

牙科材料學 Dental morphology 應用物理化學性質篇

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

- 牙齒形態相關名辭術語之定義與敘述
- 牙齒號碼系統之介紹
- 牙齒之顎間關係與生理功能形態之考慮
- 恒齒形態之辨識與差異之比較
- 乳齒形態之辨識與差異之比較
- 恒齒與乳齒之比較
- 牙髓腔形態
- 牙齒之萌出、排列與咬合
- 牙體形態學與各牙科臨床科目之相關
- 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.

前言

牙醫界所使用的材料大部份是在酸鹼度，溫度和濕度變化都十分大的口腔內應用，因此，對於材料的物理化學性質，特別是在應用時的表現，將可預估材料的耐久性和生物相容性等。現今分別就與牙醫應用範圍內較為相關之物理化學性質介紹如下：

壹、密度(Density)

密度的定義為單位容積所含的質量。而任何一種物質以其擁有的密度和水作比較時，則此比值稱之為比重(Specific Gravity)，而比重的標準乃指一立方厘米的水在攝氏4度時的質量，並以此作為比重的基本單位，與其它液體和固體作為比較時的單位，在測量方法上，比重和密度是相似的，如果水的密度定為1時，則此時物質的密度與比重相同。在牙科材料中，應用的材料其密度的大小或比重的輕重及其製成的復形體，將直接影響患者的舒適度及在口腔與牙齒窩洞的固持作用與穩定性，同時，可能材料本身對口腔軟組織會造成不同程度的壓迫反應。

牙醫界常用或接觸的物質其密度如表3-1所列。

貳、物理變化：

物質本身將遵守物質不滅定律而不會消滅，然而，組成物質的分子或原子則可能因為自身擁有的能量或外界周圍能量的改變而受影響，而導致組成的物質出現形態或狀態的改變。例如：由水分子組成的三種不同物質形態的冰塊(固態)、水(液態)和水蒸氣(氣態)。此種形態的不同特稱之為相(Phase)。

相具有下列三種特性：

甲、在一相內從開始至結束都具有相同的結構或原子排列：

乙、在一相內從開始至結束有大致相同的成份和性質：

丙、一相與其任何毗鄰的相都有一個清楚的界面。

例如：倘若把冰塊置於一真空密封箱中，冰塊將開始溶解，有一部份溶解的水甚至化成水蒸氣，此時，水分子出現三種相共存：固態(冰)、液態(水)和氣態(水蒸氣)，這些型的水分子各自都有一個明確的相，各自都有單一原子排列，單一的性質，並且各型式間有一清楚的界面，在此種情況下，這些相都是具有相同的成分，但是，以不同的相存在。

貳、物理變化：

一、熔化溫度(Melting Temperature)和凝固溫度(Freezing Temperature)

物質的相的變化直接與其組成的原子或分子所擁有的能量或是受外界溫度的影響有關。因此，對物質造成相變化的能量或溫度將是物質的重要特性之一：特別是牙科材料，由於應用的範圍多在口腔內，所以在使用時的溫度必須與口腔組織相配合，例如：常用的蠟或印模材料，為求在使用於口腔時不致造成硬或軟組織的傷害，一般而言，這些材料其熔化或軟化點的溫度只能比人體溫度稍高，但卻不能低於口腔溫度，否則材料的應用效果將大受影響，所以，材料所擁有的熔化點或凝固點經常是選擇材料在口腔內或口腔外實驗室操作的考慮因素之一。熔化溫度是多種材料，特別是金屬或陶瓷類材料在口腔外操作必須考慮的條件，例如：金屬的熔化點將是製作復形體相關條件配合的決定因素，如鑄造用的包埋材料。關於熔化溫度和凝固溫度的特性，見圖3-1所示。

當一固體物質受熱時開始轉變成液體，但是當固體未完全熔化成液態物質時，額外的熱或能量必須持續的供應，直至全部固體熔化成液體為止。在牙科材料物質中由於絕少使用單一元素物質，大部份都是化合物或複合物，因此在熔化溫度方面往往呈現一熔化溫度範圍(Range)而非單一元素物質的熔化點(Point)，例如：牙科嵌體用蠟其開始熔化溫度為攝氏48度，全部熔化成液態時溫度往往高達攝氏80度，而常用鑄造用合金其熔化範圍更寬達攝氏100度以上。

同樣地，在過冷或溫度下降時，液態的物質將可能出現凝固現象，在凝固的開始和進行時，物質將發生某段時間內溫度的持續穩定不變，此乃物質將內含的熔化熱(Heat of Fusion)釋放出來，直至液態物質全部結晶凝固為止，表3-2將列出牙科部份常見物質其熔化溫度和熔化熱。

貳、物理變化：

二、無限的溶解度(Unlimited Solubility)

如果以水和酒精各一杯來說明，水是一個相，而酒精是另一個相。如果我們把水倒入酒精內並加以攪拌，則只能產生一個相。杯中含有的是水和酒精的溶液。它具有單一的組織、性質及成分。水與酒精能互相溶解。它們呈現的是無限的溶解度亦即不論水與酒精的比例多少，將它們能混合在一起只會產生一個相。

相同地，如果我們把一罐液態銅和一罐液態鎳混合，將只會產生一個相。此液態合金到處都具有相同的成分性質及結構，圖3-2a。因此液態鎳和液態銅乃具有無限的溶解度：不論鎳與銅相對的量是多少都只會產生一個相。如果讓液態銅鎳合金固化並冷卻至室溫，只會產生一個固相。固化之後，銅原子和鎳原子並不分開，而是不規則地分佈在FCC晶格的格子點上。在固相內部，結構性質及成分都是均勻的，並且銅原子與鎳原子間無界面存在。因此，銅與鎳亦具有無限的固溶溶解度，此種固相稱為固溶體(Solid Solution)，圖3-2b。

貳、物理變化：

三、有限的溶解度(Limited Solubility)

當我們把少量的鹽(一個相)加入一杯水(第二個相)並加以攪拌時，鹽會完全地溶解於水中，圖3-3。結果只能找出一個相——鹽水(Salty Water或Brine)。然而，如果我們加入太多鹽到水中，過剩的鹽將沈澱在杯底。此時我們就有兩個相——含鹽量達到飽和的鹽水以及過剩的鹽固體。我們發現鹽在水中具有有限的溶解度。

如果我們把少量的液態鋅加入液態銅中，將產生一單相的溶液。當此一銅鋅溶液冷卻並固化時，我們將得到具有FCC結構的單相固溶體，其中銅原子與鋅原子任意地佔據正常的格子點。然而，如果溶液的含鋅量大於40%時，過剩的鋅原子將和一部份的銅原子結合而形成一種CuZn化合物，圖3-2(c)。結果出現兩個固相共存—約含40%Zn的飽和銅鋅固溶體以及一種CuZn化合物。結論是鋅在銅中的溶解是有限的。

在極端的情況下，一材料在另一材料中完全沒有溶解度。此種例子如：油與水，圖3-4；或銅-鉛合金。固溶體常見於牙科用金屬材料中，特別是復形用的合金材料，然而，在材料科學，為使一合金系統，能具有無限固溶溶解度，某些條件必須能滿足。這些條件稱為Hume-Rothery法則，現陳述如下。

- (1)金屬原子必須具有相近的大小尺寸，其原子半徑之差不能大過5%。否則，由於原子大小的不同，所產生的晶格應變量會太大，以致不允許有無限溶解度。
- (2)金屬必須具有相同的結晶結構。否則，必定在某些位置有過渡型的結構，從一相過渡到另一不同結構的相。
- (3)金屬原子必須具有相同的價數。否則，價電子的差異可能促進化合物的形成，而非固溶體。
- (4)金屬原子必須具有相近的陰電性。如果陰電性差異很大，則更易於形成化合物，例如：鈉與氯結合而形成氯化鈉。

貳、物理變化：

四、膠態系統(Colloidal System)

膠態系統的膠體粒子多為有機成分為主，其尺寸大小較一般溶液為大，但是在溶劑中不受重力影響而不發生沈澱現象，卻呈一均勻狀態分散在介質中，非真溶液，亦非懸浮液，例如：霧、煙和牛奶。

膠態系統的組成分子並不完全喪失其特性，仍保有部份原有的性質，一般而言，膠態系統的主要溶劑為水，而膠體和水可藉物理和化學反應形成水膠。

總括而論，物質的三態可以自由組合成為不同的溶體系統，現列述於表3-3。

貳、光學性質(Optical Property)

牙科材料使用於口腔作復形時，除了基本的物理、化學和機械性質要穩定與優良外，常必須考慮美觀的因素，而材料所表現的美觀，牽涉的影響因子可歸納為色彩(Color)、半透明度(Translucency)、表面光澤(Surface Gloss)和螢光效應(Fluorescence Effect)。這些因子將分別由牙醫師，技術人員和患者在不同的環境和條件去鑑賞，而以上的各項因素又分別受：甲、照明體(Illuminant)或光源(Light Source);乙、材料與光線的相互反應作用，和丙、觀察者的判讀結果。見圖3-5。因此，光線、被觀察的物體和觀察者這三項條件常被稱為『視覺現象的三要素』。

貳、光學性質(Optical Property)

一、照明體或光源

每件物質經光源照射後，光線與物體相互作用而最後經觀察者的判讀而決定物質的色彩。而光源所擁有的不同光波長的強度將造成色彩的主要部份，一般可見光的波長範圍介於380nm至760nm之間，而白光本身事實是不同波長的色光的混合，只要很簡單地使用稜鏡將下同波長的色光分散結果，將如圖3-6所示，分出紅、橙、黃、綠、藍和紫等色彩。經過稜鏡被分成各種色彩的色光，稱作光譜(Spectrum)，光譜再加以分光，再也無法分成新的光線或色彩，是故光譜又被稱為單色光(Monochromatic)，而照明體一般的描述是以色溫(Color

Temperature, K)來表示，乃一相對某一放射個體在某溫度所發生的同一色光的比較結果。表3-4列出幾種主要的光源及其色溫數值。由於，太陽光是我們人類最主要的光源，因此，照明體一般以能發出接近日光光源的色光強度最為理想，因為材料在往後的使用機會中以日光的曝露環境所佔的時刻比較長，而利用自然光或接近自然光的照明體作為比較選色得到的結果也將獲得較為真實的效果。

貳、光學性質(Optical Property)

二、物體

一般由於組成物體的物質不同，物體大致可分為不透明體(Opaque)，半透明體(Translucent)和透明體(Transparent)三大類。物體被判讀其擁有的色彩主要決定於物體與照射體所發出色光的反應作用。此反應作用包括反射作用(Reflection)，透射作用(Transmission)和吸收作用(Absorption)等。

二、物體

1. 反射作用

反射光的光量越大，則物體看起來越亮，因此，如果把標準白色面的反射光量當作100單位，以物體反射光量與之相比，得到一具代表性的色物體(Color Object)的分光反射率。每一色物體都有一特有的分光反射率，其曲線就成為物體的分辨色彩的主要依據。圖3-7所示，乃幾種代表性的光譜反射率曲線。物體被視為某種色彩主要是該物質能把光譜中該段波長的光反射出來而將其餘波長的光吸收，因此，當我們視一物體為藍色時，即表示該物體將藍光反射開來而吸收其餘的色光，見圖3-8。另外，任何物體在無光源的環境下均呈現黑色，所以，色彩並非附著於物體本身，主要是由於光線的反射才會感覺到色彩。

二、物體

2. 透射作用

材料獲得透射色彩乃由於物體能將光源透射結果，一般而言，波長無法被透射的光譜部份將自然被物體所吸收。例如：一片綠色的濾片乃可能將綠色波長範圍的光進行透射而將光譜中其餘波長的光吸收。

貳、光學性質(Optical Property)

三、觀察者

觀察者從物體對光的反射或透射結果而判讀物體的色彩結果。人類對色彩的主要感受器是眼睛內視網膜的神經細胞，以大腦的整合判讀，一般而言，人類眼睛對不同波長的光會有不同的反應，經測定結果對綠色光區域最為敏感。雖然眼睛是一個良好的判定色彩的器官，但在實際應用上，例如配色以及色差容許範圍的決定上，往往由於主觀的意見不同，容易造成彼此的爭執，這就是造成現今很多測色科學儀器日益被重視的主要原因。為了將色彩能數據化，國際照明委員會(簡稱CIE，全名為Commission International de l'Eclairage或International Commission on Illumination)經過多次的實驗與統計，而訂定了人類肉眼對紅、綠和藍三種主要色的刺激數值(Stimulus Values)定名為三刺激數值(Tristimulus Values)，X、Y、Z。

關於三刺激數值之計算方式，首先我們應知道測色必需具備以下三項資料：

- 甲、照明規定：標準光源的光譜能量分佈(E_{λ})。
- 乙、色物體的光學性質：就是如圖3-7之分光反射率(R_{λ})。
- 丙、觀察者的色感覺：CIE光譜三原色的刺激數值， X_{λ} 、 Y_{λ} 、 Z_{λ} 。

由以上三個要件，可將物體之顏色，模擬人眼之感受，計算出其紅、綠、藍三色各有多少量，而將顏色給予科學數據化，而定出三刺激數值，相同顏色其三刺激數值必然相同，而反射率不同之兩色體，其三刺激數值在某些光源下有可能相同，但在另外某些光源下，卻又不一樣，因此，由這三個數值的乘積可以得到每一波長的三刺激數值，然後將可見光範圍內所有波長的刺激數值加起來，就可得到代表一個色彩的三刺激數值，且可以用以下公表示之：

$$\begin{aligned} X &= K \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{x}_{\lambda} \cdot \Delta \lambda = \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{x}_{\lambda} \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots \text{紅} \\ Y &= K \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \cdot \Delta \lambda = \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots \text{綠} \\ Z &= K \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{z}_{\lambda} \cdot \Delta \lambda = \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{z}_{\lambda} \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots \text{藍} \end{aligned}$$

其中 R_{λ} ：物體的反射率，可由分光儀(Spectrophotometer)量度得知。
 E_{λ} ：光源的能量分佈，各種光源有不同的能量分佈。
 \bar{x}_{λ} 、 \bar{y}_{λ} 、 \bar{z}_{λ} ：觀察者(人眼)之三原色刺激數值。
X、Y、Z：三刺激數值，分別為紅、綠、藍。

貳、光學性質(Optical Property)

四、色彩的三屬性

首先，我們可將所有色彩大略區分為白色、黑色、灰色…等下帶色彩的顏色，及紅、綠…等有色彩的顏色。簡單而言，沒有色彩的顏色稱之為『無彩色』，有色彩的顏色稱之為『有彩色』。因此，在色彩方面的無彩色將以明度(Value、Lightness)階段來分；而有彩色則以色相(Hue)區分，再經由明度、彩度(Chroma)或飽和度(Saturation)兩項屬性來細分色彩。從以上的說明中，色相、明度和彩度三者合稱為色的三屬性。換言之：

甲、色相：乃紅、綠、黃、藍等之區分。

乙、明度：明暗之區分。

丙、彩度：色的鮮艷、強弱之區分。

以上三者所組成色彩的立體關係如圖3-9所示。

四、色彩的三屬性

1.色相

乃表示紅、橙、黃、綠、藍、紫等顏色系統的術語，純色以外的顏色就連褐色、粉紅色等都是基本色相，即使是同一色相範圍的顏色，性質也會不一樣，譬如說，同一色相有鮮艷、暗色、深淺之別，這些都可以用系統方法予以分類。

色相的配列是一種連續配列，是按照光譜的波長順序排列，所以只要知道波長，很快地就能知道色相的順序及相互關係。由於其排列是按紅、橙、黃、綠、藍、紫作成的環狀配列，所以一般稱之為色相環，見圖3-10所示。

四、色彩的三屬性

2.明度

色彩的明亮度即光線之反射率。凡物體反射光量較多時觀察者在感受上將變得較為明亮，吸收光線比例較多時，物體看來較為暗淡，然而，人類肉眼的觀察感受而言實際上並不是每一波長都是一樣的，而是呈一曲線分佈，見圖3-11所示。雖然每個人的感覺不一定相同，但是在550nm波長處，每個人都有一“最大明度”感覺，我們以它的視感度為1或100，來求其他波長的“比視感度”(Relative Luminosity)，此乃CIE建立的國際基準，合於此項基準的觀測者為“CIE標準觀察者”。

四、色彩的三屬性

3.彩度

顏色可以認為是純色與無彩色的混合結果：所謂[純色]就是指絕對不含白、灰、黑等無彩色成分存在的色，純色混合造成感覺上顏色變化的程度就是彩度。彩度表示方法，規定用顏色中含主要色彩成分的多寡，以百分數來表示。“飽和度”即表示一個顏色含有多少純色成分的術語。

五、色彩的混合

1.原色(Primary Color)

原色是指不能以任何其他兩種單色混合而成的色彩。光學的三原色是紅、綠、藍，而在色料調配方面三原色是指紫紅(Magenta)、黃和綠青(Cyan)等。

2.次色(Secondary Color)

次色是指二個以上的單色混合而成的色彩，例如色光中的黃色，色料中的綠色都是次色，因為黃色是由綠和紅混合而成，色料中的綠色可由黃和綠青兩種原色混合而成。因此在色光系統的原色即是色料系統的次色，而色料系統的原色卻是色光系統的次色。

五、色彩的混合

3.色彩的混合(Color Mixing)

是指兩種以上的色彩，經過混合後產生另一種色彩的現象，一般而言可分為兩大類型：

i. 加法混色(Additive Mixture)

此種情形的色彩混合乃屬於色光的混合，當兩種以上的單色光投射在一起時將產生另一種色光之現象，當色光重疊混合時，呈互相反射光線，增加了明度因而混合成另一種色光，且比原來未經混合時的單色光明度較高。

ii. 減法混色(Subtractive Mixture)

此種情形多指色料的混合，屬於攪和的混合，當兩種色料進行混合時，產生相互吸收光線的作用，所以色料混合的種類和次數愈多，結果吸收光量愈多，反射光量愈少，色彩趨向灰暗。

貳、光學性質(Optical Property)

六、色彩系統(Color System)

色彩系統是指表示或描述某物體色彩的參數。現今僅介紹較常用的體系。

1. 曼塞爾色彩系統(Munsell Color System)

乃美國一名美術教師曼塞爾(Albert H. Munsell, 1858–1918)所建立的色彩系統，此表色系統的特是製作出標準的色票，以色票來實際相對表示物質的色彩，圖3-12乃此立體色彩的系統。曼塞爾決定色相的基本顏色有：紅(R)、黃(Y)、綠(G)、藍(B)、紫(P)等五種色相，中間插入黃紅(YR)、黃綠(YG)、藍綠(BG)、藍紫(PB)、紅紫(RP)等五種色彩，成為10種主要色相。每種色相又細分為10部份，全部共計100種色相。經過細分的10種色，加上一土0的號碼，其第5號便為此色相的代表色；更詳細的說，例如：紅的色相記號為R，因此，紅色的色相從1R–10R為止，第5個色相(5R)就是紅色的代表色，見圖3-13色相環的表示。

明度階段的表示方法從N0、N1、N2、N3、N10，全部分為11個階段。黑色為『0』，白色為『0』，中間九種階段為灰色。『N』字是Neutral的大寫。

彩度的表示方法則以無彩色為0，隨著色調階段性的加強，以1、2、3的數字表示。彩度最高的純色，其階段隨色相之不同而有差異。以紅色有14種彩度階段最多，見圖3-14之剖面圖所示。

曼塞爾表色系統之記號以HV/C表示，H是色相(Hue)，V是明度(Value)，C是彩度(Chroma)；例如：5R純色的記號，記為5R4/14，唸作『5R4的4』：即色相=5R，明度=4，彩度=14。

10種主要色相的純色，以曼塞爾表色系記號表示，分別為：5R4/14、5YR6/12、5Y8/12、5GY7/10、5G5/8、5BG5/6、5B4/8、5PB3/12、5P4/12、5RP4/12。

總括言之，此系統由於是經驗歸納而建立的，因此在數值計算方面的應用雖然無法進行，但是在色彩訊息的傳遞和交換上甚為方便。

六、色彩系統(Color System)

2. 國際照明委員會色彩系統(CIE Color System)

此系統基本上是採用三刺激數值(X、Y和Z)作為參數，同時又將借助CIE色度圖(Chromaticity Diagram)作為色彩判定使用。

在CIE系統中目前最廣泛被採用的是L*a*b*系統，其中的L*，a*和b*三項參數的數值仍然是從三刺激X、Y、Z數值運算而來，L*與明度有關與曼塞爾系統相似，而a*和b*乃描述色度坐標有關，CIE和曼塞爾兩大系統的相互關係，見圖3-15。

此系統的優點是其色彩的安排在系統內呈均勻三度立體空間的安排且在視覺分析上較為一致並能容易以數字形表示各種色體的色彩差異。

貳、光學性質(Optical Property)

七、位變異構現象(Metamerism)

位變色彩(Metameric Color)乃指同樣的三刺激數值的色光在某特定的光源下將出現不同光譜能量分佈的結果。見圖3-16所示。在圖3-16中，甲和乙物體在三刺激數值測量時擁有相等的結果，然而反射曲線表現卻完全不同，此種現象在臨床應用上特別是進行此色(Shade Matching)更注意避免此現象的發生。例如在選擇義齒的色彩時使用螢光源，然而在白熱燈光(Incandescent Light)下卻出現與原有比色的物體不同的效果，因此，比色時光源的品質和強度在牙科材料選擇過程中乃一重要考慮因素，為避免此種位變異構現象，一方面可從實際應用環境中主要光源例如：日光，作為比色的光源，另外可以使用分光儀將不同物體的反射曲線繪畫出來作為事先鑑別應用。

肆、熱學性質(Thermal Property)

一、熱容量(Heat Capacity)或此熱(Specific Heat)

熱學性質，包括熱容，導熱度(Thermal Conductivity)及熱膨脹(Thermal Expansion)，皆受原子振動影響。就導熱度而言，能量是經由電子來傳導。在此，振動可以能量來表示，亦即我們可運用能量的波動性。

在絕對零度時，材料內的原子完全處在靜止狀態。但是當把熱量供給材料時，原子即刻獲得熱量，而以一特定的振幅與頻率振動。此種振動產生一種被稱為聲子(Phonon)的彈性波。聲子的能量可用波長、頻率或溫度來表示，如以下的公式：

$$E = kT$$

其中 k 為 Boltzman 常數($1.38 \times 10^{-24} J / K$)， T 為絕對溫度。

材料經由獲得或失去聲子來獲得或失去能量。因此，使材料改變溫度所需的能量(或聲子數目)在應用上便有其意義，而且可用熱容或比熱來表示能量。熱容是使一莫耳材料令其溫度改變1度所需的能量。熱容之表示法一般有二種，一是定壓熱容 C_p ，另一是定容熱容 C_v 。理論上，一已知體積的材料之熱量是一常數， $C_p=3R=6$ 卡/莫耳。

其中 R 為氣體常數，相當於1.987克/莫耳。

比熱是使一特定重量或質量的材料溫度上升1度所需的能量，比熱與熱容之間的關係為：

$$\text{比熱} = \frac{\text{熱容}}{\text{原子量}}$$

在大多數材料應用計算中，均以使用比熱較為方便，部分材料的比熱列在表3-5。

肆、熱學性質(Thermal Property)

二、熔化熱(Heat of Fusion)

其意義為將1克的物質從固態轉化成熔點時的液態所需的熱量。熔化熱其計算公式為：

$$\text{熔化熱} = \frac{\text{總吸收熱量}}{\text{物質的質量}}$$

熔化熱的量通常與此物質的熔化或凝固點有關，因為此時需額外添加熱量於物質上以期達到完全液化作用，因此只要物質保持熔融狀態，熔化熱都會一直存在液態物質之內，以待凝固或固化過程中再次釋放出來，一些常用的物質其熔化熱數據見表3-2所列。



肆、熱學性質(Thermal Property)

三、熱膨脹(Thermal Expansion)

乃原子獲得熱能並開始振動之行爲，如同一個原子半徑發生擴大變化的現象。因此，原子間的平均距離和材料整體的尺寸都增大。材料每單位長度的尺寸增加量 Δl 被定義為線熱膨脹係數(Linear Coefficient of Thermal Expansion) α ，以公式表示如下：

$$\Delta l = \alpha \Delta T$$

其中 ΔT 為溫度增加量。

一材料的線熱膨脹係數和它本身的鍵結之強度有關。爲使原子從它們的平衡位置移開，我們必須供給材料內原子的能量。如果材料的原子鍵結所具有的能量凹槽很深(圖3-17)，則原子分開的程度較小，並且線熱膨脹係數較小。

因此，這關係也說明了具有高熔點的材料由於擁有強大的原子間吸引，使得它們的熱膨脹係數很小，見圖3-18所示，與鑽石、鎢或陶瓷比較之下，鋁和矽化合物等材料，後者的線熱膨脹係數則較大。在此要特別注意，並非在所有的溫度下線熱膨脹係數都是常數。一般情況下，線膨脹係數乃一複雜的溫度相關函數，或僅祇定出某特定溫度範圍內的常數。部份牙科常用材料的線熱膨脹係數見表3-6所列。

肆、熱學性質(Thermal Property)

四、導熱度(Thermal Conductivity)

導熱度在應用上通常以 K 作為量度熱傳導通過一材料之速率的一種指標，在定義上導熱度乃將每分鐘傳導通過一已知面積的熱量與存在的溫度梯度(Temperature Gradient) $\Delta T / \Delta X$ 關聯起來，公式的表示如下：

$$\frac{Q}{A} = K \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

其中 A 為面積， Q 為熱量。

需注意的是導熱度 K 在熱傳導中所扮演的角色與質量傳遞中的擴散係數 D 完全相同，對於導熱度的圖解說明見圖3-19所示。

如果價帶內的電子很容易被激發進入傳導帶，則熱能可經由電子傳導。被傳導的能量大小取決於受激電子的數目與它們的遷移率；因此，我們預期導熱度與導電度之間將存在某種關係，如下公式所示：

$$\frac{K}{\sigma T} = L = 5.5 \times 10^{-9} \text{ cal} \cdot \Omega / \text{s} \cdot \text{K}^2$$

其中 L 為 Lorentz 常數。

原子受熱誘導的振動所產生的聲子也能把能量傳導通過該材料。我們預期高溫可增大熱傳導的速率，其原因是那時聲子的能量較高。

四、導熱度(Thermal Conductivity)

1. 金屬的導熱度

電子為金屬與合金內熱能傳導的主要角色，因為金屬與合金的價帶與傳導帶之間並無能隙存在。然而，晶格缺陷、顯微組織及製程也會影響導熱度。因此，經過冷作的金屬、固溶強化及兩相合金與它們無缺陷的同類比較，其導電度可能較低。另外，高溫會使金屬電子的遷移率降低，因而預期金屬的導電度在高溫下會變小。因此，就金屬而言，導熱度起初隨溫度上升而降低，接著變得幾乎是常數，然後再緩慢地增大，此時的熱傳導乃屬於晶格振動的原理。

四、導熱度(Thermal Conductivity)

2. 陶瓷的導熱度

晶格的振動(即聲子)為陶瓷與絕緣性材料內熱傳導之主要角色。這些材料的能隙太大，以致除非在很高的溫度下，否則無法使很多電子被激發進入傳導帶。因此正常情形下，陶瓷在高溫時具有很高的導電度，因為那時的聲子能量很高，並且尚有一些電子的貢獻導熱功能。

其他因素也會影響陶瓷的導電度，例如具有緊密堆積結構、低密度及高彈性模數的材料可產生高能量聲子，這些聲子能促成高導熱度。結晶質固體與它們的非晶質或玻璃質同類比較，其導熱度較高，因為聲子散射的比率較低。孔隙亦會降低導熱度，例如品質最佳的耐火磚含有大量的孔隙。我們可把這種材料視為一種複合材料，而孔隙為此材料的分子組成之一。

至於牙科材料方面，經驗告訴我們金屬類較非金屬復形體的熱傳導為佳，因此由於熱傳導的優劣在實際應用上便可造成不同的效果和影響。例如一較大的金合金嵌體，汞齊或是牙冠的復形體如果太靠近牙髓組織將可能由於溫度改變時對牙髓組織造成冷熱的刺激，所以，必須考慮使用熱傳導較差的材料作為保護牙髓或絕緣體的應用，一般常用牙科材料其導熱度見表3-7所列。

肆、熱學性質(Thermal Property)

五、熱擴散度(Thermal Diffusivity)

其定義為物質在某單位時間內對熱量傳送的情形，其中與物質的導熱度(K)比熱(Cp)和密度(p)有關聯，以下公式乃表示它們相互的關係：

$$\text{熱擴散度} = \frac{K}{C_p \times \rho}$$

單位為毫米平方/秒。

由於熱擴散度乃描述因為溫度的不平衡而發生熱量在物質內進行平衡變化的過程，因此，將某些材料特別的是金屬類，在擁有低比熱和高導熱度條件下製成的復形體將較自然齒質容易發生熱刺激。常用牙科材料之熱擴散度見表3-8所列。

伍、電性質(Electrical Properties)

一、電阻率(Electrical Resistivity)和導電性(Electrical Conductivity)

對於任何物質其所具的電性質最基本考慮就是對電流的傳導影響程度。根據歐姆定律(Ohm's Law)，電位(Potential, V)，電流量(I)和電阻率(R)三者間之關係為：V=IR。

而導電性與電阻率互成倒數的關係；在實際運算應用時，一般對電性質的敘述是以其電阻效應最常被採用，表示對於一均勻材質的導體，在恆溫狀態下，物體的長度(l)，截面積(A)與其對電流的流過效果可以用下列公式表示之：

$$\text{電阻率}(R) = \text{電阻係數}(\rho) \times \frac{l}{A}$$

電阻率的單位為

歐姆數。牙科常用材料的電阻係數數值如表3-9所列，其中數值愈大表示對電流的絕緣效果最佳。

伍、電性質(Electrical Properties)

二、電化電池(Electrochemical Cell)

將兩片相接觸的金屬並放置在一可導電的溶液[稱為電解質(Electrolyte)]內時就構成一組電化學電池。如此形成的完整電路可構成電鍍(Electroplating)或電化學腐蝕(Electrochemical Corrosion)。

二、電化電池(Electrochemical Cell)

1.電化電池的組元

電化學電池是由四個組元所構成的(圖3-20)

- (1)陽極：陽極釋出電子給電路而受侵蝕。
- (2)陰極：陰極藉著化學反應(或稱陰極反應)接收來自電路的電子，與電子在陰極處結合的離子生成副產品。
- (3)物理接觸：陽極和陰極必須作電性連接，一般是利用物理接觸，才能讓電子從陽極流到陰極。
- (4)電解質：電化電池中必須有電解質與陽極及陰極相接觸，電解質可導電，因而得以構成完整的電路。電解質提供了金屬離子離開陽極表面的中介物，並確保此離子能移動至陰極去接收電子。

按此方式定義的電化電池已界定了電化學腐蝕及電鍍。這二種過程的相異點在於此電池的目的、造成電流在此電路中流動的電位之電源及發生在陰極的反應種類等因素。

二、電化電池(Electrochemical Cell)

2.陽極反應

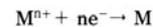
陽極通常是金屬，在電化電池中它發生氧化反應(Oxidation Reaction)，其中的金屬原子被離子化。在此，金屬離子進入電解質內，而電子則離開陽極進入連線部份朝陰極方向移動。



二、電化電池(Electrochemical Cell)

3.電鍍之陰極反應

電鍍時，陰極發生還原反應(Reduction Reaction)，這是氧化反應的逆反應。

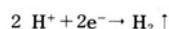


二、電化電池(Electrochemical Cell)

4.腐蝕之陰極反應

除非在下平常的狀態下，否則在電化學腐蝕期間並下發生金屬覆蓋作用，在陰極處的還原反應多由生成氣體、固體或液態等副產品之作用所取代(圖3-21)。

甲.氫電極：在無氧存在的液體中：例如氫氯酸(HCl)或停滯的水，最常見的陰極反應是釋放氫氣。此稱氫電極(Hydrogen Electrode)。



4.腐蝕之陰極反應

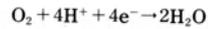
乙.氧電極：在經過曝氣的水中，氧即為陰極所接納而生成羥離子(Hydroxyl, OH⁻)。



氧電極(Oxygen Electrode)促使電解質富於OH⁻離子。這些離子可與帶正電的金屬離子[例如Fe²⁺]起反應而生成一固態物質(例如Fe(OH)₂，即常見的鐵鏽)。

4. 腐蝕之陰極反應

丙.水電極：在氧化性酸中，陰極反應的副產品為水。



如果氧與氫能連續地供應，則將形成水電極(Water Electrode)，在陰極處，既不生成一固態銹皮的堆積層，也不產生高濃度或稀薄的離子。

二、電化電池(Electrochemical Cell)

5. 電極電位

當一完全理想的金屬被放置在電解質內時，它能發展出一個與它本身釋放電子之趨勢有關的電極電位(Electrode Potential)。然而，此氧化反應的趨動力為一個與之大小相等但方向相反的還原反應趨動力所抵消，因而沒有淨腐蝕發生。結果我們才量測不到單一電極材料的電極電位。

二、電化電池(Electrochemical Cell)

6. 電動勢順序

為求得一金屬釋放其電子的趨勢，我們以半電池(Half-Cell) (圖3-22)為基準來測度此金屬電極與一標準電極之間的電位差(Potential Difference)。待測的金屬被放置在其離子濃度為1M溶液內，另外，一參考標準電極也放置在其離子濃度為1M溶液內。這兩種電解質可作電性接觸，但下允許它們互相混合。此二電極各自建立出自己的電極電位。於此電路斷路時測定這兩個電極間的電壓，就能求出電位差。通常我們取氫電極的電位為我們的標準參考電極，在此就令其電壓為零。如果該金屬釋放電子的趨勢大於氫，則該金屬的電位為負值-該金屬對氫電極而言是陽極。

三、電化腐蝕的型

以下我們將介紹幾種電化腐蝕最常見的型式。

1. 均勻腐蝕

當一金屬被放入一電介質內時，金屬的某些區域會比其他區域更為“陽極”。然而，這些區域的位置會移動。甚至有時會周而復始。既然陽極區域與陰極區域不斷地遷移，即使該金屬並未和另一種材料接觸，該金屬也會很均勻地發生侵蝕(Attack)。

三、電化腐蝕的型

2. 電化電池(Galvanic Cell)

電化侵蝕(Galvanic Attack)發生於金屬某一區域經常為陽極，然而另一區域則經常為陰極。這類電化電池就稱為Galvanic電池，一般可區分為三種型式—成分電池(Composition Cell)、應力電池(Stress Cell)和濃差電池(Concentration Cell)。

三、電化腐蝕的型

3. 成分電池(Composition Cell)

成分電池也就是不同種金屬(Dissimilar Metal)間的腐蝕，它是在兩種金屬或合金(例如銅和鐵)構成一電化電池所造成的腐蝕。在合金元素與電解質濃度對極化的影響方面，emf順序可能無法告訴我們那個區域受到腐蝕及那個區域受到保護，因此，我們另採用一種Galvanic順序(Galvanic Series)來代替emf順序:前者乃根據下同種合金在一特殊環境下的陽極性趨勢或陰極性趨勢來排列(表3-11)。對海水、淡水與工業用環境而言，由於離子濃度的不同我們可能發現電化順序各有不同。成分電池出現在兩相合金內，其中的一相比另一相更具陽極性。因而在合金內二種相可形成許多細小的顯微電池，導致發生電池性腐蝕反應。就對腐蝕的抵抗力而言，幾乎所有的兩相合金都要比與它成分類似的單相金屬差。

三、電化腐蝕的型

4. 應力電池(Stress Cell)

出現在一含有局部應力下相同區域的金屬內。受高應力(即含高能量)的區域成爲陽極，而應力低的區域則成爲陰極(圖3-23)。具有細小晶粒(即晶界數量較大)的區域，比同一材料之粗大晶粒區域更具陽極性。經高度冷作的區域比低度冷作的區域更具陽極性。而作用應力的存在會加速腐蝕速率。

三、電化腐蝕的型

5. 應力腐蝕(Stress Corrosion)

是因電化作用所致;但其他機轉，例如在一已存在的裂縫之尖端處吸附了雜質，也會造成應力腐蝕。破壞的發生係腐蝕與作用應力聯合造成的結果。作用應力愈高，破壞發生的時間也愈短。

疲勞破壞也會因腐蝕發生而引發或加速。腐蝕疲勞(Corrosion Fatigue)係以引發裂縫(可能產生蛀孔或凹縫)及增進裂縫延伸速率等作用來減弱材料的疲勞性質。

三、電化腐蝕的型

6. 濃差電池(Concentration Cells)

濃差電池的發生係由於電解質的濃度有差異，圖3-24。根據Nernst方程式，金屬離子濃度的差異可造成電極電位的差異。與高濃度溶液接觸的金屬爲陰極；與稀薄溶液接觸的金屬爲陽極。

四、氧濃差電池(Oxygen Concentration Cell)

通常是指缺乏氧的狀態發生於陰極反應爲氧電極， $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ 。

電子由氧濃度低的區域(陽極)流到氧濃度高的區域(陰極)。附著物，例如皮或水，將氧與其底下的金屬隔開。結果，在附著物底下的金屬就成爲陽極而受到腐蝕。這就造成所謂的“蛀孔腐蝕”(Pitting Corrosion)。水線腐蝕(Waterline Corrosion)的情況也類似，在水線以上的金屬曝露於含氧量高的空氣中，而在水線以下的金屬所接觸的水含氧量低。因此，在水線以下的金屬會受到腐蝕。正常情形下，在水面下較深處的金屬之腐蝕速率比正好在水線下的金屬慢，這是因爲電子必須行走較大的距離距離所致。由於裂縫和接縫處的含氧量比其周圍的原材料低，故裂縫或接縫的尖端成爲陽極，而導致間隙腐蝕(Crevice Corrosion)。埋設在土壤內的管道也可能因爲土壤成分的差異而受到腐蝕。速率的差異也可能導致濃度差異--停滯的水含氧濃度較低，而與空氣接觸且快速移動的水含氧濃度較高;故在停滯水附近的金屬是陽極而受到較嚴重的腐蝕。

陸、磨損(Wear)

由於口腔是一動態環境，除了上述的電化學反應外，對所使用的材料同時會有機械性的反應發生。磨損或沖蝕係因固體或液體的機械性侵蝕而使構成一元件的材料慢慢地被移去，腐蝕與機械性破壞也可能是因這種型態的侵蝕所致。

陸、磨損(Wear)

一、接觸磨損(Adhesive Wear)

亦稱爲刮痕(Scoring)或磨蝕(Galling或Seizing)，它發生於兩個固體表面在壓力之下相對滑動之時，表面凹凸不平(Surface Projection)或粗糙(Asperities)是塑性變形之結果，並且後來藉著局部高壓力而熔接在一起(圖3-25)。在滑動進行之時這些鍵結被打斷，而在一表面上產生空穴及在另一表面上造成凹凸不平，並且經常產生顆粒微小的磨屑。以上的因素皆能促進表面進一步的磨損。

一、接觸磨損(Adhesive Wear)

減低接觸磨損的方法可歸納為：

- (1)荷重小，磨損速率將降低。
- (2)如果兩個表面都具有幾乎相等的高硬度，則磨損速率將較緩慢。
- (3)平滑的表面並降低凹凸不平處形成鍵結的可能性，可使磨損速率降低。
- (4)防止接觸可使磨損減至最輕程度。例如，使用潤滑劑可降低接觸磨損發生的機會。

陸、磨損(Wear)

二、磨料磨損(Abrasive Wear)

當材料為與其表面接觸的硬質顆粒所除去時，就發生所謂的磨料磨損。在此，硬質顆粒可以是存在表面上的另一種材料，或者是存在而兩表面間的鬆散顆粒(圖3-26)。磨料磨損與接觸磨損不同之處在於前者不發生鍵結。此種磨損一般在耕犁、刮刀、軋碎機及磨床等被用來處理有磨損性材料的機械中很常見，而且也可能發生於無意間使硬質顆粒進入正在運轉的機械元件內。磨料磨損也被用在希望除去一部份材料的研磨作業中，牙科復形體的磨光處理即是其中最典型的例子。具有高硬度且在高溫下具高強度的材料對磨料磨損的抵抗力最佳。作為抵抗磨料磨損方面之應用的典型材料，包括淬火及回火鋼、滲碳或表面硬化鋼，在使用期間以應變硬化獲致強化的高錳鋼、鈷合金(例如Stellite)、複合材料、白鑄鐵，以及藉焊接獲得表面硬化的材料。

陸、磨損(Wear)

三、液體沖蝕

一材料的完整性可能會被一正在流動之液體所帶來的高壓力造成沖蝕而破壞，此種液體沖蝕能造成金屬表面的應變硬化，並導致局部變形、龜裂和損失一部份材料。

柒、表面現象(Surface Phenomena)

一般而言，表面現象包括了表面張力(Surface Tension)、濕潤(Wetting)、吸附作用(Adsorption)、毛細管作用(Capillary Action)和黏著作用(Adhesion)。在臨床牙科材料應用範圍內，特別是針對復形物與牙齒結構的界面，上述的表面現象對復形物的穩定性與耐久性有重要的相連關係。

柒、表面現象(Surface Phenomena)

一、表面張力(Surface Tension)

在正常情況下，液體和固體其表面的原子和分子都較物體的內部組成的原子和分子擁有較高的能量。在液體方面，此能量稱之為表面張力。從圖3-27所示，液體表面的分子由於容易經蒸發作用而喪失部份的分子，因此分子間有較大的空間距離，從過去的學習和經驗中知悉，分子間距離愈大將造成一較大的淨分子間吸引力，結果將形成表面的收縮力量或表面張力，液面也將呈下降凹陷結果，部份物質的表面能力見表3-12所列。

柒、表面現象(Surface Phenomena)

二、濕潤(Wetting)

其定義就是一滴液體在固定物質表面散佈程度，從圖3-28可以說明。同一種液體在不同的表面將出現不同的濕潤效果。首先要注意是液體的表面和液體與固體界面所成的角度稱之為接觸角(Contact Angle, θ)，零度接觸角乃表示完全濕潤結果，相對下在較小的接觸角度情形下乃表示液體在固體表面有較良好的濕潤作用，如果數值大於90度乃表示濕潤效果較差。表3-13所列乃牙科常見材料的接觸角數值。濕潤程度的優劣常影響材料的固位性。

柒、表面現象(Surface Phenomena)

三、吸附作用(Adsorption)

為降低表面的能量，移動的原子和分子將集中在高能位的表面部位，例如：活性炭表面容易吸附氣體分子，其目的不外是傾向降低表面的能量。因此，當表面能量高且擁有較廣的表面積時吸附作用將最是強烈，而在表面漸被遮蓋時則將緩慢下來。另外，吸附作用只發生在表面，而吸收作用(Absorption)則經過穿透和吸進而達物質的內部(如水膠體吸水反應)，而金箔表面所吸附的氣體則必需在使用前將之去氣處理。

柒、表面現象(Surface Phenomena)

四、毛細管作用(Capillary Action)

液體的表面能量會形成把液體壓迫進入裂溝，窄縫和細管內的壓力，而此類壓力作用在臨床上常是復形材料賴以獲得固位效果的力量來源。毛細管柱高(Capillary Rise)乃表示毛細管液柱的高度(h)，可以用下列公式表示之：

$$h = 2\gamma \cos \theta / rdg$$

γ 為表面張力， θ 為接觸角， r 為管內徑， d 為液體密度， g 為重力常數，相當於980達因/克。

如果接觸角少於90度，液面將出現上昇，若角度大於90度，如在液體汞內或水在鐵弗龍表面，液柱面將下沉，必需施以壓力才會上昇，見圖3-29所示。在應用上，除了復形物固位性的影響外，齶齒之常出現於牙齒表面的小窩，裂縫甚至鄰接面，也與毛細管作用和形成流體負壓力的現象有關連，見圖3-30。

柒、表面現象(Surface Phenomena)

五、黏著作用

此作用乃兩種材料在界面上發生緊密接觸鍵結的常見現象，在牙醫界臨床應用上，例如牙釉質在酸蝕(Etching)時，常用37%磷酸液處理15至60秒後，牙釉質表面將產生10至30微米深的腐蝕凹陷粗糙表面，在復形進行時，樹脂類材料便可黏著在上述粗糙表面上而獲得機械式的固位效果。

在獲得理想的材料間黏著效果之前以下的條件必須加以考慮才能維持長久的黏著作用和降低失敗的發生。

- (1)清潔度：無任何殘留物或污染的表面有利分子間直接接觸作用，因此，表面經常須進行預先處理，例如：酸蝕作用。
- (2)表面的穿透作用：有利液體或流動性較佳的物質穿透對方物體的內部可加強黏著效果。
- (3)化學反應：除了機械式固位效果外，分子間如有進一步的反應將有助黏著的持久性。
- (4)黏著性收縮效果：正確地利用化學反應所發生的收縮效果，有加強機械性的固位。
- (5)熱應力：注意物理性變化，例如：熱膨脹係數的差異，可減低因溫度改變所引起的應力現象以減低應力集中造成的黏著破壞。
- (6)環境因素：避免酸鹼度，溫度和壓力的大幅度改變，將有助黏著作用的持久。

柒、表面現象(Surface Phenomena)

六、牙本質的黏著作用

在牙科復形工作中對於牙釉質的黏著鍵結作用已經獲得十分理想的效果和觀念，然而，由於基本組成成分的不同，見表3-14所列，牙本質只含45%的礦物質，其餘的組成為有機物和水，對於酸蝕作用的反應將與牙釉質迥然不同。因此，對於牙本質的有機物部份在加強黏著效果方面將是主要利用的部份，目前最常使用的方式是利用部份含親水根(Hydrophilic Group)的酸或聚合物與牙本質有機物的主要成分：膠原蛋白質起化學反應，特別是離子鍵和氫鍵的形成，而獲得黏著效果。另外，除了以上的化學反應外，牙本質的表面常存有一層厚度不均勻，而組成卻是疏鬆柔軟的食物殘渣或經磨削(Grinding)後殘餘的牙齒碎屑物質，此層物質稱之為塗抹層(Smear Layer)。

塗抹層的存在直接影響牙科材料與牙本質的濕潤和接觸，為求達到黏著的最佳效果，此塗抹層一般建議先行清潔處理，以披露牙本質才進行黏著作用，處理方如圖3-31所示步驟。目前最常用去塗抹層的方法，包括：甲、機械：使用滑石粉和刷子刷洗牙本質表面；乙，化學式：利用聚丙烯酸等化學劑抹擦含塗抹層之牙本質的表面15至30秒，然後沖水清洗。

塗抹層的存在雖然會影響牙科材料黏著作用的進行，但是對於某些對牙髓會產生刺激副產品的材料，例如磷酸鋅黏合劑，早期時可能有強酸性現象，在使用於牙冠牙橋黏合時，支台牙表面可能存有的塗抹層則下必去除，甚至保留或加塗上塗漆(Varnish)作為保護牙本質、牙髓的作用，而此時黏合作用(Cementation)的效果是依賴支台牙間的平行性而獲得固位結果，而非黏合劑的黏著作用為主。黏著作用的成功可以提昇復形工作的品質，材料的黏著穩定，可減少臨床出現復形物邊緣滲漏(Marginal Leakage)而造成邊緣變色(Marginal Discoloration)、牙髓刺激(Pulpal Irritation)和二度齲齒(Secondary Caries)的發生。