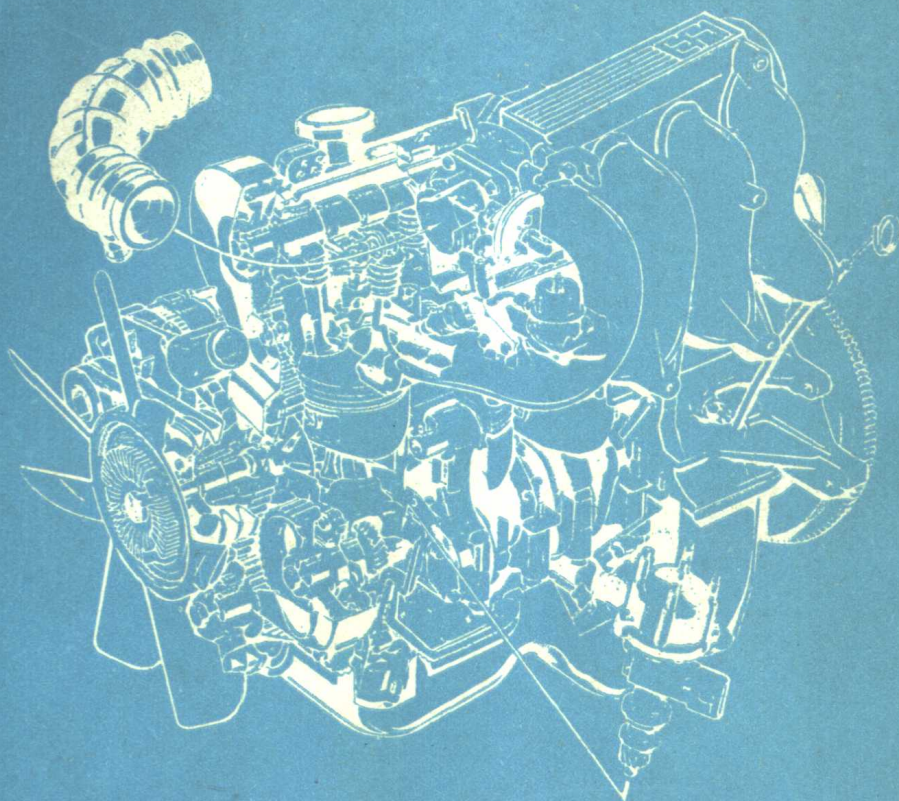


汽车发动机原理

清华大学 程宏著



学术期刊出版社

汽车发动机原理

程 宏 著

学 术 期 刊 出 版 社

汽车发动机原理

程 宏 著

学术期刊出版社出版

(北京海淀区学院南路86号)

新华书店北京发行所发行

北京昌平百善印刷厂排版印刷

787×1092毫米 16开本 10.25印张

1988年3月第1版 1988年3月第1次印刷

印数: 0001—3000

ISBN 7-80045-033-3/U·1

定价: 2.80元

前 言

一、在60与70年代,一方面由于大气污染和石油危机的压力,另一方面由于电子技术的应用,汽车发动机的技术迅速发展。汽车年产数千万辆,从事研究和发展工作的科技人员数量突出,在技术第二第三线以及理论方面,研究与探索的工作繁多,牵涉学科甚广,并形成一些专门化学术领域。在闭关自守并经过“文革”之后,突然处于这种复杂情况之下,需要全面有所认识,才能判断我们急应致力的方向。

二、在教学中也应当考虑到这种情况。虽然针对专门化领域可以设专门课程或读专著,但一个人难以全面选读,况且产品发展中的问题大多并没有到形成学术体系的程度,也没有专著。因此若能以尽可能少的内容,而可了解近期发展有关的基本概念,将有助于提高判断方向的能力,并提供在需要时自行深入的基础。

三、汽车发动机的这种情况,不能要求内燃机专业统编教材解决。此外发动机性能是多方面情况的综合表现,在没有对各方面之间互相关系有所认识之前,对于单项问题的深入难以真正理解。因此在“文革”后重新招生时,清华大学汽车系内燃机专业的内燃机原理课程学时及内容没有增加,应用汽车专业的统编内燃机原理教材,再以此为基础增加汽车发动机原理的内容。

四、为了在尽可能少的学时内达到上述目的,决定以当前产品发展问题为纲,从恢复招生开始即进行准备,由1982年起,用挂图和记笔记的方式试行教学。在浩瀚的资料中选材、提炼和编排,颇费斟酌。对于一些探索方向的提法要恰如其份,更费心思。况且情况在不断变化,自己的认识也在逐渐深入,因而逐年的讲课内容都有所变动。目前似乎基本上可以暂时稳定,可以成文以利学习。全部讲课原为32小时(40学时),有教材后,讲课时间可更减少。

五、在编写中,偏重与产品发展直接有关的基本概念,而且使文字尽可能精简,以便于掌握要点和统观全局。有不为才能有所为,因而不重复内燃机原理教材已有内容,不牵涉与产品发展关系甚远的理论,不详述具体结构细节,不求面面俱到,更不考虑作为参考资料。

六、附自习选编文献,可有助于巩固正文所述概念,扩大理解范围和深度,并有益于提高工作能力。早有此想法并有所准备,但一直未能实施。现设想可以实现,却由于技术发展迅速,原选文献已不甚适宜。改选的文献数量较大,为减小篇幅,大部分改为文摘,这样也有益于突出所需重点。

七、组织这样的教材和这种编写办法,是为了适应我国当前特殊形势的需要,是一种新的尝试,希得到各方面的指教。

八、感谢中国汽车工程学会对本书编写的鼓励和对出版的支持。

目 录

前言

第一章 工作循环 (1)

第一节 概述 (1)

第二节 气体的热力性质和反应温度 (2)

第三节 燃料空气循环 (4)

第四节 循环模拟 (11)

第二章 汽车的使用油耗 (14)

第一节 概述 (14)

第二节 降低最低比油耗的探索 (16)

第三节 降低常用工况油耗的探索 (21)

第四节 产品发展 (22)

第三章 车用直喷式柴油机的

燃烧系统 (25)

第一节 概述 (25)

第二节 燃烧系的配合 (26)

第三节 喷油 (26)

第四节 空气运动 (28)

第五节 混合气形成 (29)

第四章 大气污染 (32)

第一节 概述 (32)

第二节 黑烟 (33)

第三节 排放CO、HC、NO_x (35)

第四节 汽车的排放 (38)

第五节 排放测定 (40)

第六节 工程问题研究举例 (41)

第五章 燃料和润滑油 (43)

第一节 车用燃料概况 (43)

第二节 汽油 (44)

第三节 轻柴油 (47)

第四节 醇类 (48)

第五节 润滑油 (48)

文摘

文摘一 CAD用于配气系 (SAE790277) (52)

文摘二 CAD用于歧管 (MTZ1978, 12) (56)

文摘三 CAD用于燃烧系 (FISITA865012) (63)

文摘四 车用柴油机发展现状 (FISITA865009) (69)

文摘五 (1) 绝热发动机 (SAE840431) (72)

(2) 低散热发动机 (SAE860317) (76)

文摘六 循环不均问题 (MTZ1978, 7/8) (79)

文摘七 汽油喷射(AE1984, 2/3) (81)

文摘八 直喷汽油机 (FISITA865004) (84)

文摘九 在缩口燃烧室中的空气运动 (FISITA865008) (88)

文摘十 小缸径轿车直喷式柴油机 (FISITA 865014) (92)

文摘十一 柴油机的排放 (FISITA865010) (98)

文摘十二 M15的应用 (MTZ1981, 4) (100)

文摘十三 M100的应用 (MTZ1982, 3) (104)

文摘十四 润滑油品级 (汽车学会1983年会论文) (107)

文选

文选一 稀混合气高压压缩比汽油机 (FISITA 865034) (109)

文选二 动力系统综合控制 (FISITA865028) (119)

文选三 HC排放 (1962SAE PaperNo.486B) (131)

第一章 工作循环

第一节 概 述

一、实际循环 (Actual Cycle) 循环情况决定性能。

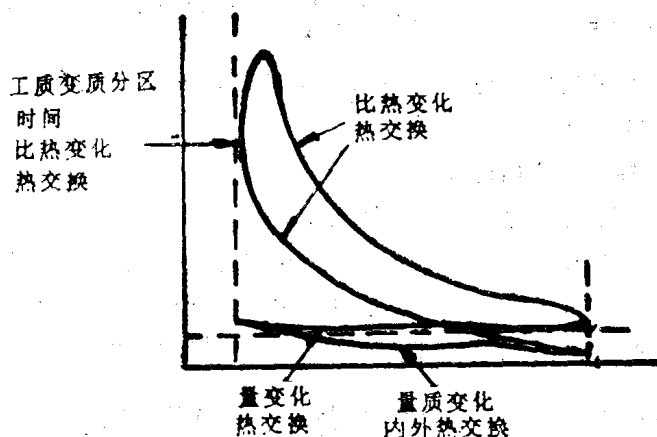


图1-1 循环情况

可分为两大部分：

- (1) 换气过程——性能好的前提。
- (2) 缸内过程——定换气情况下决定循环好坏。

研究时必须抽象，办法不同即形成不同理论循环 (Theoretical Cycle)，可无限多，但基本可分为三类。

二、空气标准循环 (Air Standard Cycle) 以等容加热说明。

假定前提是：

1. 忽略换气，只考虑缸内过程。
2. 作为封闭工质热力循环，等容加热及放热代表燃烧及排气。

3. 工质为空气，温度均匀，比热一定。

4. 压缩膨胀等熵。

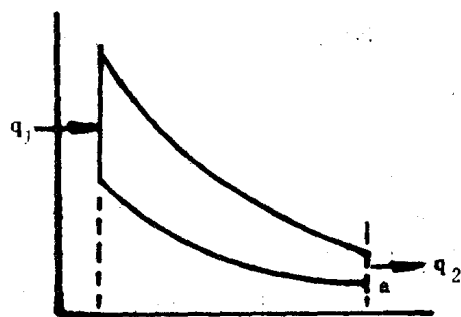


图1-2 空气标准循环

计算是由a点状况、压缩比 ϵ 及加热量 q_1 出发。特点是简单，可用简单热力学分析而有助于判断方向，在历史上起过重大作用。应用时需切记前提，否则可作出错误结论，而且结论即使方向对，数量也不可能相符。

三、燃料空气循环 (Fuel Air Cycle) 或理想循环 (Ideal Cycle 或 Vollkommen Motor)

假定前提是：

1. 忽略换气，只考虑缸内过程。
2. 计入工质更换。

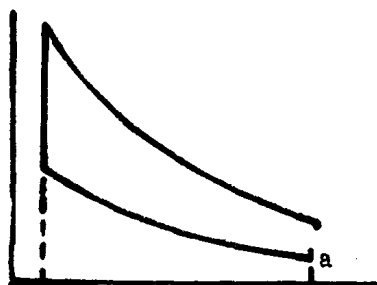


图1-3 燃料空气循环

工质性质（组成及比热）和反应按实际计算，但组成及温度取为均匀的，反应按化学平衡计算。

3. 绝热而无热交换。

计算是由a点组成（包括过量空气系数 α ）、状况及压缩比 ϵ 出发。特点是已计入物质本性，而人力可改变的因素假定为理想状况。于是所得理想循环效率 η_{id} ，可作为在出发条件下具体设计所能达到的极限，而相对效率 $\eta_{r,i} = \frac{\eta_i}{\eta_{id}}$ 可表示具体设计的完善程度。理想循环还

有助于判断潜力的大小和问题的所在，有助于理解参数改变对性能在数量上的影响。但所需应用的热力学和计算比较复杂。

四、循环模拟(Cycle Simulation)

全面考虑换气过程和缸内过程，而且全面使计算符合实际。虽然必有简化，但力求可根据结构图纸预计性能（Performance Prediction），或结合经验而预计性能。应用循环模拟可以节省试制试验的成本及时间，可以深入掌握规律而利于改进，可以优化设计。循环模拟的计算复杂，需用计算机进行，因而是性能方面用计算机辅助设计（CAD）的重要手段。

第二节 气体的热力性质和反应温度

一、单一气体热力性质

1. 内燃机有关气体可作为远离临界状态，符合状态方程 $p v = R_{m,0} T$ 。

2. 计入比热变化及结构内能则

(1) 由第一定律 $dq = de + p dv$,

对1kgmol
$$C_v = \left(\frac{dq}{dT} \right)_v = \frac{de}{dT},$$

可以证明 C_v 不因 v 的不同而变化，所以 C_v 和 e 只是 T 的函数，于是

$$e = \int_0^T C_v dT + e_0 = e(T) + e_0.$$

是否有内能为0的状态，物理学尚不明确。但计算定成分气体的状态变化时，无需 e_0 值。对于变成分气体则可用相对基准，如取二原子气体 $e_0 = 0$ 。 $e(T)$ 可以测知，但其数值随所用基准温度而不同。

(2) $h = e + p v = e + R_{m,0} T$,

于是 h 只是 T 的函数。

由于 $dh = de + p dv + v dp$,

所以 $dq = de + p dv = dh - v dp$,

而
$$c_p = \left(\frac{dq}{dT} \right)_p = \frac{dh}{dT},$$

于是 c_p 也只是 T 的函数。

$$h = \int_0^T c_p dT + h_0 = h(T) + h_0.$$

以 0°K 为基准温度时, $h_0 = e_0$ 。

3. 单一气体的 $c_v(T)$ 、 $c_p(T)$ 、 $e(T)$ 、 $h(T)$ 中, 知其一即可知其他, 于是气体热力性质资料中, 给出其中之一即可。例如 (Benson);

$$\text{O}_2 \text{ (J/kgmol): } h(T) = 3.43328T - 8.18100 \times 10^{-6}T^2 + 9.66990 \times 10^{-8}T^3 - 1.4439 \times 10^{-11}T^4$$

$$h_0 = 0$$

$$\text{H}_2\text{O: } h(T) = 3.74T + 5.66 \times 10^{-4}T^2 + 4.95 \times 10^{-8}T^3 - 1.82 \times 10^{-11}T^4$$

$$h_0 = -2.39225 \times 10^8$$

二、混合气体热力性质

1. 符合状态方程 $pV = R_{m,0}T$ 及 $PV = MR_{m,0}T$, 与组成成分无关。

2. 混合气体中成分 i 的莫尔百分数为 x_i , 则 $\sum x_i = 1$, 而混合气体的

$$e = \sum (x_i e_i(T)) + \sum (x_i e_{i,0}),$$

$$h = \sum (x_i h_i(T)) + \sum (x_i h_{i,0}).$$

可见只是简单综合。熵 s 不如此, 气体混合是非可逆过程。

三、反应热及热值

1. 定容反应热 (氧弹)

由第一定律 $dq = de + pdv$

$$Q_V = E_P - E_R = (E_P(T_R) + E_{P,0}) - (E_R(T_R) + E_{R,0}) = M_P c_{P,P}(T_R) - M_R c_{P,R}(T_R) + \Delta E_0$$

2. 反应热随反应物及反应温度而不同。

在标准温度 T_S 下反应热改正值为热值 $-Q_V$, (是高热值),

$$Q_{VS} = (M_P c_{P,P}(T_R) + M_P c_{P,0}) - (M_R c_{P,R}(T_S) + M_R c_{P,0}).$$

3. 以二原子气体 ($e_0 = 0$) 试验可测定 H_2O 等的 e_0 值。



图1-4 定容反应热

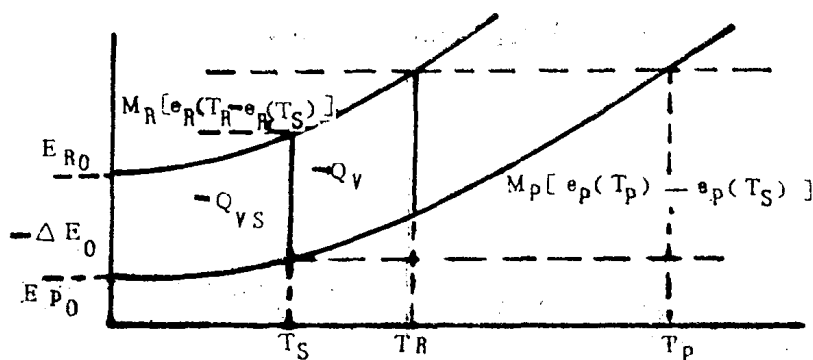


图1-5 定容反应图解

四、定容绝热反应温度

1. 由 $dq = de + pdv$ 可知反应中 $de = 0$, 于是

$$(M_P c_{P,P}(T_P) + M_P c_{P,0}) - (M_R c_{P,R}(T_R) + M_R c_{P,0}) = 0.$$

据此可确定 T_P 。

2. 可不用 e_0 而用热值计算(应当用低热值)。

由 Q_V 式知



图1-6 定容绝热反应

$$M_P c_{PO} - M_R c_{RO} = Q_{VS} - (M_P c_P(T_S) - M_R c_R(T_S))$$

于是 $M_P(c_P(T_P) - c_P(T_S)) - M_R(c_R(T_R) - c_R(T_S)) + Q_{VS} = 0$ 。

3. 简化计算用 $-Q_{VS} = M_P c_P(T_P) - M_R c_R(T_R)$ ，是有差别的。

4. 非定容非绝热的反应，需计入 dq 及 pdv 。

第三节 燃料空气循环

一、柴油机的燃料空气循环

1. 概况

假定缸内工质的成分及温度分布均匀(单区模型)，总过量空气系数 α 大而不考虑高温分解，且无热交换。

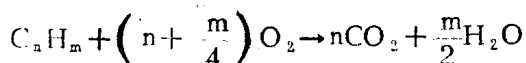
2. 通用式

(1) 组成成分变化

状态1 已知: $b_1 \text{CO}_2 + b_2 \text{H}_2\text{O} + b_3 \text{O}_2 + b_4 \text{N}_2 + b_5 \text{C}_n \text{H}_m$ ，
共 $M_1 \text{kgmol}$ ， $E_1 = E_1(T_1) + E_{10}$ 。

状态2 已知: V_2 ，燃烧 dM_f kgmol 。
未知: $a_1 \text{CO}_2 + a_2 \text{H}_2\text{O} + a_3 \text{O}_2 + a_4 \text{N}_2 + a_5 \text{C}_n \text{H}_m$ ，
共 $M_2 \text{kgmol}$ ， $E_2 = E_2(T_2) + E_{20}$ 。

可求知: 按当量反应



$$dM_f \left(n + \frac{m}{4}\right) dM_f \quad ndM_f \quad \frac{m}{2} dM_f$$

于是据反应平衡得:

$$a_1 = b_1 + ndM_f$$

$$a_2 = b_2 + \frac{m}{2} dM_f$$

$$a_3 = b_3 - \left(n + \frac{m}{4}\right) dM_f$$

$$a_4 = b_4$$

$$a_5 = b_5 - dM_f$$

可解得 $a_1 \dots a_5$ ，知 M_2

又 1kgmol 的反应结构内能变化为 Δc_0 ，则 dM_f 反应的变化为 $dM_f \Delta c_0$ ，于是知 $E_2 = E_2(T_2) + E_{20}$ 。

(2) 能量式

$$dQ - dW = dE$$

$$= (E_2(T_2) + E_{20}) - (E_1(T_1) + E_{10})$$

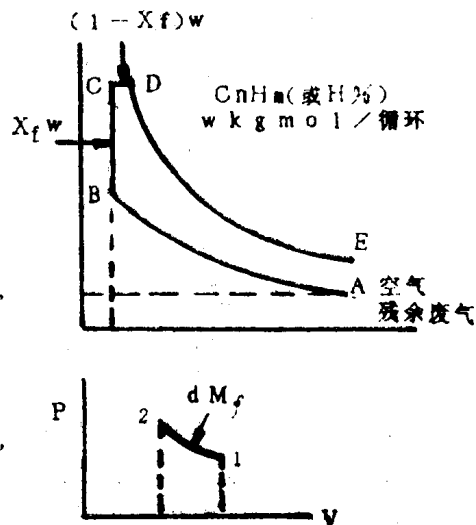


图1-7 柴油机的燃料空气循环

$$=E_2(T_2)-E_1(T_1)+dM_f \Delta c_0 \quad (1)$$

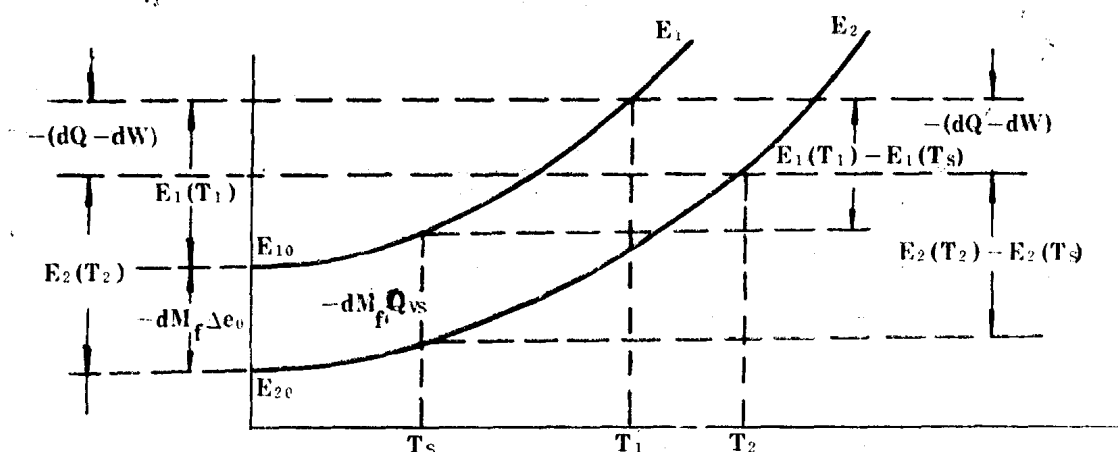


图1-8 一个步长的计算

若用热值计算, 则

$$dM_f Q_{vs} = E_2(T_s) - E_1(T_s) + dM_f \Delta c_0$$

因而 $dQ - dW = (E_2(T_2) - E_2(T_s)) - (E_1(T_1) - E_1(T_s)) + dM_f Q_{vs} \dots (1)'$

3. 各过程计算

(1) 绝热压缩: $dQ = 0$, 成分不变, 于是式(1)或(1)'简化为

$$-dW = E_2(T_2) - E_1(T_1).$$

由A点起计算一个步长:

$$E_2(T_2) - E_A(T_A) + \frac{p_A + p_2}{2} (V_2 - V_A) = 0.$$

$$\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_A V_A}{T_A}.$$

可得 T_2, p_2 . 逐点计算到B.

(2) 等容燃烧: $dQ = 0, dW = 0, dM_f = x_f w$, 于是由B可一步计算到C:

$$0 = E_C(T_C) - E_B(T_B) + x_f w \Delta c_0$$

或

$$0 = (E_C(T_C) - E_C(T_s)) - (E_B(T_B) - E_B(T_s)) + x_f w Q_{vs}$$

可确定 T_C , 再由状态式定 p_C .

(3) 等压燃烧: $dQ = 0, dW = p_C (V_D - V_C), dM_f = (1 - x_f) w$, 于是由C一步计算到D:

$$-p_C (V_D - V_C) = E_D(T_D) - E_C(T_C) + (1 - x_f) w \Delta c_0.$$

$$V_D = \frac{M_D}{M_C} \frac{T_D}{T_C} V_C.$$

可解得 T_D, V_D .

(4) 绝热膨胀与压缩同, 逐点计算.

(5) 于是可计算循环功及 η_{1d} .

二、汽油机的燃料空气循环

1. 概况

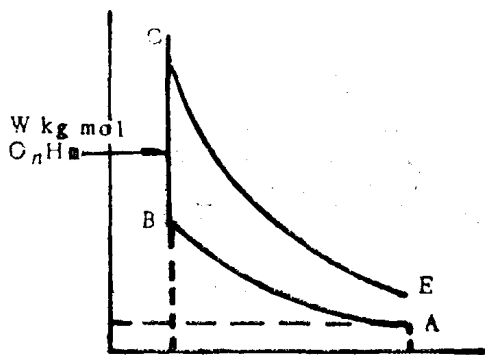
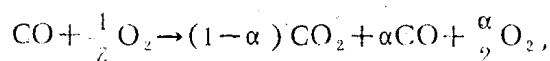


图1-9 汽油机的燃料空气循环

可冷凝于高温生成的情况。

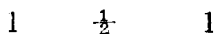
(2) 一种反应按温度处于平衡状况时, 例如



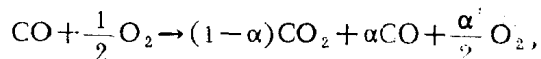
需知分解度 α , 才知成分组成和放出的化学能, 才可能知温度。分解度可由平衡常数计算。

(3) 根据化学热力学, 一个孤立系统内部成分可变时, 当平衡于熵最大状况($dS=0$)。于是可以证明, 在定 T 、 p 下, 将平衡于Gibbs自由能 $G=H-TS$ 最小的情况($dG=0$)。据此可得平衡常数 K_p , 其值可按反应物的热力性质计算(见R. S. Benson: Advanced Engineering Thermodynamics)。 K_p 只是反应及 T 的函数。

(4) 如对于反应 $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$



已知某 T 下的 K_p 值, 将情况表示为:

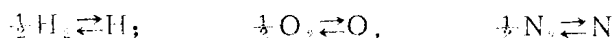


总压力为 p , 则
$$K_p = \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}} p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \sqrt{\frac{2+\alpha}{\alpha}} \sqrt{\frac{1}{p}}$$

于是可求知分解度 α , 因而可知组成成分。分解度不仅与反应及 T 有关, 也随反应成分量和总压力 p 而变。

(5) 进行化学平衡计算时, 需确定考虑哪些反应, 应当是实际存在的反应, 而且该反应的 K_p 值已知。

例如 C_2H_2 + 空气的燃烧平衡, 考虑少时已有下列反应:



于是成分有 H_2O 、 H_2 、 OH 、 H 、 CO_2 、 CO 、 N_2 、 NO 、 N 、 O_2 、 O 。全面平衡的计算工作量已经很大。

有人计算 CH_4 + 空气而 $\alpha=1$ 时燃烧生成物平衡状况, 如图1-10所示。

由图1-10可见, 在 2500°K 以下, 分解很少, 但在 2500°K 以上, 则分解迅速增多。

NO在排气温度下，平衡量不多，但因冷凝而成为排放难题。均匀混合气火焰传播燃烧时不出现C，但强爆震时可出现。

有人计算C₆H₆+空气在不同α时的燃烧温度。

由图1—11可见，计算温度符合实际。α偏出1多时，分解的影响小。α~0.9时温度最高，这有利于火焰传播。

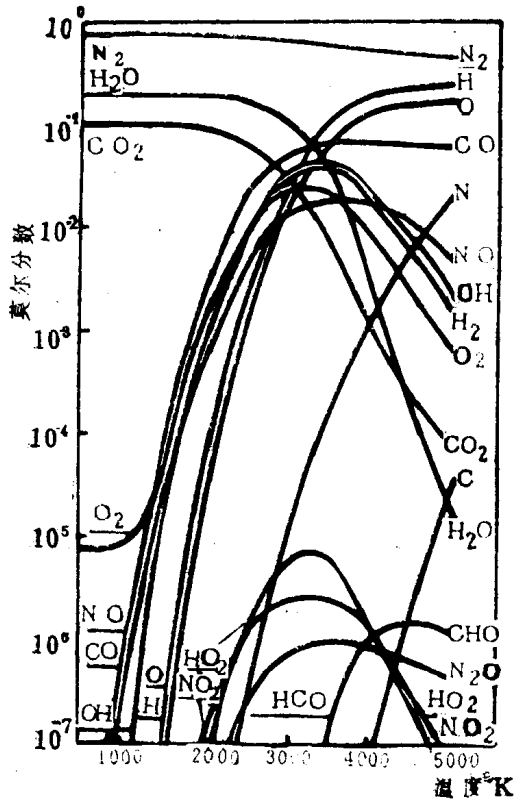


图1-10 平衡计算结果

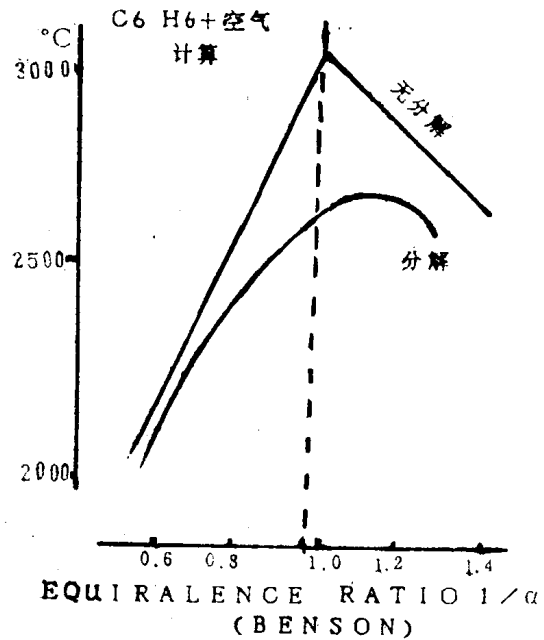
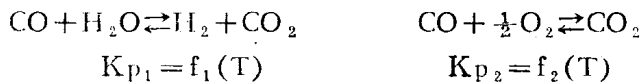


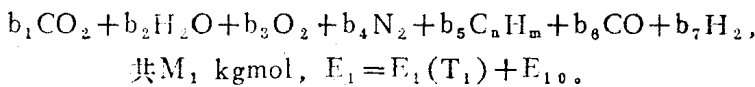
图1-11 不同α时的燃烧温度

3. 通用式 为了简便说明，只考虑两平衡反应：

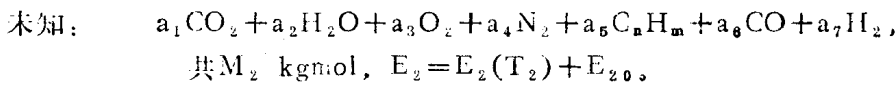


(1) 组成成分

状态1已知：



状态2已知： v₂, 燃烧dM_f kgmol.



按原子数或分子数平衡得：

$$\begin{aligned} \text{C:} \quad & b_1 + b_6 + nb_5 = a_1 + a_6 + na_5 \\ \text{H:} \quad & 2b_2 + mb_5 + 2b_7 = 2a_2 + ma_5 + 2a_7 \\ \text{O}_2: \quad & \frac{b_2}{2} + b_3 + \frac{b_6}{2} = \frac{a_2}{2} + a_3 + \frac{a_6}{2} \end{aligned}$$

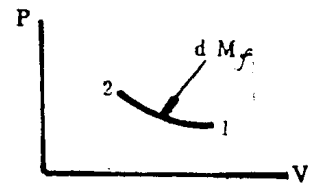


图1-12 一个步长的计算

$$N_2: \quad b_4 = a_4$$

$$C_nH_m \quad b_5 = a_5 + dM_f$$

$$\text{据化学平衡知: } K_{p1} = f_1(T_2) = \frac{p_{CO_2} p_{H_2}}{p_{CO} p_{H_2O}} = \frac{a_1 a_7}{a_6 a_2},$$

$$K_{p2} = f_2(T_2) = \frac{p_{CO_2}}{p_{CO} p_{O_2}^{1/2}} = \frac{a_1}{a_6} \sqrt{\frac{M_2}{a_2 p_2}}.$$

于是有7方程式, 而有9未知数 $a_1 \cdots a_7$ 、 T_2 、 p_2 , 不能解。

(2) 能量式

$$dQ - dW = E_2 - E_1$$

$$\begin{aligned} &= (a_1 e(T_2)_{CO_2} + a_2 e(T_2)_{H_2O} + a_3 e(T_2)_{O_2} + a_4 e(T_2)_{N_2} + a_5 e(T_2)_{C_nH_m} \\ &\quad + a_6 e(T_2)_{CO} + a_7 e(T_2)_{H_2}) - (a_1 e_0 CO_2 + a_2 e_0 H_2O + a_3 e_0 O_2 + a_4 e_0 N_2 \\ &\quad + a_5 e_0 C_nH_m + a_6 e_0 CO + a_7 e_0 H_2) - E_1 \end{aligned}$$

$$\text{其中 } dW = \frac{p_2 + p_1}{2} (V_2 - V_1), \quad dQ = 0.$$

$$(3) \text{ 状态式 } p_2 V_2 = M_2 R_{m.o.1} T_2.$$

综合上述9式, 可同时解得成分及状态。

4. 各过程计算

(1) 压缩 不计压缩中微量反应, C_nH_m 按理想气体对待。逐点计算, 与柴油机相同。

(2) 燃烧 按化学平衡计算, 一步完成。

(3) 膨胀 按化学平衡逐点计算。

三、燃料空气循环计算结果

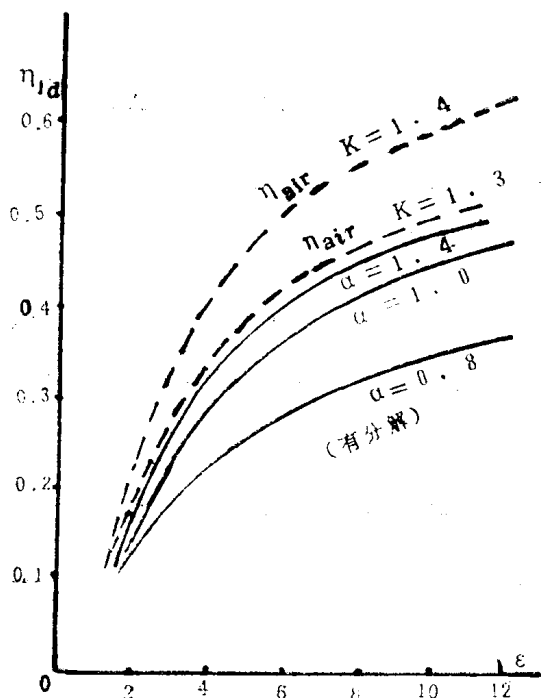


图1-13 等容燃烧的 η_{id}

1. 随所用热力性质系统不同, 所考虑化学反应不同, 燃烧假定条件不同, 则循环的计算和结果也有所差异。

2. 汽油机

(1) η_{id} 与 η_{air} 随 ε 而变化的规律相似, 但 η_{id} 值较低。在 $\varepsilon=8$ 、 $\alpha=1$ 的情形, $\eta_{air}=0.566$, $\eta_{id}=0.444$, 比值 $\eta_{id}/\eta_{air}=78.4\%$ 。空气在 2500°C 与 500°C 下实际瞬时比热的比值是81%, 平均比热比值是59%。可知比热变化是 η_{id} 低于 η_{air} 的重要原因。此外还有高温分解的影响, 如图1-14所示。

(2) 从空气标准循环不可能判断 α 对 η 的影响, 从燃料空气循环可知, α 大则 η_{id} 高。

3. 柴油机 循环最高压力对 η_{id} 有明显影响。见图1-15。

四、与实际对比

1. 1930年发表车用产品发动机的情况如

图1-16。

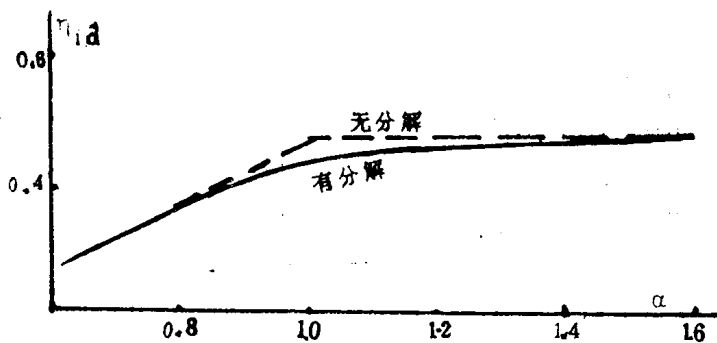


图1-14 分解的影响

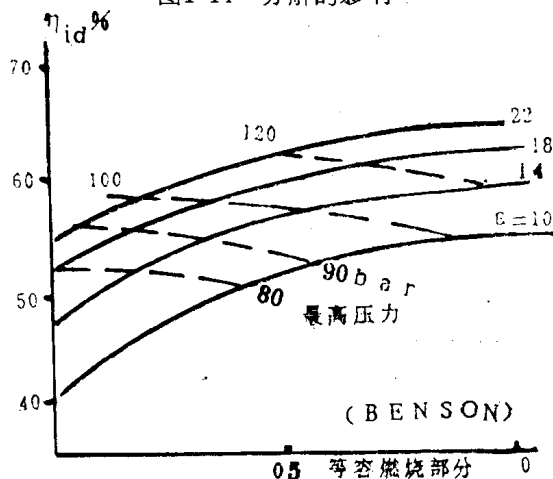


图1-15 最高压力的影响

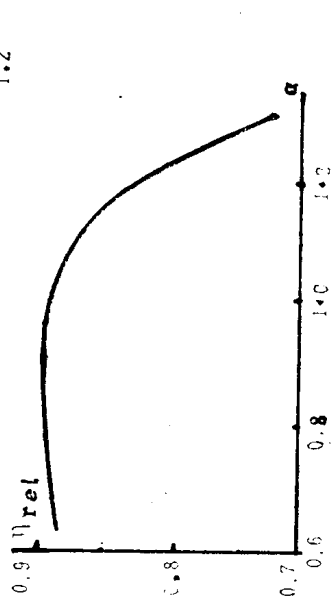
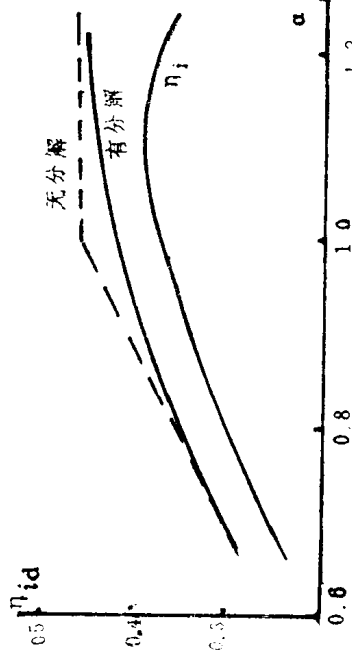
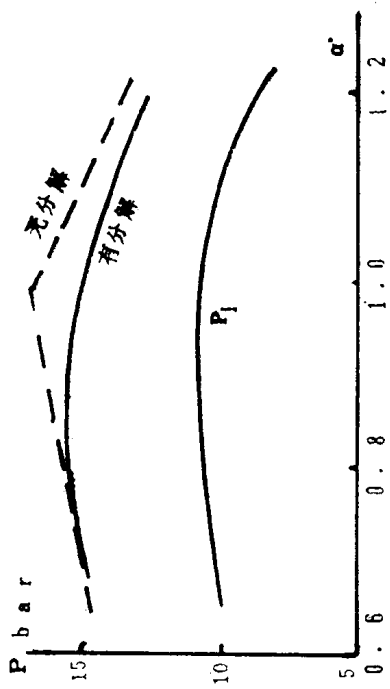
2. 举例分析

	$\eta=1$	$g_e=63.2\text{g/psh}$	
Carnot(300-2500°K)	0.88	71.8	40.2(循环, 包括 ϵ)
otto, $\epsilon=8$ 时			
η_{air}	0.565	112	33(工质, 包括 α)
$\eta_{id}(\alpha=1.1)$	0.435	145	
$\eta_i(\eta_{rel}=0.85)$	0.37	171	26
$\eta_e(\eta_M=0.80)$	0.296	214	
			33

(1) 循环的潜力最大, ϵ 的影响也明显, 例如在 $\alpha=1.2$ 时

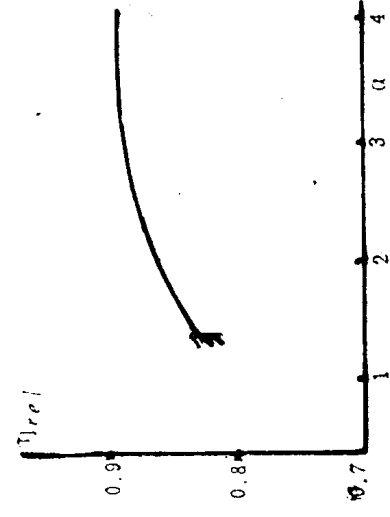
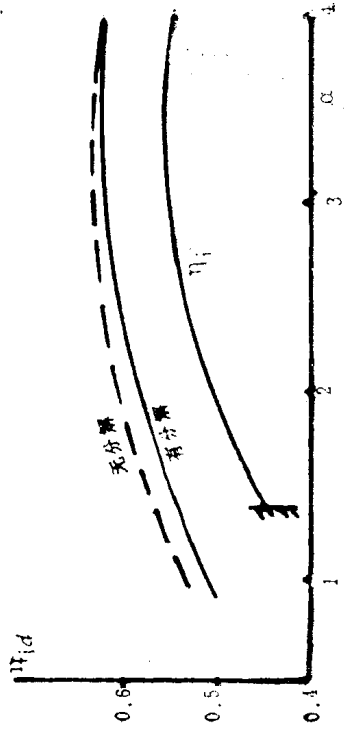
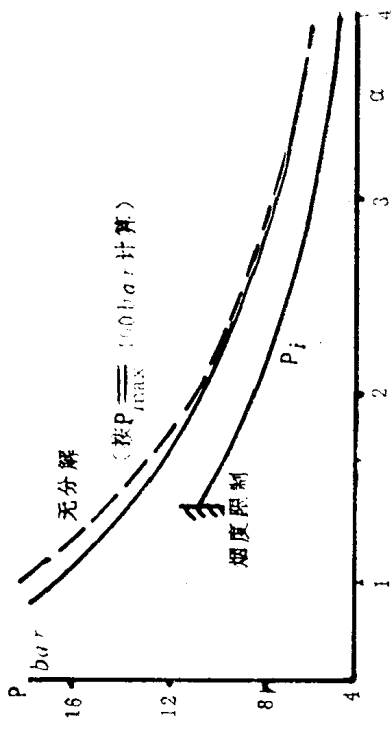
$\epsilon=8$	$\eta_{id}=0.445$	13%
10	0.476	
12	0.503	

(2) 汽车发动机所用工质, 难以不用空气, 但 α 有影响。在 $\alpha < 1$ 时, 因过浓而 η 下降



汽油机 $\epsilon = 7$ 满负荷定转速
(F. PISCHINGER)

图1-16(1) 汽油机不同 α 下的 η



柴油机 $\epsilon = 15$ 转速一定 (F. PISCHINGER)

图1-16(2) 柴油机不同 α 下的 η

很多。在 $\alpha > 1$ 时, 于均匀混合气起火界限以内, 对 η 影响不大。例如在 $\varepsilon = 10$ 时

$\alpha = 0.8$	$\eta_{id} = 0.365$	20%
1.0	0.457	
1.2	0.476	2.9%
1.4	0.49	

(3) $\eta_{r,i}$ 代表 η_i 与 η_{id} 的差别, 原因如下。

(a) 燃烧过程中, 缸内工质成分及温度并非分布均匀。在火花点火或柴油喷射的情况下, 这都不可避免, 均匀反应的设想尚难实现。

(b) 燃烧不完全。汽油机在 $\alpha > 1$ 情况下, 柴油机在烟度容许情况下, 燃烧效率皆可 $> 99\%$ 。

(c) 冷却损失。到冷却系的热量多, 但在燃烧及膨胀过程中的传热量只占一部分, 而其中可转变为有效功的又只占小部分。

(d) 等容度(放热规律)。影响明显。

(4) 机械损失有潜力, 对汽车发动机尤其重要。

第四节 循环模拟

一、缸内过程模拟

1. 燃料空气循环的计算已如上述, 计算中对燃烧过程的假定前提是:

- (1) dM_i (放热规律) 已知, 而且是人为规定。
- (2) 化学反应在柴油机是只生成 CO_2 及 H_2O , 在汽油机是按化学平衡计算。
- (3) 缸内工质的成分和温度总是分布均匀(单区模型)。

同时对传热的假定是:

- (4) $dQ = 0$ 。

2. 在实际发动机中:

(1) dM_i 决定于许多因素。例如在汽油机有汽油的蒸发分配、缸内空气运动、火花点火后的化学反应速率及起火、燃烧室空间分布及火焰传播速等。在柴油机则牵涉到喷油规律、油注的雾化及发展、空气运动、传热传质混合、化学反应速率和发火延迟、预混燃烧及渗透燃烧等。

(2) 不论是汽油机还是柴油机, 燃烧局部的温度都高, 必有分解。而且N有关的反应速度较慢, 在状态迅速变化的情况下, 需按反应动力学计算。

(3) 不论是汽油机还是柴油机, 燃烧都是逐步扩展的, 缸内工质的成分和温度极不均匀。

(4) 缸内工质不匀, 各处壁面层的状况不同, 传热系数难定, 辐射传热更难确定。幸而 dQ 的变化对 η 影响较小, 可以利用宏观的经验资料, 但要解决局部热流及热应力, 则难以计算准确。

3. 上述诸环节都已有很多研究, 都已有的模拟程序, 种类很多而繁简不同。也有综合而成的各种缸内过程模拟程序, 可针对机型结合经验资料而用于实际设计, 甚至也有了预测爆

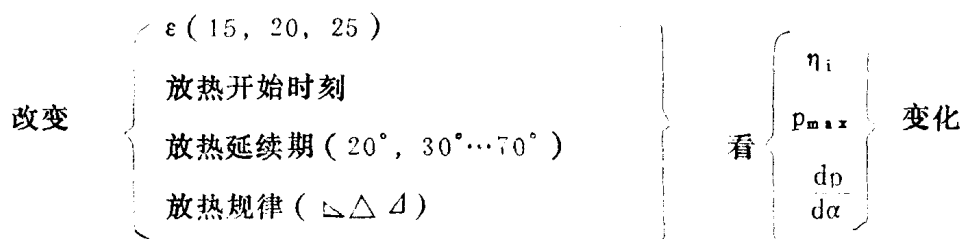
震的程序。但是这些程序还不到可以普遍适用的成熟程度。细致的大型程序应用复杂，尚难在设计工作中应用。

二、缸内过程模拟应用例

由燃料空气循环可得到比空气标准循环更深入的理解，与此类似，即使是简略的循环模拟计算，也可用以得出更有价值的判断。在计算机应用初期的1960年，林慰梓所发表的一项工作，可作为这种例子。

1. 目的 了解直喷式柴油机燃烧过程参数对性能的影响。

2. 算法 针对目的简化条件：用单区模型，定 α ，燃烧放热逐点计算，不计热分解，传热量按放热量简单比例计算。



3. 结果中有下列判断：

(1) 放热早则 p_{max} 、 $\frac{dp}{d\alpha}$ 高。放热规律图重心在上死点时， η_i 最高。

(2) 放热延续期为 40° ；放热时刻在 η_i 最大时，改变放热规律形状的计算结果：

	$p_{max} \text{ lb/in}^2$			$\frac{dp}{d\alpha} \text{ max lb/in}^2$			η_i		
	$\epsilon=15$	20	25	15	20	25	15	20	25
$\triangle$	1100	1500	2100	73	108	143	.511	.546	.576
Δ	1050	1550	2070	39	74	90	.506	.540	.566
∇	1050	1400	1700	37	36	—	.495	.522	.547

由此可知， ϵ 对 η_i 有明显影响，但对 p_{max} 及 $\frac{dp}{d\alpha}$ 影响更大得多。放热规律形状对 η_i 影响小，只是形状初期对 $\frac{dp}{d\alpha}$ 影响大。

(3) $\epsilon=15$ ，上死点开始放热，放热规律 $\triangle$ ，改变放热延续期的计算结果：

延续期	$p_{max} \text{ lb/in}^2$	$\frac{dp}{d\alpha} \text{ max lb/in}^2$	η_i
30°	980	75	.514
40°	860	58	.494
50°	790	47	.476
60°	730	40	.455
70°	700	33	.439

由是可知，放热延续期短则 η_i 高（若放热在最有利时刻，则 η_i 变化较小），但到 40° 以下 p_{max} 及 $\frac{dp}{d\alpha}$ 急增。