

现代模具技术

注塑成型原理与注塑模设计

《现代模具技术》编委会 编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

现代模具技术——注塑成型原理与注塑模设计/《现代
模具技术》编委会编. —北京:国防工业出版社,1996.1

ISBN 7-118-01398-6

I. 现… II. 现… III. ①注塑-理论②注塑-模型-设计
IV. TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 14766 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 384 千字

1996 年 1 月第 1 版 1996 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1-5000 册 定价:21.40 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

序

在现代化工业中,模具工业已成为工业发展的基础,许多新产品的开发和生产在很大程度上要依赖于模具生产,特别是在汽车、轻工、电子、航空等行业尤为突出。模具工业已纳入国家的基础工业范畴,成为国民经济中的独立行业。

模具工业发展的关键是模具技术的进步,模具技术涉及到许多新的学科,因此,模具既是一种高科技型产品,又是一种技术密集型产品。模具技术已成为衡量一个国家机械制造技术水平的重要标志之一。世界上许多国家,特别是一些工业发达国家,对模具技术十分重视,除不断增加资金投入外,还制订各种优惠政策,促进了模具技术的发展,从而加快了新产品的开发和生产。

现代模具的特点是形状复杂、精密度高和长寿命,生产要求高质量、短周期、低成本。模具工业要适应模具的特点和生产要求,必须综合应用各种新技术,要具有较高的标准化程度,实行专业化生产和市场经济的运行机制。

目前,我国模具技术水平虽有长足的进步,但远远不能满足国民经济发展的需要,与发达国家和地区相比仍有很大差距。因此,必须高度重视模具技术发展,大力提高我国模具技术水平,以满足工业部门对模具不断增长的需要。

提高模具技术水平的关键在于努力培养模具人才,提高模具从业人员的管理与技术水平。为此目的,中国航空工业总公司科学技术委员会和科技部组织了有关教授、专家,在总结模具技术工作经验的基础上,参考了大量的专著、文献和资料,编写了《现代模具技术》。该书突出了先进性和实用性,可作为模具教学、科研和生产的重要参考书籍,它对提高我国模具人员的技术水平,促进模具技术进步会起到积极的作用。

姜燮生

总编辑委员会

主任委员

于欣

副主任委员

戚道纬 刘湘

顾问

任湛谋 许发樾 刘建东

委员

(按姓氏笔画为序)

平 申 卢文玉 朱 江 刘瑞麟 李正平
张 林 张 勤 姜淑芳 崔连信 阎茂林 翟 平

2010/01

本分册主编

翟平 赵伟

参加编审人员

(按姓氏笔画为序)

平 申 卢文玉 朱 江 刘 湘 刘瑞麟
李正平 张 林 张 勤 姜淑芳 戚道纬
崔连信 阎茂林 温世杰 翟 平

责任编辑

孙中明

前 言

注塑工艺和注塑模设计从传统的经验和技艺走上科学化的道路,已经过了几十年的历程,尤其在最近十余年有了明显的发展。目前,注塑模的设计、分析和制造,已广泛利用了计算机辅助技术来代替技术人员的经验和直觉知识。

多年来,人们一直期望能预测注塑成型时塑料熔体在流道-型腔系统中的流动情况和注塑制品在型腔内的冷却、凝固过程,以便在模具制造之前就能发现设计中存在的问题,修改图纸而不是返修模具。但这种愿望只有计算机技术在工业中获得广泛应用的基础上才能变为现实。

早在 60 年代中期,就有人利用有限差分法对注塑过程进行过数值模拟,到 80 年代初,注塑过程和注塑模设计的计算机模拟技术受到了广泛重视,此技术的推广、应用,以及各种商品软件的问世,促成了注塑模计算机辅助工程分析(CAE)这一很有生命力的学科方向。

应当提出的是,CAE 技术目前还不能代替人的创造性工作,它只能帮助人们判断设计方案是否正确,而设计方案的确在在很大程度上仍需依靠设计人员的经验和水平。

目前,我国在注塑模 CAD、CAE 和 CAM 方面与先进国家相比,还有相当大的差距,本书的目的就是向读者介绍在注塑模 CAE 这一学科领域中,国内外的研究方向与成果,以及其在工业中的应用情况,重点在于注塑过程中的物理现象、数学模拟方法,以及各种因素对制品质量的影响。

本书可分为以下几部分:

第一章至第五章主要介绍了热塑性塑料的物理性质以及塑料熔体在流道和型腔中流动的数学模拟;

第六章至第八章介绍了热塑性塑料注塑成型时材料的热学、流变、松弛等特性,以及注塑工艺条件对制品的取向、残余应力、密度分布和收缩的影响,着重于这些因素与制品质量之间的密切关系。

第九章较详细地介绍了在一个注塑周期中模具内的热交换过程、物理和数学模拟方法、冷却系统设计和参数优化,以及冷却不良对制品质量的影响。注塑过程中制品的热传递和凝固是注塑工艺和注塑模设计中的主要问题之一。

第十章介绍了注塑模流道系统和浇口的有关设计和计算。

第十一章至第十四章介绍了注塑模的基本结构和设计方法。这部分内容,可以帮助模具设计人员了解当前注塑模结构及其发展情况。由于篇幅所限,取材时尽可能删除了复杂的结构图,而侧重于典型结构及其设计方法。

有关注塑过程工程分析的资料、文献很多,分散于各类科技杂志中,但系统论述的书籍还很少。由于编者水平和实际经验所限,错误之处在所难免,敬请同行专家和读者批评指正。

本书在编写过程中,得到了原航空航天工业部科技委、研究院和原航空航天工业部工艺研究所的有关领导及同志们的关怀和具体帮助。西北工业大学林德宽教授详细地审阅了本书主要内容,并提出了许多宝贵意见,在此一并致谢。

编 者

内 容 简 介

现代模具技术丛书包括:《模具 CAD/CAM 技术》、《注塑成型原理与注塑模设计》和《汽车覆盖件模具设计与制造》。

注塑成型是生产塑料零件的主要方法,而制品的质量和性能则与注塑成型时塑料熔体的流动和冷却过程密切相关。因而,国内外都很重视这方面的研究和应用。本书较系统地介绍了这方面的研究成果。

全书共十四章,可分为两部分:第一部分介绍了注塑过程中的各种物理现象、数学模型的建立和数值求解方法、各种因素对制品质量的影响;第二部分介绍了注塑模的基本结构和设计方法。

本书可供从事注塑工艺和注塑模设计工作的工程技术人员使用,也可作为高等院校有关专业本科生或研究生的教材或参考书。

目 录

第一章 塑料及其有关性质	1
§ 1-1 塑料结构	1
§ 1-2 常用注塑材料的物理性质	4
§ 1-3 塑料的力学性质特点	6
第二章 聚合物熔体的流动分析	9
§ 2-1 沿圆管的等温流动	9
§ 2-2 沿平行平板之间通道的等温流动	12
§ 2-3 沿非均匀截面通道的等温流动	15
第三章 聚合物熔体的粘性	21
§ 3-1 克罗斯-阿伦尼乌斯粘性模型	21
§ 3-2 四参数模型有关参数的分析	22
§ 3-3 粘度系数的测定和曲线拟合	27
第四章 模具型腔充填	33
§ 4-1 塑料熔体在型腔中的流动	33
§ 4-2 注塑条件对制品质量的影响	37
§ 4-3 塑料熔体在复杂形状型腔中的流动	40
§ 4-4 流动设计原则	46
第五章 模具型腔充填模拟	47
§ 5-1 简单几何形状型腔的充填模拟	47
§ 5-2 简单几何形状的组合	56
§ 5-3 任意平面几何形状型腔的充填模拟	64
第六章 注塑制品中的取向	77
§ 6-1 实验技术	77
§ 6-2 取向和熔体流动的关系	78
§ 6-3 影响制品取向的因素	80
§ 6-4 取向对制品机械性质的影响	83
§ 6-5 利用双折射模拟取向	84
§ 6-6 热和流动引起的双折射	88
§ 6-7 非晶聚合物注塑件中的取向	90
第七章 注塑制品中的残余应力	94
§ 7-1 残余应力的测量技术	94
§ 7-2 热和流动引起的残余应力	98
第八章 注塑制品中的密度分布和收缩	106
§ 8-1 密度分布	106
§ 8-2 收缩	112

第九章	模具中的热交换和冷却系统设计	118
§ 9-1	注塑压力周期	118
§ 9-2	注塑过程中的冷却时间和封闭时间	120
§ 9-3	模具中的热交换	125
§ 9-4	冷却过程的物理模拟	137
§ 9-5	解热传导方程的边界元法	140
§ 9-6	冷却系统设计和参数优化	142
§ 9-7	冷却效果不良对制品质量的影响	145
§ 9-8	冷却系统的计算机辅助设计简介	146
第十章	注塑模流道系统设计	149
§ 10-1	概述	149
§ 10-2	流道系统的分类及有关计算	150
§ 10-3	浇口设计	154
第十一章	注塑模分类及其基本结构	162
§ 11-1	注塑模分类	162
§ 11-2	注塑模型腔与结构设计	167
§ 11-3	浇注系统设计	179
§ 11-4	顶出机构设计	192
第十二章	特种注塑模具设计	201
§ 12-1	成型塑件侧向凹凸面的模具	201
§ 12-2	成型塑件螺纹部分的模具	211
§ 12-3	无流道凝料模具	219
第十三章	模温控制机构	234
§ 13-1	模温控制的重要意义	234
§ 13-2	影响模温的因素及冷却时间计算	234
§ 13-3	冷却效果判断	235
§ 13-4	模具热分析及冷却系统设计	235
§ 13-5	冷却管道分布和冷却效果的关系	237
§ 13-6	模具冷却方式	237
§ 13-7	加热装置与加热功率计算	242
第十四章	注塑模强度及成型零件尺寸计算	243
§ 14-1	注塑模强度计算	243
§ 14-2	成型塑件尺寸计算	249
附录	单位换算表	256
参考文献	257

第一章 塑料及其有关性质

人们所说的塑料,指的是一大类材料,其中包括诸如尼龙、聚乙烯、聚四氟乙烯等。这些材料的性质互不相同,正如金属材料大类中的铝和钢在性质上有很大差别一样。

塑料以其独特的性能和便宜的价格,已广泛用于工程技术和日常生活领域,可以说,当代世界若没有塑料是不能想象的。

由于塑料的内部结构比金属的结构复杂,故掌握其性能特点也就比较困难。然而,对一般工程技术人员来说,要想有效地使用塑料,或在塑料制品生产时能充分利用其本身特性,并不一定需要详细地知道其化学结构,只要对其内部结构有一般的了解,知道不同种类和不同牌号塑料之间的性能差别,就可以合理地应用塑料。因此,本章只是简要地介绍塑料结构,并不涉及其复杂的化学性质,而是着重于聚合物独特的分子结构对其熔体的流动性和粘性的影响。

§ 1-1 塑料结构

一、聚合材料

合成的大分子、或称长链分子,是由千百个被称为“单体”的分子单元结合在一起而形成的。将单体结合在一起的过程称为“聚合”。大分子中单体的数量称为“聚合度”。

例如,乙烯单体聚合时,连接碳原子的双键打开,并和邻近的乙烯单体键合,形成 CH_2 基长链,即为聚乙烯分子,如图 1-1 所示。

通常认为聚合物和塑料含义相同,实际上它们之间是有区别的。聚合物是聚合过程所产生的纯材料,很少单独使用,只有在渗入添加剂后才在工业中应用。有添加剂的材料才称为塑料。聚合物渗入诸如稳定剂、润滑剂、色料等,目的是为了改善材料的性质。

重要的塑料可以分为两大类:

(一)热塑性塑料

在热塑性塑料中,各长链分子之间是靠较弱的范德瓦耳力维持在一起的。受热时,分子之间的作用力进一步变弱,使材料软化并具有柔性。温度继续升高时,则变为粘性熔体,而在冷却时,熔体会重新凝固。这种加热软化、冷却凝固的循环是可逆的,可以重复多次。这种性质是热塑性塑料的主要特点,很多工艺方法就是建立在这种性质的基础上的。然而,热塑性塑料也存在着一些缺点,其中主要是对温度过于敏感。

聚乙烯、聚氯乙烯、尼龙、聚甲基丙烯酸甲酯(有机玻璃)、聚丙烯、醋酸纤维等属于热

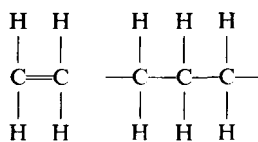


图 1-1 乙烯单体和聚乙烯分子

塑性塑料。

(二)热固性塑料

热固性塑料是通过化学反应生成的。反应过程可以分为两个阶段：第一阶段和热塑性材料类似，即生成长链分子，但这种长链分子能进一步起化学反应；第二阶段是在模具中的温度和压力下进行的，反应后，材料内部形成密集的网状组织，各长链分子相互形成强有力的键合，使材料冷却后再次加热时不能软化，若温度过高，则材料碳化并分解，故为不可逆过程。这种性质与鸡蛋煮熟后变硬，再加热也不会软化相类似。

由于强有力的化学键合，热固性塑料非常坚硬，其机械性质对温度不敏感。

苯酚塑料、氨基塑料、环氧树脂、某些聚酯、呋喃树脂等属于热固性塑料。

二、长链分子结构

前面已经谈到，聚合物材料是由长链分子组成的，这种独特的结构对固态塑料的粘弹性和塑料熔体的流动性都有重要的影响，故较详细地了解链的性质对掌握制品的使用要求和制造工艺是有一定意义的。

我们仍以聚乙烯为例。沿长链的每个 CH_2 基上，键角是确定的。若将一个碳原子放在一个正四面体的中心，则碳原子的四个键将分别指向四面体的四个顶角，键角为 $109^\circ 28'$ ，这样，聚乙烯长链就具有了线型锯齿形的几何形状，如图 1-2 所示。

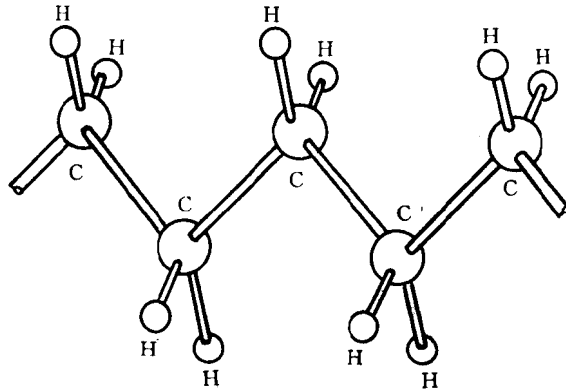


图 1-2 聚乙烯模型

事实上，如图 1-3 中所示，若将键 1—2 绕本身轴线旋转，则键 2—3 将旋转成一个圆锥。同样，键 2—3 绕本身轴线旋转，则键 3—4 将形成一个旋转圆锥。如此类推，整个长链分子的形态将是随机的。

实际的长链分子的结构还要复杂，有时在主链的某些点生出次级链（或称支链），如图 1-4 所示。

在实际的聚合物中，并非所有的大分子都具有相同的长度。每个大分子的长度取决于聚合时一系列的随机因素。例如，在乙烯单体充裕的地区，链可能迅速生长，而在乙烯单体贫乏的地区，链生长缓慢，甚至停止。故在实际聚合物中不存在单一的分子量，而是用统计方法确定平均分子量和分子量分布情况。

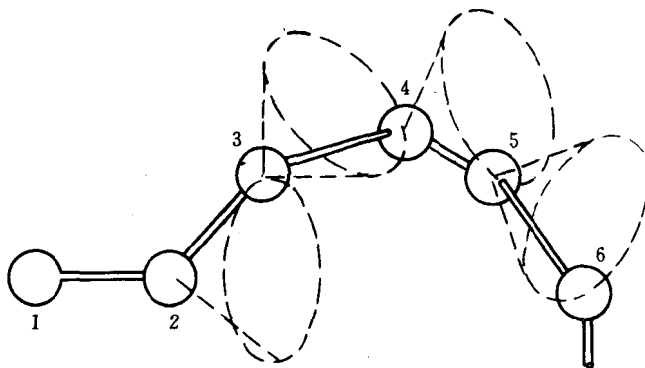


图 1-3 分子链骨架的随机形态

三、分子链的排列

前面已将分子链模型描述为以碳原子为骨架的、可随机扭转的线型长链分子。在聚合物中,这些长链分子的排列以及相互之间的作用,对材料的性质有明显的影响,其中最主要的是材料是否结晶。利用 X 射线衍射法对很多聚合物进行研究后得知,在一些聚合物中,存在着三维有序(结晶)区和无序(非结晶)区。

聚合物是否易于形成结晶要取决于分子链的结构。例如,若聚乙烯分子具有高支链度,则难以形成有序排列,结晶也就困难。在较复杂的聚合物中,如图 1-5 所示,若边基 X 较大,亦难以从无序结构中形成有序区。从另一方面说,具有充分对称性的结构则易于结晶。

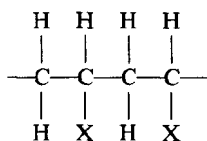


图 1-5 较复杂的结构

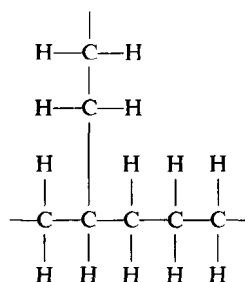


图 1-4 聚乙烯中的支链

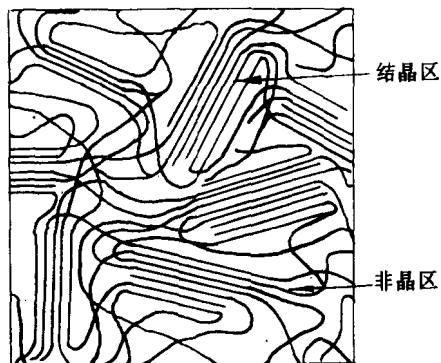


图 1-6 结晶型聚合物模型

长链分子的另一个重要特性是,受到应力作用后易于重新排列。例如塑料,当受到拉伸作用时,其长链分子倾向于沿应力方向排列成直线,这种现象称为“取向”。分子取向会导致机械性质的各向异性,这并不是注塑制

品所需要的,但这种性质有利于纤维和薄膜的生产。有关取向的形成及其影响因素,以后还要详细介绍。

应当着重指出的是,不应把取向和结晶混淆。X射线衍射指出,取向的聚合物不一定存在结晶区(见图 1-6)。同样,光学检测指出,聚合物可能结晶,但不一定有明显的取向。

室温下对半结晶的聚乙烯或聚丙烯冷拉伸时,在材料内部就会形成取向。聚甲基丙烯酸甲酯和聚苯乙烯皆为非结晶塑料,在高温下拉伸亦能形成取向。

§ 1-2 常用注塑材料的物理性质

从聚合物结构特点可以看出,不同的聚合物也会有共同的性质。例如,和其他种类的材料(如金属)相比,聚合物的分子是比较松散地结合在一起的,因而具有较低的密度。密度最大的塑料是聚四氟乙烯(PTFE),其密度为 2.2g/cm^3 。密度最低的塑料是聚烯烃类(聚乙烯、聚丙烯),其密度约为 0.9g/cm^3 。塑料中的化学键对性质亦有影响。分子链骨架上的原子(多数是碳原子)使塑料具有很低的导电性和导热性。另外,由于各分子链之间的范德瓦耳力微弱,故全部热塑性塑料都具有较高的热膨胀系数。

然而,除这些共有的性质外,每种塑料还具有本身的独特性质,在应用和成形时应细致考虑。

注塑成型时,需要一系列的加工步骤,主要有:将固态聚合物加热成熔体;在压力作用下使熔体注入模具型腔;冷却定形;顶出制品。可以看出,在注塑过程中,聚合物的物理状态和外部条件(如温度、压力和时间等)都在不断变化。因此,注塑过程的工艺性与材料的密度、比热容、导热系数、玻璃化温度、熔化与分解温度以及力学和流变性能等都密切相关。

下面介绍几个与注塑过程密切相关的聚合物性能。

一、比热容

比热容定义为单位重量材料温度升高 1°C 时所需要的热量。其单位是 $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ 。

塑料的比热容随温度而变化。结晶型聚合物,如聚乙烯和聚酰胺等,比热容不仅比非晶聚合物,如聚苯乙烯要高,而且随温度变化时具有峰值。这是因为结晶型聚合物熔化时不仅升温需要热量,而且还需要补充以熔化潜热所需要的热量。

不同塑料升温至加工温度所需要的热量差别很大,表 1-1 给出了一些常用聚合物的比热容和其他热物理性能。

表 1-1 热塑性塑料常温下的热物理性质

塑 料	比热容 c_p ($\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	导热系数 λ ($\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$)	热扩散系数 $a\times 10^6$ (m^2/s)
聚苯乙烯	1.340	1050	0.126	9
ABS	1.591	1100	0.209	13
聚甲基丙烯酸甲酯	1.465	1180	0.189	11
硬聚氯乙烯	1.842	1400	0.209	15
聚碳酸酯	1.256	1200	0.194	13

(续)

塑 料	比热容 c_p (kJ/kg·°C)	密度 ρ (kg/m ³)	导热系数 λ (W/m·°C)	热扩散系数 $\alpha \times 10^8$ (m ² /s)
聚 酚	1.256	1240	0.260	17
低密度聚乙烯	2.093	920	0.335	16
高密度聚乙烯	2.303	950	0.482	22
尼 龙 66	1.675	1140	0.247	13
聚 丙 烯	1.926	900	0.138	8
聚 甲 醛	1.465	1410	0.230	11

二、热扩散系数

塑料的升温与冷却速率与热扩散系数有关。热扩散系数 α 由下式表示

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (1-1)$$

式中, c_p 为定压比热容(kJ/kg·°C); ρ 为密度(kg/m³); λ 表示导热系数(W/m·°C)。

由式(1-1)可以看出, 导热系数 λ 高、而定压比热容 c_p 低的材料, 热扩散系数 α 大。

温度对塑料的热扩散系数有很大影响。结晶型塑料的热扩散系数对温度的依赖关系比非晶型塑料更为密切。

三、密度与比容

聚合物的密度与温度有强烈的依赖关系。温度升高时, 聚合物的密度减小。结晶型聚合物的密度一般较非结晶型聚合物密度大。

注塑过程中, 温度在不断发生变化, 故聚合物的密度也在不断变化。这种变化对注塑制品的质量有重要影响。

比容定义为单位重量物质所占据的体积, 它与密度互成倒数, 即

$$\rho = \frac{1}{V} \quad (1-2)$$

比容 V 反映了塑料在注塑过程中, 在温度和压力的作用下, 制品的膨胀与收缩所引起的尺寸变化, 是一个很重要的参数。

四、玻璃化温度

聚合物的玻璃化温度 T_g 是指线型非结晶聚合物由玻璃态(硬脆状态)向高弹态(橡胶弹性态)、或由后者向前者转变的温度。当温度低于玻璃化温度时, 聚合物中的大分子链段凝固成坚硬的固态。当温度高于玻璃化温度时, 大分子链段就拥有了足够的自由活动能量, 但此时还不是整个大分子链段在运动, 故表现出来的还是高弹性橡胶的性质, 此时, 聚合物中的自由容积会突然增加。

取合物中的自由容积可表示为

$$V_f = V - V_0(T) \quad (1-3)$$

式中, V_f 为聚合物中的自由容积; V 为聚合物所占据的全部容积; $V_0(T)$ 为聚合物中大分子

链本身所占据的容积。图 1-7 所示的是聚合物比容随温度的变化规律。

温度为 T 时, 聚合物中的自由容积 V_f 可用下式计算

$$V_f = V_g + (T - T_g)\beta \quad (1-4)$$

式中, V_g 为聚合物在 T_g 温度下的自由容积; T 为高于玻璃化温度 T_g 100°C 以内的温度; β 为热膨胀系数。

玻璃化温度 T_g 主要与聚合物中大分子链的柔性有关。另外, 大分子的交联、结晶、取向等都会使 T_g 升高。各种聚合物的 T_g 值可查阅有关手册。

五、熔化温度

熔化温度 T_m 指的是结晶型聚合物中大分子链从有序状态转变为无序的粘流状态所需要的温度。在非晶聚合物中, 材料从 T_g 开始即行软化成高弹态, 但从高弹态转变为粘流态时却没有明显的熔点, 而是一个温度范围。

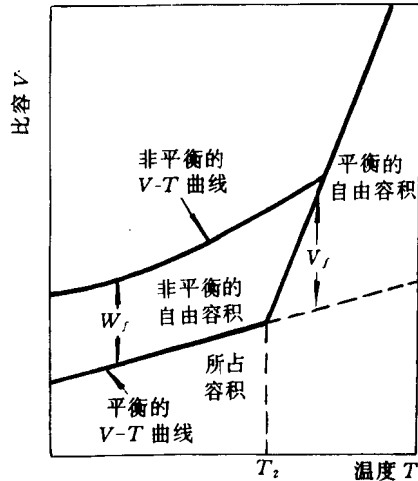


图 1-7 聚合物的比容-温度曲线

六、聚合物的热降解、分解温度和热稳定性

塑料因加工温度偏高, 或在加工温度下停留时间过长, 从而使平均分子量降低的现象称为热降解。如出现这种情况, 则熔体的粘度降低, 制品出现飞边、气泡和银丝, 机械性质变差, 如弹性消失、强度降低等。

分解温度是指聚合物因受热而迅速分解为低分子可燃物质的温度。在氧气充分的条件下, 聚合物的分解是放热反应, 会使温度进一步升高, 达到燃点时就会燃烧。

所谓热稳定性, 是指聚合物在高温条件下抗化学反应的能力。热稳定性不仅与加工温度有关, 而且与在加热温度下停留的时间有关。加热温度愈高, 为使聚合物不起化学反应, 则停留的时间应愈短。

当温度达到分解温度时, 聚合物中不稳定结构中的分子最先分解, 温度继续升高或延长加热时间其余分子才发生断裂, 使整个聚合物热降解。故将热降解温度称为热稳定性温度, 其值略高于分解温度。

显然, 分解温度是注塑温度的上限。聚合物从粘流态转变温度至分解温度之间范围的大小对注塑成型非常重要, 它决定了注塑的难易程度和注塑温度可选择范围。此温度区间愈小、温度愈高, 则注塑愈困难。为了提高聚合物的热稳定性, 常在塑料中加入热稳定剂, 以使加工温度区间变宽, 允许停留的时间加长。

§ 1-3 塑料的力学性质特点

为了获得高质量塑料制品, 就需要充分了解塑料的两个方面的性质。一方面是为产品