



高等学校教材

原油流变学

李传宪 编著

中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

原油流变学

YUANYOU LIUBIANXUE

李传宪 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

原油流变学/李传宪编著. —东营:中国石油大学出版社, 2006. 12

ISBN 978-7-5636-2157-6

I. 原... II. 李... III. 石油输送—流变学—高等学校—教材 IV. TE83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 153015 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 原油流变学

作 者: 李传宪

责任编辑: 高 颖(电话 0546—8393394)

封面设计: 人和视觉

出版者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791, 8392563)

开 本: 180×235 印张: 16.75 字数: 336 千字

版 次: 2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 24.00 元



内 容 提 要

本书是油气储运工程专业的专业课教材之一,主要内容包括:流变学基本原理、非牛顿流体基本流变特性、流变性测量基础、原油流变性、原油流变性的评价及测定、原油流变学在工业中的应用。考虑到研究生深入学习、研究原油流变学的需要,书中有些内容重点是为他们而编写的。

本书以1994年版《原油流变性及测量》教材为基础,进行修订、改编,力求反映近年来国内外原油流变学的研究现状和研究成果,并重新命名为《原油流变学》,以使本书的名称和内容更符合原油流变学研究的进展现状。本书可供从事油气储运工艺研究、设计和生产管理的工程技术人员参考。

原油流变学

YUANYOULUBIANXUE

前 言

Preface

流变学是研究物质变形与流动的科学,是一门多学科交叉的新兴边缘学科,目前在许多工程领域有着广泛的应用。原油流变学是当代流变学的一个分支,是研究原油流动性质的科学,它与原油的开采、集输、储运过程密切相关。原油及其与油层中的水所形成的乳状液的流变性对采油生产和集输工艺有重要影响。我国是盛产含蜡原油的国家,这类原油的凝点和出现非牛顿流体特性的温度比较高,低温下的粘度较大,其流变性直接影响着输油管道的建设、管道输油的生产效益和安全。目前,稠油的开采量在全球也日益增加,这种原油流变性的最大特点就是其粘度非常大,正是这种较差的流动性给稠油的开采与输送带来很大的问题。因此,学习、研究并发展原油流变学对石油工业的发展有着重要的意义。

原油流变性及其测量作为油气储运工程专业大学生的一门专业课程已经有 20 多年的历史,同名教材于 1994 年由石油大学出版社公开出版发行,至今已使用多年。近年来,随着国内外石油工业的快速发展,人们对原油流变性的研究日益深入,研究内容越来越广泛,研究技术越来越先进,同时,对原油流变学的理论认识也日益深化,原油流变学在工业、工程中的应用亦越来越深入。目前,原油流变学已逐渐发展成为一门内容比较充实的学科体系,以原油流变学这一名称替代原油流变性及其测量,也正体现了原油流变学的这种发展。油气储运工程专业最新的教学大纲已将原油流变性及其测量这一课程名称改为原油流变学,新教材对罗哲鸣主编的原教材《原油流变性及其测量》作进一步修订并充实后,从内容到框架结构更能体现原油流变学这一学科体系,因此,新的教材被命名为《原油流变学》。

本书是在结合编者及编者单位——中国石油大学(华东)油气储运教研室多年从事原油流变学研究的工作实践、研究成果和教学经验,以及广泛吸收国内外最新研究成果的基础上编写而成的。本书一方面力求突出原油流变学学科体系的基本框架;另一方面力求展示原油流变学最新的研究成果;另外,考虑到学生在学习、掌握流变学时的困难,在内容安排上力求结合油气储运工程专业特点,深入浅出。本书主要

前 言

Preface

内容包括流变学基本原理、非牛顿流体基本流变特性、流变性测量基础、原油流变性、原油流变性的评价及测定、原油流变学在工业中的应用。

本书在编写过程中得到了罗哲鸣老师的大力支持,研究生朱静、郭刚、林名桢、林爱涛、李志岩也协助做了许多文字编排、图件绘制等工作,在此表示感谢!

由于原油本身组成、结构和流变性的异常复杂性,目前对原油流变学中不少问题的认识还是模糊的,存在学术观点的分歧也是难免的。书中某些观点可能是作者比较欣赏的,难免偏颇。再者,由于作者的水平有限,书中肯定存在不少错误和疏漏,恳请读者批评指正。

作 者
2006.11

第一章 绪 论	1
第一节 流体的粘度	1
一、流体的粘性	1
二、牛顿粘性定律	1
三、粘度的定义	2
四、粘度与温度、压力的关系	3
第二节 流变学概念	4
一、流变学的定义及研究对象	4
二、流变学的研究和发展	4
三、流变学是一门交叉边缘学科	5
第三节 力、形变和流动	5
一、连续介质的概念	6
二、力与变形	6
三、应变速率、剪切速率与速度梯度	7
四、流变方程	8
第四节 物质的流变学分类	9
第二章 非牛顿流体的基本流变特性	11
第一节 流体的流变性分类	11
一、分散体系的概念	11
二、流体的流变性分类	11
第二节 与时间无关的粘性流体	12
一、牛顿流体	12
二、假塑性流体	13
三、胀流型流体(或称膨肿性流体)	17
四、宾汉姆(Bingham)流体	18
五、屈服-假塑性流体	19
六、卡森流体	20
第三节 与时间有关的粘性流体	21
一、概述	21
二、触变性流体的特征	22
三、触变性机理	24

四、触变性测量及触变模式	26
第四节 粘弹性流体	33
一、粘弹性流体的一些流变现象	33
二、粘弹性流体的流变特征	35
三、线性粘弹性体(模型)	38
第五节 悬浮液微观流变学	47
一、概述	47
二、作用在分散相颗粒上的力	47
三、悬浮液微观结构	49
四、悬浮液的粘度	50
五、胶体作用对粘度的贡献	56
六、悬浮液的粘弹性	58
七、可变形颗粒悬浮液	59
第三章 流变性测量基础	61
第一节 概述	61
一、流变测量的分类	61
二、流变测量的任务与内容	62
第二节 细管法测定流变性	62
一、细管法测粘的基本原理	62
二、细管法测定非牛顿流体流变性原理	65
三、测量误差分析	73
四、重力毛细管粘度计测定粘度	78
第三节 旋转法测定流变性	79
一、同轴圆筒式	80
二、锥-板式	95
三、平行圆板式	96
四、单圆板式	97
五、旋转流变仪结构特点	99
第四节 落球粘度计	101
一、测定原理	101
二、滚动落球粘度计	102

第五节 线性粘弹性测量	103
一、静态实验	103
二、动态实验	107
第四章 原油流变性	117
第一节 原油的基本组成	117
一、概述	117
二、蜡晶	118
三、原油中的胶质和沥青质	120
第二节 原油的分类	122
一、化学分类法	122
二、商品分类法	123
第三节 含蜡原油的流变类型	125
一、原油的胶体特性	125
二、含蜡原油流变类型随温度的变化特点	126
三、原油的粘温曲线	127
第四节 含蜡原油的粘弹性	129
一、胶凝含蜡原油的小振幅振荡剪切实验特性	130
二、胶凝含蜡原油的蠕变/回复特性	133
三、原油粘弹性机理	135
第五节 含蜡原油的触变性	135
一、非牛顿含蜡原油的基本结构特性	136
二、含蜡原油的触变性特征	137
三、含蜡原油触变性的数学描述	140
第六节 含蜡原油胶凝结构的屈服特性	144
一、胶凝原油的屈服过程特性	145
二、胶凝原油的屈服与屈服应变	147
三、蠕变模式	148
四、关于胶凝原油屈服值的讨论	149
第七节 非牛顿含蜡原油的历史效应	155
一、热历史的影响	155
二、冷却速度的影响	159

三、剪切历史的影响	161
第八节 稠油及原油乳状液的流变性	164
一、稠油的流变性	164
二、原油乳状液的流变性	170
第五章 原油流变性的评价及测定	174
第一节 实验油样的预处理	174
一、取样	174
二、预处理	175
第二节 原油凝点及其测定	175
第三节 原油粘度的测定	178
一、原油动力粘度的测量	178
二、非牛顿原油表观粘度的测量与实验数据处理	179
第四节 原油屈服值的测定	183
一、间接法	184
二、直接法	185
第六章 原油流变学在工业中的应用	192
第一节 非牛顿流体的管流摩阻计算	192
一、流态划分	192
二、与时间无关的非牛顿流体层流压降计算	194
三、与时间无关的非牛顿流体紊流压降计算	197
第二节 含蜡原油的热处理输送	199
一、含蜡原油的热处理原理	199
二、热处理效果的评价及稳定性	200
三、热处理输送工艺	202
第三节 含蜡原油添加降凝剂输送	203
一、加剂含蜡原油的改性效果及其工程应用意义	204
二、含蜡原油化学改性的原理	205
三、内部因素对降凝剂改性效果的影响	207
四、外部因素对降凝剂改性效果的影响	209
五、管输条件的模拟	214
六、含蜡原油加剂输送工艺	216

第四节 稠油的乳化降粘输送·····	217
一、概述·····	217
二、稠油乳化降粘的原理·····	218
三、乳状液的鉴别·····	218
四、乳状液的类型理论·····	220
五、乳状液的稳定性·····	222
六、乳化剂·····	225
七、O/W 型乳状液的流变性·····	228
八、稠油 O/W 型乳状液的破乳·····	231
九、乳化降粘工艺·····	232
附录 流变学基本英汉术语词汇·····	234
参考文献·····	253

第一章 绪 论

第一节 流体的粘度

一、流体的粘性

流体普遍存在于自然界中,流体的流动是流体在重力或外力作用下随时间的连续变形过程。人们都有这样的经验:河水在河里流动时,河中央水面处的流速最快,而越接近河岸,流速越慢;当物体在静止的液体中旋转时,周围的液体也会跟着旋转,一旦物体停止转动,旋转的液体也会慢慢静止下来;当流体在管道中流动时,管中心轴处的流速最快,越接近管壁,流速越慢,甚至在管壁处由于流体与固体壁面的粘附作用,流体的流速为零。这些都说明流体流动时其内部各部分的速度不相同,流层间存在着速度差,而且流体的运动在逐层传递。

流体流动时流层间存在着速度差和运动的传递正是由于流体具有粘性(这也是流体与固体最重要区别)所致。当相邻流层存在着速度差时,快速流层力图加快慢速流层,而慢速流层力图减慢快速流层,这种相互作用随层间速度差的增加而加剧。流体所具有的这种特性就是粘性。流层间的这种力图减小速度差的作用力称为内摩擦力或粘性力。

流体的粘性实质上是流体分子微观作用的宏观表现,可以从分子运动论来解释。

气体具有粘性是由于动量传递所致。气体分子间的距离大,当气体流动时,其分子除了向所受力的方向运动外,分子的无规则运动也比较激烈。当处于快层的分子(它们具有较大的动能)由于热运动而迁移到慢层时,就把较大的动量传给具有较小动量的慢层分子而将其加速;当慢层的分子迁移到快层时,则使快层分子动量减小而减速。

液体具有粘性是由于分子引力所致。液体分子间的距离比气体小得多,分子的热运动不如气体剧烈,几乎没有动量传递,但分子间的引力却远比气体大。当液体流动时,由于分子间具有引力,快层的分子力图拉着慢层的分子前进,而慢层的分子则尽量将快层的分子往后拽。

流体分子间的这些相互作用使得其运动得以逐层传递,并保持着层间的速度差,即呈现流体的粘性。

二、牛顿粘性定律

牛顿粘性定律给出了粘度与内摩擦力的定量关系。如图 1-1 所示,在两个平行

平板间充满液体,下板固定不动,施一恒定力于上板,使其做平行于下板的匀速运动,此时介于两平板间的液体也由静止变成运动状态。紧贴 upper 板的液体附着在上板上,与其等速(速度为 V)向前运动,最下层的液体贴着下板不动(速度为零),中间的液体越接近上板,速度越快,越接近下板,速度越慢,运动由上逐层向下传递,形成如图 1-1 所示的速度分布。

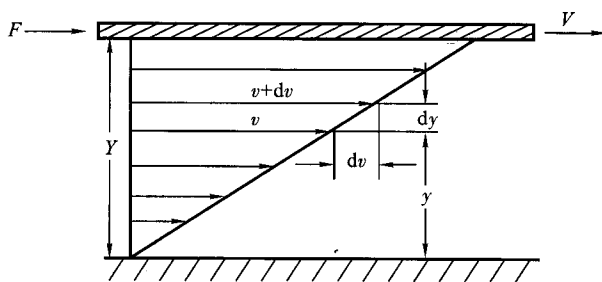


图 1-1 液体在平行平板间的流动

设相邻流层间的接触面积为 A , 距离为 dy , 速度差为 dv , 则流体的粘性力为

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1-1)$$

式中: F ——粘性力(又称内摩擦力), N ;

A ——流层间的接触面积, m^2 ;

$\frac{dv}{dy}$ ——速度梯度, s^{-1} ;

μ ——流体的动力粘度, $Pa \cdot s$ 。

流体的动力粘度单位也常用 $mPa \cdot s$ 表示, $1 Pa \cdot s = 1000 mPa \cdot s$ 。

式(1-1)亦可写成如下形式:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1-2)$$

式中: τ ——剪切应力, 等于 F/A , Pa ;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, 等于 $\frac{dv}{dy}$, s^{-1} 。

公式(1-1)及(1-2)称为牛顿内摩擦定律或牛顿定律。凡符合牛顿定律的流体称为牛顿流体,反之,则称为非牛顿流体。牛顿流体的剪切应力与剪切速率之间呈正比关系,剪切应力与剪切速率的比值为常数,即动力粘度;非牛顿流体的剪切应力与剪切速率之间无正比关系,剪切应力与剪切速率的比值不是常数。

三、粘度的定义

1. 动力粘度

动力粘度是稳态层流流动中的剪切应力与剪切速率的比值,即

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} \quad (1-3)$$

动力粘度是流体对形变的抵抗随形变速率的增加而增加的性质。

2. 运动粘度

运动粘度是动力粘度与同温度下的流体密度 ρ 的比值, 又称比密粘度, 用符号 ν 表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

在国际单位制中, μ 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, ρ 的单位为 kg/m^3 , 因此 ν 的单位为 m^2/s 。运动粘度这个量在实际应用及测量方面有许多方便之处, 例如在许多流体力学计算(如雷诺数的计算)中, 用 ν 比用 μ 方便; 许多条件粘度与运动粘度之间比较容易建立经验换算公式; 利用重力型玻璃毛细管粘度计可以很方便地测得运动粘度。需要指出的是, 不能用运动粘度来衡量流动阻力的大小(动力粘度才是流动阻力的度量), 下面这组数据(20 °C 的水与空气的动力粘度 μ 、运动粘度 ν 与密度 ρ 的值)可以说明这一点。

$\mu_{\text{水}} = 1.002 \text{ mPa} \cdot \text{s}$	$\mu_{\text{空气}} = 0.01827 \text{ mPa} \cdot \text{s}$	$\mu_{\text{水}}$ 比 $\mu_{\text{空气}}$ 大 54.8 倍
$\nu_{\text{水}} = 1.0038 \text{ cm}^2/\text{s}$	$\nu_{\text{空气}} = 15.70 \text{ cm}^2/\text{s}$	$\nu_{\text{水}}$ 比 $\nu_{\text{空气}}$ 小 15.6 倍
$\rho_{\text{水}} = 0.9982 \text{ g}/\text{cm}^3$	$\rho_{\text{空气}} = 0.001164 \text{ g}/\text{cm}^3$	$\rho_{\text{水}}$ 比 $\rho_{\text{空气}}$ 大 857.6 倍

可见, 水比空气的动力粘度大得多, 而空气比水的运动粘度大得多(这是因为水的密度比空气的大得多)。我们在水中行走时明显感到比在空气中行走时的阻力大, 这正是由于水的动力粘度比空气的大, 倘若用运动粘度来度量流动阻力那就不对了。运动粘度是在重力作用下流动阻力的度量。

四、粘度与温度、压力的关系

粘度与温度的关系非常密切, 在常温、常压下, 当温度变化 1 °C 时, 液体的粘度变化达百分之几至十几, 气体约为千分之几。粘度与温度并不成线性关系, 它与温度范围有关。温度越低, 粘温关系越密切, 即随温度的降低, 粘度随温度的变化越大。例如, 在 0 °C, 20 °C 及 100 °C 下, 当温度变化 1 °C 时, 水的粘度变化分别约为 3.4%, 2.5% 及 1.1%。

此外, 低压下的气体与液体的粘度随温度变化的规律完全相反。气体的粘度随温度的升高而增大, 因为气体的粘性是由于动量传递所致, 当温度升高时, 分子的热运动加剧, 动量增大, 流层间的内摩擦加剧, 所以粘度增大; 液体的粘性来自分子间引力, 随温度的升高, 分子间的距离加大, 分子间引力减小, 内摩擦减弱, 所以粘度减小。

粘度随温度变化的程度还与许多因素有关, 例如物质的化学组成、粘流活化能、粘度的大小等。通常液体的粘度越大, 液体的粘度随温度的变化就越大。

液体和气体的粘度随着压力的增大而增大。因为气体的压缩性很强, 所以压力

的变化对气体粘度的影响更大。

第二节 流变学概念

一、流变学的定义及研究对象

上一节介绍的主要是较简单的流体,即牛顿流体。自然界中更多的流体并不属于牛顿流体,传统的流体力学无法应对这类流体的流动行为,这就需要有新的学科,即流变学来解决这类问题。流变学(rheology)是一门研究材料或物质在外力作用下变形与流动的科学。

当物料受外力作用时会发生形变,这种形变相对时间而言可能是长时间的、永久的,也可能是瞬间的、暂时的。同样,当外力消除后,形变可能是永久的,也可能是可回复的。理想的固体能够产生可逆弹性形变,当外力消除后,形变所需能量可以完全回复;理想的液体、气体等流体,其形变是不可逆的,并能产生流动,形变所需能量以热的形式消散至流体中,简单地消除外力不能回复这种能量。

按照流变学的字面意义,它几乎研究所有物质在外力作用下的形变或流动问题,包括经典的虎克固体和牛顿流体这样的极端。但实际上,这些经典极端往往被认为超出了现代流变学研究的范围。弹性力学研究的是纯弹性固体的受力与变形问题,流体力学则是研究牛顿流体的受力与流动问题,在这2个极端的情况下,物质的受力与变形或流动的关系相对比较简单。实际上,人们遇到的许多物质既不是理想的固体,也不是理想的流体。特别是现在随着科学技术的快速发展,许多新材料不断大量涌现在各个领域,例如,许多行业的胶体溶液、悬浮液、乳状液、高分子溶液等,它们的性质往往介于理想固体和理想流体之间,很难用传统的弹性力学或流体力学学科进行描述。流变学就是专门对这类材料的受力与形变或流动问题进行研究,所以,流变学研究的是纯弹性固体和牛顿流体状态之间所有物质的变形与流动问题。

实际物质对所施加的力的响应取决于物质本身的分子结构或粒子结构,以及影响这种内部结构的条件、周围的温度和系统的压力等。物质在外力作用下变形与流动的性质称为物质的流变性,那么,流变学就是研究物质流变性的科学。

二、流变学的研究和发展

在流变学的建立与发展的过程中,美国物理化学家宾汉姆(E. C. Bingham)教授作出了划时代的贡献。他不仅发现了一类所谓宾汉姆(Bingham)流体(如润滑油、油漆、泥浆等)的流动规律,而且把20世纪以前积累下来的有关流变学的零碎知识进行了系统的归纳,并正式命名为流变学。1929年,宾汉姆等倡议成立了美国流变学会(Society of Rheology of USA),且同年创刊《流变学杂志》。人们一般以此作为流变

学(作为学科)创立的标志。此后,流变学逐步被欧、美、亚等各大洲的许多国家所承认。目前,全世界许多国家都有自己的流变学会。1948年,在荷兰召开了第一届国际流变学会议,以后每4年举行一届国际流变学会议。2004年,在韩国的首尔举行了第十四届国际流变学会议。一般地说,我国在流变学方面的工作是从新中国成立后才开始的,特别是改革开放以来,在科学技术和工业发展的促进下,无论是在广度上还是在深度上,流变学在我国都有了很大的发展。我国于1985年11月在长沙召开了第一届全国流变学会议,2006年9月在济南山东大学举办了第八届全国流变学会议。

三、流变学是一门交叉边缘学科

既然流变学所研究的形变和流动问题是普遍存在的,那么它与其他学科的研究对象和内容总会相互重叠,是一种典型的多学科交叉科学。例如流变学与物理学(尤其是其中的物性物理学和力学)、化学(特别是胶体化学、高分子化学)、数学等学科领域密切相关。因此,可以说流变学是一种学科的“谱”,包括从非常数学化的理论到非常实用的应用研究,形成了许多不同的分支(如理论流变学、应用流体流变学),同时涉及宏观和微观的众多复杂的现象和性质。流变学的发展有着密切的工业背景,它是应工业的需要而发展起来的,因此,流变学在各工业领域的研究和发展产生了许多对应的流变学分支,如聚合物加工流变学、生物流变学、药品流变学、食品流变学、原油流变学、土壤流变学等。

就流体而言,凡流变性质不符合牛顿内摩擦定律的流体统称为非牛顿流体。以非牛顿流体为主要研究对象的流变学分支称为流体流变学。可以认为原油流变学是流体流变学的一个分支。不同的流变学分支,尽管有许多共性,但由于各分支研究的对象不同、研究的目的不同、环境条件不同等,其研究理论、研究方法可能有较大的不同。

流变学研究的内容非常广泛,笼统地讲,可分为以下几个方面:①流变测量理论与技术研究;②物质流变方程的确定;③复杂流动中流变行为的测定或计算。

本书主要是关于原油流变学的内容,主要介绍流变学的基本概念和理论、原油流变学测量基础、原油基本流变性质、原油流变性的评价、原油流变性在石油工业中的应用。

第三节 力、形变和流动

在传统上流变学作为力学的一个分支,是因为物质的流变性是应用力学的基本原理来确定的,尽管流变学更注重不同物质的力学性质与其内部结构之间的关系,而不同于力学本身。

一、连续介质的概念

物质是由运动的分子组成的,分子间是有间隙的。从原理上讲,要完整地描述物质的性质,应该描述其所有分子的性质,即确定在每一时刻分子的位置、速度、加速度等,但实际上这又是不可能的。在大部分情况下,这样做也是不必要的,因为人们更关心的是分子运动的整体效应,如温度、压力、密度、宏观速度等,它们都是大量分子运动的统计平均性质。

基于上述原因,人们引入了物质连续介质的模型。所谓连续介质,就是把物质看做是由一个挨一个的、具有确定质量的、连续地充满空间的众多微小质点所组成的。即认为物体内的质点是微观上充分大(含有众多的分子)、宏观上充分小的分子团,这些质点完全充满所占空间,没有间隙存在。例如流体,流体质点之间应无空洞;相邻微团在流动过程中不能超越,也不能落后;在微团形变过程中,相邻微团永远连接在一起。质点的性质是众多分子的统计平均性质——宏观性质,质点的运动是分子集合的总体运动——宏观运动。

物质被看成是连续介质,就摆脱了复杂的分子运动,而着眼于宏观运动,那么反映宏观物质的各种物理性质都是空间坐标的连续函数,在解决流变学问题时,可以应用数学分析中的连续函数概念进行数学解析。

当然,当所研究的物体大小与物质分子的平均自由行程在同一个数量级时,连续介质模型是不适用的。

二、力与变形

一般施加到材料上的外力有3种或是这3种力的组合:一是使材料伸张的力,称为拉力或张力 F_T ;二是使材料压缩的力,称为压缩力 F_P ;三是使材料产生扭转等切向变形的力,称为切向力 F_S 。在这些力的作用下,材料发生拉伸形变、压缩形变、剪切形变,如图1-2所示。一些复杂形变可以认为是由这些简单形变组合而成的。

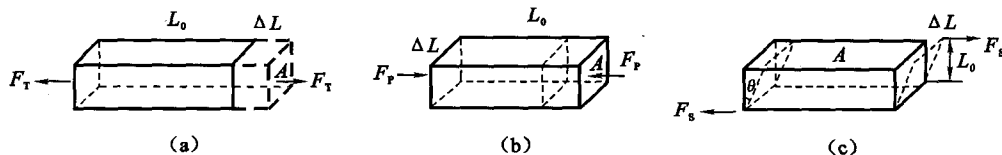


图 1-2 几种简单形变

在流变学中,描述物质或材料所受的外力要用应力。应力是作用于单位面积上的力。对于上述3种力,相应地有3种应力,即

拉伸应力 τ_T :

$$\tau_T = \frac{F_T}{A} \quad (\text{力的方向与作用面 } A \text{ 垂直})$$