

二氧化碳清洗技術在焚化廠的應用-以空氣冷凝器(ACC)鰭片清洗為例

蘇敬智^{1*} 王彥智² 洪建皓³ 陳昱志²

摘要

隨著臺灣各焚化廠設備逐漸老舊導致效能降低，以空氣冷凝器(ACC)為例，因長年在戶外導致其鰭片附著大量污染物，降低ACC熱交換效率，進而影響垃圾處理量與發電量。針對上述問題，傳統的清潔方式包括自來水清洗、化藥清洗及水刀清洗等，皆因有二次污染或可能對設備造成傷害，因此本文章將針對應用二氧化碳乾冰清洗焚化廠空氣冷凝器鰭片進行工法介紹與成效討論。在空氣冷凝器鰭片執行乾冰清洗後，垃圾處理量由原先的494 ton/day提升至614 ton/day，共提升24%；入汽機蒸汽產量由原先的65.4 ton/hr提升至73.7 ton/hr，共提升13%；發電量由原先的232.8 MWH提升至276.2 MWH，共提升19%，顯示乾冰清洗在此系統上能發揮具體效益。乾冰清洗在焚化廠的應用上，除空氣冷凝器的鰭片外，尚有爐管、汽輪發電機及空氣預熱器等設備皆能應用。

關鍵詞：焚化廠，空氣冷凝器，乾冰清洗，發電量，垃圾處理量

1. 前言

在焚化廠的製程當中，鍋爐熱交換所產生的過熱蒸汽進入汽輪發電機後產生電力，該蒸汽做完功後將經由空氣冷凝器(ACC, Air Cooled Condenser)將蒸汽冷凝成水(圖1)回收再利用。空氣冷凝器效能越佳，越能快速凝結蒸汽使汽水循環更加順暢，有助於提升垃圾處理量與發電量。本廠因現階段遭遇空氣冷凝器效能不佳的問題，故下文將針對研究動機、歷年清洗方式與目前現狀等三部分進行說明。

1.1 研究動機

臺灣各焚化廠設備逐漸老舊效能亦隨著降低，以空氣冷凝器為例，因長年在戶外導致其鰭片附著大量污染物，除影響空氣冷凝器熱交

換功能外，其真空值也不佳，對垃圾處理量與發電量皆有不利的影響。所以若能有效去除空氣冷凝器鰭管與鰭片上的污染物，對本廠的操作運營有莫大助益。

1.2 常見清洗方式

主要清洗方式為自來水清洗、檸檬酸藥劑清洗及水刀清洗三種方式，介紹如下：

◇自來水清洗

每座空氣凝結器的內、外部皆用自來水清洗，方式為利用消防泵與消防水帶執行清洗，清洗壓力為7.5–8.0 Kg/cm²，每座(共6座)清洗時間約為8小時。但此方法會有產生二次污染(廢水)的問題。

◇檸檬酸藥劑清洗

用檸檬酸(學名為2-羥基丙烷-1,2,3-三羧

¹信鼎技術服務股份有限公司 資深工程師

²信鼎技術服務股份有限公司 工程師

*通訊作者 E-mail: liverpool@ecove.com

收到日期: 2019年02月21日

修正日期: 2019年05月13日

接受日期: 2019年05月20日

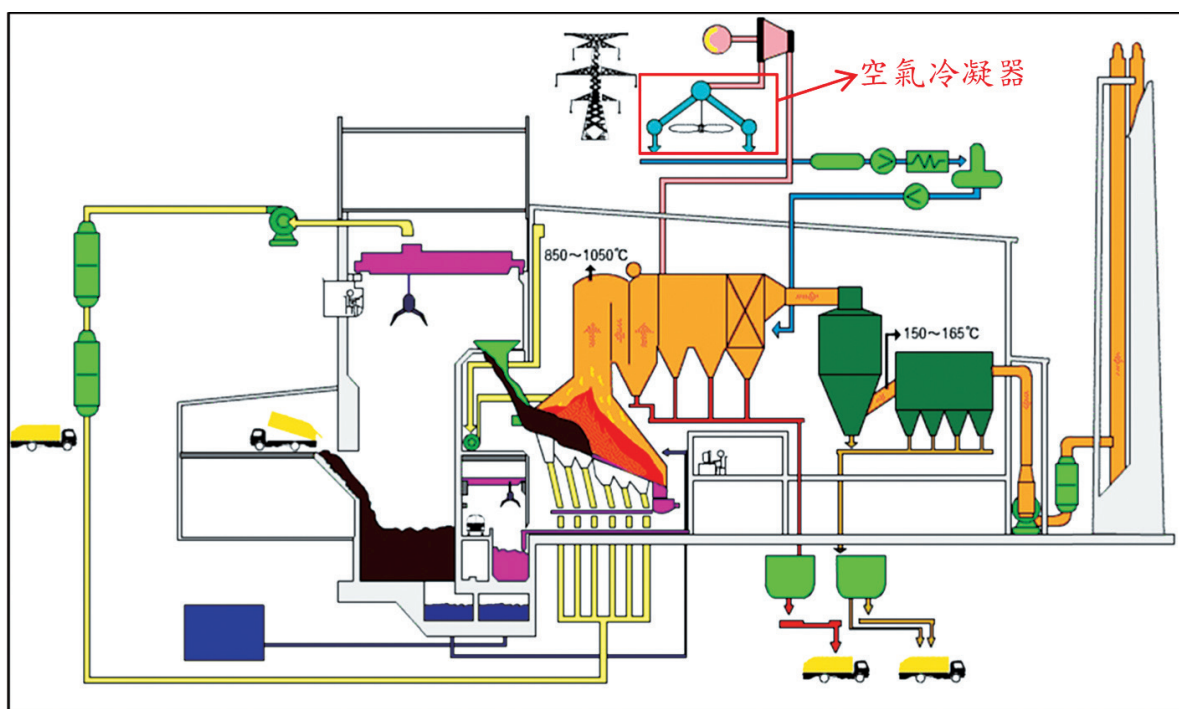


圖1 焚化廠處理流程圖(本研究繪製)

酸，化學式為 $C_6H_8O_7$)藥劑執行清洗，方式為加水調配成10%的檸檬酸，在ACC鰭片上加藥噴灑完成且停留30分鐘後(圖2)，以自來水粗沖鰭片，並於隔日再用自來水細清ACC鰭片(圖3)。此方法除有二次污染問題外，且藥劑容易對鰭片有腐蝕效應，對設備造成傷害。

◇水刀清洗

以水刀執行清洗(High-Pressure Water Jetting)，其壓力限定為20,000–28,000 PSI



圖2 ACC鰭片上檸檬酸加藥狀況(信鼎營運廠)



圖3 ACC鰭片上用自來水細清(信鼎營運廠)

(1,406–1,968 Kg/cm^2)，雖效果不錯，但因壓力過大，在清洗過程也容易造成部分鰭片損壞。

1.3 目前現狀

二氧化碳清洗前相關數據如表1所示，垃圾處理量與發電量僅達設計量的55%與66%，明顯效能低落。

表1 空氣凝結器設計與現狀相關數據比較表(信鼎營運廠)

項次	項目	單位	設計值*	實際值**
1	垃圾熱值	Kcal/kg	1,600	2,432
2	垃圾處理量	Ton/day	900	494
3	入汽機蒸汽產量	Ton/hr	76.1	65.4
4	發電量	MWH	355.2	232.8
5	ACC真空值	Kg/cm ²	-0.80	-0.47
6	大氣溫度	°C	23	24

* 設計值為MCR 100%的條件

** 實際值為2017年11月29日數據

2. 二氧化碳清洗技術與運用

孫洪孟等(2011)指出乾冰清洗初次使用是在1945年美國海軍利用此技術進行油脂清洗，以下將針對乾冰清洗原理、其他二氧化碳清洗方式及二氧化碳清洗優點等三方面進行介紹。

2.1 乾冰清洗原理

二氧化碳乾冰清洗係指使用乾冰顆粒，在超音速的推動下對表層進行輕微的爆破(圖4)，清洗去污過程說明如下：

✧ 低溫剝離過程

被加速的乾冰顆粒與污染物表面進行熱交換，污染物層溫度被降低後遇冷收縮、變脆及龜裂，由於污染物層和基體的膨脹係數不同，所以乾冰的低溫將容易降低污染物層與基體間的結合力，使其容易去除。

✧ 衝擊、吹掃過程

在空氣壓力的推動下，由噴嘴噴出的乾冰顆粒具強大動能，對污染物層有磨削、剪

切的作用，使污染物層產生破碎狀況。

✧ 昇華過程

孫洪孟等(2011)提到乾冰顆粒與污染物層碰撞後會迅速昇華為二氧化碳氣體，短時間內體積擴大891倍，細碎的乾冰微粒進入污染物層的隙縫後，其體積瞬間爆炸形同微型爆炸，將有效去除污染物。

2.2 其它二氧化碳清洗方式

除上述乾冰清洗方式外，張育仁(2008)提到二氧化碳清洗方式尚有雪花噴流、液態二氧化碳及超臨界二氧化碳清洗等方式，介紹如下：

✧ 二氧化碳雪花噴流清洗法(Snow Cleaning)

二氧化碳雪花噴流清洗法與乾冰顆粒噴洗法兩者都是以乾冰作為清洗媒介，而二氧化碳雪花清洗法則是依賴較小的粒徑的乾冰或雪花來去除污染物，其清潔原理同乾冰顆粒噴洗法，但其噴出的顆粒大小如同雪花般大，因此被稱為二氧化碳雪花噴流清洗(圖5)。

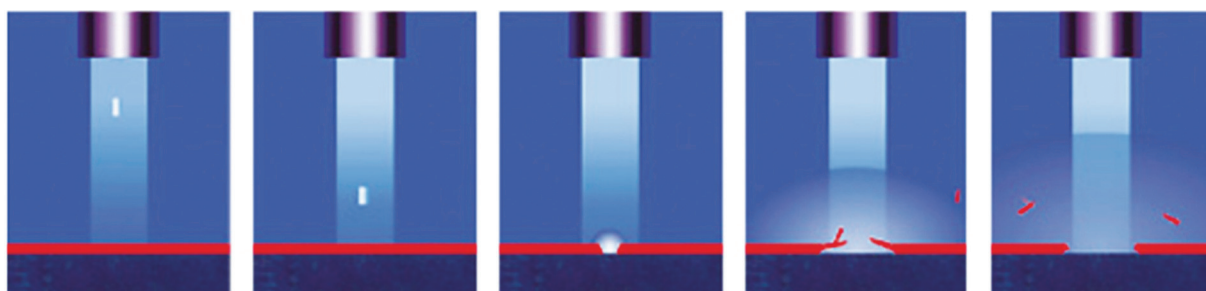


圖4 乾冰清洗原理示意圖(冷研科技有限公司，2018)

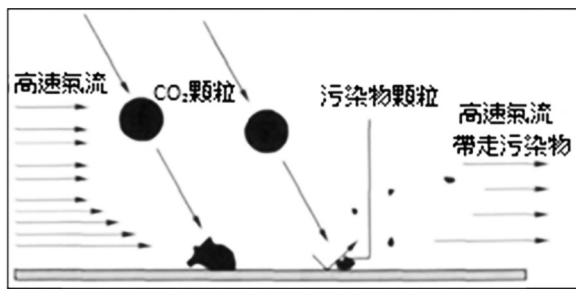


圖5 二氧化碳雪花噴流清洗法原理(魏育才，2014)

◆液態二氧化碳清洗法(Liquid CO₂)

液態二氧化碳在碰撞污染物層表面的瞬間會變形，成為一道流體，然後繼續快速的在污染物層表面移動，對污染物顆粒產生一股向前推的黏性拖曳力和向上的浮力，當這兩股力量大於污染物對於基體表面的附著力時，污染物就會被噴射帶離基體表面(圖6)。

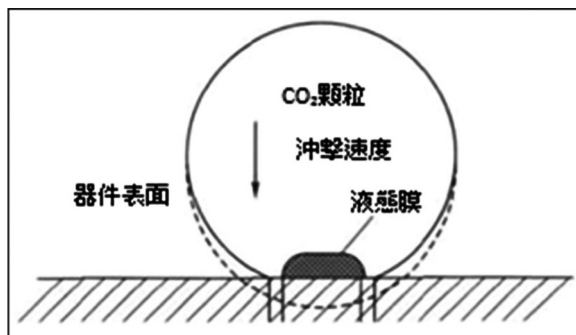


圖6 液態二氧化碳清洗法原理(魏育才，2014)

◆超臨界二氧化碳清洗法(Supercritical CO₂)

超臨界二氧化碳清洗法極適於清洗精密、微小、有微細孔洞、幾何形狀複雜的工件，由於超臨界二氧化碳的低表面張力，使它極易滲入奈米級的深孔、細縫中，把隱藏的污物溶解後帶出。

2.3 二氧化碳清洗優點與缺點

冷研科技有限公司(2018)網站中指出，二氧化碳清洗優點包含不傷及基體、無二次污染及不對人體造成傷害等，茲說明如下：

◆不傷及基體

乾冰清洗免除設備基體的損傷(耗)，不

具侵蝕性、可燃性與導電性，可以下列兩種方式來說明，第一：乾冰清洗並不會腐蝕或損耗被清洗源，意味著可以保持被清洗物完整性及所允許的最低公差值，這是傳統噴砂系統所無法相比擬的。第二：傳統的清洗方式常因運輸、敲擊等，造成設備損壞，乾冰清洗可免除以上困擾。

◆無二次污染

不論是使用溶劑或是噴砂及傳統拋光研磨的方式，都會產生大量廢棄物處理的成本，而工業界轉換乾冰清洗的最大原因便是為了減少廢棄物的處理費用，乾冰清洗系統不會產生二次污染源，可省下一筆處理費用，對環境亦更為友善。

◆不對人員造成傷害

因乾冰清洗不會使操作人員長時間暴露在化學物品或充滿粉塵的空氣中，不會使操作人員造成職業傷害，唯一需注意是乾冰清洗過程中會產生二氧化碳，故在清洗過程中需注意空氣流通。

乾冰清洗也不全然沒有缺點，乾冰在使用後無法避免的會以二氧化碳方式排放，就本公司實際操作經驗，清洗一廠造成二氧化碳之排放量約在2噸-4噸之間。二氧化碳的材料成本較高，因此以此方法執行清洗的成本自然攀高，是傳統清潔方式的2-4倍。惟就減廢、對施工人員的健康觀點來看，此增加的成本是必要且有價值的。

3. 二氧化碳清洗在空氣冷凝器鰭片上的運用

以下將針對空氣冷凝器設計資訊、二氧化碳清洗相關設備資訊與清洗過程觀察說明進行介紹。

3.1 空氣冷凝器設計資訊

本廠空氣冷凝器形式為A型鰭片屋散熱鰭片(圖7)，鰭片屋共兩座，每座各3室(合計共6

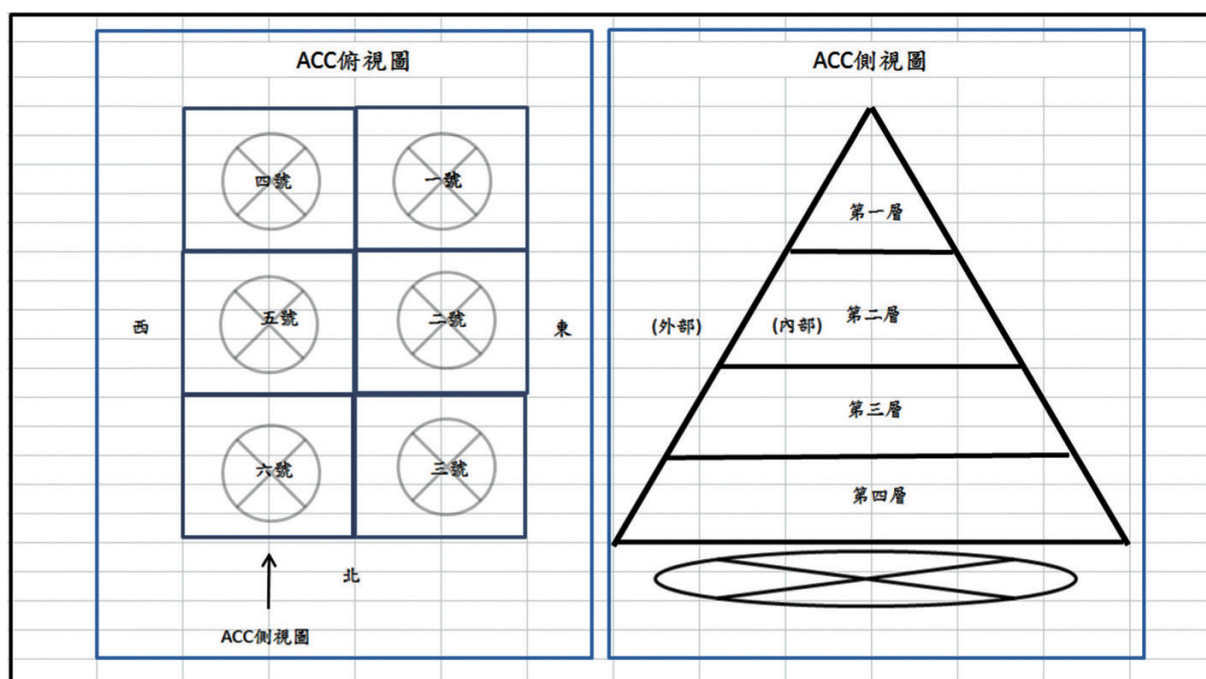


圖7 空氣冷凝器整體平面與立面示意圖(本研究繪製)

室)，每室共有鋁製鰭片管2面，單一面L 7,964 mm × W 8,000 mm × H 7,284 mm，每面鰭片管共3層(圖8)。

3.2 二氧化碳清洗相關設備資訊

二氧化碳清洗系統主要有空氣壓縮機、乾

冰清洗機、噴槍與噴嘴(圖9)等，說明如下：

✧空壓機

為提供清洗的空氣來源，空氣壓力約為7 kg/cm²。

✧乾冰清洗機

Cold Jet公司(2018)說明，放入直徑為3

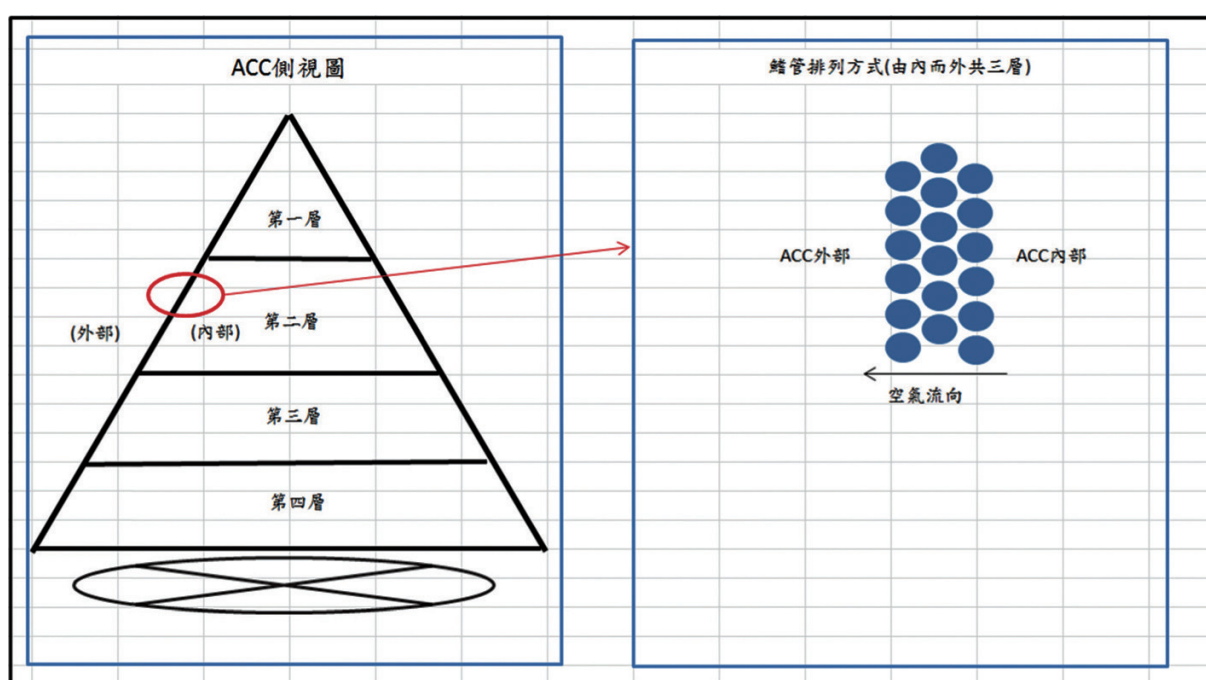


圖8 空氣冷凝器鰭管排列示意圖(本研究繪製)

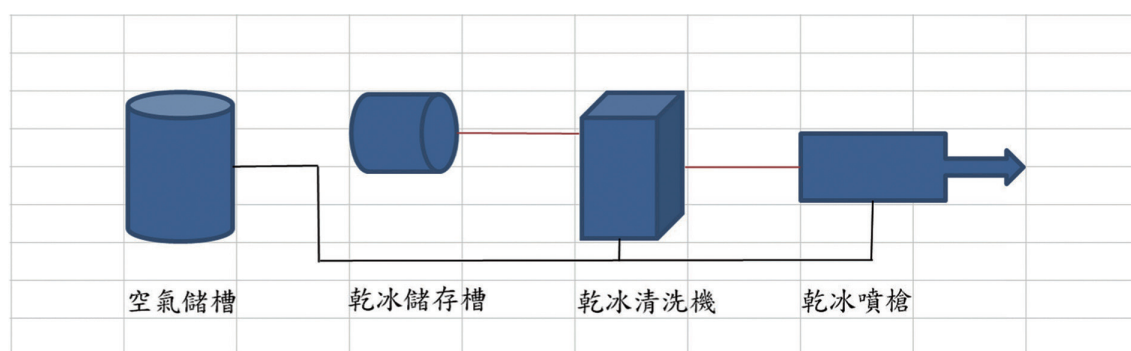


圖9 二氧化碳清洗系統示意圖(本研究繪製)

mm的乾冰，經過進料器後藉由空氣輸出乾冰，其乾冰傳送量約為0–3.2 kg/min，正常輸冰量約為1.5–2.0 kg/min。

◇噴槍與噴嘴

乾冰經由乾冰清洗機輸出後，透過乾冰噴槍與噴嘴衝擊預清洗標的物，達到清潔效果。

3.3 清洗過程效果觀察說明

在利用乾冰清洗空氣冷凝器鰭管與鰭片過程中，大部分附著在其上的水垢皆能大量被去除，唯有鰭管間與鰭片間因水垢附著嚴重且無孔隙的部分不易清除，研判要經過多次反覆清洗與熱漲冷縮效應後，才有機會全數清洗乾淨。

4. 結果與討論

以下針對本次清洗後的結果、未能清洗乾

淨的原因探討與後續此清洗方式在焚化廠的其他應用進行說明。

4.1 清洗結果

乾冰清洗後，垃圾處理量由原先的494 ton/day提升至614 ton/day，共提升24%；入汽機蒸汽產量由原先的65.4 ton/hr提升至73.7 ton/hr，共提升13% (因清洗前真空不佳，部分原要進汽機的蒸汽已走By-pass，因此入汽機的蒸汽量提升不多)；發電量由原先的232.8 MWH提升至276.2 MWH，共提升19%，如表2所示，顯現乾冰清洗在空氣冷凝器清洗上達到顯著效益。

4.2 無法清洗乾淨的原因探討

在本次試驗中，雖乾冰清洗可有效清除鰭片上的水垢，但因部分鰭管間與鰭片間的水垢附著嚴重與扎實，無縫隙讓乾冰顆粒穿透進行破壞其結構的因素，導致部分水垢無法被完全清除。後續待該設備熱漲冷縮的物理現象讓附

表2 乾冰清洗前後相關數據比較表(本研究整理)

項次	項目	單位	設計值*	清洗前**	清洗後***
1	垃圾熱值	Kcal/kg	1,600	2,432	2,354
2	垃圾處理量	Ton/day	900	494	614
3	入汽機蒸汽產量	Ton/hr	76	65.4	73.7
4	發電量	MWH	355.2	232.8	276.2
5	ACC真空值	Kg/cm ²	-0.8	-0.47	-0.47
6	大氣溫度	°C	23	24	15

* 設計值為MCR 100%的條件

** 清洗前為2017年11月29日數據

*** 清洗後為2018年02月06日數據

著其上的水垢產生縫隙後再進行反覆清洗，應能去除其水垢。

4.3 在焚化廠的其他運用

乾冰清洗除能運用在空氣冷凝器的鰭管與鰭片之外，在焚化廠尚可應用的範圍說明如下：

- ✧電力設備：如發電機線圈、定子、轉子及渦輪機的葉片等清潔作業。
- ✧爐管：如水牆管、過熱器管、節熱器管等爐管表面等清潔作業。
- ✧其它熱交換器：如空氣預熱器、密閉式冷卻水系統散熱鰭片等。

參考文獻

- 孫洪孟、徐文驥、孫晶與遲永濤，2011。乾冰清洗特性及試驗研究，第14屆全國特種加工學術會議論文集：662-665。
- 張育仁，2008。二氧化碳雪花噴流之形成與特性研究，國立成功大學航太太空工程研究所碩士論文：1-107。
- 魏育才等，2014。二氧化碳清洗技術原理分析，清洗世界，第30卷第8期：35-38。
- 冷研科技有限公司，2018。擷取自公司網站 <http://www.dryicetech.com.tw/>。
- Cold Jet公司，2018。擷取自公司網站 <https://www.coldjet.com/>。

Application of Carbon Dioxide Cleaning Technology in an Incineration Plant – Taking Air Condenser Cooler Fin Cleaning as an Example

Ching-Chih Su^{1*} Yen-Chih Wang² Jian-Hau Hung² Yu-Chih Chen²

ABSTRACT

By considering the air-cooled condenser (ACC) as an example, we can observe that a large amount of pollutants are attached to the ACC fins because of long-term outdoor exposure, reducing the heat exchange efficiency of the ACC and affecting waste treatment and power generation because the performance of the equipment is observed to gradually decline at various incineration plants in Taiwan. To solve these problems, traditional cleaning methods, such as water cleaning, chemical cleaning, and water jet cleaning, can be used, which may damage the equipment by introducing secondary pollution. Therefore, this study will introduce methods and discuss their effectiveness with respect to the application of carbon dioxide dry ice cleaning on the ACC fins in the incineration plants. After subjecting the ACC fins to dry ice cleaning, the waste disposal amount increased from 494 to 614 ton/day, an increase of 24%; the steam production of the steam turbine increased from 65.4 to 73.7 ton/h, an increase of approximately 13%; and the power generation increased from 232.8 to 276.2 MWH, an increase of 19%. These observations indicated the application benefits of dry ice cleaning with respect to this system. In case of the incineration plants, there are other equipment that can be applied with dry ice cleaning in addition to the ACC fins, including the furnace tubes, steam turbine generators, and air preheaters.

Keywords: Incineration plant, Air Condenser Cooler, Dry Ice Cleaning, Power generation, the amount of waste treated.

¹Senior Engineer, ECOVE Environment Services Corporation.

²Engineer, ECOVE Environment Services Corporation.

*Corresponding Author, E-mail: liverpool@ecove.com

Received Date: February 21, 2019

Revised Date: May 13, 2019

Accepted Date: May 20, 2019