

# 2

## 物質的性質與化學鍵

位於比利時布魯塞爾的原子球塔，問世於 1958 年的世界博覽會。這座高 102 米、由 9 個直徑 18 米的空心不鏽鋼球體，組成鐵的金屬晶體結構形狀，成為布魯塞爾的象徵。連接球體的管道內有電動扶梯與電梯，可通往球體內的展覽廳與公共場所。無論金屬晶體的晶體結構為何，其形成原子間的作用力均屬於金屬鍵。



- 2-1 化學鍵的種類 53
  - 2-1.1 離子鍵與離子化合物 53
  - 2-1.2 金屬鍵與金屬晶體 57
  - 2-1.3 共價鍵與分子 60
  - 2-1.4 共價網狀固體 62
- 2-2 單鍵與多鍵 64
- 2-3 混成軌域 66
  - 2-3.1  $sp^3$  混成軌域 66
  - 2-3.2  $sp^2$  混成軌域 68
  - 2-3.3  $sp$  混成軌域 70
- 2-4 價殼層電子對互斥理論與分子形狀 73
- 2-5 鍵極性與分子極性 76
- 2-6 分子間的作用力 80
  - 2-6.1 偶極—偶極力 80
  - 2-6.2 偶極—誘發偶極力 81
  - 2-6.3 分散力 82
  - 2-6.4 氫 鍵 84

### 開始前想一想

化學鍵的理論是化學家發展出來，用以解釋各種物質的結合方式，在化學（全）中曾經做過簡述，請你根據過去所學過的內容，思考並嘗試回答以下的問題：

Q1：目前有哪些化學鍵理論？請簡述他們之間的差異。

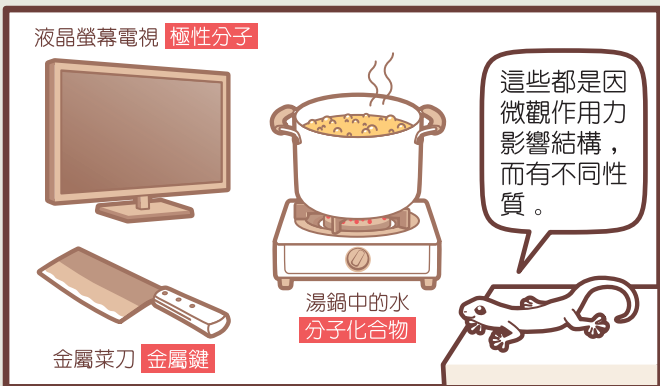
Q2：請你畫出二氯甲烷的路易斯結構；已知二氯甲烷僅存在一種結構，並無異構物，想想看二氯甲烷應該呈現什麼形狀？

Q3：巨觀世界中所觀察到的結合現象，常常可以利用這些微觀的作用力加以解釋，例如：利用主要成分為澱粉的漿糊將郵票貼在信封上，是否就與之前學過的化學鍵理論有關，還是另有其他作用力？



# 畫中有化

湯鍋中沸水滾滾、砧板上切菜聲咚咚、電視節目一幕閃過一幕，萬物因作用力形成生活所見的不同樣貌。此時，等待晚飯的小守傾聽壁虎娓娓道來牠攀爬的小秘密……





因為物質的結構與物質的性質息息相關，所以對物質結構的認識一直是化學家積極探究的課題，其中牽涉最廣的即是化學鍵原理的研究，部分的內容已於化學(全)中介紹。本章將更深入探討化學鍵的原理與化學鍵如何影響分子的結構與極性，並簡介存在於分子間的作用力，以及他們如何影響物質的性質。

## 2-1 化學鍵的種類

在化學(全)的課程中曾介紹，原子與原子相結合可形成離子化合物、金屬、分子物質及共價網狀固體四種不同的物質，而原子間的結合能力即為化學鍵；原子結合形成鍵結，會放出能量，相反地，要破壞化學鍵使原子分開則必須吸收能量。

### 2-1.1 離子鍵與離子化合物

陰、陽離子間藉由離子鍵形成離子化合物。在常溫下，離子化合物大多呈現固態的結晶狀，故又稱為離子晶體(ionic crystal)。以離子晶體氯化鈉為例，離子間的庫侖靜電力可利用式 2-1 估算其電位能值。

$$U = k \left( \frac{Q_1 Q_2}{r} \right) \quad \text{式 2-1}$$

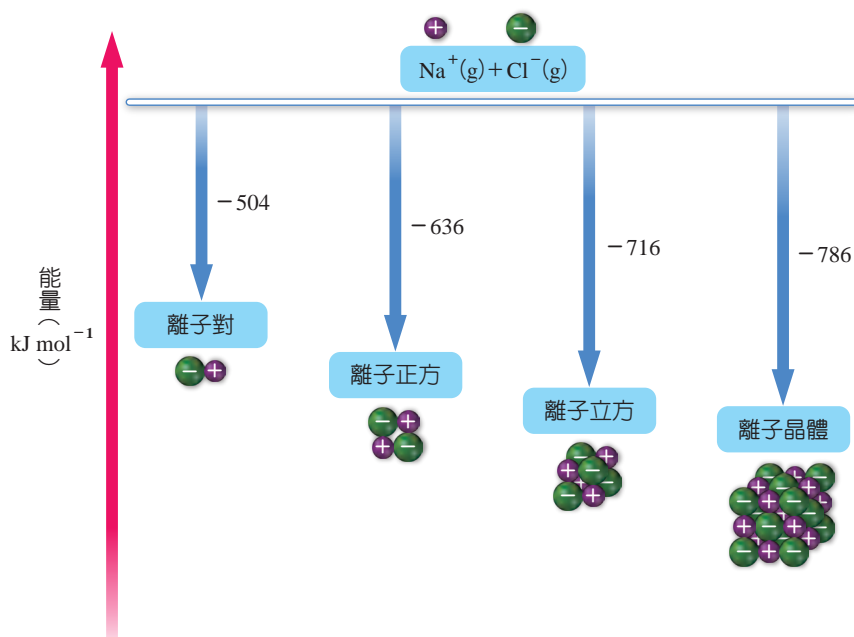
其中  $Q_1$ 、 $Q_2$  為離子帶電量，以庫侖(C)為單位。例如： $\text{Na}^+$  為  $+1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，而  $\text{Cl}^-$  則為  $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ； $k$  為庫侖常數，其值約為  $9 \times 10^9 \text{ J m C}^{-2}$ ； $U$  為電位能，單位為 J。

靜電力具有同性相斥、異性相吸的性質。若將兩離子相距無窮遠 ( $r = \infty$ ) 之位能值定為零，當  $Q_1$ 、 $Q_2$  為異性電荷時，由上頁式 2-1 可知其位能為負值；而同性電荷間之斥力位能則為正值。故氯化鈉藉由離子鍵形成時，會使異性電荷離子盡量靠近，而同性電荷離子則盡量遠離，即靜電引力所造成的位能下降量會大於斥力所造成的位能上升量，堆積愈密集，位能下降量愈多。由圖 2-1 可看出氯化鈉形成離子對、離子正方、離子立方及離子晶體時，每莫耳的位能（負值）遞增，故氯化鈉最終皆以最穩定的離子晶體（下頁圖 2-2）形式存在。

氯化鈉晶體形成可以式 2-2 之熱化學反應式表示。



其中  $-786 \text{ kJ mol}^{-1}$  稱為氯化鈉之晶格能（lattice energy）。



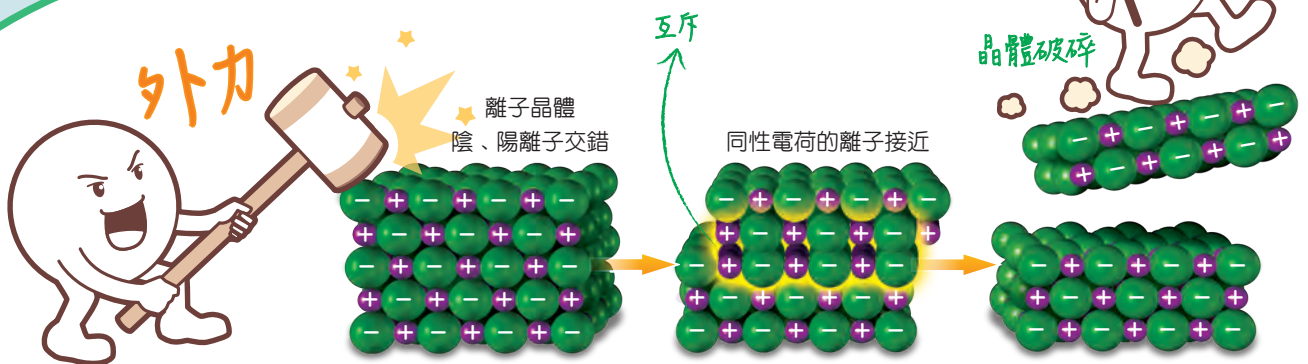
▲ 圖 2-1

氯化鈉離子對、離子正方、離子立方及離子晶體形成時，其能量變化關係圖。



▲圖 2-2 氯化鈉晶體結構圖 (●Cl<sup>-</sup>, ●Na<sup>+</sup>)

由於離子鍵是靠陰、陽離子間之靜電作用力而形成，此作用力可在任何方向上發生鍵結，意即離子鍵遍佈在整個離子晶體中，因此，離子鍵不具有方向性。由圖 2-3 可看出，當離子晶體受到外力作用時，陰、陽離子錯位，造成離子間斥力大於引力，晶體碎裂，故離子晶體無延性與展性。



▲圖 2-3 當離子晶體受到外力作用時，造成晶體破碎。

離子鍵強弱會影響離子晶體的熔點高低。根據式 2-1，當陰、陽離子之帶電量乘積 ( $Q_1Q_2$ ) 愈大時，離子鍵愈強，離子晶體晶格愈不容易被破壞，其熔點較高。例如：氧化鎂之熔點高達  $2800\text{ }^\circ\text{C}$ ，遠較氯化鈉之  $802\text{ }^\circ\text{C}$  為高，主要是因為氧化鎂陰、陽離子分別帶  $-2$  與  $+2$  之單位電量，而氯化鈉僅帶  $-1$  與  $+1$  單位電量之故。若  $Q_1$ 、 $Q_2$  乘積相等時，則可由  $r$  之值（陰、陽離子核間距離，即陰離子與陽離子半徑之和）比較出離子鍵的強弱， $r$  值愈大者，離子鍵愈弱，熔點愈低。例如：氯化鈉之熔點高於溴化鉀 ( $734\text{ }^\circ\text{C}$ )，即是因氯離子與鈉離子半徑和小於溴離子與鉀離子半徑和之故。

範例  
2-1

已知離子晶體晶格能的大小與離子鍵的強弱有關，離子鍵愈強者，晶格能愈大。離子化合物氯化鈉之晶格能為  $-786\text{ kJ mol}^{-1}$ ，則  $\text{Li}^+(\text{g}) + \text{F}^-(\text{g}) \rightarrow \text{LiF}(\text{s})$  之  $\Delta H$  值最可能為下列何者？

- (A)  $-1047\text{ kJ mol}^{-1}$  (B)  $1047\text{ kJ mol}^{-1}$  (C)  $-617\text{ kJ mol}^{-1}$   
(D)  $617\text{ kJ mol}^{-1}$  (E)  $-786\text{ kJ mol}^{-1}$

..... 解答 .....

氟化鋰之陰、陽離子半徑和小於氯化鈉，故具有較強的離子鍵，即晶格能較大，又  $\text{Li}^+(\text{g}) + \text{F}^-(\text{g}) \rightarrow \text{LiF}(\text{s})$  形成離子鍵，應為放熱，故僅(A)有可能為合理數值。故選(A)

練習  
2-1

已知離子鍵愈強，則離子晶體具有愈高的熔點。由高而低排列  $\text{NaCl}$ 、 $\text{KBr}$ 、 $\text{KI}$ 、 $\text{LiF}$  等離子化合物的熔點順序。

## 2-1.2 金屬鍵與金屬晶體

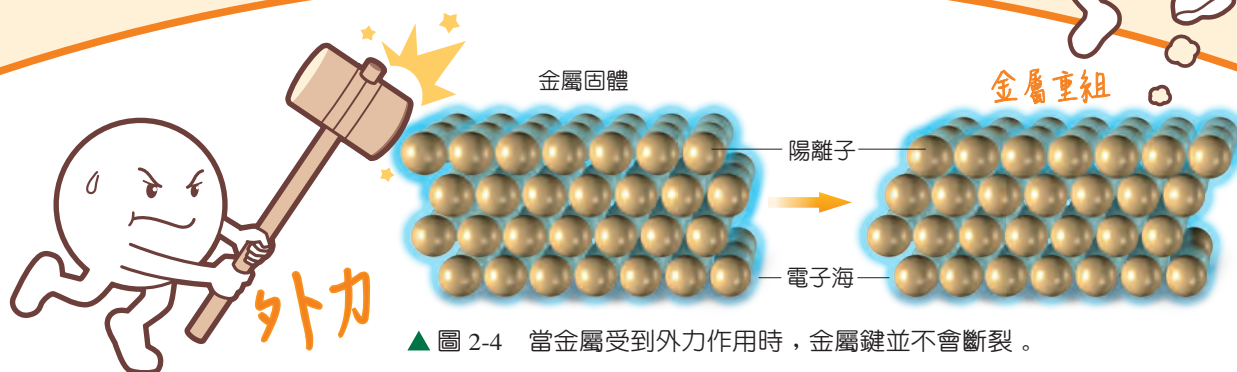
金屬是由金屬原子藉由金屬鍵結合而形成。金屬原子具有低游離能的特性，因此，價電子被游離後可以在整個金屬晶格中自由移動形成「電子海」，金屬鍵即為此大規模金屬陽離子與電子海中的自由電子間的作用力，遍佈在整個金屬晶體中，所以**金屬鍵同樣不具有方向性**。

當金屬受到外力作用時，可使金屬陽離子移位，但是晶格間隙中充斥著自由電子，可立即移動填補空缺（圖 2-4），故**金屬具有延性與展性**。

金屬鍵的強弱，亦可由金屬晶體的熔點高低看出，金屬原子間的結合，主要來自於金屬陽離子與自由電子吸引所造成的位能下降，故當**金屬的價電子數愈多**，陽離子與自由電子間產生的引力就愈強，**金屬熔點愈高**。例如：第三週期的鈉、鎂、鋁之價電子數分別為 1、2、3 個，故其熔點高低順序為鈉（ $97.8^{\circ}\text{C}$ ）< 鎂（ $650^{\circ}\text{C}$ ）< 鋁（ $660.3^{\circ}\text{C}$ ）。1A 族之金屬，因其價電子數皆相同，故半徑愈大者，**熔點愈低<sup>註1</sup>**，熔點高低順序即為：鋰 > 鈉 > 鉀 > 銣 > 鉍。

### 註1

金屬鍵強弱除受價電子數與半徑影響之外，尚與金屬晶體的堆積情況有關，例如：2A 族金屬之熔點數據如下：鈹（ $1287^{\circ}\text{C}$ ）、鎂（ $650^{\circ}\text{C}$ ）、鈣（ $842^{\circ}\text{C}$ ）、鋇（ $777^{\circ}\text{C}$ ）、鋇（ $727^{\circ}\text{C}$ ）、鐳（ $700^{\circ}\text{C}$ ）。看似缺乏規律性，即是因為晶體堆積方式不同所造成之差異。



▲圖 2-4 當金屬受到外力作用時，金屬鍵並不會斷裂。



範例  
2-2

有甲～戊五種金屬為 Li、Na、K、Mg、Al 中任一種，其熔點、第一游離能 ( $IE_1$ ) 及原子半徑之部分數值如下表。其中丙之熔點為五者中最高。回答下列問題：

	甲	乙	丙	丁	戊
熔點 ( $^{\circ}\text{C}$ )	180		660		64
$IE_1$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )		495	581	735	419
半徑 (pm)	152		143	160	227

- 甲～戊分別為何種金屬？
- 乙之熔點與半徑分別最可能為下列何值？  
 (A)  $650^{\circ}\text{C}$ , 170 pm (B)  $98^{\circ}\text{C}$ , 152 pm (C)  $650^{\circ}\text{C}$ , 166 pm  
 (D)  $98^{\circ}\text{C}$ , 186 pm (E)  $211^{\circ}\text{C}$ , 163 pm

..... 解答 .....

- 五者中以 Al 之熔點最高，故丙為 Al；又丁之  $IE_1$  與半徑皆大於丙 (Al)，其餘四者中僅 Mg 符合此兩性質皆大於 Al，故丁為 Mg。剩下甲、乙、戊中，戊之熔點低於甲，半徑大於甲，而  $IE_1$  小於乙，故可知戊必為 K；而甲之半徑小於丁 (Mg)，故甲應為 Li，乙即為 Na。  
 $\therefore$  甲為 Li；乙為 Na；丙為 Al；丁為 Mg；戊為 K
- 乙為 Na，其熔點應介於 Li ( $180^{\circ}\text{C}$ )、K ( $64^{\circ}\text{C}$ ) 之間；其半徑應介於 Li (152 pm)、K (227 pm) 之間。故選(D)

練習  
2-2

下列各選項皆為中性原子之電子組態，哪些應具有金屬鍵？

- (A)  $1s^1$  (B)  $1s^2$  (C)  $1s^2 2s^2 2p^2$  (D)  $[\text{Ne}]3s^2$  (E)  $[\text{Ar}]3d^2 4s^2$



# 輕鬆嚐能帶理論

能量  $\gg$  高

金屬鍵的形成可用能帶模型 (band model) 來加以描述。以金屬鋰為例，單獨一個鋰原子，其價電子位於一個固定能階的  $2s$  價軌域中，若有兩個鋰原子形成  $\text{Li}_2$  分子，則兩個  $2s$  價軌域彼此結合形成兩個能量不同的分子軌域，一個較原本的  $2s$  軌域能階低，另一個則較高；若有  $n$  個鋰原子彼此結合，則  $n$  個  $2s$  價軌域彼此結合的結果，會造成  $n$  個能量幾乎連續的能帶，當  $n$  很大時，則可視為連續的能帶，其中能量較低的左半部能帶共有  $\frac{n}{2}$  個軌域，此  $\frac{n}{2}$  個軌域可被鋰的  $n$  個價電子所填滿，稱為價帶 (valence band)；能帶的右半部  $\frac{n}{2}$  個軌域能量較高，未填入電子，稱為傳導帶 (conduction band, 圖 2-5)。因為金屬的價帶與傳導帶緊緊相連在一起，因此價帶中的電子可十分輕易躍入傳導帶中，故金屬易導電。矽、鍺及砷等半導體，價帶和傳導帶間的能量差較大，故導電性較差，可藉由加熱使電子躍入傳導帶中，所以半導體導電性會隨溫度增加而變大。鑽石與硫等絕緣體，價帶與傳導帶間的能量差最大，故導電性極差。

參考資料：[https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_band\\_structure](https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_band_structure)



軌域數量

2

4

16

$6.02 \times 10^{23}$

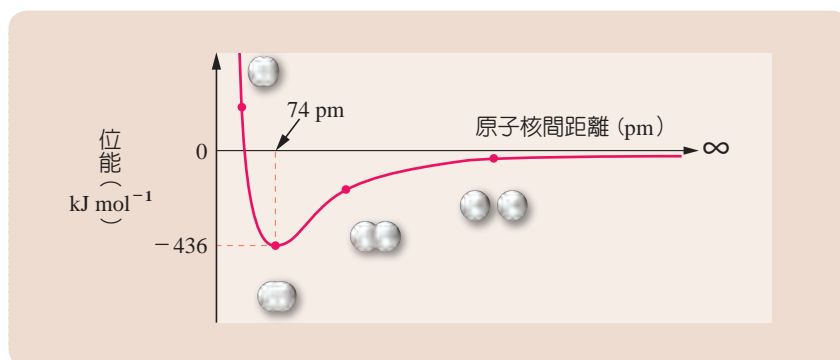


► 圖 2-5 能帶理論示意圖

## 2-1.3 共價鍵與分子

化學(全)中曾介紹，共價鍵是非金屬原子間藉由共用價電子所形成的鍵結。但共價鍵理論除價電子共用外，還有價軌域重疊概念。以氫分子為例，當兩個 H 原子靠近結合在一起即成為  $H_2$  分子。H 原子在基態時，其電子組態為  $1s^1$ ，當兩個 H 原子相距無窮遠時，彼此之間不存在作用力，我們定義此時兩 H 原子間的位能為零，見圖 2-6。

► 圖 2-6 氫分子形成過程的位能與原子核間距離關係圖 (● 氫)



當兩原子互相靠近，兩個  $1s$  價軌域開始重疊，距離愈近其軌域重疊部分愈大，兩個 H 原子核對於軌域中電子的吸引力也愈大，系統的位能則由於吸引力增加而降低。當兩 H 原子繼續靠近，最終可達到一個具有最低位能的狀態，此時原本單獨的兩個 H 原子已結合成了  $H_2$  分子，系統的位能值經測量為  $-436 \text{ kJ mol}^{-1}$ ，亦即已較兩個 H 原子相距無窮遠時能量低了  $436 \text{ kJ mol}^{-1}$ ，此數值即為氫分子之鍵能 (bond energy)；這時兩 H 原子核相距  $74 \text{ pm}$ ，即為  $H_2$  分子的 H-H 鍵長 (bond length)。倘若再迫使 H 原子繼續互相接近，雖然可使價軌域重疊的部分更大，但也因為兩原子核的距離太近，導致系統內的斥力大增，反而會使位能大幅增加而不利於氫分子存在。下頁表 2-1 列出一些常見的共價鍵鍵能與鍵長數據。



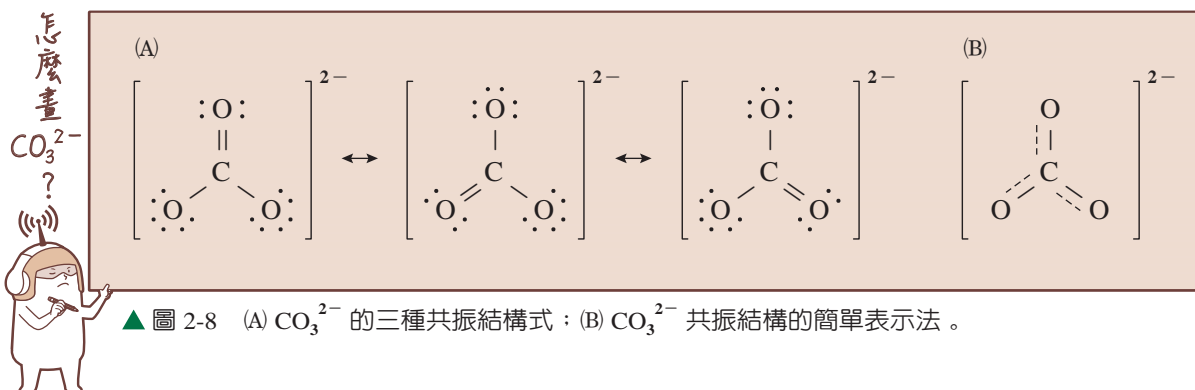
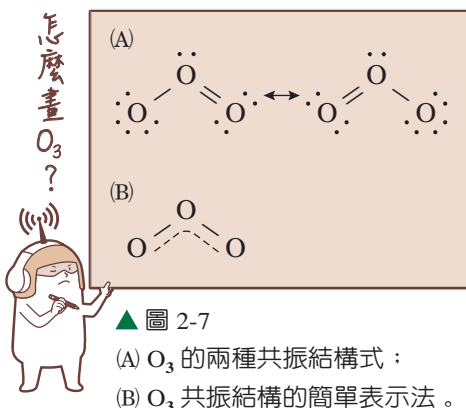
▼表 2-1 一些常見的單鍵之鍵長與鍵能

	H-H	H-C	H-N	H-O	H-F	C-C	C-N	C-O	C-F	C-Cl	C-Br	C-I
鍵長 (pm)	74	114	107	103	92	154	147	143	141	176	191	210
鍵能 (kJ mol <sup>-1</sup> )	436	411	386	459	570	346	305	358	485	327	285	213
	N-N	N-O	N-F	N-Cl	O-O	O-F	O-Cl	F-F	Cl-Cl	Br-Br	I-I	
鍵長 (pm)	140	136	134	169	132	130	165	128	198	228	266	
鍵能 (kJ mol <sup>-1</sup> )	167	201	283	200	142	190	218	155	240	190	149	

在化學(全)中曾學過路易斯結構的畫法，若以路易斯結構來描繪 O<sub>3</sub> 分子，可發現 O<sub>3</sub> 有雙鍵，但其雙鍵似乎在中心 O 原子與周圍任一 O 原子間均可 (圖 2-7)。

諸如以上 O<sub>3</sub> 的情況，一個分子或離子擁有兩個或兩個以上合理的路易斯結構，則其鍵結為兩個結構式之共振 (resonance)。實際研究 O<sub>3</sub> 的分子發現，中心 O 原子與左、右兩個 O 原子間的鍵長其實是相等的，介於單鍵與雙鍵的長度之間，故將其 O-O 間鍵數視為  $1\frac{1}{2}$  鍵。同理，CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 離子亦具有共振結構 (圖 2-8)，其 C 與任一 O 原子

間鍵數則為  $1\frac{1}{3}$  鍵。



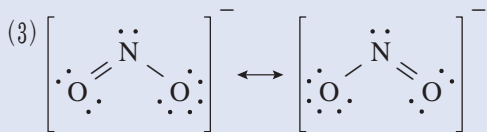
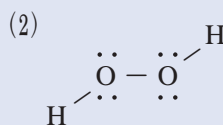
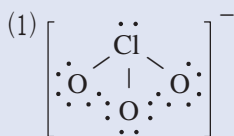
共價鍵具有鍵長、鍵能及鍵角 (bond angle) 的概念，這種現象稱為方向性，也因為共價鍵具有方向性，所以分子物質可描述其形狀。另外，分子間不具有化學鍵，只有很微弱的分子間作用力，所以分子物質的熔點、沸點較低，固態時也沒有延性與展性。關於分子的形狀和分子間作用力等內容，會在後面的小節中介紹。

### 範例 2-3

畫出下列分子或離子的路易斯結構，並指出何者具有共振結構。

- (1)  $\text{ClO}_3^-$  (2)  $\text{H}_2\text{O}_2$  (3)  $\text{NO}_2^-$  (4)  $\text{N}_2\text{F}_2$

解答



(有共振結構)



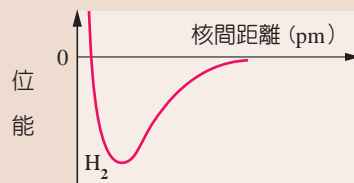
### 練習 2-3-1

判斷下列分子或離子，何者具有共振結構？

- (A)  $\text{ClO}_2^-$  (B)  $\text{H}_2\text{S}$  (C)  $\text{NO}_3^-$  (D)  $\text{NH}_4^+$  (E)  $\text{CO}$

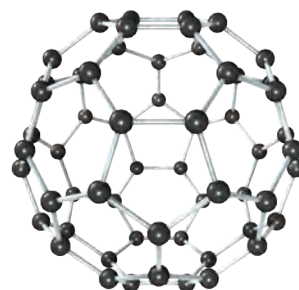
### 練習 2-3-2

已知  $\text{H}_2$  分子形成時，其核間距離與位能之關係如右圖所示。依共價鍵鍵長與鍵能的概念，在此圖中描繪  $\text{I}_2$  與  $\text{HI}$  分子的曲線。



## 2-1.4 共價網狀固體

鑽石與石墨是碳的兩種同素異形體 (allotrope)，它們都是以共價鍵將碳原子串聯成巨大的網狀結構。科學家曾一度認為碳元素無法形成如  $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{S}_8$  (斜方硫、單斜硫) 等單獨的分子，直到足球形的  $\text{C}_{60}$  被發現，碳元素仍可以小分子形式存在的事實才獲得印證 (圖 2-9)。



▲ 圖 2-9  $\text{C}_{60}$  的結構圖

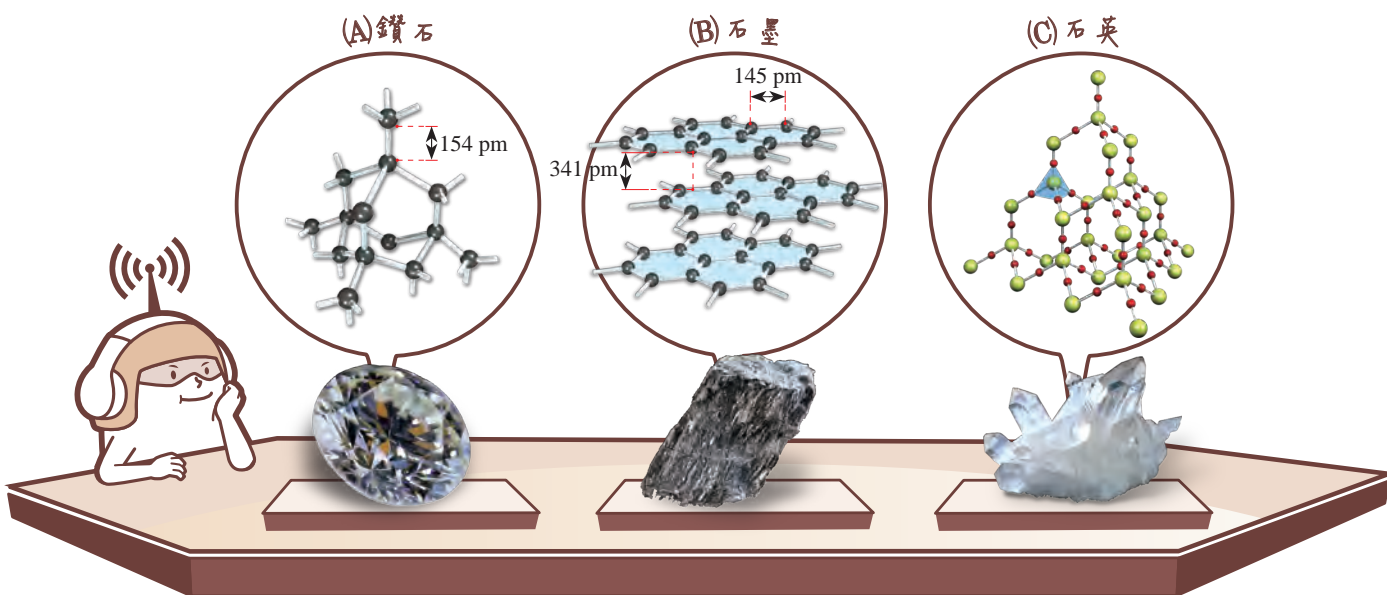


鑽石的結構如圖 2-10(A)，每個碳原子皆與周圍四個碳原子藉由共價鍵結合成四面體結構，也就是說鑽石是三度空間共價網狀固體，此結構使鑽石結構堅韌，硬度為所有物質中最大的。

石墨的結構如圖 2-10(B)，碳原子與周圍三個碳原子鍵結，連續連接成蜂巢狀具有六邊形格子的平面結構，所以石墨與鑽石一樣皆為共價網狀固體。但是石墨的平面結構具有共振，其碳-碳鍵數為  $1\frac{1}{3}$  鍵，因為共振的電子並非固定於某特定的碳原子之間，所以石墨成了非金屬元素中一種能導電的物質。由晶體繞射資料顯示，石墨的兩層平面間的距離高達 341 pm，僅有微弱的作用力，所以石墨不若鑽石堅硬，其硬度僅 1 ~ 2 之間；當石墨受外力作用時會造成石墨層間的滑動，因此石墨可作為潤滑劑使用。

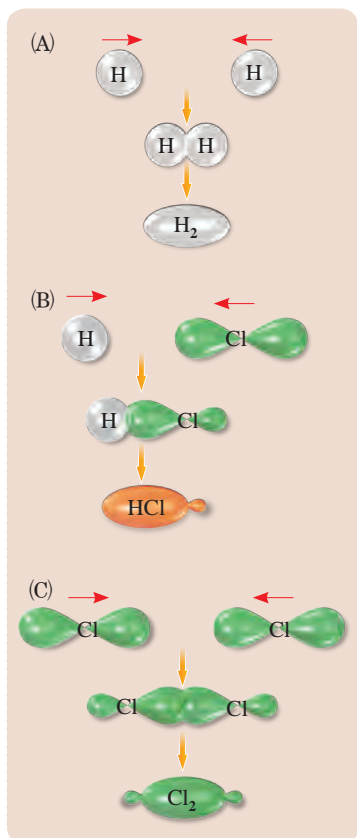
共價網狀固體熔化時必定需要破壞其網狀結構，故此類物質具有極高的熔點、沸點，鑽石與石墨之熔點皆高於 3500 °C。

除碳之外，同屬 4A 族之矽亦為與鑽石結構相似、呈三度空間立體網狀排列的共價網狀固體；矽之化合物——石英 (SiO<sub>2</sub>，圖 2-10(C)) 也是共價網狀固體。此外，氮化硼 (BN)、碳化矽 (SiC) 亦為共價網狀固體。

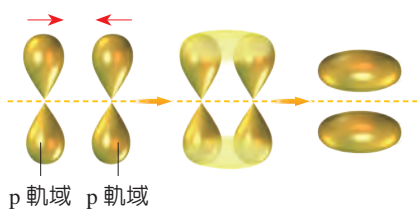


▲圖 2-10 結構示意圖：(A)鑽石；(B)石墨；(C)石英。(●碳；●氧；●矽)

## 2-2 單鍵與多鍵



▲圖 2-11  
(A)  $\text{H}_2$  : (B)  $\text{HCl}$  : (C)  $\text{Cl}_2$  的  $\sigma$  鍵形成示意圖。



▲圖 2-12  $\pi$  鍵形成示意圖

化學(全)曾學過兩原子共用一對價電子可形成單鍵，共用兩對為雙鍵，共用三對則形成參鍵。以  $\text{H}_2$  分子為例，兩 H 原子間共用一對價電子，故為單鍵。若以軌域重疊概念視之，兩 H 原子之 1s 軌域重疊，會沿著核間軸方向形成如圖 2-11(A)的橢球形軌域，此種軌域電子雲在兩原子核間軸密度最大，離軸愈遠，電子雲密度愈小，這樣的軌域重疊方式稱為  $\sigma$  鍵，此種鍵結不會因為旋轉而被破壞。根據包立不相容原理，氫分子中的兩個價電子會以相反的自旋方向填入此  $\sigma$  鍵中，稱為單鍵，意即單鍵必為  $\sigma$  鍵。

此外，像  $\text{HCl}$  分子，H 原子的 1s 軌域與 Cl 原子的 3p 軌域也會沿核間軸方向重疊而形成  $\sigma$  鍵(圖 2-11(B))。 $\text{Cl}_2$  分子中的 Cl—Cl 單鍵亦是由兩個 Cl 原子的 3p 軌域彼此「頭對頭」重疊形成  $\sigma$  鍵(圖 2-11(C))。

若兩原子間具有雙鍵或參鍵，則其原子間僅有一個  $\sigma$  鍵，其餘的鍵結稱為  $\pi$  鍵， $\pi$  鍵是藉由兩原子的 p 軌域「肩並肩」平行重疊而成，其電子雲分布在兩原子核間軸之相反兩側(圖 2-12)，例如： $\text{O}_2$  分子具有雙鍵，其雙鍵為一個  $\sigma$  鍵加一個  $\pi$  鍵； $\text{N}_2$  分子中則是由一個  $\sigma$  鍵和兩個  $\pi$  鍵形成參鍵。 $\pi$  鍵的形成將在 2-3.2 節中再詳述。



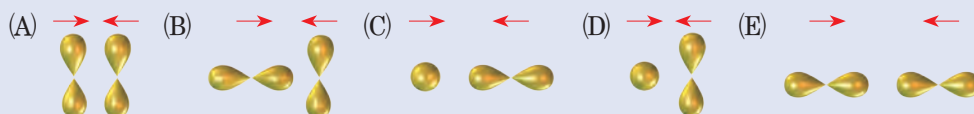
表 2-2 為乙烷、乙烯及乙炔分子之結構和碳-碳原子間鍵長與鍵能數據，由表中數據可看出，相同原子間的鍵結，**鍵長為：單鍵 > 雙鍵 > 參鍵**，而**鍵能則為參鍵 > 雙鍵 > 單鍵**，亦即**鍵數愈多者，鍵能亦愈大，而鍵長愈短**。

▼表 2-2 乙烷、乙烯及乙炔分子之結構和碳-碳原子間鍵長與鍵能數據

	乙烷 (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	乙烯 (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	乙炔 (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )
鍵 型	單鍵	雙鍵	參鍵
碳-碳鍵長 (pm)	154	134	120
碳-碳鍵能 (kJ mol <sup>-1</sup> )	370	680	830
分子形狀	立體形	平面形	直線形
鍵角 (°)	109.5	120	180

範例  
2-4

下列哪些價軌域互相靠近，可重疊形成  $\sigma$  鍵？



..... 解答 .....

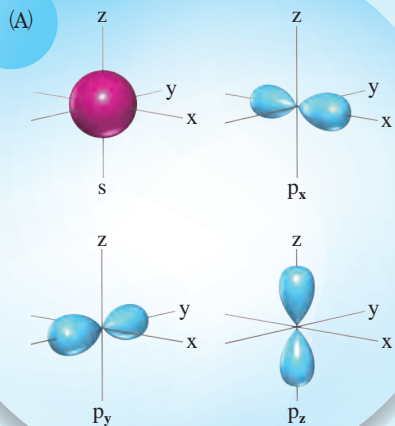
$\sigma$  鍵的形成必須是兩軌域以「頭對頭」方式重疊。故選(C)(E)

練習  
2-4

由大至小排列下列化合物的鍵長長短。

HF、H<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub> 和 CH<sub>4</sub>。



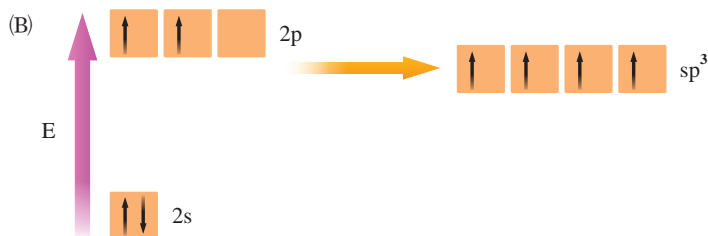
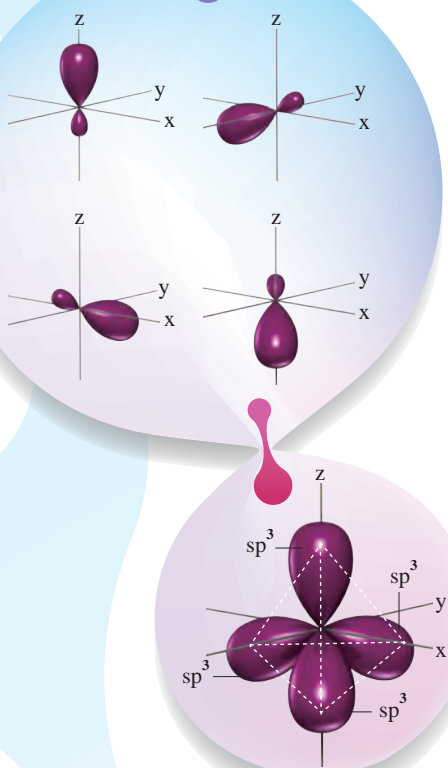


## 2-3 混成軌域

有些分子的鍵結情形無法用簡單原子軌域重疊的觀念來合理解釋，科學家提出了混成軌域 (hybrid orbital) 的觀念來加以說明，下面介紹幾種常見的混成軌域。

### 2-3.1 $sp^3$ 混成軌域

具有正四面體結構的甲烷 ( $CH_4$ ) 分子，是說明  $sp^3$  混成軌域的最佳例子。實際觀察甲烷分子中的四個 C-H 鍵彼此夾角為  $109.5^\circ$ ，但其中心原子碳並無可形成  $109.5^\circ$  的價軌域。為解釋此一現象，美國化學家鮑林提出了混成軌域的觀念，他認為甲烷中的碳原子，會將其四個價軌域，即一個 2s 軌域與三個 2p 軌域，先進行「軌域混成」(orbital hybridization)，混成的結果會使原本能量、形狀不相同的四個軌域變為能量、形狀完全相同的四個「 $sp^3$  混成軌域」，碳的四個價電子再分別占據



▲ 圖 2-13 C 原子  $sp^3$  混成軌域：(A)軌域形狀；(B)能階關係。



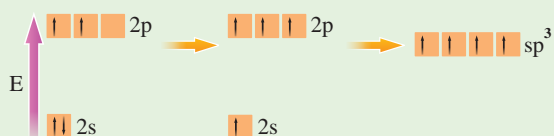
其中一個  $sp^3$  混成軌域，彼此互成  $109.5^\circ$ ，根據洪德定則，甲烷中 C 原子  $sp^3$  混成軌域之能階關係與軌域形狀如圖 2-13 所示<sup>註2</sup>。

這四個  $sp^3$  混成軌域分別指向正四面體的四個頂點，四個氫的 1s 軌域再與碳的四個  $sp^3$  混成軌域形成四個  $\sigma$  鍵，於是形成如圖 2-15 的甲烷分子。

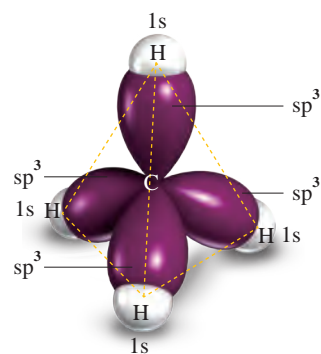
與甲烷分子同樣具有  $sp^3$  混成軌域的例子還有  $NH_3$  分子與  $H_2O$  分子。 $NH_3$  分子也是利用中心的氮原子之四個價軌域先混成為完全相同的四個  $sp^3$  混成軌域，而氮原子的五個價電子則依據包立不相容原理與洪德定則進入此四個軌域中，造成有一個軌域全填滿，三個軌域為半填滿。全填滿軌域中的電子其後將成為氮原子上的孤對電子，其餘的三組不成對電子則分別與三個氫原子的電子形成 N-H 單鍵，如圖 2-16(A)所示。至於水分子，中心氧原子則有兩對孤對電子與兩個 O-H 單鍵，呈現如圖 2-16(B)的彎曲形水分子。

註2

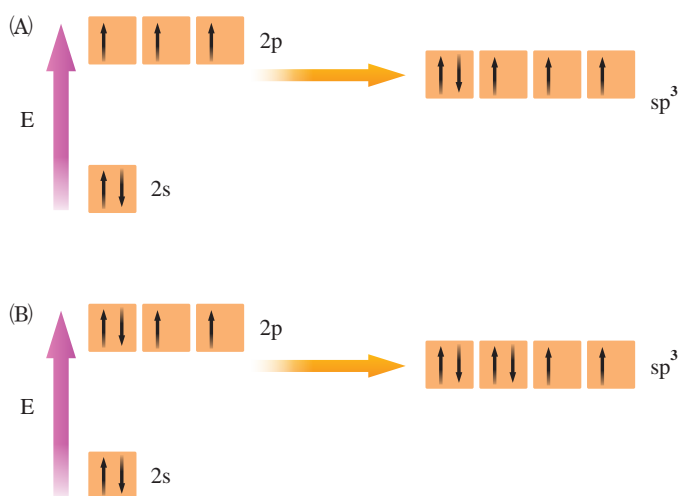
此處亦有人提出電子提升 (promotion of electron) 的說法，C 原子先將 2s 軌域中一個電子提升至 2p 的空軌域，而形成激發態 ( $2s^1 2p^3$ )，再進行軌域混成 (圖 2-14)。



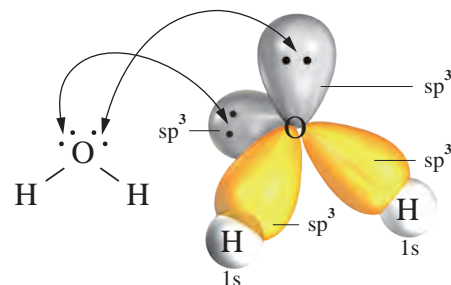
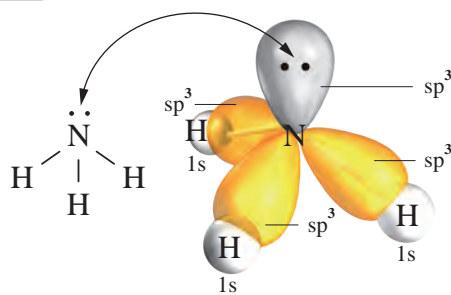
▲圖 2-14 電子提升示意圖

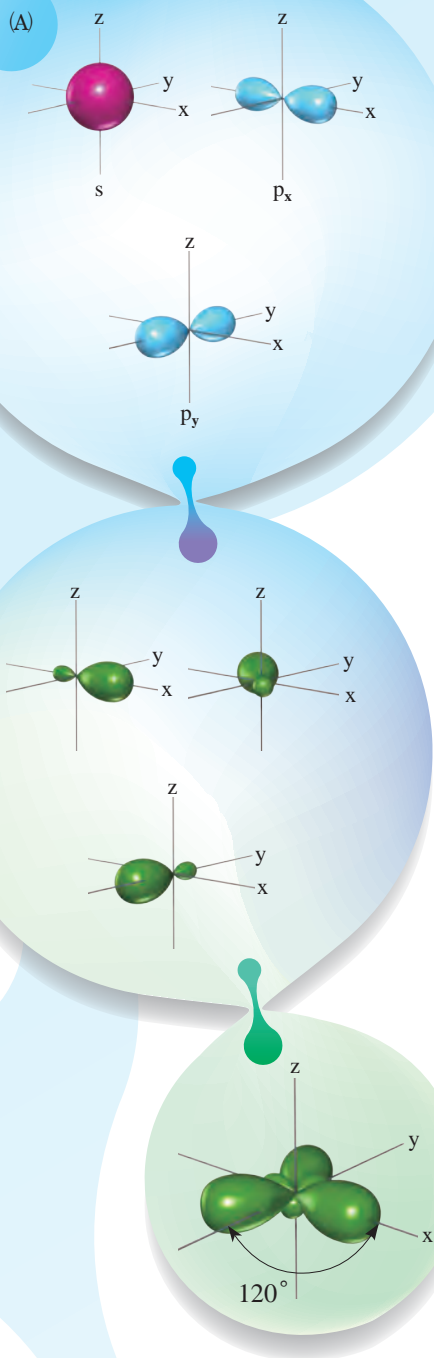


▲圖 2-15 甲烷分子



▲圖 2-16 (A)  $NH_3$  與 (B)  $H_2O$  的中心原子之混成軌域與分子結構

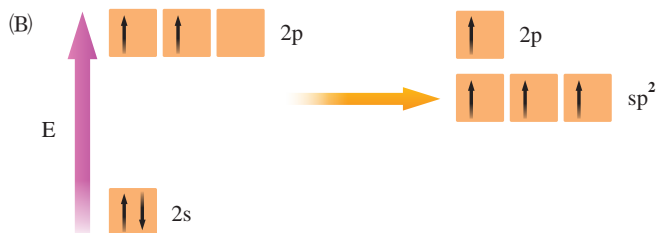




## 2-3.2 $sp^2$ 混成軌域

乙烯 ( $C_2H_4$ ) 是具有  $sp^2$  混成軌域的典型例子。乙烯中的兩個碳原子鍵結前，先各自將  $2s$  與三個  $2p$  軌域中的兩個 (假設是  $2p_x$  與  $2p_y$ ) 進行「 $sp^2$  混成」，得到能量、形狀完全相同的三個  $sp^2$  混成軌域，這三個  $sp^2$  混成軌域位於同一平面上且相互間的夾角呈  $120^\circ$  (圖 2-17)，最後剩下的一個未參與混成的  $2p_z$  軌域則垂直於此三個  $sp^2$  混成軌域，碳原子的四個價電子則以相同的自旋方向分別進入這四個軌域中，其軌域能階與混成軌域形狀如圖 2-17 所示。

乙烯分子鍵結時，兩個碳原子的各自其中一個  $sp^2$  混成軌域可互相重疊形成一個  $C-C \sigma$  鍵，其餘四個  $sp^2$  混成軌域則與四個氫原子鍵結形成



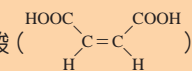
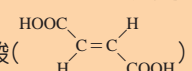
▲ 圖 2-17 C 原子  $sp^2$  混成軌域：(A)軌域形狀；(B)能階關係。

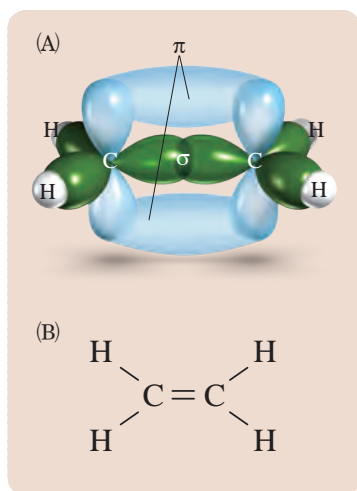
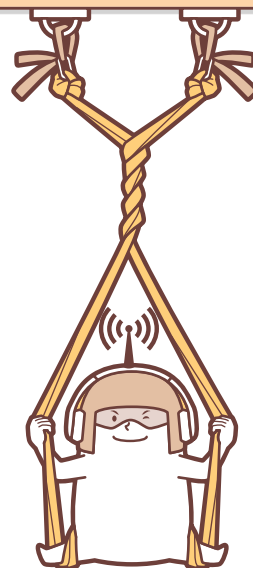


四個 C-H  $\sigma$  鍵，最後各自的一個  $2p_z$  軌域，因其電子雲最大的區域位於  $z$  軸上，所以彼此平行靠近重疊時，僅能以「側邊對側邊」的方式平行重疊，重疊後的軌域在核間軸的電子雲密度為零，即為 2-2 節中介紹過的  $\pi$  鍵，所以在乙烯的分子中，兩個碳原子間共有一個  $\sigma$  鍵加一個  $\pi$  鍵。因為  $\pi$  鍵為  $p$  軌域平行重疊而成，故若固定一個碳原子繞核間軸旋轉另一個碳原子，將破壞  $\pi$  鍵電子雲，故  $\pi$  鍵無法旋轉。乙烯的鍵結情形與分子結構如圖 2-18。

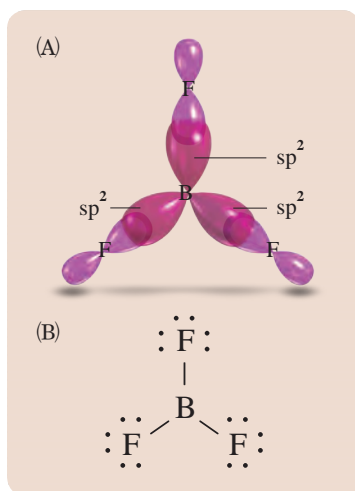
與乙烯同樣具有  $sp^2$  混成軌域的例子還有  $BF_3$  分子。中心原子 B 先將其原子軌域混成三個能量相等的  $sp^2$  混成軌域（各具有一個價電子）與一個  $2p$  空軌域，此三個  $sp^2$  混成軌域再與 F 原子的  $2p$  價軌域重疊形成三個 B-F  $\sigma$  鍵，其鍵結情形和分子結構如圖 2-19。

### （動次）<sup>2</sup>想

順丁烯二酸 (  )  
在鹽酸催化下，加熱可轉變為  
反丁烯二酸 (  )，  
請問此轉變是因為雙鍵會旋轉所造成的嗎？

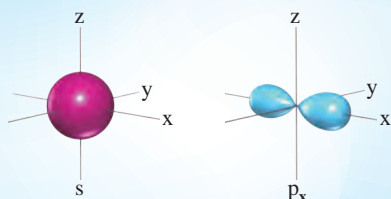


▲ 圖 2-18  
乙烯分子的鍵結與分子結構



▲ 圖 2-19  
 $BF_3$  的鍵結與分子結構

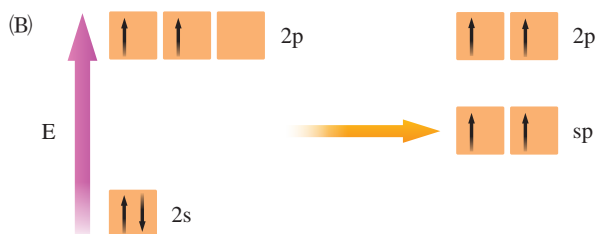
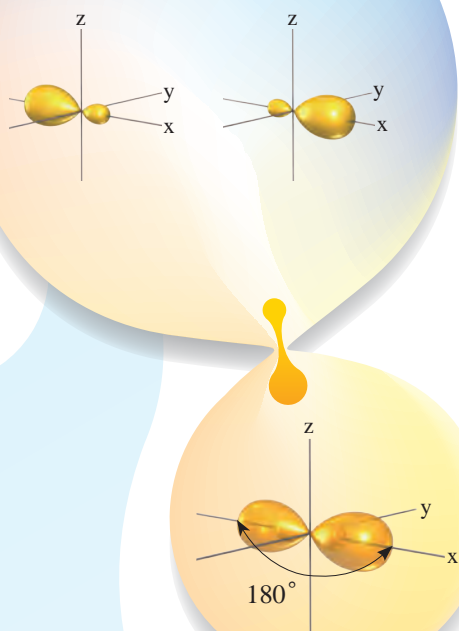
(A)



### 2-3.3 sp 混成軌域

乙炔 ( $C_2H_2$ ) 分子的鍵結可以 **sp 混成軌域** 描述。乙炔中的兩個碳原子先將其一個  $2s$  軌域與一個  $2p$  軌域 (假設是  $2p_x$ ) 進行「sp 混成」, 得到兩個能量、形狀相同的 **sp 混成軌域**, sp 混成軌域分布在碳原子的兩端, 夾角為  $180^\circ$ , 如圖 2-20 所示, 每個碳原子上尚有兩個未參與混成的  $2p$  軌域 ( $2p_y$  與  $2p_z$ ), 它們與 sp 混成軌域兩兩互相垂直。

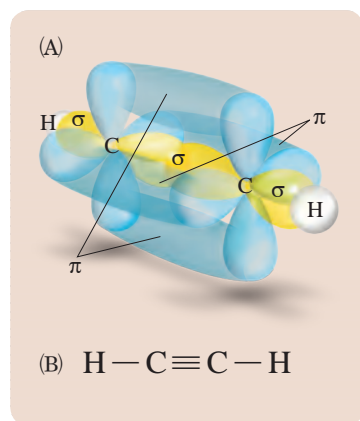
鍵結時兩個碳原子各自使用一個 sp 混成軌域彼此重疊形成一個  $C-C \sigma$  鍵, 剩下的兩個 sp 混成軌域則與兩個氫原子再形成兩個  $C-H \sigma$  鍵, 因為 sp 混成軌域夾角  $180^\circ$ , 所以這四個原子位於同一直線上。兩個碳原子上現在各剩下一個  $2p_y$  與  $2p_z$  軌域, 如同乙烯的情況, 兩個  $2p_y$  間會彼此平行重疊形成一個  $C-C \pi$  鍵, 兩個  $2p_z$  間則會彼此重疊形成另一個  $C-C \pi$  鍵, 所以乙炔的碳原子間共有一個  $\sigma$  鍵加兩個  $\pi$  鍵成為參鍵。乙炔的鍵結情形與分子結構如下頁圖 2-21。



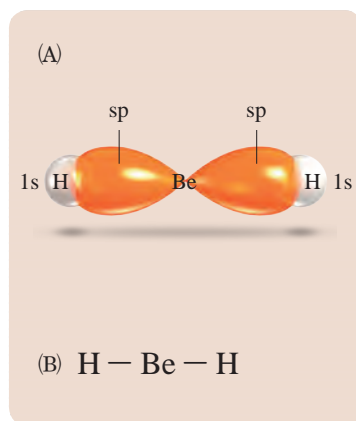
▲ 圖 2-20 C 原子 sp 混成軌域：(A)軌域形狀；(B)能階關係。



與乙炔同樣具有  $sp$  混成軌域的例子還有  $\text{BeH}_2$  分子，中心原子  $\text{Be}$  的兩個價電子分別占據  $\text{Be}$  原子軌域混成後的兩個  $sp$  混成軌域，此兩軌域分別與  $\text{H}$  原子的  $1s$  軌域重疊，形成兩個  $\text{Be}-\text{H}$   $\sigma$  鍵，成為直線形的  $\text{BeH}_2$  分子，其鍵結情形與分子結構如圖 2-22 所示。



▲ 圖 2-21  
乙炔的鍵結與分子結構



▲ 圖 2-22  
 $\text{BeH}_2$  的鍵結與分子結構

### 範例 2-5

已知  $\text{PCl}_3$  分子形狀與  $\text{NH}_3$  分子相似，試說明  $\text{PCl}_3$  分子中心原子  $\text{P}$  的混成軌域，並描述其鍵結型態。

..... 解答 .....

5A 族的  $\text{P}$  具有五個價電子。鍵結時， $\text{P}$  先利用其  $3s$  與三個  $3p$  軌域混成四個  $sp^3$  混成軌域，其中的三個  $sp^3$  軌域各填入一個電子，另一個  $sp^3$  軌域則填入成對的兩個電子。三個  $\text{Cl}$  原子各利用其半填滿的  $3p$  軌域與  $\text{P}$  的三個半填滿  $sp^3$  軌域重疊形成三個  $\sigma$  單鍵， $\text{P}$  原子上尚存一對位於  $sp^3$  軌域中的電子，即為孤對電子。

### 練習 2-5

說明下列分子或離子之中心原子的混成軌域。

- (1)  $\text{CO}_2$  (直線形)
- (2)  $\text{NO}_2^-$  (彎曲形)

胖博士  
開講

## 100%的離子鍵 有？沒有？

想像兩種約會模式：熱戀中的兩人，一人一支吸管，互相依偎共飲一杯奶昔，奶昔幾乎均勻分享給雙方；另一對情侶則是面對面坐著，其中一人在吃了兩口蛋糕後，另一人便把剩下大半的蛋糕接過去吃光。後者看起來沒有前者親密、浪漫，但都是在約會！

原子的結合情形，類似上述兩種模式，第一種像是「共價鍵式」，第二種則與「離子鍵式」相似，奶昔和蛋糕代表原子間的價電子，它可以是「共享」，也能傾向「轉移」。科學家利用鍵結兩端原子的電負度差來描述價電子共享或轉移的程度。若兩相同原子形成鍵結，兩端原子的電負度相同，亦即電負度差為零，則此兩原子均等共用鍵結電子對。此種共價鍵為非極性共價鍵，我們稱其離子性 (ionic character) 為零，也就是具有 100% 的共價性，可視為完全的共價鍵，例如： $H_2$ 、 $O_2$ 、 $Cl_2$  等。

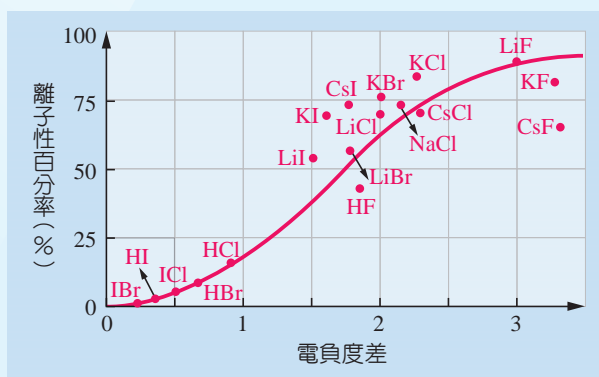
兩原子鍵結時的離子性百分率可以表示為：

$$\text{離子性百分率} = \frac{X-Y \text{ 鍵偶極矩之測量值}}{\text{電子完全轉移成 } X^+Y^- \text{ 之理論偶極矩}} \times 100\%$$

上式中的偶極矩，定義為  $\mu = \delta \times r$  ( $\delta$  為原子所帶的電荷量， $r$  為鍵長)，單位為「德拜 (Debye, D)」，換算成 SI 單位制： $1 D = 3.33 \times 10^{-30} C m$ 。例如： $HF$  分子之鍵長為  $91.7 pm$  ( $9.17 \times 10^{-11} m$ )，理論上電子對完全轉移成  $H^+F^-$  時，其偶極矩為  $1.60 \times 10^{-19} C \times 9.17 \times 10^{-11} m = 1.47 \times 10^{-29} C m = 4.41 D$ ，而氣態  $HF$  分子偶極矩之實測值為  $1.83 D$ ，故  $HF$

$$\text{分子之離子性百分率} = \frac{1.83 D}{4.41 D} \times 100\% = 41.5\%$$

將一些氣態物質之離子性百分率與電負度差作圖 (如圖 2-23)，可看出離子性百分率大致隨鍵結兩端原子電負度差增加而增加，但即使是將電負度最大與最小的原子鍵結 ( $CsF$ )，也不可能達到 100% 的離子性。利用離子性百分率的概念，可以大略分類離子鍵與共價鍵，50% 以上者，可視為離子鍵；而 50% 以下者，即為共價鍵。



▲ 圖 2-23 一些氣態物質之離子性百分率與電負度差的關係圖

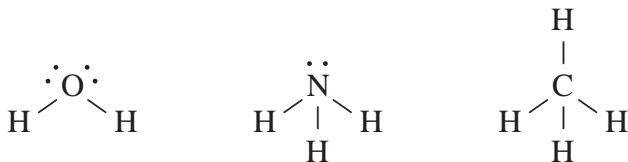




## 2-4 價殼層電子對互斥理論與分子形狀

化學鍵結理論主要的目標之一就是解釋以及預測分子的形狀。有一種非常簡單但在預測分子形狀方面簡單而實用的理論，稱為價殼層電子對互斥 (valence shell electron pair repulsion) 理論，簡稱為 **VSEPR 理論**。在運用此理論時，完全不需要原子軌域的觀念，只要能夠畫出路易斯結構，形狀就可被正確預測出來。

價殼層電子對互斥理論認為，分子或離子內圍繞中心原子之電子對，包括鍵結電子對 (bp) 與孤對電子 (lp) 應盡量遠離，使電子間的斥力降至最低。例如：氣態的  $\text{BeCl}_2$  分子，它的路易斯結構為  $:\ddot{\text{Cl}}-\text{Be}-\ddot{\text{Cl}}:$  為了使在中心鈹原子周圍的兩對 bp 斥力最小，必須使它們盡量遠離，所以當夾角為  $180^\circ$  時，也就是  $\text{BeCl}_2$  呈直線形時，斥力最小。同樣地， $\text{BF}_3$  分子中，三對 B-F 鍵亦必須盡量遠離，故  $\text{BF}_3$  分子會呈現平面三角形之結構，其  $\angle\text{FBF}$  之角度為  $120^\circ$ 。一般而言，中心原子上的電子對中，lp 比 bp 占據的空間範圍廣，所以電子對間的斥力大小為 **lp-lp 斥力 > bp-lp 斥力 > bp-bp 斥力**。利用這個原理，我們可以比較中心原子同為四對電子的  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$  及  $\text{CH}_4$  之鍵角大小，它們的路易斯結構如下：





$\text{CH}_4$  的四對電子皆為 bp，完全相等，故呈四面體形時的斥力最小，其鍵角為  $109.5^\circ$ ； $\text{NH}_3$  的中心原子 N 上有一對 lp，因斥力的作用，使得  $\text{NH}_3$  的鍵角略小於  $109.5^\circ$ ，實測值為  $107^\circ$ ； $\text{H}_2\text{O}$  的 O 原子上有兩對孤對電子，斥力更大，壓迫 bp 使得  $\text{H}_2\text{O}$  的鍵角僅  $104.5^\circ$ 。

▼表 2-3 各種不同電子對數目之單中心原子分子的幾何形狀



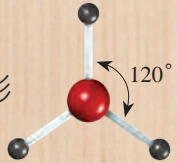
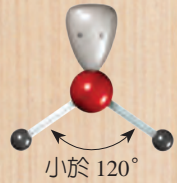
型 式	X 的數目	中心原子上之 孤對電子數目	電子對的形狀	分子形狀	常見實例
$\text{AX}_2\text{E}_0$	2	0	 直線	直線形 	$\text{CO}_2$
$\text{AX}_3\text{E}_0$	3	0	 平面三角形	平面三角形 	$\text{BF}_3$
$\text{AX}_2\text{E}_1$	2	1	平面三角形	彎曲形 	$\text{SO}_2$



表 2-3<sup>註3</sup> 列出有各種不同電子對數目之單中心原子分子的幾何形狀，將單中心分子以路易斯結構畫出，中心原子即為 A，周圍原子為 X，中心原子上之孤對電子為 E，再對照表 2-3 即可預測出其分子形狀。

## 註3

若中心原子電子對數目為五對與六對，則依據 VSEPR 理論，其結構應為雙三角錐與正八面體，但此類物質已超過八隅體，故將其列於附錄二中，有興趣的同學可自行參閱。



X: 與中心原子 A 鍵結之周圍原子  
E: 中心原子上之孤對電子



型式	X 的數目	中心原子上之孤對電子數目	電子對的形狀	分子形狀	常見實例
$AX_4E_0$	4	0		正四面體形 	$CH_4$
$AX_3E_1$	3	1	 正四面體	三角錐形 	$NH_3$
$AX_2E_2$	2	2		彎曲形 	$H_2O$

**範例**  
**2-6**

寫出下列分子或離子的形狀。

(1)  $\text{ClO}_2^-$  (2)  $\text{NF}_3$  (3)  $\text{BF}_3$  (4)  $\text{CCl}_4$

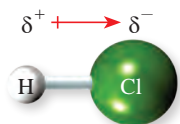
..... 解答 .....

(1)彎曲形；(2)三角錐形；(3)平面三角形；(4)正四面體形。

**練習**  
**2-6**

比較  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$  及  $\text{BeH}_2$  三種分子，其鍵角的大小順序。

## 2-5 鍵極性與分子極性



▲ 圖 2-24  
HCl 分子的極性共價鍵

兩原子形成鍵結時，電負度的大小若是不同，彼此對鍵結電子對的吸引力也不相同，如圖 2-24 所描述的 HCl 分子，Cl 原子電負度比 H 原子大，所以 Cl 原子對於鍵結電子對的吸引力較強，因此可視為 Cl 原子端帶有部分負電荷，以  $\delta^-$  表示，H 原子端帶部分正電荷，以  $\delta^+$  表示。像這種共價鍵的兩端電荷分布不均的現象稱為極性（polarity），而此種鍵結則稱為極性共價鍵。

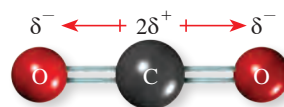
鍵極性的量度稱為偶極矩（dipole moment），偶極矩為一向量，其方向定義為由帶部分正電的一方（電負度較小的原子）指向帶部分負電的一方（電負度較大的原子）。若鍵的兩端原子的電負度差愈大，則鍵極性愈大。例如：鹵素族的鹵化氫，其鍵極性的大小順序為  $\text{HF} > \text{HCl} > \text{HBr} > \text{HI}$ 。



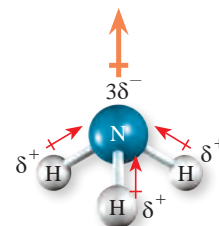
一個分子中，所有鍵偶極矩的向量和若為零，稱為非極性分子，若鍵偶極矩的向量和不為零，則為極性分子。雙原子分子因為僅有一個化學鍵，所以鍵極性就代表分子極性。鹵化氫和一氧化碳皆屬於極性分子，而  $H_2$  則為非極性分子。

多原子分子就不同了，從圖 2-25 二氧化碳的結構可看出，C 與 O 之間的鍵偶極矩不為零，但因為  $CO_2$  是直線分子，兩鍵偶極矩的大小相等，但方向相反，恰好互相抵消，所以  $CO_2$  分子偶極矩等於零，為非極性分子。 $NH_3$  分子的形狀為三角錐形，鍵偶極矩的方向由 H 原子指向 N 原子，此三偶極矩的向量和不為零（有一淨向量指向上方，如圖 2-26），故  $NH_3$  為極性分子。

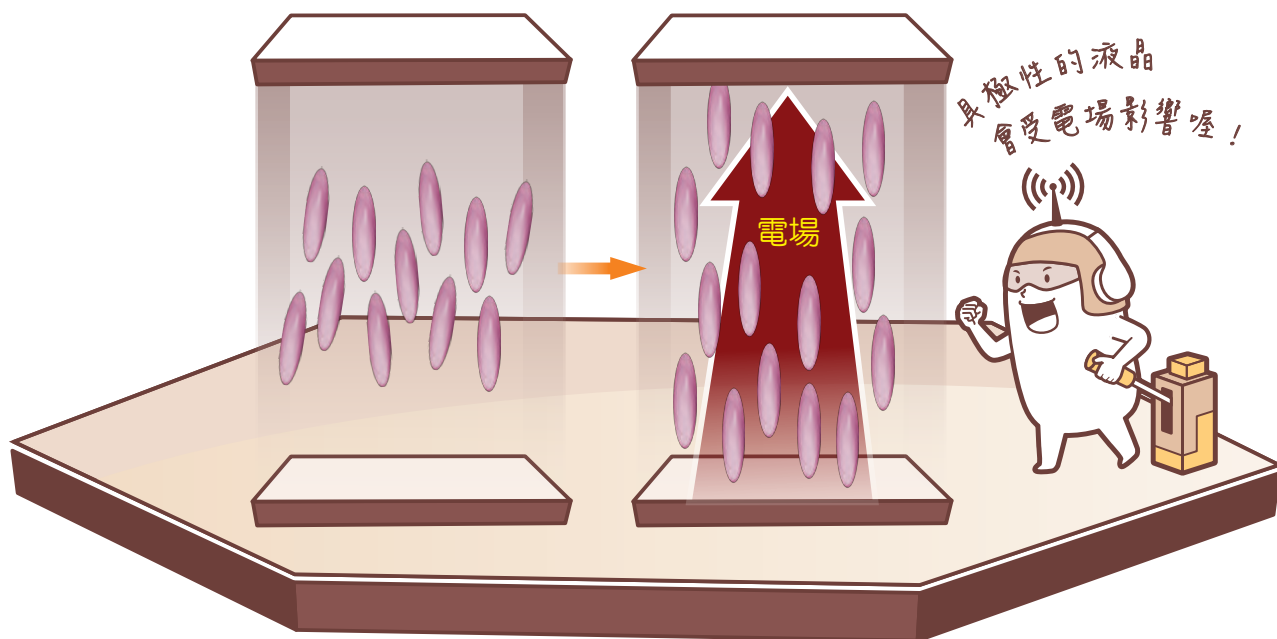
具有極性的分子在電場的作用下會偏向，例如：液晶顯示器中的液晶分子，即為具有極性的分子，當電場作用時會沿著電場方向整齊排列，有如晶體（圖 2-27）。



▲ 圖 2-25  
 $CO_2$  的鍵偶極矩向量和為零，故為非極性分子。



▲ 圖 2-26  
 $NH_3$  的鍵偶極矩向量和不為零，故為極性分子。



▲ 圖 2-27 液晶分子受電場影響示意圖

### 範例 2-7

試說明下列分子的幾何形狀，並判斷何者為極性分子，何者為非極性分子。

(1)  $\text{H}_2\text{O}$  (2)  $\text{CF}_4$  (3)  $\text{SO}_2$  (4)  $\text{PCl}_3$

..... 解答 .....

- (1)  $\text{H}_2\text{O}$  為彎曲形，有極性。  
 (2)  $\text{CF}_4$  為正四面體形，無極性。  
 (3)  $\text{SO}_2$  為彎曲形，有極性。  
 (4)  $\text{PCl}_3$  為三角錐形，有極性。

### 練習 2-7

試判斷下列何者為極性分子？何者為非極性分子？

$\text{O}_2$ 、 $\text{CS}_2$ 、 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 、 $\text{BeCl}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 。

### 閱讀 Focus 科普篇

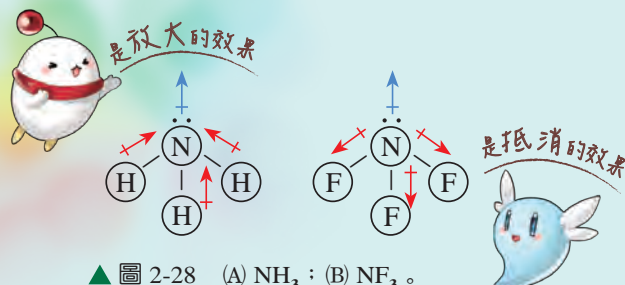
## 孤對電子與分子偶極矩的關係

分子的中心原子上若有孤對電子，則此孤對電子亦會貢獻一偶極矩，其方向為由中心原子指向孤對電子，下面以  $\text{NH}_3$  和  $\text{NF}_3$  為例說明（圖 2-28）。

$\text{NH}_3$  分子中，N 與 H 之電負度分別為 3.0 與 2.1，故 N-H 之鍵偶極矩向量由 H 指向 N，此三鍵偶極矩之向量和則指向上方，與中心原子上孤對電子之偶極矩方向一致，意即孤對電子之偶極矩使  $\text{NH}_3$  的鍵偶極矩產生「放大」的效果。

$\text{NF}_3$  分子中，N 與 F 之電負度分別為 3.0 與 4.0，故三個 N-F 鍵之鍵偶極矩方向恰與  $\text{NH}_3$  者相反，雖 N-F 之鍵偶極矩略大於 N-H，但中心原子上孤對電子之偶極矩卻對  $\text{NF}_3$  之偶極矩造成「抵消」的效果，因此  $\text{NF}_3$  之分子極性反而較  $\text{NH}_3$  小。

孤對電子的偶極矩還可使無鍵偶極矩之分子產生極性。例如：臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 之分子具有極性，即是因為中心 O 原子上的孤對電子所引發。



▲ 圖 2-28 (A)  $\text{NH}_3$  ; (B)  $\text{NF}_3$ 。

# 快閃小實驗

## 偏折不偏折...這是個問題



### 原理與目的

分子若具有極性，則可受帶靜電物質的吸引而使運動方向發生偏折，若無極性，則不受帶電物質的影響。下面這個簡單的小實驗可帶領大家看到這個現象。

### 藥品與器材

- 水 適量
- 正庚烷 適量
- 滴定管 1支
- 滴定管架 1組
- 絨布 1塊
- 氣球 2個
- 燒杯 (500 毫升) 2個

使用完畢之正庚烷應統一回收交由老師再次利用。

### 步驟

在兩支滴定管中分別裝入水與正庚烷，以滴定管架直立固定好。

水

正庚烷

吹飽一個氣球並將吹口綁緊，以一塊絨布在氣球的固定一側反覆摩擦數次，使氣球帶電。

在裝水的滴定管下方置一空燒杯，打開活栓使水流下，再以帶電氣球靠近流出水柱，觀察水柱是否偏折？

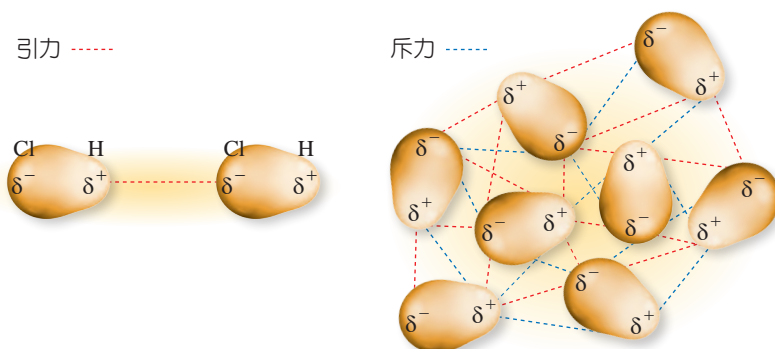
換成裝正庚烷的滴定管，重覆步驟 3，觀察正庚烷液柱是否偏折？

## 2-6 分子間的作用力

分子間的作用力不同於化學鍵（離子鍵、共價鍵及金屬鍵），它是存在於分子間較弱的作用力，包括氫鍵與凡得瓦力，凡得瓦力又可更細分為偶極－偶極力、偶極－誘發偶極力及分散力。

### 2-6.1 偶極－偶極力

極性分子因為分子內電荷分布不均，會形成帶部分電荷的兩極性端，此現象有如一塊磁鐵的兩極，與另一塊磁鐵相遇時，異極性的兩端會彼此吸引。分子間會發生偶極－偶極力的典型例子是氯化氫分子，如圖 2-29。氯化氫分子中的氯原子帶部分負電（以  $\delta^-$  表示），所以和另一分子中帶部分正電（以  $\delta^+$  表示）的氫原子端靠近，產生了庫侖靜電引力，但是能量約只有一般共價鍵的 1%。



▲圖 2-29 HCl 分子間偶極－偶極力示意圖



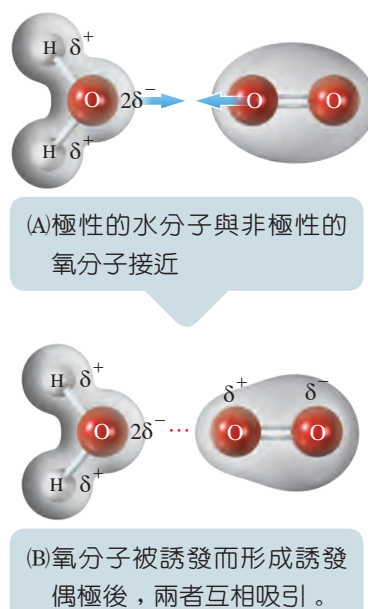
很顯然的，分子間偶極－偶極力的大小與分子的極性大小有關，分子極性愈大者，分子間偶極－偶極力愈大。由表 2-4 可見，極性愈大的物質，沸點愈高，可見其分子間的作用力也愈大。

▼表 2-4 一些分子量相近的極性與非極性分子沸點之比較

非極性			極性		
分子式	分子量	沸點 (°C)	分子式	分子量	沸點 (°C)
N <sub>2</sub>	28	-196	CO	28	-192
SiH <sub>4</sub>	32	-112	PH <sub>3</sub>	34	-85
GeH <sub>4</sub>	77	-90	AsH <sub>3</sub>	78	-55
Br <sub>2</sub>	160	59	ICl	162	97

## 2-6.2 偶極－誘發偶極力

倘若有一個由極性分子與非極性分子組成的混合系統，即可能產生分子間偶極－誘發偶極力。當極性分子靠近非極性分子時，非極性分子內的電子雲受到極性分子的一端作用，造成此一端電子雲密度發生變化，因此非極性分子也產生了暫時性的極化現象。像這樣非極性分子受到極性分子「誘發」而產生暫時性的極化，稱為**誘發偶極**。誘發偶極分子與永久偶極分子（極性分子）間會產生正、負電荷間的吸引力，此種吸引力即為偶極－誘發偶極力（圖 2-30）。例如：苯與氯仿（CHCl<sub>3</sub>）的混合溶液中，氯仿分子（極性分子）與苯分子（非極性分子）間即存在偶極－誘發偶極力。



▲圖 2-30 水分子與氧分子間的偶極－誘發偶極力示意圖

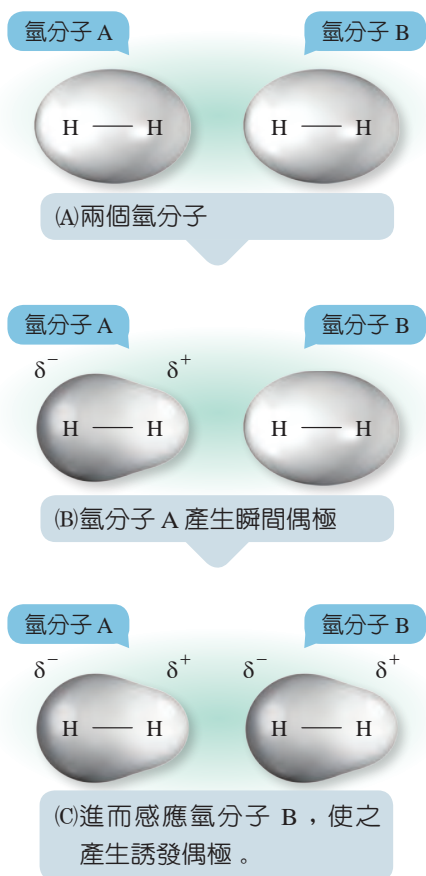


## 2-6.3 分散力

科學家觀察到，在高壓、低溫之下，即使是非極性物質也能夠被液化或固化，表示非極性分子間必然也存有吸引力，此吸引力最早是由德國科學家倫敦（F. London，1900 ~ 1954）所提出，稱此作用力為倫敦分散力（London dispersion force），簡稱為分散力（dispersion force）。

分散力的形成可解釋為非極性分子中，原本均勻的電子雲在某一瞬間產生電子向某一區域較集中，因而造成短暫電荷分布不均的現象，此現象稱為瞬間極化。若此分子周圍恰有其他非極性分子存在，則此非極性分子有可能受此瞬間極化分子誘發而產生誘發偶極，此誘發偶極又可能使鄰近的其他分子產生誘發偶極，在這些誘發偶極與誘發偶極間的作用力即為分散力（圖 2-31）。

分散力只有在兩分子極為接近時，才會顯現，但所有分子間皆有此作用力。分散力的大小與瞬間極化發生的機率有關，所以分子愈大，電子雲範圍愈廣，瞬間極化的現象愈可能發生，分散力就愈大。如表 2-5，鹵素與鈍氣的沸點皆會隨著分子量愈大而愈高，是因為分子量愈大，分散力也愈大。



▲ 圖 2-31 分散力示意圖



▼表 2-5 鹵素與鈍氣的沸點一覽表

化學式	原子 / 分子量	沸點 (°C)
F <sub>2</sub>	38	-188
Cl <sub>2</sub>	71	-34
Br <sub>2</sub>	160	58
I <sub>2</sub>	254	184
He	4	-269
Ne	20	-246
Ar	40	-186
Kr	84	-153
Xe	131	-108

分散力的大小除取決於分子量外，與分子的表面積大小也有關，**分子的表面積愈大**，與其他分子接觸機會增加，**分散力就愈大**。例如：分子式為 C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> 的戊烷具有三種同分異構物，其結構如表 2-6。其中直鏈狀的正戊烷具有最大的表面積所以沸點最高；而新戊烷的結構接近球形，表面積最小，所以沸點最低。

▼表 2-6 戊烷的三種異構物之結構與其沸點 (● 氫, ● 碳)

名稱	正戊烷	異戊烷	新戊烷
結構式	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3-\text{C}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$
空間填充模型			
沸點 (°C)	36	28	9.5

### 範例 2-8

正丁烷 ( $C_4H_{10}$ ) 與丙酮 ( $(CH_3)_2CO$ ) 之分子量皆為 58，但正丁烷的沸點為  $-0.54^\circ C$ ，而丙酮的沸點卻有  $56.2^\circ C$ ，試說明其沸點差異的主要原因。

..... 解答 .....

丙酮為極性分子，分子間除分散力外，尚存在較強的偶極－偶極力，所以沸點會較非極性的正丁烷高。

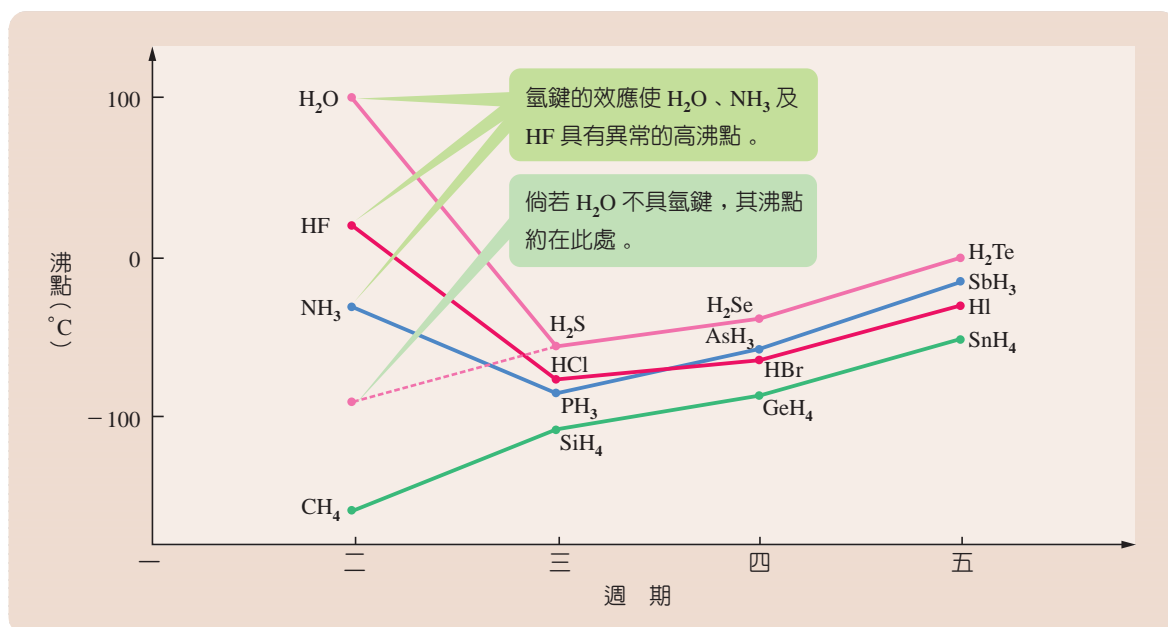
### 練習 2-8

試排列下列物質之沸點由高到低的順序。

$CF_4$ 、 $CCl_4$ 、 $CBr_4$ 、 $Cl_4$ 。

## 2-6.4 氫 鍵

科學家在研究第 14、15、16 及 17 族氫化物的沸點時，發現了一個奇特的現象：第 15 族的  $NH_3$ 、第 16 族的  $H_2O$  及第 17 族的  $HF$ ，其沸點與各同族氫化物相較下，皆異常的高；但第 14 族的  $CH_4$  則未出現此異常現象（圖 2-32），此現象引發科學家思索，上述異常的分子之分子間除凡得瓦力外，應存在一種更強的作用力——**氫鍵**（hydrogen bond）。



▲圖 2-32 第 14、15、16 及 17 族氫化物的沸點比較。

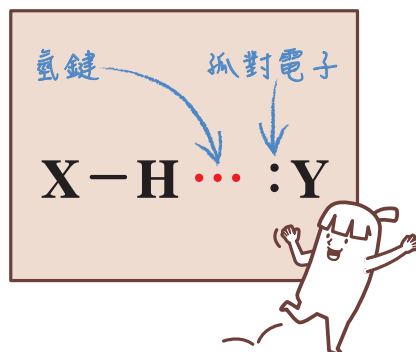


氫鍵基本上可視為一種偶極—偶極力，但它的強度遠較偶極—偶極力更強，是分子間作用力最大的一種，所以將它與偶極—偶極力分開，單獨討論。

氫鍵的發生有一定的條件，圖 2-33 中的實線是分子內的化學鍵，虛線即為氫鍵。圖 2-33 中，**X** 必須是電負度很大的原子，如 **F**、**O**、**N** 等，因為其電負度很大，造成與其鍵結的 **H** 原子具有很高的正電性；**Y** 原子則除了必須具有高電負度外，例如：**F**、**O**、**N**，還必須有孤對電子，因為此孤對電子傾向於與氫原子共用，因而形成氫鍵。由實驗觀察到，當氫鍵形成時， $\angle XHY$  非常接近  $180^\circ$ <sup>註4</sup>，所以氫鍵不但可視為偶極—偶極力，也與共價鍵相似，具有方向性。

氫鍵的存在常會造成該物質具有較特殊的物理性質，如前述的  $H_2O$ 、 $HF$  及  $NH_3$  分別較同族的氫化物有較高的沸點；而  $CH_4$  因為沒有分子間氫鍵，所以與同族其他氫化物相較，並無較高沸點。

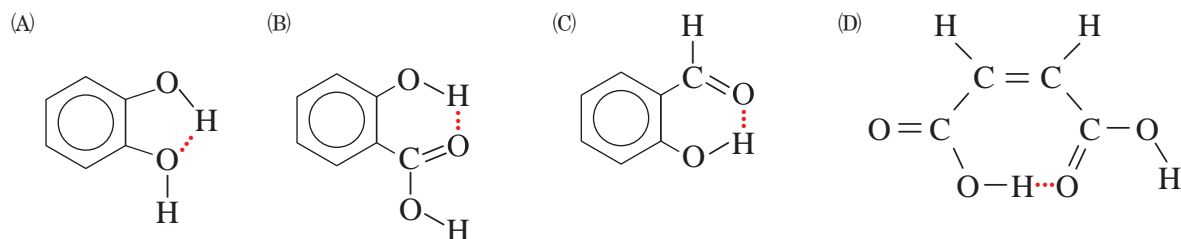
氫鍵並非只可存在於分子間，有時化合物的結構條件符合，亦可能形成分子內氫鍵，例如：圖 2-34 的分子都具有分子內的氫鍵。



▲ 圖 2-33 氫鍵形成示意圖

註4

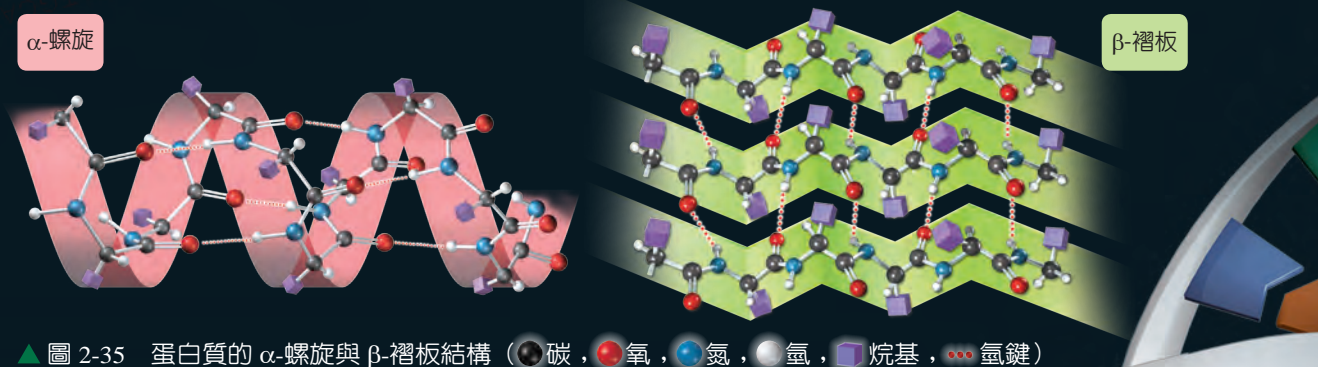
但氫鍵有時因受到結構剛性不可彎曲之影響，並不一定會呈現  $180^\circ$ ，如圖 2-34 中，含苯環結構的分子內氫鍵，其角度遠小於  $180^\circ$ 。



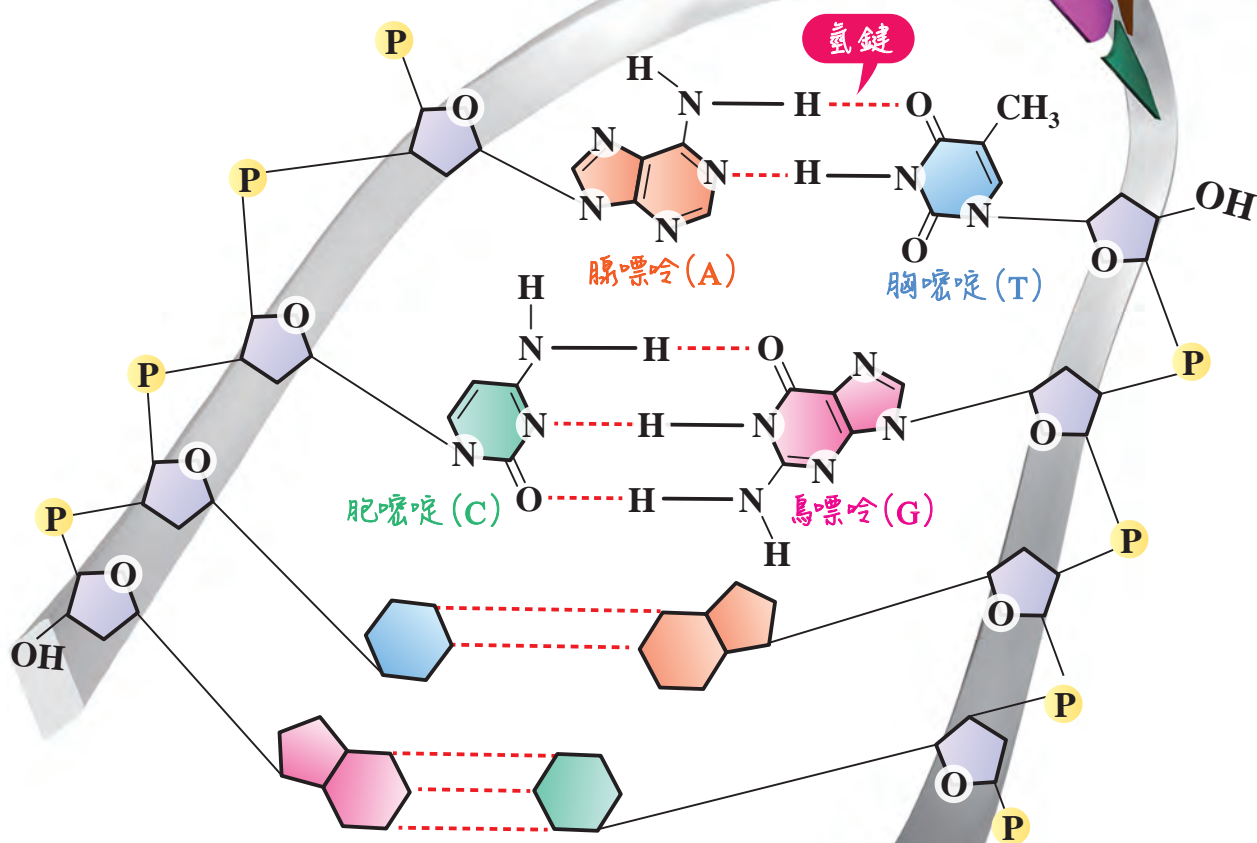
▲ 圖 2-34

(A) 鄰苯二酚、(B) 鄰羥基苯甲酸（柳酸）、(C) 鄰羥基苯甲醛及(D) 順丁烯二酸的結構中都具有分子內氫鍵。

自 20 世紀中葉以後，科學家亦發現氫鍵在生物體內重要大分子之結構上，扮演極為關鍵的角色。例如：蛋白質結構中因為有氫鍵的支撐，所以可形成特別的  $\alpha$ -螺旋與  $\beta$ -褶板之結構（圖 2-35）；而 DNA 亦利用其分子中含氮鹼間之氫鍵，形成雙股螺旋的結構（圖 2-36）。這些重大的發現，開啟了此後生化與遺傳等相關科技的大門。



▲圖 2-35 蛋白質的  $\alpha$ -螺旋與  $\beta$ -褶板結構 (● 碳, ● 氧, ● 氮, ● 氫, ● 烷基, ... 氫鍵)

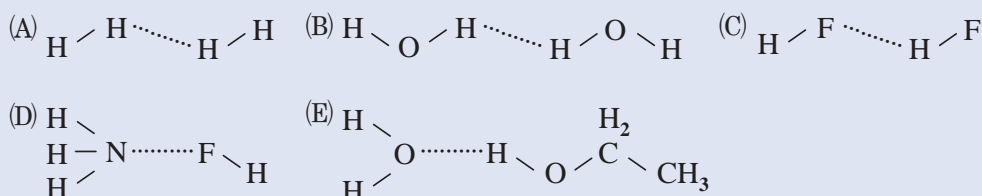


▲圖 2-36 DNA 的雙股螺旋結構

綜合以上敘述，分子間的作用力大小會影響分子物質沸點的高低。其中，氫鍵具有最關鍵的影響力，如有機化合物中，具有氫鍵的羧酸和醇等，其沸點會明顯較其他無氫鍵者高。其次，則是考慮分子量，分子量較大者，分散力亦大，故沸點也較高。最後，則須考慮分子是否具有極性，有極性的分子，因分子間具有偶極-偶極力，沸點也會較無極性者高。

### 範例 2-9


氫鍵是生物體內一種重要的作用力，DNA 的雙股螺旋結構就是利用氫鍵來維繫的。下列用點線表示的鍵結（不考慮鍵角），哪些是氫鍵？



..... 解答 .....

接在 F、O、N 之 H 原子，與另外電負度較大且有孤對電子之原子間形成氫鍵；(A)(B) H 沒有孤對電子，不成立；(D) 沒有氫原子，不成立。故選(C)(E)

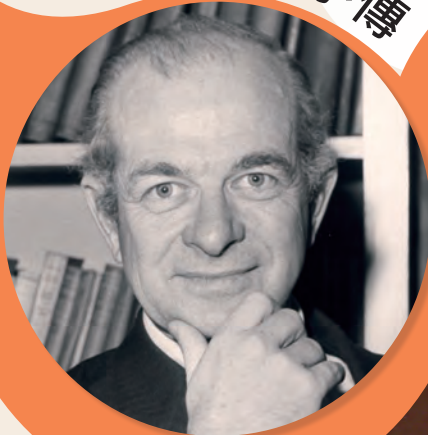
### 練習 2-9

下列有關酚（-OH）、苯（）及甲苯（-CH<sub>3</sub>）沸點由高到低的排序，何者正確？

- (A) 酚 > 苯 > 甲苯    (B) 甲苯 > 苯 > 酚    (C) 苯 > 酚 > 甲苯    (D) 酚 > 甲苯 > 苯  
(E) 甲苯 > 酚 > 苯

## 科學家小傳

想出一個好點子的最好辦法，就是想出很多點子。



## 鮑林

L. C. Pauling  
1901 ~ 1994

美國化學家鮑林誕生於奧勒岡州的波特蘭市，父親是一位藥商。鮑林從小就喜歡閱讀，中學時在一位好朋友的指導下，進行了許多的化學實驗，從此立志成為化學家。15 歲時便取得奧勒岡農業學院的入學許可，但因為仍有兩個美國歷史課程的學分未取得，故未獲得高中畢業證書而無法入學；因此，鮑林離開學校打工一年後，才順利進入大學就讀。過了 45 年，鮑林獲頒諾貝爾獎之後，其母校才補發高中文憑給他。

大學時期，鮑林研讀了路易斯以及朗謬 (I. Langmuir, 1881 ~ 1957) 等人有關分子結構的研究報告之後，便決定鑽研這個主題，因而選修了許多物理與數學方面的相關課程。1922 年，鮑林進入加州理工學院深造，專攻晶體的 X 光繞射研究，1925 年取得物理化學與數學物理學博士學位。之後，鮑林負笈歐

洲，先後在慕尼黑的索莫非實驗室、哥本哈根的波耳實驗室及蘇黎世的薛丁格實驗室研究量子力學。經過兩年的努力，鮑林成為當時新興的量子化學領域之領航員。

西元 1927 年，鮑林返回美國擔任加州理工學院的理論化學助理教授，此後五年發表了 55 篇論文，其中包括 X 光繞射的晶體結構研究，以及利用量子力學計算原子與分子的結構，並發表五個決定錯離子晶體結構的定律。1930 年成為正教授，1931 年獲頒美國化學會的朗謬獎章。隔年，鮑林發表了一篇他自認為此生中最重要的論文——以混成軌域解釋四價碳的鍵結；同一時期，鮑林也提出電負度的概念，並推算出大部分元素的電負度值。在 1930 年代中期以前，鮑林的研究領域幾乎完全在探討無機分子的結構，

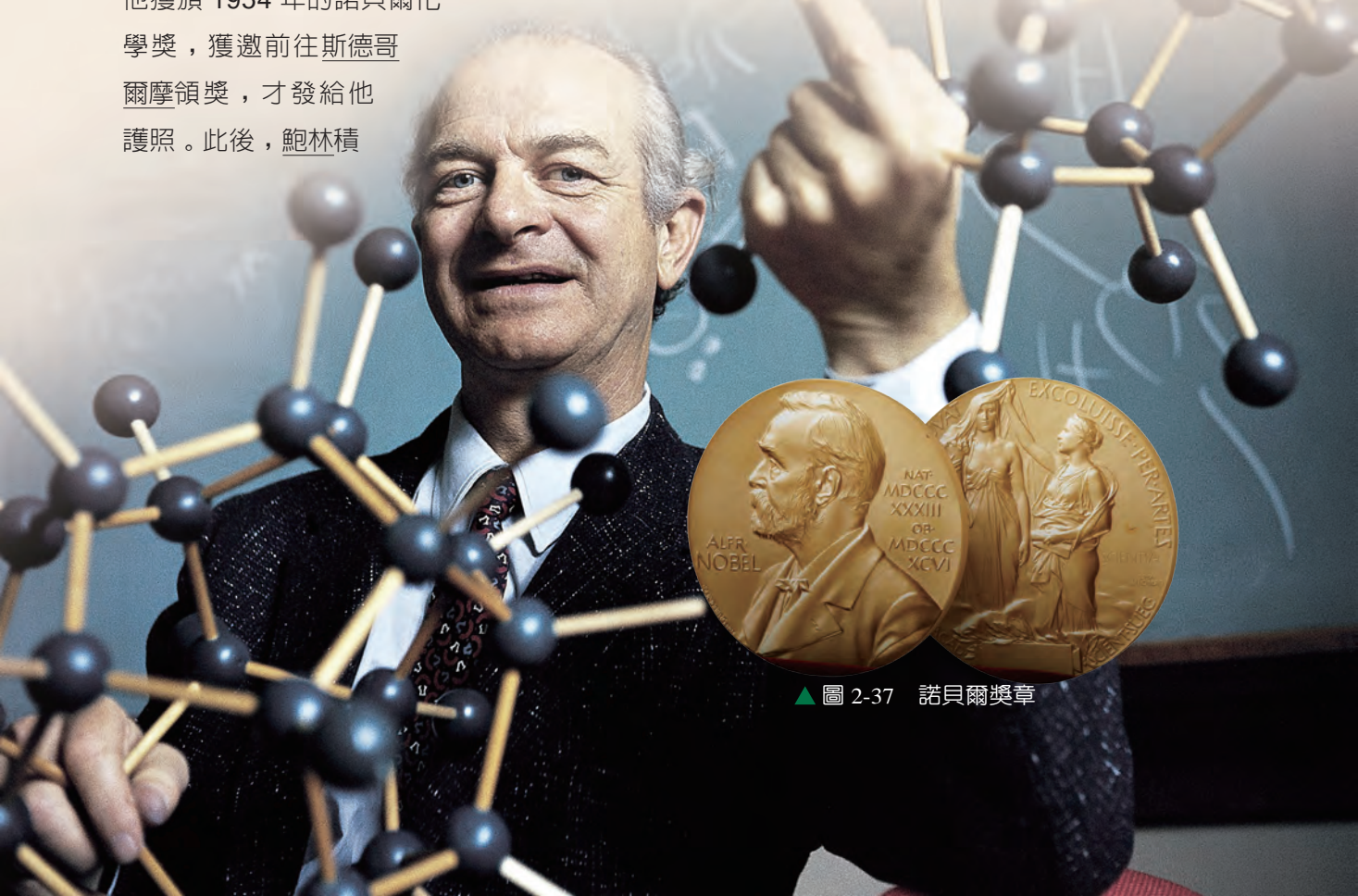
但之後他卻開始對分子生物學產生興趣，他首先利用 X 光繞射研究血紅素的結構，並模擬出血紅素分子在攜帶與失去氧氣前後結構上的變化。1951 年，鮑林在經過長達 11 年的努力之後，解開了蛋白質的二級結構，提出  $\alpha$ -螺旋形與  $\beta$ -褶板狀的分子模型。

在第二次世界大戰以前，鮑林對於政治問題漠不關心。但是，當他見到二戰所帶來的可怕後果，又受到其夫人的影響後，轉變為一位熱心的和平主義者。曼哈頓計畫開始時，歐本海默曾邀請鮑林主持化學部門，但他拒絕。1946 年，他加入由愛因斯坦所領導的原子科學家緊急委員會，該會的宗旨是警告政府須注意核武所帶來的危害，他極端狂熱的行徑受到了美國政府的關注。1952 年，美國政府甚至取消他的護照長達兩年，直到他獲頒 1954 年的諾貝爾化學獎，獲邀前往斯德哥爾摩領獎，才發給他護照。此後，鮑林積

極投入反核武運動；1958 年，由鮑林具名，向聯合國提出了一份由 11,021 位各國科學家共同簽署的「反核武試爆」請願書，經過不斷對各強國政府施加壓力，美蘇兩國終於在 1963 年共同簽署了「部分禁止核武試爆條約」。因反核武的貢獻，鮑林獲得了 1962 年的諾貝爾和平獎。

晚年，鮑林大力倡導服用維生素 C 的養生論。1994 年 8 月 19 日，鮑林因前列腺癌病逝，享壽 93 歲。十幾年前，新科學人雜誌曾票選有史以來最偉大的 20 位科學家活動，20 世紀的科學家中僅有鮑林與愛因斯坦兩人上榜，可見其在科學界的崇高地位。

參考資料：<http://natsci.parkland.edu/che/203/paragraphs/pauling.htm>



▲ 圖 2-37 諾貝爾獎章



摘要與架構

物質的性質  
與化學鍵



化學鍵種類

VSEPR 與分子形狀

分子極性

分子間作用力

離子鍵

形成

離子化合物

熔點、沸點高。  
質硬而脆（無延性與展性）。  
電解質。

金屬鍵

形成

無方向性

金屬

具有延性與展性。  
電、熱良導體。

形成

分子物質

熔點、沸點低。  
無延性與展性。

共價網狀  
固體

熔點、沸點極高。  
無延性與展性。

共價鍵

單鍵與多鍵

$\sigma$  鍵：軌域沿核間軸方向重疊形成。  
 $\pi$  鍵：p 軌域彼此平行重疊形成。  
單鍵：必為  $\sigma$  鍵。  
雙鍵：1 個  $\sigma$  鍵 + 1 個  $\pi$  鍵。  
參鍵：1 個  $\sigma$  鍵 + 2 個  $\pi$  鍵。

混成軌域

$sp^3$   
 $sp^2$   
 $sp$

原則：電子帶負電，因斥力關係使電子對應盡量遠離。

斥力大小： $lp-lp > lp-bp > bp-bp$

可判定分子形狀，並比較鍵角大小。

極性分子：分子內各鍵偶極矩向量和不為零者。

非極性分子：分子內各鍵偶極矩向量和等於零者。

凡得瓦力

偶極-偶極力：極性分子間存在。  
偶極-誘發偶極力：極性與非極性分子間存在。  
分散力：所有種類的分子間皆存在。

氫鍵

條件 —  $X-H \cdots Y$ , X、Y 為高電負度原子，  
例如：F、O、N；Y 還需具有孤對電子。

種類 — 分子間氫鍵。  
分子內氫鍵。

## 習題

## 一、基本題 (以 \* 標示者為多重選擇題)

## 2-1 化學鍵的種類

- \* 1. 下列有關離子晶體和金屬晶體的敘述，哪些正確？
- (A)離子晶體和金屬晶體在固態時，皆具有導電性  
 (B)離子晶體不具延性與展性  
 (C)離子晶體的熔點一定較金屬晶體為高  
 (D)離子晶體的導熱性不良  
 (E)常溫、常壓下，所有離子晶體與金屬皆成固態
2. 有關 NaCl、MgO 及 KCl 熔點高低之比較，何者正確？
- (A) NaCl > MgO > KCl (B) NaCl > KCl > MgO (C) MgO > KCl > NaCl  
 (D) KCl > MgO > NaCl (E) MgO > NaCl > KCl
3. 下列物質中，何者具有最高的熔點？
- (A)鋁金屬 (B)形成網狀固體的矽 (C)形成分子固體的磷 (D)形成分子固體的硫  
 (E)鈉金屬
4. 有關共價網狀固體的敘述，何者錯誤？
- (A)常以簡式來表示化學式 (B)皆可導電 (C)共價鍵有方向性，故網狀固體無延性與展性 (D)硼、碳、矽皆有以元素或化合物存在之共價網狀固體 (E)熔點較分子物質高
5. 下列有關天然鑽石的敘述，何者正確？
- (A)與石墨一樣，黑而堅硬 (B)是硼的同素異形體 (C)屬於分子晶體 (D)熔點高、熔化熱大、硬度大 (E)是電的良導體
- \* 6. 下列分子或離子，哪些具有共振結構？
- (A)  $\text{NO}_3^-$  (B)  $\text{ClO}_4^-$  (C)  $\text{C}_6\text{H}_6$  (苯) (D)  $\text{C}_2\text{H}_4$  (E)  $\text{PCl}_3$

## 習題

7. 下列各組所含的物質何者均屬於分子固體？

- (A) 乾冰、碘、固態氫 (B) 氯化鉀、三氯化硼、冰晶 (C) 鑽石、石英、溴化鉀  
(D) 鎂、鋁、硝酸鉀 (E) 巴克球、斜方硫、氯化鈉

## 2-2 單鍵與多鍵

8. 下列何項是  $\pi$  鍵的特點？

- (A) 造鍵的兩軌域以頭對頭部分重疊 (B) 造鍵之一方供應孤對電子 (C) 造鍵的雙方軌域方向是平行的 (D) 鍵能比  $\sigma$  鍵大 (E) 能自由旋轉

9. 丙二烯的分子結構為  $\text{H}_2\text{C}=\text{C}=\text{CH}_2$ ，則丙二烯分子中共有幾個  $\sigma$  鍵與  $\pi$  鍵？

- (A)  $2\sigma$ 、 $2\pi$  (B)  $0\sigma$ 、 $4\pi$  (C)  $6\sigma$ 、 $2\pi$  (D)  $4\sigma$ 、 $4\pi$  (E)  $2\sigma$ 、 $6\pi$

10. 承第 9 題，丙二烯分子最多有幾個原子共平面？

- (A) 3 (B) 4 (C) 5 (D) 6 (E) 7

\* 11. 下列有關鍵能的比較，哪些正確？

- (A)  $\text{Cl}_2 > \text{Br}_2 > \text{I}_2$  (B)  $\text{N}_2 > \text{O}_2 > \text{H}_2$  (C)  $\text{HF} > \text{HCl} > \text{HBr} > \text{HI}$   
(D) 碳-氧鍵： $\text{CO} > \text{CO}_2 > \text{CO}_3^{2-}$  (E) 氮-氮鍵： $\text{N}_2\text{H}_4 > \text{N}_2\text{H}_2 > \text{N}_2$

## 2-3 混成軌域

12.  $\text{BCl}_3$  分子中的共價鍵是由哪兩個軌域重疊而成？

- (A)  $p-p$  (B)  $sp^2-p$  (C)  $sp^3-s$  (D)  $sp^3-p$  (E)  $sp-p$

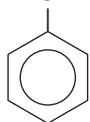
\* 13. 2 個 H 原子使用  $1s^1$  互相結合生成  $\text{H}_2$  分子時，以  $(s-s)$  表示其軌域重疊情形，則下列分子中原子間軌域重疊情形，哪些正確？

- (A)  $\text{Cl}_2$  ( $p-p$ ) (B)  $\text{H}-\text{Cl}$  ( $s-p$ ) (C)  $\text{CCl}_4$  ( $sp^2-s$ ) (D)  $\text{H}_2\text{O}$  ( $p-s$ )  
(E)  $\text{NH}_3$  ( $sp^3-s$ )

\* 14. 下列分子的鍵結軌域中，哪些含有  $sp^3$  混成軌域？

- (A)  $\text{H}_2\text{S}$  (B)  $\text{C}_2\text{H}_6$  (C)  $\text{NH}_3$  (D)  $\text{CH}_3\text{Cl}$  (E)  $\text{C}_2\text{H}_2$

15. 下列化合物中，何者不只一種碳之混成軌域（ $sp$ 、 $sp^2$ 、 $sp^3$ 等）？  
 (A)  $\text{CH}\equiv\text{C}-\text{C}\equiv\text{CH}$  (B)  $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3$  (C)  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$   
 (D)  $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$  (E)  $\text{CH}=\text{CH}_2$



- \* 16. 下列哪些分子的原子都在同一平面上？  
 (A) 乙烯 (B) 甲烷 (C) 三氟化硼 (D) 氨 (E) 苯

## 2-4 價殼層電子對互斥理論與分子形狀

17. 下列五組分子中，何組的分子之立體結構相似？  
 (A)  $\text{NH}_3$ ， $\text{BF}_3$  (B)  $\text{NF}_3$ ， $\text{SO}_3$  (C)  $\text{C}_2\text{H}_2$ ， $\text{BeF}_2$  (D)  $\text{CS}_2$ ， $\text{OF}_2$  (E)  $\text{C}_2\text{H}_2$ ， $\text{H}_2\text{O}_2$
- \* 18. 有關分子或離子的鍵角比較，下列哪些正確？  
 (A)  $\text{CO}_2 > \text{NO}_3^- > \text{ClO}_4^-$  (B)  $\text{CH}_4 > \text{SiH}_4 > \text{GeH}_4$  (C)  $\text{SO}_3^{2-} > \text{SO}_3 > \text{SO}_2$   
 (D)  $\text{CH}_4 > \text{NH}_3 > \text{H}_2\text{O}$  (E)  $\text{CS}_2 > \text{SO}_2 > \text{H}_2\text{S}$
19.  $\text{I}_2$  難溶於水，但若水中含有  $\text{I}^-$ ，則  $\text{I}_2$  即可與之反應生成  $\text{I}_3^-$  而溶於水中，可用以檢驗澱粉存在，下列關於  $\text{I}_3^-$  的敘述何者正確？  
 (A)  $\text{I}_3^-$  溶液遇澱粉呈現黃褐色  
 (B) 中心 I 原子上有兩對孤對電子  
 (C) 鍵角最接近  $120^\circ$   
 (D) 形狀最接近直線  
 (E) 中心 I 原子有 8 個電子

## 2-5 鍵極性與分子極性

- \* 20. 下列分子中，哪些是極性分子？  
 (A)  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  (B)  $\text{PCl}_5$  (C)  $\text{NF}_3$  (D)  $\text{BeH}_2$  (E)  $\text{H}_2\text{O}_2$

## 習題

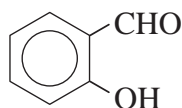
- \* 21. 下列有關  $\text{BeF}_2$ 、 $\text{BF}_3$ 、 $\text{CF}_4$ 、 $\text{NF}_3$  四種氟化物之各項敘述，哪些正確？
- (A) 具有高鍵偶極矩之分子，其分子的偶極矩必不為零  
 (B)  $\text{BF}_3$  的分子偶極矩約與  $\text{NH}_3$  相等  
 (C)  $\text{NF}_3$  的分子偶極矩比其他氟化物為大  
 (D) 氟化物中，兩鍵結原子之游離能相差愈大，則其分子偶極矩愈大  
 (E) 該四種氟化物中，有三種為非極性分子
- \* 22. 下列哪些為非極性之直線形分子？
- (A)  $\text{HCl}$  (B)  $\text{CO}_2$  (C)  $\text{C}_2\text{H}_2$  (D)  $\text{SO}_2$  (E)  $\text{NO}_2$

## 2-6 分子間的作用力

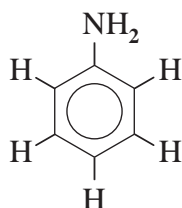
- \* 23. 下列哪些為  $\text{CH}_3\text{F}$  之分子間作用力？
- (A) 偶極—偶極力 (B) 偶極—誘發偶極力 (C) 分散力 (D) 氫鍵 (E) 共價鍵
24. 週期表第 14 族元素的氫化物： $\text{CH}_4$ 、 $\text{SiH}_4$ 、 $\text{GeH}_4$  及  $\text{SnH}_4$ ，其沸點依所列的順序由左向右增高。這種趨勢之發生是由於各分子的何項性質差異所致？
- (A) 分子偶極矩不同  
 (B) 共價鍵強度的不同  
 (C) 氫鍵強度的不同  
 (D) 分散力的大小不同  
 (E) 鍵偶極矩不同
25. 將蛋白置於酒精中，則蛋白原來透明膠狀的性質消失，這是因為蛋白分子內何種鍵結被破壞？
- (A) 共價鍵 (B) 離子鍵 (C) 氫鍵 (D) 雙硫鍵 (E) 金屬鍵

\* 26. 下列化合物中哪些具有分子內氫鍵？

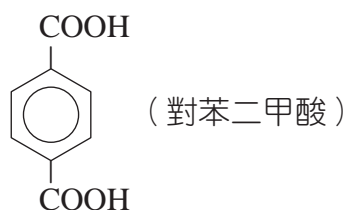
(A)



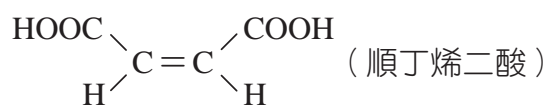
(B)

(C)  $\text{CH}_3\text{COOH}$ 

(D)



(E)



\* 27. 下列有關沸點高低之比較，哪些正確？

(A)  $\text{S}_8 > \text{P}_4 > \text{Cl}_2 > \text{Ar}$  (B) 新戊烷 > 正戊烷 > 異戊烷 (C)  $\text{N}_2 > \text{O}_2$ (D) 順二氯乙烯 > 反二氯乙烯 (E)  $\text{HF} > \text{H}_2\text{O} > \text{NH}_3$ 

## 二、綜合題

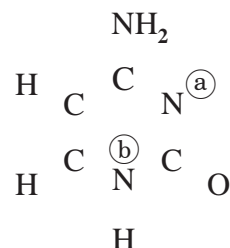
28. 依沸點高到低的次序，排列下列各物質： $\text{F}_2$ 、 $\text{NaF}$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{Ne}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 。

29. 碳-碳原子之間的鍵結，有單鍵、雙鍵或參鍵，下列各物質中，平均碳-碳之間的共價鍵結為多少個鍵？

(1) 鑽石 (2) 乙烯 (3) 乙炔 (4) 苯 (5) 石墨

## 三、素養題

30. 在 DNA 的結構中含有四種含氮鹼——A、T、C、G，這四種含氮鹼彼此的配對和組合掌控了生物遺傳的密碼。含氮鹼中的 C 稱為胞嘧啶，分子式為  $\text{C}_4\text{H}_5\text{N}_3\text{O}$ ，其各原子排列方式如右圖所示，但鍵結均未繪出：



(1) 已知胞嘧啶中各原子皆滿足八隅體法則，畫出其正確之路易斯結構。

(2) 胞嘧啶分子中共有多少個  $\sigma$  鍵？多少個  $\pi$  鍵？多少對孤對電子？

(3) 標示 (a) 與 (b) 之 N 原子各為何種混成軌域？