

集塵設備逆洗噪音問題診斷與改善驗證

李建興¹、蔡夏生¹、洪雲煌²、洪鈞易²

¹財團法人車輛研究測試中心振動噪音課

²啟煌通風工程有限公司

E-mail:leo_li@artc.org.tw

經濟部小型企業創新研發計畫編號: 1Z990185

摘要

本文主要針對工業用彈匣式集塵機的逆洗噪音進行噪音機制探討並設計消音器與優化改善，並配合對策件試作達成進一步改善效果。彈匣式集塵設備使用一段時間後，濾材上會有積塵問題，一般均以高壓噴流逆洗方式來清洗濾材積塵以維持集塵性能，而逆洗除塵所產生的噪音高達 110 dB(A)，已產生嚴重的勞工安全衛生問題，其中噪音改善過程中，需同時避免逆洗噴流壓力大量損失以確保集塵設備使用效能。本文以頻譜測試分析與逆洗噴流高速攝影討論實際噪音特性與流場模型，最終改善結果可使集塵機系統級噪音降低至 79dB(A)，出口噴流壓力則維持原型設計之 70%。未來可以此改善驗證方法進一步投入量產品質控管，並累積建置不同類型集塵設備逆洗噪音改善設計資料庫，以協助業者可快速進行不同規格集塵設備性能匹配，並擴充客製化服務項目。

關鍵詞：彈匣式集塵機、逆洗噪音、逆洗噴流高速攝影。

1. 前言

塵肺類職業病為各工業國家職業災害防治的重點項目，表 1 為行政院勞委會所公佈歷年來粉塵類別職業病勞工保險給付人次一覽表，台灣自 94 年後在粉塵作業環境努力改善下，使國人在粉塵相關職業病罹患率大幅降低，但近三年來，勞保對粉塵職業病給付人次卻又有上升趨勢，帳面數據上人次的增加雖不多，實際上勞委會所發行的報告刊物中卻也坦承在職業病個案的統計數字中確實有低估的情形。對各項塵肺類職業病防治辦法中，除了主動以口罩保護勞工呼吸系統外，目前大多以集塵設備來降低粉塵量以維護勞工健康；市場上各類型集塵設備中，彈匣式又因價格便宜、組裝方便、容易清洗與擴充性佳等特色而較容易被市場所接受。圖 1 為集塵設備示意圖，一般係以集塵腔內濾材進行空氣過濾淨化，而長時間使用則會使濾材上產生積塵，通常以高壓氣瓶藉由電磁閥控制產生噴射氣流進行逆洗除塵，達到維持集塵效率與延長濾材壽命之目的，而逆洗瞬間所產生音量高達 110dB(A)，相當於飛機低空飛過所產生之音量，且不同規模大小集塵設備所產生間歇性的噴流噪音對作業勞工與附近住家更是產生莫大噪音污染。

過去探討噴流噪音問題的文獻著重於噴射引擎或噴射飛機等議題，且多以數值分析為研究基礎；而結合

數值分析與實際驗證改善噴流噪音問題的相關文獻中，T. Norum [1]利用風洞實驗針對不同水流速度通過大型高壓噴嘴所產生的噴流噪音特性進行研究，藉由流體質流量率(mass flow rate)、噴流入口位置與噴流型式等參數調整以評估噴流噪音改善效果，其中發現噴流的質流量率對噴流噪音之影響最為關鍵；以水而言，在馬赫數為 0.8 的亞音速條件下，質流量率若下降 0.3，則噴流噪音可有效改善 2 dB。D. Papamoschou [2]針對飛機系統藉由不同派龍吊掛 (pylon-based) 可調變流隔板 (deployable flap) 形式與角度變更並進行實際噪音頻譜量測，且建立一套實驗檢測模式，以評估渦輪噴射引擎的噴流噪音抑制效果，其中變流裝置型式為實心隔板、粗孔徑穿孔網板與細孔徑穿孔網板，變流隔板與派龍掛架角度均為 22°；最終結果發現以細孔徑穿孔網板對噴流噪音有最佳抑制效果，在機翼下方可降低噪音 2.1 dB，側線方向可降低噪音 1 dB，但靜推進力卻也下降 0.7%。L. A. Garrison 等人 [3]針對噴射引擎動力混合器 (forced mixer) 建立一套半理論噴流噪音預測模型，首先以 four-source 模型模擬軸流混合器音源並計算噴流特性，接著以 two-source 模型預測內混合器所產生之噴流噪音，其中藉由調整 low frequency source reduction、high frequency source augmentation 與 common cutoff Strouhal number 等三項參數利用非線性最小平方法進行聲音壓力位準預測最佳化，以取得合理之噴流噪音預測數學模型。此外，在噴流流場特性研究方面，蔡 [4]以數值方法分析高速噴流噪音與流速特性，並設計一款噴嘴閥型式，其中改善策略以分散氣體壓力以達到氣流包覆式設計，使噴頭出口總面積維持不變，即可有效降低噪音並維持噴流速度。

表 1 行政院勞委會所公佈歷年來粉塵類別職業病勞工保險給付人次一覽表(資料來源：行政院勞工委員會)

年度	類別	職業性氣喘、過敏性肺炎	礦工塵肺症及其併發症	矽肺症及其併發症	石綿肺症及其併發症	總計
94 年		1	214	2	—	217
95 年		1	49	4	4	58
96 年		3	64	5	2	74
97 年		6	54	2	7	69
98 年		3	69	3	2	77
99 年		2	76	—	4	82

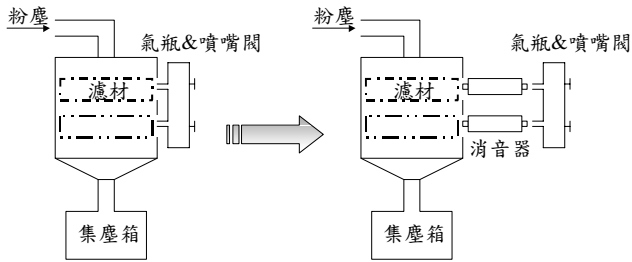


圖 1 氣流式集塵設備示意圖

綜合上述文獻回顧，多由噪音源處改變噴頭型式並變更噴流特性以達到噪音抑制之目的；傳統強調靜音集塵機的產品多為小型集塵機，且僅注重集塵過程鼓風機的降噪，但鼓風機噪音相較於大型工業用集塵設備的逆洗除塵噪音而言，兩者差異可高達 30~60 dB(A)。本文主要以消音器針對噴流路徑進行集塵機逆洗噪音問題處理如圖 1 所示，並結合實際逆洗噴流流場高速攝影與振動噪音頻譜分析進行逆洗噪音機制探討，並擬定改善策略，最終以對策件試作進行改善效果評估。

2. 噪音產生機制探討與改善對策擬定

本節主要針對逆洗過程建立噪音、振動、逆洗效能等量化量測流程，並進行原況進行流場可視化拍攝，以協助進行逆洗噪音產生機制與改善策略擬定。

2.1 設備架構與訊號量測

圖 2 為集塵機驗證平台，架構比照基本的集塵機設備規格如集塵壓縮機集塵、排氣風管、空氣壓縮機、集塵腔、粉塵回收桶，並同時因應產品開發之需求進行部分設計變更，以符合作為整機研究驗證平台所須具備的功能，說明如下：

- (1) 圖 2 所標示編號 1 處為逆洗除塵消音室，消音器即放置於其中，為能方便更換消音模組，故針對此空間增加艙門設計，以能方便拆換消音器，進而對消音性能進行快速評估。
- (2) 編號 2 為麥克風量測放置位置，距離地面 1.2m，麥克風指向集塵機消音室與出氣口交接處，且距離為 1.3 m。
- (3) 為評估加裝不同消音器後的逆洗效能，於編號 3 處改以強化玻璃取代原有的腔壁，以方便觀察集塵作動時的流場行為與除塵效果。
- (4) 此外，為能更進一步瞭解逆洗噴流噪音特性，在集塵設備集塵腔斜板處架設加速規，以評估板塊振動對系統噪音之貢獻程度。

其中噪音量測設定部份，分為 1/3 八度音量測與線性頻譜量測，整體噪音與振動量測設定綜合說明如下：

- (1) 1/3 八度音量測時，中心頻率範圍為 20-20k Hz，時間常數為 1/8 秒，頻率加權為 A 加權，平均方式取最大值(peak hold)，量測逆洗歷程最大噪音。
- (2) 線性頻譜量噪音測時，有效頻寬為 25.6k Hz，解析條數為 8192，頻率加權為 A 加權，訊號量測歷時 1 秒，並紀錄該段時間之時頻圖。

- (3) 振動量測部分則設定有效頻寬為 25.6k Hz，解析條數為 8192，量測逆洗過程中集塵腔斜板處的振動響應。

此外，集塵機驗證平台在逆洗性能量化驗證系統假設與設定相關說明如下：

- (1) 此集塵機主要以高壓氣瓶裝載壓力 6kgf/cm²(約 5.9 bar)之空氣，藉由電磁閥控制產生噴流達到濾材逆洗除塵目的。
- (2) 在逆洗性能量化指標的定義則以出口端之流量(Q)為參考基準，Q可表示如下：

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{S.G}} \quad (1)$$

其中 C_v 為流量係數， ΔP 為壓力差， $S.G$ 為流體比重。

- (3) 在高壓氣瓶體積與壓力均為常數，且最終逆洗出口端截面積亦不變的考量下，流量又與出口端與集塵腔(即大氣端)之壓力差成正比，本文假設大氣端壓力為定值，僅以逆洗出口端壓力作為逆洗性能之評估。
- (4) 圖 3 消音器出口端壓力量測之架設示意圖，為能量化逆洗噴流的暫態響應，本文以壓力感應器進行消音器出口端壓力量測，量測設定取樣率為 51.2 k Hz，時間加權則為矩形加權(rectangular window)，量測完整逆洗過程之時域壓力訊號。

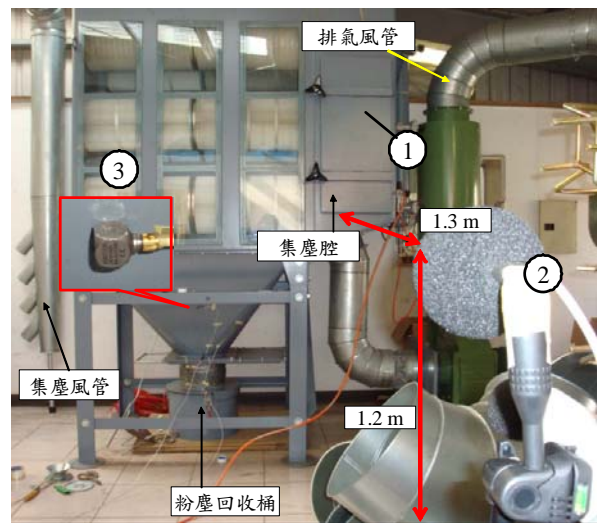


圖 2 集塵機驗證平台

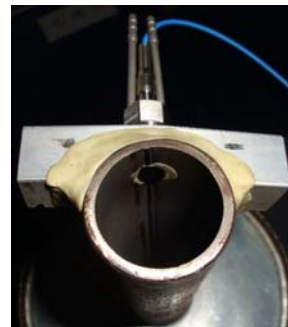


圖 3 消音器出口端壓力量測架設示意圖

噴流流場可視化拍攝中，圖 4 為流場觀測平台示意圖，以 VRI Phantom 9.0 高速攝影機對消音器噴流方向以 2600 fps(frame per sec)之速度進行拍攝，主要目的在於觀察完整噴流流場型態並計算噴流角度，以利於對策件設計製作。



圖 4 流場觀測平台示意圖

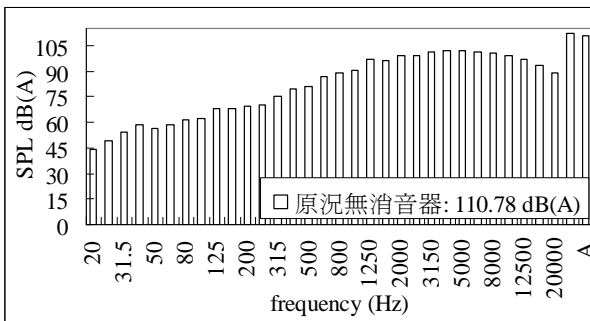


圖 5 集塵機系統原況噪音 1/3 八度音量測結果

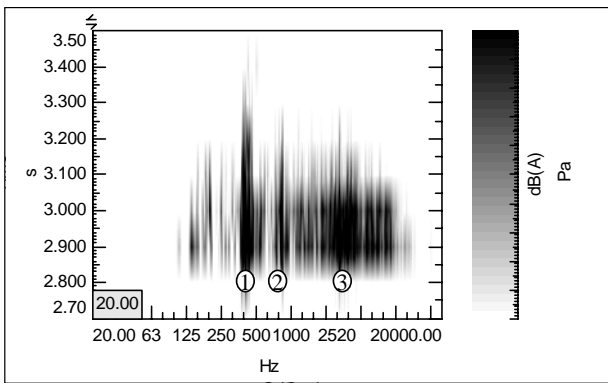


圖 6 集塵機系統原況噪音時頻圖

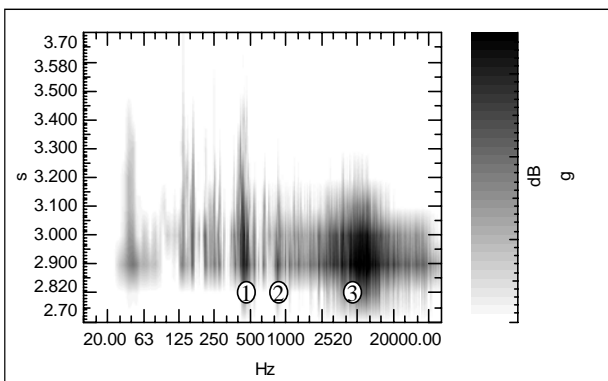


圖 7 集塵腔板塊振動時頻圖

2.2 噪音產生機制探討

在噴流噪音發聲機制研究部分則搭配整機驗證平台進行實機量測，以取得實際作動情形之細部頻譜數據，可進一步釐清噪音成分，整體集塵逆洗作動振動噪音訊號量測結果說明如下：

- (1) 圖 5 為集塵機系統原況噪音 1/3 八度音量測結果，由於所量測之噴流噪音為瞬間脈衝響應，原況量測中並未出現任何特徵頻帶，主要能量約集中在中心頻率 315 Hz 以上，整體噪音訊號仍呈現出白噪音(white noise)型式。
- (2) 圖 6 為集塵機逆洗過程線性時頻圖，實際集塵機的消音室與集塵腔皆有噪音抑制效果，藉由時頻圖適當聲壓範圍調整，可明顯觀察到編號 1 的 430 Hz 與編號 2 的 830 Hz 等特徵頻率，而編號 3 則為大範圍之白噪音分佈。
- (3) 為進一步解析上述之頻率響應來源，圖 7 為集塵腔板塊振動時頻圖，比對噪音時頻訊號，可發現兩者間存在許多相對應頻率，其中較為明顯之特徵頻率為 430 Hz 與 830 Hz，而編號 3 處仍為白噪音分佈；此外，雖板塊在逆洗作動過程中出現約 50 Hz 的振動響應，但圖 6 噪音時頻圖中並未有此音頻出現，估推論 50 Hz 為結構之自然頻率特徵。
- (4) 進一步針對集塵腔斜板振動量測點進行同點自然頻率量測(driving point FRF)，圖 8 為集塵腔板塊頻率響應函數圖，由於衝擊錘之使用限制，僅觀察可靠頻寬 2000 Hz 內的 FRF，其中確認 50Hz、430 Hz、830 Hz 為該處結構之自然頻率。
- (5) 綜合上述討論，由振動與噪音訊號分析可確認集塵腔板塊結構容易被逆洗噴流之能量激振產生噪音，尤其在 430 Hz 處結構模態對逆洗噪音之影響最為敏感。

時頻圖中，雖可由適當上下限調整辨識特徵頻率，但這些頻率多出現於 1000 Hz 以下，各頻譜的振幅分佈仍為白噪音特性，顯示單純由頻譜角度進行噪音機制探討時存在其限制，需另以流場特性輔以討論之，並擬定改善策略。在實際流場觀測中，圖 9 為實際流場拍攝結果，搭配文獻[4]探討相關說明如下：

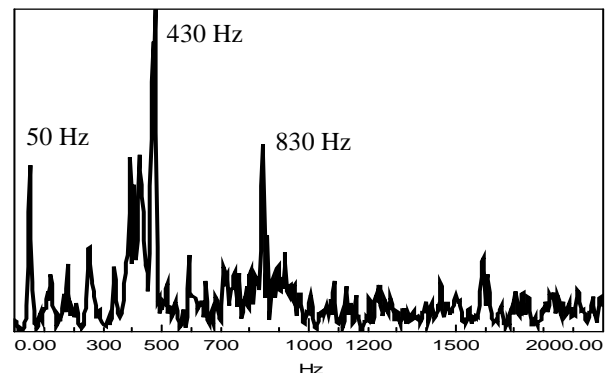
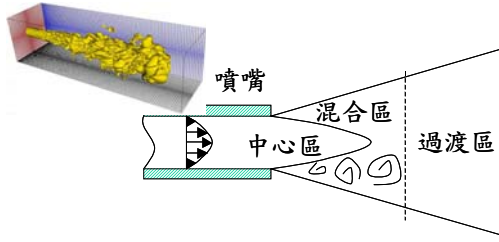
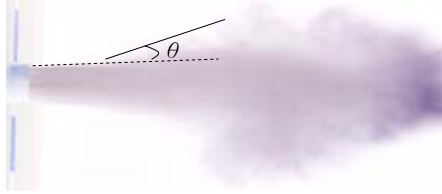


圖 8 集塵腔板塊頻率響應函數



(a) 噴流模型示意圖



(b) 實際噴射流場結果
圖 9 噴流型式觀測結果

- (1) 在氣流自噴頭噴出後，便會與週圍流體產生摩擦與紊動作用，造成噴流的速度逐漸降低，同時產生捲吸帶入週圍氣流。
- (2) 如圖所示的中心區又稱為核心區 (core region)，其特性為流速恆定之高速層流 (high speed laminar flow)。
- (3) 週圍氣流與空氣劇烈混合產生小型渦流，此擾動現象為高頻噪音的主要來源，稱為擾動混合區。
- (4) 在擾動混合區下游為過渡區，其噴流寬度較大且流動速度較低，因此產生較擾動混合區大的渦流，噪音發生也以低頻音為主。
- (5) 由於受靜態空氣阻力影響，實際混合區中的捲吸氣流則伴隨噴流路程而沿途發展，混合區與過渡區則未有清楚之分界線，但可明確觀察中心區與混合區之夾角 θ ，經估算後約為 20° 。

2.3 改善策略擬定

透過上述針對噴流噪音機制之探討，在逆洗噪音問題改善過程中，須能同時達到噪音抑制與逆洗性能維持之目標，整體改善策略說明如下：

- (1) 為維持噴流逆洗性能，須能在噴流發展過程中保留中心層流區；而從噪音機制而言，混合渦流區為高頻音之能量來源，故需將其導引分離或破壞，以減緩聲壓高頻能量。
- (2) 關於激發低頻噪音的過度區，則是噴流發展末期不可避免之行為，在本文所討論之集塵機中，過度區已被導入於集塵腔濾材中，唯所激發之能量則容易與結構板塊自然頻率發生耦合而產生結構音，未來可針對結構動態特性進行設計變更，以改善低頻噪音問題。

在後續的改善對策中，由於試做件成本與驗證時程考量，本文主要針對噪音頻率範圍較大的高頻逆洗噪音進行對策改良，以不同消音器設計減緩噴流之渦流區能

量且同時維持中心區結構，進而期望達到噪音抑制與逆洗性能之平衡設計。

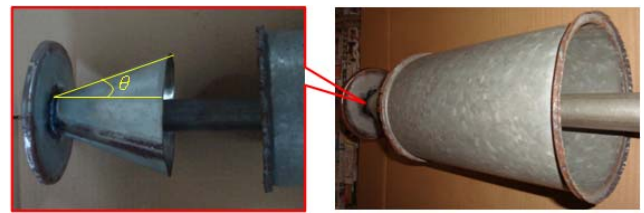
3. 不同對策件試作及噪音改善效果評估驗證

本節針對逆洗噴流噪音進行消音器試作與調校優化，主要分為原型消音器與優化件噪音改善效果評估等兩小節進行說明。

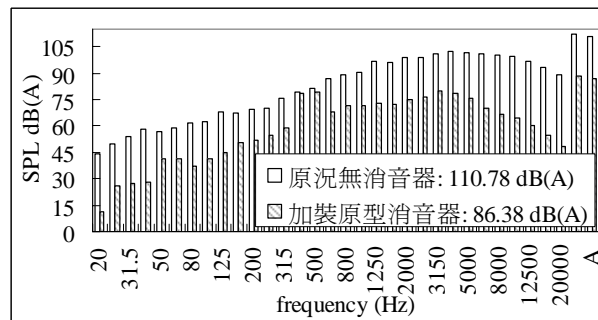
3.1 原型消音器設計

依據 2.3 節所討論之噪音改善策略，圖 10 原型消音器設計及各項性能量測結果，相關說明如下：

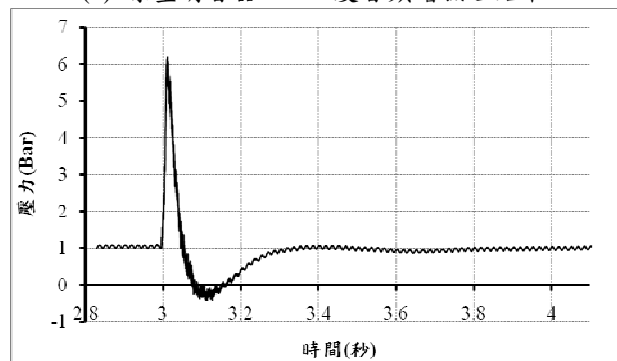
- (1) 就原型消音器結構設計理念方面，依改善策略之擬定原則，為維持噴流結構的中心層流區，故如圖 10(a) 以空心直通管距離入口端適當距離以導引噴流中心區至出口，期望維持逆洗性能。
- (2) 考量實際噴流型式拍攝結果，經估算後中心區與混合區夾角為 20° ，如圖 10(a) 在消音器入口端設計上即使用相同夾角之錐形板以導引混合區渦流至直通管與消音器筒壁間，目的在於降低混合區渦流效應所造成的高頻噪音。



(a) 原型消音器結構設計示意圖



(b) 原型消音器 1/3 八度音頻譜驗證結果



(c) 原型消音器出口端壓力驗證結果

圖 10 原型消音器設計及各項性能量測結果

表 2 一般常見吸音材質吸音特性表[5]

中心頻率(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
泡沫膠上的絨毯	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73
混凝土上的絨毯	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
開孔金屬板(4 英吋厚)	0.70	0.99	0.99	0.99	0.94	0.83
開孔金屬板(2 英吋厚背 後有岩棉纖維層)	0.21	0.87	1.52	1.37	1.34	1.22
開孔金屬板(4 英吋厚背 後有岩棉纖維層)	0.89	1.20	1.16	1.09	1.01	1.03
夾板(0.375 英吋厚)	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
聚胺脂泡沫膠(1 英吋)	0.16	0.25	0.45	0.84	0.97	0.87
吸音岩棉天花板	0.18	0.45	0.81	0.97	0.93	0.82

- (3) 如圖 10(b)在逆洗噪音量測驗結果中，此原型消音器設計在逆洗噪音改善效果可由原況的 110.8 dB(A)大幅降至 86.4 dB(A)；觀察各頻譜噪音抑制效果，除中心頻率 400 Hz 與 500 Hz 等頻帶並未有太大降幅外，其餘頻帶則有 17 dB(A)~ 37 dB(A)不等之改善效果。
- (4) 進一步討論中心頻率 400 Hz 與 500 Hz 等頻帶未有較大之噪音抑制效果，依 2.2 節所討論之逆洗噪音機制，主要原因係來自於集塵腔板塊振動之結構音貢獻，而此階段因對策成本考量，並未對集塵腔結構進行改善設計。
- (5) 就原型消音器加裝後的逆洗性能而言，如圖 10(c)，巨觀上假設流體為不可壓縮特性，由於高壓氣瓶體積遠大於消音器體積，故逆洗瞬間所量測之壓力值為 6.2 Bar，大於高壓氣瓶的 5.9 Bar。
- (6) 透過集塵機驗證平台結合主觀評估與客觀檢驗證，此消音器原型設計在逆洗噪音與除塵效果的表現已明顯優於原況設計，且初步達到改良之目的。

3.2 優化件與噪音改善效果驗證

在原型消音器設計中，僅以改變流場特性進行內部隔板結構進行設計製造，以同時達到噪音抑制與逆洗效能；在本節的改善驗證過程中，則針對高頻噪音再進行對策件試作，表 2 為一般常見吸音材質吸音特性表[5]，其中又以開孔金屬板對 1000 Hz 以上吸音效果較佳，因消音器體積與重量考量，故無法以表 2 中相關材質規格尺寸進行加工，僅以一般厚度約 2mm 之金屬穿孔網板做為吸收高頻音能量之對策件。

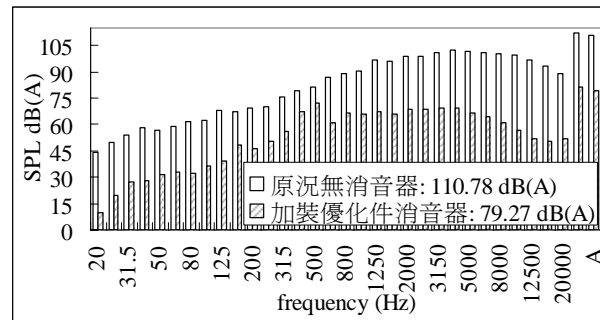
進一步針對流場高速攝影觀測進行暫態行為觀察，發現噴流結構的發展過程中，影響中高頻聲音的渦流隨時間變化而不斷增長，在原型消音器設計中，僅能將噴嘴閘出口部份渦流結構吸收破壞，大部分能量仍順著直通管延伸至集塵腔內發展另一個噴流結構，仍然出現噴流噪音問題。

綜合上述討論，故對原型消音器設計變更，圖 11 為對策消音器設計及各項性能量測結果，相關結果說明如下：

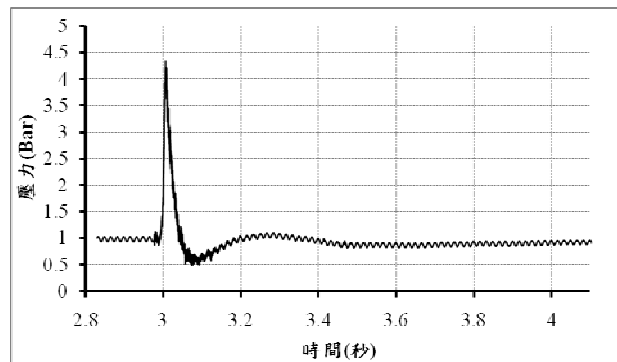
- (1) 就原型消音器結構設計理念方面，針對高頻噪音吸收考量，故將原本的直通管變更為金屬穿孔網管，同時在直通穿孔網管與消音器筒身之間以吸音棉進行適當包覆，以更提升消音性能。
- (2) 同時考量在任何時間點均有渦流區產生，於是進一步移除錐形板，將直通穿孔網管直接與消音器入口端相接，由穿孔網減緩渦流效應，期望可同時兼顧噪音改善與逆洗性能。
- (3) 如圖 11(b)在逆洗噪音量測驗結果中，此消音器對策件在逆洗噪音改善效果再由原型件的 86.4 dB(A)更進一步降至 79.3 dB(A)；觀察各頻譜噪音抑制效果，則仍在中心頻率 400 Hz 與 500 Hz 等頻帶未有明顯改善效果。
- (4) 就對策件消音器加裝後的逆洗性能而言，如圖 11(c)，相較於原型件 6.2 Bar 的瞬間逆洗壓力值，對策件逆洗壓力則降至 4.4 Bar，衰減率為 29%。



(a) 對策消音器結構設計示意圖



(b) 對策消音器 1/3 八度音頻譜驗證結果



(c) 對策消音器出口端壓力驗證結果

圖 11 對策消音器設計及各項性能量測結果

- (5) 由上述討論確認此對策件之設計在逆洗噪音問題可獲得最大效益之改善，但確實影響到逆洗瞬間壓力，而在逆洗性能的影響程度評估中，透過集塵機驗證平台進行逆洗效能主觀評估，最終結果顯示在此消音器設計下的並不影響逆洗作動時的除塵效果。

4. 結論

本文針對集塵機逆洗除塵噪音問題建立一套診斷流程，其中結合噪音頻譜時頻分析、1/3 八度音分析、結構振動頻率量測與噴射流場高速攝影以探討逆洗噪音產生機制，並建立噴流性能快速評估模式；依所擬定之改善策略進行對策件試作，即以穿孔網管結合吸音棉破壞噴流結構渦流區並吸收高頻噪音能量，且同時維持層流中心區以達到逆洗除塵目的；最終逆洗噪音由 110 dB(A) 降至 79 dB(A)，改善效果達 31 dB(A)，噴流出口端壓力則由 6.2 Bar 降至 4.4 Bar，除塵壓力仍可維持 70%，最終評估結果則達到噪音改善目的且同時不影響逆洗除塵效果。

5. 致謝

蒙經濟部技術處小型企業創新研發計畫(計畫編號：1Z990185)經費支持，以及啟煌通風工程有限公司所提供之測試平台與協助對策件加工製作，使本研究得以順利進行，特此致謝。

6. 參考文獻

- [1] T. Norum, "Reductions in multi-component jet noise by water injection," in *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Manchester, United Kingdom, paper NO.: AIAA-2004-2976, 2004.
- [2] D. Papamoschou, "Pylon-Based Jet Noise Suppressors," *AIAA JOURNAL*, Vol. 47, No. 6, pp. 1408-1420, 2009.
- [3] L. A. Garrison, W. N. Dalton, A. S. Lyrintzis, and G. A. Blaisdell, "Semi-empirical noise models for forced mixer jet noise predictions," *Aeroacoustics*, Vol. 5, No. 2, pp. 139-171, 2006.
- [4] 蔡宏儒，運用數值模擬方法進行噴頭流場與聲場的耦合分析，國立聯合大學碩士論文，2007。
- [5] 白明憲，工程聲學，全華圖書股份有限公司，2008。

Jet Noise Diagnosis and Suppression in Dust Collector Pulse-jet Cleaning Condition

Jian-Xing Li¹, Hsia-Sheng Tsai¹, Yun-Huang Hung², Jiun-Yi Hung²

¹Noise and Vibration Section

Automotive Research and Testing Center

²Chi-Huang Ventilation Engineering Co. Ltd

SBIR project: 1Z990185

ABSTRACT

This paper performs jet noise diagnosis and suppressant silencer design in industrial dust collector pulse-jet cleaning condition and optimized the silencer design to achieve advanced improvement effect. Dust had accumulated on fabric filter during cartridge collector operating. In general, a high pressure blast of air is used to remove dust from the filter to maintain performance of dust collector. However, the jet noise as high as 110 dB(A) causes a threat to occupational safety and health. Moreover, the preserving of pulse-jet cleaning performance is considered when studying the pulse-jet noise reduction. In this paper, the pulse-jet noise properties and jet flow pattern are discussed with spectrum analysis and pulse-jet flow of high speed photography. As the result, pulse-jet noise level can be reduced to effectively 79 dB(A), and outlet jet pressure can be also retained 70%. In the future, this technical procedure can assure the quality control, and accumulate silencer design database of different cleaner machine can be applied to fast tuning and customization service.

Keywords: cartridge collector, pulse-jet cleaning noise, pulse-jet flow of high speed photography.