

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



内燃机原理

NEI RAN JI YUAN LI

刘永长 主编

华中理工大学出版社



内容简介

本书是中国船舶工业总公司教材编审室的规划教材。教材内容力求做到与教学改革相适应;与现代科学技术发展相适应。

本书讲述内燃机工作原理及其主要工作过程。全书共分十章,分别讨论了内燃机循环、燃料供给、工质形成与燃烧、换气过程、排放与噪声、增压技术、工作过程的数值计算、以及特性及其分析等,既保证了基本理论、基本内容、基本要求的教学需要,又反映了新技术、新进展、新经验的时代特色。力求本书博采众长,有所创新。

本书主要作为内燃机专业本科学生《内燃机原理》课程的教材,也可作为相近专业的本科生和研究生的教学参考书,对从事内燃机研究的工程技术人员也有参考意义。

内 燃 机 原 理

刘永长 主编

责任编辑 易秋明

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉市皇冠彩印厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:426 000

1992年7月第1版 1999年8月第5次印刷

印数:8 201—9 200

ISBN 7-5609-0679-6/TK·27

定价:19.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

出 版 说 明

根据国务院国发[1978]23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会(小组)评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会(小组)复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

本书是根据船舶动力教材委员会 1986 年制定的“教学基本要求”编写的,经船舶动力教材委员会评选后推荐出版。本书以柴油机工作过程及其性能指标为其主要研究对象,着重阐明柴油机的基本原理及有关理论。为了扩大专业面,也介绍了汽油机的工作循环、燃烧及特性等内容。本书可适用于所有内燃机专业,因此,定名为《内燃机原理》。

现在,对内燃机性能的要求,已从单纯考虑经济性及动力性扩展到对排放、噪声、可靠性、燃料适应性等多方面的综合要求,因此,其涉及的面比较宽,实践性也很强,而面对的又是初次接触专业课程的学生,因此,本书希望在内容的深度和广度上、在反映基本理论和最新技术成果上、在理论和实践上力求得到很好的兼顾,以使教材既有体系的完整性,又富有时代感。

本书采用国际单位制,在换制过程中,对公式、数据、图表重新进行了换算和标定。

本书由刘永长教授主编,并具体编写了第一、二、六、九诸章。参加编写的还有(以章次为序):程德豪副教授(第三章)、张煜盛副教授(第四章)、张宗杰副教授(第五章)、朱梅林教授(第七章)、金国栋副教授(第八章)和王元庆高级工程师(第十章)。

上海交通大学刘焯棠教授对本书进行了审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,错误在所难免,敬请批评指正。

编 者

1990 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 内燃机在国民经济和国防建设中的作用	(1)
§ 1-2 内燃机当前的发展水平	(6)
§ 1-3 内燃机今后的发展趋势	(12)
第二章 内燃机循环的热力学分析	(14)
§ 2-1 内燃机理想循环	(14)
§ 2-2 涡轮增压内燃机理想循环	(16)
§ 2-3 内燃机理想循环热效率	(17)
§ 2-4 内燃机实际循环	(20)
第三章 内燃机的燃料与燃油供给	(28)
§ 3-1 内燃机的燃料	(28)
§ 3-2 内燃机燃油喷射系统	(32)
§ 3-3 柴油机的燃油喷射过程及其影响因素	(36)
§ 3-4 柴油机燃油的不正常喷射及其消除	(45)
第四章 内燃机的燃烧与放热	(51)
§ 4-1 内燃机燃烧热化学	(51)
§ 4-2 柴油机的可燃混合气形成和燃烧室	(54)
§ 4-3 柴油机燃烧	(68)
§ 4-4 汽油机的可燃混合气形成与燃烧	(73)
§ 4-5 内燃机的燃烧放热及其热平衡	(85)
第五章 柴油机的换气过程	(92)
§ 5-1 四冲程柴油机的换气过程	(92)
§ 5-2 四冲程柴油机的充气系数	(96)
§ 5-3 四冲程柴油机配气定时的确定	(100)
§ 5-4 二冲程柴油机的换气过程及其品质评定	(105)
§ 5-5 换气过程的试验研究	(113)
第六章 内燃机的性能分析	(118)
§ 6-1 内燃机的指示参数	(118)
§ 6-2 内燃机的机械损失及机械效率	(122)
§ 6-3 内燃机的有效参数	(128)
§ 6-4 内燃机的强化指标与强化分析	(130)
§ 6-5 内燃机的热计算	(138)
第七章 柴油机增压	(150)
§ 7-1 增压技术和增压方式	(150)

§ 7-2	废气可用能和涡轮增压系统	(155)
§ 7-3	涡轮增压器	(168)
§ 7-4	涡轮增压器与柴油机的配合	(174)
第八章	柴油机的排放和噪声	(187)
§ 8-1	柴油机排放物及其危害性	(187)
§ 8-2	柴油机排放物生成机理	(189)
§ 8-3	柴油机排放物的机内和机外净化	(194)
§ 8-4	柴油机噪声	(201)
§ 8-5	降低柴油机噪声的一般方法	(209)
第九章	柴油机工作过程数值计算	(214)
§ 9-1	柴油机的工质及热力系统的划分	(214)
§ 9-2	柴油机气缸内的热力过程	(216)
§ 9-3	柴油机进排气系统内的热力过程	(224)
§ 9-4	柴油机缸内过程计算的边界条件	(226)
§ 9-5	柴油机与涡轮增压器的匹配	(239)
第十章	内燃机的运行特性	(247)
§ 10-1	内燃机的运行工况和调节	(247)
§ 10-2	内燃机的基本运行特性	(251)
§ 10-3	内燃机的实用运行特性	(259)
§ 10-4	内燃机功率及燃油消耗率的修正	(263)
主要符号	(269)
参考文献	(271)

第一章 绪 论

§ 1-1 内燃机在国民经济和国防建设中的作用

内燃机是将燃料燃烧释放出来的热能转变为有用机械能的一种能量转换装置。在内燃机中燃料与空气混合、燃烧,产生高温、高压的工作气体,它作为热能的载体推动活塞,通过连杆、曲轴向外输出机械功。由于这一能量转变过程完全是在发动机的内部完成的,所以称为内燃机。根据着火方式、燃料类别、冲程数和进气状态等的不同,内燃机又常常分为各种不同的类型,例如:按着火方式可分为压燃式与点燃式内燃机;按使用燃料的不同又分为汽油机、柴油机、煤气机、多种燃料发动机……,按冲程数分有四冲程内燃机和二冲程内燃机之别;按进气状态的不同分为增压内燃机和非增压(自然吸气式)内燃机等。不过,不论哪一种类型的内燃机其基本工作原理都是一致的。本门课程是研究内燃机整个工作循环中各个过程的各个阶段的情况,分析影响各个过程各个阶段的主要因素,从中找出它的一般规律,并研究提高各种性能指标的有效措施,以及指出进一步提高性能指标的方向。

众所周知,人类的任何发明、创造都来源于生产实践和科学试验活动,内燃机的起源也是如此。百年前,德国人 N. A. 奥托(N. A. Otto)和 R. 狄赛尔(R. Diesel)在总结前人无数实践经验的基础上,对内燃机的工作循环提出了较为完善的奥托循环和狄赛尔循环,才使到他们为止几十年间无数人的实践、创造活动得到了一个科学的总结,并有了质的飞跃,他们将前人粗浅的、纯经验的、零乱无序的经验,其中包括无数失败和盲目实践的经验,加以继承、发展、总结、提高,找出了规律性,为现代汽油机和柴油机热力循环奠定了理论基础,为内燃机的发展作出了伟大的贡献。内燃机问世至今已经历了百余年的发展历程,前人为之付出了艰辛劳动,经过了无数次的改进和提高,才使内燃机日臻完善。现代内燃机无论是在结构还是性能方面都已今非昔比,成为当今用量最大、用途最广、无一与之匹敌的最重要的热能机械,是人们赖以生活和生产的重要的动力装备,在国民经济、国防建设和人们生活中发挥着重要的作用。其具体表现在:

一、内燃机是量大、面广、热效率最高的动力机械

现代高性能车用柴油机的循环热效率已达 40%以上,超长行程二冲程船用柴油机的循环热效率甚至可高达 50%以上(比油耗 154g/kW·h),车用汽油机的有效热效率也可达 33%左右,与其他热机相比是热效率最高的动力机械。正因为这一优势,所以使内燃机的应用在所有热机中一直居于领先地位,过去和现在内燃机都是应用最为广泛的动力机械。此外,由于功率覆盖面大,转速范围宽,单机功率从小于 1kW 的汽油机到 4×10^4 kW 以上的船用柴油机,功率档次比较齐全;从转速只有 70r/min 的 Sulzer RTA68 低速船用柴油机,到 9000r/min 的波尔舍 V8-3000 高速赛车汽油机,车用柴油机的转速也可高达 5000r/min(高尔夫轿车柴油机),能满足各种配套机具的需要。功率覆盖面如此之大,转速范围如此之宽,也没有任何一种热机可以

与之相媲美,所以内燃机的用量极大,有一个高数额的社会保有量,配套面广,应用于国民经济和国防建设(陆、海、空军的动力装备)的各个领域。从农业机械、汽车、摩托、赛车、工程机械、机车、战车、电站、舰艇和民用船舶,乃至飞机(农用飞机、体育竞技用飞机)都广泛采用内燃机,特别是在水陆交通运输和农用动力中占有压倒优势。内燃机之所以能得到如此广泛的应用,并在几十年间经久不衰,这是因为内燃机除了具有热效率高、经济性好、功率覆盖面大、转速范围宽的优点之外,还具有制造工艺要求并不十分高难,可在一般加工精度的设备上制造;使用的材料比较一般,多为普通铸铁、铸铝和碳素钢;能适应不同配套机具的需要,且不受使用环境和场所的严格限制;具有较长的使用寿命,操作、维修技术比较简单,价格相对比较低廉,能为不同层次的用户所承受;在柴油机上如果略加改造,还可使用多种燃料和劣质燃料,能为用户带来更大的方便和经济上的好处等一系列为其他热机所不及的优点。

与发达国家相比,我国的生活和生产水平还比较低,一切都在发展和前进之中。农业和交通运输是我国经济建设中的薄弱环节,在本世纪内是我国国民经济发展的战略重点。农业将有一个较大的投入,农业的出路在于机械化;汽车工业将有一个大的发展,它将带动整个机械工业的腾飞;加强水陆交通运输,搞活物资流通环节。所有这些,都预示着我国内燃机工业将有一个大的发展,对内燃机产品的数量和质量将有一个更大、更高的要求,内燃机用量在动力机械中将会占据更大的比重,这个发展前景是不容置疑的。

二、内燃机是机车、船舶和舰艇的主要动力装备

机车、船舶和舰艇在国内外都毫无例外地采用柴油机作动力。这是因为柴油机热效率最高、比油耗最低、功率覆盖面大、转速范围宽、起动迅速、运行安全、维修方便、使用寿命长、并能燃用劣质燃料。在大功率动力装置中柴油机占了绝对优势。

在世界各国中,铁路是主要的交通干线,特别是内陆国家,铁路承担着最大的运输量。发达国家的机车动力已全部电气化或内燃机化,我国机车动力当前主要是实现内燃机化。尽管在边远或非客运线路上,我国仍使用着一定数量的蒸汽机车,少数干线已开始采用电力牵引机车,但就总体而言,当前或今后一段时期内我国铁路运输的主力军还是内燃机车。当前,国产机车动力的主要机型是北京二七机车厂的16V24/26型和大连机车厂的16V24/27.5型,功率都为2206kW。

在船舶方面,柴油机作为主机和辅机更是占了统治地位。内河及沿海船舶全部以柴油机作为主机和辅机;在远洋船舶中,因为柴油机不但油耗最低,而且能燃用价格低廉的劣质油,所以柴油机作为主机的比例与年俱增。据日本轮机学会会刊统计,1980年国外新建的2000t以上的船舶总数为1434艘,其中以柴油机作为主机的1398艘,占总数的97.49%;1981年总数为1603艘,以柴油机作为主机的1572艘,占总数的98.07%,其余31艘的主机为蒸汽轮机,只占总数的1.93%。进入80年代中后期,尽管造船业面临世界性的不景气局面,但采用柴油机作为船舶主、辅机这种趋势有增无减,特别是大型低速超长行程二冲程柴油机的出现,使比油耗进一步降低,达到150g/kW·h左右的新水平,在万吨级船舶主机选用上具有更大的竞争力。我国有数千公里的海岸线,几千个岛屿和辽阔的海域,是一个重要的海洋大国;内陆有长江、黄河、黑龙江、珠江等四大水系和鄱阳湖、洞庭湖、太湖等大型内陆湖泊;在南方诸省,小型江河、湖泊、港汊纵横交错,构成外运内联的水上运输网络。因此,海运和内河运输是我国交通运输的主要组成部分,造船业是内燃机的重要市场。由于我国造船、造机的设备能力和技术水平的限制,尚不能在数量和质量上满足日益增长的水上运输的需要,水上运输的潜力还未充分发挥,

所以,随着我国航运业的进一步发展,我国船舶内燃机工业可望出现一个兴旺的局面。

世界各国海军都以常规装备为主,战舰也以常规动力为主,军辅船舶更是如此。海军轻型水面舰艇如猎潜艇、巡逻艇、炮艇、鱼雷快艇、导弹快艇、登陆舰及辅助舰等绝大多数以柴油机作为动力装置,有些大型水面舰艇,如导弹护卫舰、驱逐舰以柴油机或柴油机与燃气轮机联合装置作为动力装置,至于常规潜艇全以柴油机作为动力装置。巡洋舰、航空母舰则多采用蒸汽轮机或核动力装置,即使是这些舰种,也常以柴油机作为应急装置或辅机。总之,柴油机已成为海军舰艇最主要的动力装备。我国海域辽阔,海岸线漫长,海军是保卫我国海疆的一支重要国防力量。本着以防御为主的建军方针,我国海军主要发展轻、潜、快艇种,柴油机在海军动力装备中占有举足轻重的地位。

三、内燃机是现代汽车和战车的最佳原动机

汽车工业是一个综合性工业,它与机械、电气电子、仪表、电脑、材料、化工等许多工业门类相关,反映了一个国家的工业基础和技术水平,它的发展也带动了其他工业部门,从许多发达国家和新兴工业化国家的经济发展来看,都是从汽车工业的发展起飞的,美、日、西欧如此,南朝鲜、巴西也是如此。根据日本汽车工业会的统计,世界的汽车保有量至1985年底为4.85亿辆,其中小客车约3.7亿辆,载货车及公共汽车约1.1亿辆,其比例大约是3:1。日本的汽车保有量是0.48亿辆,约占世界保有量的10%。目前世界的汽车保有量以每年2.5%的比率增加,预计到2000年将超过6亿辆。根据过去的统计资料,汽车的年产量是保有量的1/10,从汽车产量便可看出汽车工业的规模之大。在日本,汽车制造业的产值占全国制造业产值的12%,电气、机器制造业的产值约为15.5%,可见汽车工业的重要性。我国汽车产品在数量和质量上与世界水平相比还有很大差距,远满足不了国内市场的需要,在车型上主要还是以卡车为主,小车市场基本上为进口车所占领。为改变我国汽车工业发展落后的局面,国家决定在长春、湖北、上海建立三条轿车生产线,各省市和军工生产部门也在开发或转产农用车、轻型车或客车,正形成一股“汽车热”,我国汽车工业将会出现一个新局面。

发动机是汽车的“心脏”,汽车与发动机相互依存,共同发展。英国D. A. 佩克(D. A. Parker)等人根据1986年世界各国汽车发动机生产和研制的情况提出如表1-1所载的观点。

表 1-1 1986 年各种汽车动力装置情况

型 式	状 况	热效率%		燃 油 耗	成 本	存在问题的方面
		现时	潜力			
传统汽油机	成批生产	28	33	100(基准)	100(基准)	排放与燃油耗
涡轮增压汽油机	成批生产	30	34	100	122 以下	成本、响应特性
分层充气汽油机	有限生产	32	36	95	110	成本、噪声
分开式柴油机	成批生产	32	35	78	123 以下	烟度、怠速敲缸、噪声
直喷式柴油机	成批生产	34	37	72	120	烟度、转速限制、噪声
隔热复合涡轮柴油机	研究中	40	48	61	—	成本、复杂性、可靠性
汪克尔转子发动机	有限生产	28	32	107	125	成本、排放与燃油耗
斯特林发动机	研究中	34	42	73	450	成本、可靠性
燃气轮机(金属材料)	有限生产	34	42	130	350	成本
燃气轮机(陶瓷材料)	研究中	—	48	110	—	成本、可靠性
电 池	有限生产	39	45	72	135 以下	成本、行驶范围、重量
燃料电池	研究中	42	—	68	180	成本、行驶范围、重量

他们统计,1982年往复式车用内燃机在市场上的销售量占99.95%,汪克尔转子发动机仅占0.05%,往复式内燃机在车用动力中占绝对优势。在最近几年间,尽管调节汽车发动机的市场因素已发生显著变化,但对成本与耐久性的要求更为重要,在油价较为稳定的背景下,往复式内燃机仍是未来汽车的最佳原动机。汽车工业的振兴必然带来内燃机工业的大发展。

军用车辆,如装甲车、坦克、牵引车、移动式发电机组、军用运输车等动力装置几乎毫无例外地采用内燃机,尽管燃气轮机装置也有用于装甲车和坦克的,但为数极少。内燃机仍是军用车辆不可替代的最重要的动力装备。

四、内燃机是城市大气环境的主要污染源

环境污染是现代工业社会发展的消极因素。80年代以来,环境污染已到愈来愈严重的程度,已引起人们的严重关注和不安。环境科学家们普遍认为,地球气温正在不断上升,21世纪将是一个大热的世纪。尽管地球经历了不少忽冷忽热的时期,但这次它将比以往任何一次热得更快更厉害。大热在即的威胁是显而易见的:由燃烧石油、煤、柴油、汽油等矿物燃料产生的CO₂正在大气层中迅速聚结,从机动车辆排气管和工业溶剂等各种人造化学物质中释放出来的氟氯化碳等有害气体也在迅速增多。这些气体在大气层中能起到玻璃暖房式的聚热作用,从而使地球气温升高。正因为上述原因,到21世纪中叶,大气层中的CO₂可能比现在要增加60%,即比工业革命前增加一倍,所以地球气温至少要上升2至3度,也可能升高8度以上。即使上升2度也可能带来极大的影响,因为这个温度值只是个平均数,在某些地区或某个季节,上升的温度可能会高得多,所以将会带来灾难性的后果。

此外,内燃机排气中还含有有毒气体CO、NO_x和HC及炭烟和微粒,污染大气,直接危害人体健康。环境问题是当代社会面临的四大问题(粮食、人口、环境、能源)之一。大气污染是环境污染最重要的一个方面,也是控制与治理较为困难的一面,城市人烟稠密,大气污染尤为严重。在城市大气污染中,内燃机的有害排放量约占60%,因此,内燃机排放是城市大气环境的主要污染源。

为了控制大气污染,美国、日本和西欧各国都制定了严格的内燃机排放法规。特别是日本,由于国土面积狭小,人口分布趋于都市化,因此其法规是世界上最严格的。1975年开始的法规要求将排气中的CO、HC及NO_x分别比法规制定前的降低90%以上。美国1984年制订了重型柴油机的排放法规,相对于以往的十三工况法,引进了瞬态循环法。美国联邦法规规定:HC为1.74g/kW·h、CO为20.77g/kW·h和NO_x为14.34g/kW·h;加利福尼亚州法规规定:HC为1.74g/kW·h、CO为20.77g/kW·h和NO_x为6.33g/kW·h。柴油机排气所含的微粒是汽油机的20倍,美国对柴油机的微粒,尤其是炭粒的限制十分严格,小型柴油机的排气微粒法规限制值为0.6g/mile,加州法规1985年为0.4g/mile,1986年为0.2g/mile;美国联邦法规也从1987年起进一步强化,1991年为0.34g/kW·h,1994年为0.136g/kW·h,以后逐年严格。欧洲各国也进行了强化法规的工作。

我国内燃机排放指标十分落后,1980年对我国汽车排放指标的普查表明:CO含量为日本现行法规的28~38倍,HC为16~26倍,NO_x为3~7倍,达到十分惊人的地步。而汽车保有量还在逐年增加,内燃机排气的有害物质对大、中城市的大气污染日益严重,直接危害人们的健康,控制排气污染已到了刻不容缓的地步。提高内燃机性能,保护大气环境,造福子孙后代,具有特殊重要的意义,是内燃机工作者应尽的社会责任。

噪声也是公害之一,在内燃机噪声频谱中,占主导地位的声频通常在500Hz以上,这种噪

声特性会造成人的烦恼感。日本自 1971 年开始实施加速噪声法规以来,对噪声的控制也在逐步提高要求,80 年代中期已进入第二阶段,噪声法规规定中型以上车辆的限值是 83dB(A),小型车为 78dB(A)。

环境保护对当代内燃机提出了更新更高的要求,内燃机正面临着严格排放和噪声限制的挑战。

五、提高内燃机性能是节能和环保的迫切需要

我们知道,自然界矿物能源贮量有限,而人类能源消耗量却逐年增加,全世界的石油探明贮量 1976 年为 $814.8 \times 10^8 \text{t}$,1982 年约为 10^{11}t ,其中海底油占 20~25%。全世界的石油产量 1976 年为 $28.5 \times 10^8 \text{t}$,1978 年为 $31 \times 10^8 \text{t}$ 。如按正常年增率(3.5%)计算,可供开采的年限都不太长,特别是石油,有人估计再过 30~50 年将会出现枯竭的局面。能源前景不容乐观,能源危机将日益深化。

在我国,能源问题也已提到议事日程。从绝对数量看,我国矿物能源贮量还比较丰富,但如按能源人均占有量计算,则只相当于世界人均占有量的 1/2。由于我国现有的生产水平和生活水平还比较低,人均一次能源的消耗量大大低于主要工业化国家,只相当于日本的 21.9%,德国的 14%,美国的 7.36%。可以预言,随着我国“四化”建设的发展,人民物质生活水平的日益提高,能源消耗量将会大幅度地增加。能源供求之间的矛盾也会愈来愈尖锐,因此,解决能源问题也是我们的燃眉之急。1981 年我国原油产量 10^8t ,成品油 $9 \times 10^7 \text{t}$,内燃机是用油大户,内燃机的年耗油量 $3 \times 10^7 \text{t}$,其中柴油 $1.8 \times 10^7 \text{t}$,汽油 $1.1 \times 10^7 \text{t}$,约占石油总产量的三分之一强。根据 1983 年农机、汽车、铁道等主要内燃机用户部门预测,到 2000 年我国内燃机用油的需要量将达到 $1.2 \times 10^8 \text{t}$ 至 $1.4 \times 10^8 \text{t}$,那时我国原油产量虽有大幅度增长,但估计每年仍将短缺 $1.2 \times 10^8 \text{t}$ 。

1980 年,我国内燃机保有量为 $2.87 \times 10^6 \text{kW}$,比 1970 年增长近 5 倍。1979 年全国共有 381 个内燃机专业生产厂家,生产能力达到 $4850 \times 10^4 \text{kW}$,其中柴油机 $2980 \times 10^4 \text{kW}$,汽油机 $1890 \times 10^4 \text{kW}$;当年产量为 $3310 \times 10^4 \text{kW}$,其中柴油机约 $2060 \times 10^4 \text{kW}$,汽油机约 $1250 \times 10^4 \text{kW}$ 。“六五”至“七五”期间,我国石油生产增长不大,但内燃机却仍保持每年 $1740 \times 10^4 \text{kW}$ 以上的增长速度,其社会保有量的增长与燃油短缺的矛盾,将越来越严重地影响到农业、交通运输以及使用内燃机为动力的其他部门的发展。对这种不利形势应有充分估计,并应采取有力对策,以保证我国在本世纪末顺利实现“四化”的宏伟战略目标。

由于我国内燃机性能指标及产品质量与国外水平相比有明显的差距,大体上落后 15 到 20 年,不仅寿命短,可靠性差,排放指标落后,而且比油耗指标较高,一般高出 $20 \sim 40 \text{g/kW} \cdot \text{h}$ (约高 8~15%)。这说明我国内燃机的性能指标还比较低,节油的潜力比较大。因此,改善燃烧,提高经济性,控制有害物质排放,实现工作过程及燃烧过程的优化控制,寻求代用燃料和应用低质燃料,减少摩擦、磨损,提高使用寿命等问题已成为当前急待解决的热门课题。如果采取各种措施,使内燃机的比油耗下降 10%,则每年可节油约 $34 \times 10^5 \text{t}$,相当于开发一个中等油田,其经济效益是十分可观的。提高经济性、降低有害物质排放已是社会对内燃机产品提出的迫切需要,也是通过努力可以达到的目标。

§ 1-2 内燃机当前的发展水平

从内燃机问世已有百年左右的发展历史,迄今已达到一个较高的技术水平。在这样一个漫长的发展历程中,有两个重要的发展阶段是具有划时代意义的:一是 50 年代初兴起的增压技术在发动机上的广泛应用,再就是 70 年代开始的电子技术及计算机在发动机研制中的应用,这两个发展趋势至今都方兴未艾。随着能源短缺和环境污染的日趋严重,内燃机正面临着排气净化法规和燃油耗法规进一步强化的严峻挑战,从而促进了各种基础研究和应用研究的开展,使当代内燃机技术达到一个新的水平,对具有百年历史的内燃机来说,近 10 年的发展,成绩是巨大的,具体表现在:

一、内燃机综合性能的进展

1. 用于机车、船舶及固定式装置的中、低速柴油机

在中、低速大型动力装置中几乎毫无例外地采用柴油机。在 750~3000kW 功率范围内,中速四冲程柴油机由于其结构紧凑、操作灵活与成本适中而仍受广泛欢迎,此外,转速范围 450~1500r/min 有利于高功率化和与配套装置的高效匹配,所以机车、低于 4000t 排水量的小型船舶以及摆渡用的运输船,通常首先选用中速柴油机。其平均有效压力可达 2.5MPa,最高压力限制在 18MPa 以下,比油耗已低于 200g/kW·h。属于这一档次的代表机型有:法国 PA6-280 柴油机,可用于机车、船舶或发电装置,其主要性能指标为:转速 1000r/min、功率 1770kW、最高压力 13.73MPa、平均有效压力 1.98MPa、比油耗 209.4g/kW·h、行程缸径比 1.036;此外,还有原苏联 16Д19、英国帕克斯曼 16VLX 等机型。

功率 3000~7500kW 的较大功率发动机,四冲程柴油机在生产成本上优于二冲程柴油机,而油耗两者不相上下,代表机型如 Sulzer ZA40 柴油机、PC2-6 柴油机、ZV40 柴油机。这些发动机在平均有效压力为 2~2.3MPa 的情况下,其最高压力为 15~16MPa,活塞平均速度 9m/s 左右,行程缸径比为 1.2~1.4。

在 7500~40000kW 功率范围内,长行程或超长行程二冲程柴油机在近 10 年中得到发展,循环热效率比其他型式的发动机高,现已达到 50~55.6%。其额定转速为从 200r/min 到 60r/min 以下,具有倒车直接耦合能力,适用于直接驱动船舶螺旋桨,从而可提高推进效率。目前,这类发动机在平均有效压力约为 1.7MPa 时的最高压力一般为 12.5MPa,行程缸径比为 3~3.5,并且还在增大,不过活塞平均速度限制在 7m/s 左右,比油耗已降至 200~150g/kW·h 左右,达到较高的技术水平。

中、低速大功率柴油机的使用寿命已有明显的提高,低速二冲程柴油机的大修期可达 20000 小时;中速四冲程柴油机达 12000~15000 小时;比重量也有了下降,中速强载发动机单位功率的重量可达 1.36kg/kW。由此,更增加了柴油机在这一功率档次内与燃气轮机和蒸汽轮机的竞争力。

2. 高速车用内燃机

进入 80 年代以后,由于能源和环境形势的严峻,车用内燃机的生产和使用都受到排气净化法规和燃油耗法规的严格限制,美国政府还专门实施了“企业共同平均燃油经济性(CAFE)”目标。这种限制,促进了内燃机技术水平的提高和各种新技术的开发研究与应用,使车用内燃机达到一个新的水平。下面分别就汽油机和柴油机加以说明。

(1) 车用汽油机

汽油机仍是汽车发动机的传统机型,由于其升功率高、工作柔和平稳、噪声低、比体积小和比重量轻,所以在轿车和轻型车上占有优势。在比油耗上由于一系列新技术的采用,也可与柴油机相抗争,因此,近10年来汽油机有了一个长足的发展。为了满足排放法规并达到良好的燃油经济性,促使高空燃比、稀混合气燃烧系统的采用。在这种系统中高压比与强烈的油气混合运动相结合,使燃烧速率提高,爆燃极限扩大。这样,在燃用无铅、辛烷值为93的汽油时,压缩比为10.5到12的高紊流运动汽油机,可采用空燃比为22以上的稀燃系统。如May火球式高紊流燃烧室用于JaguarXJS型车辆上,可提高车辆燃油经济性20%;德国鲍尔希公司的最佳热力学系统,在部分负荷时可提高燃油经济性30%;还有里卡多公司的HRCC系统,福特公司改进的HRCC系统,以及将采用的第三代稀混合气燃烧技术,其空燃比都有较大提高。丰田公司开发了一种在怠速、容易加速、减速和常速运行条件下的稀混合气燃烧系统,空燃比可达24。为了提高燃油经济性,还可采用高压比、分层充气的技术措施。在BMW公司的最新型Eta发动机中采用了一种快速燃烧系统,采用的压缩比允许高至13,燃油经济性可改善1.5~1.8%。使用有铅汽油时的压缩比也有了提高,如福特公司CVH燃烧室的压缩比为9.5,英国Jaguar MAY燃烧室的压缩比为12.5。松田公司的稳定燃烧系统为一种简单的分层充气系统,“S”形进气道与带导气屏进气门相配合起着加强空—燃混合气涡流的作用,结合高能点火系统,可在发动机全工况范围内取得提高燃烧速度与稳定着火的良好效果。菲亚特公司的Marker系统为另一种最新分层充气系统,其目的在于取得良好的燃油经济性与适用多种燃料,燃油经济性可比一般汽油机提高30%。此外,还有本田公司的复合旋流燃烧控制(CVCC)充量分层系统,GM公司的轴向分层喷油式发动机等,都能较好地改善经济性。至于汽油喷射,MAN公司的试验值得一提,MAN公司采取汽油向燃烧室壁面喷射,燃油由壁面蒸发形成混合气,实现工质分层、外源点火的燃烧方式。经过单缸机试验后,将缸径108mm,行程128mm,6缸直列MAN0836FM发动机改装成外源点火的发动机,压缩比为16。尽管它还带有原机固有的缺点,即较重的结构所造成的高摩擦功,但性能还是有了很大的改善,在整个工作转速范围内都接近于等压燃烧,最高压力与平均有效压力之比只有6,最高压力比原机低1.765~2.35MPa,在整个转速范围内没有超过5.5MPa,比油耗接近于柴油机的水平,最低油耗在231.8g/kW·h左右。这是一个很值得注意的尝试。

(2) 车用柴油机

在载货车的运行费中,燃料费约占70%,降低油耗是发动机运行经济性首要追求的目标。因为通常柴油机汽车的运行油耗比汽油机汽车要低30~40%,所以近年来国际上明显的发展趋势是大量发展柴油机汽车,即使是在以汽油机占绝对优势的轿车领域,柴油机的渗透量在欧洲与日本也逐年增加。1984年西欧柴油机轿车销售量为123万多辆,为轿车总销售量的13.3%,在德国达到20%。

以日本大、中型汽车燃油消耗率的改进为例,在过去若干年的统计数据中表明,燃油消耗率以每年2%的比率不断下降,如柴油机的最低油耗:60年代为258.4g/kW·h;70年代由于直喷式的采用,油耗率大为改善,降到224.4g/kW·h;80年代采用了带中冷器的增压装置和电子控制,降到197.2g/kW·h;到90年代初,可以降到177g/kW·h左右。当前车用柴油机的发展趋势有如下几个特点:

- ① 小排量发动机的柴油机化、直喷化及其向轿车领域的扩展;
- ② 分开式燃烧室柴油机的直喷化;

- ③ 直喷式柴油机的(涡轮)增压化;
- ④ 涡轮增压直喷式柴油机再加进气中冷器;
- ⑤ 电子控制技术的应用。

增压、高压(100MPa 以上,有些已达 150MPa)喷射无涡流系统、微涡流系统、可变涡流进气道以及电控技术等采用,使车用柴油机的性能有了一个较大的提高,MWMTBD23 112 缸 V 型,2300r/min,功率 745.7kW,比油耗小于 200g/kW·h; Cat3406B 直列 6 缸,2100r/min,298.3kW,比油耗 199.7g/kW·h;小松 S(A)6D140 直列 6 缸,2100r/min,500kW,比油耗 197g/kW·h。这些代表了车用柴油机当前或者 80 年代中期的水平。表 1-2 列出了国外主要公司近期车用柴油机产品的性能,由此可以看出其发展的动向。

表 1-2 国外最新车用柴油机

制造厂	型号	气缸排列	进气方式	排量 mL	D×S mm	最大功率 kW/r/min	最大扭矩 N·m/r/min	发动机特点
五十铃	12PC1N	V12	非增压	18017	119×135	261/2300	1206.63/1400	12RB1 型扩缸
	6RA1	L6	增压中冷	12023	135×140	220.1/2200	1216.44/1200	6RA1 型带增压中冷
	8PC1(T)	V8	增压	12011	119×135	202.2/2400	1059.5/1300	8PB1(T)型扩缸
	4FC1(T)	L4	增压中冷	1995	84×90	65.4/4500	186.4/2500	4FC1 型带增压中冷
丰田	1W	L4	非增压	4009	104×118	84.6/3200	275/2000	新机型
	1C-TL	L4	增压	1839	83×85	58.8/4500	152/2400	1C-L 型带增压
大发	DL	L4	非增压	2765	92×104	56.6/3600	175/2200	DG 型扩缸
	CL10	L3	非增压	993	76×73	28/4800	62/3500	CB 型改柴油机
伏尔加	TD101GA	L6	增压	9600	120.65×140	192/2200	1059.5/1400	TD100GA 型提高 可靠性
	TD121F	L6	增压中冷	12000	130×150	272/2050	1570/1300	TD102F 型提高功率 (261→272kW)
奔驰	OM362LA	L6	增压中冷	5700	97×128	141.2/2600	608/1600	OM352A 型带增加 中冷
	OM423LA	V10	增压中冷	18200	128×142	367.6/2300	2001.2/1200	OM420 系列带增压 中冷
	OM424LA	V10	增压中冷	21900	128×142	441/2100	—	OM420 系列带增压 中冷
曼恩	DO226MKF	L6	增压中冷	5700	102×116	141.2/2800	618/1600	采用惯性增压,提高 低速扭矩
	D2866KFZ	L6	增压中冷	12000	128×155	265/ 1800~2000	1501/ 1200~1600	D2566 系列扩缸
雷诺	M1VS08; 35.30G	V8	增压	14900	135×130	268.4/2100	1501/1400	提高功率、转速
斯太尔	WD815.67	V8	增压中冷	12000	126×120	242.6/2200	1353.8/1400	WD815 系列增压中冷 变型
泼金斯	TV8.540	V8	增压	8800	108×121	172.8/2600	775/1700	原机提高功率 (158.1→172.8kW)

成大和

3. 小型通用柴油机

为耕耘机、拖拉机等农业机械用途而发展起来的小型通用柴油机大致可分为卧式和立式两大类。

卧式柴油机,以手摇起动形式为主,它操作简便,除农用外还可作为一般工业用,功率大致为 22kW 以下。

立式柴油机,由于作业机械向大型发展,以及考虑到改善操作条件,并满足小型、高速、大功率以及低振动、低噪声等方面的要求,所以正向多缸机发展,功率扩大到 74kW 左右,作为通用发动机用于农业以外的一般工业用途,也是车用柴油机激烈竞争的对象。

为加强这类发动机在国际市场上的竞争能力,美、日、西欧各主要生产厂家自 80 年代初以来,积极进行机型品种整理,研究价值工程,调整产品方向,使之适应各种用途,也即在探讨各种用途的同时,致力于新机型的开发。最突出的动向是,甚至连原来不作考虑的小缸径系列机型也采用直喷燃烧方式,把经济性放在首位,在整机性能上也有较大提高,以满足用户的需要。

卧式通用柴油机以其用途和特性可分为 22kW 级的低速卧式机型、以 7.35kW 为中心的小型通用机型和轻小机型三种。22kW 级的代表机型为久保田公司的 KND3200 型柴油机,缸径×行程为 150×210mm,气缸容积为 3711mL,最大功率为 23.5kW/1000r/min,净重为 788kg,最低燃油耗为 197.2g/kW·h。洋马公司的 HS95 型柴油机,缸径×行程为 88×88mm,气缸容积为 535mL,最大功率为 7kW/2400r/min,净重为 103kg,最低燃油机耗为 258.4g/kW·h,装有双轴平衡和手柄放气滤清器。这是 7.35kW 左右小型通用柴油机的代表机型。这档功率是耕耘机配套机型的主要范围。轻小型卧式水冷柴油机可配套于植保机械、旋耕机和联合收割机,与风冷柴油机相比,其噪声低、工作扭矩大、油耗低,并耐久可靠,因此得到用户好评。久保田公司的 E70 型柴油机为其代表机型,缸径×行程为 75×70mm,气缸容积为 309mL,最大功率为 5.15kW/3000r/min,净重为 50kg,最低燃油耗为 273.4g/kW·h。

立式通用柴油机,机型多样,竞争激烈,提高更新快。日本石川岛芝浦公司主要用于四轮拖拉机配套的机型有 S723 型、S753 型、K773 型 3 缸机,洋马公司的 TN、TNB、TNA 系列,英国 Perkins 公司的 T3·1524 型柴油机,德国 Farymann 公司的 18C、29C 型柴油机等都具有代表性。特别值得一提的是久保田公司公布的超小型系列水冷多缸机 Z400-B、D600-B、V800-B、V800-TB,是目前世界上最小的单缸排量为 200mL 的独特机型,该机与中型系列相同,具有更高的可靠性;其高压油泵较以往小 40%,是世界上一种小型带滚子挺杆的铝泵体轻型喷油泵;它采用了独特的三旋流燃烧系统(TVCS),与直喷式小型风冷柴油机相比,油耗更低,振动及噪声更小。

二、增压技术的发展

20 年代就有人提出压缩空气提高进气密度的设想,直到 1926 年瑞士人 A. J. 伯玉希(A. J. Büchi)才第一次设计了一台带废气涡轮增压器的增压发动机。由于当时的技术水平和工艺、材料的限制,还难于制造出性能良好的涡轮增压器,加上二次大战的影响,增压技术未能迅速普及,直到大战结束后,增压技术的研究和应用才受到重视。1950 年增压技术才开始在柴油机上采用并作为产品提供市场。50 年代,增压度约为 50%,四冲程机的平均有效压力约在 0.7~0.8MPa 之间,无中冷,处于一个技术水平较低的发展阶段。其后 20 多年间,增压技术得到了迅速的发展和广泛的采用,现在,大功率柴油机已是“无机不增压”,国外车用柴油机 60%以上为增压机型,车用汽油机采用涡轮增压或机械增压的机型也逐年增多,增压技术对内燃机性能的提高起了划时代的作用。70 年代,增加度达 200%以上,正式产品作为商品提供的柴油机的平

均有效压力,四冲程机已达 2.0MPa 以上,二冲程机已超过 1.3MPa,普遍采用中冷,使高增压 ($p_c > 2.0\text{MPa}$)四冲程机实用化。试验研究则向更高水平冲刺,英国 Atlas 公司已研制出 p_c 约达 3.5MPa 的试验机,并已投入运转;瑞典 Gotverken 公司在二冲程 3 缸试验机上采用二级增压, p_c 达 1.8MPa。增压四冲程柴油机的比油耗不大于 187.6g/kW·h,二冲程机不大于 160.8g/kW·h,经济性有了很大的提高,车用柴油机(如 Steyr WD615-65)的比油耗也达到 204g/kW·h 的水平,单级增压比接近 5,并发展了两级增压和超高增压系统,相对于 50 年代初期刚采用增压技术的发动机技术水平,30 年来有了惊人的发展。进入 80 年代,仍保持这种发展势头。进排气系统的优化设计,提高充气效率,充分利用废气能量,出现谐振进气系统和 MPC 增压系统。可变截面涡轮增压器,使得单级涡轮增压比可达到 5 甚至更高。在美国大陆公司的 AVCR-1360-2 型柴油机上增压器已得到使用,增压器的压比为 4.6 至 4.8。法国的 Suralmo 超高增压系统是一种有效地提高平均有效压力的方法,其平均有效压力可提高到 3.3MPa 甚至更高,其技术关键是具有 Hyperbar 旁通和补燃的系统。采用超高增压系统,压比可达 10 以上,而发动机的压缩比可降至 6 以下,发动机的功率输出可提高 2~4 倍。法国 Poyaud520 系列发动机采用了这种超高增压系统,使发动机变得非常紧凑,具有很高的体积功率,V8×1500 型发动机的体积功率为 699kW/m³。进一步发展到与动力涡轮复合式二级涡轮增压系统。美国 Cummins 公司在一台普通涡轮增压的 NTC-400 直列 6 缸柴油机上采用自由动力涡轮复合后,试验中取得 155.4g/kW·h 的最低比油耗,比原机节油 14.8%,发动机功率由 299kW 上升到 336kW。由此可见,高增压、超高增压的效果是可观的,将发动机的性能提到了一个崭新的水平。

三、电子控制技术的应用

70 年代开始的电子技术在发动机上的应用具有划时代的意义。进入 80 年代,发动机电控技术已有了很大的发展,其主要目标是保持发动机各运行参数的最佳值,以求得发动机功率、燃油耗和排放性能的最佳平衡,并监视运行工况。

电子控制系统一般由传感器、执行器和控制器三部分组成。由此构成各种不同功能、不同用途的控制系统,如 Caterpillar 公司的 3406PEPC 系统是在 3406 柴油机上采用可编程序的发动机控制系统,具有电子调速功能,采用电子控制空燃比,可将喷油提前角始终保持在最佳值。美国 Stanaclyne 公司将其生产的 DB 型分配泵改为电子控制喷油泵,称为 PCF 系统,采用步进电机作执行元件来控制喷油量和喷油定时。日本五十铃公司的 I-TEC 系统是由 Bosch 公司的 VE 泵改成的电控系统;还有丰田公司的 EDC 电控系统也是如此。美国 Oldsmobile 发表了晶体管点火系统与电子控制汽油喷射装置相组合的 MISAR 系统。日本日产公司为适应排放法规,将空燃比、点火定时、废气再循环率及怠速 4 个因素进行电子控制,开发了 ECCS 电控系统,并用于 6 缸 2 升以上排量的发动机上,以后又用在福特公司的 EEC-III、通用汽车公司的 C-4、克莱斯勒公司的 SCC 系列机上,取得了令人满意的效果。

发动机电子控制的思路是根据预先用试验求得的发动机性能和排放图,通过电控系统对发动机运行参数进行程序控制,对汽油机还增加了爆震控制。典型的例子有,装在日产公司 3 升 V6 发动机上的分缸爆震控制,它将压力传感器装在火花塞座的金属部分,从而可对气缸内的气体压力进行检验、分析,进而对各缸独立地进行点火定时的控制,它作为控制燃烧的方法而引人注目。

发动机电子控制,已达到接近理想的最佳控制运行的可能性,因而提高了使用价值。

四、关于绝热发动机的研究

在传统的内燃机中,输入的燃料约有三分之一的能量为排气和冷却介质所带走。更充分地利用损失掉的热能是提高发动机热效率的关键,因而提出了有限冷却(或低热损失)或无冷却(绝热)发动机。有人曾作过估计,一般高速高效率柴油机,若燃油耗为 $227\text{g/kW}\cdot\text{h}$,平均热效率为 36.5% ;采用涡轮复合增压后, g_e 下降 11.4% , η_e 为 41% ;那么零件陶瓷化后, g_e 又下降 9.2% ;若再去掉风扇、水泵,则 g_e 可再下降 5.2% ,即 g_e 可达 $172.7\text{g/kW}\cdot\text{h}$,并预测如采用无润滑的气体轴承,摩擦力可降低 50% , g_e 又可降低 10.7% , η_e 将达到 53.6% 。即是说,采用陶瓷材料的绝热发动机,其性能提高的潜力是十分可观的,具有很大的吸引力。

现在陶瓷绝热发动机可分成三种类型:第一种类型是,利用陶瓷的耐磨、耐热、重量轻的特点,制造陶瓷零件,如活塞、燃烧室镶块、涡轮增压器等,以提高零件的隔热、耐热、耐磨性能;第二种类型是,将活塞、缸套、进排气门、排气道衬套等零件改用陶瓷材料,这样机体、缸盖可取消水套,并省掉散热器、水泵等,消除冷却水带走的热损失;第三种类型是,回收排气能量用以驱动动力涡轮,转换成有用功输送到曲轴,可将现在发动机的 η_e 由 $30\sim 35\%$ 提高到 50% 以上。70 年代末、80 年代初,陶瓷绝热发动机进入全盛时期。但是,现在这种“陶瓷、绝热”的势头已经有所低落,对发展绝热发动机的得失问题,国内外学术界尚还有争议,主要表现在:

(1) 热效率的提高不象预计的或计算的那样高。由于隔热,受热零件表面的温度大大提高,使吸入气缸内的空气温度也显著地提高,所以充气效率下降,进入缸内的空气量减少,压缩终点的压力大幅度上升,这是极为不利的;

(2) 在绝热发动机的情况下,理论上认为,进入充量的温度高要比低好,但实际上计算分析表明热效率将下降,这除了因空气量减少外,还由于绝热后气缸内的温度、压力引起了燃烧条件的很大变化,等容变化率大大地减少所致。不过排气热能可由涡轮复合的方式来加以利用;

(3) 根据 GM 公司 Siegl 等人的研究,低热损(LHR)发动机或绝热发动机在不增压的情况下是毫无意义的。燃料放热量被冷却介质带走的比例在道路上行驶时较大,因而将其减少并回收为有用功是重要的。光靠涡轮增压虽然能增大进气量,但不能提高热效率,因此,有必要采用动力涡轮复合或底循环方式;

(4) 即使是动力涡轮复合绝热发动机,热效率也不能马上就提高。其原因是,首先要求所采用的能量回收装置必须能调节,使发动机与涡轮的最佳效率相配合;其次,由于采用了绝热材料,使缸壁、活塞环的温度上升,这给润滑油带来问题。目前,摩擦表面温度高达 $523\sim 573\text{K}$ 时,润滑油还能满足,而完全绝热的发动机摩擦表面温度估计要上升到 $773\sim 973\text{K}$,现有的润滑油就不行了;

(5) 燃气与燃烧室壁的热传导,在高温陶瓷面(973K 左右)与低温金属面($523\sim 623\text{K}$)是否相同?热流如何分布?气缸壁面的高温润滑如何解决?等基础研究进展相当慢,带来陶瓷绝热件的很多问题;

(6) 装置的复杂、成本、可靠性等。

尽管如此,绝热发动机仍是值得重视的研究课题,陶瓷材料在发动机上的采用也是无疑的。但是,决不象过去有些人所想象或宣传的那样,能带来那样巨大的好处。

内燃机的发展决不仅限于上述几个方面,限于篇幅,在此不一一列举了。由此可见一斑,说明内燃机近年来的巨大进步。