

高等纺织院校教材

# 纺丝流变学基础

纺织工业出版社

高等纺织院校教材

# 纺丝流变学基础

臧 昆 臧 己 编

纺织工业出版社

(京)新登字037号

### 内 容 提 要

本书系统而详细地讨论了在化纤生产工艺过程中涉及到的流变学问题。包括流变学的一般性研究规律以及高聚物的普遍流变性质;本构方程和流变学基本方程组;高聚物熔体和浓溶液在纺丝过程各个工艺阶段的流变学特征;流变性质的测定以及模型研究的方法。本书除作为高等院校高分子材料加工专业(化学纤维、化纤机械)研究生课程的教学用书外,也可作为有关专业本科生的选修课教材,还可供从事化纤生产工艺和设备工作的工程技术人员参考。

责任编辑:卢 迪

高等纺织院校教材

**纺丝流变学基础**

臧昆 陈己 编

\*

纺织工业出版社出版

(北京东直门南大街4号)

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

\*

850×1168毫米 1/32 印张:11<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 字数:291千字

1993年6月第一版第一次印刷

印数:1—2000 定价:5.30元

ISBN 7-5064-0860-0/TS·0810(理)

## 前 言

高聚物流变学是近年来发展迅速的一门新学科。它涉及到高分子材料、化工、食品、生物等领域。从事化纤生产和研究的科技人员，应该而且必须掌握流变学的有关基本理论和研究方法。为此，由纺织工业部化纤专业教育委员会组织，在北京服装学院研究生“纺丝流变学基础”讲义的基础上编写本教材。

“纺丝流变学基础”作为一门技术基础课程，既有很强的理论性，又有广泛的实用性。通过本课程的学习，要求学生了解高聚物流变学的基本规律和研究方法，学会应用这些规律和方法分析、解决纺丝过程中的某些典型问题。

从论述方法上，本书主要从流变学基本方程出发，采用流变学模型分析纺丝过程中各流变参数之间的关系以揭示纺丝过程的本质，并分析流变测定仪的测定原理；还从大量的实验资料出发，分析纺丝过程中的现象与纺丝流体流变性质、纺丝条件之间关系，为工艺条件的确定和设备设计提供依据。

在内容编排上，本书强调理论联系实际，注意系统性和论述的深入浅出，适当略去某些繁杂的数学推导，而把重点放在对结论的分析和应用方面。

为便于读者理解和掌握有关的方法，提高独立分析问题的能力，在各章后附有复习题，并安排适当数量的编制计算机程序的练习。

本书还介绍近年来在纺丝流变学领域中新发表的一些研究成果，在各章后列出有关的参考文献，为读者进一步学习和研究提供一定条件。

本书第一章第一节、第二、三、四、五、六、十章由臧昆编

写；第一章第二节、第七、八、九章由臧己编写，并由臧昆统稿。本书由中国纺织大学梁伯润、关桂荷主审，参加审稿的还有中国纺织大学陈雪英、大连轻工业学院童隆坝、华南理工大学赵耀明、北京服装学院董纪震及张大省、苏州丝绸工学院王希岳及程加祺等。他们对本教材提出了许多改进的意见和建议，并给予宝贵的帮助。在此编者深表谢意。

由于编者水平所限，本书难免存在不足和尚需改进之处，衷心希望读者批评指正。

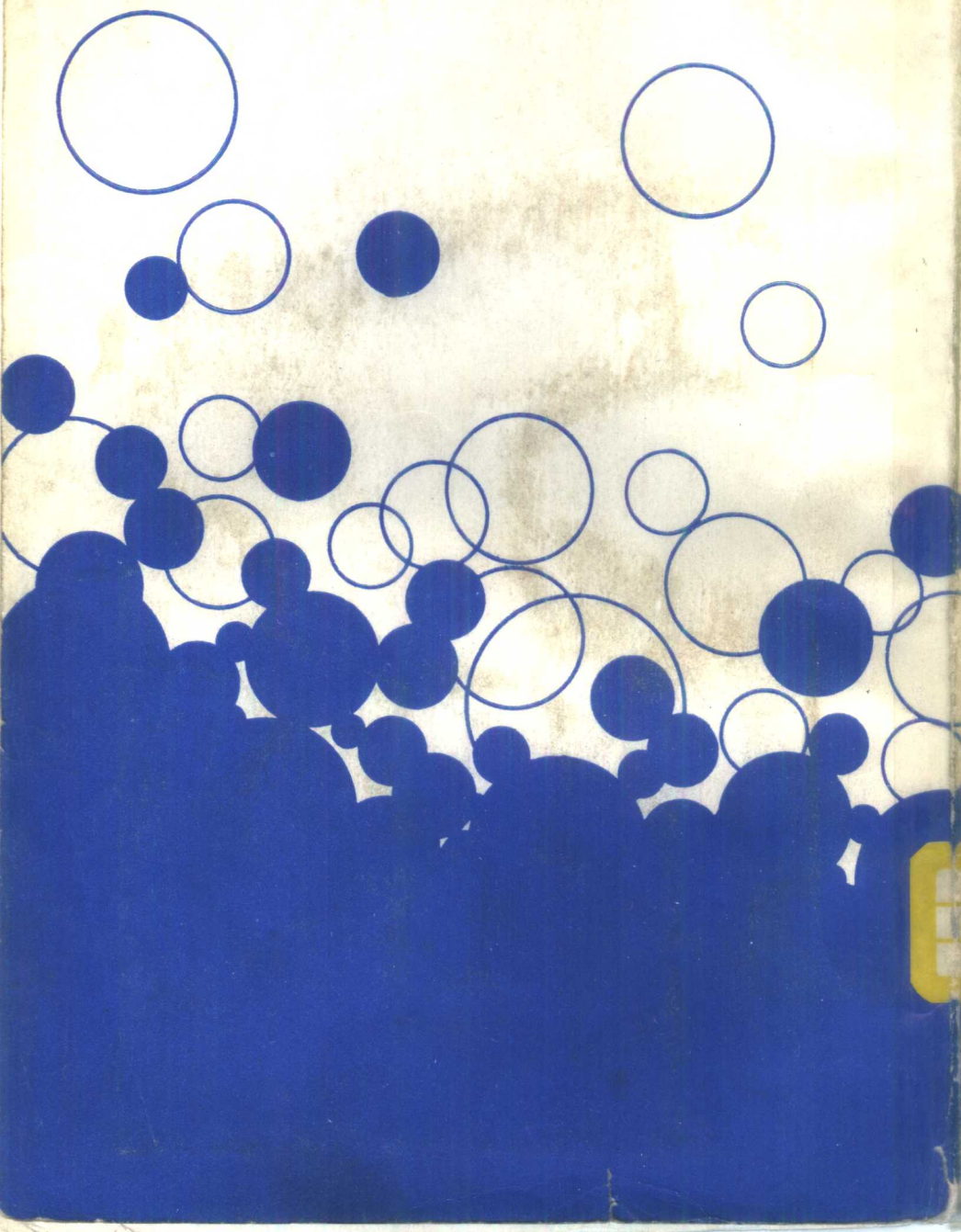
编 者

1992年1月

37558

封面设计:理想

ISBN 7-5064-0860-0/TS · 0810(课) 定价: 5.30元



# 目 录

|                   |        |
|-------------------|--------|
| 第一章 高聚物流变学概述      | ( 1 )  |
| 第一节 流变学概述         | ( 1 )  |
| 第二节 高聚物流体的流变特性    | ( 4 )  |
| 一、高聚物流体的粘性        | ( 5 )  |
| 二、高聚物流体的弹性        | ( 19 ) |
| 三、高聚物流体的动态粘度      | ( 21 ) |
| 复习题               | ( 25 ) |
| 第二章 张量分析基础        | ( 27 ) |
| 第一节 矢量及其运算        | ( 27 ) |
| 第二节 求和约定和指标记号     | ( 30 ) |
| 一、求和约定和克罗宁克符号     | ( 30 ) |
| 二、置换符号            | ( 31 ) |
| 三、哈密顿算符           | ( 32 ) |
| 第三节 坐标的旋转变换       | ( 34 ) |
| 一、平面坐标系的旋转变换      | ( 34 ) |
| 二、空间坐标系的旋转变换      | ( 35 ) |
| 第四节 标量、矢量和张量的解析定义 | ( 36 ) |
| 第五节 张量的基本运算和性质    | ( 37 ) |
| 第六节 二阶张量          | ( 39 ) |
| 一、二阶对称张量          | ( 41 ) |
| 二、二阶反对称张量         | ( 45 ) |
| 三、加莱-哈密顿定理        | ( 46 ) |
| 第七节 曲线坐标系中的张量介绍   | ( 46 ) |
| 一、基矢量和度量张量        | ( 46 ) |

|                   |         |
|-------------------|---------|
| 二、矢量的协变分量和逆变分量    | ( 53 )  |
| 三、坐标变换            | ( 55 )  |
| 四、张量的运算和性质        | ( 58 )  |
| 五、物理分量            | ( 59 )  |
| 六、张量的导数           | ( 61 )  |
| 复习题               | ( 65 )  |
| <b>第三章 流变状态方程</b> | ( 69 )  |
| 第一节 流变运动学量        | ( 69 )  |
| 一、简单运动的运动学量       | ( 69 )  |
| 二、三维空间的流变运动学量     | ( 70 )  |
| 第二节 连续介质中的运动学     | ( 78 )  |
| 一、运动的描述           | ( 79 )  |
| 二、空间坐标中的运动学       | ( 83 )  |
| 三、随流坐标中的运动学       | ( 90 )  |
| 第三节 流变动力力学量       | ( 97 )  |
| 一、微元体侧面上的应力       | ( 97 )  |
| 二、柯西应力公式          | ( 98 )  |
| 三、应力张量的分解         | ( 100 ) |
| 四、主应力及其主要性质       | ( 101 ) |
| 第四节 两类简单流动及其材料函数  | ( 101 ) |
| 一、简单剪切流动          | ( 102 ) |
| 二、简单拉伸流动          | ( 104 ) |
| 第五节 纯弹性和纯粘性的材料模型  | ( 105 ) |
| 一、胡克弹性体           | ( 105 ) |
| 二、牛顿流体            | ( 108 ) |
| 三、非线性粘性流体模型       | ( 113 ) |
| 第六节 粘弹性流体的流变状态方程  | ( 115 ) |
| 一、速率型流变状态方程       | ( 115 ) |
| 二、积分型流变状态方程       | ( 128 ) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 三、多元件模型.....            | (131) |
| 第七节 材料模型的选择.....        | (138) |
| 复习题.....                | (139) |
| 第四章 流变学基本方程组.....       | (143) |
| 第一节 连续方程.....           | (143) |
| 一、质量守恒定律——连续方程.....     | (143) |
| 二、体积分的实质导数.....         | (146) |
| 第二节 运动方程.....           | (147) |
| 一、动量定理——运动方程.....       | (147) |
| 二、动量矩定理——剪应力互等定律.....   | (149) |
| 第三节 能量方程.....           | (153) |
| 一、内能和热传导方程.....         | (153) |
| 二、能量守恒定律——能量方程.....     | (154) |
| 第四节 流变学基本方程组和定解条件.....  | (158) |
| 一、基本方程组.....            | (158) |
| 二、定解条件.....             | (161) |
| 第五节 应用举例.....           | (166) |
| 一、狭缝中的压力流动.....         | (166) |
| 二、爬杆效应的分析.....          | (170) |
| 复习题.....                | (172) |
| 第五章 纺丝物料在螺杆挤出机中的运动..... | (176) |
| 第一节 螺杆挤出机作用原理.....      | (176) |
| 第二节 熔融过程分析.....         | (179) |
| 一、熔融机理和流变学模型的建立.....    | (179) |
| 二、牛顿模型.....             | (183) |
| 三、非牛顿的幂律模型.....         | (187) |
| 第三节 计量段内熔体输送流动.....     | (192) |
| 一、流动模型.....             | (192) |
| 二、等温流动.....             | (193) |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 三、绝热流动.....                     | (195)        |
| 第四节 销钉元件混合过程分析.....             | (199)        |
| 一、销钉元件混合模型的建立.....              | (200)        |
| 二、结果和分析.....                    | (204)        |
| 复习题.....                        | (205)        |
| <b>第六章 纺丝过程分析.....</b>          | <b>(207)</b> |
| 第一节 概述.....                     | (207)        |
| 第二节 等温纺丝过程.....                 | (210)        |
| 第三节 非等温纺丝过程.....                | (216)        |
| 复习题.....                        | (224)        |
| <b>第七章 纺丝过程中高聚物流体的流动特性.....</b> | <b>(227)</b> |
| 第一节 高聚物流体通过毛细管的流动.....          | (227)        |
| 一、入口流动区.....                    | (228)        |
| 二、全展区流动.....                    | (232)        |
| 三、出口区流动.....                    | (234)        |
| 第二节 单轴拉伸流动.....                 | (250)        |
| 一、单轴拉伸流动形变的表征.....              | (250)        |
| 二、拉伸粘度的理论预示.....                | (252)        |
| 三、到达稳态拉伸之前的拉伸行为.....            | (254)        |
| 四、稳态流动时的拉伸粘度.....               | (256)        |
| 五、拉伸粘度的实验测定结果.....              | (256)        |
| 第三节 熔体流动的不稳定性.....              | (258)        |
| 一、挤出时的熔体破碎(MF).....             | (259)        |
| 二、拉伸共振.....                     | (261)        |
| 第四节 成纤高聚物流体的流变行为与纺丝条件.....      | (265)        |
| 一、熔体的流变性质.....                  | (265)        |
| 二、浓溶液的可纺性.....                  | (268)        |
| 三、喷丝孔的几何形状与流变性的关系.....          | (269)        |
| 复习题.....                        | (273)        |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第八章 两相体系的流变行为分析</b> .....    | (275) |
| 第一节 两相体系的类型.....                | (275) |
| 第二节 两相高聚物共混物的流变行为.....          | (276) |
| 一、两相高聚物共混物的分散状态.....            | (276) |
| 二、两相高聚物共混物的粘度——浓度关系.....        | (278) |
| 三、两相共混物的弹性.....                 | (280) |
| 四、两相共混物粘弹行为的解释.....             | (281) |
| 五、两相共混物纺丝时的流变行为——拉伸粘度.....      | (282) |
| 第三节 充填高聚物的流变学.....              | (284) |
| 一、充填高聚物熔体的粘度及弹性.....            | (285) |
| 二、充填高聚物的拉伸粘度.....               | (287) |
| 第四节 分层的两相流动.....                | (288) |
| 一、在圆管中芯鞘型共挤的分析.....             | (288) |
| 二、界面形状的实验结果.....                | (291) |
| 三、界面形状的流变学解释.....               | (292) |
| 复习题.....                        | (296) |
| <b>第九章 高分子流体基本流变性质的测定</b> ..... | (298) |
| 第一节 流变测量的分类.....                | (298) |
| 一、分类.....                       | (298) |
| 二、稳态剪切流动中的材料函数.....             | (299) |
| 第二节 毛细管粘度计测定粘度的原理和方法.....       | (303) |
| 一、剪切应力和切变速率的表征.....             | (304) |
| 二、校正.....                       | (306) |
| 三、对毛细管粘度计的评价.....               | (313) |
| 第三节 同轴旋转圆筒粘度计.....              | (317) |
| 第四节 锥板式流变仪.....                 | (321) |
| 一、粘度的测定.....                    | (322) |
| 二、法向应力的测定.....                  | (325) |
| 三、锥板流变性测定仪的评价.....              | (326) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 第五节 狭缝式流变仪.....           | (329) |
| 第六节 工业质量控制仪器.....         | (331) |
| 一、熔体流动指数仪(MI) .....       | (331) |
| 二、落球粘度计.....              | (332) |
| 三、量杯法.....                | (333) |
| 第七节 扭矩式流变仪.....           | (334) |
| 第八节 动态测试方法.....           | (335) |
| 第九节 在线测量技术.....           | (337) |
| 第十节 单轴拉伸粘度的测定.....        | (338) |
| 一、恒定拉伸速率的方法.....          | (339) |
| 二、等温纺丝法.....              | (340) |
| 复习题.....                  | (340) |
| 第十章 流变过程的量纲分析和相似原理基础..... | (342) |
| 第一节 引言.....               | (342) |
| 第二节 量纲分析方法.....           | (343) |
| 一、单位制和量纲 .....            | (343) |
| 二、量纲齐次性原理.....            | (345) |
| 三、应用举例.....               | (346) |
| 第三节 相似理论.....             | (349) |
| 复习题.....                  | (357) |

# 第一章 高聚物流变学概述

## 第一节 流变学概述

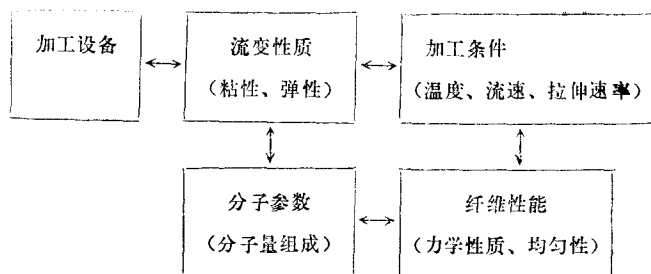
流变学是一门研究材料变形和流动的科学。变形和流动，都是物体运动的形式，可以理解为物体质点相互运动的结果。不同材料在力作用下，其流变行为大不相同。有的产生弹性变形，有的产生塑性变形，还有些材料产生流动。上述不同的流变行为，是材料具有不同流变性质的反映。

流变学是一门研究材料性质的科学，它的产生与发展与人类的生产实践活动密切相关。古埃及人用水钟测定器内水层高度与时间关系及温度对流体粘度的影响，根据“墨经”记载，两千多年前我们的祖先就有了材料变形的知识。以后，希腊人和罗马人也在这方面做了若干工作。16世纪后，对材料性质的研究迅速发展，主要是Galileo提出液体具有内聚粘性概念；Hooke建立弹性体应力和应变关系；Newton解释流体流动阻力和应变速率之间的正比关系等。19世纪，Poiseuille提出流体流经管道时，流量与管径、粘度及压差之间的定量关系；Maxwell、Kelvin和Boltzmann等人研究了应力应变对时间的依赖关系。进入20世纪，随着合成塑料、合成橡胶和合成纤维工业的迅速发展，对新材料的研究提出了新课题。为了适应这样的需要，Reiner和Bingham于1928年在美国创立了一门独立的学科，正式命名为流变学(Rheology)，并成立流变学会，举行了第一次会议，1929年出版第一期流变学杂志。此后，世界上许多国家也先后成立流变学会，专门研究各种材料的变形和流动问题。1945年组织了国际性的流变学联合委员会，并于1948年在荷兰召开首届国际流变学

会议，至今已有10届。

我国从50年代起，陆续开始流变学的研究工作。近年来流变学日益受到重视，1985年在长沙市召开全国第一届流变学学术会议，成立了流变学专业委员会，促进了我国流变学的研究。

流变学是一门技术基础课程，它既有很强的理论性，又有广泛的实用性。许多现代工业，特别是塑料、橡胶、化纤、皮革、油漆涂料和食品工业，其加工和应用过程都与高聚物的流动和变形密切相关。因此，在分子领域的流变学研究已经形成一个重要的分支，称为“高聚物流变学”。深入研究高聚物流变学，并在生产实践中广泛应用，具有重大的意义。在化纤生产领域，为了开发新品种，改善产品性能，选择适宜的加工设备和工艺参数，需要加强对高聚物熔体和浓溶液在纺丝加工过程中流变性能的研究，探讨高聚物流变性和加工条件及产品质量的关系，用框图可表示为



成纤高聚物在整个纺丝过程中的流动和变形，除了包括纺丝流体(熔体和浓溶液)在挤出机、喷丝孔和纺丝线上的流动和变形外，也应包括固化后纤维在拉伸和热定型过程中的高聚物粘弹性变形。本书主要涉及纺丝流体的流动和变形，从流变学观点研究高聚物性质、加工条件及纤维性质之间的关系。因此从内容上，本书分为四部分：第一部分介绍高聚物流体的流变特性——粘性和弹性。第二部分为流变学的基础理论，主要包括流变运动学

量, 动力学量, 流变状态方程和流变学基本方程组等。这些内容将为读者研究流变学打下必要的理论基础。在论述形式上, 除了给出直角坐标形式的描述外, 还将逐步引伸到张量形式, 从而为读者进一步的研究创造一定的条件。第三部分讨论了化纤生产各个主要阶段纺丝流体的流变行为, 包括在挤出机、喷丝孔、纺丝线上拉伸流动中的流变行为以及两相流的流变特征。第四部分将讨论纺丝流体流变性能的测量, 同时考虑到流变学在化纤加工机械方面的应用, 还讨论了有关流变过程的量纲分析内容。

同近代物理的许多分支一样, 流变学的研究也可从两种既相区别又有联系的观点, 既连续介质观点和分子论观点出发。

按连续介质观点, 组成材料的物质毫无间隙地充满物体所占据的空间, 密度、位移、速度等物理量是位置的连续函数或分段连续函数, 从而可采用无穷小的分析方法。只要所考虑的物体尺度比微观特征长度大得多, 由此得到的结果就能与实际相符, 表明连续介质的观点和研究方法是合理的。

分子论观点从微观的分子结构模型出发, 运用适当的统计方法, 得出物质的宏观性质并说明材料流变性质的各种机理, 它力图揭示物质宏观流变性质与其分子微观结构之间的内在联系, 从本质上认识物质的属性, 近年来得到较快的发展, 成为流变学的重要研究方法之一。

按物体的微观结构模型, 高聚物流变学分子理论可分为三类:

1. 以单个分子的力学模型为基础的分子运动论, 也称为相空间理论<sup>[2,3]</sup>;
2. 以高聚物分子网络模型为基础的分子网络理论<sup>[4,5]</sup>;
3. 介于上述两种模型之间的蠕动管和滑移环网络理论<sup>[6]</sup>。

对高聚物稀溶液分子运动论的研究由Kramers<sup>[7]</sup>开创于40年代, 以后Rouse, Zimm, Kirkwood, Giesekus, Lodge, Yamakawa和Fixman等都对理论的发展作出了贡献。1976年Curtiss, Bird和Hassager在总结前人工作的基础上提出了任

意珠簧分子模型的相空间理论<sup>[3]</sup>。当时这一理论只适用于高聚物稀溶液。后来,受Doi和Edwards提出的蠕动管和滑移环网络概念启发,1981年Curtiss和Bird把蠕动概念引入高聚物溶液的相空间理论,用各向异性的流体力学阻力来描绘高聚物分子间的相互作用,从而把相空间理论推广到浓溶液和熔体<sup>[8]</sup>。以后,Curtiss和Bird<sup>[9]</sup>又进一步把理论从单一分子量分布推广到考虑任意分子量分布情形。由于采用复杂的分子模型往往无法克服数学上的困难,所以近年来人们的努力集中在两个方面:对简单的分子模型作经验修正,得出实用的本构方程;用计算机模拟分子模型的布朗运动以加深对分子微观运动规律的认识及检验理论假设。

本书主要从连续介质观点出发,以宏观的方法来研究高聚物材料的流变行为,同时也从分子论的角度,对高聚物的流变行为作定性分析。

## 第二节 高聚物流体的流变特性

在自然界中最常见的材料,可以分别归入固体、液体和气体之中。固体具有一定的体积和形状,液体和气体没有固定的形状,可以流动,统称为流体。

理论力学的研究对象之一是刚体。在外力作用下,刚体没有形变,称为理想刚体,或欧几里德(Euclid)刚体。这是对实际材料的一种理想化模式,它使理论力学的研究大为简化。

在流体力学中,没有任何流动阻力的流体,称为理想流体,或帕斯卡(Pascal)流体,这也是对实际材料的一种理想化模式。

自然界中的真实物体,实际上都处于上述两种理想体之间的过渡体。例如弹性力学所研究的胡克弹性体,考虑的是在外力作用下固体的形变行为;流体力学中的牛顿流体,则考虑到流体流动时的粘度,即流动阻力的影响。欧几里德刚体、胡克弹性体、牛顿流体和帕斯卡流体统称为经典物体。

然而，上述的经典物体是不足以包括工程实际所需要的全部模式的。例如钢在常温下当应力小于比例极限时可看作胡克体，但在高温下会发生蠕变，不能再抽象成胡克体模式进行研究。除温度影响外，也需注意时间的因素。钢丝明显是固体，从力学行为看来，是典型的弹性体。水显然是液体，具有典型的粘性。但若改变过程的条件，例如在很长的时间范围内观察挂上重物的钢丝，或者水受到频率很高的力作用时，可以发现，钢丝也能产生流动，水也可具有弹性。所以，典型的弹性、粘性物质也随作用过程的不同而分别显示粘性和弹性。一般材料的性质，更与过程有关。特别是高聚物，既非典型固体，又非典型液体，其力学行为为具有粘性和弹性的组合，粘弹性的程度与时间因素有关，可用一个无量纲的特征参数德波拉(Deborah)数 $De$ 表示

$$De = \frac{\lambda}{t} \quad (1-1)$$

式中： $\lambda$ 为材料的松弛时间（参阅第三章）； $t$ 为观察时间。当 $De$ 数大时，材料主要显示固体性质；当 $De$ 数小时，则显示液体性质。水受到频率很高的作用力时，相当于在极短的时间尺度内观察水的力学行为， $De$ 数很大，水就显示固体的弹性。当温度升高时，松弛时间 $\lambda$ 变小，或者当作用时间 $t$ 增加，都使 $De$ 减少，材料显示出液体的性质。

高聚物流体是粘弹性流体，其粘性有别于牛顿流体，并有明显的弹性表现。

### 一、高聚物流体的粘性

1. 粘度有切变速率依赖性 图1-1表示了几种材料的粘度与切变速率的关系。曲线1表示粘度保持恒定数值，不随切变速率而变化，这是牛顿流体的特征。曲线2表示粘度随切变速率的增加而减小，称为切力变稀体，或称为假塑性体(Pseudoplastic)。曲线3表示粘度随切变速率的增加而增加，称为切力增稠体，或称为胀流体(Dilatant)。粘度随切变速率而变化的流体都属于非