

利用逾限火炸藥製備衍生燃料之研究

楊琮賢^{1*} 林國斌² 李金樹³ 黃其清³ 陸開泰⁴

摘要

本研究主要探討利用逾限火炸藥製備衍生燃料的可行性，首先將三種火炸藥三硝基甲苯(TNT)、海掃更(RDX)及單基發射藥(SBP)分別混摻麵粉、乾燥咖啡渣及枯樹葉碎片，並以聚乙烯醇樹脂(PVA)膠合壓製衍生燃料藥柱，再藉由燃燒反應器、數位攝影機與影像處理系統、溫度監測裝置、氧彈熱卡計及尾氣分析儀，顯像觀測衍生燃料藥柱的燃燒現象及量測燃燒時間、燃燒溫度及燃燒熱值，並進行燃燒產物有害氣體 NO_x 及CO含量的分析，實驗結果顯示利用逾限火炸藥製備衍生燃料確具可行性，惟仍需考量製程安全及污染防治等因素，方可建置有效的熱能回收系統，研究成果將有助於解決廢舊彈藥處理的問題。

關鍵詞：逾限火炸藥，衍生燃料，燃燒現象，燃燒熱

1. 前言

國軍庫儲彈藥以傳統火砲彈藥居多，使用火炸藥的成份主要為TNT (2,4,6-Trinitrotoluene)、RDX (Cyclo-1,3,5-Trimethylene-2,4,6-Trinitramine)及NC (Nitrocellulose)等(張鐵夫，2010)，早期逾使用壽期的廢舊彈藥多採用固封投海、掩埋、露天爆(燒)燬等方式銷毀處理，考量環保法令及安全因素，現行改採銷燬爐燒燬及脫藥等方式處理(王擇山等，1999；國防部，2004；王健仁，2007)；此外，國外另有水刀切割法、冷凍破壞法、電漿轉化法及超臨界水氧化法等處理方式(夏立志，2009；Eriksen, 1998；McCall, 1994；White House, 1998；Yang *et al.*, 2018)，從砲彈彈體分離火炸藥，惟設備造價及操作成本高，且回收之火炸藥無法再使用；另本研究群曾探討以超臨界流體進行彈頭

脫藥的研究(李金樹等，2014；Li *et al.*, 2013)，回收的火炸藥則無二次處理及環境污染的問題。由於目前逾使用壽限的火炸藥主要採焚化的方式銷毀，其所含之能量尚無良好的回收使用機制，且銷毀時尚需花費大量的燃料及汙染防治經費；因此，需開發新的處理方式以符合節能及環保的趨勢，而以逾限火炸藥製備衍生燃料可能是一個可行的選項。

廢棄物衍生燃料(Refuse Derived Fuel, RDF)技術是將廢棄物包括都市垃圾、一般事業廢棄物、農業廢棄物等，透過適當前處理製備成可用燃料的方法，這是不需要昂貴的機械設備及土地成本，就能夠直接將廢棄物有效利用的再生能源，相較於以直接焚化方式處理廢棄物，更具有熱能利用及污染控制之效益。RDF依據處理程序的不同可分為7類，即RDF-1至RDF-7，隨著處理程序的提升，所產生的RDF燃料等

¹國防大學理工學院化學及材料工程學系 助理教授

²國防大學理工學院化學及材料工程學系 碩士

³國防大學理工學院化學及材料工程學系 教授

⁴國防大學理工學院化學及材料工程學系 榮譽講座教授

*通訊作者，電話：03-3891716#322, E-mail: tsungmao1004@gmail.com

收到日期: 2021年08月02日

修正日期: 2021年10月04日

接受日期: 2021年10月19日

級越高，代表能得到的熱能回收越高且汙染越低(吳佩芬與葛佳賢，2002；萬皓鵬與李宏台，2010)；其中第五類廢棄物衍生燃料(RDF-5)，主要由農林、工業或都市廢棄物，經由破碎、分選、乾燥、摻配、造粒等程序，轉化成具高發熱量、容易儲運且低污染的固體燃料(田雲生等，2013；紀哲全，2003)，可直接應用於機械床式的鍋爐、流體化床鍋爐及發電鍋爐等，做為主要燃料或與燃煤混燒(吳耿東與張瑩璽，2004)，依據環保署107年9月19日訂定發布「鍋爐空氣污染物排放標準」，鍋爐的粒狀污染物、 SO_x 及 NO_x 排放標準分別為 30 mg/Nm^3 、 50 ppm 及 100 ppm 。

目前RDF-5的發展以日本居於全球領先地位，從1988年至今已有60餘座RDF-5製造廠及5座RDF-5發電廠設立，在歐盟也有蓬勃的發展，奧地利、荷蘭、義大利、德國、芬蘭都已有RDF-5生產系統，而比利時及英國也在評估籌建。臺灣起步雖晚，但目前已有一些應用案例，例如花蓮縣政府與工研院能資所合作，建立將都市廢棄物製成RDF-5燃料的示範廠，南投高峰資源再生公司將一般事業廢棄物製成RDF-5燃料，造紙業的正隆公司將廢料製成RDF-5燃料錠，送入既有的汽電共生發電系統與煤炭混燒，節省廢棄物處理費及煤炭採購成本，成效相當卓著(戴文堅等，2007)。目前RDF-5製備的尺寸並無規格標準，一般為直徑 $0.6\text{--}2 \text{ cm}$ 、長度 $2\text{--}5 \text{ cm}$ 之柱狀造型，以符合使用者需求為原則，含水率在10%以下，熱值最低為 $3,000 \text{ kcal/kg}$ (萬皓鵬與李宏台，2010)。本研究群曾探討利用逾限火炸藥RDX及TNT混摻木屑，再添加不同類型的膠合劑，以膠合法方式製備衍生燃料，量測分析其燃燒性能，實驗結果顯示其燃燒熱值雖較高，但其燃燒廢氣污染量及製備成本亦較高(翟文嘉，2012)。

本研究主要探討利用逾限火炸藥製備衍生燃料的可行性，首先將三種火炸藥RDX、TNT、SBP (Single-Base Propellant)分別混摻麵粉、乾燥咖啡渣及枯樹葉碎片，並添加少量的

聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)壓製衍生燃料藥柱，再藉由燃燒反應器、數位攝影機與影像處理系統、溫度量測裝置、氧彈熱卡計及尾氣分析儀，顯像觀測衍生燃料藥柱的燃燒現象及量測燃燒時間、燃燒溫度及燃燒熱，並進行尾氣成份分析，研究成果將可提供國軍評估以逾限火炸藥製備衍生燃料的參考依據。

2. 實 驗

2.1 實驗藥品

- (1) RDX (Cycotrimethylenetrinitramine, $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$)：軍備局生產製造中心第205廠提供，工業級，外觀為白色結晶粉體，密度 1.82 g/m^3 ，純態下溶點 204.1°C 。
- (2) TNT (2,4,6-Trinitrotoluene, $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$)：軍備局生產製造中心第205廠提供，工業級，外觀為淡黃色片狀或晶體，密度 1.65 g/cm^3 ，純態下溶點 80.9°C 。
- (3) 單基發射藥(Single-Base Propellant, SBP)：軍備局生產製造中心第205廠提供，主要成份為硝化纖維85%、二苯胺(Diphenylamine, DPA) 1%及其他添加劑14%。
- (4) 混摻物：麵粉、乾燥咖啡渣及枯樹葉碎片。
- (5) 聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)：長春人造樹脂廠商購，分子式為 $(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$ ，做為膠合劑使用，粉狀白色固體，可在 $80\text{--}90^\circ\text{C}$ 的水中溶解，其水溶液具有良好的黏結性。

2.2 實驗儀器

- (1) 燃燒反應系統(自行組裝)：主體採用不銹鋼材質燃燒反應器，內部空間尺寸 $65 \times 65 \times 75 \text{ cm}^3$ ，可承受壓力上限 15 atm ，具視窗可觀察點火及燃燒現象，反應器內延伸導線可連接溫度量測裝置，記錄燃燒反應溫度，反應過程產生的尾氣則利用尾氣分析儀分析成份，另藉由數位攝影機及影像處理系統實施燃燒現象顯像觀測，燃燒反應系統及儀器配

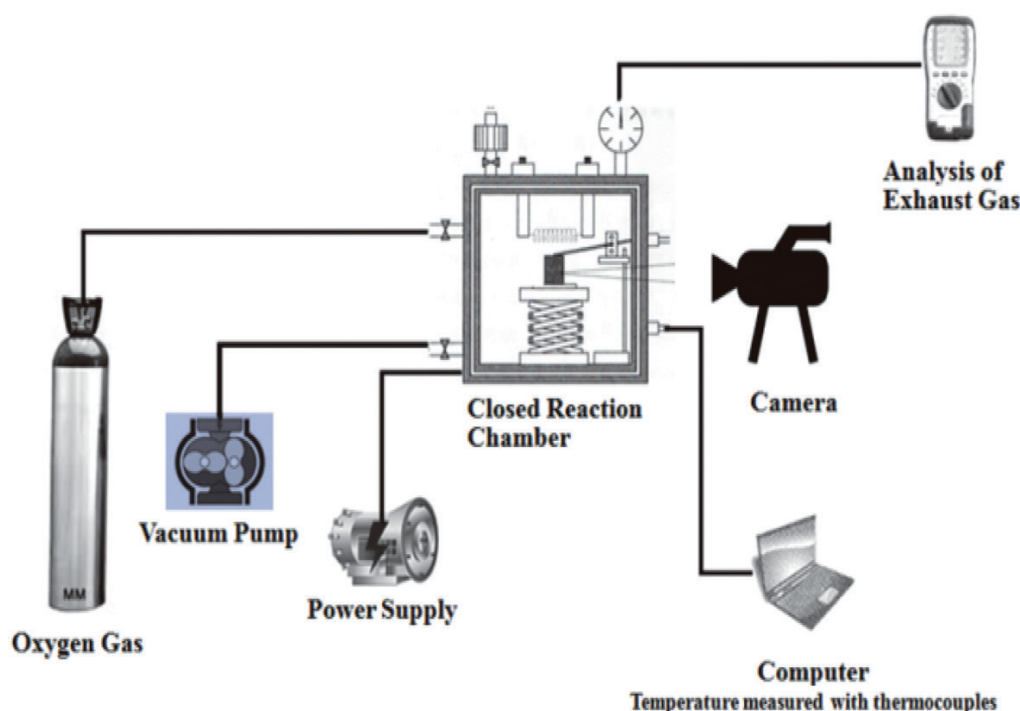


圖1 燃燒反應系統及儀器配置圖

置如圖1所示。

- (2) 溫度量測裝置：包含熱電偶及高速暫態記錄器，熱電偶型式選用K-TYPE (感熱溫度範圍為 -270 至 $1,372^{\circ}\text{C}$)，高速暫態記錄器則採用GL900型(記錄範圍設定 0 至 $1,300^{\circ}\text{C}$)，數據擷取間隔範圍在 $10\ \mu\text{s}$ 至 $1\ \text{min}$ 之間，可直接量測輸出火焰溫度，並可與電腦連結同步儲存量測數據。
- (3) 尾氣分析儀：採用美國Infrared公司製造HM5000型尾氣分析儀，可用來量測衍生燃料燃燒後 CO 、 CO_2 、 NO_x 等氣體的排放量。
- (4) 氧彈熱卡計(Oxygen Bomb Calorimeter)：採用德國IKA公司製造C2000型全自動熱卡計，可用來量測衍生燃料燃燒所釋放的熱量。
- (5) 衍生燃料壓製設備：採用健臺機械公司製造的壓藥機，手自動作業模式，以電動馬達驅動時，最高轉速為 $1,700\ \text{rpm}$ ，可用來壓製衍生燃料藥柱。

2.3 實驗配方組成規劃

實驗配方區分RDX、TNT及SBP三組，分

別與麵粉、乾燥咖啡渣及枯樹葉碎片混摻(火炸藥比例 $10\text{--}50\ \text{wt}\%$ 、混摻物比例 $50\text{--}90\ \text{wt}\%$ 及外加膠合劑PVA $3\ \text{wt}\%$)，分別量測衍生燃料藥柱的燃燒時間、燃燒溫度及燃燒熱，並進行尾氣成份(NO_x 及 CO)分析。配方組成規劃如表1所示。

2.4 衍生燃料藥柱製備

2.4.1 配藥程序

- (1) 烘乾：將各原料分別放置於錫箔承盤內，並設定真空烘箱溫度為 50°C ，以每8小時量測樣品重量乙次，連續烘乾24小時後備用。
- (2) 精秤：取已烘乾之藥品，使用電子天平依編號重量比例秤取各原料(精確至 $0.1\ \text{mg}$)備用。
- (3) 粗混：取乾淨之導電橡膠罐、導電橡膠圓筒及橡膠球($\Phi=10\ \text{mm}$)備用，先將秤好之原料分別放入導電橡膠圓筒，再放入橡膠球，並將筒與筒蓋周邊以膠帶封緊，最後放入導電橡膠罐內鎖上罐蓋，再將導電橡膠罐置於球磨機滾輪上，啟動球磨機電源，使球磨機持

表1 實驗配方組成規劃表

實驗編號	火炸藥			混摻物		
	RDX (wt%)	TNT (wt%)	SBP (wt%)	麵粉(wt%)	咖啡渣(wt%)	枯樹葉(wt%)
E1	100					
E2		100				
E3			100			
R1				100		
R2					100	
R3						100
1	(A)50	(B)50	(C)50	50		
2	(A)40	(B)40	(C)40	60		
3	(A)30	(B)30	(C)30	70		
4	(A)20	(B)20	(C)20	80		
5	(A)10	(B)10	(C)10	90		
6	(A)50	(B)50	(C)50		50	
7	(A)40	(B)40	(C)40		60	
8	(A)30	(B)30	(C)30		70	
9	(A)20	(B)20	(C)20		80	
10	(A)10	(B)10	(C)10		90	
11	(A)50	(B)50	(C)50			50
12	(A)40	(B)40	(C)40			60
13	(A)30	(B)30	(C)30			70
14	(A)20	(B)20	(C)20			80
15	(A)10	(B)10	(C)10			90

註：1. 測試編號A1-A15配方組成使用RDX，B1-B15使用TNT，C1-C15使用SBP。

2. 各組成配方均外加膠合劑PVA 3wt%。

續轉動約60分鐘後，關閉電源。

- (4) 細節：取乾淨之防潮紙及100號篩網備用，將防潮紙平鋪於工作檯面上，將100號篩網置於防潮紙上，再將導電橡膠罐內之藥品連同瓷球倒在篩網上，用篩網刷將導電橡膠圓筒及橡膠球上所沾黏之藥品刮下，並振動篩網，使篩網上之藥粉完全通過。
- (5) 烘乾：將已篩選之藥品倒入錫箔承盤置於真空烘箱內，設定溫度為50°C，持續烘乾24小時。

2.4.2 壓製藥柱程序

將烘乾後的藥品外加膠合劑PVA 3wt%充分混拌後進行壓藥程序。

- (1) 調校壓藥模使上、下沖頭及中模均同心，同

時調整壓藥衝頭行程使每次所壓出藥粒的重量及高度分別為 500 ± 5 mg及 45 ± 5 mm。

- (2) 藥柱壓藥機調校完畢後，使可手動壓藥，並定時抽取藥粒量測藥柱之重量及尺寸。
- (3) 壓製完成的藥柱經篩選後，置於真空烘箱，設定溫度為50°C，以每8小時量測樣品重量乙次，持續烘乾24小時，直至樣品重量無明顯變化。

2.5 藥柱燃燒實驗

將不同重量比率配方的乾燥衍生燃料藥柱，利用燃燒反應器及相關設備，分別量測藥柱的燃燒時間及燃燒溫度，並進行尾氣成份分析，實驗步驟如下：

- (1) 將藥柱固定在陶瓷平台置入燃燒反應器，取

熱電偶安放於藥柱內側，使熱電偶與藥柱接觸面緊密接觸，再將燃燒反應器關閉以螺絲旋緊。

- (2) 安裝數位攝影機拍攝藥柱燃燒現象，外接尾氣分析儀並於實驗前預先歸零，再開啟高速暫態記錄器，設定各項參數及儲存位置。
- (3) 啟動實驗裝置，點火系統開始點火，數位攝影機存取數位影像，高速暫態記錄器記錄火焰溫度數據，藥柱完全燃燒後，尾氣分析儀偵測氣體產物成份。
- (4) 實驗結束後，將拍攝影像及輸出火焰溫度數據儲存於電腦，再藉由處理軟體擷取所需圖像。

2.6 氧彈熱卡計實驗

將不同重量比配方的乾燥衍生燃料藥柱，利用氧彈熱卡計，分別量測藥柱的燃燒熱值，實驗步驟如下：

- (1) 開啟水箱電源檢查水位是否達最低標準，將水箱溫度設定20°C，氧氣壓力設定30 kg/cm²。
- (2) 樣品秤重後放入石英坩鍋，再將石英坩鍋安置於彈桶上，取棉線一端綁在彈桶之鎢線上，棉線另一端則與樣品接觸，然後蓋上彈桶上蓋。
- (3) 開啟氧彈熱卡計電源，將彈桶安置熱卡計內，並輸入樣品重量後，啟動燃燒開始測量熱值。

- (4) 樣品完全燃燒後，機檯面板即顯示燃燒熱值，再將彈桶緩慢洩壓即完成實驗。

3. 結果與討論

本研究自行設計燃燒反應器及其相關組件配置，並委由民間廠商依設計製作實體，系統經多次測試及校正後，始進行各組測試樣品的燃燒實驗，燃燒反應器及製備的衍生燃料藥柱如圖2所示。

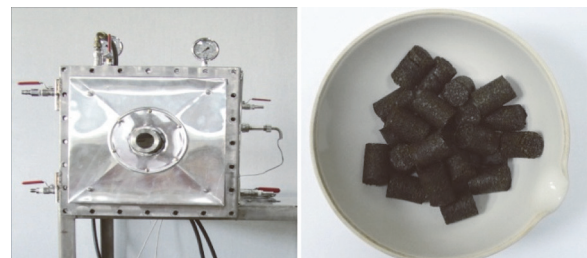


圖2 燃燒反應器及衍生燃料藥柱

3.1 RDX系列衍生燃料藥柱燃燒結果分析

3.1.1 RDX混摻麵粉衍生燃料

以RDX與麵粉混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的RDX與麵粉的重量比例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五種，另外加RDX與麵粉單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表2所示，其中燃燒反應器在燃燒過程達到溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 的時間量

表2 RDX混摻麵粉衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	RDX (wt %)	麵粉 (wt %)				NO _x (ppm)	CO (%)
E1	100	0	0.030	6.43	8.54	57	0.17
A1	50	50	10.95	0.0234	9.61	35	0.12
A2	40	60	13.21	0.0206	9.94	33	0.11
A3	30	70	15.96	0.0179	10.07	27	0.10
A4	20	80	14.15	0.0161	10.40	24	0.095
A5	10	90	12.45	0.0146	10.44	19	0.08
R1	0	100	傳火中斷		10.87	8	0.07

測，係以流體化床鍋爐的操作溫度(450–850°C)為標的，實驗結果顯示RDX未混摻麵粉配方(E1)，在燃燒過程其燃燒溫度 $\geq 450^\circ\text{C}$ 的時間僅有0.03秒，而單純麵粉配方(R1)則在燃燒過程有傳火中斷的現象，至於RDX與麵粉以不同重量比率混摻的配方(A1–A5)，燃燒溫度 $\geq 450^\circ\text{C}$ 的時間則較單純的RDX配方有顯著的增加，其中以A3配方燃燒時間較長且燃燒型態較為穩定如圖3所示；在藥柱平均燃速方面，隨著麵粉混摻比率的增加而有降低的趨勢；再經由氧彈熱卡計量測燃燒熱值，實驗結果顯示燃燒熱值隨著麵粉混摻比率的增加而有增加的趨勢；尾氣分析儀主要偵測 NO_x 及CO等有害氣體的含量，實驗結果顯示燃燒產物中有害氣體 NO_x 及CO的含量均隨著麵粉混摻比率的增加而有減少的趨勢。

3.1.2 RDX混摻乾燥咖啡渣衍生燃料

以RDX與乾燥咖啡渣混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的RDX與乾燥咖啡渣的重量比

例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五種，另外加RDX與乾燥咖啡渣單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表3所示，RDX與乾燥咖啡渣以不同重量比率混摻的配方(A6–A10)，燃燒溫度 $\geq 450^\circ\text{C}$ 的時間在13.71–20.86秒之間，較單純的RDX配方(E1)顯著的增加，其中以A9配方燃燒時間較長且燃燒型態較為穩定，而單純乾燥咖啡渣配方(R2)則為12.75秒，另在藥柱平均燃速、燃燒熱值及燃燒產物有害氣體 NO_x 及CO含量方面，則均與混摻麵粉衍生燃料的變化趨勢相同。

3.1.3 RDX混摻枯樹葉碎片衍生燃料

以RDX與枯樹葉碎片混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的RDX與枯樹葉碎片的重量比例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五種，另外加RDX與枯樹葉碎片單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表4所示，RDX與枯樹葉碎片以不同重量比率混摻的配方(A11–A15)，燃燒溫度 $\geq 450^\circ\text{C}$ 的時間在



圖3 RDX混摻麵粉衍生燃料燃燒現象觀測

表3 RDX混摻咖啡渣衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 $\geq 450^\circ\text{C}$ 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	RDX (wt %)	咖啡渣 (wt %)				NO_x (ppm)	CO (%)
E1	100	0	0.030	6.43	8.54	57	0.17
A6	50	50	13.71	0.0105	11.83	42	0.14
A7	40	60	16.35	0.00778	12.60	39	0.13
A8	30	70	18.78	0.00578	13.08	34	0.12
A9	20	80	20.86	0.00497	13.96	32	0.115
A10	10	90	17.25	0.00442	14.43	29	0.11
R2	0	100	12.75	0.00395	15.31	15	0.11

表4 RDX混摻枯樹葉衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	RDX (wt %)	枯樹葉 (wt %)				NO_x (ppm)	CO (%)
E1	100	0	0.030	6.43	8.54	57	0.17
A11	50	50	12.75	0.0169	9.97	33	0.1
A12	40	60	15.28	0.0130	10.38	28	0.09
A13	30	70	17.54	0.0111	10.48	21	0.07
A14	20	80	15.75	0.0099	10.99	18	0.06
A15	10	90	13.43	0.0089	11.09	13	0.05
R3	0	100	11.95	0.0081	11.60	8	0.04

12.75–17.54秒之間，較單純的RDX配方(E1)顯著的增加，其中以A13配方燃燒時間較長且燃燒型態較為穩定，而單純枯樹葉碎片配方(R3)則為11.95秒，另在藥柱平均燃速、燃燒熱值及燃燒產物有害氣體 NO_x 及CO含量方面，則均與混摻麵粉衍生燃料的變化趨勢相同。

3.1.4 綜合分析

RDX混摻麵粉、乾燥咖啡渣及枯樹葉碎片製備的衍生燃料，其燃燒實驗結果經綜整如圖4-8所示，不同混摻比例的配方均可順利點火燃燒，惟當RDX的重量比率較高時，將導致燃燒

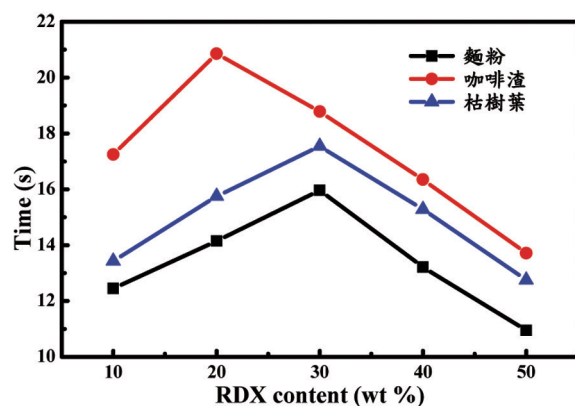
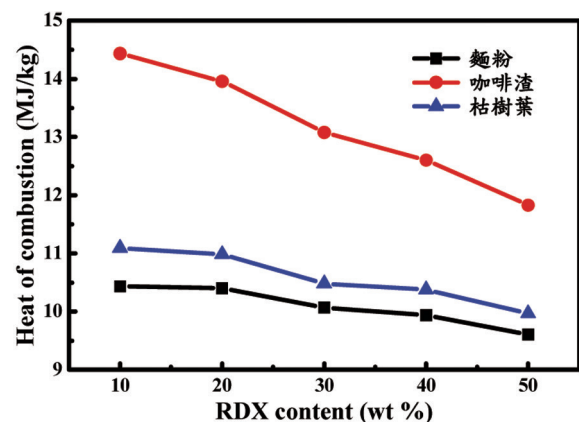
圖4 RDX衍生燃料燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 時間變化

圖6 RDX衍生燃料燃燒熱值變化

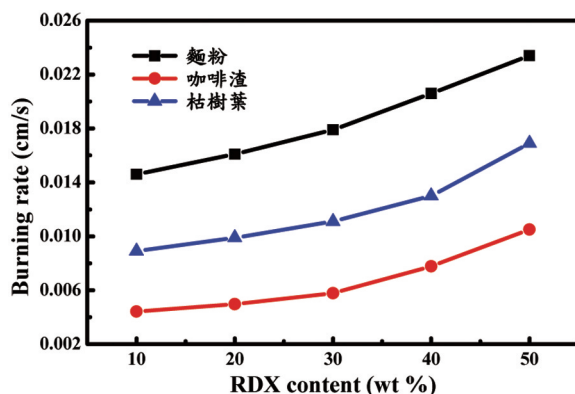
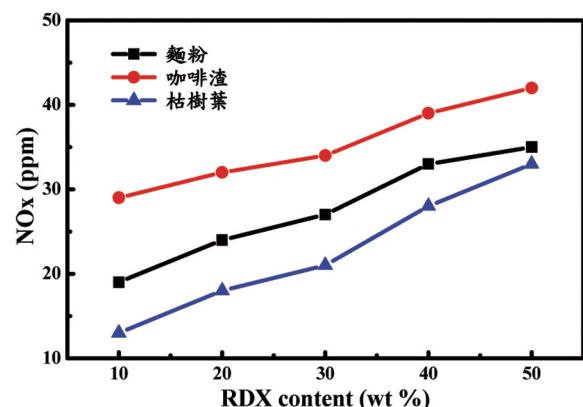


圖5 RDX衍生燃料平均燃速變化

圖7 RDX衍生燃料燃燒產物有害氣體 NO_x 含量變化

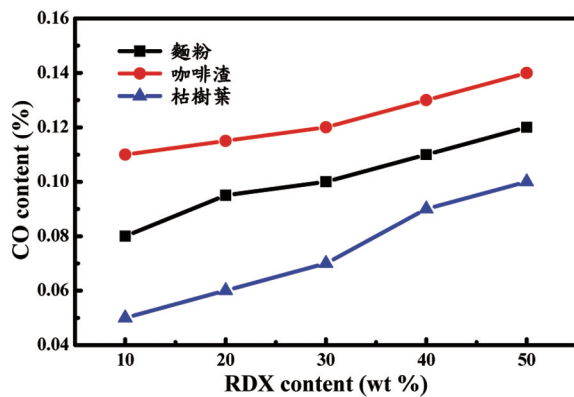


圖8 RDX衍生燃料燃燒產物有害氣體CO含量變化

速率增快，燃燒時間縮短及燃燒熱值降低，不利於燃燒熱能的回收利用。

評估三種混摻衍生燃料的性能，僅RDX混摻乾燥咖啡渣衍生燃料符合RDF-5最低熱值3,000 kcal/kg (12.55 MJ/kg)標準的需求，且具有燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 的時間長及燃燒速率慢的優點，惟其燃燒產物的有害氣體 NO_x 及CO的含量稍高。

3.2 TNT系列衍生燃料藥柱燃燒結果分析

3.2.1 TNT混摻麵粉衍生燃料

以TNT與麵粉混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的TNT與麵粉的重量比例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五種，另外加TNT與麵粉單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表5所示，實驗結果顯示TNT及麵粉在未混摻時(E2及R1配方)，兩者在燃燒過程皆有傳火中斷的現象，而TNT與麵粉以不同重量比率混摻的配方(B1-B5)，燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 的時間在12.85–16.22秒之間，其中以B2配方燃燒時間較長且燃燒型態較為穩定如圖9所示，在藥柱平均燃速方面，隨著麵粉混摻比率的增加而有降低的趨勢，燃燒熱值亦隨著麵粉混摻比率的增加而減少，係因TNT的燃燒熱值高於麵粉之故，而燃燒產物中有害氣體 NO_x 及CO的含量均隨著麵粉混摻比率的增加而有減少的趨勢。

表5 TNT混摻麵粉衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	TNT (wt %)	麵粉 (wt %)				NO_x (ppm)	CO (%)
E2	100	0	傳火中斷		13.90	26	0.13
B1	50	50	13.58	0.0187	12.29	27	0.12
B2	40	60	16.22	0.0168	12.08	24	0.09
B3	30	70	15.28	0.0152	11.58	20	0.07
B4	20	80	14.03	0.0144	11.47	18	0.06
B5	10	90	12.85	0.0130	11.27	17	0.04
R1	0	100	傳火中斷		10.87	8	0.07

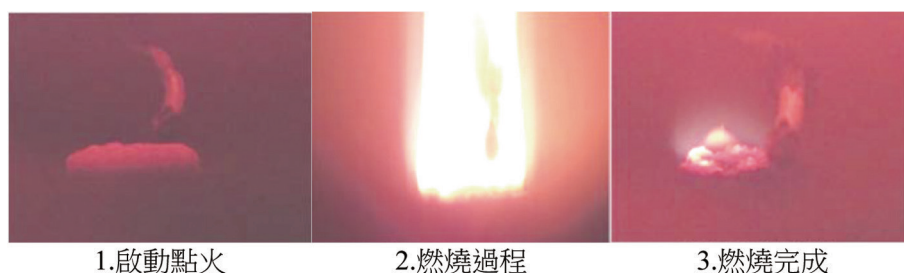


圖9 TNT混摻麵粉衍生燃料燃燒現象觀測

3.2.2 TNT混摻乾燥咖啡渣衍生燃料

以TNT與乾燥咖啡渣混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的TNT與乾燥咖啡渣的重量比例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五種，另外加TNT與乾燥咖啡渣單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表6所示，TNT與乾燥咖啡渣以不同重量比率混摻的配方(B6–B10)，燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 的時間在15.95–20.15秒之間，其中以B8配方燃燒時間較長且燃燒型態較為穩定，在藥柱平均燃速方面，隨著乾燥咖啡渣混摻比率的增加而有降低的趨勢，在燃燒熱值方面，隨著乾燥咖啡渣混摻比率的增加則有增加的趨勢，而燃燒產物分析顯示有害氣體 NO_x 及CO的含量均隨著乾燥咖啡渣混摻比率的增加而有減少的趨勢。

3.2.3 TNT混摻枯樹葉碎片衍生燃料

以TNT與枯樹葉碎片混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的TNT與枯樹葉碎片的重量比例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五種，另外加TNT與枯樹葉碎片單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表7所示，TNT與枯樹葉碎片以不同重量比率混摻的配方(B11–B15)，燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 的時間在14.25–18.55秒之間，其中以B13配方燃燒時間較長且燃燒型態較穩定，另在藥柱平均燃速、燃燒熱值及燃燒產物有害氣體 NO_x 及CO含量方面，則與混摻乾燥咖啡渣衍生燃料的變化趨勢相同。

3.2.4 綜合分析

TNT混摻麵粉、乾燥咖啡渣及枯樹葉碎片

表6 TNT混摻咖啡渣衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 ≥450°C 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	TNT (wt %)	咖啡渣 (wt %)				NO _x (ppm)	CO (%)
E2	100	0	傳火中斷		13.90	26	0.13
B6	50	50	15.95	0.00983	14.51	31	0.14
B7	40	60	17.52	0.00727	14.75	30	0.12
B8	30	70	20.15	0.00557	14.85	28	0.11
B9	20	80	18.86	0.00474	15.03	27	0.09
B10	10	90	16.96	0.00426	15.14	25	0.07
R2	0	100	12.75	0.00395	15.31	15	0.11

表7 TNT混摻枯樹葉衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 ≥450°C 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	TNT (wt %)	枯樹葉 (wt %)				NO _x (ppm)	CO (%)
E2	100	0	傳火中斷		13.90	26	0.13
B11	50	50	14.25	0.0141	12.65	24	0.10
B12	40	60	16.56	0.0129	12.52	22	0.08
B13	30	70	18.55	0.0113	12.19	17	0.06
B14	20	80	17.25	0.0105	12.06	13	0.05
B15	10	90	15.98	0.0094	11.73	11	0.03
R3	0	100	11.95	0.0081	11.60	8	0.04

製備的衍生燃料，其燃燒實驗結果經綜整如圖10-14所示，不同混摻比例的配方均可順利點火燃燒，評估三種混摻衍生燃料的性能，僅TNT混摻乾燥咖啡渣配方及TNT與枯樹葉碎片以重量比率50:50混摻配方的衍生燃料，符合RDF-5最低熱值標準的需求，且具有燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 的時間長及燃燒速率慢的優點，惟其燃燒產物

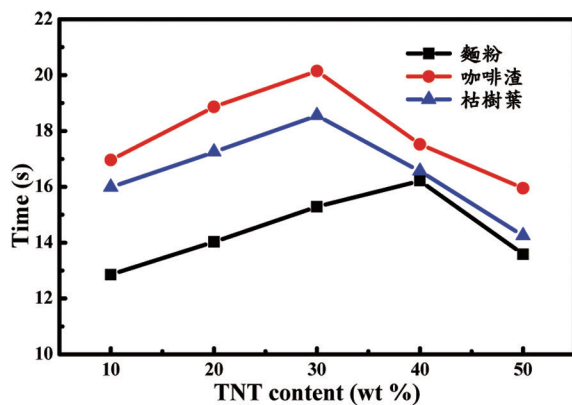


圖10 TNT衍生燃料燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 時間變化

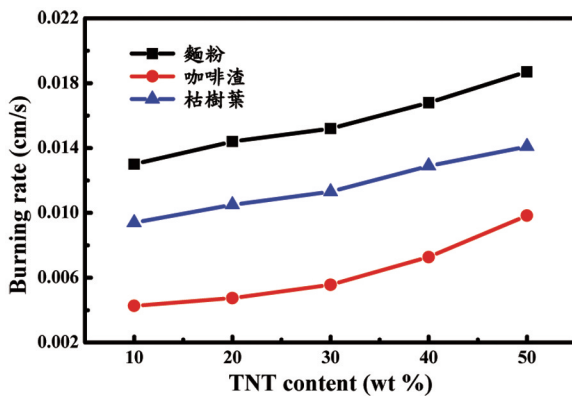


圖11 TNT衍生燃料平均燃速變化

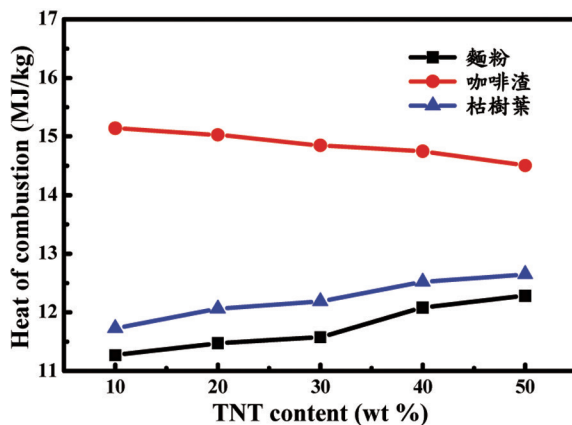


圖12 TNT衍生燃料燃燒熱值變化

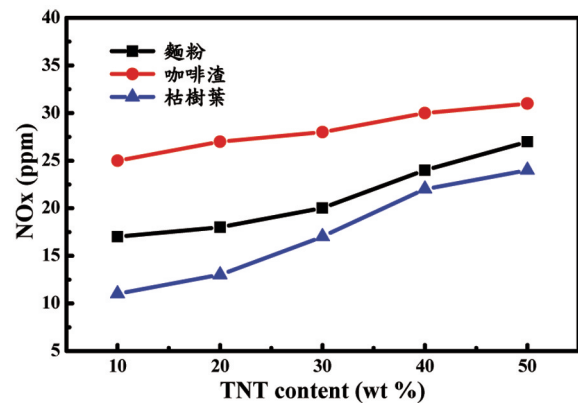


圖13 TNT衍生燃料燃燒產物有害氣體 NO_x 含量變化

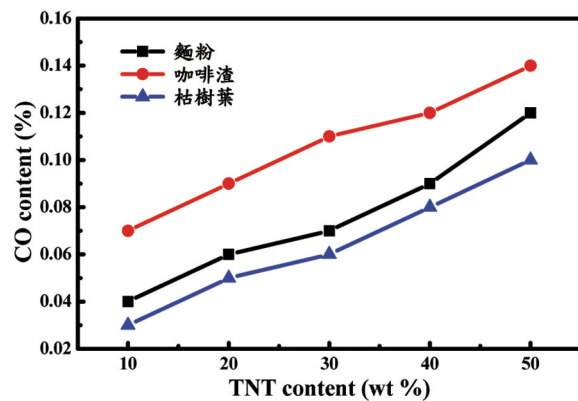


圖14 TNT衍生燃料燃燒產物有害氣體CO含量變化

的有害氣體 NO_x 及CO的含量稍高。

3.3 SBP系列衍生燃料藥柱燃燒結果分析

3.3.1 SBP混摻麵粉衍生燃料

以SBP與麵粉混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的SBP與麵粉的重量比例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五種，另外加SBP與麵粉單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表8所示，實驗結果顯示SBP未混摻麵粉配方(E3)，在燃燒過程其燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 的時間僅有0.02秒，至於SBP與麵粉以不同重量比率混摻的配方(C1-C5)，燃燒溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$ 的時間則較單純的SBP配方有顯著的增加，其中以C2配方燃燒時間較長且燃燒型態較為穩定如圖15所示，在藥柱平均燃速方面，

表8 SBP混摻麵粉衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 ≥450°C 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	SBP (wt %)	麵粉 (wt %)				NO _x (ppm)	CO (%)
E3	100	0	0.02	7.50	10.06	135	0.28
C1	50	50	13.85	0.0289	10.40	76	0.18
C2	40	60	15.78	0.0272	10.54	65	0.16
C3	30	70	17.88	0.0250	10.67	52	0.15
C4	20	80	15.88	0.0237	10.71	41	0.13
C5	10	90	13.95	0.0227	10.74	27	0.10
R1	0	100	傳火中斷		10.87	8	0.07



圖15 SBP混摻麵粉衍生燃料燃燒現象觀測

隨著麵粉混摻比率的增加而有降低的趨勢，燃燒熱值則隨著麵粉混摻比率的增加而有增加的趨勢，而燃燒產物中有害氣體NO_x及CO的含量均隨著麵粉混摻比率的增加而逐漸減少。

3.3.2 SBP混摻乾燥咖啡渣衍生燃料

以SBP與乾燥咖啡渣混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的SBP與乾燥咖啡渣的重量比例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五

種，另外加SBP與乾燥咖啡渣單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表9所示，SBP與乾燥咖啡渣以不同重量比率混摻的配方(C6–C10)，燃燒溫度≥450°C的時間在16.25–22.42秒之間，較單純的SBP配方(E3)顯著的增加，其中以C9配方燃燒時間較長且燃燒型態較為穩定，另在藥柱平均燃速、燃燒熱值及燃燒產物有害氣體NO_x及CO含量方面，則均與混摻麵粉衍生燃料的變化趨勢相同。

表9 SBP混摻咖啡渣衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 ≥450°C 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	SBP (wt %)	咖啡渣 (wt %)				NO _x (ppm)	CO (%)
E3	100	0	0.02	7.50	10.06	135	0.28
C6	50	50	16.25	0.01101	12.59	81	0.20
C7	40	60	18.95	0.00837	13.21	70	0.19
C8	30	70	20.58	0.00593	13.66	57	0.17
C9	20	80	22.42	0.00508	14.26	45	0.15
C10	10	90	18.96	0.00467	14.56	37	0.13
R2	0	100	12.75	0.00395	15.31	15	0.11

表10 SBP混摻枯樹葉衍生燃料燃燒實驗結果

實驗編號	配方組成		燃燒溫度 ≥450°C 時間(sec)	藥柱平均 燃速 (cm/sec)	燃燒熱值 (MJ/kg)	尾氣分析	
	SBP (wt %)	枯樹葉 (wt %)				NO _x (ppm)	CO (%)
E3	100	0	0.02	7.50	10.06	135	0.28
C11	50	50	15.77	0.0253	10.73	71	0.16
C12	40	60	17.85	0.0182	10.98	56	0.14
C13	30	70	19.98	0.0137	11.12	48	0.12
C14	20	80	18.02	0.0110	11.29	36	0.09
C15	10	90	16.44	0.0095	11.52	21	0.05
R3	0	100	11.95	0.0081	11.60	8	0.04

3.3.3 SBP混摻枯樹葉碎片衍生燃料

以SBP與枯樹葉碎片混摻製備衍生燃料測試樣品，其成分的SBP與枯樹葉碎片的重量比例包括10:90、20:80、30:70、40:60及50:50等五種，另外加SBP與枯樹葉碎片單一成分的測試樣品兩種做為比對，經燃燒實驗所得結果如表10所示，SBP與枯樹葉碎片以不同重量比率混摻的配方(C11–C15)，燃燒溫度≥450°C的時間在15.77–19.98秒之間，其中以C13配方燃燒時間較長且燃燒型態較為穩定，另在藥柱平均燃速、燃燒熱值及燃燒產物有害氣體NO_x及CO含量方面，則均與混摻麵粉衍生燃料的變化趨勢相同。

3.3.4 綜合分析

SBP混摻麵粉、乾燥咖啡渣及枯樹葉碎片

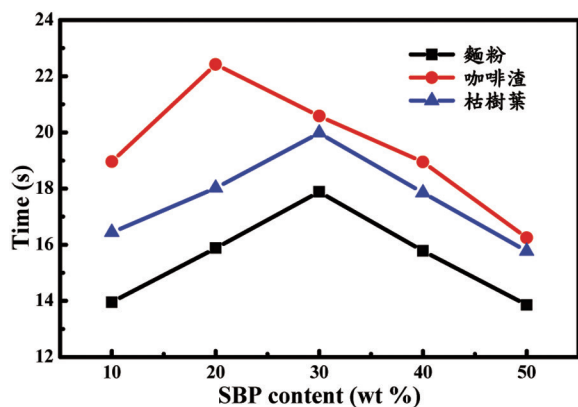


圖16 SBP衍生燃料燃燒溫度≥450°C時間變化

製備的衍生燃料，其燃燒實驗結果經綜整如圖16-20所示，不同混摻比例的配方均可順利點火燃燒，評估三種混摻衍生燃料的性能，僅SBP混摻乾燥咖啡渣衍生燃料符合RDF-5最低熱值標準的需求，且具有燃燒溫度≥450°C的時間長及燃燒速率慢的優點，惟其燃燒產物的有害氣體NO_x及CO的含量稍高。

4. 結 論

本研究利用RDX、TNT與SBP等三種火炸藥分別混摻麵粉、乾燥咖啡渣及枯樹葉碎片，再以聚乙烯醇樹脂膠合製備衍生燃料，經由顯像觀測衍生燃料藥柱的燃燒現象及量測燃燒時間、燃燒溫度及燃燒熱，並進行尾氣成份分析，探討逾限火炸藥製備衍生燃料的可行性，得到下列結論：

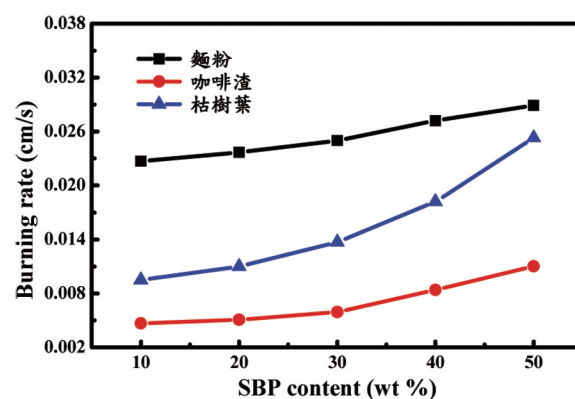


圖17 SBP衍生燃料平均燃速變化

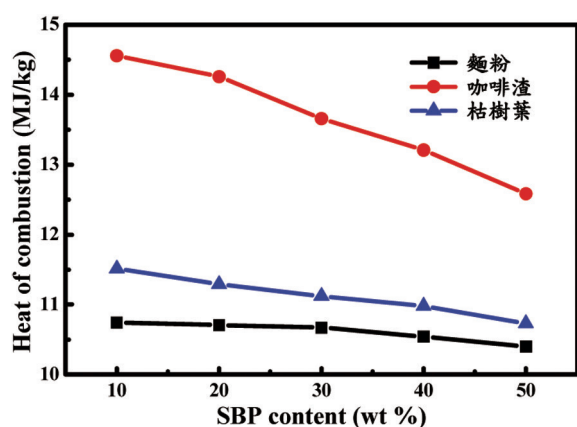


圖18 SBP衍生燃料燃燒熱值變化

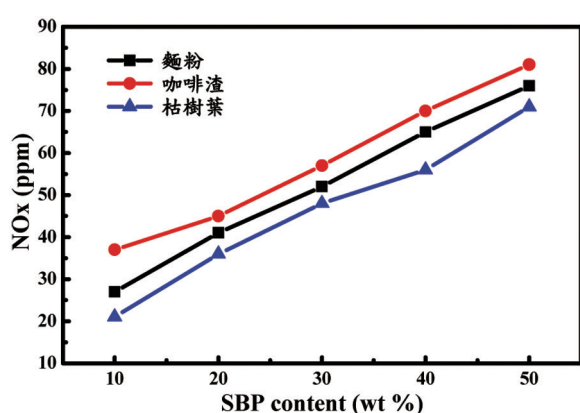
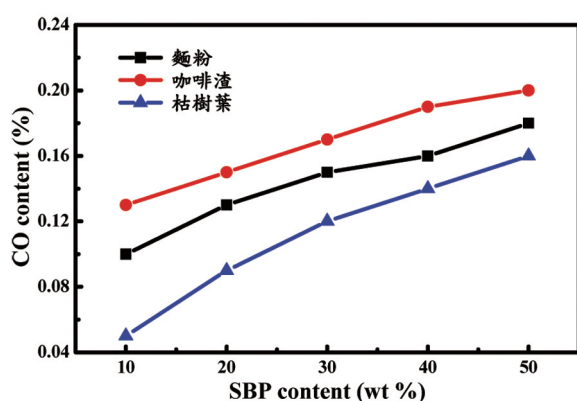
圖19 SBP衍生燃料燃燒產物有害氣體NO_x含量變化

圖20 SBP衍生燃料燃燒產物有害氣體CO含量變化

- (1) RDX、TNT與SBP等三種火炸藥，若單獨使用製備衍生燃料，因其燃速快且燃燒熱值較低，不利於熱能的回收利用，且燃燒產物的有害氣體NO_x及CO含量較高，有環境污染之虞。
- (2) 若以流體化床焚化爐操作溫度450至850°C為

標的，RDX、TNT與SBP等三種火炸藥，分別混摻20-40wt%的麵粉、咖啡渣及樹葉製備衍生燃料，可使燃燒現象穩定並延長燃燒的時間。

- (3) 若考量符合RDF-5最低熱值標準的需求，以RDX、TNT與SBP分別混摻乾燥咖啡渣配方及TNT與枯樹葉碎片以重量比率50:50混摻配方的衍生燃料較佳。
- (4) 利用逾限火炸藥RDX、TNT與SBP製備衍生燃料確具可行性，研究成果可提供國軍作為廢舊彈藥處理的參考，惟仍需考量製程安全及污染防治等因素，方可建置有效的熱能回收機制。

致 謝

本研究承蒙軍備局生產製造中心第205廠提供火炸藥樣品使研究得以順利完成，特此致謝。

參考文獻

- 王健仁，2007。超臨界流體萃取技術運用於廢棄彈藥處理與回收之研究。碩士論文，國防大學理工學院，桃園。
- 王擇山、張麗華與曹興茂，1999。廢棄火炸藥的處理與再利用，國防工業出版社，北京。
- 田雲生、張金元與陳令錫，2013。稻稈擠壓成型機之試驗研究，102年度農業工程與自動化計畫成果研討會論文集，臺中市，177: 38-43。
- 吳耿東與張瑩璽，2004。生質衍生燃料之製造與應用，化工技術，12(10): 175-182。
- 吳佩芬與葛佳賢，2002。固態廢棄物衍生燃料技術簡介，工安環保報導，8：技術報導。
- 李金樹，葉早發，陸開泰，邱永和與陳碩修，2014。以超臨界流體進行彈頭脫藥的方

- 法，中華民國專利編號：I426062。
- 夏立志，2009。以超臨界CO₂進行TNT連續萃取及模擬彈裝藥脫藥之研究，碩士論文，國防大學理工學院，桃園。
- 紀哲全，2003。添加劑對模擬城市垃圾衍生燃料(RDF-5)燃燒過程污染物排放之特性影響之研究，碩士論文，逢甲大學，臺中。
- 國防部，2004。國軍廢(棄)彈藥處理手冊，國防部聯合勤司令部，臺北。
- 張鐵夫，2010。長期儲存火炸藥熱分解參數評估及量化風險分析。碩士論文，國防大學理工學院，桃園。
- 萬皓鵬與李宏台，2010。廢棄物衍生燃料的使用，科學發展，450: 35-36。
- 翟文嘉，2012。逾限火炸藥製作衍生燃料之研究。碩士論文，國防大學理工學院，桃園。
- 戴文堅、李宏台、萬皓鵬與林忠正，2007。RDF技術實用性探討-從花蓮再生燃料示範廠營運成果及日本經驗談起，工業污染防治，26(2): 85-107。
- Eriksen, J.H., 1998. Safe disposal munitions design principles and requirements and safety assessment standardization agreement, US Department of Defense Explosives Safety Board, Washington, DC.
- Li, Jin-Shun, Taso-Fa Yeh, Kai-Tai Lu, Yung-Ho Chiu, and Chen Shuo-Hsiu, 2013. Method for Reclaiming TNT and TNT-Base High Explosive from Warhead by Strip Down in Supercritical Fluid, US Patent Number: US 8,608,880 B1.
- McCall, B.C., 1994. Autoclave meltout of cast explosives, US Department of Defense Explosives Safety Board, Washington, DC.
- White House, 1998. Executive Order 13101-Greening the Government Through Waste Prevention, Recycling and Federal Acquisition. Federal Register, 63(179): 49643-49651.
- Yang, T.M., J.S. Li, C.S. Su, K.T. Lu and T.F. Yeh, 2018. Investigation on stripping-down TNT from waste munitions by supercritical CO₂ fluid extraction under low temperature condition. Central European Journal of Energetic Materials, 15(1): 191-205.

Study on Preparation of Refuse-Derived Fuel Using Expired Explosives

Tsung-Mao Yang^{1*} Kao-Bin Lin² Jin-Shuh Li³
Chyi-Ching Hwan³ Kai-Tai Lu⁴

ABSTRACT

This study mainly explored the feasibility of using expired explosives to prepare refuse-derived fuel (RDF). First, 2,4,6-trinitrotoluene (TNT), cyclo-1,3,5-trimethylene- 2,4,6-trinitramine (RDX) and single-base propellant (SBP) were individually used to mix with flour, dry coffee dreg or withered leaf debris in a variable weight ratio, and polyvinyl alcohol (PVA) was used as a binder. These compositions were pressed into the pellets. Afterward the burning phenomena, the burning times, the burning temperatures and the heats of combustion of these experimental formulas were observed and measured by means of combustion chamber, high-speed video camera, visual-image capture system, temperature monitoring system and oxygen bomb calorimeter. In addition, exhaust gas analyzer was also used to measure the contents of harmful NO_x and CO gases for burning products. Finally, these combustion characteristics were analyzed from experimental data. The results indicated that using expired explosives to prepare RDF is really feasible. But the factors of industrial safety and environmental protection also should be considered for building effective heat recovery system. It is expected that the research results will be used to solve the problems of disposal of waste munitions.

Keywords: expired explosives, refuse-derived fuel, burning phenomenon, heat of combustion.

¹Assistant Professor, Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University.

²Master, Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University.

³Professor, Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University.

⁴Honorary Chair Professor, Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University.

* Corresponding Author, Phone: +886-3-3891716#322, E-mail: tsungmao1004@gmail.com

Received Date: August 2, 2021

Revised Date: October 4, 2021

Accepted Date: October 19, 2021