

了不起的結晶—— 金剛石

一般人大概都知道金剛石是自然界中最堅硬的物質，不過知道它是傳熱最快的晶體的人可能就不多了。最堅硬的物質到底有多堅硬？傳熱最快的晶體到底又有多快呢？

■ 余樹楨

碳元素在地球表面上常見的結晶有兩種，一是石墨，一是鑽石。其實鑽石只是俗稱，它的正式名稱，也就是鑽石的礦物學學名是「金剛石」。鑽石之所以稱為金剛石，的確是因為它擁有十分特殊，非比尋常的物理、機械和光學特性。

相對硬度與絕對硬度

教科書裡寫得很清楚，礦物的相對硬度分為10個等級。以兩礦物相互摩擦，晶體表面會出現刮痕的礦物的硬度較小，也就是說硬度大的晶體會刮傷硬度小的晶體。相對硬度從1到10的代表礦物，分別是1滑石、2石膏、3方解石、4螢石、5磷灰石、6正長石、7石英、8黃玉、9剛玉、10鑽石。

這組相對硬度表是由礦物學者摩氏（Friedrich Mohs, 1773-1839）首創的，摩氏也譯作莫氏，因此相對硬度也稱為摩氏硬度或莫氏硬度。摩氏出生於德國，1801年遷居到奧地利，從事礦物鑑定工作，因此有些書本說摩氏是奧地利人，有些網路資料則說他是德國人。

摩氏硬度是相對硬度，因此，正長石的硬度6並不等於石膏硬度2的3倍；同樣地，鑽石的硬度10也不等於磷灰石硬度5的2倍。也就是說，相對硬度只是定性的分級，而不是定量的尺度。

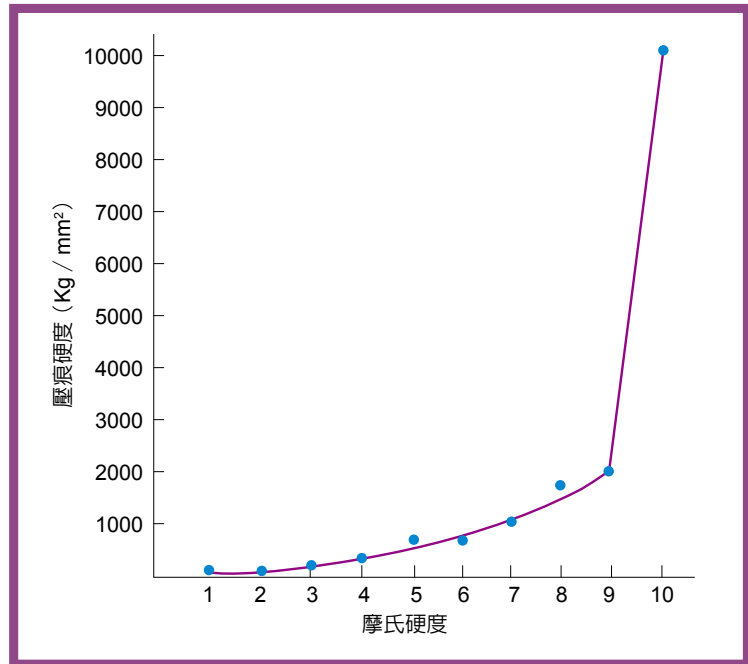
鑽石只是俗稱，它的礦物學學名是「金剛石」。
鑽石之所以稱為金剛石，的確是因為它擁有十分特殊，
非比尋常的物理、機械和光學特性。

另一種硬度分級稱為絕對硬度，它是一種定量的測定，量測的方法是在礦物晶體的平滑表面上以硬度計的探頭撞擊，同時讓探頭在晶體表面停留幾秒鐘。移開探頭後，可以在晶體表面上看到凹痕。在撞擊力和作用時間相同的條件下，硬度大的晶體凹痕較小，硬度小的晶體凹痕就比較大。由凹痕的尺寸、撞擊力的大小，以及作用的時間，就可計算出受測晶體的絕對硬度。它的單位是 Kg / mm^2 ，也就是等同於壓力的單位。因為是經由壓痕來求得硬度，所以這種絕對硬度也稱為壓痕硬度（indentation hardness）。

鋼鐵vs橡膠與橡膠vs牛油

把相對硬度和絕對硬度投圖，摩氏硬度1到9之間的絕對硬度，以相當平坦的曲線型態緩慢增加。然而從剛玉9到鑽石10的絕對硬度，卻驟然從 $2,000\text{Kg} / \text{mm}^2$ 大幅度增加到 $10,000\text{Kg} / \text{mm}^2$ ，可以明顯看出鑽石的絕對硬度的確十分突出，用鶴立雞群來形容，還不足以表達鑽石特有的超群硬度。

從日常生活的物品來做比喻，可能比較容易體會鑽石的硬度到底有多突出。有人說，如果把鑽石比做鋼鐵，硬度9的剛玉就像橡膠一般；如果把鑽石比做橡膠，剛玉



● 鑽石相對硬度與絕對硬度的投圖。鑽石的絕對硬度高達 $10,000\text{Kg} / \text{mm}^2$ ，遠遠超越其他礦物晶體，「鶴立雞群」尚不足以形容鑽石的卓越硬度。



● 鑽石的卓越硬度使得它成為工業界最有效的切割、研磨材料。鑽石本身的切割和研磨，就得靠鑽石不同方向硬度的差異來完成。（圖片來源：王柏允）

就像牛油那麼軟。也許把鑽石的硬度講得太神奇了，在一次演講中，有一位小朋友舉手發問：「鑽石既然這麼硬，如何琢磨鑽石？」大哉問！原來鑽石的切割研磨也是利用鑽石，這時一位高中生發問了，鑽石磨鑽石，兩者硬度一樣怎麼可能？

鑽石硬度的方向變化

在鑽石晶體結構中，碳原子以 sp^3 的共價鍵相互結合，每一個碳原子周圍都同樣有4個碳原子與它鍵結，形成一個正四面體的幾何關係。這樣的礦物結構，使得鑽石在(111)晶面上的碳原子數目最多，也就是說單位面積上，(111)晶面的碳原子堆積密度最大。因此可以說(111)鑽石晶面是自然界已知最堅硬的一個平面，琢磨鑽石的時候都要避開這個晶面。

在不同的結晶方向，鑽石的硬度呈現相當明顯的變化。鑽石的3個結晶軸，a軸、b軸及c軸分別是〔100〕、〔010〕及〔001〕3個向量方向，一般說來這3個方向的硬度比較小。比如說，在(100)晶面上要研磨掉一定的厚度，沿著b結晶軸方向琢磨只需要1小時，但是沿著

〔011〕方向琢磨則要花費大約7小時。也就是說，〔011〕方向的硬度比〔010〕方向的硬度高出許多。同樣地，要在(110)晶面上磨掉一定的厚度，沿著c結晶軸方向琢磨只需要1小時，但是沿著〔 $\bar{1}10$ 〕方向琢磨就要花費大約50小時。

研磨鑽石的時候，有經驗的工人大都曉得如何取得較軟的方向施工，如果抓錯方向，很快就會發現磨不下去，他們的術語稱為「吃不下去」。方向抓對了，就會很快「吃下去」，琢磨過程也就變得迅速許多。

鑽石的卓越硬度使得它成為工業界最有效的切割、研磨材料。鑽石本身的切割和研磨，就得靠鑽石不同方向硬度的差異來完成。

鑽石的分類

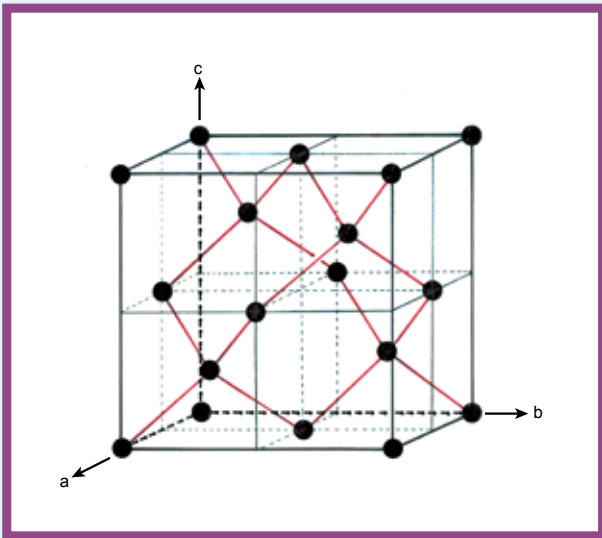
天然鑽石在地底深處、高溫高壓的環境下結晶時，難免有一些雜質和碳原子同時進入鑽石的結構中，最常見的雜質就是氮元素。氮比碳多1個電子，會在鑽石的電子軌域中形成雜質帶，這個雜質電子帶的中心能階比導帶電子軌域大約

低4eV。雜質帶中的電子會吸收紫外光及部分紫光的能量而躍升到導帶，並放出淡淡的黃光。在鑽石顏色的分級中，黃色越明顯的鑽石等級越差，價格也跟著降低。

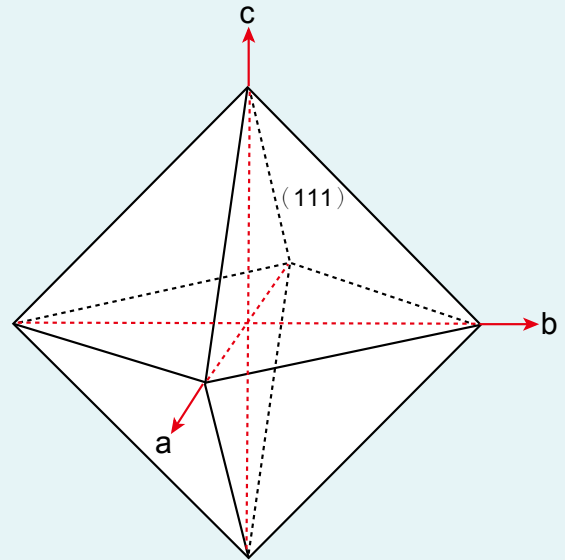
氮雜質含量較多(0.1~0.2%)的鑽石屬於第1類，氮雜質含量在0.001%以下的稱為第2類鑽石。換句話說，第2類鑽石比較純淨。自然界挖掘到的鑽石，99.9%是第1類鑽石，挖到第2類鑽石的機率大約只有千分之一。

第1類鑽石又依氮雜質是直接取代碳原子或占據晶格間隙，再細分為Ia與Ib兩類。同樣地，第2類鑽石也細分為IIa與IIb兩種。在很稀有的情況下才可能開採到IIb鑽石，IIb鑽石的特點是它會放出藍光。這種藍鑽石十分稀少，大約1,000顆第2類鑽石中才會發現1顆，也就是說，IIb鑽石在一般礦區出現的機率只有百萬分之一。

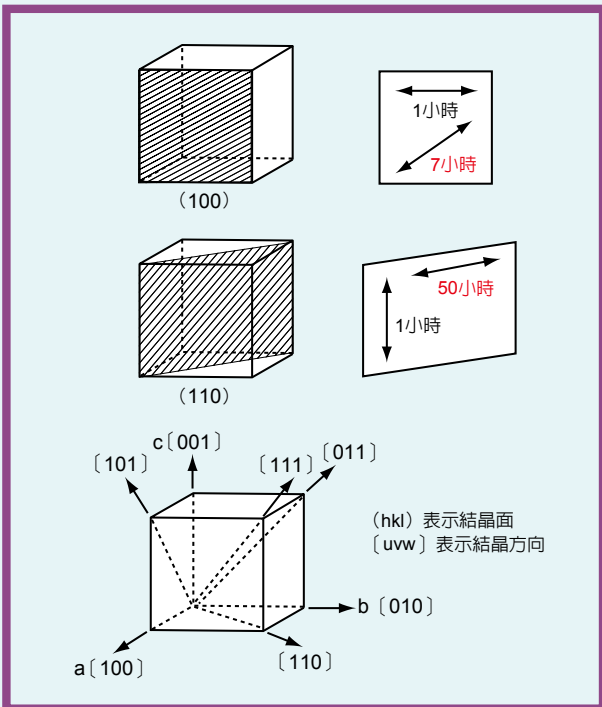
IIb鑽石特殊的地方在於它含有微量的硼，硼原子比碳少1個電子，會在鑽石的結構中形成一個電洞帶。這個電洞帶的中心能階高出鑽石的價帶軌域只有0.4eV，因此IIb鑽石的價帶



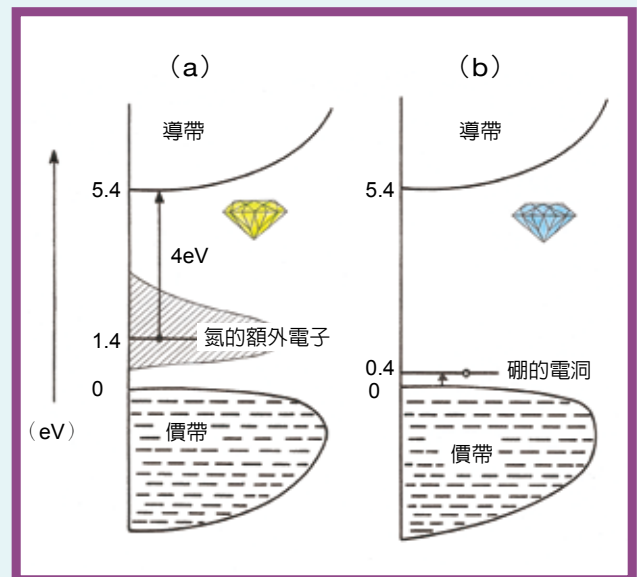
● 鑽石的晶體結構，黑色圓圈代表碳原子，紅色直線代表C-C鍵結，每一個碳原子都與周圍4個碳原子以 sp^3 共價鍵結合。



● 天然鑽石以八面體為最常見的晶形，紅色點線代表結晶軸，三角面就是(111)結晶面。鑽石的晶體結構造成(111)晶面上的碳原子堆疊密度最大，也是硬度最大的結晶面。



● 鑽石硬度隨結晶方向的不同呈現明顯的變化，各結晶方向旁邊的小時數代表磨除一定厚度所需的時間。a、b及c三個結晶軸方向，就是[100]、[010]及[001]的向量方向，硬度較低。



● (a) 鑽石含氮雜質時，氮比碳多1個電子，在鑽石結構內形成雜質帶。雜質帶電子吸收紫外光以及可見光中的短波光能躍升到導帶軌域，放出互補色黃光，造成含氮鑽石呈現黃色色調。垂直方向表示能量，水平方向表示電子數目。(b) 鑽石含硼雜質時，硼比碳少1個電子，在鑽石結構內形成電洞帶。如果價帶電子吸收可見光中的長波光躍升到電洞位置，則會放出藍光，造成含硼鑽石的高雅藍色。

一般來說，導電性高的金屬物質傳熱也快，陶瓷材料屬於電的絕緣體，傳熱速率也就慢很多。奇特的是，除了IIb鑽石是半導體外，其他的各類鑽石都是電的絕緣體，但是所有鑽石都是傳熱高手。

軌域電子會吸收白光中的長波長光而躍升到這個電洞帶，同時允許白光中的短波長光通過而呈藍色。

熱能的傳遞

從小學上自然課，就知道熱能依照傳導、輻射及對流3種不同的方式從高溫區輸往低溫區。以傳導的方式傳遞熱能需要介質，稱為導體。一般來說，導電性高的金屬物質傳熱也快，是熱的良導體。在室溫常壓下，傳熱最快的金屬是銀，它的導熱係數高達4.1watt / K-cm。銅傳熱也不慢，導熱係數可達3.8watt / K-cm。

陶瓷材料屬於電的絕緣體，傳熱速率也就慢很多。在日常生活中，多使用陶瓷材料做成盛裝溫熱食物的杯、碗、匙、盤等，主要就是利用它們傳熱速率低的特性。相對而言，烹煮食物多使用金屬類的鍋具，就是利用它們快速傳熱的特點。

鑽石的傳熱速率

說起來也蠻奇特，除了IIb鑽石是半導體外，其他的各類鑽石都是電的絕緣體，但是所有鑽石都是傳熱高手。金屬導電和傳熱靠的是外圍電子，但鑽石的外圍電子都用在鍵結上，沒有多餘的外圍電子可用來導電，因此IIb以外的鑽石都不導電。鑽石傳熱靠的不是外圍電子，而是聲子(phonon)。當物質的成分越單純、結構越簡單、雜質越少時，聲子運動就越快，傳熱速率也就越快。

鑽石的組成只有單一元素碳，結構也十分簡單。Ia、Ib、IIa及IIb 4種鑽石中，IIa最純淨、雜質最少，因此擁有最高的傳熱速率，導熱係數高達26watt / K-cm，比傳熱最快的金屬銀、銅還要快6~7倍。IIb鑽石含有少量硼雜質，導熱係數仍有15watt / K-cm。第I類鑽石雜質含量較高，依雜質含量高低，導熱係數在9~20watt / K-cm之間。

真假鑽石

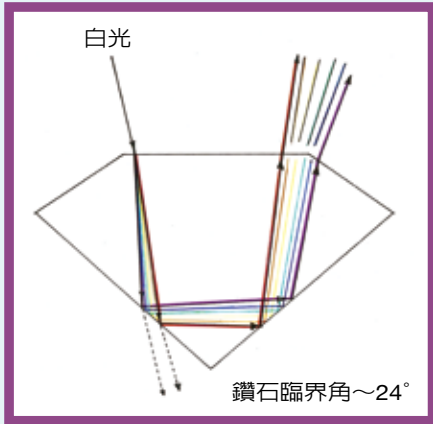
鑽石的密度 3.5 g / cm^3 ，折射率高達2.42，在自然界以質量極輕的碳原子卻能夠組構出如此緻密且具高折射率的晶體並不多見。這種極為優異的特質，搭配理想角度的切割研磨，鑽石自然就熠熠生輝、閃閃發光。更難能可貴的是它的色散也高達0.042，因此鑽石不僅光芒四射，也把彩虹般的七彩光芒發揮的淋漓盡致。鑽石所以成為人們的最愛，不是沒有科學根據的。

到珠寶店購買鑽石飾品時，顧客通常會問：「怎麼確定買的是真鑽還是仿冒品？」這時老闆一般會要顧客用舌尖舔一下，並且告訴客人說：「有沒有感覺舌尖涼涼的，因為這是真鑽；如果這只是玻璃，舌尖的感覺是暖暖的。」這個過程，基本上就是用舌尖當做探針，在寶石上做一次導熱係數的比較實驗。玻璃的導熱係數很小，只有0.008watt /

各類物質的導熱係數比較 (watt / K-cm)

鑽石	銀	銅	鋁	鋼	水泥	玻璃	冰	空氣	矽	石英	蘇聯鑽	摩星石
I 9~20												
IIa 26	4.1	3.8	2.0	0.5	0.008	0.008	0.017	0.0002	1.48	0.007~0.011	0.017	2.3~4.9
IIb 15												

● 鑽石是傳熱最快的晶體，IIa鑽石成分最純淨、雜質最少，導熱係數高達26watt / K-cm。摩星石的導熱係數已經超越傳熱最快的金屬。空氣的導熱係數極小，是天然的熱絕緣體。



● 鑽石的折射率高達2.42，因此臨界面角很小，只有24°。鑽石的高色散能力在理想的角度切割，以及全反射的推波助瀾之下，能把白光分解成絢麗的彩虹光芒。左下角兩道箭頭點線代表光線如果沒有發生全反射時的折射方向。



● 玻璃的折射率只有1.5，從光學效果來看，它似乎並不十分起眼，但是可千萬不要小看玻璃，珠寶市場上仿冒真鑽數量第一的就是它。圖中蓮花直徑13公分，高6公分。



● 蘇聯鑽的組成是氧化鋁，雖然有不錯的折光特性，不過傳熱速率遠遠不如鑽石，導熱係數不及鑽石的千分之一。圖中央的一顆重11.5克拉。

K-cm，真鑽的傳熱速率高達玻璃的千倍以上，感覺靈敏的舌尖的確很容易分辨兩者的差異。

稍微有點規模的珠寶店或當舖，大概都有一個他們稱為測量硬度的小儀器來鑑定鑽石的真偽，其實這是測試寶石導熱係數的小探針。一般來說，鑽石仿冒品的導熱係數大都十分微小，比如石英是0.007~0.011watt / K-cm，蘇聯鑽是0.017watt / K-cm，傳熱速率都不及鑽石的千分之一，使用簡易導熱探針就可分辨。多年來以這種方法區分鑽石的真偽，百分之百有效。

一直到了本世紀，寶石市場出現了稱為莫桑石的寶石，以導熱係數鑑定鑽石真偽的方法才出現漏洞。莫桑石就是礦物學中

的摩星石（moissanite），化學成分是碳化矽（SiC），因此也稱為碳矽石。人工合成的摩星石折射率略高於鑽石（2.648~2.691），色散也佳（0.104），特別是它的導熱係數2.3~4.9 watt / K-cm，相對於其他仿冒品，已經有點接近鑽石，一般寶石店家或當舖使用的簡易導熱率探針已無法有效分辨，這是幾年前國內一家當舖把莫桑石當成真鑽收當的主要原因。

展望未來

積體電路的設計和製造考量的是輕薄短小，結果是單位面積上的電子元件越來越密，造成開機使用時散發大量的熱，使得散熱成爲一項重大的工程挑戰。目

前積體電路的基板以矽晶爲主，矽的導熱係數1.48watt / K-cm，遠遠不及鑽石。

碳和矽同屬於周期表第4族元素，同時鑽石和矽晶又有相同的晶體結構，如果以鑽石取代矽晶做爲積體電路的基板，散熱就不再是困擾的問題了。

此外，鑽石的熔點接近攝氏4,000度，且不受強酸、強鹼等化學藥劑的侵蝕，考慮未來嚴苛條件下操作使用的高精密電子儀器，其中的積體電路基板材料，鑽石應是最被優先採用的對象。

余樹楨

成功大學地球科學系