


农业物料流变学

杨明韶 编著

 中国农业出版社

农业物料流变学

杨明韶 编著

中国农业出版社

编目 (CIP) 数据

农业物料流变学/杨明韶编著. —北京: 中国农业出版社, 2010. 9

ISBN 978 - 7 - 109 - 14930 - 4

I. ①农… II. ①杨… III. ①农业—物料—流变学
IV. ①S12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 165923 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

策划编辑 王芳芳

文字编辑 魏明龙

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14.75

字数: 349 千字

定价: 49.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书是在农业物料加工试验研究和教学研究的基础上拓展而成的，是一本农业物料加工流变学基本理论研究方面的著作。包括农业流变学基础，应力松弛，农业物料蠕变，任意历程中应力、应变过程，流变学过程间关系的分析，流体流变学基础，散粒体与两相流等。从实践出发，注重从基本概念上拓展农业流变学基础理论，提出了很多新的概念和思路。所以本书的基本内涵、思维路线、分析方法都有一定的参考价值。

本书的基本特点是注重基本概念分析、推理；读者容易掌握也容易受启发，在阅读中还能启发读者的思维和提出问题。

本书适于农业工程、农产品贮藏加工、食品加工、农业机械化工程等相关学科、专业科技、教学人员，尤其适于相关青年科技工作者、研究生学习和阅读。

前 言

本书是在对农业物料(主要是草物料)加工的试验研究中和农业物料学的教学实践中逐步拓展而成的。在拓展过程中注重问题的发生和提出,循着问题进行延伸,主要靠对问题的基本概念分析进行拓展,所以本书最突出的特点是农业物料加工过程的基本概念的分析研究;它还不是专门研究农业流变学的理论作品,冠名农业物料流变学也有些偏颇;但是至今还没有发现农业流变学研究的专门文献,出版此书也算是抛砖引玉吧。

在我国农业工程研究生培养方案中,提出了进行农业流变学知识的教学和研究,已经有几十年。作者在实践中对此的必要性和意义深有体会。匆匆抛出此书,也算是一种表态,一个发言。

在编写过程中,曾得到东北农业大学蒋亦元院士、山西农业大学郭玉明教授等朋友的指导和鼓励;内蒙古农业大学马彦华老师给本书绘图,对此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,难免出现问题和错误,欢迎批评指正,更欢迎交流,以促进农业流变学的发展。

编 者

2010年1月

目 录

前言

第一章 农业流变学基础知识	1
第一节 理想材料的基本特性和三个基本定律	1
一、理想弹性与虎克定律	1
二、黏性与牛顿定律	4
三、理想塑性与圣维南定律	10
第二节 万物的基本特性是黏弹性	11
一、万物皆流动	11
二、万物都有弹性和黏性	11
三、万物的内在特性是黏弹性	12
第三节 流变学是研究黏弹性规律的科学	12
一、流变学是边缘学科	12
二、农业流变学是流变学的一个重要分支	12
三、农业流变学研究的基本方法	13
第二章 应力松弛过程	16
第一节 应力松弛的基本概念	16
一、应力松弛过程的基本原理	16
二、应力松弛过程的基本概念	24
第二节 应力松弛的基本条件	25
一、应力松弛的充分条件	26
二、【M】模型具备了应力松弛的充分条件	26
第三节 应力松弛模型原理	26
一、可以进行完全应力松弛的模型	27
二、仅能部分进行应力松弛的模型	27
三、不属于应力松弛的应力突降现象的模拟模型	27
第四节 模拟应力松弛模型的基本结构分析	28
一、模拟应力松弛的基本模型结构分析	28
二、模拟应力松弛的其他模型结构	29
第五节 应力松弛过程中的基本参量	29
一、应力松弛过程中的相关参量	30
二、应力松弛参量的基本概念	30

三、牛顿体【N】应力松弛问题的思考	34
第六节 对应力松弛的分析评价	34
一、用应力松弛时间 T 分析应力松弛	34
二、用起始应力分析应力松弛	35
三、用松弛时间比率分析应力松弛	35
四、应力松弛率	37
五、其他分析方法	37
六、应力松弛的能力	37
第七节 农业物料应力松弛试验研究的一般程序	38
一、逐次剩余法	39
二、简单判定法	42
三、计算机算法	42
第八节 工程中的应力松弛	44
一、草物料压缩过程中的附加阻力分析	44
二、草片应力松弛中的平衡应力分析	48
三、突(瞬)降应力分析	49
四、草片移动过程中的应力松弛分析	50
五、压缩过程的压缩速度	51
六、农业流变学、工程学和生物学的结合	52
第三章 农业物料蠕变过程	56
第一节 蠕变过程的基本原理	56
一、蠕变的定义及实质	56
二、蠕变基本过程	56
第二节 其他蠕变过程	59
一、弹性—延滞弹性蠕变过程	59
二、延滞弹性变形—黏性流动过程	61
三、弹性变形—黏性流动过程	62
第三节 根据物料蠕变曲线选择模拟模型	64
第四节 农业物料蠕变特殊性	66
一、农业物料蠕变研究的趋势	66
二、草物料加工过程变形的复杂性	67
三、压草块(捆)蠕变曲线的虚拟研究	73
四、农业物料压缩蠕变, 延滞变形和应力延迟	76
第五节 农业物料蠕变试验	76
一、有关概念	77
二、试验样品的制备与选择	77
三、载荷的选择与加载速度	77
四、常见的试验方法	79

第六节 对农业物料其他加工过程的思考	82
一、压过程	82
二、农业物料的切割过程	82
三、农业物料的其他加工过程	83
第四章 任意历程中的应力、应变过程	85
第一节 任意历程应力、应变的数学表示方法	85
一、任意历程的应力方程式	85
二、任意历程的变形方程式	86
第二节 对任意历程应力方程式的基本分析	86
一、任意历程中的应力方程式	86
二、草物料压缩过程应力松弛实例分析	86
三、农业物料压缩过程中应力、变形的特殊关系	93
第三节 流变动力学基础	94
一、数学表示方法	94
二、线性黏弹性物料的流变动力学特性	94
第五章 变形、应力松弛、流变模型和 $T = \frac{\eta}{E}$	97
第一节 应力突(瞬)降现象	97
一、草物料压缩全过程应力曲线分析	97
二、突(瞬)降应力的概念	98
三、突(瞬)降应力的实质	98
第二节 突(瞬)降应力产生的基本条件	99
第三节 用模型理论分析应力突(瞬)降现象	100
一、模型与应力突(瞬)降现象	100
二、模拟应力突(瞬)降模型	100
三、应力突(瞬)降实例	101
第四节 应力突(瞬)降过程的基本参量	102
一、蠕变过程的应力	102
二、应力松弛过程的应力	103
三、突(瞬)降应力	103
四、突(瞬)降的模量和柔度	103
第五节 蠕变和应力松弛	104
一、问题的提出	104
二、两个过程的基本概念	104
三、举例分析	108
四、基本概念要点	109
第六节 流变方程式推导中的思考	110
一、麦克斯威尔模型【M】	110

二、开尔芬模型【K】	112
三、模型【L】 = 【K】 - 【N ₂ 】	114
四、模型【N _a 】 = 【K】 - 【H ₂ 】	115
五、巴格斯模型【B】 = 【H ₁ 】 - 【N ₂ 】 - 【K ₃ 】	116
六、任意变形历程推导的应力方程式的思考	117
第七节 蠕变与变形恢复	118
一、【K】模型的变形恢复	119
二、其他蠕变模型的蠕变和变形恢复	122
第八节 流变学模型与 $T = \frac{\eta}{E}$	126
一、流变学模型	126
二、 $T = \frac{\eta}{E}$	130
第六章 流体流变学基础	137
第一节 概论	137
一、流体与流动	137
二、流体(动)种类	137
三、层流、紊流	138
四、流动光滑管和流动粗糙管	140
五、雷诺数	142
第二节 流动曲线	143
一、概述	143
二、流动曲线与流动方程式	143
第三节 剪切流动	147
一、牛顿定律是剪切流动的理论基础	147
二、剪切流动的几种形式的分析	148
第四节 压力流动	149
一、流体在水平圆管中流动的方程式	149
二、管流中流动的基本规律及基本参数	150
第五节 混合流动(压力流动和剪切流动)	165
一、牛顿流体的流动(层流)	165
二、准黏性流体的流动情况	166
第六节 同心圆筒间的流体的回转流动	166
一、回转流动与回转式黏度计的结构原理	166
二、回转流动基本方程式	166
三、回转式黏度计参量的测量原理	168
第七节 旋转锥板式黏度计的测量原理	171

第七章 散粒体与两相流	173
第一节 概论	173
一、散粒体	173
二、研究散粒体的意义	173
三、散粒体技术的发展	173
四、本章研究的基本内容	174
第二节 散粒体的基本物理特性	174
一、形状尺寸	174
二、密度、重度	178
三、孔隙率、空隙比	179
第三节 散粒体的摩擦特性	179
一、休止角 φ_r	179
二、壁面摩擦角 φ_w	180
三、滑动摩擦角 φ_s	180
四、散粒体的内摩擦角及库仑定律	181
第四节 散粒体对容器的压力分布	185
一、储仓类型	185
二、物料对仓壁的压力分布	185
三、流体、散粒体对容器压力的思考	189
第五节 散粒体的流动性	190
一、流动性的概念	190
二、流动性的一般表示方法	191
三、散粒体的流动函数和流动因数	191
四、散粒体的排放——重力流动	192
第六节 散粒体的空气动力学特性	194
一、流动阻力与阻力系数	194
二、物料的临界速度 (terminal velocity)	196
第七节 两相流动	200
一、两相流的浓度	200
二、两相流中气流的速度	201
三、两相流输送管道断面上的粒子分布	202
四、输送管中粒子的运动状态	203
五、两相流的料气分离	205
六、两相流输送管道压力损失	210
七、气力输送主要参数的分析选择	212
八、密相气力输送	213
结束语	216
一、理论研究方面的进一步体会	216

二、基本概念分析	219
三、文献中流体力学推导是否存在问题	221
主要参考文献	223

第一章 农业流变学基础知识

第一节 理想材料的基本特性和三个基本定律

一、理想弹性与虎克定律

(一) 虎克定律的基本内容

(1) 物体受力(用应力表示)的同时,按比例产生弹性变形(用应变表示);去力的同时,弹性变形立即全部恢复。

(2) 过程中,力不变,变形不变;变形不变,(恢复)力也不会变。

(3) 过程中,力、变形与时间无关。

(4) 过程中,去力时,变形的恢复与加力时的变形过程同路程,但方向相反,即过程中没有能量损失。

(5) 弹性变形过程中的弹性模量与弹性变形恢复的弹性模量相等,而且均与时间无关。

上述内容就是虎克定律,也就是理想弹性的基本内容。具有理想弹性和符合虎克定律的材料,可称为理想弹性材料或虎克材料。理想弹性材料,均匀连续、各向同性。

(二) 用应力、应变曲线表示的虎克定律

虎克定律的应力应变曲线如图 1-1 所示。

(三) 虎克定律的基本方程式及其基本参量

$$(1) \quad \sigma = E\varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan\alpha, \quad (1-1)$$

式(1-1)为虎克定律(拉、压)应力应变关系方程式,其中, ε 是(正)应变(normal strain), σ 是(正)应力(normal stress)。

$$(2) \quad \tau = G\gamma, \quad \gamma = \frac{\tau}{G}, \quad G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (1-2)$$

式(1-2)为虎克定律(剪切)应力应变关系方程式,其中, γ 是剪切应变(shearing strain), τ 是剪切应力(shearing stress)。

(3) 若物体各个方向都受到均匀的应力,相应地产生水静压体积应变为

$$\varepsilon_V = \Delta V/V,$$

$$\text{则} \quad K = \frac{\sigma}{\varepsilon_V}, \quad (1-3)$$

式(1-3)是静液压状态方程式。

(4) 对于各向同性物料

$$E = 3K(1-2\mu), \quad (1-4)$$

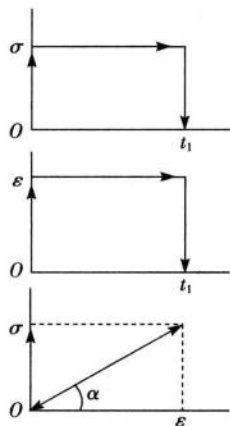


图 1-1 虎克定律的应力应变曲线

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad (1-5)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (1-6)$$

$$\mu = \frac{(3K-E)}{6K} = \frac{(E-2G)}{2G}, \quad (1-7)$$

其中, E 是拉压弹性模量或杨氏模量(modulu of elasticity), G 是剪切模量(shearing modulu), K 是体积弹性模量(modulu of volume), μ 是泊桑比(Poisson' s ratio)。

(四) 弹性变形过程中的基本概念

1. 弹性(弹力)(elasticity) 所谓弹性, 即物体在外力作用时, 阻碍其弹性变形的能力, 或者是产生弹性变形后, 弹性变形恢复的能力。物体的这种性质(能力)称为弹性。

(1) 虎克定律中, 材料弹性变形的弹性与弹性变形恢复的弹性相等且都是即时的(与时间无关)。

(2) 注意, 一般弹性物料(非虎克材料)变形的弹性与恢复弹性也是相等的, 但都不是即时的。

2. 弹性变形 具有恢复能力的变形称为弹性变形, 也就是存在恢复能力(趋势)的变形称为弹性变形。

(1) 弹性变形都应该是能恢复的。

(2) 弹性变形有即时弹性变形(变形与时间无关)和延滞弹性变形(变形与时间有关)。虎克定律(理想弹性材料)的弹性变形是即时弹性变形, 恢复变形也是即时恢复变形。而延滞弹性变形和其变形恢复都不是即时的, 都是时间的函数。

3. 弹性模量 弹性模量是表示物体阻碍其弹性变形的能力, 或弹性变形恢复能力的一个量。受力一定, 弹性模量大, 阻碍变形的能力就强, 弹性变形就困难, 或者说弹性变形一定, 弹性模量大的, 弹性变形恢复的能力就强, 所以弹性模量是表征物料弹性的一个特征参量, 也是理想弹性材料的一个基本参量。1807年英国物理学家托马斯·杨(Thomas Young)提出用应力与应变之比($E = \sigma/\epsilon$)来度量材料的刚度, 这个比值就称为弹性模量。

(1) 金属材料是晶体物质, 其弹性模量取决于晶体中原子的本性、晶体类型及晶格常数等。例如, 金属中软钢的弹性模量较大, 仅次于钨、钼、镍等。随温度升高, 晶格常数增大, 故一般金属随温度升高, 弹性模量降低。铁每升高 100°C , 模量下降 10% 。金属材料的模量对组织不敏感, 加工方法、热处理状态或加入少量合金元素, 弹性模量都不会显著变化。

(2) 无机材料是非晶体。如硅酸盐材料在应力作用下, 变形非常小, 常温下, 塑性变形更小, 一般断裂之前, 只有微小变形。因此, 可将其称为弹性体, 如混凝土材料等。

(3) 高分子聚合物的弹性模量的范围宽广。典型材料的弹性模量: $10 \sim 10^5 \text{ N/cm}^2$; 纤维集合材料的皮革、织物、纸张及针织品的弹性模量: $100 \sim 10^6 \text{ N/cm}^2$ 。这类材料的用途广泛, 就在于其刚性(弹性模量)广泛。

一般材料的弹性模量如表 1-1 所示。

表 1-1 一般材料的弹性模量

材料	E (GN/m ²)	G (GN/m ²)	泊桑比 μ
软钢	206.8	82.1	0.26
铸铁	110.3	51	0.17
铝	68.9	24.8	0.33
铜	110.3	44.1	0.36
镍 (冷拔)	213.7	79.4	0.30
花岗岩	46.2	19.3	0.20
碳酸钠石英玻璃	68.9	22.1	0.23
混凝土	10.3~37.9		0.23
橡木 (纵)	12.5	0.6	
橡木 (切向)	0.7		
尼龙	2.8		0.4
硬橡胶	2.8		0.4

4. 泊桑比 泊桑比是弹性材料的另一个基本参量。在一个方向承受载荷的材料,将在垂直于载荷方向和平行于载荷方向都产生应变。垂直载荷方向的应变称为横向应变,平行载荷方向的应变称为纵向应变。横向应变(或垂直应变)与纵向应变(或轴向应变)之比,在低于比例极限的应力时是一个常数。这是泊桑(Simeno D. Poisson)于 1811 年提出的,所以也称为泊桑比。对大多数金属,泊桑比为 $1/4 \sim 1/3$ 。

$$\text{泊桑比: } \mu = \frac{\epsilon(\text{横})}{\epsilon(\text{纵})}。$$

5. 一般弹性材料的应力应变曲线 例如,普通低碳钢的应力图(拉伸图),表示了其拉伸过程中的弹性变形、塑性变形、直至断裂的全部力学特性,如图 1-2 所示。

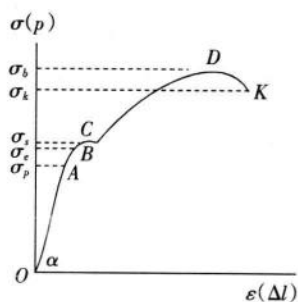


图 1-2 普通碳钢的应力图

(1) 比例极限 σ_p 是应力正比于应变的最大应力,对应于图 1-2 中的点 A。比例极限实际上很难测定,在一定的规定下所测得的值,可称规定比例极限。在测定弹性模量时,也是在比例极限以内进行的。在比例极限以内,应力正比于应变,其比例系数称为弹性模量,即 $E = \sigma/\epsilon = \tan\alpha$ 。

(2) 弹性极限 σ_e 是材料所能承受的、不产生永久变形的最大应力,对应图中的点 B。实际上与比例极限相近,对一般材料可认为两者相重合,其测定同样很困难。通常以规定的残余变形量(如 $0.005\% \sim 0.01\%$)所对应的应力来代表。测定方法与比例极限的测定方法相似。

(3) 屈服应力点 σ_s 是材料开始产生塑性变形时的最小应力(点 C),或应变出现急剧增加而应力出现松弛现象时的应力。在应力松弛过程中出现的最高应力称上屈服点 σ_{su} ,出现的最低应力称下屈服点 σ_{sl} 。

(4) 抗拉强度 σ_b ,试样在拉断前所受的最大载荷,除以试样的原始横截面积,相当于图 1-2 中的点 D。

(五) 理想弹性材料的模拟模型(元件)

即虎克定律(理想弹性体)的模拟模型。

1. 模拟元件 虎克定律的模拟元件是一根弹簧，其代号为【H】，如图 1-3 所示。弹簧承受拉力和承受压力效果相同。

2. 弹簧模拟虎克定律的过程 模拟过程如图 1-4 所示。

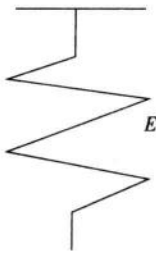


图 1-3 理想弹性体模拟元件(弹簧)

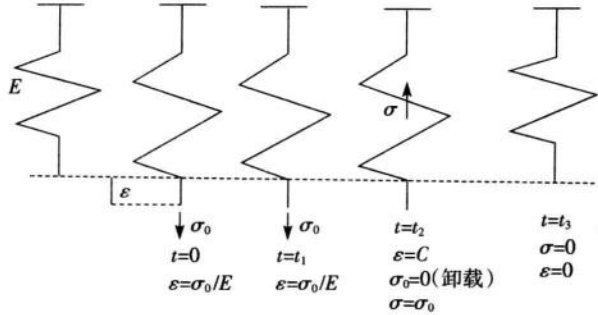


图 1-4 弹簧元件的应力应变过程

- (1) 当 $t=0$ 时，加载 $\sigma=\sigma_0$ 瞬间，弹簧的弹性应变立即等于最大值： $\epsilon=\sigma_0/E$ 。
- (2) 若保持 $\sigma=\sigma_0$ 不变，时间 t 变化时， ϵ 不会变化，即应力应变与时间无关。
- (3) 当 $t=t_1$ 时，若应变 $\epsilon=\sigma_0/E$ 不变，弹簧的应力 σ_0 也不会变。
- 当任一时刻 $t=t_2$ 时，保持变形 $\epsilon=C$ ，载荷 σ_0 立即转变为弹簧的弹性恢复力 σ ，且 $\sigma=\sigma_0$ 。
- (4) 任意时刻 $t=t_3$ 时去掉载荷，即放开变形，弹性变形立即为零，其弹性恢复力同步变为零，即没有能量损失。

所以【H】模型可完全模拟虎克定律。故弹簧拟成为理想弹性材料的模拟模型。

(六) 各向同性材料的广义虎克定律

1. 三向主应力应变的表达式

$$\epsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad (1-8)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \quad (1-9)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)]. \quad (1-10)$$

2. 三向剪切应力剪切变形的表达式

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad (1-11)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad (1-12)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}. \quad (1-13)$$

二、黏性与牛顿定律

(一) 黏(滞)性(viscosity)

(1) 脸盆里静置的水，能被逐渐搅动起来；停止搅动后，流动的速度又能逐渐慢下来，

不需多久脸盆里的水就会完全静止下来。汽油这种流畅的液体也是如此。不论什么液体都会有同样的结果。只是黏滞的油停止得快些，清澈的水运动的时间长一些。尽管如此，但是最后终究都要静止下来。好像有一种因素阻碍其流动，液体这种阻碍或抵抗自己流动的性质称为黏(滞)性。黏(滞)性的实质就是阻碍流动的摩擦力，即附着于盆壁处不流动的液体层对其相邻的流动层的液体在接触面上产生了摩擦力，流动慢的相对流动快的在流层面上产生了摩擦阻力。就是这些摩擦阻力使流动的流体逐渐停下来。这种摩擦力产生在流体流动层之间，故称为内摩擦力。显然只有相对流动才能显示摩擦力。所以这种摩擦力又称为流阻。同理，把盆中静止的液体，通过搅动能陆续流动起来也是这种摩擦力的作用。即被搅动的流动部分通过摩擦力带动静止的部分，流动快的部分带动流动慢的部分，最后带动整盆的液体流动起来。

(2) 还可以做一个简单试验：取一个内径 0.5mm，长约 20cm 的细玻璃管(毛细管)，倾斜放置，从较高端倒入水、柴油、糖稀，它们在管中流动，可以看到，柴油和糖稀流出的时间长，水流得快。这些现象与被搅动的水流动相似，重力驱动其在管中流动，因为其流动的内摩擦力不同，所以流动的快慢不同，水比柴油、糖稀的摩擦阻力小，即水比柴油、糖稀的黏滞性小。

(3) 空气中雾和尘埃颗粒向下落的速度很慢，在光的照射下可以看到尘埃飘来飘去，这是由于雾滴、尘粒下落时遇到了空气的阻力，其过程是颗粒在空气中沉降，产生气流，气体流动和液体流动一样，也存在阻碍流动的摩擦力，空气的黏性在阻碍它们下落。如果在真空中，尘埃就不会费周折了。

这样，在流体流动中，表现出来的内摩擦特性，称为流体的黏(滞)性。这种流动称为黏性流动或黏性流(Viscosity flow)。

(二) 牛顿(黏性)定律(Newton law)

1. 牛顿定律的推导 牛顿(黏性)定律就是表述理想黏性流动的规律。牛顿黏性定律(首先提出的是牛顿的假设)推导如下：

假设在两个相近的平行平面之间充满(静止)液体，如图 1-5 所示。设下平面流动速度 u 很慢，上平面也以 $u+du$ 很慢的速度向同一个方向平行运动，上下平面间的距离为 dy 且保持不变。与上下平面接触的液体分别贴着在平面上，与下平面接触的液体的流动速度为 u ，与上平面接触的液体的速度为 $u+du$ ；其间的速度差为 du 。平面间的液体一层带一层，其间各层间的速度梯度为 du/dy ，且呈线性分布，液体层间的内摩擦应力 $\tau(=F/A$ ，其中， F 是上平面处液体层的摩擦力， A 是与平面接触的面积)，与速度梯度 du/dy 成正比例，即

$\tau = \eta \frac{du}{dy}$ ，所以

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}}, \quad (1-14)$$

式(1-14)中， η 称为黏度系数或黏度。

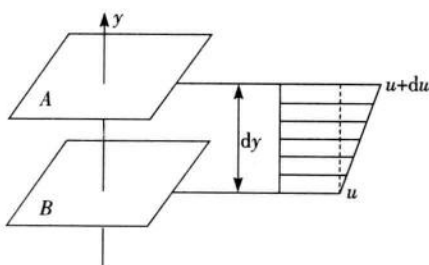


图 1-5 牛顿流体在剪切力作用下的流动

上述流动表现出来的性质就是理想黏性；即剪切力(内摩擦力)与速度梯度呈线性关系，这种关系称为牛顿内摩擦定律；这种液体可称为理想黏性体或牛顿流体。

2. 牛顿定律的另一种推导 上面的推导，与纯剪切相似。图 1-6 为一 ABCD 固体平面，DC 面上受剪切力，沿剪切方向产生角变形 γ 。用图示来进一步说明牛顿流体的速度梯度与剪切应变的相似关系，经过 dt 时间后，A, B, C, D 各点分别移动至 $A_1B_1C_1D_1$ ，由图 1-6 可知：

$$ED_1 = DD_1 - AA_1 = (u + du)dt - udt = du \cdot dt,$$

因此

$$du = \frac{ED_1}{dt}.$$

由此得到速度梯度

$$\frac{du}{dy} = \frac{ED_1}{dydt} = \frac{\tan\gamma}{dt} \approx \frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma}.$$

我们知道 $d\gamma$ 是矩形 ABCD 在 dt 时间后的剪切变形，这就表明速度梯度实质上可认为是剪切变形速度，故

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} = \eta \frac{du}{dt} = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma}, \quad (1-15)$$

式(1-15)中， η 是液体的黏度， $\dot{\gamma}$ 是剪切速率。

式(1-15)也是牛顿黏(滞)性定律的一种表示形式。

3. 牛顿流体应力应变(流动)关系曲线 如图 1-7 所示。

(1) 恒定的剪切力作用于流体平面上，带动流体呈线性流动 $\gamma = \frac{\tau}{\eta} t_1$ 。

(2) 当除去作用力后，流体不会再流回来，即保持了原来的流动距离 $\gamma = \frac{\tau}{\eta} t_1$ 。

4. 牛顿流体模拟模型

(1) 模拟元件是一个活塞，或称黏壶，或称阻尼器，代号是【N】，如图 1-8 所示。元件拉、压效果相同。

(2) 关于模拟元件应力应变过程的原理。牛顿流体的模拟元件似一个充满黏性液体的活塞。施力，活塞有移动的趋势，但受液体黏性的阻力影响，所以

①加负荷 $\sigma = \sigma$ ，当 $t = 0$ 时，由于活塞中流体的黏滞性的阻碍，此时 $\epsilon = 0$ ，即变形(流动)从零点开始。

②若保持负荷不变，随着时间 t 的变化，活塞开始移

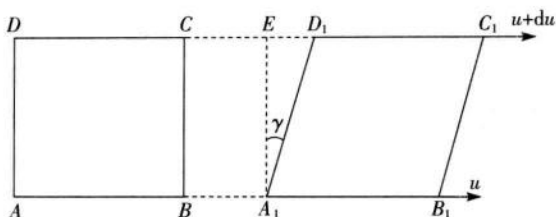


图 1-6 流体的剪切速率与剪切应变相似关系

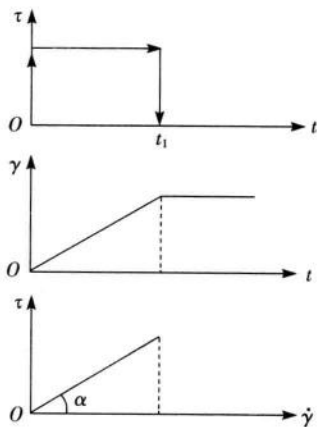


图 1-7 牛顿流体应力应变关系

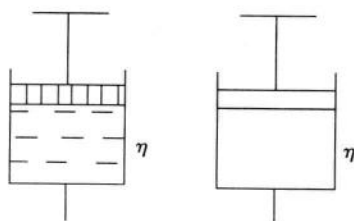


图 1-8 牛顿流体的模拟元件