



航空基础技术丛书

航空材料技术

MATERIALS TECHNOLOGY OF AERONAUTICS

北京航空材料研究院◎主编



航空工业出版社



航空基础技术丛书

航空材料技术

北京航空材料研究院 主编

航空工业出版社

内 容 提 要

材料是现代科学技术、经济社会发展和国家安全的重要支柱。“一代材料、一代飞机”是对航空装备与航空材料相互依存、相互促进发展的紧密关系的真实写照。我国航空材料科技工作者围绕航空工业先进装备的需求,开展了大量的先进航空材料应用基础和工程化研究,取得了可喜的研究成果,支撑了航空工业的技术进步。本书共分9章,从航空材料概论开始,分别介绍了高温结构材料技术、铝合金材料技术、钛合金材料技术、超高强度结构钢技术、透明材料与透明件制造技术、高温防护涂层材料技术、橡胶密封材料技术和先进航空材料检测技术等专业的基本情况及其发展。

图书在版编目(CIP)数据

航空材料技术 / 北京航空材料研究院主编. -- 北京:
航空工业出版社, 2013. 12
(航空基础技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 5165 - 0298 - 3

I. ①航… II. ①北… III. ①航空材料 IV. ①V25

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第276736号

航空材料技术 Hangkong Cailiao Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路2号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936555 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2013年12月第1版

2013年12月第1次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 32.25

字数: 822千字

印数: 1—4000

定价: 128.0元

《航空基础技术丛书》总审委会

主	任	林左鸣						
常务副主任		谭瑞松						
副	主	任	顾惠忠	吴献东	耿汝光	李玉海		
			张新国	高建设	李方勇	孙卫福		
成	员	关 桥	曹春晓	赵振业	李 明	刘大响		
		冯培德	陈祥宝	魏金钟	刘 林	周国强		
		王英杰	梁丽涛	杨胜群	曹英杰	戴圣龙		
		孙侠生	张 军	赵 波	夏裕彬	张振伟		
		张明习	谢富原					

《航空基础技术丛书》总编委会

主任 徐占斌
副主任 荣毅超 李晓红 吴世平 陈刚 刘鑫
成员 向明 梅方清 姚俊臣 周宁 史晋蕾
李小飞 徐明 吴晓峰 张力 李兴无
杨海 李志强 李周复 黄蓝 刘恩朋
轩立新 益小苏 段泽民

《航空基础技术丛书》编写办公室

主任 梅方清 姚俊臣
副主任 周宁 史晋蕾
成员 李小飞 郭晓月 熊昌友 郭倩旒 冯冰
李亚军 李少壮 杨素玲 胡律行 王湘念
陈玉 汪慧云 杨占才 李冬 张明
姚红

《航空基础技术丛书》总序

近年来，以一批先进重点型号为代表的我国航空武器装备取得了“井喷式”的发展，航空工业实现了与发达国家从“望尘莫及”到“望其项背”的历史性跨越。但我们也要清醒地看到，面对新航空装备下一轮“井喷式”发展的需要，我们面临着加强航空科技创新的迫切需求。

党的十八大报告指出，要实施创新驱动发展战略，坚持走中国特色自主创新道路，以全球视野谋划和推动创新。航空工业作为高科技战略性新兴产业，在加强自主创新和提升创新能力方面面临三个方面的挑战：一是传统的技术跟随式发展模式已经走到了尽头；二是长期积累的技术创新成果已充分应用，技术储备急需创新实践来大量补充；三是新航空装备跨越式发展对技术和管理创新提出更高要求。

要实施创新驱动的发展战略，首先要注重原始创新。加大现象发现和原理验证力度，探索未知技术领域，积极寻求原创性突破，形成一批引领未来发展，技术成熟度在1~3级的创新成果。更要注重技术创新。航空基础技术作为航空科技的重要组成部分，发挥着重要的支撑作用，支持和引领着航空科技的发展。在国家科技重大专项、重点型号攻关、新型飞机和发动机的研制中都起着强有力的保障与支撑作用，具有重要的战略意义。随着我国从跟踪研制向自主创新、从制造大国到制造强国的转变，作为科技前沿的航空基础技术必将从服务和保障的方式向技术引领方式转变，并向社会其他国民经济领域进行技术转移和输出，为全社会的技术进步和创新发展起到强有力的推动作用。

中国航空工业集团公司基础技术研究院作为航空工业基础技术的龙头，肩负着支撑、引领型号发展的双重任务，本着“航空报国，强军富民”的理念，践行“变革为先，创新为本”的精神，以知识产权战略为抓手，牵引原始创新，推动技术创新，加强管理创新，最终实现从“型号牵引”到“牵引型号”的转变。

航空基础技术的传承与传播，与航空基础技术的研究与探索同样重要。目前，我们急需有关论述基础技术等科技前沿技术的专著。因此，在中国航空工业集团公司倡导下，由中国航空工业集团公司基础技术研究院组织所属 12 家单位联合编写了一套大型基础技术专著《航空基础技术丛书》。《航空基础技术丛书》的编写，开创了航空工业各专业板块之先河，为航空工业知识积累、传承、宣传工作，为航空科学技术服务于社会开了一个好头。这种勤勉探索，对航空工业、对全社会负责的精神，值得大力提倡。

该丛书的编写，对梳理航空工业基础技术的发展脉络，宣传航空基础技术成就，引领未来航空基础技术发展方向将起到重要作用，对政府主管部门、航空工业用户、其他工业领域用户了解航空基础技术提供了一个良好的媒介，对广大航空爱好者、尤其是青年人了解航空、热爱航空起到了宣传作用，亦对社会输出相关技术、服务于我国科技进步做出了贡献。

中国航空工业集团公司董事长
党组书记



2013 年 8 月

《航空基础技术丛书》总前言

我国航空工业经过六十多年的发展，逐步形成了专业门类齐全，科研、试验、生产相配套，具备研制生产当代航空装备能力的高科技工业体系，发展了多类型多用途的飞机、直升机、发动机、导弹，研制出一批具有自主知识产权并与发达国家在役航空装备性能相当的航空器，大幅度缩小了与国外先进水平的差距，使我国跻身于能够研制先进的歼击机、歼击轰炸机、直升机、教练机、特种飞机等多种航空装备的少数几个国家之列，为我国国民经济建设、国防现代化建设、社会科技进步和综合国力的提升做出了重大贡献。

航空工业作为国家的战略性产业，决定了它的发展必须建立在牢固的基础之上。所谓跨越式发展，是长期扎扎实实、厚积薄发的结果。航空基础技术作为整个航空工业的根基，在整个航空工业的发展中起着举足轻重的作用。因此，认真梳理航空基础技术发展脉络，跟踪国际航空基础技术的发展趋势，不断创新我国航空基础技术，并为航空工业新产品研制做好技术储备，成为航空工业的一项重要任务。

为完成中国航空工业集团公司基础技术研究院“打牢基础、做强技术、支撑型号、创造财富”的使命，作为中国航空工业集团公司横向价值链的最前端，基础院承担着包括政府科研、装备预研等方面的研究任务，拥有12家科研院所和高科技企业、多个国家工程实验室和国防科技重点实验室以及航空科技重点实验室，为国防科技工业和航空科技实现长远的跨越式发展提供了技术保障，为我国航空工业又好又快发展贡献着力量。

为强化从知识创新、技术创新到成果产业化的有效传导机制，提升航空基础研究成果产业化运作能力，充分体现基础技术在基础保障、技术引领、服务支撑等方面的作用，中国航空工业集团公司基础技术研究院（简称基础院）组织编写了《航空基础技术丛书》，全面介绍了航空

基础技术的范围、内容、现状、发展趋势等，尤其对各种技术的工程化应用特点、新技术对航空装备的影响作了重点介绍，对产品设计者提高新产品设计性能，用户提升对新产品的信任起到了较大作用。通过总结经验、探索航空基础技术发展趋势，进一步构筑和完善了相关材料、制造、标准化、计量、强度、气动、测试、雷电防护等技术体系，从而夯实航空工业发展的根基，实现航空基础技术从“型号牵引”到“牵引型号”的转型升级。

《航空基础技术丛书》分为《航空标准化与通用技术》、《航空精密超精密制造技术》、《航空计量技术》、《航空材料技术》、《航空结构强度技术》、《航空制造技术》、《航空气动力技术》、《航空故障诊断与健康管理技术》、《航空测试技术》、《航空电磁窗技术》、《航空复合材料技术》、《航空器雷电防护技术》12个分册，分别由基础院所属中国航空综合技术研究所、北京航空精密机械研究所、北京长城计量测试技术研究所、北京航空材料研究院、中国飞机强度研究所、北京航空制造工程研究所、中国航空工业空气动力研究院、上海航空测控技术研究所、北京长城航空测控技术研究所、济南特种结构研究所、中国航空工业集团公司复合材料技术中心、合肥航太电物理技术有限公司等12家科研院所和高科技企业负责编写。主编单位汇集了各个相关专业的一线科研骨干承担编写工作，由各相关专业的院士、专家负责审稿，并由各单位总工程师担任各分册编委会主任，意在全面、准确地介绍各相关专业的现状、发展趋势及应用特点。

该丛书适合航空工业相关部门、航空工业所属企事业单位，总装、空军、海军等装备需求部门，航天、兵器、船舶、核、电子等军工相关部门管理人员及相关技术人员，以及相关院校的师生等阅读。

由于航空基础技术涵盖范围甚广，相关科学技术发展很快，不足之处，还望广大读者批评指正。

中国航空工业集团公司副总经理

徐占斌

2013年8月

《航空材料技术》审委会

主 任 戴圣龙
副 主 任 王亚军
成 员 陈祥宝 李兴无 吴学仁 陆 峰 李宏运
张国庆 陶春虎 赵希宏 郭 灵

《航空材料技术》编委会

主 任 益小苏
副 主 任 阮中慈
成 员 曹春晓 丁鹤雁 李嘉荣 栗付平 张庆玲
 唐见茂 曹腊梅 熊继春 张 坤 熊艳才
 金建军 何利民 梁 菁 杨春晟 刘昌奎
 黄新跃 厉 蕾 吴松华 王 珍 朱知寿
编写办公室 杨素玲

《航空材料技术》前言

材料是现代科学技术、经济社会发展和国家安全的重要支柱，而航空装备的每一代进步，结构重量系数的降低和寿命的延长，发动机推重比量级的每一次提高，无不强烈地依赖于航空材料技术的进步，因为飞机和发动机高速高温的严酷使用条件，长寿命和高可靠性等特殊性能指标，均把对材料的技术要求推到了极限，并引领着尖端结构材料技术的发展，因此“一代材料，一代飞机”就是对航空装备与航空材料的相互依存、相互促进的紧密关系的真实写照，因此世界各先进国家都把材料技术、特别是航空材料的研究与发展列入到国家的关键技术研究开发计划。

回顾中国航空工业的发展历程，我国航空材料经历了从跟踪仿制、改进改型到自主创新的不同发展阶段。我国航空材料科技工作者围绕航空工业先进装备的需求，开展了大量的先进航空材料应用基础和工程化研究，取得了可喜的研究成果，支撑了航空工业的技术进步。

《航空材料技术》的编写是由北京航空材料研究院组织、集体撰写完成的，全书共分9章，唐见茂提供了全书的初稿，在此基础上，益小苏完成第1章概论，曹腊梅和熊继春等完成第2章高温结构材料技术，张坤完成第3章铝合金材料技术，朱知寿完成第4章钛合金材料技术，金建军完成第5章超高强度结构钢技术，厉蕾完成第6章透明材料与透明件制造技术，何利民完成第7章高温防护涂层材料技术，吴松华和王珍完成第8章橡胶密封材料技术，梁菁、杨春晟、刘昌奎和黄新跃等完成第9章先进航空材料检测技术等撰写。阮中慈对全书做了初步的校阅。特别说明，复合材料是航空材料的主要组成部分，但根据丛书的整体规划，本书未包括航空复合材料技术，《航空复合材料技术》单独成册。另外，航空材料的热加工技术未独立成章，而是分散出现在各章节

了介绍。

全书成稿得到了中航工业基础院科技部和中航出版传媒有限责任公司的大力支持和指导，在此表示诚挚的感谢；也感谢本书编委会和审委会组织的数次评审，感谢中航出版传媒有限责任公司对本书编辑的辛勤劳作！在此特别感谢相关的专家作者在繁重的科研工作的同时，挤出时间参与有关章节的编写，没有他们的理解、支持和奉献，本书的成稿是根本不可能的。

《航空材料技术》编写成科普与工程应用相结合的读物，难度确实很大。编者尽管作了很大努力，但在内容取舍、深入浅出以及通俗性、趣味性等方面难免有不尽人意之处，希望读者予以指正。

《航空材料技术》编委会

2013年5月

目 录

第1章 概论	(1)
1.1 材料技术在航空装备中的地位与重要性	(1)
1.2 一代材料、一代航空装备的发展历程	(3)
1.3 航空材料技术体系与主要航空材料简介	(6)
1.3.1 航空材料技术体系	(6)
1.3.2 主要航空材料简介	(7)
1.4 航空技术发展对材料技术的牵引作用	(24)
1.4.1 飞机性能的提高对材料发展和演变的促进	(24)
1.4.2 飞机设计思想演变对选材的影响及材料性能的要求	(25)
1.4.3 发动机结构的演进及对材料的挑战	(26)
1.4.4 高性能钛合金及其复合材料的发展目标与重点	(27)
1.4.5 超高温结构材料的发展目标	(27)
1.4.6 高温聚合物基复合材料的发展目标	(28)
1.5 航空材料发展趋势	(28)
1.5.1 高性能化	(28)
1.5.2 新兴技术大量引入	(28)
1.5.3 功能材料全面加速	(29)
1.5.4 传统材料继续担纲	(29)
1.5.5 低成本和可维修性成为趋势	(30)
1.5.6 环境友好技术	(30)
1.5.7 数字化模拟技术与材料基因组技术	(31)
1.6 结语	(32)
第2章 高温结构材料技术	(33)
2.1 概述	(33)
2.1.1 高温结构材料的特点与作用	(33)
2.1.2 先进高温结构材料的现状与发展	(33)
2.2 变形高温合金材料技术	(36)
2.2.1 概述	(36)
2.2.2 变形高温合金成分设计及优化	(39)
2.2.3 合金冶炼技术	(43)
2.2.4 变形加工及热处理	(48)
2.2.5 变形高温合金组织性能表征	(57)
2.2.6 变形高温合金复合材料	(60)
2.2.7 典型变形高温合金应用介绍	(61)

2.2.8	变形高温合金发展前景	(63)
2.3	铸造高温合金材料技术	(64)
2.3.1	概述	(64)
2.3.2	等轴晶铸造高温合金材料技术	(65)
2.3.3	定向凝固柱晶高温合金材料技术	(69)
2.3.4	单晶高温合金材料技术	(74)
2.3.5	金属间化合物基高温结构材料技术	(85)
2.3.6	熔融生长陶瓷超高温结构材料技术	(94)
2.3.7	先进高温结构材料精密铸造技术	(99)
2.4	粉末高温合金	(107)
2.4.1	粉末高温合金特点	(107)
2.4.2	粉末高温合金的研究与发展	(108)
2.4.3	粉末高温合金制造技术	(113)
2.4.4	粉末高温合金的组织与性能	(125)
2.4.5	粉末高温合金未来发展	(128)
第3章	铝合金材料技术	(132)
3.1	概述	(132)
3.1.1	铝合金分类	(133)
3.1.2	变形铝合金发展历程	(134)
3.1.3	铸造铝合金发展现状	(136)
3.2	2×××系变形铝合金	(137)
3.2.1	2×××系典型合金及其特性分析	(138)
3.2.2	应用情况	(139)
3.2.3	综合评估	(140)
3.3	7×××系变形铝合金	(140)
3.3.1	7×××系典型合金及其特性分析	(141)
3.3.2	应用情况	(142)
3.3.3	综合评估	(143)
3.4	6×××系变形铝合金	(144)
3.4.1	主要6×××系合金的技术特性	(144)
3.4.2	国内外主要6×××系铝合金的应用情况分析	(145)
3.4.3	综合评估	(145)
3.5	铝锂合金	(146)
3.5.1	发展概况	(146)
3.5.2	技术特性分析	(147)
3.5.3	应用情况	(148)
3.5.4	综合评估及发展趋势预测	(150)
3.6	铸造铝合金	(150)
3.6.1	概述	(150)

3.6.2	铸造铝合金的命名原则	(150)
3.6.3	铸造铝合金的性能特点	(151)
3.6.4	主要铸造铝合金的技术特性	(153)
3.6.5	应用情况分析	(154)
3.7	先进制造技术	(156)
3.7.1	大型铝合金结构件高效数控加工技术的发展	(157)
3.7.2	先进低成本/整体化制造技术	(159)
3.7.3	其他先进制造技术	(166)
3.8	铝合金加工技术	(170)
3.8.1	铝合金加工技术的发展现状	(170)
3.8.2	铝合金加工装备的发展现状	(173)
3.8.3	我国铝合金加工技术水平、装备与世界先进水平间的主要差距	(175)
3.8.4	铝加工技术和装备的发展方向与对策	(176)
第4章	钛合金材料技术	(178)
4.1	概述	(178)
4.1.1	钛合金的性能特点及应用	(178)
4.1.2	航空用钛合金的发展概况	(180)
4.2	航空钛合金类型及合金化特点	(185)
4.2.1	航空钛合金类型	(185)
4.2.2	航空钛合金合金化特点	(187)
4.3	航空结构钛合金	(188)
4.3.1	低强度高塑性钛合金	(188)
4.3.2	中强度钛合金	(190)
4.3.3	高强度钛合金	(193)
4.3.4	超高强度钛合金	(196)
4.3.5	高性能损伤容限型钛合金	(198)
4.3.6	特种功能钛合金	(200)
4.4	航空高温钛合金	(204)
4.4.1	600℃高温钛合金	(205)
4.4.2	阻燃钛合金	(208)
4.4.3	Ti-Al金属间化合物	(210)
4.4.4	钛基复合材料	(214)
4.5	铸造钛合金	(218)
4.5.1	国外高强度铸造钛合金的研究	(219)
4.5.2	钛合金的铸造	(219)
4.5.3	高强度钛合金在铸件中的应用	(220)
4.5.4	高强度铸造钛合金的发展趋势	(221)
4.6	航空钛合金材料技术的发展与应用	(221)

第5章 超高强度结构钢技术	(223)
5.1 概述	(223)
5.2 航空用(超)高强度结构钢合金体系与创新研究	(225)
5.2.1 航空用(超)高强度结构钢分类	(225)
5.2.2 我国航空高强度结构钢创新研究	(228)
5.2.3 需要强化轴承齿轮钢技术研究与应用	(229)
5.3 40CrNi2SiMoVA (300M) 钢长寿命起落架与两个“全过程”	(230)
5.3.1 合金研制的全过程	(231)
5.3.2 应用研究的全过程	(233)
5.3.3 两个“全过程”研究与材料研究四要素之间的关系	(233)
5.4 高强度结构钢与不锈钢的热处理及力学性能	(235)
5.4.1 低合金超高强度钢的热处理与力学性能	(235)
5.4.2 高合金超高强度钢的热处理与力学性能	(236)
5.4.3 高强度不锈钢的热处理与力学性能	(238)
5.5 (超)高强度结构钢与不锈钢在航空上的应用与发展	(239)
5.5.1 (超)高强度结构钢在飞机上的应用	(239)
5.5.2 不锈钢在飞机和发动机上的应用	(242)
5.5.3 轴承齿轮钢在飞机和发动机上的应用	(243)
5.6 发展与展望	(245)
5.6.1 发展目标	(245)
5.6.2 航空超高强度钢的未来学科前沿	(246)
第6章 透明材料与透明件制造技术	(250)
6.1 概述	(250)
6.2 透明材料	(251)
6.2.1 航空有机玻璃	(251)
6.2.2 透明聚碳酸酯	(269)
6.2.3 航空硅酸盐玻璃	(271)
6.2.4 层合透明材料	(279)
6.2.5 透明中间层材料	(284)
6.2.6 边缘连接材料	(285)
6.3 透明件技术	(289)
6.3.1 航空透明件结构与功能演变历程和发展趋势	(289)
6.3.2 航空透明件制造技术的发展	(293)
6.3.3 座舱透明件成形技术	(296)
6.3.4 座舱透明件镀膜技术	(302)
6.3.5 座舱透明件加工和抛光技术	(310)
第7章 高温防护涂层材料技术	(315)
7.1 概述	(315)
7.1.1 高温防护涂层的历史发展	(315)