

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

# 高超声速气动热和热防护

中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

《国防科研试验工程技术系列教材》  
空气动力系统

# 高超声速气动热和热防护

中国人民解放军总装备部  
军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

高超声速气动热和热防护/中国人民解放军总装备部  
军事训练教材编辑工作委员会编. —北京:国防工业出  
版社,2003.5

国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统  
ISBN 7-118-03087-2

I. 高... II. 中... III. 高超音速空气动力学; 空  
气热动力学 IV. V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 006516 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 13 $\frac{1}{8}$  335 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:32.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

# 《国防科研试验工程技术系列教材》

## 总编审委员会

名誉主任委员 程开甲 李元正

主任委员 胡世祥

副主任委员 段双泉 尚学琨 褚恭信 马国惠

委 员 (以下按姓氏笔画排列)

王国玉 刘 强 刘晶儒 张忠华

李济生 邵发声 周铁民 姚炳洪

姜世忠 徐克俊 钱卫平 常显奇

萧泰顺 穆 山

办公室主任 任万德

办公室成员 王文宝 冯许平 左振平 朱承进

余德泉 李 钢 杨德洲 邱学臣

郑时运 聂 皞 陶有勤 郭詮水

钱玉民

# 《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》编审委员会

主任委员 董臻东

副主任委员 陈作斌 乐嘉陵

委 员 张涵信 王 侃 张志成 萧泰顺

刘义信 范召林 郭隆德 杨祖清

桂业伟

主 编 张涵信

副 主 编 萧泰顺 张志成 王 侃

秘 书 赵志根 沈秀春

# 高超声速气动热和热防护

主 编 张志成

副主编 潘梅林 刘初平

主 审 刘湘华

副主审 杨茂昭

## 编写人员(按编写内容顺序)

第 1 章 张志成

第 2 章 潘梅林

第 3 章 张志成 孔容宗 何显中 董广彪 刘初平

第 4 章 潘梅林 刘初平 邱卫东

第 5 章 潘梅林 刘初平

第 6 章 潘梅林 黄 杰 邱卫东 黄树清

第 7 章 张志成 刘湘华

## 总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了近千名专家、学者编著了这套系列教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套系列教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套系列教材,旨在从总体的系统性、完整性、实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业 40 年来的重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的

技术保障;四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套系列教材按国防科研试验主要工程技术范畴分为:导弹航天测试发射系统、导弹航天测量控制系统、试验通信系统、试验气象系统、常规兵器试验系统、核试验系统、空气动力系统、航天医学工程系统、国防科技情报系统、电子装备试验系统等。各系统分别重点论述各自的系统总体、设备总体知识,各专业及相关学科的基础理论与专业知识,主要设备的基本组成、原理与应用,主要试验方法与工作程序,本学科专业的主要科技成果,国内外的最新研究动态及未来发展方向等。

这套系列教材的使用对象主要是:具有大专以上学历的科技与管理干部,从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套系列教材能够有益于高技术领域里人才的培养,有益于国防科研试验事业的发展,有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

1999年10月

## 序

空气动力试验与研究是国防科研试验的重要组成部分。

新中国成立以来,我国从事航空、航天空气动力研究的科技人员坚持“自力更生、艰苦奋斗、团结协作、科学求实”的精神,建立了尺寸、速度、性能相配套的各类气动试验设备,开展了气动理论、数值计算、气动试验及模型自由飞研究,承担并完成了一系列航空、航天、兵器武器的试验、计算任务,为我国武器装备的发展作出了重要贡献。

中国空气动力研究与发展中心的广大科技人员,在空气动力试验设备的研制、空气动力试验、计算方法研究及完成航空、航天、兵器等各类武器的试验与设计中,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的科研成果。为了更有效地培养和造就新一代空气动力学研究人才,促进我国空气动力事业的不断巩固和发展,在总装备部的领导下,我们组织有关专家和科技人员编写了这套系统、全面总结几十年来理论与实践经验成果的空气动力系列教材。

本套教材是以具有大专以上学历,从事空气动力研究的科技人员为主要适用对象,既可作为空气动力试验研究的中、高级技术人员的学习指导用书,亦可作为院校空气动力学相关专业的师生参考用书。

本套教材共分 13 卷。包括:《分离流与旋涡运动的结构分析》、《计算流体力学及应用》、《低速风洞试验》、《高速风洞试验》、《高超声速气动力试验》、《高超声速气动热和热防护》、《再入物理》、《高低速风洞气动与结构设计》、《高低速风洞测量与控制系统设计》、《高超声速试验设备设计》、《飞行器系统辨识学》、《模型自由飞试验》和《流动显示技术》。

本套教材在编写过程中,得到了总装备部领导、机关,型号部门和国内空气动力研究单位的大力支持与协作,在此一并表示衷心的感谢。由于本套教材涉及专业面广,包含内容多,编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者予以指正。

《国防科研试验工程技术系列教材·

空气动力系统》编审委员会

2001年3月

## 前 言

《高超声速气动热和热防护》是《国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统》中的一册,以再入弹头和飞船返回舱为主要研究对象,论述高超声速飞行器在大气层里飞行中所受到气动加热和低空云粒子侵蚀的理论计算方法和地面试验技术。在热防护方面,本书论述了烧蚀防热型防热材料在气动加热条件下防热性能的计算和试验技术。全书分为7章,第1章概论,介绍与气动热和防热有关的基本知识;第2、3章论述弹头、返回舱和航天飞机再入气动热环境的计算与地面试验技术;第4、5章分别论述再入弹头和返回舱防热材料在气动加热环境下的防热性能计算及电弧加热设备试验技术;第6章介绍弹头防热材料抗粒子云侵蚀性能计算和试验技术;第7章对气动热和防热试验技术的发展作了简单叙述。

本书根据《国防科研试验工程技术系列教材》的性质、阅读对象和编写要求编写。本书在参阅国内外有关文献资料的基础上,主要根据中国空气动力研究与发展中心在这一方面的研究工作实践编著而成。

本书编写工作在《国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统》编审委员会的领导下进行,编委会办公室做了大量组织工作,并得到了中国空气动力研究与发展中心总体技术部、高速所、设备设计和测试仪器研究所及超高速所的大力支持,姜贵庆研究员为本书第4、5章中烧蚀防热计算提供了许多宝贵的研究资料,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,会有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2002年8月

**《国防科研试验工程技术系列教材·  
空气动力系统》**

---

| 编号   | 教材名称           |
|------|----------------|
| 7-1  | 分离流与旋涡运动的结构分析  |
| 7-2  | 计算流体力学及应用      |
| 7-3  | 低速风洞试验         |
| 7-4  | 高速风洞试验         |
| 7-5  | 高超声速气动力试验      |
| 7-6  | 高超声速气动热和热防护    |
| 7-7  | 再入物理           |
| 7-8  | 高低速风洞气动与结构设计   |
| 7-9  | 高低速风洞测量与控制系统设计 |
| 7-10 | 高超声速试验设备设计     |
| 7-11 | 飞行器系统辨识学       |
| 7-12 | 模型自由飞试验        |
| 7-13 | 流动显示技术         |

**ISBN 7-118-03087-2/V·226**

定价:32.00 元

## 内 容 简 介

高超声速飞行器在大气层里飞行过程中与周围空气发生强烈相互作用而受到严重气动加热,在低空飞行时还可能遇到雨、雪和尘埃粒子的侵蚀。正确预测飞行器各部位气动热环境和云粒子侵蚀效应,并采取有效热防护措施,是飞行器设计的一项关键技术。本书以再入弹头和飞船返回舱这两类不同飞行轨道的飞行器为主要研究对象,介绍气动热环境的理论计算方法和地面试验技术,烧蚀防热型防热材料在气动加热条件下防热性能的计算方法和地面试验技术,弹头防热材料抗云粒子侵蚀的性能计算和试验技术。

本书适用于从事高超声速气动热和热防护研究,具有大学以上学历的技术人员阅读,也可供其他有关人员参考。

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第1章 概 论                  | 1  |
| 1.1 概述                   | 1  |
| 1.2 再入飞行器热环境和热防护问题       | 4  |
| 1.2.1 再入气动加热             | 4  |
| 1.2.2 再入轨道               | 7  |
| 1.2.3 气动热和防热的地面研究与试验     | 9  |
| 1.3 高超声速流基本概念            | 11 |
| 1.4 高温空气热化学基本知识          | 16 |
| 1.4.1 常态大气组分             | 16 |
| 1.4.2 高温空气平衡组分           | 18 |
| 1.4.3 高温空气的化学非平衡         | 20 |
| 1.4.4 高温空气化学反应与飞行速度-高度关系 | 22 |
| 1.5 热力学基础                | 23 |
| 1.5.1 气体热力学状态的描述         | 23 |
| 1.5.2 热力学第一定律            | 27 |
| 1.5.3 热力学第二定律            | 29 |
| 1.5.4 统计热力学几个基本概念        | 30 |
| 1.6 高超声速气动加热基本知识         | 37 |
| 1.6.1 传热的基本形式            | 37 |
| 1.6.2 高超声速气动加热形式         | 39 |
| 1.6.3 壁面状态对气动热影响         | 41 |
| 1.6.4 不同流态的气动热           | 42 |
| 1.7 再入飞行器热防护技术简介         | 42 |
| 参考文献                     | 45 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第 2 章 再入飞行器热环境计算 .....        | 46  |
| 2.1 概述 .....                  | 46  |
| 2.2 高速边界层传热 .....             | 47  |
| 2.2.1 边界层中基本传热形式 .....        | 47  |
| 2.2.2 边界层传热 .....             | 51  |
| 2.3 再入弹头热环境 .....             | 77  |
| 2.3.1 零攻角再入弹头热环境 .....        | 77  |
| 2.3.2 有攻角弹体热流密度 .....         | 103 |
| 2.4 返回舱热环境 .....              | 107 |
| 2.4.1 返回舱的外形和热环境 .....        | 108 |
| 2.4.2 返回舱特征点热环境工程预测方法 .....   | 109 |
| 2.5 航天飞机热环境 .....             | 116 |
| 2.5.1 机身迎风面热环境 .....          | 117 |
| 2.5.2 机翼前缘驻点线上热环境 .....       | 120 |
| 2.5.3 机翼迎风面热环境 .....          | 122 |
| 2.5.4 背风面分离区热环境 .....         | 123 |
| 2.6 稀薄气体加热 .....              | 125 |
| 2.6.1 流动区域的划分 .....           | 125 |
| 2.6.2 自由分子流加热 .....           | 126 |
| 2.6.3 过渡区流动加热 .....           | 128 |
| 2.7 化学非平衡加热 .....             | 131 |
| 2.7.1 冻结边界层的壁面催化特性 .....      | 132 |
| 2.7.2 冻结边界层壁面加热 .....         | 134 |
| 2.8 热环境的数值计算 .....            | 136 |
| 2.8.1 轴对称湍流边界层方程的有限差分分解 ..... | 136 |
| 2.8.2 高温气体变熵边界层的处理 .....      | 151 |
| 2.8.3 三维湍流边界层方程数值计算方法 .....   | 152 |
| 附录 A 差分方程中的系数 .....           | 167 |
| 附录 B 有限差分关系和线性化方法 .....       | 169 |
| 附录 C 高温气体变熵边界层外缘速度的确定方法 ..... | 171 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                    | 174        |
| <b>第3章 再入飞行器热环境地面试验 .....</b> | <b>176</b> |
| 3.1 概述 .....                  | 176        |
| 3.2 飞行器热环境地面试验技术 .....        | 177        |
| 3.2.1 试验设备 .....              | 177        |
| 3.2.2 试验模型 .....              | 178        |
| 3.2.3 模型表面热流测量技术 .....        | 179        |
| 3.2.4 气动热环境试验中的辅助测量 .....     | 182        |
| 3.3 模型表面热流测量基本原理 .....        | 182        |
| 3.3.1 两层介质中的热传导 .....         | 182        |
| 3.3.2 一维半无限介质中热传导 .....       | 184        |
| 3.3.3 衬底材料的厚度 .....           | 187        |
| 3.3.4 涂层的影响 .....             | 189        |
| 3.4 薄膜传感器技术 .....             | 191        |
| 3.4.1 薄膜传感器的基本构成及材料选择 .....   | 191        |
| 3.4.2 薄膜传感器的制作工艺 .....        | 193        |
| 3.4.3 薄膜传感器的标定 .....          | 194        |
| 3.4.4 薄膜传感器的应用 .....          | 196        |
| 3.5 红外热图技术 .....              | 200        |
| 3.5.1 红外成像原理和热像仪 .....        | 200        |
| 3.5.2 红外测温影响因素分析 .....        | 202        |
| 3.5.3 红外热图试验方法 .....          | 206        |
| 3.5.4 红外热图技术应用示例 .....        | 208        |
| 3.6 相变热图技术 .....              | 210        |
| 3.6.1 相变热图的试验方法 .....         | 210        |
| 3.6.2 模型材质 .....              | 212        |
| 3.6.3 相变涂层及相变温度标定 .....       | 213        |
| 3.6.4 数据处理 .....              | 213        |
| 3.6.5 相变热图试验结果示例 .....        | 216        |
| 3.7 薄壁量热计技术 .....             | 217        |

|            |                   |            |
|------------|-------------------|------------|
| 3.7.1      | 工作原理              | 217        |
| 3.7.2      | 模型和测温元件及其连接       | 219        |
| 3.7.3      | 防护装置              | 219        |
| 3.7.4      | 测量系统              | 220        |
| 3.7.5      | 数据处理              | 220        |
| 3.7.6      | 误差分析              | 220        |
|            | 参考文献              | 221        |
| <b>第4章</b> | <b>弹头烧蚀防热</b>     | <b>222</b> |
| 4.1        | 概述                | 222        |
| 4.2        | 端头烧蚀计算            | 223        |
| 4.2.1      | 端头热环境特点           | 223        |
| 4.2.2      | 两类端头热防护材料         | 223        |
| 4.2.3      | 两类热防护机理           | 224        |
| 4.2.4      | 硅基复合材料的烧蚀计算       | 237        |
| 4.2.5      | 碳基复合材料的烧蚀计算       | 240        |
| 4.2.6      | 烧蚀外形计算            | 246        |
| 4.3        | 锥身烧蚀计算            | 248        |
| 4.3.1      | 锥身热环境特点及热防护材料     | 248        |
| 4.3.2      | 碳-酚醛复合材料的烧蚀机理     | 249        |
| 4.3.3      | 碳-酚醛复合材料的烧蚀与热响应计算 | 252        |
| 4.4        | 电弧加热器自由射流烧蚀试验技术   | 257        |
| 4.4.1      | 自由射流试验装置          | 258        |
| 4.4.2      | 试验参数测量            | 260        |
| 4.4.3      | 自由射流试验的应用         | 269        |
| 4.5        | 电弧加热器湍流平板烧蚀试验技术   | 277        |
| 4.5.1      | 湍流管试验技术           | 278        |
| 4.5.2      | 超声速湍流平板烧蚀试验技术     | 278        |
| 4.6        | 亚声速包罩烧蚀/测力试验技术    | 281        |
| 4.6.1      | 试验装置              | 282        |
| 4.6.2      | 参数测量              | 283        |