



国防科工委“十五”规划教材·动力机械及工程热物理

固体火箭发动机传热学

郑 亚 陈 军 鞠玉涛 武晓松 编著

北京航空航天大学出版社

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

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光藕
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探



索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科



学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝

前 言

科学技术的发展和工程应用的需要,使人们越来越认识到传热问题的重要性。近年来,国内外不断出现一些新的传热学教材和专著,包括一些针对通用领域内传热基础和应用的书籍以及在机械、化工、电子、航空航天和兵器等专业领域的教材,但主要内容一般仍为传热学的基本理论和计算,并在此基础上考虑各自特有的专业特点和需要。

随着固体火箭发动机在军用和民用领域的广泛应用,固体火箭的性能指标,如飞行速度和工作时间等不断提高以及各种新的高能推进剂和高强度材料的应用,固体火箭发动机中的传热和热防护越来越成为固体火箭发动机设计中的一个突出问题。例如,2003年2月,以固体火箭作为助推器的“哥伦比亚”号航天飞机发射时绝热泡沫材料脱落,击伤了航天飞机的机翼,使“哥伦比亚”号返航时解体,机上7名宇航员全部殉难;2005年7月,同样以固体火箭助推的“发现”号航天飞机在发射过程中又有少量绝热瓦和绝热泡沫脱落,热防护问题再次引起人们的重视和担忧。即使是对中小型固体火箭发动机,其热强度问题也由于传热量的增加和发动机壳体的变薄而变得更加突出,越来越被研究、设计者所重视。因此,掌握传热计算和热防护设计方法,对于提高固体火箭发动机的性能是十分重要的。

固体火箭发动机传热学一直是固体火箭专业的重要课程。国内专门针对固体火箭发动机的传热学教材是20世纪80年代南京理工大学苏志明教授编著的《固体火箭发动机传热学》。该教材的内容侧重于传热学的基础知识,全书共9章,其中第1章至第7章是有关传热学的基础理论和基本计算,这也是一般传热学教材和书籍的基本内容;仅第8章和第9章是有关固体火箭发动机传热计算和热防护的内容,专业特点不够突出还有待改进。20世纪80年代至今,经过近20年的发展,在传热学和固体火箭发动机专业领域都出现了一些新的研究成果,迫切需要补充到教材中去。

本书是在原《固体火箭发动机传热学》教材基础上重新编写的。全书共分3部分。第1部分包括第1章至第3章,主要阐述3种传热方式的基本原理和计算。第2部分包括第4章至第9章,讨论传热理论在固体火箭发动机中的应用,着重讨论固体火箭发动机中燃烧室及喷管等主要受热部件的传热计算及热防护方法。第3部分是第10章和第11章,其中第10章主要针对固体火箭发动机传热具有的瞬态和高强度特点,以一维热传导问题为例简单介绍了非傅里叶效应,这一部分主要参考了姜任秋所著《热传导质扩散与动量传递中的瞬态冲击效应》的有关内容;第11章介绍计算传热学的初步知识。在总体内容安排上,有以下特点:(1)突出了专业特点,大部分篇幅是有关固体火箭发动机的传热计算和热防护的内容;(2)在介绍有关传热学的基本内容时,着重给出传热的基本概念和基本计算公式,但对公式不做过多的数学推

导;(3) 注重工程计算和应用,由于篇幅所限,省略了某些与固体火箭发动机传热工程计算无关的内容,例如有关辐射传热角系数的计算等。通过对本教材的学习,使用者可以掌握传热学的基本内容和方法,特别是固体火箭发动机传热的工程计算和热防护设计等专业技能,如果参阅通用的传热学教材或书籍会更有收获。

参加本书编写的有郑亚(第1章至第3章、第10章)、陈军(第4章至第6章)、鞠玉涛(第7章至第9章)和武晓松(第11章、附录),全书由郑亚和武晓松统编定稿。王栋和陈雄也参加了编写工作。参与书稿录入和插图工作的研究生有周超、张家仙、吉秋平和封锋等。孙思诚教授审阅了全书,并提出不少宝贵意见。在此谨对他们表示衷心感谢!

限于编者的水平,书中错误和不妥之处,恳切希望读者提出批评指正。

编 者

2006年5月

主要符号

A	面积;截面积, m^2 ;常数
A_p	自由通气面积, m^2
A_t	喷管喉部截面积, m^2
a	导温系数(热扩散率), m^2/s ;声速, m/s
C	常数
C_b	黑体辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
C_f	摩擦系数
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_h	热量传播速度, m/s
c_s	波前速度, m/s
D	直径, m
D_i	燃烧室内径;两个同心圆的内圆直径, m
D_e	燃烧室外径;两个同心圆的外圆直径, m
d	直径, m
d_c	临界隔热层直径, m
d_{eq}	当量直径, m
d_t	喷管喉部直径, m
E	辐[射]照度, W/m^2
E_λ	单色辐照度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
F	角系数
f	管流摩擦系数
f_0	火药力换算值, J/kg
G	密流, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
g	重力加速度, m/s^2
H	焓, J ;高度, m
h	换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
$\bar{h}$	平均换热系数;总换热系数的平均值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
h_{eq}	总换热系数的有效值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
$\bar{h}_{eq}$	总换热系数的平均有效值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
I	比焓, J/kg
J	有效辐射, W/m^2

K	总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
L	辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$; 装药长度, m
L_c	燃烧室长度, m
L_λ	单色辐射强度, $\dot{W}/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$
l	长度; 特征尺寸; 射线平均行程, m
M	辐射力, W/m^2
Ma	马赫数
M_b	黑体辐射力, W/m^2
M_λ	单色辐射力, $W/(m^2 \cdot \mu m)$
m	质量, kg; 冷却率, 1/s; 传热指数, 1/m
$\dot{m}$	质量流率, kg/s
$\dot{m}_b$	燃气生成率, kg/s
$\dot{m}_t$	通过喷管的质量流率, kg/s
N_s	质量速度, $kg/(m^2 \cdot s)$
p	压强, Pa
p_0	滞止压强, Pa
Q	热量, J
q	热流密度, W/m^2
R	热阻, K/W
r	半径, m; 恢复系数; 推进剂燃速, m/s
S	萨瑟兰常数, K; 装药燃烧面积, m^2
S_c	燃烧室传热表面积, m^2
T	热力学温度, K
T_0	滞止温度, K
T_b	管流平均温度, K
T_{eq}	室壁的平衡温度, K
T_f	膜温度, K
T_g	气体温度, K
T_i	初温, K
T_m	物体中心温度; 平板壁内中心温度, K
T_p	推进剂的定压燃烧温度, K
T_r	恢复温度, K
T_s	消融表面温度, K
T_w	壁面温度, K

$\bar{T}_w$	室壁平均温度, K
T_∞	主流温度, K
T^*	参考温度, K
t	时间, s
t_a	喷管的允许工作时间, s
t_b	装药燃烧时间, s
u_s	消融速度; 烧蚀速度, m/s
V	速度, m/s
V_m	截面平均速度, m/s
V_∞	主流速度, m/s
W	体积或容积, m^3 ; 摩擦功, J
$\dot{W}$	体积流率, m^3/s
$x_{\max}$	最大受热深度, m
x_T	总受热深度, m
α	吸收比, 材料的线胀系数
α_g	气体吸收比
β	体积膨胀系数; 线膨胀系数, $1/K$; 导热系数的温度系数, $1/K$
γ	比热比
δ	厚度; 流动边界层厚度, m
δ_c	黏性底层厚度, m
δ_n	隔热层厚度, m
δ_m	室壁厚度, m
δ_{mc}	喷管喉部的临界壁厚, m
δ_T	热边界层厚度, m
ε	发射率; 装药充满系数
ε_g	气体发射率
ζ_e	扩张比
θ	过剩温度; 角度
θ_i	初始过剩温度
θ_m	中心层过剩温度
θ_w	壁面过剩温度
$\bar{\theta}_w$	壁内平均过剩温度
λ	导热系数, $W/(m \cdot K)$; 波长, μm
μ	动力黏度, $Pa \cdot s$

ν	运动黏度, m^2/s ; 泊松比
Π	湿周长, m
ρ	密度, kg/m^3 ; 反射比
σ	应力分量, MPa
σ_b	材料抗拉强度极限, MPa
τ	黏性切应力, MPa ; 透射比; 发动机工作时间, s ; 应力分量, MPa
τ_0	松弛时间, s
τ_m	发动机的极限工作时间, s
τ_{mt}	喷管的极限工作时间, s
Φ	热流量, W ; 辐射功率, W
χ	热损失修正系数
Ψ	烧去装药的相对体积

量纲为 1 的参数及其定义

$$Bi = \frac{hl}{\lambda} \quad \text{比渥数 (Biot Number)}$$

$$Fo = \frac{at}{l^2} \quad \text{傅里叶数 (Fourier Number)}$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta Tl^3}{\nu^2} \quad \text{格拉晓夫数 (Grashof Number)}$$

$$Gz = Re \cdot Pr \frac{d}{l} \quad \text{格雷兹数 (Graetz Number)}$$

$$Le = \frac{a}{D} \quad \text{路易斯数 (Lewis Number)}$$

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \quad \text{努塞尔数 (Nusselt Number)}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad \text{普朗特数 (Prandtl Number)}$$

$$Pe = Re \cdot Pr \quad \text{贝克来数 (Peclet Number)}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad \text{瑞利数 (Rayleigh Number)}$$

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad \text{雷诺数 (Reynolds Number)}$$

$$St = \frac{h}{\rho c_p V} \quad \text{斯坦顿数 (Stanton Number)}$$

符号对照表

本书符号及意义		国际符号及意义	
符 号	量的名称	符 号	量的名称
C_f	摩擦系数	μ	摩擦因数
f	管流摩擦系数	f_d	管流摩擦因数
h	换热系数	K	传热系数
		h	表面传热系数
I	比焓	h	比焓
L	辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	I	辐[射]强度, W/sr
		L	辐[射]亮度, 辐射度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
M	辐射力, W/m^2	M	辐[射]出[射]度, W/m^2
W	体积或容积, m^3	V	体积或容积, m^3
$\dot{W}$	体积流率, m^3/s	q_v	体积流量, m^3/s
$\dot{m}$	质量流率, kg/s	q_m	质量流量, kg/s
$\dot{m}_b$	燃气生成率, kg/s	q_{mb}	燃气生成质量流量, kg/s
$\dot{m}_t$	通过喷管的质量流率, kg/s	q_{mt}	通过喷管的质量流量, kg/s

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 固体火箭发动机中的传热现象	1
1.2 热量传递的基本形式	2
1.3 量纲与单位	4

第 2 章 传热学基础

2.1 热传导	6
2.1.1 导热定律	6
2.1.2 导热系数	7
2.2 热对流	7
2.2.1 牛顿冷却定律	8
2.2.2 对流换热微分方程	8
2.2.3 对流换热系数	8
2.3 热辐射	9
2.4 初始条件和边界条件	10
2.4.1 初始条件	10
2.4.2 边界条件	10

第 3 章 一维传热计算

3.1 一维稳定热传导	12
3.1.1 导热微分方程	12
3.1.2 单层与多层平壁的热传导	13
3.1.3 圆筒壁面和球壁面的热传导	15
3.1.4 有内热源时的热传导	16
3.1.5 几种特殊传热问题的处理方法	17
3.2 一维不稳定热传导	18
3.2.1 不稳定导热在特殊情况下的解法	18
3.2.2 对流边界条件下的解法	20
3.3 对流换热	27
3.3.1 影响对流换热的主要因素	27
3.3.2 速度边界层和热边界层	29
3.3.3 对流换热微分方程组	30
3.3.4 相似准则	31
3.3.5 平板上受迫流动的换热	32
3.3.6 管内受迫流动的换热	35
3.3.7 自由对流换热	41
3.4 辐射换热	45
3.4.1 热辐射的一般概念	45



3.4.2	热辐射的基本定律	48
3.4.3	黑体表面间的辐射换热	57
3.4.4	灰体表面间的辐射换热	66
3.4.5	气体的热辐射	70
3.5	复合换热	78
3.5.1	总换热系数与总传热系数	78
3.5.2	通过平壁和圆筒壁的传热	80
第4章 固体火箭发动机中传热的基本知识		
4.1	固体火箭发动机中传热的特点及分析方法	85
4.1.1	固体火箭发动机内各区域的换热特点	87
4.1.2	研究发动机传热的目的和方法	88
4.2	燃气的热力参数	88
4.2.1	质量守恒方程	89
4.2.2	吉布斯(Gibbs)自由能判据方程	89
4.2.3	热力计算方程组	90
4.2.4	基本热力学导数	91
4.2.5	平衡流动的热力参数确定	92
4.2.6	热力参数计算的数值方法	94
4.3	燃气的输运系数	95
4.3.1	输运系数计算模型	96
4.3.2	温度对输运系数的影响	97
第5章 固体火箭发动机中的热传导		
5.1	燃烧室壁的热传导	100
5.1.1	燃烧室壁面温度计算	100
5.1.2	燃烧室壁厚与传热量的关系	102
5.2	喷管壁面的热传导	103
5.3	中间底壁面的热传导	105
第6章 固体火箭发动机中的对流传热		
6.1	固体火箭发动机中的对流传热计算	107
6.1.1	自由对流传热	107
6.1.2	强迫对流传热	108
6.1.3	高速强迫对流传热	111
6.1.4	涡旋对流传热	111
6.2	固体火箭发动机对流传热的影响因素与修正	113
6.2.1	压强跳动对对流传热的影响	114
6.2.2	压强变化对对流传热的影响	116
6.3	固体火箭发动机中两相流动的对流传热	120
第7章 固体火箭发动机中的辐射换热与复合换热		
7.1	固体火箭发动机的辐射换热	123



7.2 固体火箭发动机的总换热系数	127
7.2.1 燃烧室的总换热系数	127
7.2.2 喷管的总换热系数	128
7.2.3 总换热系数的平均值	129
7.2.4 总换热系数的有效值	130
7.2.5 总换热系数的平均有效值	132
7.3 燃烧室中的热损失	136
第8章 固体火箭发动机燃烧室的热防护	
8.1 燃烧室的热防护材料	141
8.1.1 耐热隔热层	142
8.1.2 消融隔热层	144
8.1.3 隔热层材料的选择	147
8.2 燃烧室的受热影响分析	148
8.2.1 发动机尺寸及工作压强对室壁受热的影响	148
8.2.2 无热防护时发动机的极限工作时间	152
8.2.3 消融隔热层计算模型	154
8.3 隔热层设计	156
8.3.1 耐热隔热层厚度的确定	157
8.3.2 消融隔热层厚度的确定	161
第9章 固体火箭发动机喷管的热防护	
9.1 热防护材料	167
9.1.1 高熔点金属	169
9.1.2 石 墨	170
9.1.3 碳/碳复合材料	173
9.1.4 增强材料	173
9.2 喷管的烧蚀现象	174
9.3 喷管的沉积现象及其影响因素	178
9.4 简单喷管的传热与计算	179
9.4.1 喷管的允许工作时间	179
9.4.2 喷管的极限工作时间	180
9.5 喷管的热防护设计	183
9.5.1 热防护原理	183
9.5.2 喷管的烧蚀冷却模型	184
9.5.3 烧蚀喷管附面层损失计算	188
9.5.4 高硅氧/酚醛热防护工程计算	192
9.5.5 碳/碳复合材料喉衬热化学烧蚀工程计算	197
9.5.6 碳/酚醛热防护工程计算	203
9.5.7 关于 Al_2O_3 颗粒侵蚀问题的讨论	204
9.5.8 喷管热防护设计中注意的问题	204



第 10 章 热传导问题的非傅里叶分析

10.1 瞬态热传导的宏观物理现象分析	208
10.2 通用傅里叶定律	210
10.3 热量传播速度为有限值时的热传导微分方程	211
10.3.1 强瞬态热传导问题	212
10.3.2 超瞬态热传导问题	212
10.3.3 不同类型的热传导微分方程	213
10.4 瞬态热传导问题的非傅里叶分析	214
10.4.1 强瞬态热传导问题	214
10.4.2 超瞬态热传导问题	217
10.5 热冲击问题的非傅里叶分析	220
10.5.1 热应力问题的数学描述	221
10.5.2 热冲击问题的数学描述	223
10.5.3 热冲击问题的非傅里叶分析	224

第 11 章 计算传热学

11.1 求解域及控制方程组的离散方法	228
11.1.1 传热控制方程组的类型	228
11.1.2 守恒型方程和非守恒型方程	230
11.1.3 求解域离散化与网络生成	231
11.1.4 控制方程组的离散化	232
11.1.5 离散方程的相容性、收敛性和稳定性	237
11.2 一维导热问题计算	238
11.2.1 一维稳态导热的计算	238
11.2.2 一维非稳态导热的计算	240
11.2.3 边界条件与源项处理	241
11.2.4 线性代数离散方程组的求解	244
11.3 对流—扩散方程的差分格式	245
11.3.1 对流—扩散方程及其精确解分析	245
11.3.2 中心差分格式	246
11.3.3 对流项迎风格式	247
11.4 求解非边界层型流动与换热问题的 SIMPLE 方法	248
11.4.1 流场数值计算的困难	249
11.4.2 交错网格与动量方程的离散	249
11.4.3 压强修正与 SIMPLE 方法	250
11.4.4 SIMPLE 算法的计算步骤与有关说明	252
11.5 CFD/NHT 商业软件简介	252

附 录	256
-----------	-----

参考文献