



国防特色教材·动力机械及工程热物理

内燃机排放与污染控制

NEIRANJI PAIFANG YU WURAN KONGZHI

——○ 周 松 肖友洪 朱元清 编著 ○——

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·动力机械及工程热物理

内燃机排放与污染控制

周 松 肖友洪 朱元清 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

内燃机排放污染问题是内燃机技术面临的最严峻挑战。本书系统阐述内燃机污染物的生成机理和影响因素;根据国内外最新资料,详细介绍汽油机和柴油机的低排放设计理论与应用技术;在排气后处理方面,主要论述催化转化原理、发动机催化转化器和微粒捕集器。另外,本书着重介绍我国及欧美国家车用发动机的最新排放标准和测量方法,并对国际海协船用发动机的排放法规及测试规程进行详细阐述。本书还对船用发动机排放污染物的消除措施进行详细论述。

本书可供从事内燃机,特别是车用内燃机和船舶内燃机设计、研究、制造、使用等方面的工程技术人员使用,可作为相关专业本科生和研究生有关课程的教材或教学参考书,也可供从事其他热力发动机生产、研究的科技人员及大气环境管理工作参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机排放与污染控制 / 周松,肖友洪,朱元清编
著. — 北京:北京航空航天大学出版社,2010.7
ISBN 978-7-5124-0006-1

I. ①内… II. ①周… ②肖… ③朱… III. ①内燃机
—排气—净化 IV. ①TK401

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 010416 号

版权所有,侵权必究。

内燃机排放与污染控制

周 松 肖友洪 朱元清 编著
责任编辑 杨 波 史海文 李保国

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:16.5 字数:370 千字

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0006-1 定价:39.00 元

前 言

内燃机排放污染是世界各国政府和人民普遍关注的一大公害,国内外相继制定了有关内燃机排放污染物的标准,并且日趋严格。随着对环境保护认识的加深,以前不被重视的船舶发动机的排放污染也引起了人们的重视。国际海协对船用发动机氮氧化物和硫氧化物的排放进行了限制,并在2008年制定了进一步的排放控制标准。由于温室效应危害巨大,因此二氧化碳已被作为排放污染物而成为控制对象。世界各国和国际组织对二氧化碳的排放控制十分重视,IMO在2009年7月通过了新船能效设计指数和已有船能效运行指标,以减少船舶的二氧化碳排放。

内燃机排放污染物控制的优劣,既影响自然环境、人类健康,也影响内燃机、汽车、船舶等产品在国内外的销售和竞争能力。目前,我国内燃机排放标准正在进一步充实和完善,各发动机生产厂家、研究所和高等院校正在为减排而努力,有关高校纷纷开设了“内燃机排放控制”课程,已有一些有关排放的教材出版。但考虑到内燃机污染控制技术的迅速发展以及排放法规的不断完善,我们编写了本书,以反映最新的排放控制技术和法规,希望能对我国内燃机排放污染物净化工作的深入研究和有关人员的培训有所裨益。

作者在编写过程中,广泛研究、参考了国内外的研究成果和最新资料,同时也总结了作者在内燃机燃烧和排放领域内的研究成果和体会。在本书编撰中,周松负责全书的编写工作,肖友洪参与了第3,4,5,6章的编写工作,朱元清参与了第8,9章的编写工作。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者不吝指教。

作 者
2010年3月

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 大气污染	1
1.1.1 大气成分	1
1.1.2 大气污染来源及危害	2
1.1.3 温室效应	3
1.1.4 光化学反应和光化学烟雾	6
1.2 内燃机排放的污染物及其危害性	7
1.2.1 氮氧化物	7
1.2.2 一氧化碳	8
1.2.3 碳氢化合物	8
1.2.4 颗 粒	9
1.2.5 臭 氧	9
1.2.6 二氧化硫	9
1.2.7 二氧化碳	10
1.3 内燃机排放的评价指标	10
1.3.1 排放物浓度	10
1.3.2 质量排放量	11
1.3.3 比排放量	11
1.3.4 排放指数	11
1.4 内燃机污染物的排放水平	12
1.5 内燃机燃料	12
1.5.1 内燃机燃料的分类	13
1.5.2 内燃机常用燃料的性质	13
第 2 章 污染物生成机理及影响因素	16
2.1 氮氧化物	16
2.1.1 氮氧化物生成机理	16
2.1.2 影响氮氧化物排放的因素	21
2.2 一氧化碳	30

2.2.1	一氧化碳生成机理	30
2.2.2	影响一氧化碳排放的因素	32
2.3	未燃碳氢	36
2.3.1	未燃碳氢生成机理	36
2.3.2	影响未燃碳氢排放的因素	43
2.4	颗粒	50
2.4.1	颗粒生成机理	51
2.4.2	影响颗粒排放的因素	58
2.5	硫氧化物	65
第3章	汽油机的排放特性及低排放设计	67
3.1	汽油机的排放特性	67
3.1.1	稳态排放特性	67
3.1.2	瞬态排放特性	68
3.2	燃烧系统优化设计	70
3.2.1	燃烧室形状	70
3.2.2	压缩比	70
3.2.3	改善缸内气流运动	71
3.2.4	气门布置和火花塞位置	71
3.2.5	减小不参与燃烧的缝隙容积	72
3.2.6	活塞组设计	72
3.3	低排放供给系统	72
3.3.1	进气道汽油喷射系统	73
3.3.2	缸内直接喷射系统	73
3.3.3	二冲程发动机的缸内汽油直喷系统	74
3.3.4	电子控制燃油喷射系统	74
3.4	推迟点火提前角	75
3.5	点火系统和点火能量	76
3.6	排气再循环	78
3.7	可变进排气系统	79
3.8	汽油机冷启动、暖机和怠速排放控制	81
3.8.1	冷启动排放控制	81
3.8.2	暖机排放控制	82
3.8.3	怠速排放控制	82
3.9	曲轴箱排放控制	83

3.10 蒸发排放控制	84
3.10.1 燃油蒸发损失	84
3.10.2 蒸发排放控制系统	84
第4章 柴油机的排放特性及低排放设计	86
4.1 柴油机的排放特性	86
4.1.1 稳态排放特性	86
4.1.2 瞬态排放特性	87
4.2 低排放柴油机设计概述	88
4.3 低排放燃油喷射系统	90
4.3.1 推迟喷油提前角	90
4.3.2 提高喷油压力	91
4.3.3 优化喷油规律	92
4.3.4 低排放喷油器	94
4.3.5 电子控制喷油系统	95
4.4 低排放燃烧室设计	96
4.4.1 燃烧方式	96
4.4.2 非直喷式柴油机燃烧室设计	97
4.4.3 直喷式柴油机燃烧室设计	97
4.5 低排放进排气系统设计	99
4.5.1 气流组织和多气阀技术	99
4.5.2 增压与增压中冷	99
4.5.3 排气再循环	100
第5章 排气后处理	103
5.1 催化技术的基本原理和概念	103
5.1.1 催化反应的过程及扩散的影响因素	103
5.1.2 吸附过程及相关概念	105
5.1.3 催化作用的本质	105
5.1.4 催化剂的性能要求	107
5.1.5 催化剂的失活	108
5.2 催化转化器	111
5.2.1 催化转化器的结构	111
5.2.2 催化转化器的性能指标	115
5.3 常用气相污染物催化净化方法	115

5.3.1	氧化催化净化法	116
5.3.2	还原氧化催化净化法	116
5.3.3	三效催化净化法	117
5.4	颗粒捕集器	119
5.4.1	颗粒捕集器的过滤材料	119
5.4.2	颗粒捕集器的再生	122
5.4.3	颗粒捕集器的失活	124
5.5	柴油机 NO _x 还原催化转化器	124
5.6	其他排气后处理技术	125
5.6.1	四效催化转化器	125
5.6.2	NO _x 吸收器	126
5.6.3	低温等离子辅助催化系统	127
第 6 章	内燃机替代燃料和新能源	129
6.1	有机替代燃料	129
6.1.1	天然气	129
6.1.2	液化石油气	133
6.1.3	醇燃料	134
6.1.4	二甲醚	138
6.1.5	生物燃料	142
6.2	氢燃料	143
6.3	太阳能	146
第 7 章	车用内燃机的排放标准和排放测量	148
7.1	国外发动机排放标准和控制历程	148
7.1.1	机动车排放法规的演变	148
7.1.2	国外汽车排放法规	149
7.1.3	国外汽车排放测试规程	156
7.2	我国控制汽车排放的标准和技术政策	160
7.3	排气污染物的检测	162
7.3.1	排气污染物的检测方法	162
7.3.2	排气污染物的取样系统	163
7.4	排气污染物的试验设备	165
7.4.1	气体成分的测量	165
7.4.2	颗粒及烟度测量	170

7.4.3 燃油蒸发污染物的测量方法	176
第8章 船舶发动机排放及其法规	179
8.1 船舶发动机排放	179
8.1.1 二氧化碳	179
8.1.2 二氧化硫	180
8.2 船舶柴油机主要排放物	180
8.2.1 碳氢化合物	180
8.2.2 一氧化碳	181
8.2.3 氮氧化物	182
8.2.4 颗粒	185
8.3 国际海协船舶发动机排放法规(MARPOL 公约附则 VI)	187
8.4 船舶柴油机氮氧化物排放限制	189
8.5 船舶柴油机硫氧化物排放限制	191
8.6 国际海协其他气体污染物排放限制	192
8.7 IMO NO _x 技术规范	194
8.7.1 柴油机族、柴油机组以及母型机	194
8.7.2 柴油机 NO _x 排放的测试与计算	196
8.8 国际海协有关 CO ₂ 排放的限定	201
8.8.1 新船能效设计指数	202
8.8.2 能效运行指标	207
第9章 降低船舶柴油机氮氧化物和硫氧化物的措施	208
9.1 降低船舶柴油机氮氧化物和硫氧化物的机内措施	208
9.1.1 氮氧化物	208
9.1.2 硫氧化物	219
9.2 降低船舶柴油机氮氧化物和硫氧化物的机外措施	220
9.2.1 选择性催化还原技术	221
9.2.2 船舶海水脱硫技术	236
附录 课程中用到的主要缩略语一览	242
参考文献	245

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的质量。

目前地球大气的主要成分如表 1-1 所列。当大气中出现外来物质,使空气成分发生变化,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。对人体有害的化学物质、有损人们感官的气味、烟雾引起的可见度降低等,都属于大气污染的范畴。

表 1-1 大气的化学组成(体积分数 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	
	氦		18
	氖		5.30
	氪		1.14
	氢		0.50
	氙		0.09
	二氧化碳		360
	污染成分		
	甲烷		1.7
	氮氧化物		0.30
	一氧化碳		0.13
	氨		0.006
	二氧化硫		0.002
	非甲烷烃		0.000 2
	臭氧		0.02~0.1

续表 1-1

成 分		$x \times 100$	$x \times 10^{-6}$
平流层	臭氧		0.1~10
	水蒸气		3~5

1.1.2 大气污染源及危害

人需要呼吸清洁的空气。近 100 多年来,空气污染对人类健康和地球生态环境已造成了很大的威胁。19 世纪开始的工业革命,既创造了人类历史上前所未有的物质财富,同时也带来了严重的环境污染灾害。世界上许多城市都曾出现过很严重的空气污染事件。

例如,1930 年 12 月,比利时的 Mense 市出现由 SO_2 污染为主因引起的 3 天大雾;1948 年美国宾夕法尼亚州出现以 SO_2 为主的大雾;1952 年 12 月,英国伦敦出现煤烟型大雾,污染物主要是 SO_2 和 TSP(总悬浮颗粒物),持续时间长达 5 天,死亡 4 000 多人。这些污染事件都是由煤的燃烧而引起的空气污染,常称为煤烟型污染。1943 年,美国洛杉矶又出现了另一种形式的空气污染,主要是由汽车排放污染物中的 NO_x 和 HC(碳氢化合物),在夏天强烈的阳光照射下经过一系列大气化学反应而形成的二次污染,通常称为光化学烟雾。这一类型的污染后来相继出现在世界许多大型城市中。

化石燃料(主要是煤和石油)的大量使用以及大规模工业生产过程,是造成大气污染的主要原因。例如煤在燃烧过程中排放的 SO_2 和 NO_x 是形成酸雨的两种最主要的气体污染物;垃圾焚烧产生的二噁英(dioxins)等一些有毒、有害污染物,在浓度很低时就会危及人类健康和生态环境。

按照污染的范围,大气污染一般可分为 3 种类型:

- ① 局部污染——出现在一个城市或更小区域范围的空气污染,如北京、广州、沈阳等城市的空气污染,其距离尺度一般小于 100 km;
- ② 区域性污染——范围在 500 km 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、欧洲和中国西南 3 大酸雨区;
- ③ 全球性污染——污染范围为数千公里以上的大气环境问题,如温室气体排放引起的全球气候变化(主要成分是 CO_2 , CH_4 等),以及空调制冷剂和有机溶剂在使用中排放的氯氟烃(CFCs)类物质对地球平流层臭氧的破坏等。

大气污染事件的相继出现,引起公众和各国政府对空气污染的认识和重视。例如,1956 年英国通过世界第一部《清洁空气法》,其主要内容是针对煤烟型污染的控制。经过 20 多年的努力,绝大多数发达国家都已在 20 世纪 80 年代基本解决了城市煤烟型空气污染问题。

与此同时,另一类型的污染——机动车排放造成的空气污染却在许多城市逐渐加剧。研

究表明,20 世纪 80 年代在欧洲的许多大城市,机动车的排放已经成为城市空气污染的主要来源。在美国,这一问题远比欧洲突出。由于洛杉矶很早就出现了严重的光化学烟雾事件,而且科学家经过十几年的研究,也已证明光化学烟雾主要是由机动车排放的 NO_x 和碳氢化合物,在大气中经过一系列光化学反应生成的臭氧等多种氧化性很强的物质所造成的,因此,1968 年美国国会在 1963 年《清洁空气法》的基础上,通过了《清洁空气法》修正案,主要内容是增加对汽车排放污染物的控制要求。随后的 20 多年,日本和欧洲也逐渐加强对汽车排放污染的控制。

近年来,随着海运和航空业的迅猛发展,船舶和飞机对大气环境的污染越来越严重,这已引起世界各国和国际组织的广泛关注,纷纷制定法规加强对船舶和飞机排放污染的控制。

1.1.3 温室效应

太阳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 $0.2\sim 4\ \mu\text{m}$ 内,其中 $0.4\sim 0.73\ \mu\text{m}$ 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,其峰值波长为 $10\ \mu\text{m}$ 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,使地球上的生物不会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。水蒸气数量多,吸收谱带宽,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,正好是水蒸气不吸收的谱带。而通过吸收地球反射的一部分红外线把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,这就是温室效应。图 1-1 是温室效应示意图。这些起到辐射能单向过滤器作用的温室气体,可让 48% 的入射太阳辐射能通过,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。温室效应把地球表面平均温度提高到 $+15^\circ\text{C}$; 否则,按地球接收的太阳能量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一 18°C 。

但是,近 100 多年来由于碳基化石燃料的大量使用和森林的大量砍伐,作为主要温室气体的二氧化碳从工业时代开始时的 280 ppm 增加到现在的 360 ppm,目前正以每年 0.4% (即 1.5 ppm 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,如果温室效应气体浓度不断持续增加,将使地球表面温度持续增加,导致地球气候变化,其影响包括:

① 北半球冬季期更缩短,并且更冷、更湿,而夏季则变长且更干、更热,亚热带地区将更干燥,而热带地区则更湿;

② 由于气温增高,水汽蒸发加速,全球雨量每年将减少,全球各地区降水形态将会改变;

③ 改变植物、农作物分布及生长,可能加快农作物生长速度,造成土壤贫瘠,作物生长终

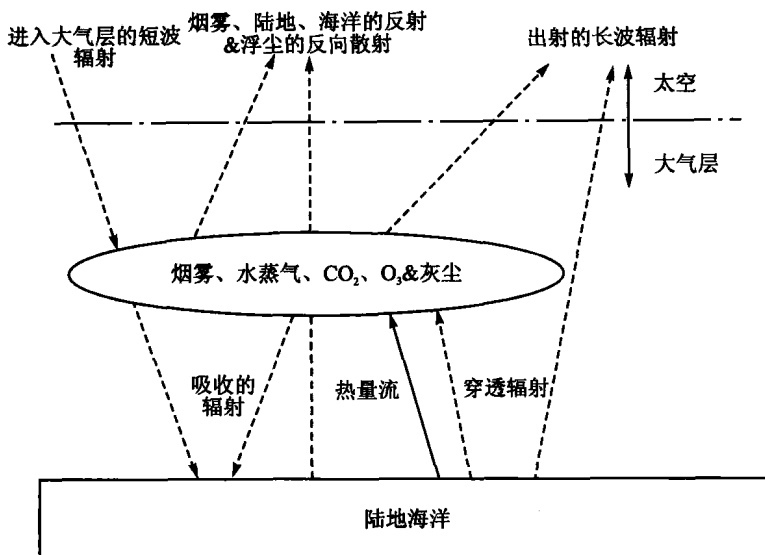


图 1-1 温室效应示意图

将受限制,还会间接破坏生态环境,改变生态平衡;

④ 海洋变暖,海平面将在 2100 年上升约 15~95 公分,导致低洼地区海水倒灌,全世界 1/3 居住于海岸边缘的人口将遭受威胁;

⑤ 改变地区资源分布,导致粮食、水源、渔获量等的供应不平衡,最终引发国际间经济和社会问题。

可见温室效应的影响绝不只限于气温,控制温室气体排放是世界可持续发展的基础之一。

温室效应气体除了二氧化碳以外,还有甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)、氢氟碳化物(HF-Cs)、全氟碳化物(PFCs)及六氟化硫(SF_6)等。每种温室效应气体对温室效应的作用是不同的。表 1-2 所列为主要温室气体的温暖化潜势。

表 1-2 主要温室气体温暖化潜势

温室气体		温暖化潜势
二氧化碳(CO_2)		1
甲烷(CH_4)		21
氧化亚氮(N_2O)		310
氢氟碳化物	HFC-23 (CHF_3)	11 700
	HFC-32 (CH_2F_2)	650
	HFC-41 (CH_3F)	150

续表 1-2

温室气体		温暖化潜势
氢氟碳化物	HFC-43-10mee ($C_2H_2F_{10}$)	1 300
	HFC-125 (C_2HF_5)	2 800
	HFC-134 ($C_2H_2F_4$)	1 000
	HFC-134a ($C_2H_2F_4$)	1 300
	HFC-152a ($C_2H_4F_2$)	140
	HFC-143 ($C_2H_3F_3$)	300
	HFC-143a ($C_2H_3F_3$)	3 800
	HFC-227ea (C_3HF_7)	2 900
	HFC-236fa ($C_3H_2F_6$)	6 300
	HFC-245ca ($C_3H_3F_5$)	560
全氟碳化物	全氟化甲烷(CF_4)	6 500
	全氟乙烷(C_2F_6)	9 200
	全氟丙烷(C_3F_8)	7 000
	全氟丁烷(C_4F_{10})	7 000
	全氟环丁烷($C-C_4F_8$)	8700
	全氟戊烷(C_5F_{12})	7 500
	全氟己烷(C_6F_{14})	7 400
	六氟化硫(SF_6)	23 900

注：以上数字为以 CO_2 温室效应强度为 1 所折算出的数字。

从表 1-2 可以看出,单位二氧化碳气体对温室效应的作用最小。但由于二氧化碳在大气中的总量很大,它对温室效应总的作用并不小。政府间气候变化专门委员会(IPCC)根据各种温室气体温暖化潜势 GWP 及其在大气中的总浓度,估算出不同温室气体的变暖效应,如表 1-3 所列。

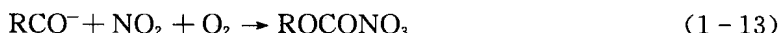
表 1-3 主要温室效应气体对温室效应的贡献 %

CO_2	CH_4	N_2O	CFC
55	15	6	24

由表 1-3 可见, CO_2 是人类活动排放温室气体中最重要的一种,CFC 居其次。

1.1.4 光化学反应和光化学烟雾

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 NO),在太阳光(主要是波长 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 的紫外线)作用下会发生复杂的光化学反应,生成以臭氧、醛和过氧乙酰基硝酸酯为主的光化学烟雾:



反应式(1-1)使整个链反应开始。当没有阳光时,这一反应进行得非常慢。在阳光作用下 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。

当没有 HC 时,上述反应式(1-2)~(1-5)终将达到平衡状态。由于反应式(1-4)对臭氧起消除作用,故反应式(1-3)产生的 O_3 浓度很低。但当有 HC 时,反应式(1-6)经反应式(1-7)使 NO 在反应式(1-8)中氧化为 NO_2 ,这一反应比反应式(1-4)进行得快,消耗了 NO,使反应式(1-4)很少发生,结果使 O_3 大量生成。

反应式(1-6)生成的醛类 RCHO 有刺鼻的气味,分子中出现双键者(如丙烯醛等)则更甚。随着分子质量的加大,气味越来越重。

在上述光化学链反应式(1-1)~(1-13)中,只有反应式(1-10)是链反应的终点,生成的烷基硝酸酯 RNO_3 ,不继续反应,构成光化学烟雾的一部分。

* : $h\nu$ 为光子。

反应式(1-11)~(1-13)最后生成过氧乙酰基硝酸酯 ROCONO_3 (PAN),它是光化学烟雾的成分之一,同时已被证实有致癌性。

1.2 内燃机排放的污染物及其危害性

内燃机用传统的碳氢燃料在空气过量完全燃烧时,主要排出二氧化碳(CO_2)和水蒸气(H_2O),还有多余的氧(O_2)和基本上可认为不参与燃烧反应的氮(N_2)。

完全燃烧产生的 CO_2 ,过去并不认为是一种大气污染物。近年来因为化石燃料的大量使用,使地球大气中的 CO_2 含量迅速增加,造成明显的温室效应,使地球的平均温度逐步提高。

含氢燃料燃烧产生的 H_2O ,一般不被认为是大气污染物,因为大气本身含有大量的 H_2O ,而且 H_2O 是地壳的主要成分。

现代内燃机燃烧过程占有的时间极短,可燃气不可能完全混合均匀,燃烧室中温度快速变化又不均匀,燃料的氧化反应不可能完全。这意味着内燃机排气中会出现不完全燃烧产物(例如 CO),甚至完全未燃烧的燃料,在使用碳氢化合物燃料的情况下称为未燃碳氢(Unburned HC)或总碳氢(THC)或简称碳氢(HC)。内燃机燃烧室中最高燃烧温度达到 2000°C ,甚至更高。在这么高的温度下,空气中的氮在高温下氧化生成各种氮氧化物(NO , NO_2),成为另一种排气污染物。

在柴油机中,喷嘴将燃油直接喷入到气缸中,燃油在燃烧前和燃烧过程中的极短时间内与气缸中的空气混合形成可燃混合气。因此,燃料与空气混合不均匀,在高温环境下缺氧的碳氢燃油会发生裂解、脱氢等反应,最后生成碳基粒子。后者接着又吸附了多种未燃烧或未完全燃烧的碳氢化合物,形成排气颗粒。

此外,燃料中含有的硫使内燃机排放出 SO_2 和 SO_3 以及硫酸盐。

综上所述,内燃机的排气中,燃烧产物包括 CO_2 , H_2O , HC, CO , NO_x , SO_x 及颗粒等,在这些物质中,除了 H_2O 以外,其余物质都对环境有害,是发动机排放出来的污染物。

以下各小节分别简述内燃机排放的主要污染物对人体和环境的危害。

1.2.1 氮氧化物

内燃机排放的氮氧化物绝大部分是一氧化氮(NO),少量是二氧化氮(NO_2),可用 NO_x 表示。 NO 是无色气体,化学性质不很活跃,具有中等毒性。对于它在空气中可能存在的浓度,没有直接的毒性。高浓度的 NO 能引起中枢神经的障碍,会影响肺的功能。 NO 在空气中氧化比较缓慢,而在紫外线作用下能迅速氧化成 NO_2 。 NO_2 是褐色气体,有刺激性气味,被吸入人体后与水结合生成硝酸,引起咳嗽、气喘,甚至肺气肿。自然环境含有微量的 NO_2 ,其含量低于 20 ppb。空气中 NO_2 浓度为 5 ppm 时,就会被人所感知;超过 100 ppm,会引起呼吸系

统疾病;达到 150 ppm 以上时,对人体有致命的危险;浓度超过 500 ppm 时,几分钟内就会出现肺浮肿而死亡。 NO_2 的环境限值为 0.05 ppm。 NO_2 的另一大危害是它参与光化学反应,形成臭氧、醛和 PAN。

1.2.2 一氧化碳

一氧化碳(CO)是无色、无味的气体,是一种对血液和神经系统毒性很强的污染物。空气中的一氧化碳,通过呼吸系统,进入人体血液内,与血液中的血红蛋白(Hemoglobin, Hb)、肌肉中的肌红蛋白、含二价铁的呼吸酶结合,形成可逆性的结合物。在正常情况下,经过呼吸系统进入血液的氧,将与血红蛋白结合,形成氧血红蛋白(O_2Hb),被输送到机体的各个器官和组织,参与正常的新陈代谢活动。如果空气中的一氧化碳浓度过高,大量的一氧化碳将进入机体血液。进入血液的一氧化碳,优先与血红蛋白结合,形成碳氧血红蛋白(COHb),一氧化碳与血红蛋白的结合力比氧与血红蛋白的结合力大 200~300 倍。碳氧血红蛋白的解离速度只是氧血红蛋白的 1/3 600。

一氧化碳与血红蛋白的结合,不仅降低了红血球携带氧的能力,而且还抑制、延缓氧血红蛋白的解析和释放,导致机体组织因缺氧而坏死,严重者则可能危及人的生命。一氧化碳对机体的危害程度,主要取决于空气中的一氧化碳的浓度和机体吸收高浓度一氧化碳的时间长短。如果空气中的一氧化碳浓度达到 10 ppm,10 分钟过后,人体血液内的碳氧血红蛋白可达到 2%以上,从而引起神经系统反应,例如,行动迟缓,意识不清。如果一氧化碳浓度达到 30 ppm,人体血液内的碳氧血红蛋白可达到 5%左右,可导致视觉和听力障碍;当血液内的碳氧血红蛋白达到 10%以上时,机体将出现严重的中毒症状,例如,头痛、眩晕、恶心、胸闷、乏力 and 意识模糊等;一氧化碳浓度再高时,就会导致死亡。

1.2.3 碳氢化合物

碳氢化合物(HC)包括未燃烧和未完全燃烧的燃油、润滑油及其裂解和部分氧化产物,如烷烃、烯烃、环烷烃、芳烃、醛、酮和有机酸等数百种成分。烷烃基本上无味,对于它在空气中可能存在的浓度,没有发现对人体健康有什么直接影响。烯烃略带甜味,有麻醉作用,对黏膜有刺激性,经代谢转化会转变成对基因有毒的环氧衍生物。烯烃是与氮氧化物一起形成有害的光化烟雾的罪魁祸首之一。芳烃有芳香味,却有危险的毒性。苯在较高的浓度下可能引起白血病,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。具有诱变性的 PAH,其活性不仅与分子构成有关,还与其立体结构密切相关。例如,苯并(a)芘(BaP)是致癌的,而苯并(e)芘(BeP)则没有直接致癌作用。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