


化工製造用書

# 化工反應裝置

選定、設計、實例

橋本健治編著



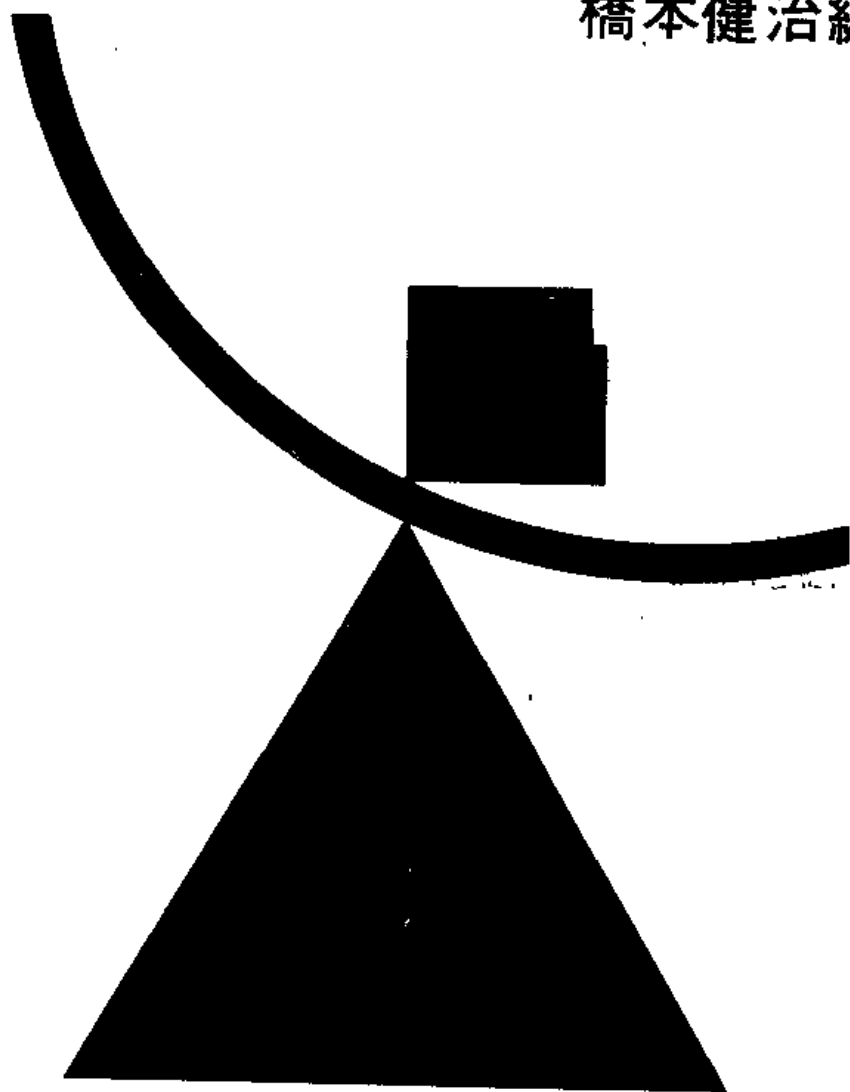
莊萬發譯著

化工製造用書

# 化工反應裝置

選定、設計、實例

橋本健治編著



莊萬發譯著

復漢出版社印行

中華民國七十三年八月一日出版

# 化工反應裝置

原著者：橋本健治

譯著者：莊萬發

出版者：復漢出版社

地址：台南市德光街六五—一號

郵政劃撥三一五九一號

發行人：沈岳林

印刷者：國發印刷廠

版權所有  
翻印必究

平裝 二元八角  
精裝 三元二角

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

# 序

化學工業等製程工業使用各種裝置，其中，反應裝置是藉化學變化變換物質的裝置，為化學工業製程的主角。反應的種類多，反應裝置內的現象複雜，比起處理物理變化的裝置，反應裝置的形式、內部構造、操作法多樣而富變化。反應工學的發展即在確立反應裝置的合理設計法。

反應工學的成書不少，但大都說明依據工業反應速度論的反應速度解析、反應裝置的操作、設計、工業反應裝置等。欲得反應裝置的一般知識時，此種內容足可達成目的，但在產業界從事反應裝置的開發、設計、操作的技術者須從反應工學教科書的基本知識邁前一步，把握多樣而複雜的工業反應裝置之具體實情。亦即，工業反應裝置的內部構造如何設計？如何選定符合目的反應裝置形式？需要具體而有體系的知識，以合理而實際的方法設計反應裝置，力求安全操作反應裝置。此種知識對研究者也有價值，可充分把握實際運轉中反應裝置的實體，從而找出新的研究課題。

遺憾的是目前幾無滿足上述要求的成書，所以出版工業反應裝置的新成書應有意義，動員在產業界第一線擔當實務的三十多位技術者，解說現在各種工業製程運轉的實際反應裝置。

本書共有 8 章，第 1 章依構造形式分類反應裝置，概說各裝置的特色與裝置形式的選定法。從第 2 章到第 7 章，各設 1 章解說固定層型、移動層型、流動層型、攪拌構型、氣泡塔型、管型反應裝置。各章包括裝置的一般「概說」與數個工業反應裝置的「實例」。第 8 章對上述各種反應裝置以外的特殊型反應裝置，以「實例」為主體敘述。在反應裝置的「概說」部份對各反應裝置解說裝置形式的分類法、各種形式的特色、裝置的規模擴大法或設計法、內部構造、安全操作法等。「實例」是選擇各該反應裝置中的主要形式而有一般性，而且今後可望發展的反應裝置例。各「實例」說明製程概要，反應裝置選定的理由與利害得失

，反應裝置的構造、操作條件、規模擴大法、裝置設計法、裝置選定的重點等，盡量列舉具體的數值，全書「實例」數近四十個。

本書有系統地整理多種工業反應裝置，同時具體表示反應裝置的實際形姿，應是化學工業等各種製程工業、工程企業、化學裝置、機械製造廠的技術者、化學工學科及化學系研究者、學生的理想參考書，但願讀者妥加利用。

# 目 次

<b>第 1 章 反應裝置的分類與選定</b> .....	1
1.1 反應的分類.....	1
1.2 反應裝置的分類.....	3
1.2.1 固定層型反應裝置.....	4
1.2.2 移動層型反應裝置.....	6
1.2.3 流動層型反應裝置.....	7
1.2.4 攪拌槽型反應裝置.....	9
1.2.5 氣泡塔型反應裝置.....	10
1.2.6 管型反應裝置.....	11
1.2.7 火炎型反應裝置.....	13
1.2.8 氣流型反應裝置.....	14
1.2.9 段塔型反應裝置.....	15
1.2.10 旋轉圓板型反應裝置.....	16
1.3 反應裝置的操作法.....	16
1.4 反應裝置內的流動與混合.....	17
1.5 反應裝置的傳熱方式.....	18
1.5.1 間接傳熱方式.....	19
1.5.2 直接傳熱方式.....	21
1.5.3 絕熱方式.....	23
1.6 反應裝置形式的選定.....	23
1.6.1 各反應樣式適用的反應裝置形式.....	23
1.6.2 氣固觸媒反應裝置.....	26
1.6.3 氣固反應裝置的選定.....	27
1.6.4 氣液反應裝置.....	27
1.6.5 氣液固反應裝置.....	29
<b>第 2 章 固定層型反應裝置</b> .....	34
2.1 固定層型氣固觸媒、液固觸媒反應裝置.....	35

2·1·1	反應裝置的形式	35
2·1·2	反應裝置的設計	38
2·1·3	反應裝置的內部構造	44
2·1·4	反應裝置的操作與安全	46
2·2	固定層型氣液固觸媒反應裝置	46
2·2·1	反應裝置的形式	46
2·2·2	氣液下向並流式反應裝置的設計	47
2·2·3	氣液下向並流式反應裝置的內部構造	56
[實例 2·1]	丙烷直接氧化反應裝置〔固定層型氣固觸媒反應裝置〕	63
[實例 2·2]	氨合成反應裝置〔固定層型氣固觸媒反應裝置〕	69
[實例 2·3]	石油精、水蒸氣改質反應裝置〔固定層型氣固觸媒反應裝置〕	77
[實例 2·4]	石油精接觸改質反應裝置〔固定層型氣固觸媒反應裝置〕	83
[實例 2·5]	固定化酵素反應裝置〔固定層型液固觸媒反應裝置〕	88
[實例 2·6]	氯化脫硫反應裝置〔固定層型氣液固觸媒反應裝置〕	94

### 第 3 章 移動層型反應裝置 101

3·1	移動層型反應	101
3·1·1	裝置形式的選定	101
3·1·2	裝置的分類與概略	103
3·2	移動層型反應裝置的設計	107
3·2·1	裝置的特性	107
3·2·2	設計的基礎	110
3·2·3	操作特性	112
[實例 3·1]	製鐵用高爐〔移動層型氣固反應裝置〕	115
[實例 3·2]	製鐵用直接還原爐〔移動層型氣固反應裝置〕	124
[實例 3·3]	石灰燒成爐〔移動層型氣固反應裝置〕	128

〔實例 3·4〕 十字流式排氣處理裝置〔移動層型氣固反應裝置〕	137
---------------------------------	-----

## 第 4 章 流動層型反應裝置.....145

4·1 流動層的基礎.....145	145
4·1·1 流動化.....145	145
4·1·2 流動化樣式的分類.....149	149
4·1·3 氣泡的舉動.....150	150
4·2 流動層操作的特色與裝置形式.....152	152
4·2·1 流動層操作的特色.....152	152
4·2·2 裝置形式.....155	155
4·3 派動層型反應裝置的設計.....158	158
4·3·1 着眼的因子.....158	158
4·3·2 氣體分散器.....162	162
4·3·3 內插物.....164	164
4·3·4 粒子捕集系.....165	165
4·3·5 反應率的計算法.....168	168
〔實例 4·1〕 Sohi o 法丙烯腈合成反應裝置〔流動層型氣固觸媒反應裝置〕	175
〔實例 4·2〕 無水順丁烯二酸合成反應裝置〔流動層型氣固觸媒反應裝置〕	181
〔實例 4·3〕 流動接觸分解反應裝置〔流動層型氣固觸媒反應裝置〕	185
〔實例 4·4〕 氣相法聚丙烯聚合反應裝置〔攪拌流動層型氣固反應裝置〕	192
〔實例 4·5〕 煤炭的流動燃燒反應裝置〔流動層型氣固反應裝置〕	197
〔實例 4·6〕 焦炭熱煤體法重質油熱分解反應裝置〔流動層型氣固反應裝置〕	205

## 第 5 章 攪拌槽型反應裝置.....211



5.1	裝置的形式	211
5.1.1	低粘度液用反應裝置的形式	211
5.1.2	高粘度液用反應裝置的形式	216
5.1.3	傳熱方式	218
5.2	操作	220
5.2.1	分批、半分批操作	221
5.2.2	連續操作	221
5.3	攪拌特性	221
5.3.1	動力特性	221
5.3.2	混合特性	224
5.3.3	傳熱特性	226
5.4	設計	228
5.4.1	均勻系低粘度液	228
5.4.2	不均勻系低粘度液	229
5.4.3	高粘度液	235
5.4.4	規模擴大法	235
[實例 5.1]	苯乙烯-丁二烯橡膠乳化聚合反應裝置〔液液系攪拌裝置〕	240
[實例 5.2]	聚苯乙烯塊狀聚合反應裝置〔高粘度液攪拌裝置〕	244
[實例 5.3]	高密度聚乙烯製造用聚合反應裝置〔液固系攪拌裝置〕	249
[實例 5.4]	對苯二甲酸合成反應裝置〔氣液固系攪拌裝置〕	252
[實例 5.5]	油脂的加氫反應裝置〔氣液固系攪拌裝置〕	258
[實例 5.6]	麵包酵母培養裝置〔氣液系攪拌裝置〕	262
[實例 5.7]	抗生物質發酵裝置〔氣液系攪拌裝置〕	268

## 第 6 章 氣泡塔型反應裝置.....274

6.1	氣泡塔型反應裝置諸形式	274
6.1.1	標準型氣泡塔	274
6.1.2	改良型氣泡塔	278

6·1·3	充填氣泡塔	282
6·1·4	懸濁氣泡塔與三相流動層	282
6·2	氣泡塔型反應裝置的設計	283
6·2·1	物質移動、氣體 hold-up、氣液接觸面積	284
6·2·2	液物性的影響	289
6·2·3	混合特性	290
6·2·4	傳熱	292
6·2·5	規模擴大法	293
6·2·6	設計例〔麵包酵母的連續培養〕	294
[實例 6·1]	烯屬烴的液相氧化反應裝置〔多段式氣泡塔型氣液反應裝置〕	302
[實例 6·2]	利用液相氧化的脫臭裝置〔噴流式氣泡塔型反應裝置〕	307
[實例 6·3]	超深層曝氣槽型活性污能處理裝置 ( deep shaft 式氣液固反應裝置 )	311
[實例 6·4]	起自 n-paraffin 的 SCP ( 微生物蛋白質 ) 生產反應裝置〔空氣揚升式氣液反應裝置〕	320

## 第 7 章 管型反應裝置 ..... 327

7·1	熱分解反應的基礎	327
7·1·1	熱分解反應的機構	327
7·1·2	熱分解反應的因子	328
7·2	管式分解爐的設計	331
7·2·1	管式分解爐的形式與構造	331
7·2·2	管式分解爐反應管的設計	333
[實例 7·1]	乙烯製造用石油精分解爐〔管式加熱爐型反應裝置〕	341
[實例 7·2]	bisbreaking 爐〔管式加熱爐型反應裝置〕	345

## 第 8 章 特殊型反應裝置 ..... 351

[實例 8·1]	火災型反應裝置—1〔塩酸製造反應裝置〕	352
----------	---------------------	-----

8·1·1	氯化氫合成的基本事項	353
8·1·2	反應裝置的特色與設計	355
8·1·3	裝置的運轉	359
[實例 8·2]	火炎型反應裝置—2〔氧化鈦製造反應裝置〕	361
8·2·1	氧化鈦生成反應的概要	361
8·2·2	反應裝置與反應工程	362
8·2·3	反應管的設計與擴大規模	365
8·2·4	反應裝置的實態與運轉	367
[實例 8·3]	火炎型反應裝置—3〔合成瓦斯製造反應裝置〕	370
8·3·1	Texaco 法瓦斯化製程	371
8·3·2	Texaco 法瓦斯化爐	373
8·3·3	利用 Texaco 法的煤炭瓦斯化	376
[實例 8·4]	氣液二相流管型反應裝置〔硫酸化及磺化反應裝置〕	378
8·4·1	氣液二相流管型反應裝置的概要	378
8·4·2	硫酸化及磺化反應裝置	382
[實例 8·5]	段塔型反應裝置〔排煙脫硫裝置〕	386
8·5·1	段塔型反應裝置概要	386
8·5·2	威爾曼·羅德法排煙脫硫裝置	389
[實例 8·6]	光反應裝置〔光亞硝基化反應裝置〕	393
8·6·1	光化學及光化學反應	393
8·6·2	PNC 法光亞硝基化反應裝置	395
[實例 8·7]	旋轉圓板型反應裝置〔排水處理裝置〕	400
8·7·1	有機物 (BOD) 及氮化合物的除去機構	401
8·7·2	旋轉圓板型反應裝置的構造	403
8·7·3	旋轉圓板型反應裝置的設計	405
8·7·4	下水處理場的運轉狀況	409
[實例 8·8]	旋轉爐型反應裝置 (水泥燒成爐)	411
8·8·1	旋轉爐型反應裝置的特色	411
8·8·2	旋轉爐型反應裝置的基礎事項	412
8·8·3	水泥燒成爐	416

# 第 1 章 反應裝置的分類與選定

本章概述反應裝置的分類，整理的觀念與反應裝置形式的選定方針。先依參與反應的相形態，把反應分類為氣相反應、液相反應、氣固解媒反應、氣液反應等。依構造形式把反應裝置大別分為固定層型、移動層型、流動層型、攪拌槽型等。若在橫座標取依相形態分類的反應，在縱座標取依構造形式分類的反應裝置，可大致編排現有工業反應裝置的地位。進一步細分反應裝置的基準有操作法，裝置內反應流體的流傳狀態、傳熱方式等。本章併用這些基準分類工業反應裝置，如此預先整理好，在承接某反應製程時，就有助於選定，設計適切的反應裝置形式，或開發新反應裝置。

本章依據上述各分類法整理各種反應裝置，為便於相互比較，對一種反應裝置形式（例如固定層型反應裝置）的記述分散於若干項目。各裝置形式有系統的解說與實例詳 2 章以後。

## 1.1 反應的分類

化學上把化學反應大別分為無機反應與有機反應，再依反應的種類或反應機構而細分類。但在反應工學的立場，依反應系所含的相形態——亦即相數與其組合分類反應較實際，反應以均質單一相發生時稱為均勻反應（homogeneous reaction）。直接參與反應的相在反應系內有二個以上時，稱為不均勻反應（heterogeneous reaction），均勻反應分為氣相反應與液相反應。不均勻反應依氣相、液相及固相的組合可分類為各種反應。表 1.1 為依據相形態的反應分類與所屬代表性反應的實例。

以下討論關連此分類法的若干問題。

(1) 相的條件 雖說依相的形態分類反應，只要以工業上實施反應為前提，就不能從反應裝置獨立分類反應。本書並非討論反應裝置內的所有相，只限於對反應的進行本質上很重要的相，依相數與其組合分類反

表 1.1 依相形態分數反應

反應的分類		反 應 例
均勻反應	氣相反應	石油精的熱分解反應、氯化氫的合成
	液相反應	酯化反應、聚苯乙烯製造反應(塊狀聚合)
不均勻反應	氣固觸媒反應	氮合成、丙烯晴合成、石油的接能分解反應、無水順丁烯二酸合成
	氣固反應	煤炭的燃燒與氯化反應、鐵礦石的還原反應、石炭石的熱分解反應、氧化鈦的製造反應(氣法)
	氣液反應	碳化氫的氯化與氧化反應, 反應吸收, 好氣性發酵
	氣液固反應	對苯二甲酸合成, 油脂的氫源加反應, 重油的氫化脫硫反應, 液相 Fischer-Tropsch 反應, 活性污泥法
	液液反應	磺化反應, SBR(苯乙烯-丁二烯共聚橡膠)製造反應(乳化聚合)
	液固反應	離子交換反應、固定化酵素反應、高密度聚乙烯製造反應
	固固反應	水泥的製造反應、陶器的製造反應

應。但是，反應裝置內相的狀態很複雜，可否算做獨立相的基準未必明確。

例如在固定層型反應裝置進行伴有反應的氣體吸收時，裝置內的固體粒子確可增高氣液兩相間的接觸效率，但不直接關連氣液反應本身，反應發生於氣相與液相。伴有此時之反應的氣體吸收分類為氣液反應。

有先以燃燒氣體把焦炭、砂等加熱，以它們為熱媒體，進行高溫吸熱反應的反應裝置。此時，固相存在反應裝置內，供給熱能。但也有以焦炭為熱媒體以外的傳熱方式，焦炭粒子相在此反應並非絕對必要的相，因而，上述的反應分類於氣相反應。

液相 Fischer-Tropsch 製程是觸媒粒子懸濁於不活性液媒體中，CO 與 H<sub>2</sub> 成氣泡吹入。實際的化學反應是 2 種氣體在固體觸媒表面上反應，液體成為媒體作用，但為進行此反應，不可缺少液媒體，而且在反應速度解析上，也不可無視液相的存在，由此理由，液相 Fischer-Tropsch 合成反應分類為氣液固反應。

利用微生物的好氣性發酵是微小固體的微生物懸濁於水相中，在其中吹入空氣的反應形式，包括液、固、氣三相，在表 1.1 却分類於氣液

反應，理由是①通常懸濁於水中的微生物為微小固體，濃度也不很大，②從反應速度解析與反應裝置設計的反應工學觀點，也沒有積極的理由把微生物當成獨立的固相。在活性污泥法，微生物集合形成相當大的絮叢狀（flock），在相形態上固不待言，在反應工學的觀點也宜視為氣液固反應。

在碳化氫的熱分解反應時，即使析出液狀的焦油狀物質或固體的游離狀碳，在它們的量微量的操作條件下，可視為均勻氣相反應。但副生物質的發生量增多，在反應裝置構造的設計上，若不能漠視其存在，宜分類為氣液反應、氣固反應或氣液固反應。

由以上若干例可歸納出有必要視為獨立之一相的條件是構成相的物質直接關連化學或生物學反應，其量在通常的意義不可不計，在反應速度解析和反應裝置設計上也須考慮其存在。

(2) 固體觸媒反應與氣固反應的區別 反應系包括氣相與固相時，固相成為觸媒時稱為氣固觸媒反應。固相為原料或生成物時只稱為氣固反應，在液固系及氣液固系的反應有固相為固體觸媒的場合，為包括微生物、酵素之固體的場合，只為反應原料或反應生成物的場合等。但在表1·1中，它們不特別區別，稱為液固反應，氣液固反應。只用固體觸媒時，例如寫成氣液固觸媒反應，油脂的加氫反應，重油的氫化脫硫反應等為氣液固觸媒反應。

## 1·2 反應裝置的分類

工業反應裝置的形式與操作法多種多樣，不易統一整理，先考慮反應裝置的分類法。

反應裝置的分類基準有：①構造形式，②反應樣式，③操作法，④反應流體的流動與接觸的狀態，⑤傳熱方式等。本書依構造形式區別反應裝置，再依各裝置的特色，由②～⑤的基準進一步詳細分類、整理。

前面依反應系內相的形態分類反應，將它用於反應裝置之分類的是②用反應樣式的分類法，例如可用於氣液反應的裝置分類為氣液反應裝置，此分類法便於選定反應裝置，本書也併用此分類法，③～⑤的分類法詳1·3～1·5節。

工業反應裝置的構造形式很多，本書依下示構造形式分類反應裝置

①固定層型，②移動層型，③流動層型，④攪拌槽型，⑤氣泡塔型，⑥管式加熱爐型及⑦特殊型。

特殊型反應裝置討論下示的反應裝置形式。

(7-1) 火炎型，(7-2) 氣流型，(7-3) 氣液二相流管型，(7-4) 段塔型，(7-5) 光照射型，(7-6) 從轉圓板型，(7-7) 轉窖型。

以下2章~8章依序討論①~⑦各裝置形式的反應裝置，當然其他的重要反應裝置形式也不少，本章盡量介紹。

①固定層型，②移動層型，③流動層型的反應裝置都包括固相，它對反應的進行有重要功能。④攪拌槽型，⑤氣泡塔型的反應裝置以液相為主要的反應場，該處有氣相時，固相也共存。⑥管式加熱爐型反應裝置以氣相或液相進行反應，有時析出固體。當成⑦特殊型反應裝置的反應裝置可分類於①~⑥，但考慮其機能與用途的特殊性，在最後1章討論。

### 1.2.1 固定層型反應裝置

(a) 固定層型的構造形式與適用分野 圖1.1為代表性的固定層型反應裝置之構造形式。通常的固定層是固體粒子不規則充填縱型外筒內部，或有規則充填成型的固形物。充填的固體有：①多孔性觸媒，②間接觸效率促進用不活性粒子，③反應用固體原料，④蓄熱用耐水物。

反應流體有氣體或液流之一的單相流(圖1.1(a))與氣液二相流(圖1.1(b))，後者採用氣液兩相成向流或並流接觸的操作法。並流法可使氣液兩相向上或向下流動。在通常的固定層，反應流體沿軸方向而流，但也有反應流體沿固定層半徑方向而流，減短層內通過距離而減小壓力損失的徑向流動式固定層型反應裝置(圖1.1(c))，實用為氨合成，石油精接觸改質反應等的反應裝置。

固定層型反應裝置最多的適用分野是用固體觸媒的反應，廣用於氣固觸媒反應(例如氨合成、石油精、水蒸氣改質反應)，液固觸媒反應(例如固定化酵素反應、離子交換反應)或氣液固觸媒反應(例如氫化脫硫反應)等。固體充填物本身對反應為不活性，不過，例如在氣體吸收之類氣液反應，改善液相的分散狀態，增進氣液間的接觸界面積及物

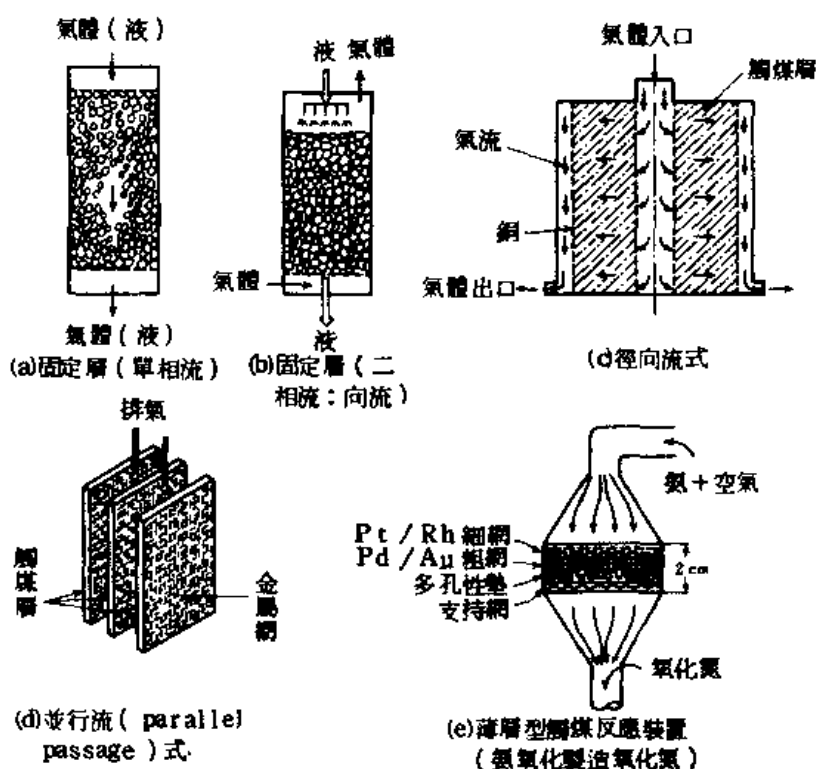


圖 1.1 固定層型反應裝置

質移動速度 (圖 1-1 (d))。

為除去鍋爐或加熱爐排氣中的氮氧化物，須除去排氣中所含煤塵或硫氧化物堵塞觸媒層或使觸媒劣化。有為此目的而開發的特殊構造並行流 (parallel passage) 式觸媒反應裝置。如圖 1-1 (d) 所示，先在以 2 張金屬網作成的方形密封形箱中裝填觸媒，形成觸媒反應層。以一定間隔排列很多箱，裝入上下開放的方形箱中，此箱在反應塔內規則堆積。反應流體沿觸媒層表面並行而流，反應成分在觸媒層內部擴散，引起反應。含煤塵的氣體不貫通觸媒層本身，可避免觸媒層堵塞或固形物累積觸媒細孔內而降低觸媒活性。

固定層型反應裝置也有一部份用於氣固反應，從煤炭製造焦炭的裝置為其例，適當粉碎的粘結炭成固定層狀態插入寬度較小而密封的爐內，遮斷空氣，從外壁加熱，把煤炭熱分解而得焦炭。蓄熱式反應裝置是高溫燃燒氣體流過亦填充火物的固定層，使反應層保持高溫，反應氣體



流過該處，在某期間內進行吸熱反應，此時，固定層用為蓄熱器詳 1.5.2 項。

(b) 薄層型反應裝置 化學反應速度非常迅速時，用重疊數張金屬製微細網的薄層型反應裝置 (shallow bed reactor)，其典型例是以空氣把氮氧化，製造氧化氮的反應裝置，早就用於硝酸製造工業，觸媒用白金或白金-銨合金的網(紗布形)。

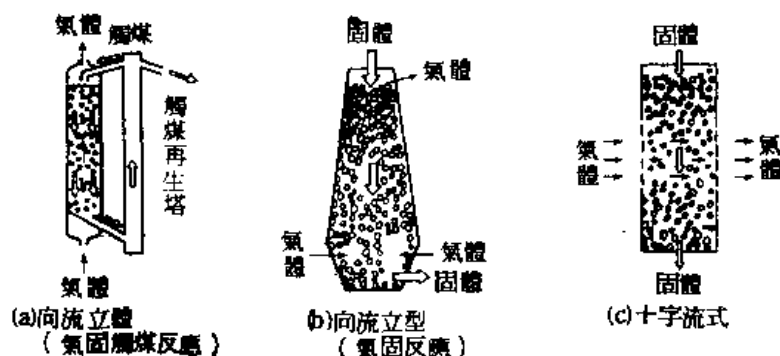
薄層型反應裝置為使反應氣體均勻流過薄層斷面，須配置觸媒網，在氮的氧化反應，白金網的表面部份氧化，其一部份蒸發，從觸媒層脫離，若反應流體的流態不均勻，會減低裝置性能，觸媒網也局部過熱，促進金屬蒸發，圖 1.1 (e) 是最近的氮氧化用薄層型反應裝置，在觸媒網下墊鎳鉻合金製多孔性席，增大觸媒層的壓力損失，使反應流體的流態均勻化，再在觸媒層 (Pt/Rh 網) 正下方設 Pd/Au 層，捕集蒸發的白金氧化物蒸氣的一部份。

用白金網的氮接觸氧化反應裝置之設計以前是依據擠壓流與氣體界膜擴散律速的假定，不過，有人報告要以混合擴散模型考慮流體混合的影響，並考慮氣體界膜內擴散及化學反應的過程而設計較適切。

### 1.2.2 移動層型反應裝置

(a) 移動層型的構造形式 移動層是固體粒子緩緩移動而接觸流體的裝置，圖 1.2 為代表性移動層型反應裝置。

典型的移動層型反應裝置是固體粒子連續供給裝置上部，藉重力在鉛直方向緩緩下降，氣體或液體與固體成向流或並流，接觸固體，實施氣(液)固觸媒反應或氣(液)固反應的反應裝置(圖 1.2 (a)(b))，此



■ 1.2 (下續)