流體與固體的物理性質

MECHANICAL PROPERTIES OF SOLIDS & FLUIDS

原著者 R. C. STANLEY

陳 蕙 珍 譯

流體與固體
的物理性質

MECHANICAL PROPERTIES OF SOLIDS & FLUIDS

原著者 R. C. STANLEY
陳 蕙 珍 譯

智林出版社印行

序

敝人曾做物性學方面的實驗，發現物體中固態與液態所具的特性、彈性、黏滯性及塑性方面的特徵，往往左右實驗上的取材。而目前能夠以淺顯文字，詳細地敍述物體力學特徵的書籍並不多見。本書是譯者在圖書館的尋書堆中，翻找出來的，著者乃英國人史丹尼（St-anely）。

本書主要分成六章，從虎克定律開始之理想施力對物體的影響，進一步係流體受張壓力作用所發生的情況，其中包括滿足牛頓力學的流體與非牛頓學說中的流體。本書有一專門敍述晶體受壓所發生晶格的缺陷及脫位的種種情況。第六章算是今日工業上極爲重要的技術——眞空物理；卽介紹眞空電鍍的基本知識，儀器的功效及應用上的探討。

根據原著的意思，此書適合大學一、二年級或專三以上的學生閱讀。翻譯中的名詞，盡可能參閱教育部頒佈之物理學名詞、化學名詞及材料科學名詞。人名因恐讀者不能熟悉，除了按照音譯外，還附以原文。參考書目大致翻閱美國物理雜誌。

譯者　陳蕙珍

目　　錄

第一章　彈性學 …… 1

1-1　介　　紹 …… 1
1-2　應力——應變曲線 …… 4
1-3　原　子　鍵 …… 11
1-4　應力和應變 …… 16
1-5　模數間的關係 …… 25
1-6　模數間的關係——一種交變的導出 …… 29
1-7　應變能量 …… 32
1-8　彈　　性 …… 35

第二章　彈性學的應用 …… 36

2-1　介　　紹 …… 36
2-2　桿內的扭轉 …… 36
2-3　樑的彎曲 …… 38
2-4　由縱向壓縮引起桿的彎曲 …… 48
2-5　螺旋彈簧 …… 50
2-6　薄壁受壓容器內的應變 …… 54
2-7　受應力物體的振動 …… 57
2-8　模數的計算 …… 61

2-9 應　變　計 ………………………………………… 67
2-10 液　　　體 ………………………………………… 75

第三章　可塑性 ………………………………………… 79

3-1 介　　　紹 ………………………………………… 79
3-2 固體的結構 ………………………………………… 79
3-3 變形機構 ………………………………………… 86
3-4 格子缺陷 ………………………………………… 87
3-5 晶體內脫節的移動 ………………………………… 94
3-6 脫位乘積 ………………………………………… 98
3-7 力學性質上的脫位效應 ……………………………100
3-8 顯微結構 …………………………………………104
3-9 纖維混合物質 ……………………………………105

第四章　黏滯性 …………………………………………107

4-1 介　　　紹 …………………………………………107
4-2 黏滯性與彈性 ……………………………………109
4-3 經由管之流動 ……………………………………112
4-4 奧斯特威爾特黏滯計 ……………………………119
4-5 旋轉圓柱黏滯計 …………………………………121
4-6 斯都克的落球黏滯計 ……………………………124
4-7 其他方法決定液體黏滯係數 ……………………126
4-8 石油的黏滯係數 …………………………………127
4-9 液體黏滯係數與壓力、溫度變易的關係 ………129
4-10 擾　　　動 ………………………………………130
4-11 柏努力方程式 ……………………………………133
4-12 柏努力公式的應用 ………………………………138
4-13 動態提升 …………………………………………142

第五章　氣體的黏滯性及非牛頓學說之流體 ………144

5-1 介　　紹……144
5-2 黏滯係數及氣體的動態理論……144
5-3 流經試管的氣體……150
5-4 氣體旋轉柱黏滯計的使用……152
5-5 非牛頓學說之流動……154
5-6 牛頓學說之流體的應用……157
5-7 滑　　潤……158

第六章　眞空物理……165

6-1 介　　紹……165
6-2 動能理論與氣體之壓力……167
6-3 電導與抽氣速率……176
6-4 眞　空　計……184
6-5 抽氣系統……192
6-6 眞空抽氣……194
6-7 眞空成分……203

第 1 章
彈性學

1.1 介 紹

若一個力加在固體上，而固體仍然保持在靜力平衡，然而它在某些方面將變形，顯然地，這些變形的總量是依外力的量及如何作用這些外力，但是更基本的，是視固體的原子層構造而定，這一章我們首先檢核當一變形力加在一眞實固體上的結果，其次將解釋兩原子間的作用力，我們將討論更多的應力與應變的意義和它們間的關係，下一章我們將利用這些概念繼續討論些特殊問題。

若是要測驗和比較結果，就是說外加力和變易的結果在邏輯上必須是可定義的，讓我們考慮一條金屬線沿軸向伸張，原先的長度是 l_0，增加的長度是 Δl，假如現在有另外一條相同的線，但長度爲 $2l_0$，用如同前條線所施的外力去伸張，則結果將伸張$2\Delta l$，由此例子可知變形是長度的函數，因此，可用樣本比較而得其他線的測驗結果，原先長度對變形量的影響可以不需要考慮，只需要簡單地考慮相對變異$\Delta l/l_0$，或是每單位長度內的相對位移，就稱爲應變（strain），同理地，線的厚度（粗細）亦是一因素，線的截面積愈大，則作用的外力相對比例增加，以得到相同的應變，因此，用單位面積上的力去表示是很方便的，在這個截面積上，此力叫做應力（stess）。

一個試驗下的樣本，不需要一定是加外力的線，它可以是外壓力加在木頭上，這外力不需是沿軸方向的力，它可以是一個切應力而使

木頭樣本產生一種角變形或切應變，如圖（1-1）所示，或者所加力能夠穩定地加在物體表面，若樣品受一似靜壓力，產生體積應變，則在所有例子中，外加應力有一個線性關係，不管外力如何加在物上，則一定產生應變，假如應力加兩倍，則應變也增加爲兩倍，在第三章將敍述到關於應力及應變非線性的關係，在本章的情況下，應力成正比於應變，因此若固體假想爲完全彈性時，這彈性關係建立於1678年虎克發現的虎克定律（Hook's Law），若應力移開則應變亦隨之而消失，但有一特殊的極限應力加在樣品上，它將不是如此，因爲固體不再恢復到原先的空間量度，接近彈性極限，樣品獲得一個永久的組合。

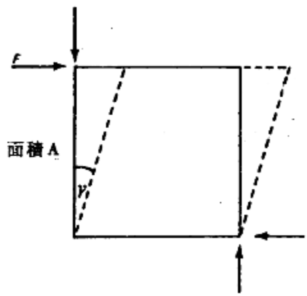

圖1·1　立方體由於切應力所產生的形變

虎克定律說明應變和所加外力成正比，可以一條線或木條在外加張力的情形下表示如 $\epsilon=s\sigma$，這裏 ϵ 是線性應變，σ 是正向壓力，s 是比例常數，叫做彈性聲順常數（elastic compliance const）或（compliance）

也可以寫作　$c=\frac{1}{s\sigma}=\frac{\sigma}{\epsilon}$ ……………………（1-1）

亦稱爲彈性勁度常數（elastic stiffness const）或勁度（stiffness）或彈性常數（elastic const）

一條線在外加張應力下的彈性勁度也可定義是楊氏係數(Young's modvlus）定義如下：

Young's modulus $E=\frac{\text{正向應力 }\sigma}{\text{線性應變 }\epsilon}$ ……（1-2）

$$=\frac{\text{每單位截面積的外加力}}{\text{每單位長度的長度改變}(\Delta l/l_0)}\cdots(1\text{-}3)$$

同樣地，容積彈性係數（bulk modulus）可定義爲：

$$\text{容積彈性係數}=\frac{\text{容 積 應 力}}{\text{體積或容積應變}\ \theta}$$

$$=\frac{\text{壓 力}\ p}{\text{單位體積的改變量即}\ (\Delta V/V_0)}\cdots\cdots\cdots(1\text{-}4)$$

因爲當壓力增加時體積即縮小，容積彈性係數是正値，爲了要合理，因而上式的符號常取負値，以配合定義，容積彈性係數就稱爲壓縮係數（compussibility）。

在液體或氣體上加壓力，可以很方便的壓縮成不同形式的體彈係數，擧例而言，一個小小壓力 δp 的改變加在容積 V 的容器，將產生氣體 δV 的改變，K 可以寫作

$$K=\frac{\delta p}{\delta V/V}=V\frac{\delta p}{\delta V}\ \text{在非常小的極限下}$$

$$K=V\frac{dp}{dV}$$

通常第三種係數是使用切變係數（模數）（shear modulus）定義爲

$$\text{切變模數}\ G=\frac{\text{切應力}}{\text{切應變}}$$

$$=\frac{\text{每單位面積的正切力}\ (\tau)}{\tan\gamma}\ \cdots\cdots\cdots\cdots(1\text{-}5)$$

這可以用圖 1-1 表示，當一個表面積爲 A 的正四方體使其受一切變力 F 和經過一 γ 角度的變形，也就是說四面體的兩平行面的位移不同，則其應變不同，很小的切應力，$\tan\gamma$ 値趨近於 γ 角度，因而切變係數也稱爲剛性係數（rigidity of modulus）或扭轉模量（torsion modulus）。

接近楊氏係數的理論是波森比（poisson's ratio）若實驗是爲求桿上的楊氏係數的量度，那就是外加的張力後，線長度的改變將會發現橫向位移的減少和縱向位移的增加是同時的，相反的，我們在桿上

加一壓線力也會得相同的結果，相對坐標的改變可以如下：

$$\underline{\text{波森比例}}\,\nu = -\frac{\text{橫向應變}}{\text{縱向應變}}$$

$$= -\frac{\text{單位寬度內寬度的改變量}}{\text{單位長度內長度的改變量}} \cdots\cdots\cdots (1\text{-}6)$$

因爲橫向和縱向應變的符號相反，因此在（poisson ratio)波森比例數前加負號，以便得出正的比例值。

其他一般所提到的形式是模量比（Specific modulus），和強力比（Specific strength）而模數比即是楊氏係數除以物質的密度 ρ，而強度比是張力強度的極限（u.t.s.）—就是材料所能承受的最大張力再除以材料密度 ρ，兩者的單位都是 m^2s^{-2} 是速度的平方，這令人回想到介質中聲波的傳播速度爲彈性係數除以密度的結果開根號而得到。

由定義可以看到楊氏係數和切變模數的單位是應力的單位，即每單位面積上的力。大部份材料的切變模數大約是楊氏係數的⅓到½左右，當壓縮係數是壓力單位的倒數時，容積模數和壓力的單位相同。波森比是無單位的，且對各方均等性的材料，其值在 0 到½之間。一般典型的性質我們列入表 1-1，在下一章我們將討論這些值的計算方法。材料應力和應變間的關係用應力應變曲線很方便地可以表現出來。

1.2 應力—應變曲線

應力 - 應變曲線通常是使一桿或棒加外力而得的是最簡便可得的方法，樣品的形式通常像圖 1-2 所示桿子中間一定截面積部分，用兩個記號標出的長度 l_0，F 是負載的應力，使 l_0 伸長到 l，這試驗是繼續穩定地增加負載 F，應力 F/A_0 和應變 $\Delta l/l_0$ 相對變化可繪出連續的圖，Δl 是 $l-l_0$。試驗階段中計算所用的截面 A_0 將普遍的使用，不管它是否會相當徹底的消滅，舉例說明，在桿子破裂以前，將會發生如圖 1-3 成頸狀的伸長，而它可考慮是整個受應力桿子中僅限於局部的伸長。

各種不同物質的彈性係數值

表 1-1　各種不同物質之典型的彈性係數值
（這些物質將由組成熱處理與形式之法則所決定）

物　質 （20℃）	楊氏係數 E $(10^{10}\,Nm^{-2})$	切變模數 G $(10^{10}\,Nm^{-2})$	容積模數 K $(10^{10}\,Nm^{-2})$	泼　森　比 V	張力強度極限 $(10^{8}\,Nm^{-2})$	強力模數（E/ρ） $(10^{6}\,m^{2}s^{-2})$	強度 uts/ρ $(10^{4}\,m^{2}s^{-2})$
鋁							
煅煉	6.9				0.5	25	1.8
螺絲	7.1	2.6	7.6	0.34	2.5	26	9
拖線	7.0				2-4.5	26	7.5-17
黃銅	10.1	3.7	11.2	0.35	1.5-4	12	2-5
銅	13.0	4.8	13.8	0.34	1.2-4.5	15	1.5-5
鐵							
鑄鐵	21	8.1	17.2	0.29	1-2	27	1.5-2.5
熟鐵	19	7.5	13.6	0.27	3-6	24	4-7.5
鉛	1.6	0.55	5.9	0.45	0.15-2	1.4	0.1-2
磷青銅	12.0	4.3	19.1	0.38	2-10	13	2-11
鋼							
碳鋼	21.0-21.3						
低合金	19.9-21.4	7.7-8.4	16.5-18.0	0.27-0.30	7-23	25-27	10-30
碳纖絲							
高模數	38-45	—	—	—	14-21	190-220	70-100
低模數	24-27	—	—	—	24-32	140-160	140-190
玻璃纖絲							
高強度	7-8.5	—	—	—	17-26	25-34	70-100

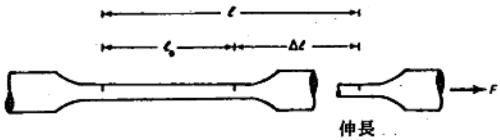

圖 1-2　張力測試樣品

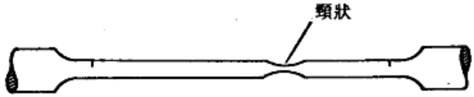

圖 1-3　張力測試樣品的局部失敗

假如一輕的鋼線負載一張力，應力 - 應變曲線可由 1-4 (a)或 1-4 (b)表示出來，彈性限度內圖上A點所示應變的增加是成正比例於應變的增加，超過此點則將出現永久變形。因爲相對應於A以下的點，樣品是完全彈性的，那就是說，當外加應力移去時，幾乎所有的應變都消失無遺。曲線中水平部分的轉變引示一個非彈性的變形與金屬的塑性流動（第三章物相塑性流的機構，這章的討論將考慮物質彈性方面）這轉變是從一般曲線到尖銳頂點，如圖所示。當應力到達對應A點

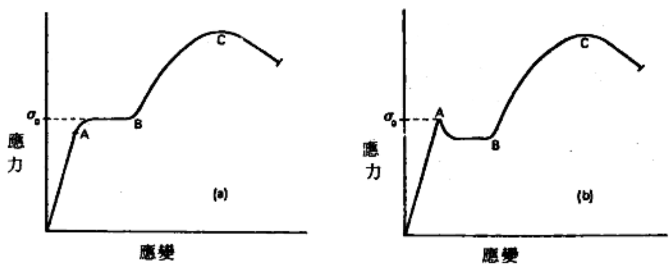

圖 1-4　張力下輕的桿狀樣品的應力一應變特性曲線

，由於試驗品中某些部份變化產生應變的突然增加。這是確切的產生屈服力σ_0（yield stress）的開始在B點以下，工作硬化（第三章將討論）增加，導致向上凹的曲線，但是同時截面積將減少，由頸狀的開始截面積急遽的減少，桿子分裂以前，曲線或許是向下凹的圖形。

如同屈服力，曲線上的其他點引起工程師們特別的興趣，這就是防應力(proof stress)或屈服強度和從塑性變形中得到特殊如同張力的量，通常是0.1％，但是0.2％，0.5％也同樣地使用，防應力的定義是表現在圖1-5中。防應力比彈性變形更明晰地定義出，然而屈點（yield point）不是時常清晰可辨認的。

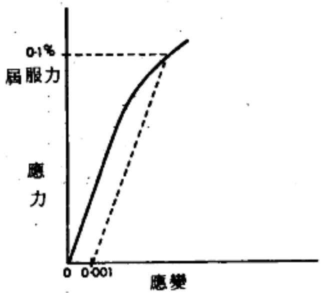

圖1-5　以圖定義屈服應力

工程師們使用更深進的形式是張力強度極限，這是發生在應力-應變曲線中應力的最大值，是對應於C點如圖1-4所示，此係樣品所能承受的最大負載除以樣品原先截面積。

對於含碳量很高的鋼條，從彈性狀態到塑性狀態，通常有一個漸漸的轉變。在此例，通常將曲線的垂直部分的終點歸之於比例極限，如圖1-6的B，在B點以下所有的點皆能永久辨認的。

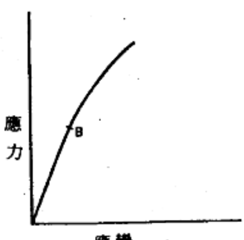

圖1-6　B點發現的比例極限

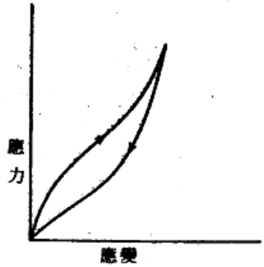

圖 1-7　橡皮內的力學帶性

有些物質如同橡皮之類，有一個非線性的應力與應變曲線，但是如果應力移去時仍然恢復原先的形狀，則我們仍稱它爲彈性現象如圖 1-7，這種物質證明力學性 (mechanical hysteresis) 兩線間的封閉面積是作用整個過程中能量的消耗量，爲貯存在彎曲橡皮內的能量，使橡皮產生熱量，但仍有一應力可到達彈性極限，亦即將應力移去將無法回復原來的形狀。對於像銅的合金或鋁之類非常軟的金屬，甚至於一個非常小的力就可引起永久的變形，如圖 1-8 所示，應力和應變間無線性關係，必須繪出曲線前端的斜率來決定 $d\sigma/d\epsilon$ ，以求得楊氏係數 E，這應變 ϵ 相對應的應力 σ 可以考慮爲彈性應變 $\epsilon_1=\sigma/E$ 及永久應變 ϵ_1 的總和。

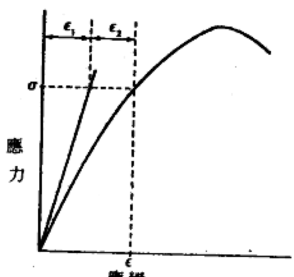

圖 1-8　對於可延展物質的應變可考慮是彈性應變 ϵ_1 和永久應變的總和

溫度對應力 - 應變曲線亦有影響。所有的彈性模數因溫度的增加而變小，舉例而言，鐵的楊氏係數之溫度效應是 $dE/dT=-4.8\times10^{7}$

$Nm^{-2}K^{-1}$，或在非 SI 單位，零度到一百度（0 ～ 100°C）是－7.0 $\times 10^{2}$ lbf in^{-2} K^{-1}。溫度漸提升時，甚至加一外加應力，斜變隨時間的增加而繼續連續着，這種狀態稱爲蠕變（creep）。在一相對的不急速的情況時斜變的發生，舉例而言，試驗合金鋼線大約 500°C 或許要連續幾個月甚至幾年。一個樣本外加一個足夠量定常負載的外加張力，則它就產生蠕變，證實了內部應變包含彈性部分及永久部分。假如常溫和定應變下，應變相對時間的圖形，第一部分的曲線可得到，可稱爲最先蠕變的週期（Fig 1-9），當這圖形成直線以後，第二蠕變的週期產生，一定蠕變比例的週期將是一個連續可討論的週期。甚至幾年下來決定物質使用的時間，蠕變率在這區域定義爲應變／時間。第三蠕變的發生是當它接近邊界時，在這獨特的區域，金屬的加入將擾亂原先晶體的方位，晶體開始崩潰，導出頸狀現象和曲線斜率的增加。

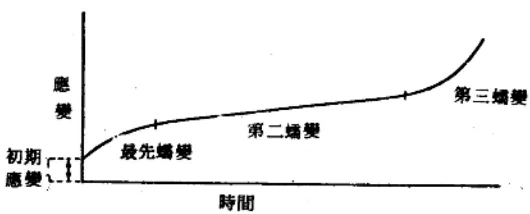

圖 1-9　樣品於定常張應力下之形變與時間關係

相反的，若一桿子在定量而致蠕變的情況下，應變更甚於應力時，一個應力將因切變產生。當時間經過一段以後，我們將會發現甚至於應變保持一定時，這個被發生的應力將會減少。這個現象我們稱之爲張弛（relexation），對於有些物質，譬如玻璃，它的蠕變將由最小的應力開始，所供給的溫度足夠高，將以一個比數連續着，這比數幾乎成比例於外的應力。這個物質可稱爲是一黏滯性（viscous manner）的表徵。

當受張力的樣品最後終於破裂時，破裂的實況可分爲幾個不同形式。一個尖銳的破裂而不是由於可估計的彈性變形或蠕變所產生時，

稱之爲脆裂（brittle fracture），同時，假如由彈性或黏滯流引起樣品厚度逐漸減薄到零，這種樣品就稱爲裂斷（rupture），因此，在還沒到達零厚度（zero thickness）以前樣品就破裂，也就是裂斷以前，它就破裂，這種破裂就說是可延展的破裂（ductile fracture），一個物料的延展性量度是伸長百分率（percent elongation），定義如下：

$$伸長百分率 = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1\text{-}7)$$

這裏 l_0 是樣品原先的驗測長度， l_f 是最後的長度，由裂縫桿子的再聚集所定。

至於一個物料是否將延裂或破裂，可從硬度測試上顯出。就和布里涅試驗（Brinell test），就是將剛硬的鋼球加壓在一個由已知負載支持的物料上，就引起物料成一個深的凹入，這可計算其剛硬度，布里涅耳發現張力強度增加時，剛硬度隨之增加。其他形狀的缺口亦可使用，例如維克（Vicker）試驗是使用菱形角錐，因爲一個可延展的物質，將有一向外的物質流；導致物質聚集在凹口的邊緣，當負載被解開時，，它將有些彈性的恢復。

如同張力伸長一樣，壓縮力所引起的應力－應變曲線亦可標示如圖，對大部分的物質給予一個線性應力及應變區域，可證明有些程度的彈力性質，就如同張力形態的曲線。再說，當應力增加時，彈性極限和屈點將抵達，因此當物料完全破裂時，通常隨之而來是有些彈性流即將至壓碎極限（crushing limit）如圖 1-10 所示。

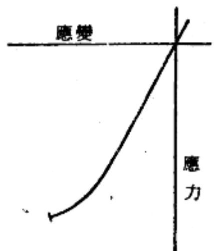

圖 1-10　脆的鋼材料在壓縮下的應力
—應變特性曲線

1.3 原 子 鍵

眞正試驗的結果到底能解釋到怎樣的程度呢？雖然創造出外加應力變形量的正確假設是困難的，甚至是不可能的，但當一物體發生變形可以找到合理的解釋，不管是對物體發生的事情或是作物體性質上的解釋。爲了做到這一點我們必須求助於原子間鍵力的知識，將可回想到最強的鍵是離子鍵、共價鍵和金屬鍵。

離子鍵的發生是因原子間帶有簡易可分開的價電子，像鹼金屬一樣。有些元素如鹵素類，原子有一獲得電子的傾向，使它最外層軌道達到飽和電子數。舉例而言，一個中性的鈉原子（原子序 11）很易於失去它 $3s$ 上的電子。就變成正離子，而得到氖（原子序 10）的穩定電子組態，同樣地，氯（原子序 17）很易得到一個電子使 $3p$ 軌道達到飽合，就變成負離子而得到氬（Ar，原子序 18）的穩定電子組態，也就是電子從鈉中性原子上失去後就加入中性的氯原子上，氯原子所到一個電子成爲負離子，而鈉離子失去一個電子就成爲正離子。正的鈉離子和負的氯離子由於靜電力能使其以附在一起，然而，離子間彼此接近有一個極限値，假如他們太接近時，它們的最外層電子層會產生重疊，這是不爲庖立不相容原理所允許的，結果離子被重疊部分所產生的排斥力彼此相排斥，這些離子將佔有一個平衡的位置，是時排斥力和靜電吸引力將達到一平衡，如圖 1-11 所示爲氯化鈉巨大分子的形態。