

99 教育部校內教師研究獎助計劃成果報告

以 3D 數值模擬及微奈米機電系統設計製造氣膠粒徑 分析微晶片之研究

The Study of Aerosol Particle Size Analysis with 3D Numerical Simulation and Micro-Electro-Mechanical-System Chip Design

計畫編號: CN9937

執行期間: 99 年 1 月 1 日至 99 年 12 月 31 日
主持人: 陳鴻瑩 助理教授 嘉南藥理科技大學



目錄：

一、中文摘要.....	2
二、緣由與目的.....	2
三、研究方法.....	2
四、結果與討論.....	4
五、計畫成果自評.....	7
六、參考文獻.....	7

以 3D 數值模擬及微奈米機電系統設計製造氣膠粒徑分析微晶片之研究

The Study of Aerosol Particle Size Analysis with 3D Numerical Simulation and Micro-Electro-Mechanical-System Chip Design

計畫編號: CN9937

執行期間: 99 年 1 月 1 日至 99 年 12 月 31 日

主持人: 陳鴻瑩 助理教授 嘉南藥理科技大學

、中文摘要

本研究是以數值模擬研究虛擬衝擊器的設計與氣膠微粒粒徑的純化收集及類。本虛擬衝擊器的設計如圖 1，氣膠微粒從樣品流進入管道後，由邊鞘流將樣品流做流體聚焦。藉由下游的側邊流使氣膠微粒因垂直方向及水平方向的拖曳力比較，而選擇由垂直方向及水平方向出口達到純化及分離氣膠微粒粒徑的目的。由於氣膠的動量反應時間是非常短的（大約為 10^{-4} ），在這樣短的動量反應時間，氣膠微粒是隨著流場所移動。因此虛擬衝擊器的流場對氣膠微粒的分離與純化扮演著很關鍵的因素。在此研究的模擬結果，可將樣品流速與邊鞘流速的比例作無因次的分析，而得到一操作曲線圖，可提供分離或純化氣膠微粒粒徑的操作參數。同時也發現，氣膠微粒粒徑分離的選擇性取決於時間因素，即氣膠微粒在流經右側出口的路徑時間 L/V 與氣膠微粒在管道移動的時間 $(D/2)/U$ 比。

關鍵詞：膠、虛擬衝擊器、數值模擬

二、緣由與目的

對於典型的衝擊器而言所要求的莫過於是容易製造和操作。衝擊器的設計和操作已經被廣泛的研究，Marple and Liu (1974) 使用數值模擬層流噴

嘴、來探討方型與圓形噴嘴衝擊器的特性，而他們的研究參數包含了不同的雷諾數、史多克數、以及噴嘴到出口與噴嘴到衝擊板的距離比例等，對衝擊器性能的影響。John (1999) 給予了一個衝擊器的簡易推導出 Stk_{50} 在矩形噴嘴中約為 $0.49 \mu m$ 、而圓形噴嘴則為 $0.25 \mu m$ 。Huang and Tsai (2002) 利用數值模擬對噴嘴與衝擊板的比例進行了研究，並提出該研究對其影響，而 Huang and Tsai 發現，當雷諾數範圍為 100~500 而嘴與衝擊板的比例下降時，收集效率將會提高，且得到較慢的噴流與重力效應對收集效率的影響。Hari et al. (2005) 運用模擬研究影響方形矩形衝擊板靈敏因素，例如重力和 ultra-Stokesian drag 的影響，也得到符合假設的實驗結果。Burwash et al. (2006) 研究雷諾數為 10^4 擾流擴散流場對 $5 \mu m$ 微粒在軸對稱衝擊噴嘴的影響，他們使用 Shear Stress Transport (SST)CFX (CFX5.7.1, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA) 中的擾流模組對噴嘴進行模擬，得到實驗結果與假設的一致性。

在本研究使用數值模擬軟體 CFD-ACE+，進行虛擬衝擊器的模擬分析進行設計

三、研究方法

1. 設計原理、問題分析及其解決途徑

Stokes 的拖曳力；

流體流動作用於微粒上的拖曳力，如下式：

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U_c^2 A C_D = \frac{1}{2} \rho (U_f - U_p)^2 \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) C_D \quad (1)$$

其中 ρ 為流體密度、 U_c 為流體對微粒的相對速度、 A 為微粒的投影面積、 U_f 為流體速度、 U_p 為微粒速度、而 D 為球體微粒的直徑。

在層流的情況下，作用在微粒的力是藉由 Stokes 的拖曳力施加於球狀微粒上，而 Stokes' drag 的解析式，由 Stokes(1982)的公式如下式：

$$C_D = \frac{24}{Re_D} \quad \text{for } Re_D < 1$$

$$C_D = \frac{24}{Re_D} [1 + 0.15 Re_D^{0.687}] \quad \text{for } 1 < Re_D < 10^3$$

$$C_D = 0.44 \quad \text{for } Re_D > 10^3$$

$$F_D = 3\pi D \mu U_c \quad \text{for } C_D = \frac{24}{Re_D} \quad (2)$$

D 為球狀微粒的直徑， μ 流體粘滯力， U_c 為流體越過微粒的相對速度，而 C_D 微粒的阻力系數。

微粒的合力；

微粒在管道移動時，微粒受重力和 Stokes' drag F_{Drag} 。而該力量的平衡可以以下方程式所表示：

$$m_p \frac{dU_y}{dt} = F_{Gravity} - F_{Drag} \quad (3)$$

對於低的雷諾數，Stokes' drag 在 Y 方向的解析式是由 Stokes' formula 所提出。

$$F_D = 3\pi D \mu U_c \quad (4)$$

其中 D 為球狀微粒的直徑， μ 流體粘度、 U_c 為微粒在 Y 方向的速度。由

方程式(4)帶入方程式(3)，可以將方程式(3)重寫為。

$$\frac{m_p}{3\pi D \mu} \frac{dU_c}{dt} + U_c = \tau_v \frac{dU_y}{dt} + U_c = \frac{[F_{Gravity}]}{3\pi D \mu} \quad (5)$$

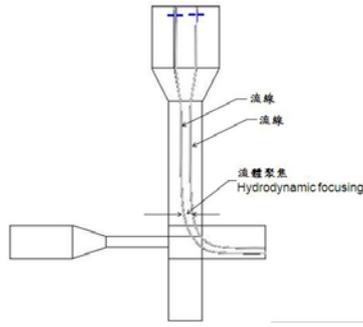
$\tau_v = m_p / 3\pi D \mu$ ，此為微粒的動量反應時間，在此還有一個重要的參數，稱之為史多克數，在流體微粒中的史多克數則被定義為：

$$St_v = \frac{\tau_v}{\tau_F} = \frac{\tau_v U_0}{C} \quad (6)$$

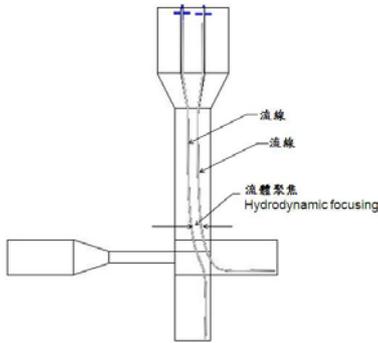
τ_F 為流體流動的時標特性尺寸，舉例來說，對於流動通過衝擊器的時間特徵為 d/V 。 d 為虛擬衝擊器的管徑， V 為 d 部的流動速度。在目前的衝擊器中 (若粒徑為 $D=2.5 \mu m$ ，噴嘴寬度為 $d=10 \text{ cm}$)，可以找到 St_v 大約為 $10^{-4} \ll 1$ 。微粒的反應時間小於相關流場的特徵時間的。因此，微粒將有充足的時間來應對流場的變化。然而 $\sqrt{St_{50}}$ (或 St_{50}) 也定義為史多克數，即指在 50% 時的收集效率。

2. 研究方法與步驟；

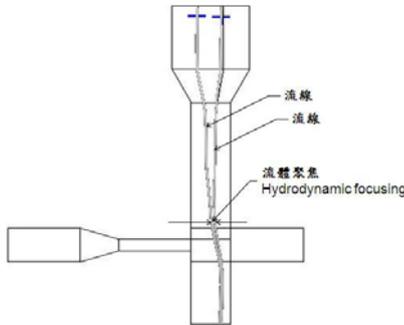
在本研究中採用一個可同時計算多重物理問題的有限體積法，CFD-ACE+ 軟體 (CFD Research Corporation, Huntsville Alabama)，而在 CFD-ACE+ 中包含了離散座標法 (Discrete Ordinate Method)，這是因為在大多數的工程應用中，對於預測輻射傳熱是有著一定的準確性與可靠性的。CFD-ACE+ 採用 Algebraic MultiGrid (AMG) Solver 以及 Conjugate Gradient Squared (CGS)+ Conditioning Solver 兩種運算器。此外，對於 SIMPLEC (Pressure-Linked Equations Consistent) 運算法則，該軟體採用壓



(a) Flow Ratio =4



(b) Flow Ratio =10



(c) Flow Ratio =20

圖 2:(a)(b)(c) 流場聚焦 vs. Flow Ratio

4.2 流場比較與微粒分離的選擇性

圖 3 是不同的 Flow Ratio 和側邊流的流場比較後，可分離出氣膠微粒粒徑的數值模擬結果，當氣膠微粒流經側邊流時，微粒的流向則取決於垂直方向與水平方向的拖曳力。

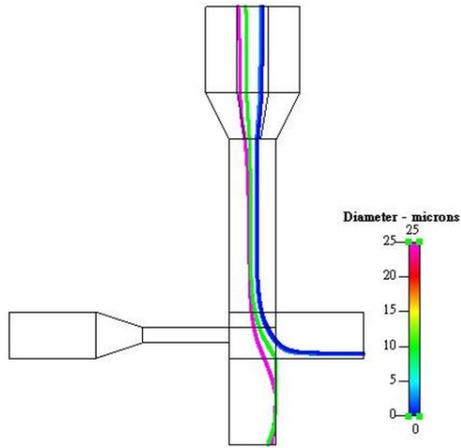
$$F_{\text{Drag-Y}} = 3\pi\mu DV$$

$$F_{\text{Drag-X}} = 3\pi\mu DU \quad (8)$$

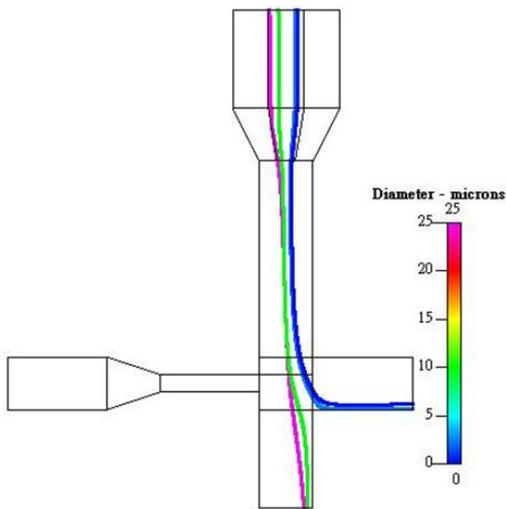
其中 μ 為流體的黏滯力， V 是虛擬衝擊器垂直方向的流速(也是流體聚焦後的速)， U 為水平方向側邊流的流速，在此力場，除了流力場之外，尚有重力場 $F_g = mg = \rho\mu g$ ，但相較於流力場，則可忽略不計，所以微粒的流向選擇性，仍單純取決於垂直方向與水平方向拖曳力的比較。由模擬結果顯示不同的 Flow Ratio，施以相同的側邊流則可分離不同粒徑的氣膠微粒。從此虛擬衝擊器的設計，微粒能從側邊分離出來，即氣膠微粒在流經右側出口的路徑時間，氣膠微粒必須能橫向移動致右側出口，即

$$\frac{d/2}{U} \leq \frac{L}{V} \quad (10)$$

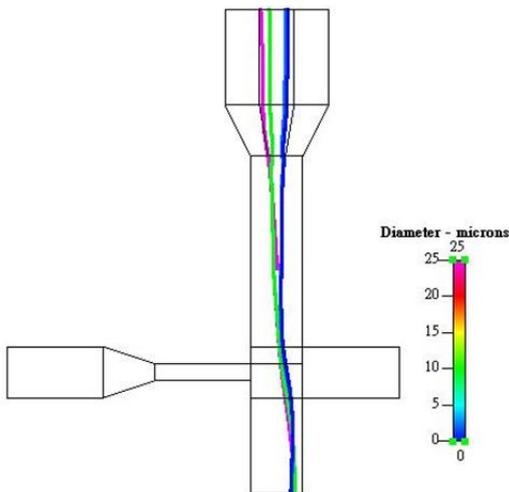
則微粒可從右側出口分離出來。由虛擬衝擊器設計模型標示， d 為虛擬衝擊器垂直管道的管徑， U 為側邊流的流速， L 為水平微粒收集出口管徑， V 為邊鞘流與樣品流流體聚焦後的流速。圖中數值模擬結果紅色流線為 $25\mu\text{m}$ 之氣膠微粒，淡綠色流線為 $10\mu\text{m}$ 之氣膠微粒，淡藍色流線為 $2.5\mu\text{m}$ 之氣膠微粒，藍色流線為 $0.3\mu\text{m}$ 之氣膠微粒。由於目前氣膠研究控制大多以選擇 $\text{PM}_{2.5}$ ($2.5\mu\text{m}$) 與 PM_{10} ($10\mu\text{m}$) 為目標， $0.3\mu\text{m}$ 氣膠微粒會進入肺氣泡，粒徑在 PM_{10} 以下大於 $\text{PM}_{2.5}$ 的懸浮微粒，雖然會進入呼吸道，等造成身體的危害，因此選擇此 4 種粒徑作數值模擬之氣膠微粒粒徑。



(a) Flow Ratio =4



(b) Flow Ratio =10



(b) Flow Ratio =20

圖 3:(a)(b)(c) 氣膠分離 vs. Flow Ratio

4.3 虛擬衝擊器可操作曲線

圖 4 是不同 Flow Ratio 之側邊流速相對可分離氣膠微粒粒徑之數值模擬結果，不同的 Flow Ratio 有不同的側邊流速相對可分離氣膠微粒粒徑之曲線，相同的 Flow Ratio 增加側邊流速則可分離較大氣膠微粒自水平微粒出口收集，越大的 Flow Ratio 則曲線往上平移。圖 5 是將圖 4 做無因次分析，U'即 Flow Ratio 除以流體聚焦流速，由圖 5 顯示其不同 Flow Ratio 曲線幾乎重疊，其重疊曲線即是微粒分離的操作曲線。由此分析圖，提供在任何 Flow Ratio 下，均可以比對側邊流的流速值相對可分離氣膠微粒粒徑。

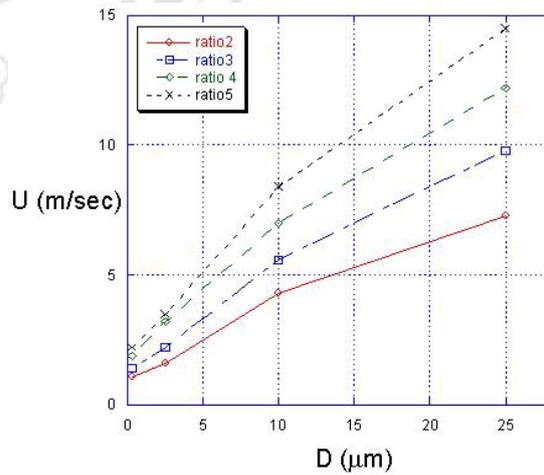


圖 4：不同 Flow Ratio 之側邊流速相對可分離氣膠微粒粒徑

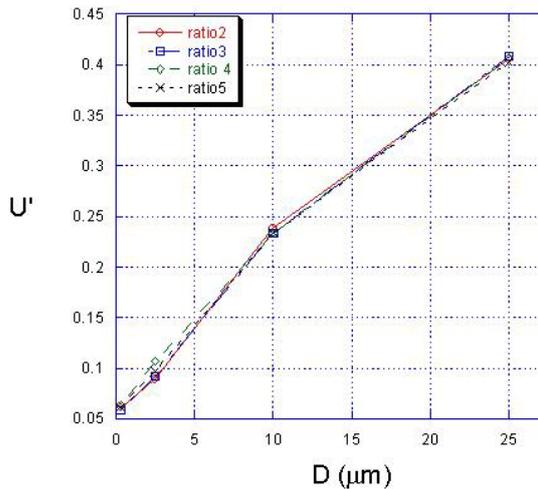


圖 5：不同 Flow Ratio 之側邊流速無因次化相對可分離氣膠微粒粒徑

五、計畫成果自評

虛擬衝擊器的使用，常是用來做大流量的氣膠微粒分類收集與分類，進而做污染控制，從本研究模擬，可得到以下的結果。

- 可依流量的需求，增加 Flow Ratio。作大流量之氣膠微粒分離。
- 從圖 5 可對照出在任何 Flow Ratio 下欲分離氣膠微粒的相對應側邊流速。
- 由力場分析可得，氣膠微粒的流向選擇性是在於垂直方向與水平方向的拖曳力比較。

d. 由微粒的路徑分析可得到，微粒的流向選擇在於垂直移動時間，必須大於橫向移動時間，微粒才能從右側出口分離出來

$$\frac{d/2}{U} \leq \frac{L}{V}$$

本研究仍然可就收集效率繼續做模擬方面的研究，另外可從實驗驗證模擬所得出的結果等互相作印證，如何可建立研究的機制，即以模擬作為快速設計與物理現象的研究再導入實

驗，如此能更有效率的研究程序。

六、參考文獻

- V. A. Marple, B. Y. H. Liu (1974) Characteristics of Laminar Jet Impactors. *Environ. Sci. Technol.* **8**, pp. 648-654.
- John W. (1999) A Simple Derivation of the Cutpoint of an Impactor. *J. Aerosol Sci.* **30**:10, pp. 1317-1320.
- Cheng-hsiung H., Chuen-jinn T. (2002) Influence of Impaction Plate Diameter and Particle Density on the Collection Efficiency of Round-Nozzle Inertial Impactors. *Aerosol Sci. Technol* **36**, pp. 714-720.
- S. Hari, Y. A. Hassan, A. R. McFarland (2005) Computational Fluid Dynamics Simulation of a Rectangular Slit Real Impactor's Performance. *Nuclear Engineering and Design* **235**, pp. 1015-1028.
- W. Burwash, W. Finlay, E. Matida (2006) Deposition of Particles by a Confined Impinging Jet onto a Flat Surface at $Re = 104$, *Aerosol Sci. Technol.* **40**, pp. 147-156.
- S.W. Yuan (1982). *Foundations of Fluid Mechanics.* Prentice-Hall, Inc.