

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

提升薄膜生物反應槽脫氮效率之研究

Improving the efficiencies of a membrane bioreactor

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC89-2211-E-002-075

執行期間：八十九年八月一日至九十年七月三十一日

計畫主持人：曾四恭

共同主持人：張育傑

執行單位：台灣大學環境工程研究所

中華民國九十年八月一日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC89-2211-E-002-075

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

計畫主持人：曾四恭 台灣大學環境工程研究所

共同主持人：張育傑 東南工業專科學校環境工程科

計畫參與人員：趙樹華 台灣大學環境工程研究所

一、中文摘要

新式薄膜生物反應槽以矽膠管供給甲醇做為碳源，進行生物脫硝反應，達到去除水體中硝酸鹽之目的，並且水體中之COD皆可小於50 mg/L。而矽膠管之纏繞方式與矽膠管內之甲醇流速並不顯著地影響甲醇自矽膠管內擴散至水體中之速率，因此希望藉由反應槽水力條件對生物膜及生物膜液膜之影響，來提升生物反應槽之脫硝速率。反應槽中的剪應力會影響生物膜的厚度與結構，當雷諾數過大或過小皆不利於生物膜之增厚，但雷諾數越大則生物膜結構越穩定；雷諾數亦會影響生物膜液膜厚度，當雷諾數愈大則生物膜液膜厚度愈薄，利於硝酸鹽的傳輸。因此，有效控制反應槽之雷諾數可達到提昇脫硝反應之目的。硝酸鹽負荷為300 mg NO₃⁻-N / day，雷諾數為4.00×10⁴時，脫硝速率為5.90 g NO₃⁻-N / m²-day，反應速率是當雷諾數為1.33×10⁴時的116%。當硝酸鹽負荷為1.20 g NO₃⁻-N / day，雷諾數為2.67×10⁴時，脫硝速率為8.04 g NO₃⁻-N / m²-day，反應速率是當雷諾數為1.33×10⁴的134%。因此，選擇適當之水力條件，可有效提升脫硝反應。

關鍵詞：脫硝反應、剪應力、雷諾數、生物膜液膜。

Abstract

Novel membrane bioreactor, use silicon tube supplying methanol as carbon source, accomplish bio-denitrification. The objective of the bioreactor is to remove nitrate in the

bulk solution and can control COD less than 50 mg/l. Since the influence of the type of tying silicon tube and methanol flow rate in silicon tube on the diffusion rate of methanol are unobvious, we hope using the influence of bioreactor hydraulic condition on biofilm and water-layer to improve the denitrification efficiency of bioreactor. The shear force of bioreactor influence the thickness and structure of biofilm, larger and smaller Reynolds number make biofilm thinner, but larger Reynolds number is more stable of biofilm structure. Reynolds number also influence the thickness of water-layer, larger Reynolds number, thinner water-layer, and more effective of nitrate transport. As the result, the purpose of improving the denitrification efficiency of bioreactor can achieve by controlling Reynolds number of bioreactor efficiently. Under nitrate loading of 300 mg NO₃⁻-N / day with Reynolds number of 4.00×10⁴, denitrification rate is 5.90 g NO₃⁻-N / m²-day which is 116% of denitrification rate when Reynolds number is 1.33×10⁴. Under nitrate loading of 1.2 g NO₃⁻-N / day with Reynolds number of 2.67×10⁴, denitrification rate is 8.04 g NO₃⁻-N / m²-day which is 134% of denitrification rate when Reynolds number is 1.33×10⁴. As the result, select an optimum hydraulic condition can improve the denitrification efficiency effectively.

二、緣由與目的

本研究先前[1][2]針對含氮廢水之除氮處理，發展出一套同時硝化與脫硝之生物

反應系統，該系統打破傳統將硝化、脫硝分置兩個反應槽的普遍設計，而將硝化與脫硝合併於同一個反應槽內，以達到節省反應槽體積及反應時間、減少鹼度消耗、減低放流水COD等優點。

此同時硝化脫硝反應槽，結果發現改變各種操作條件下，總氮去除率約在 75% 左右[2]，因此總氮去除率還有提昇的空間。所以本研究針對脫硝反應，期望能夠利用操作條件，如：反應槽中之攪拌速率、甲醇流速、砂膠管纏繞方式等，來提升脫硝反應之速率。然而決定生物膜反應效率的最重要因素是各種生長基質在生物膜中的擴散速率[3][4]，致力於減少甲醇以及硝酸鹽氮在生物膜內的擴散阻力，針對液膜及生物膜這二個主要的擴散阻力層進行研究，期能建立適當的操作條件，提昇此新式薄膜生物反應槽脫硝的處理效果。

三、結果與討論

由圖 1 可知，砂膠管之纏繞方式（交叉纏繞與環狀纏繞）及砂膠管內之甲醇流速（7.5、20、40 ml/min），對甲醇自砂膠管擴散至水體中之速率並無影響，而甲醇之擴散速率僅受甲醇濃度之影響。當甲醇濃度在 15 到 45 g/L 之間時，甲醇濃度與甲醇擴散速率成正比，此亦符合 Fick's Law，擴散通量之驅動力(Driving Force)為濃度差。當砂膠管內甲醇濃度為 30 g/l 時，其擴散速率為 1.24 mg COD/l/min；而當每升中有一克甲醇之溶液其擴散速率為 0.0387 mg COD/l/min，且擴散速率隨甲醇之濃度增加而成等比例增加。因此，在相同甲醇濃度之條件下，並無其他有效之方法可增加甲醇自砂膠管擴散至水體中之速率。

水力特性對生物膜的影響分為二部分，一是生物膜結構，一是生物膜厚度。生物膜結構方面，雷諾數愈大有利於生物膜結構之穩定，因此，雷諾數為 1.33×10^4 之生物膜，結構膨鬆，且表面具及許多大顆粒氣泡，此氣泡當過大時會破掉，造成生物膜表面產生許多坑洞，形成生物膜結構之不穩定。生物膜厚度方面，除了轉速形成之剪應力會使得過厚之生物膜剝落，

但生物膜之結構亦同時會影響生物膜增厚之現象。因此，當雷諾數大於或小於 1.33×10^4 時，皆不利於生物膜增厚，生物膜厚度會因此減小。故進流硝酸鹽氮濃度為 100 mg/l，停留時間為 24 小時，穩定狀態時，雷諾數為 1.33×10^4 之生物膜厚度約在 1.9~2.0 mm 之間；雷諾數為 2.67×10^4 之生物膜厚度約在 2.3~2.5 mm 之間；雷諾數為 4.00×10^4 之生物膜厚度約在 2.1~2.4 mm 之間。

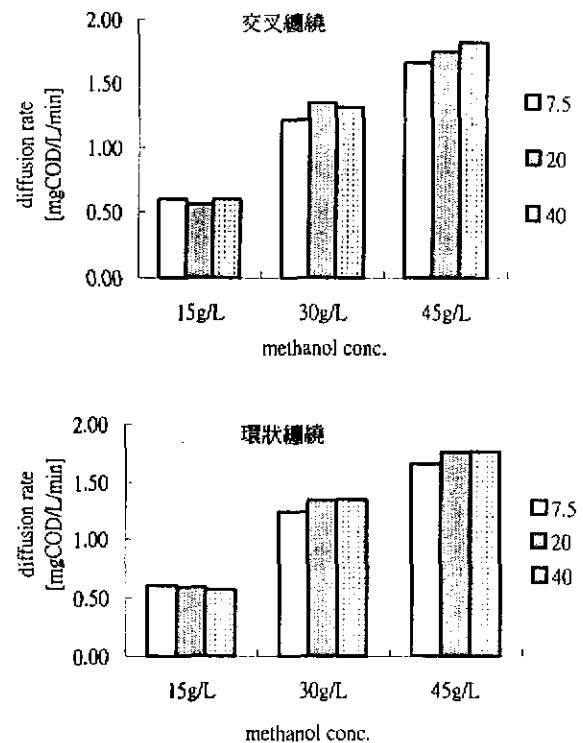


圖 1 環狀與交叉纏繞，甲醇流速分別為 7.5、20、40 ml/min 時，甲醇擴散速率之比較

由圖 2 可知，當硝酸鹽氮進流濃度為 500、200 及 100 mg/l 時，當雷諾數大於 26700 時，水體中之剪應力對生物膜厚度之影響較為顯著，因此，當雷諾數越大，受水體中剪應力較大之影響，生物膜厚度越薄；而當雷諾數小於 26700 時，生物膜結構對生物膜厚度之影響較為顯著，因此，當雷諾數越小，生物膜結構越不穩定且蓬鬆之影響，生物膜厚度越薄。且由圖 2 可知，當相同雷諾數，硝酸鹽氮進流濃度越低時，即 C/N 越大時，則生物膜厚度越厚。

生物膜液膜厚度乃利用數學模式，對批次實驗結果進行模擬而求得，當反應槽中之轉速愈快時，水流產生之剪應力愈大，反應槽亦愈達到完全混合，而對應之質傳液膜厚度亦愈小。由圖3並可了解，當雷諾數為 1.33×10^4 至 4.00×10^4 時，相對應生物膜液膜厚度之變化分佈。

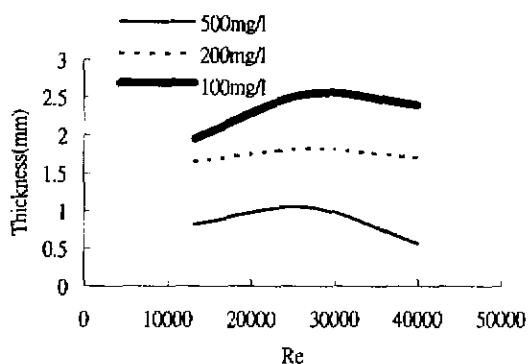


圖2 不同硝酸鹽氮濃度時，水體雷諾數 (Re) 與生物膜最終厚度之關係

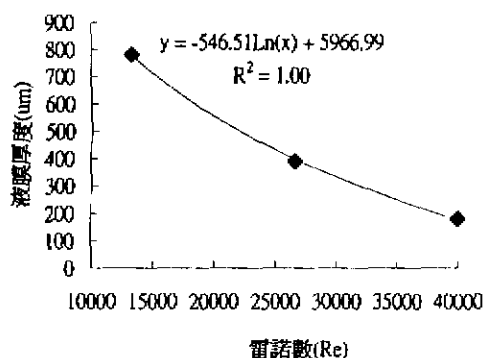


圖3 生物膜厚度為 2.54 mm，雷諾數與液膜厚度之關係

雷諾數與脫硝速率間之關係，如圖4所示，脫硝速率會隨不同硝酸鹽負荷而有所不同，而若欲用雷諾數來提升其脫硝速率，因雷諾數可影響生物膜液膜厚度與生物膜厚度，而生物膜液膜厚度愈薄，愈有利於脫硝速率。於高硝酸鹽負荷時，除低攪拌條件會隨生物膜厚度而減少脫硝速率外，若能保持在適當的攪拌條件，生物膜厚度的增加，將有利於脫硝速率。相反的，於低硝酸鹽負荷下，於較低之攪拌條件，生物膜厚度太厚反而不利於脫硝反應。依據文獻中之生物膜厚度對傳統生物膜反應

速率之影響可知，其反應速率均隨生物膜厚度的增加而減少，及生物膜愈薄，反應速率愈佳，而與本研究成果不同，其原因很可能是基質擴散之方向不同，影響不同位置之生物活性所致。

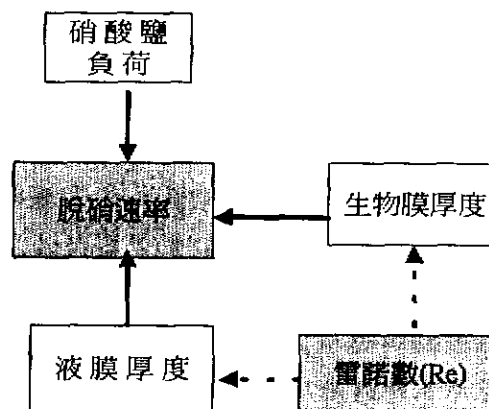


圖4 影響生物膜脫硝速率之因子示意圖

由表1及表2可知，生物膜厚度對脫硝速率之影響則視硝酸鹽負荷而有最佳之生物膜厚度，低負荷以硝酸鹽負荷 300 mg NO_3^- -N/Day 為例，當反應槽水力條件控制為雷諾數為 1.33×10^4 時，生物膜厚度為 1.8~2.0 mm，脫硝速率為 5.07 g NO_3^- -N/ m^2 -Day。但若反應槽水力條件控制為雷諾數為 4.00×10^4 時，生物膜厚度為 2.1~2.4 mm，脫硝速率為 5.90 g NO_3^- -N/ m^2 -Day，脫硝速率因此提升 16%。

表1 進流硝酸鹽氮濃度為 100mg/L，停留時間 24hrs，不同雷諾數與生物膜厚度下之脫硝速率 (g NO_3^- -N/ m^2 -d)

雷諾數 Re	膜厚(mm)			
	1.50	1.80	2.20	2.90
13300	-	5.07	4.21	3.67
26700	5.07	5.43	4.52	3.91
40000	5.09	5.45	5.90	4.95

表 2 進流硝酸鹽氮濃度為 200 mg/L，停留時間 12 小時，不同雷諾數與生物膜厚度下之脫硝速率 ($\text{g NO}_3^- \text{-N} / \text{m}^2 \text{-d}$)

雷諾數 (Re)	膜厚(mm)			
	1.40	1.70	1.85	2.85
13300	6.44	6.56	5.99	5.00
26700	7.29	7.48	7.60	8.15
40000	7.30	7.45	7.99	8.48

高負荷以硝酸鹽負荷 $1.2 \text{ g NO}_3^- \text{-N} / \text{Day}$ 為例，當反應槽水力條件控制為雷諾數為 1.33×10^4 時，生物膜厚度為 $1.8 \sim 2.0 \text{ mm}$ ，脫硝速率為 $5.99 \text{ g NO}_3^- \text{-N} / \text{m}^2 \text{-Day}$ 。但若反應槽轉水力條件控制為雷諾數為 2.67×10^4 時，生物膜厚度為 $2.3 \sim 2.5 \text{ mm}$ ，脫硝速率為 $8.04 \text{ g NO}_3^- \text{-N} / \text{m}^2 \text{-Day}$ ，脫硝速率因此提升 34%。

因此可知，當在高 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 負荷時，提高水體之雷諾數因而所提升之脫硝速率，較當高 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 負荷時來得佳。在低負荷條件下，剪應力對生物反應的影響，也較接近傳統生物膜之影響趨勢。

而模擬之脫硝效率較實驗結果為高，因為雖然生物膜厚度經過修正，但因為外側之好氧異營菌厚度亦會增加硝酸鹽之擴散阻力，因此，實驗之脫硝速率較低。實驗室反應槽因有溶氧存在，故形成外層是好氧異營菌層，但若能以密閉反應槽操作，且因脫硝反應產生氮氣，故可控制反應槽內為無溶氧存在之環境，而避免好氧異營菌之生成。而此條件下，生物膜之最佳厚度為 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}$ ，因此只要控制生物膜厚度為 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}$ ，即可維持最高的脫硝速率，但若生物膜厚度大於或小於 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}$ ，脫硝速率便大幅下降。

四、計畫成果自評

矽膠管之纏繞方式與矽膠管內之甲醇

流速並不顯著地影響甲醇自矽膠管內擴散至水體中之速率。甲醇擴散速率僅與甲醇濃度成正比。水力條件影響生物膜之結構及生物膜之厚度，硝酸鹽負荷會影響雷諾數對生物膜之脫硝速率之影響，硝酸鹽負荷高時於適當之攪拌條件下，提高生物膜厚度有利於脫硝作用；硝酸鹽負荷低時，提高生物膜厚度不利於脫硝作用，因此增加雷諾數，以控制生物膜之厚度，其提升之效率比高負荷為佳。薄膜生物脫硝反應槽在已知的進流硝酸鹽濃度下，由研究成果可知，選擇出適當的水力條件，即可有效的提昇脫硝反應速率。應用於同時硝化脫硝生物反應槽，硝化速率應亦可有所提昇，此可進一步加以研究。

五、參考文獻

- 1 張育傑，曾四恭“利用新式薄膜生物反應槽去除廢水中氮之研究”，國立台灣大學環境工程學研究所博士論文(1999)。
- 2 謝淵琳，曾四恭“利用中空矽膠管薄膜生物反應槽進行低氮廢水除氮之研究”，國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文(2000)。
- 3 Brito, A. G. and Melo, L. F. “Mass transfer coefficients within anaerobic biofilms: Effects of external liquid velocity”, *Wat. Res.* 33(17), 3673-3678(1999).
- 4 Petrov, M. and Tzonkov, St. “Modeling of mass transfer and optimization of stirred bioreactors”, *Bioprocess Engineering* 21,61-63(1999).