

第二章 文獻回顧

2.1 慣性衝擊器的設計理論

慣性衝擊器對不同大小的微粒具有不同的收集效率，它的原理是利用微粒本身的慣性力來收集微粒。如圖 2.1-1 所示，氣流通過一個噴嘴後，向下衝擊一個收集板，因流體無法貫穿收集板的關係，而使得離開噴嘴的氣流突然做一 90° 的轉彎繞過收集板。具有足夠慣性力的微粒，會脫離氣流流線而衝擊在收集板上，而慣性小的微粒，則隨著氣流流線移動而繞過收集板。

主要設計慣性衝擊器微粒收集效率的因子，是無因次參數—史脫克斯數 (St, Stokes number) 和噴嘴雷諾數 (Reynold number)。史脫克斯數的定義為微粒的鬆弛時間 (τ) 和噴嘴的平均流體流速 (V) 的乘積與噴嘴半徑 ($W/2$) 之比值，史脫克斯數和噴嘴雷諾數的定義公式如下：

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 V C_c}{9\mu W} \quad (2.1-1)$$

$$Re = \frac{\rho V W}{\mu} \quad (2.1-2)$$

其中 ρ_p 為微粒密度， d_p 為微粒直徑， V 為噴嘴的流體流速， C_c 為微粒的滑動校正因子， μ 為氣體黏滯係數， W 為噴嘴直徑， ρ 為氣流密度。對慣性衝擊器而言，史脫克斯數的平方根 (\sqrt{St}) 為無因次的氣動直徑，為影響衝擊器收集效率的重要參數值。 $\sqrt{St_{50}}$ 代表微粒收集效率為 50% 時的史脫克斯數平方根值，利用公式 (2.1-1) 可推得該慣性衝擊器的截取氣動直徑 (Cut-off Aerodynamic Diameter)。比截取氣動直徑大的微粒在通過噴嘴

後，較易脫離流線而衝擊在收集板上，比截取氣動直徑小的微粒則會順著流線繞過收集板而未被收集。

噴嘴雷諾數也是影響收集效率曲線值 $\sqrt{St_{50}}$ 的重要參數，未考慮重力效應時，在雷諾數介於 500~3,000 時，圓形噴嘴的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.47，矩形噴嘴的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.73。考慮重力效應時， $\sqrt{St_{50}}$ 的值會隨噴嘴雷諾數的降低而降低；在噴嘴雷諾數小於 100 時， $\sqrt{St_{50}}$ 的值會隨噴嘴雷諾數的降低而急遽下降 (Huang and Tsai, 2001)。

2.2 過去慣性衝擊器收集板之相關研究

- 平板型收集板

Tsai and Cheng(1995) 的研究結果顯示，對於平板型的收集板(如鋁箔)而言，大於截取氣動直徑的微粒在不塗敷矽油(Silicone Oil)的收集板上有明顯的反彈現象，雖然微粒一開始的收集效率很低，但隨著收集板上微粒的逐漸累積，提供後續微粒緩衝慣性力的作用，收集效率會有所提升，直到微粒累積到一定的厚度，收集效率會維持恆定不再有所變化。在塗敷矽油的收集板上，初始撞擊到收集板上的微粒會因為矽油的黏滯性而附著其上，但是隨著微粒的累積，接下來的微粒會因撞擊在沉積在收集板上的微粒而產生反彈現象。對於固體微粒、未塗敷矽油或是表面微粒質量負荷超過一定量的收集板而言，都會因為微粒的反彈現象而造成收集效率的逐漸低落。

Sioutas et al. (1999) 嘗試設計凹槽式的衝擊器來抑止固體微粒的反彈。結果顯示，以不塗敷任何黏著劑的單純鋁材凹槽為收集板時，微粒反彈的現象並沒有明顯的被抑止，特別是對於截取氣動直徑以上的微粒，收

集效率會有明顯的下降。

- **玻璃纖維濾紙的收集表面**

Rao and Whitby(1978a, b) 發現收集板的本身特性與黏著劑的塗敷影響微粒的收集效率甚大。實驗結果顯示，塗敷黏著劑的收集板對於固體微粒可以得到理想的收集效率曲線，未塗敷黏著劑的對照組最高收集效率只達到 30%~50%；此外，未塗敷黏著劑的玻璃纖維濾紙比未塗敷黏著劑的玻璃平板收集效率高出甚多，因為玻璃纖維濾紙表面粗糙及孔隙結構的特性，造成氣流貫入玻璃纖維濾紙的內部，可容納更多的微粒及抑止微粒的反彈，不過其收集效率曲線會較傳統理論曲線來得較平緩。Turner and Hering(1987) 也發現使用玻璃纖維濾紙可以減少微粒的彈跳，但會多收集一些細小微粒，因為隨著氣流貫穿進入玻璃纖維濾紙的微粒發生截留收集的現象。



- **泡棉收集板**

Kavouras and Koutrakis(2001) 利用聚氨酯泡棉 (PUF) 取代傳統 PM_{2.5} Harvard 慣性衝擊器的收集板，探討以聚氨酯泡棉作為慣性衝擊器的收集板時的微粒收集曲線特徵，改變參數包括 PUF 的密度、雷諾數、收集板直徑、和噴嘴至收集板距離。結果顯示，使用 PUF 作為收集板時會導致收集效率曲線的重要改變，如：50% 的截取氣動直徑從 2.48 μm 降低至 1.12 μm，對應的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.24。雖然傳統慣性衝擊器的設計理論可以正確預測平板型收集板的 50% 截取氣動直徑，但是對於 PUF 收集板而言，傳統的理论會高估 50% 截取氣動直徑的實驗值。

- 多孔金屬片

Sioutas et al. (1999) 使用具有凹槽形狀的收集板且搭配多孔金屬片作為採樣組合，可以提高收集效率及降低微粒的損失。以浸漬過黏著劑的多孔金屬片為收集板，由於多孔金屬片的孔隙結構及黏著劑的吸附效果，可以有效收集大於截取氣動直徑以上的微粒，避免微粒反彈及再揚起的現象。

Heikkinen and Harley(2000) 探討不同厚度 (thickness) 及不同孔隙度的多孔金屬片對於固體微粒的吸附貫穿特性。結果顯示，在長時間的採樣環境下，擁有孔隙結構的多孔金屬片會因為採集到大量微粒，造成微粒的累積堵塞孔洞而降低流體的穿透性，發生採樣收集效率降低的現象。採樣器上下游端壓力降的變化可以當作多孔金屬片是否要繼續使用或是更新的一個依據。

Marjamaki and Keskinen(2003) 利用多孔金屬片取代傳統慣性衝擊器的平板型收集板，探討多孔金屬片作為多階慣性衝擊器的收集板時的微粒收集曲線特徵。結果顯示，相較於傳統的平板收集板，孔隙直徑越大的多孔金屬片對於截取氣動直徑以下的微粒有著較高的收集效率，原因在於部份氣流會貫穿進入多孔金屬片內部而增加細小微粒的收集效率。此外，多孔金屬片表面粗糙度也是影響收集效率的特徵因子，當流體接近收集板表面時，不同的表面粗糙度會形成不同的表面流場及邊界層厚度，增加多孔金屬片對於微粒截留的作用。因為多孔金屬片的孔隙結構及表面粗糙的影響，以多孔金屬片作為衝擊器的收集板時的微粒收集效率曲線會顯得較為平緩，截取氣動直徑亦會較小，如圖 2.2-1 所示。

Huang et al. (2001) 利用數值方法計算多孔金屬材質慣性衝擊器的微粒收集效率。結果顯示，過剩的微粒收集效率 ($\sqrt{St} \rightarrow 0$ 的收集效率) 隨多孔金屬材質的阻力係數的減小、噴嘴雷諾數的增加和噴嘴直徑的減小而

增加。

Huang and Tsai(2003) 利用數值方法進一步探討氣流貫入多孔金屬片內部的微粒收集機制，考慮的因子包括：微粒的擴散、慣性衝擊、截留和重力作用。結果顯示，因為部份氣流貫入多孔金屬片內部，增加細微粒的收集，以多孔金屬片作為慣性衝擊器的收集板較平板的收集效率平緩，氣流貫入多孔金屬片內部的主要收集機制仍以慣性衝擊為主。在 $\sqrt{St} \rightarrow 0$ 的情況下，多孔材質對於細微粒的收集效果為擴散收集。

由以上的文獻回顧可知，多孔金屬片具有較高的收集容量和改善固體微粒在衝擊器中的彈跳及再揚起問題。多孔金屬片在沒有塗敷黏著劑的情況下，比平板型收集板有著更高的收集效率，更可應用在高溫及生化採樣的環境中，方便後續的化學分析。然而，也因為多孔金屬片特有的孔隙結構及微粒過濾作用，使得衝擊器的收集效率曲線及截取氣動直徑和傳統理論預測有所差異，造成在工作場所或是實驗環境中對氣膠濃度及粒徑分布的分析錯誤。