

中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证
系列培训教材

航空非金属材料性能测试技术

5 复合材料

航空非金属材料性能鉴委会 组织编写
张子龙 向海 雷兴平 编 著



化学工业出版社

中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证
系列培训教材

航空非金属材料性能测试技术

5 复合材料

航空非金属性能鉴委会 组织编写

张子龙 向海 雷兴平 编 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统介绍了复合材料的种类、结构、制备、性能、用途等基础知识和工艺特征、性能测试等专业知识，重点描述了材料的性能测试方法，包括试验原理、试验方法、操作步骤要求、数据处理、试验异常处理等。试验方法基本覆盖了航空、航天对该材料的各项性能要求，并与国外相应的试验方法进行了比较；性能测试从原理入手，对设备和试样、试验步骤、数据处理及影响因素进行阐述。

本书是系统学习航空非金属材料性能检测方法的培训教材，其知识结构和深度符合 HB 7475 中Ⅱ级资格证的要求。适用于复合材料技术人员，尤其是检测人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

航空非金属材料性能测试技术 5. 复合材料/张子龙, 向海, 雷兴平编著; 航空非金属性能鉴委会组织编写. —北京: 化学工业出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-122-20491-2

I. ①航… II. ①张… ②向… ③雷… ④航… III. ①航空材料-非金属材料-性能检测②航空材料-非金属材料-性能检测 IV. ①V250.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 081233 号

责任编辑: 李晓红
责任校对: 王素芹

文字编辑: 糜家铃
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装订: 三河市宇新装订厂
710mm×1000mm 1/16 印张 10 $\frac{1}{2}$ 字数 186 千字 2014 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

编审委员会

主任 李 伟

副主任 李 莉 陶春虎

成 员 (以姓氏笔画为序)

于 浩	王 斌	王宇魁	尹泰伟	叶 勇
史亦韦	吕 健	刘 嘉	刘昌奎	刘晓燕
闫秀芬	李 伟	李 泽	李 剑	李 莉
李秀芬	杨国腾	杨春晟	杨胜春	何 军
何玉怀	张世林	张田仓	张学军	张银东
武振林	苗蓉丽	欧阳小琴	季 忠	金冬岩
胡成江	侯丽华	徐友良	郭广平	郭子静
陶春虎	黄玉光	章菊华	熊 瑛	

编审委员会秘书处

主任 宋晓辉

成 员 马 瑞 马文利 任学冬 李 彦 李 轩
宋晓辉 张文扬 周静怡 赵 梦 盖依冰
焦泽辉 谢文博 程 琴



公元前 2025 年的汉谟拉比法典，就提出了对制造有缺陷产品的工匠给予严厉的处罚，当然，在今天的以人为本的文明世界看来是不能予以实施的。即使在当时，汉谟拉比法典在总体上并没有得到真正有效的实施，其主要原因在于没有理化检测及评定的技术和方法用以评价产品的质量以及责任的归属。从公元前 2025 年到世界工业革命前，对产品质量问题处罚的重要特征是以产品质量造成的后果和负责人为对象的，而对产品制造过程和产品质量的辨识只能靠零星、分散、宏观的经验世代相传。由于理化检测和评估技术的极度落后，汉谟拉比法典并没有解决如何判别造成质量问题和失效的具体原因的问题。

近代工业革命给人类带来了巨大物质文明，也不可避免地给人类带来了前所未有的灾难。约在 160 多年前，人们首先遇到了越来越多的蒸汽锅炉爆炸事件。在分析这些失效事故的经验教训中，英国于 1862 年建立了世界上第一个蒸汽锅炉监察局，把理化检测和失效分析作为仲裁事故的法律手段和提高产品质量的技术手段。随后在工业化国家中，对产品进行检测和分析的机构相继出现。而材料和结构的检测开始受到重视则是近半个世纪的事情。第二次世界大战及后来的大量事故与故障，推动了力学、无损、物理、化学和失效分析的快速发展，如断裂力学、损伤力学等新兴学科的诞生以及扫描电镜、透射电镜、无损检测、化学分析等大量的先进分析设备等的应用。

毋庸置疑，产品的质量可靠性要从设计入手。但就设计而言，损伤容限设计思想的实施就需要由无损检测和设计用力学性能作为保证，产品从设计开始就应考虑结构和产品的可检性，需要大量的材料性能数据作为设计输入的重要依据。

就材料的研制而言，首先要检测材料的化学成分和微观组织是否符合材料的设计要求，性能是否达到最初的基本设想。而化学成分、组织结构与性能之间的协调关系更是研制高性能材料的基础，对于材料中可能存在的缺陷，更需要无损检测的识别并通过力学损伤的研究提供判别标准。

就构件制造而言，一个复杂或大型结构需要通过焊接来实现，要求在结构设计时就对材料可焊性和工艺可实施性进行评估，使选材具有可焊性，焊接结构具有可实施性，焊接接头缺陷具有可检测性，焊接操作者具有相应的技能水平，这样才能获得性能可靠的构件。

检测和焊接技术在材料的工程应用中的作用更加重要。失效分析作为服役行

和对材料研制的反馈作用已被广泛认识，材料成熟度中也已经考虑了材料失效模式是否明确；完善的力学性能是损伤容限设计的基础，材料的可焊性、无损检测和失效模式不仅是损伤容限设计的保证，也是产品安全和可靠使用的保证。

因此，理化检测作为对材料的物理化学特性进行测量和表征的科学，焊接作为构件制造的重要方法，在现代军工产品质量控制中具有非常重要的地位和作用，是武器装备发展的重要基础技术。理化检测和焊接技术涉及的范围极其广泛，理论性与实践性并重，在军工产品制造和质量控制中发挥着越来越重要的作用。近年来，随着国防工业的快速发展，材料和产品的复杂程度日益提高，对产品安全性的保证要求越来越严格；同时，理化检测和焊接新技术日新月异，先进的检测和焊接设备大量应用，对理化检测和焊接从业人员的知识、技能水平和实践经验都提出了更高的要求。

为贯彻《军工产品质量管理条例》和 GJB《理化试验质量控制规范》，提高理化检测及焊接人员的技术水平，加强理化实验室的科学管理和航空产品及科研质量控制，中国航空工业集团公司成立了“中国航空工业集团公司检测及焊接人员资格认证管理中心”，下设物理冶金、分析化学、材料力学性能、非金属材料性能、无损检测、失效分析和焊工七个专业人员资格鉴定委员会，负责组织中航工业理化检测和焊接人员的专业培训、考核与资格证的发放工作。为指导培训和考核工作的开展，中国航空工业集团公司检测及焊接人员资格认证管理中心组织有关专家编写了“中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证系列培训教材”。

这套教材由长期从事该项工作的专家结合航空工业的理化检测和焊接技术的需求和特点精心编写而成，包括了上述七个专业的培训内容。教材全面、系统地体现了航空工业对各级理化检测和焊接人员的要求，力求重点突出，强调实用性而又注意保持教材的系统性。

这套教材的编写得到了中航工业质量安全部领导的大力支持和帮助，也得到了行业内多家单位的支持和协助，在此一并表示感谢。

中国航空工业集团公司
检测及焊接人员资格认证管理中心

以高分子为基础的非金属材料，包括复合材料、橡胶、密封剂、塑料、纺织材料、胶黏剂、油料、涂料等 8 类材料，由于具有密度小、重量轻等优点，在飞机、火箭等航空、航天器上的应用日益广泛和重要。以复合材料为例，在 B787 的飞机结构重量中占 50% 以上，在 A380 飞机上占 25% 以上，且应用于机翼、机身、垂尾、平尾、地板梁、整流罩、部分舱门、发动机机匣等重要部位。橡胶密封件用于飞机、航天器的液压系统、滑油系统、燃油系统、环境控制系统等，需在使用温度、系统压力等作用下具有良好的密封稳定性，否则影响飞行器的可靠性，甚至发生重大飞行事故，如美国挑战者号航天飞机就因密封圈失效造成了空中爆炸。密封剂是飞机整体油箱的关键材料，燃料性能更是飞机飞行安全的保证，等等。总之，非金属材料作为重要功能材料或结构材料，其性能直接决定了飞行器的飞行安全性和经济性。

航空非金属材料的性能测试，作为航空工业的重要技术基础，是确保装机产品质量，实施产品质量控制的重要手段。

中航工业非金属性能鉴定委员会（以下简称鉴委会）是“中国航空工业集团公司检测及焊接人员资格认证管理中心”下属的 7 个专业人员资格鉴定委员会之一，其主要任务是依据 HB7475《航空非金属性能检测人员的资格鉴定》对从事航空非金属材料性能测试的人员进行技术培训和资格考核。鉴委会成立于 1989 年，25 年来为国内航空工业培训并考核了数千名非金属材料性能检测人员，同时也有来自包括航天、兵器、核工业、空军修理厂、汽车制造业等行业的检测人员。

为配合培训和考核工作的开展，20 世纪 90 年代初，鉴委会的张向宇、杨利东、邵毓俊、杜灵玄、周以珪、陈慧敏等同志编写了《非金属性能检测丛书》，包括《复合材料测试》、《塑料测试》、《胶黏剂测试》、《橡胶测试》、《密封剂测试》、《特种纺织品及性能检测》、《涂料测试》、《油料测试》8 个分册，在对检测人员的培训和资格鉴定过程中发挥了重要作用。随着航空工业的发展，新材料、新技术、新设备的不断涌现，需要重新编写培训教材。从 2002 年开始，鉴委会编写了新的培训教材，并随后逐年进行修订、更新。在此基础上，2011 年对教材再次进行全面更新，经过近 3 年的试用和完善，完成了这套《航空非金属材料性能测试技术》的编著。

《航空非金属材料性能测试技术》按材料类别分为 5 个分册，包括《橡胶与密封剂》、《塑料与纺织材料》、《胶黏剂》、《油料与涂料》和《复合材料》，与新修订的 HB7475《航空非金属性能检测人员的资格鉴定》的专业划分相适宜，也与各航空企

业内测试专业的设置相符合。各分册的章节设置大致相同，简要介绍了材料的结构、组成等基础知识，工艺特征、性能测试等专业知识；重点阐述了材料的性能测试方法，包括试验原理、试验方法、操作步骤要求、数据处理、试验异常处理和案例分析等，旨在提高检测人员的检测水平和对实验数据处理、分析能力，其知识结构和深度符合 HB7475 的要求。

《航空非金属材料性能测试技术》是为中航工业航空非金属材料性能检测人员技术培训、考核和资格鉴定工作编写的，也可作为其他从事非金属材料性能检测的专业人员学习和参考。编著者均为中航工业科研院所及飞机、发动机厂的专业人员，有着 20 多年从事航空非金属材料性能测试的技术、学术实践和培训教学经验。

其中，复合材料性能测试技术，是复合材料性能表征与评价的重要方法，是航空复合材料结构应用的重要基础，也是确保产品质量、实施产品质量控制的重要手段。《复合材料》分册由张子龙、向海、雷兴平编著。在编写过程中，参考了国内外的相关著作、资料 and 标准。在介绍相关测试技术的同时，注重结合国内外的发展现状，分析相关测试方法的特点及应用背景，旨在帮助测试人员加深对测试技术的理解。全书共分 6 章，第 1 章介绍了复合材料基础知识，第 2 章为组分材料的试验表征，第 3 章为复合材料物理性能试验，第 4 章为复合材料层合板基本力学性能试验，第 5 章介绍了复合材料开孔、韧性及损伤相关的测试技术，第 6 章为蜂窝夹层结构性能测试技术。

由于水平有限，书中难免有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

编著者
2014 年 5 月



1 基础知识	001
1.1 复合材料的特点及其分类	001
1.1.1 复合材料的定义	001
1.1.2 复合材料的特点	002
1.1.3 复合材料的分类	004
1.1.4 单层、单向板与层合板	005
1.1.5 复合材料的性能与材料形式	006
1.2 复合材料的组成及其成型工艺	006
1.2.1 复合材料的组成	006
1.2.2 复合材料成型工艺	012
1.3 复合材料测试基础	017
1.3.1 复合材料性能测试的基本要求	017
1.3.2 复合材料性能测试的一般过程	018
1.3.3 试验数据处理	019
1.3.4 名词与术语	020
2 组分材料的实验表征	027
2.1 纤维试验	027
2.1.1 纤维物理性能	027
2.1.2 纤维拉伸性能	029
2.2 基体材料试验	032
2.2.1 树脂基体化学组分分析	032
2.2.2 树脂基体固化反应特性分析	033
2.2.3 树脂基体物理性能	033
2.2.4 树脂基体力学性能	035
2.3 预浸料试验	041
2.3.1 树脂含量	041
2.3.2 纤维面密度	044
2.3.3 挥发分含量	045
2.3.4 树脂流动性	046
2.3.5 凝胶时间	047
2.3.6 黏性/铺覆性	048

2.3.7	吸湿量	049
2.3.8	玻璃化转变温度	050
3	复合材料的物理性能试验	051
3.1	纤维增强塑料的密度和相对密度试验方法	051
3.1.1	试验原理	052
3.1.2	试验设备	052
3.1.3	试样	052
3.1.4	试验要点	052
3.1.5	结果计算	053
3.1.6	结果讨论	053
3.2	树脂含量测试	053
3.2.1	相关标准	054
3.2.2	试验原理	054
3.2.3	仪器	054
3.2.4	试样	054
3.2.5	试验要点	054
3.2.6	结果计算	055
3.3	复合材料层合板纤维体积含量和孔隙率（显微镜法）	056
3.3.1	试验原理	056
3.3.2	试验设备	056
3.3.3	试样	057
3.3.4	试验要点	057
3.3.5	结果计算	058
3.4	热导率的测定	059
3.4.1	相关标准	060
3.4.2	试验原理	060
3.4.3	试验装置	060
3.4.4	试样	061
3.4.5	试验要点	061
3.4.6	结果计算	061
3.5	平均比热容试验方法	061
3.5.1	相关标准	062
3.5.2	试验原理	062
3.5.3	试样	063
3.5.4	试验过程	063

3.5.5	结果计算	064
3.6	平均线膨胀系数试验	064
3.6.1	相关标准	065
3.6.2	试验原理	065
3.6.3	试样与试验装置	065
3.6.4	试验要点	065
3.6.5	结果计算	065
3.6.6	讨论	066
3.7	复合材料吸湿相关的测试方法	066
3.7.1	湿扩散过程	066
3.7.2	材料耐水性的试验表征	067
3.7.3	讨论	068
4	复合材料层合板的基本力学性能	069
4.1	单向层合板拉伸试验	070
4.1.1	试验原理	070
4.1.2	试样	070
4.1.3	加强片	072
4.1.4	夹持与加载	073
4.1.5	加载对中性	074
4.1.6	试验过程	075
4.1.7	数据处理	076
4.1.8	讨论	077
4.2	压缩试验方法与测试技术	077
4.2.1	压缩试验原理	077
4.2.2	常用压缩试验方法比较	077
4.2.3	试样准备	083
4.2.4	试验过程	083
4.2.5	数据处理	084
4.2.6	结果分析	084
4.3	面内剪切试验	084
4.3.1	剪切试验方法概述	084
4.3.2	几种常见剪切试验方法	086
4.4	弯曲试验	094
4.4.1	原理与装置	095
4.4.2	弯曲试验方法跨距选取	095

4.4.3	试样及试样准备	096
4.4.4	试验过程	096
4.4.5	结果计算	097
4.4.6	分析与讨论	097
4.5	层间剪切试验	098
4.5.1	短梁剪切法	098
4.5.2	双开槽剪切法	100
4.5.3	双V形槽剪切	101
4.6	织物增强复合材料及测试	101
4.6.1	拉伸试验方法	102
4.6.2	压缩试验方法	103
4.6.3	面内剪切试验方法	103
4.6.4	开孔拉伸与开孔压缩	103
5	断裂韧度与损伤评定方法	105
5.1	开孔拉伸及压缩试验	105
5.2	层间断裂韧度 G_c 试验	107
5.2.1	层间断裂韧度 G_c 试验的基本原理	107
5.2.2	试验条件	108
5.2.3	试验步骤	108
5.2.4	结果分析	108
5.3	复合材料层间断裂韧度试验	109
5.3.1	复合材料 I 型层间断裂韧度 G_{Ic} 试验	109
5.3.2	复合材料层间断裂韧度 G_{IIc} 试验	111
5.4	复合材料层合板冲击损伤及剩余压缩强度评价试验方法	112
6	夹层结构及芯材的性能测试	118
6.1	概述	118
6.1.1	夹层结构试样制备的一般要求	118
6.1.2	试验条件	119
6.1.3	性能测量	119
6.1.4	试验设备与变形测量装置	120
6.2	芯材胶条分离强度的测试	120
6.2.1	基本原理	120
6.2.2	试样及试验装置	121
6.2.3	试验概述及注意事项	122
6.2.4	结果计算	122

6.2.5	影响因素分析	122
6.3	夹层结构或芯子密度试验	123
6.3.1	试样及试验装置	123
6.3.2	试验概述及注意事项	123
6.3.3	结果计算	124
6.3.4	影响因素分析	124
6.4	夹层结构或芯子平压性能试验	125
6.4.1	基本原理	125
6.4.2	试样及试验装置	125
6.4.3	试验概述及注意事项	126
6.4.4	结果计算	126
6.4.5	影响因素分析	127
6.5	夹层结构的平拉性能试验	128
6.5.1	基本原理	128
6.5.2	试验设备与装置	128
6.5.3	试样	129
6.5.4	试样制备	129
6.5.5	试验概述及注意事项	130
6.5.6	结果计算	130
6.5.7	影响因素分析	130
6.6	夹层结构的侧压试验	131
6.6.1	基本原理	131
6.6.2	试样	131
6.6.3	试样装置	131
6.6.4	试验概述及注意事项	132
6.6.5	计算	132
6.6.6	影响因素分析	133
6.7	夹层结构或芯子剪切性能试验	133
6.7.1	基本原理	134
6.7.2	试验装置	134
6.7.3	试样	135
6.7.4	试样制备	135
6.7.5	试验概述及注意事项	136
6.7.6	结果计算	136
6.7.7	影响因素分析	137

6.8	夹层结构弯曲性能试验	137
6.8.1	基本原理	137
6.8.2	试验设备及装置	138
6.8.3	试样	139
6.8.4	试验概述及注意事项	139
6.8.5	结果计算	140
6.8.6	影响因素分析	142
6.9	夹层结构滚筒剥离试验	142
6.9.1	基本原理	142
6.9.2	试验装置	142
6.9.3	试样	143
6.9.4	试验概述	144
6.9.5	结果计算	144
6.9.6	影响因素分析	145
7	相关标准	146
	参考文献	152

1

基础知识

现代复合材料应用是从 20 世纪 30 年代开始的，最早应用的是玻璃纤维增强树脂基复合材料。经过几十年的发展，复合材料应用技术得到了迅猛发展，先后出现了碳纤维、硼纤维、芳纶纤维等多种纤维，以及多种复合材料体系。

我国的复合材料发展起始于航空航天的应用，碳纤维增强的树脂基复合材料成为应用的主要材料，到了 20 世纪 80 年代，航空复合材料的应用开始从次承力结构件向主承力结构件（如机身、机翼、直升机旋翼等）发展。目前，以碳纤维复合材料为主体的先进复合材料已经广泛地应用于航空、航天和其他工业领域，成为一类重要的结构材料。复合材料的应用程度已经成为现代先进飞机结构设计的重要标志之一。目前，商用飞机复合材料的用量已达到其结构重量的 50% 以上。复合材料在产品中的应用日益增加，包括运动器材、桥梁、建筑材料、汽车、舰船、飞行器、卫星等，几乎涉及所有工程领域。相信在不久的将来，复合材料在航空上的应用水平会获得重大的突破。

1.1 复合材料的特点及其分类

1.1.1 复合材料的定义

复合材料是由两种或者更多种材料组成的，每种材料在宏观水平相互结合且互不相容。其中有一种材料被称为增强相，而另有包覆增强相的一相被称为基体，通常基体都是连续的。增强相的形态是多种多样的，可以是连续纤维，或是连续纤维织物，也可以是短切纤维，颗粒状或是晶须状，图 1-1 为典型的各种形

态增强体构成的复合材料组成示意图。两相或多相材料复合后获得的新材料的物理及力学性能得到显著的改善，从而获得了比传统材料更优异的复合材料。复合材料的承载能力主要由增强相提供，一般情况下，最常见的基体相是工程中通常用到的树脂材料。

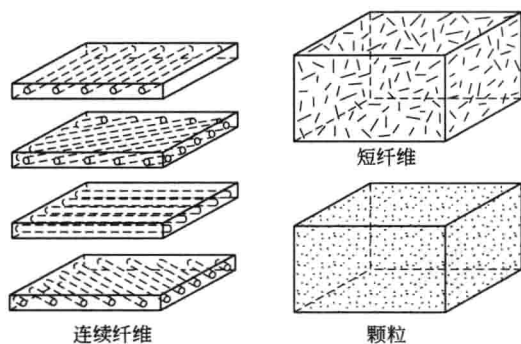


图 1-1 复合材料的几种基本形式

1.1.2 复合材料的特点

与常规材料相比，复合材料具有非常显著的特点，其特点主要体现在以下几个方面。

(1) 比强度、比模量高 航空航天应用中往往对结构的重量非常敏感，应用复合材料最主要的原因就在于其良好的比强度和比模量。所谓材料的比强度与比模量是对材料性能与自身重量的一个非常重要的衡量参数。

比模量：材料的弹性模量与其密度之比定义为比模量。

比强度：材料的强度与其密度之比定义为比强度。

复合材料的比强度和比模量都很高，可以大幅度减轻结构重量，是现代航空航天理想的结构材料。表 1-1 列出了几种材料的性能数据。

表 1-1 典型结构材料的力学性能

材 料	相对密度	弹性模量 /GPa	拉伸强度 /MPa	比模量 /(GPa·cm ³ /g)	比强度 /(MPa·cm ³ /g)
高模碳纤维	1.90	390	2100	205	1100
高强碳纤维	1.85	240	3500	130	1890
芳纶纤维	1.50	130	2800	87.0	1870
E-玻璃纤维	2.54	72.4	3500	28.5	1380
S-玻璃纤维	2.48	85.5	4600	34.5	1850
单向碳/环氧	1.60	181	1500	113	938

续表

材 料	相对密度	弹性模量 /GPa	拉伸强度 /MPa	比模量 /(GPa·cm ³ /g)	比强度 /(MPa·cm ³ /g)
单向玻璃/环氧	1.80	38.6	1062	21.4	590
硼纤维	2.63	385	2800	146	1100
结构钢	7.80	206	1009	26.4	129
铝合金	2.80	73.5	460	26.3	164
钛合金	4.50	112	940	24.8	209

从表中数据可见：单向碳/环氧复合材料的比强度是铝合金的4倍，是钛合金的3倍多；其比模量是铝合金、钛合金的5倍多。通过在结构中应用复合材料，可以在确保不降低性能的前提下，实现有效的减重。航空复合材料的实际应用实践表明，与铝合金这样的常规轻质合金材料相比，采用复合材料仍可实现25%~50%的结构减重。即使是在一些需要使用复合材料厚板的情况下，总体上也能够实现减重的效果。

(2) 材料具有可设计性 复合材料由各向异性的单层组成，通过改变每一层的铺层方向及层总数，可以根据需要设计出满足应用要求的结构。实际上，航空结构上每个复合材料件都是经过精心设计的，以确保结构的强度、刚度、动态响应特性及耐疲劳等方面都符合设计要求，且通过各种严格的、从材料到结构多层次的试验考核，才能够生产并装机使用。复合材料的可设计性不仅体现在其各项力学性能参数具有可设计性，而且物理参数也具有可设计性。例如航天上应用的零膨胀结构，就是通过复合材料层合板的铺层比例、铺层方向的设计，来实现层合板的热膨胀系数非常小的应用目标的，这种结构可以在温度差异非常大的外太空环境下，保持结构尺寸的良好稳定性。

(3) 良好的耐疲劳性能 大量的应用实践表明，复合材料的耐疲劳性能明显优于金属材料，且由于复合材料的疲劳破坏过程与金属材料大不相同，最初的损伤起始于基体开裂及界面分层，在这种疲劳损伤扩展过程中，具有明显的稳定扩展段，这就使得复合材料在已经具有明显疲劳损伤的情况下，仍具有足够的剩余强度与寿命，且在破坏前有明显的预兆。

因而，采用复合材料结构，在实现减重效果的同时，可以获得比采用金属材料结构更好的性能。对结构性能最显著的改善体现在结构的韧性及耐久性等方面，可以提高结构的使用寿命及可靠性，节省维护及更换部件的费用，因而从长远使用角度考虑，复合材料的使用成本与金属材料相比具有很好的竞争力。

(4) 工艺简便易于成型 复合材料可以成型各种型面的零件，这是采用复合