



中國工程師學會
Chinese Institute of Engineers - Taichung Chapter
台中分會會訊

NO. **72**

發行人：柳文成
編輯：李中生、黃盈盈

中華民國114年5月

目錄

一. 會務動態	2
二. 專題報導	5
三. 其他相關資訊	16

一、會務動態

中國工程師學會(台中分會)114 年會員大會

時間：114 年 5 月 15 日（星期四）上午 10 時 20 分

地點：國立中興大學電機大樓 3 樓 311 會議室

頒證授獎：

一、114 年「工程終身成就獎」得獎人為：

國立中興大學_副校長蔡清標終身特聘教授

二、114 年「傑出工程師獎」得獎人為：

中龍鋼鐵股份有限公司_冶金技術處非破壞檢驗課姬俊宇課長

三、114 年「優秀青年工程師獎」得獎人為：

中龍鋼鐵股份有限公司_水處理課曹智涵工程師

會務報告

一、本分會 114 年會員大會報名與會人員有 28 名，參加參訪者有 18 名，工作人員 3 名。

二、上述活動經費由總會補助。

三、本分會目前會員人數 411 名。

114 年會員大會活動照片



會員大會照片



「工程終身成就獎」
國立中興大學副校長
蔡清標終身特聘教授



「傑出工程師獎」
中龍鋼鐵股份有限公司
姬俊宇課長



「優秀青年工程師獎」
中龍鋼鐵股份有限公司
曹智涵工程師



全體大合照

114 年中區會員龍騰斷橋鐵道自行車體驗



其餘照片詳：

<http://www.cie.org.tw/tcc/photo.html>

活動花絮



二、專題報導

磷酸二氫鈣和六偏磷酸鈉對小麥粉塵之抑制爆炸效果影響

簡筱芹¹、徐啟銘²

¹ 雲林科技大學環境與安全衛生工程系

² 雲林科技大學環境與安全衛生工程系特約講座教授

摘要

小麥粉、米和玉米等穀物是重要的主食，但在生產和處理過程中，如磨粉、運輸和乾燥等，它們會帶來食品粉塵爆炸的風險。本研究探討了兩種常用於食品添加劑的阻燃劑：磷酸二氫鈣 ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) 和六偏磷酸鈉 ($(\text{NaPO}_3)_6$)，以降低小麥粉粉塵爆炸的風險。通過使用 20 升爆炸鋼球，研究發現此兩種阻燃劑皆顯著提高了小麥粉的最小點火能量 (Minimum ignition energy, MIE)，從 660 mJ 提高至超過 1,000 mJ，從而降低了爆炸敏感性。

在最低爆炸濃度 (Minimum explosion

concentration, MEC) 方面，磷酸二氫鈣將其提高了 33%，而六偏磷酸鈉提高了 26%。在較高粉塵濃度下，磷酸二氫鈣的抑制效果較為顯著，而在較低濃度下，六偏磷酸鈉表現更佳。此外，使用同步熱重分析儀 (Simultaneous thermal analyzer, STA) 進行熱失重分析，並通過高級熱分析軟體 (Advanced thermal analysis software, AKTS) 計算表觀活化能。這兩種阻燃劑均提高了小麥粉的熱穩定性，其中磷酸二氫鈣的表現最佳，使表觀活化能提高約 50 kJ/mol。

關鍵詞：食品粉塵爆炸、阻燃劑、爆炸敏感性、熱失重分析、熱穩定性。

壹、前言

在工業技術的不斷演進中，粉塵爆炸成為工業生產中一種潛在的重大安全隱患，尤其在金屬製造業、化學加工和食品加工等行業中更為顯著。粉塵顆粒在特定條件下與空氣混合，形成可燃性混合物，當這些混合物遇到火源或高溫時，可能引發劇烈的爆炸。因此，為了減少事故發生的風險，保護工作環境及人員安全，眾多學者深入研究粉塵爆炸的原因及機制，以期找出有效的防範措施 (Abuswer et al., 2013, Amyotte et al., 2010, Dufaud et al., 2008, Khalili et al., 2012)。

根據文獻，易發生粉塵爆炸的物質類型包括金屬粉、塑料粉、煤粉、木粉及食品粉等。其中，食品粉因其特殊的物理和化學特性，

特別容易引發爆炸。透過 Dust Safety Science 的統計顯示，2023 年引發粉塵爆炸的物質比例圖中，食品粉佔了 40%，如圖 1 所示，成為發生粉塵爆炸事故最常見的物質。自 2017 年以來，農業活動和糧食生產在全球爆炸事故中佔比達 33% - 50% (Dust Safety Science, 2023)，並且在所有可燃粉塵爆炸中，超過 50% 的事故發生於穀物升降機、筒倉內和麵粉廠。這些數據說明了粉塵爆炸事故的原因提供了依據，也能有效預防類似事故的發生。

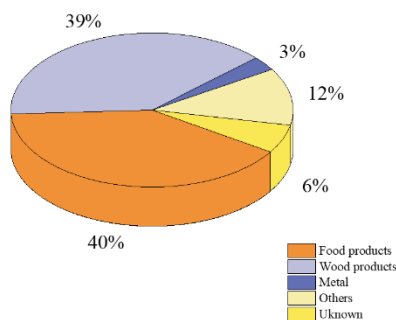
在食品加工廠中，進行食品磨碎、儲存及加工等過程時，常會產生漂浮雲狀之粉塵。粉塵爆炸的發生主要涉及粉塵在空氣中的分佈、粉塵的粒徑、粉塵濃度、點火源及其與空氣中的氧氣反應的過程。這些粉塵雲的爆炸

導致了一些嚴重的工業事故和可觀的經濟損失，因此，瞭解其形成機制與防範措施至關重要。

在食品粉中，穀物在全球飲食中扮演著重要角色，是人類的主食之一，主要形式包括大麥、小麥、大米和玉米等。其中，小麥和其它穀物以及麵粉產生的粉塵特別容易點燃並迅速傳播火焰，因為點燃這類粉塵所需的熱值相對較小 (M. Nifuku and H. Katoh, 2001)。隨著技術的進步，為了延長食品的保存期限、提升食品品質及提高營養價值，製造商在加工過程中使用了各種食品添加劑。這些添加劑不僅提升了產品的價值，同時也可能達到阻燃劑的效果。

貳、實驗方法

1. 樣品介紹：本研究採用聯華製粉食品公司所生產的純小麥粉 (Wheat flour) 及帝一化工所生產的磷酸二氫鈣 (Calcium phosphate monobasic, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) 和六偏磷酸鈉 (Sodium metaphosphate, $(\text{NaPO}_3)_6$) 做為試驗樣品。並於實驗開始之前，為了將粒徑對實驗之影響減至最低 (Iqin et al., 2022)，首先將小麥粉、磷酸二氫鈣及六偏磷酸鈉之粒徑篩分至 $10.0 - 100.0 \mu\text{m}$ ，接著以烘箱設置 50°C 並放置 24 小時烘乾三個樣品，以降低含水量對實驗的影響。接著使用相同



比例配置，如表 1 所示。

圖 1. 2023 年引發粉塵爆炸之粉塵物質類別的百分比 (Dust Safety Science, 2023)

表 1. 小麥粉與磷酸二氫鈣/六偏磷酸鈉之配比

樣品名稱	樣品組成	比例
WF	小麥粉	—
WF@Ca(H ₂ PO ₄) ₂	小麥粉： 磷酸二氫鈣	8:2
WF@(NaPO ₃) ₆	小麥粉： 六偏磷酸鈉	8:2

2. 乾濕兩用粒徑分析儀 (Laser particle size analyzer, LPSA)：本研究使用來自德國 Fritsch 公司的 Laser particle sizer，型號為 Analysette 22 之乾、濕兩用粒徑分析儀測試粒徑分佈，此型號能夠精確分析從奈米級到毫米級的粒徑儀器。本研究選用乾式測定方法，粒徑分佈操作方法主要遵循：ASTM B822-10 (Standard test method for particle size distribution of metal powders and related compounds by light scattering) (American Society for Testing and Materials, 2017)，此儀器的乾式測定方法是利用壓縮空氣生成的氣流來驅動沉積的粉體，形成穩定的粉塵雲氣流。在這一過程中，粉體顆粒被帶入氣流中，使其充分懸浮，便於進行精確的粒徑測量。儀器設計上考慮到顆粒與管壁的碰撞問題，因此在靠近管壁的位置形成了風牆，這樣的設計有效防止了粉體顆粒因碰撞而出現碎裂或其它形變，保證了測量的準確性。運用激光繞射技術，Analysette 22 能夠準確定義粉體顆粒的大小。激光光束穿過粉塵雲，根據顆粒對光束的散射情況來計算粒徑。這技術的粒徑測量範圍廣泛，涵蓋 $0.1 - 2,100 \mu\text{m}$ 的顆粒，能適應不同材料的需求。且這種乾式測定方法特別適合於顆粒形狀不規則或易於破碎的材料。由於不涉及液體介質，樣品的處理更加簡便，不會引入額外的溶劑影響測量結果。操作過程中的快速清理和調整，使得儀器能夠在多種環境下保持高效的性能。

3. 最小點火能量測試儀 (Minimum ignition energy, MIE3)：本研究所使用之 MIKE 3 由瑞士 Birsfelden Adolf Kthner AG 製造，測試方法遵循 ASTM E2019 (Standard test

method for minimum ignition energy of a dust cloud in air) (American Society for Testing and Materials, 2019)，其測試出的最小點火能量 (MIE) 判定標準為相同點火能量與粉塵濃度在 10 次的試驗中，只要其中有 1 次能引爆粉塵雲，此點火能量則被認定可引燃粉塵雲。然而於空氣環境中進行試驗，測試粉塵雲處於最容易著火的濃度時，能使粉塵雲著火的最小能量值，亦稱為最小火花引燃能量或者臨界點火能量，當最小點火能量越低時即代表該粉塵雲爆炸危險性越高，此數值可作為控制現場各種可能之點火源（包含靜電）之重要參數。在結果圖中，實心點表示發生著火的條件，並具有特定的濃度和能量設置，表示為 E2。空心點表示不燃燒的實例，對應於能量狀況 E1 (Cheng et al., 2024)，接著帶入下列公式計算出 MIE 值：

$$E_s = 10^{\frac{\log E2 - I[E2]8 \times (\log E2 - \log E1)}{(NI+I)[E2]+1}} \quad (1)$$

4.20 升爆炸鋼球 (20-L Apparatus)：本研究使用由瑞士 Adolf Kuhner AG 所生產之 20-L 爆炸鋼球，此儀器符合 NFPA 68 規範，操作標準遵循 EN 14034 (Determination of explosion characteristics of dust clouds)，模擬小麥粉於空氣環境下之粉塵爆炸現象，並且測量粉塵的最小爆炸濃度 (MEC)、最大爆炸壓力 (Pmax)、最大爆炸壓力上升速率 ((dP/dt)max) 以及標準化壓力上升速率 (Kst)。此儀器廣泛應用於研究高危險性化學反應及其特性。該裝置能容納 20 升樣品，提供足夠的反應空間，讓研究人員能在可控且安全的環境中進行測試。鋼球結構堅固，採用高強度的鋼材製造，確保在高壓、劇烈反應或爆炸情況下的物理完整性不受損。且具備高度先進的安全設計，包括自動壓力釋放系統、過熱保護以及防爆結構，能有效防止試驗過程中可能出現的意外情況。內部結構設計精良，還搭配 KSEP 320 點火器控制電極放寬，以及 KSEP 332 壓力感應系統 (Pressure sensors) 連接至電腦主機，軟體則運用 KSEP 7.0 操作與獲取測試的結果。此外，這款爆炸鋼球能支持多種測試方法，包括壓力激增測試 (Pressure surge testing) 和燃燒反應測試等，適用於研究不同材料在爆炸條件下的行為。其應用領域涵蓋製藥、化學品製造、能源產業和爆炸性材料的安全評估等

領域，為需要進行危險物質實驗的科學研究和工業測試提供了理想的工具。

5. 同步熱重分析儀 (Simultaneous thermogravimetric analysis, STA)：本研究使用日本 Hitachi 公司所製造的 STA 7200RV 同步熱重分析儀 (Simultaneous thermogravimetric analyzer, STA)，該儀器能同時進行熱重分析 (Thermogravimetric analyzer, TGA) 和差示掃描量熱法 (Differential scanning calorimetry, DSC)，提供了對材料熱穩定性、熱分解、氧化還原行為的深入瞭解。此儀器還可在高達 1,500 °C 的溫度範圍內進行精確測量，並具備多氣體控制功能，使得實驗能在不同氣體環境中進行，如氧氣、氮氣和氫氣等。通過將 TGA 和 DSC 同步進行，能夠在同一實驗中同時獲得樣品的質量變化和熱效應數據。這不僅提高了實驗效率，還能提供更全面的材料熱行為分析。例如，在樣品分解時，TGA 可以測得質量的下降，而 DSC 則可以檢測到這一過程中吸放熱的情況，兩者結合可以更精確地確定分解機制和溫度範圍，這樣的同步測量對於研究涉及熱分解、氧化還原反應、相變等材料性質的實驗特別有用，能夠為材料的熱力學性質提供詳盡而可靠的數據。本研究的操作方法為放入 3 mg 的粉塵樣品於坩堝中，接著設定升溫範圍為 30–700 °C，且升溫速率為 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 及 10.0 °C/min，使用的氣體為空氣。

6. 高等熱分析軟體 (Advanced kinetics and technology solutions, AKTS)：透過 STA 測試出的 TG，接著運用高等熱分析軟體 (Advanced thermal analysis software, AKTS) 模擬不同情況下樣品的反應，藉此得出之本實驗使用 Friedman 法、Flynn-Wall-Ozawa 法及美國材料試驗協會標準 ASTM-E698 方法可求得 Ea。所採用等轉化率法之相關方程式與參數如下所示：

(1) Friedman 方法

AKTS 是基於 Friedman 方程式之等轉化率為分法，是一種非等溫動力學分析方法。是最常用的微分方法，其推導不涉及任何近似和假設。因此，此方法適用於動力學分析

任何熱降處理。它基於 Arrhenius 方程式，用於描述分析材料反應速率與溫度之間的關係以及獲得化學反應的熱力學參數 (熵和焓)，此外，該方法還可以用來計算反應的活化能。其主要特點是將轉化函數 $f(\alpha)$ 和頻率因子 $A(\alpha)$ 結合，通過在特定轉化條件下進行線性回歸，將 $\ln(d\alpha/dt)$ 和 $1/T$ 之間的關係進行擬合，從而在不受反應動力學 $f(\alpha)$ 形式限制的情況下求得活化能 E_a ，可提供出較為準確的動力學參數。

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln[Af(\alpha)] - \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

(2) Flynn-Wall-Ozawa 方法

FWO 假設反映遵循一些反映模型 $f(\alpha)=(1-\alpha)$ ，從而進行動力學參數之評估。是一種常用於熱分析中的非等溫反應動力學研究的方法。它通過在不同的加熱速率下進行實驗，利用熱重分析 (TGA)、差示掃描量熱法 (DSC) 等數據，來計算表觀活化能，且能夠在不需確定反應級數的情況下計算活化能，又因積分法在運算模式上較微分法來得簡單。因此 FWO 方法廣泛應用於化學反應、材料科學和熱分解等領域的研究中。

$$\ln \beta = -1.0516 \frac{E_a}{RT} + \text{const} \quad (4)$$

(3) ASTM-E698 方法

ASTM-E698 是一種等溫動力學分析方法，應用於研究聚合反應之熱分析數據，通過測量在不同的等溫條件下測量反應速率來計算反應的活化能和反應機理。加熱速率 β 與反應速率 $(d\alpha/dt)$ 之間的關係有助於推算出反應的動力學參數。因為此方法為純線性擬合等轉化率線性法，只能計算最大失重速率溫度下之 E_a ，且至少需要四種不同昇溫速率估算其反應動力學參數。

$$\beta \left(\frac{da}{dt} \right) = A \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right] \times f(\alpha) \quad (5)$$

參、結果與討論

1. 粒徑分佈：使用 LPSA 對小麥粉、磷酸二氫鈣與六偏磷酸鈉進行分析，主要以瞭解小麥粉之粒徑分佈，而分析兩個阻燃劑之粒徑事為確保與小麥粉之粒徑是否在同一粒徑範圍內，避免粒徑影響後續的研究結果。本研究之粒徑分析為進行三次粒徑分析實驗之結果，並將結果取平均值。由檢測圖譜可以得知小麥粉累積粒徑百分比如圖 2 所示，兩個阻燃劑的累積粒徑百分比則如圖 3 和圖 4 所示。根據美國消防協會 NFPA 654 標準，500 μm 以上之粉塵，其顆粒相對較大，表面積相對較小，因而具有沉降速度快，火焰傳播速度慢之特性，即使粉塵具有可燃性，但難以形成粉塵爆炸，而小麥粉塵之 D50 小於 500 μm ，表示該小麥粉塵為具有潛在燃燒爆炸危害特性的粉塵，因此需要對小麥粉塵進行進一步燃燒爆炸特性分析。

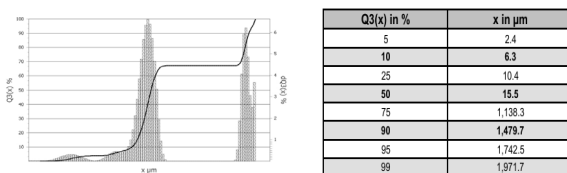


圖 2. 以 LPSA 測試小麥粉之粒徑結果

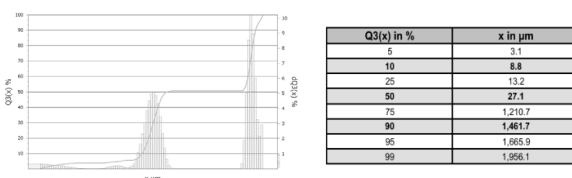


圖 3. 以 LPSA 測試磷酸二氫鈣之粒徑結果

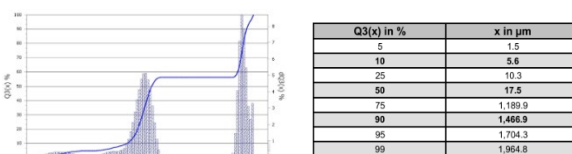


圖 4. 以 LPSA 測試六偏磷酸鈉之粒徑結果

2. 最小點火能量 (Minimum ignition energy, MIE):本研究之小麥粉塵及小麥粉添加磷酸二氫鈣或六偏磷酸鈉 MIE 實驗結果如圖 5 所示，在不添加任何阻燃劑的情況下，由圖

5 (a) 可以發現小麥粉塵雲的最小點火能量位於 3,000 mg 的濃度以及 1,000 mJ 的能量，小麥粉的 *MIE* 值經過公式 (4) 計算出來為 660 mJ，根據 ASTM E2019 標準，如表 2 所示，小麥粉的危險等級被歸類為的 2 級，屬於對靜電敏感之粉塵，有機率在製程中正常作業流程之靜電所引燃。接著添加兩種阻燃劑之後，由圖 5 (b) 及 5 (c) 所示，兩者的 *MIE* >1,000 mJ，皆明顯地提高了小麥粉塵爆炸的最小點火能量，表示了同樣的條件下，爆炸發生的機率降低。從而判斷出阻燃劑可以減少粉塵雲與外部火源接觸時的點火敏感度，從而有效抑制爆炸。

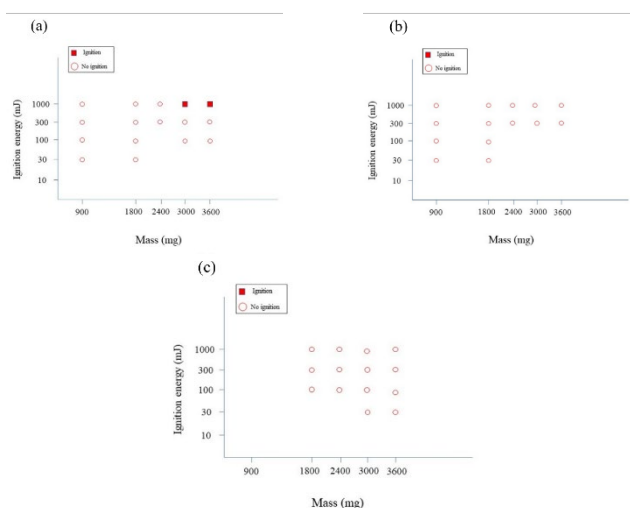


圖 5. (a) 小麥粉、(b) 小麥粉+磷酸二氫鈣與 (c) 小麥粉+六偏磷酸鈉之 *MIE* 結果

表 2. ASTM E2019 定義之 *MIE* 風險等級

等級	<i>MIE</i>	危害定義
1	$MIE > 1,000$ mJ	粉塵對靜電不敏感
2	$30 \text{ mJ} < MIE \leq 1,000 \text{ mJ}$	粉塵對靜電敏感
3	$3 \text{ mJ} < MIE \leq 30 \text{ mJ}$	粉塵對靜電異常敏感
4	$1 \text{ mJ} < MIE \leq 3 \text{ mJ}$	粉塵對靜電極為敏感

3.20 升爆炸鋼球結果

(1) 最小爆炸濃度 (Minimum explosion concentration, *MEC*)：小麥粉在空氣環境中的 *MEC* 結果如圖 6 所示。根據 EN 14034-3 標準，當壓力達到或者超過 0.2 barG 時，表示發生爆炸，若壓力小於 0.2 barG 則表示沒有發生爆炸。小麥粉在沒有添加阻燃劑的狀況下 *MEC* 為 150 g/m³，接著從圖 7 可以發現添加阻燃劑後小麥粉的 *MEC* 皆明顯提高了，添加磷酸二氫鈣的 *MEC* 為 225 g/m³，提高了 33%；而添加六偏磷酸鈉的 *MEC* 為 205 g/m³，提高了 26%。這表示此兩阻燃劑對小麥粉之抑制爆炸是有效的，從而降低了爆炸的敏感性。

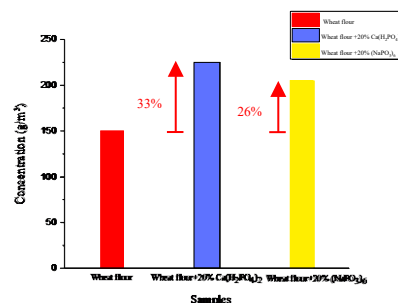


圖 6. 小麥粉、小麥粉+磷酸二氫鈣及小麥粉+六偏磷酸鈉之 *MEC*

(2) 爆炸嚴重性 (Explosion severity)：粉塵爆炸的嚴重性可以透過 $P_{\max}$ 和 $(dP/dt)_{\max}$ 兩個參數進行探討，圖 7 (a) 和 (b) 分別為小麥粉、小麥粉+磷酸二氫鈣及小麥粉+六偏磷酸鈉之 $P_{\max}$ 及 $(dP/dt)_{\max}$ ，由圖 7 (a) 可以發現六偏磷酸鈉在小麥粉塵濃度為 750 - 1,000 g/m³ 時的抑制效果比較好，這表明在此濃度範圍內，六偏磷酸鈉能有效降低爆炸壓力和壓力上升速率，從而提高安全性。相較之下，而粉塵濃度為 1,250 g/m³ 以上時磷酸二氫鈣的抑制效果比較好，因此，這些結果提供了一個實用的依據，說明在不同粉塵濃度下選擇合適的阻燃劑非常重要。在食品工廠或其它需要處理可燃粉塵的場所，可以根據實際的粉塵濃度來選擇適當的抑制劑。

接著透過圖 7 (b) 所示的 $(dP/dt)_{\max}$ 經計算後，在粉塵濃度為 750 g/m³ 時小麥粉的 K_{St}

為 65，根據爆炸危險性分級，如表 3 所示，小麥粉的等級為 St-1，屬於中等危險，添加磷酸二氫鈣後沒有明顯的阻燃效果，等級維持在 St-1，而添加六偏磷酸鈉後的 K_{st} 為 40，雖然等級一樣為 St-1，但 K_{st} 是明顯降低，證實六偏磷酸鈉在低濃度時抑制效果；而在粉塵濃度為 $1,250 \text{ g/m}^3$ 時，如表 4 所示，小麥粉的等級一樣為 St-1，屬於中等危險，在高濃度時確實是添加磷酸二氫鈣的抑制效果比六偏磷酸鈉好， K_{st} 降低了許多。

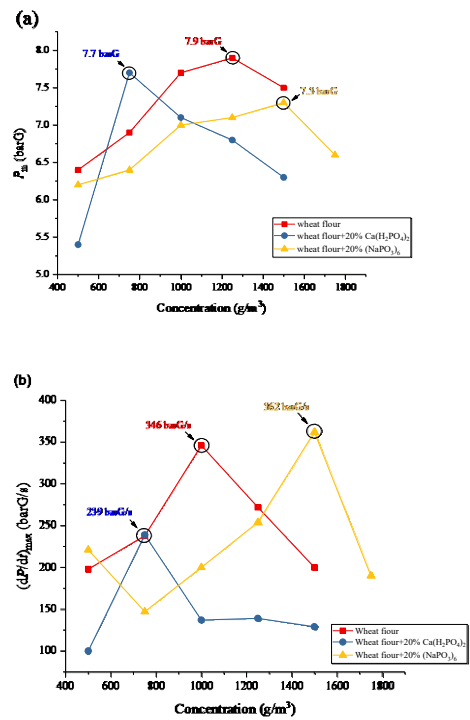


圖 7. 小麥粉、小麥粉+磷酸二氫鈣及小麥粉+六偏磷酸鈉之 (a) P_{max} 和 (b) $(dP/dt)_{max}$

表 3. $(dP/dt)_{max}$ 和 K_{st} 在粉塵濃度為 750 g/m^3 的評估結果

樣品	$(dP/dt)_{max}$ (barG/s)	K_{st} (m barG/s)	K_{st} 等 級	爆 炸 現 象
WF	238	65	St-1	中 等 危 險

WF@20% Ca(H ₂ PO ₄) ₂	239	65	St-1	中 等 危 險
WF@ 20% (NaPO ₃) ₆	147	40	St-1	中 等 危 險

表 4. $(dP/dt)_{max}$ 和 K_{st} 在粉塵濃度為 $1,250 \text{ g/m}^3$ 的評估結果

樣品	$(dP/dt)_{max}$ (barG/s)	K_{st} (m barG/s)	K_{st} 等 級	爆 炸 現 象
WF	272	74	St-1	中 等 危 險
WF@20% Ca(H ₂ PO ₄) ₂	139	38	St-1	中 等 危 險
WF@ 20% (NaPO ₃) ₆	226	61	St-1	中 等 危 險

小麥粉與磷酸二氫鈣或六偏磷酸鈉的爆炸機制進一步在圖 8 所示，圖 8(a)和 (b) 顯示在粉塵濃度 750 g/m^3 和 $1,250 \text{ g/m}^3$ 的小麥粉、添加了 20% 磷酸二氫鈣及添加 20% 六偏磷酸鈉的小麥粉，隨著時間變化的 $(dP/dt)_{max}$ 。此兩種選擇的粉塵濃度為根據圖 7 (a) 兩種阻燃劑在不同粉塵濃度表現的差異性而用來做研究。最大爆炸壓力上升速率所需的時間 (Time to maximum rate of pressure rise, TMRPR)，表示注入一點火行程所需的時間，用來評估小麥粉、小麥粉/磷酸二氫鈣與小麥粉/六偏磷酸鈉從粒子燃燒到爆炸階段的點火敏感性及火焰傳播。從圖 8 (a) 可以證明在低濃度的狀況下六偏磷酸鈉

的抑制效果是優於磷酸二氫鈣的，上升速率是大幅降低，然而在 $1,250 \text{ g/m}^3$ 濃度下，如圖 8 (b) 所示，磷酸二氫鈣抑制效果更為顯著，甚至延遲了點火時間。

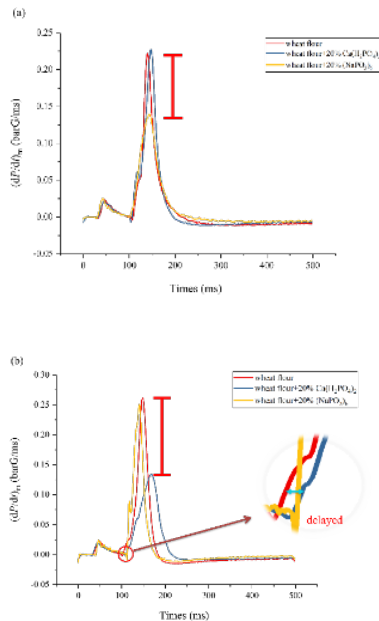


圖 8. 小麥粉、添加 20% 磷酸二氫鈣及添加 20% 六偏磷酸鈉的小麥粉，在不同粉塵濃度下隨著時間變化的 $(dP/dt)_{\max}$ ，濃度分別為 (a) 750 g/m^3 及 (b) $1,250 \text{ g/m}^3$

4. 爆炸風險分析 (Explosion risk analysis): 基於上述燃爆參數的測試結果建立了爆炸特性參數雷達圖，可以更直觀的量化添加阻燃劑對小麥粉的爆炸風險。如圖 9 所示，圖 9 (a) 為小麥粉、添加 20% 磷酸二氫鈣及添加 20% 六偏磷酸鈉的小麥粉在粉塵濃度 750 g/m^3 時的風險評估雷達圖，從面積大小可以觀察到，在低粉塵濃度時添加六偏磷酸鈉的面積明顯縮小，表示六偏磷酸鈉在小麥粉粉塵濃度較低時能有效地降低小麥粉的爆炸風險。由圖 9 (b) 是在粉塵濃度 $1,250 \text{ g/m}^3$ 時的風險評估雷達圖，可以看出添加磷酸二氫鈣時，各方面參數都是明顯小於小麥粉的，面積明顯縮小許多，表示降低小麥粉的爆炸風險之效果更好，總結起來，不同的阻燃劑對小麥粉的爆炸風險具有不同的抑制效果，六偏磷酸鈉在較低粉塵濃度下效果較好，而磷酸二氫鈣則在高粉塵濃

度時具有更強的風險降低能力。因此在製程中，應根據作業量選擇合適的阻燃劑，可以設置粉塵濃度監測儀器，即時監控粉塵濃度，當粉塵濃度達到危險濃度時，能夠立即啟動應急處理機制。

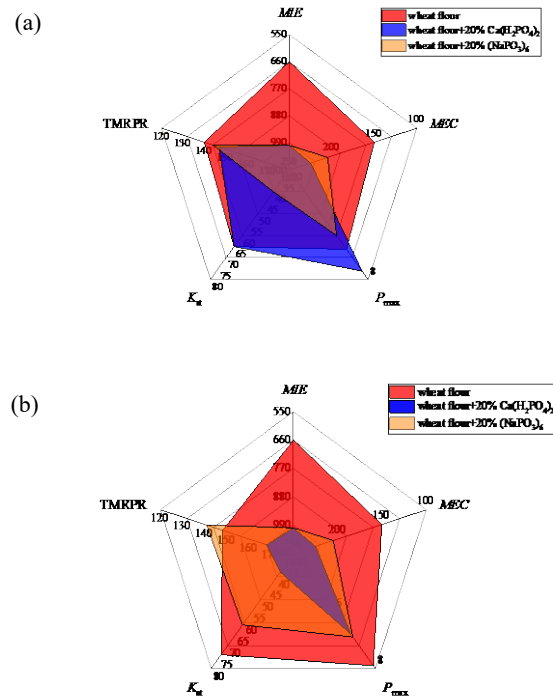


圖 9. 小麥粉、添加 20% 磷酸二氫鈣及添加 20% 六偏磷酸鈉的小麥粉，在不同粉塵濃度下的爆炸特性參數雷達圖: (a) 750 g/m^3 (b) $1,250 \text{ g/m}^3$

5. 熱重損失分析 (Thermogravimetric analysis): 使用 STA 分別對小麥粉、添加 20% 磷酸二氫鈣和添加 20% 六偏磷酸鈉之小麥粉的熱重損失 (TG) 和微分熱重曲線 (DTG) 進行分析，結果如圖 10 所示。圖 10 (a) 為 TG 結果，此圖顯示的起始分解溫度較難判斷出兩者抑制劑的效果，於是從圖 10 (b) 為 DTG 的結果觀察，可以觀察到添加磷酸二氫鈣的小麥粉之最大失重速率縮小了，表示磷酸二氫鈣的抑制效果最為顯著。

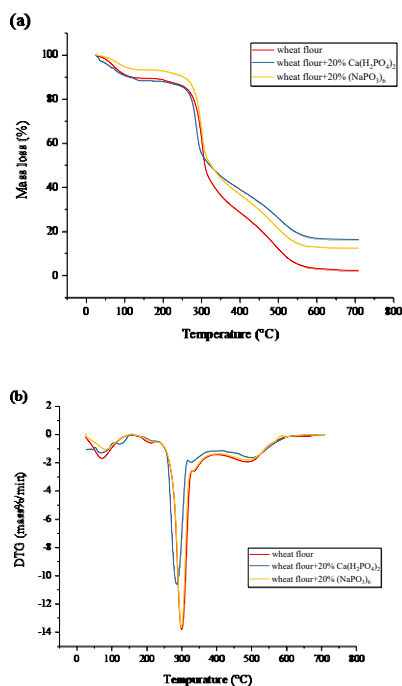


圖 10. 小麥粉、添加 20% 磷酸二氫鈣和添加 20% 六偏磷酸鈉之小麥粉之 (a) TG 及 (b) DTG

6. 熱動力學分析 (Thermodynamic analysis): 本研究針對添加 20% 的磷酸二氫鈣及添加 20% 的六偏磷酸鈉之小麥粉，透過 STA 分別以升溫速率 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 及 10.0 °C/min，於空氣環境下，溫度範圍 30–700°C 利用 AKTS 進行 Friedman 法、Flynn-Wall-Ozawa 法及 ASTM-E698 方法來求得 E_a 。

(1) Friedman 方法

透過 Friedman 計算表觀活化能、頻率因子與機理函數之自然對數及相關係數，並繪製成曲線圖。由於等轉化率法於 $\alpha < 0.2$ 及 $\alpha > 0.9$ 所計算之表觀活化能較不正確，是因為分解或固化反應之初期即接近結束的階段都叫不穩定 (Alonso et al., 2006)，因此本研究針對 $0.2 < \alpha < 0.9$ 之計算結果做討論。圖 11 至圖 13 為小麥粉、添加 20% 磷酸二氫鈣和添加 20% 六偏磷酸鈉之小麥粉的表觀活化能曲線圖，其中 X 軸為反應進程， Y_1 對應黑色曲線為表觀活化能， Y_2 對應紅色曲線為頻率因子與機理函數之自然對數， Y_3 則對應藍色曲線為相關係數。相關

係數的平方為 R^2 ，因此相關係數越接近 -1，表示其相關性越強。

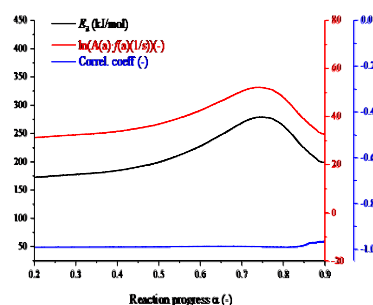


圖 11. 以 Friedman 方法取得小麥粉之表觀活化能曲線圖

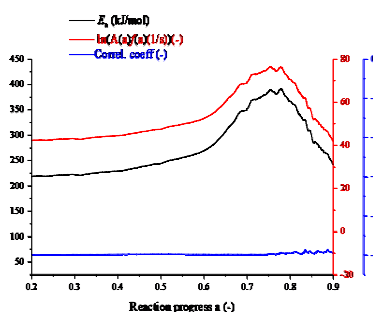


圖 12. 以 Friedman 方法取得含 20% 磷酸二氫鈣的小麥粉之表觀活化能曲線圖

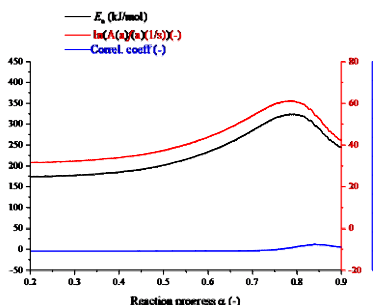


圖 13. 以 Friedman 方法取得含 20% 六偏磷酸鈉的小麥粉之表觀活化能曲線圖

(2) Flynn-Wall-Ozawa 方法

圖 14 至圖 16 為使用 Flynn-Wall-Ozawa 所得之表觀活化能曲線圖，計算後之表觀活化能與 Friedman 法相比有些許差異，不過添加阻燃劑後的小麥粉之表觀活化能皆有提高，且當活化能提高時，意味著反應變得更加困難，需要更多的能量才能完成反應，表示確實有成功抑制小麥粉。

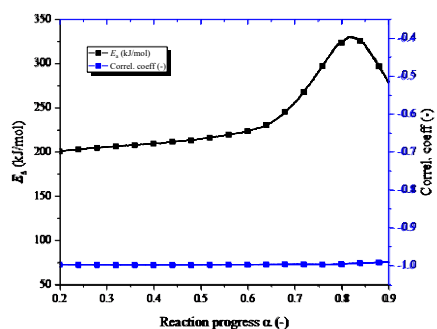


圖 14. 以 FWO 方法取得小麥粉之表觀活化能曲線圖

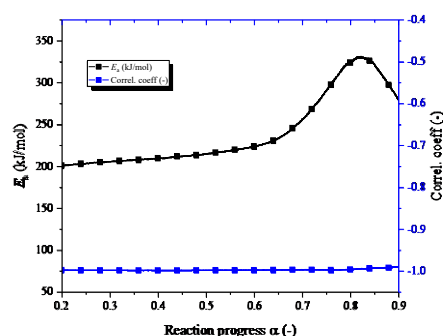


圖 15. 以 FWO 方法取得含 20% 磷酸二氫鈣的小麥粉之表觀活化能曲線圖

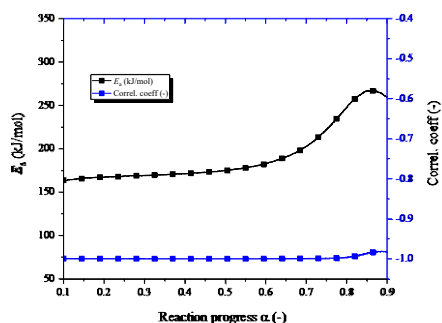


圖 16. 以 FWO 方法取得含 20% 六偏磷酸鈉的小麥粉之表觀活化能曲線圖

(3) ASTM-E698 方法

ASTM-E698 為微分後之線性擬合曲線，每個升溫數率取一點，將表觀活化能數據作線性擬合可得到斜率並計算表觀活化能，圖 17 至圖 19 三個樣品之溫度與轉化率圖。

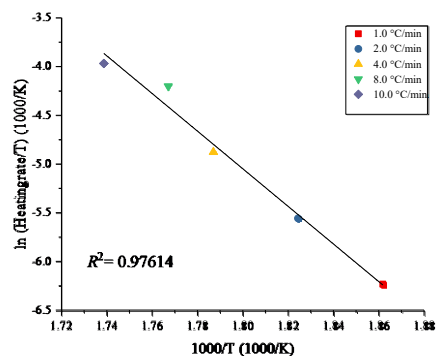


圖 17. 以 ASTM-E698 方法取得小麥粉之溫度與轉化率圖

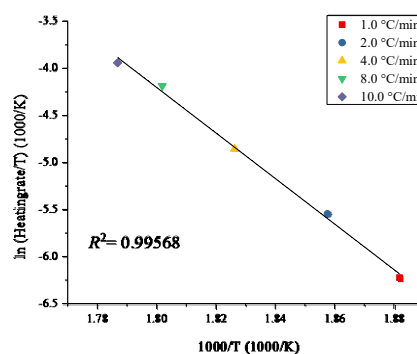


圖 18. 以 ASTM-E698 方法取得含 20% 磷酸二氫鈣的小麥粉之溫度與轉化率圖

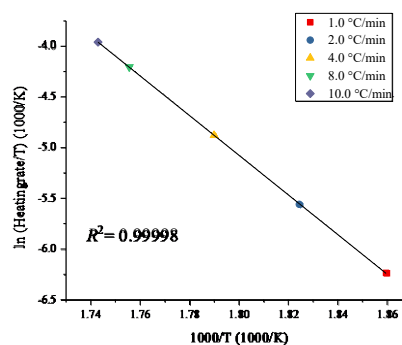


圖 19. 以 ASTM-E698 方法取得含 20% 六偏磷酸鈉的小麥粉之溫度與轉化率圖

綜合三種不同方法之熱動力學參數之比較，如表 5 所示，可以發現添加阻燃劑的小麥粉在三種方法的平均活化能皆有提高，表示兩者阻燃劑都有顯著的抑制效果，提升

了小麥粉的熱穩定性。

表 5. 三種方法之表觀活化能比較

使用方 法	E_a (kJ/mol)		
	小麥 粉	含 20% 磷酸二氫 鈣的小麥 粉	含 20% 六偏磷酸 鈉的小麥 粉
Friedman	215.5	275.5	231.0
Flynn- Wall- Ozawa	189.3	240.3	195.2
ASTM- E698	152.6	191.2	154.5

肆、結論與建議

1. 結論

- (1) 未添加阻燃劑的小麥粉塵雲的 MIE 為 660 mJ，屬於對靜電敏感的 2 級危險等級 (St-2 class) 粉塵，存在一定的爆炸風險。添加磷酸二氫鈣或六偏磷酸鈉後， MIE 值顯著提高，均超過 1,000 mJ，表示兩阻燃劑對小麥粉塵爆炸是有一定的抑制效果。
- (2) MEC 測試結果顯示，小麥粉在添加磷酸二氫鈣後，小麥粉的最小爆炸濃度提高了 33%，添加六偏磷酸鈉後則是提高了 26%。這表示，此兩種阻燃劑能有效降低其爆炸敏感性。
- (3) 透過 P_{max} 和 $(dP/dt)_{max}$ 的測試結果可以發現，兩種阻燃劑在不同的小麥粉粉塵濃度時有不同的抑制效果，磷酸二氫鈣是在高粉塵濃度時抑制效果較為優秀，六偏磷酸鈉則是在低粉塵濃度時較有抑制效果。這表示可以依照智盛時所需的粉塵濃度去選用適合的阻燃劑。
- (4) 添加阻燃劑會使小麥粉的 $TMRPR$ 提高， $(dP/dt)_{max}$ 的減少，爆炸嚴重程度降低。此外，觀察到添加磷酸二氫鈣對爆炸嚴重程度的影響比六偏磷酸鈉更強，

因為添加磷酸二氫鈣後延遲了點火時間。

- (5) AKTS 以三種方法計算表觀活化能知結果表明，採用的方法不同，所得到的數據也有所差異，但不論從哪個方法計算，添加磷酸二氫鈣或六偏磷酸鈉後的小麥粉之表觀活化能結果皆有明顯提高，且添加磷酸二氫鈣比添加六偏磷酸鈉的表觀活化能提高更多，因此可以判定添加磷酸二氫鈣後的小麥粉擁有更加優異的熱穩定性。

2. 建議

- (1) 根據本研究的結果，磷酸二氫鈣和六偏磷酸鈉可作為有效的粉塵爆炸抑制劑。建議相關行業，特別是食品加工、化工以及製藥等行業，在粉塵濃度較高的生產環境中考慮使用這些化學品進行預防性處理，以減少爆炸風險。未來可以進一步研究不同種類的粉塵對這些添加劑的反應。
- (2) 儘管磷酸二氫鈣和六偏磷酸鈉在研究中顯示為良好的抑制效果，但仍需要進行對其環境與對人體健康的長期影響評估。建議未來能研究添加劑的安全性與環境影響的評估，確保這些添加劑在實際應用中不會帶來其它的危害或負面效應。
- (3) 未來還能研究這些既是添加劑且亦有抑制效果的阻燃劑含量較低的話是否也有良好的抑制效果。

伍、參考文獻

- [1]. Abuswer M., Amyotte P.R. and Khan F.I. 2013, "A quantitative risk management framework for dust and hybrid mixture explosions", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 26, pp. 283–289.
- [2]. American Society for Testing and Materials, 2017, ASTM B822-10:

- Standard Test Method for Particle Size Distribution of Metal Powders and Related Compounds by Light Scattering. Commonwealth of Pennsylvania, USA.
- [3]. American Society for Testing and Materials, 2019, ASTM E2019: Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust Cloud in Air. Commonwealth of Pennsylvania, USA.
- [4]. Amyotte P.R., and Eckhoff R.K. 2010, “Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview”, *Journal of Chemical Health and Safety*, vol. 17, pp. 15–28.
- [5]. Dufaud O., Perrin L., and Traoré M., 2008, “Dust/vapour explosions: Hybrid behaviours?”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 21, pp. 481–484.
- [6]. DustEx Research Limited, 2023, 2022-Combustible-Dust-Incident-Report-Version-1, Nova Scotia, Halifax, Canada.
- [7]. Iqing Liu., Xiangbao Meng., Ke Yan., Zheng Wang., Wenjiao Dai., Zhifeng Wang., Fang Li., Panpan Yang., and Yang Liu, 2022, “Study on the effect and mechanism of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ and CaCO_3 powders on inhibiting the explosion of titanium powder”, *Powder Technology*, vol. 395, pp. 158–167.
- [8]. Khalili I., Dufaud O., and Poupeau M., Cuervo-Rodriguez N., Perrin L, 2012, “Ignition sensitivity of gas-vapor/dust hybrid mixtures”, *Powder Technology*, vol. 217, pp. 199–206.
- [9]. M. Nifuku and H. Katoh, 2001, “Incendiary characteristics of electrostatic discharge for dust and gas explosion”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 14, pp. 547–551.
- [10]. National Fire Protection Association, 2020, NPA 654: Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids. Quincy, Massachusetts, USA.
- [11]. National Fire Protection Association, 2023, NFPA 68: Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. Quincy, Massachusetts, USA.

三、 其他相關資訊

台中分會網站資訊將持續更新，期望能為台中分會的會員朋友們提供一個分享交流、學習、溝通及傳承的平台，歡迎大家隨時上網瀏覽並提供意見。

為響應環保及節能減碳，中國工程師台中分會會訊，採電子版本發行，刊登於網站上。為便於最新消息及活動資訊傳遞，未來將陸續致電與分會會員進行個人資料補正，或請您填妥下方補正資料，傳送至台中分會第五十三屆祕書處，感謝各位會員朋友的支持與配合。

會員基本資料補正			
姓 名		連絡電話	
服務單位		職 稱	
E-mail			
※歡迎使用 Email 回傳至信箱： jwhuang@nuu.edu.tw ，謝謝！			

會訊徵稿

本會訊歡迎會員投稿，若有資料或意見提供，請與本分會祕書處聯絡，來信請寄：jwhuang@nuu.edu.tw，黃小姐。