

改良型焰劑對雲微物理及降雨之影響

侯昭平¹ 林廷彥¹ 鄭根發² 洪偉哲²

¹ 國防大學理工學院環境與資訊工程學系

² 國防大學理工學院化學及材料工程學系

摘 要

燃燒焰劑為人工種雲方法之一，透過燃燒釋放出具有較佳吸水性的巨核粒子，成為雲內的雲凝結核，Johnson (1982)等人認為吸水性粒子半徑大於 $10\mu\text{m}$ 有利於提高雲微物理中的碰撞合併過程的效率，達到人工增雨的目的；若粒子半徑小於 $10\mu\text{m}$ ，不利於雲內的碰撞合併過程，但是較多的小粒子會使雲中凝結核數量增加，分散雲中水氣，使雲滴不易掉落，可應用為局部地區暖雲「人工消雨」的方式，使目標區域，不致因降水影響規劃的戶外活動進行。現今各國普遍採用美國 ICE 焰劑，但其並未公布詳細成份，不易估算增雨成效，且價格較高，不利大面積施放。本研究置重點於焰劑改良，並以達到低成本、粒徑小的吸水性粒子的初步研究目標，透過不同成分的調和方式，目前已可控制焰劑燃燒方式和燃燒後顆粒多數小於 $1\mu\text{m}$ 之設計目標。

關鍵字：雲凝結核、人工增雨、暖雲、人工消雨、焰劑

一、前言

2015 年台灣面臨嚴重的旱象問題，各地區亟需水資源，尤其以中南部地區災情更為嚴重。北台灣的桃園地區，受到石門水庫蓄水量不足的影響，更是已經進入第三階段限水措施，供五停二，民眾對此苦不堪言。據報導，自 2014 年 10 月開始，台灣地區的整體總降水量有逐漸下降的趨勢，直至三月，桃園地區的石門水庫已經承受不了水量短缺的影響，水庫蓄水率跌至 24% 創下歷史新低，造成民生用水的不便。為此，經濟部水利署在三月開始分別多次進行利用空軍 C-130 飛機在空中灑水以及在集水區進行燃燒焰劑的人工增雨作業。但是台灣僅僅只有缺水的問題嗎？其實並不然，在台灣，由於四面環海，一年四季都有豐沛的降水量，對於水資源應該是不虞匱乏的，但是在台灣地區降雨時空分布不均，以及地形的因素影響之下，造成可用水資源相對於降水量是比較少的情形，然而這些沒辦法將之留為己用的水有時就會造成人民的損失。每逢雨量大時，有時候會造成水災的災情，抑或連綿不斷的降雨，造成土石流或者山坡崩塌的災害，因此不管缺水或者水量過多的情形都會在民生上造成生命財產上的安全。

在過去已經有學者對於 CN (Condensation Nuclei) 或者 CCN (Cloud Condensation Nuclei) 的粒徑大小對降水的影響，早就著手研究。在 Langmuir(1948)提出了連鎖反應，表示當凝結核粒子半徑大於 1 微米，容易被激活成雲滴，較能有效提高雲內碰撞過程及降水的效率，但是 Hocking(1959)推翻這個理論，Hocking 提出粒子半徑需大於 19 微米才比較有效能夠提高效率。1982 年後，Johnson 等多位

學者研究，CN 的有效粒徑不是 1 微米，也不是 19 微米，而是只要大於 10 微米，粒徑大小達到 GCCN (Giant Cloud Condensation Nuclei) 或者 UGCCN (Ultra Giant Cloud Condensation Nuclei) 的大小，都能有效的提高碰撞合併效率，進一步提升降雨效率。

陳薏蘋(2008)分別利用 2000 年 2 月 20 日層狀鋒面降水系統以及 2003 年 5 月 16 號深對流強降水系統的兩個天氣個案，針對雲內凝結核的數量濃度作改變，探討對於降雨的影響。在 2000 年 2 月 20 號層狀降水的個案中，透過模式更改 IN 冰相凝結核數量濃度後，再透過分析垂直結構上的 Qi、Qc、Qr、Qs、Qg 混和濃度比以及雲水、雨水厚度分析得知，發現凝結核(冰相粒子或者雲凝結核)對於降雨並沒有太大的影響；而在另一個個案，2003 年 5 月 16 日的深對流強降水系統，也是得到差不多的結果，不過由於是強對流的天气系統，因此更改 IN 數量濃度時，冰相粒子會被帶往更高的地方，在冰核粒子潛熱釋放的影響下，深對流系統會愈來愈強，造成累積降雨量有少量的增加，不過降水是以雪的方式呈現。

黃家傑(2014)利用台灣地區 2006 年 8 月 25 號到 26 號的天氣資料作模擬，探討吸水性氣溶膠對於雲微物理過程的影響，黃家傑的研究中分別針對氣溶膠濃度的不同、粒子半徑大小的不同、不同的人工增雨作業方式(灑水、燃燒焰劑)、不同的人工增雨地點以及焰劑成分的不同對於石門水庫以及曾文水庫兩個集水區的降水影響作探討。黃家傑在模擬結果中，受到地形及當時天氣影響，石門水庫地區比較看不出種雲前後的差別，但是在曾文水庫地區雨量在種雲前後有明顯落差。透過雨量的分析，更可以看出焰劑成分

的不同，對於種雲結果也會產生不同的效果。從實驗中可以了解，短時間內雨量確實可以透過種雲達到提升的效果，但是對長時間的總降雨量卻是影響不大。

現在各國在以焰劑燃燒的方式種雲中，常用的焰劑種類為美國 ICE 焰劑，不過成本高，並且粒子半徑並不能達到 10 μ m 以上的要求，且研磨不均勻。因此希望自行研發並改良，使我們能夠有效的控制吸水性粒子粒徑大小達到提高降水效率並使部分雲系不易降水的目標。在 ICE 焰劑中，有陰離子(酸根離子較多)及陽離子(鉀、鎂、鈣金屬離子較多)。

二、ICE 拆解及分析

完成美國 ICE 焰劑拆解分析(圖 1)，包括：掃描式電子顯微鏡(SEM)、能量散佈光譜(EDS)分析測試(圖 2)。初步分析結果得到美國 ICE，其裝填內容物粉體被膠所包覆，經能量散佈光譜(EDS)分析，ICE 焰劑含有鉀、鈣、鎂、氯等主要元素與文獻報告相吻合(表(1))。因美國 ICE 暖雲焰劑燃放的粒子，陰離子主要為氯離子，也包含少量氟離子及硝酸根離子；而陽離子則主要包含鉀離子、鎂離子、鈣離子及少量鈉離子與銨離子，因此研判美國 ICE 暖雲焰劑，主要成分為氯化鉀(KCl)、氯化鈣(CaCl₂)及氯化鎂(MgCl₂)。ICE 焰劑成分在大自然中非常普遍常見，焰劑燃燒後種雲粒子，可以均勻擴散在大氣中，濃度很低，不會污染環境。將 ICE 使用差示熱分析法(TGA)分析，由圖 3 的波峰可以很清楚的看出 ICE 在 476 $^{\circ}$ C 左右急速燃燒，每克放熱約 1.49 kJ。

分析美國 ICE 焰劑成分後，著手進行本計畫消雨焰劑成分的調配與製備、我們採用不同的配比，構想調配不同比例的焰劑成分(表(2))，進行燃燒測試，運用粒徑儀器測試分析，瞭解焰劑燃燒後不同粒徑大小的分布，藉以尋找最佳的條件。實驗步驟與粒徑測試如表(2)

三、焰劑設計與分析

為了製作燃燒型的焰劑，我們設計的製作流程與步驟如圖4，主要設計的製作方式為將不同粒徑大小的黑藥加入二氧化矽(SiO₂)、氯化鈣(CaCl₂)、氯化鈉(NaCl)及過氯酸鈉(NaClO₄)混合攪拌，同時將膠溶於丙酮中，在與上述材料充分攪拌均勻後，倒入樣品容器中進烘箱溫度50 $^{\circ}$ C烘12小時。等烘乾後，再利用鋁粉(Al)、鎂粉(Mg)、過氯酸鉀(KClO₄)及過氯酸銨(NH₄ClO₄)調配攪拌均勻，再倒入樣品容器第二層，在室溫下自然乾燥後即為焰劑樣品(圖5)。接著，我們在完成焰劑製作後，進行多批次的燃燒測試。

(1) 3月17日焰劑樣品試燒實驗

經上述流程製備焰劑樣品共計8個，焰劑樣品使用 Viton 及 HpvAc 等2種不同的膠合劑、混合不同重量百分比(60、70、80wt.%)的黑藥與不同重量百分比(40、30、20wt.%)10 μ m 粒徑大小的二氧化矽(SiO₂)製備完成。每組配方個分別製作2個樣品(圖6(a))，焰劑樣品試燒後(圖6(c))。本次焰劑試燒目的，在尋求較佳的燃燒配方，經試燒後發現使用配方 Viton 膠合劑、80 wt.% 的黑藥與 20 wt.% 二氧化矽(SiO₂)，燃燒裝況最好，其次配方 Viton 膠合劑、70wt.% 的黑藥與 30 wt.% 二氧化矽(SiO₂)，燃燒效果最差者是配方 Viton 膠合劑、60wt.% 的黑藥與 40 wt.% 二氧化矽(SiO₂)。試燒焰劑樣品發現，所含黑藥重量百分比比較多與二氧化矽(SiO₂)重量百分比比較少者，在試燒時較容易燃燒且遺留殘渣較少；反之所含黑藥重量百分比比較少與二氧化矽(SiO₂)重量百分比比較多者，在試燒時較不易燃燒且遺留殘渣較多。

(2) 3月24日焰劑樣品試燒實驗

由3月17日試燒結果作為我們繼續改良配方的參考依據。焰劑樣品調配使用黑藥、過氯酸鉀(KClO₄)、鋁(Al)、二氧化矽(SiO₂)或氯化鈣(CaCl)或氯化鈉(NaCl)及 Viton 膠合劑。使用過氯酸鉀除了可以增加氧含量助燃外，上含有鉀離子具有吸濕性，有助於焰劑粒子燃燒後，可以吸引空氣中的水氣，進而形成雨滴。鋁可增加燃燒溫度，有助於焰劑燃燒。氯化鈣與氯化鈉同屬於具有吸濕性的離子化合物燃燒後，可以吸引空氣中的水氣，而形成雨滴。二氧化矽(SiO₂)的參雜，其目的是要焰劑燃燒出粒子粒徑的大小，符合我們預期的粒徑的大小，以便決定焰劑是具有消雨或是增雨的功用。至於 Viton 膠合劑的運用其目的是將黑藥、過氯酸鉀(KClO₄)、鋁(Al)、二氧化矽(SiO₂)或氯化鈣(CaCl)或氯化鈉等化合物，攪拌均勻後膠合在一起，避免混參後發生化學反應，且具有固化之功能。本次焰劑試燒樣品區分為五組共計10個，其中2組配方為40%黑藥、7% KClO₄、3% Al、50% 二氧化矽(SiO₂)與 20% Viton 膠合劑，其餘各組以 30wt.%(40、50 wt.%)的二氧化矽(SiO₂)、60wt.% 黑藥、15wt.% Viton 膠合劑。焰劑試燒樣品(圖7(a))，樣品試燒後燃燒後(圖7(c))。試燒焰劑樣品發現，本次試燒時均不易燃燒且遺留殘渣較多，分析其原因黑藥量減少，而二氧化矽(SiO₂)量增加，無法使其順利燃燒。

(3) 3月30日焰劑樣品試燒實驗

由3月24日試燒結果作為我們繼續改良配方的參

考依據。本次使用6wt.%的viton膠合劑、70wt.%的黑藥、30wt.%的二氧化矽(SiO_2)及氯化鈣(CaCl_2)及使用各3g的鎂粉(Mg)及過氯酸鉀(KClO_4)，鋪於焰劑上層藉以助於點燃焰劑之功用，改變製程方式(提升點火敏感度)且配方簡單化(方便研製)。本次試燒焰劑樣品共計四組8個(圖8(a))，發現焰劑在試燒時較容易點燃，燃燒過程的煙霧也較容易產生，燃燒後所遺留的殘渣也變少了(圖(b))，感覺燃燒效果非常不錯。當下決定由本配方在製作一些焰劑樣品，至台灣大學做燃燒焰劑粒徑大小的測試。

由表4的測試數據說明，經改良配方的焰劑燃燒測試粒徑皆小於 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，皆小於 $10\text{ }\mu\text{m}$ 具有消雨作用，尤其粒徑皆集中在 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 左右，顯示小粒徑的燃燒後粒子在種雲中，會將種雲中的雨珠分散，避免形成雨滴而下雨。因此改良所調配的焰劑配方，依據目前測試效果是良好可行，點燃的方式也改善了，燃燒時所產生的煙霧也較多，燃燒後所遺留的殘渣，相對的也變少了幾乎燒盡，本次焰劑燃燒測試，已經突破點燃的方式，且燃燒的焰劑粒徑大小，同樣可以達到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下，結果跟美國ICE焰劑燃燒後的粒徑分佈相似，符合本研究計畫消雨需求。

四、結論

由於人工消雨的方式有兩種，一種是讓雨下不來，這種方式的焰劑燃燒後粒徑必須小於 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下，效果最好。在這次的研究設計中，已可達此目標，未來更將進行數值模擬測試，以瞭解其和不同天氣類型的相對關係；另一種方式就是讓雨提前降下，此類焰劑亦可運用於人工增雨，但這種方式的焰劑燃燒後粒徑必須大於 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上，效果才能提升。因此，我們將持續改良配方，以達到燃燒後 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上粒徑，以符合多面向需求。

五、圖表



圖 1. (a) ICE拆解



圖 1. (b) ICE拆解

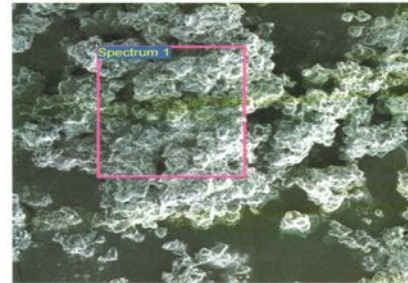


圖 2. (a)拆解ICE SEM圖

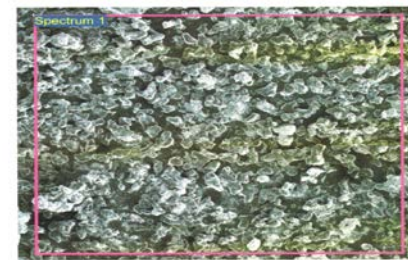


圖 2. (b)拆解ICE SEM圖

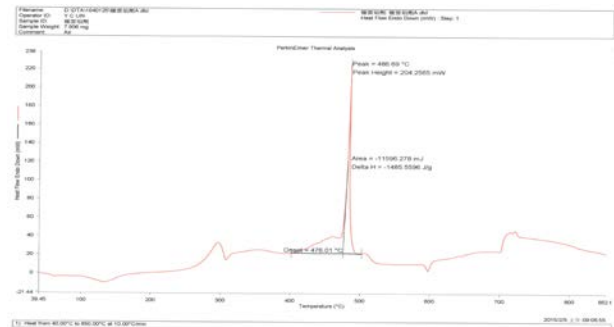


圖 3.差示熱分析法(TGA)

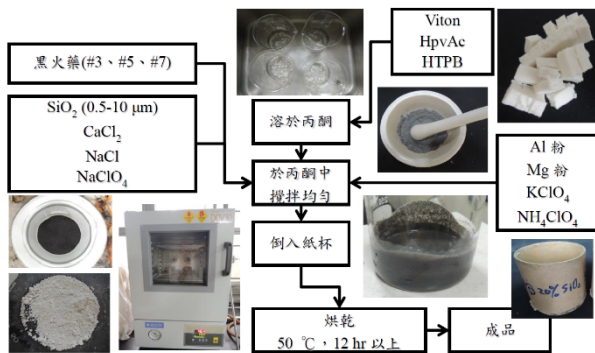


圖 4. 實驗流程與步驟



圖 5. 焰劑樣品



圖 5. 焰劑樣品



圖 6. (a)樣品試燒前



圖 6. (b)樣品試燒中



圖 6. (c)樣品試燒後



圖 7. (a)樣品試燒前

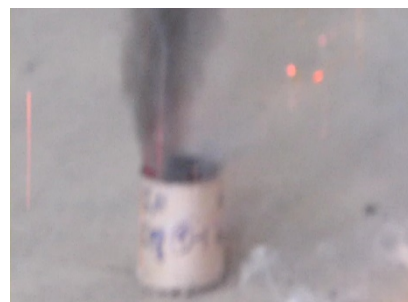


圖 7. (b)樣品試燒中



圖 7. (c)樣品試燒後



圖 8. (a)樣品試燒前



圖 8. (b)樣品試燒中



圖 8. (c)樣品試燒後



圖 9. (a)樣品試燒前



圖 9. (b)樣品試燒中



圖 9. (c)樣品試燒後

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Cl	K	Ca	Total
Spectrum 1	Yes	22.42	27.35	6.60	24.98	5.39	13.26	100.00
Mean		22.42	27.35	6.60	24.98	5.39	13.26	100.00
Std. deviation		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max.		22.42	27.35	6.60	24.98	5.39	13.26	13.26
Min.		22.42	27.35	6.60	24.98	5.39	13.26	13.26

All results in weight%

表 1. ICE元素分析

編號	不同物質之混合比例
1	10%二氧化矽+60%火藥+10%氯化鉀+10%氯化鈣+10%膠合劑
2	10%二氧化矽+60%火藥+10%氯化鉀+10%氯化鈣+5%鎂粉+5%膠合劑
3	10%二氧化矽+60%火藥+8%氯化鉀+8%氯化鈣+5%鎂粉+5%鋁粉+4%膠合劑
4	8%二氧化矽+60%火藥+8%氯化鉀+8%氯化鈣+5%鎂粉+5%鋁粉+6%膠合劑
5	8%二氧化矽+60%火藥+6%氯化鉀+6%氯化鈣+8%鎂粉+8%鋁粉+4%膠合劑

表 2. 調配不同比例的焰劑成分

粒徑大小 樣品編號	0.3 um	0.5 um	1.0 um	5.0 um	10 um
20	90.26	8.61	1.07	0.05	0.02
21	59.17	30.93	9.54	0.25	0.10
22	66.27	29.32	4.28	0.10	0.03
25-1	72.16	23.20	4.46	0.13	0.06
25-2	80.58	17.28	1.96	0.13	0.06
26-1	57.10	25.58	16.23	0.95	0.14
26-2	68.03	24.58	7.12	0.22	0.05
27-1	68.10	21.45	9.88	0.48	0.09
27-2	47.06	34.29	18.11	0.47	0.07
28-1	54.66	28.87	15.60	0.76	0.12
28-2	47.51	32.93	18.76	0.70	0.09
29-1	43.92	34.00	21.04	0.90	0.14
29-2	51.44	30.45	17.18	0.79	0.14

表3. 焰劑燃燒粒徑測試數據(%)

粒徑大小 樣品編號	0.3 um	0.5 um	1.0 um	5.0 um	10 um
37	47.74	34.27	17.80	0.16	0.02
38-1	52.07	34.25	13.55	0.12	0.02
38-2	49.68	33.23	16.93	0.14	0.03
39	46.15	33.34	20.39	0.11	0.02
40	47.12	33.65	19.03	0.18	0.03
41	43.79	35.54	20.39	0.24	0.04
42	47.06	34.93	17.74	0.24	0.03

表4. 焰劑燃燒粒徑測試數據(%)

六、參考文獻

Yi-Pin Chen, 2007: Effect of the Number Concentrations of Condensation Nuclei and Ice Nuclei on Precipitation Formation: A numerical Study, Graduate Institute of Atmospheric Sciences College of Science National Taiwan University Master Thesis

Cheng, C.-T. , W.-C. Wang, and J.-P. Chen, 2007: A modelling study of aerosol impacts on cloud microphysics and radiative properties. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133:283--297

Cheng, C.-T. , W.-C. Wang, and J.-P. Chen, 2010: Simulation of the effects of increasing cloud condensation nuclei on mixed-phase clouds and precipitation of a front system, Atmospheric Research, 96:461--476

Feingold, G., W. R. Cotton, S. M. Kreidenweis, and J. T. Davis, 1999: The impact of giant cloud condensation nuclei on drizzle formation in stratocumulus: Implications for cloud radiative properties. Journal of The Atmospheric Sciences, 56:4100--4117

Hocking, L.M., 1959: The collision efficiency of small drops, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 85(363):44-50

Johnson, D. B., 1982: The role of giant and ultra-giant aerosol particles in warm rain initiation, Journal of the Atmospheric Sciences, 39(2):448--460

Ka-Kit Wong , 2014 : Numerical simulation of increasing hygroscopic aerosols and rain embryos on cloud microphysics and precipitation: Focusing on warm-cloud seeding, Graduate Institute of Atmospheric Sciences College of Science National Taiwan University Master Thesis

Langmuir, I., 1948: The production of rain by a chain reaction in cumulus clouds droplets, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 77:402-41

