

102年度研究計畫 IOSH102-S323

102年度研究計畫 IOSH102-S323



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

高速空氣衝擊鋁鎂合金 粉塵爆炸預防研究

Dust explosion prevention research magnesium alloy high-speed air shocks

ISBN 978-986-04-0997-0



GPN:1010300755
定價：新台幣140元

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

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

高速空氣衝擊鋁鎂合金粉塵爆炸預防研究

Dust Explosion Prevention Research Magnesium Alloy High-speed Air Shocks

高速空氣衝擊鋁鎂合金粉塵爆炸預防研究

Dust Explosion Prevention Research Magnesium Alloy High-speed Air Shocks

研究主持人：吳鴻鈞、吳家維

計畫研究單位：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 7 月 1 日至 102 年 12 月 16 日

勞動部及勞動職業安全衛生研究所

中華民國 103 年 3 月

摘要

本研究藉實際於鋁鎂合金加工工廠所採取的累積粉塵為樣品，以及購自廠商 35nm、75nm、100nm、2 μ m 及 10 μ m 之鎳粉體，進行爆炸特性與熱危害分析，提出鋁鎂合金粉體燃燒爆炸的防範策略與鋁鎂合金加工安全檢核表。

在研究中利用篩網分析出粉塵顆粒分佈，再以微差掃描熱卡計(DSC)進行熱譜分析、掃描式電子顯微鏡(SEM/EDX)進行形態與成分分析、1.2L 哈特曼最小點火能量(MIE)測試儀量出樣品之最低點火能量、20 公升爆炸鋼球測出爆炸特性與法拉第杯靜電能測試器分析不同速率與材質對靜電累積的影響。

研究結果顯示在 20 公升爆炸鋼球中所測得之最低爆炸濃度(LEL)與 k_{max} 值分別為 30g/m³、28[m.bar/s]，在最大爆炸壓力發生對應的濃度下並不會產生撞擊與摩擦產生的燒結現象而其最小點火能量小於 1mJ；DSC 掃描熱譜配合掃描式電子顯微鏡分析成功的辨識出氧化與顆粒大小對粉體放熱特性之影響趨勢；法拉第杯靜電能測試結果指出了樣品濃度、尺寸、輸送速度、輸送管材質對靜電荷累積之趨勢。

歸納出 7 點結論；建立鋁鎂金屬研磨加工粉塵爆炸防止之安全預防對策。期待經由防止對策的使用可以減少鋁鎂金屬研磨加工粉塵爆炸事故的發生。

關鍵詞：鋁鎂合金粉塵、鎳粉塵、20公升爆炸鋼球、最低點所能量、靜電能測試

Abstract

This study investigates the on site aluminum magnesium alloy dust and purchased nickel powder with specified size. Analyze characteristics of dust explosion and thermal hazard. Strategies and safety checklist are proposed of aluminum magnesium alloy dust explosion prevention.

Samples were sieved firstly to understand the particle size distribution, then applied differential scanning calorimeter (DSC) to thermal analysis, scanning electron microscopy (SEM / EDX) for Morphological and composition, 1.2L Hartmann minimum ignition energy (MIE) tester for MIE, 20-liter apparatus for explosive characteristics and electrostatic energy Faraday cup tester for investigating the relation between moving rate material and static electron accumulation.

The lower explosion limit and the explosion index, K_{max} , measured in the 20L apparatus to be 30g/m^3 and $28[\text{m.bar/s}]$ respectively. There is no evidence to show that various sizes of aluminum-magnesium alloy and nickel dust at a concentration corresponding to the maximum explosion pressure result sintering when test powder through the feed pipe elbow. The MIE is under 1 mJ. Effects of particle size and degree of oxidization to thermal characteristics are successfully identified with DSC and SEM / EDX. According to the Faraday cup electrostatic energy measuring result, the relation between concentration particle sizes transporting velocity tube material to the electrical static energy was found out. Therefore proposed 7 conclusions and several ways to prevent dust explosion to maintain the aluminum magnesium alloy working place safety.

Key Words: Aluminum-magnesium alloy powder, Nickel dust , 20-liter apparatus , minimum explosion energy , Electrostatic energy test

目錄

| | |
|-----------------------------|-----|
| 摘要..... | i |
| 目錄..... | iii |
| 表目錄..... | v |
| 圖目錄..... | vi |
| 第一章 計畫概述..... | 1 |
| 第一節 前言..... | 1 |
| 第二節 目的..... | 2 |
| 第三節 工作項目..... | 3 |
| 第二章 研究方法與測試設備..... | 4 |
| 第一節 研究方法與步驟..... | 4 |
| 第二節 實驗樣品..... | 5 |
| 第三節 實驗裝置 振動篩分儀..... | 7 |
| 第四節 實驗條件..... | 12 |
| 第五節 實驗測試參數介紹..... | 15 |
| 第三章 結果與數據分析..... | 18 |
| 第一節 第一次工廠取樣鋁鎂合金粉塵粒徑分析..... | 18 |
| 第二節 工廠鋁鎂合金粉塵成分分析..... | 21 |
| 第三節 鋁鎂合金與鎳粉體之 DSC 測試結果..... | 25 |
| 第四節 鋁鎂合金粉塵之最低發火能量實驗量測..... | 27 |
| 第五節 最低爆炸濃度(LEL)實驗量測..... | 33 |
| 第六節 最大爆炸壓力(Pmax)實驗量測..... | 34 |
| 第七節 粉塵爆炸與輸送速度關係探討..... | 36 |
| 第八節 靜電荷與輸送速度關係探討..... | 38 |
| 第四章 結論與建議..... | 42 |
| 第一節 結論..... | 42 |
| 第二節 建議..... | 43 |

| | |
|--------------------------|----|
| 致謝 | 44 |
| 參考文獻 | 45 |
| 附錄一 鎳粉體之最大爆炸壓力測試結果 | 48 |
| 附錄二 靜電累積與流速關係分析結果 | 52 |

表目錄

| | |
|--|----|
| 表 1 量測粉塵最低爆炸濃度需進行之系列實驗..... | 14 |
| 表 2 是否成功爆炸之爆炸壓力判斷準則..... | 14 |
| 表 3 粉塵爆炸等級表..... | 17 |
| 表 4 工廠鋁鎂合金粉塵粒徑分析結果..... | 18 |
| 表 6 第一次樣品 No.270 鋁鎂合金 粉塵 EDX 元素分析結果..... | 22 |
| 表 7 第二次樣品鋁鎂合金 粉塵 EDX 元素分析結果..... | 24 |
| 表 8 第二次樣品經 1.2 哈特曼測試燒結之鋁鎂合金 粉塵 EDX 元素分析結果..... | 31 |
| 表 9 第二次取樣 1.2L 最低發火能量測試燒結與未燒結部份之成分重量% | 32 |
| 表 10 最低爆炸濃度(MEC)..... | 33 |
| 表 11 粒徑小於 53 μ m 鋁鎂合金粉體之最大爆炸壓力測試結果..... | 34 |
| 表 12 粒徑小於 53 μ m 鋁鎂合金粉體最大爆炸壓力隨流速改變之測試結果..... | 36 |
| 表 13 五種尺寸之鎳粉體最大爆炸壓力隨流速改變之測試結果..... | 37 |
| 表 14 鋁鎂合金粉體在不同流速、輸送材質系之..... | 38 |
| 表 15 粒徑 10 μ m 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之..... | 39 |
| 表 16 粒徑 2 μ m 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之..... | 39 |
| 靜電能量(J)測試結果..... | 39 |
| 表 17 粒徑 100nm 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之..... | 40 |
| 靜電能量(J)測試結果..... | 40 |
| 表 18 粒徑 75nm 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之..... | 40 |
| 靜電能量(J)測試結果..... | 40 |
| 表 19 粒徑 35nm 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之..... | 41 |
| 靜電能量(J)測試結果..... | 41 |

圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 1 研究方法架構圖 | 4 |
| 圖 2 第一次鋁鎂粉塵取樣現場配置圖 | 5 |
| 圖 3 第二次鋁鎂粉塵取樣現場配置圖 | 6 |
| 圖 4 振動篩分儀 | 7 |
| 圖 5 環境操作箱 | 8 |
| 圖 6 SEM 掃瞄式電子顯微鏡 | 9 |
| 圖 7 20L 爆炸鋼球配置圖 | 9 |
| 圖 8 1.2L 哈特曼最小點火能量試驗儀 | 10 |
| 圖 9 微差掃描熱卡計 | 11 |
| 圖 10 法拉第杯靜電荷量測儀 | 11 |
| 圖 11 20L 球形測試容器測試壓力曲線特徵圖 | 15 |
| 圖 12 20L 球形測試容器化學點火頭功能驗證測試壓力曲線特徵圖之一 | 15 |
| 圖 13 20L 球形測試容器化學點火頭功能驗證測試壓力曲線特徵圖之一 | 16 |
| 圖 14 振動篩分儀篩分後之鋁鎂合金粉塵力徑分佈圖 | 18 |
| 圖 15 噴霧狀 A1 粉之粒子大小與爆炸指標之關係 | 19 |
| 圖 16 樣品過篩樣態圖 | 20 |
| 圖 17 AL 粉塵之形狀與爆炸壓力 | 21 |
| 圖 18 第一次取樣樣品 1 鋁鎂合金粉塵之(A) SEM 圖形及(B) EDS 元素分析圖譜 | 22 |
| 圖 19 第一次取樣樣品 2 鋁鎂合金粉塵之(A)SEM 圖形及(B) EDS 元素分析圖譜 | 22 |
| 圖 20 現場取樣過程 | 23 |
| 圖 21 第二次取樣樣品 1 鋁鎂合金粉塵之(A) SEM 圖形及(B) EDS 元素分析圖譜 | 24 |
| 圖 22 第二次取樣樣品 2 鋁鎂合金粉塵之(A)SEM 圖形及(B) EDS 元素分析圖譜 | 24 |
| 圖 23 第一次取樣鋁鎂粉塵之昇溫掃描熱譜 | 25 |
| 圖 24 第二次取樣鋁鎂粉塵之昇溫掃描熱譜 | 26 |
| 圖 25 不同尺寸在 B=10 的條件下之 DSC 昇溫熱譜 | 27 |
| 圖 26 重量 300MG(0.25G/DM ³)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 MJ)之 1.2L 哈特曼測試結果 | 28 |
| 圖 27 重量 600MG (0.50G/DM ³)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 MJ)之 1.2L 哈特曼測試結果 | 28 |
| 圖 29 重量 1200MG(1.0G/DM ³)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 MJ)之 1.2L 哈特曼測試結果 | 29 |

| | |
|--|----|
| 圖 30 重量 1500MG (1.25G/DM3) 鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 MJ)之 1.2L 哈特曼測試結果..... | 30 |
| 圖 31 重量 1800MG(1.5/DM3)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 MJ)之 1.2L 哈特曼測試結果. | 30 |
| 圖 32 第二次取樣經 1.2 哈特曼測試燒結鋁鎂合金粉塵之(A)SEM 圖形及(B) EDS 元素分析圖譜 1..... | 31 |
| 圖 33 第二次取樣經 1.2 哈特曼測試燒結鋁鎂合金粉塵之(A)SEM 圖形及(B) EDS 元素分析圖譜 2..... | 31 |
| 圖 34 最低爆炸濃度(MEC)實驗測試圖..... | 33 |
| 圖 35 鋁鎂合金粉塵 20L 爆炸鋼球所測最大爆炸壓力及其斜率分布圖(A)3 系列之 P _{MAX} (B)、(DP/DT) _{MAX} 與燃燒時間 T ₁ (D)之分布情形..... | 35 |
| 圖 36.粉塵爆炸與輸送速度關係探討結果..... | 37 |

第一章 計畫概述

第一節 前言

2011 年成都富士康廠房爆炸造成 3 人死亡[1]，15 人受傷，2 人重傷慘劇，事件過後，此次拋光作業場所爆炸並非個案，許多類似鋁鎂合金表面拋光之作業，正逐步邁入粉塵爆炸多發期，這是在表面拋光金屬研磨產生粉塵操作流程中，一個必須面對的嚴峻課題。

2011 年 5 月 20 日[2]，位於成都的富士康集團鴻富錦精密電子(成都)有限公司拋光作業場所發生爆炸，事故聯合調查組初步認定為一起拋光作業場所集塵風管可燃粉塵意外爆炸引發的生產安全事故。近年 30%粉塵爆炸來自拋光作業場所，拋光作業主要是由拋光機和除塵系統組成。根據被拋光的產品物質不同，其副產品可能是鋁鎂合金、鋼鐵等可燃粉塵。金屬拋光粉塵主要存在於電子(電腦、手機等消費電子產品)、汽車(輪胎和剎車片)和五金等產品的製造行業；而鋁鎂粉塵的最小點燃能量很低，非常容易被點燃。靜電、機械摩擦、碰撞、電氣故障和自燃都是可能的點火源。

從 2010 年至 2011 年 5 月間中國大陸共發生 8 起金屬拋光粉塵爆炸事故，並釀成 11 死 53 傷的慘劇[2]，大約佔該期間粉塵爆炸事故的 30%。例如，2010 年 8 月間，廣東深圳的一家手機與電腦製造商和江西宜春某電器公司均發生過火災或爆炸，並造成人員和財產巨大損失。

綜觀最近發生之金屬表面研磨、拋光與清潔作業發覺，雖然除塵系統內發生了爆炸，但造成爆炸的原因多起因於前端拋光高壓空氣清潔粉塵造時成之火花。過去拋光作業單元規模小，除塵系統單獨設置，危險相對分散；而現在集中式除塵系統將多個拋光作業單元連接在一起，一旦發生事故，危害程度大大增加。

粉塵爆炸防治其來有自，世界第一次有記載粉塵爆炸發生在 1785 年，義大利北部的重要城市杜林(Torino)的麵粉倉庫發生爆炸，之後，粉塵爆炸一直威脅生產過程。在中國大陸的第一次引起廣泛關注的粉塵爆炸事故是 1987 年 3 月 15 日發生於哈爾濱亞麻廠的特大粉塵爆炸事故。該次事故死亡 58 人，傷 177 人，1.3 萬平方米的廠房遭受不同程度的破壞，直接經濟損失 880 萬。之後直到 2010 年中國大陸沒有發生死亡 10 人以上的粉塵爆炸事故，但死亡 3~9 人的重大事故卻時有發生[3]。

在國外方面，根據美國化學危險和災害調查委員會(CSB)的統計，從 1980 年到 2005 年間，美國發生了 280 多次的粉塵爆炸，造成 119 人死亡，718 人受傷。2008 年美國皇家糖廠粉塵爆炸是美國近年來損失最大的工業粉塵爆炸事故，死 14 人，傷 36 人，其中 19 人重傷。

第二節 目的

為防止粉塵作業引起之危害，勞工安全衛生法第五條訂定”粉塵危害預防標準”作為依據，此標準主要著眼於衛生面，對於爆炸相關議題則仍有待補強，勞工安全衛生研所吳鴻鈞曾提出預防粉塵爆炸之實務設計研究成果，並指出「降低塵爆危險性的方法:減少發火源的產生及降低工作場所浮游粉塵的發生。減少發火源的產生，即減少靜電、火花產生的機會」；鋁鎂合金粉體加工粉塵爆炸之工作場所概可分成兩類作業場所，一為鋁鎂合金粉體生產線，另一則為以鋁鎂合金粉體為副產品的生產線，因為相關為防止粉塵作業引起之危害，勞工安全衛生法第五條訂定”粉塵危害預防標準”作為依據，此標準主要著眼於衛生面，對於爆炸相關議題則仍有待補強，勞工安全衛生研所吳鴻鈞曾提出預防粉塵爆炸之實務設計研究成果，並指出「降低塵爆危險性的方法:減少發火源的產生及降低工作場所浮游粉塵的發生。減少發火源的產生，即減少靜電、火花產生的機會」；鋁鎂合金粉體加工粉塵爆炸之工作場所概可分成兩類作業場所，一為鋁鎂合金粉體生產線，另一則為以鋁鎂合金粉體為副產品的生產線，因為相關基礎研究相當欠缺，後者相關作業標準有待在進一步制定和完善；這方面的工作場所如:手機、筆記型電腦鋁鎂合金之拋光研磨，其作業過程中常因壓縮空氣槍吹淨黏附表面的粉體時，發生金屬粉塵爆炸。

壓縮空氣槍吹淨研磨拋光黏附表面的粉體時所產生之粉塵爆炸，與成分、顆粒大小及不同流速的靜電累積有關，而防爆機制則與最低引燃能量、爆炸下限、最大爆壓、最大爆壓上升速率等因素相關；因此本研究之主旨為:

藉測量高速空氣輸送下鋁鎂粉塵之帶電荷量與奈米、微米鋁鎂合金最低引燃能量、爆炸下限、最大爆壓、最大爆壓上升速率之量測，分析鋁鎂合金研磨拋光後之高速空氣吹散清潔作業，所造成之粉塵爆炸特性為何，以為建立防治機制的依據。

基礎研究相當欠缺，後者相關作業標準有待在進一步制定和完善；這方面的工作場所如:手機、筆記型電腦鋁鎂合金之拋光研磨，其作業過程中常因壓縮空氣槍吹淨黏附表面的粉體時，發生金屬粉塵爆炸。

壓縮空氣槍吹淨研磨拋光黏附表面的粉體時所產生之粉塵爆炸，與成分、顆粒大小及不同流速的靜電累積有關，而防爆機制則與最低引燃能量、爆炸下限、最大爆壓、最大爆壓上升速率等因素相關；因此本研究之主旨為:

藉測量高速空氣輸送下鋁鎂粉塵之帶電荷量與奈米、微米鋁鎂合金最低引燃能量、爆炸下限、最大爆壓、最大爆壓上升速率之量測，分析鋁鎂合金研磨拋光後之高速空氣吹散清潔作業，所造成之粉塵爆炸特性為何，以為建立防治機制的依據。

第三節 工作項目

第一項、蒐集相關鋁鎂合金粉塵職災案例、國內外法規。

1. 國內外相關鋁鎂合金粉塵職災案例、法規及文獻收集。
2. 國內外相關相關鋁鎂合金粉塵職災案例成因探討。

第二項、工廠鋁鎂合金粉塵粒徑及成分分析。

1. 工廠鋁鎂合金粉塵粒徑分析(可使用 SEM 或 TEM 等儀器分析)。
2. 工廠鋁鎂合金粉塵成分分析(可使用 EDX 或 Element Mapping 等儀器分析)。

第三項、進行鋁鎂合金粉塵之最低發火能量實驗測試、最低爆炸濃度、最大爆炸壓力實驗。

1. 鋁鎂合金粉塵之最低發火能量實驗量測。
2. 鋁鎂合金粉塵之最低爆炸濃度實驗量測。
3. 鋁鎂合金粉塵之最大爆炸壓力實驗量測。

第四項、鋁鎂合金粉塵、微米及奈米鎳靜電電荷與速度關係研究。

1. 鋁鎂合金粉塵爆炸與輸送速度關係探討。
2. 鋁鎂合金粉塵靜電電荷與輸送速度關係探討。
3. 微米及奈米鎳爆炸與輸送速度關係探討。
4. 微米及奈米鎳靜電電荷與輸送速度關係探討。

第二章 研究方法與測試設備

第一節 研究方法與步驟

本研究標的物有兩項，一為鋁鎂粉塵另一為奈米鎳粉體，兩種粉體之爆炸特性研究，而爆炸特性則以最低點火能量(MIE)、最低點火濃度(MIC)、最大爆炸壓力(P_{max})、最大爆壓斜率 $(dP/dt)_{max}$ 、及 kst 值等特性參數來描述，也將材料以 SEM、EDX 進行樣態分析，以提供分析判斷的背景資料。

先以 SEM 觀察粉塵顆粒外觀，同時以 EDX 做定性分析以瞭解粉塵之大概成分以及氧化程度後，再利用 DSC 測試顯示在大氣環境下，粉體之昇溫熱化學反應特性，續而以 1.2L 哈特曼最小點火能量試驗儀依 ASTM E1226 標準程序，進一步以在不同濃度、不同點火能量下之點火特性，此時以引入粉塵特性，也就是利用空氣把粉體吹散 120ms 成粉塵樣態後點火，建立粉塵之最低點火能量數據，圖 1.為本研究案研究方法之架構。

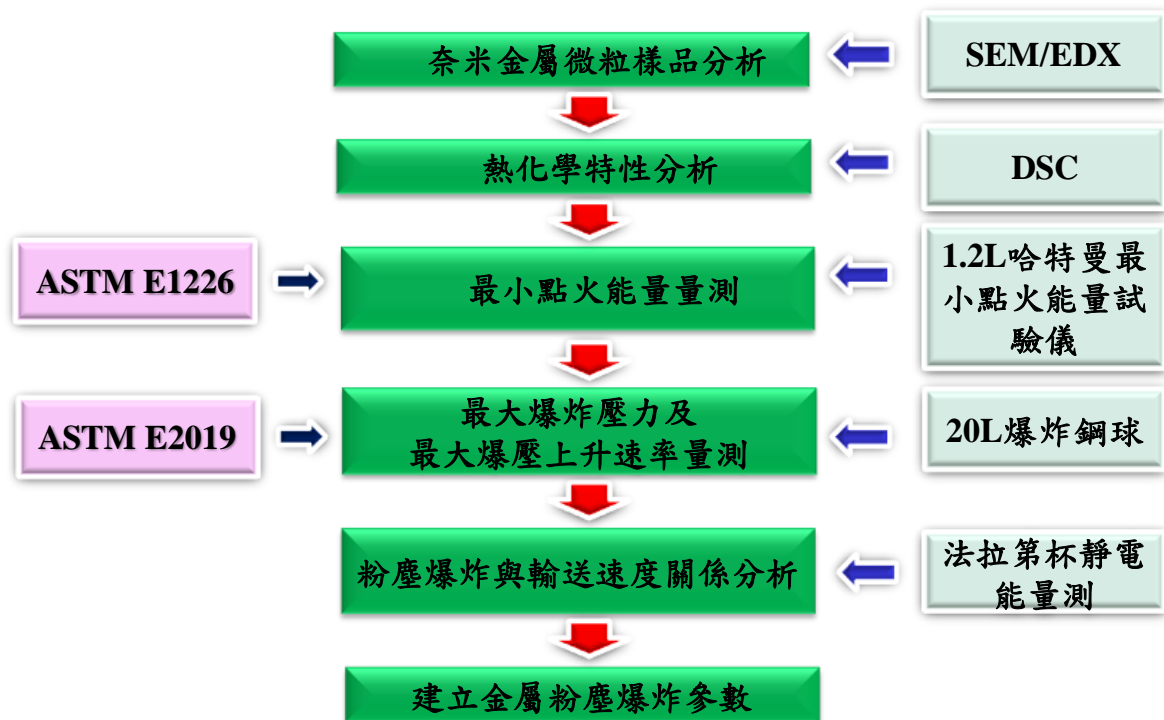


圖 1.研究方法架構圖

第二節 實驗樣品

1. 第一次實驗樣品蒐集

實驗樣品系取自彰化某家鋁鎂合金材料加工廠，在此加工廠之取樣作業如下：

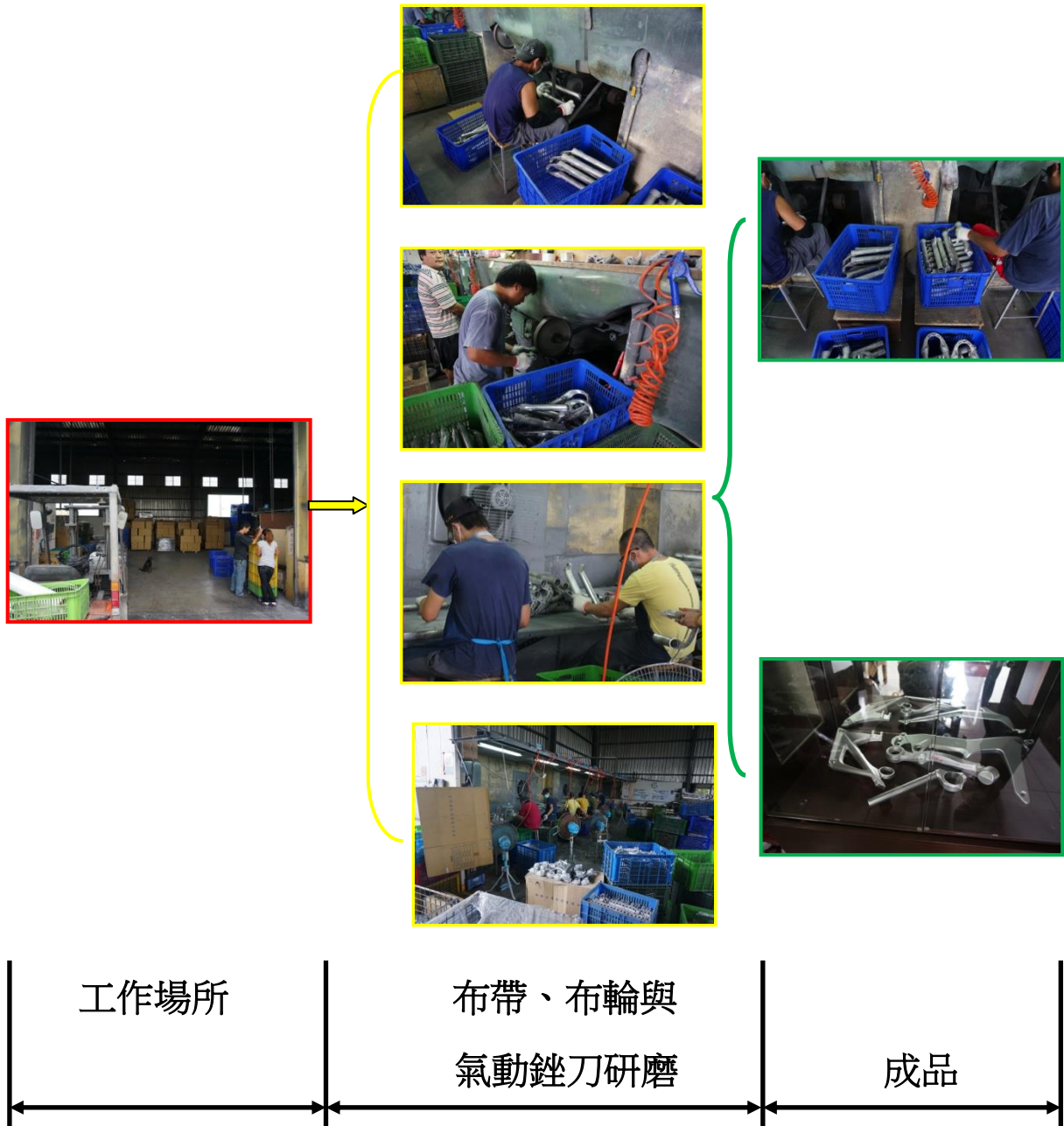


圖 2. 第一次鋁鎂粉塵取樣現場配置圖

鋁鎂合金粉塵樣品就是把布帶、布輪與氣動銼刀研磨所產生的粉體加以收集後過篩，將最上層大於 NO. 25 目(710 μ m)的粒子因混有許多雜質而予以剔除。其餘粉體於恆溫箱內以 75 $^{\circ}$ C 在常壓下恆溫 24 小時除去水份後備用。

2.第二次實驗樣品蒐集

由於第一次採樣(圖 2.)所得測試樣品於哈特曼最低點火能量測試時均無點燃紀錄，判斷應為該樣品閒置工作場所多時，大部分粉體表面都已氧化失去活性，而無法點燃，因此進行第二次取樣(圖 3.)，並請廠商即時操作，當場取得粉塵後，將粉體過篩，取通過 270 篩目(<53 μ m)粉體，於恆溫箱內以 75 $^{\circ}$ C 在常壓下恆溫 24 小時除去水份後備用。本研究於 DSC、哈特曼、20L 球形爆炸鋼球與靜電累積量分析所用材質都是用本次取樣之粉塵進行測試。

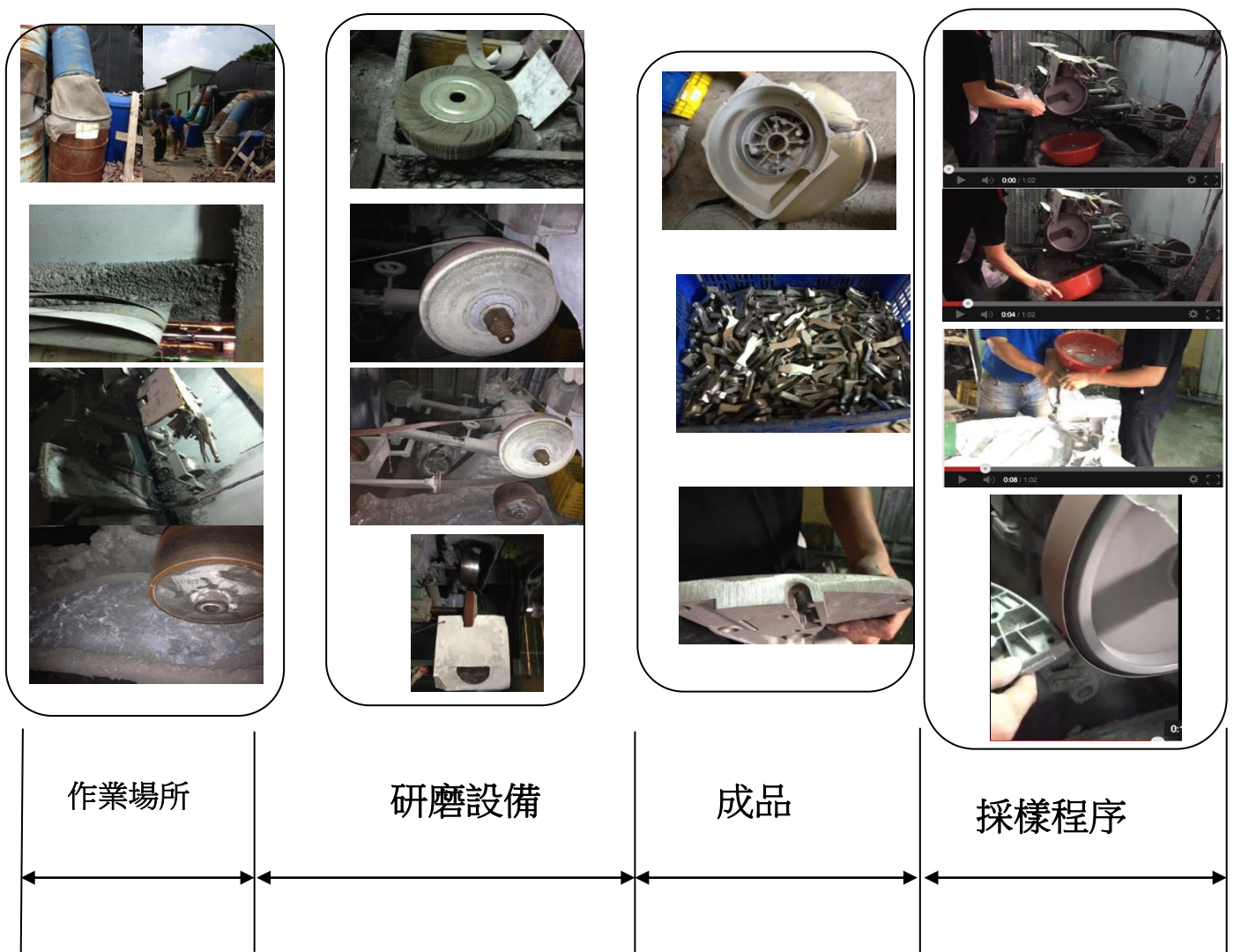


圖 3 第二次鋁鎂粉塵取樣現場配置圖

第三節 實驗裝置 振動篩分儀

本研究使用 Ro-Tap RX-29-10 Tyler 旋轉振動篩分儀，品牌:WS Tyler，如圖 4.所示。

符合 CE 標準的泰勒 Rotap 旋轉分選篩 (Tyler Test Sieve Shaker-conform to CE-standard)，篩網材料為金屬絲編織網，物料運動軌跡直線振動篩

技術參數

操作電壓： 230 Volt, 50 Hertz or 110 Volt, 60 Hertz

時間設置： 0 - 99 minutes - digital (數字顯示)

轉速： 278 ± 10

敲擊速度： 150 ± 5

噪音： 86 dBA

重量： apx. 82 kg

尺寸： 710 x 530 x 635 mm (B x D x H) 主要特點水平的旋轉運動加上垂直的敲擊運動。儀器以模擬手動篩分方式運作，採均衡機械性的旋轉加敲擊運動，其動力來自完全封閉垂直安裝的 1/4 馬力馬達，RX-30 可配 5 個標高篩或 8 個半高篩；配套篩網孔徑從 53um 到 710mm 可配銅框或不銹鋼篩網，有編織網和打孔網，篩框直徑 203mm 或 200mm。最大樣品重：3kg



圖 4.振動篩分儀

1. 環境操作箱

本研究使用詠欣有限公司製造之環境操作箱，如圖 5.所示，係以厚度為 1 cm 的壓克力板組裝而成，容積為 220 dm³，規格為 800×550×500 mm³，可在惰性或真空環境下進行操作，

避免樣品與空氣接觸，以達到鋁鎂合金粉體樣品分裝時避免氧化的目的。在環境操作箱內分裝鋁鎂合金粉體時須將母箱持續灌入氮氣，先將要放入母箱的鋁鎂合金粉體放到子箱，門鎖關閉後抽真空到 15-20 cmHg，再灌入氮氣反覆 3 次並持續補充氮氣，子箱內門打開，利用子箱傳遞所需樣品，即可在母箱中進行分裝樣品至樣品瓶。



圖 5. 環境操作箱

2. 熱場發射掃描式電子顯微鏡(SEM)

本研究使用日本捷東 (JEOL)公司製造 JSM-6500F 型熱場發射掃描式電子顯微鏡(Thermal field emission scanning electron microscope)，如圖 6.所示。熱場發射掃描式電子顯微鏡可進行鋁鎂合金粉體微結構觀察，附加能量散射光譜儀(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)可分析其鋁鎂合金粉體元素的成份，倍率範圍 5-500,000 倍，加速電壓 1-20 kV，樣品最大容許體積 $\pi \times 7.5^2 \times 10 \text{ mm}^3$ ，解析度 1.5 nm (15 kV) 至 5.0 nm(1.0 kV)。在真空狀態下以能量 15 kV 電子束聚焦在試片表面因撞擊而釋放出來，再將脫離試片電子以二次電子偵測器接收成像，得到試片表面凹凸的影像。



圖 6. SEM 掃瞄式電子顯微鏡

3. 20L 爆炸鋼球[4]

本研究使用瑞士 **Kuhner** 公司製造的 20L 爆炸鋼球，可連接壓力傳感器及空壓機，實驗所得壓力數據可記錄在電腦，設備裝置如圖 7.所示。實驗操作係在常壓環境下引燃兩個 5.0 kJ 化學點火藥以誘發粉塵氣雲爆炸，可測得樣品最低爆炸濃度(Minimum Explosible Concentration, MEC)、最大爆炸壓力(P_{max})及最大爆壓上升速率($(dP/dT)_{max}$)、最低氧氣濃度(Limiting Oxidant Concentration, LOC)等數據。



圖 7. 20L 爆炸鋼球配置圖

4. 1.2L 哈特曼最小點火能量(MIE)試驗儀

本研究使用瑞士 Kuhner 公司製造的 1.2L 哈特曼最小點火能量試驗儀，其主體容器為 1.2L 玻璃製圓柱，實驗操作係將粉體置入玻璃圓柱內藉由壓縮空氣帶動粉體由底部向頂部噴出，形成粉塵雲，再用高壓電極火花來誘發粉塵氣雲爆炸，可選擇試驗的電極點火能量有 1、3、10、30、100、300 及 1,000 mJ 等 7 種；實驗是藉調整粉塵濃度與點火延遲時間兩個變量找出最低點火能量，而點火延遲採每次變動 30ms 的程度調整，雖然點火延遲時間越長，越形擾流，但擾流過度則有粉塵分離之慮，失去測量準確度；實驗配置如圖 8.所示。



圖 8. 1.2L 哈特曼最小點火能量試驗儀

5. 微差掃描熱卡計(DSC)

本研究使用德國 NETZSCH 公司製造的 DSC 404 F3 型微差掃描熱卡計(Differential Scanning Calorimetry, DSC)，如圖 9.所示。可測試熔點/結晶行為固-固相變、多態性的結晶度、玻璃化轉變、交聯反應、氧化穩定性、純度測定、比熱等。實驗前清除氣體(purged gas)輸出壓力應調整為 0.5 bar(約 7 psi)以下，流量為 50 ml/min，以空氣為環境氣體(Protective Gas)流量設在 20 ml/min，升溫速率(β)可設定 5~50 K/min，操作極限溫度為 1650°C。



圖 9 微差掃描熱卡計

6. 法拉第杯靜電荷量測儀

靜電累積能量使用 EST111 數字電荷儀進行量測，靜電的本質為存在的剩餘電荷，電荷是所有有關靜電現象的物理量。電位、電場、電流等有關的量都是由於電荷的存在或電荷的移動所產生的物理量。而本次計畫使用之 EST111 數位電荷儀如圖 10 所示，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進行，可測量帶電電荷量、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 $\pm 10\text{pC} \sim \pm 20\mu\text{C}$ ($\pm 1 \times 10^{-11} \sim \pm 2 \times 10^{-5}$)，而測出帶電電荷量 Q 後，同時以集電式電位測定器量測出電位差 V ，因本研究所使用數位電荷儀之電荷測量單位為庫倫(C)，故使用能量公式 $E = \frac{1}{2} QV$ 來做計算，靜電能量 E 以焦耳(j)為單位。

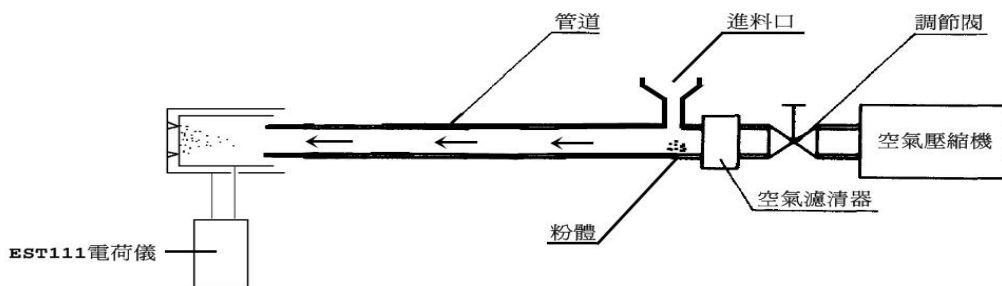


圖 10. 法拉第杯靜電荷量測儀

第四節 實驗條件

1. 實驗初始條件的選擇

將經振動篩分儀處理過的鋁鎂合金粉體於環境操作箱，依實驗所需重量實施分裝於三角錐形瓶內，1.2L 哈特曼最小點火能量測試分裝成六瓶 300、600、900、1200、1500 及 1800 mg，20L 爆炸鋼球測試分裝成 9 瓶 0.2、0.4、0.6、1.2、2.5、5.0、10.0、15.0 及 20.0 g，再將剩餘鋁鎂合金粉體分裝三瓶用以進行微差掃描熱卡計及掃描式電子顯微鏡。

實驗步驟係將鋁鎂合金粉體在環境操作箱進行分裝，先將母箱灌入氮氣，將母箱內空氣排出持續補充氮氣，將要放入母箱的鋁鎂合金粉體放入子箱，利用幫浦抽真空到 15-20 cmHg，再灌入氮氣到 76 cmHg 抽真空，反覆三次，即可將內門打開，將物品遞至母箱進行分裝，將樣品置於樣品瓶。

2. 鋁鎂合金粉體微粒樣態分析

利用掃描式電子顯微鏡進形樣態分析，實驗步驟係將鋁鎂合金粉體利用銅膠沾黏於載體，先在表面鍍一層碳層，經三十秒後再放入掃描式電子顯微鏡並抽真空，在電壓 (Accelerating Voltage) 15 kV 及倍率 (Magnification) 100,000x 條件下進行拍攝。

3. 鋁鎂合金粉體微粒熱化學特性分析

利用微差掃描熱卡計進行熱化學特性分析，將三角錐形瓶中的鋁鎂合金粉體樣品以電子天平秤量 6 mg，置入陶瓷坩鍋內蓋上坩鍋蓋進行實驗，操作條件為升溫速率 10 °C/min，起始溫度 25 °C 及結束溫度為 1000 °C，進行熱化學特性分析。

4. 鋁鎂合金粉體熱爆炸特性分析

(1) 最小點火能量試驗[5]

首先將樣品 300、600、900、1200、1500 及 1800 mg 分批放入哈特曼管中由最小電擊點火能量 1 mJ 開始，電擊 10 次若有 1 次可引燃即判定此點火能量可點燃，若點火十次皆無點燃，則依序增大點火能量為 3、10、30、100、300 及 1,000 mJ。樣品顆粒須小於 420 μ m，其點火能量(w)依兩電極間產生的電容量(c)與起使電壓(v_i)及終了電壓(v_j)間依 $w=1/2(v_i^2 - v_j^2)$ 計算。

實驗步驟係參照 ASTM E2019 開啟高壓空氣，並調整空氣壓力為 7 bar、設定點火延遲時間為 120ms 以手動方式灌入高壓空氣至 Hartmann 內部，將 Hartmann 內的氣體置換

為空氣，由 MIKE 3 操作軟體選擇適當的電極點火能量，將已知重量的粉塵由 Hartmann 上方倒入 Hartmann 內，啟動 MIKE 3 操作軟體的試驗鍵，目視觀察是否有點火現象產生。

(2) 最大爆炸壓力及最大爆壓上升速率試驗[4,6]

將樣品 0.2、0.4、0.6、1.2、2.5、5、10、15 及 20g 分批放入 20L 爆炸鋼球，並安裝 2 個能量 5 kJ 化學點火藥，測試最大爆炸壓力及最大升壓速率，再藉由數值計算求得爆炸壓力指數(K_{st})值。

實驗步驟係參照 ASTM E1226，灌入高壓空氣至鋼球內部，將鋼球內的氣體置換為空氣，利用真空泵將鋼球抽真空至 0.4 bar，將測試濃度的粉體置入 0.6 公升的粉塵釋放槽內，灌入高壓空氣至粉塵釋放槽內使壓力達 20 bar，開啟氣動閥使粉塵噴入鋼球內，鋼球內壓力會由 0.4 bar 上升至 1 bar，於氣動閥開啟後的 60 毫秒(ms)引爆 10 kJ 化學點火藥，由 2 個壓電式(piezoelectric)壓力計記錄壓力數據

以 60; 125; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500 g/m³的測試濃度為例，

如果最大壓力 P_{max} 與 $(dp/dt)_{max}$ 是發生在 250 及 500 g/m³ 兩種濃度時，此兩濃度的上下一階濃度含此兩濃度要再測兩次如下所述:

1. Series: 60, 125, 250, 500, 750, 1000 g/m³
2. Series: 125, 250, 500, 750
3. Series: 125, 250, 500, 750

如果最大壓力 P_{max} 與 $(dp/dt)_{max}$ 是發生在 500 g/m³ 一種濃度時，此濃度的上下一階濃度含此兩濃度要再測兩次即可如下所述:

1. Series: 60, 125, 250, 500, 750, 1000 g/m³
2. Series: 250, 500, 750
3. Series: 250, 500, 750

則 P_{max} 與 $(dp/dt)_{max}$ 分別計算如下:

$$P_{max} = \frac{P_m[Ser1] + P_m[Ser2] + P_m[Ser3]}{3} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{dP}{dt}_{max} = \frac{\frac{dP}{dt}_m [Ser1] + \frac{dP}{dt}_m [Ser2] + \frac{dP}{dt}_m [Ser3]}{3} \dots\dots\dots(2)$$

(3)最低爆炸濃度(LEL)

試驗標準：BS EN 14034-3

實驗儀器：20 公升爆炸試驗鋼球

化學點火藥能量：2 個 5kJ

點火延遲時間：60 ms

實驗步驟：與「最大爆炸壓力(P_{max})及最大昇壓速率($(dP/dt)_{max}$)」之步驟相同。

實驗測試系列：

欲求取粉塵最低爆炸濃度數據，需由最低粉塵濃度開始實驗，直到可爆炸的最高濃度，以每次減少 10g/m^3 的方式確認是否不會點著，重複三次成功的實驗，即可獲得最終的實驗數據，實驗系列如表 1.所示，而判斷是否成功產生爆炸現象，可由爆炸壓力評估，判斷準則如表 2 所示。

表 1.量測粉塵最低爆炸濃度需進行之系列實驗

| | | | | | | | |
|--------------|------------------|------|------|------|------|------|------|
| 待測濃度 | gm^{-3} | 10 | 20 | 30 | 60 | 125 | 250 |
| | g | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 1.2 | 2.5 | 5.0 |
| 待測濃度 (接續) | gm^{-3} | 500 | 750 | 1000 | 1250 | 1500 | 1750 |
| | g | 10.0 | 15.0 | 20.0 | 25.0 | 30.0 | 35.0 |
| 待測濃度 (接續) | gm^{-3} | 2000 | 2250 | 2500 | 2750 | 3000 | — |
| | g | 40.0 | 45.0 | 50.0 | 55.0 | 60.0 | — |

紅色範圍及包括最低需氧量與最大爆炸壓力與斜率 但需重複進行 seria2 與 seria3

* gm^{-3} 粉塵濃度表示相對於 1m^3 爆炸量測設備的樣品測試量；g 粉塵濃度表示 20 liter 樣品測試量。

表 2. 是否成功爆炸之爆炸壓力判斷準則

| 爆炸過壓 P_{ex} [bar] | P_m 正確爆炸過壓 [bar] | 是否爆炸 |
|---------------------|--------------------|------|
| < 2.0 | < 0.4 | 無 |
| ≥ 2.0 | ≥ 0.4 | 是 |

* 爆炸過壓 P_{ex} 為每次實驗直接量測之數據，正常狀態下，與正確爆炸過壓 P_m 值相同，其中 P_m 為經過修正後之爆炸壓力，而非壓力計直接量測得的爆炸壓力，主要係因 20 公升爆炸試驗鋼球的試驗結果受冷卻效應 (Cooling Effect) 及壓力效應 (Pressure Effect) 影響較大，因此需將壓力計量測得的爆炸壓力(P_{ex})進行修正，才能與 1m^3 爆炸試驗鋼球測得的結果相符如圖 11、圖 12、圖 13。

第五節 實驗測試參數介紹

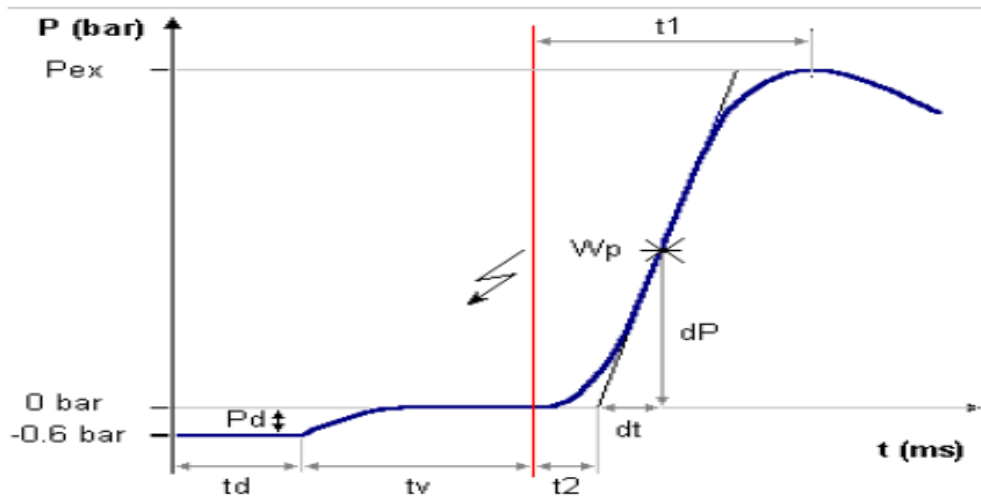


圖 11. 20L 球形測試容器測試壓力曲線特徵圖

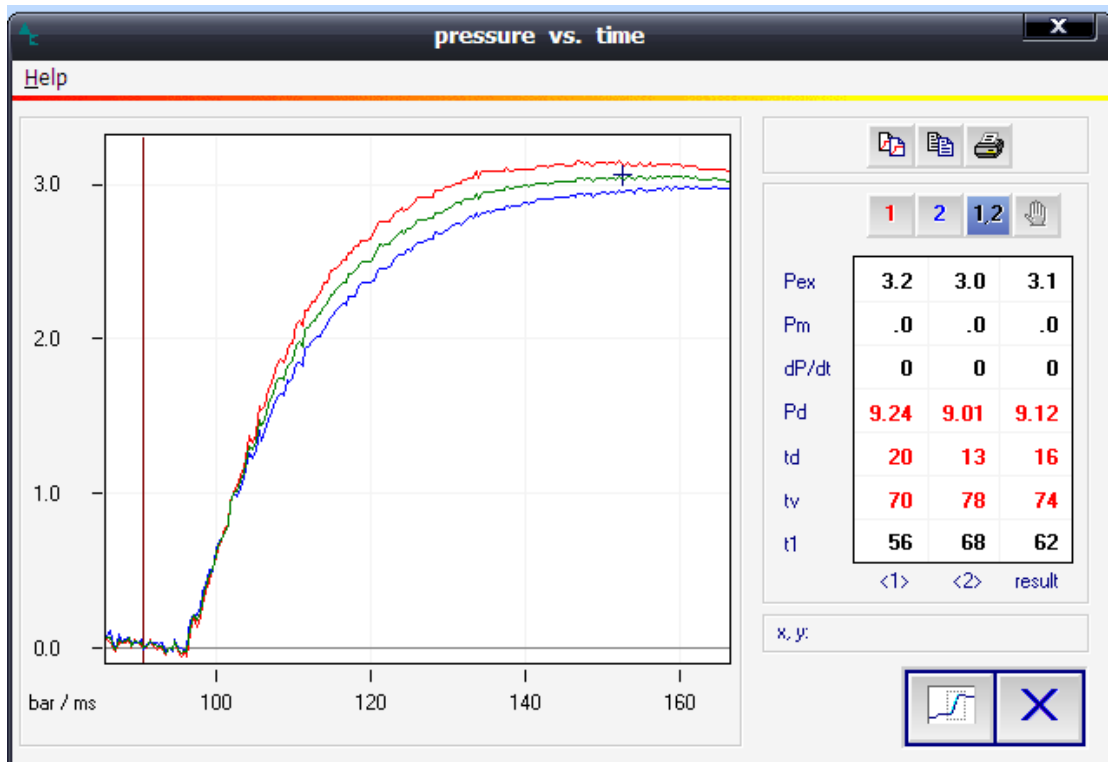


圖 12 20L 球形測試容器化學點火頭功能驗證測試壓力曲線特徵圖之一

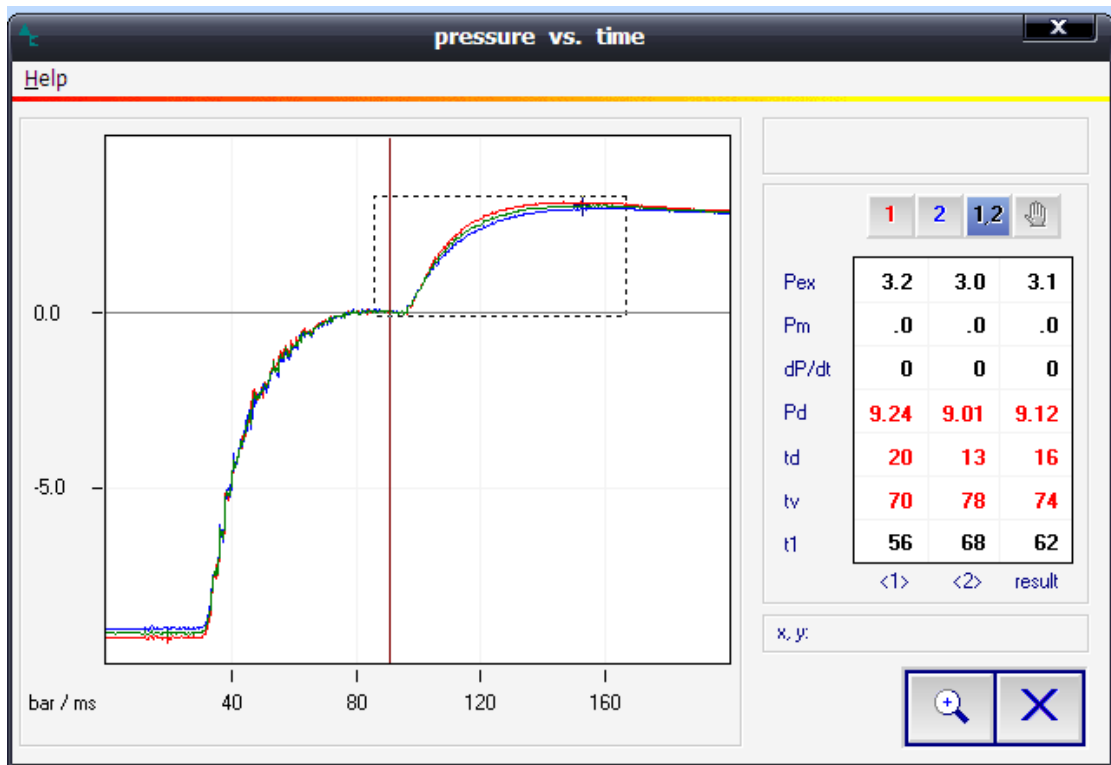


圖 13. 20L 球形測試容器化學點火頭功能驗證測試壓力曲線特徵圖之一

參數名稱:

$(dP/dt)_m$: 每一系列所測得之最大壓力上升速率

$(dP/dt)_{max}$: 將不同測試系列所測得之最大壓力上升速率之算術平均值，如式(2)所示

P_d : 20L 鋼球體內測試前後之壓力差正常範圍 0.55~0.7bar

P_{ex} : 20L 球形測試設備所測得未修正之最大壓力值

P_m : 20L 球形測試設備所測得修正後之最大壓力值 $p_m = 0.775 * (p_{ex})^{1.15}$

P_{max} : 依據 ISO 標準程序所計算出之最大壓力值，如式(1)所示

t_1 : 燃燒時間

t_2 : 誘發時間

t_v : 點火延遲時間

St : 危害指標: $K_{max} [m \cdot bar/s] = \{ 0.02 [m^3] \}^{1/3} \times (dP/dt)_{max} [bar/s]$ 其相對意義如表3所示:

表 3. 粉塵爆炸等級表

| 等級 | K_{max} [m•bar/s] | 爆炸特性 |
|----|---------------------|--------|
| 0 | = 0 | 無爆炸 |
| 1 | >0~200 | 弱或中度爆炸 |
| 2 | 201~300 | 強度爆炸 |
| 3 | > 300 | 嚴重爆炸 |

第三章 結果與數據分析

第一節 第一次工廠取樣鋁鎂合金粉塵粒徑分析

現場採集所得之工廠鋁鎂合金粉塵經恆溫乾燥去除自由水分後利用振動篩分儀，以 NO.24、NO.45、NO.100、NO.270 四種尺寸加以篩分來分析粉塵的力徑分佈如表 4.所示；

表 4.工廠鋁鎂合金粉塵粒徑分析結果

| ASTM 1170 (NO.) | DIN 4188 (mm) | MESH | 孔徑 (μm) | 篩分重量 (g) | 百分比 (%) |
|-----------------------|---------------------|------|-------------------------|-------------|------------|
| 24 | 0.701 | 24 | 710 | 19.8419 | 9.7 |
| 45 | 350 | 42 | 355 | 11.9519 | 5.9 |
| 100 | 0.149 | 100 | 150 | 36.5862 | 17.9 |
| 270 | 0.053 | 270 | 53 | 90.1144 | 44.2 |
| 底層 | 底層 | 底層 | 底層 | 45.5696 | 22.3 |
| 總合 | | | | 204.0470 | 100 |

振動篩分後之鋁鎂合金粉塵力徑分佈如圖 14.；各篩盤殘餘物之圖片如圖 15.所示，顯示 150 μm 以下的粉塵量佔有 66.5%是粉塵的主要部分，而顆粒尺寸在 710 μm 以上之粉塵，由目視即可分辨含有許多如木屑等之雜質，值得注意的是小於 53 μm 的粉塵量有 22.3%。

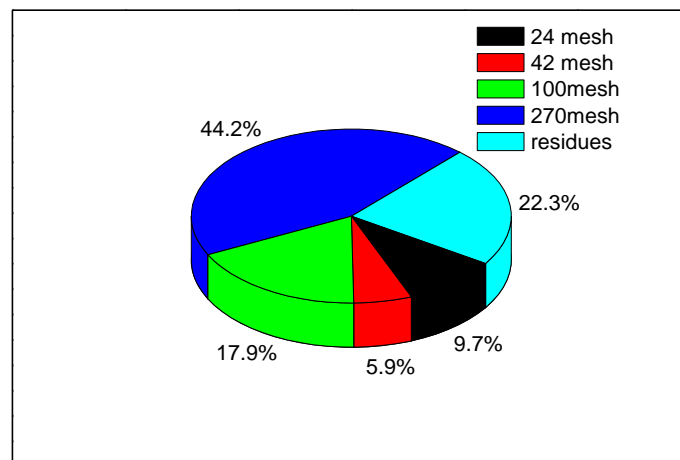


圖 14.振動篩分儀篩分後之鋁鎂合金粉塵力徑分佈圖

空氣中之粉塵經過一段時間後會自然沈降，常被認為粒徑在 $10\ \mu\text{m}$ 至 $200\ \mu\text{m}$ 間，但粉塵種類不同時理化性之差別則大，據此原因同一種粉塵依粒徑之不同爆炸性有所差異。通常粒子愈小則易爆炸，強度亦強。因粉塵粒子之燃燒起自於粒子表面，產生之熱量也被粒子本身之升溫所消耗。比面積大之小粒子所消耗之熱量少，所以產生之熱對爆炸系之溫度上升有幫助，於是成為易爆性。圖 15 表示粉塵粒子大小與數種指標間之關係。

粉塵粒子之大小理之當然與懸浮性有關，粒徑愈小懸浮時間則長如圖 16，因沈降速度小在空氣中維持爆炸性混合氣之時間則長。

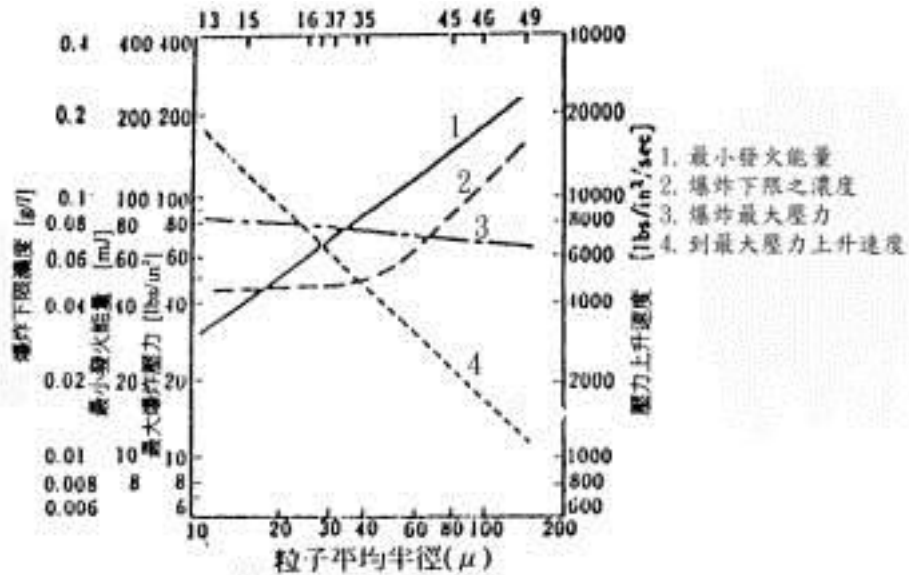
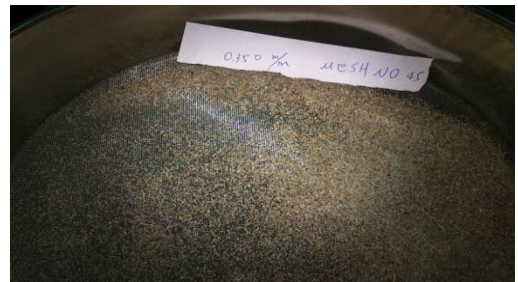


圖 15 噴霧狀 A1 粉之粒子大小與爆炸指標之關係[7,8]



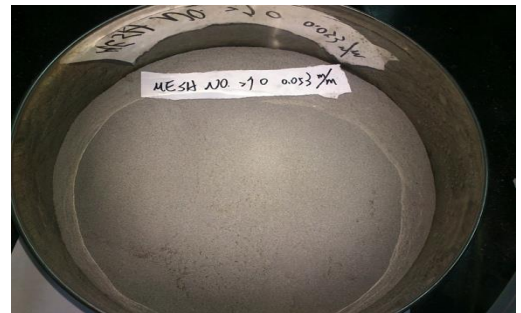
(a)未過 NO.24 篩目之殘餘物



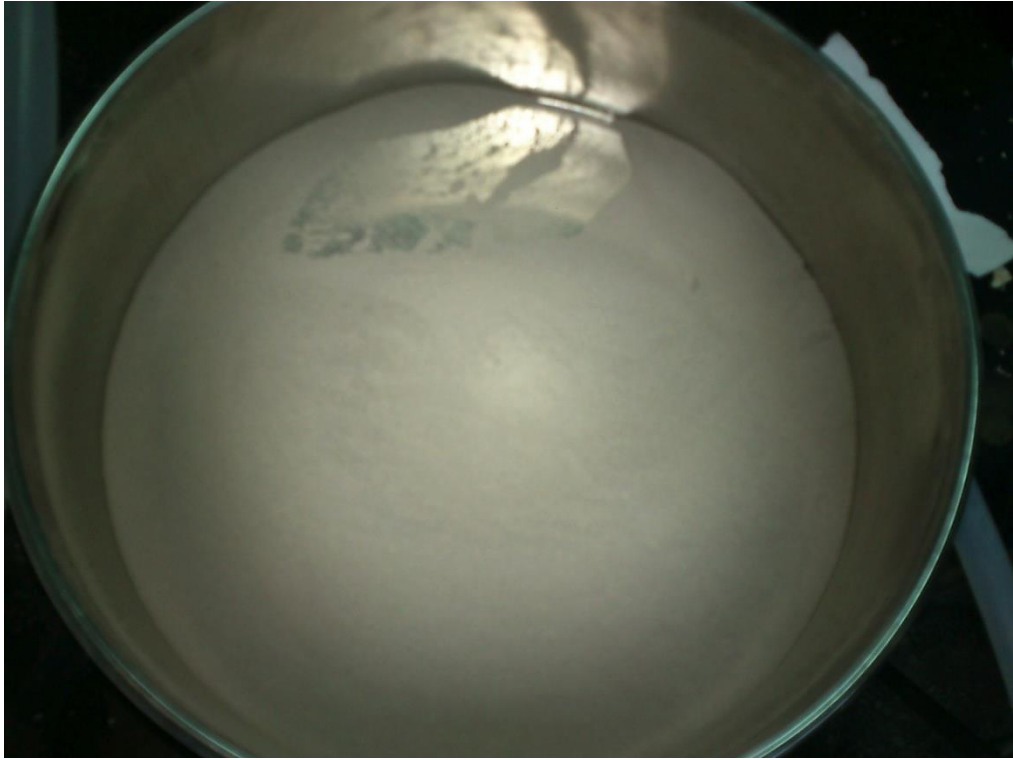
(b)未過 NO.45 篩目之殘餘物



(c)未過 NO.100 篩目之殘餘物



(d)未過 NO.270 篩目之殘餘物



(e)過 NO.270 篩目之殘餘物

圖 16.樣品過篩樣態圖

第二節 工廠鋁鎂合金粉塵成分分析

除了 24 目數(mesh)，也就是顆粒比較大的樣品，因內含有許多雜質而且比較不易點燃，不做 SEM 與 EDX 分析以外，本研究分別自 45 目、100 目、270 目、及過 270 目四分樣品中取樣進行 SEM 與 EDX 粒徑分析，取樣方式是 45 目取 1 份、100 目取 2 份、270 目取 2 份、及過 270 目取 3 份；分別重複進行成份分析，取 270 目、及過 270 目之測試與分析結果如圖 18.~圖 19.所示。

粒子之形狀及表面狀態亦極為重要。比面積則含有粒子形狀之因素，為表示此形狀與表面狀態的參數，通常被稱為形狀係數，對球狀粒子而言最小數字為 6，扁平狀者其數字在 50 以上。依圖 17 所示扁平粉塵之濃度增大時爆炸壓力則增加。但球狀粉塵達到 0.5g/l 後則壓力有降低之趨勢。粉塵在空氣中其表面能被氧化者時間愈久則顯示較難爆炸。

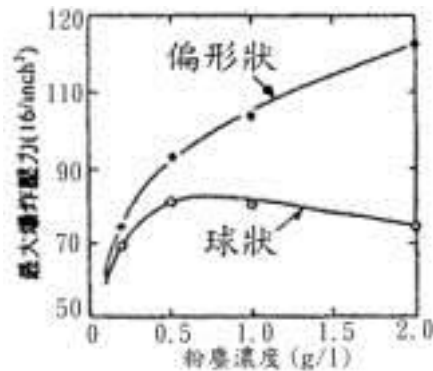


圖 17 Al 粉塵之形狀與爆炸壓力[7,8]

第一次採樣樣態與成份分析結果:

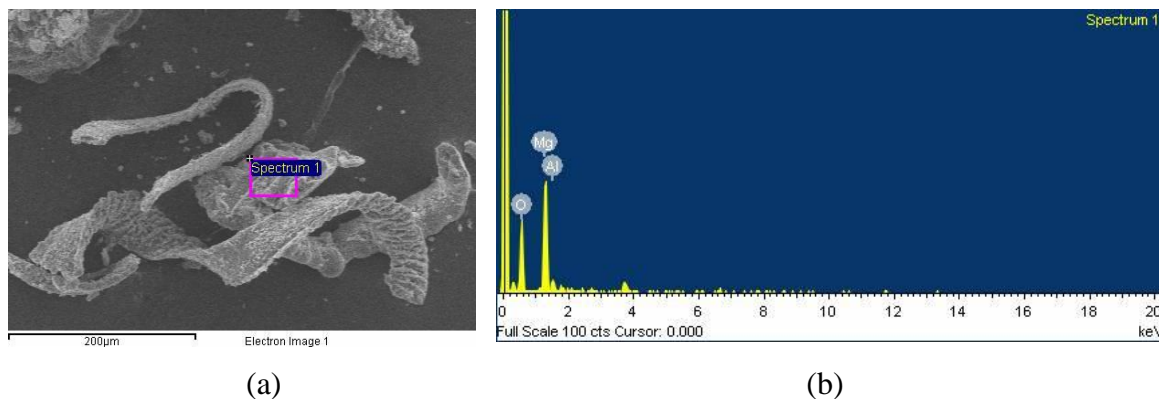


圖 18. 第一次取樣樣品 1 鋁鎂合金粉塵之(a) SEM 圖形及(b) EDS 元素分析圖譜

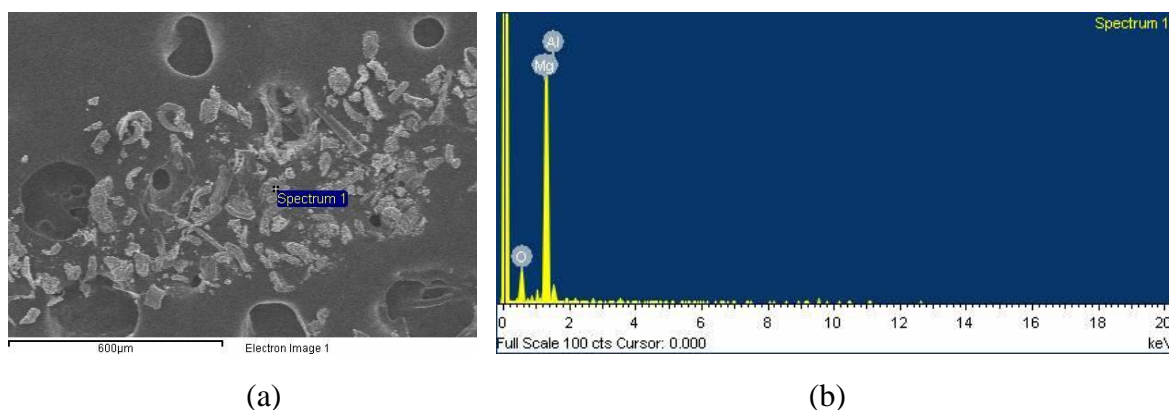


圖 19. 第一次取樣樣品 2 鋁鎂合金粉塵之(a)SEM 圖形及(b) EDS 元素分析圖譜

表 6. 第一次樣品 No.270 鋁鎂合金 粉塵 EDX 元素分析結果

| 元素 | | O | Mg | Al |
|-------|------|-------|-------|------|
| 原子百分比 | 樣品 1 | 58.75 | 36.20 | 5.05 |
| | | 1 | 0.62 | 0.09 |
| | 樣品 2 | 30.76 | 61.41 | 7.83 |
| | | 1 | 1.05 | 0.25 |

表 6. 為整理後之鋁鎂合金 粉塵之 EDX 元素分析，為使數據更易觀察比較，將氧(O)原子比例設為 1，以估算其他原子相對於氧(O)原子的比例，用來判定樣品氧化程度。理論上若為氧化鎂(MgO)的元素分析，其氧(O)原子與鎂(Mg)原子相對比例應為 1 比 1；若為鋁(Al)原子則其氧(O)原子與鋁(Al)原子相對比例應為 3 比 2；據此觀之只有樣品 2 的少部分 Mg 尚有機會再氧化，其餘大部分都已經氧化了，顯示樣品 1 的粉體有嚴重氧化的趨勢，而樣品 2 則有部分 Mg 仍未氧化保有熱分解的活性，顯示樣品間氧化程度有極大差異，推測係因存在現場的位置與離粉塵積層表面距離不同在時間的作用下呈現不同氧化程度。

為此，規劃到台中一家鋁鎂製品加工廠進行第二次線上取樣如圖 20，這加工廠的成品有

腳踏車、汽車零件及手機外殼等等種類繁多，所取樣品為即時研磨即時取樣：



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

圖 20.現場取樣過程

第二次取樣元素與樣態分析結果

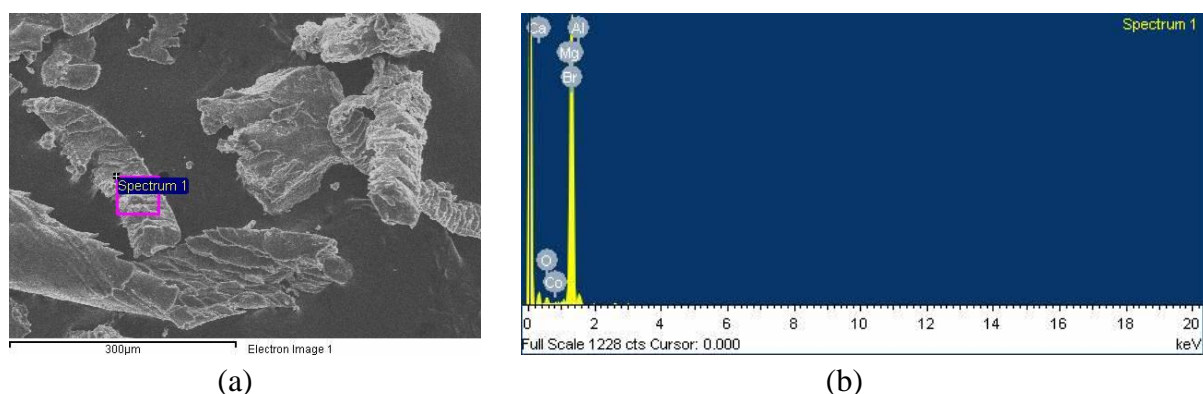


圖 21. 第二次取樣樣品 1 鋁鎂合金粉塵之(a) SEM 圖形及(b) EDS 元素分析圖譜

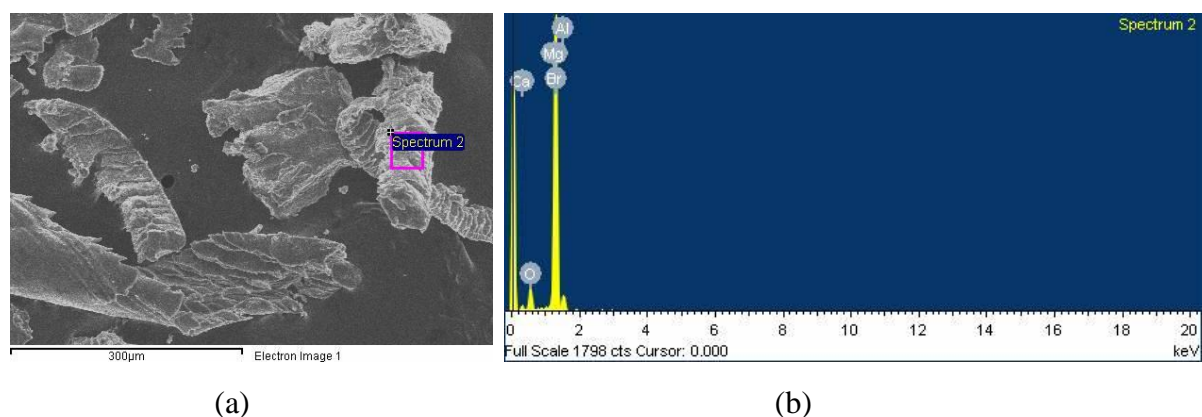


圖 22. 第二次取樣樣品 2 鋁鎂合金粉塵之(a)SEM 圖形及(b) EDS 元素分析圖譜

表 7. 第二次樣品鋁鎂合金 粉塵 EDX 元素分析結果

| 元素 | | O | Mg | Al |
|-------|------|-------|-------|------|
| 原子百分比 | 樣品 1 | 9.31 | 84.53 | 6.70 |
| | | 1 | 9.08 | 0.72 |
| | 樣品 2 | 23.31 | 70.48 | 4.57 |
| | | 1 | 3.02 | 0.20 |

第二次樣品測試結果如圖 21~22 及表 7.所示，SEM 圖顯示樣品仍是長條扁平狀，EDX 元素分析則指出樣品 1 有 800%的 Mg 未氧化，樣品 2 有 200%的 Mg 未氧化，此時研樣品已大大降低存在空間與時間的影響了。

第三節 鋁鎂合金與鎳粉體之 DSC 測試結果

實驗前清除氣體(purged gas)輸出壓力調整為 0.5 bar(約 7 psi)以下，流量為 50 ml/min，保護氣體(Protective Gas)為 20 ml/min，升溫速率可設定 5~50 °C/min，在此設定升溫速率 β 為 10 °C/min、升溫範圍為室溫至 800 °C，本測試儀器之操作極限溫度為 1650°C。

1. 鋁鎂合金粉塵之測試結果

第一次所採取的樣品在空氣環境下以升溫速率(Scanning rate, β)10°C/min 的條件下所得之昇溫掃描熱譜如圖 23 所示；顯示鋁鎂合金粉體尺寸為過 270 篩目、過此篩目之放熱量與放熱峰值溫度分別為:1827j-g⁻¹/5775.8°C、1954j-g⁻¹/573.2°C；

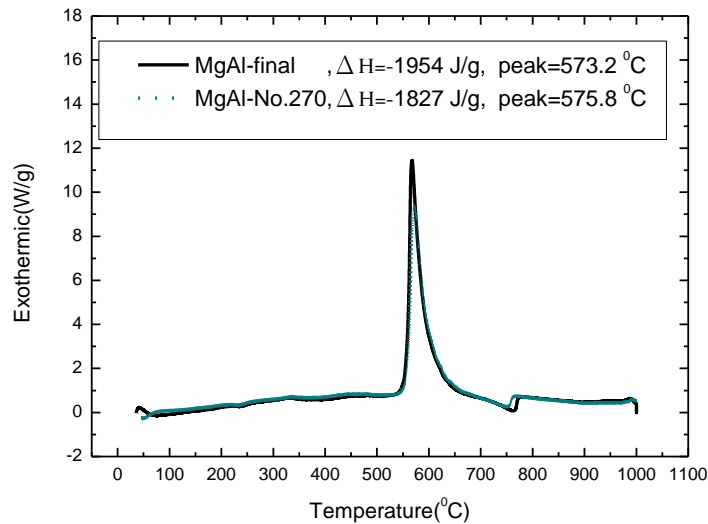


圖 23. 第一次取樣鋁鎂粉塵之昇溫掃描熱譜

第二次現場即時研磨所採樣品之昇溫掃描熱譜如圖 24.所示；圖中 MgAl-New 就是第二次取樣測試結果，新樣品之放熱量比先前最細樣品之放熱量約增加一倍(、3981j-g⁻¹/555.0°C)，放熱分解溫度(T_i)與放熱起始溫度(T₀)均大幅提前；顯示在進行研磨當時的粉塵活性是遠超過累積在現場的粉塵，這應該是累積的粉塵表面已經有某種程度的氧化所致，這由前節 EDX 成分分析中，氧原子佔了一定的比例可以證明，但即令如此，部分氧化的粉塵仍有再被點燃的潛能。

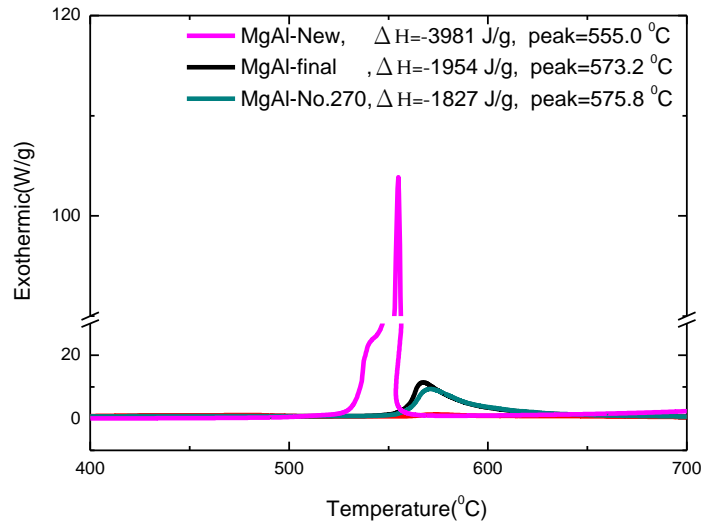


圖 24.第二次取樣鋁鎂粉塵之昇溫掃描熱譜

2. 鎳粉體之測試結果

在此以兩種微米尺寸粉體($2\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$)及三種奈米尺寸(35nm 、 75nm 、 100nm)粉體，進行昇溫掃描熱譜分析，樣品重量分別為 10.2 、 10.1 、 10.2 、 10.1 及 10.0mg 。實驗結果顯示，平均粒徑 $35\ \text{nm}$ 鎳粉產生放熱反應，反應溫度範圍介於 $271.9\sim 366.6\ ^\circ\text{C}$ ，峰值溫度為 $313.6\ ^\circ\text{C}$ ，熱焓值為 $2015\ \text{J/g}$ ；平均粒徑 $75\ \text{nm}$ 鎳粉亦產生放熱反應，反應溫度範圍介於 $320.6\sim 472.5\ ^\circ\text{C}$ ，峰值溫度為 $391.2\ ^\circ\text{C}$ ，熱焓值為 $1471\ \text{J/g}$ ；平均粒徑 $100\ \text{nm}$ 鎳粉同樣產生放熱反應，反應溫度範圍介於 $302.6\sim 548.3\ ^\circ\text{C}$ ，峰值溫度為 $390.2\ ^\circ\text{C}$ ，熱焓值為 $1132\ \text{J/g}$ ；平均粒徑 $<2\ \mu\text{m}$ 鎳粉同樣產生放熱反應，反應溫度範圍介於 $352.6\sim 658.3\ ^\circ\text{C}$ ，峰值溫度為 483.1 ，熱焓值為 $1675\ \text{J/g}$ ；平均粒徑 $2\text{-}10\ \mu\text{m}$ 鎳粉同樣產生放熱反應，反應溫度範圍介於 $380.3\sim 710.3\ ^\circ\text{C}$ ，峰值溫度為 $622.4\ ^\circ\text{C}$ ，熱焓值為 $2015\ \text{J/g}$ 。

觀察圖 25.昇溫掃描熱譜可以看出：鎳粉體放熱量與放熱峰值溫度依其尺寸由小到大分別為： $2015\text{j}\cdot\text{g}^{-1}/313.6\ ^\circ\text{C}$ 、 $1471\text{j}\cdot\text{g}^{-1}/391.2\ ^\circ\text{C}$ 、 $1132\text{j}\cdot\text{g}^{-1}/390.2\ ^\circ\text{C}$ 、 $1675\text{j}\cdot\text{g}^{-1}/483.1\ ^\circ\text{C}$ 、 $2015\text{j}\cdot\text{g}^{-1}/622.4\ ^\circ\text{C}$ ，其放熱量平均值為 1662 ± 376 峰值溫度依尺寸之增加明顯增加，由奈米級粒徑變成微米級粒徑時，峰值溫度增加尤為明顯。

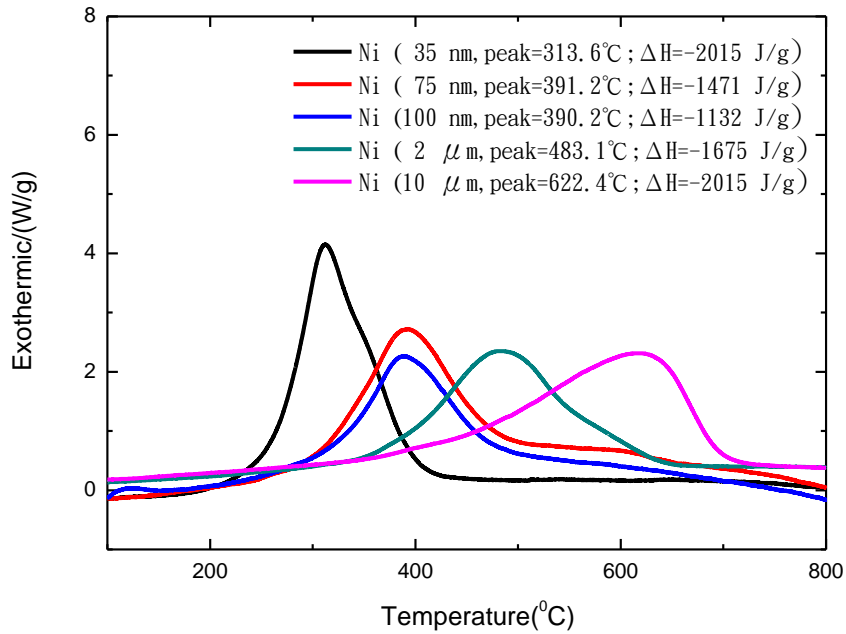


圖 25.不同尺寸在 $\beta=10$ 的條件下之 DSC 昇溫熱譜

第四節 鋁鎂合金粉塵之最低發火能量實驗量測

鋁鎂合金粉塵經最低發火能量測試，固定點火能量 1mJ，調整測試濃度使重量增加依序為 300、600、900、1200、1500 及 1800 mg (0.25、0.5、0.75、1.0、1.25、1.5(g/dm³))，結果顯示每種濃度的樣品，經點火後都出現燒結現象，但無火花或閃燃；對固定點火能量 3、10、30、100、300 至 1000 mJ，依序對每種點火能量調整測試濃度為(0.25、0.5、0.75、1.0、1.25、1.5(g/dm³))，測試結果亦無火花或閃燃之明火出現；但燒結結塊有隨濃度增大的趨勢；測試結果如圖 26.~圖 31.所示。

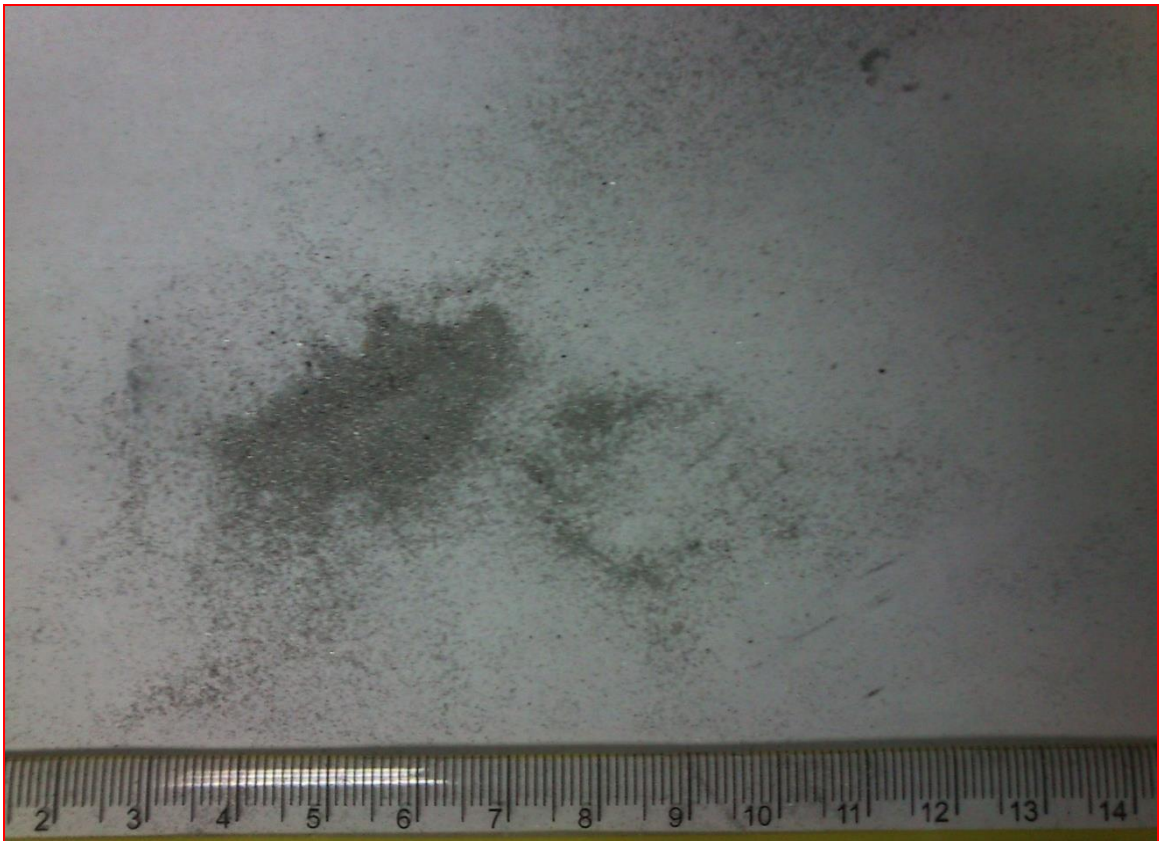


圖 26. 重量 300mg(0.25g/dm³)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 mJ)之 1.2L 哈特曼測試結果

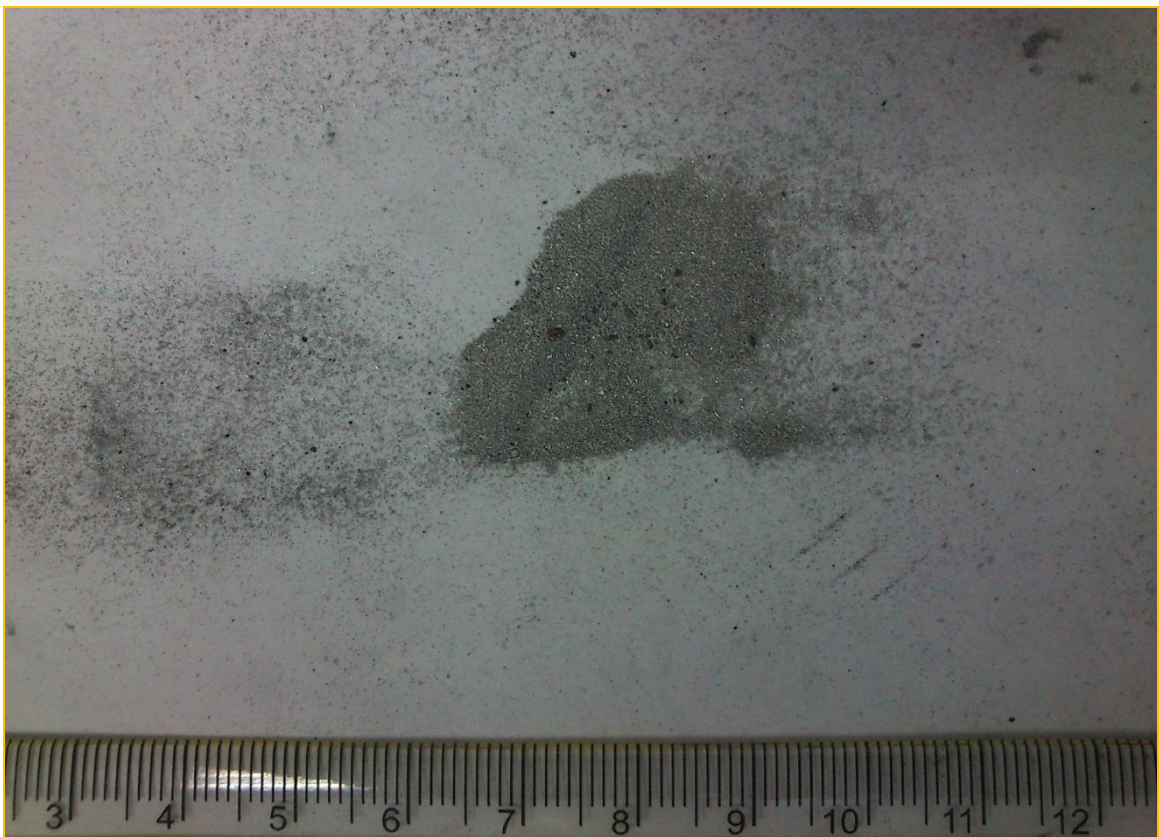


圖 27. 重量 600mg (0.50g/dm³)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 mJ)之 1.2L 哈特曼測試結果

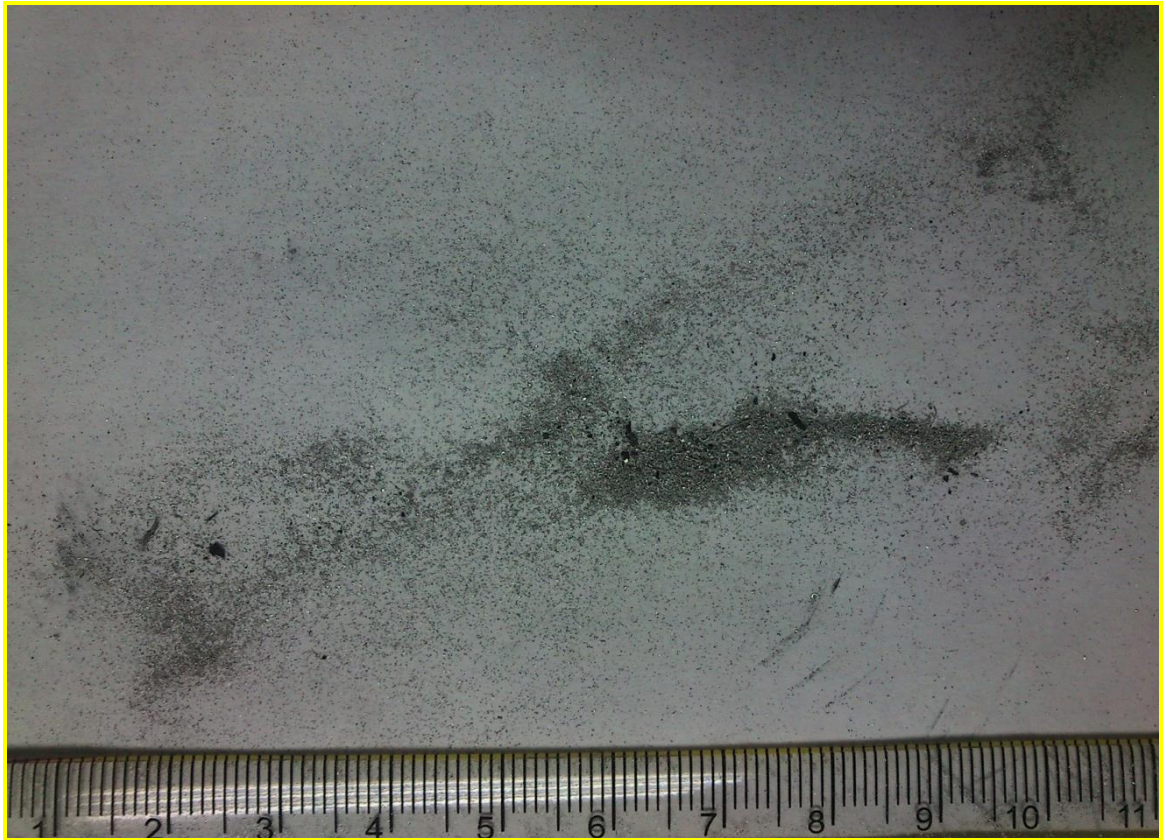


圖 28. 重量 900mg(0.75g/dm³)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 mJ)之 1.2L 哈特曼測試結果

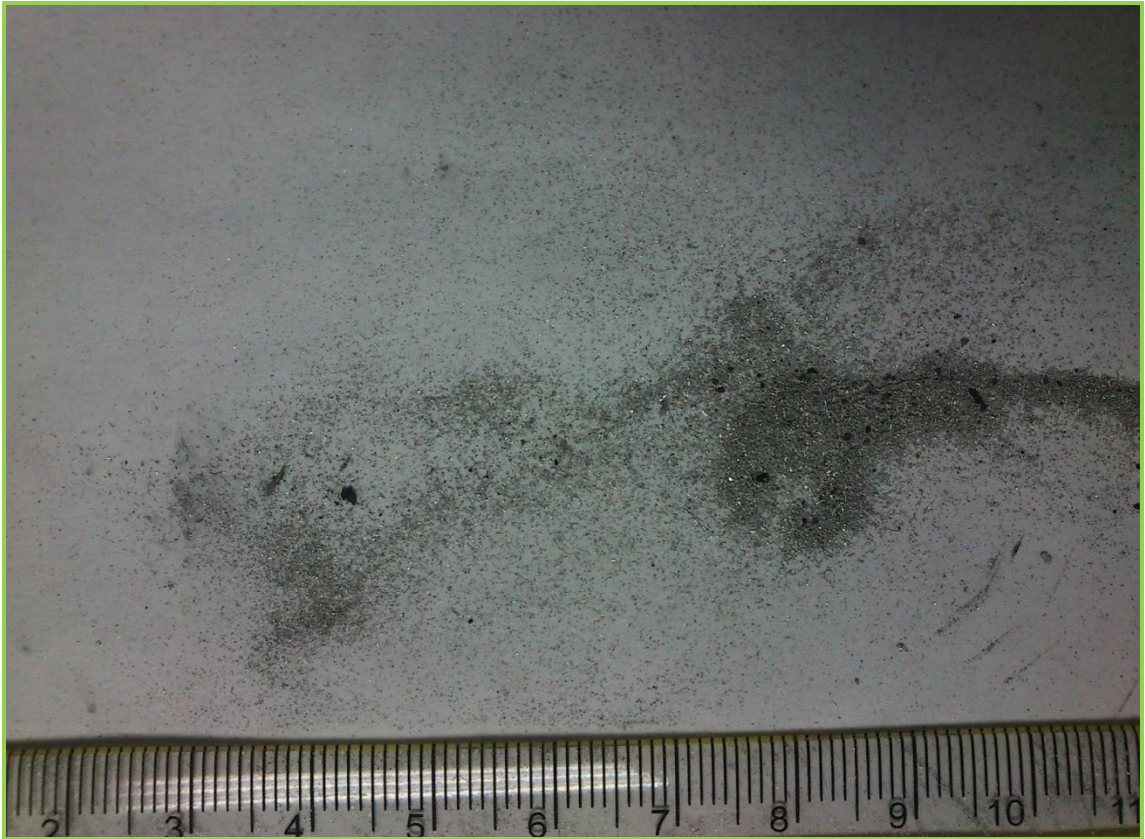


圖 29. 重量 1200mg(1.0g/dm³)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 mJ)之 1.2L 哈特曼測試結果



圖 30.重量 1500mg (1.25g/dm³) 鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 mJ)之 1.2L 哈特曼測試結果

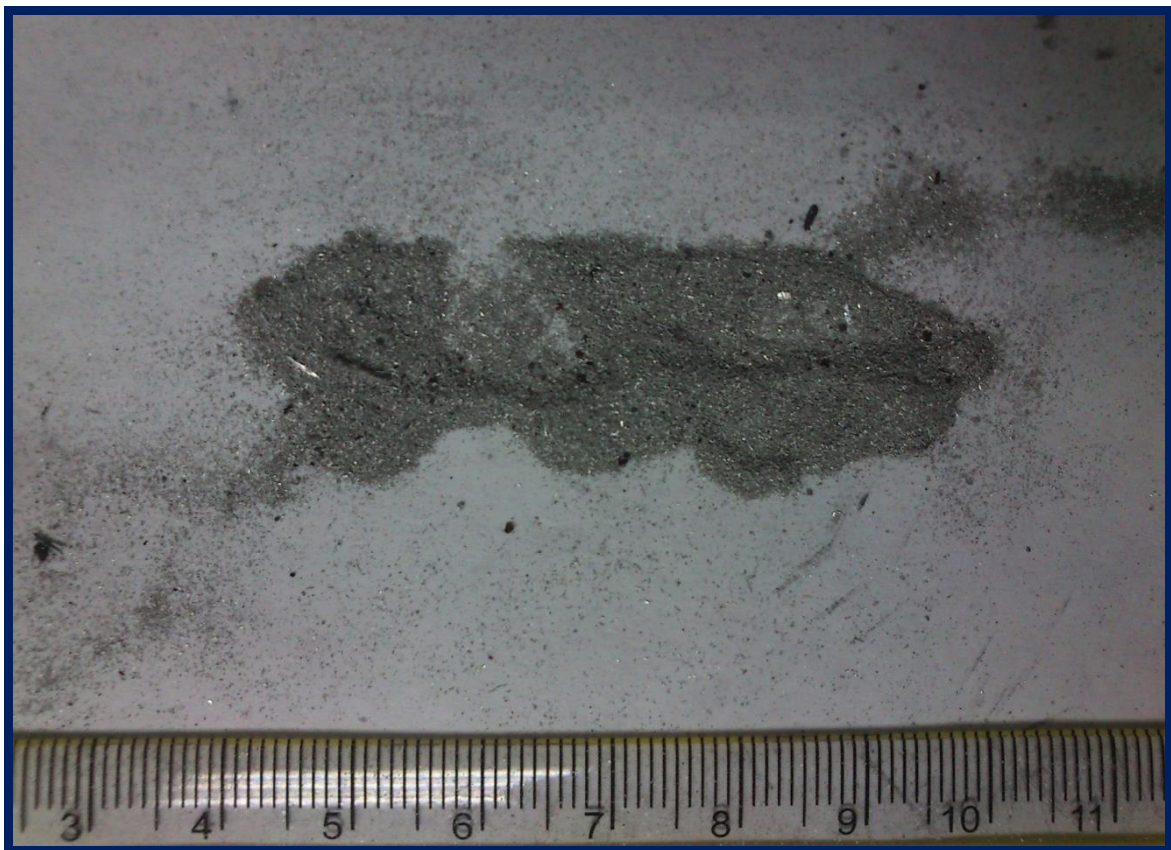
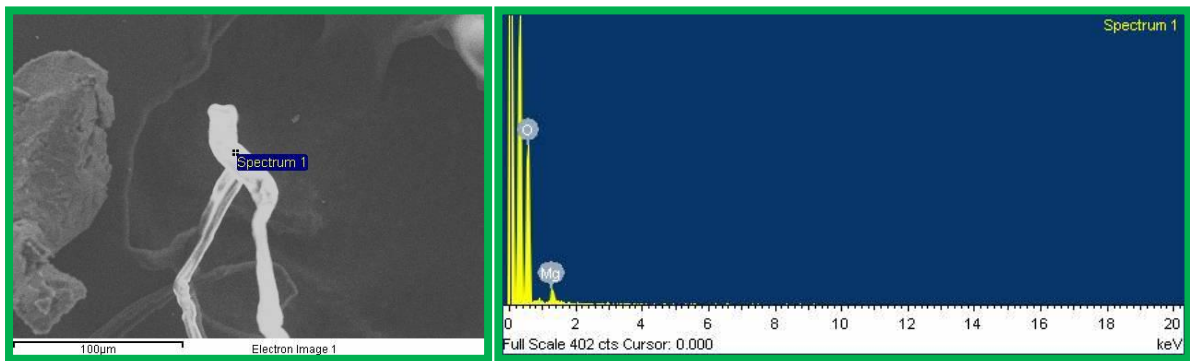


圖 31.重量 1800mg(1.5/dm³)鋁鎂合金粉塵對點火能量(1 mJ)之 1.2L 哈特曼測試結果

由於測試時並未發現火焰，但有燒結現象產生，未確定此燒結之深色物質是否為氧化物，再採集此深顏色之燒結物質進行 SEM 如圖 32、圖 33 所示及 EDX 分析其結果如表 9 所示:

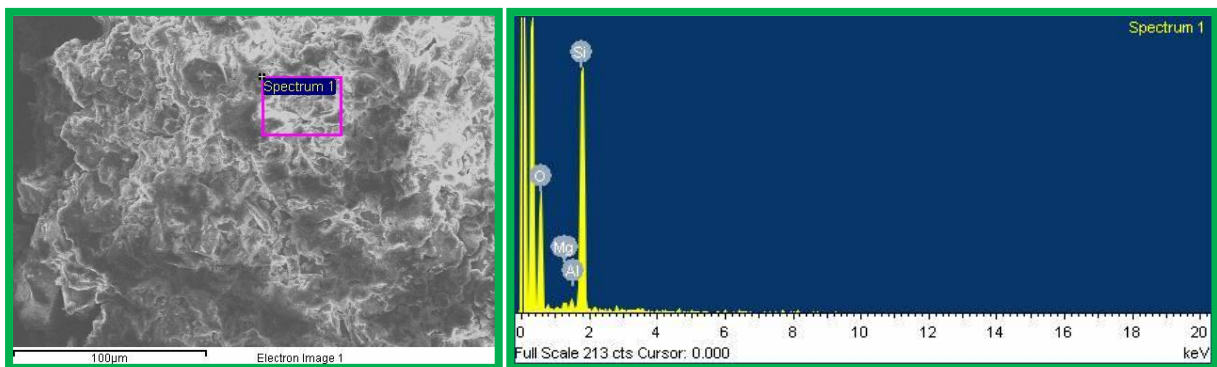


(a)

(b)

圖 32.. 第二次取樣經 1.2 哈特曼測試燒結鋁鎂合金粉塵之(a)SEM 圖形及(b) EDS 元素分析

圖譜 1



(a)

(b)

圖 33.第二次取樣經 1.2 哈特曼測試燒結鋁鎂合金粉塵之(a)SEM 圖形及(b) EDS 元素分析

圖譜 2

表 8 第二次樣品經 1.2 哈特曼測試燒結之鋁鎂合金 粉塵 EDX 元素分析結果

| 元素 | | O | Mg | Al |
|-------|------|-------|------|------|
| 原子百分比 | 樣品 1 | 94.66 | 5.34 | - |
| | | 1 | 0.06 | - |
| | 樣品 2 | 66.91 | 1.19 | 0.09 |

經 1.2 哈特曼測試燒結之鋁鎂合金粉塵之 SEM 樣態呈現熔融樣貌，而其元素分析結果顯示幾乎已完全氧化，顯然在低於 1mJ 的能量下，所有濃度都可以被點燃；此結果透露出新產生而未氧化的鋁鎂合金粉塵非常容易被點燃。將燒結與未燒結元素整理於表 9 更能看出此一結果。

表 9.第二次取樣 1.2L 最低發火能量測試燒結與未燒結部份之成分重量%

| | O | Mg | Al |
|---------|-------|-------|------|
| 未燒結樣品 1 | 6.33 | 87.44 | 7.7 |
| 未燒結樣品 2 | 15.95 | 73.29 | 5.28 |
| 燒結樣品 1 | 92.1 | 7.9 | - |
| 燒結樣品 2 | 53.65 | 1.45 | 0.13 |

第五節 最低爆炸濃度(LEL)實驗量測

針對鋁鎂合金粉塵進行 20 公升爆炸鋼球粉塵最低爆炸濃度實驗，其實驗結果如表 10. 及圖 34.所示，根據表 2 判斷是否產生爆炸之爆壓依據，鋁鎂合金粉塵最低爆炸濃度為 30 g/m^3 。

表 10. 最低爆炸濃度(MEC)

| 粉塵濃度 (g/m^3) | P_{ex} (bar) | P_m (bar) | (dP/dt) (bar/s) | 粉塵濃度 (g/m^3) | P_{ex} (bar) | P_m (bar) | (dP/dt) (bar/s) |
|----------------------------|-------------------|----------------|----------------------|----------------------------|-------------------|----------------|----------------------|
| 10 | 1.2 | 0.5 | 6.0 | 60 | 3.6 | 3.3 | 291 |
| 20 | 2.0 | 1.4 | 4.0 | 125 | 6.4 | 6.6 | 491 |
| 30 | 2.3 | 1.8 | 168 | 250 | 5.7 | 5.7 | 405 |

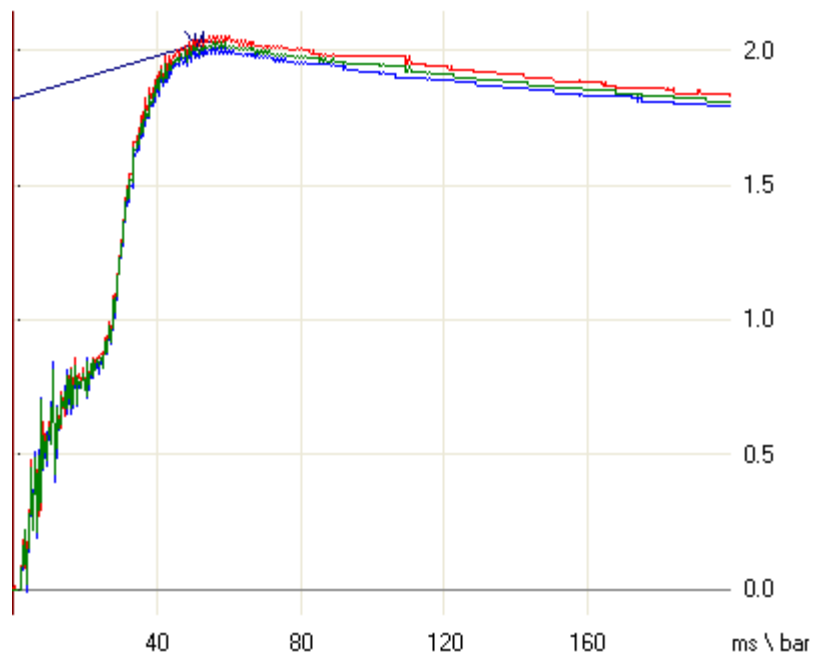


圖 34. 最低爆炸濃度(MEC)實驗測試圖

第六節 最大爆炸壓力(Pmax)實驗量測

鋁鎂合金粉塵之最大爆炸壓力測試結果如表 11.及圖 35.所示，測試步驟與測試參數之設定已於前述，在第一系列(series-1)測試中，最大爆炸壓力(P_{max})與最大爆炸壓力上升速率($(dP/dt)_{max}$)，同時出現在濃度 750 g/m³處，因此再取此濃度及包含此濃度之上下各一階濃度值，再進行第二(series-2)與第三系列(series-3) 之測試，表中紅色字體之數值，即為 3 個測試系列之(P_{max})與($(dP/dt)_{max}$)值。

依據方程式(1)與(2):

$$P_{max} = \frac{P_m[\text{Ser1}] + P_m[\text{Ser2}] + P_m[\text{Ser3}]}{3} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{dP}{dt}_{max} = \frac{\frac{dP}{dt}_m [\text{Ser1}] + \frac{dP}{dt}_m [\text{Ser2}] + \frac{dP}{dt}_m [\text{Ser3}]}{3} \dots\dots\dots(2)$$

分別計算出本研究案鋁鎂合金粉塵之 P_{max} 為 15.8bar，($(dP/dt)_{max}$) 為 1006bar/s。

再依方程式(3)

$$K_{max} [m \cdot \text{bar/s}] = 0.02791 (dP/dt)_{max} [\text{bar/s}] \dots\dots\dots(3)$$

計算出 $K_{max}=28.1$ ，此值對應於表 3，查出屬於弱或中度爆炸等級，值得吾人注意。

表 11. 粒徑小於 53 μm 鋁鎂合金粉體之最大爆炸壓力測試結果

| Parameter type Item No. | Series | Conc (g/m ³) | (P_{max}) (bar) | ($(dP/dt)_{max}$) (bar/s) | t_1 | t_v | IE |
|----------------------------|--------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|-------|-------|------|
| 1 | -1 | 10 | 6.6 | 381 | 132 | 72 | 10kj |
| 2 | -1 | 20 | 3.3 | 347 | 145 | 66 | 10kj |
| 3 | -1 | 30 | 4.7 | 337 | 130 | 73 | 10kj |
| 4 | -1 | 60 | 5.3 | 602 | 125 | 67 | 10kj |
| 5 | -1 | 125 | 5 | 525 | 173 | 69 | 10kj |
| 6 | -1 | 250 | 5.2 | 212 | 266 | 68 | 10kj |
| 7 | -1 | 500 | 3.6 | 342 | 170 | 67 | 10kj |
| 8 | -1 | 750 | 11.6 | 629 | 137 | 70 | 10kj |
| 9 | -1 | 1000 | 7.6 | 417 | 155 | 74 | 10kj |
| 10 | -1 | 1250 | 10.2 | 503 | 123 | 71 | 10kj |
| 11 | -2 | 500 | 10.9 | 337 | 167 | 71 | 10kj |
| 12 | -2 | 750 | 20.1 | 573 | 354 | 65 | 10kj |
| 13 | -2 | 1000 | 10.6 | 1329 | 172 | 69 | 10kj |
| 14 | -3 | 500 | 15.6 | 384 | 99 | 74 | 10kj |
| 15 | -3 | 750 | 15.8 | 1060 | 73 | 70 | 10kj |
| 16 | -3 | 1000 | 11.5 | 580 | 151 | 72 | 10kj |

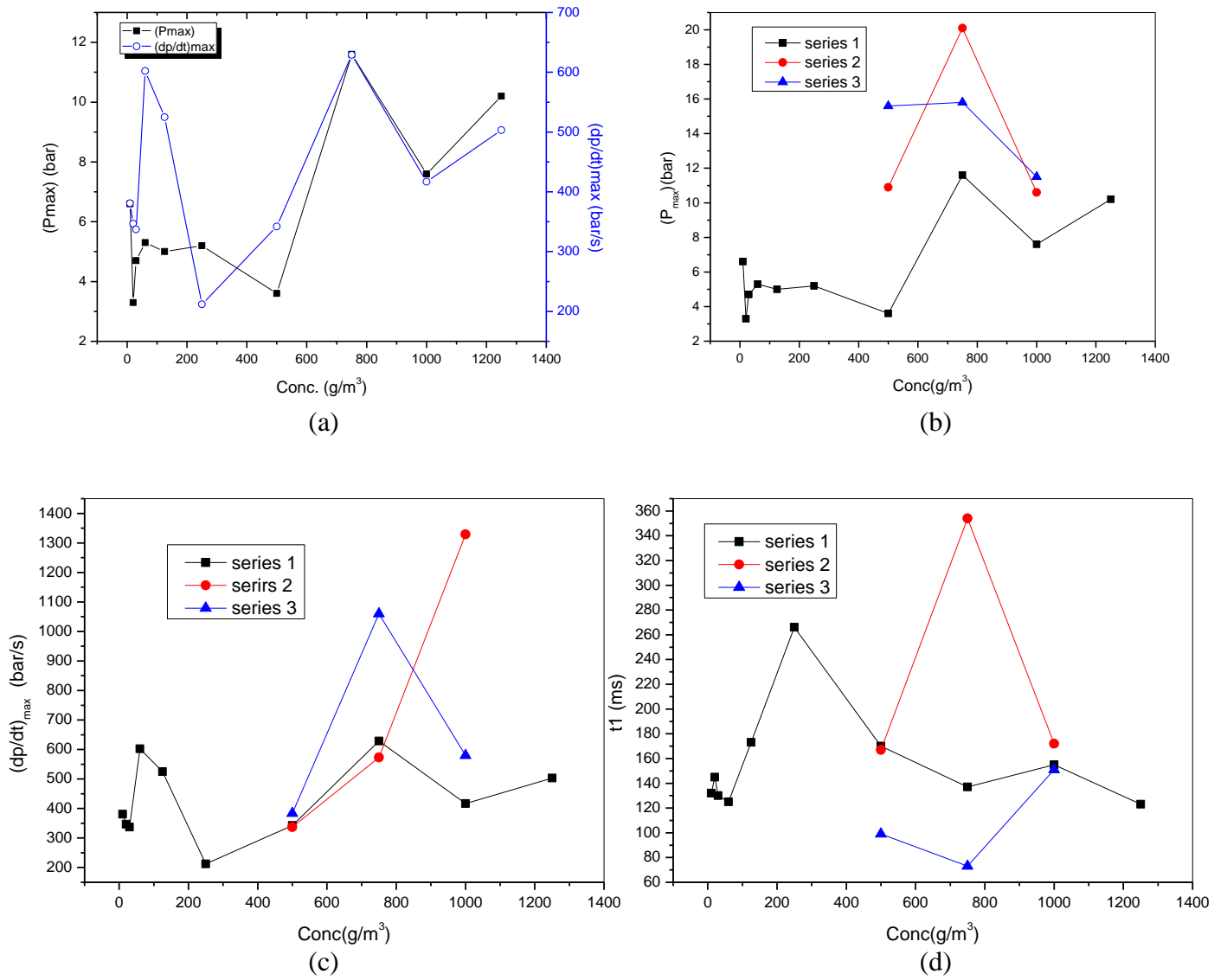


圖 35. 鋁鎂合金粉塵 20L 爆炸鋼球所測最大爆炸壓力及其斜率分布圖(a)3 系列之 P_{max} (b)、 $(dp/dt)_{max}$ 與燃燒時間 t_1 (d) 之分布情形

第七節 粉塵爆炸與輸送速度關係探討

1. 鋁鎂合金粉塵爆炸與輸送速度關係探討

粉體在管線中輸送是一般常見的物料輸送操作方法，在輸送過程中有許多能量的轉換，例如動能與摩擦力、速度與靜電累積、摩擦力與熱能，而摩擦又有粒子相互間的摩擦、粒子與管壁間的摩擦，這些交互作用在輸送管道幾何形狀固定的前提下，都可以表示成速度的參數，因此測量不同輸送速度下進入鋼球粉塵的爆炸特性，可以做為防治輸送粉體過程中，防火防爆之設計參考數據，亦可由此數據的發展趨勢，瞭解粉體的操作特徵，wu[8,9,10]人曾指出奈米鈦粉與鐵粉會在 20L 爆炸特性測試時，與進料閥彎管處發生燒結現象如表 12 所示，因此本實驗即測試在不點火狀況下，不同進料壓力是否會與進料閥彎管處發生燒結現象，實驗時的粉塵量是以產生最大爆炸壓力時的量來進行，也就是 15g。

測試時，於彎管處黏貼熱電偶，量取測試前後溫度差(ΔT)來判斷是否產生燒結(sintering)現象，並拆卸管筏觀察表面樣態已確認之。

表 12. 粒徑小於 53 μm 鋁鎂合金粉體最大爆炸壓力隨流速改變之測試結果

| Parameters Item | Conc (g/m³) | Pressure (bar) | ΔT | IE | Sintering |
|----------------------------------|---|---------------------------------|------------------------------|-----------|------------------|
| 1 | 750 | 20 | 0 | 0 | NO |
| 2 | 750 | 15 | 0 | 0 | NO |
| 3 | 750 | 10 | 0 | 0 | NO |
| 4 | 750 | 5 | 0 | 0 | NO |

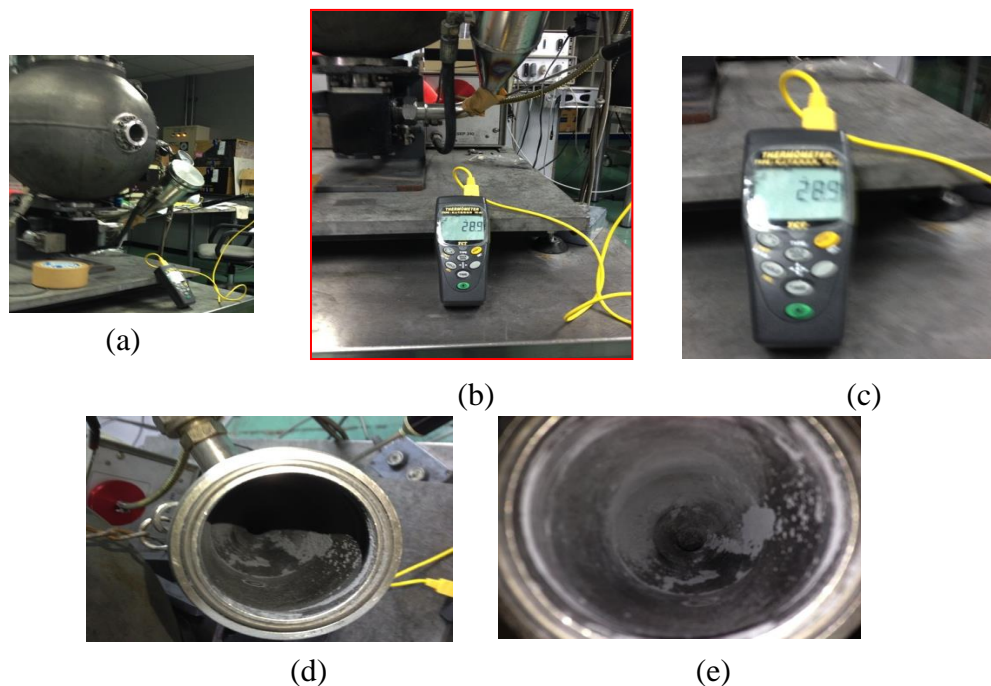


圖 36.粉塵爆炸與輸送速度關係探討結果

2. 鎳粉塵爆炸與輸送速度關係探討

圖 36.粉塵爆炸與輸送速度關係探討結果先以 20L 爆炸鋼球找出 35nm 奈米鎳粉的最大爆炸壓力濃度後再以此濃度進行粉塵爆炸與輸送速度關係探討測試，測試結果各尺寸最大爆炸壓力與濃度的關係如表 13.所示，詳細之測試資料則表示於附錄 1 中。

表 13. 五種尺寸之鎳粉體最大爆炸壓力隨流速改變之測試結果

| Parameters Item | Conc (g/m ³) | Pressure (bar) | ΔT | IE | Sintering |
|--------------------|-----------------------------|-------------------|------------|----|-----------|
| 35nm | 1000 | 5,10,15,20 | 0 | 0 | NO |
| 75nm | 125 | 5,10,15,20 | 0 | 0 | NO |
| 100nm | 125 | 5,10,15,20 | 0 | 0 | NO |
| 2 μ m | 10 | 5,10,15,20 | 0 | 0 | NO |
| 10 μ m | 500 | 5,10,15,20 | 0 | 0 | NO |

測試過程中，肘管處的溫度無改變，檢視肘管內側亦無燒結現象發生。

第八節 靜電荷與輸送速度關係探討

1. 鋁鎂合金粉塵之靜電荷與輸送速度關係探討

下表顯示若鋁鎂合金粉塵在鋼管中以不同流速不同濃度輸送之結果，靜電荷會隨速度增加、濃度增加而增加，若輸送管材質改為 PVC 塑膠管，則靜電荷隨濃度增加而增加之趨勢明顯，但沒有明顯隨輸送速度增加而改變之趨勢；在 PVC 管輸送的各種狀況靜電累積量均明顯大於鋼管材質之靜電荷如表 14 所示。

表 14. 鋁鎂合金粉體在不同流速、輸送材質系之
靜電能量(J)測試結果

| 樣品重 流速(m/s) | | 0.05g | 0.10g | 0.15g |
|----------------|----------|-------|----------|-------|
| | | 10 | PVC 管 | 392 |
| 鋼管 | 12 | | 80 | 123 |
| 20 | PVC 管 | 120 | 2360 | 7567 |
| | 鋼管 | 121 | 410 | 635 |
| 25 | PVC 管 | 706 | 941 | 4127 |
| | 鋼管 | 228 | 285 | 1015 |

2. 鎳粉體之靜電荷與輸送速度關係探討

下表 15.顯示 10 μ m 鎳粉塵在鋼管中以不同流速不同濃度輸送之結果，0.10 與 0.15 克的進料量下，靜電荷會隨速度增加、濃度增加而增加，若輸送管材質改為 PVC 塑膠管，則靜電荷隨速度增加而增加之趨勢明顯，但沒有明顯隨輸送濃度增加而改變之趨勢；在 PVC 管輸送的各種狀況靜電累積量均明顯大於鋼管材質之靜電荷，在低濃度，也就是 0.05g 加料量時，靜電量與流速間有反曲點出現之趨勢，也就是在流速 20m/s 靜電量累積最大。

表 15. 粒徑 $10\ \mu\text{m}$ 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之
靜電能量(J)測試結果

| 樣品重 流速(m/s) | | 0.05g | 0.10g | 0.15g |
|----------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | | 10 | PVC 管 | 32 |
| | 鋼管 | 4 | 3 | 6 |
| 20 | PVC 管 | 1064 | 325 | 93 |
| | 鋼管 | 1269 | 20 | 82 |
| 25 | PVC 管 | 301 | 1460 | 6800 |
| | 鋼管 | 1071 | 1225 | 3809 |

當粒徑減為 $2\ \mu\text{m}$ 時，鎳粉體靜電累積除了在 PVC 管累積量大於在鋼管輸送之累積量及在鋼管輸送，靜電荷會隨速度增加有明顯與之趨勢外，與濃度間的相關度不高，值得注意的是低流速在鋼管中流動的鎳粉幾乎沒有靜電累積現象如表 16 所示。

表 16. 粒徑 $2\ \mu\text{m}$ 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之
靜電能量(J)測試結果

| 樣品重 流速(m/s) | | 0.05g | 0.10g | 0.15g |
|----------------|----------|-----------|----------|-------|
| | | 10 | PVC 管 | 28 |
| | 鋼管 | 4 | 0 | 0 |
| 20 | PVC 管 | 18 | 60 | 536 |
| | 鋼管 | 53 | 34 | 665 |
| 25 | PVC 管 | 800 | 1348 | 512 |
| | 鋼管 | 53 | 252 | 882 |

當粒徑減為 100nm 時，有 4 種現象:

- A. 鎳粉體靜電累積在 PVC 管輸送累積量大於在鋼管輸送；
- B. 低濃度時靜電累積量隨速度增加而增加；
- C. 在 PVC 管中輸送之電累積隨濃度增加而增加，在鋼管中則無。

D. 在 PVC 管濃度對於靜電累積的影響度遠大於流速之影響如表 17 所示。

表 17. 粒徑 100nm 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之
靜電能量(J)測試結果

| 樣品重 流速(m/s) | | 0.05g | 0.10g | 0.15g |
|----------------|----------|-------|----------|-------|
| | | 10 | PVC 管 | 25 |
| 鋼管 | 15 | | 1 | 729 |
| 20 | PVC 管 | 297 | 344 | 48874 |
| | 鋼管 | 275 | 26 | 403 |
| 25 | PVC 管 | 8970 | 22416 | 25389 |
| | 鋼管 | 2852 | 95 | 168 |

當粒徑減為 75nm 時，有 4 種現象:

- A. 鎳粉體靜電累積在 PVC 管輸送累積量大於在鋼管輸送；
- B. 低濃度時靜電累積量隨速度增加而增加；
- C. 在 PVC 管中輸送之電累積隨濃度增加而增加，在鋼管中則無。
- D. 在 PVC 管濃度對於靜電累積的影響度遠大於流速之影響如表 18 所示。

表 18. 粒徑 75nm 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之
靜電能量(J)測試結果

| 樣品重 流速(m/s) | | 0.05g | 0.10g | 0.15g |
|----------------|----------|-------|----------|-------|
| | | 10 | PVC 管 | 25 |
| 鋼管 | 10 | | 5 | 5 |
| 20 | PVC 管 | 374 | 1522 | 8933 |
| | 鋼管 | 73 | 10 | 40 |
| 25 | PVC 管 | 1768 | 2714 | 34111 |
| | 鋼管 | 856 | 70 | 246 |

當粒徑減為 350nm 時，有 5 種現象:

- A. 鎳粉體靜電累積在 PVC 管輸送累積量大於在鋼管輸送；

- B. 靜電累積量隨速度增加而增加的趨勢不受濃度影響；
- C. 靜電累積隨濃度增加而增加的趨勢不受速度影響；
- D. 在 PVC 管中靜電累積隨流速增加與隨濃度增加的幅度大於前述較大尺寸者；
- E. 在 PVC 管流速對於靜電累積的影響度遠大於濃度之影響如表 19 所示。

表 19. 粒徑 35nm 鎳粉體在不同流速、輸送材質系之
靜電能量(J)測試結果

| 樣品重 流速(m/s) | | 0.05g | 0.10g | 0.15g |
|----------------|----------|-------|----------|-------|
| | | 10 | PVC 管 | 8 |
| 鋼管 | 53 | | 11 | 125 |
| 20 | PVC 管 | 1921 | 8493 | 11295 |
| | 鋼管 | 168 | 149 | 242 |
| 25 | PVC 管 | 6025 | 102120 | 32977 |
| | 鋼管 | 3075 | 618 | 1281 |

第四章 結論與建議

第一節 結論

1. 第一次採樣樣品氧化嚴重，過篩後小於 $53\ \mu\text{m}$ 之鋁鎂合金粉塵，在進行 1.2L 哈特曼最低發火能量測試時均無法點燃，但是在 DSC 昇溫掃描熱譜分析時仍有放熱反應，顯示雖然於現場堆積已久但仍具有反應之活性，因此在進一步以 20L 爆炸鋼球測試最大爆炸壓力及最低爆炸濃度時仍能點燃發火。
2. 第二次即時採樣保存避免氧化發生之樣品，因為粒徑大於 $63\ \mu\text{m}$ ，在 1.2L 哈特曼最低發火能量測試時，只有表面燒結現象而無火焰產生，經 SEM/EDX 分析有燒結與無燒結處之樣品，燒結之樣品，在樣態上呈現熔融樣貌，在元素上呈現高比例的氧化現象，而未燒結之樣品則無此現象。
3. 現場即時取樣之樣品期最低發火能量低於 1mJ，其發熱量幾乎為第一次採樣樣品之 3 倍，顯示其敏感與高發熱潛能的危害趨勢。
4. 鋁鎂合金粉塵在最大爆炸壓力的濃度下，測試其於不同輸送速度下是否會因進料 90° 肘管之衝撞而熱分解燒結，結果顯示並無此現象，不過因為樣品為非即時採樣而是有部分氧化之第一次採樣樣品，若能有足夠、夠細之即時樣品則結果如何尚難定論。
5. 利用法拉第杯，對鋁鎂粉塵進行的靜電荷與輸送速度關係實驗結果顯示：
 - A. 靜電累積在 PVC 管輸送累積量大於在鋼管輸送；
 - B. 靜電累積量隨濃度增加而增加的趨勢不受速度影響；
 - C. 靜電累積隨濃度增加而增加的趨勢大於隨速度增加而增加的趨勢；
 - D. 在 PVC 管中靜電累積幅度遠大於在鋼管中之累積幅度。
6. 在鎳粉體方面不管是微米或奈米尺寸之粉體，在最大爆炸壓力濃度的條件下，觀察不同流率衝擊 20L 爆炸鋼球之 90° 進料肘管，都不致於產生燒結現象，這點也符合其 DSC 昇溫掃描熱譜分析結果中，最大放熱量也不過 2000J/g 左右得到支持。
7. 鎳粉於法拉第杯測試結果顯示出以下特性：

10 μm 鎳粉塵在鋼管中以不同流速不同濃度輸送之結果，0.10 與 0.15 克的進料量下，靜電荷會隨速度增加、濃度增加而增加，若輸送管材質改為 PVC 塑膠管，則靜電荷隨速度增加而增加之趨勢明顯，但沒有明顯隨輸送濃度增加而改變之趨勢；在 PVC 管輸送的各種狀況靜電累積量均明顯大於鋼管材質之靜電荷，在低濃度，也就是 0.05g 加料量時，靜電量與流速間有反區點出現之趨勢，也就是在流速 20m/s 靜電量累積最大當粒徑減為 $2\ \mu\text{m}$ 時，鎳粉體靜電累積除了在 PVC 管累積量大於在鋼管輸送之累積量及在鋼管輸送，靜電荷會隨

速度增加有明顯與之趨勢外，與濃度間的相關度不高，值得注意的是低流速在鋼管中流動的鎳粉幾乎沒有靜電累積現象。

當粒徑減為 100nm 時，有 4 種現象：

- A. 鎳粉體靜電累積在 PVC 管輸送累積量大於在鋼管輸送；
- B. 低濃度時靜電累積量隨速度增加而增加；
- C. 在 PVC 管中輸送之電累積隨濃度增加而增加，在鋼管中則無。
- D. 在 PVC 管濃度對於靜電累積的影響度遠大於流速之影響。

當粒徑減為 75nm 時，有 4 種現象：

- A. 鎳粉體靜電累積在 PVC 管輸送累積量大於在鋼管輸送；
- B. 低濃度時靜電累積量隨速度增加而增加；
- C. 在 PVC 管中輸送之電累積隨濃度增加而增加，在鋼管中則無。
- E. 在 PVC 管濃度對於靜電累積的影響度遠大於流速之影響。

當粒徑減為 350nm 時，有 5 種現象：

- A. 鎳粉體靜電累積在 PVC 管輸送累積量大於在鋼管輸送；
- B. 靜電累積量隨速度增加而增加的趨勢不受濃度影響；
- C. 靜電累積隨濃度增加而增加的趨勢不受速度影響；
- D. 在 PVC 管中靜電累積隨流速增加與隨濃度增加的幅度大於前述較大尺寸者；
- E. 在 PVC 管流速對於靜電累積的影響度遠大於濃度之影響。

第二節 建議

鋁鎂合金研磨加工產生的粉塵很容易累積在作業場所，剛研磨產生的粉塵之最低點火能量小於 1mJ 非常容易被點燃，而積存之粉塵雖因部分氧化而活性降低，但 20L 爆炸鋼球測試仍可燃爆，顯示若以未氧化的新粉塵爆燃的熱與擾動點燃散積作業場所已部分氧化的舊粉塵，肇生第二次爆炸之可能性極大，而研磨作業產生點火源的可能性無法完全避免，可能來自靜電火花、研磨火花，因此若能隨時清除積存的粉塵，令縱使局部產生爆燃亦不致產生比較嚴重的二次爆燃應該是值得推薦的防暴措施。

應以教育訓練教育勞工，如若研磨產生火花，切莫驚慌奔走，擾動沈積粉塵層，產生足夠爆燃的粉塵飛揚造成二次爆炸釀成巨災。

不同尺寸、不同濃度的鎳粉體以不同輸送速率在絕緣與非絕緣導管中輸送之靜電累積情況看來，能導電的非絕緣輸送管確能有效降低靜電累積，因此輸送管的導電與系統地接地應加以落實。

致謝

本研究計畫參與人員除本所吳研究員鴻鈞、吳助理研究員俊逸外，另包括仁德醫護管理專科學校吳家為助理教授、黃柏翔副教授與胡冠華教授謹此敬表謝忱。

參考文獻

- [1] 某輕合金加工廠四起鋁鎂粉塵爆炸事故，2014/1/19，
<http://www.safety.com.cn/anlifx/fileview.asp%3>
- [2] IT時報記者 王昕，富士康廠房爆炸背後的粉塵之災 呈現多發態勢,華夏經緯網,
2011-06-01 13:24:16
- [3] 彭崇恩：粉體傳送管路帶電特性之實驗研究。國立高雄第一科技大學,環境與安全
衛生工程系碩士論文;2010。
- [4] Ch. Cesana, R. Siwek; Operating Instructions 20-l-Apparatus 6.0
- [5] ASTM E2019-03， Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust
Cloud in Air，2007。
- [6] Paul R. Amyotte, Rolf K. Eckhoff， Dust explosion causation, prevention and mitigation-An
overview， Journal of Chemical Health & Safety, January/February 2010。
- [7] 國立臺灣師範大學化學系, 2014,
<http://www.chem.ntnu.edu.tw/~chem/oldWWW/antiFire/04.htm>.
- [8] 2005年10月4日 - Dust Explosions. www.reade.com/Safety/dust.html
- [9] Wu, Hong-Chung, Ri-Cheng Chang, and Hsiao-Chi Hsiao, 2009; "Research of minimum ignition
energy for nano titanium powder and nano iron powders", Journal of Loss prevention in the
process industries.
- [10] Wu, Hong-Chung, Yung-Chih Kou, Yuan-heng Wang, Chia-Wei Wu, and
Hsiao-Chi Hsiao, 2010; "Study on safer air transporting velocity of nanograde
aluminum ion and titanium", Journal of Loss prevention in the process industries,
Vol. 23:308-311.
- [11] Wu, Hong-Chung, Hsin-Jung Ou, Hsiao-Chi Hsiao, and Tung-sheng Shin,
2010; "Explosion characteristics of aluminum Nanopowder", Aerosol and air
Quality Research, Vol. 10:38-42.
- [7] 鐘英鵬：鎂粉爆炸特性實驗研究及其危險性評價。東北大學;2008。
- [8] 張小濤：20L球形爆炸容器中美鋁合金粉爆炸特性的實驗研究。中北大學;2012。
- [9] 陳玲：鋁粉爆炸特性實驗研究和數值模擬。大連理工大學;2011。
- [10] Kwok, Q. S. M., Fouchard, R. C., Turcotte, A. M., Lightfoot, P. D., Bowes, R.,
Jones, D. E., G., 2002; "Characterization of Aluminum Nanopowder

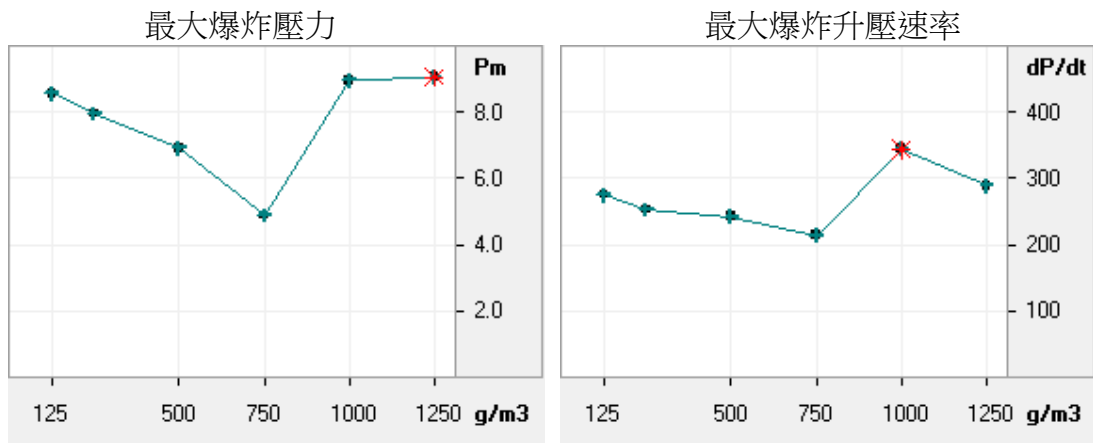
- Compositions”, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 27: 229-240.
- [11] Jones, D. E. G., Turcotte, R., Fouchard, R. C., Kwok, Q. S. M., Turcotte, A. M., Abdel-Qader, Z., 2003; “Hazard Characterization of Aluminum Nanopowder Compositions”, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 28: 120-131.
- [12] Jones, D. E. G., P.Brousseau, R. C. Fouchard, A. M. Turcotte, and Q. S. Kwork, 2006;”Thermal characterization oof passivated nanometer size aluminum powders”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimeter*, Vol. 61: 805-818.
- [13] Chang, Chih-Wei, Jo-Ming Tseng, Jao-Jia Horng, Chi-Min Shu, 2008;”Thermal Decomposition of carbon nanotube/Al₂O₃ powders by DSC testing”, *Composites Science and Technology*, Vol. 68:2954-2959.
- [14] Huang Ying, G. A. Risha, Vigor Yang, and R. A. Yetter, 2009;” Effect on particle size on combustion of aluminum particle dust in air”, *Combustion and flame*, Vol.156:5-13.
- [15] Bouillard, J., A. vugners, O. Dufaud, P. Laurent and T. Dominnque, 2009;”Safety aspects of Reactive Nano powders”, *AIChE Annual Meeting*, p. 8-13.
- [16] Boulard, J. A. vingers, O. Dufand, L. Perrin, D. Thomas, 2010;” Ignition and explosion risks of Nanopowder”, *Journal of Loss prevention in the process industries* ,Vol. 181:8730880.
- [17] Dufeud, O.,M. Traore, L. perrin. S. Chezelet, D. Thomaast, 2010;” experimental investigation and modeling of aluminum dusts explosions in the 2oL sphere”, *Journal of Loss prevention in the process industries*, Vol. 23;226-236.
- [18] Liu, L., Li, F., Tan, L., Ming, L., Yi, Y., 2004; “Effects of Nanometer Ni, Cu, Al and NiCu Powders on the Thermal Decomposition of Ammonium Per chlorate”, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 29: 34-38.
- [19] Marmo, L., Cavallero, D., Debernardi, M. L., 2004; “Aluminum Dust Explosion Risk Analysis in Metal Working”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 17: 449-465.
- [20] Luca, L. T. De., Galfetti, L., Severini, F., Meda, L., Marra, G., Vorozhtsov, A. B., Sedoi, V. S., Babuk, V. A., 2005; “Burning of Nano-Aluminum Composite Rocket Propellants”, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 41: 680-692.
- [21] Soundararajan, R., Amyotte, P. R., Pegg, M. J., 1996; “Explosivity Hazard of Iron Sulphide Dusts as a Function of Particle Size”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 51: 225-239.
- [22] Sun, J. H., Dobashi, R., Hirano, T., 2001; “Temperature Profile Across the Combustion Zone Propagating Through an Iron Particle Cloud”, *Journal of Loss*

- Prevention in the Process Industries, Vol. 14: 463-467.
- [23] Pegg, M. J., Amyotte, P. R., Lightfoot, P. D., Lee, M. C., 1997; "Dust Explosive Characteristics of Azide-Based Gas Generants", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 10: 101-111.
- [24] Going, J. E., Chatrathi, K., Cashdollar, K. L., 2000; "Flammability Limit Measurements for Dusts in 20-L and 1-m³ Vessels", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 13: 209-219.
- [25] Britton, L. G., Frurip, D. J., 2003; "Further Uses of the Heat of Oxidation in Chemical Hazard Assessment", *Process Safety Progress*, Vol. 22: 1-19.
- [26] Lunn, G. A., Holbrow, P., Andrews, S., Gummer, J., 1996; "Dust Explosions in Totally Enclosed Interconnected Vessel Systems", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 9: 45-58.
- [27] Pedrow, P. D., Goyal, K. O., Mahalingam, R., Osman, A., 1997; "Explosion Model Applied to an Intense Pulsed Plasma Source for Thin Film Deposition", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 25: 89-96.
- [28] Zyskowski, A., Sochet, I., Mavrot, G., Bailly P., Renard, J., 2004; "Study of the Explosion Process in a Small Scale Experiment—Structural Loading", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 17: 291-299.
- [29] Nifuku, M., Tsujita, H., Fujino, K., Takaichi, K., Barre, C., Paya, E., Hatori, M., Fujiwara, S., Horiguchi, S., Sochet, I., 2006; "Ignitability Assessment of Shredder Dusts of Refrigerator and Prevention of the Dust Explosion", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 19: 181-186.
- [30] Dahoe, A. E., Zevenbergen, J. F., Lemkowitz, S. M., Scarlett, B., 1996; "Dust Explosions in Spherical Vessels: The Role of Flame Thickness in the Validity of the 'Cube-Root Law'", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 9: 33-44.
- [31] Cashdollar, K. L., 2000; "Overview of Dust Explosivity Characteristics", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 13: 183-199.
- [32] Bulck, E. V., 2005; "Closed Algebraic Expressions for the Adiabatic Limit Value of the Explosion Constant in Closed Volume Combustion", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 18: 35-42.

附錄一 鎳粉體之最大爆炸壓力測試結果

Ni 35nm

| Test | 濃度 (g/m ³) | 最大爆炸 壓力 (bar) | 最大爆炸 升壓速率 (bar/s) | t1(ms) | tv(ms) | 點火能量 IE |
|------|---------------------------|---------------------|-------------------------|--------|--------|------------|
| 1 | 125 | 8.6 | 275 | 116 | 77 | 5kJ |
| 2 | 250 | 8 | 253 | 124 | 72 | 5kJ |
| 3 | 500 | 6.9 | 243 | 111 | 77 | 5kJ |
| 4 | 750 | 4.9 | 214 | 122 | 75 | 5kJ |
| 5 | 1000 | 9 | 345 | 113 | 78 | 5kJ |
| 6 | 1250 | 9.1 | 289 | 146 | 78 | 5kJ |



粉塵爆炸等級

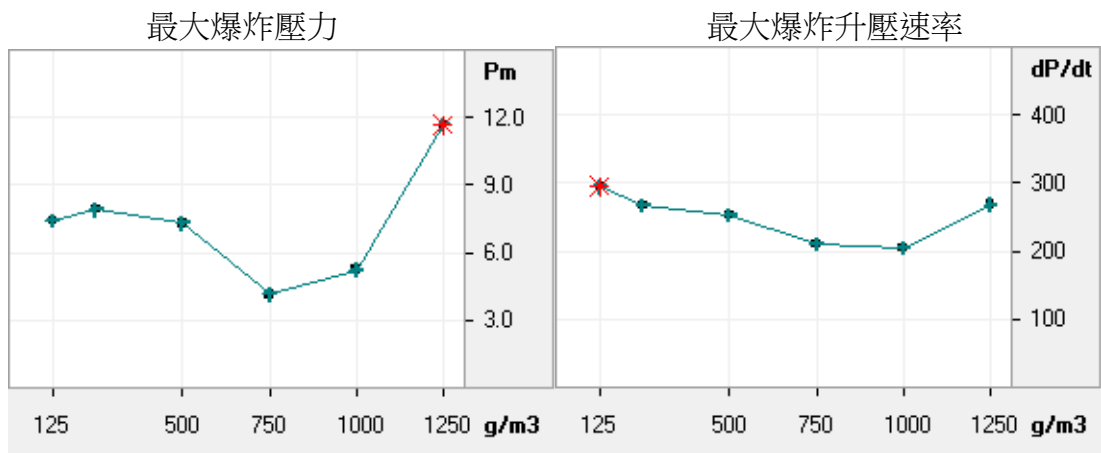
| 等級 | Kst | 爆炸特性 |
|----|-----------------|-------|
| 0 | Kst=0 | 無爆炸 |
| 1 | 0 < Kst ≤ 200 | 弱至中爆炸 |
| 2 | 200 < Kst ≤ 300 | 強度爆炸 |
| 3 | 300 < Kst | 嚴重爆炸 |

$$\begin{aligned}
 Kst &= (dP/dt)_{\max} * V^{1/3} \\
 &= 345 * 0.02^{1/3} \\
 &= 67
 \end{aligned}$$

所以 35nm 鎳粉屬於等級一，弱至中爆炸

Ni 75nm

| Test | 濃度 (g/m ³) | 最大爆炸 壓力 (bar) | 最大爆炸 升壓速率 (bar/s) | t1(ms) | tv(ms) | 點火能量 IE |
|------|---------------------------|---------------------|-------------------------|--------|--------|------------|
| 1 | 125 | 7.4 | 295 | 98 | 76 | 5kJ |
| 2 | 250 | 7.9 | 267 | 121 | 78 | 5kJ |
| 3 | 500 | 7.3 | 253 | 137 | 79 | 5kJ |
| 4 | 750 | 4.2 | 210 | 144 | 75 | 5kJ |
| 5 | 1000 | 5.2 | 205 | 135 | 79 | 5kJ |
| 6 | 1250 | 11.7 | 268 | 126 | 76 | 5kJ |



粉塵爆炸等級

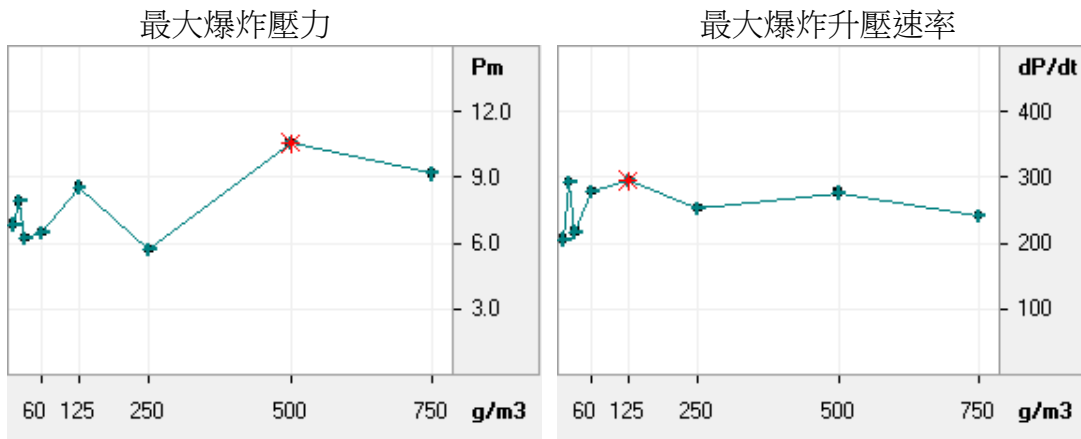
| 等級 | Kst | 爆炸特性 |
|----|-----------------|-------|
| 0 | Kst=0 | 無爆炸 |
| 1 | 0 < Kst ≤ 200 | 弱至中爆炸 |
| 2 | 200 < Kst ≤ 300 | 強度爆炸 |
| 3 | 300 < Kst | 嚴重爆炸 |

$$\begin{aligned}
 Kst &= (dP/dt)_{\max} * V^{1/3} \\
 &= 295 * 0.02^{1/3} \\
 &= 80
 \end{aligned}$$

所以 75nm 鎳粉屬於等級一，弱至中爆炸

Ni 100nm

| Test | 濃度 (g/m ³) | 最大爆炸 壓力 (bar) | 最大爆炸 升壓速率 (bar/s) | t1(ms) | tv(ms) | 點火能量 IE |
|------|---------------------------|---------------------|-------------------------|--------|--------|------------|
| 1 | 10 | 6.9 | 206 | 138 | 76 | 5kJ |
| 2 | 20 | 7.9 | 293 | 89 | 78 | 5kJ |
| 3 | 30 | 6.2 | 217 | 95 | 78 | 5kJ |
| 4 | 60 | 6.5 | 278 | 104 | 76 | 5kJ |
| 5 | 125 | 8.6 | 296 | 128 | 68 | 5kJ |
| 6 | 250 | 5.7 | 253 | 137 | 77 | 5kJ |
| 7 | 500 | 10.6 | 277 | 427 | 75 | 5kJ |
| 8 | 750 | 9.2 | 242 | 141 | 76 | 5kJ |



粉塵爆炸等級

| 等級 | Kst | 爆炸特性 |
|----|-----------------|-------|
| 0 | Kst=0 | 無爆炸 |
| 1 | 0 < Kst ≤ 200 | 弱至中爆炸 |
| 2 | 200 < Kst ≤ 300 | 強度爆炸 |
| 3 | 300 < Kst | 嚴重爆炸 |

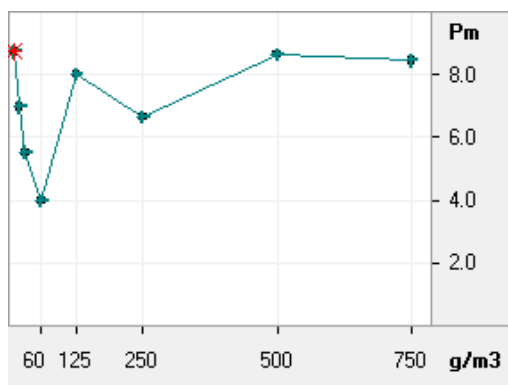
$$\begin{aligned}
 Kst &= (dP/dt)_{\max} * V^{1/3} \\
 &= 296 * 0.02^{1/3} \\
 &= 80
 \end{aligned}$$

所以 100nm 鎳粉屬於等級一，弱至中爆炸

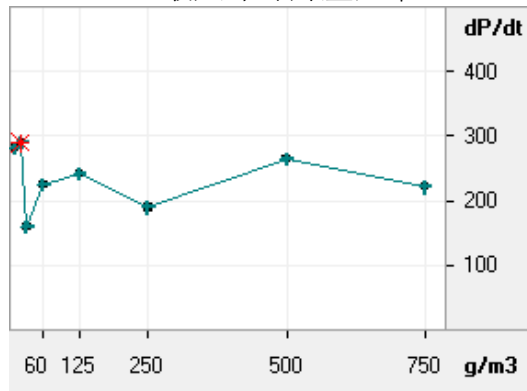
Ni 10 μm

| Test | 濃度 (g/m ³) | 最大爆炸壓力 (bar) | 最大爆炸升壓速率 (bar/s) | t1(ms) | tv(ms) | 點火能量 IE |
|------|------------------------|--------------|------------------|--------|--------|---------|
| 1 | 10 | 8.7 | 281 | 125 | 69 | 5kJ |
| 2 | 20 | 7 | 290 | 159 | 71 | 5kJ |
| 3 | 30 | 5.5 | 159 | 140 | 71 | 5kJ |
| 4 | 60 | 4 | 225 | 135 | 72 | 5kJ |
| 5 | 125 | 8 | 242 | 133 | 71 | 5kJ |
| 6 | 250 | 6.7 | 189 | 139 | 72 | 5kJ |
| 7 | 500 | 8.7 | 264 | 133 | 70 | 5kJ |
| 8 | 750 | 8.5 | 221 | 156 | 73 | 5kJ |

最大爆炸壓力



最大爆炸升壓速率



粉塵爆炸等級

| 等級 | Kst | 爆炸特性 |
|----|-----------------|-------|
| 0 | Kst=0 | 無爆炸 |
| 1 | 0 < Kst ≤ 200 | 弱至中爆炸 |
| 2 | 200 < Kst ≤ 300 | 強度爆炸 |
| 3 | 300 < Kst | 嚴重爆炸 |

$$\begin{aligned}
 Kst &= (dP/dt)_{\max} * V^{1/3} \\
 &= 290 * 0.02^{1/3} \\
 &= 79
 \end{aligned}$$

所以 10 μm 鎳粉屬於等級一，弱至中爆炸

附錄二 靜電累積與流速關係分析結果

不同粒徑、濃度之鎳粉塵在不同流速與不同輸送管材下靜電累積之量測值

| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
|---------|-------|-----|------------|---------|-----------|-----------------------------|
| 10 | 0.05 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.01 | -0.8 | 4 |
| 10 | 0.05 | PVC | 10 μ m | 0.08 | 0.8 | 32 |
| 20 | 0.05 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.27 | -9.4 | 1269 |
| 20 | 0.05 | PVC | 10 μ m | 0.28 | 7.6 | 1064 |
| 25 | 0.05 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.21 | -10.2 | 1071 |
| 25 | 0.05 | PVC | 10 μ m | -0.14 | -4.3 | 301 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.1 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.02 | 0.3 | 3 |
| 10 | 0.1 | PVC | 10 μ m | 0.04 | 1.3 | 26 |
| 20 | 0.1 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.01 | 3.9 | 20 |
| 20 | 0.1 | PVC | 10 μ m | 0.26 | 2.5 | 325 |
| 30 | 0.1 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.1 | 24.5 | 1225 |
| 30 | 0.1 | PVC | 10 μ m | 0.21 | 13.9 | 1460 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.15 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.02 | -0.6 | 6 |
| 10 | 0.15 | PVC | 10 μ m | 0.01 | 1.7 | 9 |
| 20 | 0.15 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.04 | -4.1 | 82 |
| 20 | 0.15 | PVC | 10 μ m | 0.31 | -0.6 | 93 |
| 30 | 0.15 | 不鏽鋼 | 10 μ m | 0.26 | -29.3 | 3809 |
| 30 | 0.15 | PVC | 10 μ m | 0.8 | 17 | 6800 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.05 | 不鏽鋼 | 2 μ m | 0.02 | -0.4 | 4 |
| 20 | 0.05 | 不鏽鋼 | 2 μ m | 0.05 | -2.1 | 53 |
| 20 | 0.05 | PVC | 2 μ m | 0.06 | -0.6 | 18 |
| 30 | 0.05 | 不鏽鋼 | 2 μ m | 0.02 | -5.3 | 53 |
| 30 | 0.05 | PVC | 2 μ m | 0.32 | -5 | 800 |

| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
|---------|-------|-----|-----------|---------|-----------|-----------------------------|
| 10 | 0.1 | 不鏽鋼 | 2 μ m | -0.02 | 0 | 0 |
| 10 | 0.1 | PVC | 2 μ m | 0.27 | 8.1 | 1094 |
| 20 | 0.1 | 不鏽鋼 | 2 μ m | 0.04 | -1.7 | 34 |
| 20 | 0.1 | PVC | 2 μ m | 0.07 | 1.7 | 60 |
| 30 | 0.1 | 不鏽鋼 | 2 μ m | 0.09 | -5.6 | 252 |
| 30 | 0.1 | PVC | 2 μ m | 0.35 | 7.7 | 1348 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.15 | 不鏽鋼 | 2 μ m | 0.02 | -0.04 | 0 |
| 10 | 0.15 | PVC | 2 μ m | 0.11 | 4.7 | 259 |
| 20 | 0.15 | 不鏽鋼 | 2 μ m | 0.14 | -9.5 | 665 |
| 20 | 0.15 | PVC | 2 μ m | 0.51 | -2.1 | 536 |
| 30 | 0.15 | 不鏽鋼 | 2 μ m | 0.18 | -9.8 | 882 |
| 30 | 0.15 | PVC | 2 μ m | 0.32 | 3.2 | 512 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.05 | 不鏽鋼 | 100nm | 0.05 | 0.6 | 15 |
| 10 | 0.05 | PVC | 100nm | 0.1 | 0.5 | 25 |
| 20 | 0.05 | 不鏽鋼 | 100nm | 0.09 | -6.1 | 275 |
| 20 | 0.05 | PVC | 100nm | 0.33 | 1.8 | 297 |
| 30 | 0.05 | 不鏽鋼 | 100nm | 0.46 | -12.4 | 2852 |
| 30 | 0.05 | PVC | 100nm | 0.52 | 34.5 | 8970 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.1 | 不鏽鋼 | 100nm | -0.02 | 0.1 | 1 |
| 10 | 0.1 | PVC | 100nm | 0.12 | 4.6 | 276 |
| 20 | 0.1 | 不鏽鋼 | 100nm | -0.04 | 1.3 | 26 |
| 20 | 0.1 | PVC | 100nm | 0.04 | 17.2 | 344 |
| 30 | 0.1 | 不鏽鋼 | 100nm | 0.09 | -2.1 | 95 |
| 30 | 0.1 | PVC | 100nm | 0.48 | 93.4 | 22416 |

| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
|---------|-------|-----|-------|---------|-----------|-----------------------------|
| 10 | 0.15 | 不鏽鋼 | 100nm | 0.54 | 2.7 | 729 |
| 10 | 0.15 | PVC | 100nm | 0.74 | 54.8 | 20276 |
| 20 | 0.15 | 不鏽鋼 | 100nm | 0.26 | -3.1 | 403 |
| 20 | 0.15 | PVC | 100nm | 1.03 | 94.9 | 48874 |
| 30 | 0.15 | 不鏽鋼 | 100nm | 0.12 | -2.8 | 168 |
| 30 | 0.15 | PVC | 100nm | 0.42 | 120.9 | 25389 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.05 | 不鏽鋼 | 75nm | -0.01 | -2 | 10 |
| 10 | | PVC | 75nm | -0.05 | 1 | 25 |
| 20 | | 不鏽鋼 | 75nm | -0.05 | -2.9 | 73 |
| 20 | | PVC | 75nm | 0.17 | 4.4 | 374 |
| 30 | | 不鏽鋼 | 75nm | 0.16 | -10.7 | 856 |
| 30 | | PVC | 75nm | 0.35 | 10.1 | 1768 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.1 | 不鏽鋼 | 75nm | -0.02 | -0.5 | 5 |
| 10 | | PVC | 75nm | -0.04 | 1.6 | 32 |
| 20 | | 不鏽鋼 | 75nm | -0.01 | -2 | 10 |
| 20 | | PVC | 75nm | 0.17 | 17.9 | 1522 |
| 30 | | 不鏽鋼 | 75nm | 0.1 | -1.4 | 70 |
| 30 | | PVC | 75nm | 0.23 | 23.6 | 2714 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.15 | 不鏽鋼 | 75nm | -0.02 | -0.5 | 5 |
| 10 | | PVC | 75nm | 0.15 | 43.5 | 3263 |
| 20 | | 不鏽鋼 | 75nm | 0.08 | -1 | 40 |
| 20 | | PVC | 75nm | 0.45 | 39.7 | 8933 |
| 30 | | 不鏽鋼 | 75nm | 0.12 | -4.1 | 246 |
| 30 | | PVC | 75nm | 0.77 | 88.6 | 34111 |

| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
|---------|-------|-----|------|---------|-----------|-----------------------------|
| 10 | 0.05 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.05 | -2.1 | 53 |
| 10 | 0.05 | PVC | 35nm | 0.05 | -0.3 | 8 |
| 20 | 0.05 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.04 | -8.4 | 168 |
| 20 | 0.05 | PVC | 35nm | 0.23 | 16.7 | 1921 |
| 30 | 0.05 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.3 | -20.5 | 3075 |
| 30 | 0.05 | PVC | 35nm | 0.5 | 24.1 | 6025 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.1 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.01 | -2.2 | 11 |
| 10 | 0.1 | PVC | 35nm | 0.56 | 18.5 | 5180 |
| 20 | 0.1 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.09 | -3.3 | 149 |
| 20 | 0.1 | PVC | 35nm | 0.43 | 39.5 | 8493 |
| 30 | 0.1 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.12 | -10.3 | 618 |
| 30 | 0.1 | PVC | 35nm | 0.37 | 552 | 102120 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 粒徑 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.15 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.1 | -2.5 | 125 |
| 10 | 0.15 | PVC | 35nm | 0.34 | 32.9 | 5593 |
| 20 | 0.15 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.11 | -4.4 | 242 |
| 20 | 0.15 | PVC | 35nm | 0.45 | 50.2 | 11295 |
| 30 | 0.15 | 不鏽鋼 | 35nm | 0.14 | -18.3 | 1281 |
| 30 | 0.15 | PVC | 35nm | 1.01 | 65.3 | 32977 |

不同濃度鋁鎂合金粉塵在不同流速與不同輸送管材下靜電累積之量測值

| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
|---------|-------|-----|---------|-----------|-----------------------------|
| 10 | 0.05 | 不鏽鋼 | 0.01 | -2.4 | 12 |
| 10 | 0.05 | PVC | 0.28 | 2.8 | 392 |
| 20 | 0.05 | 不鏽鋼 | 0.02 | -12.1 | 121 |
| 20 | 0.05 | PVC | -0.05 | 4.8 | 120 |
| 30 | 0.05 | 不鏽鋼 | 0.05 | -9.1 | 228 |
| 30 | 0.05 | PVC | -0.17 | 8.3 | 706 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.1 | 不鏽鋼 | 0.08 | -2 | 80 |
| 10 | 0.1 | PVC | 0.35 | 9.6 | 1680 |
| 20 | 0.1 | 不鏽鋼 | 0.05 | -16.4 | 410 |
| 20 | 0.1 | PVC | 0.33 | 14.3 | 2360 |
| 30 | 0.1 | 不鏽鋼 | 0.06 | -9.5 | 285 |
| 30 | 0.1 | PVC | 0.11 | 17.1 | 941 |
| 流速(m/s) | 克數(g) | 管材 | 電位差(kV) | 庫倫(200nC) | 能量(J), $E=\frac{1}{2}(Q*V)$ |
| 10 | 0.15 | 不鏽鋼 | 0.06 | -4.1 | 123 |
| 10 | 0.15 | PVC | 0.84 | 15.7 | 6594 |
| 20 | 0.15 | 不鏽鋼 | 0.1 | 12.7 | 635 |
| 20 | 0.15 | PVC | 0.47 | 32.2 | 7567 |
| 30 | 0.15 | 不鏽鋼 | 0.1 | -20.3 | 1015 |
| 30 | 0.15 | PVC | 0.21 | 39.3 | 4127 |

國家圖書館出版品預行編目資料

高速空氣衝擊鋁鎂合金粉塵爆炸預防研究 / 吳鴻鈞, 吳家維著. -- 1版. -- 新北市 : 勞動部勞研所, 民 103.03

面 ; 公分

ISBN 978-986-04-0997-0(平裝)

1. 工業安全

555.56

103006858

高速空氣衝擊鋁鎂合金粉塵爆炸預防研究

著(編、譯)者: 吳鴻鈞、吳家維

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 中區 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: 1010300755

ISBN: 978-986-04-0997-0