



“十三五”国家重点图书出版规划项目·重大出版工程

—— 高超声速出版工程 ——

连续爆轰发动机 原理与技术

王健平 姚松柏 著



科学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目·重大出版工程
高超声速出版工程

连续爆轰发动机原理与技术

王健平 姚松柏 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要分为三部分:第1章主要介绍爆轰的基本理论和爆轰发动机的研究背景;第2章与第3章分别介绍连续爆轰发动机的实验研究手段与数值模拟方法;从第4章开始主要以作者近十年来的研究成果为基础,以专题的形式对连续爆轰发动机的研究进行介绍,包含国内外的最新研究进展。

本书可供高超声速推进理论与工程专业的工程技术人员和师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

连续爆轰发动机原理与技术 王健平,姚松柏著.
—北京:科学出版社,2018.1
“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版
工程 高超声速出版工程
ISBN 978-7-03-055444-4
I. ①连… II. ①王… ②姚… III. ①航空发动机—
研究 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 283673 号

责任编辑:潘志坚
责任印制:谭宏宇 / 封面设计:殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2018年1月第一次印刷 印张:16 插页4

字数:260 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

高超声速出版工程
丛书专家委员会

顾 问

王礼恒 张履谦

主任委员

包为民

副主任委员

杜善义 吕跃广

委 员

(按姓名汉语拼音排序)

包为民	艾邦成	陈连忠	陈伟芳	陈小前
邓小刚	杜善义	李小平	李仲平	吕跃广
孟松鹤	闵昌万	沈 清	谭永华	汤国建
王晓军	尤延铖	张正平	朱广生	朱恒伟

高超声速出版工程

高超声速推进与动力系列

主 编

谭永华

副主编

沈 清 蔡国飙 孙明波

编 委

(按姓名汉语拼音排序)

白鹇尘	蔡国飙	常军涛	方文军	何国强
李光熙	刘卫东	沈 清	孙明波	谭慧俊
谭永华	王 兵	王 珏	王健平	徐惊雷
尤延铖	张新宇	赵庆军	郑日恒	

作者简介



王健平,1980 年中国科学技术大学近代力学系学习,1982 年教育部选派出国,1991 年获日本名古屋大学航空航天系博士并留校任助理教授。曾任日本国家航空航天研究所研究员和四日市大学副教授、教授。1996 年回国任北京大学力学与工程科学系教授、博士生导师、航空航天研究所副所长、燃烧推进中心主任。现任中国航空学会高级会员、空气动力学会理事、国际爆炸与反应系统学会理事、AIAA 增压委员会、国际计算流体力学会议等委员,军委科技委、装发部、陆装部、国家自然科学基金工程三处、两机专项专家组成员。*CFD J.*和气体物理副主编以及 10 个中英文期刊编委。发表英文中文期刊论文 120

篇,引用 480 次。1998 年,获组织部、人事部、中国科协中国青年科技奖。1999 年,获国家杰出青年基金。

丛 书 序

飞得更快一直是人类飞行发展的主旋律。

1903年12月17日,莱特兄弟发明的飞机腾空而起,虽然飞得摇摇晃晃犹如蹒跚学步的婴儿,但拉开了人类翱翔天空的华丽大幕;1949年2月24日,Bumper-WAC从美国新墨西哥州白沙发射场发射升空,上面级飞行速度超越马赫数5,实现人类历史上第一次高超声速飞行。从学会飞行,到跨入高超声速,人类用了不到五十年,蹒跚学步的婴儿似乎长成了大人,但实际上,迄今人类还没有实现真正意义的商业高超声速飞行,我们还不得不忍受洲际旅行十多小时甚至更长飞行时间的煎熬。试想一下,当我们将来可以在两小时内抵达全球任意城市的时候,这个世界将会变成什么样!这并不是遥不可及的梦!

到今天,人类进入高超声速领域快70年了,无数科研人员为之奋斗终身。从空气动力学、控制、材料、防隔热到动力、测控、系统集成等众多与高超声速飞行相关的学术和工程领域内,一代又一代科研和工程技术人员传承创新,为人类的进步努力奋斗,共同致力于推动人类飞得更快这一目标。量变导致质变,仿佛是天亮前的那一瞬,又好像是蝶即将破茧而出,几代人的奋斗把高超声速推到了嬗变前的临界点上,相信高超声速飞行的商业应用已为之不远!

高超声速飞行的应用和普及必将颠覆人类现在的生活方式,极大地拓展了人类文明,并有力地促进人类社会、经济、科技和文化的发展。这一伟大的事业,需要更多的同行者和参与者!

培根说:书是人类进步的阶梯。

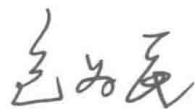
实现可靠的长时间高超声速飞行堪称人类在求知探索的路上最为艰苦卓越的一次前行,将披荆斩棘走过的路夯实、巩固成阶梯,以便于后来者跟进、攀登,意义深远。

以一套丛书,将高超声速基础研究和工程技术方面取得阶段性成果和宝贵经验固化下来,建立基础研究与高超声速技术应用的桥梁,为广大研究人员和工程技术人员提供一套科学、系统、全面的高超声速技术参考书,可以起到为人类文明探索、前进构建阶梯的作用。

2016年,科学出版社就精心策划并着手启动了“高超声速出版工程”这一非常符合时宜的事业。我们围绕“高超声速”这一主题,邀请国内优势高校和主要科研院所,组织国内各领域知名专家,结合基础研究的学术成果和工程研究实践,系统梳理和总结,共同编写了“高超声速出版工程”丛书,丛书突出高超声速特色,体现学科交叉融合,确保了丛书的系统性、前瞻性、原创性、专业性、学术性、实用性和创新性。

该套丛书记载和传承了我国半个多世纪尤其是近十几年高超声速技术发展的科技成果,凝结了航天航空领域众多专家学者的智慧,既可为相关专业人员提供学习和参考,又可作为工具指导书。期望本套丛书能够为高超声速领域的人才培养、工程研制和基础研究提供有益的指导和帮助,更期望本套丛书能够吸引更多的新生力量关注高超声速技术的发展,并投身于这一领域,为我国高超声速事业的蓬勃发展做出力所能及的贡献。

是为序!



2017年10月

序 言

爆轰波(或爆震波)是超声速燃烧波,与传统发动机中的缓燃或爆燃不同,是等容燃烧。从热力学循环角度看,采用爆轰燃烧的动力装置,由于其自压缩性质,热效率远高于其他等压燃烧系统。虽然爆轰现象发现已超过 130 年,爆轰发动机概念的提出也有 70 年的历史,但迄今没有实际应用。

连续爆轰发动机的爆轰波不驻定、不排出,而是在燃烧室内旋转传播,这就保证了可燃混合物连续充入,燃烧产物连续排出,发动机连续做功,加之燃烧速度快、流量推力可调、可多次熄点火、结构简单紧凑等优点,有望成为新型航空航天动力。

王健平教授从 20 世纪 90 年代起,就从事旋转爆轰波的机理研究,在国内最早实现连续旋转爆轰的数值模拟和试验验证。他领导团队开展了系统深入研究,在基础研究方面一直处于领先地位,在国内外相关领域受到广泛关注并产生重要影响。

本书是王健平教授课题组十年来连续爆轰发动机研究的全面总结。书中包含如空心圆筒燃烧室、粒子跟踪热力循环分析法、离散进气方式、阵列式小孔进气方式、激波反射效应、黏性效应、喷管效应、信号震荡机理、点火延迟机理、爆轰波生成湮灭机理和稳定过程等多项原创性成果。本书涵盖了连续爆轰发动机的主要基本问题的理论分析、实验研究和数值模拟结果,包括进气方式、燃料掺混、点火起爆、流场结构、热力学分析、多波面现象、喷管设计等。本书的内容不仅有助于理解连续爆轰发动机的物理化学力学机理,而且为进一步的工程应用提供了重

要参考。

随着美国国防部先进研究计划局、空军研究办公室、海军研究办公室、能源部、通用电气,以及日本、法国、俄罗斯等国家相关计划的投入,连续爆轰发动机已成为航空航天新型动力的热点。相信本书的出版将在推动我国连续爆轰发动机的研究及应用上起到重要作用。基于此,我向感兴趣的院所师生、专家学者、工程技术人员推荐本书。



2017年12月

前 言

与已有的活塞、涡轮、火箭发动机的爆燃(又译为缓燃, deflagration)不同,爆轰发动机采用的是爆轰(又译为爆震, detonation)燃烧。爆燃近似于等压燃烧,传播速度在米/秒量级。爆轰波近似于等容燃烧,是与激波紧密耦合的超声速燃烧波,传播速度千米/秒量级。

连续爆轰发动机(continuous detonation engine, CDE),又称旋转爆轰发动机(rotating detonation engine, RDE),其工作原理为:在同轴圆环形或圆筒形燃烧室的头部,持续不断地充入燃料和氧化剂,并使两者掺混;爆轰波沿着圆周方向旋转传播,波后产生的高温高压工质沿着圆轴方向膨胀排出;工质通过喷管加速产生反作用力,或者推动涡轮带动压气机、风扇做功,从而产生推力。

连续爆轰发动机具有燃烧速度快、熵增小、热效率高、比冲大、燃料流量大幅可调、结构紧凑、推力稳定、容易控制等优点,是最具潜力的新型航空航天动力装置之一。关于连续爆轰发动机的研究逐年增多,在国内外都成为了热点问题。美国、俄罗斯、日本、波兰、法国等国家都高度重视,正投入大量人力、物力、财力开展研究。

连续爆轰发动机可能的应用方向为火箭式、涡喷式和冲压式发动机。三种发动机主体结构(特别是燃烧室结构)仍未确定。对应的燃料、喷注、雾化、蒸发、掺混、起爆、波的传播、稳定工作、模态转变、热传导和冷却、排气与做功都蕴含着以往未见的特点和难点。由于连续旋转爆轰波(continuously-rotating detonation waves)是一种新的燃烧过程和方式,对许多重要机理还没有研究清楚,对许多设计方法还没有大胆尝试,对许多潜在规律还没有归纳总结,对许多关键技术还没有攻关突破。

本书第一作者从20世纪90年代初在名古屋大学任助理教授时,就在实验室主任、国际爆轰领域权威、Oppenheim奖得主 Toshi Fujiwara 教授指导下,开展了

旋转爆轰波的三维流场结构及胞格结构的数值模拟研究。20 世纪末 21 世纪初,在国家自然科学基金“空天飞行器”重大计划的支持下,王健平带领学生开展了脉冲爆轰发动机(pulse detonation engine, PDE)的数值模拟研究。2007 年,在张涵信院士的启发下,我提出用垂直于进气方向的连续旋转爆轰波产生工质的方案,并通过数值模拟验证了可行性。在北京大学培育计划、航空基金、航天创新基金、国家自然科学基金重大计划“面向发动机的湍流燃烧”等项目的资助下,从实验、数值模拟和理论分析三个方面开展了系统性研究。研究内容几乎涵盖了上述连续爆轰发动机的基本问题。部分研究成果发表在国内外相关期刊和学术会议上,目前被引用数超过 480 次。2015 年美国航空航天学会全年综述中,用 1/4 的篇幅对北京大学研究成果给予了评价,认为取得了重大进展,具有重要意义。

本书由王健平、姚松柏分工撰著,最后由王健平统编定稿。本书内容包含课题组研究生们的科研成果,如邵业涛博士、刘勔博士、李韶武博士、石天一博士、张佩光博士、唐新猛博士、王宇辉博士、周蕊博士、武丹博士、刘宇思博士、刘岩博士、李永生硕士、李洋硕士、韩旭东硕士。李韶武博士、张佩光博士、刘岩博士、博士生张树杰、张立锋、栾溟弋、夏之杰、陈岩亮及硕士生马壮参与了本书撰写过程中的讨论,并提出了许多修改意见和补充,博士生栾溟弋为本书的校对和修改做了大量工作。没有他们就没有本书付梓,可惜不能将所有学生列为共同作者。

衷心感谢国防科技大学王振国院士和孙明波教授、中国运载火箭技术研究院王珏总师、北京航空航天大学蔡国飙教授百忙之中审读本书,并提出宝贵修改意见。感谢清华大学姚强教授、西北工业大学范玮教授、中国航天空气动力技术研究院沈清总师的推荐。感谢中国空气动力研究与发展中心乐嘉陵院士、航天工程大学庄逢辰院士、中国航空发动机集团尹泽勇院士对本书撰写的指导。感谢中国航天科技集团包为民院士为首的丛书专家委员会对本书的支持。特别感谢空军工程大学李应红院士为本书作序。感谢科学出版社的大力支持和帮助。感谢国家科学技术学术著作出版基金的资助。

本书内容是课题组研究工作的阶段性总结,书中有错误或不当之处在所难免,恳请读者批评和指正。



2017 年 10 月 17 日

高超声速出版工程

目 录

第1章 概 述

1

- 1.1 爆轰发动机 / 1
 - 1.1.1 驻定爆轰发动机 / 1
 - 1.1.2 脉冲爆轰发动机 / 3
 - 1.1.3 连续爆轰发动机 / 5
- 1.2 爆轰理论 / 18
 - 1.2.1 爆轰理论的形成和发展 / 18
 - 1.2.2 C-J 理论 / 19
 - 1.2.3 ZND 模型 / 21

第2章 实 验 技 术

23

- 2.1 燃烧室 / 23
- 2.2 供气系统 / 27
 - 2.2.1 气库 / 27
 - 2.2.2 针阀与质量流量控制器 / 28
 - 2.2.3 电磁阀 / 30
 - 2.2.4 单向阀 / 31
- 2.3 排气系统 / 31

- 2.4 点火系统 / 33
- 2.5 控制系统 / 35
- 2.6 测量系统 / 36
 - 2.6.1 压强传感器 / 36
 - 2.6.2 数据采集记录 / 38
- 2.7 实验方法 / 40
 - 2.7.1 实验基本流程 / 40
 - 2.7.2 实验时序设计 / 41

第3章 数值模拟方法

42

- 3.1 化学反应模型 / 43
 - 3.1.1 一步化学反应模型 / 44
 - 3.1.2 两步化学反应模型 / 45
 - 3.1.3 基元化学反应模型 / 47
- 3.2 控制方程 / 54
- 3.3 数值方法 / 57
 - 3.3.1 Steger-Warming 矢通量分裂 / 58
 - 3.3.2 MPWENO 格式 / 63
 - 3.3.3 Runge-Kutta 法 / 66
 - 3.3.4 MPI 并行计算 / 67
- 3.4 边界条件 / 68

第4章 进气与点火起爆

73

- 4.1 喷注与掺混 / 73
 - 4.1.1 燃料喷注与掺混 / 74
 - 4.1.2 非均布进气方式的数值模拟 / 76
 - 4.1.3 阵列式小孔进气方式 / 78
- 4.2 点火与起爆 / 82
 - 4.2.1 预爆轰管起爆 / 82

- 4.2.2 电火花塞起爆 / 84
- 4.2.3 其他起爆方式 / 84

第5章 流场结构

85

- 5.1 二维连续爆轰流场 / 85
 - 5.1.1 计算方法 / 86
 - 5.1.2 连续爆轰发动机流场 / 88
 - 5.1.3 入流总压及管长对连续爆轰发动机推进性能的影响 / 94
- 5.2 三维连续爆轰流场 / 95
 - 5.2.1 控制方程 / 95
 - 5.2.2 网格收敛性 / 96
 - 5.2.3 流场结构 / 98
 - 5.2.4 曲率效应 / 103
- 5.3 入流极限 / 104
 - 5.3.1 数学模型与边界条件 / 104
 - 5.3.2 物理模型 / 105
 - 5.3.3 分析 / 105

第6章 粒子跟踪法与热力学分析

112

- 6.1 热力学循环 / 113
 - 6.1.1 Humphrey 循环 / 113
 - 6.1.2 F-J 循环 / 116
 - 6.1.3 ZND 循环 / 118
 - 6.1.4 Brayton 循环 / 119
 - 6.1.5 几种理想循环模型对比 / 121
- 6.2 粒子跟踪法在连续爆轰发动机数值模拟中的应用 / 122
 - 6.2.1 反应模型和网格验证 / 122
 - 6.2.2 粒子轨迹跟踪 / 124
 - 6.2.3 热力学过程分析和比较 / 135

6.3 二维和三维流场中的粒子轨迹及结果分析 / 138

6.3.1 物理模型和数值方法 / 138

6.3.2 二维流场中的粒子轨迹 / 140

6.3.3 三维流场中的粒子轨迹 / 142

6.3.4 三维和二维结果对比分析 / 147

第7章 多波面现象

151

7.1 波面数量与稳定性 / 151

7.1.1 进气与点火方式 / 151

7.1.2 燃烧室条件对波面个数及发动机性能的影响 / 152

7.1.3 点火至稳定燃烧过程的分析 / 156

7.2 多种进气方式 / 160

7.2.1 全面进气(全范围进气) / 162

7.2.2 居中细缝进气 / 163

7.2.3 两侧细缝进气 / 166

7.2.4 放射间隔进气 / 169

7.2.5 倾斜带状进气 / 171

7.2.6 讨论 / 172

7.3 多波面自发形成过程 / 174

7.3.1 典型算例 / 175

7.3.2 与传统数值模拟结果和实验结果的比较 / 180

7.3.3 多波面现象的分析 / 184

第8章 空心圆筒燃烧室

186

8.1 新模型的提出 / 186

8.2 网格 / 189

8.3 流场 / 192

8.3.1 爆轰波稳定过程 / 193

8.3.2 波面与可燃气体 / 196

- 8.3.3 两种模型对比 / 199
- 8.3.4 性能 / 205
- 8.4 空心圆筒燃烧室中的粒子轨迹 / 207
 - 8.4.1 布点 / 208
 - 8.4.2 结果分析 / 209

第9章 喷管与尾流

211

- 9.1 四种喷管构型 / 211
- 9.2 流场结构 / 213
- 9.3 推力性能分析 / 215
- 9.4 尾流场的影响 / 220

参考文献 / 222

彩图 / 237