

译 序

粉状燃料燃烧是燃烧理论研究的一个重要侧面。由于煤粉燃烧技术是提高燃烧效率、大幅度节约能源的有效手段之一，煤粉锅炉在动力工业中占有举足轻重的地位。随着煤粉燃烧技术的推广，煤粉工业炉、气化炉的应用也日趋广泛。近年来，煤粉燃烧方式的重要性还在增加，这不仅是因为它更普遍地应用于容量愈来愈大的电站锅炉，而且也因为它在燃煤磁流体发电（MHD）方面的潜在用途。

本书是苏联莫斯科动力学院技术科学博士T.B.维列斯基和Л.М.赫兹马梁关于煤粉燃烧的专著。书中较全面地总结了苏联学者，特别是作者本人在煤粉燃烧和炉内过程数学模拟方面的研究工作，反映了苏联煤粉燃烧理论和实验研究的主要成果。全书内容既涉及煤粉燃烧的基本问题，又注意对实际炉内过程进行定量分析，书中建立的寻求组织电站煤粉锅炉最佳工况参数的炉内过程综合计算方法，有其独到之处。到目前为止，国内关于煤粉燃烧的研究，无论在理论方面或实验方面，都进行了大量的工作，但总结煤粉燃烧的专著尚不多见。因此，尽管本书对某些专门问题的叙述比较概括，深度似嫌不足，但我们相信，这个中译本的出版，对于国内读者了解苏联煤粉燃烧的研究动向，开阔视野，提高研究水平，必会有所裨益。

本书于1978年由苏联动力出版社出版。译本中删去了原

书有关采用电子模拟计算机解煤粉燃烧问题的内容和三节附录，因此有关的节次、公式和图表的编号亦作了相应变动。对原书中出现的一些错误，已作改正，不再一一加注。

全部译稿经徐益谦教授校订；蒋持志副研究员对译稿提出了宝贵意见。限于译者水平，难免有错误和不妥之处，尚祈读者不吝指正。

译者

1985年12月

于南京工学院

序

建造现代化的高效能、经济、可靠的蒸汽发生装置，要求掌握合理设计燃烧室的方法。由于炉内燃烧过程极其复杂，直至最近，实际上还没有喷燃器和燃烧设备，尤其是燃用固体燃料的喷燃器和燃烧设备的计算方法。仅在现代化的计算技术手段出现之后，许多燃烧理论问题的求解才有可能。例如，自着火的稳定理论不可能回答过程发展中的动力学问题。但是在电子计算机上计算非稳定过程，便可求出着火时间与装置条件和工况条件之间的关系，并能准确地确定出象自着火温度这样的重要特性。同时，还可以研究细小的燃料颗粒燃烧问题和在燃烧室中燃料颗粒浓度的影响，过量空气系数和燃烧产物再循环度的最佳值问题，以及燃料细度和碾磨均匀性对燃烧的影响等。

许多数学模拟问题需要进一步明确说明。例如，炽热颗粒的不稳定热量交换与质量交换问题，颗粒、气体和界面间复杂的辐射换热问题，煤粉在旋转射流中的燃烧等。这些问题的解决，需要从事燃烧过程物理数学模型研究与从事燃烧设备研究的人员协同工作。

目前，已经建立了在电子数字计算机上对蒸汽发生装置进行热力校核计算的方法。根据经济-数学模型，进行设计计算。但是，此时燃烧室却按标准方法计算，实际上不考虑空气动力学和燃烧的特点。

在建立炉内过程的综合计算方法时，必须以从喷燃器喷出的、在炉膛空间发生相互作用的组合射流的空气动力学为基础，并要考虑燃烧设备本身的空气动力学，它与炉膛布置、燃料颗粒的多粒径分散系统的燃烧和热量交换的特点有关。另外，还要考虑燃烧产物和挥发分析出的动力学、燃烧过程中有害物质的形成等。

由数学模型得到的结果，可使燃烧过程最佳化，从而建立起固体燃料燃烧的新图式。由全苏热工研究所（Ю.Л. 马尔沙克、В.И. 巴比、Ю.Ф. 库瓦也夫）、中央锅炉汽轮机研究所（В.В. 米托尔、Б.Д. 卡茨涅里松、С.Л. 莎加诺娃）、列宁格勒工学院（В.В. 勃美朗泽夫、Л.Б. 阿赫美多夫）和其它一些机构制定的炉内煤粉燃烧的计算方法已获得实际应用。

本书介绍了莫斯科动力学院锅炉制造教研室多年来在炉内过程数学模拟方面所做的工作。苏联学者Н.Н. 谢苗诺夫、А.С. 普烈德沃季切烈夫、Л.Н. 希特林、Б.Б. 康托罗维奇、В.В. 勃美朗泽夫、И.А. 雅沃尔斯基、Л.Б. 烈兹雅科夫、С.Б. 布赫曼、Н.Б. 拉夫诺夫等所做的研究工作，是建立燃烧过程综合计算方法的基础。

书中研究了利用电子计算机进行煤粉空气（“准均相的”）一维流燃烧过程的动力学计算问题、颗粒的单粒径分散系统的燃烧、颗粒燃烧时温度场和浓度场的计算、二维射流燃烧问题及炉内多分散二维火焰燃烧数学模型的求解。讨论了在电子模拟计算机和数字计算机上解燃烧微分方程组的方法，给出了计算框图和程序，指出了求解问题和寻求组织炉内过程最佳工况参数的途径。

技术科学硕士 O. A. 帕尔谢戈夫、 M. M. 勃戈祥，以及
 E. M. 玛耳基娜和 B. C. 玛吕谢娃，参加了用电子计算机对
燃烧理论问题的计算和研究工作，对此作者谨致谢意。

作 者

目 录

第一章 一维流动中煤粉空气混合物的

着火与燃烧..... (1)

- 1-1 着火过程 (1)
- 1-2 气流自着火微分方程式 (4)
- 1-3 气流自着火和燃尽问题的数字计算机解 (15)
- 1-4 具体情况下气流自着火问题的求解结果 (27)
- 1-5 不同过量空气系数时自着火过程的研究 (33)
- 1-6 绝热和有散热情况时自着火普遍关系式的导出 ... (34)
- 1-7 自着火温度的确定 (41)
- 1-8 利用计算机求解燃料燃烧动力常数 (43)
- 1-9 燃料燃烧动力常数之间的关系 (53)

第二章 煤粉的单粒径分散系统的燃烧..... (77)

- 2-1 问题的提出和初步的计算结果 (77)
- 2-2 天然燃料单粒径分散系统的燃烧、热量和质量交换的数学模型 (89)
- 2-3 一次反应与二次反应时的浓度和温度 (102)
- 2-4 单粒径分散系统的着火和燃尽问题的求解结果 ... (113)
- 2-5 过剩空气量对煤粉燃烧的影响 (125)
- 2-6 燃烧产物的再循环和反应混合物的初始温度对燃烧过程的影响 (131)

第三章 燃料颗粒燃烧时的温度场和浓度场..... (136)

3-1	燃料颗粒的质量交换微分方程式	(136)
3-2	转化为自模形式的质量交换微分方程式的解	(138)
3-3	天然燃料颗粒群的能量和质量交换微分方程组	(147)
3-4	利用 $\Phi \Gamma \Delta A$ 电动积分器解煤粉颗粒的空气动力学 和质量交换问题	(164)

第四章 二维射流中燃料空气混合物的燃烧.....(175)

4-1	问题的提出	(175)
4-2	考虑释热的湍流射流边界层能量微分方程式	(182)
4-3	射流燃烧问题的电子数字计算机解	(191)
4-4	转化为自模形式的燃烧微分方程式的解	(200)
4-5	湍流射流中温度的初始剖面	(209)
4-6	组合射流湍流特性的确定	(212)
4-7	着火和燃烧问题的解在燃烧装置中的应用	(217)

第五章 炉膛内天然燃料多粒径分散系统二维火焰 燃烧的数学模拟.....(225)

5-1	问题的提出	(225)
5-2	炉内空气动力学的计算方式	(228)
5-3	考虑燃料的分散性	(236)
5-4	炉膛内多粒径分散系统燃料燃烧的数学模型	(239)
5-5	初始条件	(244)
5-6	边界条件	(249)
5-7	预混射流中燃料的燃烧计算	(254)
5-8	空气逐渐供给时燃料的燃烧计算	(258)
5-9	工况因素对煤粉燃烧过程的影响	(265)

参考文献.....(271)

第一章 一维流动中煤粉空气混合物的着火与燃烧

1—1 着火过程

在长时间有空气存在的自然条件下，一切形式的燃料实际上不参与化学反应。但在高温时，在含有氧化剂的混合物中，燃料能以逐渐增长的反应速度发生反应。同时，在一定的条件下，化学反应变得十分迅速。燃料从实际上不发生反应的状态转变为迅速反应称为燃料的着火。着火与可燃混合物中放热反应进行的特点有关，它是一个发生燃烧的特殊过程。

存在着两种原则上各不相同的从缓慢到迅速反应的转变机理。第一种机理可用下例说明。假定一个容器内盛有可燃混合物，靠周围介质的热量被加热到某一温度。在此温度下，反应能以可觉察到的速度进行。在这些条件下，渐渐地在混合物中开始自发的化学反应。混合物温度升高，由于混合物与空器壁间温度差的作用，还发生向周围介质散热。过程的进一步发展取决于释热和散热之间的关系。如果在可燃混合物的整个被研究的封闭空间内，反应释热量超过经壁面向周围介质的散热量，那么容器内的热量将逐渐积蓄，反应温度和速度逐渐升高，从而导致化学反应从缓慢转变为迅

速。这一过程称为自着火。

可以做一个相应的实验来研究气流的自着火。其方法是，在保持壁温和燃烧室入口处的混合物温度相等的条件下，向直流燃烧室吹入预热过的可燃混合物。由于化学反应和混合物温度的升高，混合物与燃烧室壁面间出现温度差，造成向周围介质的散热。当燃烧室中的释热量超过向其壁面的散热量时，便产生自着火。

在自着火时，混合物的组分变化只是因化学反应引起的，而温度的变化则是释热和散热共同影响的结果。限定容积的可燃混合物的自着火发生在定容条件下；而在有流动的燃烧室中，可燃混合物的自着火则在定压条件下发生。

因此，也可以把一定容积的可燃混合物随整体温度的急剧升高，化学反应过程自发地逐步发展的现象称为自着火。反应过程之所以会自发地逐步发展，是由于释热量大于通过所论可燃混合物容积界面的散热量，因而热量积聚的缘故。化学反应过程的自发发展会导致温度急剧升高，其所历经的时间称为诱导期。初始温度愈低，自着火过程发展愈缓慢。

现将第二种着火方式概述如下。在燃烧室中，通过使部分炽热的燃烧产物回流并与可燃混合物相掺混，则可实现高温加热。这不仅技术上简单，而且也较为有效。在燃烧产物再循环的情况下，反应混合物的温度大大升高，从而促使化学反应速度急剧增加（尽管由于反应物浓度的减少，反应速度有所减慢）。在这些条件下，化学反应变得极为迅速，这称为着火。在着火过程中，无论是化学反应，还是燃烧产物的再循环，都会引起反应混合物的组分发生变化。此时，反

应混合物将在一个局部或沿着某个燃烧区域所形成的表面被点燃。连续不断地进入燃烧室的混合物的着火是靠燃烧区（火焰）的扩展来进行的。

回流能将燃烧产物的热量供给进入燃烧室的可燃混合物。如果燃烧室具有使回流得以发展的设备条件，着火过程就能够完成。在直流燃烧室中，尤其可以实现着火。因为在这种燃烧室中，可燃混合物的运动与壁面脱离，形成射流和燃烧产物的反向流动。在火炬燃烧的燃烧室中，着火发生在新鲜气体与燃烧产物间有湍流扩散交换的情况下。

在由外热源点燃或者有稳定火焰的静止混合物中和层流中，着火也可以发生。通过导热和炽热燃烧产物的分子扩散，从燃烧区域或点火源传出的热量，保证了高温加热，并使贴近点火源的新鲜混合物层后续着火。此时，着火在火焰的正常传播过程中实现。

在有炽热燃烧产物再循环的条件下，着火过程中的化学反应与热量交换和质量交换同时进行。这意味着，着火是在外界因素对反应混合物的温度和浓度条件有影响的情况下发生的，即有热量和惰性气体加入反应混合物，从而使燃料的反应性质被掩盖住而难以显现出来。相反，在同样质量的可燃混合物中，当其初始温度一定并无外部热量加入时，借助化学反应的发展，着火也能完成。在这种给定的和被控制的条件下所发生的化学反应，能揭示燃料反应性质和物理条件对自着火过程发展的影响，从而确定自着火温度本身。

在蒸汽发生器的室燃设备和其它形式的燃烧室中，着火过程可以强化：一是提高混合物的预热温度，加强可能是高温的燃烧产物的再循环和提高反应物的浓度以增加释热量；

二是减少反应区中的散热量。综合采取热力的、浓度的、空气动力学的以及其它一些旨在加强释热和减少散热的措施，以强化着火过程，是组织点燃的实质所在。其任务是强化着火过程，并使火焰在离开喷燃设备的一定距离处稳定住。

自着火温度表征了燃料的反应特性。由于点燃条件的不同，着火温度可在很大的范围内变化。

在工业燃料燃烧装置所采用的混合物的预热温度下，自着火是缓慢进行的。此外，自着火（尤其是高温条件下的自着火）由爆发完成。这时，燃烧具有周期性。由于这些原因，自着火不能用于燃料的工业燃烧。但在气流中完成的着火过程，它具有连续的性质，因而可以在燃料的工业燃烧中应用。

自着火是非稳定过程。但为使问题简化起见，人们首先研究了热力自着火的稳定理论，并用该理论来确定自着火时混合物的临界状态。这种临界状态是一种极限稳定状态。因为根据临界状态的稳定理论，释热量全部散失掉，所以达到自着火温度所对应的诱导期很长，从理论上说，是无限的。

稳定理论对于阐明自着火过程的物理-化学本质有着重大的意义，但不适用于计算诱导期很短的高效能的燃料燃烧装置的工作情况。此时，则应采用热力自着火的非稳定理论。因为这才有可能揭示自着火过程发展的动力学特征，以及燃料性质和物理条件对自着火过程的影响。

1—2 气流自着火微分方程式

现在，我们研究气流中燃料空气混合物的自着火问题。

其条件为气流是一维的，圆柱形燃烧室的壁面温度等于气流温度。混合物化学反应释热量消耗于混合物的加热，一部分通过燃烧室壁面散失，所以反应混合物的热平衡方程式可用下式表示：

$$Q_p - Q_n - Q_t = 0 \quad (1-1)$$

单位时间内单位体积中化学反应的释热量是：

$$Q_t = Q_p \beta C \mu \left(\frac{273}{T} \right)^2 f K_0 e^{-E/RT} \quad (1-2)$$

式中， Q_p ——燃料燃烧热，千焦/公斤； β ——化学当量系数，表示参加反应的燃料（煤粉）与反应耗氧的重量比，公斤/公斤； C 和 μ ——分别表示 0°C 和760毫米汞柱时氧和煤粉的体积浓度，公斤/米³； f ——煤粉的比表面积，即一公斤煤粉的总表面积，米²/公斤； K_0 ——与燃料和氧分子碰撞总次数有关的指数前因子，米/秒或米³/（米³·秒）； E ——活化能，焦耳/摩尔； $R=8.31$ ——通用气体常数，焦耳/（摩尔·°C）； $\left(\frac{273}{T}\right)^2$ ——对燃料和氧浓度按实际条件进行修正的系数； T ——气流温度，K。

加热混合物所消耗的热量是：

$$Q_n = c_{cm} \frac{dT}{d\tau} \text{ 或 } Q_n = c_{cm} w \frac{dT}{dx} \quad (1-3)$$

式中， c_{cm} —— 0°C 和760毫米汞柱时煤粉空气混合物的比热，千焦/（米³·°C）； τ ——时间，秒； w —— 0°C 和760毫米汞柱时的流速，米/秒； x ——纵坐标，米。

向周围介质的散热量是：

$$Q_t = \frac{S}{V} \alpha_c (T - T_c) \quad (1-4)$$

式中, $S = \pi dl$ ——燃烧室面积, 米²; $V = \frac{\pi d^2 l}{4}$ ——燃烧室体积, 米³; α_r ——对燃烧室表面的放热系数, 千瓦 / (米²·°C); T_c ——壁面温度, K。

将式 (1-2) ~ (1-4) 中的 Q_r 、 Q_H 和 Q_c 的数值代入方程式 (1-1), 则得:

$$Q_H \beta C_H f K_0 \left(\frac{273}{T} \right)^2 e^{-E/RT} - c_{CM} w \frac{dT}{dx} - \frac{4\alpha_r}{d} (T - T_c) = 0 \quad (1-5)$$

对温度、浓度、放热系数和纵坐标无量纲化, 可将方程式 (1-5) 转变为无量纲形式:

$$\bar{C} \bar{\mu} \frac{1}{\theta^2} e^{-1/\theta} - \frac{d\theta}{d\chi} - \Omega (\theta - \theta_c) = 0 \quad (1-6)$$

初始条件: $\chi = 0$, $\theta = \theta_0$, $\bar{C}_0 = \bar{\mu}_0 = 1$ 。

式中, $\theta = \frac{RT}{E}$ ——无量纲温度;

$$\chi = \frac{x Q_H^R \beta C_0 \mu_0 f K_0 \cdot 273^2 R^3}{c_{CM} w E^3} \quad \text{——无量纲坐标;}$$

$$\Omega = \frac{4 \alpha_r E^3}{d Q_H^R \beta c_0 \mu_0 f K_0 \cdot 273^2 R^3} \quad \text{——无量纲放热系}$$

数;

$$\bar{C} = \frac{C}{C_0}, \quad \bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{——氧和燃料的无量纲浓度。}$$

在封闭容积内, 燃料和氧的初始浓度与温度无关, 因此,

式 (1-2) 中的乘数 $(\frac{273}{T})^2$ 可以略去。这时, 式 (1-6)

可写成如下形式:

$$\overline{C\mu}e^{-1/\theta} - \frac{d\theta}{d\sigma} - \Omega_1(\theta - \theta_c) = 0 \quad (1-7)$$

式中,

$$\sigma = \frac{\tau Q_H^p \beta C_0 \mu_0 f K_0 R}{c_{CM} E} \quad \text{--- 无量纲时间;}$$

$$\Omega_1 = \frac{(S/V) \alpha_r E}{Q_H^p \beta C_0 \mu_0 f K_0 R} \quad \text{--- 无量纲放热系数。}$$

在方程式 (1-6) 和 (1-7) 中, 如果略去燃料和氧在临近自着火前的消耗量, 那么可以取 $\overline{C} = \overline{\mu} = 1$ 。

这样, 我们便得到了在计及热损失的自着火条件下描写温度变化的微分方程式。一般说来, 这是不稳定的自着火问题, 因为方程式中有表征温度变化的微分项。

由于不可能得到方程式 (1-6) 和 (1-7) 的解析解, 所以人们作了各种简化, 以便能对所提出的问题求解。

努塞尔特把着火当作惰性介质 (包括惰性粉粒) 被加热到某个他认为是“着火温度”的问题来求解。假定, 在达到这一温度之后, 过程仿佛在转瞬间便发展起来。因此, 他丢弃了热平衡方程式 (1-1) 中的第一项, 并认为第三项为正 (惰性燃料被加热)。于是, 得到:

$$-Q_H + Q_r = 0 \quad (1-8)$$

或者, 在本例中为:

$$-\frac{d\theta}{d\chi} + \Omega(\theta - \theta_c) = 0 \quad (1-9)$$

上式可用解析法解出。但该式未曾考虑化学反应释热这一燃烧过程最根本的特点，所以计算数据与试验值不相吻合。

H. H. 谢苗诺夫院士研究着火时另辟蹊径。他通过略去 $\frac{d\theta}{d\chi}$ 项，把一定条件下的不稳定自着火问题简化为稳定的问题。下面研究代数方程式

$$Q_p - Q_r = 0 \quad (1-10)$$

或者本例（气流着火）的方程式

$$\frac{1}{\theta^2} e^{-1/\theta} - \Omega(\theta - \theta_c) = 0 \quad (1-11)$$

成立的条件。

很显然，着火是一个不稳定的过程，并且，在一定的条件下，由于温度的升高〔因而方程式（1-11）中应出现 $\frac{d\theta}{d\chi}$ 微分项〕，等式（1-11）将不成立。所以，着火的稳定问题就是要找出方程式（1-11）可能存在（或不存在）的条件。该条件可以从图1-1，a给出的热量收支关系曲线求得。在图1-1，a中，因化学反应而收入的无量纲热量用指数曲线 $Q_p = \frac{1}{\theta^2} e^{-1/\theta}$ 表示，无量纲热量支出用从 θ_c 点出发而斜率为 Ω 的直线 $\bar{Q}_r = \Omega(\theta - \theta_c)$ 表示。作为例子，取 $\theta_{c1} = 0.052$ 和 $\theta_{c2} = 0.058$ ，当活化能一定时（ $E = 140000$ 焦耳/摩尔），其所对应的温度值分别为 873 K 和 973 K。 $\bar{Q}_p$ 和 $\bar{Q}_r$ （直线 2，6，7）相交表示等式 $\bar{Q}_p =$

$\bar{Q}_r$ [方程式(1-11)] 成立, 并且表示存在稳定的氧化过程。实际上, 过程开始处于点 $\theta_0 = \theta_c$ 。然后, 温度升高到等于释热量线与散热量线交点横坐标上的值, 以后, 温度不随时间变化 (出现稳定过程)。事实上, 当系统温度偶然升高时, 因为散热量直线高于释热量曲线 (热量支出大于热量收入), 结果温度下降, 系统又会回到交点位置; 而当温度偶然降低时, 因为释热量曲线高于散热量直线, 系统温度应升高, 系统重新回到上述曲线的交点上。

如果直线 $\bar{Q}_r$ 低于 $\bar{Q}_p$ (图 1-1, a 中直线 1, 3, 4, 5), 那么等式 $\bar{Q}_p = \bar{Q}_r$ 不能满足。倘若 $\bar{Q}_p > \bar{Q}_r$,

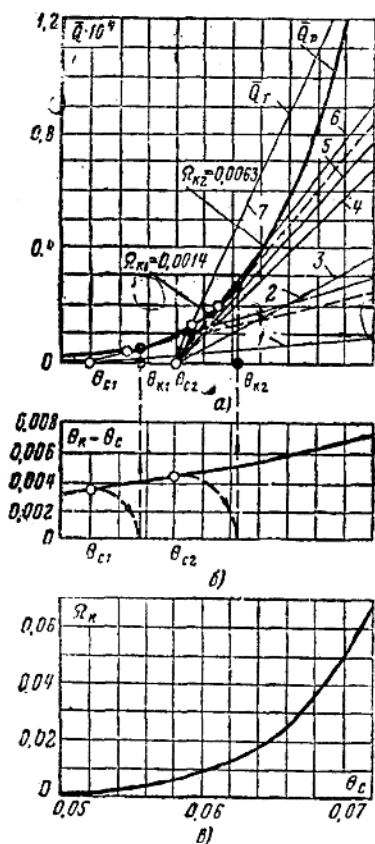


图1-1 自着火稳定理论的图解

- 1— $\Omega=0.0006$; 2— $\Omega=0.0015$;
3— $\Omega=0.0027$; 4— $\Omega=0.0050$;
5— $\Omega=0.0060$; 6— $\Omega=0.0084$;
7— $\Omega=0.0113$ 。

温度从点 θ_c 开始将不断升高, 也就是方程式 (1-11) 中出现了不稳定项 $\frac{d\theta}{d\chi}$ 。这表示不稳定的自着火过程。

自着火的临界条件是 $\overline{Q}_P$ 和 $\overline{Q}_T$ 相切 (图1-1, a 中的虚线)。形式上存在公共点证明稳定状态是可能的。当然, 仅仅在过程温度偶尔降低的情况下, 这个点才是稳定的。如果过程温度降低, 因为曲线 $\overline{Q}_P$ 比直线 $\overline{Q}_T$ 高, 则过程将重新回到切点上。但当温度偶然升高时, 平衡受到破坏, 过程的特点是温度不断上升, 最后导致着火。

例如, 对于 $\theta_{c1}=0.052$, 在 $\Omega_{K1}=0.0014$ 时出现临界状态, 此时切点处 $\theta_{K1}=0.0554$; 对于 $\theta_{c2}=0.058$, $\Omega_{K2}=0.0063$, 则 $\theta_{K2}=0.0625$ 。

在释热量曲线和散热量直线相切的临界状态处, 释热量等于散热量, 而且它们对温度的一阶导数也相等。于是有

$$\overline{Q}_{P,K} = \overline{Q}_{T,K}, \text{ 即 } e^{-1/\theta_K} = \Omega_K(\theta_K - \theta_c) \quad (1-12)$$

和

$$\left. \frac{d\overline{Q}_P}{d\theta} \right|_K = \left. \frac{d\overline{Q}_T}{d\theta} \right|_K, \text{ 即 } \frac{1}{\theta_K^2} e^{-1/\theta_K} = \Omega_K \quad (1-13)$$

H·H·谢苗诺夫从上述条件出发, 求出了作为自着火温度的混合物的临界状态温度和封闭容积内临界加热量的大小〔式 (1-7)〕。

联立解式 (1-12) 和 (1-13), 可得:

$$\theta_K = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\theta_c}}{2} \quad (1-14)$$