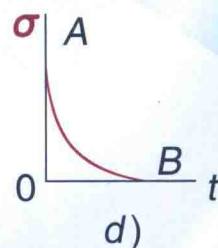
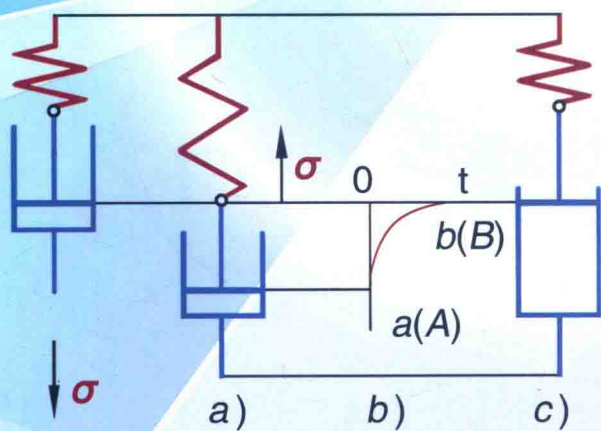


农业流变学

模型概念分析

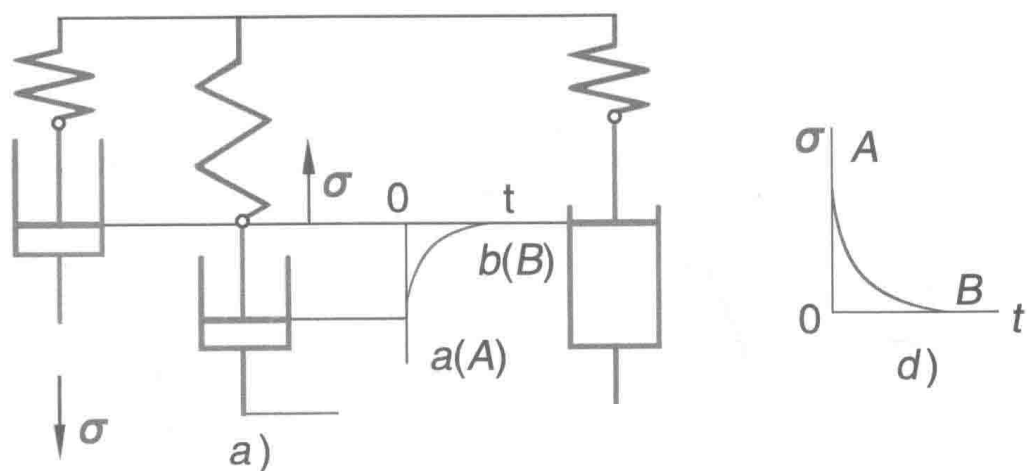
杨明韶 马彦华 编著



农业流变学

模型概念分析

杨明韶 马彦华 编著



图书在版编目 (CIP) 数据

农业流变学模型概念分析 / 杨明韶, 马彦华编著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5116-3217-3

I. ①农… II. ①杨…②马… III. ①农业-流变学-研究 IV. ①S12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 190874 号

责任编辑 李 雪 徐定娜

责任校对 李向荣

出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82109707 82105169 (编辑室)
(010) 82109702 (发行部) (010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106650

网 址 <http://www.castp.cn>

经销者 各地新华书店

印刷者 北京建宏印刷有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 15.5

字 数 375 千字

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

内容简介

本书是在“农业物料流变学”基础上编写而成的一本专著。全书贯串了模型概念的分析与思维。

本书分十章：黏弹性及流变学基础；流变学模型基本原理；基本模型模拟过程流变学解析；蠕变模型模拟过程解析；变形体保持变形条件下的应力松弛；变形体自由恢复及其应力松弛；任意历程流变学过程；农业工程与应力松弛过程；农业流变学中的变形体原理；流变学中的基本参量。

每章都有新的进展。第六章、第七章、第八章、第九章、第十章中的基本理论、基本内容基本是作者分析的新进展。

本书整体拉近了流变学过程与农业工程学科的距离，不论如何，本作品真实地反映了一个农业工程出身作者对农业工程中流变学的问题的特殊的思维。

内容提要如下。

(1) 流变学模型是对过程中实体的假设，是三个基本定律的机械融合，可以模拟实体的流变学过程。在模拟过程中，分析了模型结构与流变学过程的对应、叠加原理。

(2) 对实体的各种变形和变形恢复、变形力的恢复及应力松弛等过程及其相互间的转变机理和关系进行了全面的分析和模型模拟。拓展了实体过程、模拟模型及流变学研究的空间。

(3) 提出了自由开尔芬类模拟应力松弛过程。

(4) 提出两类应力松弛理论带来的新问题并进行了初步分析研究。

(5) 对松散物料压缩成型过程与流变学过程结合进行了分析研究，提出了复杂任意流变学理论：①实际上松散物料压缩过程是复杂任意流变学过程的典型。②过程中提出了“变形体原理”的新概念、新原理。③进行了压过程变形体恢复特性的分析研究。④提出了松散物料压缩研究的新的理论系统。⑤展示了由松散体→密实体→固体的转变的流变学过程和学科空间，进一步拓展了农业物料压缩流变学理论。

(6) 还对应力松弛的基本问题、模型与模拟模型、农业工程中流变学过程的普遍性和复杂模型的模拟过程与原理进行了分析。

(7) 在流变学过程中，将黏弹比、虎克定律、牛顿黏性定律、模拟模型四个理论融合在过程中发展成为流变学的理论基础。

本书适于农业机械化、农业物料加工、食品加工教学，农业工程科技研究人员和研究生参考，敬请广大读者批评指正。

前 言

农业流变学是新兴学科，也是农业物料生产、加工的流变学基础。现代力学的研究依赖于数学、力学的计算与推导。很多复杂的流变学问题，也依赖于运用数学推导、计算进行解析。数学的计算推导非常复杂，且需要深厚的数学力学基础。在对流变学问题的数学的计算推导过程中，有些问题，通过变换、处理，非线性问题，按线性问题解决等过程，其结果不仅产生误差，还可能存在基本概念淡化的问题，甚至产生概念的丢失。另外，非力学专业人员运用和研究流变学非常困难。但是农业工程人员注重概念。概念是事物本质的思维，概念是思维的基本形式之一，它反映事物的一般的、本质的特征。所以循概念思维分析，借助于模型，研究农业物料过程的流变学问题，应该有可拓展的空间。概念分析就是从事物的基本概念出发，在过程中始终循着概念进行思维，不但方便工程人员学习和运用流变学解析实际问题，还特别有利于概念思维能力的训练和拓展，这可能就是本作品的一个主旨。两种方法结合应该是流变学研究的基本方法。

模型是关于黏弹性物料的假设。在运用模型模拟的过程中，作者认为模型理论不仅是一种工具和方法，还应该是一种概念思维。在农业物料过程中的应用和拓展的潜力很大。提出的《农业流变学模型概念分析》粗作，严格说不属于专业流变学作品，却与农业工程学科关系密切。

其中很多概念和提法是一个农业工程出身的作者的特殊思维，可能还存在这样或那样的问题。出版的目地，就是希望能有所反映。不论怎样，问题提出来了。渴望指正，更渴望以此推动有关的进一步的研究和学习。

目 录

第一章 黏弹性及流变学基础	(1)
第一节 物体的黏弹性	(1)
第二节 基本定律基本概念	(4)
第三节 农业工程中流变学研究的一般方法	(16)
第二章 流变学模型基本原理	(18)
第一节 流变学模型基本概念	(18)
第二节 流变学模型的基本结构原理	(19)
第三节 流变学模型基本构成	(23)
第四节 含有摩擦块的两元件模型	(26)
第五节 有关流变学模型的其他问题	(27)
第三章 基本模型模拟过程流变学解析	(31)
第一节 麦克斯威尔模型 [M] 流变学解析	(31)
第二节 开尔芬模型模拟过程流变学解析	(40)
第三节 [K] 变形体的变形恢复过程分析	(45)
第四节 变形体 [K] 的应力松弛	(50)
第五节 [K] 模型与 [M] 模型对比解析	(53)
第六节 摩擦块对基本模型的影响	(56)
第七节 举例	(57)
第四章 蠕变模型模拟过程解析	(62)
第一节 蠕变三元件模型	(62)
第二节 蠕变四元件模型	(75)
第三节 摩擦块对一般蠕变模型的影响	(82)
第四节 复杂蠕变模拟模型	(84)
第五章 变形体保持变形条件下的应力松弛	(94)
第一节 一般应力松弛	(95)
第二节 三元素串联模型的特殊性	(106)
第三节 复杂的应力松弛曲线的分析	(119)
第六章 变形体自由恢复及其应力松弛	(131)
第一节 [M] 类应力松弛与变形力自由恢复	(131)
第二节 一般自由应力松弛过程	(137)
第三节 弹性串联变形力自由恢复过程	(139)

第四节	复杂变形体变形力的自由恢复与应力松弛	(149)
第七章	任意历程流变学过程	(159)
第一节	一般任意历程的分析	(159)
第二节	复杂任意过程分析	(164)
第八章	农业工程与应力松弛过程	(196)
第一节	农业工程中应力松弛过程	(196)
第二节	两类应力松弛带来的新问题	(196)
第三节	多变因素的应力松弛过程	(202)
第九章	农业流变学中的变形体原理	(212)
第一节	“变形体原理”基本内容	(212)
第二节	三种形态的特点及关系	(214)
第十章	流变学中的基本参量	
——	初论流变学参量	(219)
第一节	流变学中的弹性参量 E	(219)
第二节	流变学中的黏度或黏性系数 η	(221)
第三节	流变学模型与流变学参量	(222)
第四节	流变学中的特殊参量——延滞时间 T	(223)
第五节	实体流变学性质分析	(236)
主要参考文献	(239)

第一章 黏弹性及流变学基础

第一节 物体的黏弹性

黏弹性概念的建立和对物料的黏弹性思维是流变学的基础，也应该是模型理论的基础。

一、万物皆流动

所谓万物流动，也就是万物都有黏性。

万物皆流动是古希腊哲学家赫拉克利特（Heraclitus）的名言。他所说的万物当然包括流体态到固态等任何形态的物体。一般认为流体流动，仅有黏性，没有弹性；固体的基本特性是弹性，不能流动，而实际上呢？

（一）固体也在流动

也就是弹性的固体也能流动。流体的特征是流。实际上固体也有流动。固体的冰川、岩石、山也在慢慢地流动着，只是流动的速度缓慢而已。

即使是认为完全固体性质的混凝土、玻璃，也能流动。

英国物理学家对玻璃做过这样的试验：取一块长 35cm、宽 1.5cm、厚 3mm 的玻璃板，两端支起来，中间放置 6kg 重物。从 1938 年 4 月 6 日到 1939 年 12 月 13 日，一直放了 1 年零 8 个月后将重物取下，玻璃中部向下的弯度是 6×10^{-4} mm。也就是说像玻璃这样的固体也流动了。

1933 年科学家莱纳对水泥棒做过同样的试验，水泥棒是断面积为 2.3cm^2 的细长棒，支撑在距离为 76cm 的两个支点上，因自身重量而弯曲，经过长时间的观察，水泥棒在继续弯下去，8 个月弯下了 1mm。他用这个数据计算了水泥的黏性系数，比玻璃小 1 000~2 000 倍。这次试验是在水泥棒刚做好不久进行的。如果水泥棒制成放置 5~6 年，也许其流动更小了。

冰川是固体，也在流动。前不久，我国新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州境内发生冰川移动，造成当地 15 000 亩草场消失。冰川移动超过 20km，平均宽度大约 1km，高 30 多米。冰川移动是非常缓慢的。有人通过测量冰川的流动速度，计算出其黏度是水的 100 亿倍。冰川流动与水的流动有些相似，都是中间快，两边慢。冰川流动的原因是重力和挤压。

沥青似固体，也能流淌。在室温下，它的流动速度非常缓慢，需要很多年才能形成一滴。2013 年 5 月 7 日西班牙《阿贝赛报》报道：澳大利亚昆士兰大学托马斯·帕内尔 1927 年对沥青进行试验。历经 86 年沥青滴了 8 滴。2000 年 11 月滴了第 8 滴。第 9 滴马上就要滴了！沥青实为高黏度流体，只是黏度很高，其黏度大约是水的 1 000 亿倍。

日本学者对固体、流体曾这样论述：“有些物体当外力作用时间很短时，它很硬（如钢铁），像弹性体一样产生反弹。当外力作用时间很长时，它又像流体一样流动（如沥青）。就是说当外力作用时间小于某一时间时，物体表现出弹性；当外力作用时间大于这一时间，物体就会流动。可把这个时间叫物体的“缓和”时间。物体都有自己特有的缓和时间。对于小于缓和时间的外力（短暂的外力）物体变形，不出现缓和作用，物体的弹性可以恢复原状。当外力作用时间很长时，物体才有缓和作用而流动。钢铁等物体的缓和时间很长，流体的缓和时间接近于零。所以固体和流体之不同，只是缓和时间不同而已。这实际上还是说明固体与流体间没有根本的区别。坚硬的固体模量大，即阻碍变形的能力强，施力于物体的瞬间也产生变形，只是变形很小而已；施力时间很长，物体发生蠕变（流动）；对模量小的物体，施同样的外力，变形比较容易；因为流体流动的内摩擦阻力很小，尤其没有黏性（或黏性很小的理性流体），一施外力就会流动。

（二）流体也有弹性

即黏性的流体也有弹性。不仅固体具有弹性，实际上流体也具有弹性。例如，将有的液体放在烧杯中，正中有一根转动的圆棒，结果呈现图 1-1 两种情况，有的中间凹下（图中 a），有的沿棒上爬（图中 b, c, d）。普通的液体，圆棒转动很快时由于离心力的作用向外侧运动，就会爬上器壁（图中 a）。而带有弹性的液体，围绕圆棒盘绕起来，就像细长的橡皮条在棒上一圈圈地绕起来。没有弹性的液体向器壁上爬，有弹性的爬到中间圆棒上。

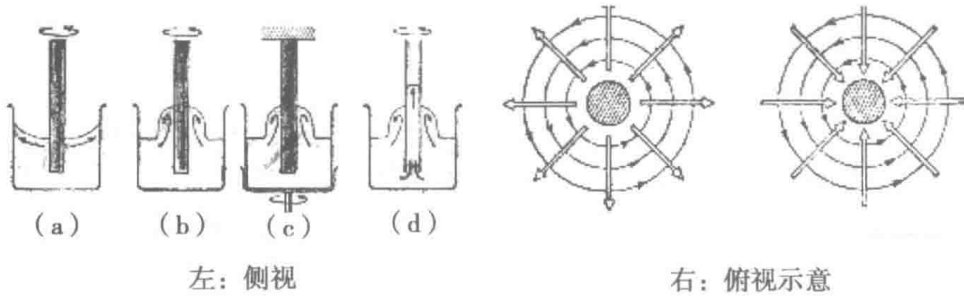


图 1-1 流体爬壁、爬棒现象

（三）物体的流动和变形的复杂性

沥青是具有一定形态的固体，放置较长时间发现它变形了，它流动了。如果是慢慢去弯曲，它不但不会折断，而且会继续弯下去；但是外力作用过猛，它就会像固体一样断了，而且断面很整齐。

淀粉糊是流体，用手握挤，就会产生裂纹，把它放开它又恢复流体状态；装在圆珠笔芯中油墨没有流动，但在写字时笔尖上小圆珠滚动，油墨就会沿着笔头上微细沟槽流出来写成一字。刷在墙上的油漆不会流下来，用刷子刷动就能均匀地布满平面上（流动了）。

奇特的蚕丝的生成。蚕丝为固体。它是非常漂亮的纤维，它是丝绸的原料，公元初年，丝绸最初到罗马时，当时用同等重量的黄金交换。它扮演了丝绸之路的主要角色。那么蚕丝

是什么？它是怎样制成的？1912年意大利都灵大学生理学家福尔，提出蚕丝的形成不是由于化学作用（干燥、二氧化碳和氧化作用等），也不是由于生物化学作用（酶的作用），而是由于力的作用，是由于力的作用将黏液变成了（固体）蚕丝。

蚕吃进大量的桑叶，在开始作茧的前两三天，蚕腹中，几乎装满了作蚕丝的原料（丝液）。蚕内部丝腺储存丝液，蚕丝的主要成分是蛋白质，叫丝蛋白，常常储存在中部丝腺中，中部丝腺内壁分泌出另一种蛋白质——“丝胶”包着丝液。后部丝腺是合成丝蛋白的地方，中部丝腺是储存丝蛋白（丝液）的地方。为了证明蚕丝是力的作用形成的，可将要吐丝的蚕宝宝用手去拉断，只能拉成钓鱼线那样粗的丝线，直径1mm，长30cm。而蚕能吐出丝的直径为0.002mm，长可达1200~1300m。吐丝口吐出的速度很快，才能保证蚕丝很细很长。蚕的解剖见图1-2。

固体的蚕丝是由流体的丝液变成的。

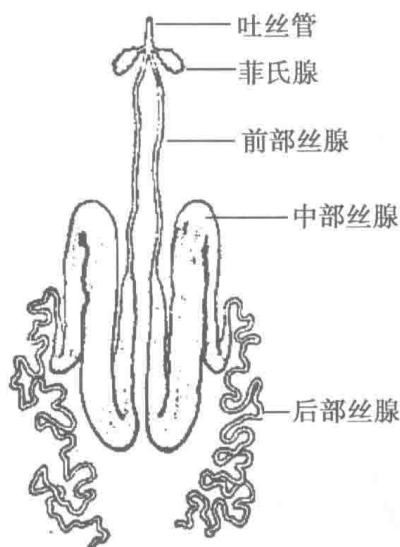


图 1-2 蚕的解剖

二、黏弹性是万物的基本特性

(一) 固体的基本特征是弹性，也有黏性

弹性是阻碍变形（流动）的能力。固体阻碍变形的能力很强，所以固体的基本特性是具有弹性。

因为固体也可流动，流动阻力是黏性，所以固体也有黏性，只是固体的黏性非常大而已。例如沥青、饴糖、橡胶等固体具有较明显的黏性。

(二) 流体的基本特征是黏性，也有弹性

流体流动的基本特征是黏性；流体也能表现出弹性，例如蛋清有“收回”现象，“收

回”现象不是流体的性质，“收回”是弹性恢复现象，不属于黏性产生的现象。所以可把蛋清类的物体称为黏弹物体。动物的黏液等也是具有弹性的流体。

(三) 万物的内在特性是黏弹性

由上分析可认为固体、流体间没有根本的区别。所谓固体、流体只是在一定环境条件下的存在的一种状态。因此说万物（从流体到固体）的内在的基本性质是黏弹性。

流变学就是物体流动的科学，研究物体过程中的黏弹性是流变学研究的基本内容。换句话说，流变学就是关于“物体形变和流动”的科学。19世纪以来弹性力学主要研究铁和岩石这样固体的弹性；流体力学主要研究水和空气的流动；流变学则研究橡胶、纤维、塑料这些既不完全是金属固体，又不完全是液体。因此流变学与生物学、医学、农业、工业、地质和食品等许多学科都有联系。其中对农业物料的研究逐渐发展成为流变学的一个分支——农业流变学。

第二节 基本定律基本概念

虎克定律、牛顿黏性定律、圣维南定律是力学中的3个基本定律，为物体黏性、弹性的基本理论。也是构成流变学模型理论的基础。进行流变学分析研究，首先必须从基本概念上理解3个基本定律。掌握其基本概念和运用也是本书的基础。这一节的重点是从基本概念上论述3个基本定律。

一、虎克定律

虎克定律是材料力学、弹性力学的基本定律。虎克定律是英国科学家虎克（R. Hooke）1660年发现的。1676年他把这个发现以一种字母组词谜的形式“ceiinossttuu”发表了。到1678年虎克自己发表了谜语的答案：“Ut tension sic vis”这句拉丁语的意思是“弹簧的力与它的伸长成正比”。基本定义是，在材料的线弹性范围内，固体的单向拉伸变形与所受的外力成比例。也可表示为在应力低于比例极限的情况下，固体中的应力 σ 与其应变 ε 成比例。另外差不多在同一时期1680年，法国的马略特也发现了类似的规律。也就是说虎克再晚两年发表，该定律可能就成了虎克—马略特定律了。

(一) 基本方程式及基本参量

1. 应力、应变过程

虎克定律的力学过程是，物体受力瞬间，立即产生弹性变形且达到其最大变形值。变形值不变，变形力也保持不变。变形过程中，变形的力完全储存在弹性变形之中。变形恢复过程开始瞬间，变形立即发生恢复，且瞬间恢复到变形前的状态。即储存在弹性变形中的能量与变形恢复同步释放。变形恢复过程，变形力已完全转变为变形恢复力，变形恢复力与变形力相等。过程中能量的转换率为100%，即没有能量损耗。所以虎克定律过程称为理想弹性

变形过程，或理想变形恢复过程。

2. 方程式与参量

(1) 方程式 $\sigma = E\varepsilon$

σ 用应力表示， ε 用应变表示；应力 σ ，应变 ε 同步；适于变形过程，也适于变形恢复过程。

(2) 基本参量

σ ——应力 (KN/mm^2)

是（拉、压）正应力，是弹性应力。

变形过程， σ 是载荷，是弹性变形的力，弹性变形的阻力；是瞬间弹性变形的力。完全储存在变形之中。变形不变， σ 不会发生变化。

变形恢复过程， σ 是弹性变形恢复力；是瞬间弹性变形的恢复力。是弹性变形储存的全部能量。弹性恢复力与变形力（载荷）相等。即变形过程没有能量耗损。

应力是过程参量。

ε ——应变

是弹性应变（无量纲）。

$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ ，其中 L_0 为试件的原长， ΔL 为试件的变形， ΔL 是小变形。

是瞬间弹性应变，与载荷 σ 同步（没有滞后）。

是能够瞬间完全恢复的弹性变形，与弹性恢复力同步，变形与恢复变形相等，即没有残余变形。

变形是过程参量。

E ——模量 (KN/mm^2) 是弹性模量

是阻碍弹性变形的能力，是弹性应力与弹性应变比值， $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ （它们都姓弹）

变形过程 E 是阻碍变形（弹性）的能力，叫弹性变形模量，是弹性变形应力与其变形应变之比；变形恢复过程，是变形恢复的模量。是变形恢复的能力。弹性变形恢复模量与弹性变形模量相等。

E 是材料性质的基本参量，在过程中固定不变，即应力和应变的比例不变。

模量为过程实体的基本参量。

一定的材料，在过程中，弹性模量大的，变形过程储存的能量就大，变形恢复过程释放的能量也就越多。

应变 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = J\sigma$ ，其中， $J = \frac{1}{E}$ 称为柔度，是模量的倒数；

$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{E}\sigma = J\sigma$ ，模量 E 和柔度 J 互成倒数关系。

变形恢复过程中，变形恢复模量是恢复应力与恢复应变之比，也即 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ 。 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} =$

$J\sigma$ ，其中 J 可叫变形恢复柔度，是变形恢复模量 E 的倒数。

变形模量与恢复模量相等；变形过程中， E 是变形的阻碍因素，变形恢复过程中， E 是变形恢复的动力因素。

(二) 变形与变形恢复过程曲线

变形与变形恢复过程，变形应力与恢复力过程曲线。

1. 过程应力应变曲线

虎克定律应力应变曲线见图 1-3。

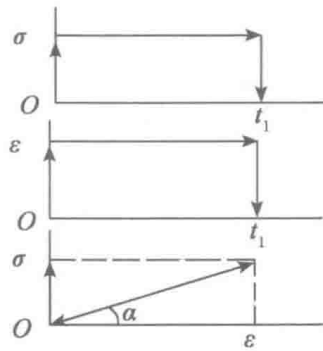


图 1-3 虎克定律应力应变曲线

瞬间 ($\Delta t = 0$) 施力 σ ，相应的应变同步达到 ε ；应力 σ 保持不变，应变 ε 也保持不变；过程中某时刻 t_1 释放应力，其应力 σ 瞬间为零，相应其应变 ε 也立即为零；应力的变化与应变的变化成比例，其比例就是其弹性模量 $\frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{tg}\alpha = E$ 。

2. 虎克定律过程参量的三维曲线图

施力变形过程储存势能 (+)，变形恢复过程释放能量 (-)，见图 1-4 所示。

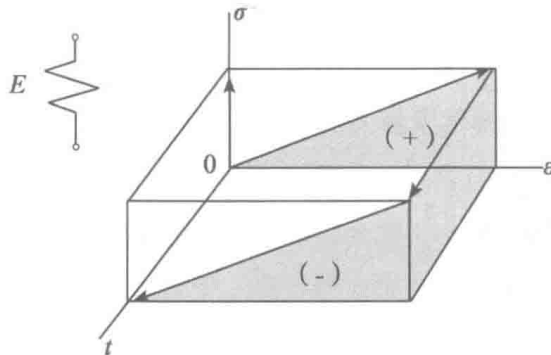
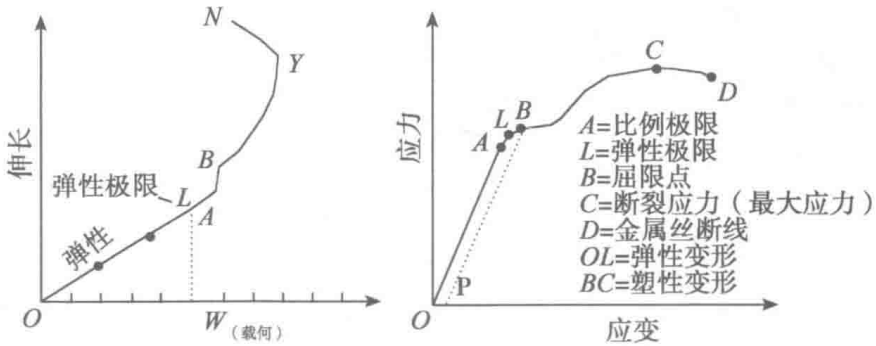


图 1-4 虎克定律三维曲线

(三) 虎克定律举例

虎克定律是理想弹性过程的规律。实际上没有完全的理想弹性过程。也就是说实际上的虎克定律过程都是接近的或是有条件的。

例如普通碳钢在小变形条件下其应力、应变的过程接近虎克定律，见图 1-5。



左：伸长——载荷图，右：应力——应变

图 1-5 普通碳钢拉应力曲线

曲线上的 A 点是比例极限点，在比例极限以内应力 σ 正比与应变 ε ，其比例系数就是弹性模量。OA 为一斜直线。去掉负荷后，变形原路回到 O，变形过程和变形恢复过程模量相等。在此范围内可认为材料完全符合虎克定律。

L 是弹性极限点，材料产生弹性变形的最大载荷 σ_e 。在此范围内材料发生弹性变形。所谓弹性变形是可以恢复的变形。材料还保持着弹性材料的基本性质。但是变形与应力开始脱离线性关系。

B 是屈服极限点，材料不发生永久变形的最大载荷 σ_s 。在此范围以内的变形还是弹性变形，即变形还能够恢复的临界点。

D 对应的 σ_b 是试样拉断前的最大载荷，除以试样的原始断面积称为材料的抗拉强度。

(四) 虎克定律是弹性力学的基础

1. 弹性

所谓弹性是材料施力产生弹性变形的性质。所谓弹性变形就是卸载后可以恢复的变形。其中瞬间恢复的弹性变形叫理想弹性变形；逐渐恢复的弹性变形可称为延滞弹性变形。具有弹性变形的材料，称为弹性材料。弹性材料碳钢在 A 点（比例极限）范围内的是理想弹性，在 B 点范围内的弹性变形称为弹性变形。可称为弹性材料。

因为一般固体都有弹性，在一定范围内，有的具有理想弹性（虎克弹性），有的具有延滞弹性。所以具有弹性是一般固体材料的特征。但并不是说固体材料仅有弹性变形。固体材料的应力、变形，不一定完全符合虎克定律。但是其中的弹性应力和弹性变形必定符合虎克

定律。

2. 理想弹性

所谓理想弹性，即施力的瞬间同步产生变形；力不变，变形不变；卸荷时，变形、变形力同步瞬间恢复。

变形不变，恢复力亦不变。变形与恢复变形相等。即过程中没有残余变形。变形力与变形恢复力相等，即变形过程没有能量耗损。完全符合虎克定律，这样的材料称为理想弹性材料。碳钢应力图中 A 点范围内的特性可认为属于理性弹性，完全符合虎克定律。符合虎克定律的材料可称为理性弹性材料或虎克材料。

3. 弹性材料中参数的型式

一般可借助于虎克定律的参数形式表征弹性材料参数的结构形式，例如， $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = J\sigma$ ， $\sigma = E\varepsilon$ ，其中的模量 E 、柔度 J 的关系结构型式对一般的弹性材料的过程亦有参照意义。一般固体材料都有弹性，所以固体材料的基本特征是弹性，所以虎克定律，也是一般弹性（固体）材料的力学的基础。

在任何力学现象中，对象（材料）其中存在的瞬间弹性应变与其弹性应力的关系均符合虎克定律。

（五）工程中的虎克定律

1. 工程材料的基本性质是弹性模量

在工程设计中，工程材料（碳钢）的强度指标，是一般计算允许变形或允许应力（A 点范围内）。当载荷 σ 一定，根据虎克定律计算出其变形应变 ε ；或者变形一定，根据虎克定律计算出载荷 σ 。

计算的根据：一是材料的弹性模量 E ，材料的模量是固有的；所以弹性模量才是材料的基本特性参量。

根据虎克定律，理想弹性材料或近理想弹性材料，才可运用虎克定律；如果材料不符合虎克定律或者过程中材料不能保持固有的模量 E ，上面的设计计算也就失去了意义。

2. 衡器传感件应是理想弹性材料

即符合虎克定律。

传感元件受力载荷、变形与卸载、变形恢复过程力和变形必须同步、成比例，且瞬间变形、瞬间恢复，没有残余变形。

在过程中每次加载一定，变形一定。载荷不变，变形也不变。即模量要严格保持一定。

传感元件材料最大称重的变形应是小变形，如果不能保持小变形，就不能作为衡器或计量的精度很低。

3. 非电量测量中应变传感器材料应该符合虎克定律

非电测量是传感器受载必须按比例产生小变形。变形大，通电产生的电阻就大，相应电压增加；通过电量的换算，将测量的载荷与电参量联系起来。显然传感器的材料变形必须符合虎克定律。一般采用在小变形范围内符合虎克定律的材料，例如 45 号碳钢。

4. 弹性储能器

弹性储能器的原理是施力产生弹性变形。保持变形不变，载荷转变成了弹性变形能量储存起来，通过变形恢复将储存的能量释放出去。

必须是弹性材料，理想弹性材料能量转换过程能量损失接近于零。其弹性模量大，储能容量较大。所以一般选用在小变形范围内接近虎克定律的材料。其弹性模量一般比较高，例如碳钢 $E \approx 200\text{GPa}$ 。

5. 有限元分析理论基础

有限元分析理论是建立在虎克定律基础上的。

有限元分析是对理想弹性材料说的，越接近理想弹性材料，就越精确、可靠。工程材料碳钢强度（模量 E ）大，在小变形条件下，接近理想材料；所以可用有限元分析方法进行计算分析。对于非弹性材料，显然失去了应用有限元分析的基础。

有限元分析的材料基本性质参量是弹性模量 E ，所以在建立有限元模型时要输入材料的模量 E 等数据。

6. 弓箭

(1) 原理

施力使弓弦变形，储存能量。骤然释放，将能量（无损失的）传递给箭。使其快速射出，并具有一定的杀伤能力（速度）。

①弓弦变形将能量储存在（弓）弦弹性变形中，所以（弓）弦的材料必须是弹性材料，其模量 E 要尽量大，且产生较大的变形，弓弦才能储存较多的能量。释放后，弓弦的弹性变形快速恢复，储存在变形中的能量驱动箭（带着能量）强力、快速射出，使其具有较强杀伤能力。

②弓弦的材料应是弹性材料，在一定的范围内且有较大的弹性模量。

③弓弦的变形应符合虎克定律，弓弦的变形与变形恢复相同，在一定的范围内，保证每次的发射工况相同。

(2) 古时郑玄提出的射箭原理实际上就是虎克定律

我国东汉的经济学家和教育家郑玄（127—200）为《考工记·马人》一文的“量其力，有三钧”的注解中写道：“假设弓力胜三石，引之中三尺，驰其弦，以绳缓偃之，每加物一石，则张一尺。”已正确地提示了力与变形成比例的关系，即后来的虎克定律。但是郑玄的发现要比虎克早 1500 年，实际上虎克定律应该是郑玄—虎克定律。

7. 其他例证

机械钟表的核心元件——发条是弹性材料，通过储存、释放能量驱动指针移动；是符合虎克定律的弹性材料；机械测力器其受力变形元件也是符合虎克定律的弹性材料。

所以虎克定律是机械工程的力学基础，虎克定律在机械工程中具有广泛的意义。

8. E 模量的延伸

①在虎克定律范围内（如碳钢 A 点以内）的模量 E 可认为理想弹性模量，是理想弹性材料的基本特征。

②固体的基本特征是具有保持其形态的能力，即具有一定的模量。一般固体，施力产生变形，有弹性变形、非弹性变形；弹性变形中可能存在理想弹性（瞬间）变形或延滞弹性变形，非弹性变形成为永久变形。也就是说一般固体施力，可能存在理想弹性模量，延滞弹性模量和非弹性变形“模量”。只有理想弹性变形，过程才符合虎克定律。

理想弹性变形的模量，完全符合虎克定律。变形模量和变形恢复模量相等。

延滞弹性变形虽然其变形可以（延滞）完全恢复，但是变形力的一部分耗损在变形中，其变形力却不能完全恢复。所以延滞弹性变形的柔度与恢复模量的倒数不相等。即延滞弹性变形过程不完全符合虎克定律。

非弹性变形力与变形关系不遵守虎克定律。非弹性变形不能恢复的原因是因为它的变形力完全损耗在变形中了。即没有恢复能力，也就是恢复“模量”等于零。

二、牛顿黏性定律及其基本概念

所谓牛顿（黏性）定律是流体流动过程中流层间的剪切（内摩擦）力与相邻流层间的速度梯度成比例。牛顿（黏性）定律是流体力学的基础。

（一）牛顿黏性定律及公式推导

所谓牛顿定律，在流体内部相邻流层存在相对运动，流层间产生阻碍流动的摩擦力（因为是同种流体间的摩擦，所以称为内摩擦力）；内摩擦力的实质是流体的黏性（ η ）的表现。内摩擦力的概念是牛顿首先提出的，相邻流层间的内摩擦力的关系为： $\tau = \eta \frac{du}{dy}$ 。其

基本意义为 τ ——流体流动的内摩擦力，或流动的剪切力， η ——流体的黏度， $\frac{du}{dy}$ ——流体流动相邻流层的速度梯度。

1. 推导流动过程公式

牛顿黏性流体在剪切力作用下的流动见图 1-6。

假设在两个相近的平行平面 A, B 之间充满（静止）流体，设上平面以 $u + du$ 很慢的速度平行运动，下平面的速度 u 与上平面同向运动。上下平面的距离为 dy ，且保持不变。上、