

第四章 結果與討論

4.1 衝擊器內壁損失的探討

微粒的內壁損失是評估衝擊器採樣效率好壞的依據，當微粒損失過大，代表微粒可能發生了彈跳或是再揚起的現象，因此會嚴重扭曲真實環境中微粒的濃度及粒徑分布。所以，測試衝擊器內壁損失的大小對於後續即時微粒的收集效率實驗，十分重要。

本研究利用不同粒徑微粒分別為 8 μm 、6.9 μm 、6.3 μm 、4.9 μm 之油酸液滴，對噴嘴大小為 2.6 mm，流量為 3 LPM 下進行不同孔隙直徑多孔金屬片的微粒收集效率及內壁損失的測試實驗。實驗結果如圖 4.2-9~圖 4.2-10 所示。結果顯示對於孔隙直徑 100 μm 多孔金屬片收集板而言，微粒收集效率分別為 96.23 %、97.7 %、97.96 %、94.99 %，微粒損失率為 1.33 %、1.12 %、1.24 %、0.87 %。對於孔隙直徑 40 μm 的多孔金屬片收集板而言，微粒收集效率分別為 96.02 %、96.21 %、98.13 %、92.97 %，微粒損失率為 2.52 %、1.49 %、0.93 %、1.45 %。對於孔隙直徑 20 μm 的多孔金屬片收集板而言，微粒收集效率分別為 95.07 %、95.68 %、97.92 %、91.76 %，微粒損失率為 2.58 %、1 %、0.89 %、0.53 %。對於孔隙直徑 5 μm 的多孔金屬片收集板而言，微粒收集效率分別為 95.94 %、92.95 %、96.59 %、92.46 %，微粒損失率為 1.65 %、1.86 %、1.25 %、0.86 %。對於鋁箔而言，微粒收集效率分別為 95.05 %、93.59 %、96.43 %、89.55 %，微粒損失率為 3.47 %、0.95 %、0.87 %、0.61 %。亦即本研究結果顯示，對於不同孔隙直徑多孔金屬片及鋁箔收集板而言，微粒的損失率皆在 4 % 以下。

再來，利用不同粒徑微粒分別為 7.9 μm 、6.7 μm 、6 μm 、4.9 μm 之油酸液滴，對噴嘴大小為 3.6 mm，流量為 2.5 LPM 下進行不同孔隙直徑多孔金屬片的微粒收集效率及內壁損失的測試實驗。實驗結果如圖 4.2-13

~圖 4.2-14 所示。結果顯示對於孔隙直徑 100 μm 多孔金屬片收集板而言，微粒收集效率分別為 94.2 %、96.44 %、84.97 %、29.01 %，微粒損失率為 3.25 %、1.41 %、1.6 %、1.23 %。對於孔隙直徑 40 μm 的多孔金屬片收集板而言，微粒收集效率分別為 93.15 %、94.11 %、83.86 %、11.44 %，微粒損失率為 3.9 %、1.56 %、1.7 %、1.2 %。對於孔隙直徑 20 μm 的多孔金屬片收集板而言，微粒收集效率分別為 93.21 %、95.89 %、78.18 %、8.67 %，微粒損失率為 2.27 %、1.79 %、1.26 %、1.82 %。對於孔隙直徑 5 μm 的多孔金屬片收集板而言，微粒收集效率分別為 93.88 %、94.36 %、75.51 %、5.61 %，微粒損失率為 2.6 %、2.13 %、2 %、1.71 %。對於鋁箔而言，微粒收集效率分別為 95.15 %、93.26 %、88.3 %、8.64 %，微粒損失率為 2.05 %、3.94 %、0.74 %、0.75 %。亦即本研究結果顯示，對於不同孔隙直徑多孔金屬片及鋁箔收集板而言，微粒的損失率皆在 4 % 以下。

由以上結果可知，測試微粒粒徑越大，衝擊器內壁損失率稍微升高，在噴嘴為 2.6 mm 及 3.6 mm 下並選擇採樣流量分別為 3 LPM 及 2.5 LPM 進行實驗，衝擊器的內壁損失率皆在 4% 以下。因此，本研究可以利用超音波霧化器系統對衝擊器做接下來的即時微粒收集效率測試。

4.2 液體微粒的收集效率特徵

超音波霧化器系統用來測定衝擊器上下游的濃度差，可以即時知道微粒的收集效率，對於微粒濃度與粒徑分佈的判讀，本研究使用氣動直徑偵測儀為之。然而，每一台氣動直徑偵測儀因為儀器加工的過程產生噴嘴尺寸、雷射管位置、兩道重疊雷射光的距離等的不同所致，所以每台氣動直徑偵測儀在使用之前皆需要校正一次。本研究於實驗室利用標準粒徑微粒 (PSL) 進行微粒粒徑的實驗室校正工作，校正結果如圖 4.2-1 所示，根據此一結果可修正氣動直徑的偵測值以確保實驗結果的準確度。另外，超音波霧化器系統的微粒濃度穩定度測試則如圖 4.2-2 所示，每六分鐘以氣動直徑偵測儀對壓克力腔體

內的微粒濃度採樣一次，連續測試 48 分鐘，腔體內微粒平均濃度比值的跳動範圍皆在正負 5% 以內，顯示本實驗系統產生的微粒濃度在長時間的測試下能有良好的穩定度。本研究對於液體微粒的收集效率圖形利用公式 4.2-1 作實驗數據的曲線擬合(fit)， R^2 值越高，對於實驗數據的擬合程度越好，越能代表收集效率曲線的趨勢。

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-B)/C}} + A_2 \quad (4.2-1)$$

其中 A_1 、 A_2 、 B 、 C 為無因次的迴歸參數。

本研究的目的是探討多孔金屬片和傳統平板鋁箔作為衝擊器的收集板時的收集效率曲線和截取氣動直徑之異同，在微粒收集效率曲線上的差異，使用以下參數來說明 (圖 4.2-3)。

1. 不同收集板截取氣動直徑的差異：
$$\frac{\sqrt{St_{50}^P} - \sqrt{St_{50}^A}}{\sqrt{St_{50}^A}} \quad (4.2-2)$$

2. 不同收集板收集效率曲線陡峭度的差異：
$$\frac{S_P - S_A}{S_A} \quad (4.2-3)$$

(P 指的是多孔金屬片， A 指的是鋁箔。陡峭度 $S = \sqrt{St_{84.1}} / \sqrt{St_{15.9}}$ ，其中 $St_{84.1}$ 為收集板在收集效率為 84.1% 時所對應的 St 值， $St_{15.9}$ 為收集板在收集效率為 84.1% 時所對應的 St 值)

圖 4.2-4~圖 4.2-11 說明多孔金屬片(孔隙直徑 100 μm 、40 μm 、20 μm 及 5 μm)和鋁箔之液體微粒收集效率曲線圖，噴嘴大小為 2.6 mm，流量為 1.5 ~3 LPM。在流量為 1.5 LPM 下 ($Re=782$)，不同收集板的實驗數據用公式(4.2-1)所擬合出的收集效率曲線 R^2 皆在 0.997 以上。多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.446，40 μm 為 0.472，20 μm 為 0.492，5 μm

為 0.496，鋁箔為 0.486，不同孔隙直徑金屬片的 $\sqrt{St_{50}}$ 和鋁箔的差異性分別為-8 %、-3 %、1 %、2 %。同樣採樣條件下，多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的微粒收集效率曲線陡峭度 (S) 為 1.221，40 μm 為 1.122，20 μm 為 1.075，5 μm 為 1.06，鋁箔為 1.066，不同孔隙直徑金屬片的微粒收集效率曲線陡峭度和鋁箔的差異性分別為 15%、5%、1%、-1%。

流量為 2 LPM 下 ($Re=1042$)，不同收集板的實驗數據用公式(4.2-1) 所擬合出的收集效率曲線 R^2 皆在 0.998 以上。多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.416，40 μm 為 0.48，20 μm 為 0.494，5 μm 為 0.503，鋁箔為 0.506，不同孔隙直徑金屬片的 $\sqrt{St_{50}}$ 和鋁箔的差異性分別為-18%、-5%、-2%、-1%。同樣採樣條件下，多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的微粒收集效率曲線陡峭度為 1.262，40 μm 為 1.105，20 μm 為 1.077，5 μm 為 1.067，鋁箔為 1.064，不同孔隙直徑金屬片的微粒收集效率曲線陡峭度和鋁箔的差異性分別為 19%、4%、1%、0%。

流量為 2.5 LPM 下 ($Re=1303$)，不同收集板的實驗數據用公式(4.2-1) 所擬合出的收集效率曲線 R^2 皆在 0.998 以上。多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.415，40 μm 為 0.484，20 μm 為 0.494，5 μm 為 0.517，鋁箔為 0.518，不同孔隙直徑金屬片的 $\sqrt{St_{50}}$ 和鋁箔的差異性分別為-20%、-7%、-5%、0 %。同樣採樣條件下，多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的微粒收集效率曲線陡峭度為 1.26，40 μm 為 1.122，20 μm 為 1.092，5 μm 為 1.069，鋁箔為 1.075，不同孔隙直徑金屬片的微粒收集效率曲線陡峭度和鋁箔的差異性分別為 17%、4%、2%、-1%。

流量為 3 LPM 下 ($Re=1563$)，不同收集板的實驗數據用公式(4.2-1) 所擬合出的收集效率曲線 R^2 皆在 0.997 以上。多孔金屬片孔隙直徑 100 μm

的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.387，40 μm 為 0.468，20 μm 為 0.493、5 μm 為 0.506，鋁箔為 0.515，不同孔隙直徑金屬片的 $\sqrt{St_{50}}$ 和鋁箔的差異性分別為-25%、-9%、-4%、-2%。同樣採樣條件下，多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的微粒收集效率曲線陡峭度為 1.328，40 μm 為 1.161，20 μm 為 1.112、5 μm 為 1.083，鋁箔為 1.09，不同孔隙直徑金屬片的微粒收集效率曲線陡峭度和鋁箔的差異性分別為 22%、7%、2%、-1%。

圖 4.2-12~圖 4.2-15 說明多孔金屬片(孔隙直徑 100 μm 、40 μm 、20 μm 及 5 μm)和鋁箔之液體微粒收集效率曲線圖，噴嘴大小為 3.6 mm，流量為 2 ~2.5 LPM。在流量為 2 LPM 下 ($Re=753$)，不同收集板的實驗數據用公式(4.2-1)所擬合出的收集效率曲線 R^2 皆在 0.998 以上。多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.408，40 μm 為 0.45，20 μm 為 0.454，5 μm 為 0.466，鋁箔為 0.446，不同孔隙直徑金屬片的 $\sqrt{St_{50}}$ 和鋁箔的差異性分別為-9%、1%、2%、4%。同樣採樣條件下，多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的微粒收集效率曲線陡峭度為 1.209，40 μm 為 1.107，20 μm 為 1.081，5 μm 為 1.064，鋁箔為 1.081，不同孔隙直徑金屬片的微粒收集效率曲線陡峭度和鋁箔的差異性分別為 12%、2%、0%、-2%。

流量為 2.5 LPM 下 ($Re=940$)，不同收集板的實驗數據用公式(4.2-1)所擬合出的收集效率曲線 R^2 皆在 0.998 以上。多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.407，40 μm 為 0.452，20 μm 為 0.461，5 μm 為 0.467，鋁箔為 0.463，不同孔隙直徑金屬片的 $\sqrt{St_{50}}$ 和鋁箔的差異性分別為-12%、-2%、0%、1%。同樣採樣條件下，多孔金屬片孔隙直徑 100 μm 的微粒收集效率曲線陡峭度為 1.215，40 μm 為 1.102，20 μm 為 1.085，5 μm 為 1.076，鋁箔為 1.07，不同孔隙直徑金屬片的微粒收集效率曲線陡峭度和鋁箔的差

異性分別為 14%、3%、1%、1%。

從表 4.2-1、表 4.2-2 中可以看出，當噴嘴雷諾數(Re)從 753 增為 1563，多孔金屬片 (孔隙直徑 100 μm 、40 μm 、20 μm 及 5 μm) 的 $\sqrt{St_{50}}$ 和鋁箔的差異性分別從-9%減為 -25%、1%減為-9%、2%減為-4%、4%減為-2%；多孔金屬片 (孔隙直徑 100 μm 、40 μm 、20 μm 及 5 μm) 的微粒收集效率曲線陡峭度和鋁箔的差異性分別從 12%增為 22%、2%增為 7%、0%增為 2%、-2%增為-1%。噴嘴雷諾數越大，有著越多的氣流會貫穿進入多孔金屬片內部，而孔隙直徑越大的多孔金屬片阻力係數越小，可以容納更多貫入的氣流，在小於截取氣動直徑的微粒收集效率較高。以多孔金屬片作為衝擊器的收集板時的收集效率曲線相較於鋁箔顯得較為平緩，截取氣動直徑亦較小。本研究對於多孔金屬片和鋁箔在收集效率曲線上的差異，另外使用 Huang et al. (2001)探討多孔金屬片孔隙結構所發展出的理想過剩收集效率參數，探討多孔金屬片與鋁箔在截取氣動直徑和收集效率曲線陡峭度的相對比值的差異(圖 4.2-16~圖 4.2-17)，兩者定義如下：

1. 截取氣動直徑的相對比值： $R_{\text{shift}} = \sqrt{St_{50}^P} / \sqrt{St_{50}^A}$ (4.2-4)

2. 收集效率曲線陡峭度的相對比值： $R_{\text{steep}} = S_P / S_A$ (4.2-5)

對於液體微粒的收集效率而言，孔隙直徑 100 μm 和 40 μm 的多孔金屬片其氣流貫穿和孔洞結構的過濾作用明顯，反應出收集效率曲線較鋁箔收集板平緩，截取氣動直徑亦較小。孔隙直徑 20 μm 和 5 μm 的多孔金屬片阻力係數很大，微粒收集效率曲線圖形和鋁箔相比，並沒有多大的差異。最後，本研究中的慣性衝擊器在不同噴嘴大小及不同採樣流量下，不管是以多孔金屬片或是鋁箔作為收集板時，對於液體微粒都能呈現出理想(S型)的收集效率曲線。

4.3 截取氣動直徑的預測理論

本研究探討不同孔隙直徑(pore size)的多孔金屬片作為慣性衝擊器的收集板時的微粒收集效率曲線，對於微粒收集效率的結果與圖形，有一些定義說明。Huang et al. (2001) 對於慣性衝擊器中使用多孔金屬片作為收集板時的微粒收集效率有著實驗數據與數值模擬的驗證，並發展出一無因次的參數，說明多孔金屬片特有的孔隙過濾及氣流貫穿作用所造成理想過剩收集效率的大小。在此，本研究引用 Huang et al. (2001) 中各個參數的定義。

多孔金屬片的阻力係數 K 如下：

$$K = \frac{\Delta p}{\mu t U} \quad (4.3-1)$$

上式中 Δp 為壓力降， μ 為氣體黏滯係數， t 為多孔金屬片的厚度， U 為多孔金屬片接觸面的面速度。本研究對不同孔隙直徑的多孔金屬片在不同流量下作壓力降的測量，結果如圖 4.3-1，計算出的 K 值則列於表 4.3-1 中。

另外，多孔金屬片的理想過剩收集效率 η_e (100%過濾收集)如下：

$$\eta_e = \alpha \phi, \quad \phi = \frac{\rho U_0}{2K\mu t} \left(\frac{D_c}{W} \right)^{0.9} \quad (4.3-2)$$

上式中 ϕ 為一無因次的參數， α 為一常數：1.39， ρ 為氣流密度， U_0 為噴嘴流速， D_c 為多孔金屬片直徑， W 為噴嘴直徑。

傳統慣性衝擊器理論可以準確的預測出截取氣動直徑大小(Marple, 1970)。但是，當以多孔金屬片作為衝擊器的收集板時則會發生高估的結果。Marjamaki and Keskinen(2003) 推導出一預測慣性衝擊器中使用多孔金

屬片為收集板時的截取氣動直徑理論，式子如下：

$$R_{\text{shift}} = \sqrt{St_{50}^P} / \sqrt{St_{50}^A} = \sqrt{1 - 2E\eta_e} \quad (4.3-3)$$

上式中 E 為流體貫穿進入多孔金屬片內部的過濾效率，假設為 100% 收集 (理想過濾)。從圖 4.3-2、圖 4.3-3 中可以發現，本研究的實驗數據與 Marjamaki and Keskinen(2003)發展出的理論線有著相同的趨勢。但是 Marjamaki and Keskinen(2003)假設多孔金屬片對於貫入的部份氣流是理想過濾收集 ($E=1$)，根據 Huang and Tsai(2003)對多孔金屬片收集效率的數值模擬，考慮的有微粒的擴散、慣性衝擊、截留和重力作用。結果顯示，微粒隨著氣流的貫穿進入多孔材質內部並不會完全的被收集 ($E < 1$)。本研究中不同孔隙直徑的多孔金屬片與鋁箔在截取氣動直徑的相對比值應該高於理論推估的結果。另外，我們將 Huang et al. (2001)，Huang and Tsai(2003)對多孔金屬片收集效率的數值模擬數據作漸近線擬合，發現本實驗數據有著良好的符合度。過去幾位學者在多孔金屬片收集效率上的研究與本實驗的結果有著相同的趨勢，當流體貫入多孔金屬片內部的量越多所造成截取氣動直徑的偏移越大，微粒收集效率曲線越平緩。但是如果準確預測出慣性衝擊器中以多孔金屬片為收集板的截取氣動直徑，必須考慮更多影響收集效率的因子，如：多孔金屬片的表面粗糙度(Marjamaki and Keskinen, 2003)。

4.4 固體微粒的收集效率特徵

4.4.1 收集板沒有塗敷黏著劑

圖 4.41-1~圖 4.41-6 說明多孔金屬片(孔隙直徑 100 μm 、40 μm 、20 μm 及 5 μm)和鋁箔之固體微粒收集效率曲線圖，噴嘴大小為 2.6 mm，採樣流量為 1.5 ~2.5 LPM。我們可以發現，對於孔隙直徑 100 μm 的多孔金屬片

而言，在小於截取氣動直徑的微粒收集效率上比鋁箔高，與測試液體微粒時有著相同的現象。孔隙直徑為 40 μm 、20 μm 、5 μm 的多孔金屬片與鋁箔在微粒的收集效率上則沒有多大的差別。大於截取氣動直徑的固體微粒在收集板上容易發生彈跳及再揚起的現象，造成收集效率的低落。本研究中觀察多孔金屬片在沒有塗敷黏著劑的情況下，擁有的孔洞結構對於固體微粒會不會有抑制彈跳的效果。在 \sqrt{St} 介於 0.6~1 之間，多孔金屬片(孔隙直徑為 100 μm 、40 μm 、20 μm 、5 μm)的微粒收集效率分別維持在 70%~85%、60%~70%、55%~60%、45%~55%，鋁箔則低於 45% 並呈現收集效率高低起伏的現象。從本研究的實驗結果看來，在收集板沒有塗敷矽油(Silicone oil)的情況下，微粒在多孔金屬片上仍會發生彈跳的現象，但是與鋁箔在大於截取氣動直徑的微粒收集效率相比，多孔金屬片確實有著改善固體微粒彈跳的優點，可歸因於孔洞結構有著比較大的吸附容量及微粒過濾收集的效果。然而，如果要得到一個真實的微粒濃度及粒徑分佈，還是需要塗敷黏著劑在收集板上以增加對固體微粒(特別是大於截取氣動直徑)的收集效率。

再者，觀察鋁箔在不同流量下的收集效率圖形，在流量為 1.5 和 2 LPM 下， \sqrt{St} 分別為 0.57 和 0.48 時的收集效率急劇的下降，當 \sqrt{St} 提升到 0.82 時微粒收集效率逐漸的上昇。因為在沒有塗敷矽油的情況下，大慣性力微粒所具有的彈跳動能大於鋁箔收集板的附著力，初始的微粒打在鋁箔上會發生彈跳的現象，等到鋁箔表面形成一層微粒層，可以提供後續微粒緩衝慣性力的作用而增加收集效率，與 Tsai and Chen (1995)的實驗結果有著相同的現象。

圖 4.41-7~圖 4.41-10 說明多孔金屬片(孔隙直徑 100 μm 、40 μm 、20 μm 及 5 μm)和鋁箔之固體微粒收集效率曲線圖，噴嘴大小為 3.6 mm，採樣流

量為 2~2.5 LPM。孔隙直徑 100 μm 的多孔金屬片在 \sqrt{St} 大於 0.7 且沒有塗敷矽油的情況下，微粒的收集效率上升至 90% 且沒有下降的趨勢，孔隙直徑 40 μm 、20 μm 、5 μm 的多孔金屬片其微粒收集效率則分別維持在 75%、70%、65% 左右，鋁箔的收集效率則為 55%~60%。多孔金屬收集板在大於截取氣動直徑的收集效率上同樣的較鋁箔高。

4.42 收集板塗敷黏著劑

根據 Pak et al. (1992) 的研究，對於矽油而言，不管塗敷在收集板上的厚度多厚，收集板對於微粒都能有很高的收集效率，因為矽油的毛細吸附作用對微粒有很強的黏著效果。所以本研究選用矽油當作收集板的黏著劑。從圖 4.42-1 可以發現，對於孔隙直徑 100 μm 、40 μm 且塗敷矽油的多孔金屬片而言，在 \sqrt{St} 大於 0.8 時的微粒收集效率可以維持在 90%~95%；而沒有塗敷矽油的對照組，收集效率則只能到 60%~75% 之間。

收集板在長時間負載固體微粒質量下的採樣效率也是我們關心的重點。根據 Turner and Hering (1987) 的研究，當收集板上的微粒負荷多於一層時，微粒的黏著效率會降至 50% 以下，原因是因為塗敷黏著劑的收集板表面被微粒層遮蓋了，造成後繼的微粒自微粒層上方反彈，收集板塗敷黏著劑防止微粒彈跳的效果往往只適用在低微粒質量負載下。收集板表面負載的固體微粒質量 (M) 可利用下式計算：

$$M = \sum_j^m \sum_i^n N_{i,j} \cdot Eff_{i,i} \cdot \rho_p \frac{\pi d_{pi}^3}{6} \quad (4.42-1)$$

上式中 i 為氣動直徑偵測儀中第 i th 個微粒氣動直徑， j 為第 j th 分鐘， Eff 為微粒收集效率， ρ_p 為微粒密度， d_p 為微粒粒徑。

圖 4.42-2 和圖 4.42-3 為多孔金屬片(孔隙直徑為 100 μm 、40 μm)和鋁箔在表面負載 0.24 mg KCl 後的微粒收集效率圖形。我們可以發現，收集板在沒有塗敷矽油的情況下，多孔金屬片和鋁箔的收集效率最高只到 80 %左右，隨即下降至 60%。因為收集板表面所累積的微粒層已經高到會被噴嘴下來的氣流沖走，或是造成後續微粒撞擊在微粒層上的彈跳現象。但是，對於塗敷矽油的多孔金屬片(孔隙直徑 100 μm 、40 μm)而言，在 \sqrt{St} 大於 0.6 的微粒收集效率仍然維持在 95 %左右，理由是因為多孔金屬片的孔洞結構會保持著矽油，避免矽油被噴嘴下來的氣流沖走，收集板上累積的微粒層會含有矽油，因此具有較大的微粒收集容量，可避免固體微粒的彈跳並增加微粒的收集效率。反之，塗敷在鋁箔上的矽油因為被微粒層所覆蓋住了，所以造成收集效率的低落，收集板負載的情形如圖 4.42-4、圖 4.42-5 所示。

