

電子噴射式機車引擎使用富氫氣體輔助燃燒之研究

高實祥、陳智榮、石育岑、林克衛

財團法人車輛研究測試中心

盧昭暉

國立中興大學機械工程研究所

E-mail: g_s_s@artc.org.tw

摘要

本文利用電子噴射式機車引擎進行添加富氫氣體來進行研究。調整引擎之怠速 CO 調整值(COFPC), 藉以改變引擎噴油量來控制引擎在稀薄燃燒的狀態下進行測試。研究結果顯示, 在引擎低負載高轉速時, 添加富氫氣體具有提升扭力的效果, 亦可以降低引擎 BSCF。而在引擎 2/3 負載下, 調整 COFPC 值至 -50 時, 引擎出現不穩定狀態, 但添加富氫氣體後, 則能使引擎穩定運轉, 顯示富氫助燃之效益。在引擎污染排放方面, 調整 COFPC 值可以使引擎 CO 值降低, 但添加富氫氣體後, CO 值反而上升許多, 但與原始引擎條件相比, 富氫氣體對於 CO 的減量仍有效益。與許多文獻一致的是, 富氫氣體的添加對於 NOx 排放方面具有極高的減量效果。雖然, 富氫氣體的添加並不適用於引擎的所有操作條件, 但未來透過引擎電子噴射控制單元的調教與富氫氣體添加量、添加時機的設計, 將可以使引擎在最有效率與污染最低的狀態下運轉, 達到引擎省能與潔淨的目標。

關鍵詞: 富氫氣體、電子噴射機車引擎、稀薄燃燒

1. 前言

石油資源匱乏和世界環境問題是汽車工業面臨的兩大難題。隨著各種污染法規的提出, 汽、柴油的品質要求越來越高, 相對的成本也不斷提高。除此之外, 各國對石油需求不斷增加, 石油資源日益減少。另以污染方面來看, 在已開發國家中, 汽車排放約占大氣污染的 30%~60%, 已成為城市大氣環境惡化的主要污染源之一。因此, 各國政府都在積極地進行車用新能源的開發和應用研究。目前, 各國汽車替代燃料的技術雖有不同, 但目標都是預防石油燃料的枯竭和減少汽車排放對環境的污染。

全世界各地逐漸探知氫氣將是未來主要發展的再生能源。在美國與歐洲, 更認知到氫氣對於一個潔淨和安全的能源供應來說, 是一個長期解決方案。2003年初美國政府投資20億美元用於氫能源的研究開發。後又追加54億美元分五年支援氫能的開發與應用。並在2003年總統國情咨文中建議: 未來5年內, 政府每年撥出20億美元, 用於推動氫燃料內燃機的研製。除美國已制定國家氫能發展路線圖外, 日本、歐盟都制定了氫能發展規劃, 歐盟撥專款用於氫能和燃料電池的研發, 歐洲十

城市2003年已開始燃料電池公共汽車商業化的載客示範運行。而氫內燃機也持續在發展中, 主要有Ford、BMW、MAZDA等汽車公司。

氫燃料具有以下特點:

- (1) 氫氣單位質量低、熱值高, 約為汽油熱值的2.7倍, 但氫與空氣理論混合氣熱值只有 3.186 MJ/m^3 , 約低於汽油18%。
- (2) 可燃混合氣濃度範圍大, 氫引擎容易達到稀薄燃燒的條件, 提高燃料經濟性, 同時也可以降低最高燃燒溫度, 降低NOx的產生。
- (3) 自燃溫度較高, 氫的自燃溫度較天然氣和汽油來的高, 不容易產生爆震, 引擎可以使用較高的壓縮比, 相對就可以提高引擎的熱效率。這一個特性也決定了氫引擎難以像柴油引擎採用壓縮點火, 而必須使用火星塞點火。
- (4) 點火能量低, 雖然氫燃料自燃點比天然氣還有汽油來的高, 但所需的點火能量卻很低, 最小可以低到0.02 mJ。因此, 氫引擎工作時幾乎沒有失火(misfire)的問題。
- (5) 燃燒速度快, 氫燃燒反應是以連鎖反應進行, 火焰傳播速度快(2.91 m/s), 是汽油的7.72倍, 在引擎中燃燒時抗爆性比汽油好, 可以採用較高的壓縮比, 因此熱效率比燃燒汽油高。
- (6) 氫氣在空氣中的擴散係數很大, 氫氣的擴散係數是汽油的12倍, 因此比汽油更容易和空氣混合形成均勻的混合氣。但是, 高的擴散係數會有洩漏的問題。由於氫氣分子極小, 滲透性也很強, 對於儲存是非常大的難題。
- (7) 氫氣密度很低, 常溫常壓下, 氫氣的密度只有天然氣的1/8倍。對於車用燃料來說, 當車輛行駛里程一定, 則氫氣所需的儲氣桶就要比其他燃料來的多。
- (8) 有害物質排放少, 氫氣燃燒的主要產物是水, 不產生CO及HC, 但產生一定量的NOx。在稀薄燃燒狀態下, NOx排放量可以大大降低。同時因為氫氣火燄的淬冷距離比汽油小, 因此靠近缸壁亦可以燃燒的完全。

不過, 氫燃料引擎也有一些使用上缺點:

- (1) 20MPa下的壓縮氫氣能量只相當於同等體積下汽油燃料的5%, 因此燃氫引擎的行駛里程受到限制。
- (2) 燃氫引擎由於混合氣熱值下降和採用稀薄燃燒方式, 引擎功率輸出受到限制。
- (3) 著火所需能量低, 點火前的混合氣控制比較困難,

進氣管容易發生回火(back fire)現象。

- (4) 燃燒壓力高, 易於發生爆燃。
- (5) 理論空燃比下燃燒產生較高的壓力和溫度, NO_x排放高, 引擎振動大。
- (6) 增壓困難。
- (7) 傳熱損失相對較大。
- (8) 引擎功率低, 獲得同等功率要比傳統汽油引擎缸徑大40-60%, 進而帶來引擎轉速降低, 機械損失增加, 引擎抗爆能力下降。

由於車用氫燃料的生產、儲存、運輸與供應等預估還有很長的路要走, 因此不管是純氫引擎或是燃料電池車輛的發展也受到這些條件的影響, 而減緩了發展的脚步。為解決氫氣儲存與供應的問題, 逐漸有了重組器的發明, 以便可以直接使用現有碳氫燃料進行氫氣生產, 並直接供給車輛使用。但重組器所產生的氫氣純度無法給純氫引擎或燃料電池使用, 再加上純氫引擎與燃料電池車輛造價高昂, 目前尚無法令一般大眾接受, 所以, 乃有了結合現有傳統內燃機引擎與重組器產生富氫氣體來輔助內燃機提升效率與降低污染之研究。

而本文也就基於電漿重組器所產生的富氫氣體比例, 透過氣瓶的方式來模擬富氫氣體, 探討添加富氫氣體對於噴射式機車引擎性能與污染排放的影響。

2. 文獻回顧

除了純氫氣燃料引擎外, 氫氣也可以混合汽油或天然氣使用。汽油引擎摻加氫氣在許多試驗中都顯示, 在現有汽油引擎的結構小幅度變動、不變更燃燒控制策略的情況下, 當摻氫氣比例不大時, 由於氫氣具有火焰傳播速度快、著火界限寬的特性, 可使混合氣的著火延遲時間縮短, 以實現稀薄燃燒, 提高引擎的經濟性; 並可以使引擎排氣中的 HC 與 NO_x 含量大為降低, 改善污染排放。但摻氫比例有一最佳化值, 摻量過少無法發揮氫氣輔助的功能, 摻加太多則會有回火問題的產生。Tomohiro[1]等人以氫氣缸內直噴方式探討添加氫氣與 SI 引擎爆震(Knock)的相關性, 實驗結果顯示, 添加氫氣可以增加燃燒速度、縮短燃燒時間, 並且降低爆震的產生。Žiga Ivanič[2]等人利用電漿重組器產氫, 再將富氫氣體噴入進氣道中與汽油混合後進入汽缸輔助燃燒, 藉以探討在稀薄燃燒下與廢氣再循環(EGR)稀釋後, 富氫氣體對於 NO_x 排放量的影響。研究結果發現, 當氫氣含量約 30%時, 在循環變異(COV)小於 3%之下, 可使稀薄燃燒範圍延伸到 $\lambda=2.0$ 左右, 而廢氣再循環率(EGR rate)則可延伸到 45%。該研究也發現, 在氫氣 30%時, 配合稀薄燃燒($\lambda=1.8$ 以上時), NO_x 可以減少約 98%以上, 幾乎接近於零排放。2005 年, Joshua A. Goldwitz 與 John B. Heywood[3]曾探討火星塞點火引擎在稀薄燃燒下的最佳化燃燒狀態, 研究發現添加氫氣來輔助引擎燃燒可以增加引擎稀薄燃燒限制達 25%以上, 並探討添加氫氣對燃燒速度的影響。2006 年, 陳鈞琳[4]等人, 利用低溫甲醇電漿重組器產生富氫氣體, 並選擇 1800 c.c.之汽車引擎進行實驗, 結果顯示添加富氫氣體後引擎扭力在油門開度 10%時約增加 6%; HC 的排放量約減少 9%左右; 而 CO 則減少 3%, CO₂ 則減

少 5%。Edward J. Tully[5]等人探討使用電漿重組器產生之富氫氣體對汽油引擎稀薄燃燒下的特性, 研究結果發現, 電漿重組器產生富氫氣體輔助燃燒具有明顯降低油耗的潛力。整體效益最高點發生在理想重組分率 20%、VDP=1.66 時, 燃油轉換效率可提升 12.3%。在高稀薄燃燒下, NO_x 排放明顯下降。接近稀薄燃燒上限時, 可降低 99%; 最高效益時, NO_x 可降低 95%。當燃燒愈稀薄, 燃燒不完全的 HC 比例亦隨之增加, 在低稀薄燃燒下, 此比例與燃油成分及富氫氣體供應量無關; 而高稀薄燃燒時, 富氫氣體的添加則可略為降低燃燒不完全的 HC 比例。Hailin Li[6]等人曾利用單缸四行程之 CFR 引擎進行甲烷添加氫氣的研究, 改變引擎壓縮比進行 CH₄、CO、CO₂、NO_x、O₂ 等污染物的探討。甲烷添加氫氣會造成理論空燃比附近(0.89~1.0)NO_x 排放的些微改變, 稀薄燃燒時則使 NO_x 排放量增加的空燃比範圍變廣。NO_x 排放的峰值出現在稍稀薄燃燒時, 而低 NO_x 排放則可在超稀薄燃燒及燃燒延遲時達到。Verhelst 等人[7]使用 GM V8 454 火花點火引擎作為實驗引擎, 比較使用氫氣在化油器引擎和噴射引擎的影響。實驗結果顯示, 相較於化油器引擎, 使用氫氣於噴射引擎輸出的功率較好, 且可減低引擎回火的產生。J. B. Green 及 L. Bromberg[8-9]等人針對電漿重組器產生之富氫氣體對 2.3L 引擎的影響進行研究, 研究結果顯示車載型電漿重組器所產生的富氫氣體中當氫氣約佔 16%時, 對引擎的 NO_x 排放具有極佳的效果, 也表明了車載電漿重組器的可行性。

3. 實驗方法與實驗設備

本實驗以電子噴射式機車引擎[10]進行測試, 引擎規格如表 1 所示。該款機車引擎採用自動控制燃油噴射系統, 以電子控制單元(以下文章中稱為 ECU)接收進氣量對應之電壓信號, ECU 依此信號計算、決定適當的噴射時間, 再將噴射時間信號送至燃油噴嘴, 使燃油噴嘴打開將燃料噴入汽缸。由於噴射系統中燃油泵浦(fuel pump)的輸送壓力並非穩定, 因此系統中採用機械式燃油壓力調節器, 使燃油壓力相對於進氣歧管穩定地保持在 2.5 bar 正壓差, 因此噴油量可與噴射時間成正比關係。

表 1 電子噴射式機車引擎規格表

引擎形式	四行程 OHC 氣冷式
總排氣量	124.6 cc
壓縮比	9.8
行程 x 內徑	52.4 x 57.8 mm
氣缸數及方式	單缸水平
壓縮壓力	15±2 kg/cm ² @ 800 rpm
最大馬力	10.2 PS @ 7500 rpm
最大扭力	0.98 kg-m @ 6500 rpm

圖 1 為引擎架設之情形, 以車身固定架將受測引擎固定, 再利用軸連接器連接受測引擎動力輸出軸與 SCHENCK E20 渦電流車體動力計[11]。引擎油耗則利用 AVL 7330.18 質量法油量計[12]量測, 並考慮電子噴

射引擎之回油問題, 可以減少油耗量測之誤差。廢氣量測採用奧地利 AVL 公司生產之 DiGas 4000 light 分析儀 [13], 可以量測 CO、CO₂、HC、O₂ 以及 NO_x 等五種氣體, 並利用取樣管進行引擎廢氣的採樣。上述儀具之保養、校正均依規定程序管制, 且人員與操作狀態亦接受完善之訓練與審核。

本實驗所使用的富氫氣體以 CO、CO₂、N₂ 及 H₂ 混合, 各氣體裝置於鋼瓶中, 利用機械式調壓閥人工調節, 並以浮子式流量計目測判讀流量。為了確保氫氣使用安全, 實驗中利用一防回火裝置, 來防止氫氣異常回火, 本研究之實驗整體佈置如圖 2 所示。

實驗方法是利用調整引擎 COFPC 值來改變引擎噴油脈寬, COFPC 為引擎原廠用來調整引擎轉 CO 排放濃度的控制參數名稱, 而實際的功能是改變噴油脈寬。首先先找出 COFPC 值改變對噴油量的影響, 並找出引擎能穩定運轉的極限值, 此文中 COFPC 為-50 時為極限值。最後再進行油門開度 1/3、2/3 與全負載下不同轉速的測試。

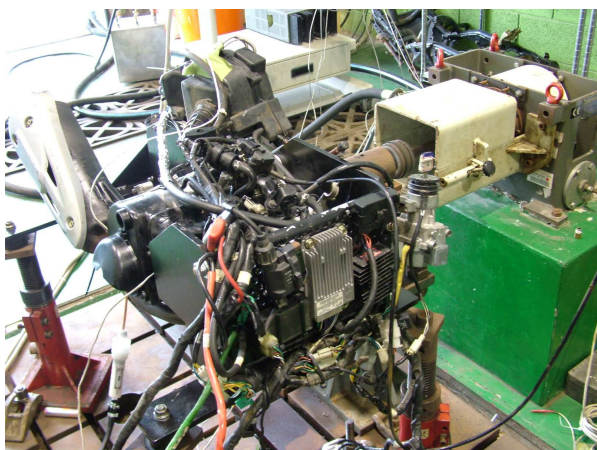


圖 1 引擎架設圖

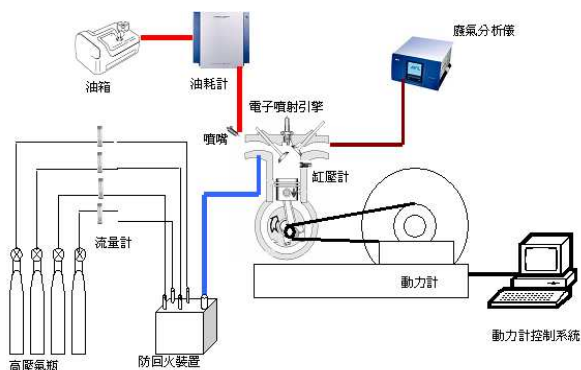


圖 2 實驗佈置圖

4. 實驗結果與討論

4.1 引擎稀薄燃燒之調整

引擎之稀薄燃燒極限係指引擎運轉盡量操作於接近燃燒界限的下限, 且在不產生爆震等異常的情況。本實驗藉由調整引擎之惰轉 CO 排放濃度控制參數 (COFPC), 來改變噴油持續時間, 實驗中未探求極限之

狀況, 僅於現有設備的調整範圍下進行稀薄程度的比較。調整 COFPC 造成的噴油持續時間改變情況如圖 3 所示, 在引擎 3000rpm 時, 調整 COFPC 為-10、-20、-30、-40 時, 由圖中可看出, 噴油持續時間與 COFPC 值幾乎呈線性關係, 調整後之噴油持續時間分別約為未調整時(COFPC=0)之 93%、87%、81%、76%。本研究分別在不同油門開度時, 調整 COFPC 參數, 觀察對氧氣排放濃度的影響, 如圖 4 所示, 顯示當轉速為 3000 rpm 時, 排放氧濃度由 COFPC 為 0 時之 1.05%, 升至 COFPC 為-40 時之 5.00%。表示調整 COFPC 參數可改變引擎燃燒狀態至更稀薄狀態, 適合於後續添加富氫氣體實驗的進行。

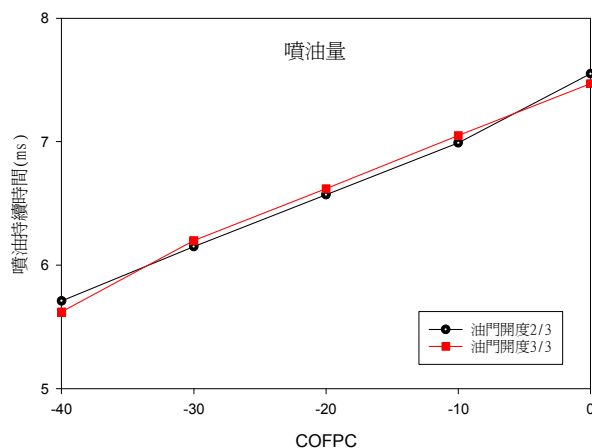


圖 3 調整 COFPC 對噴油持續時間的影響(3000 rpm)

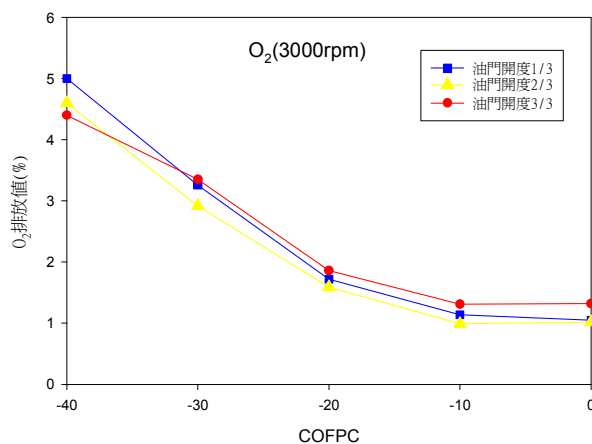


圖 4 調整 COFPC 對 O₂ 排放的影響(3000 rpm)

4.2 改變富氫氣體添加量對引擎的影響

本實驗所添加的富氫氣體由 20%氫氣、10%一氧化碳、5%二氧化碳與 65%氫氣所組成, 此係模擬電漿重組器之產出氣體的成份比例 [14]。機車引擎設計一般 1/3 油門開度燃油稀薄程度高於 2/3、3/3 油門開度, 但機車實際使用較常以 1/3 油門開度出現, 故實驗觀察 1/3 油門開度時添加不同比例的富氫氣體, 對氧氣排放濃度的影響, 如圖 5 所示。由圖中可看出, 當 COFPC 為 0 (baseline) 或 COFPC=-10 時, 雖然增加富氫氣體的添加

量,但氧氣排放濃度並未有明顯改變,顯示燃料與空氣混合之稀薄的程度並不足以支應額外添加的富氫氣體進行燃燒,僅徒然增加燃料空氣混合濃度,耗費燃料。而當 COFPC 為-40 時,氧氣排放濃度由富氫氣體添加 5 L/min 之 2.61%,比例降至富氫氣體添加 20 L/min 之 0.55%,表示此時引擎燃燒處於較稀薄的狀態,使添加之富氫氣體燃燒有耗去氧氣的情形。

圖 6 所示為在不同的富氫氣體添加量下對引擎扭力的影響。由圖可以看出,在 COFPC 值為-10 下提高富氫氣體的添加量,反而使得引擎扭力下降約 22%左右。而調整 COFPC 值為-40 後,提高富氫氣體添加量可增加扭力達 39%左右,由此可以看出,在引擎即為稀薄燃燒狀態,添加富氫氣體確實有提升引擎性能的效果。

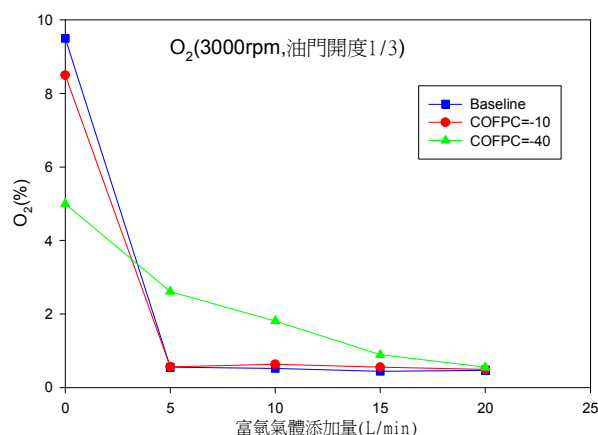


圖 5 富氫添加量對 O₂ 排放的影響

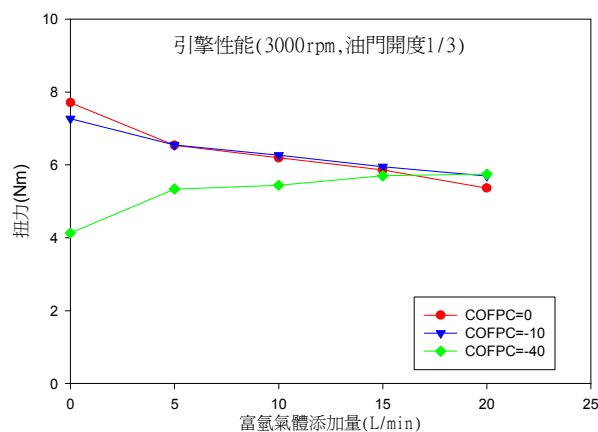


圖 6 富氫添加量對引擎性能的影響

4.3 富氫氣體添加對引擎性能與油耗的影響

在此部份針對不同引擎轉速與負載下,探討固定富氫氣體添加量對引擎的性能以及污染排放的影響。圖 7 為引擎在 1/3 油門開度下,調整 COFPC 值為-10 時,引擎扭力對固定富氫氣體添加量的表現。調整 COFPC 值為-10 後,扭力較調整前最多約下降 13%,但添加富氫氣體 10L/min 後(其中氫氣佔 2L/min),在 6000rpm 後,提升之扭力甚至高於原始設定 COFPC 為 0 時的扭力達

3%左右。但整體來說,在 1/3 油門開度下影響並不顯著。圖 8 為引擎之 BSFC 表現,其中 BSFC 為比制動燃油消耗率,公式如下。

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{W} \dots\dots\dots(1)$$

其中 \dot{m}_f 為燃油消耗率(富氫氣體流量亦考慮在內,但已依據其熱值調整其質量流率),單位為 kg/hr。W 為引擎功率,單位為 kW。經過單位換算後,得到單位為 g/kW-hr。由圖 8 可以看出,油門開度在 1/3,且引擎在轉速低於 6000rpm 下,COPFC=-10 且添加富氫氣體後,BSFC 較原始設定值略高,而在高轉速下,添加 10L/min 的富氫氣體,則可以降低引擎 BSFC 約 7%~12%。

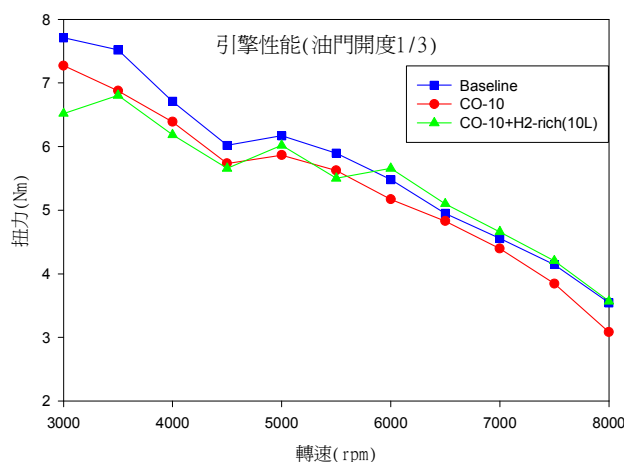


圖 7 固定富氫添加量對引擎扭力的影響(1/3 負載)

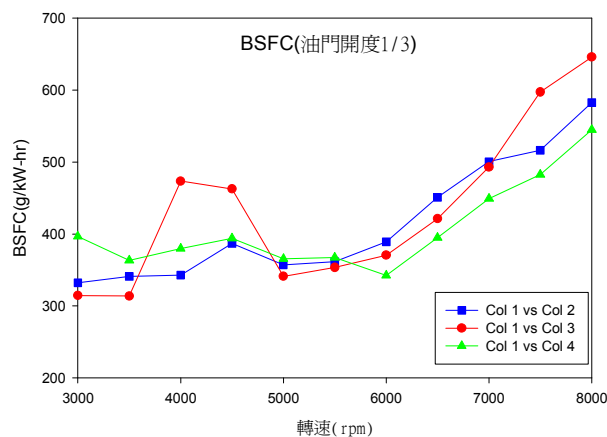


圖 8 固定富氫添加量對引擎 BSFC 的影響(1/3 負載)

接下來,再進行油門開度 2/3 的探討,在此負載下,將引擎 COFPC 值調整到引擎穩定運轉的最大極限為-50。如圖 9,在 COFPC 為-50 的狀態下,引擎在低轉速區域輸出之扭力極低,且變動頗大,但在添加富氫氣體後,引擎扭力即大幅提升 25%~50%左右;而在中高轉速,富氫氣體的添加對於引擎性能的變化影響較小。由此可知,富氫氣體在引擎低轉速區域具有輔助並穩定引擎燃燒的功能。在 2/3 油門開度、COFPC=-10 時,相

較於 COFPC=0, 添加富氫氣體後引擎扭力卻下降 13%~24%; 這與 1/3 油門開度、COFPC=-10 的狀態時, 添加富氫氣體在高轉速區具有提升引擎性能的效果不同, 主要原因可能在於添加富氫氣體後, 導致燃料濃度變高, 反而使引擎性能下降。圖 10 為引擎油門開度為 3/3 時之扭力表現, 由圖中可看出其變化情形與 2/3 油門開度相近, 在稀薄燃燒下(COFPC=-50)、添加富氫氣體後, 在低轉速區域可使引擎扭力提升 20%~65%。

圖 11 為 2/3 油門開度下的 BSFC 表現。由圖中可以看出, 在 5000rpm 以上, 光是減少噴油量(COFPC=-50)可以有效降低引擎的 BSFC, 但在 5000rpm 以下, 由於輸出扭力極低, 引擎的 BSFC 反而增加。也就是光是減少噴油量, 在中低轉速區域, 不但扭力下降, 也更耗油。但減少噴油量(COFPC=-50)的同時, 再加上富氫氣體, 則在所有轉速範圍內, 都可以有效降低引擎的 BSFC。與原有引擎的 BSFC 比較, 降幅可達 8%~24%。而 BSFC 與引擎熱效率成反比, BSFC 降低就代表引擎熱效率提高。但加氫的效果必須搭配稀薄燃燒才能顯現, 若噴油量減少不多(COFPC=-10), 由圖可看出 BSFC 反而提高, 這是因為燃料供給過多, 使引擎熱效率降低。

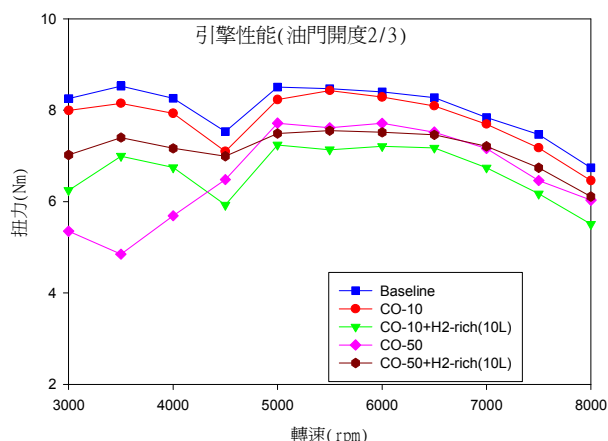


圖 9 固定富氫添加量對引擎扭力的影響(2/3 負載)

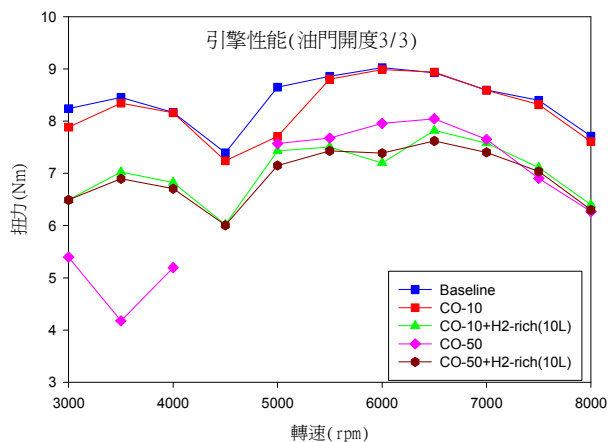


圖 10 固定富氫添加量對引擎扭力的影響(3/3 負載)

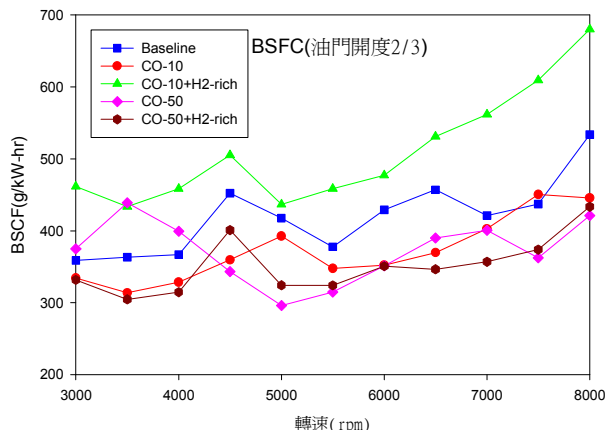


圖 11 固定富氫添加量對引擎 BSFC 的影響(2/3 負載)

另外, 本文也探討富氫氣體添加對引擎熱效率的影響, 熱效率的計算方式可由下式表示:

$$\eta_{th} = \frac{P}{\dot{m}_f \cdot Q_{HV}} = \frac{3600}{sfc \cdot Q_{HV}} \quad (2)$$

其中 sfc 為油耗, 單位為 g/kW-hr, Q_{HV} 為燃料熱值, 單位為 MJ/kg, 其中富氫燃料的熱值亦考慮在內。

由圖 12 中可以看出引擎在油門開度 2/3 時, 於低轉速區域之熱效率較高。在調整 COPFC 值-10 後, 引擎熱效率較未調整前之原始狀態時明顯上升約 5%~26%, 且兩者的變化趨勢一致。但在此條件下添加富氫氣體後, 熱效率則下降 4%~28%。在 COPFC=-50 的部份, 可以看出熱效率上升, 主要是因為在此條件下, 油耗平均減少約 28%, 但性能下降平均約 18%, 因此, 在此條件下熱效率平均約上升 14%。而在添加富氫氣體後, 因燃料量上升, 引擎性能明顯增加, 熱效率則比原始引擎條件下平均上升 19%。圖 13 為引擎在 3/3 負載下的變化情形, 由圖中可看出引擎熱效率隨轉速升高而降低, 而基本上的趨勢與 2/3 負載下一致。比較 COFPC=-50 添加富氫氣體與 COFPC=0 可以發現, 引擎在 3/3 負載下整體熱效率上升最高達 24%, 平均也有 13% 的提升。

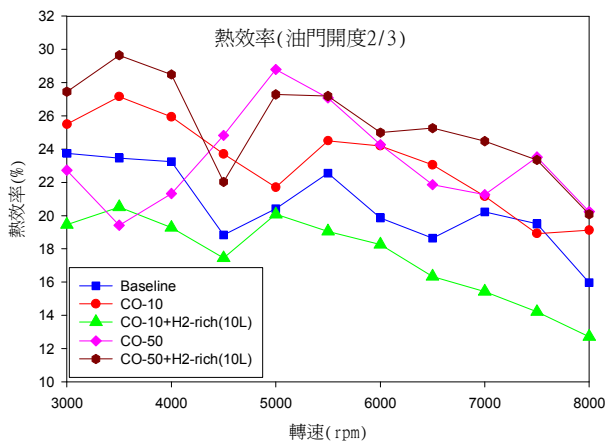


圖 12 固定富氫添加量對引擎熱效率的影響(2/3 負載)

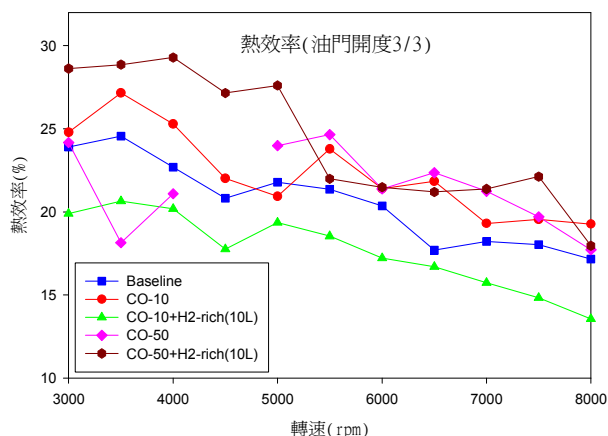


圖 13 固定富氫添加量對引擎熱效率的影響(3/3 負載)

4.4 富氫氣體添加對引擎污染排放的影響

在探討引擎性能後，另外最為重要的就是引擎污染排放。本文探討引擎在 2/3 及 3/3 負載下的污染排放表現。圖 14 與圖 15 為 CO 的排放值，由圖 14 中可以看出調整 COFPC 值可以直接降低 CO 的排放量，調整 COFPC=-10 時，CO 排放量可以降低 28%~74%，COFPC=-50 時，CO 排放量可以降低 94%~99%以上。但添加富氫氣體後則 CO 皆有明顯上升的現象，以 COFPC=-10 來看，低轉速區域 CO 排放較未調整前上升約 0.9~1.7 倍，中高轉速則僅提高 12%~38%，顯示隨引擎轉速越高則 CO 排放量上升幅度越低。而 COFPC=-50 時，雖然添加富氫氣體後 CO 的排放亦上升，但與原引擎的 CO 排放比較，仍低約 31%~55%。圖 15 所呈現的趨勢與 2/3 負載下的趨勢一致，顯見富氫氣體對於 CO 排放仍有正面的效益。

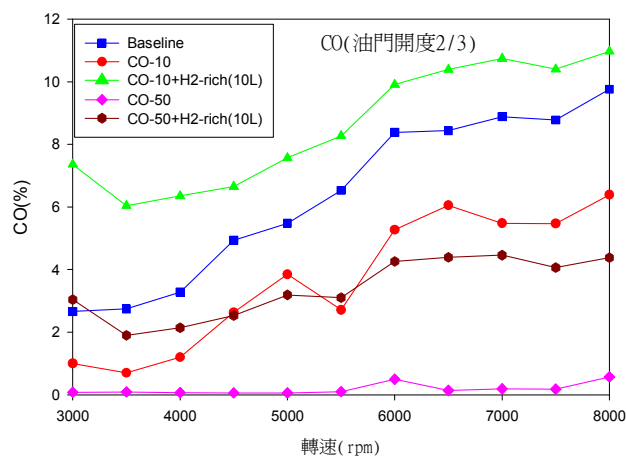


圖 14 引擎不同轉速下對 CO 排放影響(2/3 負載)

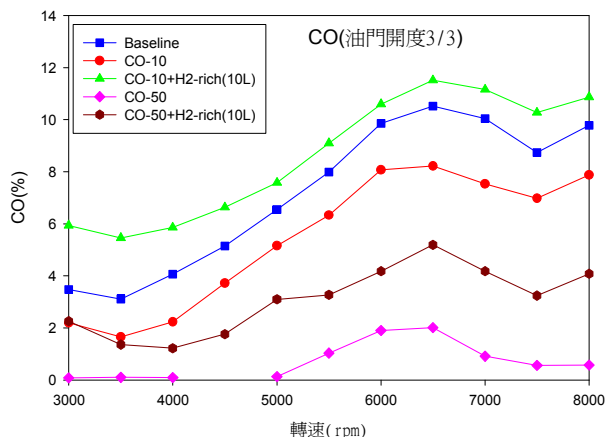


圖 15 引擎不同轉速下對 CO 排放影響(3/3 負載)

圖 16 與圖 17 為 HC 的排放量，這與 CO 排放量的有相同的表現型態，唯一的差異在於 HC 的排放量並不會隨轉速高低有太明顯的趨勢變化，而 CO 排放則隨引擎轉速升高而上升。以圖 16 來看，調整 COFPC=-10 時相較於 COFPC=0，HC 排放量最多可以降低 32%，但在添加 10L/min 的富氫氣體後，HC 排放則升高且高於 COFPC=0 的基準最多達 88%。而 COFPC=-50 時，HC 亦可降低約 45%~73%，添加富氫氣體後，雖然排放量上升，但與 COFPC=0 原始條件相較仍可以下降達 3%~42%。HC 排放量的上升，是由於添加富氫氣體後，燃料濃度變高所致。而圖 17 中可以發現趨勢也與 2/3 負載下相同。但整體 HC 排放量較 2/3 負載來的小。

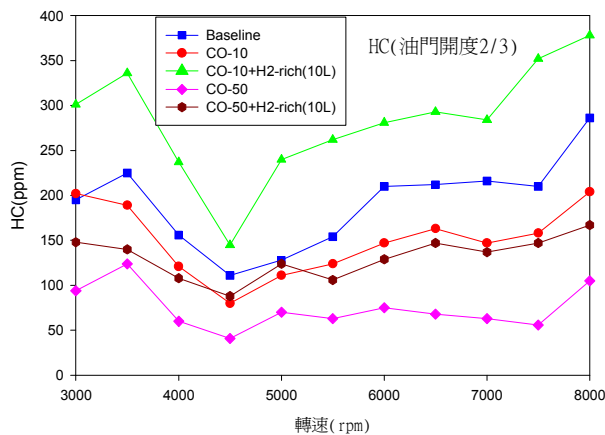


圖 16 引擎不同轉速下對 HC 排放影響(2/3 負載)

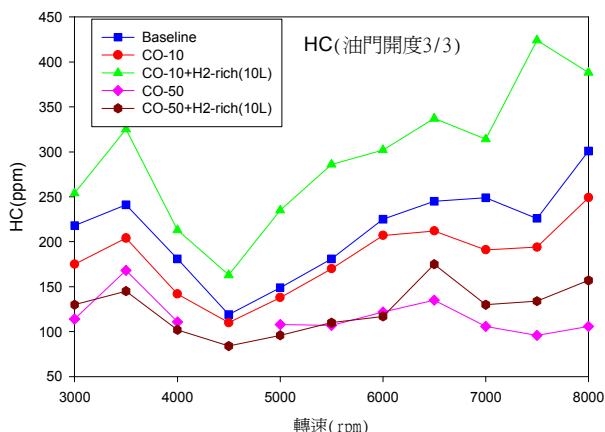


圖 17 引擎不同轉速下對 HC 排放影響(3/3 負載)

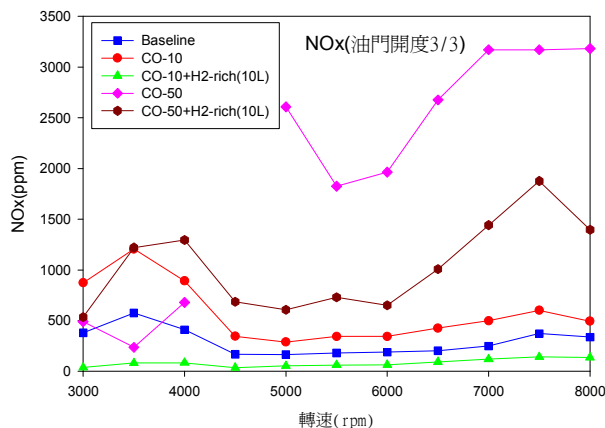


圖 19 引擎不同轉速下對 NOx 排放的影響(3/3 負載)

此外，觀察不同轉速下 NOx 排放濃度情況，如圖 18 與圖 19 所示，調整 COFPC 值可以降低 CO 的排放，但相對的會使 NOx 排放升高許多。圖 18 為 2/3 負載時的 NOx 排放情形，以 COFPC 值為-10 來看，相較於 COFPC=0 時的 NOx 排放量約上升 1.0~2.2 倍，上升幅度非常驚人。但在 COFPC=-10 添加富氫氣體後，NOx 排放則大幅下降，甚至低於 COFPC=0 時的基準，以 3000rpm 為例，可從 1399ppm 降低至 26ppm。若繼續調整 COFPC 值達-50 後，在中高轉速區域，NOx 排放濃度將大幅增加；而添加富氫氣體後，仍可以降低 NOx 許多，但仍超出 COFPC=0 時的基準。在全負載下的 NOx 排放與 2/3 負載的情形相近，如圖 19 所示。相較於圖 18，全負載下調整 COFPC 值為-50 時，中高轉速的 NOx 的排放量明顯比 COFPC=0 時的基準高出許多，顯示全負載下越稀薄燃燒 NOx 排放量也越高。因此，未來可選擇一個最佳化的操作區域，可使引擎熱效率提升並可以降低引擎 NOx 排放。

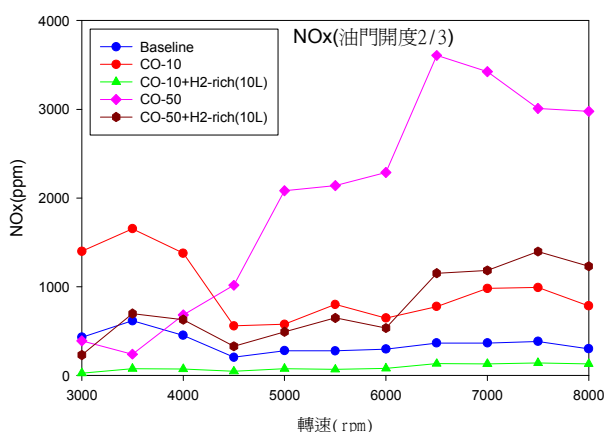


圖 18 引擎不同轉速下對 NOx 排放的影響(2/3 負載)

5. 結論

- (1) 利用電子噴射式引擎可以透過調整怠速 CO 排放值來進行噴油量調整，達到引擎稀油燃燒的狀態，利於進行稀薄燃燒下添加富氫氣體影響的評估。
- (2) 在引擎油門開度 1/3 時，屬於低負載區域，此時在 COFPC=-10 時，在高轉速區添加富氫氣體可獲得扭力的提升，而引擎 BSFC 可以降低約 7%~12%(相較於 COFPC=0)。因此，在機車引擎的操作範圍內，且引擎處於稀薄燃燒，即可利用添加適當富氫氣體，來獲得整體相當 BSFC 均低於基本狀態的表現。
- (3) 油門開度在 2/3 時，COFPC 值調整到-50 時，添加富氫氣體，在低轉速區域引擎性能可以提升 25%~50%，但因為此狀態在燃油極為稀少的狀態下，因此扭力輸出仍小於原始狀態下之扭力。另外，富氫氣體在 COFPC=-50 值具有明顯穩定引擎運轉的效果。而以熱效率來看，減少噴油量後，因引擎性能下降幅度不高，故引擎熱效率平均可上升 19%(相較於 COFPC=0)。3/3 負載下，相較於 COFPC=0，引擎熱效率則平均可以提高 13%。
- (4) 在引擎污染排放的測試中可以發現，減少噴油量再添加富氫氣體不管在引擎 2/3 或 3/3 負載下，對 CO 與 HC 排放都具有減量的效果。而 NOx 排放則較為複雜，減少噴油量會大幅提高 NOx 排放，雖然添加富氫氣體後亦可改善 NOx 的排放，但與原引擎相較則不一定有改善效果。
- (5) 在機車引擎燃燒較濃(空燃比約 9~13)之中高轉速區域，調整使處於較稀薄之燃燒條件將促使高溫燃燒的 NOx 生成(thermal NOx)，但這可透過添加富氫氣體來降低 NOx 排放濃度使趨於合乎原設計情況，惟此部份優劣仍需搭配整體相當 BSFC 權衡來看。

6. 致謝

本研究承蒙經濟部車輛潔能動力關鍵技術開發計畫贊助，計畫編號 96-EC-17-A-16-R7-0790，始得完成，謹此致謝。

7. 參考文獻

- [1] Tomohiro Shinagawa, Takeshi Okumura, Shigeo

- Furuno, Kyoung-Oh Kim, "Effects of Hydrogen Addition to SI Engine on Knock Behavior," SAE 2004-01-1851, 2004.
- [2] Žiga Ivanič, Gerty, Ferrán Ayala, Joshua Goldwitz and John B. Heywood, "Effects of Hydrogen Enhancement on Efficiency and NO_x Emissions of Lean and EGR-Diluted Mixtures in a SI Engine," SAE 2005-01-0253, 2005.
- [3] Joshua A. Goldwitz and John B. Heywood, "Combustion Optimization in a Hydrogen-Enhanced Lean-Burn SI Engine," SAE 2005-01-0251, 2005.
- [4] 陳鈞琳, 黃道易, 林百福, 李春穎, "低溫電漿甲醇重組器應用於內燃機引擎之研究", 第十一屆車輛工程學術研討會, 2006。
- [5] Tully E.J., Heywood J.B., "Lean-burn characteristics of a gasoline engine enriched with hydrogen from a plasmatron fuel reformer," SAE 2003-01-0630, 2003.
- [6] Hailin Li, Ghazi A. Karim, "Exhaust emissions from an SI engine operating on gaseous fuel mixtures containing hydrogen," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 30, pp. 1491-1499, 2005.
- [7] S.Verhelst, R.Sierens, "Aspects concerning the optimisation of a hydrogen fueled engine," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 26, pp. 981-985, 2001.
- [8] Bromberg L., Cohn D.R., Rabinovich A., Heywood J.B., "Emissions reduction using hydrogen from Plasmatron fuel converters," MIT Plasma Science & Fusion Center Report, PSFC/JA-00-7, 2000.
- [9] J. B. Green, Jr., N. Domingo, J. M. E. Storey, R. M. Wagner, J. S. Armfield, L. Bromberg, D. R. Cohn, A. Rabinovich and N. Alexeev, "Experimental Evaluation of SI Engine Operation Supplemented by Hydrogen Rich Gas from a Compact Plasma Boosted Reformer," SAE 2000-01-2206, 2000.
- [10] 光陽三冠王-AFI機車引擎維修手冊
- [11] SCHENCK E20渦電流車體動力計說明書
- [12] AVL 7330.18質量法油量計說明書
- [13] AVL DiGas 4000 Light操作手冊
- [14] 廖慶聰, 黃慶村, 洪榮芳, "富氫氣體輔助燃燒之內燃機運轉性能測試", 行政院原子能委員會委託研究計畫, 942001INER025, 2005。