

液体燃料喷气式 发动机的工作过程

[苏联] A. B. 鮑加爾斯基、B. K. 苏金著



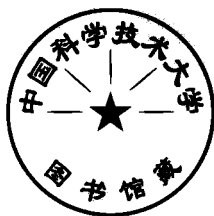
国防工业出版社

液体燃料喷气式 发动机的工作过程

〔苏联〕A. B. 鲍加爾斯基、B. K. 苏金 著

華人杰、陈寿祖、任世鐘 译

董 紹 庸 校



国防工业出版社

液体燃料喷气发动机的工作过程一书是根据苏联科学家现有的著作和实验资料而编写的，其目的在于探讨液体燃料喷气发动机理论的基本要点，指出有待解决的诸问题，并对其中某些问题（如混合气不良时燃烧过程的计算，化学作用对气流影响的估计，燃烧室的气动计算，蒸汽-气体发生器的计算，喷管以最大经济性飞行时的计算）在某种程度上做到了研究或解决。

本书共分六部分：（1）概论（包括工作原理，应用范围等）；（2）发动机热力学；（3）发动机气动力学；（4）工作过程的物理与化学；（5）发动机热计算及发动机特性曲线；（6）发动机的散热。

本书对液体燃料喷气发动机理论的发展有着很大的贡献，特别是有助于我国目前液体燃料喷气发动机理论方面的研究工作。

РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТНО-РЕАКТИВНЫХ
ДВИГАТЕЛЯХ

〔苏联〕А. В. БОЛГАРСКИЙ

В. К. ШУКИН

ОБОРОНГИЗ 1953

液体燃料喷气式发动机的工作过程

华人杰、陈寿祖、任世钟 译

董绍庸 校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第 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

850/1168 $1\frac{1}{32}$ 印张 $14\frac{5}{16}$ 366 千字

1957年7月第一版 1964年9月第二次印刷 印数：1,001—1,620册

统一书号：15034·107 定价：（科八-1）3.00元

序

从开始产生液体燃料噴气发动机的理想起，到現在已經有四十多年了，但只是在最近十年来，这种发动机才算真正地走出了實驗室研究的阶段。由于它可能广泛地应用到航空上，同时它有着装置其他类型发动机的飞机所不能达到的那些指标底成績，这些充分說明液体燃料噴气发动机在科学和技术界中所表現出的日益增长的重要性。

在液体燃料噴气发动机的理論中，有許多复杂的問題至今还没有解决。創立液体燃料噴气发动机理論之所以困难，也是因为我们在这方面拥有的試驗資料不多。

本書是初次嘗試拟定液体燃料噴气发动机理論的基本要点，并指出有待解决的这些問題中，那些是最弱之点。例如象膨胀多变指数平均值的選擇，燃燒室內的傳热計算等等都是。

在編写本書的过程中，著者对一些个別的問題在某种程度上做到了研究或解决。其中包括：混合不良时燃燒过程的計算，化学作用（在气体动力方面）对气流影响的估計，燃燒室的气动計算，蒸汽-气体发生器的計算，噴管以最大經濟性飞行时的計算等。

苏联科学家在液体燃料噴气发动机理論的发展上起着主导的作用。本書几乎完全是以苏联科学家的著作为基础而編写的。

第二、三、四、五、六、十三及十四章为 A. B. 鲍加尔斯基所写，第一、七、八、九、十、十二章为 B. K. 苏金所写，第十一章是两人合写的。

因为液体燃料噴气发动机理論中的某些問題到現在还没有彻底解决，或是根本没有去研究，所以这种发动机理論的建立，只可在提出許多簡化的先决条件下才能做到。著者衷心感謝地接受一切与本書所述問題有关的批評。

著者对工程师切尔尼洛夫斯卡婭 (А. Г. Черниловская) 和

沃耳柯娃姬 (В.Е. Волковая) 在本書最后定稿时所給予的 巨大帮助表示感謝。同时也感謝工程师謝伏魯 克 (Д.Д. Севрук)、技术科学博士格利卓杜勃 (Ю.Н. Гризодуб) 和工程师杜 施 金 (Д.С. Душкин)，承他們費心評閱本書，并提供了許多珍貴的意見。

本書採用的主要符號

- A ——功熱當量, $A=1/427$ 大卡/公斤米。
- a ——當地音速, 公尺/秒。
- 導溫係數, 公尺³/小時。
- $a_{\text{臨界}}$ ——噴管臨界截面處的音速, 公尺/秒。
- C ——物質的濃度, 公斤/公斤。
- C_P ——燃料消耗率, 公斤/公斤小時。
- c ——實際過程的比熱, 大卡/公斤度。
- 固態與液態物質的比熱, 大卡/公斤度。
- c_n ——多變過程的比熱, 大卡/公斤度。
- c_p ——等壓過程的比熱, 大卡/公斤度。
- c_r ——摩擦比熱 (假定數值), 大卡/公斤度。
- c_v ——等容過程的比熱, 大卡/公斤度。
- D ——擴散係數, 公尺²/小時 或 公尺²/秒。
- d ——管道直徑, 公尺。
- 噴管截面直徑, 公尺或公厘。
- d_3 ——管道截面的當量直徑, 公尺。
- E ——活化能, 大卡/摩爾。
- 粘度, 恩格列爾度。
- F ——管道橫截面積, 公尺²。
- F_1 ——燃燒室橫截面面積, 公尺²。
- F_a ——噴管出口橫截面面積, 公尺²。
- $F_{\text{臨界}}$ ——噴管臨界截面面積, 公尺²。
- f_1 ——燃燒室無因次橫截面面積。
- f_a ——噴管出口無因次截面面積。
- G ——氣體 (燃料) 流量, 公斤/秒。
- $G_{\text{發}}$ ——發動機重量, 公斤。
- g ——重力加速度, 公尺/秒²。
- 重量百分數, 公斤/公斤。
- g_r ——混合劑中燃燒劑含量, 公斤/公斤。
- g_0 ——混合劑中氧化劑含量, 公斤/公斤。

- H ——高度，公里。
 H_{μ} ——燃料热值，大卡/摩尔。
 $H_{\mu r}$ ——燃烧剂热值，大卡/摩尔。
 $H_{\mu o}$ ——氧化剂热值，大卡/摩尔。
 H_u ——燃料热值，大卡/公斤。
 H'_u ——燃料热值，大卡/公升。
 h ——加热比。
 I ——气体焓，大卡/摩尔。
 i ——气体焓，大卡/公斤。
 K ——反应速度常数。
 K_p ——化学平衡常数（根据压力）。
 k ——泊松绝热指数。
 传热系数，大卡/公尺²小时度。
 k_0 ——在真空中喷射的推力系数。
 k_p ——推力系数。
 L ——机械功，公斤公尺/公斤。
 $L_{\text{绝热}}$ ——绝热功，公斤公尺/公斤。
 $L_{\text{摩擦}}$ ——摩擦功，公斤公尺/公斤。
 L_t ——实际循环功，公斤公尺/公斤。
 L_K ——燃烧室长度，公尺。
 L_t ——理想循环功，公斤公尺/公斤。
 l ——直线尺寸（长度），公尺。
 辐射线长度（辐射层厚度），公尺。
 M ——摩尔数，摩尔/摩尔。
 M ——气体速度与当地音速的比。
 Ma ——马古里斯标准数。
 Mn ——多变流动的修正 M 数。
 m ——质量，公斤秒²/公尺。
 m_r ——在 1 摩尔燃烧剂中水的摩尔数。
 m_0 ——在 1 摩尔氧化剂中水的摩尔数。
 $m_{H_2O_2}$ ——在 1 摩尔过氧化氢中水的摩尔数。
 m_n ——在 1 摩尔触媒剂中水的摩尔数。
 $-N$ ——摩尔数，摩尔/公斤。
 N_u ——努塞尔特标准数。

- n ——多变指数。
表示反应次序的量。
- n_r ——实际多变指数（計入摩擦）。
- P ——推力，公斤。
力，公斤。
- $\overline{P}$ ——相对推力。
- P' ——单位推力公斤秒/公斤。
- $\overline{P}'$ ——相对单位推力。
- P'_0 ——計入蒸汽-气体发生器內混合剂消耗量的单位推力，公斤秒/公斤。
- P'_Σ ——說明发动机飞行中經濟性的单位推力，公斤秒/公斤。
- P'' ——单位推力，公斤秒/公升。
- P_r ——普兰特标准数。
- p ——压力，公斤/公分²。
- p_0 ——燃燒室前端的压力，公斤/公分²。
- p_1 ——燃燒室末端的压力，公斤/公分²。
- $p_{\text{临界}}$ ——临界截面处的气体压力，公斤/公分²。
- p_a ——噴管出口截面处的压力，公斤/公分²。
- p_c ——在燃燒室（燃料汽化完时） $c-c$ 截面处的压力，公斤/公分²。
- p_h ——气体流出处外界介質压力，公斤/公分²。
- p_s ——飽和蒸汽的压力，公斤/公分²。
- p_z ——燃燒室內气体的压力，公斤/公分²。
- Q ——气体吸收的热量，大卡/公斤。
- Q_H ——自外面加入的热量，大卡/公斤。
燃料低热值（仅用在第十章），大卡/公斤。
- $Q_{\text{摩擦}}$ ——摩擦热，大卡/公斤。
- q ——单位热流，大卡/公尺²小时。
- q' ——单位扩散流，公斤/公尺²小时。
- R ——气体常数，公斤公尺/公斤度。
- R_0 ——雷諾数（雷諾标准数）。
- r ——管道截面半径，公尺。
汽化（蒸发）热，大卡/公斤。
气体体积百分数。
- r_r ——燃燒剂体积百分数。
- r_0 ——氧化剂体积百分数。

- S ——流体阻力, 公斤。
 s ——单位面积上的摩擦力, 公斤/公尺²。
 T ——温度, °K。
 T^* ——滞止温度, °K。
 T_0 ——燃烧室前端的气体温度, °K。
 T_1 ——燃烧室末端的气体温度, °K。
 T_a ——喷管出口截面处气体温度, °K。
 T_c ——在燃烧室(燃料汽化完时) $c-c$ 截面处的气体温度, °K。
 T_n^* ——多变滞止温度, °K。
 T_T ——理论燃烧温度, °K。
 T_h ——气体流出处外界介质温度, °K。
 T_z ——静止气体中的燃烧温度, °K。
 t ——温度, °C。
 u ——内能, 大卡/公斤。
 u_n ——过程的特性速度, 公尺/秒。
 u_c ——燃烧室的燃烧率, 公斤/公尺²小时。
 u_T ——燃烧室的燃烧率, 大卡/公尺²小时。
 V ——反应速度, 公斤/公斤秒。
 气体体积, 公尺³。
 V_T ——燃烧速度, 公斤/公斤秒。
 V_d ——扩散燃烧速度, 公斤/公斤秒。
 V_K ——动力燃烧速度, 公斤/公斤秒。
 燃烧室容积公尺³。
 v ——气体比容, 公尺³/公斤。
 飞行速度, 公尺/小时。
 w ——气体速度, 公尺/秒。
 w_1 ——燃烧室末端的气体速度, 公尺/秒。
 w_a ——喷管出口截面处的气体速度, 公尺/秒。
 w_c ——在 $c-c$ 截面处(燃料汽化完时)的气体速度, 公尺/秒。
 x ——流动座标。
 y ——流动座标。
 X ——化学能, 大卡/摩尔。
 x ——化学能, 大卡/千克。
 ϑ ——能含, 大卡/摩尔。

- β ——能含，大卡/公斤。
 α ——氧化剂剩余系数。
 角，°。
 散热系数，大卡/公尺²小时度。
 β ——扩散速度常数，公尺/秒。
 角，°。
 γ ——比重，公斤/公尺³（气体）；公斤/公升（燃料及其他液体）。
 γ_r ——燃烧剂比重，公斤/公升。
 γ_o ——氧化剂比重，公斤/公升。
 δ ——厚度（壁，液层），公厘。
 直线尺寸，公尺。
 ζ ——摩擦损失系数，
 当地阻力系数。
 η ——动力粘性系数，公斤秒/公尺²。
 η_{II} ——发动机总效率。
 η_e —— $v=0$ 时，发动机的有效效率。
 η_{ev} ——发动机在飞行中的有效效率。
 η_g ——相对效率。
 η_t ——循环热效率。
 η_T ——飞行（推进）效率。
 η_i ——内效率。
 Θ ——喷管扩散段的圆锥角，°。
 x ——实际与1摩尔燃烧剂作用的氧化剂数量，摩尔/摩尔。
 x_o ——反应的化学量系数，摩尔/摩尔。
 x'_o ——反应的化学量系数，公斤/公斤。
 x''_o ——反应的化学量系数，公升/公升。
 λ ——导热系数，大卡/公尺小时度。
 μ ——分子量。
 μ' ——计入水分含量时的分子量（当成分浓度小于100%时）。
 μ_r ——燃烧剂的分子量。
 μ'_r ——计入水分含量时燃烧剂的分子量。
 μ_o ——氧化剂的分子量。
 μ'_o ——计入水分含量时氧化剂的分子量。
 ν ——运动粘性系数，公尺²/秒。

- r_c ——燃燒室容熱強度，公斤/公尺³小時。
 r_T ——燃燒室容熱強度，大卡/公尺³小時。
 ξ_d ——按離解計算的發熱係數。
 ξ_H ——按混合計算的發熱係數。
 ξ_{da} ——在噴管出口截面上，按離解計算的發熱係數。
 ξ_{dz} ——在燃燒室末端按離解計算的發熱係數。
 ξ_{Ha} ——在噴管出口截面上，按混合計算的發熱係數。
 ξ_{Hz} ——在燃燒室末端按混合計算的發熱係數。
 ξ_a ——在噴管出口截面處的發熱係數。
 ξ_z ——在燃燒室末端的發熱係數。
 Π ——管道截面的周長，公尺。
 ρ ——氣體密度，公斤秒²/公尺⁴。
 σ ——表面張力，公斤/公尺。
 σ_r ——燃燒劑濃度，%。
 σ_o ——氧化劑濃度，%。
 過氧化氫的濃度，%。
 σ_K ——觸媒劑濃度，%。
 τ ——時間，秒。
 τ_r ——燃燒時間尺度，秒。
 τ_d ——擴散燃燒時間尺度，秒。
 τ_K ——動力燃燒時間尺度，秒。
 τ_H ——停留時間，秒。
 Φ ——表面積（摩擦的，散熱的），公尺²。
 φ ——過氧化氫與觸媒劑的重量比，公斤/公斤。
 ψ ——混合特性。
 過氧化氫與觸媒劑的摩爾比，摩爾/摩爾。
 ω ——計算流體摩擦係數式中的公式係數。

在第十三、十四章中採用的注腳符號

- “Г”——指與接觸氣體那面壁有關的量。
 “Ж”——指與接觸液體那面壁有關的量。
 “П”——指有關邊界層的量。
 “Ц”——指與紊流核心有關的量。
 “f”——指關於液流平均值的量。
 “w”——指與壁有關的量。

目 录

序

本書采用的主要符号

概 論

第一章 液体燃料噴气发动机的特点及其应用范围	1
§ 1. 工作原理	1
§ 2. 发展史	3
§ 3. 液体燃料噴气发动机的特性	10
§ 4. 应用范围	12
§ 5. 液体燃料噴气发动机和其他类型发动机的比較	15

发 动 机 热 力 学

第二章 发动机的主要参数	20
§ 1. 推力	20
§ 2. 理想循环	24
§ 3. 液体燃料噴气发动机作为一种发动机时的效率	26
§ 4. 热效率与膨胀比的关系	31
§ 5. 总效率	33
第三章 燃料	37
§ 1. 对燃料的基本要求	37
§ 2. 燃燒剂	40
§ 3. 燃燒剂的物理化学性質	43
§ 4. 氧化剂	51
§ 5. 氧化剂的理化常数	54
§ 6. 自然成分	62
§ 7. 各种燃料(各种成分偶)的比較	63
第四章 燃燒过程	67
§ 1. 基本关系	67
§ 2. 燃料的重量組成及体积組成	74
§ 3. 燃燒产物的理論組成	80
§ 4. 燃料的热值	85
§ 5. 理論燃燒溫度	92
§ 6. 燃燒产物的实际組成	101

§ 7. 气体的能含	107
§ 8. 原来物質的能含	110
§ 9. 求燃燒溫度的方程	113
§ 10. 求燃燒产物組成及燃燒溫度的聯立方程的解法	115
§ 11. 算例	119
§ 12. 燃燒过程的近似計算法	132
§ 13. 計及不完全混合时燃燒过程的計算	136
第五章 流动过程	138
§ 1. 实际流动过程	138
§ 2. 发热系数	140
§ 3. 噴口处的发热系数	143
§ 4. 計算流动过程的方法	149
§ 5. 不平衡流动	150
§ 6. 平衡流动	153
§ 7. 燃燒过程与流动过程的計算举例	156
第六章 蒸汽—气体的产生	167
§ 1. 液体燃料噴气发动机內蒸汽—气体之使用	167
§ 2. 以过氧化氢作为蒸汽—气体的来源	167
§ 3. 燃燒室內水分的汽化	183
§ 4. 在蒸汽发生器內蒸汽的获得	189

发动机气体动力学

第七章 气流的轉变	193
§ 1. 几何形状影响	195
§ 2. 过程的特性速度	196
§ 3. 热影响	197
§ 4. 流量影响	199
§ 5. 化学影响	200
§ 6. 綜合影响	201
§ 7. 有摩擦的流动	202
§ 8. 液体燃料噴气发动机內气流性質的估定	204
§ 9. 几何形状影响的数量关系	205
§ 10. 热影响的数量关系	209
§ 11. 热影响与几何影响有效程度的比較	214
§ 12. 流量影响的数量关系	216

§ 13. 化学影响的数量关系	219
第八章 发动机的气动力计算	222
§ 1. 理想发动机的气动力计算	223
§ 2. 实际气流	226
§ 3. 多变流动	227
§ 4. 发动机的气动力计算	235
§ 5. 喷管构造	246
§ 6. 燃烧室与喷管的相对尺寸对发动机推力及经济性的影响	249
§ 7. 当 $p_a \neq p_b$ 时喷管的工作	257

工作过程的物理学与化学

第九章 液体燃料喷气发动机内的物理化学过程	262
§ 1. 工作过程的性质方面	262
§ 2. 燃料的雾化	265
§ 3. 汽化	267
§ 4. 扩散	268
§ 5. 化学反应	273
§ 6. 动力燃烧和扩散燃烧	274
§ 7. 燃烧室中的工作过程	276
§ 8. 喷管内的工作过程	278
§ 9. 发动机轴向气流基本参数的变化	279
第十章 工作过程的主要特性	280
§ 1. 发热系数	281
§ 2. 影响发热系数的诸因素	288
§ 3. 可燃混合剂最适宜的组成	291
§ 4. 静止燃烧状态。点燃和熄火的结构	296
§ 5. 可燃混合剂底燃尽曲线	301
§ 6. 喷管内的膨胀多变指数	304

发动机的热计算及其特性曲线

第十一章 发动机的热计算	305
§ 1. 工作混合剂底成分	305
§ 2. 氧化剂剩余系数	307
§ 3. 燃烧室内气体的压力	309

§ 4. 燃燒室的燃燒率	311
§ 5. 燃燒室前端氣體底參數	313
§ 6. 發熱系數和燃燒室底容熱強度	314
§ 7. 膨脹多變指數底平均值	316
§ 8. 噴管擴散部分底圓錐角	317
§ 9. 發動機的計算	318
§ 10. 液體燃料噴氣發動機計算舉例	324
第十二章 發動機的特性曲綫	340
§ 1. 概論。各種狀態的名稱	340
§ 2. 發動機在非設計狀態下的工作	343
§ 3. 發動機底調節特性曲綫	345
§ 4. 發動機底外部特性曲綫——高度特性曲綫和速度特性曲綫	349
§ 5. 在最大經濟性時噴管尺寸的選擇	352
§ 6. 發動機試驗的要點	363

發動機的散熱

第十三章 散熱計算的理論基礎	366
§ 1. 發動機的热交換過程	366
§ 2. 热交換原理	369
§ 3. 液體燃料噴氣發動機散熱套的計算	376
§ 4. 氣體在高速下的傳熱	384
§ 5. 散熱片	385
§ 6. 液體燃料噴氣發動機的特种散熱方法	386
第十四章 發動機的散熱計算	387
§ 1. 計算噴管散熱的方法	388
§ 2. 不平衡流動時噴管的散熱計算	389
§ 3. 按流動過程的平均多變指數作噴管的散熱計算	394
§ 4. 散熱片的計算	395
§ 5. 輻射傳熱計算	397
§ 6. 液膜散熱	402
§ 7. 冷卻液流動時的流動阻力	403
§ 8. 液體燃料噴氣發動機散熱計算舉例	407

附录

参考書目

概 論

第一章 液体燃料噴气发动机的

特点及其应用范围

液体燃料噴气发动机 (ЖРД) 在近年来已得到十分广泛的应用。用这种型式的发动机可制成强有力的飞彈，它能上升到 400 公里的高度，并以超过音速好几倍的速度飞行相当远的距离。以液体燃料噴气发动机作为动力装置的歼击机是上升最快和速度最大的飞机。这类发动机也用作輔助的动力装置，所以說液体燃料噴气发动机現在已不仅是試驗工作的对象，而已是开始可靠地应用在航空上了。

§ 1. 工 作 原 理

液体燃料噴气发动机是用液体燃料^①来工作的。液体燃料儲藏在特制的燃料箱里，在需要的时候按需用数量輸送到燃燒室中。液体燃料或是用渦輪泵組，或是用装在特制气瓶里的壓縮气体来輸送到燃燒室去的。

現在我們来研究用渦輪泵組輸送燃料到燃燒室去的发动机簡图。

图 1 簡示的液体燃料噴气发动机由下列几个主要部件組成：帶噴管的燃燒室，渦輪泵，蒸汽-气体发生器，发动机起動裝置（起動器及点火系統）及操縱器。

① 液体燃料噴气发动机的燃料是指两种成分——燃燒剂和氧化剂的总称（如果是两种成分的燃料）。

燃料的工作成分經噴咀送入燃燒室，在那里混合并燃燒起來。燃料的燃燒產物進入噴管，在那里燃燒產物的一部分熱能轉變為噴射氣流的動能。這時氣體的速​​度由零增到很大的數值，而氣體的壓力則由在燃燒室內時的壓力，降低到噴管氣體出口處的大氣壓力（當完全膨脹時）。作用在燃燒室表面上和噴管表面上這兩個壓力的合力，形成與氣體噴射方向相反的力，這就是發動機的推力。因為燃燒的溫度高達 $3000\sim 4000^{\circ}K$ ，所以燃燒室必須進行散熱。燃料中的一種工作成分或兩者均可用來散熱（在圖1中僅用氧化劑來散熱）。

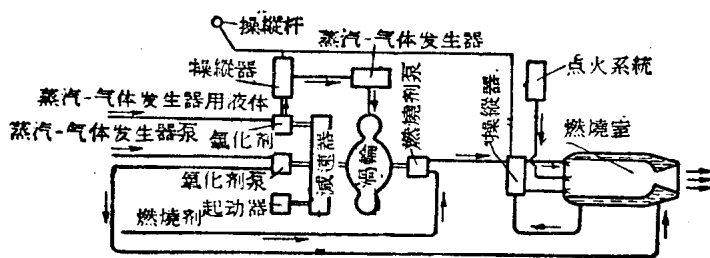


圖 1 有渦輪泵組的液體燃料噴氣發動機簡圖

渦輪泵組的用途就在于把工作成分在足夠使它適當霧化的壓力下，輸送到燃燒室去。渦輪泵組由渦輪及各泵組成，其中各泵分別供給燃燒劑、氧化劑及蒸汽-氣體發生器所需用的液體。

蒸汽-氣體發生器 (ПГГ) 是用來獲得渦輪泵組動力部分 (渦輪) 的工質 (蒸汽-氣體) 的。

要起動發動機，必須先要開動蒸汽-氣體發生器，它使渦輪泵組動起來，然後把工作成分輸送到燃燒室中，再借專門用來點燃的點火系統來點燃。

操縱器系用來建立發動機所必須的起動狀態和工作狀態。

在大多數情況下，液體燃料噴氣發動機用來工作的推進劑的成分僅在高溫下才彼此發生反應。因此在發動機開始工作之前，點火系統必須保證造成一高溫區域。但也有一些發動機用自燃推