

5. 「硼」(B) 元素的介紹

術士的功勞。

提到「硼」，人們便會想到「硼砂」(Borax；化學式為 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) (圖2)，(是「硼」的化合物之一)和「硼酸」(化學式為 H_3BO_3)。的確如此，早在約西元前 200 年，埃及、羅馬、巴比倫的煉金術士們就曾使用過「硼砂」製造玻璃和焊接黃金。「硼」之所以英文命名為 boron，就是因這字源自阿拉伯文 bauraq 或波斯文 burah，原意都是「焊接」的意思。這說明古代的阿拉伯人及波斯人已經知道「硼砂」有熔融金屬氧化物的能力，因為在焊接過程中，可用「硼砂」做助熔劑除去金屬焊接處的氧化物，使金屬牢固地結合在一起。

後來，到了1702年，人們又製得「硼酸」。但「硼酸」究竟是什麼？它的化學成分一直到19世紀初仍然還是個謎。1732年法國藥劑師喬弗勞 (Claude Joseph Geoffroy, 1685 - 1752, 圖3) 觀察到「硼砂」在燃燒後會在火焰中產生綠色，他認為這是由於這種化合物裏含有微量氣化的「硼」使火焰呈現綠色。只是一直沒有人能把元素的「硼」提取出來，不然喬弗勞就可能成為第一位發現「硼」元素的人。

前面說過「硼」的化合物雖然早在千年前便已為人所知，但純元素的「硼」卻一直到1807年才由法國科學給呂薩克 (Joseph Louis Gay-Lussac, 1778 - 1850, 圖4) 和泰納 (Louis - Jacques Thénard, 1777 - 1857,

圖5) 採用金屬「鉀」與「硼酸」反應得到，並於那年11月在法國的《理化年報》上發表了他們提取元素「硼」的方法和經過。幾乎與此同時，英國科學家戴維 (Humphry Davy, 1778-1829, 圖6) 也用相同的方法得到了元素「硼」，並於 1808 年 6 月在英國皇家學會上宣讀了他抽取元素「硼」的論文。



圖4、Claude Joseph Geoffroy, 1685-1752

© 公有領域



圖5、Louis-Jacques Thénard, 1777-1857

© Public Domain



圖3、Claude Joseph Geoffroy, 1685-1752

© Public Domain



圖6、Humphry Davy, 1778-1829

© Public Domain



圖7、硼礦

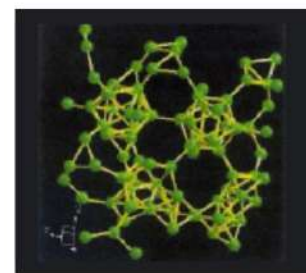


圖8、「硼」的固態架構 (rhombohedral)：菱形的、三角晶的、斜方的

純元素的「硼」的外觀看起來是帶有光澤的黑褐色 (圖7)，且「硼」在自然界中的含量相當豐富，占地殼中的 0.001%。「硼」本身非常硬，在單一元素中，「硼」的硬度僅次於「金剛石」(又叫「鑽

5. 「硼」(B)元素的介紹

石²)。正因如此，「硼」可用來製造切削工具和鑽頭。在煉鋼時，在鋼水中摻入微量的「硼」就可大大提高鋼材的強度。在「鋁」與「銅」的溶液中摻進少量的「硼」，也可大大提高導電性。「硼」也具有相當高的沸點，約攝氏4,000度，熔點也高達約攝氏2,100度。但在室溫攝氏25度時，「硼」則是穩定的固體(圖8)。

「硼」的身上一共有5個「質子」(因此在元素排行第5號)，但在自然情況下卻可能擁有5或6個中子。換句話說，「硼」有兩種「同位素」(相同的元素卻含有數量不同的中子)，分別是¹⁰B(原子量10.0129)及¹¹B(原子量11.0093)。這造成「硼」物理性質上的多變，其中¹¹B據估計占80.1%，¹⁰B則占了19.9%。

「硼」在自然界可以通過不同作用組成一箇循環系統，例如在磐石、水圈、大氣圈、生物圈之間，以及在各種地質、地球化學、生物化學作用下，「硼」會不斷地循環而存在著。

一般來說，在室溫下「硼」是不會和空氣反應的，必須在高溫時才會經由燃燒而產生「氧化硼」。且「硼」在水裏不會反應，也不溶於水。「硼」更不會和鹽酸(HCl)、氫氟酸(HF)作用，卻會和鹵素(像F₂、Cl₂、Br₂等)產生劇烈的反應。通常在實驗室裏並不需要特別製備「硼」，因為「硼」在市場上不難買到，比如說常用來製備「硼」的材料可拿常見的「硼砂」。而透過鎂和「硼」的氧化物也可以產生元素的「硼」($B_2O_3 + 3Mg \rightarrow 2B + 3MgO$)。

雖然「硼」的活潑性比元素週期表中緊隨在「硼」後的元素小的多(化學活潑性越強，代表著越容易和其它物質產生化學反應)，但人們在自然界中從未發現純元素的「硼」，相反的，「硼」在地球上一直是以化合物

的形式存在。其實，除氫、銻(Te)及「惰性氣體」(He、Ne、Ar、Kr、Xe)外，「硼」可直接和所有非金屬元素反應，也可與許多金屬元素生成硼化合物。比如說，「硼」通常與氧、水、鈉化合為一種稱為「硼砂」($Na_2B_4O_5(OH)$ 和 $Na_2B_4O_5(OH)_4 \cdot 8H_2O$)的化合物。

「硼砂」是「硼」的重要化合物之一，天然生產的「硼砂」早為中國古代醫藥學家知悉。在中國，「硼砂」做為藥物的記載最初出現在宋朝人編寫的《日華本草》中，稱為「盆砂」。據明朝李時珍解釋說：「或雲煉出盆中結成，謂之盆砂，一作「硼砂」。他在《本草綱目》中還敘述了它的醫藥作用：「消痰止嗽，破瘕結喉痺。」其中「瘕」(音唸「ㄊㄧˊㄚˊ」)指腹中脹痛，「痺」(音唸「ㄅㄧˊ」)指肢體疼痛。

中國西藏是世界上盛產「硼砂」的地方，歐洲人知道「硼砂」可能就是從西藏傳到印度，再傳到歐洲的。在1772年，瑞典商人格里爾(J. A. Grill)在《瑞典皇家學會會報》中發表文章，說有一位去中國天主教的傳教士送他一種天然「硼砂」，叫做pounxa(音譯為「硼砂」)，並說明是從西藏地下挖掘出來的，並不是人工製得的。

「硼砂」的主要用途是做清潔劑和軟水劑。我們若把「硼砂」放在洗衣機裏加熱，當水溫達到攝氏60度時，「硼砂」會裂解出「過氧化氫」(H₂O₂)，這可以漂白衣服，達到清潔效果。

如果水裏含有鈣、鎂等鹼土金屬離子，就會和肥皂化合形成浮垢狀沉澱，聚集於洗滌槽或桶的內壁四周，這種水稱為「硬水」。當「硬水」軟化後，所含的鈣、鎂離子被去除，取而代之的是較為無害的鈉和鉀元素。「硼砂」就是軟化「硬水」的最佳軟水劑。在工業界，人們也常用「硼砂」製造

5. 「硼」(B) 元素的介紹

「派熱克斯玻璃」(Pyrex Glass, 圖9), 俗稱耐熱玻璃。由於「派熱克斯玻璃」能承受溫度的急遽變化而不裂開, 可增加玻璃的耐久性, 因此這種玻璃最常見的用途是做為廚房裏用的烤盤和量杯的材料。



圖9、派熱克斯玻璃 (Pyrex Glass)

© CC BY-SA 3.0

「硼」的另一個重要且常見的化合物就是「硼酸」(H_3BO_3)。把「硼砂」和鹽酸或硫酸一起加熱就可製得「硼酸」。「硼酸」是一種很弱的酸, 有殺菌作用, 可用做眼藥水。除此之外, 「硼酸」經常用來製造滅蟑螂藥丸。「硼酸」微溶於冷水, 但隨著溫度升高, 它的溶解度明顯增大。「硼酸」的水溶液可做為防腐劑和醫療用的消毒劑, 市面上有些肥皂就含有「硼酸」成分, 並且「硼酸」在搪瓷和玻璃工業中也有著廣泛的應用。

天下沒有完美的事情, 「硼」也有危險的一面。無機「硼」中毒常由「硼酸」和「硼砂」引起, 「硼」、「硼酸」、「硼砂」的毒性基本上相似, 都是低毒類、蓄積性的毒物。從中毒的病理檢查可見胃、腎、肝、腦和皮膚出現特異性病變, 腦和肺出現水腫。動物實驗研究還發現「硼」對睪丸較敏感, 特別是性成熟期的睪丸。當發生急性「硼」中毒時應給予綜合性治療, 口服「硼」中毒時應儘快用溫水或 5% $NaHCO_3$ 溶液洗胃。

「硼」也是植物生長發育必需的「微量元素」之一, 因為「硼」是產生某些重要植物蛋白的關鍵, 可幫助植物從土壤中吸收水分, 促進根莖生長。實驗顯示「硼」元素若供應過少, 會造成植物發黃或發黑, 甚至葉子會

扭曲變形(圖10、圖11)可惜的是, 一般植物常見的普遍缺乏的微量元素: 第一種是「鋅」(Zn), 第二種就是「硼」。

直至1981年, 人們才認識到「硼」不僅是植物, 也是動物與人類必需的元素。在研究中發現, 即使小雞的維生素 D 攝取不足,



圖10、木瓜缺「硼」症 (果實塊腫)

圖片來源: 1994, 台灣農作物病蟲害防治叢書 木瓜病蟲害及防治第22頁



圖11、缺乏「硼」元素的果實, 容易產生凹凸浮腫的現象 (還好人類不會這樣)!

但仍然可以藉由餵養含「硼」的飼料達到其骨骼鈣化之目的。

其實「硼」在人類健康中所扮演的角色還不是很清楚, 但有越來越多的證據顯示人體可能需要非常少量的「硼」, 以保持骨骼的健康, 缺少「硼」可能導致關節炎和其它骨科病症。

醫學研究證明 40 歲以上的人幾乎都有骨質疏鬆現象, 尤其是婦女。骨骼雖然主要是由「鈣」(Ca)和「磷」(P)元素構成, 但如果飲食中缺少「硼」, 「鈣」就會大量消耗掉, 骨質中的「鈣」排出增多, 就容易得軟骨症。因此, 婦女們平時應注意在日常膳食中多多

5. 「硼」(B) 元素的介紹

攝取含「硼」的食物。

「硼」和鈣、磷、鎂(Mg)是人體正常代謝所需要的「微量元素」之一，對停經後婦女防止鈣質流失、預防骨質疏鬆症具有功效。「硼」的缺乏會加重維生素 D 的欠缺，另一方面，「硼」也有助於提高男性睪丸酮分泌量、強化肌肉，是運動員不可缺少的營養素。

「硼」可能對腦功能的健康性也非常重要，像是記憶力和手眼協調及反應能力可能都需要「硼」的幫忙。人們早就發現，某一些化學元素的攝入對智力的提高有一定的促進作用。其中「硼」元素的效果已被美國科學家用實驗證實：食用低劑量含「硼」食物的人，腦中電波活動會減慢，顯示腦中的智能反應下降。嚴重一些的人就連很簡單的小事都做不好，像是敲頭的速度變慢，用滑鼠點選物件也失去精準，挑選字母的速度也不快，總之，他們的智能反應全都慢了下來。當恢復正常飲食時，他們的腦電波反應增快，用腦的速度也大為改善。

雖然大多數人並不缺「硼」，但老年人有必要適當注意攝取。其實，大多數人可從水果、綠色蔬菜、堅果及豆類中得到「硼」，如蘋果、油菜、核桃、花生、牛奶、雞蛋等。每日大約服用 3 mg(1毫克 = 10^{-3} 公克)的「硼」，就能預防骨質疏鬆症。但有關「硼」在人體中的吸收和代謝，其實科學界知道的並不够多。目前只知道「硼」在膳食中很容易吸收，且大部分由尿排出，並且在血液中「硼」可與氧結合為 $B(OH)_3$ 。

據觀察，「硼」在人與動物的血液中的含量如果很低，這可能與膳食中元素鎂(Mg)的攝入有關，當鎂的攝入量低時，血液中

「硼」的早含量就會增加。

「硼」的生理功能至今還未能確定。有兩種假說解釋「硼」缺乏時，出現明顯而不同的反應，以及「硼」的一些生化特性。一種假說是，「硼」是一種代謝調節因子，經由競爭可抑制一些關鍵酵素的反應，控制許多代謝途徑。另一種是「硼」具有維持細胞膜功能穩定的作用，因而可以用來調整陰離子或陽離子的跨膜信號或運動，以影響細胞膜對激素和其它調節物質的反應。

但要注意的是，也不可過量服用「硼」，太多的「硼」反而造成人體「硼中毒」，產生腹瀉、嘔吐等現象。曾有實驗證據指出：吃入大量的「硼」，會影響男性生殖器官的健康，且孕婦懷孕時暴露到「硼」，也會生產出體重偏低或出生缺陷及生長遲緩的幼兒。

並且，含「硼」的藥物也不宜過多使用，如果只吃含「硼」的藥物而不吃含「硼」的食品，也會損傷骨骼。相反的，吃進含「硼」足夠的食物後，也不宜再吃含「硼」的藥物。除了抗骨質疏鬆外，「硼」還有減輕維生素 D 缺乏造成的不良影響，以及降血脂、抗腫瘤、抗癌症的功能。

除了人體健康外，「硼」在原子核反應堆的設計和利用過程中也起著重要的作用。在早期研究原子核產生能量的方式的時候，人們就發現「硼」是一種非常有效的「中子吸收劑」。中子做為組成原子核的基本粒子之一，它在原子核反應堆中起著至關重要的作用。當原子核反應堆中最常用的燃料鈾-235(^{235}U)吸收中子後，會「裂變」成碎片並釋放能量，也放射出新的中子。這種新產生的中子使更多的鈾-235「裂

5. 「硼」(B)元素的介紹

變^ˊ進而引發^ˊ連鎖反應^ˊ。

為避免^ˊ連鎖反應^ˊ失控導致爆炸，必須好好控制^ˊ原子核裂變^ˊ所產生中子的數量。於是，核子工程師通常把^ˊ硼棒^ˊ放進原子核反應堆中，吸收^ˊ裂變^ˊ中產生的過多中子，使原子核反應速率減慢，進而控制反應中產生的能量，因此^ˊ硼棒^ˊ又稱為^ˊ控制棒^ˊ。

「硼」在半導體製造方面也越來越重要。半導體是在^ˊ矽(Si)^ˊ或^ˊ鎵(Ga)^ˊ的晶體裏精確地摻入一些像「硼」之類的雜質，當把少量的「硼」元素摻入矽晶體裏時，「硼」原子就占據了晶體中一些原來矽原子所在的位置。然而「硼」只有3個外層電子，而矽有4個外層電子。我們就說：「硼」原子在矽晶體中形成了一個帶正電的空穴。當摻「硼」的矽晶體通電時，可誘發電子從相鄰原子向「硼」原子占據的正電性空穴移動並填充空穴，而使原先所處位置形成新的正電性空穴(圖12)。

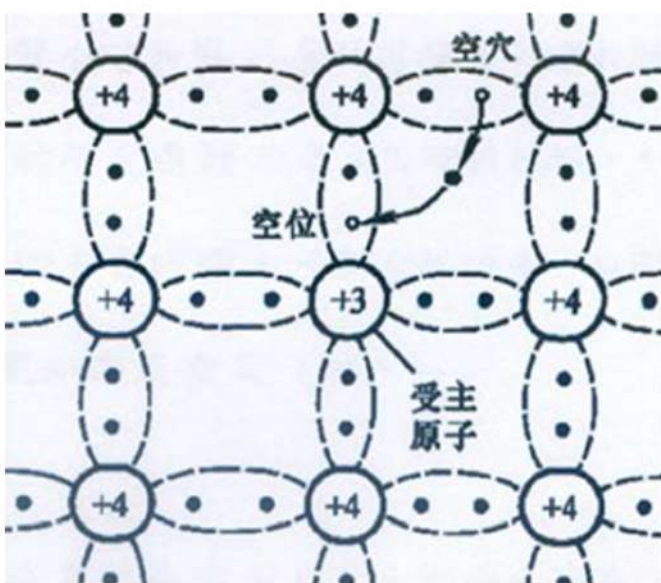


圖12、P型半導體的原理圖，電子會在空位(電洞)間流動而傳遞電子流。

圖片來源：百科知識中文網

電子這種有秩序移動的結果是，原來存在於「硼」原子所在位置的正電荷在矽晶體中會有秩序地遷移而形成電流。在這種情況下，電流的「載體」稱為正電荷，這種半導體稱為^ˊP型半導體^ˊ。^ˊP型半導體^ˊ近來常用於製造太陽能電池，這種電池能經由外界照光而產生電流。

「硼」又可用於製造某些類型的^ˊ合金^ˊ。所謂^ˊ合金^ˊ是經由熔化或混合兩種或更多種金屬製成的，因此^ˊ合金^ˊ具有的特性與個別金屬不同。最重要的是，這些^ˊ合金^ˊ在商業上可用來製造某些最強性磁體。例如，稀土類磁鐵就是利用「硼」、^ˊ鐵(Fe)^ˊ和^ˊ釹(Nd)^ˊ製成的。這種磁體可用於製造麥克風、磁性開關、揚聲器，耳機，粒子加速器，以及其它許多技術上的應用。

由^ˊ硼矽酸鹽^ˊ玻璃製成的纖維也可用於製作布料，像是^ˊ硼矽酸鹽^ˊ纖維混合其它合成纖維可製造耐用布料，以做為汽車座椅套和其它避免長期磨損的材料。

「硼」也常和碳及氮結合生成重要化合物。比如說：^ˊ碳化硼^ˊ(BC)和^ˊ氮化硼^ˊ(BN)所形成的物質硬度相當高，因而成為工業上的重要化合物。事實上，^ˊ氮化硼^ˊ可說是世上已知最硬的物質之一，上述兩種化合物都有非常高的熔點：^ˊ碳化硼^ˊ是攝氏2,350度，^ˊ氮化硼^ˊ則超過攝氏3,000度，這些性質使得^ˊ碳化硼^ˊ和^ˊ氮化硼^ˊ成為極佳的^ˊ磨料(Abraser)^ˊ和^ˊ耐火材料(Refractory Material)^ˊ。^ˊ磨料^ˊ是指可用來研磨或拋光等的粉末狀材料，^ˊ耐火材料^ˊ則是一種熔點高、可耐高溫的材料。

^ˊ碳化硼^ˊ和^ˊ氮化硼^ˊ也常拿來製作高速運輸工具，像是軍用飛機、航空器材、熱

5. 「硼」(B) 元素的介紹

屏蔽物以及耐熱纖維。人們還發現「碳化硼」和「氮化硼」可用來製備粉餅、膏狀化妝產品和口紅。

現在，醫界有一項新技術叫做「硼中子捕獲治療法」（簡稱：BNCT），可用來瞄準癌細胞，進而殺死癌細胞。方法是把「硼」注射入癌症患者的體內，「硼」便會自動進入癌細胞裏。

但到目前為止，科學家仍不清楚為何「硼」喜歡停留在癌細胞內。接著，用不傷害健康細胞的中子轟擊人體內的癌細胞。如此一來，中子穿入癌細胞裏會和癌細胞內的「硼」元素相撞，導致「硼」轉變為「鋰」(Li)原子及 α 粒子和 γ 射線，進而瓦解整個癌細胞。因為「鋰」原子和 α 粒子的行走路徑只有很短的距離，因此它們無法離開癌細胞，也就不會威脅到附近的健康細胞，卻有足夠高能量的 γ 射線殺死癌細胞。這種醫學新技術稱為「硼中子捕獲治療法」。雖是如此，這技術目前還未完全成熟，但可以想見具有治療癌症的強大潛力。

除了前面曾提到過的「硼砂」與「硼酸」外，「硼」的氫化物也是「硼」的一種重要化合物。「硼」和氫不能直接化合，但可以經由加熱的方式結合，進而得到在組成與結構上相當特殊的一系列「硼氫化合物」。因為這種「硼氫化合物」的物理性質與碳氫化合物相似，所以人們稱「硼」的氫化物為「硼烷」。

科學家又發現到「硼」和氫或和碳可形成鍵結，分別生成B—H鍵及B—C鍵，但這二種化學鍵的反應性很高、很容易氧化。舉例來說，在碳氫化合物裏，乙烷和丁烷在攝氏25度的空氣中仍可穩定存在；反之，在「硼氫化合物」裏，「乙硼烷」(B_2H_6)和

「丁硼烷」會自動燃燒。因此，想製備和碳氫化合物同當量的穩定「硼氫化合物」（即「硼烷」）是相當困難的一件事。

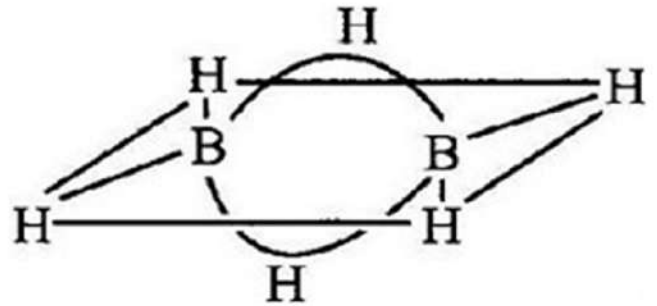


圖13、 BH_3 結構是由「三中心二電子」之BHB所組成的。

除此之外，碳氫化合物的分子結構很清楚簡單，但「硼氫化合物」的分子構造卻是異常地複雜。附帶一提的是，「乙硼烷」(B_2H_6 ，圖13)在空氣中能自燃，燃燒時生成 B_2O_3 和水，並放出大量的熱，因此可用作高能噴射燃料，常用在火箭和飛彈上。不過，由於純「硼烷」的毒性很強，比我們通常已知的毒物（如HCN、光氣等）高出許多倍，因此為了減少毒性，現有的「硼烷」燃料都不是純「硼烷」，而是它的衍生物。

雖是如此，還有其它含「硼」的化合物也在科學舞台上大放異彩。像是「氟化硼」(BF_3)，它在化學合成上是有名的酸性催化劑，經常輔助新化學分子的生成，因此至今BF₃在化學工業界仍廣泛應用著。又像 $NaBH_4$ 和 B_2H_6 分子，學過大學「有機化學」及「無機化學」的學生就知道，這些分子在眾多化學合成反應及化學試劑的應用上都扮演著相當重要的角色。

其實，正因為「硼」和氫及「鹵素」原子（X = 氟、氯、溴、碘等）可以形成所謂的「缺電子分子」（如： BH_3 和 BX_3 ），為了增加該分子結構的穩定性，必須和鄰近分子

5. 「硼」(B) 元素的介紹

加該分子結構的穩定性，必須和鄰近分子「結群拉黨」，因而出現「多面體的籠形化合物」。這些分子結構在三度立體空間中有著多樣、複雜且迷人的面貌，這也帶動了現代化學「分子鍵結理論」的進一步發展。

舉例來說，高中生熟悉的 B_2H_6 (「乙硼烷」) 分子，現代化學「鍵結理論」就認為其中的 BH_3 結構是由「3 中心 2 電子」的 $B-H-B$ 所組成的(圖13)，這個 H 原子把 2 個「硼」原子像橋狀結構般聯繫在一起，這和傳統方式(用「2 中心 2 電子」概念)解釋 C_2H_6 分子結構在觀念上有著很大的不同。

早在 1950 年代，美國政府就計劃運用「硼氫」分子做為火箭推進器的燃料，因為「硼氫化合物」和氧氣作用會生成無害的 B_2O_3 分子及水分子。可惜的是，「硼氫」分子本身有毒性，再加上多次實驗證實「硼氫」分子的燃燒放熱能力較其它物質差些，不能提供大量能量用以幫助推進器升空，後來就作罷了。

科學家也想到利用自身有多變形狀的「硼氫」分子，製備帶有「左旋光」或「右旋光」的化學鏡像異構物分子(圖14)。這是因為地球上所有生物體(包括你、我在內)都是「左旋光」物，因此生物體所吃進的食物裏，只有帶「左旋光」性的才能被吸收。同理可推，只有帶「左旋光」性的藥品才能醫好病人的病。因此科學家想到可以利用「硼氫」分子的多樣結構性製備帶有「左旋光」的藥物分子。

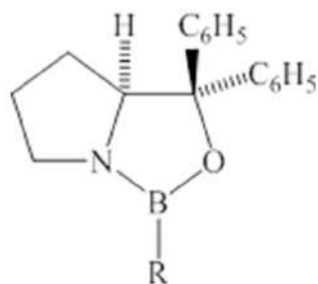


圖14、可以有效製造特殊光學活性的催化劑分子。

這樣的想法相當有創意，也正因如此，世界上有眾多的科學家投入這方面的研究工作，想要利用「硼氫」分子來設計、合成出新型且有效的治病藥物，且讓我們拭目以待。

除此之外，在過去一百多年來，化學界依據舊思維，一直認為「硼」和「硼」原子之間至多只能接二個化學鍵。但在2012年時，德國化學家利用實驗方法首度成功合成出含有「硼」和「硼」原子之間具有「三鍵」的化學分子，如(圖15)所示。這打破傳統舊觀念，使化學家對於化學分子的鍵結本質有了更深層的認識。

看完上述有關「硼」元素的介紹，可以清楚地知道「硼」的功用和功能有很多仍在探索中。或許聰明的讀者您，歡迎加入繼續研究「硼」的行列，以便對人類有更進一步的貢獻。

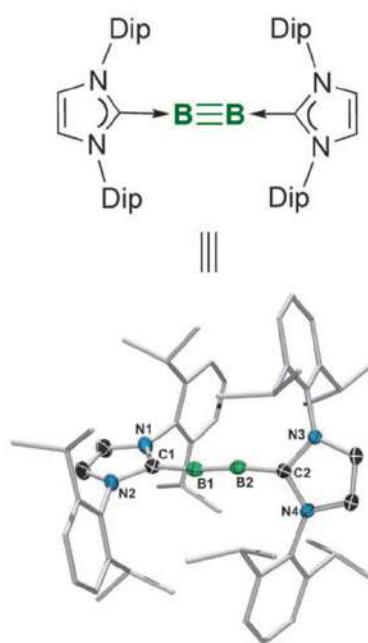


圖15、新合成出含有 $B=B$ 三鍵的化學分子，見SCIENCE 2012, VOL 336,1420 - 1422.