

## 磁性膨脹石墨對水面浮油吸附之研究

### 作者簡介



作者洪偉哲少校，中正理工學院應用化學系 93 年班，國防大學理工學院應用化學研究所碩士 99 年班。歷任國家中山科學研究院化學研究所研究助理、助理研究員、技佐、技士。現為國防大學理工學院國防科學研究所化學及材料工程組攻讀博士。專長為軍用煙幕技術與材料研發、雷達波遮蔽技術與材料干擾研究。

### 提要

- 一、膨脹石墨在形態上具有獨特的網絡狀孔洞結構，以及較大的比表面積和較高的表面活性，此疏鬆多孔的現象是由於插層的物質瞬間揮發，將石墨鱗片沿著C軸方向迅速撐開而形成，由片狀變成蠕蟲狀，膨脹比例約為200 mL/g。
- 二、膨脹石墨孔洞尺寸分佈相當廣泛，主要是由大孔、中孔組成，多孔率通常可高達50%，同時膨脹石墨具有非極性的特性，其表面的基團主要為非極性基團，是一種性能優良的吸附劑<sup>1,2</sup>，故與活性炭、分子篩等微孔材料在吸附特性上也有所不同，適用於液相吸附。
- 三、膨脹石墨在液相吸附中親油疏水，不僅極易吸附油污，對於染料、有機鹵化物（三氯乙烷、三氯乙烯）、有機磷化物、芳香族化合物、苯酚化合物、無機化合物（硫酸、硝酸、鹽酸、磷酸）、無機鹽類（重鉻酸鉀、高錳酸鉀）、有害金屬離子（銅、鋅、鐵、鉛、汞）、有害無機離子（氟、砷、氰）等亦有很強的吸附能力<sup>3</sup>。

關鍵字：膨脹石墨、油污、吸附、回收

### 前言

近年來世界各地發生了多起海洋浮油污染事故，漸漸引起了大家廣泛的關注。1989 年 3 月份，在 Alaska 的漏油事故；1991 年 5 月份，在 Angola 外海的 ABT Summer 油輪漏油事故；1993 年 1 月份，在 Shetland 群島北部廣泛海域浮油污染事故；1997 年 10 月份，在馬六甲海峽因兩艘油輪嚴重碰撞所造成的漏油事故；1997 年 1 月份，在日本海附近海域 Nakhodka 油輪漏油事故；2001 年 1 月份，漏油污染造成 Galapagos 群島中稀有物種的生存危機；2002 年 11 月份，

---

1.張晏清、孫慶榮，〈磁性膨脹石墨的製備及性能〉《材料導報》，第 21 卷，第 5 期，（重慶：西南信息有限公司，2007 年），第 129-131 頁。

2張晏清、孫慶榮，〈磁性膨脹石墨的製備及影響因素研究〉《無機材料學報》，第 23 卷，第 4 期，（上海市：中國科學院上海硅酸鹽研究所，2008 年），第 794-798 頁。

3張俊紅，〈環境友好型材料--膨脹石墨的制備方法及應用現狀〉《中國非金屬礦工業導刊》，第 1 期，（上海市：中國建築材料工業協會，2010 年），第 15-16、37 頁。

西班牙海岸油輪擱淺所造成的漏油事故<sup>4</sup>。從以上事故不難發現，漏油污染主要是在運輸和儲存過程中發生的，尤其台灣缺乏化石能源，國內煉油及石化工業所需油料須依賴油輪運輸，並大量儲放於貯油槽中，若因天候或人為因素，容易造成嚴重的環境污染事故。例如 2001 年 1 月份，希臘籍阿瑪斯號貨輪在墾丁海域擱淺，由於漏油造成龍坑生態保護區遭受污染，嚴重破壞當地珊瑚礁生態體系；2006 年 12 月份，吉尼號貨輪在蘇澳岸邊隔淺，船體洩漏 120 噸的原油，向外海漂散的油污將周遭海域染成黑色，但是回收的油污總重不到 40 噸，油污無法圍堵且除污效率過低，讓污染不斷擴大。所以適當的器材運用成為污染防治的問題。圖 1 為吉尼號觸礁擱淺及海域污染情形<sup>5</sup>；2006 年 12 月份，巴拿馬籍瑞興號輪船在基隆與萬里交界處觸礁擱淺且斷成兩大截，艙內 312.5 噸油料外漏，海岸礁岩布滿黑色重油，長達 3 公里海岸受到污染，至少須一年以上才能逐漸恢復原有地貌<sup>6</sup>。漏油污染不僅嚴重影響海洋環境，亦會嚴重污染土壤、河水，甚至地下水體，對於海洋生物、動植物及人類的生命構成嚴重威脅。因此，發展漏油回收和回收再利用的技術是至關重要的研究議題。

圖 1 吉尼號觸礁擱淺及海域污染情形



資料來源：<http://ourisland.pts.org.tw/content/> (檢索時間 2018 年 3 月 20 日)

自 20 世紀末以來，許多研究人員更加關心漏油事故發生後的處理狀況，以防止油污擴散造成環境污染。在海上漏油事故中，常用的油污處理方法有使用攔油索、汲油器、吸油材料或噴灑油分散劑和燃燒水面浮油等。由於油分散劑對水體容易造成二次污染，而燃燒浮油後亦產生大量濃煙、有毒氣體，因此這樣的處理方式比較容易受到限制。通常是使用大型的浮動屏障（攔油索）進行圍堵，然後再利用專門的船舶進行汲油，或者使用吸附材料來除油。吸附是解決水面浮油最常用的方法，各種吸附材料像是某些多孔性聚合物如聚乙烯 (Polyethylene)、聚丙烯 (Polypropylene, PP)、聚氨酯 (Polyurethane, PU)、聚對苯二

4Inagaki, M., Kang, F., Toyoda, M., and Konno, H., Advanced Materials Science and Engineering of Carbon, Butterworth-Heinemann, Waltham, pp. 313, 2013.

5 <http://ourisland.pts.org.tw/content/> (檢索日期 2018 年 3 月 20 日)。

6 <http://news.ltn.com.tw/news/focus/paper/528909>.(檢索日期 2018 年 3 月 20 日)。

甲酸乙二酯(Polyethylene Terephthalate, PET)、尼龍纖維(Nylon Fibers)、尿素甲醛泡沫(Urea Formaldehyde Foam)，以及一些天然的吸附材料如棉質纖維、稻草、木屑和蛭石等均已被廣泛使用，然而大多數的吸附材料在吸油同時又容易吸水，導致吸油效率低（每公斤聚合物的重油吸附量在 10-30kg 範圍），且吸油後的廢棄物處理又對環境造成第二次污染<sup>7,8</sup>。

膨脹石墨屬於石墨家族的另一種碳材料，其密度小、比表面積大、化學穩定性好、無毒，而且具有優良的網狀多孔結構，對於水面浮油具有吸附容量大、吸附速率快及回收利用效率高等優點。研究表示，膨脹石墨的孔洞可以分為 3 類：蠕蟲狀顆粒之間的空隙、顆粒表面上的楔形孔洞及顆粒內部的橢圓孔洞<sup>9</sup>，這是多孔和蠕蟲狀結構的特性，其吸附能力明顯高於活性碳(Active Carbon)，大分子量的水面浮油很容易進入孔洞，並很快在網狀體系中進行擴散直至充滿內部，而活性碳以中、小孔洞為主，水面浮油難以進入活性碳孔洞中，浮油黏度越大則越難擴散<sup>10,11</sup>。然而，膨脹石墨的粒徑小且具有質量輕、易碎、分散性高、操作困難等缺點，而限制其應用性，不適用於在水體環境中進行大規模水面浮油的控制和回收。所以為了提高膨脹石墨的應用價值，更容易控制和回收，並減少波浪和天候的影響，因而開發了具有磁性的膨脹石墨。磁性膨脹石墨(Magnetic Exfoliated Graphite, MEG)與膨脹石墨一樣，均能有效吸附水面上的浮油，吸附能力沒有改變，吸油後亦漂浮於水面，此時若是在漏油區域外加磁場，則可以迅速收集和方便回收已經吸油後的磁性膨脹石墨。

### 油污吸附原理

為了解決水面浮油污染問題，有研究學者已經注意到膨脹石墨獨特的孔洞結構及其吸油特性，並展開一連串的應用研究，評估膨脹石墨能否作為高效能的吸附材料。北京清華大學曹乃珍等學者於 1996 年在歐洲國際會議 Carbon 96 上，簡短發表了有關膨脹石墨對重油吸附的實驗結果<sup>12</sup>，其內容敘述膨脹石墨對於重油有一定的吸附能力，但並沒有特別顯著的吸附量。之後，Masahiro Toyoda

7陳貴峰、杜銘華、戴和武、史明志合著，〈海洋浮油污染及處理技術〉《環境保護》，第 1 期，（北京市：中國環境出版社，1997 年），第 10-13 頁。

8Paulauskienė, T., Jucikė, I., Juščenka, N., and Baziukė, D., “the Use of Natural Sorbents for Spilled Crude Oil and Diesel Cleanup from the Water Surface,” *Water Air & Soil Pollution*, Vol. 225, pp. 1-12, 2014.

9Inagaki, M. and Suwa, T., “Pore Structure Analysis of Exfoliated Graphite Using Image Processing of Scanning Electron Micrographs,” *Carbon*, Vol. 39, pp. 915-920, 2001.

10Wongkoblap, A., Intomya, W., Somrup, W., Charoensuk, S., Junpirom, S., and Tangsathitkulchai, C., “Pore Size Distribution of Carbon with Different Probe Molecules,” *Engineering Journal*, Vol. 14, pp. 45-56, 2010.

11李冀輝、劉淑芬合著，〈膨脹石墨與活性炭對工業油吸附性的對比研究〉《化學世界》，第 9 期，（上海市：化學化工學會，2005 年），第 513-515 頁。

12Toyoda, M. and Inagaki, M., “Heavy Oil Sorption Using Exfoliated Graphite: New Application of Exfoliated Graphite to Protect Heavy Oil Pollution,” *Carbon*, Vol. 38, pp. 199-210, 2000.



和 Michio Inagaki 等日本學者決定自己進行關於使用膨脹石墨吸附和回收重油、原油等研究，並於 1998 年發表一系列的實驗成果<sup>13</sup>，包含溫度、浮油黏度和膨脹石墨的孔洞結構對吸附量的影響，以及循環再利用的探討。其研究結果發現，1g 的膨脹石墨能夠在室溫下很快吸附 80g 以上的 A 級重油(比重為 0.864 g/cm<sup>3</sup>；黏度為 4 poise @25°C)，對於 A 級重油具有很高的吸附量，而且膨脹石墨的吸附能力與其堆積密度和重油黏度、溫度具有顯著的相關性；另外，膨脹石墨對於水面浮油亦具有優先選擇性且吸附後容易回收，約 80% 的吸附重油可以通過簡單的機械壓縮回收，且回收的重油中只有少量的水，這表示膨脹石墨應能有效去除工業廢水中的油污。

絕大多數的浮油都屬於非極性物質，膨脹石墨雖然是經過氧化插層和高溫膨化兩道程序所製備的碳材，但仍然保留了石墨本身的非極性特質，因而對於各種浮油具有很好的吸附性。除此之外，膨脹石墨對於浮油具有很高的吸附量主要還是受到其孔洞結構所影響。1996 年，北京清華大學曹乃珍、沈萬慈等學者和日本學者 Michio Inagaki 針對膨脹石墨的孔洞結構進行研究<sup>14</sup>，其結果表示膨脹石墨為網絡狀孔洞結構，形狀多為狹縫形、多邊形柱狀或楔形(Wedge)，比表面積在 50-200 m<sup>2</sup>/g 的範圍；從外部觀察，表面上一般為開放性孔洞，而內部則孔洞相連，包含開放性、封閉性及半封閉性孔洞等。IUPAC 將孔徑定義為微孔(Micropores; <2 nm)、中孔(Mesopores; 2-50 nm)及大孔(Macropores; >50 nm)等三種<sup>15</sup>；由於膨脹石墨的孔徑分布在 10 μm 至 1 nm 之間，最大孔徑可達 600 μm，若依 IUPAC 孔徑分類，則以大孔和中孔為主。加上膨脹石墨吸附浮油後，本身會互相黏合、搭接、聚集成團塊，產生許多較大的「貯油空間」，因此使其吸附量大為增加<sup>16</sup>。活性碳的孔洞結構則以中孔和微孔為主，其顆粒尺寸較小，又無柔韌性且表面形貌也較為平整，難以互相黏合、搭接、聚集而產生貯油空間，所以吸附量很小。另外，在製備膨脹石墨的過程中，有很多因素會直接影響其孔洞形狀和孔徑大小，因而反映到對浮油的吸附能力。例如有研究學者<sup>17</sup>發現膨化溫度確實對膨脹石墨的孔徑大小造成直接影響，隨著膨化溫度上升，其孔徑、孔洞體積也越大，直到 800°C 時，達到最大；然而再上升到 1,000

---

13Toyoda, M. and Inagaki, M., "Sorption and Recovery of Heavy Oil by Using Exfoliated Graphite," Carbon, Vol. 8, pp. 467-474, 2003.

14曹乃珍、沈萬慈、溫詩鑄、劉英傑、王正德、稻垣道夫(Inagaki, M.)，〈膨脹石墨孔結構的影響因素〉《材料科學與工程》，第 14 卷，第 4 期，(北京市：清華大學，1996 年)，頁 22-26。

15Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquerol, J., and Siemieniewska, T., "Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity (Recommendations 1984)," Pure and Applied Chemistry, Vol. 57, pp. 603-619, 1985.

16韋業、高林合著，〈膨脹石墨的多孔結構及其應用〉《長江大學學報（自然科學版）》，第 5 卷，第 1 期，(湖北省：長江大學，2008 年)，第 173-175 頁。

17曹乃珍、沈萬慈、溫詩鑄、金傳波等合著，〈膨脹石墨對油親和吸附分析〉《化學研究與應用》，第 9 卷，第 1 期，(北京市：清華大學，1997 年)，第 54-56 頁。

℃時，其孔徑、孔洞體積卻變小。因此，為了考量到浮油的吸附效能，也就不得不對各種因素加以考慮。

## 油污吸附及回收試驗

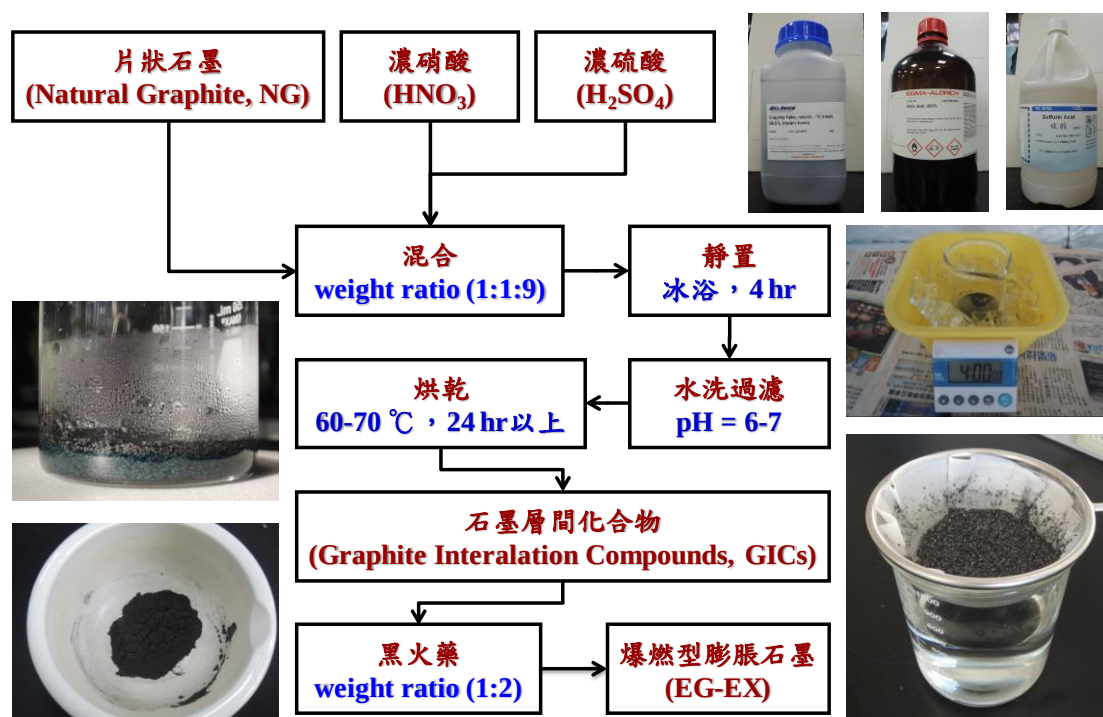
### 一、實驗材料

片狀石墨(Nature Graphite Flake, NG)、四氧化三鐵(Iron (II, III) Oxide,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、濃硝酸(Nitric Acid,  $\text{HNO}_3$ ;  $\geq 65$  wt%)、濃硫酸(Sulfuric Acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 98 wt%)、黑火藥(Black Powder, BP)、重油(Heavy Oil)、機油(Engine Oil)及柴油(Diesel Oil)。

### 二、製備方式

取適量片狀石墨，加入一定含量的混酸(NG、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$  之重量比分別為 1:1:4、1:1:6、1:9 及 1:1:12)，在冰浴中靜置 4 小時。利用化學氧化法，完成酸化、插層處理後，進行脫酸及水洗、過濾作業，pH 值保持至 6-7 之間，再送入烘箱中烘乾（設定溫度為  $60^\circ\text{C}$ ），即可得到石墨層間化合物(Graphite Intercalation Compounds, GICs)。而後取適量黑火藥與 GICs，依一定比例均勻混合，利用爆炸燃燒所產生之高溫、高壓，使 GICs 膨化，得以形成爆炸膨脹石墨(EG-EX)，製備狀況如圖 2。另外，取適量  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，依不同比例分別和 GICs 於乙醇中混合，利用直流攪拌器攪拌 1 小時，轉速約為 350 rpm，使之均勻分散，再送入烘箱中烘乾。而後取適量黑火藥與 GIC/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，依一定比例均勻混合，利用爆炸燃燒所產生之高溫、高壓，使之膨化，得以形成爆炸磁性膨脹石墨(MEG-EX)。

圖 2 膨脹石墨製備流程



資料來源：作者自繪

### 三、油污吸附試驗

採用重量量測法計算膨脹石墨或磁性膨脹石墨對於各種油污(重油、機油及柴油)的吸附量(Sorption Capacity)，其流程說明如下：

- (一)取一定重量的吸附材料(膨脹石墨或磁性膨脹石墨)，置於特定金屬濾網(孔徑為30 mesh)中。
- (二)再將金屬濾網放入到約300 mL的油污(重油260g；機油240g；柴油250g)中，使吸附材料浸泡於油液當中。
- (三)室溫維持25℃，靜置24小時。溫度會影響油污的黏性，尤其是重油。
- (四)待飽和吸附後，取出金屬濾網並懸吊靜置，直到不再有油滴滴落(重油油滴時間為1小時；機油油滴時間為1小時；柴油油滴時間為30分鐘)。
- (五)秤重並計算飽和吸附量 $Q_e$ ，如式1。經由測量吸附材料吸油前後重量的變化，即可得出每單位石墨所製備而成的膨脹石墨或磁性膨脹石墨的吸附量。

$$Q_e(\text{g/g}) = \frac{S_{wt} - W_{\text{net}} - W_m}{W_{\text{NG}}} = \frac{S_{mt} - W_m}{W_{\text{NG}}} = \frac{S_m}{W_{\text{NG}}} \quad (1)$$

其中，

$W_{\text{net}}$ ：金屬濾網的重量，g

$W_m$ ：吸附材料未吸油前的重量，g

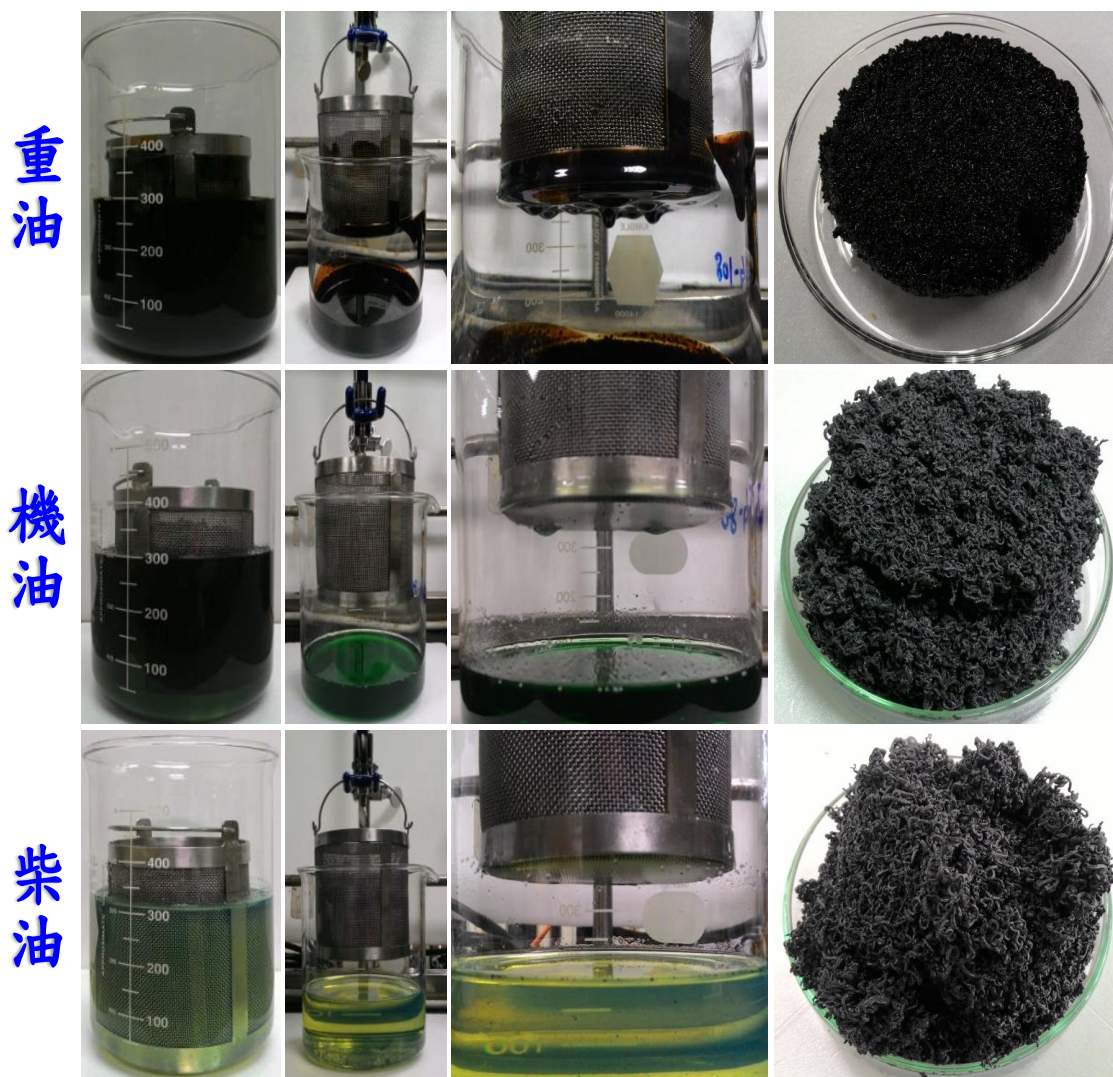
$S_{mt}$ ：吸附材料吸油後的重量，g

$S_m$ ：油污被吸附的重量，g

$W_{\text{NG}}$ ：製備膨脹石墨或磁性膨脹石墨之單位石墨重量，取 1.0 g



圖 3 磁性膨脹石墨對於各種油污的吸附情形



資料來源：作者自繪

#### 四、油污吸附特性分析

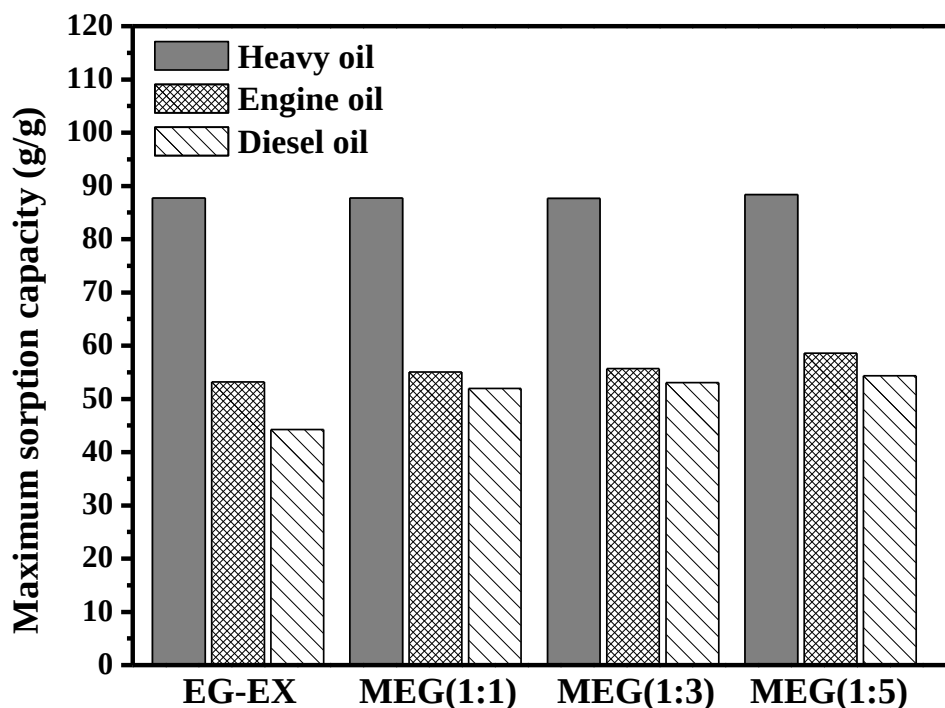
##### (一)飽和吸附量

由於膨脹石墨和磁性膨脹石墨具有大孔和中孔等孔洞結構，加上保留了石墨本身的非極性特質，所以對於油污具有很高的吸附量。圖 4 為膨脹石墨和磁性膨脹石墨分別對於重油、機油及柴油的飽和吸附量。其結果表示，1 g 的膨脹石墨可以吸附約 88 g 的重油(比重為  $0.85 \text{ g/cm}^3$ ；黏度為  $2,245 \text{ cSt @25}^\circ\text{C}$ )、約 53g 的機油(比重為  $0.79 \text{ g/cm}^3$ ；黏度為  $119 \text{ cSt @25}^\circ\text{C}$ )及約 44g 的柴油(比重為  $0.77 \text{ g/cm}^3$ ；黏度為  $7 \text{ cSt @25}^\circ\text{C}$ )。

膨脹石墨的吸附能力與油污的黏度具有顯著的相關性，對於非極性的油污而言，其黏度越高則吸附量越大。在加入磁性粉體後，並不影響其吸附油污的能力。從圖中亦可觀察到磁性膨脹石墨最多可以吸附約 88 g 的重油、約 59 g 的機油及約 54 g 的柴油，隨著磁性粉體添加量的增加，機油和柴油的吸

附量略有上升，表示磁性粉體亦有吸附低黏度油污的能力，對於高黏度的重油則沒有顯著的效果，可能是其比表面積大且具有微孔等性質影響。

圖 4 膨脹石墨和磁性膨脹石墨對各種油污的飽和吸附量



資料來源：作者自繪

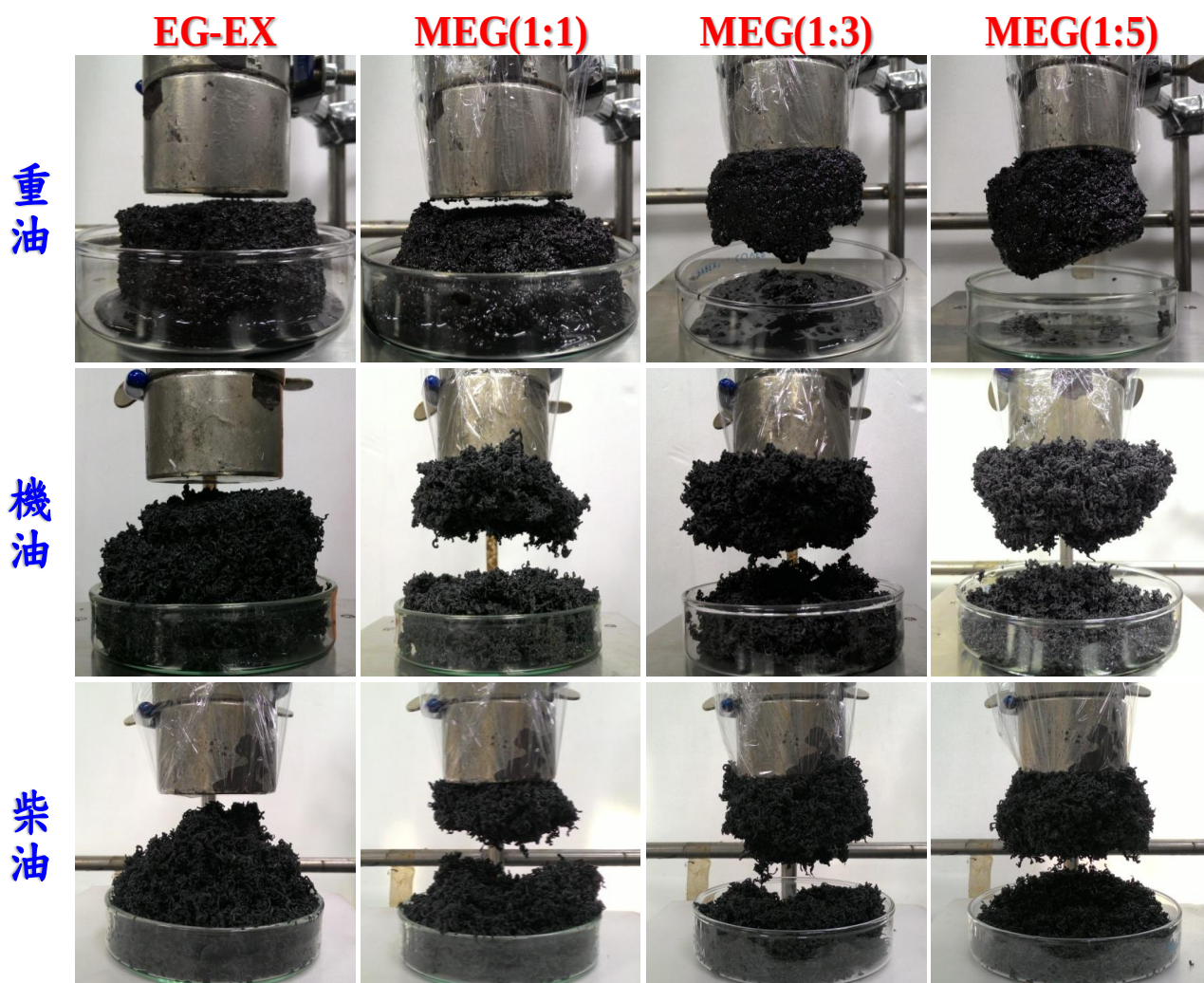
## (二)吸油後材料回收

混摻比例為 1：1 之磁性膨脹石墨的飽和磁化量為 11.63 emu/g，隨著磁性粉體含量的增加，飽和磁化量亦會隨著提高。由於實驗所使用之強力磁鐵的磁場約為 6,000-7,000 高斯(Gauss, G)，所以可以完全吸引。但是，當磁性膨脹石墨吸附油污後，其重量必然增加，尤其磁性膨脹石墨最多可吸附約 88 g 的重油，強力磁鐵與磁性膨脹石墨間產生的磁力勢必影響回收效果。因此本研究即針對吸附油污後之磁性膨脹石墨進行磁力回收實驗，瞭解不同混摻比例之磁性膨脹石墨的回收情形。

從圖 5 中即可觀察到膨脹石墨在吸附油污後無法被強力磁鐵所回收；MEG(1:1)在吸附機油和柴油後，可以被強力磁鐵所吸引，但在吸附重油之後，整個磁性膨脹石墨本身會互相黏合、搭接、聚集成團塊並黏附於玻璃皿底部，其產生的磁力無法有效回收，而當混摻比例為 1:3 及 1:5 時，強力磁鐵則可以有效回收。



圖 5 磁力回收吸附油污後的磁性膨脹石墨

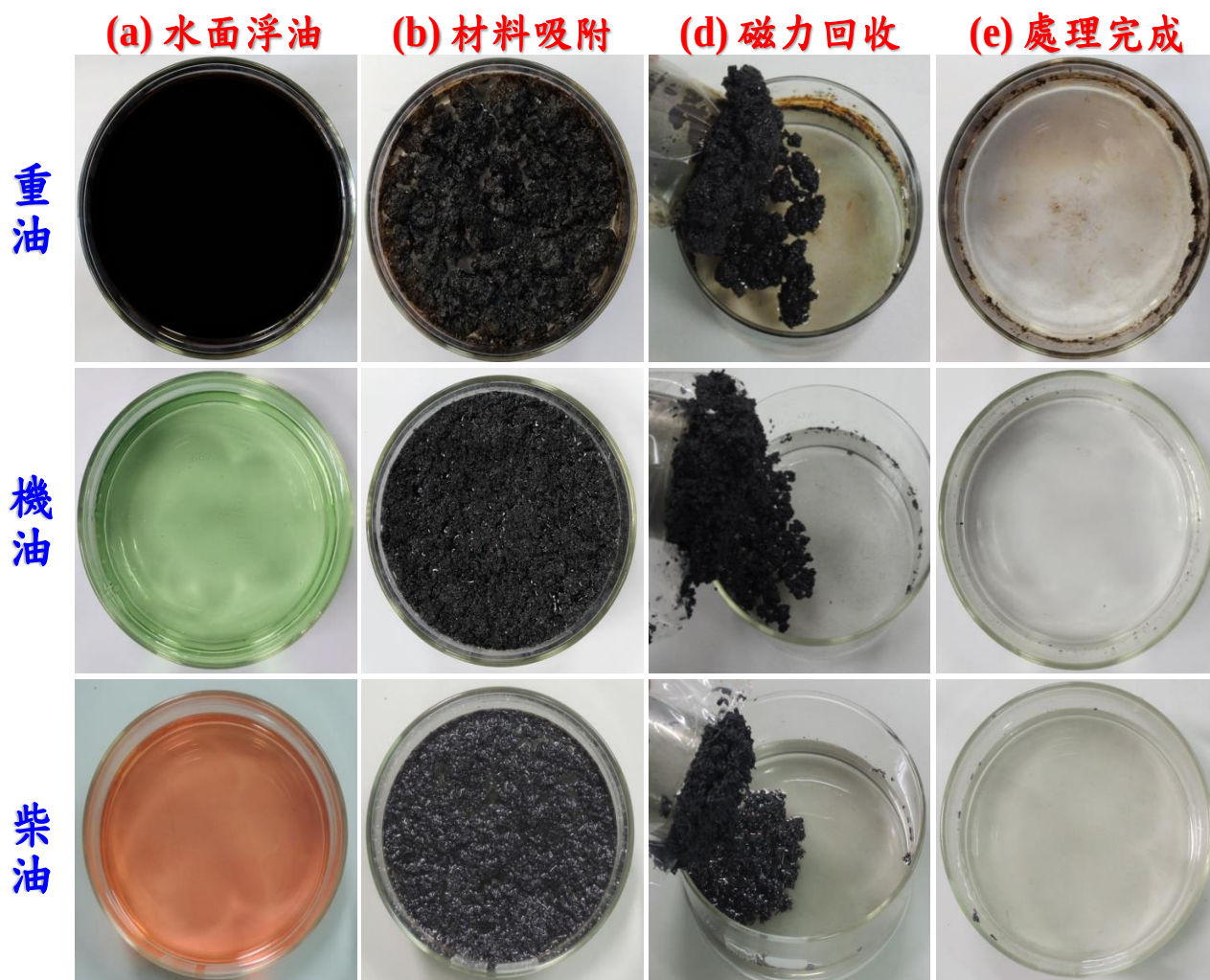


資料來源：作者自繪

### (三)水面浮油吸附和回收

圖 6 為模擬磁性膨脹石墨處理各種水面油污的過程。本研究將 2 g 的油污倒入 300 mL 的去離子水中並使油污浮於水面，如圖 6(a)所示。然後，倒入 3 g 混摻比例為 1:3 之磁性膨脹石墨，輕輕攪拌數分鐘並使磁性膨脹石墨能與浮油充分混合。在靜置 1-2 小時後，可以觀察到水面浮油被磁性膨脹石墨完全吸附並聚集成團塊，尤其以重油最為明顯，如圖 6(b)所示。圖 6(c)為磁力回收情形，可以觀察到強力磁鐵可以吸引吸附油污後的磁性膨脹石墨並加以回收。在反覆進行回收作業後，容器中的水再度變為清澈，圖 6(d)所示。由此可知，磁性膨脹石墨能浮於水面上且親油疏水，其吸油量遠遠大於吸水量，浮油黏度 越高則吸附量相對越大，對於處理含油廢水或水域表面的浮油污染具有一定的實用價值。

圖 6 模擬磁性膨脹石墨處理各種水面油污的過程



資料來源：作者自繪

#### (四)磁性膨脹石墨戶外施放測試

為了能改善磁性膨脹石墨體積大且不易貯存、運輸等缺點，本實驗以混摻、固化等步驟，製備成方便攜帶/運送的施放藥劑，如圖 7(a)所示；並利用黑火藥爆炸燃燒的方法，迅速製備磁性膨脹石墨，可以有效施放於污染區域內，去除污染物質，藉以提高其應用價值。先將 6.30 g 的固態 Viton 浸泡於 50 mL 的丙酮中，使其完全溶化；然後取 6.60 g 的石墨層間化合物、15.0 g 的四氧化三鐵及 42.0 g 的黑火藥充分均勻混摻，將其倒入於液態 Viton 中，均勻攪拌後成膠狀藥漿。將藥漿倒入於紙筒中並置於 60°C 的烘箱內，在半固化的狀態下予以壓實，壓藥密度維持在 1.28-1.32 g/cm<sup>3</sup>，再置於烘箱內直到固化完全。

在考量施放安全的前提下，採用電點火方式點火，因而將點火頭放置於藥劑上方，待布線人員撤離後，才得開始進行施放作業。圖 7(b)為電點火施作裝置，而圖 7(c)為點火頭擺放位置。從圖 7(c)中可以觀察到施放藥劑於點火後會產生大量氣體、高溫火焰及黑色蠕蟲狀顆粒（即磁性膨脹石墨）；磁性膨脹石墨隨著熱氣流噴灑於空中，而後散落於地面上，如圖 7(d)。從圖 7(f)



中即可觀察到所製備的膨脹石墨具有磁性，能夠被強力磁鐵所吸引。

圖 7 磁性膨脹石墨戶外點火施放



資料來源：作者自繪

## 結論

在控制和治理水域油污染及其回收事故漏油的研究中，其關鍵技術在於開發高效吸油、易於回收等特性的新型環境功能材料，而膨脹石墨及磁性膨脹石墨以其獨特的優點成為近年來水體油污的研究熱點，它具有發達的網絡狀孔隙結構及比表面積大，具有很好的吸附性能；同時使用磁性膨脹石墨從污染水面吸附污染油污後，可再利用外加磁場或磁鐵將吸附油污的磁性膨脹石墨回收處理再利用。未來可擴大應用在大面積的化學污染物吸附回收使用，如工業毒化物、軍方的化學戰劑、油污等方面。

## 參考資料

### 一、期刊

1. 張晏清、孫慶榮，〈磁性膨脹石墨的製備及性能〉《材料導報》，第 21 卷，第 5 期，(重慶：西南信息有限公司，2007 年)。
2. 張晏清、孫慶榮，〈磁性膨脹石墨的製備及影響因素研究〉《無機材料學報》，第 23 卷，第 4 期，(上海市：中國科學院上海硅酸鹽研究所，2008 年)。
3. 張俊紅，〈環境友好型材料--膨脹石墨的制備方法及應用現狀〉《中國非金屬礦工業導刊》，第 1 期，(上海市：中國建築材料工業協會，2010 年)。
4. Inagaki, M., Kang, F., Toyoda, M., and Konno, H., Advanced Materials Science and Engineering of Carbon, Butterworth-Heinemann, Waltham, pp. 313, 2013.
5. 陳貴峰、杜銘華、戴和武、史明志合著，〈海洋浮油污染及處理技術〉《環



境保護》，第 1 期，(北京市：中國環境出版社，1997 年)。

6. Paulauskienė, T., Jucikė, I., Juščenko, N., and Baziukė, D., “the Use of Natural Sorbents for Spilled Crude Oil and Diesel Cleanup from the Water Surface,” *Water Air & Soil Pollution*, Vol. 225, pp. 1-12, 2014.
7. Inagaki, M. and Suwa, T., “Pore Structure Analysis of Exfoliated Graphite Using Image Processing of Scanning Electron Micrographs,” *Carbon*, Vol. 39, pp. 915-920, 2001.
8. Wongkoblap, A., Intomya, W., Somrup, W., Charoensuk, S., Junpirom, S., and Tangsathitkulchai, C., “Pore Size Distribution of Carbon with Different Probe Molecules,” *Engineering Journal*, Vol. 14, pp. 45-56, 2010.
9. 李冀輝、劉淑芬合著，〈膨脹石墨與活性炭對工業油吸附性的對比研究〉《化學世界》，第 9 期，(上海市：化學化工學會，2005 年)。
10. Toyoda, M. and Inagaki, M., “Heavy Oil Sorption Using Exfoliated Graphite: New Application of Exfoliated Graphite to Protect Heavy Oil Pollution,” *Carbon*, Vol. 38, pp. 199-210, 2000.
11. Toyoda, M. and Inagaki, M., “Sorption and Recovery of Heavy Oil by Using Exfoliated Graphite,” *Carbon*, Vol. 8, pp. 467-474, 2003.
12. 曹乃珍、沈萬慈、溫詩鑄、劉英傑、王正德、稻垣道夫(Inagaki, M.)合著，〈膨脹石墨孔結構的影響因素〉《材料科學與工程》，第 14 卷，第 4 期，(浙江省：浙江大學，1996 年)。
13. Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquerol, J., and Siemieniewska, T., “Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity (Recommendations 1984),” *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 57, pp. 603-619, 1985.
14. 韋業、高林合著，〈膨脹石墨的多孔結構及其應用〉《長江大學學報（自然科學版）》，第 5 卷，第 1 期，(湖北省：長江大學，2008 年)。
15. 曹乃珍、沈萬慈、溫詩鑄、金傳波等合著，〈膨脹石墨對油親和吸附分析〉《化學研究與應用》，第 9 卷，第 1 期，(北京市：清華大學，1997 年)。

## 二、網址：

1. <http://ourisland.pts.org.tw/content/%E9%98%BF%E7%91%AA%E6%96%AF%E7%9C%9F%E7%9B%B8>(檢索日期 2018 年 3 月 20 日)。
2. <http://news.ltn.com.tw/news/focus/paper/528909>.(檢索日期 2018 年 3 月 20 日)。