

知識物件上傳表

計畫名稱：109 年度「發電設備永續發展技術及制度之規劃與推動(2/2)」

上傳主題：電力設施空氣污染防治設備

提報機構：財團法人台灣綜合研究院

資料時間：109 年 3 月 10 日

與計畫相關	☒ 是
國別	☒ 國內
能源業務	☐ 總體能源 ☐ 化石能源 ☒ 電力 ☐ 核能 ☐ 新及再生能源 ☐ 節約能源
能源領域	☐ 政策與法規 ☐ 環境衝擊與調適 ☐ 經濟及產業 ☒ 科技 ☐ 統計資訊
決策知識類別	☐ 建言 ☒ 評析 ☐ 標竿及統計數據 ☐ 其他
重點摘述	使用化石燃料的火力發電設備在運轉燃燒時皆會產生空氣污染物，主要可分為粒狀污染物(PM)、硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)，而面對日趨加嚴之相關空污法令要求及外界高度重視，改善空氣品質控制系統(Air Quality Control System, AQCS)以降低空氣污染物排放是燃煤/燃氣電廠極為重要之課題。AQCS 系統主要設備包括脫硝設備(選擇性觸媒還原/選擇性非觸媒還原)、集塵設備(靜電集塵器)及脫硫設備(排煙脫硫)，本文目的是介紹 AQCS 設備及提供影響因素，提供廠家作為參考資訊，以協助改善 AQCS 設備效率/效能。另，本文中所提及之參數值，如脫硝設備最佳反應溫度、脫硫設備最佳 pH 值等，因機組負載的不同，性能皆略有差異，故應實際測試其適應之參數，作為各機組最佳化之參數值，以達到降低空污濃度及降低營運成本之目標。
詳細說明	2018 年我國發電結構主要以煤炭及天然氣為主，各占總發電量的 38.8% 及 38.6%，由於電力設施等固定污染源為溫室氣體及空污排放量之主要貢獻來源之一，近年各界持續關注電力設施空氣污染物(以下簡稱空污)可能造成環境及人體健康等危害影響。為降低對化石燃料之依賴，國內能源轉型政策規劃於 2025 年以天然氣 50%、煤炭 30%及再生能源 20%之能源配比為目標；與煤炭相較，天然氣是一種較清潔的化石燃料，對未來空污改善將有明顯助益，但只要是使用化石燃料的火力發電設備，在運轉燃燒時皆會產生空氣污染物，因此，空氣品質控制系統(Air Quality Control System, AQCS) 是現代化

燃煤/燃氣電廠不可或缺的污染防制設備，面對日趨加嚴之相關空污法令要求及外界高度重視，改善 AQCS 控制系統以降低空污排放是燃煤/燃氣電廠極為重要之課題。

電力設施之空氣污染物主要可分為粒狀污染物(PM)、硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)，皆直接由燃燒後之煙氣所夾帶。依「固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理辦法」及「固定污染源自行或委託檢測及申報管理辦法」，SO_x、NO_x 皆為每 15 分鐘間隔之排放濃度量測數據，而 PM 則為每 3 或 6 個月之非連續量測數據，各地方政府擬陸續加嚴電力設施空氣污染物排放標準，進一步降低空污之排放標準。

AQCS 控制系統主要設備包括選擇性觸媒還原/選擇性非觸媒還原(Selective Catalytic Reduction, SCR/ Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)、靜電集塵器(Electrostatic Precipitator, EP)及排煙脫硫(Flue Gas Desulfurization, FGD)，上述設備功能分別為脫硝、除塵及脫硫，而各項設備在電廠的配置如圖 1。本文目的是介紹 AQCS 設備及提供影響因素，作為使用者參考資訊，以協助改善 AQCS 設備效率/效能。

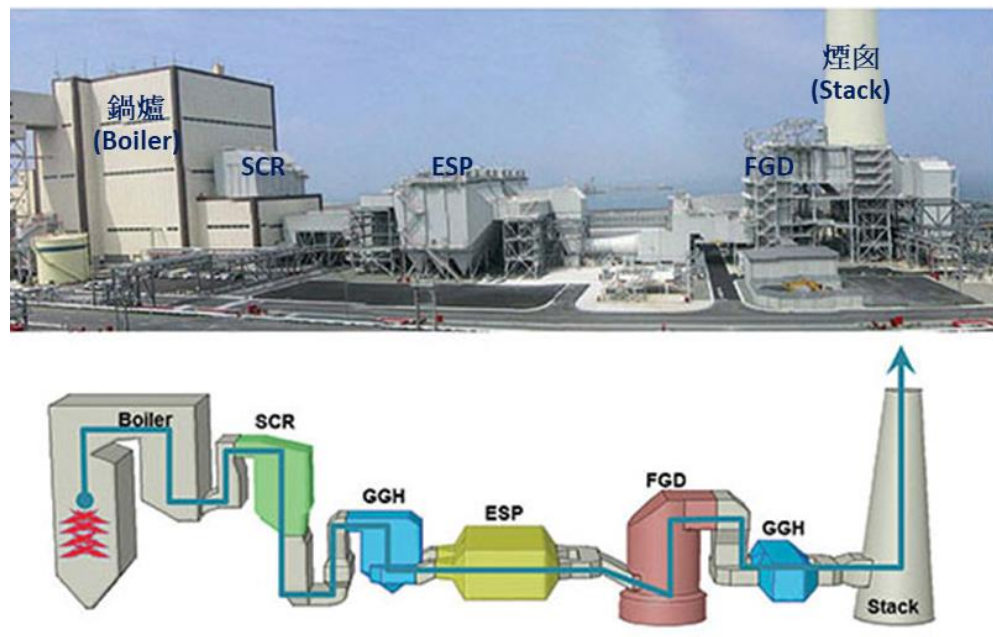


圖 1. AQCS 控制系統配置圖(T. Ushiku, 2015)

一、選擇性觸媒還原(SCR)/選擇性非觸媒還原(SNCR)

SCR 以 NH₃ 作為還原劑，以一定的比例(NH₃/NO_x)注入系統中(通常與 NO_x 濃度相當)，與待處理之煙氣充分混合，在氧氣存在條件下，經觸媒的催化作用，將 NO_x 還原成無害之 N₂ 及 H₂O；SNCR 與 SCR 最大不同處在於前

者未經觸媒的催化作用，而是直接利用高溫的環境產生活性高的自由基與氮氧化物進行反應將其還原成氮氣與水氣，影響 SNCR 脫硝效率之因素如下：

- 反應溫度範圍
- 在最佳溫度範圍內之停留時間
- 氨注入與燃燒氣體間的混合度
- NO_x 進口濃度
- NH_3/NO_x 莫耳比
- 氨逸散率

上述對影響 SNCR 脫硝效率之因素，對於 SCR 效率也皆有影響；但由於 SCR 有經觸媒之催化作用，故 SCR 需要考慮的其他影響因子，包括：

- SO_2/SO_3 轉換率
- 觸媒選擇

1. 反應溫度範圍

最佳脫硝溫度取決於在該過程中使用催化劑的類型和煙氣之成份；一般來說，當溫度升高時， NO_x 去除效率也隨之增加，但當溫度提升到某一點時，除氮效率開始下降，圖 2 中 SCR 以金屬氧化物觸媒來展現溫度與 NO_x 去除效率之關係，由圖中可知，最佳去除效率是當溫度界於 $370\text{--}400^\circ\text{C}$ ，當溫度升高到 400°C 以上時，反應速率和所產生 NO_x 之去除效率開始下降。

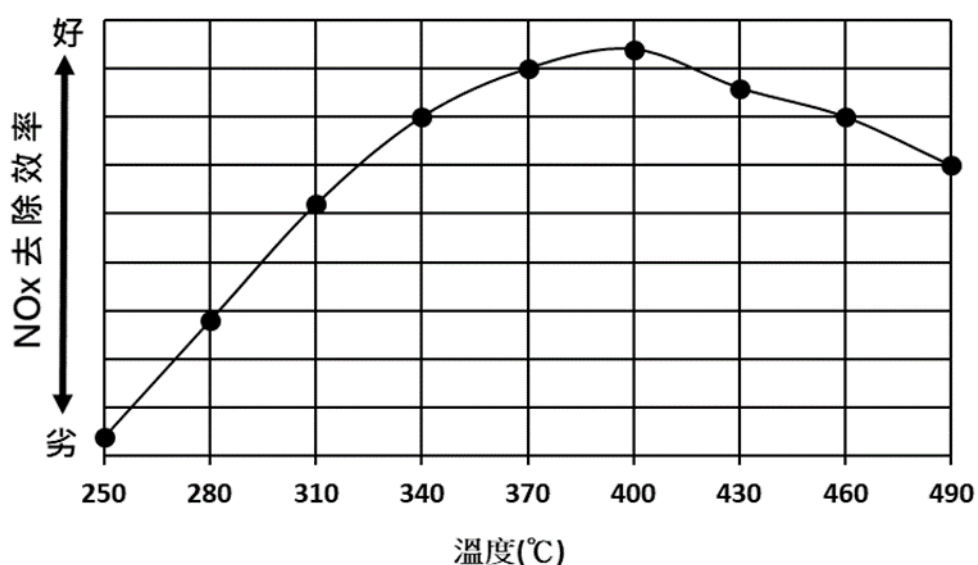


圖 2. SCR NO_x 去除效率與溫度間之關係(J.L. Sorrels et al., 2016)

而 SNCR 因注入點在爐膛，在注氨量一定的條件下，一般在 $900\text{--}1,100^\circ\text{C}$ 間會有反應，但當反應溫度升高超過 $1,000^\circ\text{C}$ 時， NO_x 去除率會因氨產生熱

分解而降低，詳如圖 3。

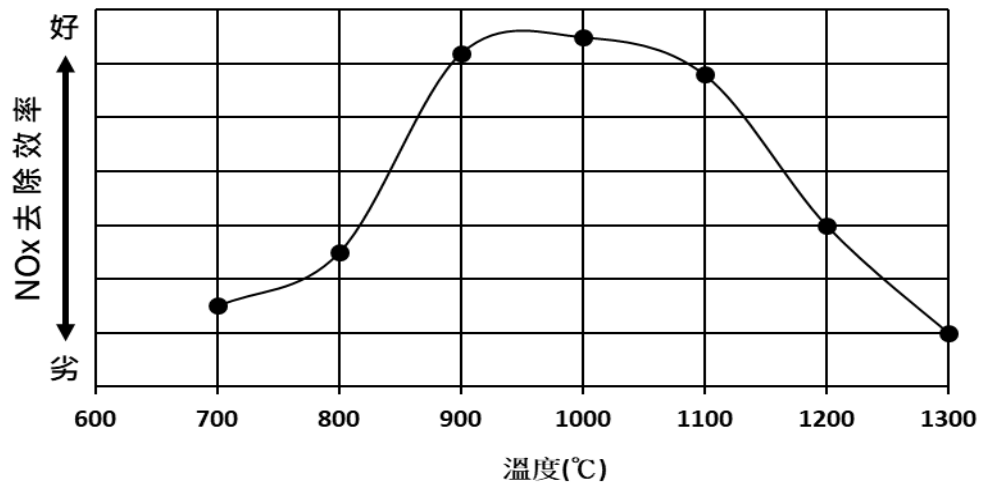


圖 3. SNCR NO_x 去除效率與溫度間之關係(T. Blejchař et al., 2018)

另，SCR 設計時反應溫度越高，催化劑量需要越小，圖 4 顯示了催化劑量隨煙氣溫度從 310°C 升至最佳範圍 370-400°C，所需催化劑量減少 40%；催化劑量的減少可促進 SCR 之投資成本下降、降低營運和維護成本及降低壓降，減少引風機所需之電力。

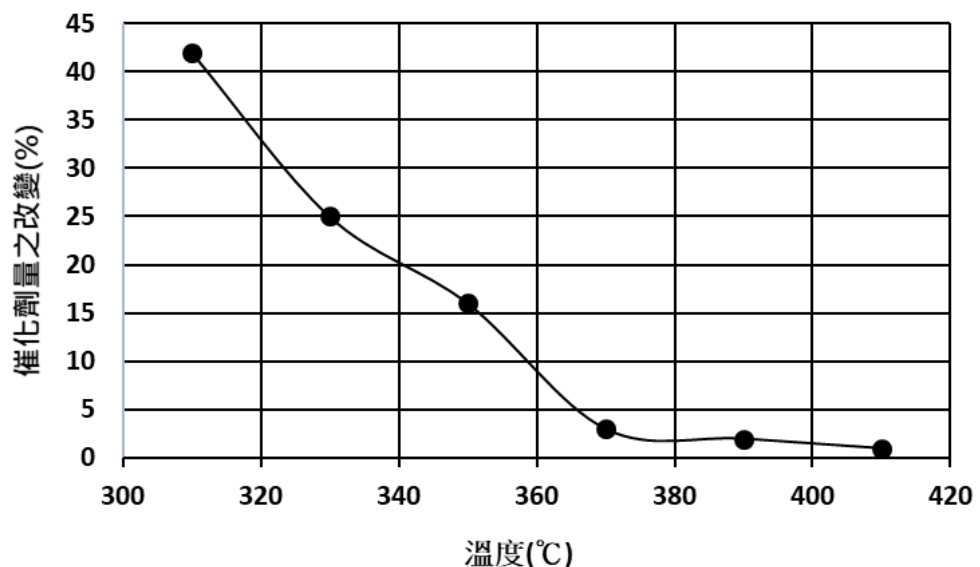


圖 4. SCR 催化劑量與煙氣溫度關係(J.L. Sorrels et al., 2016)

2. 在最佳溫度範圍內之停留時間

停留時間是反應物在反應器內的時間，一般來說影響煙氣停留時間為空間速度(Space Velocity, SV)，當空間速度越高時，停留時間變短，相對的 NO_x 去除率下降；換句話說，空間速度與停留時間及 NO_x 去除率成反比，空間速度的定義為：

$$SV = Q/V$$

其中 Q 為煙氣流量，V 為觸媒在反應槽中的體積大小。根據鍋爐協會文獻指出，SCR 系統最佳停留時間為 0.2 秒左右，隨後下降，主要因為煙氣與觸媒接觸時間增大，有利於煙氣與觸媒間的擴散及反應，促成 NO_x 去除率升高；但若停留時間過長，NH₃ 開始氧化，使 NO_x 去除率下降，如圖 5。

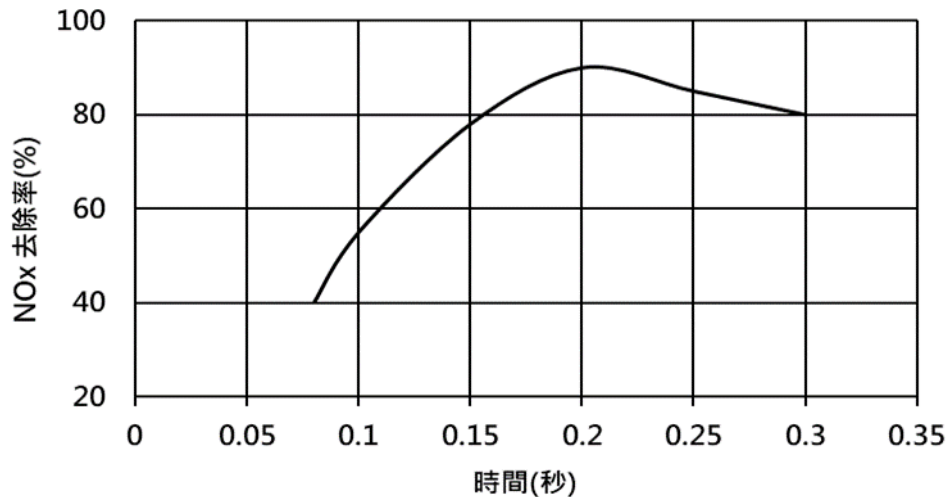


圖 5. 煙氣停留時間與 NO_x 去除率關係(陳文能, 2012)

3. 氨與煙氣間之混合度

煙氣和氨在進入 SCR 反應器之前進行混合，若氨與煙氣未能充分混合，NO_x 還原效率下降，欲想使煙氣與氨充分混合可通過以下幾點改善：

- 氨噴入點和反應器入口需有足夠長的管道
- 於反應器上游安裝靜態混合器
- 提高注氨噴射點的密度
- 修改噴嘴設計，如噴射角度和方向
- 均衡噴嘴流量

其中，造成噴嘴流量偏差的主要因素為注氨閘(Ammonia Injection Grid, AIG)，若噴氨斷面的壓力分布存在差異，即從 AIG 的母管到每個噴嘴之間的壓力差就有差異，既造成噴嘴的流量存在偏差的主要原因，進而影響氨與煙氣間之混合度。

4. NO_x 進口濃度

SCR 反應氣進口煙氣 NO_x 濃度受鍋爐運轉條件影響，煤質變化、鍋爐負載變化、燃燒條件的變化都會使反應器進口煙氣中 NO_x 濃度發生變化；除了減少源頭 NO_x 產量及提升鍋爐燃燒效率外，亦可減輕後端 SCR 之負荷及提

升其脫硝效率，而延長 SCR 壽命，減少營運成本；如何降低 NO_x 進口濃度視為重要，一般使用低氮氧化物燃燒器(Low NO_x Burner, LNB)，採用 4 種方式及其綜合應用，分別為控制混合、分散火焰、自身迴流及分段燃燒。

5. NH₃/NO_x 莫耳比

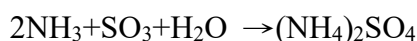
氮氮莫耳比簡稱氮氮比，定義為 SCR 反應器入口煙氣中氮濃度與氮氧化物濃度的比值，其定義式為：

$$\alpha = C_{\text{NH}_3} / C_{\text{NO}_x}$$

其中，C_{NH₃} 及 C_{NO_x} 為反應器進口煙氣中 NH₃ 和 NO_x 之濃度；理論上，1 莫耳的氮需要 1 莫耳的氮去除，若注氮量不足會導致 NO_x 脫硝效率下降；相反的，若注氮過量會導致環境的二次污染，一般在設計過程中，NH₃/NO_x 的值控制在小於 1.2 的範圍，而在實際操作上，注入的氮量隨著機組負載的變化而變化，氮量與氮去除效率的關係必須透過測試來實現。

6. 氮逸散率及 SO₂/SO₃ 轉換率

氮逸散率是指反應器出口煙氣中氮的占比，表示了未參加反應的氮量，過高的氮逸散造成環境二次污染；對於 SCR 設備，觸媒在解離 NO_x 的過程中，會將煙氣中的部分 SO₂ 催化氧化為 SO₃，稱為 SO₂/SO₃ 轉換率，發生副反應，生成具有黏性及腐蝕性的物質硫酸氨 ((NH₄)₂SO₄) 及硫酸氫氨 (NH₄HSO₄) 如下反應式：



下游設備空氣預熱器(Air Heater, AH)容易發生腐蝕或堵塞現象，而導致差壓升高並使引風機需以更大功率輸出，並造成能源使用效率下降及營運成本與 CO₂ 排放增加；一般對氮逸散濃度建議限制在 3ppm 以下，以減少因氮逸散對 SO₃ 之反應；另，當觸媒更換時，建議採用 SO₂ 低氧化型之觸媒，將 SO₂ 轉化成 SO₃ 的比例控制在 1-2% 以下。

7. 觸媒選擇

觸媒型式一般有板式及蜂巢式，其各型式之特點與適用範圍詳如表 1；在相同觸媒節距下，板式觸媒的流通面積最大，一般在 85% 以上，蜂巢式次之，流通面積約為 80%，且在相同設計條件上，適當選取大節距之蜂巢式觸媒，其防止堵塞之效果能夠接近板式。兩種觸媒以結構上來看，板式夾角數量最少，且流通面積最大，最不容易堵塞，蜂巢式流通面積一般，但表面積

大，能增加觸媒與氮之接觸反應，每個觸媒壁面夾角多為 90 度，在惡劣的煙氣環境條件中，容易產生灰份堆積而造成堵塞。

表 1. 板式及蜂巢式之特點與適用範圍

種類 \ 性能	特點	適用範圍
板式觸媒	表面積介於蜂窩式與板式之間，重量輕；活性物質比蜂窩式少約 70%。	高粉塵及低粉塵均適用；壓力損失中等。
蜂巢式觸媒	表面積大，活性高，觸媒體積小；觸媒活性物質比其他類型多 50%~70%。	高粉塵及低粉塵均適用；壓力損失高。

二、靜電集塵器(EP)

乾式靜電集塵器(Electrostatic Precipitator, ESP)是藉由放電電極線產生電暈放電(corona discharge)，使空氣分子游離而形成帶電的空氣離子，空氣離子進而接觸微粒使之帶電，帶電之微粒往與放電電極線之電性相反之收集板方向運動而被收集。收集板或放電電極線上累積之粉塵微粒需定期由敲擊器震落，由底部之漏斗收集及儲存，並定期處理；利用靜電力沉降微粒之靜電集塵器對小於 $1\mu\text{m}$ 、大於 $0.3\mu\text{m}$ 直徑之塵粒去除率達 >99%。從運轉分析靜電集塵效率影響因素如下：

- 高低壓供電控制裝置
- 敲擊制度
- 鍋爐運轉參數
- 煤質的變化
- 飛灰影響

1. 高低壓供電控制裝置

合理的電暈功率是保證 ESP 安全、穩定運轉的重要因素之一，當電場阻抗升高、電流變小時，要求設備能自動升壓，反之，當電場阻抗降低、電流變大時，要求設備能自動降壓以保持設定之電流。變壓器內部的電壓、電流取樣電阻，引進反饋信號，經微智能處理後移相控制可控矽的導通角，改變負載輸出電壓，達到穩定輸出的目的，使電場獲得最有效的電暈功率，其中變壓器中屬高頻變壓器為近年來電廠改善之作法，藉由高頻切換式電源供應 (Switch Mode Power Supplies, SMPS) 技術及閘極隔離雙極性電晶體

(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 作控制，能有效的改善集塵效率及大量節省用電。

2. 敲擊週期

在敲擊力度和均勻性都滿足要求的情況下，敲擊周期是否合理對 ES 除塵效率影響極大，敲擊周期過長與極板積灰過厚，將降低帶電粉塵在極板上的導電性能，降低除塵效率；敲擊周期過短，粉塵會分散成碎粉落下，引起較大的二次揚塵，即沉積在 EP 集塵板上的粉塵再次被氣流帶出，並二次揚塵會大大降低 EP 的效率。

3. 鍋爐運轉參數

在正常負載下鍋爐的煙氣流量、煙氣溫度、煙氣含塵濃度等參數與 EP 設計的參數相差不大；若鍋爐煙氣流量增大、煙氣溫度升高及煙氣含塵濃度增加，將導致除塵效率降低；除此之外，當鍋爐長時間低負載運行時，為穩定燃燒，投入重油助燃，造成煙氣溫度和煙氣中的粘稠物增加，導致集塵板嚴重積灰，除塵效率下降。另一方面，若鍋爐破管洩漏，停爐不及時，將增加煙氣濕度，雖然在極短時間內因煙氣被調整而降低了飛灰比電阻，除塵效率會升高，但時間稍長，EP 將嚴重積灰，尤其在洩漏量大時，極板甚至結垢，會降低除塵器的使用壽命。

4. 煤質的變化

若鍋爐燃燒煤質發生變化，其熱值較設計煤質低，灰分較設計煤質高，則會增加對集塵、飛灰輸送設備的磨損，縮短設備的檢修周期，且會使煙氣的含灰量增大，集塵效率將受到嚴重影響。根據台電工程月刊，燃煤特性直接影響煙氣中飛灰總量與特性，其中，又以下列三種影響最為顯著(李枝榮等人，2017)，如下：

(1) 燃煤灰量比(Ash Content)

使用高灰量比的煤炭會亦導致煙氣中的飛灰量增加，若在相同 EP 的集塵效率狀況下，高灰量比的煤炭亦會導致靜電集塵器後排放的粒狀物濃度(mg/Nm^3)增加。

(2) 燃煤硫份比(Sulfur Content)

當燃煤經由鍋爐燃燒後，內含的硫份會與燃氣內的氧氣結合形 SO_3 ，它能降低飛灰的比電阻係數，進而提高 EP 的集塵效率。

(3) 燃煤含水量(Total Moisture)

煙氣的含水量主要影響飛灰的比電阻係數，亦即影響飛灰的導電性，當燃煤中的總含水量(固有水量和附著水量的總和)較高，則會降低煙氣中飛灰的比電阻係數，使 EP 的集塵效率增加，反之，則減少。

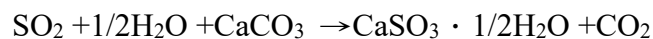
5. 飛灰影響

飛灰粒徑上升，集塵效率提高，若粉煤細度不均勻，燃燒不佳，則不完全燃燒熱損失增加，飛灰中未燃盡的碳粒增多，這些不完全燃燒之碳粒電阻較高，可能會產生二次揚塵並被氣流帶出 EP，使集塵效率降低。

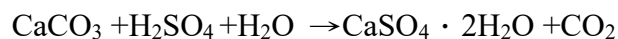
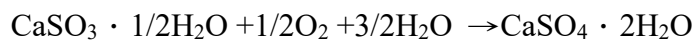
三、排煙脫流(FGD)

排煙脫硫之控制系統包括石灰石法、氫氧化鎂吸收法、鈉基吸收法、半乾式滌氣法、乾式吸收劑注入法及流體化床法，一般最常見之控制系統為石灰石吸收法，因此，此節將針對石灰石吸收法之脫硫效率相關影響因素進行探討。

濕式石灰石石膏排煙脫硫法於鍋爐燃燒後所產生之煙氣，經 ESP 除塵後，進入吸收塔，接受高濃度石灰石溶液沖洗，利用石灰石或石灰漿液吸收煙氣中的 SO_x ，生成亞硫酸鈣，經分離的亞硫酸鈣 (CaSO_3) 可以拋棄，也可以再氧化為硫酸鈣 (CaSO_4)，以石膏形式回收。是目前世界上技術最成熟、運行狀況最穩定的脫硫技術，脫硫效率達到 90% 以上，其主要吸收與氧化的化學反應如下。吸收化學反應過程如下：



氧化化學反應過程如下：



基本上，影響石灰石脫硫法效率之因素，主要因素包括 pH 值、液氣比、化學計量比、煙氣速度及粒狀物濃度，簡述如下。

1. pH 值

根據上述石灰石與硫之反應式得知，石灰石生成鈣離子 (Ca^{2+}) 與亞硫酸氫根離子 (SO_3^{2-}) 產生反應，因此即達到自煙氣中脫硫之目的； SO_2 被石灰石乳液吸收後進入反應槽，此時 pH 值會因 CaCO_3 之溶解而提高，也進而增加 SO_2 之去除效率，而提高 pH 值最有效的方法便是提高化學劑量比，亦即 CaCO_3 之用量，但是相對的將導致增加系統之操作成本並容易造成結垢現

象，因此排煙脫硫系統中，化學劑量比之控制就顯得非常重要。一般以石灰石為吸收劑時，理想 pH 值均應維持在 5-6 之間(王建中，2010)。

2. 液氣比(L/G ratio)

高液氣比將提供較佳之液氣混合及接觸面積，使得 SO_2 較易為石灰石乳液吸收，亦即提高了質量傳送之效果，提高液氣比可以提高脫硫效率，然而吸收劑與 SO_x 具有液氣平衡，既液氣比超過一定值後，脫硫效率不再增加，不同吸收塔設計，液氣比亦不同，如噴霧塔之液氣比範圍約 8~12、托盤塔及填充塔之液氣比範圍約 2~6，過高液氣比導致吸收過程之壓損增加，需使用較大的引風機，亦增加運轉成本。

3. 煙氣速度

煙氣速度會影響吸收塔內液氣的接觸效果，提高煙氣速度可增加其擾流之程度，使液氣之接觸面積增加，進而提高 SO_2 的去除率，但當煙氣速度若大於某一臨界值時，容易造成水氣隨煙氣逸出的現象(carryover)。水氣中含有石灰石乳液及飛灰等成份，當水氣通過除霧器時，容易造成除霧器結垢與堵塞，因此煙氣速度對於除霧器之設計及效率具有極大的影響(王建中，2010)。目前大多數除霧器生產廠家都將除霧器設計為雙層，並附有清洗設備，藉以清除隨煙氣通過而附着於除霧器上之石灰石乳液，俾避免因結垢而堵塞。目前煙氣速度之設計均傾向於採用較高之數值藉以增加 SO_2 的去除率，同時亦須加強除霧器清洗噴嘴及噴頭之設計，以減少 carryover 現象之發生。

4. 粒狀物濃度

煙氣進入吸收塔後，其所含之粒狀物雖可去除一部分，惟粒狀物在吸收塔內之去除率較 SO_2 之去除率低，因此煙氣中粒狀物濃度之高低將影響石膏之純度，進口煙氣中粒狀物濃度愈高，石膏之純度則愈低。當煙氣中之粒狀物濃度因靜電集塵器故障或效率降低而過高時，會使吸收塔中之石灰石乳液產生氧化鋁的遮蔽現象(Blinding)，使 CaCO_3 溶解於水中之數量減少，以致 CaCO_3 之利用率及 SO_2 之去除率皆下降，欲防止此種現象產生，最簡便之方法為增設添加 NaOH 或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 進入吸收槽之設備，以提高吸收液之 pH 值，如果能配合再排掉部分吸收乳液並加入生水等措施，即能夠加大降低鋁離子濃度，使遮蔽現象得以儘早解除，恢復系統效能。

四、結論

	本文對 AQCS 系統進行影響因素分析，其目的在於使 AQCS 系統能發揮最大效用將空污濃度最小化；脫硝、除塵及脫硫設備的更新/汰換，需考慮建造成本、廠區空間及建造時間，雖可直接改善空污，但限制因素較多，故操作面顯得格外重要。 上述之 AQCS 影響因素之資訊，除了本文中所提及之參數值，因機組的不同，性能皆略有差異，故應實際測試其適應之參數，作為各機組最佳化之參數值，主要助益為降低空污濃度及降低營運成本；在 2025 年，因考量供電穩定為首要原則，燃煤發電占我國發電結構仍占有 30%，故應將其目標放在改善 AQCS 系統，將燃煤電廠之空污排放水準接近天然氣電廠之排放水準，並持續追蹤瞭解國外先進電廠採用之空污防制技術，以供國內電廠參考。 主要參考資料來源： 1. Tetsu Ushiku, “MHPS Global Activities for Air Quality Control System Technology”, <i>Mitsubishi Hitachi Power Systems, LTD</i>, 2015. 2. John L. Sorrels, David D. Randall, Karen S. Schaffner, and Carrie Fry Richardson, “Selective Catalytic Reduction”, In <i>EPA Air Pollution Control Cost Manual</i>, chapter 2, pages 1–108. <i>EPA</i>, New York, 2016. 3. Blejchař, Tomáš, et al. “High Temperature Modification of SNCR Technology and Its Impact on NO_x Removal Process.” <i>EPJ Web of Conferences</i>, vol. 180, 2018. 4. 王建中，“興一、二空污改善計畫煙氣脫硫及靜電集塵設備(FGD、ESP)規劃設計、組裝、運轉及維護訓練”，台灣電力公司核能火力發電工程處，2010。 5. 陳文能，“燃煤火力發電廠鍋爐脫硝技術”，台灣鍋爐協會，2012。 6. 李枝榮、劉紹仲、林志聰、蔡東昇、許金和、徐榮彬，“台中電廠六號機靜電集塵器效率提升工程”，台電工程月刊 832 期（12 月號），台灣電力公司，2017。
關鍵字	電力設施、空氣污染防制設備、AQCS