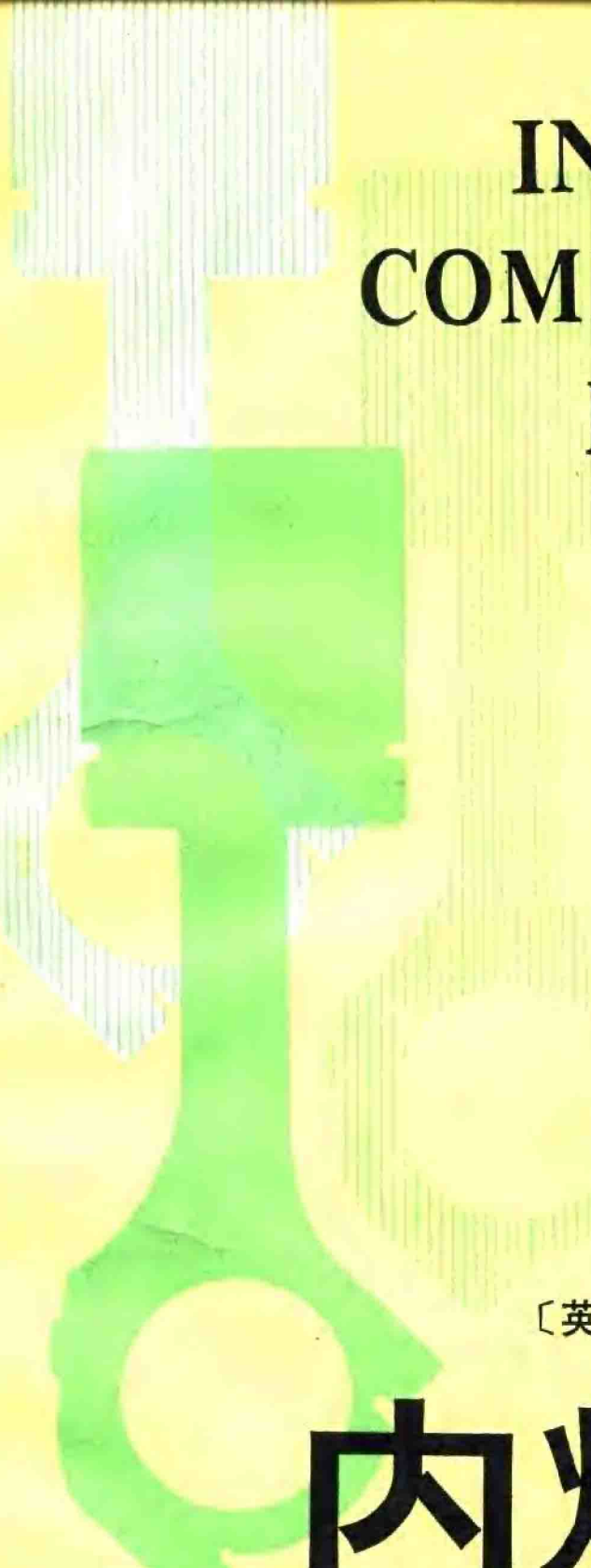




INTERNAL COMBUSTION ENGINES

〔英〕 R. S. 本 森 著
N. D. 怀特豪斯

内燃机

中国农业机械出版社

内 燃 机

(英) R. S. 本 森 著
N. D. 怀特豪斯

天津大学内燃机教研室 译

内 容 简 介

本书分析了内燃机工作过程原理,着重论述燃烧、换气、增压和传热等问题,并介绍了内燃机循环的计算方法和现代的内燃机测试技术。

原书分两卷出版,现译本合为一册。

本书可作为大专院校教材和内燃机设计,研究人员的参考资料。

Internal Combustion Engines

ROWLAND S. BENSON

N. D. WHITEHOUSE

PEPGAMON PRESS

First edition 1979

内 燃 机

(英) R. S. 本 森 著
N. D. 怀特豪斯

天津大学内燃机教研室 译

中国农业机械出版社出版

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

*

787×1092 16开 17印张 412千字

1982年6月北京第一版·1982年6月重庆第一次印刷

印数: 00,001—7,600 定价1.80元

统一书号: 15216·106

序

本书是英国曼彻斯特大学理工学院已故教授 R.S. Benson 及高级讲师 N.D. Whitehouse 合著的一本高等学校用的内燃机教材，于1979年出版。原书分 I、II 两卷，分别适用于大学本科和研究生。

作者多年来从事工程热力学及内燃机方面的研究工作，取得了卓越的成就。本书着重从热力学角度分析论述了内燃机的工作过程原理。有许多内容是作者长期进行内燃机理论及实际工作中所取得的创新资料。书中介绍了作者所提出的内燃机工作过程电算法，分别给出了压燃式发动机及火花点火式发动机简化循环计算的FORTRAN程序表。这种方法具有较简捷而又较精确的优点。本书还扼要介绍了一些现代的内燃机试验方法。这也是培养一个高级内燃机科技人才所必需的内容。

本书不仅可以作为高等学校内燃机专业的教材，而且也是从事内燃机设计和研究工作的一本有价值的参考资料。

全书由天津大学内燃机教研室集体译校，刘友钧教授主审。

天津大学教授 史绍熙

1980年12月

原 序

近来的能源危机和环境控制对内燃机的发展工作有着重大的影响。在这一发展工作中详细了解发动机中的热力过程是很必要的。过去三十年来,作者等一直在产业部门和大学里从事内燃机的设计、发展、研究和教学工作,本教材则是其部分劳动成果。许多材料都是第一手的,其中的一部分是在以前还没有发表过的。这些材料曾在作者所在的系里用作研究生和高年级大学生的教程。

本教材是作者之一(R. S. Benson)的同类教材《高等工程热力学》(第二版)的姊妹篇。这本教材的一个新特点是介绍了两个简单循环计算的FORTRAN程序表,一个是压燃式发动机的,一个是火花点火式发动机的。对于目前设计单位常用的一些较为复杂的循环计算方法也作了扼要介绍。压燃式发动机燃烧过程的定量材料和一些火花点火式发动机的数据都是以作者的试验室最新研究结果为依据的。

为便于学生使用,本教材分成两卷。第I卷的内容适于作为大学生的内燃机课程的教材,第II卷则更适用于研究生。

本书涉及的主要是内燃机的热力学,但不可避免地也包含了一些有关结构零件的内容。由于要很好地了解内燃机的运转过程要依靠试验工作,因而在第I卷中附加了关于试验方法的一节,但是其中某些试验技术只在高级研究所中才用得到。

在取得本书所用数据方面,作者要对许多研究生、研究助理人员及技术人员的帮助表示感谢;在复制本书插图方面,要对许多出版社和研究院表示感谢(我们已在适当的地方表示过应有的谢意)。对于打印草稿的M. McDonnell夫人和P. Shepherd夫人以及复制照片的J. A. Munro夫人,作者均表示谢意。

最后,作者还要为他们的妻子和家人容许和忍耐他们用去许多夜晚和周末来准备这本教材而表示感谢。

R. S. Benson
N. D. Whitehouse

目 录

第一章 内燃机概述	1	第四章 压燃式发动机的燃烧	40
1.1 引言	1	符号	40
1.2 压燃式发动机	2	4.1 燃烧过程概述	40
1.2.1 压燃式发动机的燃烧室	2	4.2 压燃式发动机的燃烧计算模型	42
1.2.1.1 分隔式燃烧室	3	4.2.1 单区燃烧模型	43
1.2.1.2 直接喷射式燃烧室	5	4.2.1.1 Lyn 的方法	44
1.2.1.3 “静止式”燃烧室	7	4.2.1.2 Whitehouse-Way 的方法	45
1.3 外源点火或火花点火式发动机	8	4.2.2 双区燃烧模型	48
1.3.1 外源点火或火花点火式发动机的		4.2.2.1 圆锥-圆环形的燃烧区模型	49
燃烧室	9	4.2.2.2 涡流-壁面喷射-燃烧区模型	51
1.3.1.1 汽车发动机燃烧室	10	4.2.3 多区燃烧模型	51
1.3.1.2 高压压缩比煤气机	11	4.2.4 紊流预测模型	51
1.3.2 分层充气发动机	12	4.3 燃烧生成的排放物	52
1.3.3 火焰点火发动机	12	4.3.1 炭烟	52
1.4 旋转式发动机	12	4.3.2 有害气体	53
1.4.1 Wankel 发动机	12	参考文献	54
参考文献	13	第五章 火花点火式发动机的燃烧	56
第二章 热力学和气体动力学基础	14	符号	56
符号	14	5.1 可控和不可控、正常和不正常	
2.1 状态方程式	15	燃烧的定义	56
2.2 热力学第一定律	15	5.2 正常燃烧	56
2.2.1 闭口系统	15	5.3 不正常燃烧——发动机的敲缸	59
2.2.2 开口系统	17	5.3.1 碳氢化合物-氧混合气燃烧	
2.3 热力学第二定律	19	的研究	60
2.4 均熵流动	20	5.3.2 发动机上的研究	63
2.4.1 连续方程式	20	5.3.3 燃料添加剂对敲缸的影响	67
2.4.2 动量方程式	21	5.4 不可控燃烧、早燃和失控运转	68
2.5 混合气	22	5.4.1 早燃	68
2.6 内能和焓的曲线图	23	5.4.2 失控运转	68
2.7 离解	26	5.4.3 轰鸣	68
参考文献	30	5.5 正常燃烧的化学热力学模型	68
第三章 空气标准循环	31	5.6 燃烧产生的排放物	70
符号	31	5.6.1 一氧化碳	70
3.1 空气标准循环的效率	32	5.6.2 一氧化氮	71
3.2 局限性	37	5.6.3 碳氢化合物	77

参考文献	77	7.4 扫气过程	136
第六章 发动机的传热	80	7.4.1 等温扫气模型	137
符号	80	7.4.2 非等温扫气模型	141
6.1 基本原理	81	7.5 换气期间的流动过程	145
6.1.1 辐射	81	7.5.1 排气门或排气口截面积	146
6.1.2 固体粒子云(如炭烟)的辐射	84	7.5.2 二冲程发动机的扫气口截面积	150
6.1.3 对流换热	85	7.5.3 简化的气口截面积	152
6.2 内燃机的传热概述	86	7.5.4 四冲程发动机的进气门截面积	153
6.3 内燃机的传热——需考虑的 几个实际问题	88	7.6 火花点火式汽油机的进气 系统——化油器	155
6.4 瞬时传热的计算	92	7.7 不稳定流动的波动效应	157
6.4.1 单区传热计算	92	参考文献	158
6.4.2 多区传热	94	第八章 压燃式发动机的循环计算	160
6.5 数值	96	符号	160
参考文献	96	8.1 引言	161
附录 I 试验方法	99	8.2 燃烧过程热力学	161
符号	99	8.3 理想双燃循环	164
I.1 压力测量和记录	99	8.3.1 等熵压缩	164
I.2 温度测量和记录	103	8.3.2 定容绝热燃烧	166
I.2.1 零件温度测量	103	8.3.3 定压绝热燃烧	168
I.2.2 气体温度测量	109	8.3.4 等熵膨胀	169
I.3 燃烧摄影和火焰速度测定	111	8.3.5 循环性能分析	170
I.4 光谱分析方法	112	8.4 单区燃烧模型的实际循环	171
I.5 化学分析技术	113	8.5 多区模型	179
I.5.1 取样阀	114	8.5.1 双区模型的热力学	179
I.5.2 奥氏(Orsat)气体分析仪	114	8.5.2 多区模型	180
I.5.3 非分散的红外分析仪 (NDIR)	115	第九章 火花点火式发动机的循环计算	181
I.5.4 火焰离子检测器(FID)	115	符号	181
I.5.5 气体层析法	116	9.1 碳氢化合物和空气混合气的 理想Otto循环	182
I.5.6 化学发光法	117	9.1.1 绝热压缩	184
参考文献	117	9.1.2 定容绝热燃烧	186
第七章 换气过程	119	9.1.3 绝热膨胀	190
符号	119	9.1.4 循环性能分析	193
7.1 四冲程和二冲程发动机的 换气过程	119	9.2 考虑燃烧时间、热损失和反应 动力学的循环计算	197
7.2 定义	124	参考文献	201
7.3 换气过程热力学	126	第十章 内燃机增压	202
7.3.1 自由排气时期	127	符号	202
7.3.2 排气冲程	129	10.1 缸内封存气体的状态与平均有 效压力之间的关系	203
7.3.3 吸气冲程	130		

10.2	机械增压	204
10.3	涡轮增压器	206
10.4	平均废气温度	212
10.5	简单的涡轮增压系统	214
10.6	理想的涡轮增压系统	216
10.6.1	二冲程发动机	217
10.6.2	四冲程发动机	222
10.7	实际的涡轮增压器系统	225
10.8	排气系统的效率	228
10.8.1	定压涡轮增压	229

10.8.2	脉冲涡轮增压	234
10.9	涡轮增压器和发动机的匹配	237
10.10	涡轮高增压	240
10.11	一些涡轮增压发动机的 工作特性	241
	参考文献	244
	附录 I	245
	A. 混合气的热力学性质	245
	B. 双燃循环的电算程序	249
	C. Otto 循环的电算程序	255

第一章 内燃机概述

1.1 引言

撰写本章的目的是为了说明后续各章的概况和范围。为了使论述明白易懂，我们先介绍一些有关燃烧过程方面的名词和叙述性的资料，而这些内容将在以后各章中作进一步阐述。

“内燃机”这个名词的含义太广，它可能使人产生误解。本书只研究间歇工作的内燃发动机，这样就不包括连续工作的内燃发动机——燃气轮机。也不包括除废气涡轮增压器这一重要的辅助装置以外的一般涡轮机械。

另一个重要的界限是，本书只研究有关发动机的热力学和气体动力学问题，而不讨论它的机械设计问题。但因机械设计与热力学的应用紧密相连，所以涉及到一些与它有关的问题也是不可避免的。本章提到了设计的某些一般性内容，而有关发动机的结构和力学方面的详细资料要参看其他著作。

间歇工作的内燃发动机作为汽车用的原动机，它到处可见。因此，它对于大多数人来说是熟悉的。这些发动机常见的是往复式发动机，其主要的运动件是作往复运动的活塞，当活塞到达上下止点时，有一个极短暂的时间是静止的。与一些通常的见解相反，运动方向的这些改变并不影响效率；也就是说，在这个过程中，并没有什么固有的损失。旋转式比往复式优越的地方主要是几何形状上的紧凑性，并非直接在气体动力学和热力学方面有何优越性。

发动机的各种空间特性参数，特别是燃烧室容积、气道截面积和表面面积以及这些参数随时间的变化，如果是适应的，那么本书后续各章的内容对旋转式发动机和往复式发动机都适用。

我们所说的这种发动机可用许多方法细分成若干不同类型。一种方法是根据用途来分类。如用作海轮动力的船用发动机；陆上发电站用的工业发动机；陆路运输用的汽车发动机。此外，对设计者来说可能是重要的，那就是，只在短时间内偶然使用的辅机和连续运转的发电设备主机比较起来，各种界限和性能好坏的标准截然不同。不过，这里我们将以燃烧、热力学和气体动力学作为主要的划分依据。

以燃烧特点为依据的分类方法，主要的问题在于点火方式，是自行着火 (self-ignition)，还是外源点火 (indirect-ignition)。所谓外源点火，是使燃烧室的某一特定地点的温度迅速升高，而把该点附近的燃料和空气混合气点燃。外源点火可以用典型的电火花方法来实现。因此，通常称它为“火花点火”。对于其他可以达到同样效果的点火方式，虽将被引起重视，但这对发动机有关问题的处理，没有或只有很小的差别。

所谓自行着火，就是燃料空气混合气被加热到高温而发生自燃——有可能混合气全部几乎同时自燃。

1.2 压燃式发动机

实际上自行着火是通过压缩实现的。压缩过程进行得很迅速，而且几乎是绝热的。此过程使空气或空气燃料混合气的温度升高到燃料的自燃温度以上。“压燃式发动机”这个名称表达了这一过程的本质，而且比起通常用的名称“柴油机”来说，显得更加明确。

压燃式发动机已能做成旋转式的，而且 Wankel 型柴油机已有所发展，但目前往复式发动机仍占优势。往复式发动机的尺寸和转速范围很宽，从缸径 6~10cm 左右，转速 4000~5000 rev/min 的小型高速辅机和汽车用发动机，到缸径在 100cm 左右，转速为 100 rev/min 的大型低速船用主机。这些数字只是为了举例说明，它并非很确切。应当注意的是，上述的转速范围，表面上看来很宽，实际上掩盖了这样一个事实，即对所有往复式发动机来说，它们的最大活塞速度，都属于同一个数量级的，是很接近的。

所有这种发动机都有许多共同点，它们需要高压压缩比来获得自行着火所必需的压力和温度。这就导致缸内有高的压力，也就需要较高的机械强度。然而高压压缩比也导致了高的膨胀比，使柴油机具有高的指示效率。为了避免出现提前点火的危险，自行着火的燃料不得不在压缩过程的后期喷入缸内，并且这股燃料还必须在缸内所达到的温度和压力条件下，在它存留在缸内的短暂时间内就能够着火。最后，为了能在可利用的短暂时间内，使燃烧迅速完成，燃料的喷射和燃烧室内燃料与空气的混合需要完成得非常迅速。这些要求限定了所喷射的燃料和气缸中的空气运动要有一定的配合；这种配合决定着燃烧室的设计。

1.2.1 压燃式发动机的燃烧室

除了满足前面所提到的混合要求以外，燃烧室的设计还应使从燃气到燃烧室壁面的散热损失尽量减小。当然，还得同时给气门和喷油嘴留出空间。这些不同的要求需要兼顾。燃烧室的型式是多种多样的，有些型式一直在使用着。本书的目的不在于说明这些燃烧室的详细结构，而是简单叙述一下燃烧室的主要型式，并提出了一些能区分它们的基本原则。

最好按照发动机的转速和尺寸（虽然它们有相当大的重迭）来区分燃烧室。它也受商品需要的影响。例如，对于汽车用小型发动机，要求它在一定尺寸下发出更大的功率，所以，它所允许的过量空气量要小，发动机的转速要高。这就非常需要燃料与空气快速混合。工业或船舶用的大型发动机的转速比较低，它有更充裕的时间让燃料和空气进行混合，它们的燃料消耗率比最大功率显得更为重要；因此，吸入较多的过量空气就比较合适。

压燃式发动机的燃料以很高的压力经单孔或多孔喷嘴喷出，形成了由很细油滴组成的喷注(spray)，这样，每个油滴的燃烧时间才不致太长。大型发动机通常采用多孔喷嘴，每孔有适当的尺寸，如 6 孔，0.4mm 孔径，8 孔，0.5mm 孔径等等。它们取决于每循环喷入的燃料量和所用的喷射压力。采用相同原理的小型发动机需要小的总喷孔截面，这就导致喷孔直径更小和孔数更少。这样利用喷注模式(spray pattern)将燃料均匀分布在整个燃烧室内就更困难了。

从这些因素得出的总的结果是在小型发动机内，需要有空气运动以确保燃料与空气得到充分混合。而随着发动机尺寸的增大，这样做就变得不太合理了。在柴油机燃烧室的设计中有意使它只具有很弱的或根本没有空气运动。

因此，根据燃烧过程中燃烧室内的空气流速来进行燃烧室的分类是合理的。一个极端情

况是分隔式燃烧室。在这种燃烧室内，燃烧过程本身就能产生强烈的空气运动。居中的情况是只有一个统一的燃烧室，或如通常所说的直接喷射式燃烧室。它的空气的运动是利用进气的方向和燃烧室的形状来产生的。而另一极端情况是，有意识地设计成没有涡流运动的直接喷射式燃烧室，称“静止式”（Quiescent）燃烧室。下面按顺序给予说明。

1.2.1.1 分隔式燃烧室

预燃室 欧洲大陆偏重于使用这种燃烧室；典型形式示于图1.1。

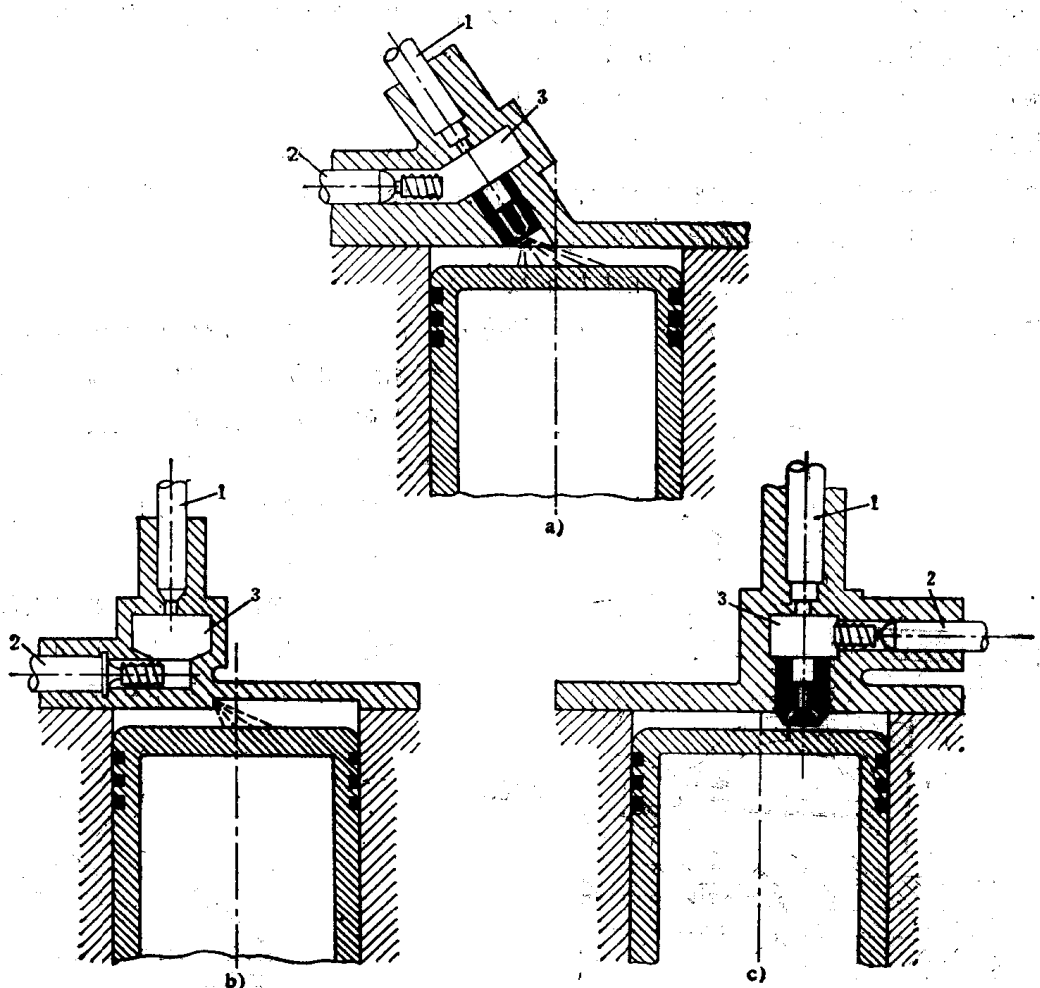


图 1.1 典型预燃室燃烧室
1—喷嘴 2—预燃室 3—预热室
(取自Schmidt⁽⁴⁾)

预燃室的设计原理是：预燃室内的空气只占总量的一部分，而燃烧就从这里开始，并使压力升高。在高压下，燃料和空气迅速地穿过通道进入主室。通道的横截面要小，以确保气流有高的速度，并能有效地进行分布。通道的设计要使燃料空气混合气能布满整个主室，可以有几个通道或几个孔。这种方法能在对燃料喷射装置要求不很高的条件下，使燃料和空气在主室中进行迅速强烈地混合。一般说来，设计这种燃烧室时对尺寸等因素的要求是很要紧的。

涡流室 对于前面所说的那种设计，就可能看到的来说，预燃室中的空气运动，在燃烧前不是有秩序的。而另一种形式的燃烧室中的空气运动能在燃烧前和燃烧期间使空气和燃料有效地进行混合。Ricardo彗星(Comet)燃烧室就是这种型式的(图1.2)。

这种燃烧室的特点是，活塞把空气沿切线方向压入球形的燃烧室内，从而产生了涡流。燃料顺气流方向喷到气流中去（也可以先在径向方向上喷射一小股燃料）。

着火以后，因燃烧使室内压力升高，混合气冲入主燃烧室，由于活塞上凹坑形状的作用，在主室内产生一个双涡流。主室与涡流室之间的通道比预燃室中的通道要大，因此，两室间的压差较小。涡流室中的涡流保证燃料和空气在涡流室内得到很好地混合，使燃烧过程在主室内能迅速完成。

涡流室的容积大约等于（或在其他形式中大于）活塞在上止点时主室的容积。

地处靠近Brighton城海边的Shoreham的Ricardo有限公司在柴油机设计和谘询业务方面做得很成功。并且还在不断地发展着这种燃烧室。

预燃室和涡流室之间的主要区别是：预燃室比较小，只燃烧一小部分燃料；而在涡流室内燃烧了燃料的大部分。这两种燃烧室都可以使用比较简单的、要求不高的燃料喷射系统，同时，因空气流速高，它们都能在低的过量空气下运转。

这两种型式燃烧室之间的差别往往并不很明显。

空气室 空气室是分隔式燃烧室的另一种型式。它有一主室。燃料是喷到主室内的。空气和燃料从主室向副室流动，并伴随着燃烧和回流。回流反过来又在主室中引起第二次扰动，从而有效地得到完全燃烧。

MAN空气室式燃烧室显示了这种作用。见图1.3。

由于从喷油嘴喷出来的喷注的中心部分进入了空气室，所以Lanova型燃烧室(图1.4)介于空气室和预燃室之间。燃

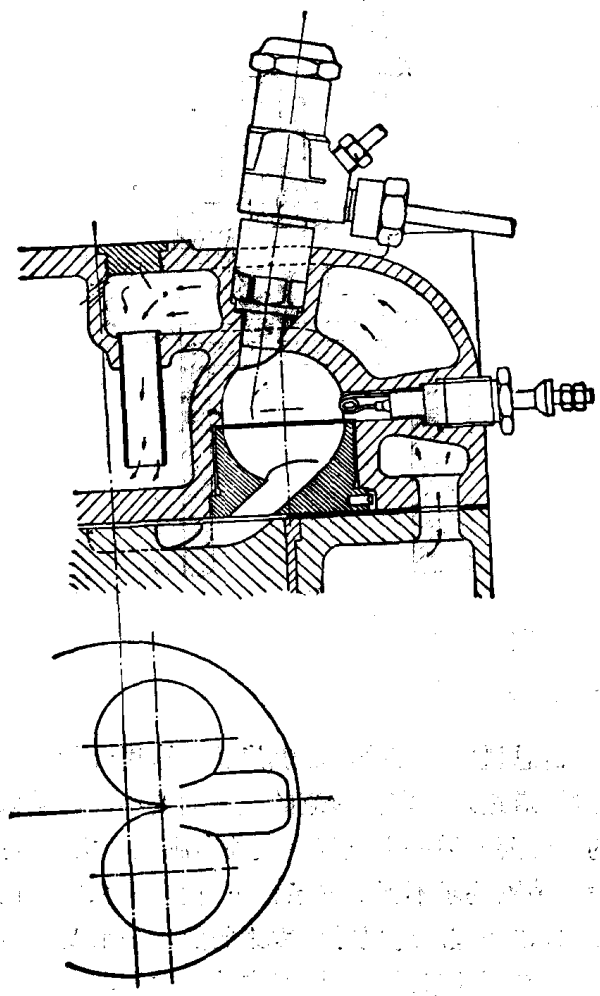


图 1.2 Ricardo 彗星 II 号燃烧室
(取自Ricardo and Hempson⁽⁵¹⁾)

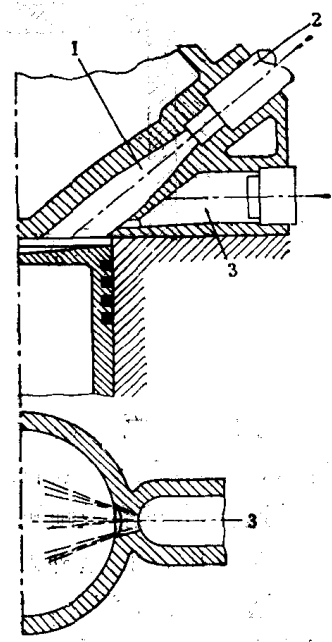


图 1.3 MAN空气室式燃烧室
1—燃烧室 2—Bosch喷嘴 3—空气室
(取自Schmidt⁽⁴²⁾)

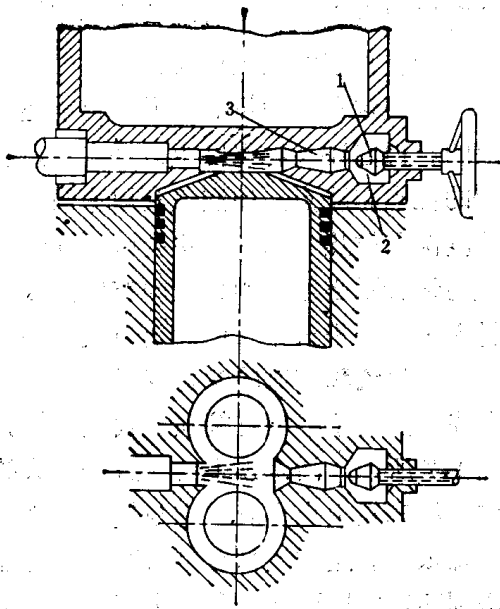


图 1.4 Lanova燃烧室
1—空气室起动阀 2—主空气室 3—空气室
(取自Schmidt⁽⁴⁾)

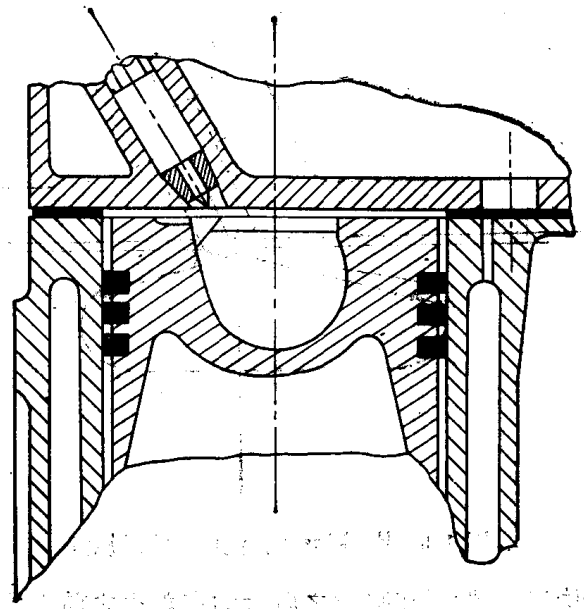


图 1.5 MAN-M发动机燃烧室
(取自Schmidt⁽⁴⁾)

烧可能是在主室开始，并蔓延到存有大部分燃料的空气室中去，然后燃料与空气再被压回到主室。

1.2.1.2 直接喷射式燃烧室

从某种意义上说，空气室式燃烧室也是直接喷射式燃烧室，但是，“直接喷射式”这个名称仅用于具有统一式的燃烧室。它有表面积比较小的优点，因而散热损失较小，这一优点在采用较低的气流速度时，将进一步显示出来。

一般情况下，燃料是通过装在气缸盖上，布置在燃烧室顶部中心或靠近中心的多孔喷嘴喷出的。燃料与空气是通过空气运动和燃料喷注分布的配合来实现混合的。一般来说，空气运动不如分隔式燃烧室那样剧烈。

MAN的Meurer燃烧系统——M发动机 虽然M发动机的燃烧室（图1.5）不同于一般型式的直接喷射式燃烧室，但也应当提到它。它属于有强涡流的直接喷射式燃烧室，但又有某些特点。燃料几乎全部切向地喷射到活塞顶内的球形室壁上。这样，燃料在到达壁面的途中并不起反应也不蒸发。少量的燃料喷到空气中去以便于自燃，而其余燃料的蒸发并离开燃烧室壁面比较缓慢，因此紧跟在着火以后，只有很少量的燃料与空气混合可供迅速燃烧。这样就限制了在燃烧早期阶段由于压力迅速升高而产生的柴油机敲缸现象，它的燃烧噪声是低的。与大多数直接喷射式柴油机比较起来，它的冷车起动比较困难，这是因为在活塞比较冷的时候，球形燃烧室壁面上的燃料蒸发得不够快的缘故。为了在冷车情况下能迅速地起动，需要采取特殊的措施。

Perkins“挤流口”(Squish Lip)式燃烧室 Perkins发动机公司的这种新发展，如图1.6所示。虽然与后面要讨论的深盆形直接喷射式燃烧室相类似，但在某些方面又类似于已经提到过的分隔式燃烧室中的涡流室，在位于活塞中的燃烧室和主室之间有起一定节流作用的通道。这种特点有利于加强空气运动和快速燃烧。正如后面要讨论的深盆形燃烧室那样，由于

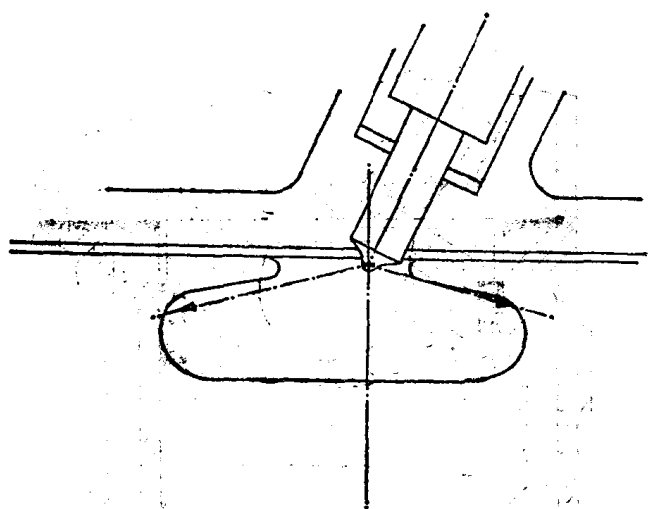


图 1.6 Perkins “挤流口”式燃烧室

这种燃烧室有保持涡流的特点，所以室中存在着有秩序的空气运动。

有关这种发动机的报道，目前还是有限的。但它在某种程度上似乎有彗星燃烧室的优点和缺点，如空气利用率高、燃烧速度快和散热率高。而主要区别在于气缸盖的设计不必考虑预燃室的布置，因而设计人员在安排进排气门时要方便得多。

有涡流和挤流的深盆形燃烧室 这种燃烧室多用于小型直接喷射式发动机。如图 1.7 所示，活塞顶上有一直径不大的深坑。活塞在上止点时，它与气缸盖之间的间隙很小。这样大部分空气都集中在盆形

凹坑内。燃料在喷射之后大约在着火之前很快地撞击到凹坑的壁面上。利用进气道形状或气门上的导气屏使空气大致以切线方向进入燃烧室。压缩时，把空气挤入盆形凹坑内，这样不仅把空气聚集在喷注附近，而且还由于角动量守恒的缘故，使空气的角速度进一步增大。因此，促进了燃料与空气的混合。特别是在深坑壁面附近的燃料和旋转着的空气之间的交界面处更是如此。附着在凹坑壁面上的液态燃料就会蒸发，并被运动着的空气带走。当燃烧室壁面附近混合好的燃料燃烧时，热的燃烧产物比缸内其他部位的气体密度低。燃烧产物在离心力的作用下向内流动，未燃的冷空气由于离心力作用，将由中心向外移动，因而产生对流。这样，喷注的分布就不象在“静止式”燃烧室中那样显得那么重要了。因此，降低了对燃料喷射装置的要求，从而使成本下降，这对小型发动机是很重要的。小型机要求减少喷孔数目，

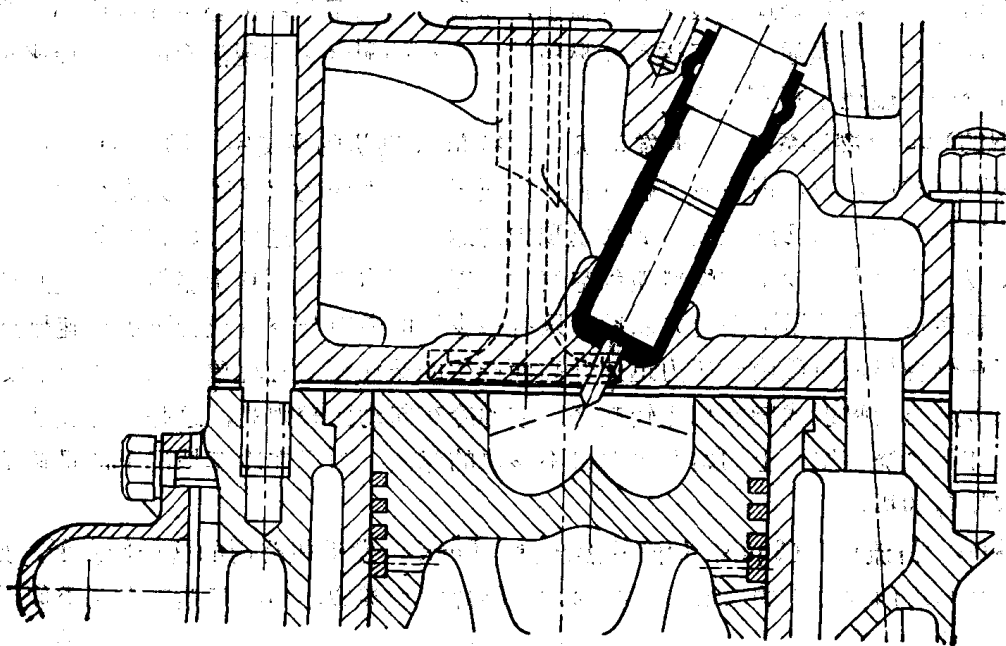


图 1.7 深盆形燃烧室

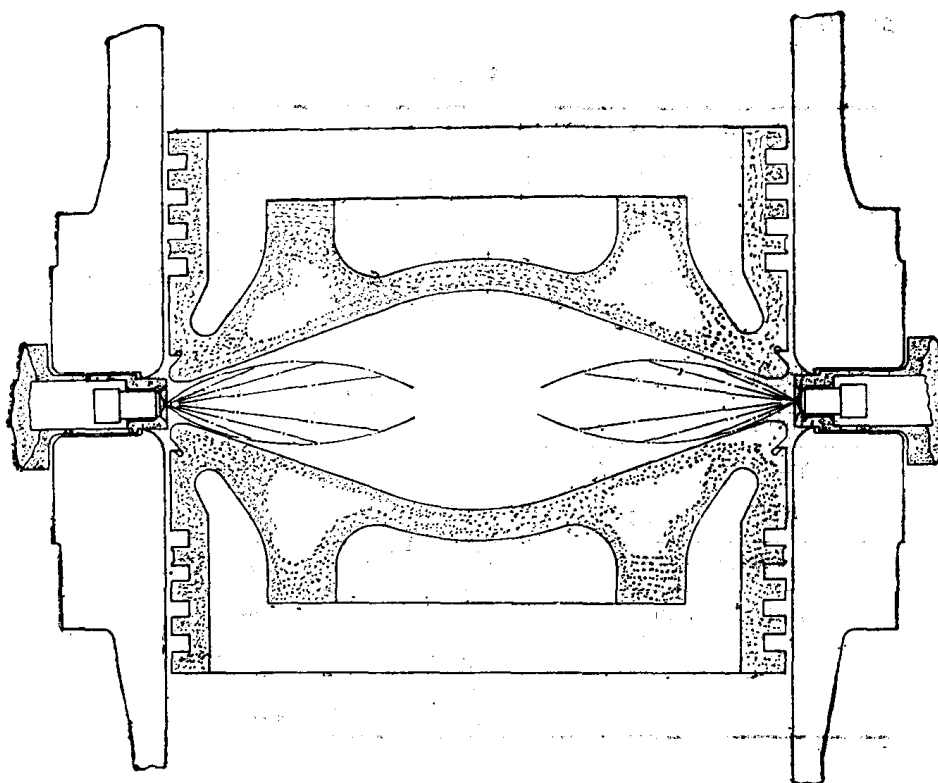


图 1.8 对动活塞式发动机燃烧室

否则喷孔孔径将变得很小。在图 1.7 中用少数几个大孔与用许多小孔比较起来将延长大修期，同时不易堵塞和腐蚀，这是有其特殊优点的。

对动活塞发动机燃烧室 由于设计结构上的局限性，这种燃烧室（图 1.8）比较特殊，故难以发展。它不能在中心处布置喷嘴，而不得不在周围布置两个或多个喷嘴。它很容易借助于一定形状的进气口获得空气涡流。喷注方向是顺着空气涡流方向的。否则，燃料又会被气流带回到喷注里边去，不利于混合。

1.2.1.3 “静止式”燃烧室

从把空气运动减到最小和依靠用多孔喷嘴喷出多股喷注来达到燃料的分布的角度看，“静止式”燃烧室是个极端的情况。

由于空气运动很小，任何喷到活塞上的燃料、甚至更不利的是喷到冷的缸套壁面上的燃料将不能很快地烧掉。因此，这种型式的燃烧室只适用于一定尺寸以上的发动机，以防止在着火前喷注过早地喷到壁面上。确切的尺寸取决于许多因素，但大多数这种发动机的气缸直径等于或大于 20cm，燃料分布靠 6 个或更多个喷孔喷出的多股喷注来保证。

典型的“静止式”燃烧室是浅盆形的，如图 1.9 所示。

优缺点的总结 各种不同型式燃烧室的优缺点可根据以上的讨论以及一般的热力学和气体动力学原理来加以判断，现将它们汇总成表 1.1。这仅是一般性概括，对某些特殊发动机

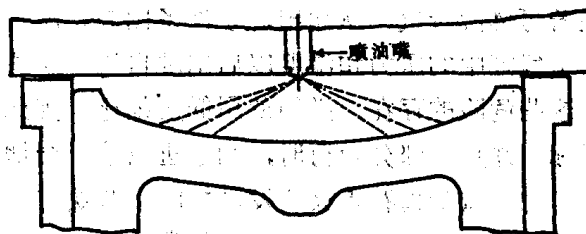


图 1.9 “静止式”燃烧室

来说，不见得都正确。

表 1.1

分 隔 式 燃 烧 室		统 一 式 燃 烧 室	
预燃室	涡流室	有涡流式	“静止式”
散热损失大		散热损失中等	散热损失小
空气利用率高		空气利用率中等	空气利用率接近中等
起动困难		起动容易	
气门受到 相当限制	气门截面 受到限制	气门截面较大	气门截面最大
通道有 节流损失	有些节流 损失	无节流损失	
燃料喷射系统要求不高		燃料喷射系统要求 中等	燃料喷射系统要求较高
主室中压力升高较慢		压力升高较快	
高 速		中高速	中低速
		燃料消耗较低	

1.3 外源点火或火花点火式发动机

在火花点火式发动机中，燃烧室内某一特定点的温度迅速升高，从而点燃了该处小容积的燃料和空气混合气，但其他地方的混合气就不象压燃式发动机那样会自行着火。这样就产生了一个从火焰传播的要求出发的特殊设计问题。为了使燃料有效地燃烧，点火源必须是被汽化了的燃料和空气的混合气所包围，以便于产生火焰中心。还必须依次地与下一层可燃混合气相接触，以便使火焰扩展到周围的全部燃料中去。只有当空燃比在一定的范围以内，不过浓也不过稀时，火焰才会传播。虽然可以通过提高压力和温度的办法把这个范围加宽，但实际上这个界限给发动机的设计增加了不少麻烦。关于这个过程的热力学分析将在第五章和第九章中讨论。

虽然在少数情况下，火花点火式发动机的燃料和空气是各自分别进入气缸内的，但通常早在压缩行程之前的进气行程中，燃料与空气在进气道里就已经混合好了。一般情况下，混合气成分要尽可能均匀。为了保证混合气的浓度在火焰传播所要求的范围内，在部分负荷时，要靠进气节流来限制空气的供给量。由于从进气开始经过压缩过程到燃烧过程一直都存在着可燃混合气，从而出现了许多困难。混合气可能提前着火或者部分混合气在正常燃烧提高了气缸中的压力和温度以后出现自燃。这些现象将在第五章中进行研究。这足以说明，由于这些危险的存在，必须使用低压缩比。因此，它的指示效率低于压燃式发动机所能达到的指标。并且在部分负荷时，由于进气节流会增加泵吸损失，致使上述缺点显得更为突出。

为了减少火花点火式发动机的一些缺点，故意不使用均匀成分的混合气而把充量分成不同成分的两部分，成为分层充气发动机。在这种发动机中，在不使可燃混合气的浓度低于可燃界限的条件下，允许吸入更多的尚未混合的空气。这样就可以使上面所谈到的那种泵吸损

失不致过大。也可以控制混合气浓度限制具有产生有害气体最多的混合比，从而避免产生大量的有害气体。

1.3.1 外源点火或火花点火式发动机的燃烧室

前面对压燃式发动机燃烧室提到的一些问题，如热损失和进排气门布置等，在这里都同样存在。但混合问题基本上不存在了，而燃烧的时间则由火焰前锋在混合气中传播的速度来控制。早燃 (pre-ignition) 和自动着火 (auto-ignition) 是必须防止的。为了减少散热损失而将燃烧室设计成具有最小的表面积，这样也将减少由于壁面激冷而产生的有害气体。

在研究几个实际的燃烧室设计以前，先详细讨论一下这些应当考虑的变化因素。

一部分燃料空气混合气在火焰前锋还未到达以前自动着火常常成为火花点火式发动机的一个最重要的问题。这种现象是一种由高温高压引起的化学反应，其发展过程需要一定的时间。为了使发生上述化学反应的时间尽量缩短，所以从点火位置到火焰传播终点的路程要尽量短。否则就希望最后燃烧的那部分混合气的容积达到最小，这样就使自动着火释放出的能量很少，因而敲缸 (knock) 就不会严重。另外，希望末端的混合气靠近冷表面，而不要靠近热表面，例如不要靠近炽热的排气门。至于为什么这样做，后面再谈。燃烧室的形状也会影响燃料空气混合气的燃烧模式 (pattern)。最好是通过循环计算来对这些影响因素进行详细研究，还可以通过它指出因末端气体的自动着火而引起敲缸的严重性和危险性，这些计算将在本书后面讲到。现在只注意到它的一般趋势就够了。

为此目的，让我们来研究一个非常简单的半球形燃烧室，如图1.10所示，火花塞放在平面的中心处。

开始时火焰速度通常较低，在靠近壁面处紊流很小。对于一给定的火焰前锋位移 r_1 ，燃气的容积等于 $\frac{2}{3}\pi r_1^3$ ，当 r_1 很小时容积很小，因此初始的燃烧速率非常低。

此后，在距燃烧室壁面一段距离处，由于紊流增强的结果，火焰速度将加大，并且火焰前锋表面积也增大了。结果经过相同的一段时间后，当火焰前锋到达 r_2 时，燃烧过的容积约为 $2\pi r_2^2 r_1 k$ ，其中 k 是火焰速度比。气缸中的压力因燃烧而升高，故未燃气体的密度也将增大。因此，燃料的燃烧速度也将显著提高。这种情况将一直持续到燃烧快要结束为止。此时又由于接近壁面，使紊流和火焰的速度转为下降。因此燃烧速度的模式如图1.11所示。

曲线的实际形状取决于火焰速度、密度和

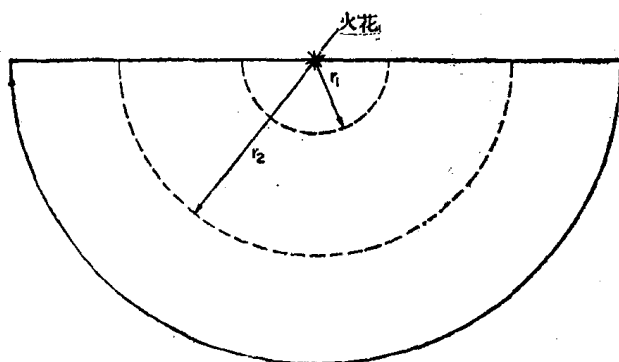


图 1.10 简单半球形火花点火式燃烧室

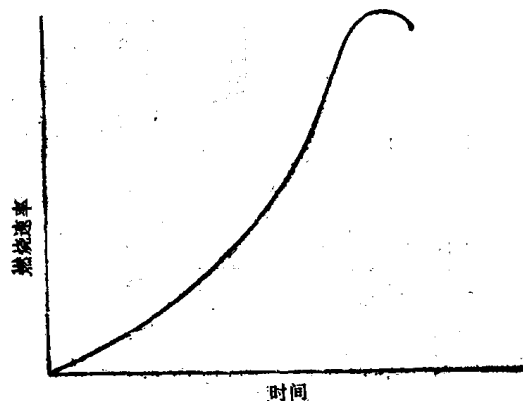


图 1.11 典型的燃烧速率曲线
(半球形燃烧室)