

認識粉塵爆炸危害與預防

總管理處安衛環中心消防管理處

一、前言

一〇四年六月二十七日於新北市八仙樂園發生粉塵爆炸並衍生火災事故，喚起社會大眾對此類事故的高度關注。台灣地區因為空氣濕度相對偏高，粉塵容易沾附水分而較難引燃（濕度超過百分之五十時可防止塵爆），使粉塵爆炸在非工廠以外場所發生的案例並不常見，故國人對此類事故較為陌生甚至未建立警覺意識。本專題特別摘錄美國工廠互助聯盟第 7-76 號規範 (US Factory Mutual, DS 7-76 Prevention and Mitigation of Combustible Dust Explosion and Fire) 及美國消防協會第 654 號規範 (NFPA 654, Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids) 之重點，供企業各廠（處）認知粉塵爆炸風險並作事先預防改善。

二、粉塵爆炸的原理與基本特性

粉未狀之可燃性固體在空氣中以分散懸浮狀態存在並結合空氣中的氧氣，其危險程度已與混合爆炸氣體相同，當再供給熱能時（指發火源，參考表一），則會引起閃燃或爆炸。

| 發火源之種類 | 實例 |
|------------|---|
| 弱火源（或稱微火源） | 煙蒂、線香 |
| 有焰火源 | 蠟燭、火柴、打火機 |
| 高溫固體（熱表面） | 燙斗、電熱器、烤箱、高溫燈管、高溫管線 |
| 機械熱能（摩擦熱） | 滾輪、電鑽、壓延機、輸送帶 |
| 斷熱壓縮 | 含空氣泡之硝化甘油 |
| 靜電 | 人體靜電（如於地毯行走）、儀器和設備的靜電、器件及材料本身摩擦的靜電（如粉體投料） |
| 自然發火 | 木屑堆置數周自然發火 |

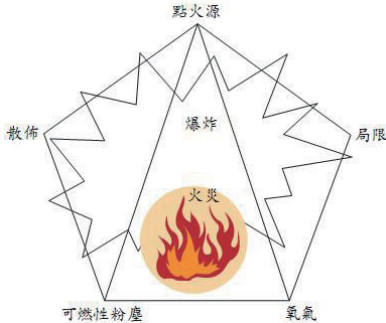
表一 發火源之種類

通常粉塵爆炸與混合氣體爆炸相比，粉塵爆炸壓力上升速度較緩，但最大壓力則大約相等，惟爆炸壓力持續時間較長是其特徵；因此，粉塵爆炸破壞力相當大，且粒徑小的可燃粉塵其最小點火能量越小，爆炸壓力也較高，倘含有金屬或合金粒子時，發熱量更大；以一〇三年八月二日發生於大陸崑山中榮工廠的「鋁金屬粉塵爆炸」事故為例，此事故共造成一百四十六人死亡，一百一十四人受傷，當時震驚世界各國[1]。

2.1 粉塵爆炸發生條件

綜合粉塵爆炸發生條件歸納為以下五項：

1. 可燃性粉塵
 2. 氧化劑（即空氣中的氧氣）
 3. 點火源（提供熱能）
 4. 粉塵與空氣混合達到「可燃濃度」
 5. 侷限空間（多數是在密閉或半密閉空間）
- 「空氣不易流



圖一 可燃性粉塵爆炸五邊形 [2]

通」處；但實際上在開放空間若達到前四項條件也可能發生粉塵爆炸」。粉塵爆炸條件前三項為火災基本三要素，加入後兩項即成為著名的「可燃性粉塵爆炸五邊形」，如圖一 [2]。

2.2 易爆炸之粉塵種類

乾燥的可燃物在空氣中懸浮狀態存在時，供應適當熱量則有爆炸之可能。下列因素可當作粉塵爆炸分析指標，如最小點火溫度 (MIT)，最小點火能量 (MIE)，限氧濃度 (LOC)，最低 (高) 爆炸濃度 (MEC)，最大爆炸上升速度 (Maximum Rate of Explosion Pressure Rise, (dp/dt) max) [3] 等。易爆炸之粉塵舉例如表二。

| 類別 | 粉塵名稱 |
|----------|---|
| 農產物 | 澱粉、棉花、稻穀、豆類、小麥、玉米澱粉 |
| 金屬類 | 鋁、鎂、鐵、錳、鈉、鈦、鋇、鋅 |
| 塑膠系及合成材料 | 醋酸纖維、硝酸纖維、木質素樹脂、酚樹脂、聚乙烯、聚苯乙烯、合成橡皮、塑料、染料 |
| 其他 | 煤炭、硫黃、木屑、棉花、煙草、飼料（如魚粉、血粉） |

表二 易爆炸之粉塵

2.2 粉塵的可燃性

依 NFPA 654 對可燃性粉塵的定義，係指粒徑等於或小於 500 μm (物質能通過美國編號 35 的標準篩網) 的固體物質 [4]。然而，相同成分的粉塵亦可能具有不同的爆炸特性，主要視粒徑大小、形狀及含水率等而定。此外，可燃性粉塵置於製程設備時，這些變數亦可能產生變化，即使粒徑大於 NFPA 654 所定義的粉塵亦具有可燃性，尤其是纖維物質，所以評估粉塵爆炸危害的主要因素在判斷粉塵是否具可燃性。

2.3 粉塵粒子之大小、懸浮濃度與最小點火能量

| 粉塵粒徑 (μm) | 最小點火能量 (mJ) |
|------------------------|-------------|
| 710-1680 | >5000 |
| 355-709 | 250-500 |
| 180-354 | 50-250 |
| 105-179 | <10 |
| 53-104 | <10 |
| 53 μm | <10 |

表三 最之與量 [5]
粉塵粒徑與最小點火能量關係參考表

粉塵依成分區分為無機與有機粉塵，無機粉塵包含金屬粉塵和一部份礦物性粉塵如煤、硫等，而有機粉塵則包括麵粉、木粉及化學纖維粉塵等。此外，能燃燒和爆炸的粉塵叫做「可燃粉塵」，

浮在空氣中的稱為「懸浮粉塵」，沉降於固體壁面上的稱為「沉積粉塵」。粉塵以能懸浮於空氣中且粒徑在 100 μm 以下時最具爆炸可能性，其粒徑與最小點火能量的關係參考如表三 [5]。

粉塵爆炸雖不像氣體有明確之爆炸界限，但於單位體積中需存有一定濃度始能爆炸，粉塵粒子懸浮濃度之爆炸上下限通常在 25 mg/L 80 mg/L 之間，而影響粉塵能否懸浮之因素有蓄電性及水分之吸附性等。粉塵爆炸的難度較易燃性氣體或火藥類為高，各種氣體及粉塵發生爆炸所需要之最小點火能量 MIE (以毫焦耳 mJ 為單位) 關係參考如表四 [5]。

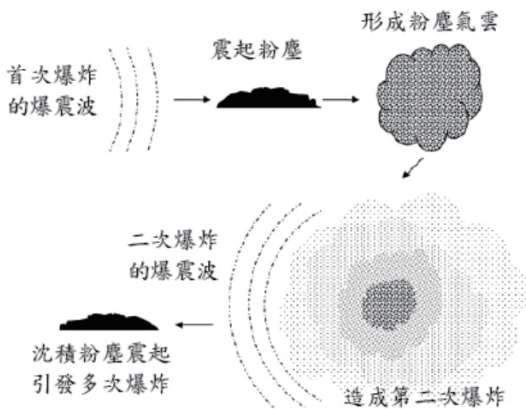
| 揮發性物質 | 最小點火能量 (mJ) | 粉塵物質 | 最小點火能量 (mJ) |
|-------|-------------|------|-------------|
| 航空汽油 | 0.2 | 鋁 | 50-280 |
| 乙炔 | 0.07-0.08 | 黑火藥 | 320 |
| 氫 | 0.011-0.017 | 巧克力粉 | 100 |
| 甲烷 | 0.28-0.39 | 軟木粉塵 | 35-45 |
| 丙烷 | 0.16-0.25 | 肥皂粉 | 60-960 |
| | | 木屑粉塵 | 20-40 |

表四 氣體及粉塵發生爆炸所需要之最小點火能量關係參考表 [5]

2.4 粉塵爆炸的特點

當粉塵氣雲在侷限或半侷限空間內被引燃，將會快速燃燒並產生爆炸，於初次塵爆所產生之氣流將揚起更多沉積粉塵進而導致二次塵爆發生，如圖二[3]。綜合粉塵爆炸的特點歸納以下五點[5]：

1. 初次塵爆時粉塵可能未完全被燃燒消耗，將揚起更多沉積粉塵而發生二次或多次塵爆，因為二次塵爆所引燃的粉塵量及濃度通常較高，因此爆炸威力亦較初次塵爆為強。
2. 粉塵爆炸所需最小點火能量比可燃性氣體爆炸較高（參考表四），粒徑越小的可燃粉塵其最小點火能量越小，且爆炸產生的壓力也較高。
3. 粉塵爆炸的反應時間為一般可燃性氣體爆炸的數十倍。
4. 與可燃性氣體爆炸相比，粉塵爆炸壓力上升較緩慢，但壓力持續時間較長，釋放的能量大，破壞力則更強。
5. 粉塵爆炸可能產生一氧化碳與爆炸物質（如塑料等）自身高溫分解產生的毒性氣體。



圖二 粉塵多次爆炸示意圖[3]

2.5 可影響「粉塵爆炸」的因素

1. 物理化學性質：物質的燃燒熱釋放率越大，則其粉塵的爆炸危險性越大，例如煤、碳、硫的粉塵等；越易氧化的物質，其粉塵越易爆炸，例如鎂、染料等。粉塵在生產過程中由於互

相碰撞、摩擦等作用，產生的靜電不易散失造成累積，當達到某數值後便出現靜電放電，靜電放電火花將可能引燃粉塵產生爆炸事故，因此，越易帶電的粉塵越易引起爆炸。

2. 粉塵之化學結構及反應性與爆炸威力有極大關係：粉塵爆炸之威力與反應產生之氣體量多寡、燃燒熱大小、產生熱量或氣體之速度有關。有機藥品、塑膠粉塵、鋁粉等因熱分解後熱釋放率大，故爆炸威力亦大。揮發性小的碳粉與農產物中灰分多或發熱量少的礦物粉塵因為只能燃燒而爆炸威力亦較弱。大部分可燃性粉塵多屬混合物，其危險性非經儀器分析否則不易預測。

3. 顆粒大小：隨著粉塵顆粒的粒徑減小，粉塵表面可吸附空氣中的氧氣量就越多，而且點火能量與爆炸下限也越低，相對的化學活性將增加且更易依附靜電，爆炸風險亦越高。

4. 粉塵的濃度及氧氣濃度：與可燃性氣體相比，粉塵爆炸也有一定的濃度範圍且具有上下限之分。若空氣中加入惰性氣體或可燃性氣體造成氧氣濃度增減時，對粉塵爆炸界限有極大影響。氧氣濃度增加時，爆炸性高，反之則爆炸性降低。

2.6 粉塵爆炸強度指數 K_{st}

粉塵爆炸常以 K_{st} 值來評估粉塵爆炸的強度，若現場粉塵濃度相同，金屬及塑膠類的粉塵爆炸其熱釋放率及強度皆會大於農作物或其他類粉塵，K_{st} 計算公式參考如下：

$$K_{st} = (dp/dt)_{\max} V^{1/3}$$

- 其中 (dp/dt) 之單位為 Pa/s，V 之單位為 m³。
- 於 1 m³ 的圓桶型容器內形成粉塵雲，以能量 10kJ 火藥點火，測其壓力和壓力上升速度。

粉塵爆炸的危險性一般以 ASTM E1226 與 NFPA 484 的標準來測定，爆炸等級 K_{st} 強度分級可參考如下表五 [3][6]：

三、粉塵爆炸發生事故統計資料 [7]

| 爆炸等級 | K _{st} | 爆炸特性 |
|------|-----------------|-------|
| 1 | <200 | 弱至中爆炸 |
| 2 | 200-300 | 強度爆炸 |
| 3 | >300 | 嚴重爆炸 |

表五 粉塵爆炸等級 K_{st} [3][6]

根據²統計美國自一九八三到二〇〇六年間發生之一百六十六件工廠粉塵爆炸事故，其中屬

金屬粉塵佔十五件、化學品及塑膠類別佔三十件，各類統計表如下表六、表九^[7]：

| 行業別 | 木材 | 食品 | 金屬 | 石化 | 紙業 | 礦業 | 公用廠 | 橡膠 | 塑膠 | 印刷 | 紡織 | 其他 |
|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|----|------|------|----|
| 件數 | 64 | 26 | 18 | 14 | 12 | 11 | 7 | 5 | 5 | 1 | 1 | 2 |
| 比例 | 39% | 16% | 11% | 8% | 7% | 7% | 4% | 3% | 3% | 0.5% | 0.5% | 1% |

表六 行業別分類表：(以木材業最高，石化業居第四位)

| 行業別 | 摩擦熱 | 火星灰燼 | 化學反應 | 明火作業 | 燃燒爐火苗 | 電氣火花 | 靜電 | 加熱失控 | 熱表面 | 其他 |
|-----|-----|------|------|------|-------|------|------|------|-----|-----|
| 件數 | 50 | 38 | 16 | 13 | 10 | 6 | 6 | 4 | 2 | 21 |
| 比例 | 30% | 23% | 10% | 8% | 6% | 3.5% | 3.5% | 2% | 1% | 13% |

表七 點火源分類表：(以摩擦熱最高，火星灰燼次之)

| 行業別 | 木材 | 食品 | 化學品 | 金屬 | 煤 | 塑膠 / 橡膠 | 紙類 | 其他 |
|-----|-----|-----|-----|----|------|---------|----|------|
| 件數 | 70 | 25 | 17 | 15 | 14 | 13 | 8 | 4 |
| 比例 | 42% | 15% | 10% | 9% | 8.5% | 8% | 5% | 2.5% |

表八 粉塵種類分類表：(以木材類粉塵最高，化學品類居第3位)

| 設備類別 | 件數 | 比例 |
|--------------------------|----|-------|
| 集塵器 (dust collector) | 66 | 39.5% |
| 衝擊器 (impact equipment) | 22 | 13% |
| 筒倉 (storage silo) | 8 | 5% |
| 加工設備 (process equipment) | 7 | 4% |
| 加熱爐 (oven) | 5 | 3% |
| 輸送帶 (conveyor) | 4 | 2.5% |
| 穀物輸送升降機 | 4 | 2.5% |
| 噴霧乾燥器 (spray dryer) | 4 | 2.5% |
| 其他 | 46 | 28% |

表九 設備類別主要分類表：(以集塵器最高，衝擊器次之)

四、粉塵爆炸預防與抑制方法

彙總 FM 7-76 及 NFPA 654 對粉塵爆炸風險提供以下預防與抑制對策：

4.1 FM 7-76 粉塵爆炸預防通則 [7]

1. 為掌握粉塵爆炸潛在風險，凡作業現場或製程存有下列條件時，應在 PHA、JSA、MOC 執行時將粉塵危害納入，並考量提高其風險評估之後果（或嚴重度）等級：

(1) 設有處理可燃性粉塵之設備，或是在廠房、建築物內可能發生粉塵外洩瀰漫之處。(2) 處理可燃性物質之設備為攪拌機、研磨機、裁切機、集塵器、氣旋機。(3) 提升製程溫度可能使過程中材質變為乾燥。(4) 增加新材料可能成為可燃性粉塵。(5) 藉由增加可燃性物質或減低惰性物質成分比例以改良產品。(6) 製程變更時涉及將半成品／成品予以處理使其粒徑變小。

2. 凡製程、設備、原物料、產品之變更涉及明顯改變粉塵特性者，應在進行 MOC 時，重新評估其爆炸後果。

3. 針對防治粉塵爆炸，可採用下列工程方法：

(1) 採用圍阻措施、收集系統及設備針對逸散粉

塵加以管控。(2) 採用安全間距或防火（爆）結構將粉塵爆炸衝擊加以區隔。(3) 避免粉塵於建築物內沉積，例如改善室內配置、增加易於清理之牆面或表面、增加水平坡度使粉塵易於垂落等。(4) 適度設計洩爆口以安全宣洩粉塵爆炸能量。(5) 針對可能產生粉塵爆炸之集塵器或設備，儘量使其遠離製程設施或建築物。(6) 設置爆炸抑制系統或以惰性氣體降低製程系統中之氧氣比例。

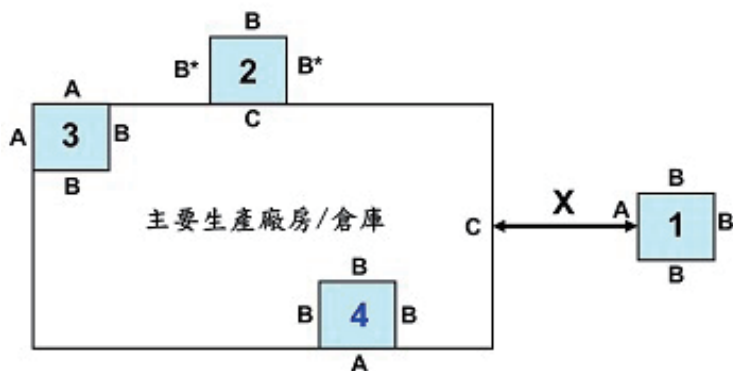
4. 確實針對粉塵爆炸防治設備加以保養維護。

5. 對於密閉系統或開放空間之粉塵可能導致之火災與爆炸事故，應全面納入作業場所緊急應變處理計畫中。

6. 嚴密監管任何點火源，包含火星、熱表面等低能量不明顯之火源。

7. 避免將空氣／粉塵分離器之排風口重複導入室內使用。

4.2 FM 7-76 針對爆炸損失控制，粉塵處理場所之建築結構可參酌如下表十及圖三建議方式予以改善 [7]：



圖三 各種粉塵處理場所與主要建築物之相對位置 [7]

| 場所位置 | 場所與主要建物之距離X 英尺(公尺) | 建築結構需求 | | | 主建物 外牆C之結構 | |
|---------------------|-----------------------|--------|----|----|----------------|-----------------|
| | | A端 | B端 | | | 屋頂 |
| 第1種： 場所與主要建物保有距離 | $X > 50$ (15) | 洩爆 | 洩爆 | 洩爆 | 無規定 | |
| | $10(3) < X < 50(15)$ | 耐爆 | 洩爆 | 洩爆 | | |
| | $X < 10$ (3) | 耐爆 | 洩爆 | 洩爆 | 耐爆(較該場所長、高多3m) | |
| 第2種 | 場所與主要建物相互緊鄰 | 不適用 | B | B* | 洩爆或耐壓 | 耐爆(較該場所長、高多3m) |
| | | | 洩爆 | 洩爆 | | |
| | | 不適用 | 洩爆 | 洩爆 | 耐爆 | 耐爆(較該場所水平寬度多3m) |
| 第3、4種 | 場所位於主要建物室內 | 洩爆 | 耐爆 | | 耐爆 | 不適用 |
| | | 洩爆 | 耐爆 | | | |

表十 各種相對位置之粉塵處理場所其建築結構標準 [7]

4.3 做好電氣分類 [2]

針對潛在有火災、爆炸之虞的危險區域，為了防止電氣火花或電熱成為點火源，必須劃分防爆區域並選用防爆電氣設備。OSHA 電氣標準 (29 CFR 1910 Subpart S) 提供危險區域電氣設備安裝的一般規定。詳細的設備安裝及焊接方法在 NFPA 70 中有所記載。另外可採用 NFPA 499 進行防爆區域劃分。對電氣要求而言，所有粉塵的危害皆屬等級 II，再依粉塵存在的時間長短進行防爆電氣選用。

4.4 NFPA 654 對粉塵的控制要求 [4]

NFPA 654 對粉塵爆炸防治措施提供下列建議：
1. 減少粉塵自製程設備或通風系統逸散出；
2. 使用集塵系統或濾網；
3. 採用可降低粉塵累積及容易清潔的表面；
4. 對所有隱蔽區域提供檢查通道；
5. 定期檢查開放及隱蔽區域是否有殘留粉塵（如風管）；
6. 定期清除殘留粉塵；
7. 若有點火源存在時，使用不會產生揚塵的清潔方法；
8. 僅可使用經認可的吸（集）塵器進行粉塵收集作業；
9. 釋壓閥的位置應遠離粉塵危害區域；
10. 研擬及落實危險性粉塵的檢查、測試、管理及防治計畫（最好以書面記載確切的頻率及方法）。

4.5 NFPA 654 對點火源的控制要求 [4]

NFPA 654 點火源控制措施之建議如下：
1. 使用適當的電氣設備及焊接方法；
2. 控制靜電（如包裝使用抗靜電材質、水蒸汽加濕），設備接地；
3. 控制煙、明火及火花（如明火管制、包覆高溫表面）；
4. 控制機械火花及摩擦；
5. 使用分離器以移除可能引燃製程物質的外界物質；
6. 使粉塵遠離熱表面；
7. 使粉塵遠離加熱系統；
8. 選擇適當的工業推車並正確使用；
9. 正確使用炸藥作動工具；
10. 適當維護所有上述設備。

4.6 NFPA 654 對損失的控制要求 [4]

NFPA 654 對降低爆炸危險及損失之防護建議如下：
1. 分離危害（採用安全距離進行隔離）；
2. 隔離危害（採用屏障物進行隔離）；
3. 建築物裝設洩爆裝置（venting）；
4. 設備裝設釋壓閥；
5. 裝置火花/餘火偵測及消防系統；
6. 裝置爆炸防護系統（可參考 NFPA 69）；
7. 裝置自動撒水系統；
8. 使用其他特殊抑制系統。

4.7 粉塵作業場所應有的管理計劃及教育訓練 [2]

管理部門應負責訂定粉塵爆炸危害預防及防護計畫，所有員工於工作前、重新分配工作及危害或製程變更時，應依計畫內容進行訓練，且依

安全的方式執行工作任務，並進行現場的粉塵及點火源控制。

五、結論：

針對已知可能發生粉塵爆炸的作業場所或製程單元，管理部門應積極從減少粉塵逸散並嚴密管控點火源著手改善，並進一步設置爆炸抑制系統、洩爆裝置，及安排相關維護保養作業以確保相關防護措施可隨時發揮功能。此外，對於密閉系統或開放空間之粉塵可能導致火災與爆炸事故，應全面納入作業場所緊急應變計畫，使防護體系能更趨完善並避免粉塵爆炸事故發生。

六、參考文獻

- [1] 維基百科，「崑山中榮工廠爆炸事故」，2014.
- [2] 歐新榮，「工業中的可燃性粉塵－預防及減緩火災爆炸的作用」，勞委會勞工安全組，2012。
- [3] 林俊榮，「奈米金屬微粒粉塵爆炸火燄傳播現象之研究」，國防大學理工學院，2015.
- [4] NFPA 654 (Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing,

Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids) .

- [5] 鄭文淮，「電氣防爆與靜電消除措施」，中區勞動檢查所，2009.

[6] NFPA 484 (Standard for Combustible Metals) .

[7] FM 7-76 (Prevention and Mitigation of Combustible Dust Explosion and Fire) .