

发动机的工作循环 与燃烧速度

〔苏联〕И. И. 章 别 著

陈 健 译 郑 锦 校



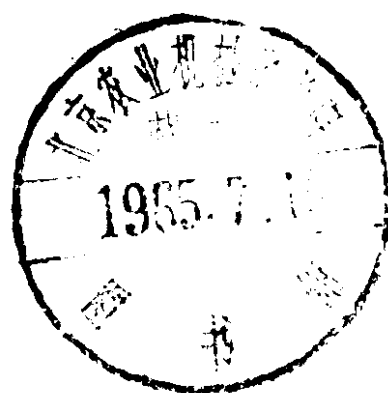
中国工业出版社

ND 17106

发动机的工作循环 与燃烧速度

〔苏联〕И.И. 韋 別 著

陈 健 译 郑 鎬 校



中国工业出版社

本书在鏈鎖反应概念和綜合試驗材料的基础上，找出了燃料在发动机中燃烧过程期間进展的規律，并以数学方程式把这个規律表示出来。提出了利用燃烧速度方程式、热力学和机构学方程式計算发动机工作循环的新方法，并給出計算示例。闡述了燃烧过程参数（燃烧延續時間，燃烧品质，燃烧效率以及点火提前角）对发动机功率、单位燃料消耗量和发动机寿命的影响。确立了正常燃烧的最大速度与爆燃之間的关系。敘述了根据示功图直接确定燃烧速度参数的方法，并列例子。最后，推导出新的鏈鎖反应动力学方程式。

本书供內燃机专业的工程技术人员和科学工作人员、高等学校的研究生和大学生使用。

И. И. Вибс
НОВОЕ О РАБОЧЕМ ЦИКЛЕ ДВИГАТЕЛЕЙ
СКОРОСТЬ СГОРАНИЯ И РАБОЧИЙ ЦИКЛ
ДВИГАТЕЛЯ
МАШГИЗ Москва 1962 Свердловск

* * *

发动机的工作循环与燃烧速度

陈 健 譯 郑 鎬 校

*

第八机械工业部图书杂志編輯部教材編輯室編輯（北京北河沿 51 号）

中国工业出版社出版（北京修德閣路內10号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 9 ·字数 212,000

1965年 5 月北京第一版·1965年 5 月北京第一次印刷

印数 0001—3,140 ·定价(科五) 1.20 元

*

統一书号： K15165 · 3703(八机-70)

目 录

緒 論	1
第一章 发动机中燃烧速度計算工作的簡述	5
1. 精确計算燃烧綫的几何形状法	7
2. 描述柴油机中燃烧速度的方程式	8
3. 根据火焰前鋒移动速度計算燃烧速度(电火花点火发动机)	25
第二章 发动机中的燃烧速度規律	31
4. 发动机中的燃烧速度方程式	32
5. 用試驗数据驗證燃烧速度規律	48
6. 燃烧速度方程式及参数分析	71
7. 其它形式的燃烧方程式	84
第三章 在考虑燃烧速度和点火提前角的情况下	
对发动机工作循环进行計算	87
8. 进气和压縮过程的計算	88
9. 工作气体等压比热和等容比热之比值的計算	92
10. 燃烧过程的計算	108
11. 膨胀过程的計算	122
12. 循环功, 平均压力, 效率和单位燃料消耗量的計算	123
13. 工作循环計算举例	125
第四章 电火花点火发动机工作循环的研究	159
14. 概述和原始数据	159
15. 燃烧延續時間对工作循环的影响	161
16. 燃烧品质指数对工作循环的影响	168
第五章 发动机中的最大正常燃烧速度对爆燃的影响	178
17. 現代的爆燃理論	178
18. 初級压縮波的形成	180
19. 着火核心和二次冲击波的产生	183

IV

20. 爆燃与正常燃烧加速度的关系·····	184
21. 燃烧延續時間和燃烧品质指数对最大燃烧速度的影响·····	189
第六章 柴油机工作循环的研究·····	193
22. 研究方法和原始数据·····	193
23. 燃烧延續時間对柴油机工作循环的影响·····	196
24. 燃烧品质指数对柴油机工作循环的影响·····	206
25. 压缩比, 有效燃烧系数和过量空气系数对柴油机工作循环 的影响·····	214
26. 增压对柴油机工作循环的影响·····	223
第七章 根据示功图分析燃烧过程的新方法·····	228
27. 概述·····	228
28. 分析示功图时所用的基本方程式和公式·····	230
29. 研究燃烧过程的第一种方法·····	232
30. 研究燃烧过程的第二种方法·····	236
31. 根据示功图分析燃烧过程的示例·····	239
第八章 新的鏈鎖反应綜合动力学方程式·····	245
32. 有效中心相对密度方程式·····	245
33. 鏈鎖反应动力学方程式·····	247
34. 用試驗数据檢驗动力学方程式·····	251
35. 动力学方程式的簡要分析·····	253
附录·····	257
参考文献·····	279

緒 論

在內燃机中，燃料的化学能在工作循环中轉化为机械能。发动机的工作循环是在气缸內周期重复的綜合的 物理和物理-化学过程。

发动机的功率、經濟性、工作可靠性和寿命都取决于工作循环的完善程度。这就使发动机的工作循环具有重大的意义。

标志发动机工作循环品质的指标有：单位功指标——平均指示压力；經濟指标——指示效率；曲軸連杆机构零件上的机械負荷和动力負荷的指标——工作气体最大压力和燃烧过程期間的压力增长速率；热力負荷指标——气体的最高溫度和气体在膨胀結束时的溫度；工作气体在排气过程开始时的状态指标（当排气提前相位相同时）——气体的压力和溫度。此外，在工作循环期間，工作气体的压力和溫度不断变化，这就决定了产生向气缸壁的传热过程。

从发动机的示功图可以得出工作循环的指标。因而可見，示功图反映出发动机工作循环的主要品质。

現在，要設計和改进发动机，或者简单地評定发动机产品，都必须取得示功图并对它們进行全面分析，否則是不可思議的。

上面敘述的发动机工作循环及其示功图的意义，早就促使工程研究人員和科学工作者創立反映发动机真实工作循环的理論模型。这些模型、理論循环和它們的曲綫图，首先是建立在热力学的基础上。理論循环和它們的曲綫图如果用数学方法描述，就可以使用一般的分析方法找出各个因素与我們关心的循环指标之間在数量上的关系。

接近发动机工作循环的第一个理論模型，是通常在工程热力学教科书中研究的著名的理想循环：等容加热、等压加热和混合

加热循环。

虽然在理想循环中，真实的燃烧过程只得到简要的研究，但由于研究了这些循环，因而得到了基本上能正确反映循环效率、平均压力与压缩比 ϵ 关系的公式。随着 ϵ 的增大，循环效率 η_t 按下面规律增加。

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$$

式中 k ——压缩和膨胀过程的绝热指数，等于等压比热与等容

$$\text{比热的比值 } k = \frac{c_p}{c_v}。$$

这个基本规律已经被发动机的整个发展历史所证实。现在设计师、石油工艺师和各个专业的研究人员，都在为进一步提高轻质燃料发动机的压缩比而继续工作着。

研究理想循环的结果，可得出这样的结论，即缓慢的燃烧过程（在 $p = \text{常数}$ 下加热）效率降低。而快速的燃烧过程（在 $v = \text{常数}$ 下加热）则相反，效率提高，并且第一种情况可使最大气体压力降低，而第二种情况使最大气体压力增高。

因为在研究理想循环时，没有考虑工作气体的化学成分变化，进气和排气过程的流动损失（充气系数等于 1），比热与温度的关系，汽缸壁传出的热损失和不完全燃烧所产生的热量损失，所以研究结果只是定性地而不是定量地反映出某些因素对工作循环指标的影响。也就是说，由此得到的循环效率、平均压力和最大压力以及其它指标的绝对值，都比发动机中真实工作循环相应的数值高些。

比较接近发动机真实工作循环的第二个理论模型，是根据莫斯科高等工业学校 В. И. 格里涅维茨基 (Гриневецкий) 教授提出 (1906~1907 年)，以后由苏联科学院通讯院士 Н. Р. 布里林格 (Брилиг)、院士 Б. С. 斯捷契金 (Стечкин) 和教授 Е. К. 马辛克 (Мазинг) 发展的方法所拟定的^[3]。用这个方法计算发动机的工作循环，考虑了工作气体化学成份在燃烧过程中的变化、进气

和排气过程中的液力损失、比热与温度的关系和由汽缸壁传出的热损失及由于不完全燃烧所产生的热量损失，有时也考虑燃烧产物的裂解。

就其广泛性和持久性意义说来，B. И. 格里涅维茨基提出的方法，可以称得上是发动机热计算的经典方法。

如果原始数据选择得正确，那么按 B. И. 格里涅维茨基的方法进行热计算，所得到的循环平均指示压力和效率，可以相当满意地和按示功图求得的数值相符合。

然而，在燃烧过程中，气体的压力和温度随时间或者随曲轴转角的变化，不可能用经典的热计算方法求得。所以，象最大循环压力这样的指标，在混合加热的情况下，就不可能用计算的方法求得，而必需给出。在等容加热的情况下，用计算法得到的最大气体压力要通过“目测”来修圆示功图顶端以进行校正，也就是说，在这种情况下，在确定循环最大压力方面，允许有一些误差。循环的另一个重要指标——压力增长速率，根本不可能用这个计算方法求出。在热计算中，同样不考虑点火提前角对工作循环指标的影响。而实际上，这个因素的影响是很大的。这个方法的缺点是在于，在经典热计算方法中，把燃烧过程概括成理想循环，在选择热量利用系数 ξ 和膨胀多变指数 n_2 的数值时，不考虑很近似的计及燃料在膨胀线上的后燃现象。

由于在考虑实际的放热速度情况下，计算燃烧过程期间（燃烧线）气体压力变化问题的复杂性，以致直到目前为止，还未能消除经典热计算方法的这个缺点。

近来迫切需要解决这个问题。

目前，发动机中的混合气形成和燃烧过程的完善，实际上已经超过了理论的发展。我们不是知道柴油机中的 M 过程（油膜混合气形成和燃烧）和汽化器式电火花点火发动机中的火焰点火吗？它们在改善发动机工作方面开辟了新的一页。柴油机在实现 M 过程时的无声燃烧及工作柔和与燃烧过程的进展有关，而火焰点火则使稀混合气的燃烧速度剧烈升高。很明显，如果找出了控

制燃烧过程发展的规律性，则进一步改善发动机各种工况下的工作循环是比较方便的。

在本书中，作者在鏈鎖反应理論和綜合大量試驗材料的基础上，得出表示发动机內燃烧过程动力学規律的数学方程式。这些方程式完滿地描述了柴油机中、电火花点火发动机中以及气流中燃烧过程的实际进展情况。燃烧动力学規律的数学表达式相当简单，而且这些方程式仅包含燃烧动力学的两个特征参数——一个是质方面的参数，一个是量方面的参数。

找出燃烧过程进行的規律以后，如果除了一般数据以外，給出平均燃烧速度（或者燃烧延續時間）、最大燃烧速度的相对時間和点火提前角，就可以計算燃烧綫和整个循环。作者引用了这种計算的詳細方法。

工作循环的新理論模型，更精确地反映出发动机真实循环中的內在联系的規律性。它不仅可以算出工作循环的图形及其指标，并且也为探求工作循环指标与其某些特征参数之間的数量关系而进行的发动机工作循环的全面理論研究奠定基础。利用这些理論研究的結果，就可以对每一具体情况找到最适宜的工作循环。

在現今的条件下，由于电子計算机的出現，給理論研究开辟了寬广的可能性。拟定精确計算发动机工作循环的数学方法，首先是拟定計算燃烧綫的数学方法，就具有特別重要的意义。

发动机中燃烧速度计算工作的简述

精确地计算燃烧过程的方法，是根据二个原则上不同的方向拟订出来的。

第一种计算方法，是根据某一个简单的数学方程式或几个方程式近似地表示示功图燃烧线，即气体压力随容积变化 $p=f(v)$ 或随曲轴转角变化 $p=F(\varphi^\circ)$ 的曲线，而进行计算的。因为燃烧线的形状不仅取决于燃烧速度和燃烧完善度，同时还取决于热力学和局部传热的规律，与点火提前角有很大的关系，所以上述方程式综合地表明了所有因素对燃烧线影响的最结果。这种方法不能用来在理论上说明各个因素对燃烧线，也就是对工作循环及其指标的单独影响，这就是这种方法的缺点。这种计算方法可以称为精确计算燃烧线的几何形状法。

第二种计算燃烧线的方法，是以热力学方程式（第一定律等）和放热速度方程式作为基础。气体状态变化的微分方程式可以写为〔4〕

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dq}{dv} = \frac{v}{k-1} \left(\frac{dp}{dv} + k \frac{p}{v} \right), \quad (1)$$

式中 q ——用于提高气体内能和作功的外加热量。在燃烧过程的情况下，就是燃烧热；

p ——气体压力；

v ——气体的比容；

$k = \frac{c_p}{c_v}$ ——等压比热和等容比热的比值；

$A = \frac{1}{427}$ ——热功当量。

将方程式(1)应用于发动机燃烧过程, 进行积分, 就得到燃烧綫 $p=f(v)$ 的普遍方程式。用这个方程式可以預先算出曲綫 $p=f(v)$ 与具体燃烧过程采用的原始条件(参数)之間的关系。或者解决相反的問題, 即研究表明燃烧过程参数的試驗曲綫。

但是, 对方程式(1)进行积分是困难的。最大的困难在于揭露发动机內放热速度的規律性。

将方程式(1)应用于发动机, 則(1)式中的 $\frac{dq}{dv}$ 是对容积取导数的热量利用速度。如果用对時間取导数的 $\frac{dq}{dt}$ 或者对曲軸轉角取导数的 $\frac{dq}{d\varphi}$ 来表示热量利用速度就比較方便。在方程式(1)中, 比容 v 的变化最好以時間 t 或以曲軸轉角 φ 表示, 这利用曲柄連杆机构的运动規律是很容易实现的。在燃烧过程中, 燃料的化学能不断地轉变为热能。这些热能部份地用来提高工作气体的內能和作功, 部份地消耗在对汽缸內壁的放热和部份燃烧产物分子的裂解上。根据这种情况, 热量利用的相对速度可写为:

$$\frac{dq}{d\varphi} = q_{\text{свс}} \frac{dx}{d\varphi} - \left(\frac{dq_w}{d\varphi} + \frac{dq_{\text{двс}}}{d\varphi} \right), \quad (2)$$

式中 $q_{\text{свс}} \frac{dx}{d\varphi}$ ——相对放热速度;

$q_{\text{свс}}$ ——在整个燃烧过程期間实际放出的全部热量;

$\frac{dx}{d\varphi}$ ——相对燃烧速度;

x ——曲軸轉过 φ 角时, 烧掉的燃料百分数;

$\frac{dq_w}{d\varphi}$ ——向汽缸內壁放热的相对速度;

$\frac{dq_{\text{дуч}}}{d\varphi}$ ——燃烧产物分子裂解消耗热量的相对速度。

方程式(2)是相对能流速度的代数和。若所有的热量都对时间取导数,则这个方程很容易变成绝对能流速度的代数和。

这样,第二种计算燃烧线的方法要预先确定这个过程期间的燃烧速度 $\frac{dx}{dt}$ (或 $\frac{dx}{d\varphi}$) 的变化规律。函数式 $x = F(t)$ 常常称为燃烧规律。

要找出燃烧过程期间的燃烧速度变化规律,必须把它与时间联系起来。这种想法导出一个原理:即时间是运动物质存在的基本形式之一[1,2]。时间不能与物质过程分开,它与物质和物质运动不可分割地有机地联系在一起。所以可以说,物体或物系在运动过程期间表现出的时间性与它们的物理化学性质有规律的联系在一起。

科学上知道物体或物系的物理化学性质与时间有规律联系的许许多多事例(物体机械运动、传热、扩散、化学动力学等规律)。

1. 精确计算燃烧线的几何形状法

现在作为特例来研究 К.И. 根基 (Генкин) [5] 提出的电火花点火发动机中燃烧线的计算方法。在下列这段上的压力变化 $p = f(v)$: 从可见燃烧开始到上止点用立方抛物线近似地表示; 以上止点到 p_{max} ——用椭圆曲线表示; 从 p_{max} 到 T_{max} ——用平方抛物线表示; 从 T_{max} 到有效放热终点——用多变曲线表示。

关于上述系统, К.И. 根基说道: “用几个不是一般的几何图形近似地表达热力学的规律, ……”

几何形状法的实质是用外界对工作循环示功图的这个复杂线段的描绘代替决定燃烧线 $p = f(v)$ 特点的内因。这就加深了几何概念的应用。燃烧线是复杂的曲线, 它的性质取决于本质不同的各种规律的相互影响, 这些规律是: 热力学和机构学的规律(考虑加热的特点和气体容积变化); 化学动力学的规律(考虑化学能

轉变为热能)；在某种程度上也与传热規律有关(考虑流向汽缸壁的部分热量損失)，而只与几何規律无关。因此，用于描述燃烧过程的几何参数(如从 $p_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 膨胀的程度，表征拋物綫曲率性质的系数等)一点也不能表示燃烧过程的特征，而只能近似地描述上述各規律綜合影响的最終結果。所以，不能借助这些几何参数获得有关某一物理化学因素单独地对燃烧过程影响的任何清晰概念。

上面所述的計算方法不可能預先算出燃烧曲綫，这可从 К. И. 根基自己的說明得到証实。他說：“……所說的这种方法不能預先算出燃烧过程的进展”[6]。因此，在理論上研究燃烧过程各个参数对工作循环主要指标的影响，就不能应用这种方法。

2. 描述柴油机中燃烧速度的方程式

第二种計算燃烧綫的方法是确定燃烧速度 $\frac{dx}{dt}$ (或 $\frac{dx}{d\varphi}$)，或者确定燃烧規律 $x = F(t)$ 。

有几个描述燃烧速度的經驗公式。此外，还有在化学动力学理論基础上推导出相应方程式的文章。

描述柴油机中燃烧速度的經驗公式 К. 涅依曼 (Нейман) 教授早在三十年代就提出二个描述柴油机中燃烧过程进展的簡單經驗公式：

$$x = \left(2 - \frac{t}{t_g} \right) \frac{t}{t_g} \quad (3)$$

和

$$x = \left(3 - 2 \frac{t}{t_g} \right) \left(\frac{t}{t_g} \right)^2, \quad (4)$$

式中 x ——在時間 t 內烧掉的燃料百分数；

t_g ——燃烧延續時間；

t ——这时的時間。

不久，Б. М. 洪察尔 (Гончар) [7] 建議用下面的經驗公式近

似地表示柴油机中的燃烧规律。

$$x = 1 - \left(1 + \frac{t}{t_m} \right) e^{-\frac{t}{t_m}}, \quad (5)$$

式中 t_m ——燃烧速度达到最大值的时间；

e ——自然对数的底。

在方程式(3)、(4)、(5)中,时间 t , t_z 和 t_m 可以用从燃料着火时算起的相应曲轴转角 φ , φ_z 和 φ_m 来代替(Б.М. 洪察尔以 φ_c 表示 φ_m)。

在图1上,把上述经验公式的图形与试验曲线 $x = F(t)$ ($x = F(t)$ 称为燃烧特性曲线),以及混合加热循环的曲线进行比较。曲线1——直接喷射航空柴油机的试验曲线[根据Б.Ф.柯洛白夫(Коробов)等的数据][52];曲线2——低速无压缩机的柴油机的试验曲线(根据К.涅依曼的数据[9]绘制);曲线3、4、5是方程式(3)、(4)、(5)的图形;曲线6——根据等容加热40%等压加热60%的混合循环绘制的燃烧特性曲线。

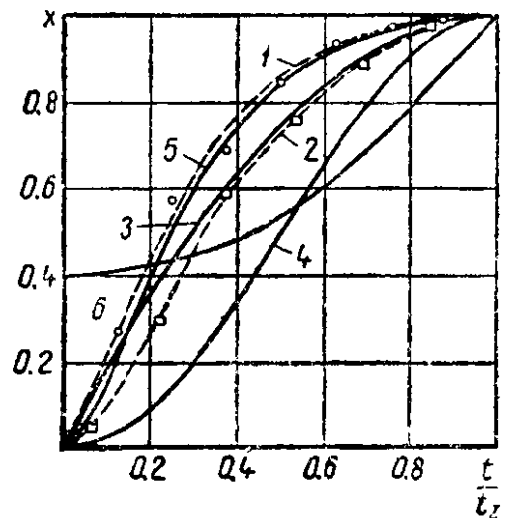


图1 燃料燃烧特性曲线

1—二冲程航空柴油机的试验曲线; 2—低速无压缩机的柴油机的试验曲线; 3, 4, 5—按方程式(3), (4), (5)绘制的理论曲线; 6—混合加热循环(在 $v = \text{常数}$, $p = \text{常数}$ 时加进热量)的特性曲线

对特性曲线进行比较,可以指出:根据经验公式(3)和(5)绘制的曲线在柴油机的试验特性曲线里面,它可以用来近似地描述柴油机中燃烧过程的进展情况。方程式(4)却不能达到这一目的。根本不能用根据混合循环规则的加热方案来描述柴油机中的燃烧过程动力学。这个加热方案在燃烧过程开始时($v = \text{常数}$),燃烧速度等于无穷大,然后突然降到零,随后又增大到某一最大值($p = \text{常数}$)。燃烧速度的这种变化特性一点也不符合发动机中燃烧过程进展的真实情况。

对經驗公式(3)和(5)进行分析。(3)式对時間微分后,得到燃烧速度方程式:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2}{t_z} \left(1 - \frac{t}{t_z} \right) \quad (6)$$

从这个方程式可以看到,燃烧速度随着 t 的增加而不断地减小。因而,在开始 ($t=0$) 时,燃烧速度最大, $\left(\frac{dx}{dt} \right)_{\max} = \frac{2}{t_z}$;

而在燃烧終了 ($t=t_z$) 时, $\frac{dx}{dt} = 0$ 。在燃烧过程沒有控制的柴

油机(在工作气体缺乏有組織的涡流情况下,通过噴嘴的几个噴孔把燃料直接噴入燃烧室,即通常称为直接噴射的柴油机)中可以看到燃烧速度大致是有这样的变化性质。

作者利用經驗公式(3)对直接噴射柴油机的工作循环进行了理論研究[10,11]。

对于用方程式(5)表示的近似燃烧規律情况,燃烧速度方程式为

$$\frac{dx}{dt} = \frac{t}{t_m^2} e^{-\frac{t}{t_m}} \quad (7)$$

从方程式(7)知道, $t=0$ 时,燃烧速度等于零。并且发现公式(7)具有最大值。对方程式(5)取二次导数,得到燃烧加速度方程式为

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{t_m^2} \left(1 - \frac{t}{t_m} \right) e^{-\frac{t}{t_m}} \quad (8)$$

使(8)式等于零,找出临界時間 $t_{kp} = t_m$ 。若 $t < t_m$,則加速度为正,燃烧速度增高;若 $t > t_m$,則加速度为負,燃烧速度降低。因而在 $t = t_m$ 时,燃烧速度最大,并且为

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{\max} = \frac{1}{e t_m} \quad (9)$$

从这个方程式可以看到,若知道時間 t_m ,也就知道最大的燃烧速度。或者相反,知道了最大的燃烧速度,也就知道時間 t_m 。

并且， $t_m \rightarrow 0$ 时， $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\max} \rightarrow \infty$ ；而在 $t_m \rightarrow \infty$ 时， $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\max} \rightarrow 0$ 。

上面已经说过，直接喷射柴油机的最大燃烧速度实际上发生在反应开始的时候。这就是说按照方程式(9)，当 $t_m = 0$ 时，燃烧速度应当为无穷大，而实际上最大的燃烧速度有一定的具体数值。因而可见，方程式(5)不能用来描述这种型式柴油机的燃烧过程。

在燃烧过程終了时 ($t = t_z$)，方程式(5)可写成：

$$x_z = 1 - \left(1 + \frac{t_z}{t_m}\right) e^{-\frac{t_z}{t_m}} = 1 - \left(1 + \frac{1}{\tau_m}\right) e^{-\frac{1}{\tau_m}} \tag{10}$$

式中 x_z ——燃烧終了时烧掉的燃料百分数；

$\tau_m \equiv \frac{t_m}{t_z}$ ——最大燃烧速度的相对时间。它是在质量方面表征燃烧过程的一个参数。

燃烧过程終了时 烧掉的燃料百分数 x_z ，由参数 τ_m 的数值决定。下面是在不同的 τ_m 时， x_z 的计算值。

τ_m	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4
x_z	1.00	1.00	0.99	0.96	0.91	0.85	0.71

以后将要说到，在柴油机中，参数 τ_m 的数值取决于混合气形成和燃烧过程的实现方法，它在 $0 \sim 0.2$ 范围内变动。将来随着这些过程的日益完善，可以期望 $\tau_m = 0.4$ 。算出的 x_z 值表明， $\tau_m > 0.15$ 时，方程式(5)的近似燃烧规律不正确； τ_m 接近于零时，正如上面所说，最大燃烧速度过大；只是当 $\tau_m \approx 0.1 \sim 0.15$ 时，才没有与试验数据相抵触的情形。З.М. 明基 (Минкин) [12] 研究二冲程柴油机时，采用 $\tau_m = 0.15$ 。

把时间 t_m 代入方程式(5) (即令 $t = t_m$)，得到燃烧速度达到最大时烧掉的燃料百分数为

$$x_m = 1 - \frac{2}{e} = 0.265,$$

即 x_m 与 t_m 无关，不管给出怎么样的 t_m 值，总是在燃烧速度最大

时烧掉 $x_m = 0.265$ 的燃料百分数，这就表明，在 $x = F(t)$ 曲线图上，曲线的转折点总有同一个 $x_m = 0.265$ 的纵座标。柴油机中的燃烧试验特性表明： x_m 可以有比 0.265 相差很大的数值，或者比它大，或者比它小。

这样可以得出结论：用经验公式(5)表示的近似燃烧规律不具有普遍性。这个公式只能在某些场合可以满意地描述柴油机中燃烧速度的变化规律。然而，它的主要缺陷，象公式(3)一样，

还在于下面的情形。最大燃烧速度的相对时间 $\tau_m = \frac{t_m}{t_z}$ ，是表

征燃烧过程进展的重要参数。这个参数与柴油机工作粗暴的现象有关。上面已经说过，在柴油机中 τ_m 在相当宽广的范围内变动。硬性地限制 τ_m 在很窄的 0.1~0.15 范围(对于公式(3)， $\tau_m = 0$)内，等于认定 τ_m 值一个常数。这样，不仅是认定柴油机中的任何燃烧过程都有着同样的进展性质，并且也不能反映出在不同的柴油机(不同的工作循环)中参数 τ_m 变化的事实。如果对所有柴油机都把 τ_m 作为常数来研究，那么也就不可能从燃烧过程进展性质的角度上比较柴油机的工作循环，也就是说，不存在从最好的 τ_m 值方向改善柴油机的可能性的问题了。

柴油机中的双分子燃烧速度方程式 K. 涅依曼^[9]根据双分子反应机构原理的概念，奠定了燃烧过程计算方法和对柴油机中燃烧进行动力分析的基础。按照这个概念，化学反应仅发生在这样的场合，即起初参加反应的分子必须互相碰撞，并且具有足够的能量并占据有利的位置。在柴油机中的燃烧过程情况下，这样的分子就是燃料和氧的分子。嗣后，反应按链锁机构原理进行到形成最终的反应产物为止。K. 涅依曼是这样来表示柴油机中燃料的化学变化的：燃料分子 + O_2 分子 $\rightarrow$ (链锁反应) $\rightarrow CO_2$ 分子 + H_2O 分子。

从这个概念出发，K. 涅依曼建议用双分子反应动力学方程式来研究和计算柴油机中的燃烧过程。双分子反应的动力学方程式为