

柴油引擎氮氧化物防制技術 SCR(urea)系統之介紹

財團法人車輛研究測試中心 林克衛

一、前言

全世界日趨嚴苛的環保污染法規是目前車輛製造廠開發引擎最為重要的挑戰之一，然而柴油引擎挾著其高於汽油引擎的熱效率與較低的二氧化碳排放優勢下，已成為未來趨勢的車種。柴油引擎車輛最為人重視的污染除了可見的粒狀污染物(PM)外，就屬於氮氧化物(NO_x)了，由於氮氧化物乃是屬於有毒氣體，且柴油引擎所排放的氮氧化物佔所有移動污染源44%以上，因此，世界各大柴油引擎製造廠莫不積極投入此一污染物的改善技術。目標都是為了符合歐盟柴油引擎EURO 4、EURO 5或是美國2007/2010年的規定。目前控制NO_x污染物的方式有很多種，例如廢氣再循環(EGR)、噴水(water injection)入汽缸內降低缸內溫度以及選擇性還原觸媒(SCR)等等，然而各大引擎製造廠商皆一致認為SCR系統為目前最有利的選擇。

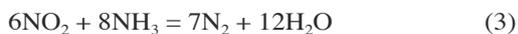
NO_x乃是柴油引擎較為人們所熟知的氣態污染物，由於氮氧化物在大氣之中會氧化成為二氧化氮(NO₂)，乃是屬於有毒氣體，不但影響視線，且會

造成呼吸方面的疾病以及肺傷害。因此在歐盟以及美國都對NO_x排放日趨加嚴的管制。2008年歐盟五期EURO 5的規定已降低為2g/kWh，美國在2007年重型柴油車輛也降低至0.2g/bhp-hr。而我國在2007年，針對重型柴油車NMHC+NO_x污染標準也降低至2.4(2.5)g/bhp-hr，輕型柴油引擎更降低為0.044g/km。其實SCR系統早在1970年代就已經被發展出來，不過主要是應用在蒸氣或燃氣渦輪機發電廠、定轉速的柴油發電機或是船舶上。其主要原因乃是因為在工廠內的廢氣一般狀況下都是定流量或流速，因此不需要太過複雜的控制即能達到一定的效果。不過，有別於固定型柴油引擎，車輛除了在惰轉狀態下才有可能定轉速外，其他狀態皆是不斷變動，因此所造成的NO_x生成量也隨之變化，所以NH₃與廢氣中氮氧化物的反應就顯得更為重要。因此，目前SCR系統乃是最佳的NO_x污染控制方案，所以本文將介紹與說明SCR系統的相關理論與應用，俾使能深入瞭解其減低NO_x的作用原理與現況。

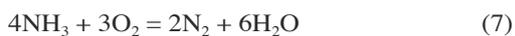
二、柴油引擎NOx的減量反應

SCR系統其全名為 Selective catalytic reduction，乃利用氨氣（NH₃）或是尿素水（urea）與氮氧化物進行化學反應，使有毒的氮氧化物氣體變成無毒的氮氣（N₂）和水氣（H₂O）。而純NH₃是具有毒性的氣體，而且儲存不易。因此，一般乃利用尿素水來作為車輛SCR系統的反應物，其具有較高的穩定性且沒有毒性容易儲存與運送。

在SCR系統中的反應以下列化學式來表示：



上述這些都是可能在SCR系統中發生的反應，氮氧化物與氨氣產生反應後，生成無毒無害的氮氣與水氣。而這些反應主要受到系統內溫度的影響。其中，第5式的反應是最快速的。然而，在系統中也有可能產生一些不期望的反應，會造成二次污染，如下：



而氨氣也有可能在低溫約100-200°C下與氧和水反應成為NH₄NO₃，這一生成物會沉澱在觸媒上。若是廢氣中含有硫（S），也有可能反應生成

(NH₄)₂SO₄或是NH₄HSO₄兩種生成物，這些反應物將會使觸媒變得污濁，降低觸媒的效率。

因此SCR系統必須要有精準的噴霧控制與噴射率，來提高氮氧化物(NO_x)的反應效率與防止過多的氨氣洩漏到大氣之中，也避免二次污染的產生。對一些固定反應可以用氧化觸媒安置在SCR系統下游來處理氨氣的洩漏問題。

在SCR系統中，尿素水溶液經過噴嘴注入排氣管中，當排氣溫度高於160°C以上時，尿素水在高熱下進行分解：



在熱分解的過程中，·NH₂也可以與NO進行反應：



這些是SCR系統中主要的化學反應，也是為什麼SCR觸媒系統可以處理氮氧化物的特性。

三、尿素水

目前運用在車輛用SCR系統的氨主要來自無毒性而且容易運送儲存的尿素(urea，CO(NH₂)₂)。

在一般情況下，尿素係以固體型態的呈現的物質，有以下的性質：

- 化學式：H₂N · CO · NH₂
- 莫爾重：60.06 kg/kmole
- 型態：無色結晶物
- 密度@20°C：1335kg/m³



- 熔點：132.7°C
- 可溶性@17°C：100g/100gH₂O

雖然可溶性可以達50%，不過一般使用在SCR系統之尿素水溶液大部份為32.5%。因為在這一濃度下，尿素水溶液具有最低的凝結溫度約-11°C，可以符合大部分的地區使用。32.5%的尿素水溶液是無色的溶液，其pH值約9.0~9.5之間，一般來說在室溫下，會很慢的分解成爲氨氣與二氧化碳。

SCR-urea的工業標準已經發展出來，目前主要的有德國2003年8月提出的DIN V 70070命名爲「NO_x Reduction Additive AUS 32」（Aqueous Urea Solution 32.5%），在歐盟則稱爲AdBlue。所以，許多搭載SCR系統的車輛大部分都會有AdBlue的字樣。

四、SCR系統

（一）觸媒

在SCR系統觸媒中最先被發現的是①鉑金（Pt）觸媒，不過這種技術主要在低溫下應用，因爲鉑金在高溫下對於NO_x的選擇性較差，以金屬爲底的SCR觸媒有較高的溫度反應範圍。而②V₂O₅爲底的觸媒可以使用在260°C到450°C之間。比起鉑金有較廣的反應範圍，NO_x轉換效率從225°C開使上升到400°C最高，之後便開始下降。而V₂O₅/TiO₂爲催化劑的觸媒，一般來講大約是在500°C到550°C下進行

轉換反應，但觸媒也必須有穩定劑來增加高溫耐久的能力，目前不管在固定或是車輛處理系統上，使用最廣泛的是三氧化鎢WO₃。V₂O₅/TiO₂最高可以到700°C，在經過750°C的高溫耐久後，觸媒會失去活性。③SiO₂/Al₂O₃催化劑的觸媒稱之爲沸石觸媒（Zeolite Catalyst，一般已經用於定置型柴油引擎上，其工作溫度可以高達600°C。下圖1爲不同材質的觸媒反應溫度的關係。

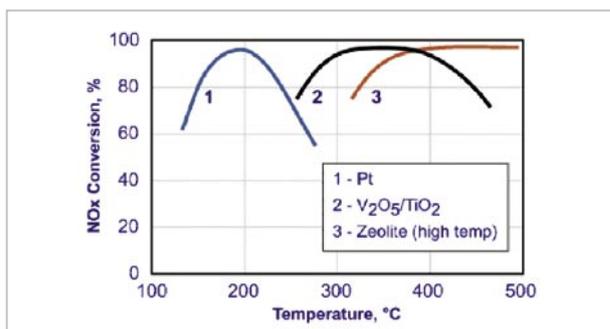


圖1 觸媒對溫度與轉換效率關係

（資料來源：http://www.dieseln.net/tech/cat_scr_mobile.html）

上述提到當NO與NO₂比率爲1：1時，將會有最佳的反應效率，然而引擎廢氣中所產生的氮氧化物中NO約佔了90%以上。因此，目前的SCR系統中，有第一階段利用氧化觸媒將NO先行轉換成爲NO₂的方式，儘量使NO與NO₂比率爲1：1來增加反應效率。因此，如何控制氧化觸媒的反應效率與溫度也直接影響了氮氧化物的反應效率。另外，由圖2也可以看出在NO₂/NO比率接近1時，選用最佳化的氧化觸媒與SCR系統，溫度在250°C至350°C區間會有最大的反應效率，約可達到95%以上。

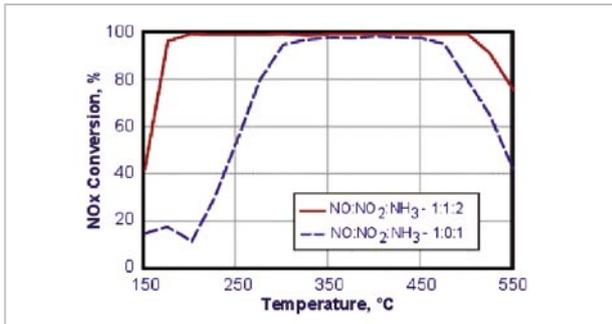


圖2 NO₂/NO比率對V₂O₅/TiO₂觸媒轉換效率影響
(資料來源：http://www.dieselnet.com/tech/cat_scr_mobile.html)

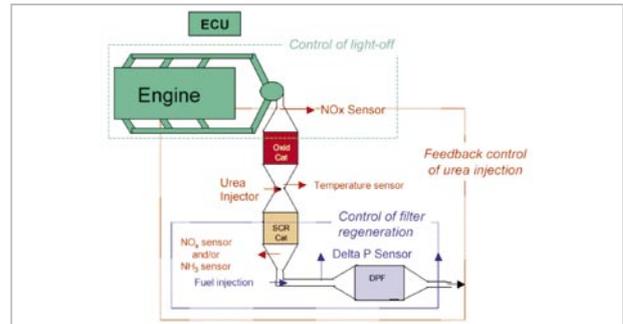


圖3 Ford輕型柴油車SCR系統

(二) SCR系統配置

一般來說，SCR系統的配置大致如下圖3所示 (Ford的輕型柴油車後處理系統)，除了在SCR觸媒前端佈置氧化觸媒外，亦在下游端佈置濾煙器來處理排氣中的粒狀污染物。圖3之系統採用閉迴路的控制模式，利用NO_x感知器來作為回饋訊號的判斷與修正。而在其他相關研究中也有討論氧化觸媒、SCR觸媒與濾煙器佈置對於系統效能的影響，由於溫度對於NO_x反應效率具有絕對的影響地位。因此，若是在SCR前端佈置氧化觸媒或是濾煙器，最直接影響的是溫度降低所導致的效率減低。不過，先前提到過，氧化觸媒佈置在SCR觸媒前端的優點，相對的濾煙器佈置在SCR觸媒前端亦有可先過濾排氣中的粒狀物質，避免SCR觸媒長期使用後被粒狀物所阻塞導致壽命減低之優點。因此，系統佈置其實取決於引擎特性、排氣溫度以及各觸媒的特性。當然，這需要進行長時間且多次的試驗與調校才能找出最佳化的佈置方式與效率。

圖4為Bosch目前最為成熟之SCR系統，該公司定名稱之為Denoxtronic系統，其中包括所有之各單元組件。此套系統主要在引擎排氣後端安裝氧化觸媒，在氧化觸媒後端安裝SCR觸媒。而尿素水注入管則安裝在兩觸媒之間。

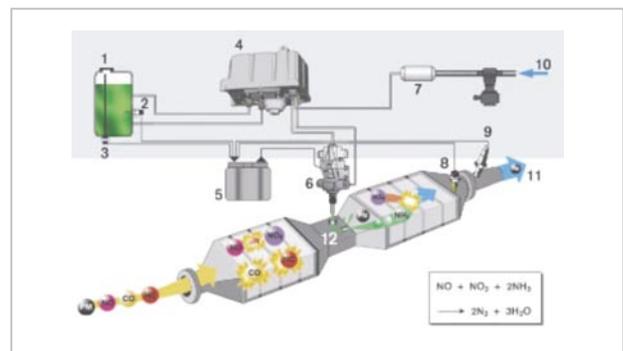


圖4 Bosch SCR系統

1. 尿素水儲存桶
2. 溫度感知器
3. 液位感知器
4. 供應模組
5. ECU電子控制單元



6. 流量閥
7. 壓縮空氣供應桶
8. 廢氣溫度感知器
9. 廢氣感知器
10. 空氣供應
11. 處理後廢氣
12. 霧化管

SCR系統反應效率的關鍵除了觸媒本身的特性外，如何控制正確的尿素水量噴入排氣管中也是另一個關鍵的技術。因此，噴量的控制系統乃是SCR系統的核心技術之一。控制的良劣將直接影響到系統的反應效率與NH₃的逸散問題，太少的尿素水噴量將導致系統反應效率不足，相反的，過量的尿素水噴入系統之中除了加快尿素水的消耗外，就會造成過多的NH₃無法參與反應，進而逸散或是生成二次污染物。

目前SCR系統控制單元之控制模式可以分為兩種，一種為開迴路控制與閉迴路控制。開迴路的控制邏輯就是，尿素水注入模組（Dosing Module）接受控制命令將尿素水注入排氣管中與廢氣在觸媒進行反應，隨即結束，並沒有其他回饋訊號回授到尿素水注入模組中進行修正，此乃為開迴路控制的標準方式。其最大的好處乃是設計簡單，相對的控制精準度不佳為其最大的缺點。然而控制精準度不佳的結果有可能造成廢氣處理效果不好，這並不會造

成任何危害。但是，另一方面，若是造成尿素水過量後生成為氨氣NH₃外洩，則將會造成二次污染。

在閉迴路控制SCR系統中，透過快速且即時的NO_x與NH₃量測回饋到控制系統中來進行尿素水噴射的修正，以達到最精準的反應效率，也可以避免NH₃洩漏。此一系統中較為困難的部分在於NO_x與NH₃感知器的發展。在2010年的法規下NO_x感知器必須有40-20 ppm的靈敏度。因此，目前亦有許多研究單位投入這方面的開發工作，惟若限於技術進程與成本，現階段較為簡單的方式，乃是建立引擎參數與NO_x排放關係，利用查表法來控制尿素水噴射量與頻率。

圖5為BOSCH最新的SCR系統，此系統是應用在輕型柴油車上，與重型柴油車不同之處在於其並不需要壓縮空氣來進行輔助噴射，由於排氣量較小因此單純只靠致動器來控制噴嘴進行噴射動作。如此一來可以減少輔助空氣單元縮小整體系統的體積，進而應用在輕型車上。在排氣管尾端的感知器也就是用來進行修正的回授訊號，屬於閉迴路的控制系統。

圖6為2006 DaimlerChrysler所宣稱即將於2007年販售的E320柴油小客車上搭載BLUETEC系統，其中包含了SCR的觸媒系統，代表未來柴油小客車在氮氧化物控制的技術進入另一個里程。

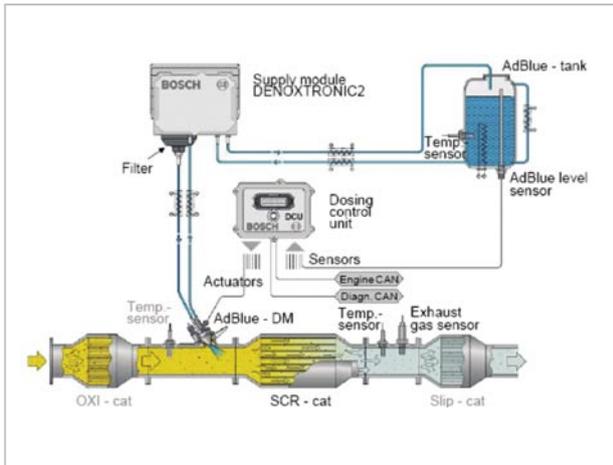


圖5 Bosch 輕型柴油車SCR系統

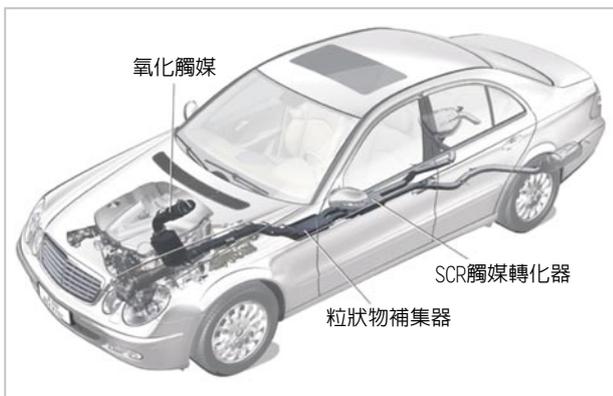
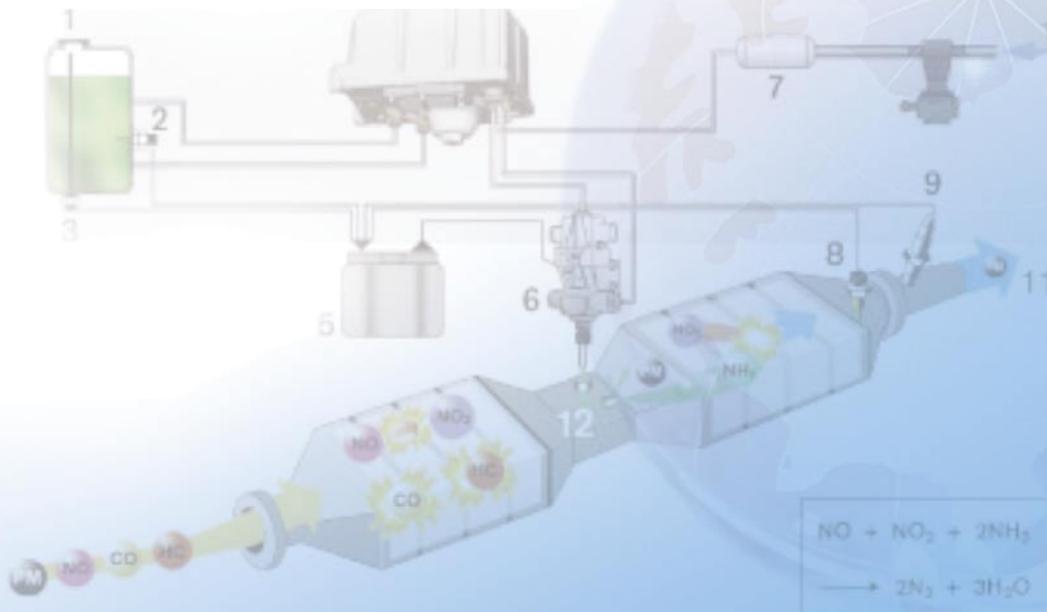


圖6 E320輕型柴油車SCR系統



五、結論

SCR系統已被歐洲與日本認為是重型柴油與中型柴油引擎車輛符合未來NO_x法規的主要技術，而在美國也是慢慢接受此一技術。且依照尿素水消耗量的預估來看，SCR系統的成長趨勢亦是可以預見。由目前歐盟車廠趨勢來看，搭載SCR系統之柴油車輛將越來越多，歐盟地區目前也建立完善之尿素水供應系統，足以應付歐盟五期甚至以後之NO_x法規要求。

目前國內也有廠商有意引進搭載SCR系統之柴油引擎車輛，來對應台灣四期或五期法規，但台灣目前尿素水之供應硬體設施問題與法規針對SCR系統之檢驗證等問題仍尚未克服。另外，由於SCR系統需定期添加尿素水，因此，將會改變車輛駕駛者的使用習慣，如何透過宣導或是法令規定車主定期添加皆是必須考慮的重要課題。



NEWS

AUTOMOTIVE RESEARCH & TESTING CENTER

六、參考文獻

- [1] http://www.dieselnet.com/tech/cat_scr_mobile.html
- [2] DEER Conference 2005, “SCR Technology for NOx Reduction Series Experience and State of Development” ,Robert Bosch corporation.
- [3] <http://www.greenchem-adblue.com / adblue / eng / products /adblue>
- [4] Sung-mu Choi,Young-kee,Seok-jae Kim Gwon-koo Yeo, “Development of Urea-SCR System for Light-Duty Diesel Passenger Car” , SAE Paper 2001-01-0519 .
- [5] Dieter H. E. Seher, Michael Reichelt and Stefan Wickert “Control Strategy for NOx - Emission Reduction with SCR ” , SAE Paper 2003-01-3362.
- [6] Sung-mu Choi, Young-kee Yoon, Seok-jae Kim and Gwon-koo Yeo “Development of Urea-SCR System for Light-Duty Diesel Passenger Car” , SAE Paper 2001-01-0519 .
- [7] Guy R. Chandler, Barry J. Cooper, James P. Harris, James E. Thoss, Ari Uusimaki, Andrew P. Walker and James P. Warren “An Integrated SCR and Continuously Regenerating Trap System to Meet Future NOx and PM Legislation” , SAE Paper 2000-01-0188 .

