



国防特色教材·动力机械及工程热物理

冲压发动机原理及技术

CHONGYA FADONGJI YUANLI JI JISHU

—○徐旭 陈兵 徐大军 编著○—

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·动力机械及工程热物理

冲压发动机原理及技术

徐旭 陈兵 徐大军 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书对亚燃冲压发动机和超燃冲压发动机的工作原理、特点、发展历程进行了介绍。以典型轴对称头锥进气冲压发动机为例,介绍了超声速进气道工作原理、设计和流场计算的基本知识;介绍了燃烧室基本概念、热力学计算、设计和流场分析的基本方法,以及尾喷管的类型、性能评估等相关知识;介绍了整体式冲压发动机的工作原理和性能计算,以及冲压发动机的燃料与材料;最后介绍了冲压发动机试验的设备、内容和数据处理中的一些相关知识。

本书可作为高等工科院校飞行器动力工程专业高年级本科生和研究生的教材,也可供从事冲压发动机研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冲压发动机原理及技术 / 徐旭等编著. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2014. 2

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1323 - 8

I. ①冲… II. ①徐… III. ①冲压喷气发动机—高等
学校—教材 IV. ①V235.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 289466 号

版权所有,侵权必究。

冲压发动机原理及技术

徐旭 陈兵 徐大军 编著
责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:22.75 字数:510 千字

2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷 印数:1 500 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1323 - 8 定价:79.00 元



若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

2013年是冲压发动机诞生100周年。1913年5月,法国工程师雷内·劳伦将其发明写成论文在《飞翼》杂志上发表,标志着冲压发动机的诞生。冲压发动机自诞生以来,经历了曲折的发展历程,几起几落。近年来,随着国际上冲压发动机,特别是超燃冲压发动机和冲压组合发动机研究热潮的兴起,冲压发动机又迎来了新一轮的研究热潮。

冲压发动机属于吸气式发动机,但不论从性能特点还是工作范围等方面考察,冲压发动机都是介于航空、航天之间的一种动力形式。它比传统的航空发动机结构简单,“飞”得更快、“飞”得更高;它比火箭发动机性能更优,比冲更高。它工作的空域范围可拓展到大气层边缘,满足某些航天应用需求。近年来,随着人们对邻近空间(20~100 km)的持续关注,冲压发动机及其组合发动机有可能在其中发挥更加重要的作用。

本书对冲压发动机的介绍,以亚燃冲压发动机为主,其间穿插介绍了超燃冲压发动机的一些工作原理和结构特点。作者希望能够借此淡化亚燃与超燃的界限,使读者能够将两者融会贯通;但限于自身能力与水平,这一目标实现起来有一定困难。

本书适合于飞行器动力工程专业高年级本科生和研究生学习使用,先修课程包括“流体力学”、“气体动力学”、“工程热力学”等,如果学生具有“计算流体力学”的相关知识则更佳。本书也可作为研究生“冲压发动机原理”课程的教材使用。

本书共分为9章,第1章概论由徐大军、徐旭编写,第2章冲压发动机的流体力学基础由徐旭、陈兵编写,第3章冲压发动机的循环过程由陈兵编写,第4章冲压发动机的进气道由陈兵编写,第5章冲压发动机的燃烧室由徐旭编写,第6章冲压发动机的尾喷管由陈兵编写,第7章整体式冲压发动机由徐大军编写,第8章冲压发动机的燃料及材料由徐大军编写,第9章冲压发动机的试验由徐旭编写。全书由徐旭统一校订。

张振鹏教授、林宇震教授等专家对本书进行了认真审阅,并提出了许多建设性的意见,在此一并向他们表示感谢。中国科学院力学所张新宇课题组为本书提供了大量素材。航天科工集团三院31所科技人员对本书进行了认真审阅,提出

了许多宝贵的意见,在此也向他们表示衷心的感谢。

参与本书编写的硕士和博士研究生有:王元光、陈志辉、王辽、张文选、陈超群、许灵芝、韦宝禧、林言中、张旭、周红叶等,在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中缺点与不足在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2013年9月

符号表

英 文

A	面积
a	声速、空燃比
c	比热容
c_V	比定容热容
c_p	比定压热容
e	单位质量流体能量
E	内能
ER	当量比
F	推力
G	Gibbs 自由能
h	焓、热值
I	总焓
I_s	比冲
J	网格的雅可比
L	恰当空燃比
M	相对分子质量
Ma	马赫数
\dot{m}	质量流率
p	压力
Pr	Prandtl 数
q	动压、流量函数
Q	热量
R	气体常数
S	火焰传播速度
s	熵
Sc	Schmidt 数

T	温度
u	x 向速度
V	速度、体积
v	y 向速度
w	z 向速度
P	功率
X	摩尔分数、摩尔浓度
Y	质量分数
z	冲量函数

希 文

α	余气系数
β	激波角
δ	锥角、楔角
ϵ	密度与总密度之比
ϕ	冲量、阻塞比
γ	比热比
η	效率
φ	当量比、流量系数
λ	热传导系数、速度系数
μ	粘性系数
ν	Prandtl - Mayer 函数、化学反应计量系数
π	静压与总压之比
θ	燃烧室温升比、气动函数
ρ	密度
σ	总压恢复系数
τ	静温与总温之比、剪应力
ψ	温升比

上下标含义

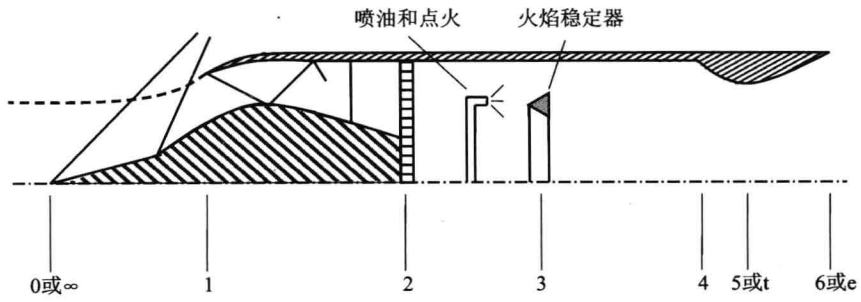
上 标

*	滞止参数
'	一阶导数
"	二阶导数

下 标

0	来流、发动机头部
1	进气道入口
2	进气道出口、燃烧室入口
3	掺混段与燃烧段交界面
4	燃烧室出口
5	喉部
6	喷管出口
∞	来流
air, a	空气
c	燃烧室
cr	临界的
e	喷管出口
f	燃料、油气比
fuel	燃料
i	第 i 种组分
ig	点火
in	进气道
l	层流的
p	燃烧产物
r	燃气发生器
real	实际的
st	化学当量的
t	喷管喉部、湍流的
th	理论的
φ	液相的

截面定义参考图



目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 引 言	1
1.2 冲压发动机的工作原理与性能特点	2
1.2.1 冲压发动机的工作原理	2
1.2.2 冲压发动机的性能特点	3
1.3 冲压发动机的类型	4
1.3.1 冲压发动机的基本类型	4
1.3.2 组合冲压发动机的类型	5
1.4 冲压发动机的发展历程与应用的发展阶段	8
1.4.1 冲压发动机的发展历程	8
1.4.2 冲压发动机应用的发展阶段	12
1.5 新概念冲压发动机	15
1.5.1 MHD 能量旁路超燃冲压发动机	15
1.5.2 水冲压发动机	16
1.6 小 结	17
习 题	17
参考文献	17
第 2 章 冲压发动机的流体力学基础	18
2.1 气体动力学基础	18
2.1.1 静参数与滞止参数	18
2.1.2 流量函数	19
2.1.3 冲量函数	19
2.1.4 激 波	20
2.1.5 膨胀波	29
2.2 真实气体效应	30
2.2.1 高超声速流动的主要特征	30
2.2.2 真实气体	31
2.2.3 热完全气体模型	32

2.2.4	真实气体效应影响算例分析	35
2.3	一维气体动力学	37
2.3.1	正方法	37
2.3.2	逆方法	39
2.4	瑞利(Rayleigh)流理论	41
2.4.1	瑞利流物理模型	41
2.4.2	控制方程及其解	41
2.4.3	换热过程对流动的影响	43
2.4.4	瑞利线	44
2.5	计算流体力学在冲压发动机研究中的应用	47
2.5.1	单一气体模型	47
2.5.2	多组分化学动力学模型	49
2.5.3	湍流燃烧	56
2.5.4	两相燃烧	60
2.5.5	时间推进与空间推进方法	64
2.5.6	一体化流场计算的模型和方法	67
2.5.7	特征线法(MOC)	69
2.6	小 结	74
	习 题	74
	参考文献	74
第3章	冲压发动机的循环过程	76
3.1	冲压发动机的循环过程及性能指标	76
3.1.1	热力循环过程及热效率	76
3.1.2	能量转换	78
3.1.3	性能指标	80
3.2	冲压发动机的流动过程分析	84
3.2.1	冲压发动机的理想流动过程	85
3.2.2	理想冲压发动机循环参数优化	94
3.3	超燃冲压发动机的循环过程	97
3.3.1	从亚燃冲压发动机到超燃冲压发动机	97
3.3.2	超燃冲压发动机的循环过程	100
3.4	小 结	102
	习 题	102

参考文献	103
第 4 章 冲压发动机的进气道	104
4.1 超声速进气道的主要类型及热力循环过程	104
4.1.1 超声速进气道的主要类型及流动特点	104
4.1.2 超声速进气道的热力循环过程	108
4.2 超声速进气道的主要性能指标	109
4.2.1 基本性能指标	109
4.2.2 进气道的效率及其他性能指标	113
4.2.3 各性能参数间的关系	116
4.3 超声速进气道的起动特性	117
4.3.1 内压式超声速进气道的起动特性	117
4.3.2 混压式超声速进气道的起动特性	123
4.3.3 影响进气道起动的主要因素及常用辅助起动措施	125
4.4 超声速进气道的典型工作状态及其影响因素	127
4.4.1 进气道-发动机流量匹配过程	127
4.4.2 超声速进气道的典型工作状态	129
4.4.3 超声速进气道的附面层问题及不稳定工作状态	135
4.4.4 超声速进气道工作状态和性能的影响因素	143
4.4.5 可调进气道及其控制	149
4.5 超声速进气道设计及性能计算	150
4.5.1 最佳波系理论	150
4.5.2 超声速进气道的型面设计	153
4.5.3 超声速进气道的性能计算	164
4.5.4 超声速进气道的流场数值模拟研究	166
4.6 高超声速进气道	167
4.6.1 构型特点	167
4.6.2 其他特殊问题	169
4.7 小 结	170
习 题	172
参考文献	173
第 5 章 冲压发动机的燃烧室	175
5.1 概 述	175

5.2	火焰稳定与传播	178
5.2.1	火焰传播速度及其影响因素	178
5.2.2	稳定火焰的方法	181
5.3	燃烧室热力气动计算	184
5.3.1	热力计算	185
5.3.2	气动计算	188
5.4	燃烧室设计	191
5.4.1	点 火	192
5.4.2	雾 化	193
5.4.3	预燃室	196
5.4.4	火焰稳定器	196
5.4.5	燃烧室阻力	198
5.4.6	影响燃烧效率的因素	199
5.4.7	超燃冲压发动机燃烧室	202
5.5	燃烧流动的分析方法	204
5.5.1	冲量分析法	204
5.5.2	CFD 方法	205
5.6	小 结	211
	习 题	211
	参考文献	212
第 6 章	冲压发动机的尾喷管	213
6.1	尾喷管的一维流动规律	213
6.1.1	收缩尾喷管流动规律	213
6.1.2	扩张尾喷管流动规律	216
6.1.3	收敛-扩张尾喷管流动规律	218
6.2	尾喷管的性能及几种典型尾喷管的工作原理	219
6.2.1	尾喷管的理论性能	219
6.2.2	几种典型的尾喷管	225
6.3	高超声速尾喷管	231
6.3.1	构型特点	231
6.3.2	其他特殊问题	231
6.4	尾喷管型面的设计方法	232
6.4.1	拉瓦尔喷管	233

6.4.2 高超声速尾喷管设计	236
6.5 尾喷管流场数值模拟	242
6.5.1 尾喷管流场数值模拟方法	242
6.5.2 尾喷管流场数值模拟算例	243
6.6 小 结	244
习 题	246
参考文献	247
第7章 整体式冲压发动机	248
7.1 特点与分类	248
7.2 整体式液体冲压发动机	249
7.2.1 工作过程	249
7.2.2 设计计算	250
7.2.3 性能分析	254
7.3 固体火箭冲压发动机	257
7.3.1 工作过程	257
7.3.2 补燃室流动特性	258
7.3.3 设计计算流程	259
7.3.4 设计计算公式	261
7.3.5 性能分析	266
7.3.6 非壅塞式固体火箭冲压发动机	268
7.4 固体燃料冲压发动机	272
7.4.1 结构与特点	272
7.4.2 内弹道分析	272
7.4.3 燃速分析	274
7.4.4 性能分析	275
7.5 固液火箭冲压发动机	276
7.5.1 工作原理	276
7.5.2 推力调节	276
7.6 总体设计与一体化设计	279
7.6.1 弹用冲压发动机性能比较	279
7.6.2 空气进气系统的选择	281
7.6.3 导弹与冲压发动机一体化设计	284
7.7 小 结	292

习 题	293
参考文献	293
第 8 章 冲压发动机的燃料及材料	294
8.1 冲压发动机液体燃料特性	294
8.1.1 石油蒸馏精制燃料	295
8.1.2 以特定化合物为主的燃料	295
8.1.3 凝胶燃料	296
8.1.4 天然存在的金刚烷燃料	296
8.1.5 人工合成高密度燃料	297
8.1.6 高密度吸热型碳氢燃料	297
8.2 冲压发动机固体燃料特性	300
8.2.1 贫氧推进剂的发展概况	300
8.2.2 贫氧推进剂的组成及配方选择原则	300
8.2.3 贫氧推进剂的分类	301
8.2.4 贫氧推进剂的燃烧特征	301
8.2.5 适用于非壅塞式固体火箭冲压发动机的 GAP 贫氧推进剂	302
8.3 冲压发动机的材料与热防护	304
8.3.1 冲压发动机对材料的要求	304
8.3.2 材料的性质	306
8.3.3 可供使用的材料	306
8.3.4 冲压发动机燃烧室热防护材料	307
8.4 小 结	308
习 题	309
参考文献	309
第 9 章 冲压发动机的试验	310
9.1 地面试验系统	310
9.1.1 试验系统的组成	310
9.1.2 试验模拟准则	317
9.2 直连式试验	318
9.3 自由射流试验	320
9.4 飞行试验	324
9.5 试验参数的测量和试验数据的处理	327

9.5.1 试验参数的测量和处理	327
9.5.2 试验气流参数对发动机性能的影响	333
9.6 小 结	337
习 题	338
参考文献	340
附 录	341

第1章 概 论

1.1 引 言

冲压发动机是一种依靠高速迎面空气流的减速增压作用进行工作的空气喷气发动机。其构造简单,没有像涡轮喷气发动机的压气机和涡轮那样的复杂转动部件,进入发动机的空气压缩是靠高速气流的滞止(冲压增压)来获得的。冲压发动机是空气喷气发动机在更高飞行速度领域发展的延伸,可应用于超声速和高超声速的飞行器中。

从工作过程上来说,空气喷气发动机是热机和推进器结合在一起的一种大气层内的飞行动力装置,燃料释放出的热能直接用于增加气流的焓,从而增加气流的动量来推进飞行器。就空气喷气发动机而言,涡轮喷气发动机的出现,解决了所谓“音障”的问题,实现了跨声速和超声速飞行。目前,涡轮喷气发动机已广泛应用于现代超声速飞行器上,包括军用飞机和民用飞机。一般来说,对飞行马赫数高达3.0左右的飞行器而言,涡轮喷气发动机仍然是适用的。但随着飞行速度的进一步提高,就又产生了新的问题。

随着飞行马赫数的增加,气流总温急剧升高,即使考虑到激波损失等因素的影响,总压增加也极为迅速。例如,当 $Ma=5$ 时,气流总温高达1 229 K,在这样高的总温下,耐高温合金的强度也将迅速下降。涡轮叶片所能承受的温度极限(1 800~2 000 K)使燃烧室中的加热量受到了很大的限制。实际上,当 $Ma=2$ 时,依靠气流的滞止所达到的静压就已经相当高了,压气机成了可以省去的部件。在这个过程中,没有压气机和涡轮转子的冲压发动机,显示了其独特的优越性,从而得到了广泛的重视和发展。

现代冲压发动机技术综合了高速气体动力学、化学热力学、化学流体力学和自动控制理论等方面的成就,而高超声速($Ma>6$)冲压发动机所采用的超声速燃烧技术,其机理就更为复杂。此外,冲压发动机的推力基于进出口气流冲量之差,为了尽可能增大这个差值,就必须细致地组织发动机内工质的流动过程和燃烧过程,增加发动机出口气流的动量。因此,冲压发动机的研制过程不仅需要进行深入的理论探索,而且还必须进行大量复杂的试验研究。

研究、设计和制造冲压发动机是目前世界各国的尖端科学技术之一,这项尖端技术所取得的成就促进了航空航天事业的发展。由于军事上的需求,要求飞行器向高速、远航程的方向发展。特别是进入21世纪以来,世界军事格局和战争形式的发展变化,力求高速度是实现导弹突防与打击时间敏感性目标的关键,因此,冲压发动机作为高速飞行器的动力装置有其十分广阔的应用前景。

1.2 冲压发动机的工作原理与性能特点

1.2.1 冲压发动机的工作原理

图 1.1 是我国 400 mm 亚燃冲压发动机的结构图,图 1.2 则为典型普通冲压发动机方案的简图。可以发现,典型的冲压发动机主要由进气道、燃烧室和尾喷管三个部件组成,其工作包括使进入发动机的空气经过压缩、加热、膨胀而产生推力这三个基本过程,具体由下列几个基本组成部分来完成:

① 进气道(也称扩压器)。迎面空气流经过扩压器,以尽可能小的损失减速增压,提供燃烧室进口所需的速度场。

② 燃烧室。减速增压后的空气进入燃烧室与燃料混合,在燃烧室中进行等压燃烧,使气体焓值增高。燃烧室设计应保证能在冲压发动机整个工作范围内保持稳定燃烧,并获得尽可能高的燃烧效率和尽可能小的热损失及流动损失。

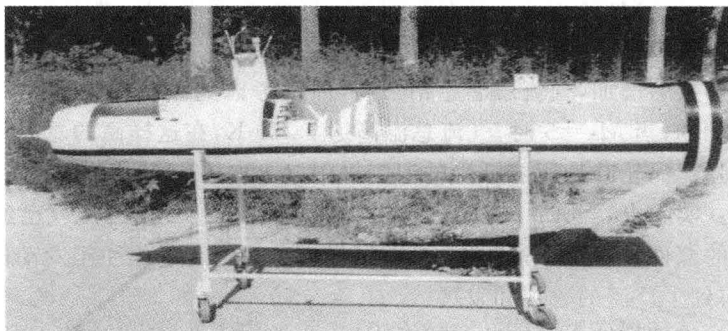
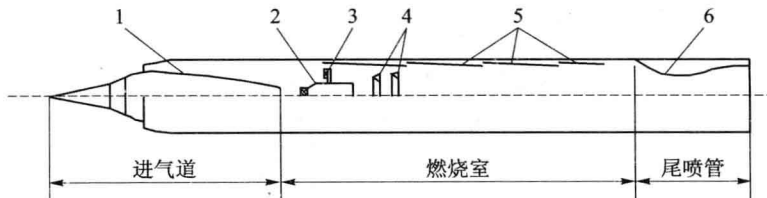


图 1.1 400 mm 亚燃冲压发动机结构图



1—中心锥;2—预燃室;3—喷嘴环;4—火焰稳定器;5—火焰筒;6—尾喷管

图 1.2 典型普通冲压发动机方案简图