

燃燒的热力理论

苏联 Л. А. 伏里斯著

电力工业出版社

燃燒的热力理論

苏联, Л. А. 伏里斯著

陈 丹 之譯

电力工业出版社

內 容 提 要

本書闡述了燃燒的基本熱力理論。書中內容着重於分析熱力方面的情况，對於化學動力學方面只作了概括介紹，在同類燃燒混合物、碳素(焦炭)以及不混合氣體等燃燒的例子中，只說明了放熱反應的意義和特點：即燃燒過程可能的穩定水準，臨界着火現象和臨界熄滅現象，火焰的熱傳播，燃燒的穩定性等。本書並研究了進風速度、混合物成分、熱量及其最初溫度等各種因素對燃燒的影響。同時也討論了燃燒時的簡單氣體動力學問題，如火焰的穩定性、紊流的作用以及爆燃的概念等。

本書供科學工作者、工程師及大學師生應用。

Л. А. ВУЛИС

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МОСКВА

1954

燃燒的熱力理論

根據蘇聯國立動力出版社1954年莫斯科版翻譯

陳 丹 之譯

*

547R133

電力工業出版社出版(北京府右街26號)

北京市書刊出版營業證可証出字第082號

北京市印刷一廠排印

新華書店發行

*

780×1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 115印張 * 267千字 * 定價(第10類) 1.70元

1957年5月北京第1版

1957年5月北京第1次印刷(0001—4,900冊)

目 录

原序	3
主要符号一覽表	6
第一章 通論	8
1-1 前言	8
1-2 关于反应速度的簡單知識	14
1-3 H. H. 西門諾夫的可燃混合物的“热力爆燃”理論	24
1-4 着火溫度	29
第二章 同类混合物的稳定燃燒情况	33
2-1 絕热过程的热平衡方程式	33
2-2 穩定状态的研究	43
2-3 临界着火条件和临界熄灭条件	43
2-4 数量上的关系	56
第三章 不均一燃燒与扩散燃燒	70
3-1 关于不均一过程的基本概念	70
3-2 煤燃燒的热力情况	82
3-3 某些补充关系	91
3-4 絕热燃燒的一般情况	105
第四章 复杂热交换	125
4-1 有热量加入的燃燒过程	125
4-2 輻射放热	133
4-3 有热量散走的燃燒过程	152
4-4 散热对于临界条件的影响	163
4-5 关于断續的波动燃燒的概念	178
第五章 一度空間方案的計算举例	181
5-1 燃尽曲綫的最簡單例子	181
5-2 馬弗爐噴燃器的簡略計算	189

5-3	噴燃器的最佳热力情况	198
5-4	零-因次模型与一度空間模型的关系。火焰的傳播	207
第六章	正常燃燒	214
6-1	火焰的傳播速度	214
6-2	溫度場和濃度場的相似	227
6-3	Я. Б. 徐尔陶維奇的火焰正常傳播理論	234
6-4	火焰区域中总能量的局部調配	247
6-5	不混合气体的層流燃燒	255
第七章	燃燒的气体动力学原理	271
7-1	П. Д. 倫道院士的火焰自紊化理論	271
7-2	气体的紊流运动与燃燒	282
7-3	气体的加热流动	296
7-4	爆燃的稳定傳播	308
	附录	316
	参考文献	318

目 录

原序	3
主要符号一覽表	6
第一章 通論	8
1-1 前言	8
1-2 关于反应速度的簡單知識	14
1-3 H. H. 西門諾夫的可燃混合物的“热力爆燃”理論	24
1-4 着火溫度	29
第二章 同类混合物的稳定燃燒情况	33
2-1 絕热过程的热平衡方程式	33
2-2 穩定状态的研究	43
2-3 临界着火条件和临界熄灭条件	43
2-4 数量上的关系	56
第三章 不均一燃燒与扩散燃燒	70
3-1 关于不均一过程的基本概念	70
3-2 煤燃燒的热力情况	82
3-3 某些补充关系	91
3-4 絕热燃燒的一般情况	105
第四章 复杂热交换	125
4-1 有热量加入的燃燒过程	125
4-2 輻射放热	133
4-3 有热量散走的燃燒过程	152
4-4 散热对于临界条件的影响	163
4-5 关于断續的波动燃燒的概念	178
第五章 一度空間方案的計算举例	181
5-1 燃尽曲綫的最簡單例子	181
5-2 馬弗爐噴燃器的簡略計算	189

5-3	噴燃器的最佳热力情况	198
5-4	零-因次模型与一度空間模型的关系。火焰的傳播	207
第六章	正常燃燒	214
6-1	火焰的傳播速度	214
6-2	溫度場和濃度場的相似	227
6-3	Я. Б. 徐尔陶維奇的火焰正常傳播理論	234
6-4	火焰区域中总能量的局部調配	247
6-5	不混合气体的層流燃燒	255
第七章	燃燒的气体动力学原理	271
7-1	Л. Д. 倫道院士的火焰自紊化理論	271
7-2	气体的紊流运动与燃燒	282
7-3	气体的加热流动	296
7-4	爆燃的稳定傳播	308
附录		316
参考文献		318

原 序

燃燒过程对于各种不同的技术部門來說，有非常大的实用意义。虽然我国(苏联)的科学在燃燒理論的發展方面已有了很大的成就，但是，要解决工程上的問題，目前还依靠着实验研究的結果，这些实验研究工作都是在实际燃燒設備中或者是在和工程条件很相接近的工作条件下进行的。

燃燒理論的作用主要是建立一般性的物理概念，从性質上来分析各个因素的影响，找出經驗数据的綜合方法以及实验工作的合理方向。

本書是叙述燃燒的基本热力理論的初步嘗試，但只限于对簡單現象的物理本質方面作近似的研究，把这些簡單現象組合起来，就構成工程上的复杂燃燒过程。

書中主要着重于燃燒过程的热力方面的分析，对整个現象，尤其是对化学动力学方面的概念，只作了概括的叙述。在化学动力学方面實質上只限于討論簡單放热反应的最普遍的性質，这些反应的速度与原有物質的濃度有关，而加速作用是与温度的升高有关。

討論得最詳細的是稳定燃燒过程的热力情况特点，临界着火現象和临界熄灭現象的物理意义，混合和对流傳热的影响以及关于燃燒的稳定性和“慣性”的最簡單的概念等。这些問題的研究方法就是 H. H. 西門諾夫院士古典方法的發展。西門諾夫院士在他关于可燃混合物热力爆燃的著作中所叙述的古典方法是近代燃燒热力理論的基础。关于火焰的傳播問題，正常燃燒与紊流燃燒的理論以及关于爆燃的簡單知識等等只佔很少的篇幅，而且是从分析稳定流动的热力过程的观点上来叙述的。

在討論个别問題的解答結果时，尽量想从性質上面使它們和

工程上的問題以及固定式爐子內燃燒過程的經過情況結合起來；使燃燒理論的結果盡量接近燃料燃燒時的實際要求，這就是作者在編著本書時所遵循的意願。要真正解決這個醞釀已久的問題，只有在將來才有可能，而且還需要靠各方面的專家共同努力。但是可以相信，在這個方向即使是初步的有系統研究也可帶給蘇維埃物理學家及熱工學家們以相當的幫助。

作者為了使本書以及在研究燃燒熱力理論時所採用的方法更能为學生所接受起見，故不但在個別問題的物理本質方面而且在討論問題時所採用的數學方面也儘可能作比較詳細地敘述，同時還利用圖解的方法使計算出來的結果盡量示成圖例。書中對於各種經驗數據，爐子的具體式樣和構造的分析，以及各種燃料在燃燒過程中的動態特性等，都不加以說明。至於燃燒液體燃料時的專門問題（像氣流的分裂過程，蒸發等等）以及煤或煤氣燃燒反應的真正本質（像初期生成物問題，在煤表面上以及在氣態中的二次反應，揮發物及灰的性質等等），在書中都沒有討論。書中唯一的工程計算例題（關於馬弗爐噴燃器的計算題），雖然把數字結果也做出來，但只有方法上的意義。

書中的最後一章——“燃燒的氣體動力學原理”——對於燃燒的氣體動力學問題作了簡要的敘述，但是所討論的問題的範圍非常有限。關於氣體動力學應用於燃燒過程問題的詳細討論應該是專門著作的研究對象。

本書整個都是根據蘇聯學者對於燃燒熱力理論所進行的研究工作寫成的，這些蘇聯學者是：Н. Н. 西門諾夫院士及其學派（蘇聯科學院通信院士 Я. Б. 徐爾陶維奇，Д. А. 弗朗克-克曼涅茨基教授，К. И. 雪爾金教授等），Л. Д. 倫道院士，蘇聯科學院通信院士 А. С. 百萊特伏契萊夫及其同事（Л. Н. 希脫林教授等），В. И. 白林諾夫教授，Г. Ф. 克諾雷教授，蘇聯科學院通信院士 З. Ф. 丘哈諾夫等等。書中（特別是前五章）記述作者本人研究所得、而且一部分在從前已經發表過的結果。關於這些結果的詳細敘述包括在作者 1945—1950 年所講授的許多課程的講義中

(特別是作者為奧忠尼啓則莫斯科航空學院的研究生所開的燃燒理論一課中有詳細的敘述)^①。

至於說到讀者所預先具備的知識範圍，那末主要的可以歸納為：要有傳熱問題的足夠知識以及燃燒技術的一般認識。某些關於化學反應速度、紊流特性等等方面的簡單知識，為了使讀者方便起見，也都在正文中提到。

本書前五章中所用的數學公式很簡單，讀者是很容易接受的，但在後面兩章中就必需熟習數學物理方程式，並且對知識水平不夠的讀者來說可能造成某些困難。但是，在敘述這兩章的同時，還作了比較詳細的物理上的說明。

作者對於工學博士 Г. Ф. 克諾雷教授為本書校閱手稿所提供意見表示感謝。

作 者

① 因為本書的手稿是在 1950 年底完成的，1950 年以後的研究工作，本書就沒有採用，所以照例在參考文獻表中也沒有把它們列入。

主要符号一覽表

符 号	因 次	名 称
T	° 绝对	温度
p	公斤/公尺 ²	压力
γ	公斤/公尺 ³	重度
v	公尺 ³ /公斤; 公尺 ³	比容; 燃燒室容积
ρ	公斤·秒 ² /公尺 ⁴	密度
I	大卡/公斤	热焓(物理热焓)
h	大卡/公斤	化学热焓
H	大卡/公斤	总热焓($H=h+I$)
T_*	° 绝对	滞止温度
w	公尺/秒	运动速度
τ	秒	时间
G	公斤/秒	混合物的每秒流量
l	公尺	长度; 紊流度范围
R	公斤·公尺/公斤·度	气体常数(或通用气体常数 $R=1.986$ 大卡/摩尔·度)
E	大卡/摩尔 ^①	活化能
W	公斤/公尺 ³ ·秒	单位容积的反应速度
V	公斤/公斤·秒	1 公斤混合物的反应速度
k	1/秒; 公尺/秒	反应速度常数(一级反应)
k_0	1/秒; 公尺/秒	爱倫尼烏斯公式中的常数
k_{eff}	1/秒; 公尺/秒	有效的反应速度常数
c'	公斤/公尺 ³	单位容积的濃度
c	公斤/公斤	相对重量濃度
Q	大卡/公尺 ³ ·秒	放热速度(热强度)
q	大卡/公斤; 大卡/公尺 ³	反应热效应; 混合物的發热量(热值)
x, y, n, t 等等	公尺	坐标
α	大卡/公尺 ² ·秒·度	对流放热系数
α_d	公尺 ³ /公尺 ² ·秒	换气系数(或扩散换气系数。——譯者)
c_p	大卡/公斤·度	等压比热
c_v	大卡/公斤·度	等容比热
λ	大卡/公尺·秒·度	导热系数
a	公尺 ² /秒	导温系数
D	公尺 ² /秒	扩散系数

符 号	因 次	名 称
μ	公斤·秒/公尺 ²	粘度系数(动力粘度系数)
ν	公尺 ² /秒	运动粘度系数
c_{np}	大卡/公尺 ² ·秒·度 ⁴	有效辐射常数
δ, d, r, R	公尺	定性尺寸
α	—	过量空气系数
π_0	—	反应的当量系数
π	—	混合物中氧化剂的重量与燃料的重量之比
k_T	—	热扩散常数
h	—	绝热指数② $\left(k = \frac{c_p}{c_v} \right)$
$\theta = \frac{RT}{E}$	—	无因次温度
$\vartheta = \frac{Rq c_0}{Ec_p}$	—	无因次发热量特性系数
$\varphi = 1 - \frac{c}{c_0}$	—	完全燃烧系数
$\beta = \frac{\alpha E}{c_p \cdot k_0}$	—	折算的对流放热系数③
$\sigma = \frac{E^3 c_{np}}{R^3 c_p k_0}$	—	折算的辐射放热系数③
$\tau_{ij} = \frac{\tau_i}{\tau_j}$	—	无因次时间
$\kappa = \frac{k_{\partial f f \partial}}{k_0}$	—	反应速度的折算常数(折算反应速度)
R	—	雷诺数 $R = \frac{wd}{\nu}$ (流动情况的相似准则)
M	—	马赫数 $M = \frac{w}{a}$ ($a = \sqrt{k g R T}$ ——音速)
λ	—	折算速度 $\lambda = \frac{w}{a \kappa p} \left(a \kappa p = \sqrt{\frac{2 g k}{k+1} R T_*} \right)$ ——临界速度)

① 活化能的因次应该是大卡/摩尔，而原文 E 的因次写成[大卡/摩尔·度]。
 恐印刷有誤，譯者修改如上。

② 严格講起来， k 应该譯成等熵指数，因絕热指数已經通用，故从之。

③ 对流傳热系数 α 中包括对流传热系数及辐射放热系数，即 $\alpha_{总} = \alpha_{对流} + \alpha_{辐射}$ 。——譯者

第一章 通 論

1-1. 前 言

本書專門討論穩定的燃燒^① 熱力情況。雖然燃燒是屬於不穩定的現象之列，但是燃燒過程熱力情況的基本概念及現象本質的許多重要結論都可從穩定系統的研究中得到。像在流體動力學中那樣，用歐拉座標來研究流動情況的方法，得到最普遍的採用。在許多場合下研究燃燒最好不要去觀察燃料或可燃混合物的個別質點的變遷，而集中精力去注意燃燒室內的某一部分中所發生的現象。在這種情況下——對於整個穩定的燃燒室工況來說——空間中任意一點的可燃混合物的狀態可以用溫度和濃度等數值不隨時間變動的數值來代表其特性。

由於運動性質是紊亂的，所以這些數值（例如溫度）可以看作是某一段時間內的一些平均值，這段時間和紊流的脈動周期相比，必須要取得相當長。

作了穩定燃燒的假定以後，在本書中對於那些根本不穩定的燃燒過程，例如活塞式或脈動式發動機中的燃燒就不加討論。

下面所要詳細討論的基本問題的本質簡略地可以用以下的道理來說明。初看起來，似乎燃燒可以在任何幾個隨意選取的工況參數（像燃燒室中的溫度，氣體的運動速度等等）值下實現，但是只要簡單觀察一下任何一爐子燃燒設備中的燃燒過程，那末就可以看出，這樣的假定是不符合實際的。在每一個具體情況中，燃燒過程只能在某一相當狹窄的參數值範圍內進行，這個範圍是由現象本身固有的內在關係來決定的，首先是由放出來的與傳出去的热量之間的关系來決定。每一設備都有自己的極限參數值（例如，空氣流進來的速度，過量空氣系數等等），超過這些極限值，爐

① 關於穩定燃燒的定義以後有說明。——譯者

子燃燒設備的穩定性工况就無法實現。變更這些參數中的某一數值(例如, 改變可燃混合物中的某一成分的過剩量), 在某些範圍內可以使燃燒情況的改變很平穩, 但是在某些場合下, 如所周知, 會給燃燒情況急劇地, 而實際上是突然地變到另一水準上。因此, 研究工作的任務首先就是要找出原理上可能的燃燒過程的穩定水準, 闡明它們的穩定性與各種“外部的”參數之間的關係, 以及最後確定過程從一水準變到另一水準時的轉變條件。

上面所提出的任務, 在一般情況中, 似乎應該從考慮燃燒室內部及其邊界處所有參數的空間分佈來解決。在數字上, 這就意味着三度空間問題的解決(在特殊情況下, 譬如: 對稱於軸的流動或近似的平面流動就變為解決二度空間的問題)。要積分出一組非線性的偏微分方程式的系統, 其所要用到的分析工具的複雜性那已經不用講了(也就是說, 要解決這種問題只有按具體條件採用數字的方法才能成功), 由於邊界條件不可能很準確地給出, 所以對於那樣問題的研究極少有可能完成。實際上, 燃燒室進口截面中空氣和燃料的詳細分佈情況, 系統邊界處運動速度的準確數值等等, 通常都是不知道的, 再加上燃燒反應的機構作用, 燃燒反應與溫度及濃度間的關係以及混合的規律等等方面知識的不夠, 同時燃燒室形狀以及燃燒室中空氣與燃料的實際運動情況又如此複雜, 因此要解釋現象的物理情況就不得不作大大的簡化。

因此, 普遍都採用近似的解答法, 主要是轉變到一度空間的線性模型(一度空間方案)。一度空間方案(通常稱它為水力学方案以與流體动力学方案相區別, 後者考慮到參數在兩個或三個空間座標上的分佈)的使用, 就相當於在計算中採用了按燃燒室截面來平均的變數值, 此時只保持唯一的空間座標——長度。在數學上這一簡化方法可以把偏微分方程式轉變成為普通的非線性的微分方程式。

採用了過程的一度空間模型之後, 在許多場合下, 可以導致質量上和數量上都很有用的結果。但是必須指出, 這一關於燃燒室截面上所有變數都看作常數的假定, 通常和實際的情況是相差

很远的。更重要的是，也許，在实际的爐子燃燒設備中，往往連座标軸的佈置都确定不下来。最后，这也是很重要的：即在实际过程中，整个爐膛容积的内部或其中的某些部分，其温度和濃度發生显著的拉平^①，这种拉平是由于新鮮混合物和燃燒产物之間的互相混合以及燃燒室内部的热交换所引起的。

这些道理使我們很难采用一度空間的模型以及不得不去寻求比較簡單而同时离开实际情况又不太远的示形方法以补充一度空間模型的不足。

采用了想使空間座标数值簡化的方法以后，自然会走上“零-因次”方案或点制方案的道路，也就是說，完全不考虑燃燒室內的变数分佈，而把整个燃燒室的諸参数值或者划作研究用的其中某一部分的諸参数值都按照平均值来計算。除了在数学上可以明显地把問題簡化外（因为可以把非綫性微分方程式变成代数方程式），即就物理方面来看，这种示形方案（實質上是有限差異法）也是很有意义的，因为它相当于新鮮混合物与燃燒室内部的燃燒产物完全混合时的極限情况，同时也相当于爐子容积中的温度和濃度完全拉平时的情况。許多情況下，在計算中采用了按容积来平均的温度和濃度的平均值之后，可以更加符合于过程进行的实际情况，如果不是在整个燃燒室中，那末在它的个别部分內，特别是在新鮮混合物的着火区域中就是这样。这里所指的是那些最通用的燃燒室構造，在这些燃燒室中新鮮混合物和燃燒产物之間能产生很好的混合，同时在这些燃燒室中，由于室內混合物的运动情况很錯綜复杂，所以实际上不可能指示出各个質点的运动軌跡。同时还要指出，正因为新产物和燃燒产物的混合，才使在許多場合中的新鮮混合物实际上有可能作連續的燃燒，因而才能保持稳定的燃燒过程。关于這一問題，以后要給予很大的注意。有限差異法（“零-因次”方案）是本書前四章所用的共同方法。在第一章（通論）中，引証一下关于化学反应速度方面的簡單知識，并

① 所謂“拉平”是指本来不相等的（不平衡的）各点的温度或濃度趋向于平衡（相等）的一种趋势，拉平并不等于已經平衡，而是正在平衡之中。——譯者

且討論一下 H. H. 西門諾夫院士所創議的可燃混合物的熱力爆燃理論[參閱文獻44]，這一理論介紹着后面三章中所採用的圖解研究法的實質。

在后面三章中——當所討論問題的複雜性逐漸增加時——挨次分析簡單的現象(組成複雜技術過程的“基元”現象)，通過這樣的分析可以確定一般的物理上的燃燒規律性以及闡明各個因素的作用。因此，在第二章中討論同類^①氣相混合物的絕熱燃燒，第三章中討論在固態表面上划取出來的基元表面上的不均一燃燒，第四章中討論加熱和對流傳熱(輻射及對流放熱)對燃燒熱力情況的影響。

兩種簡單系統的選擇——同類氣相混合物的燃燒與不均一的燃燒(反應氣體與固態表面之間進行擴散時)——之所以顯得特別方便，也是因為：它們之間在本書中的一貫類似使我們可以將這兩種情形的數學關係完全視為相同。實際上，像以後所要指出，同一公式和示式都可用來描寫這兩種過程。自然，這種符合並不是偶然的，而是由於這兩種現象在物理上關係非常密切。如果在這兩種情況中，我們集中力量來注意氣相的燃盡^②並且把化學動力學上的規律性(反應速度對溫度及濃度的關係)劃一地表示出來，則這種密切的關係就變得很明顯。後一問題需要專門的解釋。

為了解決燃燒熱力情況方面的問題，本書只牽涉最普通的，對所有放熱反應都是一樣的化學動力學方面的觀念。書中對於具體燃燒化學反應中的實際機構作用，中間產物與“活性中子”的作用及相似的問題等都不加討論，這些問題構成化學動力學的研究對象；在本書中討論得最詳細地是燃燒過程的熱力方面。因此在討論中只從化學動力學的概念方面引用了兩個完全肯定了的情

① “同類”俄文是 однородный，均一不一定同類，在均一系統中也有非同類的，但同類是均一的。——譯者

② “燃盡”俄文是 выгорание，燃料從着火點開始燃燒一直到燃料完全燒光為止，這一段燃燒過程稱為“燃盡”，不能把它當作完全燃盡看待。——譯者

况：首先是，当温度增高时，反应速度急剧增加；其次是，当混合物燃尽时，反应速度势必降低。光是想利用詳細的动力学工具来分析技术过程，在一般形式下是不能来討論問題的，因为最重要的是——目前还不可能这样做。譬如，Я.Б.徐尔陶維奇〔文献14〕指出的，对于燃燒过程的动力学來說，“要把燃燒的使用問題，即动力学經驗的使用問題提到首要的地位”，然后再来討論它的結果。想根据化学动力学的數據来直接預算燃燒速度，这还是將来的問題。

上面这种情况以及爐子設備中可燃混合物的复杂性，也是由于各个物理及物理化学現象多样性的緣故，总的复杂的燃燒过程就是由这些分現象所組成的。沉溺于一时風行的企圖，想用純粹化学动力学上的关系来从理論上建立燃燒的技术計算，这方面的失敗情形已經知道得很多了。至于把随着燃燒而产生的“副現象”——物質及能量的轉移——認為只是化学反应过程中惱人的怪态，这种观点在目前似乎是太幼稚了。同时要完全除去化学反应速度在总燃燒过程中的作用，这方面的相反概念也尚未得到發展。所有这些問題，特别是反应速度和燃燒过程中物理現象（热交換，扩散等等）之間的相互关系，在研究燃燒的热力情况时，可以非常清楚地揭露出来。

现在再回复到本書內容的簡短評述。本書的第五章是从“零-因次”方案到过程的一度空間方案的轉变环节。在这一章中簡略地討論簡單的一度空間問題，并且指出了：要把一度空間問題中的微分方程式轉变为有限差異的代数方程式，就会引到“零-因次”模型。因此，后者是一种普通的近似的研究問題的方法。此外，在第五章中还引述了一些关于火焰傳播速度的一般道理并且还包含有比較詳細的关于最簡單技术过程（馬弗爐噴燃器中碳与空气混合物的燃燒）的概略計算題。这个例題一直把数字的結果也算了出来，但主要只有方法上的意义。在这一計算中，重要的倒是：分析最佳的（“分級的”）空气配合制度，似乎它倒能提供更普遍的意义。