

流变学概论

袁龙蔚 編著



上海科学技术出版社

流 变 学 概 論

袁龙蔚 編著

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书介绍流变学要素的基本概念,叙述材料线性形变和非线性形变的一般规律,并阐明非晶形物体、分散系和固体的基本物理力学和结构力学特性,以及这些基本概念在土和沥青方面的应用。

本书供从事建筑材料的制造、质量鉴定和应用的研究工作者、工程技术人员以及高等学校的有关专业研究生阅读。

流 变 学 概 論

袁龙蔚 編著

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可證出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

上海洪兴印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 16/32 字数 171,000

1961年4月第1版 1961年4月第1次印刷

印数 1—2,000

统一书号: 15119 · 1562

定 价: (十四)1.10元

序

流变学的发展还是近廿年来的事情,但是在解决建筑材料力学特性的某些困难問題方面,业已得到了显著的成就,它对于許多工程部門(例如,机器制造、建筑、运输、水利、建筑材料制造等部門)是有极大现实意义的。1954年的国际第二届流变学会會議提出的一些成果,充分地反映了各国在这方面的巨大成就。目前,关于建筑材料流变性的研究結果,已逐漸地反映在工程构造物的設計原理和建筑材料的技术规范上。

例如,苏联“預应力鋼筋混凝土构造物設計須知”中§56規定,因混凝土的干縮和徐变而产生的鋼筋內預应力損失采用下列数值:

I. 硬鋼的控制应力为

$$\sigma_{ak} \geq 4000 \text{ 公斤/平方厘米}$$

1. 混凝土受压前的控制应力

$$\sigma_n = 1500 \text{ 公斤/平方厘米}$$

2. 混凝土受压后的控制应力

$$\sigma_n = 1000 \text{ 公斤/平方厘米}$$

II. 軟鋼的控制应力为

$$\sigma_{ak} > 4000 \text{ 公斤/平方厘米}$$

1. 混凝土受压前的控制应力

$$\sigma_n = 800 \text{ 公斤/平方厘米}$$

2. 混凝土受压后的控制应力

$$\sigma_n = 600 \text{ 公斤/平方厘米}$$

这些数值就是根据对混凝土徐变性的研究实验資料而确定的。

又如,在其他条件相同时,砂岩碎石制成的混凝土,其徐变性比石英砾石制成的混凝土几乎要大一倍。同时,徐变能力也随水

灰比的增加而显著增大。矿质硅酸盐水泥的混凝土，其徐变性比普通硅酸盐水泥的混凝土就要大得多。显然，在选择重混凝土构造物的材料时，这些分析资料是具有很大意义的，因为对构造物来说，这种很大的徐变性很容易引起裂缝的形成，甚至使构造物遭受破坏。

在15~20年以前，对于某些建筑材料（例如瀝青、瑪瑙脂、屋面卷材、胶等材料）在低温时的力学特性不仅不可能解释，甚至连合理的评定也作不到。就这类材料的力学特性而言，在低温下它们是处在液体和固体的中间地位。它们的力学特性决定于形变力的作用时间及负荷的速度。例如，高熔点的瀝青，它在负荷的速度很小时，形变有如液体；而在速度较大时，则有如脆性固体。最近的年代里，在解决这个困难问题上已经取得卓越的成就，其中起决定性作用的就是流变学观念和方法的利用。

理论流变学的基础是苏联现代学者伊留辛（А. А. Ильющин）、尔然尼采（А. Р. Ржанецын）、果尔琴勃拉特（И. И. Гольденблат）等同志的研究工作所奠定。在伊什林斯基（А. Ю. Ишлинский）、古巴诺夫（А. И. Губанов）、马切列特（Л. А. Мачерет）等同志的著作中，研究了微分形式的线性徐变规律，罗左夫斯基（М. И. Рововский）、拉包特诺夫（Ю. Н. Работнов）等同志研究了积分形式的线性徐变规律，在卡恰诺夫（Л. М. Качанов）、拉包特诺夫等同志的著作中也讲到非线性徐变理论。

实用流变学的基础，在固体材料方面系由捷索夫（А. Е. Десов）马斯洛夫（Г. Н. Маслов）、阿鲁秋年（Н. Х. Арутюнян）、伊万诺夫（Ю. М. Иванов）、米哈伊洛夫（Н. В. Михайлов）、吉布金（С. И. Гибкин）等同志的研究工作所奠定；在半固体或液体材料方面，则是列宾捷尔（П. А. Ребиндер）、白钦斯基（А. И. Баченский）、弗林克尔（Я. И. Френкель）、库萨科夫（М. М. Кусаков）、伏拉洛维奇（М. П. Воларович）、米哈伊洛夫（Н. В. Михайлов）等同志的研究工作所奠定。

此外，德国斯图尔特（H. A. Stuart）、霍温克（R. Houwink）、

斯套丁格 (H. Standinger), 法国索拜斯 (M. Cobac)、柏泰林 (A. Pettelin)、美国黎德曼 (H. Loaderman)、瑞奈尔 (M. Reiner)、宾哈姆 (E. C. Bingham)、拜奥特 (M. A. Biot), 英国哈瑞逊 (V. G. W. Harison)、斯密斯 (C. P. Smith), 荷兰布尔格 (W. G. Burger)、菲弗 (J. Ph. Pfeiffer)、萨尔 (R. N. J. Saal), 印度特鲁斯第尔 (C. Truesdell) 及日本榎木义一、中田修等人也在流变学方面作了一些工作。

现今,流变学是尖端性的科学,它的发展和其他科学一样,是与实践密切联系的。虽然它已经解决了一些重要的复杂问题,但大规模建设的全部实践,仍然向流变学提出了更多的问题。这些问题又进一步地促进了流变学的发展,使得这门年青的科学逐渐被人重视起来。例如,在蒸汽涡轮、喷气式飞机、原子能工业中都要要求找寻新的具有特殊性能的金属材料,而耐热性的研究,则是其中重要课题之一,这样,对金属流变性能中的徐变过程的研究就成为不可缺少的课题。又如,在建筑工程上,木材大量地被采用,对它的力学性质的进一步研究就占有极重要的位置,而关于温度和湿度变化时引起的弹性后效可逆形变和徐变不可逆形变的研究,以及超过塑性流极限的应力所引起的徐变形变的研究,则尤为重要。

笔者鉴于目前国内对流变学的介绍尚属少见,故把这些经常发表在专门文献中的著作,编写成这本书,以供我国广大科学工作者和工程技术人员作参考。书中介绍了流变学要素的基本概念,叙述了材料线性形变和非线性形变的一般规律,并阐明了非晶形物体、分散系和固体的基本物理力学和结构力学特性,以及这些基本概念在土和沥青方面的应用。笔者所以选择了这两种材料,是因为土(尤其是粘土)和沥青在某种程度上都可以视为分散系,它们典型地反映了流变学在固体和液体材料方面的发展和应用情况,虽然具体研究方法不同,但基本概念却有很大的一致性。

在编写本书的过程中,除有关杂志外,主要参考了下列书籍:

А. Р. Гланицын: Некоторые вопросы механики систем деформирующихся по времени, 1949;

И. Н. Гольденблат: Введение в теорию ползучести строительных материалов, 1952;

H. Freundlich: Thixotropy, 1935;

R. S. Rivlin: Rheology, 1956;

Proceedings of the Second International Congress on Rheology, 1954;

H. A. Stuart: Theorie und Molekulare Deutung technologischer Eigenschaften von hochpolymeren Werkstoffen, 1956.

流变学问题是具有很大科学研究和国民經济意义的课题。因此,本书如能促进讀者对这方面问题的概括了解,笔者就可以认为是尽到了自己的职责,但限于个人的业务水平 and 外文水平,书中难免有缺点或錯誤,笔者衷心感谢对本书提出指示、批評和意見的一切讀者。

編 著 者

目 录

序

第一章 緒論	1
§ 1 流变学及其相邻科学	1
§ 2 力和形变	4
§ 3 形变和能量变化	12
§ 4 徐变和松弛	17
§ 5 模型理論	22
§ 6 方程 $nH\dot{\epsilon} + E\epsilon = \sigma + n\dot{\sigma}$ 的几个特解	31
§ 7 稠性曲綫	37
§ 8 通用模型及其应用	39
§ 9 物体状态方程	52
第二章 綫性形变的一般規律	59
§ 1 加载及卸载对形变的影响函数	59
§ 2 綫性形变一般方程的解	63
§ 3 各类影响函数	70
第三章 非綫性形变的一般規律	76
§ 1 材料形变的三个阶段	76
§ 2 超过綫性关系时的形变規律	79
§ 3 亚彈性剪切理論	84
第四章 材料的結構力学特性	92
§ 1 材料的結構力学性质指标	92
§ 2 流动历程与立体結構网概念	100
第五章 土的流变性	109
§ 1 粘土的基本压密形变規律	109
§ 2 研究粘土結構力学性质的方法	114
§ 3 粘土的扭轉剪切形变	122
§ 4 飽水土压密过程中的徐变性	125

§ 5 冻土的流变性	133
§ 6 土形变历程的理论分析	137
第六章 沥青的流变性	147
§ 1 沥青的特性及其在流变学中的分类	147
§ 2 沥青的粘度	157
§ 3 沥青的弹塑性和流动性	166
§ 4 沥青完善流变曲线的理论分析	173
§ 5 温度对沥青流变性的影响	180
参考文献	189
重要名词汉俄英文对照表	195

第一章 緒 論

§ 1 流变学及其相邻科学

由于实践的需要,在很远的古代就开始了关于材料强度的研究。例如阿尔希特(公元前 430~365 年)、阿基米德 (Archimedes 公元前 287~212 年)及維特魯威(Vitruvius 公元一世紀)等都曾企图訂出結構物的計算方法,虽然由于这些方法沒有客觀的价值,而对于材料强度研究的发展沒有起到什么作用,但阿基米德在公元前 250 年左右发表的“論浮体”一文却是关于物体流动的第一部科学著作。至十四世紀末,列昂納尔多·达·芬奇 (Leonardo da Vinci)发表了“論水的流动及其測量”等一系列重要論文,可惜載有芬奇的在强度問題方面研究的手稿大部遺失,所以他的著作对材料强度的研究及发展並沒有表现出实質的影响。

彈性体变形的綫性形式的基本定律是 1678 年虎克(R. Hooke 1635~1702 年)提出的。1729 年勃尤芬格尔(G. B. Bülfinger)首先发表了关于应力与应变間的非綫性关系的研究报告。

以材料强度为研究对象的彈性力学作为一門独立的科学,首先系在十八世紀前半期的彼得堡科学院創立,它的奠基者就是俄罗斯科学院院士罗蒙諾索夫(M. B. Ломоносов, 1711~1765)、欧拉(L. Euler, 1707~1783)及伯諾里(D. Bernoulli 1700~1782)。

1748 年罗蒙諾索夫发表了著名的論文“气体彈性力理論的尝试”,坚决地斥責了按照过去长期习惯把气体彈性的原因归之于“无重量的彈性物质”的趋向。嗣后,在他的题为“論物体的硬性和流性”的論文中首次提出了液体及气体理論所依据的普遍的自然定律。

欧拉第一个研究了纵向弯曲問題,他还首先推导出理想流体

运动的基本微分方程,因而就给液体及气体的解析力学的发展奠定了开端。

伯諾里研究了彈性杆的橫向振動問題,他还首先确定了流体运动的压力、高度和速度間的关系。伯諾里原理是现代流体力学的一个基本原理。

沿着欧拉和伯諾里的道路,俄国学者茹拉夫斯基(Л. И. Журавский, 1821~1891)、雅辛斯基(Ф. С. Ясинский, 1856~1899)、基尔比切夫(В. Л. Кирпичев, 1845~1913)等发展了材料力学,这一方向后来也创立了结构力学。

另一条道路是从納維埃(C. L. M. H. Navier, 1785~1836)开始的,他第一个建立彈性体平衡及振动的普遍方程。他所得到的微分方程是表现为分子的位移并包含一个常数,这个常数代表物体的彈性性质。在同一时代,奥斯特罗格拉德斯基院士(М. В. Остроградский, 1801~1861)对动力彈性理論的发展作了重要贡献。納維埃理論的繼續发展,建成了数学彈性理論。法国拉梅(G. Lamé, 1795~1870)及克拉貝依隆(B. P. E. Clapeyron, 1799~1864)的卓有成效的工作,將納維埃理論应用于建筑物。必須指出,納維埃理論在某些方面是謬誤的,例如截面面积相等、狭长矩形截面杆的抗扭剛度似应大于圆形截面的抗扭剛度等。这种錯誤一直延續到1855年圣維昂(B. de Saint-Venant, 1797~1886)发表了关于棱柱体扭轉的理論为止。

到苏联社会主义革命胜利以后,無論是彈性理論或是塑性理論都得到了巨大的发展。在彈性理論方面有伽辽金(В. Г. Галеркин)院士、穆斯海利什維里(Н. И. Мусхелишвили)院士、列宾仲(Л. С. Лейбензон)院士、巴普考維奇(П. Ф. Папкович)教授等,在塑性理論方面有苏联科学院通訊院士依留辛(А. А. Ильюшин)教授、索柯洛甫斯基(В. В. Соколовский)教授及拉赫馬都林(Х. А. Рахматулин)教授等。

由于力学是一門和工程技术有密切关系的科学,所以力学必然推动工程技术,也必然被工程技术的新发展所带动。

我們知道，彈性理論是研究力在彈性體上的作用并決定此時所產生的應力和形變的科學。作為應用彈性理論的代表者就是材料力學。塑性理論是建立關於塑性形變的構成及其各階段所產生的應力規律的科學，它密切地聯繫着非線性彈性理論。例如，在所謂“簡單荷載”作用下彈塑性物體的形變規律可用具有相同拉伸圖的非線性彈性物體的方程來描述。所以，在現時已不能清楚地劃分彈性理論、材料力學、結構力學和塑性理論問題的范围。若干問題幾乎可以同樣成功地作為上述任一類力學的研究對象而解決。不僅如此，這種過去曾經是很自然的劃分，在現時由於這些學科的發展而變得不需要了。例如，關於棱柱形褶板和薄殼的計算、在彈性半無限體或半平面上的梁和板的計算及研究空間系統時作為計算單元的在彈性基礎上的平面的梁或拱等問題，都導致彈性理論和結構力學的結合。關於多角形板承載能力的計算及圓形或橢圓形板邊緣鉸的形成及其一點受載的極限力的計算等，都導致了塑性理論和結構力學的結合。至於著名的依留辛理論，則是彈性理論和塑性理論的綜合方法。

流變學就是在這樣的基礎上發生與發展的。在現代流變學中，研究物體的形變規律是從二個方向出發的：一個系由液體流動的定律出發，另一個系由固體形變的定律出發。但最基本的是時間因素。

流變學是一門建立在有關熱力學及物理化學的基礎上，由各種不同原因所引起的任何物體在變形時的構成及發展的一般規律的科學。作為力學的一個新的部門來說，它在現時是在熱力學、結晶學、地質學、物理化學、彈性與塑性理論、流體力學以及關於材料強度的知識等的基礎上發展的。

如所周知，一般的彈性與塑性理論的形變規律中，並不包含作為獨立變數的時間。例如，在彈性理論中，形變是由在指定時刻作用的力來決定的，而它与以前加荷的歷程無關。在塑性理論中，雖然已經需要知道物體由於以前的加荷而得到的應力和形變狀態，但是若荷載本身不變，也是假設求得的新形變在以後維持不變。

实际上,虽然荷载一直保持不变,但大多数材料的形变数值并非永是常数;而当荷载逐渐增大时,形变取决于加载速度。卸载后,剩余形变通常是向着原来零点方向逐渐消失。例如,木材、混凝土和砖石砌件等材料,当应力较小并把材料看作处于弹性工作时,就可以看到这种现象。应力越近于屈服点,时间因素的作用就越大。这些事实都说明,表示应力和形变关系的基本物理规律中应当包含时间。

流变学的不同于一般弹性与塑性理论,就在于它必须回答下面的问题:当外界作用的参数及历程为已知时,在某一瞬间物体中某一点的形变和应力是怎样的?

应当指出,应力、形变和时间之间不是函数关系,而只能写成微分或积分的形式。如果这个关系是函数关系,则在瞬时 t 的形变数值 ε 就与加载过程无关,也就是和 t 时间前发生的应力数值无关,但试验证明,先前加载的特征对整个以后的形变有本质上的影响。因此,函数关系不可能正确地反映材料随时间形变的实际图形。

此外,流变学的另一方面还研究了物质的机械状态及结构因素对力学性质的影响,开拓了物质结构力学。

所以,流变学是在化学-分子物理-固体力学的交界处生长起来的一门新学科,它阐明了现象上的一些基本规律,并从结构上提供了初步的说明。它是力学中研究较广义的运动的一个新的部门。

§2 力和形变

1. 力和形变的种类

作用于物体上的力,基本上可分成为二类。物体各个部分相互作用的力称为内力,周围物体对该物体作用而形成的力称为外力。由于一个物体的内力也可以成为另一物体的外力,所以,内力和外力的区分只可以是就某一物体而言。

通常,外力的来源有重力、弹力、张力、压力等,这些来自外界

的力，对该物体来说，均称为荷载。内力的形成是组成物体的分子、胶态质点或显微质点间作用的内聚力和内斥力的结果。

外力作用于物体表面上，若其作用方向与物体表面垂直，则称它为法向力；若方向与表面相切，则称为切向力。力对于它所作用的物体面积的比例，称为应力。力学上的任何应力都计算成压力的单位，其因次是 $ML^{-1}T^{-2}$ 。

内力能造成对外力的阻力，它能决定物体的物理内聚性、硬度、压缩和伸长的阻力以及物体的一切力学特性。若材料受予拉或减损了某一约束，则产生初应力。初应力形成的应力状态叫作自应力状态。

如果外力超过内力，则物体中发生形变。物体在几何形状上的改变称作应变。

固体、液体和气体的形变性质各不相同。对于形变的阻力，气体非常小，固体非常大，而液体则居中，但后者对于压缩和拉伸的阻力很大，对于其他形变的阻力却很小。

固体的各种各样形变可以分成基本的五类：压缩、伸长、切变、挠曲和扭转。液体和气体由于动性而不同于固体，它们在非常小的力（例如，压力差）的作用下即发生运动（流动）。流动是形变的一种形式，此时形变的数量，在恒定作用力的影响下连续增加。气体的流动不同于液体的运动，它受到压缩时密度也发生变化。

固体的伸长形变用相对伸长的数量来表示。切变形变的数量则取决于切变角正切的相对切变，在均匀切变的情况下，相对切变的数量在一切点中都相等。压缩形变则用相对压缩的数量来表示。在伸长和压缩的数量间有一定的关系。任何的伸长，在与伸长方向相垂直的方向中，必同时具有压缩，其尺寸变化用相对横截压缩的数量来表示。横截压缩数量与相对伸长数量的比例称为泊松(Poisson)系数。

为了要充分叙述一个平面中的均匀形变，只要知道相对伸长、相对切变和泊松系数的数值就足够了。为了要在三个方向表示形变(立体形变)，则每一个这些数量都必须知道三个数值，相应地，

这些数值就是应力分量及形变分量，它們之間是有一定关系的。

2. 虎克定律

理想彈性体，其形变 ε 和应力 σ 成正比：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-1)$$

这就是虎克定律。式中 E 为表示物体刚性的模量，具有抵抗形变的意义，其因次为单位面积的力。如应力为切应力时，则发生切应变，而模量当为剪切模量 (G)；如应力为拉应力或压应力，则相应的模量为弹性模量 (E) 或本体模量 (K)。

空间应力状态的应力与形变间的关系，也可以由虎克定律加以推广而得到。在下列諸条件下，这种推断的实际可能性，对于多数的建筑材料来说是为实验所证实的：

(1) 同时存在的所有的应力分量，以及它們各自单独所引起的作用，并不使材料进入塑性状态，即材料是在弹性形变中；

(2) 材料是各向同性的；

(3) 与所研究的物体大小相比，形变是异常小的；

(4) 形变的过程是等温的。

因此，按照虎克定律，应力 σ_x 引起物体在 x 轴方向的相对伸长量为

$$\varepsilon'_x = \frac{\sigma_x}{E},$$

在与所作用的力相垂直的 y 与 z 轴的方向，其量为

$$\varepsilon'_y = \varepsilon'_z = -\mu \frac{\sigma_x}{E}.$$

同样，我們可以得到：

$$\varepsilon''_y = -\frac{\sigma_y}{E}, \quad \varepsilon''_x = \varepsilon''_z = -\mu \frac{\sigma_y}{E};$$

$$\varepsilon'''_z = -\frac{\sigma_z}{E}, \quad \varepsilon'''_x = \varepsilon'''_y = -\mu \frac{\sigma_z}{E}.$$

成对的剪应力 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ 将引起与 xOy 平面相平行的面的变形，而其他各面将保持不变形。根据虎克定律，我們得到剪应力 (τ)

与剪切应变(γ)间的关系:

$$\gamma'_{xy} = -\frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma'_{yz} = \gamma'_{zx} = 0;$$

同样, 由于剪应力 $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ 的作用, 我們得到:

$$\gamma''_{yz} = -\frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \gamma''_{zx} = \gamma''_{xy} = 0;$$

由于剪应力 $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ 得到:

$$\gamma'''_{zx} = -\frac{\tau_{zx}}{G}, \quad \gamma'''_{xy} = \gamma'''_{yz} = 0,$$

式中: $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, 而 μ 为泊松系数。

这样, 所有应力分量的存在决定了以下的形变分量:

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

此式中形变分量是以应力分量表示的, 我們时常需要相反的关系式, 即以形变分量来表示应力分量。为此, 可由方程(1-2)解 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 等。

略去演算, 最后得到:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2G \left(\varepsilon_x + \frac{3\mu}{1-2\mu} \varepsilon_{cp} \right), & \tau_{xy} &= G\gamma_{xy}; \\ \sigma_y &= 2G \left(\varepsilon_y + \frac{3\mu}{1-2\mu} \varepsilon_{cp} \right), & \tau_{yz} &= G\gamma_{yz}; \\ \sigma_z &= 2G \left(\varepsilon_z + \frac{3\mu}{1-2\mu} \varepsilon_{cp} \right), & \tau_{zx} &= G\gamma_{zx}, \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中: $\varepsilon_{cp} = \frac{1}{3} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$ 。

由方程(3)可以得到

$$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{\sigma_y - \sigma_z} = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\varepsilon_y - \varepsilon_z}, \quad \frac{\sigma_y - \sigma_z}{\sigma_z - \sigma_x} = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_z}{\varepsilon_z - \varepsilon_x}. \quad (1-4)$$

这些比例关系指明了形变摩尔圆(ϵ, γ 为坐标)与应力摩尔圆(σ, τ 为坐标)在几何上的相似性。

凡是形变服从虎克定律的物体,就称为虎克物体。它的形变数量是应力的线性函数。服从虎克定律时的最大应力,叫作比例极限;而形变不再恢复时的限度,便叫作弹性极限。当应力比弹性极限高时,在取下荷载后形变就保持住了。在恒定的超过弹性极限的荷载下,物体便慢慢地变形,也就是物体在进行流动。

开始造成流动的应力,称为流动极限,而其形变则叫作塑性形变。工程上时常把塑性的概念与不显著增加荷载而引起形变的显著增长的受力阶段联系起来。

例如,当软钢纯拉伸时,在图上这个阶段相当于流动区域,而且视给定材料而有一定的正应力及剪应力数值。紧随流动阶段,在软钢的拉伸图上有显著的“强化”区域,材料在这个阶段的状态称为强化状态。如所周知,当流动阶段甚长时,设计的荷载不致于使材料到达强化区域,因而理论上计算时,将工作图简化,亦即将流动阶段当作是无限长的。这样,我们引进理想塑性物体的概念,图1就表示出它的拉伸及剪切图。

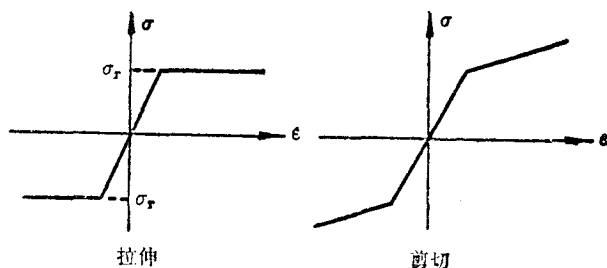


图1 理想塑性体工作图

絕大多數的建築材料在破壞的瞬時,應力和形變間的關係與虎克定律有很大的偏差。故各種建築材料可採用簡化的工作圖來代替虎克定律,即用應力和形變間的曲線關係來代替線性關係。

3. 牛頓定律

流体运动时发生内切应力的特性称为粘性或内摩擦。这一特