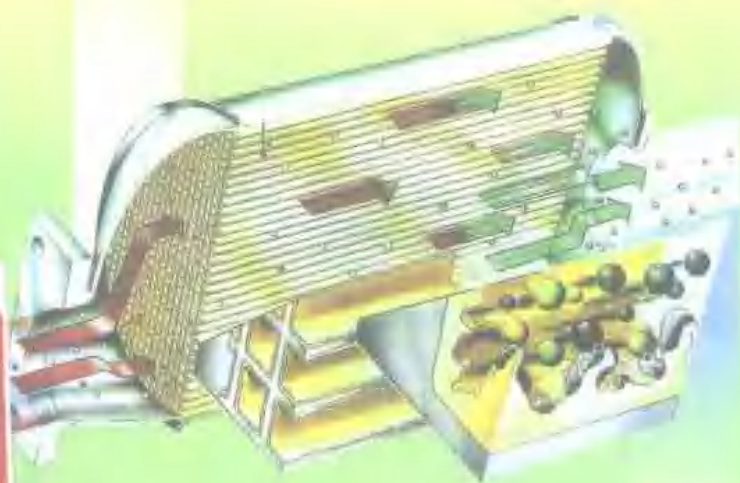


普通高等教育
兵工类规划教材

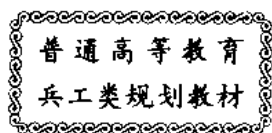
NEIRANJI
PAIFANG
YU
JINGHUA

内燃机 排放与净化

程至远 解建光 编



北京理工大学出版社



内燃机排放与净化

程至远 解建光 编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书详细叙述了汽油机污染物产生的机理,影响汽油机污染物生成的因素,汽油机排气净化措施,以及柴油机有害排放物及其控制,另外还简要介绍了内燃机排放物检测仪器和世界各国汽车排放标准及试验规范,最后一章介绍醇类、天然气、液化石油气等清洁燃料。

本书可作为内燃机专业的本科生教材,也可供从事内燃机性能、排放研究的技术人员和环保科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机排放与净化/程至远,解建光编. —北京:北京理工大学出版社,2000.7

ISBN 7-81045-704-7

I. 内… II. ①程… ②解… III. 内燃机-废气净化 IV. TK40

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 30270 号

责任印制:刘京凤 责任校对:郑兴玉

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码 100081 电话(010)68912824

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

850毫米×1168毫米 32开本 7.75印张 插页1 190千字

2000年7月第1版 2000年7月第1次印刷

印数:1—3000册 定价:11.00元

※ 图书印装有误,可随时与我社退换 ※

出版说明

在二十一世纪即将来临之际,根据兵器工业科技与经济发展对于人才素质和质的要求,兵器工业总公司教育局组织兵工专业教学指导委员会制定了《兵器工业总公司“九五”教材编写与出版规则》。在制定规划的过程中,我们力求贯彻国家教委关于“抓重点,出精品”的教材建设方针,根据面向二十一世纪军工专业课程体系和教学内容改革的总体思路,本着“提高质量,保证重点”的原则,精心遴选了在学校使用两遍以上,教学效果良好的部分讲义列入教材规划,兵工专业教学指导委员会的有关专家对于这些规划教材的编写大纲都进行了严格的审定。可以预计,这批“九五”规划教材的出版将促进兵工类专业教育质量的提高、教学改革的深化和兵器科学与技术的发展。

本教材由清华大学孙大立教授主审。

殷切地希望广大读者和有关单位对本教材编审和出版中的缺点与不足给予批评指正。

二〇〇〇年七月

前 言

汽车作为一种方便快捷的交通工具,在人们的日常生活中起着越来越重要的作用。国民经济的迅速发展和人们对美好生活的需求促进了汽车工业的飞速发展。汽车在给人们带来方便和舒适的同时,也造成了对大气环境的污染和人体健康的危害,世界上各个国家都非常重视对汽车排气污染的控制,排放法规也在逐渐严格。因此汽车从业者非常需要了解和掌握有关内燃机污染物生成机理、影响因素和控制措施等方面的知识,以便使“汽车的心脏”变得更加清洁,更符合环保要求。

本书是在北京理工大学内部讲义《内燃机排气净化》的基础上改编而成,主要是用作高等学校内燃机专业的教材。在本书改编时,对原内容作了较大的变动,删除了一些较陈旧的内容,吸收了多年来使用原教材时收集的各方面的意见和建议,补充了近年来在排放控制方面的一些新技术。全书共分七章,第一章为内燃机的有害排放物与大气的污染,第二章为汽油机有害排放物生成机理和影响因素,第三章为汽油机排气净化措施,第四章为柴油机有害排放物及其控制,第五章为内燃机排放物检测仪器,第六章为世界各国汽车排放标准及试验规范,第七章为清洁燃料。

本书成稿后,清华大学孙大立教授仔细审阅了全文,并提出许多宝贵意见和建议,同时,在编写过程中,也参阅了不少国内外有关的文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

由于本书涉及面较广,内容较多,再加之作者水平有限,恳请读者批评指正。

编 者

1999年10月

目 录

第一章 内燃机的有害排放物与大气污染	(1)
§1 引言	(1)
§2 内燃机的有害排放物及其危害	(3)
§3 光化学烟雾	(6)
§4 温室效应	(10)
§5 排放污染物的计量单位和排放指标	(10)
第二章 汽油机有害排放物生成机理及其影响因素	(14)
§1 汽油机的燃烧过程概况	(14)
§2 汽油机的污染物生成机理	(17)
2.1 概述	(17)
2.2 有害排放物的生成机理	(18)
§3 影响汽油机排气污染物生成的因素	(33)
3.1 空燃比	(34)
3.2 点火定时	(36)
3.3 汽油机运转状态	(37)
3.4 汽油机结构参数	(40)
3.5 其他因素	(44)
3.6 小结	(45)
第三章 汽油机排气净化措施	(46)
§1 化油器的改进	(48)
1.1 阻风门的改进	(48)
1.2 减速时化油器的控制装置	(50)
1.3 温度调整式加速泵	(52)
1.4 热怠速补偿阀	(54)
1.5 电子反馈控制化油器系统	(54)

§ 2 电控汽油喷射	(58)
2.1 汽油喷射系统的分类	(58)
2.2 电控汽油喷射系统	(61)
§ 3 点火系统的改进	(67)
3.1 传统点火系	(67)
3.2 电子点火系	(69)
3.3 数字式电控点火系统	(71)
§ 4 进气系统的改进	(76)
4.1 进气加热系统	(76)
4.2 可变气门定时	(78)
§ 5 燃烧系统的改进	(80)
§ 6 废气再循环(EGR)	(85)
6.1 EGR 的原理	(85)
6.2 EGR 控制方式	(87)
§ 7 催化净化技术	(89)
7.1 催化反应机理	(89)
7.2 汽车排气催化转化系统	(96)
§ 8 曲轴箱窜气、汽油蒸发排放及其控制措施	(107)
8.1 曲轴箱排放污染及其控制	(108)
8.2 汽油蒸发排放污染及其控制	(112)
第四章 柴油机有害排放物及其控制	(115)
§ 1 概述	(115)
§ 2 直喷式柴油机分区燃烧模型及有害排放物的生成	(116)
2.1 喷注中燃油-空气的分布	(116)
2.2 喷注的分区燃烧模型和有害排放物生成	(117)
§ 3 影响柴油机气态排放物生成的主要因素	(123)
§ 4 柴油机的微粒、碳烟生成机理及其影响因素	(131)
4.1 柴油机微粒和碳烟排放	(131)
4.2 柴油机碳烟的生成	(131)
4.3 排气碳烟的影响因素	(135)
§ 5 减少柴油机排气污染物的控制技术	(137)
5.1 燃烧系统的改进	(138)

5.2 进气系统的改进·····	(140)
5.3 燃料喷射系统的改进·····	(141)
5.4 燃料的改良·····	(151)
5.5 柴油机排气污染物的机外净化措施·····	(153)
第五章 内燃机排放物检测仪器 ·····	(161)
§1 前言·····	(161)
§2 排气采样方法·····	(161)
2.1 直接采样法·····	(162)
2.2 定容采样法·····	(163)
§3 内燃机排气分析仪器·····	(164)
3.1 非扩散型红外线分析仪·····	(167)
3.2 氢火焰离子化分析仪·····	(169)
3.3 化学发光氮氧化物分析仪·····	(172)
3.4 氧顺磁分析仪·····	(175)
3.5 烟度计·····	(176)
§4 柴油机排气微粒的测量仪器·····	(182)
4.1 全流式稀释风道测量系统·····	(182)
4.2 分流式稀释风道测量系统·····	(183)
第六章 世界各国汽车排放标准及试验规范 ·····	(187)
§1 世界各国排放标准·····	(187)
§2 轻型汽车排放测试规范·····	(194)
§3 重型汽车排放测试规范·····	(208)
3.1 美国·····	(208)
3.2 日本·····	(213)
3.3 欧洲·····	(215)
3.4 中国·····	(216)
§4 柴油机排气烟度标准及试验规范·····	(216)
第七章 清洁燃料 ·····	(221)
§1 液化石油气·····	(221)
§2 醇类燃料·····	(225)
§3 压缩天然气·····	(229)
§4 氢燃料·····	(231)

§ 5 电能·····	(232)
§ 6 燃料电池·····	(233)
主要参考文献·····	(236)

第一章 内燃机的有害排放物与大气污染

§ 1 引言

近几十年来,随着工业的发展和能源消耗的日益增加,由于燃烧过程产生的有害物质对大气产生了严重的污染。特别是石油燃料的大量消耗所引起的不利结果,在工业与交通集中的那些地区表现得最为突出,并引起人们的普遍关注。

内燃机的有害排放物是造成大气污染的一个主要来源。运输车辆、农用机械和工程机械用的动力装置,主要是采用内燃机。由于使用集中,数量大,因此其有害排放物对大气环境造成的危害十分严重。60年代以来,世界各国汽车保有量急剧增加,交通对大气的污染日益严重。由于汽车排放的废气是一种流动污染源,又往往在居民集中地区散发污染物,常常造成局部地区污染物浓度过高。加上汽车排放污染的高度恰好在地面附近,正处于人的呼吸带,所以汽车排放造成的大气污染对人体的健康影响很大。

汽车是当今大气污染的最大污染源已经被许多国家调查所证实。现在,世界上大约有两亿辆汽车,其中大部分在城市行驶,这些汽车每年排出两亿吨一氧化碳,四千万吨碳氢化合物,两千万吨一氧化氮等有害气体。而且,随着汽车数量的逐年增加,汽车排放到大气中的有害物质还会随之而增加。

60年代末,世界上大气污染最严重的国家是美国和日本。在美国,汽车数量已超过一亿辆,汽车排到大气的污染物占大气中污染物总量的60%,成为美国最大的大气污染源,见表1-1。据1968年调查,美国洛杉矶市有汽车四百万辆。该市每天排入大气的污染物约9 860 t,其中汽车排放的有害物质就占6 782 t。洛杉

矶是最早发现光化学烟雾的地方。这种由汽车排气酿成的光化学烟雾可以使人呼吸困难、眼红、喉痛、甚至造成中毒。这种毒雾在世界其他一些城市也曾发生过。1970年日本东京发生的光化学烟雾整整持续了一个夏季,使近两万人患了眼痛病。日本东京排放物比例见表1-2。

表1-1 1970年美国大气污染物排放量(估计值,百万吨)

污染源	CO	HC	NO _x	SO ₂	固体尘粒
交通运输	111.0	19.5	11.7	1.0	0.7
工业	11.4	5.5	0.2	6.0	13.1
固定源燃料燃烧	0.8	0.6	10.0	26.5	6.8
固体废物处理	7.2	2.0	0.4	0.1	1.4
其他	16.8	7.1	0.4	0.3	3.4
总计	147.2	34.7	22.7	33.9	25.4

表1-2 日本东京排放物的比例

污染源	CO/%	HC/%	NO _x /%	SO ₂ /%
汽车	99.7	98	36	1
工厂	0.1	1.5	63.5	99
飞机	0.2	0.5	0.5	0

世界上不断发生公害的事实迫使人们重视大气环境的保护工作。为此,一些国家先后制定了法令,采取法律措施来控制大气污染。在美国、日本和欧洲都相继制定了限制汽车排放的法规。与此同时,各国对汽车排气净化的研究工作盛行了起来。70年代以来,排气净化的研究有了飞跃的发展,并取得了显著效果。例如,美国二十年来汽车排放的污染物不断减少,CO、HC和NO_x排放量分别降低了92%、95%和52%。欧洲和日本也有相应的进展。但是控制汽车排放,减少汽车排入大气的污染,开展排气净化的研究仍是今后最大的研究课题之一。

随着我国国民经济的迅速增长,我国汽车工业也得到了迅猛发展。1978 年我国汽车产量为 14.9 万辆,到 1997 年时已达 157.7 万辆,年增长率为 13%。轿车产量也由 1978 年的 4 000 辆增长到 1997 年的 48.1 万辆。1996 年底汽车的保有量达到 1 100 万辆,为 1978 年的 8 倍,与此同时摩托车数量也在大幅度增加,但市场还远远没有饱和,中国目前汽车的保有量仅为只有八千多万人口德国的 1/4 左右。中国每人利用动力交通工具旅行的平均里程尚低于印度。随着经济的进一步发展,交通运输和汽车保有量必将继续高速增长。同时对能源供应和环境污染造成极大的压力。

为了贯彻“中华人民共和国环境保护法”,减少汽车排气对大气的污染,我国自 1983 年起制定了一系列汽车排放法规,并在全中国实施。2000 年以后,我国还将实施新的更加严格的汽车排放标准。因此,积极开展汽车污染控制方面的研究工作,采取各种有效措施减少汽车发动机的污染物排放,使我国汽车工业尽快赶上世界先进水平,已是我国内燃机工作者的紧迫任务。

§ 2 内燃机的有害排放物及其危害

内燃机排气中包含许多成分,其基本成分是二氧化碳(CO_2)、水蒸汽(H_2O)、过剩的氧气(O_2)以及存留下的氮气(N_2)等,它们是燃料和空气完全燃烧后的产物,从毒物学的观点看排气中的这些成分是无害的。除上述基本成分外,内燃机排气中还含有不完全燃烧的产物和燃烧反应的中间产物,包括一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)、固体颗粒(铅及铅化物、碳烟)及醛类等。这些成分的质量总和在内燃机排气中所占的比例不大,例如汽油机中只占 5%,在柴油机中还不到 1%,但它们中大部分是有害的,或有强烈刺激性的臭味,有的还有致癌作用,因此被列为有害排放物。

内燃机排出的有害排放物的情况随发动机的种类及其运转条件的变化而有所不同,各种发动机排出的有害成分比较见表1-3。需要说明的是,对于汽油机,排气中铅和铅化物有害成分较多是因为使用含铅汽油。当使用无铅汽油时,汽油机不存在铅污染。

表 1-3 各种内燃机排气有害成分比较

排气有害成分		汽 油 机		柴油机
		四冲程	二冲程	
CO		多	多	少
HC		中	多	少
NO _x		多	少	中
SO ₂		少	少	多
微粒	铅及铅化物	多	多	无
	碳 烟	少	少	多
	油 雾	少	多	少
臭 味		中	多	多

关于内燃机的有害排放物对人体健康和公共利益的影响,许多国家和国际组织已经作了大量的研究工作,其结论可综合如下:

1. 一氧化碳 CO

CO 进入人体后,非常容易和血液中的血红蛋白结合,它的亲和力是氧的 300 倍。因此在肺里血红蛋白不与氧结合而与 CO 结合,从而削减了氧向各组织的输送,使人缺氧,造成感觉、反应、理解、记忆等机能障碍,以及头痛、头晕等中毒症状。当大气中含有 CO 浓度达到 10 ppm* 时,就能引起人慢性中毒,出现贫血、心慌、呼吸道病变恶化等症状。当 CO 浓度达到 30 ppm 时,人在 4~6h 内中毒;达到 120 ppm 时,人在 1h 内就会中毒;而达到 10 000 ppm

* 1 ppm = 1×10^{-6}

时,就会使人死亡。一般认为在 CO 浓度为 50 mg/m^3 的环境中暴露 90 min 被认为是健康人所能允许的安全极限。

2. 氮氧化物 NO_x

内燃机排气中 NO_x 通常是指 NO 和 NO_2 。这两种成分对人都是有害的,特别是对呼吸系统。高浓度的 NO 能引起中枢神经障碍,但低浓度的 NO 对人体的影响目前尚不清楚。 NO_2 是一种褐色气体,沸点为 -21.2°C ,有特殊刺激性臭味。内燃机排气中的 NO 在排入空气后与氧接触又会变成 NO_2 。 NO_2 是内燃机排气中恶臭物质成分之一,据说 NO_2 中毒可以使人发生肺气肿,以及引起闭塞性支气管炎。对健康人大约在 9.4 mg/m^3 (5 ppm) 的环境中暴露 10 min ,即可造成呼吸失调等症状。

NO_x 除了本身对生物的危害外,还与 HC 一起生成光化学过氧化物,即光化学烟雾。这种过氧化物不仅能损害人的肌体,造成气喘、刺激眼睛等症状,对植物及某些人造材料也能造成损害。

3. 碳氢化合物 HC

HC 直接对人体健康的作用和影响目前尚缺乏充分的研究。在没有得出结论之前,人们首先把注意力放到致癌性碳氢化合物上。从硝基烃在动物身上的试验看,其影响是颇令人担忧的。另外, HC 和 NO_x 一起生成光化学烟雾,对动、植物都造成危害,而未燃烃也会直接刺激人的眼和鼻,造成人味觉功能减退。

4. 二氧化硫 SO_2

排气中 SO_2 的含量与燃料中的含硫量有关。一般来说,柴油机比汽油机中的 SO_2 要多些。 SO_2 对内燃机使用催化净化装置有破坏作用,即使少量的 SO_2 堆积在催化剂的表面,也会降低催化剂的使用寿命。同时 SO_2 是生成柴油机排气微粒的原因之一。但总的来说,与其他发生源(如燃煤)相比,汽车排放的 SO_2 所占

的比例很小。从大气污染角度看,不是汽车排放的主要问题。

5. 微粒

所谓微粒是排气中的铅化物、碳烟和油雾的总称。

(1) 铅化物

在车用汽油中,为了改善汽油的品质,曾采用添加各种铅的化合物,例如添加四乙铅可提高汽油的辛烷值和抗爆性。在高压压缩比、高性能的汽油机上大都使用添加四乙铅的高辛烷值汽油。可是这种含铅的高辛烷值汽油燃烧所生成的铅化物从发动机排出时,成为污染大气的有害物质。如果人们吸入这种气体时,铅将在人体内逐渐积累造成危害。当成年人的血液中混入 0.08 g/mL 以上的铅时,将引起所谓的铅中毒。另外,汽油中添加的铅还会使催化剂中毒,影响催化反应器的转化效率和使用寿命。为了防治铅污染,近年来许多国家开始采用无铅汽油。

(2) 碳烟

碳烟是燃料不完全燃烧的产物。内燃机的碳烟主要是直径 $0.1 \mu\text{m}$ 到 $10 \mu\text{m}$ 的多孔性碳粒构成。燃烧中各种各样不完全燃烧产物,可以以多种形式附着在多孔的活性很强的碳粒表面。这些附着在碳粒表面的物质种类繁多,其中有些是致癌物质,如 3-4 苯并芘等。

6. 臭味

臭味由多种成分引起的,除了 O_3 和 NO_2 外,燃料的不完全燃烧产物,如甲醛、丙烯醛等,也是有臭味的。臭味不仅使人感觉难受,它还刺激人的眼睛和粘膜。

§ 3 光化学烟雾

光化学烟雾是由汽车排气中的 NO_x 和未燃烃 HC 在阳光作

用下而产生的一种大气污染。光化学烟雾具有极强氧化力,它能使受力橡胶开裂、植物受损、空气的能见度降低,同时还会刺激人的眼睛和咽喉。光化学烟雾的浓度对人体和生物的影响见表 1-4。

表 1-4 光化学烟雾对人和物的影响

O ₃ 的浓度/ppm	影 响
0.02	5 min 内多数人能觉察,1 h 内胶片脆化
0.20	人肺的机能减弱,肺部有紧缩感,眼睛红肿
0.2~0.5	3~6 h 使人视力减弱
0.5~1.0	1 h,呼吸紧张,气喘病恶化
1~2	2 h,头痛,人慢性中毒
5~10	全身疼痛,麻痹,肺气肿
15~20	小动物 2 h 内死亡
20 以上	人在 1 h 内死亡

汽车内燃机排出物中作为起因的 NO_x 和 HC 在太阳光能的作用下进行光化学反应,生成光化学过氧化物。产生光化学烟雾的基本原理已由哈根-斯密特(HAGEN-SMIT)在实验室加以证实。光化学反应的主要产物是臭氧(O₃)、过氧酰基硝酸盐 PAN (PEROXYACYL NITRATES)以及醛类和有机氯化物。此外,在烟雾室中还测得能使能见度降低的烟雾剂(气溶性胶)。图 1-1 所示为典型的烟雾室试验结果。开始时烟雾室充填的是 1 ppm 的丙烯和 0.4 ppm 的 NO,当灯光照射后,从原有的 NO 很快就产生 NO₂,当 NO₂ 达到一定浓度后,HC 浓度就开始下降,最后达到平衡值。这个反应大约需要 3 h 完成。

有关光化学烟雾反应机理,凯普兰(J. CAPLAN)提出如图 1-2 所示的简化图形,列出了 13 个化学方程式。这些反应是同时

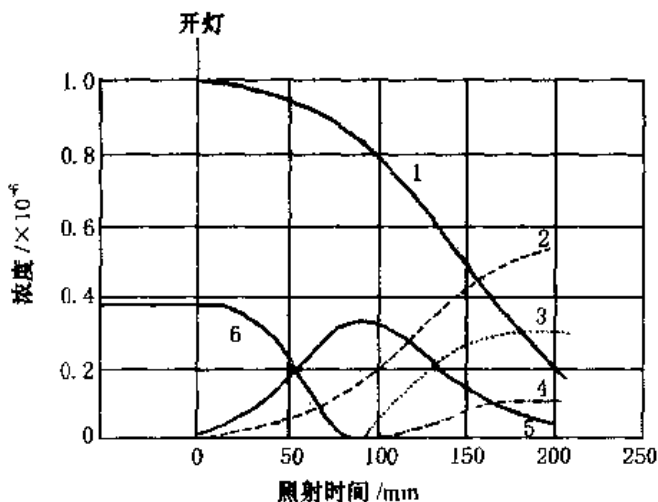


图 1-1 典型光化学烟雾反应中各成分浓度的变化
1—丙烯;2—醛;3—臭氧;4—过氧酰基硝酸盐;5— NO_2 ;6— NO

发生的,在许多情况下一反应物又参加另一反应,因此是极其复杂的。其中有四个反应式排出光化学烟雾产物:反应③排出 O_3 , 反应④和⑦排出醛类,反应⑬排出反应物过氧酰基硝酸盐 RCO_3NO_2 。这是一些对反应灵敏的生物产生强烈影响的物质。其中主要物质 O_3 是一种极强的氧化剂,对人和物具有很大的危害。在环境污染问题上,美国加州把靠近地面 O_3 含量看作光化学烟雾对空气污染的指标。除了 O_3 外,其他光化学反应物对人和物也有危害,光化学产物 PAN、甲醛、丙烯醛等对人眼具有很强的刺激作用。

必须指出,光化学烟雾的出现需要具备一定的条件:只有在汽车排放的 NO_x 和 HC 等污染物较多(包括工厂排入大气中的废气),而又处在大气对流不通畅的特殊地理环境,并具有强烈的阳光照射(例如夏季的中午),才有可能产生光化学烟雾。由于氮氧化物 NO_x 在大气中不会长期积累,同时如果不具备大气不通畅的地理环境,那么发生光化学烟雾的可能性就小。