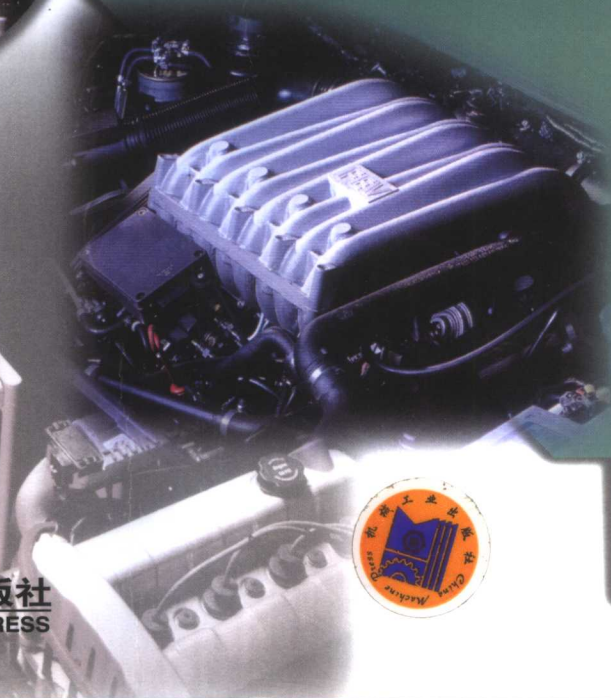
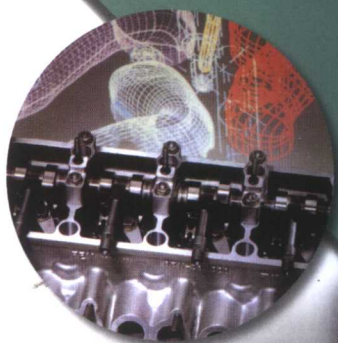




内燃机科技丛书

内燃机的 排放与控制

中国内燃机学会 组编
刘巽俊 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



内燃机科技丛书

内燃机的排放与控制

中国内燃机学会 组编
刘巽俊 编著
许斯都 周龙保 主审



机械工业出版社

内燃机的污染物排放问题是内燃机技术面临的最严峻挑战。本书系统地阐述了内燃机污染物的生成机理和影响因素;根据国内外的最新资料,详细介绍了点燃式和压燃式内燃机的低排放设计;在排气后处理方面,主要论述了三效催化转化器和微粒捕集器。另外,根据我国最新颁布的排放法规,着重介绍了车用汽油机和柴油机的排放限值和测量方法,并对欧美国家的排放法规及其最新发展作了简要的叙述。

本书可供从事中、小功率内燃机,特别是车用内燃机设计、研究、制造、使用等方面的工程技术人员阅读,也可供从事大气环境管理工作及相应专业本科生和研究生有关课程的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

内燃机的排放与控制/刘巽俊编著. 北京:机械工业出版社, 2002.11
(内燃机科技丛书)
ISBN 7-111-10987-2

I. 内… II. 刘… III. 内燃机 排气 净化
IV. TK403

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 074011 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:董连仁 版式设计:霍永明 责任校对:姚培新
封面设计:姚毅 责任印制:闫焱
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷
850mm×1168mm^{1/32}·10.125 印张·270 千字
0 001—3 000 册
定价:20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

序

“内燃机科技丛书”经作者、编审人员、编辑部及编委会成员两年来的共同努力与广大读者见面了。这套“丛书”从今天开始陆续出版并计划于2000年内完成。“丛书”的出版是我国内燃机科技界的一件好事，将对内燃机行业的科技进步起重要的推动作用。

党的十五大提出了我国21世纪经济和社会发展的宏伟蓝图，提出了在新世纪实施科教兴国战略、加快科技发展的重大目标和任务。我国科技界肩负着重大的历史使命，要求广大科技工作者把握当代世界科技发展的趋势，走在科技兴国的前列，担当起推动科技进步，解放和发展生产力的重任。随着科学技术的发展及许多高新技术在内燃机上的推广应用，内燃机的新技术、新结构、新原理、新材料和新工艺层出不穷，技术水平有了飞速发展和提高。为了担负起历史赋予的重任，迎接新世纪的挑战，中国内燃机学会决定组织编撰一套“内燃机科技丛书”，以推动我国内燃机工业发展和技术进步，并适应培养内燃机界高层次技术人材的需要。

“内燃机科技丛书”共14本，选题涉及内燃机工业发展技术进步的一些重要领域，是以单行本出版发行的专题性内燃机工程读物。“丛书”面向21世纪，内容新、起点高，不但有最新的专业理论研究，而且比较有成熟的应用技术成果，体现了科学性、先进性和实用性；反映了内燃机设计制造、开发研究诸方面国内外最新科技成就、动向及经验，是一部我国内燃机行业的重要图书。

“丛书”读者对象主要是我国内燃机行业大专以上文化水平的工程技术人员，同时也可作为高等学校相关专业方向的选修课教材或教学参考书。这既能帮助读者拓宽视野、掌握动向、提高理

EAG29/04

论水平，又能在工程实际中应用，有助于读者提高分析和解决问题的能力。

为保证“丛书”的编写质量，中国内燃机学会组建了“丛书”编委会和编辑部，领导和具体组织“丛书”的编写工作，研究确定了“丛书”书目，组织审定了编撰大纲。编委会根据我国机械工业方针任务及广大用户读者的要求，择优遴选国内内燃机界有相当工作基础的单位和专家、教授、学者，请他们承担编写任务，聘为“丛书”的主编和主审。

由于“丛书”编辑出版时间仓促，疏漏和不足之处在所难免，欢迎广大读者指正。

中国内燃机学会理事长
“内燃机科技丛书”编委会主任 李守仁
1999年6月

中国内燃机学会“内燃机科技丛书” 编辑委员会成员名单

(按姓氏笔划排序)

名 誉 主 任	何光远			
主 任	李守仁			
副 主 任	干凤琪	冯启泰	刘洪林	张小虞
	俞银贵	徐兴尧	翁祖亮	崔殿国
	蓝祖佑	蒋德明		
委 员	马京夫	王建明	朱厚国	刘永长
	闫麟角	孙少军	朴甲哲	吴培基
	张仪萌	何建光	何瑞祥	李树生
	肖正海	苏万华	卓 斌	范 仲
	周建能	周晓宇	苑 发	林 松
	赵建仁	唐克林	奚国伟	徐国雄
	钱恒荣	高宗英	黄 松	
编辑部主任	翁祖亮	(兼)		
副 主 任	王士杰	刘红宇	周龙保	蒲启南

前 言

内燃机由于能量转换效率高、功率密度大、机动性好等优点，在各行各业特别是汽车和其他移动式装置中获得广泛应用。内燃机诞生一百多年来，在动力性、经济性、可靠性等主要使用性能上，已经达到很高的水平。但是，内燃机产生的噪声和排放的污染物与环境意识日益觉醒的人们越来越不相适应。内燃机行业的工程技术人员必须清醒地认识到，内燃机能否适应人类环境的要求，是内燃机行业在 21 世纪能否继续生存和发展的关键。本书在综合国内外有关内燃机的污染物排放及其控制技术的最新资料的基础上，向读者扼要地介绍有关的新概念、新知识和新技术，以促进我国的内燃机，特别是汽车发动机在排放控制方面尽快赶上国际先进水平。

本书共分 9 章：第 1、2 章简要叙述内燃机污染物的危害性和生成机理；第 3 章介绍了有代表性的车用点燃式和压燃式内燃机的排放特性；第 4、5 章比较详细地介绍了点燃式和压燃式内燃机的低排放设计技术；第 6 章介绍内燃机排气后处理技术，重点是比较成熟的三效催化和新型的微粒捕集技术；第 7 章简要介绍燃料种类和成分对排放的影响以及对低排放燃料的述评；第 8、9 章重点介绍典型的排放法规及相应的测量技术。

本书的编写大纲于 1998 年 10 月经中国内燃机学会内燃机科技丛书大纲审定会议通过。全书编写完成后经天津大学许斯都教授和西安交通大学周龙保教授详细审阅，保证了本书的质量。

本书编写过程中参考了最新出版的大量资料，在此向这些资料的作者表示衷心感谢。书后参考文献中列出了一些近 20 年来在国内外学术刊物和学术会议上发表的有关内燃机的排放与控制方面的论文，在此也对这些论文的作者表示谢意。

最后，在本书出版之际，请允许我向中国内燃机学会及其内燃机科技丛书编辑委员会致谢。

刘巽俊

2001 年末于长春

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 大气污染	1
1.1.1 大气成分	1
1.1.2 温室效应	3
1.1.3 光化学反应和光化烟雾	4
1.1.4 有机气体的生成臭氧活性	5
1.2 内燃机排放的污染物及其危害性	6
1.2.1 一氧化碳	8
1.2.2 碳氢化合物	8
1.2.3 氮氧化物	9
1.2.4 臭氧和其他光化氧化剂	9
1.2.5 硫化物	10
1.2.6 微粒	10
1.3 内燃机排放的评价指标	10
1.3.1 排放物浓度和摩尔分数	11
1.3.2 质量排放量	11
1.3.3 比排放量	12
1.3.4 排放指数	12
第 2 章 污染物的生成机理和影响因素	13
2.1 一氧化碳	13
2.1.1 化学反应机理	13
2.1.2 点燃式内燃机	14
2.1.3 压燃式内燃机	16
2.2 未燃碳氢化合物	17
2.2.1 未燃碳氢化合物的排放渠道	17

2.2.2	生成各种未完全燃烧 HC 的化学机理	17
2.2.3	点燃式内燃机	19
2.2.4	压燃式内燃机	25
2.3	氮氧化物	28
2.3.1	生成一氧化氮的化学反应动力学	28
2.3.2	二氧化氮的生成	30
2.3.3	点燃式内燃机	31
2.3.4	压燃式内燃机	36
2.4	微粒	41
2.4.1	点燃式内燃机	41
2.4.2	压燃式内燃机	42
第 3 章	内燃机的排放特性	55
3.1	点燃式内燃机的稳态和瞬态排放特性	55
3.1.1	稳态排放特性	55
3.1.2	瞬态排放特性	57
3.2	压燃式内燃机的排放特性	59
3.2.1	稳态排放特性	59
3.2.2	瞬态排放特性	62
3.3	点燃式与压燃式内燃机排放及其耐久性的比较	64
3.3.1	排放特性的比较	64
3.3.2	内燃机排放耐久性的比较	66
第 4 章	点燃式内燃机低排放设计	68
4.1	曲轴箱排放物的控制	68
4.2	蒸发排放物的控制	71
4.2.1	燃油蒸发损失	71
4.2.2	蒸发排放控制系统	71
4.2.3	活性炭罐	73
4.2.4	电控蒸发排放控制系统简介	74
4.3	冷启动、暖机和怠速排放控制	76
4.3.1	冷启动排放控制	76
4.3.2	暖机期排放控制	77
4.3.3	怠速排放控制	78
4.4	低排放供给系统	81

4.4.1	化油器的问题及其改进	82
4.4.2	进气道汽油喷射系统	83
4.4.3	缸内直接喷射系统	88
4.4.4	二冲程发动机的缸内汽油直喷系统	91
4.5	低排放点火系统	92
4.6	低排放燃烧系统	95
4.6.1	燃烧室形状	95
4.6.2	压缩比	99
4.6.3	气门布置和火花塞位置	100
4.6.4	活塞组设计	100
4.7	排气再循环	101
4.8	其他低排放技术	105
第5章 压燃式内燃机低排放设计		109
5.1	低排放燃烧室设计	110
5.1.1	燃烧方式	110
5.1.2	非直喷式柴油机燃烧室低排放设计要点	111
5.1.3	直喷式柴油机燃烧室低排放设计	112
5.2	低排放燃油喷射系统	116
5.2.1	提高喷油压力	117
5.2.2	优化喷油规律	123
5.2.3	低排放喷油器	125
5.2.4	喷油定时和循环喷油量的控制	127
5.3	气流组织和多气门技术	129
5.4	排气再循环	137
5.4.1	柴油机的最佳EGR脉谱	137
5.4.2	增压柴油机EGR的实现	138
5.4.3	冷EGR	141
5.4.4	柴油机EGR的控制	141
5.5	增压与排放	142
第6章 排气后处理		148
6.1	三效催化转化器	149
6.1.1	催化反应机理	149
6.1.2	催化剂的组成	154

6.1.3	催化转化器的构造	163
6.1.4	催化转化器的性能指标和工作特性	165
6.2	氧化催化转化器	175
6.2.1	点燃式内燃机	175
6.2.2	柴油机排气的催化氧化	176
6.3	富氧降 NO _x 催化转化器	178
6.3.1	稀燃发动机用吸附-还原催化器	178
6.3.2	柴油机排放的 NO _x 的处理	180
6.4	柴油机排气微粒捕集器	183
6.4.1	捕集方式	183
6.4.2	过滤机理	184
6.4.3	滤芯的构造	185
6.4.4	微粒过滤器的再生	188
第7章	低排放燃料	197
7.1	石油燃料性质对排放的影响	197
7.1.1	汽油的影响	197
7.1.2	柴油的影响	206
7.2	石油燃料的低排放改造	211
7.2.1	低排放汽油	214
7.2.2	低排放柴油	215
7.3	非石油燃料的排放特性	215
7.3.1	汽油和柴油的掺水燃烧	216
7.3.2	天然气和液化石油气	218
7.3.3	醇类燃料及其衍生物	222
7.3.4	植物油	225
7.3.5	氢	226
第8章	排放测量	227
8.1	内燃机排气排放物取样系统	227
8.1.1	定容取样系统	227
8.1.2	直接取样系统	234
8.1.3	稀释取样系统	237
8.2	气体污染物测量原理	244
8.2.1	不分光红外线吸收型分析仪	245

8.2.2	化学发光分析仪	248
8.2.3	氢火焰离子化分析仪	250
8.2.4	气相色谱仪	253
8.2.5	顺磁分析仪	254
8.3	微粒的测量和分析	255
8.3.1	微粒排放质量的测量	255
8.3.2	微粒粒度分析	256
8.3.3	微粒成分分析	257
8.4	排气可见污染物测量	261
8.4.1	滤纸式烟度计	263
8.4.2	消光式烟度计	265
8.5	曲轴箱排放物和蒸发排放物的测量	266
8.5.1	曲轴箱排放物	266
8.5.2	蒸发排放物	267
第9章	排放法规	269
9.1	车用汽油机怠速污染物排放法规	270
9.2	车用柴油机排气烟度和可见排气污染物排放法规	271
9.2.1	全负荷烟度排放法规	271
9.2.2	自由加速烟度排放法规	273
9.2.3	排气可见污染物排放法规	274
9.3	轻型车用内燃机污染物排放法规	276
9.3.1	型式认证试验及排放限值	278
9.3.2	生产一致性检查及排放限值	282
9.3.3	冷起动后排气污染物排放试验 (I型试验) 规程	286
9.4	重型车用内燃机污染物排放法规	290
9.5	国外内燃机排放法规简介	295
9.5.1	美国排放法规	295
9.5.2	欧洲排放法规	299
参考文献	305

第 1 章 概 述

1.1 大气污染

1.1.1 大气成分

人类赖以生存的环境，主要由大气、水和土壤等构成。内燃机的使用直接影响到大气环境，因此本书对其他环境要素不加讨论。

目前地球大气的成分如表 1-1 所列。当大气中出现外来物质，使空气成分发生变化，按照当时的科学知识可能产生有害后果，或者使人不舒服时，就可定义为出现了大气污染。因此，对人体有害的化学物质、有损人们感官的气味、烟雾引起的可见度的降低等，都属于大气污染的范畴。

表 1-1 大气的化学组成 (摩尔分数 x)

成 分		$x \times 100$	$x \times 10^6$
对流层	基本成分		
	氮	78.084	
	氧	20.984	
	氩	0.934	
	氖		18
	氦		5.30
	氫		1.14
	氢		0.50
	氙		0.09
	二氧化碳		360 ^①

(续)

成 分		$x \times 100$	$x \times 10^6$
对流层	污染成分		
	甲烷		1.7 ^②
	氮氧化物		0.30 ^③
	一氧化碳		0.13 ^③
	氨		0.006 ^④
	二氧化硫		0.002 ^④
	非甲烷烃		0.0002 ^④
	臭氧		0.02~0.1
平流层	臭氧		0.1~10
	水蒸气		3~5

① 估计目前年增长率 0.4%。

② 估计目前年增长率 2%。

③ 估计目前年增长率 0.25%。

④ 估计目前年增长率 3%。

大概是由于在这个茫茫宇宙中，蔚蓝色地球上生物长期进化的结果，使地球大气中基本成分的平均浓度恰好适于维持地球上生物的生存。氮这个占多数的成分是无毒的，当然其浓度过高将有害于呼吸。氮被土壤中的细菌固定并参与生物代谢过程。氧为需氧生物所必需，但浓度过高反而有毒。二氧化碳在大气中的浓度也是无毒的，要引起窒息，必须有 100 倍以上的浓度，如火山爆发时所发生的那样。二氧化碳通过参与叶绿素的光合作用，转变成植物组织，因此对生物圈是不可或缺的。

水蒸气也是生物所必需的大气成分，它的浓度天然地受其饱和和蒸气压的限制。若水蒸气分压超过此压力，就凝结成水滴形成云、雨。

在地球高空的大气平流层中还有臭氧，它是由地面通过光合作用产生的氧分子与氧原子（氧分子在太阳辐射作用下发生分解产生的）发生反应生成的。臭氧也在低空的对流层中产生，是其

他排放物生成的二次污染物。

1.1.2 温室效应

太阳是地球的母亲，又是地球能量的终极来源。太阳光到达地球海平面时，其波长分布在 $0.2\sim 4\mu\text{m}$ 范围内，其中 $0.4\sim 0.73\mu\text{m}$ 之间为可见光，波长小于 $0.4\mu\text{m}$ 者为紫外线，大于 $0.73\mu\text{m}$ 者为红外线。辐射能密度高峰位于可见光区。

地球接收太阳光能后反射红外线，其峰值波长在 $10\mu\text{m}$ 左右，最大波长超过 $40\mu\text{m}$ 。

高空平流层中的臭氧吸收太阳光中的紫外线，使地球上的生物不因紫外线的杀伤而灭绝。水蒸气吸收波长 $0.8\sim 4.0\mu\text{m}$ 的近红外辐射能。由于水蒸气数量多，吸收谱带宽，它在地球红外辐射的再吸收中起着主导作用。二氧化碳吸收波长 $15\mu\text{m}$ 左右的红外线，这个波长靠近地球反射能量最大的波长，且正好是水蒸气不吸收的谱带。

通过吸收地球反射的一部分红外线能量再发射到地面的这些气体，使地球表面变暖，与在玻璃房顶温室中观察到的效应类似，这就是已为众所周知的温室效应。

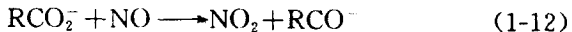
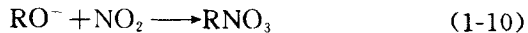
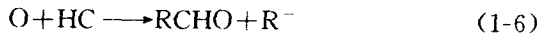
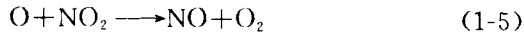
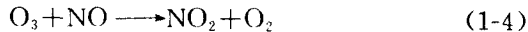
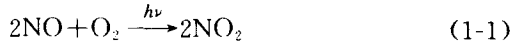
这些起到辐射能单向过滤器作用的“温室气体”，可让 48% 的人射太阳辐射能通过，使地球表面变暖，并吸收 80% 由地球表面反射的红外辐射能，防止它返回宇宙空间。这样的温室效应把地球表面平均温度提高到平衡值 $+15^{\circ}\text{C}$ 。否则，光由地球接受的太阳能与地球反射的红外线能量之间的平衡关系得出的温度将是 -18°C 。因此，没有温室效应可能就没有目前地球上欣欣向荣的生命。

但是，由于近百年来碳基化石燃料的大量燃烧和森林的大量砍伐，作为主要温室气体的二氧化碳体积分数从工业时代开始时的 280×10^{-6} 增加到现在的 360×10^{-6} ，目前正以每年 0.4%（即 1.5×10^{-6} 左右）的速率不断增加。这种温室气体的增加可能打乱地球的热平衡，导致严重后果。根据大多数学者的估计，如果二氧化碳在大气中的含量翻一番，可能使空气平均温度提高 $2\sim$

3°C, 极冰融化和海水膨胀使海平面上升 5~7m, 并大大改变地面景观: 目前的植物生长区出现沙漠, 干旱地区出现植被, 某些地区变暖而其他一些地区变凉, 以及刮风和降雨模式的相应变化。因此, 控制温室气体的排放是世界可持续发展的基础之一。

1.1.3 光化学反应和光化烟雾

内燃机和其他污染源排放到大气中的碳氢化合物 HC 和氮氧化物 (主要是一氧化氮 NO), 在太阳光 (主要是波长 0.3~0.4 μm 的紫外线) 作用下会发生复杂的光化学反应, 生成以臭氧、醛、过氧酰硝酸酯为主的光化烟雾:



反应式 (1-1) 使整个链反应开始。当没有日光时, 这一反应进行得非常慢。在日光作用下 NO 转变为 NO_2 的速度很快。 NO_2 的光化分解反应式 (1-2) 产生原子态氧, 导致进一步的一系列反应。但 NO_2 与氧烷基 RO^- 反应式 (1-10) 生成烷基硝酸酯, 又使反应链中止。

原子态氧 O 与氧分子反应式 (1-3) 生成臭氧 O_3 , 它对人体有很大毒害。