

侷限空間內通風技術對缺氧及 中毒危害環境排除效果之探討

計畫編號：NSC 88-2314-B-041-010

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：洪銀忠 嘉南藥理學院工業安全衛生系

一、中文摘要

從我國過去幾年來職業災害統計資料中發現,侷限空間災害佔了相當大的比例,造成死傷無數,其中又以缺氧及中毒等兩種空氣危害(atmospheric hazard)最為嚴重。而通風則是防止侷限空間內空氣危害最根本也是最有效的方法,除了在勞工作業前須通風使其內有害物質濃度降低至容許濃度以下外,在勞工作業中更須持續通風,因為從過去職業災害實例中顯示有害物質濃度也可能在勞工作業中因其它原因而提高,導致災害的發生。

通風對侷限空間內缺氧危害的去除,及有害污染物濃度的降低之效率受到(1)有害污染物比重;(2)通風模式(排氣或供氣);(3)體積流率(風速);(4)排氣口/送氣口之高度;(5)高寬比(aspect ratio, AR)等參數之影響甚大,而且空間內不同位置之氧氣與有害物濃度均不相同。

本研究擬採實驗的方式製作一模型,具可調整高寬比的侷限空間(AR=1、2、3、4、5)當充滿不同比重的污染物時,以不同的通風模式(排氣/送氣)在各種不同換氣速率($Q=10\text{m}^3/\text{min}$ 、 $20\text{m}^3/\text{min}$ 及 $30\text{m}^3/\text{min}$)下之氧氣恢復時間(oxygen recovery time)作一有系統的探討,分別找出供、排氣時之高寬比、污染物比重及通風換氣率與氧氣恢復時間的相關式(correlation)。

另針對前人所作相關領域方面的研究只能對測定資料透過統計理論分析污染物在侷限空間中的滯留時間,來瞭解通風效率的缺點,本研

究將藉助電腦數值模擬的方式探討氧氣/污染物在對流與擴散的交互作用下,其流場的型態及濃度的分佈狀況,以提供缺氧作業勞工與監督人員現場工作時通風改善的參考及風險之評估。

關鍵詞：侷限空間、缺氧危害、通風技術

Abstract

Confined space often present unique and serious hazards from airborne contaminants. They cause hundreds of preventable deaths each year. Mechanical Ventilation can be one of the most effective control measures, however, relatively little is known specially regarding for confined spaces.

Laboratory studies were conducted on confined space models having different aspect ratio(AR), with a single top opening for ventilation. Variable test parameters included supply and exhaust ventilation models, volume flow rate, and Ventilation inlet/outlet elevation. Oxygen deficiency, caused by several gases(included lighter/heavier than air), was the primary test condition. Furthermore, a computer code was developed to approximate confined space ventilation characteristics and provide contaminant movement data.

Findings from these studies indicated a number of guidelines for confined space ventilation design. Confined space entry procedures should require mechanical ventilation prior to and during entries unless responsible individuals confirm and document that

ventilation is not needed or is not feasible.

Keywords: Industrial ventilation, Confine space, Oxygen deficiency

二、緒論

自政府全面實施勞工安全衛生法令、加強勞動檢查、推廣安全衛生教育宣導、落實自動檢查等措施以來，全產業職業災害千人率已有大幅度的降低(民國七十六年職災千人率為 5.91，民國八十二年則為 3.27)，但幾年來臺灣地區事業單位之工作場所發生侷限空間災害者，不但未減少反而有增加之趨勢，究其原因為政府勞動檢查及事業單位的勞工安全衛生管理重點均放在勞工經常活動的場所，對於不經常進入、接近或非為人員持續停留而設計之場所的作業安全則予以忽略所致。

從行政院勞委會所編印之職業災害實例專輯中統計分析可知，自民國七十八年至民國八十二年之五年間，臺灣地區共發生六十六件侷限空間重大職業災害，造成 141 人死亡、110 人輕重傷，每件災害平均傷亡人數為 3.75 人。且又以缺氧、中毒、爆炸等空氣性危害為主(佔 66.7%)，並以缺氧為最多，中毒次之。在最近一年中，侷限空間的災害，國人印象較深刻的便是民國八十五年四月二十八日發生於臺北市東西向快速道路延吉段地下停車場集水井的沼氣中毒事故，造成一人死亡九人輕重傷的慘劇，以及民國八十五年八月二十七日發生於宜蘭縣羅東鎮垃圾衛生掩埋場廢水處理井的缺氧意外，造成工人二死三昏迷。

所謂侷限空間，依美國職業安全衛生研究所(NIOSH)的定義為：進出空間有限制性，其不足之自然通風可能含有或可能產生危險之空氣污染物，且非預定為勞工連續停留之空間；而美國職業安全衛生署所(OSHA)則定義為：足夠大且有讓勞工進入之結構，進出方法受到限制且非為勞工連續停留而設計者。所謂

的侷限空間作業包括：進入地下電纜管線或人孔之作業；開挖地下涵洞作業；水井、水槽作業；廢液處理槽之清理作業；化學反應槽、儲存槽之相關作業；船艙內作業；通風不良地下室作業；粉塵儲存槽相關作業等等。侷限空間因其結構上的侷限特性，會使得有意或無意進入該空間作業的人員受到極嚴重的傷害，其危害種類一般可分為空氣危害(atmospheric hazard)及物理性危害(physical hazard)；前者包括中毒、缺氧及爆炸等；後者則包括墜落、陷入窒息、高低溫接觸、感電及溺斃等。在臺灣過去幾年來所發生侷限空間危害中又以缺氧、中毒等空氣性危害最為慘重。而機械通風則是消除工作場所中有害污染物累積最好的方法，不僅勞工在進入作業前需預作通風使其內毒性氣體/氧氣濃度維持在合格範圍內，勞工作業中更需持續通風以確保工作人員之安全，因為毒性氣體濃度可能因其他原因而上升。然而通風方式安排之良窳，不僅影響作業前所需之通風時間(氧氣恢復時間，oxygen recovery time)之長短，若是安排不當，更可能造成毒性氣體在局部位置之滯留，造成人員的傷亡，因此透過不同通風條件下，侷限空間內部流場之數值模擬瞭解其內流場的型態及濃度場的分布，有助於提供作業者及管理者現場作業時危害風險的評估，及通風工程改善的準繩。

以往國內外有關侷限空間內部作業缺氧及中毒危害工程控制(尤其是通風控制)的研究相當匱乏(如參考文獻所列)，究其原因不是因為侷限空間災害不常見，而是因為此項作業不屬常態性的作業，因而其危險性較容易受到輕忽所致。茲將相關研究之現況介紹如下：

1990 年 Park 與 Garrison[6]首先將以往用於預測湖泊及河流內污染散佈的多胞模式(multicellular model)用於三維侷限空間內污染物的擴散之模擬。此一擴散模式之基礎乃建立在質量平衡(mass balance)上。其預測結果與實驗所得資料

比較還算合理，但此預測模式之缺點是無法模擬空間內流場的型態及散布係數(dispersion coefficient)的大小。

1990 年, Mignone 等人[7]針對污水處理系統人孔作採樣，以獲取此類侷限空間內氧氣及其他化學物質(包括甲烷、一氧化碳、硫化氫及 VOCs)的濃度隨時間之變化情形。結果發現集水人孔內會有氧氣含量突然下降及一氧化碳上升的周期性變化。而其針對該場所從業人員、雇主及主管當局問卷調查之結果也顯示，該場所有訂定進入作業程序及針對該作業實施訓練的比例相當低。

1993 年, Bowes[8]等人利用追蹤氣體技術於石化廠貯槽之通風效能之評估，量度不同通風方式的混合係數(mixing factor)，從而獲得其安全係數(safety factor)的相關資料。該研究共測定三種不同結構的侷限空間；包括實驗室的 Human exposure chamber 及兩個石化廠內特別選定的 Storage tank 及 Floating-Roof storage tank，其方法是在待測空間的進氣口釋放追蹤氣體(SF₆)於排氣口以紅外線吸收光譜儀記錄其濃度與時間變化的關係，從而獲得該空間所需的迫淨時間(purging time, $t_{1/2}$)。

三、實驗設備與量測步驟

茲將設計參數、量測項目及系統硬體本身特徵介紹如下：

(一)設計參數之探討

通風模式：在一般的半密閉空間中，假定有兩個通風口(即進排氣口)，其運轉模式有吹進及排出兩種情形。

通風換氣率：在本研究中通風量的大小以換氣率(ACH)表示時，其範圍在 10-50 之間。所謂換氣率定義為在每一小時內，空間內空氣全部更換之次數(Air Change per Hour)，即 $ACH=Q/V$ ，其中 Q =換氣量(m^3/hr)， V =作業空間之體積(m^3)。

污染物質之比重：為模擬作業環境中污染物質的真正狀況，在本研究中所探討有害污染氣體之比重有比空氣輕、

與空氣相當以及比空氣重等三種。

於通風系統啟動前先量測待測空間內污染物濃度，在啟動通風系統的同時開始記錄污染物濃度隨時間的變化。一般而言，置換式的流場(plug-flow)其通風效果最好，因此若所欲探討之空間內其流場為置換式的流場則其空氣之平均年齡最短，若其平均年齡標記為 μ_d ，則

$$\mu_d = \tau_n / 2$$

然而實際待測空間之流場型態與理想的置換式流場都會有些微的差異，亦即空間內之平均空氣年齡會稍高，令空間內實際之平均空氣年齡為 μ ，則空氣交換效率 ϵ 為

$$\epsilon = \mu_d / \mu = \tau_n / 2 \mu$$

通常 ϵ 介於 0 到 1 之間，對理想的置換式流場 $\epsilon=1.0$ ，完全混合流場 $\epsilon=0.5$ ，在靜滯流場(stagnant flow) $\epsilon<0.5$ 。

在追蹤氣體法的實驗中，所使用的追蹤氣體是六氟化硫(sulfur hexafluoride, SF₆)，六氟化硫在注入待測空間時其流量是以一事先用皂泡式流量計(bubble flowmeter, Mini-Buck Calibrator, A. P. Buck, Inc., Orlando, FL.)校正過之浮子式流量計(rotameter)測定之，並於排氣口處以一紅外光譜測定儀(Miran 1A, Foxboro Co.)監測其濃度，其採樣速度為 90L/min。為了求出每一待測空間之混合效率($k=Q/Q_{eff}$)，需先求出污染物的半生期。半生期(half life, $t_{1/2}$)，定義為空間內污染物停止產生後至其濃度降低 50%所需的時間。在具有理想通風系統的作業空間內(即其內空氣充分混合)，污染物半生期是空間體積與通風換氣率的函數，即

$$t_{1/2}=0.693V/Q$$

(二) 測試系統硬體/操作特徵

- 1.為了作流場的可視化研究，實驗模型以透明的壓克力製作以利照像。
- 2.通風動力來源是借助一 DC 馬達帶動的離心式排氣機，此一排氣機可正、反轉而作供、排氣，來達到實

- 驗中所要求的供、排氣。
- 3.採樣幫浦流量 90 L/min。
 - 4.通風系統流量的控制及量測是以一洩漏係數(Discharge coefficient)等於 0.68 的孔口板(orifice plate)測定其兩側之壓差(differential pressure)後，再代入公式而求出其流量。

四、數值模擬

為了簡化分析，吾人作以下之假設：

- 1.工作流體為牛頓流體，且為不可壓縮。
- 2.流體之物理性質，如黏度與密度，為定值。
- 3.不考慮浮力項。
- 4.濃度場不影響流速。
- 5.污染氣體由固定污染源所產生，且其產生量遠小於清淨之空氣量。
- 6.清淨空氣與污染氣體混合之動黏滯係數，簡化成清淨空氣之動黏滯係數。

基於以上假設，統禦方程式可表示如下：

1.連續方程式

$$\frac{\partial \dots}{\partial t} + \frac{\partial (\dots u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad i=1,2$$

2.動量方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\dots u_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\dots u_i u_j)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\dots \tau_l + \dots \tau_t) \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_j} \end{aligned}$$

3.紊流動能方程式及紊流能量消耗方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\dots k)}{\partial t} + \frac{\partial (\dots u_i k)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\dots \tau_l + \dots \tau_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \dots \nu \\ & \frac{\partial (\dots \nu)}{\partial t} + \frac{\partial (\dots u_i \nu)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\dots \tau_l + \dots \tau_t \frac{\partial \nu}{\partial x_i} \right) + c_1 \frac{\nu}{k} G_k - c_2 \dots \frac{\nu^2}{k} \end{aligned}$$

其中， G_k 是 k 的產生量，且

$$G_k = \dots \tau_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

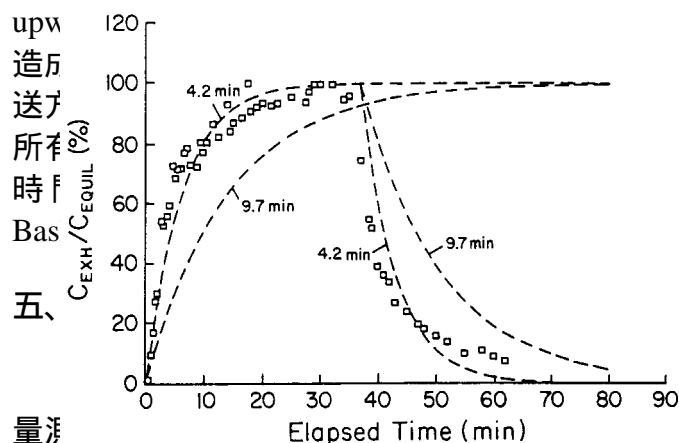
其中 u_i 是流體在 i 方向的速度， ρ 是流體的密度， p 是壓力， t 是時間， μ_l 是流體的黏度， μ_t 是流體的有效或紊流黏滯係數(effective or turbulent viscosity)，且 $\dots \tau_t = \dots c_\mu k^2 / \nu$ 。在此， c_μ 是一經驗常數， κ 與 ϵ 則分別為紊流動能和紊流能量逸散率。

4.濃度方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (C u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \dots \tau_l + \dots \tau_t \frac{\partial C}{\partial x_j} \right\}$$

以上所列式子中， $c_1=1.44$ ， $c_2=1.92$ ， $c_\mu=0.09$ ， $\sigma_k=1.0$ ， $\sigma_\nu=1.3$ ， $\sigma=1.0$ 。 C 為污染氣體之濃度，單位為 mole/m^3 。其邊界條件如下：在進氣口， $U=1$ ， $V=0$ ；在壁面上， $U=0$ ， $V=0$ ， $\partial C / \partial n = 0$ ；在排氣口， $\partial U / \partial n = 0$ ， $\partial V / \partial n = 0$ ， $\partial C / \partial n = 0$ ， $\partial k / \partial n = 0$ ， $\partial \nu / \partial n = 0$ 。且 $U=u/U_0$ ， $V=v/U_0$ 。

本研究在數值模擬程序中使用的是交錯網格系統(staggered grid system)，其個變數點的定義與平常 MAC(marker-and-cell)法中所用者相同，亦即速度分量是在 Cell 表面的中央，而其他純量則設定在 Cell 表面的中心。在動量方程式中，對流項(convective term)與其它項都採用中央差分法則(centered difference scheme)，但在空氣吹出口處對流項採用 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective kinematics)--即二次上風法則(second order



圖二 活塞型通風模式下，10ACH時量測所得之半生期()與理論半生期較(圖中虛線)之比較

六、參考文獻

- [1] Liddament, M. W., (1987). A review and bibliography of ventilation effectiveness-definitions, measurement design and calculation. Technical Note AIVC 21, Air Filtration and Ventilation Centre, Bracknell, Great Britain.
- [2] Niemela, R., E. Toppila and A. Tossavainen (1987). A multiple tracer gas technique for the measurement of air movements in industrial buildings. In: Proc. Roomvent-87. Stockholm.
- [3] D. Gosman, E. E. Khalil and J. H. Whitelaw, The calculation of two-dimensional turbulent recirculation flows. Proceedings of the Symposium on Turbulent Shear flows, Pennsylvania University (1977).
- [4] National Institute for Occupational Safety and Health Criteria for a Recommended Standard-Working in Confined Spaces. DHEW(NIOSH) Pub. No. 80-106, NIOSH, Cincinnati, OH (1979).
- [5] Garrison, R. P., and McFee, D. R., "Confined spaces-a case for ventilation", American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 47, No. 11, pp. 708-714 (1986).
- [6] Park and R. P. Garrison, "Multicellular model for contaminant dispersion and ventilation effectiveness with application in a confined space," Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 51, No. 2, pp. 70-78 (1990).
- [7] Mignone, A. T., E. C. Beckhusen, K. O. Leary, and M. Gochfield, "Temporal variation in oxygen and chemical concentration in a confined workspace: the wastewater manhole," Appl. Occup. Environ. Hyg., Vol. 5, pp. 428-434 (1990).
- [8] S. M. Bowes III, E. G. Mason, and M. Corn, "Confined space ventilation: tracer gas analysis

f mixing characteristic", Am. Ind. Hyg. Assoc., Vol. 4, No. 11, pp. 639-646 (1993).

American Society of Testing and Materials 993; "Standard test methods for determining change in a single zone by means of a tracer as dilution," ASTM E741-93:625-640.

Zhang, J. S., Wu, G. J., Christanson, L. L., Iskrowski, G. L., 1990; "Room air flow and turbulence characteristics in a 1/4 scale test room," Proceedings of Indoor Air '90:249-253. Haghighat, F., Wang, J. C. Y., Jiang, Z., 1990; "Development of a three dimensional numerical model to investigate the air flow and temperature distribution in a multi-zone enclosure," Proceedings of Indoor Air '90:183-188.

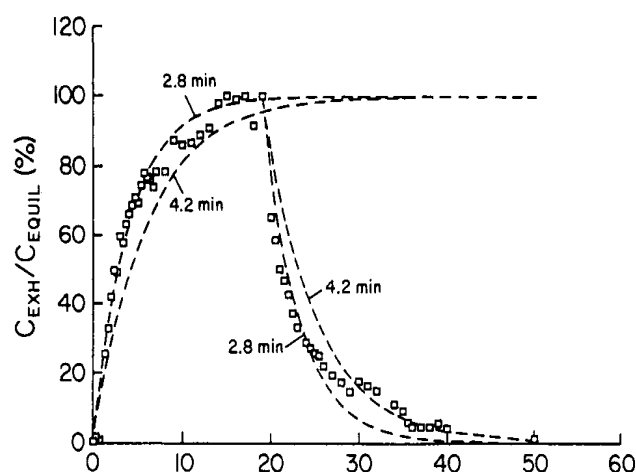
[2] Breum, N. O., 1992; "Diagnosis of ventilation by single-tracer gas techniques," Indoor Air Supplement, No. 1953 1/93.

[3] Sandberg, M., Sjoberg, M., 1983; "The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms," Building and Environment, 18:181-197.

[14] B. E. Launder and D. B. Spalding, 1974; "The numerical computation of turbulent flows," Comput. Methods Appl. Mech. Engng 3, 269-289.

[15] S. Kato and S. Murakami, 1985; "Three-dimensional numerical simulation of turbulent air flow in ventilated room by means of 2-equation model." International Symposium Computation Fluid Dynamics, pp. 560-571, Tokyo.

[16] A. Reinartz and U. Renz, 1984; "Calculation of the temperature and flow field in room ventilated by a radial air distributor," Int. J. Refrig. 7, 308-312.



圖一 置換型通風模式下，10ACH時量測所得之半生期()與理論半生期之比較(虛線)