

煤炭氣化複循環發電廠製造管線天然氣之製程最適研究

陳錫仁*、黃筱涵、黃詩芸、張惟盛
淡江大學化學工程與材料工程學系

國科會計畫編號：NSC 101-2221-E-032-051

摘要--近年來由於減核減碳的意識抬頭，未來天然氣勢必會成為主要的發電能源，由於在可見的未來，來自國外進口的台灣天然氣供應將呈現不穩定；因此，若能將管線天然氣製程融入先進的煤炭氣化複循環發電廠 (IGCC) 中，既可提供穩定、補充性質的天然氣供需系統，又能降低燃煤電廠的汙染問題。職是之故，本研究針對 IGCC 發電廠製造管線天然氣之程序暨其最適化進行系統整合設計，研究中以管線天然氣每小時產量 10,000 公斤與複循環動力發電量 12 MW 為設計目標，整個系統包含六個製程：(1) 煤炭前處理；(2) 煤炭氣化；(3) 酸氣處理；(4) 化學遷移轉化反應；(5) 甲烷化反應；(6) 複循環發電系統。最後再將程序最適化導入系統中，使得系統各變數間能達最佳化的結果。程序最適化分析後吾人可得：(1) 在 Bypass 比設定為 0.35 時兩階段化學遷移反應進料溫度分別為 290°C 與 180°C 下，可控制生成物 H₂/CO 莫耳比為 3；(2) 在進料 H₂/CO 莫耳比為 3 時，甲烷化反應操作溫度在 240°C 時，可得最大甲烷莫耳分率 0.936，沉積碳質量流量由 18,020 降為 16,220 kg/hr。論文中主要使用化工製程模擬軟體 Aspen Plus 進行程序合成與設計，最適化的部分則併入 Aspen Simulation Workbook (ASW) 軟體以進行程序整合。

關鍵字：煤炭氣化複循環發電、化學遷移反應、甲烷化反應、合成天然氣、程序最適化
論文編號：D-015

Abstract — Recently, there is no denying the fact that people like to be eco-friendly, which means being kind to the environment. Therefore, people have started to reduce the use of nuclear energy and coal-fired power for these years. Hence, natural gas will certainly be the main power resource in the future. Unfortunately, the supply of natural gas from foreign countries to Taiwan will be difficult in a foreseeable future. As a result, we have set the process of producing natural gas from an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant to solve this problem. Not only would it solve the issue of providing a constant, supplemental source of natural gas but it also would reduce the pollution of coal power. For this reason, the goal in this thesis which is researching IGCC power plant with the process of producing natural gas in optimization. Moreover, producing 10,000 kilogram per hour of natural gas and earning 12 MW power is our base-case design situation. There are six processes involved in the whole system: (1) raw coal pretreatment (2) coal gasification (3) acid gas treatment (4) shift reactions (5) methanation (6) integrated power system. In addition, we have set the process, which is optimum, into the IGCC system; it would use the resource from this system sufficiently. In other words, in this system, the efficiency will be better than before. After process optimization, we found: (1) By setting the bypass ratio as 0.35 and controlling the two-stage shift reaction feeding

temperatures at 290°C and 180°C, respectively, we are able to obtain a H₂/CO ratio of 3. (2) When controlling the H₂/CO ratio of 3 and maintaining the methanation reactor's temperature at 240°C, we are able to obtain a mole fraction of methane as 0.936 and reduce the deposit carbon from 18,020 to 16,220 kg/hr. In this research, simulation program Aspen Plus is used to carry out the process synthesis and design. Additionally, Aspen Simulation Workbook is utilized to implement the process optimization.

Keywords: Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC), Shift Reactions, Methanation, Syngas, Synthetic natural-gas (SNG), Process Optimization

一、前言

本研究進行「煤炭氣化複循環發電廠 (IGCC) 製造管線天然氣」之程序整合與最適化設計，其計畫架構如圖 1 所示。吾人首先利用化工軟體 Aspen Plus [1] 並依據設計經驗法則 (Heuristics) [2] 進行煤炭氣化複循環發電廠製造管線天然氣製程設計與模擬；其次，併入 Aspen Simulation Workbook 進行系統最適化設計。製程中包括：煤炭前處理技術、空氣分離區、煤炭氣化、煤氣淨化、酸氣處理、二氧化碳捕捉，化學遷移反應、甲烷化等單元，主要目標為整合 IGCC 與甲烷重組製程並加入最適化程序打造一個高效率與低污染的系統。淨煤發電技術之一的煤炭氣化複循環並非將煤炭直接燃燒，而是利用粉煤機將煤炭磨成粉狀後以乾式或濕式 (即水煤漿 Coal Slurry) 的狀態送入氣化爐 (Gasifier) 內，與空氣或來自空氣分離系統 (ASU, Air Separation Unit) 的氧氣在高溫、高壓下混合燃燒，而產生粗煤氣 (Raw Gas)，此粗煤氣再經燃氣淨化系統 (Gas Clean Up System) 除塵、除硫後即成為乾淨的合成氣 (Syngas)，淨化後的合成氣一部分送至複循環機組 (Combined Cycle)，先推動燃氣渦輪機發電，而渦輪機尾氣仍保持相當高的溫度，再推動蒸汽渦輪機發電，發電量為 12 MW。另一部分乾淨的合成氣經化學遷移轉化反應 (Shift Reaction)，將之轉化成適宜甲烷化 (Methanation) 的合成氣，再經純化與乾燥

(脫水)，即可得管線天然氣 (Pipeline Natural Gas, PNG)，供給工業或住家使用，產量為 10,000 kg/hr。

二、研究方法

2.1 煤炭前處理

本研究所選用的煤炭種類為煙煤[3]，粒徑主要分布於 1700~18000 μm 之間。前處理程序中包含三階段的煤炭壓研與三階段的煤炭篩析處理最後再送進乾燥處理，即可將煤炭粒徑處理至 360 μm 以下，圖 2 為煤炭前處理之程序流程。

2.2 煤炭氣化

經過前處理後的煤炭接著送進煤炭氣化區，煤炭氣化是指熱裂解生成的揮發物、碳與氣化劑發生的反應，氣化反應是在貧氧狀態下進行，因此煤炭氣化反應的主要產物為可燃性氣體合成氣 (CO、H₂、CH₄、CO₂ 等)，圖 3 為煤炭氣化之程序流程。

2.3 Rectisol 酸氣處理

Rectisol 酸氣處理方法是一種以甲醇為吸收劑的物理吸收法，主要利用甲醇在低溫高壓下對於硫化氫 (H₂S) 的吸收度高於二氧化碳 (CO₂) 的原理，藉此將兩種氣體分開。將煤炭氣化後的產物合成氣送進 Rectisol 製程，藉此將合成氣中的硫化氫與二氧化碳去除 [4]，圖 4 為 Rectisol 酸氣處理之程序流程。

2.4 複循環發電系統

燃氣-蒸汽複循環發電系統實質上是將燃氣渦輪機循環與蒸汽動力循環以一定的方式組合成一個整合型熱力循環之統稱。將 Rectisol 製程淨化後的合成氣與壓縮空氣與氮氣做為燃料在燃燒室中反應，生成的燃氣推動燃氣渦輪機做功發電，再將廢熱送進熱回收蒸汽鍋爐與低壓蒸汽加熱成中壓蒸汽，送進蒸汽動力系統做功發電，圖 5 為複循環發電系統之程序流程。

2.5 化學遷移反應

化學遷移反應主要功能是改變合成氣中一氧化碳 (CO) 與氫氣 (H₂) 的比例，將合成氣優質化，使其符合甲烷化前的需求，一般在製作管線天然氣時 H₂ 的含量要比 CO 多 3 倍以上，藉此能降低甲烷化之後，管線天然氣中沉積碳與二氧化碳 CO₂ 的含量。將 Rectisol 製程淨化後的合成氣經由旁通 (Bypass) 並配合高壓蒸汽與兩階段高低溫化學遷移反應器，進行合成氣優質化操作，圖 6 為化學遷移反應之程序流程。

2.6 甲烷化反應

甲烷化技術主要是使合成氣中的 H₂ 與 CO 在催化劑的作用下發生反應生成 CH₄。先將優質化後的合成氣去除部分水份，再送進甲烷化反應器，反應後再移除固體碳、二氧化碳及水，即獲得最後產物管線天然氣 (PNG) [3]，圖 7 為甲烷化反應之程序流程。

三、結果與討論

1. 原料：此程序進料物質為煤炭 (煙煤)，近料量為 100,000 kg/hr，近料條件為 25°C、1.013 bar，粒徑分佈為 1,700~18,000 μm。
2. 無煙煤與煙煤比較：由於無煙煤的含碳量高、揮發物、水份與灰分含量低，因此所需的氣化溫度較煙煤高，但也因為無煙煤的組成特性，使得生成物中一些不想要產物 (如 SO₂、H₂S、COS) 的產量較少。
3. 煤炭氣化：經過 ASW 分析之後，可的到氣化爐溫度為 1000°C 時，氧氣需要量為 53,920

kg/hr，當氣化爐溫度為 1200°C 時，氧氣則需要量為 66,840 kg/hr。

4. 化學遷移反應：經由 ASW 分析後，可發現化學遷移反應後的 H₂/CO Ratio 與近料時 Bypass 比例呈反比關係，並在 Bypass 比為 0.35 時可控制 H₂/CO Ratio 為 3。化學遷移反應器方面，反應器 R-101 與反應器 R-102 進料溫度階與 H₂/CO Ratio 呈反比，並在反應器 R-101 及反應器 R-102 進料溫度分別為 290°C 與 180°C 時，可控制 H₂/CO Ratio 為 3。

5. 甲烷化反應：由 ASW 分析後，可得知甲烷化反應器近料物流中 H₂/CO 莫耳比與甲烷化反應生成物中的沉積碳質量流率呈反比、與 CO₂ 莫耳流率、H₂ 莫耳流率、CH₄ 莫耳分率皆呈正比關係；另外，當甲烷化反應器操作溫度在 200~240°C 時與生成物 CH₄ 的濃度成正比，240~500°C 之反應器操作溫度則與反應生成物 CH₄ 的濃度成反比，在 240°C 時可得 CH₄ 最大莫耳分率 0.936。最後產物管線天然氣質量流率為 11,000 kg/hr。

6. 最適化操作與原始設計之比較整理於表 1。

四、參考文獻

- [1] Aspen Plus User's Guide: version 7.3, Aspen Tech., Boston, MA, U.S.A. (2011).
- [2] Bhattacharyya, D., R. Turton, and S. E. Zitney, "Steady-State Simulation and Optimization of an Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant with CO₂ Capture," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **50**, 1674-1690 (2011).
- [3] Seider, W. D., J. D. Seader, D. R. Lewin, and S. Widagdo, *Product and Process Design Principles Synthesis, Analysis and Evaluation*, 3rd ed., John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, N. J. (2010).
- [4] Apt, J., A. Newcomer, L. B. Lave, S. Douglas, L. M. Dunn, "An

Engineering-Economic Analysis of Syngas Storage,” National Energy Technology Laboratory, U.S.A. (2008).

- [5] Aspen Technology, Inc., “Rate-Based Model of the CO₂ Capture Process by MEOH using Aspen Plus” (2008).
- [6] Aspen Plus, *Physical Property Methods and Models Reference Manual*, Aspen Tech., Boston, MA, U.S.A. (2006).
- [7] Gross, J., and G. Sadowski, “Perturbed-Chain SAFT : An Equation of State Based on a Perturbation Theory for Chain Molecules,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 1244-1260 (2001).

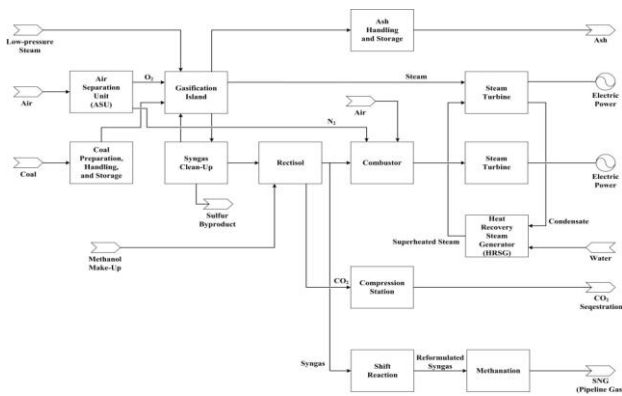


圖 1、煤炭氣化多目標 (含管線天然氣的量產) 最適化設計之系統整合方塊流程

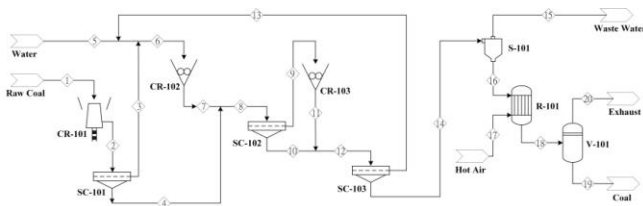


圖 2、煤炭前處理之程序流程

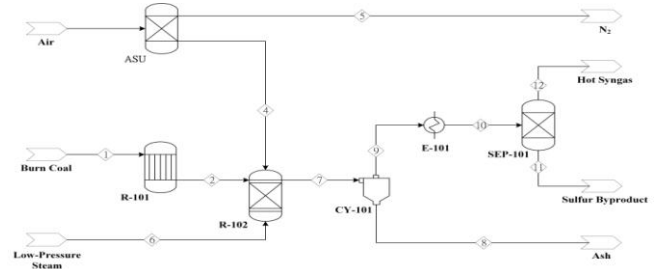


圖 3、煤炭氣化之程序流程

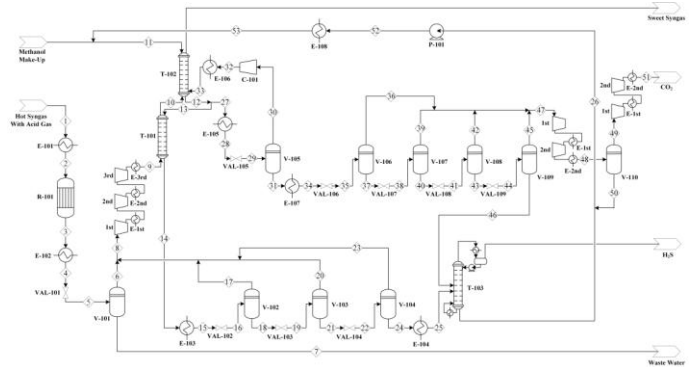


圖 4、Rectisol 酸氣處理之程序流程

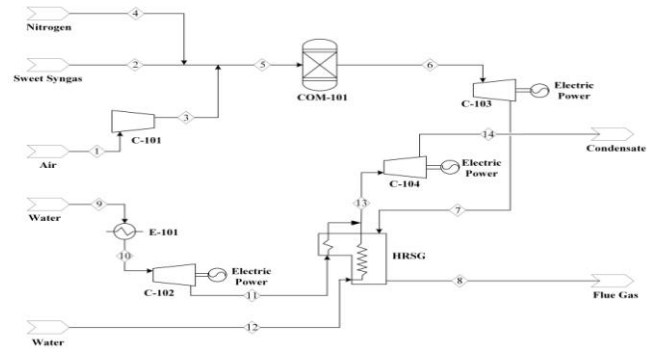


圖 5、複循環發電系統之程序流程

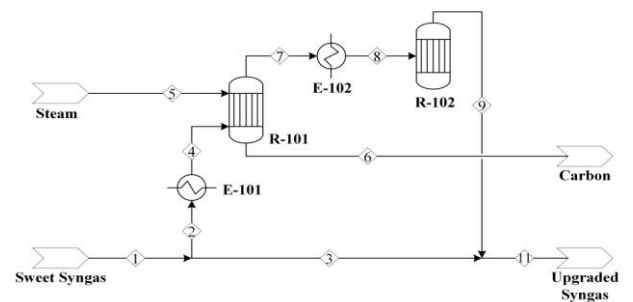


圖 6、化學遷移反應之程序流程

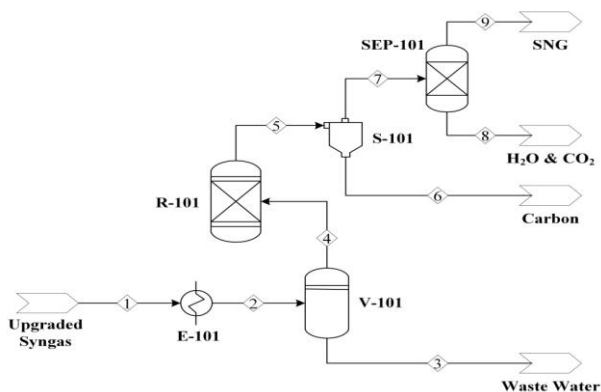


圖 7、甲烷化反應之程序流程

表 1、原始設計與最適設計之比較

設計參數與模擬結果	原始設計	最適設計
Bypass ratio	0.5	0.35
化學遷移反應器		
R-101 進料溫度 (°C)	320	290
化學遷移反應器		
R-102 進料溫度 (°C)	190	180
甲烷化反應器操作溫度 (°C)	300	240
甲烷化反應器進料		
H ₂ /CO 莫耳比	1.9	3
化學遷移反應器		
R-101 反應溫度 (°C)	544	525
化學遷移反應器		
R-102 反應溫度 (°C)	259	265
合成天然氣產量 (kg/hr)	10,200	11,000
CH ₄ 莫耳分率	0.91	0.936
CO ₂ 莫耳流率 (kmol/hr)	1,330	1,400
H ₂ 莫耳流率 (kmol/hr)	20.4	8.65
沉積碳質量流率 (kg/hr)	18,020	16,220