

科技用書

化工單元製造程序

(下)

石清陽 譯

UNIT PROCESSES IN ORGANIC SYNTHESIS

FIFTH EDITION

Editor-In-Chief, P. H. GROGGINS

Chemical Engineer

Technical Advisor, Food Machinery
and Chemical Corporation

Author of "Aniline and Its Derives"
and "Chemicals and Food Production"

大行出版社印行

科技用書

化工單元製造程序

(下)

石清陽 譯

江苏工业学院图书馆
藏书章

大行出版社印行



中華民國七十一年十月 日四版
中華民國六十八年八月 日三版
中華民國六十六年八月 日二版
中華民國六十四年五月 日初版
書名：化工單元製造程序（下）
著作者：石清陽 譯
發行人：裴振九
出版者：大行出版社
社址：台南市體育路41巷26號
電話：618685號
本社免費郵政劃撥帳號南字第33936號
本社登記證字第：行政院新聞局
局版台業字第0395號
總經銷：成大書局有限公司
台南市體育路41巷26號
電話：651916號
特價：平二〇〇元精二三〇元
編號：H0013-00314
同業友好・敬請愛護

化工單元製造程序 (下冊)

目 錄

第十章 氫化反應

§ 10-1	定義與範圍	1
§ 10-2	氫：生產及特性	6
§ 10-3	觸媒氫化及氫解：典型反應	20
§ 10-4	氫化反應之動力學及熱力學	35
§ 10-5	有關氫化觸媒之通則	45
§ 10-6	裝置及結構材料	51
§ 10-7	工業程序	55

第十一章 烴的合成及氫醛化反應

§ 11-1	引言	94
§ 11-2	Fischer - Tropsch 操作法的技術	97
§ 11-3	觸媒	101
§ 11-4	Fischer - Tropsch 反應之熱力學及動力學	104
§ 11-5	反應器的發展	107
§ 11-6	工業上的操作法	114
§ 11-7	Fischer - Tropsch 操作的經濟價值	119
§ 11-8	甲烷化反應	119
§ 11-9	與 Fischer - Tropsch 合成法相連的程序	122

第十二章 酯化反應

§ 12-1	以有機酸進行酯化反應	139
§ 12-2	羧酸衍生物之酯化反應	155
§ 12-3	加入未飽和系統之酯——酸之添加入烯類	165
§ 12-4	無機酸酯	168
§ 12-5	酯化實際方法——酯化工廠之設計及操作	170

第十三章 水解反應

§ 13-1	定義及範圍	195
§ 13-2	水解試劑	197
§ 13-3	適于水解的物料	201
§ 13-4	動力學、熱力學及水解的機構作用	207
§ 13-5	水解用器具	218
§ 13-6	水解有關之技術操作	220

第十四章 烷基化反應

§ 14-1	引言	251
§ 14-2	烷基反應的類型	253
§ 14-3	烷基試劑	263
§ 14-4	控制烷基反應的因素	267
§ 14-5	烷基反應的裝置	273
§ 14-6	烷基反應的效應	275
§ 14-7	烷化技術	276

第十五章 聚合反應（第一部份 聚合物的化學反應）

§ 15-1	引言	307
--------	----	-----

§ 15-2	聚合反應的化學——官能性	309
§ 15-3	聚合反應的方法	346
§ 15-4	聚合反應動力學	358
§ 15-5	聚合物之溶解特性	369
§ 15-6	多電解質	380
§ 15-7	固態的聚合物——玻璃橡膠之過渡作用	387
§ 15-8	聚合物之特性化	394
§ 15-9	分子特徵對聚合物性質的影響	396
§ 15-10	分子間的排列對聚合物特性的影響	398

第十五章 第二部份 聚合反應的實際操作

XI 工業上重要的聚合反應和聚合物

第十章 氫化反應

§ 10-1 定義與範圍

氫化單元程序（與返原一詞比較）係指明一物質，在觸媒存在下與氫分子的化學反應。其程序包括有氫簡單地加入分子內（氫化反應），分子為氫分解的反應（氫解或破壞氫化反應），及異構化，環狀化等等在氫分子和觸媒存在下之反應。因此，本章內所提的資料，只限於該項反應。對於氫化及氫解程序的有關化學文摘的回顧，每年均有出刊。

其他包括有氫分子與觸媒的反應，是還原胺化（氫氮解），氫甲醛反應（ $Ox\alpha$ 及 $Ox\alpha yl$ 反應）和氨的合成。可是，這些程序並不在本章內考慮。

前兩種程序係用一個第三種試劑（氮及 CO ），於後面諸章內將詳細討論。第三種程序——氨的合成，則超出此章的範圍之外。

氫化反應，更恰當地說是和返原同義。其詞常用於一反應，其中氧或若干其他元素（最普通是氮、硫、碳或鹵素）由一分子提出，或加上一分子去。然而，此反應可用各種方法進行，可是，若使用觸媒氫化則會產生有希望的還原產物。它通常是最簡單、最有用的步驟，其收率通常是很高的。產品純粹，而且吾人不需用大量容積的溶劑或溶液於處理步驟。後項因素變成甚重要當吾人希用此工業化程序時，由於觸媒返原常可使用於任何大小量的裝備。

除觸媒氫化外，較重要的返原例子是(1)利用金屬放在酸或鹼性液內(2)利用酒精溶液內的鹼(3)電解反應(4)利用鹼金屬及肼（Hydrazine），

(5)與金屬氫化物成錯鹽(6)藉氫的輸送交換。

在上列諸法中，最易和觸媒氫化反應相混淆的是氫的輸送，它包括由一物質直接交換氫到另種物質，以飽和烯類雙鍵而無自由氫分子之參與。此程序被認為是分離的，和氫化反應及脫氫反應不同，而且明顯地在酸性觸媒作用下，以離子機構在進行作用。代表性觸媒是矽一氧化鋁共沉澱物，當中含 60—90% 的 SiO_2 是最活性形態。該種觸媒對正常氫化反應並非有效。氫輸送反應在石油工業上很重要，特別由萘交換氫給烯類，以製備芳香性化合物及異石蠟烴。此反應特別有用，當低成本烯類濃縮物或裂解餾份能夠用做氫的接受者；因此，一由觸媒裂解產生的含烯汽油，通過烯一氧化鋁觸媒時，會產生一種低烯含量的汽油，高含量的芳香烴及異石蠟烴。

醇類也進行相似的氫交換反應，以乙烯當接受者，而得到 40—75% 收率的醛類或酮類。此反應在大氣壓下產生，在大約 280°C 的溫度，以銅鋅鎳銀鉻酸鹽當做觸媒。在著名的 Oppenauer 氧化反應，醇基經使用氫接受者如丙酮或環己酮，能夠轉換成羰基化合物。Aluminum *t*-butoxide 或 aluminum isopropoxide 是用做觸媒。

氫化反應綜覽：

觸媒氫化反應是廣泛用於實驗室及工業程序。在實驗室內，它用於化學合成，當做許多分析方法的基礎，並且是種研究工具以檢定及決定有機化合物的構造。工業上，大量的氫則耗用於氨、甲醇、液體燃料、含氧化合物、氫化植物油及多種有機化學品的製造。尤有進者，增量的氫被用於石油的處理，而且將來增加的數量，應供給煤碳以氫化產生燃料及化學品。

今日的氫化工業基礎，係建立於 1897 年，當 Sabatier 及 Senderens 說明鎳在汽相氫化反應內之觸媒效應。氫化反應的最早工業上的應用是用於兩碳原子間雙鍵的返原，以便把液態燃料轉化成固體脂肪的目的地，或如常言的脂肪硬化作用。此工業目前是相當龐大。

發展的氫化反應之工業化，係由於 Haber 在氨合成上經年的工作結果。Bergius 在煤炭及重油氫化和 Fischer 及 Tropsch 於燃料方面的合成。

煤炭氫化反應：煤炭之破壞氫化反應，以生產汽油，曾在國內不同時間下進行，當石油在該時證明未存時。在 Bergius 之早期工作之後，德國在 1927 年首先進行褐煤之氫化反應—繼 1935 年在大英帝國之進行無煙煤處理之後。無煙煤其氫含量低於褐煤，是更難於氫化。在 1945 年大約有十多家此種工廠於德國操作，產生航空汽油餾份，年產率是 2 百萬噸。在該十多間工廠，大約半數處理褐色或無煙煤，其餘則使用自煤炭、瀝青、或石油殘餘物之煤渣。後者較煤更易處理，由於它們含有大量比例的氫，而且並成液體狀態。

在歐洲煤並不再被氫化，或由於有新發現石油礦，或因為煤及油的相對價格已改變，使煤的氫化不再經濟性（如英國）。後者的國家內，一部份煤炭氫化裝置現在已被用做其他的目的地，諸如 Oxo 程序，烯類的觸媒水合及酚的合成。其餘的裝置則用以破壞氫化木餾油或渣油以生產汽油。

煤碳氫化產生車用燃料並不很經濟性，甚或得以獲得酚、木醇、二甲醇、甲苯、二甲苯、及液化烴氣體副產物。煤氫化反應的最新發展，可能依賴如 Union Carbide Chemical Company 之最近發展，以生產高收率的化學品——雖然它們大部份包含複雜結構，咸為人知。

石油氫化反應：美國國內之 Baton Rouge La，在第二次世界大戰之前，已建有一家處理各種石油油料的破壞氫化工廠。可是，在 1950 年以前氫化反應在石油技術上，只佔一小部份。主要因為氫的保守成本。最顯著例外的是高辛烷值烯餾份的氫化，以生產第二次世界大戰航空用的石油腦。然而，由於觸媒重組程序的進步，重石油腦之辛烷值已大為提高，大量的氫副產品已可供給石油工業，同時；此氫現已用做改進廣大的產品。在 1956 末期，大約每年 70000 噸的氫，被用於此目的地。

美國此時的石油精鍊重組容量已每日超出 924,000bbl 的產量及每日產量超過 1600 噸（每年 580,000 噸）的副產品—氫氣，其純度是 75 — 95 %——依賴操作的劇烈情況及進料的本質。目前大部份這種氫氣，被用於氨的合成。溫和的氫化作用，廣泛使用於石油的處理，特別是石油腦，煤油，柴油，加熱油及蒸餾潤滑油等產品的處理。此項溫和氫的處理，主要用以代替移去硫化化合物的較不效率的方法，以提高改進顏色和氣味，並增加產品的貯藏安定性。

目前合成氨的程序，代表最大的氫的要求，繼以石油的處理，脂肪的氫化及合成甲醇。在 1956 年末期，美國有 63 家以上的合成氨工廠，年產大約 4.8 百萬噸的氨。氨的數量相當於大約 850,000 噸氫的要求量。

脂肪的氫化：脂肪的氫化，加氫於脂肪酸內——特別是食用油如棉子油及大豆油，雖然少於所需油量的百分之一，是氫的重要出路。

此項用處重要性可能佔氨第三位，石油處理居第二位。在 1956 年美國之氫化脂肪輸出量，大約佔 1.5 百萬噸，其量主要包括有人造奶油及食用油。

由鯨油、魚油、及植物油如亞麻油、大豆油及棉子油，在加壓下加氫產生的脂肪，包括有兩類型——食用的及非食用的。食用脂肪係用做豬油、牛油取代物及烤焙工業用沙拉油，並供糖果的包裝及雪糕的製造。肥皂工業是非食用硬化油的最大消費者。其他非食用產品的小部份用途是皮革的處理、電氣絕緣、蠟燭製造、油漆製造及藥用軟膏用。

另種肥皂工業上重要發展是長鏈脂肪醇如 lauryl, cetyl 及 stearyl alcohols 之硫酸酯類的製造。它代替正常肥皂製造，製造油酸或硬脂酸鈉鹽用，這些酸類首先在高壓氫氣下氫化返原成相應的醇類，醇類然後再用硫酸酯化。這種清潔劑，成鈉鹽形態被使用，具有若干非常有趣的特性；因此，它們可溶於硬或軟水內。它們適用於硬水，而且它們的乳化及潤濕力比平常肥皂更佳。平常的肥皂在酸性介質內可分解成脂肪酸，它們甚難以除去，特別是對好的織物。sodium palmityl 及 stearyl sulfates

可溶于酸性、中性或碱性介質，不能分解成不溶性化合物。脂肪酸或可與染色操作干撓或會產生酸敗而釋出惡臭氣味。硫酸酯類並不會變成酸敗，而且因為它們的高溶解度，容易完全地自織物上洗去。這些清潔劑，雖然較常用肥皂更貴，在洗滌良好織物及纖維，及盥洗液之製備上，有許多使用性，同時它們的益處得以抵消其高價格。

其他的氫化反應：合成甲醇也耗用大量的氫氣。在 1956 年，合成速率大約是年產 800,000 噸，所需用氫氣量大約是 100,000 噸。碳水化合物的氫化及氫解，近年來已是有相當地研究。葡萄糖、蔗糖、麥芽糖、澱粉及其他糖類，曾在溫度 $100 - 250^{\circ}\text{C}$ 及壓力 $80 - 300 \text{ atm}$ ，使用 Ni，Fe 及銅觸媒以製造良好收率的丙二醇（propylene glycol）及甘油（glycerol）。少量的己醇，Ethylene Glycol 及乙醇，甲醇也可生成。利用己糖的兩步氫化反應，若干含有 40 % 甘油，40 % 丙二醇及 20 % 己醇的 glycerogen，在世界第二次大戰中，在德國生產出來。

有機化學品的製造，有許多例子其氫需要量是產物重量的 1 — 5 %，但它們的出口並不大。化學工業上最重要的氫化，可能是醇醛程序（aldol process）以生產 4 到 8 個碳鏈的醇。可是，醇醛程序的重要性是日漸減少，它採用更少量氫的 Oxo process。其他被氫化的有機化學品是 glycolic acid（或其酯類）以製造 ethylene glycol，adiponitrile 成為 hexamethylenediamine（用于尼龍的合成），dextrose 之製造 sorbitol（用於維生素 C - ascorbic acid 的製造），酚成為環己醇（Hexalin）及環己酮（用於 adipic acid 之合成）及萘之成為 tetralin（加入四個氫原子的結果）及 decalin（由加上十個氫原子的結果）。

氫也用以轉化苯為環己烷及炔衍生物為丁烷二醇。在食品工業，氫得以自脂肪油中移去酸類。得到的氫在油頁油程序處理及金屬粉的製造上，甚具重要性。為此目地，後者工業耗用量於 1956 年大約 1500 噸的氫氣。觸媒氫化反應也曾用於不同分子量及構造的材料方面，因此，材料如木材、橡膠、維生素、蛋白質、類固醇、彈性體、麻棉和尼龍，都是可參與

反應的典型化合物。尤有進者，氧化氮通過鉑碳觸媒產生氫氧胺——該項程序具有商用可能性。

在氫化程序內耗用大量的觸媒，於脂肪氫化工業上，例如每年耗用 300 — 600 噸的鎳。在 1956 年石油的處理過程中，大約 125 噸的鎳（當做氧化物）被用做氫化觸媒，另外 490 噸則用於重組程序上。而且同一年大約有 350 噸的銅，當做氫化及重組用的觸媒。

將來觸媒氫化反應可能會連續地增加其重要性、大小及用於諸種程序上。大容積的氫將需以補充觸媒重組所增加的大量氫。石油殘餘物及頁油的轉化成輕餾份會更有經濟吸引力。煤氫化程序之可能商業化以生產化學品是另個例子。均態觸媒，其中觸媒與反應物同相，無疑地將會收到更多的注意。

§ 10-2 氫：生產及特性

在發展及包括利用氫化的返原程序操作上，氫的供應是甚重要的。在小規模或研究方面的問題，氫可用鋼罐供應，而且通常相當地純粹，以致在該發展工作上，無需考慮氫氣的供應問題。可是，只要小工廠或商業化操作開始，不僅是氫的生產，其純化、處理、貯藏及壓縮也會產生問題。有時，這些看似是過份看重使所需反應進行之早期問題。可供氫生產的最重要方法將討論如下。

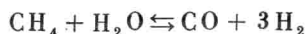
由烴生產氫氣：

氫氣可由烴經四種程序得以獲之：(1)熱分解(2)水蒸氣重組(3)部份氧化反應及(4)由觸媒重組產生出來副產物。

熱分解：這是反應的第一種：包括完全分解或裂鍊天然氣以產生碳及氫氣。目前，含高甲烷量的氣體可用熱原子碳程序，分解產生碳黑，氫是種副產品且主用做燃料。

水蒸氣重組：上面程序的第二種，是供石油氫化或合成工廠用以便由天然氣、廢石油氣或由氫化產生的氫狀產物內生產氫氣之最佳方法。

這些氣體主要由甲烷組成，其與水蒸氣的反應是



這是種觸媒反應，而且在特殊爐內，於大約 1000°C (1800°F) 下產生的反應。觸媒是種鋁氧化物成小片或立方體形。其反應是高度吸熱，因此觸媒由高鉻高鎳合金鐵管，於耐高溫之下做成功的。由爐內煙道氣含有之廢熱，可藉廢熱鍋爐以產生程序所需水蒸氣之半量。假使一氧化碳及氫混合物是需要時，如甲醇及合成烴的生產則輕的烴及水蒸氣間的反應最普遍應用。廣泛研究工作曾做，以供天然氣和水蒸氣之反應。更多水蒸氣加入一氧化碳和氫混合物內，然後水煤氣觸化反應在 $450 - 500^\circ\text{C}$ ($840 - 930^\circ\text{F}$) 下，通過鐵担體觸媒發生。

離開此轉化器的氣體含大約 79% H_2 ，20% CO_2 及 1% 未轉化烴及其他氣體。它們經冷卻並水洗以除去二氧化碳，如同水煤氣內之觸化程序。

烴與水蒸氣的反應因此是種連續程序。足以供應大量化態的氫，存在天然氣及石油精鍊氣體內主要成分甲烷、乙烷及若干未飽和的氫。美國內許多氫化工廠曾用此反應。

由天然氣、石油精鍊氣、丙烷或丁烷產生氫氣的流程圖如圖 10-1 所示。

部份氧化反應或氧重組反應：由烴生產氫氣的第三種程序是部份氧化反應。此種相當新的程序，係 Texas 公司所發展的，經濟上因為近年來生產低成本的氧的緣故。利用此項程序較水蒸氣重組相競或更佳。十個合成氣工廠利用此項程序正被建造或已建造中。此程序係用氧與天然氣或燃料油，引起非觸媒火焰反應以產生氫氣及一氧化碳混合物。

一個特殊設計的燃燒器，可使混合在反應區內完成之。而反應器係設計成圓柱形碳鋼壓力管壁，內疊以逐層的特殊耐火磚，以耐壓 200 - 300 psig 及高達 1100°C 以上的溫度。(溫度會高達 3300°C ，假使條件

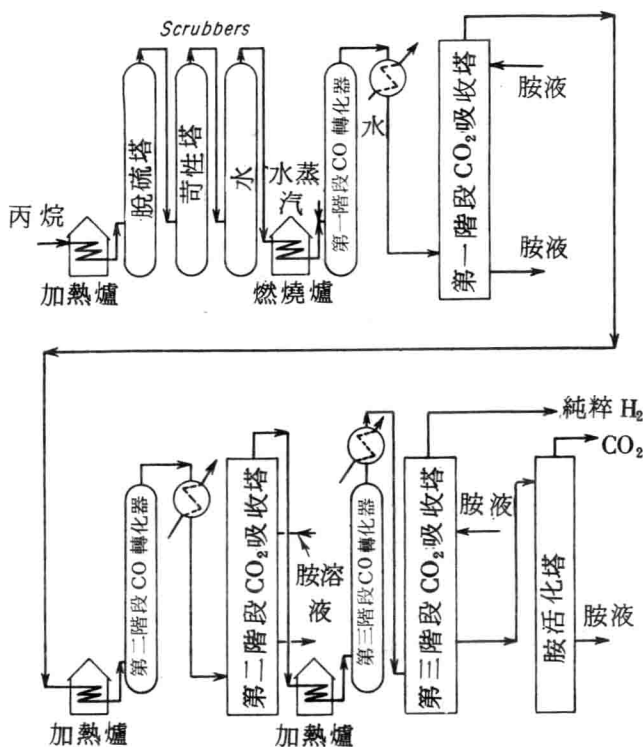


圖 10-1 以水蒸氣重組法自丙烷生產氫氣

不適當控制時；雖然在正常操作下，耐火磚只承受耐火磚可受之溫度而已。）冷氣效率（cold gas efficiency）或氫及一氧化碳的加熱值，常表示為所用燃料的百分比是居於80—85%的範圍。每1000 ft³ H₂加上生成的一氧化碳，需用大約250—270 ft³的純氧。其反應可看做是兩步驟地進行。第一階段中氧迅速地消耗，而且只有一部份烴（如甲烷）被轉化，產生大量的水及二氧化碳。在第二階段，它是速率控制，殘留的烴與水或二氧化碳起反應。其整個反應是強放熱性，雖然第一階段釋出的若干反應熱，可被吸熱重組反應所吸收。所產生之氣體內的一氧化碳因

此可以轉化成更多的氫氣，利用水煤氣移轉反應，得使一氧化碳變成二氧化碳及更多的氫。此程序具有利用煙進料氣體以供應高壓，因此得以由簡單的原料，在加壓下生產氫氣出來。

氧重組程序首被發展使用天然氣為燃料，但也用於輕油及重型燃料油。此程序對燃料的可變性，是特別令人感到興趣，由於吾人可以建造需氫的工廠，於經濟上無天然氣或煤炭的地點，但燃料油得易被輸送之處。利用部份氧化反應及次第水蒸汽重組，由不同進料得到之氣體產物的典型組成成份，如表 10-1 所示。

表 10-1 由部份氧化各種進料，產生的含氫氣體組成

組 成 成 份	氣體組成，摩爾%		
	天 然 氣	燃 料 氣	煤 氣
CO	38.0	48.0	54.4
CO ₂	2.2	3.7	5.7
H ₂	59.5	47.5	38.9
N ₂	0.2	0.2	0.8
CH ₄	0.1	0.3	0.1
H ₂ S		0.4	0.2

使用部份氧化程序需要一間氧的製造工廠，而且因為氮是種副產品，吾人可能使用低溫純化技巧以自重組氣體內，提出氫氣，當後者進行一種轉移反應時。

第二及第三程序的改變也可能，因此或 95 % 氧或富含氧的空氣可以用於合併的部份氧化重組方法中。該項重組程序與部份氧化反應相似，除了煙進料是在水蒸氣及氧存在下，在大約 940°C 鎳觸媒作用下而反

應得到的。低溫得以使用較僅用氧部份氧化時，更小的預熱表面積及承受更不嚴苛的燃燒條件。可是，此程序的主要益處是 95 % 氧的需要量比簡單部份氧化時為低。此程序也可用足夠的富含 95 % 氧的空氣，產生正確 3 : 1 氫：氮比例的氣體而完成氮的合成。（在重組及轉化一氧化碳之後。）

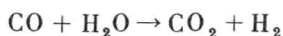
另種部份氧化程序的變換，是一重油餾份在一惰性固體存在下裂解產生。一含氫的氣體在此條件下，會造及烯及雙烯類的飽和作用。於此程序中若干焦炭及殘餘物質會沉澱惰性固體。後者經重力作用會流至燃燒區內，使固體上的碳燒盡，於氧及水蒸氣存在下，產生富有氫氣的氣體，而用於裂鍊循環上。

自觸媒裂鍊產生的副產品氫：第四種製造氫的程序，由煙一觸媒重組產生出來的副產品，其廢氣內含有 77 — 95 % 的氫。大量的氫氣，現在可由該項程序供應，而且在 1956 年末期，氫的日產量估計大約 1600 噸。多數精鍊工作者並不準備利用此種高氫含量的廢氣，在大多數的觸媒重組裝置中，此氣體僅做燃料燃燒用。可是許多氣體很快地被用於氨的合成，而且將來大部份的此類氫，將用於石油進料之脫硫及氫化含烯進料以供觸媒重組之用。

由水煤氣及水蒸汽得到的氫氣：水煤氣觸媒或 Bosch 程序是一種今日工業產氫的重要方法。水煤氣極易在標準水煤氣發生器，由價廉的原料如煤炭、水蒸汽及空氣產生出來。水煤氣的平均分析成份是：

	百分比
氫.....	49.2
一氧化碳.....	41.3
二氧化碳.....	4.2
氧氣.....	0.2
甲烷.....	0.8
氮氣.....	4.3

氣體內的一氧化碳，於鐵氧化物觸媒存在下與水蒸汽作用，如此可以得到額外氫氣及二氧化碳：



此反應的結果是水煤氣，基本上轉換成一種含有二氧化碳及氫的氣體。二氧化碳易被加壓的水洗去或用吸收劑如三乙醇胺移去，而剩下一種僅含氫氣的氣體。假若需要時，它可進一步地精製以除去少量的其他氣體。例如，少量的一氧化碳可用銅鹽氨液而洗滌除去。

水煤氣觸化程序通常在大約 $450 - 500^\circ\text{C}$ ($840 - 930^\circ\text{F}$) 下進行，及在大氣壓下完成的。其反應是放熱反應，故它一開始便自力作用 (self-supporting)。雖然有許多觸媒可以被使用，它們通常由鐵氧化物，參以鉻氧化物，鈷氧化物及氧化鋁而促進成功的。其反應是可逆的，因此假使溫度太高，轉化不會完成。可是它可以強制到更大的轉化，使用過量的水蒸汽，是它常用作法。水蒸汽易為冷凝，同時當它們冷卻時可由氣體內移去。

這些氣體，包含 $60 - 80\% \text{H}_2$ ， $20 - 40\% \text{CO}_2$ ，低於 1% 的 CO 及少量其他氣體常被貯藏在貯氣室內。它們需要時方由貯氣室送到壓縮機去，因為氫氣實際上常于高壓下使用的。在壓縮的若干中間階段，其壓力可能是 $250 - 1000 \text{ psig}$ ，混合氣由壓縮機送到洗滌塔，把二氧化碳移去。然後再把氣體重送回壓縮機，壓縮到最後工作壓力。

水的電解產生氫氣：利用水的電解產生氫氣之決定生產因素是價廉的電力。此氫氣的純度是其特色。此種氫氣生產方法最適合小工廠，當其操作不足夠供應大規模水煤氣之觸化生產方法時。該項工廠通常使用氫氣於各種合成或有機化學品的製備。雖然電解生產氫氣的成本比其他方法更高，它是小規模工廠之適用易行的方法。

氫氧化鉀或氫氧化鈉溶液，普通用於電解槽。溶液應循環通過電解槽，防止陰極金屬濃度增大而陽極濃度稀釋。近代工廠內，可以獲得 96