

## 含奈米鋁粉組合推進劑燃燒特性之研究

林奕憲<sup>1</sup> 李金樹<sup>2\*</sup> 陸開泰<sup>2</sup> 葉早發<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國防大學理工學院應用化學研究所

<sup>2</sup>國防大學理工學院化學及材料工程學系

### 摘 要

本研究主要探討含奈米鋁粉組合推進劑的燃燒特性，期藉由奈米科技提昇推進劑的性能。首先利用微差掃描熱卡計(DSC)，量測含微米及奈米級鋁粉之組合推進劑配方的熱化學反應特性，並藉由熱分析技術探討其差異性；然後實體製備小型組合推進劑藥條，再利用掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測奈米粉體在組合推進劑內的分散效果；最後，利用燃速儀及燃燒觀測儀進行燃燒實驗，探討組合推進劑的燃燒特性，並藉由燃燒現象觀測技術分析燃燒現象。實驗結果顯示，組合推進劑添加奈米級鋁粉有助於提升燃燒速率、燃燒性能且降低壓力指數。

**關鍵詞：**組合推進劑，奈米級鋁粉，反應特性，燃燒性能

## Research on the Burning Properties of Composite Propellants Containing Nano-sized Aluminum Powder

Yi-Hsien Lin<sup>1</sup>, Jin-Shuh Li<sup>2\*</sup>, Kai-Tai Lu<sup>2</sup>, and Tsao-Fa Yeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Applied Chemistry, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

<sup>2</sup>Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

### ABSTRACT

This research mainly explores the burning properties of composite propellants containing nano-sized aluminum powder. It is expected that the nanotechnology can be applied to improve the combustion performance of propellant. Firstly, the reaction characteristics of the composite propellants containing the aluminum (micro-sized and nano-sized) powders are measured using differential scanning calorimeter (DSC), then the difference between their properties is analyzed by means of thermal analysis technique. Afterward the proper dispersed technique is evaluated and scanning electron microscope (SEM) is used to observe the dispersed effect of nano-sized powders in the composite propellants. Finally, the composite propellant is processed to be a small stick, and the burning rate meter and window bomb (WB) are used to study the burning properties of composite propellants. The burning phenomenon is also analyzed by mean of the combustion observation technique. The experimental results show that adding nano-sized aluminum power can enhance the burning rate and burning properties of composite propellant, and reduce the pressure exponent of burning rate equation.

**Keywords:** composite propellants, nano-sized aluminum powder, reaction characteristics, burning performance.

文稿收件日期 99.9.27; 文稿修正後接受日期 100.6.14; \* 通訊作者

Manuscript received September 27, 2010; revised June 14, 2011; \* Corresponding author

## 一、前言

固體推進劑依結構和基本組成可分為組合推進劑(Composite Propellants)和雙基推進劑(Double Base Propellants)等兩大類[1]。組合推進劑多使用金屬粉作為燃料,如應用較多的鋁粉,可提升推進劑的能量和燃燒穩定性;鎂粉可提升推進劑的能量和改善點火性能;鎳粉則可提升推進劑的燃速並降低臨界壓力,由於鋁粉密度高,耗氧量低,有高的燃燒焓,對提高比衝的作用相當顯著,再加上原料充足,成本低廉,因此被廣泛應用。由於金屬燃料的粒徑是影響組合推進劑燃燒性能的關鍵因素之一[2],而現有組合推進劑使用的鋁金屬燃料均為微米級,且目前國內的研發成果已使組合推進劑的燃燒速度接近極限,故開發新的奈米級技術以精進組合推進劑的性能即成為世界各國重要的研究議題。

奈米級鋁粉是一種高還原性的活性鋁,美國的 ARGONIDE 公司[3]利用電爆法技術生產出奈米級結構的活性鋁  $Al_{ex}$ ,其粒徑範圍為 50-100nm,  $Al_{ex}$  比普通鋁粉易於氧化, DSC 實驗的熱圖譜顯示,在空氣中將  $Al_{ex}$  加熱到 450°C 時就開始部分氧化,且放出大量的熱,在 45°C 和 65°C 的乾燥環境下,  $Al_{ex}$  的穩定性高,但相對濕度較大時反應速度較快[4-5]。Meda 等人[6]曾探討使用微米級及奈米級鋁粉的 AP/HTPB 組合推進劑燃燒性能的差異,並指出使用奈米級鋁粉的組合推進劑,可有效降低點火溫度及點火時間,並顯著提昇燃燒速率;鄧康清等人[7]的研究則指出,超細鋁粉可提升燃速的原因,係由於其在推進劑燃面上即發生點火,並在離開推進劑燃面前即迅速燃燒完畢;江治等人[8]則曾探討含奈米級鋁粉的 AP/HTPB 推進劑在不同功率和壓力下點火的延遲時間,實驗結果顯示,加入奈米級鋁粉可有效地縮短推進劑的點火延遲時間,同時燃燒殘渣中活性鋁含量也明顯降低;另高東磊等人[9]的研究指出,奈米級鋁粉的活性鋁含量低於普通鋁粉,隨活性鋁含量的降低,奈米級鋁粉的燃燒熱值較低。

本研究主要探討添加奈米級鋁粉組合推進劑的燃燒特性,首先利用微差掃描熱卡計(DSC)量測包含微米級及奈米級鋁粉之組合推進劑熱化學反應的特性,並藉由熱分析技術探討其差異性;然後實體配製小型組合推進劑,

再利用掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測奈米粉體在組合推進劑內的分散效果;最後,利用燃速儀(Burning Rate Meter)及燃燒觀測儀(Window Bomb, WB)進行燃燒實驗,探討組合推進劑的燃燒性能,並藉由燃燒現象觀測技術分析燃燒現象;此外,利用拉力試驗機(Pull-Testing Machine)進行機械性能測試,評估組合推進劑藥柱的機械性質,研究成果將有助於研發先進的奈米級高能組合推進劑。

## 二、實驗

### 2.1 實驗藥品

- (1)HTPB(Hydroxyl Terminated Polybutadiene)：中科院四所提供,作為組合推進劑的膠合劑(Binder),其分子式： $HO(C_4H_6)_n$ 。
- (2)過氯酸銨(Ammonium Perchlorate, AP)：中科院四所提供,粒徑區分 20、90、225、400 $\mu$ m 等四種,作為組合推進劑的氧化劑(Oxidizer),為白色結晶,在 240°C 以下為斜方晶形,以上為立方晶形,其分子式： $NH_4ClO_4$ 。
- (3)IPDI(Isophorone Diisocyanate)：中科院四所提供,作為組合推進劑的熟化劑(Curing),能與 HTPB 的活性官能團發生交聯反應,在特定溫下熟化成網狀結構,其分子式： $C_{12}H_{18}N_2O_2$ 。
- (4)DOA(Dioctyl Adipate)：中科院四所提供,作為組合推進劑的塑化劑(Plasticizer)。
- (5)DPA(Diphenylamine)：中科院四所提供,作為組合推進劑的安定劑(Stabilizer)。
- (6)微米級鋁粉：中科院四所提供,粒徑約 3~5 $\mu$ m,作為組合推進劑的燃料(Metal Fuel)。
- (7)奈米級鋁粉：永朕材料科技股份有限公司商購,純度 99%,黑色粉末,粒徑約 50~150nm,作為組合推進劑的燃料。

### 2.2 實驗儀器

- (1)微差掃描熱卡計：本研究使用美國 TA INSTRUMENT 公司所生產的 SDT 2960 熱分析儀,可量測樣品化學變化的吸熱或放熱量及反應過程中重量的變化情形,測試樣品盤使用陶瓷坩鍋,反應溫度量測範圍為 25-1200°C,並在升溫的環境通入氮氣,

以避免空氣中的氧氣影響測試樣品的化學反應。

- (2)掃描式電子顯微鏡(SEM):本研究使用日本 JEOL 公司所生產的 JSM-6500F 型高解析度場發射掃描式電子顯微鏡(包含能量分散光譜儀),解析度為高解析影像,操作條件為 1.5nm(15KV),可放大倍率 10-500,000x,影像輸出為燒錄數位影像紀錄,能量分散光譜儀(EDS)則擷取物質放射出來的特性 X 光,分析其能量散佈圖,即可知該樣品元素的組成,其元素偵測範圍為 B-U (原子序 5-92),解析度為 133eV,可觀察奈米金屬粉於組合推進劑中的分散效果。
- (3)燃速儀:本研究使用中科院四所自製儀器,其主要性能諸元包括燃燒室、氣體緩衝室、氣體壓力計及點火控制計時器等,其中計時器係台灣展力公司生產之產品,可同時記錄兩段時間,時間讀取精度至百分之一秒,主要功能可在不同壓力的條件下,量測推進劑的燃燒速率。
- (4)燃燒觀測儀:本研究使用中科院四所自製儀器其主要性能諸元包括燃燒觀測主體、高速攝影機、數位影片剪輯系統及壓力與點火控制面板,其中燃燒觀測主體為日本防衛廳製,最大壓力上限為  $70.31\text{kgf/cm}^2$ ,高速攝影機在實驗全程以每秒 2000 張的速率拍攝推進劑的燃燒現象,再藉由數位影片剪輯系統將拍攝之影片,擷取欲剪輯之畫面,針對燃燒性能進行研究分析。
- (5)拉力試驗機:本研究使用日本島津公司生產的 Autograph AG-I 型拉力試驗機,最大出力值為  $500\text{kgf}$ ,係具載荷傳感器的精密電子材料試驗機,採用高剛性框架和 1.25msec 的高速採樣功能,可精確測試材料彈性區和斷裂區的試驗力。主要量測推進劑藥柱的機械性能(包括應力及應變等力學性質)。
- (6)拌藥機:本研究使用中科院四所自行組裝儀器,攪拌型式為行星轉動雙刀式,轉速範圍 1-83 rpm,攪拌槽體積 1 公升,最小拌藥量 550 公克。

## 2.3 實驗配方及規劃

### 2.3.1 實驗配方

本研究主要在評估奈米級金屬燃料對於組合推進劑燃燒性能的影響,實驗配方係調整不同粒徑金屬鋁粉燃料組成份的比例,計有 Ao-A3 等共計四組配方,實驗配方規劃如表 1 所示。

表 1. 實驗配方規劃表

原料 編號	百分比	膠合劑 (HTPB)	氧化劑 (AP)	鋁粉(Al)		其他 (HX-752、IPDI 等)	備考
				微米	奈米		
Ao		12.36%	82%	3%	0%	2.64%	原始 配方
A1		12.36%	82%	2%	1%	2.64%	
A2		12.36%	82%	1%	2%	2.64%	
A3		12.36%	82%	0%	3%	2.64%	

### 2.3.2 藥塊製備程序

組合推進劑拌製前,先將膠合劑(HTPB)、塑化劑(DOA)、安定劑(DAP)、燃料(Al)及氧化劑(AP)進行預烘,拌製過程需抽真空,避免因水氣過多,影響拌製及實驗結果,全程溫度控制在  $65^\circ\text{C}$ 。藥塊製備程序如下:

- (1)精確稱取定量具溶劑成份之 HTPB、HX-752、DOA 及 DAP 在燒杯中預先混合攪拌,再倒入拌藥機之攪拌槽中脫泡攪拌 60 分鐘。
- (2)不同粒徑之 AP 按正確比例稱取,混合後逐步加入攪拌槽中,小粒徑 AP 含量愈多時,與流質成份之混合愈困難,此時 AP 之加入應格外小心,此外拌製過程應分多次停機刮藥。
- (3)在 AP 完全加入後,經脫泡攪拌 3 小時,加入鋁粉攪拌 20 分鐘,此時組合推進劑呈黏稠狀,需注意是否影響拌製程序。
- (4)再加入熟化劑 IPDI,攪拌 30 分鐘,此時組合推進劑亦呈現黏稠狀態,但黏性降低。
- (5)待完成拌製程序後,將藥漿下料至小方盒鑄模,在  $65^\circ\text{C}$  烘箱中熟化 4 天。
- (6)製備完成的推進劑藥塊,視實驗需求進行切藥。

### 2.3.3 實驗規劃

- (1)熱化學特性實驗：從藥塊中切取 0.5-1mg 之藥粒，安置於陶瓷坩鍋內，實驗條件最高溫度設定為 1200°C，並以 10°C/min 的升溫速率，在環境通入氮氣的條件下進行 DSC 實驗，實驗測試次數計有 Ao-A3 等 4 組。
- (2)分散效應分析實驗：從藥塊中切取符合電子顯微鏡載臺要求規格之藥片，於表層鍍上白金並黏貼碳帶，以增加其導電性，實驗測試次數計有 Ao-A3 等 4 組。
- (3)燃速測試實驗：從藥塊中切取 5×5×120mm<sup>3</sup> 之藥條，並於藥條前端置入鎳鉻絲當點火線，外層塗覆 SBR 膠料加二氯甲烷的溶液當阻燃層，靜置 1 天乾燥後，在藥條中、後端各置入鉛線後安放於燃速儀，以室溫及壓力 10、40、70、100 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> 之氮氣環境條件下進行燃速測試，每一條件測試 6 次，以平均值為其燃速值。
- (4)燃燒觀測實驗：從藥塊中切取 5×5×40mm<sup>3</sup> 之藥條，並於藥條前端置入鎳鉻絲當點火線，外層塗覆 SBR 膠料加二氯甲烷的溶液當阻燃層，靜置 1 天乾燥後，安放於燃燒室，以室溫及壓力 5、10、20 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> 之氮氣環境條件下進行燃燒觀測，藥條燃燒過程以高速攝影機拍攝，每一條件配方測試數次並取最佳燃燒影像進行分析。
- (5)機械性能實驗：切製 JANNAF Class C 標準試樣尺寸的藥條並靜置 1 天，主要目的在排除藥條內殘餘的應力，在實驗前先行量測藥條的尺寸大小並求得其硬度，實驗在室溫下進行，拉力試驗機夾頭速度分別為 5、50、500mm/min，每一條件測試 3 次，所得數據求其平均值。

## 三、結果與討論

### 3.1 熱分析實驗

組合推進劑 Ao-A3 配方 DSC 圖譜如圖 1 所示，圖中顯示四組配方在 245°C 時均有一個吸熱峰，依據徐景龍等人[10]的研究分析，應為 AP 發生晶型轉變的吸熱反應，而使用微米級或奈米級鋁粉對於 AP 的晶型轉變溫度沒有影響；比較放熱峰的溫度顯示，添加奈米級鋁

粉的 A1、A2 及 A3 配方，其峰溫值均高於添加微米級鋁粉的 Ao 配方，係由於鋁粉反應活性大，易在表面形成氧化層，鋁粉表面的氧化層對於推進劑的熱分解有輕微的阻室效應，故造成添加奈米級鋁粉推進劑的放熱峰溫略低於添加微米級鋁粉推進劑，且放熱峰形較為平緩；另比較反應放熱量顯示，添加奈米級鋁粉的 A1、A2 及 A3 配方，其反應放熱量亦高於添加微米級鋁粉的 Ao 配方，其主要因為添加奈米級鋁粉配方的推進劑燃燒較為完全，後續的燃燒實驗亦顯示，添加微米級鋁粉配方的推進劑有較高的燃燒殘餘率；由於峰溫值上升會減損燃燒效益，但反應放熱量的提高則可增加燃燒效益，因此，這兩項因子對組合推進劑燃燒性能的影響程度，藉由後續燃燒速率實驗結果的分析，可確認反應放熱量提高之燃燒效益可有效填補峰溫值上升對燃燒效益的負面影響。

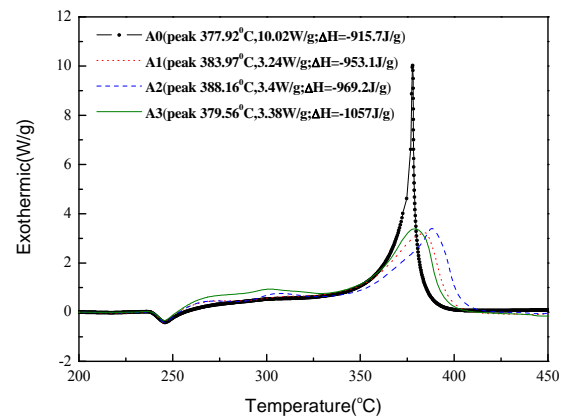


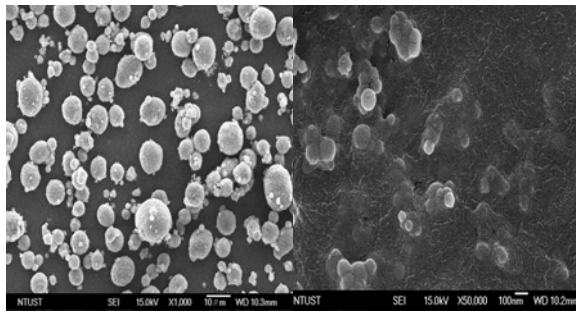
圖 1. 組合推進劑配方 DSC 圖譜

### 3.2 分散效應分析

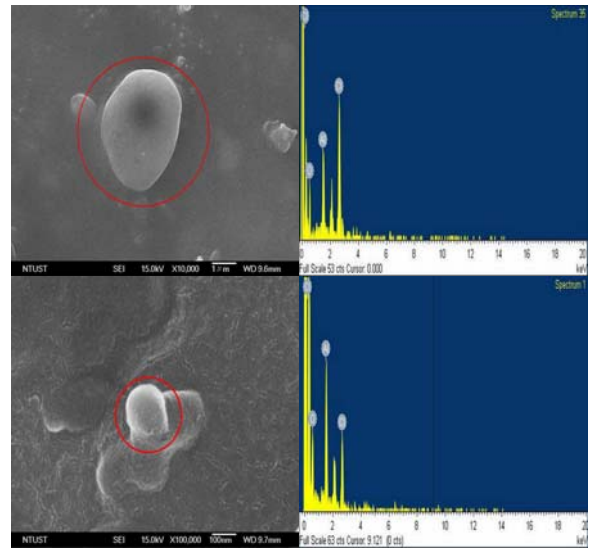
實驗所用微米級及奈米級鋁粉粉體的 SEM 如圖 2 所示，其中微米級及奈米級鋁粉粉體均呈現近似球型，符合本實驗所需。

經由拌藥程序獲得的組合推進劑樣品，取樣透過能量分散光譜儀(EDS)進行元素分析，先確認樣品存有鋁粉粉體，再藉由 SEM 進行掃描，尋找鋁粉粉體的位置；實驗觀測結果如圖 3-6 所示，圖 3 顯示 Ao 配方樣品僅包含微米級鋁粉粉體，粒徑大小約為 5μm，圖 4 顯示 A1 配方樣品包含微米級及奈米級鋁粉粉體，粒徑大小約為 3μm 及 98nm，圖 5 顯示 A2 配

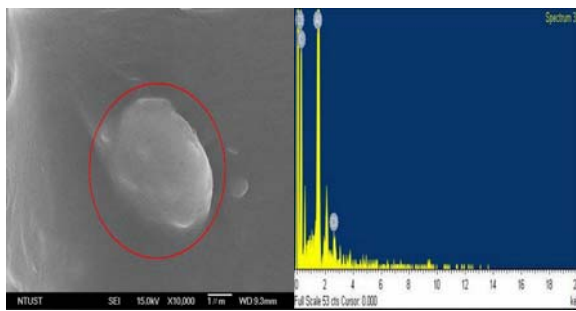
方樣品包含微米級及奈米級鋁粉粉體，粒徑大小約為 $5\mu\text{m}$ 及 $140\text{nm}$ ，圖6顯示A3配方樣品僅包含奈米級鋁粉粉體，粒徑大小約為 $120\text{nm}$ ，由上述結果可知測試樣品內的鋁粉均勻分散，符合後續燃燒實驗規劃需求。



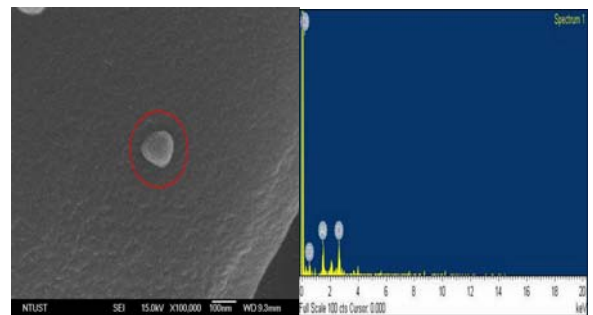
(A)微米級鋁粉 (B)奈米級鋁粉  
 圖 2. 微米級及奈米級鋁粉粉體 SEM 圖



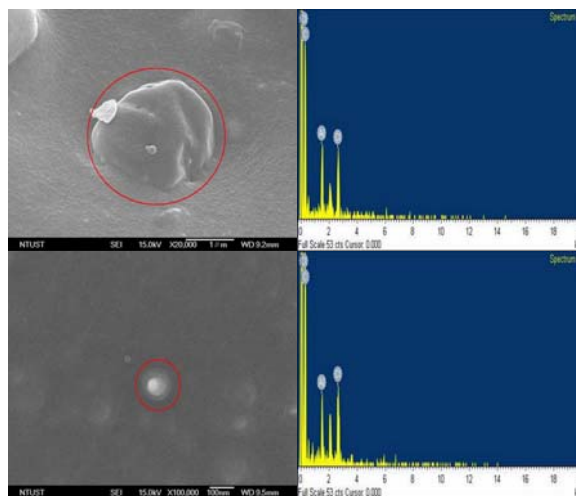
(A) SEM (B) EDS  
 圖 5. 組合推進劑A2配方SEM及EDS圖



(A) SEM (B) EDS  
 圖 3. 組合推進劑 A0 配方 SEM 及 EDS 圖



(A) SEM (B) EDS  
 圖 6. 組合推進劑A3配方SEM及EDS圖



(A) SEM (B) EDS  
 圖 4. 組合推進劑 A1 配方 SEM 及 EDS 圖

### 3.3 燃速測試

配方藥塊經熟化後切製成 $5\times 5\times 120\text{ mm}^3$ 之藥條，放置於燃速儀，實驗條件在室溫及壓力為 $10、40、70、100\text{ kgf/cm}^2$ 之氮氣環境下進行燃速測試，實驗結果綜整後列於表 2，在相同的壓力條件下，比較A0、A1、A2與A3配方的平均燃速顯示 $A2>A1>A3>A0$ ，亦即添加不同比例奈米級鋁粉的A1、A2及A3配方的燃燒速率，均大於僅添加微米級鋁粉的A0配方，實驗結果證實添加奈米級鋁粉在廣泛的壓力範圍內，有助於提升推進劑的燃燒速率。

另比較A1、A2與A3配方的平均燃速顯示 $A2>A1>A3$ ，依據掃瞄式電子顯微鏡(SEM)的觀察，添加奈米級鋁粉比例較高的A3配方，其燃燒速率較低的原因，係在拌藥過程無法藉由延長拌藥時間的方法，將奈米級鋁粉有效分散在組合推進劑內，其在基材中的團聚現

象可能影響推進劑的燃燒速率，導致 A3 配方的燃燒速率不如 A1 及 A2 配方。

表 2. 組合推進劑 Ao-A3 配方不同壓力下平均燃速

配方	壓力 kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>				
	燃速 mm/s	10	40	70	100
Ao		3.777	7.537	10.664	13.809
A1		5.138	10.951	12.833	14.812
	(較 Ao 提升率)	(26.49%)	(31.18%)	(16.90%)	(6.77%)
A2		5.150	11.701	13.560	15.125
	(較 Ao 提升率)	(26.66%)	(35.59%)	(21.36%)	(8.70%)
A3		4.938	9.692	11.935	14.238
	(較 Ao 提升率)	(23.51%)	(22.24%)	(10.65%)	(3.01%)

此外，根據 Vieille's 定律  $r_b = aP_c^n$ ，其中  $r_b$  為燃速、 $a$  為常數與推進劑初溫有關、 $P_c$  為燃燒室內的壓力、 $n$  則為壓力指數(Burning Rate Pressure Exponent)又稱為「燃燒指標」(Combustion Index)，大多數推進劑燃燒的壓力指數  $n$  值介於 0.2-0.8 之間。將 Ao、A1、A2 與 A3 配方的燃燒速率及壓力分別取對數作圖，均顯示線性關係如圖 7 所示，經由 Vieille's 定律分析，Ao、A1、A2 與 A3 配方的壓力指數值( $n$ )及速率常數值( $a$ )列於表 3，添加不同比例奈米級鋁粉的 A1、A2 及 A3 配方的壓力指數分別為 0.4626、0.4767 及 0.4574，明顯低於添加微米級鋁粉 Ao 配方的壓力指數 0.5537，顯示添加奈米級鋁粉能有效降低推進劑燃燒的壓力指數，當推進劑燃燒的壓力指數越高時，表示壓力對燃燒速率的影響程度越大，亦即推進劑燃燒後，燃燒室的壓力增加將導致燃速的加快，惡性循環的結果，可能產生爆炸的意外，故推進劑燃燒的壓力指數不宜過高。

表 3. 組合推進劑 Ao-A3 配方燃速測試數值分析表

配方	燃燒速率方程式 $rb=aPcn$	
	a 值	n 值
Ao	1.031	0.5537
A1	1.827	0.4626
A2	1.797	0.4767
A3	1.739	0.4574

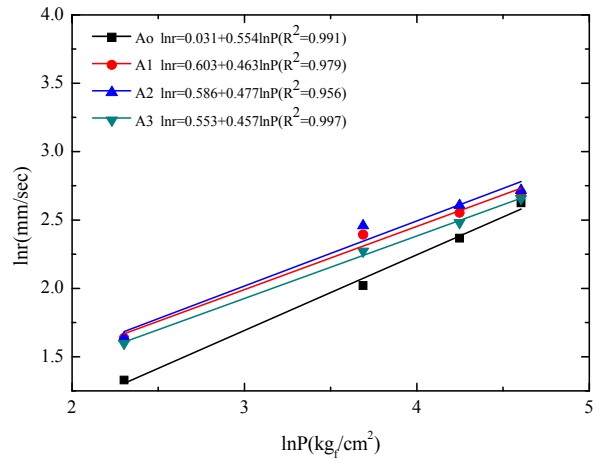


圖 7. 組合推進劑 Ao-A3 配方燃速與壓力關係圖

### 3.4 燃燒觀察

組合推進劑 Ao-A3 配方在室溫及壓力為 5、10、20 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> 之氮氣環境條件下的燃燒現象觀測如圖 8-10，比較各配方組合推進劑的燃燒現象，隨著壓力的升高，表面燃燒的劇烈程度均明顯增強且火焰區的亮度增加；此外，細部觀察各配方組合推進劑的燃燒火焰，AP 粒子燃燒形成的火焰從燃面擴散至氣相區，在燃面上所分佈的白色亮點係鋁粉熔化和初級燃燒的現象，而鋁粉的完全燃燒則增強了氣相區的火焰，至於焰尾出現的金屬液滴飛濺的現象，顯示部分鋁粉末完全燃燒。觀察 Ao、A1、A2 與 A3 配方的燃燒過程，在相同壓力的條件下，添加奈米級鋁粉的 A1、A2 及 A3 配方，燃燒劇烈的程度較添加微米級鋁粉的 Ao 配方明顯增加，且燃燒火焰向外噴射趨於密集和劇烈，但焰尾的金屬液滴飛濺現象則明顯減少，顯示添加奈米級鋁粉有助於改善組合推進劑的燃燒性能。

### 3.5 機械性能分析

組合推進劑 Ao-A3 配方機械性能測試結果如圖 11-12，其中圖 11 為拉力試驗應力 (Stress) 分析圖、圖 12 為拉力試驗應變 (Strain) 分析圖，兩圖顯示添加不同比例奈米級鋁粉的 A1、A2 及 A3 配方之應力及應變值，相對於添加微米級鋁粉的 Ao 配方差異不大，亦即對組合推進劑而言，添加奈米級鋁粉取代微米級鋁粉不至改變組合推進劑的機械性能。

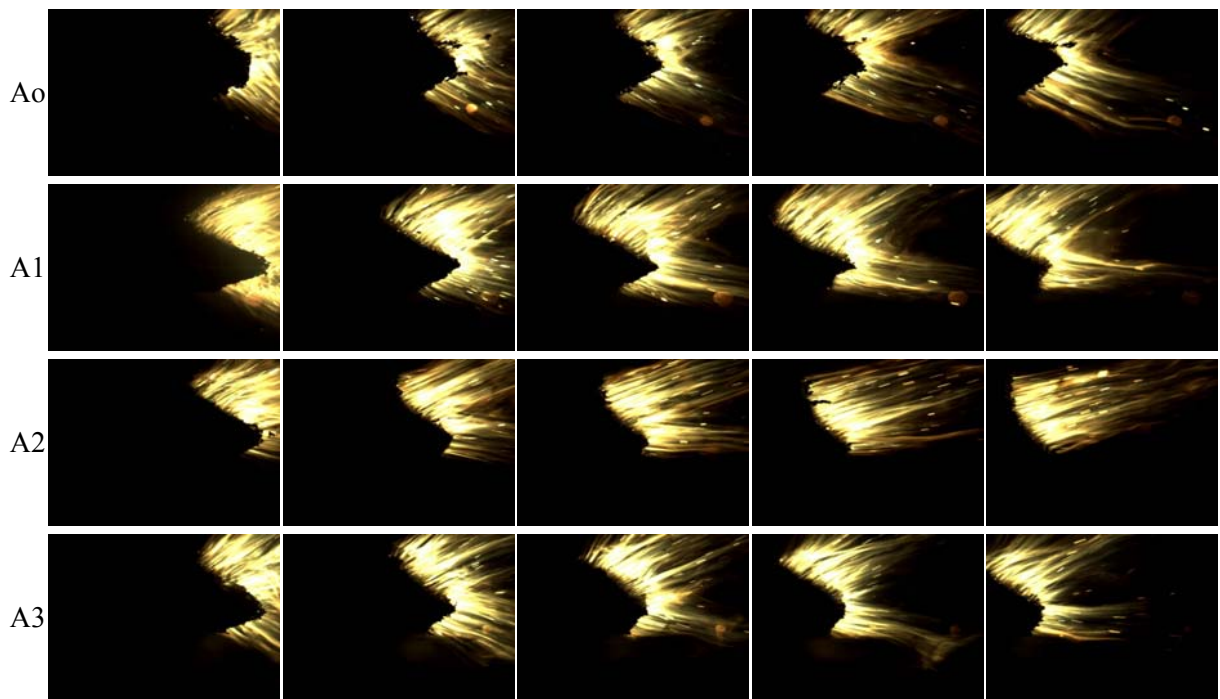


圖8. 組合推進劑A0-A3配方在氣氛壓力 $5\text{kgf/cm}^2$ 條件下燃燒現象觀測圖

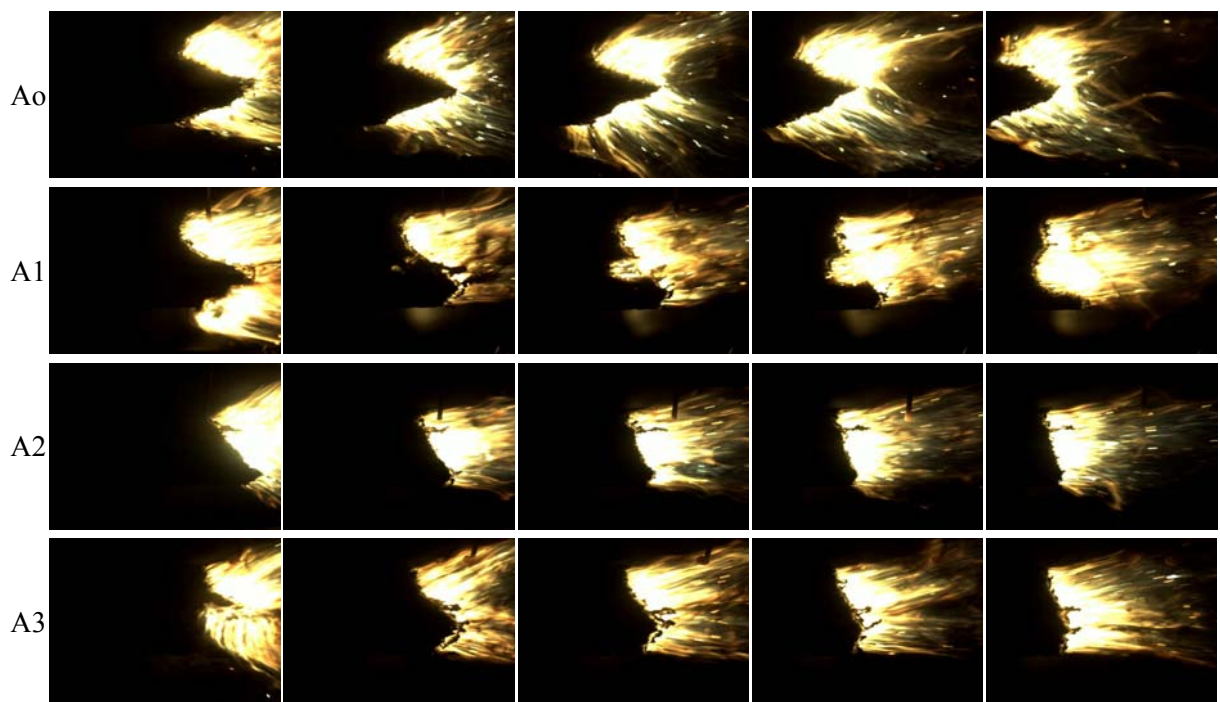


圖9. 組合推進劑 A0-A3 配方在氣氛壓力  $10\text{kgf/cm}^2$  條件下燃燒現象觀測圖

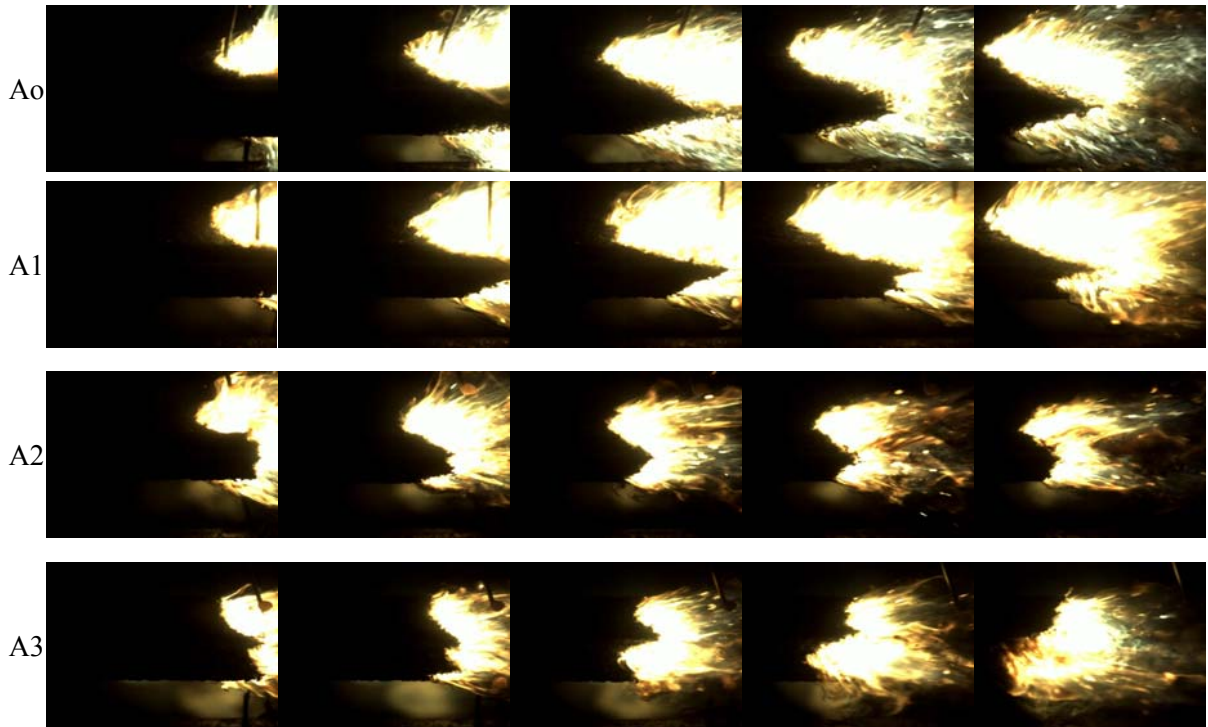


圖 10. 組合推進劑 Ao-A3 配方在氣氛壓力 20kgf/cm<sup>2</sup> 條件下燃燒現象觀測圖

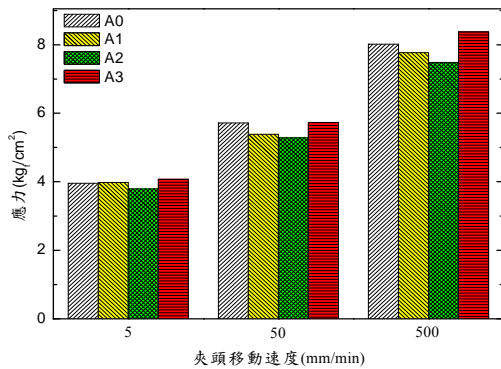


圖 11. 組合推進劑 Ao-A3 配方拉力試驗應力分析圖

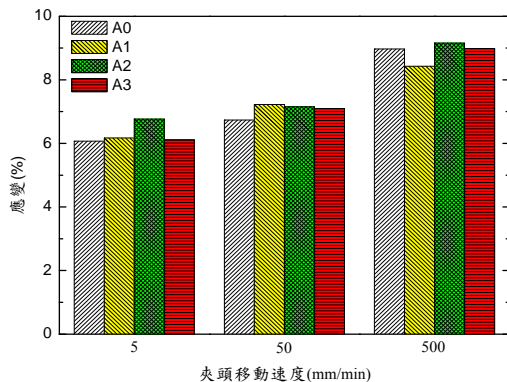


圖 12. 組合推進劑 Ao-A3 配方拉力試驗應變分析圖

#### 四、結 論

- (1) DSC 圖譜顯示，添加奈米級鋁粉的 A1、A2 及 A3 配方，峰溫值及反應放熱量均高於添加微米級鋁粉的 A0 配方，由於峰溫值上升會減損燃燒效益，但反應放熱量的提高則可增加燃燒效益，這兩項因子對組合推進劑燃燒性能的影響程度，藉由燃燒速率實驗結果的分析（添加奈米級鋁粉後燃速均較原始配方增加），可確認反應放熱量提高之燃燒效益可有效填補峰溫值上升對燃燒效益的負面影響，進而有效提升推進劑的燃燒性能。
- (2) 經由拌藥程序獲得的 A0、A1、A2 及 A3 配方的推進劑燃燒性能測試樣品，其分散效應分析顯示，A0 配方樣品包含微米級鋁粉，粒徑大小約為 5 $\mu$ m；A1 配方樣品包含微米級及奈米級鋁粉，粒徑大小約為 3 $\mu$ m 及 98nm；A2 配方樣品包含微米級及奈米級鋁粉，粒徑大小約為 5 $\mu$ m 及 140nm；A3 配方樣品包含奈米級鋁粉，粒徑大小約為 120nm；各配方測試樣品所含的鋁粉在推進劑基材內分散效果良好，符合燃燒性能測試需求。



- (3) 燃燒速率測試實驗顯示，在相同壓力條件下添加不同比例奈米級鋁粉的 A1、A2 及 A3 配方的燃燒速率，均大於僅添加微米級鋁粉的 A0 配方，證實添加奈米級鋁粉在組合推進劑中能有效提高燃燒速率並且降低壓力指數，其原因係由於奈米級鋁粉在推進劑燃面上即發生點火效應，並在離開推進劑燃面前即迅速燃燒完畢，燃燒較為完全，故能有效提高燃燒速率，且因奈米級鋁粉完全燃燒所需的時間較短，壓力對燃燒速率的影響程度降低，故能有效降低壓力指數。
- (4) 燃燒現象觀測實驗顯示，在相同壓力的條件下，添加奈米級鋁粉的 A1、A2 及 A3 配方，燃燒劇烈的程度較添加微米級鋁粉的 A0 配方明顯增加，且燃燒火焰向外噴射趨於密集和劇烈，但焰尾的金屬液滴飛濺現象則明顯減少，顯示添加奈米級鋁粉有助於改善組合推進劑的燃燒性能。
- (5) 添加不同比例奈米級鋁粉的配方之應力及應變值，相對於添加微米級鋁粉的 A0 配方差異不大，亦即添加奈米級鋁粉取代微米級鋁粉不至改變組合推進劑的機械性能。

### 致 謝

本研究承蒙國科會 NSC 98-2623-E-606-005-D 提供經費補助得以順利完成，感謝軍備局中山科學研究院四所五組、憲兵司令部刑事鑑定中心及台灣科技大學貴重儀器中心在實驗樣品及分析儀器的支援與協助。

### 參考文獻

- [1] 黃振家，推進劑學，中正理工學院，桃園，第6-7頁，1990。
- [2] 劉泰康，“固體推進劑技術發展展望”，新新季刊，第三十五卷，第四期，第94-114頁，2007。
- [3] Roland, S., “Characterization of electro exploded aluminum (Alex),” 29th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, pp. 77-1 to 77-10, 1998.
- [4] Mench, M. M., Yeh, C. L., and Kuo, K. K., “Propellant burning rate enhancement and thermal behavior of ultra fine aluminum powders (Alex),” 29th International

- Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, pp. 30-1 to 30-15, 1998.
- [5] Simonenk, V. N. and Zarko, V. E., “Comparative studying the combustion behavior of composite propellants containing ultra fine aluminum,” 30th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, pp. 21-1 to 21-14, 1999.
- [6] Meda, L., Marra, G., Galfetti, L., Severini, F., and De Luca, L., “Nano-aluminum as energetic material for rocket propellants,” Materials Science and Engineering C, Vol. 27, pp. 1393-1396, 2007.
- [7] 鄧康清、王光天、王桂蘭，“超細鋁粉的燃燒特性及燃燒模型”，固體火箭技術，第一期，第28-37頁，1996。
- [8] 江治、李疏芬、李凱、王天放、張鋼錘、王華、馬喜梅，“含納米金屬粉的推進劑點火實驗及燃燒性能研究”，固體火箭技術，第二十七卷，第二期，第117-120頁，2006。
- [9] 高東磊、張煒、朱慧、劉香翠，“納米鋁粉在復合推進劑中的應用”，固體火箭技術，第三十卷，第五期，第420-423頁，2007。
- [10] 徐景龍、陽建紅、王華，“奈米金屬粉高能推進劑熱分解性能和燃燒火焰結構分析”，飛航導彈，第十二期，第47-49頁，2006。

林奕憲等  
含奈米鋁粉組合推進劑燃燒特性之研究