

紅寶石—— 喜馬拉雅山的旭日

黃武良、劉淑蓉

鴿血紅寶石比鑽石更稀少，
其五彩繽紛鮮紅似火燄般的耀眼是如何形成的呢？
為何多產於喜馬拉雅山附近？我們對它又認識多少？

在印度梵文中，紅寶石被稱為「寶石之王」，象徵擁有者的智慧、權力、財富及避邪，也是敬神的象徵；又聖經中述及美麗及智慧時，也多以紅寶石表示。紅寶石的鴿血色澤似火燄般的耀眼，有若熱血澎湃，自古就被緬甸人譽為是戰士之石，他們深信若把它嵌入膚下就會戰無不勝。至於現代人則視其為貴重珠寶或投資標的，西元 2015 年蘇富比拍賣了一顆緬甸的鴿血紅寶石，每克拉單價破紀錄地超出百萬美金，且被取名為「日出」，象徵它的光芒如旭日般的璀璨亮麗。



緬甸鴿血紅寶石，名為卡門·露西亞（Carmen Lúcia Ruby），重 23.1 克拉，是 2004 年美國企業家彼得·巴克博士為紀念他的妻子卡門·露西亞·巴克，把它捐贈給史密森尼國家自然歷史博物館。（圖片來源：<http://geogallery.si.edu/index.php/gems-minerals-meteorites-rocks/type/corundum-var-ruby>，攝影者克拉克（Chip Clark））

紅、藍寶石的礦物——剛玉

紅、藍寶石的礦物學名是剛玉（corundum），天生透明無色，但因大都內含雜質，所以只有高純度的剛玉會呈半透明或透明。其中極少數的幸運兒又得以向世人展現其晶瑩剔透五彩繽紛的美貌，色彩之多在寶石中無出其右。除紅寶石（ruby）及藍寶石（sapphire）外，其他顏色的剛玉也通稱為 sapphire（藍寶石）。

剛玉的成分是三氧化二鋁（ Al_2O_3 ），屬於六方晶系的三方亞系，天然晶體呈現雙尖端六方柱狀體，偶而外表略帶粉紅，映出混合金剛、玻璃、貝殼的美麗光澤。剛玉的摩爾硬度高達 9，僅次於鑽石，比重 4.02 比其他透明礦物（石英 2.7，鑽石 3.51）高出許多。主要原因是

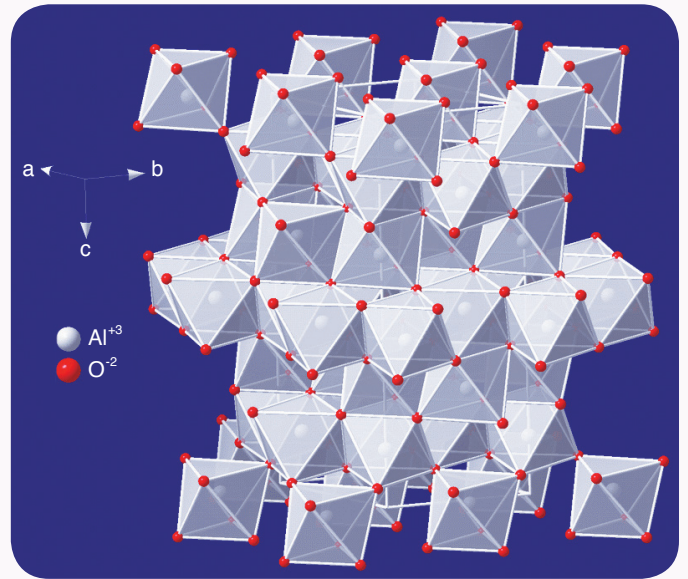
晶體中的氧原子如同乒乓球般緊密排列，其上方第二層的疊放則與下層略為錯開排列，第三層疊放時又回到第一層的正上方，如此重複疊加，形成所謂的六方緊密排列。在氧原子緊密排列的空隙間又均勻填充了鋁原子，但只填滿 2/3，其餘 1/3 仍放空。

鴿血紅揭祕

「鴿血紅」早期專用於緬甸摩谷 (Mogok) 地區生產的高品質紅寶石。上世紀 80 年代有寶石業者建議，其他地區生產的同等品質紅寶石也能用此稱呼。但怎麼樣才夠資格稱為「鴿血紅」呢？寶石專家見仁見智，全憑經驗，因為這種判斷比較像是藝術，很難用儀器辨識。然而，鴿血紅寶石神祕的色澤從何而來？為何又如此稀罕？

大自然在剛玉上繪出五顏六色的手法，是藉由寶石中的微量有色離子（例如過渡元素：鉻、鐵、鎳、鈦、錳、釩等）取代剛玉晶體中的鋁。當這些致色的離子受到可見光照射時，其外圍電子會從基態跳躍到激態，而跳躍所需的能量就是藉由吸收與該能量相當的波長（顏色）的光線，剩餘的光波則穿透而出顯示出七彩光譜。例如紅寶石中少量的鉻吸收了藍綠光因而透出紅色，其他有色剛玉致色機制也是如此。

但藍寶石（藍色剛玉）致色的原因卻與上述略為不同，它是由剛玉中的三價鋁被微量（約 0.01 ~ 0.02%）的二價鐵和三價鈦取代，使電子在二價鐵和三價鈦之間轉移所引起。轉移所需的能量來自紅橙光，因而透出賞目的藍綠光彩。有研究認為二價鐵和三價鐵間的電荷轉移也會呈現灰藍色的效果。



剛玉晶體結構可以視為是由許多略為扭曲的八面體架構而成：六個角是氧原子（紅球），八面體中心 2/3 是鋁（銀球），另 1/3 是空的。（圖片來源：<https://en.wikipedia.org/wiki/Ruby>）

鴿血紅寶石讓人著迷的四大特色是：晶瑩鮮紅、色澤深濃、色彩飽和、若隱若現的火燄般光芒。其中鮮紅色是因紅寶石所透出的紅光中，最亮的雙波峰（694.2 和 694.8 奈米）剛巧落在光譜中的正紅色區。紅寶石色澤濃度與含鉻量成正比，因而含鉻量必須適中（約 0.1 ~ 2%），而紅色的飽和度則視鉻離子的純度，也就是說，鉻以外的致色離子含量愈低時，透出的紅色愈純，愈能呈現飽和的色彩。

然而，多數天然的紅寶石除了呈現紅色外，也會含藍、綠、紫、黃等次要顏色，大大降低紅色的飽和度。例如：微量的鐵是藍寶石的必要元素，卻是紅寶石的天敵。鐵離子會透出藍綠光，降低紅寶石的飽和度，

大自然在剛玉上繪出五顏六色的手法，
是藉由寶石中的微量有色離子取代剛玉晶體中的鋁。

也會有淬滅效應，降低其紅色螢光的亮度。不巧，鐵離子在地殼中無所不在，這就是為何鴿血紅寶石之所以如此難得。緬甸摩谷的紅寶石中有少部分得天獨厚含鐵量非常低，因此出現鴿血紅寶石的機率較高。

至於鴿血紅寶石內似火燄般的光芒，專家認為是在日光下，紅寶石螢光的顏色（波長 694.3 奈米）非常接近紅寶石的紅色（694.2 奈米），不但使得紅寶石更加鮮艷，而且與紅寶石本身透出的紅色相映還會呈現閃動的光芒。尤其是，激發螢光的紫外線或可見光（藍綠光）的強度會因地點、方向、時間而異，導致螢光也隨之變化，彷彿火燄閃動。

另有人認為紅寶石的雙色性強會使不同琢面的顏色略異，而且若有琢面或結晶缺陷，因反射不完全而產生陰影，因此在發自體內的紅色螢光效應下會有似火燄的效果。有人甚至認為可能是強光的激發使紅寶石內產生雷射螢光，造成類似雷射的效應。

星光藍紅寶石

星光紅寶石在微動中會閃耀六射星光，是鴿血紅之外另類為人喜愛的珍貴紅寶石。世界著名紅、藍寶石中不乏是星光寶石，例如羅斯利夫斯（Rosser Reeves Star）紅寶石，重達 138.7 克拉，可能是世界上最大的星光紅寶石，比美著名的 100.32 克拉的德朗（DeLong Star）星光紅寶石，以及印度之星（Star of India）的星光藍寶石。後兩者連同其他多件寶石曾於 1964 年在紐約美國自然歷史博物館中被竊，其偷竊、尋覓及高價贖回的過程都十分戲劇性。



星光紅寶石—羅斯·利夫斯（Rosser Reeves Star），重 138.7 克拉，可能是世界上最大的星光紅寶石，產自斯里蘭卡。1965 年美國富豪羅斯·利夫斯夫婦捐贈給史密森尼國家自然歷史博物館。（圖片來源：<http://geogallery.si.edu/index.php/gems-minerals-meteorites-rocks/type/corundum-var-ruby>，攝影者克拉克（Chip Clark））

這類星光如同貓眼的現象，是寶石中的針狀內含物做特定方向平行排列所造成的。紅、藍寶石晶體生長時，偶爾會伴隨生長金紅石（氧化鈦）等的針狀內含物。這晶體內針狀物多數垂直 c 一軸，而且常沿著與 c 一軸平行的晶面方向排列，因此，從 c 一軸的方向看過去，針狀金紅石會呈現三組 120 度（或六組 60 度）的交叉排列。當把垂直於 c 一軸方向的面琢磨成蛋形界面後，就會看到三條（六條）星光線。

天然星光紅藍寶石因為有內含物，所以很少會如紅寶石般的透明，頂多是半透明，色澤也偏粉紅色、紫紅色或紫棕色。星光紅藍寶石的未琢磨原石辨識頗為不易，經常被當成一般的剛玉原石而施以熱處理導致星光消失。因此近年來星光紅藍寶石逐漸為優質的合成人造星光紅寶石所取代。

星光紅寶石在微動中會閃耀六射星光，這類星光如同貓眼的現象，是寶石中的針狀內含物做特定方向平行排列所造成的。

印度與歐亞陸塊碰撞出的火花

地球上紅寶石的產地，最為人注目的是沿著喜馬拉雅山南麓由西北向東南，即從塔吉克、阿富汗、巴基斯坦、喀什米亞、尼泊爾、中國、緬甸、越南等形成的弧形帶狀區。這些地區擁有紅寶石是幸也是不幸，因為這帶狀區都座落在地震帶上。地質學家發覺這弧帶恰與印度板塊和歐亞板塊碰撞後所留下的縫合線吻合，而且這些紅寶石原生礦體多數賦生在大理岩中（變質石灰岩）。紅寶石、地震、大理岩、喜馬拉雅山糾葛在一起是巧合，抑或有所關聯？這得從紅寶石的前世談起！

大約五千萬年前，從南方移動過來的印度陸塊接觸到歐亞陸塊，揭開了喜馬拉雅造山運動的序幕。兩大陸之間的特提斯海平靜的海棚上，自古就斷續發育成延綿千里的大堡礁層，其中偶而會摻雜陸上沖刷來的泥土或蒸發鹽岩。歷經漫長的地質年代，海棚下沉後，下層的大堡礁膠結成石灰岩層及少許頁岩或泥岩等，有些富含高量鋁質的泥岩就是今日紅寶石的前世之身。

之後又過了幾千萬年，板塊間的石灰岩再被擠壓而沒入地殼十多公里深處。石灰岩層經歷溫度壓力變質為大理岩，而局部夾雜其內的泥、頁岩就變質成黑色片岩或片麻岩。片岩中少數富鋁少矽的部分，例如泥岩等開始結晶生長剛玉，其中極少數鄰近含有鉻等著色離子的幸運者，得以被染上紅色或其他色彩。最後，紅寶石原生礦體又被抬升至今日的地表，得享眾生的歡寵。

緬甸紅寶石的誕生

大自然的魔術師如何把泥岩變成紅寶石呢？讓我們先了解紅寶石的形成條件。剛玉的成分雖只有氧和鋁，但地殼中除了

它們以外，另有無所不在的矽質、鐵、鈣、鈉、鎂等，因此泥岩會優先形成其他礦物，而不利剛玉（或紅寶石）的生成。例如有矽、鈣質的存在會先結晶成長石，又如大理岩偶而含有的白雲岩，其中的鎂會讓尖晶石（ $MgAl_2O_4$ ）優先生長，使得礦體中有時尖晶石比紅寶石多。地殼中氧化鋁是否被隔離，是形成紅寶石的第一個關鍵。

根據紐約美國歷史博物館哈洛（George Harlow）博士的團隊對緬甸摩谷紅寶石礦的研究，發現多數礦體附近有花崗岩漿侵入大理岩的跡象，而且礦體伴隨有常見於偉晶花崗岩中的礦物如黃玉、月長石等大晶體。因此他認為是岩漿或逸出的熱液與大理岩作用（交代變質），帶走了泥岩或片岩中的矽、鐵、鈣、鎂等。

然而，專研越南等礦體的法國 Gaston Giuliani 教授的團隊卻認為：大理岩中有些泥岩（主要含鋁高的黏土礦物）原本含矽、鐵等物質就較少，而且在大理岩變質作用過程中有時也會使矽、鐵與鋁分離，不必經由外來的岩漿熱液的交代作用也可生長剛玉。另外，包裹在大理岩內的鹽岩和海水，受熱而流動可能會扮演交換分離的角色。相較之下，緬甸摩谷地區的紅寶石礦體成因較特殊，其生成過程應較複雜。

紅寶石生成的第二個關鍵就是：是否有染紅用的鉻離子存在。鉻離子可能是岩漿熱液交換來的（例如緬甸地區），也可能是存在於極少數含有機物的泥岩或岩鹽中。要讓這兩個關鍵條件同時發生的機率非常小，這也說明了為何紅寶石礦相當稀少。

地球上因造山運動形成的紅寶石礦在其他地區也多有發現，比如坦尚尼亞、斯里蘭卡、馬達加斯加，以及 21 世紀才發現的非洲莫桑比克的巨大型紅寶石礦。這些礦體根據美國寶石研究院（GIA）的報導，是由

紅寶石經由熱處理可使微小內含物熔融，以增加淨度和透明度，同時讓內含物中的離子均勻擴散到晶體內，使得原本無色或淡色的寶石染上色彩。

更古老的造山運動（750 ~ 450 百萬年前）所生成。這陸—陸碰撞曾經整併了岡多瓦那超大古陸塊。相對於緬甸紅寶石生長在大理岩中，莫桑比克紅寶石生長於角閃岩裡，但兩者都是變質後受到侵入的花崗岩漿的交代作用。

地球上另一類紅、藍寶石原礦則發現在玄武岩內，例如產於泰國、柬埔寨、美國以及澳洲者。但這類剛玉寶石並不是從岩漿中結晶出來的，而是貧矽的鹼性玄武岩岩漿從超過 50 公里地函深處湧上，經過地殼內大約 50 ~ 25 公里處時，從周圍的變質岩中被捕獲而帶到地表，稱為捕獲岩。過去的研究認為這些含紅、藍寶石是海洋地殼隱沒入大陸地殼下，高溫高壓使原來在海底地殼的沉積物變質而成的。

但最近（2018 年）由美國寶石研究院主導的團隊對這個形成模式做了修正，發表在《美國礦物學家》期刊上，認為這些捕獲岩中的紅、藍寶石的生成，與攜帶它們的玄武岩漿是有直接關係的。這類紅、藍寶石是變質的捕獲岩（不必含有剛玉）與岩漿交互作用時所生成的，不過，說是捕獲岩的成因仍然沒錯。

不論成因為何，變質岩與岩漿捕獲的紅寶石殊途同歸。地球上各地多數的紅、藍寶石都是從原生礦風化淋濾下的殘積層或河床沖積層中生產的，稱為次生礦。各成因所產出的剛玉晶體本質相同，只是寶石顏色或品質略有差異。生長於大理岩如緬甸等含鐵量低，紅寶石品質一般較佳，生長於其他變質岩如莫桑比克者，含鐵量略高，而與鹼性玄武質岩漿接觸過如泰國、澳洲者，一般鐵量較高多偏向生長優質的藍寶石。

虛實真假的紅、藍寶石世界

目前市場上的紅寶石，五花八門虛實真假都有。本文僅以科學的角度簡介坊間各式各樣所謂的「紅寶石或藍寶石」：包括優化天然紅藍寶石；鉍擴散染色的紅藍寶石；實驗室創造（或合成）的紅、藍寶石；紅寶石的天然替身。高品質天然紅寶石稀缺難得，坊間常見的多少都有經過優化，以改善紅寶石的顏色、淨度及透明度。國內寶石界並未要求商品應註明有否經過無添加物的熱優化，但高價未經熱處理者多會特加標誌「無燒」。

紅寶石經由熱處理可使晶體中的微小內含物熔融，以增加寶石的淨度和透明度，同時讓內含物中的鉻、鐵、鈦等離子均勻擴散到晶體內，使得原本無色或淡色的寶石染上色彩。例如把含鉻內含物的寶石加熱可使紅色加深，含鐵質的內含物則可成黃色或金色。或把無色或淡藍的含鈦、鐵內含物的剛玉，加熱進行電荷轉移使它變成藍色寶石。另外，熱處理可消除寶石的副色凸顯主色，例如把紅紫色或棕色含鉻鈦的寶石加熱氧化，可去除二價鐵，阻斷了電子轉移效應，以祛除藍色系並彰顯紅色。

鉍擴散處理是近十幾年才出現的技術，是把透明淡色的剛玉與外加含鉍元素的金綠寶石（ BeAl_2O_4 ）粉末，在極高溫的氧化環境下加熱，微量鉍會擴散到剛玉表層使它染上色彩。最常見的是把淡黃色剛玉變成黃橙色藍寶石，或把粉紅色的變為生動的外橙內粉紅色的蓮花藍寶石。另外把略帶藍色的紅寶石表層染上黃橙色後，視覺上會抵銷藍光，使紅寶石更加鮮艷。

鉍擴散的致色機制是由於極微量（約 4.4 ~ 15.5 ppm）的輕原子如鉍（或鎂）進入剛玉的晶體中，會誘發其中有些微量氧離子失去一個電子，形成 O^{-1} ，留下電洞成為所謂電洞色心，可透出黃橙光。這原理類似紫水晶，只是吸收的顏色不同。

合成紅寶石是人類最早創造的寶石之一，與天然紅寶石在結晶構造或硬度等物理性質幾乎一樣。1960 年美國物理學家西奧多·梅曼就利用合成紅寶石的大晶體產生了第一束雷射光，展開今日人類多采多姿的雷射世界。在珠寶界中，合成紅寶石和合成星光紅寶石，今日已能藉其物美價廉堂堂正正以實驗室創造的品牌現身展櫃中，深為時尚年青人喜愛。

天然紅寶石大多含有外來的微小內含物，成為區別合成紅寶石的重要線索。天然與合成的紅寶石在生長時所留下的紋路也略為不同，也常用以作為區辨的指紋。但近年來有些特意以較接近自然條件下（高壓熱水）合成的紅寶石，品質相當類似天然紅寶石，因此要分辨越來越困難，需輔以稀有元素成分或拉曼光譜等檢驗。例如

美國寶石研究院以 X- 射線螢光分析，發現一般天然紅寶石含鈦、釩、鐵、鎳的量整體來說都較高，合成的紅寶石則常含微量的鉬、釩、鎢、鉛、鉍。

天然紅色寶石包括紅寶石、尖晶石、石榴石、黃玉等，古時常通稱為紅寶石。最有名的例子是鑲在英國王冠上的「黑王子紅寶石」，一直到 1783 年分辨紅寶石和尖晶石的技術建立後，才確定它是尖晶石。紅色尖晶石類似紅寶石，並常與之共生。尖晶石和石榴石同屬等軸晶系，因此無多色性，以肉眼或簡單的二色鏡就可與有二色性的紅寶石分辨。目前品質佳的紅色尖晶石與石榴石已擺脫紅寶石替身的陰影，獨樹一格成為貴婦喜愛的寶石。

黃武良

臺灣大學地質科學系（已退休）

劉淑蓉

臺灣大學師資培育中心（已退休）

