

普通高等教育“十二五”规划教材

内燃机排放与控制

张翠平 王铁 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

内燃机排放与控制

主编 张翠平 王 铁
参编 胡准庆 徐妙侠 杜慧勇
孟忠伟 朱建军 许和变
主审 杨庆佛



机械工业出版社

本书共分9章,主要包括:环境污染与内燃机排放污染物、内燃机排放污染物的生成机理与影响因素、汽油机机内净化技术及后处理净化技术、柴油机机内净化技术及后处理净化技术、排放污染物的测试技术、汽车排放法规及测试规范、车用低排放燃料及新型动力系统。本书反映了内燃机排放污染物控制的新技术和新方法,为读者全面、系统地了解内燃机排放知识提供帮助。

本书可作为高等院校车辆工程、内燃机及相近专业本科生和研究生有关课程的教材或教学参考书,还可供从事内燃机排放科技工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机排放与控制/张翠平,王铁主编. —北京:机械工业出版社,
2012.10
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-40032-5

I. ①内… II. ①张… ②王… III. ①内燃机—排气—净化—高等学校—教材 IV. ①TK401

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第241379号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 王海霞
版式设计:霍永明 责任校对:常天培
封面设计:张静 责任印制:乔宇
三河市国英印务有限公司印刷
2013年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm·12.5印张·309千字
标准书号:ISBN 978-7-111-40032-5
定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面防伪标均为盗版

前 言

汽车在诞生后的 100 多年中,虽然在制造工艺等取得了巨大的进步,但作为其动力装置的发动机技术却没有发生根本性的变化。目前,以汽油机、柴油机为代表的内燃机仍是各种道路机动车发动机的主流技术。随着机动车保有量的增加,在城市,特别是在拥挤的街道上,汽车尾气污染日益严重,成为人类健康和自然环境的最大威胁之一,给城市和区域空气质量带来了巨大压力。为此,各国相继制定了有关内燃机排放污染物的标准,日益严格的排放法规促使汽车发动机排放污染控制技术迅速发展。

本书贯穿“节能减排、绿色环保”的主题,形成了由“生成机理、机内净化、机外控制、测试技术、排放法规”五个基础平台组成的内燃机排放与控制基本内容体系。本书内容注重教学的启发性和适用性,体现教学方法的科学性,注意知识的循序渐进及理论联系实际。本书的主要内容包括:环境污染与内燃机排放污染物、内燃机排放污染物的生成机理与影响因素、汽油机机内净化技术及后处理净化技术、柴油机机内净化技术及后处理净化技术、排放污染物的测试技术、汽车排放法规及测试规范、车用低排放燃料及新型动力系统。

本书内容将基础性、系统性、实用性和先进性进行了有机结合,不仅有比较成熟的理论及应用技术成果,而且包含了内燃机排放与控制的最新技术和法规,与内燃机排放与控制的发展相适应,立足于学科发展的前沿。

本书由太原理工大学牵头编写,由张翠平、王铁任主编。太原理工大学王铁编写第 1 章,太原理工大学张翠平编写第 2 章和第 8 章,北京交通大学胡准庆编写第 3 章,重庆科技学院徐妙侠编写第 4 章,河南科技大学杜慧勇编写第 5 章,西华大学孟忠伟编写第 6 章,太原理工大学许和变编写第 7 章,太原理工大学朱建军编写第 9 章,全书由张翠平统稿,太原理工大学杨庆佛教授担任主审。

本书在编写过程中参考了大量的文献和资料,在此,对原作者一并表示深切的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有某些不足或误漏,殷切期望广大读者予以批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 环境污染与内燃机排放污

染物····· 1

1.1 环境污染与保护····· 1

1.2 环境空气质量标准····· 2

1.3 大气污染与汽车····· 4

1.4 汽车发动机排放污染物及其危害····· 5

1.4.1 汽车发动机排放污染物的 种类····· 5

1.4.2 一氧化碳····· 5

1.4.3 碳氢化合物····· 6

1.4.4 氮氧化物····· 6

1.4.5 光化学烟雾····· 7

1.4.6 颗粒物····· 8

1.4.7 二氧化碳····· 9

1.5 污染物的评定指标····· 9

第 2 章 内燃机排放污染物的生成

机理与影响因素····· 11

2.1 一氧化碳的生成机理····· 11

2.2 碳氢化合物的生成机理····· 12

2.2.1 车用汽油机未燃 HC 的生成 机理····· 13

2.2.2 车用柴油机未燃 HC 的生成 机理····· 15

2.2.3 非排气 HC 的生成机理····· 15

2.3 氮氧化物的生成机理····· 16

2.4 颗粒物的生成机理····· 18

2.4.1 汽油机颗粒物的生成机理····· 18

2.4.2 柴油机颗粒物的生成机理····· 19

2.5 影响排放污染物生成的因素····· 23

2.5.1 影响汽油机排放污染物生成的 因素····· 23

2.5.2 影响柴油机排放污染物生成的 因素····· 27

第 3 章 汽油机机内净化技术····· 33

3.1 概述····· 33

3.1.1 汽油机的燃烧过程····· 33

3.1.2 影响汽油机燃烧的因素····· 35

3.1.3 汽油机机内净化的主要技术 措施····· 37

3.2 电控燃油喷射及点火系统····· 38

3.2.1 典型电控燃油喷射系统的结构和 工作原理····· 38

3.2.2 点火系统的控制····· 42

3.2.3 怠速转速的控制····· 44

3.2.4 汽油机缸内直接喷射技术····· 46

3.3 低排放燃烧系统····· 49

3.3.1 稀薄燃烧····· 49

3.3.2 分层燃烧····· 52

3.3.3 均质压燃式燃烧····· 53

3.4 燃烧室及进气系统结构的改进····· 56

3.4.1 压缩比与燃烧室形状····· 56

3.4.2 多气门技术····· 58

3.4.3 进气增压····· 59

3.4.4 可变进气系统····· 61

3.5 废气再循环····· 62

3.5.1 废气再循环的工作原理····· 62

3.5.2 废气再循环的控制策略····· 63

3.6 汽油蒸气排放控制····· 63

3.7 曲轴箱排放控制····· 64

第 4 章 汽油机后处理净化技术····· 66

4.1 概述····· 66

4.2 三效催化转化器····· 66

4.2.1 三效催化转化器的基本构造····· 66

4.2.2 催化剂的种类····· 68

4.2.3 催化反应机理····· 69

4.2.4 三效催化转化器的性能指标····· 71

4.2.5 三效催化转化器的劣化机理····· 73

4.2.6 三效催化转换器的使用条件	75	6.1.1 DOC 的结构	110
4.3 热反应器与空气喷射	76	6.1.2 催化剂的催化原理	112
4.3.1 热反应器	76	6.2 NO _x 机外净化技术	113
4.3.2 空气喷射	76	6.2.1 吸附催化还原法	113
4.4 稀薄燃烧汽油机尾气净化技术	78	6.2.2 选择性催化还原法	115
4.4.1 直接催化分解技术	78	6.2.3 等离子辅助催化还原法	117
4.4.2 吸收还原 (NSR) 技术	78	6.3 颗粒物机外净化技术	118
4.4.3 选择性催化还原 (SCR) 技术	78	6.3.1 颗粒物捕集器	118
第 5 章 柴油机机内净化技术	80	6.3.2 等离子净化技术	124
5.1 概述	80	6.3.3 静电分离技术	124
5.1.1 柴油机的燃烧过程	80	6.4 四效催化转化器	125
5.1.2 影响柴油机燃烧过程的因素	81	6.4.1 原理简介	125
5.1.3 柴油机的主要排放污染物	83	6.4.2 各类四效催化净化系统	126
5.1.4 柴油机机内净化的主要技术 措施	83	第 7 章 排放污染物的测试技术	128
5.2 低排放燃烧系统	84	7.1 汽车排放污染物的取样系统	128
5.2.1 非直喷式燃烧系统	84	7.1.1 直接取样系统	128
5.2.2 直喷式燃烧系统	85	7.1.2 定容取样系统	130
5.2.3 气流组织及多气门技术	87	7.1.3 稀释取样系统	133
5.3 低排放燃油喷射系统	88	7.2 排气成分分析仪	135
5.3.1 喷油压力的影响	89	7.2.1 不分光红外线分析仪	135
5.3.2 喷油规律的优化	90	7.2.2 化学发光分析仪	136
5.3.3 喷油时刻	91	7.2.3 氢火焰离子化分析仪	137
5.3.4 低排放喷油器	92	7.2.4 顺磁分析仪	138
5.3.5 先进电控燃油喷射技术	93	7.3 颗粒物测量与成分分析	138
5.4 增压技术	98	7.3.1 颗粒物质量测量	138
5.4.1 增压方式	98	7.3.2 颗粒物成分分析	139
5.4.2 废气涡轮增压	99	7.4 烟度测量与分析	140
5.4.3 增压对排放的影响	103	7.4.1 滤纸式烟度计	141
5.4.4 先进的涡轮增压技术	104	7.4.2 不透光烟度计	141
5.5 废气再循环系统	106	第 8 章 汽车排放法规及测试规范	143
5.5.1 系统构成	107	8.1 概述	143
5.5.2 柴油机 EGR 与汽油机 EGR 的 比较	109	8.2 排放法规的演变	144
5.5.3 废气再循环率对柴油机性能的 影响	109	8.3 国外汽车排放法规和测试规范	145
第 6 章 柴油机后处理净化技术	110	8.3.1 美国轻型汽车排放法规和 测试规范	145
6.1 氧化催化转化器	110	8.3.2 欧洲轻型汽车排放法规和 测试规范	146
		8.3.3 日本轻型汽车排放法规和 测试规范	149

8.3.4 国外重型汽车排放法规和测试规范	152	9.1.3 对臭氧的影响	172
8.4 我国汽车排放法规的历史沿革	157	9.2 石油燃料的改善	173
8.5 我国汽车排放测试规范	160	9.2.1 汽油的改善	173
8.5.1 新车型式核准和生产一致性检测规范	160	9.2.2 柴油的改善	174
8.5.2 在用车排放测试规范	163	9.3 代用燃料	175
8.5.3 汽油车非排气污染物的测量与分析	167	9.3.1 含氧燃料	176
第9章 车用低排放燃料及新型动力系统	170	9.3.2 生物燃料	179
9.1 燃料品质对内燃机排放的影响	170	9.3.3 气体燃料	180
9.1.1 对 CO、CO ₂ 、HC 和 NO _x 的影响	170	9.3.4 氢燃料	184
9.1.2 对碳烟和颗粒物的影响	172	9.4 混合动力汽车	185
		9.4.1 混合动力汽车发展概况	186
		9.4.2 混合动力汽车的分类及特点	188
		9.4.3 混合动力汽车面临的问题	191
		参考文献	193

第1章 环境污染与内燃机排放污染物

1.1 环境污染与保护

环境是人类赖以生存的基本条件，是社会得以持续稳定发展的物质基础。人类在从环境中获取所需的物质和能量，使社会物质文明高度发展的同时，也造成了对环境的污染和对生态系统的破坏，带来了一系列如人口、粮食、能源、资源和环境等方面的社会问题。目前，全球环境问题表现为森林植物破坏、水土流失严重、土地沙漠化扩大、生物多样性减少、大气污染日益严重、温室效应加剧、大气臭氧层被破坏、酸雨蔓延、能源危机、水污染加剧、各种自然灾害频繁发生等。总之，生态平衡遭到破坏，环境不断恶化，将严重危害人体健康，长此发展下去，最终将使自然界失去供养人类生存的能力。因此，环境问题已成为国际性的热点问题，引起了人们的严重关注。

在诸多环境问题中，大气污染是一个十分严重的问题。大气是人类生存所不可缺少的基本物质条件，但人类活动和自然过程产生的某些物质进入到大气中，使大气固有的成分中增加了新的有害成分，而一旦这些有害成分积累到足够的浓度，达到足够的时间，就会对人类活动、动植物及环境造成危害。

世界上的许多城市都曾出现过很严重的空气污染事件。例如，1952年12月5日至9日，伦敦上空受强冷空气的控制，形成逆温层，连续五天被烟雾笼罩，二氧化硫（ SO_2 ）的质量浓度高达 $3.5\text{mg}/\text{m}^3$ ，颗粒物的质量浓度高达 $4.5\text{mg}/\text{m}^3$ 。成千上万的市民感到胸部憋闷，咳嗽呕吐，心血管、呼吸系统疾病的发病率迅速上升，期间死亡4000多人，造成了震惊世界的“伦敦烟雾事件”。

从1943年开始，美国洛杉矶在每年的5月与10月期间经常出现烟雾几天不散的严重污染事件。前后经过七八年，到了20世纪50年代，人们才发现洛杉矶烟雾是由汽车排放物造成的，通常称为光化学烟雾。此后，在北美、日本、澳大利亚和欧洲部分地区也先后出现这种烟雾。1955年，洛杉矶又出现“光化学烟雾事件”，由于汽车排气造成大气中的臭氧含量严重超标，造成大批森林枯黄死亡，成千上万人患上红眼病，呼吸系统疾病的发病率迅速上升，65岁以上的老人在几天内死亡400多人。

这些典型的大气污染事件表明，大气污染问题的出现与人类对能源的利用有着密切的关系。

1. 大气污染的一般分类

大气污染按其污染的范围可分为局部污染、区域性污染和全球性污染。

(1) 局部污染 出现在一个城市或更小区域范围内的空气污染称为局部污染，如北京、广州、兰州等城市的空气污染，其范围一般小于 100km^2 。

(2) 区域性污染 区域性污染是指范围在 500km^2 以上的地区出现的空气污染，以及这些污染物的跨国输送，最典型的是酸雨问题，如北美、欧洲、中国西南三大酸雨区。

(3) 全球性污染 污染范围在数千平方千米以上的大气环境问题称为全球性污染。例如, 温室气体排放引起的全球气候变化, 以及空调制冷剂 and 有机溶剂在使用中排放的氯氟烃 (CFCs) 对地球平流层臭氧的破坏等。

2. 大气污染源

大气污染的污染源可分为天然污染源和人为污染源。天然污染源是指自然界向大气排放污染物的地点或地区。例如, 排放灰尘、二氧化硫、硫化氢等污染物的活火山, 自然逸出瓦斯气, 土壤和岩石的风化, 以及发生森林火灾、地震等自然灾害的地方。人为污染源按人们社会活动的功能可分为生活污染源、工业污染源和交通污染源等。其中, 交通运输业是最主要的污染源之一, 汽车、火车、轮船、飞机等交通工具都需要燃烧燃料, 排放废物, 从而对大气造成污染, 其中又以汽车为甚。汽车成为主要的运输和代步工具后, 其在提高社会生产效率, 改善人们生活质量的同时, 也消耗了大量的能源, 排放的尾气也成了主要的交通污染源。与固定污染源相比, 汽车尾气排放的高度位于人的呼吸带中, 排出的污染物长时间在城市的街道、楼群中滞留, 对人们健康的危害最直接。可以说, 汽车是一个流动的污染源。

1.2 环境空气质量标准

为了改善环境空气质量, 防止生态遭到破坏, 创造清洁适宜的环境, 保护人体健康, 我国根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》制定了《环境空气质量标准》(GB 3095—1996); 2012 年, 根据社会经济发展状况和环境保护的要求, 又对该标准进行了适时修订。《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 规定了环境空气功能区分类、标准分级、污染物项目、平均时间及浓度限值、监测方法、数据统计的有效性规定及实施与监督等内容。其分期实施的时间要求为: 2012 年, 京津冀、长三角、珠三角等重点区域及直辖市和省会城市; 2013 年, 113 个环境保护重点城市和国家环保模范城市; 2015 年, 所有地级以上城市; 2016 年 1 月 1 日, 全国实施新标准。

GB 3095—1996 规定的污染物项目包括二氧化硫 (SO_2)、总悬浮颗粒物 (TSP)、可吸入颗粒物 (PM_{10})、氮氧化物 (NO_x)、碳氧化物等, GB 3095—2012 修订的主要内容有:

- 1) 调整了环境空气功能区分类, 将三类区并入二类区。
- 2) 增设了细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ (粒径小于等于 $2.5\mu\text{m}$) 的浓度限值和臭氧 O_3 的 8h 平均浓度限值。
- 3) 调整了可吸入颗粒物 PM_{10} (粒径小于等于 $10\mu\text{m}$)、二氧化氮、铅和苯并 [a] 芘等的浓度限值。
- 4) 调整了数据统计的有效性规定。

GB 3095—2012 将环境空气功能区分为两类: 一类区为自然保护区、风景名胜区和其他需要进行特殊保护的区域; 二类区为居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区。一类区适用一级浓度限值, 二类区适用二级浓度限值, 具体值见 GB 3095—2012。

GB 3095—2012 涉及的主要术语和定义如下。

环境空气 (Ambient Air): 指人群、植物、动物和建筑物所暴露的室外空气。

总悬浮颗粒物 (Total Suspended Particle, TSP): 指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 $100\mu\text{m}$ 的颗粒物。

颗粒物（粒径小于等于 10 μm ）（Particulate Matter, PM_{10} ）：指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物，也称可吸入颗粒物。

颗粒物（粒径小于等于 2.5 μm ）（Particulate Matter, $\text{PM}_{2.5}$ ）：指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物，也称细颗粒物。

铅（Pb）：指存在于总悬浮颗粒物中的铅及其化合物。

苯并[a]芘 Benzo[a] Pyrene (BaP)：指存在于颗粒物（粒径小于等于 10 μm ）中的苯并[a]芘。

为保证监测数据的准确性、连续性和完整性，确保全面、客观地反映监测结果，GB 3095—2012 对数据统计的有效性进行了规定：任何情况下，有效的污染物浓度数据均应符合 GB 3095—2012 的最低要求，否则应视为无效数据。

近年来，我国实施了城市空气质量周报和日报制度，采用根据国家空气质量标准制定的空气污染指数（Air Pollution Index，简称 API）来表示空气污染状况。空气污染指数 API 将常规监测的几种空气污染物的浓度简化成为单一的概念性指数值形式，并分级表征空气污染程度和空气质量状况，适合于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势。目前，计入空气污染指数的项目暂定为二氧化硫、氮氧化物和可吸入颗粒物或总悬浮颗粒物。随着环境保护工作的深入和监测技术水平的提高，将调整增加其他污染项目，以便更为客观地反映空气污染状况。我国城市空气质量日报 API 对应的污染物质量浓度限值见表 1-1。

表 1-1 空气污染指数对应的污染物质量浓度限值

污染指数	污染物质量浓度/(mg/m^3)				
	SO_2 （日均值）	NO_2 （日均值）	PM_{10} （日均值）	CO（小时均值）	O_3 （小时均值）
50	0.050	0.080	0.050	5	0.120
100	0.150	0.120	0.150	10	0.200
200	0.800	0.280	0.350	60	0.400
300	1.600	0.565	0.420	90	0.800
400	2.100	0.750	0.500	120	1.000
500	2.620	0.940	0.600	150	1.200

空气污染指数划分为 0 ~ 50、51 ~ 100、101 ~ 150、151 ~ 200、201 ~ 250、251 ~ 300 和大于 300 七挡，对应于空气质量的七个级别，指数越大，级别越高，说明污染越严重，对人体健康的影响也越明显。

空气污染指数为 0 ~ 50，空气质量级别为Ⅰ级，空气质量状况属于优。此时不存在空气污染问题，对公众的健康没有任何危害。

空气污染指数为 51 ~ 100，空气质量级别为Ⅱ级，空气质量状况属于良。此时空气质量被认为是可以接受的，除极少数对某种污染物特别敏感的人以外，对公众健康没有危害。

空气污染指数为 101 ~ 150，空气质量级别为Ⅲ（1）级，空气质量状况属于轻微污染。此时，对污染物比较敏感的人群，如儿童和老年人、呼吸道疾病或心脏病患者，以及喜爱户外活动的人，他们的健康状况会受到影响，但对健康人群基本没有影响。

空气污染指数为 151 ~ 200，空气质量级别为Ⅲ（2）级，空气质量状况属于轻度污染。

此时,几乎每个人的健康都会受到影响,对敏感人群的不利影响尤为明显。

空气污染指数为 201 ~ 300,空气质量级别为Ⅳ(1)级和Ⅳ(2)级,空气质量状况属于中度和中度重污染。此时,每个人的健康都会受到比较严重的影响。

空气污染指数大于 300,空气质量级别为Ⅴ级,空气质量状况属于重度污染。此时,所有人的健康都会受到严重影响。

1.3 大气污染与汽车

作为交通工具的机动车是人类工业文明发展的产物,自 19 世纪末世界上第一辆汽油机汽车诞生以来,经历了一个多世纪的发展,机动车已经成为人类现代生活中不可缺少的组成部分。汽车工业的发展不仅为解决交通问题创造了条件,而且带动了与汽车相关产业的发展,进而推动了国民经济的增长和就业机会的增加。

我国于 2009 年出台了《汽车产业调整和振兴规划》,受购置税优惠、以旧换新、汽车下乡、节能惠民产品补贴等多种鼓励性消费政策叠加效应的影响,2009 年和 2010 年我国的汽车产销量连续两年创全球历史新高。汽车业的发展也使我国的燃油消耗量快速增长,目前,我国的石油消耗量位居世界第二,石油产品进口量大幅增长,消费对外依存度继续提高。

1993 年,我国首度成为了石油净进口国,石油对外依存度由 1993 年的 6% 到 2006 年突破 45%,其后均以每年 2 个百分点左右的速度攀升,2007 年为 47%,2008 年为 49%,2009 年我国的原油对外依存度为 52%,首次突破 50% 警戒线。2000 年,我国石油净进口量为 7491 万 t,2005 年为 1.36 亿 t;2009 年,我国生产原油 1.89 亿 t,净进口原油量却达到 1.99 亿 t;2010 年,我国进口原油 2.39 亿 t,石油对外依存度约为 55%。预计到 2020 年,我国的石油需求量将为 4.5 亿 ~ 6.1 亿 t,届时我国对石油的进口依存度将达到 60% ~ 70%,国家能源安全将面临严峻挑战。与此同时,汽车也给社会带来了环境问题。

环境保护部发布的《中国机动车污染防治年报(2010 年度)》首次公布了我国机动车污染物的排放情况。其结果显示,2009 年我国首次成为世界汽车产销第一大国,机动车污染日益严重,机动车尾气排放成为我国大中城市空气污染的主要来源。2009 年,全国汽车产销量分别达到 1379.1 万辆和 1364.5 万辆,同比增长 48.3% 和 46.2%;机动车保有量接近 1.7 亿辆,同比增长 9.3%,与 1980 年相比,全国机动车保有量增加了 25 倍。其中,汽车 6209.4 万辆,摩托车 9453.1 万辆。按汽车排放控制水平分类,达到国Ⅲ及以上排放标准的汽车占汽车总保有量的 25.4%,达到国Ⅱ标准的占 31.8%,达到国Ⅰ标准的占 25.7%,其余 17.1% 的汽车还达不到国Ⅰ排放标准。

据统计,2010 年我国的汽车产销量双双超过 1800 万辆,同比分别增长 32.44% 和 32.37%,稳居全球产销量第一位。随着机动车保有量的增加,在城市,特别是在拥挤的街道上,汽车尾气污染将日益严重,并成为人类健康和自然环境的最大威胁,给城市和区域空气质量带来巨大的压力。据研究,目前大气中 38.5% 的一氧化碳(CO)、21.7% 的碳氢化合物(Hydrocarbon, HC)、87.6% 的氮氧化物(NO_x)、6.2% 的二氧化硫(SO_2)、32% 的颗粒物(PM)均来自汽车废气排放,而这些气体均对人体有害。在城市大气中,61% 的 CO、87% 的 HC、55% 的 NO_x 均来自汽车废气排放。因此,解决汽车尾气排放对人类危害的

问题，已成为世界各国汽车业多年来研究的重要课题之一。

经过近 30 年的努力，我国的机动车环保管理工作取得了较大的进展，实施严格规范机动车排放标准的减排效果显著。1980 年~2009 年，全国汽车污染物排放量呈逐年上升趋势：1980 年~2000 年，污染物排放量与汽车保有量呈线性关系增长；2000 年后，污染物排放量增速有所减缓，这与不断实施严格机动车排放标准和淘汰高排放的“黄标车”有关。2009 年，占汽车保有量 17.1% 的国 I 标准的汽车，其排放的四种主要污染物占总排放量的 50% 以上；占汽车保有量 25.4% 的国 III 及以上排放标准的汽车，其排放量不足总排放量的 5%。

1.4 汽车发动机排放污染物及其危害

1.4.1 汽车发动机排放污染物的种类

在汽车诞生的 100 多年里，虽然其在制造工艺等方面取得了巨大的进步，但作为动力装置的发动机技术却没有发生根本性的变化。目前，以汽油机、柴油机为代表的内燃机仍是各种道路机动车发动机的主流技术。

内燃机用碳氢化合物燃料在燃烧室内完全燃烧时，如果不考虑燃料中的微量杂质，将只产生二氧化碳（ CO_2 ）和水蒸气。内燃机排出的水分不会对地球水循环构成重大影响；至于 CO_2 ，过去人们并不认为它是一种污染物，但因为含碳化石燃料的大量使用，使地球的碳循环失衡，大气中 CO_2 的体积分数已从工业时代开始时的 2.8×10^{-4} 增加到现在的 3.6×10^{-4} 左右，加剧了“温室效应”，从而引起了全人类的关注。

实际上，燃料在内燃机中不可能完全燃烧。这是因为内燃机一般转速很高，燃料燃烧过程占用的时间极短，燃料与助燃的空气不可能混合得完全均匀，燃料的氧化反应不可能完全进行。因此排气中会出现不完全燃烧产物，如 CO 和未完全燃烧甚至完全未燃烧的 HC。对于点燃式内燃机，为了提高其全负荷转矩，不得不使用过量空气系数小于 1 的浓混合气，导致了 CO 的排放量剧增；内燃机冷启动时，燃料蒸发得不好，很大一部分燃料未经燃烧即被排出，导致了 HC 排放量的剧增。内燃机最高燃烧温度往往可达 2000°C 以上，使空气中的氮在高温下氧化生成各种氮氧化物，内燃机排放的氮氧化物绝大部分是 NO ，少量是 NO_2 ，一般用 NO_x 表示。

在压燃式内燃机中，可燃混合气是在燃烧前和燃烧中的极短时间内形成的，其混合不均程度比点燃机更严重。缺氧的燃料在高温高压环境下会发生裂解、脱氢，最后生成碳烟粒子。这些碳烟粒子在降温过程中会吸附各种未燃烧或不完全燃烧的重组 HC 和其他凝聚相物质，进而构成压燃式内燃机的重要污染物——颗粒物。

通常，汽车排放的污染物以及与交通源相关的主要污染物有：CO、 NO_x 、HC 和 PM 等。事实上，全球因燃烧矿物燃料而产生的 CO、 NO_x 和 HC 的排放量，几乎有 50% 来自汽油机和柴油机。为此，世界各国都制定了严格的排放法规，以限制内燃机排出的 CO、 NO_x 、HC 和 PM。

1.4.2 一氧化碳

一氧化碳（CO）无色无味，是一种窒息性的有毒气体。由于其和血液中有输氧能力的血红蛋白（Hb）的亲合力比氧气（ O_2 ）和 Hb 的亲合力大 200~300 倍，因而，CO 能很快

地与 Hb 结合形成碳氧血红蛋白 (HbCO)，使血液的输氧能力大大降低。高浓度的 CO 能够引起人体生理和病理上的变化，使心脏、大脑等重要器官严重缺氧，引起头晕、恶心、头痛等症状，严重时会造成心血管工作困难，甚至死亡。不同体积分数的 CO 对人体健康的影响见表 1-2。空气中 CO 的体积分数超过 0.1% 时，就会导致头痛、心慌等中毒病状；超过 0.3% 时，则可在 30min 内致人死亡。

表 1-2 不同体积分数的 CO 对人体健康的影响

$\varphi_{\text{CO}} (\times 10^{-6})$	对人体健康的影响	$\varphi_{\text{CO}} (\times 10^{-6})$	对人体健康的影响
5 ~ 10	对呼吸道患者有影响	120	1h 接触，中毒，血液中 HbCO 的含量 > 10%
30	人滞留 8h，视力及神经系统出现障碍，血液中 HbCO 的含量达到 5%	250	2h 接触，头痛，血液中 HbCO 的含量达到 40%
		500	2h 接触，剧烈心痛、眼花、虚脱
40	人滞留 8h，出现气喘	3000	30min 即死亡

1.4.3 碳氢化合物

碳氢化合物 (HC) 包括碳氢燃料及其不完全燃烧产物、润滑油及其裂解和部分氧化产物，如烷烃、烯烃、环烷烃、芳香烃、醛、酮和有机酸等多种复杂成分。烷烃基本上无味，它在空气中可能存在的含量对人体健康不产生直接影响。烯烃略带甜味，有麻醉作用，对粘膜有刺激，经代谢转化会变成对基因有毒的环氧衍生物；烯烃有很强的光化活性，与 NO_x 一起在日光中紫外线的作用下将形成具有很强毒性的“光化学烟雾”。芳香烃有芳香味，同时有危险的毒性，例如，苯在浓度较高时可能引起白血病，有损肝脏和中枢神经系统的作用；多环芳烃 (PAH) 及其衍生物有致癌作用。醛类是刺激性物质，其毒性随分子质量的减小而增大，且因出现双键而增强。来自内燃机排气的醛类主要是甲醛 (HCHO)、乙醛 (CH_3CHO) 和丙烯醛 ($\text{CH}_2 = \text{CHCHO}$)，它们都刺激眼粘膜、呼吸道，并对血液有毒害。在工作环境中连续暴露的最大允许体积分数分别为： HCHO 是 2×10^{-6} ， CH_3CHO 、 $\text{CH}_2 = \text{CHCHO}$ 是 0.1×10^{-6} 。

1.4.4 氮氧化物

氮氧化物 (NO_x) 主要是指 NO 及 NO_2 。汽车尾气中 NO_x 的排放量取决于气缸内的燃烧温度、燃烧时间和空燃比等因素。燃烧过程中排放的 NO_x 可能有 95% 以上是 NO ， NO_2 只占少量。 NO 是无色无味的气体，只有轻度刺激性，毒性不大，高浓度时会造成中枢神经的轻度障碍， NO 可被氧化成 NO_2 。 NO_2 是一种红棕色的气体，对眼、鼻、呼吸道及肺部有强烈的刺激作用，对人体的危害很大。 NO_2 与血液中血红蛋白的结合能力比 CO 还强，因而对血液输氧能力的阻碍作用远高于 CO ， NO_2 进入人体后和血液中的血红蛋白 Hb 结合，使血液的输氧能力下降，会损害心脏、肝、肾等器官，其具体影响见表 1-3。 NO_x 在大气中反应生成硝酸，成为酸雨的主要来源之一。同时，HC 和 NO_x 在大气环境中受强烈的太阳光紫外线照射后，会生成新的污染物——光化学烟雾。

表 1-3 不同体积分数 NO₂ 对人体健康的影响

φ_{NO_2} ($\times 10^{-6}$)	对人体健康的影响	φ_{NO_2} ($\times 10^{-6}$)	对人体健康的影响
1	闻到臭味	80	3min, 感到胸闷、恶心
5	闻到强烈臭味	150	30 ~ 60 min 内因肺水肿而死亡
10 ~ 15	10min, 眼、鼻、呼吸道受到刺激	250	很快死亡
50	1min 内人呼吸困难		

1.4.5 光化学烟雾

光化学烟雾 (Photochemical Smog) 是排入大气的氮氧化物和碳氢化合物受太阳光中紫外线的作用而产生的一种具有刺激性的浅蓝色烟雾。它具有强氧化性, 能使橡胶开裂, 刺激人的眼睛, 伤害植物的叶子, 并使大气能见度降低。它包含臭氧 (O₃)、醛类、硝酸酯类 (PAN) 等多种复杂化合物, 如图 1-1 所示。这些化合物都是光化学反应生成的二次污染物。当遇到不利于扩散的气象条件时, 烟雾会积聚不散, 从而造成大气污染事件。

在光化学反应中, O₃ 的质量分数约占 85% 以上。日光辐射强度大是形成光化学烟雾的重要条件, 因此, 每年的夏季是光化学烟雾的高发季节; 在一天中, 下午 2 时前后是光化学烟雾达到峰值的时刻。在汽车排气污染严重的城市, 大气中臭氧浓度的增高, 可视为光化学烟雾形成的信号。

光化学烟雾对人体最突出的危害是刺激眼睛和上呼吸道粘膜, 引起眼睛红肿和喉炎。当大气中臭氧的质量浓度达到 200 ~ 1000μg/m³ 时, 会引起哮喘发作, 导致上呼吸道疾病恶化, 同时也刺激眼睛, 使视觉敏感度和视力下降; 当其质量浓度为 400 ~ 1600μg/m³ 时, 人体只要接触 2h 就会出现气管刺激症状, 引起胸骨下疼痛和肺通透性的降低, 使机体缺氧; 其质量浓度再升高, 就会出现头痛, 并使肺部气道变窄, 出现肺气肿。若接触时间过长, 还会损害中枢神经, 导致思维紊乱或引起肺水肿等, 其具体影响见表 1-4。

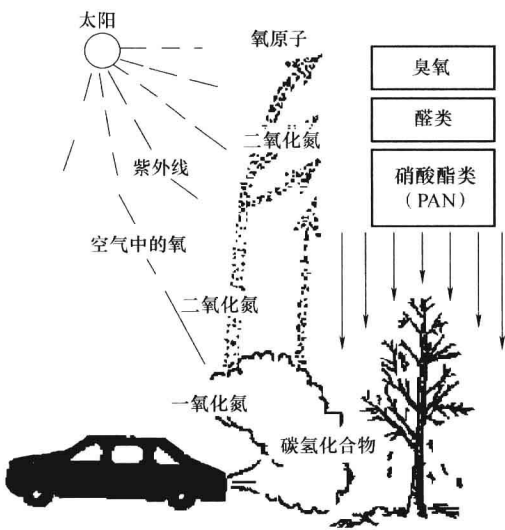


图 1-1 光化学烟雾的形成过程

表 1-4 不同体积分数的 O₃ 对人体健康的影响

φ_{O_3} ($\times 10^{-6}$)	对人体健康的影响	φ_{O_3} ($\times 10^{-6}$)	对人体健康的影响
0.02	开始嗅到臭味	1	1h 会引起气喘, 2h 会引起头痛
0.2	1h 闻到臭味	5 ~ 10	全身痛, 麻痹, 引起肺气肿
0.2 ~ 0.5	3 ~ 6h 视力下降	50	30min 即死亡

植物受到 O_3 的损害,开始时表皮褪色,呈蜡质状,经过一段时间后色素发生变化,叶片上出现红褐色的斑点。PAN 使叶子背面呈银灰色或古铜色,影响植物的生长,降低植物对病虫害的抵抗力。 O_3 、PAN 等还能造成橡胶制品的老化、脆裂,使染料褪色,并损害油漆涂料、纺织纤维和塑料制品等。另外,光化学烟雾还会促进酸雨的形成,使建筑物和机器等受到腐蚀。

另外,光化学烟雾还会使大气的能见度降低,使视程缩短。这主要是由于污染物质在大气中形成的光化学烟雾气溶胶所引起的,这种气溶胶颗粒物的大小一般为 $0.3 \sim 1.0 \mu m$ 。由于这样大小的颗粒物不易因重力的作用而沉降,能较长时间地悬浮于空气中,长距离地迁移;而且与人视觉能力可及的光波波长一致,并能散射太阳光,从而明显地降低了大气的能见度。因而妨害了汽车与飞机等交通工具的安全运行,导致交通事故增多。

所以,必须采取一系列综合性的措施来预防和减轻光化学烟雾对人类造成的损害,但需要区别的是对流层臭氧与平流层臭氧。由内燃机排放产生的 O_3 是在近地面 ($0 \sim 12m$) 的对流层大气中出现的,称为对流层臭氧,其对生态系统的危害极大;而平流层臭氧层距地面高达 $10km$,能吸收太阳的紫外线辐射,对人类和动植物起到非常有益的保护作用。

1.4.6 颗粒物

颗粒物 (Particulate, PT 或 Particulate Matter, PM) 的主要成分是碳烟、有机物质及少量的铅化合物、硫氧化物等。颗粒物对人体健康的影响主要取决于颗粒物的浓度、人体在空气中暴露的时间及粒径的大小。柴油机排气中颗粒物的含量比汽油机高 $30 \sim 60$ 倍,因而一般说到颗粒物都是指柴油机颗粒物。

碳烟是柴油发动机燃料燃烧不完全的产物,主要是指直径为 $0.1 \sim 10 \mu m$ 的多孔性炭粒。燃烧中各种各样的不完全燃烧产物可以以多种形式附着在多孔的、活性很强的炭粒表面,这些附着在炭粒表面的物质种类繁多,其中有些是致癌物质,并因含有少量的带有特殊臭味的乙醛,而往往引起人们的恶心和头晕等症状。另外,碳烟会影响道路上的能见度。

发动机废气中的铅化合物是为了改善汽油的抗爆性而加入的,它们以颗粒的形式排入大气中,是污染大气的有害物质。当人们吸入含有铅颗粒物的空气时,铅逐渐在人体内积累,当积累量达到一定程度时,铅将阻碍血液中红血球的生成,使心、肺等处发生病变,侵入大脑时则会引起头痛,甚至引发一些精神病的症状。铅还会使汽车尾气净化装置——催化转化器中的催化剂中毒,影响其使用寿命。我国早在 2000 年起就全面禁止使用含铅汽油。

汽车内燃机尾气中硫氧化物的主要成分为二氧化硫 (SO_2),主要来源于石油中较重组分 (柴油、重油等) 的燃烧。 SO_2 是一种无色、有臭味的气体,性质活泼,能引起氧化作用,也参与还原反应,并可溶于水形成亚硫酸。 SO_2 对人体健康有很大的影响,它刺激人体的眼和鼻粘膜等呼吸器官,引起鼻咽炎、气管炎、支气管炎、肺炎及哮喘病、肺心病等。当汽车使用催化净化装置时,就算很少量的 SO_2 也会逐渐在催化剂表面堆积,造成所谓的催化剂中毒,不但影响催化剂的使用寿命,还会危害人体健康。 SO_2 还是形成酸雨的主要成分,也是影响城市能见度的主要原因之一。

颗粒物的粒径大小是决定其对人体健康危害程度的一个重要因素。

1) 粒径越小,越不易沉积,长期漂浮在大气中容易被人吸入体内,而且容易深入肺部。一般粒径在 $100 \mu m$ 以上的颗粒物会很快在大气中沉降; $10 \mu m$ 以上的颗粒物可以滞留在

呼吸道中； $5 \sim 10\mu\text{m}$ 的颗粒物大部分会在呼吸道中沉积，被分泌的粘液吸附，可以随痰排出；小于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒物能深入肺部； $0.01 \sim 0.10\mu\text{m}$ 的颗粒物，50% 以上将沉积在肺腔中，引起各种尘肺病。柴油机排气中的颗粒物，其粒径一般小于 $0.3\mu\text{m}$ ，可长期悬浮在大气中而不沉降，会深入人的肺部造成机械性超负荷，损伤肺内各种通道的自净机制，促进其他污染物的毒害作用。

2) 粒径越小，粉尘的比表面积越大，物理、化学活性越强。此外，颗粒物的表面可以吸附空气中的各种有害气体及其他污染物，而成为它们的载体，被吸入人体，也会对人体造成损害。

1.4.7 二氧化碳

二氧化碳 (CO_2) 是一种无色气体，略带刺激性气味，本身并没有毒性，能溶于水，是完全燃烧的产物。大气中含有 CO_2 气体时，在上空形成气层，吸收地球表面的红外辐射，又以其长波辐射的形式，将其能量返回地球表面，这就像将地球罩在温室里，使地面实际损失的能量比其长波辐射返回的能量要少，从而对地面起到保温作用，故称之为温室效应。本来这种温室效应对地球是有利的，假如没有这种效应，地球上的温度将相当低。但是，如果大气层中的 CO_2 等气体的含量过高，则会产生对地球和人类生活不利的影响，即使地球表面的平均温度每年上升得较快，导致全球气候变暖，给人类带来海平面上升、气候失调、水灾及风灾等自然灾害，破坏自然界的生态平衡。

CO_2 在新鲜空气中的体积分数约为 0.03%，过多的 CO_2 对人体最主要的危害是刺激人的呼吸中枢，导致呼吸急促，引起头痛、神志不清等症状，表 1-5 所列空气中 CO_2 的含量对人体的影响。

表 1-5 空气中不同体积分数的 CO_2 对人体的影响

φ_{CO_2} (%)	症 状	φ_{CO_2} (%)	症 状
2.5	经数小时无任何症状	8.0	呼吸困难
3.0	无意识呼吸的次数增加	10.0	意识不清，不久导致死亡
4.0	出现局部刺激症状	20.0	数秒后瘫痪，心脏停止跳动
6.0	呼吸次数增加		

CO_2 对环境的主要危害是会引起温室效应，据统计，道路交通排放的 CO_2 约占全球 CO_2 总排放量的 20%，占温室气体总排放量的 12%，所以说汽车是碳排放的一个重要来源。为了缓解温室效应所造成的严重后果，世界各国正在开发各种高性能的发动机，以降低燃料消耗和 CO_2 排放量，同时还在积极开发使用各种非化石燃料的动力装置，如太阳能、氢燃料、核能等。如何采取有效措施降低汽车的碳排放量已成为我国当前面临的一个十分严峻的课题。

1.5 污染物的评定指标

为了评定内燃机对环境的污染程度或排放特性，常采用下列评定指标。

1. 排放物的含量

在一定排气容积中，有害排放物所占的容积（或质量）比例称为排放物的含量。通常表示体积分数的单位有%、 10^{-6} 和 10^{-9} 。含量较大时可用%，含量较小时用 10^{-6} ，而含量极小时用 10^{-9} 。常用的表示质量浓度的单位有 kg/m^3 、 kg/L 、 mg/L 和 mg/m^3 。质量浓度一般用于表征内燃机固态污染物的排放，如柴油机颗粒物的排放。考虑到排放量的数量级，常用的单位为 mg/m^3 。

2. 质量排放量

内燃机排放物的浓度表示内燃机在某工况下的排放严重程度，这种指标为内燃机的研究和开发工作者广泛应用。但在环境保护实践中，要求对污染源的环境污染物进行总量控制，以保护环境品质。因此，作为污染源的内燃机或使用内燃机的车辆，要确定其运转单位时间的排放量，称为质量排放量 G_i （常用单位为 g/h ）；或者按某标准进行一次测试的排放量，称为循环工况排放质量或工况质量排放量（常用单位为 g/test ），或者计算使用内燃机的车辆按规定的工况组合（称为测试循环）行驶后折算到单位里程的污染物排放量（常用单位为 g/km ）。

设发动机某种有害排放物的体积分数为 x_i （ 10^{-6} ），排放质量流量为 q_{mi} （ g/h ），则二者之间的关系为

$$q_{mi} = q_{Vg} x_i \rho_i \times 10^3 \quad (1-1)$$

式中 q_{Vg} ——排气体积流量（ m^3/h ）；

ρ_i ——污染物的密度（ kg/m^3 ）。

3. 比排放量

内燃机单位功率每小时（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）排放出的污染物的质量称为比排放量（ g ），其单位为 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 表示，即

$$g = \frac{q_{mi}}{P_e} \quad (1-2)$$

式中 P_e ——发动机有效功率（ kW ）。

发动机的比排放量可以客观地评价不同种类、不同大小内燃机的排放性能。比排放量可以根据测得的发动机功率、排气流量、污染物浓度或摩尔分数、污染物密度等数据进行计算。这个指标与燃油消耗率类似，也可以称为污染物排放率。