

碳六十的發現與發展

廖焜熙

國立台灣師範大學化學系

摘要：碳六十是繼石墨，金剛石之後，成爲第三種以純碳形式存在的球狀固體，這種固體有許多奇特的性質，諸如：對稱的球狀結構、穩定存在、可與多種元素反應、及超導性等，自從1985年被發現以來，無論在化學上、物理上、材料上均有蓬勃的發展。本文針對碳六十的發現、結構、化學性質及用途等，作一簡單的介紹，以提供化學教師教學上之參考。

關鍵詞：碳簇、球烯，超導體，富樂烯，巴克球，巴克富樂烯，碳六十。

壹、緒論

碳這個元素，相信對大多數人來說，並不陌生。因爲在日常生活中，我們常會接觸到它，例如：燒開水時用木炭燃燒，木炭本身就是一種由碳元素所組成的物質；又如我們每天所吃的白米飯，飯粒本身就是一種碳水化合物；汽車、機車所排出的廢氣之一：二氧化碳，是碳與氧結合所產生的化合物。諸如此類的化合物，種類繁多，不勝枚舉。因此，碳的化學可以說與人類的生活息息相關。

「碳」(*carbon*) 在化學週期表上是排序第六的原子。它是由六個質子六個中子及六個電子所組成的原子，原子量爲12。基本上，碳可說是一種化學性質相當安定的元素。因此，在自然界裡，我們不難發現有以「元素」狀態存在的碳，例如，金剛石與石墨便是一例。在一般化學教科書裡，對碳元素性質的介紹也是少不了的主題。例如，在高中基礎理化下冊第十三章裡，就介紹了有關碳原子的化學性質，其中有一段話說到：「碳有兩種同素異形體，即石墨及金剛石...」，由此可知，由純碳所組成的固體只有兩種，即石墨與金剛石，這是我們過去所了解的事實。但除了這兩種同素異性體以外，自然界裡是否仍有第三種形式的碳存在呢？這是科學家夢寐以求想要知道的事。但直到1985年以前科學家一直沒有發現，自然界裡存有第三種形式碳原子存在的證據。

1985年科學家終於發現了第三種以純碳所構成的分子。這種分子的結構有別於石墨與金剛石，乃由六十個碳原子所組成。其外形像個足球，碳原子的結構非常對稱，化學性質相當特殊。這種分子被命名爲巴克球(*buckball*) 或稱富樂烯(*fullerene*)。由於這個發現，碳六十成爲繼石墨、金剛石之後，以第三種純碳組成的固體，已成不爭的事實。也因著碳六十的發現，科學教科書需要重新改寫了。

科學家自從發現這種分子存在之後，經過十年的研究，不但確定了它的結構，同時也陸續發現了其他大型的碳分子的存在，如 C_{70} 、 C_{80} ...等，這些發現不但震驚了全世界，同時也為「碳」化學的研究開創了一個新的領域。以下本文將針對碳六十的發現、結構、化學性質及用途等，作一簡單的介紹，以饜讀者。

貳、碳六十的發現

碳六十的發現並非科學家刻意安排下的產物，乃是在偶然的機會中發現的奇蹟 (Hoffmann, 1993)。早在1966年，Jones推測碳元素態，除了石墨金剛石之外，應該還有第三種結構存在，而這種結構可能為籠狀的網狀結構，並預測這個結構應該可以利用人工的方法製造出來。然而，Chapaman，及其學生，試圖以人工的方法想合成這類分子，經過十年的努力，最後還是失敗了 (Hoffmann, 1993)。1971年，Osawa等人提出 C_{60} 分子存在的可能性，但由於當時的技術及分析儀器的關係，尚無法證明 C_{60} 分子的存在。1973年，Bochvar & Gal'pern也曾對 C_{60} 分子作理論計算；1980年，Davidson曾利用圖形理論，導出 C_{60} 分子存在的可能結構，而增加了科學家們對自然界含有 C_{60} 分子存在的事實的信心。至此，科學家對 C_{60} 分子存在及結構，在實驗證據尚未提出之前，早已提出猜想，但猜想歸猜想，最後仍沒有找到事實的證據。

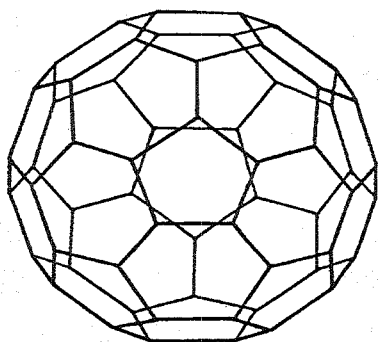
C_{60} 到底是如何發現的呢？說也奇怪， C_{60} 的發現，竟然與科學家研究碳粒子的尺寸有直接關係。科學家對碳粒子的研究興趣，主要來自想了解星際塵埃 (interstellar dust) 物質到底為何而起 (鄧金培，牟中原，民83)，因為一些由星際塵埃傳回的光譜顯示，星際塵埃可能為碳微粒所構成。為了解並確認這事實，科學家就試圖製造更細微的碳粒，以便偵測其光譜 (Huffman, 1991)，而結果卻意外的製造出 C_{60} 分子。

1985年美國萊斯大學 (Rice) 的Smalley及Curl兩位教授及英國的蘇克西 (Sussex) 大學的Kroto教授等人，為了證明星際塵埃光譜，在可見光區及紫外光區的吸收帶是由微小的石墨碳粒所造成，他們極力著手製造更微小的碳粒，並測定光譜。1985年他們利用雷射光，在高溫高壓下照射石墨，激發出石墨蒸氣，結果在蒸氣冷卻後，卻意外的得到一些不明物質，經質譜測定，這些物質的分子量為720。符合 C_{60} 分子的分子量。當時他們就推測，這是一個含有六十個碳原子所組成的新物質，並將其命名及決定其結構。後來陸續的研究證明，這正是科學家期待已久的碳六十分子，其結構也正如當初他們三人所推定的樣式。這就是碳六十的發現過程。由於他們三人，首先製造出碳六十的

分子，並決定出正確的結構，對而後的研究有巨大的貢獻，因而榮獲1996年諾貝爾化學獎。

1982-83年，*Krättschmer*及*Huffman*在海得堡繼續研究碳煙 (*carbon smoke*) 光譜。他們改變製造碳煙的參數，例如：調整氮氣的壓力，碳棒尖的樣式和電流強度，所得的樣品，經紫外光區的吸收，符合星際塵埃的光譜。1988年*Krättschmer* 再利用紅外線去研究這一種碳煙，結果發現紅外光譜圖上出現四支吸收波峰，這一發現對於 C_{60} 的結構的了解很有助益。根據理論計算的結果， C_{60} 分子具有很高的對稱性，且其僅有四種紅外線吸收模式。如今*Krättschmer*所測得的紅外線光帶及形式與理論的預測十分吻合，因此， C_{60} 的分子穩定存在的證據似乎可以確定下來。

1990年*Krättschmer*等人又發現含有 C_{60} 的碳煙，可以溶解在苯中，形成紅色溶液，將苯蒸乾得到固態的晶體，這晶體就是含 C_{60} 分子的晶體。這是科學家首次發現 C_{60} 可以用溶解在溶劑中。另外在同時期， C_{60} 的製造方法亦有了突破，*Krättschmer*等人利用石墨棒在氮氣下，以電極法加熱，首先大量製造出 C_{60} ，並利用苯溶解的方法得到純度甚高的 C_{60} 分子。這項發現使得 C_{60} 的分子得以大量製造，對以後的研究有很大的貢獻。 C_{60} 分子 X -ray分析顯示，此一分子是一個直徑為 7.6 \AA 的球形結構。1990年*Krättschmer*等人並提出 C_{60} 及 C_{70} 的紅外光譜及質譜的鑑定結果。另外*Taylor*等人也以 ^{13}C -NMR作分析，發現只有單一的化學位移，證明 C_{60} 分子的六十個碳原子，其化學環境均相同。至此， C_{60} 分子結構似乎可以完全確定下來，其外形結構如圖一所示：



圖一 C_{60} 分子的外形結構

1996年諾貝爾化學的頒發，與 C_{60} 分子的發現與發展有密切關係。以下說明這項來歷。1996年諾貝爾化學獎由三人獲得，他們分別是美國的*Smalley*，*Curl*兩位博士及英國的*Kroto*博士。他們三人在發現及分離 C_{60} 分子上有相當的貢獻。三位得獎人當中的

Kroto 博士，是發現 C_{60} 分子的背後啓發者。他從 1980 年起，即開始從事星際塵埃研究工作，他以微波方法（*microwave method*），探究含碳豐富的星球傳回的光譜，並試圖了解這些含長鏈碳分子的結構。

1985 年，它與美國的 *Smalley*，*Curl* 合作，首先以雷射光照射石墨，產生微量的 C_{60} 分子。並測定質譜，將這新分子命名，並定出其構造。（*Smalley* 是當時美國萊斯大學的物理系教授，是簇化學家（*cluster chemist*），*Curl* 則是光譜學家（*spectroscopist*）。他們將 C_{60} 分子命名為『*Buckminsterfullerene*』（巴克富樂烯）。爾後五年，他們繼續研究，以搜集更多的數據來支持 C_{60} 分子的結構。並發現其他大型分子的碳簇化合物存在的證據，如 C_{70} 等。同時 1990 年初，兩位物理學家 *Kratschmer* 與 *Huffman*，也利用碳弧法製得大量的 C_{60} ，並發現 C_{60} 分子可溶於苯中，產生結晶，使得 C_{60} 分子的結構及物理性質，獲得更明確的證據。至此 C_{60} 分子的發現已確定下來。瑞典皇家科學院決定將這份殊榮歸功於 *Kroto*，*Smalley*，*Curl* 三人。因此，這三人分別榮獲今年諾貝爾化學獎，因為他們發現了碳的第三種新形式固體，並定出其結構，這在往後的化學發展史上具有舉足輕重的地位。

C_{60} 分子到底有什麼特殊的地方，讓科學家如此的著迷，試著想去發現它呢？基本上，科學家相信，碳元素除了是石墨及金剛石之外，應該還有第三種的同素異形體存在才是，但多年來，科學家試著以人工的方法合成，但一直都未成功。如今在偶然的機會裡，用特殊的方法得到意外發現，不但滿足了人類長久以來的夢想，同時也證明了科學家的猜想是對的。從長遠的眼光看來， C_{60} 分子的發現啓發了一些科學上的意義，值得人們去思考：

一、科學上的重大發現，常出現在一些意外的事件上，這些意外事件是偶發的或不經意的，套句 *Kuhn*（1962）的說法是所謂的「異例」（*anomaly*）出現時。這些異例要有人能發現及解釋它，發現便成功了。 C_{60} 分子的發現便是一例。

二、另外也讓我們聯想到科學的研究，通過跨領域的合作，可能突破一些目前的瓶頸，而有更豐碩的成果。 C_{60} 分子的發現便是涵蓋了物理學家、天文學家及化學家的通力合作而達成的意外成果。

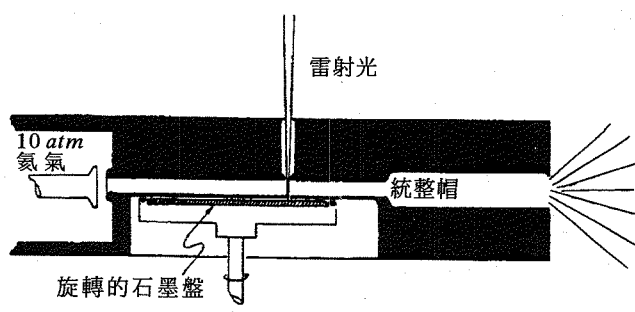
三、 C_{60} 分子的發現，除了對目前的化學、物理、材料上提供一新的研究領域之外，對於天文學，尤其是星際塵埃物質組成，有更進一步的了解，對宇宙的奧秘也提供更清楚的資訊。

C_{60} 分子的發現，至今已有十餘年的歷史了，但在商業上的用途上尚未出現。但它

的前景被看好，原因是像碳簇這類化合物，如 C_{60} 分子，具有特殊的穩定性、球形結構及不飽和鍵的特性，這些特性，考慮用來作為超導體材料及光學材料是合宜的。在用途上，從光纖、化學品、催化劑乃至於醫藥等都是良好的素材（Stevenson, 1996）。

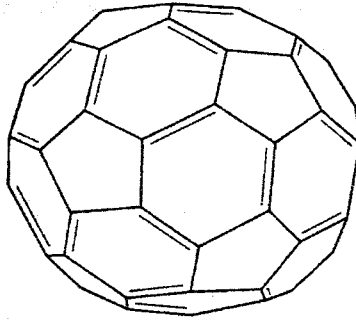
參、 C_{60} 分子的製備

C_{60} 分子的製備首當推至1985年Kroto等人的實驗設計。1985年Kroto等人設計了一個裝置，試圖製造出更微小的碳粒分子，結果卻意外的發了 C_{60} 分子，其儀器構造如下所示：



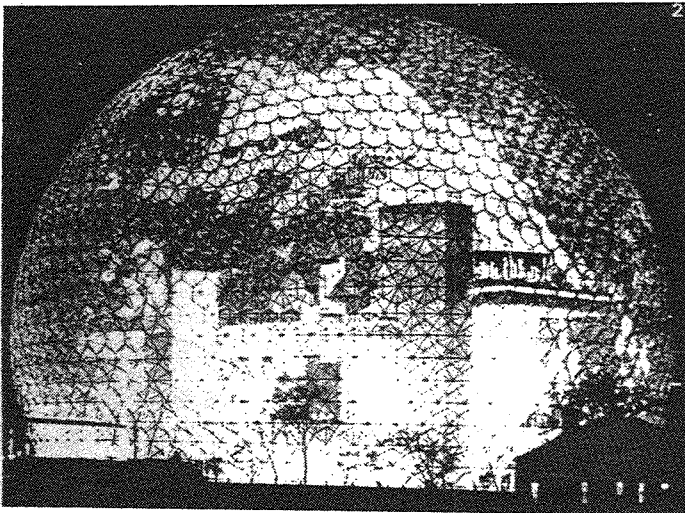
圖二 產生一碳簇分子的實驗裝置圖
(1985, Kroto et al., Nature)

這個裝置，Kroto將雷射光射入旋轉的石墨轉盤而蒸發石墨，使石墨產生氣化，石墨蒸氣與氬氣混合進入「統整帽」冷卻後，引入質譜儀偵測（time-of-flight mass spectrometer）。經由這樣簡單的設計，意外的製出微量的 C_{60} 分子來。他們在實驗中，發現一奇特的現象，即當氬氣的氣體與碳蒸氣在「統整帽」充分混合反應後，質譜上測出的化合物主要為 C_{60} 分子。其荷質比（ m/e ）為720的化合物佔95%以上，荷質比（ m/e ）為840的化合物佔5%。換言之，經由雷射光照射石墨所產生的蒸氣，經由氬氣混合冷卻後，所產生的新物種是可以安定的存在，且其主要產物為含60個碳原子所構成。這一發現對Kroto而言是一個「異例」，他想這個新的物質會是什麼樣的東西呢？當時Kroto, Smalley, Curl等人，就將這新的物種結構推想成：是一種去掉尖端的二十面體（truncated icosahedron），其結構像英式足球（Soccerball），共有60個頂點，32個面；由12個五角形及20個六角形相互連接而成的中空籠狀物。60個碳原子正好箝在20面體的60個頂上，這就是當初所發現的 C_{60} 分子的製造方法。其結構如圖三所示：



圖三 C_{60} 分子的結構

這個分子是非常穩定的，60個碳的環境均相同，碳-碳間形成雙鍵結構，且具有多種的共振結構 (*resonance structure*)。Klein (1986) 等人認為它比苯環還多出12,498個共振結構 (引自Kroto, 1990)。Kroto，將其命名為『*Buckminsterfullerene*』(巴克富樂烯)以紀念建築師『*Buckminster Fuller*』先生，在1967年為美國Montreal所設計的圓頂屋 (*Geodesic Dome*)，其構造見圖四：



圖四 Buckminster Fuller在美國Montreal所設計的圓頂屋 (*Geodesic Dome*)外貌圖 (引自, Kroto, 1990)

1990年，Huffman，Krätschmer等人將光譜級的石墨棒相接在一起，並通以100安培的高電流，石墨棒在接近處附近氣化，接著由於碳灰 (*Carbon soot*) 在100 torr的氮氣環境下，逐漸冷卻下來，在實驗容器內部冷卻沉積下來，又產生大量的 C_{60} 分

子。這是 C_{60} 分子製造方法的改良，經由此法可製造出大量的 C_{60} 分子。自此，以碳簇為反應物，合成新奇化合物的研究，已不再是困難的事，且發展的速度以幾何級數增加中（劉滄宇，何國榮，民83）。

Huffman 等人更發現這些碳灰不但可溶於苯的溶劑中，而且使苯溶液轉變成紅棕色，將這些溶液蒸乾竟然得到 C_{60} 分子的晶體。這些晶體以顯微鏡觀察，可清楚的看到漂亮的結晶。由 X -ray分析、質譜分析及紅外光譜分析等也相繼被研究，經由這些研究數據，再一次的證明 C_{60} 分子的結構，是正如*Kroto*等人當初所提出的樣式。

1992年*Tour*等人發表了以甲苯為溶劑，以矽膠及活性碳混合物當固定相，在短時間內可將 C_{60} 分子與其他分子分離出來，使得 C_{60} 分子的分離及純化更為方便，碳簇籠狀物的化學性質及物理性質乃得以清楚的研究。如今 C_{60} 分子的成品市面上已隨處可購得，製造方法不再是困難，比起當初發現時容易多了。由於 C_{60} 分子製造方法，已不再是困難，因此，在往後的發展更是突飛猛進。

肆、 C_{60} 分子的結構

1990年，*Wilson*等人及*Wragg*等人，將 C_{60} 分子的晶體放置在掃描式穿隧顯微鏡（*STM, image*）底下觀察它的影像。*Wilson*看見 C_{60} 分子的形狀近乎球狀，在金 Au （111）的表面呈現可活動的六角形排列。球狀形的內部空間約為 11.0 \AA ，圖像光亮部分為 C_{70} 。*Wragg*所觀察到的影像顯示這分子在碳簇分子中具有高對稱性（*Mackay, 1990*）。

C_{60} 分子是一個含60個碳原子以 sp^2 鍵結合而成的分子。分子的形狀已如前述，外形為一類似英式足球的籠狀結構，此分子由20個六角環（*hexagon*）及12個五角環（*Pentagon*）組成，共有32個面，60個頂點（郭培龍，鄭建鴻，民83），60個碳原子箱在每一個頂點上，形成一個目前所知最為對稱的分子。球形結構直徑為 7.6 \AA ，球內中空，屬於 I_h 的對稱物（ I_h symmetry species）。這種分子被命名為*Buckball*（巴克球）。就其外型而言，五角環與六角環相接，六角環與六角環相接，其中碳-碳鍵顯示具有雙鍵的特性，雙鍵的特性在六角環相接處較顯著，而在五角環與六角環相接處較不顯著。但事實上，60個原子卻處於相同的環境下，因此，在 ^{13}C -NMR圖譜上，只顯示單一的波峰。根據*Hawkins*等人（引自，王文竹，邱浩席，民83）利用 X -ray繞射，發現 C_{60} 分子有兩種鍵長，分別為 $r(C-C) = 1.388 \text{ \AA}$ ，是在兩個六角環接合處；另一個鍵長 $r(C-C) = 1.432 \text{ \AA}$ ，是在五角環與六角環接合處。這一系列的碳分子，碳

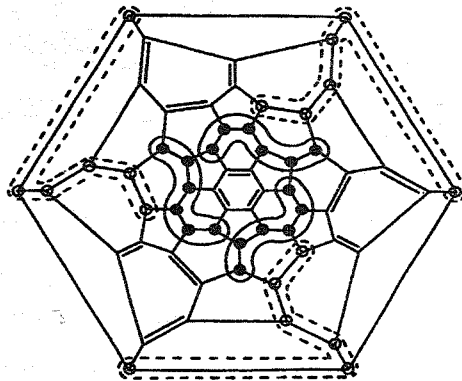
原子的數目都很大，因此，這類的分子也因稱碳簇（*carbon cluster*）分子。 C_{60} 分子只是碳簇分子中的一種而已。 C_{60} 分子也因具有烯類的性質，因此，這類的碳分子又稱為富樂烯（*fullerene*）或稱球烯。

碳數在60及70以下之球烯分子，我們通稱為球烯，若碳數介於70~100之間，稱為大球烯（*high fullerenes*），碳數大於100稱為巨球烯（*giant fullerenes*），（王伯昌，周玉璽，民83）。球烯的分子表示法，通常在碳（*C*）的右下角，寫上碳的數目，來表示這分子是由幾個碳組成。例如，表示由60個碳原子所組成之分子，可寫成 C_{60} ；由70個碳原子所組成的分子可寫成 C_{70} 。球烯的結構相當奇特，雖然為 sp^2 鍵結，但其並非都是球形結構；再者其存在可能分子，除了 C_{60} ， C_{70} 之外尚有： C_{24} ， C_{28} ， C_{32} ， C_{50} ， C_{78} ， C_{84} ， C_{540} ， C_{1500} ， C_{6000} ...等偶數碳的分子（*Kroto*，1990）。

1990年*Huffman*和*Krätshmer*以石墨棒在氮氣下，以電極加熱法，製出5%~10%的球烯（如 C_{76} ， C_{84} ，.....等）。由此看來， C_{60} 分子僅是此類碳簇分子中被發現的一種大型分子而已，除此之外尚還有許多種的碳簇分子，有待科學家去發掘（*Kroto*，1990）。

伍、 C_{60} 的化學性質

C_{60} 的化學性質，可從其奇特的幾何外形及多重雙鍵的性質顯示出來。其化學性質，基本上是與缺電子的烯類相似，所以，基本上是一個很好的電子接受者（*electron acceptor*）。它可與多電子的金屬反應，以形成化合物。在有機反應上可行加成反應，例如，氫化，鹵，烷基化，.....等加成反應。*Darwish*（1996）首先將 $C_{60}H_{18}$ 及 $C_{60}H_{36}$ 的兩種化合物之結構定出。見圖五：



圖五 $C_{60}H_{18}$ 及 $C_{60}H_{36}$ 結構圖

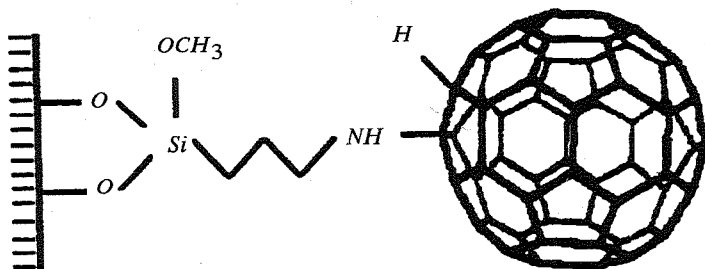
$C_{60}H_{18}$ 分子結構類似皇冠形 (*crown-shaped*)，氫原子加在第 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 16, 17, 18, 22, 23, 24, 36, 37, 38, 39, 40 個碳上。為一個 C_{3v} 對稱的分子。圖五中黑色實心的圓，代表 $C_{60}H_{18}$ 分子氫原子接在碳上的位置。 C_{60} 為一個球形結構，直徑為 7.6 \AA ，球內中空，這個結構很容易讓人聯想到將原子或分子箝入球內。*Smalley* 曾報導將鐳原子 (*La*) 箝入 C_{60} 內的例子。*Smalley* 將這個化合物的分子式寫成『 $La @ C_{60}$ 』，目前除了箝入鐳原子外，尚可箝入鉀，銣，鉍等各種大小的原子。

1996年 *Schwartz* 等人 (引自, *Saalförank*, 1996) 也將惰性氣體，如氦，氖原子箝入 C_{60} 內，形成『 $He @ C_{60}$ 』及『 $Ne @ C_{60}$ 』等分子。其做法是將「 3He 」，在 2500 atm 下， $600^\circ C$ 時，與 C_{60} 反應 5 小時而製成的。

1996年 *Cristofolini*，利用 C_{60} 及銫 (*Cs*) 在 $800^\circ C$ 時反應 4 星期，得到 CsC_{60} 化合物，這類化合物稱為「*fulleride*」。

陸、 C_{60} 的用途

國內在 C_{60} 的應用及開發上也有一些研究，並不遜於國外。例如，張勝雄，溫正華，鄧朝岡等人，於 1996 年，利用 C_{60} 碳簇狀化合物作官能基，與 3-胺基丙基，在甲苯反應下，合成了一 C_{60} 碳簇固定相 (C_{60} -*fullerene phase*)，其結構圖六所示：



圖六 C_{60} -fullerene phase 固定相之結構圖

這種化合物可用於 *HPLC* 管柱填充材料上，利用這種材料來填充 *HPLC* 管柱，在分離鹵化芳香物有良好的效果。例如，利用 C_{60} 碳簇固定相作正相層析，可將多氯芳香化合物或多氯聯苯系列的毒性化合物，作選擇性的分離。這種良好的分離效果，乃是藉由溶質與 C_{60} -*fullerene phase* 固定相間之 $\pi - \pi$ 電子交互作用或電荷的轉移作用 (*charge transfer*) 而產生。在 *HPLC* 管柱層析材料上， C_{60} -*fullerene phase* 的功效很大，未來

發展不可限量。

張勝雄，鄧朝岡繼而又發現 C_{60} -fullerene phase 作為管柱固定相，對於不同構型或取代基之炸藥及其衍生物之分離效果，具有良好的選擇性。

因該固定相官能基具有多 π 電子官能基特性，可與一些具有接受電子性質之火藥形成「donor-acceptor」電荷轉移作用，並且在對各種不同構型之火炸藥及其衍生物分離時，可藉由樣品與固定相之「襪-球」(sock-ball)結合作用，使 C_{60} -fullerene phase 固定相之 C_{60} 官能基產生強烈的「donor-acceptor」電荷轉移吸附作用。因此， C_{60} 衍生物在火炸藥之分析上有較強的鑑別力。另外 C_{60} 由於它有很多 π 電子，對於光、電的感測敏銳，國內施正雄教授，也利用它與陽離子接合，形成之化合物，對光電材之感測作用作測試，效果良好，但其研究成果尚未發表。在醫學上的用途， C_{60} 的衍生物也有生化活性。Baum (1993) 曾發表在具有掌性中心且可溶於水的 C_{60} 衍生物，有抑制愛滋病 (AIDS) 或其它病毒的合成蛋白酵素及反轉錄酵素上，有選擇性切斷特定序列 DNA 的特性，及藥物傳遞媒介等功能。

C_{60} 的另一用途乃是作為超導體的可能性。一般而言， C_{60} 是絕緣體，但摻雜鹼金屬之後，則 C_{60} 變為超導體。例如，摻雜鉀的 C_{60} 膜，「 K_3C_{60} 」，有超導性，其相變溫度為 18 K。摻雜銫的 C_{60} ，「 $Cs@C_{60}$ 」，的相變溫度為 28 K (Huffman, 1991)。

1990 年科學家發現， C_{60} 可在 16 K 以下表現有機「鐵磁」的現象。將來可能有很大的應用價值。

C_{60} 中間的空穴可用來裝載各種原子與離子，以後化學家更期望它來裝載分子、放射性化合物或藥物分子。 C_{60} 的衍生物可有各種形狀，例如 C_{70} 與 C_{84} 是螺旋形， C_{240} 呈管狀。管狀的「fullerene」可能有特別的性質，也許可發展成超強纖維 (引自，Kroto, 1996)。這種的碳微管 (carbon nanotubes) 可能比任何的材質更強韌 (Thomas, 1992)。由於 C_{60} 的鍵結行為及幾何特徵，它可以作為良好的催化劑，在材料上，可當作光電導體、電池材料、非線性光學材料、高分子添加劑等，包括纖維，填充劑，碳簇高分子及抗氧化劑等應用。 C_{60} 衍生物仍具有未被預知的其他用途，未來的發展未可限量。

柒、結語

C_{60} 自 1985 發現至今已將近 11 年了。這十多年來，從最初的結構鑑定到發現新的碳簇化合物，以至於近幾年， C_{60} 的許多衍生物一一被合成出來， C_{60} 的發展可以說蓬

勃發展。到目前為止， C_{60} 的研究，則緊接著 C_{60} 而相繼發現（*Balch, et al., 1996*；*Kroto, 1990*；*Darwish et al., 1996*；*Suzuki, et al., 1995*）如 C_{70} ， C_{82} ， C_{84} 等，隨著分離與合成技術的進步與改良，相信這類化合物之應用指日可待。

C_{60} 的發現與發展，卻是始料所未及的。當初的研究，科學家只想製造更小的碳粒，以研究星際塵埃光譜，卻意外的發現了 C_{60} 的存在。而 C_{60} 的結構，若沒有光譜學家的理論計算及人類的猜想通力合作，恐難以迅速決定。因此，在整個 C_{60} 的發展最初應歸功於下列五人：*Harold Kroto*，*Robert Curl*，*Richard Smalley*，*W. Krätschmer*及*D. R. Huffman*。在碳的發展史上，由於第三種形式碳的出現，碳化學將要邁入一個新的紀元。

本文蒙 陳素貞教授提供部份參考資料以及蒙彭育才教授指導得以順利完成，特此一併致謝。

參考資料

- 王文竹，邱浩席，民83。碳簇的電化學研究，*化學*，52，61-84。
- 王伯昌，周玉璽，民83。球烯與異球烯與巨球烯的結構，理論計算，*化學*，52，55-60。
- 張勝雄，溫正華，鄧朝岡，民83。固定相43⁽¹⁾： C_{60} 的碳簇固定相之製備及其對鹵化芳香物之層析分離應用，*化學*，54，11-21。
- 張勝雄，鄧朝岡，民85。固定相46⁽¹⁾：火炸藥在 C_{60} 的碳簇固定相上之「襪-球」層析特性研究，*化學*，54，28-39。
- 許龍麟，民83。碳簇之有機化學反應，*化學*，52，43-54。
- 許培龍，鄭建鴻，民83。碳簇的無機化學，*化學*，52，37-42。
- 劉滄宇，何國榮，民83。碳簇之質譜分析，*化學*，52，85-94。
- 劉金培，牟中原，民83。新形式的固體 C_{60} ，*科學月刊*，23，286-293。
- A. L. Balch, D. A. Costa & M. M. Olmstead (1996). Chem. Commun., 2449-2450.*
- R. H. Baum (1993). C & EN., 22, 8.*
- D. A. Bochvar & E. G. Gal'pern (1973). Dokl. Akad. Nauk SSSR, 209, 610-612; Proc. Acad. Sci. USSR (1973), 209, 239-241.*
- L. Cristofolini, C. M. Brown, A. J. Dianoux, M. Kosaka, K. Prassides, K. Tanigaki & K. Vavakis (1996). Chem. Commun., 2465-2466.*

- R. F. Curl & R. E. Smalley (1991). *Scientific American*, 265, 32-41.
- R. A. Davidson (1981). *Theoet. Chim. Acta.*, 58, 193-195.
- A. D. Darwish, A. G. Avent, R. Taylor & D. R. M. Walton (1996). *J. Chem. Soc., Perkin Trans.*, 2, 2051-2054.
- J. M. Hawkins & A. Meyer (1993). *Science*, 260, 1918.
- R. Hoffmann (1993). *Scientific American*, 7, 268, 23-30.
- D. R. Huffman (1991), *Physics Today*, 23-29.
- D. E. H. Jones (1966). *New Sci.*, 32, 245.
- D. J. Klein, et al. (1986). *J. Am. Chem. Sci.*, 108, 1301.
- H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brein, R. F. Curl & R. E. Smalley (1985). *Nature*, 318, 162-163.
- W. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, & D. R. Huffman (1990). *Nature*, 347, 354-357.
- H. Kroto (1990), *Chem. Bri.*, 26, 40-45.
- H. Kroto (1996). *Chem. Bri.*, 32, 32-36.
- T. S. Kuhn (1962). *The structure of Scientific revolution. The university of Chicago Press*, 60637.
- A. L. Mackay (1990). *Nature*, 347, 336-337.
- E. Osawa & Z. Yoshida (1971). *Aromaticity, Kagakudogjin: Kyoto*, 174-178.
- R. W. Saalf Orank (1996). *Nature*, 383, 124.
- H. Schwartz & W. Thomas (1992). *Angew. Chem.*, 31, 605-606.
- R. Stevenson (1996). *Chem. Bri.*, 32, 22-23.
- T. Suzuki, Y. Maruyama, T. Kato, K. Kikuchi, Y. Nakao, Y. Achiba, K. Kobayashi & S. Nagase (1995), *Angew. Chem.*, 34, 1094-1096.
- R. Taylor, J. P. Hare, A. K. Abul-Sada & H. W. Kroto (1990). *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, 1423-1425.
- J. M. Tour, W. A. Scirens & P. V. Bedworth (1992), *J. Am. Chem. Soc.*, 114, 7919.
- R. J. Wilson, G. Meijer, D. S. Bethune, R. D. Johnson, D. D. Chambliss, M. S. de Vries, H. E. Hunziker & H. R. Wendt (1990), *Nature*, 348, 621-622.
- J.L. Wragg, J. E. Chamberlain, H. W. White, W. Krätschmer & D. R. Huffman (1990). *Nature*, 348, 623-624.