

## 摘 要

注塑成型是塑料制品重要的成型方式。目前国际上塑料模具占总量的40%。成型过程中，工艺参数直接影响到模具内熔体的流动状态和最终制品的质量，获取并保持优化的工艺参数是成型高质量制品的前提。

在注塑模具行业，计算机辅助分析（CAE）逐渐为人们所重视，已成为塑料产品开发、模具设计及产品加工最有效的手段之一。注塑模CAE可以对模具型腔中塑料熔体的流动、保压和冷却过程，计算制品和模具的应力分布进行分析，通过模拟分析可以优化浇口的数量和位置，预防制品填充不足、熔接痕、气泡和翘曲变形等缺陷，给出合理的注射压力以及注塑时间，并可能够明确熔体流动前锋的温度变化、剪切应力、剪切速率等参数变化情况，使制品和模具结构、成型工艺参数得到优化。

打印机外壳是典型的形状复杂零件，生产时易出现翘曲、欠注等问题。本文使用注塑成型 CAE 软件 Moldflow，对基于热流道浇注系统的打印机外壳注塑过程进行了模拟分析，并优化了注射成型的各种参数。通过对实际生产的收纳盒 tray door 产品进行验证，表明应用 CAE 技术替代传统的试模法，可以缩短模具试制周期，优化模具结构，降低生产成本，有利地推动模具行业的发展，是注塑模设计制造发展的一个方向。

**关键词：** 注塑模，成型工艺优化，热流道，Moldflow

## Abstract

Plastic Injection Molding is an important molding method of plastic products. Presently, Plastic Injection Mold takes 40% of the mold industry. In molding process, process variables directly impact flow state of melt in cavity and final quality of part. Precondition of improving part quality is to get and keep process variables optimization.

In Plastic Injection Mold industry, computer aided engineering (CAE) has been used widely in mold industry, just as in other industries, and becomes most effective means of developing of plastic productions, mold designing and machining.

The CAE technology for the injection mold simulates the injection process, including filling, packing, cooling and warpage analysis. Simulation analysis could predict the defects of the products, such as short shot, weld lines, air traps and warpage deflection. Besides, it could optimize the location and amount of the gate, injection pressure, injection time, temperature change of flow front, shear stress, shear rate, etc, and optimize the design of plastic productions, injection mold, as well as technical parameters.

Printer shell is a typical product with complicated shape. This dissertation, linking the computer aided engineering (CAE) with the injection process simulation of printer shell, deals with the optimum parameters and hot runner system selection by means of Moldflow software.

By using practical production such as storage box and tray door to validate the simulation results, it could reduce the times of molding test and molding mend, shorten circle of the design and manufacture of mold, and cut down the production cost. The application of CAE is one of major tendencies of the injection mold.

**Key words:** plastic injection mold, process optimization, hot runner, Moldflow

## 关于硕士学位论文使用授权的说明

论文题目：打印机外壳注射成型工艺优化及热流道选用

本学位论文作者完全了解大连轻工业学院有关保留、使用学位论文的规定，大连轻工业学院有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文，并且本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

是否保密 (  )，保密期至      年    月    日为止。

学生签名：赵亮

导师签名：杨丹

2017年4月20日

## 第一章 绪论

### 1.1 课题的提出和选题的意义

注塑成型是现代塑料工业中极为重要的一种加工技术,适于大批量生产形状复杂、尺寸要求精确的塑料制品。传统的注射制品设计、注射工艺设计,以及模具设计大多采用尝试法。设计者依据有限的经验和比较简单的计算公式进行相应工作。但是在注射成型生产实际中,塑料注射成形过程中有很多复杂的问题在模具设计阶段很难根据经验来判断<sup>[1]</sup>。塑料熔体的流动性千差万别,制品和模具的结构千变万化,工艺条件各不相同仅凭有限的经验和简单的公式难以对这些因素作全面的考虑和处理,而且设计者经验的积累和公式的总结也往往跟不上塑料材料的发展和制品复杂程度及精度的提高。因此,正式生产之前,要经历反复的试模、修模和工艺参数调整等过程。这不仅影响模具的制造质量,使模具制造周期增长,还大大提高了其生产成本,并且质量难以得到有效保证,不利于新产品的研制与开发<sup>[2]</sup>。

注塑模CAE分析模具型腔中塑料熔体的流动、保压和冷却过程,计算制品和模具的应力分布,预测制品的翘曲、不均匀收缩和塌陷等缺陷,并由此模拟工艺条件、材料参数及模具结构对制品质量的影响,达到优化制品和模具结构、优化成型工艺参数的目的,将工程设计问题建立在科学分析的基础上<sup>[3]</sup>。应用CAE技术替代传统的试模法,可以缩短模具试制周期,降低生产成本,提高产品质量,有利地推动模具行业的发展,是注射模设计制造发展的一个方向。

注射模热流道是通过加热的办法来保证流道和浇口的塑料保持熔融状态。热流道注射模与一般注射模的主要区别是注射成型过程中浇注系统内的塑料不凝固,也不随塑件脱模,所以这种模具又称无料模具。采用热流道技术的模具可提高制件的生产率和质量,并能大幅度节省制作的原材料和节约能源,广泛应用这项技术是塑料模具的一大变革,是推动热塑性塑料注射成型向节能、低耗、高效方向发展的强劲动力。在注射过程中使用热流道系统,可节约原料10%~20%,成本可降低约30%,而投资仅增加10%~30%。因此,热流道系统已在国外得到广泛的应用,在国内亦已作为未来注射模发展的推广技术之一<sup>[4]</sup>。

热流道注射成型法问世于上世纪 50 年代，其应用推广虽经历了一个较长时间，但其市场占有率仍逐年上升，80 年代中期，美国的热流道模具占注射模总数的 15%~17%，欧洲为 12%~5%，日本约为 10%，但到了 90 年代，美国生产的塑料注射模具中热流道模具已占 40%以上，在大型制品的注射模具中则占 90%以上<sup>[1]</sup>。

在我国，热流道模具还处于研制推广应用阶段，总体还达不到 10%，个别企业达到 20%~30%。从已有的研究成果来看，基本上局限于热流道模具的结构，而热流道对注塑充填、塑件质量等方面的作用效果的研究大多是定性的、经验性的，如何选用热流道还没有定量的分析。

依靠 CAE 技术对热流道中熔体流动进行分析模拟，能更加科学准确地对分流板流道分布、大小、进料口位置等进行优化确认，并借此根据分析结果对加工工艺进行调整，从而满足注射制品日益提高的质量和精度要求<sup>[6]</sup>。

## 1.2 注塑模 CAE 技术简介

### 1.2.1 注塑模 CAE 软件的发展

注塑模 CAE 技术 (Computer Aided Engineering) 的运用是塑料成型加工及模具设计发展过程中的一个重要里程碑<sup>[7]</sup>。

早在 50 年代，美国学者就对聚合物成型过程 (尤其是塑化挤出) 的数值模拟建模做了一系列研究工作，同时，瑞士的学者给出了有关挤出的重要模型。Tadmor 和 Klein 在书中首次给出了塑化挤出的完整模型，包括固体输送、塑化和熔体输送等。70 年代初期，有关塑化挤出模拟软件 EXTRD 已商品化，该软件很大程度上是基于 Tadmor 和 Klein 书中所描述的模型。

20 世纪 60 年代，美国、英国、加拿大等国的学者如 J.R.Pearson (英)、J.F.Stevenson (美)、M.R.Kamal (加)、K.K.Wang (美) 等开展了一系列有关塑料熔体在模具型腔内流动与冷却的基础研究。在合理的简化基础上，20 世纪 60 年代完成了一维流动与冷却分析程序、20 世纪 70 年代完成了二维分析程序，20 世纪 80 年代开展三维流动与冷却分析并把研究扩展到保压分子取向以及翘曲预测等领域，进入 20 世纪 90 年代以后开展了流动、保压、冷却、应力分析的注塑工艺全过程的集成化研究<sup>[8]</sup>。

CAE 技术的载体是软件产品，CAE 技术的核心内容是计算机模拟与仿真，因此 CAE

技术的发展主要体现在软件产品上。注塑模CAE软件的发展经历了从中面流技术到双面流技术再到实体流技术的三个重要的里程碑：<sup>[9]</sup>

(1) 中面流技术：于20世纪80年代开始应用。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来代替三维计算。

(2) 双面流技术：于20世纪90年代后期诞生。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。与中面流技术相比在模型处理上大大减轻了用户建模的负担，提高了有限元建模的效率。但由于上下网格无法一一对应，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。此外，双面流技术也只是一种从中面流技术向实体流技术过渡的手段。

(3) 实体流技术：在现实原理上与中面流相同，所不同的是数值分析方法有较大差别。在实体流技术中熔体的厚度方面的物理量变化不再被忽略，这时只能采用三维有限元网格，依靠三维有限差分法或三维有限元法对熔体的充模流动进行数值分析。三维有限元模型分析已经成为注塑成型模拟发展的热点<sup>[10]</sup>。

从二十世纪八十年代开始，注塑模CAE技术从试验室阶段进入实用阶段，目前国际上具有代表性的商品化软件有：<sup>[11][12]</sup>

(1) 美国MOLDFLOW公司的MoldFlow，该公司自1976年发行了世界上第一套塑料注射成型流动分析软件以来，一直主导塑料成型CAE软件市场。2000年4月，MOLDFLOW公司收购了另一个世界著名的塑料成型分析软件C-MOLD。MoldFlow软件主要包括：MoldFlow Plastics Advisers(产品优化顾问，简称MPA)、MoldFlow Plastics Insight(注塑成型模拟分析，简称MPI)、MoldFlow Plastics Xpert(注塑成型过程控制专家，简称MPX)。本文采用的是MoldFlow Plastics Insight。

(2) 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、二维流到模拟Flow Pattern Lay-flat、三维流动分析FISTO、二维冷却分析Thermal Layout等。

(3) 美国SDRC公司的I-DEAS软件。该软件原为通用的机械CAD/CAM软件，90年代初，该公司开发注射成型流动和冷却分析软件，并与I-DEAS集成，推出适合注塑模的I-DEAS。

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。

我国注塑模CAE技术研究始于20世纪70年代末，发展也很迅速。“八五”期间，由北京航空航天大学、华中理工大学、四川联合大学等单位联合进行了国家重点科技攻

关课题“注塑模 CAD/CAE/CAM 集成系统”，并于 1996 年通过鉴定，部分成果已投入实际应用，使我国的注塑模 CAD/CAE/CAM 研究和应用水平有了较大提高。目前出现的拥有自主知识产权的软件有，华中理工大学开发的塑料注塑模 CAD/CAE/CAM 系统 HSC6.1，郑州工业大学研制的 Z-MOLD 分析软件等。

### 1.2.2 注塑模 CAE 应用现状

目前，CAE 技术在美国、日本、欧洲等国应用比较广泛，但我国还几乎处于起步阶段，即使有些企业使用，但仍不成熟，未受到预期的经济效益。我国注塑模 CAE 技术推广困难主要有两个因素：<sup>[13]</sup>

#### (1) 对 CAE 系统工程师要求高

注塑模 CAE 系统虽然是一个很好的工程分析工具，但它只能告诉用户该产品在当前工艺条件下可能产生的缺陷，提供解决问题的思路，而并不能提供解决问题的方案。要充分发挥注塑模 CAE 技术的作用，关键在于对分析结果的正确评价与最佳解决方案的确定。而分析结果的评价又涉及到产品设计、模具设计、注塑成型工艺、高分子材料学以及有限单元法等多个学科相关方面的理论和经验。这就要求 CAE 系统工程师既要有相关方面的理论知识，又要有一定的实践经验，实践经验可以说是 CAE 的灵魂，但实践经验的积累是一个长期的过程，这对 CAE 系统工程师的综合素质提出了较高的要求。一个经验丰富的注塑工艺师可能只要在 CAE 软件上运算几次就可能得出较好的方案，而一个注塑经验缺乏的用户可能运算几十次都找不出症结所在。而我国 CAE 技术发展时间短，成熟的注塑模 CAE 用户屈指可数。

#### (2) CAE 技术效益不够明显

对小模具制造企业，CAE 软件偏贵，而且从软件投入到产生效益需要较长时间，效益不够明显，这也阻碍 CAE 技术的发展。

### 1.3 本课题研究的内容

本论文主要采用注塑模 CAE 软件 Moldflow，针对现有的打印机外壳成型缺陷，改变热流道形式，并对注塑过程进行模拟，在模拟过程中分析各种注塑工艺参数如压力、温度、时间等，以及塑件几何形状对熔体填充、流动、冷却和翘曲等方面的影响，经过对比得到塑件注射成型的结构优化方案。最后，通过对收纳盒注塑模浇口设计和华录松下

tray\_door注塑CAE的优化来验证模拟实验方法。表明应用CAE技术替代传统的试模法，可以缩短模具试制周期，优化模具结构，降低生产成本，提高产品质量，有利地推动模具行业的发展，是注塑模设计制造发展的一个方向。

## 第二章 注塑 CAE 软件 Moldflow 简介

### 2.1 Moldflow 软件及其功能

Moldflow 软件是美国 MOLDFLOW 公司的产品, 该公司自 1976 年发行了世界上第一套塑料注射成型流动分析软件以来, 一直主导塑料成型 CAE 软件市场。2000 年 4 月, MOLDFLOW 公司收购了另一个世界著名的塑料成型分析软件 C-MOLD。Moldflow 软件采用目前先进的有限元分析技术, 依靠计算机模拟模具型腔形状和处理、分析大量数据, 对人们提出的工艺条件(模温、料温、注射时间、浇口等)进行校验, 从而找到满意的工艺参数。Moldflow 软件对热塑性塑料熔体进入模具的流动过程的模拟分析是非常成功的, 特别是在复杂情况下的分析, 是世界公认的注塑 CAE 工业标准。MOLDFLOW 几乎统治了全球注塑 CAE 市场。它与欧美排名前五名的 CADEM 集成软件签署了专用接口协议<sup>[14]</sup>。

MoldFlow Plastics Insight (注塑成型模拟分析, 简称 MPI): 对塑料产品和模具进行深入分析的软件包, 它可以在计算机上对整个注塑过程进行模拟分析, 包括填充、保压、冷却、翘曲、纤维取向、结构应力和收缩, 以及气体辅助成型分析等, 使模具设计师在设计阶段就找出未来产品可能出现的缺陷, 提高一次试模的成功率。2001 年底, MoldFlow 公司发布了集 MPI2.0 与 C-MOLD 2000.7 功能于一体的 MPI3.0, 现已升级到 6.1 版本。

在模具加工之前, 在计算机上对整个注塑成型过程进行模拟分析, 包括填充、保压、冷却、翘曲、纤维取向、结构应力、收缩以及气辅成型和热固性材料流动分析, 找出可能出现的缺陷, 提高一次试模成功率, 使生产厂家实现高质量、低成本、短周期的目标。该技术的作用主要表现在以下几个方面<sup>[15]</sup>。

#### (1) 优化塑料制品设计

塑件的壁厚、浇口数量及位置和流道系统设计等对于塑料制品的成败和质量关系重大。以往全凭制品设计人员的经验来设计, 往往费力、费时, 而设计出的制品也不尽合理、利用 Moldflow 软件, 可以快速设计出最优的塑料制品。

### (2) 优化塑料模设计

由于塑料制品的多样性、复杂性和设计人员经验的局限性，传统的模具设计往往要经过反复试模、修模才能成功。利用 Moldflow 软件，可以对型腔尺寸、浇口位置及尺寸和冷却系统等进行优化设计，在计算机上进行试模、修模，可以大大提高模具质量，减少试模次数。

### (3) 优化注塑工艺参数

由于经验的局限性，工程技术人员很难精确地设置制品最合理的加工参数，选择合适的塑料材料和确定最优的工艺方案。Moldflow 软件可以帮助工程技术人员确定最佳的注射压力、锁模力、模具温度、熔体温度、注射时间、保压压力和保压时间、冷却时间等，以注塑出最佳的塑料制品来。

## 2.2 MPI 分析应用

### 2.2.1 MPI/Flow(流动)分析

注射成型流动模拟包括前处理、分析计算和后处理 3 个步骤。前处理过程主要为分析计算准备数据，如零件建模、网格划分、材料参数的指定等；分析解算过程主要采用有限元法进行数值迭代计算；后处理主要是在可视化环境下进行计算结果的评价<sup>[16]</sup>。

对于任何注塑成型来说，最重要的是控制塑料在模具中的流动方式。制品的许多缺陷，如气穴、熔接痕、短射乃至制品的变形、冷却时间等，都与树脂在模具中的流动方式有关。MPI/Flow 通过对熔体在模具中的流动行为进行模拟，可以预测和显示熔体流动前沿的推进方式、填充过程中的压力和温度变化、气穴和熔接痕的位置等，帮助工艺人员在试模前对可能出现的缺陷进行预测，找出缺陷产生的原因并加以改进，提高一次试模的成功率<sup>[17]</sup>。

#### 一、MPI/Flow 的作用

MPI/Flow 能够对注塑成型从制品设计、模具设计到成型工艺提供全面和并行的解决方案。

#### 1、制品设计

制品设计者能用 MPI/Flow 解决以下问题。

(1) 制品能否充满。这一古老的问题一直为许多设计人员所关注，特别是对于大型制品。

(2) 制品最小壁厚。在满足制品使用性能和工艺性能的前提下，减小制品壁厚能够大大降低制件的循环时间，从而提高生产效率，降低制件成本。

(3) 制品工艺性能。在产品的设计阶段具有充分的选择浇口位置的余地，确保制品的审美特性。

### 2、模具设计

MPI/Flow 能在以下方面辅助模具设计人员，以得到良好的模具设计。

(1) 确保良好的填充形式。

(2) 最佳的浇口位置与数量、类型以及正确地确定阀浇口的开启与闭合时间，有效地发挥阀浇口的作用。特别是对于有纤维增强的树脂的填充过程，通过分析纤维在流动过程中的取向来判断其对制品强度的影响，并据此判断浇口位置设置的正确与否。

(3) 流道系统的优化设计。通过流动分析，帮助模具设计人员设计出压力平衡、温度平衡或者压力、温度均平衡的流道系统，并最大程度地减少流道部分的体积。同时，对流道内熔体的剪切速率和摩擦热进行评估，避免材料的降解和型腔内过高的熔体温度。

### 3、成型工艺

注塑成型者可利用 MPI/Flow 在以下方面得到帮助。

(1) 通过对熔体温度、模具温度、注射时间等主要注塑加工参数对制品工艺性能提出一个目标趋势，从而帮助注塑成型者确定各个加工参数的正确值并确定其可变化范围，得到更加稳定的成型工艺条件。

(2) 会同模具设计人员，结合使用最经济的加工设备，确定最佳的模具方案。

(3) 对于制品在预定的标称厚度的条件下，可以对两种以上的树脂材料的成型性能进行比较，会同制品设计人员选择成本、质量、可加工性较好的设计方案。

在填充过程分析的基础上，进一步进行保压分析，可以得到熔体在保压过程中压缩产生的密度变化，并优化出合适的保压工艺参数。注塑过程中，翘曲是由于制品收缩率不均匀而产生的。为了得到均匀的收缩率，型腔压力必须得到控制。在保压过程中，作用在熔体上的压力越大，收缩率越小。由于存在压力梯度，使得后填充区域收缩率比浇口附近收缩率大。为了减少这些差异，在保压过程中可随时间变化逐步减小保压压力。压力的变化范围取决于制件和浇口的尺寸、材料类型、成型参数以及壁厚的变化等<sup>[18]</sup>。调整压力曲线对制件不同区域收缩率的影响见附录图 3—图 5。

### 4、流动分析的一般步骤

采用 MPI/Flow 可使注塑成型从制品设计、模具设计到注塑工艺的确定完全在并行

工程的环境下进行，不仅克服了传统的串行设计存在的产品开发周期长的缺点，而且提高了开模的成功率，优化了注塑成型的工艺条件，降低了产品的开发和制造成本。流动分析的一般步骤见附录图 1。

### 2.2.2 MPI/Cool (冷却) 分析

在注塑成型中，模具的温度直接影响到制品的质量和生产效率。通过温度调节，保持适当的模具温度，可减小制品的变形、增强制品力学性能、改善制品的表观质量、提高制品尺寸精度。同时，缩短占整个注射循环周期约80%的冷却时间是提高生产效率的关键。因此，设计合理的冷却系统，对模具温度进行有效调节是十分必要的。MPI/Cool 通过分析模具冷却系统对模具和制品温度场的影响，优化冷却系统的布局，以达到使塑件快速、均衡冷却的目的，从而缩短注塑成型的冷却时间，提高生产效率，减少废品，增加经济效益<sup>[19]</sup>。

#### 一、MPI/Cool 简介

影响注塑模冷却的因素很多，如制品的形状，冷却介质的种类、温度、流速，冷却管道的几何参数及空间布置，模具材料，熔体温度，工件要求的顶出温度和模具温度、制品和模具间的热循环交互作用等。这些参数之间互相联系、互相影响，唯有这些参数的合理组合才能获得理想的效果。但靠传统的经验和简化公式是很难确定的，只有通过 CAE 分析才能得到理想的结果。

MPI/Cool 采用边界元法 (Boundary Element Method) 对模具的温度场进行三维模拟，对于制品在其厚度方向上采用解析解来计算温度分布，并通过制品的热流量将二者完全耦合进行迭代求解。同时将模具的温度场与冷却管道中冷却介质的能量方程联立起来求解，因此可以可靠地计算制品/模具及模具/冷却介质间的界面温度。在计算过程中，考虑了型芯和型腔在制品厚度方向的不对称性对制品温度分布的影响。

MPI/Cool 能够模拟冷却管道 (包括隔板管、喷流管、连接软管)、镶块、多种模具材料、冷流道和热流道、分型面及模具边界对模具和制品温度的影响，从而为优化冷却系统提高可靠的依据。

MPI/Cool 不仅能对中性面模型和 Fusion 模型进行冷却分析，而且能够对 3D 模型进行冷却分析。

此外，MPI/Cool 和 MPI/Flow 相结合，可以得到十分完美的动态的注塑过程分析。

#### 二、MPI/Cool 的作用

MPI/Cool 通过对模具、制品、冷却系统的传热分析, 为用户提供了丰富的模拟结果。

(1) 冷却时间。为保证制品在脱模时要有足够的强度, 以防止脱模后发生变形, 要确定合适的冷却时间。MPI/Cool 能够计算制品完全固化或用户设定的固化百分比所需要的冷却时间。

(2) 型腔表面的温度分布。型腔表面温度对制品质量具有重要影响。MPI/Cool 能够模拟注射周期的型腔表面温度分布, 帮助工艺人员确定模具温度的均匀程度及是否达到材料所要求的模具温度。对于中性面模型, MPI/Cool 还可以计算制品两个侧面的温度差别。

(3) 制品厚度方向的温度分布。制品在顶出时刻的温度是确定冷却时间是否合理的重要因素, 如果温度过高, 则需加强冷却或适当延长冷却时间, 而温度过低, 说明冷却时间太长。MPI/Cool 能够预测制品在顶出时刻沿厚度方向不同位置的温度分布, 最高温度在厚度方向的位置, 沿厚度方向的平均温度以及某一单元温度沿厚度方向的变化。

(4) 制品的固化时间。依据模具表面的温度预测制品完全固化所需要的时间。

(5) 冷却介质的温度分布及冷却管道表面的温度分布。冷却介质的温度变化、冷却管道表面与冷却介质间的温度差是决定冷却是否有效的重要依据。

(6) 冷却管道中的压力降低、流动速度及其雷诺数。雷诺数决定了流动状态, 应保证冷却介质处于紊流状态。

(7) 镶块的温度分布、镶块/模具界面的温度差分布。镶块/模具间的温度差别反映了热量通过界面的阻力大小。

(8) 分型面和模具外表面的温度分布。

### 2.2.3 MPI/Warp(翘曲)分析

随着注塑成型流动、保压、冷却及应力研究的不断发展, 九十年代初, 翘曲变形模拟开始进入注塑成型集成模拟阶段<sup>[20]</sup>。

对成型塑件翘曲变形及应力的分析已在CAE领域引起了广泛的重视和研究热情。美国AC公司、澳大利亚Mold Flow公司以及日本丰田R&D实验中心等越来越倾向于采用对注射成型过程的集成模拟来预测翘曲变形。无论从改进注塑件产品质量, 还是从提高注塑行业生产效率、降低生产成本来看, 注塑件翘曲变形模拟的研究都有重大意义<sup>[21]</sup>。

#### 一、翘曲产生的原因

Moldflow MPI/WARP 模块把翘曲分为两种形式，见图 2.2.3.1。

1) 稳定翘曲 (图 2.2.3.1 a): 翘曲变形与收缩应变成正比。

2) 非稳定翘曲 (图 2.2.3.1 b): 翘曲变形是由于制品弯曲而产生的。在这种情况下，收缩应变表现为平面应变，由于平面应变过大导致制品失稳而弯曲。一般，这种翘曲变形很大。

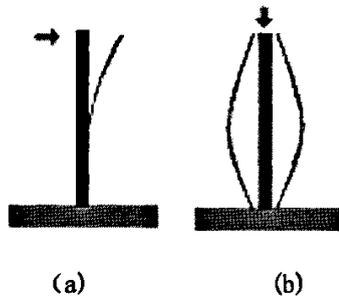


图 2.2.3.1 翘曲分类

Fig 2.2.3.1 Category of warpage

## 二、翘曲产生的原因

注塑过程中，翘曲是由于制品收缩率不均匀而产生的。影响注塑制品收缩的因素很多，材料特性（包括材料分子链结构、结晶性能、流变性能等）、工艺条件（包括注射速度、注塑压力、模腔压力、保压时间、冷却时间等）和模具设计（包括嵌件结构、浇口类型、冷却回路分布等）等都影响其收缩行为。图 2.2.3.2 为成型工艺参数设置对熔体收缩率的影响。

收缩率不均匀表现在以下几方面：

- (1) 制品不同部位的收缩率不一样；
- (2) 沿制品厚度方向收缩率不同；
- (3) 与分子取向平行和垂直方向的收缩率不同。

MPI/WARP 把翘曲产生的原因归结为以下三点：

- (1) 冷却不均匀；
- (2) 收缩不均匀；
- (3) 分子取向不一致。

因此，MPI/WARP 模块的主要目的是确定制品翘曲变形的结果是否满足设计要求，如果不能满足设计要求，给出产生翘曲的主要原因。

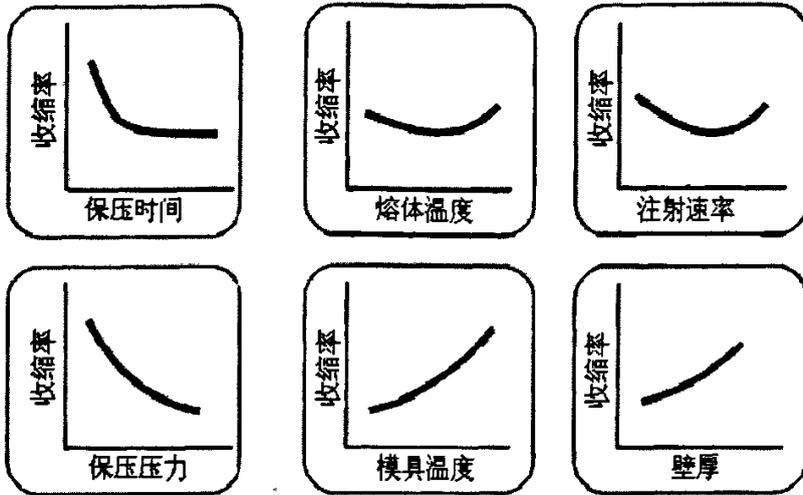


图 2.2.3.2 成型工艺参数设置对熔体收缩率的影响

Fig 2.2.3.2 Effect of Processing Conditions on Shrinkage

### 三、翘曲分析步骤

进行翘曲分析之前，冷却、流动分析必须已经完成。在选择分析流程时，有两种分析流程 Cool - Flow - Warp (简称 CFW) 和 Flow - Cool - Flow - Warp (简称 FCFW)。CFW 在进行冷却分析时假设熔体的前沿温度不变，而 FCFW 在进行流动分析时假设模壁温度不变。对于翘曲分析，经过实践验证，假设熔体的前沿温度不变 (CFW) 计算的结果更精确<sup>[22]</sup>。

对于 FUSION 网格模型，MPI/WARP 还不能进行弯曲分析，所以分析非常简单，选择 Cool - Flow - Warp 分析流程后，在设置工艺参数（菜单命令 Analysis 下的 Process Settings 命令）的第三步，选取 Isolate cause of warpage 选项，该选项的作用是判断产生翘曲变形的的主要原因。如果网格数量大于 50000 个，选取 Use iterative solver 选项，可显著减少计算时间<sup>[23]</sup>。图 2.2.3.3 为确定翘曲变形量的流程图，确定制品翘曲变形的结果是否满足设计要求，如果不能满足设计要求，则给出产生翘曲变形的的主要原因。则按图 2.2.3.4 优化翘曲变形。

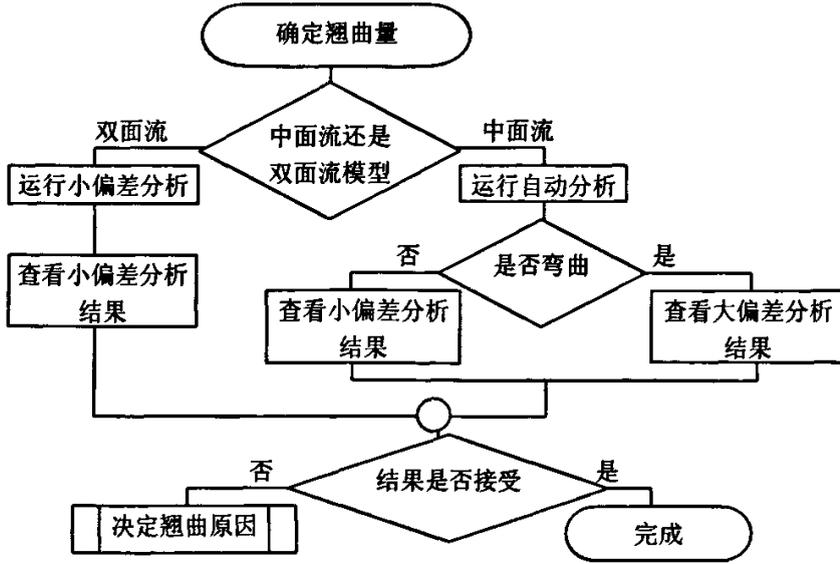


图 2.2.3.3 确定翘曲变形量流程图

Fig 2.2.3.3 Determine the Magnitude of Warpage Flow Chart

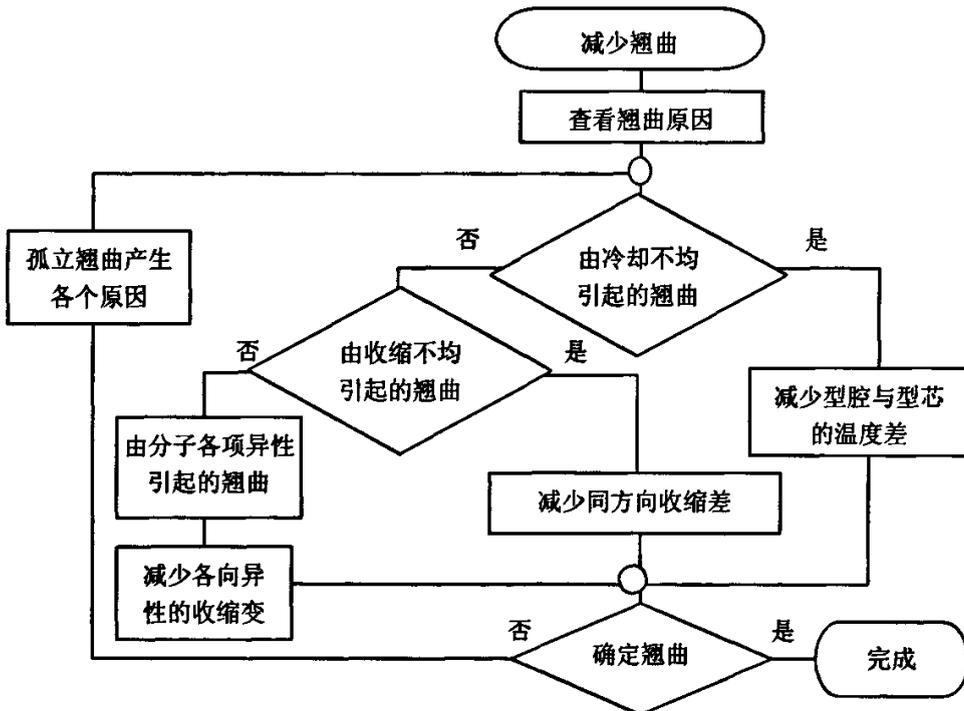


图 2.2.3.4 优化翘曲变形流程图

Fig 2.2.3.4 Reducing Warpage Procedure

## 第三章 注塑制品的几种常见缺陷及解决办法

### 3.1 熔接线

在注射成型过程中,当采用多浇口或型腔中存在孔洞、嵌件、以及制品厚度尺寸发生变化较大时,塑料熔体在模具内会发生两个方向以上的流动,当两股熔体相遇时,就会在制品中形成熔接线(weldline)。尽管熔接线是在模具填充过程中形成了,但它们的结构、形状和性质与整个注塑过程相关。我们可以根据交汇角把它们分为熔接线(weld lines)和熔合线(meld lines)。传统上以两股熔体的汇流角度来区分熔接线和熔合线,如图 3.1.1 所示,汇流角度小于  $135^\circ$  时产生的是熔接线,大于  $135^\circ$  时产生熔合线。可以注意到的是汇角度在  $120^\circ \sim 150^\circ$  时,熔接线的表面痕迹将会消失。一般认为熔接线的品质比熔合线差,因为在熔接线形成后,较少分子跨越熔接线相互融合。提高熔接线和熔合线区域的温度和压力可以改善其强度。考量塑料强度与外观时,一般都不容许产生熔接线,添加纤维的强化塑料更是如此,因为纤维通常平行于熔接线配合;而无法跨越熔接线<sup>[24]</sup>。

熔接线的强度决定于两股熔体波前相互交织的能力,熔接线区域的强度可能是无熔接线区域的  $10\sim 90\%$ <sup>[25]</sup>。因为范围宽广,能够促成较佳熔接线品质的成形条件应值得检验,包括:

- 高射出压力和高射出速度。
- 高熔体温度与高模壁温度。
- 在接近浇口处产生熔接线。
- 两股汇流的熔体波前的温度差必须小于  $10^\circ\text{C}$ 。

按生产方式的不同,熔接缝可分为热熔接缝(hot weldline)和冷熔接缝(cold weldline)。当两股面对流动的熔体相遇后,不再产生新的流动,这时所产生的熔接缝称为冷熔接缝;当熔体流动中碰到障碍物(如嵌件)后,分成两股或多股熔体,绕过障碍物,分开的熔体又重新汇合并继续流动,这时所形成的熔接缝称热熔接缝。

近些年来,对注塑制品熔接线的分析得到了普遍的关注,这一方面是由于大型复杂

制件的逐渐增多，另一方面是人们对制品的外观和内在性能要求越来越高。如何提高熔接线处的性能成为研究的重点<sup>[26]</sup>

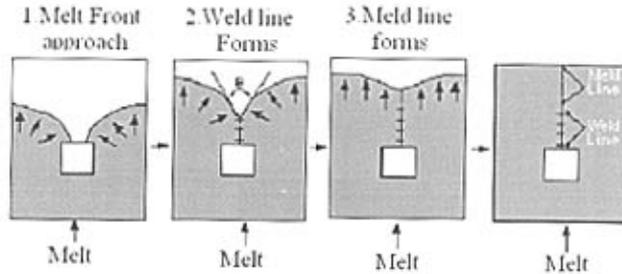


图 3.1.1 熔接线与熔合线  
Fig 3.1.1 Weld line and Meld line

熔接线的存在会产生潜在的致命缺陷，影响熔接线的因素很多，凡影响分子链缠结、结晶取向和分子热作用的因素都会影响到熔接线的强度。这些因素都和熔接线形成中分子活性有关，依赖于材料特征和工艺条件，材料特征主要包括松弛时间、结晶形貌等，而工艺条件包括注射速度、模具温度、熔体温度、压力等。而这些因素又是相互耦合和相互作用的，特别是对于不同的材料，这些作用机理又不尽相同，我们往往无法判定起决定作用的影响因素。

假如熔接线在充填完全以前形成，而且立即进行保压，结果的熔接线较不明显，而且强度较强。对于复杂几何形状的塑件，流动分析模拟可以针对模具的设计变更加以预测熔接线和熔合线的位置，并且监控各股熔体波前之温度差。

改善塑件熔接线和熔合线的方法说明如下：

(1) 变更塑件设计：增加壁厚，以帮助压力的传送，并且保持较高的熔体压力。调整浇口位置与尺寸，或减小塑件的厚度比。

(2) 变更模具设计：加大浇口与流道的尺寸。将排气孔设在熔接线和熔合线，以消除气穴，避免塑件的强度减弱。改变浇口设计以去除熔接线和熔合线，或者在接近浇口处形成承高压与高保压压力的熔接线和熔合线。

(3) 调整成形条件：假如塑件在熔接线处有破裂的倾向，可以在塑料过热的范围以内，适度提高熔体温度、模具温度、射出速度、或射出压力。熔体温度太低造成熔体波前无法交互编织在一起。然而熔体温度太高也可能造成树脂裂解，仍无法产生好的编织

面。射出压力太低而无法逼迫熔体在熔合线结合。

(4) 小心准备塑料：提高熔体流动性有助于减小熔接线，所以在塑件功能许可范围内，可以考虑改用流动指数(MI)值较高的塑料。

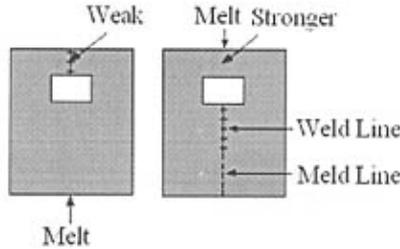


图 3.1.2 浇口位置对熔接线的影

Fig 3.1.2 Gate position influence on Shrinkage

### 3.2 翘曲变形

翘曲(warpage)是塑件未按照设计的形状成形，却发生表面的扭曲，塑件翘曲导因于成形塑件的不均匀收缩。假如整个塑件有均匀的收缩率，塑件变形就不会翘曲，而仅仅会缩小尺寸；然而，由于分子链/纤维配向性、模具冷却、塑件设计、模具设计及成形条件等诸多因素的交互影响，要能达到低收缩或均匀收缩是一件非常复杂的工作。

热塑性塑料注塑制品成型时收缩率波动较大，特别是结晶性塑料注塑制品更加明显，结晶度不仅取决于化学结构而且还受到加工过程中冷却速率(冷却参数:熔体温度、模具温度、制品厚度)的影响。对于结晶性塑料，横向收缩率均稍高于流动方向的收缩率；注射速率对收缩率的影响则较为轻微<sup>[27,28]</sup>。

塑件因收缩不均而产生翘曲，收缩率变化的原因包括：<sup>[29]</sup>

- 塑件内部温度不均匀。
- 塑件凝固时，沿着壁厚方向的压力差异和冷却速率差异。
- 塑件尚未完全冷却就顶出，或是顶出销变形，倒勾太深，顶出方式不当，脱模斜度不当等因素都可能造成塑件翘曲。
- 塑件壁厚变化导致冷却速率的差异。
- 塑件具有弯曲或不对称的几何形状。
- 塑件材料有、无添加填充料的差异。

- 流动方向和垂直于流动方向之分子链 / 纤维配向性差异，造成不同的收缩率。
- 保压压力的差异（例如浇口处过度保压，远离浇口处却保压不足）。

塑件材料添加填充料与否，会造成收缩的差异，如图 3.2.1 所示。当塑件具有收缩差异，其壁厚方向与流动方向产生不等向收缩，造成的内应力可能使塑件翘曲。由于强化纤维使塑件的热收缩变小和模数变大，所以添加纤维的热塑性塑料可以抑制收缩，它沿着添加纤维的排列方向（通常是流动方向）的收缩比横向的收缩小<sup>[30]</sup>。

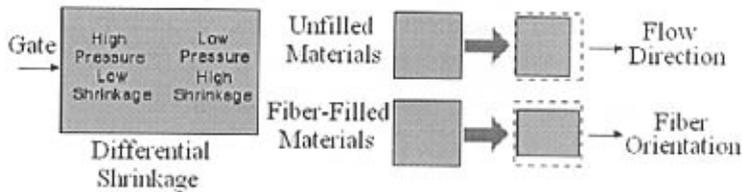


图 3.2.1 填充料对翘曲的影响  
Fig 3.2.1 Fiber-Filed Materials influence on Warpage

不均匀冷却以及塑件在公模、母模之间壁厚方向的不对称冷却都会导致收缩差异，如图 3.2.2 所示。材料从模壁到中心层发生不均一的冷却与收缩，结果会在顶出以后造成翘曲。



图 3.2.2 不均匀冷却对翘曲的影响  
Fig 3.2.2 differential Cooling influence on warpage

塑件之收缩量随着壁厚增加而增加。不均匀壁厚所造成的收缩差异是无添加强化填充材料之热塑性塑料塑件发生翘曲的主要原因。更具体地说，塑件剖面壁厚的变化通常造成冷却速率差异与结晶度差异，结果就造成收缩差异与塑件翘曲，如图 3.2.3 所示。

残留应力也会造成翘曲，加长成型品在模具内的冷却时间可以改善此类翘曲。不均匀的冷却也会造成翘曲。顶出时成型品温度太高，顶针使成型品翘曲。

塑件温度分布不均匀会造成塑件翘曲。造型复杂的组件也会造成不均匀的冷却，尤其没设置冷却系统的模具更是如此。

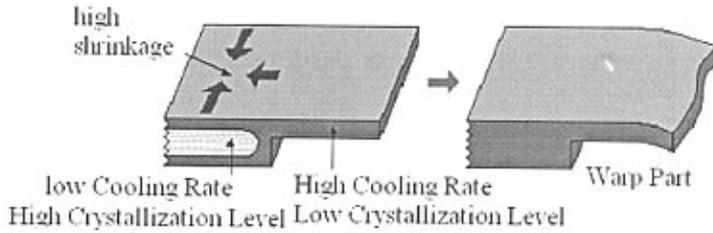


图 3.2.3 壁厚对翘曲的影响

Fig 3.2.3 Part wall thickness influence on warpage

### 3.3 气穴

气穴 (air traps) 是指熔体波前将模穴内的空气包覆，它发生在熔体波前从不同方向的汇流，或是空气无法从排气孔或镶埋件之缝隙逃逸的情况。气穴通常发生在最后充填的区域，假如这些区域的排气孔太小或者没有排气孔，就会造成气穴，使塑件内部产生空洞或气泡、塑件短射或是表面瑕疵。另外，塑件壁厚差异大时，熔体倾向于往厚区流动而造成竞流效应 (race-tracking effect)，这也是造成气穴的主要原因，要消除气穴可以降低射出速度，以改变充填模式；或者改变排气孔位置、加大排气孔尺寸。由于竞流效应所造的气穴可以藉由改变塑件壁厚此例或改变排气孔位置加以改善排气问题<sup>[31]</sup>。气穴的改善方法说明如下：

(1) 变更塑件设计：缩减壁厚比例，可以减低熔体的竞流效。

(2) 应变更模具设计：将排气孔设置在适当的位置就可以改善排气。排气孔通常设在最后充饱的区域，例如模具与模具交接处、分模面、镶埋件与模壁之间、顶针及模具滑块的位置。重新设计浇口和熔体传送系统可以改变充填模式，使最后充填区域落在适当的排气孔位置。此外，应确定有足够大的排气孔，足以让充填时的空气逃逸；但是也要小心排气孔不能太大而造成毛边。

(3) 调整成形条件：高射出速度会导致喷射流，造成气穴。使用较低的射出速度可以让空气有充足的时间逃逸。

### 3.4 喷射<sup>[32]</sup>

当熔体以高速流过喷嘴、流道、或浇口等狭窄的区域后，进入开放或较宽厚的区域，并且没有和模壁接触，就会产生喷射流。蛇状发展的喷射流使熔体折合而互相接触，造成小规模缝合线，如图 3.4.1 所示。喷射流会降低塑件强度，造成表面缺陷及内部多重瑕疵。

相较之下，正常的充填模式之熔体波前则不会产生这些问题。改善塑件之喷射流瑕疵的方法说明如下：

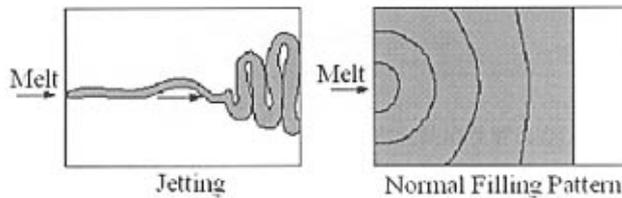


图 3.4.1 喷射流与正常充填的比较

Fig 3.4.1 Comparison of Jetting and normal-fill

(1) 更改模具设计：通常喷射流问题出现在浇口设计，可以重新安置或变更浇口设计，以引导熔体与侧壁金属模面接触。使用重迭浇口，如图 3.4.2。以逐渐扩张的熔体流动面积来减低流动速度；使用凸片或扇形浇口，如图 3.4.3 或图 3.4.4，可以提供熔体从浇口到模穴较平顺的转移，降低熔体的剪应力和剪应变。加大浇口与流道尺寸，或缩短浇口长度。检讨冷料井是否设计不当。

(2) 调整成形条件：调整为最佳的螺杆速度曲线，使熔体波前以低速通过浇口，等到熔体探出浇口外再提高射速，以消除喷射流，如图 3.4.4。亦可能调整料筒温度以逐量提高或降低各段熔体的温度，以消除喷射流，此改善方法的原因仍未确定，但是可能与模嘴膨胀效应和熔体性质（例如黏度和表面张力等）之改变有关系。对于大多数的塑料，降低温度使得模口膨胀效应增大；但是，也有塑料（例如 PVC）则因为升高温度而增大模嘴膨胀效应。

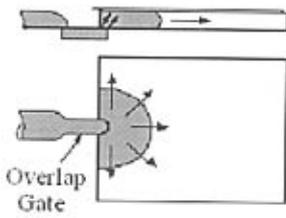


图 3.4.2 重迭浇口  
Fig 3.4.2 Overlap Gate

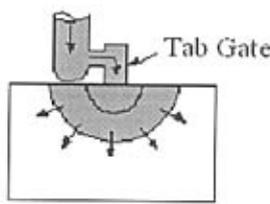


图 3.4.3 凸片浇口  
Fig 3.4.3 Tab Gate

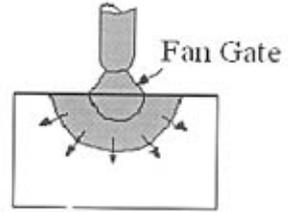


图 3.4.4 扇形浇口  
Fig 3.4.4 Fan Gate

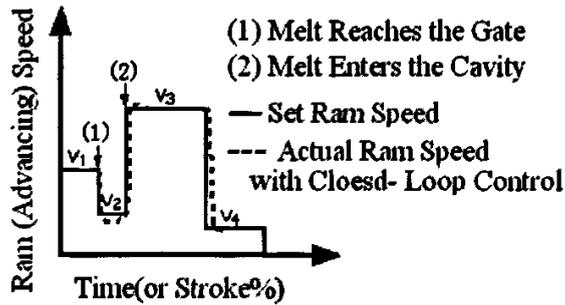


图 3.4.4 螺杆速度曲线  
Fig 3.4.4 Ram speed profile

## 第四章 打印机外壳注塑成型工艺优化及热流道选用

### 4.1 优化问题的提出及热流道的选用

本文所采用的是Brother公司生产的一款打印机的外壳。材料为ABS。最大允许剪切应力为0.3MPa，最大熔体温度280℃，最小熔体温度为200℃。生产出的制品存在着表面有黑条纹的缺陷。分析原因由于只采用单流道热流道系统，而打印机外壳的形状复杂，尺寸又比较大，同时又采用较难成型的ABS原料。为了使熔体充满型腔，必须使用较高的压力和较快的射出速度，熔体通过浇口和壁厚较薄处时，会造成大量的剪切热，使塑料裂解；而射出速度太快或射出压力太高，可能导致流道系统和模穴内的气体无法在很短的充填时间内从排气孔排出，造成包风。结果，模穴内的空气受压缩，压力与温度升高，使得流道路径末端或包风区域的塑件表面的塑料裂解而造成烧痕。图4.1.1为打印机外壳三维实体模型，图4.1.2为有限元网格模型。

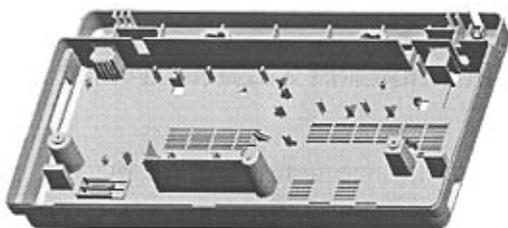


图 4.1.1 三维实体模型

Fig 4.1.1 Printer shell 3D Mode

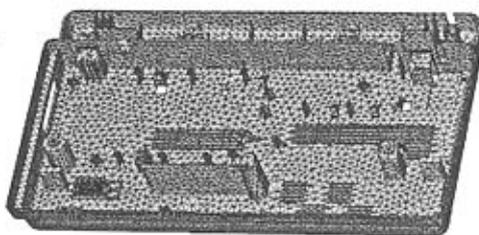


图 4.1.2 3D 网格模型

Fig 4.1.2 Printer shell Fusion model

使用注塑流动模拟分析软件，可以显示模腔各处切应力的分布情形。切应力代表塑料在加工过程中由于剪切流动造成的应力分布。如果应力过高，塑料可能发生降解，还会造成过大的变形和翘曲。是否使塑料产生裂解及是否会形成过大的残余应力的依据。若切应力过高（如大于1MPa），有可能使塑料成型制品产生很大的应力，甚至影响制品的强度<sup>[33]</sup>。图4.1.3型腔壁处的剪切应力与熔体流动前沿温度。图中制件左下方的型腔

壁处的剪切应力在 0.5MPa 以上，超出了材料的最大允许剪切应力。

为了解决出现的问题，可以通过降低注射压力和射出速度来降低发生缺陷处的剪切率。图 4.1.4 (a) 在原始方案中增加了一个热流道，但从型腔壁处的剪切应力曲线（图 4.1.6(a)），点 2、3、4、5 处的剪切应力都超过了材料最大允许剪切应力，而且从熔接痕分析图中看到，制件的熔接痕分布非常不理想，其中有几条粗长的熔接痕，这是在分析过程中应该避免的。因此方案 a 不能被采取。方案 b 采用三个浇口，左右两个浇口采用阀式浇口，中间采用普通热流道。

阀式浇注系统是基于普通热流道系统结合相关技术的进一步发展，为解决普通浇注系统在注塑成型中存在的问题，人们在普通浇注系统的基础上作了大量开发与研究。阀式浇口在原来热流道浇口处加上一个可以控制开、关的阀门装置，注塑时浇口的开和关根据具体要求决定其工作方式。注塑时，中间浇口首先进料，当熔体经过左右两个浇口时，阀式浇口打开，开始进料。通过阀式浇口控制注塑过程，熔体按顺序注入注塑模型腔，各股熔体能很好的融合，从而消除各浇口之间的熔接痕。同时，由于浇注时顺序控制的，注塑时的压力和熔体温度相对于普通浇口而言可降低很多。这样大型复杂和薄壁类制件注塑成型就很容易实现，也可以有效地避免浇注不足的问题<sup>[34]</sup>。

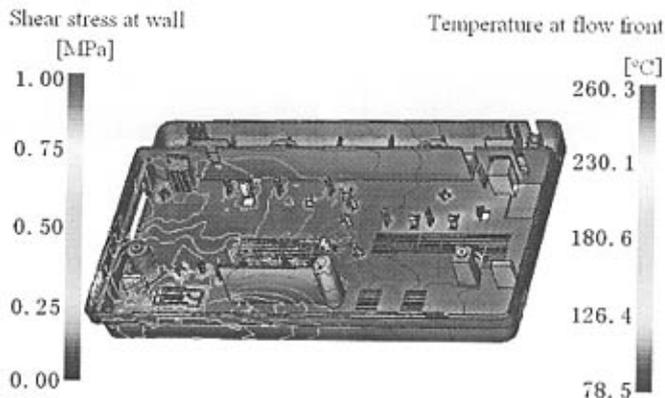


图 4.1.3 型腔壁处的剪切应力与熔体流动前沿温度

Fig 4.1.3 Shear stress at wall and melt flow front temperature

从 4.1.5 熔接痕分析图中可以看到，方案 b 不仅消除了方案 a 出现的长、粗的熔接痕，而且在数量上也大大减少，因而塑件的强度和表面质量得到很大提高。从 4.1.6(b) 型腔壁处的剪切应力变化曲线可以看到，剪切应力大大降低，都低于材料的最大允许剪

切应力。因此选用方案 b 的热流道系统。

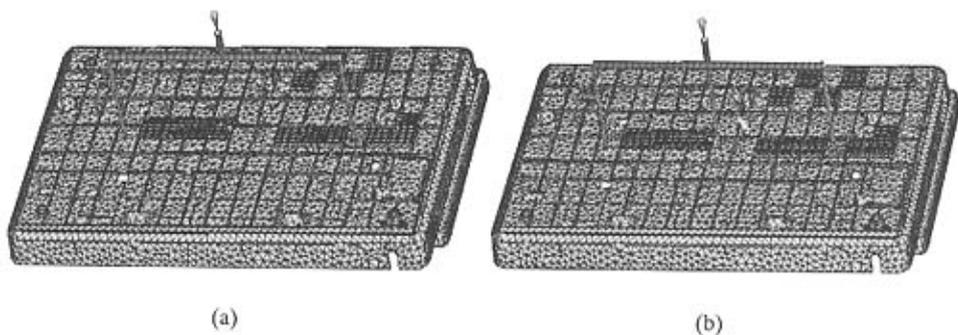


图 4.1.4 热流道的选取  
Fig 4.1.4 Hot runner selection

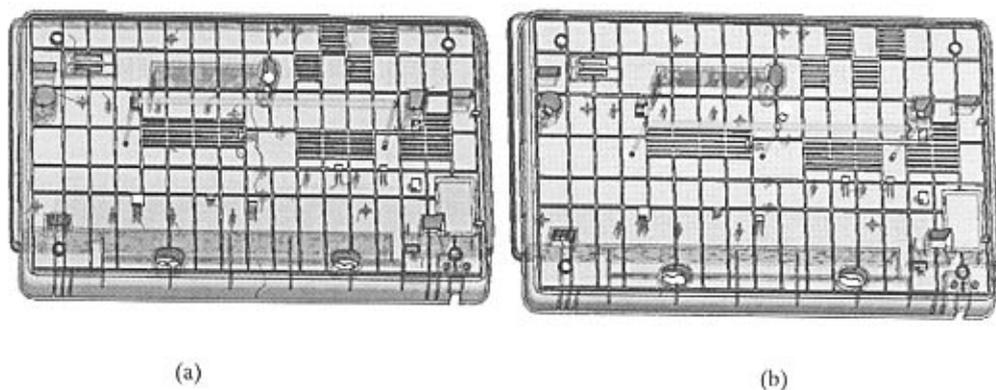
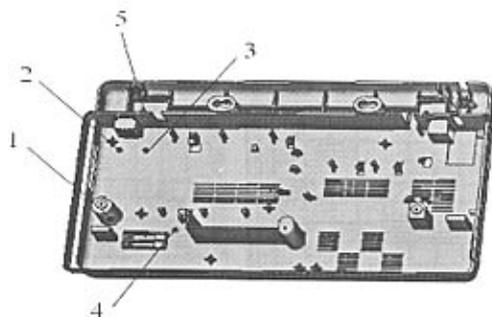


图 4.1.5 熔接痕的分布形式  
Fig 4.1.5 Distribution of weld line



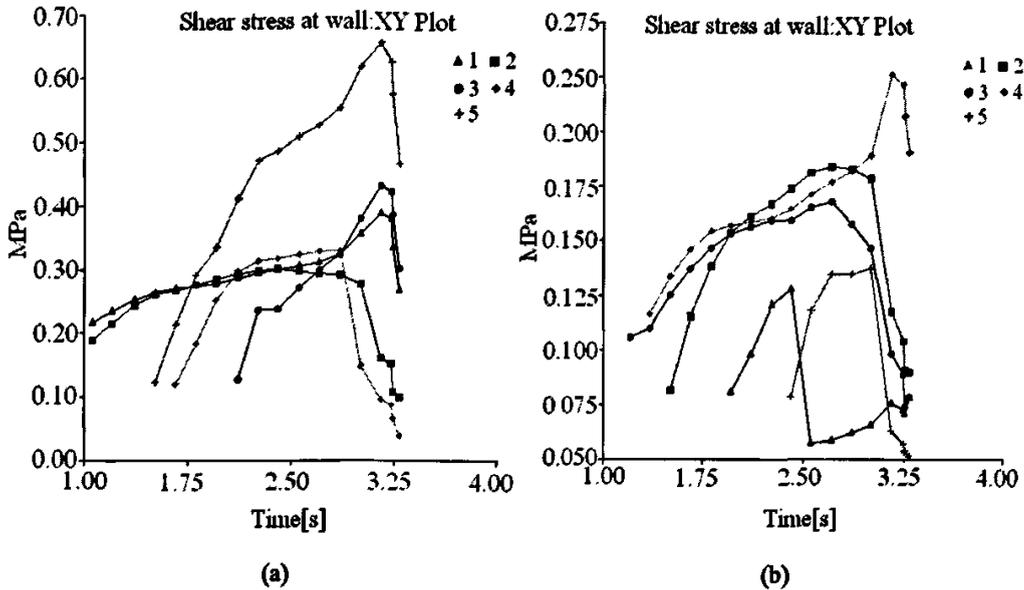


图 4.1.6 型腔壁处的剪切应力曲线

Fig 4.1.6 Shear stress at wall curve

## 4.2 打印机外壳的冷却分析

冷却分析的目的是预估冷却时间及整个成型周期的长短，以便缩短冷却时间，提高成型效率。优化整个冷却系统设计，主要是分析各部分冷却是否均匀，以便合理设计和分布冷却系统，使塑料制品各部分的冷却效果均匀而有效。避免因冷却不均造成塑料制品的翘曲变形问题。

一个好的冷却系统设计应该使冷却液的温升小于  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，如果温升过大，则应增大冷却液流量。通常用雷诺数 ( $Re$ ) 来判断冷却液是处在层流状态还是处在紊流状态。当  $Re < 2300$  时为层流状态， $2300 < Re < 10000$  时为过渡流， $Re > 10000$  时为紊流状态。为使冷却液处于紊流状态，冷却液的流速（流量）应达到一定值，实际生产时一般应该使  $10000 < Re < 30000$ <sup>[35]</sup>。

打印机外壳工艺参数为：熔体温度  $235\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，型腔温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冷却管道直径为  $10\text{ mm}$ ，冷却介质为水，温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冷却时间  $48\text{ s}$ 。图 4.2.1 为冷却水道的布置方式。从图 4.2.2 冷却液温度图中看到，冷却液的温升在  $1.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，表明冷却系统的设计及冷却参数的设

置都比较合理。

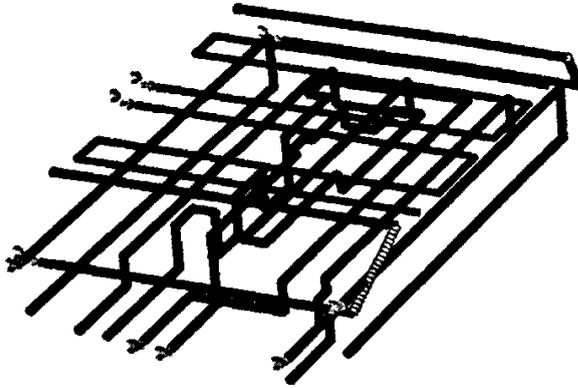


图 4.2.1 冷却水道的布置方式  
Fig 4.2.1 Cold channel distribution

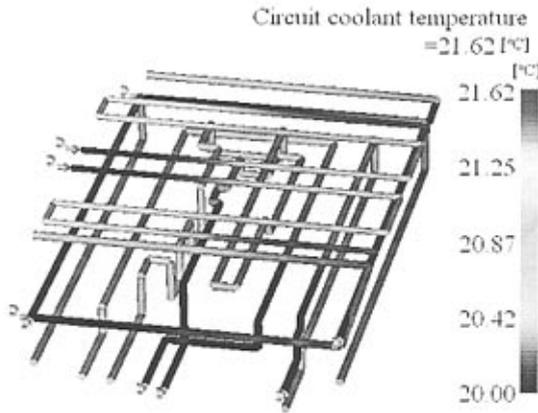


图 4.2.2 冷却液温度图  
Fig 4.2.2 Coolant temperature

### 4.3 保压时间和保压压力的确定

在注塑过程中,翘曲变形是由于制品收缩率不均匀而产生的。为了得到均匀的收缩,必须对型腔压力进行控制。保压时间和保压压力的确定应该使体积收缩率低并且均匀的

分布在整个产品中,分布不均匀会导致变形。体积收缩率的高低由熔体冷凝时具有的压力大小决定,压力越大,收缩越小。一般来说,保压压力维持到浇口凝固后即可停止,太长的保压时间只是浪费能源而已。保压时间过短,在浇口未凝固即停止保压,会造成型腔内压力比流道内的压力大而发生逆流现象,逆流会使产品产生表面凹陷并产生残留应力<sup>[36]</sup>。

保压压力的大小对保压过程至关重要,过高的保压压力会造成溢料和模具损伤,增加产品的残留应力;过低的保压压力则会造成补料不足,收缩过大。适当的保压压力有助于提高产品的表面质量和防止过分收缩,在实际生产中,可以将保压压力设置为充模结束时的喷嘴处压力的80%左右,这一点利用CAE分析很容易得到<sup>[37]</sup>。

先对初始给定的工艺参数进行注塑模拟,首先用恒定的压力进行长时间保压,确保浇口完全凝结。保压压力随时间变化曲线如图4.9所示。

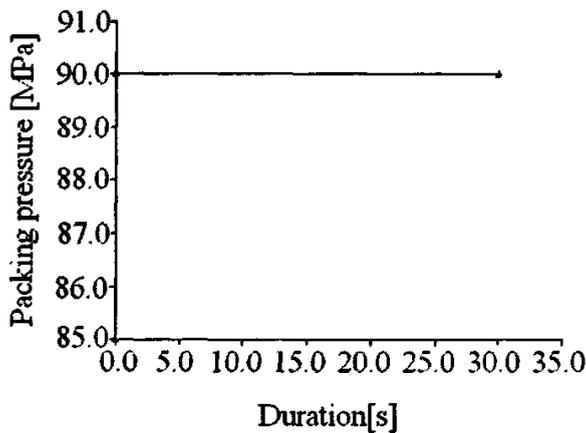


图 4.3.1 初始保压压力设置  
Fig 4.3.1 Initial Packing pressure

然后找出相对体积收缩率高的地方,研判是否因为保压压力或保压时间不够,使得型腔内的塑料因为压力偏低或塑料补充不足而填压不实,是否浇口附近有塑料回流情形,借着这些信息,可以正确的设定保压的压力和时间<sup>[38]</sup>。

图4.3.2为浇口处的体积温度随时间的变化图,从中可以看到,在24.77s左右,浇口的体积平均温度已经低于转换温度107℃,即浇口已经冷凝。在图4.3.3浇口冷凝层因子随时间变化曲线中(其纵坐标指浇口冻结的程度,数值为1时说明浇口完全冻结),

浇口在23.69s已经完全凝固。综合两种曲线的变化，最终确定保压时间为22s。

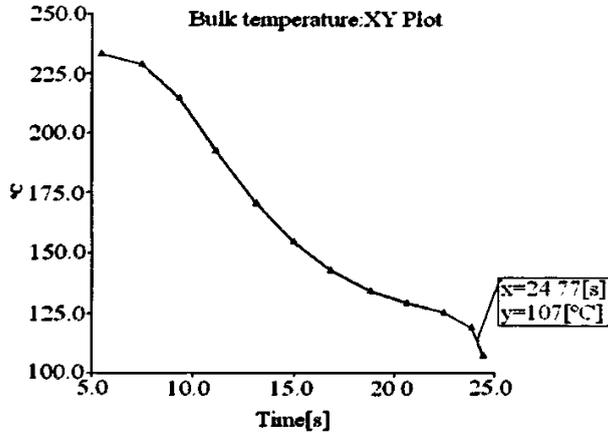


图 4.3.2 浇口的体积温度曲线  
Fig 4.3.2 Bulk temperature curve of Gate

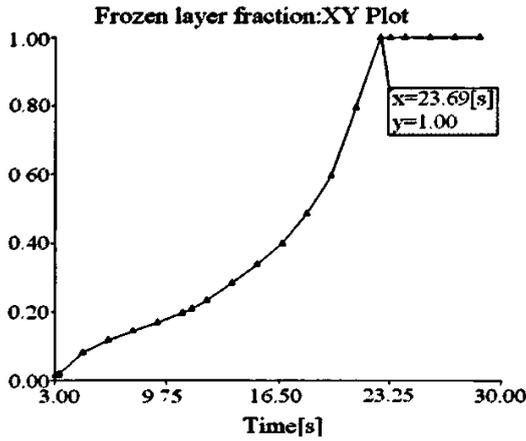


图 4.3.3 浇口冷凝层因子曲线  
Fig 4.3.3 Frozen Layer fraction curve of gate

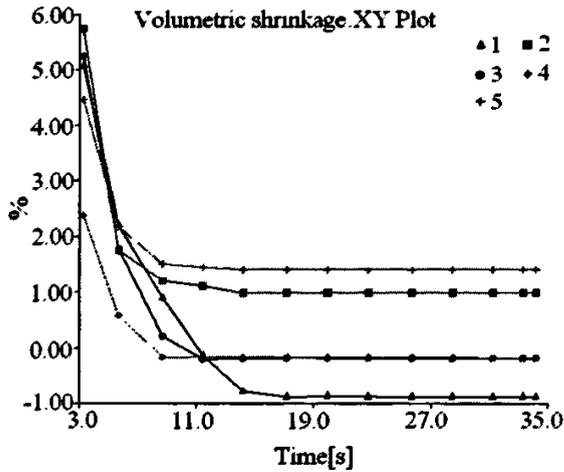


图 4.3.4 体收缩率曲线  
Fig 4.3.4 Volumetric shrinkage curve

体收缩率是聚合物材料线收缩的定性表示。型腔中制品的体收缩率变化(体收缩率的最大值和最小值的差值)越小越好,即,制品的体收缩率越均匀越好<sup>[39]</sup>。从图 4.3.4 体收缩率变化曲线可以看出,点 3、4、5 处的体收缩率均为负数,说明这些地方出现了过保压现象,即保压压力过大。结合附录图 3 至图 5 收缩率与保压压力的关系曲线和浇口的冷凝时间,设定保压压力随时间变化曲线如图 4.3.5 所示。

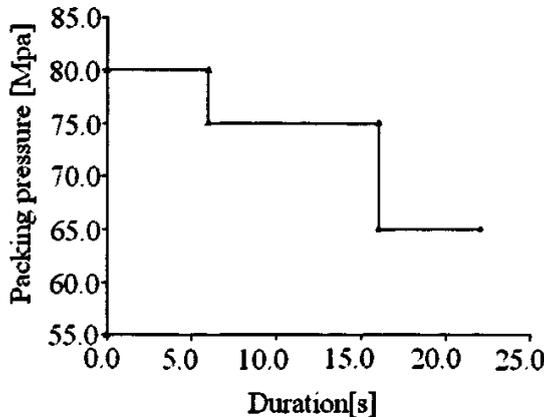


图 4.3.5 保压压力曲线  
Fig 4.3.5 Packing pressure curve

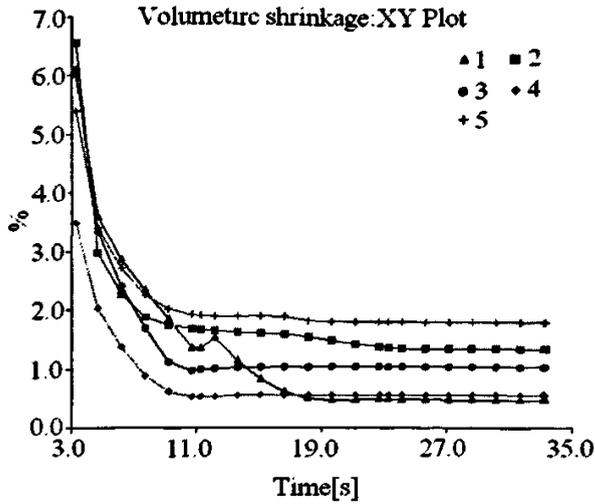


图 4.3.6 体收缩率曲线  
Fig 4.3.6 Volumetric shrinkage curve

在图4.3.6中，体收缩率的最大值和最小值的差值在1.5%左右，变化比较均匀，说明保压时间和保压压力的设定比较合理。

#### 4.4 产品的翘曲分析

利用 CAE 软件对不同工艺条件下的塑料注射成型过程进行模拟,可以优化模具结构和注射工艺参数,减少试模时间,提高一次试模合格率。因此在模具制造之前就应该增加 CAE 的模拟步骤,将问题尽可能的消灭在产生之前<sup>[40]</sup>。对于打印机外壳,要求其翘曲变形量不超过 1mm。对产品作 MPI/WARPA 分析后得到总的翘曲变形量如图 4.4.1 所示,其总变形量的最大值为 0.852mm。其中冷却不均匀性、塑件收缩不均匀性和分子取向不一致性引起的翘曲变形分量分别如图 4.4.2~图 4.4.4 所示从以上可看出,塑料收缩不均匀引起的翘曲变形最大为 0.836mm,其影响最大;冷却不均匀性引起的翘曲变形最大为 0.300mm;而分子取向的不一致引起的翘曲变形最大为 0.049mm,影响最小。从以上分析结果得出:塑件的翘曲主要是由于塑料收缩不均匀引起的。翘曲变形量小于工程要求。

本文通过分析模拟结果,发现工艺参数安排不合理的部分,相应地调整工艺参数,经过反复模拟试模,从而优化成型工艺。

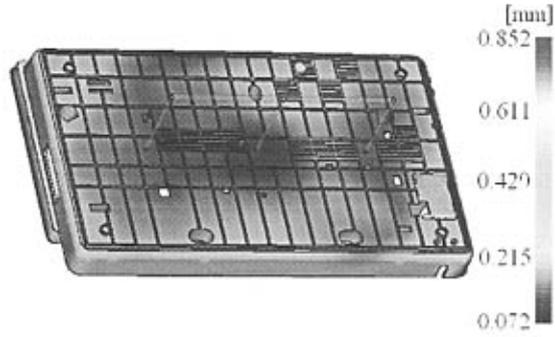


图4.4.1 总体翘曲变形量  
Fig 4.4.1 Deflection of all effects

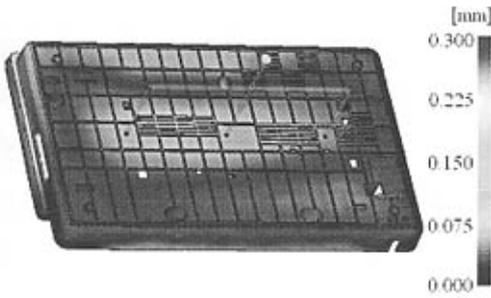


图4.4.2 冷却不均匀引起的翘曲变形量  
Fig 4.4.2 Deflection of differential cooling



图4.4.3 塑件收缩不均匀引起的翘曲变形量  
Fig 4.4.3 Deflection of differential shrinkage

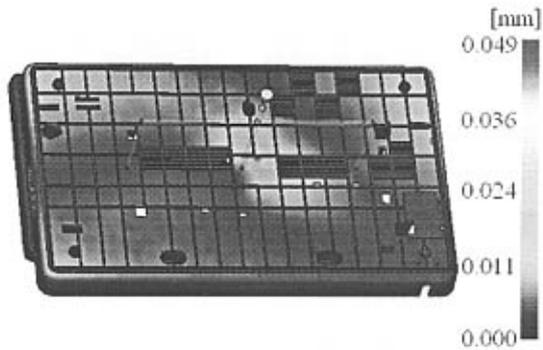


图4.4.4 分子取向不一致引起的翘曲变形量  
Fig 4.4.4 Deflection of orientation effects

## 第五章 模拟实验在实际生产中的应用

### 5.1 基于 CAE 技术的收纳盒注塑模浇口优化设计

浇口是注射成型模具的浇注系统中连接流道和型腔的熔体通道。浇口数量和位置对压力和熔接线有很大的影响。浇口数量较多,熔体在型腔中流动的流程较短,所需注射压力较低,但可能会使熔接线的数目增多;相反,如果浇口数量较少,尽管熔接线的数目可能会减少,但由于流程较长,所需的注射压力较高,制品的内残余应力也相应增高,并可能会导致注塑件产生翘曲变形。因此,对浇口数量及位置进行优化设计,特别是对结构复杂的注塑件具有重要的应用价值。流动过程是塑料成型的初始阶段,对后续的凝固、变形以及分子取向都有重要的影响,模拟流动过程可以预测注射成型中熔接线、气穴的位置,判断是否出现胀模、短射等缺陷<sup>[41]</sup>。

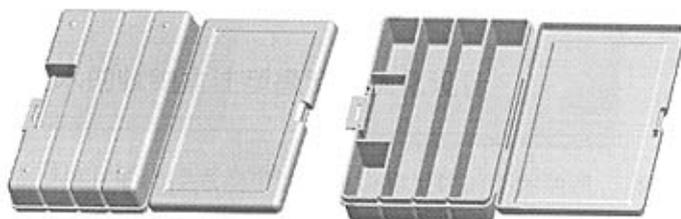


图 5.1.1 收纳盒的三维实体模型

Fig 5.1.1 3D model of Storage box

收纳盒模拟分析过程要对制件进行分析,首先要在数模表面生成三角形网格来覆盖整个工件表面,为以后的 MPI/flow 分析提供一个基础平台。因此首先在 Pro/Engineer 中创建实体模型,并将其以 STL 的格式导入到 MPI 模块中。图 5.1.1 为收纳盒的三维实体模型,由实体模型建立的该制件的有限元分析模型如图 5.1.2 所示,其网格采用 Fusion(双面层)模型来生成,有限元分析模型网格数为 39183,节点数为 19949,匹配率

为 92.8%。附录图 6 为收纳盒实际产品图。塑件材料为 SK Corporation 的 PP，型号为 Yuplene B360F。相关参数为：塑料熔融温度为 230°C；模具温度为 50°C。收纳盒模拟分析流程如附录图 2 所示。

### 5.1.1 浇口位置的初步确定



图 5.1.2 收纳盒有限元网格  
Fig 5.1.2 Fusion Model of Storage box

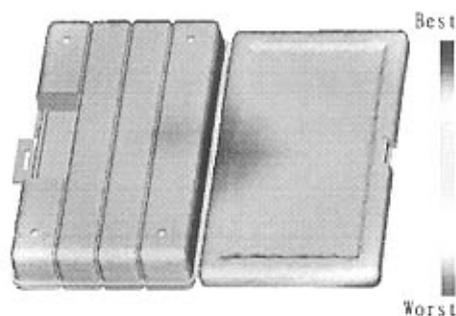


图 5.1.3 最佳浇口位置  
Fig 5.1.3 Best Gate position

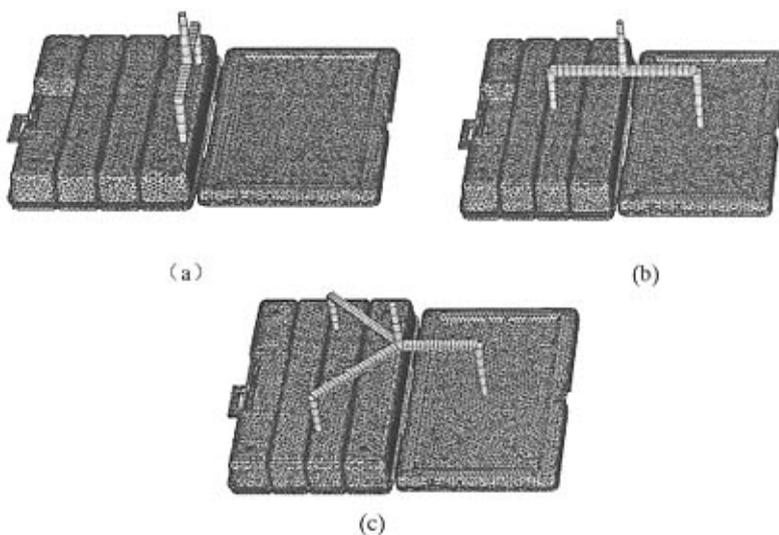


图 5.1.4 浇口布置的形式  
Fig 5.1.4 Gate position distribution

MPI 模块提供了最佳浇口位置分析功能，图 5.1.4 中蓝色区域为浇口最佳位置。进行该分析有助于选定浇口位置，可避免由于浇口位置设置不当引起的不合理成型<sup>[42,43]</sup>。通过软件对工件的初步分析，结合实际制件的技术要求和生产方式，得出如图 5.1.5 所示三种浇口的布置方式。

### 5.1.2 不同位置的填充时间分析

充模时间显示的是熔体流动前沿的扩展情况。填充时间可以直观地观察制件的填充是否平衡。如图 5.1.2.1 所示，方案 a 中收纳盒顶部在 1.38s 被充满，底部在 1.23s 被充满，两者相差 0.15s；方案 b 中顶部在 1.27s 被充满，底部在 1.00s 被充满，两者相差 0.27s；方案 c 中顶部在 1.32s 被充满，而底部则在 0.90s 被充满，两者相差 0.42s。由此可见方案 a 填充的平衡性较好。

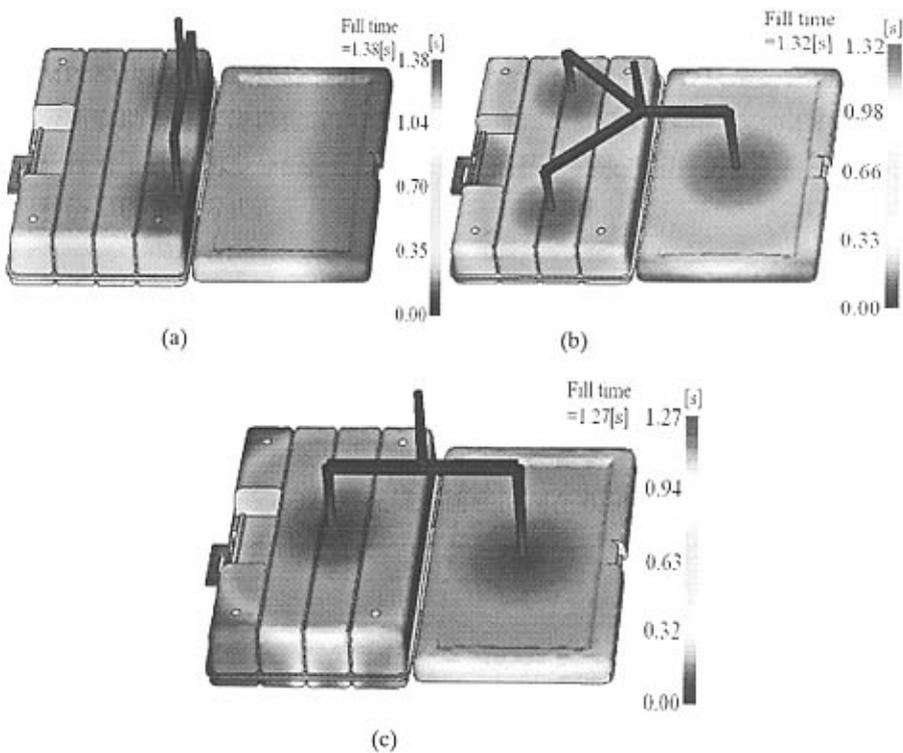


图 5.1.2.1 填充时间分析

Fig 5.1.2.1 Fill time analysis

### 5.1.3 不同位置产生的气穴

在塑料熔体注射充填过程中，模内除了原有空气外，还有塑料含有的水分在注射温度下蒸发而成的水蒸气，塑料局部过热分解产生的低分子挥发性气体等，这些气体若不能通过排气系统顺利排出模腔，气穴的出现有可能导致短射的发生，造成充模不完全，最终在制品表面形成瑕疵，甚至可能由于气体压缩产生热量，出现焦痕。

图 5.1.3.1 中圆点所示的部分是气泡产生的位置。这三个方案的气穴大部分出现在筋和边的末端和分型面上，所以气体在充模时能自行逃逸，不会出现由于排气不畅产生高温气体灼伤制品的情况，三种方案气穴的分布情况都可以接受。

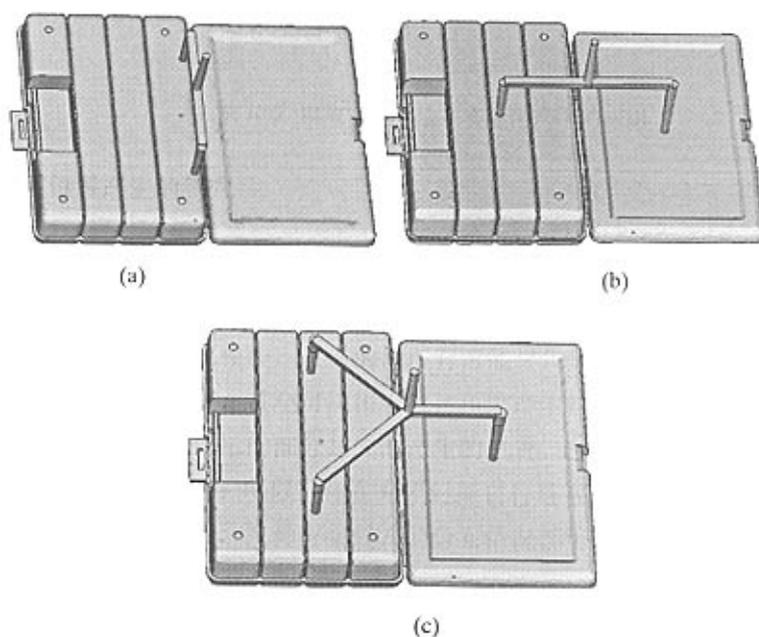


图 5.1.3.1 气穴分布位置分析

Fig 5.1.3.1 Air traps distribution analysis

### 5.1.4 不同位置产生的熔接线分析

熔接线产生于两股低温流头相遇的位置，熔接线的出现对制品强度有一定的影响，会削弱制品的结构强度并在制品的表面产生缺陷。所以应尽量缩短熔接线的长度和避免出现在制品的主要受力部位。

图 5.1.4.1 中所示的可能产生熔接线的位置。方案 a 有两条熔接线出现在收纳盒底部和顶部的连接处，此处制件壁厚较薄，且为主要受力部位，严重影响了收纳盒的使用性能。其它两个方案中熔接线都出现在制件的非受力区域，方案 a 熔接线的数量要少于方案 c，且熔接线出现的位置熔体前沿温度都在 230°C 以上，具有良好的熔接性，从而可以保证熔接线产生机率较小，不会影响制件的使用性能和外观质量。以上仅给出几个重要分析图的比较，结合其它分析图和注塑件本身的特点，可以得出方案 a 优于方案 b 和方案 c。分析结果与实际结合，从而较准确地选出了较佳的浇口数量和浇口位置。如图 5.4.1.2。

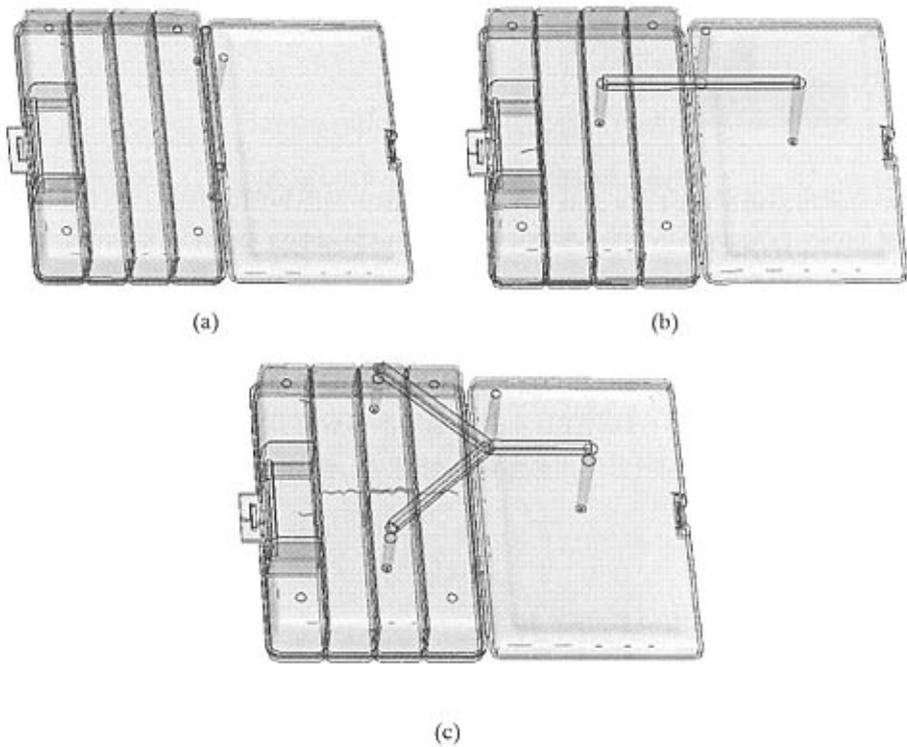


图 5.1.4.1 熔接线分布位置分析  
Fig 5.1.4.1 Weld line distribution analysis

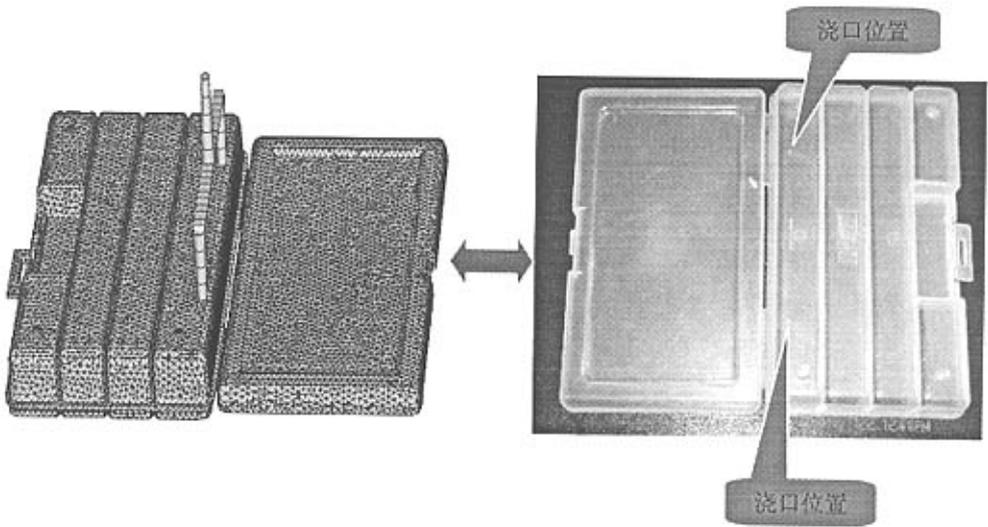


图 5.4.1.2 收纳盒产品最终方案及产品图

Fig 5.4.1.2 Final design and practical product of storage box

## 5.2 华录松下 tray door 成型 CAE 优化

### 5.2.1 流道系统和浇口的优化

塑件为华录松下 M6012/M6030 tray door 产品，制品原料为 UMG ABS 株式会社的 TJ3L 型号 ABS。图 5.2.1.1 为产品实体模型。产品采用一模两穴。初始设计为图 5.2.1.2 中方案 a，采用直分流道和侧浇口。在试模过程中，制件末端圆柱和加强筋末端出现充填不满；制件表面有缩痕；加强筋末端材料变色；浇口附近产生喷射流。如图 5.2.1.3、图 5.2.1.4 所示。为解决制件充填不满的问题，提高注射压力和注射速度，但注塑时间问题仍旧存在。初步认为模具排气不良，造成模穴压力高涨，无法充填完全。

对产品进行流动分析，发现在制件未充满部位都有气穴产生，如图 5.2.1.5。而加强筋末端的材料变色是由于排气不良，型腔内部压力与温度升高，使得流道路径末端或包风区域的塑件表面的塑料裂解而造成烧痕。通过开设排气槽，充填不满和加强筋末端材料变色的问题得到了解决。如图 5.2.1.6 所示。

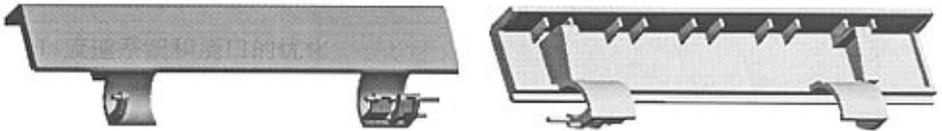


图 5.2.1.1 Tray door 实体模型

Fig 5.2.1.1 Tray door 3D model

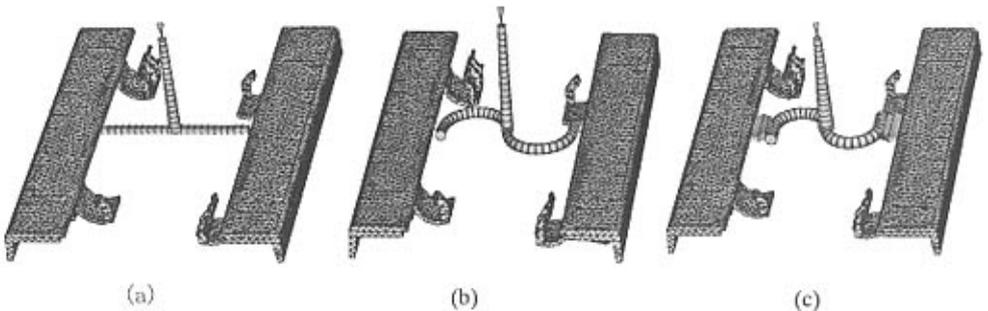


图 5.2.1.2 产品流道布置形式

Fig 5.2.1.2 Runner system distribution

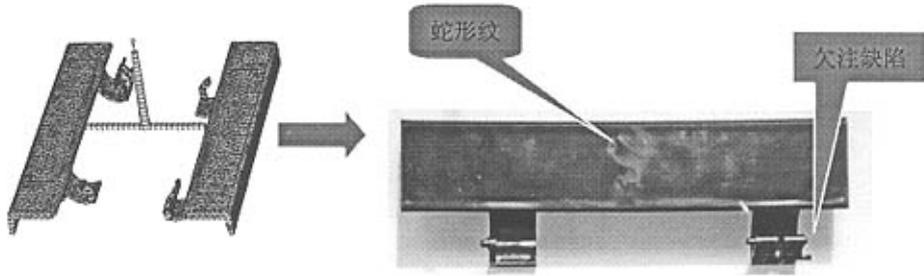
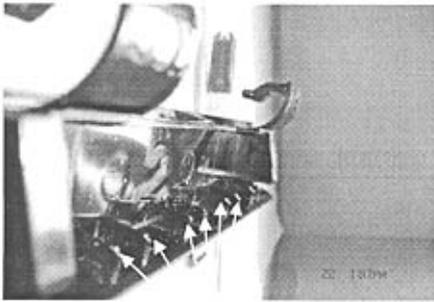
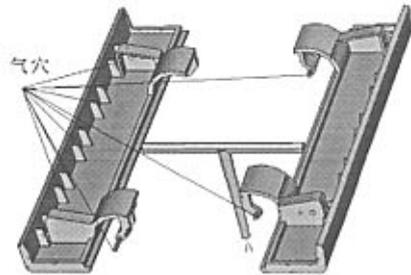


图 5. 2. 1. 3 初始方案及产品缺陷图  
Fig 5. 2. 1. 3 Initial design and deflection of product



加强筋末端的欠注缺陷  
图 5.2.1.4 Short shot at lib area



气穴位置分析  
5. 2. 1. 5 Air trap position

试模过程中，首先通过改变分流道形状来解决喷射流的问题。将直分流道改为半圆形分流道，如方案 a。但试模过程中还是在浇口附近产生喷射(如图 5. 2. 1. 6)。

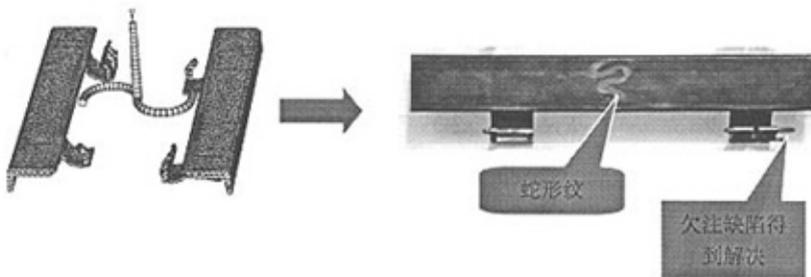


图 5. 2. 1. 6 方案二及产品缺陷图  
Fig 5. 2. 1. 6 Design two and its deflection

对方案 a 和方案 a 进行 CAE 分析,可以从熔体平均速度曲线 (如图 5. 2. 1. 8(a)、(b))

中看到，方案 a 和方案 a 浇口附近的熔体平均速度都在 600cm/s（图中点 1），其它部位（图中点 2~4）的熔体平均速度都在 30cm/s 以下。由于浇口附近的熔体速度较高，而浇口尺寸又较小，熔体经浇口进入模具型腔开放的区域，因此产生喷射。最后采用方案

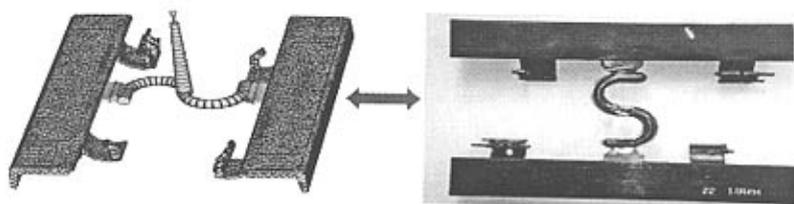
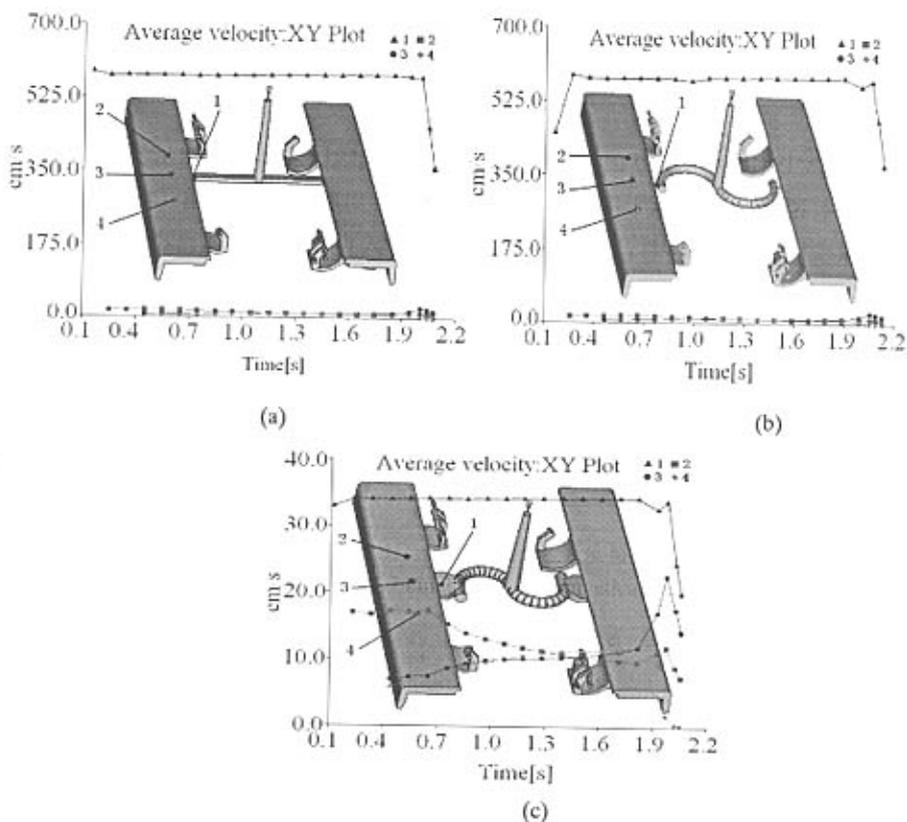


图 5.2.1.7 最终方案确定及实际产品图

Fig 5.2.1.7 Final design and practical product



5. 2. 1. 8 熔体平均速度曲线

Fig 5.2.1.3 Average velocity curve of melt

c (如图 5.2.1.2(c)),采用半圆形分流道和扇形浇口。通过改成扇形浇口,浇口附近的熔体平均速度有了明显下降,见方案 c 平均速度曲线(图 5.2.1.8(c))。经试模后,喷射的问题得到了解决,见图 5.2.1.7。

### 5.2.2 Tray door 产品的冷却分析

Tray door 工艺参数为:熔体温度 235°C,型腔温度为 80°C。冷却管道直径为 10mm,冷却介质为水,温度为 20.2°C,冷却时间 24s。图 5.2.2.1 为 tray door 产品冷却水道的布置形式和冷却液温度图。

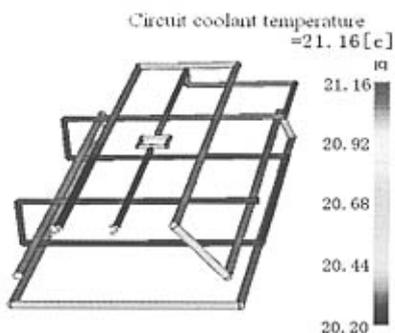


图 5.2.2.1 产品冷却水道布置形式和冷却液温度图  
Fig 5.2.2.1 Cold channel distribution and coolant temperature

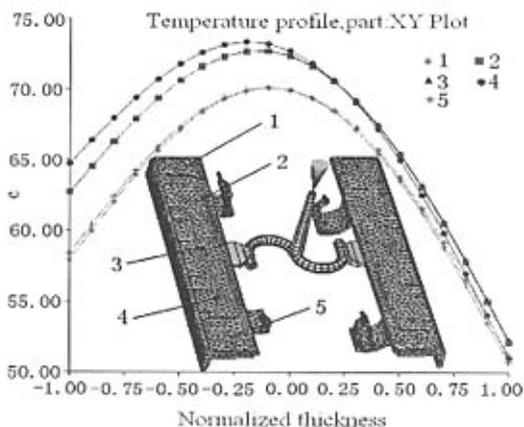


图 5.2.2.2 厚度方向温度曲线  
Fig 5.2.5 Normalized thickness temperature curve

可以看出,冷却液出口温度与进口温度之差在 $1^{\circ}\text{C}$ 之内,表明冷却系统设计的较好。图5.2.2.2为制件厚度方向温度曲线。制件在型腔侧和型芯侧温度分布比较均匀,冷却效果较好。(横坐标-1.00和1.00分别代表制件型腔侧和型芯侧)

### 5.2.3 Tray door 产品保压时间和保压压力的确定

模腔压力的分布对制品质量的影响最大。正是因为不同位置的模腔压力不同造成了制品重量的波动和厚度的不均匀。一般在企业生产中,出现保压时间不够或者冷却时间不够的解决办法非常简单,只要适当延长即可。但是对于如何设定保压压力才能使得模腔压力分布均匀,目前还没有行之有效的方法。目前的工业注塑过程中保压压力通常设定为定常值。但定常压力设定不能有效地消除模腔压力差,而且可调节范围不大。这种简单设置无法实现保压阶段的最优质量控制。但现在这种保压压力的设定方法仍在广泛使用,其原因大概有两个:一是大多数注塑机缺乏有效的针对复杂的保压压力曲线的控制手段;二是还没有形成有关最优保压压力曲线设定的成熟结果,

本文采用Moldflow软件,以不同的保压曲线对保压冷却阶段进行模拟,以获得合理的保压压力和保压时间。

先对初始给定的工艺参数进行保压模拟,以80MPa的压力保压15s,如图5.2.3.1所示,

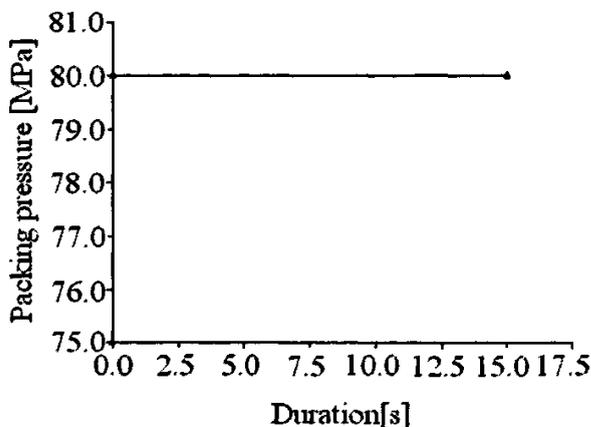


图 5.2.3.1 初始保压压力设置

Fig 5.2.3.1 Initial Packing pressure

图5.2.3.2 为浇口处的体积平均温度随时间的变化图, 从中可以看到, 在12s 左右, 浇口的体积平均温度已经低于转换温度100 °C, 即浇口已经冷凝。在浇口冷凝层因子曲线(图5.2.3.3)中, 浇口在12.02s完全冷凝, 综合两个曲线的结果, 确定保压时间为12.5s。

恒压保压过程虽然保压设定和控制比较简单, 但从图5.2.3.4中可以看出, 模腔中的压力沿着流动方向始终存在着较大的压力梯度, 模腔压力分布很不均匀, 从而造成制品的收缩率分布不均。而且恒压保压过程在保压结束后仍然有比较大的模腔压力, 会使制品内部留有较大的残余应力, 造成制品脱模后发生翘曲变形。

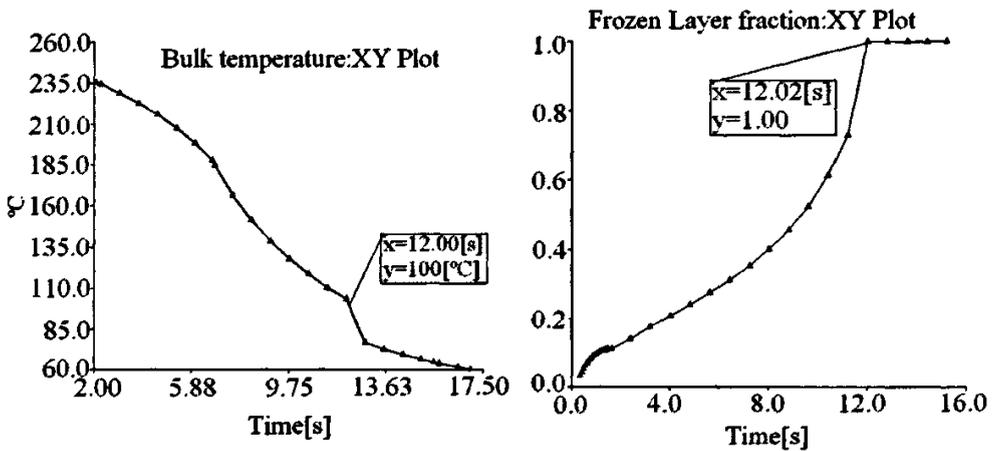
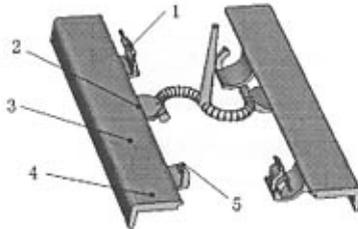


图 5.2.3.2 浇口的体积温度曲线  
Fig 5.2.3.2 Bulk temperature curve of gate

图 5.2.3.3 浇口冷凝层因子曲线  
Fig 5.2.3.3 Frozen Layer fraction curve of gate

阶梯降压保压过程的保压设定和控制也比较简单, 而且模腔压力分布比恒压过程的模腔压力分布均匀很多, 美中不足的是, 由于阶梯降压保压过程设定的压力突然变化, 而模腔中的压力变化无法快速的响应, 故可能出现模腔压力高于保压压力的情况(如图 5.2.3.5所示), 产生倒流, 使制品的质量不稳定。为了保证制品的质量, 阶梯降压保压的压力设置应该确保模腔内的熔体不发生倒流和使得模腔压力分布均匀<sup>[44]</sup>。



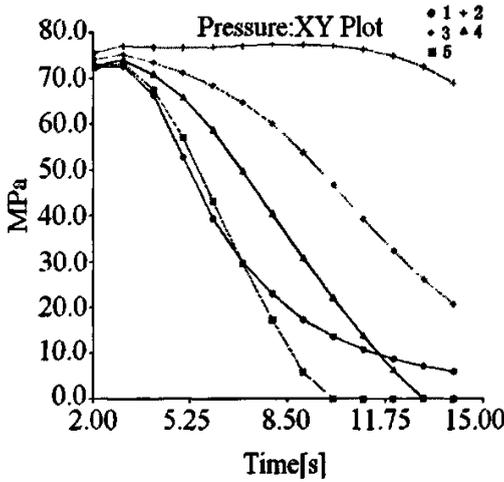


图 5.2.3.4 型腔压力曲线  
Fig 5.2.3.4 Cavity pressure curve

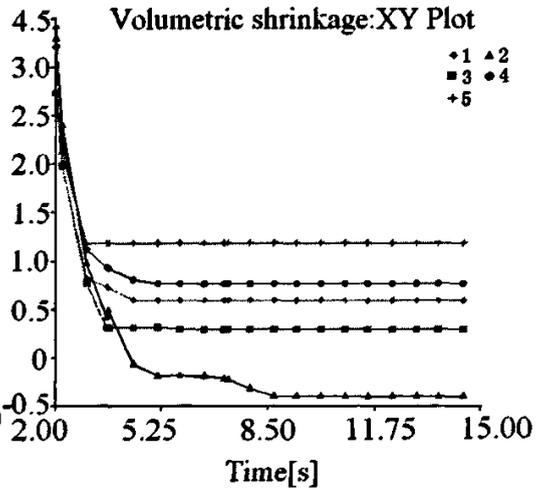


图5.2.3.5 体收缩率变化曲线  
Fig 5.2.3.5 Volumetric shrinkage curve

结合附录图3至图5收缩率与保压压力的关系曲线，设定保压压力如图5.2.3.6所示。首先以80MPa的压力保压4.5s，然后以60MPa的压力保压8s。图5.2.3.7 型腔压力变化曲线中，型腔压力分布的比较均匀，且在保压压力由80MPa降至60MPa后，浇口处的压力大于型腔其它部位的压力，确保模腔内的熔体不发生倒流，保证制品的质量。从图5.2.3.8 体积收缩率变化曲线可以看出，浇口和后填充区域的最大收缩率之差在1%左右，各区域的收缩都比较均匀，经过对型腔压力分布曲线和制品体积收缩率变化曲线进行分析得出保压压力和保压时间参数的设置比较合理。

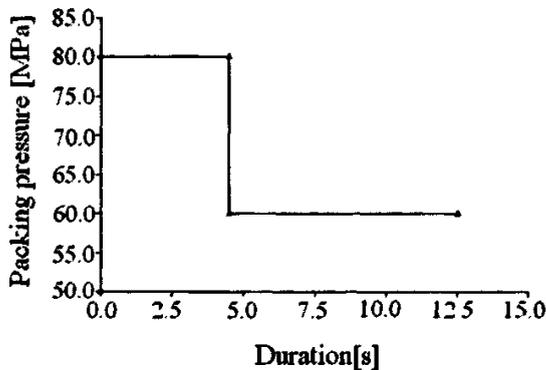


图 5.2.3.6 保压压力变化曲线  
Fig 5.2.3.6 Packing pressure curve

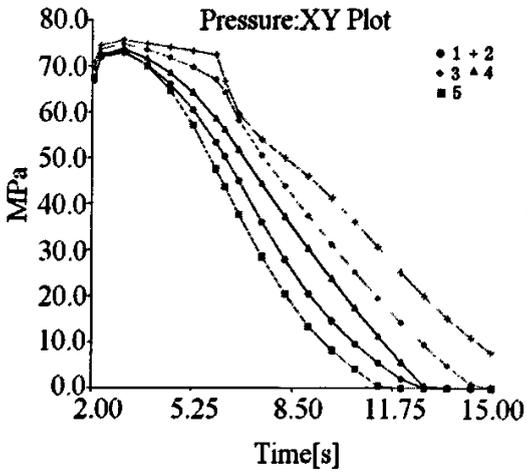


图 5.2.3.7 型腔压力变化曲线  
Fig 5.2.3.7 Cavity pressure curve

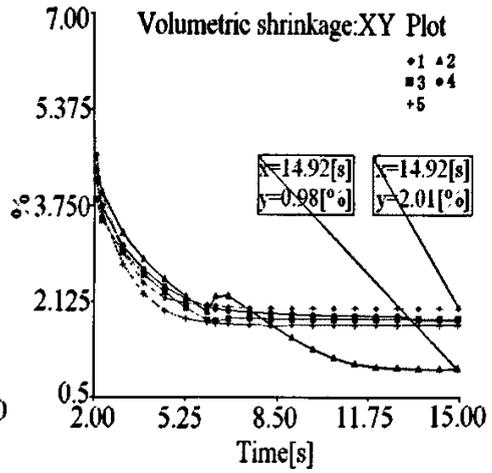


图 5.2.3.8 体积收缩率变化曲线  
Fig 5.2.3.8 Volumetric shrinkage curve

### 5.2.4 Tray door 产品的翘曲分析

对产品作MPI/WARPA 分析后得到总的翘曲变形量如图5. 2. 4. 1所示, 其总变形量的最大值为0.015mm, 满足总变形量小于0.03mm的技术要求。

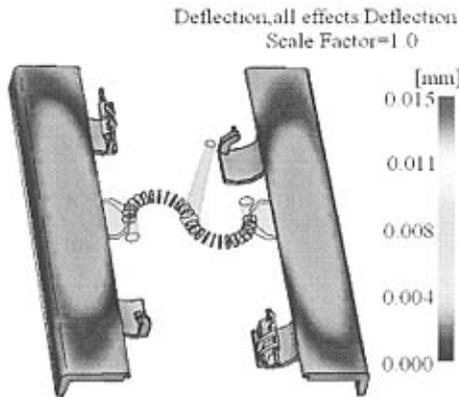


图 5.2.4.1 制件翘曲变形量  
Fig 5.2.4.1 Deflection of all effects

### 5.3 小节

本文以收纳盒注塑模浇口优化设计和华录松下 tray door 注塑 CAE 优化为实例, 利用 CAE 软件系统, 对打印机外壳注塑成型工艺优化模拟分析进行了实际验证。成型工艺参数的设置与实际生产所设置的参数基本一致。通过该方法可以进行充模过程流动情况的模拟, 分析缺陷原因, 通过分析模拟结果, 发现工艺参数安排不合理的地方, 相应地调整工艺参数, 经过反复模拟试模, 优化成型工艺。一是选择合理的流道和浇口的尺寸及位置, 二是得到合理的注射参数, 对提高模具的设计水平和一次试模成功率, 减少模具的返修率和注塑制品的质量, 都具有重要的意义。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

本论文对塑料注射成型模具的注射模拟进行了研究。研究成果对于缩短注塑产品的开发周期，提高产品质量和技术水平具有参考价值。其主要研究过程及要点总结如下：

(1) 以打印机外壳成型过程模拟为例，展开CAE技术注塑模成型工艺优化中的应用研究。用Moldflow软件进行流动过程、冷却、翘曲模拟，得到一系列的结果，如充模时间，温度、压力分布、剪切速率、气泡、熔接线、冷却液分布图、翘曲变形图等。以图表的形式表现了各个参数的具体影响结果。对这些结果进行分析，找出设计方案中存在的问题，逐步修改设计方案，获得满意的结果，这些有助于读者较大程度地了解注塑模CAE系统和注塑模设计的知识，从而有效地应用注塑模CAE技术。

(2) 对本文提出的方法进行了工艺实例验证，以收纳盒和tray door产品为例，验证了注塑工艺方案优化的方法。作者认为虽然CAE技术为注塑模成型工艺优化的实施提供了有利条件，但是由于CAE技术本身在数学模型、工艺条件描述等方面与生产实际仍有一定的差距。所以在重视模拟技术的同时必须与实际相结合，基于这种认识，本文进行了注塑成型工艺优化方法的实际验证，并进行了成功地尝试。

(3) 对普通热流道系统模具和阀式浇口热流道模具分别进行了充填过程的流动分析模拟。使用阀式浇口热流道系统，熔体按顺序注入注塑模型腔，各股熔体能很好的融合，可以很好地解决各浇口之间的熔接痕问题，提高塑料制品的表面质量，并以此对打印机热流道系统进行了选用。

### 6.2 展望

在我国热流道模具还处于研制推广阶段，热流道模具的标准化工作还没有完善，本文也仅从流动分析方面探讨热流道模具的选用，而热流道对塑件质量，如塑件的尺寸精度、强度及刚度的影响以及生产的经济性还需作深入研究。

注塑模CAE分析是了解和优化模具设计与制造工艺的最佳途径，将CAE技术融入到产品的开发当中是当今制造业的一个发展趋势。但注射模流动模拟软件只是一种辅助工具，它能否在生产中发挥作用并产生经济效益，在很大程度上取决于模具设计者的正确使用。

采用塑料注射模CAE技术工作，在我国还没有广泛推广，应用注塑模拟软件Moldflow系统也还有很多工作要作，随着计算机技术的发展与深入，不久将来，我国的塑料模具工业应用CAE技术将会有长足的进展。

## 参考文献

- [1] 叶福源, 黄志高, 周华民, 等. 冰箱抽屉注射成形的 CAE 优化. 电加工与模具, 2004, 3: 50~51
- [2] 宋燕星, 陈玉全, 陈永秋, 等. 汽车中央空调塑料饰件模具注塑流变分析 CAE. 哈尔滨理工大学学报, 2004. 9 (5): 9~11
- [3] 张晓陆. MoldFlow 在注塑成型中的应用. 模具制造, 2005, 7: 5~8
- [4] 马国亭. 模具热流道技术应用与选择. 模具制造, 2005, 2: 59~63
- [5] 陈建玲, 刘廷华. 热流道技术的发展和概况. 模具工业, 2003, 8
- [6] 张卫忠, 刘廷华. 针阀式喷嘴及其在热流道注射模中的应用. 模具工业, 2002, 7: 46~49
- [7] 申长雨, 陈丹波, 刘春太. 塑料模 CAE 发展技术概况. 模具工业, 2001, 1: 51~56
- [8] 林志宏. 注射模 CAE 技术的应用研究. 模具制造, 2004, 1: 1~4
- [9] Cheng Xuewen, Li Dequn, Zhou Huamin. Development of Integrated Simulation for Plastic Injection Molding. CADDM, 2005, 15 (1): 9~15
- [10] Geng Tie, Li Dequn, Zhou Huamin. Numerical Filling Simulation of Injection Molding Using Three-Dimensional Model. CADDM, 2003, 13(1-2): 6~14
- [11] H, Mattew *et al.* Practical Questions and Answers on Computerized Mold Filling Analysis, Plastics Technology, 1984, 30(4), 73-79
- [12] 钟佩思, 沈友徽, 马静敏, 等. 模具先进制造技术发展趋势综述. 模具制造, 2005, 3: 1~4
- [13] 范新风. 我国注塑模 CAE 技术的应用现状分析. 机电技术, 2004, 2: 6~7
- [14] 虞兴翔, 管文浩. 跨世纪的 MOLDFLOW. 模具技术, 1998, (4): 89 9
- [15] 张小甫, 阎峰云, 王翠香, 等. MoldFlow 和 Plastic Advisor 在注塑成型中的应用. 模具设计, 2004, (2): 14~16
- [16] 项辉宇, 冷崇杰, 钟约先, 等. 流动模拟技术在洗衣机面板模具设计中的应用. 模具工业, 2002, 11: 6~9
- [17] 张晓陆. MoldFlow 在注塑成型中的应用. 模具制造, 2005, 7: 5~8
- [18] 美国 MOLDFLOW 公司上海代表处. moldflow Plastic insight advanced flow simulation training manual 上海: 美国 MOLDFLOW 公司上海代表处, 2003. 96~98
- [19] 申长雨, 陈静波, 刘春太, 等. 注射模冷却过程 CAE 技术. 模具工业, 2001, 4: 52~56
- [20] 郭志英. 注塑制品翘曲变形数值模拟及实验研究. [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2001
- [21] 申长雨, 李海梅, 高峰, 等. 注塑制品的翘曲变形分析. 中国塑料, 1993 (2): 35~38
- [22] 阳湘安. 注塑产品的翘曲分析及改进. 现代制造工程, 2005, 2: 84~86
- [23] 单岩, 王蓓, 王刚, 等. Mold flow 模具分析技术基础. 北京: 清华大学出版社, 2004. 144~145
- [24] 杨凤霞, 王爱荣, 张耀昌. 热塑性塑料注塑件熔接缝影响因素分析. 塑料工. 2005, 33(4): 34~36
- [25] 刘春太. 基于数值模拟的注塑成型工艺优化和制品性能研究. [博士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2003
- [26] S.G. KIM, N. P. SUH. Performance prediction of weldlines structure in amorphous polymers, Polymer Engineering and Science. 1986, 26 (1): 1200-1206

- [27] Motahhari , siamak , Cameron , *et al.* Contribution to residual stress by differential resin shrinkage. *Journal of Reinforced Plastics and composites* , 1999 ,18 (11) : 1011~1020
- [28] Patrick Gipson , Peter Grelle , Brent Salamon. Reducing shrinkage and warpage in glass-mat thermoplastic composites. *Injection moulding* , 1996 , 52 (9) :43~43
- [29] 姜勇道, 李德群. 华塑CAE软件翘曲分析及应用. *模具制造*, 2004, 10: 15~17
- [30] 马浩军, 胡广洪, 阮雪榆. 利用moldflow软件分析解决注塑件翘曲问题. *模具技术*, 2002, 5: 55~58
- [31] 杨占尧, 赵卫兵. 塑料注射模排气系统结构设计. *工程塑料应用*. 2005, 33 (7) :49~51
- [32] 刘来英. 注塑成型工艺. 北京: 机械工业出版社, 2004, 225~226
- [33] 刘来英. 注塑成型工艺. 北京: 机械工业出版社, 2004, 159~159
- [34] 谭文胜, 周建忠. 注塑模阀式浇注系统的浇口位置优化控制. *模具技术*, 2005, 4: 38~40
- [35] 陆宜清, 陈静波. 冷却模拟技术在注塑模及工艺参数设计中的应用. *河南农业大学学报*, 2004, 38(3) :335~338
- [36] 刘春太, 郑占明, 申长雨, 等. 注塑模保压过程的有限元数值模拟. *塑料*, 2002, 31 (2) : 24~26
- [37] 申长雨, 陈静波, 刘春太. 注塑保压过程中的数值模拟和塑件的收缩分析. *模具工业*, 2001, 5: 48~52
- [38] 宋光明等. 基于CAE技术的注塑成型保压过程模拟分析. *轻工机械*. 2003, 3: 84~86
- [39] 王利霞, 杨杨, 王蓓, 等. 注塑成型工艺参数对制品收缩率变化的影响及工艺参数优. *高分子材料科学与工程*, 2004, 20 (2) : 174~176
- [40] 毛华杰, 袁乐健, 史宏江. 利用CAE技术解决制件翘曲问题. *塑料科技*, 2005, 4: 30~33
- [41] 曹伟, 申长雨. 基于实体的注射成型流动模拟. *计算力学学报*, 2004, 21(1) :115~120
- [42] J Koszkuł, J Nabialek. Viscosity models in simulation of the filling stage of the injection molding process[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2004,157-158:183-187.
- [43] H S Kim, J.S Son, Y.T Im. Gate location design in injection molding of an automobile junction box with integral hinges[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 120(1-3): 110-115
- [44] 陈曦, 高福荣, 钱积新. 基于质量的注塑保压过程建模方法研究: 最优保压压力曲线设定. *中国塑料*. 2002, 16(4) :51~54

## 致 谢

衷心感谢在实验过程中给予我指导和帮助的老师。特别是我的导师杨林教授，他对工作一丝不苟的态度和对科学实事求是的精神，以及对学心悉心培养的为师作风，不仅会使我在以后的学习和工作中受益匪浅，而且对我以后的生活态度和为人准则也将有很大的帮助，杨老师在学业上、工作中和生活中都给了我无微不至的关怀和照顾，在此衷心感谢老师几年来的关怀和培养。导师巨大的人格魅力将永远鼓舞我在科研道路上前进的巨大动力，我将铭记终生！

特别感谢熊弟霖教授，通过两年来学习和生活的交往，深深感受到熊教授严谨的治学态度，以及在学术上孜孜以求的精神。熊教授在专业学科领域中有深厚的造诣；他对待学生严格要求，对学生的学习和科研工作从不马虎。

衷心感谢武占侠、赵略、赵新宇、曹峰同学及其他各位同学在课题研究过程中给予我的帮助与支持。感谢所有给予我关心和帮助的人，在此谨向诸位老师和同学表示衷心的感谢！

附录

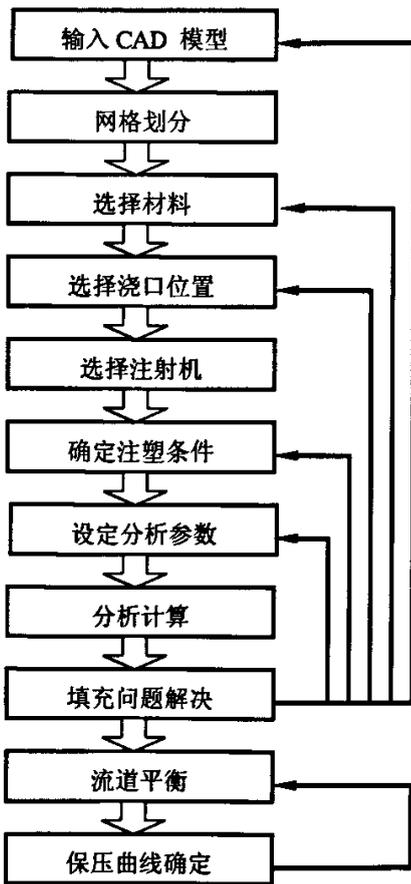


图 1 典型的流动分析分析流程  
Fig 1 Typical flow analysis flow chart

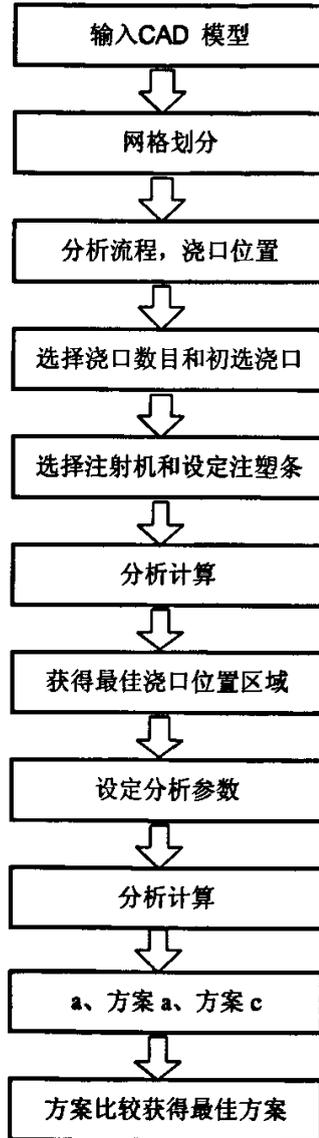


图 2 浇口数目和位置优化流程图  
Fig 2 Optimization of gate number and position flow chart

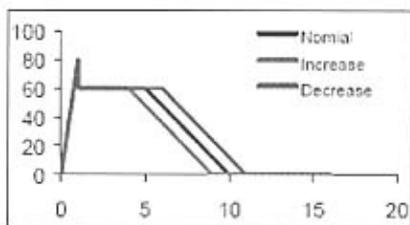


图 3 调整后填充区域收缩率  
Fig 3 Adjust shrinkage of end-filling area

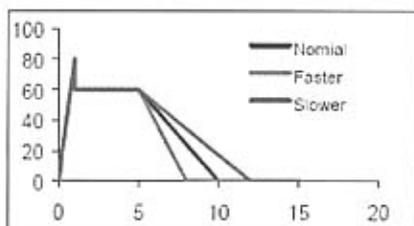


图 4 调整浇口区域收缩率  
Fig 4 Adjust shrinkage of gate area

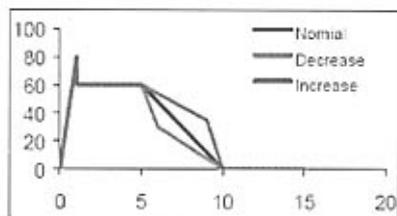


图 5 调整制件中部收缩率  
Fig 5 Adjust shrinkage of middle area