

富氧燃燒技術之應用與分析

張育誠^{1*} 吳國光² 焦鴻文² 簡國祥³ 歐陽湘⁴

摘 要

富氧燃燒技術一直被廣泛認為有效節能手段之一，在早期就已經使用於鋼鐵與玻璃工業中，作為快速升溫與提高產能之用，後續更施行於燃燒、製鋁、石化、造紙、水泥、紡織、食品或使用鍋爐作業之產業。本文提供相關製程加熱工業之富氧燃燒技術與措施，同時整理國際上富氧燃燒研究案例與說明該項技術之節能潛力。另外，文中亦介紹目前常見的製氧原理，包括：深冷處理法、變壓吸附法與薄膜分離法，同時針對這些方法之優缺點進行分析說明。

關鍵詞：富氧燃燒、液氧、製程加熱

1. 前 言

氧氣在標準狀態(STP)下，無色、無味、分子量32.0，可分為氣態氧與液態氧兩種。氣態氧比空氣略重，又稱GOX (gaseous oxygen)，液態氧則呈現淡藍色，比水略重，又稱LOX (liquid oxygen)。一般而言，氧氣為不可燃(nonflammable)之強氧化劑，可有效加速燃燒速率。

大多數工業加熱製程需要大量的能量，而通常能量的來源是藉由碳氫燃料燃燒過後產生。常見的碳氫燃料包含：天然氣、燃油、煤炭等。在燃燒過程中，燃料必須搭配空氣作為氧化劑，當採用比一般空氣中氧氣含量更高的比例時，將可獲得更劇烈的燃燒反應，此種燃燒手段則稱為富氧燃燒(oxygen-enriched combustion)。

早期富氧燃燒技術，經常應用於鋼鐵工業與玻璃工業中，主要原因在於富氧燃燒具備快

速升溫、產生高溫環境與高度的節能效果備受肯定。近年來，富氧燃燒更是二氧化碳捕獲必須採取的手段之一，雖然純氧燃燒限制了應用領域，但若改採用微富氧燃燒，使用條件門檻較低，且排氣量低、傳熱效果佳、節約能源、降低污染排放及較低的建置成本等優點，普遍可運用於各行業，未來將可提供廠家另一種節能技術的選擇。

2. 富氧燃燒技術原理

當石油或天然氣等化石燃料燃燒時，燃燒反應將空氣中的氧與碳氫燃料，形成水與二氧化碳，同時在此反應過程中釋放出熱量。而空氣是由21%氧氣，78%氮氣與1%的其他氣體所構成。在空氣與燃料進行燃燒時，化學惰性氣體氮氣稀釋了活性氧，並帶走大部分的熱量由煙囪排出。因此，若能增加燃燒中的氧氣濃度，則可降低排氣熱損失。一般而言，燃燒

¹財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所資深研究員

²工研院綠能所研究員

³工研院綠能所正研究員兼經理

⁴工研院綠能所正研究員

*通訊作者, 電話: 03-5916369, E-mail: Y.C.Chang@itri.org.tw

收到日期: 2014年10月14日

修正日期: 2015年06月07日

接受日期: 2015年08月20日

空氣中的氧濃度超過21%以上，稱之為富氧燃燒。

目前有關於二氧化碳捕捉(CO₂ capture)主要技術手段，包含燃燒後(post combustion)、燃燒前(pre combustion)與富氧燃燒(oxy-fuel combustion)。其中，富氧燃燒技術為最直接且有效的CO₂捕捉效率。在一般的燃燒過程中，將助燃空氣中的氧氣濃度提升，降低氮氣比例，則直接反應至燃燒後煙氣的二氧化碳生成濃度，以利後端捕捉效果。此外，富氧燃燒與一般燃燒主要特點在於，減少排氣熱損、增加爐內傳熱效果、減少理論空氣量、提升火焰溫度、降低排氣污染與增加鍋爐熱效率等(Wall, 2007)。

目前國際上現行的富氧燃燒技術，大致可分為三大類：純氧燃燒(oxy-fuel combustion)、空氣與氧氣燃燒(air-oxygen/fuel combustion)與微富氧燃燒(air enrichment)三種(Baukal, 1998)。純氧燃燒，火焰溫度高、溫度反應速率快且節能效果佳。由於此種技術燃燒所需的空氣，完全以100%氧氣濃度提供(圖1)，燃燒反應過後，僅會生成水與高濃度二氧化碳，為目前國際常見用來進行二氧化碳捕捉與封存過程中手段之一。在安全考量下，多數純氧燃燒採用擴散火焰方式，將氧氣與燃料分別由不同管線輸送，直接於燃燒器出口再進行混合。

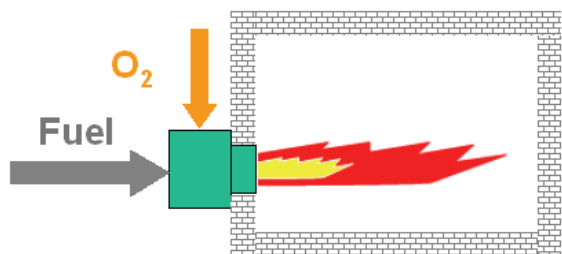


圖1 純氧燃燒示意圖(本研究繪製)

此外，純氧燃燒，火焰傳播速度快，火焰溫度高(絕熱火焰溫度2,800°C)，鍋爐本體材質與燃燒器(burner)必須經由特殊設計，不適合用於一般鍋爐，即使進行大幅改裝，也可能因為高溫環境導致燃燒室耐火材受損，而縮短設備

使用壽命。此外，純氧燃燒氧氣(pure oxygen)用量大，供氧方式多數需具備氧氣工廠為主。

空氣與氧氣燃燒，是將空氣與氧氣同時供應至燃燒器中，如圖2所示。可操作在較高的氧濃度，且氧氣成本又比純氧燃燒低。

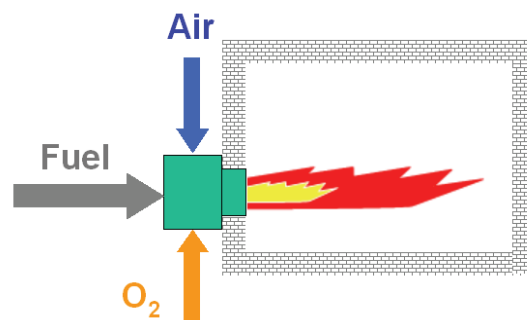


圖2 空氣與氧氣燃燒示意圖(本研究繪製)

微富氧燃燒，空氣與氧氣事先進行混合，如圖3所示，氧氣濃度約為30%左右，優點在於鍋爐爐體與燃燒機結構、材質無須特別改造，並且相較於前面兩種富氧燃燒技術，氧氣消耗量低，降低製氧成本，並可提高系統節能效率，對於一般蒸汽鍋爐皆可適用，使用條件較不受限。

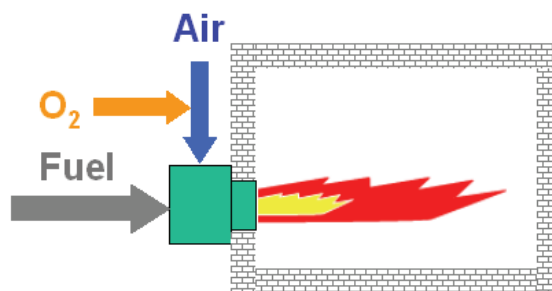


圖3 微富氧燃燒示意圖(本研究繪製)

富氧燃燒具備增加燃燒效率、改善整體污染排放、增加輻射熱通量、改善火焰穩定性與熱傳效果、提升生產效率、降低排氣量與提升火焰溫度等幾項特點，下列分項說明：

1. 增加燃燒效率：燃燒空氣中惰性氣體減少，降低爐體排氣總量，減少排氣熱損(heat loss)。
2. 改善整體污染排放：經由富氧系統與燃燒調

整過後，可改善氮氧化物(純氧燃燒)、一氧化碳、二氧化碳與碳氫化合物等排放總量。

3. 增加輻射熱通量：燃燒空氣中氧濃度增加，使得排氣中CO₂提升，而氣體輻射主要來自於CO₂，進而提升輻射熱通量。
4. 改善火焰穩定性與熱傳效果：當氧氣濃度增加，相對於燃燒空氣中活化氧被提升，有穩定火焰與提高溫度效果，對爐內有更佳的熱傳能力。
5. 提升生產效率：在相同的燃料消耗量下，火焰溫度提高，增加被加熱物的熱傳效率，提升產量減少煙氣排放量。
6. 降低排氣量：純氧燃燒比一般空氣燃燒，可減少約75%的排氣量(Kiriishi *et al.*, 2009)，並降低排氣熱損。
7. 提升火焰溫度：一般空氣燃燒絕熱火焰溫度(adiabatic flame temperature)約1,950°C，純氧燃燒絕熱火焰溫度則可高達2,800°C (Kiriishi *et al.*, 2009)。

目前富氧燃燒較可行的方式為微富氧燃燒，因為，多數傳統燃燒機皆可採用，設備不會有損毀問題，同時氧氣成本花費較少。

富氧燃燒除了可增加煙氣中二氧化碳的濃度，同時也具備節能減碳潛力，長久以來在國際間對於富氧燃燒，用以捕捉二氧化碳與節約能源之效果，皆表示肯定並持續技術發展。同時國外針對此燃燒技術議題不斷進行研究與探討，廣泛運用於各領域之間。

3. 富氧燃燒產業應用

富氧燃燒技術可適用於各種需要加熱製程工業中，用以提高燃燒效率。技術具備應用潛力範圍，包含：鋼鐵業、造紙業、石化業、水泥業、發電業等。已經成為商業化節能技術手段之一，以下針對國際間不同產業採取富氧燃燒技術之研究與應用狀況，進行說明。

3.1 鋼鐵業之工業加熱爐

2011年Wang *et al.* (2011)採用21-37%之富氧燃燒應用於鋼鐵廠之熱風爐(hot stove)中，進行節能潛力影響分析。當增加燃燒空氣中氧含量時，每增加100°C的高爐(blast furnace, BF)溫度，生產每噸鐵水約可減少9 kg的焦炭(coke)或9.15 kg的粉煤(pulverized coal, PCI)用量。此外，在固定高爐溫度條件之下，可減少熱風爐所需之焦爐氣(coke oven gas, COG)流量。

2010年Karimi and Saidi (2010)於一座41.1 MW燃燒量之推入式工業加熱爐(push type reheating furnace)，進行不同氧氣濃度(21%、30%、40%、50%、60%)富氧燃燒之鋼胚熱傳與能耗分析。其中，分別於三組不同位置(soak, top, bottom burner zone)之燃燒器中，進行排氣污染與燃料消耗量試驗。根據實驗結果顯示，當氧氣濃度由21%增加至60%時，每噸鋼胚(billet)所產生的一氧化氮排放量由5.9 kg降低至1.34 kg，其一氧化氮消滅率可達77%。此外，在加熱爐效率方面，則是由59%提升至71.7%。在燃料消耗部分，當氧氣濃度為60%時，每噸鋼胚所需消耗燃料量，由1.29 GJ降低至1.059 GJ。若以全年燃料消耗量來評估，加熱爐連續運轉340天，約可減少 5.9×10^6 m³之氣體燃料用量。

3.2 水泥業之熟料旋窯

於水泥製程中，熟料(clinker)生產主要是藉由旋窯(rotary kilns)設備進行燒成過程，因此需要使用大量的熱能。根據2009年德國Manickam *et al.* (2009)藉由3D數值模擬，針對燃燒粉煤之水泥旋窯，以不同比例之氧氣濃度，進行富氧燃燒研究分析。研究中數值模型是依據實廠水泥旋窯幾何尺寸縮小3倍(數值模型尺寸直徑1 m、長度20 m)，分別採用23%、40%、60%、100%之氧氣濃度進行燃燒分析。根據研究結果顯示，隨著燃燒空氣的氧氣濃度增加，有效提升燃燒反應，使得火焰長度縮短、強度變強。此外，隨著氧氣濃度增加(23%、40%、60%、100%)，窯內的火焰溫度由2,100 K提升至3,100

K。當提升一次空氣中氧氣濃度時，火焰長度特徵隨著氧氣濃度增加而縮短，同時在過剩空氣比例相同條件之下，燃燒空氣質量流率減少，對於火焰的輻射強度明顯增強。因此，富氧燃燒技術可提升火燄溫度與輻射強度，同時減少煙氣體積流量，將有助於水泥熟料製程產量效率提升(Leger and Friday, 2001；Tseng and Lohr, 2001)

此外，根據Murphy and Shadix (2006)與Bejarano and Levendis (2007)研究顯示，富氧燃燒對於粉煤顆粒，可增加去揮發速率(devolatilisation rate)、焦炭反應性、顆粒表面溫度與減少燃燼時間(burnout time)。

3.3 造紙業之石灰窯

在造紙製程中，苛化過程(causticization)將碳酸鈣(CaCO_3)分離出，再利用石灰窯進行加溫鍛燒約 $1,200^\circ\text{C}$ ，製成氧化鈣(CaO)與二氧化碳，其中氧化鈣再提供苛化過程作為回收使用。而富氧燃燒技術可適用於不同型式之高溫製程，用以提高燃燒效率。根據造紙能源最佳實務指引(best practice guidebook)，已將富氧燃燒技術列為製漿廠石灰窯(lime kiln oxygen enrichment)最佳實務技術之一(Wisconsin paper council, 2005)，技術方式是以氧氣與燃燒空氣混合後，進入石灰窯燃燒器中。根據Kramer *et al.* (2009)與McCubbin (1996)之研究顯示，採用富氧燃燒於石灰窯，節能率可達7%-12%同時已被證實其效益列為最佳實務技術。

3.4 石化業之硫磺工場

原油煉製過程中，為防止成品中含硫成份，必須將硫化氫氣體加以回收，然後藉由硫磺工廠(sulfur recovery unit, SRU)轉化成硫磺，再製作其他產品。而硫磺工廠在Claus製程中，採用富氧燃燒技術已成為一種商業化具經濟效益的方法(Rameshni, 2002)。以微富氧燃燒技術(<28%氧氣濃度)方式，約可提升20%-25%硫磺產量；中富氧燃燒技術(28%-45%氧氣濃度)方

式，則可提升75%硫磺產量，但是燃燒器必須採用特殊材質，以承受高溫之火焰溫度。當採用高富氧燃燒技術(>45%氧氣濃度)方式，將可提升150%的硫磺產量。

3.5 發電業之發電鍋爐

美國ALSTOM公司以 450 MW燃煤鍋爐進行空氣燃燒與富氧燃燒之比較分析。由實驗結果得知，在相同的燃燒量下，鍋爐效率可由傳統空氣燃燒的88.13%提升至富氧燃燒的90.47%。另外，可增加輻射熱傳，幅度介於6%-13%，但對流熱傳會降低，下降幅度介於1%-8%。整廠熱效率則由35%降低至23%，主要原因為空氣分離及 CO_2 壓縮液化時的能量消耗，但仍比傳統空氣燃燒加裝胺吸收法進行 CO_2 回收之熱效率來的高(Nsakala *et al.*, 2001)。Okawa *et al.* (1997)與Levy *et al.* (1981)研究顯示，使用混合高濃度 CO_2 的氧氣，進行燃燒能夠減少 NO_x 排放，其主要原因可能是CO大量生成，導致影響 NO_x 的聚合。

此外，美國Babcock & Wilcox公司Farzan *et al.* (2008)，曾經於俄亥俄州一座30 MW燃煤鍋爐測試廠(CEDF furnace)，進行煤炭富氧燃燒實驗。由於該廠為大型燃煤鍋爐，富氧燃燒所需之氧氣，以每天提供240噸氧氣工廠為主。其中，實驗項目包含：污染排放、火焰特徵與機組穩定性，同時為確認煤炭富氧燃燒效果，並施行100小時長時間富氧模式測試。根據實驗結果指出，採用煤炭富氧燃燒，火焰穩定性佳且火焰顏色較為明亮(輻射熱明顯提升)， NO_x 與 SO_2 排放明顯減少，特別是 NO_x 排放減少50%最為顯著。此外，鍋爐負載運轉穩定，且熱效率明顯提升。

3.6 環保業之廢棄物焚化爐

2015年Fu *et al.* (2015)，於一座每日可處理350噸垃圾廢棄物之鏈條式煤炭鍋爐中，採用富氧燃燒進行煤炭與廢棄物共同焚化(co-incineration)實驗。根據研究結果顯示，以一般

傳統燃燒方式，使用20%煤炭與廢棄物共燒，爐體排氣熱損失約為12%，等同於以25%富氧燃燒(未添加煤炭)。此外，垃圾廢棄物水份含量高，對於焚化作業而言，需進行乾燥前處理。研究顯示，廢棄物含水量達50%情況下，富氧燃燒燃燒溫度大約比傳統燃燒提升25%。富氧燃燒將有助於焚化作業之燃燒溫度提升與降低排氣熱損失。

2008年Chin *et al.* (2008)，則是藉由富氧燃燒應用於焚化爐處理廢水廠有機污泥(organic sludge)。有機污泥約佔30%的廢棄物比例，以22%氧氣濃度進行燃燒，評估爐膛溫度與污染排放物。研究結果顯示，採用富氧燃燒，使得爐體平均溫度可高於在一般操作模式，以主燃燒室而言，約可提升50°C以上，此外，未燃碳(unburned carbon)損失也可減少3.5 wt.%。此外，2000年韓國Choung *et al.* (2000)，曾經於旋轉式焚化爐，藉由富氧燃燒進行廢橡膠燃燒，協助爐內燃燒溫度之提升。

4. 製氧方式

富氧燃燒技術是將燃燒空氣(combustion air)中的氧氣濃度超過21%以上稱之。但是一般工廠沒有現成的製氧設備，因此在實施富氧燃燒時，可能會受制於氧氣來源問題。

一般而言，提供氧氣方式可分為氧氣鋼瓶與製氧系統。氧氣鋼瓶方式分別為氣態氧(GOX)或液態氧(LOX)鋼瓶供氧。在製氧系統方面，製氧方式種類繁多，目前應用方式可分三種，分別為深冷分離法(cryogenic distillation)、變壓吸附法(pressure swing adsorption, PSA)、薄膜分離法(membrane)，而以簡易度、耗能及操作成本上，薄膜分離法都是較為簡易且經濟，以下針對三種製氧方式進行分析說明。

(1) 變壓吸附法製氧方式：

變壓吸附是利用改變壓力，使得分子篩

在高壓下吸附，達到吸附平衡後，再降壓解吸，釋放出被吸附的氣體成份，使分子篩再生，換言之，即是將空氣中的氧、氮進行分離，而得到高濃度的氧氣。一般而言，變壓吸附除了分子篩作為吸附劑之外，還需搭配壓縮機達到改變壓力的效果，進行將空氣中氮氣與氧氣分離。變壓吸附製氧程序可分為以下四個步驟(Nsakala *et al.*, 2001)：進料加壓(feed pressurization)、產物釋放(product release)、減壓(depressurization)、低壓沖洗(low pressure purge)。在應用方面，一般工業燃燒設備所在環境條件不佳，空氣中粉塵相當多，PSA製氧系統對於源頭空氣的潔淨度要求相當嚴格，因此製氧系統的過濾元件除了要具備一定的規格外，維護與更換頻繁，因此可能造成工廠日常維護成本提高。

(2) 深冷法分離製氧方式：

將空氣壓縮，再膨脹降溫，冷卻後液化，然後利用氧氮的沸點溫度不同。在精餾塔內，透過高溫蒸汽與低溫液體兩者相互接觸後，蒸汽中較多的氧被冷凝出，經過多次接觸，達到把空氣分離為氧、氮為目的，即可得到高濃度之氧氣。不過此種方式，設備投資成本較高，並且設備所需置放空間較大，在一般的工業應用上為主要考量因素。

(3) 薄膜分離製氧方式：

利用高分子聚合物(富氧膜)薄膜來選擇過濾進料氣，而當空氣經過富氧膜時，其滲透透過膜壁不同的速率，在壓力差的驅動之下，滲透速率相對較快的氣體優先通過，而達到空氣中氧分離的效果(圖4)。

基本系統元件包含：過濾系統、鼓風機、富氧膜、真空泵浦等，其中過濾系統是將空氣中雜質及油氣進行前處理動作，藉由鼓風機將空氣送入富氧膜組件中。真空泵則是用來產生壓力差，抽取富氧空氣。如圖5與圖6所示，分別為減壓式與加壓式薄膜分離法製氧。

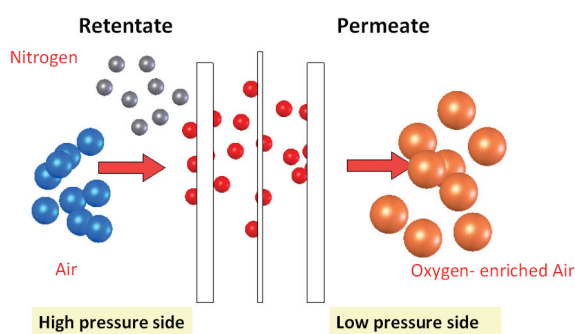


圖4 薄膜分離製氧原理(本研究繪製)

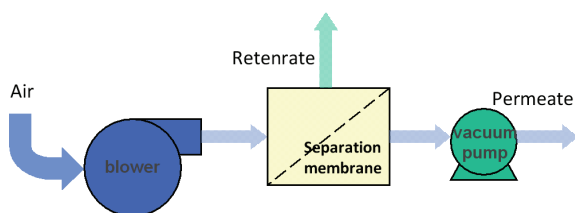


圖5 減壓式薄膜分離法製氧流程圖(本研究繪製)

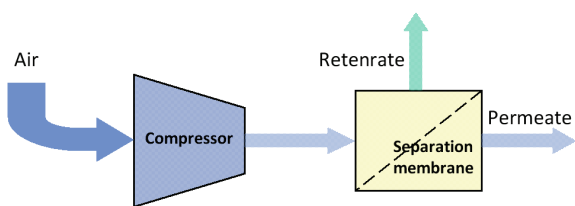


圖6 加壓式薄膜分離法製氧流程圖(本研究繪製)

空氣富氧膜主要有三種類型，分別為板式、中空纖維式與捲式。其中，捲式富氧膜濃度約可達27%-31%，中空式富氧膜濃度約30%-45%。近年來，富氧膜分離技術的發展，將可能成為一種製氧的替代方式。雖然目前的聚合物富氧膜無法大規模產製高濃度(95%)的氧氣，但在微富氧氣產製(40%以下氧氣濃度)相較於一般製氧技術，是具有較低成本與操作簡易的競爭力。其中，根據Bhide與Matson研究證實指出，富氧膜產製氧氣技術，氧氣濃度可達到25-40%，同時每日連續產量可達10噸以上(Okawa *et al.*, 1997與Levy *et al.*, 1981)。

薄膜分離製氧方式若要達到更高的製氧濃度，則對必針對富氧膜材質進行改善，而氣體通過富氧膜時，其中將氣體分離的效果，主

要與氣體種類、膜的孔隙尺寸有關。假設膜的孔隙尺寸小於氣體的自由平均路徑(mean free path)時，則對流現象將會被分子流(Knudsen diffusion)所取代。

Knudsen氣體分子流定義為氣體分子進行兩次碰撞後，所行經的路徑稱之氣體平均自由路徑，定義為 λ ：

$$\lambda = \frac{3\eta}{2p} \sqrt{\frac{\pi RT}{2m}}$$

其中， η ：氣體的黏度、 p ：壓力、 R ：理想氣體常數、 m ：為分子重量、 T ：溫度。

當膜的孔隙尺寸小於氣體的自由平均路徑時，氣體分子流動型態為Knudsen流，氣體通量(J)則為：

$$J = \frac{4r(p_h - p_l)}{3lRT} \sqrt{\frac{2RT}{\pi m}}$$

m ：為氣體分子重量、 r ：孔隙的半徑、 l ：孔隙的長度、 p_h ：上游壓力側、 p_l ：下流壓力側。

反之，當膜的孔隙尺寸大於氣體自由平均路徑時，將產生對流現象，則氣體分離現象無法產生。因此，富氧膜的滲透性(permeability)與滲透選擇性(selectivity)，將是決定氧氣濃度與產製過程是否更具經濟的關鍵要素(Farzan *et al.*, 2008)。

以上說明主要針對變壓吸附法、深冷分離法與薄膜分離法三種製氧方式，簡易比較分析如下：

深冷分離法初期建置規模相當大，需投入大量的建置成本，除非工廠本身有大量的氧氣需求，否則並不適用於富氧燃燒；利用變壓吸附法製氧，其氧氣產出量大、濃度高，設備成本降低於深冷分離法。不過因為氧氣濃度高，除非以空氣稀釋，否則僅適用於純氧燃燒，不適合使用在一般傳統燃燒機。

此外，燃燒系統中皆有升降載(turn-down)需求，利用PSA製氧系統與風車結合的型式，

對於系統升降載控制十分困難，換言之，則需更改原有設備的控制方式。採用薄膜分離法製氧方式，氧氣濃度低、產量小，其氧氣濃度非常適用於微富氧燃燒，但其氧氣產出量小，應用在微富氧燃燒會有供氣不足的情況。不過薄膜製氧系統的空氣來源為風車(送風機)，而PSA製氧系統的空氣來源為空壓機，故薄膜製氧系統耗電明顯小於PSA製氧系統。

富氧燃燒空氣經常被使用於天然氣或煤炭氣化燃燒中，現今多數的製氧技術主要是以深冷蒸餾法與變壓吸附法兩種傳統製氧方式，不過以上兩種製氧技術的能源成本較高，換言之，需投入的二次能源當量佔投入產出一定的比例。

5. 結 論

富氧燃燒技術一直是被視為可有效提升能源效率的方法之一，根據美國能源局曾指出，能源密集型的工業應用富氧燃燒技術，可具有減少三分之二的熱量損失排入大氣中的節能潛力。目前富氧燃燒技術為一種新興的燃燒技術，並在世界各國蓬勃發展。

主要是因為富氧燃燒在節約能源、減少排煙量、提升產能、減少污染排放與碳捕捉等皆有明顯效益。因此，目前國外仍持續不斷進行多方的測試與研究，並且，當燃燒空氣中氧氣濃度於30%以下時，燃燒機不需變更主體結構，可直接使用，在建置成本考量上更是一大誘因。

參考文獻

- Baukal, C. E., 1998, Oxygen-enriched combustion, CRC Press, New York.
- Bejarano, P. A., Y. A. Levendis, 2007, Combustion of coal chars in oxygen-enriched atmosphere, Combustion Science and Technology, 179, 1569-1587.
- Choung, J. W., Han, I. H., Son, S. S., 2000, Effect of oxygen enrichment in waste rubber incineration using rotary-kiln incinerator. Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society, 17, 994-1000.
- Chin, S., Jurng, J., Lee, J., Hur, J. H., 2008, Oxygen-enriched air for co-incineration of organic sludges with municipal solid waste: A pilot plant experiment, Waste Manag., 28, 2684-2689.
- Farzan, H., McDonald, D. K., McCauley, K. J., 2008, Oxy-coal combustion pilot, IEAGHG International oxy-combustion network, Babcock & Wilcox, Yokohama, Japan, Mar. 5-6, 2008.
- Fu, Z., Zhang, S., Li, X., Shao, J., Wnag, K., Chen, H., 2015, MSW oxy-enriched incineration technology applied in China: Combustion temperature, flue gas loss and economic considerations, Waste Manag., 38, 149-156.
- Karimi, H. J., Saidi, M. H., 2010, Heat transfer and energy analysis of a pusher type reheating furnace using oxygen enhanced air for combustion, Journal of Iron and Steel Research, 17(4), 12-17.
- Kiriishi, K., Fujimine, T., Hayakawa, A., 2009, High efficiency furnace with oxy-fuel combustion and zero-emission by CO₂ recovery, Proceedings of 24th World Gas Conference, Oct. 2009, Buenos Aires, Argentina.
- Kramer, K.J., Eric Masanet, Tengfang Xu, and Ernst Worrell, 2009, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry (Report No. LBNL-2268E), Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, Oct. 2009. Retrieved from <http://www.energystar.gov/ia/business/industry/>

- downloads/Pulp_and_Paper_Energy_Guide.pdf.
- Leger, C. B., Friday, J. G., 2001, Oxygen enrichment for cement kiln firing. IEEE.
- Levy, J. M., Chan, L. K., Sarofim, A. F., 1981, 18th International Symposium on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh, PA.
- Manickam, B., Dinkelacker, F., Lobe, T., Tertychnyy, M., 2009, Enriched oxygen combustion simulation for rotary kiln application, Proceedings of the European Combustion Meeting.
- McCubbin, N., 1996, Numerous recovery options offer solutions for mill effluent closure, Pulp & Paper Magazine, Mar. 1996. Retrieved from http://www.risiinfo.com/db_area/archive/p_p_mag/1996/9603/96030131.htm.
- Murphy, J. J., C. R. Shadix, 2006, Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments, Combustion and Flame, 144, 710-729.
- Nsakala, N. Y., Marion, J., Bozzuto, C., Liljedahl, G., Palkes, M., Vogel, D., 2001, Engineering feasibility of CO₂ capture on an existing us coal-fired power plant, First national conference on carbon sequestration, Washington DC, May 14-17, 2001.
- Okawa, M., Kimura, N., Kiga, T., 1997, The characteristic of pulverized coal combustion in the system of O₂/CO₂ combustion for CO₂ recovery, ASPACC, 543-546.
- Rameshni M., 2002, Cost effective options to expand SRU capacity using oxygen, Sulfur Recovery Symposium, WorleyParsons resources & energy, May 6-10, 2002.
- Tseng, H., Lohr, J. W., 2001, Oxygen enrichment. International Cement Review.
- Wall, T. F., 2007, Combustion processes for carbon capture, Proceedings of the Combustion Institute, 31, 31-47.
- Wang, C., Jarlsson, J., Hooey, L., Boden, A., 2011, Application of oxygen enrichment in hot stove and its potential influences on the energy system at an integrated steel plant, World Renewable Energy Congress 2011, Sweden, 8-13, May 2011, Linkoping, Sweden.
- Wisconsin paper council, Pulp & paper industry energy best practice guidebook, Focus on Energy, May 2005.

Application and Analysis of Oxygen-Enriched Combustion Technology

Yu-Cheng Chang^{1*} Kuo-Kuang Wu² Ho-Wen Chiao²
Kuo-Hsiang Chien³ Ou-yang Shoung⁴

ABSTRACT

Oxygen-enriched combustion technology has been widely recognized as one of the most effective methods in energy saving. It has been used early in the steel and iron, and glass-melting industries for rapid heating and increasing productivity. Due to the inherent advantages, oxygen-enriched combustion has recently gained popularity in the industrial combustion for aluminum, petroleum refining, pulp and paper, cement, textile, food processing, or in industries operated with boilers. This paper provides information related to the process heating for oxygen-enriched combustion technologies and industrial measures. In addition, this paper includes case studies from oxygen-enriched combustions around the world and the related information on energy saving potential when available. Also enclosed is an introduction of oxygen concentrators including cryogenic distillation, pressure swing adsorption, and membrane. Advantages and disadvantages for each method are analyzed and described.

Keywords: oxygen-enriched combustion, liquid oxygen, and process heating

¹ Senior Researcher, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

² Researcher, GEL, ITRI

³ Principal Researcher and Manager, GEL, ITRI

⁴ Principal Researcher, GEL, ITRI

* Corresponding Author, Phone: +886-3-5916369, E-mail: Y.C.Chang@itri.org.tw

Received Date: October 14, 2014

Revised Date: June 7, 2015

Accepted Date: August 20, 2015