

科學圖書大庫

機械工程實驗

王德翔 杜亞雄 合編
楊永盛 聶國禎

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

機械工程實驗

王德翔 杜亞雄 合編
楊永盛 聶國禎



徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會

科學圖書大庫

監修人 徐銘信 科學圖書編譯委員會主任委員
編輯人 林碧銓 科學圖書編譯委員會編譯委員

版權所有

不許翻印

中華民國六十六年九月三日再版

機械工程實驗

基本定價 1.20

編者 王德翔 中正理工學院副教授
杜亞雄 中正理工學院工學士
楊永盛 中山科學研究院研究助理
聶國禎 中正理工學院機械工程碩士

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(63)局版臺業字第0116號

出版者 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686號
發行者 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥帳戶第 15795號
承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話 9719739

我們的工作目標

文明的進度，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力。在整個社會長期發展上，乃對人類未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，自應各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同將人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之收穫，已超越以往多年累積之成果。昔之認為若幻想者，今多已成為事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，尤為社會、國家的基本使命。培養人才，起自中學階段，此時學生對基礎科學，如物理、數學、生物、化學，已有接觸。及至大專院校專科教育開始後，則有賴於師資與圖書的指導啟發，始能為蔚為大器。而從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啟導後學，旨趣崇高，彌足欽佩！

本基金會係由徐銘信氏捐資創辦；旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利，民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，惜學成返國服務者十不得一。另曾贈送國內數所大學儀器設備，輔助教學，尚有微效；然審情度理，仍嫌未能普及，遂再邀請國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。以主任委員徐銘信氏為監修人，編譯委員林碧銓氏為編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱工作。「科學圖書大庫」首期擬定二千種，凡四億言。門分類別，細大不捐；分為叢書，合則大庫。為欲達成此一目標，除編譯委員外，本會另聘從事

翻譯之學者五百餘位，於英、德、法、日文出版物中精選最近出版之基本或實用科技名著，譯成中文，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，內容嚴求深入淺出，圖文並茂。幸賴各學科之專家學者，於公私兩忙中，慨然撥冗贊助，譯著圖書，感人至深。其旅居國外者，亦有感於爲國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬多寡，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，其報國熱忱，思源固本，至足欽仰！

今科學圖書大庫已出版一千餘種，都二億八千餘萬言；尚在排印中者，約數百種，本會自當依照原訂目標，廣續進行，以達成科學報國之宏願。

本會出版之書籍，除質量並重外，並致力於時效之爭取，舉凡國外科學名著，初版發行半年之內，本會即擬參酌國內需要，選擇一部份譯成中文本發行，惟欲實現此目標，端賴各方面之大力贊助，始克有濟。

茲特掬誠呼籲：

自由中國大專院校之教授，研究機構之專家、學者，與從事工業建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究之學人、留學生；

大專院校及研究機構退休之教授、專家、學者

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或就多年研究成果，分科撰著成書，公之於世。本基金會自當運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。尚祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啓

中華民國六十四年九月

編輯要旨

本書係遵照教育部新頒五年制工專機械科暫行課程標準編輯而成，全書分爲(1)材料試驗(2)流體試驗(3)力學及測量試驗(4)熱工試驗等四大基本機械工程實驗。其中，材料試驗內容包括拉伸、硬度、衝擊、疲勞、壓縮、彎曲、剪斷及顯微鏡等實驗，流體試驗內容包括泵之性能、管路摩擦阻力、送風機、孔口板特性及空壓機性能等實驗；力學及測量試驗內容包括車床精密量測、動平衡、光彈性、車床切削力、機械振動及一般量測等實驗；熱工試驗內容包括溫度計檢定、固液體燃料熱值測定、氣體燃料熱值測定、廢氣分析、熱傳導係數測定、熱交換器、蒸餾、着火點、汽油引擎性能及柴油引擎性能等實驗。全部實驗分三學期授畢，每學期1學分，每週實驗3小時，合計八十四小時。

本書實驗單元係根據編者多年教學經驗訂定，惟各校環境、設備等不同，實驗次序可酌量變更。

王德翔 杜亞雄 楊永盛 聶國禎 謹識

中華民國六十六年四月於桃園

目 錄

材 料 試 驗

實驗一	拉伸試驗	1
實驗二	硬度試驗	8
實驗三	衝擊試驗	16
實驗四	疲勞試驗	22
實驗五	壓縮試驗	25
實驗六	彎曲試驗	29
實驗七	剪斷試驗	34
實驗八	顯微鏡試驗	37

流 體 試 驗

實驗一	泵之性能試驗	43
實驗二	管路摩擦阻力實驗	47
實驗三	送風機性能試驗	55
實驗四	孔口板特性實驗	59
實驗五	空氣壓縮機性能試驗	62

力學及測量試驗

實驗一	車床之精密測量	67
-----	---------	----

實驗二	動平衡試驗	72
實驗三	光彈性實驗	76
實驗四	車床切削力測定	78
實驗五	機械振動測定	80
實驗六	一般測量	82

熱 工 試 驗

實驗一	溫度計之檢定	89
實驗二	固體或液體燃料之熱值測定	91
實驗三	氣體燃料熱值測定	94
實驗四	廢氣分析	97
實驗五	熱傳導係數之實驗	100
實驗六	有關熱交換器之實驗	102
實驗七	ASTM蒸餾試驗	104
實驗八	著火點實驗	106
實驗九	汽油引擎性能試驗	108
實驗十	柴油引擎性能試驗	111

材料試驗

著者：楊永盛

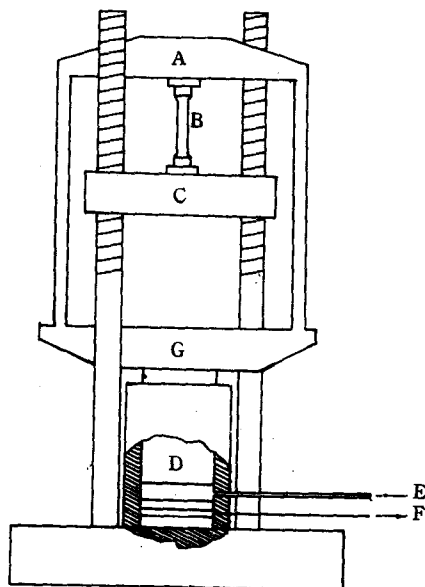
校對：王德翔

實驗一 拉伸試驗

1. 目的 測定材料之彈性係數、彈性限、比例限、降伏強度、伸長率、及斷面縮率。

2. 所需設備

(1) 萬能試驗機 (Universal testing machine) 拉伸試驗機雖有各種型式，但是各種試驗機的主要原理大都相同，通常利用油壓或機力將荷重加於試桿上，使試桿受到拉力。圖 1-1 所示為 Baldwin-Tate



- A : 拉力夾頭
- B : 試桿
- C : 可調夾頭
- D : 液壓活塞
- E : 由液壓幫浦出來之液壓油路
- F : 通往荷重指示計 (Bourdon meter) 之液壓油路
- G : 試驗枱

圖 1-1 萬能試驗機。

2 機械工程實驗

—Emery 萬能試驗機。所謂「萬能」乃因該試驗機不但可以做拉伸試驗，還可做壓縮、彎曲等試驗。

荷重係藉液壓幫浦將油打入油缸舉起活塞D而加力，試驗枱G與拉力夾頭即被舉升，試桿被拉力夾頭A及可調夾頭C所夾緊（若做壓縮試驗時，則試桿係置於枱與可調夾頭間）。油缸內之油不僅有向上的壓力舉起活塞，同時也有一等值向下的壓力作用於缸底的感囊上，將感囊內的油自油路F擠至荷重指示計（圖1-2）之管路，經校準後，可指出荷重大小。加力或去力之速率，可調整油閥大小加以控制之。

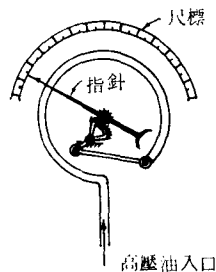
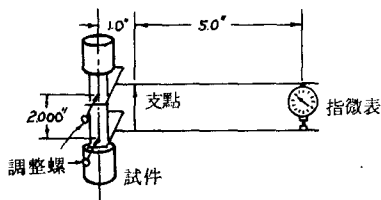


圖 1-2 荷重指示計 (Bourdon 計)。

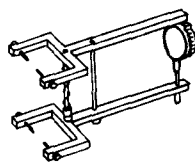
(2) 卡尺 (Caliper rule) 或測微器 (Micrometer)

(3) 伸長計 (Extensometer) 和指微表 (Dial gage) 伸長計係用以測定試桿受力時的伸長量。如 (圖 1-3) 所示為使用機械方法度量伸長量最常用之 Moore 伸長計裝置圖。該圖係利用兩對調整螺夾附於試桿上，當試桿被拉伸時，則以支點為中心，兩橫桿遂壓縮指微表，由表內指計之移動刻度，即可讀出試桿之伸長量。

如 (圖 1-3 a) 之裝置，當指微表刻度指示為 0.001 吋時，即試桿實際伸長量為 $0.001/5 = 0.0002$ 吋。若計算該試桿之應變 (Strain)，則為 $0.0002/2 = 0.0001$ ，亦即應變可由指微表所示刻度值直接除以 10 而得。



(a) 裝置圖



(b) 詳細圖

圖 1-3 莫爾 (Moore) 伸長計。

3. 實驗原理 以荷重 (Load) 加於試棒上，則隨著荷重之增加，試件會逐漸伸長，若將每一荷重及其對應的伸長逐一記錄下來，則可得如圖 1-4 之各種荷重——伸長曲線 (Load-elongation diagram)。

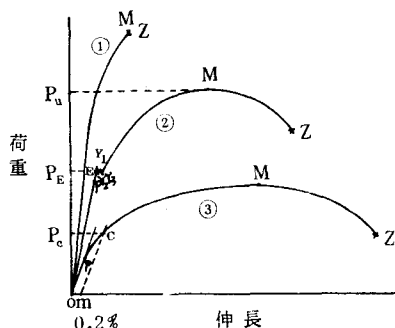


圖 1-4 荷重——伸長曲線。

(1) 彈性限 (Elastic limit)

彈性限為材料所能忍受而不呈永久變形的最大應力。如圖 1-3 中曲

線②，當荷重增大時，伸長量就會增加，如荷重不超過某一限度（如 E 點），則荷重除去後，試件尺寸仍恢復至原來大小，亦即無永久變形發生。此種受到 E 點以下的荷重時所發生的變形，叫做彈性變形 (Elastic deformation)。E 點的荷重 P_E 除以試棒的原斷面積 A_0 ，所得之值稱之彈性限。即

$$\text{彈性限} = \frac{P_E}{A_0} \quad (\text{Kg/mm}^2) \quad \dots\dots\dots (1-1)$$

(2) 比例限 (Proportional limit) 圖 1-4 中，可看出當荷重不超過某一範圍時（如 P 點以下），荷重與伸長係成正比，此能維持荷重與伸長仍成正比的最大應力即稱之比例限。在比例限內，荷重與伸長量係依虎克定律 (Hook's law) 而變化。此 P 點之荷重 P_p 除以試棒原斷面積 A_0 所得之值即為比例限。

$$\text{比例限} = \frac{P_p}{A_0} \quad (\text{Kg/mm}^2) \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

一般言之，比例限和彈性限之數值非常接近，但兩者之意義完全不同。彈性限是除去荷重後，所產生的變形是否會完全恢復的一個臨界點 (Critical point)，而比例限則是荷重與伸長的關係是否會依照虎克定律變化的一個臨界點。

(3) 彈性係數 (Modulus of elasticity) 彈性係數又稱楊氏係數 (Young's modulus)，是表示材料受到比例限以內的荷重時，在材料

內部所產生的應力 (Stress) 與應變 (Strain) 之比。即

$$\text{彈性係數 } E = \frac{\text{應力}}{\text{應變}} = \frac{\frac{P_x}{A_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{P_x L_0}{A_0 \Delta L} \dots\dots\dots (1-3)$$

式中, P_x : 比例限內某一荷重

ΔL : 荷重為 P_x 時之伸長量

L_0 : 試棒原長 (試棒上之標距長)

A_0 : 試棒原斷面積

- (4) 降伏強度 (Yield strength) 與降伏點 (Yield point) 當荷重超過比例限 P , 則荷重——伸長曲線不再成正比, 而過了 Y_1 點 (見圖 1-4), 荷重會由 P_{Y1} 突降低至 P_{Y2} , 以後的某一段時間內, 荷重在 P_{Y2} 的附近上下變動, 同時, 試棒亦在 P_{Y2} 與 P_{Y3} 間發生較大的伸長變化, 這現象叫降伏 (Yielding)。由於 Y_2 與 Y_3 間的荷重不穩定, 故通常以 Y_1 點的荷重 P_{Y1} 除以試棒原斷面積 A_0 之值, 稱為上降伏點 (Upper yield point), 以表示材料的降伏點。

$$\text{上降伏點} = \frac{P_{Y1}}{A_0} \text{ (Kg/mm}^2 \text{) } \dots\dots\dots (1-4)$$

降伏點僅在未受硬化 (Hardening), 熱作 (Hot working) 過的鋼料, 以及少數非鐵合金上發生。至於大多數的金屬材料, 則在其荷重——伸長曲線上並無特別明顯的降伏點。這時, 則採用試棒的永久變形 (Permanent deformation) (即永久伸長量) 達到某一定值 (通常定為 0.2% 或 0.002 in/in) 時之應力, 視同為降伏點, 此應力稱為降伏強度 (Yield strength)。求降伏強度的方法, 只須自荷重——伸長曲線的原點量取某預定永久伸長 $\overline{om}$ ($\overline{om} = 0.2\%$ 永久伸長), 再從 m 點作一直線平行於 $\overline{OP}$, 此直線與曲線之相交點 C 之荷重若為 P_0 時, P_0 除以試棒原斷面積 A_0 , 即得降伏強度 σ_y (此法稱為橫距 off-set 法)。

$$\text{降伏強度 } \sigma_y = \frac{P_0}{A_0} \text{ (Kg/mm}^2 \text{) } \dots\dots\dots (1-5)$$

降伏點與降伏強度在物理意義上並不相同, 其間之關係如圖 1-5 所示, 曲線之斜率初次變為 0 處之應力為上降伏點, 再次變為 0 處之應

為下降伏點。至於降伏強度則定為永久變形量為0.2%時的應力。不過，此種不同，在工程上並無特別重要的意義。

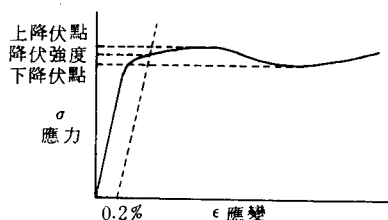


圖 1-5 降伏點與降伏強度之關係。

- (5) **抗拉強度 (Tensile strength)** 抗拉強度乃由試棒在測試過程中所受過的最大荷重除以其原斷面積而得，又稱最大強度或極限強度 (Ultimate strength)。當試棒材料降伏完了以後，荷重再繼續增加時，其伸長量的增加率將比荷重的增加率大。在荷重超過M點時，通常在試棒的中央部分會發生局部變形 (Local deformation)，此現象常見於延性材料，稱之頸縮 (Necking)。發生頸縮以後，該部分的直徑即漸次縮小，荷重亦隨之降低，直到拉斷為止。這時，試棒所承受的最大負荷 (Ultimate load) P_u 。除以試棒原斷面積 A_0 ，即得試棒材料的抗拉強度 σ_t 。

$$\text{抗拉強度 } \sigma_t = \frac{P_u}{A_0} \text{ (Kg/mm}^2\text{)} \dots\dots\dots (1-6)$$

至於一些脆性材料，如鑄鐵等，幾乎看不出有頸縮現象，其荷重—伸長曲線如圖 1-4 中之①所示，其斷裂點荷重即為其最大荷重。

- (6) **伸長率 (Percentage of elongation)** 在Z點試棒被拉斷之後，從試驗機上試棒，把兩個斷口接合，如圖 1-6，然後量取標距長 L_f ，此值與原來標距 L_0 。之差數 ($L_f - L_0$)除以原來標距 L_0 ，所得之商以百分率表示，即得伸長率 ϵ 。

$$\text{伸長率 } \epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (1-7)$$

- (7) **斷面縮率 (Percentage of area reduction)** 試件之拉斷部分的最小斷面積 A_f 和原來的斷面積 A_0 之差數 ($A_0 - A_f$)除以原斷面積

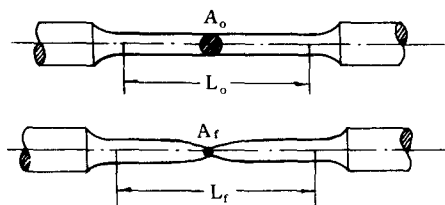


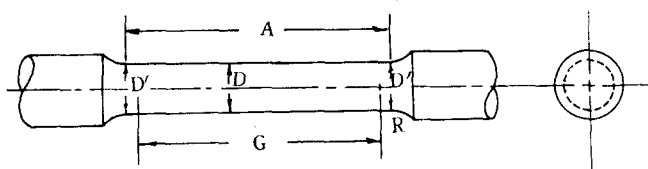
圖 1-6 拉斷前後之試棒。

A_o ，所得之商以百分率表示，即得試棒材料之斷面縮率 ϕ 。

$$\text{斷面縮率 } \phi = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (1-8)$$

實驗方法

- (1) **試棒形狀與尺寸** 拉伸試棒的形狀、尺寸等各國都有規格。普通作試棒時，係依材料的材質和形狀來決定試棒的形狀和尺寸。圖 1-7 所示為常用的標準 $\frac{1}{2}$ 吋圓形拉伸試棒。



$$A = 2 \frac{1}{4} \text{ in. (min)}$$

$$D = 0.500 \pm 0.010 \text{ in.}$$

$$G = 2.000 \pm 0.010 \text{ in.}$$

$$R = \frac{3}{8} \text{ in.}$$

$$D' - D = 0.005 \text{ in. (max)}$$

圖 1-7 標準 $\frac{1}{2}$ 吋圓形拉伸試棒。

(2) 操作步驟

- ① 開動萬能試驗機，並將荷重指示計上之黑色與紅色指針皆歸零。
- ② 量取試棒之正確尺寸，並在試棒上規定之標距 L 。內取適當之等分，分別作記號之。

- ③ 將試棒裝置於該試驗機之拉力夾頭與可調夾頭間，注意試棒須保持垂直位置，且須夾持妥當。
- ④ 調整荷重指示計上之指針使之歸零，試驗機上若有荷重——伸長自動記錄器，亦同時歸零。若無，則依圖 1-3 所示，將伸長計夾定於試棒上，以便讀取伸長變化量，唯使用該法時，於試棒斷裂前須先將伸長計取下，以免損壞。
- ⑤ ——記錄荷重變化及其對應之伸長關係，直到試棒拉斷，並繪成荷重—伸長曲線圖。
- ⑥ 試棒拉斷後，將試驗機依操作程序規定復原及關閉。
- ⑦ 將拉斷之試棒自試驗機上取下，把兩斷口接合，以卡尺量測該試棒拉斷後之標距長 L_r 各等分之伸長變化及斷口處直徑等值。

5. 結果與討論

(1) 結果

- ① 試棒之類型，形狀及尺寸。
- ② 繪製荷重與伸長之關係圖。
- ③ 求彈性限、彈性係數、比例限、降伏強度、抗拉強度、伸長率及斷面縮率等值。
- ④ 繪製試棒斷裂情形（即伸長率分佈）圖。
- ⑤ 其他相關數據。

(2) 討論

- ① 在本實驗過程中，有那些因素將會影響到試驗的結果，應如何避免之。
- ② 斷裂點是否在試棒標距內之中央，如偏向兩側斷裂時，是否會影響伸長率？若是，應如何修正。
- ③ 材料的熱處理（Heat treatment）條件會影響該材料的荷重——伸長曲線嗎？
- ④ 伸長率與斷面縮率是否一定成正比關係，原因何在？
- ⑤ 由荷重——伸長曲線，除可求取抗拉強度，降伏強度等諸值外，是否還具有何種物理意義，能說明材料的韌性嗎？

6. 問題

- (1) 拉伸試驗的目的何在？

- (2) 一般材料之比例限與彈性限往往非常接近而不易區分，但二者所代表的物理意義是否相同？試說明之。
- (3) 降伏點與降伏強度二者在物理意義上有何不同？
- (4) 彈性係數如何求得？
- (5) 由試棒的斷口能否判斷材料的延，脆狀況？

實驗二 硬度試驗

1. 目的 測定材料之 Brinell 硬度，Rockwell 硬度及 Shore 硬度。

2. 所需設備

- (1) Brinell 硬度試驗機 Brinell 硬度試驗機之構造略圖，如圖 2-1

，係以液壓法作用大至 3000 Kg 的荷重，而藉一標準硬鋼球（即壓痕器）壓入試件的表面，由其壓痕大小而測定材料的硬度。

- (2) Rockwell 硬度試驗機

Rockwell 硬度試驗機之構造原理略圖，如圖 2-2 所示，係藉不同大小的荷重，配以不同的壓痕器，如頂角為 120° ，尖端半徑為 0.2mm 的金剛石圓錐體，或直徑分別為 $\frac{1}{16}$ ； $\frac{1}{8}$ ； $\frac{1}{4}$ ； $\frac{1}{2}$ 吋的硬鋼球，配合各種硬度，厚度不同的材料而組合使用。由其在試件表面所留下永久變形的深度，比較而得硬度。

- (3) Shore 硬度試驗機 如圖 2-3 所示，Shore 硬度試驗機是把尖端裝有金剛石的小撞錘掛在垂直管內一定高度，從預定之高度，使小撞錘自由落下，撞擊試件後，視其反跳高度而表示材料之硬度值。

- (4) 測徑儀

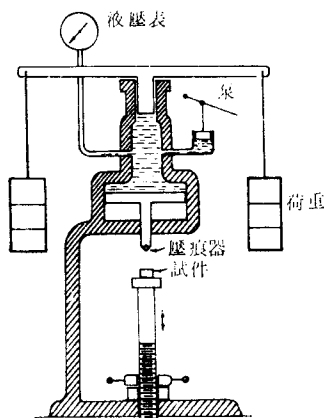


圖 2-1 Brinell 硬度試驗機構造原理略圖

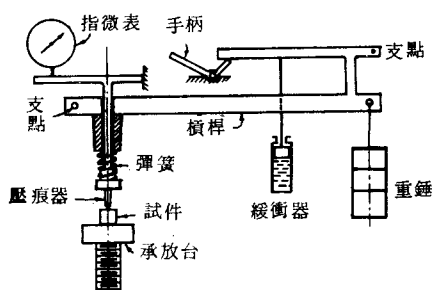


圖 2-2 Rockwell 硬度試驗機構造原理略圖。

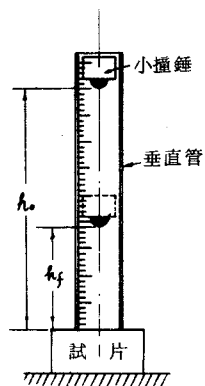


圖 2-3 Shore 硬度試驗機原理略圖。

3. 實驗原理

(1) Brinell 硬度 如圖 2-4

(a)(b) 所示，把標準鋼球，用一定荷重壓入試件表面，使試片生球面壓痕。此時，所加之荷重，除以球面壓痕的表面積，所得之商，謂之 Brinell 硬度。通常用 BHN 或 H_B 表示之。

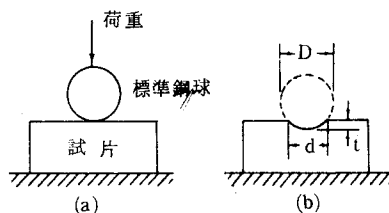


圖 2-4 Brinell 硬度試驗之原理。

$$\begin{aligned} \text{BHN (或 } H_B) &= \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi D t} \\ &= \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \cdots \cdots (2-1) \end{aligned}$$

式中， P = 加在標準鋼球上之荷重 (Kg)

D = 標準鋼球之直徑 (mm)

A = 球面壓痕之表面積 (mm^2)

d = 壓痕之最大直徑 (mm)

t = 壓痕之最大深度 (mm)

實際上測定硬度時，只要用測徑儀把試件上的壓痕直徑 $d_{(\text{mm})}$ 測定後，即可查表（見附表一）而得。

試驗時所使用的鋼球直徑和荷重大小，係由被試驗材料之情況決定，表 2-1 即示用以試驗各種材料的鋼球直徑和荷重大小。

表 2-1 Brinell 硬度試驗所用之鋼球及荷重

鋼球直徑 $D_{(\text{mm})}$	荷 重 (Kg)	記 號	適 用 材 料
10	3000	BHN (10/3000)	鐵、鋼
10	1000	BHN (10/1000)	銅、鋁及其合金
10	500	BHN (10/500)	輕合金、軟金屬
5	750	BHN (5/750)	硬質材料之薄板

(2) Rockwell 硬度 如圖 2-5 (a)~(d)，把小鋼球或金剛石圓錐體，用一定的荷重壓入試片的表面，使試片發生壓痕，壓痕的深度即被用以表示 Rockwell 硬度。壓痕器種類與荷重大小的選擇，均視材料情況而決定，不同配合所測得的 Rockwell 硬度分別稱為 R_A （或 $H_R A$ ）， R_B （或 $H_R B$ ）， R_C （或 $H_R C$ ）……等等，如表 2-2 所示，其中最常用者為 R_C 及 R_B 兩種。前者用於硬質金屬材料，後者用於軟質金屬材料。

Rockwell 硬度測定時，先要加小荷重（Minor load）10Kg，使壓痕器牢固在試件面上，而以此時的壓入深度為基準，其次再加上大荷重（Major load）把壓痕器壓入試件，最後除去大荷重，只留下小荷重，而以加大荷重時所發生的永久變形的深度來比較硬度的大小。深度小，表示材料對變形的抵抗大，也就是材料之硬度高。壓痕深度通常可以從試驗機上之刻度盤直接讀出。刻度盤上有黑色的外圈及紅色的內圈，兩種刻度。使用金剛錐壓痕器時，讀黑色外圈之刻度，使用鋼球壓痕器時，則讀紅色內圈之刻度，黑色刻度採用 100 的基準刻度，紅色刻

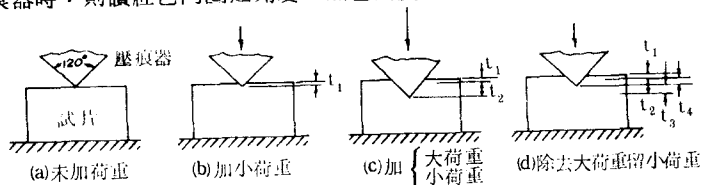


圖 2-5 Rockwell 硬度試驗原理。