G Haisitend, J R Rinderie 和 N P Suh 在注塑模具设计中仅考虑压力、温度、体积三者关系,根据塑料 P-V-T 试验图分析可能产生的体积收缩,并采用变体积法对收缩量进行补偿。R G Egbers 和 K G Johnson 首次对不同牌号 HDPE 在不同冷却时间、模具温度、熔体温度和注射压力下,采用不同浇口尺寸测试其收缩情况,得出 80%收缩与制品厚度和浇口尺寸有关,20%收缩与成型条件有关的结论。G P Hebert 和 L P Salloum 通过试验测量 PMP 在充填 30%纤维是温度变化对收缩的影响,并用统计法总结出收缩与制品及模具温度之间的关系。

二十世纪八十年代中期,收缩研究已经由定性分析发展到提出简单经验模型的阶段。W B H Nievelstein 和 G Menges 着重研究保压压力、模具温度、制品厚度、熔体流动方向对收缩的影响,并采用线性叠加原理获得预测收缩的经验模型。G Salloum, D Charland 和 B Sanachgrin 通过大量试验,发现影响收缩大小的工艺参数依次是保压压力、冷却时间、模具温度、最大注塑压力、熔体温度、收缩与成型参数呈线性关系,建立了磁盘和平板的收缩模型。J Shoemaker, R Allan 和 P Engelmann 研究了均匀壁厚制品和变壁厚制品的收缩均匀性,并通过优化保压过程来减少收缩量。B Sanschagrín, S Rivard, L P Hebert 和 P Girard 着重研究纤维增强材料的收缩性能,提出了预测纤维增强材料的收缩模型。试验表明:影响增强纤维材料轴向收缩和横向收缩的因素有保压压力、注塑速度、熔体温度、模具温度及增强比例,其中最重要的是增强比例,其次是保压压力和模具温度。E C Bernhardt 介绍 Tmconcept 公司收缩评估软件,该软件考虑了成型工艺条件、流动取向、模具外形等影响收缩的主要因素,并认为仅用 P-V-T 数据的简化收缩模型计算涉及诸如取向、各向异性等影响因素的复制品的收缩是不正确的。Boudreaux E

和 Ford A G 分别研究了不同注塑温度、模具温度条件下 PMP 和增强型 PMP 制品的收缩, 并采用统计方法提出了与材料特性、模具结构、制品几何形状、工艺条件有关的收缩试验模型。

到二十世纪八十年代末期, 许多学者开始利用收缩研究成果分析注塑制品翘曲变形。Thomas 和 Mccfery 最先在注塑流动、保压、冷却模型基础上提出了预测翘曲变形的模型。该模型考虑到材料体积收缩、应力松弛和取向, 通过试验和线性回归方法获得制品收缩与这些影响因素之间的关系。然后在收缩预测的基础上, 通过结构分析程序计算翘曲变形。二十世纪九十年代初, 澳大利亚 MOLDFLOW 公司对许多材料在改变流动速度、保压压力、保压时间、模具温度、塑料充填时间、制品厚度等参数条件下, 测量制品收缩大小, 并根据测试结果, 归纳了影响制品收缩的因素, 包括体积收缩、结晶程度、应力松弛和取向效应。在此基础上, Walsh 提出了能考虑更多基本变量(体积收缩、结晶性能、模具限制、塑料取向等)的收缩预测方法, 并利用流动和冷却分析结果预测收缩应变。S F Walsh 和 P Kennday^[26]等在收缩预测基础上, 将收缩应变输入通用结构分析程序, 通过线性或非线性分析计算翘曲变形。与 MOLDFLOW 公司不同, 美国 AC-Tech 公司主要从四各方面分析收缩/翘曲成因, 包括不均匀冷却、不均匀面内密度分布、取向效应和角隅/边缘效应, 并在流动、保压、冷却分析基础上, 利用有限元分析软件计算翘曲变形。由于其产品 C-MOLD 是基于 P-V-T 图计算体积收缩, 为了提高精度, 后来采用了“等效 P-V-T”数据和结晶动力学来测量塑料材料特性, 该方法能大大提高收缩预测和翘曲变形模拟精度。如今, 绝大多数商用化注塑分析软件采用收缩/翘曲分析模型。

2.3.4 翘曲变形研究方法的比较

以上总结的三种研究翘曲变形的的方法各有特点, 各有优劣, 并可互为补充, 产品设计方法学将工程优化思想用于产品设计、模具设计和成型工艺参数选择上, 以减少翘曲变形。其核心是把影响制品翘曲变形的的主要因素作为设计变量, 以最小变形作为设计目标, 对产品、模具和工艺条件进行优化设计。但是, 为减少设计变量维数, 往往只考虑最重要的几个因素而忽略其他因素, 这将使优化结果有偏差, 更为重要的是, 不能在模具设计阶段预测翘曲变形。试验方法则往往局限于某一特定几何形状、特定材料和工艺条件, 不能全面考虑诸多因素对翘曲变形的影响, 试验结果本身也很难大范围地推广利用。但是试验方法能研究翘曲变形的成型机理, 以指导实际生产, 并且是验证数值模拟软件可靠性的重要手段, 以帮助提高模拟软件的分析精度。与此同时, 由于注塑成型基础研究的进步和相关学科的迅速发展, 使越来越多的学者开始从理论上研究翘曲变形机

理, 又因为收缩 / 翘曲机理研究开展的较早, 因而在理论上较其它机理成熟得多, 因此应用广泛, 是目前最主要的翘曲变形理论。

2.4 注塑成型 CAE 的数值模拟理论

塑料熔体充模过程可以认为是粘性不可压缩非等温流动与传热过程, 它总是伴随着与内摩擦、传热有关的能量耗散过程, 可以采用粘性不可压缩流体的基本方程来描述。在推导流体, 特别是聚合物熔体的方程时, 我们假设流体是一个连续体。即忽略材料的分子结构, 并可以在流体内的任意点确定像速度和密度之类的物理变量。这一假设还保证了这些物理因素的变化是均匀的, 从而使我们能够推导出它们的量值。虽然忽略流体的分子结构会产生较大的限制, 但连续体的假设使我们使用标准数学工具来准确描述流体的运动。

2.4.1 动量方程 (牛顿第二定律)

根据牛顿第二定律, 一个单元的动量的变化量等于作用在这个单元上的所有作用力的总和。用公式表示为^[27]:

$$\rho \cdot \frac{d\bar{V}}{dt} = \rho \cdot \bar{g} + \nabla \tau - \text{grad}p \quad (2.1)$$

笛卡尔坐标下为:

X 方向:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho \cdot g_x \right) \quad (2.2)$$

Y 方向:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho \cdot g_y \right) \quad (2.3)$$

Z 方向:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho \cdot g_z \right) \quad (2.4)$$

2.4.2 能量守恒定律 (热力学第一定律具体形式)

根据能量守恒定律, 在流动的介质中任何内部的能量变化都是外部做功的结果。这些外部做功的类型为: 所施加的变形应力所作的功; 压力做功引起的体积变化; 热量的升高与下降。据此, 我们得出能量方程^[28]:

$$\rho \cdot C_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad} T \right) = -\text{div} \bar{q} - T \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \cdot \text{div} \vec{V} + \tau \cdot \text{grad} \vec{V} \quad (2.5)$$

笛卡尔坐标下为:

$$\begin{aligned} \rho \cdot C_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) - T \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \cdot \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \\ + \left[\left[\tau_{xx} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + \tau_{yy} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} + \tau_{zz} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} \right] + \tau_{xy} \cdot \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \tau_{xz} \cdot \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \cdot \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.4.3 连续方程 (质量守恒定律)

流体的一些性质是位置和时间的函数。连续性方程用来表示因流量的变化 (因速度矢量引起) 引起的流体内某个点上瞬时密度的改变。其形式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (2.7)$$

笛卡尔坐标下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot V_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

2.4.4 状态方程 (Spencer Gilmore 方程)

为模拟注射成型过程, 需要了解流体的热力学性质。这可以从材料的 PVT 数据 (压力、体积和温度关系) 获得。描述这三者之间关系的是材料的状态方程。用这个状态方程, 当已知其中的任意两个变量时, 就可以得到第三个变量。Spencer Gilmore 方程, 对应于静态的理想气体状态方程的形式, 其形式如下^[29-30]:

$$V = \frac{R \cdot T}{W \cdot (p + p^*)} + b^* \quad (2.9)$$

式中: R—气体常数;

T—流体温度;

W—材料分子单体的相对分子量;

P—流体压力;

P*—Cohesion 压力;

b*—微分子的固有体积。

2.4.5 塑料粘度模型

(1) 牛顿流体和非牛顿流体

应力与应变成比例变化的流体，称牛顿流体。在任何温度下，牛顿流体的粘度是常数。然而，不同温度下，流体具有不同的粘度。而应力与应变不成比例变化的流体，则为非牛顿流体。

(2) 充模分析的粘性模型

为建立注塑成型过程的模型，需要建立粘性函数。关于粘性的函数现有很多有名的模型。常见的粘性函数有：幂律模型、二次模型、矩阵模型、Ellis 模型、Cross 模型、Carreav 模型、积分模型。

所有的模型都是为了尽可能地接近流体的试验数据而建立。粘性对温度的依赖性一般是通过用另外的附加函数乘以粘性函数来获得。

WLF 方程：

$$a_r = e^{\frac{-b_1(T-T_0)}{b_2+T-T_0}} \quad (2.10)$$

其中 b_1 和 b_2 是常数， T_0 是参考温度，而 T 是当前温度。

Arrhenius 方程^[31]

$$a_r = e^{\frac{\Delta U}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.11)$$

其中 ΔU 是活化能， R 是气体常量， T_0 参考温度， T 是当前温度。

① 幂律模型

该模型的数学表达式为：

$$\eta = \psi \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (2.12)$$

其中： ψ 和 n 是常数。当 $\psi=n$ 和 $n=1$ 时，即为牛顿流体。对聚合物熔体，常数 n 介于 0 和 1 之间，而 ψ 介于 5000 和 50000 [Pa·s] 之间。对式子两边求自：

$$\ln(\eta) = (n-1) \cdot \ln(|\dot{\gamma}|^{n-1}) + \ln(\psi) \quad (2.13)$$

这个式子表明他们之间是线性关系。因此，幂律模型能够反映高切变率下熔体的行为。而且也容易通过把试验数据带如该公式来确定常数 ψ 和 n 。

幂律模型也有其不足之处，它仅适用于应变率较高的情况。幂律模型在注塑成型的成型流动中有着广泛的应用。尤其在充模阶段，通常切变率很高，可以用幂律模型进行计算。

② 二次模型

为解决低切变率时的粘性问题，可以用下面的经验公式^[32]：

$$\ln(\eta) = A_0 + A_1 \cdot \ln \dot{\gamma} + A_2 \cdot T + A_3 (\ln \dot{\gamma})^2 + A_4 \cdot T \cdot \ln \dot{\gamma} + A_5 \cdot T^2 \quad (2.14)$$

其中： A_i 是常数。

然而这个模型也有其局限性。这个模型虽然有很好的适用性，但它会导出没有流变学意义的流体行为。如：它可导出流体的粘度随切变率成正比增加，而这是不可能的。

③ 矩阵数据

这个模型只是对粘度、温度和切变率三者关系试验所得数据的集合。没有建立函数关系，因而没有拟合曲线。分析程序在接近现场条件的数据点之间进行直线插值。矩阵数据适用于具有非寻常特性的流体，如结晶熔体，为了有效的利用所列数据，矩阵数据必须覆盖尽可能宽的粘度范围。其他用函数表示的模型可以通过外插值获得曲线所在范围以外的数值，尽管这些结果可能不准确。而矩阵模型确无法适用外插值法。

④ Ellis 模型

该模型把粘度表示为切变率 τ 的函数。其形式为：

$$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right)^{a-1} \quad (2.15)$$

⑤ Carreau 模型

模型的数学表达式为：

$$\eta = \frac{a}{(1 + b \cdot |\dot{\gamma}|)^c} \quad (2.16)$$

其中： a 、 b 和 c 是流体的常量。

⑥ Cross 模型

该模型的数学表达式为：

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (2.17)$$

其中： τ^* 为牛顿流体和幂律模型流体的转变点处的切应力。

⑦ 积分模型^[41-42]

这个流变状态方程描述了弹性的和粘性的聚合物熔体流动行为。

$$\underline{\sigma}(t) = -p(t) \cdot \underline{E} + \underline{\tau}(t) = -p(t) \cdot \underline{E} + \int^t \mu(t-t') \cdot h(I_1, I_2) \cdot C_i(t')^{-1} dt' \quad (2.18)$$

式中： $\sigma(t)$ —在观察间隔 t 处的应力张量；

$p(t)$ —各向同性的压力；

E —单位张量；

$\tau(t)$ —额外应力张量；

$\mu(t-t')$ —在恒温下线性粘弹性理论的记忆函数；

$h(I_1, I_2)$ —衰减函数；

$C_i(t')^{-1}$ —Fingerscher 变形张量；

I_1, I_2 —Fingerscher 变形张量的不变量。

2.5 充模流动过程假设与简化

塑料熔体在加工过程中的流动，满足连续性方程、动量定律及能量守恒方程、流变本构方程。注塑流动是一个粘弹性、非稳态非等温的复杂过程，加上模腔内几何形状的复杂，要对其流动做精确描述比较困难，故在实际应用中作适当简化和假定。

在工程实际中，注塑加工的制品多是薄壁件，即厚度方向尺寸远不于其它两个方向的尺寸，因此可假定熔体在扁平型腔中流动。在此基础上做如下简化：型腔壁以热传导为主，忽略沿厚度方向的对流传热，而型腔内的流动以热对流为主，忽略沿流动方向的热传导。模腔内流动以粘滞为主，忽略惯性力的影响，仅考虑熔体的剪切力，忽略正应力的影响假定。假定压力沿厚度方向不变，忽略因冷凝层等作用在厚度方向产生的压力梯度。假定熔体为不可压缩流体，并设熔体前沿位置在厚度方向不变。

2.6 翘曲 CAE 的数学模型及数值计算

从工程角度讲，翘曲分析就是在塑件的设计阶段完成注塑成型制品尺寸的预测，并可以预测注射制品的使用性能，验证模具结构、注塑工艺参数是否合理，为用户设计提供直观有效的信息。从力学研究角度讲，就是根据初应力、初应变、边界条件、工作载荷等求解静态（准静态）平衡方程，得到位移的结构分析过程。在注塑成型过程中产生的应变可完整地表示为如下的形式：^[35]

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^p + \varepsilon_i^T + \varepsilon_i^C + \varepsilon_i^R + \dots \quad (2.19)$$

式中：

ε_i —与应力相对应的真实的应变分量；

ε_i^p —静压力产生的应变

ε_i^T —温度不均匀产生的应变，与膨胀系数有关；

ε_i^c —结晶收缩产生的应变；

ε_i^R —化学反应产生的应变。

为了便于研究，所考虑的各种应变常常被看成是时间或压力的函数，即：

$$\varepsilon_i^j = f(p) \text{ 或 } \varepsilon_i^j = f(T)$$

式中：j—表示前面所述的各种应变。

各种应变的表达式为：

$$\varepsilon_i^p = -\int_0^p \beta dP, \quad \varepsilon_i^T = -\int_{T_0}^T a dT, \quad \varepsilon_i^c = -\int_{\lambda_0}^{\lambda} c_r dC, \quad \varepsilon_i^R = \int_{\zeta_0}^{\zeta} c_r dR \quad (2.20)$$

式中

P—压力；

T—温度；

ζ —结晶度；

λ —化学反应时的一种转换系数；

β —可压缩性；

a—热膨胀系数；

C_r —与材料结晶相关的常数；

C_R —与材料化学反应相关的常数。

初应力（注塑制品的残余应力）主要包括：流动 / 保压过程的流动残余应力及温度不均匀引起的热残余应力，可用粘弹本构方程求出。初应力、初应变确定后，可用有限元数值方法完成翘曲变形分析。注塑制品翘曲变形的 CAE，一般是：先求出制品出模时的残余应力，然后利用热弹性不变形理论，采用基于三角形薄板、薄壳离散单元的有限元模型，计算脱模后的变形值。翘曲变形的数值模拟公式为^[36-37]：

$$\sum_i [K_i] \{\delta\} = \{R_T\} - \{R_0\} \quad (2.21)$$

上式右端第一项为温度等效温度载荷，第二项为初始应力（残余应力）、初始应变的等效载荷。

从数值计算角度讲，一般二次单元（如六点三角形板单元）比线性单元（如三结点三角形板）有更高的精度；而且对于同一种网格，单元数目越多，其解越接近于真实解。就翘曲变形 CAE 本身而言，数学模型、数值算法能保证相当高的精度，但由于有些参数，如粘弹性的剪切松弛时间，测量拟合获得比较困难，加上注射成型过程对分子运动

取向的影响机理有待于进一步研究，工程应用时对计算机计算时间的要求，模型的简化比较多，在数学模型、数值算法两方面会带来一定的误差。

3 制品及模具结构

对于模具设计人员来说,如何根据图样或产品要求尽快的设计出结构优化的模具是重中之重。模具设计需要考虑很多因素,如塑件特点、型腔数目、注塑机类型、模具制造工艺的可行性以及具体的加工条件等。在对这些问题进行充分的研究之后,就可以开始模具设计了。主要包括模具的总体结构、成型部分、浇注系统、冷却系统和脱模机构等的设计^[38]。本课题利用的是现有的模具进行研究。

3.1 制品及工艺性分析

本次分析的塑料件,是一个开口状的零件,壁厚为 2.6mm。如图 3.1 所示,开口的尺寸为 9 mm,开口内需要配合一个圆杆,圆杆与塑件之间靠销钉连接,连接后的圆杆可以在塑件开口范围内摆动。圆杆直径为 8mm,其配合情况如图 3.2 所示。材料为 POM (聚甲醛)。

POM 的突出性能为:力学性能和刚性好,接近金属材料,是替代铜、铸铝、铝等金属材料的理想材料;耐疲劳性和耐蠕变性极好;耐磨损、自润性和摩擦性好;热稳定性和化学稳定性高,电绝缘性优良。POM 的缺点为密度大,耐酸及耐燃性不好,后收缩大且不稳定,尺寸稳定性差,耐候性不高。POM 广泛用于电子电器、机械、汽车、仪器仪表、建筑和日用品领域。

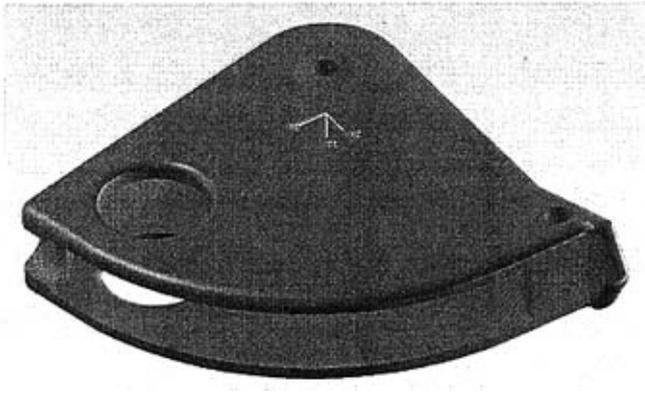


图 3.1 制品模型
Fig.3.1 Product model

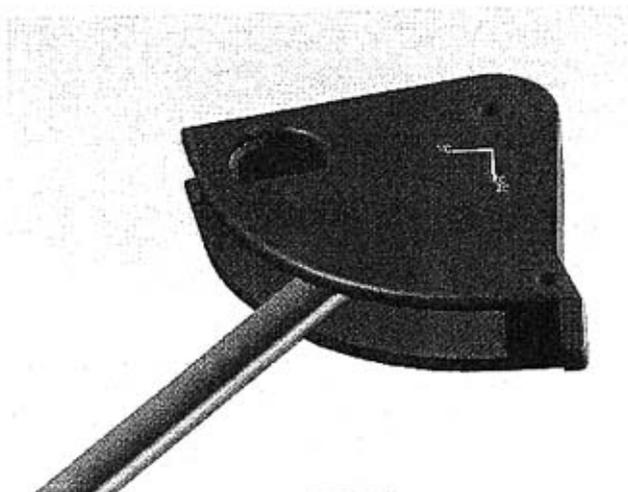
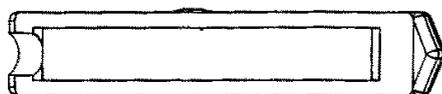


图 3.2 产品的配合
Fig.3.2 Products assembly

由于在设计模具的过程中，没有考虑到制品翘曲变形的严重性，导致制品在出模后开口部分向内侧收缩严重，开口尺寸变小，最大翘曲变形量在 0.8mm 左右。变形示意图如图 3.3 所示。制品实物照片如图 3.4 所示（为了清楚的表示出变形，特意将变形处涂成白色）。由于变形的存在，使得圆杆在制品中运动时，就会与其发生摩擦，运动受阻，制品不合格。在实际生产中，通过调整注塑工艺参数翘曲变形不能得到明显的改善。



理想状况



实际状况

图 3.3 变形情况
Fig.3.3 Deformation

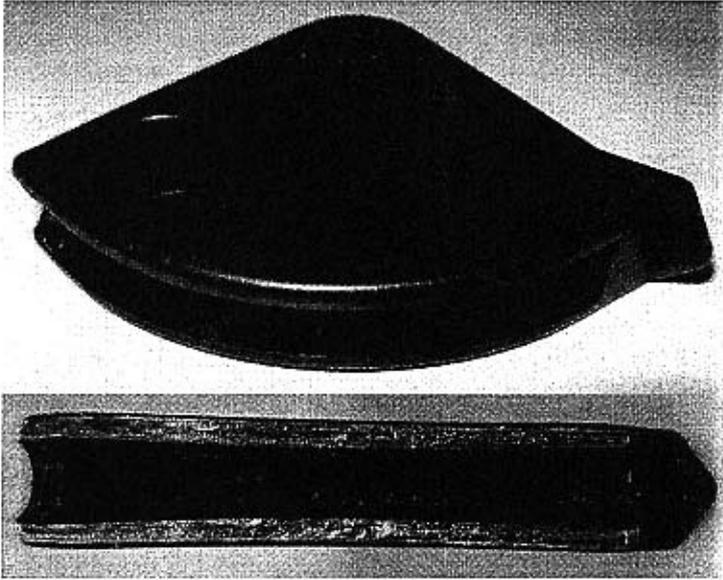
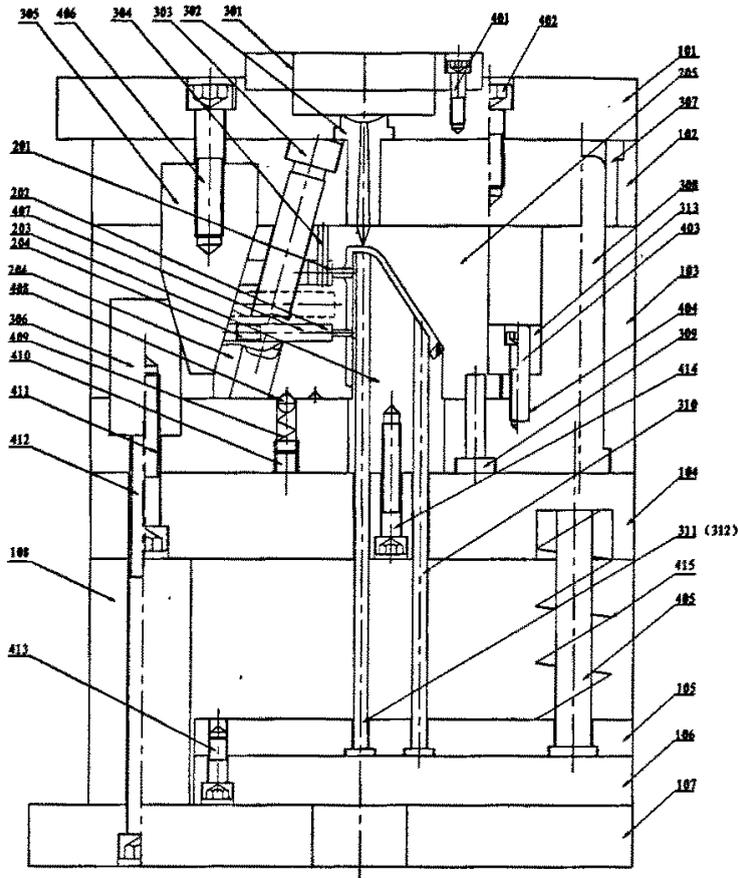


图 3.4 制品照片
Fig.3.4 Product photos

3.2 模具的总体结构

注塑模具按照总体结构可以分为单分型面注塑模、双分型面注塑模、带有活动镶块的注塑模和带有侧向分型抽芯的注塑模具等。由于此塑料件为扁平的开口结构，如果选择开模方向为垂直开口的方向，那么要增加一个很大的侧向抽芯机构，而且抽芯机构的行程也很大，模具制造很困难。如果开模方向为顺着开口方向，那么，侧向抽芯机构的行程会变得很小，在模具制造上很容易实现，但是侧向抽芯机构会变成两个，而且分型面也变成了一个复杂的曲面。对于此种结构的塑件，哈夫结构的模具是最适合不过了，模具结构如图 3.5 所示。



101-定模固定板 102-定模板 103-动模板 104-动模底板 105-顶杆固定板 107-动模固定板
 201-侧滑块镶块 1 202-侧滑块镶块 2 203-型芯 204-左侧滑块 205-右侧滑块 301-定位环
 302-浇口套 303-斜导柱 305-定模左楔紧块 306-定模右楔紧块 309-销钉 310,311,312-顶杆
 313-压板

图 3.5 模具结构图
 Fig.3.5 Mold structure

3.3 模具的成型部分

成型部分，作为塑件的几何边界，包容塑件，完成塑件的结构和尺寸的成型，是注塑模的核心部分。成型部分通常是由定模、动模、嵌件、特殊成型零件以及成型顶杆等组成。本课题的塑件采用一模一腔，哈夫结构，其结构简图如图 3.6 所示。

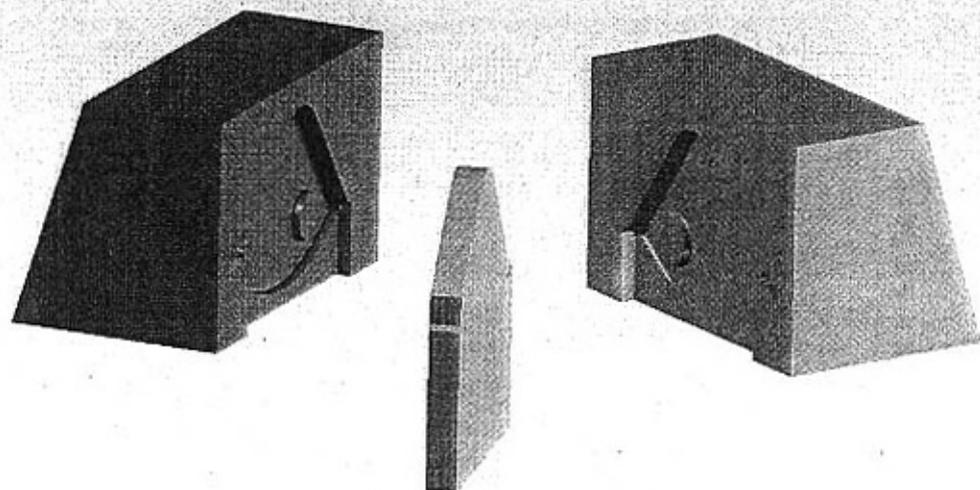


图 3.6 成型部分
Fig.3.6 Molding parts

3.4 模具的冷却系统

在注塑成型过程中，模具的温度直接影响到塑件成型的质量和生产效率。由于各种塑料的性能和成型工艺要求不同，模具的温度也要求不同，一般注射到模具内的塑料温度为 200°C 左右，而塑件固化后从模具型腔中取出时其温度要低很多，这就需要在模具中通入冷却水，使模具降温。普通的模具通入常温的水进行冷却，通过调节水的流量就可以调节模具的温度。这种冷却方法一般用于流动性好的低熔点塑料的成型。为了缩短成型周期，还可以把常温的水降低温度后再通入模具内。因为成型周期主要取决于冷却时间，用低温水冷却模具，可以提高成型效率。对于流动较差的塑料如聚碳酸酯、聚苯醚等，如果模具温度太低会影响塑料的流动性，增大流动剪切力，使塑件内应力增大，甚至还会出现冷流痕、银丝、短射等缺陷。因此对于高熔点、流动性差的塑料，流动距离长的制品，为了防止填充不足，有时也在水管中通入温水或热油。

本套模具的冷却水道的详细布局可以从模具的俯视图（图 3.7）和型芯型腔的零件图（图 3.8，图 3.9）中看出。由于受到型芯的结构所限，型芯的冷却采用了隔板的形式。此布局基本能保证型芯型腔的均匀冷却，可以尽可能的减小内应力的产生。

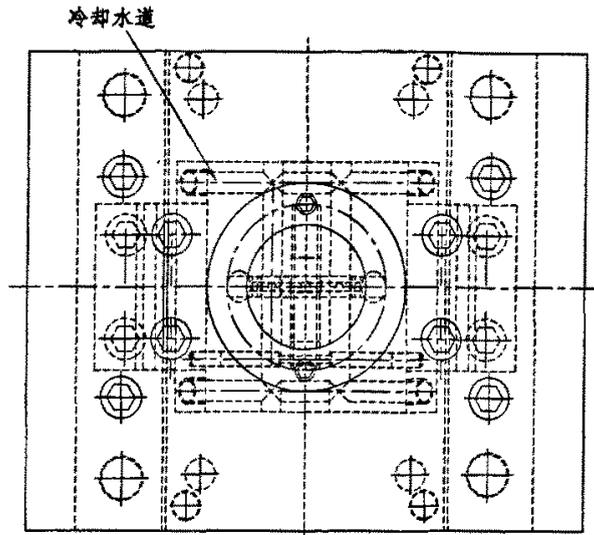


图 3.7 模具俯视图
Fig.3.7 Planform of mold

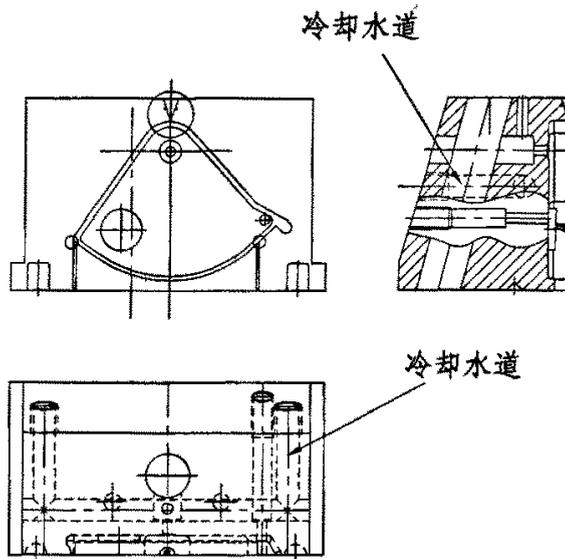


图 3.8 型腔
Fig.3.8 Cavity

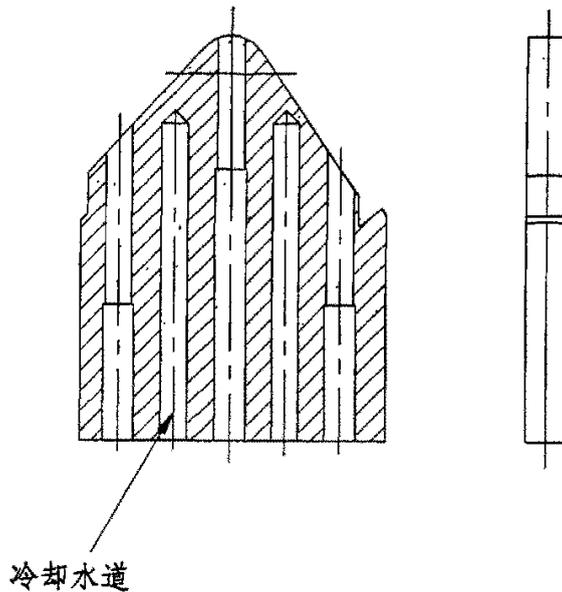


图 3.9 型芯
Fig.3.9 Core

3.5 模具的浇注系统

浇注系统是指模具中从注塑机喷嘴到型腔为止的塑料流动通道。它可分为普通流道浇注系统和无流道浇注系统两大类型。浇注系统设计的好坏对制品性能、外观和成型难易程度影响很大。

本套模具采用的浇注系统如图 3.10 所示，浇口尺寸为 $\Phi 0.8\text{mm}$ ，成型后浇注部分很容易在浇口位置与制品分离。为了防止在开模时浇注部分留在浇口套内，在浇注部分设计了倒锥形的结构，这样在开模时候，浇注系统首先与制品一起脱离定模部分，然后在斜导柱的推动下，侧滑块分开，制品与浇注部分都留在型芯上，然后由推出机构推出，完成脱模过程。

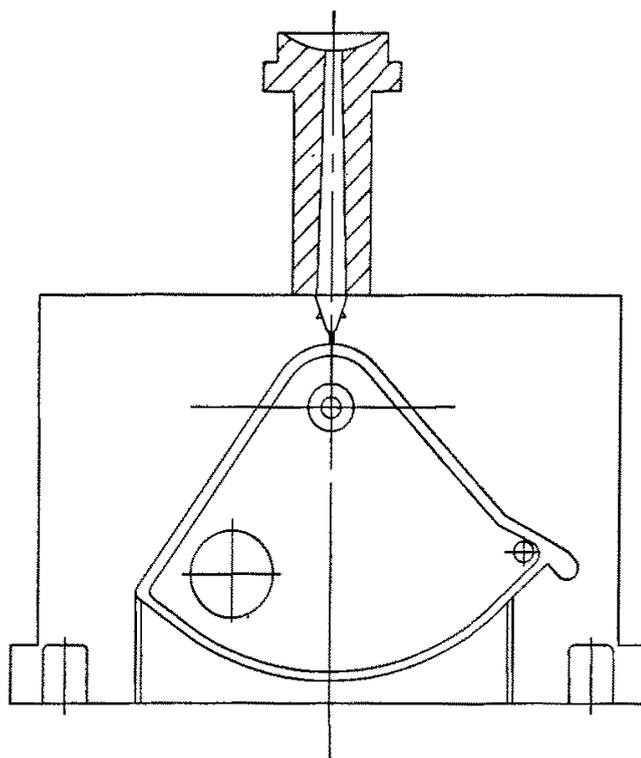


图 3.10 浇注系统
Fig.3.10 Feeding system

3.6 模具的脱模机构

在注塑成型的每一个循环中，塑件必须从模具中脱出，将塑件从模具中脱出的机构成为脱模机构，或称顶出机构。顶出过程中，要求塑件受力均匀，不至在顶出时变形或损坏。

本套模具有三个顶杆，每个顶杆的头部都参与成型，为了防止顶杆的转动，将顶杆的端部铣成长圆形。三个顶杆分布均匀，塑件在顶出时受力均匀。

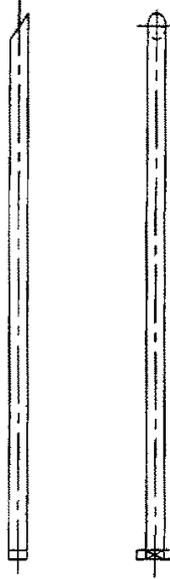


图 3.11 顶杆
Fig.3.11 Ejector pin

3.7 实验设备及相关工艺

3.7.1 实验设备

实验中所采用的注塑机是香港华大机械有限公司生产的 TTI-120F 型注塑机，其照片如图 3.12 所示。TTI-120F 型注塑机采用 320 行 40 点阵单色液晶显示器，显示数据和设定参数，薄膜键盘控制显示页面和机器功能。该注塑机有手动、半自动和全自动三种操作模式。此注塑机的技术参数见表 3.1。

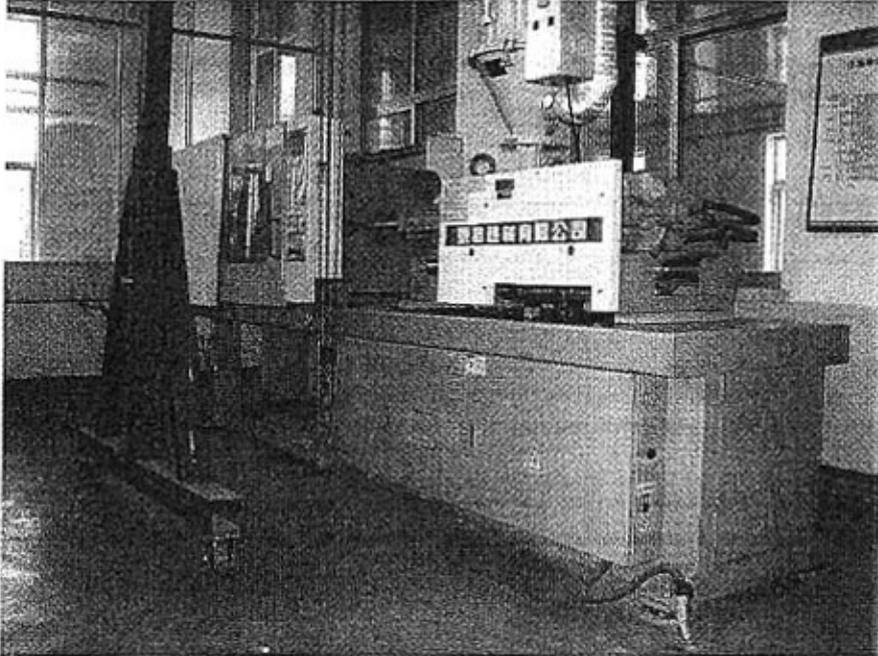


图 3.12 华大 TTI-120F 注塑机
Fig.3.12 Huada TTI-120F injection machine

表 3.1 华大 TTI-120F 型注塑机技术参数

Tab. 3.1 Technology parameters of Huada TTI-120F injection machine

| 注射部分 | | 锁模部分 | |
|--------|-----------------------|--------|---------|
| 螺杆直径 | 40mm | 锁模力 | 120t |
| 螺杆长径比 | 20 | 锁模行程 | 340mm |
| 理论注射体积 | 215cm ³ | 模板最大间距 | 710mm |
| 最大注射速度 | 156cm ³ /s | 最大注射压力 | 1780bar |
| 顶杆行程 | 95mm | 注射台行程 | 300mm |
| 螺杆行程 | 171mm | 顶杆力 | 4t |
| 螺杆最大转速 | 260r/min | 顶杆数 | 1 |

3.7.2 成型材料

本实验所采用的材料是日本宝理塑料有限公司生产的 POM M90-44，其基本参数如表 3.2 所示。

表 3.2 成型材料 POM M90-44 基本信息

Tab.3.2 Basic information of modeling material POM M90-44

| 性能项目 | | 试验条件[状态] | 测试方法 | 测试数据 | 数据单位 |
|------|------------------|--------------------|------------|--------------------|-----------------------|
| 物理性能 | 比重 | — | ASTM D-792 | 1.41 | — |
| 机械性能 | 拉伸强度 | — | ASTM D-638 | 60 | MPa |
| | 伸长率 | — | ASTM D-638 | 60 | % |
| | 弯曲强度 | — | ASTM D-790 | 96 | MPa |
| | 弯曲模量 | — | ASTM D-790 | 2580 | MPa |
| | IZOD 冲击 强度 | 缺口侧 | — | ASTM D-256 | 63 |
| 反缺口侧 | | ASTM D-256 | | 760 | J/m |
| 电气性能 | 介电击穿强度 | 短时间 实验: 2mmt | ASTM D-149 | 24 | MV/m |
| | 体积电阻系数 | 3mmt | ASTM D-257 | 1×10 ¹⁴ | Ω.cm |
| 热性能 | 线膨胀系数 | 室温 | — | 10 | X10 ⁻⁵ /°C |
| | 热变形温度 | 1.82MPa | ASTM D-648 | 110 | °C |
| | 阻燃性 | — | UL 94 | HB | — |

3.7.3 注塑工艺条件及对制品成型的影响

在制品和模具确定之后，注塑工艺参数的选择和调整对制品质量将产生直接影响。

(1) 注塑参数

① 注射量 注射量是指注塑机螺杆在注射时向模具中所注射的物料的熔体量。选择注射量时，一方面必须充分的满足制品及其浇注系统的总用料量，另一方面必须小于注塑机的理论注射体积。如果选用注射量过小则会因注射量不足而是制品产生各种缺陷，但过大又造成能源的浪费。所以注塑机不可用来加工小于理论注射量的 10%或超过理论注射量的 70%的制品。

② 计量行程 每次注射行程终止后，螺杆是处在料筒的最前位置，当预塑程序到达时，螺杆开始旋转，物料被送到螺杆头部，螺杆在物料的反压力作用下后退，直至碰到限位开关为止。这个过程称为计量过程或预塑过程，螺杆后退的距离称计量行程，或

预塑行程。因此物料在螺杆头部所占有的容积就是螺杆后退所形成的计量容积，也正是注射容积，其计量行程也就是注射行程。因此制品所需要的注射量是用计量行程来调整的。

注射量的大小与计量行程的精度有关：如果计量行程调节太小会造成注射量不足，如果计量行程调整的太大，使料筒前部每次注射后的余料太多，使熔体温度不均或过热分解，计量行程的重复精度的高低会影响注射量的波动。

料温沿计量行程的分布是不均匀的，增加计量行程会加剧料温的不均匀性。

③ 余料量 螺杆注射完了之后，并不希望把螺杆头部的熔料全部注射出去，还希望留存一些，形成一个余料量。这样，一方面可以防止螺杆头部和喷嘴直接接触发生机械破损事故；另一方面，可通过此余料量来控制注射量的重复精度，达到稳定注塑制品质量的目的；如果余料垫过小，达不到缓冲的目的，如果过大会使余料积累过多。

④ 防涎量 防涎量是指螺杆计量到位后，又直线的倒退一段距离，使计量室中熔体的比容增加，内压下降，防止熔体从计量室向外流出。这个后退动作称为防流涎动作。后退距离称为防流涎量或防流涎行程。防流涎还有一个目的是在注射喷嘴不退回进行预塑时，降低喷嘴流道系统的压力，减少内应力，并在开模时容易抽出料把。

⑤ 螺杆转速 螺杆转速影响注塑物料在螺杆中输送和塑化的热历程和剪切效应，因此它是影响塑化能力、塑化质量和成型周期等因素的重要参数。无论对于结晶型聚合物还是非结晶型聚合物，随着转速的提高塑化能力都会增加，熔体温度也会提高。

⑥ 预塑背压 预塑时的背压简称背压，表示螺杆在预塑时，计量室中熔体的压强。预塑时，只有螺杆头部的熔体压力，克服了螺杆后退时的系统阻力之后，螺杆才能后退。

⑦ 注射压力与保压压力 选择注射制品的注射压力时，首先要考虑注塑机所允许的注射压力，如果注射压力调定过低会使模腔压力不足，熔体不能充满模腔，反之，如果调定过大，不仅会造成制品溢边、涨模等不良现象，还会造成压力波动，甚至系统过载。不管是动压还是静压，在注射压力作用下，熔体充满模腔之后，制品在模内边冷却边收缩，为了补缩需要继续维持熔体流动的注射压力称保压压力。因此注射压力和保压压力都控制了充模压力，对选择和调整注射和保压压力对制品质量起重要影响。

⑧ 注射速度 注射速度是单位时间内注入模腔中熔体的体积。注射速度对许多工艺因素起影响。注射速度提高将使充模压力提高，使流动长度增加并使制品质量均匀而密实。但是过高的充模速度会使增加压力损失，会造成熔体的不稳定流动发生弹性湍流或由于熔体速度头的冲击，造成涨模溢边现象。

注射速度的确定，应该根据不同的注塑制品的结构形状尺寸，浇道系统和聚合物的性质以及有关的流变数据来确定。注射速度必须保证流变数据中对指定材料所允许的切

变速率和最短流动长度，必须保证由剪切而产生的热效应和切变效应不超过聚合物的热物理性质和切变强度所允许的程度。

(2) 合模参数

① 合模力 在注射充模阶段和保压补缩阶段，模腔压力要产生是模具分开的涨模力。为了克服这种涨模作用，合模系统必须施予模具以闭紧力，称为合模力。

合模力的调整将直接影响制品的外观质量和尺寸精度；合模力不足会导致模具离缝，发生溢料，但太大会使模具变形，制品产生内应力和不必要的能量消耗。

② 顶出力 当制品从模具上落下时，需一定的外力来克服制品和模具的附着力。所以制品的顶出力、顶出速度和顶出行程要根据制品的结构，形状和尺寸，制品的材料性能以及工艺条件进行调整。过小的顶出力制品无法脱下，过大的顶出力和顶出速度会使制品发生翘曲变形，甚至断裂破坏。

③ 顶出摩擦力 顶出力必须大于制品和模具表面的摩擦力时，制品才能脱模，但是影响此摩擦力的因素很多。如表面压力、顶出速度、冷却时间、脱模温度、表面粗糙度等等。

(3) 温控参数

① 烘料温度 料的干燥对某些聚合物材料是必备的工序，如果聚合物湿度太大，制品就会出现剥层、银纹等不良现象。

② 料筒与喷嘴温度 根据聚合物在料筒内的塑化机理，分三段加热：第一段固体输送段是靠近料口处，温度要低一些，有冷却水冷却防止物料架桥保证较高的固体输送效率；第二段压缩段是物料处于压缩状态并逐渐熔融，温度设定比第一段要高出 20~25℃，第三段计量段是物料全熔融，预塑开始时，这一段相应于螺杆计量段，在预塑终止后形成计量室储存塑化好的物料。

喷嘴温度对保证注塑工艺同样是重要的，因为喷嘴有加速熔体和提高温度的作用。为了防止熔体在喷嘴处凝固，需要提高喷嘴加热圈的温度。

③ 模具温度 模具温度是指与制品接触的模腔表面温度。因为它直接影响到制品在模腔中的冷却速度，所以选择合适的模温会缩短成型周期，提高制品质量，减少废品率。

结合以上各个参数对制品成型的影响，并通过试验中的调试，最终确定了试验中各工艺参数（如表 3.3 所示）。

表 3.3 注塑工艺参数
Tab.3.3 Process settings

| 工艺参数 | | | | | | | |
|--------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 温度控制系统 | 喷嘴 | 一段 | 二段 | 三段 | 四段 | 五段 | 油温 |
| | 180 | 190 | 185 | 180 | 17 | 17 | 16 |
| 注射系统 | | 射胶一段 | 射胶二段 | 射胶三段 | 射胶四段 | 保压一段 | 保压二段 |
| | 速度 | 90% | 60% | 30% | 20% | 10% | |
| | 压力 | 120bar | 35bar | 30bar | 20bar | 10bar | 0 |
| | 位置 | 42mm | 42mm | 42mm | 42mm | 0.5s | 0.2s |
| 合模系统 | | 快速锁模 | 低压锁模 | 高压锁模 | 慢速开模 | 快速开模 | 减速开模 |
| | 速度 | 30% | 5% | 10% | 10% | 30% | 10% |
| | 压力 | 50bar | 10bar | 80bar | 80bar | 50bar | 15bar |
| | 位置 | 110mm | 31mm | 3mm | 50mm | 180mm | 200mm |
| 顶针设定 | | 速度 | 压力 | | 位置 | | |
| | 顶针前进 | 10% | 30bar | 顶出 | 70mm | | |
| | 顶针后退 | 16% | 15bar | 退回 | 15mm | | |

4 模流分析软件 Moldflow 介绍

随着翘曲理论研究不断完善, 模具 CAE 技术取得了长足的进步, 出现了许多优秀的商品化模流分析软件。比较有名的有 MOLDFLOW、C-MOLD、MOLDEX 和华塑 CAE 等。由于 MOLDFLOW 在模具分析中用的最早, 使用范围最广, 因而一直以来都在业界中处于主导地位, 被广泛认为是最优秀的塑料模具分析软件, 代表了塑料模具 CAE 技术发展的最高水平。

4.1 MOLDFLOW 简介

MOLDFLOW 公司自建立以来, 通过自身的不懈努力以及与科研机构、企业客户在研究和产品开发方面的紧密合作, 确立了在模流分析软件中的领导地位。2000 年, MOLDFLOW 公司合并了美国 AC-Tech 公司及其产品 C-Mold。

经过近 20 年的不断发展, MOLDFLOW 系列软件的用户数量迅速增长, 并且遍布世界工业领域各大知名企业, 应用程度也达到不断的深入。通过“进行广泛的注塑分析”将 MOLDFLOW 积累的丰富注塑经验带进制品和模具设计, 并将分析结果和实际注塑机控制相联系, 自动监控和调整注塑机参数, 从而优化模具设计、优化注塑机参数设置、提高制品生产质量的稳定性, 使得制品具有更好的工艺性^[36]。

运用 MOLDFLOW 软件, 可以得到制品的实际最小壁厚, 优化制品结构, 降低材料成本, 缩短生产周期, 保证制品能全部充满; 运用 MOLDFLOW 软件, 可以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, 在计算机上进行试模、修模, 大大提高模具质量, 减少修模次数; 运用 MOLDFLOW 软件, 可以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。

4.2 MOLDFLOW 系列软件

MOLDFLOW 的产品适用于优化制品和模具设计的整个过程, 并提高了一套整体的解决方案。MOLDFLOW 软硬件技术为制品设计、模具设计、注塑生产等整个过程提供了非常有价值的信息和建议, 而且这些信息可以方便地实现共享。下面简单介绍一下 MOLDFLOW 的系列产品。

4.2.1 Moldflow Plastics Adviser

Moldflow Plastics Adviser 简称 MPA, 它为注塑成型提供了一个低成本、高效率地解决方案。其特点是: 可以从任意常用 CAD 系统中(如 CATIA、UG、PRO/E)接受实体

造型的 STL 格式文件，不需要任何修改；无需划分有限单元网格，可直接进行注塑成型分析；支持 OpenGL 技术，图形处理高效、快捷；操作相对简单易学。

Moldflow Plastics Adviser 包括 Moldflow Part Adviser（产品设计顾问）和 Moldflow Mold Adviser（模具设计顾问）两个产品。使得该系列产品可以在以下方面大大提高分析效率。

Part Adviser 适用于制品设计者，塑件顾问使得设计者在产品初始设计阶段就注意到产品的工艺性，并指出容易发生的问题。同时，制品设计者可以通过了解如何改变壁厚、制品形状、浇口位置和材料选择来提高制品的工艺性。塑件顾问还提供了关于熔接痕位置、困气、流动时间、压力和温度分布的准确信息。

Mold Adviser 适用于模具设计者，模具顾问为注塑模采购者、设计者和制造者提供了一个准确易用的方法来优化他们的模具设计。它可以设计浇注系统并进行浇注系统平衡，可以计算注塑周期、锁模力和注射体积，可以建立单型腔系统和或多型腔系统模具。和塑件顾问一样，它基于网络的分析报告使您可以和同事们快速地交流有关模具尺寸、流道尺寸和形式，以及浇口的设计等信息。

4.2.2 Moldflow Plastics Insight

Moldflow Plastics Insight 简称 MPI，它是一个更为深入的制品和模具设计分析的软件集成体，它提供了强大的分析功能、可视化功能和项目管理功能。这些工具使使用者可以进行深入的分析和优化。MPI 使用者可以对制品的几何形状、材料的选择、模具设计及加工参数设计进行优化，从而获得高质量的产品。本文翘曲分析的实例就是在 MPI 下完成的。

使用者可以方便地输入 CAD 模型、选择和查询材料、建立模型并进行一系列的分析，同时先进的后处理技术能给使用者观察分析结果带来方便，它还可以生成基于 Internet 的分析报告，方便地实现数据共享。

MPI 提供了行业内最优秀的集成方案，实现了最广泛的几何模型集成。无论设计的几何模型是什么形式（包括线框模型、表面模型、薄壁实体以及难以用中型面来表达的厚壁实体），MPI 都能提供易于使用的、稳定的、集成的环境来处理。

MPI 能够模拟最广泛的热塑性塑料和热固性塑料注射成型中的制造工艺。具体地说就是 MPI 可以模拟热塑性塑料注射成型过程中的充填、保压以及冷却阶段，还能预测出制品成型后的缺陷，如制品翘曲等。甚至能够分析纤维填充材料的流动情况，预测纤维的取向并在预测产品翘曲时加以考虑。MPI 还可以模拟其他各种热塑性塑料成型工艺，

如气体辅助注射成型、共注和注压成型以及反应成型过程，包括热固性注射成型、反应注射成型和半导体芯片封装。

4.2.3 Moldflow Manufacturing Solutions

Moldflow Manufacturing Solutions 系列产品简称 MMS，它是一个完整的协同合作的管理系统，可提供产品的工艺数据来进行实时的生产管理，自动地设定优化和控制生产过程。

MMS 系统能直接输入 MPA 和 MPI 软件的分析结果，这两个软件都是注塑成型工艺最好的预测分析产品。MPA 和 MPI 的分析结果来设定注塑机的最初流速和压力曲线。通过这种方法，在产品和模具设计阶段就开始的优化工作能直接继承到产品生产过程中，从而缩短模具处理的时间。

MMS 系统集合了一系列运用 Moldflow Plastics Xpert(MPX)和 Moldflow Shot Scope 技术的模块，如今，全球的制造商都在使用这些技术来进行实时的生产管理。

4.3 MOLDFLOW 注塑成型模拟技术

注塑成型模拟技术是一种专业化的有限元分析技术，它可以模拟热塑性塑料注射成型过程中的填充、保压以及冷却阶段，它通过预测塑料熔体在流道、浇口和型腔中流动过程，计算浇注系统及型腔的压力场、温度场、速度场、剪切应变速率场和应力场的分布，预测制品成型缺陷，从而达到优化塑件、模具结构和工艺参数的目的。

MOLDFLOW 作为塑料分析软件的创造者，自 1976 年发行世界上第一套流动分析软件以来，在技术和发展趋势上一直主导着塑料 CAE 软件市场。随着塑料行业的不断发展、塑料制品的复杂程度和对塑料制品质量的不断提高，MOLDFLOW 的注塑成型模拟技术也经历了中面流技术、双面流技术和实体流技术三个阶段。

4.3.1 中面流技术

Midplane 是中面流技术，即将产品的 3D 模型简化为中间面模型。所谓中面就是提取的位于模具型腔和型芯中间的层面来简化 3D 模型。用一维和二维的耦合算法和来代替三维计算。基于中面流技术的注塑流动模拟软件应用的时间最长、范围最广。但实践表明，基于中面流技术的注塑模 CAE 软件在应用中具有很大的局限性。专业的注塑模 CAE 软件造型功能较差，采用手工操作直接构造中面模型十分困难，建构过程往往需要花费大量的时间；由 CAE 软件根据产品三维模型自动计算生成中面模型的效果不理想，网格修补工作量大；由于 CAD 阶段使用的是产品的物理模型，而 CAE 阶段使用的是产

品的数学模型，两者的不统一，使得二次建模不可避免。由此可见，中面流技术已经成为了注塑模 CAE 技术发展的瓶颈。

基于中面流技术的注塑成型模拟技术能够成功地预测充模过程中的压力场、速度场、温度分布、熔接痕位置等信息，具有以下一些优点：技术原理简单，容易理解；网格划分结果简单，单元数量少；计算量较小，即算即得。

但是在中面模型中，由于考虑产品的厚度远小于其他两个方向即流动方向的尺寸，将熔体的充填流动视为扩展层流，忽略了熔体在厚度方向的速度分量，并假设熔体中的压力不沿厚度方向变化，由此将三维流动问题简化为流动方向上的二维问题和厚度方向的一维分析。由于采用了简化假设，它产生的信息是有限的，不完整的。

4.3.2 双面流技术

Fusion 模型是双面流技术，即将产品的 3D 模型简化为外表面和内表面耦合而成的双面流模型。双面流是指在制品的内外表面产生有限元网格，而不是在中间面。目前基于双面流技术的注塑模 CAE 软件均可以将 CAD 系统输出的三维模型的 STL 文件格式转化为有限元网格模型。因此与中面流技术相比在模型处理上却大大减轻了用户建模的负担，提高了有限元建模的效率。因此基于双面流技术的注塑模 CAE 软件在全世界拥有了庞大的用户群，得到了广大用户的支持和好评。但由于上下表面网格无法一一对应，造成上下对应表面的熔体流动前沿存在差别，使得双面流技术分析的准确性受到一定的限制。

双面流技术是指模具型腔或制品在厚度方向上分成两部分，与中面流技术不同，它不是在中面，而是在型腔或制品的表面生成有限元网格，利用表面上的平面三角网络进行有限元分析。相应地，与基于中面的有限差分在中面两侧（从中型层至两模壁）进行不同，厚度方向上有限差分仅在表面内侧（从模壁至中性层）进行。在流动过程中，上下两表面的塑料熔体同时并且协调地流动，其模拟过程为首先产品 STL 格式模型，再进行网格划分，最后进行成型分析。

由于双面流仍然采用和中面流一样的二维半的简化模型假设，所以它除了用有限差分法求解温度在壁厚方向的差异外，基本上没有考虑其他物理量在厚度方向上的变化；随着塑料注塑成型工艺的进步，塑料制品的结构越来越复杂，壁厚差异越来越大，物理量在壁厚方向上的变化变得不容忽视；由于在双面流中，熔体仅仅沿着上下表面流动。因此，分析的结果缺乏真实感，与实际情况仍有一定得差距。

从总体上讲,双面流技术只是一种从二维数值分析(中面模型)向三维数值分析(实体模型)的一种过渡。要实现严格意义上的注塑成型产品的虚拟制造,必须大力开发实体模型技术。

4.3.3 实体流技术

实体流技术的有限元网格不同于 Midplane 模型和 Fusion 模型所采用的二维三角面元,而采用能够真正反映实际流动状态的三维四面体单元。与中面流或双面流相比,基于实体流技术的注塑模 CAE 软件目前所存在的最大问题就是计算量巨大、计算时间长,例如电视机前壳这样的塑料制品,用现行的注塑模 CAE 软件,用目前配置最好的计算机仍需要数百小时才能计算出一个方案。这与目前的模具开发周期相违背,成为制约注塑模 CAE 技术全面推广的瓶颈。因此要真正推广基于实体流技术的注塑模 CAE 软件仍有待软件算法的改进和计算机硬件设备速度的提升。由于中面流技术久经考验,计算速度快,分析准确性高,至今仍然是注塑成型 CAE 分析的主流^[21]。

与中面模型或表面模型相比,由于实体模型考虑了熔体再厚度方向上的速度分量,所以其控制方程要复杂得多,相应的求解过程也复杂得多,计算量大、计算时间过长,这是基于实体模型的注塑流动分析目前存在的最大问题。三种注塑成型分析技术,在技术特点上各有千秋。在实际的工程应用中,要对制品的情况有一个合理的认识,要认清问题的关键所在,从而采用合适的分析技术,利用最少的成本,得到相对满意的分析结果。

5 数值模拟及变形补偿

5.1 MPI 分析过程

5.1.1 项目的创建与模型导入

在 UG 中建立塑料件的三维模型。将其存为 STL 格式。

进行 Moldflow 模拟首先应该新建一个项目。创建新项目可以通过选择 File/New Project 来完成。此时，系统会弹出项目创建路径对话框，我们需要在 Project Name 文本框中输入项目名称，在这里我们将项目命名为 chanpin，默认的创建路径是 MPI 的项目管理路径，如图 5.1 所示。

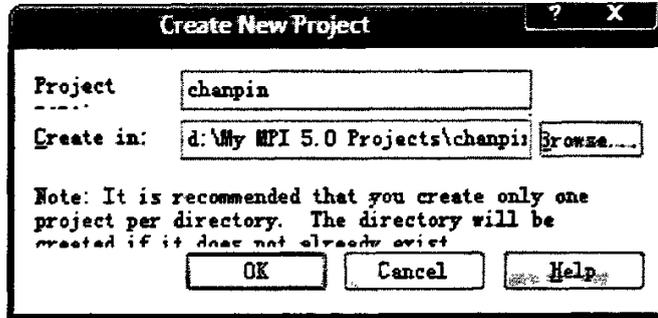


图 5.1 新建项目对话框

Fig.5.1 Creat new project

在项目管理视窗中将显示新建项目名称 Project chanpin，接着导入被分析的产品。右击 project chanpin，接着在弹出的快捷菜单中选择 Import 命令，系统自动弹出 Import 对话框，利用浏览窗口导入刚刚存好的 STL 文件。这里需要选择网格划分类型和产品设计尺寸单位，如图 5.2 所示。使用 Fusion 网格进行划分，故在对话框中选 Fusion 类型，产品设计尺寸单位选择 Millimeters。

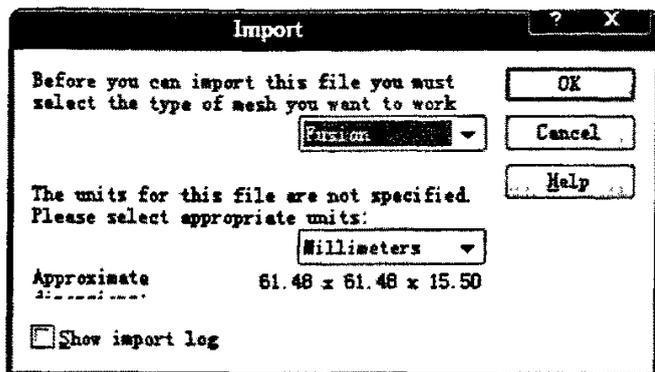


图 5.2 模型导入对话框
Fig.5.2 Import model

5.1.2 模型的网格划分和修补

被分析模型的网格划分和修改是 MPI 分析前处理中最为重要,同时也是最为复杂繁琐的环节,需要耐心仔细的进行处理,网格划分的是否合理,将直接影响到产品最终的分析结果。

在任务对话框中双击 Create Mesh 图标,或者选择 Mesh/Generate Mesh 命令,此时系统会自动弹出网格划分对话框,如图 5.3 所示,点击 Advanced 按钮,在 Global edge length 文本框中输入希望的网格大小。输入网格大小为 3mm,其它值为默认。

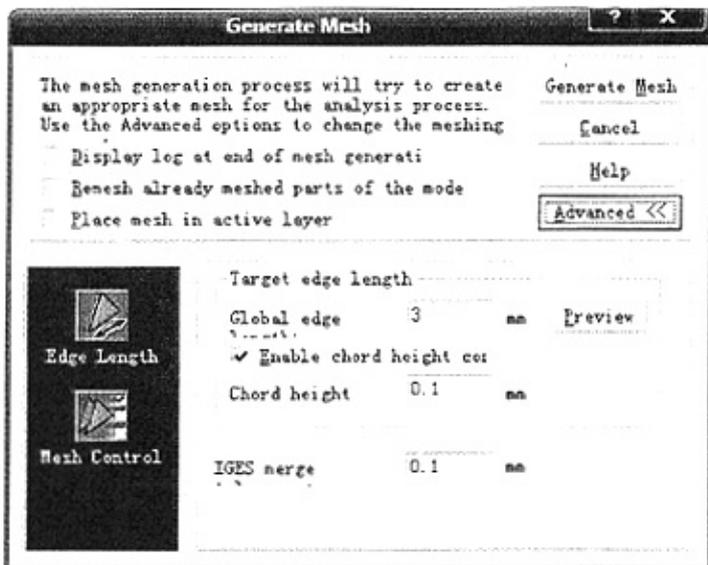


图 5.3 网格划分对话框
Fig.5.3 Generate mesh

设置完毕后，点击 **Generate Mesh** 按钮，系统根据设置情况，自动完成网格的划分和匹配，其过程可以在界面左下角的消息窗口中看到，网格划分之后在管理窗口中出现两个新的层：**New Triangles** 和 **New Nodes**，这两层分别放置三角单元和节点。此时系统划分出来的网格往往存在缺陷，需要进行手工修补，使其质量达到要求后才能进行准确的分析。选择 **Mesh/Mesh Statistics** 命令，可以看到网格统计结果如图 5.4 所示。整个模型必须只有一个连通域。自由边、非交叠边、未定向单元、交叉单元和完全重叠单元的数量都应该是 0。单元纵横比数值视具体情况而定，但是一般最大值应该控制在 10~20 之间。我们可以看到图 5.4 中的网格统计已经基本满足分析要求，可以进行下一步操作了。一旦统计信息中出现网格缺陷，则需要利用 **MPI** 提供的网格工具进行网格的修补，直至消除所有的缺陷和错误。

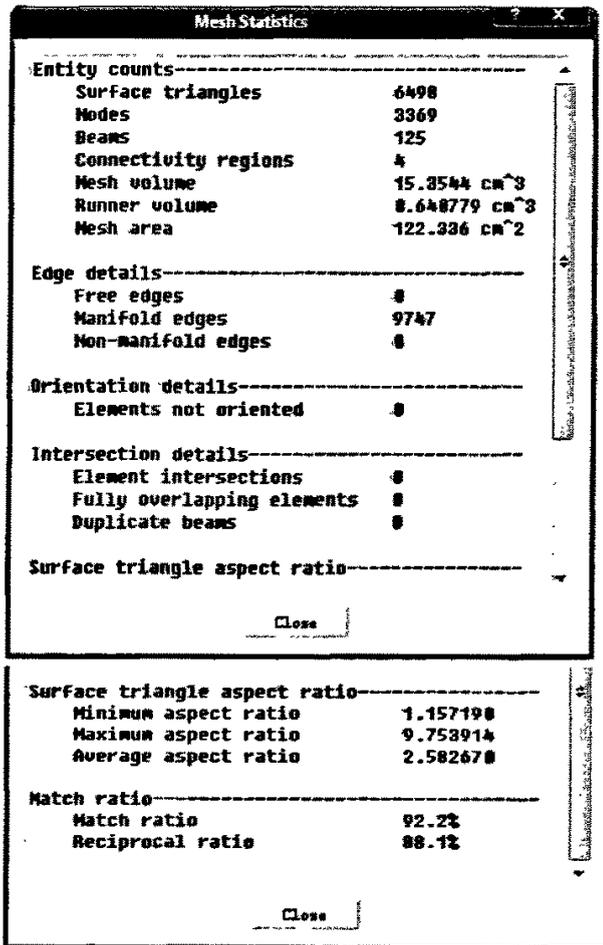


图 5.4 网格信息统计
Fig.5.4 Mesh statistics

修改网格质量，修改后的网格单元数：6498，节点数：3369。纵横比最大为 9.75，匹配率为 92.2%。

5.1.3 分析类型及产品注塑原料的选择

在完成产品模型的网格划分和网格缺陷修改之后，依照分析任务窗口 Study Tasks 中的顺序，设置分析类型及分析内容的次序。

在 MPI 中，创建一个新的项目 Project 后，默认的分析类型是 Fill 填充分析，选择 Analysis/Set Analysis Sequence/Cool+Flow+Warp。

设置完分析类型后，需要选择并设置产品的注塑原料。首先在分析任务窗口 Study Tasks 中，右击材料一栏，并选择 Select Material 命令，在弹出的对话框中，单击 Search 查询，弹出搜索条件对话框，在搜索条件中的 Manufacturer 和 Trade Name 两栏的描述中分别填入 Polyplastics 和 Duracon M90-44，单击 search，在弹出的对话框中选中此材料，再单击 select。此时分析任务窗口 Study Tasks 中的材料一栏正确显示出所选材料 Duracon M90-44: Polyplastics，如图所示。

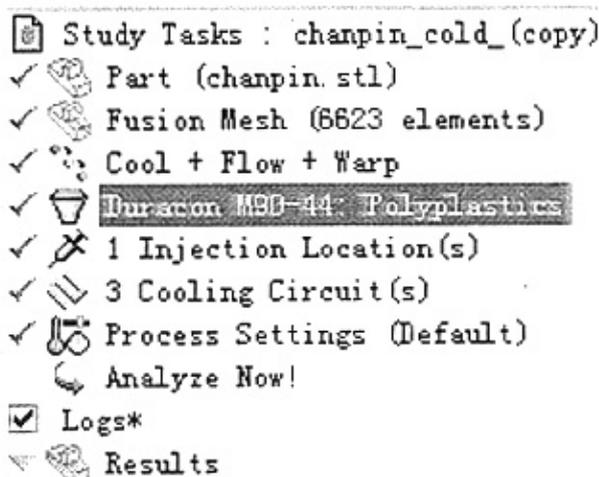


图 5.5 任务窗口

Fig.5.5 Study tasks

5.1.3 添加浇注系统和冷却系统

浇注系统和冷却系统的更改对翘曲变形的影响很大，但是一旦模具做好以后，再想通过更改浇注系统和冷却系统来控制翘曲变形，往往是不现实的，或者成本会很高。因此，只针对模具型腔的尺寸进行相应的更改，对于现有的浇注系统和冷却系统不做更改。

在 MPI 中, 浇注系统与产品的网格模型不同, 全部是由线型杆单元组成的, 其创建方式一般有两种方式: 采用菜单中的 Modeling/Runner System Wizard 工具, 对形状尺寸比较简单的浇注系统进行创建; 直接利用系统的直线、曲线创建功能, 首先勾画出浇注系统的中心线, 再对中心线进行杆单元的网格划分。

我们采用第二种方式进行浇注系统的建立。首先是浇口位置的确定, 浇口在产品上的位置是设计好的, 但是在划分好的网格模型上, 只能选择与事先设计最为相近的节点, 作为浇口位置。由浇口位置偏置出其他端点, 然后在端点之间创建直线, 浇口、主流道、分流道要分开创建, 然后分别对于每一段直线定义不同的属性。具体的操作步骤如下:

首先在两端点间创建直线, 选择 Modeling/Create Curves/Line 命令, 分别选择确定直线的两个端点, 取消 Automatically creat nodes at end points of curve 复选框, 单击 Change 按钮, 设置直线属性, 点击图 5.6 所示的 New 按钮, 会弹出下拉菜单, 选择相应的直线属性后, 会弹出对话框进行详细的参数设置, 如尺寸, 材料, 截面形状等等。

然后是对浇注系统进行网格划分, 利用层管理工具, 将浇口、分流道、主流道分别归属到相应的层中, 将新建的节点归属到 New Nodes 层中, 然后分别对浇注系统各部分进行单元划分。

与产品网格模型中的三角形单元不同, 浇注系统和冷却系统的网格采用的是杆单元, 每个单元具有两个节点。在进行网格划分的过程中, MPI 系统是对所有显示层中的几何体进行网格划分, 并且网格单元的大小是一致的, 因此要对浇口、流道分别进行划分。

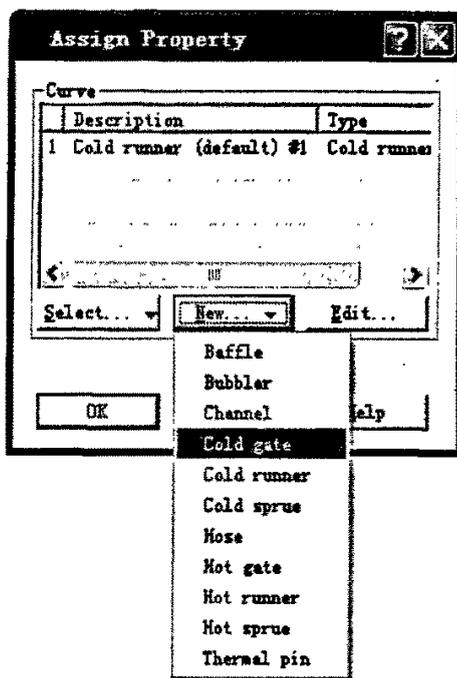


图 5.6 设置直线属性
Fig.5.6 Assign property

冷却系统的建立过程与浇注系统的建立过程相似，也是首先建立端点，然后创建直线，在设置直线属性时，选择 Channel 命令，在弹出的对话框中设置冷却水道各项参数及属性。最后进行冷却水道的网格划分。

在完成了冷却系统各部分的建模和网格杆单元划分之后，还必须设置进水口的设置。选择 Analysis/Set Coolant Inlet 命令，然后单击 Edit 按钮，设置冷却介质的参数。

浇注系统和冷却系统建立完成以后，其结果如图 5.7 所示。

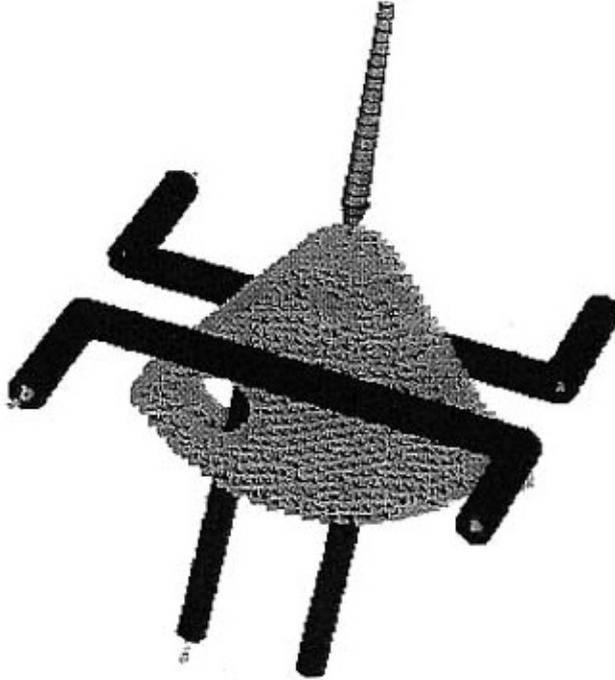


图 5.7 浇注系统和冷却系统
Fig.5.7 Runners and cold circuits

5.1.4 注塑工艺过程参数的设定

工艺过程参数包括了整个注塑周期内有关模具、注塑机等所有相关设备及其冷却、保压、开合模等工艺的参数。因此，过程参数的设定实际上是将现实的制造工艺和生产设备抽象化的过程。过程参数的设定将直接影响到产品注塑成型分析结果。

选择 Analysis/Process Setting Wizard，或者直接双击任务栏窗口 Study Tasks 中的 Process Setting 一栏，会弹出如图 5.8 所示的对话框，显示过程参数设置的第一页冷却分析设置 Cool Settings。第一页的设置为默认设置。单击下一步，进入参数设置的第二页，在 Filling Control 下拉菜单中选择 Flow rate，设置为 $156\text{cm}^3/\text{s}$ 。单击 Advanced options 按钮，弹出高级设置选项，在 Process control 中点击 edit，弹出对话框，选择 temperature control，在 mold temperature control 选择 cavity differs from core，设置型芯与型腔温度差为 10°C 。在 Injection molding machine 中点击 select，选择 120F (40mm) : Welltec Machinery Limited。

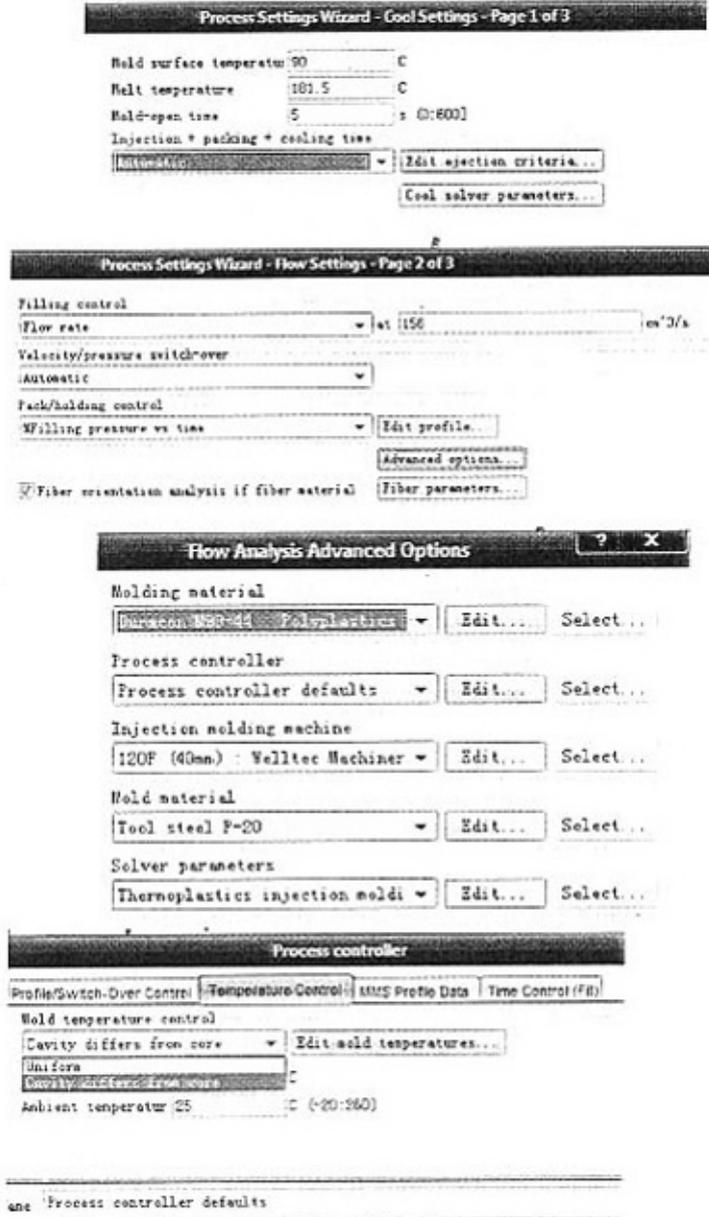


图 5.8 工艺参数设置
Fig.5.8 Process settings

通过上面的这些设定，完成了分析前处理工作，此时，分析任务窗口中所有任务的前面都会出现一个绿色的对号，同时窗口的最后一项 Analyze Now!不再是灰色的不可用状态。这时就可以进行分析计算，整个解算器的计算过程基本由 MPI 系统自动完成。双击任务栏窗口中的 Analyze Now!该选项即可进行完整的填充分析。待分析结束后，分析任务窗口最下方会以多级菜单的形式生成模拟结果。

5.2 分析结果

对制品进行 flow + cooling + warp 的分析。分析结束后，查看翘曲分析结果，由于本案例最关心的尺寸是制品的开口大小，Z 方向的翘曲变形可以直观的反映出开口尺寸的变化。因此，将 Z 方向的翘曲变形作为研究对象。Z 方向上的翘曲分析结果如图 5.9 所示。图中红颜色和蓝颜色的区域是变形量最大的区域。从图中可以看到，Z 方向的最大变形量为 0.3mm 和-0.3mm 左右。实际生产中，制品出模后，开口位置向内侧翘曲，最大翘曲位置与模拟分析的位置是一致的，实际生产的产品最大变形量的数值经测量大概在 0.8mm 和-0.8mm 左右。预测的变形量与实际值的差别还是挺大的。因此在修改模具的时候不能仅仅依据预测的变形量进行修改。

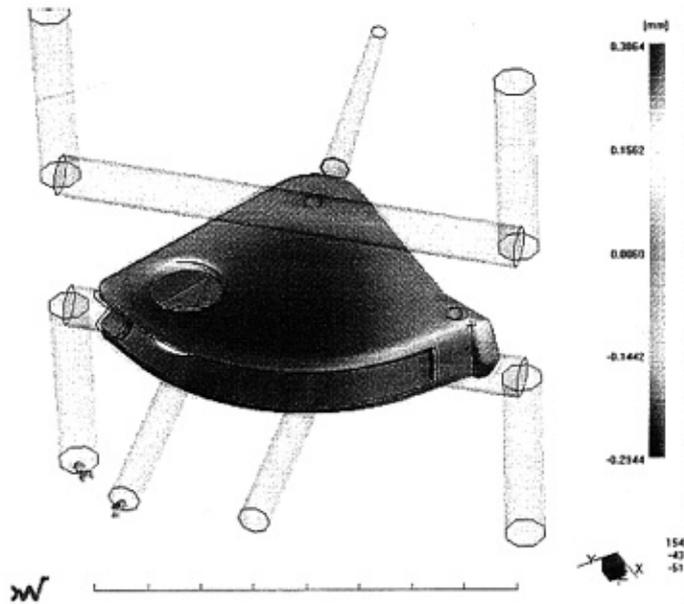


图 5.9 翘曲变形分析
Fig.5.9 Warp analysis

5.3 确定初始变形补偿量

根据上述分析，可以看出，在设计模具的时候，要充分的考虑到翘曲变形的影响，要对翘曲变形的趋势和位置有清晰的认识，才能在模具设计和制造过程中不至于被动，才能最大限度的设计出合格的模具。Moldflow 软件对于翘曲的变形的模拟分析难免会有

误差,但是 Moldflow 软件对于翘曲变形的趋势把握还是比较准确的。由此看出, Moldflow 软件对于模具设计还是有一定的指导意义的。

在修改模具之前,首先需要确定出变形补偿量的大小。如果变形补偿量不适当,往往会适得其反,导致模具修改失败。Moldflow 模拟的最大翘曲变形量是 0.3mm 左右,而实际的制品最大翘曲量在 0.8mm 左右,仅仅依据软件模拟的翘曲变形量还是有很大误差的,因此要结合实际情况综合考虑。

5.3.1 修改模具方案的确定

对于此制品来说,如果要很好的控制翘曲变形的缺陷,又要保证制品的厚度不发生太大的变化,需要将型芯变厚,同时将型腔变大。

为了更好的表示出制品和模具的关系,将制品在 A-A 处做了断面图(图 5.10), A-A 处制品在模具中的断面如图 5.11 中第一幅图所示。

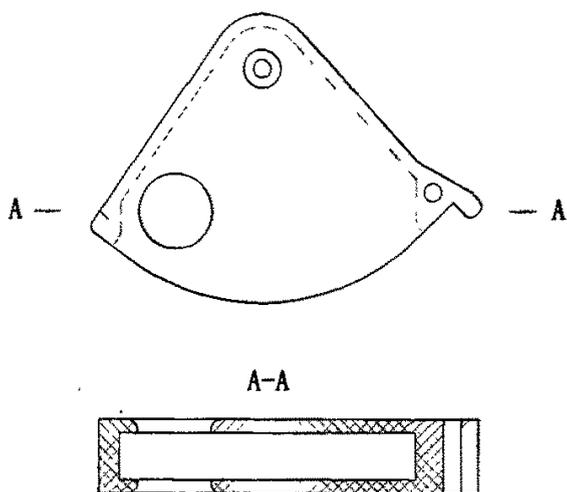
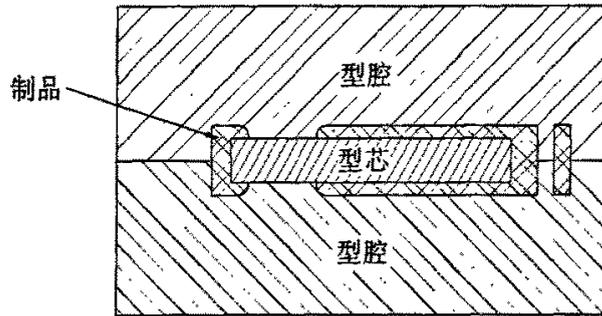
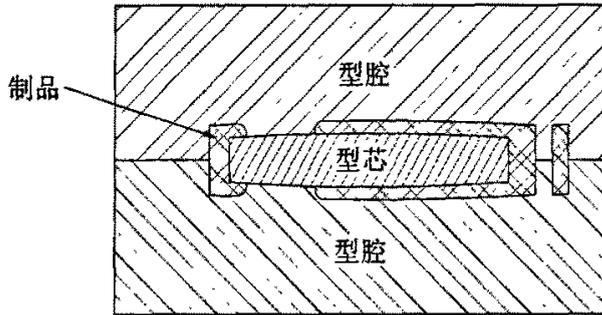


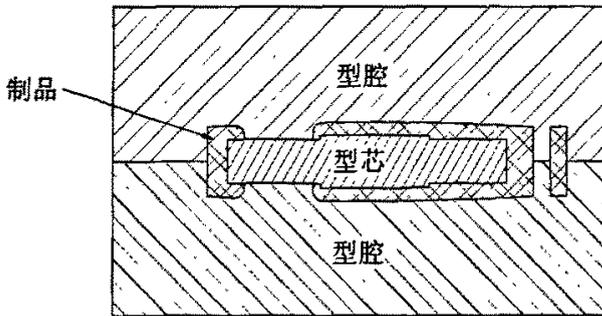
图 5.10 制品断面图
Fig.5.10 Section details



改模具前状况



方案一



方案二

图 5.11 方案对比
Fig.5.11 Plans compare

针对此塑料件的变形，首先按照图 5.11 中的方案一进行修改模具。将型芯两个面做成凸面，同时把型腔内表面相应也变成向内凹的曲面。这样在适当的变形补偿量下，制品会抵消掉翘曲变形，成为合格的产品。

但是从成本和加工难度来看，这样修改模具并不是最好的方案。对于型芯来说，要达到修改的目的，可以在两个面上都增加一个凸面的薄片，每个薄片的外沿轮廓要与型芯的一致。这样的话，加工复杂程度比重新加工一个型芯还要大，不如将型芯整个换掉。因此，方案一对型芯的修改是换型芯。对于型腔来说，内凹的曲面加工并不难，但是型腔上有一个嵌件和一个突起是直接与型芯表面配合的，由于型芯的修改，这些嵌件和突起也要进行相应的修改，修改成和型芯表面配合的曲面，由于嵌件的端面变成了曲面，为了防止在型腔中转动，要考虑嵌件的定向问题。如果这些与型芯配合的端面加工的不好，会导致制品成型时在这些端面处产生飞边，造成新的缺陷。

结合制品的变形情况，为了尽可能的减少修模成本，降低加工难度，考虑到最大变形处只是集中在开口的中间部位，因此只在最大变形处的附近进行反变形设计（图 5.11 方案二）。对型芯的修改避开了突起和嵌件的位置，这样使得修改型腔的时候，加工难度和精度的要求大大降低。同时，对于型芯的修改，只需要加工两片薄形的镶块，镶块的边沿尺寸不用和型芯的边沿一致，加工复杂程度大大降低。

5.3.2 反变形设计

由于实际生产的制品的最大翘曲变形量为 0.8mm 左右，首先将变形补偿的最大量定在 0.8mm。为了保证制品的强度，不至于使缺口处的壁厚太薄。制品外侧也改成曲面，使缺口处的壁厚在 2.5mm 左右。修改后的制品如图 5.12 所示。

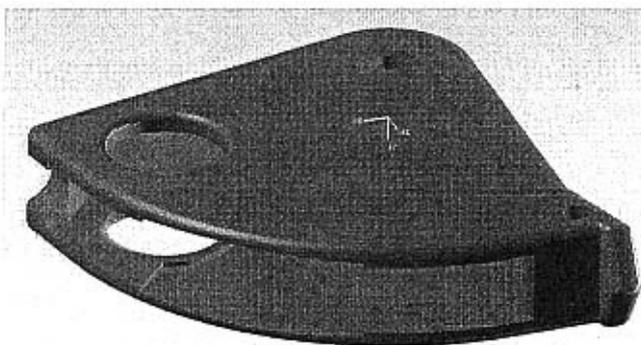


图 5.12 反变形设计
Fig.5.12 Anti-deformation design

反变形设计后，需要对其进行新的翘曲变形分析，需要注意新的分析要保持原有的条件不变。对反变形设计后的制品进行新的翘曲分析，将其另存为 STL 格式文件，导入到 MPI 中，划分网格，修改网格质量，选择注塑原料，添加浇注系统和冷却系统，设定工艺过程参数，再次进行翘曲变形分析。再次分析的结果如图 5.13 所示。

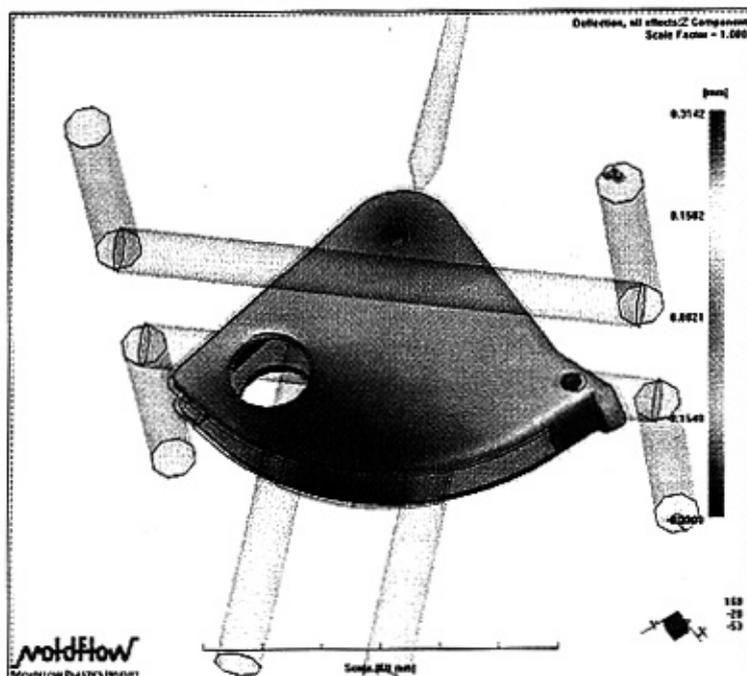


图 5.13 翘曲分析
Fig.5.13 Warp analysis

根据初始变形补偿量，我们进行了反变形设计，反变形设计后的制品在 MPI 中进行了翘曲分析，分析的结果显示，在 Z 方向上最大翘曲变形量的位置没有改变，预测的最大翘曲变形量仍然保持在 0.3mm 左右。这表明经过了反变形设计，制品的翘曲变形趋势和翘曲变形大小没有发生太大的变化。由此可以判断出，按照此变形补偿量修改模具，那么生产出来的产品，其最大翘曲变形量也会在 0.8mm 左右，刚好与初始变形补偿量抵消了。因此，此初始变形补偿量是可以接受的。

5.4 确定最终变形补偿量

由于此制品使用过程中，最关键的配合尺寸就是开口的大小，如果开口尺寸稍微大一些，对于配合不会有影响。这样在变形补偿量的基础上，如果不影响制品的使用性能，可以使补偿量更安全一些，让补偿更大一些，然后对最终的变形补偿量进行计算机模拟分析，如果与初始的翘曲分析量差别不大，那么最终的变形补偿量就可以接受了。

在初始变形补偿量的基础上，让最大变形补偿量增加 0.4mm，变成 1.2mm。内侧为一个弧面的缺口，为了保证制品的强度，不至于使缺口处的壁厚太薄。制品外侧也相应的改成曲面，使缺口处的壁厚在 2.5mm 左右。修改后的制品如图 5.14 所示。

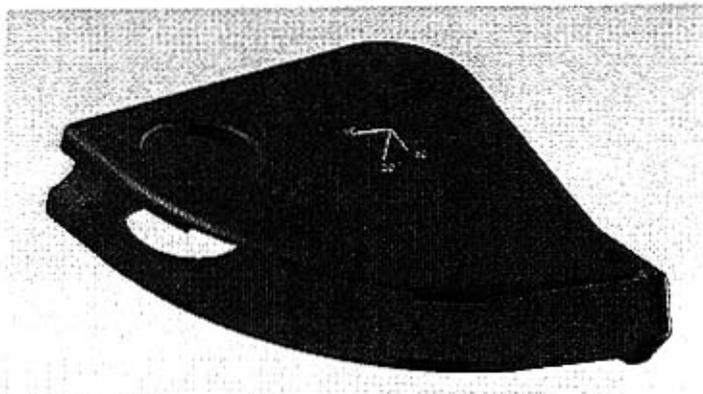


图 5.14 反变形设计
Fig.5.14 Anti-deformation design

通过变形补偿后的塑料件，再次用 MPI 进行分析，保持相同的工艺条件，翘曲分析的结果如图 5.15 所示。从分析的结果来看，进行变形补偿后的塑件，预测的最大翘曲量为 0.25mm 左右，表明变形补偿后的制品，由于结构的变化，反而对翘曲变形的抵抗更强了。并没有由于结构的改变发生很大的变化。因此，变形补偿量是可以接受的。

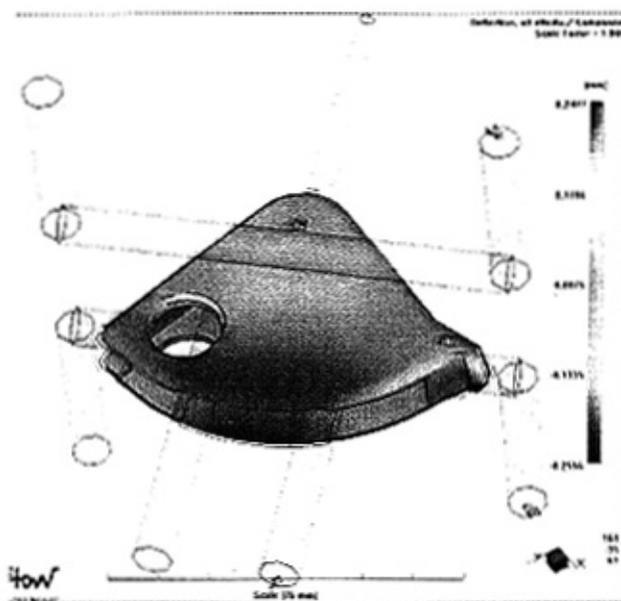


图 5.15 修改后的制品翘曲分析
Fig.5.15 Modified product warp analysis

5.5 修改模具

按照变形补偿量来修改模具。对型芯的修改，增加两个薄片。由于型腔的加工方法是用电火花加工，对其的修改，是修改电极，把电极做成中间突起的曲面。修改后的型芯图纸见图 5.16，修改后的型芯与型腔的如图 5.17 所示，生产出的塑料件照片如图 5.18 所示。经测量，在变形补偿区域的形状已经接近一个平面，其尺寸已经达到了生产要求，抵消了翘曲变形。

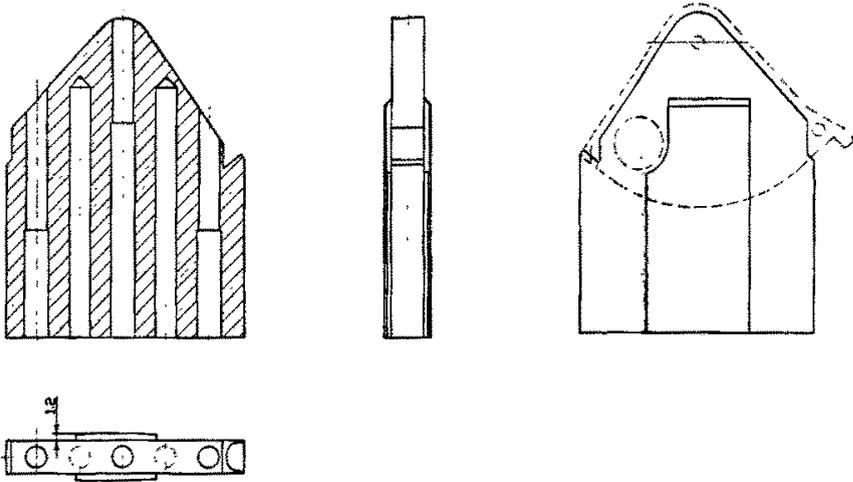


图 5.16 修改后的型芯
Fig.5.16 Modified core

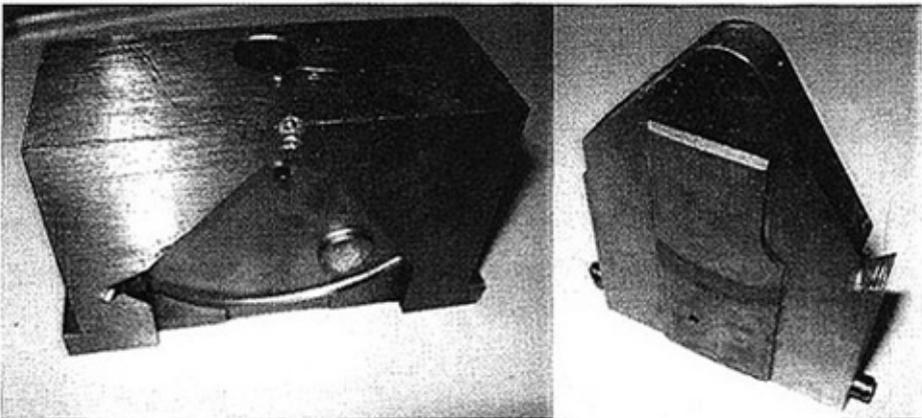


图 5.17 修改后的型芯与型腔照片
Fig.5.17 Modified cavity and core

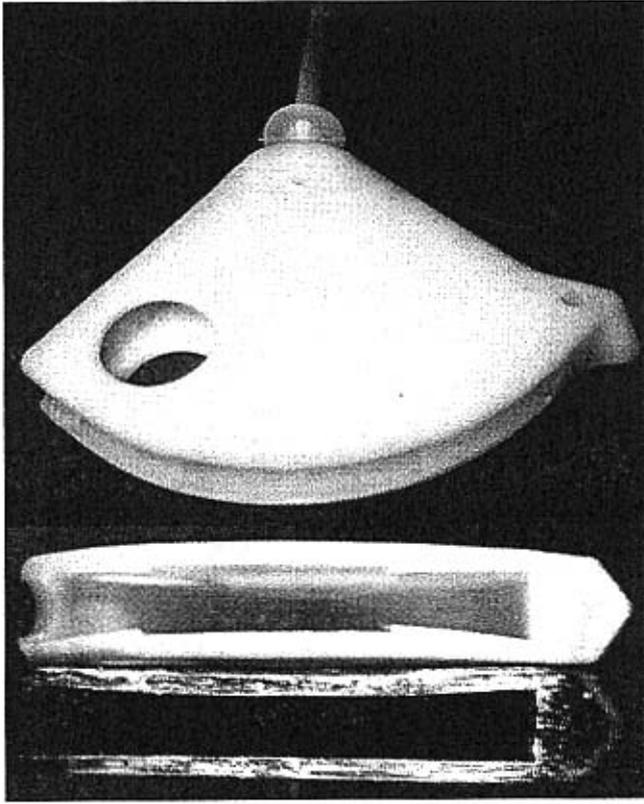


图 5.18 最终制品
Fig.5.18 Final product

结 论

随着塑料产品不断发展,人们对注塑产品的质量要求也越来越高。翘曲变形是影响注塑制品使用性能的最大缺陷之一。很多注塑模具的设计都是凭设计者的经验,缺乏科学依据,具有较大的盲目性,不仅使模具的生产周期加长、成本变高,而且质量也难以保证。针对生产中急需解决的问题,迫切需要对翘曲变形进行深入的研究。

本文以一个存在严重翘曲变形的制品作为研究对象,完成了从 CAD 建模、模型导入 CAE、网格划分、浇注系统和冷却系统的建立、工艺参数的确定等完整的塑料件仿真模型建立过程。对塑件的注射、保压、冷却、翘曲变形进行了模拟仿真,参照 MPI 模流分析软件的翘曲变形分析结果,对模具进行反变形设计。并在实际生产中进行验证,取得了理想的效果,达到了消除变形的目的。

在利用 Moldflow 软件模拟分析过程中,发现了 Moldflow 软件对于翘曲变形量的预测分析与实际生产的情况还是有一定差别的,但是 Moldflow 软件预测的翘曲变形位置和趋势与实际生产情况符合的很好,对于模具设计和注塑成型过程还是有很强的指导意义的。要正确的看待 Moldflow 软件对于翘曲变形预测的参考变形量,并合理的使用 Moldflow 软件,才能更好的发挥 Moldflow 软件在模具设计和注塑成型过程中的指导作用。

在模具设计阶段如果没有充分考虑到翘曲变形的问题,对于很多制品结构来说,通过调整注塑工艺参数往往是不能很好的控制翘曲变形的。一种有效的方法就是通过修改模具来降低制品的翘曲变形缺陷,也就是进行变形补偿。但是对于变形补偿量的把握是个很棘手的问题,仅仅凭经验有时并不能取得很好的效果,导致修改模具次数过多或者修模失败,从而增加了模具成本,延长了生产工期。要合理的结合 CAE 软件在模具设计和注塑成型过程的指导作用,找出预测的翘曲变形量与实际翘曲变形量之间的关系,并适当的调整变形补偿量,使其更安全,这样才能尽可能的减少修改模具的次数,提高生产效率。

以往对于翘曲变形的研究,多集中在翘曲变形理论研究和影响因素的控制上。而对模具修改的补偿量很少研究。本课题是对翘曲变形控制的一种尝试,对于翘曲变形的变形补偿研究有一定的意义。

参考文献

- [1] 刘守荣. 塑料成型工程学. 北京:机械工业出版社, 2006:2-5.
- [2] 陈建华. 塑料注射制品翘曲变形研究:(硕士学位论文). 合肥:合肥工业大学, 2006.
- [3] 包荣华. CAD/CAM 在注射模设计中的应用. 模具制造, 2002, (2):3-7.
- [4] 袁中双, 李德群, 肖景容. 注塑 CAE 技术的进展与趋势. 中国机械工程, 1992, (6):13-16.
- [5] 周士冲. CAE 在薄壳件注塑成型浇注系统设计中的应用:(硕士学位论文). 镇江:江苏大学, 2006.
- [6] 张佑生, 王永智. 塑料模具计算机辅助设计. 北京:机械工业出版社, 1999:1-15, 214-237.
- [7] 吴崇峰. 实用注塑模 CAD/CAE/CAM 技术. 北京:中国轻工业出版社, 2000:1-42.
- [8] Hasan Kurtaran, Tuncay Erzurumlu. Efficient warpage optimization of thin shell plastic parts using response surface methodology and genetic algorithm. *Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 27(1):5-6.
- [9] B A Mlekusch. Residual Stresses in Short-Fibre Reinforced Injection-Moulded Thermoplastic Parts. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2002, 2(6):10-14.
- [10] Chiaming Yen, J C Lin, Wujeng Li et al. An abductive neural network approach to the design of runner dimensions for the minimization of warpage in injection mouldings. *Materials Processing Technology*, 2006, 174:22 - 28.
- [11] Babur Ozcelik, Tuncay Erzurumlu. Determination of Effecting Dimensional Parameters on Warpage of Thin Shell Plastic Parts Using Integrated Response Surface Method and Genetic Algorithm. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, 32:1085 - 1094.
- [12] 陈静波, 申长雨, 刘春太. 聚合物注射成型流动残余应力的数值分析. *力学学报*, 2005, 37(3):272-280.
- [13] 董斌斌, 申长雨, 李倩. 注射成型薄壁制品收缩与翘曲因素. *化工学报*, 2005, 56 (4):727-732.
- [14] 郭志英, 阮雪榆, 李德群. 注塑制品翘曲变形数值分析模型. *中国机械工程*, 2002, 13(17):1515-1519.
- [15] 康俊远, 严丽, 李永鸿. CAE 技术在薄壳注塑件翘曲变形分析中的应用. *工程塑料应用*, 2006, 34(1):32-34.
- [16] 连昌伟, 胡广洪, 王兆远. 工艺参数对注塑制品变形影响的研究. *模具技术*, 2006, (2):36-40.
- [17] 陈晓平. 薄壳件注塑成型工艺参数优化研究:(硕士学位论文). 杭州:浙江大学, 2005.
- [18] 郭志英, 李德群. 注塑制品翘曲变形的研究. *塑料科技*, 2001, (1):22-24.
- [19] Nelson C Baldwin. *Plastics Designing & Processing*. Thermal Stresses 1974, 25:12-23.
- [20] K B Spatola. A New Generation of Warp-Free Thermoplastic Alloys Electrical/Electronic Applications. *Engineering Plastics*, 1985, 13(1):143-148.
- [21] B H Lee. Variation of Part Wall Thickness to Reduce Warpage of Injection Molded Part. *Polym Plastic Technol Engineer*, 1997, 36(5):701-807.

- [22] Rakesh Sahu, Dongang Yao, Byung Kim. Design Methodology for Minimizing warpage. *Plastics Engineering*, 1998, 33(1):21-27.
- [23] D W Radford, R J Diefendorf. Shape Instabilities in Composites Resulting from Laminate Anisotropy. *Reinforced Plastics Composites*, 1993, 12:58-62.
- [24] V Leo, Ch Curelliez. The Effect of the Packing Parameters, Gate Geometry and Mold Elasticity on the Final Dimensions of a Molded Part. *Polymer Engineer Science*, 1996, 36:1961-1969.
- [25] Hiroyuki Kikuchi, Kiyohito Koyama. Generalized Warpage Parameter. *Polymer Engineer Science*, 1996, 36(10):1309-1325.
- [26] S F Walsh. Shrinkage and Warpage Predication for Injection Molded Components. *Reinforced Plastics and Composites*, 1993, 12(5):451-462.
- [27] 李金良, 龙玲. 注塑制品翘曲变形分析. *CAD/CAM 与制造业的信息化*, 2003, (7):11.
- [28] 李海梅, 刘永志. 注塑件翘曲变形的 CAE 研究. *中国塑料*, 2003, 17(3):53-58.
- [29] 郭志英, 李德群. 注塑制品翘曲变形有限元数值模拟的误差分析. *华中理工大学学报*, 2000, (8):17-19.
- [30] 王利霞, 余晓容, 申长雨. CAE 技术在注塑成型中的应用. *化工进展*, 2004, 23(3):260-266.
- [31] 申长雨, 李海梅. 塑料模具 CAE 技术概况及发展趋势. *工程塑料应用*, 2001, (2):29.
- [32] 刘法谦, 燕立唐, 李荣勋. 汽车内饰件 C-MOLD 优化设计. *塑料加工应用*, 2002, (24):12.
- [33] Takaaki Matsuoka. Integrated simulation to predict warpage of injections molded parts. *Polymer Engineering and Science*, 1999, 31(14):43-44.
- [34] H H Chang, C A Hiber, K K Wang. An unified simulation of the filling and postfilling stages in injecting molding. *Polymer Engineering and Science*, 1991, 31(2):68.
- [35] R Y Chang, B D Tsaur. Experimental and theoretical studies of shrinkage, warpage and sink, marks of crystalline polymer injection molded parts. *Polymer Engineering and Science*, 2005, 35(15):18-19.
- [36] L C Yang, M Charmchi, S J Chen. Numerical simulation of polymer flowing in an empty tube with solidification. *Polymer Engineering and Science*, 1992, 32(11):13-16.
- [37] H Ghoneim, C A Hieber. Incorporation of density relaxation in the analysis of residual stresses in molded parts. *Polymer Engineering and Science*, 1997, (1):37.
- [38] 宋满仓, 黄银国, 赵丹阳. 注塑模具设计与制造实战. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [39] 单岩, 王蓓, 王刚. Moldflow 模具分析技术基础. 北京:清华大学出版社, 2004.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

宋满仓, 黄强. 针对塑料件翘曲变形的变形补偿研究. 大连理工大学研究生院网络学刊. 2007. 属于学位论文第五章

致 谢

本文是在宋满仓副教授的细心指导下完成的。感谢我的导师宋满仓副教授。这两年多来在学习和生活上给我的无微不至的帮助和关怀。导师渊博的学识，敏锐的学术思想，严谨求实的治学态度，和蔼可亲、平易近人的待人风格，使我受益匪浅，将永远激励着我在将来的学习和工作中不懈努力，不断进步。谨此向导师致以衷心的感谢和诚挚的敬意。

感谢工程训练中心的梁延德教授等老师、师傅，为我提供了便利的实验条件，在此表示真挚的感谢。

感谢大连理工大学模具研究所的王敏杰教授、于同敏副教授、赵丹阳老师、潘宝刚助理工程师的教诲和指导。

感谢 Moldflow 公司广州办事处的姜勇道先生。他在使用 Moldflow 软件方面给予了我细心的指导，对我的课题有很大的帮助。

感谢任柏青、王岩、吕长友、侯春华、邢龙斌等人对我的课题研究给予的无私帮助和宝贵意见。感谢攻读硕士期间给予我无私帮助的模具研究所的兄弟姐妹们。

感谢我的室友李延磊、张振华，有缘在一起度过了研究生的学习生活，你们让我的生活充满快乐和微笑，祝我们寝室的每个人都生活美满幸福、工作顺利。衷心地感谢我的家人，他们的鼓励、关怀是我取得的所有成绩的源动力，最后，向所有给予作者关心和帮助的人们表示感谢！

最后，向百忙之中抽出宝贵时间来评审本论文的专家、教授、学者表示衷心的感谢，感谢你们的关心和评审。