

结构隐身复合材料的发展与展望

The Development of Structural Absorbing Composites

邢丽英, 张佐光 (北京航空航天大学, 北京 100083)

XING Li-ying, ZHANG Zuo-guang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 简要介绍了国内外隐身复合材料发展现状, 分析了国内外隐身复合材料研究与应用上存在的差距。基于国内隐身复合材料研究技术基础和常用增强纤维电磁特性, 提出了对隐身复合材料用增强纤维特性需求。认为适合隐身复合材料使用的增强纤维的研制成功是高性能隐身复合材料发展的关键之一。

关键词: 隐身技术; 隐身复合材料; 增强纤维; 电磁特性

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2002) 04-0048-04

Abstract: The development of structural absorbing composites is presented in this paper. It shows that there is large gap in research and application of structural absorbing composites at home and abroad. Based on the development of structural absorbing composites and the experimental results of the electromagnetic properties of reinforced fibers used in composites, the author thinks that the development of high properties fibers is important to develop high property structural absorbing composites.

Key words: stealth technology; structural absorbing composites; reinforced fibers; electromagnetic properties

现代战争中, 信息的获取和反获取已成为斗争的焦点, 先敌发现、先敌攻击是克敌制胜的重要保障, 武器装备隐身化能够打破现有的攻防格局, 提高战略武器系统的突防能力, 提高战术武器的生存能力和作战效能。如果己方武器的雷达截面(RCS)降低 10dB, 敌方雷达的探测距离就降低到原来的 56%, 面搜索能力降低到原来的 32%, 体搜索能力降低到原来的 18%。降低了敌方雷达的探测能力也就是增强了我方的攻击能力, 削弱了敌方的防守能力。有数据表明, 在海湾战争中, 隐身飞机出动的架次仅占飞机出动总架次的 2%, 但它摧毁的目标数量占被摧毁目标总数的 40%。由此可见, 武器装备隐身化可以显著提高军事效益, 因此武器装备隐身化是当前世界军事高技术发展的重要方向之一, 美、英、法、俄等国都在致力于武器装备的隐身化。

美国的飞机隐身技术处于世界领先地位, 自 20 世纪 50 年代即开始飞机隐身技术的研究, 70 年代中期制订了综合应用隐身技术研制隐身飞机的计划, 迄今, 美国已研制过 8 种隐身飞机, 10 余种准隐身飞机和 12 种无人驾驶隐身飞机。

美国隐身战斗机的杰出代表是 F-117A 隐身攻击机、B-2 隐身战略轰炸机和 F-22 先进战斗机, 被分别称为美国第一代、第二代和第三代隐身飞机, 其 RCS

相应为 $0.02 \sim 0.025\text{m}^2$ 、 0.1m^2 和 $0.1 \sim 0.01\text{m}^2$ 。

飞机隐身性能的获取, 是通过机体外形或结构的隐身设计、采用隐身材料、无源(或有源)阻抗加载等多种措施。据报道, 对于一架总体隐身效果达 20dB 的飞机来说, 外形隐身效果为 5~6dB; 吸波材料隐身效果为 7~8dB; 其余为阻抗加载技术的贡献。因此吸波材料的应用对减缩武器装备 RCS 有重要作用。

与先期发展的雷达吸波涂层相比, 隐身复合材料因其不增加飞机的额外重量, 且其结构的可设计性, 能给电气及飞机结构设计师们提供充分的设计空间, 可以实现兼顾隐身和承载双重功能的吸波复合结构(RAS), 并有利于旨在拓宽吸收频带的新型吸波机理(如电路模拟和手征媒质等)的实施, 因而日益受到人们的重视, 已经成为隐身材料, 同时也是复合材料研究领域中的一个十分重要的研究方向。

1 国内外结构隐身复合材料发展现状

隐身复合材料的发展建立在先进复合材料发展基础之上, 其应用水平随着复合材料在飞机上应用比例的增高而提高。国外隐身飞机不仅先进复合材料的用量大大高于常规作战飞机, 而且由于有充分利用的设计、材料、制造、性能检测及质量控制等先进复

合材料技术储备,因而隐身复合材料及吸波复合结构的研究与应用也已取得较大发展。从 20 世纪 70 年代末, F-117A 隐身飞机使用复合材料用量占结构重量的 10%, 到 90 年代, F-22 先进隐身战斗机使用量达到 24%, 说明隐身复合材料在很大程度上影响着整个隐身技术的发展。

隐身复合材料的研制与发展时间并不长, 但发展迅速, 已从玻璃纤维增强发展到碳纤维与混杂纤维增强, 基体树脂从热固性发展到热塑性; 应用部位从次承力结构件发展到主承力结构件, 再到全机(弹)身。美国的 B-2, F-117 及 F-22 等隐身飞机均在不同部位使用了隐身复合材料。

另外, 国外在热塑性(如 PEEK) 混杂纱吸波复合材料、耐高温 SiC 纤维吸波材料、导电智能蒙皮、异形截面纤维在隐身复合材料中的应用及将电路模拟(CA) 吸波材料和电阻片型吸波材料与吸波复合材料一道复合用于结构蒙皮等相关方面的报道。

国内开展隐身复合材料研究已有 10 多年历史, 从应用基础研究起步到材料研制及初步应用均有一定进展。其中对以玻璃纤维增强的树脂基复合材料进行了较深入研究, 并已在武器装备上获得应用。对碳纤维及 Kevlar 纤维增强的隐身复合材料研究已有一定技术基础。

国内外在隐身复合材料研究方面的差距如下:

(1) 国外已经提出(或已解决)了隐身复合材料的关键材料—承载纤维即碳纤维的反射特性的改进途径(如异形截面碳纤维或表面改性碳纤维)以及可能利用的承载结构方式(如混杂铺层和混杂多维编织等), 而我国航空航天应用的碳纤维目前大部分依赖进口, 更谈不上研制和供应特殊性能的碳纤维。至于碳纤维的表面改性, 还没有达到可工程实用的水平。

(2) 国外已解决了电性能和力学性能一体化设计问题, 由透波材料、吸波材料和高反射特性碳纤维增强复合材料组成的吸波—承载复合结构已成功地进入工程实用阶段, 而我国仅对玻璃钢类型的吸波结构研究相对比较成熟, 以碳纤维增强为主的吸波—承载复合结构的设计、制造、检测及相关材料的研究则刚刚开始。

(3) 国外已将电路模拟, 频率选择表面及手征结构等新的吸收机制引入隐身复合材料的设计中并已开始应用, 而我国电路模拟, 频率选择表面等新途径的研究本身刚刚起步, 付诸工程型号使用时, 其工艺实施途径还需作很多深入细致的研究工作。

(4) 国外隐身复合材料研究本身正在向多功能方向发展, 如兼顾耐高温、抗烧蚀以及智能化等等, 而我国隐身复合材料研究本身技术基础薄弱, 隐身—承

载双功能隐身复合材料尚无可实用的一整套配套技术。

(5) 国外已将隐身复合材料与隐身涂层的应用结合起来, 在隐身性能、结构承载、电磁兼容性以及表面防护等诸多方面统筹兼顾, 而我国在这方面刚刚进入预先研究。

2 纤维增强复合材料电磁特性

隐身复合材料融承载与吸波于一体, 复合材料中常用的几种增强纤维特性见表 1。

表 1 几种树脂基复合材料用纤维性能比较

Table 1 Properties comparison of fibres used in composites

纤维性能种类	拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	电阻率/ ($\Omega \cdot m$)
E 玻璃纤维	2.8~3.5	70~80	$\sim 10^{10}$
S 玻璃纤维	3.5~4.9	85~92	$\sim 10^{10}$
T 300 碳纤维	3.1	230	$\sim 10^{-5}$
Kevlar-49 芳纶纤维	2.8	127	$\sim 10^{10}$

碳纤维复合材料既具有高比强度、高比模量, 又能减轻重量, 还可耐发动机燃油和液压油等, 因此飞行器上愈来愈多地使用碳纤维复合材料。但碳纤维的电阻率随其热处理温度的升高而降低, 碳纤维的导电性和承载特性均是各向异性的, 制备先进复合材料常用碳纤维的电阻率和电磁参数测试结果见表 2 和表 3。

由表 2 及表 3 看出, 碳纤维在两个方向上的电阻率和介电常数差别很大, 由此带来碳纤维复合材料随着铺层方向的改变对电磁波的响应特性随之发生变化。碳纤维排布方向不同与电磁波作用后的前界面反射特性见图 1。

表 2 碳纤维电阻率

Table 2 Resistance rate of carbon fibers

频率 / Hz	纤维束/ ($\Omega \cdot m$)	单向碳纤维层板* 直流电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	
10^2	5.84×10^{-5}	0°	90°
10^3	2.56×10^{-5}	4.0×10^{-5}	6.6×10^{-2}
5×10^4	2.30×10^{-5}		
10^5	2.3×10^{-5}		

由图 1 看出, 随着纤维排布方向与电场夹角的增大, 前界面反射减小。夹角为 0° 时, 碳纤维复合材料对电磁波全反射; 夹角为 90° 时, 其对电磁波有一定透过; 当纤维交叉铺层时, 其对电磁波的作用也为全反

射。玻璃纤维及 Kevlar 纤维增强复合材料与碳纤维复合材料的前界面反射对比见图2。由图可以看出, 玻璃纤维及 Kevlar 纤维复合材料具有较好的透波性能。

表3 单向碳纤维层板*的复介电参数

Table 3 Permittivity of carbon fibers unidirectional composites

频率/GHz	平行于电场方向 (0° **)		垂直于电场方向 (90°)	
	ϵ_r	ϵ_i	ϵ_r	ϵ_i
8.2	493.92	187.18	14.74	11.22
9.0	337.72	91.52	13.89	10.24
10.0	447.69	189.03	15.07	9.38
11.0	489.92	189.73	13.84	8.85
12.0	513.5	117.08	14.97	7.67

* 碳纤维体积含量: 63.5%。

** 平行于电场方向测试数据离散系数较大, 仅供参考。

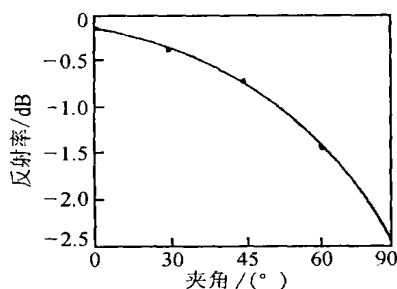


图1 碳纤维铺层方向与电场夹角不同时前界面反射特性

Fig. 1 The variation of radar absorbing property with the angle formed by carbon fiber ply direction and electric field

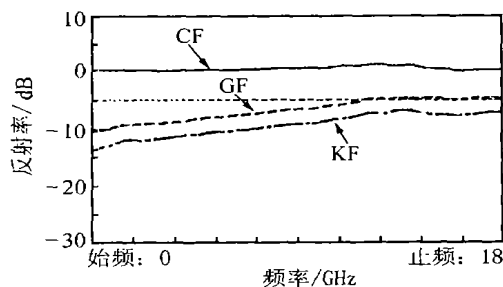


图2 几种纤维前界面反射特性曲线

Fig. 2 Radar absorbing property of different fibers

上述几类纤维用于隐身复合材料中存在以下问题:

(1) 玻璃纤维和 Kevlar 纤维的电阻率高, 是好的透波材料, 需加入吸收剂赋予其吸波性能, 而且纤维本身拉伸模量较低, 因此很难在承载特性要求高的部位使用;

(2) 碳纤维复合材料具有较好的承载特性, 但高性能碳纤维复合材料是雷达能量的强反射体, 只有与

其它减缩 RCS 的材料与技术相结合时, 才能获得减缩 RCS 的良好效果。

从实验结果及理论分析看, 要将长碳纤维直接应用于垂直入射状态下的结构吸波材料中是不可行的, 需将其与其它透波纤维进行混杂, 从而获得一定的吸波效果。

图3表示碳纤维与 Kevlar 纤维混杂后复合材料层板电磁波反射特性, 图4表示混杂纤维中填加吸收剂制备的隐身复合材料层板电磁波反射特性。由图可见, 通过碳纤维与透波纤维进行合理的结构设计, 可获得较好的吸波效果, 但由此带来力学性能的下降, 使得目前研制的隐身复合材料无法在飞机主承力结构上使用。

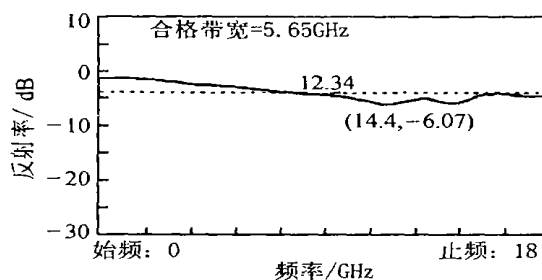


图3 混杂层板反射率特性曲线 (厚度 $d = 3.15\text{mm}$)

Fig. 3 Radar absorbing property of hybrid composites

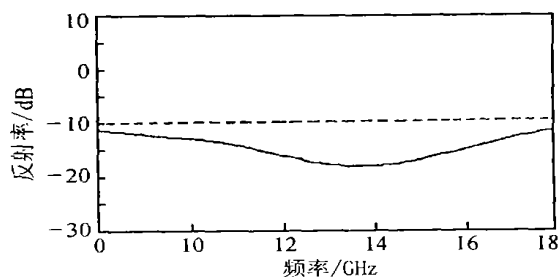


图4 填加吸收剂混杂层板反射率特性曲线 (厚度 $d = 4\text{mm}$)

Fig. 4 Radar absorbing property of hybrid composites filled with absorbing materials

3 结构隐身复合材料发展趋势及对增强材料的需求

3.1 结构隐身复合材料发展趋势

理想的隐身复合材料应当具有吸收频带宽、重量轻、物理力学性能好、易于成型和不会由于电磁波的入射而影响其化学稳定性等特点, 但目前尚未作到这一点。为了获得性能优异的隐身复合材料, 世界各国都在致力于开发新型吸波机制、高性能吸收剂、高性能吸波树脂和纤维及发展多功能隐身复合材料等。

新型吸波机制主要包括电路模拟吸收机制、手征媒质吸收机制、等离子体吸收机制、纳米材料吸收机制及智能材料吸收机制等。

近年来纳米材料、陶瓷材料、手征材料、导电高分子材料等新材料正逐步应用到隐身复合材料中，使隐身复合材料吸收频带更宽、适应性更强。

高性能纤维的发展主要是可调电阻率 SiC 纤维、碳纤维表面改性纤维及高性能有机纤维等。隐身复合材料的多功能化主要表现在吸波/承载一体化、耐高温、抗烧蚀、智能化、多频谱兼容等。

另外在降低隐身复合材料制造与维护成本方面应开展深入研究工作，以便为进一步扩大隐身材料的应用范围奠定基础。

3.2 高性能隐身复合材料对增强纤维的需求

(1) 高性能 SiC 纤维

作为高耐热、抗氧化材料和聚合物基及陶瓷基复合材料的高性能增强纤维，连续 SiC 纤维不仅具有优良力学特性与耐高温性能，且电阻率可调。有报道指出，当 SiC 纤维的电阻率为 $10^1 \sim 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 时具有最佳吸波性能。已有报道的几种碳化硅纤维特性见表 4。

表 4 碳化硅纤维特性

Table 4 The properties of SiC fibers

纤维种类	拉伸强度 / MPa	拉伸模量 / GPa	电阻率 / ($\Omega \cdot \text{m}$)
Nicalon (NL-400)	2.8	180	$10^3 \sim 10^5$
Nicalon (NL-500)	3.0	220	$0.005 \sim 0.05$
国产 SiC 纤维 (KD-1)	2.0	170 ± 10	$10^3 \sim 10^5$

由于 SiC 纤维的电阻率可调，因此从电结构设计上比其它纤维更具有优越性，可采用不同的铺层、编织及混杂方式等获得具有一定电导率梯度分布的隐身复合材料。同时由表 4 看出，日本的 Nicalon 系列 SiC 纤维具有与 T300 相当的力学性能且电阻率可调，因此将此类纤维应用于高性能隐身复合材料的研制中具有良好前景。

(2) 改性高性能碳纤维

1) 碳纤维表面改性: 通过在高性能碳纤维表面镀金属镀层等，实现调节纤维的电磁参数，使得碳纤维具有一定的导磁率，从而使由碳纤维制备的隐身复合材料具有高的吸波性能及力学性能;

2) 异形截面碳纤维: 文献报道国外已将异形截面碳纤维应用于隐身复合材料，具有高的吸波性能及力

学性能。

(3) 高性能透波纤维

1) 力学性能高于高性能碳纤维, 通过加入吸收剂进行电设计，赋予其电性能，并保持高承载特性。

2) 力学性能与高性能碳纤维相当, 与其它纤维混杂后获得好的电性能与力学性能，如高性能 PBO 有机纤维等。

4 结束语

综上所述，隐身复合材料已经成为隐身材料和复合材料研究领域中的一个十分重要的研究方向，高性能增强纤维的研制成功是发展同时具备高的吸波性能及力学性能的隐身复合材料的关键之一，使飞行器在主承力部位使用隐身复合材料成为可能，对推动我国隐身技术的发展具有重要意义。随着雷达探测及通讯技术的发展，隐身复合材料将会得到愈来愈广泛的应用。

参考文献

[1] Joseph Jones. Stealth Technology: the art of black magic [M]. TAB Book Inc., 1989: 142.

[2] 克拉特 E F, 等. 雷达散射截面-预估、测量和减缩 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1988: 244.

[3] P S Bradshaw, et al. Signature management and structural materials, Materials and Processing-Move into 90's [M]. Elsevier Science Publisher B Y, Amsterdam, 1989: 187- 197.

[4] Clifford F Lewis Materials keep a low profile [J]. Materials Engineering, 1988 (6): 12.

[5] John M Lon. Stealth technique and stealth aircraft [M]. Lockheed corp., 1992, 8: 89.

[6] 陈绍杰. 隐身技术中的复合材料 [J]. 隐身技术, 1993, 12: 25 - 28.

[7] 邢丽英. 短碳纤维电磁特性及其在吸波材料中的应用研究 [J]. 材料工程, 1998, 1: 19- 21.

[8] 薛明华, 王振荣. F-16 战斗机电磁散射特性综合评估 [J]. 航天电子对抗, 1999, 2: 12- 15.

[9] 陈蕾蕾, 凌永顺, 时家明. 纳米材料与电子对抗 [J]. 航天电子对抗, 1999, 1: 5- 8.

[10] 孟新强, 朱绪宝. 隐身技术和隐身武器的研究与应用现状 [J]. 航天电子对抗, 1999, 3: 18- 21.

[11] 张卫东, 冯小云, 孟秀兰. 国外隐身材料进展 [J]. 宇航材料工艺, 2000, 3: 8- 10.

[12] 吴晓葆. 关于隐身的两个设想 [J]. 航天电子对抗, 2000, 2: 16- 18.

收稿日期: 2002-02-15; 修订日期: 2002-03-15
作者简介: 邢丽英 (1965-), 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 复合材料及结构隐身复合材料, 联系地址: 北京 81 信箱 12 分箱 (100095)。