

健康綠建材揮發性有機化合物逸散模式研究－以塗料類為例

內政部建築研究所自行研究報告

100  
年度



# 健康綠建材揮發性有機化合物 逸散模式研究－以塗料類為例

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 100 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



PG10003-0579

099301070000G2029

**健康綠建材揮發性有機化合物  
逸散模式研究—以塗料類為例  
(成果報告)**

研 究 人 員：歐俊顯助理研究員

**內政部建築研究所自行研究報告**

**中華民國 100 年 12 月**

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



## 目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	VII
第一章 緒論 .....	1
第一節 研究背景與動機 .....	1
第二節 研究方法與流程 .....	2
第二章 文獻回顧與理論探討 .....	4
第一節 文獻回顧 .....	4
第二節 小結 .....	28
第三章 檢測儀器設備與試驗方法 .....	30
第一節 量測原理及設備介紹 .....	30
第二節 建材中甲醛逸散檢測方法—小型環控箱測試方法 ..	31
第三節 建材中揮發性有機物質逸散檢測方法—小型環控箱測 試方法 .....	33
第四節 抽測建材選樣原則 .....	35
第四章 建材檢測結果與逸散模式分析 .....	37
第一節 乳膠漆 .....	37
第二節 水性水泥漆 .....	42
第三節 接著劑 .....	45
第五章 結論與建議 .....	47
第一節 結論 .....	47

第二節 建議.....	47
附錄一 審查會議紀錄與回應.....	49
附錄二 乳膠漆 TVOC 歷時逸散濃度、逸散速率檢測數據.....	52
附錄三 水泥漆、接著劑 TVOC 歷時逸散濃度、逸散速率檢測數據	54
參考書目.....	56

## 表次

表 2.1	綠建材認可表.....	4
表 2.2	健康綠建材評定項目.....	5
表 2.3	經濟部標準檢驗局營建類 CNS 族群材料分類表.....	6
表 2.4	室內裝修建材分類方式.....	7
表 2.5	揮發性有機物之定義.....	17
表 2.6	室內有機污染物質分類.....	10
表 2.7	VOCs 種類及逸散來源對照表.....	12
表 3.1	建材分析項目表.....	35
表 4.1	乳膠漆(E-1)模式模擬與實測數據比較表.....	38
表 4.2	乳膠漆(E-2)模式模擬與實測數據比較表.....	39
表 4.3	水泥漆(C-1)樣本模式模擬與實測數據比較表.....	42
表 4.4	水泥漆(C-2)樣本模式模擬與實測數據比較表.....	42
表 4.5	接著劑(A-1)樣本模式模擬與實測數據比較表.....	45



## 圖次

圖 1.1	研究流程.....	3
圖 2.1	逸散機制示意圖.....	13
圖 2.2	物理模型示意圖.....	20
圖 3.1	建材揮發性有機物質逸散研究之系統簡圖 .....	31
圖 3.2	甲醛採樣及分析流程圖 .....	32
圖 4.1	乳膠漆(E-1)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較	38
圖 4.2	乳膠漆(E-1)TVOC 逸散速率實測數據與模式模擬結果比較	39
圖 4.3	乳膠漆(E-2)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較	40
圖 4.4	乳膠漆(E-2)TVOC 逸散速率實測數據與模式模擬結果比較	40
圖 4.5	乳膠漆(E-3)TVOC 逸散濃度實測歷時情形 .....	41
圖 4.6	乳膠漆(E-3)TVOC 逸散速率實測歷時情形 .....	41
圖 4.7	水泥漆(C-1)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較	43
圖 4.8	水泥漆(C-1)TVOC 逸散速率實測數據與模式模擬結果比較	43
圖 4.9	水泥漆(C-2)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較	44
圖 4.10	水泥漆(C-2)TVOC 逸散速率實測數據與模式模擬結果比較	44
圖 4.11	接著劑(E-1)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較	46
圖 4.12	接著劑(E-1)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較	46



## 摘要

### 關鍵詞：健康綠建材、揮發性有機化合物、逸散模式

#### 一、研究緣起

健康類綠建材係 4 類綠建材標章當中，佔標章申請數量最大宗(截至 100 年 11 月份統計占 77.6%)，該類綠建材標章之主要精神係透過評定基準規範管制建材內含之揮發性有機化合物(TVOC)氣體逸散速率；惟健康類綠建材逸散濃度及逸散速率之歷時曲線並未納入建材基本資料；另消費者於選用該類綠建材應用於室內裝修時，與一般建材相比較，健康類綠建材具有低量揮發性有機化合物逸散特性，如能以圖像、數據具體量化呈現差異，對於綠建材推廣更具助益，爰配合本所相關研究計畫建置開發之建材逸散模擬軟體，將軟體資料庫納入本所歷年累積之建材逸散檢測數據，配合軟體功能除提供室內裝修竣工後，經合理通風換氣判斷較佳入住時間外，更能提供後續政策宣傳及圖像比較參考，對於維護國人健康及綠建材推廣更具助益。

#### 二、研究方法及過程

本研究係以健康綠建材標章之塗料類建材為主要探討對象，並以小型環控箱模擬建築空間環境，依據 ASTM D5116-06 規範之溫度、濕度、通風換氣及裝修負荷率等氣候、環境條件控制，將建材逸散檢試驗採樣時間由 48 小時延長至 96 小時，除藉由試驗室分析設備儀器進行定性定量化之分析，取得長期逸散行為之實測結果外，並以文獻提出之逸散行為模擬驗證，依據實測結果符合程度給予模擬成果良窳之評價，有助於建立塗料類建材之逸散行為資料庫。

#### 三、研究發現

1. 經採用一階衰減模式模擬結果，在 TVOC 逸散濃度、逸散速率峰值方面除發生時間預測近似外，逸散濃度、逸散速率峰值預測誤差普

遍較大，根據 NMSE 評估整體 TVOC 逸散濃度、逸散速率模擬成果顯示，以接著劑之模擬成果與逸散行為描述最佳，水泥漆次之，乳膠漆則視個案呈現較大變異性，甚至有 1 筆乳膠漆產品實測結果完全不適用相同方式模擬。

2. 檢視甲醛逸散濃度及逸散速率檢測結果，經標章認證建材之甲醛逸散量較低，通常於 24 小時以後已達儀器偵測極限  $2(\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ ，建議 0~2 小時逸散濃度及逸散速率分別採用  $8(\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ ；2~24 小時採用  $4(\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ ，至 24 小時之後可逕取儀器偵測極限值代替以建置逸散資料庫。
3. 本研究進行 2 筆健康綠建材檢測及 1 筆接著劑之 96 小時逸散測試，經檢視試驗結果於 48 小時以後，逸散即趨近定值，全數符合健康綠建材評定基準要求，以本所現有之塗料類健康綠建材 48 小時檢測數據，應可據以建立 48 小時以後之建材逸散模式需求。

#### 四、初步建議事項

建議一、

轉換本所現有健康綠建材逸散檢測資料提供模擬軟體資料庫擴充：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

建議除轉換本所既有建材逸散檢測資料外，應針對具有市場知名度但本所無檢測資料之建材進行補測，加強本年度另案開發之建材逸散模擬軟體(測試版)之實用性。

建議二、

建置室內環境空氣品質評估軟體與驗證：中長期建議

主辦機關：行政院環境保護署

協辦機關：內政部建築研究所

室內空氣品質管理法甫經立法院三讀通過，中央主管機關係行政院環境保護署，TVOC 僅為室內環境空氣品質之一環，建議併予納入環保標章產品，進行後續室內環境空氣品質評估軟體開發及驗證工作，俾利民眾初步評估使用。

## ABSTRACT

**Key words : Healthy Green Building Material 、TVOC 、Emission Model**

### **1. Origin of Research**

Healthy Green Building Material is the largest one of 4 categories of Green Building Material marks (statistics until Nov. 2011 77.6%), the main spirit of healthy green building materials is expressing contamination emission rate of total volatile organic compounds (TVOC); but the basic specific of healthy green building material was not including contamination concentration or emission rate curve of testing duration, and consumer choosing healthy green building material compares with the material without certified for interior decoration using, the former has the characteristic of low emission rate, the research attempt to provide graphic or quantitative conception expressing the difference of the green building materials and the normal one, showing the specific differences, for the promotion of green building materials more useful, by the way with the related research project developed simulation software, the software included in the database accumulated over the years of the building material testing data, provided with the software functions in addition to the completion of interior decoration, after a reasonable time ventilation to determine the better occupied timing, but also provides policy advocacy and follow-up more reference images, for the maintenance of people's health and help promote green building materials.

### **2. Research Methods and Processes**

The paint with healthy green building materials as the major object in this study, and a small environmental control chamber simulate the space environment, according to ASTM D5116-06 specifications of temperature, humidity, ventilation and loading factor etc. environmental conditions

controlled, check the sampling time from 48 hours extend to 96 hours, in addition to laboratory analysis equipment instruments by qualitative and quantitative analysis of the obtained long-term behavior of the testing results, and the literature proposed dissipation behavior simulation and verification, based on the measured results compared with the simulation results and evaluating the simulation result, attempt to establish the database of emitting behavior of paints.

### 3. Research Finding

1. The first-order decay model simulations, the TVOC concentration peak of dissipation and dissipation rate forecast approximate time of occurrence in addition to, the peak of concentrations and emission rate are generally in greater prediction error, based on NMSE assess the overall concentration of TVOC, emission rate simulation results show that the adhesive behavior of the simulated results and describe the best, followed by cement paint, latex paint is showing a large variability depending on the case, even one paint products that just do not apply the same measured simulate.
2. View the formaldehyde concentration and emission rate of test results, formaldehyde of material certified by the green building material dissipating amount is very low, usually after 24 hours reaching to instrument detection limits  $2(\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ or } \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ , the proposed concentration of 0 to 2 hours and dissipation rates of fugitive in  $8(\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ or } \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ ; 2 to 24 hours with  $4(\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ or } \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ , to 24 hours after the instrument detection limit  $0.002(\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ or } \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$  can replace the path to take to build the database.
3. In this study, the health 2 green building materials and 1 adhesive test of 96 hours tests, review testing results after 48 hours is set closer to the value of green building materials in full compliance with healthy assessment level. The existing 48 hours test data of healthy green building materials, should be able to set up 48 hours later, emission database for building materials emission behavior demand.

## 第一章 緒論

### 第一節 研究背景與動機

綠建材標章制度自 94 年起全面開放生態、健康、節能及減廢共四類綠建材標章申請，綠建材除需滿足基本材料性能外，更賦予從原料採取、產品製程乃至使用過程，以地球環境負荷最小，且對於人體健康無害等額外考量，並納入建築技術規則規定於室內裝修、供公眾使用及經本部認定公眾使用等建築物進行管制，至此可謂帶動營建新興產業及賦予綠建材新附加價值。

健康類綠建材係為 4 類綠建材標章當中，佔標章申請數量最大宗(截至 100 年 11 月份統計占 77.6%)，該類綠建材標章之主要精神係透過評定基準規範管制建材內含之揮發性有機化合物(TVOC)氣體逸散濃度；惟健康綠建材相關逸散濃度及逸散速率之歷時曲線尚未納為建材基本資料，係屬建材公示基本資料闕漏部分；另消費者於選用該類綠建材應用於室內裝修時，與一般建材相比較，健康類綠建材並具備低量揮發性有機化合物逸散特性，如能以圖像方式具體呈現量化差異概念，對於綠建材推廣更具助益，爰配合本所相關研究計畫建置開發之建材逸散模擬軟體，並將歷年累積相當數量之建材逸散檢測數據納為該軟體資料庫使用，配合該軟體功能除提供室內裝修竣工後，經合理通風換氣判斷較佳入住時間外，更能提供後續政策宣傳及圖像比較參考，對於維護國人健康及綠建材推廣更具助益。

擬根據本所歷年完成之塗料類健康綠建材檢測，優先選取現行有效之健康綠建材標章產品之檢測數據，預期完成數據迴歸統計分析並建立逸散行為經驗模式，除彙整該類建材之有機化合物逸散濃度、逸散速率等歷時行為基本資料外，並配合相關前期研究已初步建置完成之建材逸散模擬軟體架構，進行該軟體綠建材相關逸散資料庫擴充，促使該軟體建材資料更為完備，並趨近實務應用需求。

## 第二節 研究方法與流程

### 一、 文獻分析法

蒐集國內外建材逸散試驗及數值模擬等相關文獻及成果資料，彙整目前藉由實驗分析驗證所提出之 TVOC 及甲醛逸散行為特性及模式等，以及現有之室內空氣品質模擬工具之計算模擬原理，並以本所歷年累積之實測數據進行模式驗證，從中選擇適用之逸散行為描述型式。

### 二、 實驗分析法

自獲評為健康綠建材標章之塗料類建材當中，抽樣進行 TVOC 及甲醛逸散檢測，並延長現行評定試驗僅進行 48 小時採樣至 96 小時，除藉由試驗室分析設備儀器進行定性定量化之分析，取得長期逸散行為之實測結果外，另可驗證文獻所提出之逸散行為模擬結果，依據實測結果給予模擬成果良窳之評價，有助於建立塗料類建材之逸散行為資料庫。

### 三、 數值模擬法

利用國際間已開發之室內空氣品質模擬工具(如 IA-QUEST、美國環保署開發之 WPEM 等模擬軟體)，並以本所相關研究計畫進行建置之建材逸散模擬軟體架構，以前述實測實驗參數輸入進行模擬，配合實測所得數據進行比對，就軟體模擬結果進行驗證，並完成程式建材資料庫之塗料類等濕式建材逸散資料庫擴充。

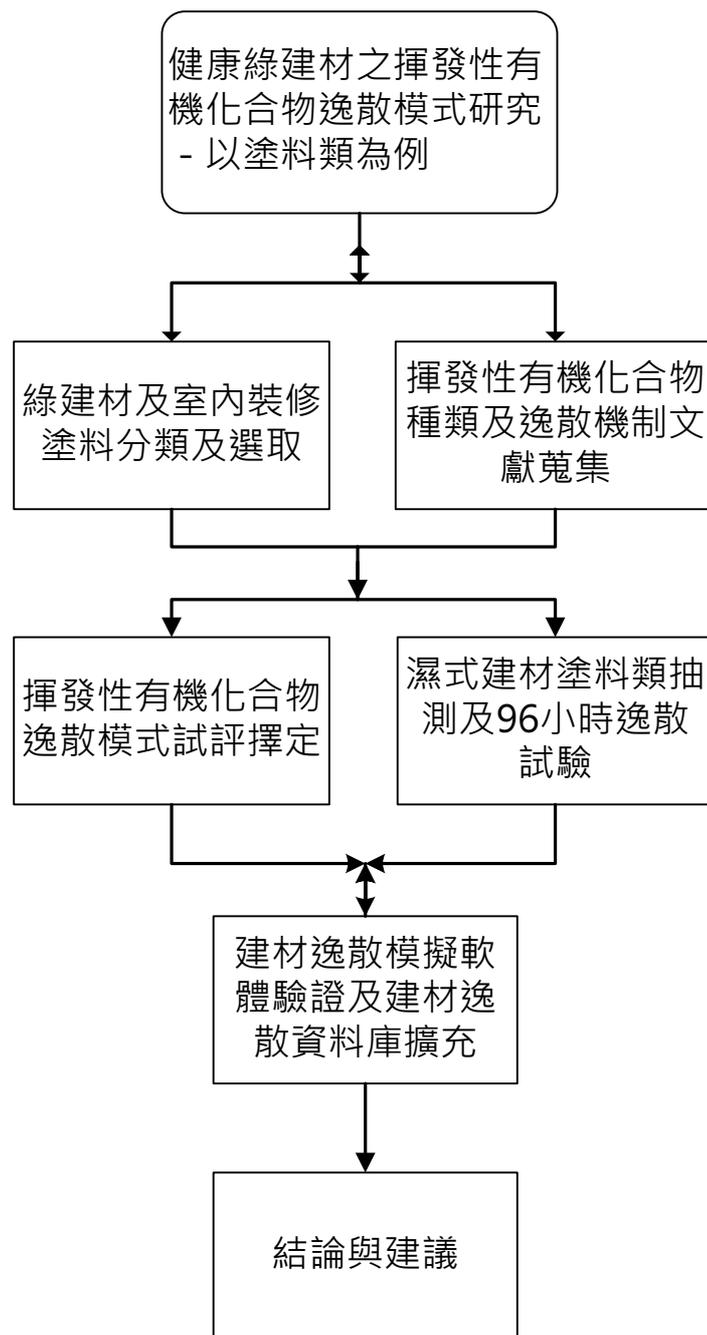


圖 1.1 研究流程

資料來源：本研究整理

## 第二章 文獻回顧與理論探討

### 第一節 文獻回顧

#### 一、綠建材概述及再生綠建材種類

##### (一)綠建材概述

綠色建材概念源自 1988 年第一屆國際材料科學研究會中提出，其中綠色乃指其對永續環境發展的貢獻程度。時至 1992 年國際學術界針對綠建材(Green Building Material)始定義為：「在原料採取、產品製造、應用過程和使用以後的再生利用循環中，對地球環境負荷最小、對人類身體健康無害的材料，稱為綠建材」<sup>1</sup>，並於建築技術規則第 299 條第 12 款明定：「綠建材：指經中央主管建築機關認可符合生態性、再生性、環保性、健康性及高性能之建材。」，綠建材相關認可標準詳如表 2.1

表 2.1 綠建材認可表

認可範圍		使用於建築物之部位
第一類 環保標章建材	(1)塑橡膠類再生品	1.天花板材料 2.內部牆面材料 3.高度超過 1.2 公尺固定於地板之隔屏或兼作櫥櫃使用之隔屏。 4.樓地板面材料。  ※但不包括衛浴設施、家具、管線材、門窗類
	(2)建築用隔熱材料	
	(3)水性塗料	
	(4)回收木材再生品	
	(5)資源化磚類建材	
	(6)資源回收再利用建材	
綠建材標章建材		
其他經中央主管建築機關認定具有同等性能者		

資料來源：綠建材解說與評估手冊-2011 年更新版

<sup>1</sup> 綠建材解說與評估手冊-2011 年更新版，江哲銘主編，內政部建築研究所，2011

## (二)健康綠建材<sup>2</sup>

### 1. 健康綠建材標章產品

內政部藉由建立「綠建材標章制度」，制訂明確之評定基準用以規範廠商，除確保建材品質合乎國家標準基本性能規範要求外，且兼顧環境衝擊影響考量，並減低使用者健康危害風險及保障消費者之權益等附加效益；其標章申辦核發過程須先符合綠建材通則規定，取得綠建材性能試驗指定機構出具效期 1 年內之試驗報告書，再檢具經綠建材標章評定專業機構性能認可之規格評定書及申請書，經內政部認可通過者始發給綠建材標章。現行綠建材標章制度係依據建材之「生命週期」，包括資源採取、製造、使用、廢棄再生，訂定生態、健康、高性能及再生共四大範疇。因此標章主要區分為生態綠建材、健康綠建材、高性能綠建材及再生綠建材等項目評定。其中健康綠建材係針對 TVOC(BTEX)及甲醛之逸散速率進行分級規定。(如表 2.2)

**表 2.2 健康綠建材評定項目**

1	地板類	木質地板、地毯、架高地板、塑膠木材等。
2	牆壁類	合板、纖維板、石膏板、壁紙、防音材、粒片板、木絲水泥板、木粒片水泥板、纖維水泥板、矽酸鈣板等。
3	天花板	合板、石膏板、礦纖天花板、玻纖天花板等。
4	填縫劑與油灰類	矽利康、環氧樹脂、防水塗膜材料等。
5	塗料類	油漆等各式水性、油性粉刷塗料。
6	接著(合)劑	油氈、合成纖維、磚黏著劑、白膠(聚醋酸乙烯樹脂)等。
7	門窗類	木製門窗(單一均質材料)。

<sup>2</sup>「健康綠建材」擬自綠建材解說評估手冊-2011年更新版起，更名為「低逸散健康綠建材」，預計自2012年1月起實施。

## 2. 第一類環保標章產品

環保標章制度在實施上可分為三類，即第一類環保標章，第二類廠商自行宣告的環境訴求及第三類環境宣告，而其「環境標誌與宣告」種類與定義依據乃依據國際標準組織（ISO）已公告之 ISO 14024 系列標準之定義，若於中華民國國家標準中乃以 CNS 14020、CNS 14021、CNS 14020 及 CNS 14025 系列標準定義，前述三類標章當中僅第一類環保標章頒發專用之商標。截至 2011 年 11 月止，我國已公告的第一類環保標章產品規格中，同屬綠建材認可範圍產品規格認證項目－水性塗料共計 14 筆。

## 二、 室內裝修用建材分類

為探討散健康綠建材應用於室內裝修對人體健康影響，以下就「室內裝修建材」相關分類方式進行探討。目前國內的建材分類方式，經由經濟部標準檢驗局認證通過的建材，依其營建類 CNS 族群分類，有關材料的分類方式有二種，一為依材料方式分類，另一則依工程方式分類，彙整如表 2.3。

**表 2.3 經濟部標準檢驗局營建類 CNS 族群材料分類表**

(一)結構材料	(二)裝修材料			
	(A)地面	(B)內裝	(C)外裝	(D)一般材料
水泥	石材製品	木質板	石材	石材製品
砂石、粒料	木板	合板	木板	混凝土製品
混凝土	磁磚	纖維板	磁磚	板類
模板	金屬材料	石膏板	塗料	合板
基樁	其他	其他裝飾板	其他	纖維板
鋼筋及鋼料		粉刷材料		其他裝飾板
熔接及接合		壁紙		嵌板
木材		磁磚		金屬類
其他		塗料		陶磁類、磁磚
		其他		玻璃
				塗料
				其他

資料來源：李俊璋，2003

經參考行政院國科會相關研究，本土建築中各種類型建材如地板材、天花板材、隔間材、木板材、塗料、油漆等，以及內政部建築研究所針對建材進行分類，各自釐清其使用性質、材料特性及產品原料並加以分類如表 2.4 所示，本研究為配合相關研究開發之軟體架構，主要將針對其中塗料類、填縫劑與油灰類及接著(合)劑等濕式建材進行相關探討及抽測檢驗。

表 2.4 室內裝修建材分類方式

項次	材料部位分類	主要物質
第一類	地板類	地毯(捲型鋪面地毯、方塊組合地毯、活動軟質地毯)、木質地板(合成板材、木質地坪、木條地、木塊地、拼花木質地、木質複合地、彈性木質地系統)、架高地板、塑膠地磚、橡膠地板、網路地板、樹脂地、氣氧化鎂地、環氧樹脂地、彈性液體塗層地、膠結式填灌地、 <u>壓克力地</u> 、特殊地、磁磚(崗石地磚、止滑磚)、磨石子等
第二類	牆壁類	美耐板、夾板、纖維板、石膏板、聚合板、防音建材、防潮板、貼面磚、 <u>隔熱磚</u> 、 <u>壁紙壁布</u> 、牆壁粉刷(水泥粉刷、石膏粉刷、磚土粉刷、桧石粉刷)等
第三類	天花板類	礦纖天花板、玻纖天花板、 <u>木石纖維板</u> 、 <u>金屬天花板</u> 、 <u>吸音天花板</u> 、特殊天花板等
第四類	填縫劑與油灰類	矽利康、環氧樹脂、 <u>接口密封劑</u> 、 <u>聚硫填縫膠</u> 、 <u>封口膠</u> 、 <u>填縫膠</u> 、 <u>變性矽質填縫劑</u> 、 <u>PU 填縫材</u> 、 <u>防火填縫膠</u> 、 <u>磁磚填縫泥</u> 、 <u>磁磚石材黏著膠泥</u> 、 <u>矽酮填縫劑</u> 、 <u>球土</u> 等
第五類	塗料類	調和漆、塑膠漆、油性水泥漆、水性水泥漆、環氧樹脂漆、PU 漆、纖維素塗料、著色劑、封水塗料、凡立水、防火塗料、木器漆、紅丹底漆、石質塗料、混凝土保護塗料、特殊塗料、 <u>壁面塗料</u> 、 <u>抗磨損塗裝</u> 、 <u>厚釉面塗裝</u> 、 <u>水泥質塗裝</u> 、 <u>彈性聚合物塗層</u> 、 <u>膨脹性塗料</u> 、 <u>化學抵抗塗層</u> 等室內外油漆
第六類	接著(合)劑	油氈、合成纖維/聚氯乙炔.等
第七類	門窗類	木製門窗、 <u>金屬門</u> 、 <u>透光塑膠板</u> 等
第八類	傢俱類	木作樓梯及扶手、櫥櫃、衣櫃及用具、窗簾等
第九類	其他材料	塑膠結構材

資料來源：李俊璋，2003

### 三、塗料與塗裝之定義及其構成原理

塗料是指用來覆蓋於物質表面並提供保護效果，同時強化其外表美觀的物品，通常會因乾燥或化學反應而產生硬化並形成表膜(塗膜)的材質。而使用塗料塗抹於物質表層上的動作即稱為塗裝。

塗料於人類社會使用歷史由來已久，最早於中國樓蘭洞穴中的壁畫即曾出現塗料使用的蹤跡，雖然天然漆塗膜具備堅固、耐久等優異保護性能，惟受限於天然原色僅能調配棕、黑色等深色系略嫌單調，並伴隨著晚近石油化學技術日趨發達，利用新式化學合成法所製造的含有壓克力(Acrylic)、環氧樹脂(Epoxy Resin)、氟(Fluorine)等成份之優異塗料陸續在二次世界大戰後陸續問世，時至今日塗料種類可謂多如繁星，依調整塗料的主要成分比例，如結合材、顏料、添加劑及溶劑等，還能夠賦予物質各種機能。

#### 1. 結合材：

為凝結塗料的基礎成分，也是構成塗膜功能所不可或缺的成分，一般俗稱凡立水(Varnish)或亮光漆，結合材種類將決定塗料的耐候性與柔軟性，結合材主要成分為樹脂，舉凡：壓克力樹脂、聚氨脂樹脂、壓克力矽樹脂、氟樹脂及環氧樹脂等均為代表；甚至天然乾性油亦能充當結合材使用，如蓖麻油、亞麻仁油及桐油的脂肪酸與空氣中的氧氣反應後便會形成塗膜，且與油性塗料具有相當良好相容性。

#### 2. 顏料：

即所謂的著色物質，用來塗抹於物質其上並使其染上色彩，也是塗料之所以鮮豔多彩的主因，主要可區分為無機顏料與有機顏料，分別展現不同的遮蔽力及明暗度，以及對於光、熱抵抗能力。

#### 3. 溶劑：

則是用來將樹脂、油脂溶解並賦予流動性之物質，有時更被當作稀釋劑使用，如油性塗料的溶劑或稀釋劑的乾性油為松節油(Turpentine)。除水性塗料外，絕大多數的合成樹脂塗料所使用的溶劑大致區分為酒精(醇類)、酯類、乙醚、酮類、脂肪族碳化氫、芳香族碳化氫等；另外以水為主

要溶劑則稱之為水性塗料。

#### 4. 添加劑：

雖佔塗料主要材料少許比例，卻為提升塗料性質的重要角色，包含提高顏料與結合材的相容性所需之濕潤劑、使顏料均勻分散的活性劑、調整塗料黏稠度之黏性調節劑，以及消除氣泡使塗膜更加美觀的消泡劑等。

依據張志成(1999)、陳逸青(2003)等人針對建築塗料種類、塗料性質乃至參考行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所提出之塗料型式分類法，油漆依其性質和用途有不同之特性，其中有關建築工程所用之油漆種類和性質分類如下：

- (1)調和漆(ready-mixed paint)：使用長油性樹脂顏料、乾燥劑和溶劑調配製造而成，適用於室內外一般木料、鐵製品之面漆。
- (2)乳膠漆(emulsion paint)：由水溶性聚乙烯醇及壓克力樹脂，配以耐候性顏料製造而成，俗稱塑膠漆或PVC漆。以清水為溶劑，適用於建築物之內外水泥牆、合板等表面裝飾。
- (3)水泥漆(cement mortar)：由耐候，耐水性之丙乙烯共聚合樹脂為主體，配合特殊合成樹脂及耐候耐鹼顏料製造而成，有水性及油性兩種，適用於一般建築物內外水泥牆面石膏泥灰等物表面的維護及裝飾之用。
- (4)磁漆(alkydenamel)：以清漆為媒液加入各種著色粉製造而成，刷塗後於大氣中乾燥，形成一層平滑、光亮、硬質並具耐久性的薄膜。磁漆內的著色粉具強力的遮蔽力及顏色，其表面亮度不大僅具蛋殼光澤。適用於鋼鐵、木製品、車輛等面漆。
- (5)凡立水(vernish)：又稱清漆或假漆。因無添加著色粉，故呈透明無色，乾固後形成一層平滑光亮，堅硬之薄膜，除可透視底層原材料之質紋，亦兼具保護作用。

#### 四、揮發性有機化合物概述

根據美國環保署(EPA)及歐盟環保署(EEA)等研究已證實曝露於低濃度揮發性有機物之室內環境，將對人體健康造成廣泛影響，輕則引發各種不適症

狀(如頭痛、疲倦、刺激皮膚或眼睛及呼吸道疾病等)、慢性病，重者則可引發癌症，統稱 SBS(Sick-Building Syndrome)症候群。

有關揮發性有機物(以下簡稱 VOCs)之定義，為在標準狀態下(20°C, 1 atm)，蒸汽壓大於 0.1 mmHg 以上之有機化合物，本研究另整理國際間 VOCs 相關定義，如表 2.4 所示<sup>3</sup>。揮發性有機化合物因涵括範圍廣泛，世界衛生組織(WHO)依物質沸點介於 50-260°C 之間定義方式亦廣為學術研究接受，依照沸點的不同尚區分為半揮發性有機化合物(semi-volatile organic compounds)及極易揮發性之有機化合物等(very volatile organic compounds)(WHO, 1989) (如表 2.5 所示<sup>4</sup>)，但同樣具備高揮發性的一氧化碳、二氧化碳、甲烷及醛類等氣體雖符合前揭定義，但不納入揮發性有機物之列。

**表 2.5 揮發性有機物之定義**

機構	定義
美國環保署 (EPA)	蒸汽壓>0.1mm Hg 物質
澳洲國家污染物追蹤計畫 (Australian National Pollutant Inventory)	任何具碳鏈或碳環結構，且在 25°C 條件下，蒸汽壓>2 mm Hg 的化學物質
歐盟	任何在 20°C 條件下，蒸汽壓>0.074 mm Hg 之化學物質

資料來源：本研究整理

**表 2.6 室內有機污染物質分類**

描述	縮寫	沸點範圍
極易揮發有機化合物	VVOC	0°C 至 50~100°C
揮發性有機化合物	VOC	50~100°C 至 240~260°C
半揮發性有機化合物	SVOC	240~260°C 至 380~400°C
粒狀有機化合物或附著於粒狀物上的有機化合物	POM	>380°C

資料來源：Maroni, 1995; WHO, 1989

室內 VOC 主要來自吸煙、烹調等產生的煙霧和天然氣(甲烷)，裝飾材料、傢俱、家用電器、清潔劑等日常用品；室外 VOC 之主要來源，則為燃料燃燒以及交通運輸所產生廢氣，VOC 亦為戶外重要空氣污染來源之一，部分 VOC 經太陽照射後與大氣中的 NO<sub>2</sub> 進行光化學反應而產生臭氧，雖然平流層之臭氧

<sup>3</sup> Benoit Guieysse and Cecile Hort, 2008, "Biological treatment of indoor air for VOC removal: Potential and challenges", *Biotechnology Advances*, 26, 398-410.

<sup>4</sup> Maroni, M., B. Seifert and T. Lindvall, 1995, "Indoor Air Quality - a Comprehensive Reference Book", Elsevier, Amsterdam.

具備吸收紫外線功能，可保護人類及動植物免於陽光中強烈紫外線的侵襲，但在對流層（海平面至離地表 11 km 以下範圍）之臭氧，卻對於人體呼吸系統產生威脅，此外高濃度臭氧也會破壞建築物以及穀物的生長，而 VOC 本身也會造成土壤或地下水的污染，並且令煙霧問題更形惡化之關鍵，本研究係以探討具立即警示性之室內氣態揮發逸散為主。

### 五、 濕式建材中揮發性有機物質探討

無論乾式或濕式建材逸散之氣態 VOCs，其來源多半為製造或裝修過程中所混摻或使用之有機溶劑或黏著劑，室內 VOCs 種類及相關建材所逸散出的化合物種類如表 2.7 所示，依據我國主要揮發性有機化合物排放行業統計資料可知，塗料的製造及塗裝過程中所排放之 VOCs 量約可達總排放量的 49% 左右（如圖 2.1 所示），其 VOC 排放量顯然居於所有建材中的首位，對室內使用人員的健康危害也最為顯著。以溶劑型塗料為例，其成分主要是以高分子合成樹脂作為成膜物質，有機溶劑做為稀釋劑，加入定量的顏料、填料及助劑，經混合、攪拌後，溶解形成揮發性塗料，塗刷在牆面以後，隨著塗料中所含溶劑的揮發，成膜物質與其他不揮發的成分共同形成均勻而連續的薄膜，即成塗膜，上述過程中溶劑所揮發的有機物質便是室內揮發性有機污染物。由此可見，室內裝修大量使用的塗料類建材將會對室內空氣品質造成相當程度的影響。本研究主要針對濕式建材如塗料、填縫劑及膠結劑等類別產品進行後續探討。

表 2.7 VOCs 種類及逸散來源對照表

來源	釋放 VOCs 種類	來源	釋放 VOCs 種類
膠結劑/ 填縫劑	甲醛，丁基醚，乙烯基環己烷，丙二醇，2-丙烯酸	塗料	甲苯，丙二醇，乙二醇，丙烯酸丁酯，甲基丙醇
地毯	4-Phenylcyclohexene，醋酸乙烯酯，苯乙烯，十二醇，乙醛	列表機/ 影印機	苯乙烯，乙苯，二甲苯，苯，2-乙基-1-己醇
化學清潔劑	檸檬烯，異戊烷，異丙醇，丁氧基乙醇，1,4-二氯苯	彈性/橡膠 地板	苯乙烯，十二烷，benzothiazole，醋酸乙烯酯，環己烷
油氈類 (Linoleum)	乙酸，乙醛，己酸，戊酸，癸烷	紡織物	甲醛，丙烯腈，乙醛，癸烷，十四烷
木製品	甲醛，2-pentylfuran，苯甲醛，乙醛，戊醛	牆壁覆蓋物	萘，methylpyrrolidinone，苯乙烯，酚，乙基己酸
辦公室傢俱	甲醛，乙醛，醋酸丁酯，乙醛，環己酮	百頁窗	乙基己酸，癸醇，十二烯，乙基己醇，萘
進駐建築人員	香煙煙霧(ETS)所產生的苯，松烯(terpene)，矽氧烷化合物(止汗劑、除臭劑成份)，乾洗衣物殘留四氯乙烯，乳液保濕皂及化妝品所含 C <sub>12</sub> to C <sub>16</sub> 烷烴。		

資料來源：Jonathan A. Bernstein et al，2008

## 六、揮發性有機化合物之逸散機制及排放模式

### (三)建材揮發性有機化合物逸散機制(Emission Mechanisms)

室內建材的揮發性有機化合物排放，主要由二種機制所控制，第一種是由物體表面揮發(evaporation)所控制，係指建材表面與接觸表面空氣層因濃度梯度的不同，而驅動的質傳機制；另外一種則是建材本身內部的擴散(internal diffusion)，該機制主要因為建材本身內部的濃度梯度差而引發的質傳效應，如圖 2.1 所示。主要由其中一種所控制為原則，而二者同時作用者為例外。

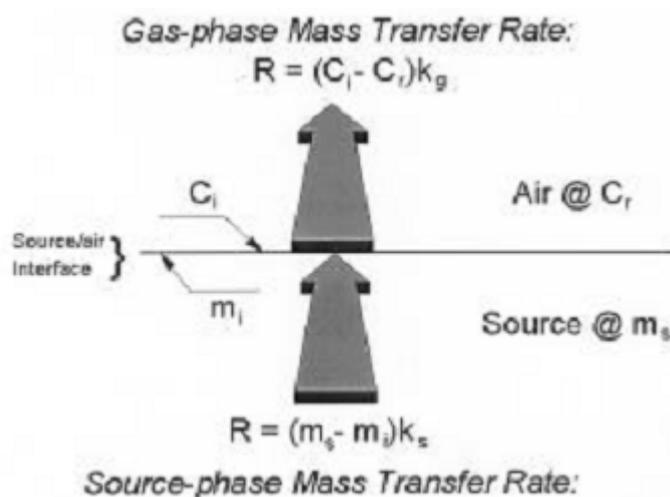


圖 2.1 逸散機制示意圖

上述二種機制影響強弱，主要取決於相關逸散環境條件，例如風速、空氣交換率、溫度、相對濕度、物體表面吸附、沉積效應(Sink Effect)等。而在現行規範實驗設備能有效控制者多為風速、溫度、相對濕度及空氣交換率。

在國內文獻部分，陳新智君<sup>5</sup>、陳鎮宇君<sup>6</sup>，以溫度、濕度及換氣率為變因，探討建築板材中甲醛濃度與該三項環境因子之間的變化關係，結果證明甲醛濃度逸散速率因子 (Emission Rate Factor) 隨溫度升高上升，而提高換氣率則導致最高濃度發生時間提前，以及逸散速率因子上升等情形；然而在濕度的影響方面則呈現不穩定狀態；黃冠仁君<sup>7</sup>以黏著劑探討環境因子對 VOCs 逸散模式的影響；陳丁于君<sup>8</sup>、陳振誠君<sup>9</sup>及邵文政君<sup>10</sup>同樣以溫度、濕度及換氣率為變因，探討合板及清漆之揮發性有機物質，結果發現溫、濕度的上昇亦同時造成建材逸散量的增加，而換氣率的增加對合板、清漆及及複層建材所造成的影響並未呈現相同的態勢，僅造成清漆的

<sup>5</sup>陳新智，2000，室內木質建材揮發性有機物逸散之研究，台灣大學環工所碩士論文。

<sup>6</sup>陳震宇，2001，室內木質建材甲醛逸散之研究，台灣大學環工所碩士論文。

<sup>7</sup>黃冠仁，1999，室內建材逸散揮發性有機物之研究—黏著劑之揮發性有機物逸散因子，台灣大學環工所碩士論文。

<sup>8</sup>陳丁于，2002 台灣地區室內環境因子對建材揮發性有機物質逸散行為影響之研究-以清漆為例，國立成功大學建築研究所碩士論文。

<sup>9</sup>陳振誠，2004，台灣本土氣候下換氣率影響建材有機物質逸散特性之研究-以合板及清漆為例，國立成功大學建築研究所碩士論文。

<sup>10</sup>邵文政，2006，建材揮發性有機化合物管制策略之研究，成功大學建築研究所博士論文。

逸散量增加。

#### (四)揮發性有機化合物污染源排放模式

污染源排放模式可區分為經驗模式及物理模式兩大類型。經驗模式直接根據實驗結果進行迴歸分析，並模擬出符合實驗結果的方程式；而物理模式則是利用物理模型並結合質傳及流場等理論，推導而得理論方程式。以下分別簡述經驗模式及物理模式之相關方程式，並將利用理論基礎，配合實驗結果所推導之方程式則稱為半經驗模式 (Semi-Empirical Model)，併予納入物理模式類型討論。

##### 1. 經驗模式

###### (1) Colombo equation (Colombo et al., 1990)

由於室內污染源的特性和環境系統均可能影響 VOCs 排放的特性，因此需累積足夠的實驗資料，始能建立具代表性的經驗模式；但此類模式較缺乏理論基礎。由 Colombo et al. (1990) 所證實可應用在長時間排放的擴散限制污染源以及排放時間較短的薄膜型產品，例如家庭中所應用之清潔劑以及塗料。模式的基本型如式(2-1)：

$$c = A_{LC}[1 - e^{-(B_{RC}t)}] - C_{LC}[1 - e^{-(D_{RC}t)}] \text{-----2-1}$$

c：測試箱內濃度( $mg/m^3$ )

t：時間(hr)

ALC、CLC：線性參數( $mg/m^3$ )

BRC、DRC：速率參數( $h^{-1}$ )

在不同的參數組合下，此模式可以應用於二種不同的濃度變化，其一為濃度由零起始增加，直到上升至最大值後逐漸衰減至零或是一個穩定態，此時參數條件為  $BRC > DRC$  且  $1 < (ALCBRC/CLCDRC) < \infty$ 。其二為濃度由零增加到一穩態，且  $CLC \leq 0$  或  $BRC \leq DRC$ 。不論在何種情況下，當達到穩定態時，濃度值皆為  $ALC - CLC$ 。另外，經由計算可以得到測試箱中可能產生的最大濃度( $C_{max}$ )和出現最高濃度的時間( $t_{max}$ )，如式(2-2)、(2-3)：

$$C_{max} = A_{LC} \left[ 1 - \left( \frac{A_{LC} B_{RC}}{C_{LC} D_{RC}} \right)^{B_{RC}/(D_{RC}-B_{RC})} \right] - C_{LC} \left[ 1 - \left( \frac{A_{LC} B_{RC}}{C_{LC} D_{RC}} \right)^{D_{RC}/(D_{RC}-B_{RC})} \right]$$

$$\text{-----2-2}$$

$$t_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{A_{LC}B_{RC}}{C_{LC}D_{RC}}\right)}{B_{RC} - D_{RC}} \text{-----2-3}$$

濃度的變化速率如式(2-4)表示：

$$\dot{c} = A_{LC}B_{RC}e^{(-B_{RC}t)} - C_{LC}D_{RC}e^{(-D_{RC}t)} \text{-----2-4}$$

濃度由最大值再逐漸趨近於零時，令  $A_{LC} \doteq C_{LC}$ ，方程簡化如式(2-5)

$$c = A_{LC} \left[ e^{(-D_{RC}t)} - e^{(-B_{RC}t)} \right] \text{-----2-5}$$

同樣的，當濃度逐漸趨向於一個穩態增加，方程式亦可簡化為式(2-6)，經由統計分析結果，簡化方程式所得到的模擬結果與基礎模式的結果差異在 5% 以內。

在質量平衡的計算上，測試箱內的質量平衡可以利用如式(2-7)：

$$V\dot{c} = E + R_d - R_s - I - F_c \text{-----2-7}$$

V：測試箱體積 ( $m^3$ )

E：排放速率 (mg/hr)

R<sub>s</sub>：整體表面吸持速率 (The Global Sorption Rate) (mg/hr)

R<sub>d</sub>：整體表面脫附速率 (The Global Desorption Rate) (mg/hr)

I：在整體表面特殊物質不可逆之吸附速率 (mg/hr)

F：氣體流量 ( $m^3 \cdot hr^{-1}$ )

當  $t=0$  時， $C=0$ ，則  $R_d$ 、 $R_s$ 、 $I$  皆為 0，可得初始排放速率如式(2-8)

$$E_0 = V\dot{c} = V(A_{LC}B_{RC} - C_{LC}D_{RC}) \text{-----2-8}$$

當時間趨近無窮大時，測試箱內部達到穩態時  $(dc/dt)=0$ ，且  $R_d=R_s$ ，則可以得到最後的排放速率如式(2-9)

$$E_{\infty} = I_{\infty} - F_{\infty} = I_{\infty} + F(A_{LC} - C_{LC}) \text{-----2-9}$$

其中  $I_{\infty}$  為未知，方程式中的參數可以提供  $E_{\infty}$  最低限制，若捨去  $F(A_{LC} - C_{LC})$  的影響，可由此獲得  $I_{\infty}$  的估計值。式(2-7)的排放速

率可以表示如式(2-10)：

$$E = V\dot{c} - R_d + R_s + I + F_c \text{ -----2-10}$$

在上式中，若未知的吸持及脫附速率的底限可以獲得，或是其值相當小，相對於其他項可以忽略，則 E 值可以獲得。

對於式(2-8)中的參數  $B_{RC}$  及  $D_{RC}$ ，可利用  $c_1$  進行合理推估如  $B_{RC} = 2c_1 / (t_1 c_{max})$ 。對於一個排放快速的污染源，可假設  $D_{RC}$  = 空氣交換率；對於一個排放緩慢的污染源而言，則可假設  $D_{RC}$  為 0.1~0.01 倍的空氣交換率，惟此模式不適用於  $A_{LC} - C_{LC}$  為負的情況。

## (2) 牆面塗料暴露評估模式

有關塗料排放研究當中，美國環保署所發展的壁面塗料暴露評估模式(Wall Paint Exposure Assessment Model, WPEM)利用小型環境測試箱的實驗，引用相關的理論及經驗模式進行預測評估。在針對醇酸樹脂塗料進行的實驗及預測評估上，首先利用最簡單的一階衰減模式，再進一步利用二階衰減的模式進行計算，並求出衰減係數，經由一階及二階的衰減模式結果的比較，可以發現二者所得的結果相近，因此可以知道對於塗料的排放預測上，一階模式能有效地表示出排放特性(USEPA, 2001)。

針對排放衰減率的預測上，可利用式(2-11)計算：

$$k = a \times VP^b / (MW^c \times FT^d) \text{ -----2-11}$$

k：排放衰減率(1/hr)

VP：蒸汽壓(torr)

MW：莫耳重(g/mole)

FT：薄膜厚度(mil)

a, b, c, d：常數

經由實驗結果及式(2-11)的計算，發現由式(2-11)所計算的衰減係數較實驗值大。此外，對於高蒸汽壓及低莫耳重之化合物，式(2-11)的估計值與實驗值間存在較大的差異。

## (3) 一階衰減模式

Tichenoretal.(1991)假設測試箱為理想連續攪拌之反應槽，在不考慮 sink 效應以及蒸汽壓作用的影響下，污染物的排放速率呈現一階衰減，可以表示成式(2-12)之一階衰減方程式

$$R = R_0 e^{-kt} \text{ -----2-12}$$

$R$ ：於時間  $t$  之排放速率 ( $mg/m^2 \cdot h^{-1}$ )

$R_0$ ：於  $t=0$  之排放速率 ( $mg/m^2 \cdot h^{-1}$ )

$k$ ：一階衰減係數 ( $hr^{-1}$ )

$t$ ：時間 ( $hr$ )

測試箱的質量平衡方程式表示為式(2-13)，其意義為測試箱內的污染物質量的改變量等於污染物排放量與排出測試箱的污染物差量。

$$V\dot{C} + QC = AR_0 e^{-kt} \text{ -----2-13}$$

$V$ ：測試箱容積 ( $m^3$ )

$C$ ：測試箱內部污染物濃度 ( $mg/m^3$ )

$A$ ：污染物表面積 ( $m^2$ )

$Q$ ：測試箱的氣體流量 ( $m^3/h$ )

以初始條件  $C(0)=0$ ，代入得解

$$C = \frac{AR_0(e^{-kt} - e^{-Nt})}{V(N-k)} \text{ -----2-14}$$

其中  $N$  定義為氣體交換率 ( $hr^{-1}$ )， $N \equiv Q/V$ 。

有關排放衰減率  $k$  值，可利用式(2-11)推估：

惟依文獻實驗結果比對式(2-11)計算結果，發現由式(2-11)所計算所得之衰減係數較實驗值大。此外，對於高蒸汽壓及莫耳分子量偏低之化合物，該公式較不適用。

## (4) 二階段衰減模式

Chang et al.(1992)研究木料著色劑的排放行為，將木料著色劑所含揮發性有機物(Nonane, Decane, Undecane, 1, 2, 4 Trimethyl-benzene (TMB))的排放行為分為兩階段式的數值模式

進行計算。第一階段為排放速率快速衰減的時期，出現實驗進行後的 10 小時內。其排放速率衰減以一階指數衰減速率式表示：

$$R_1 = R_{10}e^{-k_1t} \text{ -----2-15}$$

- $R_1$ ：第一階段排放速率( $mg/m^2 \cdot h^{-1}$ )
- $R_{10}$ ：第一階段初始排放速率( $mg/m^2 \cdot h^{-1}$ )
- $k_1$ ：第一階段速率衰減係數( $hr^{-1}$ )
- $t$ ：時間(hr)

因此測試箱內部的質量平衡式為

$$V\dot{C} + QC = AR_0e^{-k_1t} \Rightarrow \dot{C} + NC = \frac{AR_1}{V}e^{-k_1t} \text{ -----2-16}$$

- $C$ ：測試箱內濃度( $mg/m^3$ )
- $A$ ：塗佈的面積( $m^2$ )
- $V$ ：測試箱容積( $m^3$ )
- $N$ ：空氣交換率(1/hr)

以初始條件  $C(0)=0$ ，可得解如下：

$$C = \frac{AR_1(e^{-k_1t} - e^{-Nt})}{V(N - k_1)} \text{ -----2-17}$$

另一方面，排放速率的一階指數衰減式的推導是以排放速率正比於單位面積所含污染物的重量  $n$  為基礎，亦即：

$$R_1 = -\dot{n} = k_1n \text{ -----2-18}$$

式(2-18)將排放速率表示為單位面積污染物重  $n$  和排放速率衰減係數  $k_1$  的乘積， $k_1$  牽扯到複雜的物理化學反應及質量傳輸，在不同的情況下不易預測真實的數值，所以在實驗中使用以 Decane 為基準的相對數值來表示。實驗的結果顯示此假設定可得到合理的結果。

第二階段部分，排放速率的改變亦以指數衰減函數表示為：

$$R_2 = R_{20}e^{-k_2t} = k_2n \text{ -----2-19}$$

- $R_2$ ：第一階段排放速率( $mg/m^2 \cdot h^{-1}$ )
- $R_{20}$ ：第一階段初始排放速率( $mg/m^2 \cdot h^{-1}$ )
- $k_2$ ：第一階段速率衰減係數( $hr^{-1}$ )

t：時間(hr)

同理以初始條件  $C(0)=0$ ，可得類似式(2-18)型態解，由於第二階段之數學模式係適用於長時間，故以此初始條件來替代真實值並不會造成太大的誤差。由實驗數據顯示，長時間的排放其濃度變化趨近於一直線，且其斜率為  $-k_2$ 。 $k_2$  及  $R_{20}$  計算係以 20 小時後的量測值模擬求出。 $k_1$  及  $k_2$  相較發現有明顯差異，顯示兩階段排放由不同的機制所控制。其原因為經歷一段時間後，污染物只能由已乾燥的油漆表面孔洞排放，所以該部分的排放速率控制於污染物在多孔介質的擴散度上。則氣相物質在多孔物質中的擴散係數(Knudsen Diffusivity, D)表示如下式：

$$D = \frac{a}{M_G^{0.5}} \text{-----2-20}$$

D：擴散係數( $cm^2/s$ )

a：變數，與孔隙直徑、溫度相關，( $cm^2/s$ )( $mole/g$ )<sup>0.5</sup>

$M_G$ ：氣體的莫耳質量( $g/mole$ )

$R_1$  及  $R_2$  分別代表第一階段及第二階段的排放速率，在第一階段中，由於  $R_1$  及  $k_1$  大於  $R_2$  及  $k_2$ ，故  $R_1$  大於  $R_2$ ；但在第二階段時， $R_1$  快速衰減而使  $R_2$  佔優勢，所以可以將兩相的排放速率式結合成為雙指數模式(Double-Exponential Model)

$$R = R_1 + R_2 = R_{10}e^{-k_1t} + R_{20}e^{-k_2t} \text{-----2-21}$$

該表示型式類似 Colombo 所提出的一階衰減模式。

### (5) 乳膠漆經驗模式

乳膠漆所含之 VOC 逸散行為無法用簡單的衰減模式加以適當描述，因此，Hansen (1974)建議之經驗模式如下式：

$$R(t) = \frac{R_0}{1 + aR_0t} \text{-----2-22}$$

其中  $R_0$  為  $t=0$  時的排放率，a 為迴歸係數。

## 2. 物理模式

### (1) 環控箱作用模式

James et al. (1988)考慮環境測試箱內四種不同的作用包含有污染源排放(The Source)、測試箱內的混合(The Well-Mixed

Contents of The Chamber)、測試箱的出口排放(Exit)、沉積 (sink) 效應，提出一理論模型，如圖 2.2 所示。

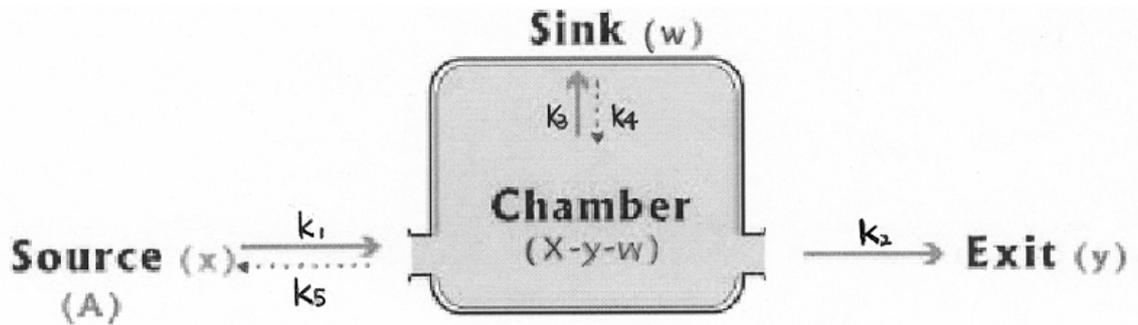


圖 2.2 物理模型示意圖

在圖 2.2 中，A 代表污染源的初始質量， $x=x(t)$  為污染源排放污染質量對時間  $t$  的函數， $y=y(t)$  為測試箱出口污染物質質量對時間  $t$  的函數， $w=w(t)$  為測試箱內污染物沈降質量對時間  $t$  的函數。 $k_1$ 、 $k_5$  代表污染源作用的速率係數， $k_2$  為污染物排出測試箱的速率係數， $k_3$  為沉降的速率常數， $k_4$  為吸附物質的再脫附速率係數。濃度對時間的函數表示如下：

$$C(t) = \frac{(x - y - w)}{V} \text{-----2-23}$$

其中  $V$ ：測試箱容積

在假設測試箱完全混合作用的理想空間中，整個測試系統利用三個微分方程分別描述：

$$\dot{x} = k_1 g(x, t) - k_5(x - y - w) \text{-----2-24}$$

$$\dot{y} = k_2(x - y - w) \text{-----2-25}$$

$$\dot{w} = k_3(x - y - w) - k_4 w \text{-----2-26}$$

穩定狀態下，污染物質質量由污染源排放到測試箱中的速率，逸散

速率因子(ERF)可表示為  $ERF = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dx}{dt}$

式(2-25)代表自環控箱內排出污染物質質量的速率，此速率正比於環控箱中污染物的質量。由於環控箱體積固定，所以此排放速率也就正比於箱中污染物濃度。式(2-26)表示污染物在環控箱內的速率，污染物沈降至物體表面的速率正比於箱中污染物的質

量，而污染物自表面脫附的速率則是正比於已吸附在物體表面的污染物質。  $k_3$  及  $k_4$  為測試箱的特性參數，與真實的生活環境有所不同。若環控箱內的氣體流量為一定值  $F$ ，則  $k_2 = F/V$  為單位時間內氣體交換的次數，由於  $F$  為實驗可控制條件，故  $k_2$  為一已知速率係數。由方程式解出速率係數的不同，分成 4 項子模式：

1. Full Model ( $k_3 \neq 0$  ,  $k_5 \neq 0$ ) ;
2. Sink Model ( $k_3 \neq 0$  ,  $k_5 = 0$ ) 表示排放速率不受已排放污染物濃度增加的影響；
3. Vapor Pressure Model ( $k_3 = 0$  ,  $k_5 \neq 0$ ) 表示已排放出之污染物無沉降現象；
4. Dilution Model ( $k_3 = 0$  ,  $k_5 = 0$ ) 為最簡單之稀釋模式。

## (2) 氣相質傳模式

Spark et al. (1996) 提出氣相質傳模式，在正常環境下，室內污染源排放污染物的質傳過程是污染物先通過污染源與空氣界面後，再由界面進入空氣中。質傳過程的兩個部份都可以用排放驅動力 (Driving Force) 除上質傳阻抗 (Resistance) 來表示，當系統達穩定狀態時，這兩個質傳速率是相等的。在污染源內部，質傳的驅動力是污染物在污染源內部和污染源與空氣界面間的濃度差。

$$R_s = (m_s - m_i) k_s \text{ -----2-27}$$

$R_s$  : 污染源質傳速率 ( $mg/m^2 \cdot h^{-1}$ )

$m_s$  : 污染源中污染物濃度 ( $mg/m^2$ )

$m_i$  : 污染物與空氣界面污染物濃度 ( $mg/m^2$ )

$k_s$  : 污染源質量傳輸過程阻抗的倒數 ( $hr^{-1}$ )

在空氣中，質傳的驅動力是污染物在空氣中和污染源-空氣界面的濃度差。

$$R_s = (C_i - C_r) k_g \text{ -----2-28}$$

$R_s$  : 氣相質傳速率 ( $mg/m^2 \cdot h^{-1}$ )

$C_i$  : 空氣中污染物濃度 ( $mg/m^3$ )

$C_r$  : 污染物與空氣界面污染物濃度 ( $mg/m^3$ )

$k_g$  : 氣相質量傳輸過程阻抗的倒數 ( $m \cdot hr^{-1}$ )

式(2-27)及式(2-28)中所列污染源與空氣界面濃度難以測量。由於在空氣中的濃度可測得，所以在模式的使用上要將方程式中，質傳係數改寫成代表全部質傳過程的係數，且使用平衡濃度計算。當污染物在空氣中與在污染源中濃度達平衡時，可得

$$C^* = f(m_s) = am_s \text{ -----2-29}$$

其中 a 為常數，根據 Tichenor et al. (1993)年提出的 VB Model， $a = C_v / M_0$ ，其中  $C_v$  為污染物飽和蒸汽壓濃度， $M_0$  為污染源之初始污染物濃度。

在污染源-空氣界面，將  $C_i$  與  $m_i$  線性關係式代入式(2-27)、(2-28)可得，

$$\left(\frac{a}{k_s}\right)R = (am_s - am_i) = (C^* - C_i) \text{ -----2-30}$$

$$\left(\frac{1}{k_g}\right)R = -(C_r - C_i) \text{ -----2-31}$$

合併式(2-30)、(2-31)可得：

$$R = \frac{C^* - C_r}{(k_g)^{-1} + a \cdot k_s^{-1}} \text{ -----2-32}$$

$$R = \frac{m^* - m_s}{(ak_g)^{-1} + k_s^{-1}} \text{ -----2-33}$$

如不考慮兩部分質傳其係數間數值的差距，式(2-32)中分母代表整體氣相質傳阻抗(Overall Gas-Phase Mass Transfer Resistance)，可簡化為  $(k_g)^{-1}$  取代， $k_g$  為整體氣相質傳係數；式(2-33)中分母代表全部污染源相質傳阻抗(Overall Source-Phase Mass Transfer Resistance)，可簡化為  $(k_s)^{-1}$  取代， $k_s$  為整體污染源相質傳係數(Overall Source-Phase Mass Transfer Coefficient)，由於氣相污染物的濃度較容易取得，故式(2-32)較常用於室內空氣品質相關研究。在大多數的情況下，兩部分質傳阻抗會有一個遠大於另一個，所以進一步簡化。對於許多室內重要的污染源而言(例如濕性污染源)，其氣相質傳

阻抗較佔優勢，故可忽略  $a \cdot k_s^{-1}$  該項，則式(2-32)可進一步簡化為：

$$R = \frac{C^* - C_r}{1/k_g} \text{-----2-34}$$

### (3) 修正型 VB 與 VBX 模式

在關於塗料的排放研究中，美國環保署所發展的壁面塗料暴露評估模式(Wall Paint Exposure Assessment Model, WPEM)引用 Guo et al. (1999)針對油性室內用塗料所導出的半經驗模式。Guo et al. (1999)的研究中利用兩種方法，第一種方法是利用已經發展出的二個質傳模式以及二個重要的參數，分別為 TVOCs 的總蒸汽壓以及平均莫耳重。

第一個引用的質傳模式為 VB 模式(Tichenor et al., 1993)，如式(2-35)

$$E = k_m (C_{vo} \frac{M_T}{M_{T0}} - C) \text{-----2-35}$$

$k_m$ ：TVOCs 的氣相質傳係數(m/hr)

$C_{vo}$ ：基於 TVOCs 的總蒸汽壓所得之初始空氣/來源介面之 TVOC 濃度。(mg/m<sup>3</sup>)

$M_T$ ：殘留在來源的 TVOC 量(mg/m<sup>2</sup>)

$M_{T0}$ ：使用的 TVOC 量(mg/m<sup>2</sup>)

$C$ ：空氣中之 TVOC 濃度(mg/m<sup>3</sup>)

第二個引用的質傳模式為修改過的 VBX 模式(Tichenoretal., 1993)，如式(2-36)

$$E_i = k_{mi} (C_{vi} \frac{M_i \bar{m}}{M_T m_i} - C_i) \text{-----2-36}$$

$E_i$ ：物質 i 的排放因子(mg/m<sup>2</sup>·h<sup>-1</sup>)

$k_{mi}$ ：物質 i 的氣相質傳係數(m/hr)

$C_{vi}$ ：基於物質 i 的蒸汽壓所得之空氣/來源介面之濃度。(mg/m<sup>3</sup>)

$M_i$ ：物質 i 殘留在來源的量(mg/m<sup>2</sup>)

$\bar{m}$ ：有機溶劑之平均莫耳重(g/mole)

$m_i$ ：物質 i 的莫耳重(g/mole)

$C_i$  : 物質 i 在空氣中的濃度 ( $mg/m^3$ )

其中,  $\frac{M_i \bar{m}}{M_T m_i}$  為物質 i 在混合溶劑中的莫耳含量。參考 Guo et

al. (1999) 將  $C_{vo}$  及  $C_{vi}$  以蒸汽壓及莫耳重表示

$$C_{vo} = 10^3 \frac{P_0 \bar{m}}{760 v_m} C_{vo} \text{-----2-37}$$

$$C_{vi} = 10^3 \frac{P_i \bar{m}_i}{760 v_m} \text{-----2-38}$$

$P_0$  : TVOCs 之總蒸汽壓 (mm-Hg)

$P_i$  : 單一物質 i 之蒸汽壓 (mm-Hg)

$v_m$  : 一莫耳氣體在一大氣壓下之體積 (在 23°C 下,  $v_m$  等於  $0.0243 m^3$ )

將式(2-37)、(2-38)代入式(2-34)、(2-35)可得

$$E = k_m (1.32 P_0 \frac{\bar{m}}{v_m} \frac{M_T}{M_{T0}} - C) \text{-----2-39}$$

$$E = k_{mi} (1.32 P_i \frac{\bar{m}}{v_m} \frac{M_i}{M_T} - C_i) \text{-----2-40}$$

上述公式相關參數可以利用物質的特性計算

$$M_{T0} = \theta dy_0 \text{-----2-41}$$

$$M_{i0} = \theta dy_i \text{-----2-42}$$

$\theta$  : 濕膜厚度 (m)

$d$  : 產品密度 ( $g/m^3$ )

$y_0$  : 產品中 TVOC 含量 (mg/g)

$y_i$  : 物質 i 在產品中的含量 (mg/g)

第二種方法則是利用最簡單的一階衰減模式以及二個主要參數  $E_0$  及  $k$  進行計算, 並假設初始濃度為 0, 則可得到式(2-43)

$$E_0 = 1.32 k_m P_0 \frac{\bar{m}}{v_m} \text{-----2-43}$$

$$E_{0i} = 1.32 k_{mi} P_i \frac{\bar{m}}{v_m} \frac{M_{i0}}{M_{T0}} \text{-----2-44}$$

其中  $\frac{M_{i0}}{M_{T0}} = \frac{y_i}{y_0}$  代入式(2-44)可得

$$E = 1.32k_m P_i \frac{\bar{m} y_i}{v_m y_0} \text{-----} 2-45$$

k 值可利用第一種方法的求得，故一階衰減模式的衰減係數可以表示為

$$k = \frac{E_0}{M_{T0}} \text{-----} 2-46$$

將式(2-46)代入式(2-41)可得 TVOC、單一種 VOC 物質之衰減係數如式(2-47)、(2-48)所示，

$$k = \frac{E_0}{\theta dy_0} \text{-----} 2-47$$

$$k_i = \frac{E_{0i}}{\theta dy_i} \text{-----} 2-48$$

有關氣相質傳係數的計算則可以利用如式(2-74)估算

$$k_m = 0.33DL_c^{-1/3} \left( \frac{vQ}{\mu} \right)^{2/3} \text{-----} 2-49$$

D：VOC 在空氣中的擴散( $m^2/hr$ )

Lc：來源的特徵長度(=來源面積的平方根)(m)

V：橫越來源的空氣速度(m/hr)

Q：空氣的密度( $g/m^3$ )

$\mu$ ：空氣的黏滯係數( $g/hr/m$ )

#### (4) 濕性塗料應用於多孔隙基質模式

Yang et al. (2001)針對吸附性材質上應用濕性建材—塗料進行模擬計算，除引用一般常用在模擬擴散的 VB 模式外，並考慮內部擴散機制。該模式假設如下：

1. 假設使用塗料量小，且每層(包含塗料、底質、空氣)濃度分布均勻。
2. 假設微觀觀點塗料及基質為均一狀態，並定義一有效 VOC 質傳擴散係數。
3. 排放過程中，VOCs 在材料-空氣介面間處於熱平衡，且只在此處發生揮發。
4. VOC 之濃度梯度為唯一質傳驅動力。
5. 材料與空氣間的質傳擴散係數相當小，因此忽略排放所產生的生成熱或釋放熱。
6. 忽略 VOC 對空氣流場的影響。

7. 不考慮化學反應。

A. 塗料區域(material film)

應用 Fick' s Law 解釋發生在塗佈層中短暫的 VOC 擴散過程

$$\frac{\partial C_m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_m \frac{\partial C_m}{\partial x_j} \right) \text{-----2-50}$$

其中， $\tau$ ：時間

$C_m$ ：塗料中的濃度

$D_m$ ：塗料內的質傳係數

對於濕性材料-基質之 VOC 系統而言， $D_m$  視為熱反應過程係數，可以利用 Arrhenius-type equation 來解釋

$$D_m(C_m T) = D(C_m) \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \text{-----2-51}$$

其中  $E_d$  介於 4~12 (Kcal/mole)，視氣體聚合物種類決定。

T：溫度

如果  $C_m / C_{m,0}$  非趨近於 0，通常可利用 Third-power empirical equation 求得塗佈層中 VOC 濃度與  $D_m$  的關係。

$$D(C_m) = D_0 \left( \frac{C_m}{C_{m,0}} \right)^3 \text{-----2-52}$$

B. 基質(substrate)

使用連續模型及 Fick' s law 來表示的基質中的 VOC 擴散，可以表示如下列形式

$$\frac{\partial C_s}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_s \frac{\partial C_s}{\partial x_j} \right) \text{-----2-53}$$

其中  $C_s$ ：基質中的濃度

$D_s$ ：基質內的擴散係數

由於在基質中 VOC 的濃度相當小，因此將在基質中的擴散係數  $D_s$  與 VOC 濃度的影響忽略，而將另一影響參數溫度表示成式 (2-54)

$$D_s = D_{s,0} \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \text{-----2-54}$$

而在基質中任意位置 VOC 流動可以表示如式(2-55)

$$\text{VOC Flux: } q = -D_s \frac{\partial C_s}{\partial x_j} \text{-----2-55}$$

因應基質的質傳係數  $D_s$  為一小值，因此在進行數值分析需要良好網格化技巧，因此發展出如式(2-56)的吸附模式，並假設該吸附模式為線性模式，連接該時間點  $\tau_n$  之 VOC 吸附速率及過去時間  $\tau_{n-}$  的吸附影響。

$$q(\tau_n) = x_0 C_{ms}(\tau_n) + \tilde{q}(\tau_{n-}) \text{-----2-56}$$

### C. 塗布材料-空氣界面(material-air interface)

利用 Henry' s Law 描述塗料與空氣間的平衡狀態， $C_m$  代表揮發性溶解物在溶劑中的含量濃度， $C_a$  代表氣相狀態的溶解物濃度。

$$C_m = K_{ma} C_a \text{-----2-57}$$

其中  $K_{ma}$  為無因次之 partition 係數

### D. 空氣(air)

在描述物質與空氣間邊界層的 VOC 傳遞現象，對於牛頓流體而言，可以利用下列方程式表示：

$$\text{連續方程：} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \text{-----2-58}$$

動量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_j} - \rho g_{i\beta} (T - T_{ref}), i = 1, 2, 3 \dots$$

-----2-59

能量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{S_r}{c_p} \text{-----2-60}$$

氣態 VOC 傳遞方程式：

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho C_a) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C_a) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial C_a}{\partial x_j} \right) + \rho S \text{-----2-61}$$

### E. 邊界條件 (boundary conditions)、初始條件 (initial conditions)：

$$C_{a,inlet} = 0 \text{ (空氣進氣側)}$$

$$-D_m \frac{\partial C_m}{\partial y} = -D_a \frac{\partial C_a}{\partial y} \text{ (材料與空氣介面處)}$$

$$-D_m \frac{\partial C_m}{\partial y} = -D_s \frac{\partial C_s}{\partial y} \text{ (材料與基質介面處)}$$

於薄膜、基材介面處  $C_m = C_s$

於空氣中， $C_{a,0} = 0$

於塗料薄膜處  $C_{m,0} = C_{l,0} / \alpha$ ，其中  $\alpha$  為液態薄膜遭基質吸附體積比例。

於基質中， $C_{s,0} = 0$

將以上邊界條件及初始條件代入，可得數值模式：

$$E = \frac{h_c C_{m,0}}{K_{ma}(r_1 - r_2)} \left[ (r_1 + N)e^{-r_1 t} - (r_2 + N)e^{-r_2 t} \right] \text{-----2-62}$$

$$\text{其中， } r_{1,2} = 0.5 \left\{ - \left[ N + Lh_c + \frac{h_c}{K_{ma} \delta} \right] \pm \left[ \left( N + Lh_c + \frac{h_c}{K_{ma} \delta} \right)^2 - \frac{4NLh_c}{K_{ma} \delta} \right]^{0.5} \right\}$$

-----2-63

$$\delta = \frac{1000m}{\rho_1 A_s \alpha} \text{-----2-64}$$

該模式提出模擬內部擴散機制的結果，可改進 VB 模式因缺少內部擴散機制假設，導致與實際實驗結果在後段的排放比較有相當大的差異。相較之下，在逸散過程後段有相當趨近的趨勢，進而減低誤差。依據該文獻試驗佐證，判斷於長時間逸散的主導機制應為擴散。針對排放量值的分析，在剛開始的四個小時內時，大約有 63% 的 VOCs 排放，而大約有 5% 擴散進入基質。而後，逸散以及擴散量逐漸緩慢地增加，大約在 24 小時時，VOCs 逸散量達 78.1%，擴散入底質為 6.1%，保持在材料層約為 15.8%。

## 第二節 小結

揮發性有機化合物逸散機制，主要類型有經驗模式及物理模式，兩類逸散模式具有個別優劣勢。以經驗模式而言試驗所費不貲，且所得實測數據僅適用於該環境條件下之逸散歷時行為，不同試驗環境條件轉換不易，且較缺乏理論基礎(因其逸散模式係根據實測數據所得)，惟優勢在於所得資料係屬實測結果可信度較高；就物理模式而言，逸散機制及學理考量周全，對於不同試驗環境之逸散歷時行為，則採用各建材如擴散係數、蒸氣壓、莫耳分子重或分配係數等基本物理或化學性質參數，藉以反映不同測試環境條件差異，惟各種模式所需參數不同且量測不易(甚至無法測得)，從減少試驗量觀點亦未必盡佔優勢，所得推估結果仍

需實測數據結果佐證。

綜合上述文獻回顧及理論探討，本研究將以獲頒本部健康綠建材標章產品之塗料或室內裝修常用之黏著劑等濕式建材優先選樣抽測，以小尺寸環控箱模擬建築空間依 ASTM 5116-06 及本所【室內建材揮發性有機逸散物質檢測標準試驗方法】MOIS901014 試驗方法規範之溫度、濕度、通風換氣率及裝修負荷率等氣候、環境條件控制，對建材進行危害物質之定性定量分析並將數據採樣蒐集時間延長至 96 小時，俾利探討 48 小時以後逸散行為，做為逸散模式選擇及佐證；另配合本所歷年累積相當數量之實測數據，可提供相關研究建置之建材逸散模擬軟體資料庫使用。

## 第三章 檢測儀器設備與試驗方法

### 第一節 量測原理及設備介紹

#### 一、揮發性有機逸散物標準檢測試驗法—小型環控箱法分析原理

本研究用於評估室內裝修使用再生綠建材之揮發性有機物質逸散量，主要採用小型環控箱測試法；利用小型環境控制箱模擬室內環境條件，將受測建材放入，建材中之揮發性有機物質會於環控箱內持續逸散，再以含有 Carbotrap 及 Carboxen 1000/1003 三種不同吸附劑之吸附管予以定流量捕集濃縮，經熱脫附（Thermal Desorption）裝置熱脫附後注入氣相層析質譜儀（GC/MS）或氣相層析儀（GC/FID），進行揮發性有機物質的定性與定量分析。

#### 二、檢測系統

本研究所採用之揮發性有機物質標準測試方法乃參考 ASTM (American Society for Testing and Material) D5116-06 所規範之小型環控箱測試法、加拿大國家實驗室所提出之濕式建材測試法<sup>11</sup>，及內政部建築研究所建立之室內建材有機逸散物質標準試驗方法及程序<sup>12</sup>等。其原理主要是將待測建材樣品放入可控制橫溫恆濕之環境控制箱中，並針對溫度、濕度、換氣率及風速等因子加以控制，然後以一定流量之採樣 Pump 將箱體內的待測污染物抽出，並經熱脫附儀器後，再以特定分析儀器對該污染物進行定性及定量的分析研究。

本測試系統包括下列四大部分，分別是環境控制箱（Test Chamber）、清淨空氣產生系統（Clean Air Generation System）、環境監測及控制系統（Monitoring and Control Systems）及採樣與分析設備（Sample Collection and Analysis Equipment）等。其系統架構概要如圖 3-1.1 所示：

<sup>11</sup> J.P. Zhu, R.J. Magee, J.S. Zhang and C.Y. Shaw, 1999, "A Small Scale Chamber Test Method for Measuring Volatile Organic Compound Emissions from Wet Building Materials" CMEIAQ Final report 1.3.

<sup>12</sup> 江哲銘、李俊璋，2000，室內建材揮發性有機物質標準檢測方法及程序之研究，內政部建研所。

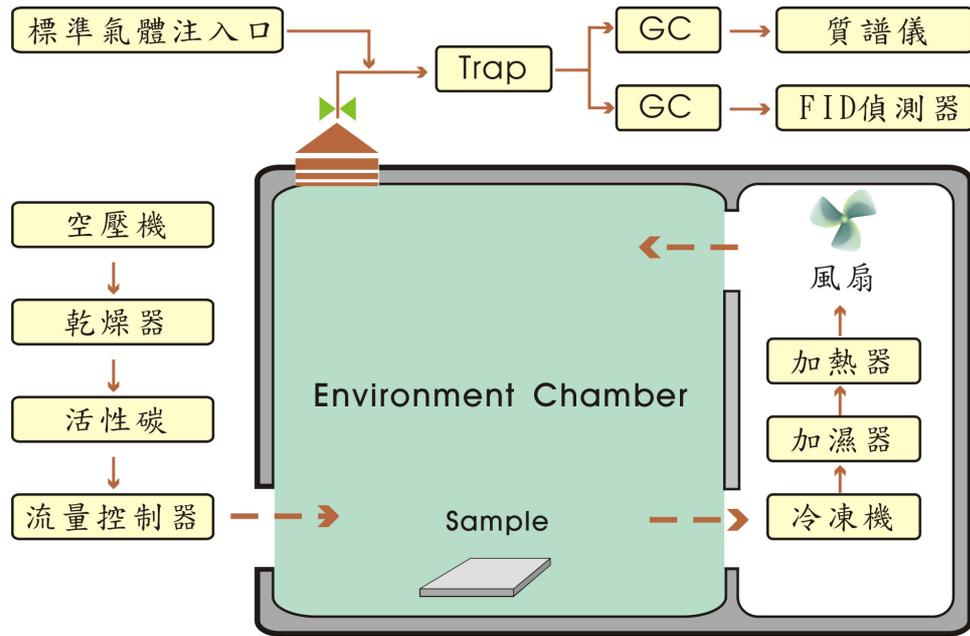


圖 3.1 建材揮發性有機物質逸散研究之系統簡圖

## 第二節 建材中甲醛逸散檢測方法—小型環控箱測試方法

### 一、方法概要

本方法主要用於室內建材中甲醛(Formaldehyde)之逸散評估；利用小型環境控制箱模擬室內環境條件，將欲測試的建材放入，其所含之甲醛會於環控箱內慢慢逸散至穩定狀態，再以 XAD-2(coated with 2-HMP (2-Hydroxymethyl piperidine))，連接採樣幫浦以流量 100 mL 進行採樣，採樣完成後經 1mL 甲苯脫附後，以 GC/FID 進行分析。

### 二、適用範圍

本方法適用於分析建材中甲醛逸散評估。樣品氣體體積為 10L 時，有效分析濃度範圍在 0.24~16 ppm(0.3~20 mg / m<sup>3</sup>)。

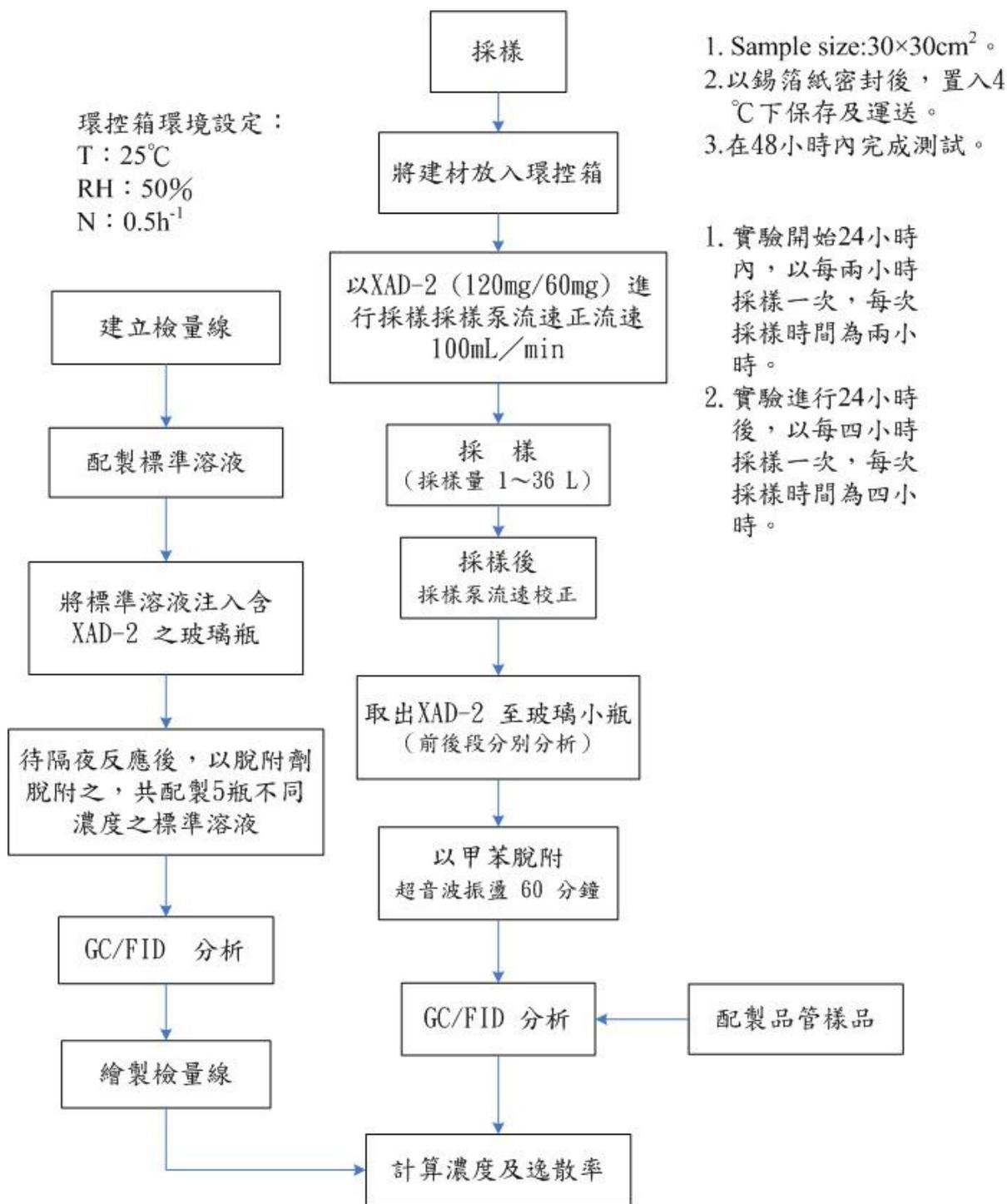


圖 3.2 甲醛採樣及分析流程圖

資料來源：本所【室內建材揮發性有機逸散物質檢測標準試驗方法】  
MOIS901014 試驗方法

### 第三節 建材中揮發性有機物質逸散檢測方法—小型環控箱測試方法

#### 一、 測試原理：

本方法主要用於室內建材中揮發性有機物質（Volatile Organic Compounds, VOCs）之逸散評估；利用小型環境控制箱模擬室內環境條件，將欲測試的建材放入，建材中之揮發性有機物質會於環控箱內慢慢逸散至穩定狀態，再以含 Carbotrap 及 Carboxen1000/1003 三種不同吸附劑之吸附管予以定流量捕集濃縮，經熱脫附（Thermal Desorption）裝置熱脫附後注入氣相層析質譜儀（GC/MS）及氣相層析儀/火焰離子偵測器（GC/FID），分別進行揮發性有機物質的定性與定量分析。

#### 二、 適用範圍

本方法適用於常見室內建材中揮發性有機物質之逸散濃度測試，以計算其逸散率與衰減情形。適用範圍受限於樣品收集時揮發性有機化合物在吸附管可能的穿透效應，檢測濃度範圍將在後續實驗中訂定。

#### 三、 干擾

(一)建材所含揮發性有機物質於建材製造完成後慢慢逸散於空氣中，為精準的評估VOCs的逸散量，須於建材製造完成後一週內進行採樣分析，以避免儲放過程中因有機物質逸散或受其他污染源污染而產生誤差。

(二)建材樣品於採樣及運送過程中，須避免接觸其他有機物質污染源，而使建材對特定有機物質產生吸附或脫附之現象，對於分析結果產生干擾；樣本在採樣及運送過程中須置放於4°C之密閉空間下進行保存。

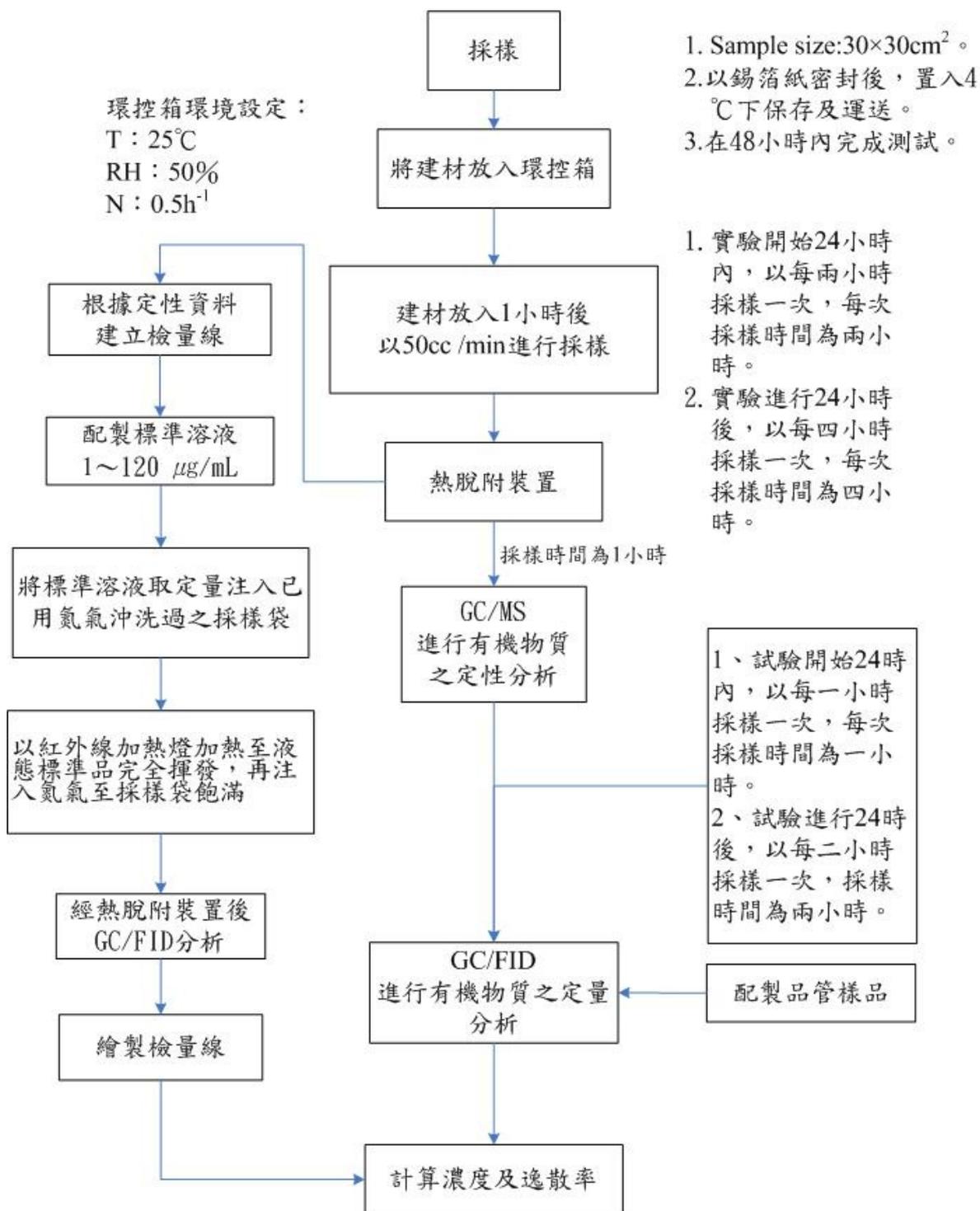


圖 3.3 揮發性有機物質分析流程圖

資料來源：本所【室內建材揮發性有機逸散物質檢測標準試驗方法】  
MOIS901014 試驗方法

#### 第四節 抽測建材選樣原則

本研究係以健康綠建材—塗料類為主要研究對象，並參考勞委會勞工安全衛生研究所提出之塗料型式分類，經檢索綠建材標章資料庫現行有效標章之濕式建材類型，因部分市售具知名度品牌另送其他認證試驗機構進行測試，本所性能試驗中心固無相關逸散檢測資料，爰優先選取該廠牌之乳膠漆、水泥漆各 1 種產品檢測外，另選取 1 種雖非綠建材標章認證，但室內裝修實務常用之水性 PVAC 接著劑—南寶樹脂(俗稱白膠)等建材進行 96 小時逸散檢測試驗，俾利驗證本所性能試驗中心之 48 小時檢測數據可符合長時間逸散推估需求，並可納供另案研究開發之建材逸散模擬軟體資料庫使用，相關建材明細詳如表 3.1

表 3.1 建材分析項目表

序號	分類	編號	建材名稱	備註
1	乳膠漆	E-1	Stolatex 3000 乳膠漆	既有 48 小時檢測 成果
2		E-2	金典乳膠漆	既有 48 小時檢測 成果
3		E-3	立邦淨味乳膠 漆	
4	水泥漆	C-1	永記 860 水泥 漆(平光)	既有 48 小時檢測 成果
5		C-2	得利水性水泥 漆(平光)	
6	接著劑	A-1	南寶樹脂	



## 第四章 建材檢測結果與逸散模式分析

本研究依照前節所述之濕式建材類別，先進行塗料檢測取得實測數據，再採用逸散排放模式探討並比對實測及模擬結果，依據實測與模擬結果除比較預測峰值、預測時間誤差外，進行 NMSE 值(Normalized mean square error)計算，據以評價預測數值與實測數據符合程度。

本研究採用一階衰減模式配合質量平衡方程式模擬逸散行為，有關一階衰減模式需利用實驗的數據先行求取模式參數，一般常用的 excel 軟體僅內建線性、多項式及簡單指數型式等迴歸工具，對於本研究並不適用，故以繪圖專用程式針對實測數值進行 curve-fitting 求解  $R_0$  及  $k$  之後，再行代入式(4-1)、(4-2)，進行模擬結果與實測數值 NMSE 計算。

$$R = R_0 e^{-kt} \text{ -----4-1}$$

$$C(t) = \frac{AR_0(e^{-kt} - e^{-Nt})}{V(N-k)} \text{ -----4-2}$$

### 第一節 乳膠漆

乳膠漆之實測數據與一階衰減模擬結果除濃度峰值、逸散速率之出現時間尚屬吻合，惟濃度最大峰值模擬結果均產生約 30~45%不等的低估情形，但是在逸散速率部分的模擬成果較佳，另檢視逸散濃度及逸散速率之 NMSE，普遍以逸散濃度之 NMSE 值變動較大，整體評估以 E2 的模擬成果較佳(符合美國環保署 WPEM GUIDE 建議值 0.25 以內)，其誤差成因應為揮發性有機化合物逸散初期劇烈震盪所導致，後續多出現 2 次逸散尖峰，如 E-3 後續甚至出現達 4 次逸散尖峰，至 24 小時以後之模擬結果與實測數據誤差則相對較小。逸散濃度及逸散速率實測與模擬數據比較分別如表 4.1、4.2 所示，逸散歷時曲線圖如圖 4.1~4.4 所示。

表 4.1 乳膠漆(E-1)模式模擬與實測數據比較表

測試條件：25°C RH=50% ACH=0.5 h <sup>-1</sup>		R <sub>0</sub>	k	峰值	峰值出現時間 (hr)	誤差(%)	NMSE
濃度 Conc.(μg/m <sup>3</sup> )	實測	1452.26	0.102	1419	3	-45.5	0.351
	模擬			773.91	4		
逸散速率 ER (Emission Rate , μg/m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	實測	2637.49	0.118	2488	1	-5.8	0.104
	模擬			2344.85	1		

(本研究整理)

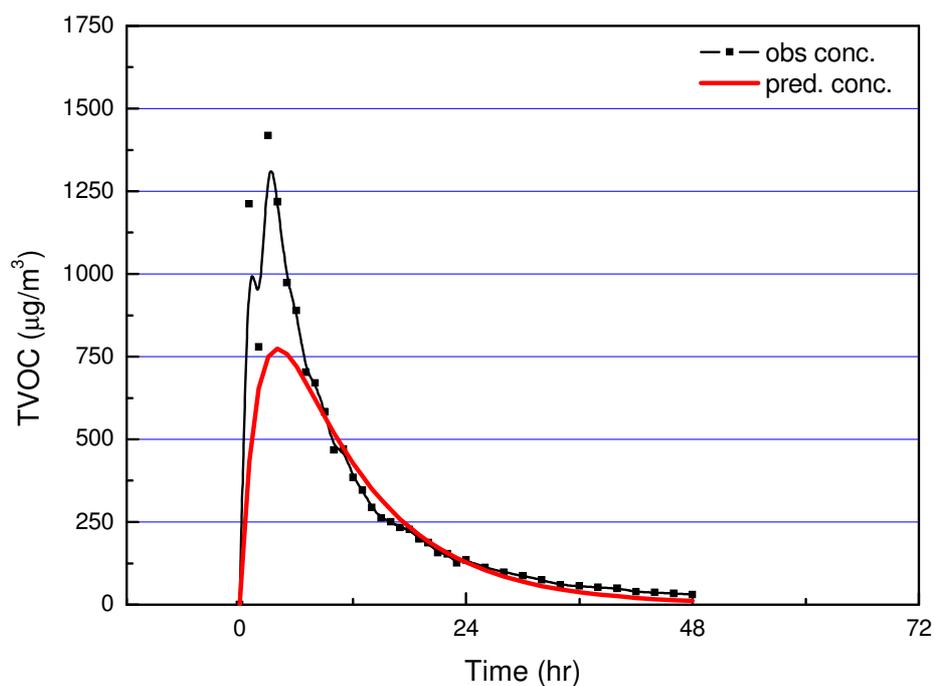


圖 4.1 乳膠漆(E-1)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較

(本研究整理)

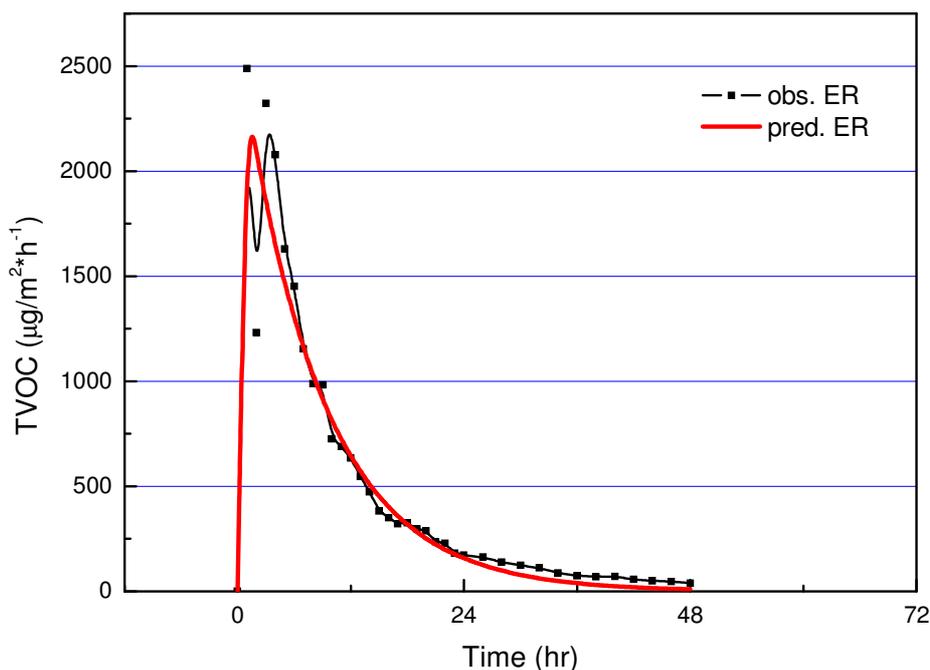


圖 4.2 乳膠漆(E-1)TVOC 逸散速率實測數據與模式模擬結果比較

(本研究整理)

表 4.2 乳膠漆(E-2)模式模擬與實測數據比較表

測試條件：25°C RH=50% ACH=0.5 h <sup>-1</sup>		R <sub>0</sub>	k	峰值	峰值出現時間 (hr)	誤差(%)	NMSE
濃度 Conc.(µg / m <sup>3</sup> )	實測	135.238	0.266	151	2	-30.8	0.06
	模擬			104.44	3		
逸散速率 ER (Emission Rate , µg / m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	實測	2637.491	0.118	363	1	-5.8	0.04
	模擬			341.83	1		

(本研究整理)

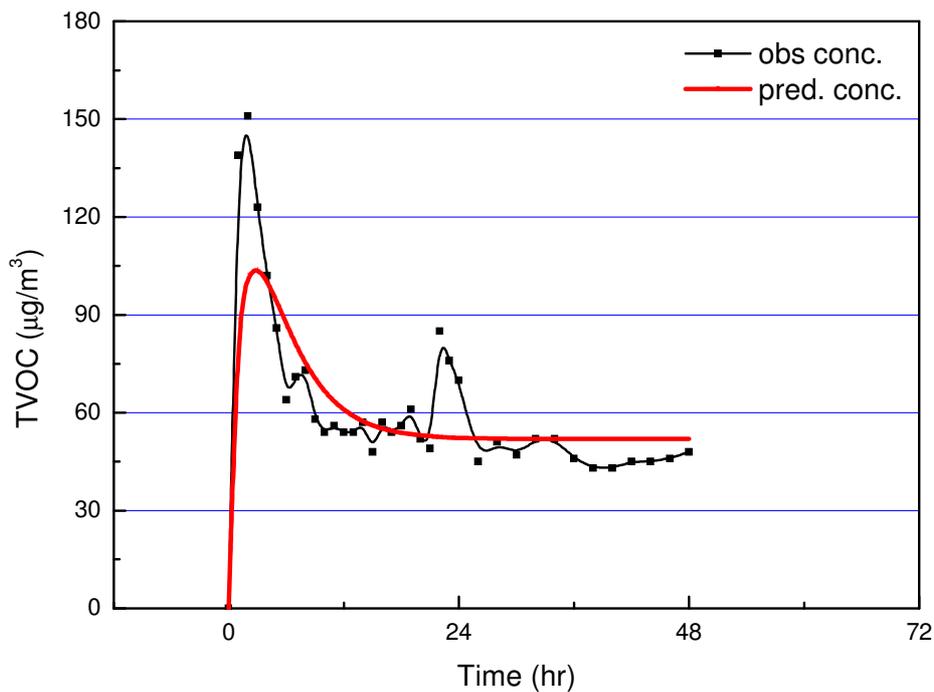


圖 4.3 乳膠漆(E-2)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較

(本研究整理)

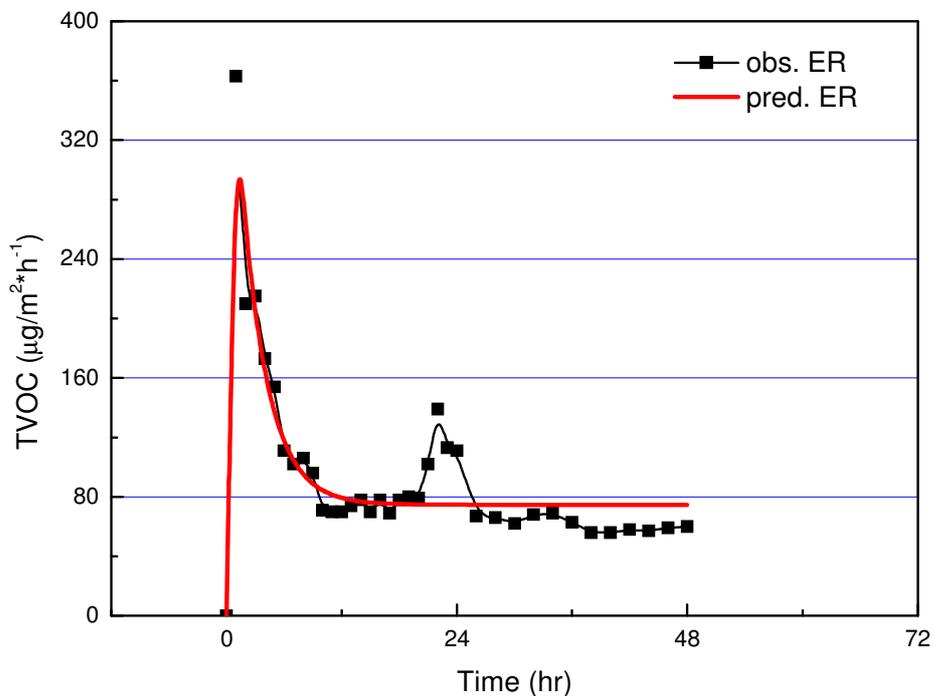


圖 4.4 乳膠漆(E-2)TVOC 逸散速率實測數據與模式模擬結果比較

(本研究整理)

值得注意的是乳膠漆(E-3)的逸散濃度與逸散速率抽測結果，整體來看係3項乳膠漆塗料當中，無論是初期逸散濃度或逸散速率均為最低，試驗全程之逸散速率亦能符合健康綠建材評定基準，惟其逸散行為並無明顯趨勢呈現不穩定跳動情形，且有緩步增加趨勢，與其他乳膠漆建材逸散行為明顯有異。經檢視試驗數據並初步迴歸後，判定不適用一階衰減模式，究係試驗手法誤差或建材成份特性所導致尚待釐清。

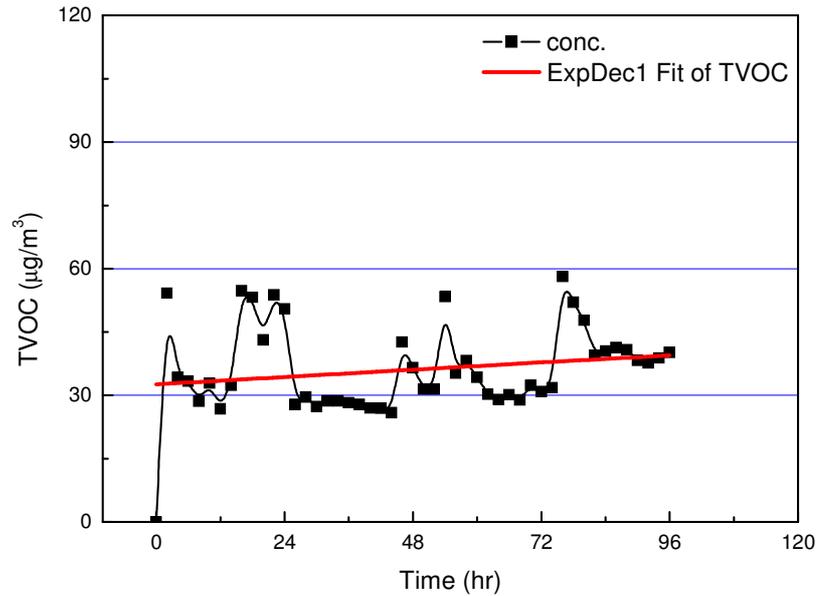


圖 4.5 乳膠漆(E-3)TVOC 逸散濃度實測歷時情形

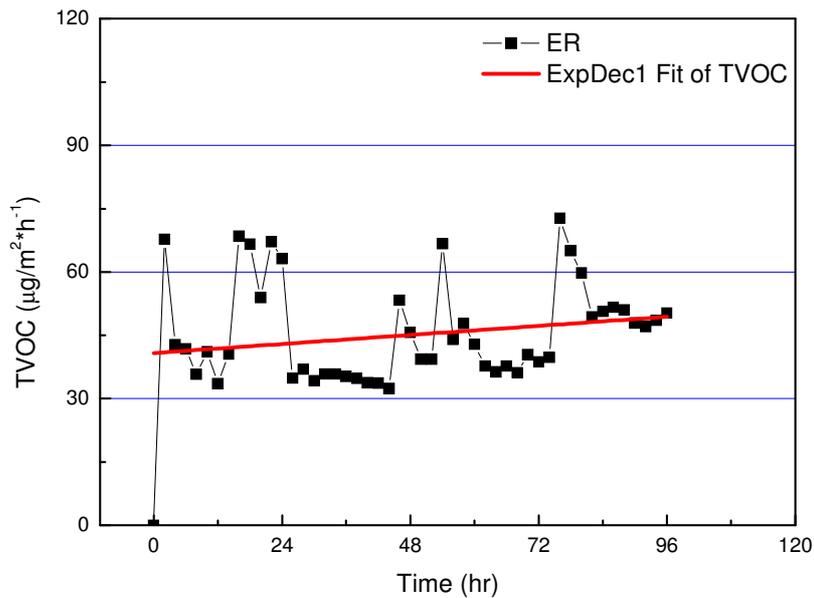


圖 4.6 乳膠漆(E-3)TVOC 逸散速率實測歷時情形

## 第二節 水性水泥漆

經比較實測數據與模擬結果，除濃度峰值誤差較大甚至在(C-2)塗料之逸散速率峰值產生高估達 3.8 倍情形外，經檢視 NMSE 計算結果，推估模式整體逸散濃度及逸散速率模擬結果，符合美國環保署 WPEM GUIDE 建議值 0.25 以內，顯示水性水泥漆較乳膠漆更為適用一階衰減逸散模式。相關成果如表 4.3~4.4 所示，逸散濃度及逸散速率實測數據與模擬成果比較詳如圖 4.7~4.10。

**表 4.3 水泥漆(C-1)樣本模式模擬與實測數據比較表**

測試條件：25°C RH=50% ACH=0.5 h <sup>-1</sup>		R <sub>0</sub>	k	峰值	峰值出現時間 (hr)	誤差 (%)	NMSE
濃度 Conc. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	實測	291.63	0.049	307	1	-29.8	0.09
	模擬			215.54	5		
逸散速率 ER (Emission Rate, $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ )	實測	412.25	0.044	758	1	-43.5	0.06
	模擬			428.06	1		

**表 4.4 水泥漆(C-2)樣本模式模擬與實測數據比較表**

測試條件：25°C RH=50% ACH=0.5 h <sup>-1</sup>		R <sub>0</sub>	k	峰值	峰值出現時間 (hr)	誤差 (%)	NMSE
濃度 Conc. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	實測	166.83	0.441	103.86	3	-15.9	0.11
	模擬			87.36	2		
逸散速率 ER (Emission Rate, $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ )	實測	1560.89	0.975	129.83	3	+387.7	3.48
	模擬			633.12	1		

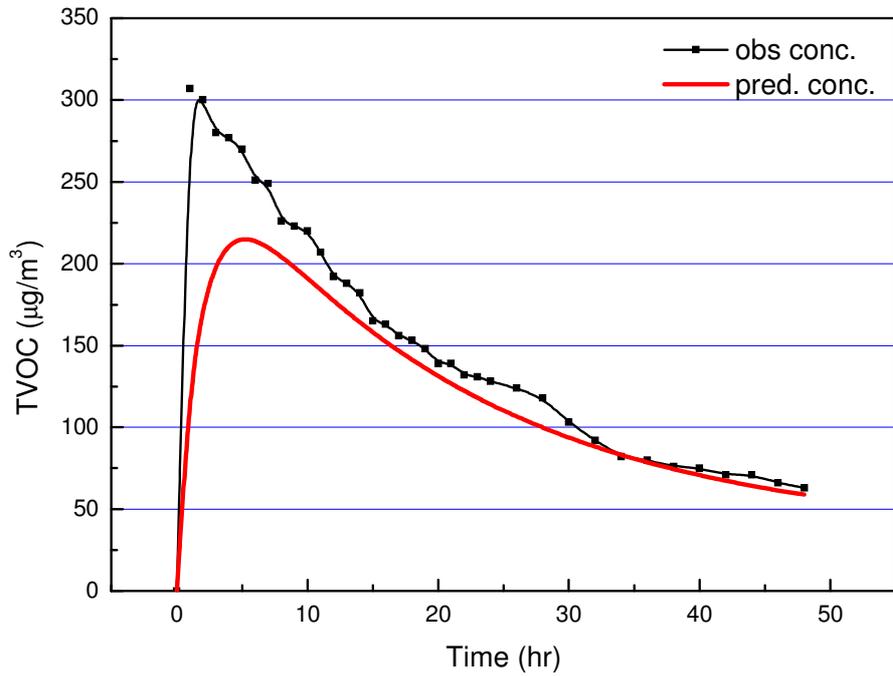


圖 4.7 水泥漆(C-1)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較  
(本研究整理)

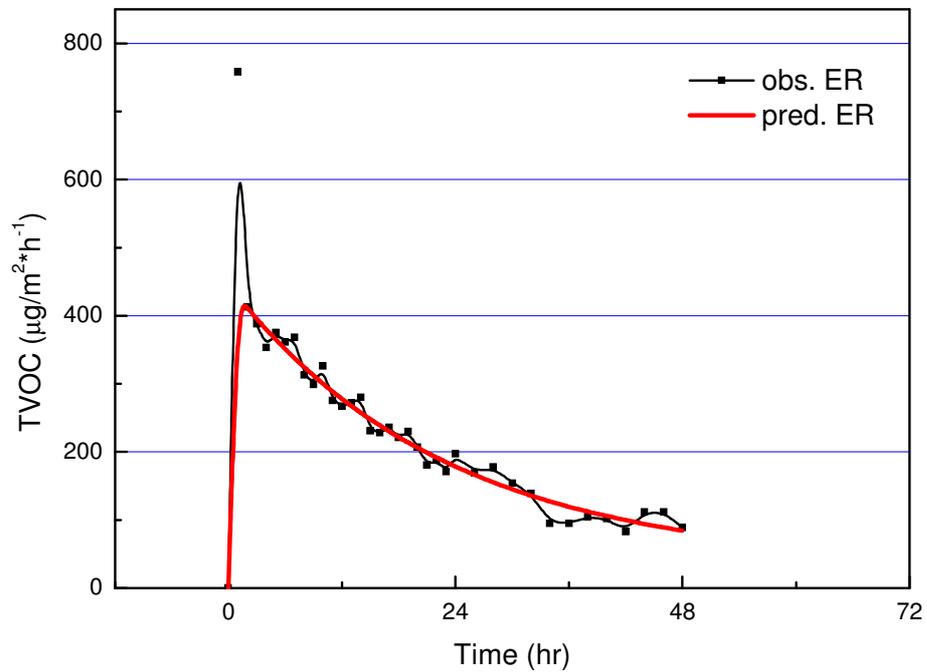


圖 4.8 水泥漆(C-1)TVOC 逸散速率實測數據與模式模擬結果比較  
(本研究整理)

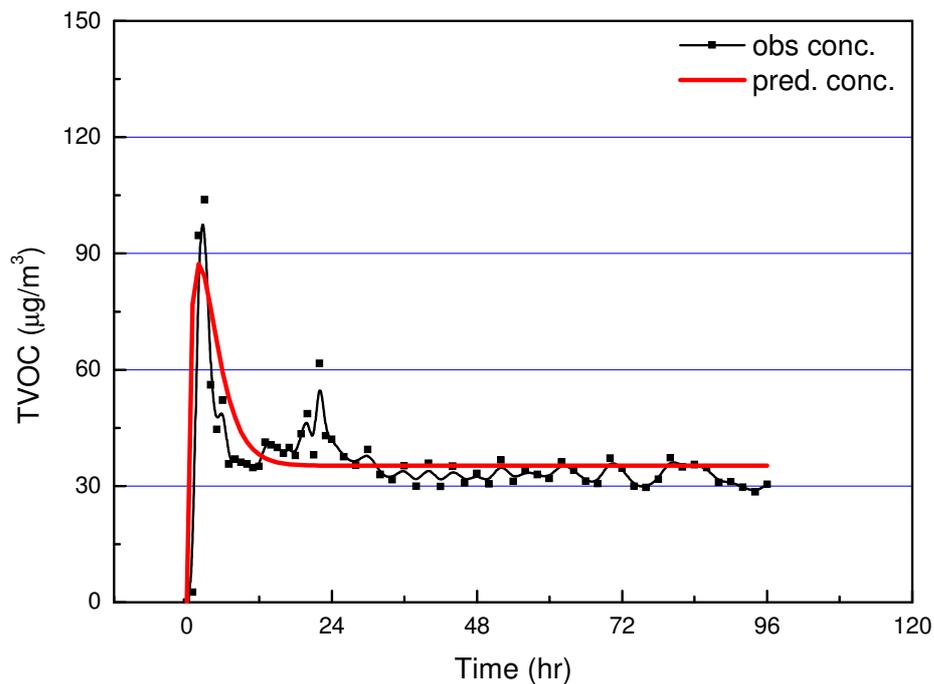


圖 4.9 水泥漆(C-2)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較

(本研究整理)

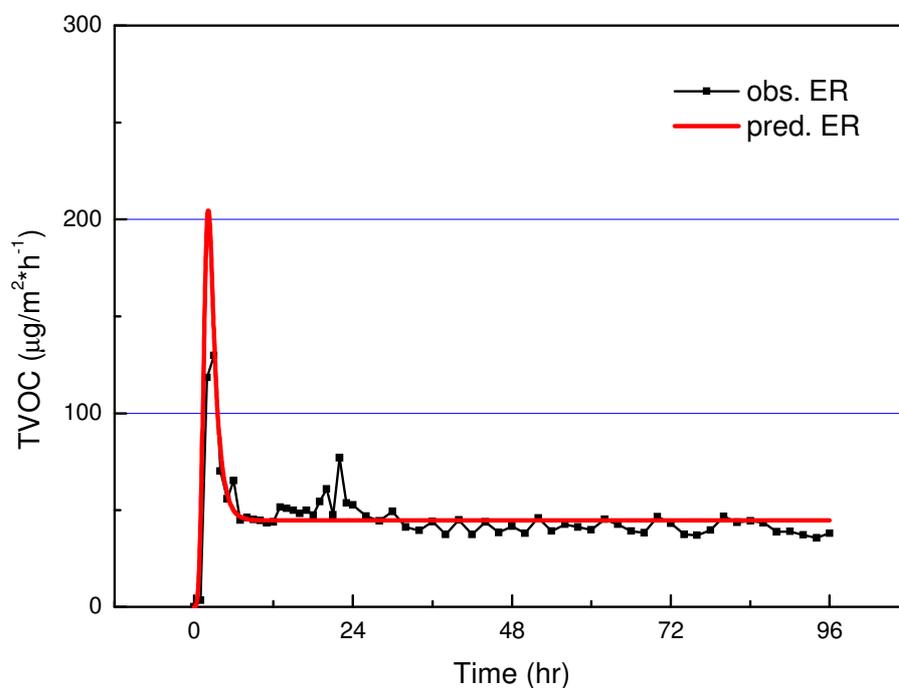


圖 4.10 水泥漆(C-2)TVOC 逸散速率實測數據與模式模擬結果比較

(本研究整理)

### 第三節 接著劑

本研究為使建材逸散模擬軟體資料庫內容更臻完備，故增加選取 1 件非綠建材標章建材，惟室內裝修實務上慣用之接著劑—白膠進行檢測，併初步探討接著劑是否同樣適用相同模式進行模擬。經檢視模擬結果在模擬逸散速率峰值結果相當準確，僅低估 3.4%，但出現時間與實測結果有極大落差，與前述各節試驗結果比較，濕式建材明顯受塗佈操作手法、塗佈劑量等因素影響，試驗變異性較大，並出現濕式建材逸散常見 2 次尖峰逸散型態。由蒐集文獻瞭解濕式建材表面凝固薄膜強度與揮發性氣體蒸氣壓之間，決定後續 2 次尖峰逸散發生時間，本試樣與乳膠漆(E-3)試樣品同樣於 72 小時左右出現 2 次尖峰逸散(不同的是 E-3 在此之前尚有 3 次逸散突增現象)，除預測峰值產生時間有明顯落差外，檢視整體模擬結果及 NMSE 評價，一次衰減模式相當適合採用模擬接著劑逸散行為模式。

表 4.5 接著劑(A-1)樣本模式模擬與實測數據比較表

測試條件：25°C RH=50% ACH=0.5 h <sup>-1</sup>		R <sub>0</sub>	k	峰值	峰值出現時間 (hr)	誤差 (%)	NMSE
濃度 Conc. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	實測	39.99	0.258	52.98	2	-19.9	0.03
	模擬			42.46	2		
逸散速率 ER (Emission Rate, $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ )	實測	49.99	0.258	66.22	2	-3.4	0.03
	模擬			63.98	2		

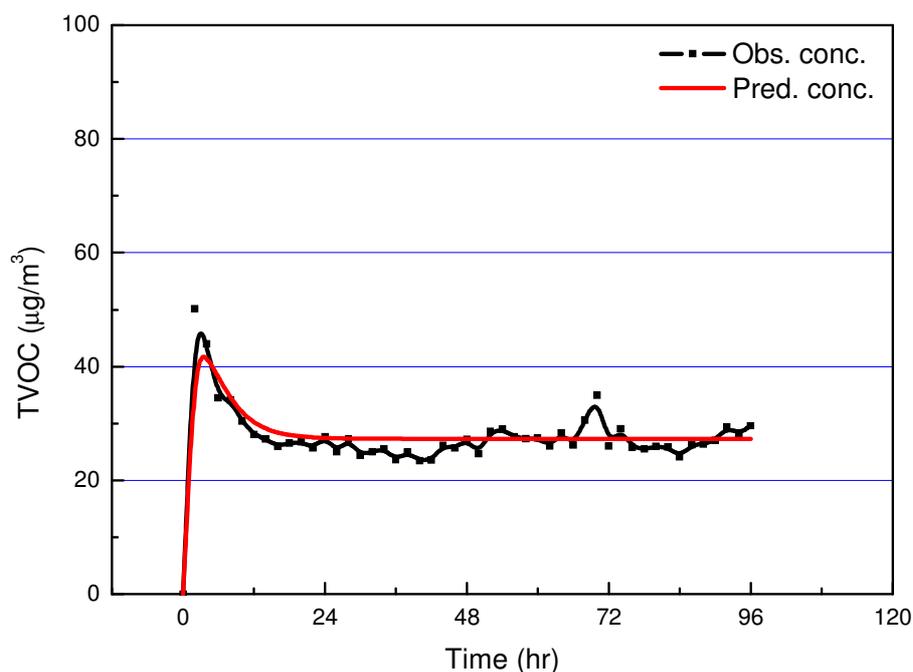


圖 4.11 接著劑(E-1)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較

(本研究整理)

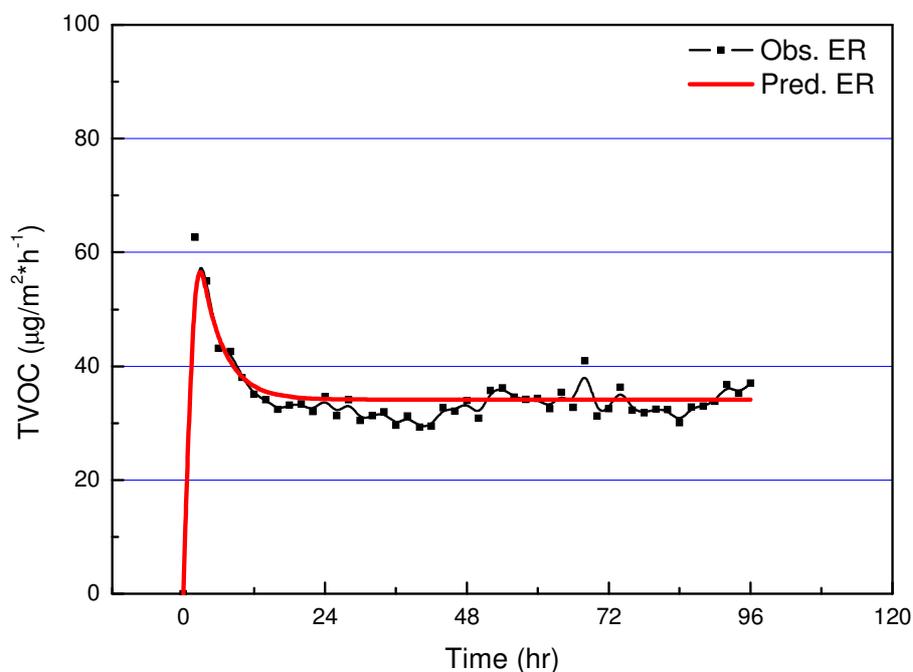


圖 4.12 接著劑(E-1)TVOC 逸散濃度實測數據與模式模擬結果比較

(本研究整理)

## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

- 一、經採用一階衰減模式模擬結果，在 TVOC 逸散濃度、逸散速率峰值方面除發生時間預測近似外，逸散濃度、逸散速率峰值預測誤差普遍較大，根據 NMSE 評估整體 TVOC 逸散濃度、逸散速率模擬成果顯示，以接著劑之模擬成果與逸散行為描述最佳，水泥漆次之，乳膠漆則視個案呈現較大變異性，甚至有 1 筆乳膠漆產品實測結果完全不適用相同方式模擬。
- 二、檢視甲醛逸散濃度及逸散速率檢測結果，經標章認證建材之甲醛逸散量較低，通常於 24 小時以後已達儀器偵測極限，建議 0~2 小時逸散濃度及逸散速率分別採用  $8(\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ 或 } \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ ；2~24 小時採用  $4(\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ 或 } \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$ ，至 24 小時之後可逕取儀器偵測極限值  $2(\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ 或 } \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$  簡化代替進行甲醛逸散資料庫建置。
- 三、本研究進行 2 筆健康綠建材檢測及 1 筆接著劑之 96 小時逸散測試，經檢視試驗結果於 48 小時以後，逸散即趨近定值，全數符合健康綠建材評定基準要求，以本所現有之塗料類健康綠建材 48 小時檢測數據，應可據以建立 48 小時以後之建材逸散模式需求。

### 第二節 建議

建議一、

轉換本所現有健康綠建材逸散檢測資料提供模擬軟體資料庫擴充：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本所歷年業已累積相當數量之健康綠建材逸散檢測資料，可先行提供轉化建材逸散模擬軟體資料庫擴充使用；惟部分市面高市占率塗料品牌，因另送本部認可之綠建材指定試驗室進行檢測，為本所 TVOC 及甲醛檢測數據所無部分，本次研究亦優先抽樣檢測但未臻完備，建議除轉換本所既有建材逸散檢測資料外，應針對另送認可檢驗機構檢

測，而本所現無逸散資料之建材進行補測或逕予數據引用，加強本年度另案開發之建材逸散模擬軟體(測試版)之實用性。

建議二、

建置室內環境空氣品質評估軟體與驗證：中長期建議

主辦機關：行政院環境保護署

協辦機關：內政部建築研究所

室內空氣品質管理法甫經立法院三讀通過，中央主管機關係行政院環境保護署，為因應該法初步規劃由本部負責建築室內環境空氣品質工作項目，建議除進行後續室內環境空氣品質評估軟體開發及驗證工作外，並考量後續納入環保標章產品，俾利民眾初步評估使用。

## 附錄一 審查會議紀錄與回應

### 期初審查會議紀錄及處理情形

審查意見	辦理情形
<p>研究計畫請補充說明相關研究之建材資料庫已完成部分，及敘明本年度擬補充之建材資料庫項目，並清楚說明如何強化軟體應用於總逸散濃度推估與評定最佳入住時間等程式功能之間關係。</p>	<p>研究過程將瞭解該軟體開發功能，並配合軟體資料庫分類方式，並以實測方式進行驗證。</p>
<p>採用數學模式推估揮發性有機化合物逸散濃度衰減，應注意仍需實驗數據佐證，並請考量應用現有實測數據資料之可行性，妥適檢視能否支持本研究持續進行。</p>	<p>遵照審查意見，將增加建材 48 小時以上逸散檢測，佐證採用數學模式之合適性。</p>

期中審查會議紀錄及處理情形

審查意見	辦理情形
建議檢討實驗檢測流程於置入樣品後，是否未經過一段時間之平衡過程隨即進行試驗，導致環控箱試驗初期產生數值跳動情形。	建材逸散試驗係依本所「室內建材揮發性有機逸散物質檢測標準試驗方法」，於建材取樣後以錫箔紙密封於 4°C 下靜置，在 48 小時內完成試驗；健康類綠建材皆依循相同試驗流程進行建材逸散性能評定。
建議延長逸散測試時間並增加樣品抽驗數量，俾利比對水泥漆及乳膠漆之試驗結果差異。	已完成 3 筆 96 小時逸散檢測試驗，各增加 1 筆水泥漆及 2 筆乳膠漆試驗比較差異。
為減少工地現場施工污染，建議增加乾式建材製作、施工及模擬成果比較，俾使國內乾式建材資料庫更為充實。	乾式建材逸散資料去年度業由相關研究建置，本年度係以濕式建材逸散資料庫建置為主。
本研究係選取健康綠建材標章塗料進行抽測，該類塗料之甲醛濃度原已極低(甚至小於偵測極限)，建議僅就 TVOC 部分進行分析即可。	遵照委員意見辦理。
塗料逸散模式如經確立，建議於建材基本資料加註或公告安全使用數量、範圍及逸散所需最短時間，並探討逸散物與空氣接觸面積之關係。	本研究係依本所標準檢測流程，將逸散面積與空間負荷率固定為 0.4 之相同基準下進行，至逸散所需最短時間將配合建材逸散模擬軟體進行試算。
考量室內裝修實務係以同一部位使用多種建材為主，請說明單一建材逸散行為，如何應用推估多種建材複合使用之逸散行為。	經查國外已建置之室內空氣品質模擬程式，有關多種建材複合使用之逸散行為推估，係採用各建材逸散速率乘以使用面積加總方式，將於後續研究比較釐清運算機制。

<p>1.期中報告書 p.27、p.47 如 terpene、partition coefficient 等名詞中譯，請再行確認以符合常用慣例。</p> <p>2.期中報告書 p.12 頁將纖維板、石膏板歸納為外裝材料類，請檢討是否適宜</p> <p>3.參考文獻請增列 2003 陳逸青君等人碩論，俾利相關模式引用與比較。</p>	<p>報告書內容誤繕、名詞中譯不符常用慣例及參考文獻漏列等項，已遵照委員意見修正。</p>
--	---

期末審查會議紀錄及處理情形

審查意見	辦理情形
除針對國內知名品牌或高市佔率產品補測並釐清定義外，建議對於中國大陸生產建材更應選取檢測，以符合公平原則。	感謝委員建議，已釐清修正並補充說明。
報告書 p.47 結論二述及建材甲醛逸散量測試，24 小時以後已達儀器偵測極限，請說明如何檢視分析與對應。	感謝委員意見，已補充敘明
報告書 p.48 建議二室內環境空氣品質評估軟體建置與驗證由環保署主政並納入環保標章產品部分，惟人員、建築配置、換氣排程等係屬建築領域，相關建議請再研酌修正。	感謝委員意見，已修正
有關接著劑第 68 小時逸散濃度、逸散速率之突增異常，請查明原始數據是否有誤；如無錯誤建議再予複測檢核。	有關接著劑第 68 小時逸散突增現象，俟檢視檢測原始數據決定是否再行測試校核。
基於本年度係以塗料類為例，其中第四章第三節所列接著劑部分，請再予斟酌是否保留該節內容。	接著劑因室內裝修實務工作上經常使用，爰納入本研究測試樣品之一
本研究執行深入，惟案例數量較少，建議後續可由彙整資料庫數據，以同類建材之多筆數據交叉比對，再予確立逸散模式特性，應更具實質效益。	案例數量增加、物理模式之材料特性、擴散原理與質傳過程等相關探討納入後續研究。

## 附錄二 乳膠漆 TVOC 歷時逸散濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )、逸散速率( $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ )檢測數據

Time(hr)	E-1		E-2		E-3	
	逸散濃度	逸散速率	逸散濃度	逸散速率	逸散濃度	逸散速率
1	1.212	2.488	0.307	0.758	-	-
2	0.779	1.231	0.3	0.413	54.19	67.73
3	1.419	2.323	0.28	0.388	-	-
4	1.218	2.078	0.277	0.353	34.25	42.81
5	0.974	1.629	0.27	0.375	-	-
6	0.89	1.452	0.251	0.361	33.41	41.77
7	0.703	1.154	0.249	0.368	-	-
8	0.67	0.988	0.226	0.313	28.61	35.76
9	0.583	0.982	0.223	0.299	-	-
10	0.467	0.725	0.22	0.326	32.88	41.09
11	0.47	0.689	0.207	0.275	-	-
12	0.385	0.635	0.192	0.267	26.82	33.53
13	0.346	0.546	0.188	0.272	-	-
14	0.294	0.473	0.182	0.28	32.43	40.54
15	0.262	0.382	0.165	0.231	-	-
16	0.251	0.35	0.163	0.228	54.78	68.48
17	0.233	0.321	0.156	0.236	-	-
18	0.227	0.327	0.153	0.221	53.26	66.57
20	0.198	0.298	0.148	0.23	43.14	53.92
22	0.187	0.287	0.139	0.207	53.76	67.2
24	0.156	0.237	0.139	0.181	50.51	63.14
26	0.153	0.228	0.132	0.188	27.86	34.83
28	0.126	0.181	0.131	0.171	29.58	36.98
30	0.135	0.172	0.128	0.197	27.36	34.2
32	0.112	0.162	0.124	0.169	28.67	35.84
34	0.098	0.138	0.118	0.178	28.65	35.81
36	0.087	0.124	0.103	0.154	28.23	35.29
38	0.075	0.111	0.092	0.139	27.82	34.77
40	0.059	0.086	0.082	0.095	26.99	33.74
42	0.056	0.074	0.08	0.095	26.95	33.69
44	0.052	0.069	0.076	0.105	25.91	32.39
46	0.049	0.07	0.075	0.102	42.63	53.29
48	0.039	0.056	0.071	0.083	36.53	45.66
50	-	-	-	-	31.49	39.36
52	-	-	-	-	31.46	39.33
54	-	-	-	-	53.35	66.69
56	-	-	-	-	35.23	44.04
58	-	-	-	-	38.2	47.75
60	-	-	-	-	34.29	42.86
62	-	-	-	-	30.21	37.76
64	-	-	-	-	29.07	36.33
66	-	-	-	-	30.16	37.7
68	-	-	-	-	28.9	36.12
70	-	-	-	-	32.34	40.43
72	-	-	-	-	30.96	38.7
82	-	-	-	-	39.48	49.35
84	-	-	-	-	40.48	50.61

健康綠建材之揮發性有機化合物逸散模式研究 - 以塗料類為例

86	-	-	-	-	41.28	51.61
88	-	-	-	-	40.81	51.01
90	-	-	-	-	38.29	47.87
92	-	-	-	-	37.67	47.08
94	-	-	-	-	38.83	48.53
96	-	-	-	-	40.22	50.28

**附錄三 水泥漆、接著劑 TVOC 歷時逸散濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )、逸散速率  
( $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ )檢測數據**

Time(hr)	C-1		C-2		A-1	
	逸散濃度	逸散速率	逸散濃度	逸散速率	逸散濃度	逸散速率
1	307	758	2.67	3.33	-	-
2	300	413	94.62	118.27	50.12	62.65
3	280	388	103.86	129.83	-	-
4	277	353	56.09	70.11	43.93	54.91
5	270	375	44.65	55.81	-	-
6	251	361	52.14	65.17	34.5	43.13
7	249	368	35.72	44.65	-	-
8	226	313	36.89	46.11	34.05	42.56
9	223	299	36.09	45.11	-	-
10	220	326	35.68	44.6	30.41	38.01
11	207	275	34.76	43.45	-	-
12	192	267	35.03	43.79	28.06	35.08
13	188	272	41.28	51.6	-	-
14	182	280	40.61	50.76	27.24	34.05
15	165	231	39.88	49.85	-	-
16	163	228	38.52	48.16	25.9251	32.4063 7
17	156	236	39.86	49.83	-	-
18	153	221	37.89	47.36	26.52	33.15
20	148	230	43.48	54.35	26.71	33.39
22	139	207	48.62	60.77	25.64	32.05
24	139	181	38.05	47.56	27.66	34.57
26	132	188	61.61	77.01	25.03	31.29
28	131	171	42.96	53.7	27.24	34.06
30	128	197	42.04	52.55	24.38	30.48
32	124	169	37.48	46.85	25.01	31.26
34	118	178	35.43	44.29	25.56	31.95
36	103	154	39.44	49.31	23.64	29.55
38	92	139	33	41.25	24.96	31.19
40	82	95	31.62	39.52	23.43	29.28
42	80	95	35.23	44.03	23.55	29.44
44	76	105	29.94	37.42	26.14	32.68
46	75	102	35.9	44.88	25.65	32.06
48	71	83	29.88	37.36	27.19	33.98
50	-	-	35.12	43.9	24.68	30.85
52	-	-	30.78	38.47	28.57	35.72
54	-	-	33.21	41.52	28.97	36.21
56	-	-	32.94	41.18	27.65	34.57
58	-	-	31.88	39.85	27.31	34.14
60	-	-	36.17	45.21	27.44	34.3
62	-	-	34.07	42.59	26.01	32.51
64	-	-	31.32	39.15	28.34	35.43
66	-	-	30.6	38.25	26.16	32.7
68	-	-	37.17	46.46	30.55	40.94
70	-	-	34.5	43.12	34.95	31.18
72	-	-	29.94	37.42	26.01	32.52
82	-	-	29.59	36.99	25.84	32.3
84	-	-	31.72	39.65	24.05	30.07

健康綠建材之揮發性有機化合物逸散模式研究 - 以塗料類為例

86	-	-	37.26	46.57	26.25	32.81
88	-	-	34.93	43.66	26.36	32.96
90	-	-	35.51	44.39	27	33.76
92	-	-	34.76	43.45	29.41	36.76
94	-	-	30.93	38.67	28.16	35.2
96	-	-	31.09	38.86	29.6	37

## 參考書目

中文部份：

- (1) 綠建材解說與評估手冊-2011年更新版，江哲銘主編，內政部建築研究所，2011
- (2) 行政院國家科學委員會專題研究計畫子計畫二：居住環境中甲醛及揮發性有機物質逸散材質之生命週期與健康風險研究(I)
- (3) 油漆及粉刷作業，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所 IOSH 安全資料表，2002
- (4) 室內木質建材揮發性有機物逸散之研究，陳新智，2000，台灣大學環工所碩士論文。
- (5) 室內木質建材甲醛逸散之研究，陳震宇，2001，台灣大學環工所碩士論文。
- (6) 室內建材逸散揮發性有機物之研究－黏著劑之揮發性有機物逸散因子，黃冠仁，1999，台灣大學環工所碩士論文。
- (7) 台灣地區室內環境因子對建材揮發性有機物質逸散行為影響之研究－以清漆為例，陳丁于，2002，國立成功大學建築研究所碩士論文。
- (8) 建材揮發性有機化合物逸散特性與預測式建立之研究－以塗料類建材為例，陳逸青，2003，國立成功大學建築研究所碩士論文。
- (9) 台灣本土氣候下換氣率影響建材有機物質逸散特性之研究－以合板及清漆為例，陳振誠，2004，國立成功大學建築研究所碩士論文。
- (10) 建材揮發性有機化合物管制策略之研究，邵文政，2006，成功大學建築研究所博士論文。
- (11) 室內環境中油性塗料揮發性有機物排放特性分析，李筱雨，2002，元智大學機械工程學系碩士論文。
- (12) 室內建材揮發性有機物質標準檢測方法及程序之研究，江哲銘、李俊璋，2000，內政部建築研究所。

英文部份：

- (1) ASTM D5116-06, "Standard Guild for Small-Scale Environmental Chamber Determinations of Organic Emission From Indoor

- (2) Material/Products” , 1997. Benoit Guieysse and Cecile Hort, 2008, “Biological treatment of indoor air for VOC removal: Potential and challenges” , Biotechnology Advances, 26, 398 - 410.
- (3) Molhave, L., Moller, sJ., 1978, The atmospheric environment in modern Danish dwellings-measurement in 39 flats, indoor climate” , (eds) P.O Fanger, O. Valbjorn, Danish Building Research Institute, Horsholm, Denmark, p.171-186
- (4) Seifert, B. and Abraham, H. J. 1982, “Indoor air concentrations of benzene and some other aromatic hydrocarbons” , Ecotoxicology and Environmental safety, 6 p.190-192
- (5) Brooks, B. O., G. M. Utter, J. A. Debory and R. D. Schimke, 1991, Indoor air pollution: an edifice complex” , Clinical Toxicology.
- (6) Seifert, B. “Organic Indoor Pollutant: Source, Species and Concentrations” , Chemical and Environment Science Volume 4: Chemical, Microbiological, Health and Comfort Aspects of Indoor Air Quality—State of the Art in SBS, Ed. Knoppel H. and Wolkoff, p.25-36.
- (7) Yu C, Grump D, Squirt R., 1997, “The Indoor Air Concentration and the Emission of VOCs and Formaldehyde from Materials Installed in BRE LOM Energy Test Houses.” Indoor and Built Environment. 6, 45-55.
- (8) Molhave L., 1982, “Indoor Air Pollution Due To Organic Gases and Vapors of Solvents in Building Materials” , Environment International, Vol.8, 117-127.
- (9) Jonathan A. Bernstein et al, 2008, “The health effects of nonindustrial indoor air pollution” , J Allergy Clin Immunol, 585-591

- (10) Chamber Determinations of Organic Emission From Indoor Material/Products” , 1997.
- (11) Black A. , Evans J. C. , Hadfield E. H. , Macbeth, T. G. , Morgan A. , Walsh M. , “Impairment of Nasal Mucociliary Clearance in Woodworkers in The Furniture Industry,” . Brit. J. Ind. Med. , 31(1), 10-17(1974).
- (12) Chang , J. C. S. , Guo, Z. , 1992a. Characterization of organic emissions from a wood finishing product-wood stain. Indoor Air 2, 146-153. Chang, John C. S. , Sparks, Leslie E. , and Guo, Zhishi, “ Evaluation of sink effects on VOCs from a latex paint , “ Journal of Air & Waste Management Association, Vol. 48, 953-958, 1998. Chang, John C. S. , Guo, Zhishi, Fortmann, Roy, and Lao, Huei-Chen, ” Characterization and Reduction of Formaldehyde Emissions from a Low-VOC latex Paint, ” Indoor Air, Vol.12, 10-16, 2002.
- (14) Cox, Steven S. , Zhao, Dongye, Little, John C. , ” Measuring partition and diffusion coefficients for volatile organic compounds in vinyl flooring, ” Atmospheric Environment, Vol. 35, 3823-3830, 2001.
- (15) Cox, Steven S. , Hodgson, Alfred T. , Little, John C. , ” Effect of Air Exchange Rate on Emissions of VOCs from Building Materials, ” Proceedings of A&WMA 94th Annual Conference & Exhibition, Orlando, Florida, June 24-28, 2001.
- (16) Colombo equation:Colombo, A. , De Bortoli, M. , Schauenburg, H. , and Vissers, H. , 1990, Chamber Testing of Organic Emission from Building and Furnishing Material, The Science of the Total Environment Vol.91, p237-249.
- (17) Guo, Z. , Sparks, L. E. , Tichenor, B. A. , Chang, J. C. S. , “Predicting the emission of individual VOCs from petroleum

- based indoor coatings, "Atmospheric Environment, Vol.32, 231-237, 1998.
- (18) John C.S. Chang, Leslie E. Sparks, and Zhishi Guo., "Evaluation of sink effects on VOCs from a latex paint", Journal of Air & Waste Management Association, Vol. 48, 953-958, 1998.
- (19) Sparks, L.E., Tichenor, B.A., and Chang, J.(1996)  
"Gas-phase mass transfer model for predicting volatile organic compound (VOC) emission rates from indoor pollutant sources," Indoor air 6, 31-40
- (20) USEPA, WALL PAINT EXPOSURE MODEL(WPEM), USEPA Office of Pollution Prevention and Toxics Washington, DC and National Paint and Coatings Association Washington, DC, 2001.
- (21) X. Yang, Q. Chen, J. Zeng, J.S. Zhang, C.Y. Shaw, "A mass transfer model for simulating volatile organic compound emissions from "wet" coating materials applied to absorptive substrates." International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.44, p1803-1815, 2001.
- (22) X. Yang, Q. Chen, J. Zeng, J.S. Zhang, R. Magee, C.Y. Shaw, "Numerical simulation of VOC emissions from dry materials" Building and Environment, Vol. 36, 1099-1107, 2001.
- (23) Tichenor, B. A., 1989, "Measurement of Organic Compound Emissions Using Small Scale Chamber", Environment International, Vol.15, 389-396.
- (24) J.P. Zhu, R. J. Magee, J. S. Zhang and C. Y. Shaw, 1999, "A Small Scale Chamber Test Method for Measuring Volatile Organic Compound Emissions from Wet Building Materials" CMEIAQ Final report 1.3.