

كيمياء الحفز

الفصل الخامس: العمليات الحفزية

الفصل السادس: أنواع الحفز

الفصل السابع: الملامح العامة للتفاعلات المحفزة غير المتجانسة

الفصل الثامن: نظريات الحفز

الفصل التاسع: الحفز الإنزيمي

الفصل الخامس

العمليات الحفزية

- الحفز
- أهمية عمليات الحفز
- طبيعة الحفز
- العامل الحفاز يحدد اتجاه التفاعل
- نشاطية العامل الحفاز
- اعتماد التفاعل على كل من السطح ومسامية العامل الحفاز:
 - أ- السطح النشط للعامل الحفاز
 - ب- عدم تجانس السطح
 - ج- مسامية العامل الحفاز:
- 1- متوسط الممر الحر للجزيئات أكبر من نصف قطر المسام
- 2- متوسط الممر الحر أقل من نصف قطر المسام
- التفاعلات المتضمنة ذرات منفردة أو شقوقاً حرة:
 - i- التفاعلات غير المتسلسلة
 - ii- تفاعلات المتسلسلة الخطية:
 - أ- تنشيط السلسلة
 - ب- نمو أو انتشار السلسلة
 - ج- إيقاف نمو السلسلة ونهاية التفاعل
 - iii- تفاعلات المتسلسلة المتفرغة
- أسئلة ومسابئلة عامة

الحفز

تهتم كيمياء الحفز بدراسة الأثر الحفزي للعوامل الحفازة على بعض العمليات والتفاعلات الكيميائية. فهناك تفاعلات كيميائية ذات معدل بطيء جدا ويكون معدل سريانها غير ملحوظ، فإذا ما أضيف إلى هذه التفاعلات كميات صغيرة من مواد معينة، لوحظ أن معدل سريانها يزداد، وأن سرعتها تتضاعف آلاف المرات. وقد أطلق على هذه المواد المضافة بكميات صغيرة اسم "عوامل الحفز" أو "العوامل الحفازة".

وقد تحقق العالم بيرزيليوس "Berzelius" في عام 1836م من وجود مواد لها تأثير على معدل التفاعل، أي إنها تزيد المعدل بدون استهلاك لتلك المواد في التفاعل. واعتقد أن عمل هذه المواد بأنها تحرر الأربطة الموجودة في الجزيئات بحيث تصبح الذرات للمواد المتفاعلة في حرية تامة.

وعموما، ليس هناك من شك أن العامل الحفاز يعجل التفاعل كما كان معتقدا أولا من بيرزيليوس، ولكن هناك حالات عديدة الآن، وجد أن العامل الحفاز له أيضا تأثير مضاد على معدل التفاعل.

فالحفز مصطلح يطلق على تغيير سرعة (معدل) التفاعل الكيميائي نتيجة وجود العامل الحفاز.

ويعرف العامل الحفاز "Catalyst" بأنه: "المادة الغريبة (الأجنبية) التي تضاف إلى وسط التفاعل بكميات صغيرة جدا فتؤثر على معدل التفاعل وتغيره، دون أن تشترك في التفاعل.

وتعرف عملية الحفز بأنها: "العملية التي يتم فيها تغيير سرعة (معدل) التفاعل نتيجة وجود العامل الحفاز. وكلمة "تغيير" تعني إما "زيادة" وإما "نقص"، فإذا كانت "زيادة" كان الحفز إيجابيا، وإذا كانت "نقصا" كان الحفز سلبيا. وبناء على ذلك يمكن تعريف كل من الحفز الإيجابي والسلبى على النحو التالي:

الحفز الإيجابي: العملية التي يتم فيها زيادة سرعة (معدل) التفاعل نتيجة وجود العامل الحفاز.

الحفز السلبي: العملية التي يتم فيها خفض سرعة (معدل) التفاعل نتيجة وجود العامل الحفاز.

أهمية عمليات الحفز

يطلق لفظ الحفز - عموما - على تعجيل أو "تسريع" التفاعلات الكيميائية. وتستخدم عمليات الحفز بدرجات كبيرة في الصناعة، حيث إن استخداماتها في تزايد مستمر. ويمكن القول أن نحو (90%) من عمليات التقنيات الحديثة التي أدخلت حديثا في الصناعات الكيميائية هي تفاعلات حفزية (محفزية).

والتفاعلات الحفزية تخضع للقوانين العامة للكيمياء وللديناميكا الحرارية. ففي وجود العامل الحفاز، نجد أن سرعة التفاعلات الكيميائية تعجل (تزداد) آلاف بل ملايين المرات، والتي تتم عند درجات حرارة منخفضة، لتحقيق مكاسب تجارية. فمن خلال استخدام العوامل الحفازة، نجد أن هناك عددا كبيرا من التفاعلات الكيميائية يمكن أن تتم بمقياس تجارى.

والحفز يستخدم فى تصنيع بعض المركبات غير العضوية المهمة الناتجة من الصناعات الكيميائية الثقيلة، مثل: الهيدروجين، والنشادر (غاز الأمونيا)، وحمض الكبريتيك، وحمض النيتريك.

كذلك، يلعب الحفز دورا كبيرا فى الكيمياء العضوية الصناعية، وخاصة فى مجال تحضير المركبات العضوية. فهو يساعد فى إتمام عمليات الأكسدة، والهيدرة، والهدرجة.

وتستخدم العوامل الحفازة -أيضا- فى تصنيع بعض المركبات الوسيطة الأساسية لتحضير البوليمرات العالية كالمطاط الصناعى (بيتا داين، وستيارين، وايزوبيوتيلين)، والبلاستيك (الميثانول، والفورمالدهيد، والفثاليك اللامائى).

كذلك، نجد أن التحضير المباشر للمركبات عالية الجزيئية بواسطة البلمرة والتكثيف المتعدد للأحاديات، تتم جميعها باستخدام العوامل الحفازة.

طبيعة الحفز

الطبيعة الأساسية للحفز هي نفسها لكل أنواع الحفز: التعجيلي، وغير المتجانس، والإنزيمي. وبصفة عامة، فإن التأثير التعجيلي (الإسراع) للعوامل الحفازة يختلف تماما عن تلك العوامل المؤثرة على التفاعلات الكيميائية، مثل: الحرارة، والضغط، والتشعيع.

فعلى سبيل المثال، فإن زيادة درجة الحرارة تعجل (تسرع) التفاعل عن طريق زيادة مستوى الطاقة للجزيئات المتفاعلة، وذلك بتثيبتها بالحرارة من مصدر خارجي، وهذا يكون مصحوبا بتغير في الطاقة الداخلية للنظام. وهكذا، فإن رفع درجة الحرارة يزيح الاتزان.

ومن ناحية أخرى، فإنه عند إدخال (استعمال) المواد الحفازة، فإن مستوى الطاقة للجزيئات المتفاعلة لا يتغير. فالعامل الحفاز لا يزيح الاتزان الكيميائي (لا يغير موضع الاتزان)، ولكنه فقط يعجل (يسرع) الوصول إلى الاتزان عند درجة الحرارة المعطاة. وفي وجود العوامل الحفازة، فإن ثابت معدل التفاعل الأمامي وثابت معدل التفاعل الخلفي تزداد بطريقة متكافئة (متساوية)، ولذلك فإن الاتزان لا يتغير.

والطبيعة الأساسية للتأثير التعجيلي (الإسراع) للعامل الحفاز تتكون أساسا في خفض طاقة التنشيط للتفاعل الكيميائي، والذي ينتج من تغير منهج التفاعل والذي ينفصل فيه العامل الحفاز.

وبالنسبة للتفاعل الذي يمر من خلال متتابعة من المراحل الأولية، التي تتطلب طاقة أقل للتنشيط عن التفاعل المباشر (بدون العامل الحفاز)، فإن الأقل في طاقة التنشيط (E)، يكون الأعلى في معدل التفاعل والذي يمكن التعبير عنه رياضيا بالمعادلة:

$$K = A e^{-E/RT}$$

حيث E طاقة التنشيط للتفاعل

R الثابت العام للغازات

T درجة الحرارة المطلقة

K ثابت معدل التفاعل

A مقدار ثابت

ولنتصور تفاعل ثنائي الجزيئية يتم في عدم وجود العامل الحفاز، والذي يمكن

تمثيله بالمعادلة:



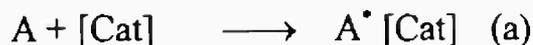
وهذا التفاعل يسير بدون العامل الحفاز من خلال تكوين المترابك النشط

(AB*)، حيث يمكن تمثيل ميكانيكية التفاعل كما يلي:



أما في حالة وجود العامل الحفاز، فإن التفاعل يسير بطريقة مختلفة، من خلال

مجموعة من المراحل الأولية المتعددة:

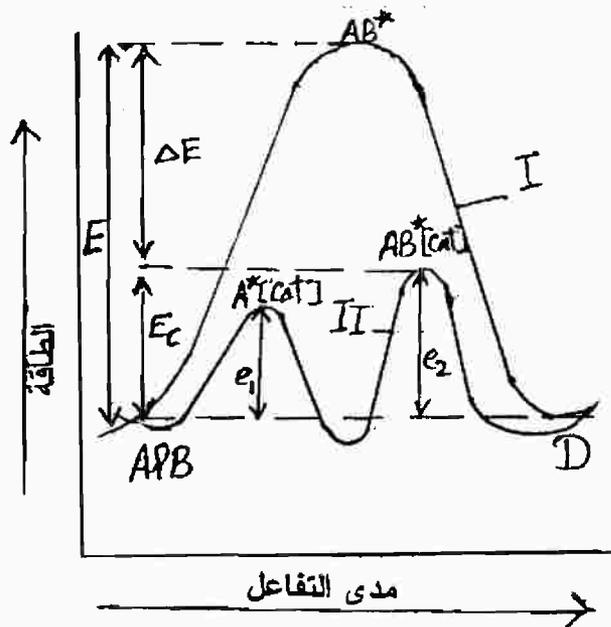


ويوضح الشكل (5-1)، التغير في طاقة النظام المتفاعل عند استخدام العامل

الحفاز للتفاعل المعطى. فإذا كانت "E" هي طاقة التنشيط للتفاعل المحفز، و e_1 ، e_2

هي طاقات التنشيط للمراحل الوسيطة (a) و (b). فإذا كانت " E_c " أقل من "E"، فإن

الحفز يكون إيجابياً.



شكل (5-1): التغيرات في طاقة النظام المتفاعل: (I) في حالة عدم وجود عامل حفاز، (II) في حالة وجود عامل حفاز.

والتأثير التعجيلي للعامل الحفاز يقاس بـ "فاعليته" (A_c). وتعرف فاعلية العامل الحفاز بأنها النسبة بين ثابت معدل التفاعل في وجود العامل الحفاز K_c وثابت معدل التفاعل في عدم وجود العامل الحفاز K ، والذي يعطى بالمعادلة:

$$A_c = \frac{K_c}{K} = \frac{e^{-E_c/RT}}{e^{-E/RT}} e^{\Delta E/RT}$$

حيث ΔE هي الفرق بين طاقة التنشيط للتفاعل في غياب العامل الحفاز المحفز وطاقة التنشيط للتفاعل في وجود العامل الحفاز (مقدار الانخفاض في طاقة التنشيط)، حيث إن:

$$\Delta E = E - E_c$$

الانخفاض فى طاقة التنشيط ليس هو السبب الوحيد للارتفاع الحاد فى معدل التفاعل المحفز مقارنة بالتفاعل المباشر (غير المحفز). وهناك حالات (تفاعلات) معروفة حيث إن العوامل الحفازة تغير معدل التفاعل الكيمياءى بدرجات مختلفة بدون تغير ذات معنى فى طاقة التنشيط بتغير نوع العامل الحفاز. وفى هذه الحالات، فإن السبب الأساسى للتغير فى معدل التفاعل يشار إليه على أنه راجع للتغير فى قيمة (K_0) فى معادلة أرهينيوس.

العامل الحفاز يحدد اتجاه التفاعل

نجد أن معظم التفاعلات المحفزة تكون لها طبيعة خاصة، تختلف عنها بالنسبة للتفاعلات غير المحفزة. وللتعرف على هذه الطبيعة نأخذ على سبيل المثال: التحلل الحرارى لثنائى إيثايل إيثير.

فقد وجد أن مركب ثنائى إيثايل إيثير يتحلل حرارياً فى عدم وجود العامل الحفاز ليعطى النواتج: ميثان وإيثيلين وأول أكسيد الكربون، طبقاً للمعادلة التالية:

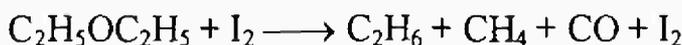


ولكن، وفى وجود العامل الحفاز (اليود)، فإن ثنائى إيثايل إيثير يتحلل حرارياً بسرعة كبيرة (تعادل 10.000 مرة فى عدم وجود العامل الحفاز)، حيث يعطى نواتج جديدة تختلف عن تحلله فى عدم وجود العامل الحفاز) وهذا يؤكد حدوث تغير فى ميكانيكية التفاعل، والتي يمكن توضيحها على النحو التالى:

يكون اليود مع جزئ ثنائى إيثايل إيثير مركبات وسيطة:



ويمكن تمثيل التفاعل الكلى:



ويلاحظ أنه في ذلك التفاعل المحفز قد تكون الإيثان، وقد تم استرجاع العامل الحفاز مرة أخرى.

وبالمقارنة في طاقة التنشيط لكل من التفاعلات غير المحفزة والتفاعلات المحفزة، وجد أنها تأخذ القيم (51800) سعر حراري/مول، و (17800) سعر حراري/مول، وكما هو واضح أنها أكبر بنحو ثلاث مرات في حالة التفاعلات غير المحفزة.

وفي هذه العمليات المذكورة آنفاً، نجد أن تأثير العامل الحفاز يؤدي إلى اختزال طاقة التنشيط، وبالتالي إلى زيادة سرعة (تسريع) التفاعل.

نشاطية العامل الحفاز

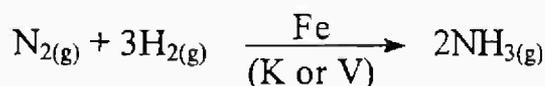
تحدد نشاطية العامل الحفاز بالتركيب الإلكتروني لذرات مادة العامل الحفاز، وبترتيب الذرات للمتفاعلات الموجودة على سطح العامل الحفاز. ويعتقد أن العيوب الموجودة في الشبكة البلورية للعامل الحفاز الصلب، وعدم انتظام التركيب البلوري تكون ما يسمى بـ "المراكز النشطة".

تعتمد فعالية العامل الحفاز على عدة عوامل، أهمها:

- 1- التركيب الكيميائي للعامل الحفاز.
- 2- المساحة السطحية للعامل الحفاز.
- 3- نوعية وكمية الشقوق والمسامات الموجودة بالعامل الحفاز.
- 4- تركيز وطريقة توزيع العامل الحفاز عند الاستعمال.

ويمكن لسطوح بعض العوامل الحفازة أن يتغير الدور الذي تقوم به نتيجة إضافة بعض المواد. فإذا كانت المادة المضافة في وجود العامل الحفاز تزيد وتسرع التفاعل بمعدل أكبر، سميت هذه المادة "منشط الحفز"، لأنها تزيد من نشاطية العامل الحفاز وتجعله يؤثر على معدل التفاعل بدرجة أكبر. ويجب ملاحظة أن مادة "منشط الحفز" لا تلعب أي دور إذا أضيفت بمفردها وفي غياب العامل الحفاز. فهذه المادة لا تؤثر على معدل التفاعل ولكنها تؤثر على فاعلية العامل الحفاز نفسه.

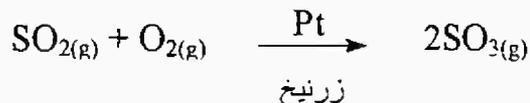
ففي تخليق النوشادر، على سبيل المثال:



وجد أن إضافة كميات قليلة من البوتاسيوم أو الفانديوم تزيد من نشاطية الحديد المستخدم كعامل حفاز، مما يعجل التفاعل ويجعله يسير بسرعة أكبر. مع ملاحظة أنه إذا أضيف البوتاسيوم أو الفانديوم بمفرده، وفي غياب الحديد، لا يكون له أى دور على الإطلاق في تحفيز التفاعل.

وعلى جانب آخر، توجد مواد إذا أضيفت إلى التفاعل المحفز فإنها تثبط وتبطئ هذا التفاعل، نتيجة تأثيرها السلبي على نشاطية العامل الحفاز، وتسمى هذه المواد "مسمات الحفز".

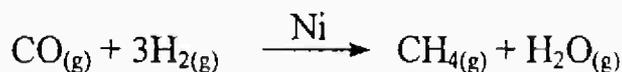
فقد وجد أن وجود كميات قليلة من الزرنيخ تقلل نشاطية وقدرة البلاتين كعامل حفاز عند تحضير ثالث أكسيد الكبريت من ثاني أكسيد الكبريت:



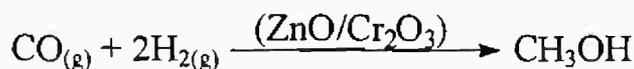
حيث تتكون "زرنيخات البلاتين" التي تترسب على سطح البلاتين، وتعمل كحاجز أو مانع، يوقف النشاط الحفزي لمعدن البلاتين.

وتتميز العوامل الحفازة بنوعيتها في النشاطية. ففي بعض الأحيان يمكن لمادة ما أن تحفز تخليق مجموعة من النواتج من بعض المتفاعلات، بينما يمكن لمادة أخرى أن تحفز تخليق مجموعة أخرى من النواتج، وذلك من المتفاعلات السابقة نفسها. والمثال على ذلك:

يمكن لخليط من أول أكسيد الكربون والهيدروجين أن يتفاعلا، لينتجا مخلوطا من الهيدروكربونات، أحدهما هو الميثان (CH₄)، عند استخدام النيكل كعامل حفاز:



فى حين يتكون الميثانول (الكحول الميثيلى)، نتيجة اتحاد أول أكسيد الكربون والهيدروجين عندما يستخدم خليطا من أكاسيد الخارصين والكروم، طبقا للمعادلة التالية:



اعتماد التفاعل على كل من السطح ومسامية العامل الحفاز

أ- السطح النشط للعامل الحفاز

يؤثر التركيب الكيميائى للعامل الحفاز على معدل التفاعل الكيميائى. كذلك، فإن مساحة سطح العامل الحفاز التى تتعرض لجزيئات المواد المتفاعلة تكون هى المؤثر فى حساب نشاطية العامل الحفاز.

وكان كلا من العالمين "بانشنكوف وتوبشيفا" أول من أدخل مساحة سطح العامل الحفاز فى الحسابات الخاصة بنشاطية العامل الحفاز.

ومن التجارب العملية، وفى حالة تسمم العامل الحفاز، نجد أن سطح العامل الحفاز لا يكون معرضا بالكامل لجزيئات المواد المتفاعلة.

ب- عدم تجانس السطح

يجب الأخذ فى الحسبان عدم تكافؤ المراكز النشطة للامتزاز على سطح العامل الحفاز. فقد لوحظ أن المراكز النشطة للامتزاز ليست متكافئة أيضا من منظور الطاقة لكل وحدة مساحة (مركز نشط).

ويمكن أخذ مثال لتوضيح ذلك، وهو امتزاز الكلور على سطح (السيليكا-جل)، حيث يمكن تطبيق معادلة "لانجمير" (Langmuir):

$$\theta = \frac{K_p}{1 + K_p}$$

والتي يمكن كتابتها على الصورة التالية:

$$V = \frac{V_{\text{sat}} P / P_{1/2}}{1 + P / P_{1/2}}$$

حيث: V حجم المواد الممتزة.

V_{sat} حجم المواد الممتزة فوق التشبع.

P ضغط المادة الممتزة فوق التشبع.

$P_{1/2}$ نصف الضغط عند التشبع.

ويمكن وضع المعادلة السابقة، على الصورة:

$$\frac{P}{V} = \frac{P}{V_{\text{sat}}} + \frac{P_{1/2}}{V_{\text{sat}}}$$

ويرسم العلاقة بين (P/V) مقابل (P) ، فإننا نحصل على خط مستقيم، يكون ميله (slope) مساويا $(1/V_{\text{sat}})$ ، في حين يكون الجزء المقطوع (Intercept) يساوي $(P_{1/2}/V_{\text{sat}})$ ، والتي يمكن أن تؤخذ فسي التعبير المحتوى الانتروبي (ΔS) ، والإنثالبي (ΔH) .

$$P_{1/2} = e^{-\Delta S/R} \cdot e^{\Delta H/RT}$$

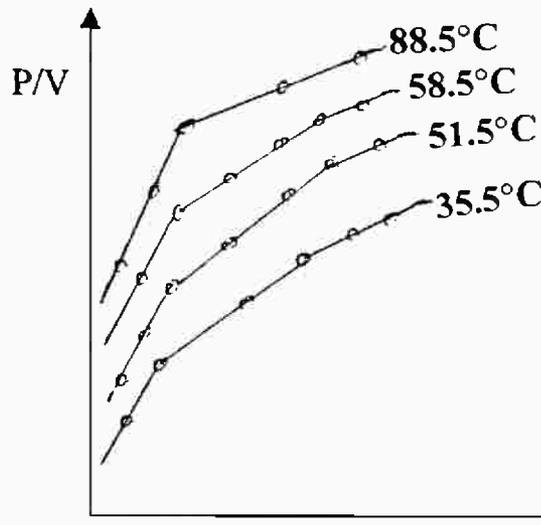
ويوضح الشكل (5-2)، دراسة امتزاز الكلور على سطح (السيليكا- جل) عند

درجات حرارة مختلفة. وكما هو ملاحظ من الشكل عدم وجود خط مستقيم. كذلك، نجد

أن المنحنى يوجد فيه كسر خلال شكل المنحنى، خلال مدى الضغط.

فكل مقطع عن الخط المستقيم سوف يقابله كمية من الامتزاز على جزء من

السطح يميز بهذا الاختلاف ثابت تقريبا عند ثبوت لقيم من الحرارة.



شكل (5-2): ايزوثيرم امتزاز الكلور على (السيليكا - جل) طبقا لنظرية لانجمير.

ج- مسامية العامل الحفاز

تؤثر مسامية العامل الحفاز الصلب (غير المتجانس) تأثيرا واضحا على معدل التفاعل، كما أن أنصاف أقطار المسامات للسطح الصلب تؤثر على معدل التفاعل، بناء على نفاذية الجزيئات في داخل هذه المسامات. وهذا يعني مضادة نصف قطر المسام مع نصف قطر الجزيئات، مما يدل على أن معدل التفاعل يقل مع زيادة نصف قطر الجزيئات التي تكون أكبر من أنصاف أقطار المسامات.

وبناء على ما سبق، فإنه يمكن مناقشة الحالات التالية:

1- متوسط الممر الحر للجزيئات أكبر من نصف قطر المسام:

وقد تحدد هذا النوع بواسطة "نيودسن" (Knudsen). فعند ضغط ($P = 10^5$) نيوتن/م²، وطول الممر الحر ($l = 10^{-5}$) سم، بينما يكون نصف قطر الممر أقل من (10^{-5}) سم، تم تعيين معامل الانتشار باستخدام العلاقة:

$$D_k = \frac{1}{3} V d$$

حيث: V سرعة جزيئات الغاز.

ℓ طول الممر الحر.

D معامل الانتشار لنودسن.

ولكن عند ضغط (10^5) نيوتن/م²، ومسام لها نصف قطر أقل من (10^{-4}) سم (طول الممر الحر أقل من نصف قطر المسام)، والصدمات بين جزيئات الغاز تتكرر أكثر منها مع جدار الأنبوبة الشعرية (المسامات). ففي هذه الحالة، نجد أن معدل الانتشار لا يعتمد على نصف قطر المسام، ويتبع القانون:

$$D = \frac{1}{3} V \ell$$

حيث: V متوسط سرعة جزيئات الغاز.

أما في حالة ما إذا كان طول متوسط الممر الحر أكبر بكثير من نصف قطر الأنبوبة الشعرية، فإن قوة السريان لا يتم تعيينها من معادلة "نودسن"، ولا تعتمد على انخفاض الضغط.

2- متوسط الممر الحر أقل من نصف قطر المسام:

إذا كان متوسط الممر الحر أقل من نصف قطر المسام، فإذا انخفض الضغط، فإن سريان الغاز الظاهر بناء على هذا الانخفاض في الضغط، فإنه يتوأكب مع موور حجم الغاز.

ويمكن أن يعطى معامل الانتشار المميز لهذا النوع باستخدام معادلة هاجن-

بوازिला (Hagen-Poiseuille equation):

$$D_p = \frac{r_c^2 RT}{8\eta}$$

حيث r نصف قطر المسام
 C تركيز الجزيئات الكلية
 η لزوجة الغاز
 R الثابت العام للغازات
 T درجة الحرارة المطلقة

ويمكن حساب معامل الانتشار (D_p) لغاز ضغطه يساوى ($P = 10^5$ نيوتن/م²، ولزوجته ($\eta = 10^{-4}$ Cp) ، ونصف قطر الأنبوبة الشعرية ($r = 10^{-4}$ سم، فإن معامل الانتشار (D_p) يساوى:

$$D_p = 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{S}$$

أى إن قوة السريان فى المسامات الصغيرة تعرقل حجم الانتشار.

التفاعلات المتضمنة ذرات منفردة أو شقوقا حرة

كان الاعتقاد فيما مضى، أن كل التفاعلات تحدث فى خطوة واحدة. ولكن، اتضح أن معظم التفاعلات الكيميائية تتم على خطوات. وقد وجد أن كثيرا من التفاعلات تتكون فيها متراكبات وسطية، مثل: الذرات المنفردة أو الشقوق الحرة. ويكون الشق الحر عبارة عن ذرة أو جزيئ يحتوى على إلكترون منفرد أو أكثر، وبالتالي تكون الشقوق الحرة بارا مغناطيسية، ومن ثم يكون نشاطها عاليا.

ويمكن تقسيم التفاعلات إلى ثلاثة أنواع، تبعا لنوع السلسلة المتكونة:

(i) تفاعلات غير متسلسلة

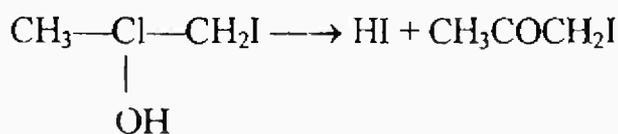
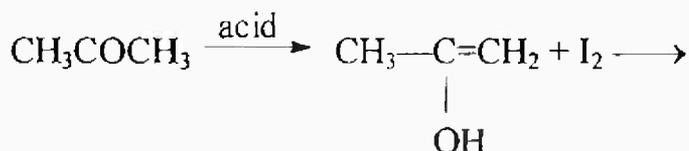
(ii) تفاعلات متسلسلة خطية

(iii) تفاعلات متسلسلة متفرعة

(i) التفاعلات غير المتسلسلة

في هذا النوع يكون هناك مركز نشط، مثل: الشق الحر أو الجزئ .. وهذا التفاعل يعطى مركبا وسطيا، تتكون بعد النواتج.

والمثال على ذلك، هو إضافة اليود إلى الأسيتون في وسط حمضي:



(ii) تفاعلات المتسلسلة الخطية

في هذا النوع من التفاعلات، يمر التفاعل بثلاث مراحل:

أ- تنشيط السلسلة.

ب- نمو أو انتشار السلسلة.

ج- إيقاف نمو السلسلة ونهاية التفاعل.

أ- تنشيط السلسلة

تتم هذه المرحلة، وذلك بإحداث كسر في الرابطة الضعيفة للمتفاعل، وتكوين مايسمى "بالشق الحر" أو "الذرة المفردة"، والذي يعتبر حاملا للسلسلة فيما بعد.

ب- نمو أو انتشار السلسلة

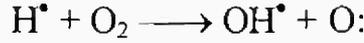
في هذه الخطوة، يهاجم الشق الحر أحد المتفاعلات لينتج أحد النواتج وشقا حرا آخر. وهذا الأخير يتفاعل ليعطى شقا حرا جديدا، ويهاجم بدوره أحد المتفاعلات. وهكذا تستمر هذه المرحلة في تكوين النواتج وحاملا للسلسلة.

ج- إيقاف نمو السلسلة ونهاية التفاعل

تختفى في هذه المرحلة الشقوق الحرة من وسط التفاعل، وذلك إما بتفاعلها مع بعضها البعض، أو بإعادة ترتيب الشق بحيث ينتج جزيء عادي، وتتحطم بذلك حاملات السلسلة، وينتهي التفاعل.

(iii) تفاعلات المتسلسلة المتفرعة

في بعض التفاعلات خصوصاً التي تحدث عند أكسدة الهيدروكربونات في وسط غازي، يستمر تكوين الشقوق الحرة بكثافة كبيرة، وذلك عندما يتفاعل الشق الحر لينتج شقين آخرين أو أكثر، مثل ما يحدث في تفاعل الهيدروجين مع الأكسجين، كما يلي:



وفي هذه التفاعلات، تزداد أعداد الشقوق الحرة بطريقة مستمرة، وتزداد بالتالي سرعة التفاعل في وقت قصير، وقد يؤدي ذلك إلى حدوث انفجار.

أسئلة ومسائل عامة

- 1- عرف كل مما يأتي:
الحفز – العامل الحفاز
- 2- تكلم عن أهمية الحفز في العمليات الصناعية.
- 3- ناقش طبيعة العامل الحفاز وأثرها في توجيه التفاعل.
- 4- عرف: فاعلية العامل الحفاز.
- 5- ناقش أثر كل من السطح والمسامية للعامل الحفاز على معدل التفاعل.
- 6- تكلم عن التفاعلات المتضمنة ذرات منفردة أو شقوقا حرة.
- 7- عرف: منشط العامل الحفاز – مسمم العامل الحفاز.