

102年度研究計畫 IOSH102-S324

IOSH102-S324



勞動部勞動及職業安全衛生研究所  
INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR



勞安所研究報告

# 純氧中輸送微米及奈米鐵爆炸 危害特性研究

A Study of the Explosion Hazard Characteristics of  
Micro- and Nano-iron Pure Oxygen Transport

ISBN 978-986-04-0759-4



GPN:1010300756

定價：新台幣140元

IOSH102-S324

勞動部勞動及職業安全衛生研究所  
INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR

純氧中輸送微米及奈米鐵爆炸危害特性研究

**A Study of the Explosion Hazard  
Characteristics of Micro- and Nano-iron  
Pure Oxygen Transport**

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

# 純氧中輸送微米及奈米鐵爆炸危害特性 研究

## **A Study of the Explosion Hazard Characteristics of Micro- and Nano-iron Pure Oxygen Transport**

研究主持人：吳鴻鈞、蔡匡忠

計畫主辦單位：行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

研究期間：中華民國 102 年 07 月 01 日至 102 年 12 月 16 日

勞動部勞動及職業安全衛生研究所  
中華民國 103 年 3 月

# 摘要

先前於台南市某鋼鐵工業股份有限公司發生液態氧氣化管線爆炸意外。災害發生當時於控制閥旁邊進行通氣開車試驗，當控制閥打開通氣至 50%之後，彎管及閥體本身，瞬間產生燃燒破裂，高溫、高壓氧氣直接衝擊作業人員，導致現場 1 人死亡 7 人受傷，該事故燃燒物質疑為鐵管氧化的粉體(氧化鐵及鐵的混合物)而引火源疑為氧化鐵粉體帶靜電引起。

氧化鐵粉體之中心結構為鐵，外圍為氧化鐵的物質，高速氧氣帶動之下，該粉體像電容器一般，形成帶正負電荷的靜電粉體。當粉體碰觸過濾器及鐵管壁時，即放出攜帶的靜電荷，產生火花。且因氧氣環境，粉體之最低發火能量降低，而引起燃燒，，先前已有學者做過微奈米金屬粉塵的最大爆炸壓力、最低爆炸濃度、最大升壓速率及最小點火能量等研究，卻很少有關於純氧環境下靜電引發微奈米金屬粉塵的相關研究，而靜電也是形成點火源的重要因素之一。因此本計畫先調查老舊鋼瓶內部生鏽情況，再經由 TEM (Transmission electron microscopy) 穿透式電子顯微鏡及 SEM (Scanning electron microscope) 掃描式電子顯微鏡觀測粉體粒徑及分析成分。採集裁切後老舊鋼瓶之粉體經由 TEM 及 SEM 成分分析與粒徑分析過後粒徑範圍為 5nm~250nm 之間，其最小點火能量皆小於 1mJ，當粉體粒徑增加其所需的點火能量也隨之增加。

輸送過程中純氧環境下奈米鐵粉所產生的能量皆會隨著粉體濃度的增加而上升，粉體粒徑越小所產生的能量會越大，由分析結果藉以推斷先前於台南市某鋼鐵工業股份有限公司發生液態氧氣化管線爆炸意外，瞬間產生燃燒破裂，高溫、高壓氧氣直接衝擊作業人員，是由於鋼瓶內部粉體粒徑大小為奈米等級，僅需 1mJ 即可引燃因而導致災害發生，本研究成果可做為從事氧氣鋼瓶作業勞工之使用安全參考。

關鍵詞：微奈米粉體、最小點火能量、氧氣環境

## Abstract

As estimated by the Nano-technology Center of the Industrial Technology Research Institute, the annual production value of Taiwan's nanotechnology industry has reached NT\$1 trillion, which is 3 % of the global total. Nanotechnology is an industry with high future potential.

Nano-powders are widely used in industry. As the powders are micro- and nano-scaled, their specific surface area is significantly increased, and this increases the risk of their being ignited. Nano-powders, oxygen, and ignition sources commonly exist together in factories, and the nano-powders can easily be ignited with the application of a very small ignition energy ( $< 1\text{mJ}$ ).

Previous studies have investigated the maximum explosive pressure, minimum concentration of explosion, maximum speed of pressure rise, and minimum ignition energy of metal nano-powders. However, very few studies have focused on the effects of static charge on the ignition of micro- and nano-powders in a pure oxygen environment. This study investigated the size and content of dust in old industrial steel oxygen bottles, and found that the size was between 5 and 250 nm by SEM or TEM. Additionally, we measured the static charge that is generated when different micro- and nano-powders (Fe) of different sizes (from 35 to 100 nm) move at different velocities (10, 20, 30 m/s) in an oxygen environment. The electric charge and electric potential difference were measured and used to calculate electrical energy. The results of this study can provide information for preventing micro- and nano-powder dust explosions. The research results can also be used as a safety reference by people working with steel oxygen cylinders.

Key Words: micro- and nano-powder, oxygen, dust explosion

# 目錄

摘 要.....	i
Abstract .....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	vii
第一章 背景分析.....	1
第一節 前言.....	1
第二節 目的.....	2
第三節 工作項目.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
第一節 最大爆炸壓力及最大升壓速率.....	3
第二節 最低爆炸濃度(MEC).....	4
第三節 落錘撞擊實驗及最小點火能量.....	5
第四節 靜電能量.....	7
第五節 最低需氧濃度.....	11
第六節 高速奈米粒子帶電荷研究.....	12
第三章 研究方法.....	13
第一節 微米及奈米金屬粉體.....	13
第二節 實驗設備.....	13
第三節 實驗模組之設計.....	20
第四章 結果與討論.....	21
第一節 老舊鋼瓶內部採樣實驗.....	21
第二節 最小點火能量試驗.....	30
第三節 靜電累積能量實驗.....	35
第四節 微、奈米鐵爆炸與傳送速度關係探討.....	38
第五節 老舊鋼瓶靜電防止對策.....	39

第五章 結論與建議.....	40
第一節 結論.....	40
第二節 建議.....	41
誌謝.....	42
參考文獻.....	43

# 圖目錄

圖 1 Fe-65nm 最大爆炸壓力 .....	3
圖 2 Fe-65nm 最大升壓速率 .....	3
圖 3 靜電發生現象 .....	7
圖 4 物理破壞引起靜電的發生 .....	7
圖 5 最小點火能量與靜電放電能量的對照 .....	9
圖 6 EST111 數字電荷儀 .....	14
圖 7 集電式電位測定器 .....	14
圖 8 改裝後氧氣環境下之最小點火能量試驗裝置 .....	16
圖 9 壓縮氧氣鋼瓶之壓力 .....	16
圖 10 最小點火能量試驗儀構造圖 .....	17
圖 11 含氧感知器 .....	17
圖 12 Fe powder 100 $\mu$ m 粉塵雲引燃示意圖 .....	18
圖 13 Fe powder 35 nm 粉塵雲引燃示意圖 .....	18
圖 14 防爆型集塵桶 .....	19
圖 15 實驗設備圖 .....	20
圖 16 老舊氧氣鋼瓶內部圖之一 .....	21
圖 17 老舊氧氣鋼瓶內部圖之二 .....	22
圖 18 老舊氧氣鋼瓶內部圖之三 .....	22
圖 19 老舊氧氣鋼瓶內部圖之四 .....	23
圖 20 老舊氧氣鋼瓶內部圖之五 .....	23
圖 21 老舊鋼瓶內部粉體(前) .....	24
圖 22 老舊鋼瓶內部粉體成分分析(前) .....	24
圖 23 老舊鋼瓶內部粉體(中) .....	25
圖 24 老舊鋼瓶內部粉體成分分析(中) .....	25
圖 25 老舊鋼瓶內部粉體(後) .....	26
圖 26 老舊鋼瓶內部粉體成分分析(後) .....	26
圖 27 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體(前) .....	27

圖 28 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體成分分析(前).....	27
圖 29 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體(中).....	28
圖 30 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體成分分析(中).....	28
圖 31 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體(後).....	29
圖 32 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體成分分析(後).....	29
圖 33 Fe powder 15 $\mu\text{m}$ 通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果.....	30
圖 34 Fe powder 100 $\mu\text{m}$ 通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果.....	31
圖 35 Fe powder 150 $\mu\text{m}$ 通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果.....	31
圖 36 Fe powder 15 nm 通過空氣(左)及氧氣(右)的最小點火能量試驗結果.....	32
圖 37 Fe powder 35 nm 通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果.....	33
圖 38 Fe powder 65 nm 通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果.....	33
圖 39 粉體粒徑大小與最小點火能量之關係.....	34
圖 40 氧氣環境下不同流速、粒徑、濃度之奈米鐵粉於 PVC 管與不鏽鋼管中之能量分布圖.....	35
圖 41 空氣中不同粒徑鐵粉所產生能量.....	36
圖 42 純氧環境中不同粒徑鐵粉所產生能量.....	37

# 表目錄

表 1 是否成功爆炸之準則.....	4
表 2 Fe-65nm 最低爆炸濃度(MEC).....	4
表 3 奈米金屬粉體爆炸測試數據.....	11
表 4 奈米鐵粉 Fe-15 nm、Fe-35 nm 及 Fe-65 nm 粉塵爆炸系列實驗結果.....	38
表 5 老舊鋼瓶靜電防止對策.....	39

# 第一章 背景分析

## 第一節 前言

先前於台南市某鋼鐵工業股粉有限公司發生液態氧氣化管線爆炸意外，災害發生當時於控制閥旁邊進行通氣開車試驗，當控制閥打開通氣至 50% 之後，彎管及閥體本身，瞬間產生燃燒破裂，高溫、高壓氧氣直接衝擊作業人員，導致現場 1 人死亡 7 人受傷[1]。該事故燃燒物質疑為鐵管氧化的粉體(氧化鐵及鐵的混合物)而引火源疑為氧化鐵粉體帶靜電引起。氧化鐵粉體之中心結構為鐵，外圍為氧化鐵的物質。高速氧氣帶動之下，該粉體像電容器一般，形成帶正負電荷的靜電粉體，當粉體碰觸過濾器及鐵管壁時，即放出攜帶的靜電荷，產生火花。且因氧氣環境，粉體之最低發火能量降低[1]，而引起燃燒，而鋼瓶內部粉體粗估為微米狀態，甚至有降至奈米級的可能性，因此本計畫將以 TEM (Transmission Electron Microscopy) 穿透式電子顯微鏡及 SEM (Structural Equation Modeling) 掃描式電子顯微鏡進行粉體粒徑及成分分析。

且因粉末粒徑進入微奈米尺度的情況下，粉塵比表面積（表面積／體積）大幅提升，增加粉塵可被引燃的機會，而潛在的粉塵爆炸危害風險也會大幅增加。在實際製程廠區內，到處充斥可燃物（微米及奈米粉塵）、點火源（高溫設備、火花或是摩擦靜電等）以及足夠的氧氣，因此，控制點火源成了微奈米金屬粉塵製程場所最重要的防爆措施[5]。目前可以從已知的相關實驗中測出數據進而提供業界參考，如「最大爆炸壓力（Maximum explosion pressure,  $P_{max}$ ）」、「最低爆炸濃度（Minimum explosible concentration, MEC）」、「最大升壓速率（Rate of maximum explosion pressure rise,  $(dP/dt)_{max}$ ）」，三種實驗皆以 20 公升爆炸鋼球標準測試方法來進行，其利用真空泵將鋼球本體內抽真空，接著將測試樣品置入樣品粉末裝置容器內，利用電腦系統或是手動操作方式將螺線管閥開啓，透過空氣壓力及粉塵產生噴嘴，將樣品散佈於鋼球本體內，經過幾毫秒的時間讓粉塵適當的混合分佈於鋼球內，電極能量將引炸點火藥進行粉塵爆炸實驗測試，爆炸後的壓力數據，藉由高、低壓力速度傳輸線傳送至電腦內，記錄成時間函數的壓力數據，完成實驗。在相關微奈米金屬之實驗中，標準程序之 60 毫秒的延遲點火時間使得大部分奈米金屬粉塵皆無法量測得到預期之最大爆炸壓力（ $P_{max}$ ）及

最低爆炸濃度 (MEC) 實驗數據，因此將延遲點火時間由 60 毫秒提前至 0 毫秒則可順利得到最大爆炸壓力 ( $P_{max}$ ) 及最低爆炸濃度 (MEC) 數據。(其可能原因推測為：奈米粉塵入料過程產生摩擦火花，導至奈米金屬粉末於入料管內先行燃燒或爆炸，因標準程序的 60 毫秒延遲點火而無法得到最終所需實驗數據。) 由於奈米金屬粉體所造成的危害較大。

## 第二節 目的

奈米與微米金屬粉塵已廣泛地使用在工業上，在以往的案例中，曾發生過數件粉塵爆炸意外。由於奈米鐵粉的最小點火能量低於 1 毫焦耳，而在進料過程中，粉體因互相碰撞或與管壁碰撞常會使靜電量累積增加，當大量靜電累積後有可能會導致靜電自行放電成為靜電火花並引燃產生粉塵爆炸。然而目前國際間對於靜電能量產生點火源造成粉塵爆炸的相關論文或研究仍相當有限，先前勞研所進行「高速奈米粒子帶電荷」研究中已針對奈米鐵粉進行相關研究但為氧氣濃度 21% 之情形下，因此本計畫將針對微米鐵粉、奈米鐵粉及鋼瓶內部之粉體於氧氣環境下進行靜電累積能量之測試，並觀察發生爆炸時所需要的能量，建立相關實驗數據，以利往後奈米及微米金屬粉塵爆炸危害預防研究。

## 第三節 工作項目

因國內對於靜電能量所造成的粉塵爆炸相關研究相較於其他  $P_{max}$ 、MIE 等實驗較為缺少，而靜電能量又是可能成為點火源的其中一種因素，若是忽視極有可能造成重大傷亡，因此為了深入瞭解靜電能量對於國內使用最為廣泛之奈米鋁粉、奈米鈦粉及奈米鐵粉的影響，本計畫的研究主旨為：

- 一、進行鋼瓶內部鐵粉之粒徑大小及其成分分析。
- 二、進行微米鐵粉、奈米鐵粉及鋼瓶內部粉體之最小點火能量實驗。
- 三、進行三種不同粒徑之微米鐵粉、奈米鐵粉及鋼瓶內部粉體於三種不同流速下之靜電累積能量實驗。
- 四、進行三種不同濃度之微米鐵粉、奈米鐵粉及鋼瓶內部粉體於三種不同流速下之靜電累積能量實驗。

## 第二章 文獻回顧

本章節彙整有關微奈米粉體的相關能量試驗與靜電產生的原理及危害等相關研究成果。

### 第一節 最大爆炸壓力及最大升壓速率

先前吳鴻鈞[6]利用 20 公升爆炸鋼球進行不同粒徑之奈米鋁粉、奈米鐵粉、奈米鈦粉的最大爆炸壓力及最大升壓速率量測，其實驗結果顯示三種不同奈米金屬在不同粒徑下，最大爆炸壓力及最大升壓速率皆會隨著粉塵濃度越高而隨之提升，以 65 nm 鐵粉為例，其結果如圖 1 及圖 2 所示，最大爆炸壓力( $P_{max}$ )為 4.2 bar，此時粉塵濃度為  $1,500 \text{ g/m}^3$ ，其最大升壓速率( $(dP/dt)_{max}$ )為 252 bar/sec，此時粉塵濃度約為  $1,000 \text{ g/m}^3$ ，根據公式可以計算出爆炸特性參數  $K_{st}$  值為  $68.0 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ 。

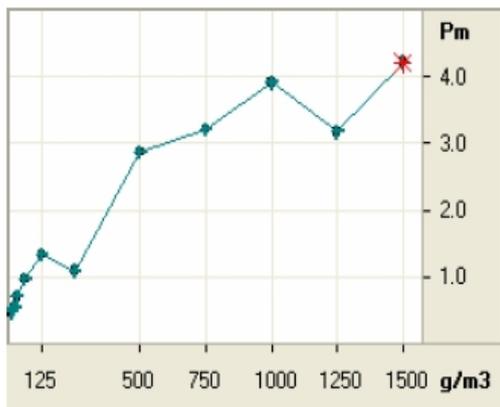


圖 1 Fe-65 nm 最大爆炸壓力[6]

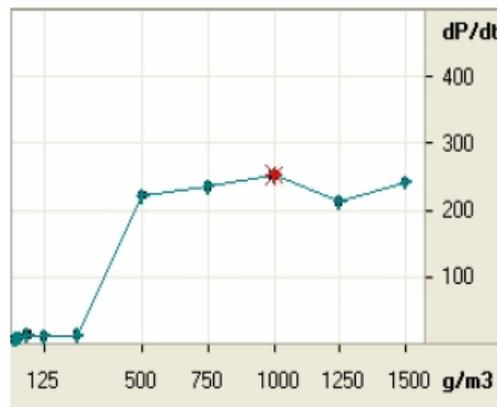


圖 2 Fe-65 nm 最大升壓速率[6]

最大爆炸壓力( $P_{max}$ )實驗測出奈米鋁粉為  $10.5 \pm 0.8 \text{ bar}$ 、奈米鈦粉為  $6.65 \pm 0.25 \text{ bar}$  及奈米鐵粉為  $3.9 \pm 0.4 \text{ bar}$  [6]；

由最大升壓速率( $(dP/dt)_{max}$ )之數據可以算出三種粉塵的「爆炸特性參數」，發現奈米鋁粉之爆炸危害等級達到 3 級，相較於奈米鈦粉及奈米鐵粉之危害等級 1 高出許多，顯示奈米鋁粉的爆炸危害程度影響最鉅[6]；

可以觀察出粉塵濃度對於最大爆炸壓力( $P_{max}$ )及最大升壓速率( $(dP/dt)_{max}$ )有著些微的影響，濃度越高則最大爆炸壓力會隨之升高。

## 第二節 最低爆炸濃度(MEC)

吳鴻鈞等人[6]針對不同粒徑之奈米鋁粉、奈米鐵粉及奈米鈦粉，在濃度 10、20、30、60、125、250 g/m<sup>3</sup> 的狀態下，進行 20 公升爆炸鋼球粉塵最低爆炸濃度(Minimum explosible concentration, MEC)量測實驗，其實驗結果顯示除了 30 nm 奈米鋁粉外，其於測試試體皆在 60 g/m<sup>3</sup> 以上的濃度才會發生爆炸，且爆炸最低濃度並沒有隨著粉塵濃度的提升而有明顯的改變，表 1 為先前學者進行實驗所計算之爆炸壓力準則，以 65 nm 鐵粉為例，其結果如表 2，根據表 1 成功爆炸之爆炸壓力判斷準則，可推斷出符合爆炸過壓  $\geq 2.0$  bar 及最大爆炸壓力  $\geq 4.0$  bar 之濃度為最低爆炸濃度 60 g/m<sup>3</sup>。

表 1 是否成功爆炸之爆炸壓力判斷準則[6]

爆炸過壓 $P_{ex,e}$ [bar]	$P_m$ 正確爆炸過壓 [bar]	是否爆炸
$< 2.0$	$< 0.4$	否
$\geq 2.0$	$\geq 0.4$	是

表 2 Fe-65 nm 最低爆炸濃度(MEC)

濃度 (g/m <sup>3</sup> )	$P_{ex,e}$ (bar)	$P_m$ (bar)	濃度 (g/m <sup>3</sup> )	$P_{ex,e}$ (bar)	$P_m$ (bar)
10	1.2	0.5	125	1.9	1.3
20	1.3	0.5	250	1.7	1.1
30	1.4	0.7	500	3.3	2.9
60	1.6	1.0	750	3.5	3.2

最低爆炸濃度(MEC)之奈米鋁粉為粒徑 35 nm 時其濃度達 20 g/m<sup>3</sup>；75 nm 及 100 nm 粒徑之濃度則同為 60 g/m<sup>3</sup>、奈米鈦粉之濃度皆為 60 g/m<sup>3</sup>、奈米鐵粉之粒徑為 65 nm 時其濃度達 500 g/m<sup>3</sup>；

此外亦可觀察出粉塵粒徑對於最低爆炸濃度(MEC)並無顯著的影響。

### 第三節 落錘撞擊實驗及最小點火能量

為測試一般撞擊或摩擦情況下奈米金屬粉塵的最低撞擊能量數據，吳鴻鈞 [8] 以「落錘撞擊實驗」利用 BAM 撞擊測試儀，藉由落錘撞擊實驗進行。撞擊測試儀的極限是使用 60 cm 高及 10 kg 錘重，以位能公式算出最大撞擊能為 60 J，在最大撞擊力的強況下，三種不同尺度之奈米金屬粉塵(35、75、100 nm 鋁粉；35、75、100 nm 鈦粉；15、35、65 nm 鐵粉)皆無爆炸現象，推測出奈米鋁粉、奈米鈦粉及奈米鐵粉的撞擊敏感度皆遠大於 60 J [8]；

在先前「最小點火能量實驗」的研究中使用 1.2 公升哈特曼測試儀，以不同高壓電極點火能量(1、3、10、30、100、300、1000 mJ)誘發粉塵雲爆炸，以目視判斷粉塵雲是否有被電極火花引燃，展現此三種粉塵皆只需 1 mJ 的火花能量即可引燃。

吳鴻鈞 [8] 亦以 20 公升爆炸鋼球做「氮氣惰性化實驗」之測試，實驗中增加氮氣量將氧氣濃度由 21% 降至 16%，藉此增加最小點火量，卻發現此三種粉塵的最小點火量依然小於 1 mJ。

Eckhoff [12] 提出極低之最小點火能量的觀察如下：電火花等離子的溫度大幅超越粉塵雲的火焰溫度；因此凝結後的粒子將保留其主要的火焰傳播過程中的完整性，即使有很低的火花能量，也可能使得產生的微小雲區及分散的奈米粒子瞬間被點燃。因為空氣中形成的奈米粒子粉塵雲有著非常低的最小點火能量，因此即便是非常細微能量的靜電放電火花都必須要考慮 [12]。

Eckhoff [12] 指出當粉塵雲的原生顆粒粒徑降至 1  $\mu\text{m}$  以下時，粉塵雲將會更為易燃，最小點火能量也會隨之下降，並且有極高的  $K_{st}$  值；Eckhoff 亦將顆粒的凝結力納入考慮因素，因為分散的粉塵在形成粉塵雲時，很難達到控制顆粒的分散情形，當粒徑達到奈米尺寸時，粉塵的凝結力的力量會變得更強，在凝結後的顆粒，對於燃燒裂解而揮發成氣體的速度就會下降，間接影響了粉塵雲的爆炸速率。但在相同金屬粉塵中，奈米粒子粉塵雲的  $K_{st}$  值並沒有比微米粒子粉塵雲高，因此對於奈米大小及微米大小的粒子所做的粉塵爆炸之通風、隔離防護等應該是一樣可行。

延遲時間則是決定奈米顆粒粉塵雲形成至點火時的良好分散性因子，一般實驗室規模可延遲 20~60 ms，但是凝結現象僅有可能在初始階段而已，因此，如果爆炸現場之意外點火延遲時間顯著高於實驗室測試時，實驗室數據可能無法完整模擬真正粉塵雲爆炸之嚴重性。而除了延遲時間外，Eckhoff[12]考慮到紊流因素，凝結率會隨著紊流之紊流率而提高，紊流率的升高也將會提高 MIE。然而，在粉塵雲的燃燒情況下，單純的紊流影響還是不太清楚。在一般燃燒的情況下，紊流將會提高燃燒率，但隨著凝結現象在粉塵雲中發生，將會降低燃燒率。

影響最大爆炸壓力( $P_{max}$ )及最大升壓速率( $dP/dt$ )的主要因素除了粉塵粒徑之外，粉塵濃度也佔了相當大的成分。當粉塵濃度在  $1000 \text{ g/m}^3$  以下時，隨著粉塵濃度的增加，最大爆炸壓力也會隨之逐漸增加，而當粉塵濃度到達  $1250 \text{ g/m}^3$  以上時，因粉塵濃度已超越爆炸濃度界限，隨著粉塵濃度的增加，最大爆炸壓力則會隨之減少。以鋁粉  $75 \mu\text{m}$  及  $100 \text{ nm}$  為例，最大升壓速率在  $75 \mu\text{m}$  時為  $6.34 \text{ MPa/s}$ ，而在  $100 \text{ nm}$  時則升到了  $21.96 \text{ MPa/s}$ [13]。

先前學者較未探討靜電引發鋼瓶內部金屬粉體的相關研究，而靜電也是形成點火源的重要因素之一，因此本計畫將以靜電所產生的能量，針對不同粒徑、濃度之微米鐵粉、奈米鐵粉及鋼瓶內部粉體於純氧環境下進行實驗，評估靜電累積能量之關係，是否與粉塵爆炸時靜電自我放電現象有關，並觀察靜電能量是否會成為點火源，藉以達到預防微米金屬粉塵爆炸危害之目的。

## 第四節 靜電能量

產生靜電的原因以接觸、破壞、感應這三種為主。在粉體傳輸作業中，主要以接觸的方式產生靜電。

### 一、接觸：

通常物體在一般的情況下是維持電中性，當物體和物體間開始相互接觸分離等力學運動時，在接觸間距小於  $25 \times 10^{-8}$  mm 的介面會發生電荷轉移現象，此時，失去電子的一方會帶有正電荷，獲得電子的一方則帶負電荷，形成電氣雙重層(Electrical double layer)。最後，將兩物分離，這兩個物體將會帶極性相反且等重量的電荷，而這分離後所殘留下的過剩電荷就稱為靜電如圖 3 所示[14]。

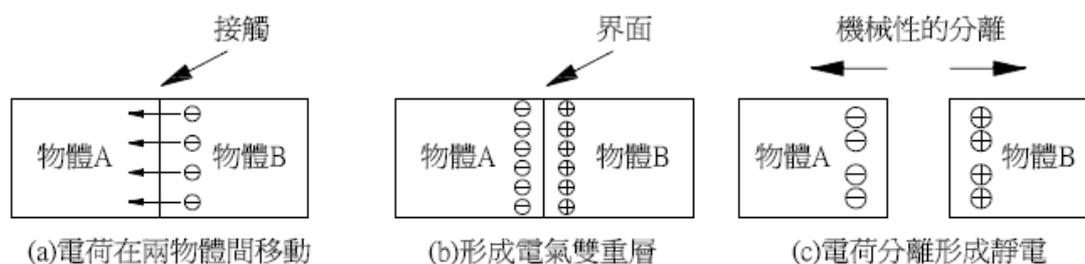


圖 3 靜電發生現象

### 二、物理性破壞起電：

固體物體會因為破壞時發生摩擦之後因正、負電荷不均衡分布而產生靜電如圖 4 所示[14]。

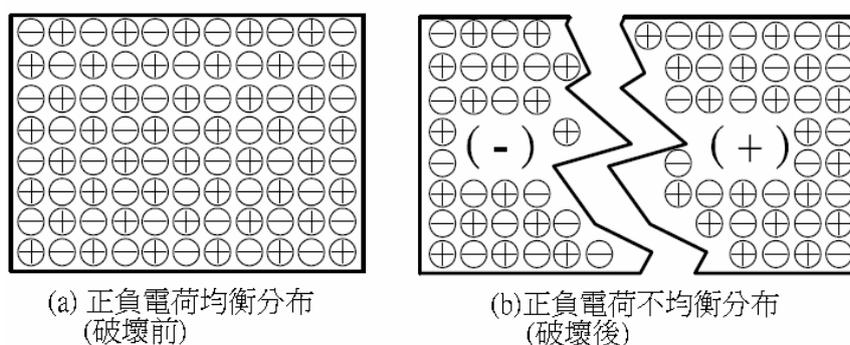


圖 4 物理破壞引起靜電的發生

### 三、感應起電

感應帶電是指帶電體在不經接觸的情況下，而使其他物體內的正負電局部分離的現象。靜電感應主要為根據是同種電相排斥，異種電相吸引的基本電學原理[14]。

「帶電」是指經由摩擦等方式起電後所「殘留」下來的電荷。因靜電的產生與逸散是同時發生，當靜電的產生量大於逸散量時，亦是殘留的電荷開始「累積」在物體上，且累積後發生的現象，便是靜電帶電現象[14]。靜電產生量和逸散量之關係，如下關係式[15]：

$$Q = Q_g - Q_t$$

Q：靜電帶電量(靜電累積量)

$Q_g$ ：靜電產生量

$Q_t$ ：靜電逸散量

靜電會在不同的物理接觸情形下產生靜電或在進行化學反應時產生靜電，如：燃燒。製程中多以接觸的方式產生靜電，又會因接觸的方式不同，而產生不同形式的帶電現象。

因電荷分離運動即會產生靜電，導電體周圍之介質中，則會產生電場。電場之大小將依電荷之累積而逐漸上升。當靜電荷在液體或固體上累積超過一定之限度時，介質即會失去絕緣性，於瞬間變成導電性，電荷將進行中和，即為靜電放電現象，並有可能造成危害的發生。靜電所引起之放電現象，其放電能量可經由下式獲得：

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C}$$

E：放電能量(J)

Q：物體累積電荷量(C)

C：物體電容量(F)

V：電位或電壓(V)

當靜電火花所放出的能量(E)超過點燃物質所需的最小點火能量，則物質被點燃，於是引發火災、爆炸的機率相對的增高許多，危險性也就增大許多。一般言之，若靜電火花所產生的能量能低於物質最小著火能量的 1/4，則可說達到安全的境界[17]。實際上，放電電位約在 3 kV 時，幾乎可以引燃所有的可燃性氣體；而大多數的可燃粉塵在電位約 5 kV 時可以被點燃[18]。

當電場強度超過 30 kV/m 或表面達最大帶電密度  $2.7 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$  時，帶電物質對地面或帶相反電的物質放電。而由於帶電物體種類之不同，可能為固體、流體、粉體或其他條件的不同，放電現象亦區分為幾種不同之放電型式、依其特點可分為 7 種類型：火花放電、電暈放電、刷狀放電、射狀放電、粉堆放電、雷狀放電、電場輻射放電。

圖 5 為靜電產生能量與氣體、蒸氣和粉塵的最小點火能量相對照圖，此圖說明可燃氣體和蒸氣可被火花、刷狀、粉堆和沿面放電點燃，而可燃性粉塵能被火花、射狀、圓錐放電給點燃，虛線部分為不確定的範圍，此不確定的結果是因為易感受性的特別條件。

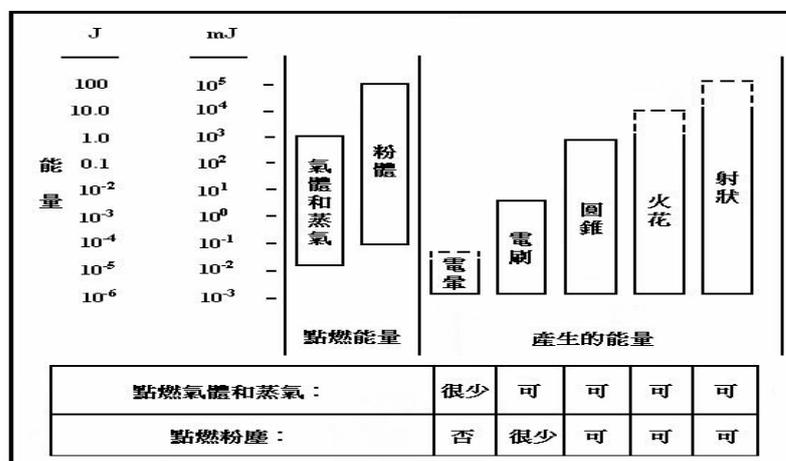


圖 5 最小點火能量與靜電放電能量的對照

在粉體傳輸過程中，粉體顆粒與管壁之間、粉體顆粒與顆粒之間，由於相互發生碰撞與摩擦，將會使粉體產生帶電。而粉體帶電主要具有幾種規律[16]：

- (一) 當粉體與輸送管道材質不同時，其靜電產生之情況較嚴重，極性較一致。
- (二) 當粉體濃度越高時，顆粒和輸送管接觸、摩擦的機會增加，電荷量也會增加。
- (三) 當輸送距離越遠時，則粉體顆粒帶電情況將越嚴重，最後趨於飽和值。
- (四) 當氣體輸送速度越快時，粉體顆粒帶電情況將越嚴重，最後也將趨於飽和值。

此外在粉體粒徑小於 40  $\mu\text{m}$  時極容易發生粉塵爆炸[15]，但粒徑在 100  $\mu\text{m}$  以上則很難著火，本研究將以 65  $\mu\text{m}$  以下之微米及奈米金屬粉體來進行試驗，文獻[19]中提及，當粉體濃度越高時，所產生的電荷量也越高，研究結果顯示電荷量分布趨勢為粉體濃度 0.212 g 大於 0.159 g 大於 0.106 g 大於 0.053 g，是由於粉體濃度越高時，顆粒和輸送管之間、顆粒和顆粒之間，相互接觸、摩擦及分離的機會增加，因此相對電荷量也會增加[19]，另外濕度越大時電荷量則越小，但流速之影響需再做進一步研究。

## 第五節 最低需氧濃度

先前於台南市某鋼鐵工業股份有限公司發生液態氧氣化管線爆炸意外，高溫、高壓氧氣直接衝擊作業人員，造成 1 人死亡 7 人受傷。引火源疑似為氧化鐵粉體帶靜電引起。氧化鐵粉體構造乃中心為鐵，外圍為氧化鐵的物質。高速氧氣帶動之下，該粉體如電容器一般，形成帶正負電荷的靜電粉體。當粉體碰觸過濾器及鐵管壁時，即放出攜帶的靜電荷，產生火花。且因氧氣環境，粉體之最小點火能量降低，而引起燃燒

為了解粉體燃燒爆炸所需的最低氧氣濃度(Minimum Oxygen Concentration, MOC)，吳鴻鈞[8]等人利用 20 公升爆炸鋼球，針對不同種類奈米粉體進行最低需氧濃度之研究。藉由調整氧氣濃度，由一大氣壓下的氧氣濃度開始逐漸降低氧氣濃度，直至不會產生爆壓為止，以測量出不同材料、粒徑的最低需氧濃度。

經實驗測量結果，三種不同粉體的最低需氧濃度分別如表 3 所示，顯示若是氧氣濃度不足此值則無法引爆，依此實驗結果配合氮氣惰性化可設計防爆措施。

表 3 奈米金屬粉體爆炸測試數據

測試樣品	最低需氧濃度(MOC)
Al 35 nm	12.25%
Al 75 nm	13%
Al 100 nm	13.5%
Fe 15 nm	12%
Fe 35 nm	12.5%
Fe 65 nm	11.5%
Ti 35 nm	13%
Ti 75 nm	粉體毀損
Ti 100 nm	14%

## 第六節 高速奈米粒子帶電荷研究

先前勞研所已完成「高速奈米粒子帶電荷研究」相關計畫並針對奈米鋁粉、奈米鈦粉及奈米鐵粉進行大氣環境下之高速輸送實驗，使用 EST111 數字電荷儀量測粉體電荷量及集電式電位測定器量測粉體電位差。實驗結果如下所示：

- 一、奈米鋁粉、奈米鈦粉及奈米鐵粉所產生的能量皆會隨著粉體濃度的增加而上升，推論是由於隨著粉體濃度的增加，粉體顆粒與管壁之間，相互接觸、摩擦的機會增加，能量也會跟著增加。
- 二、奈米鋁粉、奈米鈦粉及奈米鐵粉所產生的能量皆會隨著流速而隨之升高，造成此影響之因素為氣體輸送速度越快時，粉體粒子帶電情況將越嚴重，使能量會隨流速增加而增加。
- 三、奈米鋁粉、奈米鈦粉及奈米鐵粉之粉體粒徑越小，所產生的能量會越大，是由於粉體粒徑越小時，比表面積越大而粉塵粒子為金屬粉塵具有很大的帶電量，在以空氣為輸送氣體時容易造成瞬間大能量的傳送，其造成的危害越高。
- 四、由於 PVC 管在帶電序列中與金屬粉體之極性相差較大於不鏽鋼管，因此粉體通過 PVC 管輸送所產生的靜電荷皆會大於粉體通過不鏽鋼管所產生的靜電荷。
- 五、奈米鋁粉於 PVC 管進行實驗時，造成法拉第筒中燒結現象之產生，經 SEM 晶相分析拍攝後發現 40 nm 的奈米鋁粉在流速 30 m/s 下，於 0.15 g 及 0.1 g 影像皆有部分絲狀情況發生，推測有可能是燃燒行為發生。
- 六、綜合各項實驗，推論出研究所量測之靜電能量僅有可能為輸送後殘留之能量，部分能量藉由輸送管而逸散，亦有部分能量因燒結現象而散失，因此以數字電荷儀及電位測定器所量測之能量，並不完全為粉體輸送所產生之能量，尚需考慮其餘造成能量散失情形以獲得更準確之能量大小。

雖此空氣速度與奈米粒子帶電量關係研究已於 101 年完成，但研究之環境僅於大氣中，未對非大氣環境下做研究，查國內有關氧氣鋼瓶因年久未用，於在使用時開啓後隨即爆炸之職災，故本計畫主要針對純氧環境中於不同輸送速度對微米鐵粉、奈米鐵粉及鋼瓶內部粉體帶電荷進行研究。

## 第三章 研究方法

本研究先調查老舊鋼瓶內部粉體累積情形，再以一自行設計之氣動傳輸設備進行實驗，以模擬工業上利用氣動傳輸顆粒製程之管路帶電特性，並於出口端進行電荷量及電位差之量測以計算出粉體產生之靜電量。且於勞研所進行爆炸鋼球之混合濃度試驗及氧氣環境下最小點火能量試驗，以模擬氧氣鋼瓶內部粉體之狀態。

### 第一節 實驗材料

本研究欲以微米級鐵粉、奈米級鐵粉、鋼瓶內部粉體做為實驗材料，並選用工業製程中使用較為廣泛使用之粒徑，其粒徑大小如下：

微米鐵粉

15  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$ 、150  $\mu\text{m}$

奈米鐵粉

15 nm、35 nm、65 nm

鋼瓶內部粉體

### 第二節 實驗設備

本研究將收集二十支使用十年以上之老舊鋼瓶，並將鋼瓶切割後收集粉體並以膠帶在鋼瓶前、中、後段以沾黏方式採樣再經由 TEM (Transmission Electron Microscopy) 穿透式電子顯微鏡及 SEM (Structural Equation Modeling) 掃描式電子顯微鏡觀測粉體粒徑以及進行成分分析。

待粒徑及成分分析完畢後，將模擬鋼瓶內部粉體之鐵粉組合及實驗用微米及奈米級鐵粉進行氧氣環境下最小點火能量試驗，並觀察其最小點火能量之差異。

本研究將進行微、奈米粉塵的靜電累積能量量測實驗，以靜電檢測儀器測量出靜電電荷量，使用國際間用以計算粉塵靜電能量的計算方法，以及相關的粉塵爆炸危害預防規範，期能規劃並擬定適用於國內微、奈米粉塵爆炸危害之預防策略，以下為所使用的研究方法及步驟說明。

靜電累積能量將使用 EST111 數字電荷儀進行量測，EST111 數字電荷儀(圖 6)，主要依循中國國家標準 GB/T 12703-91 紡織品靜電性能測試方法進行之測試分析規範，可測量各種粉體、液體、固體的帶電電荷量、火花放電電荷轉移量、金屬體的電容量。EST111 數字電荷儀能夠直接讀出粉體摩擦後的電荷量值，其測量範圍在 $\pm 10 \text{ pC} \sim \pm 20 \text{ } \mu\text{C}$  ( $\pm 1 \times 10^{-11} \sim \pm 2 \times 10^{-5}$ )，而測出帶電電荷量  $Q$  後，同時以集電式電位測定器(圖 7)量測出電位差  $V$ ，即可由公式  $E=1/2Q \times V$  計算出靜電能量，因本研究所使用數字電荷儀之電荷測量單位為庫倫(C)，並非電容(F)故未使用公式  $W = 1/2 C V^2$  來做計算。

在測試樣品方面，本次計畫將進行微米鐵粉、奈米鐵粉及鋼瓶內部粉體在不同粒徑、不同濃度及氧氣濃度下的靜電累積能量量測實驗，實驗將於常溫、常壓條件下進行，以符合實際工廠製程的操作環境。



圖 6 EST111 數字電荷儀



圖 7 集電式電位測定器

在最小點火能量試驗方面，本計畫使用最小點火能量試驗儀進行測試，哈特曼(Hartmann)測試儀其形狀為一圓筒狀，是美國礦物局首先發展出的測試裝置，設置有電子點火裝置，壓縮空氣帶著粉體由底部向頂部噴出，形成粉塵雲，此一粉塵雲通過點火裝備被引爆，火焰沿著圓筒之軸向傳播。本研究最小點火能

量測試設備所採用之 1.2 L Modified Hartmann 為強化玻璃製的圓柱垂直管，其內徑約為 68 mm，高度為 300 mm，內容積約為 1.2 L，由瑞士 Kühner AG 公司製造，型號為 MIKE3，此設備乃藉由高壓電極火花來誘發粉塵雲爆炸，在試驗過程中，需以目視判斷粉塵雲是否有被電極火花引燃，每一組試驗皆以引燃十次為極限，於十次試驗中若有一次引燃則將其判斷為該最小點火能量，若點火十次皆未能引燃則判斷為該能量不足引燃該粉體濃度，將點火能量調升至下個能量繼續進行最小點火能量試驗，其可選擇試驗的電極火花能量有 1、3、10、30、100、300 及 1000 mJ 等 7 種，其外觀如圖 8，而本實驗選試驗之粉體濃度（哈特曼試驗儀內設置）有 150、300 及 600 mg 等 3 種。

此外，為符合本次計畫相關規範之氧氣環境下進行最小點火能量試驗，因此將以往所使用壓縮氣體之空氣鋼瓶換成氧氣鋼瓶並將氧氣壓力調整至  $7 \text{ kg/m}^2$  如圖 9，並藉由含氧濃度感知器來偵測玻璃管內之氧氣濃度以確保管內為氧氣環境，如圖 10、圖 11 於每次實驗前將氧氣灌入玻璃管中，當氧氣濃度已達 90% 時即進行實驗，再以目視方式進行判斷粉塵雲是否引燃如圖 12、13 當鐵粉引燃成功則進行下一組試驗，並於每次測試後以防爆型集塵桶(圖 14)將玻璃管內之粉體清除。



圖 8 改裝後氧氣環境下之最小點火能量試驗裝置



圖 9 壓縮氧氣鋼瓶之壓力



圖 10 最小點火能量試驗儀構造圖



圖 11 含氧感知器



圖 12 Fe powder 100  $\mu\text{m}$  粉塵雲引燃示意圖



圖 13 Fe powder 35 nm 粉塵雲引燃示意圖



圖 14 防爆型集塵桶

### 第三節 實驗模組之設計

實驗方法如圖 15 所示，將測試樣品於進料口投入後，藉由氧氣或空氣鋼瓶產生空氣後將進料口落下之粉體，由管道右側吹向左側，在移動過程中粉體與管壁間相互摩擦產生靜電，最終這些帶有靜電電荷的粉體將滑入法拉第筒中，由 EST111 電荷儀直接讀出靜電電荷量；而電位則是用集電式電位測定器在管道中直接量測，從集電器的小孔射出微弱的  $\alpha$  射線，偵測集電器與粉體之間的離子變化，藉以計算出粉體的電位差。

設備管件選用製程廠區較常使用的不鏽鋼管及 PVC 管，其管徑為 16 mm，進料口至管徑末端之傳輸長度為 300 mm，輸送壓力使用氧氣鋼瓶產生高壓氧氣來帶動粉體，實驗中會在粉體進料處之左側設置空氣濾清器，目的是為了阻隔氧氣鋼瓶所帶動空氣中的灰塵而影響粉體的濃度及準確性，實驗期間皆會控制環境中的溫、濕度使實驗環境趨於相同的狀態，將其控制在 $\pm 5\%$ 內的條件下來進行實驗。

在實驗測試樣品方面，本次計畫選用微米鐵粉(10、100、150  $\mu\text{m}$ )、奈米鐵粉(15、35、65 nm)及鋼瓶內部粉體，選用 0.05 g、0.10 g、0.15 g 三種不同濃度分別做測量，藉由氧氣或空氣鋼瓶產生 10、20、30 m/s 三種不同流速之空氣，最後於 EST111 電荷儀中讀取靜電電荷，並計算出靜電累積能量。

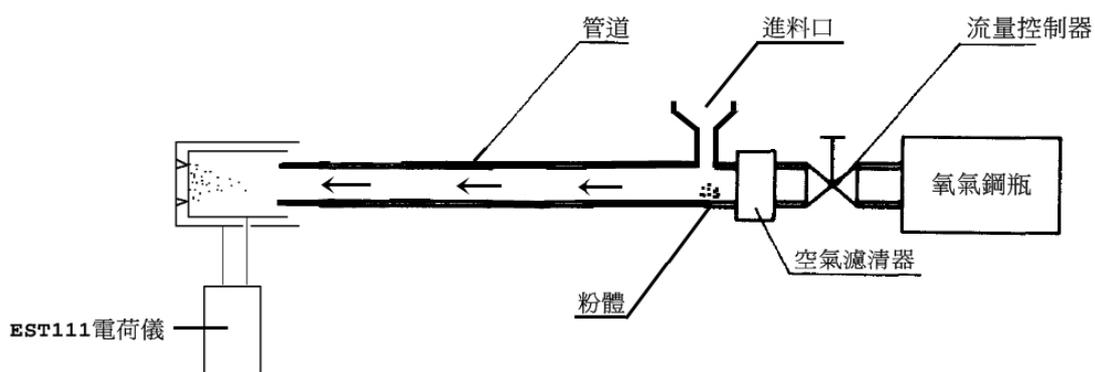


圖 15 實驗設備圖

## 第四章 結果與討論

### 第一節 老舊鋼瓶內部採樣實驗

#### 一、採樣結果

本研究目前已完成裁切二十支使用數十年以上之老舊氧氣鋼瓶，皆於高雄市大寮區志安特殊鋼企業有限公司進行，老舊鋼瓶於裁切後發現每支鋼瓶內壁皆有明顯氧化生鏽之情形，但皆未發現剝落之氧化鐵粉沉積於鋼瓶底部，推測先前剝落之氧化鐵粉可能已於氧氣鋼瓶使用時與氧氣一同吹送出去，圖 16~圖 20 為本計畫所收集之二十支鋼瓶之內部情形：



圖 16 老舊氧氣鋼瓶內部圖之一



圖 17 老舊氧氣鋼瓶內部圖之二



圖 18 老舊氧氣鋼瓶內部圖之三



圖 19 老舊氧氣鋼瓶內部圖之四



圖 20 老舊氧氣鋼瓶內部圖之五

## 二、TEM 粒徑分析結果

本研究欲將老舊鋼瓶裁切後收集鋼瓶內部殘留粉體進行 TEM 及 SEM 拍攝，觀察粉末之平均粒徑以及表面結構以及成份分析，採樣結果未發現粉體殘留但將膠帶沾黏鋼瓶前、中、後段內部進行相關分析。

圖 21~26 為 TEM 的粒徑分析結果，由圖中可看出鋼瓶內部粉體之平均粒徑皆為 5nm 以下；由圖 22、24、26 成分分析結果可看出老舊鋼瓶內部粉體主要元素為鐵、氧化鐵以及微量錳、銅等元素。

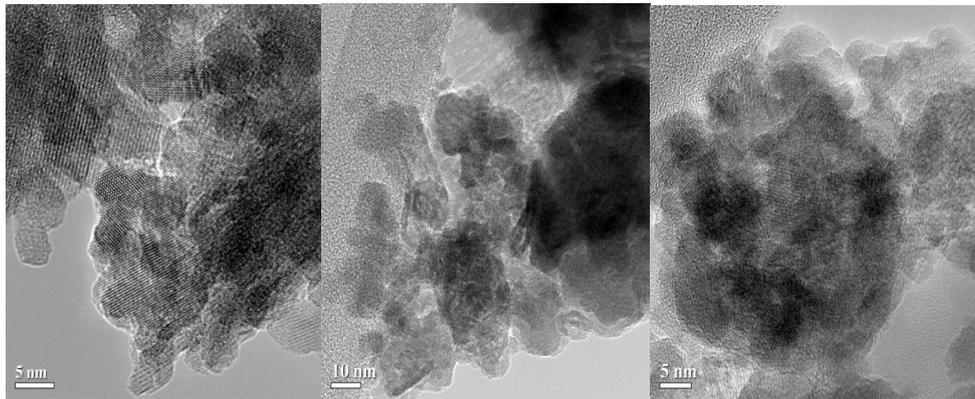


圖 21 老舊鋼瓶內部粉體(前)

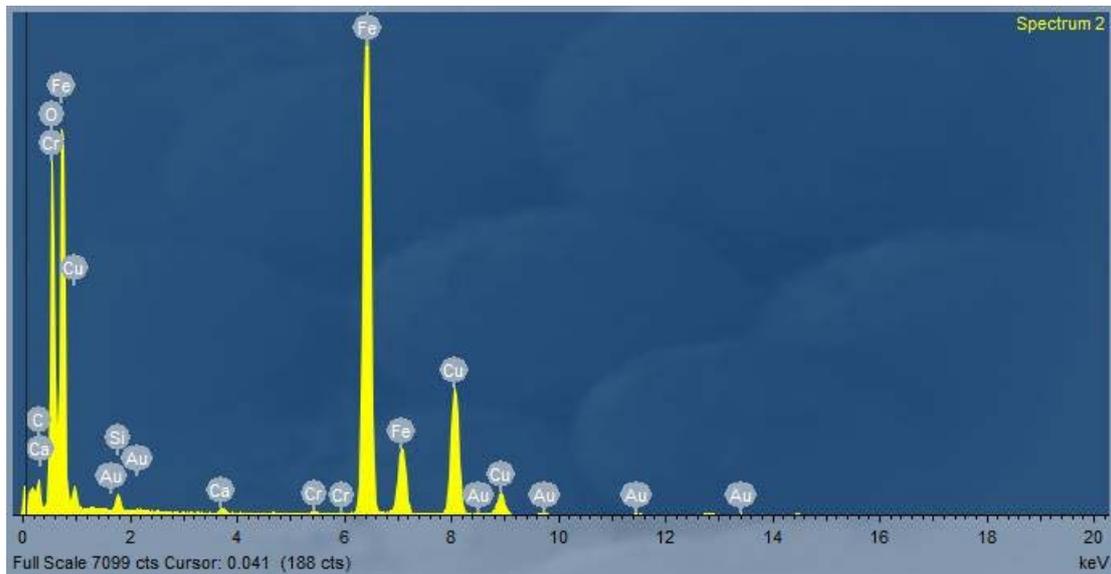


圖 22 老舊鋼瓶內部粉體成分分析(前)

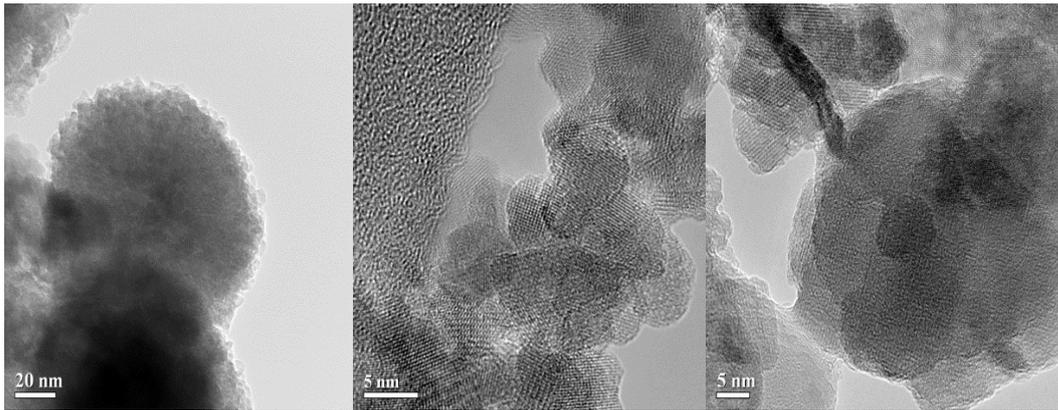


圖 23 老舊鋼瓶內部粉體(中)

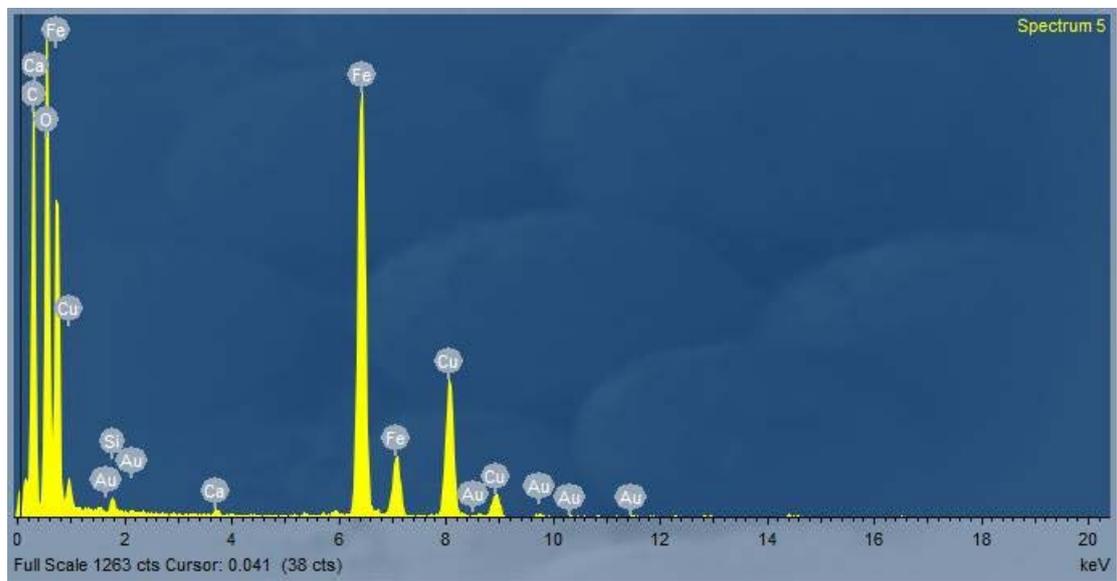


圖 24 老舊鋼瓶內部粉體之成分分析(中)

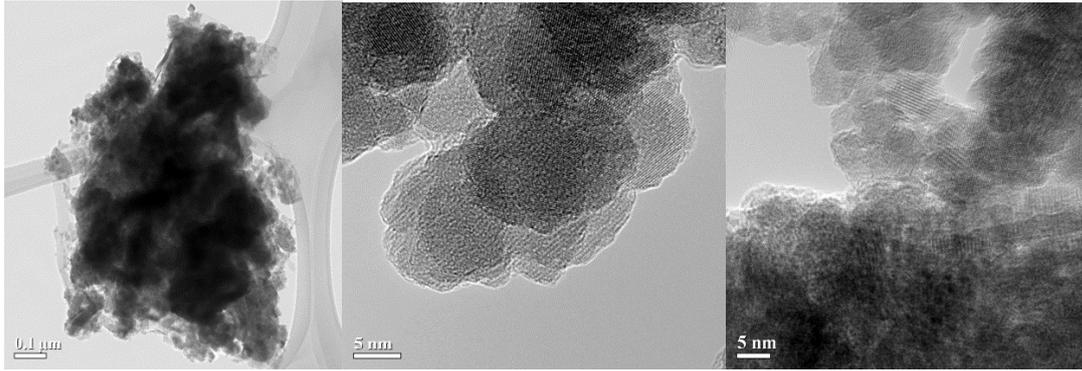


圖 25 老舊鋼瓶內部粉體(後)

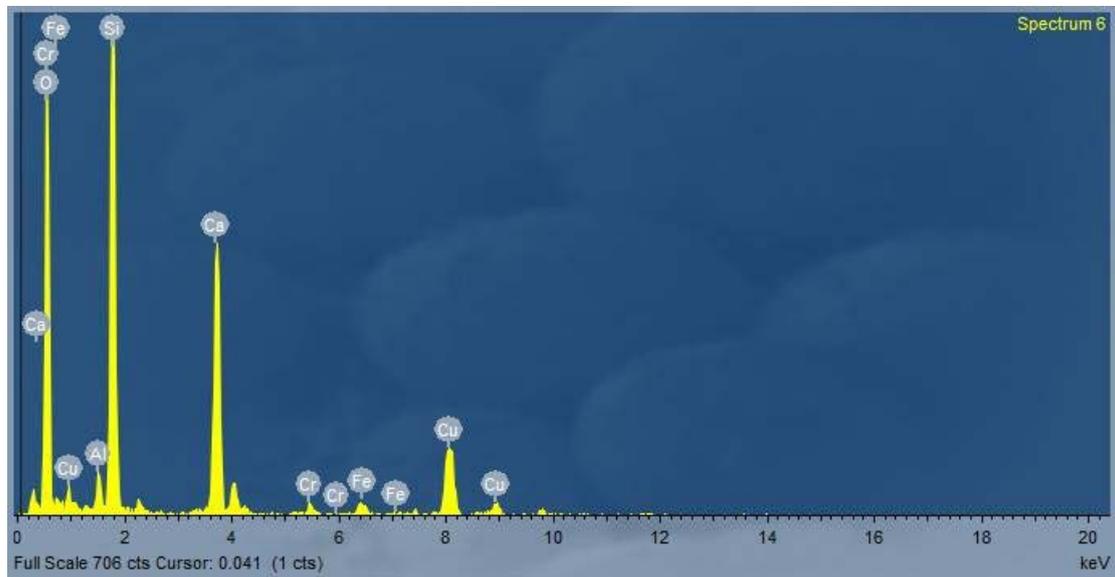


圖 26 老舊鋼瓶內部粉體之成分分析(後)

### 三、SEM 晶像分析結果

圖 27~32 為 SEM 的晶像分析結果，由圖中可看出鋼瓶內部粉體之平均粒徑為 120nm~250nm 之間；由圖 28、30、32 成分分析結果可看出老舊鋼瓶內部粉體主要元素為鐵、氧化鐵以及微量錳、銅等元素。

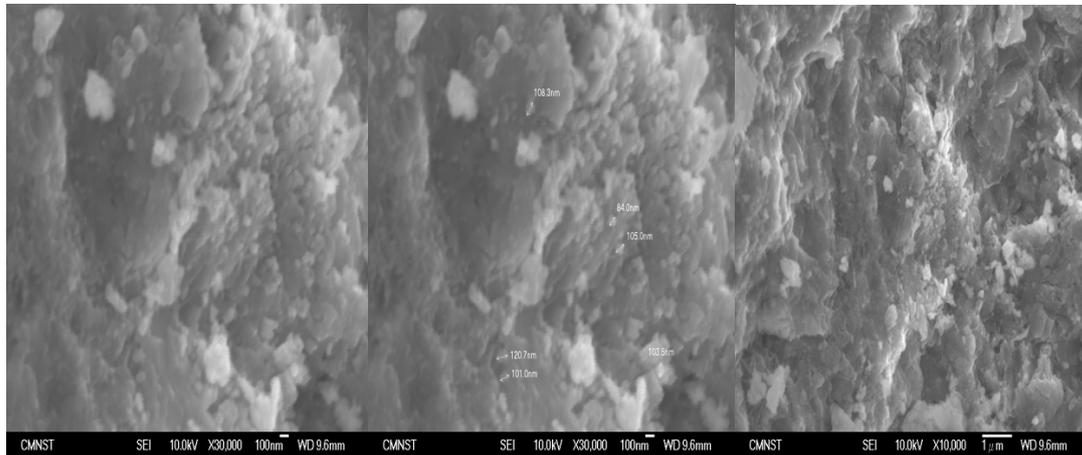


圖 27 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體(前)

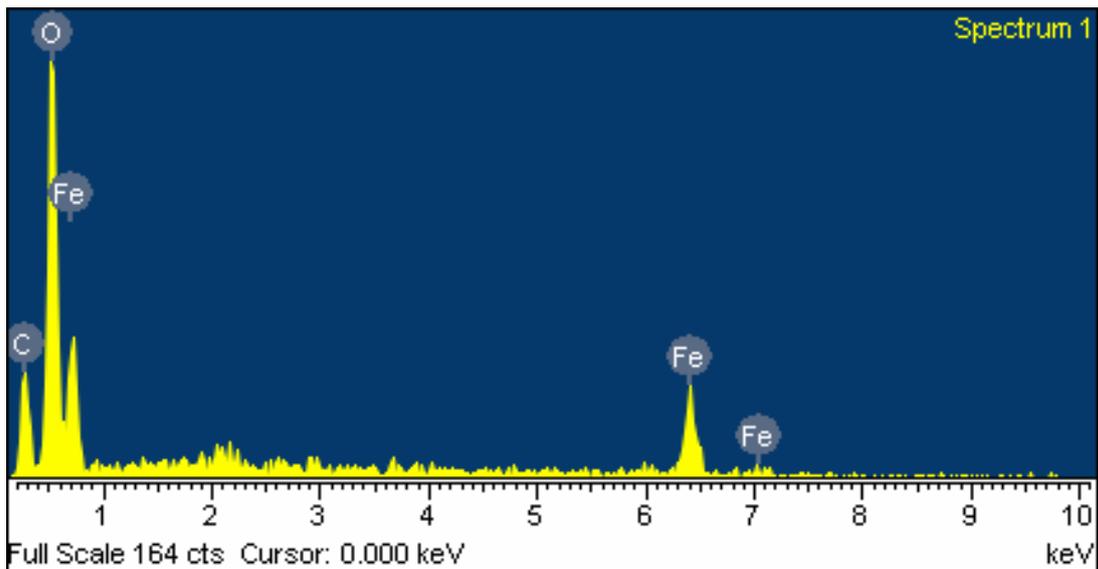


圖 28 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體之成分分析(前)

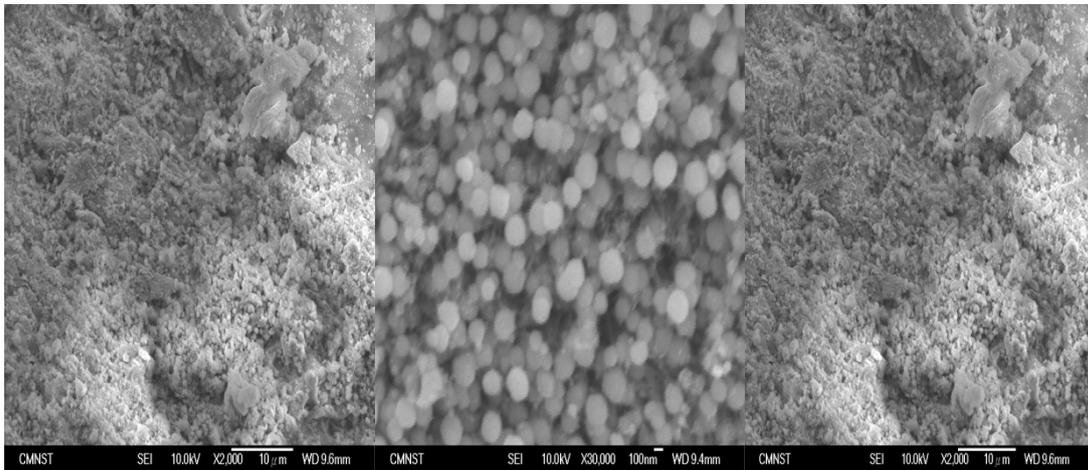


圖 29 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體(中)

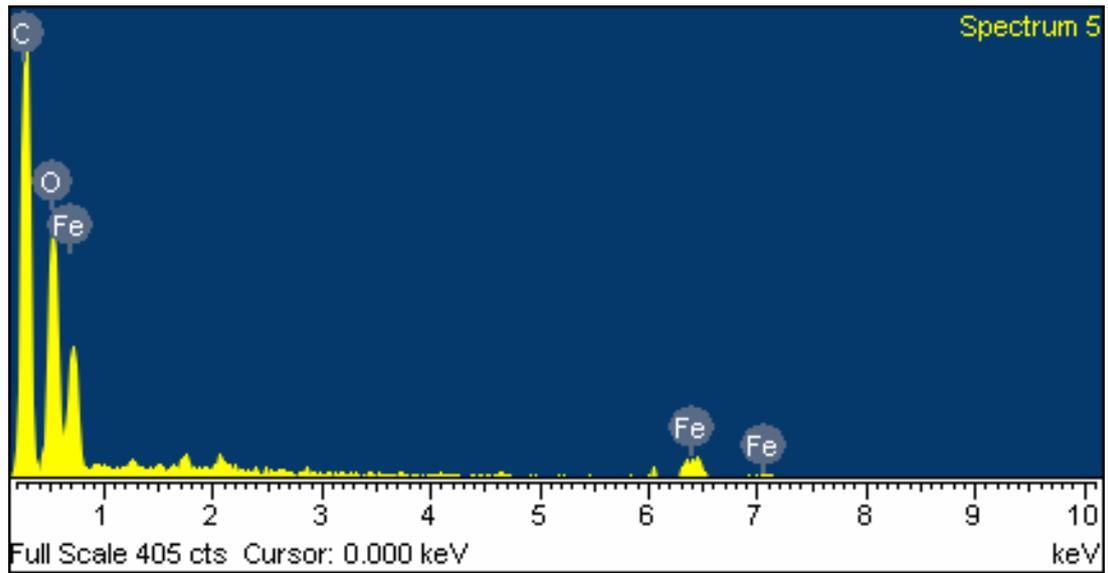


圖 30 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體之成分分析(中)

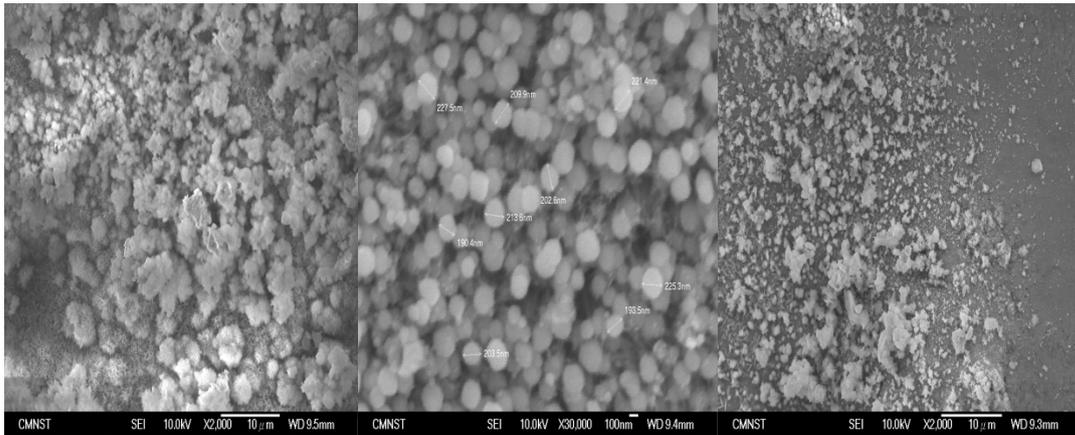


圖 31 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體(後)

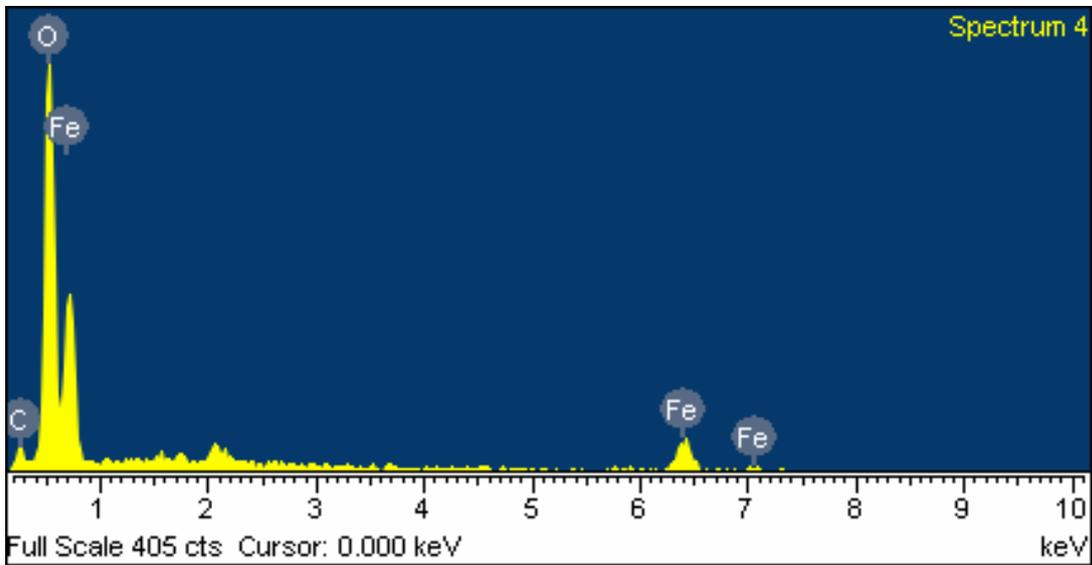


圖 32 SEM 拍攝老舊鋼瓶內部粉體之成分分析(後)

#### 四、粒徑分析討論

經由 TEM (Transmission Electron Microscopy) 穿透式電子顯微鏡及 SEM (Structural Equation Modeling) 掃描式電子顯微鏡觀測粉體粒徑，經由分析可得粉體粒徑範圍為 5nm 至 250nm，本次研究 15nm、35nm、65nm 皆包含在其範圍內。

## 第二節 最小點火能量試驗

由採樣結果得知老舊鋼瓶內部粉體粒徑介於 5~250nm 之間，藉由 1.2 L 最小點火能量試驗儀通過純氧來進行實驗，而本計畫也額外進行空氣環境下之試驗以比對其不同環境下之差異性，其結果如圖 33~圖 34 所示，其中實心點表示該粉塵量在該點火能量下會被引燃，空心點則為不會引燃，本計畫針對濃度及粒徑兩種結果進行分析，其濃度分析如下：

由圖 33 所示，左圖為 15  $\mu\text{m}$  的鐵粉通過空氣進行試驗、右圖為 15  $\mu\text{m}$  的鐵粉通過氧氣進行試驗，當粉體濃度為 150 mg 時通過空氣引燃的能量需 30 mJ，而當換成氧氣時則僅需 3 mJ 的點火能量即可引燃相同濃度之粉體；當粉體濃度為 300 及 600 mg 時通過空氣引燃的能量皆為 10 mJ，而換成氧氣時點火能量皆下降至 3 mJ 即可引燃。

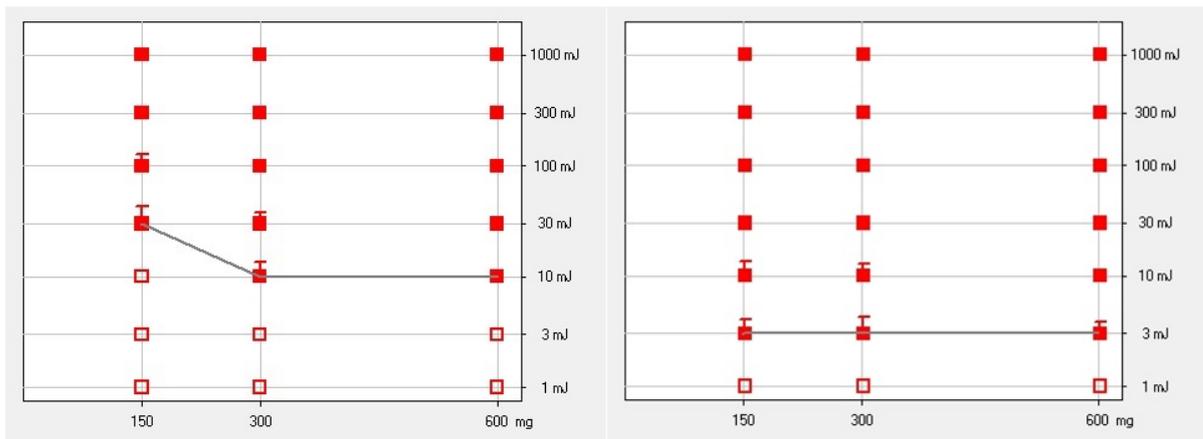


圖 33 Fe powder 15  $\mu\text{m}$  通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果

由圖 34 所示，左圖為 100  $\mu\text{m}$  的鐵粉通過空氣進行試驗、右圖為 100  $\mu\text{m}$  的鐵粉通過氧氣進行試驗，當粉體濃度為 150 mg 時通過空氣引燃的能量需 300 mJ，而當換成氧氣時則在 30 mJ 的點火能量便引燃相同濃度之粉體；當粉體濃度為 300 mg 時通過空氣引燃的能量為 100 mJ，換成氧氣時點火能量下降至 10 mJ 即可引燃；粉體濃度增加至 600 mg 時，通過空氣引燃鐵粉的能量需 30 mJ，而換成氧氣時點火能量則下降至 10 mJ。

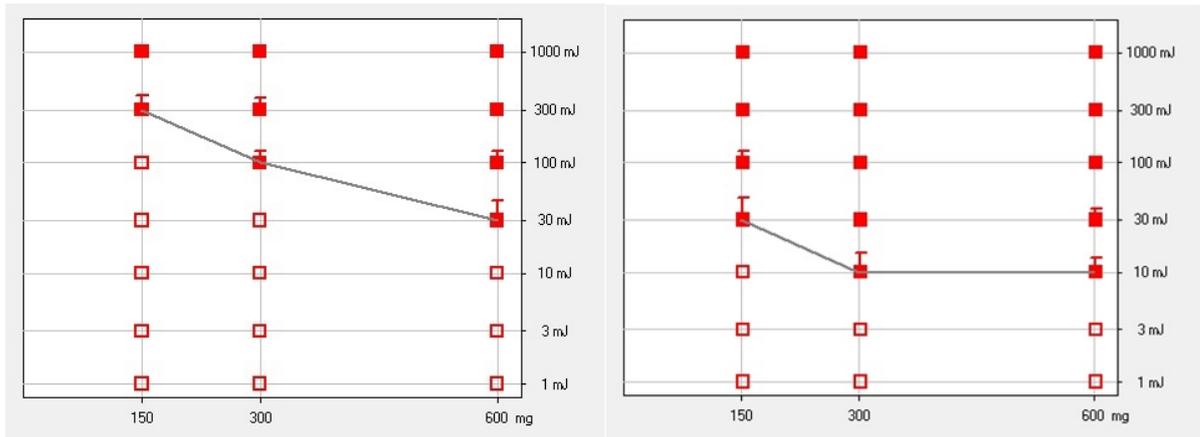


圖 34 Fe powder 100  $\mu\text{m}$  通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果

由圖 35 所示，左圖為 150  $\mu\text{m}$  的鐵粉通過空氣進行試驗、右圖為 150  $\mu\text{m}$  的鐵粉通過氧氣進行試驗，當粉體濃度為 150 mg 時通過空氣在 7 種能量皆未能引燃，而當換成氧氣時則僅需 30 mJ 的點火能量即可引燃相同濃度 150 mg 之粉體；當粉體濃度為 300 及 600 mg 時通過空氣引燃的能量皆為 100 mJ，將壓縮氣體換成氧氣時 300 mg 點火能量下降至 30 mJ 即可引燃，而 600 mg 則是下降為 10 mJ 即可引燃粉塵雲。

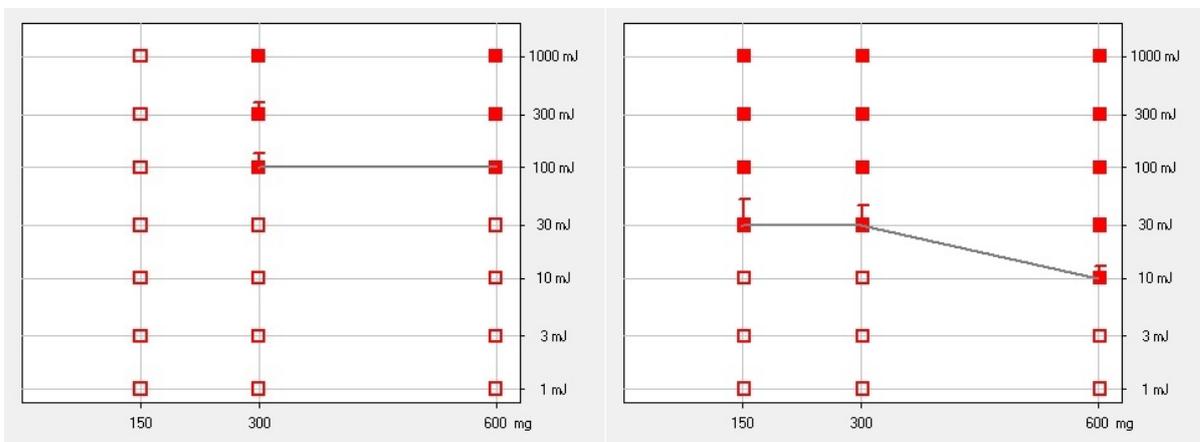


圖 35 Fe powder 150  $\mu\text{m}$  通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果

在奈米鐵粉方面，先前吳鴻鈞等人於「奈米粉塵爆炸危害預防對策研究」中已進行相同粒徑之最小點火能量試驗，因此本計畫將氧氣環境下之測試結果與先前吳鴻鈞所進行之空氣環境下做比較以觀察兩種不同環境之差異，其結果如圖 24～圖 26 所示。

由圖 36 所示，左圖為 15 nm 的鐵粉通過空氣進行試驗、右圖為 15 nm 的鐵粉通過氧氣進行試驗，當粉體濃度為 300 mg 時通過空氣引燃的能量需 100 mJ，而當換成氧氣時則僅需 1 mJ 的點火能量即可引燃 300 mg 之粉體；當粉體濃度為 600 mg 時不論通過空氣或是氧氣其引燃的能量皆小於 1 mJ。

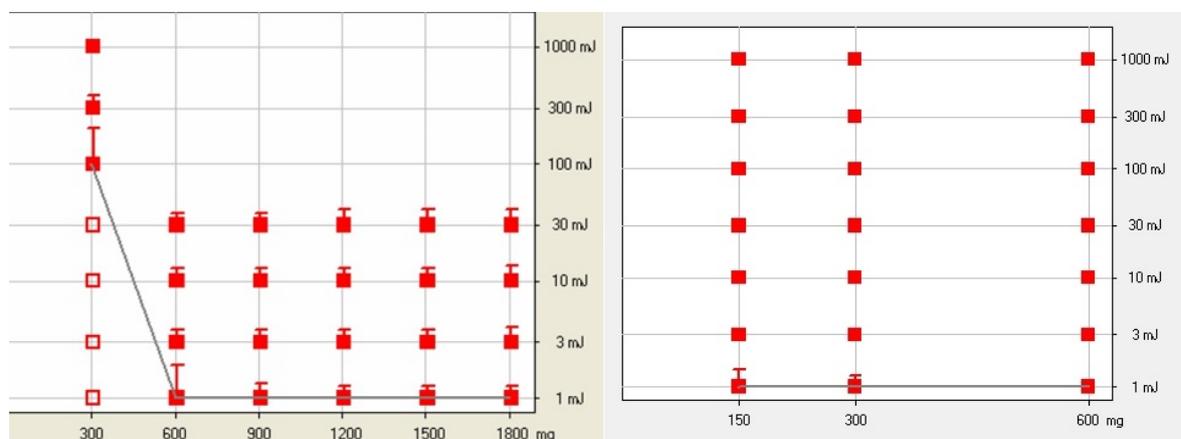


圖 36 Fe powder 15 nm 通過空氣(左)及氧氣(右)的最小點火能量試驗結果

由圖 37 所示，左圖為 35 nm 的鐵粉通過空氣進行試驗、右圖為 35 nm 的鐵粉通過氧氣進行試驗，當粉體濃度為 300 mg 時通過空氣所引燃的最小點火能量需 30 mJ，而當換成氧氣時則僅需 1 mJ 的點火能量即可引燃 300 mg 之粉體；當粉體濃度為 600 mg 時不論通過空氣或是氧氣其引燃的能量皆小於 1 mJ。

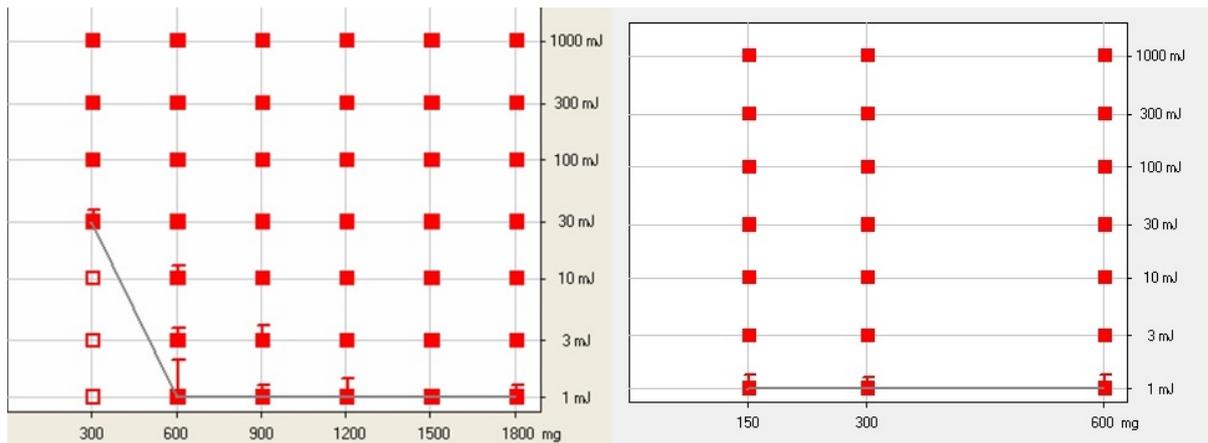


圖 37 Fe powder 35 nm 通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果

由圖 38 所示，左圖為 65 nm 的鐵粉通過空氣進行試驗、右圖為 65 nm 的鐵粉通過氧氣進行試驗，當粉體濃度為 300 mg 時通過空氣所引燃的最小點火能量需達 1000 mJ，而當換成氧氣時則僅需 1 mJ 的點火能量即可引燃 300 mg 之粉體；當粉體濃度為 600 mg 時通過空氣所引燃的最小點火能量需 10 mJ，在換成氧氣時僅需 1 mJ 的能量即可引燃 600 mg 之奈米鐵粉。

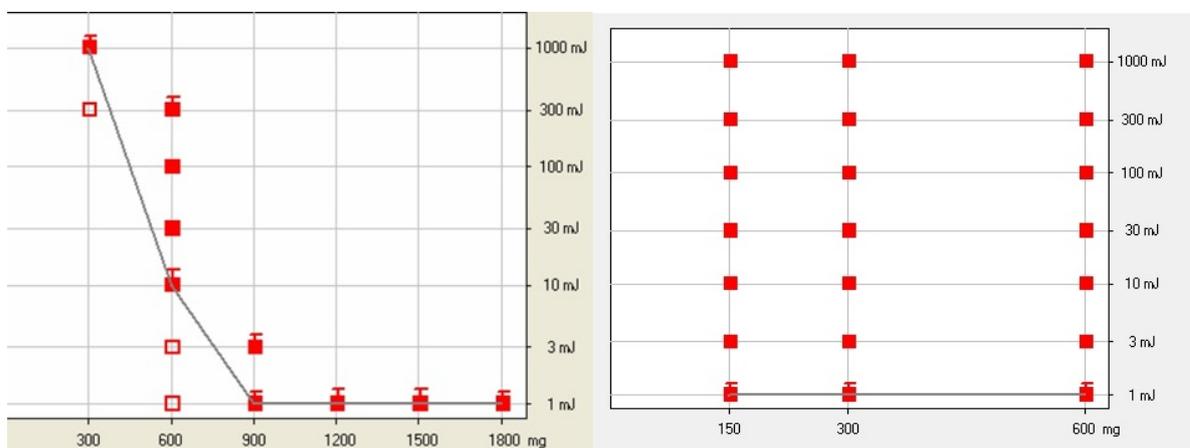


圖 38 Fe powder 65 nm 通過空氣及氧氣的最小點火能量試驗結果

由這六組相比較之實驗結果，可以明顯看出當壓縮氣體由空氣換成氧氣時粉塵所需的點火能量皆大幅下降，甚至在奈米粒徑時以氧氣環境進行最小點火能量試驗，不論在 150、300 及 600 mg 的濃度下皆只需 1 mJ 的能量即可引燃。

本研究將實驗結果依粒徑大小進行彙整後，可以看出於氧氣環境濃度下之

最小點火能量試驗在奈米尺度時，不論 15、35 及 65 nm 皆僅需 1 mJ 的能量即可引燃，當粉體粒徑上升至微米時隨著粒徑的增加其所需的引火能量也隨之增加，如圖 39 所示以 150 mg 之濃度為例，15  $\mu\text{m}$  鐵粉的最小點火能量為 3 mJ，100  $\mu\text{m}$  及 150  $\mu\text{m}$  鐵粉的最小點火能量皆為 30 mJ；在 300 mg 之濃度時，15  $\mu\text{m}$  鐵粉的最小點火能量為 3 mJ，當粉體粒徑上升至 100  $\mu\text{m}$  時最小點火能量則增加至 10 mJ，當粉體粒徑再上升至 150  $\mu\text{m}$  時其最小點火能量隨之上升至 30 mJ，顯示出粉體粒徑越小其最小點火能量也越小。

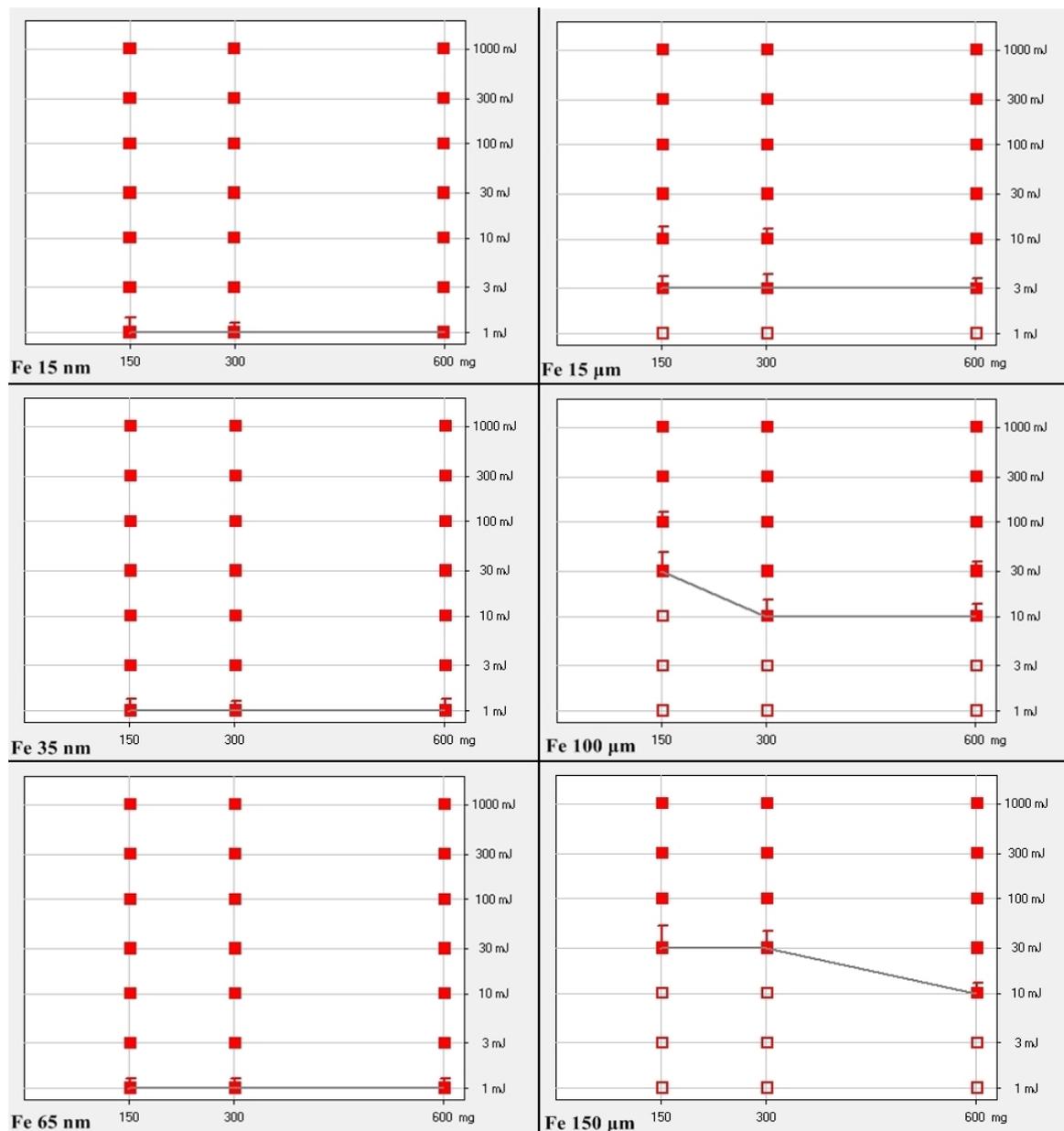


圖 39 粉體粒徑大小與最小點火能量之關係

### 第三節 靜電累積能量實驗

#### 一、純氧下不同粒徑與不同濃度之微、奈米鐵粉能量趨勢圖

因粉體電荷量會累積於法拉第筒內，直接量測出電荷量及電位差後，以能量公式  $E = \frac{1}{2} QV$  計算出能量大小，繪製出其趨勢圖如圖 40-41 圖所示。

實驗結果中發現，純氧下所有實驗粒徑越小產生能量越大，以奈米鐵粉為例，圖 40、為奈米鐵粉 25nm、35nm、65nm 通過 PVC 管及不鏽鋼管時粒徑所產生之能量大小，由圖中可以看出粉體輸送所產生的能量，隨著粒徑越小能量有逐漸升高的趨勢，當粒徑為 25nm 時，所產生的能量皆為最大值，35nm 次之，而 65nm 所產生的能量則最小，圖 41 粉體輸送時所產生的能量大小會隨著粒徑的增加而變小，即當粒徑越小時，粉體粒子帶電情況將越嚴重，使能量亦隨之升高。

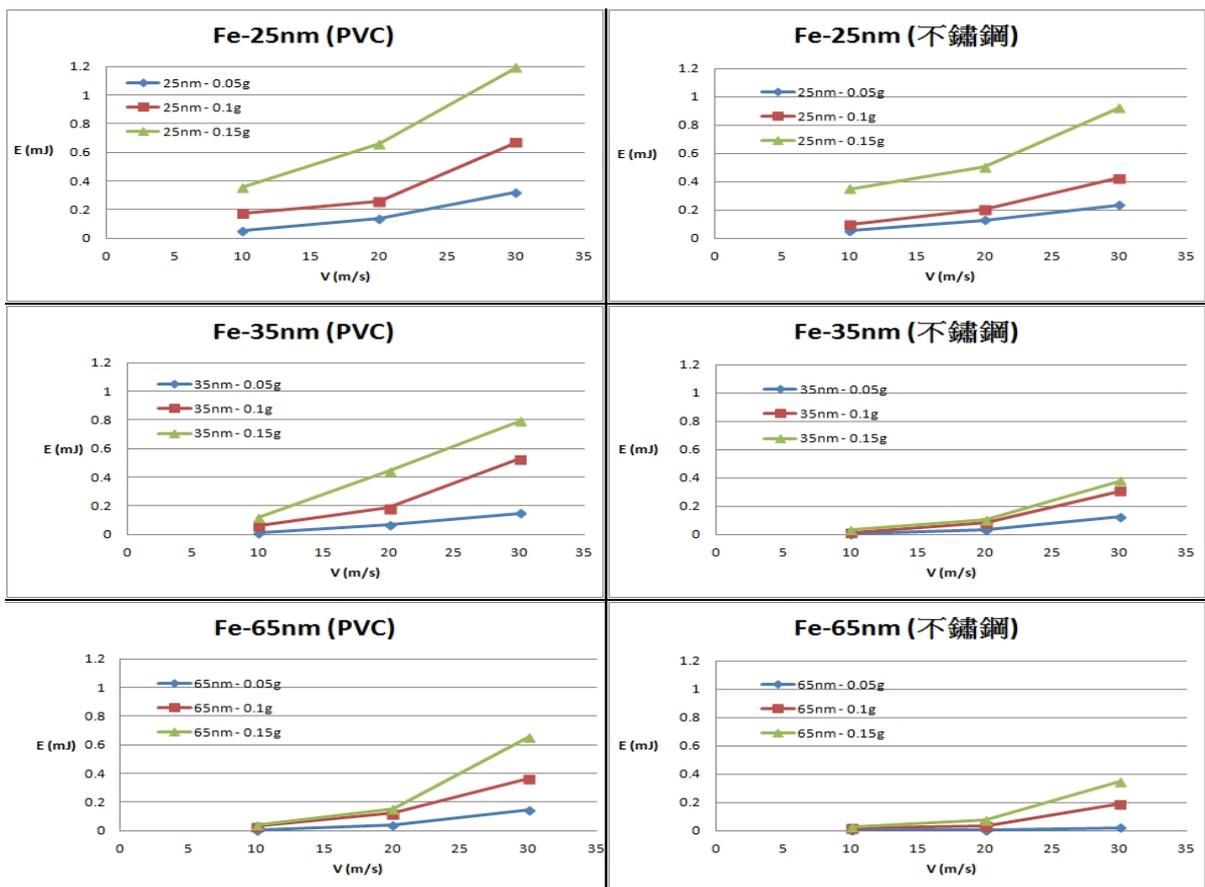


圖 40 純氧環境下不同流速、粒徑、濃度之奈米鐵粉於 PVC 管與不鏽鋼管中之能量分布圖

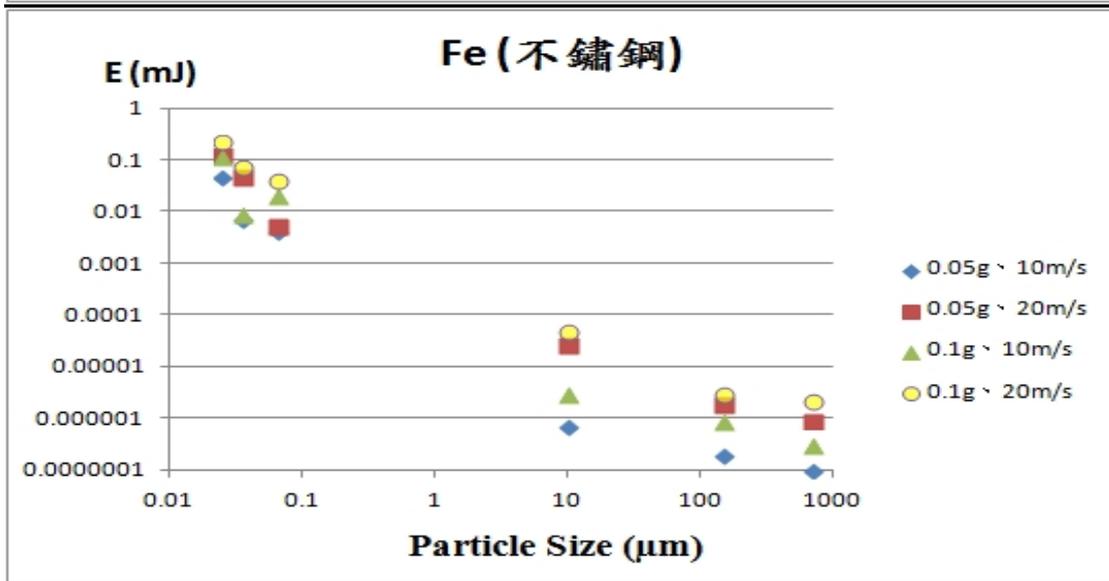
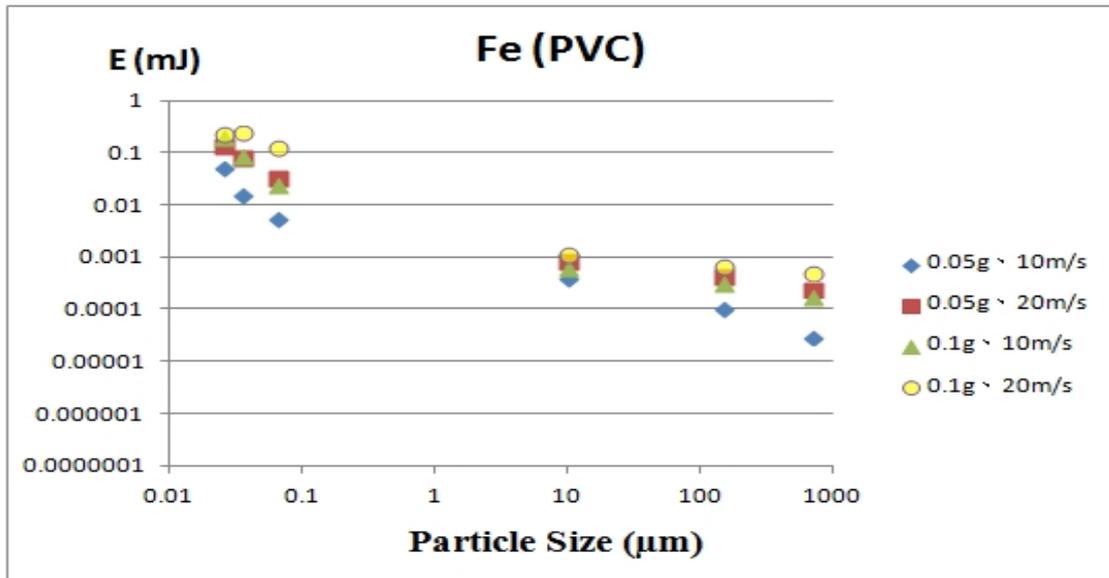


圖 41 空氣中不同粒徑鐵粉所產生能量

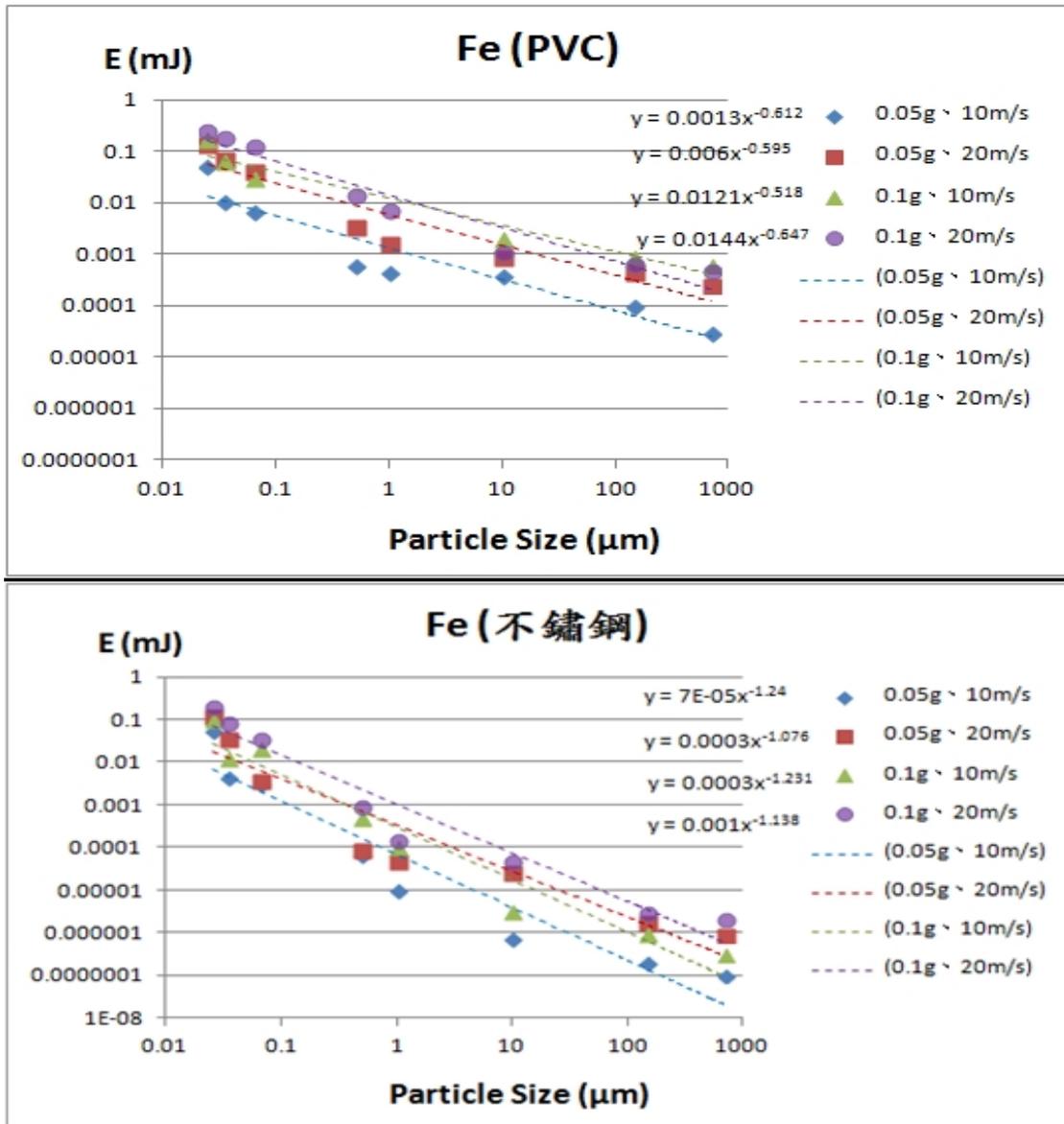


圖 42 純氧環境中不同粒徑鐵粉所產生能量

圖 41 為「高速奈米粒子帶電荷研究」與圖 42 純氧環境進行實驗分析比對，比對後發現純氧下產生之靜電產生量略高於空氣環境下之靜電產生量。

#### 第四節 微、奈米鐵爆炸與傳送速度關係探討

吳鴻鈞等人[6]提出利用 20 升爆炸鋼球進行奈米鐵粉 Fe-15nm、Fe-35nm、Fe-65nm 粉塵爆炸測試，結果如表 4 所示，低濃度粉塵進入鋼體後，經過點火藥爆炸，偵測出無爆炸壓力產生，但是鋼瓶外殼卻產生高溫；當粉體濃度提升至 750 g/m<sup>3</sup>時，測試樣品於粉塵產生噴嘴沉積並產生高溫，無法均勻分散至鋼體內進行實驗，當粉塵濃度再提昇至 1000 g/m<sup>3</sup> 後，測試樣品於樣品裝置容器連結至鋼球之鋼管肘彎處產生高溫，無法進入鋼體內進行實驗，後因保護儀器避免高溫熔化現象產生，系列實驗最高策是濃度停止於 1000 g/m<sup>3</sup>。

表4 奈米鐵粉Fe-15 nm、Fe-35 nm 及Fe-65 nm 粉塵爆炸系列實驗結果

待測濃度	g/m <sup>3</sup>	30	60	125	250	500	750	1000
	g	0.6	1.2	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0
實驗現象	鋼球壁高溫但無壓力訊號						<ul style="list-style-type: none"> <li>• 測試樣品於粉塵產生噴嘴沉積並產生高溫</li> <li>• 無壓力訊號</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 測試樣品於樣品裝置容器連結至鋼球之鋼管肘彎處產生高溫</li> <li>• 無法入料</li> <li>• 無壓力訊號</li> </ul>

本計畫進行裁切老舊鋼瓶後，採取鋼瓶內部粉體拍攝 TEM 晶像分析，其分析結果之平均粒徑為 5nm~250nm，對照吳鴻鈞等人[10]之最小點火能量 15nm 以下皆小於 1mJ，依此判定該粒徑 5nm~250nm 皆位於爆炸粒徑範圍內，皆有爆炸可能發生，並提供老舊鋼瓶靜電防止對策如表 5。

## 第五節 老舊鋼瓶靜電防止對策

表 5 老舊鋼瓶靜電防止對策

防止對策	內容
老舊鋼瓶	避免將氧氣鋼瓶高度重複使用甚至將氧氣鋼瓶使用超過十年以上，應加強氧氣鋼瓶之更換率。
長時間未使用之老舊鋼瓶	放置長時間未使用的老舊鋼瓶，內部可能沉積生鏽之鐵粉，必須緩慢開啓鋼瓶避免快速沖出內部粉體引起靜電造成爆炸危害。
防止作業員的靜電	作業員依規定穿著抗靜電衣/鞋等進行相關作業，以防止作業員本身產生靜電，同時可以靜電消除器消除作業環境之靜電。
粉體粒徑的選取	粉體的粒徑越小越容易產生靜電，靜電放電會成爲引火源，造成粉塵爆炸，若顆粒爲奈米尺度需加強管制作業環境之引火源。
接地	若可燃性粉體使用的設備與裝置等爲金屬導體物質，可使用單點或多點接地等，亦可將輸送管與儲槽部分進行跨接接地。
防止粉體堆積	須定期清理粉體輸送管與儲槽內部，以避免因爲粉體與管壁的摩擦和分離行爲，導致靜電的產生。
設備區域劃分	若廠內無法避免使用火源，則須將輸送管或大量粉體堆積之儲槽與引火源區域進行隔離。
限制使用量大小	可燃性粉體使用量大時，粉體容易摩擦產生靜電，大規模的粉塵會形成火花放電或沿面放電，而引起粉塵爆炸，所以應限制其規模大小。
表面光滑	儲槽內壁、輸送管內若爲金屬材質，應除去突起物使其表面平整，以防止靜電放電之尖端放電造成災害。

# 第五章 結論與建議

## 第一節 結論

文獻探討、實驗測試與數據分析結果，本研究計畫結論如下：

- 一、使用十年以上之老舊氧氣鋼瓶裁切後發現每支鋼瓶內壁皆有明顯氧化生鏽之情形，但皆未發現剝落之氧化鐵粉沉積於鋼瓶底部，推測先前剝落之氧化鐵粉可能已於氧氣鋼瓶使用時與氧氣一同吹送出去。
- 二、裁切老舊鋼瓶後，內部雖未發現剝落的氧化鐵粉，但瓶壁仍附著少量的奈米鐵粉，平均粒徑為 5~250 nm，元素分析結果為鐵與氧化鐵以及微量金屬元素，在純氧環境下最小點火能量皆小於 1mJ 爆炸危害發生性極高。
- 三、最小點火能量實驗中，微、奈米鐵粉在純氧環境下之最小點火能量皆比空氣環境下小，則在純氧環境中容易產生爆炸危害；當粉體粒徑從奈米上升至微米時隨著粒徑的增加其所需的點火能量也隨之增加。
- 四、在純氧環境下 Fe 鐵粉微米等級之 MIE<3mJ，而奈米等級之 MIE<1mJ，靜電能量足以引燃純氧環境下之奈米鐵粉。
- 五、輸送過程中純氧環境下奈米鐵粉所產生的能量皆會隨著粉體濃度的增加而上升，推論是由於隨著粉體濃度的增加，粉體顆粒與管壁之間，相互接觸、摩擦的機會增加，能量也會跟著增加。
- 六、輸送純氧環境下奈米鐵粉之粉體粒徑越小，所產生的能量會越大，是由於粉體粒徑越小時，比表面積越大而粉塵粒子為金屬粉塵具有很大的帶電量，在以氧氣為輸送氣體時容易造成瞬間大能量的傳送，其造成的危害越高。
- 七、由分析結果藉以推斷先前於台南市某鋼鐵工業股份有限公司發生液態氧氣化管線爆炸意外，瞬間產生燃燒破裂，高溫、高壓氧氣直接衝擊作業人員，可能由於鋼瓶內部粉體粒徑大小為奈米等級，若在閥件前累積一定粉體量，震動、高速沖出等條件則造成事故發生，本研究已證實鋼瓶內部可能產生微奈米級粉塵，可能為造成該案例之原因。

## 第二節 建議

- 一、本研究可以確定奈米鐵粉於氧氣鋼瓶輸送過程中，有一定的危害源存在，因輸送所產生的能量超過 1mJ 時即有被點燃的可能性，工業上操作此類金屬粉體須加強注意其作業環境，對於工業界使用的奈米金屬粉種類與事故狀況宜進行收集與調查。目前國內外相關研究成果與文獻很少，工業界使用空氣輸送可能造成的奈米金屬粉危害，宜再進行持續研究。
- 二、由本計畫之相關研究結果可以推斷出氧氣鋼瓶具有一定的風險存在，雖然氧氣鋼瓶於操作上已有相關法規制定其使用規範，但仍無法完全避免鋼瓶本身的氧化現象所造成之危害，因此本計畫建議事業單位應加強氧氣鋼瓶之更換率，避免將氧氣鋼瓶高度重複使用甚至將氧氣鋼瓶使用超過十年以上、放置長時間未使用的老舊鋼瓶皆有高危害風險存在。

## 誌謝

本研究計畫參與人員除本所吳研究員鴻鈞、劉副研究員冠廷、吳助理研究員俊逸外，另包括蔡教授匡忠、許副教授宏德、蘇副教授崇輝等人，謹此敬表謝忱。

## 參考文獻

- [1] 吳鴻鈞:氧氣管線燃燒爆炸 1 死 7 傷研究報告。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所；2012。
- [2] Kwok M., Fouchard C., Turcotte M., Lighfoot D., Bowes, Jones, D.E., G., Characterization of Aluminum Nanopowder Compositions, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2002;27: 229-240.
- [3] Jones G, Turcotte R, Fouchard C, Kwok M, Turcotte M, AbdelQader Z. Hazard Characterization of Aluminum Nanopowder Compositions Propellants, Explosives. Pyrotechnics 2003;28: 120-131.
- [4] Liu L, Tan L, Ming L. Effects of Nanopowder Ni, Cu, Al and NiCu Powders on the Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate, Propellants Explosives. Pyrotechnics 2004;29: 34-38.
- [5] Marmo L, Cavallero D, Debernardi L, Aluminum Dust Explosion Risk Analysis in Metal Working, Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2004;17: 449-465.
- [6] 吳鴻鈞、吳家維:國內工業用奈米粉塵爆炸特性研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所；2006。
- [7] 吳鴻鈞:奈米粉塵爆炸危害預防對策研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所；2006。
- [8] 吳鴻鈞、謝明宏:奈米金屬粉塵爆炸研究－氮氣惰性化。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所；2007。
- [9] 吳鴻鈞、唐繁:奈米金屬粒子碰撞研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所；2008。
- [10] 吳鴻鈞、郭勇志:奈米金屬粒子傳輸管道彎曲度爆炸研究－鐵及鈦。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所；2008。
- [11] 吳鴻鈞、高振山、唐繁:空氣輸送奈米金屬粉塵爆炸機制研究－靜電。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所；2009。
- [12] Rolf K, Does the dust explosion risk increase when moving from um-particle powders to powders of nm-particles. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2012;25: 448-459.

- [13] Qingzhao L, Baiquan L, Wenxia L, Cheng , Chuanjie Z. Explosion characteristics of nano-aluminum powder-air mixtures in 20 L spherical vessels. *Powder Technology*.2011;212: 303-309.
- [14] 労働省産業安全研究所，靜電氣安全指針，日本産業安全技術協會 1988。
- [15] 賴耿陽，電器安全教材實務，復漢出版社 2001，一版 p65-87
- [16] 蘇文源、葉芳俊:工廠靜電危害案例之成因分析。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所 2006。
- [17] 張寶銘等、靜電防護技術手冊，電子工業出版社 2000。
- [18] 徐啓銘、張銘坤、吳鴻鈞:防爆技術指針製作－儲槽、空氣濾清裝置、裝卸料裝置。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所 2001。
- [19] Gajewski J, Szaynok A.Charges measurement of dust particles in motion. *Journal of Electrostatics*1981;10:229-234.
- [20] Juliusz B. Gajewski J .Charge measurement of dust particles in motion - part II.*Journal of Electrostatics*(1984);15 67-79.
- [21] Luca L , Galfetti L, Severini F, Meda L, Marra G, Vorozhtsov A, Sedoi V, Baduk V.Burning of Nano-Aluminum Composite Rocket Propellants, *Combustion, Explosion and Shock Waves*2005;41:680-692.
- [22] Soundararajan R, Amyotte R, Pegg J.Explosibility Hazard of Iron Sulphide Dusts as a Function of Particle Size.*Journal of Hazardous Materials*1996;51: 225-239.
- [23] Sun J, Dobashi R, Hirano T .Temperature Profile Across the Combustion Zone Propagating Through an Iron Particle Cloud.*Journal of Loss Prevention in the Process Industries*2001;14: 463-467.
- [24] 吳鴻鈞、郭勇志:空氣輸送奈米金屬粉塵爆炸機制研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所報告 2011。
- [25] 林鴻民，奈米材料未來的發展趨勢，科技發展政策導覽 2002，SR9109，648-659。
- [26] 李曉嵐：奈米鐵粉結合電動力法處理含硝酸鹽土壤之研究（碩士論文）。高雄：中山大學；2003。

國家圖書館出版品預行編目資料

純氧中輸送微米及奈米鐵爆炸危害特性研究 / 吳鴻鈞, 蔡匡忠著. -- 1 版. --  
新北市 : 勞動部勞研所, 民 103.03 面 ; 公分  
ISBN 978-986-04-0759-4(平裝)  
1. 工業安全 2. 勞工安全  
555.56 103005003

純氧中輸送微米及奈米鐵爆炸危害特性研究

著(編、譯)者: 吳鴻鈞、蔡匡忠

出版機關: 勞動部勞動及職業安全衛生研究所

22143 新北市汐止區橫科路 407 巷 99 號

電話: 02-26607600 <http://www.ilosh.gov.tw/>

出版年月: 中華民國 103 年 3 月

版(刷)次: 1 版 1 刷

定價: 140 元

展售處:

五南文化廣場

台中市區中山路 6 號

電話: 04-22260330

國家書店松江門市

台北市松江路 209 號 1 樓

電話: 02-25180207

- 本書同時登載於本所網站之「出版中心」, 網址為:  
<http://www.ilosh.gov.tw/wSite/np?ctNode=273&mp=11>
- 授權部分引用及教學目的使用之公開播放與口述, 並請注意需註明資料來源; 有關重製、公開傳輸、全文引用、編輯改作、具有營利目的公開播放行為需取得本所同意或書面授權。

GPN: 1010300756

ISBN: 978-986-04-0759-4