

牙科材料學  
Dental morphology

## 機械性質篇 Mechanical Properties

臺北醫學大學 牙醫學系  
董德瑞老師  
drdong@tmu.edu.tw

### 學習目標

• 能辨識及敘述牙齒之形態、特徵與功能意義，並能應用於臨床診斷與治療

1. 牙齒形態相關名辭術語之定義與敘述
2. 牙齒號碼系統之介紹
3. 牙齒之顎間關係與生理功能形態之考慮
4. 恆齒形態之辨識與差異之比較
5. 乳齒形態之辨識與差異之比較
6. 恆齒與乳齒之比較
7. 牙髓腔形態
8. 牙齒之萌出、排列與咬合
9. 牙體形態學與各牙科臨床科目之相關
10. 牙科人類學與演化發育之探討

### 參考資料

1. 牙科材料學(鍾國雄)
2. Phillip's Science of Dental Materials (11th edition, Kenneth J. Anusavice)
3. Craig's Restorative Dental Materials (12th edition, John M. Powers, Ronald L. Sakaguchi.

### Summary

- The course of Dental Morphology provides the student with knowledge in the morphological characteristics of the teeth and related oral structures upon which a functional concept of intra-arch relationships may be based for the clinical application to patient assessment, diagnosis, treatment planning, and oral rehabilitation.

### 壹、緒論

牙科常用的材料種類繁多，當進行選擇材料時，往往都必需將材料的性質加以分析，俾使所選用的材料能符合實際使用的需要。在分析過程中，牙科用的材料所擁有的機械性質是其中的重要考慮性質和因素。材料應具備何種程度的強度、硬度或延性？是否要承受反覆作用的動態咬合力或磨損的狀況？都必須在決定材料之前要確實了解，才會選擇得到適合的材料。然而，在材料的機械性質方面，我們往往所能獲得的是一些數據，而這些數據卻又是在理想化的試驗過程中所測試得來的，因而，可能與實際臨床應用上有所差異，有鑑於此，在本章內容將同時討論用以測定材料在外力作用時所發生反應變化的各項試驗，使讀者能瞭解性能試驗所代表的意義。

### 貳、力(Force)

具有方向性的，因方向性的不同可分為受力或施力，其通用單位為牛頓(Newton)，可簡單定義為一公斤質量的物體在運動作用中可產生9.8牛頓的力，在介紹牙科用材料的機械性質之前，首先對力或咬合力的基礎知識作一簡介，俾使讀者考慮和選擇材料在分析過程中有一參考的數據資料。正常齒列結構上所能承受的咬合力為自200牛頓-240牛頓的範圍不等，在經過不同復形工作處理後的復形體在咬合過程中所承受的力又各有不同，在固定牙橋復形方面，白齒部位所承受的力約為250牛頓，活動義齒(Removable Partial Denture)則平均約為70至240牛頓不等。正常的咬合所發生對牙齒的力量(Normal Biting Force)約為390至800牛頓範圍，文獻報告的數值為565牛頓，然而，此數據會隨著研究統計對象的年齡，口腔齒列和組織狀態，是否有裝置任何的復形物？更重要的是咬合接觸的情況而有所改變。

## 貳、強度(Strength)

對於物體所擁有的強度特性，可從受力的方向分成以下三種的考慮，見圖4—1。

### 一、抗壓強度(Compressive Strength)

作用力與物體的中軸在同一軸線上，但是作用力是方向相對向。

### 二、抗張強度(Tensile Strength)，抗拉強度

作用力與物體的中軸也在同一軸線上，但是作用力方向是相反。

### 三、抗剪強度(Shear Strength)

作用力的方向為相對的，與物體的中軸不在同一軸線上，此種強度的表現多在物體抵抗彎曲或扭曲時會出現。

因此，物體或材料的強度就是說明在承受某方向的作用力時，物體或材料能保持結構的完整或擁有不被破壞的性能。

## 參、機械性質(Mechanical Properties)

一般提到材料的機械性質時，將牽涉到材料在受作用力的表現，而對作用力的說明，其中的專有名詞：

### 一、應力(Stress)

定義為單位面積所發生或承受的力：

$$\text{應力} = \frac{\text{作用力}}{\text{力量所作用的面積}}$$

當相同大小的力作用於物體表面時，倘若受力的面積愈小，則應力數值將愈增大，表4—1同時，相對物體或材料的強度表現，應力方向同樣可分為抗壓應力(Compressive Stress)、抗張應力(Tensile Stress)和抗剪應力(Shear Stress)，由這三種基本的應力形態組合成為複雜的材料內部應力分佈情況。

應力在使用的國際單位主要是以MPa(百萬巴，Megapascal)表示，1 Pascal (巴，Pa)：表示每一平方公尺承受一牛頓的荷重或作用力。

1MPa：百萬牛頓/平方公尺=牛頓/平方毫米

在英制單位則為psi(磅每平方英寸，Pound Per Square Inch)，二者的換算為145psi=1MPa。

## 一、應力(Stress)

在應力的測量操作中，除了對試片施予壓，拉或剪三種作用力外，外加兩種較為常用之試驗方法：

### 1.三點彎曲試驗法(Three-point Bending Test)

將擬試驗之材質製造成一定大小的長方棒或片狀，如圖4—2，然後架於間距為L的支架上，在架起之試片的中央施予F的荷重，使試片彎曲甚至斷裂，記錄發生變形或斷裂時之最大荷重，經計算便得如此類材料所具備的抗彎強度(Bending Strength)或抗撓強度(Transverse Strength)。如圖4—2所示，當外力施於物體上時，直接受力的表面所承受的是壓縮作用(Compression)，而在物體的內部，遠離受力點的地方所產生的是抗張(Tension)的變化，整體所受的應力數值可從試片的尺度和記錄所得的作用力量大小，計算得知：

$$\text{應力} = \frac{3 \times \text{最大的作用力} \times \text{支點的間距}}{2 \times \text{試片的厚度} \times \text{試片的寬度}}$$

## 一、應力(Stress)

### 2.對徑壓縮強度試驗法(Diametral Compression Strength Test)

在牙科材料中，對於某些脆性的物質，例如陶瓷，部份的複合材料和汞齊等等，如果以一般的拉張試驗測定材料的應力強度，常出現在彎曲變形之前材料便呈現崩裂，無法真正測得材料的強度，因此，將拉張試驗改良為壓縮方式測定，則可獲得差異性較小，準確度較高的結果。試驗方式為將材料製備成長圓柱形，然後在試驗機上，沿直徑的兩端平行施予壓縮力量，如圖4—3所示。對於真正脆性的材料，此項試驗所發生的是對試片施予點和線形的壓縮力，此時試片內部所發生的是抗張的力量，因此，此試驗方法可以間接測得材料的抗張強度，但是對於延性的材料由於有明顯的壓縮變形變化，原先施力的接觸面積會因施力的加強而逐漸加大，此時所測量的應力便因受面積變大而受影響，同時，也由於施力作用於一平面上，所以，對於試片本身所發生的力量變化，將以壓縮力為主，而非原先拉張試驗的目的。

## 參、機械性質(Mechanical Properties)

### 二、應變(Strain)

定義為物體受外力作用時，其長度變形量和原長度的量的比例。

$$\text{應變} = \frac{\text{長度變形量}}{\text{原長度的量}}$$

關於壓縮變形和拉張變形的應變如圖4—4所示。

## 參、機械性質(Mechanical Properties)

### 三、抗拉試驗(Tensile Test)

抗拉試驗的目的在測定材料對靜荷重或緩慢施加的力量之抗拉能力。其試驗裝置如圖4—5所示，典型的試片直徑為0.505吋，規準長度(Gage Length)為2吋。將試片在試驗機中夾緊固定後，並施予一個力或荷重(Load)，同時利用一個應變計(Strain Gage)或伸縮尺(Extensometer)來測定荷重作用時，試片介於規準記號間所發生伸長量的變化。

抗拉試驗的結果，以荷重對規準長度來表示，如表4—2和圖4—6所示，以此種方式來表示試驗的結果，只能描述具有此一特殊直徑的材料之行為而已。如果採用一直徑較大的試片，則將產生一已知變形量的力將相對較大。一般在記錄或表示抗拉或抗壓試驗的結果是以應力—應變曲線表示之。

### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

#### 四、應力—應變曲線(Stress—Strain Curve)

利用表4-2所列的荷重和規準長度數據分別按應力和應變的定義將可繪出如圖4-7的應力—應變曲線。在圖中有下列代表材料本身機械性質的標示，例如：彈性模數、彈性伸長、降伏強度、抗拉強度、塑性變形和斷裂強度。

##### 1. 彈性變形與塑性變形(Elastic and Plastic Deformation)

當一力作用到試片上時，其原子間的鍵會伸長而使得試片伸長。當我們將力除去時，鍵會回復原來的長度使試片回復它最初尺寸。在應力應變曲線的彈性(Elastic)部份內的金屬伸長是可回復的。在較高的應力作用下，材料將以一種塑性(Plastic)的方式來反應。隨著應力的增加，差排開始移動(發生滑動)，材料乃開始塑性變形。除去作用力後，只能使彈性變形回復，但由滑動造成的變形是永久性的，見圖4-8所示，開始滑動那點的應力是彈性行為與塑性行為的分界點，稱為彈性限界(Elastic Limit)。

一般介紹應力應變曲線圖形時常列出彈性限界和比例限界(Proportional Limit)的位置於圖形上，見圖4-9所示，由定義知悉，比例限界乃應力與應變圖形中彈性伸長變化能依虎克定律維持直線比例關係之最大應力。而彈性限界乃材料能忍受不發生永久變形的最大應力。雖然二者的定義不同和測定的方法不同，但是二者的區別通常視使用試驗的儀器其精密度而定。一般在實際操作的結果，往往視比例限界和彈性限界為相同的應力點。

### 四、應力—應變曲線(Stress—Strain Curve)

#### 2. 彈性模數(Modulus of Elasticity)

彈性模數，又稱為楊氏模數(Young's Modulus)是應力應變曲線在彈性區域內的斜率，此種關係仍遵照虎克定律(Hook's Law)。表示如下：

$$\text{彈性模數} = \frac{\text{應力}}{\text{應變}}$$

此模數與材料內部原子的結合力有密切的關係，見圖4-10，甲、在力反應和原子間距離曲線上的平衡間距點所具有的陡峭程度乃表示要分開原子(即造成彈性伸長)的難易程度，愈是陡峭的斜率表示需要更強大的應力，才能將原子分開，一般而言，金屬材料多具有頗高的彈性模數，因此，熔點高的金屬其束縛力與彈性模數皆較大，見表4-3。

模數是表示材料勁度(Stiffness)的一種量度指標，一具有高彈性模數的強勁材料，即使在一彈性荷重範圍內受作用力也能經常保持其尺度和形狀的穩度或變化量較為微小。因此，在選擇經常接受強度作用力的材料時，彈性模數就必須注意其大小的適用程度。圖4-10，乙、表示鐵和鋁的彈性行為，如果一30,000psi的應力作用在金屬棒上，鐵棒有0.001吋吋的彈性變形，而在相同的應力下鋁材料的棒將發生0.003吋吋的變形。因此鐵的勁度比鋁高三倍。

### 四、應力—應變曲線(Stress—Strain Curve)

#### 3. 降伏強度(Yield Strength)

降伏強度乃材料性能之一，表示材料在應力作用下開始產生塑性變化，應力與應變的比例關係發生偏差，在此應力作用時材料內部發生有限度的永久性應變，而此永久性變形的程度視所設定的支距降伏強度(Offset Yield Strength)而定。支距降伏強度是針對大部份材料而言，乃由於彈性行為的改變或塑性行為的應力不容易正確地察覺或測量出其精確數量而特別設定之。首先，要決定一個被容許的微小永久變形量，例如0.2%或0.002吋吋，但以不得破壞元件的功能或完整為原則；然後建立一條與應力應變曲線彈性伸長部份互相平行的線，但起始點在應變軸上距原點0.002吋吋，因此所謂0.2%支距降伏強度就是此平行線交於應力—應變曲線的應力強度，如圖4-11所示。

### 四、應力—應變曲線(Stress—Strain Curve)

#### 4. 工程應力(Engineering Stress)和工程應變(Engineering Strain)

就一已知材料而言，如果在試驗時將力換成應力，並且把規準記號間的距離變化換成應變量，則此簡單試驗的結果便可以應用到各種尺寸和形狀的試樣上去。而工程應力和工程應變可依下列方程式而定義：

$$\text{工程應力} = \frac{\text{荷重或作用力}}{\text{試驗開始之前試片初始的截面積}}$$

$$\text{工程應變} = \frac{\text{受作用力後兩規準記號間的距離—兩規準記號間的初始距離}}{\text{兩規準記號間的初始距離}}$$

#### 四、應力—應變曲線(Stress—Strain Curve)

##### 5. 真應力(True Stress)和真應變(True Strain)

工程應力在超過比例限界或彈性限界後，試片將發生變形現象，在進行抗拉試驗時，由於拉張的力量作用，試片會出現長度增長和截面積變小的情況，而且長度和面積的變化往往也不是均勻地發生，因此，在定義上將為：

$$\text{真應力} = \frac{\text{作用力}}{\text{上述作用力作用時的真正截面積}}$$

$$\text{真應變} = \epsilon_t = \int_{l_0}^{l_t} \frac{dl}{l_0} = \ln \left( \frac{l_t}{l_0} \right) = \ln \left( \frac{A_0}{A} \right)$$

在試片發生變形後，真應變的決定將採用數學積分法：：求取在特定時刻內原截面積(A<sub>0</sub>)和當時截面積(A)的比值，真應力—真應變曲線與工程應力—工程應變曲線間的關係，見圖4—12。

通常在牙科材料機械性能試驗中，多不採用真應力和真應變，因為大多數材料特別是金屬和合金材料只要一旦超過降伏強度，就開始變形。此時，元件不再保有原有的形狀，它已算是損壞不堪，甚至不能再繼續應用或不再滿足原來設定的用途了。

#### 四、應力—應變曲線(Stress—Strain Curve)

##### 6. 極限強度(Ultimate Strength)

乃材料在原有的尺度情況下，抵抗撕裂或斷裂的最大或最高的作用力稱之。超過此極限強度，試片材料將會發生瓦解或斷裂等永久性變形。材料在斷裂的時候，由於脆性的程度不同而往往出現不同的斷裂形態，例如：具延展性的材料將有明顯的頸縮(Necking)現象出現，見圖4—13。在拉張試驗中，所測得的極限強度就代表材料所擁有的抗拉強度，表示作用力的最高點時所求得的應力，亦即是工程應力—應變曲線上的最高應力值。但是，在許多延性材料內部，變形並不維持均勻。在某些區域中的變形量遠較試片其他區域為大，而使得截面積發生局部性的大幅度減少，見圖4—13。這種局部的變形區域稱為頸縮。由於在這一區域的截面積變小，因而使它繼續變形所需的力量較小，於是以前以初始面積計算出來的工程應力就變小，因此，所謂極限強度在具延展性的材料而言就是在頸縮開始那點的應力。

以下將試片的變形情況和應力—應變曲線圖互相配合以說明曲線圖和材料試片其同步變化過程。

甲、當材料在彈性限界範圍內接受作用力，當除去作用力時，試片可恢復原狀。

乙、當材料試片接受作用力超過材料的降伏強度而發生塑性變形，當除去作用力時，試片除了彈性的完全恢復外，另將發生塑性反應的永久性變形。

丙、當材料試片在接受超過材料的極限強度作用時，如果試片本身屬於脆性材料，則將出現無頸縮變化的斷裂結果，若是屬於非脆性材料則試片中 央將出現頸縮變化。由於頸縮現象發生，試片的截面積便出現減少，由於應力定義為單位面積所承受的作用力，因此在截面積縮減的情況下，促使試片變形的作用力便降低，在工程應力—工程應變的曲線圖中便會出現應力下降的現象。

丁、當材料試片繼續接受外力作用時，試片截面積將大幅度減少，最後造成斷裂的結果。

不同性質的材料其斷裂的形態各異，如圖4—14所示，可以是點狀的分離，是頸縮後的斷裂或是高度脆性材料的截面積斷裂現象。關於材料具有延展性或頸縮現象的斷裂，其發生機轉可用圖4—14說明之。從最初的頸縮：內部瑕疵，空泡和缺陷的集中，而到最後產生剪切方式的斷裂發生。

#### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

##### 五、Poisson比(Poisson's Ratio)

當物體受力產生彈性變化時，材料試片將同時出現側向應變量與縱軸向應變量，而此兩項方向不同的變形量比例值稱之為Poisson比，見圖4—15。從此項比例值之大小，可以預測材料是屬於脆性或是具延展性的，理想的材料Poisson比為0.5，然而，在實際材料試驗時，側向的應變量會較預估的來的少些，因此典型的Poisson比一般測量結果約為0.30。

#### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

##### 六、耐久性(Durability)

牙科材料由於多存在口腔內使用，由於口腔的動態，溫度和酸鹼度不斷地變化，所以材料在以上的變化中能保持穩定是十分重要。耐久性乃指材料具有承受使用甚或濫用而能保持原有結構，發揮同樣的功能的能力，因此，足夠的強度與化學和物理變化的穩定性是此項性質的基本條件。

### 叁、機械性質 (Mechanical Properties)

#### 七、延性(Ductility)

延性是量度一材料能承受最大的抗拉變形量而不致於斷裂的一種指標，延性的表示法有兩種。第一種是量取試片在試驗前與試驗後兩規準記號間的距離，利用伸長百分比(%Elongation)來描述試片在破壞前的伸長量。

$$\text{伸長百分比} = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$L_0$ ：為試片抗拉試驗開始時兩規準記號之間的距離。

$L_t$ ：為試片在抗拉試驗過程中，在斷裂前面兩規準記號之間的最大距離；

第二種辦法是量取破壞點處，在試驗前與試驗後的截面積改變百分率，並利用面積縮小百分比(%Reduction in Area)來描述試片在試驗過程中變瘦(Thinning)的量。

$$\text{面積縮小百分比} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

$A_0$ ：為試片抗拉試驗開始時的截面積；

$A_1$ ：為試片在抗拉試驗過程中，在斷裂前的截面積。

延性對設計者與製造者而言都很重要。一元件的設計者寧願材料呈現若干延性，使得在作用應力太高時，元件在斷裂前有變形產生。製造者希望有延性的材料，使它能作成複雜的形狀，而不致於在製造過程中材料發生斷裂了。

### 叁、機械性質 (Mechanical Properties)

#### 八、展性(Malleability)

展性乃表示材料能承受錘打或輾滾成薄片的能力，展性與延性最大的不同點乃是展性呈承受壓縮的作用力而延性卻是在拉張狀態下進行試驗。

### 叁、機械性質 (Mechanical Properties)

#### 九、脆性(Brittleness)

延性材料所展示的工程應力—工程應變曲線，在抗拉強度處通過一最大值，而較為脆性的材料之最大荷重或抗拉強度都發生在破壞點。極端脆性的材料，例如陶瓷，其降伏強度、抗拉強度和斷裂強度全部一致，見圖4—16。

### 叁、機械性質 (Mechanical Properties)

#### 十、壓縮試驗(Compression Test)

壓縮試驗主要是對材料的抗壓強度作一測量，試片以圓柱形為主，施予壓縮的作用力使試片產生變形或斷裂。對於圓柱形試片在承受壓縮力量時，其內部的力向量的分佈經測定實非單純的壓縮方向力，而是壓縮，拉張和剪切均同時發生的複雜情況。見圖4—17所示，雖然，力量分佈走向是十分複雜，然而，由於施力的方式為壓縮作用，因此，所獲得的應力和強度均歸納為材料的抗壓強度。

在進行壓縮試驗時，試片的大小和施力方向將導致產生不同的結果，目前在試片的製作上，以直徑和高度為1比2之圓柱體為公認的規格，例如，直徑為4毫米則試片高度應為8毫米或以上，施力沿圓柱體的縱軸方向，另外，為求獲得較合理，變異較小的數據結果，試片的兩端應保持光滑或是與試驗機十字頭間的摩擦作用愈低愈理想，最低限度各試片的兩端均經同一粗細的水砂紙磨光，以期獲得一致的粗糙度和摩擦係數。如果試片在測試過程中，與試驗機間沒有足夠的潤滑處理，產生強大的摩擦效應，則施予壓縮作用力後，除了產生與施力方向平行(X軸)的軸心作用力外，同時在Y和Z軸也會發生壓縮力量，此不同軸向的力量，如果在短小的內部將可都產生匯集的效果稱之為三軸性(Triaxiality)，甚至與相反方向的三軸性區域互相影響，最後將形成試片材料的強度較實際的為高，較正確光滑試片測試在強度方面有明顯增高的結果，見圖4—18。因此，試片的尺度和處理在進行試驗前應加以考慮，最後試驗結果才能獲得較正確合理的結果。

### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

#### 十一、抗剪試驗(Shear Test)

抗剪試驗的進行是對試片施予與縱軸垂直且方向相對的作用力，結果將造成試片的變形，基本上，剪應力乃等於原單位受力面積的作用力，而剪應變則等於試片變形或移位的角度正切值，見圖4-19。

### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

#### 十二、斷裂韌性試驗(Fracture Toughness Test)

此項試驗可測得材料在特殊的情況下，例如有瑕疵(Flaw)，裂縫(Crack)或缺口(Notch)，抵抗外力作用致發生材料斷裂的能力。斷裂韌性是以 $K_{Ic}$ 符號代表，其測量計算公式如下：

$$K_{Ic} = Y \sigma \pi c$$

Y：乃一參數，與原設計之裂縫形狀有關。

$\sigma$ ：材料試片不發生斷裂所能承受最大的作用力。

C：裂縫的尺度。

試驗之設計簡圖見圖4-20所示。

試驗之設計簡圖見圖4-20所示。

### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

#### 十三、衝擊試驗(Impact Test)

為選擇一種材料能承受一突然施加的巨大荷重，我們必須測定一材料在衝擊試驗下對破壞的抵抗能力，有許多衝擊試驗程序已被設想出來，其中包括Charpy試驗(Charpy Test)，見圖4-21，它的試片可以有缺口或無缺口；而以V字形缺口對測定材料對裂縫延伸的抵抗力最合適。Charpy試驗是利用一很重的擺錘，其中擺錘自高度h處劃過一圓弧路線而打擊到並打斷試體之後到達一較低的最終高度h<sub>2</sub>。知道擺錘的最初和最終高度就可以計算出位能的差值。此差值就是試體破壞過程中所吸收的衝擊能(Impact Energy)，或稱吸收能(Absorbed Energy)。此能量通常以英尺-磅(ft·lb)或焦耳(J)來表示。其中1ft·lb=1.356J，通常我們把材料承受衝擊的能力稱為此材料的韌性。

至於衝擊能或韌性與應力-應變曲線圖的關係，見圖4-22。圖之陰影部份即是材料在進行彈性變形至彈性限度為止所吸收的能量，稱為彈性能(Resilience)。此能量將在變形過程儲存在材料內部，而在彈性恢復的時候釋放出來。材料在開始受力至斷裂時所吸收的全部能量，亦即應力-應變曲線下所涵蓋的能量面積稱為韌性。具有高強度且具高延性的材料，就是良好的韌性材料，見圖4-23，另一方面，陶瓷材料由於脆性高，延性差，雖然擁有較高的強度，但韌性卻較差。見圖4-24觀察六種不同的應力-應變曲線。

### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

#### 十四、溫度的影響

在進行各項強度試驗時，幾乎每種材料試驗均受溫度變化的影響，如圖4-25。降伏強度、抗拉強度和彈性模數在高溫下皆會降低，然而，以破壞時的應變量來量度的性質，如延性，則呈增加的現象，因此材料製造商可以在高溫下將某種材料按所須的形態而塑形，此操作稱為熱作(Hot Working)，就是利用材料在高溫下會出現延性較高和變形較大但需要的應力卻較低的特性。

### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

#### 十五、疲勞試驗(Fatigue Test)

在許多應用中，元件可能會承受一低於材料降伏強度的應力，但這個應力不停地反覆作用，且此種應力可能是由於旋轉、彎曲或振動的結果，因此即使此一應力低於降伏強度，但在此應力作用很多次之後元件也終成破壞模樣稱為疲勞。通常用來量度對疲勞的抵抗力之方法，是懸臂旋轉試驗(The Rotating Cantilever Beam Test)，圖4-26，這是將一經過加工的圓柱試體的一端固定在一馬達傳動的夾頭上，然後在另一端上懸掛一重物。最初有一個張力作用在上表面，而底面則受到壓力，在旋轉90度後原先有張力和壓力作用的部位已無應力作用。旋轉180度後，原先受張力的部位現在變成受壓力。於是，在任意一點的應力都完成由無應力到最大張應力到最大壓應力的一項完全循環。

由一系列疲勞試驗得到的最重要結果，是材料在特定應力下的疲勞壽命 (Fatigue Life) 和耐久限 (Endurance Limit)。疲勞壽命告訴我們的是當一元件受到一應力反覆地作用時，它究竟能使用多久。例如：如果我們要設計一工具鋼元件，使它在它的使用年限內，承受一應力循環：100,000次，則我們必須利用設計使作用應力低於90,000psi，見圖4-27。

耐久限是種臨界應力值，如作用應力恆低於這個應力值，就永遠不會發生疲勞破壞。為避免此工具鋼元件的疲勞破壞，我們必須確保作用應力恆低於60,000psi。某些材料，例如許多鋁合金，不具有真正的耐久限。對於這些材料而言，疲勞壽命是更具決定性的考慮：作用應力必須足夠低，使疲勞破壞不致於在此元件的使用年限內發生。通常將疲勞強度 (Fatigue Strength) 指定為疲勞破壞不致於在循環內50億次內發生的最高作用應力。疲勞裂縫源自受應力作用的材料表面，尤其是表面應力最高之處。不論何種因設計或製造而在表面上產生的缺陷都會導致應力集中並促進疲勞裂縫的形成。此種疲勞敏感性可利用一有缺口的疲勞試體來測定，圖4-29。有時候，為使疲勞破壞的可能性降至最低，須將表面高度磨光，以減低表面的缺陷和磨擦效應。

疲勞的抵抗力亦與材料表面處的強度有關。對於許多以鐵為基質的合金，耐久限大約是該材料抗拉強度的一半。耐久限與抗拉強度之比值稱為耐久比 (Endurance Ratio)。

$$\text{耐久比} = \frac{\text{耐久限}}{\text{抗拉強度}} = 0.5$$

若材料的表面抗拉強度增加，則它對疲勞的抵抗力亦增加。相同地，溫度也會影響材料對疲勞的抵抗力。隨著溫度的上昇，強度降低，因而疲勞壽命與耐久限皆降低。

### 叁、機械性質 (Mechanical Properties)

#### 十六、潛變試驗 (Creep Test)

如果我們在一高溫下對一材料施加一作用力，則材料將會逐漸伸長終至破壞，即使所作用的應力低於材料在該溫度下的降伏強度。高溫時物體承受一定作用力下所發生的塑性變形稱為潛變。為求得一材料的潛變特性，我們將該材料置於一爐中並施予一大小固定的應力，圖4-30。剛加上應力，試片就立刻發生微量的彈性伸長  $\epsilon$ ，見圖4-31；而此彈性變形是由作用的應力與材料在該溫度時的彈性模數所決定。

高溫能使金屬內部的差排進行爬昇 (Climb)。在爬昇的過程中原子利用擴散移入或移出差排線，而導致差排沿垂直(而非平行)滑動面的方向運動，如圖4-32。於是，差排就能夠脫離阻礙滑動的晶格缺陷。當差排利用爬昇離開缺陷之後，它就能繼續滑動，即使那時的作用應力並不高，仍將造成試體的額外變形。在潛變試驗過程中，應變或伸長量是以一種時間為函數來量度，並將所得的結果繪成一條潛變曲線，圖4-31。在潛變的第一階段內，許多差排自阻礙物處脫離就開始滑動，而導致金屬變形。後來，自阻礙物處脫離的差排之速率等於差排再被其他缺陷阻擋的速率，這就造成潛變的第二階段，或稱為恆態 (Steady State) 潛變。潛變曲線的恆態部份之斜率稱為潛變速率 (Creep Rate)

$$\text{潛變速率} = \frac{\Delta \text{應變}}{\Delta \text{時間}}$$

最後，在潛變的第三階段中，頸縮開始發生，以致應力增大，同時試體的變形速率逐漸加快直到發生破壞為止。破壞發生所需的時間稱為破裂時間 (Rupture Time)。較大的應力或較高的溫度都將使破裂時間縮短。而且提高潛變速率，圖4-33 表示潛變試驗結果的方式，最常見的圖示為應力-破裂曲線 (Stress-Rupture Curve) 圖，可讓我們能推算元件在一特定應力與溫度組合下的期望壽命 (Expected Life Time) 見圖4-34。

### 叁、機械性質(Mechanical Properties)

#### 十七、硬度試驗(Hardness Test)

硬度試驗的目的在量度一材料表面對被硬物穿透的抵抗力。有很多不同的硬度試驗已被設計出來，但其中最常用的二種方法是Rockwell試驗(Rockwell Test)與 Brinell試驗(Brinell Test)圖4—35。

在Brinell硬度試驗中，我們把一硬鋼球(通常直徑為10mm)壓入材料的表面，而在荷重除去後量取留在材料表面上的壓痕直徑。所謂Brinell硬度(Brinell Hardness Number, BHN)是按這個方程式來計算，

$$BHN = \frac{F}{(\pi/2) D (D - \sqrt{D^2 - D^2})}$$

其中 F 為荷重 (以公斤為單位)，D 為壓痕器的直徑 (以厘米為單位)，D<sub>1</sub> 為壓痕的直徑 (以厘米為單位)。

其中 F 為荷重 (以公斤為單位)，D 為壓痕器的直徑 (以厘米為單位)，D<sub>1</sub> 為壓痕的直徑 (以厘米為單位)。

在Rockwell硬度試驗中，對較軟的材料是用直徑較小的硬鋼球，對較硬的材料則用鑽石圓錐(Diamond Cone)，壓痕器穿透的深度係由試驗機自動量取並換算為Rockwell硬度數。有許多種Rockwell試驗的變通方式也常被用到，如表4—4所列。

Vickers硬度試驗與Knoop硬度試驗是微觀的表面硬度試驗。它們所造成的壓痕極其微小，以致需要由顯微鏡來觀察和度量其大小。Vickers硬度試驗其壓痕器為鑽石稜錐(Diamond Pyramid)，角度為136度，在施予一定荷重後可以在材料表面壓出一方形的壓痕，其計算硬度數的公式為：

$$\text{Vickers 硬度數 (VHN)} = \frac{2P \sin \frac{\theta}{2}}{D^2}$$

P為施予的荷重，D為壓痕對角線長度的平均值和θ為136度，見圖4—36。

Knoop硬度試驗所採用之壓痕器為一稜錐，一面呈130°，另一面呈172°30'。圖4—37。在材料表面壓出的壓痕呈一菱形，其計算硬度數的公式為：

$$\text{Knoop 硬度數 (KHN)} = \frac{P}{A} = \frac{P}{CL^2}$$

P為施予的荷重，A為壓痕的面積，C為常數(0.07028)與壓痕面積和壓痕器長對角線長度平方有關，L為測量得到之壓痕長對角線的長度。牙科常用材料其硬度見表4—5所列。

硬度數主要是當作材料的比較、製造規範、熱處理、品質控制，以及與材料其他性質及行為有迴歸關係等的一種基礎。例如，鋼的Brinell硬度與其抗拉強度間的關係式為：

$$\text{抗拉強度} = 500BHN$$

硬度數可在幾分鐘內求得，而幾乎不需先作試片的準備，並且不會破壞元件，但卻能提供一個準確的抗拉強度的近似值。材料的硬度與其對磨損的抵抗力有良好的迴歸關係。用來打碎或研磨礦砂的材料必須極其堅硬，才能確保此材料不會為堅硬的生料所侵蝕或磨損。相同地牙科材料使用於咬合直接接觸的部位必須具備堅硬耐磨的性能，才能維持更長久的使用年限。

### 叁、機械性質 (Mechanical Properties)

#### 十八、黏度 (Viscosity)

對於液體和糊狀物質其流動性的研究，主要是以測量其黏度為主，根據黏度的測定方式可計算為：

$$\text{黏度} = \frac{\text{剪應力}}{\text{剪速率}}$$

表示當一個剪應力作用在物體(液態為主)時，材料內部的分子會以黏性流動的方式相對滑動而產生一個位移量。亦即是單位時間內產生位移量所需的剪應力，以分子結構的說明圖，見圖4—38。實際應用的例子，則見圖4—39。在針管一端施予應力迫使針管內的液態材料以一定的速率擠出，所能擠出的材料量便可以從該液態材料的黏度而決定。如果黏度很高的材料，造成一既定位移量所需的應力便很高，因此，具有高黏度的聚合物不容易發生黏性變形。

在進一步考慮材料的剪應力和剪速率的關係，根據材料的流動特性，一般可訂定為：

$$\text{剪應力} = K(\text{剪速率})^n$$

K和n乃材料性質的常數，n可定義為流動指數(Flow Index)，簡單而言，如果n=1，表示剪應力和剪速率二者呈直線正比關係，相對而言，材料的黏度乃一常數，與剪速率大小無關，此類的材料稱之為牛頓型流體(Newtonian Fluid)當流動指數小於1時，在剪速率增加時，剪應力的增加較正常線性比例為低，因此出現了在增加剪速率情況下，材料的黏度卻下降，感覺流動性較好，材料較為稀薄，此類材料稱之為擬塑型流體(Pseudoplastic Fluid)。

倘若流動指數值大於1，在剪速率增加時，剪應力的增加較正常線性比例為高，出現了剪速率增加而材料的黏度卻上升，感覺流動性較不好，材料較為濃稠，此類材料稱之為膨脹型流體(Dilatant Fluid)，圖4—40為以上各稱液體其黏度與剪速率的關係繪圖。

在牙科用材料中，以牛頓型和擬塑型流體黏度性質最為常見，此類流動性質將大大影響材料臨床使用操作的難易度，原因是牙科用材料多為兩種黏度不同的液態或糊狀材料的混合，然後經過化學反應慢慢凝固，最後成為彈性物或固態材料，因此，在調和以上液態或糊狀材料的初期，材料的黏度將決定了操作者的操作容易程度，同時隨時間的變化而發生的材料黏度改變速率也是一重要的因素。所以，在黏度增加達到無法操作的狀態時，從調和的開始至此之間的時間稱之為操作時間(Working Time)，圖4—41，顯示二種材料在化學反應過程中其黏度因時間而變化的情況，假設圖中V1，乃表示材料達到無法再使用的黏度，A材料其操作時間為T1時，B材料在T2時其黏度才開始增加，一直至T3時才達到V1的黏度，因此，根據此黏度與時間的圖便可以說明B材料具有比A材料較長的操作時間，B曲線更顯示材料在反應至凝固之前有一誘導期，此段時期多是由於廠商為延長操作時間而在材料化學組成中添加延緩劑所造成的。

另一重要與黏度相關的事項乃臨床操作時出現的凝固特性就是凝固時間，此時間是材料達成最後凝固狀態或是形成應用上所需的各項性能。測量凝固時間的方式，將因材料的種類而各有異同，其中較常用的是以抵抗穿透的能力來判定。因此，材料在達到凝固時，將表示能夠抵抗一定重量和直徑大小尖端的探針之穿刺，圖4—42，左圖表示材料未達到凝固的結果，測量探針很輕易便穿刺入材料內部，經達到凝固的材料將如右圖的顯示可以支持測量探針而毫無穿刺或是壓痕留在材料表面，以此方法測定材料的操作或是凝固時間應注意使用的測量探針其重量和尖端大小的標準化，以便讓獲得的數值較合理和與其它文獻作參考比較。

以上所介紹的流動變形主要是針對液體或黏度高的流體，對於固體物質，例如金屬材料，其變形或機械特性通常是以差排來描述其分子的變化。當作用力或應力低於降伏強度時，材料將發生彈性變形，而此彈性變化主要來自原子鍵的伸長而發生。當應力高於降伏強度時，金屬內部的差排由於外力的作用而進行移動，結果是材料形狀出現永久性的變形，在聚合物材料方面的情況便稍為複雜不同，在受應力時如果其大小超過降伏強度作用時，聚合物也將同時呈現彈性和塑性變形反應。彈性變形的機轉有兩種，一是分子鍵內部的伸長及扭曲，乃一鍵單元的可回復移動。至於在聚合物內部所發生的塑性變形其主要成因是來自內部分子的黏性流動。黏性流動是在聚合物內的鍵相對滑動而發生的，在應力除去之後，鍵乃存在於它的新位置，不再回復原位，結果使聚合物發生永久性變形，圖4—43因此聚合物所呈現的這種變形行為稱為黏彈性(Viscoelasticity)，亦即變形的發生是一種彈性變形與黏性流動的組合，變形的彈性與黏性分量決定了聚合物的最終變化。