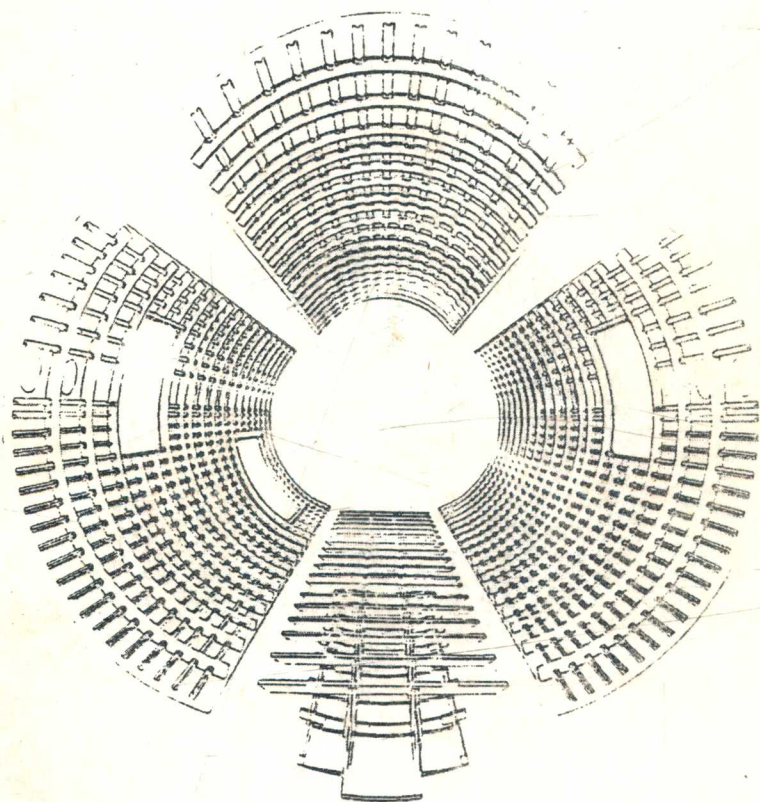


# 用于下一代 民用运输机的新材料



航空材料研究院  
航空工业总公司 第六二三研究所  
第六零三研究所

# 用于下一代民用运输机的新材料

先进民用飞机新材料专业委员会(Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft)

国家材料咨询局(National Materials Advisory Board)

航空航天工程局(Aeronautics and Space Engineering Board)

工程和技术系统专业委员会(Commission on Engineering and Technical Systems)

国家研究委员会(National Research Council)



一九九八年四月廿九日



30770406

出版号 NMAB-476

国家学术出版社

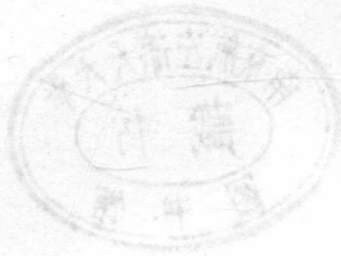
Washington, D.C. 1996

770406

## 内 容 简 介

本书是美国国家研究委员会先进民用飞机新材料专业委员会，针对下一代民用运输机的研制，于1996年发表的建议书，以供美国政府在制订科技政策时使用。该建议书覆盖了材料应用的各个领域，从材料创新到先进金属合金与有机基复合材料的選擇、制造、设计与加工，同时还涉及到使用经验，无损评定和维护。

本书对航空部门，包括材料、工艺、设计、分析、制造、使用及维护等领域的管理和技术人员有重要的参考价值，也可供高等院校有关专业的教师和研究生参考。



出版号: NMAB-476

国家科学出版社

Washington, D.C. 1996

770100

## 译者前言

面对民航业和飞机制造商的困境,美国国家研究委员会于1996年编写出版了题为“下一代民用运输机用的新材料(New Materials for Next-Generation Commercial Transport)”的建议书,为美国政府在制订有关航空科研的政策提供了科技咨询。委员会下属的先进民用飞机新材料专员委员会曾代表联邦航空管理局(FAA)针对下一代亚音速运输机中的新材料应用开展了研究,广泛征求了工业界、学术界专家,以及政府机构,特别是国家航空航天局(NASA)的意见,本书即是这一研究的成果。这一建议不仅涉及到新材料(包括先进金属材料 and 复合材料)研制本身,同时还涉及到它的选择、制造、设计与加工,以及使用经验、无损评定和维护等与新材料应用有关的所有领域。这对于我国的航空部门和有关的管理、技术人员了解国外发展动态,进一步明确航空科研发展方向方面有着同样重要的参考价值。为此,中国航空工业总公司航空材料研究院、第六二三研究所和第六〇三研究所决定共同组织翻译此书。从1988年起,美国NASA赞助和组织开展了“先进复合材料技术”(ACT)的庞大研究计划。该项计划的概况在1992年的第10届美国DoD/NASA/FAA的纤维复合材料结构会议上,由该项目的主要负责人之一J.G.Davis Jr.做了全面的介绍。为了使有关人员能及时了解这一计划的研究目的、内容及进展情况,我们将这篇文章列为附录,一并翻译出版。

本书的译校人员为:序言和执行总结:沈真译,吴学仁校;第一章:郑敏仲译,沈真校;第二章:薛景川译,沈真校;第三章:陶春虎译,吴一雷校;第四章:李野译,陈祥宝校;第五章:李野译,陈祥宝校;第六章:郑敏仲译,吴学仁校;第七章:郑敏仲译,吴学仁校;第八章:李野译,史亦伟校;第九章:沈真译,吴学仁校;附录一:沈真译,吴学仁校;附录二:张阿盈译,沈真校。全书由沈真统校,吴学仁、朱梅庄、龚鑫茂审核。沈薇负责全书的编辑和出版。

航空材料研究院

中国航空工业总公司 第六二三研究所

第六〇三研究所

一九九七年十一月



**说明：**作为本报告主题的这一项目是由美国国家研究委员会理事会批准的，该委员会的成员均来自美国科学院、美国工程院和美国医学学会。负责本报告的小组成员是按照他们的具体专业，并考虑到适当的平衡原则后选出的。

本报告由专门小组(组成人员不包括作者)审定，审定方法得到了报告审定委员会(由美国科学院、美国工程院和美国医学学会成员组成)的批准。

美国科学院是私人非营利、经费自筹的协会，它由从事科学和工程研究、致力于科技发展并把它用于公众福利的优秀学者组成。根据 1863 年由国会批准的宪章，美国科学院有权对联邦政府的科技事务进行咨询。Bruce M. Albert 博士是美国科学院的现任院长。

美国工程院建于 1964 年。根据美国科学院的章程，它是由杰出工程师组成、与科学院平行的组织，它在管理和成员选择方面具有自主权，并与美国科学院共同负责对联邦政府的科技咨询。美国工程院还负责赞助满足国家需求的工程计划、推进教育和研究，并评定工程师的优秀成果。Harold Liebowitz 博士是美国工程院的现任院长。

美国医学学会是 1970 年由美国科学院建立的，它的职责是组织有关专业的杰出成员来审查与公众健康有关的政策性事务。美国医学学会根据国会宪章授予美国科学院的权限，为联邦政府的咨询机构，并可自主鉴定医疗护理、研究和教育方面的项目。Kenneth I. Shine 博士是美国医学学会的现任理事长。

美国国家研究委员会是 1916 年由美国科学院组建的，以联合广大的科技界实现科学院有关促进科技发展，并向联邦政府进行咨询为目的。依照科学院确定的总方针，该委员会在为政府、公众和科学与工程界服务方面，已经成了美国科学院与美国工程院二者的主要执行机构。该委员会由科学院、工程院及医学学会共同管理，Bruce M. Albert 博士和 Harold Liebowitz 博士分别是国家研究委员会的主席和副主席。

由国家材料咨询局和航空航天工程局完成的这项研究是根据美国运输部的项目号 FAA-93-G-040 来执行的。

## 先进民用飞机新材料专业委员会:

JOHN A.S. GREEN(主席), Lockheed Martin Laboratories, Baltimore, Maryland  
BERNARD BUDIANSKY, Harvard University, Cambridge, Massachusetts  
DAVID J. CHELLMAN, Lockheed Martin Aeronautical Systems Company, Marietta,  
Georgia  
LARRY P. CLARK, Boeing Defense and Space Group, Seattle, Washington  
JOHN W. GILLESPIE, JR. University of Delaware, Newark  
CHARLES E. HARRIS, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia  
MURRAY H. KUPERMAN, United Airlines Maintenance and Operations Center, San  
Francisco, California  
PAUL A. LAGACE, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge  
VICKI E. PANHUISE, AlliedSignal Aerospace, Tempe, Arizona  
KENNETH L. REIFSNIDER, Virginia Polytechnic Institute and State University,  
Blacksburg  
MICHAEL P. RENIERI, McDonnell Douglas Aerospace, St. Louis, Missouri  
EDGAR A. STARKE, University of Virginia, Charlottesville  
HERBERT J. WARDELL, Gulfstream Aerospace, Savannah, Georgia

## 航空航天工程局联络代表

C. JULIAN MAY, Tech/Ops International, Inc., Kennesaw, Georgia

## 国家材料咨询局职员

THOMAS E. MUNNS, 高级计划官员  
AIDA C. NEEL, 高级项目助理  
JACK HUGHES, 研究副理

## 航空航天工程局

ALAN C. ANGLEMAN, 高级计划官员

## 国家材料咨询局

ROBERT A. LAUDISE(主席), AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey  
G. J.(REZA) ABBASCHIAN, University of Florida, Gainesville  
JAN D. ACHENBACH, Northwestern University, Evanston, Illinois  
MICHAEL I. BASKES, Sandia National Laboratories, Livermore, California  
I. MELVIN BERNSTEIN, Tufts University, Medford, Massachusetts  
JOHN V. BUSCH, IBIS Associates, Inc., Wellesley, Massachusetts  
HARRY E. COOK, University of Illinois, Urbana  
EDWARD C. DOWLING, Cyprus AMAX Minerals Company, Englewood, Colorado  
ROBERT EAGAN, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico

ANTHONY G. EVANS, Harvard University, Cambridge, Massachusetts  
CAROLYN HANSSON, University of Waterloo, Ontario, Canada  
MICHAEL JAFFE, Hoechst Celanese Research Division, Summit, New Jersey  
LIONEL C. KIMERLING, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge  
RICHARD S. MULLER, University of California, Berkeley  
ELSA REICHMANIS, AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey  
EDGAR A. STARKE, University of Virginia, Charlottesville  
KATHLEEN C. TAYLOR, General Motors Corporation, Warren, Michigan  
JAMES W. WAGNER, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland  
JOSEPH G. WIRTH, Raychem Corporation, Menlo Park, California

ROBERT E. SCHAFRIK, 局长

### 航空航天工程局

JOHN D. WARNER(主席), The Boeing Company, Seattle, Washington  
STEVEN AFTERGOOD, Federation of American Scientists, Washington, D.C.  
JOSEPH P. ALLEN, Space Industries International, Inc., Washington, D.C.  
GEORGE A. BEKEY, University of Southern California, Los Angeles  
GUION S. BLUFORD, JR., NYMA, Inc., Brook Park, Ohio  
RAYMOND S. COLLADAY, Marietta Astronautics, Denver, Colorado  
BARBARA C. CORN, B.C. Consulting, Inc., Searcy, Arkansas  
STEVEN M. DORFMAN, Hughes Telecommunications and Space Company, General  
Motors Hughes Electronics, Los Angeles, California  
DONALD C. FRASER, Boston University, Boston, Massachusetts  
DANIEL HASTINGS, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge  
WILLIAM HEISER, United States Air Force Academy, Colorado Springs, Colorado  
BERNARD L. KOFF, Pratt & Whitney, West Palm Beach, Florida  
DONALD J. KUTYNA, Loral Corporation, Colorado Springs, Colorado  
JOHN M. LOGSDON, George Washington University, Washington, D.C.  
FRANK E. MARBLE, California Institute of Technology, Pasadena  
C. JULIAN MAY, Tech/Ops International, Inc., Kennesaw, Georgia  
BRADEORD W. PARKINSON, Stanford University, Stanford, California  
GRACE M. ROBERTSON, Douglas Aircraft Company, Long Beach, California

JOANN C. CLAYTON, 专职委员

## 感 谢

本报告的建议和结论集中了委员会所联系的很多人员与机构的智慧,特别要感谢下列人员的工作,他们给委员会提供了详细的汇报材料: Douglas Cairns (经理, 先进复合材料技术部, Hercules)——创新的复合材料工艺(工艺/性能关系); Robert Crowe (国防科研办公室, 先进研究项目处)——机敏材料和结构; Robert Gog (技术代表, 汉莎航空公司)——飞机使用和维护; Gerald Janicki (先进材料和结构分部主任, 麦道公司运输机部)——新材料在亚音速飞机中的应用; Donald E. Larsen (先进技术分部, Howmet 公司)——用于民用飞机的无余量成型熔模铸造钛合金部件; J.A. Marceau (材料技术分部, 波音民用飞机部)——在役(老龄)机队的使用经验; S. G. Sampath (FAA 技术中心)——与在民用机队使用经验有关的老龄飞机问题; Brian W. Smith (计划主管, 材料技术分部, 波音民用飞机分部)——民用飞机用材料与工艺市场驱动的材料发展与工程需求; Darrel Tenney (材料分部, NASA Langley 研究中心)和 James Starnes (结构分部, NASA Langley 研究中心)——先进亚音速飞机提出的新材料和结构。

委员会衷心感谢联邦航空管理局(FAA)所给予的支持和鼓励,并对 Pramode Bhaghat, Peter Shyprykevich, Joseph Soderquist 和 Bill Wall 参加多次讨论会表示谢意。

委员会特别要感谢 Thomas Munns (国家材料咨询局的高级计划官员)和 Alam Angleman (航空航天工程局计划官员),他们自始至终参与了研究工作,并给予了人员支持,并感谢 Aide Neel 和 Jack Hughes 的大力帮助。



## 序 言

湍流通常是与飞行有关的术语,但近年来,似乎民航业在地面也遭遇到了严重的“湍流”。航空公司经受了各种无序因素的联合冲击,首先是持久全面的经济衰退,又继之以价格战;新航空公司挑起的强烈竞争;以及最近对短程通勤航班安全的担忧。所有这些都严重地影响着民航业的财政健康运行。事实上竞争已残酷到如此地步,以至一些著名的航空公司也不得不为生存而苦苦挣扎。这种情况对飞机制造商也产生了巨大的影响,使它们对今后的设计和制造发展,采取了务实而不图虚名的方针。

正是面对这一动荡不安的现实,先进民用飞机新材料专业委员会已代表 FAA 对下一代亚音速运输机中的新材料应用开展了研究。由于无法预计近期材料与结构的发展,试图观测今后 15 ~ 20 年内工业界的技术发展,从而完成这一如此复杂的任务是令人望而生畏的。但在广泛的争议探讨后,本委员会认为对技术发展的途径已经形成了初步的概念。而在这多事之秋,更难确定的是发展这些技术的时机。

通过生动活泼的激烈争辩和讨论,委员会的各种观点得到了充分的交流,这均衡地综合了来自工业界及学术界专家的意见,还有政府机构,特别是国家航空航天管理局(NASA)的经验。委员会还综合吸收了先进金属材料 and 有机基复合材料两方面资深专家的意见。委员会的专家建议覆盖了材料应用的各个领域,从材料创新到合金与复合材料的选择、制造、设计与加工,还涉及到使用经验、无损评定和维护。所听取的意见中还涉及了从小型公务机直至大型运输机所获得的经验。

在研究过程中,除了听取委员会成员的建议外,还组织了对材料研究、发展、制造和应用等一些技术关键的集中研讨,选择性地采纳了其中一些专家有价值的观点。通过这些研讨,飞机制造和维修专家、材料和部件供应商、工业界与政府部门的军机与民机研究负责人及材料和结构研究人员帮助完善了本报告的建议和结论,他们的见解大大丰富了本报告所提供的內容。

本项研究的目的,是要确定与引入新材料有关的工程问题,以及对下一代民用运输机的全寿命耐久性预期会产生的影响。委员会研究了在下一代民用运输机中可能采用的新材料和结构方案,以及可能影响应用决策的关键因素。基于这些预测,委员会确定和分析了为使用这些新材料与结构方案最必需的设计、表征、监控和维修项目。本项研究不涉及与高速民用运输机或涡轮发动机热端部件有关的内容,但包括了使用中可能发热的发动机附件(如推力反向机构),研究还考虑了与旋翼机有关的特殊问题。因此,本委员会的研究重点是要鉴别适用于大型亚音速运输飞机类的新材料与结构,当然这些研究成果也适用于有类似问题的通用航空器类。

通过研究,本委员会目前恪守的信念是,尽管民航业面临着“湍流”(可能会继续存在下去),本报告对适用于下一代民用运输机的先进材料和工艺技术的发展方向,确实提出了一些深入的见解,这将会有助于保持一支安全、有效并能生存的民用机队。

John A.S. Green (主席)

先进民用飞机新材料专业委员会

# 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 执行总结.....                          | 1  |
| 第一部分 引言.....                       | 5  |
| 第1章 要求和驱动力.....                    | 5  |
| 1.1 背景.....                        | 5  |
| 1.2 航空工业概况及重要发展趋势.....             | 6  |
| 1.3 下一代飞机.....                     | 7  |
| 1.4 新材料的应用.....                    | 7  |
| 1.4.1 驱动力和障碍.....                  | 7  |
| 1.4.2 计划的演变进展.....                 | 9  |
| 第二部分 材料、工艺和结构方案.....               | 11 |
| 第2章 结构方案.....                      | 14 |
| 2.1 革新结构方案.....                    | 14 |
| 2.1.1 无余量成型部件.....                 | 14 |
| 2.1.2 整体加筋及均布和正交格栅结构.....          | 15 |
| 2.1.3 革新夹层结构.....                  | 16 |
| 2.1.4 先进的连接方法.....                 | 17 |
| 2.1.5 混杂层压板方案.....                 | 19 |
| 2.1.6 机敏材料和结构.....                 | 19 |
| 2.2 先进的金属机身.....                   | 21 |
| 2.3 复合材料机翼.....                    | 22 |
| 2.4 复合材料机身.....                    | 22 |
| 2.5 总结.....                        | 25 |
| 第3章 金属材料与工艺.....                   | 26 |
| 3.1 铝合金.....                       | 26 |
| 3.1.1 提高强度和腐蚀抗力.....               | 26 |
| 3.1.2 提高寿命和损伤容限.....               | 26 |
| 3.1.3 低密度(铝锂)合金.....               | 27 |
| 3.1.4 新材料.....                     | 28 |
| 3.2 高强钢.....                       | 28 |
| 3.3 钛合金.....                       | 29 |
| 3.3.1 $\alpha$ 和近 $\alpha$ 合金..... | 30 |

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 3.3.2 | $\alpha/\beta$ 合金 ..... | 30 |
| 3.3.3 | $\beta$ 合金 .....        | 30 |
| 3.3.4 | 低成本合金 .....             | 31 |
| 3.4   | 金属基复合材料 .....           | 31 |
| 3.5   | 工艺发展趋势 .....            | 32 |
| 3.5.1 | 成型 .....                | 32 |
| 3.5.2 | 接近无余量锻造和铸造工艺 .....      | 33 |
| 3.5.3 | 锻造工艺 .....              | 33 |
| 3.5.4 | 铸造工艺 .....              | 33 |
| 3.5.5 | 低切削应力的零件高速切削 .....      | 35 |
| 3.5.6 | 超塑性成型和扩散连接 .....        | 35 |
| 3.6   | 总结 .....                | 36 |

## **第 4 章 聚合物复合材料和工艺 .....** 39

|       |                     |    |
|-------|---------------------|----|
| 4.1   | 复合材料的发展 .....       | 40 |
| 4.1.1 | 增韧热固性聚合物 .....      | 40 |
| 4.1.2 | 热塑性聚合物 .....        | 40 |
| 4.1.3 | 下一代体系 .....         | 41 |
| 4.2   | 工艺的趋势 .....         | 41 |
| 4.2.1 | 树脂传递模塑(RTM) .....   | 42 |
| 4.2.2 | 树脂膜渗透 .....         | 43 |
| 4.2.3 | 织物预成型 .....         | 44 |
| 4.2.4 | 膜片成型 .....          | 45 |
| 4.2.5 | 拉挤成型 .....          | 46 |
| 4.2.6 | 先进的热固性材料的丝束铺设 ..... | 48 |
| 4.2.7 | 热塑性材料的原地压实 .....    | 48 |
| 4.2.8 | 电子束固化 .....         | 48 |
| 4.3   | 总结 .....            | 49 |

## **第 5 章 适应环境的材料和工艺 .....** 50

|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 5.1   | 环境要求 .....            | 50 |
| 5.1.1 | 资源保护和回收条例(RCRA) ..... | 50 |
| 5.1.2 | 净化空气条例(CAA) .....     | 50 |
| 5.1.3 | 净化水条例(CWA) .....      | 50 |
| 5.1.4 | 有毒物质控制条例(TSCA) .....  | 50 |
| 5.2   | 工作区的健康和安全 .....       | 51 |
| 5.3   | 对飞机材料的影响 .....        | 51 |
| 5.4   | 总结 .....              | 52 |



|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 第三部分 分析方法.....              | 53        |
| <b>第 6 章 结构性能评估方法.....</b>  | <b>53</b> |
| 6.1 结构完整性的分析预测方法.....       | 53        |
| 6.1.1 金属结构.....             | 53        |
| 6.1.2 复合材料.....             | 55        |
| 6.1.3 胶接连接.....             | 57        |
| 6.2 先进的成本与结构优化方法.....       | 57        |
| 6.3 总结.....                 | 58        |
| 第四部分 飞机的使用.....             | 59        |
| <b>第 7 章 飞机的维护和修理.....</b>  | <b>60</b> |
| 7.1 航空公司的维修.....            | 60        |
| 7.1.1 结构的维修.....            | 60        |
| 7.1.2 结构件的维修.....           | 61        |
| 7.2 使用经验.....               | 61        |
| 7.2.1 停机坪和维修损伤.....         | 62        |
| 7.2.2 老龄飞机.....             | 63        |
| 7.3 总结.....                 | 68        |
| <b>第 8 章 无损评定(NDE).....</b> | <b>69</b> |
| 8.1 热学方法.....               | 70        |
| 8.2 声发射(AE).....            | 71        |
| 8.3 激光无损评定方法.....           | 71        |
| 8.4 其他无损评定方法.....           | 72        |
| 8.5 作为一种工程手段的无损评定.....      | 72        |
| 8.6 总结.....                 | 73        |
| 第五部分 结论和建议.....             | 75        |
| <b>第 9 章 委员会的发现.....</b>    | <b>75</b> |
| 9.1 结论.....                 | 75        |
| 9.2 机构的作用.....              | 76        |
| 9.3 建议.....                 | 77        |
| 9.3.1 材料、制造和结构方案.....       | 77        |
| 9.3.2 评定结构性能的方法.....        | 77        |
| 9.3.3 检测、维护和修理.....         | 78        |
| <b>参考文献.....</b>            | <b>79</b> |



|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>附录 A 委员会成员简历 .....</b>             | <b>87</b> |
| <b>附录 B ACT 计划综述 .....</b>            | <b>89</b> |
| B.1 引言 .....                          | 89        |
| B.2 ACT 计划的思路 .....                   | 89        |
| B.3 A 阶段: 选择的要点 .....                 | 90        |
| B.4 政府/工业界的联系 .....                   | 90        |
| B.5 ACT 指导委员会 .....                   | 91        |
| B.6 NASA/ACT 中心研究课题 .....             | 92        |
| B.7 财政年度总经费 .....                     | 93        |
| B.8 NASA/ACT 的纤维自动铺设研究课题的任务 .....     | 93        |
| B.8.1 基本型机身概念 .....                   | 94        |
| B.8.2 基本型四分之一机身上部大壁板 .....            | 95        |
| B.8.3 AFP 机身上部壁板的初步工艺试验件 .....        | 95        |
| B.9 NASA/ACT 关于 RTM 研究课题的任务 .....     | 95        |
| B.9.1 干预成型件的多针缝纫机 .....               | 96        |
| B.9.2 道格拉斯飞机公司的缝合/RTM 机翼壁板 .....      | 96        |
| B.10 NASA/ACT 编织预成型研究课题的任务 .....      | 97        |
| B.10.1 编织增强的复合材料构件 .....              | 97        |
| B.10.2 编织的 Y 型翼梁预成型件 .....            | 98        |
| B.11 ACT 计划重点课题的支持技术 .....            | 98        |
| B.12 采用综合技术制造的盒形梁试验验证载荷相互作用的重要性 ..... | 98        |
| B.13 成本数据库和成本模型的研究 .....              | 99        |
| B.14 技术基础计划——协调工业界和 NASA 的作用 .....    | 100       |
| B.15 总结 .....                         | 100       |

## 执行总结

飞机安全是所有乘坐飞机的人们最关心的事,并且也是飞机工业界的主要设计准则。虽然飞机工业界对出色的安全记录很满意,但旅客和民用运输机群数量的持续增长,仍要求事故率进一步降低,以达到 FAA 提出的,到本世纪末死亡事故减少 50% 的目标。

为了执行 1988 年关于航空安全性研究条例(P.L. 100-591), FAA 已经着手实施了涉及民用飞机安全性的全方位长期综合计划。FAA 计划的总目标是要预计可能影响未来飞机的技术进展,以及评定它们对飞机安全带来的影响。

为了实现高效减重结构的成本与性能效益,新飞机(在本报告中指将在今后 15 ~ 20 年内投入使用的飞机)将使用新的材料、制造工艺和结构方案。与飞机安全性有关的一个重要考虑是,当飞机使用超出了它们原来的设计寿命后,结构材料的退化,从而材料的稳定性、抗腐蚀性、疲劳行为和维修方法都被提到了优先考虑的地位。为了评估民用飞机所用新材料和结构,需要评定飞机在整个寿命期间,从制造直至维修的性能和使用成本。此外,还要彻底了解材料特性和在航线使用时预期的性能,以相应发展保证飞机使用寿命期内安全性的那些检测与维修方法。

本项研究的主要目的,是要确定与应用新材料和先进材料及其对未来飞机在它们使用寿命期间的耐久性和技术风险影响的有关问题。委员会研究了下一代民用飞机可能要用的新材料和结构方案,以及对决定是否使用有影响的因素。在这些预测的基础上,委员会试图确定出这样一些设计、表征、监控和维修项目,它们是将先进材料和结构方案用于下一代飞机的技术关键。这项研究着重于大型亚音速民用运输飞机的机体结构,所确定这些研究项目,很多也适用于小型通用航空器(固定翼和旋翼机)。本研究的重点,大部分只限于机体的主结构和次结构。

## 发现

目前,在将新材料和结构设计用于民用飞机方面已取得了重大的进展。飞机设计师一直在使用新材料和新结构方案,以便改善性能、耐久性、与环境条款的符合性,以及最近提出的降低采购和维修成本。委员会认为在下一代飞机上会进一步增加新材料和结构的应用。

目前影响民航业、制造商和材料工业的动荡不定的经济气候,已经使先进材料的应用准则发生了重大的变化,从而使飞机制造商对民航业降低总成本(包括采购和维修成本)的要求也正在做出反应。要求材料的变化方式是逐步改善——即渐进演化式而不是革命性的。新的高性能材料不能迅速增加应用的主要障碍是:采购、制造、取证和全寿命成本,对它们的破坏机理及其相互作用了解不深入,技术风险以及材料供应基地的现状。

预期在下一代民用飞机上使用量会增加的主要“新”机体材料包括:聚合物基复合材料(层压板、剪裁成型、编织和缝编三维构型、预浸带和丝束的自动铺设)和金属合金(高韧性和高屈服强度铝合金、铝锂合金、高强钛合金、高强钢以及铸件)。相反,委员会在强调技术的循序渐进和总成本时,认为金属基复合材料在下一代运输机体中的应用不会有明显的增加。

飞机机体制造商还越来越多地采用一体化的产品研制方法，它考虑了象可生产性、成本、无损评定(NDE)的方法与准则以及修理和维护这样一些因素，同时从研制计划一开始就要让航空公司的设计师、制造商和供应商介入。

民用飞机的建造和使用，是在全球的基础上，由世界各国的制造商、供应商和加工商共同进行的，因此在新材料和结构研制及其商业化中，编制并协调材料和工艺、试验和评定、无损评定(NDE)、修理及维护方法的国际标准是至关重要的。尽管在研制新飞机方面有了国际合作，民用运输机的制造和使用却仍然是竞争极为激烈的商业活动。委员会坚信，竞争的压力会继续影响着新材料与工艺的选用准则。

## 建议

技术的进步是通过航空公司、工业界、学术界和政府机构的共同努力取得的。在建议的形成过程中，委员会确定了在研制下一代飞机时可能使用的技术，并概述了为取得这些进展所需做的工作。这些建议面向与新材料应用有关的所有机构，而且特别指出了在所有这些发展中 FAA 应起的作用。

委员会建议，总的来说，FAA 应该参与技术发展过程所有各阶段的工作，特别是与飞机安全性、使用、维修和无损评定有关的工作。

## 材料、制造和结构方案

飞机结构件的改进将继续取决于选材、分析方法、结构方案和工艺创新等因素。随着对经济承受能力的越加重视，开发的新材料可能变得更少；另一方面，健壮而成本低廉的工艺方法和与环境条款的符合性将成为决定性的考虑因素，以进一步降低成本。具体地说，委员会展望，继续不断地改善金属合金与聚合物基复合材料的性能和耐久性今后的方向，那些易于采用低成本工艺方法的材料与结构将在今后得到重视，如金属的铸造、高速机加工和超塑成型/扩散连接，复合材料的纤维铺设、树脂转移模塑和非热压罐工艺等。

委员会建议，FAA 与工业界、政府和学术机构在发展新材料、工艺与结构技术方面的工作应遵循下述的指南：

跟踪那些会给飞机结构提供低成本制造方法的新材料加工技术，重点应放在理解新的制品形式、工艺方法和热处理，以及它们对材料性能可能带来的影响；

支持发展用于确定工艺参数和要求的新的工艺过程的建模技术；

建立和维护由候选工艺方法得到的材料与结构性能数据库，数据库应包括试验方法、物理和力学性能、失效模式以及可能存在的缺陷及制造工艺对性能行为的影响；

与材料界、制造界和民航业共同开发编制全行业的标准，来改进最终产品的一致性，特别是材料供应来源越来越全球化，这一问题更趋突出；

参与由工业界和 NASA 赞助的飞行硬件验证计划，这些计划旨在将新材料、制造工艺和结构方案用于高风险项目。FAA 的重点应是证明检测与修理技术的适用性，和研制验证与监控这些结构所需的技术。

## 评定结构性能的方法

虽然结构分析方法在过去 20 年里已取得了显著的进展，但目前航空工业界使用的飞



机结构设计和分析方法仍基本上是半经验的。通常可采用高精度的有限元分析来预测复杂形状结构中的应力、应变和位移场，然而，对结构工程师来说，可靠地预测失效模式、极限强度、剩余强度及疲劳寿命仍然是很难的。目前的标准做法仍然主要依赖包括试样、小元件、元件、组合件、部件及全尺寸结构件等的大量试验。常常要通过试验来实现对设计细节尺寸的优化。尺寸效应是通过积木式方法来处理的，这种方法依靠试验来证实在每一尺寸水平上预期的结构性能。委员会预计虽然这种积木式的结构设计方法将继续无限期地存在，但更精确的分析估算方法会大大加快新材料在飞机主结构中应用的进程。

委员会建议，FAA 与其他工业界、政府、学术机构在研究改进分析方法的工作中应遵循下列指南：

支持研究并加快使用用于预测剩余强度随时间变化的分析与计算方法；

支持能改进对材料与其结构基本破坏机理理解的研究计划，要包括在不同尺寸量级(从材料到结构)表现的各种失效模式的交互作用。

## 检测、维护和修理

新材料和结构方案的成功应用依赖于有效的维修计划，这一计划在保证乘客安全的同时也应是低成本的。老龄飞机的经验已经给民航业提供了大量检测和修理技术方面的重要教训。这些经验为下一代材料和结构提供了改进检测与修理工艺的框架。继续制约着飞机维修计划有效性的主要问题为：结构检测标准不完善、无法正确解释缺陷检测结果、检测技术不可靠、新的无损评定(NDE)方法过于昂贵，以及设计分析与无损评定结果之间缺乏联系。在发展和实施改进的维修与检测方法中，FAA 的领导作用和航空公司与制造商的自始至终参与是至关重要的。

委员会建议，FAA 在负责发展改进的维修与检测方法时应遵循下列指南：

支持编制和完善用于无损评定方法、所用具体材料和在结构中应用的标准，特别是要通过参与工业界与 NASA 赞助的、使用新材料、制造工艺和结构方案的结构件与飞行硬件验证计划来开展上述工作；

支持研究用于服役中飞机机体材料与结构检测的低成本、定量无损评定方法。重点是提高缺陷检测的可靠性、降低成本、以及便于外场使用的检测方法，应尤其重视研究难于接近或仅能从单侧接近的快速大面积检测方法；

发展更好的分析方法来确定无损评定的可靠性及材料与结构的可检性，以支持损伤容限和耐久性分析；

支持那些能使用由定量无损评定方法和计算分析得到的结果的、用于材料和结构实时修理与维护工艺的研究。

## 报告组织

委员会的发现分成五部分。第一部分给出了对新材料应用发展趋势、要求和动力的综述。接着这一综述的是分别对下列专题的讨论：材料、工艺和结构方案，分析方法和飞机使用。第 5 部分给出了具体的结论和建议，它们在委员会审议时取得了共识。

