

## 苯乙烯之聚合反應危害特性評估

曾慶揚<sup>1</sup> 曾柏翰<sup>1</sup> 吳冠緯<sup>1</sup> 杜逸興<sup>2</sup> 徐啟銘<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 國立雲林科技大學 環境與安全衛生工程系/所  
製程安全與防災實驗室

640 雲林縣斗六市大學路三段 123 號

E-mail: [shucm@webmail.yuntech.edu.tw](mailto:shucm@webmail.yuntech.edu.tw)

<sup>2</sup> 仁德醫護管理專科學校

356 苗栗縣後龍鎮溪洲里 7 鄰砂崙湖 79-9 號

E-mail: [ysduh@jente.edu.tw](mailto:ysduh@jente.edu.tw)

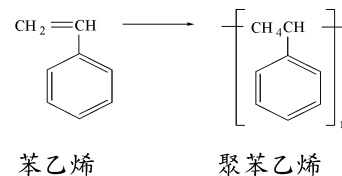
### 摘要

苯乙烯 (styrene) 為國內重要石化工業產品之一，常被應用於不飽和聚酯樹脂中，做為交聯劑 (cross-linking agent) 和溶劑使用，如聚苯乙烯 (poly-styrene, PS)、ABS 樹脂 (acrylonitrile-butadiene-styrene)、苯乙烯-丙烯腈 (styrene-acrylonitrile)、苯乙烯-丁二烯橡膠 (styrene-butadiene rubber, SBR) 及使用不飽和聚酯樹脂的工廠；目前國內尚有其它行業使用苯乙烯，如乳劑製造、玻璃纖維鑄模、絕緣物體、亮光漆、防護襯敷、樹脂、橡膠、凡立水等製造業，台化、台苯及國喬公司合計年產量已達到 100 多萬噸，並且開始外銷國外市場。瞭解苯乙烯聚合動力學和起始劑誘發的自由基聚合反應，對工業上製造 PS、ABS 及 SBR 的最佳化及產能之提昇相當重要。本研究主要應用微差掃描熱卡計 (differential scanning calorimetry, DSC) 與熱分析軟體模擬比對苯乙烯之熱危害評估，進而得到熱動力學參數 (thermokinetic parameters)，如活化能 (activation energy,  $E_a$ )、頻率因子 (frequency factor,  $k_0$ )、反應階數 (reaction order,  $n$ ) 及反應熱 (heat of reaction,  $Q$ ) 等，進一步推估其安全參數及其反應機制及反應模式。

關鍵字：苯乙烯、微差掃描熱卡計、熱動力學參數、安全參數

### 1. 前言

苯乙烯其為無色、油性之可燃性液體，低濃度環境中即有芳香氣味，高濃度則有刺鼻味，加抑制劑時安定，但未加抑制劑之苯乙烯非常不安定，在某些起始劑存在下，會於室溫緩慢聚合。對於人體危害之症狀有高濃度蒸氣可能造成頭痛、噁心等。吞食或嘔吐可能造成倒吸入肺部。在 25°C，一大氣壓時蒸氣壓為 6.31 mmHg，沸點 145°C [1]，閃火點 31°C (88°F)，爆炸界限 1.1-7.0 vol%。苯乙烯及聚苯乙烯結構式如下所示：



苯乙烯根據美國防火協會 (National Fire Protection Association, NFPA) 之危害等級：“3”，表示此液體幾乎可在常溫下點燃，用水滅火可能失效，因為此液體本身有低閃火點，且顆粒狀、片狀或纖維束狀的固體也易燃燒，而且固體本身燃燒很迅速，因為此物質本身含氧的緣故，也會在常溫下的空氣中自然點火燃燒。

反應性級數：“2”，表示此物質在正常狀況下不穩定，會穩定地進行激烈的化學變化，但並不會爆炸。此物質在正常溫度及壓力下會進行化學變化，迅速釋放能量，或是在溫度及壓力增加時會產生激烈化學變化，也可能和水發生激烈反應或和水混合形成爆炸危險性的混合液。在波及大區域及大型火災時，必須從防護嚴密的位置實施滅火工作，以策安全。健康危害級數：“2”，表示此物質對健康有害，但暴露區可配戴自備空氣的呼吸器自由進出。

由於評估苯乙烯聚合反應時，自催化反應是很重要的因素，不管在使用、取樣、運輸或儲藏時，常會因苯乙烯本身自加速熱分解反應或非預期之污染現象等因素而發生在運輸或儲藏時，常會因苯乙烯本身自加速熱分解反應或非預期之污染現象等因素而引發失控反應。本實驗主要為探討苯乙烯及含抑制劑時於 35–350°C 下之反應機制，並進行相關之危害評估。本研究是使用微差掃描熱卡計 (differential scanning calorimetry, DSC) 觀察聚合放熱反應之熱譜圖。DSC 所應用的相關軟體，只能求出 n 階反應的相關熱動力學參數，而無法運算自催化反應時的熱動力學參數。對製程安全出現相當大的盲點，因而計算動力學模擬和安全參數，從 DSC 實驗數據取得動力學參數加以分析，瞭解其反應機制。

表 1. 近年來國內發生相關苯乙烯或其衍生物災害的傷亡案例 [2]。

日期	傷亡	災害	發生原因	化學物質
83/05/07	0/1	爆炸 火災	苯乙烯儲槽發生爆炸	苯乙烯
84/07/08	0/0	火災	聚苯乙烯半成品外洩，造成排水溝起火燃燒	聚苯乙烯 半成品
85/01/26	0/1	爆炸	電焊工程導致爆炸	ABS
86/07/27	0/0	粉塵 爆炸	輸送管線產生靜電，引發粉塵爆炸	ABS
87/01/21	4/0	洩漏 火災 爆炸	苯乙烯槽車遭到追撞，苯乙烯洩出造成爆炸	苯乙烯
88/10/06	1/0	爆炸	電線走火，引發反應槽爆炸	苯乙烯
90/08/15	1/0	無洩漏	休旅車與化學槽車對撞	苯乙烯

表 2. 近年來國外發生相關苯乙烯或其化合物災害的傷亡案例 [3]。

日期	傷亡	災害	發生原因	化學物質
87/06/27	1/0	洩漏	鐵路運輸，受熱釋壓系統洩放流體	1. 甲苯 2. 苯乙烯
88/06/23	4/2 300 人撤 離	火災， 爆炸	入料過快引發失控反應	1. 苯乙烯 2. 丁二烯
88/07/25	0/0	爆炸	化學品貯存量過大	1. 苯乙烯 2. 三氯乙烷
88/09/13	300 人撤 離	洩漏	空中運輸設備發生洩漏	1. 苯乙烯
89/02/05	無傷亡	洩漏	油輪意外	1. 苯乙烯
89/03/14	800 人撤 離	洩漏	化學品接觸發生反應	1. 醇 2. 苯乙烯
89/03/27	71/1	洩漏 爆炸	人為操作失誤導致聚合反應發生	1. 丁二烯 2. 環己烷 3. 苯乙烯
89/10/31	0/0	洩漏	油輪意外	1. 異丙醇 2. 亞甲基酮 3. 苯乙烯
90/10/29	100 戶強 制疏散	洩漏	鐵路槽車準備卸料時發生洩漏	1. 苯乙烯
92/03/12	0/1	爆炸	儲槽清洗時發生爆炸	1. 苯乙烯

## 2. 實驗裝置與方法

### 2.1 樣品

本研究使用 99.7 wt% 苯乙烯和含有第三丁基鄰苯二酚 (4-tert-butylcatechol, TBC) 由國喬化工提供，並保存於 4 °C 之冷藏櫃中。

### 2.2 微差掃描熱卡計 (DSC)

DSC 是用以測量物質微量的熱量變化與溫度間的關係，常用的系統有熱通量式 (heat flux DSC) 與功率補償式 (power-compensation, DSC) 兩種，本研究使用熱通量式 DSC 821° 系統。其原理乃是將參考體與樣品放置於加熱爐中，加熱爐四周有一組加熱器，用以控制加熱爐溫度。在參考體與樣品下方有一熱流感溫體，其上有一熱電偶 (thermocouple) 可以偵測出參考體與樣品間的溫度差 ( $\Delta T$ ) [4]。當樣品昇溫到轉折點，如晶態轉變、熔點、沸點或產生熱分解反應，此時加熱器所供應之能量 (毫瓦, mW) 為樣品所吸收 (吸熱反應) 或釋放 (放熱反應) 之能量，使樣品與參考體間的溫度不再維持平衡，而有熱通量產生 (heat

flux)。此種差異對溫度的關係圖，即該樣品之熱譜圖 (thermogram)。本研究選定之實驗溫度為 35–350°C，昇溫速率為 4°C · min<sup>-1</sup>。

### 3. 結果與討論

#### 3.1 熱危害分析

實驗發現，苯乙烯主要可產生兩只放熱波峰，如圖 1 所示，苯乙烯可產生至少兩只波峰，由於過去文獻中已證實小只峰值是位於起始與傳播過程中，因放熱而產生，另一大只峰值為鏈轉移時所發生。圖 1 為苯乙烯與含抑制劑之反應在 DSC 中所得之熱值與溫度間之關係。圖 2 為純苯乙烯放熱聚合反應之生成熱與時間之關係圖。熱生成速率與時間之關係圖如圖 3 所示。在表 3 中純苯乙烯第一只波峰放熱起始溫度平均為 105.7°C。而表 4 為第二只波峰最大峰值溫度平均為 208.4°C。各組實驗之動力學參數及其安全參數之數據資料之整理如表 3–4 所示。而含抑制劑苯乙烯的熱潛在危害特性，由下列表 5 和 6 可以得知含有抑制劑苯乙烯，整體的反應機制與純苯乙烯相似，但隨者抑制劑 (4-tert-butylca-techol, TBC) 的濃度增加整體的放熱起始溫度與活化能隨之提高，提昇苯乙烯放熱聚合反應所需的能量，使得苯乙烯自催化反應發生機率降低，對於儲藏及運輸上有莫大貢獻。

#### 3.2 苯乙烯之動力學分析

在 DSC 動力掃描曲線中，發現苯乙烯具有兩只明顯之放熱波峰。苯乙烯之熱分解反應為一複雜之機制 (mechanism)。在此針對其反應模式做相關之分析，其整體反應包含兩個連續性之反應：已知苯乙烯聚合反應機制依序為起始反應、傳播反應、鏈轉移、終止反應 [5]。而 A 為起始反應，A 起始劑累積引發 B<sub>1</sub> 傳播發生放熱情形為第一波峰，分子鏈結斷裂形成第二波峰 (最大峰值) B，而後聚合反應終止。



其第一只波峰之反應為自催化反應，而第二只

波峰之反應則為 n 階反應。經由模擬函數所推估出來之 苯乙烯反應動力方程式如 (3)–(5) 所示 [6], [7]：

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot f(\alpha), \text{ where } f(\alpha) = \begin{cases} (1-\alpha)^n & \text{case 1-N-order reaction} \\ (1-\alpha)(\alpha+z) & \text{case 2-autocatalytic reaction} \end{cases}$$

$$r_1 = \frac{d\alpha}{dt} = K_0(T) \cdot (1-\alpha)^{n_1} (z + \alpha^{n_2}) \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{d\alpha}{dt} = K_0(T) \cdot (1-\alpha)^{n_1} \quad (4)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \sum_{i=1}^2 Q_i^{\infty} r_i \quad (5)$$

$\alpha_1$  及  $\alpha_2$  分別為物種 A 及 B<sub>1</sub> 之轉換級數； $r_i$  及  $Q_i^{\infty}$  代表 i 階之反應速率及熱效應，i=1, 及 2; dQ/dt 為整體之熱生成速率。此外， $k_i(T)$  遵守阿瑞尼氏之速率常數之依賴溫度：

$$k_i(T) = k_{0i} \exp(-E_{ai} / RT) \quad (6)$$

$k_{0i}$  及  $E_{ai}$  為 i 階之頻率因子及活化能。R 為氣體常數 (= 8.314 J · mol<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>)。

#### 3.3 儲運安全參數

本研究使用 DSC，將實驗中物質反應所得之轉換率 (conversion rate) 及對加熱速率 (heating rate) 數值，利用單一熱譜圖面積積分後，可獲得瞬間反應速率 (instantaneous reaction rate)。將反應動力方程式資料中之反應速率、轉換率及溫度取自然對數，使用最小平方比及線性迴歸後，即可獲得反應階數 (n) 活化能 (E<sub>a</sub>) 及頻率因子 (k<sub>0</sub>) 等參數。進一步計算 T<sub>NR</sub> 及 T<sub>SADT</sub> 之安全參數來評估製程或儲運上之安全性。熱危害評估方法運用於工業製程上，可有效降低危害發生之可能性。本研究將提出一套快速、有效率之評估方法，運用於各種工業 [8]。

製程上，以工程方法和安全參數來做評估。根據 NFPA 所提出，自反應性物質之 T<sub>SADT</sub> 小於或等於 55°C 時，運輸過程中溫度需做有效控制，以避免災害發生。根據先前 Townsend 及 Fisher 二位學者 [9] 分別藉由 Semenov 之理論所衍生而出，如不折返溫度 (temperature of no return, T<sub>NR</sub>)、到達最大反應速率所需之時間 (time to maximum

rate, TMR )、自加速分解反應所需之溫度 (self-accelerating decomposition temperature, T<sub>SADT</sub>)，在此本文利用 Townsend 及 Method of Willberforce 之計算方法求得 T<sub>NR</sub> 及 T<sub>SADT</sub>，下方程式 Semenov model 熱爆炸基礎公式：

$$\frac{E_a}{RT_A^2}(\Delta H)A \exp(-E_a/RT_A)C^n = \frac{U(1.8)S}{Ve} \quad (7)$$

其中，E<sub>a</sub> 為活化能 (cal · g<sup>-1</sup> · mol<sup>-1</sup>)，R 為氣體常數 (1.9872 cal · g<sup>-1</sup> · mol<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>)，T<sub>A</sub> 為環境溫度 (K)，ΔH 為生成熱 (Btu · lb<sup>-1</sup> · mol<sup>-1</sup>)，A 為動力學的前指數因子 (可變的)，C 為反應濃度 (lb · mol · ft<sup>-2</sup>)，n 為動力學反應階數，U 為全部的熱轉換係數 (Btu · h<sup>-1</sup> · feet<sup>2</sup> · °F<sup>-1</sup>)，S 為表面積 (ft<sup>2</sup>)，V 為反應物之體積 (ft<sup>3</sup>)，e ≈ 2.7183，由美國聯碳公司發展的方法，以 Method of Willberforce 與分析法 (analytical method) 皆可求得自加速分解溫度，介紹如下：

### 3.3.1 圖表法 (Method of Willberforce)

令反應熱為 ΔH，則測試罐由物質所得之熱 Q<sub>g</sub>

$$Q_g = m \cdot \Delta H \cdot A \cdot e^{-E_a/RT} \quad (8)$$

由測試罐所傳出之熱 Q<sub>i</sub>

$$Q_i = U \cdot a \cdot (T - T_0) \quad (9)$$

令 Q<sub>g</sub> = Q<sub>i</sub> 可得

$$m \cdot \Delta H \cdot A \cdot e^{-E_a/RT} = U \cdot a \cdot (T - T_0) \quad (10)$$

其中 U: 熱傳係數

a: 熱傳面積

將式 (10) 微分，並將式 (8) 代入消去

$$\frac{E_a}{RT^2} \cdot U \cdot a \cdot (T - T_0) = U \cdot a \quad (11)$$

$$T_0 = T - \frac{RT^2}{E_a} \quad (12)$$

其中 T = T<sub>NR</sub> + 273.15

$$T_0 = T_{SADT} + 273.15$$

整理可得

$$T_{SADT} = T_{NR} - \frac{R(T_{NR} + 273.15)^2}{E_a} \quad (13)$$

將樣品之熱力學參數以到達最大加熱速率時間對溫度作圖，可得到不折返溫度，再利用式 (13) 求取樣品之自加速分解溫度。

### 3.3.2 分析法 (analytical method)

根據 Townsend 等人的研究指出，當一放熱反應進行時，在任一時間下，反應物的濃度可以一溫度的函數近似之：

$$C = \frac{T_f - T}{\Delta T_{AB}} \cdot C_0 \quad (14)$$

C 為反應物於 t 時間的濃度

T<sub>f</sub> 為測試罐之末溫，ΔT<sub>AB</sub> 為測試罐末溫與初始溫度之差

將式 (14) 帶入阿瑞尼士方程式及速率方程式，則速率方程式可表示如下：

$$\frac{dC}{dt} = -A \cdot e^{-E_a/RT} \cdot \left(\frac{T_f - T}{\Delta T_{AB}}\right)^n \cdot C_0^n \quad (15)$$

式 (14) 對 t 微分，並取代式 (15) 之左項得：

$$m_T = \frac{dT}{dt} = k \cdot \left(\frac{T_f - T}{\Delta T_{AB}}\right)^n \cdot \Delta T_{AB} \cdot C_0^{n-1} \quad (16)$$

m<sub>T</sub> 為於溫度 T 之自加熱速率

將式 (16) 積分可求得到達最大加熱速率時間 (Θ<sub>m</sub>):

$$\theta_m = \frac{R \cdot T^2 \cdot C_p}{E_a \cdot \Delta H_{AB} \cdot k} \quad (17)$$

系統之時間常數 (τ)

$$\tau = \frac{m \cdot C_p}{U \cdot (1.8) \cdot a} \quad (18)$$

當到達最大加熱速率時間與系統之時間常數相等時，系統之溫度將達到不折返溫度，故令式 (17) 與式 (18) 相等，可得不折返溫度 T<sub>NR</sub>。

$$(T_{NR} + 273.15)^2 = \frac{m \cdot E_a \cdot \Delta H_{AB} \cdot k}{R \cdot U \cdot (1.8) \cdot a} \\ = \frac{m \cdot E_a \cdot \Delta H_{AB} \cdot A \cdot e^{-E_a/R(T_{NR} + 273.15)}}{R \cdot U \cdot (1.8) \cdot a} \quad (19)$$

以表 1 純苯乙烯 (7.5 mg) 為例，如下公式所示：

$$(T_{NR} + 273.15)^2 = \frac{150880 \times 43290 \times 634.95 \times 4.420 \times 10^4 e^{-\frac{43290}{8.314 \times (T_{NR} + 273.15)}}}{8.314 \times 11.34 \times 1.8 \times 1.51}$$

得 T<sub>NR</sub> = 49°C ; T<sub>SADT</sub> = 38.2°C

以數值疊代法計算，可得到不折返溫度，再將不折返溫度代入式 (13)，即可計算求得自加速分解溫度。於求得樣品之自加速分解溫度後，即可依據求得之值採行合適的防制措施，如加裝冷凍空調

設備、加入抑制劑、改良容器材質等，當某一物質之  $T_{NR}$  越高時，其  $T_{SADT}$  越高，表示到達失控反應的溫度越高。瞭解樣品之自加速分解溫度，可於儲運過程中事先做好防備的工作，使反應性化學物質的失控行為可被有效控制。

本研究應用先前專家學者所提出之理論，搭配熱卡計及熱分析軟體進行苯乙烯昇溫實驗，以計算其動力學參數和安全參數，其結果如下表所示。從表 1 和 2 清楚觀察到隨著抑制劑濃度的增加，整個反應放熱起始溫度 ( $T_{onset}$ ) 及  $T_{NR}$  跟著提高，對於取樣、儲運、製程上有顯著的幫助。相同地在圖 1 中也發現含有抑制劑苯乙烯放熱起始溫度明顯提高，而自催化反應（第一只峰值）相對苯乙烯高，而後之反應機制大致相同。

圖 2、3 和 4、5 經由熱分析軟體模擬比對實驗值，探討苯乙烯之反應生成熱對時間之關係曲線及熱生成速率對時間，進一步取得動力學參數和安全參數。而從中發現含抑制劑苯乙烯自催化反應其  $Q$  值明顯變大，影響後面  $n$  階反應使其  $Q$  值降低。

表 3. 利用模擬函數作苯乙烯放熱聚合反應，第一波峰之動力學及安全參數（自催化反應）。

參數 styrene	m (mg)	$E_a$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$T_0$ (°C)	$n_1$	$n_2$	$T_{NR}$ (°C)	$T_{SADT}$ (°C)
Pure styrene 30-350-4	7.5	161.01	103.6	1.4	0.30	49.0	38.2
Pure styrene 30-350-4	11.5	156.79	106.7	1.4	0.31	45.0	38.4
Pure styrene 35-400-4	7.3	156.72	104.6	1.4	0.31	51.0	38.1
Pure styrene 35-400-4	9.5	157.26	103.9	1.5	0.30	66.0	37.4

表 4. 利用模擬函數作苯乙烯放熱聚合反應，第二波峰之動力學及安全參數（ $n$  階反應）。

參數 styrene	m (mg)	$n_1$	A	$E_a$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$T_{max}$ (°C)
Pure styrene 30-350-4	7.5	1.94	33.65	156.98	208.25
Pure styrene 30-350-4	11.5	1.84	33.58	156.96	212.27
Pure styrene 35-400-4	7.3	1.99	33.26	154.62	208.57
Pure styrene 35-400-4	9.5	1.99	32.63	151.99	207.54

表 5. 利用模擬函數作含抑制劑苯乙烯放熱聚合反應，第一波峰之動力學及安全參數（自催化反應）。

參數 styrene	m (mg)	$E_a$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$T_0$ (°C)	$n_1$	$n_2$	$T_{NR}$ (°C)	$T_{SADT}$ (°C)
Styrene + TBC 10 ppm	9.19	157.42	132.3	1.8	0.51	67.00	37.38
Styrene + TBC 20 ppm	9.30	161.81	138.9	1.9	0.50	71.00	37.19
Styrene + TBC 40 ppm	4.40	162.50	145.5	1.7	0.60	82.00	36.66
Styrene + TBC 50 ppm	10.3	163.27	149.6	1.8	0.60	86.00	36.46

表 6. 利用模擬函數作含抑制劑苯乙烯放熱聚合反應，第二波峰之動力學及安全參數（ $n$  階反應）。

參數 styrene	m (mg)	$n_1$	A	$E_a$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$T_{max}$ (°C)
Styrene + TBC 10 ppm	9.19	1.48	32.28	151.00	203.32
Styrene + TBC 20 ppm	9.30	1.60	32.80	153.32	203.94
Styrene + TBC 40 ppm	4.40	1.41	34.23	157.68	203.13
Styrene + TBC 50 ppm	10.29	1.52	34.38	160.80	204.50

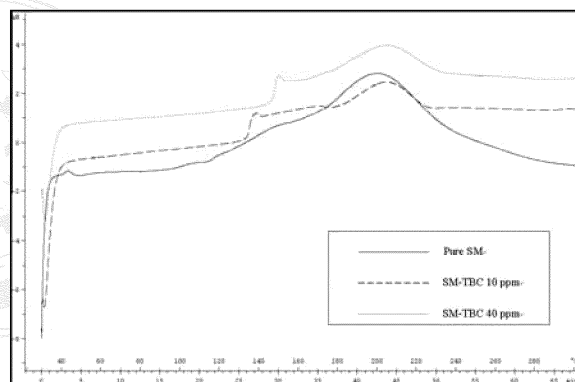


圖 1. 由 DSC 中量測之苯乙烯與加入抑制劑之苯乙烯反應之熱值與溫度之關係圖。

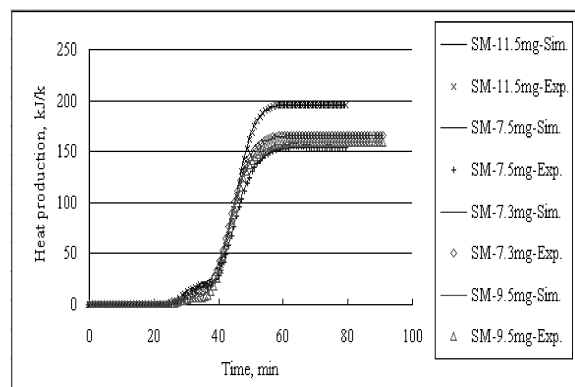


圖 2. 純苯乙烯由模擬函數計算所得之反應生成熱對時間之關係曲線（—），以及 DSC 動力昇溫實驗所得之反應生成熱對時間之關係曲線（□□）之結果。

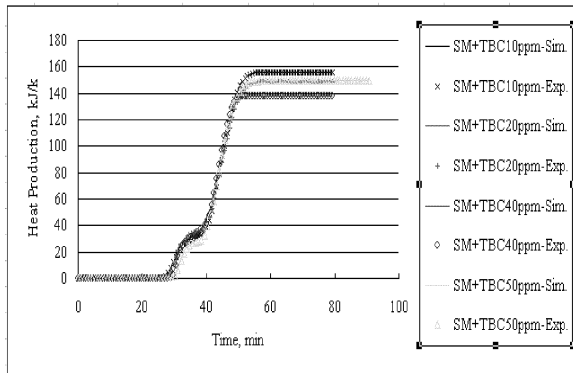


圖 3. 含抑制劑苯乙烯由模擬函數計算所得之反應生成熱對時間之關係曲線(—)，以及 DSC 動力昇溫實驗所得之反應生成熱對時間之關係曲線 (□□) 之結果。

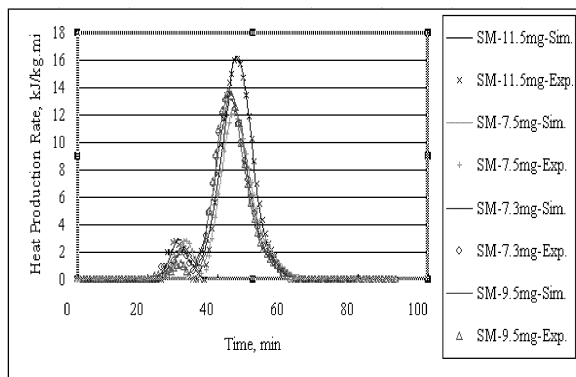


圖 4. 純苯乙烯放熱聚合反應經由模擬函數計算所得之熱生成速率對時間之關係曲線 (—)，以及 DSC 動力昇溫實驗所得之熱生成速率對時間之關係曲線 (□□) 之結果。

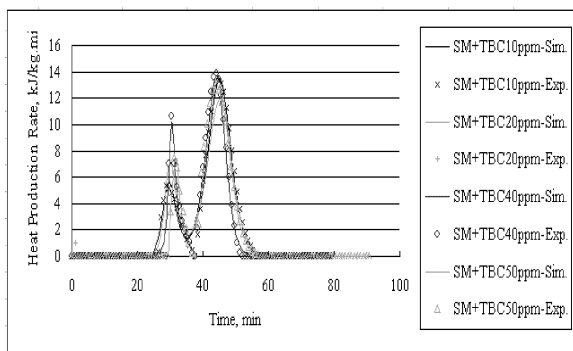


圖 5. 含抑制劑苯乙烯放熱聚合反應經由模擬函數計算所得之熱生成速率對時間之關係曲線 (—)，以及 DSC 動力昇溫實驗所得之熱生成速率對時間之關係曲線 (□□) 之結果。

#### 4. 結論

本研究主要針對苯乙烯與含抑制劑苯乙烯之

放熱聚合反應進行熱危害評估，經過實驗及所得之數據進行探討分析，歸納出下列結論：由實驗及軟體模擬結果得知：放熱聚合反應有兩只放熱波峰與文獻符合，在  $105^{\circ}\text{C}$  自催化反應發生（第一只波峰）， $120^{\circ}\text{C}$  為 n 階反應（第二只波峰）；而在加入抑制劑後，有部分明顯改變其熱熱起始溫度升高，活化能提高、放熱量降低及不影響其反應機制，延遲反應發生。由於苯乙烯使用量大，在使用、取樣、儲運、製程中若因為蓄熱、自加速放熱分解或非預期之污染現象等因素引發失控反應，其伴隨的熱量及氣體壓力將造成整個製程反應失去控制，使得反應器爆裂，甚至引發化學物質外洩造成生態不可回覆的衝擊，而安全參數可提供適當資訊，讓相關人員深入瞭解其本質危害性，防範事故於未然。

#### 參考文獻

- [1] 陳進傳，苯乙烯單體低溫放熱行為之研究，國立雲林科技大學，環境與衛生工程系碩士班，碩士論文，2002。
- [2] 工研院環安中心之重大災害資料庫，網址：<http://w3.itri.org.tw/accident/>, 2004.
- [3] 美國化學安全與危害調查局，網址：<http://www.chemsafety.org/>, 2004.
- [4] Mettler Toledo, “STAR<sup>o</sup> Software with Solars Operating System, Operating Instructions, Switzerland”, 2003.
- [5] William A. Pryor, Lynn D. Lasswell, “The Mechanism of the Initiation Step in the Self-Initiated Thermal Polymerization of Vinyl Monomers”, 1970.
- [6] A.A. Kossoy, A. Benin, “Minutes of 21st Meeting of DIERS User Group of the *AIChE*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- [7] A.A. Kossoy, E. Koludaroova, “Specific Features of Kinetics Evaluation in Calorimetric Studies of Runaway Reactions”, *Journal of Loss Prevention Process Industries*, 8(4): 229 – 235, 1995.

- [8] Dong Yang, Hiroshi Koseki, Kazutoshi Hasegawa, "Predicting the Self-accelerating Decomposition Temperature (SADT) of Organic Peroxides Based on Non-isothermal Decomposition Behavior", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16: 411-416, 2003.
- [9] Harold G. Fisher, David D. Goetz, "Determination of Self-accelerating Decomposition Temperature for Self-reactive Substances", *Journal of Loss Prevention in the process industries*, 6(3): 183-193, 1992.

