

柴油引擎污染排放控制技術

盧昭暉 國立中興大學機械工程研究所

一、前言

柴油引擎由於熱效率高、省油、使得柴油車的應用範圍日漸增加，尤其是行走里程較長的公共汽車及貨車卡車都是使用柴油引擎為動力來源。根據交通部的統計資料，2012年在台灣地區柴油大客貨車約只有19萬輛，佔所有機動車輛數的0.8%，佔所有汽車數量的2.7%[1]。雖然柴油車的比例不高，但依據全國加油站的銷售統計，柴油銷售量約佔汽油銷售量的44%，佔全部銷售量的三成[2]。這是由於大型柴油客貨車的排氣量遠大於一般小汽車，且大部份都使用於大眾運輸及長途載貨等高行駛里程的用途，故其污染排放亦相當可觀。

根據環保署的交通工具排放總量推估，柴油大客貨車所產生的粒狀污染物約與其他所有交通工具的總合相同，硫氧化物及氮氧化物則高於其他所有交通工具的總合。此外，柴油引擎所排放的黑煙由於可用肉眼明顯的分辨出來，為一般民眾所厭惡，而降低柴油引擎的黑煙排放也成為民眾一致的訴求。世界衛生組織 (WHO) 的國際癌症研究署 (IARC) 於2012年6月12日正式宣布，把柴油引擎廢氣列為致癌物，級別與石棉、砷和芥子氣一樣，屬於確定對人類致癌物質。台灣都會地區主要的大眾運輸皆依賴公共汽車，相對的排放之空氣污染量也大增，對環境空氣品質造成嚴重傷害，故柴油車污染的管制定為一項重要的環保課題。

二、柴油引擎污染排放測試

全球有關柴油引擎的染排放檢測方式與排放標準可分成美國，歐洲，與日本三大系統，因這三個地區是全世界柴油車的主要生產與製造國。由於重型柴油引擎的應用範圍非常廣，柴油車的種類又非常多，重型柴油引擎的製造商與柴油車的製造商通常都分開來，同一款重型柴油引擎可以應用到非常多種的柴油車上，故重型柴油引擎的污染排放測試與一般汽機車的檢測方式不同，不是在車體動力計上以整輛車來進行，而是將引擎拆下，在引擎動力計上進行。

美國最早的柴油引擎污染排放測試是穩態測試，稱為13 Mode，這以三種不同引擎轉速來進行測試，分別為最大負載轉速，最大扭力轉速，與怠速。在前兩種轉速下再區分成10%，25%，50%，75%，與100%等五種負載，共有十種轉速與負載組合，再加上在怠速上進行三次測試，共有十三個測試點。各測試點的污染排放量是由該測試點的污染排放濃度，引擎排氣流量，及輸出馬力計算而得，而總排放量則是由各測試點的污染排放量乘上測試點的比例權重而得。

為實際反應行車狀況，美國的重型柴油引擎污染排放測試改以美國暫態循環(US Transient Cycle)來進行，這是用來模擬重型柴油引擎在美國都會區內的行車狀況，主要由四部份所組成，第一部份為紐約市區(NYNF, New York Non Freeway)，模擬紐約市區內道路的行車狀況，第二部份為洛杉磯市區(LANF, Los Angle Non Freeway)，模擬洛杉磯市區內道路的行車狀況，第三部份為洛杉磯市區高速公路(LAFY, Los Angle Freeway)，模擬洛杉磯市區高速公路的行車狀況，第四部份又重複NYNF。整個循環共二十分鐘，汙染測試是由兩個循環所構成，其中第一個循環為冷啟動，第二個循環為熱啟動。在暫態循環過程中，引擎絕大部份的時間都處於暫態的狀況，其平均負載只有最大負載的

20%-25%。所相當的行車速度約為30km/h，所相當的行車距離約為10.3公里。

歐洲的重型柴油引擎污染排放測試早期也是以13 Mode進行，所用的十三個測試點與美國早期的13 Mode相同，但各點的比重則不一樣，高轉速與高負載的比例比較高，可反應出歐洲的行車狀況。目前歐洲也改用暫態測試，所使用的測試型態稱為歐洲暫態循環(ETC, European Transient Cycle)，這是依據德國實際道路測試的結果，包括市區，郊區，以及高速公路三段，每一段600秒。其中市區型態包括多次等停與怠速，最高車速50km/h，郊區型態包括急加速，最高車速72km/h，高速公路型態則車速變化不大，平均車速88km/h。

日本自1974年開始管制重型柴油引擎的污染排放，剛開始只管制NO_x與黑煙，其中NO_x是以6 Mode來進行污染排放測試，這是以六種不同的引擎轉速與負載組合來量測引擎所排放污染物的濃度，再將各測試點的量測值乘上一個權重比例，而得到平均排放濃度，以ppm為單位。自1994年以後，日本開始管制PM，並改採用13 Mode來進行重型柴油引擎的污染排放測試，並改以g/kWh為管制單位。13 Mode是將6 Mode上同一轉速下的負載做更細的區分，惰速及低負載的比例增加，以反應交通擁擠狀況的行車狀況。2005年後，日本也開始採用暫態測試，稱為JE05暫態循環，用於3.5噸以上的車輛，這是依據東京的行車型態所制定。總測試時間為1800秒，平均車速26.94 km/h，最高車速88km/h。

其他世界各國的柴油引擎排放標準大致都遵循美國，歐洲，或日本的模式，有些國家只單獨採取其中一種模式，如墨西哥採用美國模式，中國，泰國及巴西採用歐洲模式，有些國家則接受兩種以上的模式，如澳洲同時接受美國，歐洲，及日本1994年的標準。我國過去採

用美國的測試程序，目前則採用雙軌制，同時接受美國及歐洲的標準。

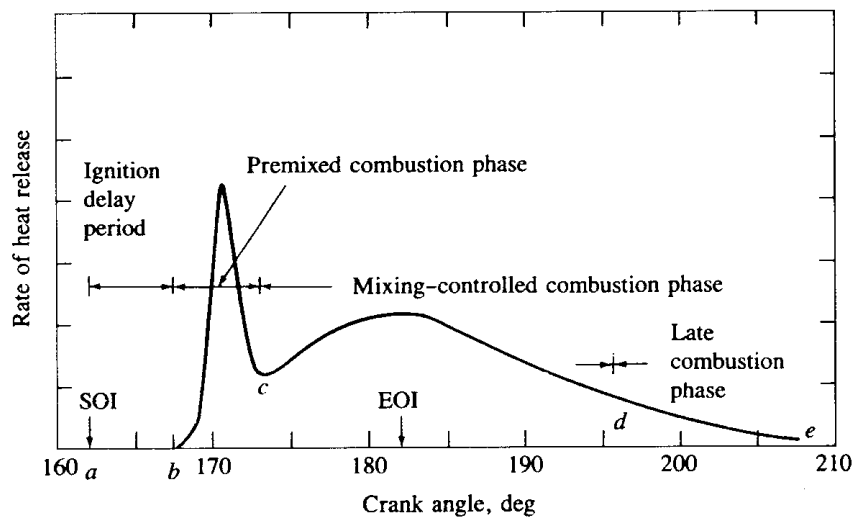
由各國柴油引擎污染排放標準演變的資料可以知道，雖然柴油引擎的污染管制有CO，HC，NO_x，與PM四項，但近年來主要的管制重點都在NO_x，與PM兩項，CO與HC的排放標準已不再加嚴，因若能通過嚴格的PM標準，則通過CO，HC，與黑煙的標準都沒有問題。表一所示為我國重型柴油引擎NO_x與PM排放標準的演變。我國柴油車污染排放管制開始實施的時間相當早，但剛開始時只進行黑煙排放的管制，以不透光率或黑煙污染度為管制單位。自1987年七月一日起，新車型審驗與新車檢驗以黑煙污染度為管制單位，排放標準為50%污染度，一般稱為第一期標準。1993年七月一日起開始實施行車型態污染排放測定，其中輕型柴油車(2.5噸以下)以LA-4行車型態於車體動力計上進行測試，重型柴油車(3.5噸以上)則以美國暫態循環於引擎動力計上進行測試，黑煙排放標準為40%污染度，一般稱為第二期標準。1999年七月一日起實施第三期柴油車排放標準，黑煙排放標準則降為35%污染度。2004年一月一日起實施第四期柴油車排放標準，黑煙排放標準則降為25%污染度。2012年一月一日起實施第五期柴油車排放標準，改採用歐洲的測試方法，黑煙排放標準則降為15%污染度[3]。

表一：我國重型柴油引擎污染排放標準

年代	NO _x	PM	Smoke (污染度)	測試方法
1987			50%	
1993	6.0	0.7	40%	US Transient Cycle (g/bhp-h)
1999	5.0	0.1	35%	
2006	2.4	0.1	25%	
2012	2.0	0.03	15%	ETC (g/kW-h)

三、影響柴油引擎污染排放之因素

柴油引擎的燃燒系統設計可分成間接噴射與直接噴射兩類，直接噴射引擎具有較低的燃油消耗率，但噪音大，且NO_x與PM的污染較高，通常用於重型柴油引擎，而間接噴射引擎則以輕型柴油車為主。由於間接噴射與直接噴射引擎的燃燒方式不同，影響其污染排放的因素也不一樣，但面對的問題都相同，那就是如何同時降低NO_x與PM的排放。



Typical heat release diagram for a DI diesel engine.

圖一：柴油引擎的燃燒可分成三個階段[4]

NO_x與PM的排放彼此間有相互消長的關係，即改善了NO_x很可能會造成PM的劣化，反之亦然。這與柴油引擎的燃燒特性有關。柴油引擎的燃燒可分成三個階段，如圖一所示。燃料噴進氣缸後並不會馬上開始燃燒，由高壓噴嘴噴出的液態燃料顆粒需要揮發成氣態，與空氣混合，形成空燃比適當的混合氣，達到自燃的溫度與壓力，才會開始燃燒。由開始噴油到開始燃燒的階段稱為點火延遲(Ignition Delay)。而開始燃燒後，在點火延遲階段噴入的燃料因已與空氣混合良好，會迅

速燒完，此階段稱為預混燃燒。由於燃料瞬間燃燒，會引起相當大的溫度與壓力變化，也會在氣缸內形成高溫區。當預混燃料燒完後，嘴噴仍持續在噴油，而此時噴進氣缸的燃料會形成擴散火燄，此階段稱為擴散燃燒，直到所有燃料燒完為止。柴油引擎NO_x的形成是燃燒溫度太高所致，主要發生在預混燃燒的階段。而PM的形成是燃燒不完全所致，主要發生在擴散燃燒的階段。若降低點火延遲，使預混燃燒階段的燃料量減少，可改善NO_x，但擴散燃燒階段的燃料量就會增加，使PM增加。

影響柴油引擎污染排放的因素包括噴油正時，噴油壓力，噴油嘴設計，燃燒室形狀，紊流強度，壓縮比等，以下說明各因素的影響。

(1).噴油正時

噴油正時會影響油滴噴在燃燒室內的位置與角度，也會影響點火延遲時間。噴油正時的影響在直噴式引擎比在間接噴射引擎較顯著。噴油正時提早會使燃燒最高壓力較早發生，燃燒溫度增加，同時拉長點火延遲，使預混燃燒階段的燃料量增加，故NO_x會增加，但HC則因燃燒良好而減少。延後噴油正時雖然可降低NO_x，但因燃燒最高壓力發生的時間延後，活塞做功量減少，耗油率增加。此外，延後噴油正時會減少PM的氧化，並使黑煙增加。由於污染產生的機制十分複雜，最好能依據引擎的轉速與負載來調整噴油正時，就像汽油引擎的點火控制一樣，可同時減少NO_x及PM排放。

(2).噴油壓力

噴油壓力會影響油滴顆粒大小，油滴噴射速度，貫穿深度，噴油寬度，噴油率，及燃料與空氣混合的程度。提高噴油壓力可使燃料與空氣混合良好，增加預混燃燒階段可燃混合氣的量，故NO_x會增加，但PM會減少。在相同的噴油壓力下延遲噴油正時可降低NO_x，但升高

PM，而在相同的噴油正時下提高噴油壓力可降低PM，但升高NO_x。噴油壓力太高會產生燃燒噪音，並提高耗油率，故針對每一種噴油嘴而言，有一個最佳的噴油壓力，而此最佳噴油壓力與引擎轉速有關。此外，提高噴油壓力可降低黑煙排放。

(3).噴油嘴設計

間接噴射式柴油引擎通常採用柱塞型(pintle type)噴油嘴，而直接噴射式柴油引擎通常採用孔口型(hole type)噴油嘴。孔口型噴嘴的孔數，孔徑，孔長，尖端油囊體積(Sac volume)，噴油角度及噴嘴安裝位置都會影響柴油引擎的燃燒及污染排放。噴油嘴孔數多且孔徑小有助於噴油霧化，可縮短點火延遲，可部份抵消提高噴油壓力對NO_x的影響。但孔徑也不是越小越好，必須配合噴油壓力，否則油滴速度太低，貫穿深度不夠，噴油寬度拉長，對燃燒不利。

(4).噴油率

噴油率與噴油壓力，噴嘴孔數有關，必須配合燃燒室設計，一般都在25-30度曲軸角間。引導式噴油(pilot injection)是在正式噴油以前先噴入一小部份的燃料，通常都少2%，可有效降低燃燒噪音，並可降低NO_x。預先噴入少量燃料，在相同油耗下可降低NO_x的排放，但黑煙則會增加。

(5).燃燒室

燃燒室形狀影響空氣與燃料之混合，燃燒室之設計必須考慮提供足夠的噴油路徑，使油滴的運動不受阻礙，也必須提供強烈的渦旋運動，使空氣與燃料混合。直接噴射引擎設計的趨勢是具有再迴入(Reentrant)特性的燃燒室。這種形狀的燃燒室可產生較強的渦旋(swirl)，使空氣與燃料均勻混合。此外，燃燒室的位置必須與噴油嘴的位置配合，新的趨勢是燃燒室與噴油嘴的位置都移到活塞正中心。

但由於提高噴油壓力可使燃料霧化良好，不需強烈的渦漩即可使空氣與燃料均勻混合，故另一個燃燒室設計的趨勢是平靜燃燒室(Quiescent chamber)的發展。這種引擎採用淺碟形燃燒室配合高壓噴油，可降低燃料消耗。

(6).壓縮比

提高壓縮比可縮短點火延遲，減少預混燃燒的油量，故可降低NO_x排放。由於提高壓縮比可提高氣缸內溫度，故也可改善冷起動與高轉速低負載時的PM與白煙問題。此外，提高壓縮比也可改善耗油率，補償因延遲噴油正時所增加的油耗。

四、柴油引擎污染控制技術

柴油引擎的污染控制技術可分成進氣系統，燃燒系統，燃料系統，與後處理系統。

(1).四閥引擎

四閥引擎可提高進氣效率，降低排吸損失，故耗油率及HC排放都有改善。此外，四閥引擎並可配合可變閥門正時，在高負載四閥全開，以提高進氣量，而低負載時只開一個進氣閥，提供高渦漩比。四閥引擎另一項優點是噴油嘴可置於氣缸頭中央，燃燒室則可移到活塞正中心。

(2).渦輪增壓器

引擎在低轉速時，渦輪增壓器的流量不足，效率偏低，造成空氣量不夠，而產生黑煙及PM。在高轉速時，渦輪增壓器的流量過多，增壓過量，產生NO_x。故渦輪增壓效果必須配合引擎的轉速與負載，目前是以洩壓閥(Waste gate)與可變幾何渦輪增壓器(Variable Geometry Turbocharger)來調節增壓量。

使用洩壓閥則引擎可選配較小的渦輪增壓器，在低轉速時即可達到足夠的增壓量，而在高轉速時可將洩壓閥打開，將一部份的排氣直接排出，不經渦輪機，避免過度增壓。過去洩壓閥都是以彈簧及連桿方式，直接由壓縮機出口壓力操作，不是很準確。目前則以電子控制方式操作，由ECU決定適當的增壓量，再以連桿機構來開閉洩壓閥，如此可以精確的控制增壓量，也可將環境變因考慮進來。此外，在車輛加速過程中，也可以利用洩壓閥的開閉來減少渦輪遲緩，提高車輛的加速性。

可變幾何渦輪增壓器則是利用改變渦輪機入口流道面積，直接改變渦輪增壓器的流量特性。當流道面積縮小時，相當於採用較小的渦輪增壓器，在低轉速即可達到足夠的增壓量，且加速性好。而當流道面積增大時，相當於採用較大的渦輪增壓器，在高轉速時也不需要洩壓，可以維持高效率。

(3).電子控制噴油系統

電子控制噴油系統可使用更高的噴油壓力，可隨轉速與負載調整噴油正時，噴油寬，及噴油瞬時流量。共軌噴油系統(Common Rail Injection System)是柴油引擎噴油系統的新發展趨勢，該系統包含可調節流量的高壓油泵，高壓油管與油軌，噴嘴，電子控制器，感測器與制動器。其中感測器包括引擎轉速感測器，曲軸角相位感測器，加速油門感測器，渦輪增壓感測器，進氣溫度感測器，冷卻水溫感測器，進氣流量感測器，及油桿壓力感測器。油桿內的壓力由ECU來控制，可根據不同引擎轉速與負載來改變。可調節流量的高壓油泵與油桿壓力感測器則構成一個控制迴路，使油桿壓力可穩定在設定值上。

共軌噴油系統可在不同引擎轉速與負載條件下來自由設定噴油壓力，以獲得較佳油耗或較低污染。也可以分兩階段或多階段噴油，如

引導噴油，以降低噪音，或在燃燒後期噴油，提供NO_x還原觸媒轉化器所需要的碳氫化合物還原劑。

(4).EGR

EGR是利用排氣再度循環進入氣缸內使用，因其比熱高，且具稀釋作用，可降低燃燒溫度，對降低NO_x排放很有效。但若EGR比例太高，燃燒速度會變慢，容易產生黑煙與PM。使用EGR也會增加CO的排放量。當EGR流量小於10%時，對CO排放的影響還不大，但當EGR大於10%時，CO的排放量會開始增加，這是因為EGR太多時，在燃燒過程中CO不容易獲得氧氣，而且燃燒溫度降低，也不利CO氧化。

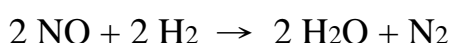
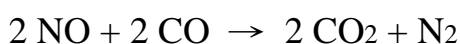
有幾種不同方法都可以用來達成排氣再循環，最簡單的方法是直接將氣缸內的已燃氣體留一部份下來，下一個循環再使用，稱為內部排氣再循環(Internal EGR)，這可用可變閥門正時來完成。但因已燃氣體的溫度高，會提高燃燒溫度，故所能使用的比例有限。另一種方法是直接將排氣從渦輪機上游接出，經過EGR控制閥，送到中間冷卻器下游的進氣管，稱為熱排氣再循環(Hot EGR)。此法雖然可降低NO_x排放，但會增加PM排放。第三種方法是在EGR管路中加上一個冷卻器，稱為冷排氣再循環(Cooled EGR)。其中EGR是利用引擎的冷卻水來冷卻。冷EGR可降低進氣溫度，提高進氣效率，改善耗油率。

在相同引擎負載下，增加EGR流量可提高NO_x的削減率。EGR在引擎高負載時效果較好，即引擎在高負載時，以較小的EGR流量即可達到較高的NO_x削減率。

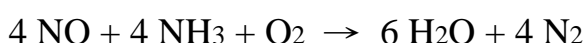
因柴油引擎的排氣中含有碳粒，使用EGR時排氣中的碳粒會迴流進入氣缸，附著在氣缸壁上，污染機油，並增加氣缸壁磨損。解決的方法是使用EGR過濾器，將排氣中的碳粒過濾掉。

(5).還原觸媒轉化器

以觸媒轉化器來降低NO_x排放有選擇式還原(SCR)，非選擇式還原，及分解三種方式。目前汽油車所使用的三元觸媒轉化器屬於非選擇式還原，由於引擎控制在正規化空燃比(stoichiometric A/F)附近燃燒，排氣中O₂的含量非常低，NO_x是以排氣中的CO，HC，H₂做為還原劑，來完成還原反應，其化學反應可表示如下。



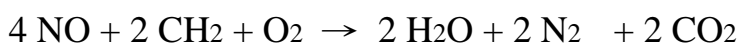
柴油引擎的排氣中含有相當高的O₂，三元觸媒轉化器無法使用。在高氧含量下一般是以選擇式還原來降低NO_x排放，以氨氣(NH₃)做為還原劑，其化學反應如下。



由於NH₃具有毒性，不方便儲存，一般都採用尿素的水溶液來取代NH₃，使用時在當場產生NH₃。當尿素的水溶液噴入高溫排氣中，水會先氣化，形成尿素結晶，此尿素結晶再分解成NH₃與異氰酸(isocyanic acid)，異氰酸可以再經水解作用產生NH₃。為了加速尿素水解，有一些SCR系統會在還原觸媒之前增加一個水解觸媒(V₂O₅/TiO₂/WO₃)。

過去此法只適用於固定式的柴油引擎，不適合車用的柴油引擎，因氨氣之儲存有問題。但目前此問題已解決，目前國內已有不少符合五期標準的柴油車配備SCR，定期到保養廠添加尿素。

選擇式還原也可使用碳氫化合物做為還原劑，其化學反應如下。



而此反應的觸媒主要是將沸石(zeolite)粉披覆在陶磁擔體上，並以銅離子(Cu⁺⁺)取代沸石中的鈉離子(Na⁺)來提高其反應性。其他的貴重金屬，如鉑(Pt)，鈀(Pd)，銻(Rh)，金(Au)，銀(Ag)，銱(Ir)等也有使用。

在實驗室中以模擬排氣來進行量測，NO_x還原效率可達50%以上，但在真實柴油引擎中，NO_x還原效率只有10-30%。

但在柴油引擎的排氣中，碳氫化合物的含量不高，無法提供足夠的還原劑來將NO_x還原，解決的方法為在排氣管前端注入碳氫化合物，或直接使用柴油當做還原劑，即多噴一些柴油來降低NO_x排放。以碳氫化合物做為還原劑，炔類(alkyne)的效果最好，烯(alkene)類其次，烷類(alkane)的效果較差，而柴油的還原效果則介於炔類與烯類之間。由於電子控制式柴油噴射系統可進行分段噴油，若可結合電子噴油系統與NO_x還原觸媒轉化器，可利用電子噴油系統在排氣行程中額外噴油，做為還原劑，則不需要另一套噴入機構，而且很容易做最佳噴入時機控制。

柴油引擎排氣中的其他成份對NO_x還原效率有影響，其中H₂O會降低NO_x還原效率，SO₂對NO_x還原效率沒有直接影響，但會毒害觸媒轉化器，而CO對NO_x還原效率沒有影響。

(6).濾煙器

一般柴油引擎 PM 後處理技術包括氧化觸媒和過濾法，利用氧化觸媒技術可部分氧化排氣中可溶性有機粒子 (SOF)，但對碳粒則無氧化能力，當柴油引擎在低負荷時，PM 成份中可溶性有機粒子成份較高，氧化觸媒氧化效果可明顯降低 PM 排放，而在高負荷時，由於 PM 成份中可溶性有機粒子成份較低，氧化效果不高。典型的氧化觸媒氧化效果大約可降低排氣中 PM 20% ~50% 排放，不過柴油引擎氧化觸媒同時會促進引擎排氣中所含之 SO₂ 氧化生成 SO₃，生成硫酸及金屬類硫酸鹽等粒狀污染物。

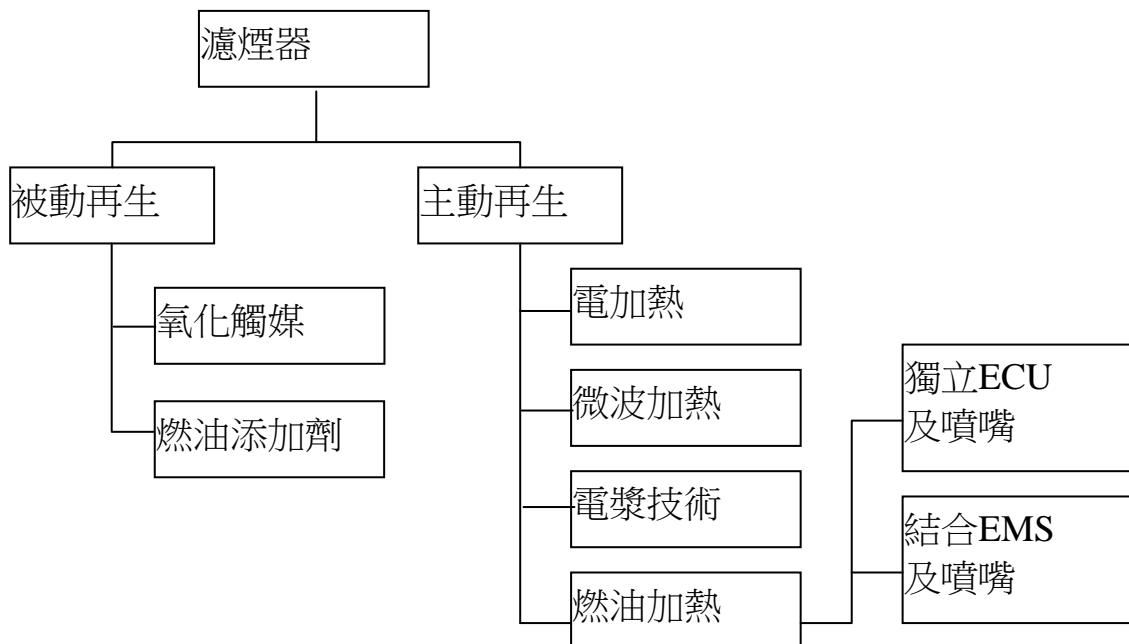
過濾法為柴油引擎降低 PM 排放最直接的方法，濾煙器主要由極小孔隙的緊密濾芯材料組成，可截留柴油引擎廢氣中的固態碳粒及可

溶性有機粒子達到過濾的功能，一般過濾效果可達 70%~90%。濾芯材料為濾煙器的主要元件，一般濾煙器對濾材要求高的微粒過濾效率、低的排氣阻力、高的機械強度和抗震動性能，還須具備耐熱衝擊性與耐腐蝕性等特性。其中高的過濾效率與低的排氣阻力是相互矛盾的，選擇材料時要綜合考慮這兩方面的性能，常見之濾材種料有三類：

- A. 陶瓷基過濾材料：目前應用最多的是陶瓷基過濾材料，它們通常由氧化物或碳化物組成，主要成分包括氧化矽，氧化鎂，與氧化錳。陶瓷基濾材具有多孔結構，在 700°C 以上能保持熱穩定，主要結構包括蜂窩陶瓷、泡沫陶瓷及陶瓷纖維氈。目前在濾煙器上研究和使用較多的是壁流式蜂窩陶瓷，常用熱膨脹係數低、造價低廉的堇青石製成。它具有多孔結構，這種 DPF 對微粒的過濾效率可達 90% 以上，目前應用最廣的美國 Corning 公司和日本 NGK 公司生產的 DPF 採用的就是壁流式蜂窩陶瓷。
- B. 金屬基過濾材料：金屬在材料的強度、韌性和導熱性等方面有陶瓷無法比擬的優勢，目前研究較多的是泡沫合金和金屬纖維氈。泡沫合金具有高的熱導率，可兼作熱再生裝置的輻射加熱器，熱度分佈均勻，再生時濾材不會開裂與熔化。金屬纖維氈與陶瓷纖維氈過濾材料相比，具有強度高、使用壽命長及容塵量高等特點；與金屬絲網過濾材料相比，具有過濾精度高，透氣性好，比表面大和毛細管功能等特點。
- C. 複合基過濾材料：陶瓷基過濾材料和金屬基過濾材料都有不可避免的缺陷，因此開始考慮複合基增強過濾材料，目前研究與應用主要集中在纖維氈結構上，可解決在再生過程中燃燒引起的局部過熱導致過濾材料熔融破裂或殘留煙灰黏附在過濾材料上使 DPF 失效的問題。目前已有廠商使用不鏽鋼外殼內裝有耐溫

2,200°C 的特殊 SIC (Silicon Carbide) 濾芯(非傳統堇青石)，可以處理過濾引擎所產生的黑煙；其處理效果可達 98 % 以上。

濾煙器對於廢氣中粒狀污染物質的過濾效率高，但在過濾過程中，由於濾煙器粒狀物堆積導致引擎排氣背壓升高，當排氣背壓達到 16~20kPa 時，柴油引擎油耗性能將開始惡化，因此必須定期地除去粒狀物，使濾煙器恢復到原來的工作狀況，即再生還原系統，一般濾煙器的再生還原方式可分為「被動」再生和「主動」再生，架構如圖二所示。



圖二 濾煙器的再生還原系統架構

濾煙器被動式再生方法係指濾煙器的再生過程，除了使用柴油引擎排放廢氣的能量外，沒有其他外加的能量輸入。常用的被動式再生方法是利用化學催化的方法降低微粒的反應溫度 (300°C)，使微粒可在柴油引擎排氣溫度下燃燒，達到再生目的。連續性再生濾煙器 (CR-DPF) 與觸媒濾煙器 (CDPF) 是典型濾煙器的代表，利用引擎

排放的 NO 經過氧化觸媒反應產生 NO₂，濾煙器濾材內所堆積之粒狀物可藉由 NO₂ 反應，將碳反應成 CO₂ 排出，使濾煙器回復過濾功能。目前已證實 NO₂ 比 O₂ 對於廢氣中粒狀污染物的低溫氧化媒介效果更為有效，但廢氣中所含的硫經由觸媒氧化後，形成硫酸會抑制 NO 與 NO₂ 的反應，降低還原的效率。

在燃油中加入添加劑也是被動再生系統的一種，添加劑一般為可溶性的金屬（銅、鈾、鉑、鐵等），燃燒後生成的金屬氧化物對粒狀物起催化作用，降低粒狀物起燃溫度，從而在較低的排氣溫度下不需外部能源（400°C），濾材碳粒即能自行再生。目前已有國外車廠小客車使用燃料添加方法來降低 PM 排放，因應符合歐盟 4 期法規。但燃料添加劑的燃燒金屬氧化物隨排氣流經濾煙器時，造成沈積現象，累積在濾材上的添加劑金屬燃燒氧化物會堵塞濾材孔隙，縮短濾煙器的壽命，且影響柴油引擎的動力性和燃油經濟性。

採用主動式再生方法的濾煙器需要外加輸入能量，提高氣流溫度到微粒的起燃溫度（600°C）使微粒燃燒，目前研究較多的主動式再生包括電熱再生系統、微波加熱再生系統、電漿再生系統、及燃油加熱系統等，其中燃油加熱系統是最常用的系統。燃料加熱再生技術是將燃料直接通入引擎的排氣管中，利用排氣中剩餘的氧氣和燃料混合燃燒，對沈積在濾材中的微粒進行加熱，達到著火溫度燃燒達成再生。一般燃料再生技術可分為兩種，一為結合引擎管理系統，利用原引擎的噴油嘴，在排氣行程排氣閥打開時，再噴入適當的燃料，提高濾煙器還原溫度；另外一種是透過獨立 ECU 及額外的噴嘴與供油系統，將燃料直接噴入排氣系統，來提高濾煙器還原溫度。圖三所示為濾煙器再生前後的比較，由圖可看出濾煙器表面的積碳都燒光了。



圖三：濾煙器再生前後的比較

六、結論

柴油引擎的熱效率高，在公共汽車及貨車卡車的應用十分廣汎，雖然總數不多，但污染排放仍相當可觀。我國自1987年起開始管制柴油車汙染，目前已進入第五期柴油車排放標準，主要的管制重點在NO_x與PM兩項。依據排放標準與實際路面上使用的引擎污染排放之比較，CO與HC的排放均遠較標準低，而NO_x與PM的排放則很接近標準，顯示NO_x與PM的排放需要改善。由於NO_x與PM的排放彼此間有相互消長的關係，面對未來的法規趨勢，需要更進步的污染控制技術。

目前發展中或已使用的柴油引擎的污染控制技術可分成進氣系統，燃燒系統，燃料系統，與後處理系統。包含的項目則有四閥引擎，渦輪增壓器，高壓噴油，電子控制柴油噴射系統，EGR，氧化觸媒及還原觸媒。由於污染產生的機制十分複雜，彼此間又有相互消長的關係，這些技術必須配合使用，才能有效降低污染。

參考資料

1. 交通部網站，全國車輛數統計。
2. 經濟部能源局網站，全國汽柴油銷售統計。
3. 交通工具空氣污染物排放標準，行政院環保署。
4. Paul Degobert, *Automobiles and Pollution*, Editions Technip – Paris, (1995).