



工業污染防治

INDUSTRIAL POLLUTION PREVENTION AND CONTROL





中華民國七十一年一月創刊

中華民國一一〇年六月出刊

發行人：呂正華

總編輯：凌韻生

編輯委員：江廣鈺、吳義林、李公哲、林文印、林凱隆、凌永健、馬鴻文、
康世芳、張添晉、陳士賢、歐陽靖暉、鄭禮田、盧至人、魏榮宗
顧洋(依姓名筆畫順序)

企劃：陳良棟、曾志雄、王義基、洪萱芳

執行編輯：陳見財、吳宜樺、莊茂森、陳筱薇、張映昉

發行所：經濟部工業局

出版所：經濟部工業局

台北市信義路三段41-3號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2704-3753

網址 <https://www.moeaidb.gov.tw/>

財團法人台灣產業服務基金會

台北市大安區106四維路198巷39弄14號1F

TEL：(02)2784-4188

FAX：(02)2784-4186

網址 <https://www.ftis.org.tw>

行政院新聞局出版事業登記證

局版臺誌第三一四七號

中華郵政北字〇五二七號

執照登記雜誌交寄

設計印刷：致琦企業股份有限公司

～ 本刊文章版權所有，非經同意不得轉載 ～

～ 本刊文稿屬個人學術發表，不代表經濟部工業局立場～

151 工業污染防治

環境化學與微生物類

貯存系統環境保護整合管理策略

.....簡慧貞、陳以新、張富傑 1

空氣污染與噪音類

鋼鐵廠燒結製程靜電集塵器效率提升案例分享

.....陳隆森、李臻育、蔡東昇、許文馨、梁達嵐 29

廢(污)水處理類

滴水成金、資源永續

.....王維綸 47

廢棄物類

應用電化學技術去除焚化底渣氯離子之研究

.....陳志成、田馥瑄、林以潔 59

世界主要國家都市廢棄物管理策略之回顧與研析

.....江康鈺、周綵蓉、胡友馨、陳雅馨 79

煉鋁產業二次物料提取永續氫氧化鋁之研究

.....陳俊良、王多美、簡光勵、楊昇府 122

環境規劃與管理類

廢棄太陽能板之環境足跡評估與綠色設計

.....郭財吉、鄭安森 146

本期簡介

「工業污染防治」刊物（以下簡稱本刊）自民國 71 年發刊至今，已出版 150 期，共刊載 1,786 篇技術論文，為目前環工界歷史最悠久之技術刊物，提供國內產、官、學、研環保人員之專業發表平台。

近年來，國內社會大眾、環保團體及輿情均相當重視各項環保議題，且中央及地方環保主管機關亦積極制修定環保法規。產業界為因應此趨勢與符合法規要求，需多元落實各類工業污染防治（制）技術，據以改善製程及提升管末處理設施效能。為響應環保，本刊物以電子化方式，置於工業局永續發展組委辦之「產業綠色技術資訊網」，供各界瀏覽下載。

110 年度之文稿範疇包含空污（跨媒介）整治及案例、節水廢水回收再利用、廢水氨氮及重金屬處理技術、綠色材料與永續物料管理、土壤與地下水整治、毒性化學物質管理、再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估及淨零碳排。本期共收錄 7 篇，分別撰述「貯存系統環境保護整合管理策略」、「鋼鐵廠燒結製程靜電集塵器效率提升案例分享」、「滴水成金、資源永續」、「應用電化學技術去除焚化底渣氯離子之研究」、「世界主要國家都市廢棄物管理策略之回顧與研析」、「煉鋁產業二次物料提取永續氫氧化鋁之研究」及「廢棄太陽能板之環境足跡評估與綠色設計」，作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

空氣污染與噪音類

鋼鐵廠燒結製程靜電集塵器效率 提升案例分享

陳隆森*、李臻育*、蔡東昇**、許文馨**、梁達嵐**

摘 要

燒結製程通常為鋼鐵廠最大空氣污染源，大多數皆配置靜電集塵器 (Electrostatic Precipitator, ESP) 作為收集粒狀污染物的設備。燒結製程原料多樣，製程廢氣內之粒狀污染物特性變化大且為高灰電阻之粉塵，其特性為難以帶電、不易被集板吸引 (飄移速度較慢) 而達到收塵效果，且因製程關係，ESP 較難有長停機做完整維護，經過長久運轉年限後，通常有集塵效率低落的問題。本文介紹透過更新 ESP 的機械零件及高頻變壓器 (Switch Mode Power Supply, SMPS)，以回復因老舊設備所導致的集塵效率衰退，更進而提升集塵效率、提高 ESP 的穩定性。升級高頻變壓器的 ESP，相較於傳統變壓器，高頻變壓器使用三相電源，具有極低的漣波率 (Ripple Wave)，不但電壓電流曲線 (V-I Curve) 具有更穩定的輸出表現，同時也可以將輸出電壓穩定的控制在傳統變壓器的峰值電壓，可以避免傳統變壓器因漣波率高而頻繁跳火 (Sparkle) 的問題，也可以擁有更高的集塵效率。

【關鍵字】靜電集塵器(Electrostatic Precipitator)、粒狀物排放(Particle Emission)

* 中龍鋼鐵股份有限公司
** 台耘工業股份有限公司

煉鐵廠設備檢修工廠股長
副總經理、業務處專案管理專員
規格設計處技術支援主任

一、前言

靜電集塵器 (Electrostatic Precipitator, ESP) 為目前工業製程常使用且效果顯著的控制設備之一，需每年定期維護保養，以確保 ESP 運轉時的穩定性；然而，隨著逐漸加嚴的環保法規，現今許多廠區的 ESP 面臨既有除塵效率不足、內部零件老舊的問題，導致除塵效率低落，若不進行設備維護或升級，將無法符合現行法規。常見的 ESP 改造方式為定期更換內部老舊零件，如集板、極線，以維持原始效率及運轉可靠度、或是藉由增加集塵面積及提升放電效率來提升 ESP 集塵效率。然而更換內部老舊零件或擴建 ESP 以增加集塵面積，所需工期較長且成本較高，必需提早規劃停機時間方能施工。提高放電效率，可藉由將傳統變壓器 (Conventional Transformer Rectifier) 升級為高頻變壓器 (Switch Mode Power Supply, SMPS) 來達成，工期短且易於施工，為目前提升 ESP 效率的主流方式之一。

中龍鋼鐵位於台中市龍井區，是國內唯一同時擁有電爐與高爐的一貫化作業鋼廠，主要設備皆採用最新高效環保製程設計。高爐產線產製鋼種包括一般碳鋼、結構用鋼、高強度低合金鋼等，並可生產集團中最大熱軋超厚、寬尺寸之一般結構用鋼。高爐設備裡包含燒結機 2 座，年總產能為 620 萬噸。

燒結作業是將粉鐵礦、各類助熔劑 (石灰石、蛇紋石及白雲石) 及細焦炭及部分其他製程回收之廢料經由混拌、造粒後，經由佈料系統加入燒結機，由點火爐點燃細焦炭，經由抽氣風車抽風完成燒結反應，高熱之燒結礦經破碎冷卻、篩選後，送往高爐作為冶煉鐵水之主要原料 (圖 1)。因此負責處理燒結尾氣的 ESP 穩定性與可靠度非常重要，否則將會影響高爐產能 (圖 2)。由於燒結製程原料之多樣性，其煙氣內之粒狀污染物特性變化大且為高灰電阻之粉塵，其特性為難以帶電、不易被集板吸引 (飄移速度較慢) 進而達到收塵效果，因此改善燒結場的 ESP 集塵效率的實為一大挑戰。

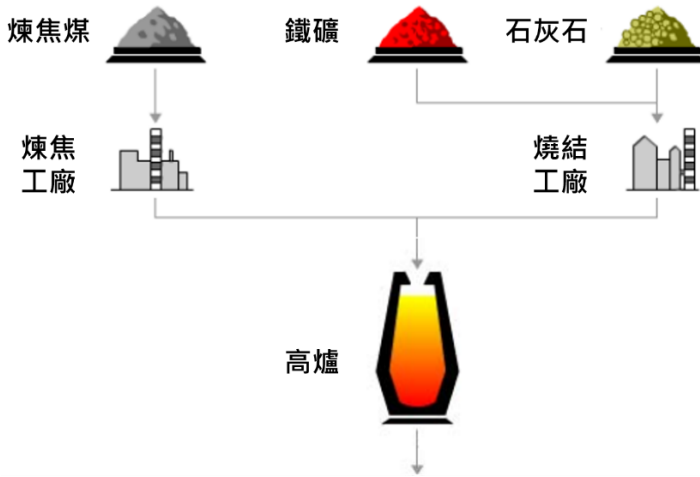


圖 1 煉鐵廠製程

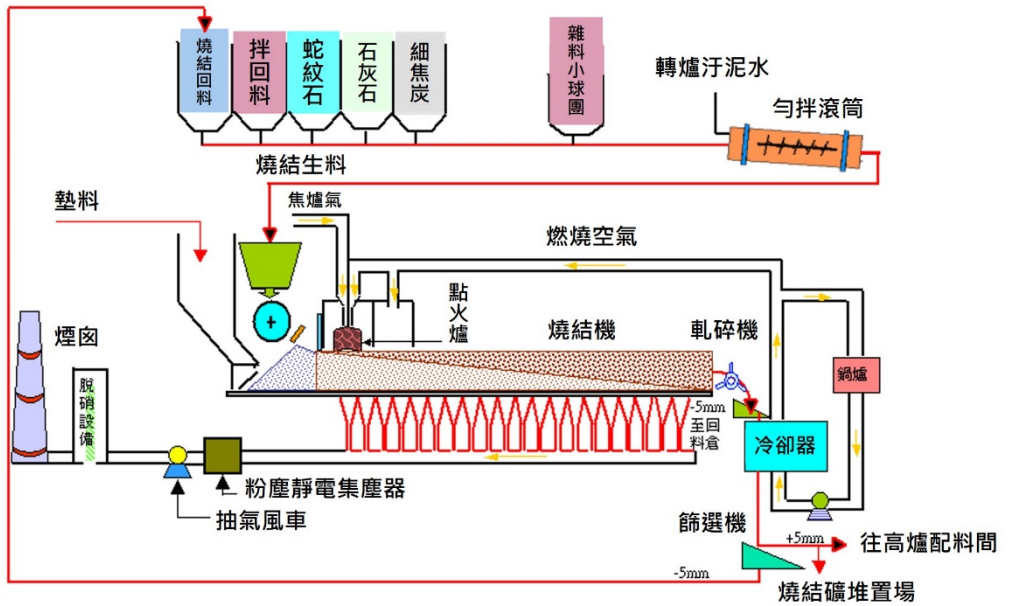


圖 2 燒結製程示意圖

中龍鋼鐵二號燒結場備有 2 台 ESP，分別為大 ESP 收集製程廢氣及小 ESP 收集廠區內粉塵。二號燒結場自 2010 年啟用運轉至今約 10 年，然而因 ESP 長時間連續運轉，內部機械結構每況愈下，導致集塵效率低於原始設計值。而在 ESP 後端設有袋式集塵機，ESP 效率低落也導致濾袋使用壽命縮短而增加維護費用。燒結場配合煉鐵製程每年 350 天的長時間運轉，每季僅停機 1~2 天，難以徹底進行全面的機械維護工作，一般均配合高爐停爐大修期間才可排定長時間停機計畫。通常在機械狀況不佳時，會先改善機械狀況後再進行電氣改善以提升效率，但在時間與成本考量下，中龍鋼鐵決議先改善電氣設備，即變壓器升級，後續再特別申請長停機以改善 ESP 內部機械狀況。本文介紹中龍鋼鐵二號燒結大 ESP 如何利用高頻變壓器提升集塵效率，進而汰換內部老舊零件而增加運轉穩定度與可靠性。

二、ESP 與 HFTR 之理論基礎

ESP 原理是利用在極線 (Discharge Electrode, DE) 施加直流高壓形成電暈放電效果，使氣體電離釋放大量游離電子，當含塵煙氣通過靜電集塵器所組成的電場時，煙氣中原本不帶電的粉塵粒子會因此而被荷電 (Charge)，且在電場電磁力的作用下，向極性相反的集板 (Collecting Electrode, CE) 移動，當荷電粉塵到達集板後，電子會被導入大地而粉塵則被吸附在集板上，達到煙氣淨化效果，而被吸附在集板上的粉塵則透過敲擊方式震落。

ESP 效率可由 Deutsch Anderson Equation 來說明 (Parker,1997)。

$$\eta = 1 - \frac{1}{e^{\omega A/Q}}$$

η ：靜電集塵器之除塵效率 (%)

ω ：飄移速度 (Migration Velocity, m/s)

A：集塵面積 (Effective Collecting Area, m²)

Q：煙氣流量 (Flue Gas Flow Rate, m³/s)

分析此公式後，可發現若要提高集塵效率，必須提高粒子飄移速度，或者提高集塵面積，或是降低煙氣流量。其中，提高集塵面積，一般有下列幾種方式：

1. 修改進氣入口或出口煙道，增加放電場長度；
2. 串聯或並聯另 1 台新的 ESP；
3. 減小集板極線間距，增加煙道數量；
4. 屋頂增高，增加安裝的集板高度。

以上 4 種方式均可提高有效集塵面積，達到提升集塵效率的目的，但缺點是必須修改集塵器整體機械結構設計，不僅費用昂貴且施工工期長。此外，前 2 個方式若 ESP 內部無足夠空間，則無法實行；第三個方式縮小間距則是會提高火花 (Spark) 發生的頻率，造成放電電壓無法提高，反而降低輸出功率，導致無法有效提升集塵效率。

若是降低煙氣流量，則會影響單位時間內可處理的含塵煙氣，進而造成前端製程必須降載，單位時間內的產量也會下降，此亦非燒結場之所願。因此，升級 ESP 高壓供電系統以提高粒子飄移速度即為最為符合經濟效益的改善方法。

現今由於電力電子與數位控制技術的快速發展，靜電集塵器電源設計與製造商設計出一新型三相高頻 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 觸發供電系統，其原理如圖 3 所示：

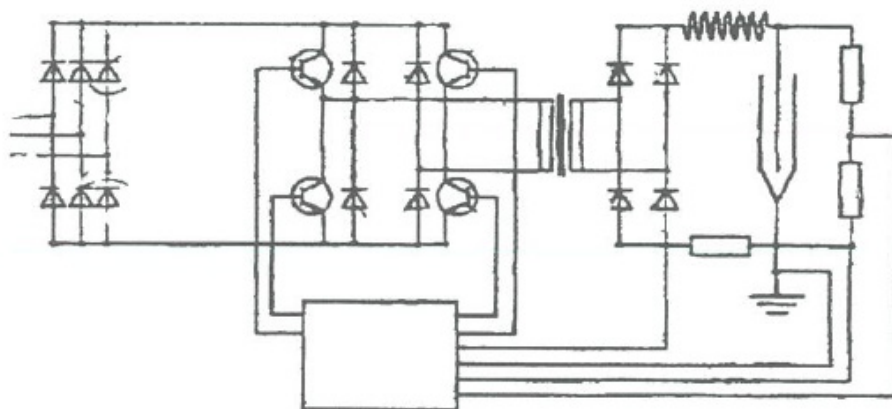


圖 3 三相高頻 IGBT 觸發供電系統原理 (Parker, 2003)

一般來說，上述之圖形可分解為圖 4 中的 4 個區塊：

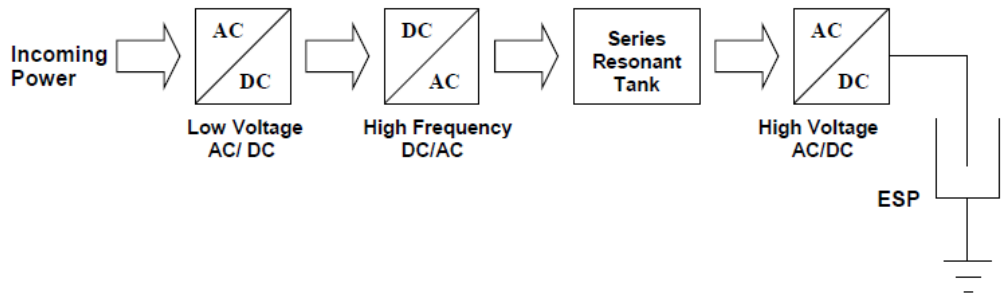


圖 4 三相高頻 IGBT 觸發供電系統分解圖 (NWL)

(一) AC/DC 區塊

三相 480V 交流電源輸入，並經整流及濾除脈波干擾後，輸出平滑穩定約 650V 單相直流電壓。

(二) DC/AC 區塊

由 IGBT 全波電橋電路組成，此電路將輸入的 650V 單相直流電壓轉換成高頻 50kHz 交流電壓。

(三) Series Resonant Tank 與 AC/DC 區塊

將輸入的高頻 50kHz 交流電壓經升壓整流後，轉換成高頻直流電壓輸入靜電集塵器內。

其優點包括：1. 三相高頻 IGBT 觸發供電系統相較傳統單相低頻 SCR(Silicon Controlled Rectifier, SCR) 觸發供電系統，可有效降低輸入之無效功率 (KVA_r) 以提高功率因素並改善耗功之問題 (NWL)。2. 三相高頻電源系統因極低的漣波率，故其平均輸出二次側電壓 (kV) 幾乎趨近於峰值電壓，相較於傳統低頻電源峰值電壓低很多，故可輸出更多功率進入靜電集塵器內，進而提升集塵效率。3. 其運轉頻率高達 50kHz，搭配快速反應的 IGBT 元件與電控系統 (DSP)，其響應速度較其他兩種傳統低頻 SCR 供電系統快 150 倍以上，可快速抑制火花的短路電流，並快速回升至之前火花發生點，以提升集塵效率。3 大優點詳述如下：

(一) 改善功率因數

在相同的二次輸出功率 (kW) 下，三相高頻 IGBT 觸發供電系統的輸入功率 (KVA) 約是單相低頻 SCR 觸發供電系統的 60%。而低頻供電系統都是使用 SCR 做相角控制，經全波整流後導入靜電集塵器內，故當漣波率越大，則平均輸入的直流電壓 (kV) 則越低，意即一次側需汲取更多功才能達到所需的平均輸入的直流電壓，進而導致無效功率 (KVAR) 大幅增加。圖 5 是傳統單向低頻 SCR 電源系統與三相高頻 IGBT 電源系統功率因數比較示意圖。

If Output Limit at 80kV, 1000 mA (80kW)

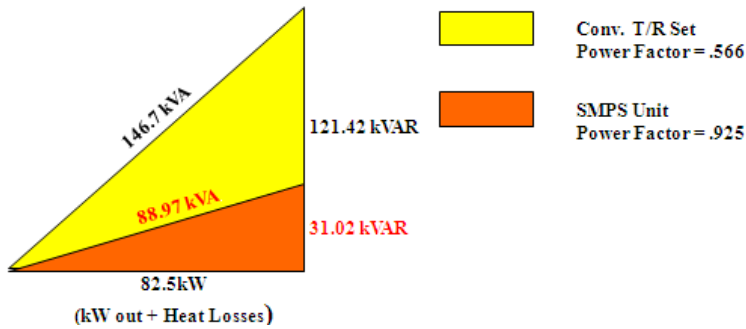


圖 5 三相高頻與單相低頻功率因數比較圖

由圖 5 可知，在相同輸出功率時，三相高頻電源系統的直流電壓由於僅有極低的漣波成分，可大幅降低無效功率而提升功率因數，使輸入的功率可極大部份輸出至靜電集塵器內；而傳統單相電源系統則因過大的漣波成分，導致低功率因數，而需耗用更多能源，才能達到與三相高頻電源系統相同的輸出效果。

(二) 提高輸出功率

如圖 6 所示，三相高頻電源系統在輸出相等電流 (mA) 的狀況下，其平均輸出電壓 (kV) 遠低於傳統低頻電源的峰值電壓 (火花或電弧發生時的電壓)，意即此時三相高頻電源系統可以在不發生任何火花或電弧的狀況下，輸出更多功率進入靜電集

塵器內，以達到提高集塵效率的效果 (圖 7)。

PowerPlus 與 Conventional T/R 輸出電壓(kV)之波形比較

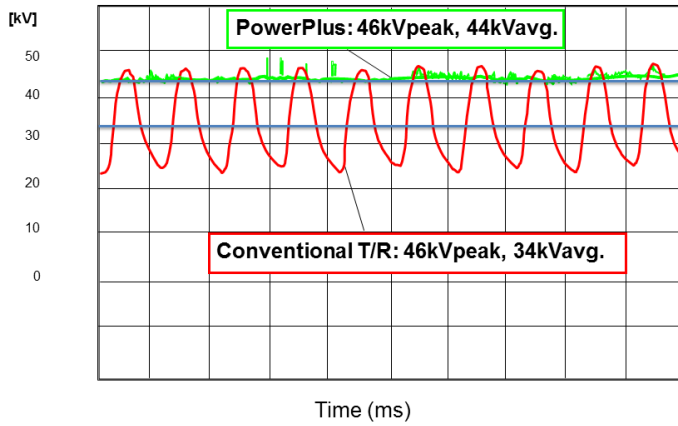


圖 6 三相高頻與單相低頻輸出電壓峰值 / 平均值示意圖

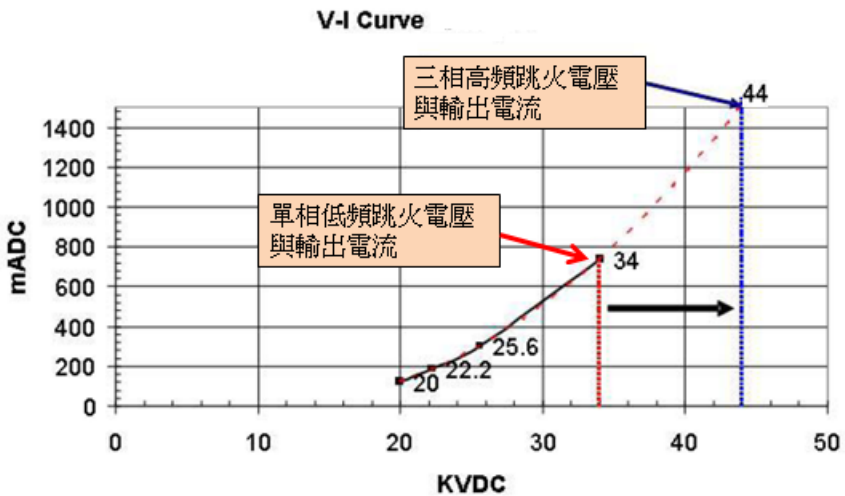


圖 7 三相高頻與單相低頻輸出電壓 / 電流示意圖 (NWL)

(三) 快速響應的 IGBT 元件與電控系統

傳統低頻 SCR 電源系統，由於受限頻率以及 SCR 反應速度，容易發生電源諧波及電流衝擊等問題。而三相高頻電源系統使用快速響應的 IGBT 元件與電控系統，並運轉在高頻率範圍，使它在偵測到火花或電弧後，可在 $30\mu\text{s}$ 時間內快速關閉 IGBT 的輸出，因此電源側僅會汲取到極小的火花或電弧的能量；對比於傳統低頻 SCR 控制系統，由於受限於使用頻率，其最快反應時間為 8.33 ms (60Hz)，因此電源側會汲取到較大的火花或電弧的能量，使得電源側須設計更大的電容器及絕緣油量以吸收這些能量所產生的熱量。此外，高頻電源的電控系統，更具備下列特點，可自動對靜電集塵器做適應性的調整：

1. 與 IGBT 組合後，允許間歇放電 (Intermittent Energization, IE) 的時間控制在 0.1ms 內，使其可有更佳的能力去處理高濃度與高灰阻的粉塵所導致的逆電量現象 (Back Corona)。
2. 當火花及電弧結束後，較傳統低頻 SCR 電源系統更快速提升輸出電壓至額定值，因此在單位時間內，能輸出更多功率 (如圖 8 所示，線與底部圍出之面積) 至靜電集塵器內，以提高集塵效率。

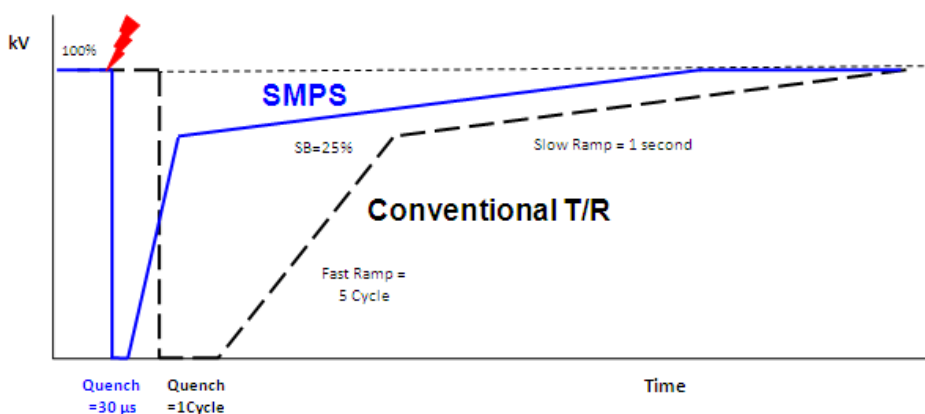


圖 8 三相高頻與單相低頻輸出電壓 / 火花反應示意圖

三、燒結二場大 ESP 電氣改善計畫

處理燒結廢氣的 ESP 在高壓電源系統常見問題為二次電壓不足、過多火花或電弧現象 (林勳佑等, 2010), 於是從變壓器升級方面改善集塵效率主要有 2 個重點: 增加輸入 ESP 之電壓與增加電流密度。提高輸入 ESP 之電壓能加強高灰電阻粉塵的帶電效果, 並增加飄移速度。而增加電流密度則可增大電場, 促進粉塵粒子帶電。

為了讓中龍燒結的靜電集塵器效率更加提升, 以減低粒狀物排放, 因此本改善計畫, 將傳統變壓器改為高頻變壓器, SCR 觸發供電系統一併升級為三相高頻 IGBT, 同時盤箱內部零件、電纜以及人機介面亦同步更新, 以確保系統運轉時的穩定性。

在規劃變壓器更新階段, 首先要評估變壓器的二次側額定電壓及電流, 這 2 個參數代表的是高壓電源系統輸入至 ESP 的電能大小, 其中電壓與電極間距有關, 電流則是與集塵面積相關。預計改善的 ESP 集板與集板間距為 460 mm, 原始設計的傳統變壓器規格為 80 kV, 700 mA, 根據 Kim et al. (1998) 所做的實驗 (圖 9), ESP 在相同煙氣負載狀況下, 使用不同集板間距所做的 V-I 曲線, 確立集板間距與電壓之關係。

根據圖 9 中數據, 可以得到以下的結論: 從 460 mm 集板間距的 V-I 曲線判斷, 一般運轉狀況下, 其電壓值可達到 90~100 kV, 因此在 460 mm 集板間距的 ESP 上, 應搭配使用額定值 100 kV 以上之變壓器; 若使用較小 kV 的變壓器, 抑制了可輸出電壓, 無法顯著改善粒子的飄移速度與 ESP 效率。若在 460 mm 集板間距的 ESP 上只運作 70kV 所得到的二次側電流與 100 kV 的情況下相比, 只有 1/2。

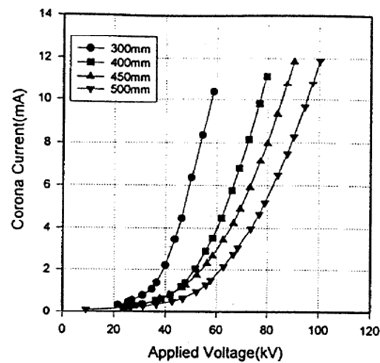


圖 9 各距離 V-I curve 表現

在 ESP 內部機械狀況不佳導致火花的情況下，此 ESP 平常運轉值維持在 60~85 kVavg，其運轉中 kV 峰值 (kVpk) 應為 70~90 kV，倘若機械狀況獲得改善，則可能運作出更高的 kV 值，原始設計之集板到集板的間距為 460 mm 也正是為了能使 kV 達到極大值。一般而言，300mm 間距會搭配 70kV 的變壓器；400mm 間距則是搭配 83kV 的變壓器。以中龍燒結此台 ESP 內部間距 460mm 而言，應選擇 100kV 的變壓器才可達到最佳的放電效果，再加上燒結 ESP 常見問題為二次電壓不足，若更新時僅選擇市面上常見規格 83kV，則無法有效發揮大間距的優點，影響集塵效率的提升效果。而以現有變壓器計算電流密度為 0.33~0.39 mA/ m²，一般建議之電流密度應為 0.4~0.5 mA/ m²。從集板間距、運轉數值與電流密度、以及改用高頻變壓器後 kVavg 將幾乎等於 kVpk 等多方面來評估，本計畫的高頻變壓器將選用 100 kV、1050 mA 之規格。

中龍鋼鐵的燒結二場大 ESP 總共有 2 個倉室 (Chamber)，每個倉室共有 3 個電場 (Electrical Field)，每個電場都有 1 台傳統變壓器，共有 6 台傳統變壓器，本計畫將全部更新為高頻變壓器，然而燒結場停機時間僅有 2 天，無法在一次工程內完成 6 台高頻變壓器的更新，所以決議分 2 次工期各 2 天，每次安裝 1 個倉室的變壓器 (共 3 台)，專案規劃將施工時間設為 24 小時三班制，實際施工僅花費 1.5 天。

表 1 中龍燒結場大修改善順序一覽表

施工工期	更換倉室
108.05	Chamber A
109.02	Chamber B

為了比較更新高頻變壓器對中龍 ESP 的表現，更新前後均請第三方檢測廠商對 ESP 進行效率檢測，檢測的種類為粒狀污染物檢測 (NIEA A101.76C)。由於量測之製程為燒結製程，入口濃度差異甚大，檢測時將採用同步量測，同時量測上游與下游之濃度，以確保檢測的集塵效率具有可比較性，採樣時也一併量測含氧量，依標準氧氣濃度進行校正後，可以使更新前後之檢測結果具有參考價值。

四、ESP 電氣改善成果

圖 10 至圖 11 比較 ESP 其中 1 個倉室 Chamber A 在更新高頻變壓器前後的電氣表現。由以下電壓電流比較圖可發現，更新後的第一室 Ch1 電壓（黑色曲線）與第三室 Ch3 電壓（藍色曲線）因火花產生之震盪幅度約 4kV 普遍略低於更新前的電壓振幅 8~10kV，而電流在遇到火花後下降之幅度及回升之速度表現也高於原本的電流值，這是因為高頻變壓器快速抑制火花的短路電流並快速回升至之前火花發生點的特性。唯有第二室的電壓電流表現異常，歸因於集板與極線間距不足，導致火花頻繁產生，為了維持 ESP 運轉時的穩定性，必須先行切除部分的集板極線，導致更新後電壓與電流表現低於更新前。

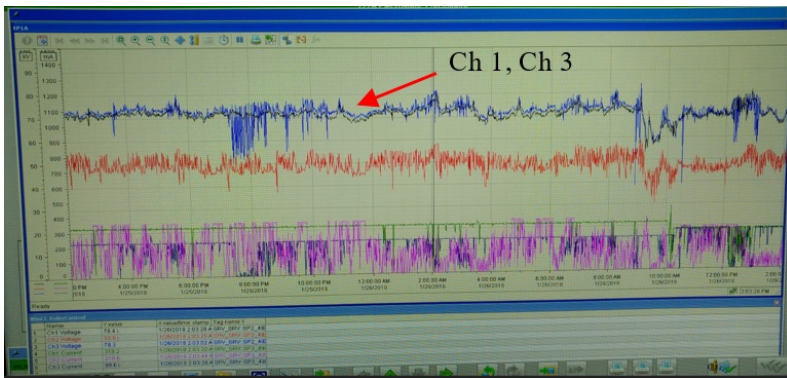


圖 10 Chamber A 共 3 室於 2018 年 1 月 26 日之電流電壓曲線

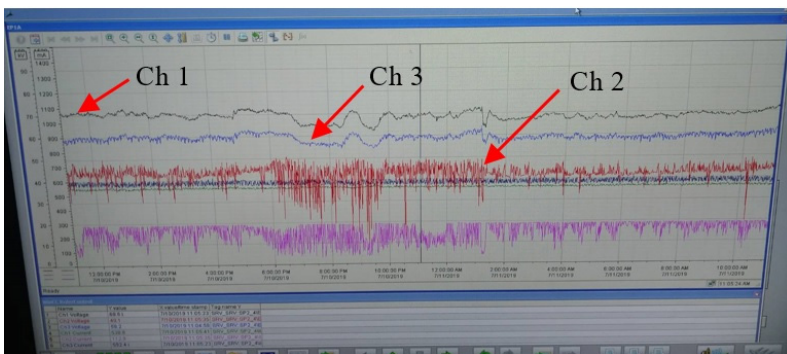


圖 11 Chamber A 共 3 室於 2019 年 7 月 10 日之電流電壓曲線

註：圖 10.11 原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

此外更藉由更新前後的粒狀物檢測結果可知，更新前測得之 ESP 集塵效率為 79.4%，而更新高頻變壓器之後，集塵表現可提升至 95%。結果證明，將傳統變壓器升級為高頻變壓器，對於 ESP 之集塵效果有相當顯著的幫助。

雖然一般靜電集塵器收集效率正常均可達 98% 以上，本次改善前後的效率均較低的原因，係因內部機械件狀態不甚理想，導致間距不足易火花、部分變形嚴重集板、極線已切除等問題，雖更新高頻變壓器已大幅提升集塵效率，但持續運轉下，內部機械件狀態只會越來越差，連帶也影響更換高頻變壓器帶來的好處。

五、機械問題與改善方案及成果

燒結二場大 ESP 機械構造為 2 個倉室 (Chamber)，每個倉室有 3 個區室 (Field)，第一室及第二室每室有 18 排集板與 17 排極線。每排集板有 9 片集板，每排極線框有上下兩組極線框。第三室為移動式集板。每室集板與極線間距皆為 230mm。燒結 ESP 常見的機械問題有集板積灰、極線積塵、位移與集板彎曲變形 (張木彬, 2018)。極線積灰會使二次電流無法釋出，而集板積灰或彎曲變形會縮短集板與極線的間距，易造成高頻率火花，導致電壓無法升高，兩者皆會大幅降低集塵效率。2017 年機械檢驗時發現 Chamber A 第二室 A2 及 Chamber B 第二室 B2 的機械狀況最為嚴峻。在 A2 及 B2 區室中，18 排集板中皆有 9 排已嚴重變形 (圖 12)，導致與極線間距低於 80mm。此 ESP 集板變形彎曲的主因為集板底部與集板之限制角鐵的間距過小，導致集板在熱漲冷縮時空間不足受擠壓而變形，且隨運轉時間越久，情況越嚴重。由於每季只有 1~2 天的停機時間，僅能就彎曲嚴重的部分做暫時處置，如切除集板 (圖 13)、極線或微調限制角鐵之位置以盡量回復原設計間距。A2 累計已切除 5% 集板面積，而 B2 為 15%。一般而言，當集板面積減少 10% 以上，集塵效率就會大幅降低。因此，在電氣改善完後 A2 區室的運轉數值仍然沒有顯著改善。為了徹底改善 ESP 運轉穩定度，中龍鋼鐵在 2020 年每個 Chamber 各規劃 30 天的長停機，逐步更換 Chamber A3 區室及 Chamber B 兩室：B2、B3 區室的集板。



圖 12 Chamber A 第二室集板嚴重變形彎曲

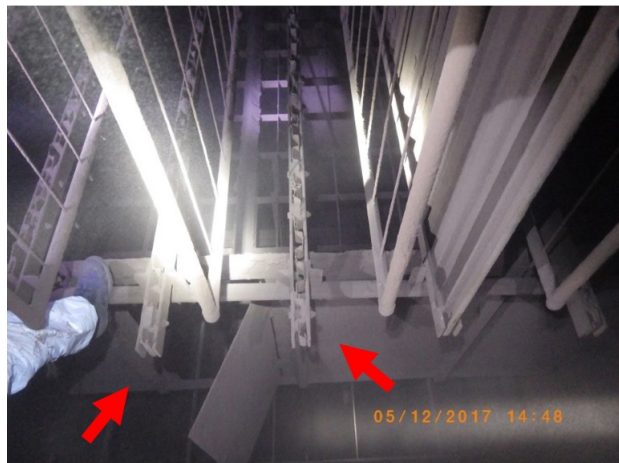


圖 13 Chamber B 第二室集板切除

註：圖 12.13 原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

內部機械件更新前後的運轉數值彙整如表 2。圖 10 與圖 14 為電氣與機械改善前 2018 年的運轉數值，圖 15~ 圖 18 為機械與電氣改善後於 2021 年 1 月 6~8 日之運轉數值。

表 2 內部機械件更新前後運轉數值

區室	A1	A2	A3
2018 年 1 月 25~26 日	66~74kV	50kV	66~74kV
2021 年 1 月 6~8 日	76~80kV	58~60kV	78kV
區室	B1	B2	B3
2018 年 1 月 25~26 日	66~74kV	50kV	66~74kV
2021 年 1 月 6~8 日	-	60~65kV	-

綜觀而言，Chamber A, B 的運轉電壓皆在改善後獲得顯著提升，電壓升高能加強高灰電阻粉塵的帶電效果以增加粒子飄移速度，是影響燒結製程 ESP 效率的重要因素之一。以 Chamber A 部分而言，在更新改善 A2 區室機械狀況後，圖 16 電壓數值（紅線）明顯比電氣改善完後的圖 11 又更穩定，且有較長的時間維持在較高的電壓。以 Chamber B 而言，比較圖 14 與圖 18，B2 區室平均運轉電壓從 50kV 左右增加到 61kV。而 B3 區室為移動式集板與毛刷干涉短路問題，B1 區室則無更新，因此此 2 室未列入比較。

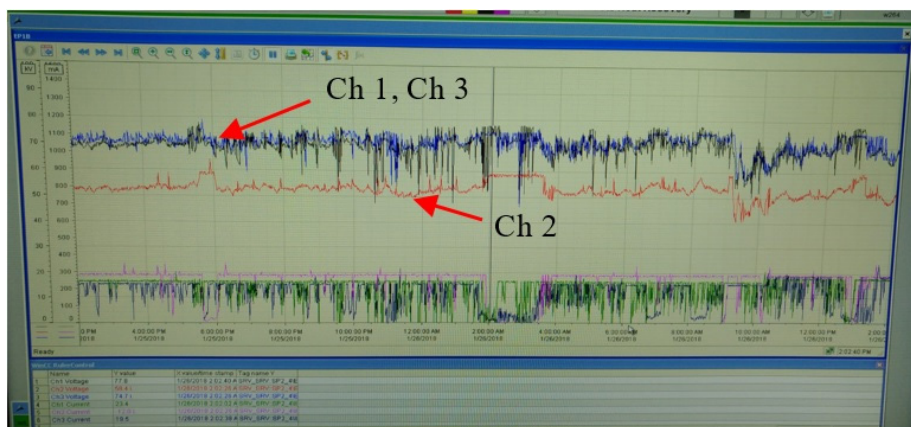


圖 14 Chamber B 共 3 室於 2018 年 1 月 25~26 日之電流電壓曲線

44 鋼鐵廠燒結製程靜電集塵器效率提升案例分享

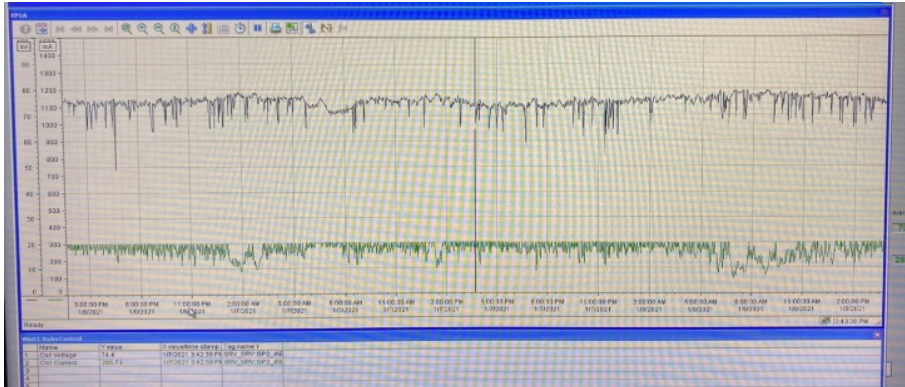


圖 15 Chamber A1 電流電壓曲線

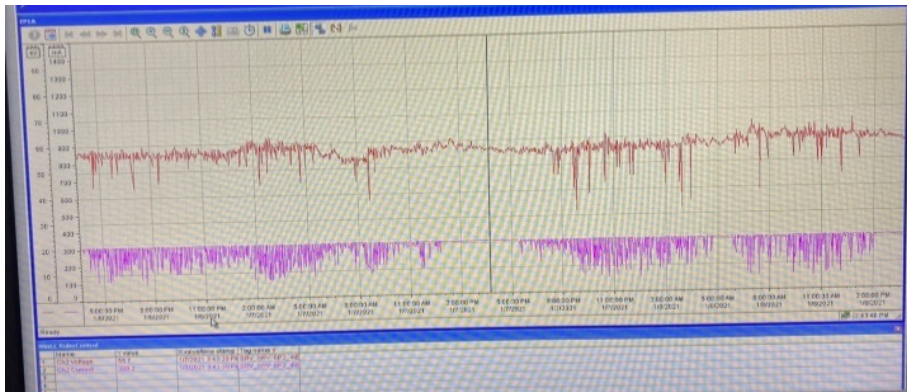


圖 16 Chamber A2 電流電壓曲線

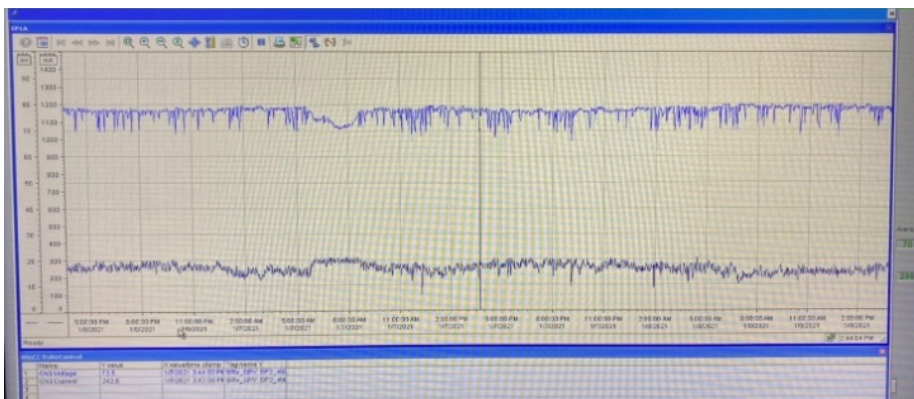


圖 17 Chamber A3 電流電壓曲線

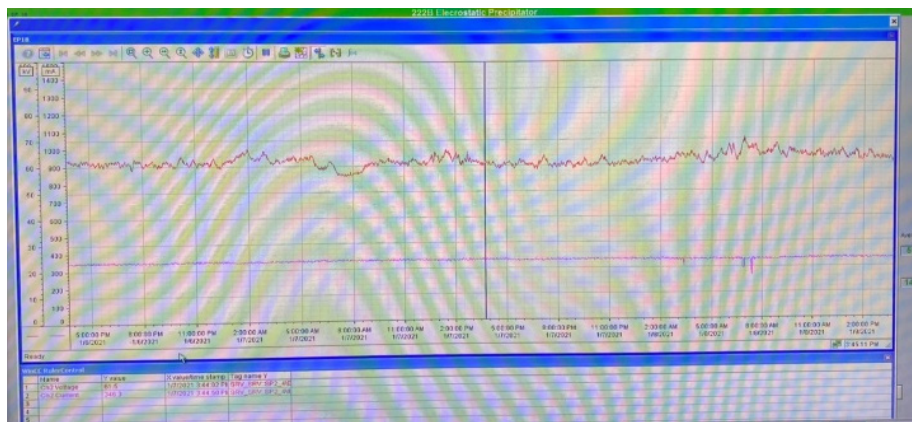


圖 18 Chamber B2 電流電壓曲線

註：圖 15~18 原影圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

六、結論

透過此更新案的結果可得到以下結論：在無法長時間停機改善機械狀況時，更新電氣設備是提升 ESP 集塵效率的最佳方案，使用搭載 IGBT 的高頻變壓器以取代傳統變壓器，不但可以利用更低的電壓，製造出更高的電流值，具有更高的能源轉換率，使 ESP 的集塵效率從 79.4% 提升至 95%；同時，可以大幅降低每年的運轉維護成本，省去了因低轉換率導致能源無故消耗的問題，並造就了環境維護與高效節能的雙贏局面。若在停機時間允許下，更新內部老舊機械部件則能帶來更穩定的運轉數值，增加運轉可靠度。在良好的機械狀況下，也更能極大化電氣改善所帶來的效益。

本研究雖未針對 $PM_{2.5}$ 探討，但已有研究顯示 ESP 在操作良好的狀況下適合作為鋼鐵廠燒結工廠之可過濾性微粒 $FPM_{2.5}$ 防制設備，且去除效果達 98% 以上，因此可推估當 ESP 集塵效率提高後，細懸浮微粒去除效率也會相對提升。

綜上，燒結製程通常為鋼鐵廠最大空氣污染源，且因製造關係 ESP 相較之下維護困難，但中龍鋼鐵歷年來對燒結場 ESP 改善不遺餘力，持續降低粒狀物排放量，實屬善盡企業社會責任。

參考文獻

林勳佑、黃以松、陳俊達，鋼鐵廠燒結製程除塵效能提升與改善，中工高雄會刊，第 18 卷，第 2 期。

張木彬，燃煤及煉鋼程序空氣污染最佳可行控制技術研究，科技部 107 空污防制科技研究合作計畫期末成果報告 - 計畫編號 :MOST-107-EPA-F-006-004

K. R. Parker (1997), Applied Electrostatic Precipitation, London, UK, Blackie Academic & Professional.

Ken Parker (2003), Electrical Operation of electrostatic Precipitators, London, UK, The Institution of Electrical Engineers.

NWL, DSP PowerPlus Series 7 Product Manual.

NWL, Sizing a PowerPlus Unit to replace T/R Sets.

Kim, Y. J., Jeong, S. H., Hong, W. S., Cho, S. S., & Ham, B. H. (1998, September), Effect of the plate spacing and discharge electrode shape on the efficiency of wide plate spacing electrostatic precipitator. In Proceedings of Seventh International Conference on Electrostatic Precipitation: pp. 590-595.

ISSN 12042783 GPN 2007100008

工本費：250元



本期刊下載

發行所：經濟部工業局

106臺北市大安區信義路三段41之3號（信義大樓）

TEL：(02)2754-1255 FAX：(02)2704-3753

本期刊全文網址：<https://proj.ftis.org.tw/eta/>