

[美] C. F. 泰勒 著

张胜瑕 程未云 等译

The Internal-
Combustion
Engine
in Theory
and Practice

内燃机

Volume 1:
Thermodynamics,
Fluid Flow,
Performance

Charles Fayette Taylor

人民交通出版社

下

内 容 简 介

这是美国麻省理工学院 C.F. 泰勒教授编写的内燃机教科书，分上下两册。下册根据1977年原版平装本第二卷译出。主要论述内燃机燃烧理论、燃料、材料和发动机的设计。

本书供内燃机科技人员和大专院校师生阅读参考。

内 燃 机

下 册

〔美〕C.F. 泰勒 著

张胜暇 程未云 等译

人民交通出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：37.5 字数：888千

1983年7月 第1版

1983年7月 第1版 第1次印刷

印数：0001—4,600册 定价：5.70元

译者说明

本书为美国麻省理工学院汽车工程荣誉教授泰勒(C.F.Taylor)所著,至今仍作为麻省理工学院机械系及美国不少院校研究院的教材,亦为国际内燃机界的名著之一。

本册主要包括燃烧理论、燃料、材料及设计部分,可供从事内燃机设计、制造和研究的工程技术人员以及内燃机专业研究生参考。

本册由河北工学院内燃机教研室戈新贞(第一、二、四章)、程未云(第三、五、六、七章)、董锡强(第八章)、穆丰瑞(第九、十二章)、张胜瑕(第十、十一章)及汽车拖拉机教研室刘辑昌(第十三、十四章)等同志翻译。全书并由张胜瑕、程未云二同志统校。

在本书翻译过程中,河北工学院副院长潘承孝教授对我们的工作给予不少指导和帮助,特致谢意。此外,河北工学院王健安同志及吉林工业大学李惠珍、郭作杨同志亦参加了部分译校工作,一并在此表示谢意。

由于译者的水平有限,错误之处在所难免,希广大读者批评指正。

译者

一九八一年

原 著 者 序

如在上册中一样，本册中大量的资料系来源于著者担任麻省理工学院飞机与汽车发动机的斯隆(Sloan)实验室主任及政府和工业界顾问时期的多年工作经验。

由于本册的准备工作比原来预计的耗费了较多时间和精力，以致延期出版，本人谨对上册的读者们表示歉意。

对曾协助提供资料、建议以及打字、编辑和校对的人员和单位，致以衷心的感谢。

虽然力求避免错误，然而在此大量篇幅的著作中，错误在所难免，读者如发现错误，尚希通过麻省理工学院印刷厂转告本人，俾便在今后再版时予以更正。

C.F.泰勒

1968年5月

引言

本书上册已经出版多年。自上册出版以来，在其涉及的领域中已有若干重要发展。现简述如下：

燃料-空气介质的热力特性 应用计算机技术建立了类似于上册中 C-1 到 C-4 那样的热力图表，而这些图表在燃料成分、燃空比、温度和压力等方面所包括的范围则比过去的图表更为广泛 $[0.030 \sim 0.035]^*$ 。

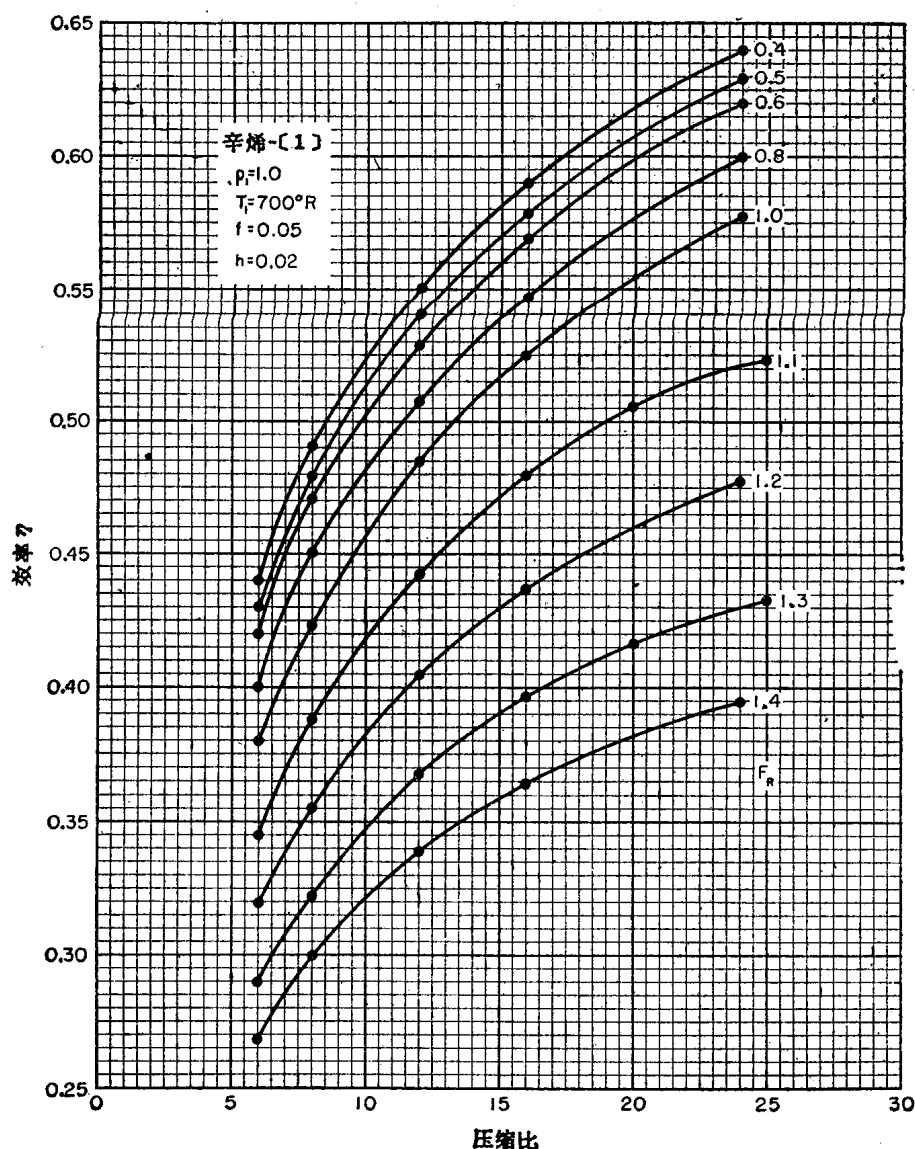


图0-1 定容燃料-空气循环的效率与压缩比的关系[埃德森和泰勒, 0.040]

* 括号内的数字为本书所列参考文献的项目编号。

燃料-空气循环 根据与充量相应的热力性质所编制的计算机程序，又重新计算了燃料-空气循环的特性。在计算中所用全部重要参数的变化范围，都比以前能够使用的范围要宽广得多〔0.040~0.045〕。

埃德森(Edson)和泰勒(Taylor)在《发动机性能范围》〔0.040〕一文中，提供了以点1（压缩始点）的状态为基础的定容燃料-空气循环的特性。这些特性比那些包含理想进、排气过程的特性更方便、更有用。上册第二版即以该参考文献的资料取代了初版中以四冲程理想进、排气过程的循环为基础的图45。

为方便只有上册初版的读者，在此摘引了参考文献0.040中的最重要资料，即表达燃料-空气循环的效率和最高压力与初始压力之比 p_3/p_1 的图0-1至0-6。在参考文献 0.040中包含着以下重要结论：

湿度（水蒸汽质量与空气质量之比）在 0 到 0.06 之间的变动，不影响燃料-空气循环的效率。

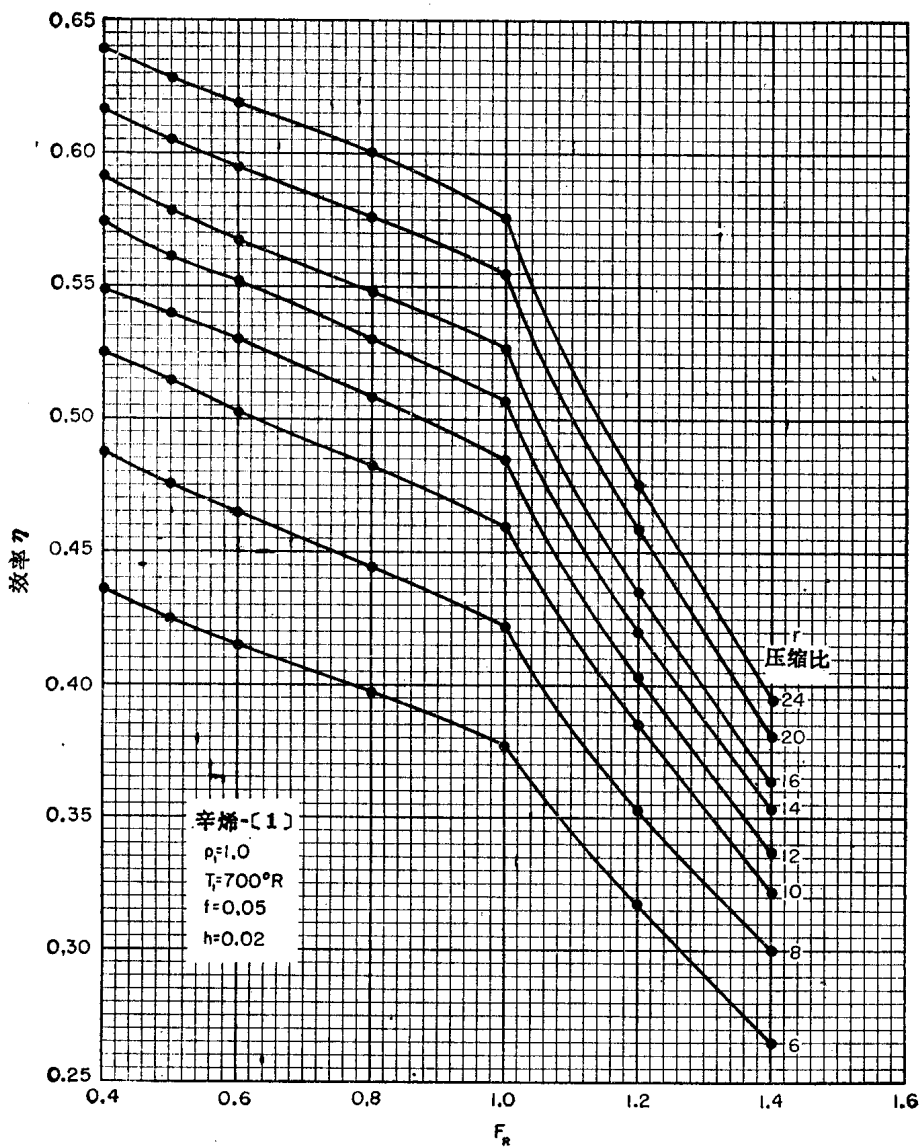


图0-2 定容燃料-空气循环的效率与 F_R 的关系〔0.040〕

残余废气系数 f 在 0 到 0.10 之间的变动, 对效率只有轻微影响, 可忽略不计。

除 $F_R = 1.0$ 以外, 初始压力 p_1 对效率的影响很小(图0-3)。

初始温度 T_1 增加, 则效率(图0-4)和 p_3/p_1 (图0-6)降低。

埃德森在参考文献0.041中阐明了当压缩比一直增加到300以前, 定容燃料-空气循环的效率随压缩比的增加而连续增加的情况(当采用异辛烷, 而 $F_R = 1.0$ 和 $r = 300$ 时, 定容燃料-空气循环的效率为0.80)。但实践表明, 在没有爆燃的情况下, 指示功率大约在压缩比 r 增加到17时就达到了峰值[上册图12-15和参考文献12.49]。

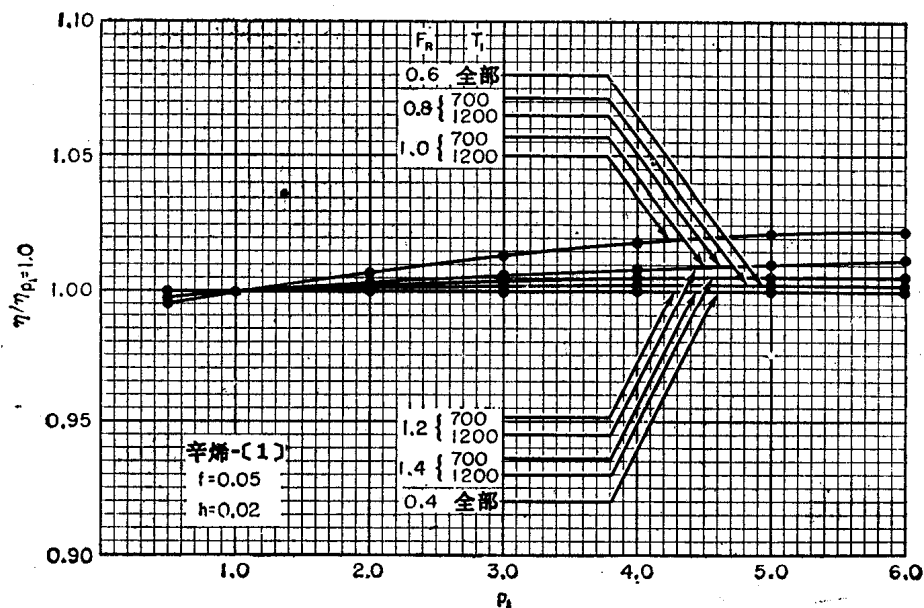


图0-3 当压缩比为 6 至 24 之间的任意值时 (按图0-1和图0-2的所用值), 初始压力对效率的影响[0.040]

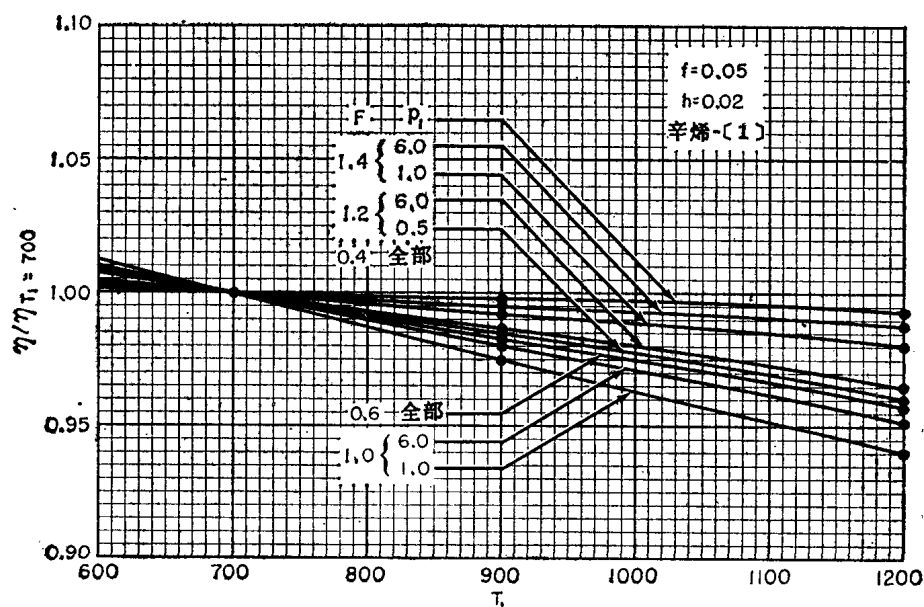


图0-4 当压缩比为 6 至 24 之间的任意值时 (按图0-1和图0-2的所用值), 初始温度对效率的影响[0.040]

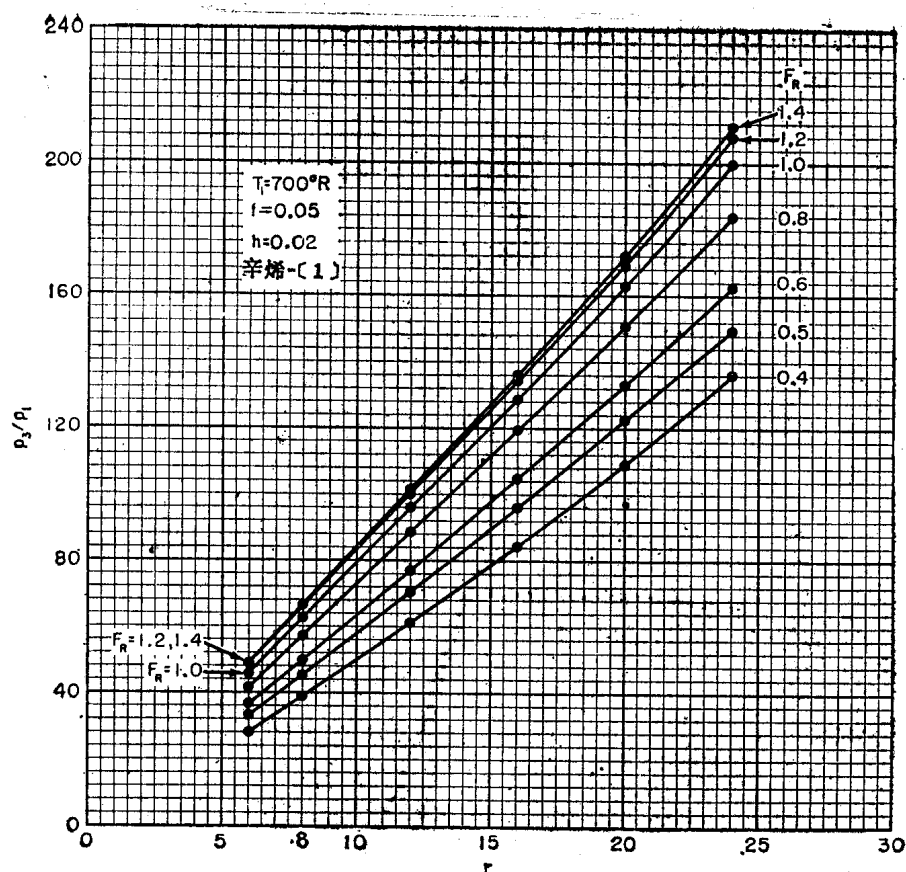


图0-5 当 p_1 为0.5至6.0之间的任意值时(按图0-3和图0-4的所用值), 压缩比对最高压力的影响[0.040]

发动机的实际循环 已经发表过若干按任意的燃烧速率和热损失率来对循环进行计算的成果[0.121, 0.122]。参考文献0.050则对测定和分析发动机实际循环作出了重大贡献。

空气充量 有些冲程缸径比很小的发动机在商业上所获得的成功, 证明了上册第六章有关“冲程缸径比的影响”的论述是正确的。这个问题将在本册第十章中进行详细分析。

自从在上册发表了有关进气管效应的材料以来, 对进、排气管动力效应的兴趣大为增加。在本书参考文献12.05~12.092中, 提供了一些这方面的新材料。

热损失 继续进行了有关热损失的研究[0.080~0.087, 10.882~10.886]。在增压发动机中, 气阀重叠度对传入冷却剂中的热量有显著影响[10.884, 10.886], 这是在上册中没有提到的一个新发现。

其它 在文献目录中也援引了以下领域在上册出版后所发表的重要著作:

实际循环分析[0.050~0.051];

摩阻、润滑和磨损[0.090~0.097];

尺寸的影响[0.110~0.114];

非增压发动机性能[0.120~0.122];

增压发动机性能[10.860~10.872]。

用以补充上册第十章和第十三章的有关增压发动机性能的材料, 列入本书第十章和第十一章及其参考文献中。而用以补充该两章有关增压器设计的最新材料, 则归并在本书第十二章及其参考文献中。

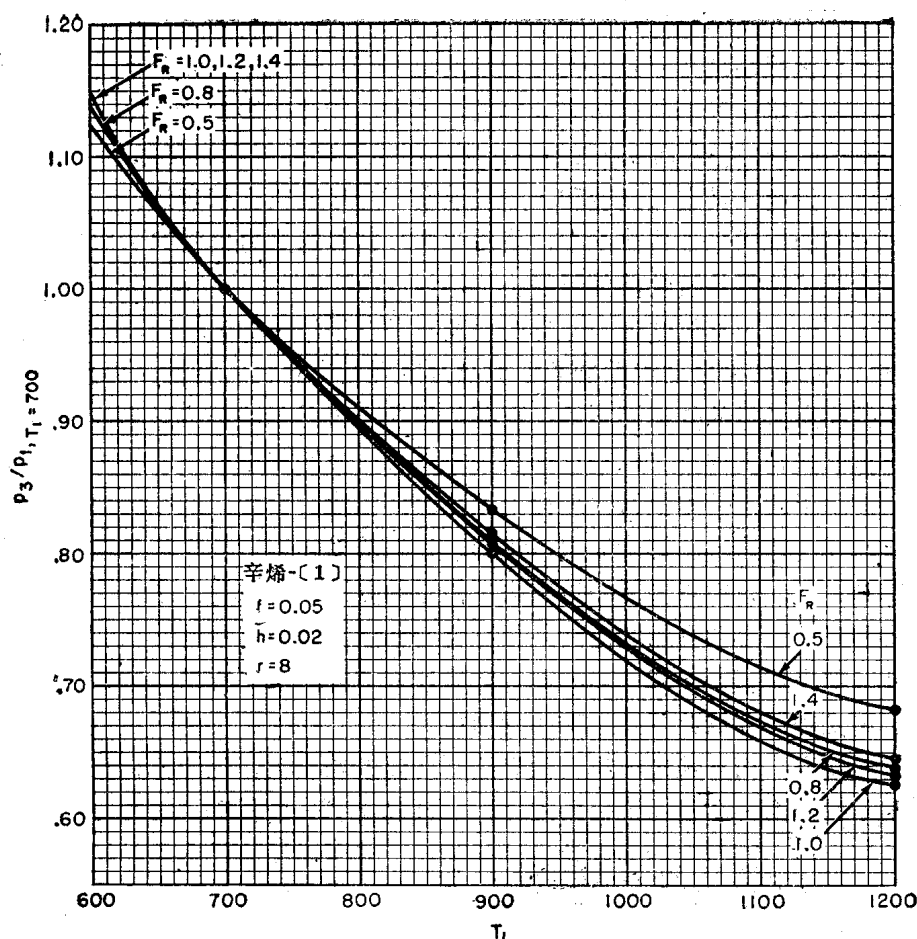


图0-6 当 p_1 为0.5至6.0之间的任意值时(按图0-3和图0-4的所用值), 初始温度对最高压力的影响[0.040]

膨胀更完全的发动机 自写作上册以来, 按膨胀更完全的循环来设计的发动机已在商业上获得了一些进展[10.855~10.857]。这种循环所使用的膨胀比大于有效压缩比。采用这种方案的原因在于实际的气缸最高压力受到限制, 柴油机受应力的限制, 而火花点火发动机则受爆燃的限制。在膨胀更完全的四冲程发动机中, 用提前关闭进气阀而使有效压缩比低于膨胀比的办法来控制压缩压力, 从而限制相应的气缸最高压力。而在采用菌形阀的二冲程发动机中[见上册图7-1e], 则用延迟关闭排气阀来取得同样效果[10.72]。这种循环的优点是其效率可能比膨胀比等于压缩比的那种循环高。而缺点是在最高压力相同的条件下, 其平均有效压力比一般方案低。

膨胀更完全的循环实际上只用于不经常以轻载运行的发动机。因为在轻载运行时, 膨胀冲程后期的气缸平均压力将接近机械损失平均压力, 甚至还可能更低。在这种情况下, 就循环的更完全膨胀部分的效率而言, 可能得不偿失。例10-6为应用这种循环的实例。

计算机分析 也许自上册出版以来, 在发动机研究技术中最重要的发展是应用数字计算机来模拟包括整机性能在内的发动机各个方面的性能。和许多其它领域一样, 计算机使得解复杂方程成为可能, 这些方程如用老办法去计算, 则是非常麻烦的。

对于诸如发动机中处于平衡状态的气体热力性质[0.030~0.035]和燃料-空气循环[0.040~0.045]等已知基本关系的领域, 计算程序已很成熟。其结果, 既扩大了现有资料的

范围又提高了其准确性。此外，计算机还有效地应用于振动分析和配气机构设计（见第十二章）。

计算机技术已被成功地用于预测四冲程发动机的容积效率，该效率是作为气阀流通能力、配气定时、发动机转速等的函数来计算的。其中，传热的影响相当小，完全可以用近似方法处理[0.060~0.062]。至于二冲程循环，则由于不了解扫气期间在流动过程和混合过程等方面的关系式，因此，其空气充量和“陷气效率”的计算就比较麻烦。

由于缺乏可靠的瞬时局部传热系数，使预测传热速率的努力也受到了阻碍[0.084]。这种不可靠因素，也成了计算整机性能的障碍。

已经发表了大量有关整机性能的计算资料及其与实测结果的比较[0.121, 0.122, 10.864, 10.865]。显然，实际影响发动机性能的参数超过了现有计算机的容量，而且，对于许多参数来说，编制程序所必需的知识还不够。理想的情况应该是忽略那些影响甚微的项目。这样，程序的质量就在很大程度上依赖于那些决定项目取舍的程序编制者的水平。许多明知是重要的因素，却由于缺乏基本数据，理论上无法编制程序。因此，迄今所拟定的发动机程序，对于诸如瞬时传热速率、燃烧速率、扰动、摩擦等未知因素的处理是建立在部分理论和部分假定的基础之上。采取以实测结果来修正假定的方法，已经建立了若干令人相当满意的能与一定型式和尺寸的发动机的实测结果相符合的程序。因为迄今所发表的大多数程序都忽略了气缸尺寸（如上册第十一章所述）和许多设计细节的影响，所以，这种程序的定量计算结果不适用于型式和尺寸彼此相差悬殊的发动机。

尽管有这些缺点，而且绝对值也还没有达到必要的精确度，但计算机技术确已成为指明发动机性能基本倾向的一个很有价值的工具。一旦建立了一个程序，就能够在很广阔的范围研究许多重要参数，而与实际的发动机试验相比，其所消耗的经费和时间是微不足道的。随着计算技术的经验积累，其精确度将会提高，并且，有希望将其总结成无量纲体系，以便概括适当范围的气缸尺寸和设计细节。能巧妙地进行程序计算和整理实验结果的计算机技术，可能为飞跃改进发动机性能和发动机设计创造了条件。至于计算机应用于发动机设计和性能等各方面的参考资料，则可在文献目录的许多章节中查得。

目 录

引言	1
第一章 火花点火发动机的燃烧(一)	1
正常燃烧	1
基本理论和实验	1
发动机中的火焰传播	4
发动机气缸内的火焰传播和压力变化	8
排气中的排出物	16
第二章 火花点火发动机的燃烧(二)	17
爆燃和早燃	17
爆燃	17
早燃	50
第三章 柴油机的燃烧	52
定义	53
燃烧过程的摄影	53
燃烧的三个阶段	55
柴油机中的爆燃	57
柴油机的燃烧室设计	67
柴油机气缸尺寸对燃烧的影响	71
多种燃料和双重燃料柴油机	71
柴油机排气中的排出物	72
第四章 内燃机的燃料	73
石油燃料	73
气体燃料	79
非石油燃料	80
火花点火发动机的燃料	80
火花点火发动机所用燃料的爆燃特性	89
燃料成分对早燃的影响	96
火花点火发动机燃料的其他性能	97
燃料对火花点火发动机功率和效率的影响	97
柴油机的燃料	101
非常规燃料	108
第五章 对混合气的要求	109
火花点火发动机对混合气的要求	109
柴油机对混合气的要求	120
燃空比对发动机排出物的影响	121

第六章 火花点火发动机的化油器设计	122
稳流条件下的混合气形成	122
瞬变条件下的混合气形成	129
汽车化油器的整体方案	130
航空化油器	131
喷射化油器	133
第七章 燃油喷射	136
柴油机的燃油喷射	136
火花点火发动机的燃油喷射	143
尺寸因素对燃油喷射的影响	151
第八章 发动机的平衡和振动	153
文献	153
定义	153
符号	154
单缸气体作用力	156
惯性力和力矩	156
发动机的扭矩	168
着火不均匀的发动机	176
主副连杆发动机	176
典型发动机的平衡	178
发动机的振动	179
发动机的外部振动和隔振	185
发动机的噪声	189
第九章 发动机材料	198
结构材料	198
材料的非结构性能	216
钢	217
铸铁	222
铝合金	223
镁合金	224
轴承和轴瓦合金	224
其它材料	225
材料的具体选择	225
第十章 发动机设计(一)	229
初步分析研究与缸数、尺寸及其排列	229
前言	229
确定基本设计要求及初步分析研究	229
气缸数、缸径及气缸排列的选择	245
例题	250
对例题的一般讨论	269

实验性的研究工作.....	269
第十一章 发动机设计(二).....	280
零件的设计步骤 承力机件的设计.....	280
零件设计中的一般问题.....	281
螺纹紧固件.....	286
发动机图例.....	290
承力机件.....	315
气缸设计.....	315
活塞设计.....	322
连杆.....	327
曲轴设计.....	330
曲轴箱的设计.....	340
发动机轴承.....	344
第十二章 发动机设计(三).....	352
气门和配气机构 齿轮传动机构和辅助系统.....	352
菌形气门.....	353
二冲程发动机的进气门和气口.....	361
配气机构设计.....	363
齿轮传动装置.....	376
增压器和扫气泵.....	380
进、排气歧管.....	381
点火系统.....	382
喷油系统.....	383
水冷系统.....	383
风冷系统.....	384
润滑系统.....	384
辅件.....	384
密封垫和密封圈.....	385
综合的设计准则.....	386
第十三章 内燃机与其它动力机的比较及其发展前景.....	390
对传统型式内燃机的一些局部改进.....	391
非传统容积式内燃机.....	391
燃气轮机.....	396
外燃动力装置.....	406
斯特林发动机.....	407
电动力装置.....	407
不吸入空气的动力装置.....	408
小结.....	409
燃料资源.....	409
第十四章 用于发动机研究和试验的测量设备与安全设施.....	410

基本设备.....	410
测量设备和测量技术.....	411
单缸试验机的全套设备.....	420
试验程序.....	423
安全措施.....	424
符号及其量纲.....	427
英汉名词术语对照表.....	430
参考文献目录.....	445

第一章 火花点火发动机的燃烧(一)

正 常 燃 烧

鉴于一般火花点火发动机点火时,所供给的燃料-空气混合气十分均匀,并已基本气化;因而,本章将主要讨论均匀、气态混合气的燃烧。

在火花点火发动机中考虑应用不均匀混合气的研究已进行了多年,但远未达到实用阶段。因为这种层流进气主要是用来控制爆燃的,所以该问题将留待第二章探讨*。

基本理论和实验

对于均匀、气态燃料-空气混合气的燃烧问题,已进行了大量的理论和实验研究。其中一些与内燃机有密切联系的内容已列入本章的参考文献目录中。这些研究包括在发动机上的实验以及在稳流系统、各种形式的容器,即燃烧弹中的研究工作。研究表明,火花点燃的气态燃料-空气混合气的燃烧特征,一般表现为由着火点开始火焰迅速扩展并连续向外传播。如火焰由着火点一直传播到燃烧室末端而其速度和形状没有突变,则称为正常燃烧;如混合气在火焰到达之前自行着火燃烧,则称为自燃;如反应速率骤增并同时出现可测的压力波,则称为爆燃。自燃和爆燃将在下一章中进行讨论。本章只研究正常燃烧。

燃烧化学 由于燃料-空气混合气的燃烧是在高速、高温下进行的,因此很难观察其中的化学过程。尽管在该领域进行了不断的探索,然而,有关燃烧和火焰传播的理论仍然是带有很大推测性的[1.10~1.16]。

未燃气体和经过冷却的燃烧产物的化学成分是可以测定的。然而,实验证明,在这两者之间的变化过程中包含有大量的中间化合物。

目前被普遍接受的一种理论认为:燃料-空气混合气的燃烧依靠链反应,这种反应是由少量高度活化的成分所引起,而反应本身除产生生成物之外,还产生附加的活化成分,从而使反应增殖,直到燃烧完成(达到平衡),或者是直到链中断反应超过链生成反应时为止。火焰前锋处的链生成反应在其中断之前,只能渗入较冷的未燃充量区一定深度,因而形成一条明显的火焰边界。然而,如果未燃气体达到足以维持链反应的高温,则剩余的可燃气将突然自燃。

关于链反应理论,将在下一章中作比较详细地讨论,而参考文献[1.10~1.13]中的内容也很丰富。本章后文则用以探讨影响发动机工作的燃烧物理方面值得注意的问题。

火焰传播 正常燃烧中的反应层前锋边界称作火焰前锋。火焰前锋及其后面的燃烧产物所发的光通常已能满足目测或摄影的需要。若亮度不够,则可加入微量钠化物以加强之。

* 经允许,在第一章至第七章中引用了以前出版的泰勒和泰勒著《内燃机》一书中的部分材料。美国宾州,斯克兰顿。国际教科书公司1961年出版。

在火焰位置固定的情况下，是燃气穿过火焰运动而不是火焰在燃气中传播。燃气涡轮就属于这种燃烧型式。如燃气作单向稳定流动，则火焰相对于燃气的速度等于燃气相对于火焰边界的法向速度。

在发动机中，由于活塞的运动、燃烧室不同程度的不规则形状、前一循环留下的残余废气、以及强烈的气体扰动等因素而使燃烧过程复杂化。因此，最好首先研究气态混合气在简单环境下的燃烧。

定容燃烧的火焰运动与压力变化 首先研究均匀、静态燃料-空气混合气在定容器（即燃烧弹）中的燃烧。图1-1所示为某中心点火球形燃烧弹所装燃料-空气混合气中的火焰位置与时间的关系。该图系将火焰图象聚焦在以等速移动的胶卷上摄得。因而所得火焰轨迹边缘的斜率与火焰速度成正比。值得注意的是火焰由点火点出发就具有轮廓分明的界线，并且除过程的始点与终点附近外，其速度近乎不变。

在定容燃烧室中，由于已燃气体的膨胀而压缩未燃充量，使混合气内的火焰运动复杂化。上述原因引起未燃充量与火焰前锋的衔接边界相对于燃烧室移动，因而所观察到的火焰传播速度由两种运动速度合成：一为火焰进入未燃充量区的运动速度，称为“燃烧速度”；一为由于已燃气体的膨胀作用而把火焰前锋向前推进的速度，称为“推移速度”。图1-2表示在图1-1所示的球形燃烧弹内测得的燃烧速度、推移速度和观测速度。

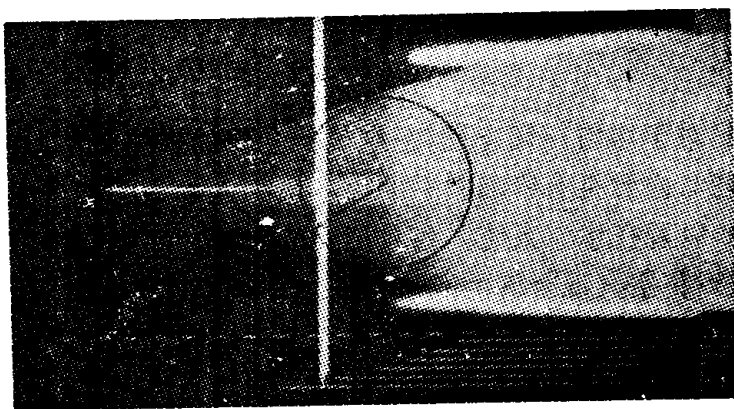


图1-1 中心点火球形燃烧弹中的火焰轨迹。即火焰球面由点火点 x 开始，在按已知速度移动的胶片上留下的轨迹。与轨迹相应的火焰半径 r 如图所示〔菲涅克等1.27〕

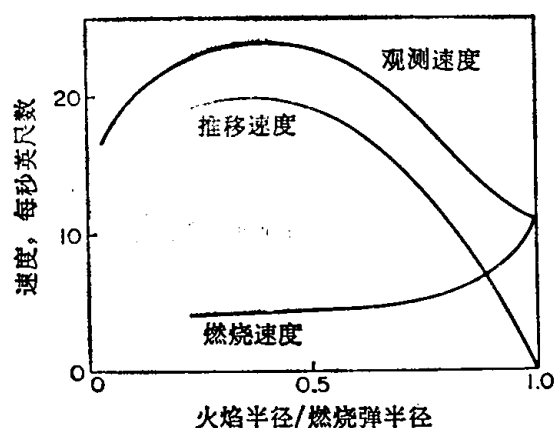


图1-2 中心点火球形燃烧弹中的观测速度、燃烧速度和推移速度。 2CO_2 开始出现于 $1/3\text{ atm}$, 77°F 〔1.27〕

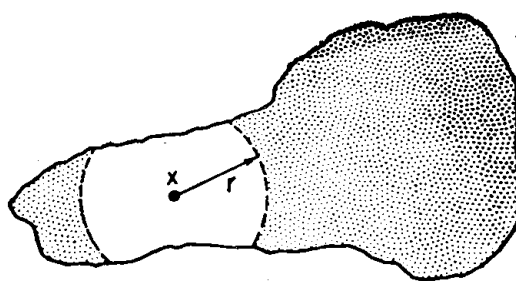


图1-3 任意型式的定容器， x 为点火点， r 为火焰半径，阴影面积代表未燃容积

图1-3表示某一正在传播球形火焰前锋的容器。根据观测结果〔1.61, 1.78〕，已燃质量与总质量之比与该瞬时的压力升高值与总压力升高值之比成正比，由此可以确定火焰位置与压力之间的关系。即：

$$\frac{M_b}{M} = \frac{P - p_1}{P_2 - p_1} \quad (1-1)$$

式中: M_b = 已燃质量;
 M = 充量总质量;
 P_1 = 初始压力;
 P_2 = 燃烧终了压力;
 P = 所求的瞬时压力。

假定未燃充量为受绝热压缩的理想气体, 则可写出下式:

$$M_b = M - M_u = M - \frac{PV_u m_u}{RT_u}$$

且,

$$T_u = T_1 \left(\frac{P}{P_1} \right)^{(k-1)/k}$$

式中注脚 u 指未燃部分。将上述关系代入式1-1, 可得:

$$\frac{P - P_1}{P_2 - P_1} = 1 - \frac{P_1 V_u m_u}{MRT_1} \left(\frac{P}{P_1} \right) \quad (1-2)$$

由图1-3显然可见, 对于任意给定的火焰半径 r , 其未燃部分体积 V_u 取决于容器形状及点火点的位置。

为说明容器形状和点火点位置的影响, 可探讨两种极端情况。第一种情况即为图 1-1 所示实验采用的中心点火, 直径为 D 的球形燃烧弹。此时 $V_u = \frac{\pi}{6} [D^3 - (2r)^3]^*$ 。这种形状

使已燃容积与火焰半径 r 之比达到了最大可能值; 第二种情况是使该比值为最小值的在一端点火的长圆管形容器。后者 $V_u \approx A(L - r)$, 式中 A 为圆管的横截面积, L 为圆管长度。

对于上述球形和长圆管形容器, 按式 1-2 计算所得的压力与火焰半径的函数关系示于图1-4中。图中也给出了有关球形燃烧弹的实测数据, 从而证实了式 1-2 一般是有效的。

火花点火发动机燃烧室的几何形状通常介于图1-4中的两种型式之间。这两种型式共有的一个重要特征是: 除靠近火焰行程的末端外, 其压力升高得很慢。对于球形, 当火焰已传播到燃烧室的一半路程时, 压力大约仅升高 2%。即使是长管形, 其相应的压力升高也仅为 11%。由此我们获得了一个非常重要的结论, 即等容燃烧过

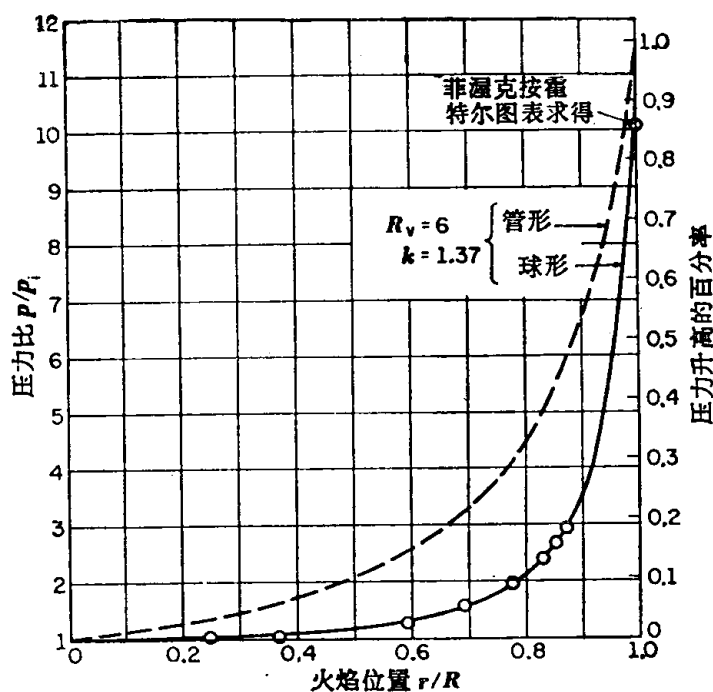


图1-4 定容器中的压力-火焰半径关系曲线:

r = 火焰半径, R = 燃烧弹半径。

——中心点火球形燃烧弹(式1-2);

-----端点火长圆管形容器(式1-2);

○○○球形燃烧弹实测点;

燃料 C_8H_{18} , $F_R = 1.03$ [菲涅克等1.27]

* 此处原文误为 $V_u = \frac{\pi}{6} (D^3 - r^3)$ ——译者注。