

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高濃度廢水自發性高溫好氧處理程序 (ATAT) 最佳化研究

(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-039-001-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：中國醫藥大學環境醫學研究所

計畫主持人：江舟峰

計畫參與人員：吳勇興、梁永政、陳建安

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 9 月 22 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

■成果報告 □期中進度報告

(計畫名稱)

高濃度廢水自發性高溫好氧處理程序(ATAT)最佳化研究(2/2)

計畫類別：■ 個別型計畫 □ 整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2211 - E - 039 -001 -

執行期間： 94 年 8 月 1 日 至 95 年 7 月 31 日

計畫主持人：江舟峰

共同主持人：

計畫參與人員： 吳勇興、梁永政、陳建安

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：□精簡報告 ■完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

□涉及專利或其他智慧財產權，□一年□二年後可公開查詢

執行單位：中國醫藥大學環境醫學研究所

中 華 民 國 95 年 9 月 25 日

摘要

自發性高溫好氧處理 (ATAT) 是指高濃度廢水進行好氧分解時，因反應過程釋放生物熱，而不需外加其他熱能，可將系統溫度維持於 45-55 °C。文獻指出 ATAT 之優點為過剩污泥極少，反應速率較高。本研究結合可程控呼吸儀及熱監控技術，嘗試自行設計生物熱卡計，於 ATAT 程序下，進行比生物潛熱 (h_b , cal/g BOD_r) 評估，以利工程設計之參考。

本設計可分為五大部分：反應槽 (2 L)，磁力攪拌系統 (最大 1000 rpm)，氧氣測定及供氧系統 (最大 900 mg/hr)、溫度測棒及補溫系統 (最大 100 J/s) 及電腦數據接受系統 (最短時距 1 min)，本研究並利用熱平衡模式開發生物潛熱演算法，考量三種熱能及熱通量：補熱 (H_c, J_c)，傳導熱損 (H_t, J_t) 及生物潛熱 (H_b, J_b)。本研究著重生物熱卡計的熱預算設計與功能規範訂定。

首先進行空白實驗探討反應槽熱傳通量 (J_t)，再以葡萄糖為基值，於 55 °C 馴化高溫菌，再植入呼吸儀反應槽進行生物潛熱測定，操作條件為：容積負荷 10.0 g COD/L 及污泥齡 (SRT) 10 天。

實驗結果顯示，在 8 天試驗中，攝氧曲線呈現典型之外呼吸及內呼吸特徵，平均而言，24 小時後 COD 去除率約達 90%，傳導熱損 (H_t) 及熱通量 (J_t) 分別為 -720 Kcal 及 -550 cal/min，生物潛熱及通量分為 4.2 Kcal 及 5.8 cal/min。但由於反應槽絕熱不佳，補溫比 (r) 高達 99.6%，比潛熱 (h_b) 測定結果為 46 Kcal/g，與理論值之 3.5 kcal/g 高出甚多。進一步建立熱預算分配模式，以利生物熱卡計之設計，結果顯示為降低補溫至 65%，應提高絕熱效率，並將補熱通量降至 10~30 J/s，並提高補熱精確度至 1~5 J/s。

Abstract

The autothermal thermophilic aerobic treatment (ATAT) is a process capable of spontaneous reaction at a temperature of 45~55 °C without the addition of external heat. The process is attractive because of low excess sludge, comparing with typical activated sludge processes. The purpose of this study was to evaluate a biological calorimeter, which is crucial to ATAT design and operation. The calorimeter is basically a programmable aerobic respirometer equipped with a heat-controlled system. The calorimeter measures the specific biological heat (h_b , in cal/g BOD_T) of wastewater, which is an important system parameter for the ATAT process.

The calorimeter consists of five major components: a reaction vessel (2 L), a mixing system (max.1000 rpm), an oxygen supply and control system (max. 900 mg O₂/hr), a heat compensation and control system (100 J/s), and a signal processing and control system (min. interval 1 min). A heat balance model [$dH/dt = dH_c/dt + J_t + h_b(dO_u/dt)$] was developed to assist on data analysis. The model considers three types of heat (cal) and flux (cal/min): heat compensation (H_c, J_c), heat transfer via conduction (H_t, J_t), and biological heat (H_b, J_b).

The system was first evaluated by blank tests for determination of J_t . A thermophilic reactor was operated for seed culture acclimated on glucose. The seed culture was then transferred to the reaction vessel of the calorimeter for sample tests. The vessel was fed every day with glucose feed stock (10 g COD/L) at an SRT of 10 days.

The experimental results show oxygen uptake curves within 8 consecutive days. The curves show a typical pattern of endogenous respiration after 10 hours with a removal of 90 % after 24 hours. The heat transfer (H_t and J_t) was determined to be -720 kcal and -550 cal/min. The biological heat was estimated to be 4.2 kcal and 5.8 cal/min on average. However the compensation heat ratio ($r = H_c/H_t$) was as high as 99.6 % due to poor insulation. The h_b was determined to be 50 kcal/g, much larger than the theoretical value of 3.5 kcal/g for glucose. A heat balance model was then developed to investigate proper design specifications. It was suggested that the reaction vessel must be insulated to reduce compensation heat to $H_b/(1-r)$, or 10.5 kcal ($r = 60$ %) for reliable measurement. Also a smaller compensation heat flux (such as 10 ~ 30 J/s) with higher precision (1 ~ 5 J/s) should be used for more stable heat control.

前言

廢水生物處理目前遭遇瓶頸在於高污泥量、低反應速率與低有機負荷，而自發性高溫好氧處理 (autothermal thermophilic aerobic wastewater treatment, 以下簡稱 ATAT) 適足以解決這些問題。ATAT 操作於 55 ~ 65°C 之高溫好氧條件。根據 vant Hoff-Arrhenius 定律，高溫能提高基質降解速率，所以在高溫下系統可處理較高濃度廢水，而不致於影響處理效果 (Lapara and Alleman, 1999)。高溫亦能提高油脂之水中溶解度，以促進含高濃度油脂廢水之處理效果 (Chiang, 1999)。根據熱力學觀點，高溫環境使生物細胞合成效率下降，促使生物反應過程中基質分解之熱能釋放增加，相對造成細胞生長可用能量比例變小，因此污泥量可望減少，而且此熱能釋放恰可供維持反應高溫之熱能需求。

傳統上對於 ATAT 的考量不外乎：一、高溫若不能由廢水降解反應自發產生，外加熱源成本驚人；二、高降解速率須輔以高氧傳速率，然而高溫會降低氧氣在水中的溶解度，減緩氧傳速率。事實上經歐美地區多座高溫好氧污泥消化 (autothermal thermophilic aerobic sludge digestion, 以下簡稱 ATAD) 實廠成功經驗，ATAD 已被美國環保署 (US EPA, 1990) 列為成熟技術 (promising technology)，而國內也有兩座實廠分別被證實為 ATAT (Chiang *et al.*, 2001) 與 ATAD (Chiang *et al.*, 2002)，因此 ATAT 可行性不容置疑，惟當務之急在尋求理論根據以提昇 ATAT 之設計與操作技術。

若以傳統實驗室規模連續流馴化槽 (chemostat) 進行 ATAT 可行性研究，其可能遭遇困難有：一、開放性系統可能造成大量蒸發熱損，不易評估反應產生熱值；二、以空氣曝氣可能因氧傳速率不及基質降解速率造成質傳限制，若改以純氧曝氣則因屬開放系統而有氧氣爆炸等安全顧慮；三、一般磁石攪拌效果有限亦容易造成溶氧質傳限制；四、分析工作多利用 COD 與 MLVSS 分析，分析方法耗時費力且精準性不佳。目前新型呼吸儀為密閉系統，且具有純氧曝氣、稀土磁石強力攪拌，以及可程式即時線上監控瞬間攝氧量等特性，適足以克服上述困難。

本研究自行嘗試設計一套由反應槽 (2 L)，磁力攪拌系統 (最大 1000 rpm)，氧氣測定及供氧系統 (最大 900 mg/hr)、溫度測棒及補溫系統 (最大 100 J/s) 及電腦數據接受系統 (最短時距 1 min) 等五大部分所組成之呼吸儀 ATAT 系統，具有可程式即時線上監控大量累積攝氧數據 (O_u vs. t) 與補溫加熱數據 (H_c vs. t) 等功能，可作為 ATAT 可行性評估及生物熱卡計之研究設備。

生物熱卡計文獻

生物好氧反應熱是用來估算自發性高溫好氧程序 (ATAT 與 ATAD) 熱平衡之重要參數。由於好氧生物反應之最終電子接受者為氧氣，而且生物好氧反應熱與系統攝氧量成正比關係，因此學者 (Bailey and Ollis, 1986) 一般均認為，以單位攝氧量所產生的反應熱，來表示生物好氧反應熱最恰當。本研究則將其稱為比生物潛熱 (specific biological heat potential, hb)，單位 kcal/(g O_u)。

Bailey and Ollis (1986)認為比生物潛熱(hb)可以利用基質(hc,s)與微生物細胞(hc,x)之燃燒熱進行理論計算，公式為

$$hb = hc,s - Y_o hc,x \quad (A)$$

美國環保署的 ATAD 技術轉移報告(USEPA, 1990)則引用 Cooney et al. (1968)的研究成果，建議採用比生物潛熱(hb)值範圍為：3.391 – 3.501 kcal/(g Ou)。但是，Cooney et al. (1968)的數據是，在 30 °C 與 37 °C 兩溫度條件下，量測多種不同基質與不同純菌的實驗結果，該文並無直接數據顯示其高溫適用性。

事實上，這是屬於生物熱卡計研究(bio-calorimetry)的領域，長期以來一直為生化工程學者所重視。生化工程學者認為不管是好氧或厭氧生物反應槽的生物活度(bioactivity)，皆與系統的反應產熱率(heat evolution rate, HER)成正比，而且熱量的監控變數只有溫度，其量測準確又容易自動化，因此以系統的反應產熱率(HER)做為生物反應器的監控指標是個適當的選擇。另一方面，由於生物反應受溫度的影響很大，因此生物熱卡計研究也有助於瞭解生物反應器之熱交換器設計。

關於生物熱卡計研究，von Stockar and Marison (1989)與 Marison et al. (1998)是兩篇很完整的評論文獻(review papers)，說明了各式各樣的生物熱卡計的設計原理、歷史演進與應用。文中介紹的生物熱卡計包括：

直接量測型生物熱卡計(direct determination biocalorimeter) (Silman, 1985)：這是一種厭氧熱通量生物熱卡計(anaerobic heat-flux biocalorimeter)，其設計關鍵在於使用一熱通量感測片(heat flux sensor)，是由 4,800 條銅鈷熱電偶(Cu-Co thermocouple junctions)所組合而成。

動態生物熱卡計(dynamic biocalorimeter) (Cooney et al., 1968; Mou and Cooney, 1976)：其反應槽體積大(7 – 14 L)，特點是使用動態溫升來計算系統累積熱率，扣除非生物熱率總和後，可求得生物反應熱。

連續式生物熱卡計(continuous calorimeter) (Luong and Volesky, 1980; Luong et al., 1983)：其反應槽體積大(14 L)，特點是採恆溫(thermostat)操作，並使用沉水式電子補溫加熱器(compensation heater)來估測反應熱。

熱平衡生物熱卡計(heat-balance biocalorimeter) (van Kleeff et al., 1993; van Kleeff et al., 1995; van Kleeff et al., 1996)：其特點是採恆溫(thermostat)操作，並使用沉水式恆溫棒(thermostating finger)來估測反應熱。

熱通量生物熱卡計(heat-flux biocalorimeter) (Meier-Schneiders et al., 1995a; b; c)：其特點是採恆溫差操作，亦即固定反應槽夾套熱通量(jacket heat flux)，並於反應槽夾套設有熱通量感測片(heat flux sensor)(亦稱 thermophile (並非指高溫菌))，可連動沉水式電子

補溫加熱器(compensation heater)用來估測反應熱。這種生物熱卡計已經發展出兩種不同的量產機型：BFK (Meier-Schneiders and Schafer, 1996)與 BioRC (Marison and von Stockar, 1986; von Stockar and Marison, 1989; Marison et al., 1998)。

除了上述五種巨型(macro-scale)生物熱卡計，還有只需幾毫升測試樣品的微型(micro-scale)生物熱卡計。微型生物熱卡計之缺點是未設置連續供氧與攪拌的配備，而優點則是發熱量之偵測極限很低，可用於低基質濃度系統，如廢水系統(Fortier et al., 1980; Ishikawa et al., 1981; Beaubien and Jolicoeur, 1985; von Stockar and Marison, 1989)。

巨型生物熱卡計之曝氣方式都是採用空氣曝氣，而且採用質譜儀(mass spectrometer)量測進出反應槽空氣之氧氣濃度，再換算成攝氧率(OUR)。但是，文獻曾指出其攝氧率量測之準確度通常不如其熱量量測之準確度。另外，尚需注意生物反應槽中基質與菌量濃度通常都很高，因此其生物反應產生的熱量亦高，所以較容易量測；反觀廢水系統，其基質與菌量濃度都低，因此其發熱量小，監測上比較困難；所以，本研究建議改用呼吸儀(respirometer)量測生物熱卡計之攝氧率，以提高其攝氧率量測之準確度。

理論推導

比生物潛熱 (specific biological heat potential, h_b) 乃指生物反應時攝取單位氧氣質量所釋放之熱量，單位一般表示為 kcal/g BODr，為 ATAT 可行性之重要參考，配合 ATAT 熱平衡分析可以瞭解 ATAT 如何產生自發性高溫。對呼吸儀 ATAT 系統而言，利用補溫與熱損加熱溫控系統，將反應瓶內外分別控制在兩不同恆溫下，其熱平衡分析可考量如下：

$$[\text{累積}] = [\text{反應}] - [\text{熱損}] + [\text{補溫}]$$

亦即

$$dH/dt = h_b dO_u/dt - J_t + dH_c/dt \quad (1)$$

其中 h_b 為比生物潛熱，單位 kcal/g BODr； O_u 為累積攝氧量，單位 g； J_t 為反應槽熱傳 (heat transfer) 損失通量項，單位 kcal/min； H_c 為累積補熱 (heat compensation) 量，單位 kcal。依據熱傳導原理， J_t 可以表示如下：

$$J_t = (k_t)(\Delta T) (A_t)/(L_t) \quad (1a)$$

其中， k_t 為熱傳導係數，因材質而異，玻璃為 $0.102 \text{ cal}^\circ\text{C-cm-min}$ ， ΔT 為溫度差 $^\circ\text{C}$ ， A_t 為傳導面積，單位 cm^2 ， L_t 為熱傳導路徑長度，單位 cm。當操作溫度達穩定時， J_t 為一常數。當系統達恆溫穩態操作時， $dH/dt = 0$ 。Equation 1 可改寫為：

$$0 = h_b dO_u/dt - J_t + dH_c/dt \quad (1b)$$

將Equation 1b以初始條件：當 $t = 0$ ， $O_u = 0$ 且 $H_c = 0$ ，代入積分可得

$$H_c = J_t t + h_b O_u \quad (2)$$

利用呼吸儀ATAT系統可以獲得大量攝氧數據 (O_u vs. t) 與補溫數據 (H_c vs. t)，運用於Equation 2配合複迴歸 (multiple linear regression) 最小平方法 (least square method) 可用以求取熱損速率 (J_t) 與比生物潛熱 (h_b) 之實驗估計值。亦可先利用空白絕熱試驗求出Equation 2之熱損失速率 J_t ，再對 $H_c - J_t t$ vs. O_u 進行簡單線性迴歸 (simple linear regression)，由其斜率求取比生物潛熱 (h_b) 之實驗估計值。對於一段試驗期間，可依下式定出補溫比 (r)：

$$r = H_c / (J_t t) \quad (3)$$

“ r ”值大小提供一項評估ATAT系統反應自發性 (reaction spontaneity) 之指標。當“ r ”值愈小，ATAT系統所能達到的反應自發性就愈大。

實驗方法

本研究之實驗主要有：高溫馴化培養與呼吸儀 ATAT 試驗兩部分，其中高溫馴化培養為穩態操作，用以提供所有呼吸儀 ATAT 試驗植種來源 (seed source)，必須操作至所有呼吸儀 ATAT 試驗完成為止。

高溫馴化培養

本研究自行設計高溫馴化槽以培養高溫菌，其裝置如圖 1 所示，特點包括：在 10 L 反應瓶中，靠空氣泵打入空氣，經瓶底之曝氣石曝氣，以維持溶氧 1~2 mg/L；依溫度棒測值，利用比例積分微分 (PID) 溫度控制器連動加熱棒以維持高溫 55°C，精確度 0.1°C；反應瓶內置一沉水泵以 1200 L/hr 流速循環攪拌，以維持反應瓶內溶氧與溫度均勻分布；為避免大量水分蒸發，反應瓶頂接一冷凝迴流管；基質與營養鹽為避免酸敗分置於兩個 4 L 玻璃瓶中，利用蠕動泵依設定之流速同時連續進流到反應瓶中，並靠反應瓶出流口維持液面高度以控制污泥齡 (SRT)。

高溫菌種取自北部某食品油脂 ATAT 實廠之高溫好氧曝氣池。取回 10 L 菌種植入高溫馴化槽後，再以 10,000 mg/L COD 葡萄糖人工水樣控制 SRT = 10 d 進流，可定期由出流水取樣分析 COD、pH 與 MLVSS，並觀察污泥沉降性、顏色、泡沫與顯微鏡菌相，以監控馴化情形。

呼吸儀 ATAT 試驗

呼吸儀 ATAT 試驗為本研究之核心實驗，所使用呼吸儀 ATAT 系統是以美國 CES

公司最新 OLR-300 型線上呼吸儀進行設計改裝，如圖 2 所示，乃由反應槽 (effective volume 2 L)，磁力攪拌系統 (最大 1000 rpm)，氧氣測定及供氧系統 (最大 900 mg/hr)、溫度測棒及補溫系統 (最大 100 J/s) 及電腦數據接受系統 (最短時距 1 min) 等五大部分所組成。其中：純氧供氣單元可設定反應瓶頂空間氧含量，根據氧氣監測器測量值，以電腦程式依開/關控制方式連動銳口閥(orifice)由氧氣鋼瓶供氧，銳口閥每開一次供氧 0.5 mg/2 sec，電腦程式紀錄累積開放次數可換算成攝氧量，最大供氧速率 900 mg/hr，氧化產生二氧化碳由吸收瓶中 12-N KOH 溶液所吸收，另外尚裝有一空氣循環泵，以利反應瓶頂空間與純氧供氣單元連通管線中氣體之均勻分布；進流取樣單元具三蠕動泵可以用來植種、進流基質、廢棄污泥與取樣分析，亦可改裝為針筒抽取之進流取樣操作方式；補溫加熱溫控單元可設定反應瓶內的溫度，依溫度棒測值以開/關控制方式連動加熱棒以 100 W(J/s) 功率補溫，紀錄加熱棒開啟累積時間即可換算補溫加熱量；反應瓶底置一加重型稀土磁石，可以磁力攪拌器強力驅動攪拌，不易脫速，轉速可調整 0~1000 rpm；訊號數據監控處理單元是利用 HP 出品之界面控制商業軟體 VEE 所撰寫之程式，可以線上即時監控攪拌轉速、溫度、累積攝氧量、累積補溫加熱量等數據，並可繪製成線上即時動態圖，功能強大操作彈性亦強；熱損加熱溫控單元依反應瓶外壁所置溫度棒測值，以 PID 控制器連動加熱線圈，並經風扇循環氣流，可控制反應瓶外壁高溫，減少反應瓶內外壁溫差，以降低反應瓶熱損失。

進行呼吸儀 ATAT 試驗時，先自高溫馴化槽植種 2 L 至呼吸儀 ATAT 系統之反應瓶中，採半連續進流操作，每日以針筒依所控制之 SRT 換算抽取定量污泥廢棄，隨即添加等體積葡萄糖人工水樣，待每日累積攝氧趨勢達穩定再現即可終止該批試驗。廢棄污泥可進行 pH、COD、MLVSS 等分析。

結果與討論

生物潛熱

圖 3 所示為利用 ATAT 呼吸儀系統 (圖 2) 以葡萄糖人工水樣操作在反應瓶內部 55 °C，外壁 50 °C，操作頻率 (f_w) 1 cycle/d，進流基質濃度 (S_f) 10,000 mg COD/L，污泥齡 (SRT) 10 d 之連續八天攝氧曲線 (O_u vs. t)；而其相對之補溫供熱曲線 (H_c vs. t) 則為圖 4 所示。由此二圖可知攝氧曲線 (O_u vs. t) 敏感度較高；相對補溫供熱曲線 (H_c vs. t) 則較不敏感。

利用式 2 對圖 3 之攝氧曲線 (O_u vs. t) 與圖 4 之補溫供熱曲線 (H_c vs. t) 進行複迴歸演算，可得如表 1 所示之比生物潛熱 (h_b) 與熱損速率 (J_t) 值。表 1 所示之熱損速率 (J_t) 平均值 0.49 kcal/min 與絕熱測試實驗值 0.55 kcal/min，相差 10 %。但是表 1 所示之比生物潛熱 (h_b) 值離散度高，且有不合理之負值出現，其平均值 46 kcal/g BODr 與一般文獻值 (3.39~3.50 kcal/g BODr) 相差甚大。使用 h_b 的平均值 (46 仟卡/克 BODr) 和平均熱損通量值 (J_t) (0.50 仟卡/分)，可以計算出式 3 所定義的補溫比，其在 24 小時試驗期間的第 12 小時達到 99.6% 之最低值。

由圖 3 之攝氧曲線 (O_u vs. t) 與圖 4 之補溫供熱曲線 (H_c vs. t)，判斷可能原因為 ATAT 呼吸儀系統 (圖 2) 之補溫控制單元之靈敏度 ($0.25\text{ }^\circ\text{C}$) 不足以配合其攝氧控制單元之靈敏度 (0.25 mg/sec)，或者肇因於熱損太大而不足以顯現出生物反應熱之貢獻。由圖 4 之補溫供熱曲線 (H_c vs. t) 近乎直線的情形來判斷，熱損可能太大，可優先考慮進行改善。

生物熱卡計設計

如表 2 所示，為進一部探討熱卡計的系統設計，本研究自行研發一套熱預算(heat budget)數學模式，模式中考量 3 種熱通量：heat compensation (H_c)，heat loss via reaction tank (H_t)，biological heat (H_b)。模式演算法如下：

1. 求解系統 H_t ：利用空白試驗熱通量數據、設備參數 ($J_c = 1000\text{ J/s} = 1,433\text{ cal/min}$, on-time = 0.35 min/min, $A_t = 800\text{ m}^2$, $L_t = 0.3\text{ cm}$, $k_t = 0.102\text{ cal/}^\circ\text{C-cm-min}$)、及操作條件 ($t = 55\text{ }^\circ\text{C}$, $T_a = 53.2\text{ }^\circ\text{C}$)，於 2 hr 試驗時間，求解出 $J_t = -503\text{ cal/min}$, $H_t = -60.4\text{ cal}$ 。值得注意的是， T_a 的選定影響 H_t 甚鉅，是故操作環境溫度的控制相當重要，必須依賴精準的 PLC 控制。
2. 求解補溫比 (r)：利用樣品 ATAT 試驗數據，設定 $S_f = 10\text{ g/L COD}$, $H_b = 3,500\text{ cal/L COD}$, Removal $E = 90\%$, SRT = 20 days, 於 24 hr 反應時間，求解 $H_t = -725\text{ kcal}$, $H_b = 6.3\text{ kcal}$, 補溫比 $r = 99.7\%$ ，顯示相對於生物反應熱，系統熱損太高。
3. 熱卡計功能參數設計：先設定 $H_b = 6.3\text{ kcal}$ ，在補溫比須達 $< 50\sim 60\%$ 時，縮短試驗時間為 8 hr，且減少 heat 加熱通量至 10 J/s ，可將 H_c 降至 6.9 kcal ，故若要達到補溫比的要求，需提升絕熱效率，將熱損 H_t 降至 -10.6 kcal ，或將反應槽厚度當量增加到 $L_t = 10\text{ cm}$ ，可使用岩棉為絕熱材，達到絕熱的效果。

結論與建議

本研究以自行設計之 ATAT 呼吸儀進行 ATAT 系統之熱平衡探討，雖然目前未能如期準確測得比生物潛熱。本研究判斷以目前所設計之 ATAT 呼吸儀要準確測得比生物潛熱必須改善反應槽傳導熱損，降低補熱比為 60% ，使熱損降至 10.5 Kcal ，此外補熱通量應降低至 $10\sim 30\text{ J/s}$ ，以將其補熱精確度提高至 $1\sim 5\text{ J/s}$ 。具體結論與建議如下：

1. 原呼吸儀生物熱卡計之加熱器供熱功率(100 W)過大，實難用於量測發熱量不大之實驗室 ATAT 系統，建議改用較小功率加熱器(10 W 或更小)。
2. 原呼吸儀生物熱卡計之熱電偶(thermocouple J-type)溫度測棒，其靈敏度($0.25\text{ }^\circ\text{C}$)不足，難以量測發熱量不大之實驗室 ATAT 系統，建議改採較高靈敏度之溫度測棒，或改採多點量測改善之。

3. 原呼吸儀生物熱卡計之絕熱程度不足，難用於量測發熱量不大之實驗室 ATAT 系統，建議採用絕熱材包覆設計，或真空夾套斷熱設計。
4. 原呼吸儀生物熱卡計之溫度控制方式採開/關控制(on-off control)模式較為粗躁，建議加大原設計之控制頻率(0.5 1/s)，或改採比例積分微分控制(PID control)模式。
5. 對於呼吸儀生物熱卡計之各設計規格之選用與搭配，可採用本研究開發之模擬程式，進行虛擬測試，以減少成本，並提高成功機率；這種利用電腦輔助設計(computer aided design, CAD)進行生物熱卡計研發的方式，已經成為一種趨勢(Zaldivar et al., 1996)。

參考文獻

- Beaubien, A. and Jolicoeur, C. (1985) "Applications of flow microcalorimetry to process control in biological treatment of industrial wastewater." *Journal WPCF*, 57(1), 95–100.
- Chiang, C. F. (1999) "Study of thermo-philic aerobic treatment of high strength wastewater by respirometry," technical report, Chaoyang University of Technology, Taichung, Taiwan, ROC.
- Chiang, C. F., Lu, C. J., Sung, L. K., and Wu, Y. S. (2001) "Full-scale evaluation of heat balance for autothermal aerobic treatment of food processing wastewater," *Wat. Sci. Tech.*, 43(11), 251-258.
- Chiang, C. F., Y. S. Wu, L. K. Sung, T. H. Lui (2002) Full-scale evaluation of autothermal thermophilic aerobic digestion of sludges from chicken-processing wastewater, *3rd IWA Cong.*, Melbourne, Australia.
- Cooney, C.L., Wang, D.I.C., and Mateles, R.I. (1968) "Measurement of heat evolution and correlation with oxygen consumption during microbial growth." *Biotechnology and Bioengineering*, 11, 269–281.
- Fortier, J.L., Reboul, B., Philip, P., Simard, M.A., Picker, P., and Jolicoeur, C. (1980) "Calorimetric studies of biodegradation processes in biological wastewater treatment." *Journal WPCF*, 52(1), 89–97.
- Ishikawa, Y. and Shoda, M. (1981) "Design and performance of a new microcalorimetric system for aerobic cultivation of microorganisms." *Biotechnology and Bioengineering*, 23, 2629–2640.
- Lapara, T. M., and Alleman, J. E. (1999) "Thermophilic aerobic biological wastewater treatment," *Wat. Res.*, **33**, 895.
- Luong, J.H.T. and Volesky, B. (1980) "Determination of the heat of some aerobic fermentations." *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 58, 497–504.
- Luong, J.H.T., Yerushalmi, L., and Volesky, B. (1983) "Estimating the maintenance energy and biomass concentration of *Saccharomyces cerevisiae* by continuous calorimetry." *Enzyme Microb. Technol.*, 5, 291–296.

- Marison, I.W. and von Stockar, U. (1986) "The application of a novel heat flux calorimeter for studying growth of *Escherichia coli* W. in aerobic batch culture." *Biotechnology and Bioengineering*, 28, 1780–1793.
- Marison, I.W., Liu, J.S., Ampuero, S., von Stockar, U., and Schenker, B. (1998) "Biological reaction calorimetry: development of high sensitive bio-calorimeters." *Thermochimica Acta*, 309, 157–173.
- Meir-Schneiders, M., Grosshans, U., Busch, C., and Eigenberger, G. (1995a) "Biocalorimetry supported analysis of fermentation processes." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 43, 431–439.
- Meier-Schneiders, M., Weikmann, W., Grosshans, C., Busch, C., and Steinbuchel, A. (1995b) "On-line analysis of *Alcaligenes eutrophus* fermentations." *Canadian Journal of Microbiology*, 41(Suppl. 1), 267–273.
- Meier-Schneiders, M., Schafer, F., Grosshans, U., and Busch, C. (1995c) "Impact of carbon dioxide evolution on the calorimetric monitoring of fermentations." *Thermochimica Acta*, 251, 85–97.
- Mou, D.G. and Cooney, C.L. (1976) "Application of dynamic calorimetry for monitoring fermentation process." *Biotechnology and Bioengineering*, 18, 1371–1392.
- Silman, R.W. (1986) "Anaerobic calorimetry of *Zymomonas mobilis* using a heat-flux sensor." *Biotechnology and Bioengineering*, 28, 1769–1773.
- USEPA (1990) "Autothermal thermophilic aerobic digestion of municipal wastewater sludge," *Environmental Regulations and Technology*, EPA/625/10-90/007.
- Van Kleeff, B.H.A., Kuenen, J.G., and Heijnen, J.J. (1993) "Continuous measurement of microbial heat production in laboratory fermentors." *Biotechnology and Bioengineering*, 41, 541–549.
- Van Kleeff, B.H.A., Kuenen, J.G., Honderd, G., and Heijnen, J.J. (1995) "Model-based optimization of equipment and control for heat flux measurements in a laboratory fermentor." *Biotechnology Progress*, 11, 525–532.
- Van Kleeff, B.H.A., Kuenen, J.G., and Heijnen, J.J. (1996) "Heat flux measurements for the fast monitoring of dynamic responses to glucose additions by yeasts that were subjected to different feeding regimes in continuous culture." *Biotechnology Progress*, 12, 510–518.
- Von Stockar, U. and Marison, I. W. (1989) "The use of calorimetry in biotechnology." *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 40, 93–136.
- Zaldivar, J. M., Hernandez, H., and Barcons, C. (1996) "Development of a mathematical model and a simulator for the analysis and optimization of batch reactors: experimental model characterization using a reaction calorimeter." *Thermochimica Acta*, 289, 267–302.

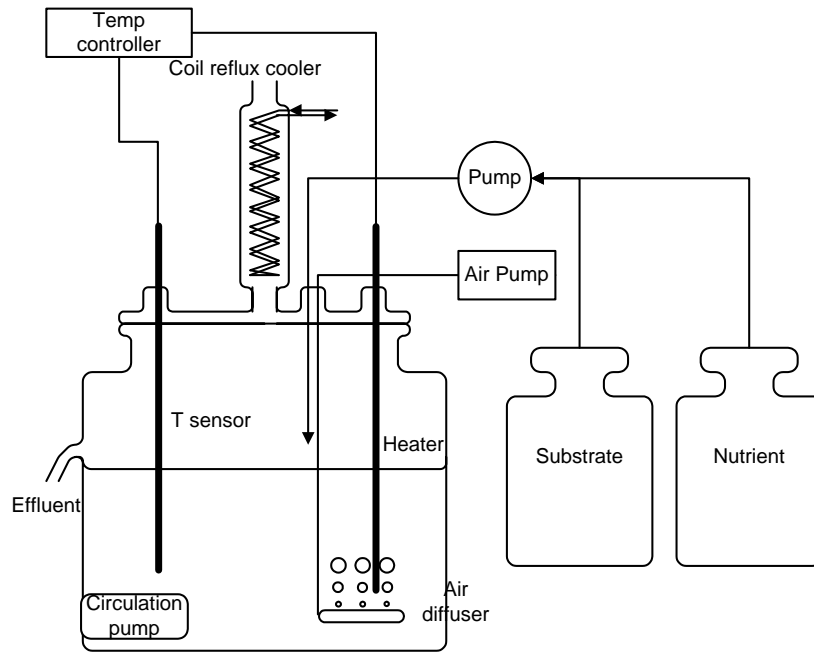


圖 1: 高溫喜氣好氧菌種馴化槽

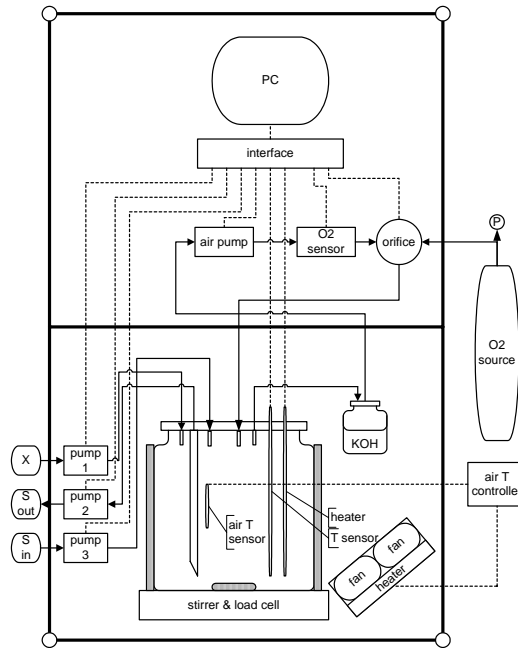


圖 2: ATAT 呼吸儀生物潛熱測定系統

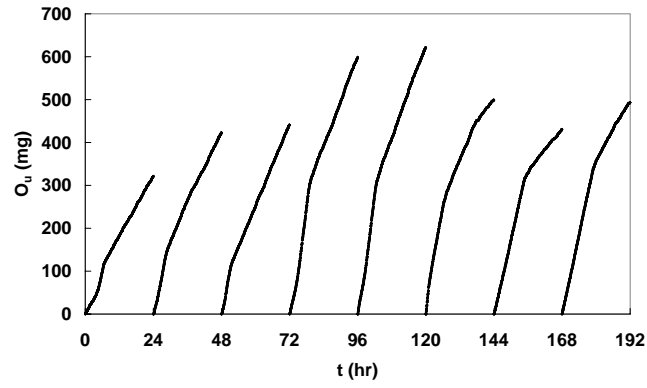


圖 3: 連續八天之 ATAT 攝氧曲線測定結果

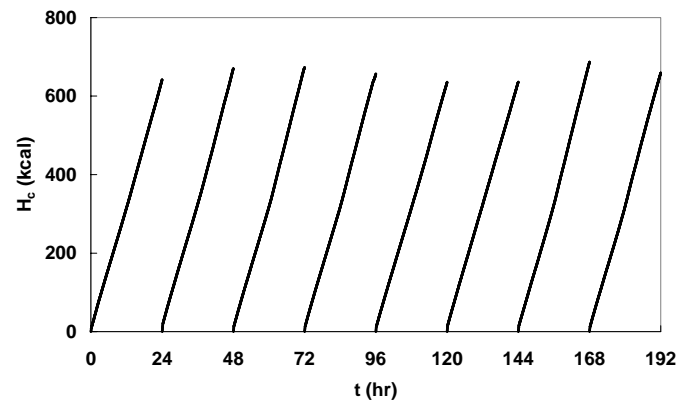


圖 4: 連續八天之 ATAT 補熱測定結果

表 1: 反應槽熱損通量即生物潛熱測定結果

Day	1	2	3	4	5	6	7	8	Average
J_t (kcal/min)	0.48	0.50	0.54	0.50	0.45	0.43	0.54	0.51	0.49
h_b (kcal/g BODr)	64	60	88	38	12	-3.2	66	46	46
R^2	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	1.000	1.000	0.999	

表 2 : 生物熱卡計熱預算分配模式與功能參數設計

	OLR-300		OLR-300	OLR-300	Remarks
	Sample test		Blank test	PLC temp	
1. Gain 1 - Heat compensation (Hc)					
Jc	100	W (J/s)	100	10	Reduce flux
Jc	1433	cal/min	1433	143	Design > Jt
t	24	hr	2	8	Shorten rxn time
tc	0.35	min/min	0.35	0.10	on time
Hc	722	kcal	60.4	6.9	
Cv	5.0	%	5.0	1.0	Design better control
dJc	72	cal/min	72	1.4	
dHc	36	kcal	3	0.1	
2. Loss 1 - Heat transfer (Ht)					
At	800	cm ²	800	800	
lt	0.3	cm	0.3	10.0	Design sufficient insulation
k	0.102	cal/oC-cm-min	0.102	0.102	for glass
Tt	55	oC	55	55	
Ta	53.2	oC	53.2	52.3	Design sufficient dT
Jt	-490	cal/min	-503	-22	
Ht	-705	kcal	-60.4	-10.6	Design for ~ 10 kcal
Cv	5	Lab =3~5%	5.0	1.0	
dJt	-24	cal/min	-25	-0.2	
dHt	-35	kcal	-3	-0.1	
3. Gain 2 - Biological heat (Hb)					
Sf	10	g/L COD	0	10	Design Hb > 10 kcal
SRT	10	days	10	10	
Vt	2	L	0	2	
Vf	0.2	L/feed	0	0.2	
E	90	%	0	90	
hb =	3500	cal/g COD	0	3500	
T	12	hr	10	8	
Avg Jb	8.8	cal/min	0.0	13.1	
max Jb	26.3	cal/min	0	39.4	f pk = 3
Hb	6.3	kcal	0.0	6.3	Design Hb < 10 kcal
Max OUR	450	mg/hr		675	Design < 600 ~4000
Net	23.684	kcal	0.006	2.605	Adjust for zero
Net/Total	3.36	%	0.01	24.63	Adjust for < 5 %
Total	705.0	kcal	60.4	10.6	
r	102.5	%	100.0	65.1	Design r < 50 ~60 %

