

超重力技術發展與應用

Higee Technology Development and Applications

許玲榕、林佳璋

Ling-Jung Hsu, Chia-Chang Lin

新發展之超重力技術係利用旋轉填充床讓氣液在高的重力場中接觸，以提升氣液質傳效率。此技術具有高質傳效率、小設備尺寸、高處理量、低能源耗用及低投資與操作成本等優點，因此，此技術已經被廣泛應用在蒸餾、氣提、吸收、臭氧氧化及奈米粉體合成等程序。本文主要介紹此技術之原理，並分享長庚大學超重力實驗室之研究成果，包含 VOCs 吸收、CO₂ 吸收及奈米粉體合成與應用等。

A novel Higee technology has been developed by the utilization of rotating packed beds, providing an intense contact between gas and liquid under a high gravity, thus leading to a higher gas-liquid mass transfer. This technology is characterized by its high mass transfer efficiency, small equipment size, high process capacity, low energy consumption, and low operating and capital costs. Therefore, this technology has been widely used to distillation, stripping, absorption, ozonation, and nanoparticles synthesis. This article focuses mainly on the principles of this technology. Some research results obtained by Higee Laboratory at Chang Gung University were also given, including VOCs absorption, CO₂ absorption, and fabrication and application of nanoparticles.

一、前言

「超重力」是指甚麼呢？這個聽起來很陌生，有點像重金屬搖滾感覺的字眼，具體來說是利用高速旋轉產生 100 倍以上的重力場，以提升化工製程中不同相間質傳效率的革命性技術，是一項新穎且潛力無窮的高效率化工製程技術。

在人類進入二十一世紀之際，科技的發展對人類經濟發展、生存環境改善及健康保障等都將有極大的貢獻，且對於傳統工業的轉型與升級和新興產業的形成有相當程度的影響。在化工製程中常使用的質傳原理能廣泛應用於化工、能源、環保及生醫等產業之製程，但受限於地球重力場強度的作用，

以致於使用質傳原理的傳統設備，為了達到一定的效率，導致設備體積龐大，且空間利用率和設備生產效率低，如此將提高建廠成本及操作費用，因此開發高效率及小體積之質傳設備成為重要的研究課題。

1976 年美國太空計畫徵求微重力場 (micro gravity) 試驗項目，英國 ICI 公司的新科學研究小組 Ramshaw 等人以理論研究獲得在微重力場下不利於蒸餾、吸收與氣提等程序，反而在超重力 (high gravity) 下有利於這些程序。朝著這一思路而進行的實驗研究證實理論判斷，因此要縮小傳統設備體積且強化質傳，就必須要突破重力的限制。由於地球重力無法增加，只能藉由高速旋轉以產

生超重力，於是超重力 (Higee，取“High G”之音) 技術蘊育而生。此創新的技術由英國 ICI 公司之 Ramshaw 和 Mallinson 在 1981 年首先發表專利，並將其應用於蒸餾和吸收程序⁽¹⁾。

超重力技術之設備主要使用一個轉筒，並在轉筒內裝入填充物，再利用馬達帶動轉筒高速旋轉，進而產生離心力也就是超重力，這類設備通常被稱之為旋轉填充床 (rotating packed bed)。由於轉筒在高速的轉動中會產生強大的離心力，使得液相被分散成三種主要型式，如孔隙流 (pore flow)、液滴流 (droplet flow) 及液膜流 (film flow) 等⁽²⁾，因而能夠提高相間的接觸面積，進而讓不同相間的物料作強制性接觸，質傳阻力也因此減小，如此能增強設備之質傳效率與處理量。

目前依據氣液接觸之方式，旋轉填充床可分為逆流式旋轉填充床與錯流式旋轉填充床，其結構如圖 1 與圖 2 所示。這兩種旋轉填充床的液體皆由中央的液體分布器噴入旋轉填充床內，主要差別在於逆流式旋轉填充床的氣體由旋轉填充床側邊進入，而錯流式旋轉填充床則是由旋轉填充床底部進入，兩者的氣體最後都由床體上方排出。

由於超重力技術具有相當高的質傳效率，因此其所延伸的特性有以下幾項：(1) 設備尺寸小；(2)

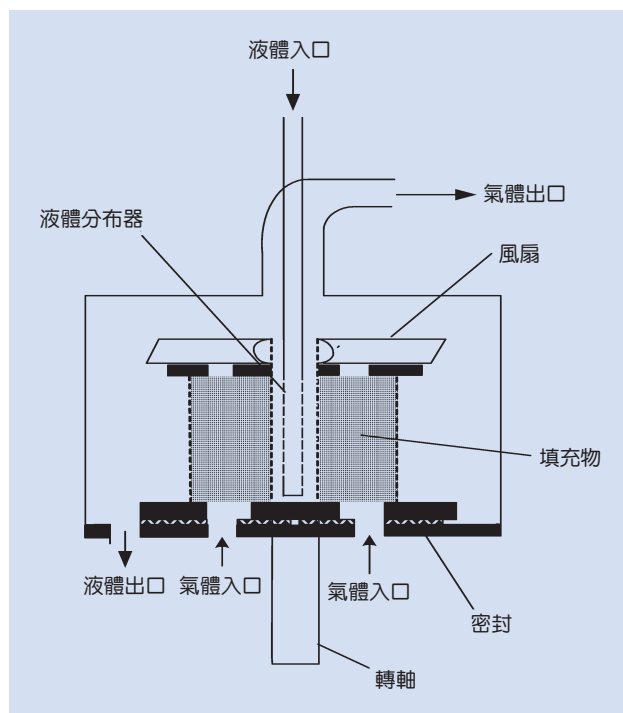


圖 2. 錯流式旋轉填充床結構圖。

極大地強化質傳過程；(3) 物料停留時間極短；(4) 氣體通過之壓降與傳統設備相近；(5) 便於操作；(6) 運轉維護與檢修方便；(7) 可任意方向安裝；(8) 可安裝於移動物體上 (如艦艇、飛行器及海上平台)；(9) 可快速而均勻地微觀混合⁽³⁾。由以上可以得知超重力技術可以應用於處理特殊物料如熱敏性物料、昂貴物料及有毒物料。除此之外，目前超重力技術廣泛地使用在氣液接觸程序，如蒸餾⁽⁴⁾、氣提⁽⁵⁻⁶⁾、揮發性有機物 (volatile organic compounds, VOCs) 吸收⁽⁷⁻¹³⁾、CO₂ 吸收⁽¹⁴⁻¹⁸⁾、臭氧吸收⁽¹⁹⁻²⁰⁾、臭氧氧化⁽²¹⁾ 及奈米粉體合成⁽²²⁾ 等。本文主要介紹長庚大學超重力實驗室近幾年所研發的成果，如 VOCs 吸收、CO₂ 吸收及奈米粉體合成與應用。

二、VOCs 吸收的超重力技術

工業上常使用揮發性有機物 (VOCs) 作為溶劑或洗劑，這些使用過後的 VOCs 會經由空氣或廢水傳播到大氣中，再經由呼吸作用被人類或動物吸入體內，直接對我們的健康造成傷害。除此之外，VOCs 亦會經由廢水流入河川最後流到大海裡，若

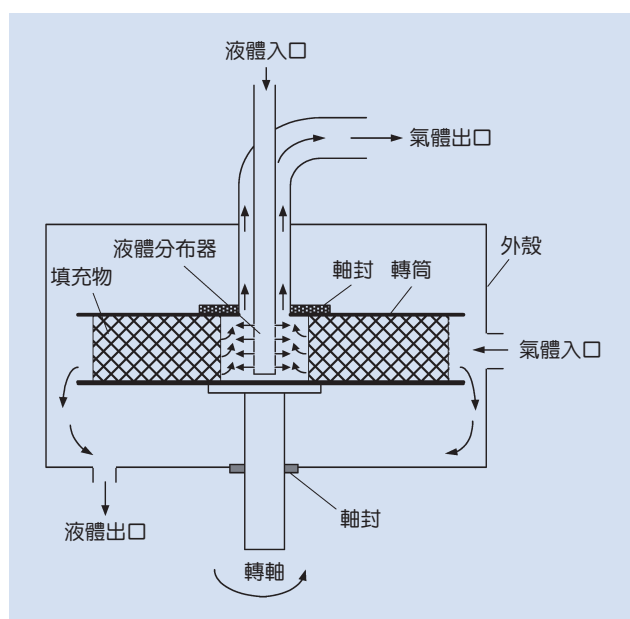


圖 1. 逆流式旋轉填充床結構圖。

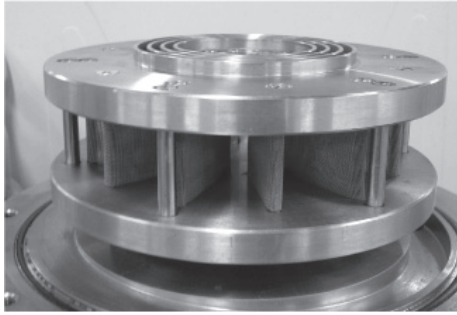


圖 3. 葉片型旋轉填充床構造圖。

是被植物或水中的生物所吸收，也會造成植物的死亡，對整體生態造成嚴重的影響。因此，政府對此制定相關的法令，以管控 VOCs 的排放濃度與排放總量，所以許多研究者積極地開發有效率及低成本之 VOCs 去除方法如熱焚化⁽²³⁻²⁴⁾、吸收⁽²⁴⁻²⁶⁾、冷凝^(24, 27)、吸附^(24, 27) 及生物處理^(24, 28) 等，其中吸收法為一種可連續操作、耗能小及成本低之有效控制 VOCs 的方法。

由於超重力技術可使氣液之間的接觸面積大幅地增加，使得吸收率增加，因此利用超重力技術吸收 VOCs 會比傳統填充塔更有效地去除 VOCs。以下研究是利用超重力技術吸收 VOCs 之成果，都是使用葉片型旋轉填充床作為吸收 VOCs 之設備，其實際構造如圖 3 所示。

首先使用水作為吸收劑吸收不同 VOCs，

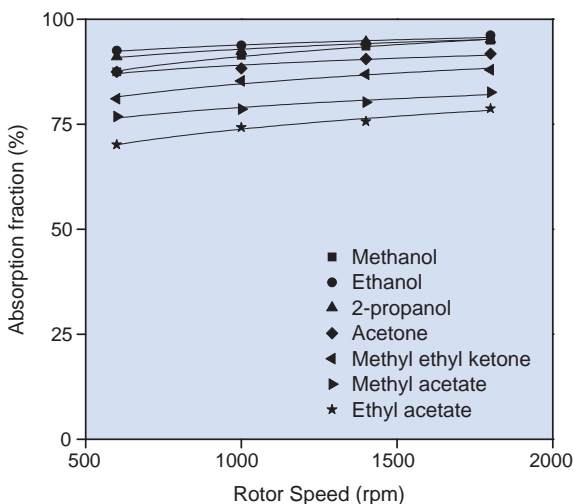


圖 4. 轉速對 VOCs 去除率之影響 (氣體流量：20 L/min、液體流量：0.65 L/min)⁽³⁰⁾。

VOCs 所使用的種類有甲醇、乙醇、異丙醇、丙酮、丁酮、乙酸甲酯、乙酸乙酯共七種⁽²⁹⁻³⁰⁾。研究結果發現，VOCs 去除率會隨著轉速及液體流量的增加而增大，如圖 4 與圖 5 所示；隨著氣體流量的增加而減小，如圖 6 所示；溶解度愈高的 VOCs 去除率愈高，在相同的操作條件下 VOCs 去除率：醇類 > 酮類 > 酯類。七種 VOCs 在氣體流量 5 L/min、液體流量 0.65 L/min 及轉速 1800 rpm 下皆有最大去除率，分別如下：甲醇 98.1%、乙醇 99.3%、異丙醇 98.5%、丙酮 98.2%、丁酮 97.6%、乙酸甲酯 94.5%、乙酸乙酯 95.2%。

由於文獻中⁽⁷⁻¹²⁾ 多使用水作為 VOCs 的吸收劑以探討吸收效率，但實際應用若是以水吸收 VOCs，必定會增加廢水量，將會降低廢水處理廠之效率，因此我們以廢水為吸收劑，採用鹽類水溶液作為模擬廢水，探討在不同吸收劑下 (水、碳酸鈉水溶液及硫酸鈉水溶液)，各項操作條件對甲醇去除率之影響⁽³⁰⁾。結果顯示，氣相質傳係數 ($K_G a$) 會隨著轉速、液體流量及氣體流量的增加而增大；甲醇去除率隨著轉速及液體流量的增加而上升，隨著氣體流量的增加而減小。再者，由於水加入鹽類會造成亨利常數增加，進而導致去除率變差，如圖 7 所示。因此，仍以水之甲醇去除率為最高，其中在氣體流量 20 L/min、液體流量 0.65 L/min 及轉速 1800 rpm 之操作條件下，水之甲醇去除率為 94.9%。

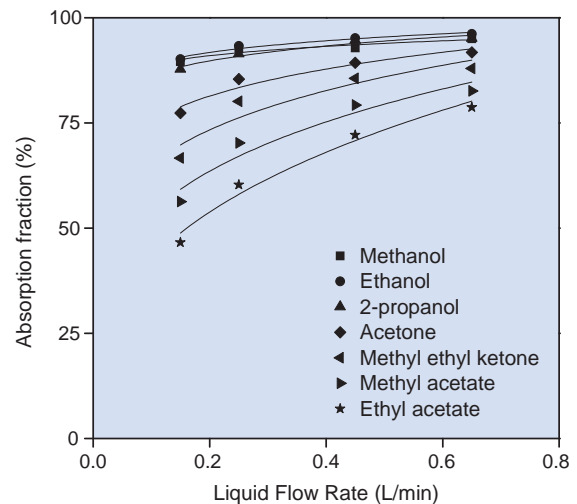


圖 5. 液體流量對 VOCs 去除率之影響 (氣體流量：20 L/min、轉速：1800 rpm)⁽³⁰⁾。

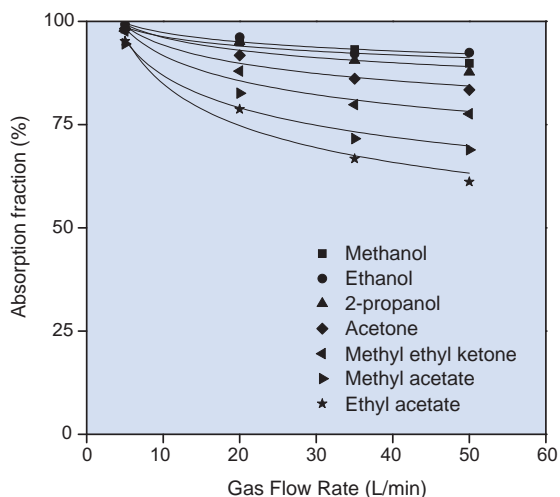


圖 6. 氣體流量對 VOCs 去除率之影響 (液體流量：0.65 L/min、轉速：1800 rpm)⁽³⁰⁾。

由以上可以得知，利用超重力技術吸收 VOCs 是一項有效控制 VOCs 的方法，其中以水吸收 VOCs 最有效率，但是以水吸收 VOCs 會造成廢水量增多進而導致處理成本增加，因此直接以廢水吸收 VOCs 便不會額外造成廢水處理的困難。但是由於廢水之組成相當複雜且以廢水當作吸收劑將降低 VOCs 去除率，因此如何有效地利用廢水成為當前的一大挑戰。

三、CO₂ 吸收的超重力技術

隨著世界上各地工業化發展，人們大量燃燒使用煤炭、石油及天然氣等石化燃料，也排放大量的溫室氣體二氧化碳，使得兩極冰山融化、海平面上升及各地氣候異常，全球因而陷入嚴重的暖化問題。目前世界各國對於溫室氣體的排放皆有相關法律管制，除了管制排放之外，許多研究者也試圖減少已排放之二氧化碳。目前二氧化碳回收的方法可約略分為物理法和化學法，由於物理法主要在高壓低溫條件下操作，需要消耗較多的能量，因此在工業上以化學法較常被使用。化學法通常使用傳統填充塔進行二氧化碳之化學吸收，但傳統填充塔需要較龐大的設備以增進吸收效率，若是改成使用旋轉填充床則可以縮減設備大小，進而降低成本。以下介紹本實驗室利用旋轉填充床吸收二氧化碳之結

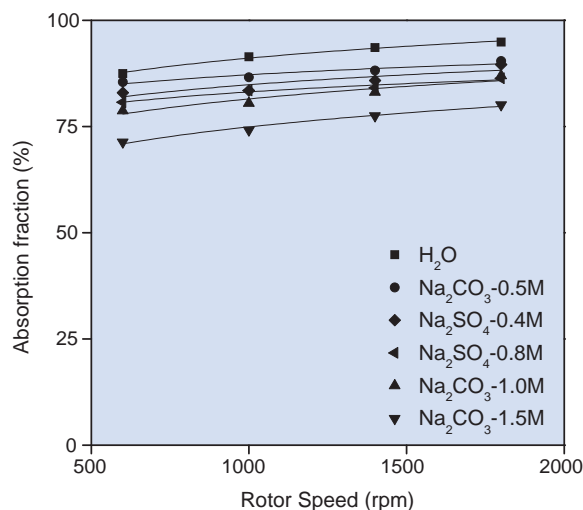


圖 7. 吸收劑對 VOCs 去除率之影響⁽³⁰⁾。

果，使用的吸收劑有氫氧化鈉、單乙醇胺 (MEA) 和 2-胺基-2-甲基-1-丙醇 (AMP)、二次乙亞胺 (PZ) 及混合醇胺水溶液等，討論各種操作參數對 CO₂ 去除率的影響。

本實驗室先使用單一吸收劑如 NaOH、MEA 及 AMP 水溶液在錯流式旋轉填充床 (如圖 8 所示) 中吸收二氧化碳⁽³¹⁾，結果發現氣相質傳係數 ($K_G a$) 會隨著轉速、氣體流量、液體流量及吸收劑濃度的增加而增大，但會隨著二氧化碳濃度的增加而減小。而 CO₂ 去除率會隨著轉速及液體流量的增加而增大，但隨著氣體流量及二氧化碳濃度的增加而減小。CO₂ 去除率以 MEA 最佳，其次為氫氧化鈉，最差的是 AMP。整體而言，三種吸收劑在高轉速及高液體流量下，有較高之 CO₂ 去除率，其中去除率最差的 AMP 為 85%，去除率最好的 MEA 則高達 98%。

使用 MEA、PZ/MEA 及 AMP/MEA 水溶液在錯流式旋轉填充床中吸收二氧化碳⁽³²⁻³³⁾，部分結果如表 1 所示。從此表可以得知，含有 PZ 之水溶液有助於二氧化碳的吸收。再者，CO₂ 去除率會隨轉速及液體流量的增加而增大，但隨著氣體流量的增加而減小。三種吸收劑在高轉速及高液體流量下，皆有較高的 CO₂ 去除率，例如：在轉速為 1613 rpm、液體流量為 0.54 L/min 及氣體流量為 9.7 L/min 之下，CO₂ 去除率皆可達到 95% 以上。除此之外，CO₂ 去除率亦會隨吸收劑溫度及填充物軸向



圖 8. 錯流式旋轉填充床。

高度的增加而增大，然而 CO_2 去除率卻不會受到氣體溫度之影響。

除了使用錯流式旋轉填充床外，本實驗室利用氫氧化鈉水溶液在葉片型旋轉填充床內吸收二氧化碳⁽³⁴⁾，結果氣相質傳係數 ($K_G a$) 會隨著轉速、氣體流量、液體流量及氫氧化鈉濃度的增加而增大，但隨二氧化碳濃度的增加而減小。 CO_2 去除率會隨轉速、液體流量及氫氧化鈉濃度的增加而增大，但隨著二氧化碳濃度及氣體流量的增加而減小，此吸收特性與錯流式旋轉填充床結果一致。

四、奈米粉體合成與應用的超重力技術

由於科技發展的進步，商品的規格日漸縮小，奈米科技成為發展重點。近年來奈米粉體的需求日

益增加，由於國內缺乏完善的製程，因此國內的奈米粉體目前仍主要仰賴進口，價格較昂貴。由於超重力技術強大的離心力可以增加反應的接觸面積，並加速反應速率，且反應物在設備內停留時間極短，可快速均勻地混合，因此使用超重力技術合成的奈米粉體具有形貌均一、粒徑小及粒徑分布窄之特性。以下介紹本實驗室利用超重力技術合成氫氧化鎂及氧化鋅奈米粉體之成果。

1. 奈米氫氧化鎂

本實驗室使用葉片型旋轉填充床進行氯化鎂和氫氧化鈉反應合成氫氧化鎂奈米粉體⁽³⁵⁾。研究結果顯示氫氧化鎂平均粒徑隨反應物濃度的增加而減小，但隨轉速的增加而增大。在反應物流量比為 1:1 時具有最佳之分散性，以及當轉速為 600 rpm 時可得到最小平均粒徑為 44.1 nm 的氫氧化鎂粉體，如圖 9 所示。圖 10 為所合成氫氧化鎂的粒徑分布圖，此顯示由超重力技術所合成的氫氧化鎂粉體具有粒徑分布窄之特性。

2. 奈米氧化鋅

本實驗室採用超重力技術結合反應沉澱法合成奈米氧化鋅，以不同鋅鹽 (氯化鋅、醋酸鋅、硝酸鋅、硫酸鋅) 與氫氧化鈉於旋轉填充床中合成氫氧化鋅，再經由煅燒使氫氧化鋅生成奈米氧化鋅⁽³⁶⁻³⁷⁾。研究結果顯示，不同鋅鹽反應物於適當的操作條件下，可形成不同形貌的奈米氧化鋅粉體，其結果如圖 11 所示。

操作條件			0.5 M MEA	0.1 M AMP 0.4 M MEA	0.1 M PZ 0.4 M MEA
液體流量 (L/min)	氣體流量 (L/min)	轉速 (rpm)	去除率 (%)	去除率 (%)	去除率 (%)
0.22	9.7	538	72.0	63.3	91.6
		1613	87.6	80.6	94.5
	68	538	22.0	18.9	33.0
		1613	27.9	26.8	46.8
0.54	9.7	538	93.4	89.7	95.1
		1613	95.2	95.1	97.1
	68	538	39.9	35.3	49.2
		1613	49.5	44.8	60.6

表 1. 吸收劑對 1% CO_2 去除率之影響⁽³²⁾。

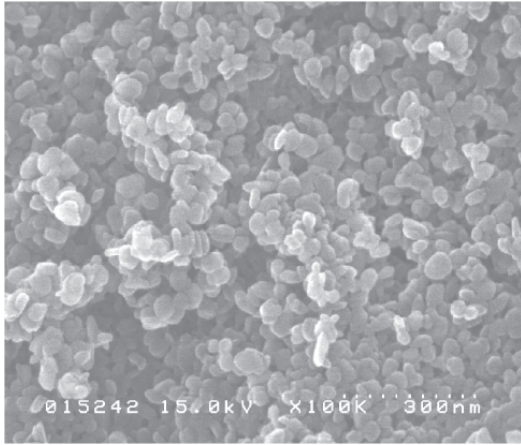


圖 9. 超重力技術所合成氫氧化鎂之 FE-SEM⁽³⁵⁾。

再者，當鋅鹽為氯化鋅時，氯化鋅與氫氧化鈉濃度分別為 0.8 M 與 1.6 M，流量皆為 0.5 L/min，轉速為 1980 rpm，再以 450 °C 煅燒 1 小時，可得到球狀之奈米氧化鋅，其具有最小之粒徑 (如圖 11(a) 所示) 與最窄之粒徑分布。

由以上結果證實以超重力技術合成之奈米粉體具有形貌均一、粒徑小及粒徑分布窄之特性。由於超重力技術可連續操作，且其所需要之設備空間小，更具有操作成本低及耗能低之特性，因此可以

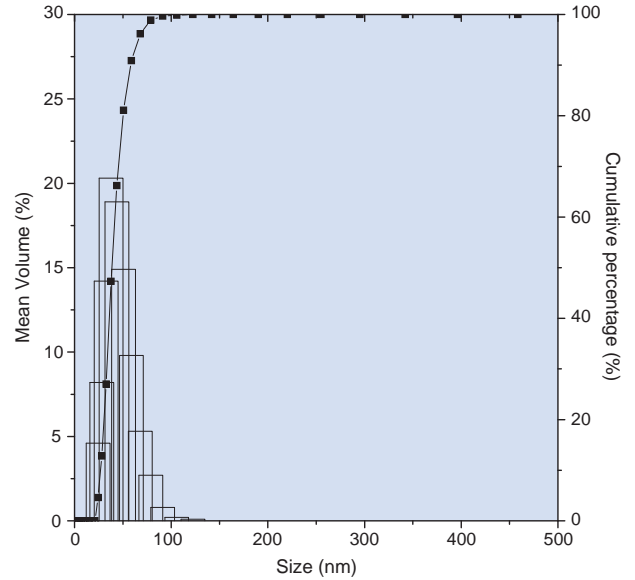


圖 10. 超重力技術所合成氫氧化鎂之粒徑分布⁽³⁵⁾。

利用超重力技術取代現有的工業技術以大量生產奈米粉體。

3. 奈米粉體應用

由於奈米氧化鋅有很好的光催化活性，可作為光催化氧化反應之光觸媒，因此利用超重力技術合

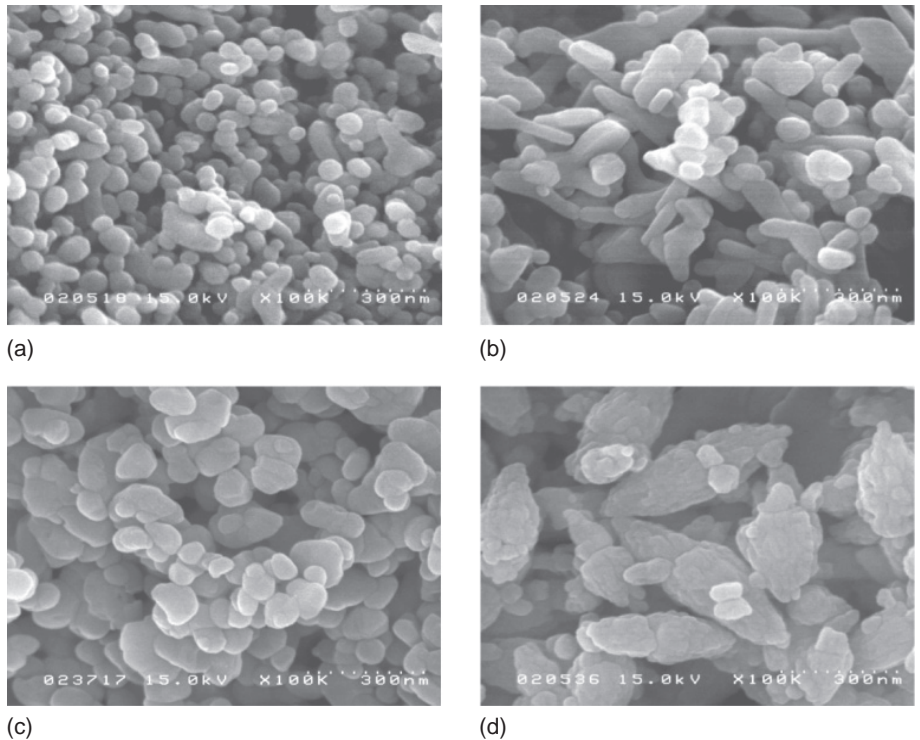


圖 11. 鋅鹽種類影響奈米氧化鋅之形貌：(a) $ZnCl_2$ ，(b) $Zn(CH_3COO)_2$ ，(c) $Zn(NO_3)_2$ ，(d) $ZnSO_4$ ⁽³⁶⁻³⁷⁾。

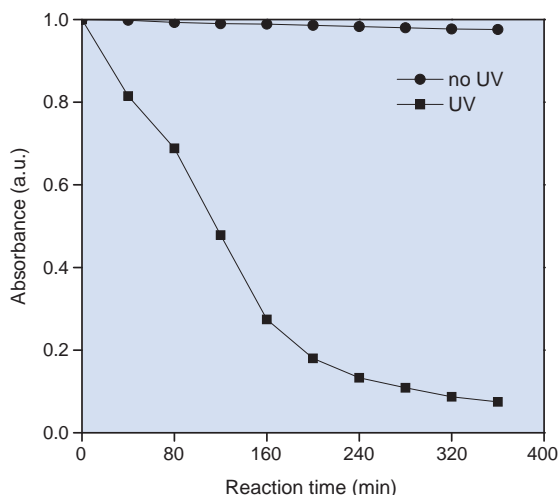


圖 12. 自製奈米氧化鋅光觸媒之光催化活性⁽³⁵⁾。

成之奈米氧化鋅作為光觸媒，使用 3 L 反應器進行光催化降解甲基橙⁽³⁶⁾，在甲基橙濃度為 10 ppm、奈米氧化鋅添加量為 0.5 g/L 及紫外光波長為 365 nm 下，其光催化反應結果如圖 12 所示。由此圖可以得知利用超重力技術合成之奈米氧化鋅作為光觸媒，其光催化降解甲基橙之去除率可高達 90%。

奈米氧化鋅不僅只用於光催化氧化反應，奈米氧化鋅亦可作為光催化還原反應之光觸媒，如還原二氧化碳。本實驗室使用以超重力技術合成之奈米氧化鋅進行光催化還原二氧化碳，並與商用之奈米氧化鋅和二氧化鈦之結果做比較⁽³⁸⁾。在反應溫度為 25 °C、pH 值為 6.0、反應前溶氧量為 0.08 mg/L、光觸媒添加量為 1.0 g/L 及紫外光波長為 365 nm 之操作條件下，所得到之光催化還原二氧化碳結果如圖 13 所示。由此圖可以得知，總有機碳 (total organic carbon, TOC) 會隨著反應時間的增加而增多，如此可以了解溶液中確實進行光催化還原反應。再者，藉由實驗數據的比較，可以發現商用奈米氧化鋅之光催化還原效果較二氧化鈦佳，而利用超重力技術合成之奈米氧化鋅，其光催化還原效果又高於商用奈米氧化鋅與二氧化鈦。

五、未來展望

在 VOCs 吸收部分，利用超重力技術結合水，可以獲得相當不錯的去除率，期許未來能克服直接

以廢水吸收 VOCs 之困難，並能以超重力技術合成之光觸媒，光催化降解水中 VOCs 為較無害之二氧化碳和水。在 CO₂ 吸收部分，超重力技術結合不同吸收劑，已經獲得不錯的去除率，期許未來能將空氣中二氧化碳還原成可用且無毒害之碳氫化合物。在奈米粉體合成部分，超重力技術已經成功地合成奈米氫氧化鎂及奈米氧化鋅，為了提高光催化反應之效率，期許日後能研發出高催化活性之光觸媒，甚至研發在一般光源下即有光催化活性之光觸媒。再者，本實驗室也將積極擴展光觸媒之應用領域，如降解水溶性高分子或環境賀爾蒙等。由於超重力技術應用非常廣泛，除了本文介紹的幾個部分外，超重力技術亦可應用於臭氧氧化、除塵、萃取及氣提等程序。因此，本實驗室除了改善目前研究之外，也會積極從事研究其他超重力技術之相關應用，並將相關研究之技術成果移轉給業界，持續朝商業化規模進行開發研究。

參考文獻

1. C. Ramshaw and R. H. Mallinson, U.S. Patent, 4,283,255 (1981).
2. J. R. Burns and C. Ramshaw, *Chem. Eng. Sci.*, **51**, 1347 (1996).
3. 郭錯, 柳松年, 陳建峰, 鄭冲, *化學進展*, **1**, 1 (1997).
4. C. C. Lin, T. J. Ho, and W. T. Liu, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **35**, 1298 (2002).
5. H. S. Liu, C. C. Lin, S. C. Wu, and H. W. Hsu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 3590 (1996).

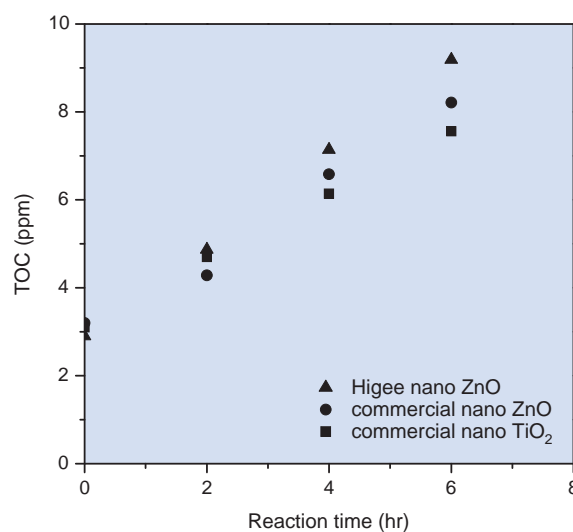


圖 13. 奈米氧化鋅光催化還原二氧化碳效率之比較。

6. C. C. Lin and W. T. Liu, *J. Ind. Eng. Chem.*, **12**, 455 (2006).
7. Y. S. Chen and H. S. Liu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, 1583 (2002).
8. C. C. Lin, T. Y. Wei, W. T. Liu, and K. P. Shen, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **37**, 1471 (2004).
9. C. C. Lin, T. Y. Wei, S. K. Hsu, and W. T. Liu, *Sep. Purif. Technol.*, **52**, 274 (2006).
10. C. C. Lin and G. S. Jain, *Sep. Purif. Technol.*, **54**, 51 (2007).
11. C. C. Lin and K. S. Chien, *Sep. Purif. Technol.*, **63**, 138 (2008).
12. C. C. Lin, Y. C. Lin, and K. S. Chien, *J. Ind. Eng. Chem.*, **15**, 813 (2009).
13. C. Y. Chiang, Y. S. Chen, M. S. Liang, F. L. Lin, C. Y. Tai, and H. S. Liu, *J. Taiw. Inst. Chem. Eng.*, **40**, 418 (2009).
14. C. C. Lin, W. T. Liu, and C. S. Tan, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **42**, 2381 (2003).
15. C. C. Lin and B. C. Chen, *J. Ind. Eng. Chem.*, **13**, 1083 (2007).
16. C. C. Lin and B. C. Chen, *J. Ind. Eng. Chem.*, **14**, 322 (2008).
17. C. C. Lin, B. C. Chen, Y. S. Chen, and S. K. Hsu, *Sep. Purif. Technol.*, **62**, 507 (2008).
18. C. C. Lin, Y. H. Lin, and C. S. Tan, *J. Hazard. Mater.*, **175**, 344 (2010).
19. C. C. Lin and Y. R. Su, *Sep. Purif. Technol.*, **61**, 311 (2008).
20. C. C. Lin, C. Y. Chao, M. Y. Liu, and Y. L. Lee, *J. Hazard. Mater.*, **167**, 1014 (2009).
21. C. C. Lin and W.T. Liu, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **78**, 138 (2003).
22. J. F. Chen, Y. H. Wang, F. Guo, X. M. Wang, and C. Zheng, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**, 948 (2000).
23. E. N. Ruddy and L. A. Carroll, *Chem. Eng. Prog.*, **89**, 28 (1993).
24. F. I. Khan and A. K. Ghoshal, *J. Loss Prev. Process. Ind.*, **13**, 527 (2000).
25. F. Lalanne, L. Malhautier, J. C. Roux, and J. L. Fanlo, *Bioresour. Technol.*, **99**, 1699 (2008).
26. F. Heymes, P. M. Demoustier, F. Charbit, J. L. Fanlo, and P. Moulin, *Chem. Eng. J.*, **115**, 225 (2006).
27. P. Dwivedi, V. Gaur, A. Sharma, and N. Verma, *Sep. Purif. Technol.*, **39**, 23 (2004).
28. I. Daubert, C. Lafforgue, C. Maranges, and C. Fonade, *Biotechnol. Prog.*, **17**, 1084 (2001).
29. 簡國興, 葉片型旋轉填充床應用於揮發性有機物吸收之研究, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2006).
30. 林榆喬, 葉片型旋轉填充床中亨利常數對揮發性有機物吸收影響之研究, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2009).
31. 陳柏志, 錯流式旋轉填充床應用於二氧化碳吸收之研究, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2007).
32. 陳詠文, 以混合醇胺溶液於錯流式旋轉填充床中吸收二氧化碳之研究, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2008).
33. 林俞宏, 在錯流式旋轉填充床中以醇胺溶液移除二氧化碳之研究, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2008).
34. 朱慶榮, 葉片型旋轉填充床應用於二氧化碳吸收之研究, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2009).
35. 蔡政華, 葉片型旋轉填充床的微觀混合特性和氫氧化鎂奈米粉體製備, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2008).
36. 林永杰, 旋轉填充床應用於合成氫氧化鋅與氧化鋅奈米粉體, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2008).
37. 尤易成, 不同鋅鹽於旋轉填充床合成氫氧化鋅與氧化鋅奈米粉體, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文 (2009).
38. 張境夫, 奈米氧化鋅光催化還原二氧化碳之可行性研究, 大專學生參與專題研究計畫研究成果報告 (2009).



許玲榕小姐為長庚大學化工與材料工程學士，現任長庚大學化工與材料工程學系研究助理。

Ling-Jung Hsu received her B.S. in chemical and materials engineering from Chang Gung University. She is currently a research assistant in the Department of Chemical and Materials Engineering at Chang Gung University.



林佳璋先生為國立台灣大學化學工程博士，現任長庚大學化工與材料工程學系副教授。

Chia-Chang Lin received his Ph.D. in chemical engineering from National Taiwan University. He is currently an associate professor in the Department of Chemical and Materials Engineering at Chang Gung University.