

塑 料

成型

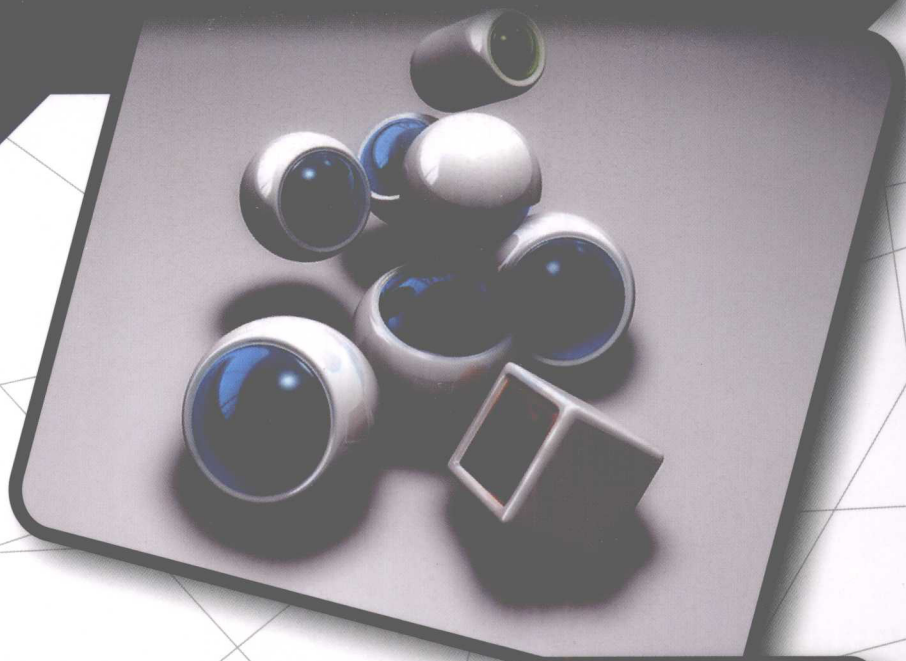
—CAE—Moldflow

CAE—Moldflow

应用基础

吴梦陵 张 琰 主 编
庄卫国 副主编

基础 + 案例 + 经验 = 快速入门与应用



操作视频讲解
素材文件支持



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内容简介

塑料成型 CAE

——Moldflow 应用基础

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为读者学习塑料成型 CAE 技术和 Moldflow 的快速入门提供了良好的平台。全书共分 13 章, 主要包括: 注塑成型 CAE 技术绪论、聚合物的结构特点与常见塑料的性能、Moldflow 软件的基本操作、Moldflow 网格前处理以及实例分析、浇注系统冷却水路创建、浇注系统的平衡设计、浇口位置的不同对熔接痕的影响、基于正交试验工艺参数的优化分析方法和应用 Moldflow 解决具体问题的实例等内容。

本书可作为高等工科院校材料成型及控制工程专业本、专科学生或机械类其他专业学生的教材, 也可作为模具设计及产品设计、相关工程技术人员的参考书或自学教程。本书附带素材光盘, 内有范例的项目方案和部分范例的视频教学录像, 便于读者学习使用。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

塑料成型 CAE: Moldflow 应用基础 / 吴梦陵, 张珑主编. —北京: 电子工业出版社, 2010.6
ISBN 978-7-121-10962-1

I ①塑… II. ①吴…②张… III. ①注塑—塑料模具—计算机辅助设计—应用软件, Moldflow—高等学校—教材 IV. ①TQ320.66-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 095820 号

责任编辑: 朱清江

特约编辑: 钟永刚

印 刷:

北京京科印刷有限公司

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 15.5 字数: 400 千字

印 次: 2010 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4 000

定 价: 38.00 元 (含 DVD 光盘 1 张)



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

前 言

塑料成型是制造业中的一个主要组成部分，而流动模拟对塑料成型具有重要意义；运用塑料流动模拟能帮助设计人员优化成型工艺与模具结构，指导设计人员从成型工艺的角度改进产品形状结构、选择适合的塑料材料和成型设备，评判不同材料采用同一工艺与模具成型的可行性，分析可能出现的问题；达到降低生产成本、缩短模具开发周期的目的。

Moldflow 软件是美国 Moldflow 公司的产品，Moldflow 的产品用于优化制件和模具设计的整个过程，提供了一个整体解决方案。2008 年 6 月 12 日，设计软件领导厂商 Autodesk（欧特克）公司宣布收购 Moldflow 公司，进一步有助于 Autodesk 为企业提供更完善的塑胶制件最佳化设计工具，并进一步拓展现有数字化原型（Digital Prototyping）方案之技术产品完整性。

全书共分为 13 章。在介绍了注塑成型 CAE 技术的发展、注塑模 CAE 技术的国内外水平、注塑模 CAE 的发展趋势和聚合物的结构特点与常见塑料性能的基础上，详细介绍了 Moldflow 软件的基本操作、Moldflow 网格前处理以及实例分析。重点突出冷却水路创建、浇注系统的平衡设计、浇口位置的不同对熔接痕的影响等产品、工艺和模具的优化和设计方法。其中第 12 章详细介绍了基于正交试验工艺参数优化分析方法。第 13 章介绍了应用 Moldflow 解决具体问题的两个实例。本书内容全面，实例丰富，讲解详细，条理清晰。本书根据 Moldflow 中文版实际操作界面，直接截取软件中对话框、操作面板和按钮，使读者能直观、准确地操作软件进行学习。

本书由南京工程学院吴梦陵、张琰担任主编，吴梦陵编写了第 1、8、9、12、13 章，张琰编写了第 2、3、10、11 章；庄卫国担任副主编，编写了第 4、5、6、7 章。同时，杨一帆、张佳蓉、纪媛媛等为本书进行了校稿工作，在此深表感谢。

在编写本书的过程中，得到电子工业出版社和 Moldflow 公司大中华区的关心和帮助，也得到了南京工程学院以及兄弟院校、有关企业专家的大力支持和帮助，在此一并表示感谢，同时感谢所引用文献的作者，他们辛勤研究的成果也使得本书增色不少。

由于编者水平有限，书中难免有不当和疏漏之处，恳请使用本书的教师和广大读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 注塑成型 CAE 技术的发展	1
1.2 国内外注塑模 CAE 技术水平	4
1.3 注塑模 CAE 的发展趋势	6
1.4 Moldflow 软件介绍	7
第2章 聚合物的结构特点与常见塑料的性能	9
2.1 聚合物的结构特点	9
2.2 常用塑料简介	11
2.3 注塑制品注射过程中主要的缺陷	14
2.3.1 欠注	14
2.3.2 收缩凹陷	15
2.3.3 翘曲变形	16
2.3.4 变色焦化	17
2.3.5 波流痕	17
2.3.6 银纹	18
2.3.7 熔接痕	18
2.3.8 产品黏模	18
2.3.9 气穴	19
2.3.10 溢料	19
2.4 注塑条件对制品成型的影响	19
第3章 Moldflow 网格前处理	21
3.1 概述	21
3.2 网格的类型	22
3.3 网格的划分	22
3.4 网格状态统计	24
3.5 网格处理工具	26
3.6 网格缺陷诊断	33
3.7 网格处理实例	38
3.8 网格划分实例	40
3.8.1 模型的网格划分	40
3.8.2 网格缺陷修改	41

第4章 Moldflow 用户界面及基本操作	57
4.1 Moldflow 用户界面	57
4.1.1 窗口分布及简要说明	57
4.1.2 菜单栏和工具栏	58
4.2 菜单功能简介	59
4.2.1 文件操作	59
4.2.2 编辑	61
4.2.3 视图	61
4.2.4 建模	62
4.2.5 网格	63
4.2.6 分析	63
4.2.7 结果	64
4.2.8 报告	65
4.2.9 工具	65
4.2.10 窗口和帮助	65
4.3 基本操作	66
4.3.1 分析项目管理	66
4.3.2 鼠标操作	67
第5章 基础建模	68
5.1 节点的创建	68
5.2 线的创建	69
5.3 面(区域)的创建	72
5.4 多模腔创建	74
5.5 浇口创建	78
5.5.1 浇口创建命令	78
5.5.2 浇口属性设置	79
5.5.3 浇口曲线与柱体单元划分	80
5.6 浇口创建实例	81
5.6.1 侧浇口的创建	81
5.6.2 扇形浇口的创建	83
5.6.3 顶针潜伏式浇口的创建	84
5.6.4 牛角形(香蕉)浇口的创建	86
5.7 冷流道浇注系统创建实例	88



第 6 章 冷却水路创建92	9.6.4 流道优化平衡分析小结.....152
6.1 冷却水路手动创建命令.....92	9.7 组合型腔优化后的流动分析.....153
6.2 冷却水路属性设置.....93	9.7.1 设计方案的调整及分析前处理.....153
6.3 冷却水路曲线与柱体单元划分.....94	9.7.2 分析计算.....155
6.4 循环式冷却水路创建实例.....95	9.7.3 结果分析.....156
6.5 挡板式水路创建实例.....97	第 10 章 浇口位置的不同对熔接痕的影响158
6.6 喷泉式水路创建实例.....99	10.1 概述.....158
第 7 章 工艺参数设置102	10.2 原方案熔接痕的分析.....158
7.1 分析序列的设定.....102	10.2.1 项目创建和模型导入.....158
7.2 物料的选择.....104	10.2.2 材料选择.....164
7.3 成型工艺参数的设置.....107	10.2.3 工艺过程参数的设定和分析计算.....165
7.3.1 成型工艺参数.....107	10.3 改进原始方案.....168
7.3.2 成型工艺参数的设置.....109	10.3.1 增加加热系统后的分析.....168
第 8 章 最佳浇口位置设计112	10.3.2 分析计算.....173
8.1 浇口设计原则.....112	10.3.3 结果分析.....175
8.2 最佳浇口位置设计.....113	10.4 对浇口位置和形式改变后的分析.....176
8.2.1 分析前处理.....113	10.4.1 分析前处理.....176
8.2.2 产品初始成型分析.....116	10.4.2 分析计算和结果分析.....183
8.2.3 原设计方案优化后的分析.....120	第 11 章 注射成型流动模拟结果的分析185
8.2.4 计算结果分析.....123	11.1 流动模拟结果分析.....185
第 9 章 浇注系统的平衡设计125	11.2 分析报告的生成.....202
9.1 概述.....125	11.3 动画和图片的保存.....205
9.2 lock-left 的浇口位置分析.....128	第 12 章 基于正交试验工艺参数优化分析207
9.2.1 分析前处理.....128	12.1 正交实验概述.....207
9.2.2 分析计算.....129	12.2 数值模拟与正交试验方法结合的多工艺参数优化.....209
9.2.3 结果分析.....130	12.2.1 基于正交试验多工艺参数优化.....209
9.3 lock-right 的浇口位置分析.....131	12.2.2 单个因素影响的试验.....212
9.3.1 分析前处理.....131	第 13 章 Moldflow 分析案例219
9.3.2 结果分析.....132	13.1 汽车保险杠.....219
9.4 handspike 的浇口位置分析.....133	13.2 录音机前面板.....225
9.4.1 分析前处理.....133	13.2.1 方案 1 (原始浇注系统).....226
9.4.2 结果分析.....133	13.2.2 方案 2 (只改变流道尺寸).....232
9.5 组合型腔的充填分析.....134	13.2.3 方案 3 (改变浇注系统).....234
9.5.1 分析前处理.....135	13.2.4 方案 4 (采用热流道系统).....236
9.5.2 分析计算.....143	13.3 优化冷却系统, 缩短成型周期.....238
9.5.3 结果分析.....143	参考文献242
9.6 组合型腔的流道平衡分析.....145	
9.6.1 分析前处理.....146	
9.6.2 分析计算.....149	
9.6.3 结果分析.....150	



1.1 注塑成型 CAE 技术的发展

塑料成型是制造业中的一个重要组成部分,而流动模拟对塑料成型具有重要意义。运用塑料流动模拟能帮助设计人员优化成型工艺与模具结构,指导设计人员从成型工艺的角度改进产品形状结构、选择合适的塑料材料和成型设备,评判不同材料采用同一工艺与模具成型的可行性,分析可能出现的问题,达到降低生产成本、缩短模具开发周期的目的。对于一般简单的塑料制品(简称制品)的成型,只进行流动模拟分析即可,但对于复杂精密塑件的成型,不仅要流动过程进行模拟分析,还需要对充模、保压过程中塑件与模具的冷却进行分析,甚至需要分析开模后塑件的残余变形与应力等。

成型过程数值模拟是模具 CAE 中的基础,目前,所采用的数值模拟方法主要有两种:有限元法和有限差分法。一般在空间上采用有限元方法,而当涉及时间时,则运用有限差分法。CAE 软件的应用过程如图 1-1 所示。首先根据制品的几何模型剖分具有一定厚度的三角形单元,对各三角形单元在厚度方向上进行有限差分网格剖分,在此基础上,根据熔体流动控制方程在中性层三角形网格上建立节点压力与流量之间的关系,得到一组以各节点压力为变量的有限元方程,解方程组求得节点压力分布,同时将能量方程离散到有限元网格和有限差分网格上,建立以各节点在各差分层对应位置的温度为未知量的方程组,求解方程组得到节点温度在中性层上的分布及其在厚度方向上的变化,由于压力与温度通过熔体黏度互相影响,因此,必须将压力场与温度场进行迭代耦合。

其中,数值分析采用有限元/有限差分混合法,其基本步骤:根据前一时间步的压力场计算出流入各节点控制体积的流量,根据节点控制体积的充填状况更新流动前沿,在此基础上根据能量方程计算当前时刻的温度场,再根据温度场计算熔体的黏度和流动率等,形成压力场的整体刚度矩阵。为保证新引入的边界条件,需要对整体刚度矩阵进行修正,解压力方程组求得节点压力分布。由于流动率的计算依赖于压力分布,因此,压力场控制方程是非线性方程,需对压力场进行迭代求解。重复上述计算过程直到整个型腔被充满。充模流动模拟的数值计算流程如图 1-2 所示。

注塑成型流动模拟技术不断的改进和发展,经历了从中面流技术到双面流技术再到实体流技术这三个具有重大意义的里程碑。

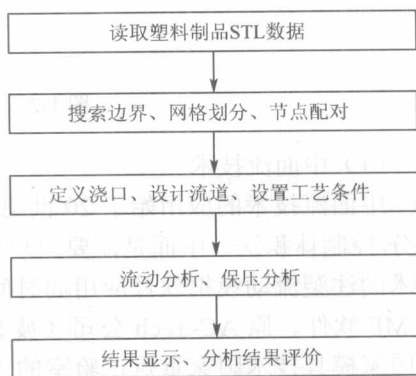


图 1-1 CAE 软件的应用过程

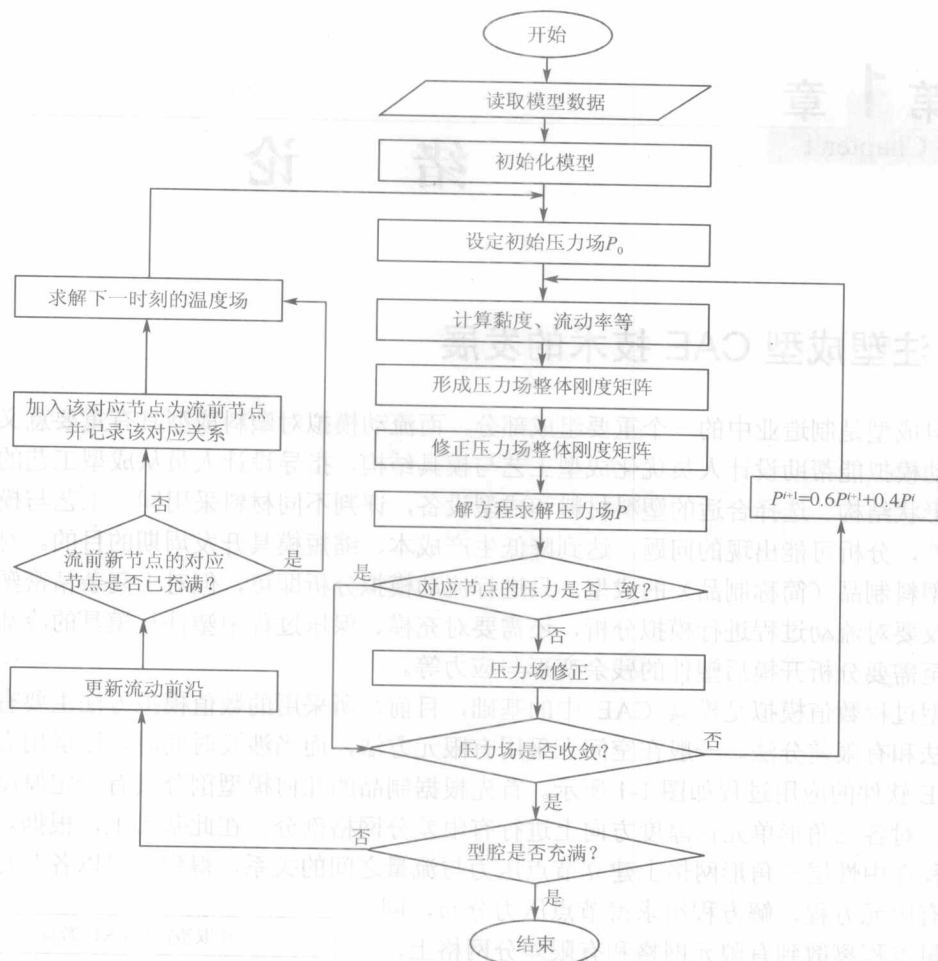


图 1-2 充模流动模拟的数值计算流程图

(1) 中面流技术

中面流技术的应用始于 20 世纪 80 年代。其数值方法主要采用基于中面的有限元/有限差分/控制体积法。中面是需要用户提取的位于模具型腔面和型芯中间的层面，基于中面流技术的注塑流动模拟软件应用的时间最长，范围也最广，其典型代表如国外 Moldflow 公司的 MF 软件、原 AC-Tech 公司（被 Moldflow 公司并购）的 C-Mold 软件，国内华中科技大学国家模具技术国家重点试验室的 HSCAE-F3.0 软件。实践表明，基于中面流技术的注塑成型流动软件在应用中具有很大的局限性：①用户必须构造出中面模型，采用手工操作直接由实体/表面模型构造中面模型十分困难；②独立开发的注塑成型流动模拟软件（如上述的 Moldflow、C-Mold 和 HSCAE-F3.0 软件）造型功能较差，根据产品模型构造中面往往需要花费大量的时间；③由于注塑产品的千变万化，由产品模型直接生成中面模型的 CAD 软件的成功率不高、覆盖面不广；④由于 CAD 阶段使用的产品模型和 CAE 阶段使用的分析模型不统一，使二次建模不可避免，CAD 与 CAE 系统的集成也无法实现。由此可见，中面模型已经成为了注塑模 CAD/CAE/CAM 技术发展的瓶颈，采用实体/表面模型来取代中面模型势在必行，在 20 世纪 90 年代后期，基于双面流技术的流动模拟软件便应运而生。

(2) 双面流技术

双面流是指将模具型腔或制品在厚度方向上分成两部分,有限元网格在型腔或制品的表面产生,而不是在中面。相应地,与基于中面的有限差分法是在中面两侧进行不同,厚度方向上的有限差分仅在表面内侧进行。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。显然,双面流技术所应用的原理和方法与中面流没有本质上的差别,所不同的是双面流采用了一系列相关的算法,将沿中面流动的单股熔体演变为沿上下表面协调流动的双股流。由于上下表面处的网格无法一一对应,而且网格形状、方位与大小也不可能完全对称,如何将上下对应表面的熔体流动前沿所存在的差别控制在工程上所允许的范围内是实施双面流技术的难点所在。

目前,基于双面流技术的注塑流动模拟软件主要是接受三维(3D)实体/表面模型的 STL 文件格式。该格式记录的是 3D 实体表面在经过离散后所生成的三角面片。现在主流的 CAD/CAM 系统,如 UG、Pro/E、SolidWorks、AutoCAD 等,均可输出 STL 格式文件。这就是说,用户可借助于任何商品化的 CAD/CAM 系统生成所需制品的 3D 几何模型的 STL 格式文件,流动模拟软件可以自动将该 STL 文件转化为有限元网格模型供注塑流动分析,这样就大大减轻了使用者建模的负担、降低了对使用者的技术要求。因此,基于双面流技术的注塑流动模拟软件问世时间虽然只有短短数年,便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。双面流技术具有明显优点的同时也存在着明显的缺点:分析数据不完整。双面流技术在模拟过程中虽然计算了每一流动前沿沿厚度方向的物理量,但并不能详细地记录下来。由于数据的不完整,造成了流动模拟与冷却分析、应力分析、翘曲分析集成的困难。此外,熔体仅沿着上下表面流动,在厚度方向上未作任何处理,缺乏真实感。

(3) 实体流技术

从某种意义上讲,双面流技术只是一种从二维半(2.5D)数值分析(中面流)向 3D 数值分析(实体流)过渡的手段。要实现塑料制品的虚拟制造,必须依靠实体流技术。实体流技术在实现原理上仍与中面流技术相同,所不同的是数值分析方法有较大差别。在中面流技术中,由于制品的厚度远小于其他两个方向(常称流动方向)的尺寸,塑料熔体的黏度大,可将熔体的充模流动视为扩展层流,于是熔体的厚度方向速度分量被忽略,并假定熔体中的压力不沿厚度方向变化,这样才能将 3D 流动问题分解为流动方向的 2D 问题和厚度方向的一维分析。流动方向的各项待求量,如压力与温度等,用 2D 有限元法求解,而厚度方向的各项待求量和时间变量等,用一维有限差分法求解。在求解过程中,有限元法与有限差分法交替进行,相互依赖。在实体流技术中熔体的厚度方向的速度分量不再被忽略,熔体的压力随厚度方向变化,这时只能采用立体网格,依靠 3D 有限差分法或 3D 有限元法对熔体的充模流动进行数值分析。因此,与中面流或双面流相比,基于实体流的注塑流动模拟软件目前所存在的最大问题是计算量巨大、计算时间过长,例如,电视机外壳或洗衣机缸这样的塑料制品,用现行软件,在目前配置最好的计算机上仍需要数百小时才能计算出一个方案。如此冗长的运行时间与虚拟制造的宗旨大相径庭,塑料制品的虚拟制造是将制品设计与模具设计紧密结合在一起的协同设计,追求的是高质量、低成本和短周期。如何缩短实体流技术的运行时间是目前注塑成型计算机模拟领域的研究热点和当务之急。



1.2 国内外注塑模 CAE 技术水平

注塑模 CAE 技术的发展大致经历了三个阶段：①技术探索阶段（20 世纪 60~70 年代）；②蓬勃发展时期（20 世纪 70~80 年代）；③成熟推广时期（20 世纪 90 年代）。

早在 20 世纪 50 年代，美国学者就对聚合物过程（尤其是塑化挤出）的数值模拟建模作了一系列工作，同期，瑞士的学者给出了有关挤出的重要模型。1959 年，Bernhardt 在书中总结了成型建模中的许多问题。Mckelvey 在书中首次成功地描述了一个统一的方法，即采用质量守恒以及相变换的原理描述问题。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。20 世纪 70 年代初期，有关塑化挤出模拟的软件 EXTRUD 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 70 年代以来，很多大学和企业的研究者们都致力于注射、挤出和其他工艺的计算模型的研究。然而，这些计算模型对加工技术产生的影响并不大，直到 1978 年才产生了第一个注塑成型充填阶段的模拟软件 Moldflow。20 世纪 80 年代，随着 C-MOLD 软件的问世及其他一些软件广泛用于注射成型过程，模具设计才成为依赖于计算机预测的工程科学。

自 20 世纪 80 年代以来，北美和欧洲的许多研究小组对聚合物熔体流经管道、口模和成型设备的各个方面进行了深入的调查、研究，推出了关于聚合物流动的有限元分析软件 FIDAP，POLYFLOW、NEKTON 和 POLYCAD 等。

20 世纪 90 年代，研究重点集中于材料的黏弹性、复杂 3D 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注射成型的工艺条件设定方面的应用，也成为研究热点，其中代表性的成果如下：

①澳大利亚 Moldflow 公司的 Moldflow Plastics Advisers——塑料产品及模具设计的 CAD 整合方案；Moldflow Part Insight——专业模流分析；Moldflow Mold Xpert——运用于注塑机及控制器的计算机辅助分析专家系统。

②美国 Advanced CAE Technology 公司（2000 年 2 月 11 日被 Moldflow 公司兼并）推出的注塑模 CAE 系统 C-MOLD，包括 C-Flow（流动分析）、C-Park（保压分析）、C-Cool（冷却分析）、C-Park/W（保压及简单翘曲分析）、C-Design（结构设计、成本估算等）。

③德国 IKV 塑料工程研究所的 CADMould 系列，能系统地进行注塑模的流变分析、热力学分析及结构设计。

④加拿大 McGill 大学的 McKAM-II 系统，能模拟注塑过程的流动、保压和冷却各个阶段。

⑤美国和意大利 Plastic-Computer Inc. 的 TMConcept 专家系统。

⑥美国 Structure Dynamics Research Corporation (SDRC) 的 Polyfill 和 Polycool-2 软件，分别进行注塑成型的流动和冷却分析。

⑦美国 GRAFTEK Inc. 的注塑模 CAD/CAM/CAE 集成系统。包括 OPTIMMOLDIII（3D 几何造型）、SIMUFLOW（2D 流动模型）、SIMUFLOW3D（3D 流动分析）、SIMUCOOL（2D 冷却分析）、OPTIMOLD（模具结构设计）。

⑧美国 Paulson Seminar Programs Inc. (PSP) 的 IMES 专家系统。

⑨美国 Application 的注塑模流动分析软件 Moldfill 和冷却分析软件 Moldcool。

我国注塑模 CAE 研究始于 20 世纪 70 年代末，发展也很迅速。早期的开发工作仅限于



注塑模具 CAD 系统和 2DCAE 的研究。到 90 年代受国外引进的先进的注塑模具 CAE 技术的影响,才开始较复杂 3D 成型和冷却系统的 CAE 研究。由于开发 CAD/CAE 系统需要较系统、成熟的图形软件支撑,而在 80 年代中期,国内还没有较好的图形软件,当时 AutoCAD 系统的引入,使绝大部分二次开发软件都是基于这样一个平台,因此,国内自行开发的注塑模具 CAD/CAE 系统大多是在 AutoCAD 系统上进行的。

华中科技大学塑性成型模拟及模具技术国家重点实验室从 1985 年开始,通过“七五”、“八五”、“十五”期间国家重点攻关和国家自然科学基金项目的支持,系统而深入地开展了塑料注塑成型仿真软件系统的研究和开发。从 1989 年推出的 HSCAE 1.0 版到 2005 年的 HSCAE 6.10 版,经历了从 2D 分析到 3D 分析,从实用化到商品化,从局部试点到大面积推广应用的进程,成功研发出了具有中国特色、达到当前国际先进水平的商品化塑料注塑成型集成化仿真系统 HSCAE 6.10 版。从 HSCAE 1.0 版起,该系统建立了一个基于知识的注塑模缺陷诊断专家系统 KBDDDES。采用非精确推理及确定性理论,按人类专家处理问题的思维方式来协调各专家对问题假设的不确定性,并应用正反混合推理的控制策略,对常见的注塑件缺陷及注射过程中的故障进行,得出结论并给出避免缺陷或故障的方法及建议。

郑州工业大学模具研究所自 1987 年开始投入模塑模具及橡塑成型加工技术的研究与开发,经过十余年努力,开发出具有我国自主知识产权的橡塑制品成型计算机模拟及计算机模拟优化设计集成系统 Z-MOLD,现已在轻工、化工、汽车、电子等数十家企业的近百种精密模具及制品的设计制造中得到应用。该软件具有优化产品设计(壁厚、材料等)、模具设计(浇注系统、冷却系统)、成型工艺条件(料温、模温、注射速率、保压时间、冷却时间等)、提高一次试模成功率。动态模拟充填过程、熔接线和气穴位置、注射压力和锁模力、保压压力和体收缩率、冷却时间及模壁温度、冷却管道效率等功能。

上海交通大学从 1983 年起开始对注塑模具的计算机应用进行了多层次的研究,并在国内首次把人工智能技术引入注塑模具的 CAD 系统中。1987 年,开发了实用化的注塑模具 CAD 系统,并应用于洗衣机内缸等大型塑料件的设计上,取得了实用化的应用。1989 年,开发了一套集成化注塑模具智能 CAD 系统,目前,正在开发一个智能化的 CAD/CAE 系统,基于工作站 UG 为图形支撑环境,以 Moldflow 为分析系统,用 ANSYS 来实现。

中国科技大学 1995 年开发了一个在计算机运行的注塑模 CAD 系统,该系统是以 AutoCAD 和 SAP 有限元计算模块为支撑,该系统成为广义的 CAD 系统即具有 CAD/CAE 的功能,应用了曲面造型技术和有限元分析计算冷却系统(2D 技术),并有效解决了计算机内存资源有效利用的难题。

浙江大学从 1994 年起开发了一套精密注塑模 CAD/CAE 系统,该系统主要针对录像带塑料模具的国产化而解决精密注塑模设计和制造问题。它是基于工作站 UG 为图形支持平台,以 Moldflow 实现 CAE 过程,其特点主要以特征造型来构造产品模型,从而解决了几何造型系统不能表达工艺信息等问题,这是以前系统所不能解决的问题。

东南大学于 1995 年开发了一套计算机环境下运行的注塑模具 SEIMCAD 系统,该系统也是基于计算机和 AutoCAD 来开发 3D 线框图形软件,可以实现产品输入、型腔设计、常规设计、注塑过程模拟分析及前后处理和提供 CAM 的界面接口等功能,较好地解决了线框模型到面模型的转换,成型过程模拟和流道系统设计等一些关键技术,是一个 CAD/CAE 技术的全面实现并为 CAM 的实现做好了准备。

各科研院所经过十多年的不懈努力,在注塑模 CAD/CAE 领域取得了长足的进步,软件



的国有化比重在不断增加。

1.3 注塑模 CAE 的发展趋势

随着科学技术的迅速发展,互联网技术的普及和全球信息化,注塑模 CAE 技术功能进一步扩充,性能也进一步提高,呈现出如下的发展趋势。

(1) 用 3D 实体模型取代中心层模型

3D 分析(实体流技术)正在被应用到共注塑成型、多次注射成型、气体辅助成型、组合模腔成型和叠模成型。仿真软件分析 3D 的纤维取向和翘曲,3D 技术非常重要。因为 2.5D(双面流技术)只能表明纤维在一个平面上的取向,而 3D 可以表明纤维在各个角度的取向。3D 分析提供的信息是 2.5D 所无法比拟的,如湍流与层流的辨识、熔融物料中的气泡、喷射和重力的影响等。3D 模拟还可以了解模具本身的情况。在 2.5D 模拟中,在模具中嵌入一个镶件后,需要生成相应网格,然后计算热量是怎样穿过这个镶件的。但是在 3D 模拟中,进入模型就可以观察到温度变化。我国台湾的 Moldex3D 和德国的 Sigmasoft 等,几乎都无一例外地专注于 3D 领域。Moldflow 为其最新的 Moldflow Plastics Insight 分析软件包开发了几种新模块,包括预测纤维取向、翘曲和厚壁制件中的热-力学性能分析的 MPI 3D 模块。Moldflow 在其 3D 软件中扩展了创建热固性塑料制品模型的能力。Moldflow Plastics Insight 分析软件包支持 64 位计算机,可以较快地创建大的模型。如图 1-3 所示为 Moldflow 网格的三种有限单元模型。

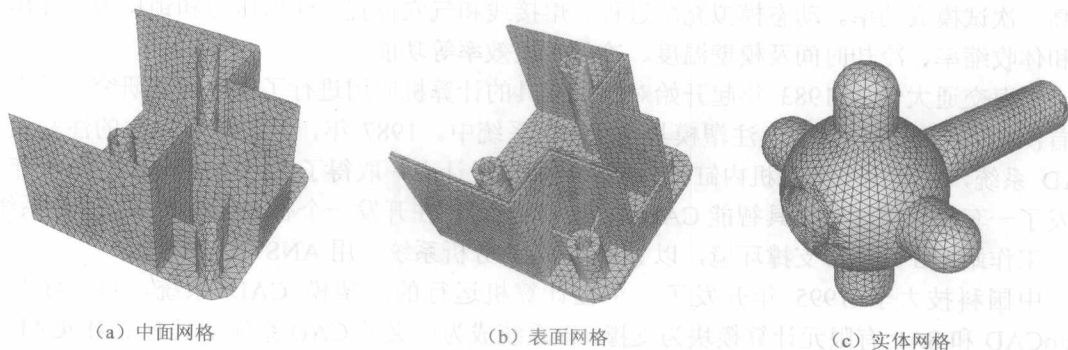


图 1-3 Moldflow 网格的三种有限单元模型

(2) 有限元、有限差分、控制体积方法的综合运用

注塑制品是薄壁制品,制品厚度方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸,温度等物理量在厚度方向的变化又非常大,若采用单纯的有限元或有限差分方法势必造成分析时间过长,无法满足模具设计与制造的实际需要。在流动平面采用有限元法,厚度方向采用有限差分法,分别建立与流动平面和厚度方向尺寸相适应的网格并进行耦合求解,在保证计算精度的前提下使得计算速度满足工程的需要,并采用控制体积法解决了成型中的移动边界问题。对于内外对应表面存在差异的制品,可划分为两部分体积,并各自形成控制方程,通过在交接处进行插值对比保证这两部分的协调。

(3) 数值计算与人工智能技术的结合

优选注塑成型工艺参数一直是广大模具设计人员关注的问题,传统的 CAE 软件虽然可



以在计算机上仿真出指定工艺条件下的注塑成型情况,但无法自动对工艺参数进行优化。使用人员必须设置不同的工艺条件进行多次 CAE 分析,并结合实际经验在各方案之间进行比较,才能得出较满意的工艺方案。同时,在对零件进行 CAE 分析后,系统会产生有关该方案的大量信息(制品、工艺条件、分析结果等),其中分析结果往往以各种数据场的形式出现,要求用户必须具备分析和理解 CAE 分析结果的能力,所以传统的 CAE 软件是一种被动的计算工具,无法提供给用户直观、有效的工程化结论,对软件使用者的要求过高,影响了 CAE 系统在更大范围内的应用和普及。

(4) 制品与流道系统的 3D 流动保压集成分析

流道系统一般采用圆柱体单元,而制品采用的是三角形单元,注塑模 CAE 系统可以采用半解析法解决混合单元的集成求解问题,这样,不仅能分析一模一腔大型复杂的制品,而且能够分析一模多腔小型精密制品,大大拓宽了系统的使用范围。

(5) 塑料制品熔合纹预测的高效算法

熔合纹对制品的强度、外观等有重要影响,准确预测熔合纹位置是仿真过程的难题。注塑模 CAE 系统通过节点特征模型方法大大提高了熔合纹预测的准确性和效率,并利用神经网络方法对熔合纹的影响程度作出定性评价,为用户对成形质量的评估提供了直接的判断依据。

注塑模 CAE 技术的发展,给模具行业带来了一场技术革命。但因为塑料熔体是非牛顿黏弹性流体,制品结构复杂,成型充模流动过程的非稳态、非等温性,使充模过程的数值模拟相当复杂,所以,在程序实现时作了一些假设,建模过程进行了适当简化,这样计算结果精度与实际结果会有偏差,然而总体趋势与实际结果是一致的。由于进行 CAE 分析时还要重新建模,不能充分利用产品设计的 3D 模型,造成重复劳动。国外注射模软件商已开始着手于集成化的 CAD/CAE 技术研究,并有商品化软件形成。虽然这些软件能识别 CAD 的 3D 图形,但集成的 CAD/CAE 软件本身不具备建立浇注系统、冷却管网等的功能,使分析应用范围大大减小。

1.4 Moldflow 软件介绍

Moldflow 软件是 Moldflow 公司的产品,该公司自 1976 年发行了世界上第一套塑料注塑成型流动分析软件以来,几十年来以不断的技术改革和创新一直主导着 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公司 C-MOLD。提出了“进行广泛的注塑过程分析”的理念。2008 年 6 月 12 日,设计软件领导厂商 Autodesk 公司宣布完成收购 Moldflow 公司,并将进一步集成现有全球性支持机制及经销合作伙伴,持续为 Moldflow 用户提供产品维护及服务;现持有 Moldflow 维护合约(Maintenance Agreement)的用户,将转入 Autodesk Subscription 产品维护及服务合约之中。

Moldflow 的产品用于优化制件和模具设计的整个过程,提供了一个整体解决方案。Moldflow 软硬件技术为制件设计、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。Moldflow 系列产品包括:①塑件顾问系列(Moldflow Plastic Advisers);②高级成型分析(Moldflow Plastic Insight);③专家试模系统(Moldflow Manufacturing Solution)。高级成型分析(Moldflow Plastic Insight)在功能上可以划分为以下内容。

(1) MPI/Fusion(双层面网格模型),分析形状特征复杂的薄壳类塑胶零件。它基于



Moldflow 的独家专利的 Dual Domain (双层面) 分析技术, 直接从 CAD 软件中提取实体表面产生网格。Fusion 网格大大降低前期网格处理时间, 能快速对产品进行流动、冷却、翘曲等分析。它以最快的网格处理及最佳的网格质量和准确的分析结果成为应用广泛的薄壁件分析的网格形式。

(2) MPI/3D (3D 实体模型), 模拟粗厚件产品的塑料流动分析。

(3) MPI/Midplane (中间面网格模型), 分析肉厚较均匀的薄壳类塑胶零件。它提取实体壁厚的中间面作为网格外形, 并赋予它厚度, 使用较少的网格数目快速分析得到最精确的分析结果。

(4) MPI/Flow (流动分析、优化充填和保压阶段), 模拟射出成型过程中熔胶流动行为模式, 以确保产品设计、质量及制造的可行性。

(5) MPI/Cool (冷却分析), 塑料射出和保压阶段被最佳化后的进一步分析。

(6) MPI/Warp (翘曲变形分析), 预测塑料产品在开模后的收缩和翘曲结果。

(7) MPI/Gas (气体辅助注塑分析), 仿真压力控制或体积控制两种模式在气体辅助射出成型运用。

(8) MPI/Stress (应力分析), 分析塑件产品在受外界载荷情况下的机械性能, 在考虑到注塑工艺条件下, 优化塑料制品的强度和刚度。

(9) MPI/Shrink (收缩分析), 提供精确的收缩量评价和透过模具外形的收缩变化以确保预测产品收缩的尺寸。

(10) MPI/Optim (注塑机参数优化分析), 射出成型条件最佳化工具, 能够自动处理生产过程中决定射出成型条件。

(11) MPI/Fiber (纤维取向分析), 在塑料注射过程中塑料纤维流动方向对产品机械强度性质方面会有重要的影响。

(12) MPI/Reactive_Molding (热固性塑料分析), 可以模拟热固性树脂的流动和固化, 并深入理解这些复杂的处理过程。

(13) MPI/MuCell (微孔发泡成型分析), 使用一种由熔融聚合物中混合二氧化碳 (CO_2) 或氮气 (N_2) 所形成的超临界流体 (SCF) 注射进模具中以制造多微孔泡沫制品。

(14) MPI/Co-Injection (连续注射分析), 模拟连续注入两种材料的性能。

从模块划分上可以划分为前处理模块、分析计算模块和后处理模块。前处理包括塑件几何形状的建立及有限元网格的自动剖分、注塑材料特性参数及注塑工艺条件的交互输入, 为注塑过程的计算机模拟创造必要的条件。分析计算模块包括根据输入的材料数据、工艺条件等模拟塑料从注入型腔开始至充满型腔的填充过程, 模拟时间的长短与模型的复杂程度和单元数目及计算机的配置有关。后处理模块是指注塑过程模拟结果的图形化, 通常以等值线和等色图的形式来表示。流动分析结果包括提供熔体在型腔中流动过程的动态模拟, 给出任一时刻压力、温度、剪切速率和剪切应力分布, 预测熔接线和气穴位置等。



第2章

Chapter 2

聚合物的结构特点与常见塑料的性能

2.1 聚合物的结构特点

塑料是以高分子聚合物（树脂）为主要成分的物质，高分子聚合物也称高聚物。高聚物结构分为高分子链结构和高分子凝聚态结构两个大方面。聚合物分子的链结构不同，其性质也不同，线型聚合物（图 2-1（a））包括带有支链的线型聚合物（图 2-1（b）），其物理特性是具有弹性和塑性，在适当的溶剂中可溶胀或溶解，随着温度的不断升高，聚合物微观表现为分子链逐渐由链段运动乃至整个分子链的运动，宏观表现为聚合物逐渐开始软化乃至熔化状态而流动。这些特性随温度的降低而呈现逆向性。体型聚合物的大分子链之间形成立体网状结构（图 2-1（c）），具有脆性，弹性较高塑性较低，成型前是可溶解和可熔融的，一旦成型固化后，就成为既不溶解也不熔融的固体。

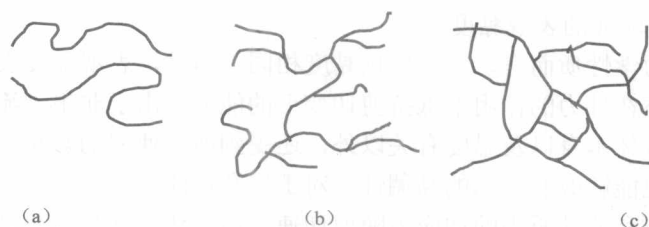


图 2-1 聚合物分子的链结构示意图

固体聚合物可划分为晶态聚合物和非晶态聚合物，取一块线型非晶态（无定形）聚合物样品，对它施加一个恒定应力，可发现样品的形变和温度的关系如图 2-2 所示，这种描述高聚物在恒定应力作用下形变随温度改变而变化的关系曲线称为热力学曲线。而晶态高聚物的热力学曲线如图 2-3 所示。

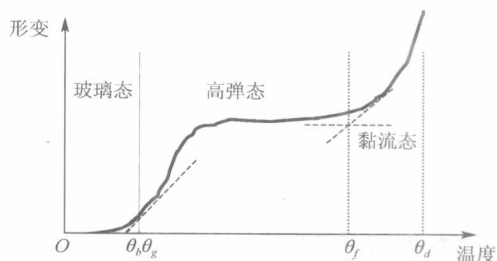


图 2-2 非晶态高聚物温度和形变曲线

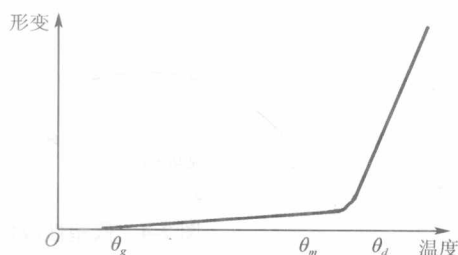


图 2-3 晶态高聚物热力学曲线

把非晶态高聚物按温度区域不同划分为三种力学状态：玻璃态、高弹态和黏流态。玻璃态和高弹态之间的转变称之为玻璃化转变，对应的转变温度即玻璃化温度，用 θ_g 表示。高弹态与黏流态之间的转变温度成为黏流温度，用 θ_f 表示。使用温度是有要求的，不能太低，否则会发生断裂，使塑料失去使用价值，通常有一个温度极限 θ_b ，这个温度被称作脆化温度，是塑料使用的下限温度。当温度继续上升，超过某一温度极限 θ_d 时，聚合物就不能保证其尺寸的稳定性和使用性能，通常将 θ_d 称为热分解温度。高聚物在 $\theta_f \sim \theta_d$ 之间是黏流态，塑料的成型加工就是在此范围内进行的。由此可见，塑料的使用温度范围为 $\theta_b \sim \theta_g$ ，而塑料的成型加工范围为 $\theta_f \sim \theta_d$ 。

绝大多数的聚合物熔体都表现为非牛顿液体。这些聚合物熔体都近似地服从 Qstwald-De Waele 提出的指数流动规律，其表达式为

$$\tau = K \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^n = K \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^n = K \gamma^n \quad (2.1)$$

式中 τ ——剪切应力；

K ——与聚合物和温度有关的常数，可以反映聚合物熔体的黏稠性，称为黏度系数；

γ ——剪切速率；

n ——与聚合物和温度有关的常数，可以反映聚合物熔体偏离牛顿流体性质的程度，称为非牛顿指数。

式 (2.1) 也可改写为：

$$\tau = K \gamma^{n-1} \gamma = \eta_a \gamma \quad (2.2)$$

$$\eta_a = K \gamma^{n-1} \quad (2.3)$$

式中 η_a ——非牛顿液体的表观黏度。

就表观黏度的力学性质而言，它与牛顿黏度相同。但是，表观黏度表征的是服从指数流动规律的非牛顿流体在外力的作用下抵抗剪切变形的能力。由于非牛顿流体的流动规律比较复杂，表观黏度与流体本身以及温度有关以外，还受到剪切速率的影响，这就意味着外力的大小及其作用时间也能够改变流体的黏稠性。对于假塑性流体而言，当流体处于中等剪切速率区域时，流体变形和流动所需的切应力随剪切速率而变化，并呈指数规律增大；流体的表观黏度也随剪切速率而变化，呈指数规律减小。这种现象被称作假塑性液体的“剪切稀化效应”。假塑性液体的剪切速率与剪切应力及表观黏度的关系如图 2-4 所示。图 2-4 (a) 为剪切应力 τ 与剪切速率 γ 的关系；图 2-4 (b) 为表观黏度 η_a 与剪切速率 γ 的关系。由图 2-4 可以看出，聚合物熔体黏度对剪切速率具有依赖性，且剪切速率的增大可导致熔体黏度的降低。

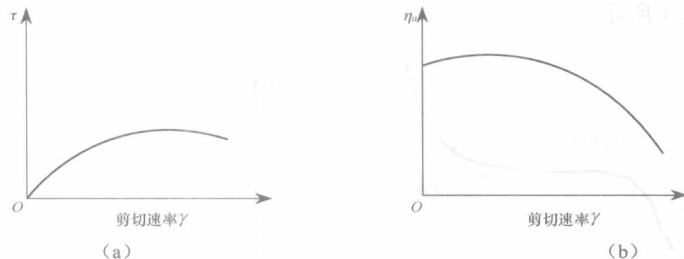


图 2-4 假塑性液体的 $\gamma-\tau$ 、 $\gamma-\eta_a$ 关系曲线

2.2 常用塑料简介

1. 丙烯腈—丁二烯—苯乙烯共聚物 (ABS)

ABS 是 PS 的改性产品, 一种新型的工程塑料, ABS 是由丙烯腈 (A)、丁二烯 (B)、苯乙烯 (S) 组成的三元共聚物, 来源广泛, 性能优异, 20 世纪 60 年代以来发展迅速, 是目前产量大、应用广的一种工程塑料。

丙烯腈使 ABS 具有高强度、热稳定性及化学稳定性, 约占 20%~30%; 丁二烯使 ABS 具有坚韧性、抗冲击特性, 约占 25%~30%; 苯乙烯使 ABS 具有易加工、高光洁度及高强度, 约占 40%~50%。ABS 是一种具有韧性、质硬性和刚性的工程塑料, 具有超强的易加工性、外观特性、低蠕变性和优异的尺寸稳定性以及很高的抗冲击强度。ABS 的特性主要取决于三种单体的比率, 通过控制三种成分的比例可以改变 ABS 的性能。ABS 具有良好的电镀性能, 其收缩率小, 尺寸稳定。

ABS 具有良好的成型性和综合力学性能, 因此, 用途广泛, 在机械工业上用来制造水箱外壳、蓄电池槽、冷藏库、冰箱衬里、管道、电机外壳、仪表壳、齿轮、泵叶轮、轴承和把手等。ABS 在汽车工业上的用途也日趋增大, 用 ABS 可制造汽车挡泥板、扶手、热空气调节导管、加热器等, 还有用 ABS 夹层板制轿车车身等。此外, ABS 还可用来制作水表壳、纺织器材、家用电器外壳、文教体育用品、玩具、电子琴及收录机壳体、食品包装容器、农药喷雾器及家具等。

2. 聚苯乙烯 (PS)

PS 是苯乙烯单体聚合而成的, 1920 年开始工业化生产, 性能优良, 来源丰富, 价格低廉, 应用广泛。PS 为无色透明珠状或粒状, 无臭、无味、无毒、易于着色, 密度为 1.05 g/cm^3 。易燃烧, 并有苯乙烯臭味放出。火焰呈黄色、冒黑烟。大多数商业用的 PS 都是透明的, 透光率 88%~92%, 仅次于有机玻璃。PS 具有非常好的几何稳定性、热稳定性、电绝缘特性以及很微小的吸湿倾向。PS 的缺点是力学性能不高, 质硬而且脆, 冲击强度和耐热性差, 易燃。

为改进其性能, 对其进行改性, 产生了苯乙烯系列树脂, 常用的有五大品种。

(1) 通用级聚苯乙烯 (GPPS), 俗称硬胶。

(2) 高冲击聚苯乙烯 (HIPS), 俗称不碎胶。

(3) 发泡级聚苯乙烯 (EPS), 俗称发泡胶。

(4) AS (SAN 料), 俗称透明不碎胶。

(5) ABS, 俗称高度 (超) 不碎胶。

由于聚苯乙烯的刚性大、透明度好、电性能优良, 而且成本低、易成型, 近几十年来, 发展了改性聚苯乙烯和以苯乙烯为基体的共聚物, 使它的用途更加广泛。聚苯乙烯在工业上可作仪表外壳、灯罩、化学仪器零件、透明模型等。在电气方面用做良好的绝缘材料、接线盒、电池盒等电器零件。在日用品方面广泛用于包装材料、各种容器、玩具等。

3. 聚丙烯 (PP)

聚丙烯 (PP) 是丙烯单体经聚合而成的, 1957 年, 实现工业化生产, 原料来源丰富, 性能优良, 价格便宜, 发展速度居几大通用塑料之首。聚丙烯为白色、无味、无毒及可燃的白色蜡状透明塑料, 不吸水、光泽好、易着色, 密度为 $0.90 \sim 0.91 \text{ g/cm}^3$, 是通用塑料中最轻的一种。聚丙烯耐热性好, 能在 100°C 以上的温度下进行消毒灭菌, 熔点为 $164^\circ\text{C} \sim 170^\circ\text{C}$, 聚

