

消音器應用在粉塵氣流系統之 問題剖析

林啟修*

摘要

傳統吸收式消音器已被廣泛運用在工業噪音防制之被動式(passive)控制設備。舉凡送風機、壓縮機、冷卻水塔、汽渦輪機等設備均可在其進、出風口端設置該類型消音器來達到減音之功能。在一般良好之操作環境下，吸收式消音器之使用期限是可以維持相當之年限而不會對其減音功能有太大改變；反之，在流體輸送系統中有粉塵或其他腐蝕性氣體等惡劣環境(hostile environments)下，消音器中之消音柵(baffles)將因其組成材料受到粉塵侵入堵塞(clogging)而降低其減音功能，或是因鋼材受到腐蝕等而縮短使用年限，即使再經過清理亦很難恢復原有之性能。

【關鍵字】

1. 粉塵氣流(dust-laden dirty gas stream)
2. 吸收式消音器(dissipative silencer)
3. 平行消音柵(parallel-baffle)
4. 共振器(resonator)

*中鼎公司環工專案副組長

基於此原因，國外早在 70 年代末期就針對吸收式消音器中所使用之消音柵進行改良，研發出各種特殊型式之共振器(resonator)消音柵，以取代傳統由吸音材填充之消音柵，並廣泛應用在增壓鍋爐(pressurized boilers)及燃煤動力工廠之排煙脫硫(flue gas desulphurization, FGD)、脫硝 Denox 等大型系統之誘引式送風機出口煙道中，以降低由煙囪口傳出之噪音量。該類型消音器之設計及製造技術在國外已相當成熟，且其減音及空氣動力性能，多經過實驗室實際測試故產品相當可靠。但就國內控制應用而言，一般仍局限在採用傳統吸收式消音器為主，僅少數垃圾焚化廠、鋼鐵廠及水泥廠使用過共振式消音器。但實際上只要是製程中會產生飛灰、塵粉等空污之工廠，都有可能面臨相同的問題。本文旨在介紹國外研發成功之過程及經驗，以期能提供給國內業界作為參考。

一、傳統吸收式消音器概述

吸收式消音器是最被廣泛應用於流體輸送，以及需要較寬頻帶(broadband)減音量且需有較小之風壓損失情況。這類消音器是由設計成不同長度及厚度之平行消音柵(parallel baffle)組合，並安裝於與氣流同一方向上以達到寬頻噪音之減量。最常使用之消音柵構造為內部填充多孔性吸音材(porous sound-absorbing materials)並外覆沖孔金屬板(開孔率一般在 20%至 40%)；在氣流速度非常高之情況下，還需再配合其他外覆材料如：玻璃纖維布、金屬網等，以防止吸音材表面受到侵蝕(erosion)而影響到吸音性能。其他構造之消音柵則適用在特殊之情況下，例如特定頻率之高減音量或操作環境中有粉塵之情況。此部份將在第三節中加以探討。

吸收式消音器其消音原理主要是利用設置於氣流通道之平行消音柵，將輸送氣流平均分散於各消音柵之間，以利消音柵能充份吸收聲能，因此消音柵間氣流通道(passage)距離應小於聲波波長。當聲波通過多孔性吸音材之孔隙時，由於吸音材本身與氣流間之流體阻抗(flow resistivity)相互產生摩擦作用，將聲能轉換成熱能而達到消除噪音之目的，因此消音柵厚度與多孔吸音材流體阻抗數值的選定就非常重

要。

吸收式消音器另外一個特點在於可藉由消音柵前端圓狀鼻錐型(rounded nose)及後端漸縮尾狀(faired tail)之良好空氣動力設計，而獲得低的風壓損失。當送風機負載並無足夠安全餘裕值，或是原系統並無安裝消音器而事後必須加裝時，壓降要求就變得非常重要了。因此吸收式消音器特別適用於需要輸送大量氣體量且低風壓損失之情況。

二、傳統吸收式消音器之限制及影響

傳統吸收式消音器由於受到本身音頻減音特性以及內部消音柵組成構造等因素影響，在噪音防制設計與應用上應特別謹慎。尤其是在如燃煤動力工廠之排煙脫硫、脫硝及增壓鍋爐等大型系統中，所使用之消音器體積都非常大且重，如使用不當將造成日後保養清理之不便，或是縮短使用年限而需重新安裝新的消音器。

2.1 噪音源對象限制

使用平行消音柵之傳統吸收式消音器，其所表現出音頻減音特性為類似鐘形(bell shape)曲線，其八度音階中心頻率(octave band center frequency)減音最大值範圍通常分佈在 500Hz 至 2,000Hz，且低於 500Hz 之減音值即大幅衰減。此類消音器使用在多翼離心式送風機時並不會有太大問題；但如果是針對徑向式及軸流式送風機之噪音防制時，則減音效果就會降低。主要原因是上述送風機均存在明顯之葉片通過頻率(blade passing frequency, BPF)及其和諧(harmonic)頻率純音，這些純音(pure tone)範圍大都在 200Hz 至 400Hz 之間，而傳統吸收式消音器在這些純音範圍並無法有效提供一定程度之減音值。

因此之故，當傳統吸收式消音器應用在誘引式送風機(induced draft fan)出口煙道時，雖然由煙囪口傳出之噪音仍可降低，但由於寬頻部份之噪音減量相較於純音部份來得大，使得原先在未安裝消音器前寬頻部份對純音部份之噪音妨礙效應(masking)將大幅降低，亦即安裝消音器後寬頻與純音位準間之差距增大，導致純音部份之噪音感覺會聽得更加清楚，其並非純音部份之噪音量增加。有關純音與背景

音間差異之影響詳圖 1。

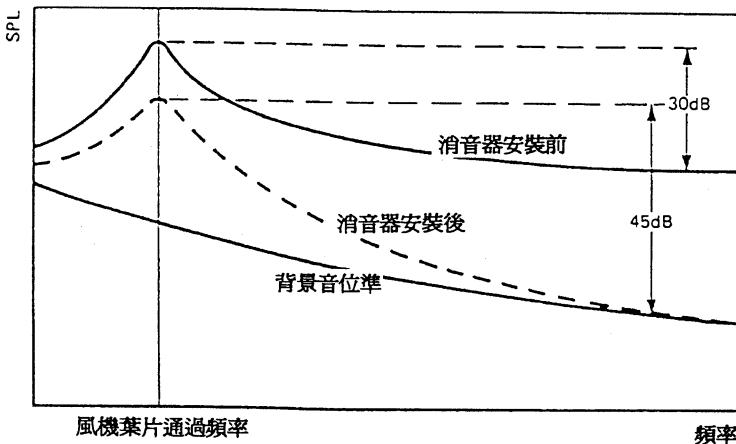


圖 1 純音與背景音間差異之影響

2.2 輸送氣體對象限制

在設計及應用傳統吸收式消音器時，對於系統內輸送氣體之性質如：含塵量、腐蝕性、含水量、限制溫度等應加以考慮。當使用內部完全填充多孔性吸音材之平行消音柵時，由於消音柵是直接與氣體流(gas streams)接觸，一旦輸送氣體中含有粉塵及水氣時，粉塵就會容易附著在消音柵表面金屬沖孔板上，長時間以後，甚至會將其開孔部份或是吸音材表面孔隙堵塞，而降低吸音功能及消音器使用年限。不幸的是這種氣體裏含有多量灰塵或直接吸取微粉炭之操作環境，經常是使用徑向式送風機做為空氣輸送之用，由 2.1 節可知其純音成份是非常顯著的。

早在 50 年代國外即嘗試利用各種方法來防止粉塵侵入多孔吸音材，例如使用一不透氣薄膜(nonporous foil)外覆於多孔材表面。不過薄膜厚度對於本身機制強度與聲能穿透進入多孔材有相對影響。使用厚的膜會影響中、高頻部份吸音效果；而薄的膜對材料本身機械強度較低，因此並不是非常可行的。另外藉由設計成可抽取式

消音柵，或是在消音器進口端設置適當數量之空氣噴嘴(nozzles)，利用高壓空氣定期吹洩消音柵表面氣流通道，是可以暫時改善消音器功能；不過長時間以後利用前述方法則就無法明顯有效回復消音器功能，主要是因為粉塵顆粒已經侵入多孔吸音材內部而無法藉由清除表面來移除。此時，就惟有重新安裝新的消音器。

三、共振式消音器之發展及應用

由於傳統吸收式消音器在應用上會受到音源及系統條件之限制及影響，且雖然初期設置成本較低，但日後定期清理保養及拆裝費用就無法避免。因此在 70 年代末期歐洲及北美就針對排煙及其他氣流中含粉塵之系統發展出特殊之消音器，來克服過去在含塵量系統所遭遇到之問題。現就其發展及應用現況說明如下：

3.1 設計原理

早期研發之特殊消音器其消音柵是由一系列側向開口(slits)之空腔(cavity)組成，且開口並無覆蓋任何多孔材或是其他薄鋁，因此粉塵就不會附著在開口之面積上。其中最早發展出消音器之一就是依據側向分岐共振器(side branch resonator)原理設計，利用聲波相位(phase)干涉來達到減音目的(如圖 2 所示)。共振器之共振頻率是可以調頻的(tuned)，通常共振頻率是針對特定頻率如：風機葉片通過頻率及其一階和諧頻率，來設計共振器空腔開口之尺寸及容積。當聲音以平面波(plane wave)方式通過空腔開口側面時，氣體擠壓縮空腔背部反射之聲波與正面入射聲波交會，兩者相位角差 180 度時，即波峰、波谷重疊，聲能就被平衡抵消而獲得最佳之減音效果。

側向分岐共振器在功能上仍有限制，一旦需要達到高的減音值時，在使用上就有困難。為了提升共振式消音柵在寬頻帶之減音性能，可在空腔頂部或背部內襯吸音材，此時消音柵就成了共振吸收式。由於內襯吸音材位置並不像傳統吸收式消音器消音柵，是直接曝露在粉塵氣流中，加上共振器與氣流間微妙之方向組成，以及利用開口部分特殊角度斜鋁(blind)設計，都可大幅降低粉塵侵入堵塞吸音材孔隙之塵量。

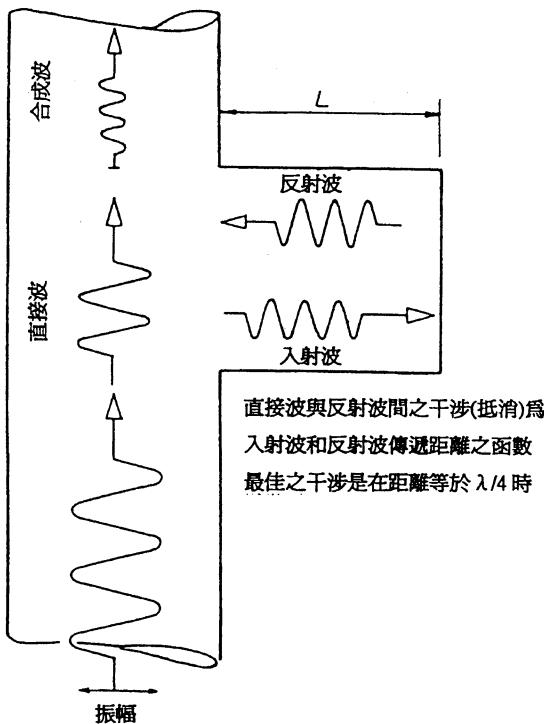


圖 2 共振器消音原理

3.2 組成構造

基本上，共振器消音柵是將傳統消音柵內部充填吸音材之空間，以金屬板中央區隔成左右兩側，每側再橫隔成數個供共振用空腔。消音柵中央橫隔之金屬板並不限於一直的平板，亦可以是具折角之平板，以便於消音柵左右兩側搭配不同尺寸之空腔。至於空腔正面開口大小、室內有無吸音材以及內襯位置等，則依實際減音需求而定。如使用吸音材時則吸音材不可以直接曝露在髒的氣流中，而必須以細目不鏽鋼網保護之。至於材質方面考量，一般鋼材使用之鍍鋅及塗裝方式極易受粉塵氣

流之摩擦(erosion)剝落而腐蝕，因此內部鋼材應該使用耐腐蝕之不鏽鋼材以確保長期使用年限，厚度至少 12ga。

3.3 商業化產品

$\lambda/4$ (quarter wavelength)消音器是依據側向分岐共振器原理設計發展出來的，利用分佈在氣流兩側分岐短槽(stub channels)做為聲響阻抗(acoustical impedance)之用，將聲能轉換成熱能。這些分岐之短槽是由隔板平行排列成狹窄之空腔所組成。顧名思義 $\lambda/4$ 消音器即是指前述之短槽，其聲響有效長度等於主要通過頻率之波長的四分之一，在這頻率下可獲得最大之減音量。除 $\lambda/4$ 外，短槽之有效長度也可以前述之 $3/4\lambda$ 或 $5/4\lambda$ 。不同型式之 $\lambda/4$ 共振式消音柵如圖 3 所示。通常設計製造 $\lambda/4$ 消音器之廠商均會對其產品進行性能測試以確保其品質。性能測試是依據 ASTM E477-84 "Duct Liner Materials and Prefabricated Silencers for Acoustical and Airflow Performance" 方法，其結果包括：動態介入損失值(dynamic insertion loss)、自發噪音(self-noise)及風壓損失值。

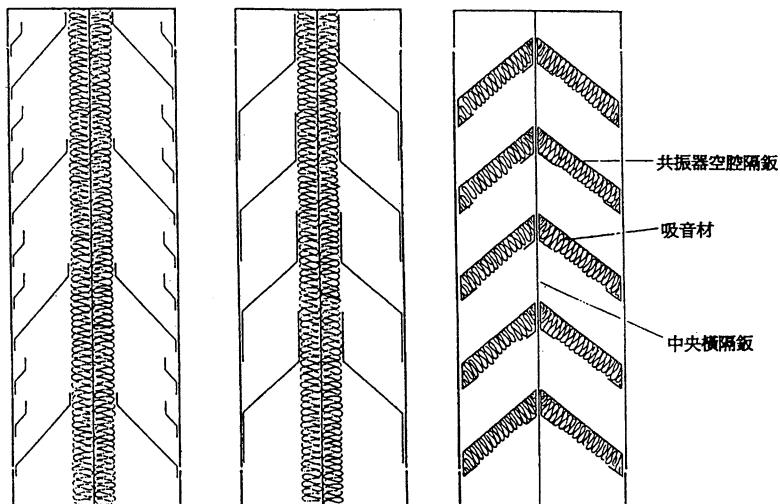


圖 3 不同形式之 $\lambda/4$ 共振式消音柵

由於所設計之消音器具有自動清理(self-cleaning)特性，故在高含塵量之氣流

中，是不太會發生大量粉塵附著在共振器開口及表面之現象。即使是不可避免有少量粉塵會附著在隔板之平滑表面上，也可因此而增加共振器之阻尼(damping)作用。當輸送氣體流是成垂直時，消音器安置方向必須是讓消音柵中共振器開口面以斜的方向朝下，這樣的設計將使進入共振器空腔內之粉塵，可藉由重力作用回流到垂直之氣體流向中，如此粉塵就不會沉降(settling)在共振器開口上。反之，當消音器是應用在輸送氣體流成水平時，則其消音柵中整列的開口必須是垂直的，且其共振器空腔是以斜的方向面對氣流，這樣的設計將可使粉塵顆粒因斜的隔板阻擋而降落到氣流通道底部。這也就是說為何消音器具有自動清理特性之故。在不同氣體流向下方 $\lambda/4$ 共振式消音器設置方式如圖 4 所示。

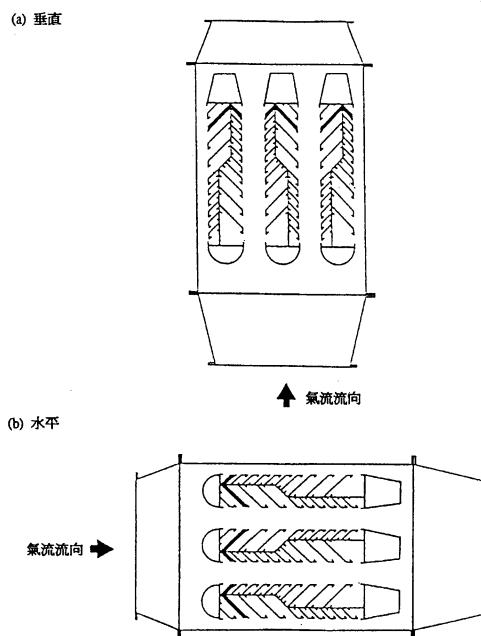


圖 4 不同氣體流向下方 $\lambda/4$ 共振式消音器設置方式

如果含塵氣體之特性是屬於乾燥、非黏著性(non-sticking)及非硬化性(non-

cementing)時，則使用 $\lambda/4$ 消音器是不需要清理的。對於排煙系統中所使用之消音器，可以藉由觀察一整年中從消音器排放之含塵量多寡、含水量，來判定是否需進行清理。在國外案例中即使老舊燃煤動力工廠之含塵量超過 $300\text{mg}/\text{m}^3$ ， $\lambda/4$ 消音器仍舊被應用成功。

四、共振式消音器案例介紹

國內某大型垃圾資源焚化廠袋濾式集塵器使用之誘引抽風機其轉速為 1,150 rpm、風機葉片數 12 片，當袋濾式集塵器暫停使用時，鍋爐燃燒之廢氣在經半乾式洗煙塔後直接由繞流(bypass)通路輸送至抽風機。這種情況下廢氣內粉塵量最大，其排煙成份如下：

Volume flowrate (wet) : $132,281 \text{Nm}^3/\text{hr}$

Mass flowate (wet) : $163,115 \text{kg/hr}$

Volume rate of H_2O : $26,125 \text{Nm}^3/\text{hr}$

Mass rate of H_2O : $20,992 \text{kg/hr}$

N_2 volume (dry) : 80%

O_2 volume (dry) : 10%

Temperature : 260 degrees C

Dust : $9,000 \text{ mg/Nm}^3$

HCl : 1,300 ppm

Sox (as SO_2) : 300 ppm

Nox (as NO_2) : 105 ppm

CO : 60 ppm

Pb : 40 mg/Nm^3

Cd : 30 mg/Nm^3

Hg : 1 mg/Nm^3

202 消音器應用在粉塵氣流系統之間題剖析

依風機廠商所提供之風機出口端之音能位準(sound power level, PWL)如下：

| Hz | 63 | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| PWL,dB | 117 | 114 | 113 | 107 | 104 | 104 | 100 | 98 |

依風機規格計算其葉片通過頻率 $BPF=230\text{Hz} (=1150*12/60)$ 。噪音由風機出口端經煙函排氣管傳至廠周界之音量預估為 51dB(A) ，超過第二類噪音管制區夜間時段 50dB(A) 之規定值。因此須進行噪音防制，其目標為周界減音量需達到 15dB(A) 。在八度音階成份中葉片通過頻率之噪音位準為 55dB ，與環境中人耳可覺察之頻率最低音量位準間差距達 30dB ，因此當背景噪音低於 45dB(A) 時，在周界將會很清楚聽到風機葉片通過頻率造成之純音影響。

雖然在正常操作下粉塵量僅約 20mg/Nm^3 ，但在繞流情況下粉塵量將高達 $9,000\text{mg/Nm}^3$ ，因此並不適用傳統吸收式消音柵而必須使用共振式消音柵，通常前述之設計限值建議為 15mg/Nm^3 。由於排氣中含水量佔 10% ，屬於具黏著性之有塵排氣，故另外須考慮增加人孔設計，以便於停爐期間進行消音柵清理。

由於廢氣中含 1300ppmHCl 且溫度範圍在 $150^\circ\text{C}-260^\circ\text{C}$ ，故內部鋼材須使用 AISI 316TI (DIN-4571)，吸音材為礦棉並外覆不鏽鋼網。共振器尺寸大致上可區分為兩類，主要是針對葉片通過頻率(230Hz)及其一階和諧頻率(460Hz)，因此消音器在接近上述頻率之八度音階中心頻率 250Hz 及 500Hz 處減音量最大。預估消音器之減音量如下，整體減音量為 17dB(A) 。

| Hz | 63 | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| dB | 4.7 | 10.8 | 27.1 | 27.1 | 23.8 | 21.8 | 15.9 | 7.7 |

在八度音階成份中葉片通過頻率之噪音位準將降為 28dB ，與環境中人耳可覺察之頻率最低音量位準間差距縮小至 11dB 。因此當消音器安裝後不僅是整體音量獲得改善，即使是背景噪音很低時，在周界亦不容易聽到風機葉片通過頻率造成之純音

影響。而整體消音器之風壓損失值為 200Pa。

五、結論

針對不同之噪音源控制及輸送氣體對象，在消音器型式的選用上尤其應格外謹慎，一般而言傳統吸收式消音器應用範圍遠較共振式消音器來得廣泛。以應用在粉塵氣流中誘引式送風機之噪音防制為例，兩者間之優劣如下：

1.就傳統吸收式消音器而言

- (1)它對於誘引式送風機所產生之葉片通過頻率及其和諧頻率(200Hz-400Hz)無法有效提供一定程度之減音量。
- (2)吸收式消音柵容易受粉塵氣流之阻塞而降低消音功能。據國外實際測試結果顯示，在濕的粉塵氣流下使用兩年之傳統吸收式消音器，如消音柵表面不清理，則會因粉塵阻塞而降低 70%之消音功能。而且即使是以清理方式處理，初期雖然仍可維持一定效果，但長期以後則就無法回復到原有性能。
- (3)較低之風壓損失值。
- (4)初期設備成本較低，但日後維護費用則無可避免，甚至最後須要重新安裝新的消音器。

2.就共振式消音器而言

- (1)它可以針對誘引式送風機所產生之葉片通過頻率及其和諧頻率，來設計共振器空腔尺寸及容積，有效提供一定程度之減音量。據國外實際測試結果顯示，就相同長度、空氣通道及消音柵厚度而言，共振式消音器在前述頻率減音效果上較傳統吸收式多 1.5 倍。
- (2)共振器空腔不會有大量粉塵阻塞之問題，即使是少量粉塵附著在空腔表面，反而可以增加共振器之阻尼作用，因此在減音性能上是不會受粉塵影響。
- (3)較高之風壓損失值，但通常不超過 2 i.w.g.(498N/m²)。
- (4)初期設備成本較貴，但在一般情況下日後維護是不需要的。

參考文獻

- 1.行政院衛生署環境保護局，”噪音管制手冊：噪音防制策略篇”，6-12，中華民國七十六年六月
- 2.David A. Bies and Colin H. Hansen, “Engineering Noise Control”, E & FN SPON, p348-p350, 1996
- 3.Lewis H. Bell, Douglas H. Bell, ”Industrial Noise Control”, Marcel Dekker, Inc., p302 p313-p314, 1994
- 4.Cyril M. Harris, “Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control”, McGraw-Hill, Inc., p30.19-p30.20, 1991
- 5.J D Webb, “Noise Control in Industry”, Sound Research Laboratories Limited, p204, p329, 1978
- 6.John Reason, “Plan Fan, Gas Turbine Silencers to Meet Long-Term Demands”, Power, p48, May 1987
- 7.R&M, “Industrial Sound Protection: The Use of Silencers to Diminish Fan Noise”
- 8.Willich, “Silencer for Dust-Laden and Aggressive Gas Flows”
- 9.Q.E. International B.V., “Industrial Silencers”