

漫談寶石的顏色— 兼論臺灣主要寶石的顏色成因

Talking about the Colors of Gemstones- Also on the Causes of the Colors of Taiwan's Main Gems

余炳盛 國立臺北科技大學 資源工程研究所

鄭子善 國立臺灣師範大學師資培育與就業輔導處

Yu, Bing-Sheng Institute of Resources Engineering, National Taipei University of Technology

Cheng, Tzu-Shen Office of Teacher Education and Careers Service, National Taiwan Normal University

五顏六彩的寶石

寶石之所以會被普世大眾所喜好，除了光澤耀眼之外，豔麗多彩的顏色應該是一個主要的因素。除了透明無色的鑽石、和闐白玉等少數寶玉石，絕大部分吸引人的珍貴寶石都是因為它們有著多采多姿的顏色，例如紅寶石、藍寶石、祖母綠、翡翠、紫水晶、橄欖石、土耳其玉、臺灣藍玉髓等等。

有些寶石只有一種色系，但有些品種的寶石卻可以有多種顏色的變化。是什麼因素造成這些寶石有千變萬化的顏色？讓我們從科學的角度帶您一窺寶石顏色的奧妙。



圖1 具有各種豔麗色彩的寶石總是吸引人們的目光

顏色是眼睛對可見光的感覺反應。所謂可見光是指波長約400~780奈米的電磁波，有些文獻描述350到750奈米，此乃因為每個人對可見光的感受範圍有所差異所致。電磁波是一種能量型態，波長不同，眼睛便會感受到顏色的不同，例如400奈米左右是紫光，500奈米左右是綠光，600奈米是黃光，而700奈米是紅光，中間是漸變的關係。白光通常包含強度大約一樣的所有不同波長的可見光光波。

當一道白光的電磁波入射到寶石材料內部時，如果寶石對可見光的電磁波完全不吸收，寶石便會呈現透明無色或是白色，反之如果對所有可見光電磁波完全吸收，那寶石便會是黑色。如果寶石只吸收其中部分的光波，那就會呈現剩下來的反射或穿透過去的電磁波的顏色，例如一個寶石如果將白光中的藍到綠光吸收了，那該寶石可能就會呈現紅至橙色。

寶石若是百分之百由該礦物的化學成分組成，沒有存在雜質或後述的各種形成顏色的因素，其呈現出來的顏色稱為「自色」，而如果因為雜質或缺陷等等因素的存在，便可能呈現其他的顏色，稱之為「他色」。例如純剛玉(Al_2O_3)、純石英(SiO_2)、純方解石($CaCO_3$)的白色都是白色或透明無色的，但是剛玉的他色則有紅色(紅寶石)、藍色(藍寶石)、粉紅色、綠色、紫色、橘色、黃色等。石英的他色則有紫色(紫水晶)、粉紅色(粉晶、玫瑰或薔薇水晶)、褐色或黑色(煙水晶)以及綠色等，方解石也有紅色、橙色、黃色、綠色、藍色、黑色等多種不同的顏色。

電子作用的寶石顏色成因

至於某些寶石為何會吸收特定的可見光而產生不同的顏色呢？在此就一些主要成因做簡要的說明。

致色元素

寶石的顏色主要成因之一是由電子作用所引起的。由於可見光電磁波的能量大約介於1.7~3.4 eV(電子伏特)之間，這種能量大小剛好與一些寶石材料內的自由電子躍遷所需的能量類似，因此它們便可能吸收部分光波而產生顏色。



圖2 石英家族具有多種「他色」，因而更加迷人。



圖3 橄欖石是因為含有過渡元素-鐵而產生成嬌豔的綠色。

例如當寶石含有d軌域未填滿的元素，例如鈾、鉻、錳、鐵、鈷、鎳、銅等元素時，因為其d軌域未填滿，d軌域的電子便有機會吸收可見光光波的能量，而在各d軌域間躍遷，致使寶石產生顏色。這些會導致寶石產生顏色的元素，也稱之為「致色元素」。

例如翡翠及祖母綠便是因為含鉻元素才會形成綠色，紅寶石的紅色也是因為含鉻元素而引起的，孔雀石及土耳其玉因含銅元素而呈綠色，薔薇石英及玫瑰石（薔薇輝石）都是含錳元素，橄欖石因含鐵元素而呈綠色等等。

晶體場轉移

讀者可能覺得很奇怪，為何一樣是含鉻，翡翠與祖母綠是綠色的，而紅寶石卻是紅色的呢？這就涉及到較艱深一點的科學理論了。鉻離子在祖母綠及紅寶石內都是以結晶學的六配位（即上、下、前、後、左、右六個方向）與其他六個離子鍵結，或者可以描述為其沿著XYZ三軸方向產生鍵結。當周邊與鉻離子鍵結的離子種類不同，會影響鉻離子在XYZ三軸方向的 $d_{x^2-y^2}$ 與 d_z^2 兩個軌域的壓縮情形，使得它們與其他 d_{xy} 、 d_{yz} 、 d_{zx} 三個軌域的能階差距有不同的變化，便會進一步影響吸收的光波的能量，此種作用稱為「晶體場轉移（Crystal Field Transitions）」。

在祖母綠內鉻元素的d軌域能階差主要是吸收紫到藍以及黃到紅色的光波，便呈現綠色；而紅寶石內的鉻離子卻是吸收紫到靛色，以及綠到黃色的光波，所以呈現紅色為主的顏色，並帶些微的藍色色調。

分子軌域理論

另一種也是由電子作用引起的寶石顏色的成因稱為「分子軌域理論」（Molecular Orbit Theory）。當寶石材料結晶構造內同時具有兩種不同價數的離子存在時，電子便可能在兩個離子間來回跳躍，使得兩離子的價數隨時改變，在此同時也吸收特定能量的可見光，而使寶石產生顏色。

例如：海藍寶石內如果含有鐵離子雜質，其鐵離子可以是正二價（ Fe^{2+} ）及正三價（ Fe^{3+} ），電子如果從正二價鐵跳到正三價鐵，此時原來正二價鐵變成



圖4 翡翠或祖母綠因含有鉻離子而呈現綠，但同樣含有鉻元素的紅寶石卻是紅色的。

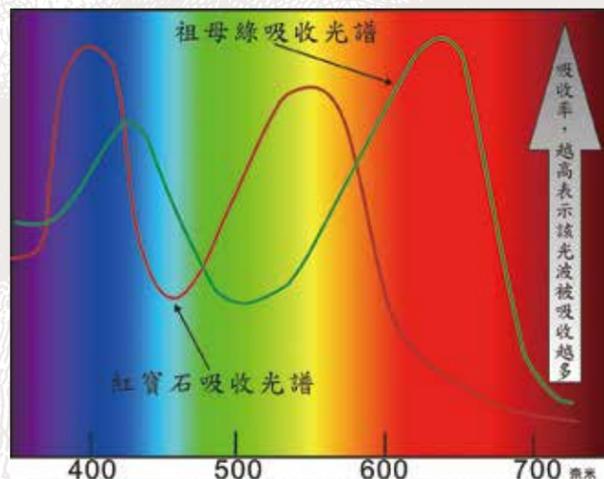


圖5 紅寶石及祖母綠的吸收光譜圖顯示因晶體場不同，同樣是鉻離子，其對光波的吸收卻不同。

正三價鐵，而原來正三價鐵則變為正二價，這過程便吸收部分的可見光波，而使海藍寶石呈現藍色。類似機制產生顏色的寶石還有藍色的堇青石（含有鐵離子雜質， $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ ）、藍寶石（含有鐵離子及鈦離子雜質， $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{4+}$ ）、藍晶石（含有鐵離子及鈦離子雜質， $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{4+}$ ）等等。

色心

色心（Color center）也是一種由電子作用形成寶石顏色的原因。所謂的「色心」是指當寶石生長時，其內部產生結晶缺陷，例如：部分陰離子的缺失等。由於整個寶石材料必須正負電荷平衡，空缺下來的陰離子的位置會有自由電子補充空位，而此自由電子便可以吸收可見光而使寶石產生顏色。

因「色心」機制產生顏色最有名的寶石例子便是螢石（冷翡翠）。在螢石的結晶中，經常會有氟離子（ F^- ）的缺失，而有電子填充於其空位，便造成螢石產生紫色等色彩。其他的例子還包含紫色的紫水晶、黑色或褐色的煙水晶、藍色或黃色的岩鹽、因自然或人工受輻射而產生缺陷的藍色黃玉（Topaz）等。

物理作用的寶石顏色成因

還有另一大類的顏色成因為物理作用造成的，主要有：寶石含有包裹物、干涉作用，以及色散作用。

含有包裹物

寶石的生長環境通常很複雜，難免會包含一些雜質元素，有的時候甚至還會將其他礦物的小顆粒也包含在其晶體中，這種被包含進來的其他小礦物顆粒稱為包裹物，有些礦物顆粒小到數微米以下，比頭髮直徑還細小呢！這些構成包裹物的礦物常常本身便具有顏色，因此當它們被包裹在其他寶石內部時，便會造成該寶石的顏色產生變化。如果包裹物的顆粒很小又很均勻分佈的話，有時候真的很難察覺該寶石的顏色竟是由其他礦物造成。

這樣的例子非常多，例如：所謂的東菱石（也稱為東菱玉或印度玉）是因為石英內部含有綠色的鉻雲母所致。紅色碧玉（Jasper）是一種微晶質的二氧化矽寶石，其紅色是由於含赤鐵礦造成的。俄勒岡州太陽



圖6 藍寶石是因為含有鐵離子及鈦離子雜質，電子來回轉移而形成藍色。



圖7 紫水晶因為含有微量的鐵離子，造成石英內部產生色心而呈紫色。



18 圖8 東菱石因為石英內部含有綠色的鎂雲母，使其顯現綠色外觀。



圖9 拉長石內部具有聚片狀微結構，致使光線干涉而形成色彩。

石則是因為斜長石內包含晶體銅的包裹物，使其呈現金黃色耀眼的色彩。

干涉作用

某些寶石生長時，會在其內部形成很薄的層狀構造，當光線入射到該寶石內部時，光線會在各薄層間產生反射作用。由於反射出來的光線來自不同深度的薄層表面，各光線行走的路程不同，便會產生「光程差」。原來光線入射時是同相位（各光波波峰或波谷同時前進），而反射光波則可能因為光程差，使得某一光波可能比另一光波多走半個波長，反射出來時變成A光波的波峰與B光波的波谷相遇，兩個光波產生破壞性干涉，而會被抵銷。反之，如果兩個光波反射出來的光程差剛好等於其波長的整數倍，則波峰還是會與波峰同時前進（同相位），該光波會產生建設性干涉，便不會被抵銷。

由於白光中有不同波長的光波，例如某多層狀結構寶石光線反射路徑出來的光程差是400奈米。對於紫光（波長約400奈米）而言便不會消失，但波長約780奈米的紅光則會被抵銷，因此使得從該方向觀看寶石，便會呈現藍紫色為主的顏色。

干涉作用造成的彩色寶石最著名的例子便是蛋白石，它一層一層的結構是由微小的非晶質二氧化矽球大致規則排列而成。其他的例子還包含：部分珍珠表面的淡淡光彩、長石系列礦物構成的月光石、日光石、拉長石等。

這種因干涉引起的顏色，當我們從不同角度去觀察它的時候，顏色常會有變化，礦物學上又稱之為變彩(Play of color)，其原因乃是因為眼睛從不同角度觀察此類寶石時，光線的光程差便會改變，因此整體干涉產生的顏色也跟著變化。

這種因干涉引起的顏色，當我們從不同角度去觀察它的時候，顏色常會有變化，礦物學上又稱之為變彩(Play of color)，其原因乃是因為眼睛從不同角度觀察此類寶石時，光線的光程差便會改變，因此整體干涉產生的顏色也跟著變化。

色散

小時候很多人都玩過三稜鏡，透過它可以觀察太陽光變成紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫的彩虹。為什麼三稜鏡可以將白光的顏色分開呢？實際上，介質對於不同波長的光，會具有不同的折射率。因此當白光穿過介質被折射時，各光波折射率的不同使得其轉彎的角度各異，組成白光的各種波長的光線變會被分開，這種現象稱為白光的色散，簡

稱光的色散。一般波長越小，折射率越大：藍色光折射率大，紅色光折射率小。光線的分離程度會跟介質的色散能力以及介質尺寸大小有關。

每一種寶石材料的色散能力不同，由於寶石通常很小顆，要在小小的空間中便能明顯將白光分開，必需色散能力很強。例如鑽石便具有非常高的色散能力(色散率0.044)，遠高於石英(色散率0.013)及剛玉(色散率0.018)等，所以可以將白光在短距離內輕易分開成紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫的光線，從不同角度射出，因此當我們由不同角度觀察鑽石，就會看到它呈現出來不同顏色的光芒變化，有人稱之為「火花(Fire)」。

其他同樣具有良好色散能力，而能使即使是本來是無色，在白光照射下也能呈現五顏六彩光芒的寶石包含：金紅石、翠榴石、鉛石、立方氧化鋯(C.Z.，蘇聯鑽)等。

臺灣寶玉石的顏色成因

臺灣雖然不出產鑽石、紅、藍寶石等耀眼奪目的寶石，但是中國人數千年以來最為文人雅士尊崇，最足以為君子表徵的「玉」，臺灣卻是最主要的生產地。花蓮豐田的閃玉，不僅產量世界第一，並且數千年前的卑南文化，便已開始廣泛應用她了。除此之外，聞名的臺灣藍寶(藍玉髓)、俊秀典雅的文石、風采迷人的珊瑚、氣象萬千的玫瑰石、以及碧玉、石榴子石等，也都是臺灣有生產，且為大家熟悉的寶石。

接下來舉其中較為重要的臺灣玉、藍玉髓、文石及玫瑰石四種礦物岩石寶石，介紹它們的顏色與成因。

臺灣閃玉

世界各地產出閃玉的國家很多，但臺灣可能是其中較為蓬勃發展者，不僅帶動了產業的發展，且「臺灣玉」打響了國際知名度，成為了臺灣地區最具代表性的寶石，深受觀光客所喜愛。一般閃玉的成因可以分為二種：一為蛇紋岩與含矽、鈣的熱液換質作用而成，顏色偏綠為主；二為含矽的熱液與白雲岩因接觸換質作用而成，通常顏色較白。花蓮豐田的臺灣閃玉屬於前者。

寶石級之臺灣閃玉，多呈菠菜綠或稍帶黃之綠色，尤以半透明者為佳。臺灣玉原石顏色可從透閃石的白色到隨著陽起石的比例(亦即含鐵量)增加而漸呈暗綠色，或因鈣離子部份被鉻離子取代而呈現祖母



19 圖10 蘇聯鑽也具有高的色散能力，可使白光分散成多種顏色。

綠顏色，此屬於致色元素的雜質所造成的顏色，國立臺灣大學地質學系已故譚立平教授認為鉻離子含量的影響較為重要。

另外，部分臺灣玉也可能因含有鈦離子的含量升高或石墨之微小包裹體而接近黑色，其成色原因如果是前者，則為致色元素造成，而後者則為包裹體造成的。

臺灣藍玉髓

臺灣目前所發現較為貴重的寶石，除了臺灣玉之外，就屬俗稱臺灣藍寶的寶石較為珍貴，但此「藍寶」與剛玉類的「藍寶石」(Sapphire)不同，它是一種藍玉髓。這種深具魅力的寶石是一種明亮藍色或藍到藍綠色玉髓，是最受人喜愛的玉髓之一，它的高級品質可和最漂亮的綠松石媲美。

玉髓或稱石髓，是一種隱晶質石英。隱晶質石英是指粒度很小，在顯微鏡下才能看得到結晶的石英，也屬於石英礦物的一種，常含有非常微量的水，半透明或不透明，緻密質，貝殼狀斷口顯著，莫氏硬度7，比重約為2.58~2.64，較標準石英低。

當質純不含雜質時為白色，但如果在白色玉髓母體晶粒間之孔隙或晶界面摻入其他礦物雜質時，便會受影響而呈現雜質礦物的顏色。例如臺灣藍寶的藍玉髓便是因為含有矽孔雀石(Chrysocolla)的微小包裹體而呈淡藍色；紅褐色玉髓(俗稱紅皮，常與藍玉髓伴生)是因含有鐵的氧化物而成紅色。但是紫玉髓則是因為鐵離子進入玉髓母體晶格子形成色心 構造而成紫色，其透明度較佳。

文石

世界上產文石的地方較為稀少，澎湖文石算是較聞名者。澎湖文石之開採已有逾百年歷史主要產地包含：西嶼、望安及將軍，以及澎湖本島、白沙島及其他岩礁等。臺灣的三峽地區亦有文石產出。

文石主要由霏石與方解石

所構成，充填於玄武岩之氣孔中或裂隙之間，形成厚數公釐到數公分的細脈。其他礦物成分還包括菱鐵礦、鐵白雲石、石髓、褐鐵礦、蛋白石及綠泥石等。文石中的礦物硬度多在3~4之間，比重約為3，呈塊狀、薄片狀、葡萄狀或球狀集合體，顏色有白、青、紅、黃、藍、淡褐、紫色或數色混合而成，紋路花樣變化大，如同心圓、圓球聯珠或彩雲狀等，甚為美觀。這種多樣化的顏色變化，最主要是不同礦物交替生長，造成的紋理變化。

玫瑰石

「玫瑰石」是一個俗稱，並非國際上通用的名稱，由於玫瑰石是由許多不同的含錳礦物組成，所以地質學家就稱呼它為「富錳岩石(Manganese-rich rocks)」。根據地質學家的研究，臺灣所產的玫瑰石主要是由玫瑰色的薔薇輝石(Rhodonite)及菱錳礦(Rhodochrosite)組成，夾雜棕黃及灰白色的錳輝石、石英、錳白雲石及黑色的軟錳礦和黑錳礦，另外尚有少量的正長石、綠泥石、錳鋁榴石、白雲母、綠簾石、方解石、錳閃石、鉭長石、褐錳礦、含水的錳酸鹽和石棉等等。由於玫瑰石是由這許多不同顏色的變質礦物集合體所形成，所以玫瑰石是變質岩的一種。

其如山水畫般多彩的紋理主要是由各種礦物混雜及褶皺造成。其中最豔麗的粉紅色，主要便是由含錳的薔薇輝石造成，當然菱錳礦也有貢獻，而這兩種礦物的粉紅色成因，均是因為含錳元素所致。

結語

多彩的寶石豐富了人的生命。但仔細探索竟發現，大部分寶石之所以會有顏色的變化，竟然是因為它們「不夠完美」，有許多雜質元素及結晶結構缺陷的存在。如果寶石都「太完美」了，那麼世界許多寶石就只剩下白色的了。想像一下，沒有紅寶石、藍寶石、祖母綠、翡翠、紫水晶等，那世界會多枯燥單調。您也許會說，白色的鑽石不錯啊！那是因為其還有強烈的色散能力，可以將白光分散成不同色彩，大部分的寶石都沒有良好的色散能力，真的就只能呈現呆滯的白色。

所以在寶石的世界而言，就是：「因為存在許多缺陷，寶石的世界才沒有缺陷」。人生亦復如此，總是要充滿各種挫折、挑戰與歷練，生命的歷程才會變的更豐盛與美麗。

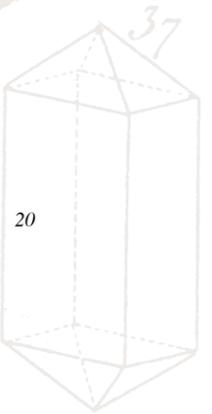


圖11 臺灣玉的綠色主要是由於含鉻離子所致。



圖12 臺灣藍玉髓因含有均勻微細的矽孔雀石包裹體而形成藍綠色。



圖13 文石主要是由於多種礦物交互生長而形成紋理的色彩變化。



圖14 玫瑰石內部含有薔薇輝石及菱錳礦，它們的顏色主要是由於錳離子造成的。