

課題十

化學平衡



課題十

化學平衡



試想像移動着的吊纜上有些纜車。如果上山的纜車的速率與下山的纜車的速率相等，吊纜上的纜車數目便維持不變。這種情況是化學平衡的一個比喻。

第39章 動態平衡

第40章 平衡常數

第41章 濃度和溫度的變化對化學平衡的影響

第 39 章

動態平衡

39.1 不可逆反應與可逆反應

39.2 動態平衡的特徵

學習目標

研習本章後，你應能：

- 39.1 • 列舉適當例子說明不可逆反應及可逆反應；
- 39.2 • 明瞭化學平衡的本質是動態的；
 - 描述達至動態平衡下的化學體系的特徵。

第 39 章 動態平衡

你知道圖中的兩個人正在做甚麼嗎？



這兩個人正在拋擲六支棍棒。他們每人手持兩支棍棒，同一時間，另外兩支棍棒則被拋在空中。他們以相同的速率把棍棒來回拋擲，而在手中和空中的棍棒數目卻維持不變。來回拋擲兩個過程以相同的速率進行，這情況跟化學平衡相似。

試想想...

- 若這兩個人以不同的速率拋擲棍棒，情況會怎樣？
- 圖中顯示拋擲棍棒的某特定時刻，而該狀態稱為動態平衡。「動態」在這裏是甚麼意思？
- 在化學世界中，會否出現動態平衡？

研習本章後，你應能回答以上問題。

39.1 不可逆反應與可逆反應

不可逆反應

只會向着單一方向進行的化學反應稱為**不可逆反應**。不可逆反應進行時，反應物會持續變為生成物，當其中一種反應物耗盡時，反應便會完結。

以下是一些不可逆反應的例子：

1. 金屬與稀氫氯酸的反應

鎂與稀氫氯酸反應，生成氯化鎂和氫(圖39.1)。

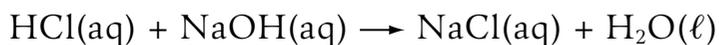


反應只向着單一方向進行

然而，把氫氣通入氯化鎂溶液中，則沒有產生任何反應。這顯示該反應只會向着單一方向進行。

2. 酸鹼中和作用

稀氫氯酸與稀氫氧化鈉溶液中中和，生成氯化鈉和水。



反應只向着單一方向進行

然而，氯化鈉溶液則不會變為氫氯酸和氫氧化鈉。這亦顯示反應只會向着單一方向進行。



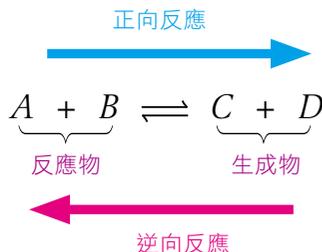
圖39.1 鎂帶與稀氫氯酸反應，生成氯化鎂溶液和氫氣。

課文重點

不可逆反應只會向着單一方向進行，當其中一種反應物耗盡時，反應便會完結。

可逆反應

另一方面，很多化學反應卻不會完結。生成物會作出反應，變為原來的反應物，這些反應稱為**可逆反應**。我們可用以下的方程式來表示：



學習錦囊

為方便起見，我們常把可逆反應方程式左方的物質稱為「反應物」，在右方的物質稱為「生成物」。

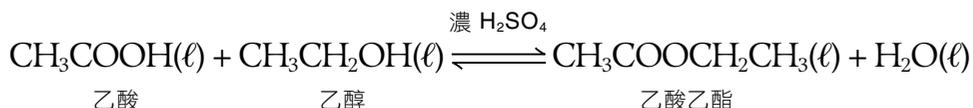
符號「 \rightleftharpoons 」表示反應是可逆的。由左至右進行的反應（即 $A + B \rightarrow C + D$ ）稱為**正向反應**；由右至左進行的反應（即 $C + D \rightarrow A + B$ ）稱為**逆向反應**。

在可逆反應中，化學方程式左方的物質（即 A 和 B ）是正向反應的反應物；而方程式右方的物質（即 C 和 D ）則是正向反應的生成物。相反，在逆向反應中「反應物」和「生成物」的角色則會對調。

以下是一些可逆反應的例子：

1. 酯化作用 (生成酯)

在有濃硫酸作為**催化劑**的情況下，乙酸與乙醇加熱後會產生反應，生成乙酸乙酯（一種具有香甜水果味的酯）和水。



在反應中，生成的乙酸乙酯同時會與水反應，變回乙酸和乙醇。因此，即使把反應混合物回流加熱一段長時間，反應也不會完結。這例子顯示該反應會同時以正向和逆向兩個方向進行。在反應混合物中，乙酸、乙醇、乙酸乙酯和水同時存在。

學習錦囊

催化劑是一種能改變（通常是提高）化學反應速率的物質。它的化學性質在催化過程中並沒有改變。

2. 乙酸的電離作用

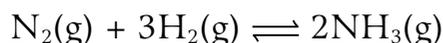
弱酸在水中只會輕微電離。例如，乙酸分子在水中只會輕微電離，生成乙酸根離子和氫離子。與此同時，乙酸根離子會與氫離子結合，生成乙酸分子。



所得的溶液同時含有乙酸分子和極少量的乙酸根離子和氫離子。

3. 氨的工業製備過程 (哈柏法)

在有鐵粉作為催化劑的情況和適當的條件下 (400°C–450°C 和200大氣壓強)，氮與氫反應，生成氨。與此同時，部分氨會分解為氮和氫 (如以下逆向反應所示)。



上述反應會同時以正向和逆向兩個方向進行。有關哈柏法的詳細過程將會在「課題十三：工業化學」再作討論。

課文重點

可逆反應會以正向和逆向兩個方向進行，而反應並不會完結。

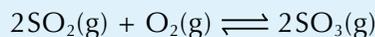
活動39.1

探究不可逆反應和可逆反應的例子

在本活動中，你將會搜尋一些不可逆反應和可逆反應的例子。

課堂練習39.1

參考以下反應：



- 上述反應是可逆的嗎？試加以解釋。
- 上述 SO_3 的分解作用是正向反應還是逆向反應？
- 分別寫出正向反應和逆向反應中的反應物和生成物。

39.2 動態平衡的特徵

化學平衡的動態本質

在可逆反應中，當正向反應的速率與逆向反應的速率相等時，體系便達至**平衡**。這時，化學體系中並沒有任何可觀察的變化。注意由於在平衡狀態下，正向反應和逆向反應仍在進行中，故化學平衡的本質是**動態**的。

我們可利用在跑步機上跑步的情況來比喻**動態平衡** (圖39.2)。由於圖中的女子跑步的速率與相反方向移動的輸送帶的速率相等，故她與輸送帶的運動達至動態平衡，並保持在跑步機上的某個位置。



試想想

你能舉出其他例子用作比喻動態平衡嗎？

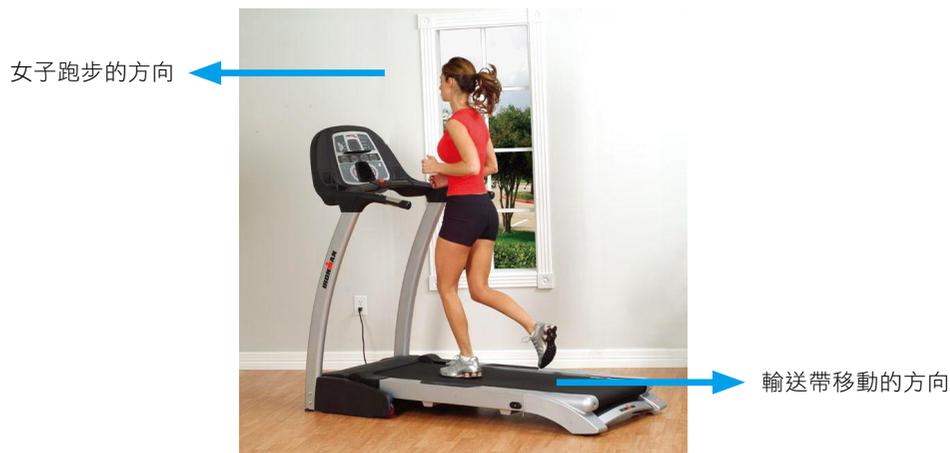
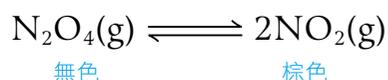


圖39.2 跑步的速率與輸送帶移動的速率相等，只是移動方向剛好相反。圖中的女子和輸送帶的運動已達至動態平衡。

讓可逆反應達至動態平衡

考慮以下可逆反應的方程式：



四氧化二氮 (N_2O_4) 是無色的氣體，而二氧化氮 (NO_2) 則是棕色的氣體。在該化學體系中的正向反應是 N_2O_4 分子分解為 NO_2 分子的過程，而逆向反應則是 NO_2 分子結合成 N_2O_4 分子的過程。

讓我們看看這個可逆反應如何達至動態平衡。

試想想

為甚麼我們必須把試管塞好，可逆反應才會發生？

學習錦囊

達至平衡狀態前，正向反應的速率較逆向反應的速率為高。

1. 在常溫常壓下，把無色的 $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ 通入試管內，並把試管緊緊塞好（**密閉體系**）。參看圖39.3(a)。

由於在反應開始時 N_2O_4 的濃度最高，故**正向反應的速率也是最高**。與此同時，由於在反應開始時，試管中並沒有 NO_2 ，故**逆向反應的速率等於零**。

2. 部分 N_2O_4 分子分解為 NO_2 分子，導致氣態混合物逐漸變為棕色，參看圖39.3(b)。隨着反應進行，越來越多的 N_2O_4 分子分解，生成更多的 NO_2 分子。

由於 N_2O_4 的濃度逐漸下降，故**正向反應的速率會變得較低**。與此同時， NO_2 的濃度逐漸上升，**逆向反應的速率也會變得較高**。

3. 最後，**正向反應的速率相等於逆向反應的速率**， N_2O_4 和 NO_2 的濃度也會維持不變。而氣態混合物的顏色則再沒有任何變化，仍持續呈棕色。參看圖39.3(c)。此時，該體系達至**動態平衡**。

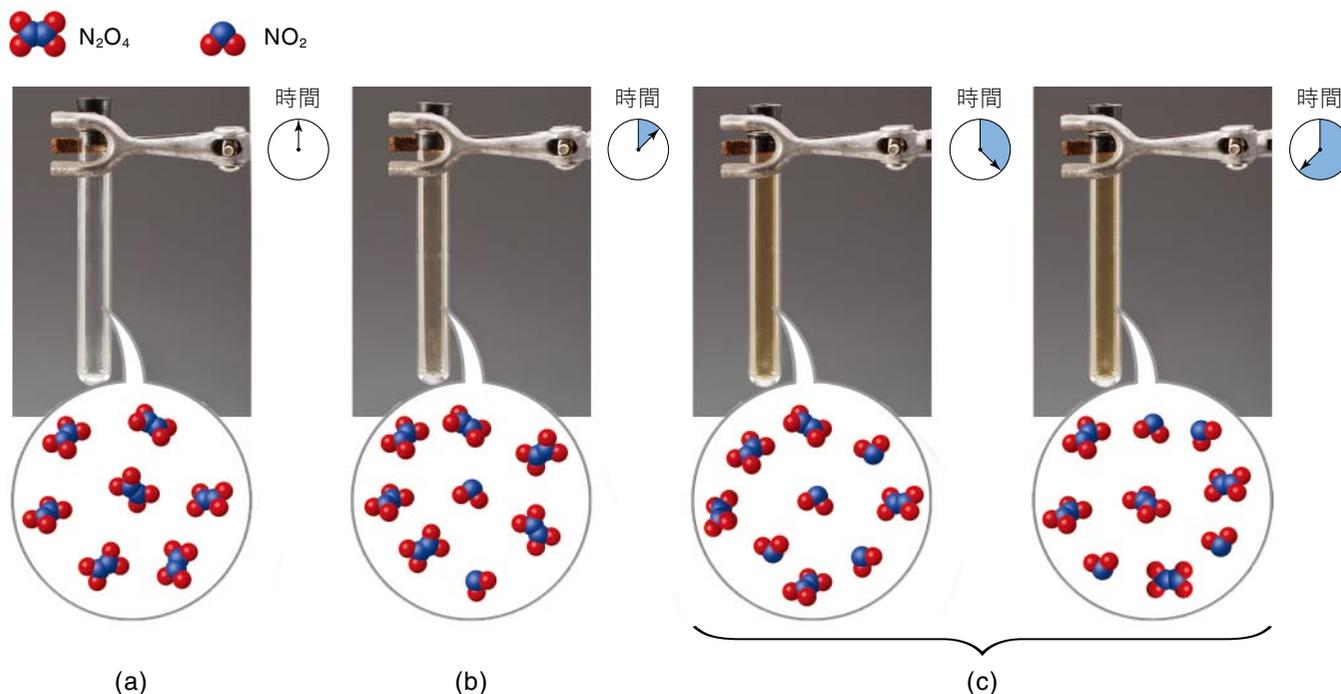


圖39.3 以 N_2O_4 作反應物而建立的 N_2O_4 和 NO_2 平衡體系。

- (a) 反應開始時，體系中只有無色的 N_2O_4 分子。
- (b) 體系中其中一些 N_2O_4 分子會分解為 NO_2 分子，而混合物也逐漸變成棕色。
- (c) 由於 N_2O_4 分子分解作用的速率相等於 NO_2 分子結合作用的速率，故兩種物質的濃度維持不變，混合物仍持續呈棕色。該體系達至動態平衡。

概念檢查

✘ 某可逆反應達至平衡時，所有反應物和生成物的濃度都是相同的。

✔ 某可逆反應達至平衡時，所有反應物和生成物的濃度會維持不變，但不一定相同。

圖39.4顯示在 N_2O_4 和 NO_2 體系中，反應混合物的顏色深度變化，以及 N_2O_4 和 NO_2 的濃度隨時間的變化。須注意反應以 N_2O_4 作起始反應物，而達至平衡時，混合物的顏色深度，以及 N_2O_4 和 NO_2 的濃度則會維持不變。

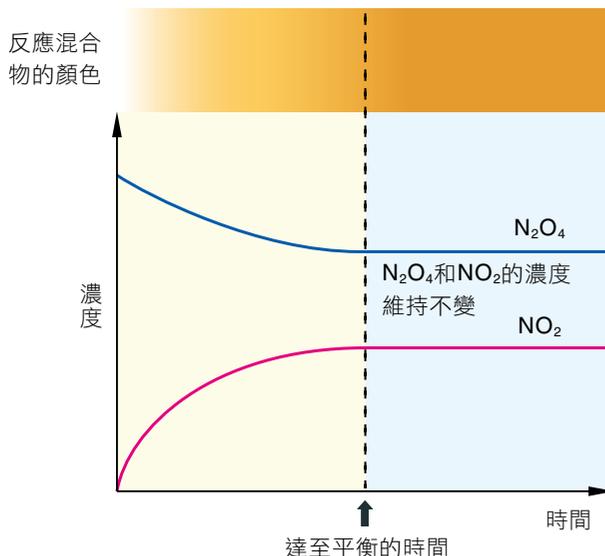


圖39.4 在 N_2O_4 和 NO_2 平衡體系中，反應混合物的顏色深度變化（圖的上方）及 N_2O_4 和 NO_2 的濃度隨時間的變化（下方曲線）。

圖39.5顯示在 N_2O_4 和 NO_2 平衡體系中，正向反應和逆向反應的速率隨時間的變化。當達至平衡時， N_2O_4 分子分解作用和 NO_2 分子結合作用的速率是相等的。即是說，正向反應和逆向反應的速率是相等的。

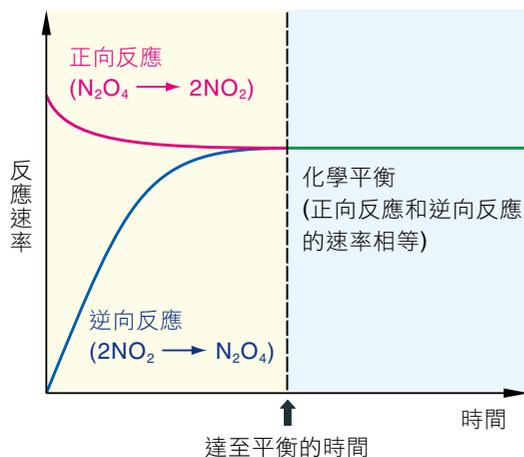


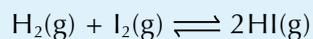
圖39.5 在 N_2O_4 和 NO_2 的平衡體系中，正向反應和逆向反應的速率隨時間的變化。

課文重點

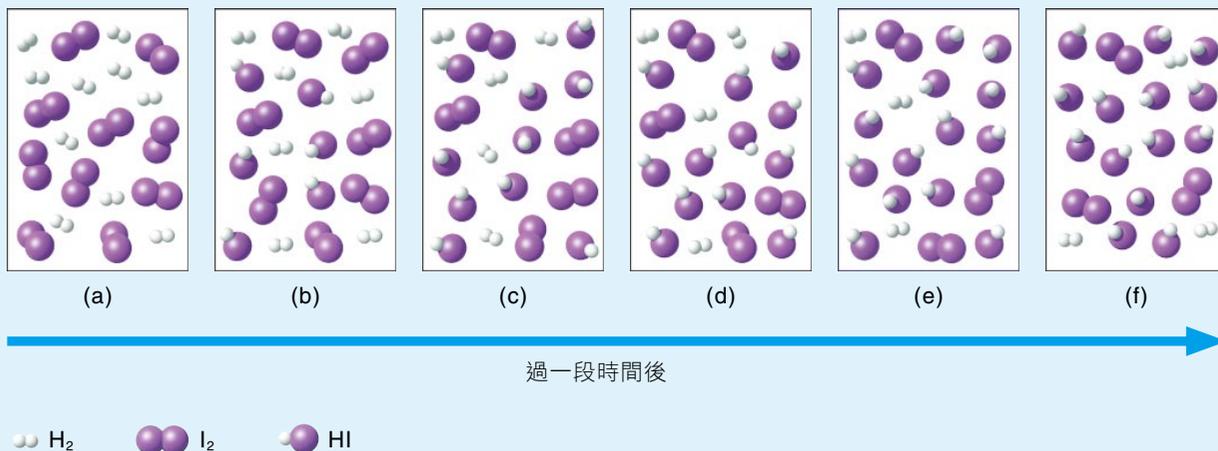
化學平衡的本質是動態的。當達至平衡時，正向反應和逆向反應的速率是相等的。

課堂練習39.2

在某特定溫度下，把具有相同摩爾數的 H_2 和 I_2 氣體加入一個密封的容器中，會發生以下反應：

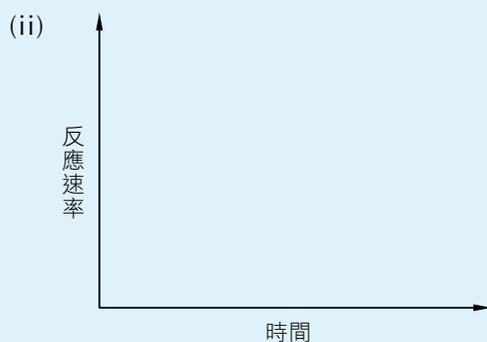
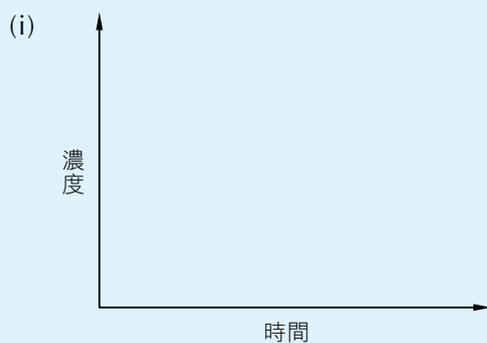


(a) 以下哪幅圖代表體系已達至動態平衡？試加以解釋。



(b) 在下圖繪畫曲線來顯示下列資料：

- (i) H_2 、 I_2 和 HI 的濃度隨時間的變化；
- (ii) 直至反應混合物達至平衡為止，正向反應和逆向反應的速率隨時間的變化。

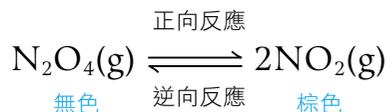


(c) 描述反應混合物的顏色深度隨時間的變化。

(提示： $\text{H}_2(\text{g})$ 和 $\text{HI}(\text{g})$ 是無色的，而 $\text{I}_2(\text{g})$ 是紫色的。)

從反應的任何一方開始均可達至動態平衡

再考慮以下的可逆反應：



若以NO₂取代N₂O₄作起始反應物，可否獲得相同的平衡混合物？我們可在常溫常壓下，把N₂O₄和NO₂分別放入密封容器中以進行實驗，並讓兩個體系達至平衡。

表39.1記錄了兩個實驗中N₂O₄和NO₂的起始濃度和平衡濃度。

表39.1 只以N₂O₄ (實驗1) 或NO₂ (實驗2) 作起始反應物的兩個實驗中，N₂O₄和NO₂的起始濃度和平衡濃度。

實驗	起始濃度 (M)		平衡濃度 (M)	
	N ₂ O ₄	NO ₂	N ₂ O ₄	NO ₂
1	0.0500	0	0.0429	0.0141
2	0	0.1000	0.0429	0.0141

(註：兩個實驗中N和O原子的總數目相等。)

根據實驗結果，以N₂O₄ (實驗1) 或NO₂ (實驗2) 作起始反應物，均可獲得相同的平衡混合物。

課文重點

從可逆反應的任何一方開始，均可達至動態平衡。

在密閉體系中達至動態平衡的重要性

反應要達至動態平衡，必須在密閉體系中進行，這確保物質不可進入或離開體系。

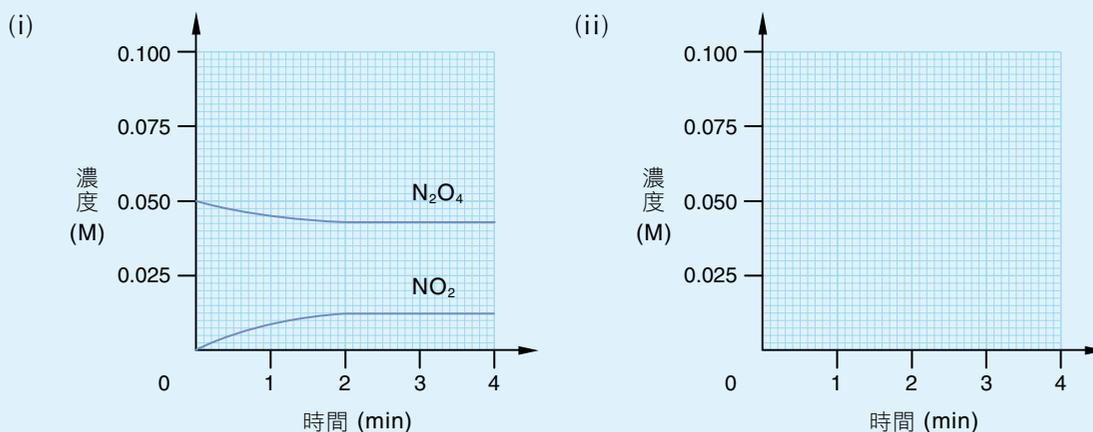
以N₂O₄和NO₂的平衡體系為例，氣態混合物是在蓋上塞的試管或密封容器中進行反應，否則N₂O₄和NO₂會逸走，體系便永遠不能達至平衡。

課文重點

動態平衡只能在密閉體系中建立，使物質不可進入或離開體系。

課堂練習39.3

1. 下圖(i)顯示以下反應在一個密封容器中達至平衡的濃度對時間的坐標圖。



- (a) 根據圖(i)，哪種化合物 (N_2O_4 還是 NO_2) 是反應物？
- (b) 若把0.100 M的 NO_2 加入一個密封容器中使反應開始，根據表39.1的數據，在圖(ii)中略繪 N_2O_4 和 NO_2 的濃度隨時間的變化。假設反應在時間 $t = 1.3 \text{ min}$ 達至平衡。
2. 某學生知道碳酸鈣的熱分解作用是可逆反應，並可達至平衡。該學生把已稱量的碳酸鈣放在坩堝中強烈加熱一段長時間。然而，反應結束後，該學生發現坩堝中沒有剩餘任何碳酸鈣。
- (a) 碳酸鈣強烈加熱時，會產生甚麼生成物？
- (b) 寫出碳酸鈣熱分解作用的化學方程式。
- (c) 解釋為甚麼在該實驗中不能達至平衡。

總結動態平衡的特徵

總括來說，動態平衡具有下列特徵：

1. 在動態平衡下，反應物和生成物均同時存在，而它們的濃度維持不變。因此，反應混合物不會有任何可觀察的變化。
2. 在動態平衡下，正向反應和逆向反應的速率是相等的。
3. 在可逆反應的正向反應或逆向反應的任何一方開始，均可達至動態平衡。
4. 動態平衡只能在密閉體系中建立，使物質不可進入或離開體系。

重要詞彙

中文詞彙	英文翻譯	頁數
1. 不可逆反應	irreversible reaction	3
2. 可逆反應	reversible reaction	4
3. 正向反應	forward reaction	4
4. 逆向反應	backward reaction	4
5. 催化劑	catalyst	4
6. 動態平衡	dynamic equilibrium	6
7. 密閉體系	closed system	7

進度評估

若能回答下列問題，在問題旁邊的空格內劃上「✓」號。若未能回答，便需要翻閱課本相關的頁數。

		頁數
1. 不可逆反應是甚麼？	<input type="checkbox"/>	3
2. 可逆反應是甚麼？	<input type="checkbox"/>	4
3. 符號「 \rightleftharpoons 」是甚麼意思？	<input type="checkbox"/>	4
4. 可逆反應的正向反應和逆向反應是甚麼？	<input type="checkbox"/>	4
5. 在動態平衡下，反應混合物有任何可觀察的變化嗎？	<input type="checkbox"/>	8
6. 在動態平衡下，反應物和生成物的濃度會怎樣？	<input type="checkbox"/>	8
7. 正向反應和逆向反應的速率在動態平衡下有甚麼關係？	<input type="checkbox"/>	8
8. 為甚麼動態平衡只能在密閉體系中建立？	<input type="checkbox"/>	10

摘要

39.1 不可逆反應與可逆反應

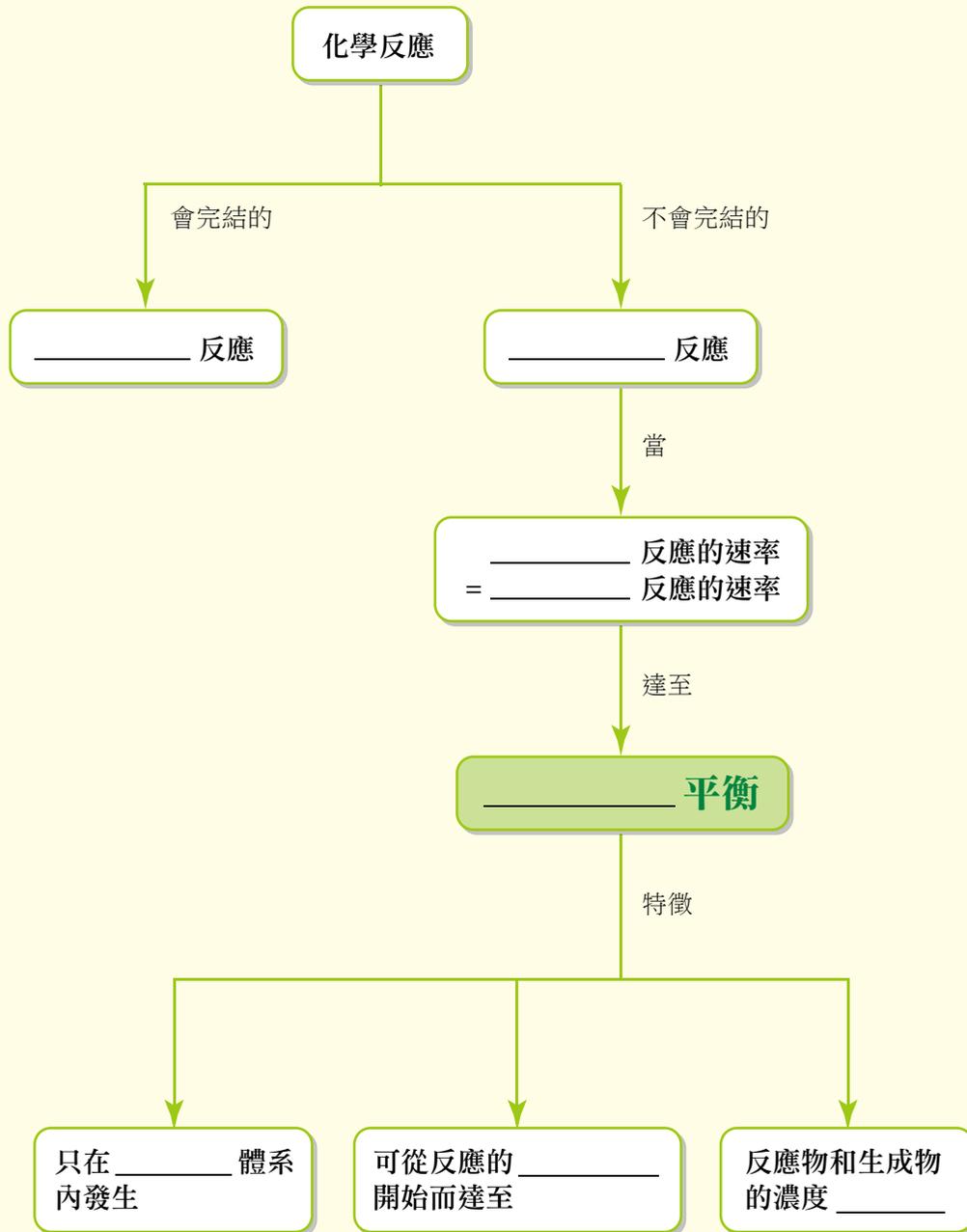
1. 若化學反應只能向着單一方向進行，當其中一種單一反應物耗盡時，反應便會完結，即表示該反應是不可逆的。
2. **不可逆反應**的例子包括：
 - (a) 金屬與稀氫氯酸的反應
 - (b) 酸鹼中和作用
3. 若化學反應會以正向和逆向兩個方向進行，即表示該反應是可逆的。方程式中的符號「 \rightleftharpoons 」表示反應是可逆的。
4. **可逆反應**的例子包括：
 - (a) 酯化作用 (生成酯)
 - (b) 乙酸的電離作用
 - (c) 氨的工業製備過程 (哈柏法)

39.2 動態平衡的特徵

5. 化學平衡的本質是動態的。
6. 在**動態平衡**下，反應物和生成物的濃度維持不變。因此，反應混合物不會有任何可觀察的變化。
7. 在動態平衡下，**正向反應**和**逆向反應**的速率是相等的。
8. 從可逆反應的正向反應或逆向反應的任何一方開始，均可達至動態平衡。
9. 動態平衡只能在**密閉體系**中建立。

概念圖

完成以下概念圖。



(提示：逆向、密閉、動態、任何一方、正向、不可逆、可逆、不變)

章節練習

填充題

第39.1節

- _____ 反應只會向着單一方向進行，當其中一種反應物耗盡時，反應便會_____。
- _____ 反應會以 (_____ 和 _____) 兩個方向進行，而反應並不會_____。

第39.2節

- 動態平衡有下列特徵：
 - 在動態平衡下，_____ 和 _____ 均同時存在，而它們的 _____ 維持_____。
 - 在動態平衡下，正向反應和逆向反應的速率是_____的。
 - 從可逆反應的 _____ 或 _____ 任何一方開始，均可達至動態平衡。
 - 動態平衡只能在 _____ 體系中建立。

多項選擇題

第39.1節

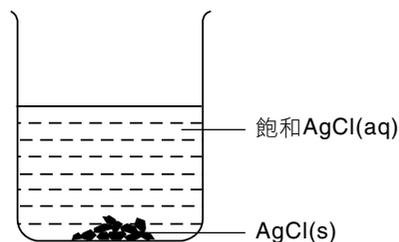
- 下列哪些是可逆反應？
 - 氮的分解作用生成氮和氫
 - 二氧化硫和氧之間的反應生成三氧化硫
 - 乙酸和甲醇的酯化作用生成乙酸甲酯和水

A. 只有(1)和(2)
 B. 只有(1)和(3)
 C. 只有(2)和(3)
 D. (1)、(2)和(3)

- 在常溫常壓下，下列哪個反應不會完結？
 - 氫氧化鈉在水中的離解作用
 - 乙醇的燃燒作用
 - 碳酸在水中的電離作用
 - 氨和氫氯酸的中和作用

第39.2節

- 下圖顯示飽和氯化銀溶液中有一些固態氯化銀。在常溫常壓下，該體系達至動態平衡。



下列哪項或哪些有關該平衡的陳述正確？

- 溶液中銀離子的濃度維持不變。
 - 溶液中AgCl的分量與固體中AgCl的分量相等。
 - 以上的平衡可以下列方程式來表示：

$$\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{AgCl}(\text{s})$$
- A. 只有(1)
 B. 只有(2)
 C. 只有(1)和(3)
 D. 只有(2)和(3)

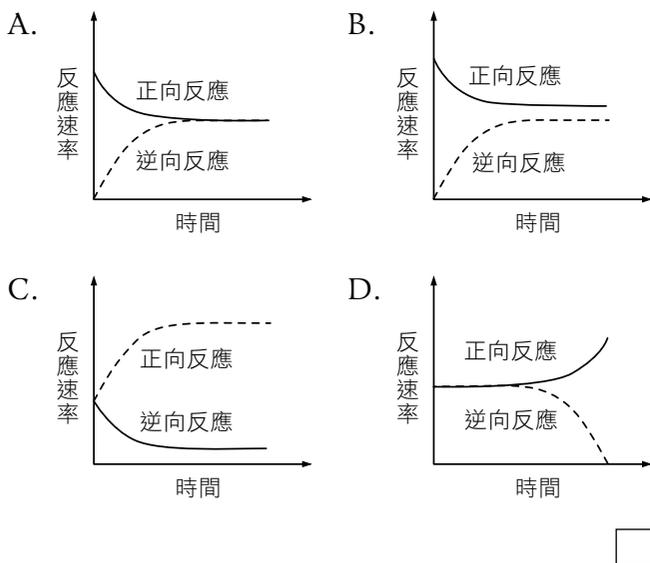
- 參看以下可逆反應：



在動態平衡下，下列哪項或哪些陳述正確？

- N_2O_4 分子的分解速率相等於 NO_2 分子結合的速率。
 - N_2O_4 和 NO_2 的濃度相等。
 - 反應混合物的顏色深度維持不變。
- A. 只有(1)
 B. 只有(2)
 C. 只有(1)和(3)
 D. 只有(2)和(3)

8. 下列哪個圖表正確顯示平衡體系的反應速率隨時間的變化？



9. 下列哪項不是動態平衡的特徵？

A. 反應必須在密閉體系中進行。

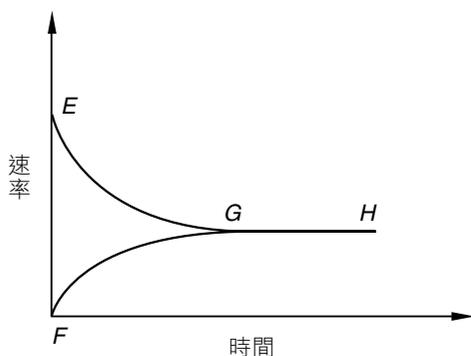
B. 在動態平衡下，正向反應和逆向反應的速率相等。

C. 在動態平衡下，反應物和生成物的濃度相等。

D. 從可逆反應的正向或逆向方向，也可達至動態平衡。



10. 下圖顯示了某可逆反應的正向反應和逆向反應的速率。

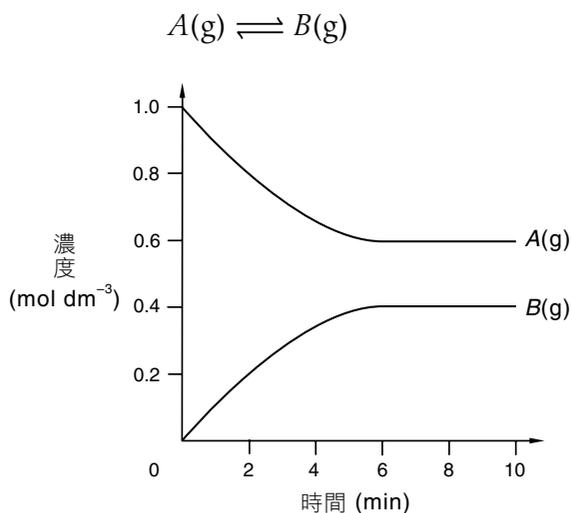


下列哪項有關坐標圖的陳述不正確？

- A. 曲線EGH代表正向反應的速率。
- B. 在F時，逆向反應的速率等於零。
- C. 在G和H之間，生成物和反應物的濃度相同。
- D. 在F和G之間，生成物的濃度上升。



11. 下圖顯示在某特定溫度下， $A(g)$ 和 $B(g)$ 在一個 1 dm^3 的密封容器中進行反應時的濃度隨時間的變化。



下列哪些陳述正確？

- (1) 在第2分鐘，正向反應的速率和逆向反應的速率相等。
- (2) 在第6分鐘，體系達至動態平衡。
- (3) 若只把 $B(g)$ 加入密封容器中作起始反應物，而其他反應條件維持不變， $A(g)$ 和 $B(g)$ 的平衡濃度分別為 0.6 mol dm^{-3} 和 0.4 mol dm^{-3} 。

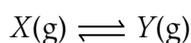
- A. 只有(1)和(2)
- B. 只有(1)和(3)
- C. 只有(2)和(3)
- D. (1)、(2)和(3)



結構題

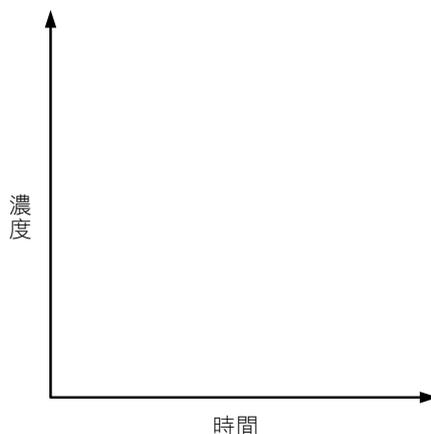
第39.2節

12. 鐵與蒸汽反應，生成氧化鐵(II)(III) (Fe_3O_4) 和氫(H_2)。某學生把鐵和蒸汽在密封容器中一起加熱，經一段時間後，體系會達至動態平衡。
- 在平衡狀態下，體系中會發生兩個反應。
 - 寫出該兩個反應的方程式。
 - 該兩個反應的速率有甚麼關係？
 - 寫出表示反應達至平衡的方程式。
 - 若開始時把 $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s})$ 和 $\text{H}_2(\text{g})$ 放在相同的密封容器中一起加熱，體系會否達至在(b)部所指的平衡狀態？試加以解釋。
13. 在300 K下，約75%的物質X被轉化為Y，直至體系達至動態平衡。

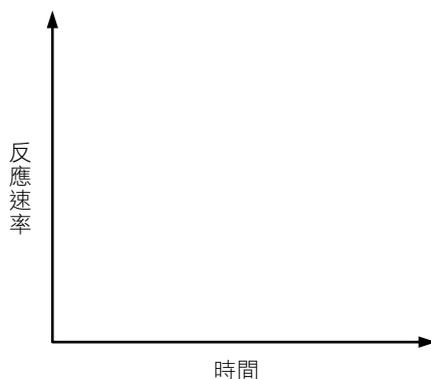


在下圖中，略繪X(g)和Y(g)的濃度對時間的曲線，直至反應混合物達至平衡為止，標示達至平衡的時間。

(標示曲線為X(g)和Y(g)。)



14. 氣態三氯化磷 (PCl_3) 與氯氣在一個密封容器中反應，生成氣態五氯化磷 (PCl_5)。一段時間後，體系達至動態平衡。
- 寫出所涉及反應的方程式。
 - 建議一個可顯示體系已達至平衡的方法。
 - 在下圖中，略繪正向反應和逆向反應速率的曲線，並標示達至平衡的時間。



- (d) 若上述反應在開放容器中進行，體系會否達至平衡？解釋你的答案。

15. 就以下各可逆反應，建議一個可顯示反應已於某刻達至平衡的方法，並加以解釋。

