

高能微煙推進劑之燃燒視流化及液態氮熄火表面觀察研究

葛揚雄^{1*} 葉日洋² 何思宜² 葉早發³

¹國防大學理工學院動力及系統工程學系

²國防部軍備局中山科學研究院

³國防大學理工學院化學及材料工程學系

摘要

本文成功研製 GAP/CL20(40/60)、GAP/CL20/AP(40/40/20)、GAP/CL20/ Catalyst(40/60/0.5) 及 GAP/CL20/AP/Catalyst(40/40/20/0.5) 等四種基礎配方之新型高能微煙推進劑，使用 AP 粒徑分別為 3 及 225 μm ，催化劑則為 Fe_2O_3 、Butacene 及 Phthalocyanine Copper。拌製而成的推進劑及配方組成用於高壓(2~30 kg_f/cm^2)燃燒現象觀察及常壓熄火面觀察之研究。透過燃燒觀察，當壓力低於 10 kg_f/cm^2 時，GAP/CL20 推進劑有大量的碳渣形成，壓力升高至 30 kg_f/cm^2 ，無論有無添加催化劑之 GAP/CL20 推進劑均呈現出較大的火焰，當添加 AP 於 GAP/CL20 推進劑，在燃面上隱約中可看見有一暗區(Dark Zone)形成。以液態氮熄火的新方法，可以成功得到常壓下 GAP/CL20 的熄火面，透過 SEM 圖，可發現在其燃面上似有 CL20 融化所造成之融熔層。

關鍵詞：推進劑，燃燒，GAP

Flow Visualization of Combustion and Liquid-Nitrogen Quenched Surface in an Energetic Smoke-Reduced Propellant

Yang-Hsiung Ko^{1*}, Jih-Yang Yeh², Szu-Yi He², and Tsao-Fa Yeh³

¹Department of Power Vehicle and Systems Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

²Chung-Shan Institute of Science and Technology, Armaments Bureau

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

ABSTRACT

Four types of modern energetic minimum-smoke propellants based on GAP/CL20(40/60), GAP/CL20/AP(40/40/20), GAP/CL20/catalyst(40/60/0.5), and GAP/CL20/AP/catalyst(40/40/20/0.5) were successfully formulated. The AP sizes used were 3 and 225 μm . Catalysts employed were Fe_2O_3 , Butacene, and Phthalocyanine Copper. The formulation and specimens obtained were subjected to the investigations of high pressure burning phenomena observations (2~30 kg_f/cm^2) and quenched burning surface morphology (ambient pressure). Large amount of carbonaceous residues atop of GAP/CL20 propellant was observed when under low pressure (<10 kg_f/cm^2) from combustion observations. The full-fledged flame can be observed for all GAP/CL20 propellants with or without catalyst under higher pressures (~30 kg_f/cm^2). With the addition of AP to GAP/CL20 propellant, an ambiguous dark zone atop of burning surface can be observed. A novel quenched method utilizing liquid nitrogen had been successfully implemented to obtain the quenched sample under ambient pressure for morphology investigations. Scanning electron microscope (SEM) photos depicted a molten layer, possibly due to CL20, on the burning surface.

Keywords: propellant, combustion, GAP

文稿收件日期 100.3.10; 文稿修正後接受日期 100.6.29; *通訊作者

Manuscript received March 10, 2011; revised June 29, 2011; * Corresponding author

一、前言

目前推進劑的發展朝微煙、高能、低污染三個方向研究，但實際上仍存有許多問題尚待克服。固體推進劑中多以過氯酸銨 (Ammonium Perchlorate, AP) 作為氧化劑，含量達70%以上，原因在於AP分子結構中有較多的含氧量，燃燒時可自給自足外，尚有多餘的氧可提供其他的燃料使用，因此被廣泛的使用，其最大的缺點是燃燒後生成HCl，一旦與水氣相凝結便會形成白色煙霧，即二級煙。二級煙中HCl屬酸性物質，會造成環境污染，且白色煙霧易曝露飛彈飛行軌跡。推進劑為求更高能量會在配方中加入少量金屬鋁粉，但鋁粉燃燒時會與氧作用產生白色固體粒子三氧化二鋁，即一級煙。這些尾煙，無論是一級煙或二級煙都將造成降低飛彈的隱蔽能力、干擾視線及干擾導控信號等不利因素。一、二級煙的產生由金屬鋁粉及氧化劑AP所造成，本文之推進劑配方中不添加鋁粉，以硝胺(Nitramine)系列氧化劑中六硝基六氮雜異伍茲烷 (Hexanitrohexaazaisowurtzitane, CL20) 取代AP。因氧化劑AN及CL20分子結構中不含氯原子，燃燒後不會產生HCl與空氣中水氣凝結成白色煙霧，故無二級煙之顧慮。參考國外微煙推進劑的研究，為得到微煙的效果，仍添加少量的AP以增加推進劑的含氧量。Eisele與Menke [1]研究GAP/CL20/AP系列之微煙推進劑，認為20%的AP於燃燒後所產生的HCl含量，不足以與空氣中的水氣凝結成白色煙霧形成二級煙，仍符合微煙推進劑之要求。故本文仍使用少量之AP做為氧化劑以提供推進劑燃燒時氧的來源，增加燃燒效果。

為達到高能量要求，以新型高能之膠合劑“縮水甘油疊氮化物聚合物”(Glycidyl Azide Polymer, GAP)取代常用之膠合劑羥基端聚丁二烯 (Hydroxy-Terminated Polybutadiene, HTPB)，同時加入少量的燃速調節劑Fe₂O₃、Butacene 及 Phthalocyanine Copper，藉由 Window Bomb及降壓熄火燃燒觀察以瞭解所造成之影響。GAP為含疊氮基之高分子化合物，常溫下為黃色液體，分子量在2000~5000之間，熱分解溫度約在175~250°C之間產生第一階段分解，由分子結構中的C-N₃鍵斷裂形成C≡N，並釋放出氮氣。第二階段分解溫度在250~400°C，為高分子主鍵斷裂形成的放熱階

段，因具有高生成熱和高燃速的特性，且本身屬鈍感材料，成為近代推進劑研發中重要的膠合劑 [2-6]，可改善低能量的問題，同時具有低特徵信號、低易損性、低污染等優點。CL20屬Nitramine系列之氧化劑，具有高生成熱，Li和Brill [7]以Sol Gel的方法研製GAP/CL20系列組合推進劑，增加推進劑能量，卻會增加推進劑的敏感度，不利軍事上的使用，故在推進劑的製作上仍以拌藥機拌藥為主。

固體推進劑的燃燒過程從微觀的角度來看，是一個複雜的物理及化學反應過程。燃燒的初始階段為各成份加熱分解生成氣體，接著在氣相中可燃性的氣體和氧化性的氣體發生擴散混合及劇烈的氧化還原反應，放出大量的熱。高溫的氣相再將熱回饋至未燃燒部份使燃燒不斷地接續發生。燃燒產生的火焰是可燃氣體燃燒時發生的現象，而火焰則因燃燒機制的不同而區分為預混火焰及擴散火焰。預混火焰是指氣態的氧化劑與膠合劑在進入火焰反應區前已混合均勻，而擴散焰則是氣態的氧化劑與膠合劑在進入火焰反應區前仍是分離的，進入反應區後經過混合再燃燒。

日本學者 Kubota [8]曾就組合推進劑之燃燒火焰作詳盡觀察，發現不同的氧化劑會產生不同的火焰結構。以RDX及HMX等Nitramine系列氧化劑，燃燒產生的火焰為預混火焰，屬均質；以AP為氧化劑，燃燒火焰為擴散火焰，屬異質燃燒。在火焰結構上，Nitramine系列氧化劑燃燒時會形成一暗區，Yang et al. [9]對於暗區的形成有詳盡的研究，其主要原因為燃燒時，固體氧化劑會先分解產生NO₂，接著NO₂還原成NO再形成N₂。此一氧化還原過程，最後在氣相形成了發光的火焰(Luminous Flame)。由於NO還原成N₂之反應速率與壓力有關，低壓時NO還原成N₂速度緩慢，放熱量少且不發光，因此形成較暗的區域，在此區域外緊接著才是Luminous Flame。此較暗的區域與雙基推進劑燃燒時形成的暗區(Dark Zone)相似，因此亦稱為暗區。暗區厚度則隨壓力升高而減小消失。

以AP作為氧化劑，其燃燒火焰包含了預混火焰及擴散火焰，兩者火焰的形成與AP的粒徑及壓力有關。Beckstead et al. [10]於1970年提出以AP為氧化劑的BDP火焰，當AP粒徑越小或在低壓時，化學反應速率小於擴散速率，形成的火焰以Primary Diffusion Flame火

焰為主；AP 粒徑越大或壓力越大時，化學反應速率大於擴散速率，在氣體尚未混合前即發生了化學反應，此時以 Premixed Monopropellant Flame 為主，化學反應後仍有可燃性的氣體再與膠合劑混合燃燒，而形成 Final Diffusion Flame。

透過燃燒現象的觀察，以 GAP 為膠合劑、CL20 為氧化劑之推進劑可滿足微煙之要求 [1, 8]，成為研發下一代高能推進劑的重要參考。

二、實驗設備與方法

2.1 實驗設備

主要儀器

- (1) 高壓燃燒觀測儀
- (2) 高速降壓熄火儀

2.2 實驗方法

2.2.1 燃燒觀察

將熟化後之藥塊切成約 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 4\text{cm}$ 之藥條，置於燃燒觀測儀中(如圖 1)，燃燒室壓力控制在 $2\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 至 $30\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ ，氮氣環境下，以鎳鉻絲點燃，點燃之藥條以 NAC HSV-200 高速攝影機與照像機拍攝推進劑燃燒過程，拍攝速率 1000 張/秒。

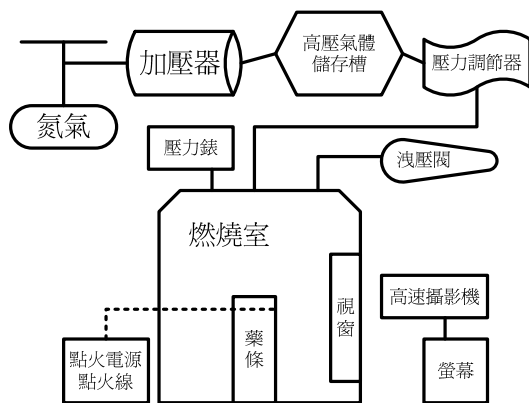


圖 1. 燃燒觀測裝置示意圖

2.2.2 熄火燃面觀測

熟化後之藥塊切成 $1.2\text{cm} \times 1.2\text{cm} \times 5\text{cm}$ 之小藥條，置於熄火設備(如圖 2)之燃燒室中，將液態氮倒入約藥塊

三分之一高度，在常壓下，通電引燃穿過藥塊之鎳鉻絲，待藥塊燃燒至與液態氮液面等高時，因溫度瞬間下降，導致燃面無足夠之熱能供給持續燃燒而熄滅，所得燃面以 SEM 觀察之。

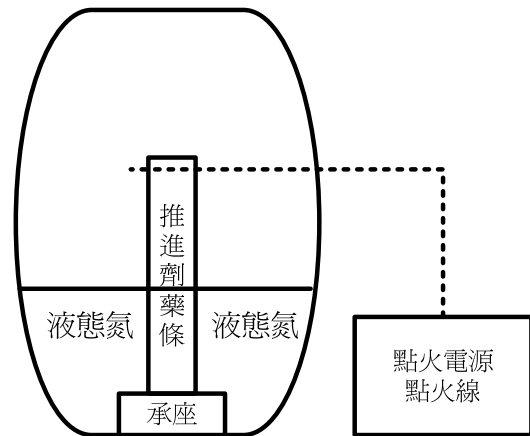


圖 2. 熄火裝置示意圖

三、結果與討論

本實驗所需之推進劑藥塊均以熟化條件 $\text{NCO}/\text{OH} = 1.1$ 、 $\text{OH}_{(\text{TMP})} = 0.3$ 為主，並以 GAP/Filler 之重量比 40/60 之比值進行拌藥，同時外加不同的燃速調節劑 0.5% 及以 20% 不同粒徑 AP 取代基礎配方中 CL20，計獲九種配方如表 1 以探討其燃燒特性。

3.1 燃燒觀察

將熟化後之藥塊以 Window Bomb 觀察表 1 配方編號 001 至 009 推進劑之燃燒火焰，燃燒室壓力設定為 $2\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 、 $5\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 、 $10\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 、 $30\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ ，利用相機透過玻璃視窗拍照，以了解推進劑在不同壓力下之燃燒現象。

3.1.1 不同粒徑 AP 燃燒現象

GAP/CL20/AP 分別由 $3\mu\text{m}$ 及 $225\mu\text{m}$ 兩種不同粒徑的 AP 組成，燃燒象現分別如圖 3 及圖 4。圖 3 配方編號 002 為 AP 粒徑 $3\mu\text{m}$ 時，因粒徑小，比表面積(Specific Surface Area)大，受熱分解後易與膠合劑接觸，因此產生的火焰以緊貼燃面之 Primary Diffusion Flame 為

表1. 配方組成

料 編 號 (g)	原 重 量						
	GAP-Diol	GAP-A	CL20	AP	Fe ₂ O ₃	Butacene	Phthalocyanine Copper
001	65.00	6.50	119.53	0.00	0	0	0
002	65.00	6.50	79.69	39.84	0	0	0
003	65.00	6.50	79.69	39.84	0	0	0
004	65.00	6.50	119.53	0.00	1.00	0	0
005	65.00	6.50	79.69	39.84	1.00	0	0
006	65.00	6.50	121.10	0.00	0	1.00	0
007	65.00	6.50	80.74	40.37	0	1.00	0
008	65.00	6.50	119.53	0.00	0	0	1.00
009	65.00	6.50	79.69	39.84	0	0	1.00

編號 003 所使用的 AP 粒徑為 225 μ m，其餘配方所使用之 AP 粒徑均為 3 μ m。

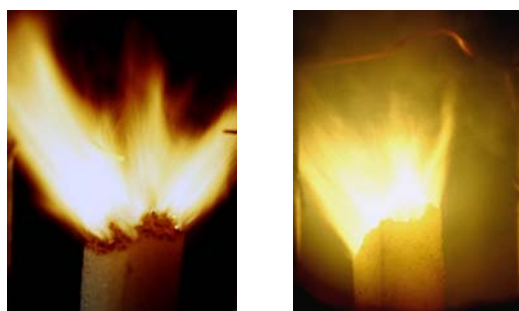
主，對燃面產生的回饋熱大，可提供未燃燒的部份達到預熱效果，形成之火焰較寬且強。圖4 配方編號 003 為 AP 粒徑 225 μ m 時，其粒徑大，比表面積較小，受熱分解後與膠合劑接觸面積較小，因此多數的 AP 分解後，產物自行燃燒形成 Premixed Monopropellant Flame，產生的 Primary Diffusion Flame 則相對較少，但利用 AP 燃燒後多餘的氧可再與膠合劑在離燃面相對較遠氣相中燃燒形成 Final Diffusion Flame。AP(225 μ m)在低壓下，燃面上有少量的碳渣形成且無明顯的火焰；隨壓力升高，化學反應速度加快，燃面上已無碳渣且有稀疏的火焰形成。



(a) (b)
圖4. 配方003 GAP/CL20/AP(225 μ m)燃燒現象：
(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²

3.1.2 不同催化劑 GAP/CL20 燃燒現象

含不同催化劑之 GAP/CL20 推進劑在不同壓力下燃燒現象如圖 5~圖 8。圖 5 配方編號 001 未添加任何燃燒調節劑，在壓力 10 kgf/cm² 以下燃燒時，產生大量的碳渣且看不見火焰形成。圖 6 配方編號 004、圖 7 配方編號 006 及圖 8 配方編號 008 分別於配方編號 001 添加 F₂O₃、Butacene 及 Phthalocyanine Copper 作為催化劑。圖 6 為添加 F₂O₃ 時，與圖 5 配方 001 相比在低壓時可產生火焰，當壓力加大至 30 kgf/cm²，其火焰更明亮、更猛烈。圖 7 為添加催化劑 Butacene，低壓下燃燒火焰稀疏，燃面



(a) (b)
圖3. 配方002 GAP/CL20/AP(3 μ m) 燃燒現象：
(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²

上可看見粒子的燃燒軌跡，隨壓力增加，火焰變強變亮。

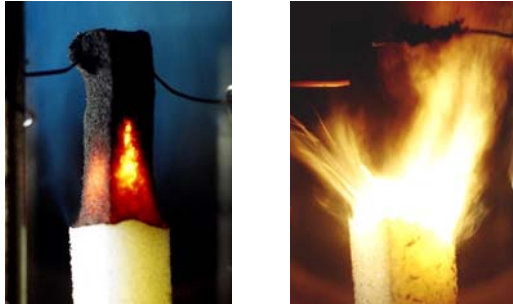


圖5. 配方001 GAP/CL20 燃燒現象：
(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²。



圖6. 配方004 GAP/CL20含0.5% Fe₂O₃ 燃燒現象：
(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²。



圖7. 配方006 GAP/CL20含0.5% Butacene 燃燒現象：
(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²

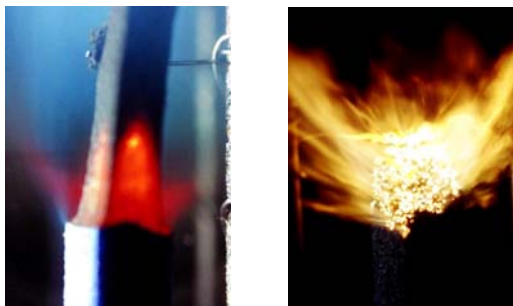


圖8. 配方 008 GAP/CL20 含 0.5% Phthalocyanine Copper 燃燒現象：
(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²

圖6 配方編號004 與圖7 配方編號006 在高溫分解時均會產生鐵離子，所形成的鐵離子下以配方編號004 含量較多，形成的火焰也較強。圖8 配方編號008 高溫分解會產生銅離子，形成之火焰較含有鐵離子的圖6 配方編號004 及圖7 配方編號006 弱，且在低壓下有大量碳渣形成，與圖5 配方編號001 形成的火焰類似。

3.1.3 不同催化劑 GAP/CL20/AP 燃燒現象

含不同催化劑之 GAP/CL20/AP 在不同壓力下燃燒現象如圖9~圖11，三種催化劑在低壓下燃面上似有一很薄的暗區(Dark Zone)存在，該區隨壓力升高而消失，以含 Butacene 者最明顯。圖9 配方編號005 及圖10 配方編號007 分別含催化劑 Fe₂O₃ 及 Butacene，與前述未添加 AP 之圖6 配方編號004 及圖7 配方編號006 相比，添加 AP 後，所形成的燃燒火焰較為劇烈。此一現象與燃速調節劑 Fe₂O₃ 及 Butacene 分解後產生鐵離子具有加速 AP 分解效果，致使反應加速。

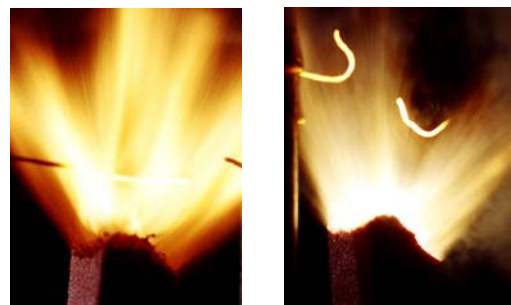


圖9. 配方 005 GAP/CL20/AP 含 0.5% Fe₂O₃ 燃燒現象：
(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²



圖10. 配方007 GAP/CL20/AP含0.5% Butacene 燃燒現象：
(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²



圖 11. 配方 009 GAP/CL20/AP 含 0.5% Phthalocyanine Copper 燃燒現象：(a) 5 kgf/cm²；(b) 30 kgf/cm²

圖 11 配方編號 009 添加 Phthalocyanine Copper 催化劑，高溫分解後產生銅離子，銅離子具有與鐵離子相同的效果，可加速 AP 分解速度，但因銅離子佔的比例甚少，因此不明顯。由火焰結構中可看見在低壓下含不同催化劑之 GAP/CL20/AP 不再有碳渣的產生，隨著壓力的增加，火焰越強，亮度越亮。

綜觀配方編號 001~配方 009 之燃燒現象，各配方的火焰隨燃燒室壓力增加，火焰越強、亮度越亮。其中配方編號 001 在低壓下燃燒時，留有許多的碳渣，燃燒不完全。添加催化劑之 GAP/CL20 推進劑，除配方編號 008 含有 Phthalocyanine Copper 在低壓下燃燒仍有碳渣出現外，其餘均無明顯碳渣形成，取而代之為燃面上有許多的亮點出現。依 Yang et al.[11]觀察 HTPB/CL20 燃燒現象，認為燃面上的亮點為 CL20 與金屬添加物燃燒所形成。因此研判本實驗所觀察到的亮點為 GAP 與 CL20 燃燒分解造成。隨著壓力升高，燃面粒子燃燒情形被火焰亮度覆蓋，已漸無法觀察到亮點。另外可發現，含有氧化劑 AP 之配方，其火焰較未添加氧化劑 AP 之火焰強，顯見 AP 的多氧特性，使 GAP/CL20 推進劑的燃燒化學反應劇烈，因此含有 AP 之燃速較快。

3.2 熄火面觀察

燃面觀察是瞭解燃燒現象之利器，有助於對燃燒機構之瞭解，必須靠燃燒過程中熄火達成。一般推進劑熄火面觀察，以快速降壓熄火裝置可得到推進劑的熄火燃面。本實驗因採用 GAP、CL20 等高能材料，可能受限於推進劑本身高能量影響，無法由傳統方式得到熄火樣品。經多次實驗結果，縱使將壓力提高至 70 kgf/cm²，仍無法將 GAP/CL20 藥塊熄火。參考

國外學者以水熄火方式[12]，將藥塊點燃後丟入水中亦無法將藥塊熄火。經嘗試各種方法後，發現以液態氮可達成熄火目的，得部份藥塊熄火面。將得到之熄火面稍作清理後，以鍍金機在其表面上鍍金，再以 SEM 觀察之。

不同粒徑 AP 燃燒後形成之熄火面如圖 12，配方編號 002 推進劑 AP 粒徑為 3 μ m 如圖 12.(a)，從 SEM 照片中可看到在熄火面上似有一融熔層覆蓋著其他固體顆粒，此融熔層研判為 GAP 及 CL20 受熱熔解所產生，由 EDXA(Energy Dispersive X-Ray Analysis)的元素分析可發現，融熔層所覆蓋的固體顆粒為尚未分解的 AP，融熔層表面有 AP 分解後留下的大量氯元素及氣體衝出融熔層形成之小氣泡。當 AP 粒徑改以 225 μ m 如圖 12.(b)，從其熄火面上可看到裸露於熄火面的 AP 及燃燒後凹陷於表面所留下的痕跡，GAP 及 CL20 所形成的融熔層無法將 AP 整顆埋入，因此表面上沒有氣孔的產生。

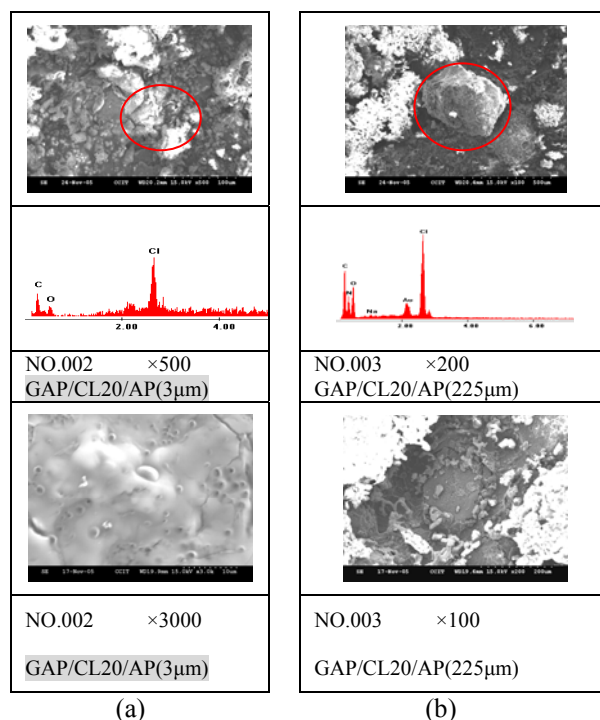


圖 12. 不同粒徑 AP 熄火燃面表面形態及 EDXA 分析：(a) AP--3 μ m；(b) AP--225 μ m

添加催化劑 Fe₂O₃ 之 GAP/CL20 燃面上覆蓋著融熔層且有許多的孔洞及凹層，如圖 13。從熄火面上並未發現 CL20 顆粒，研判燃面上的 CL20 受到大量的回饋熱影響均已成融熔態，僅在次表面上有未融熔的 CL20，因被表面融熔層覆蓋，故看不到未燃燒之 CL20 顆粒。

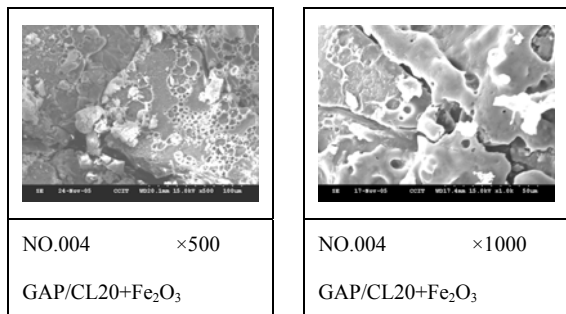
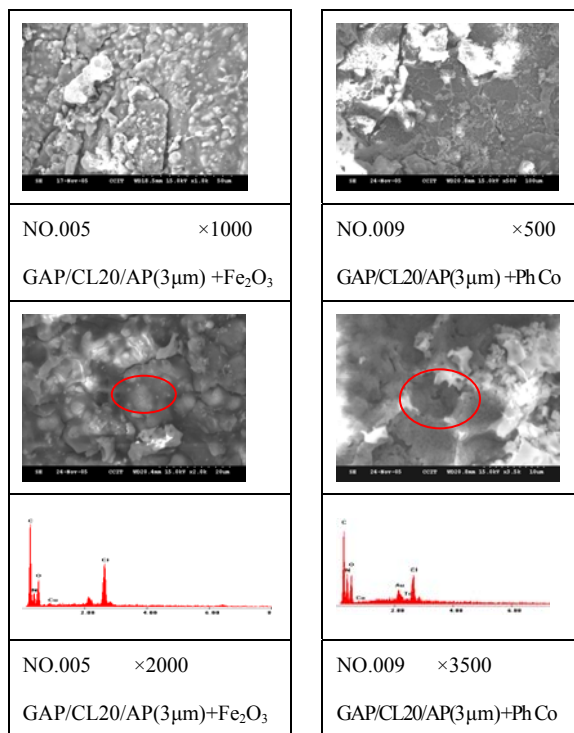


圖 13. 含 Fe_2O_3 催化劑之GAP/CL20熄火面形態

圖 14 為添加催化劑 Fe_2O_3 及 Phthalocyanine Copper 的 GAP/CL20/AP($3\mu m$) 熄火面。圖 14.(a)含 Fe_2O_3 催化劑的熄火面與未添加催化劑之 GAP/CL20/AP($3\mu m$) (圖 12.(a))相似，熄火面上亦有一明顯融熔層，但表面氣泡較少。圖 14.(b)添加催化劑 Phthalocyanine Copper，其熄火表面融熔層不明顯，但由 EDXA 分析似可看見一顆顆 AP 燃燒後留下的痕跡。



(a) 添加催化劑 Fe_2O_3 (b) 添加催化劑 PhCo

圖 14. 不同催化劑之GAP/CL20/AP($3\mu m$)熄火面及EDXA分析：(a) 添加催化劑 Fe_2O_3 ；(b) 添加催化劑PhCo

四、結 論

GAP 系列高能微煙推進劑透過高壓燃燒現象觀察及常壓液態氮熄火面燃燒觀察，可以

瞭解推進劑之燃燒特性。由實驗結果發現，GAP/CL20 推進劑具高能的特性，配方中加入 20%AP 則可增加推進劑的含氧量，使燃燒更完全進而提高能量，且仍符合微煙的要求。以 Window Bomb 觀察 GAP/CL20 燃燒現象，在壓力低於 $10\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 燃燒時，生成物中有大量碳渣，壓力增加至 $30\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 時，則無碳渣出現。以 20%AP 取代 CL20，從燃燒現象中可看出，AP 可有效降低碳渣的形成。添加燃速調節劑可加速 AP 分解，增加火焰亮度，提升燃燒效率。推進劑 GAP/CL20 在常壓下，熄火面為 GAP 與 CL20 受熱後融解形成的融熔態。配方中添加 AP 後，在熄火面上則可看見被融熔層覆蓋著的固體 AP，及 AP 分解生成之氣體衝出融熔層留下的氣孔。

參考文獻

- [1] Eisele, S. and Menke, K., "About The Burning Behavior and Other Properties of Smoke Reduced Composite Propellants Based on AP/CL20/GAP," 32nd International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, pp. 149-1-149-18, 2001.
- [2] Reshmi, S., Varghese, T. L., Krishnan, K., Rao, S. S., and Ninan, K. N., "Thermo Analytical Investigation on Glycidyl Azide Polymer Based Propellant," 34th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, pp. 98-1-98-12, 2003.
- [3] Kubota, N., Sonobe, T., Yamamoto, A., and Shimizu, H., "Burning Rate Characteristic of GAP Propellants," Journal of Propulsion, Vol. 6, No. 6, pp. 686-689, 1990.
- [4] Aiello, P. F. and Manzara, A. P., "GAP Benefits," ADPA International Symposium on Energetic Materials Technology, New Orleans, Louisiana USA, pp. 144-149, 1992.
- [5] 王天放、李疏芬，"新型高能聚合物 GAP 的熱分解和燃燒"，火炸藥學報，第二八卷，第一期，第 5-8 頁，2005。
- [6] 趙孝彬、侯林法、張小平，"GAP/AN 推進劑熱分解性能研究"，推進技術，第二十卷，第三期，第 86-90 頁，1999。
- [7] Li, J. and Brill, T. B., "Nanostructure

- Energetic Composites of CL-20 and Binders Synthesized by Sol Gel Methods,” *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 31, No. 1, pp. 61–69, 2006.
- [8] Kubota, N., *Propellants and Explosives*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, pp. 157–197, 2002.
- [9] Yang, R., Thakre, P., Liao, Y. C., and Yang, V., “Formation of Dark Zone and Its Temperature Plateau in Solid-Propellant Flames: A Review,” *Combustion and Flame* 145, pp. 38–58, 2006.
- [10] Beckstead, M. W., Deer, R. L., and Price C. F., “A Model of Composite Solid-Propellant Combustion Based on Multiple Flames,” *AIAA Journal*, Vol. 8, No. 12, pp. 2200–2207, 1970.
- [11] Yang, R., An, H., and Tan, H., “Combustion and Thermal Decomposition of HNIW and HTPB/HNIW Propellants with Additives,” *Combustion and Flame* 135, pp. 463–473, 2003.
- [12] 陸頌屏、彭匯成，“推進劑煙量評估規範”，中科院化學研究所，桃園，CSIRR-85D-M30，1996。