

**專題** 報導

冷卻水塔節水實務技術

▶ 專案一部 林村豐

一、前言

事業單位諸如工廠、商業大樓及其他有較大之空調或冷卻負載之設施需求的建築物中，皆有設置冷卻水塔(Cooling Tower)，其目的是藉由水作為吸收熱之介質以使空調或冷卻負載之設備降溫。簡而言之，當水吸熱之後被輸送至冷卻水塔藉由風扇散去水體中的熱，散熱後的水再迴流至原設施中進行吸熱。然而不當的操作維護，除了無法節省冷卻水塔之耗水量，亦引發其系統產生結垢(scaling)，因而降低熱傳效率以致造成耗能。冷卻水塔的節水技術相當的多元，本文著重於應用物化方面的技術避免系統發生結垢或腐蝕，以提升冷卻水塔之節水效益。

二、冷卻水塔之節水與節能的關連性

冷卻水塔運作過程的冷卻循環水損失主要包括：蒸發損失(Evaporation)、排放損失(Bleed-off)及飛散損失(Drift)。而損失的水量必須馬上補入冷卻水塔中，這種水被稱為補充水(Make-up Water)，以確保系統設備可以安全穩定地運轉操作。

補充水量(M)等於蒸發(E)、排放(B)及飛

散損失(D)的總和。其關係式為： $M = E + B + D$ 。

由上述的關係式可以得知，若要力行珍惜水資源，減少冷卻水塔之耗水量，就必須減少補充水量(M)的消耗。然而每座冷卻水塔的蒸發(E)及飛散損失(D)皆有一定之消耗量，此消耗量並無法改變，唯一可以改變的，就只有減少排放損失量(B)，因此排放損失(B)越少，補充水量(M)就越少。

至此，或許有些讀者認為「只要不對冷卻水塔進行任何的排放損失(B)，就能達到最高之省水量。」？

這個觀念是徹底錯誤的。因為水體在散熱蒸發的過程中，水中的溶解性固體(TDS)並沒有伴隨水分子(H_2O)的蒸發而一起被蒸發，雖然有持續注入補充水，但系統中溶解性固體(TDS)的濃度卻持續的增高，因此若冷卻水塔無任何排放損失(B)，當循環水質之LSI(藍氏飽和指數) >1 時，TDS將被析出呈現固態，並在冷卻水塔的系統內附著，即是所謂的結垢(scaling)，這將造成整個系統熱傳效率的降低並引發耗能。例如：一般水冷離心式冷凝器的主機未發生結垢時，主機

滿載耗能率為0.69 kw/RT；隨著結垢係數上升(scaling factor)，熱交換效率降低，1年內主機耗能率將遞增為0.89 kw/RT，如圖1所示，中斜線之區域即為1年額外消耗之能源。

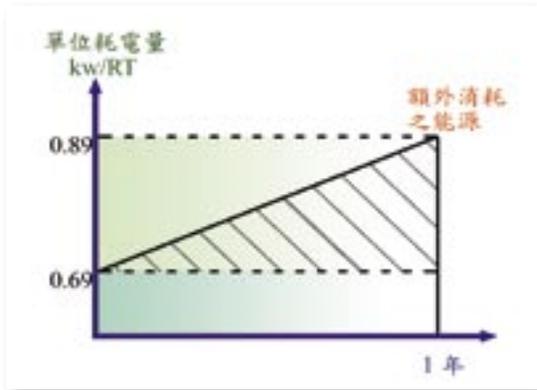


圖1 冷卻水塔因結垢引發額外消耗能源說明

所以冷卻水塔的排放損失(B)，不能完全零排放，但如何將排放量降至最低，且不引發結垢耗能，達到節水與節能兼顧的雙贏局面，這都必須依賴適切的節水技術予以因應。

三、冷卻水塔之節水空間的診斷依據

進行冷卻水塔之節水空間的診斷，所依據的主要判斷參數包括濃縮倍數(Concentrate)及藍氏飽和指數(LSI)，計算的方式分別說明如下：

(一) 濃縮倍數(C)

濃縮倍數(C)是指冷卻水塔之冷卻循環水所循環的次數，可經由冷卻水塔排放水之導電度值($EC_{排}$)除以其補充水之導電度值($EC_{補}$)，予以獲得。公式的表示方式為： $C = EC_{排} \div EC_{補}$ 。例如某座冷卻水塔排放水之導電度值為1,200 $\mu S/cm$ 及補充水之導電度值為300 $\mu S/cm$ ，則濃縮倍數= $1,200 \mu S/cm \div 300 \mu S/cm = 4$ 。

欲減少冷卻水塔的補充水消耗量，必須提升其冷卻循環水的濃縮倍數。例如某座冷卻水塔改善前之濃縮倍數($C_{前}$)為4，期盼改善後之濃縮倍數($C_{後}$)可達到6，則改善後所節省補充水的百分率可經由下列公式算出： $節水百分率 = (C_{後} - C_{前}) \div C_{前}(C_{後} - 1) \times 100\% = (6 - 4) \div 4(6 - 1) \times 100\% = 10\%$ 。

(二) 藍氏飽和指數(LSI)

藍氏飽和指數(LSI)是用來判斷冷卻水塔的水質是否會造成其系統產生結垢或是腐蝕的依據，計算的公式為： $LSI = pH - pH_s$ 。計算的過程所需的參數包括：酸鹼值(pH)、Ca硬度、M鹼度(M_{alk})及總溶解性固體(TDS)的數據值。首先經由理論公式： $pH_s = pCa(-\log[Ca^{2+}]) + pM_{alk}(-\log[M_{alk}]) + C_{scale}(f(T, TDS))$ 的計算，得到水中飽和時之pH值(pH_s)；再經由pH與 pH_s 間的相減，其代表的意義可以顯示出碳酸鈣於此冷卻循環系統中呈現沉積或是溶解的傾向。

一般當 $LSI > 0.5$ 傾向結垢， $LSI > 2$ 則傾向嚴重的結垢；當 $LSI < -0.5$ 傾向腐蝕， $LSI < -2$ 則傾向嚴重的腐蝕；而水質的最理想狀態，則是當 $-0.5 < LSI < 0.5$ 時。

於進行冷卻水塔濃縮倍數提升的過程，必須密切監控水質之LSI值的變化，並搭配適當的水質處理技術予以因應，以避免系統發生結垢或是腐蝕。

四、冷卻水塔之節水技術

導電度計是從事冷卻水塔之節水作業的基本工具，事業單位可由其冷卻水塔的排放水及補充水的導電度值，計算出目前的濃縮倍數(原始濃縮倍數)，再依據擬提升的濃縮倍數，選擇適切的節水技術。提高濃縮倍數之後所節省之排水量如表1所示。

依據經濟部工業局於民國92~96年間所進行之工業節水輔導資料，國內工業部門冷



卻水塔的原始濃縮倍數大都介於1.5~4.0之間。若欲提升濃縮倍數至6.0，適切的節水技術可選擇替代水源法，並同時搭配化學加藥法；若欲提升濃縮倍數至10.0，適切的節水技術包括臭氧氧化法及磁化法。各項技術說明如下：

(一) 替代水源搭配化學加藥法

一般工廠的冷卻水塔多採用自來水作為補充水的水源，為因應水價上漲，減少自來水的消耗，可收集廠內某些低污染度的製程排水水(5.0<pH<8.0、導電度<300 μ S/cm、濁度<12NTU、COD<10mg/L)，或是製程生成水諸如蒸氣冷凝水等，再經過簡單的處理或不經過任何處理，做為自來水的替代水源，直接進流至冷卻水塔做為補充水，將可減少整個冷卻水塔系統對自來水的需求量。

使用替代水源必須注意替代水質之LSI值，同時搭配適宜的化學藥劑予以處理，避免冷卻水塔系統發生結垢或是腐蝕。所添加的藥劑種類依替代水質而定：

- 1.當LSI>1時，添加抗垢劑如有機磷酸鹽(Organo-phosphates)等，或是添加硫酸。主要是降低循環水之pH值，將水中部份的重碳酸鈣(Ca(HCO₃)₂)轉換成溶解度較高之硫酸鈣，同時也能減少不溶解物質的量。
- 2.當LSI<-1時，循環水呈現低pH值，可添加腐蝕抑制劑，這種抑制劑的種類包括磷酸鹽、矽酸鹽、亞硝酸鹽、鉬酸鹽等。以抑制金屬的腐蝕或於金屬表面形成一種保護膜。
- 3.當替代水質含藻類(algae)、黏泥(slime)、菌類(bacteria)及真菌(fungi)時，易引發菌藻污塞，將促使結垢及腐蝕問題更加惡化，同時會導致冷卻水塔壓降及熱傳效率不良，此狀況必須添加滅菌劑，滅菌劑的種類包括次氯酸鈉(NaOCl)、氯胺、

表1 提高濃縮倍數之後所節省之排放量

	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10
1.5	33%	44%	50%	53%	56%	58%	60%	61%	62%	63%	64%
2.0		17%	25%	30%	33%	38%	40%	42%	43%	44%	45%
2.5			10%	16%	20%	25%	28%	30%	31%	33%	34%
3.0				7%	11%	17%	20%	22%	24%	25%	26%
3.5					5%	11%	14%	17%	18%	20%	21%
4.0						6%	10%	13%	14%	16%	17%
5.0							4%	7%	9%	10%	11%
6.0								3%	5%	6%	7%

二氧化氯(ClO₂)等，一般水體中的自由氯(OCl⁻)濃度維持在0.1~0.4 mg/L之間，即能抑制微生物及藻類之滋長。

筆者前(96)年度輔導桃園縣南崁某PBC製造廠，發現該廠將含Cu²⁺濃度低於3mg/L的製程水洗廢水，未經任何除銅處理就直接回收至冷卻水塔系統中，雖然Cu²⁺能分解循環水中的氨氮(NH₃-N)，並抑制微生物及藻類的生長，但Cu²⁺無法於自然界中自行分解，持續將含Cu²⁺的替代水注入冷卻水塔，Cu²⁺濃度將於其系統中累增；同時該廠選擇鹽酸(HCl)添加於冷卻循環水中以控制LSI值，則產生Cu(H₂O)₄²⁺+4Cl⁻ ⇌ CuCl₄²⁻+4H₂O的反應，結果於冷卻水塔循環系統內產生綠色的CuCl₄²⁻垢，如圖2所示。這顯示選擇不當的替代水質，以及不當的加藥，或許也能將LSI值控制於理想狀態，但卻產生了不是預期的化學反應，終將對系統產生污染負荷。

(二) 臭氧氧化法

臭氧處理法防止結垢的原理，主要是將循環水中之硬度物質(鐵、錳、鈣、鎂等)產生鈍化反應，以軟泥的型態沉澱在冷卻水塔底池中，這些軟泥很容易經由過濾器(濾徑<10 μ m)而被濾除，並不會黏著於循環系統之管壁表面；此外，臭氧也具有排除水塔中既有水垢之功能。臭氧處理法也能氧化引發

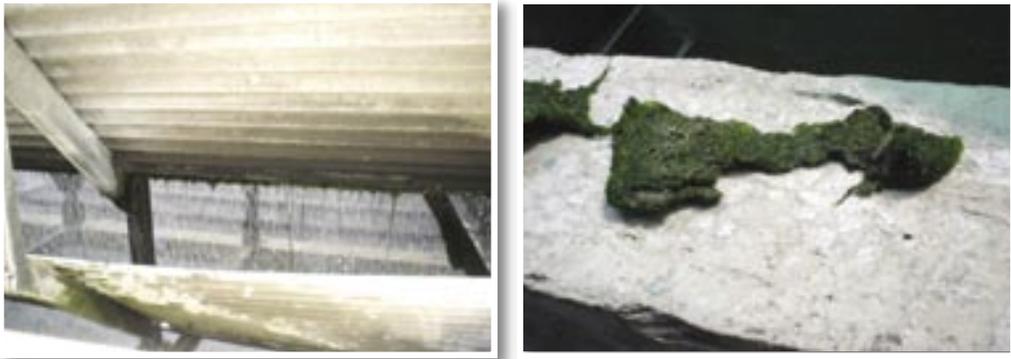


圖2 冷卻水塔出現綠色結垢物

腐蝕的離子，達成系統防腐蝕的效果。除了抗垢抑制腐蝕，臭氧亦能破壞病毒和細菌的細胞膜，有效抑制循環水中微生物的滋長，以及避免產生生物垢(青苔)。

冷卻水塔之臭氧處理套裝設備(如圖3所示)包括臭氧機組、注入器(Injector)、泵浦、袋式過濾器及電控箱。任何型式的冷卻水塔皆適用臭氧處理，且改裝工程並不複雜，施工期間短(不含試車約1~3日)。應用臭氧處理冷卻循環水的案例在國內已有不

少實績，圖4為使用臭氧與傳統化學加藥處理的比較，圖中左邊之冷卻水塔為僅經過臭氧處理(無添加其他藥劑)，右邊的冷卻水塔維持傳統化學藥劑處理。當持續操作3個月後，再彼此比較，明顯發現左邊的冷卻水塔裡面原先結的垢逐漸脫落，並經過濾器濾除後，冷卻水塔內也不再出現結垢，且循環水質色度清澈；而右邊的冷卻水塔一直維持傳統化學藥劑處理，可清楚目視冷卻水塔內結生物垢(青苔)，且循環水質色度較濁。



圖3 臭氧處理可將冷卻水塔之循環水的濃縮倍數提升至10以上



(三) 磁化法

該技術之所以能在不加藥之前提下使冷卻水塔循環系統不發生結垢，其主要之機制為利用夾管式的磁化設備，該設備擁有強大的磁力(最大磁力可達80,000高斯)，其強大的磁力可穿透10mm厚之鋼管，藉由其強大磁力的作用，將管線內水體中之正電荷離子諸如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Si^{4+} 等的價電位改變，而被強迫改變為負電荷，以致失去與水中之陰離子諸如 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 O^{2-} 等結合的能力。藉由同性相斥因而避免結垢發生。

在不發生結垢之前提下，該股循環水之 H_2O 分子會因熱交換過程而發生蒸發現象，但水中之離子並不會隨著 H_2O 分子一同蒸發，以致該股水中離子濃度越來越高，導電度值也隨之提高。但由於該設備強大磁力作用使管線內不發生結垢，因此導電度值即使在 $4,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上也不須因擔心結垢而必須強制排水，因而提升節水效率。該設備之應用範例如圖5所示。

五、結 論

隨著全球暖化引發的氣候變遷效應，聯合國於2007年所發表的全球報告已向世人警告，至2050年全球1/3的人類將因缺水而變成難民。為因應水資源的缺乏，節水技術



圖4 臭氧處理可有效抑制菌藻的滋生，維持循環水質的穩定

已在各國受到重視，且國際間的財經專家將廢水回收及海水淡化，視為本世紀的藍金產業。由於國內事業單位之冷卻水塔的用水量約占整個事業單位總用水量的20%~50%，若冷卻水塔之節水技術能於國內廣泛推廣，將可為我國節省下可觀的水資源。∞

參考文獻

- 1.經濟部工業局，「冷卻水塔用水管理於工業節水之實務應用」，2006年12月。
- 2.愛樹科技，「臭氧應用於冷卻水塔-亞東氣體400 RT實例」，2005年1月。
- 3.經濟部工業局，「工業用水效率提升及回收再利用技術手冊」，2003年12月。
- 4.中技社，「Power-magnet超勁磁設備功能評估」，2000年4月。

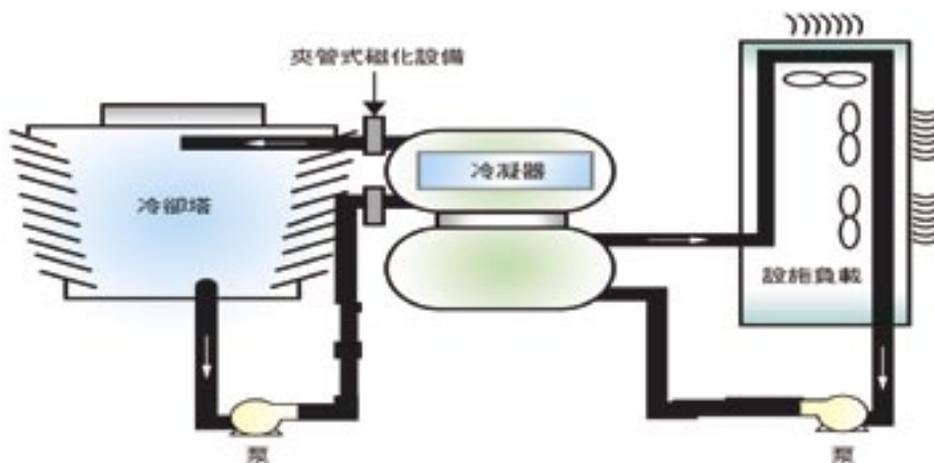


圖5 磁化設備應用範例