



高速自燃式发动机理论

T.M. 密里庫莫夫 著



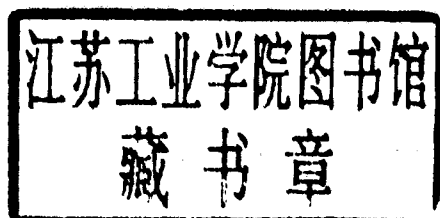
国防·業出版社

高速自燃式发动机理論

T. M. 密里庫莫夫 著

吳大昌等 譯

李兆麟 技校



國防工業出版社

本書系根据苏联國防出版社 1953 年出版的 Т. М. 密里庫莫夫 (Мелькумов) 教授所著的“高速自燃式发动机理論”一書譯出。原書經苏联高等教育部審定为高等工業学教科書。書中叙述精簡，內容新穎，亦可供在工厂和實驗室工作的工程師和技术員參考之用。

Т. М. Мелькумов
ТЕОРИЯ
БЫСТРОХОДНОГО
ДВИГАТЕЛЯ
С САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕМ
Государственное
Издательство Оборонной Промышленности
Москва 1953
本書系根据苏联國防出版社
一九五三年俄文版譯出

高速自燃式发动机理論

〔苏〕 密里庫莫夫 著
吳大昌等 譯
李兆麟 校

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
北京五三六工印刷 新华書店發行

*

8.0×1168 耗 1/82·12 半插張 2·334,000 字
一九五七年十二月第一版
一九五七年十二月北京第一次印刷
印數：1—960 册 定價：(10)2,10 元

序 言

战后五年計劃期間，在国民經济部門中高速自燃式发动机（柴油机）获得了广泛的应用。同时，根据苏共第十九次代表大会关于1951~1955年間发展苏联的五年計劃的指示，大型載重柴油汽車和柴油拖拉机的产量要大量增加。这些都促使我們对这种型別发动机有了更大的兴趣。

因而著者認為可以出版本書，以便对制造和使用高速自燃式发动机这一方面的广大专业人員有所帮助。

根据已发表的資料，本書肯定了俄国和苏联的学者們及工程师們在确立及发展高速自燃式发动机的工作过程和构造这方面的创造性的工作。

А.И.托尔斯托夫（Толстов）教授和他的实验室内的同事們对本書提供了很多資料。莫斯科高等工业学校 А.С.奥尔林（Орли）教授和他的教研組內的同事們，以及 Н.В. 伊諾傑姆崔夫（Иноземцев）教授在校閱本書原稿时提出了很多宝贵的意見。А.И.可罗列夫（Королев）在准备原稿时給予了很多技术上的帮助。著者謹对他們表示謝意。

Т.М.密里庫莫夫（Мслькумов）

一九五二年九月十五日

目 录

序 言

自然式发动机的发展简史	1
-------------	---

第一章 緒論	7
--------	---

§1. 自然式发动机工作过程的特点	7
§2. 燃料喷入气缸	17
§3. 两冲程工作过程的简图	28

第二章 理想循环	34
----------	----

§4. 引 言	34
§5. 等压供热循环	34
§6. 混合供热循环	39
§7. 循环热效率的方程式	43
§8. 等压循环与等容循环热力学性质的比較	44

第三章 发动机的各个过程	48
--------------	----

§9. 燃料的元素組成和氧化反应	48
§10. 燃燒所需要的空气量与燃燒产物的成份	49
§11. 以分析废气方法来确定空气利用率及不完全的燃燒	51
§12. 分子变化系数	58
§13. 气体热容量	61
§14. 气体的内能与焓量	67
§15. 充气系数与余气系数。在压缩开始时工质的参数	73
§16. 热計算方法	84
§17. 压缩过程	86
§18. 燃燒方程式	90
§19. 膨胀过程	97
§20. 平均指示压力	98

§21. 指示效率与每指示马力-小时的燃料消耗量	100
§22. 发动机的指示功率与有效功率。机械效率。每有效 马力-小时的燃料消耗量	102
§23. 各种发动机的指示功率的比较	107
§24. 发动机的热平衡	111
§25. 自然式发动机实际燃烧过程的一般特性	114
§26. 燃烧过程的物理-化学计算方法	125
第四章 各种因素对发火与燃烧的影响	136
§27. 燃料性质的影响	136
燃料的化学结构	136
自然温度	138
燃料的加添物	140
§28. 构造因素的影响	141
压缩比	141
燃烧室的结构	142
燃料喷射压力	142
空气的涡流	144
燃料供给的规律	146
活塞材料	148
§29. 进气条件的影响	151
外界空气的温度	151
进气压力	152
空气中氧和雜質的含量	156
§30. 使用因素的影响	161
负荷与转速	161
喷射提前角	163
发动机的热状态	165
第五章 自然式发动机所用燃料	167
§31. 燃料的物理-化学常数	167
重量密度	169
热值	169

元素組成	170
粘度	170
備份	171
閃點	172
燃點	172
自燃點	172
水份	172
機械雜質	173
硫份	173
灰份	173
碳渣的形成與的析出	173
中性	174
凝固點	174
按族分的化學組成	174
§32. 判斷燃料質量的方法	176
A. 摩托法	178
標準方法	178
發火延遲時期法	179
起動法	181
B. 實驗室法	182
苯胺點	182
柴油指數	182
粘度-重量常數	183
分鐘-重量常數	184
第六章 燃料的噴霧	185
§33. 總論	185
§34. 油注分裂的原因與形狀	186
§35. 油注內燃料的分佈	201
§36. 噴霧的細微度和均勻度	207
噴霧細微度的概念	207
噴霧的均勻度	213
§37. 各種因素對噴霧細微度和均勻度的影響	215

噴射壓力	215
反壓力	217
噴油泵軸的轉速	219
燃料的黏度	220
噴嘴的構造	220
§38. 油注的射程	222
§39. 各種因素對油注射程和錐角的影响	225
噴射壓力	226
反壓力	226
空氣和燃料的溫度	227
噴嘴的直徑	227
轉速	228
燃料的重量密度	228
噴嘴的構造	229
§40. 噴射系的主要功用及其簡圖	229
§41. 液體燃料的壓縮性	247
§42. 供油規律（噴射特性）	248
§43. 噴油泵和噴油嘴孔主要尺寸的近似計算	255
第七章 燃燒室	263
§44. 燃燒室的功用和類別	263
§45. 單腔的燃燒室	265
AЧ-30型燃燒室	266
派卡特（Паккард）航空發動機的燃燒室	268
ЮМО型燃燒室	270
Д-11航空發動機的燃燒室	274
§46. 雙腔燃燒室	276
預燃室構造	277
拉諾夫（Ланов）燃燒室	286
理卡圖（Рикардо）渦流室	291
第八章 自燃式發動機的特性曲綫	299
§47. 功率的命名和特性曲綫的分類	299
§48. 發動機的功率及經濟性與各種因素的关系	302

指示效率	303
指示功率	309
摩擦功率	315
增压器所消耗的功率	317
废气涡轮的功率	324
§49. 四冲程自然式发动机的外部特性曲线	328
无增压非高空的自然式发动机	328
增压发动机	331
机械传动的增压器情况	331
液力传动的离心式增压器情况	334
废气涡轮传动的增压器情况	336
§50. 四冲程自然式发动机的螺旋桨特性曲线	337
无增压非高空的发动机	337
有增压器的发动机	340
§51. 四冲程自然式发动机的经济特性曲线	343
§52. 四冲程自然式发动机的高空特性曲线	346
§53. 二冲程自然式发动机特性曲线的一般情况	352
第九章 二冲程发动机的型别。排气与清除机构	
断面的计算	357
§54. 清除的基本任务	357
§55. 清除简图	359
§56. 排气及清除计算简图	368
§57. 清除前的排气	371
§58. 清除时间的清除和排气	379
§59. 配置的时间-断面	382
位于气缸下部的壁孔清除的情况	385
直流双活塞式清除的情况	387
直流气阀-壁孔式清除的情况	389
§60. 四冲程与二冲程自然式发动机的比较	391

自燃式发动机的发展簡史

苏联在发动机制造业的发展方面获得了巨大的成就。在偉大的卫国战争中，由于在軍事技术的各部門中保证了优良的质量，苏联发动机制造业也积累了丰富的实际經驗。苏联的科学总结了这些經驗，并为各种类型发动机进一步的改进打下了新的基础。在发动机制造业的发展中，由压缩而引燃的（或简称自燃式发动机，又名柴油机）高速发动机占很重要的位置。

在很多应用方面，制造及采用适当类型的自燃式发动机的优先权应属于俄国和苏联的技术界。

可惜，关于自燃式发动机在俄国产生和成长的历史还没有系统的資料。然而，即使仅对人所共知的一些事实作一鳥瞰，也足以証明在制造各种类型的自燃式发动机及扩大其应用范围这方面我們祖国的技术界所起的作用是特殊重大的。

从1892年起，在俄国的一个工厂内〔现在命名为“俄国柴油机”（Русский дизель）〕便开始生产固定式煤油內燃发动机；最初制造的是四冲程的发动机，此后又制造了新設計的两冲程发动机。这些发动机的样品于1893年在芝加哥世界博覽会上获得最高一級的奖状。

1896年在下新城（Нижий'Новгород）的博覽会上，七个俄国工厂的煤气发动机及煤油发动机和各国的发动机一起在会上陈列，根据鉴定人的証明，俄国工厂所制造的发动机比很多外国的发动机要好一些。

1897年Р.狄塞尔（Дизель）所創造的自燃式煤油发动机的首次簡單試驗的結果才公諸于世。狄塞尔的发动机在經過了四年不成功的試驗之后，还只能用煤油来工作，其单位耗油量为240克/馬力-小时。然而，俄国柴油机工厂在1899年已經出产了完

全是自己所独创的内燃发动机，这种发动机不仅可以用煤油来工作，并且可以用任一种液体燃料（包括原油在内）来工作。这种发动机具有新式构造的燃料泵，此燃料泵后来为全世界所有工厂的示范样品。

此外，代替了狄塞尔的吸入空气与来自气缸的废气一起经过单级压气机压缩进气的办法，俄国工程师们则采用了单独的二级压气机。这种装置后来也成为一种标准装置，而且提高了喷射系统的可靠性。1899年在试验第一个新型发动机的样品时，它的原油单位耗油量已达到221克/马力·小时，换言之，比狄塞尔煤油发动机的耗油量要低些。

在“俄国柴油机”工厂内俄国工程师们所设计的发动机也通称为“狄塞尔”发动机，但如同上面所提出的，它们之间有显著的差别，而且我们的发动机是较好的。我国的发动机与狄塞尔发动机之间的差别极为显著，因此我国的发动机在国外被称为“俄国发动机”。

俄国是世界上第一个将自燃式发动机用于船舶和潜水艇上的国家。1903年，在“范达尔”号（Вандел）油船上便安装了船用发动机；1908年，在波罗的海造船厂所制造的“明诺加”（Минога）号潜水艇上安装了第一个换向发动机，当转速为400转/分时，此发动机的功率为120马力。从那时起，自燃式发动机在造船业中便占有了巩固的地位，而在潜水艇上则占着独一无二的位置。俄国又是世界上第一个将自己制造的发动机安装在大内燃机轮船上的国家。因此，在创造轮船及潜水艇用的自燃式发动机（包括换向发动机在内）方面，优先权应属于我们的国家。

1899年，俄国工程师们Г.В.脱林克列儿（Тринклер）提出了无压气机自燃式发动机的有关专利申请书，在1904年便制造成并试验过这种发动机。这次试验比之萨巴台（Сабатэ）所提出的有关专利申请书要早四年；既然这一事实已经确定，以后就没有任何根据将混合加热循环称为萨巴台循环。

还要指出的是：1911年在全世界各国船队中的48艘内燃机轮

船的总数中有26艘是俄国所制造的，其他各国加起来則只有27艘。若将那时安装着600~1000馬力的发动机的巨型內燃机輪船加以比較，則在15艘这种巨型船舶的总数中俄国占有14艘。

1903年設計師 R. B. 馬明 (Мамин) 設計了世界上第一台无压气机自燃式发动机，在这种发动机內燃料不必借着压缩空气来噴散。R. B. 馬明所設計的发动机在俄国以及在国际間的展覽会上都曾展覽过。因此，在創造无压气机自燃式发动机方面，优先权应属于我国。十年以后，国外才开始出現无压气机式发动机。

1910年，R. B. 馬明創造了輪式拖拉机，在这个拖拉机上安装了在构造上较为独特的无压气机自燃式发动机。

世界上第一台具有直流式气閥-壁孔换气的两冲程发动机是1906年在俄国創造成并試驗过的。

1914年，在“俄国柴油机”工厂便研究了无换气泵的两冲程发动机，在这种发动机中，换气是借着排气系統內压力波来完成的。很久以后，在英国和法国才出現类似的无换气泵的两冲程发动机。

以上的例子足以証明，在固定式和船用发动机制造业方面，早在革命前的俄国便获得了巨大的成就，而且几乎無論在那一方面都先于西方国家。

在偉大的十月革命之后，苏联的发动机制造业获得了空前飞跃的发展。苏联共产党向苏联人民提出了許多巨大的任务，也提出了創造安装在陆用車輛上的輕型自燃式高速发动机的任务。在这方面，我們已获得重大的成績。1934年，苏联組織了国际間的汽車竞赛，在这些汽車上安装着自燃式发动机。英国，德国和其他国家的工厂都参加了这次竞赛。当时有外国专家参加的評判委员会曾經指出，苏联的发动机比外国的发动机要好些。从那时起，高速自燃式发动机便被广泛地应用于苏联的載重汽車和拖拉机上。不久，自燃式发动机并开始安装在坦克上。在这方面，毫无疑問的，优先权应属于苏联。

在創造自燃式航空发动机方面，苏联所取得的成績也不比美

国、英国和法国差。尽管这些国家作了很多試驗，然而直到最近，实际上用来工作的自燃式航空发动机并没有創制成功。

德国的蓉克斯（Юнкерс）工厂曾制造了两冲程发动机；其中700~800馬力的发动机的性能很好，而且具有令人满意的可靠性。然而，功率比700~800馬力更大的发动机便沒有制成；或者即使制成，它的可靠性也不能令人满意。蓉克斯工厂在很多年的期間內設計了大功率的自燃式航空发动机，并在世界大战期間按照四軸系制造了4400馬力的自燃式航空发动机。这种四軸系的概念是在蓉克斯工厂采用之前的8~10年前由俄国工程师 А.А. 亚加托夫（Агапов）在1925年首先提出的。

在四軸系的基础上，苏联設計师 А.Д. 查洛姆斯基（Чаромский）創造了 АУ-30 型水冷式航空发动机，这种发动机經过后来的修改其功率可达2000馬力，而且在卫国战争中将它实际用于轟炸机上。在所有安装在飞机上的各种自燃式航空发动机中，这种发动机是功率最大而又最經濟的。在航行情况下，具有气輪增压器的发动机的耗油量达140~145克/馬力-小时，比蓉克斯工厂所制造的最好的发动机的耗油量要低10%。

著者所設計的具有新型燃燒室构造的 Д-11 型气冷自燃式小功率航空发动机順利地进行了正式的試車台試驗和特种飞行試驗，这些試驗証明了它具有很大的可靠性和經濟性。按照正式試驗的記錄，在并没有利用廢气能量的情况下，发动机的单位耗油量为145~150克/馬力-小时。

航空发动机制造业的发展以及与其有关的研究工作的发展对于陆地运输用的高速自燃式发动机的发展有着很大的影响。

在战后第一个五年計劃期間，自燃式发动机获得了更广泛的应用：用在載重汽車上，拖拉机上，铁路运输上，水路运输上等等。

在苏联共产党第十九次代表大会的指示中对于1951~1955年第五个五年发展計劃規定了进一步增加大載重量柴油汽車的产量以及完成制造更經濟的柴油拖拉机的任务。

根据以上所述，很明显的，采用高速自燃式发动机的范围既然是如此的广泛，因而这种型式的发动机对于国民经济当然极为重要。

苏联的科学和技术在創造和发展为各种用途用的自燃式发动机这一方面的重要性和优先性是非常清楚的。

俄国和苏联的工程师們、学者們在发展自燃式发动机工作过程原理方面以及在研究并确立影响工作过程的各种規律方面的贡献也是不能忽视的。在这些方面可以指出的是：1907年 *В.И. 格林涅維茲基* (Гриневецкий) 所研究并发表了关于电火花点火发动机的热計算；*Н.Р. 布里林格* (Брилинг) 教授和 *Е.К. 馬辛格* (Мазинг) 教授所提出的关于自燃式发动机的热計算。苏联的研究工作者在作精确的热計算方面获得了丰富的实验資料。适用于高速发动机工作过程的精确的燃燒平衡方程式是1940年由著者所导出的。苏联的研究工作者关于高速自燃式发动机工作过程的研究发表了很多創造性的著作。在这方面值得提出的是：*Н.И. 伏罗古欣* (Ворогушин)，*А.И. 托尔斯托夫*，*А.Д. 查洛姆斯基*，*Д.Н. 弗魯保夫* (Вырубов)，*В.Г. 李勃勞維奇* (Либрович)，*Н.В. 伊諾杰姆崔夫*，以及著者等人的研究和著作。这些研究工作者确立了工作过程的特殊性和規律，以及影响过程的基本因素和这些因素所起的影响的性質；获得了有关混合物形成及燃燒的实验資料；作出了混合物形成及发展过程中能量的理論計算。在一系列假設的基础上，*Н.В. 伊諾杰姆崔夫* 作出了有关燃烧过程的物理-化学計算方法，这个方法是根据由实验所得的許多系数来計算燃烧过程中的時間因素。

Г.Г. 卡里希 (Калисий)，*В.Я. 拿丹松* (Наданзон)，*И.В. 阿斯泰霍夫* (Астахов) 及 *Н.В. 許米盖尔斯基* (Шмигельский) 等研究了喷射过程和喷射动力学；結果获得了有关供油特性和規律的相当精确而可靠的計算方法。*А.И. 托尔斯托夫*，*А.С. 伊里索夫* (Ирисов)，*Д.Л. 哥里得希切因* (Гольдштейн) 及著者等研究了供油到气缸內的問題，并确立了对燃料的要求。*А.И.*

托尔斯托夫, Д.А. 保尔特諾夫 (Портнов), А.И. 查洛姆斯基及著者等研究了自燃式发动机特性的計算和分析。H.P. 布林格在研究发动机热量散入冷却介質中及确立散热方程式方面做了很多工作。А.С. 奥尔林在很多年內通过进一步地改进計算仪器和发展实验的研究方法, 有系統地研究了两冲程发动机中換气的問題。

苏联的工程师們和学者們在自燃式发动机方面的工作的特点絕不祇限于这些, 还应指出: 第一, 苏联創造思想的独立性; 第二, 苏联发动机制造业在理論上和实际上所发表的資料在很多方面都超过外国的資料。这是由于: 在有历史意义的偉大的十月革命胜利后, 苏联政府和共产党創設了大量的科学研究所, 撥出了經費以便在高等技术学校和工厂里可以进行有益的科学研究工作, 号召大批的人用必需的知識武装自己, 积极地进行創造, 并且組織了广大的科学界和工厂人員的工作。

第一章 緒 論

§1. 自燃式发动机工作过程的特点

凡空气在气缸中受到压缩，而燃料在压缩終了时被喷入气缸内并由于空气的高温而引燃的活塞式内燃发动机，本书統称为压缩引燃发动机，或简称为自燃式发动机。

自燃式发动机必需的附件为高压油泵和喷油嘴，其功用是将燃料按比例輸送到气缸中并使其雾化。

四冲程发动机每一循环的工作过程是按下列順序进行的。在第一冲程中，当活塞自上止点向下止点移动时，空气自大气吸入气缸内，或用贮气器内的空气充满气缸。贮气器具有高于大气压的压力，此压力是由特殊的增压器或压气机产生的。在第一冲程期間内，进气閥是开着的。在第二冲程中，当活塞自下止点向上止点移动时，两种气閥都是关闭的，气缸内的空气便受到压缩；发动机的压缩比是如此选择的，压缩終了时空气的温度和压力必須保証能够引燃燃料，燃料是在活塞快到上止点之前才开始喷入气缸内的。压缩終了时空气的压力通常不低于30公斤/公分²，而在增压及高压压缩比的发动机内則达70公斤/公分²，或者还高些；压缩終了时空气的温度通常不低于500~550°C，常常达到800°C。燃料的燃烧在接近上止点时才开始，但主要是在第三冲程内产生燃烧。在燃烧过程进行中，发动机气缸内的压力便升高。最大爆发压力与燃烧室的型别、增压值和压缩比有关，此压力可达60~100公斤/公分²，或者还高些。在第三冲程期間内，当活塞向下止点移动时，所有气閥仍然是关闭的；气缸中燃料燃烧过程結束，燃烧产物則膨胀。当活塞快到下止点之前，在膨胀冲程終了时排气閥便开启，并开始废气的排出过程，此时，由于繼續地膨胀，

而且主要由于气缸中气体量的减少，气缸中的压力便急速降低。在第四冲程中，活塞在排气阀开启的情况下移向上止点，因而将废气自气缸内排出。

在排气行程終了时，进气阀便开启；而排气阀则继续保持开启一段时期。气阀所以这样的交迭是为了能更好地自压缩室内排出废气。由于在自燃式发动机中，进入气缸的只是空气，因而气阀的交迭时间便可以比汽化器式发动机更长些。汽化器式发动机气阀的交迭是受到限制的，因为当新鲜混合物与废气接触时，新鲜混合物便有被引燃的危险。因此，自燃式发动机便比汽化器式发动机能更彻底地排出压缩室中的废气；特别是由于自燃式发动机具有更大的压缩比，其压缩室容积便比汽化器式发动机小得多，因而废气的相对量总是少一些。在具有增压的发动机中，若增大气阀交迭，则借新鲜空气可以完全地或差不多完全地将压缩室内的废气排入排气管中。

将空气和燃料分开来输入气缸内，而且燃料是在压缩过程中喷入的，这便使得发动机可以做成两冲程的。防止混合物损失，或者防止换气时混合物着火的这两个问题，在汽化器式两冲程发动机中是非常重要的，但在自燃式发动机中这些问题便不存在。

在两冲程发动机内，每一循环的工作过程是按下列顺序进行的。当活塞自下止点移向上止点时，先关闭流入新鲜空气及废气自气缸内排出所经过的窗孔或阀门，然后，便进行压缩过程。压缩終了时燃料喷入气缸中，由于压缩空气的高温燃料便着火并燃烧。燃烧后，活塞移向下止点，燃烧产物便膨胀。膨胀終了时，排气窗孔（阀门）开启，废气便自气缸内排出，气缸中的压力便降低。此后，换气窗孔（或阀门）开启，气缸内腔即与贮气器连通，借着特备的压气机，贮气器中保持增高的压力。空气自贮气器冲入气缸内，并将废气排到大气中，此时一部分空气经排气孔漏出；一部分废气则留在气缸中，并与新鲜空气混合。空气流入气缸中及废气自气缸内排出的过程，称为换气过程。当活塞自下止点移向上止点时，换气孔和排气孔都关闭。换气孔或与排气孔