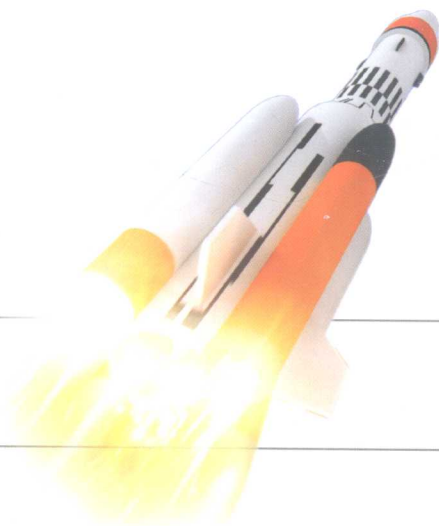


高等学校教材 · 航空、航天、航海系列
TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION

固体火箭发动机复合材料与工艺

崔 红 王晓洁 闫联生 编著



西北工业大学出版社

GUTI HUOJIAN FADONGJI FUHE CAILIAO YU GONGYI

固体火箭发动机 复合材料与工艺

崔 红 王晓洁 闫联生 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书紧密结合近 50 年来我国固体火箭发动机复合材料应用技术的发展,较全面地阐述了固体火箭发动机非金属复合材料制造技术的相关理论知识及设计、研究、生产方面的实践经验和新技术、新工艺,主要包括壳体复合材料及其成型工艺、喷管复合材料及其成型工艺、复合材料检测技术、复合材料相关技术发展趋势等。

本书可供固体火箭发动机复合材料相关专业的研究生专业课教学使用,也可对相关技术及管理人员从事“固体火箭发动机”“复合材料”专业方向的学习提供重要参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

固体火箭发动机复合材料与工艺/崔红,王晓洁,闫联生编著. —西安:西北工业大学出版社,2016.1

ISBN 978-7-5612-4709-9

I. ①固… II. ①崔… ②王… ③闫… III. ①固体推进剂火箭发动机—非金属复合材料 IV. ①V435②V254

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016)第 022867 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:9.25

字 数:209 千字

版 次:2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价:78.00 元

“固体火箭发动机技术基础及工程概论”系列教材

编审委员会

主 任 田维平

副主任 张康助 侯 晓

委 员 张钢锤 任全彬 张小平 刘勇琼 龚晓宏

张立武 张永侠 柴玉萍 陈雷声 白向荣

李文岛 周养龙 刘伟凯 王常建 张 翔

赵 阳 史宏斌

编审委员会办公室

主 任 赵 阳

成 员 谢 莉 王苏安 单 云 赵孝彬 马 涛

李迎春 张 琳 拜啸霖 陈迎朝 王建锋

胡媛媛 张 锋 陈 聪

《固体火箭发动机复合材料与工艺》

编审委员会

主 任 刘勇琼

副 主 任 崔 红 张 翔

委 员 邓红兵 郝志彪 杨 杰 曾金芳 王晓洁

李瑞珍 闫联生 郭亚林 刘建军 李崇俊

李辅安 肖志超 刘建超

工作人员 李迎春 张 琳 黄 芹

总 序

航天动力技术研究院(又名中国航天科技集团公司第四研究院)1986年被国务院学位委员会批准为硕士学位授予单位,现有航空宇航科学与技术、化学工程与技术、材料科学与工程、仪器科学与技术4个一级学科硕士学位授权点。

为培养航天事业需要的科技人才,保障硕士研究生培养质量,航天动力技术研究院专门开设了“固体火箭发动机技术基础及工程概论”专业课,按固体火箭发动机设计、推进剂理论与工程、装药与总装工艺、复合材料与工艺、金属件制造技术和固体火箭发动机试验测试等6个部分开展教材编写工作,2010年完成了教材初稿编写,2011年开始使用本教材。经过几年的教学实践,对相关教学内容不断进行完善。2014年邀请西北工业大学、西安交通大学、第二炮兵工程大学相关专业的教授及院内的专家对教材进行了评审,根据他们的意见,又对教材进行了较大的修改。现在6本教材已陆续完稿,包括《固体火箭发动机设计技术基础》《固体火箭推进剂理论与工程》《固体火箭发动机装药与总装工艺学》《固体火箭发动机复合材料与工艺》《固体火箭发动机金属件制造技术》《固体火箭发动机试验测试》,其中《固体火箭推进剂理论与工程》已于2014年5月先期出版。

“固体火箭发动机技术基础及工程概论”系列教材包含固体火箭发动机技术的基础知识、基本理论,融入科研实践和研制经验,参考国外该专业的技术发展,具有鲜明的行业特色。本系列教材不仅可作为硕士研究生培养专业课教材,也可作为相关技术及管理人员的专业参考书和培训教材。

在编写本系列教材过程中,得到了航天动力技术研究院和院属四十一所、四十二所、四十三所、四〇一所、七四一四厂、七四一六厂有关专家、领导及人力资源部门的通力合作与支持,在这里谨向他们,尤其是技术专家们表示诚挚的谢意!

在本系列教材的编写过程中,我们虽付出大量心血,几经易稿和修改,但难免有疏漏、错误及不足之处,敬请读者提出宝贵意见。

本系列教材编审委员会

2015年7月

代 序

——飞向永恒之梦的动力源泉

自古迄今,从走出非洲的遥远祖先,到互联网时代的思辨青年,人类从未停止对神秘宇宙的追问与探寻,从未停止遨游太空的神思和梦想。及至 21 世纪的今天,航天技术的进步与发展,使得人类探索、开发和利用宇宙空间成为现实。从第一个进入太空的地球人尤里·加加林,到第一个踏上月球的地球人阿姆斯特朗,从第一颗人造卫星的发射到载人飞船太空交会对接,在茫茫宇宙中,人类不断延伸着自己生命的触角,不断向深邃的未知领域释放智慧的光芒。

航天技术是当今世界高技术群体中最具影响力的综合性科学技术之一。生命智慧对于宇宙规律的探求使得人类航天技术不断得以突破性发展,人类活动范围从地球物理空间迅速延伸到外太空以至更远的宇宙。航天技术的变革与进步,又反过来影响人类的思维模式,使整个人类自身的面貌和生活方式也发生了深刻的变化。

固体燃料火箭发动机技术作为航天技术的重要组成部分,为火箭或导弹飞行提供充足的动力。如果把航天飞行器比作一只遨游太空的鹏鸟,那么,固体燃料火箭发动机就是这只鹏鸟的心脏,为翱翔于茫茫宇宙波涛之上的鹏鸟提供源源不绝的前进动力。

中国航天技术的突飞猛进,不仅仅昭示着一个现代化科技大国的实力,更彰显了中华民族沉寂了近百年的自强与自信。在实现我国从航天大国向航天强国跨越的过程中,固体火箭发动机技术的发展起着举足轻重的作用。作为固体火箭发动机技术扛鼎单位的航天动力技术研究院,始终以国家强大、民族昌盛为己任,艰苦创业,顽强拼搏。50 多年来,冲破重重险阻,攻克道道难关,走出了一条自力更生、自主创新的中国航天固体动力发展之路,推动我国航天固体动力事业从无到有、从小到大、从弱到强的历史性跨越,圆满完成了以“两弹一星工程”“高新工程”和“载人航天工程”为代表的各项重大任务,为增强国家战略安全能力和综合国力做出了突出贡献。

十八大以来,新一代中共中央领导集体持续倡导人才强国战略,而实现航天强国的夙愿必须依靠大量高素质人力资源。自 1986 年,航天动力技术研究院被国务院学位委员会批准为硕士学位授予单位以来,至今从事学位与研究生教育已 30 年。在多年的工程实践和教学研究中,积累并形成了一系列具有自主知识产权的航天固体动力核心技术。为了更好地做好技术传承,为国家航天事业构建人力资源梯队,培养专业知识精英,我们组织了包括固体火箭发动机设计、推进剂理论与工程、装药与总装工艺、复合材料与工艺、金属件制造技术和固体火箭发动机实验测试等六大部分的教材编写工作,经过 5 年多的教学实践和不断完善,已经形成了一套较为系统的硕士研究生教材。除了凝聚众多固体火箭专业研究人员的智慧结晶之外,这套教材的最大特色在于扎实的技术基础与具体的工程实践紧密结合。

探索一切事物是人类的本性。美国的物理学家 F.J. 戴森说:“在上帝给了我们生命之后,

科技可能是它赐给我们最贵重的一份礼物。”航天技术是科技的一部分,它仍将不断进步成长,并且继续帮助人类摆脱过去的束缚和羁绊。我们要珍惜、善待这份特殊的珍贵之礼,承继敢于探索、勇于献身的精神血脉,薪火相传,把关乎民族自信、国家富强乃至人类发展的航天事业不断推向前进。

我儿时一直存有一个天地之梦,梦想未来人类的飞行,能够像一只自由之鸟,翩翩飞舞于浩瀚无垠的太空,与宇宙万物对话,与造物之主谈心。现在,面对复杂的、全方位无限的未来,我仍无法预知其终点。但我相信,手头的这套教材,是通往天地之梦的一个阶梯,为我们的前行提供动力源泉,扶持我们向着永恒之梦不断追寻。

田维平*

2015年7月

* 田维平,博士,研究员,博导。现任航天动力技术研究院院长,中国宇航学会固体火箭推进专业委员会主任。

前 言

本书是航天动力技术研究院研究生教材“固体火箭发动机技术基础及工程概论”6个专题之一,重点介绍了固体火箭发动机相关的复合材料与工艺技术基础。

复合材料是当代材料技术发展的重要趋势之一,尤其在导弹与航空航天领域的应用发展非常迅速,并发挥着越来越重要的作用。本书着眼于固体火箭发动机复合材料技术长远发展对人才素质能力的要求,紧密结合多年来在固体火箭发动机复合材料技术领域方面的科研实践,梳理、汇集核心知识与经验而成,具有鲜明的行业特色。

全书共16章,分上、下两篇。第1章为绪论,对固体火箭发动机及相关复合材料进行总体介绍,由崔红研究员编写。第2章~第10章为上篇,重点介绍固体火箭发动机壳体复合材料及相关技术,主要由王晓洁研究员编写。第11章~第16章为下篇,重点介绍固体火箭发动机喷管复合材料,主要由闫联生研究员编写。李瑞珍研究员重点对喷管复合材料相关内容进行了校对及修改,程勇研究员重点对壳体复合材料相关内容进行了校对及修改。崔红研究员、郭亚林研究员对全书进行了统一审核及校订。鉴于保密原因,书中涉及的某些设计及工艺参数仅供学习参考,不能作为确定设计、工艺参数的依据。

我国固体火箭发动机复合材料技术是几代技术专家经过艰苦创业、拼搏奋斗,逐步发展起来的。本书是在充分总结几代航天复合材料专家的实际工作经验和有关理论探讨的基础上编写而成的,字里行间渗透着一代代航天科技工作者艰辛的汗水,在这里谨向他们,尤其是老一辈技术专家们表示诚挚的敬意!

本书的编写得到了各级领导及相关专家的大力支持。西北工业大学乔生儒教授、张守阳教授、颜红侠副教授对本书进行了审阅,航天动力技术研究院邓红兵、刘勇琼、郝志彪、杨杰、曾金芳、张翔、刘建军、李崇俊、李辅安、肖志超、刘建超分别对相关章节进行了审阅,并提出了具体修改意见,使本书得以顺利定稿、出版。

航天动力技术研究及院属四十三所人力资源部做了大量的组织协调工作。

谨向以上领导、专家和部门表示衷心感谢!

由于水平有限,加之缺乏经验,书中难免有疏漏、错误及不足的地方,恳请专家、读者提出宝贵意见。

编 者

2015年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 固体火箭发动机	1
1.2 复合材料	2
1.3 复合材料与固体火箭发动机	3
上 篇 固体火箭发动机复合材料壳体技术	
第 2 章 壳体复合材料概述	7
思考题	9
第 3 章 壳体结构复合材料原材料	10
3.1 增强纤维	10
3.2 基体树脂	15
3.3 壳体复合材料界面	20
思考题	23
第 4 章 壳体芯模设计及成型技术	24
4.1 芯模设计原则及材料	24
4.2 芯模制备技术	25
思考题	27
第 5 章 内绝热层材料及成型技术	28
5.1 内绝热层材料	28
5.2 软片制备	29
5.3 封头制备	30
5.4 绝热层成型	30
思考题	30
第 6 章 壳体成型技术	31
6.1 预浸纱带制备	31
6.2 缠绕成型技术	32

6.3 固化成型技术	42
6.4 机械加工技术及脱模	44
思考题	44
第7章 复合裙材料及成型技术	45
7.1 复合裙概述	45
7.2 复合裙制备方法	46
思考题	48
第8章 壳体外防护技术	49
8.1 外防热技术	49
8.2 抗低轨道空间环境侵蚀外防护技术	49
8.3 抗核效应技术	50
8.4 抗激光技术	50
思考题	51
第9章 壳体检测技术	52
9.1 无损检测	52
9.2 水压和气密检验	55
思考题	55
第10章 高性能树脂基复合材料的发展趋势	56
思考题	57

下 篇 固体火箭发动机复合材料喷管技术

第11章 喷管复合材料概述	58
11.1 喷管部件的作用	58
11.2 喷管对防热材料的需求	59
11.3 喷管防热材料的特点和分类	60
思考题	60
第12章 树脂基防热复合材料	61
12.1 国内外固体火箭发动机喷管树脂基防热复合材料技术现状	61
12.2 模压防热复合材料的制备、性能及质量控制	64
12.3 布带缠绕防热复合材料的制备、性能及质量控制	69

12.4 树脂基防热材料技术存在的问题及研究方向	74
思考题	78
第 13 章 C/C 复合材料	79
13.1 C/C 复合材料的特点及技术现状	79
13.2 C/C 复合材料的制备工艺	81
13.3 C/C 复合材料的性能及其在固体火箭发动机上的应用	99
13.4 存在的问题及研究方向	101
思考题	102
第 14 章 热结构陶瓷基复合材料	103
14.1 连续纤维增强 C/SiC 复合材料制备	103
14.2 连续纤维增强陶瓷基复合材料的破坏特征及增韧机理	111
14.3 陶瓷基复合材料的性能	112
14.4 陶瓷基复合材料在火箭发动机上的应用及发展方向	112
14.5 超高温陶瓷基复合材料技术研究进展	115
思考题	116
第 15 章 柔性接头材料及成型技术	117
15.1 柔性接头材料的技术要求	117
15.2 材料的选择及其成型工艺	118
15.3 柔性接头部件成型工艺	119
15.4 质量检查与控制	120
15.5 柔性接头技术发展及研究方向	121
思考题	125
第 16 章 喷管组装及黏结工艺	126
16.1 喷管组装的特点和技术要求	126
16.2 柔性喷管的组装	127
16.3 组装黏结的质量控制	129
思考题	129
附录	130
附录 1 常用术语	130
附录 2 符号和缩略词	130
参考文献	133

第 1 章 绪 论

1.1 固体火箭发动机

固体火箭发动机(Solid Rocket Motor, SRM) 是一种采用固体推进剂的化学火箭动力装置,在导弹武器、运载火箭和空间飞行器中都有广泛应用。其最大特点是结构简单,具有机动、可靠、生存能力强的优点,非常适合现代战争的要求,因此在武器系统和航天领域有广泛的应用。但正是由于固体火箭发动机结构简单的特点,它不能像液体发动机那样用液体冷却。因而必须选用高性能、高效率、功能强的先进材料来承受高温、高压、高速和化学气氛下各种复杂载荷的作用,从而给结构设计带来困难,同时也对材料工程提出了苛刻的要求。

固体火箭发动机通常由燃烧室、推进剂药柱、喷管和点火器 4 个主要部分组成,如图 1-1 所示。高性能固体发动机的特征是高能、轻质、可控,这三者是相互关联的,是以先进材料为基础和支撑技术联系起来的。例如轻质复合材料壳体可以提高发动机质量比和性能;提高发动机能量则需采用高能量推进剂,同时还要求增大工作压强,这就要求燃烧室承压能力增高,且要求喷管使用更耐烧蚀的轻质材料;实现发动机推力向量控制和推力终止,也需要选用先进的复合材料和成型工艺。由此不难看出,先进材料的全面应用是提高发动机性能的一项决定因素。

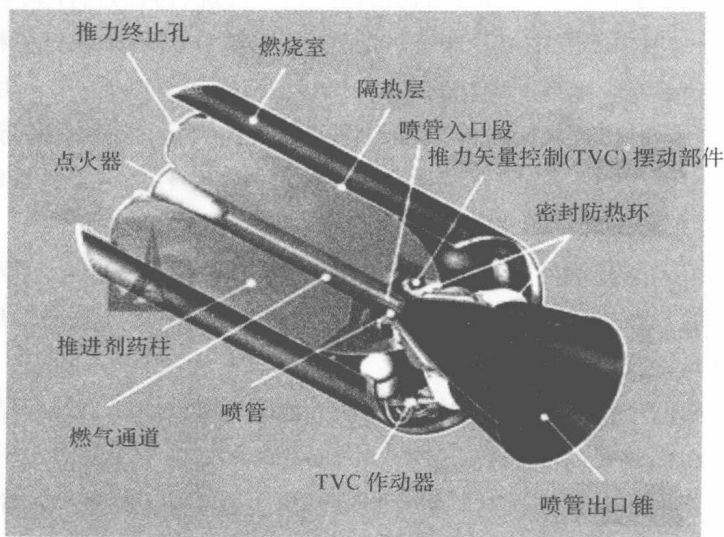


图 1-1 固体火箭发动机结构示意图

1.2 复合材料

本书涉及的复合材料,是指用两种或两种以上不同性能、不同形态的组分材料通过人工复合手段组合而成的一种多相材料。从复合材料的组成与结构分析,其中,一相是连续的,称为基体相;另一相是分散的、被基体包容的,称为增强相。增强相与基体相之间有一个交界面,称为复合材料界面,复合材料的各个相在界面上可以物理地分开。通过在微观结构层次上的深入研究,发现复合材料界面附近的增强相和基体相由于在复合时复杂的物理和化学原因,具有既不同于基体相又不同于增强相组分本体的复杂结构,同时发现这一结构和形态会对复合材料的宏观性能产生影响,所以界面附近这一结构与性能发生变化的微区也可作为复合材料的一相,称为界面相。因此确切地说,复合材料是由基体相、增强相和界面相组成的。

复合材料按照增强体的几何形态可分为纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料、薄片增强复合材料和叠层复合材料。按照基体的性质可分为金属基复合材料和非金属基复合材料,后者又分为聚合物基复合材料和陶瓷基复合材料。碳/碳(Carbon/Carbon, C/C)复合材料构成一种特殊的类型,即用碳纤维增强碳基体。如果从使用功能上来区分,又可以将复合材料分为主要利用它们力学性能的结构复合材料和主要利用它们电、热、声、光等功效的功能复合材料。复合材料具有下列特点。

1) 复合材料与传统材料相比的显著特点是它具有可设计性。复合材料的机械及热、声、光、电、防腐、抗老化等物理、化学性能都可按制品的使用要求和环境条件要求,通过组分材料的选择和匹配以及界面控制等材料设计手段,最大限度地达到预期目的,以满足产品的使用性能。

2) 复合材料的第二个特点是材料与结构的同一性。传统材料的构件成型是经过对材料的再加工,在加工过程中材料不发生组分和化学的变化,而复合材料构件与材料是同时形成的,组成复合材料的组分材料在形成复合材料的同时也就完成了构件的制作。由于复合材料这一特点,使之结构的整体性好,可大幅度减少零部件和连接件数量,缩短加工周期,降低成本,提高构件的可靠性。正因为如此,本书在阐述各复合材料零部件的制造技术时,都是从其构成原材料开始的,主要介绍原材料的要求、复合材料的成型工艺及其性能。

3) 复合材料的第三个特点是可以充分发挥复合效应的优越性。复合材料是由各组分材料经过复合工艺形成的,但它并不是几种材料简单的混合,而是按复合效应形成新的性能,这种复合效应是复合材料特有的。

4) 复合材料的第四个特点是材料性能对复合工艺的依赖性。复合材料结构在形成过程中有组分材料的物理和化学变化,过程非常复杂,因此产品的性能对工艺方法、工艺参数、工艺过程等依赖性较大。如果在成型过程中不能准确地控制工艺参数,会增大复合材料产品的性能离散性。

复合材料的命名习惯是增强材料名称在前,基体材料名称在后,如碳布/酚醛复合材料,也可仅写增强材料或基体材料。

1.3 复合材料与固体火箭发动机

随着现代高科技战争对战略战术武器系统作战性能要求的提高,新型陆基和潜基洲际战略导弹、新一代战术导弹、新一代空空导弹等武器装备得到进一步发展,对固体火箭发动机的性能要求越来越高,不断减轻发动机自身结构质量成为固体火箭发动机技术发展的主要方向之一。先进复合材料可显著提升固体火箭发动机的性能,从而赋予武器装备型号强突防能力、高生存能力和快速反应能力,是武器装备性能改进和技术战术指标提升的基础,也是战略战术武器和航天飞行器减轻结构质量、提高可靠性的有效手段,逐渐成为衡量航天材料技术水平的一个重要标志。美、日、俄等国始终把复合材料技术列为国家关键技术和国防关键技术予以优先发展,其先进武器装备固体火箭发动机复合材料技术趋于成熟、应用日益广泛。

固体火箭发动机复合材料品种较多,分类方法也各异。通常按照其在固体火箭发动机上的应用部位来分,可分为壳体复合材料和喷管复合材料两大类。其中,壳体复合材料包括壳体结构材料、内绝热层材料、外防热材料和连接裙材料等;喷管复合材料包括树脂基防热复合材料、C/C 复合材料、热结构陶瓷基复合材料和柔性接头及其热防护复合材料等。

1. 壳体复合材料

美国先进三叉戟 I (C4) 导弹的 I, II, III 级发动机,三叉戟 II (D5) 导弹的 III 级发动机,战术导弹“潘兴 II”两级发动机壳体结构材料均采用 Kevlar-49 纤维/环氧复合材料。俄罗斯先进的 SS-24, SS-25 及“白杨 M”(即 SS-27)(见图 1-2)等洲际固体导弹 I, II, III 级发动机壳体结构材料均采用 APMOC 纤维/环氧复合材料。

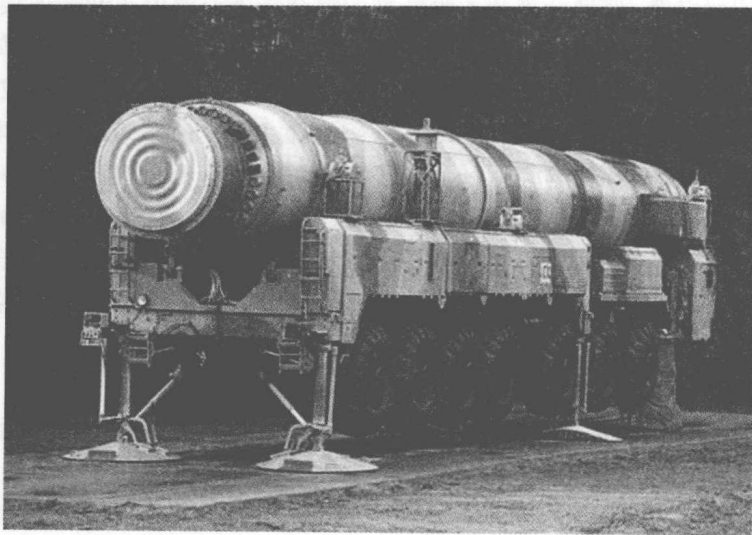


图 1-2 俄 SS-27 战略导弹

相比于 Kevlar, APMOC 等芳纶纤维复合材料,碳纤维复合材料可使发动机壳体容器特性系数(PV/W 值)有较大提高。近年来国外碳纤维复合材料发展迅速,并逐渐在先进武器固体火箭发动机壳体上得到应用(见表 1-1)。

表 1-1 碳纤维复合材料在国外高性能固体发动机壳体上应用情况

发动机名称	壳体材料
美国三叉戟-D5 I、II 级	IM7 碳纤维/环氧树脂复合材料
美国 ERINT 低空拦截弹、THAAD 高空拦截弹	碳纤维/环氧树脂材料
美国“PAC-3”爱国者导弹	碳纤维/环氧树脂材料
日本“M-5”火箭第 III 级	碳纤维/环氧树脂材料
欧洲“阿里安 5”	碳纤维/环氧树脂材料
法国 M51 I、II 级	碳纤维/环氧树脂材料
美国“大力神-4”运载火箭助推器发动机	碳纤维/环氧树脂材料

目前国外先进固体发动机壳体结构复合材料技术发展呈现如下特点:①选用高性能纤维满足壳体的轻质化、高压强等要求。日本 H-2A 火箭的助推器已使用 T1000 碳纤维。美国陆军负责开发的一种新型超高速导弹系统中的小型动能导弹(CKEM),其壳体也采用了 T1000 碳纤维/环氧树脂材料。②壳体结构呈现大型化和低成本化。大型固体助推器和固体小运载技术的发展使得复合材料壳体进一步大型化,同时助推器和固体小运载有更多的低成本制造要求。

国外先进战略、战术型号固体火箭发动机普遍采用复合材料裙。复合材料裙的结构形式和成型方法主要有以下 4 种:①外加金属端框的复合裙结构。这种结构较适用于中长裙,在美国、西欧等国普遍采用。②混杂裙结构。俄罗斯的 SS 系列战略导弹(包括其最先进的“SS-27”)发动机均采用碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维的混杂纤维或混编布制作连接裙,此种结构较适合于短裙结构,也适合高过载的外界环境。③RTM 裙结构。欧航局阿里安 5 的助推发动机连接裙采用碳纤维预制体树脂传递模塑(Resin Transfer Molding, RTM)成型工艺制造,复合材料裙直径 3m。④预浸带铺放整体裙结构。织女星 I 级 P80 发动机的壳体裙采用了预浸带铺放整体成型工艺,而且在裙与壳体间添加了弹性剪切层。目前复合裙材料技术发展特点如下:①高性能纤维、混杂纤维、织物的应用提高复合裙的性能。美国“侏儒”的第 I, II, III 级发动机均采用先进的复合材料裙。潜地导弹三叉戟 C4 三级燃烧室采用了复合材料锥形连接裙,裙体轴压承载 789 kN(壳体直径 760 mm)。②网格结构的应用。采用网格结构作为固体火箭发动机级间段,与铝合金相比质量大幅度降低,同时有效载荷能力增加。

2. 喷管复合材料

喉衬是固体火箭发动机喷管的核心部件。提高高温下喉衬材料的抗烧蚀性能是影响发动机设计的关键因素。C/C 复合材料具有轻质、优异的高温力学性能、良好的烧蚀性能、极好的抗热震性及可设计性等优点,是航天武器型号固体火箭发动机喷管喉衬的主要材料。喉衬预制体结构是决定材料热力学性能的关键因素。美国主要使用软编织或混合编织法成型 3D C/C 复合材料喉衬,应用于“三叉戟 II”等。俄罗斯在编织工艺上多使用粗纤维束或炭棒编织。4D 编织物既保持了轴向的高强度,又具有良好的抗烧蚀性能。法国火箭发动机喉衬预制体成型技术有刚性棒装配 4D 结构、2.5D(或称为准 3D)针刺预制体等。

SRM 喉衬材料的发展方向是通过改进工艺从而进一步提高性能并降低成本,主要包括:

①采用难熔碳化物陶瓷改性方法来提高抗烧蚀性能以承受更高的燃气温度或更长的工作时间。②复合材料喉衬构件日趋大型化。大型固体助推器和固体运载技术要求研制大尺寸 C/C 复合材料喉衬构件。构件尺寸的增大给 C/C 复合材料的成型工艺和制备装备带来很大的难度,例如热结构件由于尺寸效应而增大的热应力对材料构件的完整性造成严重的威胁,解决这一问题需突破优质原材料选择和成型工艺方法匹配性等关键技术。

固体火箭发动机喷管扩张段主要采用树脂基耐热复合材料。其特点是成本低、周期短、性能优良,在国外许多在役型号上得到了广泛的应用。近年来,喷管扩张段树脂基耐热复合材料技术发展主要集中在抗烧蚀基体改性和成型工艺改进研究两个方面,以达到进一步提高抗烧蚀性能的目的。在抗烧蚀基体改性方面,美国的科研工作者采用纳米黏土(MMT)、纳米碳纤维(CNF)和多面体低聚半硅氧烷(POSS)三种纳米材料对 SC1008 酚醛树脂进行改性,来提高其抗烧蚀性能。在成型工艺改进方面,主要包括斜向缠绕、重叠缠绕/针刺、2.5D 针刺等新的成型工艺方法研究。如“阿里安 5”(Ariane 5)运载火箭捆绑助推发动机,其喷管长 3.42 m,出口直径 2.862 m。该喷管出口锥前部烧蚀层采用碳/酚醛 45°角斜向缠绕结构,从膨胀比为 2 处开始,采用布层与中心线平行的重叠缠绕结构,出口锥后段烧蚀层为碳和高硅氧布/酚醛材料,与中心线平行缠绕。织女星“Vega”I 级 P80 喷管扩张段前段(逆流区)采用 2D 碳/酚醛材料,柔性接头耐热帽和扩张段后段采用由 2.5D 预制体 RTM 工艺成型的 Naxeco/树脂材料。

与树脂基耐热复合材料相比,C/C 复合材料可大幅度减轻喷管的质量、提高发动机质量比,在国外战略导弹Ⅱ、Ⅲ级得到广泛应用,成为国际先进洲际战略武器系统的标志之一。国外开展 C/C 扩张段(延伸锥)成型和应用技术研究的国家主要有俄罗斯、乌克兰、美国和法国等。应用 C/C 扩张段(延伸锥)的典型固体发动机有美国 MX 导弹的Ⅲ级、侏儒导弹的Ⅱ级和Ⅲ级,俄罗斯 SS-24 的Ⅱ级、白杨-M 的Ⅲ级等,见表 1-2。

表 1-2 C/C 扩张段在国外典型发动机上的应用情况

国 家	导弹、运载火箭发动机	部 件	C/C 部件结构
美国	Star 系列宇航发动机	C/C 扩张段	二维渐开线型
	惯性顶级发动机	C/C 扩张段	二维渐开线型
	MX 导弹Ⅲ级发动机	扩张段 C/C 延伸锥	二维渐开线型
	侏儒导弹Ⅱ、Ⅲ级发动机	C/C 扩张段、延伸锥	针刺成型
	DeltaⅢ运载火箭Ⅱ级发动机	三级 C/C 延伸锥	针刺成型
	雅典娜(Athena)运载火箭惯性顶级发动机 Orbus21HP	C/C 延伸锥	针刺成型
俄罗斯	起点一号运载火箭上面级发动机	C/C 扩张段	二维渐开线型
乌克兰	SS-24 导弹Ⅱ级发动机	C/C 延伸锥	二维缠绕成型
法国	卫星远地点发动机 MageⅡ	C/C 扩张段	二维渐开线型
	Ariane 4 运载火箭上面级液氢液氧发动机	SiC 涂层 C/C 延伸锥	针刺成型