

第一章 概 论

§ 1.1 概 述

流变学是研究材料在外力作用下形变、流动以及时间效应的科学。

材料在受到外力作用时，便会发生形变。当形变不断扩展时便成为流动。形变和流动的产生和发展总要有一定的时间历程。因此在流变学中，材料的流变行为用力、变形和时间三个参数来表示。

流变学所研究的材料是多种多样的。在农业工程部门主要研究各种农业材料，如固体农业材料，包括水果、一些作物、植物的种子等；液体农业材料，如各种植物油，蜂蜜，糖浆，食品加工过程中的一些中间原料、动物饲料和动物排泄物等；以及水田土壤，包括水田耕作土壤、河塘泥浆等。由于农业材料与聚合物以及其它工业产品相比具有一定的特殊性，其发展和应用具有相对的独立性，已经发展成比较成熟的流变学分支。把主要研究农业材料流变特性的这一流变学分支称为农业流变学。耕作土壤也是一种农业材料。由于土壤力学已经发展成一个比较完整的力学分支，因此在农业流变学中一般不包括土壤，但应包括水田土壤。在流变学的其

他分支中也各有其重点的研究对象，如化工部门主要研究聚合物的流变特性；建材部门研究各种建筑材料，如新拌水泥浆等。根据研究对象的不同，可将流变学划分成不同的分支。

流变学为物理学中最接近于力学的一个分支，与许多学科如物理学、数学、化学、力学、生物学、工程学等有关，仍属于古典力学的范畴。农业流变学属基础应用学科，主要研究农业物料的流变理论、流变学特性的测量和流变学在工程中的实际应用。农业流变学对农业机械、食品机械和畜牧机械等方面的工程技术人员来说是一门很有用的基础学科。最近几十年农业流变学在实际工程应用方面已经取得了一定成效，显示出了广阔的应用前景。

在农业机械的设计中，通过研究作物茎秆等部分的流变特性，可对有关的收获机械进行优化设计。研究种子和谷物的流变特性，以便采取措施防止种子损伤，在干燥过程中的应力开裂等。

研究水果的流变特性，可用于水果成熟度的机械检验，有利于水果收获、加工机械化的实施，也有助于寻求水果最优包装、运输、贮藏方法，以减少损失。

研究水田土壤的流变性，对于改善水田耕作机械的通过性以及水田机械工作、行走部件的设计都具有重要的意义。对于河塘泥浆的泵送及管线设计，农业流变学的研究结果也具有一定的指导作用。

农业流变学的研究对象主要是真实的农业物料的流变行为，一般不预先作假设和抽象。因此试验法和由试验归纳理

论的方法，在流变学的研究中占有十分重要的位置。往往是先对真实的物料进行流变特性试验，然后再总结、抽象成理论。

§ 1.2 农业流变学发展简史

物料受到外力作用后会发生形变和流动。对这一现象古人在劳动实践中已观察和认识到了。希腊哲学家 Heraclitus称之为“万物皆流”，即一切皆流、一切皆变的意思。我国先哲孔子也说过“逝者如斯夫”，意即“一切都在流动”，与希腊哲学家表达了同样的意思。所有这些可看作是对物料流变行为宏观的、感性上的认识，还不能看作等同于现代科学意义上的流变学概念。

流变学 (Rheology) 一词来源于古希腊的动词“流动”，它最早出现于1879年。如当时英国测量流体粘度的小型粘度计称为微流变仪 (Microrheology)，1901年德国出现了 Rheologie 一词，当时仅指研究水的流动的科学，其目的在于与水的静力学分开。这时候都还没有给出“流变”或“流变学”明确的科学定义。这个词在当时的出现和使用可看作是偶然的，还不能看作流变学作为一门学科已经建立。

1920年美国物理化学家宾汉姆 (E. C. Bingham) 对油漆、粘泥浆和印刷油墨的流动性进行研究，并指出物料的流动与形变的关系十分重要。1929年他倡导在美国创立流变学会 (The Society of Rheology)，根据应力、应变和时间来研究物料的流动和形变的规律，称这一学科为流变

学，并肯定它是物理学的一个分支。其后一些国家也相继成立了流变学会，到1976年召开第七届国际流变学会议时，已有28个国家参加。我国也于1985年建立了跨行业、跨学科的流变学会。为全国一级学会，并已举行过一次年会。

流变学所研究的问题非常广泛，几乎涉及所有的物料以及金属、矿物等，所以流变学又可看作是一门边缘学科（Frontier Science）。它包括的范围很广，除粘性流体如蜂蜜、浆饲料等；塑性液体如食品中的黄油等；粘塑性流体如乳酪、果子酱、番茄酱、鱼酱等以外，还包括纤维、橡胶、塑料、油漆、涂料、沥青、土壤、泥浆、有机和无机肥料等。此外还包括一些中间状态的物料，如具有较高温度尚未凝成固体的铁液、钢液和其他金属、化工熔液等。其中钢铁、木材等弹性物料的流变性属于材料力学的研究范畴，一般不在流变学中重复。

从本世纪40、50年代以来，国外开始进行农业物料的流变学研究，主要研究内容包括土壤（主要是水田泥土）、种子、肥料、农药，农作物的茎、叶、根，农产品如谷粒、水果、蔬菜、饲料，畜产品如蛋、肉、蜂蜜以及食品如乳脂、奶油、乳酪、果酱、鱼酱等的流动与形变，以及流变学在农业工程中的应用。1956年起美国纽约的卜洛克林工业科技学院（Polytechnic Institut of Brooklyn N. Y.）陆续出版《流变学理论和应用》论文集，1975年出到第五卷。1957年Scott Blair和Markus Reiner发表了《农业流变学》一书，第一次详细、系统地阐述了农业流变学的研究内容和应用前景，向农业工程师们介绍了流变学的知识。它标

志着农业流变学已发展得比较成熟，成为流变学中一个比较完整的独立分支。1970年Mohsenin的专著对此作了更为深入的讨论，进一步奠定了农业流变学的基础。

从50年代开始，国内的少数学者开始注意到流变学这门新的学科，翻译和编写了一些流变学方面的著作，系统地向我国读者介绍流变学的知识和研究进展情况，起到了先驱作用。我国农业流变学的研究开展要稍晚一些。1981年北京农业工程大学首先开始编写《农业流变学导论》（讲义），并于1984年首次为研究生讲授农业流变学课程，开展了液体农业物料如植物油、蜂蜜、番茄酱等流变特性的研究，建成了比较完整的农业流变学实验室。江苏工学院也在同一时期组织人力研究水田土壤的流变特性，先后发表了一系列有关这方面的论文。这些工作为我国农业流变学的研究和应用起了一个很好的先锋作用。这门新兴的学科正在受到农业工程工程师和其它科学工作者更加广泛的注意和重视。

§ 1.3 生物学系统的流变性质

农业物料，如从农产品所获得的种子、食料、饲料和有机肥料等，其本身属于一个生物（学）系统，它们不同于大批生产的工业产品。它们有生命，经常产生形状、大小、呼吸的变化和其它方面的生命活动过程。在其贮藏和发育中，其细胞对体外的湿度、温度、氧、能耗和养料供应非常敏感，而且还有一些难于控制的内在因素。在生物固体中，其弹性随年龄与生理状态而变化。生物液体则大多数为非牛顿

液体，即不按牛顿的力学原理的规律而运动，因此也就增加了研究工作的复杂性。

由于上述的复杂情况，研究生物系统的流变行为，完全采用理论的数学分析和计算方法是比较困难的。很少存在一些如物理学中的常数问题。所以一般采用试验和总结经验的方法来进行研究。

虽然如此，目前研究农业物料的流变行为还得从力学原理和流变学开始。农业物料的流变分类系统初步可按图 1-1 所示。

液体农业物料粘性流中的非牛顿流可分为两大类

1. 与时间无关的非牛顿流体 其应力取决于当时当地的应变速率或流动状态，与流动的历史过程无关，一般称之为无倚时性（time-indepedent）。从广义上讲，它将塑性流也包括在内，又可分为两种：

（1）无屈服应力的非牛顿流体 即一般所指的狭义的非牛顿流体（见图 1-1）。其剪应力—剪应变关系如仍用牛顿公式表示，则须引用表观粘度。一般用幂律方程式表示（详细讨论见后）。它包括伪塑性流和胀塑性流。

（2）有屈服应力的非牛顿流体 它呈现出固体的某些特性，具有屈服应力。只有当应力梯度超过其屈服应力（某一确定值）时，流动才发生。这就是图 1-1 中所示的塑性流。它分为宾汉式流（或称全塑性流）和非宾汉式流，后者又有类塑性流（quasi-plastic flow）和胀塑性流（dilatant flow）两种。

在与时间无关的非牛顿流体中，还有 Casson 流体等 在

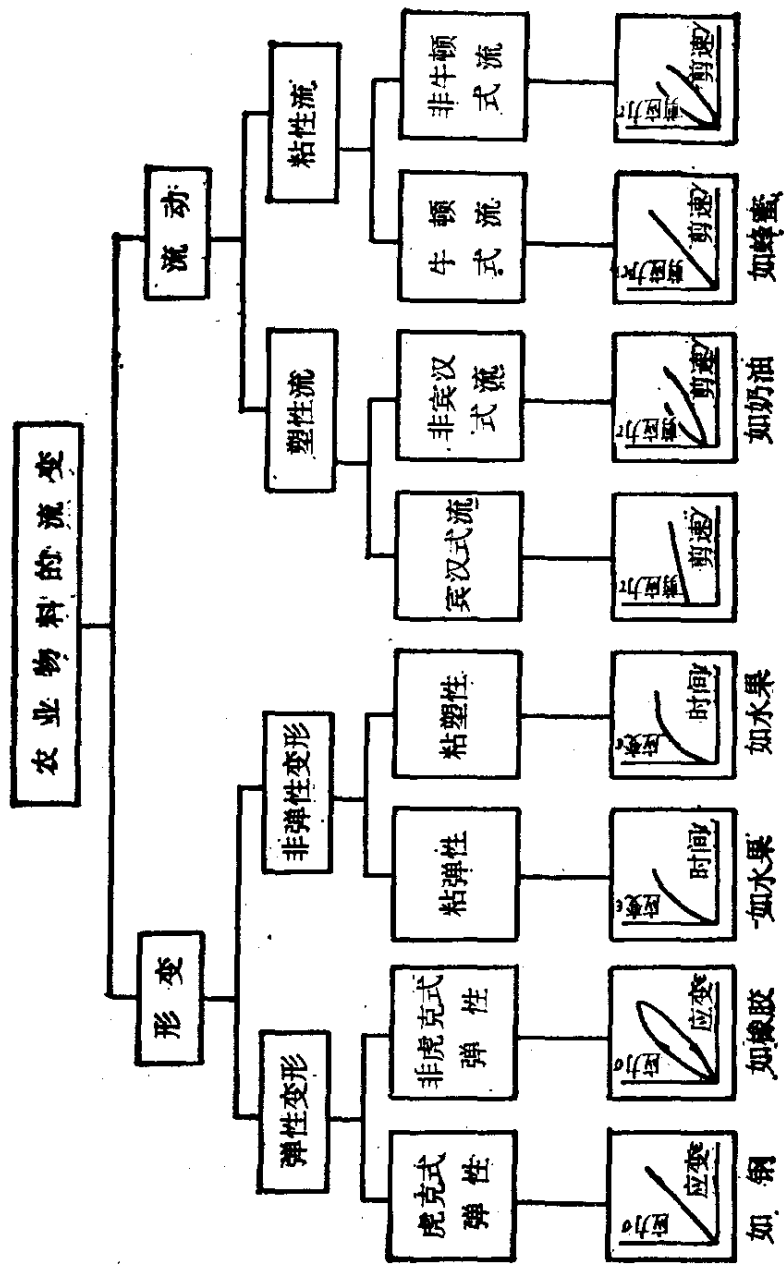


图 1-1 农业物料的流变学分类

流动规律上有一些特殊性。

2. 与时间有关的非牛顿流体 ——粘弹性流体。其应力不仅取决于当时当地的应变速率，而且与历史有关，即流体对于机械信息是有记忆的。当前研究较多的是线性粘弹性流体。这类流体又称为倚时性（time-dependent）流体。

绝大多数液体农业物料和生物流体为非牛顿流体。

农业物料的机械性质是指它们在外力作用之下所产生的行为，如在静载荷与动载荷之下产生应力—应变行为，以及某些物料在空气中、水中、容器内和管道中的流动行为。当由于外力的作用，物料产生流动和形变时，其机械性质也可以认为是流变性质，而且流变学还考虑到物料受载荷作用时的时效。所以物料流变的机械行为表示着力、形变和时间三个参数。我们在工程中所见到的物料与时间相关的应力和应变行为、徐变（或蠕变）、应力松弛和粘性等，都是流变性质的例子。

对于固体农业物料如水果等，可依据其受力时的形变分为弹性变形与非弹性变形。弹性变形一般与时间无关，经常用应力—应变间关系来表示。非弹性变形往往是倚时性的，经常用应变（应力）—时间关系来表示。

如果只论述物料的机械性质而不论及流变性质，则通常只涉及物料在受力作用下的运动，如物料运动时的阻力、阻力系数、最终速度、冲击后的回弹和复原系数等。

因此可以说，流变学是物料在受力、温度、湿度等的变化作用和影响下所产生的内在变化，包括应力、形变和时效三个方面。流动则可看作是形变的一种特殊情况，是无限连

续不断的形变。

§ 1.4 材料的物理状态

各种物料的状态，由其在某一时间内所受载荷的大小和变形史而定，同时还受其环境因素如温度的影响，特别是农业物料和生物物料，其本身的含湿量也影响到其物理状态。一般物料（不包括气体）在常温下具有两种不同的状态：固体状态和液体状态。但还有一些物料既具有固体的弹性和塑性，又具有液体的粘性和流动性。而这些性质还受时间的久暂和温度变化的影响。例如饴糖、糖果是固体，如果放置的时间较长，它们会变软，悄悄地流变而粘在一起，甚至结成块。如果在夏天，气温升高，这种现象更为明显。建筑材料中的沥青，其物理状态也是如此。人们称之为流动的固体。实际上物料除固体和液体状态外，还有一种过渡或中间状

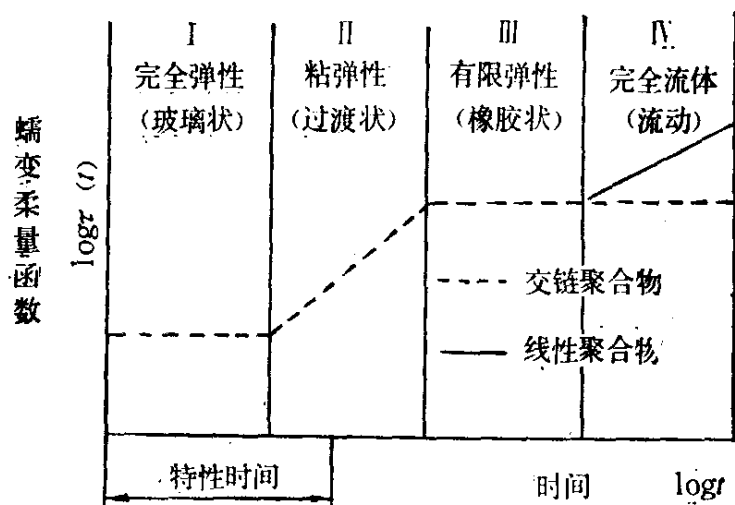


图 1-2 蠕变柔量函数与时间的关系

态，即粘弹体状态 (viscoelastic state) 和有限弹性体状态 (如橡胶状态)。Sharpe (1965) 曾以物料的蠕变柔量函数 (creep compliance function) (图 1-2) 和应力松弛模量函数 (Relaxation modulus function) 相对于时间的对数值，绘出物料的状态图 (图 1-3)，定量地表示物料的状态。其定义为：当载荷或应力保持常值，在给定的时间 t 上，

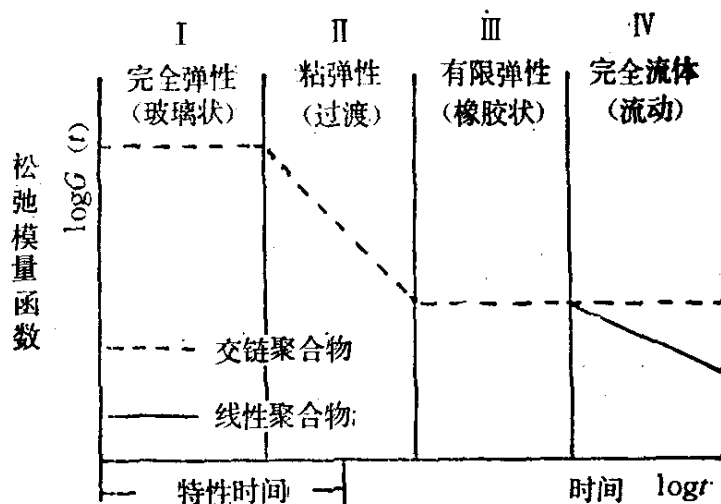


图 1-3 应力松弛模量函数与时间的关系

$$\text{蠕变柔量函数 } J(t) = \frac{\text{剪应变 } \gamma}{\text{剪应力 } \tau} \quad (1-1)$$

相似的，当应变保持常值，在给定的时间 t 上

$$\text{应力松弛模量函数 } G(t) = \frac{\text{剪应力 } \tau}{\text{剪应变 } \gamma} \quad (1-2)$$

所有具有线性反应的物料将显示出符合于图中一个区或

两三个区的行为。 I 区符合于完全弹性物料的行为。解释这一类物料行为的弹性理论是基于这样的假设；物料的状态不依时间的久暂或达到形变前的过程而变化。 II 区符合于具有粘性和弹性两者的物料的行为。很明显其行为是倚时的，并由线性粘弹性理论来处理。 III 区符合于橡胶或软物料，具有非线性弹性行为，处理这些物料的理论称为有限弹性理论，专涉及大的和有限的形变。 IV 区表示应力与应变速率成比例的物料或完全流体的物料状态。它由传统的水动力学中的有关理论来处理。在实际物料中，只要不超过某一临界应力，按线性处理可以得到比较满意的结果。如果超过这一临界应力，则会出现塑性形变，便应采用塑性理论来处理。实际流体也可能显示非线性，可以采用非牛顿流体的理论来处理。

由于对于农业物料的研究工作至今还不够充分，以及难于测定其特性时间 (Characteristic times) 以确定一种物料在物理状态谱中的位置，因此上面只是给出了一种概念。更感兴趣的读者可查阅本书后的有关文献。

第二章 理想物料的行为

§ 2.1 传统的理想物料

物料有两种型式的形变，即形状和体积的变化与流动。前者径称形变，它分为弹性形变与非弹性形变两种。后者分为粘性流与塑性流两种（图 1-1）。因此，弹性、塑性和粘性是物料的三种基本性质。可以用这些性质来说明物料的流程行为。代表这三种基本性质的三种传统理想物体分别称为胡克体（Hookean body），以〔H〕表示；圣文南体（St. Venant body），以〔St. V〕表示；牛顿液体（Newtonian liquid），以〔N〕表示。胡克体具有强度和弹性而无粘性；圣文南体具有弹性和塑性而无粘性；牛顿液体仅具有粘性而无弹性和强度。由于实际物料都不具备完全的弹性、完全的塑性和完全的粘性，绝大多数实际物料是弹性与塑性、弹性与粘性的结合。因此，在分析其流变行为时，常用上述三种理想体作为比较的标准。

§ 2.2 理想的弹性行为

理想弹性体是指当受到外力作用时，按比例产生形变；

而在卸载后，形变则完全消失的物体。理想弹性体的应力—应变关系由胡克定律来表示（图 2-1）。

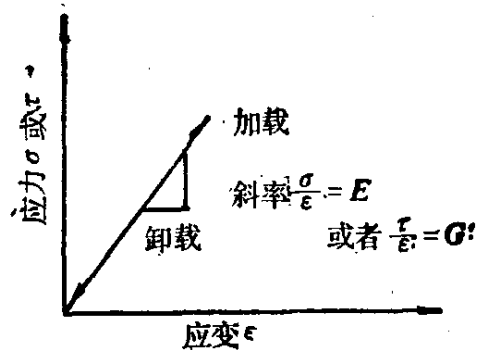


图 2-1 理想弹性体的应力—应变关系

实际物料是千差万别的，往往具有多种特性。在推导方程时，如

果精确考虑各方面的因素，则导出的方程非常复杂，实际上也难于求解。对于理想弹性体，虽然已经进行过理想化处理，还需要作出若干基本假设，从而略去一些暂不考虑的因素，使主要矛盾更加明确和突出。基本假设为：

1. 物体是连续的 即考察对象整个的被组成这个物体的物质所填满，不留下任何空隙。事实上从物理学中我们已经知道，物质是由更小的微粒所组成的，微粒间和其内部都有一定的空隙。假定物体是连续的，是对研究对象的进一步的理想化近似。

2. 物体是均匀的和各向同性的 均匀的是指整个物体是由同一种材料组成的，物体内部不同点处材料的各种性质均不随位置而变化。各向同性则指物体的物理性质在各个方向是相同的。

3. 物体是完全弹性的 即当物体受到外力作用时，应力—应变关系服从图 2-1 所示的规律，而与应变产生的历程无关。当外力使物体发生形变时，外力所做之功以“弹性能”的形式被贮存在物体内部，成为物体要恢复原状的反弹

力。它在外力卸除后，便在瞬间使物体恢复原状。

推导理想弹性体的本构方程，可以从静力学方面、几何学方面和物理学方面等三个方面来考虑。有关弹性力学方面的著作已对此作了比较详细的讨论，我们在此仅直接给出结果。

对于理想弹性体，在笛卡尔坐标系中共有 15 个未知函数：6 个应力分量 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ 、 $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ 、 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ；6 个应变分量 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 、 γ_{yz} 、 γ_{zx} 、 γ_{xy} ；和 3 个位移分量 u 、 v 、 w 。

形变分量与应力分量间有如下的关系：

$$\left. \begin{aligned}
 \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\
 \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] \\
 \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \\
 \gamma_{yz} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \\
 \gamma_{zx} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx} \\
 \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}
 \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

也可以用应变分量表示应力分量，

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\mu}{1-2\mu} e + \varepsilon_x \right) \\
 \sigma_y &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\mu}{1-2\mu} e + \varepsilon_y \right) \\
 \sigma_z &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\mu}{1-2\mu} e + \varepsilon_z \right) \\
 \tau_{yz} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{yz} \\
 \tau_{zx} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{zx} \\
 \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xy}
 \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

形变分量与位移分量之间的关系如下：

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_y &= \frac{\partial u}{\partial y} & \varepsilon_z &= \frac{\partial u}{\partial z} \\
 \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}
 \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式中： E ——弹性模量

μ ——泊松比

$$e = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2-4)$$

弹性模量 E 及几个常用常数的定义及相互关系如下：

$$E = \frac{\text{拉或压应力}}{\text{拉或压应变}} \quad (2-5)$$

剪切模量或刚度模量

$$G = \frac{\text{剪切应力 } \tau}{\text{剪切应变 } \gamma} \quad (2-6)$$

胡克体在水静压力作用下，体积模量或抗压能量

$$K = \frac{\text{水静压力 } P}{\text{体积应变 } \varepsilon_v} \quad (2-7)$$

上述弹性模量常数与泊松比 μ 间的关系为：

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{3G} + \frac{1}{9K} \quad (2-8)$$

$$E = 3K(1 - 2\mu) \quad (2-9)$$

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (2-10)$$

$$\mu = (3K - E) / (6K) \quad (2-11)$$

$$\mu = (E - 2G) / (2G) \quad (2-12)$$

表 2-1 给出了由上述方程式计算的由固体到类液体的泊松比 μ 、 E/G 比和 K/E 比的值。

表 2-1 固体到类液体的泊松比 μ 、 $\frac{E}{G}$ 、 $\frac{K}{E}$ 比值

泊松比 μ	$\frac{E}{G}$ 比	$\frac{K}{E}$ 比
0	2.00	0.333
0.10	2.20	0.417
0.20	2.40	0.556
0.25	2.50	0.667
0.30	2.60	0.833
0.35	2.70	1.111
0.40	2.80	1.667
0.45	2.90	3.333
0.50	3.00	

大多数材料的泊松比在0.2—0.5之间。当泊松比接近于0.5时，材料的性质接近橡胶或液体。很明显，液体不能产生剪应力，其剪切模量 $G = 0$ ，因此按式(2—10)其弹性模量也等于零。因为液体的体积模量 K 是一个有限值，由式(2—9)， $1 - 2\mu = 0$ ，所以 $\mu = 0.5$ 。

虽然理想的弹性行为出现在某些固体物料小应变的情况下(小于0.1%)，但在实验技术改进以后，已证明完全的弹性并不存在于实际物料

之中。而且基本假设中指出，物料在消除应力后，应变必须全部消失。所以我们应当把图2-1表示的钢的线性弹性与橡胶的非线性弹性(图2-2)加以区别。橡胶的弹性极限非常大，伸长2—3倍仍保持其弹性。我们称为弹性小或弹性弱，即其弹性模量 E 值小。了解这一流变性质后，我们就可以选定适当的外力或载荷以利用其有用的形变位置或形变体积等。

各种不同的食料和

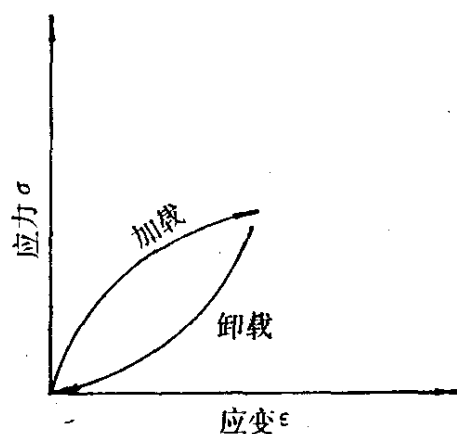


图 2-2 非线性弹性（橡胶）

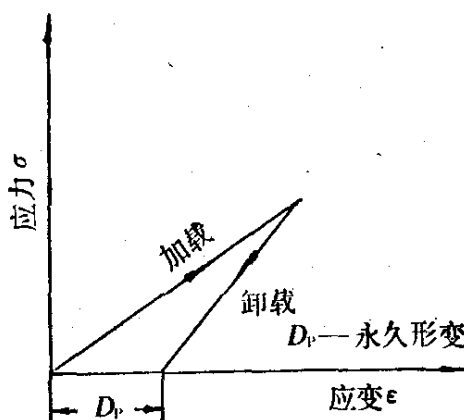


图 2-3 干玉米粒角质胚乳的非弹性变形