

廢(污)水處理類

含氮廢污水綠色處理系統建立

蔡明瀚*、簡偉倫**、陳國源**、周珊珊***、黃思蓁****、
趙淑如***** 黃志彬*****、張莉珣*****、顏旭明*****

摘 要

隨著全球科技業及化工石化業高度發展，因使用大量含氮化學藥品，致使氨氮排放總量大增。環保署自民國 100 年起陸續推動氨氮放流濃度管制，逐漸將氨氮納入放流水管制標準，包括科學工業園區專用污水下水道系統、晶圓製造及半導體製造業、光電材料及元件製造業、石油化學業、化工業、石油化學專業區專用污水下水道系統等。並自民國 110 年 1 月 1 日起，針對金屬表面處理業、電鍍業等特定事業及其他工業區專用污水下水道系統和公共污水下水道系統新增氨氮管制項目，期望能減少水體氨氮排放總量，減緩對生態環境的衝擊影響。現有的技術針對低濃度含氮廢污水多以生物處理方式為主，高濃度則係以氣提方式進行回收；然中濃度含氮廢水在處理上有廢液清運處理等其他問題產生。另外，化工業及金屬表面處理業等含有中高濃度硝酸鹽氮廢水的產業，大多面臨既有單元脫硝功能較差與可擴充空間不足等問題，也亟需新的解決方案。

因此本研究以目前主要有技術缺口的中濃度氨氮與硝酸鹽氮廢污水為標的，研發 3 項具低污泥、低耗能、低成本及低占地空間的含氮廢污水綠色處理技術：「氣提結合觸媒氧化中濃度氨氮廢水技術」、「觸媒還原中高濃度硝酸鹽氮廢水技術」及「聚乙烯醇 (PVA) 生物球處理中低濃度硝酸鹽氮廢水技術」，希望能藉此快速提升國內含

氮廢水的處理技術。在中濃度氨氮廢水處理部分，團隊結合氣提法及催化氧化型觸媒 (catalytic oxidative activated carbon, COAC) 來處理中濃度氨氮廢水 (200~5,000 mg/L)。結果顯示，氣提觸媒氧化方式可以達到 94% 以上的氨氮去除率，且無二次污染產生，水中殘餘的氨氮濃度可銜接生物系統更為經濟。在硝酸鹽氮廢水 (500~5,000 mg/L) 處理部分，選用脫硝觸媒 (denitrification catalyst, DNC) 搭配還原劑來使用，如此可達到極高的氮氣選擇性。另外，也可使用廢氨水來作為還原劑，兼具可同步處理硝酸鹽氮廢水及氨氮廢水的效益。PVA 生物球技術應用在中低濃度硝酸鹽氮廢水 (<500 mg/L)，在體積負荷為 2.5 kg NO₃-N/m³-d 時，其出流水硝酸鹽氮濃度均能維持在 <30 mg/L，可達到法規放流標準；相較於傳統生物處理生物球可達到 80% 污泥減量。

【關鍵字】硝酸鹽氮、氨氮、觸媒、氣提、生物球、脫硝

* 國立陽明交通大學 環境工程研究所	博士候選人
** 國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心	工程師
*** 國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心	執行長
**** 中華大學 工業產品設計學系	特聘教授
***** 工業技術研究院 材料與化工研究所	研究員
***** 國立陽明交通大學 環境工程研究所	終身講座教授
***** 行政院環境保護署 水質保護處	簡任技正
***** 行政院環境保護署 水質保護處	處長

前言

含氮污染物若進入河川，將造成藻類大量繁殖引起水體優養化。工業廢水氨氮排放量占總排放量 29.2%，其中含科學園區在內的高科技及石化工業產業，因使用大量含氮化學藥品，致使台灣重點產業的氨氮排放總量，約占全國工業總排放量之 70% (朱等，2012 年)。環保署自民國 100 年起陸續推動氨氮放流濃度管制，逐漸將氨氮納入放流水管制標準，包括科學工業園區專用污水下水道系統、晶圓製造及半導體製造業、光電材料及元件製造業、石油化學業、化工業、石油化學專業區專用污水下水道系統等。並自民國 110 年 1 月 1 日起，針對金屬表面處理業、電鍍業等特定事業及其他工業區專用污水下水道系統和公共污水下水道系統新增氨氮管制項目，期望能減少水體氨氮排放總量，減緩對生態環境的衝擊影響。

低濃度氨氮廢水多用生物處理方式，高濃度廢水可以氣提方式回收成氨水，環保署於民國 110 年執行的「廢污水新興處理技術示範驗證計畫」針對金屬表面處理業和電鍍業，成功研發氨氮氣提及結晶氯化銨之循環經濟創新技術 (吳等，2021 年)；而中濃度氨氮廢水 (數百 ~ 數千 mg/L) 處理則是氣提後以硫酸洗滌成硫酸銨，硫酸銨需進一步純化才能回收，然而不純的硫酸銨會產生廢液清運等後續問題。因此，中濃度氨氮廢水仍亟待研發更友善環境的綠色新興處理技術。由於氨氮放流水管制標準為新增修之法案，對於既設工廠而言，常面臨用地不足，無法增設或擴建氨氮廢水處理單元之問題，因此處理程序選擇上需考量用地較小之方案或修改既有程序上來提昇去除氨氮之功能。

此外，硝酸鹽氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 也是地表水資源中常見的污染物， $\text{NO}_3\text{-N}$ 除了會對環境造成影響外，也會透過生物累積或直接飲用等方式，影響人體的健康。經濟部工業局更於 2019 年起於工業區下水道使用管理規章中，將 $\text{NO}_3\text{-N}$ 納入收費標準。某些廢水中含有中高濃度硝酸鹽氮的產業如化工業、金屬表面處理業及電鍍業等，大多面臨既有單元脫硝功能較差與可擴充空間不足等問題，若使用傳統的生物脫硝來處理 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，需較大的設備面積，對於空間有限的工廠並不合適。為解決氨氮、硝酸鹽氮等含氮廢污水的污染問題，實有必要發展含氮廢污水綠色處理技術來降低含氮污染物的排放濃度。

本研究以目前主要有技術缺口的中濃度氨氮與硝酸鹽氮廢污水為標的，研發具低污泥、低耗能、低成本及低占地空間的含氮廢污水綠色處理技術。

二、含氮廢水處理技術

本研究目的為研發氨氮與硝酸鹽氮廢污水綠色處理技術，中濃度氨氮廢水 (200~5,000 mg/L)、中高濃度硝酸鹽氮廢水 (500~5,000 mg/L) 與中低濃度硝酸鹽氮廢水 (50~500 mg/L) 分別以氣提/觸媒氧化、觸媒還原與生物球脫硝技術進行處理 (圖 1)。

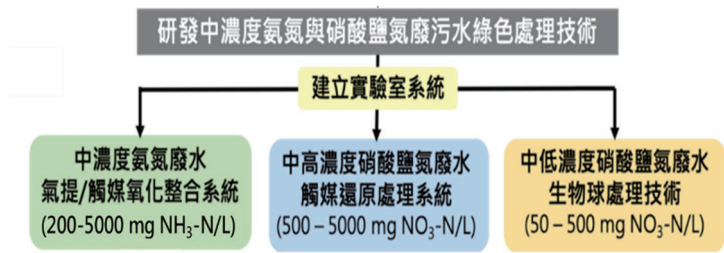


圖 1 研究架構

現今實務上對於高濃度氨氮去除技術主要都需要經過兩階段處理 (圖 2)。首先將水中氨氮在高溫、高 pH 條件下以氣提或脫氣膜將氨吹出，第二階段再藉由冷凝製成液氨、吸收形成硫酸銨進行回收或將氨氣經過熱處理氧化後形成氮氣來把氨氮去除。然而，以吸收的方式通常需要額外的處理成本；利用熱處理則依據操作溫度的高低來決定整體操作成本。(丁等，2020 年、張等，2016 年、傅等，2016 年)

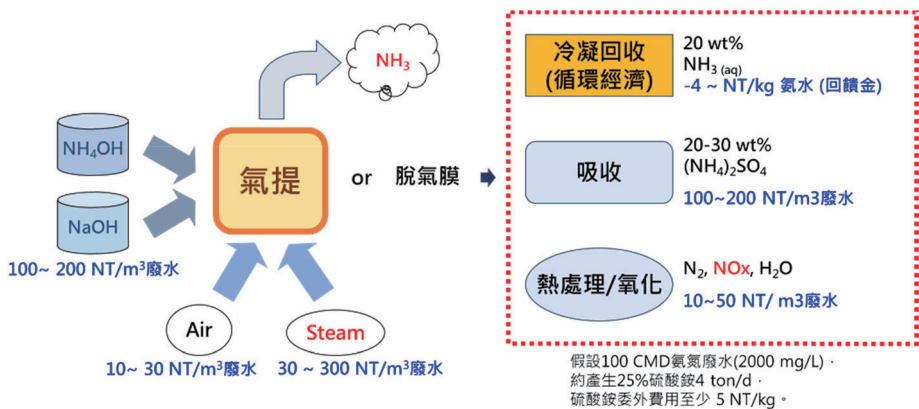


圖 2 氨氮廢水去除技術總論

本研究所選用的觸媒為以椰殼活性碳為載體的多金屬氧化物觸媒 (圖 3)，其主要可分為催化氧化型觸媒 (catalytic oxidative activated carbon, COAC) 及脫硝觸媒 (denitrification catalyst, DNC) 2 大類。活性碳上其中 1 種貴金屬—鈦 (Ru) 具有多種氧化態，其價數在不同氧化條件下可從 +3 ~ +8，使得此觸媒兼具良好的活性碳吸附及催化氧化與還原特性 (周等，2020 年)。

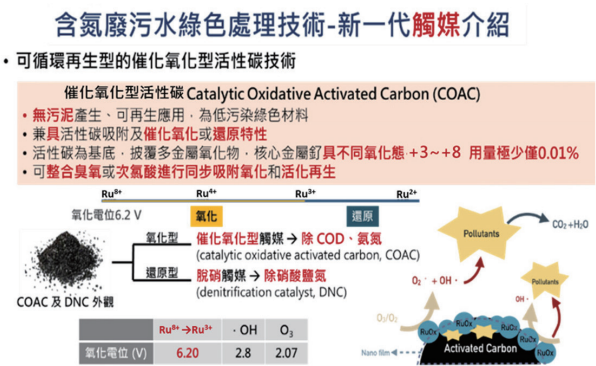


圖 3 可循環再生型觸媒

生物球為本研究團隊自行開發的技術 (圖 4)，適用於處理中低濃度硝酸鹽氮 (50~500 mg/L) 廢水。生物球是將改性後的聚乙炔醇 (PVA) 漿料和脫硝菌混合後滴入成形劑固定化形成直徑約 3~4 mm 的球體，再加入硬化劑使其穩定。PVA 生物球孔隙約 1~10 μm，脫硝菌被包埋其中，故對環境有較高的耐受性如耐鹽度、耐高溫、耐酸鹼及耐藻毒等。此包埋方式可保有更多的生物量，可縮減反應槽體積，提供更大的處理負荷 (黃思尊，2020 年)。

含氮污水綠色處理技術-PVA包埋菌生物球

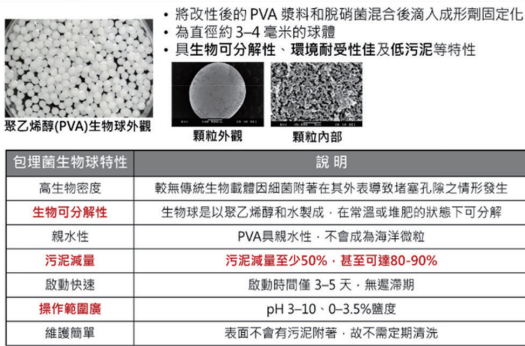


圖 4 PVA 生物球技術

2.1 氣提 / 觸媒氧化系統

氣提 / 觸媒氧化處理法主要係評估處理 1,000~5,000 mg/L 氨氮濃度廢水之適用性。第一階段氣提法係將氨氮廢水調整至鹼性環境，並加熱至適當操作溫度及通入空氣使氨氣吹出。第二階段為觸媒催化氧化法，氣提反應完之氨氣經由冷凝管去除多餘水分，水分除去後之氨氣再與臭氧產生機產生的臭氧 (O_3) 合流，接著流入觸媒氧化固定床進行催化氧化反應，並同時控制反應溫度 ($40\sim100^\circ\text{C}$) 及觸媒含水率 ($30\sim90\%$)，以達到觸媒催化氧化反應之最佳操作條件。

2.2 觸媒還原系統

觸媒還原技術乃利用脫硝型觸媒 (DNC) 搭配還原劑 (硫代硫酸鈉) 於不鏽鋼密閉反應釜中進行還原反應。置入中高濃度硝酸鹽氮廢水 ($500\sim5,000\text{ mg/L}$) 於密閉反應釜，再使用硫酸及氫氧化鈉調整水樣 pH 值，依序添加適量觸媒及還原劑，安裝上蓋進行密閉反應，並設定反應溫度並開啟攪拌器進行反應。

2.3 生物球脫硝系統

本實驗以生物球包 CC 化工廠厭氧 / 好氧脫硝系統濃縮污泥 (簡稱 CC 菌)，對硝酸鹽氮處理的效能測試。微生物馴養操作因子參照以往脫硝程序經驗，加入基質 ($C/N=4$)，起始 pH 調整至 6.0 ± 1.0 ，記錄 pH、ORP 及硝酸鹽氮濃度等數值變化，觀察其脫硝效能，待穩定後即將生物球置入槽體進行試驗。試驗加入定量 10% 生物球 (200 mL) 於 2L 槽體，試驗體積負荷為 $1.3\sim2.7\text{ kg NO}_3\text{-N/m}^3\text{-d}$ ，維持約 4.8 h 水力停留時間後，當處理效率穩後提升其負荷。

三、含氮廢污水綠色處理系統開發

3.1 氣提 / 觸媒氧化氮氮處理系統

現有主流氮氮處理技術依據氮氮濃度由低至高分別為生物處理、氣提吸收與汽提回收 (圖 5)。其中，生物處理具有佔地空間大、反應慢等劣勢，而氣提吸收則會有衍生副產物需額外處理的問題。因此，本研究提出氣提 / 觸媒氧化技術期望以更高效率且無二次污染產生的方式去除氮氮。

氣提 + 觸媒氧化技術的氮氮廢水應用標的

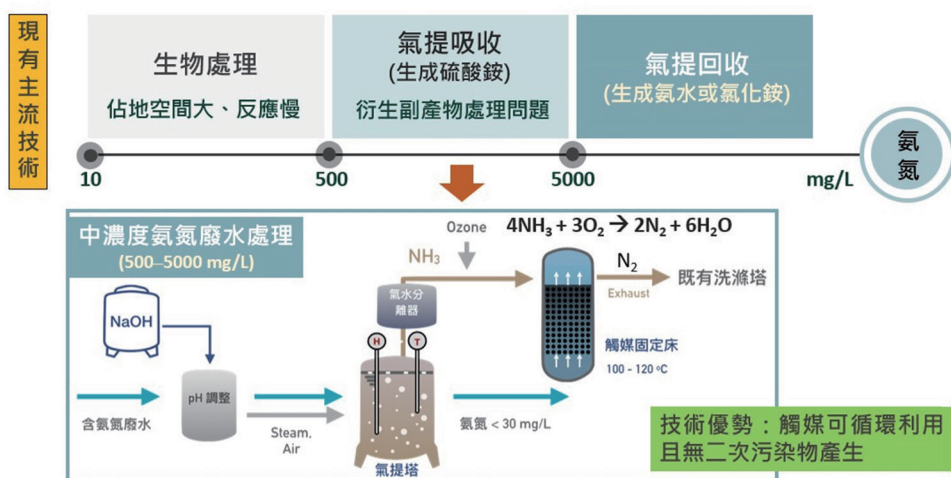


圖 5 氣提 / 觸媒氧化技術應用標的

3.1.1 觸媒含水率及觸媒塔溫度影響

中高濃度氮氮 (3,500 mg/L) 經氣提後，將吹出之氮氣通往觸媒氧化塔進行氧化。結果顯示，觸媒含水率越高，氮氮去除率越高 (圖 6a)。當觸媒含水率固定在 90% 下，氮氮去除率隨著觸媒塔溫度越高而提高 (圖 6b)。當觸媒塔溫度為 80°C 時，氮氮去除率可達近 94%，且吸收瓶中剩餘氮氮濃度可降低至 177 mg/L，此濃度已可銜接生物系統進行後續處理。

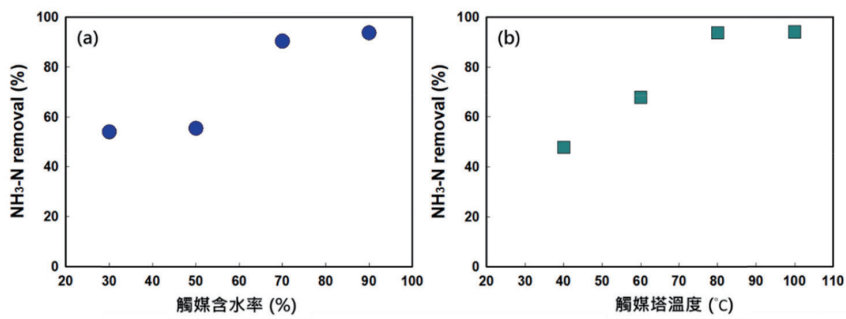


圖 6 (a) 觸媒含水率；(b) 觸媒塔溫度對氨氮去除率影響

3.1.2 模廠操作參數與實驗結果

某電腦周邊設備業金屬表面處理原水氨氮 2,000~4,000 mg/L，氣提 / 觸媒氧化技術模廠 (圖 7) 操作參數如表 1 所列，測試結果顯示，於觸媒含水率 > 95%，氣提塔溫度 90°C 搭配觸媒氧化塔 100°C 時，氣提塔出水氨氮平均濃度為 303~420 mg/L，觸媒氧化氨氮去除率為 94.8~96.5% (表 2)。

表 1 模廠操作參數

處理程序	操作參數	
氣提法	pH值	10.5~12.0
	空壓流量(Nm ³ /h)	2~5
	氣液比	50 ~500
	氣提溫度 (°C)	80~100
	停留時間 (min)	10~90
觸媒 氧化法	反應溫度 (°C)	95~120
	相對濕度 (%) (或觸媒含水率)	70~80
	臭氧流量 (m ³ /h)	2~5
	空間流速 (h ⁻¹)	2500~5000
	進氣方向	由上往下

表 2 模廠測試結果

控制參數	操作條件與實驗結果	
臭氧流量(m ³ /h)	4	4
空壓流量(Nm ³ /h)	3	3
原水pH	12.01	12.48
平均氣提前氮(mg/L)	2,005	3,696
平均氣提後氮(mg/L)	303	420
平均氮去除率(%)	94.8	96.5
空塔流速(h ⁻¹)	2,350	2,350



圖 7 氣提 / 觸媒氧化整合系統

3.2 觸媒還原硝酸鹽氮系統

目前低濃度硝酸鹽氮廢水主要以生物處理為大宗，高濃度以酸回收樹脂進行處理，然而對於中濃度硝酸鹽氮廢水處理仍缺乏合適技術。因此本研究以觸媒還原技術期望提供中濃度硝酸鹽氮廢水處理之解方 (圖 8)。觸媒還原技術除了不會產生二次污染外，藉由氨水的添加不僅可以幫助還原硝酸鹽氮且可達到廢棄氨水資源化的效用。

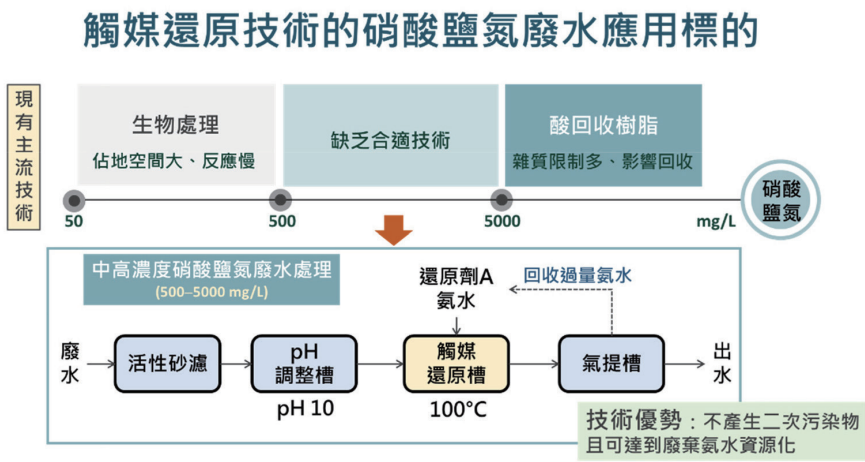


圖 8 觸媒還原技術的硝酸鹽氮廢水應用標的

3.2.1 觸媒與還原劑添加量的影響

圖 9 為 DNC 添加量對 1,000 mg/L 硝酸鹽氮去除率變化，結果顯示未添加 DNC 時，硝酸鹽氮去除率雖然可以達到約 60%，但反應後有 96 mg/L $\text{NH}_3\text{-N}$ 生成；有添加 DNC 反應的實驗組， $\text{NH}_3\text{-N}$ 的生成量則趨近於零。當 DNC 添加量低於 10 mL，其去除率落在 70% 以下；DNC 添加量大於 15 mL 以上， $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率可達 81%。因此，DNC 的添加量須為反應總體積的 9% (即添加量 15 mL) 以上，且添加 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 進行硝酸鹽氮的還原反應，對於硝酸鹽氮去除率與氨氮選擇性皆有正面的效果。還原劑添加量對硝酸鹽氮去除具顯著影響，當 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 為 1:5 增加至 1:10，硝酸鹽氮的去除率會由 56% 增加至 80%，另以較便宜的還原粉取代部分 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的添加 (即 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 : \text{還原粉} = 1:1:5$)，也和 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 1 : 5$ 的去除率相當。

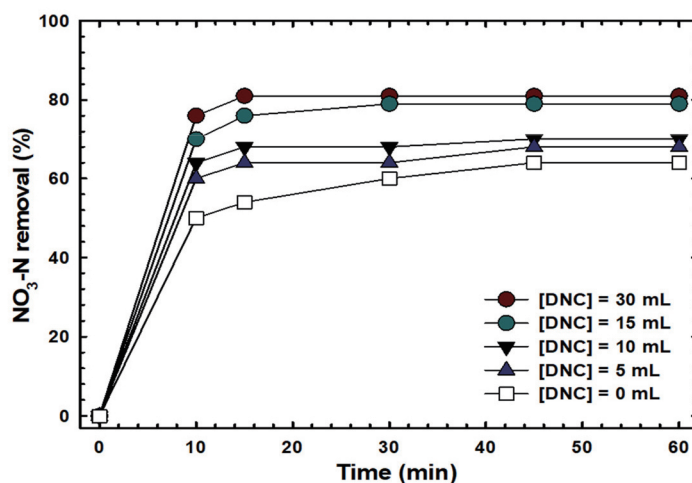


圖 9 DNC 與 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 在不同 DNC 添加量下的硝酸鹽氮去除率變化
(反應條件： $\text{NO}_3\text{-N} = 1000 \text{ mg/L}$ 、 $\text{pH} 9$ 、 25°C 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 10000 \text{ mg/L}$)

3.2.2 加藥模式經濟化：兩階段加藥程序

硝酸鹽氮廢水依據圖 10 之流程進行兩階段式加藥測試，分別進行 2 種濃度的硝酸鹽氮廢水處理 (圖 11)，當 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度為 $3,000 \text{ mg/L}$ ，第一段添加之氨水為 $16,000 \text{ mg/L}$ ，第二段添加硫代硫酸鈉劑量分別以 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 為 1:2 及 1:4 (w/w)。結果顯示結合兩階段處理後，2 種加藥比例的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 最終對硝酸鹽氮去除率皆可達約 60% (圖 11a)。先前實驗曾測試 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 在 1:10 的加藥量下亦可達到 60% 去除。說明脫硝觸媒搭配氨水及硫代硫酸鈉做分段添加的模式，有助於減少硫代硫酸鈉之使用量。當 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度為 $1,000 \text{ mg/L}$ ，第一段添加氨水，第二段添加硫代硫酸鈉劑量分別為 $3,000$ 及 $6,000 \text{ mg/L}$ 時，可分別達到 42.1 與 60.0% 去除率 (圖 11b)。

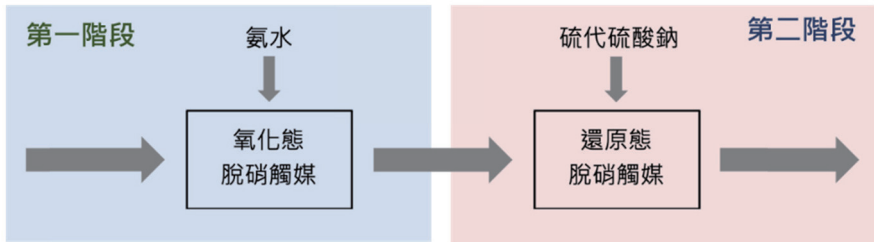


圖 10 硝酸鹽氮廢水 2 階段加藥模式示意

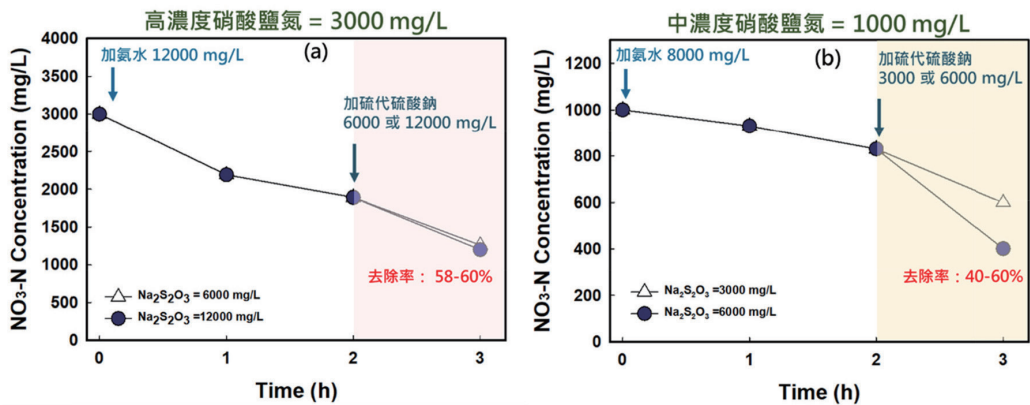


圖 11 硫代硫酸鈉加藥濃度對兩階段加藥模式去除硝酸鹽氮的效能影響
NO₃-N = 3,000 mg/L ; (b) NO₃-N = 1,000 mg/L (反應溫度：120 °C)

3.2.3 模廠操作參數與實驗結果

本團隊於某金屬表面業進行觸媒還原硝酸鹽氮實廠廢水模廠測試 (圖 12)，該廠廢水 10 CMD，硝酸鹽氮濃度約 5,000 mg/L，經過既設的機械蒸氣再壓縮系統 (Mechanical Vapor Recompression, MVR) 處理後會產生 500 kg/day 鹽類污泥，導致整理處理成本相當高。本團隊測試以兩階段處理方式進行 (圖 13)，第一階段將氨水 (50,000 mg/L) 添加於原硝酸鹽氮 (4,763 mg/L) 廢水，此時可去除 30.2% 硝酸鹽氮。第二階段添加硫代硫酸鈉 (25,000 mg/L) 後可使兩階段硝酸鹽氮去除率達 58.7%，剩餘硝酸鹽氮濃度約 1,970 mg/L。測試結果說明，利用氨水取代部分硫代硫酸鈉可有效去除高濃度硝酸鹽氮，預估每噸水之操作成本可較原有 MVR 減少 50% 以上。

觸媒還原模廠建置

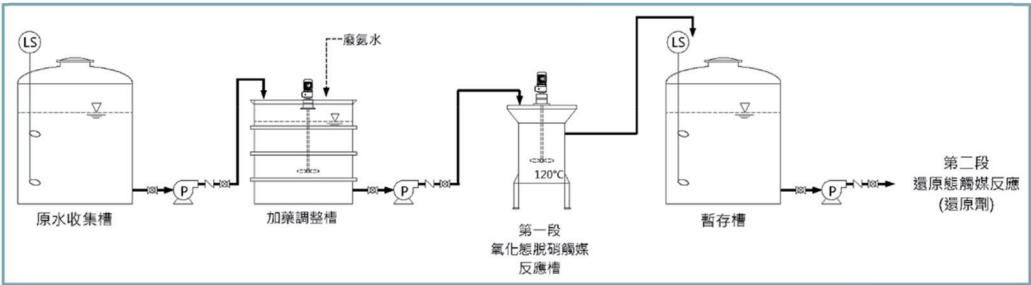
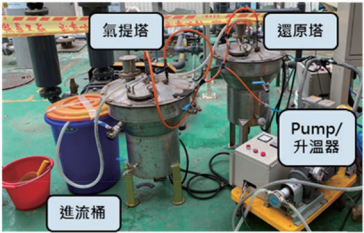
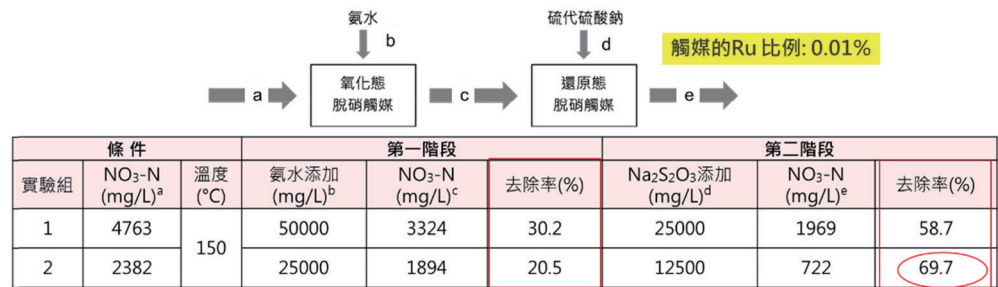


圖 12 觸媒還原模廠



- 利用氨水取代部分硫代硫酸鈉可有效去除高、中濃度NO₃-N
- 將觸媒的Ru 比例提升至0.02%，兩階段法可提升NO₃-N去除率至約84%

增加第3階段另添加還原粉可再提升
NO₃-N去除效率至約82%

圖 13 某 T 廠金屬基本工業廢水測試

3.3 PVA 生物球脫硝處理系統

3.3.1 碳氮比與初始硝酸鹽氮濃度影響

本實驗以生物球包埋某化工廠厭氧 / 好氧脫硝系統濃縮污泥 (簡稱 CC 菌)，進行對硝酸鹽氮處理的效能測試。圖 14 為 CC 菌在不同 C/N 比與初始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 ($\text{NO}_3\text{-N}$ =100 和 300 mg/L) 下經脫硝 12 小時的硝酸鹽氮濃度變化。初始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度為 100 mg/L 時，當 C/N= 3，經 4 小時反應後， $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度由 95 mg/L 降低至 56 mg/L，經 8 小時後才可達到放流標準 (圖 14a)。當 C/N = 4 時，反應僅需 4 小時即可將 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度降至 20 mg/L，再延長反應至第 8 小時後幾乎完全去除。初始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度提高為 300 mg/L 時 (圖 14b)， $\text{NO}_3\text{-N}$ 經 8 小時反應後，仍殘留約 100 mg/L，經 12 小時反應可完全去除。綜上所述，C/N = 4 為最理想的參數，100 和 300 mg/L 之 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分別可在第 4 與 12 小時內完全去除。

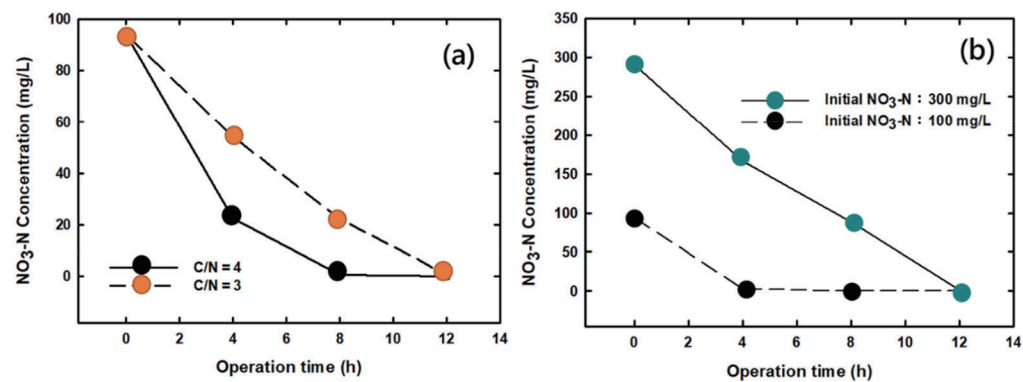


圖 14 CC 菌生物球脫硝試驗 (a) 不同 C/N；(b) 不同初始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度

3.3.2 體積負荷影響

圖 15 為 CC 菌於各體積負荷下硝酸鹽氮進出流濃度變化，進流合成廢水的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度設定為 100~540 mg/L，結果顯示 CC 菌的生物球槽體經長時間反應，在體積負荷為 2.5 kg $\text{NO}_3\text{-N}/\text{m}^3\text{-d}$ 以下時，其出流水硝酸鹽氮濃度能維持在 <30 mg/L，可達到放流水標準 (低於 50 mg/L)。

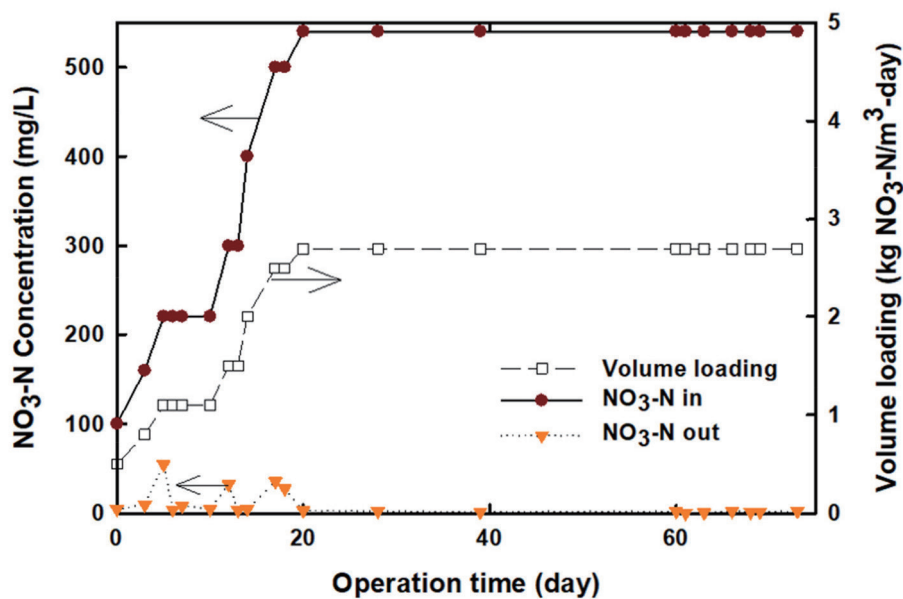


圖 15 體積負荷對 CC 菌生物球長期脫硝影響

3.3.3 生物球脫硝污泥產生量

為判斷脫硝生物球槽體之污泥產生量，以式 1、式 2 計算污泥產率。

$$\Delta SS = SS_{out} - SS_{in} + SS_{accumulate} \dots \dots \dots (1)$$

$$Sludge\ yield = \Delta SS / \Delta NO_3N \dots \dots \dots (2)$$

污泥產量實驗設計 CC 菌生物球連續流槽體 (2 L)，CC 菌槽在長期馴養下，其脫硝狀態穩定，體積負荷為 2.7 kg NO₃-N/m³-d 時 (流量 =10 L/d)，出流皆可達放流水標準。污泥產率實驗歷程共 5 天，每天記錄硝酸鹽氮變化，進流水體幾乎無 SS 故忽略；出流之 SS 為連續流出之水體，取適量過濾之。在第 1 天及第 5 天將槽體內均勻混合後取出含 SS 水樣以玻璃纖維濾紙過濾過濾，計算污泥產率。

實驗結果顯示，當體積負荷為 2.7 kg NO₃-N /m³-d 時，CC 菌槽體污泥產率僅為 0.16 g SS/g NO₃-N，相較於傳統懸浮性脫硝菌污泥產率理論值 0.8 g SS/g NO₃-N，CC 菌槽體污泥減量可達 80%。生物球由於顆粒內主要為休止細胞因此不會產生大量污泥。

3.3.4 某金屬表面處理業生物球脫硝實績

某金屬表面處理業硝酸錫廢液處理後清洗廢水中含有高濃度硝酸鹽氮約 4,000 mg/L，經生物球脫硝後可使硝酸鹽氮濃度降低至 100~300 mg/L (圖 16)。此實績顯示生物球除了能夠處理低濃度硝酸鹽氮，即便對於高濃度硝酸鹽氮亦可有效將其去除。生物球脫硝系統模組如圖 17 所示。

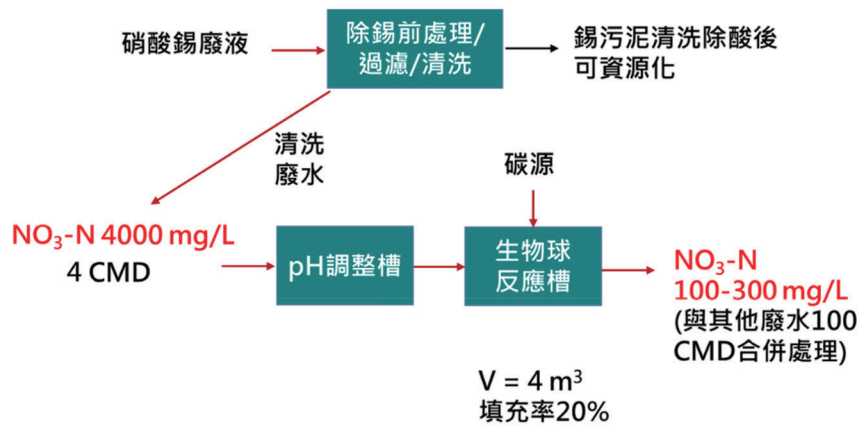


圖 16 某金屬表面處理業硝酸鹽氮廢水處理流程



圖 17 生物球脫硝系統模組

四、結論

對於中濃度氨氮 (200~5,000 mg/L) 廢水，本團隊以氣提法搭配催化氧化型觸媒整合進行處理。結果顯示，當觸媒含水率越高 (70~90%)、氧化塔溫度 80°C 以上時，可以達到 94% 以上的氨氮去除率，且水中殘餘的氨氮濃度可銜接生物系統更為經濟。

對於中高濃度硝酸鹽氮廢水 (500~5,000 mg/L) 處理，選用脫硝觸媒 DNC 搭配還原劑可以達到 80% 的硝酸鹽氮去除，且不太容易產生氨氮。另外，以廢氨水來取代部分硫代硫酸鈉進行兩階段加藥模式下，亦可在減少加藥成本的情況下有效的達到硝酸鹽氮去除。

對於中低濃度硝酸鹽氮廢水 (< 500 mg/L)，研究證實以 PVA 生物球技術在體積負荷為 2.5 kg NO₃-N/m³-d 時，長時間操作下可以維持其出流水硝酸鹽氮濃度在 < 30 mg/L，達到法規放流標準。此外，生物球所產生的污泥產量相較於傳統懸浮性污泥系統可大幅減少約 80%。

致 謝

本文承行政院環境保護署水質保護處 111 年度「含氮廢污水綠色處理系統示範驗證計畫」支持，特此致謝。

參考文獻

朱敬平、鍾裕仁、許國恩、黃欣栩、江家菱、王郁萱、許家銓、黃育德、胡雁翠、烏春梅、吳碩傳 (2012)，事業廢水特性調查及污染管制措施研議計畫，行政院環境保護署。

丁立文 (2020)，氣提 / 觸媒燃燒方式處理半導體業氨氮廢水，2020 臺灣水務產業發展研討會。

吳柏璋、侯嘉洪、賴進興、官文惠、駱尚廉、蔡人傑、張莉珣、顏旭明 (2021)，含氮物質之新興物化處理技術評析，工業污染防治，第 153 期。

周珊珊、何心平、賴怡芬、梁文龍、黃志彬 (2020)，新型觸媒處理難降解 COD 與含氮廢水之技術與應用介紹，中華民國環境工程學會電子報，第 3 期。

張冠甫、徐樹剛、黃盟舜、李茂松、張王冠 (2016)，氨氮廢水處理與回收技術及案例，產業綠色技術與法規資訊，第 120 期。

傅正貴、李玫、許哲彰、王俊元 (2016)，創新氨氮廢水資源化，新竹科學園區廠務技術研討會。

黃思尊 (2020)，109 年護城河水質改善試驗計畫，新竹市政府。