




行政院環境保護署

108 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

機械/化學方式處理分離油污染土壤

期末報告（定稿）

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：中臺科技大學／環境與安全衛生工程系
專案主持人：張益國 副教授
專案執行期間：108 年 1 月 4 日起至
108 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 108 年 12 月 印製



機械(化學方式處理分離油污染土壤

期末報告(定稿)

行政院環境保護署



專案基本資料表

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|--|--------------|----------------------------|--------------|--|------------------|
| 專案性質 | | <input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質 | | 專案類別(單選) | | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 | |
| 研究主題 | | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他 | | | | | |
| 申請機構系所 | | 中臺科技大學 環境與安全衛生工程系 | | | | | |
| 機構地址 | | 40601 台中市北屯區廬子路 666 號 | | | | | |
| 專案主持人 | | 張 益 國 | | 職等／職稱 | | 副 教 授 | |
| 協同主持人 | | 徐 一 量 | | 職等／職稱 | | 副 教 授 | |
| 專案名稱 | 中文 | 機械/化學方式處理分離油污染土壤 | | | | | |
| | 英文 | Mechanical/chemical treatments for oil contaminated soils separations | | | | | |
| | 關鍵字 | 總石油碳氫化合物、機械碰撞、化學氧化、水力漩流分離 | | | | | |
| 執行期程 | | 自 民 國 1 0 8 年 1 月 4 日 起 至 民 國 1 0 8 年 1 1 月 3 0 日 止 | | | | | |
| 專案主持人 | | 姓名：張益國 | | Email：ykchang@ctust.edu.tw | | 專線：04-22390168 手機：0937365778 | |
| 專任助理 | | 姓名： | | Email： | | 專線： 手機： | |
| 經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額) | 專 案 預 估 經 費 | | 第一年金額 | | 第二年金額 | | 編列說明 |
| | 1. | 人事費用 | 351,000 | | | | (1~5 項相加之 50%為限) |
| | 2. | 貴重儀器使用含維護費 | 74,000 | | | | (與計畫實驗相關) |
| | 3. | 消耗性器材與主要費用 | 244,206 | | | | (與計畫主體相關) |
| | 4. | 其它研究相關費用 | 62,433 | | | | (含差旅與租賃費用) |
| | 5. | 雜支費用 | 32,000 | | | | (1~6 項相加之 5%為限) |
| | 6. | 行政管理費 | 65,066 | | | | (1~5 項相加之 10%為限) |
| | 7. | 自籌款 | 100,000 | | | | 裕山環境工程股份有限公司 |
| | 申請補助金額(1~6 項) | | 828,705 | | | | 總金額：828,705 |
| 計畫總金額(1~7 項) | | 928,705 | | | | 總金額：928,705 | |

(請於空白處蓋上申請單位大小章)

 專案主持人：_____ (簽名及蓋章) 日期： 108.12.26





研究成果中英文摘要

(一) 中文部分：

本研究以「機械/化學方式處理分離油污染土壤」，架接於現有技術上，應用超音波震盪、擦洗等處理方式，添加非結晶型二氧化矽當研磨介質，使用高氧水增加化學氧化能力，探討是否增進總石油碳氫化合物(TPH)去除處理效能。

首先(1)應用超音波震盪機械碰撞、添加非結晶型二氧化矽當介質，以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2 情況下，可得 TPH 去除率 72.7%；使用自來水當試劑水，最佳 TPH 去除率 74.2%。處理高 TPH 油污染土壤較低 TPH 油污染土壤效果略佳。高氧水使用與否，對 TPH 去除無明顯差異。而添加非結晶型二氧化矽為重要之實驗條件，不同添加比例(1:200、1:100、1:50)均對 TPH 去除有所助益。(2)利用擦洗處理高 TPH 油污染土壤時，添加非結晶型二氧化矽為重要之實驗參數，對 TPH 去除有所增進。利用擦洗處理低 TPH 油污染土壤時，非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 30 分鐘為較合適之條件。(3)水力漩流分離土壤，模擬入流速度以 3.5m/s 對細顆粒分離效果較佳。實際漩流試驗後，underflow stream 顆粒 $63\mu\text{m}$ 以下佔 15.9%、 $63\mu\text{m}$ 以上佔 84.1%；overflow stream 顆粒中(應為細顆粒土壤) $63\mu\text{m}$ 以下佔 75.7%、 $63\mu\text{m}$ 以上佔 24.3%，仍帶有部分粗顆粒土壤，原因可能是模廠泥水泵馬力不夠，導致流速不足，未來可藉增速改善。

本研究藉 (1)機械碰撞、(2)化學氧化、(3)水力分離系統，搭接於現有土壤清洗(soil washing)單元上，貼近實廠應用，促進粗細顆粒分離(污染物濃淡分級)。整體而言，非結晶型二氧化矽當研磨介質添加為重要之影響參數，可有效促進 TPH 去除；高氧水使用與否，則對 TPH 去除無明顯差異。超音波震盪及擦洗處理，對油污染土壤 TPH 去除可達 62.0%~79.0%間。

關鍵詞：總石油碳氫化合物、機械碰撞、化學氧化、水力漩流分離



(二) Abstract :

In this work, we applied mechanical/chemical treatments for oil contaminated soils separations. The amorphous SiO_2 from chemical mechanical polishing (CMP) wastewater was used as physical grinding agent in mechanical collision (ultrasonic treatment and scrubbing treatment). Due to the keen shape, it might be useful for oil-cluster particles separations. After that, the high oxygen-content fine bubble was applied as chemical oxidation to diminish total petroleum hydrocarbon (TPH) in particle.

Firstly, under the conditions of ultrasonic treatments, the optimum TPH diminishment 72.7% was achieved by applying 35mg/l high oxygen-content water with liquid to solid ratio (L/S) 2, 74.2% TPH diminishment was achieved by applying tap water. There was no significant different between the use of high oxygen-content water and the tap water as reagent. But the amorphous SiO_2 particles additions played an important role in TPH diminishment. Under the scrubbing treatment, the amorphous SiO_2 particles additions was also important for high TPH-content soils treatment. Furthermore, the optimum separation process was approached through hydrocyclone separation. The FLUENT flow simulations are applied to calculate the cut-off size and fractional efficiencies in hydrocyclone separators. Finally, through upon mechanical/chemical treatments, the oil contaminated soils (esp. high TPH content soils) might be physical separated. The soils might be reused and the TPH concentration might be reduced.

Keywords: Total petroleum hydrocarbon, Mechanical collision, Chemical oxidation, Hydrocyclone separation



目錄

專案基本資料表

研究成果中英文摘要

| | |
|----------------------------------|----|
| 第一章 前言 | 1 |
| 第二章 研究目的 | 4 |
| 第三章 文獻探討 | 6 |
| 3-1 機械碰撞 | 7 |
| 3-1-1 超音波震盪 | 7 |
| 3-1-2 擦洗 | 9 |
| 3-1-3 非結晶型二氧化矽 | 10 |
| 3-2 化學氧化 | 13 |
| 3-3 水力分離 | 14 |
| 3-4 FLUENT 流況模擬 | 18 |
| 第四章 研究方法與過程 | 21 |
| 4-1 實驗準備 | 21 |
| 4-1-1 油污染土壤 | 21 |
| 4-1-2 含非結晶型二氧化矽之研磨粒 | 22 |
| 4-2 實驗方法與步驟進行 | 23 |
| 4-2-1 機械碰撞 | 23 |
| 4-2-2 高氧微泡水 | 23 |
| 4-2-3 水力分離 | 24 |
| 4-2-4 應用情境 | 26 |
| 4-2-5 其他分析 | 27 |
| 4-3 分析比較現行既有技術能力、專利、產品市場需求及競爭力評估 | 30 |
| 4-4 執行成果貢獻及成果效益 | 32 |
| 4-5 工作進度甘特圖 | 33 |
| 第五章 結果與討論 | 34 |



| | |
|---|----|
| 5-1 採樣 | 34 |
| 5-2 基本特性分析 | 35 |
| 5-2-1 pH 值 | 35 |
| 5-2-2 物理/化學特性 | 35 |
| 5-2-3 總石油碳氫化合物分析(TPH) | 35 |
| 5-2-4 非結晶型二氧化矽 | 37 |
| 5-2-5 高氧水 | 38 |
| 5-3 超音波震盪處理高、低 TPH 油污染土壤 | 39 |
| 5-3-1 超音波震盪處理高 TPH 油污染土壤(35 mg/l 高氧水當試劑水)流況模擬 | 39 |
| 5-3-2 超音波震盪處理高 TPH 油污染土壤(自來水當試劑水) | 42 |
| 5-3-3 超音波震盪處理低 TPH 油污染土壤(35 mg/l 高氧水當試劑水) | 44 |
| 5-3-4 超音波震盪處理低 TPH 油污染土壤(自來水當試劑水) | 46 |
| 5-3-5 濃度平衡計算 | 47 |
| 5-3-6 小結 | 49 |
| 5-4 擦洗處理高、低 TPH 油污染土壤 | 50 |
| 5-4-1 擦洗處理高 TPH 油污染土壤(35 mg/l 高氧水當試劑水) | 50 |
| 5-4-2 擦洗處理高 TPH 油污染土壤(自來水當試劑水) | 52 |
| 5-4-3 擦洗處理低 TPH 油污染土壤(35 mg/l 高氧水當試劑水) | 55 |
| 5-4-4 擦洗處理低 TPH 油污染土壤(自來水當試劑水) | 57 |
| 5-4-5 小結 | 59 |
| 5-5 水力漩流分離 | 60 |
| 5-5-1 流場模擬模型 | 60 |
| 5-5-2 流場模擬情境 | 62 |
| 5-5-3 水力漩流器分離試驗 | 65 |
| 5-5-4 小結 | 67 |



| | |
|---------------------------|----|
| 5-6 結論與建議 | 68 |
| 5-6-1 結論 | 68 |
| 5-6-2 建議 | 69 |
| 參考文獻 | 70 |
| 108 年度專案成果績效自評表 | 73 |
| 附件一 | |



圖 次

| | |
|---|----|
| 圖 1-1 典型土壤清洗程序 | 2 |
| 圖 2-1 某油污染土壤粒徑分布比例 | 4 |
| 圖 2-2 某油污染土壤影像觀察 (a)正常顆粒、(b)細顆粒與油團聚成較粗顆粒、(c)粗細顆粒外層包覆油膜 | 4 |
| 圖 3-1 CMP 示意圖 | 10 |
| 圖 3-2 研磨廢水中非結晶型二氧化矽之影像 | 11 |
| 圖 3-3 高氧水設備示意圖 | 13 |
| 圖 3-4 水力漩流器示意圖 | 16 |
| 圖 3-5 油污染土壤(a)原樣、(b) underflow 樣本雷射粒徑分析圖 | 18 |
| 圖 4-1 顆粒分析軟體實驗結果示意圖 | 22 |
| 圖 4-2 高氧微泡水運作之情況 | 24 |
| 圖 4-3 水力漩流分離器之結構與實驗室組裝照 | 25 |
| 圖 4-4 模擬流場內壓力分佈圖 | 25 |
| 圖 5-1 高 TPH 油污染土壤採樣過程 | 34 |
| 圖 5-2 低 TPH 油污染土壤採樣過程 | 34 |
| 圖 5-3 高氧水產製後靜置時間與溶氧值關係圖 | 38 |
| 圖 5-4 高氧水於不同處理程序中之時間與溶氧值關係圖 | 38 |
| 圖 5-5 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 去除率 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2) | 40 |
| 圖 5-6 高 TPH 油污染土壤原樣照片 | 41 |
| 圖 5-7 高 TPH 油污染土壤經 5 分鐘反應後照片(非結晶型二氧化矽：油污染土壤=1:200，以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2) | 41 |
| 圖 5-8 高 TPH 油污染土壤經 30 分鐘反應後照片(非結晶型二氧化矽：油污染土壤=1:200，以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比 | |



| | |
|---|----|
| 設計為 1:2) | 41 |
| 圖 5-9 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 去除率 (以自來水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 43 |
| 圖 5-10 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 去除率 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 45 |
| 圖 5-11 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 去除率 (以自來水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 47 |
| 圖 5-12 GC-FID 分析土壤 TPH | 48 |
| 圖 5-13 GC-FID 分析水溶液 TPH | 48 |
| 圖 5-14 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 去除率 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 51 |
| 圖 5-15 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 去除率 (以自來水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 53 |
| 圖 5-16 高 TPH 油污染土壤經擦洗 5 分鐘反應後照片(非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 = 1 : 200, 以自來水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 54 |
| 圖 5-17 高 TPH 油污染土壤經擦洗 5 分鐘反應後照片(非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 = 1 : 200, 以自來水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 54 |
| 圖 5-18 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 去除率(以 35 mg/l 高氧水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 56 |
| 圖 5-19 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗 | |



| | |
|---|----|
| 反應時間後之 TPH 去除率（以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2） | 58 |
| 圖 5-20 FLUENT 操作畫面 | 60 |
| 圖 5-21 水利漩流器 | 61 |
| 圖 5-22 水利漩流器模擬模型 | 61 |
| 圖 5-23 水利漩流器模擬模型網格圖 | 62 |
| 圖 5-24 漩流器內壓力分佈圖 | 64 |
| 圖 5-25 漩流器內顆粒軌跡圖 | 64 |
| 圖 5-26 模擬土壤經水力漩流處理之雷射粒徑分析圖 | 65 |



表次

| | |
|--|----|
| 表 3-1 某電子廠研磨液之安全資料表(safety data sheet, SDS)中的成分辨識資料 | 11 |
| 表 3-2 某電子廠研磨廢水分析結果一覽表 | 12 |
| 表 5-1 油污染土壤樣本 pH 值 | 35 |
| 表 5-2 高、低 TPH 油污染土壤粒徑分析結果 | 35 |
| 表 5-3 高、低 TPH 油污染經氣相層析儀/火焰離子化偵測器分析結果 | 36 |
| 表 5-4 非結晶型二氧化矽污泥重金屬組成 | 37 |
| 表 5-5 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 39 |
| 表 5-6 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值 (以自來水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 42 |
| 表 5-7 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 44 |
| 表 5-8 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值 (以自來水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 46 |
| 表 5-9 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 殘存值 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 50 |
| 表 5-10 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 殘存值 (以自來水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2) | 52 |
| 表 5-11 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應 | |



| | |
|---|----|
| 時間後之 TPH 殘存值（以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2） | 55 |
| 表 5-12 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 殘存值（以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2） | 57 |
| 表 5-13 不同情境模擬結果 | 63 |



第一章 前言

隨著經濟的迅速發展及工業的密集發展，石化業原料需求與日俱增。台灣中油公司為充足供應國內能源需求，在高雄煉油廠先後興建蒸餾、煤裂等工場及供應石化原料之輕油裂解工場，全盛時期總共有 46 座工場，日煉原油 27 萬桶，年產乙烯 50 萬噸，供應全國近半油料及仁大/林園工業區石化下游廠商之進料需求，全年產值約 2,000 億元。除負責輕油裂解煉製生產外，更是南部輸儲轉運之重要樞紐，為國內民生與國防用油供應鏈中重要之一環(台灣中油股份有限公司，2018)，後因政策及公司營運規劃關係，最終於 2015 年 11 月 1 日停工。高雄煉油廠關廠釋出 177 公頃土地，未來如何利用各界想法不同。惟自日據時代迄今已逾 60 年歷史，由於工廠設備漸舊、破損或工安事故而造成的多起污染事件，造成廠區內土壤及地下水污染問題，污染改善將是未來數年至數十年主要面臨之挑戰。目前台灣中油公司、高雄市政府、地方居民初步共識在高污染區域打造生態公園，至於輕度污染區域是要做綠能產業園區、高值石化園區或者是商業區，則有待進一步規畫協調(中時電子報，2015)。台灣中油公司擬定 20 年污染整治計畫，預計花 115 億，在健康評估無虞下，將污染場址有限度利用。

勇興台(2016)「中油公司高雄煉油廠污染後續調查及污染改善監督工作計畫報告」指出，高廠東南側處金屬中心、統一宅急便、中濱企業等多處土地土壤地下水總石油碳氫化合物 (total petroleum hydrocarbon, 以下簡稱 TPH) 超過土壤污染管制標準。北側區域金屬中心、北誼興業股份有限公司、高楠段 322、328 地號污染場址鄰近地區等調查結果顯示，金屬中心污染狀況嚴重(80% 以上超過土壤管制標準)、北誼興業及 328 地號下游區域都有測點超過管制標準狀況；南側地區之游鐵高空區域調查結果顯示土壤受 TPH 污染嚴重，檢出 TPH 最高濃度達 125,000mg/kg，污染深度並有深淺兩層，TPH 污染物主要屬於 C10~C40 較重質油品污染。高志明(2005)「應用整合型復育技術處理受燃料油污染之土壤及地下水」報告中指出，在受油品污染土壤及地下水場址中，燃料油具有含碳數高且不易衰減及揮發之特性，處理困難度高於受汽油及柴油污染之地下環境。另外，在高雄煉油廠生產系列中，中殼潤滑油基礎油廠亦是其中重要一環。中殼基礎油廠的原料取自常壓塔底油，經真空分餾後，蒸出部分稱做中性油(Neutral oil)。中性油再進入加氫精製程序，主要是油中的硫進行管控。後續再進入溶劑脫蠟單元，利用丁酮/甲苯混合液，對直鏈烷烴溶解度的鑑別性，在低溫下將結晶析出的石蠟濾除。以提升中性油的低溫流動性，濾渣即為副產品粗蠟。最後中性油經真空重蒸，分餾成不同黏度的餾份，即為基礎油成品(70P, 150SN, 500SN)，而塔底油即為亮滑油(150BS)。基礎油加入功能性添加劑的複配，成為適用各種不同車輛與工業機械的潤滑油(吳堅/煉製研究所)。



依立法院議案關係文書院總第 887 號 政府提案第 15700 號 之 4701(2018.5.23)，中殼公司原生產潤滑油與基礎油，因潤滑油供需失衡，另配合中油公司高雄煉油廠 2015 年底關閉，中殼公司提前於 2014 年底結束生產，2015 年底廠房拆遷完畢後，自 2017 年 1 月開始土壤及地下水污染整治作業，預計整治期 5~6 年。高廠研擬停廠之後，預計部分採用開挖離地方式進行土壤整治。

Bayley(2005)指出，污染物主要因下列三種作用力之緣故而存在於顆粒表面：

- (1) 污染物與顆粒間以化學鍵形式結合。
- (2) 污染物與顆粒間之親水/疏水性質差異。
- (3) 污染物與顆粒表面間之表面作用力(凡得瓦爾力)。

美國環保署（USEPA）則研究發現，大部分有機/無機污染物常附著於細小顆粒(如黏土及矽土)表面上，在此一情形下，則可利用物理分離技術，先將大顆粒物質先予分離，可大大降低待處理污染沉積物之體積。為達土壤減量目的，處理程序(如下圖所示)大多配有土壤分級程序，初步分離粗細(乾淨/受污染)土壤，達成減容目的。

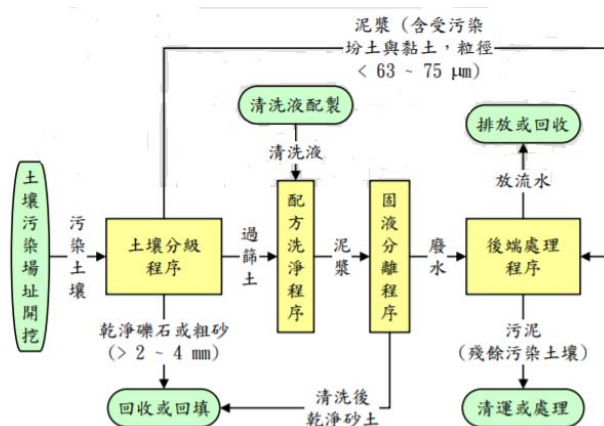


圖 1-1 典型土壤清洗程序 (摘自黃智等，2011)



第一章

唯上述土壤分級程序(例如:水力漩流(Hydrocyclone)分離系統)處理含油顆粒土壤時，有時成效未如預期，積極探討其原因。可能原因有：

- i. 水力漩流器之設計與條件操作尚未達最佳效果；
- ii. 含油顆粒土壤因油污與顆粒黏著，所以大小顆粒分不開。

遂本年度進行研究計畫「機械/化學方式處理分離油污染土壤」，期望藉由計畫執行、試驗分析，解決上述問題並釐清原因。



第二章 研究目的

計畫團隊先期觀察某油污染土壤顆粒分布情況，其結果如圖 2-1 所示。

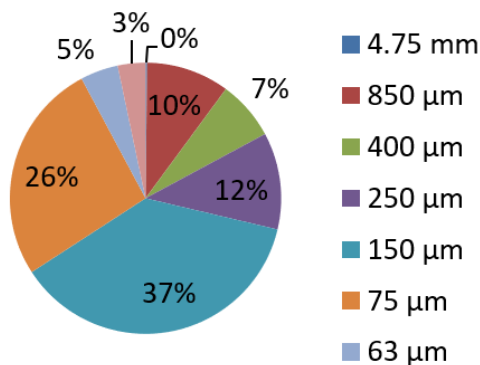


圖 2-1 某油污染土壤粒徑分布比例

依過往經驗，有機污染物應該容易附著於細顆粒。後續將細顆粒(尤其是 $<75 \mu\text{m}$)分離後，應能獲得不錯之污染物濃淡分離。惟發現有時候所分離之粗顆粒，TPH 仍會超過 1000 mg/kg，有必要進一步了解。遂進一步進行土壤影像觀察(如圖 2-2 所示)，

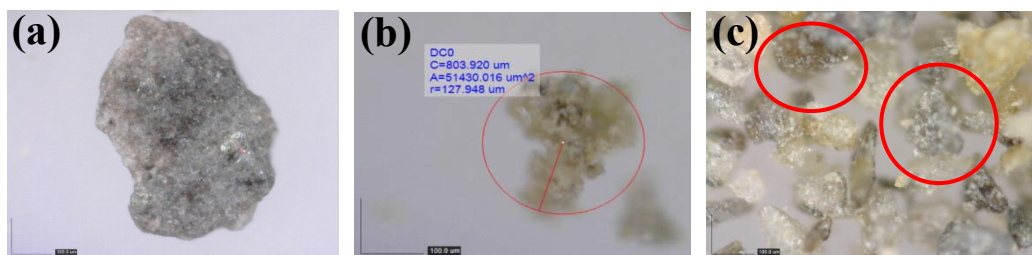


圖 2-2 某油污染土壤影像觀察 (a)正常顆粒、(b)細顆粒與油團聚成較粗顆粒、(c)粗細顆粒外層包覆油膜

圖 2-2a 為正常土壤顆粒，另發現有些粗顆粒其實是油污與細顆粒之團聚物(圖 2-2b)、圖 2-2c 則顯示有些顆粒(粗細均有)外層包覆油膜、有些則無。鑑於以上含油土壤可能發生情況，遂思考若能將油污團聚物打散，或者將顆粒外層油膜切除，應能對後續顆粒分離及程序處理有所幫助。目前已有實場作業以攪拌搭配水力分選分離方式分離油污染土壤，攪拌效果良好可使顆粒懸浮，但若加入機械碰撞作用，應更能提升顆粒分離效能。後續水力分選可分離細顆粒($75 \mu\text{m}$)油污



第二章

染土壤，原預期粗顆粒土壤 TPH 含量低，但因為有細顆粒與油團聚成較粗顆粒、粗細顆粒外層包覆油膜(如圖 2-2)現象，所以有些粗顆粒土壤 TPH 含量仍高。

本研究以「機械/化學方式處理分離油污染土壤」計畫，架接於現有設備及程序基礎上，期藉由增加機械碰撞、化學氧化、客製化水力分離條件，增進油污染土壤處理功效。茲將進行方式簡述如下：

- (1)機械碰撞：添加非結晶型二氧化矽當介質，利用超音波震盪及擦洗方式，讓非結晶型二氧化矽與含油土壤顆粒碰撞，達成顆粒分離效果(粒粒分明)；
- (2)化學氧化：以高氧微泡水注入攪拌槽，除具化學氧化能力增加 TPH 分解及顆粒分離效果外，亦兼具浮除效果。
- (3)水力分離：客製化設計水力漩流器分離顆粒。

期達成本土化設計應用，發展適合搭接於現有土壤清洗技術(soil washing)上之處理模組，持續改善分離設備及操作條件，促進粗細顆粒分離(污染物濃淡分級)。



第三章 文獻探討

由於石油化學品貯槽洩露、油槽管線腐蝕滲漏、輸油管遭竊賊盜油破壞或是施工品質不良及人員操作管理不當等因素，所造成之油品污染土壤事件層出不窮，甚至危害地下水資源。在受油品污染土壤及地下水場址中，燃料油有其含碳數高且不易衰減及揮發之特性。因此，燃料油污染土壤及地下水之整治困難度高於受汽油及柴油污染之地下環境(高志明，2005)。另外，在高雄煉油廠生產系列中，中殼潤滑油基礎廠一直是個極具特徵性製程。它關鍵的溶劑萃取與溶脫蠟單元，幾乎沒有在其它傳統煉油製程陣列中出現。中殼基礎油廠的原料取自常壓塔底，經真空分餾後，蒸出部分稱做中性油(Neutral oil)。塔底油進入丙烷脫瀝青單元，利用丙烷對瀝青溶解性較低的特性，將瀝青與膠質沉澱脫除。脫瀝青油併入中性油進入溶劑萃取單元，利用糠醛對飽和烴與不飽和烴溶解度的鑑別性，脫除中性油中部分芳香烴，以提高中性油黏度指數與抗氧性，萃餘的芳香烴即為副產品橡膠軟化油(吳堅，2016)。中性油再進入加氫精製程序，主要是油中的硫進行管控。後續再進入溶劑脫蠟單元，利用丁酮/甲苯混合液，對直鏈烷烴溶解度的鑑別性，在低溫下將結晶析出的石蠟濾除。以提升中性油的低溫流動性，濾渣即為副產品粗蠟。最後中性油經真空重蒸，分餾成不同黏度的餾份，即為基礎油成品(70P, 150SN, 500SN)。而塔底油即為亮滑油(150BS)。基礎油加入功能性添加劑的複配，成為適用各種不同車輛與工業機械的潤滑油，而潤滑油的性能實為基礎油與添加劑整合之體現。其中第一、二(G-I, G-II)為精煉礦物油，第三、四、五類(G-III, G-IV, G-V)為合成油。

油品成分主要為碳氫化合物，故土壤污染之指標成分即為總石油碳氫化合物(Total petroleum Hydrocarbon, TPH)，此指標又分汽、柴油兩類，亦即TPHg與TPHd。此外，油品中苯、甲苯、乙苯、二甲苯(Benzene、Toluene、Ethylbenzene、Xylene, BTEX)所佔比例高，且目前無鉛汽油中多會添加甲基第三丁基醚(Methyl Tertiary Butyl Ether, MTBE)以促進汽油燃燒，上述成分亦成為重要之污染指標。油品洩漏至土壤中時，首先會藉由重力作用沿著未飽和層土壤之孔隙向下溢散，並由高濃度往低濃度移動。土壤若受輕質油品(汽油、燃料油)污染時，因碳數較低易形成揮發性有機氣體(VOC)，此氣體不僅在土壤孔隙中傳播，甚至浮出地表經光分解後形成有毒性之水溶性苯或二甲苯；若受重質油品(柴油及原油)



污染時，會因重力而滲入土壤被吸附於土粒表面，且隨吸附時間越長，若油品之重量大於土壤吸附能力時，會因脫附而流入地下水中，造成地下水污染。大部分有機/無機污染物常附著於細小顆粒(如黏土及砂土)表面上，在此一情形下，則可利用物理分離技術，先將大顆粒物質先予分離，可大大降低待處理污染沉積物之體積，後續更可佐以熱處理及化學方式處理整治。茲將不同機械/化學處理方式介紹如下：

3-1 機械碰撞

3-1-1 超音波震盪

超音波是指人耳無法接收的聲波，頻率大於 20 kHz。超音波的應用依頻率而不同分為三個範圍，(1)功率型超音波 20—100 kHz 為物化反應的頻率範圍；(2)高頻率超音波 100 kHz—1MHz 動物飛行及溝通、偵測固體的裂縫、水中回音定位、胎兒掃描、骨盆異常、腫瘤檢測、破壞生物的細胞及都市污泥消化，和(3)診療用的超音波 1—500 MHz(吳采芳，2012)。

超音波震盪的清潔原理，在於利用超音波振動水，使微細的真空氣泡在水裡產生，當真空氣泡爆破時釋放了儲存在氣泡裡面的能量，釋放超過 10,000 磅吋的壓力將物件表面的油脂或污垢帶走，這是利用超音波在液體中的「空穴效應 (cavitation)」(維基百科，2019)。所謂空穴效應一般發生在較低頻的週波上，超音波振動對液體瞬間造成「增壓」及「減壓」，反覆的動作會產生幾近真實的空洞，取入溶於液體的氣體成為氣泡。該氣泡被大力壓縮消滅時，會以強大的衝擊波直接破碎附著於被洗淨物的固體性污物，此為超音波洗淨力(台超萃取洗淨精機股份有限公司，2018)。

超音波可形成充滿蒸氣及壓縮氣體的空穴，稱為微泡(micro bubbles)，當微泡崩解時提供高熱能，可裂解水分子產生強氧化力的氫氧自由基，氧氣分解成氧原子，並與自由基產生交互作用，當氫氧自由基發生自身結合則生成過氧化氫。在勻相超音波化學反應分為三個區域(1)微泡內部；(2)微泡及液體界面及(3)液體溶液中。微泡內部的 5,000 K 高溫足以將水分子裂解成氫基和氫氧自由基，而氫氧自由基可擴散到界面和液體溶液中氧化吸附在氣泡表面或溶液中的污染物，而在微泡內部和界面的高溫可將揮發性有機物熱解反應(吳采芳，2012)。



徐敬添等(2001)指出，分散是使用研磨介質碰撞時所產生的碰撞力與分散液間所產生之剪切力來分散粒子，造成粒子分散的力量來源可分成六種，(1)介質正面撞擊的壓縮力；(2)同方向運動，但具速度差之碰撞的碰撞力；(3)同方向平行等速運動之剪切力；(4)同方向平行非等速運動的剪切力；(5)任意方向之碰撞的剪切力與碰撞力；(6)研磨介質旋轉之碰撞。因此在系統中具有極高碰撞力與剪切力之能量密度。若增加研磨介質之數目，則可增加碰撞點，而當研磨介質變得更小時，則可提供研磨之剪力面將會增加，所以使研磨介質變小除可增加研磨介質之碰撞點外，也可提高研磨介質之剪切面。在同一體積基準下(1 liter)，若研磨介質直徑為1mm，其碰撞點約為 5×10^6 ，當降低研磨介質直徑至0.3mm時，則碰撞點會增加至 171×10^6 。另外，其它經常用在固/液系統之濕式分散方法尚有高剪力混合分散(High Shear Mixing)；超音波(Ultrasonics)：使用高能直接施予分散液流體；微噴均質機(Microfluiders/Pressure homogenizers)：使用高壓將分散液流體通經一微孔，利用噴出時之剪切力與噴出後與器壁之碰撞力產生分散之效果；雙滾輪或三滾輪(Roll mill)：以兩個或三個滾輪，將分散液流體置於兩滾輪之夾縫中，利用滾輪轉動之速度差所產生之剪力來進行分散。一般可利用超音波振動清水，使微細的真空氣泡在水裡產生，當真空氣泡爆破時釋放了儲存在氣泡裡面的能量，釋放溫度約攝氏 5000 度以及超過 10,000 磅吋的壓力將物件表面的油脂或污垢帶走。洗機所產生的超音波的頻率約為 20-50 千赫(20-50KHz)(維基百科，2019)。

本研究即是利用超音波震盪，以空穴效應衝擊波及搭配(w/)/不搭配(w/o)物理介質(非結晶型二氧化矽)與油污染土壤碰撞，期達成分離效果。



3-1-2 擦洗

擦洗程序屬於濕式分離技術一種，其機制主要係根據反向之葉片組於轉動時會產生強烈的雙向流，使高礦漿濃度之待處理樣品進行機械式顆粒間之擦撞，由於擦洗程序係藉由污染顆粒本身之間、其與液相及葉片組間之物理碰撞及剪力作用，進而達到將附著於顆粒表面之污染物移除目的（黃亮順，2009）。於擦洗系統內之污染土壤顆粒會因上述之交互作用力而產生兩種結果：

(1) 污染物與顆粒之剝離：顆粒上之污染附著物或污染薄層從顆粒本身移除；

(2) 顆粒碎裂現象：可能因不當操作條件之緣故，造成擦洗系統內產生過大的相互作用力，進而使土壤污染團聚物直接發生碎裂現象。碎裂情況於擦洗過程中係不意樂見的。

吳弘任、鄭大偉(2012)研究亦指出，擦洗係選礦工程中常用之物理分離技術，能提供強大之剪力使顆粒碰撞，去除礦物表面之泥渣、雜質，以利後續之分選，並提升礦物之品位。該研究以試驗級擦洗機進行批次系列擦洗，可將底渣中之水溶性氯離子含量降至 0.018 wt. %，達規範標準。吳弘任(2012)研究亦指出，擦洗程序早期應用於石英砂之選礦上，將富含石英砂之沉積岩表面附著之黏土塊與氧化物薄膜，藉由擦洗技術使石英砂顆粒相互碰撞，以利後續分選。

黃亮順(2009)指出，典型的擦洗設備包含攪拌轉速調節鈕與攪拌葉片組，先在擦洗槽內將樣品調配成礦漿型態，再藉由葉片轉動時所產生之強烈雙向流，使顆粒彼此間發生物理性之衝擊、剪力及擦撞作用，將附著在大顆粒表面上之細顆粒團聚物洗下或擊碎，再搭配篩分方式即能達到粗、細顆粒分離的效果。而影響擦洗效率因子很多，主要包含擦洗時間長短、礦漿濃度(液固比)、溫度與污染物種類及其濃度等。Stegmann(2001)顯示，有 90 %的污染物富集在土壤中的細粒徑顆粒上，若能移除細粒徑之土壤顆粒，除了可減少待處理土壤體積外，亦能將污染物富集。Strazišar and Sešelj (1999)的研究中，使用擦洗設備對受鉛污染之土壤進行試驗，評估擦洗時間長短對鉛去除效率之影響。結果顯示，濃度 70-80 %的礦漿，在轉速 570 rpm 的情況下，擦洗時間與鉛移除率有相關性，隨著擦洗時間增至 90 分鐘條件下，受污染土壤樣品鉛具 90 %去除率。此外，該研究亦指出污染物的去除效隨著顆粒粒徑增大而有增高的趨勢，粒徑範圍在



0.1-0.4 mm 時，移除效率為 46 %；若粒徑範圍在 0.8-1.25 mm 時，其移除效率則增加為 65 %。吳弘任(2012)研究指出，礦漿濃度改變對於焚化飛灰中氯鹽去除率有影響，較低礦漿濃度顆粒有較大之顆粒撞擊機率，但部分顆粒無法有效撞擊。擦洗時間愈長，處理效果愈好。

黃亮順(2009)亦指出，擦洗輸入之功率大小會與擦洗器之葉片轉速快慢成正比，進而直接影響顆粒受擦洗的程度高低。輸入越多的能量(即轉速提升)給予擦洗系統，則移除之污染物量也會越多。但為了達到最適擦洗操作條件，給予系統的能量必須與欲移除的污染物量達成某程度上之平衡。

Feng et al. (2001)以擦洗技術處理受柴油污染土壤，於 600rpm 轉速情況下，受污染之顆粒(粒徑範圍 0.1-0.5 mm)情況下，柴油污染土壤可達 97.4%去除率。

因此，本研究以擦洗技術處理搭配(w/)/不搭配(w/o)物理介質(非結晶型二氧化矽)與油污染土壤碰撞為本研究探討項目之一。

3-1-3 非結晶型二氧化矽

1980 年 IBM 成功發展出一套化學機械研磨(Chemical mechanical polishing, CMP)技術，解決半導體業微影顯像(Photolithography)聚焦困難及解像度不良問題。氧化膜研磨液乃將二氧化矽介電層、磷硼矽玻璃膜、淺溝隔絕層、多晶矽薄膜磨平及擦亮，微影顯像光線可於光罩上聚焦，精密線路方可被蝕刻成形。CMP 方法乃將晶圓壓在一塗佈研磨液(Slurry)的旋轉拋光墊(Pad)上，研磨液內的奈米磨粒(Abrasive)會逐漸磨除表面的突出處使其平坦及光滑(如圖 3-1)。

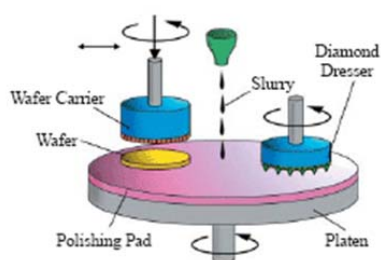


圖 3-1 CMP 示意圖 (資料來源：工業材料雜誌 253 期)



第三章

本研究初步蒐集某電子廠研磨液之安全資料表中成分辨識資料(如表 3-1)，其主要組成非結晶型二氧化矽、添加劑(界面活性劑)及水。依其危害分類，非屬「危害性化學品標示及通識規則」所規範之危險物或有害物質。

表 3-1 某電子廠研磨液之安全資料表(safety data sheet, SDS)中的成分辨識資料

● 研磨液原料

三.成分辨識資料

混合物

| 中文名稱 | 英文名稱 | CAS No. | 危害成分(%) | 危害分類 |
|----------|------------------|-----------|---------|------|
| 非晶形之二氧化矽 | Silica amorphous | 7631-86-9 | 0%~50% | |
| 添加劑 | Additive | | 0%~10% | |
| 水 | Water | 7732-18-5 | 40%~50% | |

(註:此表為電子廠提供，顯示非屬危害物品。故未重製，直接原表附上)

經 CMP 處理程序後所產生的，即為研磨廢水，富含非結晶型二氧化矽 (如圖 3-2 所示)。顆粒外觀有稜有角，影像中觀察顆粒大小約介於 $35\ \mu\text{m} \sim 800\ \mu\text{m}$ 間。

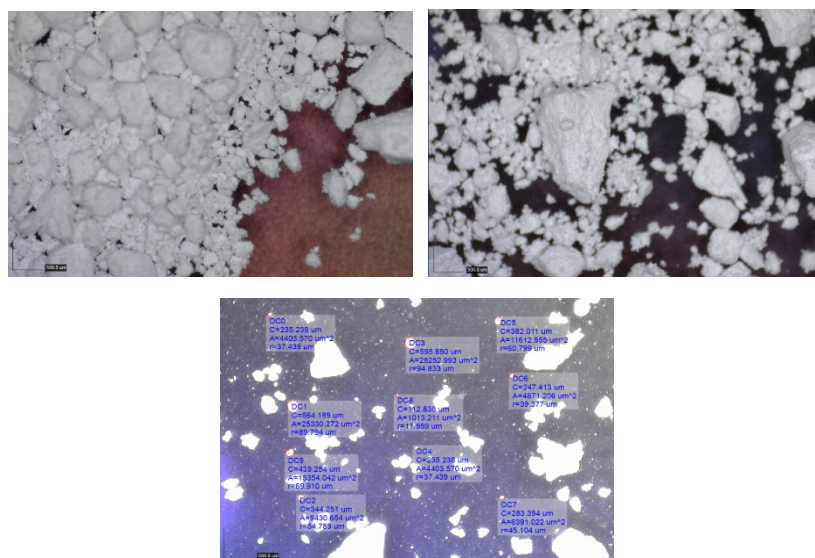


圖 3-2 研磨廢水中非結晶型二氧化矽之影像



機械/化學方式處理分離油污染土壤

目前國內半導體業多以傳統化學混凝/沉澱處理非結晶型二氧化矽研磨廢水。混凝沉澱處理過程，採用過量加藥多元氯化鋁或氯化鐵方式進行；亦有電子廠以薄膜過濾方式直接進行分離(林欣慧，2005)。表 3-2 為某電子廠研磨廢水分析結果，資料顯示，主要為懸浮固體物過高問題，其餘性質尚符合晶圓製造及半導體製造業放流水水質項目及限值要求。

表 3-2 某電子廠研磨廢水分析結果一覽表

| 檢驗項目 | 檢測值 | 檢驗項目 | 檢測值 |
|-------|----------------|------|--------------|
| pH | 8.5 | 氟鹽 | <0.05mg/l |
| 水溫 | 24.5℃ | 氨氮 | 0.41mg/l |
| 界面活性劑 | ND<0.03mg/l | 懸浮固體 | 323mg/l |
| 砷 | ND<0.0004mg/l | 硝酸鹽氮 | 0.06mg/l |
| 生化需氧量 | <1.0mg/l | 真色色度 | <25 |
| 化學需氧量 | 5.3mg/l | 氰化物 | ND<0.002mg/l |
| 鎘 | ND<0.001mg/l | 鉬 | ND<0.004mg/l |
| 總鉻 | ND<0.004mg/l | 鎳 | <0.020mg/l |
| 六價鉻 | ND<0.0073mg/l | 鉛 | ND<0.003mg/l |
| 銅 | 1.45mg/l | 鋅 | <0.020mg/l |
| 鎳 | 0.020mg/l | 硼 | ND<0.020mg/l |
| 汞 | ND<0.00015mg/l | 銻 | ND<0.004mg/l |

若能妥善應用研磨廢水中非結晶型二氧化矽，將其添加於土壤清洗程序中，再搭配超音波震盪及擦洗方式機械碰撞，應能讓含油土壤顆粒經碰撞後，油污與細顆粒之團聚物打散，包覆油膜顆粒其外層油膜被切除，達成顆粒分離及油污物理分離效果。



3-2 化學氧化

除上述機械碰撞外，化學氧化亦有助於油污染土壤油污分離。夏國芳等(2018)以電催化水處理受重油污染土壤之研究：機制及效益評估中提出，重油具化學穩定性佳、高抗熱解能力、含碳數高與不易生物代謝分解等特性，使其長期鍵結於土壤中。為了降解此種難以分解之有機污染物，該研究選用電催化水(electrolyzed catalytic water, NECW)，利用觸媒催化電極產生直流電場，將水分子結構改變並產生大量帶電微泡(micro bubble)。帶電微泡可有效將吸附於土壤中的重油溶出，且氧氣微泡溶解於水中後產生超氧自由基(superoxide, O_2^-)，可進一步於水中產生氫氧自由基，微氣泡表面電荷在氣泡消失於水中時會將能量釋放，使水中帶有超氧自由基，進而產生氫氧自由基及其他具有氧化能力之產物。因此電催化水可有效淋洗污染土壤中的重油並將重油分解。該研究顯示中性電催化水在不額外添加氧化劑的條件下，具有實場應用電催化水做持續性油污溶出與有機污染物降解的潛力。

另外，李瑪麗(2008)則指出，溶解空氣浮除(DAF)利用水在不同壓力下溶解度不同的特性，對全部或部分待處理(或處理後)的水進行加壓加氣，增加水的空氣溶解量，通入加過混凝劑的水中，在常壓情況下釋放，空氣析出形成小氣泡，粘附在雜質絮粒上，造成絮粒整體密度小於水而上升，從而使固液分離。

本研究所使用高氧微泡水設備示意如圖 3-3 所示。



圖 3-3 高氧水設備示意圖



可產製新鮮高氧水 35~40 mg/l 溶氧，且經過 72 小時靜置，高氧水溶氧量仍高達 19.5~24.1 mg/l。後續利用反應噴嘴進出口流體的流量與壓力變化產生真空吸引力，將液體或氣體吸入與管線內流體混合，利用噴出時之剪切力與噴出後與器壁之碰撞力產生高氧微泡水。

3-3 水力分離

現今發展多元的污染土壤整治方式中，在工程實務上分為物理、化學、生物的處理方法；不同類型之整治技術又可分為：現地 (In-situ) 與離地 (Ex-situ) 兩種處理方式 (張尊國, 2002)。於各物理分離技術中，各有其優缺點與應用範圍，若妥善搭配使用可有效分選出不同粒徑顆粒。以 ARCADIS 全球工程顧問公司為例 (Mann, 1999)，其進行土壤清洗的方式，首先挖掘場址重金屬污染土壤，經過旋轉式礦石篩濾除粒徑大於 5 mm 之固體粒子，其餘固體粒子由傳輸裝置送入濕篩設備，進一步濾除粒徑大於 2 mm 之固體粒子，為避免在濕篩過程中有土壤粒子膠結成大粒子而被濾除，該設備尚具有六道高壓噴水器以排除膠結粒子。所濾除之粒徑介於 2~5 mm 粒子經由分析確認符合整治目標後，再歸返回場址。所有粒徑小於 2 mm 之固體粒子則進入水力漩流分離器 (hydrocyclone) 中接受清洗處理。清洗後，較粗粒子可維持在底端，較細粒子與酸洗液則由上端排除。前者再釋出回場址，並經由分析確認其是否符合整治目標；後者則作為廢水污泥處理，即經由聚合物添加、沉降、加壓厚實、脫水後製成污泥餅，再以合法方式送至中間處理場或最終處置場處理。針對不同的需求，該設備可調整粗、細粒子分離的切入點 (cutting point)，因此可決定經過水力漩流分離器清洗後欲排除粒子之粒徑大小，提高整治效率。若土壤同時受到有機污染，則可加入適當的界面活性劑進行攪拌，降低污染物與土壤粒子間的表面張力，促使污染物與界面活性劑微胞 (micelle) 結合而以泡沫形式漂浮，再經由浮選槽 (flotation cells) 將之移除 (蘇紹瑋、陳尊賢, 2008)。

歸納常見物理分離操作單元如下分述：

(一)、機械式篩分：

機械式篩分之分離機制係依照土壤顆粒的大小，將帶離的土壤固體顆粒樣本放置在標準篩號之篩網上，藉由機械式的震動或搖動來進行土壤顆粒分離，主要係提供合適粒徑利於後續處理，其常用的篩分器包含筒狀旋轉式篩分器、震動篩與旋轉篩分器等。(Kelly, 1982)於文中提出，篩分器



進行顆粒分離具有不錯的效果，但是一般工業鮮少採用小於 70 mesh (210 μm) 的篩網進行分離，原因在於孔徑過小，使篩網本身會有損耗與堵塞等問題，而孔徑過小對細顆粒分選能力較孔徑大的能力低。

(二)、水力式篩分：

水力式篩分之分離機制主要是藉由土壤中不同顆粒大小在液相中會有沉降速度差異之現象或因離心力的作用而達到顆粒分離的目的。一般而言水力式分離技術主要涵蓋兩個類別：

(1) 濕式渦錐，以離心力作為土壤顆粒分離機制。

(2) 螺旋式分級器，以機械式分級為基礎。

其中水力漩流分離技術廣泛地用在土壤篩分處理程序上，主要是利用顆粒在渦錐內所受之離心力大於重力之原理將小顆粒土壤從大顆粒的砂土中分離出來，由於重金屬常以極細顆粒型態存在(Petavy et al., 2009)，故能藉由濕式渦錐將其與大粒徑顆粒分開，達到土壤中重金屬分離之效果，也因離心力遠大於重力之緣故，故僅需很短的操作時間即可達到效果，整體而言，濕式渦錐分級器具有高效率且操作費用低等優點。

水力漩流分離 (Hydrocyclone) 其原理為使用壓力將廢水 (礦漿) 從給礦口 (Inlet) 注入，沿筒部 (Cylindrical section) 以切線方向給入，利用高水流切線速度產生離沉降力量，較粗及較重顆粒則由錐形尾部 (Cone Apex Opening) 排出，而較輕及較細顆粒則由漩渦管 (Vortex Finder) 上昇至頂部，由頂部開口溢流。廢水 (礦漿) 給入壓力通常界於 15-65 psi，視顆粒粗細及欲分離之程度而定。

影響水力漩流分離器效能之因子甚多，主要包括水力漩流分離器 (1) 筒部直徑、(2) 錐部角度、(3) 漩渦管直徑、長度及其位置、(4) 離心力及廢水 (礦漿) 切線速度。其中，筒部直徑視處理量而定，經常採用尺寸為 3-15 吋；錐部角度約 10-20 度間。漩渦管之作用為避免短路 (Short circuit)，管直徑、長度及其位置可控制粗細顆粒分離程度 (水力漩流器如圖 3-4 所示)。



圖 3-4 水力漩流器示意圖

水力漩流分離器主要是由圓柱體及圓錐體連結所組成，其整體包含進料口、溢流口、溢流管、底流口，而流體部分為外部漩流及內部漩流。固體顆粒與液體混合後，一起沿切線方向進入水力漩流分離器內，混合液遇到器壁後被迫作旋轉運動，而固體顆粒則依原有的直線運動的慣性繼續向前運動，粗顆粒慣性力大能夠克服水力阻力靠近器壁而細小顆粒慣性力較小，無法靠近器壁隨混合液作旋轉運動，在後續給料的推動下混合液繼續向下和旋轉運動固體顆粒相應產生慣性離心力，於是粗顆粒繼續向器壁聚集，而細小顆粒則停留在中心區域，就發生粗細顆粒由器壁向中心的分層排列。

離心力可由增加轉速或縮小旋轉半徑而增加，離心力係數（Centrifugal Coefficient, G_c ）為離心力加速度與重力加速度之比，它代表離心沉降之能力。

$$G_c = \frac{v^2}{gr} \quad (3-1)$$

其中， G_c 為離心力係數

V 為礦粒切線速度

g 為重力加速度

r 為旋轉半徑

水力漩流分離器之操作，主要是控制進口流量或進口壓力，或是調整底流及溢流的分流比。分流比是水力漩流分離器的重要參數之一，其定義



如下式：

$$S = \frac{Q_u}{Q_o} \quad (3-2)$$

其中 Q_u 與 Q_o 分別代表了底流端及溢流端的體積流率。藉由調整底流端及溢流端的閥件閥開度，來調整制所需的分流比，而且我們可以經由實驗發現到，進口壓力也可以造成分流比的改變，通常是進口的壓力越大，水力漩流分離器的分流比會越小，由於分流比的改變會影響到內部流場的變化，因此分離效率的表現也會隨之改變。

總括分離效率(Overall separation efficiency, downflow hydrocyclone)是水力漩流分離器中最具重要性的操作參數，可同時表現出該結構參數之好壞與操作參數之優劣。下列式子為其定義：

$$E = \frac{Q_u C_u}{Q_f C_f} \quad (3-3)$$

式中 Q_f 與 Q_u 分別代表了進口端及底流端的體積流率， C_f 及 C_u 分別為進口端、底流端的重量濃度百分比。

將操作改變水力漩流分離器負荷能力、分離(級)粒度、產物分配、分離(級)效率，藉由水力漩流分離器形態及給礦泵選擇，控制進流速率，調整漩流器參數，分離出粗顆粒粒子。



3-4 FLUENT 流況模擬

流場電腦模擬起源於計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)技術，將物理方程式，利用一些數學模式轉換成電腦語言，以電腦執行運算，模擬流場之流動特性，並從中擷取所需的資料，如壓力、速度、流場方向等，依據擷取的資料評估流場特性，輔助設計與效能驗證，電腦模擬可假想成在電腦內執行一個虛擬的實驗。其中 FLUENT(現已納入 ANSYS 系統)為泛用型有限體積、以壓力基準的三維計算流體力學軟體，該軟體提供了結構性網格與非結構性網格的設定，除了一般三維流體計算之外，此軟體尚還有自由液面、多相流場(如液固流計算、三相流計算)等功能。利用物件組合、分離功能，完成三維複雜幾何模型，並自動建立網格分佈及變形網格之檢驗及調適，建立流況模型。

依某油污染土壤的粒徑分布情況之前期觀察，以水力漩流器分離該油污染土壤，其結果如圖 3-5 所示，underflow 所得粗顆粒分離效果好。發現分離之粗顆粒，TPH 仍會超過 1000 mg/kg，主要原因可能為有些粗顆粒其實是油污與細顆粒之團聚物(如圖 3-3b)、有些顆粒(粗細均有)外層包覆油膜、有些則無。因此才研提上述機械碰撞/化學氧化等處理方式處理油污染土壤。

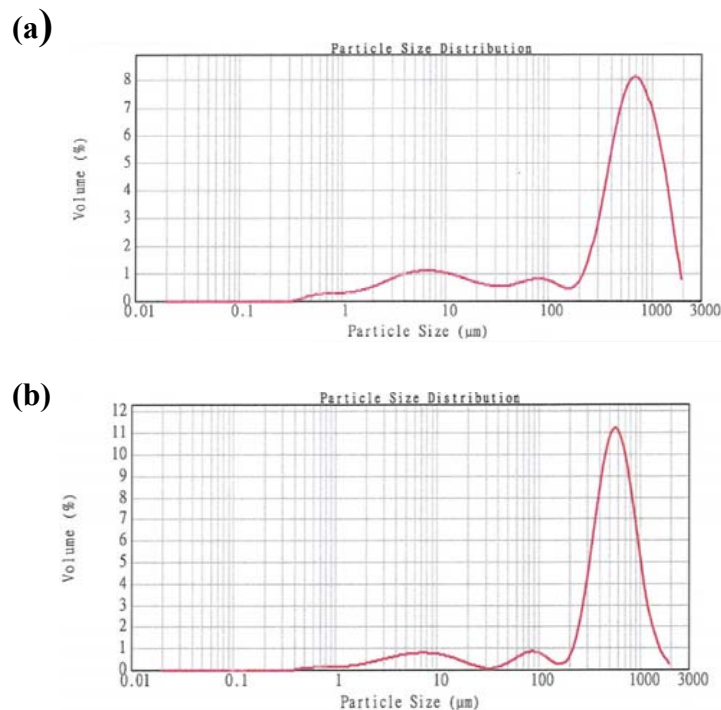


圖 3-5 油污染土壤(a)原樣、(b) underflow 樣本雷射粒徑分析圖



第三章

Narasimha et al. (2005)曾使用 Computational Fluid Dynamics (CFD) 技術對 hydrocyclone 進行 cut size 預估，該研究以 Navier - Stokes equations (納威爾-史托克方程式)之 steady-state conservation of mass and momentum 對 hydrocyclone 進行顆粒模擬。另依據望熙榮(1998)，漩流分離器設計及效能與旋轉數 Ne 值有關，

$$Ne = \frac{1}{H} [L_b + L_c/2] \quad (3-4)$$

其中 Ne 為旋轉數；H 為流入管高度(m)；

Lb 為水力漩流器本體高度(m)；Lc 水力漩流器底部圓錐部份高度(m)

旋轉時間(顆粒於外螺旋須碰撞器壁) Δt 為

$$\Delta t = 2\pi R \frac{Ne}{V_i} \quad (3-5)$$

R 為水力漩流器本體半徑(m)

V_i 為進流速度(m/s)

$$V_t = \frac{dp^2(\rho_p - \rho_l)V_i^2}{18\mu R} \quad (3-6)$$

V_t 為終端速度(m/s)

dp 為顆粒直徑(m)

ρ_p 為顆粒密度(kg/m³)

ρ_l 為液體密度(kg/m³)



機械/化學方式處理分離油污染土壤

μ 為液體黏滯係數(kg/m-s)

$$V_t = \frac{W}{\Delta t} \quad (3-7)$$

W 為流入管寬度(m)

結合公式 3-6~3-9 可得

$$dp = \left[\frac{9\mu W}{nN\pi V(\rho_p - \rho_l)} \right]^{1/2} \quad (3-8)$$

理論上此為最小顆粒可去除粒徑，大於此粒徑顆粒(粗顆粒)均可被去除。惟上述為理論值，實際上常另外用 dpc 計算 50%去除粒徑。

經機械/化學方式處理過之油污染土壤，其顆粒分布樣態到底為何?仍有待實驗進一步分析。考量每組水力漩流器均有其分離特性與合適處理之顆粒尺寸，因此有必要針對機械/化學方式處理過之土壤，先瞭解粒徑分析與 TPH 分布後，客制化設計水力漩流分離器或微調現有水力漩流分離器(如管長與 underflow 開口)，並尋求合適操作參數。



第四章 研究方法與過程

4-1 實驗準備

4-1-1 油污染土壤

預計採取南部某油污染土壤(主要為 TPH 超過土壤污染管制標準 1,000 mg/Kg)，該區 TPH 約 5,000~30,000mg/Kg 不等。目前這批處理中之土壤 TPH 目前介於 5,000~7,000 mg/Kg。因此，本研究預計採取 TPH < 10,000mg/kg (樣本一)、TPH > 10,000mg/kg 油污染土壤(樣本二)進行後續試驗探討、比較，亦將評估不同質地油品污染土壤，了解其對分離效能之影響。主要包含下列工作進行，

(1) 粒徑分佈

本研究粒徑分析以乾篩之方法來篩分。此外，更以雷射粒徑分析比對其粒徑分佈。

(2) pH 值

根據環保署環境檢驗所土壤酸鹼值 (pH 值) 測定方法—電極法 (NIEA S410.62C) 測定土壤樣品之酸鹼值 (pH 值)。秤取 20g 土壤於 50ml 之燒杯內，加入 20 mL 試劑水蓋上錶玻璃，並且持續攪拌混合液 5 分鐘，可適度分次加入試劑水至可測量 pH 值為止。靜置混合液約 1 小時，使混合液的大部分固體沉澱，以直接、過濾、離心或利用其他方式取得水相層，測定水相層之 pH 值，並記錄溫度。

(3) 總石油碳氫化合物分析 (TPH)

土壤中的 TPH 需先經過萃取，方能上機定量，由於索氏萃取方法循環萃取次數高，其結果可視為樣品的總濃度，當場址進入查驗階段時，常以該結果與管制標準比較，作為解除列管的條件。然因索氏萃取所需時間長 (大於 16 小時)、使用溶劑量大 (每樣品需 200 mL)、進而需耗時濃縮定容，對於土壤污染場址整治單位而言，耗費成本與耗時皆不利於技術的調整。若能有一快速萃取又能符合基本的品管目標之方法，以加快樣品分析程序，會有利於技術的模場試驗或整治階段的內部品管(張美玲, 2017)。根據美國環保署 (USEPA) SW846- METHOD 9077: Turbidimetric Screening



Method for Total Recoverable Petroleum Hydrocarbons in Soil 及 PetroFLAG™ 方法，利用萃取液(甲醇)萃取出土壤中之 TPH，以濁度計推算出其濃度大小。其過程為(1)秤取 10g 之待測土壤裝入混合試管中；(2) 加入萃取液與土壤充分攪拌 2 分鐘，使 TPH 溶出，然後靜置 5 分鐘；(3)將原萃取液 0.45 μ m 過濾後，加入乳化劑並靜置 10 分鐘；(4) 利用濁度計讀取測值。TPH 濁度法 Test kit 檢測經費較為便宜，本研究作為例行快篩之檢測方法。另外選擇幾種具代表性、關鍵性樣本，進行下列 GC/FID 分析。

而根據環保署環境檢驗所土壤中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層析儀/火焰離子化偵測器法(NIEA S703.62B)，先將土壤充份混合，秤取約 1 g 之土壤置入 20 mL 之棕色瓶，紀錄土壤樣品重量。加入 1 g 無水硫酸鈉，充份混合之。加入 5 mL 正己烷與丙酮混合萃取液(1:1 v/v)。將附有鐵氟龍墊片之螺旋蓋蓋上並鎖緊，並充分震盪。經超音波萃取，濃縮定量至適當體積後，以 GC/FID 分析。

(4) 顆粒監測

研究主要利用影像量測系統及顆粒分析軟體(如圖 4-1)，分析顆粒粒徑型態，反饋修正處理條件。另外，亦進行雷射粒徑分析，了解顆粒分布狀態。



圖 4-1 顆粒分析軟體實驗結果示意圖

4-1-2 含非結晶型二氧化矽之研磨粒

非結晶型二氧化矽之研磨粒取自於中部某電子廠，將分析基本特性如粒徑、pH 值、氧化還原電位、重金屬含量、硝酸鹽、氟鹽、氨氮含量等，確認其特性。



4-2 實驗方法與步驟進行

本研究以「機械/化學方式處理分離油污染土壤」，架接於現有技術上，增加處理流程之分離效能及氧化效能，茲說明如下：

4-2-1 機械碰撞

添加(w)/未添加(w/o)非結晶型二氧化矽當介質，若有添加則規劃 0.5%、1%、2% w/w 添加量。利用超音波震盪及擦洗方式，讓非結晶型二氧化矽與含油土壤顆粒碰撞，達成顆粒分離效果(期望粒粒分明)。

(1)首先應用超音波震盪(ultrasonics)外加於傳統單純攪拌處理，搭配非結晶型二氧化矽(充當物理介質)，在油污染土壤顆粒表面進行碰撞反應，應可將油污團聚物打散，或者將顆粒外層油膜切除。目前規劃以 DELTA 廠牌，40kHz，400W 槽體式超音波震盪機進行批次試驗。處理時間 5mins ~ 30mins；水浴溫度為常溫。改變處理時間及輸出功率，觀察顆粒影像及 TPH 含量，建立最適條件。研究過程將單獨試驗超音波震盪及機械碰撞研磨效果，再串聯進行混合使用綜效評估。

(2)除上述超音波震盪方式外，利用擦洗技術(attrition scrubbing)探討礦漿濃度(50%)、擦洗時間(15mins、30mins)、轉速(500rpm)及非結晶型二氧化矽之添加等操作條件對受油污染土壤油污分離。擦洗主要利用反向之葉片組於轉動時會產生強烈的雙向流，使礦漿顆粒進行機械式擦撞。由於擦洗程序係藉由污染顆粒本身之間(本研究另外還添加非結晶型二氧化矽)、其與液相及葉片組間之物理碰撞及剪力作用。擦洗作用可使油污染團聚物碎裂或者使油污染物與顆粒剝離，進而達到將附著於顆粒表面之污染物移除目的。

4-2-2 高氧微泡水

本研究所使用之高氧微泡水(新鮮高氧水 35~40 mg/l 溶氧，且經過 72 小時靜置，高氧水溶氧量仍高達 19.5~24.1 mg/l)，乃利用反應噴嘴進出口流體的流量與壓力變化產生真空吸引力，將液體或氣體吸入與管線內流體混合，利用噴出時之剪切力與噴出後與器壁之碰撞力產生高氧微泡水。以溶氧 35mg/l 以上高氧微泡水注入攪拌槽(如圖 4-2)，除具化學氧化能力增加 TPH 分解及顆粒分離效果外，氣泡於槽底因為釋壓逐漸



上浮，小氣泡亦逐漸變大，具攪拌浮除效果。另外，氣泡若在水中爆破，則瞬間增加水中溶氧且兼具氣泡震波效能，破壞/氧化油污染土壤顆粒。本項溶解空氣設備由裕山環境工程股份有限公司支援，將討論高氧微泡水反應時間對 TPH 分解及顆粒分離效果之影響。



圖 4-2 高氧微泡水運作之情況

4-2-3 水力分離

本研究搭配前述機械碰撞、化學氧化處理後，客製化設計水力漩流器分離含油污染顆粒。與先前研究農地土壤、底泥顆粒分離不同之處在於顆粒粒徑分佈差異及含油情況，因此須客製化處理。水力漩流分離器如圖 4-3 所示，其整體包含圓柱、圓錐體、進料口、溢流口、溢流管、底流口，而流體部分為外部漩流及內部漩流。固體顆粒與液體混合後，一起沿切線方向進入水力漩流分離器內，混合液遇到器壁後被迫作旋轉運動，而固體顆粒則依原有的直線運動的慣性繼續向前運動，粗顆粒慣性力大能夠克服水力阻力靠近器壁，而細小顆粒慣性力較小，無法靠近器壁隨混合液作旋轉運動。在後續給料的推動下，混合液繼續向下和旋轉運動固體顆粒相應產生慣性離心力，於是粗顆粒繼續向器壁聚集，而細小顆粒則停留在中心區域。較粗及較重顆粒則由錐形尾部（Cone Apex Opening; underflow）排出，而較輕及較細顆粒則由漩渦管（Vortex Finder; overflow）上昇至頂部，由頂部開口溢流。



圖 4-3 水力漩流分離器之結構與實驗室組裝照(自有設備)

影響水力漩流分離器效能因子包括水力漩流分離器(1)筒部直徑、(2)錐部角度、(3)漩渦管直徑、長度、(4)礦漿切線速度。為節省水力漩流分離器開發成本，設計可行之漩流管及操作條件，避免太多試誤程序造成時間、樣本、分析等消耗，本研究利用三維流場模擬軟體 FLUENT 進行水力漩流分離器設計及流場模擬，解析水力漩流分離器於不同入口速度下的流場特性，並針對水力漩流分離器內部壓力分佈、速度分佈及粒子分佈等進行細部流場分析，做為設計參考。例如圖 4-4 為模擬流場內壓力，橘色為壓力最大的地方，一開始在進料時壓力較大，而越往內側觀察，壓力逐漸減小，在藍色及青色區塊了解到為內部漩流為負壓的狀態，而顆粒大部分都是從溢流管兩側漩流出去，從流場壓力來看，區塊的分布較為工整，也顯示出，流場穩定的狀況較為順暢。

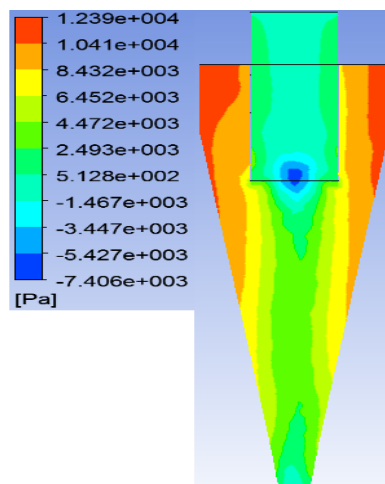


圖 4-4 模擬流場內壓力分佈圖



研究計畫以計算流體力學進行渦流模型分析，其採用多重網格加速收斂技術進行設計。實驗後再與水力漩流分離試驗之參數及結果驗證，分析泥漿在水力漩流分離器內流動傳輸情況，進而解析並回饋改善，擷取適宜操作條件(例如錐形尾部粗顆粒 $>150\mu\text{m}$ 土壤收集能力達80%以上)。

4-2-4 應用情境：機械/化學方式處理分離油污染土壤

- (1)以機械方式(擦洗技術、超音波震盪)摩擦撞擊油污染顆粒，使油污團聚物打散，或者將顆粒表層油膜切除，並討論添加(w)/未添加(w/o)非結晶型二氧化矽當介質之效果；
- (2)再則輔以高氧水氧化降解/微泡浮除將油污與顆粒分離。期間，監測分析水中 TOC 變化、土壤顆粒 TPH 變化，解析 TPH 於固相、液相轉移，評估機械/化學方式處理效能。
- (3)分析 TPH 濃集於細粒徑顆粒之尺寸，或者粗顆粒是否 TPH 已低於 1,000 mg/kg 以下。客制化水力漩流器，應用分離粗細顆粒，達成大粒徑的土壤顆粒經分離後，因不含或只含微量污染物而可逕行回填或再利用使用。可增加土壤回用比例，達成污染物處理減容效果。

操作條件：

- (1)超音波震盪(ultrasonics)：以 DELTA 廠牌，40kHz，400W 槽體式超音波震盪機進行批次試驗。處理時間 5mins~30mins。水浴溫度為常溫。改變處理時間及輸出功率，觀察顆粒影像及 TPH 含量，建立最適條件。
- (2)擦洗技術(attrition scrubbing)：探討礦漿濃度 50%、擦洗時間(15mins、30mins)、轉速(500rpm)
- (3)上述機械方式討論添加(w)/未添加(w/o)非結晶型二氧化矽當介質。
- (4)客制化設計(或微調修改)可分離目標尺寸顆粒的水力漩流器。
- (5)水/泥比(liquid to solid ratio)= 4；流速 2~3m/s。樣本先預篩，用 0.5cm 篩網，將石頭、金屬、雜草去除，避免漩流管阻塞。



4-2-5 其他分析如下：

1. 粒徑分佈

將烘乾後之土壤秤取適當重量，置入 100、230、300、400mesh 之標準篩網內，以振動篩機進行篩分析，之後倒出各個標準篩上截留之反應灰並加以秤重，重複上一步驟，使得兩次數據的相對百分偏差小於 10%，即可求得粒徑分佈。除此之外，進行雷射粒徑分析，其分析範圍為 0.37~2000 μm 。若樣本含有 2.0 mm 以上之顆粒則依美國篩分析法(ASTM D422)測定。

2. pH 值

根據環署檢字第 208.02C 號廢棄物(NIEA R208.02C)之氫離子濃度指數(pH 值)測定法測定土壤之 pH 值。秤取 20g 土壤於 50ml 之燒杯內，加入 40ml 試劑水，蓋上錶玻璃，並且持續攪拌懸浮液 5 分鐘，靜置懸浮液約 15 分鐘，使懸浮液的大部分固體沉澱，以 pH 電極測定水相層 pH 值。

3. X 光螢光分析(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)：Spectro, XEPOS。

X 光照射樣品時所發射出的次生 X 光稱為 X 光螢光，為樣品所含元素的特性 X 光光譜線，利用偵測此 X 光螢光之波長與強度，測知物質所含元素的種類與含量。

4. 重金屬總量濃度

精秤 0.05g 土壤，置入微波消化所使用之鐵氟龍容器中，加入 2ml HNO_3 、2ml H_3PO_4 、2ml HBF_4 ，蓋上鐵氟龍蓋及減壓閥後，放入旋轉承座中加以旋緊，將旋轉承座放入微波消化器(Milestone)中進行消化，消化完成後待至冷卻，將消化液定量至 50ml，以感應耦合電漿發射光譜儀(ICP-OES)偵測其中重金屬等元素濃度，再由消化液體積換可得土壤含各元素之總量。

除上述土壤重金屬總量分析外，亦分析 100、230、300、400mesh 不同粒級之重金屬含量，了解重金屬主要分佈/濃集於粒級顆粒上，俾利後續水力漩流分離。



5. 表面形態觀察

將土壤樣品，置於真空抽氣乾燥保存盒內抽真空乾燥後，以雙面膠固定於先後經去離子水及酒精由超音波震盪清洗過之銅製小圓柱體上，經確認不易移動或掉落之後再予真空鍍碳。鍍碳後樣品置於電子顯微鏡內真空基座上，抽真空後進行電子顯微表面型態觀察。

6. 表面元素分析

除此之外，更以掃描定點或面之二次電子，得到試樣表面之半定量元素組成，由元素分佈圖譜分析指標元素在試樣表面之分佈情形。能量散佈儀(EDX)之操作條件為：掃描能量範圍由 0 到 10.23KeV，掃間為 100 秒。

7. 毒性特性溶出程序 (TCLP)

根據環保署環境檢驗所訂定之毒性特性溶出程序(Toxicity characteristic leaching procedure, TCLP)試驗規定，先測定土壤之 pH 值，取 5.0 g 之土壤，加入 96.5 mL 之去離子水，劇烈攪拌 5 分鐘，以 pH 電極量測 pH 值，若 $\text{pH} < 5.0$ ，則使用萃取液 A(萃取液 pH 為 4.93 ± 0.05)，若 $\text{pH} > 5.0$ ，加入 1.0 N 之 HCl 3.5 mL，蓋上錶玻璃加熱至 50°C ，並持溫 10 分鐘，待冷卻於室溫後量測溶液之 pH 值，若 $\text{pH} < 5.0$ ，則使用萃取液 A(萃取液 pH 為 4.93 ± 0.05)，若 $\text{pH} > 5.0$ ，則使用萃取液 B(萃取液 pH 為 2.88 ± 0.05)。而後秤土壤 100 g 以上，加入 20 倍樣品重之萃取液，置於旋轉裝置上，旋轉頻率為 30 ± 2 rpm，旋轉時間為 18 ± 2 小時，待旋轉時間結束後，以 $0.7\mu\text{m}$ 之玻璃纖維濾紙過濾。本研究則使用感應耦合電漿發射光譜儀(ICP-OES)偵測其中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等金屬濃度，了解重金屬溶出程度。

8. 其他實驗中所使用的儀器設備，說明如下：

- (1) 振動篩機：Retsch
- (2) 烘箱：Ching Ying Model C1-12E。
- (3) pH meter：Suntex Model SP-7。
- (4) 電子天平：AD，GR-200，精度小數點以下三位。
- (5) 去離子水製造機：Milli-Q RO



第四章

- (6) 微波消化器：High performance microwave digestion unit, Milestone。
- (7) 感應耦合電漿光譜分析儀(ICP)：Perkin Elmer, Optima 2000。
- (8) 薄膜濾紙：Cellulose Nitrate 材質，MFS 公司，孔徑 0.45 μ m。
- (9) 超音波震盪器：ULTRASONIC CLEANER
- (10) 真空蒸鍍機(鍍碳)：JOEL JEE-4X Vacuum Evaporator。
- (11) 掃描式電子顯微鏡(SEM)：Hitachi SEM S-2500。X 光能量散佈儀(EDX)：Kevex-ray model：3200-040。
- (12) 總有機碳分析儀 (Total organic carbon analyzer, TOC) -用於偵測土壤中有機碳之含量：TELEDYNE TEKMAR Torch Combustion TOC analyzer。



4-3 分析比較現行既有技術能力、專利、產品市場需求及競爭力評估

技術能力：

本研究先前已自行設計組裝模廠級水力漩流系統(本土化)，並已獲有新型專利-攪拌分離裝置(鄭文良、張益國)，中華民國專利證號新型第M372209號，2010.1-2019.4。中華民國發明專利，第I549764號，機動式分離含重金屬之土壤顆粒處理方法(張益國、徐一量、鄭文良、劉原宏、張育祺、洪振瑋、盧幸成)，2016.09-2035.06。具研發及設計能力發展本土化技術。

市場需求：

臺灣目前污染土壤處理可選擇方式為熱處理(非焚化)、固化與掩埋；再利用方式則多採輕質骨材與營建材料的製作或作為水泥製程之摻配料，惟製成骨材再利用時常面對產品去化問題。然以環境永續角度的思維，在技術層次如何增加污染土壤合理再利用或完成處理後回歸環境之比例，應該被更深入的思考與檢討，期能達到土壤資源永續之目標。而台灣中油公司亦有利用生物堆法(Biopile)進行油污染土壤再利用試驗，惟所需分解時間較長，土地面積使用較多。因此，本研究應用機械/化學方式處理分離油污染土壤，提供原受油污染土壤經淨化後，(部分)再利用機會，屬環境友善性。

競爭力評估：

受油污染土壤熱處理費用貴、數量龐大，動則以萬方起跳。若全數熱處理，花費甚鉅。另雖有生物堆法(Biopile)進行再利用試驗，惟所需分解時間較長，土地使用面積需求大，成效待進一步評估。本研究應用機械/化學方式處理分離油污染土壤，並客制化(或微調修改)水力漩流器，應用分離粗細顆粒，達成大粒徑的土壤顆粒經分離後，因不含或只含微量污染物而可逕行回填或再利用使用，增加土壤回用比例，達成污染物處理減容效果。將原受油污染土壤經淨化處理後，提供土壤(部分)再利用回歸土地環境機會。

為何提出機械/化學方式處理？因為先期自行試驗，將某些受油污染土壤，經水力漩流獲得粗顆粒後，原以為就可滿足TPH 1,000 mg/kg法規要



第四章

求，但分析結果有些合格，有些不合格。進一步發現，某些粗顆粒其實是由含油細顆粒團聚所組成、或者粗顆粒表面被油膜附著。因此，需前處理，打散細顆粒團聚現象，最好能將油膜去除或者減少其附著量，達成油污染土壤處理量減容效果，遂提出本案。期能提供有別於傳統熱處理外，一種可搭配使用，能架接於現有技術上，增加油污染土壤處理分離效能之方法。並更可促進本土處理業、人員之技術與經濟發展。

實務應用限制因子主要可能為：

- (i) 進流樣本顆粒大小：樣本需先預篩，預計用 0.5cm 篩網，將石頭去除，避免漩流管阻塞。
- (ii) 流速：目前可提供約 3 m/s 流速。未來實場應用需有 15-20Hp 馬達及配管。
- (iii) 添加水量及廢水處理：因為要使顆粒能分離，依以往經驗，liquid/solid ratio 約在 4 以上，所以要額外添加水。除此之外，衍生廢水處理或廢水回用設備應予以考量設計。惟若假設處理標的是中油高雄煉油廠，則其廢水處理設施正常運作中，緩解廢水處理問題。



4-4 執行成果貢獻及成果效益

4-4-1 預期完成工作項目

1. 完成採樣、樣本處理製備工作。
2. 完成粒徑分析、TPH 分析。
3. 完成機械方式(擦洗技術、超音波震盪)摩擦撞擊油污染顆粒，並討論添加(w/)/未添加(w/o)非結晶型二氧化矽當介質之效果。
4. 評估輔以高氧水氧化降解/微泡浮除將油污與顆粒分離，解析 TPH 於固相、液相轉移，綜合評估機械/化學方式處理效能。
5. 客制化設計製做(或微調修改)水力漩流器，應用分離粗細顆粒。達成大粒徑的土壤顆粒經分離後，可回填或再利用使用，增加土壤回用比例，達成污染物處理減容、環境友善目標。

4-4-2 執行成果貢獻及成果效益

1. 計畫完成可申請專利 1 件，國內或國外研討會論文 1 篇。
2. 對產業發展:務實地試驗，期待能解決目前業界面臨含油污染土壤(尤其是燃料油、潤滑油等重油)顆粒分不開情況。以搭接於現有土壤清洗技術單元基礎上，發展少許操作條件更動(如添加非結晶型二氧化矽擦洗、高氧微泡單元)、增加串聯操作單元(如超音波震盪)、客製化設計水力分離系統(馬達、管線無須更動，只換漩流管及優化操作條件)，分離粗細顆粒，達成污染物濃淡分級功效。
3. 國家發展方面:除可增進產業在整治/再利用含油污染土壤的實務效能之外，亦可作為含油污染處理之技術參考，將對褐地重生、地力永續有正面的助益，提升我國國際形象。另外，電子廠研磨廢水(非結晶型二氧化矽)之再利用，亦屬循環經濟之國家政策。
4. 輸出水力漩流系統客制化設計、製作技術；開發搭接於現有土壤清洗技術之機械碰撞、化學氧化單元。協助東亞國家處理受油污染土壤，達成環境外交政策目標。



第四章

4-5 工作進度甘特圖

| <div>年月</div> <div>工作項目</div> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 備註 |
|-------------------------------|----|----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|
| 文獻資料蒐集與採樣 | | | | | | | | | | | | |
| 基本特性分析 | | | | | | | | | | | | |
| 機械碰撞試驗(超音波震盪、擦洗)及效能評估 | | | | | | | | | | | | |
| 高氧微泡化學氧化試驗 | | | | | | | | | | | | |
| 漩流器客製化製做與操作條件擷取 | | | | | | | | | | | | |
| 處理資料與撰寫報告 | | | | | | | | | | | | |
| 工作進度估計百分比 (累 積 數) | 3% | 9% | 18% | 30% | 45% | 58% | 67% | 76% | 85% | 94% | 100% | |
| 預定查核點 | 期中 | | 1. 完成採樣及基本特性分析工作 2. 機械碰撞試驗(超音波震盪、擦洗)進行 | | | | | | | | | |
| | 期末 | | 1. 高氧微泡試驗效能評估 2. 漩流器客製化製做與操作條件擷取 | | | | | | | | | |

說明：

1、工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。

2、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。

3、「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。



第五章 結果與討論

5-1 採樣

本研究赴南部某油污染土壤進行採樣，採集高 TPH 土壤(採樣前先以 TPH test kit 測試，數值 17,310 mg/kg)、低 TPH 油污染土壤(採樣前先以 TPH test kit 測試，數值 1718 mg/kg)，過程如圖 5-1、5-2 所示。在此，高、低 TPH 本研究以 10,000 mg/kg 做區隔。



圖 5-1 高 TPH 油污染土壤採樣過程



圖 5-2 低 TPH 油污染土壤採樣過程



5-2 基本特性分析

5-2-1 pH 值

根據行政院環境保護署環境檢驗所公告之氫離子濃度指數(pH 值)測定法 (NIEA R208.02C)測定土壤酸鹼值，其結果如下表 5-1 所示。

表 5-1 油污染土壤樣本 pH 值

| 地點 | pH 值 |
|-------------|-----------|
| 高 TPH 油污染土壤 | 7.51±0.02 |
| 低 TPH 油污染土壤 | 7.54±0.02 |

土壤酸鹼性共分為 7 級，分級指標如下：4.5 酸性極強；4.5-5.5 強酸性；5.5-6.5 酸性；6.5-7.5 中性；7.5-8.5 鹼性；8.5-9.5 強鹼性；9.5 鹼性極強。上述結果顯示，高 TPH 油污染土壤、低 TPH 油污染土壤均屬中性-鹼性間。

5-2-2 物理/化學特性

將高 TPH 油污染土壤、低 TPH 油污染土壤進行乾篩，各標準篩階層倒出秤取重量，重複以上步驟，使得數據的相對百分比偏差小於 10%，以求得樣本之粒徑分布。其結果如表 5-2 所示。

表 5-2 高、低 TPH 油污染土壤粒徑分析結果

| 檢驗項目 | 單位 | 粒徑分布百分比 | |
|-----------------------|----|-------------|-------------|
| | | 高 TPH 油污染土壤 | 低 TPH 油污染土壤 |
| >150 μm | % | 67.6 | 9.0 |
| 63 ~150 μm | % | 23.4 | 33.8 |
| 37 ~ 63 μm | % | 5.5 | 38.5 |
| <37 μm | % | 3.5 | 18.7 |

5-2-3 總石油碳氫化合物分析(TPH)

將高 TPH 油污染土壤、低 TPH 油污染土壤送樣，經超音波萃取法 (NIEA M167) 前處理，再予濃縮定量至適當體積後，以耐 350°C 以上高溫之層析管柱，以土壤中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層析儀/火焰離子化偵測器法(NIEA S703.62B)進行分析。其中低碳數(如汽油類)之石油系污染分析



機械/化學方式處理分離油污染土壤

是相當於烷類從 C₆ 到 C₉ 的範圍，高碳數(如柴油類或柴油以上) 之石油系污染分析是相當於烷類從 C₁₀ 到 C₄₀ 的範圍。其結果如表 5-3 所示。

表 5-3 高、低 TPH 油污染經氣相層析儀/火焰離子化偵測器分析結果

| 檢驗項目 | 單位 | 偵測 極限 | 高 TPH 土壤 | 低 TPH 土壤 | 樣品編號 | | | 檢驗方法 |
|--|-------|----------|-------------|-------------|------|--|--|----------------------|
| | | | | | 以下空白 | | | |
| 苯 (Benzene) | mg/kg | 0.01 | ND | ND | | | | M711.04C |
| 甲苯 (Toluene) | mg/kg | 0.01 | ND | ND | | | | M711.04C |
| 乙苯 (EthylBenzene) | mg/kg | 0.01 | ND | ND | | | | M711.04C |
| 間、對-二甲苯 (m,p-Xylene) | mg/kg | 0.01 | ND | ND | | | | M711.04C |
| 鄰-二甲苯 (o-Xylene) | mg/kg | 0.01 | ND | ND | | | | M711.04C |
| TPH-g | mg/kg | 0.10 | ND | ND | | | | M157.01C S703.62B |
| TPH-d | mg/kg | 30.00 | >10000 | 3667.36 | | | | M167.01C S703.62B |
| 註： 1.本檢驗報告僅對該樣品負責，並不得隨意複製及作為宣傳廣告之用。 2.本報告檢驗樣品係由採樣單位自備，本單位僅負責檢驗分析。 3.採樣單位、地點、時間及樣品名稱、類別等資料係由採樣單位提供。 4.“ND”表示低於偵測極限(MDL)。 5.TPH-g 樣品先以 NIEA M157.00C 進行前處理。 6.TPH-d 樣品先以 NIEA M167.01C 超音波萃取步驟進行前處理。 7. <input type="checkbox"/> 請注意超過法規管制標準。 | | | | | | | | |

後續因經費因素，將擇優選取機械/化學處理效果佳之條件，送樣進行氣相層析儀/火焰離子化偵測器分析。全部樣本將先以 TPH 濁度法 Test kit 檢測，進行處理效果判斷。



5-2-4 非結晶型二氧化矽

非結晶型二氧化矽由中部某光電廠提供研磨污泥，該廠以傳統化學混凝/沉澱處理非結晶型二氧化矽研磨廢水。混凝沉澱處理過程，採用過量加藥多元氯化鋁方式進行。含矽廢水污泥經烘箱以 105℃ 條件下烘乾 24 小時至恆重量測，含水率為 75.64%，固體物含量 24.36%，粒徑介於 0.5 μm ~45 μm 間。研磨過篩(200 mesh)取樣經微波消化後，以 ICP-OES 分析元素組成，結果如下表所示，可發現目前組成中鋁與矽的比例為 3:1，材料中主要以矽、鋁組成比例為主。

表 5-4 非結晶型二氧化矽污泥重金屬組成

| 元素 | | 氧化物換算 | |
|----------|-------|--------------------------------|-------|
| 單位：wt % | | | |
| Al | 12.94 | Al ₂ O ₃ | 24.44 |
| Si | 3.71 | SiO ₂ | 7.96 |
| K | 0.22 | K ₂ O | 0.27 |
| 單位：mg/kg | | | |
| Ca | 454 | CaO | 636 |
| Cu | 2717 | CuO | 3401 |
| Fe | 762 | Fe ₂ O ₃ | 1089 |
| Ba | ND | BaO | ND |
| Cd | ND | CdO | ND |
| Cr | ND | Cr ₂ O ₃ | ND |
| Mg | ND | MgO | ND |
| Na | ND | Na ₂ O | ND |

ND : < 50 mg/kg

再經毒性特性溶出程序(TCLP)試驗，可得 Ba 0.24 mg/l、Cu 4.69 mg/l，其餘 As、Cd、Cr、Cr⁶⁺、Hg、Pb、Se 均小於方法偵測極限測定值，非屬有害溶出特性。



5-2-5 高氧水

本研究自行產製新鮮高氧水 35~40 mg/l 溶氧(本次實驗初始值為 37.8mg/l)，且經過 48 小時靜置，高氧水溶氧量仍高達 26.8 mg/l。後續利用反應噴嘴進出口流體的流量與壓力變化產生真空吸引力，將液體或氣體吸入與管線內流體混合，利用噴出時之剪切力與噴出後與器壁之碰撞力產生高氧水。茲將不同高氧水產製後靜置時間與溶氧值作圖如下。

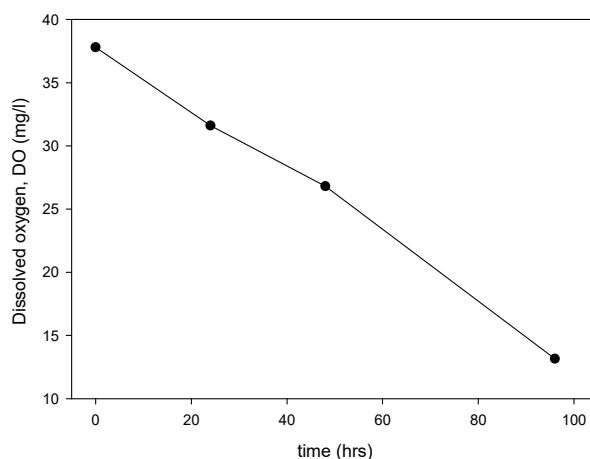


圖 5-3 高氧水產製後靜置時間與溶氧值關係圖

考量實驗之一致性，本研究後續都使用溶氧 35.0 ± 0.2 mg/l 之高氧水進行試驗。另外，考慮溶氧程度會隨著不同程序試驗進行而有差異，本研究亦對後續會使用高氧水當試劑水之程序，進行溶氧與反應時間關係(如圖 5-4)，以當作基本數據對照比較。

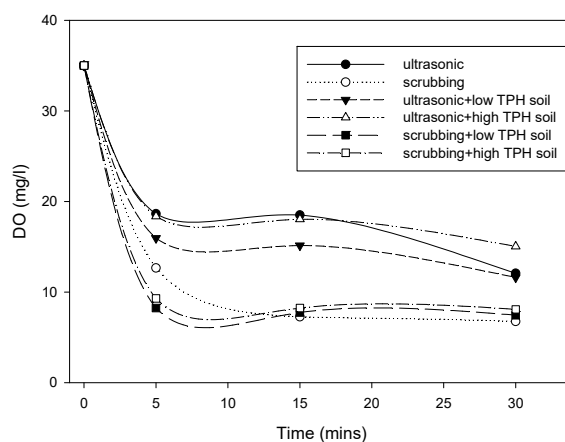


圖 5-4 高氧水於不同處理程序中之時間與溶氧值關係圖



5-3 超音波震盪處理高、低 TPH 油污染土壤

以 40kHz, 400W 超音波進行高、低 TPH 油污染土壤處理，水洗固液比設計為 1:2。實驗條件考慮變因有：

- (1) 添加/不添加非結晶型二氧化矽。如果有添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 添加/不添加高氧水。

5-3-1 超音波震盪處理高 TPH 油污染土壤(35 mg/l 高氧水當試劑水)

實驗條件：

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50、未添加
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 添加高氧水當試劑水。

以四分法對高 TPH 油污染土壤進行分樣，經濁度法 TPH 測試所得濃度為 $6,268 \pm 1,191$ mg/kg，後續以 6,268mg/kg 進行比較。以 35 mg/l 高氧水當試劑水，高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同反應時間之 TPH 值如下表所示。

表 5-5 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

| | 反應時間 | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 | 5 mins | 10 mins | 30 mins |
| 1:200 | 2419 mg/kg | 2033 mg/kg | 2428 mg/kg |
| 1:100 | 4549 mg/kg | 3640 mg/kg | 1712 mg/kg |
| 1:50 | 2244 mg/kg | 2226 mg/kg | 2088 mg/kg |
| 未添加非結晶型二 氧化矽 | 6404 mg/kg | 5467 mg/kg | 7249 mg/kg |



實驗結果顯示，添加非結晶型二氧化矽：油污染土壤，添加比例 1:200、1:100、1:50，反應時間 30 分鐘可得 TPH 去除率 61.3%~72.7%間 (如圖 5-5 所示)；未添加非結晶型二氧化矽則 TPH 去除率低於 12.8%。顯示添加不同比例之非結晶型二氧化矽具一定之 TPH 去除成效。再輔以顯微鏡呈相，圖 5-6 為高 TPH 油污染土壤原樣照片、圖 5-7 為高 TPH 油污染土壤經 5 分鐘處理後照片、圖 5-8 為高 TPH 油污染土壤經 30 分鐘處理後照片，觀察高 TPH 油污染土壤經不同時間反應後照片，了解表面型態變化。

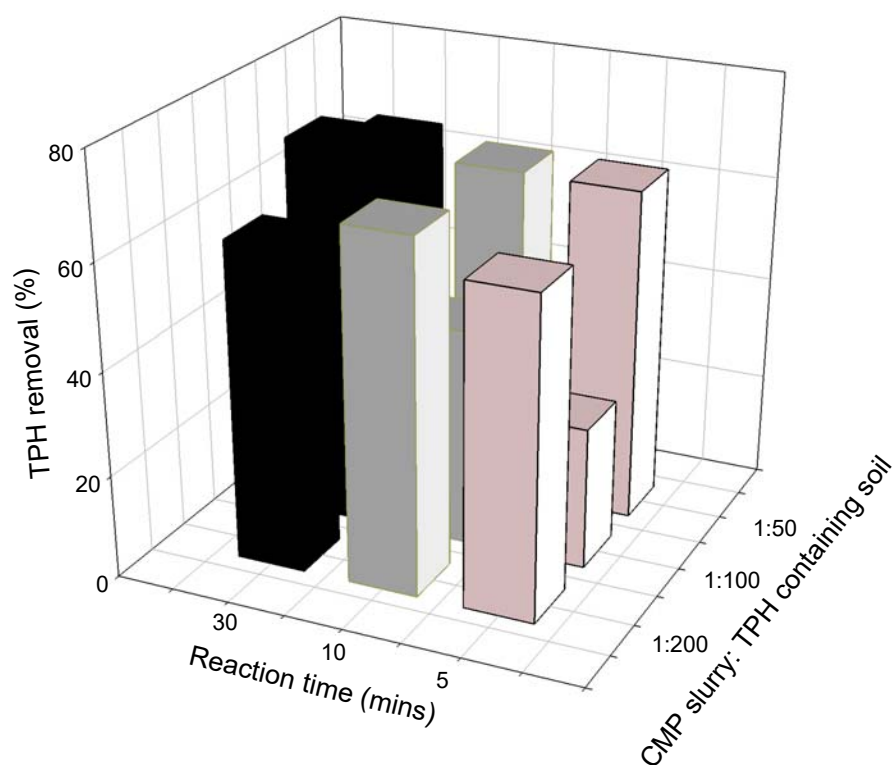


圖 5-5 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 去除率 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)



第五章

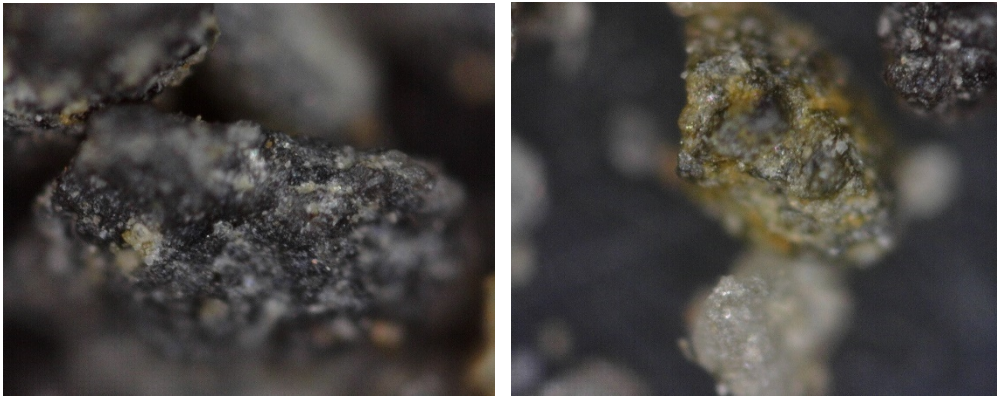


圖 5-6 高 TPH 油污染土壤原樣照片

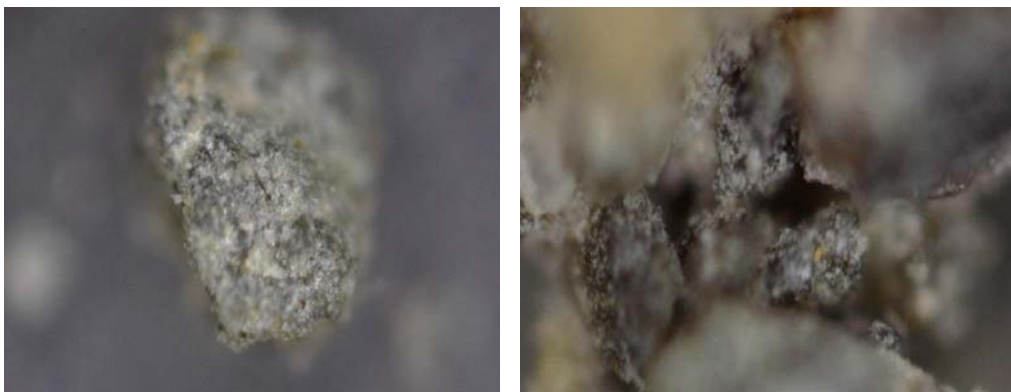


圖 5-7 高 TPH 油污染土壤經 5 分鐘反應後照片(非結晶型二氧化矽:油污染土壤=1:200，以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)



圖 5-8 高 TPH 油污染土壤經 30 分鐘反應後照片(非結晶型二氧化矽:油污染土壤=1:200，以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)



5-3-2 超音波震盪處理高 TPH 油污染土壤(自來水當試劑水)

實驗條件：

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50、未添加
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 添加自來水當試劑水。

高 TPH 油污染土壤($6,268 \pm 1,191 \text{ mg/kg}$)以自來水當試劑水，油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同反應時間之 TPH 值如下表所示。

表 5-6 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值 (以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

| | 反應時間 | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 | 5 mins | 10 mins | 30 mins |
| 1:200 | 2456 mg/kg | 1822 mg/kg | 2474 mg/kg |
| 1:100 | 1721 mg/kg | 1859 mg/kg | 2263 mg/kg |
| 1:50 | 1620 mg/kg | 2639 mg/kg | 2566 mg/kg |
| 未添加非結晶型二 氧化矽 | 4971 mg/kg | 6211 mg/kg | 6900 mg/kg |

實驗結果顯示，添加非結晶型二氧化矽：油污染土壤，添加比例 1:200、1:100、1:50，反應時間 30 分鐘內可得 TPH 去除率 57.9%~74.2%間 (如圖 5-9 所示)；未添加非結晶型二氧化矽則 TPH 去除率低於 20.7%。顯示添加不同比例之非結晶型二氧化矽具一定之 TPH 去除成效。



第五章

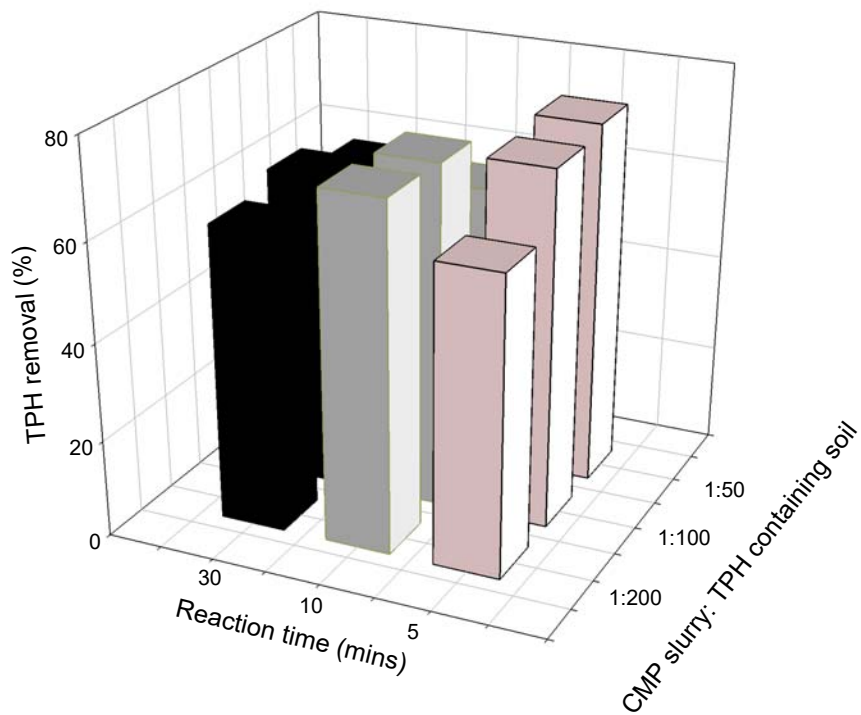


圖 5-9 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 去除率 (以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)



5-3-3 超音波震盪處理低 TPH 油污染土壤(35 mg/l 高氧水當試劑水)

實驗條件：

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50、未添加
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 添加高氧水當試劑水。

低 TPH 油污染土壤經濁度法 Test Kit 測試結果為 748 ± 292 mg/kg，後續以 748 mg/kg 值進行實驗比較。以 35 mg/l 高氧水當試劑水，對低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加比例及不同反應時間之土壤 TPH 殘存值如下表所示。

表 5-7 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

| | 反應時間 | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 | 5 mins | 10 mins | 30 mins |
| 1:200 | 1537 mg/kg | 382 mg/kg | 219 mg/kg |
| 1:100 | 1115 mg/kg | 904 mg/kg | 738 mg/kg |
| 1:50 | 1124 mg/kg | 1041 mg/kg | 1142 mg/kg |
| 未添加非結晶型二 氧化矽 | 794 mg/kg | 876 mg/kg | 996 mg/kg |

實驗結果顯示，經非結晶型二氧化矽:油污染土壤=1:200，反應時間 30 分鐘可得 TPH 去除率 70.7%(經不同非結晶型二氧化矽添加及不同反應時間後之 TPH 去除率整理如圖 5-10 所示)，效果較佳。非結晶型二氧化矽:油污染土壤=1:50、未添加非結晶型二氧化矽幾乎無效果。



第五章

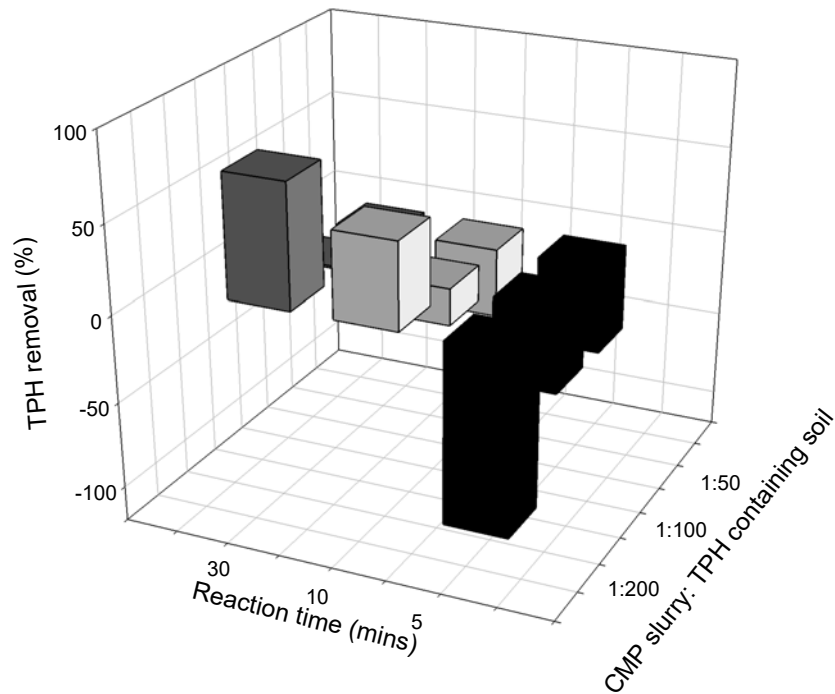


圖 5-10 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 去除率 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)



5-3-4 超音波震盪處理低 TPH 油污染土壤(自來水當試劑水)

實驗條件：

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50、未添加
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 以自來水當試劑水。

低 TPH 油污染土壤經濁度法 Test Kit 測試結果為 748 ± 292 mg/kg，後續以 748 mg/kg 值進行實驗比較。以自來水當試劑水，對低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加比例及不同反應時間之土壤 TPH 殘存值如下表所示。

表 5-8 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值 (以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

| | 反應時間 | | |
|--------------------|-----------|------------|-----------|
| 非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 | 5 mins | 10 mins | 30 mins |
| 1:200 | 619 mg/kg | 279 mg/kg | 188 mg/kg |
| 1:100 | 426 mg/kg | 546 mg/kg | 381 mg/kg |
| 1:50 | 913 mg/kg | 867 mg/kg | 720 mg/kg |
| 未添加非結晶型二 氧化矽 | 628 mg/kg | 1840 mg/kg | 784 mg/kg |

實驗結果顯示，經非結晶型二氧化矽:油污染土壤=1:200，反應時間 30 分鐘可得 TPH 去除率 74.9%(經不同非結晶型二氧化矽添加及不同反應時間後之 TPH 去除率整理如圖 5-11 所示)，效果較佳；非結晶型二氧化矽:油污染土壤=1:100 其次；非結晶型二氧化矽:油污染土壤=1:50 效果差、未添加非結晶型二氧化矽效果亦不佳。

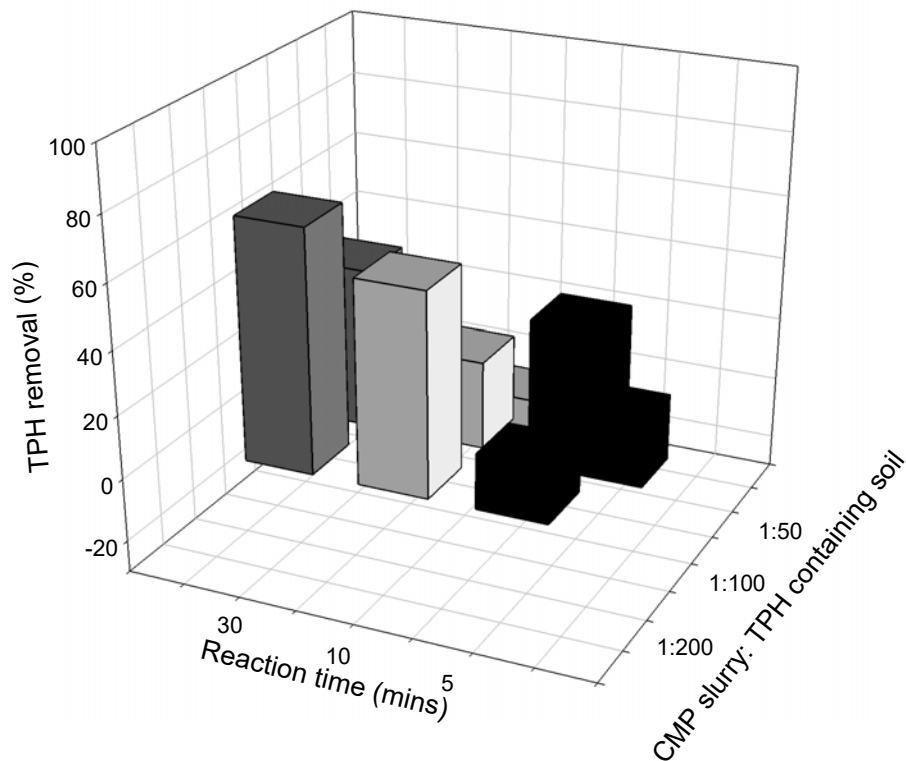


圖 5-11 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 去除率 (以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

5-3-5 濃度平衡計算

(a)選取高 TPH 油污染土壤進行濃度平衡，經土壤中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層析儀/火焰離子化偵測器法(GC-FID)分析計算，所得濃度為 6,148 mg/kg，與 testkit 所得 6,268 mg/kg 結果相近。

(b)將此高 TPH 油污染土壤以超音波震盪處理，實驗條件為

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):100(油污染土壤)，水洗固液比設計為 1:3 (100g 土樣:300g 自來水)。
- (2) 反應時間 10 分鐘；
- (3) 添加自來水當試劑水。



機械/化學方式處理分離油污染土壤

(c)土壤殘餘 TPH 以 GC-FID 法測得 1,512 mg/kg(圖譜如圖 5-12)；testkit 法測得 1,537 mg/kg。

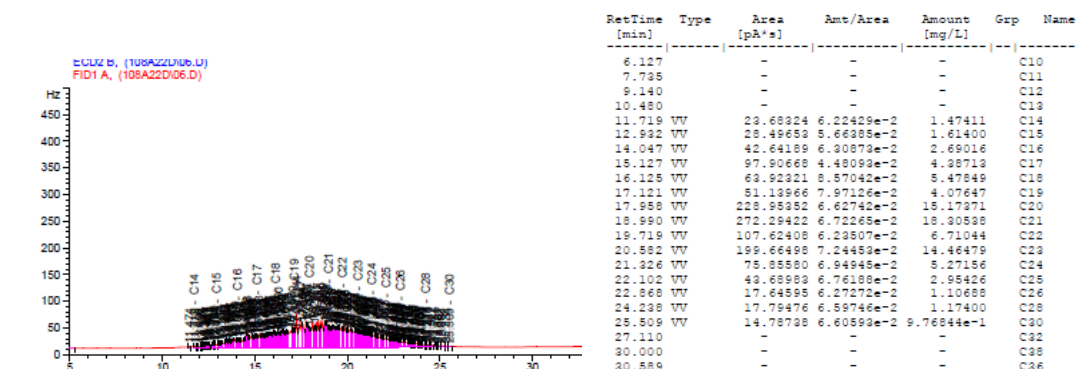


圖 5-12 GC-FID 分析土壤 TPH

(d)水溶液殘餘 TPH 部分，以 GC-FID 法分析未檢出(ND；圖譜如圖 5-13)、testkit 法不能做水相。以 TOC 測得 12.48 mg/l。

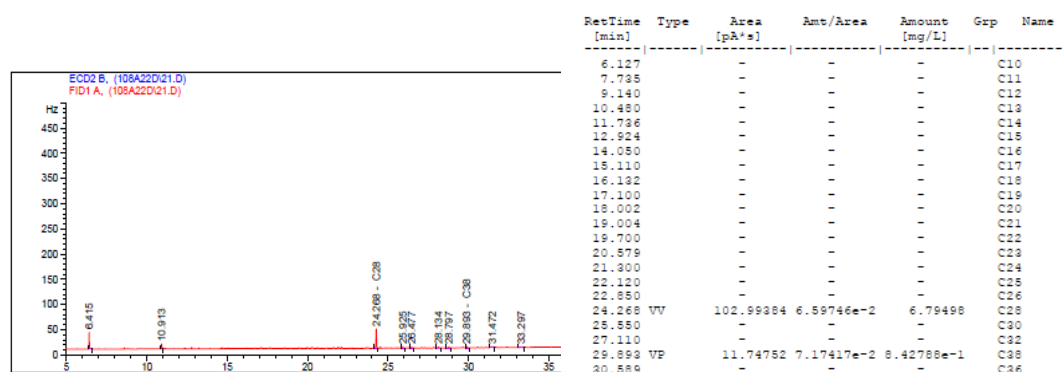


圖 5-13 GC-FID 分析水溶液 TPH

雖然溶液中 TOC 無法代表 TPH 含量，但有機碳濃度偏低，是否屬相的轉移或者揮發仍有待後續探討釐清。



5-3-6 小結

(a) 效能：超音波震盪處理高、低 TPH 油污染土壤。以實驗數據而言，處理高 TPH 油污染土壤其處理效能較低 TPH 油污染土壤效能略佳。高氧水使用與否，對 TPH 去除無明顯差異。添加非結晶型二氧化矽為重要之實驗條件，不同添加比例(1:200、1:100、1:50)均對 TPH 去除有所助益。

(b) 成本效益分析：

(1) 計算以超音波震盪處理、使用高氧水當試劑、反應時間 30 分鐘，處理每噸高 TPH 油污染土壤花費。

水量消耗：水洗固液比(solid to liquid ratio)設計為 1:2，每噸土壤用掉 2 m^3 水。

未考慮回收水情況下，每噸土壤花費=每度水 12.075 元* 2 m^3 = 24.15 元

(2) 每噸高氧水製造成本(水費除外)，電費為

$0.746 \text{ KW} * 0.5 \text{ H} * (5.10 * 4/12 + 3.97 * 8/12) = 1.62 \text{ 元}$

營業用夏月電價 6 月至 9 月 5.10 元/度

營業用非夏月電價 3.97 元/度

每噸高氧水氧氣成本 10 元(實驗室使用高純氧)

使用 2 噸高氧水=23.24 元

(尚未考慮高氧水設備初設費 1,000,000 元)

(3) 實驗室超音波震盪電費

$0.4 \text{ kw} * 0.5 \text{ H} * (5.10 * 4/12 + 3.97 * 8/12) = 0.87 \text{ 元}$ ，處理 100g 土壤。

工業用超音波震盪器 4500W，300 公升容量。

$4.5 \text{ KW} * 0.5 \text{ H} * (5.10 * 4/12 + 3.97 * 8/12) = 9.79 \text{ 元}$ ，處理 100kg 土壤。

每噸土壤處理電費 97.9 元。

(尚未考慮工業用超音波震盪器設備初設費 2,000,000 元)

(4) 未考慮機器設備初設費及維修成本，單純考量材料費及水電費，

每噸土壤處理成本 $24.15 + 23.24 + 97.9 = 145.3 \text{ 元}$

(5) 若使用自來水則為 $24.15 + 97.9 = 122.1 \text{ 元}$

註 1:若考慮廢水處理，則每噸處理費用 30 元。

註 2:若評估機械磨損，每處理 $100,000 \text{ m}^3$ 泥漿更換槽體內壁約新台幣 100,000 元。一組超音波震盪處理所需空間約 $2\text{m(W)} * 10\text{m(L)} * 2\text{m(H)}$ 。



5-4 擦洗處理高、低 TPH 油污染土壤

5-4-1 擦洗處理高 TPH 油污染土壤(35 mg/l 高氧水當試劑水)

實驗條件：

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50、未添加
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 添加高氧水當試劑水。

以四分法對高 TPH 油污染土壤進行分樣，經濁度法 TPH 測試所得濃度為 $6,268 \pm 1,191$ mg/kg，後續以 6,268mg/kg 進行比較。以 35 mg/l 高氧水當試劑水，高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同反應時間之 TPH 值如下表所示。

表 5-9 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 殘存值 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

| | 反應時間 | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 非結晶型二氧化矽： 油污染土壤 | 5 mins | 10 mins | 30 mins |
| 1:200 | 2382 mg/kg | 2860 mg/kg | 2511 mg/kg |
| 1:100 | 3888 mg/kg | 4035 mg/kg | 3612 mg/kg |
| 1:50 | 3649 mg/kg | 3796 mg/kg | 3493 mg/kg |
| 未添加非結晶型二 氧化矽 | 3998 mg/kg | 5311 mg/kg | 4944 mg/kg |

添加非結晶型二氧化矽：油污染土壤，添加比例 1:200，時間 5mins～30mins，TPH 去除率可達 60.0%～62.0%間 (如圖 5-14 所示)；若未添加非結晶型二氧化矽，則時間 5mins～30mins，TPH 去除率僅 15.3%～36.2%間，顯示添加非結晶型二氧化矽具效果。



第五章

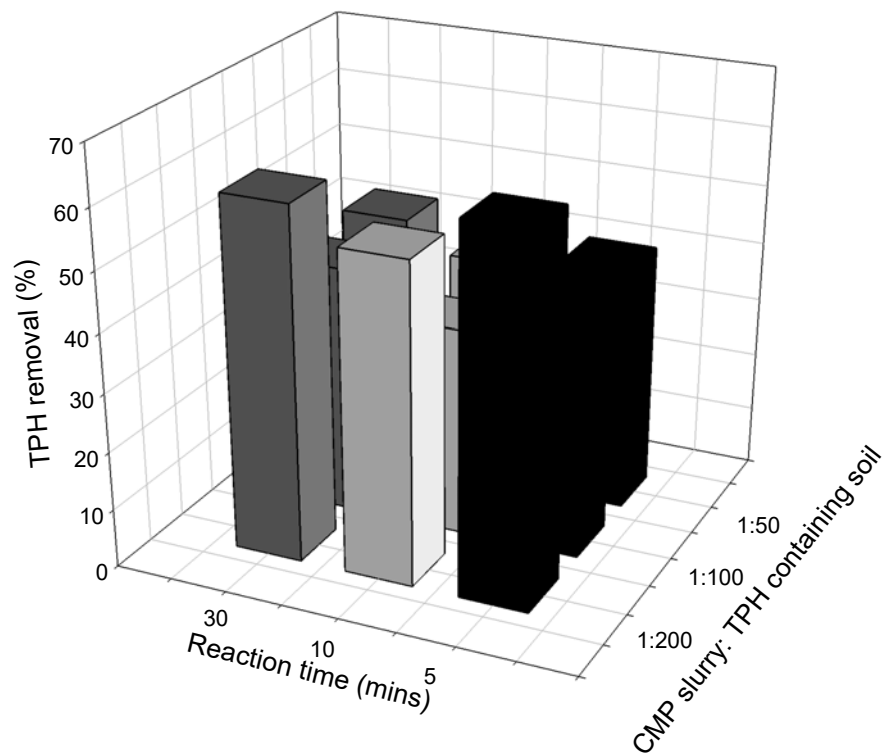


圖 5-14 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 去除率 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2)



5-4-2 擦洗處理高 TPH 油污染土壤(自來水當試劑水)

實驗條件：

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50、未添加
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 添加自來水當試劑水。

以四分法對高 TPH 油污染土壤進行分樣，經濁度法 TPH 測試所得濃度為 $6,268 \pm 1,191$ mg/kg，後續以 6,268mg/kg 進行比較。以自來水當試劑水，高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同反應時間之 TPH 值如下表所示。

表 5-10 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 殘存值 (以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

| | 反應時間 | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 | 5 mins | 10 mins | 30 mins |
| 1:200 | 2299 mg/kg | 1804 mg/kg | 1785 mg/kg |
| 1:100 | 5091 mg/kg | 4751 mg/kg | 3392 mg/kg |
| 1:50 | 3925 mg/kg | 4567 mg/kg | 4182 mg/kg |
| 未添加非結晶型二 氧化矽 | 6630 mg/kg | 4301 mg/kg | 4870 mg/kg |

實驗結果顯示，添加非結晶型二氧化矽：油污染土壤，添加比例 1:200，反應時間 30 分鐘內可得 TPH 去除率 71.5% 間 (如圖 5-15 所示)；未添加非結晶型二氧化矽則 TPH 去除率低於 31.8%。顯示添加不同比例之非結晶型二氧化矽具一定之 TPH 去除成效。



第五章

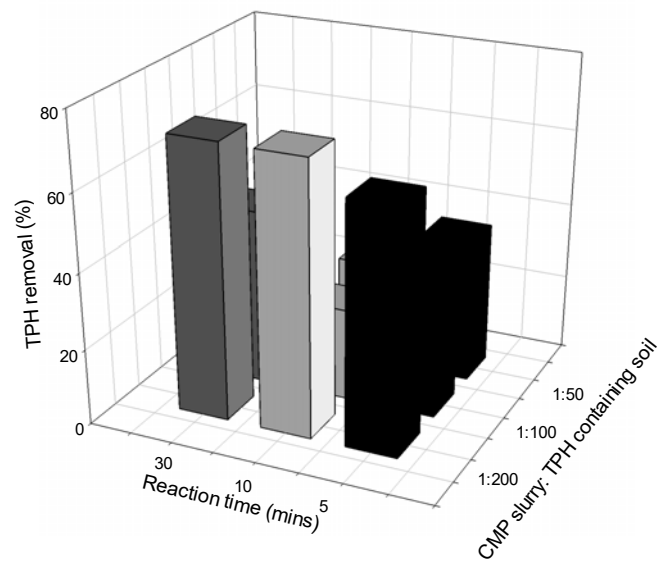


圖 5-15 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 去除率 (以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)



機械/化學方式處理分離油污染土壤

再輔以顯微鏡呈相，圖 5-16 為高 TPH 油污染土壤經 5 分鐘處理後照片、圖 5-17 為高 TPH 油污染土壤經 30 分鐘處理後照片，觀察高 TPH 油污染土壤經不同時間反應後照片，了解表面型態變化。

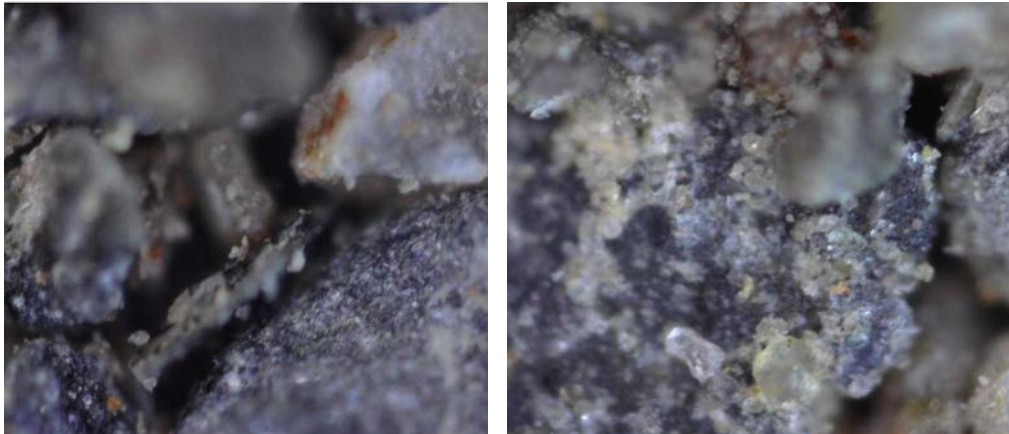


圖 5-16 高 TPH 油污染土壤經擦洗 5 分鐘反應後照片(非結晶型二氧化矽:
油污染土壤=1:200，以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

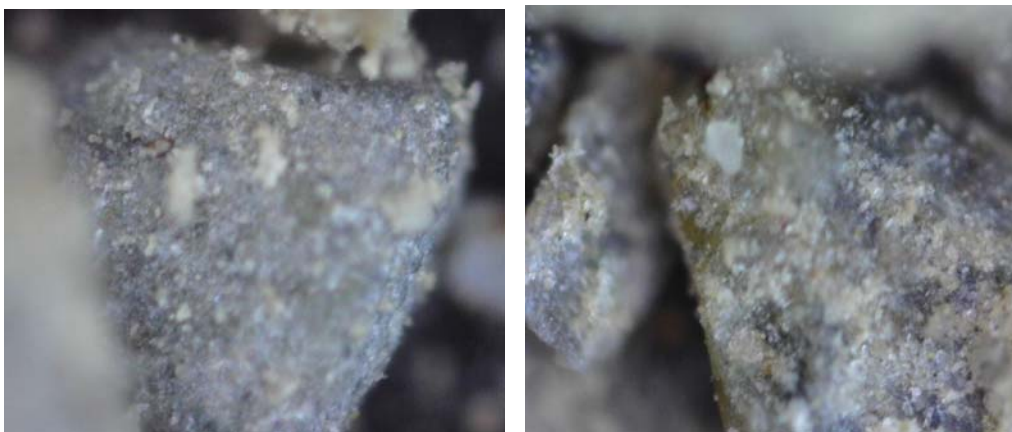


圖 5-17 高 TPH 油污染土壤經擦洗 30 分鐘反應後照片(非結晶型二氧化矽:
油污染土壤=1:200，以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)



5-4-3 擦洗處理低 TPH 油污染土壤(35 mg/l 高氧水當試劑水)

實驗條件：

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50、未添加
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 添加高氧水當試劑水。

低 TPH 油污染土壤經濁度法 Test Kit 測試結果為 748 ± 292 mg/kg，後續以 748 mg/kg 值進行實驗比較。以 35 mg/l 高氧水當試劑水，對低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加比例及不同反應時間之土壤 TPH 殘存值如下表所示。

表 5-11 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 殘存值 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

| | 反應時間 | | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| 非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 | 5 mins | 10 mins | 30 mins |
| 1:200 | 444 mg/kg | 166 mg/kg | 157 mg/kg |
| 1:100 | 390 mg/kg | 466 mg/kg | 352 mg/kg |
| 1:50 | 233 mg/kg | 294 mg/kg | 177 mg/kg |
| 未添加非結晶型二 氧化矽 | 286 mg/kg | 368 mg/kg | 245 mg/kg |

實驗結果顯示，添加非結晶型二氧化矽：油污染土壤，添加比例 1:200，反應時間 30 分鐘內可得 TPH 去除率 79.0% (如圖 5-18 所示)；未添加非結晶型二氧化矽則 TPH 去除率介於 50.9%~67.2% 間。添加/未添加非結晶型二氧化矽效果差異不顯著。



機械/化學方式處理分離油污染土壤

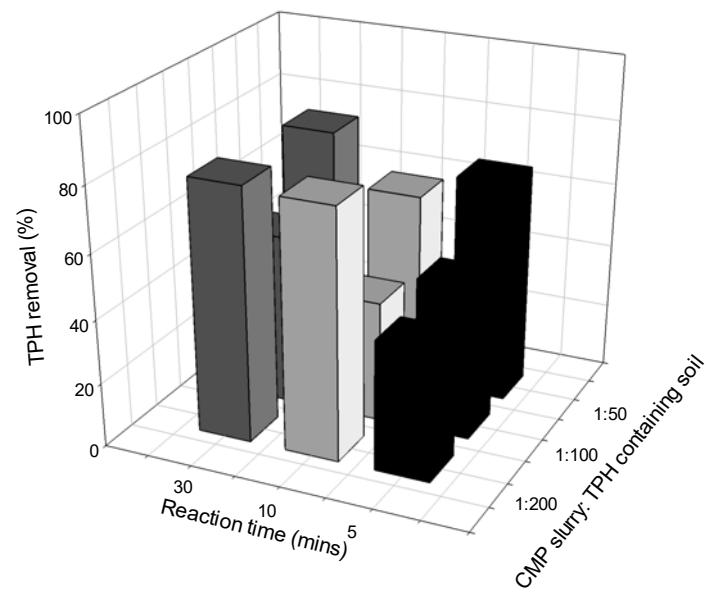


圖 5-18 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 去除率 (以 35 mg/l 高氧水當試劑水, 水洗固液比設計為 1:2)



5-4-4 擦洗處理低 TPH 油污染土壤(自來水當試劑水)

實驗條件：

- (1) 添加非結晶型二氧化矽，則添加比例設計為 1(非結晶型二氧化矽):200(油污染土壤)、1:100、1:50、未添加
- (2) 反應時間 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘。
- (3) 添加自來水當試劑水。

低 TPH 油污染土壤經濁度法 Test Kit 測試結果為 748 ± 292 mg/kg，後續以 748 mg/kg 值進行實驗比較。以自來水當試劑水，對低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加比例及不同反應時間之土壤 TPH 殘存值如下表所示。

表 5-12 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 殘存值 (以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)

| | 反應時間 | | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| 非結晶型二氧化矽: 油污染土壤 | 5 mins | 10 mins | 30 mins |
| 1:200 | 272 mg/kg | 277 mg/kg | 174 mg/kg |
| 1:100 | 221 mg/kg | 172 mg/kg | 226 mg/kg |
| 1:50 | 348 mg/kg | 300 mg/kg | 304 mg/kg |
| 未添加非結晶型二 氧化矽 | 465 mg/kg | 484 mg/kg | 426 mg/kg |

實驗結果顯示，非結晶型二氧化矽:油污染土壤=1:200、1:100、1:50，反應時間 5~30 分鐘，可得 TPH 去除率 53.4%~77.0%(經不同非結晶型二氧化矽添加及不同反應時間後之 TPH 去除率整理如圖 5-19 所示)，具一定之 TPH 去除效果。未添加非結晶型二氧化矽效果則略差，去除率僅 35.2%~43.0%。



機械/化學方式處理分離油污染土壤

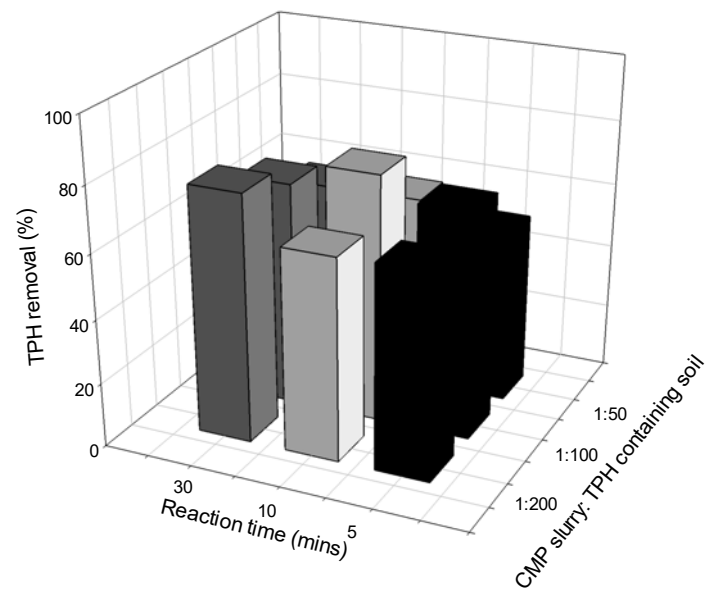


圖 5-19 低 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同擦洗反應時間後之 TPH 去除率 (以自來水當試劑水，水洗固液比設計為 1:2)



5-4-5 小結

(a) 效能：以擦洗處理高、低 TPH 油污染土壤。

(1)處理高 TPH 油污染土壤時，添加非結晶型二氧化矽為重要之實驗參數，對 TPH 去除有所助益。

(2)處理低 TPH 油污染土壤，使用高氧水情況下，添加/未添加非結晶型二氧化矽效果無明顯差異。

(3)處理低 TPH 油污染土壤，使用自來水情況下，添加非結晶型二氧化矽效果略勝於未添加。

(b) 成本效益分析：

(1) 計算以擦洗處理、使用高氧水當試劑、反應時間 30 分鐘，處理每噸高 TPH 油污染土壤花費。

水量消耗：水洗固液比設計為 1:2，每噸土壤用掉 2 m^3 水。未考慮回收水情況下，每噸土壤花費=每度水 12.075 元* 2 m^3 = 24.15 元

(2)每噸高氧水製造成本(水費除外)，電費為

$$0.746\text{KW} \times 0.5\text{H} \times (5.10 \times 4/12 + 3.97 \times 8/12) = 1.62 \text{ 元}$$

營業用夏月電價 6 月至 9 月 5.10 元/度；營業用非夏月電價 3.97 元/度。每噸高氧水氧氣成本 10 元(實驗室使用高純氧)

使用 2 噸高氧水=23.24 元

(尚未考慮高氧水設備初設費 1,000,000 元)

(3)實驗室擦洗電費

$$0.5\text{kw} \times 0.5 \text{ H} \times (5.10 \times 4/12 + 3.97 \times 8/12) = 1.09 \text{ 元，處理 } 100\text{g 土壤。}$$

工業用擦洗機 11.2KW， 6M^3 容量。

$$11.2\text{KW} \times 0.5\text{H} \times (5.10 \times 4/12 + 3.97 \times 8/12) = 24.3 \text{ 元，處理 } 1000\text{kg 土壤。}$$

每噸土壤處理電費 24.3 元。

(尚未考慮工業用擦洗機設備初設費 250,000 元)

(4)未考慮機器設備初設費及維修成本，單純考量材料費及水電費，

每噸土壤處理成本 $24.15 + 23.24 + 24.3 = 71.8$ 元

(5)若使用自來水(不用高氧水)，則每噸土壤處理成本為 **$24.15 + 24.3 = 48.5$ 元**

註 1:若考慮廢水處理，每噸處理費用約 30 元。

註 2:若考慮機械磨損，擦洗槽主要機械磨損是螺旋槳翼。 10m^3 擦洗槽約經 $50,000\text{m}^3$ 泥漿擦洗需更換槳翼，槳翼組 40,000 新台幣。擦洗槽所需空間約 $5\text{m(W)} \times 5\text{m(L)} \times 6\text{m(H)}$ 。



機械/化學方式處理分離油污染土壤

5-5 水力漩流分離

FLUENT 軟體採用多種求解方法和多重網格加速收斂技術，因而能達到最佳的收斂速度和求解精度，FLUENT 使用新的 NITA 運算方法來求解，大大減少求解暫態問題的所需時間。後處理器 FLUENT 的後處理可以生成有實際意義的圖片、報告、跡線追蹤等功能，圖 5-20 為 FLUENT 的操作畫面。

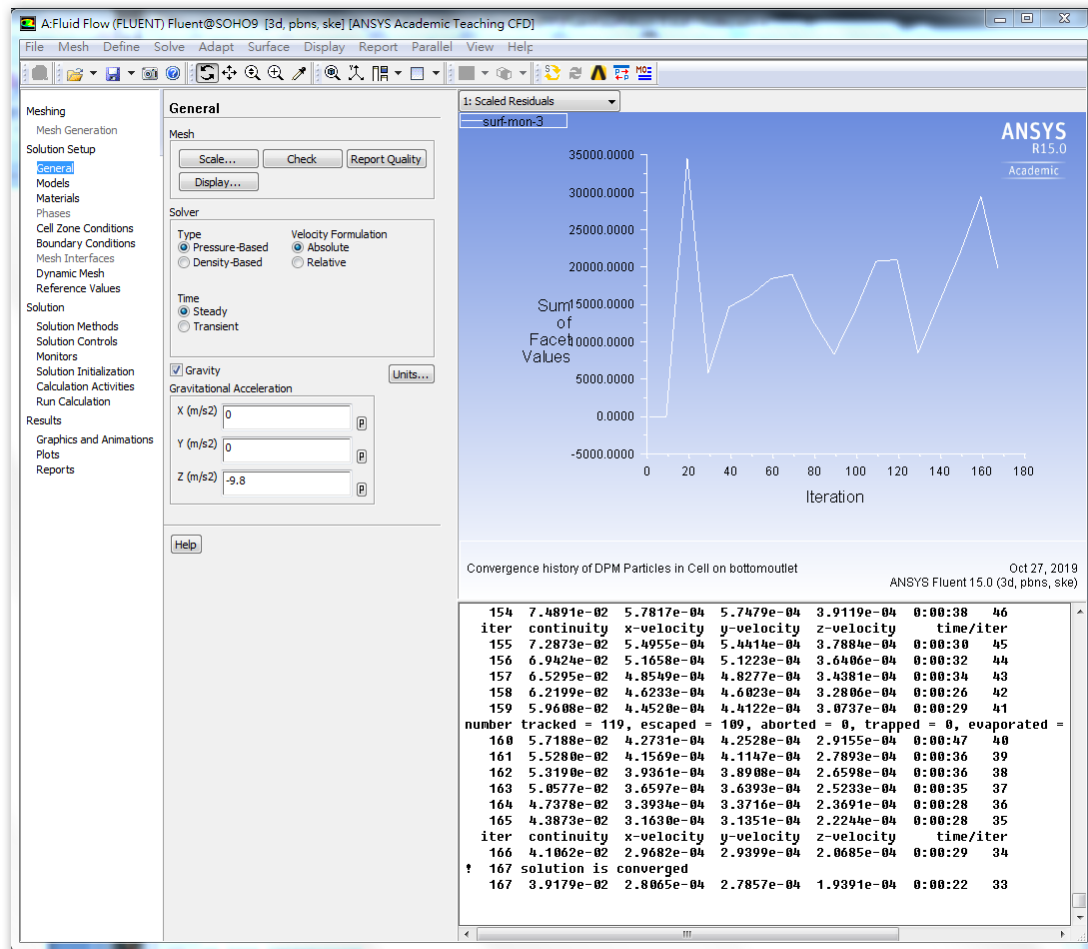


圖 5-20 FLUENT 操作畫面

5-5-1 流場模擬模型

本年度計畫針對模型進行模擬測試，各部位尺寸如圖 5-21 所示。流場模擬之模型如圖 5-22，其網格圖如圖 5-23。



第五章

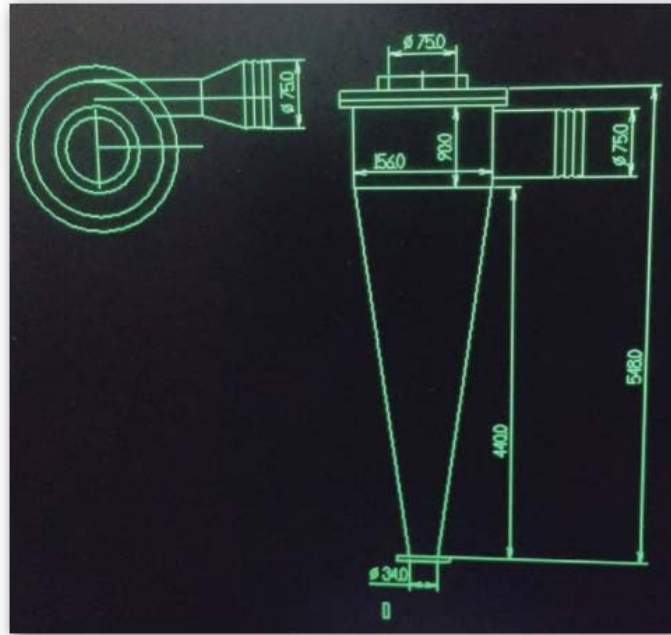


圖 5-21 水力漩流器

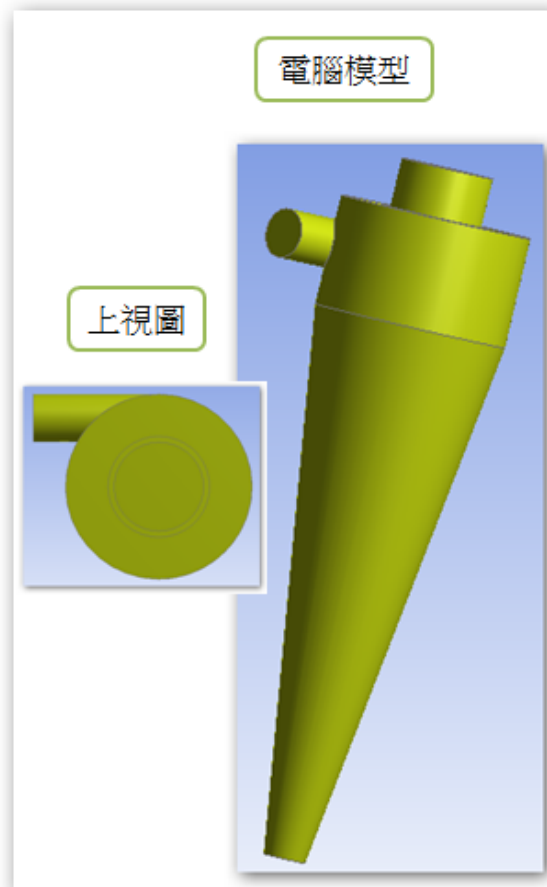


圖 5-22 水力漩流器模擬模型

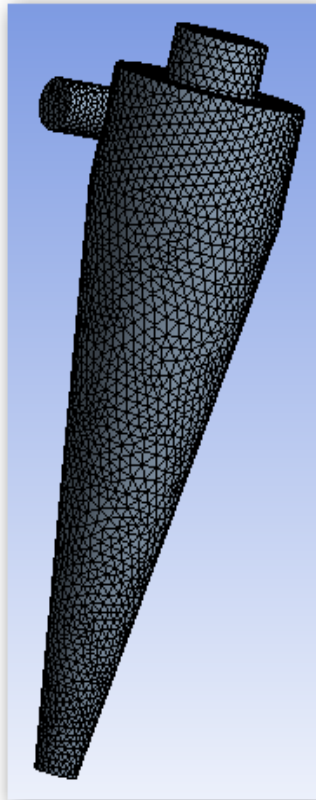


圖 5-23 水力漩流器模型網格圖

5-5-2 流場模擬情境

分別進行不同入口速度、粒徑，在水力漩流器中的上下分離效率進行比較，探討流速、尺寸與粒徑的相互關係。

表 5-13 為各情境模擬結果，由表中大致可看出，在粒徑 $63\mu\text{m}$ 以下，跟 $100\mu\text{m}$ 以上的粒徑，可清楚的由上下出口分離，粒徑愈小在上方出口的比率愈高，下方出口則對 $200\mu\text{m}$ 以上的粒徑，具有 100% 的分離率。其中，以 3.5m/s 對細顆粒分離效果較佳。圖 5-24 為漩流器內壓力分佈圖，從中可看出，中央部份為低壓區。圖 5-25 則為入口顆粒軌跡圖，由圖中可以看出顆粒的旋轉軌跡。



表 5-13 不同情境模擬結果

| | 粒徑(μm) | 入口速度 | 上部出口比率 | 下部出口比率 |
|----|---------------------|---------|--------|--------|
| 模型 | 20 | 3.5m/s | 99% | 1% |
| | | 7.5m/s | 76% | 24% |
| | | 9.5m/s | 74% | 26% |
| | | 11.5m/s | 83% | 17% |
| | 37 | 3.5m/s | 82% | 18% |
| | | 7.5m/s | 75% | 25% |
| | | 9.5m/s | 82% | 18% |
| | | 11.5m/s | 76% | 24% |
| | 63 | 3.5m/s | 76% | 24% |
| | | 7.5m/s | 62% | 38% |
| | | 9.5m/s | 73% | 27% |
| | | 11.5m/s | 74% | 26% |
| | 100 | 3.5m/s | 24% | 76% |
| | | 7.5m/s | 17% | 83% |
| | | 9.5m/s | 20% | 80% |
| | | 11.5m/s | 63% | 37% |
| | 200 | 3.5m/s | 0% | 100% |
| | | 7.5m/s | 0% | 100% |
| | | 9.5m/s | 0% | 100% |
| | | 11.5m/s | 0% | 100% |
| | 400 | 3.5m/s | 0% | 100% |
| | | 7.5m/s | 0% | 100% |
| | | 9.5m/s | 0% | 100% |
| | | 11.5m/s | 0% | 100% |

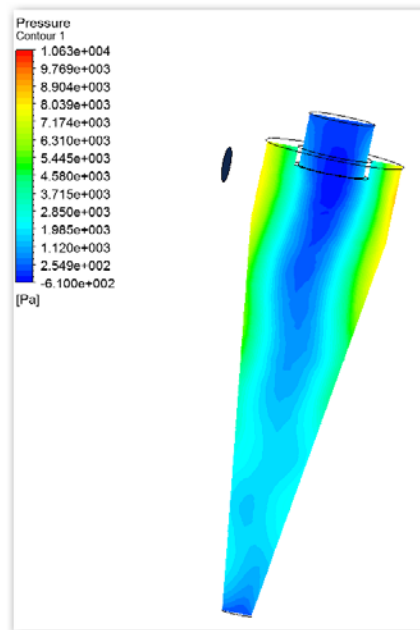


圖 5-24 漩流器內壓力分佈圖



圖 5-25 漩流器內顆粒軌跡圖



5-5-3 水力漩流器分離試驗

將此水力漩流器應用於模廠顆粒分離，使用某模廠設備進行試驗，以 3.5m/s 入口流速進行試驗分離，結果如圖 5-26 所示。

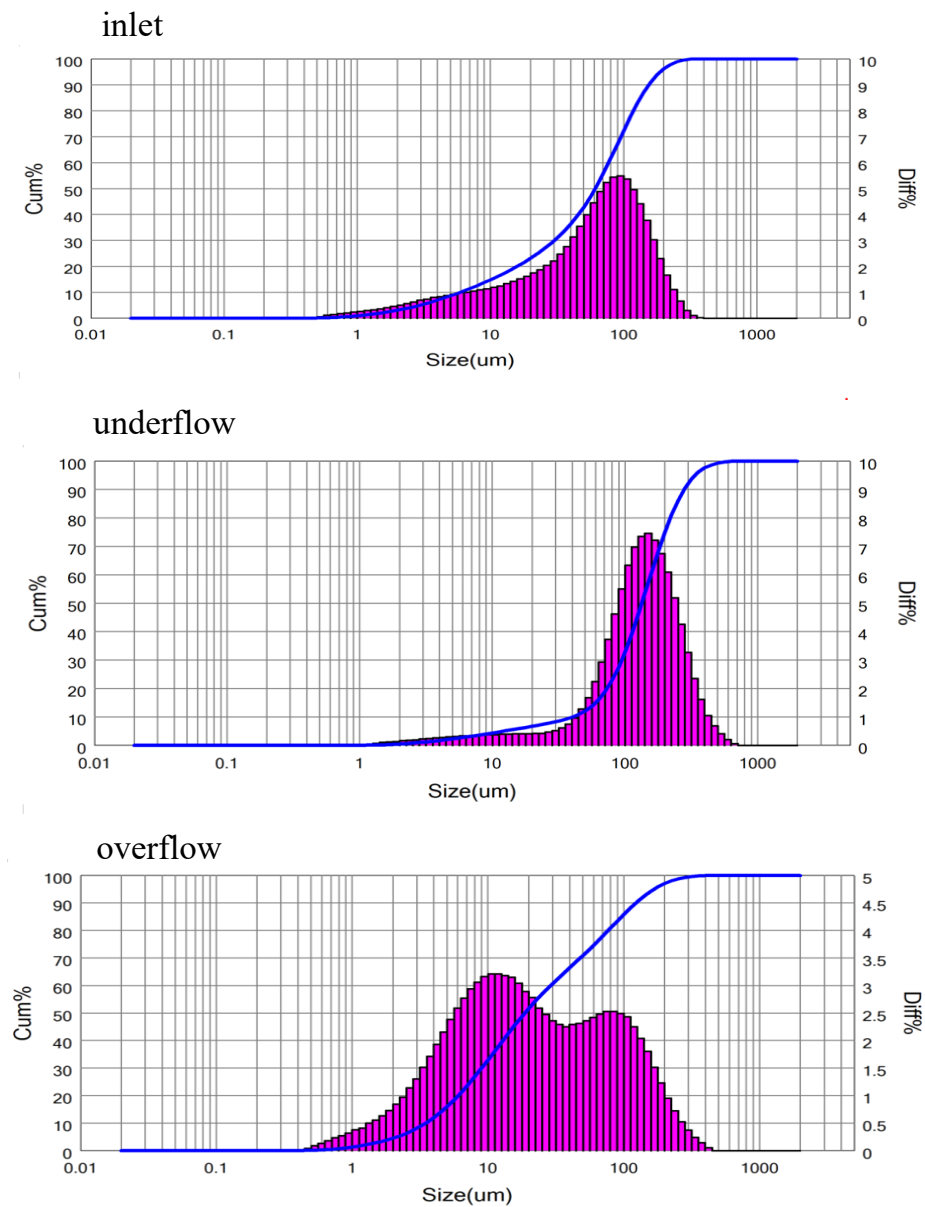


圖 5-26 模廠土壤經水力漩流處理之雷射粒徑分析圖



以 underflow stream 顆粒而言， $63\mu\text{m}$ 以下佔 15.9%、 $63\mu\text{m}$ 以上佔 84.1%；overflow stream 顆粒中 $63\mu\text{m}$ 以下佔 75.7%、 $63\mu\text{m}$ 以上佔 24.3%。搭配 TPH 分析可知，原本油污染土壤 TPH 6,071 mg/kg，經模廠流程處理，underflow TPH 415 mg/kg、overflow TPH 1,241 mg/kg。由雷射粒徑分析圖中可發現，overflow(應為細顆粒土壤)中仍帶有部分粗顆粒土壤。經觀察水力漩流(Hydrocyclone)分離系統處理含油顆粒土壤時，成效未如預期原因可能為：

1. 土壤顆粒未完全攪拌。攪拌槽因槳板轉速、扭力不足，容易造成顆粒沉澱不均勻現象。因此抽送至水力漩流器時，造成顆粒分離效果變差。
2. 漩流器尺寸或操作條件仍有提升改善空間。依據圖 5-26 overflow 顆粒中仍夾帶粗顆粒， $63\mu\text{m}$ 以下佔 75.7%、 $63\mu\text{m}$ 以上佔 24.3%，顯示流速可能不足。詢問模廠工程師，確實有流速不足情況，最大約僅達 3m/s，因泥沙泵馬力關係，經常流速僅為 2.5m/s 左右。後續或可藉由提升操作流速或者縮小漩流器尺寸來改善。



5-5-4 小結

成本效益分析：

水量消耗：

依據試驗設計為 3.5m/s 流速，水/泥比(liquid to solid ratio)=4
 $\pi * (0.075/2)^2 * 3.5 \text{ m/s} * 60 \text{ s/min} = 0.93 \text{ m}^3/\text{min}$

每分鐘可處理 0.93 m³ 泥漿，使用 830L 水量(可處理 210kg 乾泥)。

每小時可處理 $0.93 \text{ m}^3/\text{min} * 60 \text{ mins/hr} = 55.8 \text{ m}^3$ 泥漿。(含 12.6 公噸乾泥及 50 噸水)

每小時用水量 = 50m³ 水

未考慮回收水情況下，每小時花費=每度水 12.075 元*50m³= 603.8 元

電量消耗：

每小時電費 = 7.46 KW(泥水泵)/*(5.10*4/12+3.97*8/12)= 32.4 元

營業用夏月電價 6 月至 9 月 5.10 元/度

營業用非夏月電價 3.97 元/度

若以處理 1 萬噸乾泥、水/泥比(liquid to solid ratio)=4 計算，每小時處理能力 62.6 噸泥水，配置 1 支漩流管、1 部馬達。

1. 設備費：總計 680,000 元

(i) 漩流管 1 支 80,000 元

(ii) 馬達 1 部 100,000 元

(iii) 電磁式流量計裝 2 台 $48,000 * 2 = 96,000$ 元

(iv) 軟管閥件 20,000 元

(v) FLUNET 軟體租用 84,000/年

(vi) 攪拌槽、攪拌機、Silo 桶等 300,000 元

2. 水費 4 萬噸水*12.075 元/噸=483,000 元

3. 電費 (10000 噸/12.6 噸/小時)*32.4 元/小時=25,714 元

4. 平均每噸水力漩流處理費=(680,000+483,000+25,714)/10,000=118.9 元/噸乾土。

註 1:若考慮廢水處理，每噸廢水處理用約 30 元。

註 2: 若考慮機械磨損，水力漩流管約經 50,000 m³ 泥漿分離會磨損內壁，全新一支漩流管約新台幣 50,000-80,000 元。大量使用可考慮 PU 內襯。水力漩流組空間約 5m(W)*5m(L)*6m(H)即可



5-6 結論與建議

5-6-1 結論

(1) 本研究採集高、低 TPH 土壤，TPH test kit 測試數值分別為 17,310 mg/kg、1718 mg/kg。其土壤 pH 值分別為 7.51 ± 0.02 、 7.54 ± 0.02 ，屬中性-鹼性土壤。再經氣相層析儀/火焰離子化偵測器分析結果，高、低 TPH 油污染均屬 TPH_d，TPH 測試數值分別為 $>10,000$ mg/kg、3667 mg/kg。

(2) 非結晶型二氧化矽為中部某光電廠提供之研磨污泥。污泥經烘箱以 105°C 條件下烘乾 24 小時至恆重量測，含水率為 75.64%。再經毒性特性溶出程序(TCLP)試驗，可得 Ba 0.24 mg/l、Cu 4.69 mg/l，其餘 As、Cd、Cr、Cr⁶⁺、Hg、Pb、Se 均小於方法偵測極限測定值，非屬有害溶出特性。

(3) 對於高 TPH 油污染土壤，添加非結晶型二氧化矽對超音波震盪處理及擦洗處理非常重要，不同添加比例(1:200、1:100、1:50)均對 TPH 去除有所正面幫助。

茲將超音波震盪處理最佳條件整理如下：

- a. 高氧水當試劑水，非結晶型二氧化矽添加比例 1:100、反應 30 分鐘，得最佳去除率 72.7%。
- b. 自來水當試劑水，非結晶型二氧化矽添加比例 1:50、反應 5 分鐘，得最佳去除率 74.2%。

茲將擦洗處理最佳條件整理如下：

- c. 高氧水當試劑水，非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 5 分鐘，得最佳去除率 62.0%。該條件下，反應時間 30 分鐘，去除率 60.0% 亦佳。
- d. 自來水當試劑水，非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 30 分鐘，得最佳去除率 71.5%。

高氧水使用與否，對 TPH 去除無明顯差異。

(4)處理低 TPH 油污染土壤時，使用高氧水情況下，添加/未添加非結晶型二氧化矽效果無明顯差異；在使用自來水情況下，添加非結晶型二氧化矽效果略勝於未添加。

茲將超音波震盪處理最佳條件整理如下：

- a. 高氧水當試劑水，非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 30 分鐘，得最佳去除率 70.7%。



第五章

- b. 自來水當試劑水，非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 30 分鐘，得最佳去除率 74.9%。

茲將擦洗處理最佳條件整理如下：

- c. 高氧水當試劑水，非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 30 分鐘，得最佳去除率 79.0%。
- d. 自來水當試劑水，非結晶型二氧化矽添加比例 1:100、反應 10 分鐘，得最佳去除率 77.0%。非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 30 分鐘，得第二佳去除率 76.7%。

對低 TPH 油污染土壤處理，非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 30 分鐘對超音波震盪處理及擦洗處理為較合適之條件。

(5)水力漩流情境模擬，粒徑愈小在上方出口的比率愈高，下方出口則對 200 μm 以上的粒徑，具有 100%的分離率。其中，模擬入流速度以 3.5m/s 對細顆粒分離效果較佳。實際漩流後，underflow stream 顆粒而言，63 μm 以下佔 15.9%、63 μm 以上佔 84.1%；overflow stream 顆粒中(應為細粒土壤)63 μm 以下佔 75.7%、63 μm 以上佔 24.3%，仍帶有部分粗顆粒土壤，原因可能是模廠泥水泵馬力不夠，導致流速不足。

(6)初估超音波震盪處理(未考慮設備費，單純考量材料費及水電費)，使用高氧水情況下，每噸土壤處理成本 24.15+23.24+97.9=145.3 元；若使用自來水則為 24.15+97.9=122.1 元。

擦洗每噸土壤處理成本 71.8 元(使用高氧水)；若使用自來水(不用高氧水)，則每噸土壤處理成本為 48.5 元(未考慮設備費，單純考量材料費及水電費)。

水力漩流平均每噸處理費 118.9 元/噸乾土(含設備費)。

5-6-2 建議

- (1) 本研究使用設備多，反應參數多，花費許多時間、經費於系統建置、試驗分析。建議未來能延續研究期程，使整個研究更趨完整，也更貼近實廠需求。
- (2) 經觀察水力漩流(Hydrocyclone)分離系統處理含油顆粒土壤時，土壤顆粒未完全攪拌，應改善攪拌裝置。流速不足部分，則建議後續提升操作流速或者縮小漩流器尺寸來改善。
- (3) 進行專利佈局，保護智慧財產並活絡土水產業。



參考文獻

Bergström, J., 2006. Flow Field and Fibre Fractionation Studies in Hydrocyclones, Ph. D. dissertation, Royal Institute of Technology School of Chemical Science and Engineering, Sweden.

CL:AIRE technical bulletin, 2007, Understanding soil washing.

Detzner, H. D., Schramm, W., Döring, U. and Bode, W., 1998. New technology of mechanical treatment of dredged material from Hamburg harbour, Water Science & Technology, 37 (6-7), 337-343.

Detzner, H.D., 1995. The Hamburg project METHA: Large scale separation, dewatering, and reuse of polluted sediments, Europ. Water Pollut. Contr. 5(5), 38-42.

Feng, D., Lorenzen, L., Aldrich, C., Mare, P.W., 2001. Ex situ diesel contaminated soil washing with mechanical methods. Mineral Engineering, 14, 1093-1100.

Mainza, A., Powell, M.S., and Knopjes, B., 2004. A comparison of different cyclones in addressing challenges in the classification of the dual density UG2 platinum ore. International Platinum Conference 'Platinum Adding Value', The South African Institute of Mining and Metallurgy, 95-102.

Mann, M.J. 1999. Full-scale and pilotscale soil washing, Journal of Hazardous Materials, 66, 119-136.

Narasimha, M., Sripriya, R. and Banerjee, P.K., 2005. CFD modelling of hydrocyclone - prediction of cut size, International Journal of the Mineral Processing, 75, 53-68.

Petavy, F., Rubana, V., Conil, P., 2009. Treatment of stormwater sediments: Efficiency of an attrition scrubber - laboratory and pilot-scale studies, Chemical Engineering Journal, 145, 475-482.

Strazišar, J., Sešelj, A., 1999. Attrition as a process of comminution and separation. Powder Technology, 105, 205-209.



台超萃取洗淨精機股份有限公司，2018。<http://www.tst.tw/index.php>。

吳弘任(2012)，焚化底渣洗選及資源化之研究，國立臺北科技大學資源工程研究所碩士論文。

吳弘任、鄭大偉，2012。擦洗技術應用於焚化底渣除氯之研究，2012 清潔生產暨環保技術研討會，經濟部工業局。

吳采芳，2012。超音波結合芬頓程序處理廢水中難分解有機物：以化工廠廢水為例。國立交通大學環境工程研究所碩士論文。

吳堅，2016。中殼潤滑油廠關廠與因應，煉製研究所。

<https://new.cpc.com.tw/division/lb/knowledge-text.aspx?ID=55>

李瑪麗，2008。溶气气浮的分类及设计原理。

news.tgnet.com/Detail/200804152189928653_2/ 黃亮順，2010。擦洗技術應用於廢污中重金屬分離之研究，國立成功大學環境工程學系碩士論文。

周志豪，2011。複合式土壤整治技術綜合執行土壤整治之案例分析探討，社團法人台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第 39 期。

夏國芳、林金魁、陳財福、洪崑曉、高志明，2018。以電催化水處理受重油污染土壤之研究：機制及效益評估，中華民國環境工程學會 2018 土壤與地下水研討會。

徐敬添、張義和、簡維誼、蔡書雅，2001。奈米微分散技術與材料應用，應用奈米材料技術-國內研究與應用簡輯，工業材料。

高志明，2005。應用整合型復育技術處理受燃料油污染之土壤及地下水，行政院環境保護署委託研究計畫。

張美玲、廖以瑄、莊玉雯，2017。桃園市大學校院產業環保技術服務團環保簡訊，第 37 期。

張益國、徐一量、鄭文良、劉原宏、張裕棋、洪振瑋、盧幸成，2016。中華民國發明專利，第 I549764 號，機動式分離含重金屬之土壤顆粒處理方法 (2016.09-2035.06)。

張尊國，2002。張尊國，台灣地區土壤污染現況與整治政策分析，財團法人



機械/化學方式處理分離油污染土壤

國家政策研究基金會，永續（析） 091-021 號。

南投縣政府環境保護局，2017。南投縣政府環境保護局委託辦理 105 年度南投縣土壤及地下水污染調查及查證工作計畫報告書，富立業工程顧問股份有限公司。

望熙榮，1998。空氣污染防制，中央圖書出版社。

黃亮順，2009。擦洗技術應用於廢污中重金屬分離之研究，國立成功大學環境工程學系碩士論文。

黃智、吳勇興、林淑滿、鐘裕仁，2011。土壤清洗技術於土壤污染整治應用，中興工程季刊，第 110 期，pp. 53-61。

經濟部工業局，2003。工廠土壤及地下水污染整治技術手冊－石化業。

維基百科，2019。

<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%B6%85%E8%81%B2%E6%B3%A2&variant=zh-hant>

蘇紹瑋、陳尊賢，2008。土壤清洗法整治重金屬污染土壤國內外最新研究與整治案例之回顧，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊。



**行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案**

108 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：108 年 12 月 16 日

| | | | |
|--------|--|-------|--|
| 案性質 | <input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質 | 專案類別 | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 研究主題 | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他 | | |
| 申請機構系所 | 中臺科技大學環境與安全衛生工程系 | 專案主持人 | 張益國 |
| 專案名稱 | 機械/化學方式處理分離油污染土壤 | | |
| 專案執行期程 | <input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末 | | |

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

| 項目 | | 目標達成程度 | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 期末 達成數 | 結案後半年 達成率 | 備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱) |
|----------------------------------|------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------------------------|
| A 學術 產 出 及 活 動 | 1.國內投稿 (篇數) | (1)論文 | | | | | |
| | | (2)研討會論文 | | | | | |
| | 2.國外投稿 (篇數) | (1)期刊論文 | | | | | |
| | | (2)研討會論文 | 1 | 1 | 1 | | CESE2019 |
| | 3.報告 (篇數) | (1)技術報告 | | | | | |
| | | (2)研究報告 | 1 | 0 | 1 | | |
| | 4.專著 (本數) | | | | | | |
| | 5.辦理學術 會議(場數) | (1)研討/說明會 | | | | | |
| | | (2)成果發表會 | | | | | |
| | | (3)論壇 | | | | | |
| B 人 才 培 育 | 6.研發改良 技術(項數) | (1)已開發技術 | | | | | |
| | | (2)技術平台 | | | | | |
| | 7.研發人員 (人數) | (1)碩士 | 2 | 2 | 2 | | |
| | | (2)博士 | | | | | |
| | 8.研究團隊 (個數) | (1)跨領域團隊 | 1 | 1 | 1 | | 航太流體 |
| | | (2)跨機構團隊 | | | | | |
| | | (3)形成研究中 心 | | | | | |
| | | (4)形成實驗室 | | | | | |



| <div> <div>目標達成程度</div> <div>項目</div> </div> | | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 期末 達成數 | 結案後半年 達成率 | 備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱) |
|--|-------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------------------------|
| 9.其他指標 (請自行命名) | (請自填) | | | | | |



(二) 產業面

| 目標達成程度 | | | | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 期末 達成數 | 結案後半年 達成率 | 備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料) |
|-------------|------------------|-------------|-------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------------------------------------|
| 項目 | | | | | | | | |
| A 智慧財產權 | 1.專利 (件數) | 已 核 准 | 發明 | | | | | |
| | | | 新型/設計 | | | | | |
| | | | 合計 | | | | | |
| | | 申 請 中 | 發明 | | | 1 | | 已委請承洋專利事務所進行申請程序 |
| | | | 新型/設計 | 1 | 0 | 0 | | |
| | | | 合計 | | | | | |
| B 研發技術轉移 | 2.先期技術 成果移轉 | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 3.技術移轉 (專利) | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 4.技術移轉 (應用技術) | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 5.可移轉 產業技術 | (1)技術(件數) | | 1 | 0 | 1 | | |
| | | (2)品種/系(件數) | | | | | | |
| C 產學研合作 | 6.促成合作 研究 | 件數 | | | | | | |
| | | 金額(仟元) | | | | | | |
| | 7.促成投資 | 件數 | | | | | | |
| | | 投資金額(仟元) | | | | | | |
| | 8.促成取得 業界科專 | 件數 | | | | | | |
| | | 業界投資金額(仟元) | | | | | | |



| 項目 \ 目標達成程度 | | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 期末 達成數 | 結案後半年 達成率 | 備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料) |
|-------------------|-------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------------------------------------|
| 9.其他指標 (請自行命名) | (請自填) | | | | | |

(三) 政策面

| 項目 \ 目標達成程度 | | | 申請預 估數 | 期中 達成數 | 期末 達成數 | 結案後半年 達成率 | 備註 (說明未達成原因 或 其他詳細資料) |
|-----------------------|------------------|--------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------------|
| A 服 務 便 民 | 1.技術服務 | 次數 | | | | | |
| | | 收入(仟元) | | | | | |
| | 2.諮詢服務 | 次數 | | | | | |
| | | 收入(仟元) | | | | | |
| B 支 援 合 作 | 3.協助政府制定 (件數) | (1)政策 | | | | | |
| | | (2)法規 | | | | | |
| | | (3)規範 | | | | | |
| | | (4)標準 | | | | | |
| D 社 會 效 益 | 4.獲得認證(件數) | | | | | | |
| | 5.獲得獎項(件數) | | | | | | |
| | 6.提升能源效率(%) | | | | | | |
| | 7.節能減碳效率(%) | | | | | | |
| 8.其他指標 (請自行命名) | | (請自填) | | | | | |



三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500 字為限）

學術成就：將投稿國際(或國內)研討會：1 篇、申請專利：1 篇。

技術創新：將受油污染土壤經淨化處理後，提供土壤(部分)再利用回歸土地環境機會。主要技術包含：

(1)以機械方式(擦洗技術、超音波震盪)摩擦撞擊油污染顆粒，使油污團聚物打散，或者將顆粒表層油膜切除，並討論添加(w/)/未添加(w/o)非結晶型二氧化矽當介質之效果；

(2)輔以高氧水氧化降解/微泡浮除將油污與顆粒分離。監測分析水中 TOC 變化、土壤顆粒 TPH 變化，解析 TPH 於固相、液相轉移，評估機械/化學方式處理效能。

(3)分析 TPH 濃集於細粒徑顆粒之尺寸，或者粗顆粒是否 TPH 已低於 1,000 mg/kg 以下。客制化水力漩流器，應用分離粗細顆粒，達成大粒徑的土壤顆粒經分離後，因不含或只含微量污染物而可逕行回填或再利用使用。可增加土壤回用比例，達成污染物處理減容效果。

經濟效益：臺灣目前污染土壤處理可選擇方式為熱處理（非焚化）、固化與掩埋；再利用方式則多採輕質骨材與營建材料的製作或作為水泥製程之摻配料，惟製成骨材再利用時常面對產品去化問題。然以環境永續角度的思維，在技術層次如何增加污染土壤合理再利用或完成處理後回歸環境之比例，應該被更深入的思考與檢討，期能達到土壤資源永續之目標。因此，本研究應用機械/化學方式處理分離油污染土壤，提供原受油污染土壤經淨化後，(部分)再利用機會，屬環境友善性。

社會影響：提高社會觀感與信任。並可輸出機械/化學方式處理分離油污染土壤系統客制化設計、製作技術，協助鄰近國家處理受油污染土壤。



計畫單位回覆行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

108 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

■申請計畫書 期中報告 審查意見回覆對照表
期末報告

| | | | |
|---|----------------------|---|----------------|
| 計畫年度 | 108 年度 | 計畫類型 | ■ 研究型 □ 模場型 |
| 計畫類別 | ■ 整治 □ 調查 □ 其他 | | 主持人：張益國 |
| 計畫名稱 | 機械/化學方式處理分離油污染土壤 | | |
| 委員審查意見 | | 計畫單位回覆 | |
| <u>委員一：</u> 1. 建議試驗不同濃度污染土壤及不同粒徑之土壤進行比對結果。 2. 建議進行成本效益評估。 | | <u>回覆情況：</u> 1. 謝謝委員建議。以 TPH 10,000mg/kg 當分界點，將採取高、低濃度濃度污染土壤進行後續試驗。粒徑部分則依現場情況，採取質地差異大的進行實驗。 2. 謝謝委員建議。將於計畫執行後期評估成本效益。 <u>回覆情況：</u> 1. 原則上不需要額外添加藥劑。高氧微泡注入攪拌槽後，氣泡會持續往上升，應有足夠浮力供應浮除。惟若考慮增強油污分離效果，添加藥劑是好的選擇，研究過程將視浮除情況選擇添加與否(可能添加六偏磷酸鈉或其他浮除劑)。 2. 謝謝委員建議。將單獨試驗超音波震盪及機械碰撞研磨效果，再串聯進行混合使用綜效評估，再次謝謝委員。 3. 本研究使用之 CMP 非晶質二氧化矽來自於沉澱池，已經固液分離。 4. 報告委員，實際使用上高氧水初產時溶氧濃度可高達 35~40mg/l 以上，且經過 72 小時靜置，高氧水溶氧量仍高達 19.5~24.1 mg/l。實際使用時，反應處理時間短，故所提供之高氧水應能維持 20mg/l 以上。 | |
| <u>委員二：</u> 1. 以高氧微泡水注入攪拌槽，如何達到浮除的目的，是否需要添加藥劑才有浮除的效果。 2. 建議分別評估超音波震盪及機械碰撞研磨的效果，再進行評估混合使用兩種作法所能產生的綜效。 3. 本研究所擬使用之 CMP 非晶質二氧化矽是否有經過固液分離。 4. 本研究擬使用高氧水設備產生高溶氧，請補充說明實際使用時的氧濃度是否可以維持高氧的濃度。 | | | |



附件一

| | |
|--|--|
| <p>5. 本研究所擬處理中之土壤 TPH 目前介於 5,000~7,000ppm，建議補充說明處理後所擬達到之 TPH 含量。</p> <p><u>委員三：</u></p> <p>1. 添加 SiO₂，高氧微泡水在不同油品及濃度其添加參數宜考量。另後續廢水以生物處理可處理？亦需評估處水處理。</p> <p>2. 建議以不同質地油品污染作試驗，以評估分離效能。</p> <p><u>委員四：</u></p> <p>1. 主持人的學術研究能力與土水污染技術發展能力均佳，其專業能力足以勝任本計畫。主持人近五年研究與土水污染技術發展績效亦佳。</p> <p>2. 本計畫執行團隊的學術研究能力與土水污染技術發展能力佳，其研發能力足以勝任本研究計畫。本計畫執行團隊近五年執行與土水污染相關計畫的執行績效佳。</p> <p>3. 本計畫的執行對國內未來土壤及地下水污染調查及整治工作推動有其貢獻，但工程實務應用的可行性仍待實場執行成效的驗證。</p> <p>4. 依申請計畫書內所提出的成果績效自評表可推估本專案所預估的執行成果對國內土水污染的技術研發有其貢獻。</p> <p>5. 本計畫書撰寫具體，計畫書中對研究方法的說明具可行性。但計畫執行成果對未來土水污染的實場實務應用成效仍待實際執行成果的驗證。建議將已有部分實場操作上仍待改進之處略加說明。</p> | <p>5. 初步目標設定在 1,000mg/kg 以下，最好低於 800mg/kg，這樣比較符合現地使用。</p> <p><u>回覆情況：</u></p> <p>1. 謝謝委員提醒，將考量不同情況油污染情況，添加不同濃度。目前廢水處理上，原本設定處理目標所納排的高廠廢水處理設施持續運作中，因此廢水可併入處理。前期拜訪時，亦討論此問題，高氧水可能還可帶給生物處理更好的反應條件(廢水溶氧提高)。惟若是處理其他個別的油污染土地，則必須考慮廢水處理問題。</p> <p>2. 謝謝委員建議。將評估不同質地油品污染土壤，了解其對分離效能之影響。</p> <p><u>回覆情況：</u></p> <p>1. 謝謝委員肯定。</p> <p>2. 謝謝委員。</p> <p>3. 期待能實廠應用，做出貢獻。</p> <p>4. 謝謝委員。</p> <p>5. 謝謝委員建議。部分實場操作上可改進之處補充說明於申請計畫書 3-2 節，敬請委員參閱。</p> <p>該段文字摘錄如下「目前已有實場作業以攪拌搭配水力分選分離方式分離油污染土壤，攪拌效果良好可使顆粒懸浮，但若加入機械碰撞作用，應更能提升顆粒分離效能。後續水力分選可分離細顆粒(75 μm)油污染土壤，原預期粗顆粒土壤 TPH 含量低，但因為有細顆粒與油團聚成較粗顆粒、粗細顆粒外層包覆油膜(如圖 3-3)現象，所以有些粗顆粒土壤 TPH 含量仍高。」</p> |
|--|--|



| <p>6. 本計畫書中對相關文獻蒐集尚完整。計畫主持人對國內外本研究領域現況了解。</p> <p>7. 本計畫書所規畫之執行期限合理，本計畫書對預期成果已有適當的說明。</p> <p>8. 本計畫屬於延續性計畫，主持人已將所執行過計畫的研發成果彙整，並已有相關的論文發表，並已獲得專利。</p> <p>9. 本計畫書已將原初審意見加以說明(或修正)。</p> | <p>6. 謝謝委員。</p> <p>7. 謝謝委員。</p> <p>8. 謝謝委員肯定。</p> <p>9. 是。</p> |
|---|--|
| 本署審查意見 | 計畫單位回覆 |
| 無 | 研究團隊將更加努力，朝實廠應用目標邁進 |



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒申請計畫書 ☐期中報告 構想書階段審查意見
☐修正計畫書 ☐期末報告 回覆對照表

| | | | |
|---|--|--|--|
| 計畫年度 | 108 年度 | 計畫類型 | <input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗 |
| 計畫類別 | <input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他 | | 主持人：張益國 |
| 計畫名稱 | 機械/化學方式處理分離油污染土壤 | | |
| 委員審查意見 | | 計畫單位回覆 | |
| <u>委員一：</u> 1. 本計畫利用研磨廢水中的非結晶型二氧化矽，來將油污染表面碰撞反應，將油污打散後，而後續二氧化矽是否會有吸附油膜，請說明。 2. 處理後之廢水處理請說明。 | | <u>回覆情況：</u> 1. 感謝委員意見。以目前前期自行測試，採集到 TPH 5000~7000 mg/kg 油污染土壤，用非結晶型二氧化矽機械方式處理後，非結晶型二氧化矽並未明顯吸附油膜。當然，高濃度 TPH 土壤尚未採樣測試，性質應更黏稠，後續影響進一步研究釐清。 2. 若以研究目標-南部某關廠石化業廠而言，目前規劃經處理後廢水併入該廠廢水場操作(持續運作中)。 | |
| <u>委員二：</u> 1. 本案構想擬以半導體製程之 CMP 研磨所使用之二氧化矽作為機械研磨的介質。建議補充說明研磨時是否添加其他化學物質，以提升去除效果。 2. 請補充說明添加此介質的必要性。一般而言，土壤的自然研磨應可達到相同的效果。 | | <u>回覆情況：</u> 1. 報告委員，目前尚未規劃添加其他化學物質(或許六偏磷酸鈉為可行之添加物)。因考量後續土壤回用，盡量不外加物質。因此多以機械方式、高氧微泡方式處理。 2. 考量受油污染土壤顆粒表面包覆油膜，自體碰撞效果可能效果受一些限制。因此，添加質地堅硬之結晶型二氧化矽。實驗規劃添加(w)/ | |



3. 建議補充說明本案所提之高氧微泡水注入攪拌槽中所指的高氧濃度，及如何達到高氧效果。

- 未添加(w/o)非結晶型二氧化矽當介質，討論自體研磨、添加非結晶型二氧化矽協助研磨之效果。
3. 謝謝委員建議，補充說明本研究高氧微泡水產生機制於申請書3-4及4-2-2 節中。新鮮高氧水 35~40 mg/l 溶氧，且經過 72 小時靜置，高氧水溶氧量仍高達 19.5~24.1 mg/l)，後續利用反應噴嘴進出口流體的流量與壓力變化產生真空吸引力，將液體或氣體吸入與管線內流體混合，利用噴出時之剪切力與噴出後與器壁之碰撞力產生高氧微泡水。注入攪拌槽的高氧濃度在 20mg/l 以上。

| 時間 | 風壓 | 土壓 |
|-------|------|------|
| 10:00 | 0.15 | 0.15 |
| 10:05 | 0.16 | 0.16 |
| 10:10 | 0.17 | 0.17 |
| 10:15 | 0.18 | 0.18 |
| 10:20 | 0.19 | 0.19 |
| 10:25 | 0.20 | 0.20 |
| 10:30 | 0.21 | 0.21 |
| 10:35 | 0.22 | 0.22 |
| 10:40 | 0.23 | 0.23 |
| 10:45 | 0.24 | 0.24 |
| 10:50 | 0.25 | 0.25 |
| 10:55 | 0.26 | 0.26 |
| 11:00 | 0.27 | 0.27 |
| 11:05 | 0.28 | 0.28 |
| 11:10 | 0.29 | 0.29 |
| 11:15 | 0.30 | 0.30 |
| 11:20 | 0.31 | 0.31 |
| 11:25 | 0.32 | 0.32 |
| 11:30 | 0.33 | 0.33 |
| 11:35 | 0.34 | 0.34 |
| 11:40 | 0.35 | 0.35 |
| 11:45 | 0.36 | 0.36 |
| 11:50 | 0.37 | 0.37 |
| 11:55 | 0.38 | 0.38 |
| 12:00 | 0.39 | 0.39 |
| 12:05 | 0.40 | 0.40 |
| 12:10 | 0.41 | 0.41 |
| 12:15 | 0.42 | 0.42 |
| 12:20 | 0.43 | 0.43 |
| 12:25 | 0.44 | 0.44 |
| 12:30 | 0.45 | 0.45 |
| 12:35 | 0.46 | 0.46 |
| 12:40 | 0.47 | 0.47 |
| 12:45 | 0.48 | 0.48 |
| 12:50 | 0.49 | 0.49 |
| 12:55 | 0.50 | 0.50 |
| 13:00 | 0.51 | 0.51 |
| 13:05 | 0.52 | 0.52 |
| 13:10 | 0.53 | 0.53 |
| 13:15 | 0.54 | 0.54 |
| 13:20 | 0.55 | 0.55 |
| 13:25 | 0.56 | 0.56 |
| 13:30 | 0.57 | 0.57 |
| 13:35 | 0.58 | 0.58 |
| 13:40 | 0.59 | 0.59 |
| 13:45 | 0.60 | 0.60 |
| 13:50 | 0.61 | 0.61 |
| 13:55 | 0.62 | 0.62 |
| 14:00 | 0.63 | 0.63 |
| 14:05 | 0.64 | 0.64 |
| 14:10 | 0.65 | 0.65 |
| 14:15 | 0.66 | 0.66 |
| 14:20 | 0.67 | 0.67 |
| 14:25 | 0.68 | 0.68 |
| 14:30 | 0.69 | 0.69 |
| 14:35 | 0.70 | 0.70 |
| 14:40 | 0.71 | 0.71 |
| 14:45 | 0.72 | 0.72 |
| 14:50 | 0.73 | 0.73 |
| 14:55 | 0.74 | 0.74 |
| 15:00 | 0.75 | 0.75 |
| 15:05 | 0.76 | 0.76 |
| 15:10 | 0.77 | 0.77 |
| 15:15 | 0.78 | 0.78 |
| 15:20 | 0.79 | 0.79 |
| 15:25 | 0.80 | 0.80 |
| 15:30 | 0.81 | 0.81 |
| 15:35 | 0.82 | 0.82 |
| 15:40 | 0.83 | 0.83 |
| 15:45 | 0.84 | 0.84 |
| 15:50 | 0.85 | 0.85 |
| 15:55 | 0.86 | 0.86 |
| 16:00 | 0.87 | 0.87 |
| 16:05 | 0.88 | 0.88 |
| 16:10 | 0.89 | 0.89 |
| 16:15 | 0.90 | 0.90 |
| 16:20 | 0.91 | 0.91 |
| 16:25 | 0.92 | 0.92 |
| 16:30 | 0.93 | 0.93 |
| 16:35 | 0.94 | 0.94 |
| 16:40 | 0.95 | 0.95 |
| 16:45 | 0.96 | 0.96 |
| 16:50 | 0.97 | 0.97 |
| 16:55 | 0.98 | 0.98 |
| 17:00 | 0.99 | 0.99 |
| 17:05 | 1.00 | 1.00 |
| 17:10 | 1.01 | 1.01 |
| 17:15 | 1.02 | 1.02 |
| 17:20 | 1.03 | 1.03 |
| 17:25 | 1.04 | 1.04 |
| 17:30 | 1.05 | 1.05 |
| 17:35 | 1.06 | 1.06 |
| 17:40 | 1.07 | 1.07 |
| 17:45 | 1.08 | 1.08 |
| 17:50 | 1.09 | 1.09 |
| 17:55 | 1.10 | 1.10 |
| 18:00 | 1.11 | 1.11 |
| 18:05 | 1.12 | 1.12 |
| 18:10 | 1.13 | 1.13 |
| 18:15 | 1.14 | 1.14 |
| 18:20 | 1.15 | 1.15 |
| 18:25 | 1.16 | 1.16 |
| 18:30 | 1.17 | 1.17 |
| 18:35 | 1.18 | 1.18 |
| 18:40 | 1.19 | 1.19 |
| 18:45 | 1.20 | 1.20 |
| 18:50 | 1.21 | 1.21 |
| 18:55 | 1.22 | 1.22 |
| 19:00 | 1.23 | 1.23 |
| 19:05 | 1.24 | 1.24 |
| 19:10 | 1.25 | 1.25 |
| 19:15 | 1.26 | 1.26 |
| 19:20 | 1.27 | 1.27 |
| 19:25 | 1.28 | 1.28 |
| 19:30 | 1.29 | 1.29 |
| 19:35 | 1.30 | 1.30 |
| 19:40 | 1.31 | 1.31 |
| 19:45 | 1.32 | 1.32 |
| 19:50 | 1.33 | 1.33 |
| 19:55 | 1.34 | 1.34 |
| 20:00 | 1.35 | 1.35 |
| 20:05 | 1.36 | 1.36 |
| 20:10 | 1.37 | 1.37 |
| 20:15 | 1.38 | 1.38 |
| 20:20 | 1.39 | 1.39 |
| 20:25 | 1.40 | 1.40 |
| 20:30 | 1.41 | 1.41 |
| 20:35 | 1.42 | 1.42 |
| 20:40 | 1.43 | 1.43 |
| 20:45 | 1.44 | 1.44 |
| 20:50 | 1.45 | 1.45 |
| 20:55 | 1.46 | 1.46 |
| 21:00 | 1.47 | 1.47 |
| 21:05 | 1.48 | 1.48 |
| 21:10 | 1.49 | 1.49 |
| 21:15 | 1.50 | 1.50 |
| 21:20 | 1.51 | 1.51 |
| 21:25 | 1.52 | 1.52 |
| 21:30 | 1.53 | 1.53 |
| 21:35 | 1.54 | 1.54 |
| 21:40 | 1.55 | 1.55 |
| 21:45 | 1.56 | 1.56 |
| 21:50 | 1.57 | 1.57 |
| 21:55 | 1.58 | 1.58 |
| 22:00 | 1.59 | 1.59 |
| 22:05 | 1.60 | 1.60 |
| 22:10 | 1.61 | 1.61 |
| 22:15 | 1.62 | 1.62 |
| 22:20 | 1.63 | 1.63 |
| 22:25 | 1.64 | 1.64 |
| 22:30 | 1.65 | 1.65 |
| 22:35 | 1.66 | 1.66 |
| 22:40 | 1.67 | 1.67 |
| 22:45 | 1.68 | 1.68 |
| 22:50 | 1.69 | 1.69 |
| 22:55 | 1.70 | 1.70 |
| 23:00 | 1.71 | 1.71 |
| 23:05 | 1.72 | 1.72 |
| 23:10 | 1.73 | 1.73 |
| 23:15 | 1.74 | 1.74 |
| 23:20 | 1.75 | 1.75 |
| 23:25 | 1.76 | 1.76 |
| 23:30 | 1.77 | 1.77 |
| 23:35 | 1.78 | 1.78 |
| 23:40 | 1.79 | 1.79 |
| 23:45 | 1.80 | 1.80 |
| 23:50 | 1.81 | 1.81 |
| 23:55 | 1.82 | 1.82 |
| 00:00 | 1.83 | 1.83 |
| 00:05 | 1.84 | 1.84 |
| 00:10 | 1.85 | 1.85 |
| 00:15 | 1.86 | 1.86 |
| 00:20 | 1.87 | 1.87 |
| 00:25 | 1.88 | 1.88 |
| 00:30 | 1.89 | 1.89 |
| 00:35 | 1.90 | 1.90 |
| 00:40 | 1.91 | 1.91 |
| 00:45 | 1.92 | 1.92 |
| 00:50 | 1.93 | 1.93 |
| 00:55 | 1.94 | 1.94 |
| 01:00 | 1.95 | 1.95 |
| 01:05 | 1.96 | 1.96 |
| 01:10 | 1.97 | 1.97 |
| 01:15 | 1.98 | 1.98 |
| 01:20 | 1.99 | 1.99 |
| 01:25 | 2.00 | 2.00 |
| 01:30 | 2.01 | 2.01 |
| 01:35 | 2.02 | 2.02 |
| 01:40 | 2.03 | 2.03 |
| 01:45 | 2.04 | 2.04 |
| 01:50 | 2.05 | 2.05 |
| 01:55 | 2.06 | 2.06 |
| 02:00 | 2.07 | 2.07 |
| 02:05 | 2.08 | 2.08 |
| 02:10 | 2.09 | 2.09 |
| 02:15 | 2.10 | 2.10 |
| 02:20 | 2.11 | 2.11 |
| 02:25 | 2.12 | 2.12 |
| 02:30 | 2.13 | 2.13 |
| 02:35 | 2.14 | 2.14 |
| 02:40 | 2.15 | 2.15 |
| 02:45 | 2.16 | 2.16 |
| 02:50 | 2.17 | 2.17 |
| 02:55 | 2.18 | 2.18 |
| 03:00 | 2.19 | 2.19 |
| 03:05 | 2.20 | 2.20 |
| 03:10 | 2.21 | 2.21 |
| 03:15 | 2.22 | 2.22 |
| 03:20 | 2.23 | 2.23 |
| 03:25 | 2.24 | 2.24 |
| 03:30 | 2.25 | 2.25 |
| 03:35 | 2.26 | 2.26 |
| 03:40 | 2.27 | 2.27 |
| 03:45 | 2.28 | 2.28 |
| 03:50 | 2.29 | 2.29 |
| 03:55 | 2.30 | 2.30 |
| 04:00 | 2.31 | 2.31 |
| 04:05 | 2.32 | 2.32 |
| 04:10 | 2.33 | 2.33 |
| 04:15 | 2.34 | 2.34 |
| 04:20 | 2.35 | 2.35 |
| 04:25 | 2.36 | 2.36 |
| 04:30 | 2.37 | 2.37 |
| 04:35 | 2.38 | 2.38 |
| 04:40 | 2.39 | 2.39 |
| 04:45 | 2.40 | 2.40 |
| 04:50 | 2.41 | 2.41 |
| 04:55 | 2.42 | 2.42 |
| 05:00 | 2.43 | 2.43 |
| 05:05 | 2.44 | 2.44 |
| 05:10 | 2.45 | 2.45 |
| 05:15 | 2.46 | 2.46 |
| 05:20 | 2.47 | 2.47 |
| 05:25 | 2.48 | 2.48 |
| 05:30 | 2.49 | 2.49 |
| 05:35 | 2.50 | 2.50 |
| 05:40 | 2.51 | 2.51 |
| 05:45 | 2.52 | 2.52 |
| 05:50 | 2.53 | 2.53 |
| 05:55 | 2.54 | 2.54 |
| 06:00 | 2.55 | 2.55 |
| 06:05 | 2.56 | 2.56 |
| 06:10 | 2.57 | 2.57 |
| 06:15 | 2.58 | 2.58 |
| 06:20 | 2.59 | 2.59 |
| 06:25 | 2.60 | 2.60 |
| 06:30 | 2.61 | 2.61 |
| 06:35 | 2.62 | 2.62 |
| 06:40 | 2.63 | 2.63 |
| 06:45 | 2.64 | 2.64 |
| 06:50 | 2.65 | 2.65 |
| 06:55 | 2.66 | 2.66 |
| 07:00 | 2.67 | 2.67 |
| 07:05 | 2.68 | 2.68 |
| 07:10 | 2.69 | 2.69 |
| 07:15 | 2.70 | 2.70 |
| 07:20 | 2.71 | 2.71 |
| 07:25 | 2.72 | 2.72 |
| 07:30 | 2.73 | 2.73 |
| 07:35 | 2.74 | 2.74 |
| 07:40 | 2.75 | 2.75 |
| 07:45 | 2.76 | 2.76 |
| 07:50 | 2.77 | 2.77 |
| 07:55 | 2.78 | 2.78 |
| 08:00 | 2.79 | 2.79 |
| 08:05 | 2.80 | 2.80 |
| 08:10 | 2.81 | 2.81 |
| 08:15 | 2.82 | 2.82 |
| 08:20 | 2.83 | 2.83 |
| 08:25 | 2.84 | 2.84 |
| 08:30 | 2.85 | 2.85 |
| 08:35 | 2.86 | 2.86 |
| 08:40 | 2.87 | 2.87 |
| 08:45 | 2.88 | 2.88 |
| 08:50 | 2.89 | 2.89 |
| 08:55 | 2.90 | 2.90 |
| 09:00 | 2.91 | 2.91 |
| 09:05 | 2.92 | 2.92 |
| 09:10 | 2.93 | 2.93 |
| 09:15 | 2.94 | 2.94 |
| 09:20 | 2.95 | 2.95 |
| 09:25 | 2.96 | 2.96 |
| 09:30 | 2.97 | 2.97 |
| 09:35 | 2.98 | 2.98 |
| 09:40 | 2.99 | 2.99 |
| 09:45 | 3.00 | 3.00 |
| 09:50 | 3.01 | 3.01 |
| 09:55 | 3.02 | 3.02 |
| 10:00 | 3.03 | 3.03 |
| 10:05 | 3.04 | 3.04 |
| 10:10 | 3.05 | 3.05 |
| 10:15 | 3.06 | 3.06 |
| 10:20 | 3.07 | 3.07 |
| 10:25 | 3.08 | 3.08 |
| 10:30 | 3.09 | 3.09 |
| 10:35 | 3.10 | 3.10 |
| 10:40 | 3.11 | 3.11 |
| 10:45 | 3.12 | 3.12 |
| 10:50 | 3.13 | 3.13 |
| 10:55 | 3.14 | 3.14 |
| 11:00 | 3.15 | 3.15 |
| 11:05 | 3.16 | 3.16 |
| 11:10 | 3.17 | 3.17 |
| 11:15 | 3.18 | 3.18 |
| 11:20 | 3.19 | 3.19 |
| 11:25 | 3.20 | 3.20 |
| 11:30 | 3.21 | 3.21 |
| 11:35 | 3.22 | 3.22 |
| 11:40 | 3.23 | 3.23 |
| 11:45 | 3.24 | 3.24 |
| 11:50 | 3.25 | 3.25 |
| 11:55 | 3.26 | 3 |



興趣，將採集南投重金屬場址土壤試驗。

委員四：

1. 本計畫為延續型計畫。

2. 計畫書中說明："...美國環保署 (USEPA) 則研究發現，大部分有機/無機污染物常附著於細小顆粒(如黏土及砂土)表面上，在此一情形下，則可利用物理分離技術，先將大顆粒物質先予分離，可大大?低待處理污染沉積物之體積。為達土壤減量目的，處理程序(如下圖所示)大多配有土壤分級程序，初步分離粗細(乾淨/受污染)土壤，達成減容目的..."，國內亦有水力分離(水洗)，水洗/界面活性劑，水洗/酸洗...等實務應用案例，其成敗在於水洗固液比、TPH 污染成分 (MW & Solu.)、污染齡、土壤質地、攪拌、震動、有機質、膠結...等等因子，本計畫能否由國內相關經驗中探討其限制因子，而加以評估，以提升成效?(即本計畫能否評估檢討既有技術的

回覆情況：

1. 報告委員，是。主要差別在於 107 年處理底泥，並進行水力漩流效能驗證。108 年度則機械/化學方式處理油污染土壤，後續再予以顆粒分離。

2. 申請人嘗試以水力漩流分選受油污染土壤顆粒(自行測試)，確實可分離出粗顆粒來。但卻也發現粗顆粒 TPH 濃度沒想像中低，有時超過 1000mg/kg。進一步影像觀察，發現有些粗顆粒是團聚物(由許多含油細顆粒所組成)、有些粗顆粒表面仍包覆油膜。因此，提出機械/化學方式處理油污染土壤，隨後才進行水力分離之研究架構。委員提出相關影響水洗之因子，包含水洗固液比、TPH 污染成分 (MW & Solu.)、污染齡、土壤質地、攪拌、震動、有機質、膠結...等等，本研究盡量蒐集資訊，尋找其操作因子，以提出既有技術限制。



缺失?)。

3. 計畫書中說明："…評估機械碰撞處理單元效能及合適操作參數，解析超音波震盪及擦洗技術對油污團聚物打散或顆粒外層油膜切除效能，以及評估化學氧化處理單元效能及合適操作參數…"，為達成前述目標，本計畫建議應先評估主持人已執行成果的適宜性與限制性，若已執行成果的限制性可由藥劑添加而加以改善，則本計畫有其意義。若前期成果的限制因子並非化學性因子，則本計畫的評估條件是否合適？

3. (已執行成果說明)107 年研究利用三維流場模擬軟體 FLUENT 進行水力漩流分離器流場模擬，歷經數十次模擬，得到可分離 $63\mu\text{m}$ 顆粒最佳模擬條件為：

(1)入口直徑 75mm(3inch)

(2)入口速度 4m/s

(3)底部出口直徑 33mm

(4)管徑 156mm

(5)下部管長 440mm

以此為設計基準，進行水力漩流器製作與後續驗證試驗。實驗結果顯示，台中灌溉渠道底泥小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒分離效率為 78.0%，僅略低於設計分離效率；高雄港浚泥小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒分離效率為 82.3%，接近設計分離效率。已執行成果主要進行底泥顆粒分離，並未探討其他處理處置方案。

惟自行測試以水力漩流分選受油污染土壤顆粒，確實可分離出粗顆粒來。但卻也發現粗顆粒 TPH 濃度有時超過標準。遂提出 108 年度機械/化學方式處理分離油污染土壤研究案，探討添加(w)/未添加(w/o)非結晶型二氧化矽當介質，利用超音波震盪及擦洗方式，讓非結晶型二氧化矽與含油土壤顆粒碰撞，達成顆粒分離效果(期望粒粒分明)。並輔以高氧微泡水破壞/氧化油污染土壤顆粒。最後客制化(或微調修改)水力漩流器，應用分離粗細顆



粒，達成大粒徑的土壤顆粒經分離後，因不含或只含微量污染物而可逕行回填或再利用使用，增加土壤回用比例，達成污染物處理減容效果。

回覆情況：

委員五：

1. 請補充說明生物與機械、化學方法之關聯性。

1. 本研究以機械方式(擦洗技術、超音波震盪)摩擦撞擊油污染顆粒，使油污團聚物打散，或者將顆粒表層油膜切除。再則輔以高氧水氧化降解/微泡浮除將油污與顆粒分離。期間，監測分析水中 TOC 變化、土壤顆粒 TPH 變化，解析 TPH 於固相、液相轉移，評估機械/化學方式處理效能。因處理流程使用高氧微泡水，水中溶氧高，建議可以生物處理方式進行廢水處理。目前規劃經處理後廢水併入該廠廢水場操作(廢水處理廠持續運作中)。

2. 非結晶型二氧化矽是否有油污殘留之現象產生。

2. 以自行研究採集到 TPH 5,000~7,000 mg/kg 油污染土壤，用非結晶型二氧化矽機械方式處理後，非結晶型二氧化矽並未明顯吸附油膜。

3. 本計畫測試土壤油污濃度及限制值為何？

3. 高濃度 TPH 土壤性質應更黏稠，更不易被機械/化學處理分離，因此研究規劃採集 $\text{TPH} < 10,000\text{mg/kg}$ 及 $\text{TPH} > 10,000\text{mg/kg}$ 兩種油污染土樣進行測試。期後續實驗進行，進一步研究釐清。



| | |
|--|--|
| | |
|--|--|



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告

☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

| | | | |
|--|--|--|--|
| 計畫年度 | 108 年度 | 計畫類型 | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別 | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它 | 主持人：張益國 NO：A6 | |
| 計畫名稱 | 機械/化學方式處理分離油污染土壤 | | |
| 委員審查意見 | | 計畫單位回覆 | |
| 委員一 1. 本計畫擬藉機械碰撞、化學氧化、客製化水力分離系統，搭接於現有土壤清洗技術單元上，期望貼近實場應用，發揮更大效能。 2. 108 年度專案成果績效自評表學術面成果大致符合，產業面請再努力達標。 3. 期中應完成南部某油污染土壤採樣及基本特性分析，以及機械碰撞試驗(超音波震盪、擦洗)，進度符合。 4. 未來仍需設定多項反應參數，比較擦洗與超音波震盪效果等，期待早日完成實場應用。 | | 委員意見回覆： 1. 謝謝委員肯定，研究繼續朝實場應用邁進。 2. 產業面將再努力，期能協助業界解決問題。 3. 謝謝委員。 4. 謝謝委員意見。期末報告將比較不同處理方式效能，提出成本效益評估。 | |
| 委員二 1. 非結晶型二氧化矽：油污染土壤=1：50 的效果不理想部分，後續請釐清。 2. 後續若有申請專利，請於期末報告說名。 3. 期末報告建議能有成本效益評估。 | | 委員意見回覆： 1. 非結晶型二氧化矽：油污染土壤=1：50 的效果不佳，後續找尋可能原因以釐清。 2. 預計將以研究題目「機械/化學方式處理分離油污染土壤」為主軸申請專利，待能蒐集更多研究成果，進行專利撰寫，並於申請專利前，發函貴署惠允。 3. 謝謝委員建議，將依委員意見辦理。 | |
| 委員三 1. 請補充前審查意見回覆表。 2. 本案構想擬以半導體製程之CMP研磨所 | | 委員意見回覆： 1. 謝謝委員意見。構想書階段、計畫申請階段審查意見回覆表如附件一，敬請委員參閱。 2. 謝謝委員建議。經毒性特性溶出程序 | |



| | |
|---|--|
| <p>使用之二氧化矽作為機械研磨的介質。表 5-4 有提供相關金屬元素之組成。建議補充說明其他化學物質。</p> <p>3. 圖 5-3 為靜置時氧濃度的變化。然而本案將進行進行超音波震盪，以處理 TPH，此過程是否會影響氧的溶解度。</p> <p>4. 表 5-5(高 TPH)，例如 1：200，反應時間 30 分鐘，TPH 殘留量 4283mg/kg。建議補充在沒有高氧水的情況下的空白實驗。</p> <p>5. 比較表 5-6(低 TPH，高氧水)與表 5-7(低 TPH，自來水)，似乎自來水的效果更佳。請補充說明。</p> | <p>(TCLP)試驗，可得 Ba 0.24 mg/l、Cu 4.69 mg/l，其餘 As、Cd、Cr、Cr⁶⁺、Hg、Pb、Se 均小於方法偵測極限測定值。將再洽詢半導體非結晶型二氧化矽提供公司，是否有加入其他化學物質，以補列分析提供委員參考。</p> <p>3. 研究期望用高氧水氧化能力化學分解油污；亦利用高氧水加超音波震盪，氣泡經超音波震盪爆破破壞油污附著，此過程應會影響溶氧程度。謝謝委員建議，將補充測試超音波對溶氧影響。</p> <p>4. 謝謝委員建議，將持續試驗沒有高氧水的情況下的效果。</p> <p>5. 謝謝委員意見，後續將一併比較高 TPH/低 TPH 油污染土壤，經高氧水/自來水試驗結果，以解析說明現象。</p> |
| <p>委員四</p> <p>1. 專案執行進度符合期程及工作內容。</p> <p>2. 建議宜以有、無添加高氧水作為添加劑，評估其去除效益及成本。</p> <p>3. 宜以目前執行成果及操作量能、設備、評估現場操作可行性與瓶頸。</p> <p>4. 相關技術是否能達新型專利申請宜評估之。</p> | <p>委員意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員肯定。</p> <p>2. 謝謝委員建議，期末報告將依委員意見進行去除效能及成本效益評估。</p> <p>3. 謝謝委員意見。後續將現場操作設備加入、現場操作可行性、操作量能、可能遭遇瓶頸等列入評估考量。</p> <p>4. 雖然擦洗、超音波震盪、高氧水等已為商用設備，經與承洋專利事務所洽談，將此流程整體規劃進行專利申請應可行。謝謝委員提醒與建議。</p> |
| <p>委員五</p> <p>1. P. 21、4-1-1 規劃使用濾篩進行粒徑分析，但 P. 27 的分析方法為乾篩，請確認。</p> <p>2. 圖 5-4 中高 TPH 油污染土壤經不同 SiO₂ 添加及反應時間之測試，結果變化無一致性的趨勢，是否/如何確認混合樣品的均勻性及代表性？</p> | <p>委員意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員指正。P. 21 為誤繕，本研究使用乾篩及雷射粒徑分析進行顆粒分布，將進行報告修正。</p> <p>2. 謝謝委員意見。為盡量減少誤差，研究使用高/低濃度油污染土壤經四分法分離後取樣，每批次以 100g±0.1g 土壤進行試驗，期減少樣品差異性。</p> |



附件一

| | |
|---|---|
| <p>3. 使用超音波的形式為何？槽體式功率低效果熱有限，棒式功率高但作用範圍小，應適當規劃考量及設計。</p> <p>4. 本方法額外導入 SiO_2 所產生的廢水將如何處理？需小心避免造成二次污染。</p> <p>5. 使用超音波及擦洗、水力漩流分離的均為高耗能方法，建議進行成本效益評估。</p> | <p>3. 以 DELTA 廠牌，40kHz，400W 槽體式超音波震盪機進行批次試驗。主要考量光電業(太陽能板製造)使用槽體式超音波震盪機，未來可設計連續處理。</p> <p>4. 謝謝委員提醒。所使用之非結晶型二氧化矽外觀像泥狀(含水率 75.64%，像濕的細沙或軟的石膏)，經乾燥後備用。研究過程所產生廢水，在學校實驗室目前排放至學校之實驗室廢水處理廠處理；未來如果在實場，將導入實場廢水處理系統，避免二次污染。謝謝委員關心指正。</p> <p>5. 謝謝委員建議，將依委員意見進行成本效益評估。</p> |
| <p>委員六</p> <p>1. 研究實驗過程中，是否有考量土壤、水等總量濃度平衡？請說明之，另實驗程序土水比率為何？</p> <p>2. 請說明實驗相關土壤及水（或泥），經實驗分離及檢測分析後，如何處理？</p> | <p>委員意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員意見。土壤進行 test kit TPH 測試，廢水部分將以總有機碳 TOC 測試。考量目前分析經費，約可規劃兩個水樣進行 TPH 測試，嘗試計算總量平衡濃度。另跟委員報告說明，實驗程序土水比率為 1:2。</p> <p>2. 實驗後相關土壤及泥，由本校環安中心委託合格機構清除處理。廢水部分，則由本校實驗室廢水處理廠處理。謝謝委員關心。</p> |
| <p style="text-align: right;">專案主持人： <u>張益國</u> (簽名及蓋章)</p> | |



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告

☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

| | | | |
|--|--|---|--|
| 計畫年度 | 108 年度 | 計畫類型 | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別 | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它 | 主持人：張益國 NO：A6 | |
| 計畫名稱 | 機械/化學方式處理分離油污染土壤 | | |
| 委員審查意見 | | 計畫單位回覆 | |
| 委員一 | | 委員意見回覆： | |
| 1. 試驗油污土壤為 TPHd 或 TPHg？ 2. 建議補述污染物分布於原土壤、二氧化矽？高氧水等分布百分率？ 3. 水力漩流操作參數是否依土壤質地、油品種類、濃度等差異相關操作時做的前處理(或評價)。 4. 建議評估機械磨損、耗能、空間處理量能可行性及實際大量操作瓶頸。 | | 1. 報告委員，經分析油污土壤，均為 TPH-d。 2. 油污染物 100%分布於原土壤；非結晶二氧化矽、高氧水、自來水等均未檢出。 3. 水力漩流器操作主要依土壤質地評估操作參數。油品種類及濃度等則視其附著於不同粒徑顆粒，選擇將欲分離顆粒之粒徑分開。 4. 目前經詢問設備商，超音波震盪主要機械磨損來自於槽體內壁不銹鋼。因為光電業超音波震盪槽無內壁磨損問題，本研究泥水處理部分，略估每 100,000m ³ 泥漿更換槽體內壁約新台幣 100,000 元。擦洗槽主要機械磨損是螺旋槳翼，10m ³ 擦洗槽約經 50,000m ³ 泥漿擦洗需更換槳翼，槳翼組 40,000 新台幣。水力漩流管約經 50,000 m ³ 泥漿分離會磨損內壁，全新一支漩流管約新台幣 50,000-80,000 元。大量使用可考慮 PU 內襯。空間上，超音波震盪處理所需空間約 2m(W)*10M(L)*2m(H)；擦洗槽所需空間約 5m(W)*5m(L)*6m(H)；水力漩流組空間約 5m(W)*5m(L)*6m(H)即可。補充說明於 5-3-6、5-4-5、5-5-4 各小結，煩請委員參閱。 實際大量操作瓶頸應在於超音波震盪 | |



| | |
|--|--|
| | 及擦洗槽所需時間；以及相對地若使用多組並聯處理，空間需求亦須納入考量。 |
| <p>委員二</p> <p>1. 本計畫以機械碰撞、化學氧化、水力分離三種方式處理分離油污染土壤，各小節各使用方法應有控制組的 TPH 去除率，以利比較使用該方法的有效性。</p> <p>2. 各實驗參數對 TPH 移除率的實驗結果均無穩定一致的趨勢變化(圖 5-5、5-9、5-10、5-11、5-14、5-15、5-18 及 5-19 等)例如圖 5-5 以高氧水+ SiO₂+超音波處理高 TPH 油污染土壤，每組結果比使用自來水差可能原因為何？圖 5-10 每組去除率為負值之原因？是否有任何重複實驗確認數據的穩定性與可信度？</p> | <p>委員意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員意見。機械碰撞試驗中(包含超音波震盪及擦洗實驗)，可用未無添加非結晶型二氧化矽當控制組進行比較，如表 5-5、表 5-6、表 5-7、表 5-8 等。在高 TPH 土壤處理上，添加非結晶型二氧化矽為重要之實驗條件，對超音波震盪及擦洗均是(如 5-3-6 小結(a)及 5-4-5 小結(a)所述)。</p> <p>以化學氧化而言，原本即設計自來水當控制組，但實驗結果顯示，高氧水及自來水差別並不顯著。</p> <p>水力漩流依據模擬結果以 3.5m/s 進行實驗，但現場操作流速僅達 2.5m/s 左右，未能符合設計條件要求，所以才可能出現分不開現象。預計後續將加大泥水泵馬力測試。</p> <p>2. 謝謝委員意見。從結論 5-6-1 (3)、5-6-1(4)，高氧水使用與否對高 TPH 去除無明顯差異。至於自來水去除率效果比高氧水好，猜測可能原因為油污染土壤經高氧水反應後，於乾燥階段採用風乾處理，此時顆粒表面自由水殘存含氧持續與顆粒表面油污作用。乾燥後，以 testkit 測濃度，得到較高濃度 TPH，因此 TPH 去除效果差。</p> <p>圖 5-10 去除率負值有可能如上述原因所造成。</p> <p>當初規劃利用 GC-FID 分析法與 testkit 方法比對。以四分法對高 TPH 油污染土壤進行分樣，經濁度法 TPH 測試所得濃度為 6,268±1,191 mg/kg。經土壤中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層</p> |

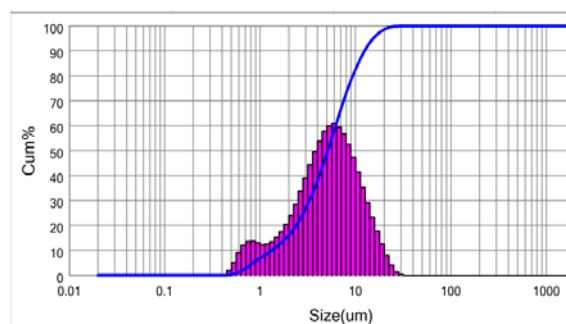


| | |
|--|---|
| <p>3. 考量擦洗式超音波的功率低及大分子 TPH 氧化降解所需時間長，或可增加二種處理方式的操作時間以提升對 TPH 的去除率。</p> <p>4. 圖 2-1 無法規劃各分區、P.4 及 P.7 需校訂排版。</p> | <p>析儀/火焰離子化偵測器法(GC-FID)分析計算，所得濃度為 6,148 mg/kg，與 testkit 所得 6,268 mg/kg 結果相近。</p> <p>另一組土壤 TPH 以 GC-FID 法測得 1,512 mg/kg；testkit 法測得 1,537 mg/kg。</p> <p>3. 謝謝委員建議。加長反應時間，應能對數據解釋更有幫助。</p> <p>4. 謝謝委員意見。圖 2-1 改彩色影印，各粒徑區可清楚呈現。P.4 重新排版、P.7 微幅調整。敬請委員校閱。</p> |
| <p>委員三</p> <p>1. 計畫實際進度符合預期進度。</p> <p>2. 計畫新增以「機械/化學方式處理分離油污染土壤」為主軸申請專利中。</p> <p>3. 建議將試驗的情形整理列出最佳的操作條件。</p> <p>4. 期末報告有新增成本效益評估，有關廢水處理成本是否宜一併納入，請參考。</p> | <p>委員意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員肯定。</p> <p>2. 報告委員，目前專利申請進度為內文已完成，學校用印中，也已函文行政院環境保護署。</p> <p>3. 謝謝委員建議。補充說明如 5-6-1 結論，敬請委員參閱。</p> <p>4. 謝謝委員意見。廢水處理成本每噸約 30 元。補充說明於 5-3-6、5-4-5、5-5-4 各小結註 1，煩請委員參閱。</p> |
| <p>委員四</p> <p>1. 含油顆粒土壤因油污與顆粒黏著，所以大小顆粒分不開。建議補充說明土壤表面的油污含量(試驗區 TPH 約 5,000 ~30,000mg/Kg)是否會影響除油的效果(本研究採用兩種油含量的依據)。</p> <p>2. 本研究將添加 CMP 研磨漿料之非結晶型二氧化矽當介質，利用超音波震盪及擦洗方式。建議確認 CMP 研磨漿料</p> | <p>委員意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員意見。利用物理超音波震盪、擦洗再加上非結晶型二氧化矽添加，確實可將高、低 TPH 土壤處理至較佳去除率 62.0%~79.0%。整體來看，高 TPH 土壤處理效果較低 TPH 土壤顯著。</p> <p>2. 謝謝委員建議。CMP 研磨料固體物含量 24.36%，補充說明如 5-2-4 節，敬請委員參閱。另 CMP 磨料介於 0.5μm~</p> |



之粒徑及固體含量(表 3-2)，並補充說明是否適合作為本研究之擦洗介質。

45 μ m 間(如下圖)，適合做為本研究之擦洗介質。



- | | |
|---|---|
| <p>3. 本案取的 CMP 為廢水處理的污泥，廢水處理過程的添加物是否會影響處理效果，請補充說明。</p> | <p>3. 經洽詢電子廠人員，該公司廢水處理只加 PAC 多元氯化鋁，應不至影響本研究處理效果。謝謝委員意見。</p> |
| <p>4. 表 5-2，高、低 TPH 油污染土壤粒徑分析結果，對於高 TPH 含量的污染土壤，在較大粒徑的 TPH 含量較高，而在低 TPH 含量的污染土壤卻有相反的趨勢，請補充說明。</p> | <p>4. 謝謝委員意見。採樣前曾詢問現場工程師，確實該油污染土壤高 TPH 的顆粒較粗，低 TPH 的顆粒較細。可能跟原來土壤質地、污染程度不同有關。</p> |
| <p>5. 圖 5-4 高氧水於不同處理程序中之時間與溶氧值關係圖。超音波及 scrubbing 程序的含氧量不同，請補充說明。</p> | <p>5. 報告委員，原始濃度都控制在相同之 35mg/l，隨後隨著超音波程序及擦洗程序，殘存的含氧濃度遞減。經超音波程序殘存含氧濃度較高；擦洗程序趕走水中較多含氧。</p> |
| <p>6. 表 5-5 高 TPH 油污染土壤經不同非結晶型二氧化矽添加及不同超音波震盪反應時間後之 TPH 殘存值。非結晶型二氧化矽：油污染土壤=1：200 的去除率似乎時間的影響不大，且其值與 1：50 相去不遠，請補充說明。</p> | <p>6. 報告委員，超音波震盪處理高 TPH 油污染土壤，條件上較無趨勢性。但對低 TPH 油污染土壤處理，非結晶型二氧化矽添加比例 1:200、反應 30 分鐘對超音波震盪處理及擦洗處理為較合適之條件。補充說明於 5-6-1 結論，敬請委員參閱。</p> |
| <p>7. 表 5-5：未添加非結晶型二氧化矽。處理 30min 後的 TPH 有增加的趨勢。請補充說明。</p> | <p>7. 研究過程以四分法對高 TPH 油污染土壤進行分樣，經濁度法 TPH 測試所得濃度為 6,268\pm1,191 mg/kg。或許有可能實驗過程未添加非結晶型二氧化矽導致無明顯效果，該組試樣濃度又略高，</p> |



| | |
|--|--|
| | 因此呈現此結果，惟尚屬誤差範圍內。 |
| <p>委員五</p> <p>1. 中英文摘要及建議未能清楚說明，應再加強，如使用水質的影響(地下水或河川…等)。</p> <p>2. 本研究探討不同非晶型二氧化矽及超音波震盪進行含油污土壤離場清洗之效果，及水力漩流分離成效，在影響因子參數探討上較不充分。如對不同型態、不同土質之土壤、不同超音波功率/溫度…等等，可建議於未來研究納入，也可考量將實驗設計如田口直交表等納入，可節省試驗資源。</p> | <p>委員意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員意見。中英文摘要、結論與建議已修正，敬請委員參閱。使用水質部分，本研究目前只討論高氧水與自來水，尚未考量地下水與河川水，敬請委員見諒。</p> <p>2. 謝謝委員建議。確實這次分析量大，耗費時間、人力與經費，爾後可考慮田口式設計。再次謝謝委員提點。</p> |