

# 空氣污染防治(七)

鄭 福 田\*

## 伍、有毒氣體控制—冷凝

### 一、緒 言

把蒸氣式污染物 (Vapor pollutant) 之溫度降低到其露點 (dew point)，此時其在氣體中之分壓等於蒸氣壓，可使蒸氣冷凝為液體，因此可以去除排氣中之污染性蒸氣及水蒸汽，因此可以把冷凝當作是有毒氣體控制方法之一。

### 二、冷凝器之型式

冷凝蒸氣之設備 (condenser) 或冷却器 (gas cooler)，即表面式和接觸式 (surface and contact)，表面式者之蒸氣和冷凝劑以熱交換器隔開，而接觸式者則蒸氣和冷凝劑 (空氣，水或其他) 直接互相接觸。

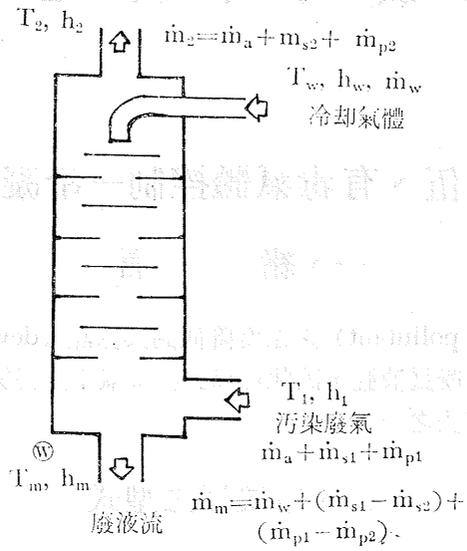
(一)直接接觸式冷凝器，最簡單者如圖一所示，乃供給足量甚或過量之空氣或水使蒸氣之溫度降至預期之溫度，冷凝下之蒸氣 (已成液體) 或水則經處理或回收後再予排放，一般之濕式集塵設備，如文氏洗滌器，沖淋塔 (spray tower) 等不但可以去除廢氣中之塵埃，同時可以達到吸收，冷凝氣體或蒸氣之效果。

(二)表面式熱交換器，乃是一種能促進某種流體到另一種流體間熱傳送之設備，但兩種流體間不直接接觸，由一隔牆隔開，其最簡單之型式為逆向流熱交換器 (counter flow exchanger)，如圖二所示，當冷流體在管中流過時，熱流體則自包圍於管之外殼流過而在管壁上發生熱之傳送作用，同樣也可安排使熱流體在內管流過而冷凝劑則繞流於管之外圍，此種型式稱為套管式熱交換器 (double-pipe heat exchanger)，如果冷、熱流體在熱交換器內僅流過一次時，稱為單程熱交換器 (single-pass heat exchanger) 但通常為提高單位體積內之有效熱傳面積，而採用多程式熱交換器，即利用擋板，使流體在管殼內往返流動，如圖三乃二程管，一程殼之擋板多程式熱交換器，此即為 (shell-and tube heat exchanger)，如圖三所示之殼管熱交換器，其中之一種或兩種流體都可沿交換器之長度而作數次前後來回之流動，圖三所示者乃一外殼通路及兩管通路者，稱為1—2交換器 (1-2 exchanger)，另可根據需要而設計兩外殼通路及兩管通路之2—2交換器和2-4交換器等。表面式熱交換器也可依兩種流體流動方式之不同而分為：

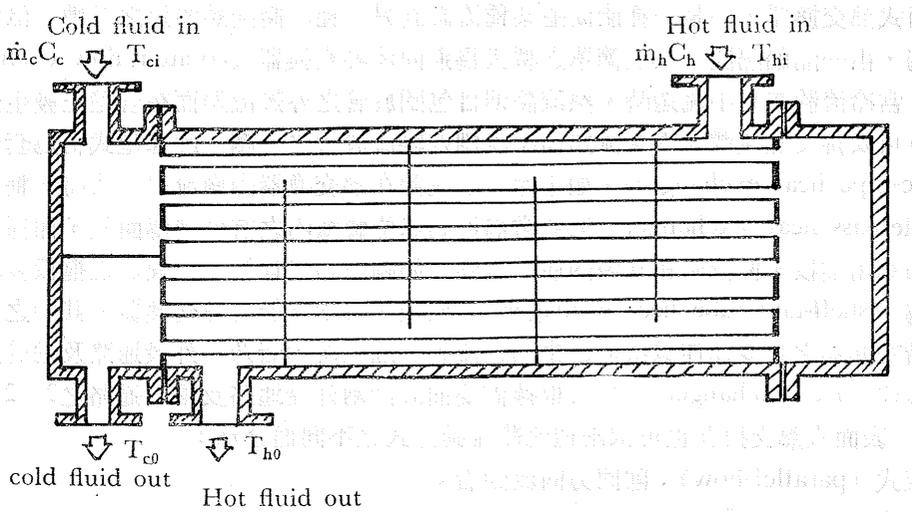
1. 並流式 (parallel-flow)：即同方向流動者。
2. 逆流式 (counter flow)。
3. 垂直向流式或稱交流式 (cross-flow)。

\* 本小組委員臺灣大學環境工程研究所教授

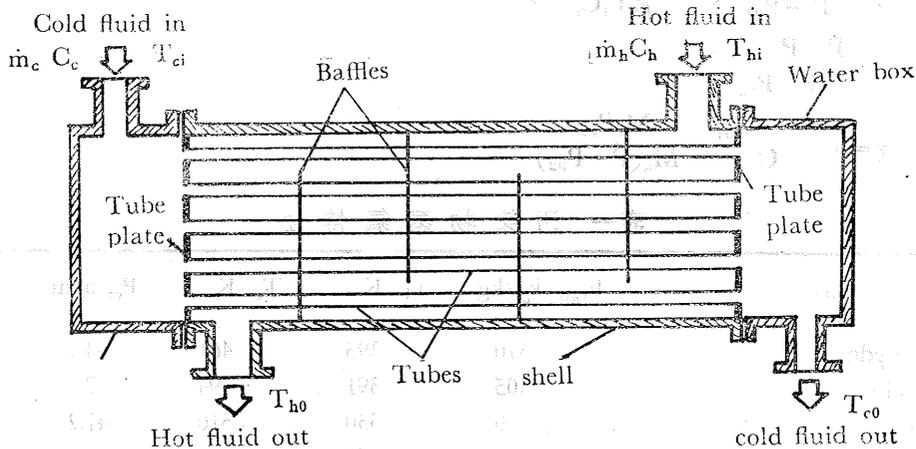
包含 淨化氣流 空氣



圖一 直接接觸式冷凝器



圖二 逆向流單程交換器



圖三 殼管熱交換器（二程管，一程殼）

### 三、基本學理

#### (一) 通則

利用冷凝以處理空氣污染物首應注意者乃探討污染蒸氣之熱力學特性，即其在飽和蒸氣時，蒸氣壓力和溫度之關係，以及冷凝時潛熱隨溫度之變化情形，表一列載常見氣體污染物在  $0^{\circ}\text{C}$  時之潛熱，臨界溫度 (critical temperature) 及臨界壓力 (critical pressure) 及在一大氣壓下之沸點及常數  $B$ 。利用表一及公式(1)(2)可以計算得在某一溫度下飽和蒸氣之冷凝潛熱及壓力。

$$\ln P_p = \ln P_c - 2.303 B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} \right) + \left( 2.67 - \frac{1.8B}{T_c} \right) \ln \frac{T}{T_c} + 0.422 \left( \frac{T_c^2}{P_c T^2} P_p - 1 \right) \quad (1)$$

$$h_{fg} = h_{fgb} \left( \frac{T_c - T}{T_c - T_b} \right)^{0.38} \quad (2)$$

其中  $P_p$  : 某溫度下之蒸氣壓力

$T$  : 已知溫度

$T_b, T_c, h_{fgb}$  : 由表一查出之數據

$h_{fg}$  : 在溫度  $T$  下修正之冷凝蒸氣潛熱。

#### (二) 冷凝之效率

對於氣體污染物之冷凝去除效率可用下式各式表示之

$$\eta = 1 - \frac{\dot{m}_{p2}}{\dot{m}_{p1}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P}{P - P_{p2}} \left( 1 - \frac{M_p P_{p2}}{RT_1 C_{mv1}} \right) \quad (4)$$

$$\eta = \frac{P - P_{p2}/C_{v1}}{P - P_{p2}} \quad (5)$$

$$\eta = 1 - \frac{1 - C_{m1}}{C_{m1}} \times \frac{M_p P_{p2}}{M_a (P - P_{p2})} \quad (6)$$

表一 污染物蒸氣特性

| Gas                   | $h_{fgb}$ , kJ/kg | $T_b$ , K | $T_c$ , K | $P_c$ , atm | B, K  |
|-----------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|-------|
| Acetaldehyde          | 570               | 293       | 461       | 54.7        | 2,182 |
| Acetic acid           | 405               | 391       | 594       | 57.1        | 3,384 |
| Acetone               | 520               | 330       | 510       | 47.2        | 2,473 |
| Allyl alcohol         | 684               | 370       | 545       | 55.5        | 3,582 |
| Ammonia               | 1,375             | 239       | 405       | 111.3       | 1,802 |
| n-Amyl alcohol        | 503               | 411       | 583       | 37.4        | 3,990 |
| Benzene               | 394               | 353       | 562       | 48.3        | 2,387 |
| Bromine               | 194               | 331       | 584       | 102         | 2,136 |
| n-Butane              | 386               | 272       | 425       | 37.7        | 1,765 |
| n-Butyl alcohol       | 592               | 391       | 563       | 43.6        | 3,786 |
| Carbon disulfide      | 352               | 319       | 552       | 78          | 1,975 |
| Carbon tetrachloride  | 194               | 350       | 556       | 45.0        | 2,313 |
| Chloroform            | 247               | 334       | 536       | 54          | 2,301 |
| Cyclohexane           | 358               | 354       | 553       | 40.2        | 2,369 |
| n-Decane              | 252               | 447       | 618       | 20.8        | 3,707 |
| Diethylamine          | 381               | 329       | 496       | 36.6        | 2,432 |
| Diethyl ketone        | 380               | 376       | 561       | 36.9        | 2,912 |
| Ethane                | 489               | 184       | 305       | 48.2        | 1,073 |
| Ethyl acetate         | 434               | 305       | 523       | 38.0        | 2,730 |
| Ethyl alcohol         | 855               | 351       | 516       | 63.0        | 3,590 |
| Ethylamine            | 611               | 290       | 456       | 55.5        | 2,178 |
| Ethyl benzene         | 339               | 409       | 617       | 35.6        | 2,976 |
| Ethyl chloride        | 338               | 285       | 460       | 52          | 1,892 |
| Ethylene              | 483               | 169       | 283       | 50.5        | 971   |
| 1,2 Ethylene chloride | 324               | 355       | 561       | 53          | 2,568 |
| Ethyl ether           | 351               | 308       | 467       | 35.9        | 2,204 |
| Ethyl formate         | 407               | 327       | 508       | 46.8        | 2,393 |
| Freon 22              | 232               | 232       | 370       | 48.5        | 1,562 |
| n-Heptane             | 320               | 371       | 540       | 27.0        | 2,755 |
| n-Hexane              | 337               | 342       | 507       | 29.3        | 2,439 |
| Hydrogen bromide      | 218               | 207       | 363       | 84          | 1,265 |
| Hydrogen chloride     | 443               | 188       | 324       | 81.5        | 1,200 |
| Hydrogen cyanide      | 880               | 299       | 457       | 53.2        | 2,458 |

|                           |       |     |     |       |       |
|---------------------------|-------|-----|-----|-------|-------|
| Hydrogen fluoride         | 1,562 | 188 | 461 | 64    | 368   |
| Hydrogen sulfide          | 548   | 213 | 373 | 88.9  | 1,336 |
| Isobutyl acetate          | 309   | 391 | 561 | 31.4  | 3,334 |
| Isobutyl alcohol          | 578   | 381 | 548 | 42.4  | 3,665 |
| Isopropyl alcohol         | 667   | 355 | 508 | 47.0  | 3,640 |
| Methane                   | 510   | 111 | 190 | 45.4  | 562   |
| Methyl alcohol            | 1,100 | 338 | 512 | 79.9  | 3,345 |
| Methyl chloride           | 428   | 249 | 416 | 65.9  | 1,618 |
| ✓ Methyl ethyl ketone M2K | 444   | 353 | 535 | 41.0  | 2,688 |
| Methyl formate            | 470   | 305 | 487 | 59.2  | 2,223 |
| Naphthalene               | 316   | 491 | 748 | 40.0  | 3,621 |
| n-Octane                  | 306   | 399 | 569 | 24.5  | 3,098 |
| n-Pentane                 | 357   | 309 | 470 | 33.4  | 2,108 |
| Propane                   | 426   | 231 | 370 | 41.9  | 1,432 |
| Propionic acid            | 414   | 414 | 612 | 53    | 3,880 |
| n-Propyl acetate          | 336   | 375 | 549 | 33.2  | 3,000 |
| n-Propyl alcohol          | 688   | 371 | 537 | 51.0  | 3,739 |
| Propylene                 | 438   | 225 | 365 | 45.6  | 1,383 |
| Pyridine                  | 450   | 388 | 620 | 55.6  | 2,748 |
| Sulfur dioxide            | 389   | 263 | 431 | 77.9  | 1,947 |
| Sulfur trioxide           | 533   | 318 | 491 | 83.8  | 2,980 |
| ✓ Toluene                 | 363   | 384 | 592 | 40.6  | 2,719 |
| Trichloroethylene         | 240   | 360 | 544 | 49.5  | 3,005 |
| Water                     | 2,257 | 373 | 647 | 218.3 | 3,233 |
| Xylene                    | 347   | 417 | 630 | 36.8  | 3,063 |

其中 $\eta$ ：冷凝效率

$\dot{m}_{p2}, \dot{m}_{p1}$ ：分別代表污染蒸氣在情況 2 及 1 時之質量流率

$P, P_{p2}$ ：分別代表大氣及污染物在情況 2 之壓力

$M_p$ ：污染物之分子量       $M_a$ ：空氣之分子量

$R$ ：氣體常數

$T_1$ ：在情況 1 之溫度

$C_{mv1}$ ：情況 1 之質量對體積濃度

$C_{v1}$ ：情況 1 之體積對體積濃度

$C_{m1}$ ：情況 1 之質量對質量濃度

如果進流及出流之濃度很小時， $P_{p2} \rightarrow 0$  則公式(4)至(6)可簡化成：

$$\eta = 1 - \frac{M_p P_{p2}}{RT_1 C_{mv1}} \quad (7)$$

$$\eta = 1 - \frac{P_{p2}}{PC_{v1}} \quad (8)$$

$$\eta = 1 - \frac{M_p P_{p2}}{M_a PC_{m1}} (1 - C_{m1}) \quad (9)$$

### ⇒直接接觸冷凝器

最簡單之直接接觸冷凝器如圖一所示者，由質量與能量之平衡與不減可導出所需之冷凝用水流率為：

$$\dot{m}_w = \frac{1}{C_w(T_m - T_w)} \{ \dot{m}_1 [C_{ma1}(h_{a1} - h_{a2}) + C_{ms1}(h_{g1} - h_{fm}) + C_{mp1} C_{pp}(T_1 - T_m) + C_{mp1} h_{fgp}] - \dot{m}_2 [C_{ms2}(h_{g2} - h_{fm}) - C_{mp2} C_{pp}(T_m - T_2) + C_{mp2} h_{fgp}] \} \quad (10)$$

其中  $C_w$  為冷却水比熱，

$C_{pp}$  為污染蒸氣之比熱

$$\text{如果差度差不大，則 } h_{a1} - h_{a2} = C_{pa}(T_1 - T_2) \quad (11)$$

$C_{pa}$ ：空氣之比熱

$$\dot{m}_{s2} = \frac{\rho_{g2} \dot{m}_1 [C_{ma1}/M_u + (1-\gamma)C_{mp1}/M_p]}{P/RT_2 - \rho_{g2}/M_s} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{p2} = (1-\gamma)C_{mp1}\dot{m}_1 \quad (13)$$

$$\dot{m}_2 = [C_{ma1} + (1-\gamma)C_{mp1}]\dot{m}_1 + \dot{m}_{s2} \quad (14)$$

$\dot{m}_{s2}$ ,  $\dot{m}_{p2}$ ,  $\dot{m}_2$  分別代表流出冷凝器之水蒸氣，污染物及總質量流率（如圖一所示）。

(1) 只有水蒸氣——污染物存在時

此種情況很接近於實際上之工業生產程序，去上述公式(10)–(14)中有關空氣之項後可得下列各式：

$$\dot{m}_w = \frac{1}{C_w(T_m - T_w)} \{ \dot{m}_1 [C_{ms1}(h_{g1} - h_{fm}) + C_{mp1} C_{pp}(T_1 - T_m) + C_{mp1} h_{fgp}] - \dot{m}_2 [C_{ms2}(h_{g2} - h_{fm}) - C_{mp2} C_{pp}(T_m - T_2) + C_{mp2} h_{fgp}] \} \quad (15)$$

$$\dot{m}_{s2} = \frac{\rho_{g2} \dot{m}_1 (1-\gamma)C_{mp1}}{M_p(P/RT_2 - \rho_{g2}/M_s)} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{p2} = (1-\gamma)C_{mp1}\dot{m}_1 \quad (17)$$

$$\dot{m}_2 = (1-\gamma)C_{mp1}\dot{m}_1 + \dot{m}_{s2} \quad (18)$$

(2) 共有空氣和污染物蒸氣存在時

將公式(10)–(14)中有關水蒸氣之項去掉後可得下列各式：

$$\dot{m}_w = \frac{1}{C_w(T_m - T_w)} \times \{ \dot{m}_1 [C_{ma1} C_{pa}(T_1 - T_2) + C_{mp1} C_{pp}(T_1 - T_m) + C_{mp1} h_{fgp}] + \dot{m}_2 [C_{pp}(T_m - T_2) - h_{fgp}] \} \quad (19)$$

$$\dot{m}_a = C_{ma1}\dot{m}_1 = (1 - C_{mp1})\dot{m}_1 \quad (20)$$

$$\dot{m}_{p2} = (1-h)C_{mp1}\dot{m}_1 \quad (21)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_a + \dot{m}_{p2} = (1-\gamma)C_{mp1}\dot{m}_1 \quad (22)$$

(3) 污染物濃度甚低時

即  $C_{mp1} < 0.01$  時，則可把上述(19)–(22)式簡化成：

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad (23)$$

$$C_{mp2} = (1-\gamma)C_{mp1} \quad (24)$$

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{m}_1}{C_w(T_w - T_m)} \{ C_{pa}(T_1 - T_2) + C_{mp1}C_{pp}[(T_1 - T_2) - \eta(T_m - T_2)] + \eta C_{mp1}h_{fgp} \} \quad (25)$$

#### 四表面熱交換器

冷、熱兩流體間熱之傳輸速率 $Q$ 為：

$$Q = UA\Delta T_m \quad (26)$$

$U$ ：總熱傳輸係數

$A$ ：熱傳輸面積

$U$ 可用下式表示之：

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_G} + \frac{k_x}{x} + \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_L} \quad (27)$$

其中  $h_G, h_L$  分別代表氣、液流（即熱、冷流體）側之熱交換係數

$x$ ：熱交換管之管壁厚

$k_x$ ：熱傳導率（thermal conductivity）

通常  $\frac{k_x}{x}$  很小，可以忽略

$\Delta T_m$ ：對數平均溫度差

$$\text{即 } \Delta T_m = \frac{(T_{G1} - T_{L2}) - (T_{G2} - T_{L1})}{\ln[(T_{G1} - T_{L2}) / (T_{G2} - T_{L1})]} \quad (28)$$

其中之  $G, L$  分別代氣、表液相（即熱、冷流體）

1 與 2 分別代表初始與最後之情況

如交換器為多程者（multipass exchanger），則需依下式而加以校正。

$$\Delta T_m = F_T \Delta T_{tm} \quad (29)$$

$F_T$ 之大小則依圖四而解得。

(1)共有水蒸氣——污染物蒸氣存在時表面冷凝器之冷凝流出冷凝器之質量流率，體積流率分別為：

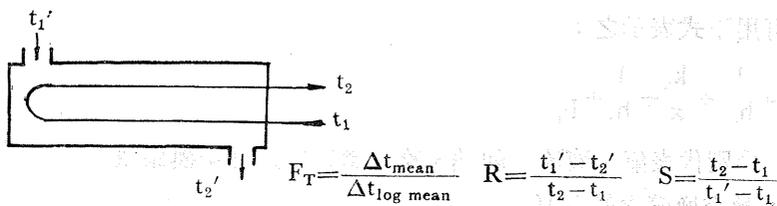
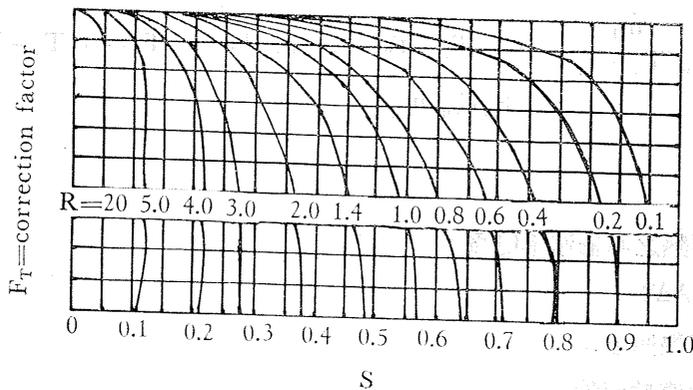
$$\dot{m}_2 = (1 - C_{mp1})\dot{m}_1 \times \frac{M_p P_{p2}}{M_s(P - P_{p2})} \left[ 1 + \frac{\rho_{g2}}{M_p(P/RT_2 - \rho_{g2}/M_s)} \right] \quad (30)$$

$$Q_2 = \frac{(1 - C_{mp1})\dot{m}_1 P_{p2} RT_2}{M_s P(P - P_{p2})} \times \frac{2 - \rho_{g2} RT_2 / M_s P}{1 - \rho_{g2} RT_2 / M_s P} \quad (31)$$

(2)只有空氣——污染物蒸氣存在表面冷凝器之冷凝

$$\dot{m}_2 = (1 - \eta C_{mp1})\dot{m}_1 \quad (32)$$

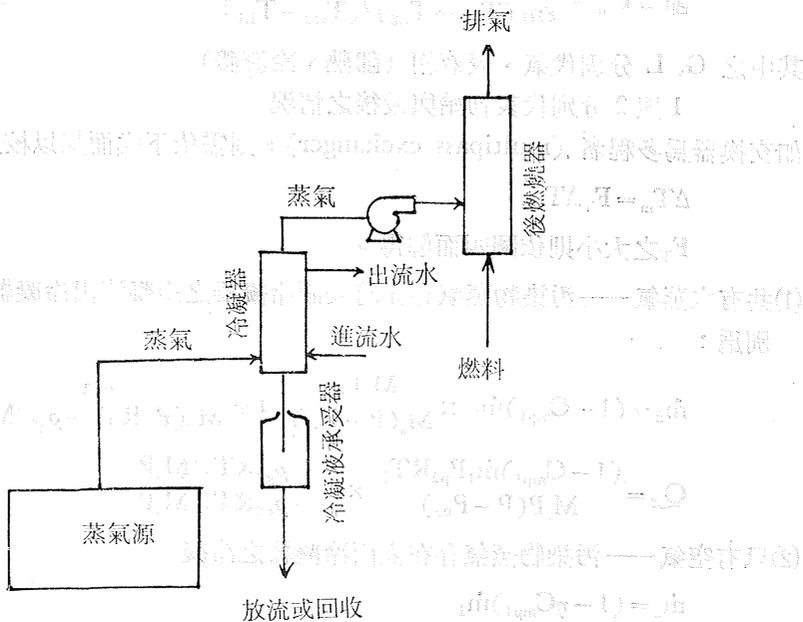
$$Q_2 = \frac{\dot{m}_1 RT_2}{P} \left[ \frac{1 - C_{mp1}}{M_a} + \frac{(1 - \eta) C_{mp1}}{M_p} \right] \quad (33)$$



圖四 Ft 修正值 (適用單程殼雙程或偶數程管交換器)

#### 四、應用與結語

冷凝可說是回收有用之有機性氣體污染物，減少其造成空氣污染之最好方法，如要把它當做



圖五 冷凝與後聯燒燃合使產例

是一種獨立之空氣污染控制設備，則需使用低溫之冷水甚或冷却劑，否則如果使用一般室溫之水 (room-temperature) 作為冷却流體，則僅能把它當作是吸附式後燃燒器 (afterburner) 之預先處理設備，用以減輕其後續設備之負荷，如圖五，冷凝措施不論是單獨式與其他方法 (或設備) 聯合使用，已經在石化工業，硝酸、氯氣、清潔劑、溶劑、去油 (degreaser)、乾洗、製藥等舉凡與蒸氣或會產生蒸氣等之工業上使用成功，使用此種措施，不但可以控制空氣污染，而且回收有用生產原料或成品，減少成本，為頗值得考慮使用之方法。

### 參 考 文 獻

1. U. S. Hew "Air Pollution Engineering Manual".
2. Martin Crawford "Air Pollution Control Theory".
3. J. M. Marchello "Control of Air Pollution Sources".
4. Louis Theodore and Anthony J. Buonicure "Air Pollution Control Equipment: Selection, Design, Operation and Maintenance".
5. 葉和明著 "單元操作"