

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	200016
參展科別	環境工程
作品名稱	「硫」不住的「紅」塵—— 探討二硫化錫降解 羅丹明之研究

就讀學校	國立中興大學附屬高級中學
指導教師	游宗憲
作者姓名	張凱鈞 邱子綸 吳昕燁

關鍵詞	<u>壓電材料、二硫化錫、羅丹明</u>
-----	----------------------

作者簡介



大家好，我們是環境工程組（硫不住的紅塵），來自興大附中314的張凱鈞、邱子綸、吳昕燁，昕燁是團隊的小團寵，總是熱心幫忙，子綸負責一些實驗操作，而凱鈞主要負責研究報告和資料查詢。而我們的實驗是研究壓電材料降解羅丹明，藉由改變合成二硫化錫參數，提升降解效果，期望解決廢水污染等議題。從開始接觸壓電材料，降解不同染料，選取羅丹明為主要研究對象，中途甚至更改鈦酸鋇為二硫化錫，最終實驗驗出降解效果在幾秒內降解90%的二硫化錫合成參數，期望將其應用在解決污染的問題上。

2025 年度國際科學展覽會

作品說明書

作品編號：

科 別：環境工程

作品名稱：「硫」不住的「紅」塵

——探討二硫化錫降解羅丹明之研究

關 鍵 詞：壓電材料、二硫化錫、羅丹明

摘要.....	2
壹、研究動機.....	2
貳、研究目的.....	2
參、研究設備及器材.....	4
研究藥品.....	4
肆、研究過程與方法	
一、研究架構圖.....	5
二硫化錫.....	6
二、實驗步驟.....	6
製作觸媒.....	6
伍、研究結果	
一、不同實驗階段之粉體.....	8
二、二硫化錫於各種不同方法所製成下降解羅丹明之效果.....	9
三、以不同溫度(溫度:160°C、180°C、200°C)合成之二硫化錫降解各濃度羅丹明.....	10
四、由上述變因額外探討，以不同條件合成之二硫化錫降解羅丹明.....	12
陸、實驗討論	
一、比較二硫化錫在不同比例、加熱時間與溫度下降解羅丹明之效率圖.....	14
二、比較以不同溫度(溫度:160°C、180°C、200°C)合成之硫化錫降解各濃度羅丹明.....	17
三、由上述實驗探討後進行額外比較.....	20
柒、儀器分析	
一、XRD 分析.....	23
二、SEM 分析.....	24
三、PL 分析.....	25
捌、結論.....	26
玖、參考資料及其他.....	28

Abstract

This study investigates the synthesis of piezoelectric material SnS₂ using different ratios of thiourea and tin(II) chloride at a fixed temperature of 200°C and heating time of 9 hours for the degradation of rhodamine dye. Experimental results reveal that the optimum molar ratio of 1:4 yields a degradation rate of 96%. Subsequently, under fixed conditions of 1:4 molar ratio and 200°C temperature, it was found that the SnS₂ catalyst exhibited the best degradation performance with a hydrothermal time of 9 hours. Furthermore, among different hydrothermal temperatures, the synthesis of SnS₂ catalyst at 200°C showed the highest degradation efficiency, also reaching 96%. The catalyst synthesized under optimal conditions was then tested for the degradation of rhodamine at various concentrations, demonstrating that at a concentration of 50ppm, a degradation rate of 99% was achieved within 2 seconds, while even at 70ppm concentration, the degradation efficiency remained at 86%. Finally, SEM analysis of the SnS₂ catalyst revealed particle sizes in the micrometer range, while PL analysis indicated its capability to generate hydroxyl radicals.

摘要

本研究將不同比例的硫脲與二氯化錫，在固定溫度 200°C、加熱時間 9 小時，所合成出的壓電材料 SnS₂用來降解羅丹明染料，實驗結果發現以莫耳比 1:4 為最佳，降解率可達到 96%。接著固定莫耳比 1:4 及溫度 200°C 下，發現在不同水熱時間時以水熱九小時的 SnS₂觸媒降解效果最好。最後本實驗以固定比 1:4 及水熱時間 9 小時在不同水熱溫度所合成的 SnS₂觸媒，以水熱溫度 200°C 時的降解效率最好，可達到 96%。接著我們將最佳合成條件的觸媒對不同濃度的羅丹明進行降解，可發現當羅丹明濃度達到 50ppm 時，只需要 2 秒降解率即可達到 99%，即使濃度達到 70ppm 時濃度降解效果仍可達到 86%。最後對 SnS₂觸媒進行 SEM 分析發現顆粒大小為微米等級，而在 PL 分析發現本觸媒具有活性的能力且符合實驗結果。

壹、研究動機

近年來，水資源稀缺的問題日益嚴重，台灣受限於地形及高人口密度，以至於更難有效應用水資源，而其中汙水的處理不僅能夠有效降低河川汙染也能淨化水資源使其回收再利用，於是我們期望藉由合成壓電材料二硫化錫來催化降解染料汙染，而二硫化錫不僅可以用來降解染料，也可以透過過濾及震盪的方式回收粉末，達到降低水汙染和環境永續的目標。我們使用二硫化錫來降解不同的染料包括亞甲藍、甲基橙和羅丹明，其中羅丹明的降解效果最佳，亞甲藍降解效果略低於羅丹明一些，甲基橙降解效率則是趨近於 0，因此我們決定以羅丹明為主要染料，嘗試改變合成二硫化錫的條件，包括改變莫耳比例、鍛燒溫度、鍛燒時間及降解不同濃度的羅丹明，希望找出降解效果較佳且適用濃度較廣的比例。

文獻探討

2013 年，王教授及其團隊提出壓電催化的概念。催生出我們想要藉由壓電材料解決環境污染的想法，參考文獻 ScienceDirect，水熱合成 SnS₂、WS₂ 和 VS₂ 奈米結構的比較研究，研究顯示 VS₂ 在 10 分鐘內實現了 99% 的 MB 降解，讓我們有利用其他壓電材料降解不同染料的想法，在 Sustainable Energy & Fuels 期刊中，也觀察到關於使用水熱合成法合成 SnS₂ 和以較長時間和較高溫度合成 SnS₂ 有較佳的效果，研究顯示亞甲基藍(MB)染料在兩小時內降解，使我們催生想使用 SnS₂ 降解其他染料，我們期望藉由合成壓電材料二硫化錫來催化降解羅丹明，而本實驗最後得出溫度 200°C、加熱時間 9 小時、莫耳比 1：4 所合成之 SnS₂降

解效果最好且降解 50ppm 羅丹明染料時，只需要 2 秒降解率即可達到 99%。

貳、研究目的

- 一、改變硫脲與二氯化錫的莫耳數比合成二硫化錫，降解羅丹明，找到效果最佳的比例。
- 二、改變合成二硫化錫的加熱時間，降解羅丹明，找出最佳的加熱時數。
- 三、改變二硫化錫的加熱溫度，降解羅丹明，找出最佳的加熱溫度。
- 四、使用不同溫度的二硫化錫，降解不同濃度的羅丹明，分別找出較佳的染料適用濃度。
- 五、將不同條件的觸媒進行儀器檢測，探討不同條件之觸媒對降解羅丹明效果的影響。

參、研究設備及器材

一、研究藥品：

二硫化錫、氯化錫、硫脲、亞甲藍、甲基橙和羅丹明

二、研究器材：

藥勺、燒杯、塑膠杯、磁石、攪拌台、離心機、手套箱、氮氣、電子秤、水熱罐、超音波

震盪機、計時器、烘箱、光譜分析儀器(UV)、石英槽、鑷子、玻璃罐、實驗手套、擦拭

紙、拭鏡紙、秤量紙、塑膠離心瓶、封膜、離心瓶、移液器、DI 水、無水酒精



圖 3-1 離心機(小罐)



圖 3-2 XRD



圖 3-3 烘箱



圖 3-4 電子天平



圖 3-5 震盪機

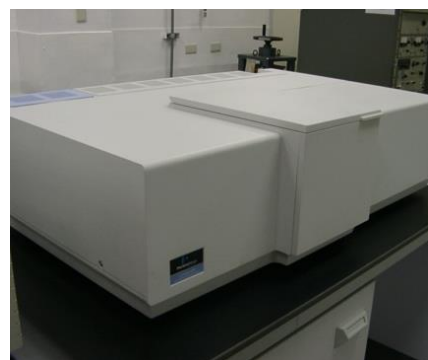


圖 3-6 UV Light

肆、研究過程與方法

一、研究架構圖

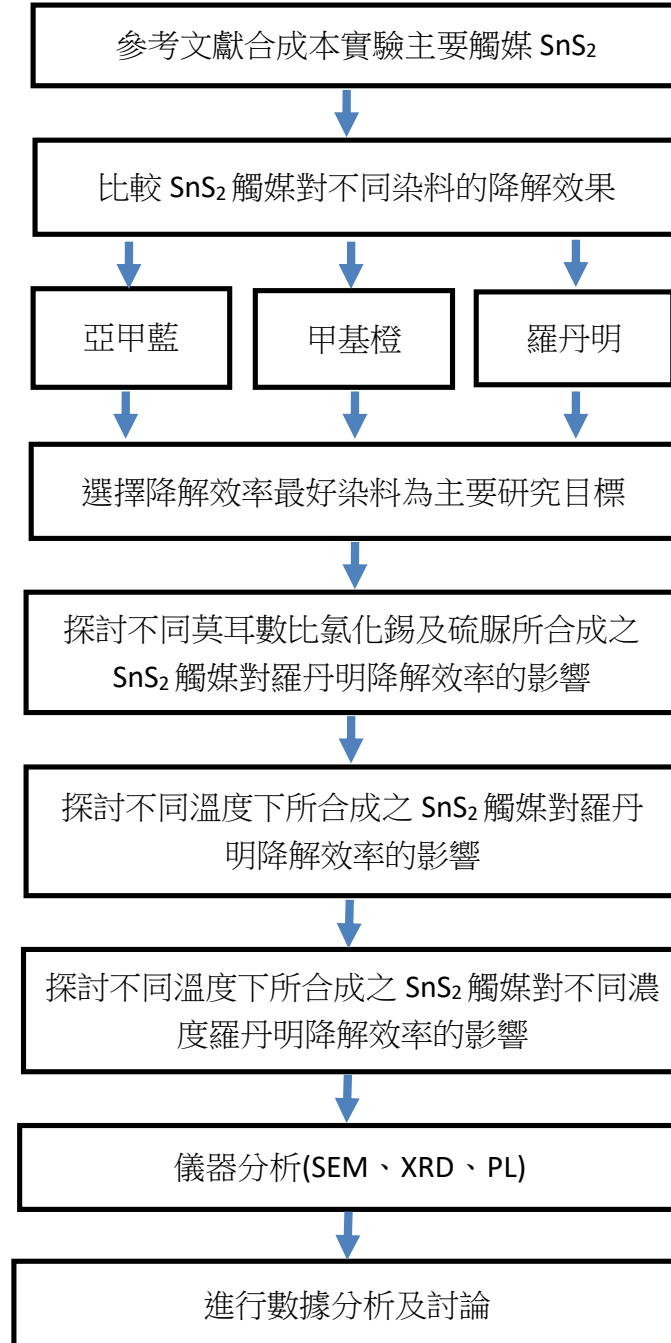


圖 4-1 研究架構圖

二、研究原理

（一）二硫化錫

一種類似石墨烯結構的壓電材料，也是一種半導體材料，具有比表面積大、高催化性等特點，在水資源污染修復工程中有廣泛的應用，因此我們希望改變合成二硫化錫的參數，找出降解羅丹明效果較佳或適用性較廣的二硫化錫。

（二）壓電催化

2013 年，王教授及其團隊提出壓電催化的概念。當壓電材料受到外力時，壓電效應引起極化而導致壓電材料的能帶傾斜，與溶液產生能量差，當此情況發生時，電子由高能量區往低能量區轉移，這種在壓電材料內產生電場，並誘導溶液產生電化學催化的現象稱為壓電催化。

三、實驗步驟

（一）製作觸媒

1. 在無氧環境下將氯化錫以及硫脲依照參數比例倒入 76ml 乙醇溶液
2. 將溶液放入 100 毫升水熱罐，放入烘箱依照參數控制加熱溫度與加熱時間
3. 加熱完畢，將水熱罐拿出來等待冷卻至常溫
4. 將內部溶液利用去離子水進行震盪與離心分離粉末去除雜質 3 次，然後再以水酒精進行上述步驟 1 次
5. 將粉末放入 50 度烘箱，待完全烘乾即完成

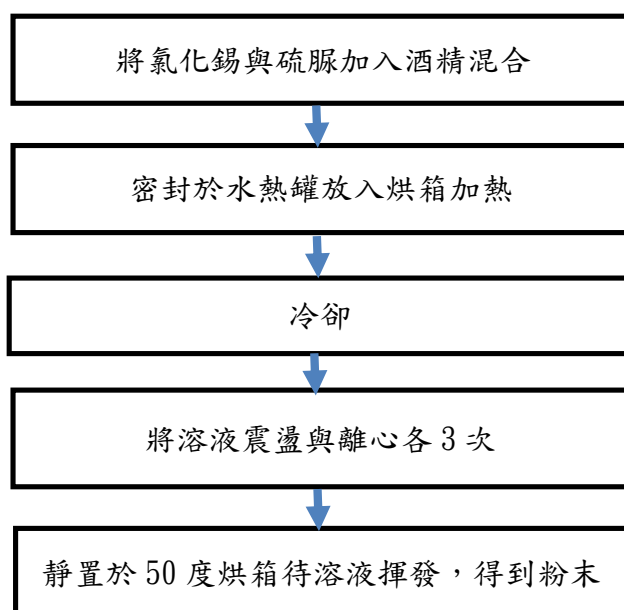


圖 4-3 觸媒製作流程圖

(二) 進行超音波催化反應

1. 配置濃度 500ppm 羅丹明 B 溶液，使用量筒量測 500ml 去離子水、電子天平秤量 250 毫克 RDB 粉末，將二者裝在反應容器中，以磁力攪拌器固定轉速 300rpm 攪拌至 RDB_(s)完全溶解。
2. 利用去離子水稀釋上述溶液至我們想要的實驗參數。
3. 依照參數濃度配置 RDB 溶液 15 毫升，將 10 毫克二硫化錫觸媒粉末倒入，放入無光環境等待暗吸附 30 秒。
4. 利用超音波震盪 2 秒、4 秒、6 秒、8 秒、10 秒以及 20 秒，各抽取 2 毫升一管，例如:震盪 2 秒，抽取第 1 管(2 秒)，再震盪 2 秒，抽取第 2 管(4 秒).....
5. 將每一管離心 2 次，讓觸媒粉末與溶液分離，取溶液部分
6. 將離心後之溶液放入光譜儀中測量其吸光度
7. 測光波長為 400 至 650 奈米的各波長吸光度，由於吸光度最強值大多都在光波長 545 奈米，所以計算降解效率以此波長計算

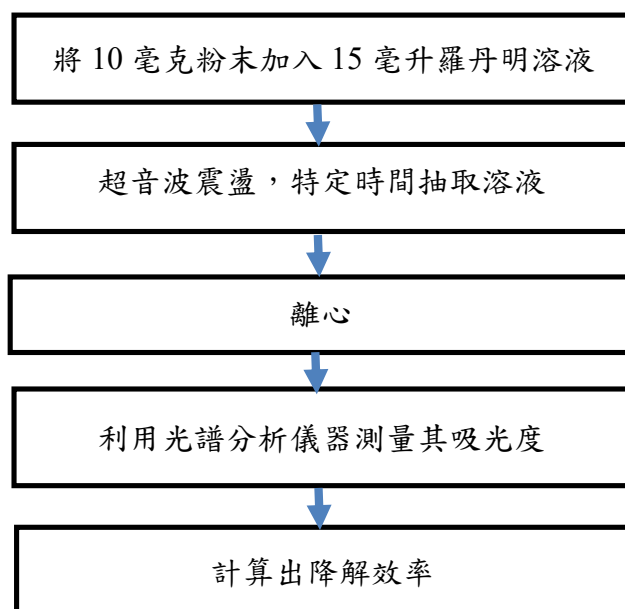
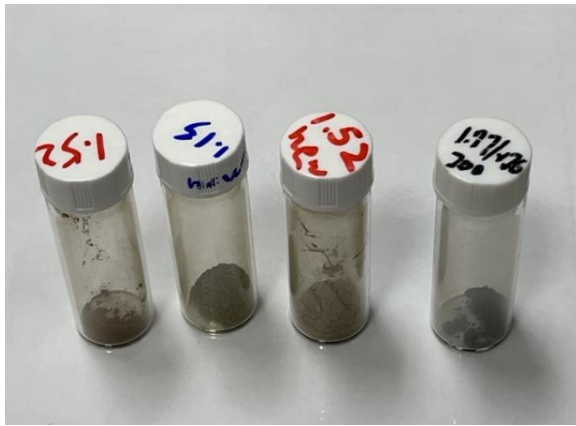


圖 4-4 超音波催化反應流程圖

伍、研究結果

一、不同實驗階段之粉體

(一) 以不同莫耳數比，氯化錫比硫脲(1:2、1:3、1:4、1:5)製成之二硫化錫



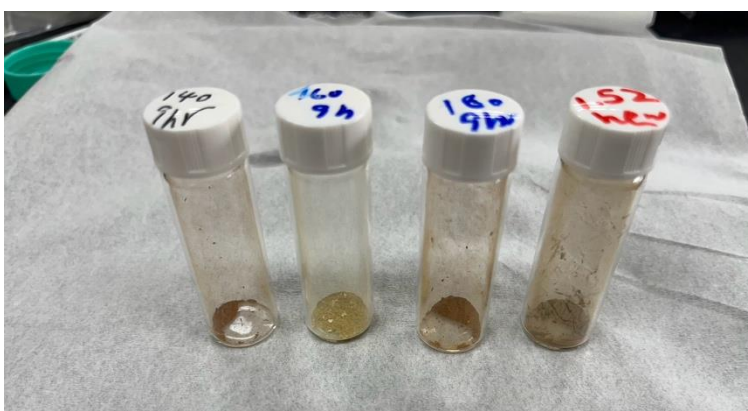
不同莫耳數比數之二硫化錫(溫度:200、加熱時間 9hr)

(二) 以不同加熱時間 (3hr、6hr、9hr、12hr、15hr) 製成之二硫化錫



不同加熱時間之二硫化錫(溫度:200°C、莫耳數比 1:4)

(三) 以不同加熱溫度(溫度:160°C、180°C、200°C) 製成之二硫化錫



不同加熱溫度之硫化錫(加熱時間:9hr、莫耳數比 1:4)

二、二硫化錫於各種不同方法所製成下降解羅丹明之效果

(一) 以不同莫耳數比製成之二硫化錫

取氯化錫 1.77g 及硫脲分別以不同莫耳數比(1:2、1:3、1:4、1:5) 合成 SnS_2 ，置於 200°C 、9 小時的水熱罐加熱。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加 10ppm 羅丹明製成觸媒(15ml)後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量其吸光度，換算成其降解效率，數據如表 5-1。

表 5-1 不同莫耳數比製成之 SnS_2 降解羅丹明之效率數據表(%)

時間 莫耳數比	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
1:2	0%	62.3%	80.3%	81.7%	84.0%	81.6%	84.5%
1:3	0%	77.1%	80.9%	84.3%	85.4%	87.7%	89.3%
1:4	0%	95.0%	95.5%	95.0%	95.5%	95.0%	95.6%
1:5	0%	52.9%	84.4%	88.6%	86.6%	86.7%	87.6%

(二) 以不同加熱時間 (3hr、6hr、9hr、12hr、15hr、18hr) 製成之二硫化錫

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.52g 以固定莫耳數比 1:4，分別以不同加熱時間(3hr、6hr、9hr、12hr、15hr、18hr) 合成 SnS_2 ，置於 200°C 的水熱罐加熱。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加 10ppm 羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量吸光度，換算成降解效率，數據如表 5-2。

表 5-2 不同加熱時間製成之 SnS_2 降解羅丹明之效率數據表(%)

時間 加熱時間	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
3hr	0%	83.0%	84.0%	87.3%	89.0%	86.7%	86.1%
6hr	0%	85.1%	89.1%	87.2%	88.6%	87.9%	88.7%
9hr	0%	95.0%	95.5%	95.0%	95.5%	95.0%	95.6%
12hr	0%	94.8%	95.8%	94.9%	95.7%	94.9%	95.8%
15hr	0%	94.5%	95.7%	94.6%	95.8%	94.4%	95.7%
18hr	0%	93.9%	95.7%	94.5%	95.7%	94.5%	95.7%

(三) 以不同加熱溫度製成之二硫化錫

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.52g 以固定莫耳數比 1:4 合成 SnS_2 ，分別以不同溫度 (160°C、180°C、200°C) 的水熱罐加熱，加熱 9hr。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加 10ppm 羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量吸光度，換算成降解效率，數據如表 5-3。

表 5-3 不同加熱溫度製成之 SnS_2 降解羅丹明之效率數據表(%)

時間 加熱溫度	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
160°C	0%	77.7%	82.6%	89.6%	90.4%	91.1%	92.0%
180°C	0%	93.2%	94.4%	94.9%	95.2%	95.0%	93.9%
200°C	0%	95.0%	95.5%	95.0%	95.5%	95.0%	95.6%

三、以不同溫度(160°C、180°C、200°C)合成之硫化錫降解不同濃度羅丹明

(一) 以 160°C 合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.52g 以固定莫耳數比 1:4、加熱時間 9hr，置於水熱罐加熱 160°C。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加入不同濃度(10ppm、20ppm、30ppm、50ppm、70ppm、90ppm)羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量吸光度，換算成其降解效率，數據如表 5-4。

表 5-4 160°C 製成之 SnS_2 降解不同濃度羅丹明之效率數據表(%)

時間 羅丹明濃度	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
10ppm	0%	77.7%	82.6%	89.6%	90.4%	91.1%	92.0%
20ppm	0%	56.0%	61.7%	63.3%	65.0%	65.7%	67.7%
30ppm	0%	37.2%	42.6%	49.0%	50.1%	51.3%	54.0%
50ppm	0%	17.8%	18.7%	18.9%	20.3%	20.1%	21.5%
70ppm	0%	2.8%	3.2%	4.1%	3.9%	4.5%	4.6%
90ppm	0%	0.8%	1.4%	1.4%	6.7%	5.1%	6.9%

(二) 以 180°C 合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.52g 以固定莫耳數比 1:4、加熱時間 9hr，置於水熱罐加熱 180°C。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加入不同濃度(10ppm、20ppm、30ppm、50ppm、70ppm、90ppm)羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量其吸光度，換算成其降解效率，數據如表 5-5。

表 5-5 180°C 製成之 SnS_2 降解不同濃度羅丹明之效率數據表(%)

時間 羅丹明濃度	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
10ppm	0%	93.2%	94.4%	94.9%	95.2%	95.0%	93.9%
20ppm	0%	68.7%	69.9%	70.4%	70.5%	71.1%	72.3%
30ppm	0%	53.2%	58.1%	59.9%	61.0%	61.6%	63.5%
50ppm	0%	42.6%	45.1%	48.3%	48.9%	50.6%	50.6%
70ppm	0%	14.6%	15.4%	18.1%	19.1%	20.5%	20.7%
90ppm	0%	2.9%	2.7%	2.8%	2.9%	3.7%	3.8%

(三) 以 200°C 合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.52g 以固定莫耳數比 1:4、加熱時間 9hr，置於水熱罐加熱 200°C。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加入不同濃度(10ppm、20ppm、30ppm、50ppm、70ppm、90ppm)羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量吸光度，換算成降解效率，數據如表 5-6。

表 5-6 200°C 製成之 SnS_2 降解不同濃度羅丹明之效率數據表(%)

時間 羅丹明濃度	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
10ppm	0%	95.0%	95.5%	95.0%	95.5%	95.0%	95.6%
20ppm	0%	97.5%	97.5%	97.5%	97.5%	97.5%	97.5%
30ppm	0%	98.3%	98.2%	98.5%	98.2%	98.5%	98.3%
50ppm	0%	98.9%	98.6%	98.9%	98.8%	98.6%	98.7%
70ppm	0%	81.7%	82.5%	84.2%	85.3%	85.0%	85.8%
90ppm	0%	26.9%	31.5%	32.9%	34.2%	33.2%	29.1%

四、由上述變因額外探討，以不同條件合成之二硫化錫降解羅丹明

(一) 使用莫耳數比(1:3) SnS_2 ，探討不同加熱時間，降解羅丹明(10ppm)

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.14g 以固定莫耳數比 1:3 合成 SnS_2 ，置於 200°C 的水熱罐加熱，改變加熱時間(3hr、6hr、9hr、12hr、15hr)。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加 10ppm 羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量其吸光度，換算成其降解效率，數據如表 5-7。

表 5-7 莫耳數比 1:3，不同加熱時間製成之 SnS_2 降解羅丹明之效率數據表(%)

時間 加熱時間	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
3hr	0%	42.7%	59.3%	65.4%	58.5%	59.5%	59.1%
6hr	0%	78.1%	73.0%	73.7%	72.2%	71.6%	71.1%
9hr	0%	77.1%	80.9%	84.3%	85.4%	87.7%	89.3%
12hr	0%	75.5%	80.3%	81.7%	84.0%	81.6%	84.5%
15hr	0%	93.2%	90.4%	93.2%	88.4%	92.6%	90.1%

(二) 使用莫耳數比(1:3) SnS_2 ，降解不同濃度羅丹明

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.14g 以固定莫耳數比 1:3 合成 SnS_2 ，置於 200°C 的水熱罐加熱，加熱 9hr。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加不同濃度(10ppm、20ppm、30ppm)羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量其吸光度，換算成其降解效率，數據如表 5-8。

表 5-8 200°C 製成之 SnS_2 (莫耳數比 1:3) 降解不同濃度羅丹明之效率數據表(%)

時間 羅丹明濃度	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
10ppm	0%	77.1%	80.9%	84.3%	85.4%	87.7%	89.3%
20ppm	0%	32.3%	32.8%	32.7%	34.0%	33.1%	50.1%
30ppm	0%	21.2%	20.8%	22.2%	20.7%	22.6%	21.4%

(三) 以 180°C 合成之 SnS₂(莫耳數比 1:4)，於不同加熱時間，降解羅丹明

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.52g 以固定莫耳數比 1:4 合成 SnS₂，置於 180°C 的水熱罐加熱，分別以不同加熱時間(9hr、12hr、15hr、18hr)。合成後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加 10ppm 羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量其吸光度，換算成其降解效率，數據如表 5-9。

表 5-9 莫耳數比 1:4，不同加熱時間製成之 SnS₂ 降解羅丹明之效率數據表(%)

時間 加熱時間	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
9hr	0%	93.2%	94.4%	94.9%	95.2%	95.0%	93.9%
12hr	0%	93.8%	93.5%	92.3%	91.5%	91.3%	88.9%
15hr	0%	92.6%	91.7%	93.1%	93.4%	92.9%	93.5%
18hr	0%	89.3%	90.0%	91.3%	91.2%	91.1%	91.2%

(四) 以不同溫度，相同時間，合成之 SnS₂(莫耳數比 1:4)，降解 30ppm 羅丹明

取氯化錫 1.77g 及硫脲 1.52g 以固定莫耳數比 1:4 合成之 SnS₂，分別以不同溫度(160、180、200)°C 置於水熱罐加熱，加熱 9 小時後，取觸媒二硫化錫 0.01g，加 30ppm 羅丹明(15ml)製成觸媒後，以超音波震盪並且離心，最後將離心後之溶液放入光譜儀中測量其吸光度，換算成其降解效率，數據如表 5-10。

表 5-10 莫耳數比 1:4，不同加熱溫度，相同時間製成之 SnS₂ 降解羅丹明之效率數據表(%)

時間 加熱時間	0 秒	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒	10 秒	20 秒
160 °C	0%	37%	43%	49%	50%	51%	54%
180 °C	0%	53%	58%	60%	61%	62%	64%
200 °C	0%	98%	98%	99%	98%	99%	98%

陸、實驗討論

一、比較二硫化錫在不同比例、加熱時間與溫度下降解羅丹明之效率圖

(一) 比較氯化錫與硫脲在不同莫耳數比合成下製成之二硫化錫降解 10ppm 羅丹明的效果

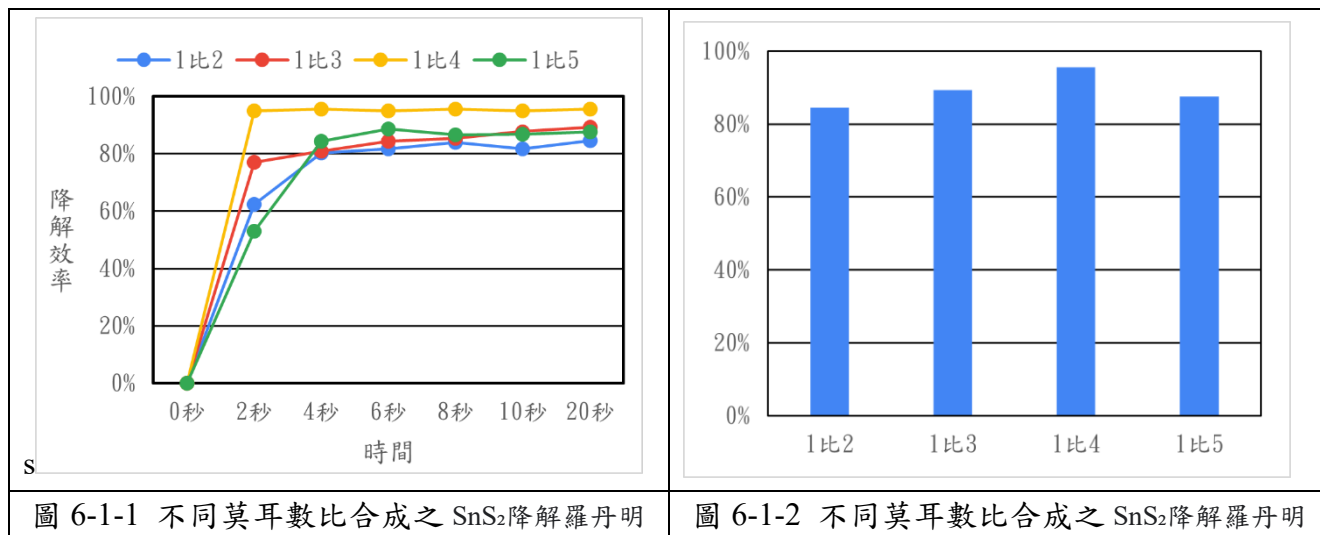


圖 6-1-1 不同莫耳數比合成之 SnS₂降解羅丹明

圖 6-1-2 不同莫耳數比合成之 SnS₂降解羅丹明

圖 6-1-1、圖 6-1-2 為不同莫耳數比，氯化錫比硫脲(1:2、1:3、1:4、1:5)製成之 SnS₂觸媒 (溫度:200°C、加熱時間:9hr)的降解效率分析比較圖。由圖中我們可以看出四種比例的觸媒其降解效率都隨著超音波震盪的時間越長而越好，而且莫耳數比 1:4 製成的 SnS₂觸媒其降解效率在各秒數都高於其他比例的 SnS₂觸媒。在經過超音波震盪 2 秒時即可對羅丹明染料達到 95%的降解率且在超音波震盪 20 秒時其降解效率達到 95.6%。而莫耳數比 1:3 和 1:5 的 SnS₂觸媒在超音波震盪 20s 後，對羅丹明染料的降解效率分別為 89.3%和 87.6%，略低於莫耳數比 1:4 觸媒的 95.6%，而莫耳數比 1:2 的 SnS₂觸媒在經過 20s 超音波震盪後的降解效率則為 84.5%，為所有比例的檢測粉末中的最低。因此本實驗可得出當氯化錫與硫脲以莫耳數比 1:4 所合成的 SnS₂觸媒對羅丹明染料有最佳的降解效果，另外莫耳數比 1:3 的 SnS₂觸媒在 2s 時的降解效率雖然也可達到 77%，但還是遠低於莫耳數比 1:4 觸媒的 95%。若以 20 秒的降解效率來看，總體降解效果高低依序為莫耳數比：1:4 > 1:3 > 1:5 > 1:2。

(二) 比較不同加熱時間製成之二硫化錫降解 10ppm 羅丹明的效果

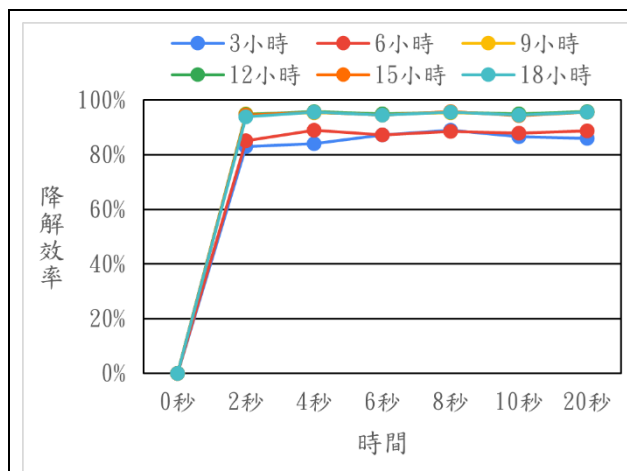


圖 6-1-3 不同加熱時間合成之 SnS₂降解羅丹明

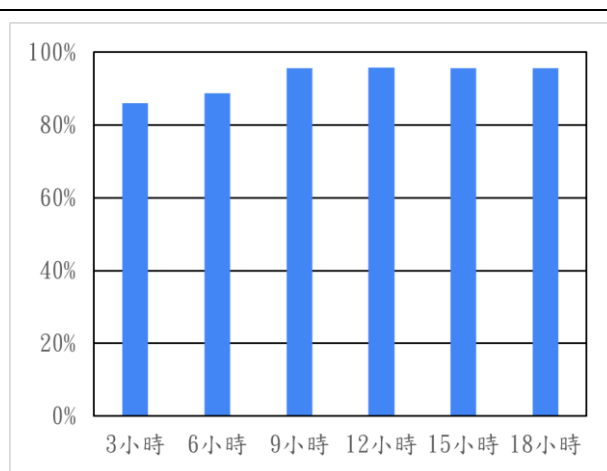


圖 6-1-4 不同加熱時間合成之 SnS₂降解羅丹明

圖 6-1-3、圖 6-1-4 為氯化錫比硫脲(1:4)製成之 SnS₂，於水熱罐中以不同時間加熱(3hr、6hr、9hr、12hr、15hr、18hr) 對羅丹明染料的降解效率比較分析圖，分別以折線圖和長條圖表示。如圖表所示，降解效果最差的為水熱時間 3hr 和 6hr 的 SnS₂觸媒，兩者降解效率相近，數線近乎重疊，在後面的 XRD 分析中，兩者的粉末晶形也具有高度相似性。而 9hr 以上(含 9hr)的另外四種觸媒其降解效率接近，在 20s 時對羅丹明染料都可達到了 95%的降解效果，而其中 12hr 的 95.8%為最佳，但 9hr 也有達到 95.6%，15、18hr 都為 95.7%，彼此之間相差不到 1%，且由圖 6-1-3 可知，9hr 以上的四種 SnS₂觸媒降解效率都在 2 秒時即達到約 95%。基於不過度耗費能量及綠色化學永續能源為原則，本實驗最後選擇 9hr 為合成 SnS₂觸媒的最佳時間，之後我們也會嘗試以更低的加熱時間合成粉末。

(三) 比較不同溫度製成之二硫化錫降解 10ppm 羅丹明的效果

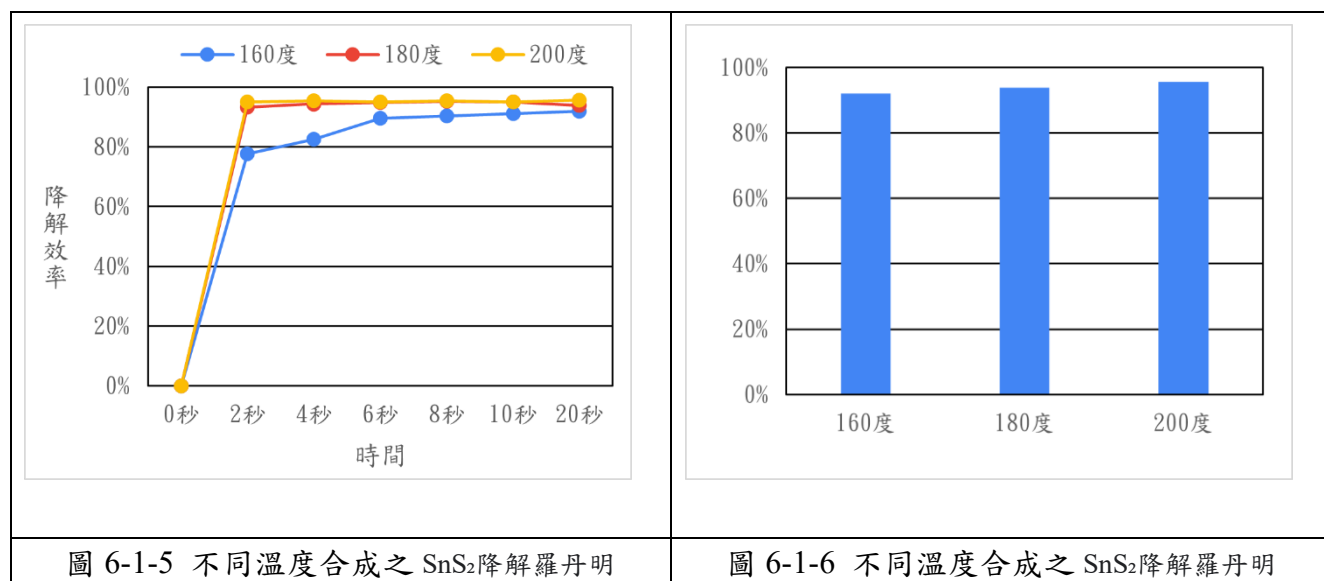


圖 6-1-5、圖 6-1-6 為氯化錫比硫脲(莫耳數比 1:4)，於水熱罐中以不同溫度(160°C、180°C 以及 200°C)加熱 9hr 後所製成之 SnS₂觸媒對羅丹明染料的降解效率分析比較圖，分別以折線圖和長條圖表示。由圖表中我們可得知，這三種不同溫度所製成之 SnS₂觸媒其降解效果皆隨著超音波震盪的時間越長其降解效率也越好。在經過超音波震盪 20s 時，以 200°C 的 SnS₂觸媒降解效果最佳，對羅丹明染料的降解效率可達到 95.6%，而 160°C 與 180°C 的 SnS₂觸媒，也分別有 92.0% 和 93.9% 的降解效果。此外當經過超音波震盪 2s 時我們可發現 160°C 所合成的 SnS₂觸媒其降解效率低於另外兩種溫度所合成的觸媒，推測可能是加熱溫度較低，當其形成晶體時的粉末結構與另外兩種溫度不同而造成的影響，因此整體來說，在合成觸媒時水熱溫度至少要達到 180°C 以上，此時所合成出來的 SnS₂觸媒其降解效果較為優秀。之後本實驗會再此嘗試往更低溫合成 SnS₂，確認是否能夠找出既能保持良好的降解效果之餘，也能夠朝著減少耗費能量，以達到保護環境及節能的目標。

二、比較以不同溫度(溫度:160°C、180°C、200°C)合成之硫化錫降解不同濃度羅丹明

(一) 比較 160°C 合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明的效果

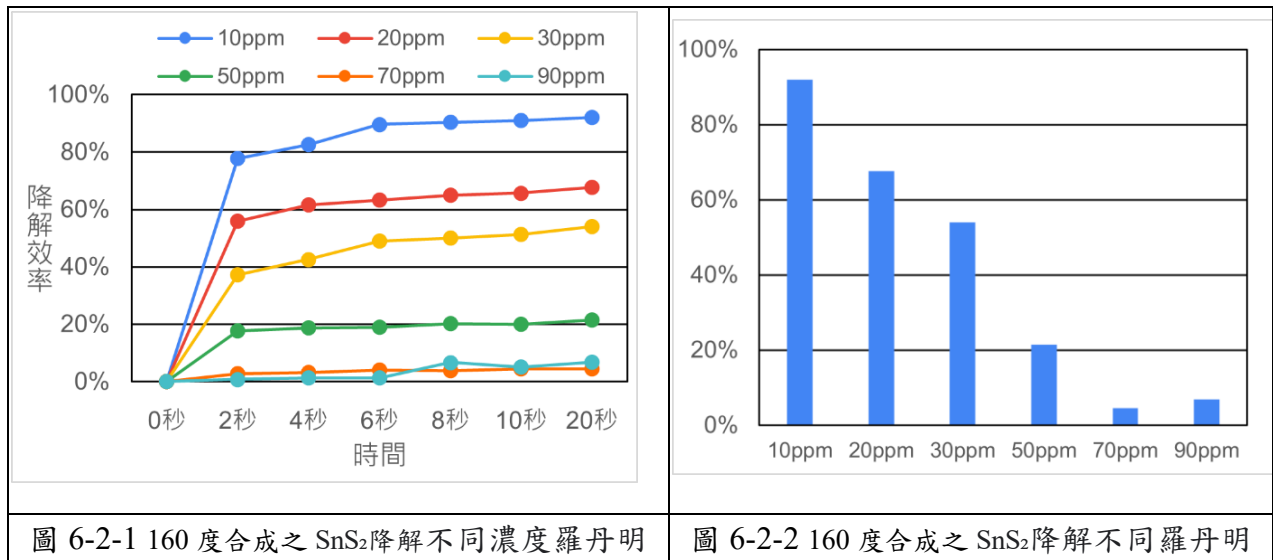


圖 6-2-1、6-2-2 為以 160°C 合成之硫化錫，固定加熱時間 9hr，氯化錫比硫脲 1:4，分別對不同濃度(10ppm、20ppm、30ppm、50ppm、70ppm、90ppm)之(15ml)羅丹明的降解效率分析比較圖，分別以長條圖及折線圖表示。我們可由圖中看出隨著濃度的增加，觸媒對羅丹明的降解效果百分比呈現越來越低的趨勢，當超音波震盪降解 20s 時，對 10ppm 的羅丹明降解效果達到了 90.4%，在 20ppm 的羅丹明時，降解效率達 67.7%，30ppm 時，降解效率為 57.7%，50ppm 之後，降解效率僅有 20% 或更低，但是若將濃度與降解效率同時考慮時，當超音波震盪降解 20s 時，10ppm 的觸媒對羅丹明染料的降解量相當於有 $10\text{ppm} \times 90.4\% = 9\text{ppm}$ 的效果，而對 20ppm 的羅丹明染料的降解量為 $20\text{ppm} \times 67.7\% = 13.5\text{ppm}$ 。如果是 30ppm 的羅丹明降解量為 $30\text{ppm} \times 57.7\% = 17.3\text{ppm}$ 。因此我們可看出同樣在超音波震盪 20s 時，觸媒對 30 ppm 的羅丹明染料降解量是最高的，而觸媒對 50ppm 的羅丹明降解量為 $50\text{ppm} \times 20\% = 10\text{ppm}$ 反而呈現下降的趨勢，而 70ppm 及 90ppm 就更低了，因此不計算討論，所以我們可推知本實驗所合成的觸媒最適合降解的羅丹明染料最高濃度為 30ppm，最後若以 20 秒時對染料的最大降解量的效果由高到低分別為羅丹明 $30\text{ppm} > 20\text{ppm} > 50\text{ppm} > 10\text{ppm} > 70\text{ppm}$ 。

(二) 比較 180°C 合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明的效果

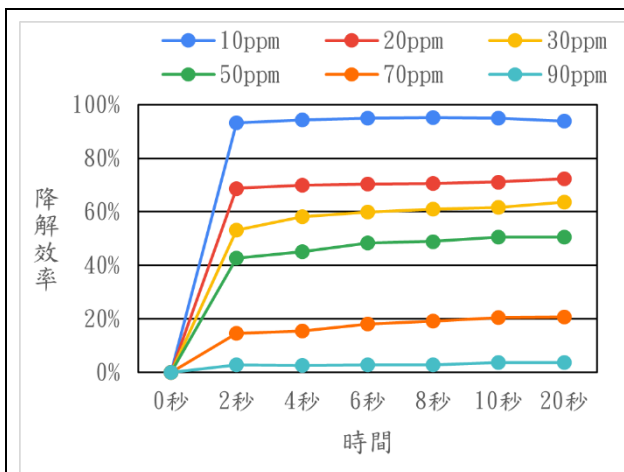


圖 6-2-3 180 度合成之 SnS₂降解不同濃度羅丹明

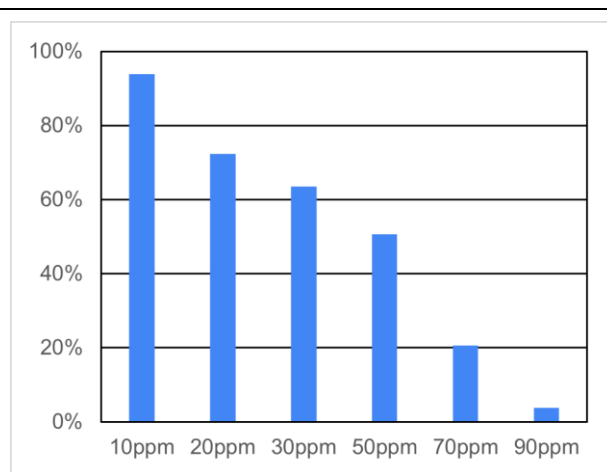


圖 6-2-4 180 度合成之 SnS₂降解不同濃度羅丹明

圖 6-2-3、6-2-4 為以 180°C 合成之硫化錫降解不同濃度羅丹明，固定加熱時間 9hr，氯化錫比硫脲 1:4，降解不同濃度(10ppm，20ppm，30ppm，50ppm，70ppm，90ppm)之(15ml)羅丹明的降解效率比較圖，分別以長條圖及折線圖表示。如圖表所示，折線的分佈為隨著濃度的增加，對羅丹明的降解效果越不理想，同樣是在超音波震盪降解 20s 時，觸媒對 10ppm 的羅丹明降解效果達到了 93.9%，在 20ppm 時，降解效率達 72.3%，30ppm 時，降解效率為 63.5%，50ppm 時為 50.6%，70、90ppm 分別為 20.7%、3.8%，同樣的若是我們同時考慮濃度與降解率來看，則觸媒對 10ppm 的羅丹明染料的降解量相當於有 $10\text{ppm} \times 93.9\% = 9.4\text{ppm}$ 的效果，對 20ppm 的羅丹明染料的降解量則有 $20\text{ppm} \times 72.3\% = 14.5\text{ppm}$ 的效果，對 30ppm 的羅丹明染料的降解量相當於有 $30\text{ppm} \times 63.5\% = 19\text{ppm}$ 的效果，對 50ppm 的羅丹明染料的降解量達到所有濃度的最高相當於有 $50\text{ppm} \times 50.6\% = 25.3\text{ppm}$ 的效果，對 70ppm 的羅丹明染料的降解量下降為僅剩 $70\text{ppm} \times 20.7\% = 14.5\text{ppm}$ 的效果，對 90ppm 的羅丹明染料的降解量更是僅有 $90\text{ppm} \times 3.8\% = 3.4\text{ppm}$ 。所以我們可推知本實驗所合成脂觸媒最適合降解的羅丹明染料最高濃度為的 50ppm，最後若以 20 秒時對染料的最大降解量的效果由高到低分別為羅丹明濃度 $50\text{ppm} > 30\text{ppm} > 20\text{ppm} = 70\text{ppm} > 10\text{ppm} > 90\text{ppm}$ 。

此外我們也由圖得知 180°C 合成之 SnS₂觸媒各秒數的降解效率都優於 160°C 同秒數時的降解效率，此結果也符合我們上次的推測，不同的加熱溫度會影響二硫化錫的降解效率及最大降解濃度。

(三) 比較 200°C合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明的效果

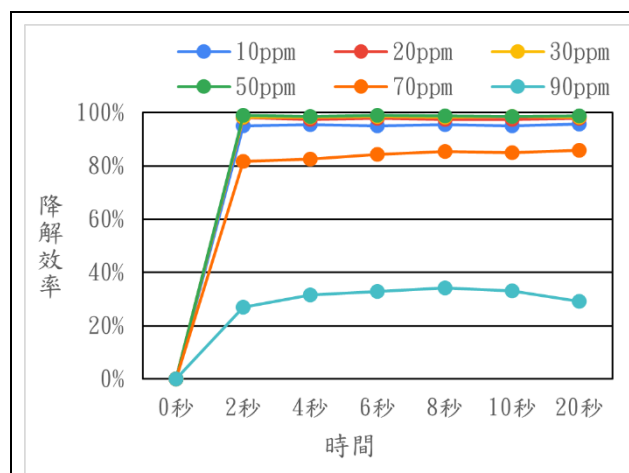


圖 6-2-5 200 度合成之 SnS₂降解不同濃度羅丹明

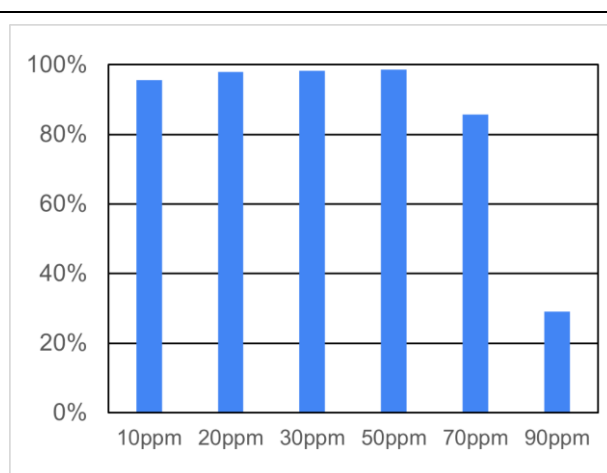


圖 6-2-6 200 度合成之 SnS₂降解不同濃度羅丹明

圖 6-2-5、6-2-6 為以 200°C 合成之硫化錫降解不同濃度羅丹明，固定加熱時間 9hr，氯化錫比硫脲 1:4，對不同濃度(10ppm，20ppm，30ppm，50ppm，70ppm，90ppm)之 (15ml)的羅丹明染料降解效率分析比較圖，分別以長條圖及折線圖表示。如圖表所示，10ppm 到 70ppm 的降解效率折線接近且都在 2 秒時達到了 80%以上而 90ppm 則大幅下滑，在 20s 時，10ppm 到 50ppm 的降解效率均為 95%以上，其中 50ppm 時為 98.7% 為最佳，70ppm 為 85.8%略為下滑，90ppm 為 29.1%明顯下滑，該粉末適用於 70ppm 以下的羅丹明，粉末的泛用性較 160°C、180°C 廣。

此外若是同時考慮濃度與降解效率來看則觸媒對 10ppm~90ppm 的羅丹明染料的降解量分別有 10ppm x 95.6%=9.6ppm、20ppm x 97.5%=19.5ppm、30ppm x 98.3%=29.5ppm、50ppm x 98.7%=49.4ppm、70ppm x 85.8%=60ppm、90ppm x 29.1%=26.2ppm 的降解效果。所以我們可看出在 200°C 所合成出的 SnS₂觸媒對羅丹明的最高且最佳的降解濃度為 70ppm，可在超音波震盪 20s 時即達到降解 60ppm 的效果。最後若以 20 秒時對染料的最大降解量的效果由高到低分別為羅丹明濃度 70ppm > 50ppm > 30ppm > 90ppm > 20ppm > 10ppm。

(四) 比較不同溫度合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明的最大降解量效果

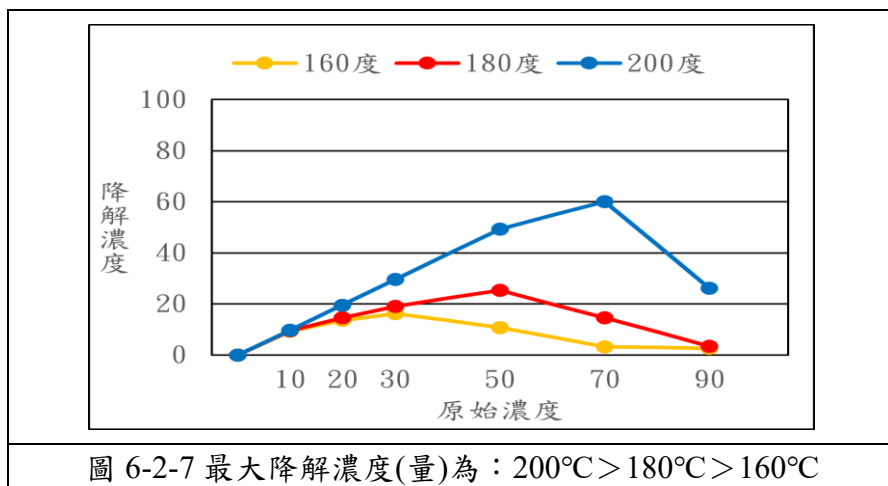


圖 6-2-7 為不同溫度所合成之 SnS_2 觸媒對不同濃度羅丹明的最大降解量分析圖，由圖中我們可看出 200°C 所合成的觸媒不論在任何羅丹明濃度下，其最大降解濃度皆比另外兩種溫度所合成之觸媒高，且反應 2 秒時最大降解量即可達到 60ppm，180°C 所合成之觸媒最大降解濃度約為 25ppm 左右，160°C 所合成之觸媒更低，最大降解濃度僅有約 17ppm，因此本實驗建議使用 200°C 所合成之 SnS_2 觸媒來降解工業廢水中的染料，因為其適用降解濃度更廣，最大降解量更高，降解效果更佳。

三、將相關實驗進行綜合比較

(一) 比較莫爾數比 1:3 以不同時間加熱合成之二硫化錫，降解羅丹明的效果

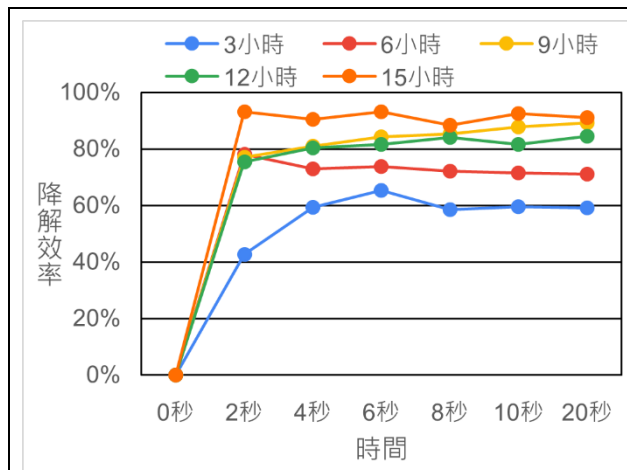


圖 6-3-1 莫爾數比 1:3 不同加熱時間合成之 SnS_2 降解羅丹明

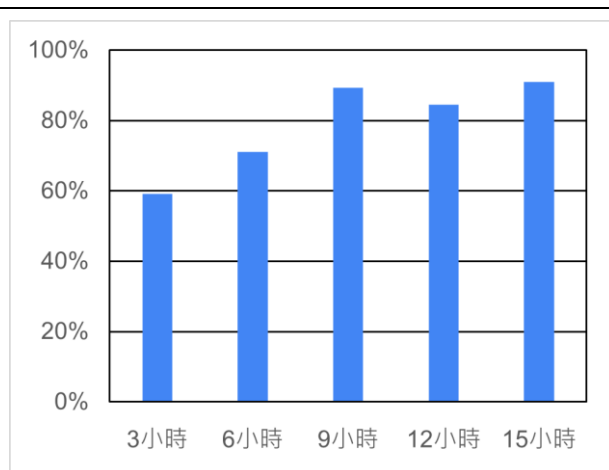


圖 6-3-2 莫爾數比 1:3 不同加熱時間合成之 SnS_2 降解羅丹明

圖 6-3-1、圖 6-3-2 為氯化錫比硫脲比 1:3 製成之 SnS_2 (溫度:200°C)，改變加熱時間 (3hr、6hr、9hr、12hr、15hr) 降解 10ppm 羅丹明的降解效率比較圖，分別以長條圖及折線圖表示。如圖圖 6-3-1、圖 6-3-2，降解效率折線隨著時間增加而出現了起伏情形，其中以水熱時間 15hr 時所製成的觸媒降解效果最佳，降解率可達的 90.1%，而水熱時間 9hr 的觸媒也可達到 89.3% 的降解效率。我們由兩圖可得知在 20s 時，隨著加熱時間增加，所

有不同溫度所製成的觸媒其降解效率皆逐漸增加，而且 9hr 及 9hr 以上降解效率差不多，其中以莫耳數比 1:3 的 SnS_2 在 9hr(含)以上降解羅丹明有較佳的效率。

(二) 比較莫爾數比 1:3 合成之二硫化錫，降解不同濃度羅丹明的效果

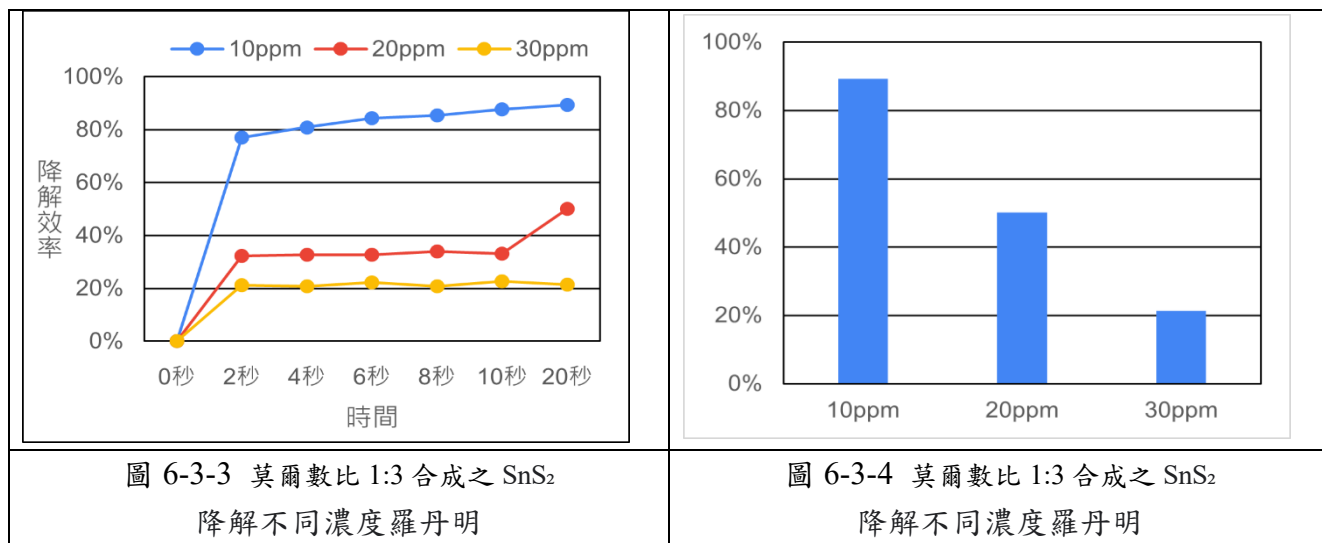


圖 6-3-3、圖 6-3-4 為氯化錫比硫脲比 1:3 製成之 SnS_2 觸媒 (溫度:200°C)，加熱時間 9hr，降解不同濃度羅丹明的分析比較圖。由圖中可以得知，隨著羅丹明的濃度增加，降解效率逐漸下降，降解 10ppm 羅丹明為最佳，達到 89.3%，而 20ppm 就下滑到 50.1%，30ppm 時只剩 21.4%，因此若同時考慮濃度及降解率來看，則此條件的觸媒對 10ppm~30ppm 的羅丹明染料的降解量分別為 $10\text{ppm} \times 89.3\% = 8.9\text{ppm}$ 、 $20\text{ppm} \times 50.1\% = 10\text{ppm}$ 、 $30\text{ppm} \times 21.4\% = 6.44\text{ppm}$ 。由上述數據可知 SnS_2 觸媒在 20s 時可對 20ppm 的羅丹明達到 10ppm 的降解最大量，因此本實驗推測 20ppm 的羅丹明即是本觸媒的最高降解濃度，所以沒有繼續測試更高濃度羅丹明。本條件的觸媒適合降解濃度較低的羅丹明。

(三) 比較莫爾數比 1:4，溫度 180 度以不同時間合成之二硫化錫，降解羅丹明的效果

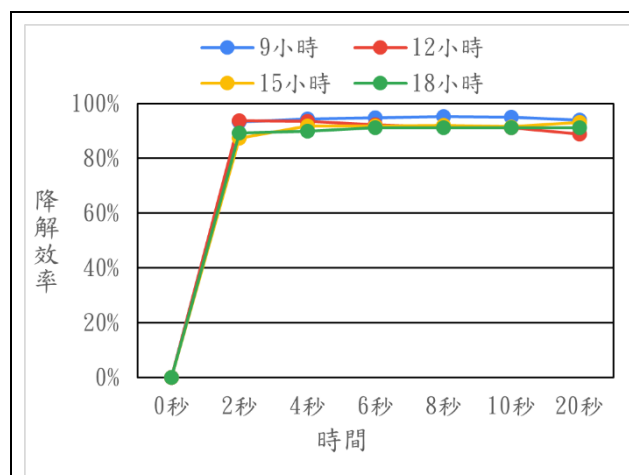


圖 6-3-5 不同加熱時間合成之 SnS₂降解羅丹明

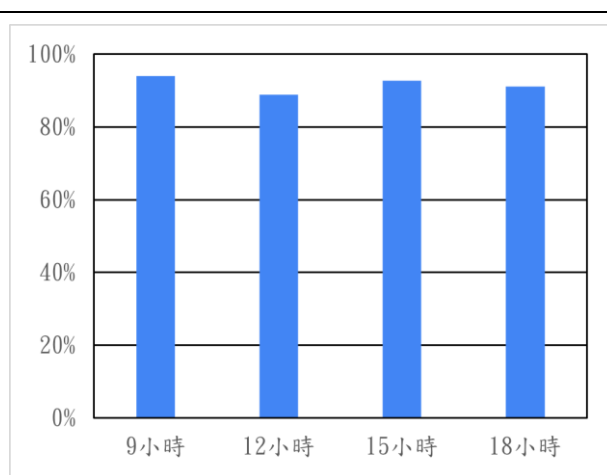


圖 6-3-6 不同加熱時間合成之 SnS₂降解羅丹明

圖 6-3-5、圖 6-3-6 為氯化錫比硫脲比 1:4 製成之 SnS₂觸媒 (溫度:180°C)，改變加熱時間(9hr、12hr、15hr、18hr)，降解羅丹明的分析比較圖，分別以折線圖和長條圖表示。由圖表中我們可以得知，四種不同時間所合成的觸媒接隨著超音波震盪時間越長降解效果越好，當震盪 20s 時，發現水熱時間 9hr 的 SnS₂觸媒對羅丹明染料的降解效率為最佳，降解率為 93.9%，而水熱時間 12hr、15hr、18hr 的觸媒其降解效果依序為 88.9%、93.5%、91.2%，在溫度 180 度下，四種不同水熱時間所合成的觸媒降解效率都很接近。且和 200°C所合成的 SnS₂觸媒效果相似，基於不過度耗費能量為原則，因此本實驗選擇在溫度 180°C的情況下，9hr 為合成 SnS₂的最佳時間。

(四) 比較不同溫度製成之二硫化錫降解較高濃度 30ppm 羅丹明的效果

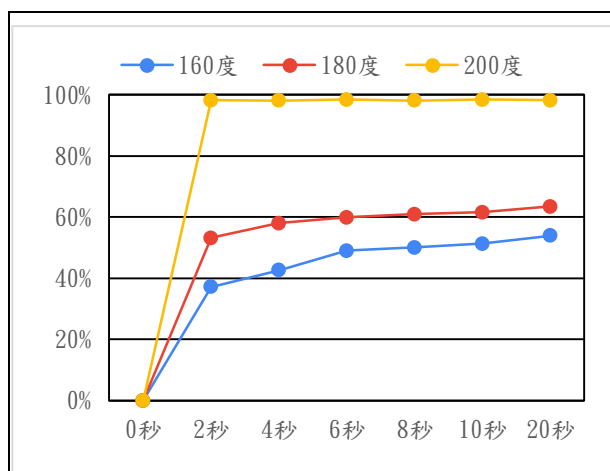


圖 6-3-7 不同加熱時間合成之 SnS₂降解較高濃度羅丹明

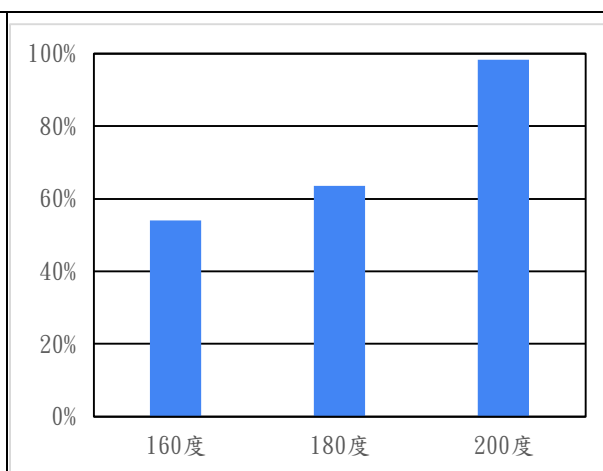


圖 6-3-8 不同加熱時間合成之 SnS₂降解較高濃度羅丹明

圖 6-3-7、圖 6-3-8 為氯化錫比硫脲(1:4)製成之 SnS_2 觸媒，於水熱罐中以不同溫度(160°C 、 180°C 以及 200°C)加熱 9hr 的降解效率折線圖和長條圖。有圖中我們可知，三種不同溫度的觸媒都隨著超音波震盪時間越長講解效果越好，且水熱溫度越高所合成的 SnS_2 觸媒對羅丹明的降解效果越好，其中以 200°C 所合成的 SnS_2 觸媒對羅丹明染料的降解率最高，可在超音波震盪 2 秒時即可達到 98% 的降解率，而 180°C 所合成的 SnS_2 觸媒對羅丹明染料經超音波震盪 20 秒後才可達到約 64% 的降解率，而最低溫度 160°C 合成的 SnS_2 觸媒對羅丹明的降解率則更是降到 54% 左右，因此本實驗推測合成 SnS_2 觸媒最佳的水熱溫度條件為 200°C 。

柒、儀器分析

一、XRD 分析

本實驗將二硫化錫粉末進行 **XRD** 分析，探討粉末結晶成相狀況。X 光角度 2θ 從 10 至 65 度。

(一) SnS_2 ，200 度 3 小時、6 小時與 9 小時的 XRD 比較

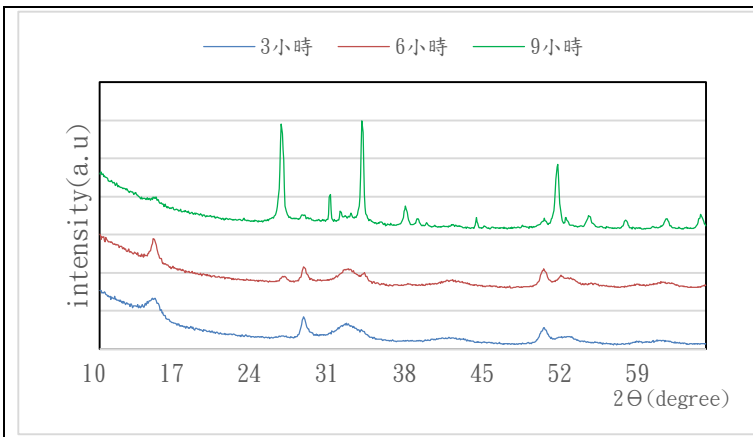


圖 7-1-1 SnS_2 ，200 度(3、6、9 小時)的 XRD 分析圖

由圖 7-1-1 得知，二硫化錫在溫度 200 度下，3 小時與 6 小時的晶型相似度 high，而 200 度 9 小時我們推測可能因為加熱時間過長而影響結晶情形導致晶型變化，且 9 小時降解效果較其餘兩者佳，因此我們推測 9 小時圖形突起部分為具有較好降解能力的結晶。

(二) SnS_2 ，180 度，12 與 18 小時的 XRD 比較

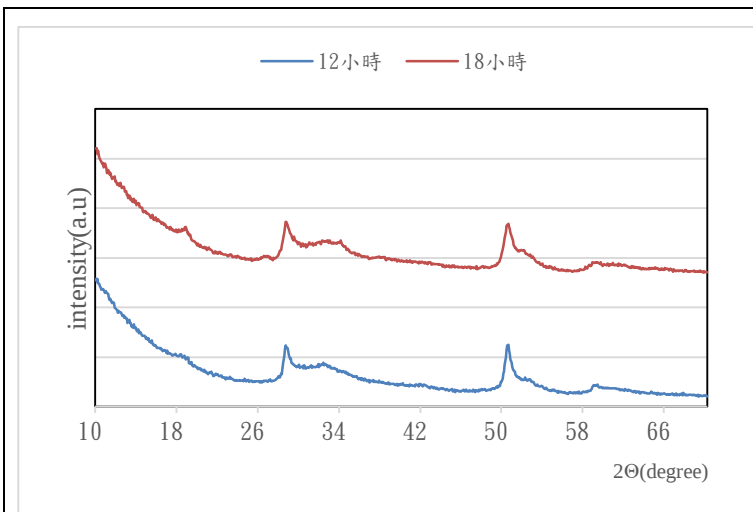
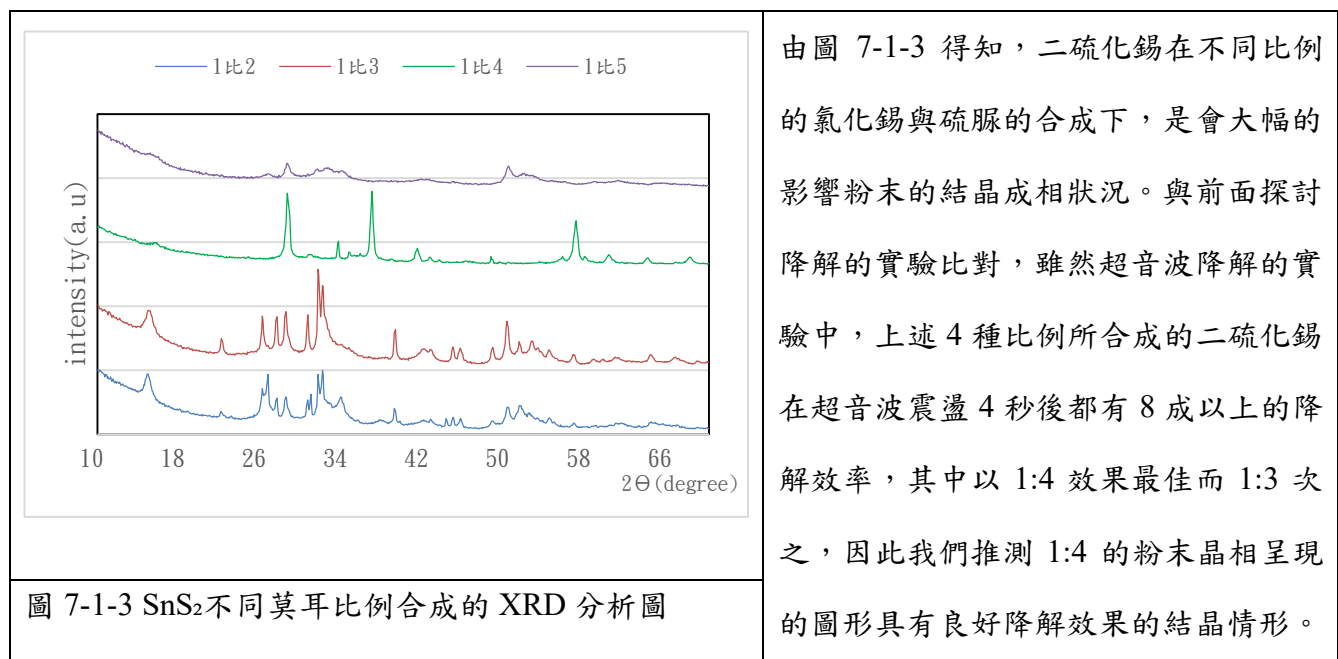


圖 7-1-2 SnS_2 ，180 度，12 與 18 小時的 XRD 分析圖

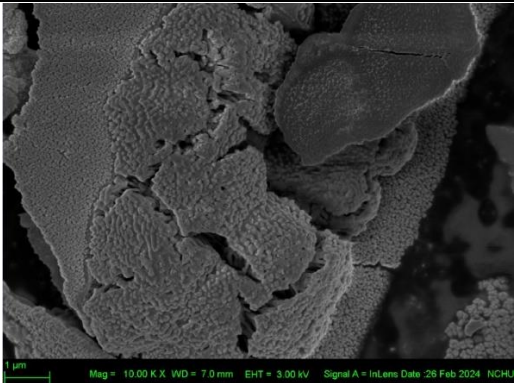
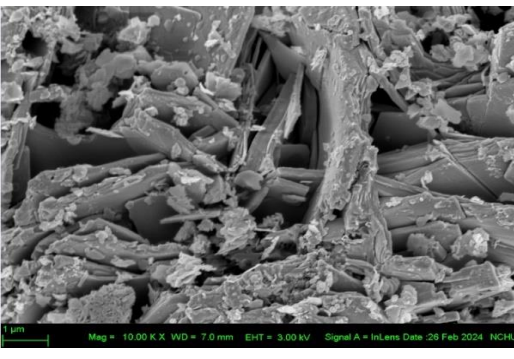
由圖 7-1-2 得知，二硫化錫在溫度 180 度下，加熱 12 與 18 小時所形成的晶型也是高相似度，但是與 200 度 3 小時與 6 小時的晶型又有些許差異，可能是因為溫度高低會影響晶型的成相，加熱時間過長也會造成晶型不同。12 小時與 18 小時降解效果分別為 91.2% 及 88.5%，因此我們推斷具有相似線型的粉末其降解效果差異不大。

(三) SnS_2 在不同比例氯化錫與硫脲合成的 XRD 比較



二、SEM 分析

將二硫化錫粉末送 SEM 分析，觀察其顆粒大小與形狀

	根據圖 6-2-1 所呈現， 顆粒呈微米級大小，呈現團聚狀，直徑長度約為 10 微米長，旁邊有些許零碎顆粒，粉末表面粗糙不平整，表面積相較其他莫耳比例的 SnS₂廣，推測為降解效率較佳的原因之一。
圖 7-2-1 SnS₂，1:4 的 SEM 分析圖	
	根據圖 6-2-2 所呈現，顆粒呈微米級大小，結構為條狀不規則，彼此間有許多坑洞纏繞交錯，表面也略為粗糙，表面積較少連續面，構造相較 1:4 SnS₂不完整。
圖 7-2-2 SnS₂，1:3 的 SEM 分析圖	

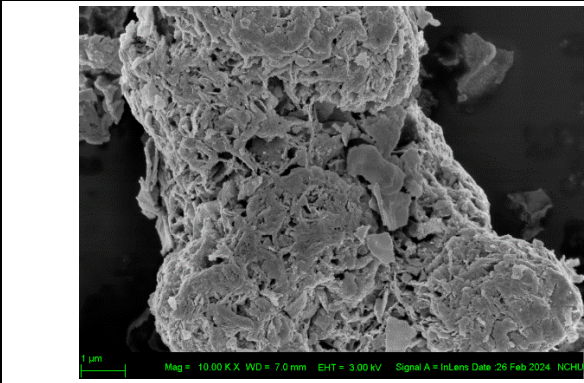


圖 7-2-3 SnS₂，1:2 的 SEM 分析圖

根據圖 6-2-3 所呈現，顆粒呈微米級大小，呈現塊狀，直徑長度約為八微米長，表面略為粗糙且有許多凹陷起伏，連續面不完整，旁邊也有些小碎塊，整體結構比 1:3 SnS₂完整但較 1:4 SnS₂略差。

三、PL分析(自由基檢測)

(一) 相同比例、溫度，不同水熱時間

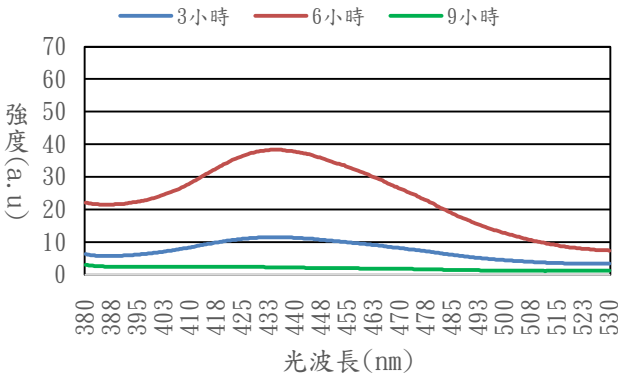


圖 7-3-1 電子電洞對存在時間：9hr > 3hr > 6hr

(二) 相同比例、水熱時間，不同溫度

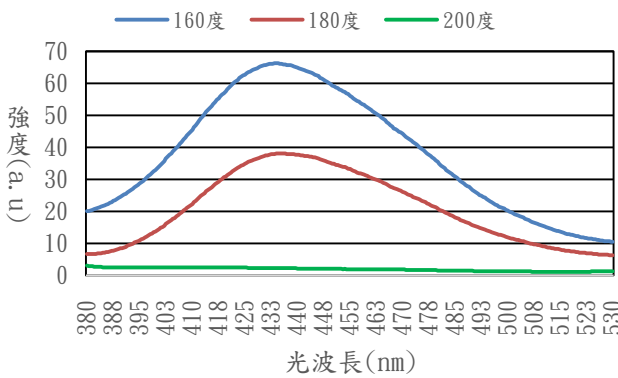


圖 7-3-2 電子電洞對存在時間：200°C > 180°C > 160°C

圖 5-3-1 為莫耳比例 1:4、溫度 200°C，不同水熱時間所合成 SnS₂觸媒的 PL 分析圖，由圖中我們可以看出吸收峰值大小為 9hr > 3hr > 6hr。由於螢光吸收光譜儀其吸收峰值越大表示電子電洞對交換越快，電子電洞對交換越快表示電子電洞對存在的時間越短，因此電子電洞對存在時間為 9hr > 3hr > 6hr，以 9 小時電子電洞對存在時間最長，電子電洞對存在時間越長，可以產生的氫氧自由基越多反應活性越好，因此我們推測 9 小時的 SnS₂觸媒推測會有較好的反應催化活性，與我們的實驗結果相符合。

圖 5-3-2 為莫耳比例 1:4、水熱時間 9 小時，不同水熱溫度所合成 SnS₂觸媒的 PL 分析圖，由圖中我們可以看出吸收峰值大小為 160°C > 180°C > 200°C，因此電子電洞對存在時間為 200°C > 180°C > 160°C，其中以 200°C觸媒其電子電洞對存在時間最長，因此本研究推測 200°C的 SnS₂觸媒會有較好的反應催化活性，與我們的實驗結果相符合。

捌、結論

一、本實驗發現當固定水熱溫度 200°C、水熱時間 9hr 的條件下，不同莫耳數比所製成之 SnS₂觸媒，降解羅丹明效果由高到低依序為：**1:4** > 1:3 > 1:5 > 1:2。

二、本實驗發現當固定反應物莫耳數比 1:4，水熱溫度 200°C 時，不同水熱時間所製成之 SnS₂觸媒，降解羅丹明效果由高到低依序為：**9hr** ≡ 12hr ≡ 15hr ≡ 18hr > 6hr > 3hr。

三、本研究發現當固定氯化錫與硫脲以莫耳數比 1:4，水熱時間 9 小時，不同水熱溫度所製成之 SnS₂觸媒，降解羅丹明效果由高到低依序為：**200°C** > 160°C > 180°C。

四、以不同溫度(溫度:160°C、180°C、200°C)合成之二硫化錫降解各濃度羅丹明

(一)以 160°C、加熱 9hr 合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明，

1.降解百分率依序為：10ppm > 20ppm > 30ppm > 50ppm > 70ppm > 90ppm

2.最大降解量依序為：**30ppm** > 20ppm > 50ppm > 10ppm > 70ppm

(二)以 180°C、加熱 9hr 合成之二硫化錫降解不同濃度羅丹明，

1.降解百分率依序為：10ppm > 20ppm > 30ppm > 50ppm > 70ppm > 90ppm

2.最大降解量依序為：**50ppm** > 30ppm > 20ppm = 70ppm > 10ppm > 90ppm

(三)以 200°C、加熱 9hr 合成之硫化錫降解不同濃度羅丹明，

1.降解百分率依序為：10ppm ≡ 20ppm ≡ 30ppm ≡ 50ppm > 70ppm > 90ppm

2.最大降解量依序為：**70ppm** > 50ppm > 30ppm > 90ppm > 20ppm > 10ppm

五、由實驗得知，以氯化錫比硫脲 1:3 製成之 SnS₂，在水熱罐維持 200°C，改變水熱時間降解 10ppm 羅丹明，降解效果由高到低依序為：15hr > 9 hr > 12hr > 6hr > 3hr

六、由實驗得知，以氯化錫比硫脲 1:3 製成之 SnS₂，在水熱罐維持 200°C、加熱 9hr，降解不同濃度羅丹明，降解效果由高到低依序為：10ppm > 20ppm > 30ppm

七、由實驗得知，以氯化錫比硫脲 1:4 製成之 SnS₂，在水熱溫度 180°C 下，不同水熱時間，降解 10ppm 羅丹明，降解效果由高到低依序為：**9hr** > 15hr > 18hr > 12hr

八、XRD 儀器分析

(一) 200 度 3、6、9 小時的粉末分析成相，以 9 小時的晶相最為複雜，具有較大起伏，且降解效果最佳最佳，因此我們推斷該線型為最佳粉末結晶成相。

(二) 200 度 12、18 小時兩者粉末結晶成相相似，其降解效果差異不大，分別為 89%及 91%。因此我們推測具有相似結晶及成相的粉末降解效果也會相似。

(三) 以不同莫耳比例 (1:2、1:3、1:4、1:5) 以 200 度加熱 9 小時所合成之觸媒，以 1:4 的結晶最為完整，推測 1:4 的線型為具有良好降解效果的結晶表現。

九、SEM 儀器分析：各比例合成之二硫化錫呈微米級大小，以 1:4 二硫化錫其結構較完整，推測為降解效果較佳的原因之一。

十、PL 儀器分析：

(一) 電子電洞對存在時間：**9hr** > 3hr > 6hr

(二) 電子電洞對存在時間：**200°C** > 180°C > 160°C

(三) 本實驗由 PL 圖水熱溫度 200 度加熱 9hr 合成之二硫化錫觸媒，具有較佳的促使氫氧自由基產生的能力，推測為降解效果最佳的主要原因。

十一、 本實驗成功找出合成 SnS₂觸媒最佳條件為莫耳數比 1:4、水熱溫度 200°C、水熱時間 9hr，且此觸媒可在低能量狀態下 **2 秒內**對 50ppm 羅丹明染料高達 **99%**的去除率。

玖、參考資料及其他

- 一、 Joseph, A., & Aneesh, P. M. (2022). Efficient degradation of methylene blue: A comparative study using hydrothermally synthesised SnS₂, WS₂ and VS₂ nanostructures. *Materials Research Bulletin*, 146, 111623.
- 二、 Matyszczyk, G., Jóźwik, P., Zybert, M., Yedzikhanau, A., & Krawczyk, K. (2023). Dye-Modified, Sonochemically Obtained Nano-SnS₂ as an Efficient Photocatalyst for Metanil Yellow Removal. *Materials*, 16(17), 5774.
- 三、 Damkale, S. R., Arbuj, S. S., Umarji, G. G., Panmand, R. P., Khore, S. K., Sonawane, R. S., ... & Kale, B. B. (2019). Two-dimensional hexagonal SnS₂ nanostructures for photocatalytic hydrogen generation and dye degradation. *Sustainable Energy & Fuels*, 3(12), 3406-3414.
- 四、 周邃安 (2020) ·以二硫化錫薄片製備之壓電奈米發電機應用於生物力學能量收集與智能人機介面·台北：國立臺灣大學化學研究所。
- 五、 林信翰 (2014) ·二硫化錫於可見光驅動光催化分解水產氫之研究·新竹：國立清華大學化學工程學系。
- 六、 林昱廷 (2019) 透過機械力壓電催化驅使少數層二硫化鉬/石英微米柱之多層次異質結構在產氫反應及水汙染降解之研究·新竹：國立清華大學材料科學工程學系。
- 七、 楊鈞富 (2022) ·二硫化錫/三氧化鉬奈米複合材料用於超級電容電極與光催化反應·高雄：國立中山大學材料與光電科學學系研究所。
- 八、 台灣研究亮點/環境修復與能源永續之創新材料 - 壓電觸媒。

一、圖片出處總表：

編號	出處	編號	出處
圖 3-1	第二作者自行拍攝	圖 6-1-6	第一作者自行繪製
圖 3-2	國立中興大學貴儀中心	圖 6-2-1	第三作者自行繪製
圖 3-3	第二作者自行拍攝	圖 6-2-2	第三作者自行繪製
圖 3-4	第二作者自行拍攝	圖 6-2-3	第三作者自行繪製
圖 3-5	第二作者自行拍攝	圖 6-2-4	第一作者自行繪製
圖 3-6	國立中興大學貴儀中心	圖 6-2-5	第一作者自行繪製
圖 4-1	第三作者自行繪製	圖 6-2-6	第一作者自行繪製
圖 4-3	第三作者自行繪製	圖 6-2-7	第一作者自行繪製
圖 4-4	第三作者自行繪製	圖 6-3-1	第三作者自行繪製
表 5-1	第一作者自行繪製	圖 6-3-2	第三作者自行繪製
表 5-2	第一作者自行繪製	圖 6-3-3	第三作者自行繪製
表 5-3	第一作者自行繪製	圖 6-3-4	第一作者自行繪製
表 5-4	第一作者自行繪製	圖 6-3-5	第一作者自行繪製
表 5-5	第一作者自行繪製	圖 6-3-6	第一作者自行繪製
表 5-6	第一作者自行繪製	圖 6-3-7	第一作者自行繪製
表 5-7	第一作者自行繪製	圖 6-3-8	第三作者自行繪製
表 5-8	第一作者自行繪製	圖 7-1-1	第一作者自行繪製
表 5-9	第一作者自行繪製	圖 7-1-2	第一作者自行繪製
表 5-10	第一作者自行繪製	圖 7-1-3	第一作者自行繪製
圖 6-1-1	第三作者自行繪製	圖 7-2-1	第一作者自行繪製
圖 6-1-2	第三作者自行繪製	圖 7-2-2	第三作者自行繪製
圖 6-1-3	第三作者自行繪製	圖 7-2-3	第三作者自行繪製
圖 6-1-4	第一作者自行繪製	圖 7-3-1	第一作者自行繪製
圖 6-1-5	第一作者自行繪製	圖 7-3-2	第三作者自行繪製

【評語】 200016

本研究以不同方式製備二硫化錫觸媒，並探討用其來移除羅丹明染料之效果。實驗數據豐富，然而報告中較為缺少過往文獻比較，亦未探討染料移除為物理吸附或是化學分解，建議可進一步討論其降解機制，以使研究成果更有應用價值。