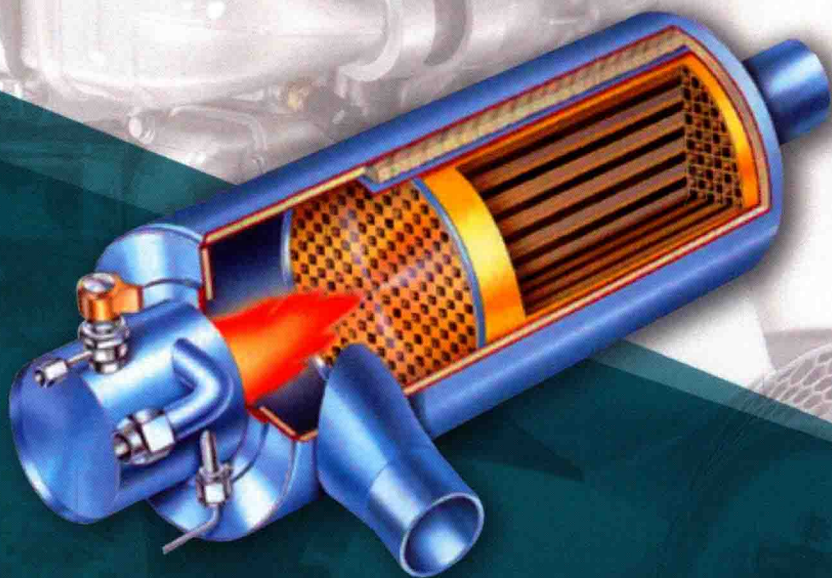


柴油机微粒捕集器 喷油助燃再生过程 热工模型及其控制

伏军 龚金科 鄂加强 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

柴油机微粒捕集器 喷油助燃再生过程 热工模型及其控制

伏军 龚金科 鄂加强 著

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以降低柴油机排气中的微粒污染、降低柴油机所造成的环境污染为目的,结合理论与实验分析,对微粒捕集器及其喷油助燃再生系统在降低柴油机排气污染上的应用进行深入研究,内容主要包括绪论、喷油助燃装置热工参数对再生过程的影响、喷油助燃再生微粒捕集器入口临界温度模型、微粒捕集器背压采集系统动态响应数学模型、喷油助燃再生背压阈值 MAP、喷油助燃再生喷油量与补气量优化控制模型以及喷油助燃再生控制系统的研究等内容。

本书可供动力机械及工程、热能工程、机械工程和 control 理论与控制工程等领域的科研工作者与工程技术人员使用,也可供各高等院校以上相关领域的教师、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

柴油机微粒捕集器喷油助燃再生过程热工模型及其控制 / 伏军, 龚金科, 鄂加强著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017.1

ISBN 978-7-5170-5224-1

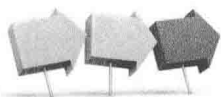
I. ①柴… II. ①伏… ②龚… ③鄂… III. ①柴油机—喷油过程—热工过程—模型②柴油机—喷油过程—热工控制系统 IV. ①TK421

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第045768号

书 名	柴油机微粒捕集器喷油助燃再生过程热工模型及其控制 CHAIYOUJI WEILI BUJIQI PENYOU ZHURAN ZAISHENG GUOCHENG REGONG MOXING JIQI KONGZHI
作 者	伏军 龚金科 鄂加强 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9.75印张 186千字
版 次	2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

随着环境保护和大气治理工作的不断深入以及污染排放法规的严格要求，柴油车尾气微粒排放控制已成为大气污染治理及其生产领域的重大课题之一，微粒捕集器（Diesel Particulate Filter, DPF）以其过滤效率高、可靠性好等优点成为当前汽车微粒排放控制技术的研究热点，同时也成为人们公认的能最有效解决柴油机微粒排放问题的手段之一，从其研究进程来看，再生技术问题一直是微粒捕集器技术的关键，且制约着微粒捕集器技术的发展。

目前，提出的微粒捕集器再生方式有很多，一般是采用加热等方法定期或连续将捕集的微粒烧尽，以保证微粒捕集器良好的持续工作性能。在众多热再生方式中，喷油助燃再生技术不受油品含硫量高等特点的限制，核心装置燃烧器采用与柴油机相同的燃料，装车使用时不需对发动机原结构做很大的改动。另外，还有不受排气温度的限制、再生窗口宽等优点，为解决柴油机微粒排放开辟了一条新途径。

本书以国家自然科学基金项目“车用柴油机微粒捕集多孔介质的微波及铈—锰添加剂复合再生机理研究”（50876027）、国家“863”项目子项“新一代环保高效柴油机研发”（2008AA11A116）及湖南省自然科学基金重点项目“车用微粒捕集器复合再生过程气粒两相流动与燃烧数值模拟”（06JJ20018）等为研究来源，基于微粒捕集器全流式喷油助燃再生技术对其热工参数模型及控制方面开展研究。重点研究了喷油助燃再生过程中主要热工参数对再生过程的影响、喷油助燃再生微粒捕集器入口临界条件温度模型、微粒捕集器背压采集系统动态响应数学模型、喷油助燃再生背压阀值MAP、喷油助燃再生喷油量与补气量优化控制模型以及喷油助燃再

生控制系统。

本书为喷油助燃再生微粒捕集器在结构设计、性能分析、再生过程控制等方面提供了理论依据和技术参考，为其实用化奠定了基础，其中一些研究方法和成果对其他类型微粒捕集器的研究也具有重要的参考价值。

著者

2016 年 11 月



目录

前言

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 项目背景	1
1.1.2 微粒的生成机理与危害	3
1.2 柴油车排放法规的发展	3
1.2.1 国外排放法规	4
1.2.2 国内排放法规	5
1.3 柴油机微粒排放控制技术的研究现状	7
1.3.1 燃料技术	8
1.3.2 机内净化技术	10
1.3.3 后处理技术	13
1.4 柴油机微粒捕集器技术	16
1.4.1 过滤体材料	17
1.4.2 过滤体再生	19
1.5 喷油助燃再生技术的研究进展	22
1.6 项目来源及主要研究内容	27
1.6.1 项目来源	27
1.6.2 本书的主要研究内容	28
参考文献	31
第2章 喷油助燃装置热工参数对再生过程的影响	43
2.1 再生过程数学模型	43
2.1.1 模型假设	43
2.1.2 再生模型	44
2.2 初始条件和边界条件	47
2.3 再生模型耦合求解	48
2.3.1 速度场/压力场耦合求解	48

2.3.2 温度场/微粒浓度场耦合求解	52
2.4 模型参数及初始/边界值	54
2.5 计算结果分析	56
2.5.1 油气配比的影响	56
2.5.2 喷油压力的影响	57
2.5.3 喷油率的影响	59
2.5.4 补气量的影响	59
2.6 其他因素对再生过程的影响	61
2.6.1 初始微粒沉积量的影响	61
2.6.2 排气流量的影响	62
2.7 本章小结	63
参考文献	64
第3章 喷油助燃再生微粒捕集器入口临界温度模型	66
3.1 过滤体入口单孔道再生模型的简化	66
3.2 过滤体入口废气临界温度模型	69
3.3 模型验证	72
3.3.1 试验设计	72
3.3.2 结果分析	73
3.4 入口临界废气温度影响因素分析	75
3.4.1 过滤体孔道壁厚的影响	75
3.4.2 过滤体孔道初始微粒层厚度的影响	76
3.4.3 过滤体过滤面积的影响	77
3.4.4 排气氧浓度的影响	77
3.5 本章小结	78
参考文献	79
第4章 微粒捕集器背压采集系统动态响应数学模型	81
4.1 动态测试响应精度理论	82
4.2 测压系统动态响应与精度模型	82
4.3 模型简化	85
4.3.1 传递函数	85
4.3.2 过滤体背压数学模型	86
4.4 背压信号采集系统响应数学模型的建立	87
4.5 模型验证	88
4.5.1 干净过滤体背压对比	88

4.5.2 不完全干净过滤体的背压	94
4.6 本章小结	94
参考文献	95
第5章 喷油助燃再生背压阈值 MAP	97
5.1 再生时机的判断	97
5.1.1 几种判断方法的对比	97
5.1.2 再生时机的确定	99
5.2 试验设计	99
5.2.1 试验方法	99
5.2.2 试验数据采集与处理	99
5.3 DPF 对柴油机油耗经济性的影响	101
5.3.1 AVL BOOST 仿真软件	101
5.3.2 计算模型	101
5.3.3 结果验证	106
5.4 柴油机微粒捕集器再生背压阈值 MAP 的建立	109
5.4.1 装有干净 DPF 柴油机的工作油耗	109
5.4.2 DPF 再生排气背压阈值 MAP	113
5.5 本章小结	113
参考文献	114
第6章 喷油助燃再生喷油量与补气量优化控制模型	116
6.1 喷油助燃过程热平衡方程	116
6.2 喷油量优化控制模型的建立	118
6.3 喷油量/补气量模型的改进	120
6.4 喷油量/补气量优化算法	121
6.5 喷油量/补气量优化控制结果分析	124
6.6 本章小结	126
参考文献	126
第7章 喷油助燃再生控制系统的研究	128
7.1 再生控制	128
7.1.1 控制策略	128
7.1.2 特点分析	130
7.2 控制系统硬件设计	131
7.2.1 系统电源	131
7.2.2 控制单片机	131

7.2.3	V/F 变化器	133
7.2.4	传感器外围电路.....	134
7.2.5	数据存储芯片 24C02C	136
7.2.6	外围控制电路	136
7.2.7	不掉电时钟 DS1302	136
7.2.8	再生过程数据显示	137
7.2.9	多路模拟开关	138
7.3	控制系统程序设计	138
7.4	应用研究	138
7.5	本章小结	142
	参考文献.....	142
第 8 章	总结与展望.....	144
8.1	总结	144
8.2	有待进一步研究的问题	146
附录	喷油助燃再生系统主控制程序流程图.....	147

第 1 章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 项目背景

从诞生、发展至今，内燃机已有 100 多年的历史，在社会生产力提高、国民经济发展及人类物质文明进步等方面发挥了极大的作用，广泛应用于交通运输、农用机械以及各种工程施工机械中，成为不可或缺的源动力。但随着内燃机应用数量的剧增，其尾气有害物质排放量也随之激增。据相关资料统计，在全球燃烧矿物燃料产生的有害气体排放量中，50% 左右来自于内燃机，对大气环境的恶性影响也越来越严重。进入 21 世纪以来，面对频发的生态环境恶化现象，无论是发达国家还是发展中国家，都对环境保护问题给予了前所未有的关注，并将其作为人类社会研究中的焦点。世界各国根据各自的大气质量标准、经济技术条件等不断地制定出越来越严格的尾气排放法规来控制各种内燃机特别是机动车的排放污染，以求经济的可持续发展。

随着先进工业国家经济持续快速的发展，汽车保有量大幅增加，仅以我国为例，据公安部交通局数据显示，2011 年我国的汽车保有量为 1.04 亿辆，而到 2015 年年底我国的汽车保有量达到了 1.72 亿辆，比 5 年前增长了 65.4%，每年的增幅均超过 10%。而随着居民生活水平的提高，私家车保有量也在急剧增长，且私家车占据汽车的比例也越来越大。2011 年我国的私家车保有量为 0.58 亿辆，占总汽车保有量的 55.9%，截至 2015 年年底我国私家车保有量达到了 1.24 亿辆，占总汽车保有量的 72.09%。如图 1.1 所示给出了近 5 年来我国汽车保有量和私家车保有量的统计数据。而据权威机构预测，到 2050 年世界汽车保有量将超过 30 亿辆，如此多的汽车数量，其排出的污染物已成为大气环境最大的污染源之一，资料表明，大气污染物中的 60% 来自汽车排放。

较同排量的汽油机而言，柴油机具有更高的热效率、更好的适应性能，以及更大的输出功率和较低的油耗等诸多优势，已逐渐成为汽车的主要动力，尤其是中、重型车辆动力领域，柴油机的保有量和需求量占有绝对优势的地位，在轻型车动力领域，其应用范围也在不断扩大，柴油机轿车所占比重日趋增大。在世界轿车产量中，西欧柴油轿车比重在 2002 年达到 40%，2008 年达到

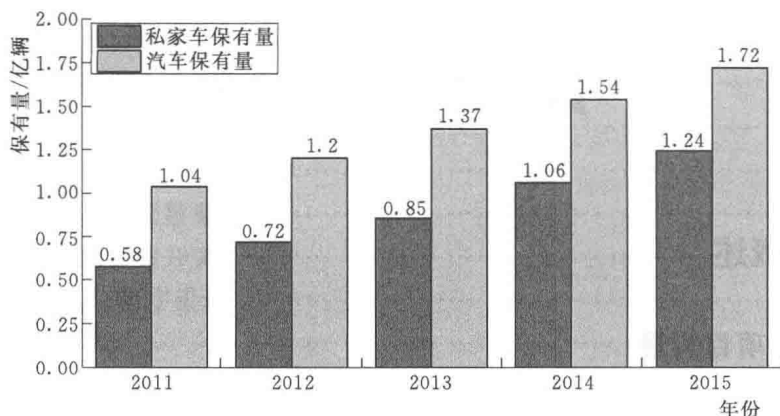


图 1.1 近 5 年来我国的汽车保有量和私家车保有量

了 50%；就我国而言，2000 年柴油机的年产量为 62.975 万台，至 2010 年底，其年产量达到 393.6 万台，年产量在 10 年的时间翻了 6 倍多。因此，车辆动力柴油机化的趋势使得对柴油机排放的研究变得越来越重要。

柴油机排放的污染物如下：

(1) 一氧化碳 (CO)。CO 是一种无色无味的气体，主要是由于柴油不完全燃烧而产生的。由于 CO 与血红蛋白的结合能力约为 O_2 的 200~250 倍。因此，当 CO 通过呼吸道进入人体后将与人体中的红细胞相结合，造成缺氧，引起头痛、呕吐、昏迷等反应，严重的甚至还会造成痴呆、中毒等后果。

(2) 碳氢化合物 (HC)。HC 是燃料燃烧所产生的多种化合物的总称。对于柴油机，尾气的 HC 主要包括有未燃烧的燃料、分解的燃料分子以及少量的中间产物等。HC 对呼吸道和眼部的黏膜具有较强的刺激作用，容易引起结膜炎、鼻炎等症状。

(3) 氮氧化合物 (NO_x)。柴油机尾气中的 NO 和 NO_2 总称为 NO_x 。在发动机尾气中有 90% 的 NO_x 为 NO。其中， NO_2 具有较强的刺激作用，能够降低远方物体的亮度和反差，是形成光化学烟雾的主要成分。同时， NO_x 还能与空气中的水分结合形成具有腐蚀性的酸，是酸雨的重要成因之一。

(4) 颗粒物 (PM)。柴油机尾气中的 PM 主要是由于柴油在高温、缺氧条件下产生的。烃分子在高温缺氧的条件下会进行部分氧化和热裂解，生成不饱和的烃类，这些不饱和的烃类再经过不断的脱氢、聚合，形成以碳为主的碳烟晶核。气相烃以及其他物质在碳烟晶核的表面凝聚，最终形成链状或团絮状的 PM。与汽油机相比，柴油机排气中的有害成分碳氢化合物 (HC) 和一氧化碳 (CO) 含量较低，大约低一个数量级，但氮氧化物 (NO_x) 和颗粒物 (PM) 的排放量较高，特别是 PM 的排放量要高出 30~80 倍，在当前严峻的

环保形势下,无疑严重地制约了柴油机的长远发展,柴油机汽车的微粒排放控制研究已成为当前汽车发展过程中极其重要且极具挑战性的课题。

1.1.2 微粒的生成机理与危害

柴油机排气微粒主要是由气相燃料分子在气缸内高温缺氧区经裂解、脱氢过程核化形成的先期产物,或在气缸内低于 1500K 左右的低温区域通过聚合、冷凝生成碳烟微粒,通过表面吸附生长或碰撞聚集气相物质及其微小粒子而形成的很多原生微球的聚集体,显微镜下总体结构呈现为团絮状或链状,如图 1.2 所示。

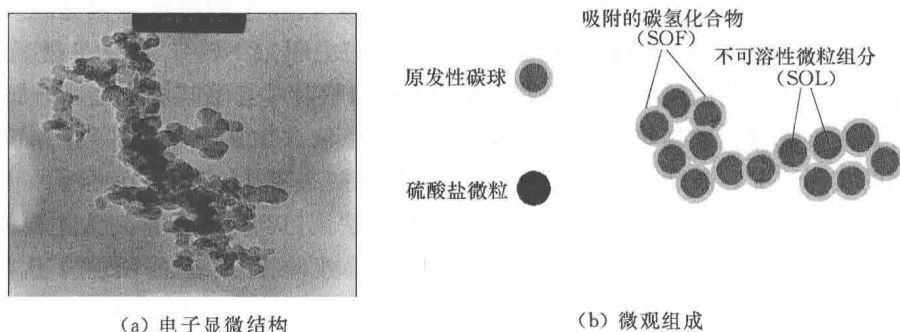


图 1.2 柴油机微粒物电子显微镜照片及微观组成

柴油机排放的微粒物微观结构分两个部分(也可分成 3 个部分),一部分为不可溶性组分 SOL (Solids),即不能溶于有机溶剂,主要由碳烟或无机盐(如硫酸盐)或两者混合组成;另一部分则是可溶性有机组分 SOF (Soluble Organic Fraction),即可以溶于有机溶剂,主要由各种未燃或未完全燃烧的燃料、润滑油中 HC、含氧有机物和多环芳烃 PAH 以及水分物质等组成,成分复杂,含近百种成分。

对于现代柴油机,其排放的微粒粒径小(在几十微米甚至几微米之间)、质量轻,比表面积大,能较长时间地悬浮于大气中(大部分微粒悬浮高度刚好处于人体高度范围),除降低大气能见度外,很容易通过人体呼吸系统吸入肺部并沉积,导致肺气肿、呼吸道疾病、心血管疾病、支气管炎等慢性病变。同时,微粒中表面积吸附的 SOF 中含有多环芳香烃(PAH)等成分,具有很强的毒性或致癌性,极大地危害着人类的健康。随着环保意识的加强和大气治理工作的不断深入,越来越严格的排放控制标准将相继出台。

1.2 柴油车排放法规的发展

对汽车尾气的污染,人们给予了较大的重视。1964 年美国加利福尼亚州

最先开始对汽车尾气加以控制，之后国会 1970 年通过《空气净化法案》，并成立环保总署（EPA）进行监督执行。同年，欧洲经济委员会（ECE）和日本也制定了相应的排放控制标准。此后的几十年，在逐步意识到汽车保有量快速增长的同时，其排放的尾气污染也极大地威胁了人类的生存环境和身体健康。因此，从改善日益恶化的生存环境角度出发，世界各国都制定了相应的越来越严格的汽车排放法规。

纵观这些排放控制法规整体的发展进程，具有这样的几个特点：①按从轻型车到重型车、从汽油车到柴油车的车型顺序逐步控制的；②对污染物的限制遵循先解决主要矛盾，后解决次要矛盾的顺序：汽油车的排放控制是从 CO、HC 到 NO_x，而柴油车则从可见的碳烟到 CO、HC、NO_x，最后是微粒子；③随着人们意识到微粒子对人体健康的严重危害后，对其限制措施也逐渐加强，其有毒有害成分、致癌物质苯、甲醛等也相应地包含在各控制范围内；④结合各国的实际情况，鼓励并大力支持汽车朝超低排放和零排放的方向发展。

目前，美国、日本和欧洲制定的汽车排放法规已衍生成世界三大主要的法规体系，其他国家都结合本国的发展特点不同程度地参照或全部采用了这些法规和标准，现就这三大排放法规体系及我国排放法规发展的历程作简要阐述。

1.2.1 国外排放法规

对汽车尾气的排放控制，最先源于美国加利福尼亚州（简称“加州”）洛杉矶地区，该地区汽车流通密度大，加之地形特殊，属四面环山的盆地，地势对流通风差，污染的大气不易散发，成为美国当时污染最为严重的城市，并首次发生“光化学烟雾”事件，频繁爆发的大气污染事故，使得加州在 1959 年建立起相应的法律法规来规定汽车排放控制和大气质量标准，并在全国衍射开来。发展至今，美国排放法规形成了控制指标种类最多也最为严格的特点。从各州参照执行的情况来分，其排放法规可分为两类，一类为加州空气资源局（CARB）排放法规，另一类为环境保护总署（EPA）颁布的联邦排放法规两种。从两者的发展历史来看，前者较后者领先 1~2 年左右，期间先后采用“7 工况法”“LA-4C（FPT-72）测试循环”“LA-4CH（FPT-75）测试循环”等方法来控制汽车的排放，修订其净化法逐步加强对 NO_x 的限制，并对 HC、CO 也逐步实现加严控制。随后，在 1970 年开始对重型车用和客车用柴油机实施烟度排放控制标准，对重型柴油机在加速、爬坡和最大负荷时的烟度限值予以了规定。美国环保总署在 1985 年颁布了重型车用柴油机微粒排放标准，对各阶段应达到的排放指标提出了具体要求。随后，在人们致力于降低柴油机微粒排放的研究过程中，意识到燃油中硫含量对微粒排放的影响后，美国环保总署于 1993 年颁布的排放法规中提出了对燃油中硫含量加以限制。从

1994 年开始, CARB 计划执行极为严格的 LEV 法规(低污染汽车法规)和 CF 计划(清洁燃料汽车计划),并按 4 个阶段即 TLEV(过渡低排放车)、LEV(低排放车)、ULEV(超低排放车)和 ZEV(零污染车)逐步进行。与 EPA 的排放要求相比, CARB 法规对微粒排放的限制要更为严格,且规定从 1998 年起销售到加州的轻型 ZEV 车占比为 2%,2001 年达到 5%,2003 年达到 10%,并在 2004 年起进一步强化汽车排放法规(SULEV),使其排放限值为 ULEV 车的 1/4,之后逐步过渡到 ZEV 车。

日本从 1966 年起开始对汽车尾气的排放加以控制,通过采取“4 工况”“10 工况”与“10.15 工况”等检测试验法,将 CO 的排放量控制到 3% 范围内。并对小型车辆的 CO 排放逐步限制至 1.5% 范围内,同时增加 HC 和 NO_x 两项排放控制指标并逐步引用到柴油车上。日本排放法规将限值分为两种,即最高值与平均值,规定每一辆车控制指标的排放量不得高于最高值,且每季度测得的平均值不能超过法规允许的平均值限值。

欧盟经济委员会(ECE)于 1970 年开始采用 ECE W5 法规来控制轻型汽油车尾气与曲轴箱污染物排放,随后考虑到 NO_x 的排放问题,先后采用 ECE R83 与 ECE R15-04 等法规来予以控制,通过不断修订与加严,在 1992 年、1996 年、2000 年、2005 年和 2008 年分别制定并开始执行欧 I~欧 V 的排放法规体系,其内容涉及安全、环保、节能三大领域等约 109 项。

与美国、日本等国家相比,欧洲地区国家的排放控制起步较晚,刚开始时排放标准也要求得较宽松,但推出欧 I 排放法规后,其排放控制步伐和排放限值不断加快、加严,其排放控制标准已超过日本排放法规规定的标准并已接近美国的 LEV 计划。

在载客车用和重型卡车用柴油机微粒排放控制方面,美国、日本、欧洲国家各自颁布的标准及相应的内容与时间如图 1.3 和图 1.4 所示。

1.2.2 国内排放法规

国内机动车污染控制是从 1979 年《中华人民共和国环境保护法(试行)》颁布后开始的。在世界三大法规体系中,考虑到欧洲排放法规及相应的排放标准在道路交通情况与松严程度等方面与我国的国情相似。因此,借鉴欧美经验,在全面等效地采用欧盟(EU)指令、ECE 技术内容和部分前欧共体(EEC)法规的基础上形成了我国的排放法规体系,其中, ECE R49 法规、ECE R24 法规、ECE R83 法规和 ECE R85 法规等规定的技术为我国同等采用,成为我国新的车用柴油机排放标准系列,即《压燃式发动机和装用压燃式发动机的车辆排气污染物排放限值及测试方法》(GB 17961—1999)、《压燃式发动机和装用压燃式发动机的车辆排气可见污染物排放限值及测试方法》(GB 3847—1999)、《汽车污染物排放限值及测试方法》

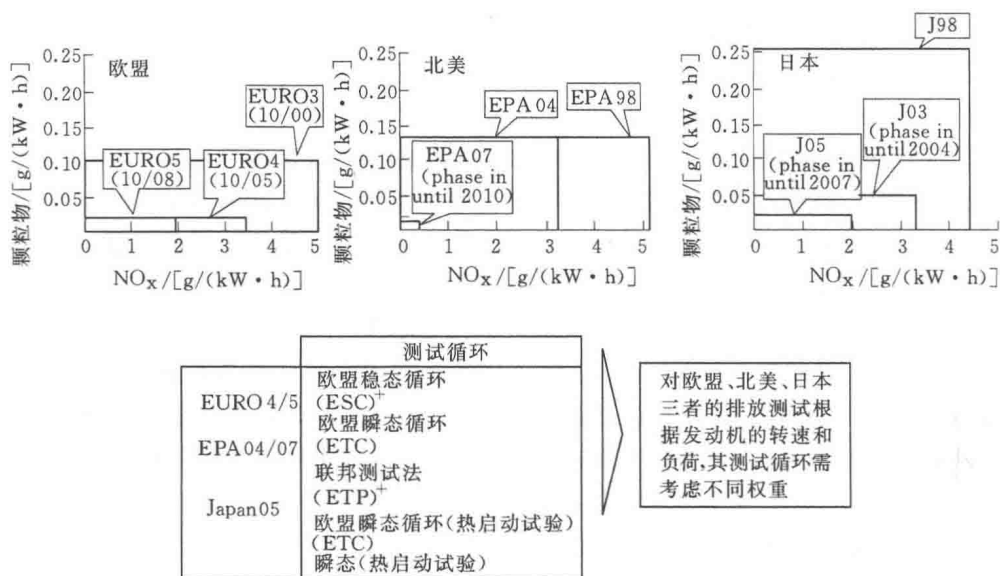


图 1.3 载客车用柴油机的排放法规

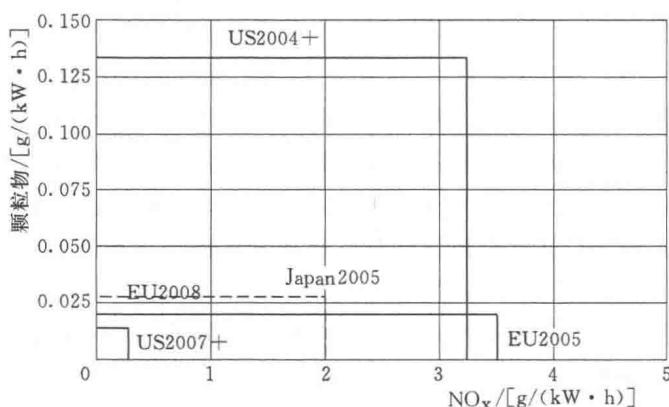


图 1.4 重型卡车车用柴油机的排放法规

(GB 14761—1999)、《汽车用发动机净功率测试方法》(GB 17692—1999), 上述法规已从 2000 年 1 月 1 日起实施。

表 1.1 是根据《汽车用发动机净功率测试方法》(GB 17692—1999) 中的规定, 列出了我国稳态循环 (ESC) 和负荷烟度试验 (ELR) 工况柴油车辆排放标准。

对应于欧 I、欧 II 标准, 2001 年我国又颁布了国 I、国 II 排放标准, 即《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》(GB 18352.1—2001/GB 18352.2—2001)、针对重型柴油机的《车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法》(GB 17691.2—2001), 并实施《关于对低污染排放小汽车减征消费税的

通知》(财税〔2000〕26号)来刺激排放标准的实施进度。

表 1.1 ESC 和 ELR 试验限值

阶段	一氧化碳 (CO) /[g/(kW·h)]	碳氢化合物 (HC) /[g/(kW·h)]	氮氧化物 (NO _x) /[g/(kW·h)]	颗粒物 (PM) /[g/(kW·h)]	烟度 /m ⁻¹
Ⅲ	2.1	0.66	5.0	0.10、0.13 ^①	0.8
Ⅳ	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Ⅴ	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
EEV ^②	1.5	0.25	2.0	0.02	0.15

① 对每缸排量低于 0.75dm³，及额定功率转速超过 3000r/min 的发动机。

② EEV 是指环境友好汽车 (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle)。

在 2005 年 7 月 1 日，北京计划实行国Ⅲ排放标准 GB 18352—2005、GB 17691—2005 (针对重型柴油机)，其标准已于 2007 年 7 月 1 日开始实施，对于国Ⅳ排放标准则在 2010 年 7 月 1 日开始实施。我国柴油车排放标准见表 1.2。

表 1.2 我国柴油机车车辆排放标准 单位：g/km

法规	车 型	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	PM	实施日期
国 I	柴油机	2.72/3.16			0.97/1.13	0.14/0.18	2000 年前后
	非直喷柴油车	1.0			0.7	0.08	
国 II	直喷柴油车	1.0			0.9	0.10	2004 年前后
	非直喷柴油车	0.64		0.5	0.56	0.05	
国 III	直喷柴油车	0.64		0.5	0.56	0.05	型式核准-2007 年
国 IV	柴油车	0.5		0.25	0.3	0.025	2010 年型式核准
国 V	重型柴油车						2012 年型式核准

在我国某些国际化大都市如北京、上海等，鉴于经济社会已发展到一定的程度，在与国际接轨的过程中，出于特殊的政治、环境需要，例如北京迎接 2008 年奥运会、上海举办 2010 年世博会等，均已提前实施了更严格的排放标准，明显减小了与国外排放标准之间的差距。

但从欧Ⅱ、欧Ⅲ及欧Ⅳ排放法规控制严度来看，对 HC、CO、NO_x 与 PM 4 种排放限值，欧Ⅲ限值分别是欧Ⅱ的 60%、53%、71%和 67%，欧Ⅳ限值分别是欧Ⅲ的 70%、71%、70%和 20%。因此，同比之下，我国现行的汽车排放标准较欧洲仍落后 8~10 年，这主要是由各国排放控制技术发展水平来决定的。

1.3 柴油机微粒排放控制技术的研究现状

经过数十年汽车排放污染控制进程的推进，柴油机的微粒排放控制技术已

取得了长足的发展。目前, 这些技术可归纳为 3 种, 分别是燃料技术、机内技术和机外后处理技术, 现就这三大技术进行简要阐述。

1.3.1 燃料技术

燃料技术主要是通过改进燃料组分和性质来提高燃油品质, 或使用替代燃料以降低微粒排放。目前主要的燃料技术发展现状分为:

(1) 添加剂技术。自 1949 年 Bartholome 和 Saehsse 做了关于采用某些添加剂能减少炭烟的报道后, 20 世纪 60 年代, 添加剂的研究开始广泛开展起来。早期的添加剂以不溶于油的无机金属盐为主, 且主要用于工业和民用锅炉上, 应用受较多的限制。随后, 可溶于油即油溶性金属盐添加剂成为研究重点, 特别是 20 世纪 60 年代后期到 70 年代, 美国大力开展了以降低发动机碳烟微粒排放为目的的研究计划, 大大推动了添加剂的发展步伐。根据 Howard J. B、Kausch W. J、Norman 等人的试验结果, 在柴油中加入 5% 体积的钡盐添加剂时, 排气烟度可下降 30%~50%; Golothan、Apostolescu 等发现在单缸直喷柴油机上, 燃油含 0.05% 质量的钡盐时烟度可降低 40%~50%; 根据 Hayhurst、吕九琢等人的报道, 采用的环烷酸钡添加剂中, 当钡质量含量为 0.1% 时, 其平均消烟率可达 67.7% 左右。此外, 国外一些研究机构还针对某些金属盐添加剂复合使用时的协同性进行了试验研究, 很多资料表明, 部分金属添加剂复合使用时具有良好的协同性, 即复合使用时其减烟效果比单独使用一种添加剂时要好。但考虑到金属基添加剂在气缸内形成的灰烬通过排气排入大气后, 形成金属飘尘将造成二次污染。因此, 对添加剂的研究从 20 世纪 80 年代后开始回归谨慎并趋向低潮。同时, 对无灰型有机化合物添加剂如叔丁基过氧化氢、硝基烷烃与硝酸酯等虽也引起了人们的注意, 但较有灰添加剂而言效果较差, 需做进一步的研究。

(2) 改进石油炼制技术, 降低车用燃油含硫量。在欧洲、美国和日本, 车用燃油含硫量对汽车微粒排放的影响问题受到了很大的重视, 研究表明, 含硫柴油燃烧后形成的硫酸盐将使柴油机微粒排放呈正比增加, 柴油中含硫质量分数每增加 0.1%, 柴油机微粒比排放增加 $0.02 \sim 0.03 \text{ g}/(\text{kWh})$ 。各国都把降低燃油硫含量作为一项重要目标, 从 2005 年起欧洲限制柴油含硫量最高不能超过 50ppm, 甚至提出含硫量低于 10ppm 的无硫目标。在美国, 环保总署建议从 2006 年起, 汽车使用的市售柴油硫含量应减少到 15ppm 左右。而我国受石油炼制水平的限制, 目前含硫量仍处于 1500ppm 左右的水平, 与世界平均水平相差甚远, 将硫含量降低到美、欧水平, 这将是一个任重而道远的目标, 因为每一次硫含量的降低, 都需要炼油厂做大量的技术改进、设备更新和大量资金的投入, 炼油厂面临严峻挑战, 但随着高品质燃油需求的不断增加, 世界范