

濕式洗滌塔之硫酸液滴處理效率提升研究

黃俊超*、吳信賢**、簡弘民***

摘 要

本研究主要利用界面活性劑添加於硫酸液滴濕式洗滌塔洗滌水中，用來提升洗滌塔內填充物表面水膜帶電量，同時設計一套專門去除微小液滴之除霧系統，其處理風量可達 5 CMM(m^3/min)的模廠來驗證此項技術。結果顯示，本技術可將硫酸液滴之去除效率由原本的 45.7% 提升至 85.9%，實廠則選擇了高科技廠內的一座 1,000CMM 的洗滌塔進行修改與測試，結果發現針對硫酸液滴的去除效率可達 78.1%。

【關鍵字】硫酸液滴、洗滌塔、噴霧、界面活性劑

*工研院能源與環境研究所 副研究員

**工研院能源與環境研究所 研究員

***工研院能源與環境研究所 正研究員

一、前言

半導體製程中經常使用大量有機溶劑及酸鹼溶液、氣體來進行蝕刻或清潔，部分化學物質會因揮發而被排氣系統收集。隨著產業產能遽增，製造過程產生廢氣也隨之增加。這些化學物質可能逸散到作業環境空氣中，而影響作業人員健康及產品生產良率，也有可能由排放管道排放而影響周界空氣品質。因此，行政院環保署在 88 年公告「半導體製造業空氣污染管制及排放標準」^[1]來管制半導體業者空氣污染物的排放。

半導體業排放標準要求無機酸及有機廢氣等空氣污染物應導入污染防制設備，處理至符合去除效率或排放總量 2 項要求之一。例如，硝酸、鹽酸、磷酸及氫氟酸等污染物，工廠的總排放量需小於 0.6 kg/hr，硫酸則需小於 0.1 kg/hr，或是洗滌塔的去除效率達到 95 % 以上。若上述無機酸以濕式洗滌設備處理，而且無法證明符合排放標準時，其控制條件應符合下列之規定：設備洗滌循環水槽之 pH 值應大於 7、潤濕因子應大於 0.1 m²/hr、填充段空塔滯留時間應大於 0.5 秒及填充物比表面積應大於 90m²/m³。

半導體製程不斷的向前邁進，特別在潔淨室環境空氣品質有效控制空氣中 Airborne Molecular Contamination, AMC)微污染的問題更在各廠之間普遍受到重視。因為 AMC 會對不同製程產生不良的影響，嚴重時可能對產品造成致命的缺陷而影響良率。潔淨室內的 AMC 來源大致包括外氣、製程化學品、機台設備、室內工作人員和建材等。外氣的污染包括煙囪排放、汽機車排放的廢氣，經由外氣補充口(Makeup Air Unit)再被吸回潔淨室內。由於大多數半導體廠集中於科學園區，針對新竹科學園區周界空氣品質的研究^[2]顯示，部份監測點總氟化物的周界濃度測值已超過「固定污染源空氣污染物排放標準」的周界標準值（10μg/m³）。而且在風速低於 2m/s 時，由於擴散不良，空氣中污染物濃度分布一致且有偏高的現象（如圖 1 所示）。此外也發現週界空氣中污染物濃度變化與園區整體產值的變化有顯著相關性（如圖 2 所示），換句話說，較嚴重的外氣污染問題可能會出現在產能高峰期。

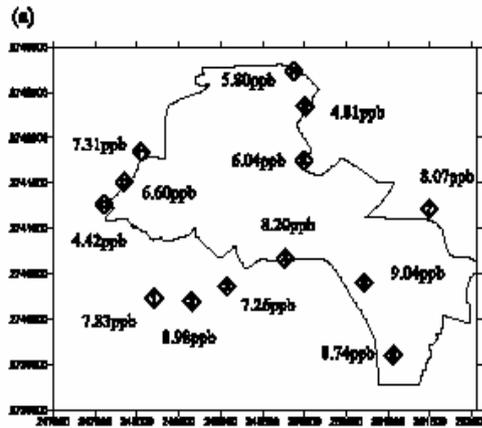


圖 1 園區空氣中污染物濃度分布^[2]

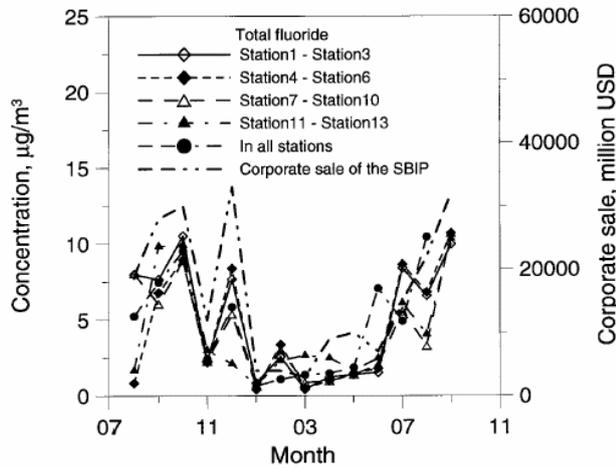


圖 2 污染物濃度分布與產值關係^[2]

外氣污染事件可歸因於廠房太過密集，以及煙囪排放高度設計的缺失，由於建築物之間太過集中，頂樓的廢氣排放常因建築物之間的效應使得氣體不易擴散，最後會在很短的距離落至地面，然後再回到建築物內，這樣的情況就稱為 Fume Re-entry 效應（如圖 3），如果是發生在尾氣排放後，經由空調進氣口引入潔淨室

內（如圖 4 所示）等等的近距離且高污染問題，形成 AMC 污染而影響產品良率的機會也會升高。

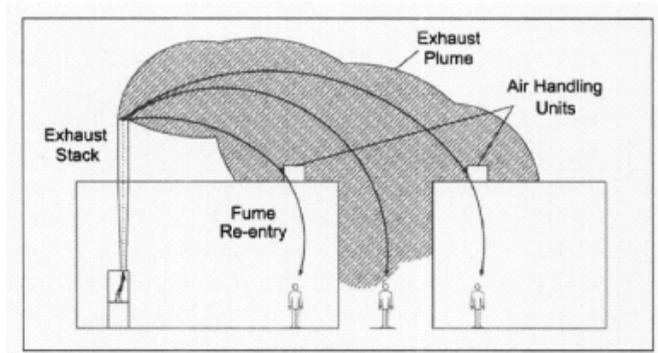


圖 3 Fume Re-entry 效應^[3]

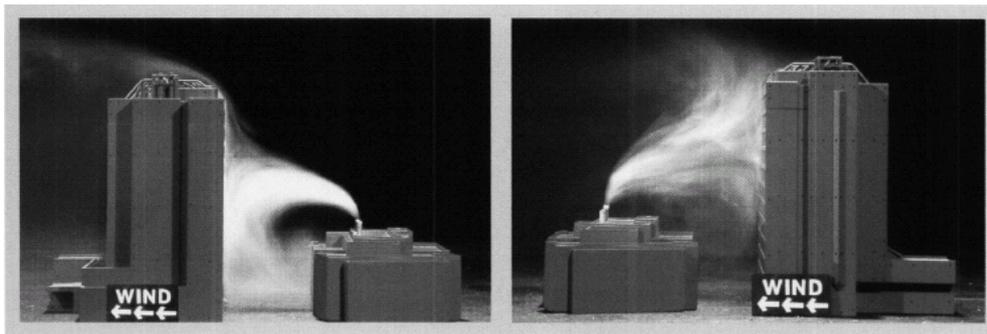


圖 4 排氣對鄰近廠房的影響^[3]

鄭等人即曾經在排放管道釋放追蹤氣體 SF_6 並在空調進氣口監測其濃度變化，証實上述交互污染問題確實存在，特別是在風速低的季節以及空調進氣口位在排放管道下風處的時候^[4]。而高科技產業廢氣排放特徵為低濃度與大風量，廢氣排放組成中，無機酸鹼污染物包含了粒狀及氣狀，但以氣狀污染物為主^[5]。酸性廢氣排放管道中氣狀污染物以氟化氫、氯化氫與氨氣為主要污染物，平均濃度為 1,254、660 與 $1,127 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，粒狀污染物以氟鹽、氯鹽、氨鹽與硫酸液滴為主，濃度分別

為 439、264、294 與 207 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。

蔡等人曾經進行新竹科學園區無機酸鹼廢氣的排放總量推估，其中硫酸液滴排放量為 7.8 公噸/年^[6]，簡與陳推估科學園區內工廠之硫酸液滴排放總量則為 13.6 公噸/年^[7]，顯示硫酸液滴在高科技產業的排放量不小。高科技產業的無機酸廢氣控制設備大多以填充式濕式洗滌塔為主。但目前法規要求管制的無機酸廢氣中，硫酸液滴因是粒狀污染物，廢氣處理原理與硝酸、鹽酸、磷酸及氫氟酸等氣體並不相同，因此洗滌塔原有處理效率上可能無法兼顧對氣狀污染物的酸性廢氣與粒狀污染物的硫酸液滴。黃曾對高科技產業的填充式濕式洗滌塔對於硫酸液滴的處理效率進行研究，針對半導體各廠的 57 座與光電廠的 17 座填充式濕式洗滌塔利用環保署環檢所公告 NIEA 450.70B 的標準採樣方法進行硫酸液滴的採樣，採樣結果發現大部分的硫酸液滴處理效率接近 0%^[8]。

濕式洗滌是藉由氣液接觸把氣體中的污染物傳送到液體中，達到淨化廢氣的目的。氣液接觸過程中，氣態污染物藉由紊流、分子擴散等質量傳送現象進入液體中；微粒態污染物在洗滌塔中去除的應用機制則包括：衝擊(impingement)、布朗運動(Brownian diffusion)、截流(interception)、靜電沉降(electrostatic precipitation)、重力(gravity)等等。衝擊與布朗運動分別是收集粒徑大於 3 μm 及粒徑小於 3 μm 之微粒的主要機制。

常用在控制微粒物質的形式例如文式洗滌塔、噴霧式洗滌塔、篩板塔、填充塔等等。大致上來說，可依收集粒徑由小到大排列如下：文式塔(小於 1 μm)、篩板塔(大於 1 μm)、填充塔(大於 3 μm)、噴霧式塔(大於 5 μm)^[9]。可見目前高科技產業常用的填充塔並不適合用來處理粒徑約僅有次微米的硫酸液滴。較大粒徑(1~10 μm)硫酸液滴在一般填充塔可以被有效去除；較小粒徑硫酸液滴(1 μm 以下)或氯化銨微粒(0.1~2 μm)則須使用對次微米微粒有更高效率的設備加以去除，例如文氏洗滌器會較易去除小於 1 μm 之微粒。

有許多研究利用不同的方式增加洗滌液帶電的特性，例如通電、噴霧自然帶電、加藥等方法。Pilat 等人在報告指出，在噴霧塔裡當小滴和微粒被相反極性地充電時，由水滴收集小微粒(0.05 - 5 μm 粒徑範圍)的效果顯著地增加^[10]。另一個類似的實驗結果亦顯示，0.5 μm 微粒的收集效率從未充電情況的 79 % 增加到被充

54 濕式洗滌塔之硫酸液滴處理效率提升研究

電情況的 89 %；5 μm 微粒的收集效率則從未充電情況的 90 % 增加到被充電情況的 97 %^[11]。Vaaraslahti 等人認為水滴在噴灑過程會有自然充電現象。如果微粒是中立的或被充電對相反極性，由增加小滴的充電即可提高在洗塵器的微粒去除效率^[12]。

Pilat 與 Lukas 也針對不同材質的灑水頭研究其帶電的特性，研究中針對了不鏽鋼、黃銅與鐵氟龍材質的噴嘴進行帶電量的測量，結果發現噴嘴除了不同材質下會噴出不同的帶電量外，不同流量與壓力也會造成帶電量的差異，其結論是黃銅材質的帶電量最高，其次是鐵氟龍材質，不鏽鋼材質則是最差的^[13]。

Polat 等人則添加界面活性劑於洗滌液中，並且認為添加界面活性劑可以使洗滌液帶電，進而提高氣體吸收效果^[14]。Chein 等人提出，界面活性劑可以使洗滌液提高帶電量、應用於提升處理氯化氫、氟化氫與氨氣氣體的去效率，研究發現含界面活性劑與不含界面活性劑的洗滌水，在噴霧液滴與填充塔段的帶電量差異可達 1,200~1,500 nC/L。在這樣的帶電差距下可有效提升靜電沉降的效果，同時也讓洗滌塔處理低濃度之無機酸鹼廢氣效率獲得大幅度的提升^[15]。實際應用於半導體產業的填充塔時，也發現經添加界面活性劑的洗滌塔（配合噴霧系統），將處理氯化氫、氟化氫與氨氣氣體的效率由原來的 20~30 % 提升到 70~90 %，提升效果十分顯著^[16]。本研究則進一步利用洗滌液帶電的特性，使得硫酸液滴更容易被洗滌塔處理，進一步提升洗滌塔處理硫酸液滴的效能。

二、研究方法

2.1 模廠測試裝置

為了獲得新型除霧器與界面活性劑之設計參數及操作條件，作為進行實廠洗滌塔修改的基本設計及成本估算之依據。研究中所設計的模廠模擬風量為 5 CMM、在洗滌塔填充段的停留時間約 1 秒、洗滌水 pH 值控制在 8.6~9.1 之間、循環水量為 16 L/min、洗滌塔內風速為 2.1 m/sec，其餘各項參數皆與實廠洗滌塔相似。模廠設計流程圖如圖 5 所示。

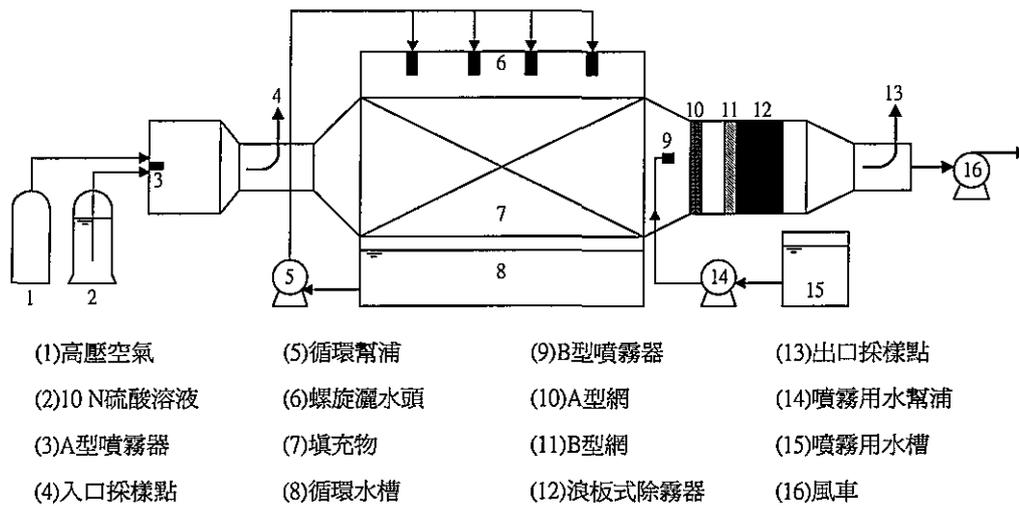


圖 5 模廠洗滌塔設計流程圖

硫酸液滴的產生方法是使用 Spraying Systems 公司所生產的 1/8 JN-SS 噴嘴噴出，這個噴嘴是使用高壓空氣將 10N 的硫酸溶液以虹吸的方法噴出霧滴，其霧滴之粒徑大小可控制在 $20\ \mu\text{m}$ 以下，同時再以一個截取直徑為 $2.5\ \mu\text{m}$ 的衝擊板將 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上的大粒徑硫酸液滴加以去除，模擬高科技產業廢氣中小粒徑硫酸液滴存在的狀況。

填充塔所使用的灑水頭為螺旋式噴水頭，此噴水頭主要目的是將循環的洗滌水均勻灑佈於填充物料上，增加氣液接觸的面積，提升處理廢氣的效率。填充段與除霧段間所使用的噴霧頭是某公司所生產的 MW15 噴嘴，此噴嘴主要目的是將界面活性劑均勻噴灑在 A 型網上，利用界面活性劑本身具有帶電的特性，讓 A 型網上帶電，增加 A 型網去除硫酸液滴物質的處理效率。B 型網主要目的是將一些穿透過 A 型網的界面活性劑液滴加以攔除，避免隨著廢氣排放至大氣中，同時也能夠把一些洗滌水噴出之洗滌液加以攔除。浪板式除霧器目的則是將填充塔所噴出之大型水滴加以攔除。本模廠洗滌塔的入、出口採樣在位置 4 與位置 13 之處。

2.2 實廠測試裝置

為了確認模廠設計參數應用到實廠後仍具功效，研究中特別在一家高科技廠商的填充式濕式洗滌塔進行修改與測試，本座測試的洗滌塔主要處理酸性廢氣，廢氣風量為 1,000 CMM，洗滌水 pH 值控制在 8.5~9.5 之間、循環水量為 1,600 L/min、洗滌塔內風速為 2.5 m/sec，其修改後之流程如圖 6 所示：

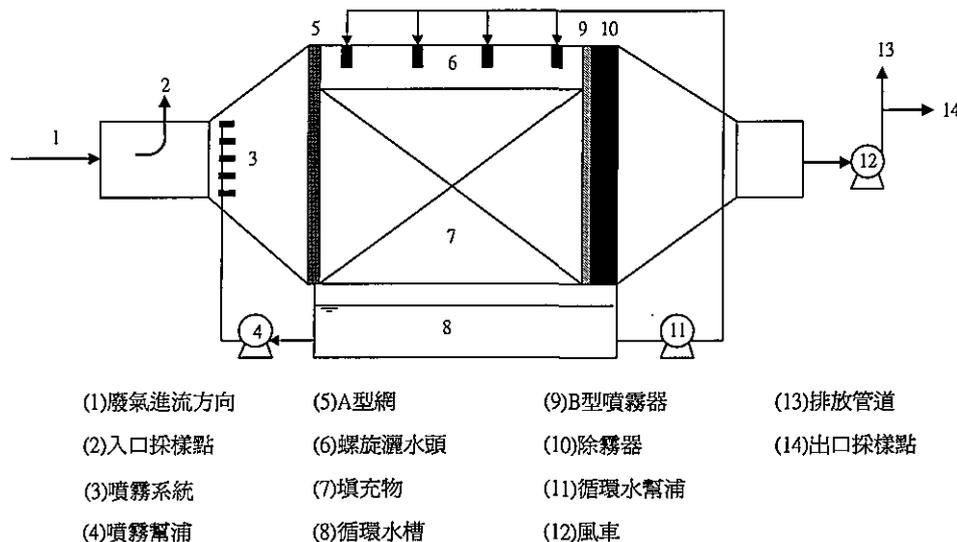


圖 6 實廠洗滌塔設計流程圖

進行修改後的洗滌塔增加了噴霧系統、噴霧幫浦、A 型網與 B 型網，由於實廠洗滌塔在填充物與除霧器之間沒有足夠的空間安裝類似模廠的噴霧系統與 A 型網，因此在實廠中將此系統放置在填充物之前端，目的仍然是利用界面活性劑讓 A 型網帶電，增加 A 型網去除硫酸液滴的效率。另外由於本座洗滌塔原本設計考量到壓損的問題，除霧器是使用比表面積較大的填充物料來替代原有浪板型的除霧器，在截取小液滴的效果明顯不佳，因此在除霧器前面多安裝一個 B 型網，將較小的水滴加以攔截下來，降低排放口因洗滌水噴出所造成的硫酸液滴濃度。不論是 A 型網或是 B 型網，在洗滌塔內的安裝厚度都不超過 1 公分，A 型網為 PP 材質(60 mesh)，B 型網為金屬材質(35 mesh)。

2.3 採樣分析方法

本研究中使用環檢所公告的標準檢測方法「排放管道氫氟酸、鹽酸、硝酸、磷酸及硫酸檢測方法」(NIEA A452.70B)。本方法可同時採集到氫氟酸、鹽酸氣體與硫酸液滴等氣狀與粒狀污染物，偵測極限為氫氟酸 $0.86 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 、鹽酸 $1.31 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 、硝酸 $0.75 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 、磷酸 $1.46 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 與硫酸 $2.49 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，本方法硫酸液滴的偵測極限比「排放管道中硫酸液滴檢測方法」(NIEA A441.11B)低非常多，此方法的偵測極限為 $50\sim 100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，因此 NIEA A452.70B 的方法更適合高科技產業高廢氣風量與低排放濃度的特性。

採樣方法主要利用多孔金屬固氣分離採樣器(Porous-metal Denuder)來進行^[17]。所採用的採樣器分解圖如圖 7 所示，採樣氣體由採樣器入口進入，先經過第一階孔徑 $2 \mu\text{m}$ 、直徑 37 mm 的鐵氟龍濾紙收集所有的微粒態污染物，然後再經過第二階與第三階分別塗敷碳酸鈉與檸檬酸等化學藥劑，孔隙直徑為 $100 \mu\text{m}$ 、直徑 25 mm 、厚度 23 mm 的多孔金屬片來吸收酸、鹼等氣態污染物。所得到的樣品再以離子層析儀(Ion Chromatography)進行分析，即可得知洗滌塔對酸、鹼氣體與微粒的排放濃度。

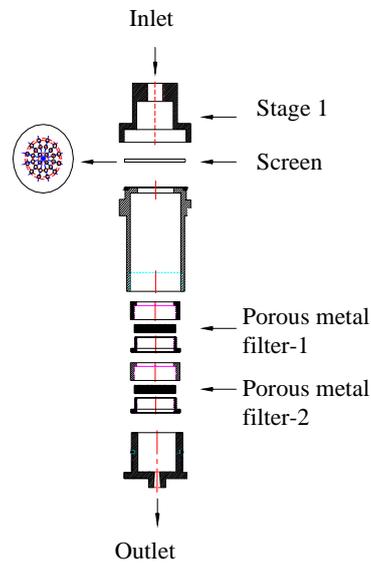


圖 7 多孔金屬固氣分離器組合分解圖

效率計算方式是同時於洗滌塔進出口進行採樣，並分析氣狀與粒狀污染物進出口濃度(C_{in} 及 C_{out} as ppb)。最後依公式(1)計算對氣狀與粒狀污染物之去除效率(RE%)。

$$RE\% = \left[1 - \frac{C_{out}}{C_{in}} \right] \times 100 \quad (1)$$

三、結果與討論

3.1 模廠硫酸液滴模擬濃度分佈

模廠測試的硫酸液滴是以實驗室硫酸液滴噴霧系統模擬產生，實驗室 114 次的採樣數據分析顯示，所產生的硫酸液滴平均濃度為 6.981 mg/Nm^3 ，濃度分佈狀況如圖 8 所示，圖顯示產生的硫酸液滴濃度大多集中在小於 10 mg/Nm^3 ，濃度 $5 \sim 9 \text{ mg/Nm}^3$ 最多。

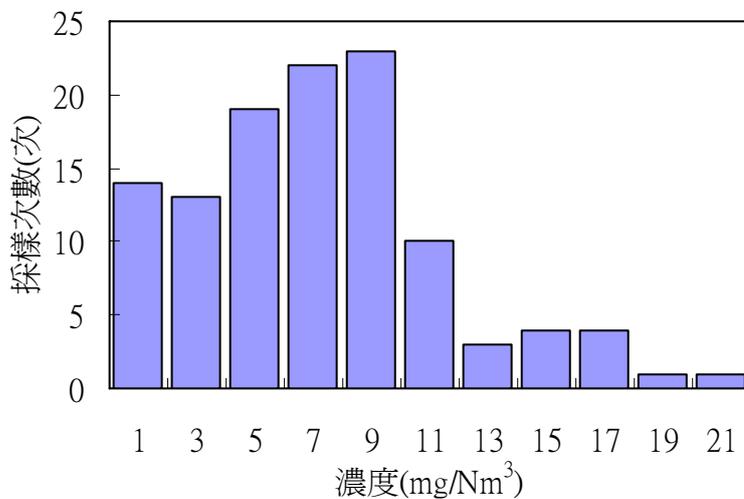


圖 8 模廠硫酸液滴產生濃度分佈圖

3.2 模廠硫酸液滴處理效率測試

研究中針對 6 種不同的設置條件與參數進行研究,其中條件 1 目的在了解一般洗滌塔設置條件與操作參數下對於硫酸液滴的處理效率,因此以不添加或增加界面活性劑或設備之臥式填充塔進行測試。條件 2 是在條件 1 的狀況下,在洗滌水中添加界面活性劑,目的是讓水膜能更均勻的分佈在填充物料表面,增加廢氣接觸機會,提升去除效率。這兩個條件的測試結果如圖 9 所示,在條件 1 的情形下,硫酸液滴的處理效率都在 30~60%,且大部分落在 50%以下,平均處理效率為 45.7%。條件 2 在添加了界面活性劑後,硫酸液滴處理效率提升至 40~70%,且大部分落在 50%以上,平均處理效率為 52.4%。

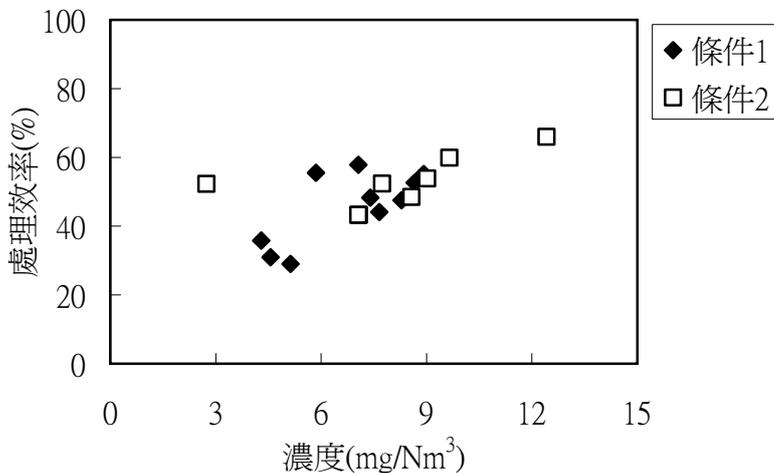


圖 9 模廠洗滌塔添加與未添加界面活性劑於洗滌水中處理效率之分佈

條件 3 與條件 4 都在除霧器部分增加了 A 型網與 B 型網的裝置；條件 3 的洗滌水中未添加界面活性劑,條件 4 則添加了界面活性劑於洗滌水中,其結果如圖 10 所示,在未添加界面活性劑時其處理硫酸液滴的效率介於 70~80%,條件 4 添加後大部分處理效率大於 80%;兩條件平均處理硫酸液滴的效率分別為 76.4%與 80.2%。

60 濕式洗滌塔之硫酸液滴處理效率提升研究

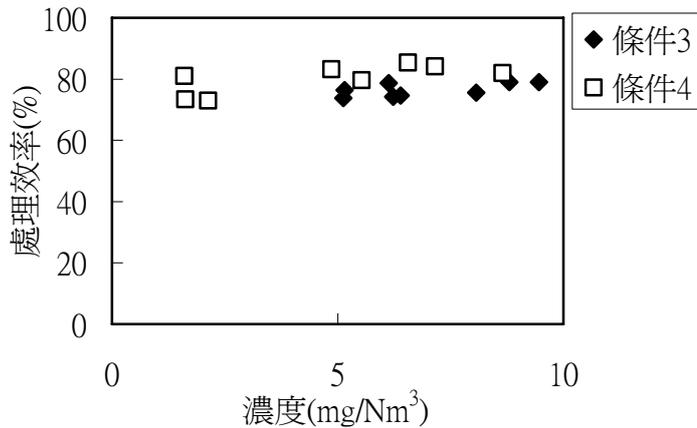


圖 10 新設除霧網後，添加與未添加界面活性劑於洗滌水中處理效率之分佈

條件 5 除了安裝 A 型網與 B 型網以外，同時在 A 型網上噴上自來水，條件 6 則在 A 型網上噴上界面活性劑，以比較在噴霧系統添有無加界面活性劑時對硫酸液滴處理效率之影響。當只有噴自來水時，洗滌塔對硫酸液滴的去除效率為 78~85 %；若添加界面活性劑後，去除效率在 80~92 % 之間，且大部分的處理效率在 85 % 以上；條件 5 的平均去除效率為 81.1 %，條件 6 的平均處理效率有 85.9 %，兩條件的實驗結果如圖 11 所示。

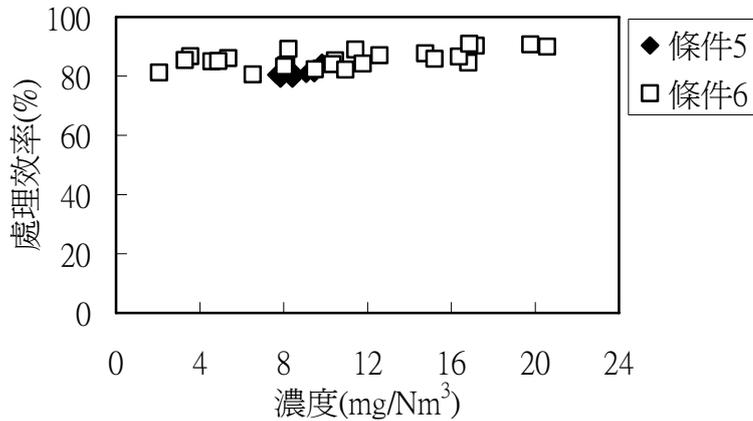


圖 11 於噴霧系統中添加與未添加界面活性劑處理效率之分佈

條件 1 至條件 6 之相關操作參數與比較如表 1 所示，由表中可知，條件 1 是洗滌塔完全不做任何改善時，對於硫酸液滴的平均去除效率僅有 45.7%，標準偏差達到 10.5%，且洗滌水的水滴容易穿過除霧器而被出口端的採樣器採集到，由於穿過除霧器的水滴大小不一，在採樣器中經常會發生突然採到一堆水滴或沒有採到水滴的狀況，也間接造成在條件 1 的狀況下數據間變化較大的情況。條件 2 因為使用界面活性劑讓填充物料表面水膜分佈更均勻，使得平均去除效率可提升至 52.4%，但此條件下的標準偏差仍有 7.8%。顯示在使用與條件 1 相同的除霧器時，都會因為除霧效果不佳造成處理效率無法維持穩定的狀況。

條件 3 與條件 4 在裝上除霧裝置後，添加界面活前後的平均處理效率分別為 76.4% 與 80.2%，且兩者的標準偏差只有 2.22% 與 4.70%，明顯比條件 1 與條件 2 能夠維持穩定的處理效率，顯示除霧器的好壞直接影響硫酸液滴的處理效率，同時由於廢氣所帶出含有界面活性劑水滴有一部份被 A 型除霧網所攔截，在 A 型除霧網形成了帶電，也間接提升了處理硫酸液滴的效率。

條件 5 與條件 6 則顯示直接在 A 型網上噴上自來水與界面活性劑後，洗滌塔對硫酸液滴的平均處理效率分別為 81.1% 與 85.9%，且標準偏差只有 1.78% 與 2.95%，顯示使 A 型網帶電與在洗滌水添加界面活性劑後，可以使洗滌塔處理硫酸液滴的效果更好也更穩定。在條件 1、2 與條件 3、4 以及條件 5、6 三組相似條件中，添加與未添加界面活性劑前後其洗滌塔的處理效率都約有 5% 的提升。

表 1 模廠與實廠洗滌塔不同操作參數下處理硫酸液滴效率比較表

條件	1	2	3	4	5	6	實廠
風量(CMM)	5	5	5	5	5	5	1,000
塔內風速(m/s)	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.5
循環水量(L/min)	16	16	16	16	16	16	1,600
新型除霧器	無	無	有	有	有	有	有
安裝噴霧系統	無	無	無	無	有 ^a	有 ^b	有 ^b
洗滌水添加界面活性劑	無	有	無	有	無	有	有
平均處理效率(%)	45.7	52.4	76.4	80.2	81.1	85.9	78.1
標準偏差(%)	10.48	7.80	2.22	4.70	1.78	2.95	4.67
樣本數(組)	10	8	8	8	8	25	5

62 濕式洗滌塔之硫酸液滴處理效率提升研究

註：a：自來水，b：界面活性劑

3.3 實廠硫酸液滴處理效率測試

依據模廠測試結果，將相關最佳化的參數與設計應用到實廠上，如圖 6 之規劃，同時也在洗滌塔與噴霧系統中添加界面活性劑，針對改善後實廠洗滌塔處理硫酸液滴的效率進行量測，測試結果如圖 12 之分佈，平均處理效率為 78.1%，標準偏差為 4.67%，顯示經過這套修改系統後，洗滌塔的確能夠以較穩定與較高的處理效率處理硫酸液滴。由於受限於修改既有之洗滌塔，設計與空間安排皆無法完全按照模廠之最佳化參數設計，且實廠之廢氣組成較為複雜，雖然處理效率不及模廠的最佳結果，但與文獻中傳統填充式濕式洗滌塔處理高科技產業之硫酸液滴效率(約 0%)相比^[8]，則已經相當大幅度提升洗滌塔硫酸液滴的處理效率。

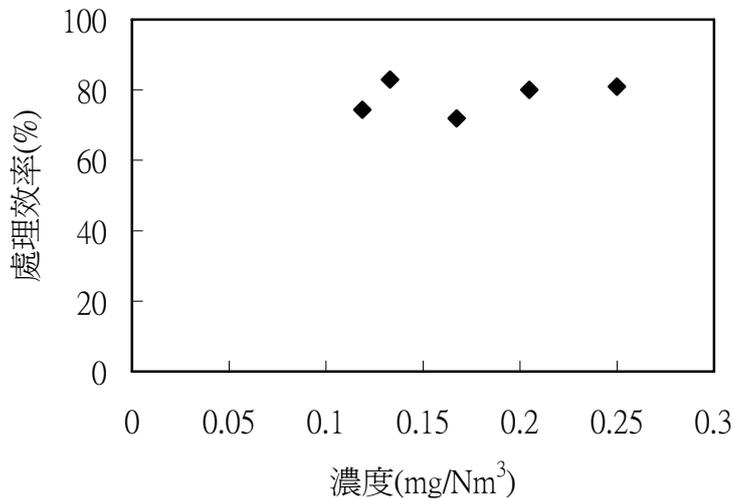


圖 12 修改後實廠洗滌塔對硫酸液滴處理效率分佈圖

四、結 論

本研究結果提供一項僅需將現有洗滌塔作局部修改，便能夠提升運轉中洗滌塔硫酸液滴處理效率之最佳解決方案。因此結果顯示在添加界面活性劑與更新除霧裝置後，可讓實廠洗滌塔原處理效率，提升至 70~85%。另外在相同條件下單獨添加

界面活性劑於洗滌水中，大約都有 5 % 穩定的效率提升。研究結果也發現謹慎選用一個好的除霧器，可以讓洗滌塔處理硫酸液滴的效果有明顯的區別。

半導體產業所排放的硫酸液滴雖然屬於低濃度範圍，但是因為風量極大且業者群聚特性，因此排放廢氣的處理結果對區域性空氣品質影響相當可觀。這些硫酸液滴飄散至大氣中，有可能會轉化成為潔淨室最常擔心的硫化物，隨著各種先進製程的發展，從提升產品良率的角度才是業者進行空氣污染防治工作的主要驅動力；另外，維護我們周遭環境品質也是一大重要因素。因此無論是哪一方面來看，提升硫酸液滴處理效能之需求已經是日益殷切。

五、參考文獻

- 1.行政院環保署，「半導體製造業空氣污染管制及排放標準」，1999。
- 2.Chuen-Jinn Tsai, Chang-Tso Chang, Shankar G. Aggarwal, I-Fu, Hung, Study of Inorganic Aerosol in Ambient Air Around Hsinchu Science Based Industrial Park, Sixth International Aerosol Conference, pp.409-410, 2002.
- 3.Ronald L. Petersen, Bard C. Cochran, John J. Carter, Specifying Exhaust and Intake Systems, ASHRAE Journal, pp.30-37, 2002.
- 4.Jui-Hsiang Cheng, Li-Wen Ting, Ching-Lung Cheng, Shou-Nan Li, Shao-I Yen and Shin-Fu Chiou, Cross Contamination of Airborne Molecules from the Stack Emissions between a New Twelve-inch Fab and a Neighboring Eight-inch Fab, ISESH 12th Annual Conference, 2005.
- 5.簡弘民、吳信賢、黃俊超，無機酸鹼廢氣高效率洗滌技術，工業技術研究院，pp.9-10，2005。
- 6.Chuen-Jinn Tsai, Chang-Tso Chang, Tsing-Wei Liu, Chun-Chao Huang, Chih-Liang Chien and HungMin Chein, Emission Characteristics and Control Efficiency of Acidic and Basic Gases and Aerosols from Packed Towers, Atmospheric Environment, vol.38, pp.643-646, 2004.
- 7.HungMin Chein, Tzu Ming Chen, Shankar G. Aggarwal, Chuen-Jinn Tsai and Chun-Chao Huang, Inorganic Acids Emission Factors of Semiconductor Manufacturing Processes, Journal of the Air & Waste Management Association,

64 濕式洗滌塔之硫酸液滴處理效率提升研究

- vol.54, pp.218-228, 2004.
- 8.黃俊超，高科技產業無機酸鹼廢氣組成與填充式濕式洗滌塔控制效率之研究，國立交通大學環境工程研究所碩士論文，2003。
 - 9.Cooper, C. D. and Alley, F. C., Air Pollution Control 1 : A Design Approach, PWS Engineering Publisher, Boston, pp.166~188,1986.
 - 10.Michael J. Pilat, Steven A. Jaasund, Leslle E. Sparks. Collection of Aerosol Particles by Electrostatic Droplet Spray Scrubbers; Environmental Science & Technology, vol.8, pp.360-362, 1974.
 - 11.H. T. Yang, S. Viswanathan, W. Balachandran, M. B. Ray, Modeling and Measurement of Electrostatic Spray Behavior in a Rectangular Throat of Pease-Anthony Venturi Scrubber; Environmental Science & Technology, vol.37, pp.2547-2555, 2003.
 - 12.Kati Vaaraslahti, Ari Laitinen and Jorma Keskinen. Spray Charging of Droplets in a Wet Scrubber; Journal of the Air & Waste Management Association, vol.52, pp.175-180, 2002.
 - 13.Michael J. Pilat and John C. Lukas, Droplet Charging for Wet Scrubber, Journal of the Air & Waste Management Association, vol.54, pp.3-7, 2004.
 - 14.M Polat, H Polat, S Chander, Electrostatic Charge on Spray Droplets of Aqueous Surfactant Solutions; Journal of Aerosol Science, vol.31, pp.551-562, 2000.
 - 15.HungMin Chein, Shankar G. Aggarwal and Hsin-Hsien Wu, Efficient Control System for Low-Concentration Inorganic Gases from a Process Vent Stream: Application of Surfactants in Spray and Packed Columns, Environmental Science & Technology, vol. 38, pp.5766-5772, 2004.
 - 16.HungMin Chein, Shankar G. Aggarwal, Hsin Hsein Wu, Tzu Ming Chen and Chun Chao Huang, Field Enhancements of Packed Tower Performance for Low-Concentration Acidic and Basic Waste-Gases from Semiconductor Manufacturing Process, Journal of the Air & Waste Management Association, vol.55, pp.647-657, 2005.
 - 17.C. J. Tsai, C. H. Huang, S. H. Wang, Collection Efficiency and Capacity of Three Samplers for Acidic and Basic Gases, Environment Science & Technology, vol. 35, pp.2572-2572, 2001.