

## 一般工業通風簡介

吳俊耀譯\*

### 一、前言

“一般工業通風(general industrial ventilation)”一詞為外來語，其意義乃在於由一地區、房間或建築物補充或排出空氣。依功能區分，通風可分為下列兩項：

1. 稀釋通風 - 其目的乃基於健康危害、火災、爆炸及臭味控制上的考慮，利用乾淨空氣稀釋受污染空氣，使環境中污染物濃度降低。然由於稀釋通風需導入大量稀釋空氣，對於局部排放之污染源，稀釋通風則較不經濟。
2. 热控制通風 - 其目的在於控制高溫作業環境之空氣溫度，例如金屬鑄造、烤箱等作業場所，以避免工作者受傷害或感到不適。

以下即分別就稀釋通風及熱控制通風之原理、控制方法說明之，以供工業界設置通風系統時之參考。

### 二、稀釋通風

#### 2.1 稀釋通風原則

稀釋通風系統設計之基本原則如下：

1. 選擇適當之稀釋風量，表1中列有多種污染物，當每公升溶劑蒸發時，在充份混合的條件下，欲稀釋至界限值(TLV)所需之乾淨空氣量，然此空氣量隨著系統設計之不同需乘以一常數K值(參見2.2節)。
2. 排氣口儘量靠近污染源。
3. 進氣口與排氣口的安排應使氣流通過污染源，操作者則位於進氣口與污染源之間。
4. 稀釋通風經常使用大風量、低壓風車，若排氣欲循環使用時，需設置空氣處理設備，以確保人員安全。
5. 為確保排氣不致於再度進入作業環境，排氣口需遠離門窗或通風口。

---

\*中國技術服務社工業污染防治中心工程師

表 1 蒸氣稀釋空氣量

溶 液 種 類	界 限 值 (TLV, ppm)	稀 釋 至 TLV 所 需 空 氣 量 (m <sup>3</sup> /1 溶 液 蒸 發)
丙酮(Acetone)	750	441
正醋酸戊酯(n-Amyl acetate)	100	1632
苯(Benzene)	10	無建議值
正丁醇(n-Butanol)	50	5280
正醋酸丁酯(n-Butyl acetate)	150	1224
乙二醇單丁醚(Butyl Cellosolve)	25	無建議值
二硫化碳(Carbon disulfide)	10	無建議值
四氯化碳(Carbon tetrachloride)	5	無建議值
乙二醇單乙醚(Cellosolve)	5	無建議值
乙二醇單乙醚醋酸酯(Cellosolve acetate)	5	無建議值
氯仿(Chloroform)	10	無建議值
二氯乙烷(1,2 Dichloroethane)	10	無建議值
二氯乙烯(1,2 Dichloroethylene)	200	
1,4二氧陸園(Dioxane)	25	無建議值
醋酸乙酯(Ethyl acetate)	450	618
乙醇(Ethyl alcohol)	1000	414
乙醚(Ethyl ether)	400	578
汽油(Gasoline)	300	需要特殊考慮
異戊醇(Isoamyl alcohol)	100	2232
異丙醇(Isopropyl alcohol)	400	792
異丙醚(Isopropyl ether)	250	684
醋酸甲酯(Methyl acetate)	200	1500
甲醇(Methyl alcohol)	200	2946
甲基丁基酮(Methyl n-butyl ketone)	5	無建議值
乙二醇單甲醚(Methyl Cellosolve)	5	無建議值
乙二醇單甲醚醋酸酯(Methyl Cellosolve acetate)	5	無建議值
甲基氯仿(Methyl Chloroform)	350	683
甲基乙基酮(Methyl ethyl ketone)	200	1350
甲基丙基酮(Methyl propyl ketone)	200	1194

表 1 蒸氣稀釋空氣量 (續)

溶 液 種 類	界 限 值 (TLV, ppm)	稀 釋 至 TLV 所 需 空 氣 量 (m <sup>3</sup> /1 溶 液 蒸 發)
甲基異丙基酮(Methyl isobutyl ketone)	50	3876
石油腦(Naptha)		需要特殊考慮
石油脂(Naptha VM&P)	300	需要特殊考慮
硝基苯(Nitrobenzene)	1	無建議值
醋酸丙酯(n-Propyl acetate)	200	1050
乾洗溶劑(stoddard solvent)	100	1800-2100
四氯乙烷(1,1,2,2-Tetrachloroethane)	1	無建議值
四氯乙烯(Tetrachloroethylene)	50	4752
甲苯(Toluene)	100	2280
三氯乙烯(Trichloroethylene)	50	5400
二甲苯(Xylene)	100	1980

## 2.2 在健康上的稀釋通風

為避免遭受健康危害之稀釋通風有下列四點限制因素：

1. 污染物之產生量不能太大或稀釋之空氣風量必須適當。
  2. 工作者必須儘量遠離污染源，使工作者之曝露濃度不得超過界限值(TLV)。
  3. 毒性污染物質濃度必須很低。
  4. 污染物之蒸發速率須均一。

稀釋通風之目的既然是在於將污染物濃度稀釋至界限值(TLV) 以下，因此必須先確定蒸氣產生速率或溶液蒸發速率，而這些數值則應由實驗求得。

### 2.2.1 稀釋通風方程式

在均一的污染物產生速率下，通風速率即在於使環境中污染物保持固定濃度，假設稀釋空氣不含污染物，以質量平衡計算。

$$[\text{累積速率}] = [\text{產生速率}] - [\text{去除率}]$$

式中： $V$ =室內體積

G = 產生速率

$Q'$  = 有效的通風速率

$C$ =污染物濃度

$t$  = 時間

在穩定狀態下， $dc = 0$

$$Gdt = Q' Cdt;$$

$$\int_{t_1}^{t_2} G dt = \int_{t_1}^{t_t} Q' C dt$$

當污染物濃度( $C$ )及產生速率( $G$ )保持一定時，

$$G(t_2-t_1) = Q' C(t_2-t_1)$$

$$Q' = \frac{G}{C} - \dots \quad (2)$$

考慮通風系統之安排無法使空氣完全混合，因此通風速率須乘上  $-K$  值。

$$Q' = \frac{Q}{K} \quad \text{--- (3)}$$

式中： $Q$ =實際通風速率( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$Q'$  = 有效通風速率 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$K$ =不完全混合當數

所以(3)式變為

$$Q = \left[ \frac{G}{C} \right] K \quad \dots \quad (4)$$

K 值的決定，基於下列數種考慮：

1. 稀釋空氣在室內的佈置，所造成之混合狀態，參考圖 1。
  2. 污染物之毒性，雖然 TLV 與污染物毒性不盡相同但仍可依下列指標判斷之：  
    低毒性物質 TLV > 500ppm  
    中毒性物質 TLV 100~500ppm  
    高毒性物質 TLV < 100ppm
  3. 工作場所操作狀況包含：
    - (1) 工作時間、操作週期及工作者與污染源之正常距離。
    - (2) 工作環境內污染源數目及分佈情況。
    - (3) 季節變化對於自然通風之影響。
    - (4) 空氣排出設備之機械效率。
    - (5) 各種會影響工作人員呼吸區內毒性物質濃度之因素。
  4. K 值之決定基於上述各種考慮，其範圍在 1~10 之間。

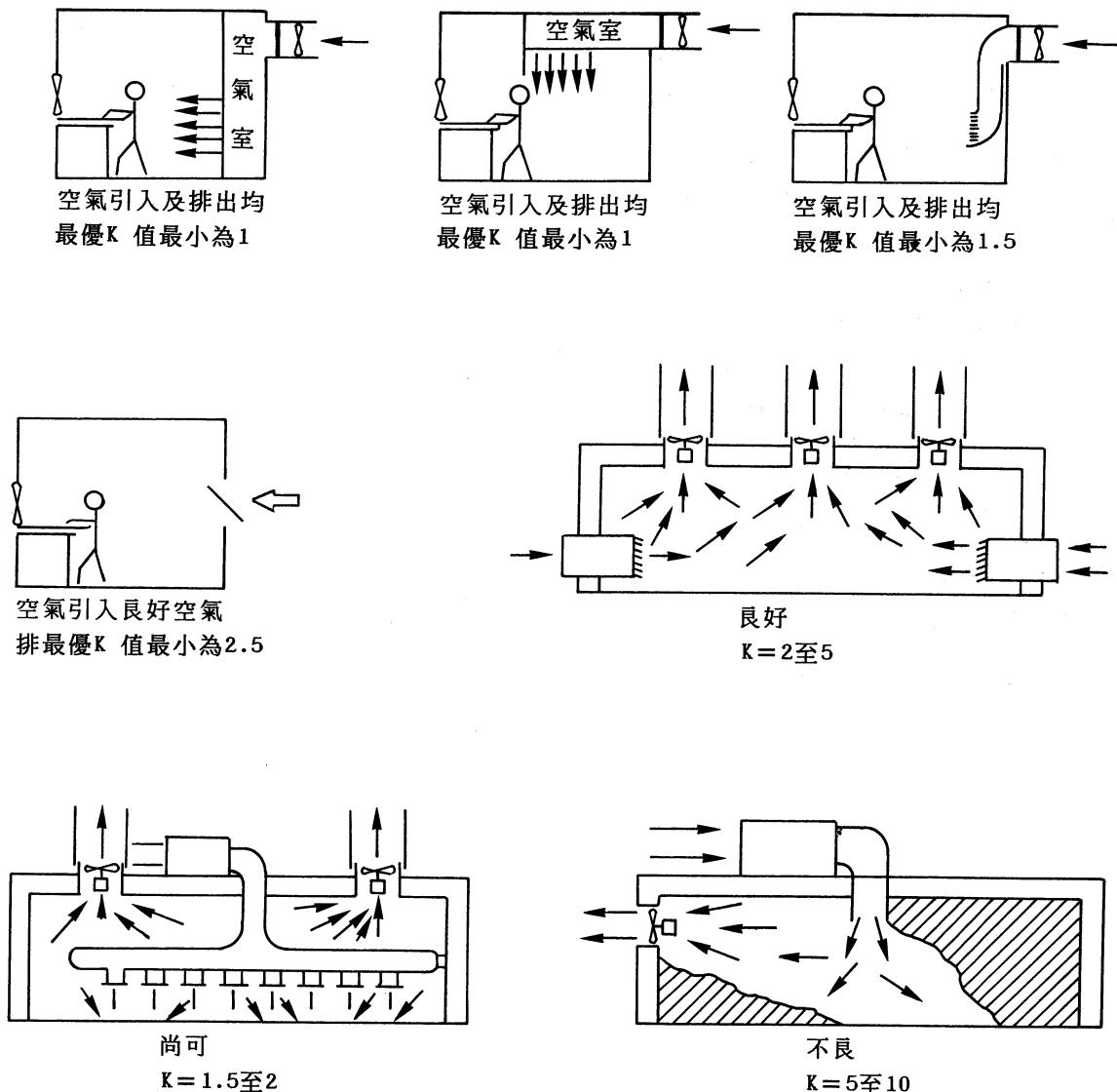


圖 1 稀釋通風的原則及K值之選擇

## 2.2.2 穩定狀態下求污染物濃度

在穩定狀態下氣體或蒸氣濃度可由下列質量平衡式表示之。

$$Q' = \frac{G}{C}$$

因此，當污染物產生速度維持一定時，欲使環境中污染物濃度降低至可接受限值，所需之未受污染空氣通風速率即可輕易地算出。經常可接受之污染物濃度限值以界限值(TLV)為依據，其濃度表示方法通常為ppm，則液體溶劑產生速率為：

$$G = \frac{24.5 \times SG \times ER}{MW}$$

式中： $G$ =產生速率，( $m^3/min$ )

$24.5 = 11$ 溶劑蒸發時，STP下所佔之體積 $m^3$

$SG =$ 溶劑比重

$ER =$ 蒸發速率( $l/min$ )

$MW =$ 溶劑分子量

當 $Q' = G/C$ 時，可表示為：

$$Q' = \frac{24.5 \times SG \times ER \times 10^6}{MW \times C} \quad (5)$$

(計算範例)

甲基氯仿(Methyl Chloroform) 在槽中蒸發速率為 $0.0121/min$ ，當  $TLV = 350ppm$ ， $SG = 1.32$ ， $MW = 133.4$ ，假設  $K = 5$ ，求欲維持蒸氣濃度在 $TLV$ 時，所需之有效通風速率( $Q'$ )及實際通風速率( $Q$ )？

$$Q' = \frac{(24.5)(10^6)(1.32)(0.012)}{(133.4)(350)} = 8.3m^3/min$$

由於一完全混合，需考慮 $k$ 值，則

$$Q' = \frac{(24.5)(10^6)(1.32)(0.012)(5)}{(133.4)(350)} = 41.6m^3/min$$

### 2.2.3 污染物濃度與時間之變化 (參見圖 2)

在未達穩定狀態時，污染物濃度與時間之變化關係可由下列得之，依質量平衡微分方程式：

$$\frac{dc}{G - Q'C} = \frac{dt}{V}$$

由上式積分得

$$\ln \left[ \frac{G - Q'C_2}{G - Q'C_1} \right] = \frac{Q'(t_2 - t_1)}{V} \quad (6)$$

式中1指初始狀態，2指最終狀態。如果希望得知污染物濃度達某一限值所需時間時，可由下式計算之，以 $\Delta t$ 表示 $t_2 - t_1$ ，則

$$\Delta t = -\frac{V}{Q'} \left[ \ln \left[ \frac{G - Q'C_2}{G - Q'C_1} \right] \right] \quad (7)$$

若 $C_1 = 0$ 時

$$\Delta t = -\frac{V}{Q'} \left[ \ln \left( \frac{G - Q'C_2}{G} \right) \right] \quad \text{-----(8)}$$

若欲得知經過某一時間後污染物濃度時，假設  $C_1 = 0$ ，則(8)式變為：

$$C_2 = \frac{G \left[ 1 - \exp \left( -\frac{Q' \Delta t}{V} \right) \right]}{Q'} \quad \text{-----(9)}$$

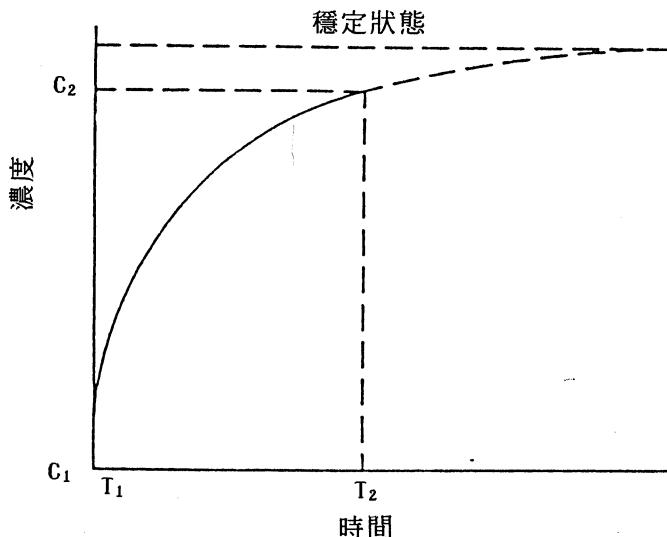


圖 2 污染物濃度與時間之關係

(計算範例)

甲基氯仿在下列情況下蒸發，求濃度( $C_2$ )達200ppm時所需時間及耗時60分鐘蒸氣濃度( $C_2$ )？

$$G = 0.035 \text{ m}^3/\text{min}, Q' = 60 \text{ CMH}, V = 3000 \text{ m}^3, C_1 = 0, K = 3$$

$$\Delta t = -\frac{V}{Q'} \left[ \ln \left( \frac{G - Q'C_2}{G} \right) \right] = 21 \text{ min}$$

$$C_2 = \frac{G \left[ 1 - \exp \left( -\frac{Q' \Delta t}{V} \right) \right]}{Q'} \times 10 = 408 \text{ ppm}$$

#### 2.2.4 洗淨速率（參見圖3）

當污染物已存在於作業環境中欲以未污染空氣洗淨，其洗淨速率(rate of purging)由下式計算之

$$Vdc = -Q'Cdt$$

$$\int_{C_1}^{C_2} \frac{dc}{c} = -\frac{Q'}{V} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$\ln \left[ \frac{C_2}{C_1} \right] = -\frac{Q'}{V} (t_2 - t_1)$$

或  $C_2 = C_1 \exp \left[ -\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V} \right]$  ----- (10)

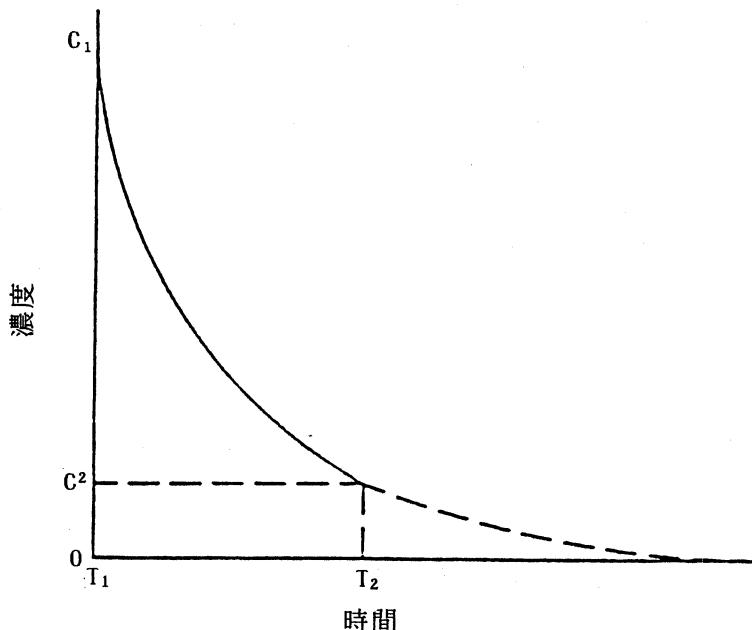


圖 3 污染物洗淨速率圖

(計算範例)

- 一作業環境空間  $V = 3000m^3$ ，其污染物屬間接排放，今欲以一固定通風速率  $Q' = 60$  CMM稀釋污染物濃度，1.求使污染物濃度由  $100ppm(C_1)$  降低至  $/25ppm(C_2)$  所需時間？  
2.若污染物濃度為  $100ppm(C_1)$  經 60 分鐘通風後，求  $C_2$ ？

$$t_2 - t_1 = -\frac{Q'}{V} \ln \left[ \frac{C_2}{C_1} \right] = 69.3min$$

$$C_2 = C_1 \exp \left[ -\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V} \right] = 30.1ppm$$

#### 2.2.5 對於多種污染物混合之稀釋通風

在許多場合中污染物的產生及由於多種混合溶劑的蒸發所引起，當兩種或多種毒性物質共同存在時，共同的效應可能超過個別存在時之毒性，在缺乏無加成作用證明的條

件下，各種污染物所需通風速率必須予以相加，即環境中各種污染物濃度與其界限值比值之和，若大於1時則大於限值，如(1)式。

$$\frac{C_1}{TLV_1} + \frac{C_2}{TLV_2} + \dots + \frac{C_n}{TLV_n} \quad (1)$$

式中C代表污染物濃度值，當(1)式大於1時，欲使環境中混合污染物濃度達安全範圍所需通風速率即為各成份污染物所需通風速率之和。

除非有很好的理由證明，各成份污染物對於人體或動物的影響無相關性，否則應遵循上述原則；在此種情況下，可以各種成份所需之通風速率之最大值為準。

#### (計算範例)

一清潔及膠合的作業程序中，同時會逸散 MEK及甲苯兩種溶劑，由於兩者皆有麻醉性，所以必須考慮其加成性，經測試得知作業環境中含150ppm MEK及50 ppm甲苯，由(1)式計算得知  $((150/200)+(50/100)=1.25>1)$ ，兩者加成後超過混合後之界限值，其所需之通風速率計算如下：

假設兩者溶劑之蒸發速率均為0.0161/min；選擇MEK之K=4，甲苯K=5；MEK比重=0.805，甲苯比重=0.866；MEK分子量=72.1，甲苯分子量=92.13。

#### 1. MEK之通風速率Q<sub>1</sub>

$$Q_1 = \frac{(24.5)(10^6)(0.805)(0.016)(4)}{(72.1)(200)} = 87.5\text{m}^3/\text{min}$$

#### 2. 甲苯之通風速率Q<sub>2</sub>

$$Q_2 = \frac{(24.5)(10^6)(0.866)(0.016)(5)}{(92.13)(100)} = 184.2\text{m}^3/\text{min}$$

#### 3. 混合時之通風速率Q

$$Q = Q_1 + Q_2 = 271.1\text{m}^3/\text{min}$$

### 2.3 防止火災及爆炸之稀釋通風

稀釋通風的另一目的在於降低密閉空間中蒸氣濃度，使其保持在爆炸限制值(LEL)以下。必須強調的是此觀念不適用於有工作人員暴露在該蒸氣之下的情況，若有人員必須存在，則稀釋通風就須以健康上的原則作考慮。理由可比較TLV及TEL值中得知。

以二甲苯為例，其TLV值為100ppm，而LEL值為1%或10,000ppm，當二甲苯存在於工作環境時，為防止爆炸或火災需保持二甲苯的濃度在LEL的25%或2500ppm以下，這種空氣如遇爆炸可能導致嚴重傷亡，人員不宜在場。然而，在乾燥爐，密閉的乾燥室中及通風管中，可採用防止火災及爆炸的稀釋通風以降低蒸氣濃度在LEL以下。

(5)式可修正以求出低於LEL 所需的通風速率，以LEL代替TLV，可得下式：

$$Q = \frac{(24.5)(\text{液體比重})(100)(ER)(Sf)}{(\text{液體分子量})(LEL)(B)}$$

註：

1. 由於LEL以百分率表示，而非如TLV以ppm表示，(5)式中 $10^6$ 項變為100。
2. Sf為一安全係數需視達成之安全狀況的百分比而定，在許多爐及乾燥室中，僅需維持蒸氣濃度低於LEL之25%，在有適用通風的連續爐中，Sf採用4。在批式的乾燥爐中，若有良好的氣體分配者，考慮污染物之尖峰產生速率，在所有時間內，Sf均採用10或12；在非再循環或不適當通風分配的批式或連續乾燥爐中，需要較大的Sf值。
3. B為一常數，乃考慮蒸氣或混合氣體溫度較高時，會有較低之爆炸限值，當溫度上升至120°C時B=1，若高於120°C，B=0.7。

(計算範例1)

一批琺瑯浸漬架在再循環爐中，以180°C的溫度烘乾一小時，在琺瑯架上的揮發物體包含0.951的二甲苯。欲在所有時間內使爐內混合二甲苯蒸氣濃度稀釋到一安全限值時，所需通風速率為何？

二甲苯的LEL = 1%；比重 = 0.88；MW = 106；Sf = 10；B = 0.7

$$Q = \frac{(24.5)(0.88)(100)(0.95/60)(10)}{(106)(1)(0.7)} = 4.6\text{m}^3/\text{min}$$

由於上述的計算是在25°C的條件下，通風速率需校正至180°C：

$$Q_{180^\circ\text{C}} = Q_{25^\circ\text{C}} \frac{(273+180)}{(273+25)} = 7\text{m}^3/\text{min}$$

(計算範例2)

在多數的環境中，由於操作溫度及操作方式使得溶劑的蒸發並非均一。

一直徑180cm的研磨機用於混合樹脂砂，每一循環週期為10分鐘，在每批樹脂砂中包含180kg的砂、8.6kg的樹脂及281的乙醇（乙醇在最初二分鐘內蒸發），求所需通風速率？

乙醇：LEL = 3.28%；分子量 = 46.07；Sf = 4；B = 1；比重 = 0.789

$$Q_{25^\circ\text{C}} = \frac{(24.5)(0.789)(3.8/2)(100)(4)}{(46.07)(3.28)(1)} = 97.2\text{m}^3/\text{min}$$

若操作溫度為95°C時

$$Q_{95^\circ\text{C}} = Q_{25^\circ\text{C}} \frac{(273+95)}{(273+25)} = 120\text{m}^3/\text{min}$$

當作業程序中，含有多種溶劑混合時，其考慮原則如2.2.5節所述，然TLV值以LEL取代之。

### 三、熱控制通風

在溫度高的工業環境中，利用熱控制通風，為工業通風較特別的一環，其最初的目的在於避免在溫度高的工作環境中工作者受傷害或感到不適，由於熱的工作環境可能造

成工作者之不適、生病、傷害或工作效率降低，因此，在熱控制通風上的設計時，應考慮人體生理上對熱的忍受強度。

熱控制通風系統的設計包括通風空氣流量，風速、溫度、濕度及空氣流經工作環境的路線，亦經常包含了空調機器的設計，在此方面的設計規範可參考American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE)之技術手冊。

### 3.1 热平衡及热交换

在一空間內的環境狀況必須能適合人體熱平衡，並維持在適當的範圍 $37 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，欲使體熱維持一定值，人體表面必須與環境保持熱交換，熱交換速率符合熱力學基本定義，熱交換量有下列兩項函數。

1. 人體新陳代謝產熱量，在休息時為每公斤人體每小時產熱約 $1 \text{ kcal}$ ；在中強度工作時 $5 \text{ kcal/kg-hr}$ 。
2. 由環境中所獲得之熱量。影響熱交換之因素則包含空氣溫度、濕度、皮膚溫度、風速及工作人員服裝質料、數量等，至於呼吸熱損失除非在吃重的工作及乾燥的作業環境下，才予以考慮。

熱平衡可以用下式表示之：

$$\Delta S = (M - W) \pm C \pm R - E \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

式中， $\Delta S$  = 體內熱含量變化

$M - W$  = 新陳代謝產熱 - 工作消耗熱量

$C$  = 對流熱損失或獲得

$R$  = 輻射熱損失或獲得

$E$  = 呼吸熱損失

欲解答上述式子，必須事先量測新陳代謝熱產量，空氣溫度、空氣中水蒸氣壓、風速及平均輻射溫度等，且為方便起見，假設一位70公斤、表面積為 $1.8\text{m}^2$ ，身著傳統長袖及長褲的工作者為“標準工作者”(Standard worker)。

#### 1. 對流(Convection)

工作人員皮膚與工作環境間對流熱交換速率主要為空氣溫度( $t_a$ )、人員皮膚表面平均溫度( $t_{sk}$ ) 及皮膚表面風速( $V_a$ )之函數，其關係如印式所示，式中以“標準工作者”(standard worker)為依據。

$$C = 8.16V_a^{0.6}(t_a - t_{sk}) \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

式中： $C$  = 對流熱交換速率(watts)

$V_a$  = 風速(m/s)

$t_a$  = 空氣溫度( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_{sk}$  = 皮膚表面平均溫度( $^{\circ}\text{C}$ )，經常以 $35^{\circ}\text{C}$ 計算

當 $t_a > 35^{\circ}\text{C}$ 時，皮膚表面由空氣獲得對流熱； $t_a < 35^{\circ}\text{C}$ 時，則由皮膚表面流失熱量。

## 2. 輻射(Radiation)

輻射熱源與工作人員皮膚表面之輻射熱交換速率為熱源絕對溫度與皮膚表面絕對溫度差四次方之函數，然較可接受之關係成為(5)式，式中仍以工作人員穿著一層衣物為依據。

$$R = 7.91(t_w - t_{sk}) \quad \text{---(5)}$$

式中： $R$ =輻射熱交換速率(watts)

$t_w$ =平均輻射溫度( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_{sk}$ =皮膚表面平均溫度( $^{\circ}\text{C}$ )

## 3. 蒸發(evaporation)

由皮膚表面蒸發水份會造成人體熱量的流失，最大蒸發容量(或熱流失)為風速( $V_a$ )、環境空氣中水蒸氣壓( $\rho_a$ )與皮膚表面溫度之水蒸氣壓( $\rho_{sk}$ )差之函數，其關係以工作人員穿著一層衣物為依據如(6)式。

$$E = 16.73V_a^{0.6} (\rho_{sk} - \rho_a) \quad \text{---(6)}$$

式中： $E$ =蒸發熱損失(watts)

$V_a$ =風速(m/s)

$\rho_a$ =工作環境水蒸氣壓(mmHg)

$\rho_{sk}$ =皮膚表面水蒸氣壓(mmHg)，假設皮膚表面 $35^{\circ}\text{C}$ 時為 $42\text{mmHg}$ 。

圖4表示在一定的相對溫度下，休息中且穿著適當的工作人員，其各項熱損失與熱獲得隨乾球溫度變化關係。

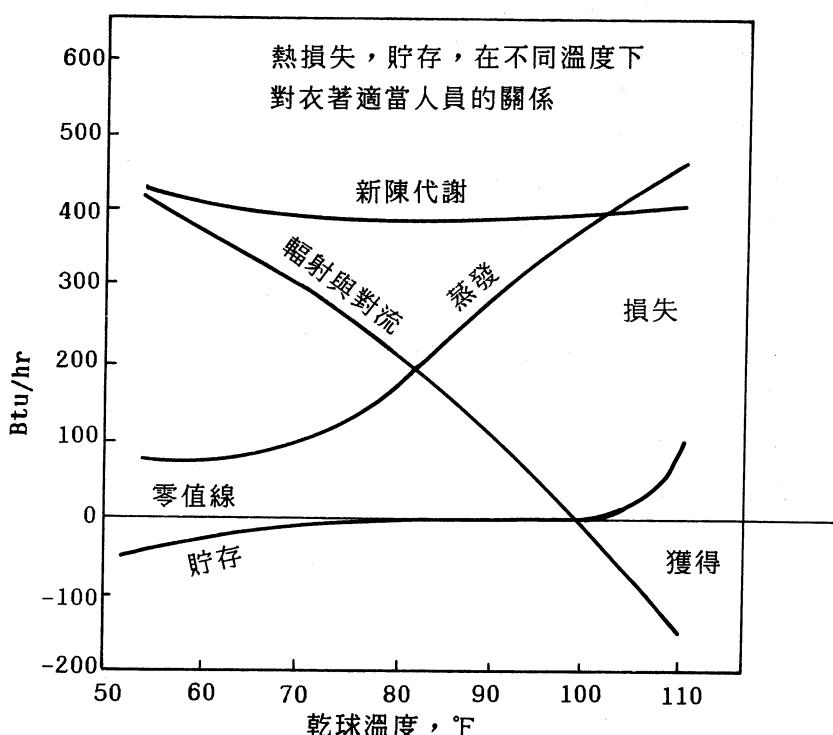


圖4 工作人員熱損失、熱獲得與乾球溫度之關係圖

### 3.2 热強度量測及指標

#### 3.2.1 热强度量測(heat stress measurement)

热强度量測可經由測量環境氣象及物理因子，再評估這些因素對於人體的影響，用以推導熱強度指標(heat stress index)，常用於工業上熱強度量測項目如下：

- 1.乾球溫度( $t_a$ ) - 為量測氣象因子最簡單的方式，量測方法為使用溫度計測量空氣溫度。
- 2.天然濕球溫度( $t_{nwb}$ ) - 指暴露於自然空氣流動下所量測之濕球溫度。
- 3.風速( $V_a$ ) - 為熱傳導速率之主要參數。
- 4.輻射熱 - 來自於太陽或紅外線對人體產生的熱負荷，量測法之一是使用黑球溫度計 (black globe thermometer)測量。
- 5.代謝熱消耗 - 可經由能量消耗或作業分析，查表 2 而得。

表 2 各種工作狀態下工作者能量之消耗

A.活動情況	kcal/min	
坐著	0.3	
站立	0.6	
走路	2.0~3.0	
上坡走路	每上坡一公尺加0.8	
B.工作種類	平均kcal/min	範圍kcal/min
手工 - 輕微	0.4	0.2~1.2
重負荷	0.9	0.7~2.5
以一個手臂工作 - 輕微	1.0	1.0~3.5
重負荷	1.8	2.5~9.0
以雙手臂工作 - 輕微	1.5	
重負荷	2.5	
全身工作 - 輕微	3.5	
中度	5.0	
重負荷	7.0	
沉重負荷	9.0	
C.基本代謝	1.0	
D.計算範例		
假設工作情況為重負荷之手臂工作		
1.站立	0.6	
2.雙手臂工作	3.5	
3.基本代謝	1.0	
總計	5.1kcal/min	

### 3.2.2 热强度指標(heat stress index)

在許多熱強度指標中以濕球黑球溫度指標(wet bulb globe thermometer index, WBGT index) 最容易量測，對於室內之WBGT指標計算方式如下：

$$WBGT = 0.7t_{nwb} + 0.3tg \quad (17)$$

式中： $t_{nwb}$ =天然濕球溫度

$t_g$ =輻射或球溫度

對於室外之WBGT指標計算方式如下：

$$WBGT = 0.7tnwb + 0.2tg + 0.1ta \quad (18)$$

式中： $t_a$ =大氣溫度

WBGT指標乃結合濕度、風速、溫度及輻射等效應，且在室外亦考慮陽光所造成之影響，其量測設備如圖5所示。WBGT指標與特殊工作狀況新陳代謝產熱相結合，可用以評估工作環境之熱強度。以下即說明利用新陳代謝產熱及WBGT指標研判未適應及已適應工作環境工作者，暴露於工作環境之時間限值及特定界限值(Specific ceiling limits)

1. 未適應工作環境之工作者：對於未適應工作環境之工作者以圖6判斷工作者暴露時間不得超過圖中RAL之警戒線。
2. 已適應工作環境之工作者：對於已適應工作環境之工作者則以圖7研判工作者暴露時間不得超過圖中REL警戒線。
3. 界限值(Ceiling limits)：在不考慮有工作者在工作場所產生新陳代謝產熱的情況下，只要環境中的熱量超過圖6、7中C曲線的範圍，就必須使用適當的熱保護衣物或設備。

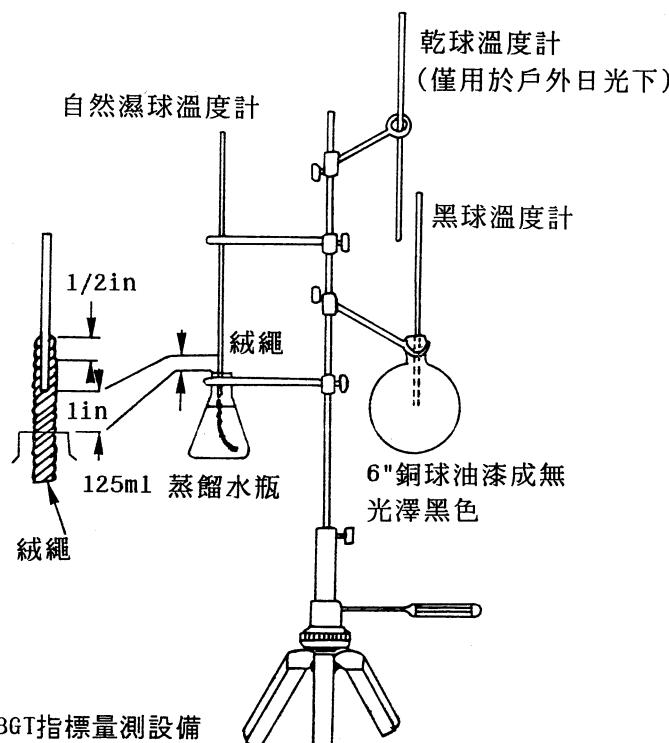
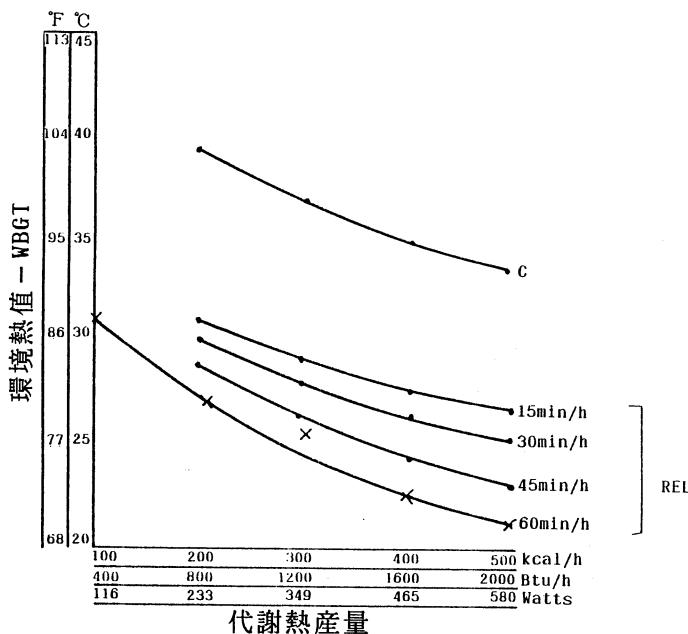


圖 5 WBGT指標量測設備

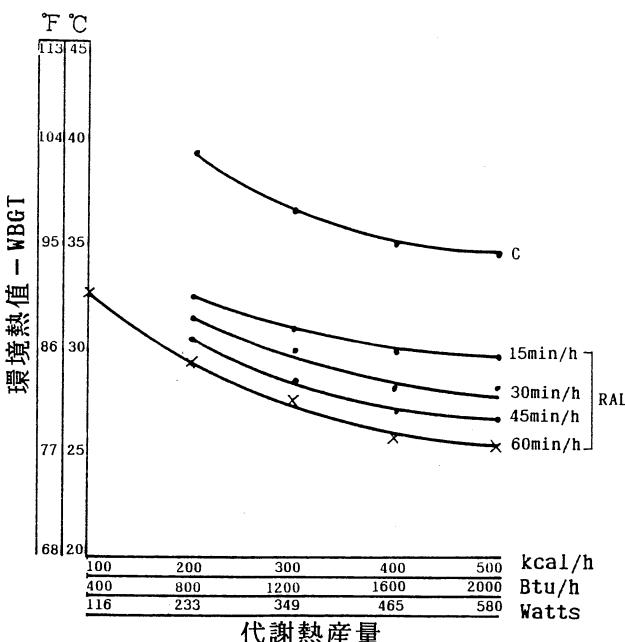


C = 界限值

RAL = 建議警戒限值

\*以一個“標準工作者”為計算依據

圖 6 未適應工作者熱強度警戒限區



C = 界限值

REL = 建議暴露限值

\*以一個“標準工作者”為計算依據

圖 7 已適應工作者熱強度暴露限值

### 3.3 控制方法

以下所討論的熱控制方法僅為一般工程方法，對於工業衛生上較複雜之控制程序，則不予討論。這些方法主要為限制暴露時間及暴露員工總數；如果不能由其他方法獲得控制，可以證明有需要去限制暴露時間和休息時間或在冷氣中工作。有時檻板、屏障或隔間也可用於減少工作者不需要的暴露機會。

#### 3.3.1 通風系統

如果工作室外有溫度較低的空氣手源，可利用抽風的通風法去除過量的熱或濕度。以一個封閉的熱源而言（例如反射爐或其他鍋爐），可使用重力或強制通風煙囪就是以防止過多的熱進入工作室；如果熱源為部份圍場或為局部排氣氣罩，可利用氣罩設計原則決定抽氣風量。

在大多數操作情形下，不能使用局部排氣者，可利用一般通風。為求達到所需的風量需要估計所有顯熱及潛熱來源的總和，以及預先決定可接受的溫度及濕度上升限制。為顯熱所需的風量可依下式計算：

$$Q = \frac{\text{總BTU/hr顯熱}}{1.08 \times \text{上升溫度}(\text{F})} \times 0.0283 \quad (19)$$

式中  $Q = \text{m}^3/\text{min}$

欲使用上述公式需先估算熱負荷，包括日光負荷、燈光、馬達及其他特別的熱源；其中日光負荷，燈光及馬達全部為顯熱，而人員熱負荷則部份為顯熱、部份為潛熱。在所有可能釋放顯熱或潛熱之情況，應先把它們分別所佔的數量或百分率估算出來。在為顯熱而使用上述公式時，所允許的上升溫度必須決定，因此若外界氣溫乾球溫度為32°C，而室內溫度允許提升至36°C所需風量僅為允許室內溫度340°C時所需風量之一半。

在潛熱方面，雖較為困難但程序相同，如果蒸氣蒸發量的總和已知，所需之空氣量如下：

$$Q = \frac{\text{BTU/hr潛熱}}{0.67 \times \text{水份含量差}(\text{Grains/lb})} \times 0.0283 \quad (20)$$

當釋出之水份量為已知時，則使用下列公式計算：

$$Q = \frac{116.71\text{lb/hr水份蒸發量}}{\text{水份含量差}(\text{Grains/lb}) \times \rho} \times 0.0283 \quad (21)$$

式中  $\rho$  為空氣密度 ( $\text{lb}/\text{ft}^3$ )，含水量差則表示外界水份含量以及工程設計可接受的抽風系統水份含量間之差。從上述兩公式所算出的風量，應取其大者為所需風量，因為二者都是同時會吸收顯熱及潛熱；然在大部份的情況下顯熱負荷遠大於潛熱負荷，因此在設計上可以僅依據顯熱基礎來計算。

通風系統的設計必須使氣流能通過熱源，以利將室內熱量帶出，圖8及圖9說明此一原則。

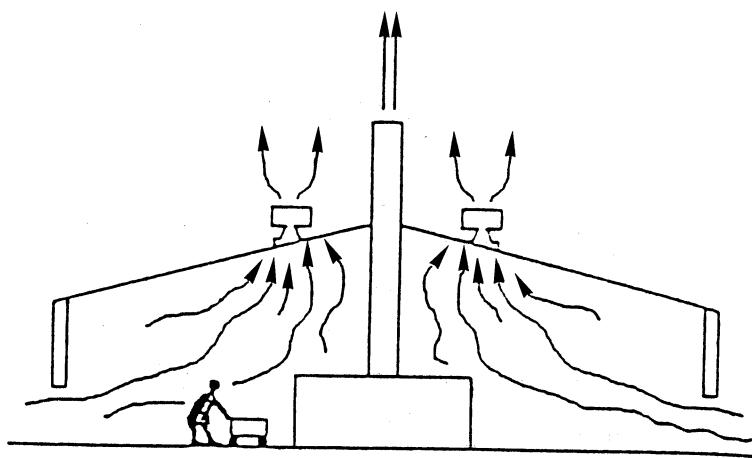


圖 8 自然通風

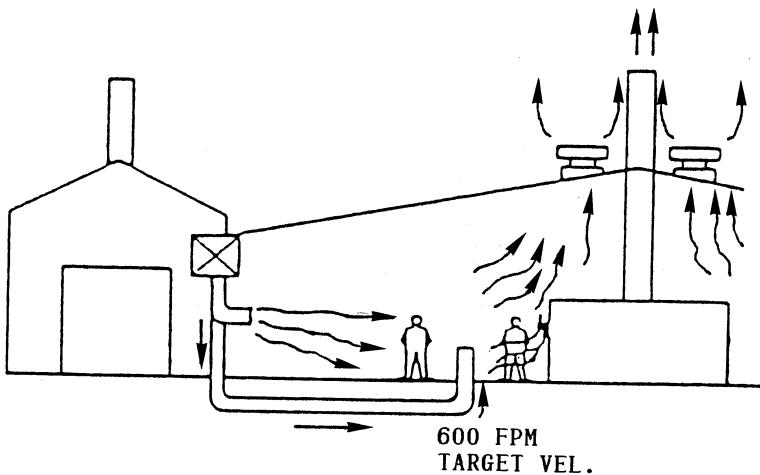


圖 9 機械式通風

### 3.3.2 風速冷卻

如果工作環境空氣乾球或濕球溫度低於 $35 - 38^{\circ}\text{C}$ ，工作者可藉由對流或蒸發的方式予以冷卻。如果乾球溫度高於 $35 - 38^{\circ}\text{C}$ ，若增加空氣流速可能反因對流，將熱傳之於工作者；如果濕球溫度也高，蒸發熱散失量不會成比例增高，淨結果反而增加工作者之熱負擔。因此許多設計者認為若想實際上帶出熱，供應空氣溫度不應超過 $27^{\circ}\text{C}$ 。

流行的作法指出風速若大於表 3 所列者，可成功的用於直接冷卻工作者；而且，如果想要有最佳的結果，應對空氣供給有直接控制（如圖 10），以有助於在熱暴露和供給空氣溫度上每日及季節性的變動。

表3 工作者可接受受空氣風速

工作狀況	風速(m/s)
1. 持續性的暴露 空調空間 固定工作站，一般通風或點冷卻：	0.25~0.38
坐著	0.38~0.64
站立	0.5~1.0
2. 間歇暴露、點冷卻或散熱站 輕熱負荷及活動 中熱負荷及活動 高熱負荷及活動	5~10 10~15 15~20

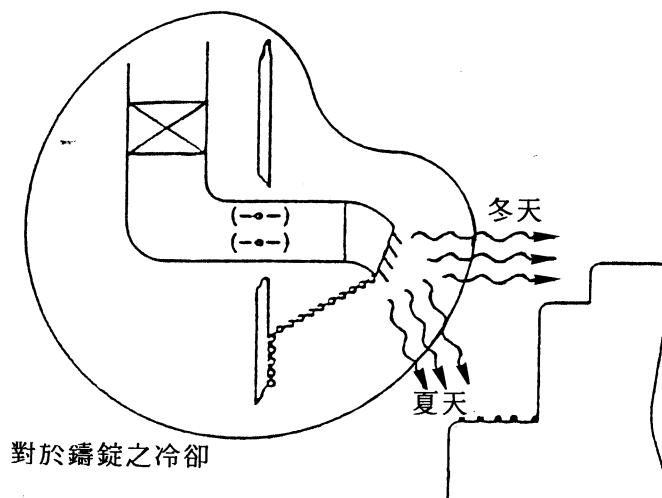


圖10 空氣直接控制之點冷卻

### 3.3.3 輻射熱控制

由於輻射為一種熱的形式，且不需藉介質傳導，輻射熱不能由任何上述的方法控制。但若在熱體上油漆或覆上以低輻射發射特性的材料是減少輻射的一種方法，例如對於熔融金屬或玻璃所產生的輻射熱，不能直接控制者，利用輻射屏蔽是可行的，此類屏蔽材料包括金屬板；簾幕或其他的材料介於輻射源或工作者之間。屏蔽能把輻射熱的部份自工作者處反射出去而減少輻射熱，表4為較常使用之屏蔽材料的相對效果。

表 4 通常屏蔽材料的相對效果

屏 蔽 材 料 及 表 面	射到表面所反射 的輻射熱 (%)	自表面發射的 輻射熱 (%)
鋁板 (光亮的)	95	5
鋅板 (光亮的)	90	10
鋁板 (已氧化)	84	16
鋅板 (已氧化)	73	27
油漆鋁板 (新消潔的)	65	35
油漆鋁板 (灰暗、髒污)	40	60
鐵板 (光潔的)	45	55
鐵板 (已氧化)	35	65
磚	20	80
油漆表面 (黑)	10	90
油漆表面 (白)	10	90
石棉板	6	94
油漆表面 (單調的黑色)	3	97

本文譯自 American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Industrial Ventilation, 20th Edition, 1988.