

《近代空气动力学丛书》

高速气流传热与烧蚀热防护

Heat Transfer of Hypersonic
Gas and Ablation Thermal Protection

姜贵庆 刘连元 著



国防工业出版社

近代空气动力学丛书

高速气流传热与烧蚀热防护

Heat Transfer of Hypersonic Gas and
Ablation Thermal Protection

姜贵庆 刘连元 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高速气流传热与烧蚀热防护/姜贵庆,刘连元著.
北京:国防工业出版社,2003.1
(近代空气动力学丛书)
ISBN 7-118-02867-3

I. 高... II. 姜... III. ①飞行器—空气动力学:
热力学②飞行器—烧蚀—防护 IV. V411.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 033564 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{8}$ 171 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:21.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

IV

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 崔士义 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

序

有书应有序,序者必须说明为什么要写书,写书有什么意义。

近代空气动力学丛书是 1994 年开始酝酿的,等书出齐肯定是下了世纪了。这是一套跨世纪的丛书,当然我们希望它能有跨世纪的意义。20 世纪初始有飞机出现,莱特(W. Wright, O. Wright)兄弟于 1903 年发明了飞机。到 30 年代,低速飞机的设计已日趋成熟,而空气动力学的研究为此做出了突出的贡献。1934 年开始由美国戈根海姆基金会支持、由杜朗(W. F. Durand)主编并成为航空发展基石的六卷本的空气动力学理论(Aerodynamic Theory)丛书就是很好的佐证。著名的力学家普朗特(L. Prandtl)、泰勒(G. I. Taylor)及卡门(T. von Karman)等均为该丛书撰写了重要章节。我国学者钱学森在 40 年代末曾称丛书中泰勒所写的可压缩性流体力学为此领域当时最佳的著作。杜朗的这一套书并不是直接为设计用的,它强调的是一个一个专题的理论基础,是为飞机设计者的技术创新服务的。第二次世界大战后,人类很快进入了超声速时代,卡门和钱学森等人在 40 年代末提出要编写一套现代化的空气动力学丛书,这就是由查雷(J. Charyk)做主编的由普林斯顿大学出版的高速空气动力学与喷气推进(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书,这套丛书直到 50 年代后期才出齐。著名空气动力学学者钱学森、林家翘、郭永怀都是该丛书的主要作者。

进入 50 年代,洲际核导弹的研制成为苏美两国武器竞赛的关键项目。苏联在 1957 年 10 月 4 日发射了世界上第一颗人造地球卫星,显示了苏联有发射洲际导弹的能力;1961 年 4 月 12 日,世界上第一位航天员加加林(Ю. А. Гагарин)乘“东方”1 号飞船实现

了绕地球的轨道飞行。美国提出了“阿波罗”登月计划,并于1969年7月20日实现了两名航天员登上了月球,并顺利地返回;1981年4月12日美国“哥伦比亚”号航天飞机从地面起飞,绕地球36圈以后成功地降落在爱德华兹空军基地。另一方面,气动性能先进的苏-27和F-22等也相继出现。这些大大促进了航空航天事业的发展。作为航空航天事业的基础,近代空气动力学不仅涉及低速、跨声速、超声速,而且包括高超声速和超高速范围,此时空气中已产生离解、电离和其他化学反应。空气动力学已不再仅仅是30年代以机翼理论为代表的传统的学科,它的发展引发了多学科之间相互渗透,大大丰富了空气动力学的内涵。

过去近50年的航空航天事业的迅速发展,拉动了空气动力学各方面的研究工作,使空气动力学作为一个重要学科,全方位突出于航空航天科学的前沿。特别是半个世纪以来计算机及计算理论和技术的发展使计算流体力学(计算空气动力学)成为一个主要的分支学科;电子技术、控制技术及传感器技术的迅猛发展使气动实验技术日新月异,从以前宏观的测力测压,发展到精细流场的测量;非线性动力学的发展和拓扑分析提供了新的理论武器。在这半个世纪内虽然有空气动力学专著出版,但是没有看到30年代、50年代那样高品位的空气动力学丛书。因此,在1994年的一次有国内部分空气动力学工作者参加的座谈会上,张涵信等同志就倡议由中国的空气动力学工作者发挥集体智慧来编著一套跨世纪的近代空气动力学丛书,并很快得到原国防科工委的赞同,成立了编委会,编委会的日常管理工作挂靠在中国空气动力研究与发展中心,并在国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的支持下开展工作。

前面这两套丛书都是世界级权威写的。30年代的丛书是世界性的,主要的作者包括了世纪性的科学家普朗特、泰勒和卡门。50年代普林斯顿大学的那套丛书,主要的作者都是当时在美国的第一流科学家。我们的丛书要继承和发扬前两套丛书的优点,显然,编著工作是十分艰巨的。

新中国成立后,在自力更生的方针指引下,由于国内空气动力学部门和全国有关单位的大力协同,以及气动力学工作者的努力奋斗,在钱学森和郭永怀的率领下,不仅继承了普朗特、卡门学派的优良传统,而且在钱学森发展的系统工程思想的指导下,抓住空气动力学总体,促进各学科之间的交叉,使我国的空气动力学在过去 40 多年的时间里得到了迅速的发展,可以说从无到有接近和达到国际先进水平,并积累了十分宝贵的经验。我们不能妄自菲薄,应该很好地加以总结,使这套丛书能充分反映新中国空气动力学工作者的重要成就。

我们并不认为这套丛书是经典性的、完美无缺的,但是认真朝这个方向努力的。我们希望这套丛书的出版不仅能够促进中国航空航天事业在 21 世纪的发展,并且对世界航空航天事业也有所贡献。

庄逢甘

1999 年 9 月 9 日

近代空气动力学丛书编辑委员会

组 成 人 员

主 任 委 员 庄逢甘

副 主 任 委 员 张涵信 崔尔杰 贺德馨 张仁杰

委 员 王承尧 王政礼 邓学莹 田 震

(按姓氏笔画为序) 乔志德 邬华谟 刘官德 安复兴

杨其德 杨岬生 李椿萱 吴芝萍

吴望一 沈 青 沈孟育 苗瑞生

范洁川 俞鸿儒 蒋 范 程厚梅

舒 玮 童秉纲

前 言

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及与物体相互作用的科学,是航空航天技术最重要的理论基础之一。飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,无不与空气动力学的发展密切相关。在新型飞行器设计中,空气动力学将起到愈发重要的作用。

我国的航空航天事业取得了举世瞩目的成就,广大空气动力学工作者为发展航空航天事业和空气动力学科学做出了突出贡献。为了促进空气动力学的进一步发展,迎接新世纪挑战,总结经验,培养人才,更好地为航空航天事业和国民经济服务,特组织编著出版近代空气动力学丛书。

近代空气动力学丛书由 20 多种单本专著组成,分理论和实验两部分。理论部分包括:跨声速空气动力学理论,无黏性高超声速空气动力学理论,稀薄气体动力学,计算流体力学——差分方法的原理与应用,计算流体力学谱方法,流体力学的有限元方法,高速气流传热与烧蚀热防护,多相湍流反应流体力学,高温非平衡空气绕流,湍流,旋涡与分离流动结构的分析,风工程与工业空气动力学,飞机设计空气动力学,发射气体动力学等。实验部分包括:风洞实验、风洞天平,风洞实验干扰与修正,脉冲风洞,近代流动显示技术等,丛书的编著坚持“五性”原则。即桥梁性:丛书是基础空气动力学到空气动力学前沿过渡的桥梁。专题性:丛书分成若干单本,每一单本仅涉及一个专门领域,是专著性丛书。近代性:丛书不仅重视学科已有的成就,而且重视近代的发展。系统性:每一单本专著,均有系统地介绍该领域的知识和发展。配套性:丛书的各单本专著联合在一起,基本覆盖了近代空气动力学各领域。为了组织和推动丛书的编著,组成了以庄逢甘院士为主任委员的编

辑委员会,负责制定丛书编写计划、选定编著者、审查书稿以及向国防科技图书出版基金评审委员会推荐申请资助等。中国空气动力研究与发展中心对编辑委员会的工作在人员和经费方面都给予了支持。丛书的各单本专著系通过申请国防科技图书出版基金获得资助后,由国防工业出版社列选出版。

本书是《近代空气动力学丛书》高速气动传热与烧蚀热防护分册,重点论述解决飞行器再入“热障”的热防护技术及其机理。

再入飞行器的“热障”问题的解决如同解决“声障”与“黑障”一样,是航空航天发展史上的重要里程碑,它开拓了航天技术中的一个新领域和新学科——气动热力学;而高速气动传热与烧蚀热防护是气动热力学的主要内容。高速气动传热与烧蚀热防护是空气动力学、传热、传质学、燃烧学、热力学,物理化学,材料学等多学科的发展和延伸,又有着自己的丰富内涵。它的解决和发展有力地推动了航空航天事业的发展。

在庄逢甘院士亲临研究和精心组织下,倾注了一代人的精心研究和心血,我国的热防护技术取得了丰硕的成果和实践经验。本书的主要内容是作者在飞行器气动热与热防护研究和设计第一线工作的经验总结,书中坚持理论与实践相结合,在偏重工程应用的同时,力求简明阐述热防护的基本概念和基本理论、工程计算、数值模拟和应用实例。

全书共6章,内容包括:绪论、化学边界层理论、再入飞行器的热环境、烧蚀热防护理论与工程计算、大气中水生成物粒子对飞行器的侵蚀、飞行器气动加热的数值模拟和混合型传热的数值计算。

化学边界层理论是烧蚀热防护的理论基础,而化学边界层在我国首先由庄逢甘院士在1961年提出,本书的主要理论是庄逢甘院士在1961年—1965年担任烧蚀防护理论研究课题组长期间提出并在以后的研究实践中不断完善的。其间课题组成员杨希霓研究员、黄振中研究员、欧阳水吾研究员都曾为烧蚀热防护理论的完善和应用作出了重要贡献。在此谨向他们表示感谢。

本书在编写过程中得到庄逢甘院士、张涵信院士、童秉纲院士

的鼓励和指导,童秉纲院士和安复兴研究员对本书的部分章节认真地进行审核,并提出宝贵的修改意见,在此深表谢意。最后还要感谢王淑华研究员、李鸿权研究员协助本书的起草工作,这些对保障本书的质量,起到了重要的作用。

本书的出版对扩大航天科技工作者和气动热力学研究人员及立志于航天事业的广大学者、教授、讲师和青年学生会有所帮助。

由于本书涉及理论和知识面是很广的,又是当代的前沿科学,作者虽在编写过程力求严谨,减少差错,但难免有不足之处甚至错误,衷心地希望广大读者给予指正。

作 者

目 录

绪论	1
第1章 化学边界层理论	10
1.1 边界层的特性	10
1.2 可压缩层流边界层的控制方程	12
1.3 可压缩层流边界层方程的相似性解	15
1.4 有质量引射层流边界层的相似性解法	20
1.4.1 基本方程和边界条件	20
1.4.2 相似变换	21
1.4.3 壁面热交换	22
1.4.4 算例	22
1.5 高超声速化学边界层	23
1.5.1 有化学反应层流边界层基本方程	24
1.5.2 化学平衡边界层	26
1.5.3 化学冻结边界层	29
第2章 再入飞行器的热环境	31
2.1 热交换模型与气动加热基本参数	31
2.1.1 热交换模型	31
2.1.2 气动加热基本参数	33
2.2 简单外形层流气动加热计算	34
2.2.1 平板	35
2.2.2 半球	35
2.2.3 圆锥	38
2.2.4 圆柱	38
2.2.5 任意轴对称外形	38

2.3 简单外形湍流气动加热计算	39
2.4 翼前缘和舵面气动加热计算	39
2.4.1 翼前缘气动加热计算	39
2.4.2 舵面前缘气动加热计算	41
2.4.3 翼面气动加热计算	42
2.5 有迎角弹头气动加热计算	42
2.5.1 有迎角气动加热计算方法	42
2.5.2 轴对称比拟法	43
2.6 变熵效应	45
2.7 粗糙壁热增量计算	46
2.7.1 层流粗糙壁热增量因子计算	46
2.7.2 湍流粗糙壁热增量因子计算	47
2.8 转捩区热流计算与转捩准则	48
2.8.1 转捩区热流计算	48
2.8.2 转捩准则	49
第3章 热防护理论与工程计算	52
3.1 热防护概念	52
3.2 硅基复合材料烧蚀机理及工程计算	56
3.2.1 硅基复合材料烧蚀机理	57
3.2.2 液态层控制方程及其解析解	59
3.2.3 硅基复合材料烧蚀工程计算	63
3.3 碳基复合材料烧蚀机理及工程计算	67
3.3.1 碳基复合材料的物化性能及热化学烧蚀计算	67
3.3.2 碳基复合材料表面力学剥蚀特性	77
3.3.3 碳基复合材料烧蚀工程计算与实验结果 的比较	78
3.4 碳化复合材料的烧蚀机理及工程计算	78
3.4.1 三种模型的基本方程	82
3.4.2 标准方程的差分离散	86
3.4.3 标准方程的初始条件与边界条件	88

3.4.4	表面烧蚀计算与进入材料内部净热流的确定	89
3.4.5	热解气体质量流率和各层厚度的确定	90
3.4.6	算例	92
第4章	大气中水生成物粒子对飞行器的侵蚀	94
4.1	大气中的云层和降水粒子	94
4.1.1	云层和降水粒子的宏观描述	95
4.1.2	云层和降水粒子的微观结构	95
4.2	粒子在激波层中的运动特性	101
4.2.1	球形粒子的阻力系数和热交换系数	102
4.2.2	非球形粒子的等价方法	103
4.2.3	粒子在激波层中的运动	108
4.3	天气粒子热增量	115
4.3.1	粒子侵蚀热增量机理	115
4.3.2	驻点热增量因子	117
4.4	粒子撞击侵蚀特性	118
4.4.1	靶材质量损失比 G 或有效侵蚀焓 H_{eff} 的 确定方法	118
4.4.2	弹性撞击的极限速度	121
4.4.3	靶元的塑性变形和流动变形的极限速度	122
4.4.4	高速撞击下的材料力学特性	123
4.4.5	弹体撞击的特征时间分析	124
4.4.6	粒子与靶体撞击碎片逸出现象	125
4.4.7	质量损失比和有效侵蚀焓的理论推导	126
第5章	飞行器气动加热的有限元数值模拟	132
5.1	高超声速绕流与有限元	132
5.2	结构网格的高分辨率有限元离散格式	134
5.2.1	一维 Euler 方程的有限元离散	135
5.2.2	二维和三维 Euler 和 N-S 方程有限元离散	137
5.3	非结构网格的有限元离散格式	144
5.3.1	模型方程的离散格式	144

5.3.2 n 维 Euler 方程有限元离散	145
5.3.3 非结构有限元离散的数值验证	147
5.4 有限差分—有限元杂交算法	148
5.4.1 有限元、有限差分及其杂交算法	148
5.4.2 二阶精度的 NND 有限差分—有限元杂交格式	148
5.4.3 三阶精度 ENN 有限差分—有限元杂交格式	151
5.4.4 有限差分—有限元杂交算法的隐式格式	155
5.5 壁面热流密度的积分算法	160
第 6 章 混合型传热的数值计算	163
6.1 热辐射传热特性	163
6.2 热辐射的一些基本定律	165
6.2.1 黑体辐射	165
6.2.2 非黑体辐射	168
6.2.3 能量衰减的 Bouguer—Lambert(布格尔— 拉满倍定律)	171
6.2.4 确定发射率的 Fresnel(弗雷斯内尔)方程	172
6.2.5 能量发射与 Gardon(加尔唐)公式	174
6.3 热辐射的能量传递方程	175
6.4 辐射和传导的混合传热	176
6.5 辐射、传导和对流的混合传热	179
6.6 窗口的温度分布计算	181
6.6.1 吸收介质中的热辐射传递计算	181
6.6.2 窗口内部吸收介质的温度分布计算	185
参考文献	191
主题词索引	199