

高等学校轻工专业试用教材

# 塑料成型工艺学

成都科技大学 主编

轻工业出版社

2006

高等学校轻工专业试用教材

# 塑料成型工艺学

成都科技大学主编

轻工业出版社

高等学校轻工专业试用教材

**塑料成型工艺学**

成都科技大学主编

轻工业出版社出版

(北京阜成路3号)

天水新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

787×1092毫米 1/16 印张:  $23\frac{4}{16}$  插页: 1 字数: 526千字

1983年4月第一版第一次印刷

印数: 1—13,500 定价: 2.65元

统一书号: 15042·1703

## 编者说明

本教材由天津轻工业学院、大连轻工业学院和成都科技大学根据北京化工学院、天津轻工业学院、大连轻工业学院和成都科技大学共同制定的编写大纲联合编写，并由轻工业部组织的塑料成型加工专业教材编审委员会审定。

本教材共分十二章。第一章绪论介绍塑料成型工艺及塑料成型加工工业的一般情况。第二章讨论各种成型工艺共同的基本理论，以便以后章节的叙述和学习，第三章介绍各种塑料的配制方法，各种助剂的作用和工艺性能。第四章至第十一章介绍各种塑料成型方法和成型过程的分析，为本书的主要内容。塑料制品的机械加工、修饰和装配内容不多，合并写在第十二章。

本教材可供塑料成型加工专业、塑料成型工艺课程教学用，也可供从事塑料成型加工的科技人员阅读参考。

编写分工如下：第一章、第二章和第十二章由成都科技大学张承琦编写；第三章和第七章由成都科技大学黄锐编写；第四章和第十一章由成都科技大学曾邦禄编写；第五章由成都科技大学林师沛和刘忠仁合编；第六章和第九章由天津轻工业学院张明善编写；第八章由大连轻工业学院肖作顺编写；第十章由天津轻工业学院许建南编写。张承琦负责主编。

在编写过程中，我们得到了有关高等院校领导的关怀和支持，保证了编写工作的顺利进行，在此特致衷心地感谢。定稿前，天津轻工业学院、北京化工学院、大连轻工业学院、郑州轻工业学院、湖北轻工学院和成都科技大学的部分教师参与了审稿的工作，并提出了宝贵的意见，特此表示感谢。

由于水平所限，难免有不妥或错误之处，我们诚恳地希望使用本书的教师和读者批评指正。

编者

# 目 录

## 第一章 绪论

- 1.1 塑料成型以及其在塑料工业中的重要性····· (1)
- 1.2 塑料成型工业的过去和未来····· (2)
- 1.3 我国的塑料制品生产····· (3)
- 1.4 塑料制品的生产工序和组织····· (4)
- 1.5 本课程的主要内容和要求····· (5)

## 第二章 塑料成型的理论基础

- 2.1 概述····· (6)
- 2.2 聚合物的流动和流变行为····· (6)
- 2.3 聚合物的加热与冷却····· (22)
- 2.4 聚合物的结晶····· (24)
- 2.5 成型过程中的定向作用····· (31)
- 2.6 聚合物的降解····· (36)
- 2.7 热固性塑料的交联作用····· (39)

## 第三章 成型用的物料及其配制

- 3.1 概述····· (41)
- 3.2 粉料及粒料····· (41)
- 3.3 溶液····· (72)
- 3.4 分散体····· (75)

## 第四章 压缩模塑

- 4.1 概述····· (81)
- 4.2 预压的作用····· (81)
- 4.3 预热和干燥的作用····· (85)
- 4.4 压缩模塑用的设备····· (89)
- 4.5 模压过程 and 操作方法····· (92)
- 4.6 模压成型的控制因素····· (94)
- 4.7 模压成型中容易产生废品的类型、原因及其处理方法····· (98)
- 4.8 冷压烧结合成型····· (98)

## 第五章 挤出

5.1 概述 .....	(101)
5.2 挤出设备 .....	(101)
5.3 挤出机的一般操作方法 .....	(106)
5.4 挤出理论 .....	(106)
5.5 挤压所需的机械功与热量 .....	(116)
5.6 设计螺杆的要点 .....	(116)
5.7 几种新型螺杆 .....	(118)
5.8 双螺杆挤出机 .....	(121)
5.9 几种制品的挤出工艺 .....	(123)
5.10 发展动向 .....	(130)

## 第六章 注射模塑

6.1 概述 .....	(133)
6.2 注射模塑设备 .....	(134)
6.3 注射模塑工艺过程及控制因素 .....	(142)
6.4 注射模塑工艺条件的分析讨论 .....	(148)
6.5 几种常用塑料的注射模塑特点 .....	(152)
6.6 热固性塑料的传递模塑和注射模塑 .....	(158)
6.7 注射吹塑和挤出吹塑 .....	(163)
6.8 注射模塑的发展概况 .....	(169)

## 第七章 浇铸

7.1 概述 .....	(175)
7.2 静态浇铸 .....	(175)
7.3 嵌铸 .....	(190)
7.4 离心浇铸 .....	(193)
7.5 流延铸塑 .....	(196)
7.6 搪塑 .....	(198)
7.7 滚塑 .....	(200)

## 第八章 层压塑料和增强塑料的成型

8.1 概述 .....	(203)
8.2 增强作用和胶接作用 .....	(204)
8.3 树脂 .....	(206)
8.4 增强物及其表面处理 .....	(208)
8.5 高压成型 .....	(222)

8.6	低压成型 .....	(226)
8.7	缠绕成型 .....	(233)
8.8	其它成型 .....	(238)

## 第九章 泡沫塑料的成型

9.1	概述 .....	(243)
9.2	机械发泡法 .....	(244)
9.3	物理发泡法 .....	(247)
9.4	化学发泡法 .....	(251)
9.5	泡沫塑料的性能与应用 .....	(267)

## 第十章 压延与涂层

10.1	概述 .....	(270)
10.2	压延设备 .....	(270)
10.3	压延过程中的流动分析 .....	(274)
10.4	压延工艺 .....	(278)
10.5	压延成型的进展 .....	(285)
10.6	塑料涂层制品 .....	(286)
10.7	塑料涂覆 .....	(293)

## 第十一章 塑料的热成型

11.1	概述 .....	(297)
11.2	热成型的基本方法 .....	(298)
11.3	热成型的设备 .....	(303)
11.4	模具 .....	(306)
11.5	工艺因素分析 .....	(307)
11.6	热成型常用的几种塑料 .....	(311)

## 第十二章 塑料的机械加工、修饰和装配

12.1	概述 .....	(313)
12.2	机械加工 .....	(313)
12.3	修饰 .....	(326)
12.4	装配 .....	(336)

附录

# 第一章 绪 论

## 1.1 塑料成型以及其在塑料工业中的重要性

塑料工业共包含塑料生产（包括树脂和半制品的生产）和塑料制品生产（也称为塑料成型工业或加工工业）两个系统。没有塑料的生产，就没有塑料制品的生产，其理由十分明显。但是没有塑料制品的生产，塑料就不能成为生产或生活资料。所以两个生产系统是一个体系的两个连续部分，是相互依存的。

塑料制品的生产是一种既复杂而又繁重的过程，它的目的专在根据各种塑料的固有性能，利用一切可以实施的方法，使其成为具有一定形状而又有使用价值的物件或定型材料。当然，除加工技术外，生产成本和制品的质量都应列为重点考虑的因素。

塑料制品生产系统主要是由成型、机械加工、修饰和装配四个连续过程组成的（参见图1-1）。成型是将各种形态的塑料（粉料、粒料、溶液或分散体）制成所需形样的制品或坯件的过程，它在四个过程中最为重要，是一切塑料制品或型材生产的必经过程。成型的种类很多，诸如各种模塑、层压以及压延等。其它三个过程，通常都是根据制品的要求来取舍的，也就是说，不是每种制品都须完整地经过这三个过程。机械加工指的是在成型后的工件上钻眼、切螺纹、车削或铣削等过程，它是用来完成成型过程所不能完成或完成得不够准确的一些工作。修饰的目的是美化塑料制品的表面或外观，间或也有为达到其它目的的，例如，为提高塑料制品的介电性能就要求它具有高度光滑的表面。装配是将各个已经完成的部件连接或配套以使其成为一个完整制品的过程。后三种过程有时统称为加工。从对比的角度来说，加工过程常居于次要地位。

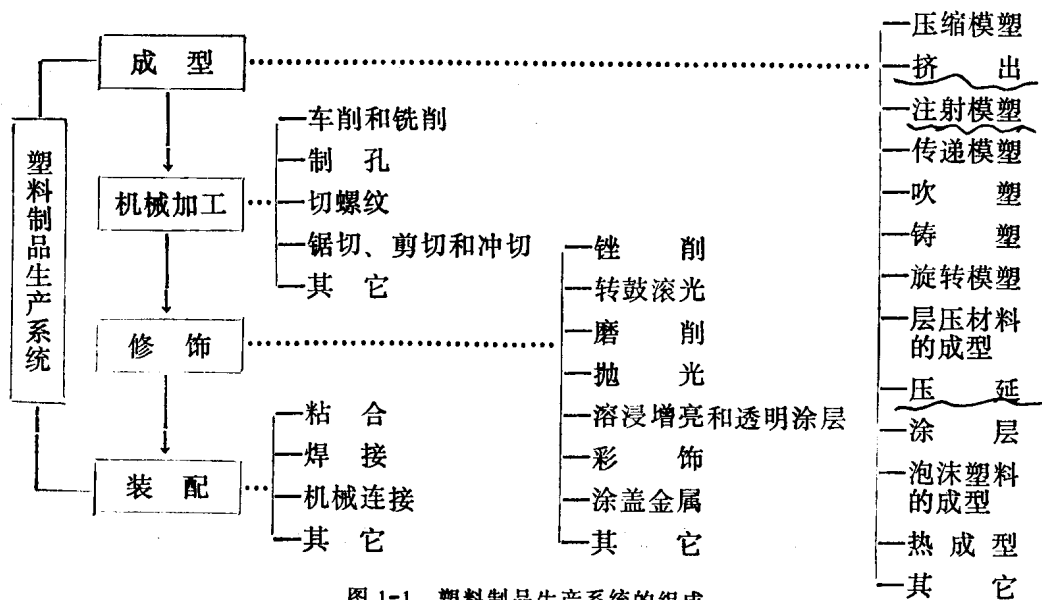


图 1-1 塑料制品生产系统的组成



## 1.2 塑料成型工业的过去和未来

就世界范围来说，塑料成型工业自1872年开始到现在已度过仿制和扩展并已深入地转到了变革的时期。当塑料最初问世时，由于品种不多和对它们的本质的理解不足，在塑料制品生产技术上，只能从塑料与某些材料具有若干相似之处而进行仿制。作为借鉴的主要是橡胶、木材、金属和陶瓷等制品的生产。此后，塑料品种渐多，而且在其制品生产的不断实践和实验的基础上，对塑料各类制品和塑料的特征都有了比较明确的认识，因此，不论在生产技术和方法上，都有显著的改进和扩展。这一时期的开始约在本世纪的二十年代。五十年代以来，由于各项尖端科学技术以及许多工业部门和农业上发展的需要，都要求具有某些特种性能或性能特别优良的塑料制品，而且在制品数量、结构以及尺寸大小和准确程度上也提出了更高的要求。基于这些要求，同时还力求不使塑料固有性能在制品生产过程中有所下降，对许多原用的生产方法就不得不自头至尾细心研究，作一番革新，而对一些适合客观需要所设计的新型塑料和制品又不能不分别根据具体的特点在生产上进行创新。革新和创新就是这里所说的变革。截至目前为止，不仅塑料制品的数量和应用种类都有了显著的增长，而且绝大多数的新旧生产方法也都逐渐形成合理的系统，从而使塑料制品的生产日益成为一个专门而又较大的生产部门。

塑料制品生产和塑料生产的增长几乎是同步的。世界塑料生产的年增长率在70年代以前平均为12~15%；进入70年代以后，年增长率有所下降，平均为4~5%；估计在80年代中年增长率可能有些回升，但已不十分可能超过10%。不管怎样，塑料在四大工业材料（钢铁、木材、水泥和塑料）中的年增长率总是居于首位。我国由于具体的情况不同，目前塑料的年产量虽不能与各工业先进国家相比，但年增长率却较高。就过去世界上发展塑料的情况来看，它的快速增长不完全是原有制品数量的单纯增加，而主要是应用范围的日益增大。这说明从事塑料工业者的任务比较繁重和与其它生产部门联系的重要性。现将塑料制品应用的主要部门和其情况简述如下：

1. 农业：塑料薄膜和片材，在农业生产中的育苗、护理庄稼和收割、蓄水、排水以及贮青等方面的积极作用都是十分昭著的。因此，对这两种塑料制品需求量的增长很快。一个较为迫切的要求是如何使这两类制品经久耐用和价格便宜。其次，在农田排灌中还需要大量的管材和管件。

2. 包装：塑料在制造包装容器、货袋、货物护层和其它包卷用的材料方面已十分普遍，但在如何使其迎合需要而兼具原用纸张、玻璃或金属包装的优点上，则还需继续做大量的工作。

3. 交通运输：据统计，汽车、轮船以及其它交通工具等所用的塑料数量，如果按每辆或每艘计算，则逐年都在增加。

4. 电气工业：电线、电缆、录音带、电视机、计算机、收音机以及各种通讯设备所用的塑料数量，无不与日俱增，而且还要求产品性能在批量上比较整齐划一和结构上的精致化和微型化。

5. 化学工业：利用塑料轻盈和耐腐蚀的特性，力求改进或重建许多典型的化工设备。

6. 仪表工业：将继续推广塑料在这方面的应用，主要是用它来制造主辅部件。

7. 建筑业：原用的木材、灰泥和砖瓦已越来越多地改用了塑料。改用不完全是单纯的取代，更多的则是新技术和新结构的采用，这对整个建筑业都富有革命的意义。此外，在室内采光、供水、顶板、地面、壁板等方面所用的塑料数量也越来越多。

8. 航空工业：不管是民用或军用飞机，采用塑料的数量和品种都在不断地增加。其中主要的是利用各种增强塑料作为结构和覆面材料，这对减轻机体重量具有重要意义。

9. 国防与尖端工业：由于塑料具有种种特殊性能，因此它正在国防与尖端工业中发挥为其它材料所不能代替的作用。目前在人造卫星、火箭发动机以及原子能等工业中用的主要有各种烧蚀材料、耐腐蚀材料，增强塑料和工程塑料等。此外，在常规武器中用作制造各种零部件的塑料数量也相当可观。

10. 家俱：泡沫结构塑料不仅能够取代木材而做成多种多样的家俱，并且能使它们兼备木质家俱原来所没有的一些特性。其次，由模塑或热成型方法所制成的椅凳是颇为实用的。于此必须注意，家俱并不限于家用，其它如机关、工厂、学校和一些公共场所也需要大量的家俱。

11. 体育用具和日用百货：在这方面主要是提供新型产品。

从目前情况来看，塑料制品生产今后发展的方向理应是：简化生产流程和缩短生产周期；加深对塑料在成型过程中所发生的物理和化学变化的认识，借以改进生产技术、方法和设备；实现全面机械化和自动化以利大量生产；设计更大更新的设备以适应各个生产部门对大型、微型或新型塑料制品生产的要求。

### 1.3 我国的塑料制品生产

我国的塑料制品生产仅在解放后才得到发展。解放前，这项工业是典型的半殖民地工业，一切原料和设备几乎都仰仗进口，所以它的命脉完全操在侵略者的手中，听凭其摆布和扼杀。至于设立的工厂，不仅规模不大，而且十分简陋，绝大多数都是工场式的手工劳动，当然，这些场所几乎都是帝国主义插进我国的吸血管和资本家残酷剥削劳动人民的工具。其次，工厂的数目既少，分布也极不平衡，差不多全都集中在沿海几个大城市，所生产的制品数量很少，质量也极低劣，只能作为日常用品的一些点缀，说不上与工农业发生什么关系。

解放后，在党中央和毛主席的领导下，我国塑料工业，与其它工业一样，得到了很大的发展。建国30年来，平均年增长率竟超过30%。近年来，由于我国的石油生产的发展，为塑料工业提供了充分的原料。因此，可以预见今后塑料及其制品增产的趋势。其次，随着生产发展的需要，全国各地还设了不少的研究机构和学校，充分体现了自力更生的主张，同时还为社会主义建设培养了人才。现在我们不仅能够用各种方法生产各种类型的塑料制品和设备，而且还有许多创造和发明。更为重要的是我们可以针对我国的具体情况所设想的蓝图按计划地大踏步前进，丝毫不受外来的干扰。此外，所有工厂的劳动条件都已今非昔比，而且仍在不断地改进。

前进中肯定是会遇到困难的，当前的困难是：(1)若干品种的塑料，其质量还较差；

(2)由过去以煤或电石为原料的路线改为石油需要时间和技术设备；(3)新品种的加快发展；(4)成型工艺和设备的继续扩大和发展；(5)辅助材料的扩大和发展等。

### 1.4 塑料制品的生产工序和组织

从原料到塑料，又从塑料到塑料制品的全部简单流程见图1-2。该流程共分〔1〕、〔2〕、〔3〕三个连续部分。图中长方形表示过程；正方形表示原料、中间产物或成品；实线箭头表示流程前进的方向；虚线箭头表示该段流程前进的另一种方式。根据1-1节所说的情况，当知〔1〕和〔3〕两部分是分别属于塑料和塑料制品两个生产部门的，而生产部门也确实是这样分的。至于第〔2〕部分，按理也应属于塑料部门，但一般较大的成型工厂往往为了方便，也有将这部分归入自己的生产范围。这样，除能满足它自己对塑料在配制上的多样性要求外，还可以简化仓库的管理。

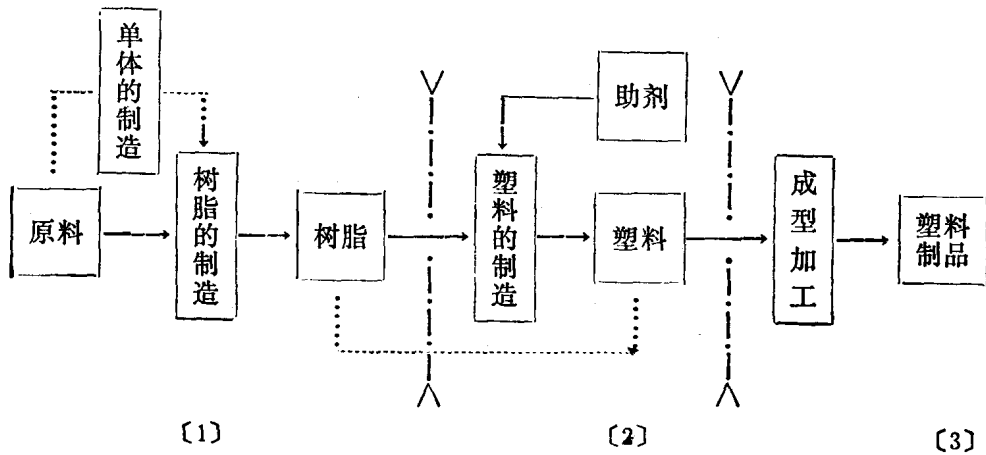


图 1-2 自原料至塑料制品的简单生产流程

已如前说，塑料制品的生产共由四个过程所组成。不过有些塑料在成型之前每每需要预先处理，即经过预压、预热或干燥等，因此，生产塑料制品的完整工序共五个：(1)预处理；(2)成型；(3)机械加工；(4)修饰；(5)装配。在任何制品的生产过程中，这五个工序都应依上列次序进行，不容颠倒，否则在一定程度上会影响制品的质量或浪费劳动力和时间。如果某些制品的生产不需要完整地通过这五个工序，则在剔除某些工序后仍然须按上列先后的次序进行，不能越次。

通常在生产一种新制品之前，制造者应先熟悉该种制品在物理、机械、热、电以及化学性能等方面所应具备的指标，而后根据这些要求选定合适的塑料并从而决定成型加工的方法，同时还应对成本进行估算以断定其是否合理。最后，再通过试制并确定生产工艺规程。在工艺规程中，对每个工序规定的步骤常非一个，必须先后分明。对每个工序的操作条件也须有明确的指标，并应规定所能允许的差值。有关防忌的事项也应列出，以保证生产的安全。当然，在实践的基础上还须不断地完善该项工艺规程。

成型工厂对生产的布置通常有两种体制。一种是过程集中制，也就是将前列五种工序所用的各种生产设备分别集中来进行生产。它的优点是宜于品种多、产量小而又属短

期性的生产；其缺点则在衔接生产工序时所需的运输设备多、费时费工和不易连续化。另一种是产品集中制，也就是按照一种产品所需生产过程实行配套成龙的生产。它宜于生产单一、量大和永久性强的制品。由于连续性很强，这种制度不仅在运输上比较方便，而且还容易实行机械化和自动化，成本也因而得以降低。不管用那一种体制进行生产，均应在合理的段落设置技术检验站，借以保证正常的生产和合格的制品质量。

### 1.5 本课程的主要内容和要求

本课程是设想在学者已具有热力学、化学、力学、质量与能量的传递、高分子物理学和各种塑料性能的基本知识的基础上进行讲授的，论及的内容主要是塑料成型工艺和有关理论。

对工艺的叙述重在成型这一环节，共分八章（第四至第十一章）进行。至于机械加工、修饰和装配，则因其所涉内容不多，所以就合并为一章（第十二章）。论述工艺之前，有必要对所用各种塑料的配制进行论述，故放在第三章内进行。理论的叙述，除在与工艺结合的情况下进行外，为了便于对一些共同的基本理论作系统的探讨和学习，特将其集中并放在各种工艺的前面。

学习时，要求在密切结合工艺过程的前提下尽可能地对每种工艺所依据的原理、生产控制因素以及在工艺过程中塑料所发生的物理与化学变化和它们对制品性能的影响具有清晰的概念，并进一步理解各种成型工艺所能适应的塑料品种以及其优缺点。

对所用的设备和模具只概略地提出对它们的主要要求而不作详细的叙述，因还有与本门课程配合设立的两门独立课程。

## 第二章 塑料成型的理论基础

### 2.1 概 述

塑料成型是一门工程技术，它所涉及的内容是将塑料转变为有用并能保持原有性能的制品。

在所有的成型过程中，首先要求对塑料在这一过程中所能表现的各种物理和化学行为有足够的认识，因为只有在这种基础上才能求得合理的原料配方，定出合理的工艺和发展工艺，并进而对所用的工艺设备提出合理的要求。

本章将简要地叙述塑料在成型过程中所表现的一些共同的基本物理和化学行为——聚合物的流变、加热和冷却、结晶、定向（包括纤维性填料）和降解以及热固性塑料的交联作用。至于其它，则均将分散在以后各章内讨论。

### 2.2 聚合物的流动和流变行为

#### 2.2.1 剪切粘度和非牛顿流动

由于聚合物的大分子结构和运动特点，它在物理聚集态上常可归为结晶态、玻璃态、高弹态和粘流态。但在正常应用中只限于玻璃态或结晶态，而在成型过程中，除极少数几种工艺外，均要求它处于粘流态，因为在这种状态下的聚合物不仅易于流动，而且易于变形，这给它的输送和造形都带来很大的方便。为使塑料在成型过程中易于流动和变形，并不限定用粘流态的聚合物（聚合物熔体），采用聚合物的分散体（包括溶液）也是可以的，熔体和分散体都属于液体的范畴。

液体的流动和变形都是在受有应力的情况下得到实现的。重要的应力有剪切、拉伸和压缩应力三种。三种应力中，剪切应力对塑料的成型最为重要，因为成型时聚合物熔体或分散体在设备或模具中流动的压力降、所需功率以及制品的质量等等都受它的制约。拉伸应力在塑料成型中也较重要，经常是与剪切应力共同出现的，例如吹塑中型坯的引长、吹塑薄膜时泡管的膨胀、塑料熔体在锥形流道内的流动以及单丝的生产等等。压缩应力较不重要，一般均忽略不计，但这种应力对聚合物的其它性能却有一定的影响，例如熔体的粘度，所以在某些情况下应给予考虑。

如所周知的，液体在平直导管内受剪切应力而发生流动的形式有层流和湍流两种。层流时，液体主体的流动是按许多彼此平行的流层进行的，同一流层之间的各点速度彼此相同，但各层之间的速度却不一定相等，而且各层之间也无可见的骚扰。如果将流动速度增大而使其超过一定的临界值，则流动即转为湍流，湍流时，液体点速度的大小和方向都随时间而变化，此时液体内部会出现骚扰。层流和湍流的区分系以雷诺准数(Re)

\* 此处及以后所指的聚合物，如无说明，均指线型结构的。

为准，它是由下式定义的：

$$Re = D\bar{v}\rho/\eta \quad (2-1)$$

式中D为导管的直径； $\bar{v}$ 为液体的平均速度； $\rho$ 为液体的密度； $\eta$ 为液体的剪切粘度。对通常液体来说，凡 $Re < 2100 \sim 4000$ 时均为层流，过此则为湍流。在成型过程中，聚合物熔体流动时的雷诺准数常小于10，而聚合物分散体的则常不止此数，但也不会大于2100，所以它们的流动按照上述的说法应该都是层流，事实上亦正如此。但必须指出，在少数情况下容有例外，因为限定这些液体层流的条件不仅有雷诺准数，而且还有弹性雷诺准数(Re)。这将在2.2.6节讨论。

描述液体层流的最简单规律是牛顿流动定律。该定律称：当有剪切应力 $\tau$ （一般用达因-秒/厘米<sup>2</sup>表示），于定温下，加于两个相距为dr的液体平行层面以相对速度dv移动时（见图2-1），则剪切应力 $\tau$ 与剪切速率 $dv/dr$ （亦称应变速率，流变速率或速度梯度，其单位为秒<sup>-1</sup>， $dv/dr$ 也可表为 $\dot{\gamma}$ ）之间即呈下列直线性的关系：

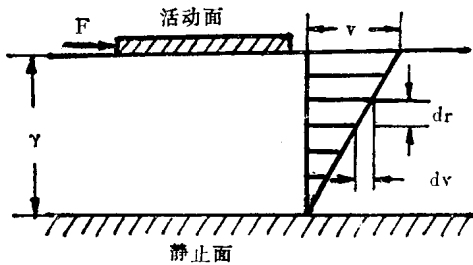


图 2-1 剪切应力与剪切速率关系图

$$F = \text{剪切力} \quad F/A = \tau = \text{剪切应力}$$

$$A = \text{剪切面} \quad \tau = \eta \frac{dv}{dr}$$

$$\tau = \eta(dv/dr) = \eta(v/r) = \eta\dot{\gamma} \quad (2-2)$$

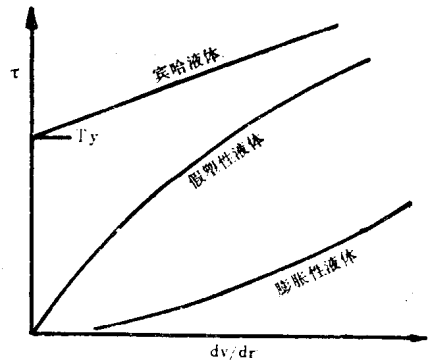


图 2-2 牛顿液体流动曲线图

式中 $\eta$ 为比例常数，通称为牛顿粘度（单位为泊，泊 =  $\frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2}$ ），它是物料的一种基本特性，依赖于物料分子结构和温度，而不依赖于剪切应力和剪切速率。以 $\tau$ 对 $dv/dr$ 所作的图称流动曲线图。凡液体层流时符合式(2-2)所示关系的通称牛顿液体，其流动曲线都是直线图（见图2-2）。

在客观事物中，真正属于牛顿液体的只是低分子化合物的液体或溶液。聚合物熔体，除聚碳酸酯和偏二氯乙烯-氯乙烯共聚物等少数几种与牛顿液体相近外，绝大多数都只能在剪切应力很小或很大时表现为牛顿液体。在成型过程中，通常对它们所施的剪切应力却远远不是很小或很大，所以它们表现的流动行为与牛顿液体不合。聚合物分散体在成型过程中的流动行为同样也不是牛顿流动。

凡液体受力流动时不服从式(2-2)规律的，均称为非牛顿液体。但是习惯上仍保持用“粘度”（严格地说应该是非牛顿粘度或表观粘度，通以 $\eta_a$ 表示）一词借以表征该类液体的特征。这里所谓的“粘度”同样是测定该类液体流动时所施加的剪切应力和当

时所发生的剪切速率的比值，与牛顿粘度一样，都是剪切粘度。不过非牛顿粘度与牛顿粘度不同，它在定温下是随所加剪切应力的情况而变的。由实践证明，变的情况是多种多样的，如果不考虑聚合物熔体的弹性（这将在以后讨论），则可将其归为两个系统。

1. 粘性系统 这一系统在受力流动时的特性是其剪切速率只依赖于所施剪应力的 大小，但按其所表现的剪切应力-剪切速率的关系，又可分为宾哈液体、假塑性液体和膨胀性液体三种。

(1) 宾哈液体 这种液体与牛顿液体相同的是它在剪切应力-剪切速率关系上也表现为直线，不同的是它的流动只有当剪切应力高至一定程度后才开始（图2-3）。需要使液体产生流动的最小应力 $\tau_y$ ，称为屈服应力。这种液体的流动方程可表为：

$$\tau - \tau_y = \eta_p \frac{dv}{dr} = \eta_p \dot{\gamma} \quad (2-3)$$

式中 $\eta_p$ 称为刚度系数，等于流动曲线的斜率。宾哈液体所以有这种行为，原因是液体在静止时内部存有凝胶性结构。这种结构当外加应力超过 $\tau_y$ 时即完全崩溃。在实际中，几乎所有聚合物在其良性溶剂中的浓溶液和凝胶性糊塑料的流动行为，都与这种液体很接近。

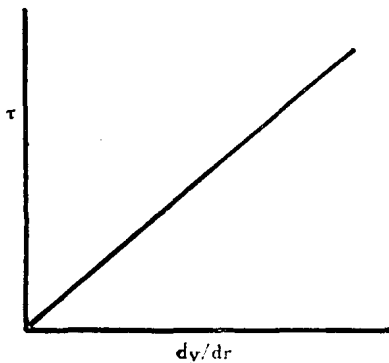


图 2-3 粘性液体系统的流动曲线

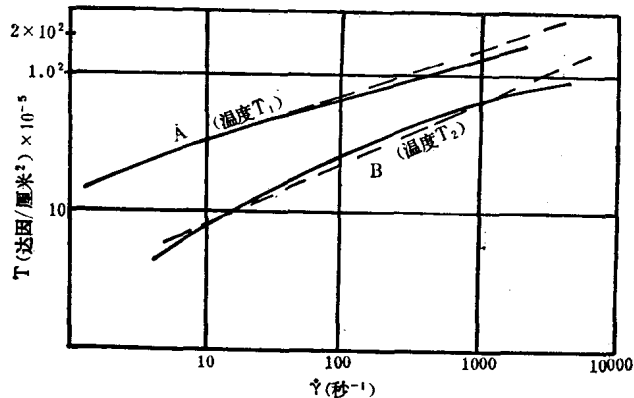


图 2-4 聚合物熔体流动曲线典型图

(2) 假塑性液体 这种液体是非牛顿液体中最为普通的一种，它所表现的流动曲线是非直线的（图2-3），但并不存在屈服应力。液体的表观粘度是随剪应力的增加而下降的。大多数聚合物的熔体，也就是塑料成型中处理最多的一类物料，以及所有聚合物在其良性溶剂中的溶液，其流动行为都倾向于这类假塑性液体。图 2-4 是在对数坐标上所绘的聚合物熔体流动曲线典型图。A 与 B 是分别在温度 $T_1$ 和 $T_2$ 下所绘的曲线， $T_1 < T_2$ 。A、B 两根曲线均接近于直线（图 2-4 中的破折线，是加画的直线，借以与 A 和 B 作比较）。从图可以看出：如果将剪切应力或剪切速率的范围缩小，则 A 和 B 将更为逼近直线。近似直线在剪应力轴上所跨越的范围约为一个数量级，而在剪切速率轴上则约为一个半到两个数量级。因此可以得知：在任何给定范围内，剪应力和剪切速率的关系可用指数定律来描述，即：

$$\tau = K \left( \frac{dv}{dr} \right)^n = K \dot{\gamma}^n \quad (2-4)$$

式中 $K$ 与 $n$ 均为常数 ( $n < 1$ )。K 是这种液体稠度的一种度量，液体粘稠性越大时，K 值

就越高； $n$ 是判定液体与牛顿液体的差别程度的， $n$ 值离整数1越远时，液体的非牛顿性就越强，因为用式(2-4)描述牛顿液体时，其中 $n$ 即等于1。

指数函数仅是描述假塑性液体流动行为的一种方式。描述这种行为且能使其适应剪应力范围多至一个数量级以上的公式，不管是从理论上的或经验上的，为数尚不少，但是这种较大范围的适应是通过比较复杂的数学关系而取得的。从工程角度来说，在解决具体问题时要求一个公式描述液体流动的范围(剪应力或应变速率的范围)并不十分宽广，所以采用简单经验性的指数函数已为常事。

表示假塑性液体流动行为的指数函数，还可以用另一种形式表示，即，

$$dv/dr = \dot{\gamma} = k\tau^m \quad (2-5)$$

式中 $k$ 与 $m$ 也是常数( $m > 1$ )。 $k$ 常称为流动度或流动常数(注意， $k$ 与 $K$ 的意义是对立的)，顾名思义， $k$ 值越小时表明液体越粘稠，也就是越不容易流动。 $k$ 和式(2-4)中的 $K$ 的关系为：

$$(1/k)^n = K \quad (2-6)$$

$m$ 所指的意义和 $n$ 一样，但须指出： $m$ 并不等于 $n$ ，而是等于 $1/n$ 。

$k$ 和 $K$ 都是温度的函数。从式(2-6)可以看出：如果因为温度的变化而引起 $K$ 或 $k$ 的变化，则 $k$ 的变动幅度恒大于 $K$ 。所以文献上常用 $k$ 而少用 $K$ 。

按前述表观粘度的定义知：

$$\text{表观粘度} = \eta_a = \tau/\dot{\gamma} \quad (2-7)$$

结合式(2-4)，当知服从指数定律的液体，其 $\eta_a$ 应为：

$$\eta_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2-8)$$

结合式(2-5)时则为：

$$\eta_a = K^{-\frac{1}{m}} \dot{\gamma}^{\frac{1-m}{m}} \quad (2-9)$$

假塑性液体的粘度随剪切应力(或剪切速率)的增加而下降的原因是与液体分子的物理结构有关的。对聚合物溶液来说，当它承受应力时，原来由溶剂化作用而被封闭在粒子或大分子盘绕空穴内的小分子就会被挤出，这样，粒子或盘绕大分子的有效直径即随应力的增加而相应地缩小，从而使液体粘度下降，因为粘度大小与粒子或大分子的平均大小成比例，但不一定是线性关系。对聚合物熔体来说，造成粘度下降的原因在于其中大分子彼此之间的缠结。当缠结的大分子承受应力时，其缠结点就会被解开，同时还沿着流动的方向排列成线，因此就降低了粘度。缠结点被解开和大分子排列成线的程度是随应力的增加而加大的。显然，这种大分子缠结的学说，对聚合物溶液粘度依赖于所施的剪切应力，也是一种必要的说明。

用指数函数式(2-5)描述聚合物熔体流动行为时，式中的 $m$ 值一般在1.5至4的范围内变化，但是当剪切速率增高时，某些聚合物的 $m$ 值竟可达至5。图2-4中所示的流动曲线，其 $m$ 值约为3。平均分子量相同的同一聚合物，其分子量分布幅度大的流动性对所施应力的敏感性大。

几种热塑性塑料的表观粘度与剪切应力的关系见图2-5。

(3) 膨胀性液体 这种液体的流动曲线也是非直线的(图2-3)，而且也不存在屈



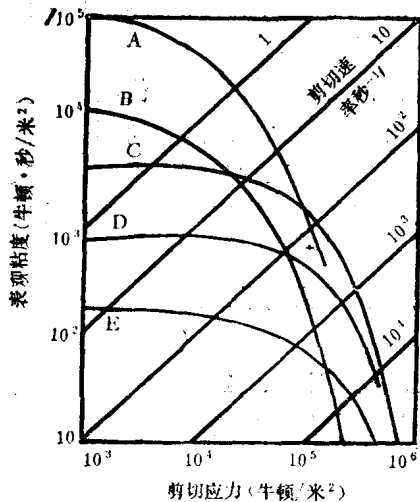


图 2-5 几种热塑性塑料的表观粘度与剪切应力关系

A—低密度聚乙烯 (170℃) B—聚丙烯 (230℃) C—聚甲基丙烯酸甲酯 (230℃)  
D—甲醛共聚物 (200℃) E—尼龙-66 (285℃)

服应力，但与假塑性液体不同的是它的表观粘度会随剪应力的增加而上升。膨胀性液体的流动行为也可以用式 (2-4) 或式 (2-5) 来描述，只是式 (2-4) 中的常数  $n$  大于 1；式 (2-5) 中的常数  $m$  则小于 1。属于这一类型的液体大多数是固体含量高的悬浮液。处于较高剪切速率下的聚氯乙烯糊塑料的流动行为就很接近这种液体。膨胀性液体所以有这样流动行为，多数的解释是：当悬浮液处于静态时，体系中由固体粒子构成的空隙最小，其中液体成分只能勉强充满这些空隙。当加于这一体系的剪切应力不大时，也就是剪切速率较小时，液体就可以在移动的固体粒子间充当润滑剂，因此表观粘度不很高。但当剪切速率逐渐增高时，固体粒子的紧密堆砌就次第被摧毁，整个体系就显得有些膨胀。此时液体不能再充满所有空隙，润滑作用因而受到限制，表观粘度就随着剪切速率的增长而增大。

2. 有时间依赖性的系统 属于这一系统的液体，其剪切速率不仅与所施剪切应力的大小有关，而且还依赖于应力施加的时间长短。当所施的剪切应力不变时，这种液体在恒温下的表观粘度会随着所施应力的持续时间而逐渐上升或下降。上升或下降到一定值后即行停止，这意味着系统已达平衡。这种变化是可逆的，因为液体中的粒子或分子并没有发生永久性的变化。表观粘度随剪切应力持续时间下降的液体称为摇溶性（或触变性）液体，与此相反的则称为震凝性液体，其中以前一种较为重要。属于摇溶性液体的有某些聚合物的溶液，如涂料与油墨等；属于震凝性液体的有某些浆状物，如石膏的水溶液等。关于这些液体流动行为的物理机理，可能与假塑性和膨胀性液体极为相似，所不同的只在流动开始后需要一段时间以备达到平衡。由于对这类液体流动的研究还不很够，一时尚不能得出任何定量性的结论。

将非牛顿液体按以上的分类，目的只在简化实际情况而便于认识和研究。事实上，在塑料成型过程中所遇到的同一聚合物的熔体或分散体，于不同条件下，常会分别具有以上几种类型的行为。

几种主要成型操作中，塑料所受剪切速率的范围见表 2-1。对给定的塑料来说，如果通过实验求得了在这种范围下的粘度数据（即流动曲线图），则对该种塑料在指定成型方法中的操作难易程度就能作出初步判断。譬如在注射模塑时，如果某一塑料（或聚合物）熔体在温度不大于其降解温度而于剪切速率为  $10^3 \text{ 秒}^{-1}$  的情况下测得其表观粘度为 500~5000 泊，则在注射中将不会发生困难。表观粘度过大时，则塑模的大小与设计就受有较大的限制，同时所压制品很易出现缺陷；过小时，溢模的现象比较严重，制品质量也有问题。

通常所见的熔融塑料的粘度范围为  $10^2 \sim 10^6$  泊；分散体的粘度范围约在 10 泊左右。