

美國地區天然氣管線混入氫氣之可行性與氫烷氣內燃機應用特性

洪劍長 工研院綠能所研究員

摘要

天然氣管線混入氫氣的方式，可利用既有天然氣管線，將再生能源產出的氫氣運送至全國各地，有助於短期間內擴大再生能源或氫能的應用。天然氣管線混入 5%-15% 低含量氫氣，對原本管線系統影響與應用設備的修改相當低。此外，使用氫烷氣作為內燃機引擎的替代燃料，有潛力降低 CO₂ 與其它有害物質的排放。研究結果顯示，內燃機系統只需微小修改，就能用多種混氫天然氣運轉，除了能減少 CO₂、CO 排放外，還可藉由提高空燃比減少 NO_x 排放。

一、緣起

風力能或太陽能之類的再生能源發電裝置，輸出電力容量取決於季節或天候條件。當日照或風力條件不佳時，其發電量偏低，需增加其它燃氣發電比重以滿足用電需求。當日照或風力條件良好且為離峰用電時段，可能發電量過剩，則系統需要進行儲能。蓄電池是最常見儲能方式，但其電力流失與壽命限制問題難以克服，不利提供再生能源之長時間儲存。

近年來，氫能的應用受到世界各國的重視。氫氣可以做為不同能源的共同載體，是有潛力的再生能源儲存方式。圖 1 是一種將電力轉換為燃氣(Power to gas, PtG)的能源儲存管理模式。將過剩的再生能源電力，用於電解水產生氫氣，則可長時間儲存。再者，還可將氫氣與二氧化碳進行合成反應產生甲烷，供入既有之天然氣系統。氫氣便於應用在建築物電力、備援發電與分散式社區電力之定置型燃料電池發電系統或各類型氫燃料電池應用。未來相關應用可逐步拓展其市場規模，電力轉換為氫氣或燃氣的能源管理模式，將是解決再生能源儲存與擴大其應用的可行方法。

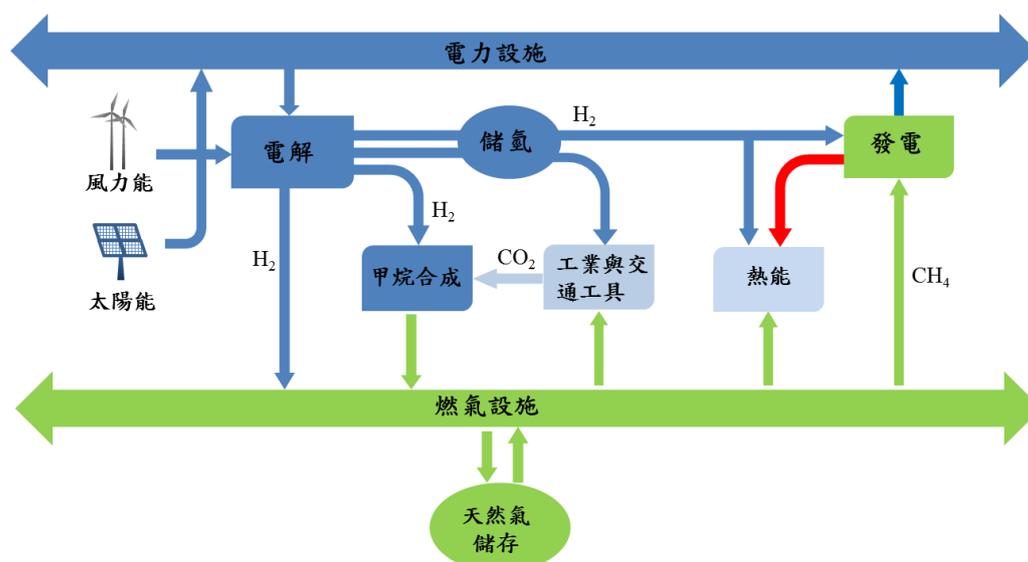


圖 1、再生能源電力轉換燃氣之能源儲存管理模式

未來氫能的發展，主要關鍵是供應氫氣的基礎設施普及化。鑑於現存天然氣管線系統已建置完備且遍及工業與家庭用戶，能源工程師提出天然氣管線混入氫氣的方式，利用現成天然氣管線系統，將再生能源產出的氫氣運送至全國各地。此方法可以在短期間內擴大氫能應用的廣

度，也促進提高再生能源的產量與用量。現有天然氣管線系統的優勢包括地理範圍廣大、交互連接性、大容量、維修與控制架構、安全程序、氣網管理、操作策略建置完善，且公共接受度廣泛。

美國天然氣管線系統已發展至大型管線系統互相連結，包含 244 萬哩管線，400 座地下儲存設施與 1,400 座壓縮站。美國天然氣供應鏈包含 4 類型輸送管線。集氣管線將各種來源天然氣帶至處理廠；輸送管線運送天然氣至都市入口，其輸送容量大且距離長；配氣管線有 2 類型幹管與用戶管線，運送氣體至當地用戶。地下儲氣設施之輸送管線直接連結大型工業用戶。儲氣設施用於因應供應量變動之緩衝調節供氣，以滿足冬天暖氣季節之尖峰需求。天然氣佔能源總使用量約 25%。若藉由天然氣管線混氫，賦予氫能這些優勢，可提升氫能源設施之普及性、長期性與整合性。

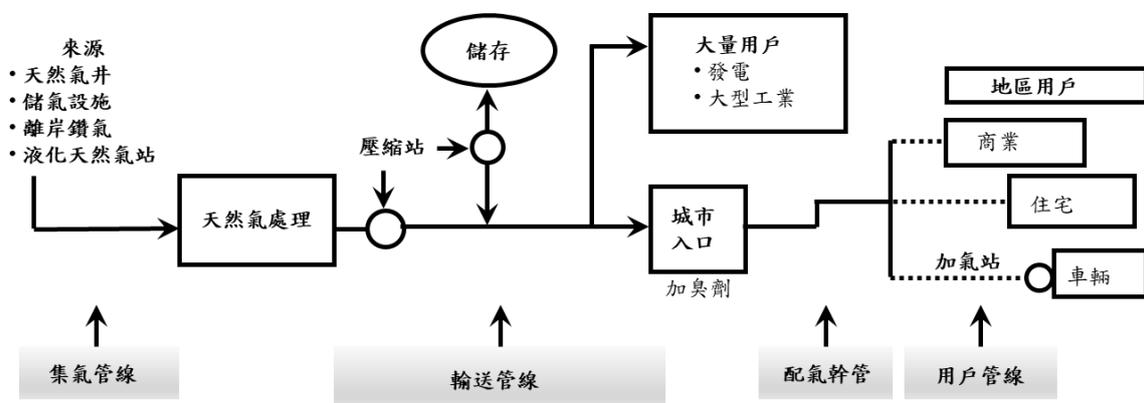


圖 2、天然氣供應鏈之 4 類型輸送管線

二、天然氣管線混氫的運作方式

天然氣管線混氫的作法是在管線上游混入氫氣而在下游將天然氣與氫氣分離。分離出來的氫氣供應燃料電池發電或氫能車輛加氫使用，天然氣則導回管線。混氫含量通常是 5%~15%，可減少大部分的負面影響或風險。在管線下游進行天然氣與氫氣分離(萃取氫氣)，已有成熟的技術可以做到，包括變壓吸附(PSA)法、分離膜純化法與電化學氫氣分離(氫氣泵)法。通常，含氫量愈高，氫氣分離萃取成本愈低。以 PSA 方法為例，假設氫氣回收率為 80%，管線壓力 300 psi，萃取 10% 氫氣的成本是 \$3.3~\$8.3/kg-H₂；萃取 20% 氫氣的成本降至 \$2.0~\$7.4/kg-H₂。萃取成本主要來自設備投資，其中壓縮步驟成本佔最主要部分。萃取分離出來的天然氣必須再壓縮導回管線。因為氫氣含量低，需要再壓縮的天然氣量很大，因此需用大容量壓縮機。

都市天然氣入口站位於高壓輸送管線至低壓配氣系統(也稱為輸送至配送管控傳輸站)之間。此處設施提供進行天然氣計量與減壓。因為是天然氣減壓操作所在，其壓力變化條件正可提供進行管線氣體萃取氫氣。分離後的天然氣以減壓狀態導回低壓配氣管線，不需再作壓縮，節省大量壓縮設備成本。若是在減壓站進行氫氣萃取，則天然氣無需再壓縮。氫氣萃取成本降低 6 到 11 倍(\$0.3~\$1.3/kg-H₂)。

三、天然氣管線混入氫氣的可行性

天然氣管線混入氫氣是否可行，相關因素包括混氫的利益、管線系統的鋪設範圍、應用設

備的影響、安全性、管線材質耐受性、系統管理、氣體洩漏以及萃取氫氣之效益等。

氣體洩漏將造成整體氣體損失以及經濟與安全顧慮。將近 100% 的美國天然氣輸送管線為直徑 4~48 吋的鋼管。約 96% 輸送管線為陰極披覆防蝕處理之鋼管。不同型態管線之使用材料如圖 2 所示。配氣管線主要用料是鋼與聚乙烯(PE)(分別為 47% 與 48%)。用戶管線尺寸通常為 0.5 吋~2 吋，以 PE(63%) 或鋼(33%) 製造。其它材質包括鑄鐵、與各類塑膠。管線洩漏成因，主要有 8 種模式。包括腐蝕、材料缺陷、自然力、開挖、其它外力、設備故障與操作不當等。氫分子比甲烷分子微小很多，因此經由管壁與接合處洩漏量較大。天然氣管線系統加入氫氣，會提高洩漏風險。但混氫量 20% 以下之用戶管線洩漏風險增加微小。用戶管線因其操作壓力遠低於配氣幹管，其氣體洩漏損失不明顯。

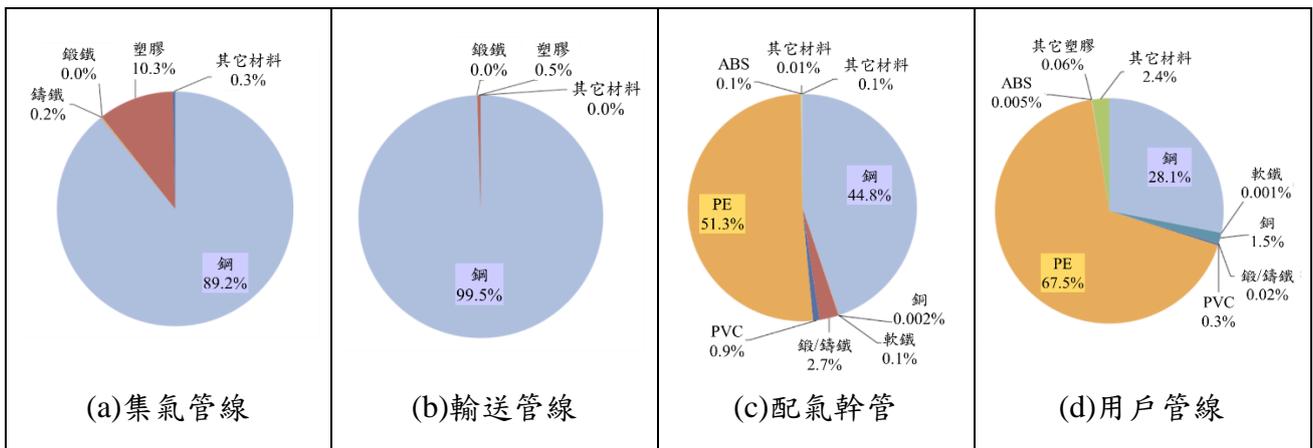


圖 3、集氣、輸送、配氣與用戶天然氣管線材料哩數百分比(PHMSA 2012)

可燃性氣體洩漏到外部，若未逸散稀釋而聚積高濃度，將有較高的爆炸風險。混氫天然氣的氣體聚積特性類似於純天然氣。一般而言，50% 以下混氫天然氣釋放至外界的聚積濃度只有微小程度提高。但是當混氫量超過 70% 時，聚積濃度增加明顯。混氫量 20% 以下之氣體在侷限通風空間爆炸之激烈程度增加平緩。混氫量高於 50% 情況，超壓顯著增加。若提供通風或減少空間堵塞，爆炸超壓可以有效減少。

應用設備影響方面，使用燃料的設備，諸如家用鍋爐/爐具、工業用或發電等設備，相關評估認為可以不作修改或僅微幅修改而使用混氫天然氣。一般燃料使用設備可接受混氫天然氣的含量範圍是 5%~20%。其可接受之最大混氫量，因各別條件而有所差異，包括天然氣成分、設備(或引擎)類型以及設備年份。研究評估認為，美國國內大部分現有設備在適當操作下，混氫量到達 28% 仍可安全使用。定置型燃氣引擎與燃氣渦輪則較不能接受含氫量變動。

四、氫烷氣內燃機應用特性

氫氣除了供應燃料電池發電之外，也可直接做為內燃機之燃料而產生動力輸出。但氫氣比燃油或天然氣更為易燃，實際運轉仍需在點火與流量控制上作少部份調整。在相同容積的內燃機氣缸內，純氫含有之能量較純天然氣少 8%，因此輸出動能會稍降低。內燃機使用混氫燃料主要優勢是可以用較高比例空氣進行運轉。研究機構曾使用各種成份混氫天然氣，對於機車引擎進行運轉試驗，探討空氣燃料混合比例(λ)與燃料成分對於內燃機性能與排放物的影響。

使用汽油燃料測得內燃機引擎最大輸出功率較純天然氣高約 20%。燃料較稀薄情況，混氫天然氣的輸出功率較高，如圖 3 所示。使用天然氣的內燃機會產生 CO₂，使用純氫燃料則 CO₂ 產出為零，兩者差異約 25%。引擎 CO₂ 排放量隨含氫量而呈現遞減關係，如圖 4 所示；而較高含氫量情況，通常 CO 產生量較低。氮氧化物(NO_x)的形成機制是內燃機的局部高溫狀態所致。因為氫氣燃點溫度高，因此混氫燃料將產生較高 NO_x 排放，如圖 4 所示。此外，混氫燃料可以在較稀薄燃料條件下進行燃燒而減少 NO_x 產生，但功率輸出會減少。

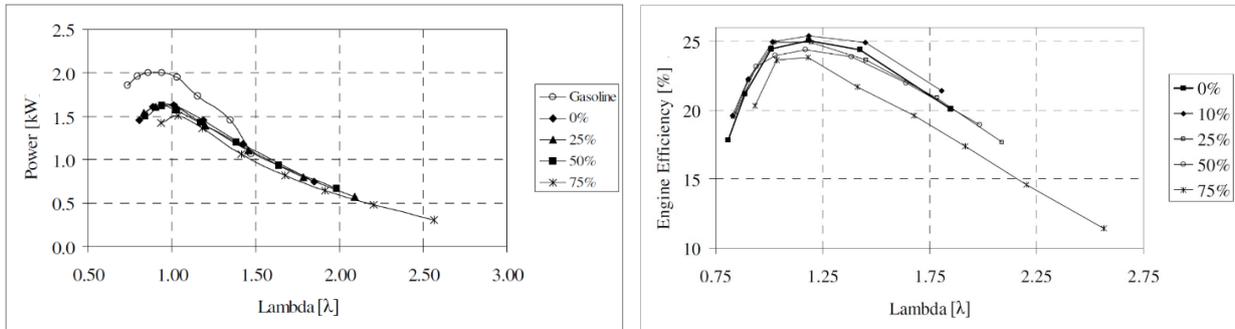


圖 3、內燃機使用不同含氫量的氫烷氣之輸出功率與效率對空氣燃料混合比(λ)的關係

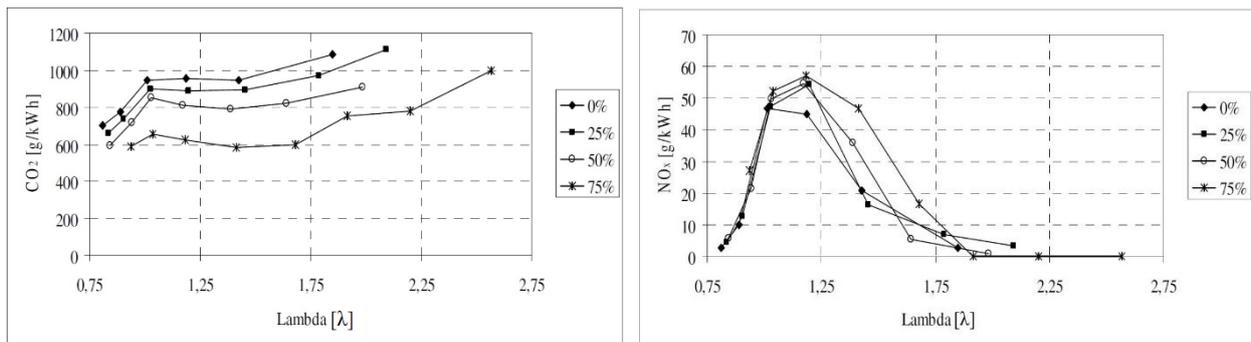


圖 4、內燃機使用不同含氫量的氫烷氣之 CO₂ 與 NO_x 產生量對於空氣燃料混合比(λ)的關係

五、結論

天然氣管線 5%-15% 低量混入氫氣可使得現存管線系統的修改減至極低。初步成本評估在減壓站萃取氫氣具有經濟效益。以壓降 300 至 30 psi 的減壓站而言，萃取含氫量 10% 的天然氣，其每公斤氫氣成本為 \$0.3-\$1.3 美元。內燃機使用不同成份混氫天然氣運轉，其空氣燃料比例與混氫量對於性能與排放物具有影響。相關研究顯示，內燃機系統只需微小修改，就可利用多種混氫天然氣運轉，且混入氫氣會使 CO₂、CO 排放減少，並助於使用高空氣混合比例運轉而減少 NO_x 排放量。

六、參考文獻

1. M. W. Melaina, O. Antonia, and M. Penev, "Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues", Technical Report, NREL/TP-5600-51995, March 2013.
2. Wouter Dalhuijsen, et. al., "Internal Combustion Engine Vehicle: Emissions and Performance Using Blends of Natural Gas and Hydrogen", 20076572 (JSAE), Society of Automotive Engineers of Japan, 2007.