

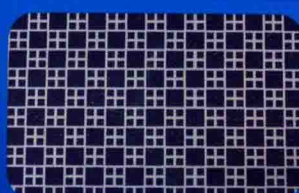


先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书

高温吸波结构材料

High-Temperature Structural Materials for
Microwave Absorption

刘海韬 黄文质 周永江 等著



科学出版社

先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书

高温吸波结构材料

High-Temperature Structural Materials for
Microwave Absorption

刘海韬 黄文质 周永江 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

高温吸波结构材料特指可承受热、力载荷,具备吸波功能,并可维持装备外形的一类结构、功能一体化材料。高温吸波结构材料是破解目前新一代军事飞行器高温部件隐身问题的重要出路,对于提升武器装备的突防与生存能力具有重要的军事意义。本书深入总结了作者十余年来在高温吸波结构材料方面的研究成果,系统阐述了高温吸波结构材料需求和应用、高温吸波结构材料体系组成及制备方法、传统和超材料吸波材料的结构形式及设计方法、典型高温吸波结构材料与构件制备及性能等内容。

本书可为从事高温隐身材料相关领域的高校师生,高温隐身材料研究、开发和生产相关人员,以及从事航空航天、动力等武器装备设计和应用相关人员提供可靠的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高温吸波结构材料 / 刘海韬等著. —北京: 科学出版社, 2017.6

(先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书)

ISBN 978-7-03-053600-6

I. ①高… II. ①刘… III. ①高温结构材料—吸波材料 IV. ①TB35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 132571 号

责任编辑: 徐杨峰

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 269 000

定价: 95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书》

编辑委员会

主 编 王 军

副主编 程海峰 王 浩

编 委	陈朝辉	张长瑞	肖加余	宋永才
	王应德	周新贵	冯 坚	刘荣军
	简 科	李 斌	余金山	刘海韬
	邵长伟	马青松		

从 书 序

在陶瓷基体中引入第二相复合形成陶瓷基复合材料,可以在保留单体陶瓷低密度、高强度、高模量、高硬度、耐高温、耐腐蚀等优点的基础上,明显改善单体陶瓷的本征脆性,提高其损伤容限,从而增强抗力、热冲击的能力,还可以赋予单体陶瓷新的功能特性,呈现出“ $1+1>2$ ”的效应。以碳化硅(SiC)纤维为代表的陶瓷纤维在保留单体陶瓷固有特性的基础上,还具有大长径比的典型特征,从而呈现出比块体陶瓷更高的力学性能以及一些块体陶瓷不具备的特殊功能,是一种非常适用于对单体陶瓷进行补强增韧的第二相增强体。因此,陶瓷纤维和陶瓷基复合材料已经成为航空航天、武器装备、能源、化工、交通、机械、冶金等领域的共性战略性原材料。

制备技术的研究一直是陶瓷纤维与陶瓷基复合材料研究领域的重要内容。1976年,日本东北大学 Yajima 教授通过聚碳硅烷转化制备出 SiC 纤维,并于 1983 年实现产业化,从而开创了从有机聚合物制备无机陶瓷材料的新技术领域,实现了陶瓷材料制备技术的革命性变革。多年来,由于具有成分可调且纯度高、可塑性成型、易加工、制备温度低等优势,陶瓷先驱体转化技术已经成为陶瓷纤维、陶瓷涂层、多孔陶瓷、陶瓷基复合材料的主流制备技术之一,受到世界各国的高度重视和深入研究。

20 世纪 80 年代初,国防科学技术大学在国内率先开展陶瓷先驱体转化制备陶瓷纤维与陶瓷基复合材料的研究,并于 1998 年获批设立新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室(Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites Laboratory,简称为 CFC 重点实验室)。三十多年来,CFC 重点实验室在陶瓷先驱体设计与合成、连续 SiC 纤维、氮化物透波陶瓷纤维及复合材料、纤维增强 SiC 基复合材料、纳米多孔隔热复合材料、高温隐身复合材料等方向上取

得一系列重大突破和创新成果,建立了以先驱体转化技术为核心的陶瓷纤维和陶瓷基复合材料制备技术体系。这些成果原创性强,丰富和拓展了先驱体转化技术领域的内涵,为我国新一代航空航天飞行器、高性能武器系统的发展提供了强有力支撑。

CFC 重点实验室与科学出版社合作出版《先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书》,既是对实验室过去成绩的总结、凝练,也是对该技术领域未来发展的一次深入思考。相信通过这套丛书的出版,能够很好地普及和推广先驱体转化技术,吸引更多科技工作者以及应用部门的关注和支持,从而促进和推动该技术领域长远、深入、可持续地发展。

中国工程院院士
北京理工大学教授



2016年9月28日

前 言

随着世界新军事革命的加速推进,武器装备远程精确化、智能化、隐身化、无人化趋势更加显著,隐身性能已经成为新一代武器装备的典型特征和重要能力。特别是随着各类预警探测和拦截打击系统间组网能力的提升,使军事飞行器在未来信息化战争中面临着多平台、多传感器的预警探测和拦截武器的组网威胁,隐身性能成为飞行器生存与突防的关键。

长久以来,隐身技术研究人员最为关注的是飞行器的前向与侧向隐身性能,更加注重的是飞行器的突防能力,但随着现代战争攻防转换速度的加快以及组网、立体化侦察打击威胁的加剧,包括尾向在内的全方位隐身已经成为重要的发展方向。发动机以及后体结构作为飞行器尾向最主要的雷达散射源,一方面受制于动力条件约束,外形隐身设计余地有限;另一方面受制于高温条件约束,发展相对成熟的以磁损耗吸波材料为代表的常温吸波材料无法应用。因此,高温吸波材料技术成为解决飞行器尾向高温部件隐身问题的重要出路。此外,对于新一代高速飞行器,由于高速运动产生的气动热使装备表面温度较高,而受气动外形设计约束,外形隐身设计受到较大限制,其前向与侧向隐身性能也极大地受制于高温吸波材料的研制水平。

高温吸波结构与涂层是高温吸波材料的两种重要形式。高温吸波结构材料特指可承受热、力载荷,具备吸波功能,并可维持装备外形的一类结构功能一体化材料。与高温吸波涂层相比,高温吸波结构材料的典型特征是具备承载功能,将之替代金属部件后,可在满足部件热、力使用性能要求的前提下赋予其雷达隐身功能,并且不会增加装备重量,从而产生显著的军事效益。本书重点针对高温吸波结构材料展开讨论。

高温吸波结构材料在某种程度上可以认为是在热结构材料基础上发展起来

的,在热结构材料热、力性能约束的基础上,增加了电性能约束,导致其在设计、选材、制备、性能测试等方面的难度更大。目前国内外针对高温吸波结构材料开展了大量研究工作,但现阶段尚未获得广泛应用,主要原因在于诸多科学、技术以及工程难题尚未得到有效解决,主要表现在以下几方面:高温吸波结构材料约束边界条件多,设计与选材限制大;电性能设计空间小,宽频吸波实现困难;材料电性能随温度变化规律复杂,机制尚不清晰;成本高,制备工艺复杂;性能测试标准不健全,试验平台不成熟,性能考核耗资高等。

国防科学技术大学自“八五”期间即开展了碳化硅吸波纤维以及高温吸波材料的相关研究工作,在武器装备预研、军品配套科研、国家自然科学基金等项目的长期支持下,在结构材料隐身设计、碳化硅吸波纤维制备及产业化、先驱体转化工艺制备高温吸波结构材料及构件、高温吸波超材料等方面取得了一系列重要突破,已研制出耐温 1 000℃、覆盖 2~18 GHz 频段、具备承载功能的高温吸波结构材料,并具备了结构件研制能力,可制备 1 m 量级轴对称、双曲面、翼面类等复杂形状构件,并通过了典型环境考核。

本书重点总结作者十余年在高温吸波结构材料领域的研究成果,系统阐述高温吸波结构材料需求和应用、高温吸波结构材料体系组成和制备方法、传统及超材料吸波材料的结构形式以及设计方法、典型高温吸波结构材料与构件制备和性能等内容。

本书共 5 章:第 1 章高温吸波结构材料需求及应用,由刘海韬和黄文质执笔,主要介绍高温吸波结构材料概念与内涵、军事需求、研究现状与应用、研制难点等;第 2 章高温吸波结构材料体系组成以及制备方法,由刘海韬和黄文质执笔,主要介绍高温吸波结构材料体系组成、SiC/SiC 复合材料和 Oxide/Oxide 复合材料两种重要高温吸波结构材料体系的特性以及制备方法,重点阐述连续纤维增强陶瓷基复合材料体系的热、力、电特性以及工艺对材料电性能的影响;第 3 章传统雷达吸波材料结构形式及其优化设计方法,由刘海韬和周永江执笔,主要介绍传统结构形式雷达吸波材料的设计方法,并重点对常用的 Salisbury 屏吸收体、单层吸波材料、多层阻抗匹配吸波材料、Jaumann 吸收体和夹层结构吸波材料的电性能设计方法和吸波特性进行阐述;第 4 章超材料吸波材料结构形式

及其优化设计方法,由刘海韬、周永江、孙良奎和庞永强执笔,主要介绍电磁超材料在吸波技术中的应用概况、超材料吸波材料优化设计方法、电阻型和导体型超材料吸波材料等内容;第5章典型高温吸波结构材料与构件制备及性能,由刘海韬执笔,主要针对单层结构、双层结构、夹层结构三种传统结构形式高温吸波结构材料,以及基于高温电阻型超材料、基于导体型无序超材料两种新型高温吸波结构材料的制备方法及性能进行阐述,最后简要介绍典型高温吸波结构件的制备及其性能验证。全书由刘海韬统稿并审校。

本书内容涵盖了刘海韬、周永江、孙良奎、庞永强、王义、田浩博士论文的部分研究内容,在此感谢他们为本书编写提供的宝贵资料。同时感谢中国航天科工集团、中国航空工业集团和中国航空发动机集团等单位对高温吸波结构材料提供的应用支持。

鉴于作者的学识和水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

刘海韬

2017年3月28日

目 录

丛书序

前言

第 1 章	高温吸波结构材料需求及应用	1
1.1	高温吸波结构材料概念与内涵	1
1.2	高温吸波结构材料的军事需求	3
1.2.1	侦察预警威胁	5
1.2.2	拦截威胁	7
1.2.3	武器装备高温部件工况及暴露征候分析	9
1.3	高温吸波材料研究现状与应用	11
1.3.1	国外高温吸波材料	12
1.3.2	国内高温吸波材料	15
1.4	高温吸波结构材料的难点	17
	参考文献	20
第 2 章	高温吸波结构材料体系组成以及制备方法	26
2.1	高温吸波结构材料体系组成	26
2.1.1	承载功能相	27
2.1.2	吸波功能相	46
2.2	SiC/SiC 复合材料特性及其制备方法	48
2.2.1	碳化硅纤维电性能	48
2.2.2	SiC/SiC 复合材料制备工艺及其对复合材料电性能影响	59
2.2.3	SiC/SiC 热结构复合材料研究应用现状简述	66
2.3	Oxide/Oxide 复合材料特性及其制备方法	70
2.3.1	Oxide/Oxide 复合材料制备工艺	70

2.3.2 Oxide/Oxide 复合材料性能及应用现状	72
参考文献	75
第3章 传统雷达吸波材料结构形式及其优化设计方法	93
3.1 传统结构形式雷达吸波材料优化设计方法	93
3.1.1 反射率计算方法	93
3.1.2 优化方法	96
3.2 Salisbury 屏吸收体	103
3.3 单层吸波材料	105
3.3.1 单层吸波材料完全吸收条件下的电磁参数范围	106
3.3.2 单层吸波材料一定反射率阈值条件下的电磁参数范围	109
3.4 多层阻抗匹配吸波材料	111
3.4.1 多层阻抗匹配吸波材料的阻抗渐变原则	111
3.4.2 多层阻抗匹配吸波材料的最佳层数	112
3.5 Jaumann 吸收体	114
3.6 夹层结构吸波材料	115
3.6.1 夹层结构吸波材料吸波性能优化及其对材料性能要求	116
3.6.2 夹层结构吸波材料吸波性能参数敏感度分析	121
参考文献	122
第4章 超材料吸波材料结构形式及其优化设计方法	124
4.1 电磁超材料在吸波技术中的应用概况	124
4.1.1 电磁超材料的概念	124
4.1.2 高阻抗表面吸波材料	126
4.1.3 电磁吸波超材料	128
4.2 超材料吸波材料的优化设计方法	131
4.2.1 解析方法	131
4.2.2 数值计算方法	134
4.2.3 等效电路法	139
4.3 电阻型超材料吸波材料	142
4.3.1 电阻型超材料吸波材料的等效电路模型分析	142
4.3.2 电阻型超材料吸波材料极限吸波带宽分析	146

4.3.3	电阻型超材料吸波材料周期结构特性对吸波性能影响·····	147
4.3.4	电阻型超材料吸波材料介质层厚度对吸波性能影响·····	150
4.3.5	电阻型超材料位置对吸波材料吸波性能影响·····	152
4.3.6	双层电阻型超材料吸波材料的吸波性能·····	154
4.4	导体型超材料吸波材料·····	155
4.4.1	短切线超材料吸波材料等效电路分析·····	156
4.4.2	短切线超材料吸波材料吸收频率·····	160
4.4.3	短切线超材料吸波材料吸收强度·····	164
4.4.4	短切线超材料吸波材料吸波频带展宽方法·····	167
	参考文献·····	176
第5章	典型高温吸波结构材料与构件制备及性能·····	182
5.1	单层结构高温吸波结构材料制备及性能·····	182
5.1.1	添加高温吸收剂技术方案·····	182
5.1.2	碳化硅吸波纤维技术方案·····	189
5.2	双层阻抗匹配结构高温吸波结构材料制备及性能·····	191
5.3	夹层结构高温吸波结构材料·····	193
5.3.1	夹层结构高温吸波结构材料制备及其吸波性能·····	194
5.3.2	夹层结构高温吸波结构材料反射率随温度变化机制·····	197
5.4	高温电阻型超材料吸波结构材料·····	204
5.4.1	高温电阻型超材料的体系设计·····	206
5.4.2	高温电阻涂层微观结构及导电机制·····	207
5.4.3	高温电阻涂层的制备及其电性能·····	213
5.4.4	基于单层高温电阻型超材料的吸波材料·····	225
5.4.5	基于双层高温电阻型超材料的吸波材料·····	234
5.5	高温导体型超材料吸波结构材料·····	237
5.5.1	均质短切线超材料高温吸波结构材料·····	238
5.5.2	双层梯度短切线超材料高温吸波结构材料·····	241
5.6	典型构件制备以及性能验证·····	242
	参考文献·····	245

第 1 章 高温吸波结构材料需求及应用

1.1 高温吸波结构材料概念与内涵

雷达吸波材料(简称吸波材料)的发展可以追溯到第二次世界大战期间。近几十年来,随着雷达探测与反探测技术的飞速发展以及外形隐身技术的日趋成熟,吸波材料技术已逐渐成为提升当代武器装备雷达隐身性能的重要技术途径。特别是高速飞行器和动力系统,因其受气动外形以及功能限制,外形隐身设计受到很大局限,吸波材料技术已成为提升其雷达隐身性能的重要出路。

经过多年的发展,吸波材料已衍生出多种类型。按照损耗机制可以分为电损耗与磁损耗型;按照吸收频段可以分为窄频(1~2 波段)与宽频(3 波段以上)型;按照是否具备承载功能可分为涂覆与结构型;按照服役温度可以分为常温($<100^{\circ}\text{C}$)、中温($100\sim 400^{\circ}\text{C}$)与高温($>400^{\circ}\text{C}$)型。各类吸波材料的定义与特点可参考相关著作与文献^[1-8]。本书重点探讨可服役于高温环境、具备承载功能的高温吸波结构材料。

高温吸波结构材料特指可承受热、力载荷,具备吸波功能,并可维持装备外形的一类结构、功能一体化材料。与高温吸波涂层相比,高温吸波结构材料具有承载功能,将之替代金属部件后,可在满足部件热、力使用性能要求的前提下赋予其雷达隐身功能,并且不会增加装备重量,从而产生显著的军事效益。

高温吸波结构材料在某种程度上可以认为是在热结构材料基础上发展起来的,其与热结构材料的最大差异体现在吸波功能上。具体到材料属性,主要体现在电性能上,包括直流电性能(电阻率)与交流电性能(微波电磁参数)。材料的电性能决定了电磁波与材料的相互作用关系,主要包括吸收、透射和反射。材料与电磁波的相互作用比较复杂,并且与材料宏观结构特性密切相关(如层状结构特性、周期结构特性等)。为直观说明不同电性能材料与电磁波的相互作用关系,图 1.1 简单列出不同电阻率单层均质材料对电磁波的作用特性。

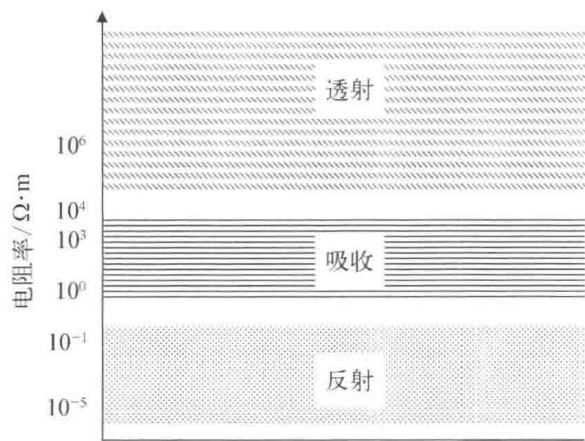


图 1.1 不同电阻率材料对电磁波的作用特性

需要说明的是,图 1.1 中不同电阻率材料对电磁波的透射、吸收以及反射作用仅体现其主要功能特性,并不是严格意义上的物理说明。对于任何材料,这三种现象往往是同时存在的,只是哪种作用占主导的问题,并且与材料的厚度、电磁波频率也密切相关。当电阻率小于 $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$,材料对电磁波主要呈现反射特性。当电阻率大于 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$,材料对电磁波主要呈现透射特性。需要说明的是,材料的透射特性与材料的厚度密切相关,往往也会由于厚度的因素导致材料的输入阻抗与自由空间不匹配而造成对电磁波的部分反射作用。而对于吸波材料,电阻率可以在较广的范围内分布,这是因为吸波材料的结构形式多种多样,每种结构形式的吸波材料的电性能要求各不相同。以多层阻抗匹配吸波材料为例,一般由匹配层、损耗层以及反射层构成,各功能层根据阻抗匹配特性要求对材料的电性能要求不尽相同。反射层一般要求具有较低的电阻率以实现电磁波的完全反射;匹配层一般要求具有较高的电阻率以实现与自由空间的阻抗匹配;损耗层一般要求具有适中的电阻率以实现损耗与阻抗匹配的协调统一。

通过以上分析可以发现,由于高温吸波结构材料对电性能的特殊要求,在热结构材料热、力约束的基础上,增加了电性能约束,导致其在设计、选材、制备、性能测试等方面与热结构材料有显著差异,研制的难度更大。此外,需要说明的是,目前研制的热结构材料一般不具备吸波功能,比如高温合金的电阻率低于 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$,碳/碳(C/C)复合材料、碳纤维增强碳化硅(C/SiC)复合材料的电阻率一般低于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$,以上材料对电磁波主要呈现反射特性;而用于热结构材料的碳化硅纤维增强碳化硅(SiC/SiC)复合材料由于未考虑电性能约束条件,往

往也不具备吸波性能或者吸波性能很差^[9-12]。

本节重点阐述了高温吸波结构材料的概念与内涵,下节就武器装备对高温吸波结构材料需求进行简要分析。

1.2 高温吸波结构材料的军事需求

随着世界新军事革命的加速推进,武器装备远程精确化、智能化、隐身化、无人化趋势更加明显,隐身性能已经成为武器装备的重要能力。特别是随着各类预警探测和拦截系统间组网探测与协同打击能力的提升,使军事飞行器在未来信息化战争中面临着多平台、多传感器的预警探测和拦截武器的组网威胁,隐身性能成为飞行器生存与突防的关键^[4]。

以美国为代表的军事强国自20世纪50年代即针对战机、导弹等军事飞行器开展了隐身技术的系统研究和应用,包括早期的U-2、SR-71和D-21侦察机,20世纪70年代的F-117A和B-2轰炸机,20世纪80~90年代的F-22和F-35战斗机,到了21世纪,又出现了以X-47为代表的隐身无人机(图1.2)。经过几十年的发展,通过综合应用隐身外形与材料技术,飞行器的隐身性能已经取得重大突破。据报道,美国F-22战斗机的前向与侧向雷达散射截面(RCS)已经低于0.1 dBsm,较常规飞机的RCS低近三个数量级^[4],相应的,根据雷达探测方程(1.1)^[2,4],其相对常规飞行器可探测距离降低80%以上,显著提升了突防与生存能力。

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 S_{\min}} \right)^{1/4} \quad (1.1)$$

式中, $R_{\max}$ 为雷达最大探测距离; P_t 为发射机功率; A 为天线有效截面; σ 为雷达散射截面; λ 为波长; $S_{\min}$ 为雷达可接收最小信号。

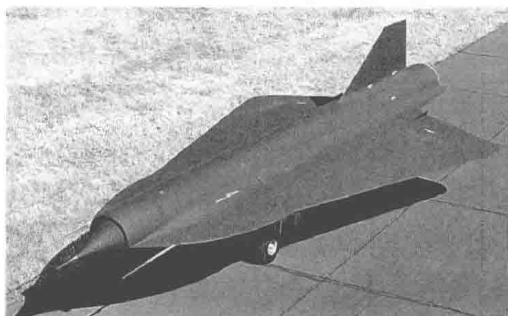
长久以来,隐身飞行器设计人员更为关注的是飞行器的前向与侧向隐身性能,更加注重的是飞行器的突防能力。但随着现代战争攻防转换速度的加快以及组网、立体化侦察打击能力的提升,包括尾向在内的全方位隐身已经成为重要的发展方向以及隐身工程师的研究目标^[4]。发动机以及后体结构作为飞行器尾向最主要的雷达散射源,受制于动力条件约束,外形隐身设计余地有限,应用高温吸波材料成为解决尾向高温部件隐身问题的重要出路。此外,对于新一代高速飞行器,由于高速运动产生的气动热使装备的表面温度较高,而



(a) U-2



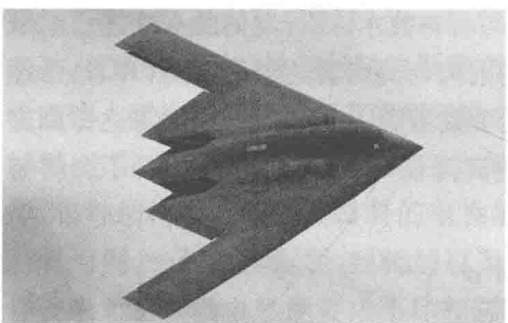
(b) SR-71



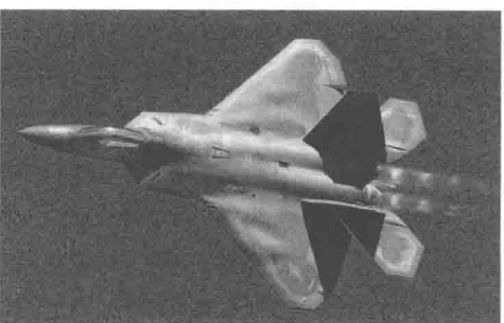
(c) D-21



(d) F-117



(e) B-2



(f) F-22



(g) F-35

图 1.2 美军主要隐身飞行器

受气动外形约束,其前向与侧向隐身性能也极大地受制于高温吸波材料的研制水平。

本节后续内容将重点从武器装备侦察预警威胁、拦截威胁、武器装备高温部件工况及暴露征候三个方面具体分析高温吸波材料的军事需求。

1.2.1 侦察预警威胁

侦察预警系统可通过一系列传感、遥测手段发现、定位、识别威胁目标。侦察预警探测系统在现代高技术战争中首当其冲、首当其用,是战场决策的重要情报来源,是掌握战争主动权的必要前提。预警探测系统是国家防御体系的重要组成部分,可由天基、空基、陆基、海基平台搭载光学、红外、雷达等传感器实施侦察预警功能,并且不同侦察预警平台间已逐渐形成了组网探测能力。在当前以及未来一段时间内,战机、导弹主要的探测威胁仍来自各种天基、空基、陆基和海基雷达系统,比例占到 60%左右^[4]。

以美国为例,其目前主要雷达侦察预警系统性能如表 1.1 所示,从表中可以看出,现阶段美国侦察预警雷达系统以相控阵和合成孔径雷达为主。相控阵雷达最大探测距离可以达到约 5 000 km,合成孔径雷达的最高成像分辨率优于 0.3 m。雷达的主要工作频段覆盖 UHF 至 X 波段,因此要求武器装备具备宽频段隐身功能。预警探测平台呈现陆、海、空、天多维一体化特性,对不同作战功能的飞行器提出了全方位隐身要求。现有雷达侦察预警系统呈现出的宽频域、全天时、立体化特征使未采取隐身措施的战机、导弹等武器装备在雷达组网探测下面临较大的暴露威胁。图 1.3 列出了代表性雷达侦察预警系统。

表 1.1 美国主要侦察预警雷达性能水平

雷 达 名 称	雷 达 类 型	工 作 频 段	主 要 技 术 参 数
Lacrosse	星载合成孔径雷达	X、L	标准模式分辨率: <1 m 精扫模式分辨率: <0.3 m
AN/APY-3	机载多孔径相控阵雷达	X	探测距离: >250 km
AN/APY-1	机载脉冲多普勒雷达	S	探测距离: >320 km
AN/APS-145	机载相控阵雷达	UHF	探测距离: >270 km
AN/APG-77	机载合成孔径雷达	X	最大分辨率: 0.3 m
AN/SPY-1	舰载无源相控阵雷达	S	探测距离: >370 km
SBX	海基有源相控阵雷达	X	探测距离: >4 800 km
Pave raws	陆基有源相控阵雷达	UHF	探测距离: >4 800 km