

廢(污)水處理類

## 應用電吸附法於冷卻水循環回用之研究

蔡嘉恩\*、翁煥廷\*\*、陳孝行\*\*\*

### 摘 要

冷卻水塔廣泛應用於各行各業，在工業生產中，提供冷卻水吸收或轉移製程設備及產品多餘熱量，以維持所需工作溫度。由於水體中含有各種不同濃度的懸浮及溶解性固體，當水從冷卻水塔蒸發時，這些固體會濃縮在水體內，因而沉積在傳熱界面形成水垢。硬度和二氧化矽是造成冷卻水塔結垢的關鍵因子。一般工業冷卻水塔大多採用定量排棄冷卻水及補充新鮮水源搭配化學加藥方式，來維持冷卻水塔的水質。傳統化學加藥方式衍生大量污泥及二次污染問題，應用電化學法具有離子去除效果顯著、耗電量低、無二次污染及操作維護簡易等優點。

本研究對象為石化廠製程冷卻水塔排放水，應用電吸附(Electro-sorption)電化學法降低冷卻水塔排放水中二氧化矽及鈣、鎂硬度等結垢形成物，探討其去除效果及適用實廠之最適操作條件，期未來可於實廠運用，降低冷卻水塔排放水之結垢因素，將其回用作為冷卻水塔補充水源，以提高廠內水資源使用率。

研究結果顯示，在 pH 值 11 條件下，採用電吸附法於操作電壓 1.5V、反應時間 90 分鐘，可獲得鈣離子去除率 84.9%、鎂離子去除率 87.5% 及二氧化矽去除率 85.3%。如以實廠冷卻水塔排放水量 900 CMD 推估，經電吸附處理後全數回收作為冷卻水塔補充水源，推估工廠用水成本約 4,219 元/天，較工廠現行以定量排棄並補充新

## 50 應用電吸附法於冷卻水循環回用之研究

鮮自來水之用水成本約 10,800 元/天，約可節省 19.7 萬元/月之運轉成本；如考量設備投資費用之攤提，預估約 4.2 年即可回收，為具經濟效益之可行方案。

**【關鍵字】** 冷卻水、電吸附、電混凝、二氧化矽、鈣硬度、鎂硬度

---

- |                        |     |
|------------------------|-----|
| * 環誠顧問有限公司             | 執行長 |
| ** 國立中央大學永續環境科技研究中心    | 顧問  |
| *** 國立臺北科技大學環境工程與管理研究所 | 教授  |

## 一、前言

行政院鑒於氣候變遷造成缺水風險升高，為解決產業發展關鍵「五缺」之缺水問題，於 107 年擬訂包含開源、節流、調度及備援等 4 大策略之「產業穩定供水策略行動方案」，其中在「節流」策略之一為提高「工業用水循環利用」，目標為將整體工業用水回收率由目前約 70%，預估於 120 年提升至 80%；另「水利法」部分條文於 105 年公告修正後，興辦或變更開發行為之計畫用水量達一定規模者，應提出用水計畫全面納管，並針對用水大戶開徵耗水費，但已落實節約用水措施者，得酌予減徵。(經濟部，2018)

冷卻水塔為工業製程中最常見也是最重要的熱交換設備之一，依行業別及製程類型不同，工廠冷卻用水占整體工業用水量約 4~6 成，台灣每年冷卻用水需求量約 250 萬立方公尺以上，為工業節水之重要關鍵。工業冷卻用水係用於吸收或轉移製程設備或產品之餘熱，以達成所需溫度條件之目的。一般可區分為直接冷卻用水與間接冷卻用水，其中，間接冷卻用水因用水量較大且污染性較低之特性，最具備回收再利用的價值。相較於工業製程產生之廢污水，冷卻水污染性低、具回收使用之可行性，為工業用水回收之首選，惟冷卻水回收須克服結垢、腐蝕及菌藻滋生等問題。

在冷卻水塔運作過程中，冷卻水透過泵浦不斷循環使用，因蒸發逸散的機制達到熱交換效果，但也因重覆循環造成水中許多有機物質、無機物質(如 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等離子)不斷濃縮，溶解性固體(Total dissolved solids, TDS)濃度持續增高，於溫度升高時溶解度降低，形成沉澱結晶附著於受熱面或傳熱表面上(如管路、濾網及散熱材)；再者受到陽光照射及空氣中的微塵污染物影響，致使冷卻系統內產生結垢、腐蝕及微生物滋生等問題，進而導致冷卻系統的熱交換效率下降、形成無謂的能源損失，甚至造成製程設備過載跳脫的嚴重影響。冷卻水塔結垢問題，長期以來都是影響冷卻水回收使用可行性的重要關鍵。

冷卻水中的二氧化矽及鈣、鎂離子為造成冷卻水系統內產生結垢的重要因素，一般工業冷卻水塔大多採用定量排棄冷卻水及補充新鮮水源搭配化學加藥方式，來維持冷卻系統的水質。傳統的硬水軟化方法為添加阻垢劑或石灰軟化法，然衍生大量污泥

及二次污染問題。近年來已有許多研究探討電化學技術應用於水處理，以及市場商業化產品，相較於傳統處理技術，電化學法具有離子去除效果顯著、無二次污染及操作維護簡易等特色。

本研究係以石化廠製程冷卻水塔排放水為研究對象，探討以電化學法降低冷卻水中二氧化矽及鈣、鎂硬度，比較各種方法之去除率，尋求適用於實廠之操作電壓、反應時間及 pH 值，並比較傳統化學混凝與電化學法應用於處理冷卻水塔排放水之成本分析，以評估冷卻水塔排放水回用之可行方案。

## 二、電吸附技術簡介

電吸附技術為結合電化學與吸附分離的新興技術，可用於移除水中無機鹽類和離子性物質。電吸附技術具有能源消耗低、無二次污染、前處理要求低及操作簡單等特色。其基本原理是利用對含鹽類水溶液施加靜電場，迫使水中離子朝向相反電荷的電極移動，且被吸附在電極表面形成的電雙層中，達到去除離子的目的。

電吸附(electrosorption, ES)又被稱為電容去離子(capacitive deionization, CDI)，與常見的吸附方式不同，電吸附是將吸附劑極化以操作界面電位，從而改變界面吸附量和選擇性。其原理如圖 1 所示，當鹽水或電解質水溶液流經正負電極層之間，溶液中的正離子與負離子，因受到電場之影響，將分別向陰極與陽極移動，並集中吸附於多孔電極材(如活性碳)的表面上。電吸附是一種不涉及電子得失的非法拉第過程，利用電化學與物理吸附作用迅速移除溶液中的離子；反之，若移除電場，則可將吸附於電極表面的離子予以脫附出來(黃仁宗等，2010)。電吸附原理係藉由施加電位或電流時在電極表面所引發的吸附現象。當外加靜電場於電極表面時；電極與溶液界面會形成電雙層(electric doublelayer)如圖 2 所示。

當電極通電時，溶液中帶電粒子被迫往帶有相反電荷的電極表面移動，於電雙層的電解液中一側通過而被吸附補償，或通過在外亥姆茲面(outer Helmholtz plane)與擴散層(Gouy-Chapman 擴散層，音譯：古伊-查普曼)使電極表面聚集帶有相反的電荷的粒子。如此離子帶電粒子就會在電極表面聚集，即可達到濃縮效果，而將水中的鹽

類、膠體顆粒及其它帶電物質的濃度大幅地降低，因而達到水的除鹽、去硬、淡化和淨化。當電極表面的電荷密度為零時，固態吸附劑(如活性碳)的表面與電解質水溶液介面的排列情形。通常此介面區域會被水分子的偶極所覆蓋住，溶液中其他表面活性的離子或分子也有可能被吸附住。由於庫侖引力的作用關係，對於帶正電荷、負電荷或不帶電粒子的吸附平衡，是由於電極上的電荷來決定的。當電極上的電位越偏向正電位或越偏向負電位時，越容易吸附帶有相反電荷的粒子，同時會減少同性的電荷粒子之吸附(何鈞筌，2012)。

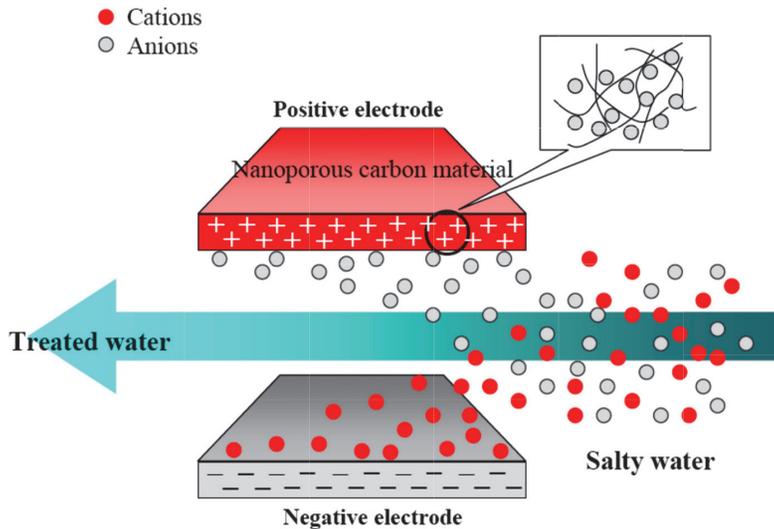


圖 1 電吸附原理的示意圖 (Hou, 2008)

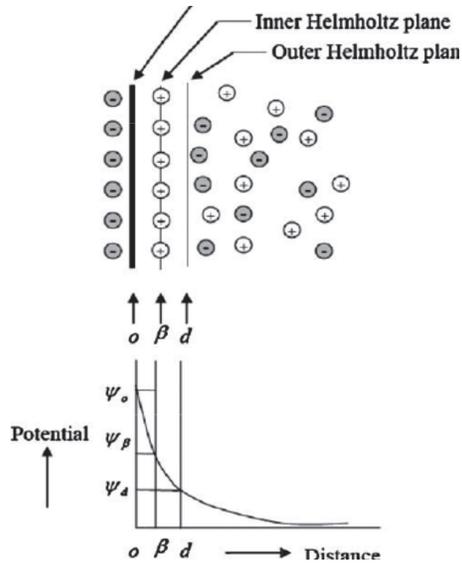


圖 2 水溶液中電雙層示意圖 (Vithayaveroj, 2004)

當電極表面的電荷密度為零時，電極表面會被水分子的偶極覆蓋住，水溶液中其他表面活性離子或分子也可能被吸附住。因庫侖引力作用關係，對於帶正電荷、負電荷或不帶電粒子的吸附平衡，是由電極上的電荷來決定的。當電極上的電位越偏向正電位或越偏向負電位時，越容易吸附帶有相反電荷的粒子，同時會減少同電性的電荷粒子之吸附(何鈞筌，2012)。

然就技術面而言，電吸附的技術關鍵在於多孔隙的電極吸附材料，好的電極材料必須具備良好的導電性、低電阻、較大的比表面積以提供大量的電雙層，以及再生能力佳等性質(陳榕，2006及王鑫，2010)。所以具有大的比表面積的碳材料，乃成為重要的電極吸附材料。不過，電吸附法也有一些限制。研究發現進流水污染物的濃度較低者，其去除率較佳(Farmer，1997)，因此必須要有預處理的階段。同時為避免因為高鹼度造成電極表層結垢，以致影響電極的除鹽效果，研究已指出應將進流水中的  $\text{HCO}_3^-$  濃度控制在  $100 \text{ mg/L}$  以下(趙雪娜，2008)。一般而言，欲獲得良好的處理成效，進流水的水質參數應控制如下：導電度  $\leq 500 \text{ }\mu\text{S/cm}$ 、COD  $\leq 100 \text{ mg/L}$ 、濁度  $\leq 5 \text{ NTU}$ 、SS  $\leq 5 \text{ mg/L}$  及油脂  $\leq 3 \text{ mg/L}$  (韓寒, 2010)。

電吸附法使用不犧牲電極，無極板損耗且沒有衍生污泥的問題，本研究採用石墨碳電極材料，具備良好的導電性及較大的比表面積，將碳電極置於靜電場時，碳電極與水溶液界面處會產生很強的電雙層(厚度一般為 1~10 nm)，能吸引大量的離子並儲存一定的能量(劉海靜等，2003)。因此本研究使用石墨碳片為極板進行電吸附實驗，探討冷卻水塔排放水中二氧化矽、鈣及鎂離子之去除率。

### 三、研究方法與設備

本研究使用之實驗水樣為國內某石化大廠提供之製程冷卻水塔排放水，為非接觸冷卻水，實驗用水水質與冷卻水塔補給水水質標準如表 1 所示。由於冷卻水塔冷卻水不斷循環，會使水中離子持續濃縮而衍生結垢，進而導致冷卻水塔的冷卻能力下降且增加耗能，因此該廠採用定量排水並補充新鮮水源方式，以維持冷卻水水質。然而此股冷卻排放水若能移除水中二氧化矽及鈣、鎂離子，將可作為廠內回收使用的乾淨水源，提高水資源使用率。本研究期建置一操作簡易且可有效降低冷卻水中二氧化矽及鈣、鎂硬度之處理方案，以供實廠可將冷卻排放水回收使用。

表 1 實驗用水水質與冷卻水塔補給水水質標準

水質項目	單位	實驗水樣	冷卻水塔補給水水質標準 (JRA-GA-02-1994)
pH (25°C)		7.9	6.0~8.0
導電度	μS/cm	2,830	≤ 300
M-鹼度	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	86	≤ 50
鈣硬度	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	675	≤ 50
鎂硬度	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	142	≤ 20
矽酸鹽	mg/L as SiO <sub>2</sub>	65	≤ 30
硫酸鹽	mg/L as SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	883	≤ 50
氯化鹽	mg/L as Cl	213	≤ 50
鐵份	mg/L as Fe	1.05	≤ 0.3
濁度	NTU	16.6	≤ 20

### 3.1 實驗設計

為探討應用電吸附法處理冷卻水塔排放水中二氧化矽及鈣、鎂離子，本研究設計之電化學反應槽為透明壓克力板黏合製作而成，如圖 3 所示，反應槽內徑為長 5 公分 × 寬 10 公分 × 高 15 公分，於反應槽內有兩條 0.2 公分之溝槽（用於置放電極板），兩溝槽中心點間隔為 1 公分。本研究所使用之電極板大小皆為長 10 公分 × 寬 10 公分 × 厚 0.2 公分，極板材質為石墨碳，有效電極面積為 85.5 平方公分。另於反應槽底部使用磁石攪拌設備，藉由磁石攪拌促進反應槽內水樣之流動混合，確保水樣可均勻地進行電化學反應。

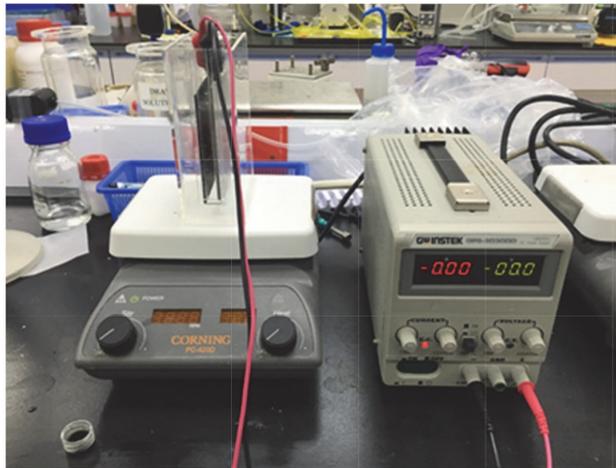


圖 3 電化學反應系統之設計

### 3.2 實驗步驟

1. 取實廠冷卻水塔排放水倒入反應槽中，將反應槽放置在磁石攪拌機上，設定轉速為 300 RPM。
2. 使用  $\text{H}_2\text{SO}_4$  調整水樣之酸鹼值為 pH 7，以電源供應器分別調整電壓為 0.5 V、1.0 V、1.5 V，於反應時間90分鐘時，直接於反應槽內取水做水質分析。
3. 使用 NaOH 調整水樣之酸鹼值 pH 為 11，以電源供應器分別調整電壓為 0.5 V、1.0 V、1.5 V，於反應時間90分鐘時，直接於反應槽內取水做水質分析。

## 四、結果與討論

### 4.1 不同操作電壓於 pH 7 對於電吸附效果之影響

本實驗於酸鹼值 pH 為 7 (考量實廠應用，試以酸鹼值中性條件操作) 環境下進行測試，分別將操作電壓調整至 0.5 V、1.0 V、1.5 V (Voltage，以下同)，於反應 90 分鐘後，直接在反應槽內取水分析二氧化矽及鈣、鎂離子濃度，彙整如表 2 所示、去除率如圖 4 所示。由實驗結果可看出，隨著電壓的增加，水中的鈣、鎂離子濃度逐漸下降，於電壓 1.5 V 時鈣、鎂離子去除率分別達 82.9 % 及 84.6 %，惟二氧化矽並無明顯去除效果，其原因為在 pH 為 7 條件下，二氧化矽呈現未解離狀態，在水體中呈現電中性，並不會受到電場影響而吸附於電極表面，仍存留於水體中。

由於電壓增加可提升鈣、鎂離子去除率，本研究試將電壓再提升，當大於 1.6 V 時，陰、陽兩側電極開始產生氣泡，研判應為氫氣及氧氣，且 pH 值也開始下降，顯示反應槽內發生水電解反應，符合文獻所述當施加過大之外部電場時，將導致水電解並發生化學反應 (J. H. Lee 等, 2010)，因此應將操作電壓控制在 1.5 V 以下。

表 2 電吸附於 pH 為 7 比較不同操作電壓觀察二氧化矽與鈣、鎂濃度變化

固定反應時間 90 分鐘、pH 7			
操作電壓	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)
0.5 V	63.1	160.1	18.3
1.0 V	63.0	77.5	8.9
1.5 V	63.0	46.2	5.2

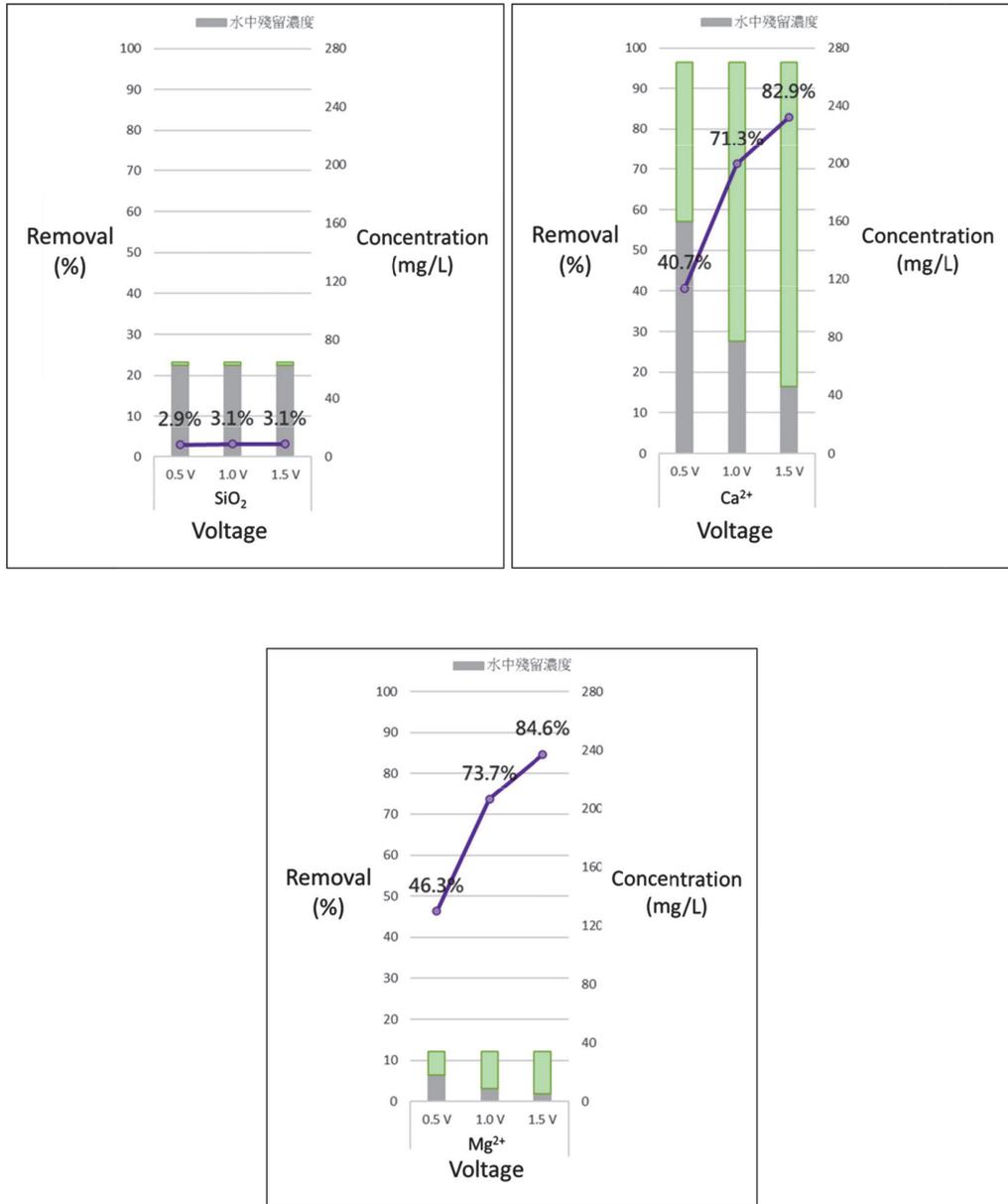


圖 4 電吸附於 pH 為 7 比較不同操作電壓觀察二氧化矽與鈣、鎂去除率變化

#### 4.2 不同操作電壓於 pH 為 11 對於電吸附效果之影響

二氧化矽大多以非結晶型態存在於水體中(又稱矽酸)，其溶解度隨不同溫度、pH 值及離子強度而變化。單矽酸在中性或 pH < 8.5 時不會離子化；在鹼性時，矽酸帶較多負電荷，使彼此互斥不易聚集，但因聚合反應速率比水解反應快，且當 pH 為 11 時溶解度大幅提升，單矽酸會完全離子化而以  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  的形式存在水中，容易形成大粒徑顆粒，在顆粒長大的同時，隨著水中矽酸顆粒減少，二氧化矽平衡濃度亦隨之而降。

爰本實驗以 1M 之氫氧化鈉 NaOH 將 pH 調整至 11 之鹼性條件下進行測試；另依前節實驗條件，設定操作電壓 0.5 V、1.0 V、1.5 V，於反應 90 分鐘後，直接在反應槽內取水分析二氧化矽及鈣、鎂離子濃度，彙整如表3所示，結果顯示除鈣、鎂離子仍維持良好的去除效果，二氧化矽去除率明顯大幅提升，於操作電壓 1.5 V 條件下，二氧化矽去除率為 85.3 %、鈣離子去除率為 84.9 %、鎂離子去除率為 87.5 %，如圖 5 所示。

表 3 電吸附於 pH 為 11 比較不同操作電壓觀察二氧化矽與鈣、鎂濃度變化

固定反應時間 90 分鐘、pH 為 11			
操作電壓	$\text{SiO}_2$ (mg/L)	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/L)
0.5 V	36.3	138.5	16.9
1.0 V	16.5	56.2	6.2
1.5 V	9.6	40.8	4.3

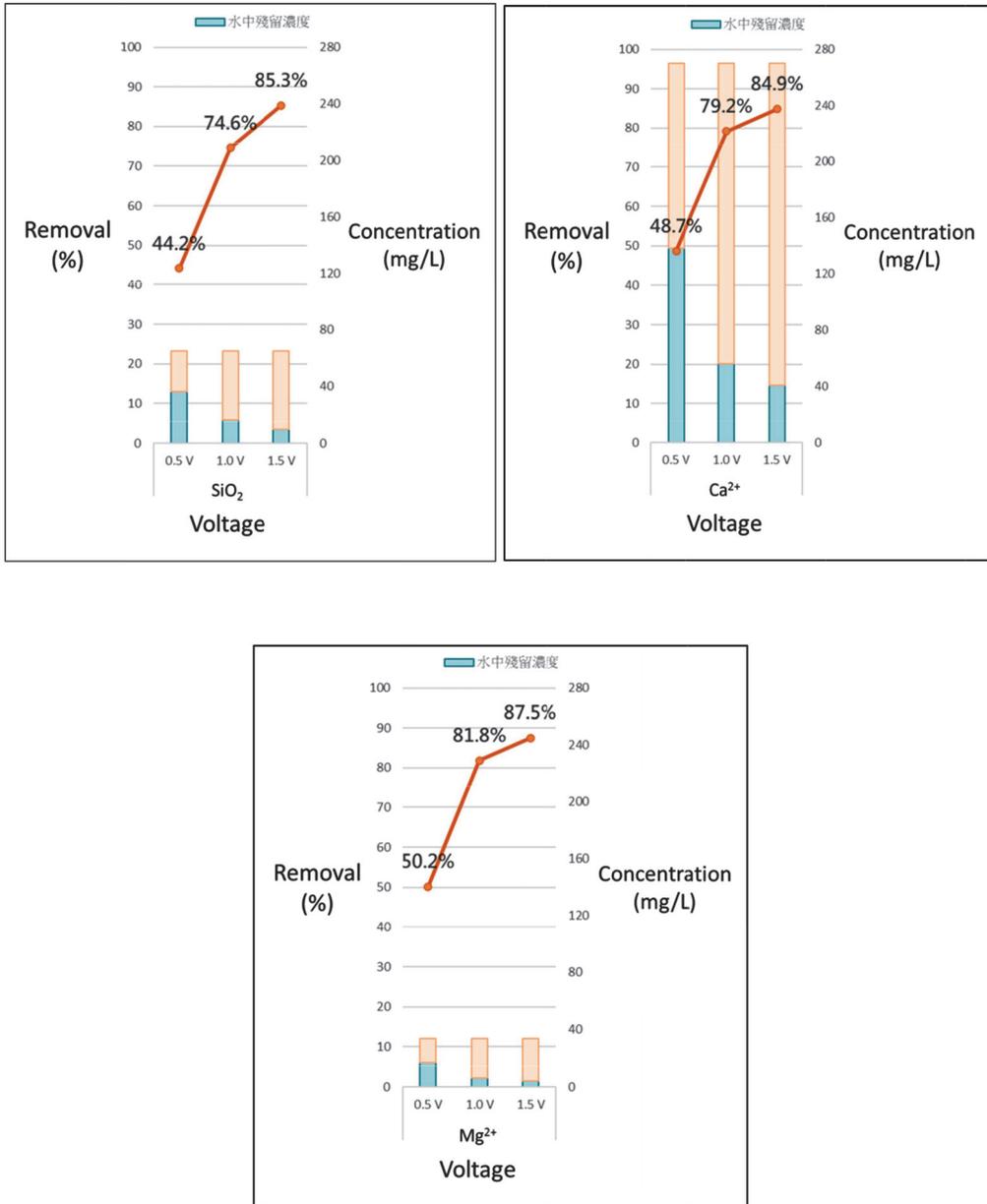


圖 5 電吸附於 pH 為 11 比較不同操作電壓觀察二氧化矽與鈣、鎂去除率變化

### 4.3 電吸附處理之綜合探討

本研究以石墨碳板為電吸附之電極材料，實驗原水之二氧化矽濃度為 65 mg/L、鈣離子濃度為 270 mg/L、鎂離子濃度為 34 mg/L，藉由調整原水酸鹼值在不同操作電壓進行電吸附實驗。其中在 pH 為 7 中性環境下，施加外部電場(操作電壓)由 0.5 V 調升至 1.5 V，此時因電容充電原理，電子經由外環電路逐漸累積在電吸附反應槽內的陰、陽兩電極板上，水溶液中的鈣離子及鎂離子受到外部電場引力的影響，被帶負電荷之電極所吸引，而電吸附於石墨碳電極表面，從實驗結果可明顯看出水溶液中的鈣、鎂離子皆有明顯去除效果。然而，二氧化矽在水中為單體形式存在(亦即單矽酸)，而單矽酸在 pH 為中性或 pH < 8.5 的狀態下不會離子化，因此在中性環境下，電吸附對於未解離的單矽酸並沒有顯著的吸附作用，因此系統對於二氧化矽去除率不甚理想。考量二氧化矽在 pH 為 11 鹼性環境下，單矽酸可被完全水解離子化以  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  的形式存在水中，可望藉由施加外部電場使  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  被吸引至陽極表面，本研究將原水調整為 pH 為 11 鹼性後，依相同操作電壓進行電吸附試驗，結果顯示二氧化矽去除率明顯大幅提升，且鈣、鎂離子亦維持良好的去除效果。

由於電吸附技術主要是利用電來作為移除離子之驅動力，當逐步提高施加電流後，兩側電極間為達到與外部電場相同的電位差，電極表面電位開始增加，反應槽內電極與冷卻水樣的固液界面之間的電雙層開始產生壓縮。在施加電流提高時，電雙層重疊效應影響減弱，因此石墨碳電極本身之微孔可被用於吸附離子。使用石墨碳為電極材料來吸附水中離子時，因為其奈米孔洞以中孔與微孔為主，孔徑大小與電雙層厚度在同一尺度中，且依據不同的電吸附離子，形成的電雙層構造亦有所不同。

因高濃度水溶液具有較高的驅動力(driving force)，使離子能被擴散至電極孔洞內，且因電雙層壓縮導致電雙層重疊作用降低，離子排除作用較不顯著。因此，在高濃度水溶液中，奈米孔洞之比表面積較能夠被電吸附應用。此外，因低濃度水溶液之導電度較低，產生較大阻抗，將阻礙離子在奈米孔洞之傳輸，且因沒有足夠反應時間，加上孔洞之電雙層重疊作用，離子因此被排除在孔洞外，碳比表面積無法有效應用，致使石墨碳電極無顯著的電吸附作用。

當施予過大的外部電場能量時，反應槽內將伴隨發生水電解及化學反應，因此當氫離子解離出來時，導電度也隨之上升，且氫離子將與水中其他離子產生競爭，並受到電場作用而被吸附到電極板上。這點可以從實驗中當施加電流達 1.6 V 以上時，觀察兩側電極明顯產生大量氣泡呈現類似滾沸狀而知。由於氫離子或氫氧根離子在水溶液中具有較高的離子移動速度，成為佔優勢之物質，進而影響水中二氧化矽與鈣、鎂離子的吸附。二氧化矽雖然 pH 為 11 鹼性環境下可被完全水解為  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  而被吸引至陽極表面，惟在此操作電流下，二氧化矽及鈣、鎂離子均無法與氫離子或氫氧根離子競爭，以致於提高施加電場能量後，水中矽酸鹽無法有效被移除。因此，雖然提高操作電壓有助於提高水中離子去除率，但是施加過高的電場恐造成水體酸化現象，影響電吸附過程中系統穩定性以及電極的吸附機制，造成效率降低。

### 4.4 冷卻水塔排放水循環回用之成本分析

本研究目的為將冷卻水塔排放水處理後直接循環回用至冷卻塔，以提高廠內水資源使用率，爰以某石化廠為例，探討冷卻排放水回收之成本效益。一般冷卻水塔須定量排水的原因為避免水中結垢因子的濃度提升而產生管線結垢，進而降低熱交換的效能。冷卻水塔產生之結垢物主要可分為兩類，一為硬質性的結晶形水垢，如常見的碳酸鈣或碳酸鎂化合物、硫酸鈣或硫酸鎂化合物、磷酸鈣或磷酸鎂化合物及偏矽鈣或偏矽酸鎂等物質；另一種為軟質的不定形雜物，如淤泥或微生物等沉澱物，在此不討論軟質之不定形雜物的問題，因石化廠之冷卻水塔通常都有設置旁濾設備，可除去冷卻水中滋生的微生物或淤泥。

本研究應用電吸附法可大幅降低冷卻水中的二氧化矽及鈣、鎂硬度，使冷卻水塔不致因離子濃縮而結晶形成水垢，因此評估將冷卻水排放水全部回收使用作為冷卻水塔補充水源。經查本研究探討對象工廠之製程冷卻水塔實際排水量約介於 760~900 CMD，根據本實驗結果，規劃將原直接排入廢水處理場的 900 CMD 冷卻排放水直接以電吸附法處理後循環回用，並比較採傳統加藥混凝法(添加  $\text{MgCl}_2$ )處理，再配合後端砂濾設備，將加藥混凝法處理後殘留的 SS 去除(砂濾逆洗所產生的反洗水排入既有廢水場的調勻槽內)，作為本研究探討成本分析之標的，以期降低廠內用水量及操作

成本。冷卻水塔排放水循環回用處理單元主要設備及其操作費用分析如表 4 所示，其中：若以傳統加藥混凝作為前處理單元，其流程為進流泵將冷卻排放水輸送至 pH 調整槽一，將冷卻排放水的 pH 值調升至 11 後，再溢流至反應槽，於反應槽加入的氯化鎂，添加劑量為 0.7g/L，隨後再流入快沉槽將反應槽中形成的氯化鎂—二氧化矽及氫氧化鈣等結晶物予以沉澱，其上澄液再流入 pH 調整槽二，並將 pH 值調整至 7，最後經砂濾後，直接回送至冷卻水塔內。依表 4 統計以加藥混凝為前處理之藥劑費及電費初估約 94,753 元/天。

若將冷卻水塔排放水以電吸附處理，其流程為進流泵將冷卻排放水輸送至 pH 調整槽一，將冷卻水 pH 值調升至 11 後，送至電吸附反應槽，由於電吸附使用碳材為不犧牲電極板(碳電極使用壽命較長且價格低廉，在此成本估算予以忽略不計)，冷卻水經電極吸附水中離子後，再流入 pH 調整槽二，並將 pH 值調整至 7，即可直接送回冷卻水塔循環使用，在不考慮電極吸附飽和後之再生處理費用提前下，依據表 4 推估以電吸附處理冷卻水之成本初估約 4,219 元/天。

表 4 冷卻水塔排水循環回用主要設備及其操作費用分析

前處理	設備名稱	規格	數量	操作時間 (小時/天)	操作費 (元/天)
加藥混凝	進流泵	38 CMH	1台	24	528.7
	調整槽	40 T	2座	-	-
	反應槽	4.5 T	3座	-	-
	加藥機	2.8 LPM	3台	24	81
	攪拌機	-	3台	24	40.5
	快沉槽	25 m <sup>2</sup>	1座	24	13.5
	藥劑貯桶	-	3座	-	-
	氯化鎂	-	-	-	93,270
	液鹼	-	-	-	208
	硫酸	-	-	-	611

## 64 應用電吸附法於冷卻水循環回用之研究

前處理	設備名稱	規格	數量	操作時間 (小時/天)	操作費 (元/天)
電吸附	進流泵	38 CMH	1台	24	528.7
	調整槽	40 T	2座	-	-
	加藥機	2.8 LPM	1台	24	27
	反應槽	56 T	1座	24	1,944
	碳電極板	-	-	-	-
	電費	-	-	24	900
	液鹼	-	-	-	208
	硫酸	-	-	-	611
砂濾	暫存槽	40T	1座	-	-
	進流泵	38 CMH	1台	23.5	528.7
	反洗泵	78 CMH	1台	0.5	22.5
	鼓風機	2.5 MM	1台	0.1	1.1

註：估算基準為電費 3 元/度，工業級 45% 氯化鎂 140 元/kg，45% 液鹼 8 元/L，49% 硫酸 4 元/L；未將污泥處理費用納入計算。

進一步針對工廠現況作法(定量排棄 900 CMD 冷卻水循環水，並補充新鮮自來水)與本研究經電吸附處理後全數回用至冷卻水塔，進行操作成本比較。以該廠每日需補充自來水 900 CMD 計算，冷卻水塔每日使用自來水費約 10,800 元(暫忽略排入廢水場後之處理費用)，相較於將冷卻水塔排放水以電吸附處理後，直接回補冷卻水塔約 4,219 元/天，高出約 6,581 元/天，換算每月可節省約 19.7 萬元之運轉成本，如表 5 所示；若再考慮設備攤提，以電吸附設備約 1,000 萬元估算，預估約 4.2 年可攤提，具經濟效益。如未來耗水費開徵後，工廠使用自來水水費可能上升至 14~15 元 /m<sup>3</sup>，相較之下，冷卻排放水已具回收之效益。

表 5 冷卻水塔用水成本比較—直接補新鮮水、電吸附及加藥混凝

方案	自來水成本 (元/天)	操作成本 (元/天)	每日總成本 (元/天)	換算每月 節省成本(元)
直接補充新鮮自來水	10,800	0	10,800	—
電吸附處理後直接回用	0	4,219	4,219	197,430
加藥混凝+砂濾處理後回用	0	94,753	94,753	—

註：自來水以12 元/ m<sup>3</sup>計算。

## 五、結論

本研究係以石化廠製程冷卻水塔排放水為例，使用石墨碳電極進行電吸附處理冷卻水，以探探討二氧化矽及鈣、鎂硬度之去除效果，以尋求有效處理方案及適當之操作條件。

過去已有許多研究文獻應用電化學法從不同類型的水中去除形成水垢的物質，包含飲用水、RO 排放水及海水等，然而較少有研究應用於處理冷卻水中的二氧化矽及鈣、鎂離子等結垢物質。由於冷卻水塔用水量，且水質特性相對於工業廢水而言較單純，甚具回收使用之價值，目前業界多使用定期排水及補充新鮮水，並輔以加藥處理方式，成本高昂且造成水資源浪費。本研究應用電吸附與電混凝去除冷卻水中二氧化矽及鈣、鎂硬度，獲致良好處理成效，可供未來實廠應用之參考。惟實廠應用須進一步考量實際水質條件及現場水質浮動變異性，建議先以小型模廠模擬測試各種可能水質狀況，據以規劃電化學處理之模組化設備，俾依水質即時狀況調整電化學操作參數。

## 參考文獻

經濟部(2018)，產業穩定供水策略行動方案，p 1、p 10-12。

何鈞筌(2012)，以中孔碳材為電吸附劑電吸附水中微量銅離子，碩士論文，國立雲林科技大學化學工程與材料工程系，雲林縣。

黃仁宗、錢中明(2010.11)，電吸附技術應用於廢水回收再利用：除鹽與 COD，中華民國環境工程學會2010廢水處理技術研討會，p 1-3。

劉海靜、張鴻濤、孫曉慰(2003)，電吸附法去除地下水中離子的試驗研究，中國給水排水，Vol. 19 No.11，p 36-38。

陳榕、胡熙恩(2006)，電吸附技術的應用與研究，化學進展，第 18 卷第 1 期，p 80-86。

王鑫、包景嶺、馬建立(2010)，電吸附除鹽技術之電極材料研究進展，四川環境，第 29 卷第 2 期，p 119-121。

趙雪娜、倪文、陳兆林(2008)，結垢對電吸附除鹽的影響及其控制，過程工程學報，第 8 卷第 5 期，p 887-891。

韓寒、陳新春、尚海利(2010)，電吸附除鹽技術的發展及應用，工業水處理，第 30 卷第 2 期，p 20-23。

Hou, C.H. (2008), Electrical Double Layer Formation in Nanoporous Carbon Materials, Ph.D. Dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.

J. H. Lee, W. S. Bae, and J. H. Choi (2010), Electrode reactions and adsorption/desorption performance related to the applied potential in a capacitive deionization process, Desalination, vol. 258, p 159-163.

Farmer, J.C, Tran, T.D., Richardson, J.H., Fix, D. V., May, S.C., and Thomson, S.L. (1997), The Application of Carbon Aerogel Electrodes to Desalination and Waste Treatment, Annual Meeting of the American Institute of Chemical Engineers, Los Angeles, CA, November 16-21.