

**NCCM -11**  
**第十一届全国复合材料学术会议**

**中国·合肥**  
**2000年10月**

**中国力学学会**  
**中国航空学会**  
**中国复合材料学会**  
**中国宇航学会**

**主办：中国力学学会**  
**承办：中国科学技术大学**

# 复合材料的现状与发展

——第十一届全国复合材料学术会议论文集

Present Situation and Development  
of Composite Materials

主 编	毛天祥		
副主编	夏源明	(常务)	
副主编	陈绍杰	党嘉立	高树理
编 委	毛天祥	党嘉立	高树理
	崔德渝	夏源明	杨乃宾
	罗 焱	陈绍杰	陈万金

中国科学技术大学出版社

2000·合肥

**图书在版编目(CIP)数据**

复合材料的现状与发展: 第十一届全国复合材料学术会议论文集/毛天祥, 夏源明主编.  
—合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000. 9  
ISBN 7-312-01198-5

I. 复… II. ①毛…②夏… III. 复合材料-学术会议-文集 IV. TB33-53

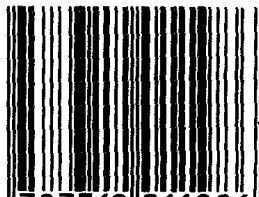
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 41485 号

责任编辑: 马 钢 汪 洋 张泰永  
装帧设计: 刘俊霞

中国科学技术大学出版社出版发行  
(安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026)  
安徽肥西新华印刷厂印刷  
全国新华书店经销

开本: 787×1092/16 印张: 59.5 字数: 1500 千  
2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷  
印数: 1—750 册  
ISBN 7-312-01198-5/TB·4 定价: 120.00 元

ISBN 7-312-01198-5



9 787312 011986 >

# 第十一届全国复合材料学术会议

主 席 杜善义  
副主席 张宝乾 费斌军 宋焕成 夏源明  
秘书长 夏源明

## 学术委员会

主 任 毛天祥  
副主任 夏源明 党嘉立 高树理 崔德渝

## 组织委员会

主 任 夏源明  
副主任 张志新 蔡 红 杨乃宾

# 前 言

第十一届全国复合材料学术会议将于 2000 年 10 月在中国科学技术大学举行。本届学术会议由中国力学学会、中国航空学会、中国复合材料学会和中国宇航学会联合举办，由中国力学学会主办，中国科学技术大学承办。

经论文编辑委员会审定，本论文集共收入论文 182 篇，分类为 11 个部分，即大会特邀报告（4 篇）、原材料（8 篇）、聚合物基复合材料（22 篇）、金属基复合材料（19 篇）、陶瓷基和碳基复合材料（12 篇）、纺织和编织复合材料（15 篇）、功能复合材料和纳米复合材料（11 篇）、复合材料修补和连接（6 篇）、复合材料性能表征和测试技术（33 篇）、复合材料力学和结构分析（34 篇）、综述和应用及其他（18 篇）。若将本文集的分类和目录与第十届全国复合材料学术会议文集的分类和目录作一对比，细心的读者不难发现其中的一些变化。这些变化体现了什么样的内涵，对此“仁者见仁，智者见智”，难以有统一的认识。不过，至少可以认为这些变化在一定程度上反映了近两年来我国复合材料研究、开发和应用的现状和进展。尽管收录的论文有所减少，但内容仍然比较丰富充实，对今后的发展仍有一定的指导意义和参考价值，这也说明两年一届的全国复合材料学术会议无论过去、现在或将来都是必要且有积极意义的。至于作用和意义是否伟大深远，还是让读者自己去体会评价，编者实不敢妄加评说。好在中华民族的腾飞和事业的发展，需要的并不一定是华丽的词藻，而是深沉、科学的思索和实实在在的艰苦奋斗。编者衷心祝愿我国复合材料事业在新世纪飞速发展。

出版一个会议文集是十分不易的，没有全体会议论文作者和有关人员的辛勤劳动是不可能使文集问世的。借此机会，请允许我代表会议的举办单位，代表会议的领导机构和文集的编委会，向全体论文作者、编辑人员和中国科学技术大学出版社的同志们致以崇高的敬意！最后祝愿第十一届大会圆满成功！

第十一届全国复合材料学术会议副主席  
第十一届全国复合材料学术会议文集常务副主编  
中国科学技术大学教授



2000 年 7 月

# 加强耐热复合材料应用基础研究 ——国防重点实验室的重要研究任务之一

党嘉立 刘春立 王俊山

(航天材料及工艺研究所 功能复合材料国防重点实验室, 北京, 100076)

**摘要** 本文介绍了我国耐热复合材料应用研究的发展现状。通过美苏耐热材料研究与应用的发展历程, 论述了开展耐热材料应用基础理论和实验研究的重要性和紧迫性。强调应开展对材料热防护机理、材料与极端环境的作用机理及材料行为表征评价等方面的深入研究, 以提高我国耐热材料研制的工艺水平、提高热防护效能、降低材料成本和生产周期。文中建议以功能复合材料国防重点实验室为依托, 结合国家相关基础研究计划, 组织结构设计、材料研制、材料行为评价研究单位和高等院校, 合作开展此项工作, 促进我国耐热复合材料的研制应用从定性分析向定量评价的转变, 提高武器的战术效能。

**关键词** 耐热材料 复合材料 基础研究

## 1 引言

飞船、航天飞机、再入飞行器等航天器要以较高的速度穿越大气层, 航天器外表面将经受由于气动加热形成的高温、高热流密度, 同时可能经受高过载、高速粒子云侵蚀等极端的服役环境条件, 需要采用满足耐热及其他功能要求的各类耐热材料, 包括一次性使用的烧蚀耐热材料(如碳/碳材料、低密度烧蚀材料等)、可重复使用的耐热材料(陶瓷耐热瓦等)和热结构材料(抗氧化碳/碳、碳/陶复合材料、金属耐热瓦、金属蜂窝结构等)。其中再入飞行器再入大气层时要经受 7000-8000K 的超高温、 $10\text{MW}/\text{m}^2$  量级的热流密度、 $10^2\text{g}$  量级的过载、高速粒子云侵蚀, 服役环境极端恶劣, 因此耐热材料一直是各军事大国发展的重点材料。

美国导弹头部耐热材料, 由早期的石墨类材料发展到正交三向碳/碳(C/C)材料和细编穿刺 C/C 材料, 九十年代服役的新型导弹端头帽选用芯部含有难熔金属的先进 C/C 材料, 使耐热材料进一步提高耐热效能, 适应更加严酷的服役条件, 提高弹头的战术性能指标。其发展历程一方面是由于提高武器性能的需要, 另一方面是基于对耐热材料、服役环境、环境作用及耐热机理的广泛深入的研究和逐步认识。如美国新一代弹头, 基于对材料再入过程烧蚀、侵蚀机理的多年深入研究, 指导耐热材料研制和弹头结构设计, 使再入过程中弹头烧蚀外形稳定对称变化, 并实现了弹头的被动滚控。

前苏联基于对弹头再入条件下耐热材料与环境间相互作用的研究成果和理论, 采用了与美国不同的材料选择与设计方案, 如对于 C/C 端头帽材料, 它不追求非常高的强度和密度(即很低的烧蚀后退量), 只要求端头帽烧蚀后形状稳定, 不烧穿即可。因此其耐热材料的成本比美国低很多。

我国经过几十年的发展, 在耐热材料上取得了较大的进展, 无论是耐热材料品种还是性能都达到了较高的水平, 并得到了成功应用。但在相关应用基础研究方面, 应该说, 与美国、前苏联有相当大的差距。多年来虽然开展了一些耐热材料组织结构、性能测试、表征和评价研究, 也建立了多种模拟再入条件的耐热材料性能测试、表征技术。但是, 由于再入条件下, 极端环境的严酷性、材料环境响应的复杂性、环境效应与材料组织结构及航

天器结构以及飞行参数的相关性，我们开展基础研究的广度与深度还远远不足，模拟环境与真实再入环境之间的差别很大，隔热材料的数据齐全性和可靠性也存在明显不足，因此对隔热材料再入环境响应及热防护机理等的认识还十分有限，材料研究及航天器设计缺乏有效的理论指导。这一现状严重地制约了新型航天器的研制，急需在隔热材料基础研究方面加大投入，为进一步提高我国隔热材料研究水平提供理论和试验依据。

## 2 国外隔热材料相关基础研究的发展历程与特点

多年来，美国国防部一直将军用材料研究列入国防关键技术计划予以重点支持，并十分重视材料的基础研究计划与相关材料研究计划的衔接。在隔热材料研制与应用过程中，开展了大量的相关基础研究工作，包括材料基本热力学性能数据获取、模拟环境试验、材料性能表征与评价等技术，研究材料的环境响应特性、材料组织结构与环境响应的关系，进行隔热机理研究。建立隔热材料性能数据库，进行材料环境响应的数值模拟研究，为新型隔热材料研制和设计应用提供指导和依据。由于重视基础研究和预先研究，其隔热材料新品种及新的结构形式不断涌现，一直领导着隔热材料的发展方向。如其被动滚控端头，就是在对隔热材料烧蚀特性的多年研究基础上，利用先进碳/碳材料和碳/酚醛材料在再入过程中的烧蚀外形变化来实现对滚转力矩的控制。

前苏联在隔热材料研究过程中，建立了完善的材料高温性能（超高温热物理、力学性能）测试、模拟环境（烧蚀、高速粒子侵蚀、及附加各类载荷环境）测试手段和评价技术，因此对隔热机理研究比较深入，成功地研制了生产率高、成本低的碳/碳隔热材料。

国外隔热材料研制应用过程中，相关基础研究工作主要包括下列内容：

- 高温条件下材料基本力学性能、热物理性能测试研究

这些数据是评价材料使用性能和隔热设计应用最基本的力学参量，包括常温至超高温条件下材料的热膨胀、热导率、比热容，模量、强度、泊松比、断裂延伸率。这些材料性能与材料在服役环境条件下，热传导特性、内应力分布、抗热冲击能力、均匀烧蚀能力等隔热效能直接相关，是材料评价、数值分析、部件设计等的重要基本数据。材料高温条件下的力学及热物理性能测试技术复杂，试验成本较高，准确获得材料性能数据难度较大。美苏等国已经具备测试材料 3000℃ 下性能的能力，并积累了较多的材料数据。

- 模拟条件下隔热材料响应测试及评价技术

隔热材料能否满足设计使用要求，如何评价和表征隔热材料的环境行为，是十分重要而又复杂的问题。由于实际飞行试验、地面台架试验等需要耗费大量的财力和时间，因此，模拟使用环境试验技术考核和评价材料的使用性能对隔热材料研究和应用有着重要的作用。如采用弹道靶试验模拟粒子高速碰撞侵蚀过程，采用电弧加热器加粒子侵蚀试验模拟材料在高温、高速粒子作用下的材料响应。这些模拟试验手段在一定程度上反映了材料的环境行为，借助这些模拟试验手段反复试验和对比，使人们对极端环境下的材料行为的认识逐步深化，对隔热、烧蚀、侵蚀机理的研究起了重要的作用。但是模拟条件试验一般为单个或数个环境因素的模拟，与真实的环境条件有较大的差异。因此，国外近年来仍然致力于发展多环境因素的大型模拟试验手段。

- 材料微观结构、环境损伤特性等研究

由于隔热材料非均质、各向异性，材料内部的微观结构、界面形态、残余应力、缺陷分布等对材料的使用性能、环境响应有重要的影响，因此这方面的研究工作一直伴随着材料研究而进行。材料内部在工艺过程中形成的残余应力，影响隔热材料的使用性能，增强体与基体之间的界面层结构在很大程度上影响隔热材料的抗热震性能，隔热材料表面涂层可以改善高温抗氧化性能。隔热材料的微观结构研究、环境损伤特性研究对认识材料的环

境响应行为，寻求有效的材料工艺手段提高耐热材料的效能有重要的意义。材料微观结构及环境损伤机理研究也是建立环境响应物理模型的重要基础。

#### • 极端环境条件下耐热材料响应的计算机模拟技术

由于极端环境条件的复杂性，模拟试验手段难以全面模拟实际服役条件，同时模拟试验同样要花费较大的试验费用。近二十年来随着计算机技术的发展，国外在基于对耐热材料环境响应研究的基础上，从材料环境响应的物理本质出发，尝试采用计算机模拟技术研究材料的极端环境响应。但是计算机模拟技术必须建立在对材料自身、环境特性、材料环境响应的深刻认识基础上，需要考虑材料非均质、各向异性、热物理及力学性能非线性、物态变化、质量迁移、损伤机制、非固定边界条件等大量物理建模因素，涉及到物理、化学、热力学、材料学、细观力学、仿真等诸多学科，因而问题极为复杂。目前虽然发达国家在这一领域进行了不少工作，但考虑的因素还较为简单，还不能全面模拟材料的复杂环境响应。

发达国家在耐热材料应用基础研究方面已经开展了广泛的工作，建立了比较完备的研究手段和方法，积累了大量的材料基本性能和使用性能数据，在材料环境响应、损伤机制、材料使用性能表征与评价方面，经历了从基本材料性能表征、模拟环境条件使用性能评价、到材料环境响应仿真指导材料设计的发展历程。发展的趋势体现为：

- ① 材料环境响应行为的评价由单一环境因素向多因素发展；
- ② 材料环境损伤、失效机理研究由宏观向微观尺度发展，对热防护机理的认识逐步深化；
- ③ 材料环境响应由定性分析向定量描述发展；
- ④ 由试验模拟向计算机数值模拟技术发展，最终指导材料设计。

值得注意的是，材料环境响应的数值模拟技术是今后发展的方向，但它是以前人们对材料环境响应的系统、深入认识为基础和前提的。

### 3 加强耐热材料相关基础研究是功能复合材料国防重点实验室的重要任务

近年来，国家已经加大了基础研究的支持力度，并制定了相应的基础研究计划，作为耐热复合材料研制生产单位的功能复合材料国防重点实验室，其重要任务之一就是加强耐热材料的应用基础研究，以提高我国耐热材料的研究应用水平。

根据国外相关研究的发展趋势和国内的研究现状，功能复合材料国防重点实验室在此领域的主要研究内容应包括：

- 不同种类耐热材料环境响应的测试与评价技术；
- 不同种类耐热材料环境条件作用下性能演化规律的研究；
- 耐热材料微观组织结构与环境损伤特性的研究；
- 烧蚀、侵蚀过程能量沉积和质量迁移规律研究；
- 细观热防护理论研究；
- 材料环境响应特性数据库、知识库的建立；
- 耐热材料环境响应行为的物理建模和数值模拟技术研究；
- 耐热材料的优化设计方法及服役条件下性能预测研究。

由于耐热材料服役条件下环境响应的复杂性，上述应开展的基础研究工作可以说是一个大的系统工程，真正能实现耐热材料的优化设计及服役条件下材料行为的准确预测还有漫长的道路要走。因此无论是从难度、工作量，还是试验研究条件、经费投入等因素考虑，



都需要集中国内从事耐热材料研制、试验、设计使用单位及高等院校的研究力量协作进行，结合国家相关研究计划，尽快开展这一领域的研究工作，提高我国耐热材料的研制和应用水平。

## **Emphasis on the Application Basic Research of Thermal Shield Composite Materials**

Dang Jiali    Liu Chunli    Wang Junshan

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing, 100076)

**ABSTRACT:** This paper briefly presents the development trend and application research of thermal shield composite materials. Through the investigation on the development of thermal shield composite materials in the United State and Russia, the paper discusses the importance of the basic theoretical research and experiment study on the material with emphasis on the research of thermal shield mechanism, influence of extreme condition and symbolization and evaluation of composite material to improve our composite materials research work.

**KEYWORDS:** thermal shield composite materials, composite materials

# 面向二十一世纪的美 国 复 合 材 料 产 业 及 先 进 复 合 材 料 技 术\*

梁志勇 段跃新 张佐光 宋焕成  
(北京航空航天大学 104 教研室, 北京 100083)

**摘 要** 本文根据近两年来美国 CFA、SAMPE 及复合材料工业界的会议、活动和发展动态, 系统分析和总结当前美国复合材料产业和先进复合材料科学与技术的发展前沿情况, 提出一些我国复合材料产业发展和科学与工程研究的思路和建议。

**关键词** 复合材料 工艺 制造 低成本

## 1 前言

树脂基复合材料科学与技术经过近六十年的发展, 在美国已形成了一个年产值为 200 多亿美元, 从业人数多达二十万人的新兴产业, 并自九十年代中期以来, 一直保持着高于美国 GPD 增长速度的高增长速率。根据美国商业部及 CFA (Composites Fabrication Association) 近年来发表的统计资料, 本文将介绍和分析美国复合材料产业的构成、市场及各种成型工艺技术的应用情况及主要的产业运作模式。通过分析和研究为适应二十一世纪汽车工业、航空航天工业、基础设施的建设与修复和延寿以及 EPA (美国国家环保局) 的环保要求, 美国复合材料技术研究和产品发展动向和面临的问题, 为我国复合材料产业的快速发展提供一些可借鉴的经验<sup>[1-2]</sup>。

结合美军下世纪初先进战斗机 F-22 及 JSF 和空间战斗机的发展需求, 美国复合材料界系统提出了二十一世纪初期先进复合材料技术及应用的主要发展方向, 并从材料技术、工程应用技术、后勤保障技术及低成本化技术等四个方面明确了先进树脂基复合材料科学与技术发展目标和技术关键。能同时满足减重、高抗损伤容限、隐身及低成本化四项指标的设计、材料、工艺和工程集成技术及其应用将是本初世纪美国先进复合材料的发展重点, 新工艺及新材料的创新与基于 IT 技术的复合材料工程能力是其技术基础<sup>[3-6]</sup>。

为更好地规划和进行新世纪我国复合材料技术的研究和应用发展, 我们在注重对一些已定关键材料及工艺技术突破的同时, 如何通过新材料、新工艺和集成制造技术方面的创新, 全面提高我国复合材料的工程化能力和水平, 是确保本世纪初我国复合材料研究及应用水平能够接近和达到世界先进水平的关键。

## 2 美国树脂基复合材料产业

### 2.1 产量持续增长

自 1991 年以来, 伴随着完成产业结构调整美国经济的持续增长, 美国树脂基复合材料工业已经历了 8 个持续增长的年头。1998 年美国复合材料产量达到了 163.3 万吨, 与 1997 年相比增长率高达 5.5%, 高于当年美国 GPD 的增长率, 并预计 1999 年可达 170 万吨的历史新高产量。图 1 为美国主要产业部门近 4 年来复合材料产量的变化情况 (1999 产量为预计值)。可看出, 除造船业和国防工业复合材料产量增长不明显, 甚至出现负增

\* 本研究为自然科学基金 No.59773004 及 No.59833110 资助项目

长（减产）外，其它产业部门的产量增长均较明显，其主要原因是造船业市场相对饱和以及冷战结束后国防工业需求相对下降所致。此外以汽车为主的交通运输业和建筑业为美国复合材料用量的大户，并且具有较大的增长速度，对美国复合材料总量的明显增长具有重要作用。

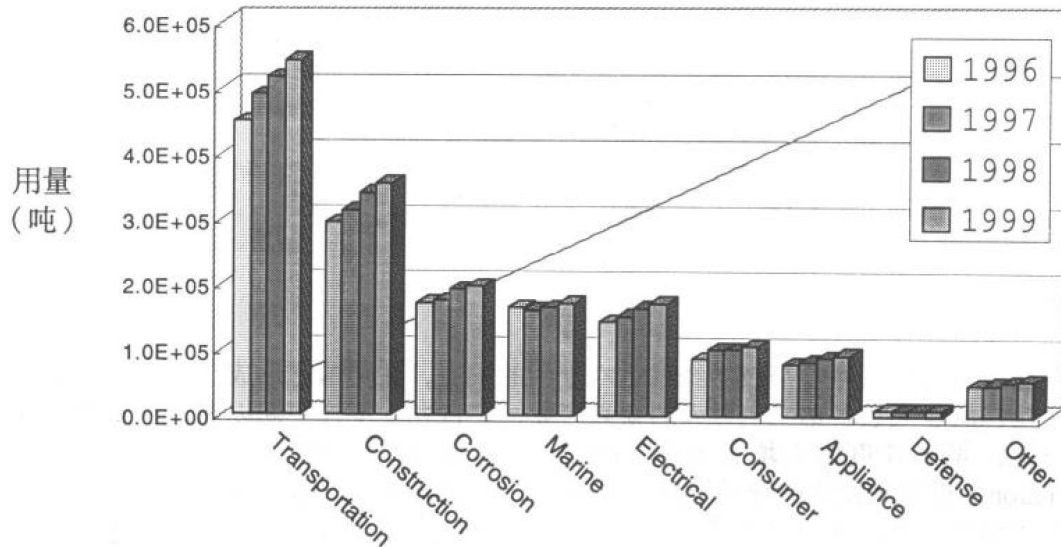


图 1 1996-1999 美国主要工业部门复合材料用量

## 2.2 产业现状

1998 年美国复合材料工业现状可总结如表 1。由表可见，美国已形成了一个年产值为 247 亿美元，从业人数多达二十三万人的新兴产业。其行业人均产量和产值分别约为 7 吨和 10 万美元的水平。显然，复合材料行业的人均产值在美国不算高，但统计表明仅占总产量 0.5% 的国防用复合材料（以先进复合材料为主）产值却与占总产量 31% 的交通运输业复合材料产值相当（见 2.3）。因此，先进复合材料产业仍为一个高附加值产业。当然，相当数量的个体和小作坊式的复合材料工厂没有包括在该统计数据内。美国 5,457 生产线采用的成型工艺统计结果如图 2，其中的手糊工艺包括了玻璃钢手糊工艺和预浸料/热压罐工艺。虽然，美国复合材料工业仍以手糊工艺为主，但机械化工艺的应用已具有相当规模，如占总产量 31% 的交通运输业复合材料就是以 SMC/BMC 成型工艺为主。

表 1 1998 年美国复合材料工业状况

The Total Reinforced Processing Plants	3,149
Primary Processing Facilities	4,286
End-User With Captive Processing	1,171
Total Processing Operations	5,457
Volume of Composites Output	163.3X10 <sup>4</sup> Ton
Processor Employees	236,000
Value of Composites Output	US\$24.7 Billion

## 2.3 市场需求预测

1996 年美国商业部及 CFA 对美国复合材料市场需求进行了预测，得出了十分乐观的预测结果，预计美国复合材料市场需求将高达 1160 亿美元（为现在产值的 5 倍），各主要工业部门和成型工艺的市场需求见图 3 及图 4。其中航空航天、建筑和交通运输业将有较大的市场需求，手糊工艺、SMC 及热塑性材料的注射成型将有较大的市场需求。当然，该预测结果可能过于乐观，但仍可反应美国复合材料市场可能的发展趋势。

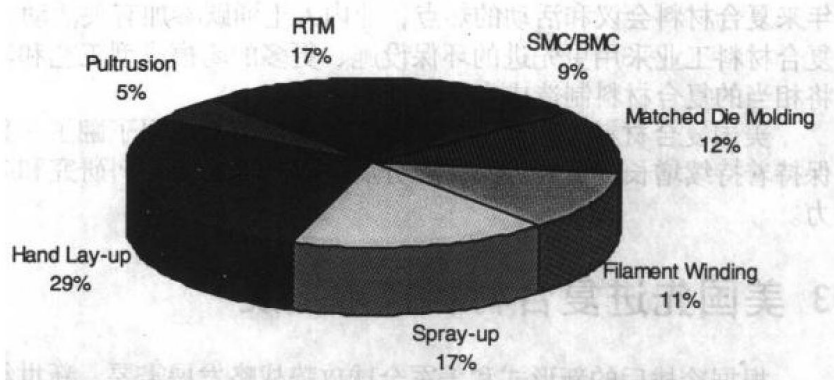


图 2 美国复合材料工业成型工艺应用情况

当然，该预测结果可能过于乐观，但仍可反应美国复合材料市场可能的发展趋势。

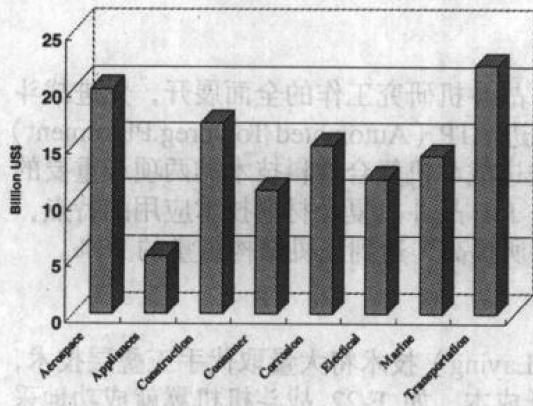


图 3 各主要工业部门市场需求预测

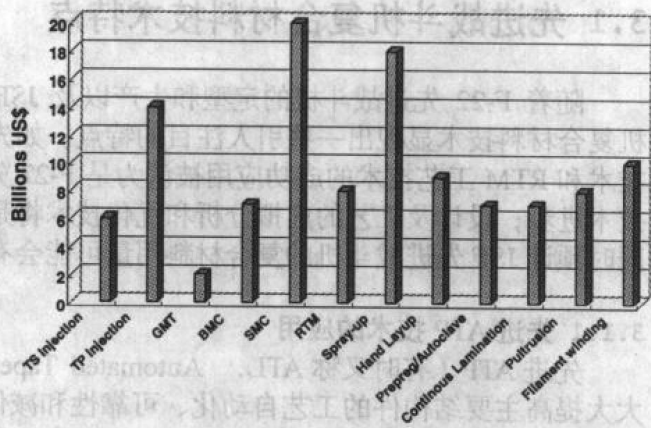


图 4 各主成型工艺市场需求预测

## 2.4 环保问题

美国对复合材料制成品环保问题的关心远不及日本和欧洲，其认为复合材料制成品没有二次污染问题，并且复合材料制成品的回收利用已有了可行的技术方案和尝试结果，在一定的经济条件下可完全可实现，加之美国地广人稀和目前复合材料的产量还不大，因此制成品及其固体废料的环境污染问题尚不突出。但美国对复合材料制造工艺过程中可挥发性有机物的环境污染问题却高度重视。EPA 把复合材料工艺列为主要的大气污染行业，并在加紧制定和通过有关的环保法规。其中与复合材料工艺有关的环保法规就是 MACT 标准。MACT 标准原意为：Maximum achievable control technology（可达到的控制有机物排放的最好水平及标准）。在对整个复合材料工业有机物排放调查、分析和建立有关模型的基础上，根据行业目前能达到的最好水平和所能承受的环保经济投入，EPA 与 CFA 等行业协会共同制定针对复合材料工业的 MACT 标准，达到既能实现环保要求又考虑复合材料生产企业的环保经济投入能力，并且是一部完全具有可操作性的双赢法规。MACT 标准目前已基本完成了技术准备工作，预计今年提交议会审议，2001 年成为正式法律，2004 年左右全面实施。MACT 标准的实施将对美国复合材料工业产生较大的影响，因此成为近

年来复合材料会议和活动的热点，业内人士踊跃参加有关活动。MACT 标准的实施将促使复合材料工业采用更先进的环保设施、更多的闭模成型工艺和环保型材料体系。当然，这将相当的复合材料制造成本的增加。

美国复合材料产业在近十年内产量和产值均取得了翻了一翻的可喜成绩，并在近年来保持着持续增长的良好势头，充分反应了美国复合材料研究和应用的突出的竞争力和生命力。

### 3 美国先进复合材料技术发展

根据冷战后的新形式和美军全球攻势战略发展需要，新世纪初美国先进复合材料研究和应用将以进一步提高复合材料在各种武器平台上的用量、有效缩短产品开发周期、提高复合材料的工程化能力与水平以及复合材料的低成本化为主要发展目标，满足以美军下世纪初先进战斗机 F-22、JSF、空间战斗机和精确打击武器为代表的武器发展需求。本文将先进复合材料的低成本化为主线，介绍和分析这方面的研究工作和进展情况。

#### 3.1 先进战斗机复合材料技术特点

随着 F-22 先进战斗机的定型和生产以及 JSF 战斗机研究工作的全面展开，先进战斗机复合材料技术显现出一些引人注目的特点。如先进 ATP (Automated Towpreg Placement) 技术和 RTM 工艺技术的成功应用被认为是 F-22 先进战斗机复合材料技术的两项最重要的技术进步；设计及工艺的虚拟分析和优化技术将是 JSF 战斗机复合材料技术应用的特点，同时预计 JSF 先进战斗机的复合材料用量可能会有所提高，达到飞机结构重量的 30%。

##### 3.1.1 先进 ATP 技术的应用

先进 ATP (有时又称 ATL, Automated Tape-Laying) 技术将大量取代手工叠层技术，大大提高主要结构件的工艺自动化、可靠性和降低成本。如 F-22 战斗机机翼就成功地采用该技术完成了机翼上下蒙皮的叠层工作。该机翼蒙皮外型尺寸约为 6.0mX5.7m，并有一定曲度，厚度变化为从翼尖的 3.8mm 变化为翼根的 14.2mm，每个机翼蒙皮的重量约为 113 公斤。这种先进的 ATP 设备可铺叠 76.2mm 至 152.4mm 的专用碳纤维/BMI 预浸带 (带厚约为 0.2mm)。由于采用了先进的控制软件和机器人系统，ATP 机器能够完全满足 F-22 复合材料制造质量的要求，可达到 30m/min 的铺叠速度和  $\pm 1.27$ mm 的铺叠精度，大大提高了批生产的可靠性、生产效率和降低成本。这类先进 ATP 机器的平均价格为 US\$300 万。

先进 ATP 技术将在 JSF 战斗机项目中得到进一步的扩大应用，如 Lockheed Martin 和 Boeing 均在积极开发 JSF 战斗机发动机异型进气道和的 ATP 技术。此外，V-22、C-17 及美国陆军的先进战车复合材料技术中均计划采用先进 ATP 技术。分析表明，与手工叠层技术相比，采用先进 ATP 技术可降低批生产制造成本 30%-50%。

##### 3.1.2 先进 RTM 技术的应用

RTM 工艺技术的成功应用被认为是 F-22 先进战斗机复合材料技术的另一项最重要的技术进步。图 5 为 RTM 工艺在 F-22 先进战斗机上的具体应用情况 (图中飞机轮廓线内画出的具体结构均为采用 RTM 工艺制造的复合材料零件)。可见，RTM 工艺技术主要用于制造机身内部各类主承力梁 (如 sineweave beam) 和各类框件 (frames)。每架 F-22 战斗机有多达 360 个零件是由 RTM 工艺制造，其总重量达 254 公斤，占每架 F-22 战斗机非蒙皮复合材料重量的 45%。同时，F-22 战斗机 RTM 工艺复合材料零件达到了很高的

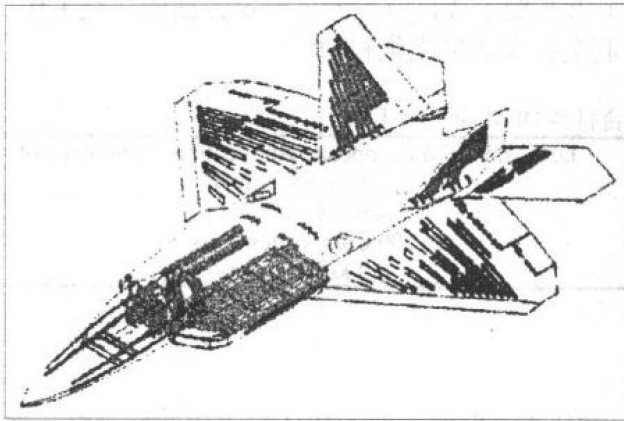


图5 RTM工艺在F-22先进战斗机上的应用情况

制造质量水平，其复杂主承力结构件的制造尺寸精度高达 $\pm 0.127\text{mm}$ ，零件的不合格率低于5%，从而可减少约200 hr的装配时间。RTM工艺复合材料零件与传统的预浸料/热压罐和金属零件相比，其成本仅降低10%，但由于大大提高了零件的整体性，RTM工艺复合材料零件的减重可达40%以上。可见，采用RTM工艺技术提高零件的整体性，减少复合材料零件数目和连接工作，既可实现成本的降低，同时又可达到较大的减重效果，对进一步促进复合材料在先进战斗机上的应用具有重要意义。同时，RTM工艺也将作为一个主要的成型工艺技术在JSF战斗机上获得应用。

### 3.1.3 相对稳定的材料体系

F-22先进战斗机复合材料体系可主要分为两大块：预浸料材料体系和为RTM工艺材料体系。其中预浸料材料体系以IM7/977-3环氧体系和IM7/5250BMI体系为主，RTM工艺以IM7/PR500环氧体系和IM7/5250-4RTM（BMI树脂）为主。F-22的选材体现了低成本和稳定可靠的特点。其中碳纤维是选用中模中强的IM7，具有较高性能/价格比的美国国产纤维，而没有选用较昂贵的高性能纤维（如T-800），见表2。同时树脂选用了相对较成熟的977-3、5250及PR500等树脂体系，而没有采用氰酸酯和高韧性的环氧树脂体系。从目前报道的研究工作来看，JSF战斗机的材料体系也不会有大的变化。此外，预计JSF可能会采用一些LTM材料体系用于复合材料工装和零件的制造，进一步降低制造成本。

表2 碳纤维性能/价格比

PAN-Based Carbon Fibers	Tensile Modulus (GPa)	Cost (US\$/Kg)
Standard Modulus(12K)	231-245	36-40
Intermediate Modulus(12K)	280-350	62-66
High Modulus(12K)	350-490	120-130
Ultra-High Modulus(3K, 6K, 12K)	490-980	240-1800
Heavy Tow (48K-320K)	231-245	16-22

### 3.1.4 CAI计划与先进设计和工艺模拟分析技术

先进复合材料在在JSF战斗机上的应用可能会进一步提升为结构重量的30%，因此复合材料低成本化的压力也会进一步增大。因此，美国空军以JSF战斗机为背景组织进行CAI（Composite Affordable Initiative）计划。该计划以美国空军、Lockheed Martin和Boeing等主要复合材料应用单位为主，并由多家大学和国家实验室参加，组成一个国家级的研究队伍，在10-15年的时间内达先进战斗机主要复合材料结构件的制造成本降低一个数量级的目标。其主要技术思路为：进一步提供复合材料结构件的整体性、更多地采用共固化和胶结技术以及采用复合材料的DFM（Design for Manufacture）和DFA（Design for Affordability）技术，真正实现复合材料的优化应用，从而大大提高复合材料的应用效益，实现制造成本降低一个数量级的目标。美国空军提出，要达到这一成本目标，飞机结构设计和制造水平要实现如表3的技术飞跃。因此，JSF先期的复合材料研究工作主要是集中在先进设计-制造一体化技术、各种复合材料可制造性模型、制造成本和风险模型、工艺质量控制与在线优化技术等方面。如从1995年就开始的JSFMCAT（Joint Strike Fighter

Manufacturing Capability Assessment Toolset) 就花费了数百万美元进行这方面的研究工作。因此, JSF 将较全面地推动复合材料设计与制造技术的集成化和 IT 化。

表 3 先进战斗机复合材料 DFM 和 DFA 目标

Today Composite Application Technology Of Advanced Fighter	DFA and DFM Composite Application Technology of Advanced Fighter
11,000 Metal Parts	450 Metal Parts
500 Composites Parts	200 Composites Parts
135,000 Joint Parts	6,000 Joint Parts

### 3.2 空间先进复合材料技术

“Migration to Space”目前也成为美国空军的重要发展方向, 预计与之相应的材料研究经费将占整个美国空军材料研究经费的四分之一。复合材料的低成本化同样是美国空间战斗机和武器系统的主要议题。低成本传热控制材料 (Thermal management materials) 的研究和开发将为武器体系进出大气层提供可设计和控制的热障性能。具有较高刚度和耐热性的碳-碳泡沫芯材技术将为太空武器系统提供高性能的夹层结构基础材料。同时具有高尺寸稳定性的复合材料连接和接头材料体系也是太空复合材料技术的关键。此外, 能够满足太空环境的耐久性传感器复合材料也是研究的重点。

### 3.3 非热压罐类工艺发展迅速

采用非热压罐工艺 (Out-of-Autoclave) 可大大降低工装、高温辅助材料和能耗的成本, 是复合材料低成本化的一条主要途径。非热压罐工艺可分为三大类: 包括 RTM、RFI 和 SCRIMP 在内的 LCM 工艺技术、UV/E-beam 固化工艺技术以及低温固化高温使用的 LTM 材料体系及应用技术。

RTM 工艺技术已在 F-22 上获得较成功的应用, 同时美国 Navy、Army 和 NASA 也在开展系统的 LCM 工艺技术研究工作。如 Navy 计划采用 SCRIMP、UV-Curing/RTM 和 LTM 技术以实现 US\$10/公斤~ US \$30/公斤的复合材料成本目标, 从而扩大复合材料在舰艇结构上的应用。美国空军材料研究实验室采用著名的 P-4A (程序化粉末预成型体技术) 技术, 研究非连续定向碳纤维预成型体技术, 以实现高性能碳纤维预成型体的低成本批量化制造。Army 和著名的 Delaware 大学的 CCM (Center of Composite Materials) 研究采用 RTM 共注射技术 (Co-Injection) 一次注射成型包括防弹陶瓷层、乙烯基酯复合材料结构层和酚醛复合材料防护层的整体复合材料装甲车体技术。目前, 这些研究工作的重点集中在工艺过程模拟分析与优化、质量监控技术、低成本演示验证和样件试制等方面。美国军方把上述的技术研究和开发工作列为未来的 5-10 中长期研究规划。

UV/E-beam 固化工艺技术具有显著的低成本化特点, 特别是 UV/E-beam 固化工艺可以 LCM 工艺和缠绕等工艺相结合能够获得更好的复合材料低成本效果, 具有良好的技术发展前景。当目前对这类新型固化技术的固化机理、主要影响因数和界面等问题的认识尚未充分, 需要进一步的研究工作。

LTM 材料体系及应用技术是先进复合材料低成本化的另一条有效途径。在特殊的固化机理下, 这类材料体系能够在 60-80°C 的条件下进行固化并达到相当的固化程度, 从而可在自由状态下进行中温或高温后处理, 以获得较高的  $T_g$  和耐热性, 从而具有了所谓的低温固化高温使用特性。这类树脂最初仅是以用于制备低成本复合材料工装为应用目的, 但由于其良好的材料性能和低成本特点, 目前这类材料也同样可用于复合材料结构件的制



备。

以上新材料新工艺的研究和应用大大丰富了复合材料科学与工程的内容,进一步开拓了复合材料的应用领域和提高了竞争力。

## 4 结论

由以上的介绍和分析可看出,美国复合材料工业也具有了相当的规模,是美国汽车和建筑等支柱产业的基础工业,是先进国防技术的主要组成部分。同时,先进复合材料在军机上的应用已由上世纪 70 年代的单纯减重为目的,发展到今天要求同时满足减重、高抗损伤容限、隐身及低成本化四项指标,体现了先进复合材料应用水平的迅速提高。本世纪初复合材料的 DFM 和 DFA 技术的研究和应用,将进一步推动复合材料的在各种武器平台的成功应用。为更好地规划和进行新世纪我国复合材料技术的研究和应用发展,我们在注重对一些已定关键材料及工艺技术突破的同时,如何通过复合材料新材料、新工艺和集成制造技术方面的创新,全面提高我国复合材料的低成本化和工程化能力和水平,是确保本世纪初我国复合材料研究及应用水平能够接近和达到世界先进水平的关键。

### 参考文献

- [1] 梁志勇,段跃新等,国际复合材料技术研究和应用,北航内部研究报告,2000.3。
- [2] Joe McDermott, Updating the Demographics of the Composites Industry, Composites Fabrication, No.10, 1998, 8-25.
- [3] L. Bersuch, R. Benson and S. Owens, Affordable Composite Structure for Next Generation Fighters, Proc. of 43th International SAMPE Symposium, May, 1998, 56-65.
- [4] R. deCillis and C.D. Caputo, Affordable Approach to the Production of Complex Aerospace Composite Components Via Resin Transfer Molding, Proc. of 43th International SAMPE Symposium, May 1998, 1710-1714.
- [5] C. Hip, SAMPE up-date: F-22 Raptor, High Performance Composites, 1998, Vol.6, July/August, 23-25.
- [6] S.S.Brown, Raptor Gives Composites a Lift, Aerospace America, 1998, No.9, 24-29.
- [7] H.Benson Dexter, Development of Textile Reinforced Composites for Aircraft Structure, Proc. of 4<sup>th</sup> International Sym. for Textile Composite, Oct., 1998, Kyoto, Japan.

## The USA Composites Industry and Advanced Composites Technology at the Beginning of the New Century

Zhiyong Liang Duan Yuexin Zhang Zuoguang and Song Huancheng  
(Beijing University of Aero. & Astro., 100083, Beijing)

**ABSTRACT** The recent developments of USA composites industry and the leading-edge of advanced composites technology are reviewed in this paper. The data and analyses of the paper are mainly based on the conferences and activities of CFA and SAMPE. The comments and suggestions for the developments of composites industry and composites R&D of China are also presented in the report.

**KEYWORDS** Composites Processing Manufacture Affordable



# 功能复合材料的性能与应用

高树理 张明习

(中国航空工业济南特种结构研究所, 250023)

**摘要** 本文对功能复合材料的定义、透波功能复合材料、人工介质材料、隐身功能复合材料、梯度功能复合材料以及其他功能复合材料的基本组成、性能特点和应用领域进行了较为系统的介绍。重点介绍了透微波功能复合材料和梯度功能复合材料。并提出了今后的发展展望。

**关键词** 功能复合材料 透波 隐身 梯度功能复合材料 性能与应用

## 1 引言

功能复合材料是指除机械性能以外而提供其他物理性能的复合材料,如导电、超导、半导、磁性、压电、阻尼、吸波、吸声、摩擦、屏蔽、阻燃、防热、隔热等功能复合材料。功能复合材料主要由功能体和基体组成,或由两种(或两种以上)功能体组成。在单一功能体的复合材料中其功能性质主要由功能体提供,但基体不仅起到粘接和赋形作用,同时也会对复合材料整体的物理性能有影响。多元功能体的复合材料可以具有多种功能,同时还有可能由于复合效应而产生新的功能。这种多功能复合材料是功能复合材料的发展方向。

功能复合材料的复合效应主要分为线性效应和非线性效应两类。线性效应包括平均效应、平行效应、增补效应和相抵效应。非线性效应包括乘积效应、系统效应、诱导效应和共振效应。功能复合材料的最大特点在于它的可设计性,因此在给定的性能要求、使用环境及经济条件限制的前提下,从材料的选择途径和工作结构途径上进行设计。利用线性效应的混合法则,通过合理铺设可以设计出某一温度区间膨胀系数为零或接近于零的构件。又如利用XY平面是压电性,XZ平面呈现电致发光性,可以通过铺层设计得到YZ平面呈现压致发光性的复合材料。模仿生物体中的纤维和基体的合理分布,通过数据库和计算机辅助设计可望设计出性能优良的仿生功能材料。

功能复合材料的发展是伴随着现代科学技术的飞速发展而发展起来的,而且其重要性越来越明显。以飞行器的雷达天线罩为例,雷达天线罩是提高综合火控系统作战能力的重要部件,而且提高雷达天线罩的性能所花费的投资与提高雷达的性能相比,是事半功倍的工作,花大力气发展雷达天线罩用功能复合材料技术,为我国自己的微波探测技术的发展作出了贡献。本文从材料发展的角度,概括地总结了功能复合材料的性能与应用,并提出今后的发展预测。

## 2 透波功能复合材料

### 2.1 透微波功能复合材料

#### 2.1.1 透微波功能复合材料的纤维

在透波复合材料中最早使用的是E玻璃纤维,后来又有特种玻璃纤维,是指高强度玻