

《内燃机》全集（新版）第6卷

工学博士 H. 李斯特

主编

工学博士 A. 匹兴格



Mixture Formation in Spark Ignition Engines

汽油机混合气形成



工学博士 H.P. 伦茨 著

倪计民 译 朱绍中 校

同济大学出版社

《内燃机》全集

(新版)第6卷

工学博士 H.李斯特教授 工学博士 A.匹兴格教授 主编

汽油机混合气形成

Mixture Formation in Spark Ignition Engines

工学博士 H.P.伦茨教授 著

倪计民 译

朱绍中 校

同济大学出版社

内 容 提 要

本书译自施普林格出版社 1990 年出版的《内燃机》全集新版第 6 卷,内容包括:燃烧基础、混合气形成基础、实验室测试技术、混合器设计、进气管设计和混合气形成的特殊形式。书末附有详细的参考文献。

本书供该领域广大科研人员、工程技术人员以及高校的相关专业教师和学生使用。

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. techn.

Lenz, Hans Peter

Gemischbildung bei Ottomotoren

© 1990 by Springer-Verlag/Wien

中文版独家版权©1998 同济大学出版社

本书由斯普林格出版社(Springer-Verlag/Wien)

授权同济大学出版社独家翻译出版中文版本

版权所有 翻印必究

汽油机混合气形成

H. P. 伦茨著

倪计民 译

朱绍中 校

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号 邮编:200092)

新华书店上海发行所发行

望亭电厂印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:490千字

1998年5月第1版 1998年5月第1次印刷

印数:1-1000 定价:50.00元

ISBN 7-5608-1864-1/TB·35

序 言

《内燃机》全集(新版)第6卷《汽油机混合气形成》受到如此热烈的欢迎,以致于这本书出版后不久,美国汽车工程师学会(SAE)便以《Mixture Formation in Spark Ignition Engines》为书名出版了这本书的英文版。

非常高兴的是,现在这本书的中文版也出版了。我非常感谢同济大学倪计民副教授,他承担了大量的翻译、出版工作。

希望这本书能给中国大量从事于混合气形成领域工作的工程师们提供帮助,并能满足涉及到环境保护的未来重要的研究任务的要求。

工学博士 H.P. 伦茨教授
维也纳, 1997.3.12

前 言

自从 1967 年 K. 勒讷和 H. 米勒的著作《汽油机的混合气形成和燃烧》^{1,1} 出版以来,已过去了 23 年。

自然,在此期间,汽油机混合气形成和燃烧领域已大踏步地向前发展,并出现了许多新的知识。因此,我欣然接受这套系列丛书的编者、工学博士 H. 李斯特教授和工学博士 A. 匹兴格教授的建议,编著一本体现当今知识状态的书籍。

因为由我领导的维也纳工程技术大学内燃机和汽车制造研究所的研究工作的突出的重点在于与有关企业合作,从事于混合气形成领域的研究,因此,获得了大量新的成果。

基于这个领域的复杂性,有大量的专业人士参与了这本书的编著工作,尤其是过去和现在的助教们。在此,我衷心地感谢与此相关的个别段落的编写者:

M. Akhlaghi 工学博士、W. Böhme 工学硕士、H. Duelli 工学博士、G. Fraidl 工学博士、H. Friedl 工学硕士、B. Geringer 工学博士、G. Pachta 工学博士、E. Pucher 工学博士和 G. Smetana 工学博士。

我也衷心地感谢工学博士 H. 申德尔鲍尔教授审阅了“燃料”一章。

因为在这套系列丛书中,由 R. 匹兴格、G. 克拉斯尼希、G. 陶卡、T. 萨姆斯^{1,2} 编著的《内燃机热力学》已在 1989 年出版,该书对燃烧基础知识做了详细的介绍。因此,本书只是在理解混合气形成的作用所要求的程度上描述燃烧基础知识。

这本书重点介绍汽油机的混合气形成,这不仅涉及到基础知识,而且也阐述了混合器及进气管的设计。同时还介绍了相应的测试技术。

因而,这本书不仅给从事研究和实践的工程师、而且也给在该领域内需加深了解的大学生们提供了知识状态和技术状态的一个概貌。

必须指出,在内燃机制造领域内经历了 100 多年的开发研究后,在汽油机混合气形成这个领域内,如今全世界正在进行广泛深入地研究,并大踏步地前进。因而,总数大约 400 余篇直接参考、引用的文献也只是所有文献中的一部分而已。

衷心地感谢:

Adam Opel AG., Rüsselsheim

AUDI AG., Ingolstadt

BMW AG, München

Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG, Stuttgart

Fritz-Hintermayer GmbH., Nürnberg

Mercedes-Benz AG, Stuttgart

Pierburg GmbH., Neuss

R. Bosch GmbH., Stuttgart

Volkswagen AG, Wolfsburg

提供各种各样的资助和开放版权。

此外,还要感谢 M. Akhlaghi 工学博士和 E. Pucher 工学博士对本书的最后的编纂,以及 P. Kohoutek 工学硕士和 W. Leitner 先生对许多图片的图像造型。

维也纳,1990年1月
工学博士 H. P. Lenz(伦茨)教授

译校说明

奥地利 AVL 公司创始者、工学博士汉斯·李斯特教授曾在 1926 ~ 1932 年间在同济大学机械学科研究所工作过,为中国培养出了第一批内燃机科学工作者。1985 年,工学博士汉斯·李斯特教授被同济大学聘为同济大学名誉教授。从工学博士汉斯·李斯特教授在《内燃机》全集新版第 1 卷中译本所写的序言中,我们可以看到工学博士汉斯·李斯特教授对中国的眷恋和友好。如今,《内燃机》全集新版第 6 卷由同济大学翻译出版,是对工学博士汉斯·李斯特教授的仙逝的最好的纪念。

《内燃机》全集新版第 6 版的著者、工学博士 H.P. 伦茨教授在世界内燃机行业享有很高的威望,他是奥地利汽车工程协会主席,也是每年一度的维也纳内燃机国际会议的主席之一。他的著作集中了他多年来的研究成果。

我们衷心地感谢工学博士 H.P. 伦茨教授为撰写本书所付出的辛勤劳动。我们希望本书中译本的出版能为中国内燃机技术的发展提供帮助。

我们衷心地感谢工学博士 H.P. 伦茨教授对中国内燃机科技发展和教育事业的热情支持与帮助,感谢他同意将本书译成中文并妥善地处理了有关版权问题。

在翻译过程中,尽量采用直译的方式。由于原著图片中没有完全采用国际单位制,而且书写也不统一,中译本中已做了修改。

倪计民 朱绍中
上海,1997.3.18

目 录

符号、缩写和索引

1. 燃烧基础	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 热值的确定	(1)
1.3 内燃机工作过程基础	(1)
1.3.1 概述、理想循环、比较过程	(1)
1.3.2 卡诺过程(理想循环)	(2)
1.3.3 等容过程(理想循环)	(2)
1.3.4 等压过程(理想循环)	(3)
1.3.5 混合过程(理想循环)	(4)
1.3.6 韦伯函数	(4)
1.3.7 裂解	(5)
1.3.8 工作过程计算	(6)
1.4 汽油机燃烧过程细节问题	(6)
1.4.1 着火前反应	(6)
1.4.2 炽热点火(早火)	(6)
1.4.3 着火	(7)
1.4.4 着火延迟期	(9)
1.4.5 燃烧过程和充量运动	(9)
1.4.6 爆震	(18)
1.4.7 工作过程	(19)
1.4.8 效率	(22)
2. 混合气形成基础	(26)
2.1 空气	(26)
2.2 燃料	(29)
2.2.1 对燃料的要求	(29)
2.2.2 燃料的组分和结构	(30)
2.2.2.1 概述	(30)
2.2.2.2 纯碳氢化合物	(30)
2.2.2.2.1 链形的(脂肪族的)碳氢化合物	(30)

2.2.2.2.2	环形的(环状的)碳氢化合物	(32)
2.2.2.3	含氧碳氢化合物	(34)
2.2.2.3.1	醇(酒精)	(34)
2.2.2.3.2	醚	(35)
2.2.2.4	燃料添加剂	(36)
2.2.3	燃料的特性和指标	(37)
2.2.3.1	汽油	(37)
2.2.3.2	永久性燃气	(41)
2.2.3.3	液化气	(42)
2.3	化学当量混合比;过量空气系数	(43)
2.4	混合气供给	(44)
2.4.1	混合气数量	(45)
2.4.2	混合气成分	(47)
2.5	混合气制备	(50)
2.5.1	燃油雾化	(53)
2.5.1.1	压力雾化	(54)
2.5.1.2	压力空气雾化	(58)
2.5.2	燃油汽化	(59)
2.6	混合气传送和分配	(63)
2.6.1	集中式混合气形成的传送和分配	(63)
2.6.1.1	一般性描述	(63)
2.6.1.2	空气和燃油蒸气(气态)	(64)
2.6.1.3	油滴	(64)
2.6.1.4	壁面油膜	(68)
2.6.2	分散式混合气形成的传送和分配	(73)
3.	实验室测试技术	(76)
3.1	燃油和空气质量的确定	(76)
3.1.1	空气质量测量	(76)
3.1.2	燃油测量	(76)
3.2	过量空气系数的确定	(77)
3.2.1	概述	(77)
3.2.2	不同过量空气系数确定方法的精度考察	(78)
3.2.2.1	原子平衡方法	(78)
3.2.2.2	单一组分-过量空气系数计算方法	(79)
3.2.3	由废气分析确定过量空气系数方法的比较	(81)
3.2.4	瞬态过量空气系数的确定	(81)
3.2.5	二冲程内燃机过量空气系数的确定	(82)

3.3	壁面油膜的确定	(82)
3.4	油滴尺寸的测试技术上的测定	(82)
3.4.1	确定油滴尺寸的测量方法	(83)
3.4.1.1	光学图像方法	(83)
3.4.1.2	消光方法	(84)
3.4.1.3	散射光方法	(84)
3.4.2	散射光方法的理论基础	(84)
3.4.3	散射光方法的结构和测量设备	(86)
3.4.4	误差影响的估计和散射光方法测量的评判	(87)
3.4.4.1	双折射	(87)
3.4.4.2	测量光束的不均匀性	(88)
3.4.4.3	处理方法	(88)
3.4.4.4	其他影响测量结果的因素	(89)
3.4.4.5	对测量精度的评价	(90)
3.4.5	描述稳态油滴谱的可能性	(90)
3.4.6	瞬态油滴谱的描述	(91)
3.5	喷油器油束的测量	(93)
4.	混合器设计	(95)
4.1	集中式混合器	(95)
4.1.1	化油器	(95)
4.1.1.1	基本方程式	(96)
4.1.1.2	化油器各个基本系统	(98)
4.1.1.2.1	空气喉口,节气门	(98)
4.1.1.2.2	保持燃油液面高度的装置	(106)
4.1.1.2.3	主油系	(110)
4.1.1.2.4	怠速系	(113)
4.1.1.2.5	旁通系	(114)
4.1.1.2.6	起动和暖机系	(119)
4.1.1.2.7	加速泵	(121)
4.1.1.2.8	混合气减稀和混合气加浓装置	(121)
4.1.1.2.9	补偿混合气系	(122)
4.1.1.2.10	滑行运行	(122)
4.1.1.2.11	大气校正	(122)
4.1.1.2.12	结冰	(127)
4.1.1.2.13	汽阻	(129)
4.1.1.3	化油器结构形式	(130)
4.1.1.4	等压式化油器	(132)

4.1.1.5	电子控制或调节的化油器	(134)
4.1.1.6	化油器实例	(135)
4.1.1.6.1	皮尔堡分动式化油器 2E	(135)
4.1.1.6.2	皮尔堡双腔分动式化油器 4Al	(140)
4.1.1.6.3	小型内燃机化油器,宾(Bing)-化油器	(141)
4.1.1.6.4	皮尔堡的电子化油器	(146)
4.1.2	集中式喷射	(148)
4.1.2.1	波许单点喷射(Mono-Jetronic)	(148)
4.1.2.2	尼桑单点喷射	(151)
4.1.2.3	欧宝 MULTEC 集中式喷射	(154)
4.1.2.4	本田二喷嘴集中式喷射(双点喷射)	(156)
4.1.3	液化气混合器	(157)
4.1.4	混合器几何尺寸对混合气分配的影响	(162)
4.1.4.1	基础	(162)
4.1.4.2	节气门	(162)
4.1.4.3	混合腔	(163)
4.1.4.4	进气导向	(165)
4.1.4.5	喷油时刻对混合气分配的影响	(167)
4.2	分散式混合器	(169)
4.2.1	各缸喷射	(169)
4.2.1.1	开发研制过程	(170)
4.2.1.2	电子式间歇喷射	(175)
4.2.1.2.1	波许 L-Jetronic	(175)
4.2.1.2.2	波许 LH-Jetronic	(186)
4.2.1.3	机械-电子连续喷射	(186)
4.2.1.3.1	波许 K-Jetronic	(187)
4.2.1.3.2	波许 KE-Jetronic	(192)
4.3	电磁式喷油器	(197)
4.3.1	基本功能和构造	(197)
4.3.2	不同喷油器结构形式的比较	(198)
4.3.2.1	概述	(198)
4.3.2.2	轴针式喷油器(锥形油束喷油器)	(199)
4.3.2.3	单孔喷油器(绳线形油束喷油器)	(200)
4.3.2.4	多孔喷油器	(200)
4.3.3	电磁式喷射器的重要性能	(201)
4.4	空气质量测量	(202)
4.4.1	挡板式空气量测量仪	(202)
4.4.2	涡流频率-流量测量仪	(203)

4.4.3	热传感器	(203)
4.4.3.1	热线空气质量测量仪	(203)
4.4.3.2	热膜空气质量测量仪	(206)
4.5	混合气形成-点火的组合-内燃机管理器	(207)
4.6	多气门内燃机对混合气形成的要求	(210)
4.6.1	二气门和多气门内燃机在混合气形成方面的差异	(210)
4.6.2	二气门和多气门内燃机之间的差异对混合气形成和优化可能性的影响	(210)
4.7	混合器比较评价	(214)
5.	进气管设计	(217)
5.1	集中式混合器用进气管	(217)
5.1.1	对进气管的要求	(217)
5.1.2	基本的造型准则	(217)
5.1.3	进气管基本形式	(219)
5.1.3.1	进气系统种类	(219)
5.1.3.2	进气管形式类型	(220)
5.1.4	进气管加热	(223)
5.1.5	进气管容积	(230)
5.1.5.1	单管截面	(230)
5.1.5.2	单管长度	(232)
5.1.5.3	分配体的容积	(232)
5.1.6	混合气拐弯和分支	(233)
5.1.7	管截面形状	(234)
5.1.8	分配体形式及构造	(234)
5.1.9	进气管的倾斜	(237)
5.1.10	联接孔	(237)
5.1.11	进气管材料	(238)
5.1.12	表面粗糙度	(238)
5.1.13	进气管-混合器联接法兰	(238)
5.2	分散式混合器的进气管造型	(240)
5.2.1	概述	(240)
5.2.2	谐振增压	(241)
5.2.3	波动管增压	(244)
5.2.4	无可变尺寸的非传统式进气装置	(248)
5.2.5	可变进气装置	(251)
5.2.6	分散式喷射进气管的计算	(254)

6. 混合气形成的特殊形式	(257)
6.1 集中式混合气形成的特殊形式	(257)
6.2 分散式混合气形成的特殊形式	(259)
7. 参考文献	(262)

1. 燃烧基础

1.1 概述

按照内燃机的基本原理：

内燃机是一种通过燃烧过程将燃料的化学能转换成热能、采用气态工质进一步将热能转换成机械能的机械：

此过程的第一部分，即将化学能转换成热能，可以借助于所谓的热量计来量化。由此获得了所谓的热值，即燃料能量含量的一个尺度。

此过程的第二部分，即将热能转换成机械功，在内燃机的一个工作过程中完成。为了使内燃机的工作过程能优化地利用热能，人们相应地采取两个步骤：

- A. 理论上最佳的工作过程的确定。
- B. 实际上可能的、最佳的工作过程的确定。

在第一步 A，即确定理论上最佳的工作过程，首先，对于相应的内燃机实际上能否制造得出来是无关紧要的。这种理论上的计算作为比较基础是很有意义的。

当了解了理论上最佳的工作过程后，可以判断实际上什么样的可实施的过程允许燃料被最佳地利用。

在第二步 B，确定在第一步 A 中仅基于热力学的考察所不能确定的、一台内燃机实际上能达到的最大功率，因为此时内燃机的材料特性、燃料特性、润滑油特性等起决定性作用。

最后，还必须注意其他燃料特性和那些影响排放的特性，如温度对 NO_x 的影响，压力升高对内燃机噪声的影响等。

1.2 热值的确定

一个实例是在量热容弹中确定热值，如图 1.1 所示。在容弹中确定的燃料量完全燃烧，由此产生的热量通过一个环绕容弹的热量罩壳的温度变化来确定。

1.3 内燃机工作过程基础

1.3.1 概述、理想循环、比较过程

在一个工作循环期间，内燃机内部经历了一系列物理和化学过程，各过程相互影响，很难通过总体计算

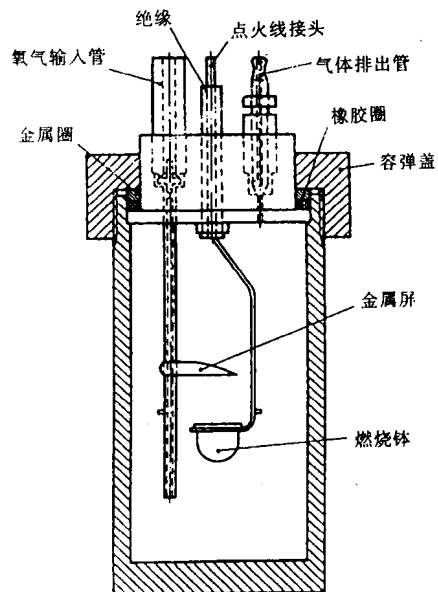


图 1.1 量热容弹示意图^{1.33}

而反映出来。

只有将整个过程分割开来和对每个过程分开进行研究,才能清楚地了解这个复杂的状况。或多或少地应用理想的比较过程已被证实是一种所需要的辅助工具。

借助于这个比较过程可以确定内燃机工作过程的基本特性,此特性也与实际应用的内燃机的形式非常接近。可以理解的是,如果计算结果越接近实际情况,则比较过程越与实际内燃机的工作过程接近。但另一方面,与实际情况越接近,计算模型总是变得越发复杂、越难做到一目了然。因此,人们必须根据各自的具体情况选择何种比较过程。目前还不可能精确地了解所有在实际内燃机中出现的影响因素。

人们区分:

A) 理想的循环过程,作下列假设:

- 工质为理想气体,具有空气在室温时的特性,即定压比热 c_p 、定容比热 c_v 和绝热指数 k 都是常数;
- 燃烧加热时工质没有出现物理和化学变化;
- 充量交换过程用放热来替代;
- 绝热压缩和绝热膨胀。

B) 比较过程,描述理想过程和实际过程存在的差别。

可能考虑的是:

- 考虑分解;
- 实际气体或混合气; $c_p, c_v, k = f(T)$;
- 加热过程可自由选择;
- 不完全燃烧;
- 不完善的充量交换;
- 热量损失。

下面给出理想循环和比较过程的实例。

1.3.2 卡诺过程(理想循环)

如图 1.2 所示,等温吸热和等温放热,热效率 η_{th} 根据方程式:

$$\eta_{th} = \frac{\text{吸入的比热量 } q_B - \text{放出的比热量 } q_A}{\text{吸入的比热量 } q_B} \quad (1.1)$$

$$\eta_{th} = \frac{q_B - q_A}{q_B} = \frac{\Delta s(T_3 - T_1)}{\Delta s T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (1.2)$$

得到。

热效率与工质的种类无关,此过程热效率可以达到最高值。

卡诺过程要求实际内燃机只有一个极小的工作表面积,吸入的比热量 q_B 要求每循环的燃料如此之少,以致于实际中少量的混合气所作的功比克服摩擦所需的功还要少。因此,卡诺过程实际上不能实现。

1.3.3 等容过程(理想循环)

图 1.3 所示的是等容过程,在等容状态下吸热和放热。

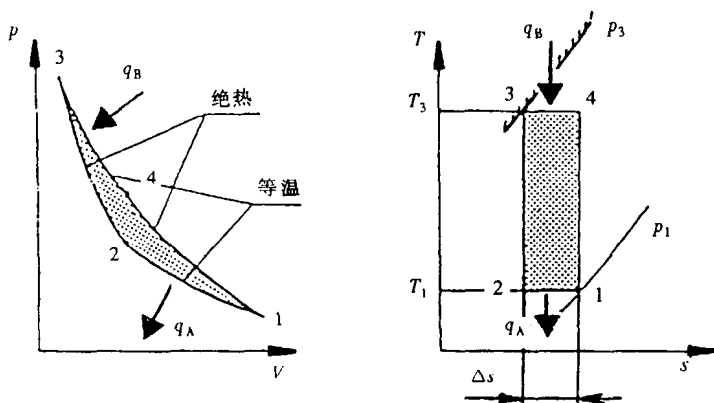


图 1.2 卡诺循环 p - V 和 T - S 图

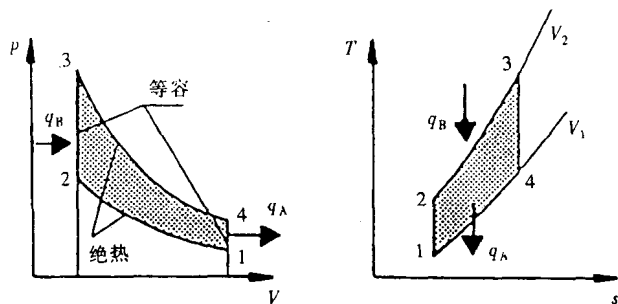


图 1.3 等容循环

这个过程的热效率 η_{th} 可以根据在卡诺过程中已引入的关系式来确定；可以得出：

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \quad (1.3)$$

式中 ϵ ——内燃机的压缩比, $\epsilon = v_1/v_2 = v_4/v_3$;

k ——绝热指数。

1.3.4 等压过程(理想循环)

图 1.4 所示的是等压过程,在等压状态下吸热,在等容状态下放热。

如前所述,得出热效率 η_{th} :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\phi^k - 1}{\epsilon^{k-1} k (\phi - 1)} \quad (1.4)$$

式中 ϕ ——容积升高比(预胀比), $\phi = v_3/v_2$, 如图 1.4 所示。

热效率不仅只取决于 ϵ 和 k , 也通过 ϕ 受内燃机负荷影响。

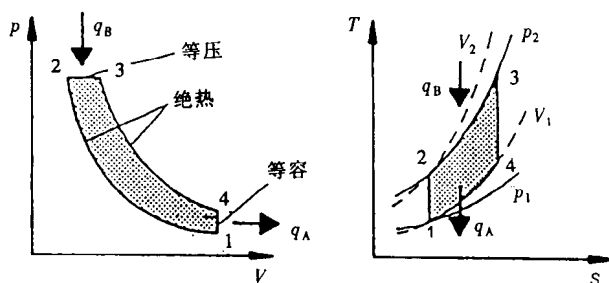


图 1.4 等压循环

1.3.5 混合过程(理想循环)

如图 1.5 所示,混合过程是受最高压力限制的理想循环。吸热过程是如此控制的:等容燃烧直至压力到达如根据强度确定的最高压力后,进行等压燃烧。人们用这个过程可以比等容过程或等压过程更好地描述内燃机的燃烧过程。

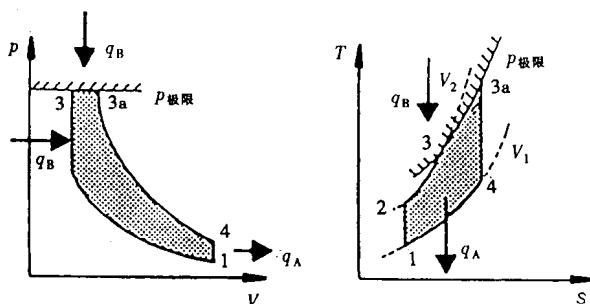


图 1.5 具有压力极限的循环(混合循环)

得到热效率:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\varphi^k \psi - 1}{\epsilon^{k-1} [(\psi - 1) + k\psi(\varphi - 1)]} \quad (1.5)$$

式中 ψ ——压力升高比, $\psi = p_3/p_2$;

φ ——预胀比, $\varphi = v_{3a}/v_3$ 。

热效率与系数 ψ 和 φ 有关;这些系数与内燃机的运行工况点相关。

1.3.6 韦伯函数

在整个循环过程中,在吸热过程范围内,工作过程可以用一个替代的燃烧函数,即韦伯函数^{1.5,1.6,1.7},作数学上近似地描述:

$$x = 1 - e^{[-f(\varphi/\varphi_B)^{m+1}]} \quad (1.6)$$

式中 x ——被转换的能量的比例,燃烧函数: E/E_{max} ;

f ——系数,对汽油机和柴油机 $f = 6.908$ 。

φ_B ——燃烧持续期, [°KW];