

爆炸性化學品危害簡介

杜逸興教授

仁 德 醫 護 管 理 專 科 學 校

內 容

- 國內外著名的熱爆炸或失控反應案例
- 何謂失控反應(Runaway reaction)
- 熱量的來源
- 爆炸性物質及不安定官能基
- 高放熱性化學反應
- 危險性較高的化工製程及相關化學品
- 熱失控反應的原因及觸發
- 危險物及有害物通識規則中之危險物

反應失控所引起較重大的損失及災害

一、硝酸銨熱爆炸：

1921年德國Oppau，死亡430人。

1947年美國德州市，死亡552人，受傷3,000人。

二、1976年義大利Seveso事件：

2,4,5-trichlorophenol製程失控，造成dioxin外洩，447人毒。

三、1984年印度Bhopal事件：a runaway reaction in a storage tank

MIC(異氰酸甲酯，methyl isocyanate)由儲槽安全閥釋放，2,500人死亡，170,000人接受治療。

四、美國1976至1986年間51件失控反應案例及不良排放系統設計，造成約1.6億美元損失，平均每次意外損失約314萬美元。

國內曾發生熱爆炸或失控反應案例

- 有機過氧化物：
 - (1)68年撫遠街爆炸(MEKPO, 死亡33人, 受傷49人)。
 - (2)85年桃園永興化工廠爆炸(MEKPO, 死亡10人, 受傷47人)。
- 高速公路苯乙烯槽車爆炸：
- 湖口福國化工廠壓克力反應器爆炸(死亡1人)
- 明沛化工苯乙烯儲槽爆(死亡1人)
- 見龍化工廠酚-醛樹脂反應器失控

什麼是失控反應(暴走反應, runaway reaction)

大部份的製程反應是放熱性的，正常操作下熱移除速率大於反應放熱速率。但製程偏離時若放熱速率大於移熱速率，會造成反應物系統溫度上升並加快反應，反應槽愈來愈熱，最後形成熱失控或溫度急速上升，這就是失控反應。反應物若在放熱過程形成大量蒸汽或非凝性分解氣體，密閉下或排出速率過慢，則會造成反應器爆破，稱之熱爆炸(thermal explosion)。英國安全衛生部(HSE)亦將1976年義大利Seveso戴奧辛外洩及1984年印度Bhopal異氰酸甲酯外洩歸為失控反應所造成的。而儲存大量反應性單體的儲槽(如SM, VCM, 丙烯酸酯類)亦有可能因蓄熱或火災引失控反應，造成火災爆炸或有毒物外洩之災害。

熱量的來源

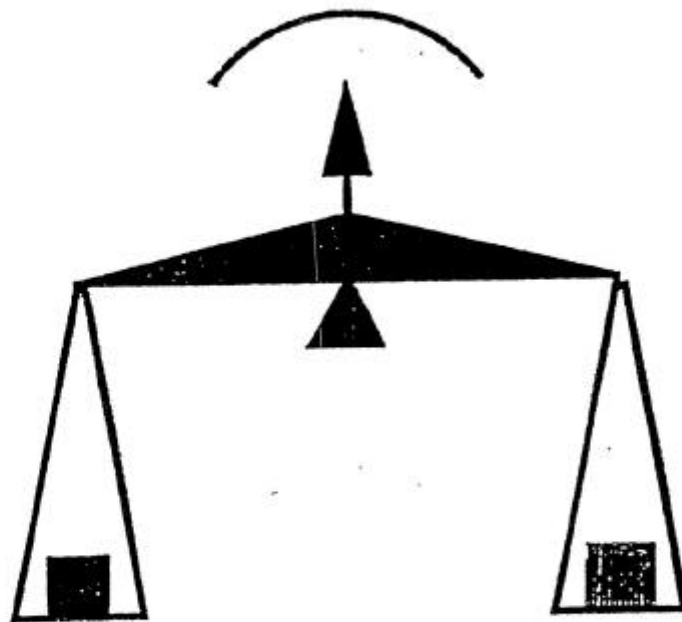
- 不安定官能團：分解反應熱(H_{decomp})
- 高放熱性的化學反應：反應熱(H_{rea})

失控化學反應或熱爆炸

- 放熱動力學(Thermokinetics)
- 參數： H, R (rate law) order of reaction, k (rate constant), 製程條件(反應物質量, 反應溫度, 體積, 進料方式, 冷卻系統...等)
- 放熱速度與冷卻速率競爭

熱平衡

熱量累積

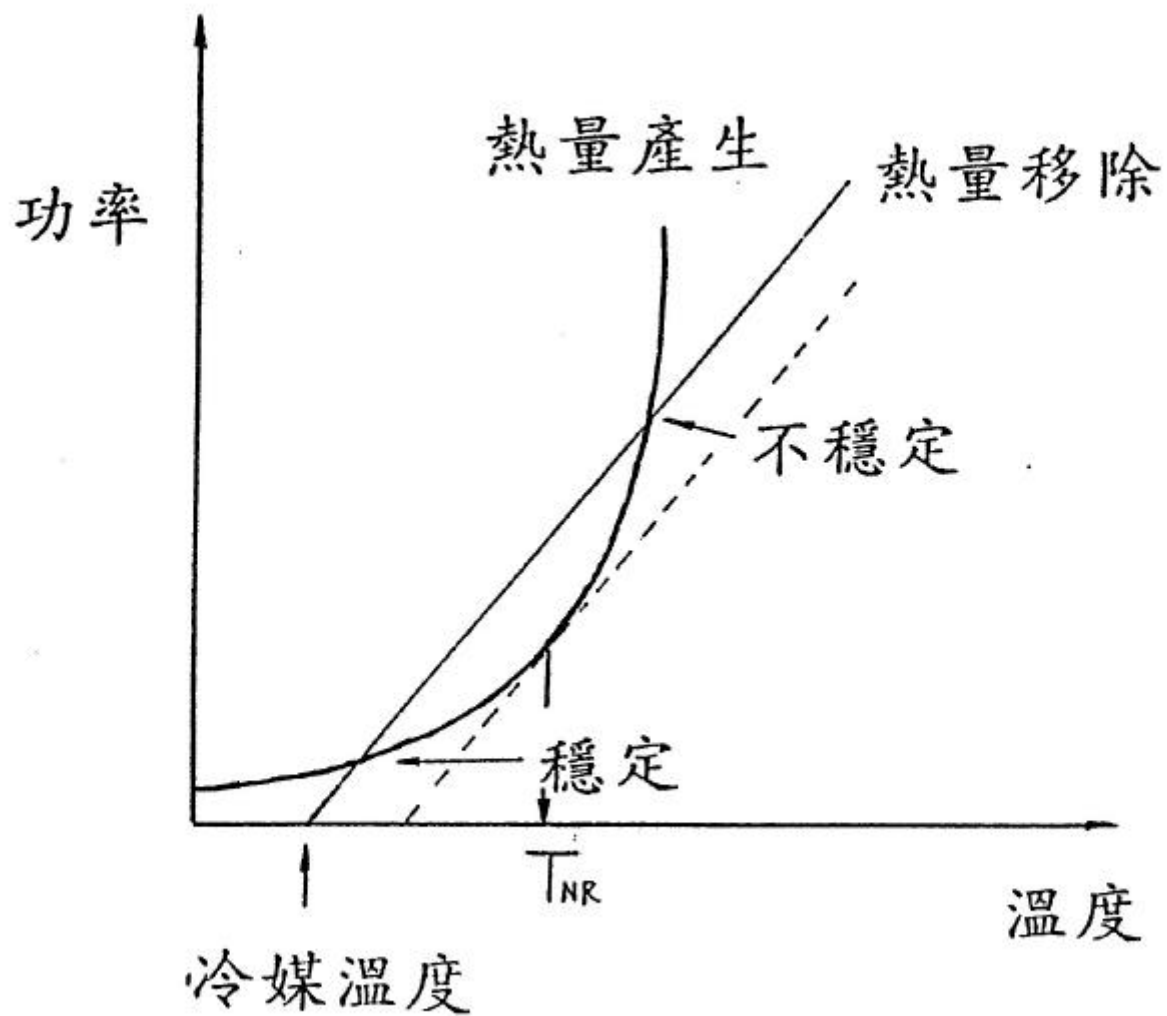


熱量產生

$$Q_G = MC_p A e^{-E_a/RT}$$

熱量移除

$$Q_R = UA(T - T_o)$$



爆炸性或不安定官能團

- Nitro compound : 硝基苯, TNT, 苦味酸, NH_4NO_3 。
- Organic peroxide : BPO, MEKPO, CHP, TBHP..等。
- $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$: 35%, 50%, 90%。
- 烯類 : 乙烯, 丙烯, 丁二烯, 苯乙烯等。
- EO : ethylene oxide

含特定官能基有機化合物分解熱的實驗值

化合物	官能基	分解熱範圍(H, -KJ/mol)
Nitro	$\begin{array}{c} \parallel \\ \diagup \text{C}-\text{NO}_2 \\ \diagdown \end{array}$	220 .. 410
Nitroso	$\begin{array}{c} \parallel \\ \diagup \text{C}-\text{N}=\text{O} \\ \diagdown \end{array}$	90 ... 290
Oxime	$\begin{array}{c} \parallel \\ \diagup \text{C}-\text{N}=\text{OH} \\ \diagdown \end{array}$	170 ... 230
Isocyanate	$-\text{N}=\text{C}=\text{O}$	20 ... 30
Azo	$-\text{N}=\text{N}-$	100 ... 180
Hydrazo	$-\text{NH}=\text{NH}-$	65 ... 80
Dizzo	$\begin{array}{c} \parallel \\ \text{C}-\text{N}\equiv\text{N} \end{array}$	130 ... 165
Peroxi	$\begin{array}{c} \diagdown \\ -\text{C}-\text{O}-\text{O}- \\ \diagup \end{array}$	200 ... 340
Epoxi	$\begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ -\text{C}-\text{O}-\text{C}- \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \end{array}$	45 80
Double bond	$\begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \end{array}$	40 ... 90

有機過氧化物分解能- U(KJ/mol)

Tert-butyl peroxybenzoat	330
Tert-butyl peroxy-2-ethylhexanoat	330
Tert-butyl peroxy-pivalat	250
Cumol hydroperoxide	265
Dicumyl peroxide	340
Dibenzoyl peroxide	340
Dibenzoyl peroxide	370
Dibenzoyl peroxide	360

含雙鍵化合物分解能量- U(KJ/mol)

Acrylic acid	67
Acrylic acid	77
1-butene	87
Styrene	73
Vinyl acetate	88
Vinyl chloride	71

芳香族硝基化合物的分解能- $U(\text{KJ/mol})$

1.3-dinitrobenzene	387
2.4-dinitrotoluene	402
Dinitroorthocresol	387
trinitroaniline	379
Trinitro benzoic acid	387
Trinitrotoluene	383
Trinitrophenol	384

部分分子官能基的分解放熱起始溫度

Group	Onset temperature of decomposition in DTA (10 K/min)	ADT ₂₄ from Dewar tests
-NO ₂	360	280
=NOH	200	110
-NO	150	80
-C-O-O-	130	80
-N ₂ ⁺	150	80
-NH-NH ₂	250	220
-N ₃	130	80

化學反應熱焓量的大小

Typical values	J mol ⁻¹		J mol ⁻¹
Neutralization (HCl)	- 55 000	Amination	-120 000
Neutralization (H ₂ SO ₄)	-105 000		
Diazotization	- 65 000	Heat of combustion	
Sulfonation (SO ₃)	-150 000	(hydrocarbons)	-900 000
Nitration	-130 000		
Epoxidation	- 96 000	Diazo decomposition	-140 000
Hydrogenation	-560 000	Nitro decomposition	-400 000
(nitroaromatic compd)			

MHIDAS資料庫之失控反應災害資料整理分析

MHIDAS資料庫收集自1900至1991年世界上所發生重大化學災害資料。包含時間、地點、災害、物料名稱與聯合國編碼、事故型態、事故源、原因、物料釋放量、損壞程度、死亡及受傷人數、關鍵字、事故摘要等重要資訊。其中與失控反應有關的事故共205件，將此205件事故加以整理，以供參考。

災害次數較多的化學品

下表為發生災害次數較多的化學品統計表。由此可見環氧乙烷、有機過氧化物、硝化物為製程中具最大熱危害的化學品。而各類的硝化物發生的災害次數總和為最高，共有26次。

MHIDAS中失控反應化學品一覽表

化學品名稱	環氧乙烷	過氧化物	氯氣	硫酸	三氯酚	硝酸	苯胺	硝基酚	氯化氫	三硝基甲苯	二甲苯
失控災害次數	18	14	11	9	8	6	6	4	3	3	3

發生失控反應的主要原因為熱化學、反應速率、熱傳及設備操作故障等因素。

- 熱化學因素

- (1)主反應或副反應大量放熱
- (2)反應失控時系統升溫造成壓力上升
- (3)生成物受熱分解

- 反應速率因素

- (1)主副反應速率太快放熱太多
- (2)達失控反應的最大反應速率時間太短(TMR太短)
- (3)放熱速率加速：加料過量、加料太快、不純物污染、攪拌因素。

- 熱傳因素

- (1)反應物質的比熱小
- (2)熱傳效果不佳
- (3)系統的粘度變高
- (4)生成物的比熱變小

- 設備操作因素

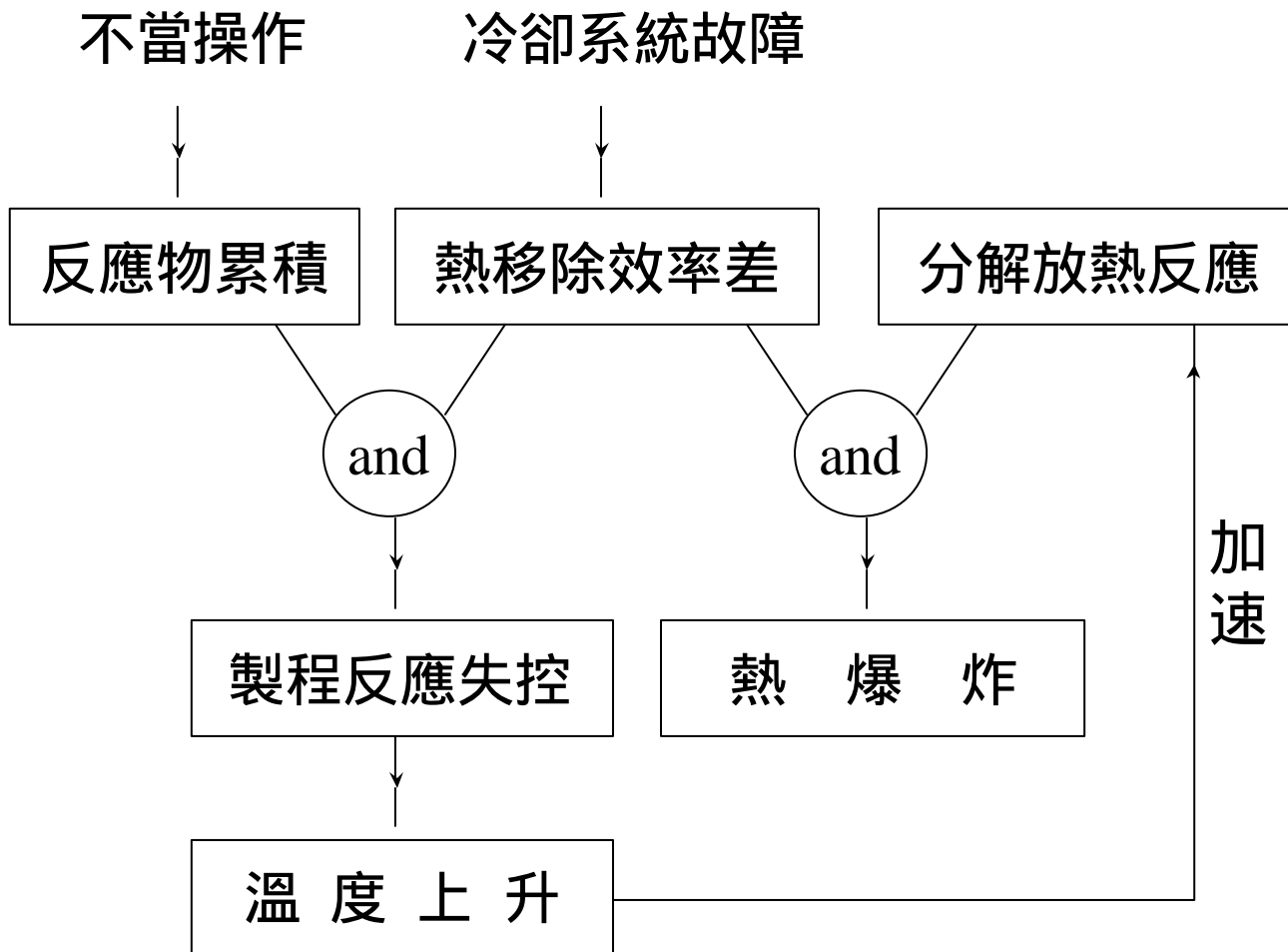
- (1)冷卻方式不妥
- (2)電源停止
- (3)冷卻系統故障
- (4)洩放系統失效
- (5)緊急情況的操作與訓練不足

英國重大失控反應化災資料分析

英國於1962至1984年間重大失控反應化災資料分析已整理分析。本次再將其延伸至1987年，總計189次批次反應引起的化學災害。其中55次資料不足，數據分析以134次資料為主。主要事故反應類別計11種，如下表所示。若以災害原因分類，則可分為(1)製程化學特性及(2)設備與操作二方面。

項次	反應類別	事故件數
1	聚合(polymerization)	64
2	硝化(nitration)	15
3	磺化(sulfonation)	13
4	水解(hydrolysis)	10
5	鹽的形成(salt formation)	13
6	鹵化(halogenation)	8
7	烷化(alkylation)	5
8	胺化(amination)	4
9	重氮化(diazotization)	4
10	氧化(oxidation)	2
11	脂化(esterificationj)	1
合 計		134

典型失控反應的發生



失控反應的觸發：製程條件偏離

(a)化學因素：副產物、不安定中間物、不相容物、原料污染、自催化、化學知識不足

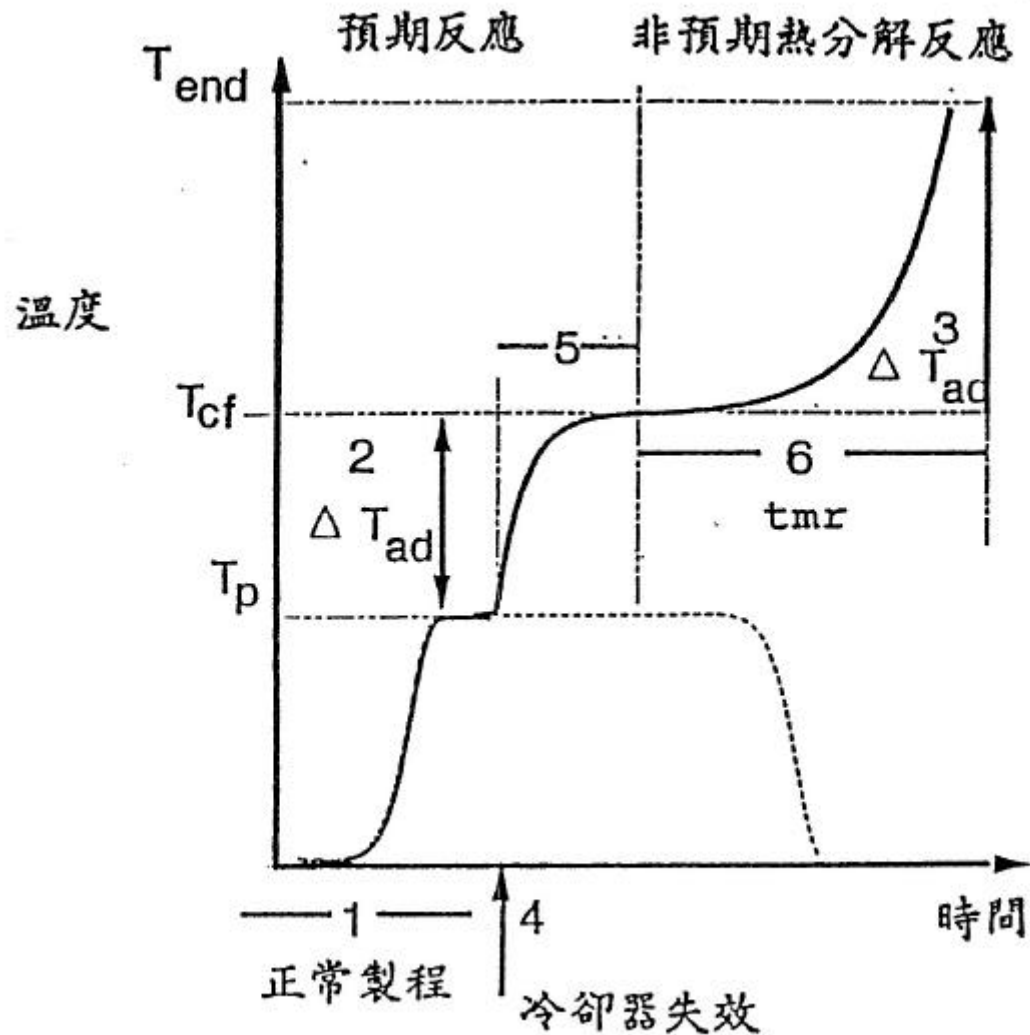
(b)物理因素：混合不均、多種相層

(c)製程控制：進料速率、順序、反應溫度、儀器誤差、設計誤差、溫度控制、冷卻容量、批次進料

(d)人為因素

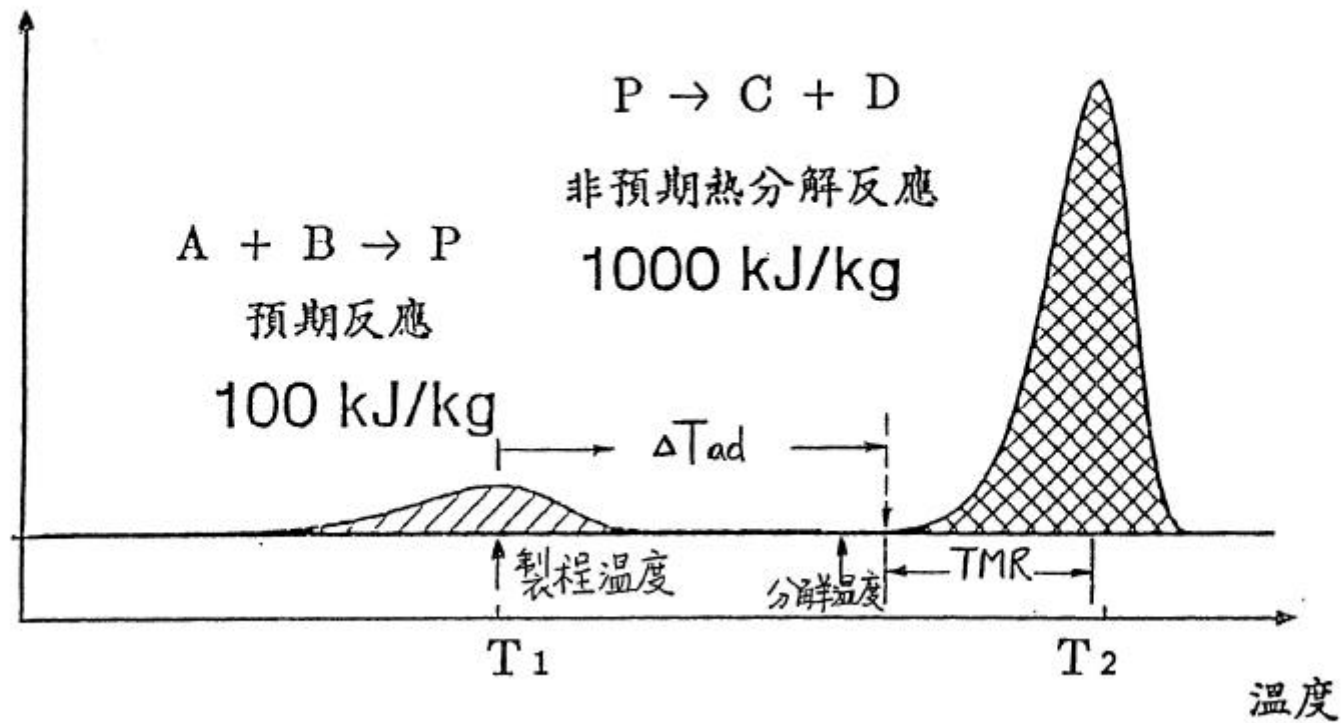
．需完全了解非預期失控反應才能制定出安全操作條件

失控反應發生過程

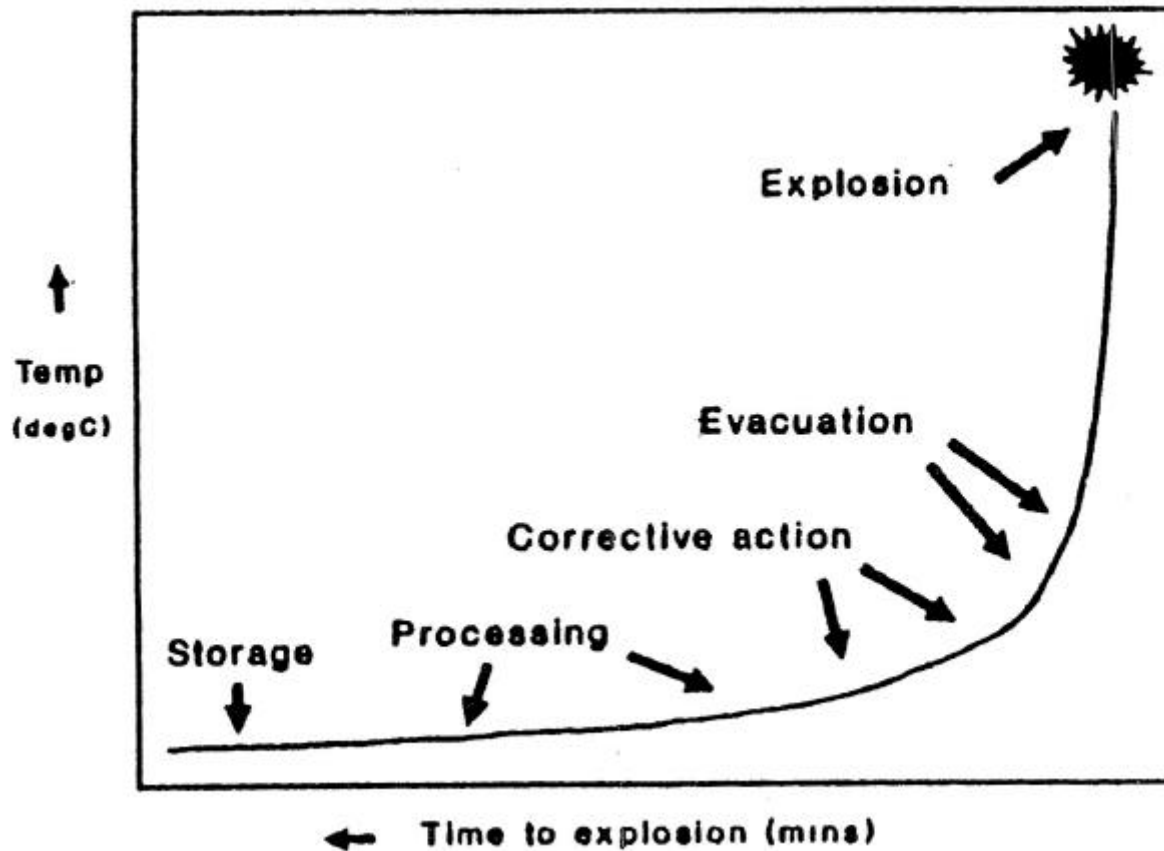


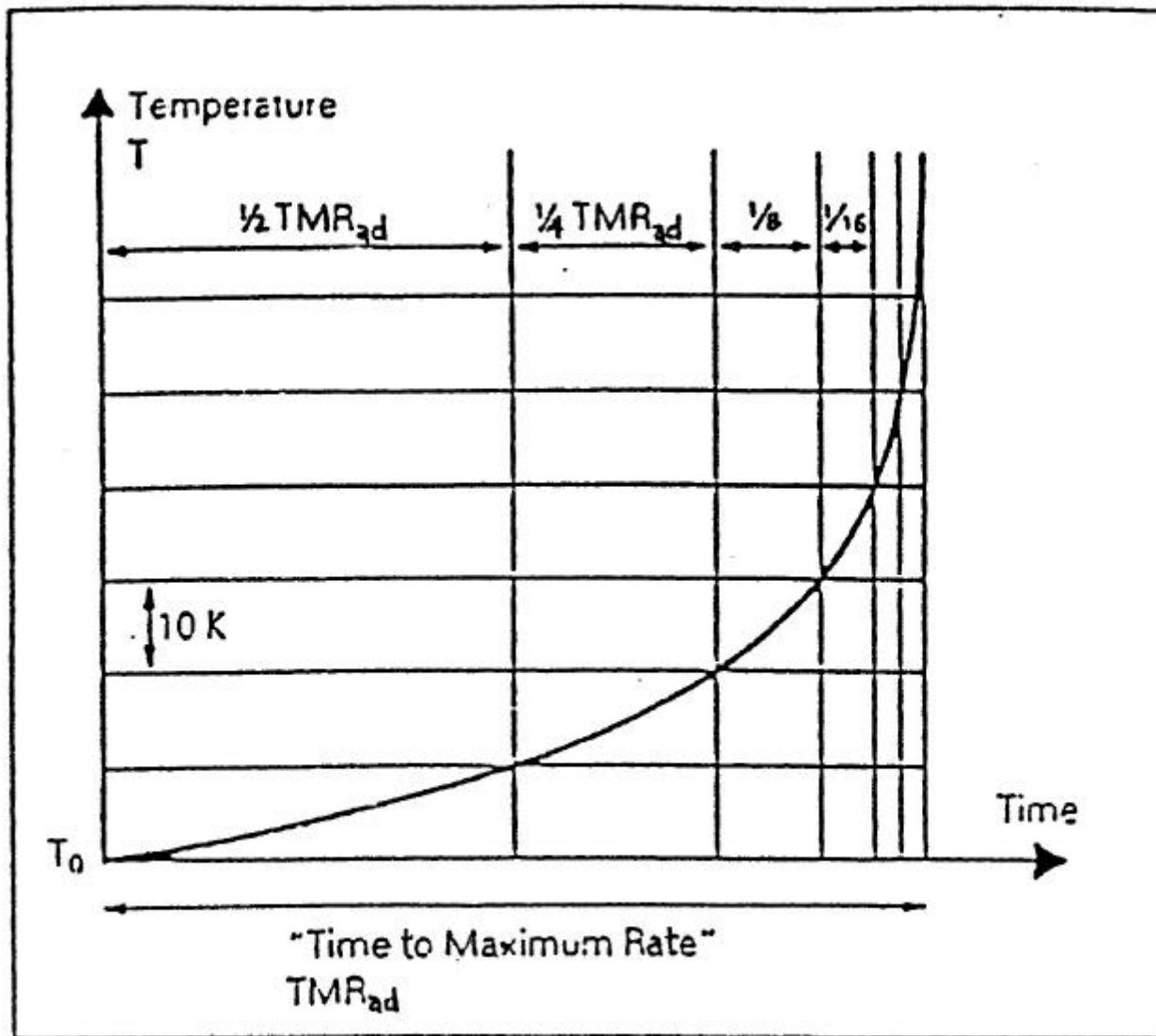
非預期熱分解反應

放熱速率



典型失控反應及溫度時間與控制關係





熱爆炸圖

失控反應鑑認與預防測試的應用

染料業

炸藥業(爆竹)業

肥料業

石化業

農藥業

西藥業

石化業

特化業

橡膠業

清潔劑業

催化劑及添加劑業

危險物及有害物通識規則

壹、危險物之爆炸性物質

- (一)硝化乙二醇、硝化甘油、硝化纖維及其他具有爆炸性質之硝酸酯類。
- (二)三硝基苯、三硝基甲苯、三硝基酚及其他具有爆炸性質之硝基化合物。
- (三)過醋酸、過氧化丁酮、過氧化二苯甲醯及其他機過氧化物。

危險物及有害物通識規則(續)

貳、有害物

但具有爆炸性或放熱性失控反應之危害行為

第一組： 有機溶劑中毒預防規則之物質		
(四)	1,2-二氯乙烯	1,2-Dichloroethylene
(七)	三氯乙烯	Trichloroethylene
(二九)	苯乙烯	Styrene
(三一)	四氯乙烯	Tetrachloroethylene
第二組： 特定化學物質危害預防之物質		
(五)	4-硝基聯苯及其鹽類	4-Aminodiphenyl and its salts
(十六)	氯乙烯	Vinyl chloride
(十七)	對一二甲胺基偶氮苯	p-Dimethylaminoazobenzene
(二三)	丙烯腈	Acrylonitrile
(三二)	對-硝基氯苯	p-Nitrochlorobenzene

危險物及有害物通識規則(續)

第三組：其他特定之化學物質		
(四)	乙腈	Acetonitrile
(六)	丙烯醛	Acrolein
(七)	丙烯酸	Acrylic acid
(八)	丙烯醇	Allyl alcohol
(九)	氯丙烯	Allyl chloride
(二七)	丁二烯	Butadiene
(五一)	2-氯-1,3-丁二烯	2-Chloro-1,3-butadiene
(五三)	環氧氯丙烷	1-Chloro-2,3-epoxypropane
(六六)	十硼烷	Decaborane
(六九)	二硼烷	Diborane
(七三)	1,1-二氯-1-硝基乙烷	1,1-Dichloro-1-nitroethane
(七五)	1,3-二氯丙烯	1,3-Dichloropropene
(七九)	二環戊二烯	Dicyclopentadiene
(九)	二硝基苯	Dinitrobenzene
(九一)	二硝基-鄰-甲酚	Dinitro-o-cresol
(九二)	二硝基乙二醇	Dinitroethyleneglycol
(九三)	二硝基甲苯	Dinitrotoluene

危險物及有害物通識規則(續)

(九八)	二乙烯苯	Divinybenzene(DVB)
(一)	1,2-環氧丙烷	1,2-Epoxypropane
(一 三)	丙烯酸乙酯	Ethyl acrylate
(一一二)	環氧乙烷	Ethylene oxide
(一二五)	六氯丁二烯	Hexachlorobutadiene
(一二六)	六氯環戊二烯	Hexachlorocyclopentadiene
(一三一)	過氧化氫	Hydrogen peroxide
(一四二)	丙烯酸甲酯	Methyl acrylate
(一四三)	甲基丙烯酸	Methacrylic acid
(一四四)	甲基丙烯腈	Methylacrylonitrile
(一五一)	過氧化丁酮	Methyl ethyl ketone peroxide (MEKPO)
(一五七)	甲基丙烯酸甲酯	Methyl methacrylate
(一六)	-甲基苯乙烯	-Methyl styrene
(一六六)	對硝苯胺	p-Nitroaniline
(一六七)	硝基苯	Nitrobenzene
(一七一)	硝基甲烷	Nitromethane
(一七二)	1-硝基丙烷	1- Nitropropane

危險物及有害物通識規則(續)

(九八)	二乙烯苯	Divinybenzene(DVB)
(一)	1,2-環氧丙烷	1,2-Epoxypropane
(一 三)	丙烯酸乙酯	Ethyl acrylate
(一一二)	環氧乙烷	Ethylene oxide
(一二五)	六氯丁二烯	Hexachlorobutadiene
(一二六)	六氯環戊二烯	Hexachlorocyclopentadiene
(一三一)	過氧化氫	Hydrogen peroxide
(一四二)	丙烯酸甲酯	Methyl acrylate
(一四三)	甲基丙烯酸	Methacrylic acid
(一四四)	甲基丙烯腈	Methylacrylonitrile
(一五一)	過氧化丁酮	Methyl ethyl ketone peroxide (MEKPO)
(一五七)	甲基丙烯酸甲酯	Methyl methacrylate
(一六)	-甲基苯乙烯	-Methyl styrene
(一六六)	對硝苯胺	p-Nitroaniline
(一六七)	硝基苯	Nitrobenzene
(一七一)	硝基甲烷	Nitromethane
(一七二)	1-硝基丙烷	1- Nitropropane
(一七三)	2-硝基丙烷	2- Nitropropane

危險物及有害物通識規則(續)

(一七四)	硝基甲苯	Nitrotoluene
(一八三)	五硼烷	Pentaborane
(二一六)	疊氮化鈉	Sodium azide
(二四八)	2,4,6-三硝基甲苯	2,4,6-Trinitrotoluene(TNT)
(二五)	醋酸乙烯酯	Vinyl acetate
(二五一)	溴乙烯	Vinyl bromide
(二五二)	乙烯基甲苯	Vinyl toluene

失控反應預防與評估

杜逸興教授

仁 德 醫 護 管 理 專 科 學 校

內 容

- 反應性危害評估需要那些測試資料？
- 需要那些測試技術及儀器？
- 反應性危害評估現有的測試標準及規範？
- 測試與評估流程的重要性
- 熱分析技術簡介
- 絕熱卡計技術簡介
- 反應熱上計技術簡介
- 測試數據在化工製程之應用及製程放大之熱害評估

物質及製程危害評估所需數據(HSE)

- 反應熱
- 絕熱升溫
- 氣體產生量
- 密閉反應器內最大壓力
- 熱產生速率
- 密閉反應器內最大升壓速率
- 到達反應最大速率時間
- 活化能
- 放熱始起溫度
- 是否具分解反應
- 是否具副反應
- 是否具爆轟性質
- 產物或分解物毒性高低

了解失控反應特性基本問題

1. 反應熱及分解熱的大小，是否危險？
2. 絕熱溫度上升？(T_{ad})
3. T_{ad} 是否引發失控反應？
4. 反應操作溫度與分解起始溫度、 T_{ad} 關係？
5. 是否有熱累積？
6. 如何達安全條件下最佳化的半批次反應？
7. 設計最小熱累積的製程及可能達到的最高溫度是否觸發失控反應？
8. 如何決定分解、反應是否為自催化反應？
9. “Time to Maximum Rate” 意義為何？
10. 如何利用TMR製定操作條件？

失控反應測試技術

1.熱分析技術(DSC, DTA)

- 快速、安全測得物質的放熱量、放熱速率、放熱起始溫度

2.絕熱卡計技術(ARC, RSST, PH1-TECII)

- 量測物質絕熱狀態，自加熱過程中溫度與壓力的變化情形

3.DIERS技術(RSST, VSP, PHI-TECII)

- 快速、安全測得物質失控的壓力數據、以進行緊急洩放設計

4.反應卡計技術(RC1, C-80)

- 模擬批式/半批式反應製程及製程參數改變所造成之效應

5.恆溫卡計技術(TAM, MS-80)

- 物質運輸/儲存之最高溫度測定

失控反應測試儀器

DSC, 微差掃熱卡計

- ．快速, 安全測得物質的放熱量, 放熱速率, 放熱起始溫度

ARC, 加速熱卡計

- ．量測物質絕熱狀態下, 自加熱過程中溫度與壓力的變化情形

RC1, 反應熱卡計

- ．模擬批次/半批次反應製程, 及製程參數改變所造成的效應

RSST, 化學反應分析儀

- ．快速, 安全測得物質失控的壓力數據, 以估算緊急洩放閥口徑

典型測試技術(CCPS)

TABLE TYPICAL TESTING PROCEDURES BY SEQUENCE

<u>Subject</u>	<u>Property to be Investigated</u>	<u>Typical Instrument/Information</u>
Identification of exothermic activity	Thermal	DSC/TA
Explosibility of Individual compounds	Detonation	Chemical structure Tube test Card gap Dropweight
	Deflagration	Oxygen balance High rate test Explosibility tests
Compatib[ility]	Reaction with common contaminants (e.g., water)	Specialized tests
Normal reaction	Reaction profile Effect of change Gas evolution	Bench-scale reactors (e.g., RCI)
Minimum exothermic Runaway temperature	Establish minimum temperature	Adiabatic Dewar Adiabatic calorimetry ARC
Runaway temperature Consequences	Temperature rise rates Gas evolution rates	Adiabatic Dewar Adiabatic calorimetry Pressure ARC VSP/RSST Pressure RCI

ARC=Accelerating Rate Calorimeter (Columbia Scientific Instrument Corp.)

DSC=Differential Scanning Calorimeter

DTA=Differential Thermal Analysis

RCI=reactor Calorimeter (Mettler Instrument Corp.)

RSST=Reactive System Screening Tool (Fauske and Associates)

VSP=Vent Size Package

反應性危害測試現有的規範

- ASTM

E472, E476, E487, E537, E698,
E967, E968, E771, E1231

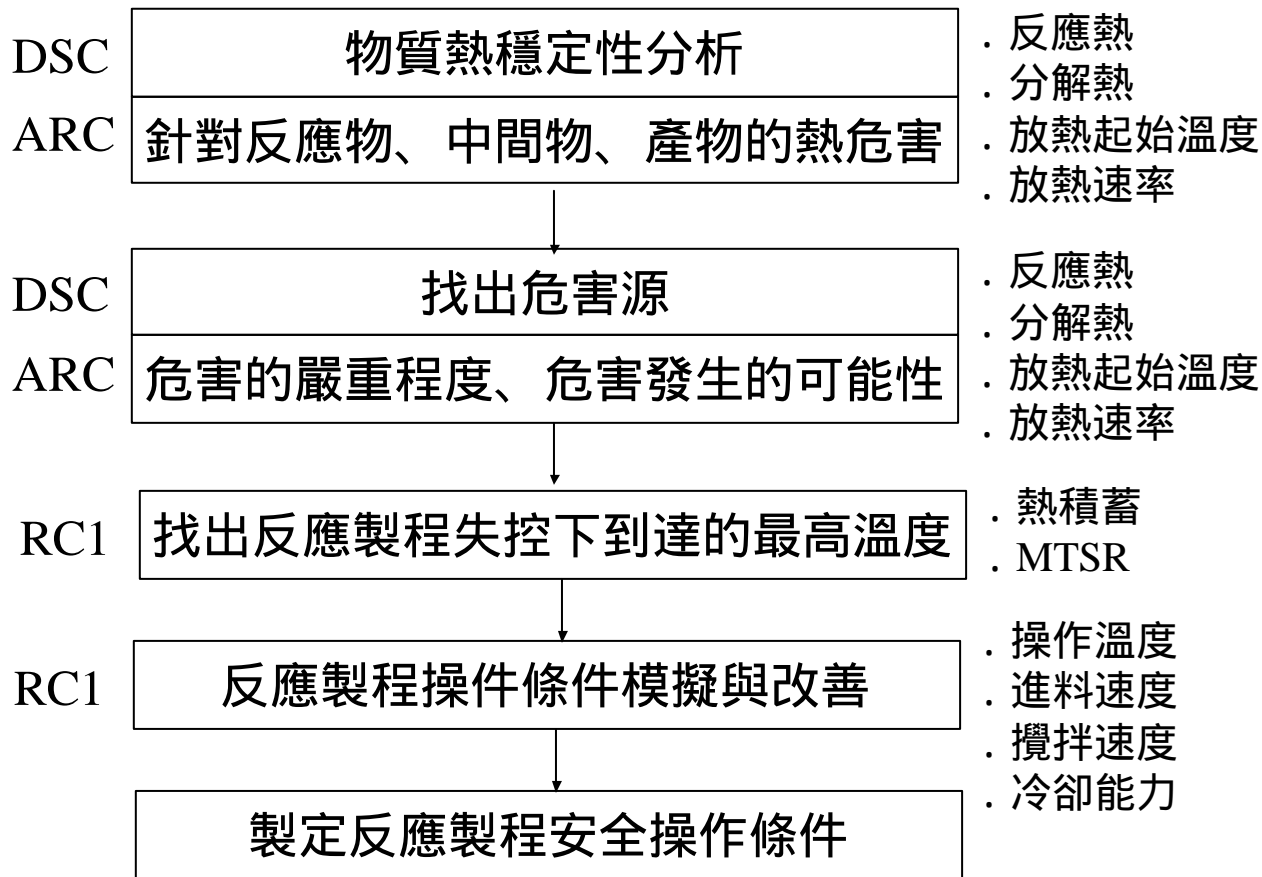
- CCPS規範(1993年)

- UN有機過氧化物 T_{SADT} 測試標準

化學反應危害評估步驟

- 文獻資料及計算
- 篩選測試
- 等溫卡計法：求取反應熱力學、反應動力學
- 絕熱卡計法：確認各別化合物及反應控制時潛在危害
- 緊急洩放處理

失控反應危害評估流程



When things go wrong!(HSE)

- 警報系統
- 進料動作停止
- 第二套冷卻系統起動
- 冰水機系統起動
- Dump system
- Quenching medium(Crash cooling)
- Catalyst killer system
- Vent or Not
- Vent system
- Relief system
- Ruptured disc
- Catch pot
- Knock-out drum
- Scrubber system

熱分析技術簡介

卡計：DTA(differential thermal analysis, 微差熱分析儀)

DSC (differential scanning calorimeter, 微差掃描熱卡計)

原理：DTA : $\frac{dQ}{dt} = C(T_s - T_R) = (-\Delta H) \frac{dn_p}{dt}$
 $A = c'(-\Delta H)$

DSC：Heat – flux DSC

$$Q_s = Q_{cs} + Q_{rs} = K_{cs}(T_c - T_s) + K_{rs}(T_r - T_s)$$

K_{cs} ：樣品與坩堝熱傳係數

K_{rs} ：參考體與樣品熱傳係數

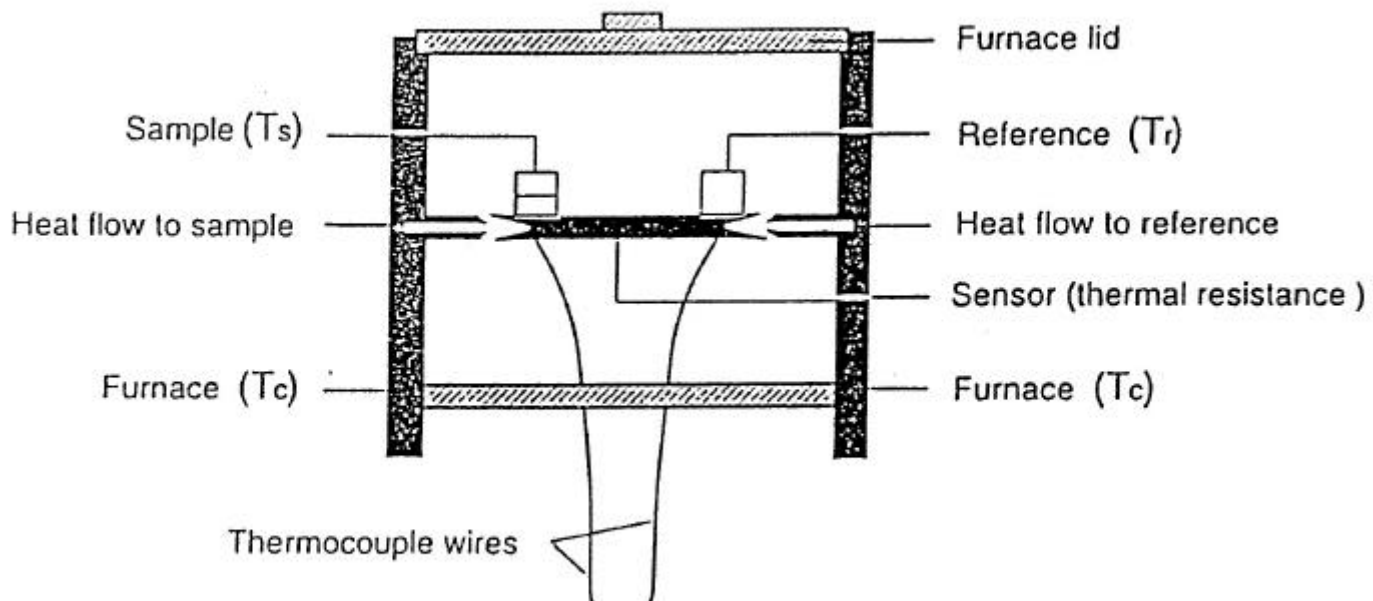
T_c ：加熱爐的溫度

T_s ：樣品的溫度

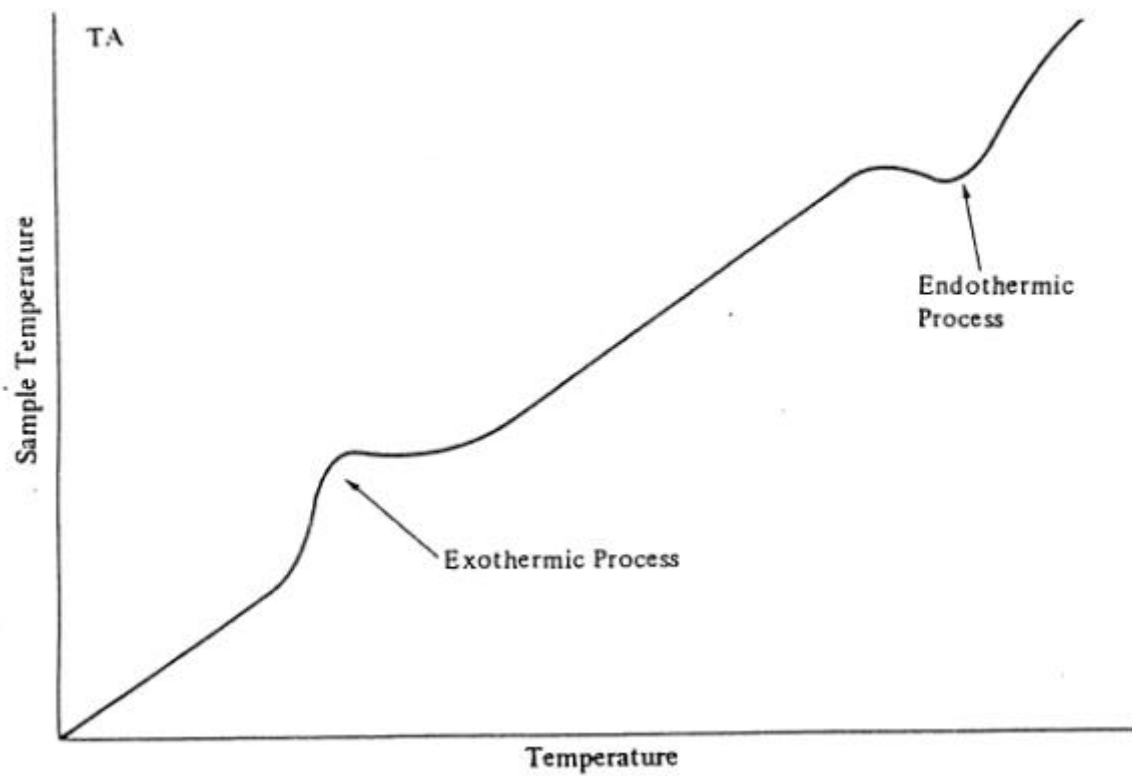
T_r ：參考體的溫度

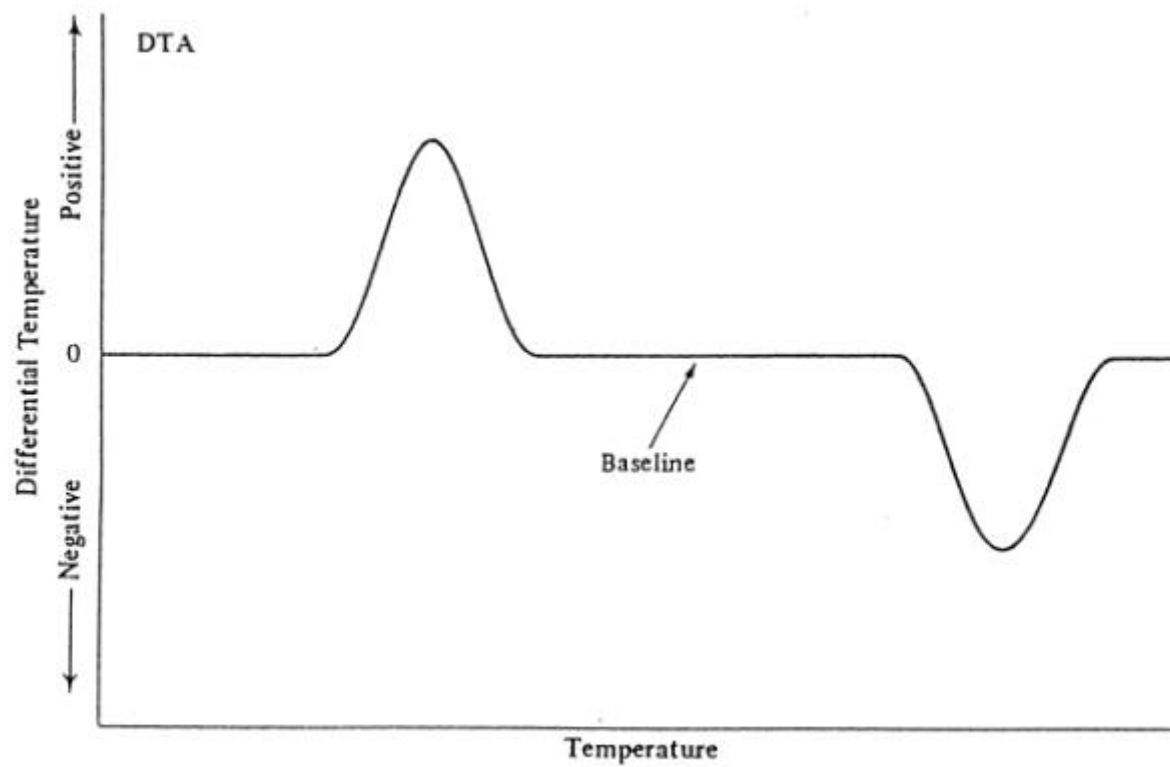
微差掃描熱卡計DSC

$$C_s(dT_s/dt) + Q_{rxn} = Q_s = Q_{cs} + Q_{rs} = K_{cs}(T_c - T_s) + K_{rs}(T_r - T_s)$$

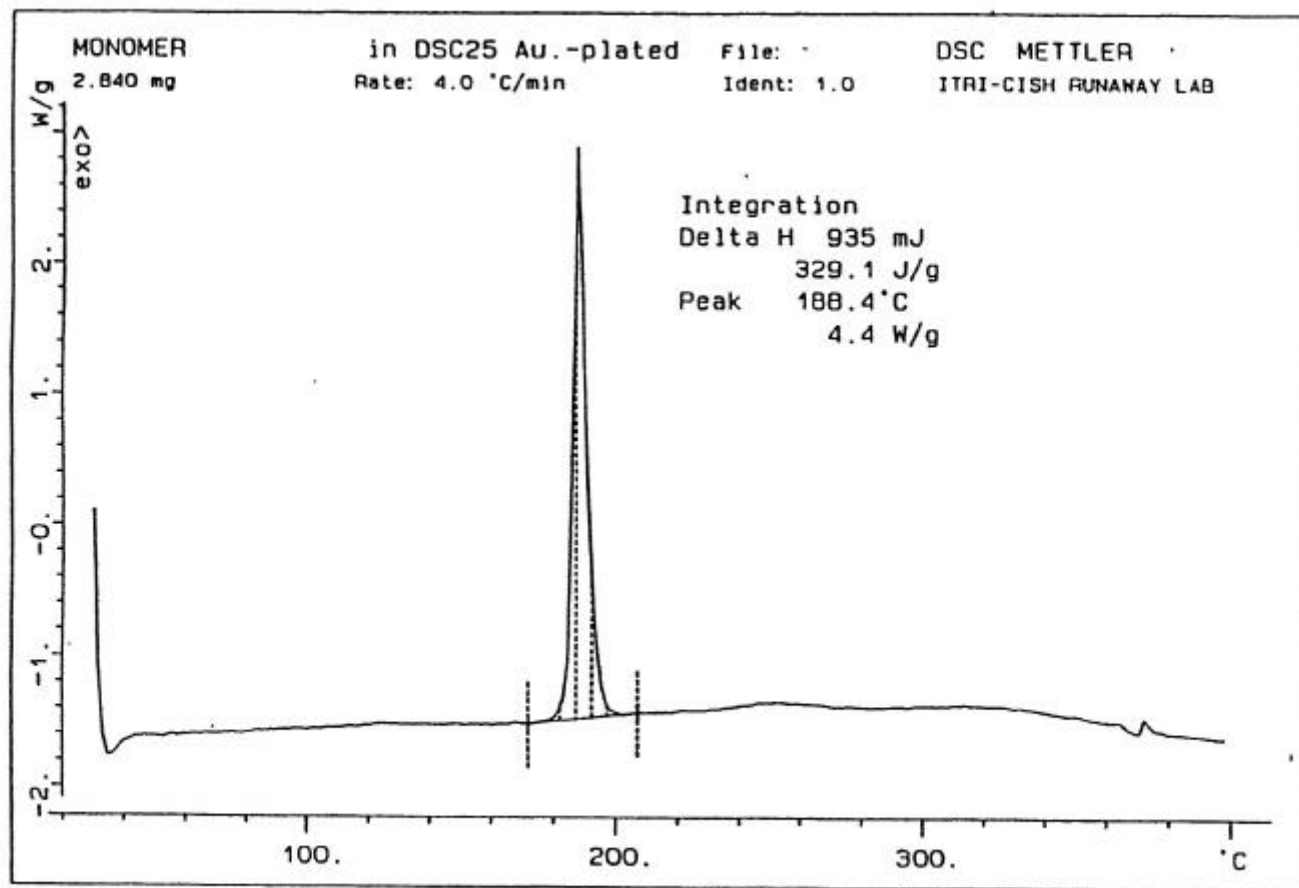


Measurement of the thermal e.m.f. U in μV





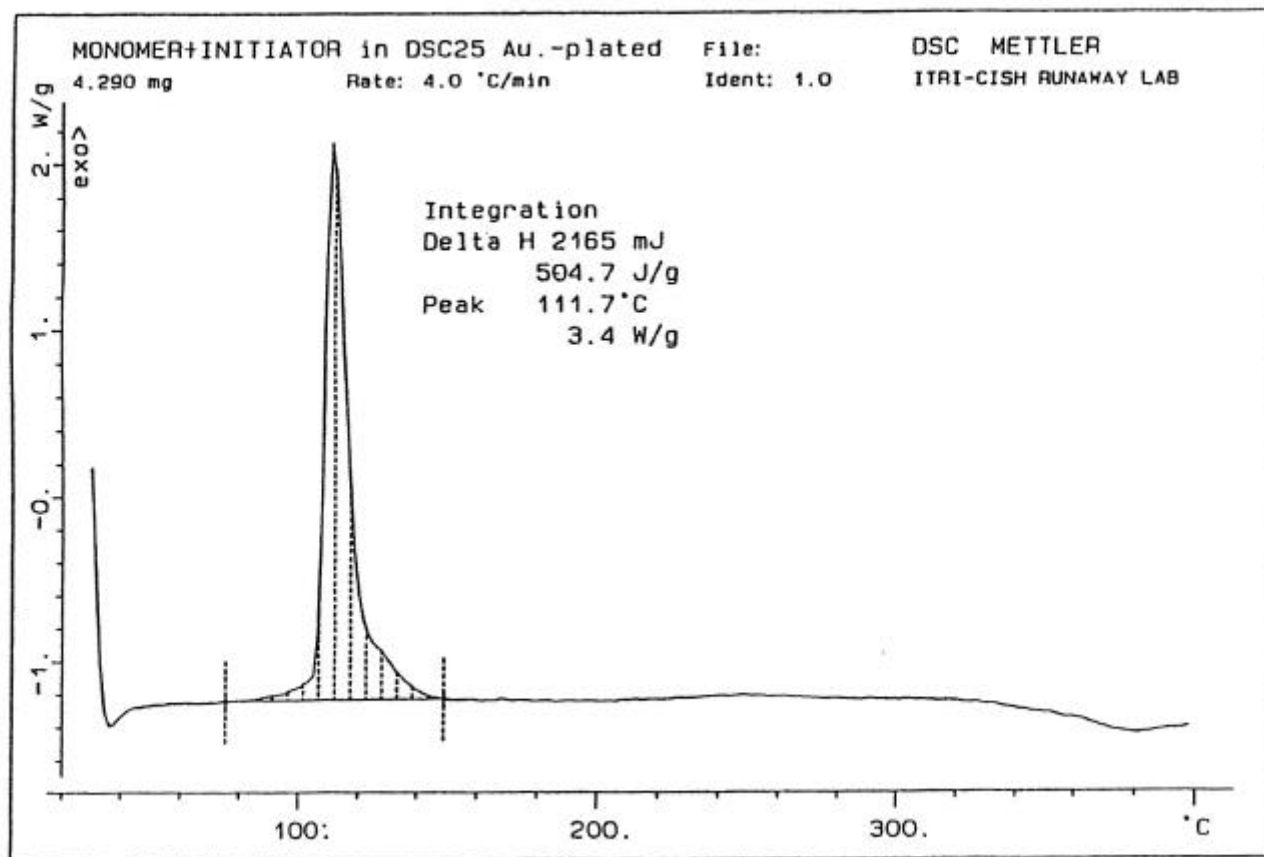
放熱功率



溫度

圖 單體熱譜圖

放熱功率



溫度

圖 單體與起始劑混合溶液熱譜圖

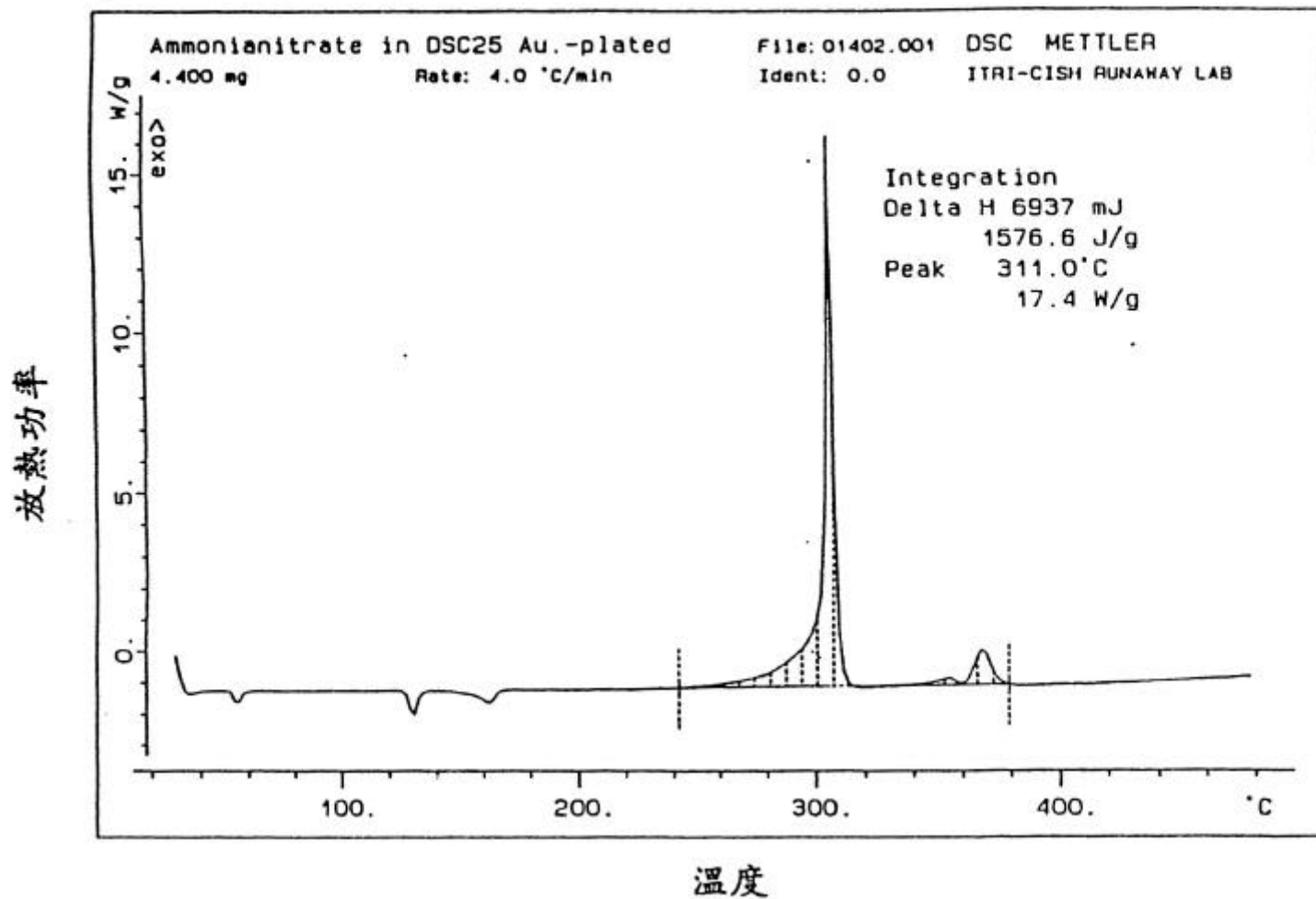


圖 硝酸銨DSC熱分析圖

放热功率

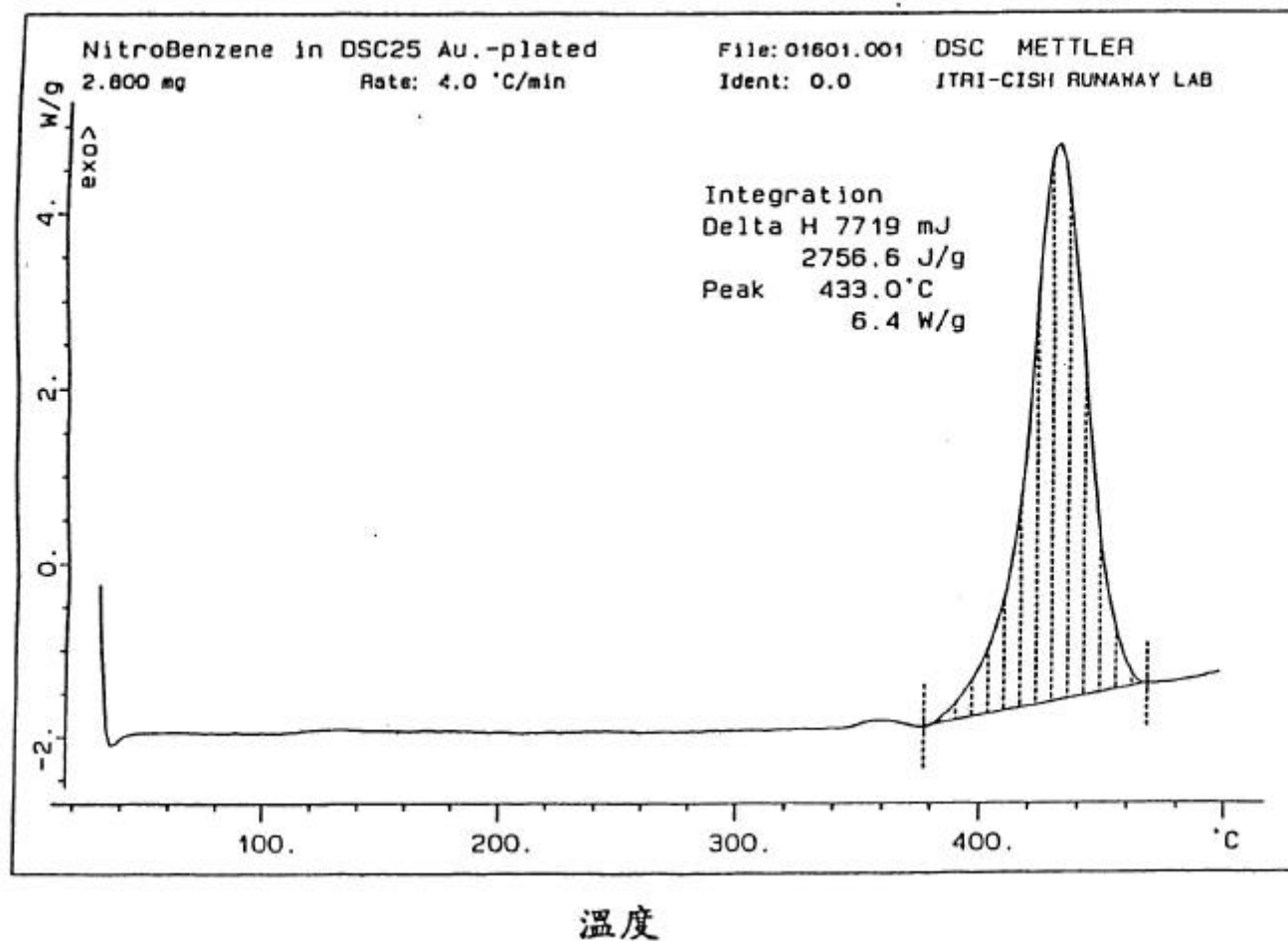


圖 硝基苯DSC熱分析圖

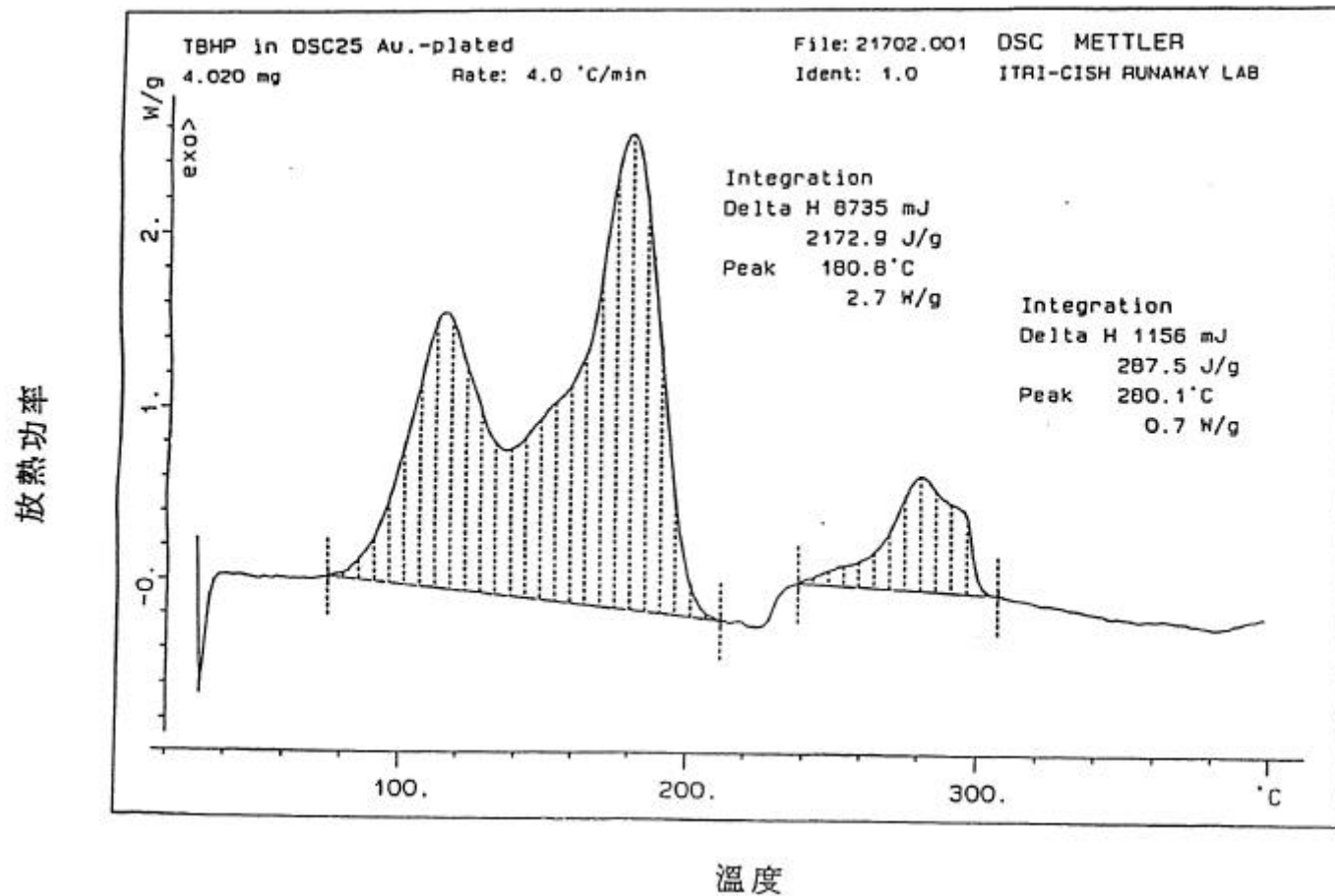


圖 TBHP之昇溫熱譜圖(昇溫速率=4°C/min)

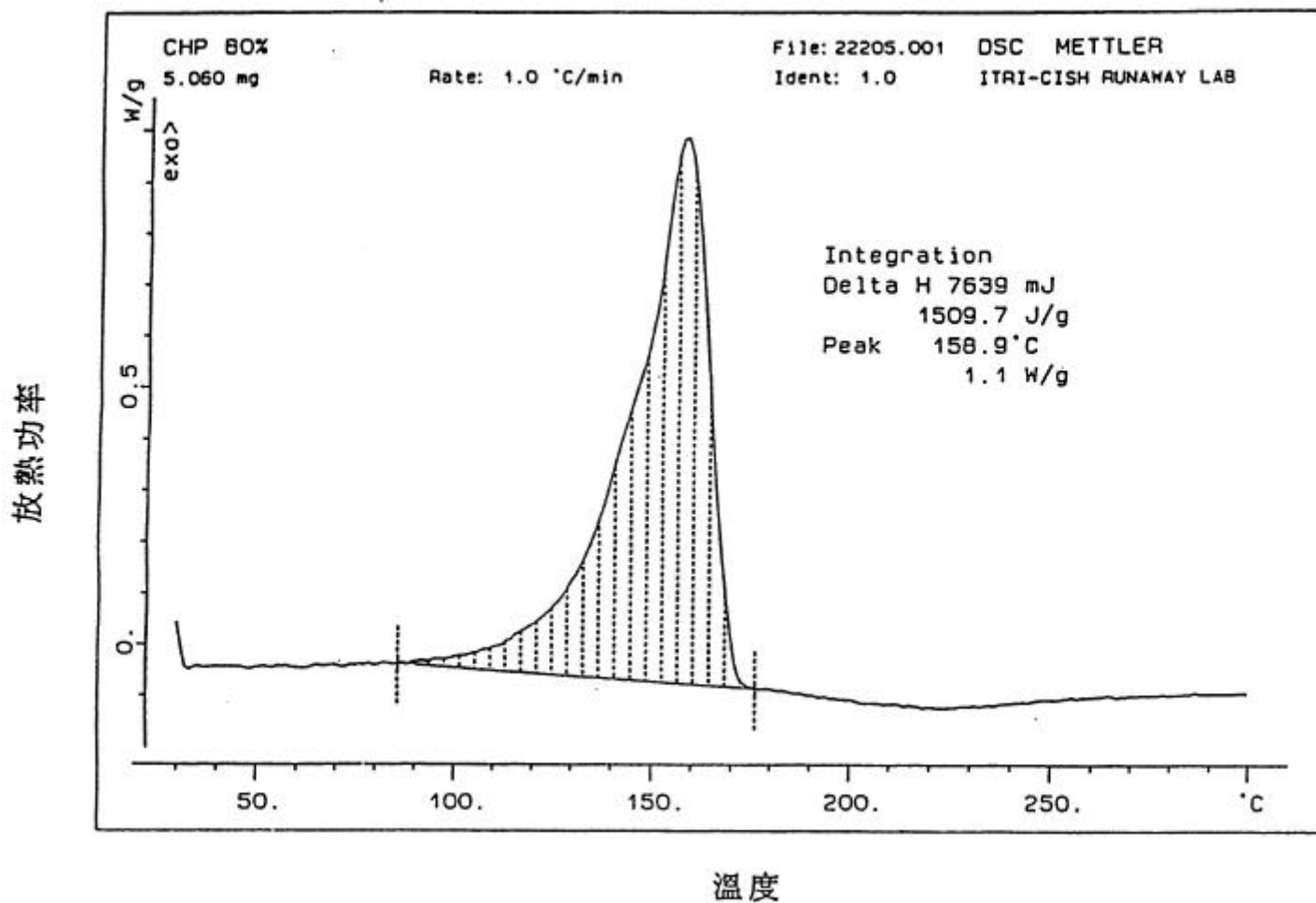
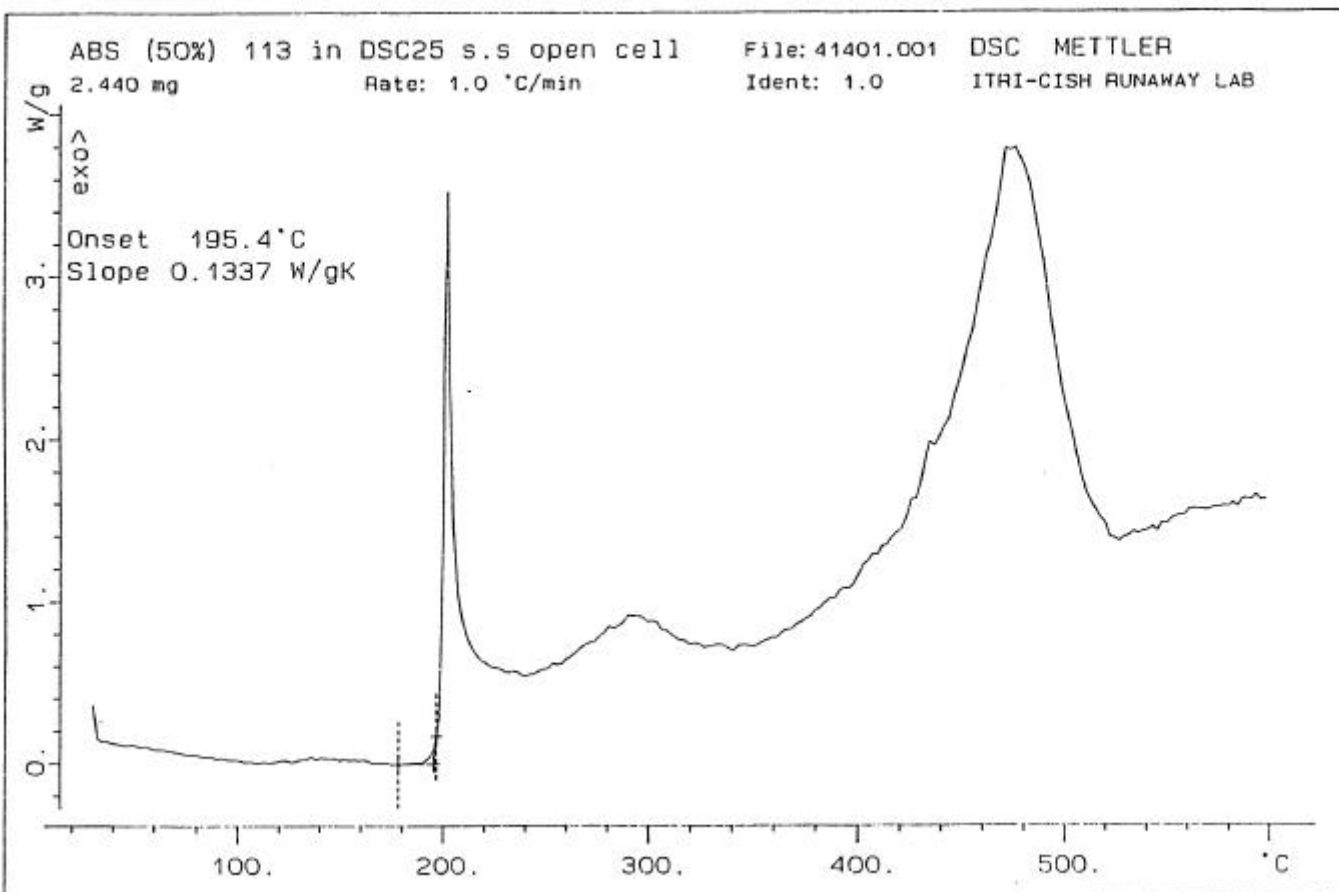


圖 80%CHP之昇溫熱譜圖(昇溫速率=4°C/min)



熱
功
率

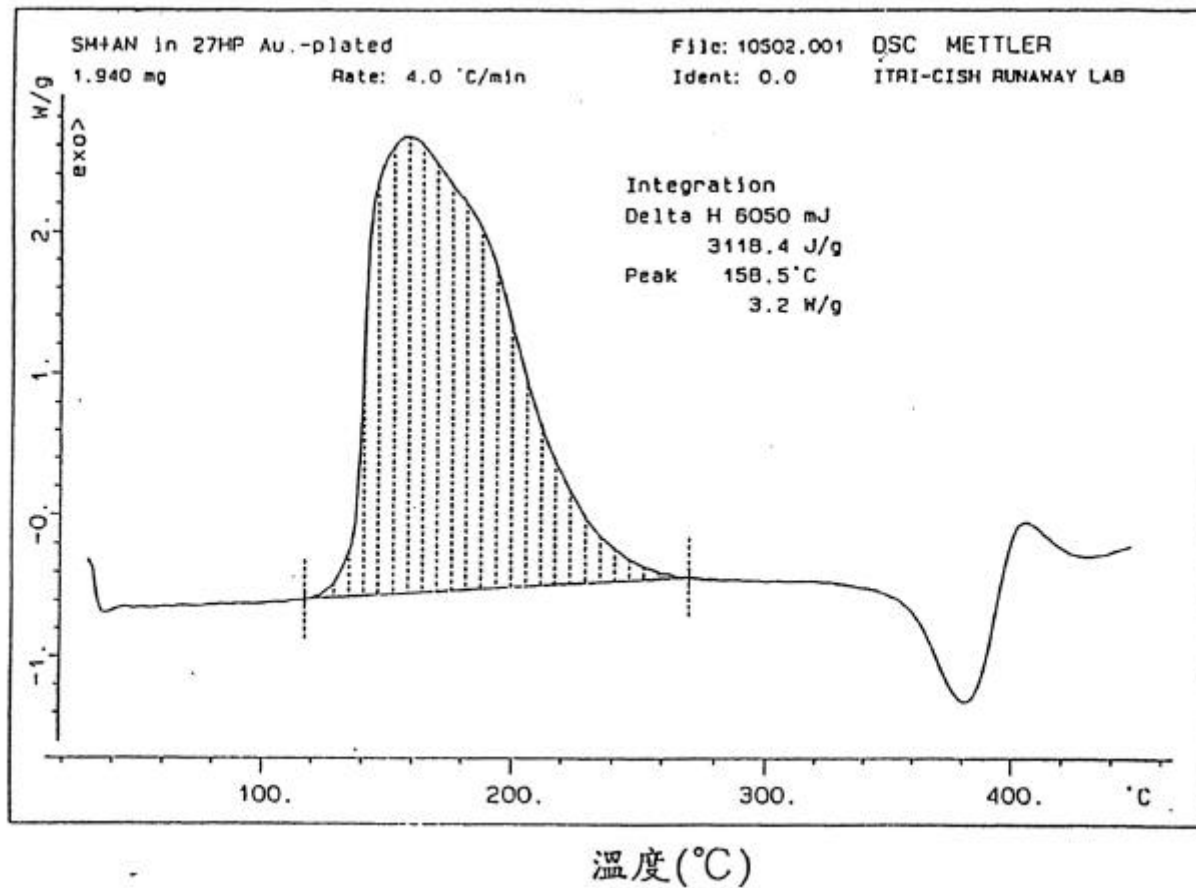
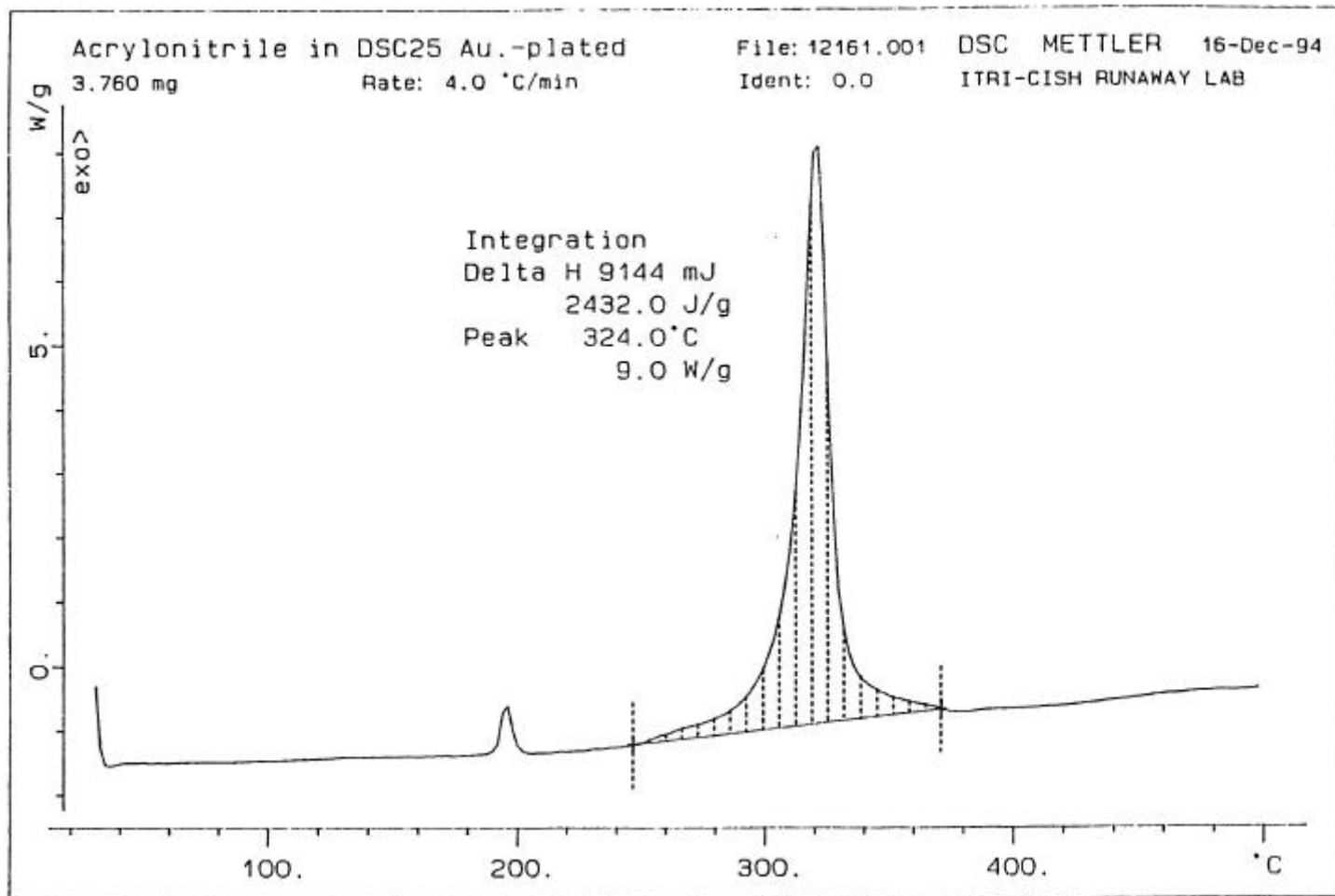


圖8 苯乙炔與丙烯?混合之熱譜分析圖



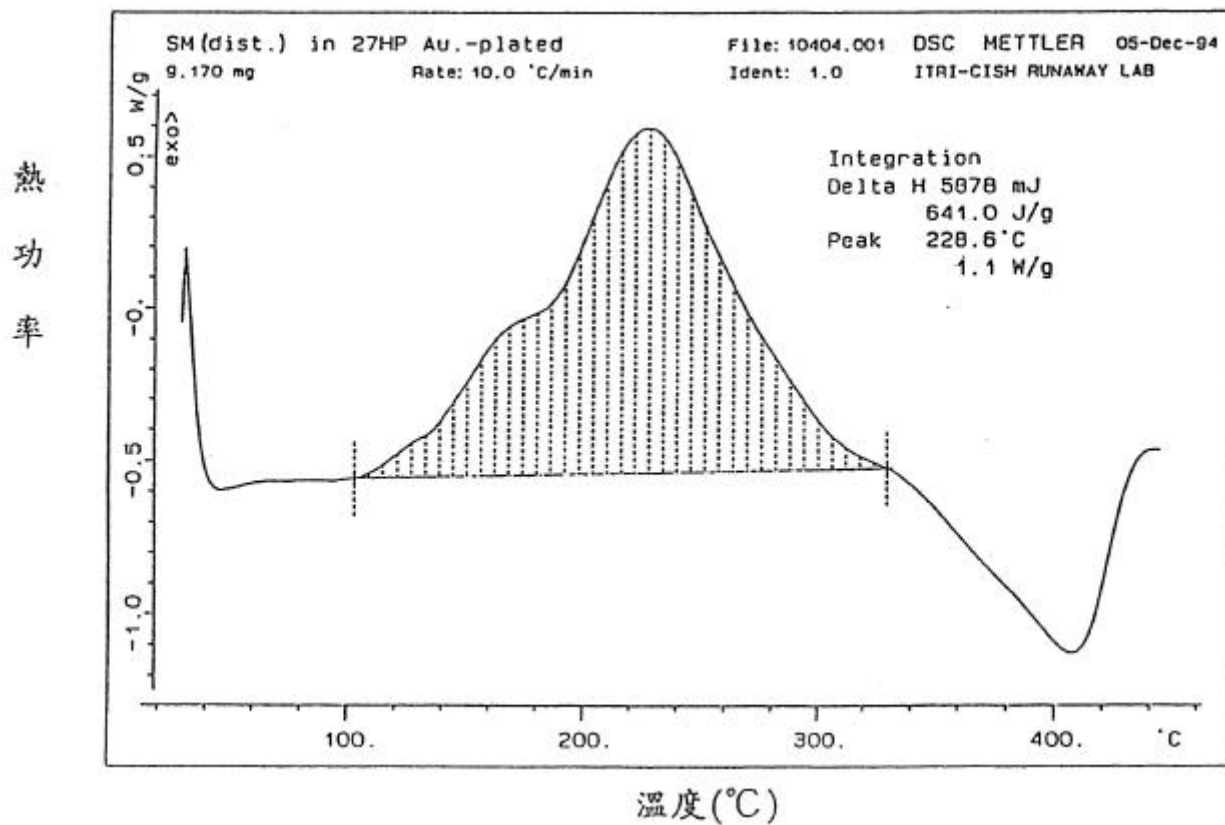


圖7 苯乙烯熱譜分析圖

絕熱卡計技術簡介

種類：

ARC：加速熱卡計

VSP

PHI-TECII

Dewar卡計

RC1絕熱模式

原理：(1) $T=T_s-T_r=0$

(2)環境線性熱補償

目的：(1)絕熱環境下反應系統特性

(2)反應失控的特性

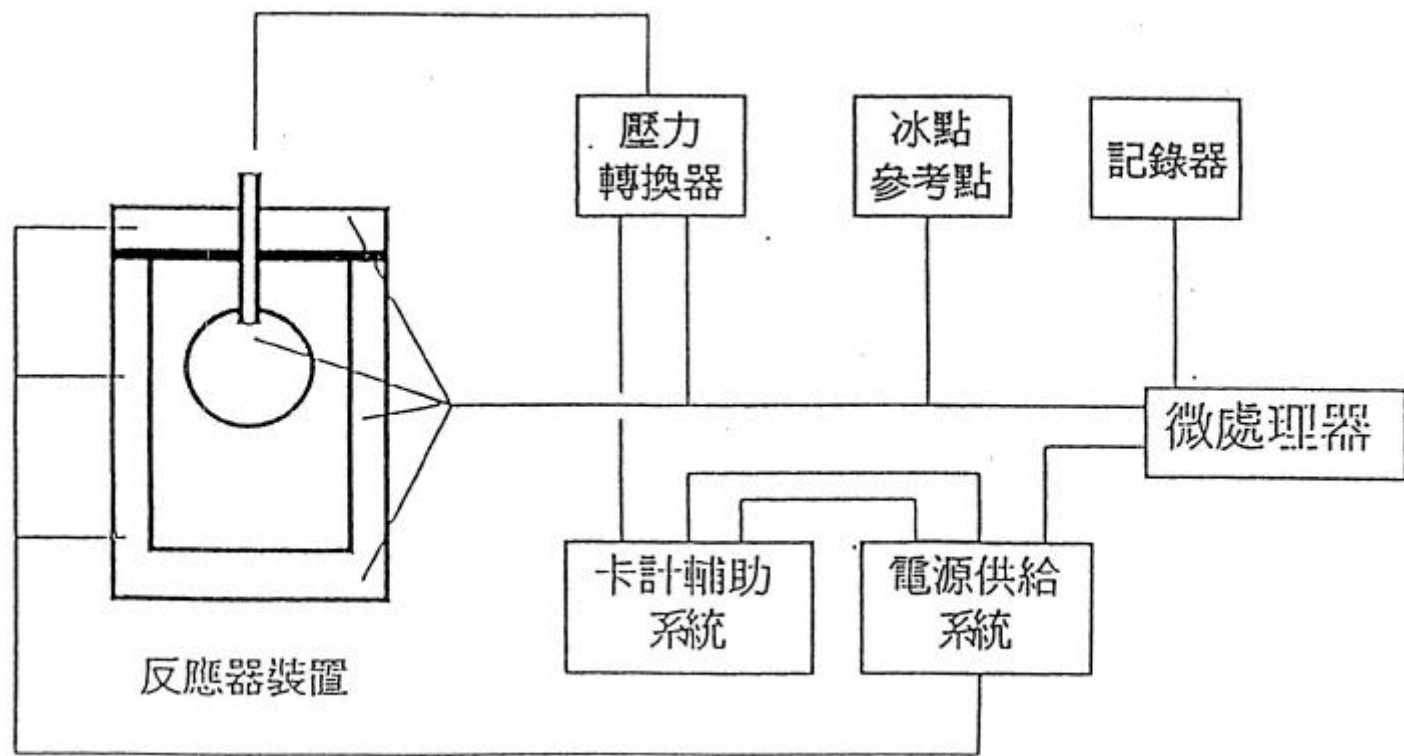


圖 ARC裝置系統圖

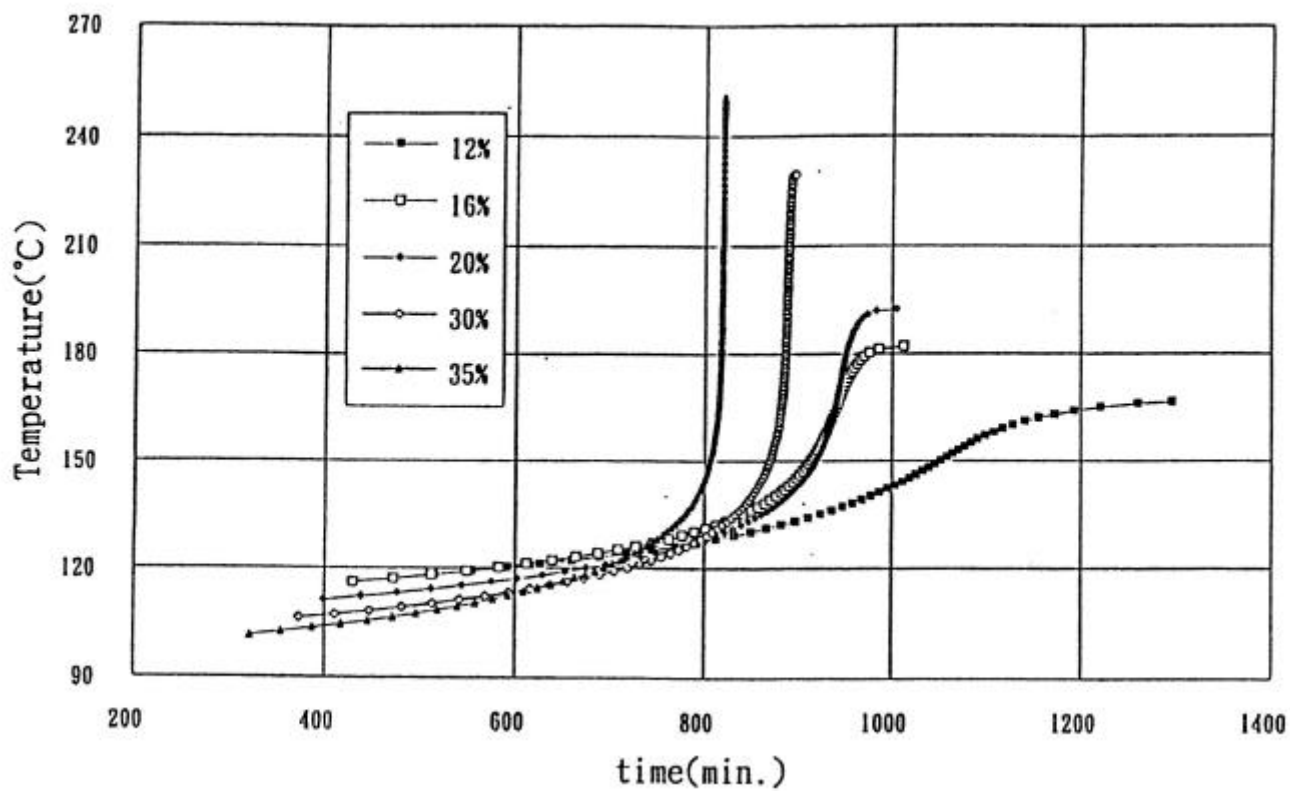


圖4 不同濃度的CHP之溫度隨時間變化圖

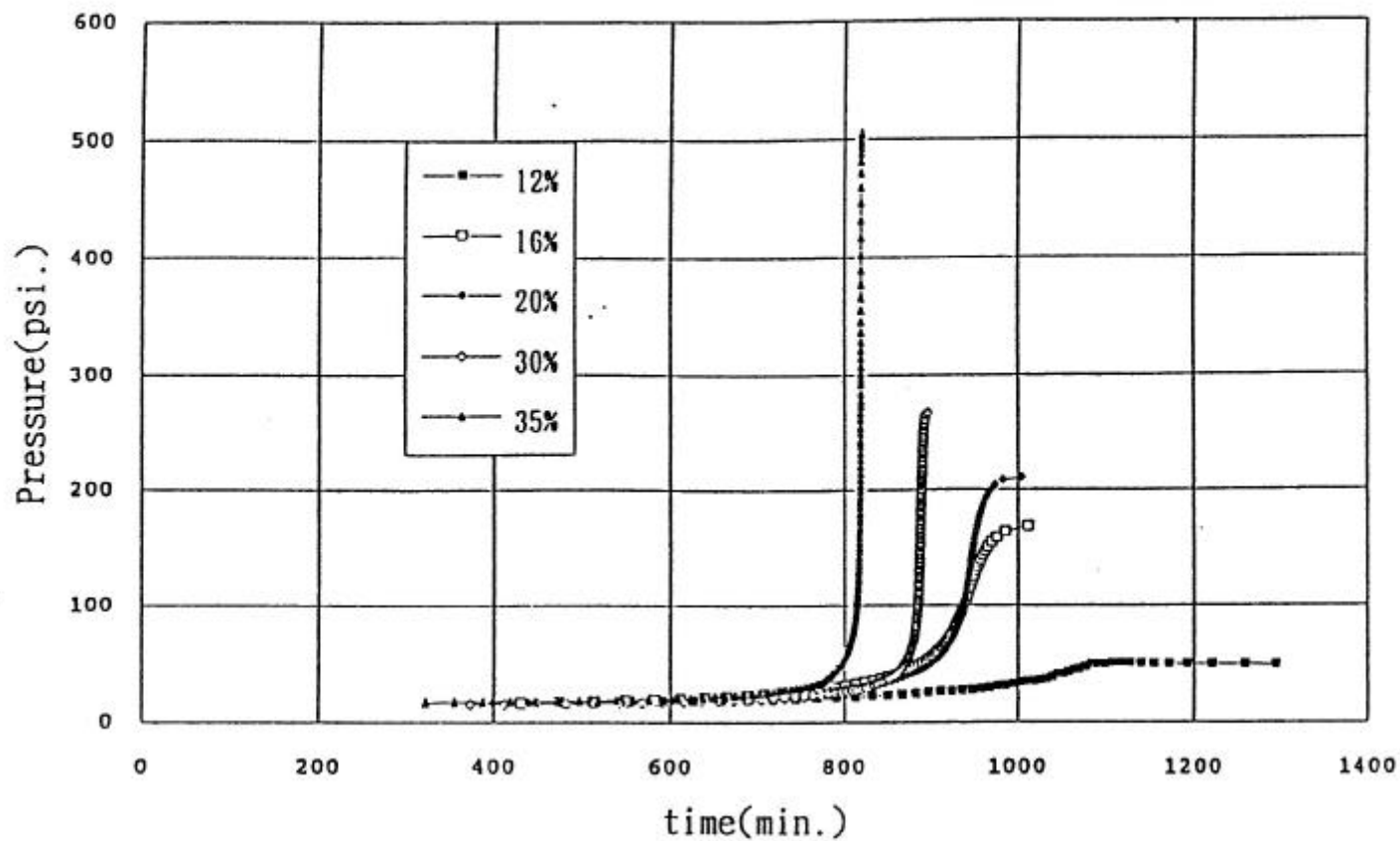


圖5 不同濃度的CHP之壓力隨時間變化圖

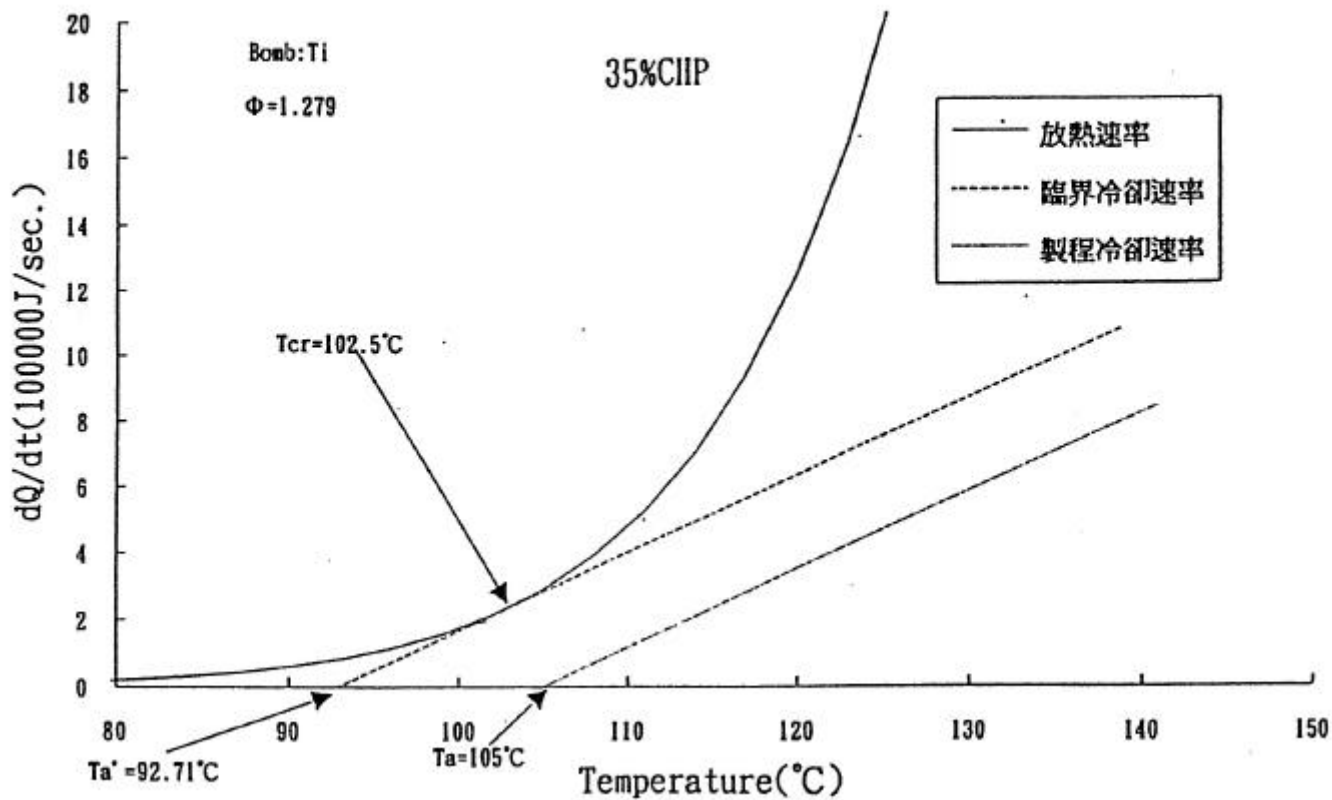


圖10 放熱速率與冷卻速率對溫度之關係圖

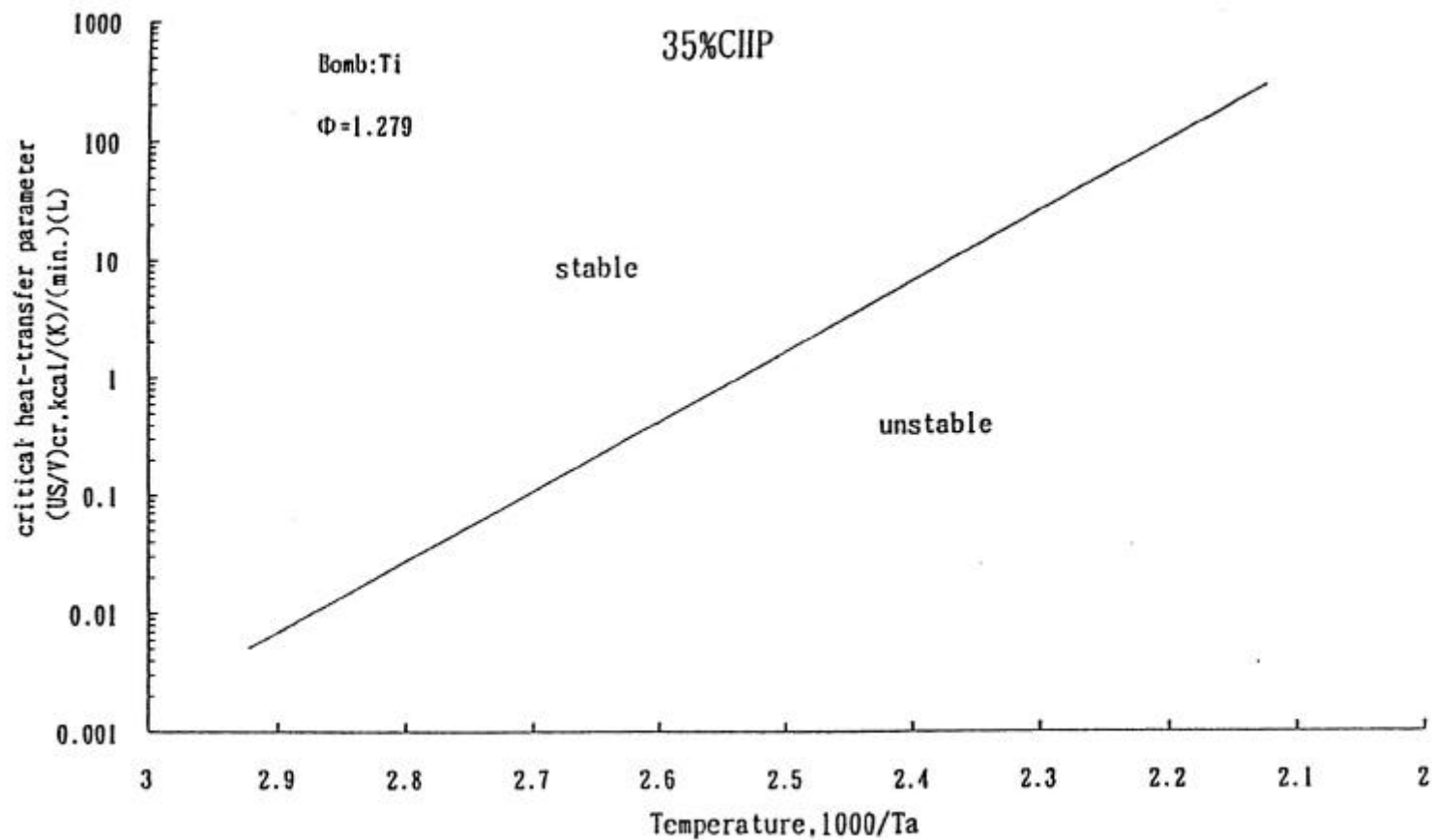


圖11 臨界熱傳參數對冷卻水溫度之關係圖

反應卡計技術簡介

種類：RC1, QRC, SIMULAR

原理：Inflow=Accumulation+Qutflow

$$(Q_r + Q_c + Q_{stir}) = (Q_a + Q_i) + (Q_f + Q_{dos} + Q_{loss} \dots)$$

Q_r ：物理或化學反應產生的熱量

Q_c ：校正功率

Q_{stir} ：攪拌器釋出之能量

Q_a ：暫存在反應系統的熱量

Q_i ：暫存在內部配件的熱量

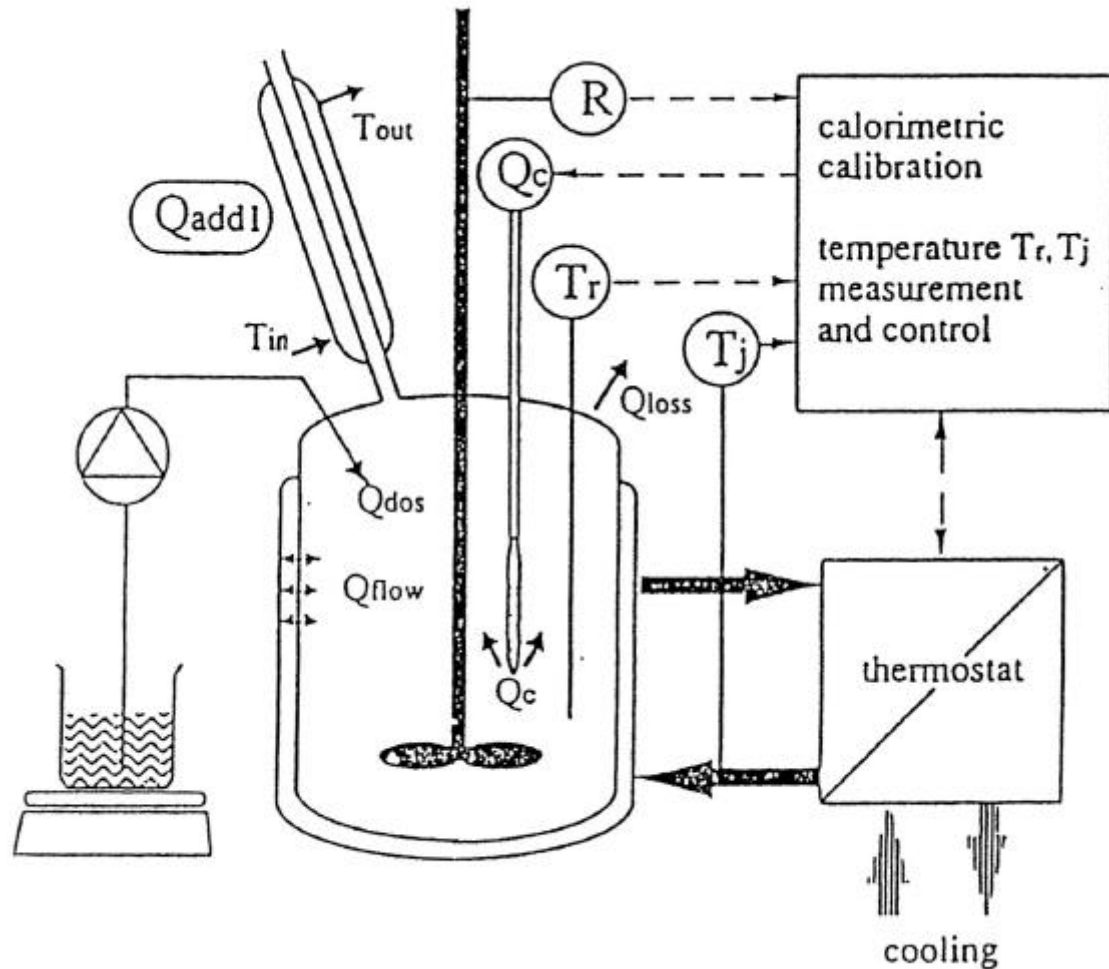
Q_f ：反應物傳統夾層油的熱量

Q_{dos} ：低溫物料進入反應槽吸收的熱量

Q_{loss} ：由槽蓋散失的熱量

反應熱卡計RCI

$$Q_r + Q_{cal} = Q_{flow} + Q_{accum} + Q_{dos} + Q_{loss} + Q_{add}$$



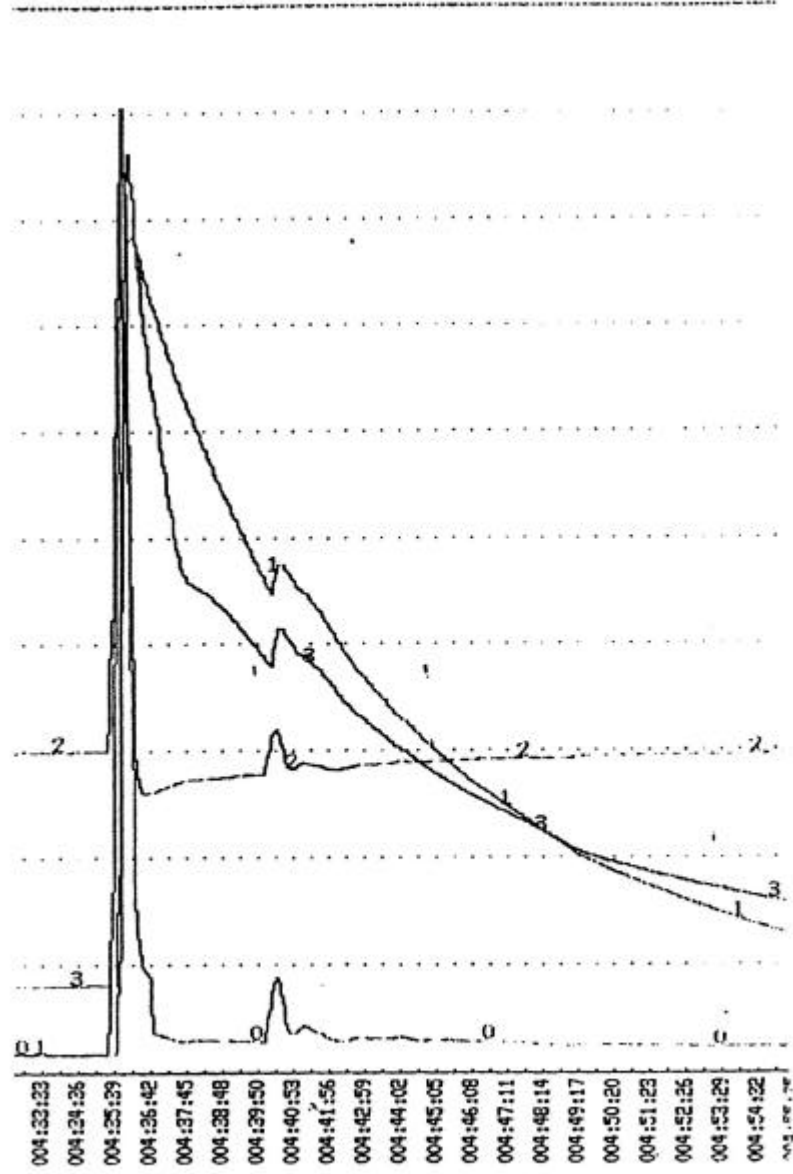
METTLER RC1 EVALUATION V3.3

5-Apr-94 17:25-pm

Coating ICL(42g) into MPD(11.1g) solved in NMP (50ml)
Reaction Enthalpy Measurement
Manual Addition With Sep. Funnel
Dr. Duh and Hsu

4. 4. 1994

Wt. Oxyde	Wt. Tr	Wt. dTr/dt	Wt. delta
6000.0	120.0	3.50	110.0
5390.0	110.0	3.00	98.0
4780.0	100.0	2.50	86.0
4170.0	90.0	2.00	74.0
3560.0	80.0	1.50	62.0
2950.0	70.0	1.00	50.0
2340.0	60.0	0.50	38.0
1730.0	50.0	0.00	26.0
1120.0	40.0	-0.50	14.0
510.0	30.0	-1.00	2.0
100.0	20.0	-1.50	10.0



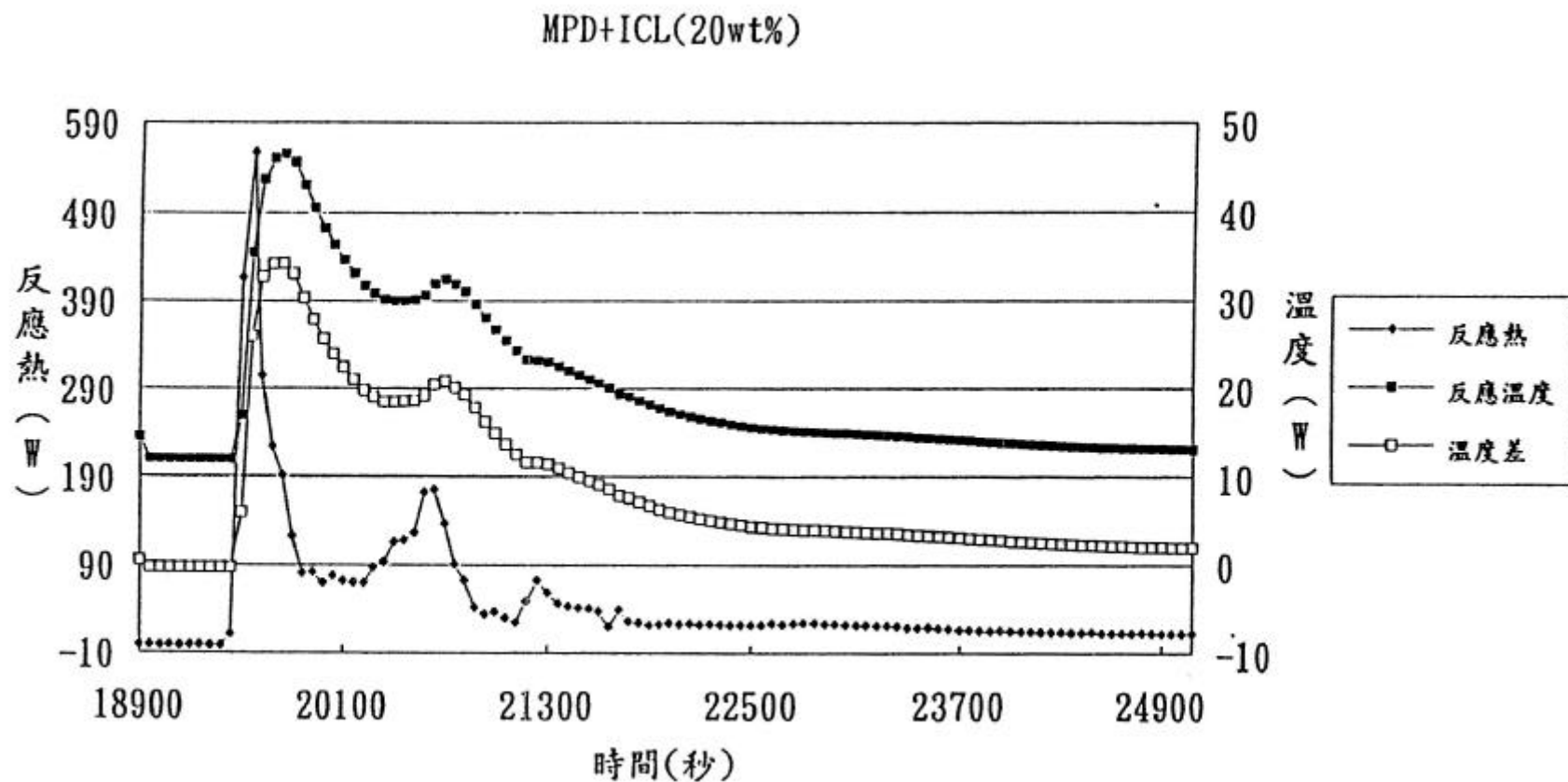
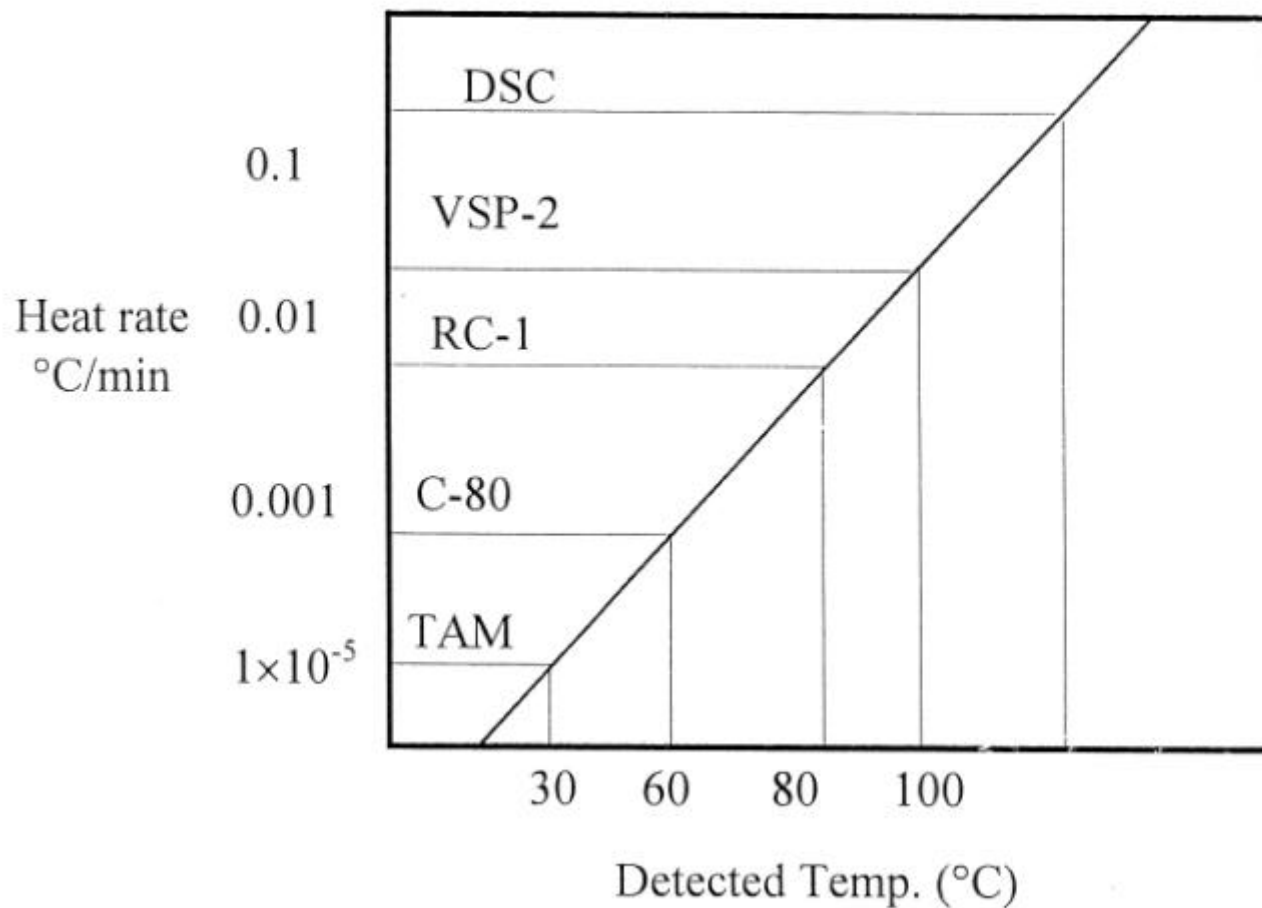


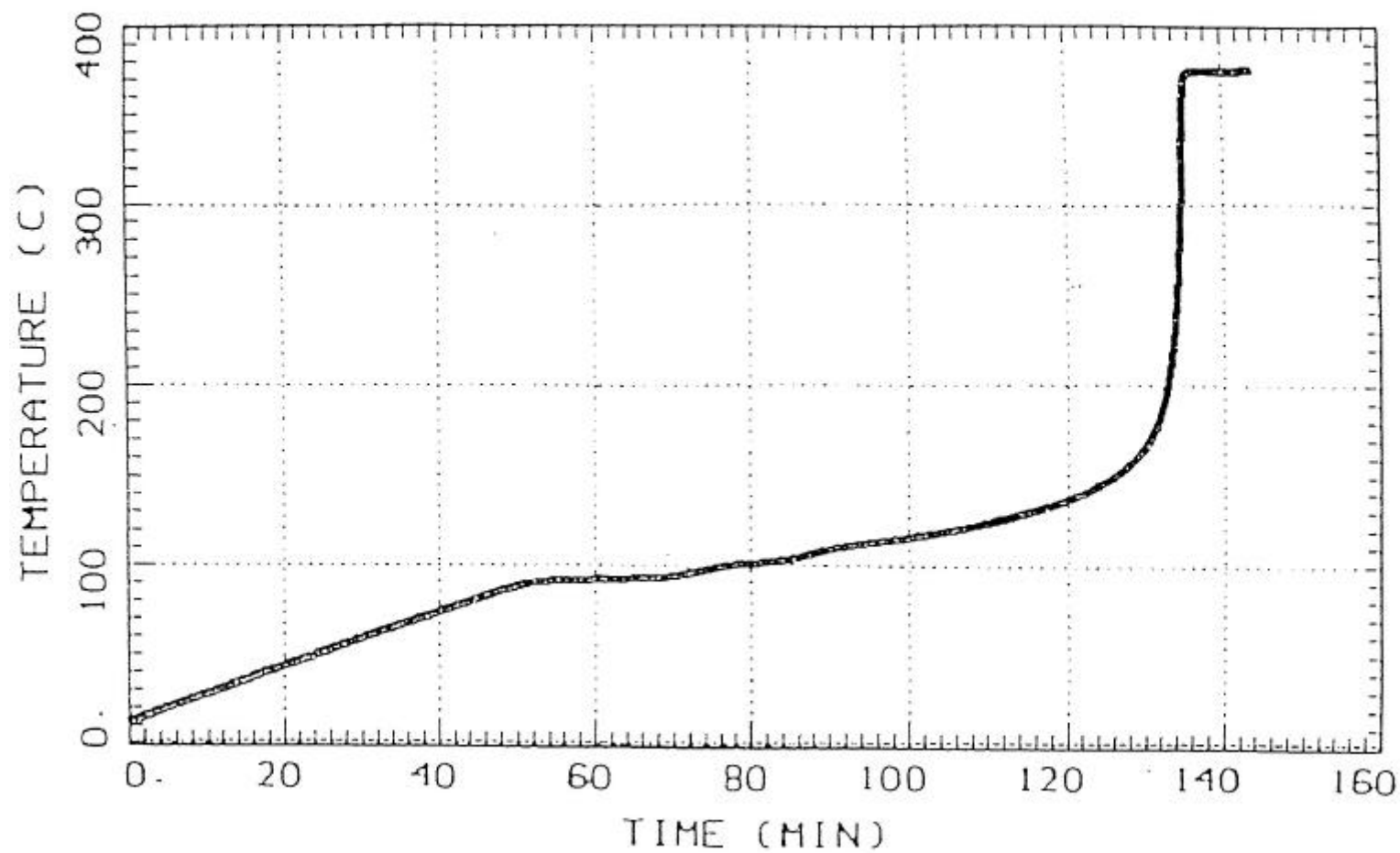
圖15 20w.t.%反應之放熱、反應溫度、反應溫度與夾層溫度差之變化情形(實驗1)

熱卡計應用範圍

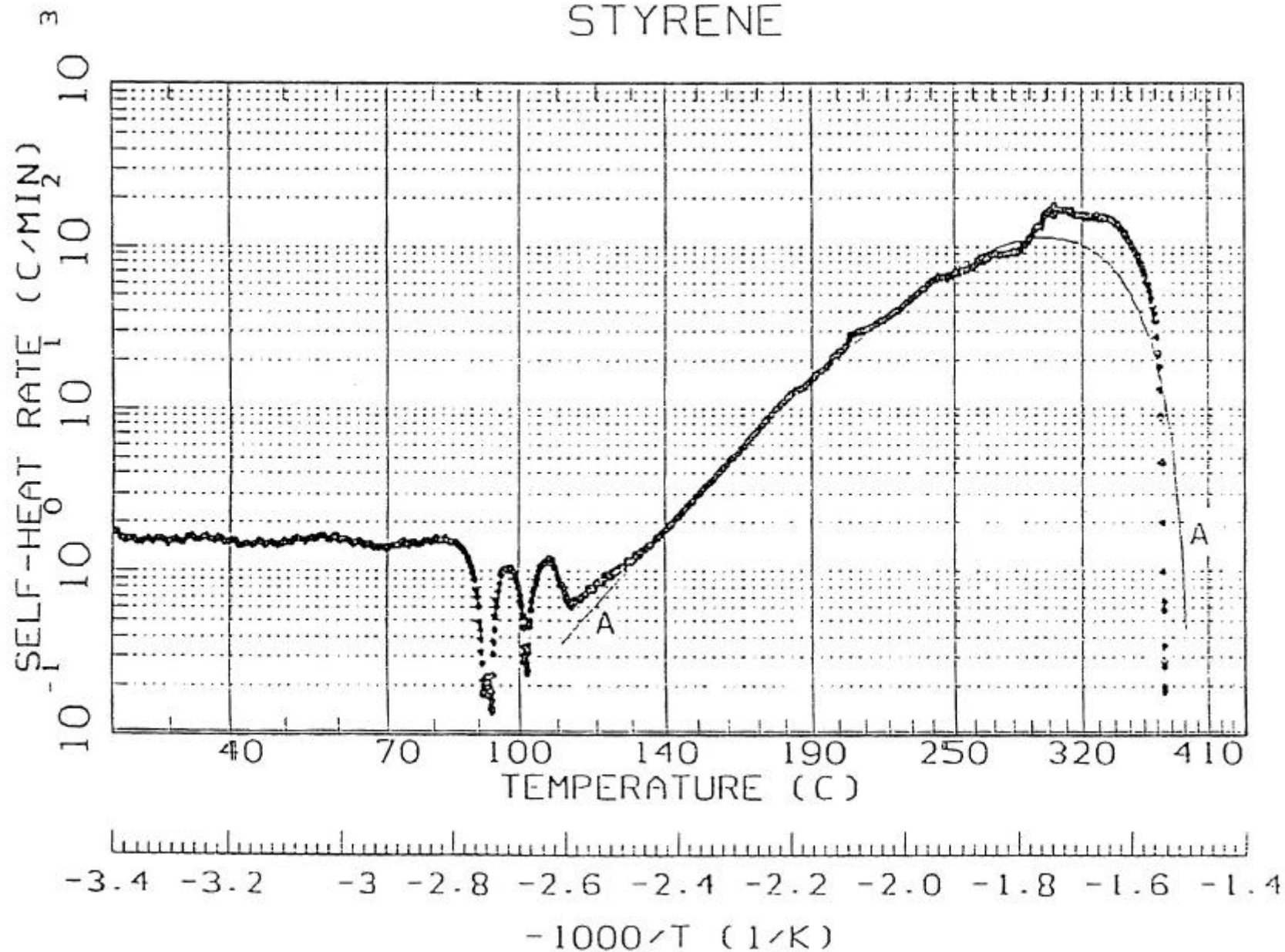
熱卡計應用範圍



STYRENE



STYRENE



測試技術在製程上的應用

(a)DSC : . 放熱起始溫度 $T_{critical}$

. 反應熱 T_{ad}

. TMR : 失控發生機率

. 動力學數據 : $E_a, n.A.$

冷卻容量

TNR alarm設定溫度

測試技術在製程上的應用(續)

(b)ARC：

- ．放熱起始溫度 $T_{critical}$, T_r (反應溫度)
- ．反應熱 T_{ad} (絕熱上升溫度)
- ． T_{ad} ：(直接測量)
- ．TMR：失控發生機率
- ．動力學數據： E_a , $n.A$ ：冷卻容量 T_{NR} alarm
設定
- ．最大壓力： P_{max}
- ．升壓速率： dP/dt

測試技術在製程上的應用(續)

(C)RC1：經濟效益(最佳製程條件)

批次($TMR < 8hr$) 半批次($TMR > 8hr$)

- ．反應熱
- ． T_{ad}
- ．熱累積
- ．放熱速率
- ．加料順序
- ．加料速率
- ．攪拌速率 製程條件對反應熱的影響
- ．pH 值
- ．充灌氣壓

安全操作條方面

- ．避免引發非預期反應
- ．改善反應製程熱累積現象
- ．評估系統冷卻能力
- ．TMR之制定
- ．製訂反應製程安全操作條件
- ．設計安全的洩放口徑與廢液處理系統