

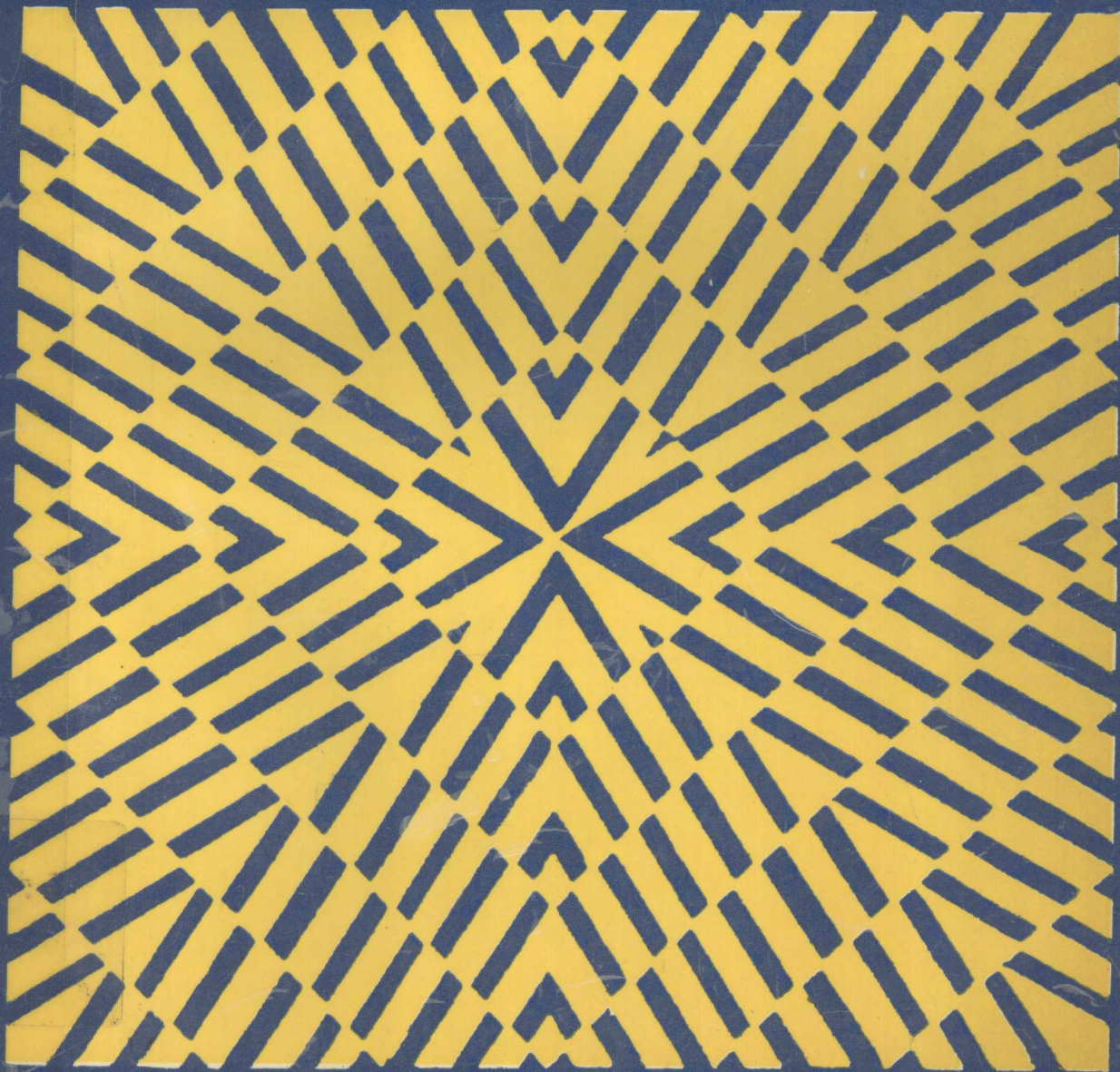


普通高等教育航天类规划教材

固体火箭发动机复合材料基础

中国航天工业总公司人事劳动教育部组织编写

王克秀 主编



V25
1009-2

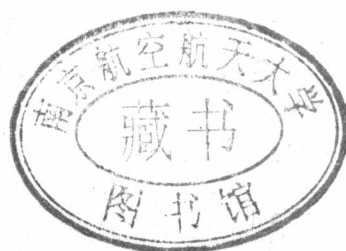
普通高等教育航天类规划教材

固体火箭发动机 复合材料基础

中国航天工业总公司人事劳动教育部组织编写

主 编 王克秀

编 者 王克秀 李葆萱



200540139

宇航出版社

200540139

(京)新登字 181 号

内 容 简 介

本书介绍了固体火箭发动机壳体用的复合材料。全书共分七章。绪论介绍了复合材料的基本知识及其在固体火箭发动机中的应用；第二、三、四章系统介绍了三类结构型纤维增强复合材料的基本组成、制造工艺和主要性能；第五、六两章分别介绍了结构型复合材料的力学性能和纤维缠绕壳体的强度设计；第七章介绍了耐烧蚀材料，特别是碳/碳复合材料的组成、工艺、性能及烧蚀机理。

本书着重介绍新型复合材料性能的基本理论和设计方法，及其与固体火箭发动机性能的关系，并力求反映国内外复合材料学科的先进水平。

本书可作为高等学校固体火箭发动机专业教材，也可供从事火箭发动机教学、科研、设计的人员参考。



普通高等教育航天类规划教材 固体火箭发动机复合材料基础

中国航天工业总公司人事劳动教育部组织编写

主 编 王克秀

责任编辑 卫 迁

*

宇航出版社出版发行

北京和平里滨河路 1 号(100013)

发行部地址: 北京阜成路 8 号(100830)

各地新华书店经销

北京市燕文印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.625 字数: 337 千字

1994 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数: 1~1000 册

ISBN 7-80034-769-9/V·180 定价: 7.70 元

航天专业本科系列教材

编委会

主 任 白拜尔
副 主 任 李志黎 杜善义
委 员 张乃通(常务) 陈达明(常务)

(以下按姓氏笔划为序)

于 翹 王文超 王本华 王希季
李成忠 李世培 刘国雄 邹德兴
郑济民 姜明河 栾儒生

编辑部成员 (按姓氏笔划为序)

丁晓桦 李定建 肖业伦 邹振祝
闵汉群 赵长安 修志伟 贾世楼
曹 英 谢蔚民 董少英 蔡增寿

出版说明

按照国家教委关于高等学校教材工作分工原则,中国航天工业总公司负责组织全国高等学校航天类专业教材的规划、编审和出版。根据航天教育发展规划,为适应航天事业发展的需要和满足航天院校本科教学的要求,在航天工业总公司教材编审委员会的主持下,成立了航天专业本科系列教材编辑委员会,负责组织编审、出版“八五”期间航天专业本科系列教材。这套书分成航天器、导弹、飞行力学、发动机、控制与制导、空间电子学六类。适应的专业范围为:飞行器系统工程、飞行器总体设计、飞行器结构与强度、飞行器动力工程、飞行器制造工程、飞行器控制与制导、飞行器发射技术与装置、飞行器环境与模拟工程、飞行力学、宇航光电工程、空间工程和卫星与卫星应用等。

编委会为这套教材制订的出版原则是:

1. 教材应保证思想性、科学性、先进性和启发性,注意理论联系实际。内容的深度与广度应有利于培养学生的自学能力,创造能力及解决实际问题的能力。

2. 由于部、院、所技术专家长期从事航天科研工作,学校教师长期从事教学,他们各自都积累了丰富的经验。为使这套航天本科系列教材既有一定的理论水平,又能很好地联系实际,因此,要求教材的编审必须具有下列形式中的一种:

- 1) 技术专家主编,学校教师参编;
- 2) 学校教师主编,技术专家参编;
- 3) 技术专家独立编写,主审者中有一名是学校教师,从教学要求把关;
- 4) 学校教师独立编写,其编写大纲须由编委会聘请有关技术专家审阅。

无论以上哪一种编写方式,均由编委会聘请部、院、所有关技术专家主审。

3. 这套教材除作为航天航空高等院校本科教材外,也可作为相应专业研究生参考书和航天领域工程技术人员继续教育的教学参考书以及有关科技人员的参考书。

限于水平和经验,这套教材的编审出版工作肯定有不少缺点和不足之处,欢迎使用教材的单位、广大教师、同学和有关技术人员提出宝贵意见,以进一步提高航天类专业本科教材的质量。

中国航天工业总公司人事劳动教育部

1994年3月

前 言

《固体火箭发动机复合材料基础》是固体火箭发动机专业的专业基础课。本书介绍了固体火箭发动机壳体、喷管等使用的复合材料基本组成、性能和加工方法，着重介绍了纤维增强复合材料的力学性能和烧蚀性能。编写时，参考了国内外最新的书刊和资料，以求反映复合材料的发展动态。

本书第一、四、五、六、七章和附录由王克秀编写，第二、三两章由李葆萱编写。全书由叶定友主审。

鉴于编者水平有限，缺点在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1992年8月

目 录

主要符号表

第一章 绪论	9
第一节 复合材料及其分类	9
第二节 复合材料在固体火箭发动机中的应用	11
第三节 复合材料的特点	16
习 题	20
第二章 玻璃纤维复合材料	21
第一节 玻璃纤维	21
第二节 基体材料	29
第三节 玻璃纤维复合材料制造工艺简介	39
第四节 玻璃纤维复合材料的主要性能	43
习 题	47
第三章 碳纤维复合材料	48
第一节 碳纤维	48
第二节 基体材料	57
第三节 碳(石墨)纤维复合材料的成型工艺	61
第四节 碳(石墨)/纤维复合材料的性能	61
第五节 固体火箭发动机燃烧室壳体用碳/环氧复合材料	67
习 题	70
第四章 有机纤维复合材料及其它纤维复合材料	71
第一节 有机纤维复合材料	71
第二节 其它纤维增强树脂基复合材料	77
第三节 金属基复合材料	82
第四节 陶瓷基复合材料	83
习 题	86
第五章 连续纤维复合材料的力学性能	87
第一节 复合材料的力学特性	87
第二节 单向纤维复合材料的弹性特性	95
第三节 正交织物(双向)复合材料的弹性特性	106
第四节 单向纤维复合材料的强度特性	109
第五节 单向混杂纤维复合材料的强度特性	118
第六节 连续纤维复合材料的其它力学性能	122

第七节 连续纤维复合材料的热性能	124
习 题	130
第六章 纤维缠绕壳体的强度设计	131
第一节 网格理论的基本概念	131
第二节 纤维缠绕壳体圆筒段的强度设计	132
第三节 纤维缠绕壳体封头设计	146
第四节 混杂纤维缠绕壳体的网格分析	163
第五节 纤维缠绕壳体体积变形及补强	171
习 题	172
第七章 耐烧蚀材料及材料的烧蚀性能	173
第一节 热防护系统的基本概念	173
第二节 评定材料烧蚀与隔热性能的综合指标	175
第三节 耐烧蚀复合材料	176
第四节 耐烧蚀复合材料的烧蚀机理及烧蚀模型	193
第五节 固体火箭发动机内绝热层材料及其烧蚀机理	200
习 题	203
附 录	204
附表一 复合材料在战略、战术导弹上的应用	204
附表二 复合材料在航天器中的应用	206
参考文献	

主 要 符 号 表

符 号 量 的 名 称

A	横截面积; 频率因子
A_f	纤维横截面积
A_m	基体横截面积
b	复合材料宽度
b_f	纤维薄片宽度
b_m	基体薄片宽度
C	裂纹长度之半; 组分浓度
c_p	定压比热容
D	圆筒内直径
d_m	最大微晶直径
d_{002}	微晶片层的层间距
E	弹性模量; 反应活化能
E_f	纤维弹性模量
E_m	基体弹性模量
E_L	纵向拉伸模量
E_T	横向拉伸模量
E_{HL}	混杂纤维复合材料纵向拉伸模量
E_{HT}	混杂纤维复合材料横向拉伸模量
E_{eff}	烧蚀热效率
F_f	纤维拉伸强度
F_m	基体拉伸强度
F_{L_c}	复合材料纵向压缩强度
F_{T_c}	复合材料横向压缩强度
F_{L_t}	复合材料纵向拉伸强度

符 号 量 的 名 称

F_{T_t}	复合材料横向拉伸强度
F_{L_T}	复合材料纵横向剪切强度
F_{HL_t}	混杂纤维复合材料纵向拉伸强度
f	股纱张力
f_b	股纱每股设计强力
f_L	经纱百分数
f_T	纬纱百分数
G_f	纤维剪切模量
G_m	基体剪切模量
G_{LT}	纵横向剪切模量
H_T	有效烧蚀热
h_D	质量扩散系数
h_S	材料热焓
I	总冲
I_s	比冲
J_{kw}	元素 k 在壁面上的质量扩散率
K	化学反应速度常数; 安全系数; 折减系数
K_a	平衡应力系数
K_f	纤维体积含量系数 ($=1/V_f$)
K_v	材料空隙率
L	m_y 克原纱的长度(m)
L_a	碳纤维条带水平基面的平均长度
L_c	圆筒长度; 碳纤维层面厚度
l	单位长度
M	螺旋缠绕一个循环总纱片条数
M_{ma}	螺旋层基体质量分数
M_{m0}	环向层基体质量分数
M_f	纤维质量分数

符 号 量 的 名 称

M_m	基体质量分数
m	环向缠绕时, 单位宽度上的纱片数
m_c	燃烧室质量; 材料质量; 碳的质量消耗率
m_f	纤维质量
m_m	基体质量
m_p	推进剂质量
m_X	X 方向附加应力系数
m_Y	Y 方向附加应力系数; 原纱质量
m_a	螺旋缠绕纤维股纱密度
m_θ	环向缠绕纤维股纱密度
$\dot{m}_s$	热化学烧蚀率
$\dot{m}_w$ (机)	机械剥蚀率
$\dot{m}_\infty$	总的质量损失率(或烧蚀率)
N	特征因子
N_{fL}	纤维纵向内力
N_{mL}	基体纵向内力
N_Z	圆筒轴向薄膜内力
N_θ	圆筒环向薄膜内力; 封头平行圆向薄膜内力
N_φ	封头子午线向薄膜内力
n	纤维缠绕层数
n_a	螺旋缠绕层数
n_θ	环向缠绕层数
n_L	经纱排纱密度
n_T	纬纱排纱密度
P	内压强
P_l	作用在圆筒端头底面上的力
P_d	壳体设计强度
P_m	壳体最大工作压强

符 号 量 的 名 称

P_{bucd}	壳体设计爆破压强
P_L	纵向拉力
P_T	横向拉力
P_Z	轴向外力
P_θ	环向外力
Q	热量
Q_a	螺旋缠绕纱片的纤维股数
Q_θ	环向缠绕纱片的纤维股数
q	平均冷壁热流
q_b	传入材料内部的净热流
q_r	烧蚀表面辐射热流率
q_w	烧蚀表面气动加热率
R	圆筒内半径;抗热震因子
R_φ	子午线曲率半径
R_θ	平行圆曲率半径
r	封头平行圆半径
r_0	封头极孔半径
T	温度
T_c	最高使用温度
T_i	材料起始温度
T_N	后封头承受的推力
T_Z	n_a 层交叉纤维在 z 方向上的拉力
T_θ	n_a 层交叉纤维在 θ 方向上的拉力
u	气流速度
V	气体总体运动速度
V_C	燃烧室容积
V_f	纤维体积分数
V_{fcr}	临界纤维体积分数

符 号 量 的 名 称

V_m	基体体积分数
V_s^*	纵向折算体积比
V_y^*	横向折算体积比
v_c	复合材料体积
v_f	纤维体积
v_m	基体体积
v_v	空隙体积
Y_{ks}	烧蚀表面上元素 k 的质量分数
a	热膨胀系数; 螺旋缠绕角
a_L	纵向线膨胀系数
a_T	横向线膨胀系数
a_0	圆筒段螺旋缠绕的平衡缠绕角
β	原纱支数
γ	复合材料平均剪应变
γ_{fLT}	纤维剪应变
γ_{mLT}	基体剪应变
ΔL	圆筒轴向伸长量
Δr	圆筒径向伸长量
δ	圆筒复合厚度
δ_{ef}	圆筒有效厚度
δ_f	纤维总厚度
δ_m	基体总厚度
δ_{fa}	螺旋缠绕纤维厚度
$\delta_{f\theta}$	环向缠绕纤维厚度
δ_L	圆筒轴向微小伸长
δ_r	圆筒环向微小增量
ε	复合材料平均应变; 介电常数
ε_f	纤维应变

符 号 量 的 名 称

ε_{fa}	螺旋向纤维应变
$\varepsilon_{f\theta}$	环向纤维应变
ε_{fu}	纤维断裂应变(断裂伸长率)
ε_L	复合材料纵向平均应变
ε_{fL}	纤维纵向应变
ε_{mL}	基体纵向应变
ε_T	复合材料横向平均应变
ε_{fT}	纤维横向应变
ε_{mT}	基体横向应变
ε_{mu}	基体断裂应变(断裂伸长率)
ε_u	复合材料断裂应变(断裂伸长率)
η	环向与纵向内力比
η_s	纵向应力分配系数
η_y	横向应力分配系数
$\eta_{机}$	机械剥蚀因子
θ	任一基准子午线旋转至另一子午线的夹角
λ	导热系数
λ_L	复合材料纵向导热系数
λ_{fL}	纤维纵向导热系数
λ_m	基体导热系数
λ_T	复合材料横向导热系数
λ_{fT}	纤维横向导热系数
μ	质量比
μ_{mi}	冲量质量比
ν_{LT}	纵向泊松比
ν_{TL}	横向泊松比
ν_{HLT}	混杂纤维复合材料纵向泊松比
ξ	无因次高度

符 号 量 的 名 称

ρ	材料密度；无因次半径
ρ_c	复合材料密度
ρ_f	纤维密度
ρ_m	基体密度
ρ_{FRP}	复合材料密度
ρ_0	极孔无因次半径
σ	应力
σ_x	x 向正应力
σ_y	y 向正应力
σ_L	复合材料纵向平均应力
σ_{fL}	纤维纵向应力
σ_{mL}	基体纵向应力
σ_T	复合材料横向平均应力
σ_{fT}	纤维横向应力
σ_{mT}	基体横向应力
σ_{cZ}	圆筒薄膜内力的轴向分量
$\sigma_{c\theta}$	圆筒薄膜内力的环向分量
σ_b	复合材料拉伸强度
σ_{fb}	纤维断裂应力
σ_{fab}	螺旋向纤维断裂应力
$\sigma_{f\theta b}$	环向纤维断裂应力
σ_{HL}	混杂纤维复合材料纵向平均应力
σ_{HT}	混杂纤维复合材料横向平均应力
σ_{FRP}	圆筒复合强度
σ_{FRPZ}	圆筒轴向复合强度
$\sigma_{FRP\theta}$	圆筒环向复合强度
σ_{L_t}	复合材料纵向拉伸应力
τ_{LT}	剪应力

符 号 量 的 名 称

τ_{fLT}	纤维剪应力
τ_{mLT}	基体剪应力
φ	曲面法线与回转轴间的夹角

下 角 标

b	断裂值
c	燃烧室；复合材料；压缩
ef	有效值
f	纤维
H	混杂复合材料
L	纵向
LT	纵横向
m	基体
P	推进剂
T	横向
t	拉伸
u	断裂值
Z	轴向
a	螺旋向
θ	环向；平行圆
φ	子午线

第一章

绪 论

材料是构成导弹与航天器的物质基础。现代战争和外层空间探索的发展,以及导弹、航天器严峻的工作环境,都对材料性能不断提出苛刻的要求。这种需求有力地推动着宇航材料的发展。新材料的出现,使合理设计有了实现的可能。随着材料的更新换代,导弹和航天器的性能,在近 40 年有了飞跃的发展。最明显的例子是复合材料的出现,它使导弹与航天器的面目为之一新。

作为重要动力装置的固体火箭发动机,其性能同样与材料的技术水平密切相关,并直接影响导弹及航天器的性能。固体火箭发动机具有结构简单、工作可靠、操作简便、使用安全和能够长期贮存等优点,已广泛用作战略和战术导弹、及航天器的发动机。固体发动机采用先进复合材料和高性能固体推进剂后,性能进一步提高,应用范围不断扩大。例如,美国现役战略导弹已全部采用固体火箭发动机。在航天推进系统中,固体空间发动机、助推器也得到广泛应用。

由于复合材料具有高的比强度、比模量,耐高温等性能,特别是它们可以根据工作结构的载荷分布、环境条件和使用要求,选择和设计材料及结构等优点,所以从它一出现就广泛地应用于航空、导弹、航天等领域,作为主要结构材料或烧蚀、隔热等功能材料。

第一节 复合材料及其分类

复合材料是由两种或两种以上性质不同、互不相溶(熔)的宏观组分,通过某种工艺方法制成,它是存在明显相界面的多相材料。

复合材料在建筑工程,工业和日常生活中早已广泛应用,如钢筋混凝土、橡胶轮胎和玻璃钢等都属于复合材料范畴。但复合材料正式作为一种新型材料而大量使用,还是第二次世界大战后的事情。它通过一定的工艺手段,将一种(或多种)细微形状的材料充分而均匀地分散在另一种材料中制成。前一种组分材料称为分散相,又称为增强材料;后一种组分材料称为连续相,或基体材料。各相材料的物理性质通称为相物理,各相材料的几何形状及其分布通称为相几何。这类复合材料在保持各个原材料特色的同时,克服单一材料的某些弱点,发挥出单一材料不能得到的综合复合特性,并能按制品的要求,通过改变相物理、相几何,使材料的力学性能、热性能、电性能等达到最佳化。它的出现,不但给人们在选择和设计材料时提供更多的自由度,而且能满足科学进展对材料不断提出的各种新要求。因此在国民经济各部门中,特别是航空、导弹、航天部门受到越来越多的重视,并得到广泛应用。

复合材料的分类见表 1-1。