

4. 「鈹」(Be) 元素的介紹

是甜甜的。一直到1957年，國際學術界才建議改名為「beryllium」，意思是取自希臘文的「綠寶石」(beryl)，就是「鈹」(音唸ㄉㄟˋ)，符號是「Be」(圖3)。

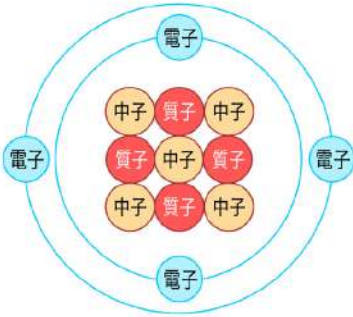


圖3、「鈹」原子結構圖。
鈹原子包括4個質子，5個
中子及4個電子



圖4、Friedrich
Wöhler, 1800-1882
© Public Domain

雖然 Vauquelin 發現了「鈹」，但是他得到的只是「氧化鈹」(後來才知道它其實是「綠寶石」，而「綠寶石」的化學式是 $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$)，沒有真正提煉出純元素的「鈹」。原因是「鈹」和氧的結合很牢固，很難把「鈹」直接從「氧化鈹」中提煉出來。

直到 1828 年，這個難題才由德國化學家 Friedrich Wöhler (1800-1882，圖4) 和法國化學家 A. A. Bussy (1794-1882) 各自解決。他們不謀而合都採用了相似的「繞道而行」的方式製得了純粹的「鈹」：也就是先使「氧化鈹」和氯反應生成「氯化鈹」(BeCl_2)，再使「氯化鈹」與金屬鉀作用，讓鉀和氯結合成氯化鉀，進而把「鈹」頂替出來。就這樣，終於得到少量深灰色的「鈹」的顆粒。

在地殼中，「鈹」的含量並不算少，約為百分之六。但由於「鈹礦」不易發現，這造成「鈹」在人們的心目中成了一種非常罕見的金屬。在找「鈹礦」方面，狗是人類的好幫手。經過特殊訓練的狗，能靈敏地從衆

多礦石中嗅出含「鈹」的礦石。

「鈹」在自然界的分布相當廣泛，天文學家從太陽和恒星的大氣中也發現過「鈹」的存在。比起其它金屬在地球上的儲存量而言，「鈹」屬於非常稀少的元素，因此「鈹」的價格很高，目前每公克「鈹」的售價是 15 美元。再加上「鈹」的分布十分分散，礦石中的含量很少，這是「鈹」的一大弱點。

「鈹」可算是地球上的稀有金屬：地表岩石和土壤中含有約 2ppm 的「鈹」，這相當於 1 公頃的土壤裡只含「鈹」2 公克。海洋的「鈹」含量更少，一百萬噸海水中的「鈹」含量，還不到 1 公克。但是，有些礦石是含有「鈹」的，像是「綠寶石」，它的成分是「矽酸鈹鋁」($\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$)，也稱為「鈹矽酸鹽」，這種礦石有時因為含有微量的「鉻」(Cr) 而可能呈現綠色，因此被稱做「翡翠」；如果呈現淡藍色，則被稱做「藍綠玉」。

在已發現的 30 種含「鈹」礦石(圖5)中，最值得開採的是「綠寶石」，它含「鈹」約 10%~14%。此外，「矽鈹石」(Be_2SiO_4) 雖也有一些工業價值，但其中「鈹」的含量就更少了。這些因素都造成「鈹」的提取成本十分昂貴，連帶影響了「鈹」的廣泛應用。近年來發現在某些煤的煤灰中也含有少量的「鈹」，因此有人認為煤灰或許是含「鈹」的潛在資源。



圖5、鈹礦

正因為「鈹」的發現和提煉都十分困難，導致「鈹」本

4. 「鈹」(Be) 元素的介紹

易舉，同樣需要長期的艱苦努力。

人們對元素性質的了解，是隨著科學技術的發展而加深的。比如對「鈹」的性質的了解，就與元素的分離方法和技術分不開。只要有了少量雜質，「鈹」就會失去本來的面目。拿「鈹」的物理性質來說，第一次提煉出來的金屬「鈹」是深灰色的，含有很多雜質。到「鈹」被發現的一百年後，法國化學家 Paul Lebeau (1868-1959) 採用電解法，把熔融的氟化鈉（或氟化鉀）和氟化鈹一起電解，煉得純度達到 99.5%~99.8% 的「鈹」，這時純「鈹」才顯示出自身閃亮白灰色的外表（圖6）。



圖6、帶白灰色的金屬鈹

© CC BY-SA 3.0

前面曾提過：「鈹」因為在地球上儲存量少，因此不易被發現，所以很珍貴，並且「鈹」是輕金屬中唯一高熔點的金屬（攝氏 1287 度）。「鈹」的化學性質比較像鋁（Al）。「鈹」不會被空氣或水腐蝕，甚至也不怕熱。總結來說，「鈹」是一種質量輕的金屬元素，「鈹」具有低密度、高熔點和高導熱性能。

再拿「鈹」的「原子價」來說，在金屬的「鈹」製得後，幾乎有半個世紀，人們對於「鈹」的「原子價」一直爭論紛紜，莫衷一是，有的說「鈹」和鋁一樣，都是三價；也有的說「鈹」跟鎂（Mg）一樣，都是兩價。直到 1870 年代，舉世聞名的俄國化學家 Dmitri Ivanovich Mendeleev（1834 -1907，圖 7）校正了「鈹」的「原子量」，確定「鈹」和鎂同屬於元素週期表第二族元素後，才真正確認「鈹」原來是二價。

前面說過，在「鈹」剛被發現時，「鈹」的命運並不佳，一直遭受到冷落，人們認為金屬的「鈹」沒有任何實際的使用價值。再加上「鈹」不易提煉和精製，長時間以來，人們對「鈹」的性質一直認識不足，以致在「鈹」被發現後的一百多年裏，「鈹」還是無聲無息，不受重視。直到 20 世紀，隨著原子能、火箭、太空船時代的到來，才發現「鈹」的真正價值，成爲一種不可缺少的新興材料。

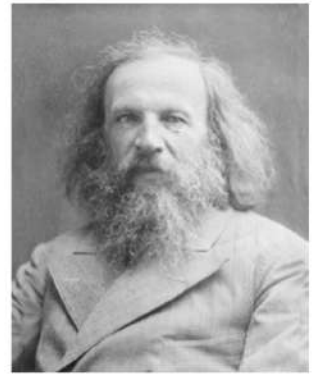


圖7、Dmitri Ivanovich Mendeleev, 1834-1907

其實，在 20 世紀初時，「鈹」在工業上已有了一些應用，主要是用「鈹」跟銅、鋁、鎳或鐵等形成機械性能良好的「合金」(Alloy)。其中以「銅鈹合金」最著名，用這種「合金」製成的彈簧，簡直不知什麼是疲勞，即使壓縮 2,000 萬次以上也不會失去彈性。「銅鈹合金」還有很高的硬度，用它製成的零件十分堅固，抗疲勞、抗腐蝕的能力也很強，因此常用來製做手錶中的游絲、高硬度軸承、耐磨齒輪，以及現代化大型飛機的零件。

「銅鈹合金」還有一個特點，就是撞擊時不像鐵器那樣會飛出火花，因此在製備這種「合金」時，不容易引起爆炸或火災。因此，常被石化工業拿來製成不會冒出火花的工具。飛機引擎也用到這種「銅鈹合金」，因為它極其堅固，而且耐腐蝕。此外，由於「鈹」和氧或硫很容易化合在一起，因此在冶金中還會拿來用做「脫氧劑」或「脫硫劑」。

「鈹」還可用來滲入鋼的表面形成「鈹化

4. 「鈹」(Be) 元素的介紹

層，再加上「鈹」在空氣中氧化後就會形成一層緻密而穩定的氧化膜，進而增加鋼的硬度和抗蝕性。至於純粹的「鈹」可以用做 X 光管的透光窗，對 X 光的透光度來說，用「鈹」做的窗比鋁窗要強 17 倍。

「鈹」還兼有「原子能工業之寶」的美稱，因為「鈹」命運的轉變跟現代科學技術的發展分不開。「鈹」在尖端技術中初試鋒芒，是在 20 世紀時。1932 年英國物理學家 Sir James Chadwick (1891-1974，圖 8) 發現：當金屬的「鈹」受到 α 粒子轟擊時，會產生一種貫穿能力極強的中子射線。中子是質量接近質子而不帶電荷的粒子，中子跟質子同是組成原子核的基本粒子。由此，人們不僅進一步了解到原子核的結構，而且在原子核物理研究上也找到了一種新工具。

用「鈹」的粉末與鐳鹽的混合物製成的中子源，每分鐘能產生幾十萬個中子。用這些中子做砲彈去轟擊原子核，可使原子核分裂而釋出巨大的能量——原子能，同時產生新的中子。此外，為了達到人工控制「原子核裂變」（由一個原子核變成兩個或三個原子核的現象）的目的，必須使產生中子的速度減慢，而「鈹」對快速中子有很強的減速作用，因此可以充當原子反應的減速劑，使「原子核裂變」反應有條不紊，連續不斷地進行下去。

在近代原子能技術中，「鈹」已不僅用做中子源材料，而且還與原子能的誕生有

關。「原子能反應堆」是用來生產人造放射性元素，以便獲得原子核能的一種規模巨大設施。目前世界上已經建造的核反應堆大多數是慢中子反應堆，這種核反應堆的中心（叫「堆芯」）是「活性區」（也叫「反應區」），「活性區」中插有好多條金屬鈾(U)棒，棒與棒之間必須配有足夠的減速劑。

減速劑的作用是使在「活性區」的「原子核裂變」反應所產生的快速中子減慢速度，比方說把中子的能量從 1.75 百萬電子伏特減小到 0.03 百萬電子伏特。中子減速的目的是為了更充分地把它們應用在原子核的「裂變」反應中，並維持「原子核裂變」反應繼續發生。可見，減速劑是建造熱中子反應堆不可或缺的主要工具。最好的核反應堆減速劑就是「鈹」了。

前面曾提到，「鈹」是一種優質的中子減速劑。這是因為「鈹」有減速劑所必須有的性能：「鈹」的中子散射截面大（高達 6.1 巴恩，【註一】），能十分有效地把「原子核裂變」後的高能量中子減速到低能量。而「鈹」的吸收截面很小（0.009 巴恩），幾乎很少吸收「堆芯」中所產生的中子，因此不會耗損中子的產量。

如果按照相等的中子轉換比率計算反應堆「堆芯」的大小，以「鈹」做為減速劑的「堆芯」尺寸會比以石墨做減速劑的小一半，這對於電功率小於 100 兆瓦的核反應堆之「堆芯」是很重要的。因為隨著「堆芯」的減小，核反應堆外層如壓力容器、生物屏蔽層這些結構也跟著縮小，進而可使核反應堆的造價大為降低。

核反應堆的「活性區」外通常是反射層，反射層的作用是把由「活性區」洩漏出



圖8、Sir James Chadwick, 1891-1974

圖片來源：By Los Alamos National Laboratory

4. 「鈹」(Be) 元素的介紹

來的中子反射回「活性區」，如此一來有利於減小核燃料的消耗。「鈹」是核反應堆中的一種理想的反射層材料，因為反應堆內鈾核連續分裂放出原子核能，一方面要讓鈾核分裂時產生的快中子減速變為慢中子，才容易再引起原子核分裂；另一方面也為了防止中子跑出鈾反應堆，又要在核反應堆周圍設置反射層讓中子返回核反應堆。「鈹」正是這種優良的核子材料。

「鈹」跟一般石墨相比，除了減速效能更高以外，還不會損失中子。「鈹」在吸收中子後又可產生兩個中子，而且容易散射中子。用「鈹」減速，可以大大縮小鈾反應堆的體積。這一點對用做船舶、飛機動力的核反應堆來說，是一個特別突出的優點。例如：若有核反應堆採用由「鈹」磚砌成的「鈹反射層」，可使核反應堆用的核燃料鈾(U235)的臨界質量由 12 公斤減少到 7 公斤，節省了 5 公斤的鈾。因此，「鈹」雖較貴，但採用「鈹」還是挺划算的。

隨著核反應堆向高溫方向發展，「鈹」以本身的高熔點和優良的抗蝕性，還可能成為高溫核反應堆燃料元件和結構元件的理想材料。

「鈹」本身吸收 X 射線的能力不強，這也是為什麼 X 射線管的窗戶是由「鈹」製成的。

在火箭技術和太空飛行方面，「鈹」以重量輕、強度大、耐高溫的三大優點建立了功勳。與常用的輕質結構材料如「鋁合金」、「鎂合金」相比，「鈹」顯示了很多的優越性，主要是：

(1)「鈹」的密度小。「鈹」的密度通常

測得是 1.85 公克/立方公分左右，但有時高些，有時低些，完全取決於雜質含量。後來用 X 光測定，才知道「鈹」的真實密度應該是 1.8477 公克/立方公分。比起其它常見金屬的密度，像金的密度 19.32 公克/立方公分、銀的密度 10.5 公克/立方公分、銅的密度 8.96 公克/立方公分、鐵的密度 7.86 公克/立方公分、鋁的密度 2.702 公克/立方公分等等。由此可見，相對而言，「鈹」的密度非常小，但「鈹」的硬度卻是很高。

(2)「鈹」的「彈性模量」大。所謂「彈性模量」，是指當物體受拉力引起變形，用以表示應力與應變之間關係的一個參數。若是「彈性模量」大，代表著引起單位面積的應變所需要的應力大。「鈹」的「彈性模量」比常用的幾種輕結構材料如「鈦合金」、「鋁合金」、「不銹鋼」的「彈性模量」高 6 倍以上。

(3)「鈹」的「熱容量」高。所謂「熱容量」，就是當物體的溫度上升或降低 1 度時所需要吸收或放出的熱量。由於「鈹」的「熱容量」高，且吸熱能力強，是鋁的 2.5 倍，鈦的 4.5 倍，這一特性使得「鈹」有良好的熱膨脹適應性。

(4)溫度升高或降低時，「鈹」的機械性質變化慢、導熱性良好，是銅的一半，鋼的 3 倍。

正因為「鈹」吸收熱量也大，所以可以做為人造衛星(圖 9)和太空船的厚壁吸收結構材料



圖9、鈹吸收熱量大，可做人造衛星和太空船的厚壁吸收結構材料

© 公有領域

4. 「鈹」(Be) 元素的介紹

。當這些飛行器在高溫環境中飛行時(如返回大氣層時)，這種材料就可以吸收熱量，進而保障飛行安全。此外，這種材料也可以幫助太空船抵抗宇宙射線輻射。

並且，「鈹」因具有密度小且高硬度的特性，能夠耐震動和超低溫而不變形。將「鈹」做爲「添加劑」熔入其它金屬中，形成含「鈹」的「合金」，可以大大增強該「合金」的強度及其表面的耐腐蝕性。因此更被運用在從宇宙觀測天體的宇宙望眼鏡之零件器材上。

由於「鈹」擁有上述這一系列特有的性質，使「鈹」在飛彈、衛星和太空船方面有廣泛的應用。

當太空船重返大氣層時，表面會產生相當大的摩擦熱，太空船上須有承受這熱能的熱屏蔽裝置。若一太空船的吸熱裝置是用鈦(Ti)製的，則這裝置重達716公斤。相反地，若以「鈹」製的，則由於「鈹」的吸收能力強且質量輕，只要159公斤就行了。再加上使用「鈹」材料可使火箭的有效載重量增加許多，因而節省許多經費。因此，「鈹」在飛彈、衛星和太空船上的應用很有經濟價值。

前面已說過，「鈹」具有密度小和高硬度的特性，所以一直是理想的衛星無線電天線材料。「鈹」天線的作用是把衛星上蒐集到的信號發射到地面。由於「鈹」也具有良好的吸熱能力，用「鈹」製造太陽能電池板及其骨架，不但能提高太陽能電池的品質，還能大大地減輕該系統的重量。

在飛機方面的應用，高速飛機爲了降低阻力和空氣動力負荷，機翼必須做得相當薄，因此對機翼材料的硬度比對強度的要求還高。由於高速所引起的高溫「彈性模量」的降低，會造成機翼顫動和不穩定，這些是必須考慮的重要參數之一。

另一方面，爲了克服推進系統所造成的顫動，也要求飛機結構材料必須具備足夠的硬度。「鈹」的硬度大於飛機上常用金屬的硬度，這就爲設計高速度飛機所需的高剛性材料提供了重要的來源。

若硬度相等，使用「鈹」製造機翼所需的重量不到鋼、鎂、鋁或鈦「合金」的一半。當一架渦輪噴氣運輸機用「鈹」代替4/5的鋁時，可減輕飛機重量的48%。又用「鈹」代替鈦「合金」和鋼，飛機的重量可分別減輕22%和37%。這樣一來，就可以增加飛機載重量。「鈹」還可以用來製造飛機上的某些零件，像是煞車盤、方向舵、壓縮機硬片等。另一方面，使用「鈹」製造機翼的應用價值也十分引人注目。

此外，如果銅加入1%-2%的「鈹」，就會變成「鈹青銅」之「合金」，它有個著名的名字叫「randol」，因爲「鈹青銅」的外表酷似真實黃金的顏色，因此「randol」又被稱爲「吉普賽黃金」(gypsy gold)。這種「合金」由於韌性強、彈性強、加上導電性能優異，所常被用做電器零件。

「鈹」的氧化物和碳化物都是耐高溫、耐腐蝕的材料，它們傳熱好、強度高，即使受到急冷急熱也不至於斷裂，因此都是製造火箭噴口的良好材料。可以這麼說：含「鈹」的氧化物是所有氧化物中最好的熱傳導物質。其中，「氧化鈹」(BeO)還是一

4. 「鈹」(Be) 元素的介紹

種很好的電絕緣材料，在高溫下比其它陶瓷材料有更優良的電絕緣性能，特別適於製作散熱用零件、微波和半導體方面的絕緣材料。

雖然「鈹」有著如此優越的性能，但是由於有若干缺點，使「鈹」的才華迄今還未能充分發揮。

「鈹」的一個最大缺點就是本身帶有劇毒，具有極高的生物毒性，並且許多含「鈹」的化合物也帶有毒性。所以在過去，「鈹」是所有非放射性元素中最少被拿來做研究的元素，也正因如此，「鈹」的物理性質和化學性質至今還不是真正全盤被了解。

而「鈹」之所以具有高度毒性是因其離子(Be^{2+})的半徑非常小，只有 $0.34 \text{ \AA} = 3.4 \times 10^{-9}$ 公分，導致 Be^{2+} 的電荷密度非常高，這使得 Be^{2+} 能夠與生物分子中的許多官能基發生強烈的相互作用，以致「鈹」容易與組成生命的 6 大基本化學元素(氫、碳、氮、氧、磷和硫)鍵結在一起，所形成的化學鍵不容易斷裂，長久下來累積在生物體內，自然的會對生物體造成毒害。因此一定要把含「鈹」的物質存放在玻璃瓶裏，儘可能不要去碰觸含「鈹」的化合物。並且，前面曾提到過，任何含「鈹」的化合物皆具有甜味，也絕對不要用舌頭去舔舔看，因為它們都有劇毒。

「鈹」的化學性質與另一個化學元素鎂(Mg)十分相似。鎂是人類需要的基本元素之一。但「鈹」會模仿鎂，並且會在一些重要的生物酶裏取代鎂的位置，結果造成人體的營養不足。「鈹」尤其對人的肺部特別敏感。在工廠裡接觸到含「鈹」化合物

的工人危險性最大，像是：製造螢光燈管的工人，因為燈管的內側都要上「氧化鈹」。只要吸入其細微的粉塵，會引起痛苦並導致致命的「鈹中毒」。簡單的說：「鈹」是個致癌性高，並且會引發嚴重慢性肺病的高毒性金屬。

如果食物中「鈹」的含量過高，就會在人體內形成「磷酸鈹」($\text{Be}_3(\text{PO}_4)_2$)，進而導致骨骼鬆軟，使人患上所謂的「鈹軟骨病」。另外，含「鈹」的許多化合物還會引起皮膚發炎、肺水腫，甚至窒息。

在世界各國開始進行「鈹」生產的時候，曾發生嚴重的「職業性鈹病」。據研究，爲了安全起見，在 1 立方公尺空氣中，「鈹」的含量要求低於 0.001 毫克(1 毫克 = 10^{-3} 公克)。因此，要生產「鈹」必須採用特殊的通風與過濾設備，確保廠房空氣清淨，這給「鈹」的生產帶來了巨大的麻煩與困難。正因「鈹」化合物毒性很大，在使用這些含「鈹」的化合物時必須非常小心謹慎。

但人類並不能完全與「鈹」隔絕，因為根據統計：每個人體內平均含有約 0.03 毫克的「鈹」，幸好這還不夠對人的身體造成傷害，因為大部分的「鈹」都被儲存在人體骨頭裏。

「鈹」的第二個缺點就是「鈹」具有令人頭痛的易脆性。「鈹」金屬雖然硬度高但很脆弱，把「鈹」放入玻璃試管中，只要試管稍微搖一搖，「鈹」就會粉碎成許多小碎片。以致「鈹」雖然是金屬，但很難加工製造成所需的形狀。至於爲什麼「鈹」很容易脆掉？有人認爲是雜質所引起的，也有人認爲「鈹」本身就是脆的，目前爭論還沒有結

4. 「鈹」(Be) 元素的介紹

果。

現在科學家們正沿著兩條途徑來解決這個問題。一是經由金屬物理學的途徑，即改進製備工藝，設法細化「鈹」的晶粒。可喜的是，利用加工方法，在較高溫度下已可使塊狀的「鈹」鍛製成不大的金屬板（暗紅色）。另一是從提高純度方面著手，目前雖然尚未實驗成功，但很多事實證明，如果純度提高了，對於「鈹」延展性的提高肯定有良好的效果。

雖是如此，更使人難以想像的是，金屬的「鈹」具備著良好的透音性，聲音在含「鈹」材料中的傳播速度高達12,600公尺/秒。與這相比，聲音在空氣和水中的透音性就遜色多了。金屬的「鈹」的這一特長引起了專家很大的興趣，大家準備用金屬的「鈹」製造樂器。相信不久的將來，人們將能聽到一種新奇、美妙的音樂，它正是由「鈹」材料製造的樂器發出的呢。

長久以來，化學界一直有個問題：「鈹」和「鈹」之間能否形成一個化學鍵，生成如 Be—Be 所示？這個問題問倒了許多化學家，因為根據傳統的「分子軌域理論」（Molecular Orbital Theory），雙「鈹」分子的「鍵級」（bond order）應該為零，也就是認為「鈹」和「鈹」之間理應沒有化學鍵存在。然而，近年來新的化學理論預測：在氣態的 Be₂ 分子中，Be—Be 鍵實際上存在一定的「鍵級」，並且具有一定的共價鍵性質。雖然已有這樣的預測，但在固體或液體中，迄今為止，實驗化學家仍無法成功合成且分離出具有 Be—Be 單一化學鍵的化合物。之所以如此，是因為 Be—Be 化學鍵在固體或液體中的穩定性極低，很容易因被其它離子或分子攻擊而破壞掉。所以要想成功的



圖10、新合成出含有 Be—Be 化學鍵的分子（CpBe-BeCp）。見Science 2023, DOI:10.1126/science.adh4419

合成且分離出含 Be—Be 鍵的化合物，一直是化學界極欲突破的關卡。

就在2023年，英國牛津大學的研究團隊做出開創性的工作，終於成功合成含有 Be—Be 單一化學鍵的化合物（圖10）。

由上述實例可見，「實驗化學」和「理論化學」是相輔相成的，缺一不可。「理論化學」可幫助我們邏輯性的思考及瞭解化學內在本質，進而可以預測前所未見的新分子存在的可能性。而「實驗化學」可以幫助我們成功的合成出化學新分子及證明「理論化學」的預測是對或錯。化學的進步與發展，就是在這種「實驗化學」與「理論化學」的相互合作下，使我們一點一滴瞭解各種化學物質的本質，進而推動化學一步一步向前邁進。

近年來，尖端技術的飛快發展產生對「鈹」的大量需求，「鈹」的產量也已大大增加。可以預期，在未來歲月裏，人類一定有辦法進一步克服「鈹」的缺點，進而有豐碩的成果出現，讓「鈹」充分發揮本身固有的特性。因此，「鈹」的生產和應用前景將必然是指日可待的。

【註一】：「巴恩」（barn符號是b）是一種面積單位，一個「巴恩」的定義是10⁻²⁸ 平方公尺，大約是一個鈾原子核的截面面積。