

液体火箭发动机中的 燃 烧

[苏联] IO. X. 沙烏洛夫、M. O. 列尔涅尔著



國防工業出版社

液体火箭发动机中的燃烧

[苏联]Ю. X. 沙烏洛夫、M. O. 列尔涅尔著

金如山译 朱宁昌校

国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书叙述燃烧室中的工作过程和燃烧理论的基本原理，同时也讨论了火焰中的化学反应动力学、燃烧不稳定性及液体火箭发动机中的物理-化学过程模拟的问题。

本书可适用于工业部门的工程师以及有关专业的研究生和高等技术学校的高年级学生。

ТОРЕНИЕ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

[苏联] Ю. Х. Шаулов、М. О. Лернер

Обorongиз 1961

*

液体火箭发动机中的燃烧

金如山译

朱宁昌校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 7 174 千字

1965 年 2 月第一版 1965 年 2 月第一次印刷 印数：0,001—2,200 册

统一书号：15034·787 定价：(科八—1) 1.50 元

目 录

代表符号	6
序	7
第一章 化学反应动力学基础	9
§ 1. 活化能	9
§ 2. 单分子反应	14
§ 3. 双分子反应	17
§ 4. 原子及基的复合反应	19
§ 5. 鏈式反应	21
1. 不分枝鏈反应	22
2. 分枝鏈反应	24
3. 简并分枝鏈反应	27
§ 6. 鏈自燃	28
§ 7. 热自燃	30
第二章 均相燃烧与非均相燃烧	33
§ 1. 澤利多維奇及弗兰克-卡麦涅茨基正常火焰速度理論 ^①	35
§ 2. 正常火焰速度与可燃混气参数的关系	40
1. 正常火焰速度与压力的关系	40
2. 正常火焰傳播速度与温度的关系	41
3. 正常火焰速度与混气成分的关系	43
4. 不同添加剂对火焰速度的作用	44
§ 3. 火焰傳播界限理論	47
§ 4. 正常火焰鋒的稳定性	53
§ 5. 紊流燃烧与爆震燃烧	64
1. 紊流燃烧	64

^① 原文中《火焰傳播速度》，本书按原文譯出——譯者注。

2. 两相混气的着火	68
3. 喷雾燃料的燃烧	80
4. 爆震理论基础	82
第三章 火焰中的化学反应动力学	87
§ 1. 火焰锋的结构	87
§ 2. 研究火焰中的化学反应动力学的方法	94
§ 3. 含有氮氧化物的混气燃烧	97
1. 一氧化氮的生成及分解动力学	98
2. 火焰中一氧化氮的分解	99
3. $\text{NO} + \text{H}_2$ 火焰中的反应机理	101
4. 火焰中二氧化氮的分解	103
§ 4. 双焰燃烧	103
1. 一氧化氮混气着火的临界条件	110
2. 火焰中反应的自抑制效应	111
第四章 混气形成	118
§ 1. 燃料雾化	119
1. 燃料输送系统中液体的运动	119
2. 液滴形成机理	120
3. 雾化特性	125
4. 雾化过程的模拟	129
§ 2. 燃料蒸发	131
1. 液滴等温蒸发	131
2. 液滴群蒸发	137
§ 3. 混合	139
§ 4. 着火延迟	144
1. 确定着火延迟的方法	145
2. 影响着火延迟的因素	147
第五章 稳定燃烧状态	150
§ 1. 一般概念	150
§ 2. 实验研究	162
第六章 燃烧过程的不稳定性	167
§ 1. 低频不稳定性的分析	173
1. 燃烧室方程式	174

2. 組元沿导管运动方程式	176
3. 稳定性边界的确定	179
§ 2. «室内»不稳定性	183
§ 3. 高频不稳定性的分析	185
燃烧室微分方程式	186
§ 4. 具有管道中分布参数的系統不稳定性分析	190
§ 5. 謝尔金不稳定性判据	194
§ 6. 燃烧过程不稳定性的实验研究	196
1. 滞后时间的测量	197
2. 实验观察	201
第七章 燃烧过程的模拟	203
§ 1. 物理-化学相似理論的基本原理	205
§ 2. 双組元液体火箭发动机的相似条件	214
参考文献	218

目 录

代表符号	6
序	7
第一章 化学反应动力学基础	9
§ 1. 活化能	9
§ 2. 单分子反应	14
§ 3. 双分子反应	17
§ 4. 原子及基的复合反应	19
§ 5. 鏈式反应	21
1. 不分枝鏈反应	22
2. 分枝鏈反应	24
3. 简并分枝鏈反应	27
§ 6. 鏈自燃	28
§ 7. 热自燃	30
第二章 均相燃烧与非均相燃烧	33
§ 1. 澤利多維奇及弗兰克-卡麦涅茨基正常火焰速度理論 ^①	35
§ 2. 正常火焰速度与可燃混气参数的关系	40
1. 正常火焰速度与压力的关系	40
2. 正常火焰傳播速度与温度的关系	41
3. 正常火焰速度与混气成分的关系	43
4. 不同添加剂对火焰速度的作用	44
§ 3. 火焰傳播界限理論	47
§ 4. 正常火焰鋒的稳定性	53
§ 5. 紊流燃烧与爆震燃烧	64
1. 紊流燃烧	64

^① 原文中《火焰傳播速度》，本书按原文譯出——譯者注。

2. 两相混气的着火	68
3. 喷雾燃料的燃烧	80
4. 爆震理论基础	82
第三章 火焰中的化学反应动力学	87
§ 1. 火焰锋的结构	87
§ 2. 研究火焰中的化学反应动力学的方法	94
§ 3. 含有氮氧化物的混气燃烧	97
1. 一氧化氮的生成及分解动力学	98
2. 火焰中一氧化氮的分解	99
3. $\text{NO} + \text{H}_2$ 火焰中的反应机理	101
4. 火焰中二氧化氮的分解	103
§ 4. 双焰燃烧	103
1. 一氧化氮混气着火的临界条件	110
2. 火焰中反应的自抑制效应	111
第四章 混气形成	118
§ 1. 燃料雾化	119
1. 燃料输送系统中液体的运动	119
2. 液滴形成机理	120
3. 雾化特性	125
4. 雾化过程的模拟	129
§ 2. 燃料蒸发	131
1. 液滴等温蒸发	131
2. 液滴群蒸发	137
§ 3. 混合	139
§ 4. 着火延迟	144
1. 确定着火延迟的方法	145
2. 影响着火延迟的因素	147
第五章 稳定燃烧状态	150
§ 1. 一般概念	150
§ 2. 实验研究	162
第六章 燃烧过程的不稳定性	167
§ 1. 低频不稳定性的分析	173
1. 燃烧室方程式	174

2. 組元沿导管运动方程式	176
3. 稳定性边界的确定	179
§ 2. «室内»不稳定性	183
§ 3. 高频不稳定性的分析	185
燃烧室微分方程式	186
§ 4. 具有管道中分布参数的系統不稳定性分析	190
§ 5. 謝尔金不稳定性判据	194
§ 6. 燃烧过程不稳定性的实验研究	196
1. 滞后时间的测量	197
2. 实验观察	201
第七章 燃烧过程的模拟	203
§ 1. 物理-化学相似理論的基本原理	205
§ 2. 双組元液体火箭发动机的相似条件	214
参考文献	218

液体火箭发动机中的燃烧

[苏联]Ю. X. 沙烏洛夫、M. O. 列尔涅尔著

金如山译 朱宁昌校

国防工业出版社

1965年11月第1版

代表符号

- E ——活化能；
 R ——通用气体常数；
 v ——容积；
 p ——压力；
 k ——化学反应速率常数；
 τ^* ——受激分子生存时间；
 u ——化学反应速率；火焰传播速度；
 u_b ——相对于燃烧产物的火焰速度；
 u_n ——正常火焰速度；
 Z ——碰撞总数；
 W_0 ——活化中心生成速率；
 f ——链分枝速率常数；
 g ——断链速率常数；
 Φ ——放热速率；
 Q ——反应热效应；
 λ ——导热系数；
 c ——比热；浓度；
 ρ ——密度；
 α ——导热系数；
 δ ——预热区；
 T_b ——着火温度；
 T_c ——燃烧温度；
 f/v ——火焰表面积与容积之比；
 t ——时间；
 τ ——感应期；滞后时间；
 μ ——流量系数；
 r_c ——(喷嘴的)喷口半径；
 r_{bx} ——喷嘴进口口半径；
 G ——流量；
 Δp ——压降；
 ν ——运动粘性系数；
- η ——动力粘性系数；
 γ ——绝热指数；
 M ——马赫(Мах)准则；
 Re ——雷诺(Рейнольдс)准则；
 Pe ——贝克莱(Пекле)准则；
 We ——韦伯(Вебер)准则；
 Nu ——努塞特(Нуссельт)准则；
 Pr ——普朗特(Прандтль)准则；
 D ——达姆克列尔(Дамкелер)准则；
 Fr ——傅鲁德(Фруд)准则；
 Ka ——卡门(Карман)准则；
 v ——流速；
 x ——空间座标；
 β ——蒸发系数；
 α ——换热系数；
 δ ——破碎尺度；
 C^* ——特征速度；
 n ——相互作用指数。
- 注脚符号：
- $г$ ——气体；燃烧剂；
 $к$ ——燃烧室；
 ϕ ——喷嘴；
 $с$ ——尾喷管；
 $о$ ——氧化剂；
 $б$ ——贮箱；
 $кр$ ——临界截面；
 $н$ ——流动；
 ——字母上端的横线表示平均值或稳态值；
 p ——算子形式的微分表示符号；
 s ——拉氏变换的变量复数。

內 容 簡 介

本书叙述燃燒室中的工作过程和燃燒理論的基本原理，同时也討論了火焰中的化学反应动力学、燃燒不稳定性及液体火箭发动机中的物理-化学过程模拟的問題。

本书可适用于工业部門的工程师以及有关专业的研究生和高等技术学校的高年級学生。

ТОРЕНИЕ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

[苏联]Ю. Х. Шаулов、М. О. Лервер

ОБorongиз 1961

*

液体火箭发动机中的燃燒

金如山譯

朱宁昌校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印張 7 174 千字

1965 年 2 月第一版 1965 年 2 月第一次印刷 印数：0,001—2,200 册

統一书号：15034·787 定价：(科八—1) 1.50 元

序

本书叙述在液体火箭发动机中进行的工作过程以及均相混气燃烧理论的基本原理。书中讨论了已公认的化学动力学原理，分析了火焰传播的一些基本规律性。要对火箭发动机燃烧室中两相混气燃烧时出现的复杂物理-化学现象进行研究和解释，就需要这些火焰传播规律性的知识。

在发动机中，由于流体动力学特性使燃烧景象发生剧烈地畸变，在这里，化学过程的动力学经常占次要的地位。热量和物质的交换过程，限制了燃烧过程的速率及其进一步的强化。可以用引入总的時間特征的方法，来研究控制这种复杂燃烧过程的规律性。稳定性的流体动力学理论就是运用这种参量的一个例子。

除了这些问题以外，书中还讨论发动机中的混气形成过程，以及物理化学过程的相似理论的基本原理。

本书对系统叙述一些基本原理作了尝试，这些基本原理，对于建立严整的液体火箭发动机的燃烧理论，是有重要意义的。由于本书篇幅所限，对某些问题作了简化分析。

本书是根据苏联及外刊上发表的文献资料写成的。书中列入的各种构造、燃料以及燃料系统的例子，均取自外刊文献。

本书作者对苏联科学院通讯院士 A. C. 普列德沃季捷列夫 (Предводителев) 教授表示深切的谢意，因为他撰写了第二章第五节^①第二小节“两相混气的着火”，同时，向所有对本书内容提出意见的读者，也将表示谢意。

^① 原文中誤为第二章第二节——校者注。

第一章 化学反应动力学基础

§1. 活化能

化学动力学是物理化学的一个分支，是关于化学反应速率的学说，燃烧及火焰传播的理论都是建立在这学说的基础上。燃烧——首先是一个在高温下进行的放热化学反应。因此，在这里叙述一些化学动力学的基本原理是适当的。

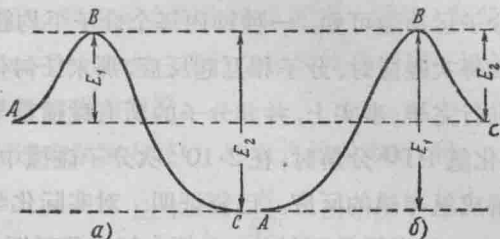


图1 能垒示意图①：

a—放热反应；b—吸热反应。

表征参加反应的分子反应能力的基本值，是该化学反应的活化能。要发生化学反应，参与相互作用的分子，应具有一个最低限度的能量，这能量称为活化能。它能够削弱或者破坏起始物分子的键，然后，可能生成能位更为稳定的新键，这些新键导致最终反应产物的生成。

为明显起见，在化学反应中，分子位能的变化可用图线说明（图1）。为发生化学反应，分子应具有某个为削弱或断裂其现存键所必需的最小能量 E_1 。获得这一能量，从而也就克服了某个能垒 AB 后，分子转变为最终产物（点 c ），并放出能量。当 $E_1 < E_2$

① 原文此图上缺一“c”字——译者注。

时(图 1, a), 总的反应热效应是正的(放热反应), 当 $E_1 > E_2$ 时(图 1, b), 反应吸热地进行(吸热反应)。

饱和分子的活化能相当大, 通常有几十大卡。例如, 生成水的反应 $E = 45$ 大卡/克分子。对饱和分子与基的反应, 活化能为 10 大卡左右; 而对原子与基的反应, 活化能实际上等于零。

温度的增高显著地提高化学反应速率, 并引起分子内各原子之间键的松弛或完全破坏。根据化学变化的分子(碰撞)机理, 可以解释温度增高时, 化学反应速率的迅速增长。在无规则的热运动中, 反应气体的各分子互相碰撞, 但化学反应仅仅是由于有效碰撞的结果才发生。

由气体分子运动论可知, 一秒钟内每个分子平均经受 10^{10} 次的碰撞。假如每次碰撞时, 分子相互起反应, 那末任何化学反应都应当瞬时地进行完毕。事实上, 并非分子的所有碰撞都导致化学反应。例如, 碘化氢 HI ^① 分解时, 在 $2 \cdot 10^{17}$ 次分子碰撞中, 仅有一次碰撞引起分解成氢与碘的反应。已经证明: 对实际化学反应的发生, 只有反应分子的碰撞是不够的; 必须在相碰的瞬间, 起始物各分子具有一定的能量, 该能量足以削弱在反应中被扯裂的键。

无效碰撞之所以大量存在, 是因为要发生化学反应, 必须是具有一定速度的, 亦即具有一定能量的分子发生碰撞。只有那些相碰分子的能量大于某一最小能量值 E 的碰撞才会导致化学反应。这个必不可少的能量也就是活化能。

在双分子反应情况下, 活化能就是两个互撞分子的动能之和。分子的化学稳定性使化学反应不容易发生。

化学反应速率随温度变化的关系, 可用速率常数为 k 的著名阿雷尼乌斯(Аррениус)公式来表示:

$$k = Be^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1.1)$$

① 原文中元素碘用“J”表示, 按习惯改用“I”——校者注。

式中 E ——活化能；
 R ——通用气体常数；
 T ——温度。

B 值表征与分子运动速度成正比的总碰撞数，而分子运动速度则正比于 \sqrt{T} ：

$$B = \text{常数} \cdot \sqrt{T}。$$

由统计物理学观点看来，阿雷尼乌斯公式中的指数项 $e^{-\frac{E}{RT}}$ 乃是能量大于 E 的那部分分子（分子分额）。下表列出不同温度时 $e^{-\frac{E}{RT}}$ 的数值（见表 1）。

应该指出，阿雷尼乌斯定律是更为一般的、麦克斯韦-玻尔兹曼（Максвелл-Больцман）统计定律的特殊情况，这统计定律给出能量按分子数的分布规律。

对反应速率常数方程(1.1)取自然对数后，得

$$\ln k = -\frac{E}{RT} + \ln B。 \quad (1.2)$$

表 1 碘化氢分解反应的活化分子分额随温度变化的关系 $2\text{HI} = \text{H}_2 + \text{I}_2$, $E = 43$ 大卡/克分子

$T^\circ\text{K}$	$e^{-\frac{E}{RT}}$
288	$6.7 \cdot 10^{-20}$
500	$7.7 \cdot 10^{-20}$
1000	$2.8 \cdot 10^{-10}$
1500	$4.2 \cdot 10^{-7}$
2000	$1.7 \cdot 10^{-5}$

因为在首次近似中，可设 B 为与温度无关的常数，则

$$\ln k = -\frac{E}{RT} + \text{常数}。 \quad (1.3)$$

① 拟应为“45 大卡/克分子”——校者注。