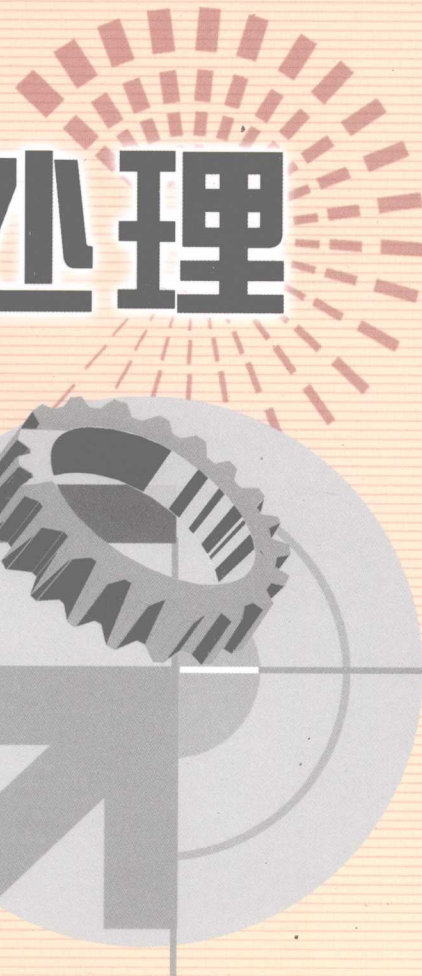


国家“十一五”应用型人才培养规划教材

航空材料 及热处理

A decorative graphic on the right side of the cover. It features a grey gear with a large grey arrow pointing upwards and to the right, superimposed on a light grey circle. Above the gear is a stylized sunburst or rising sun motif composed of red and orange rectangular segments.

HANGKONGCAILIAOJIRECHULI

刘劲松 蒲玉兴 主编

 国防工业出版社
National Defense Industry Press

V25
193
12

国家“十一五”应用型人才培养规划教材

航空材料及热处理

刘劲松 蒲玉兴 主编



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

全书共分3篇。第一篇:材料科学基础理论,讲述了材料科学基础理论,材料的性能,材料的结构与结晶,材料的变形,铁碳合金及其相图。第二篇:热处理理论与实践,讲述了热处理原理,热处理工艺,热处理设备与基本操作实例。第三篇:常用航空工程材料,讲述了金属结构材料,高分子材料,陶瓷材料,复合材料,航空油料,航空材料腐蚀与防护,典型航空机械零件选材及工艺分析。

本书适合作为职业技术学院的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空材料及热处理 / 刘劲松, 蒲玉兴主编. —北京:
国防工业出版社, 2008. 7

国家“十一五”应用型人才培养规划教材

ISBN 978-7-118-05758-4

I. 航... II. ①刘... ②蒲... III. ①航空材料-高等学校-
教材 ②航空材料-热处理-高等学校-教材 IV.

V25 V261.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 074594 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20 字数 459 千字

2008年7月第1版第1次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

在现代材料科学与技术的发展历程中,航空材料一直扮演着先导和基础作用。机体材料的进步不仅推动飞行器本身的发展,而且带动了地面交通工具及空间飞行器的进步,发动机材料的发展则推动动力产业和能源行业的推陈出新。航空材料反映结构材料发展的前沿,航空材料代表了一个国家结构材料技术的最高水平。

《航空材料及热处理》是特色专业如飞机机载设备修理、飞机及发动机维修等专业的必修课程。由于科学技术的迅猛发展,新材料层出不穷,传统的航空金属材料的应用领域正逐步被一些先进的非金属材料所替代,已经由过去的金属材料占绝对优势发展到现在金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料的多角利用时代。因此,在保证基础知识和基本理论的前提下,本教材对陈旧的课程结构体系进行了整体优化改造,以素质教育为基础,能力培养为主线,在研究总结国内外航空材料的发展趋势和规律的基础上重新构建科学、合理、规范的航空材料课程体系,即以航空材料的选择为出发点,以“航空材料的力学性能”、“航空材料的晶体结构与性能控制”、“航空零件的热处理”为纲领,有机整合所涉及的各种航空材料和多学科知识的复杂内容,并结合多年的教学实践经验及对课程改革的探索编写而成。该教材突出了实用性和综合性,注重对学生基本技能的训练和综合能力的培养。

本书可作为飞机维修、机载设备修理、航空发动机维修等专业的本科、专科教材,也可作为航空制造与维修企业的上岗培训教材,还可供从事飞机设计、制造、修理等工作的工程技术人员参考。

本书由刘劲松、蒲玉兴主编,龙皓、肖弦任副主编。参加编写的主要人员有空军航空维修技术学院刘劲松(编写绪论、第5章、第9章、第13章、第15章),湖南大学蒲玉兴(编写第4章、第10章、第12章),长沙航空职业技术学院龙皓(编写第2章、第3章)、肖弦(编写第11章、第14章)、刘晓衡(编写第6章、第7章)、许文斌(编写第8章)、陈儒军(编写第1章)。全书由陈勇审稿,刘劲松负责总纂定稿。

本书在编写过程中得到了空军航空维修技术学院的领导和同行们的大力支持和帮助,对本书的修改提出了许多宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢!

由于我们水平有限,编写时间紧迫,书中难免存在不妥之处,恳请各兄弟院校师生和读者批评指正。

编 者

2007年9月

目 录

绪论	1
阅读·思考·拓展	8

第一篇 材料科学基础理论

第1章 材料的制备与加工	11
1.1 材料的制备	11
1.1.1 金属材料的制备	11
1.1.2 陶瓷的制备	15
1.1.3 高分子材料的制备	16
1.2 材料的加工	17
1.2.1 常用材料的加工工艺方法	18
1.2.2 零件的工艺路线	22
习题	24
阅读·思考·拓展	24
第2章 材料的性能	28
2.1 力学性能	28
2.1.1 强度	29
2.1.2 塑性	31
2.1.3 硬度	32
2.1.4 韧性	36
2.1.5 疲劳强度	38
2.1.6 高温力学性能	39
2.2 材料理化性能	41
2.2.1 金属的理化性能	41
2.2.2 高分子材料的理化性能	44
2.2.3 陶瓷的理化性能	45
2.3 材料工艺性能	46
习题	47
阅读·思考·拓展	47

第3章 材料的结构与结晶	50
3.1 概述	50
3.2 纯金属的晶体结构与结晶	52
3.2.1 纯金属的晶体结构	52
3.2.2 纯金属的结晶	56
3.2.3 同素异构转变	58
3.3 合金的结构与结晶	59
3.3.1 合金的结构	59
3.3.2 合金的结晶	61
3.4 非金属材料的结构	64
习题	66
阅读·思考·拓展	66
第4章 材料的变形	69
4.1 金属的塑性变形	69
4.1.1 塑性变形的基本规律	69
4.1.2 塑性变形对金属组织结构的影响	71
4.1.3 塑性变形对金属性能的影响	71
4.1.4 回复与再结晶	72
4.1.5 金属的热加工与冷加工	74
4.2 高分子材料的变形	75
4.3 陶瓷材料的变形	78
习题	80
阅读·思考·拓展	80
第5章 铁碳合金及其相图	84
5.1 铁碳合金的基本组织	84
5.2 铁碳合金相图	87
5.2.1 铁碳合金相图分析	87
5.2.2 铁碳合金相图应用	93
5.3 铁碳合金简介	94
5.3.1 碳素钢	94
5.3.2 铸铁	99
习题	108
阅读·思考·拓展	109

第二篇 热处理理论与实践

第6章 热处理原理	114
------------------	-----

6.1 钢在加热时的转变	115
6.2 钢在冷却时的转变	118
习题	123
阅读·思考·拓展	124
第7章 热处理工艺	128
7.1 退火与正火	128
7.2 淬火	131
7.3 钢的回火	136
7.4 表面热处理	139
7.4.1 表面淬火	140
7.4.2 化学热处理	141
7.5 热处理新工艺简介	146
习题	149
阅读·思考·拓展	150
第8章 热处理设备与基本操作实例	154
8.1 热处理设备	154
8.1.1 加热设备	154
8.1.2 冷却设备	156
8.1.3 测温设备	156
8.2 热处理基本操作与实例	158
8.2.1 退火与正火操作	158
8.2.2 淬火和回火的操作	162
习题	168
阅读·思考·拓展	169

第三篇 常用航空工程材料

第9章 金属结构材料	173
9.1 合金结构钢	173
9.1.1 概述	173
9.1.2 普通低合金结构钢(普低钢)	177
9.1.3 合金渗碳钢	178
9.1.4 合金调质钢	180
9.1.5 合金弹簧钢	181
9.1.6 滚动轴承钢	183
9.1.7 超高强度钢	184
9.2 不锈钢	186

9.3	耐热钢	189
9.4	高温合金	191
9.5	铝合金	193
9.5.1	纯铝	194
9.5.2	铝合金	194
9.6	镁合金	202
9.6.1	纯镁	202
9.6.2	镁合金	202
9.7	钛合金	204
9.7.1	纯钛	204
9.7.2	钛合金	204
	习题	206
	阅读·思考·拓展	206
第 10 章	高分子材料	209
10.1	工程塑料	209
10.1.1	塑料的组成	210
10.1.2	塑料的分类	210
10.1.3	塑料的性能特征	211
10.1.4	常用工程塑料	211
10.2	合成纤维	216
10.2.1	合成纤维的生产方法	217
10.2.2	常用合成纤维	217
10.3	合成橡胶	220
10.3.1	橡胶的分类	220
10.3.2	橡胶制品的特性和组成	221
10.3.3	常用合成橡胶	222
10.4	胶黏剂	223
10.5	涂料	224
	习题	226
	阅读·思考·拓展	226
第 11 章	陶瓷材料	230
11.1	概述	230
11.2	普通陶瓷(传统陶瓷)	232
11.2.1	普通日用陶瓷	233
11.2.2	普通工业陶瓷	233
11.3	特种陶瓷(现代陶瓷)	233
11.3.1	特种结构陶瓷	233

11.3.2 功能陶瓷	235
习题	236
阅读·思考·拓展	236
第12章 复合材料	240
12.1 概述	240
12.2 复合材料的增强机制与复合原则	243
12.2.1 纤维增强复合材料的增强机制和复合原则	243
12.2.2 颗粒复合材料的增强机制和复合原则	243
12.3 常用复合材料	244
12.3.1 聚合物基复合材料	244
12.3.2 陶瓷基复合材料	247
12.3.3 碳基复合材料	248
12.3.4 金属基复合材料	248
习题	249
阅读·思考·拓展	249
第13章 航空油料	253
13.1 石油的简介	253
13.2 航空燃料油	255
13.2.1 概述	256
13.2.2 常用航空燃料油	257
13.3 航空润滑油	261
13.3.1 概述	261
13.3.2 常用航空润滑油	262
13.3.3 航空机件、仪表润滑油	263
13.4 航空润滑脂	264
13.5 航空用特种液体	266
13.5.1 航空液压油	266
13.5.2 防冰液	269
习题	269
阅读·思考·拓展	270
第14章 航空材料腐蚀与防护	271
14.1 概述	271
14.1.1 金属的腐蚀	271
14.1.2 金属的防腐方法	273
14.2 飞机的使用环境及破坏特征	275
14.2.1 飞机使用环境的特点	275
14.2.2 飞机主要部位的腐蚀特性	276

14.3 常用航空材料的防护.....	278
14.4 飞机的热环境影响及防护.....	286
习题.....	288
阅读·思考·拓展.....	288
第 15 章 典型航空机械零件选材及工艺分析	290
15.1 概述	290
15.1.1 选材的原则.....	290
15.1.2 热处理工艺的应用	294
15.2 飞机用材及其热处理.....	297
15.3 典型飞机零件选材与工艺分析.....	302
习题.....	307
阅读·思考·拓展.....	308
参考文献.....	310

绪 论

航空材料泛指用于制造航空飞行器的材料。军用飞机包括机体、发动机、机载电子和火力控制四大部分,而民用客机包括机体、发动机、机载电子和机舱四大部分。机体材料和发动机材料是航空材料中最重要的结构材料,电子信息材料则是航空机载装置中最重要的功能性材料,但一般不直接算作航空材料。飞行器作为一个整体,还用到少量非结构性材料,如阻尼、减振、降噪、密封材料等。

航空材料反映结构材料发展的前沿,航空材料代表了一个国家结构材料技术的最高水平。“一代材料,一代飞行器”是航空工业发展的生动写照,也是航空材料带动相关领域发展的真实描述。航空材料技术是材料科学领域中富有创造性和开拓性的一个重要分支,是航空工业关键技术之一,也是航空现代化和科技发展的物质基础和先导。

1. 航空材料的特点

航空产品系统庞大复杂,使用条件恶劣多变,高科技密集、品种多、批量小,要求长寿命、高可靠性。出于航空飞行及其安全性的考虑,航空材料具有一系列特点。

(1) 种类、品种、规格多。航空材料按用途分有结构材料、功能材料及工艺与辅助材料三大类;按化学成分分有金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料以及各种复合材料。各类材料又涉及众多的牌号、品种与规格。

(2) 高的比强度(σ_b/ρ)和高的比刚度(E/ρ)是航空结构材料的重要特点。减轻结构质量既可增加飞机、直升机的运载能力,提高机动性,加大航程,又可减少燃油消耗。因此,高强度铝合金、钛合金以及先进复合材料在航空上得到广泛的应用。

(3) 抗疲劳性能是航空材料的另一个突出特点,航空材料的抗疲劳性能是关系到航空产品使用可靠性和使用寿命的一项非常重要的性能指标。大量的事实说明,在飞机、发动机所发生的失效事件中,约80%以上是各种形式的疲劳损伤所引起。

(4) 质量要求高。由于飞机、直升机是一种载人反复运行的产品,在规定的使用寿命期内,对使用可靠性、安全性有着极其严格的要求,因此对航空材料要进行严格的质量控制。

(5) 高温合金是航空材料极其重要的组成部分。燃气涡轮(包括涡轮喷气、涡轮风扇、涡轮螺旋桨、涡轮轴)发动机是现代飞机、直升机的主要动力装置。随着发动机推重比(或功重比)的提高,涡轮前温度也随之升高,对材料的耐温要求也越来越高,各类高温合金则是制造现代航空燃气涡轮发动机的关键材料。

(6) 成本高、价格贵。由于航空产品品种多样而批量小,相应地航空材料的牌号品种也多,批量也小,难以形成规模化生产,同时质量要求又高,从而导致材料的成本高、价格贵。材料费用在航空产品成本中占有很大比重,如何降低其价格是航空材料发展的一个重要努力方向。

2. 航空材料的发展历史

莱特兄弟 100 年前用一些天然材料及工艺创造出第一架飞机。这架飞机的骨架用的是木材,蒙皮用的是浸树脂的棉布。棉布提供强度和刚性,树脂对棉布纤维起支持作用。

20 世纪 30 年代末期,由于战略材料主要是铝材的短缺,出现了以木质复合板制造机身及蒙皮的飞机,即著名的“蚊式”飞机,该机有“木材奇迹”之称,首次试飞时使英国战时内阁成员惊奇不已,据称其性能胜过当时所有的战斗机。今天,一些 20 世纪三四十年代的老飞机仍保留着上有涂料的棉布,DC-3 就是一个典型的例子,该机的平尾采用了树脂浸渍的棉布。

1910 年~1925 年间,飞机上用的木材骨架逐渐被钢管代替,采用铝铜合金蒙皮制造的单翼机 1912 年在德国升空,此后密度低而强度高的铝锂合金一直是重点的开发对象,但铝与锂的熔点及密度相差 4 倍以上,为熔炼及加工带来很大困难。

20 世纪 50 年代,钛合金开始广泛应用于发动机,曾出现“全钛压气机”,至今仍是发动机压气机的主要材料。在 600℃ 工作的钛合金是各国争先研制的目标,但这种合金的工艺性能不好,焊后需热处理,因此这类合金品种虽然很多,但实际应用受限。尽管如此,钛合金仍广泛用于飞机强度要求高的部位,在 F/A-22 上的结构质量百分比已攀升到 41%,是第 4 代战斗机中用得最多的材料。

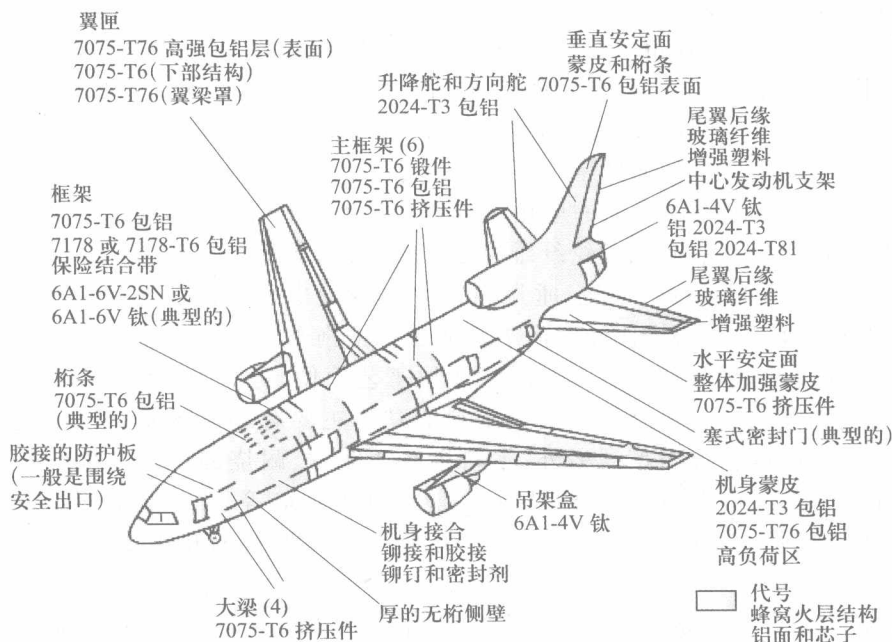
早期的涡轮发动机中,主要材料是耐热钢。英国人在 1940 年开发的铌镍系合金开创了现代高温合金的新纪元,真空熔炼、定向凝固以及单晶铸造的引入使发动机涡轮进口温度从 1940 年的 700℃ 增加到 2000 年的 1650℃,发动机的寿命也由 25h 上升到 10000h。

先进复合材料是 20 世纪后半期出现的重要发明之一,其作用可与晶体管、芯片和激光等技术创新相媲美。相对于早期的玻璃钢而言,先进复合材料是在性能上接近或优于铝合金的树脂基复合材料。所谓先进复合材料,是指以树脂为基,以有机纤维、碳纤维或玻璃纤维为增强剂的复合体,具有高比强度、比刚度、消振好的一类材料。先进复合材料的出现开辟了航空材料由天然材料、合成材料转向人工设计工程材料的新时代,特别是碳纤维研制成功后,树脂基复合材料的应用迅速扩大,广泛用于各种飞行器,素有“黑色革命”之称(因碳纤维是黑色物质)。20 世纪 70 年代的 B-2 轰炸机,其机身的大部分和机翼的绝大部分均采用碳纤维增强的复合材料。例如,美国的 F22 机中先进复合材料用量占 24%,现代民机占 14% 左右,现代直升机所占比例更高,有的超过了 50%。长期被铝合金独占的大型民机上也从波音 707 的 2%,攀升到波音 777 的 10%,空中客车系列更胜一筹,已达到 15%。在蓬勃发展的各种类型无人机上,碳纤维材料潜在的用途更不可低估。先进的复合材料还应包括金属基复合材料及陶瓷基复合材料,但目前在航空工业用量极少。

3. 航空材料的应用现状

航空材料用材很广泛,各种金属、工程塑料、橡胶、陶瓷材料,几乎应有尽有。L1011 三星式飞机的主要材料和设计特点如图所示。

在为飞机部件选择材料时,设计师要时时考虑“权衡”,也就是要选择质量最轻,而强度也要满足一定要求,此外还要考虑预算的问题。例如,历史上机身几乎无一例外的由铝



LI011 三星式飞机的主要材料和设计特点

制成,用钢加固关键部位,如发动机衬里和起落架。自从喷气发动机使用以来,钛用于抵御机身的高温。钛之后是更高级的复合材料,通常是碳、硼纤维及环氧化合物。这种复合材料非常轻,可以在某特定方向上增加强度,今天的飞机就是使用这种化合物,而且还在随着新材料的诞生而不断发展。

以铝合金、钢、钛合金为的金属材料,由于具有优良的力学性能、工艺性能和较低成本,在航空应用中占有重要地位,用做航空领域的主体材料、结构材料等。应用最广的“飞行”金属——铝合金,在 21 世纪继续占有重要位置。在民机上的结构质量比仍可达到 60% 左右,欧洲坚持发展 M2 的超声速运输机也正是看好铝合金的独特优势。铝合金进一步的发展途径在于工艺上的创新。近年开发的搅动摩擦焊及激光焊将用在一些飞机结构上,比铆接减重 60%。例如,新出现的 C80A 合金,不仅改进了 A380 的后机翼大梁的强度,而且降低了质量。目前已开发出三代铝锂合金,分别在米格型飞机、“阵风”和 EF2000 等飞机上应用。俄罗斯首创的加钪细化来提高铝锂合金的方法得到了各方的公认,可使飞机减重 5% ~ 10%,疲劳性能与钛相当,而成本只是钛的 1/4。近年来,欧美用非晶铝的方法来提高铝合金的强度又重新受到关注。研究表明:非晶铝有可能在 200℃ ~ 300℃ 工作,其潜在用途在于可代替钛合金及高温有机复合材料,例如:可用做 F/A-22 后机身上壁板、蒙皮、垂尾等,在 F119 上用做风扇匣、静子叶片等。

钛合金今后的发展方向将主要围绕合金的精密铸造、电子束焊以及超塑成形、扩散连接等新工艺,目标是降低制造成本。新型钛合金的开发将向其金属间化合物型合金延伸,主要是以钛铝及钛铝钼合金为重点,其潜在工作温度可达到 900℃,不过目前技术仍不成熟,障碍是室温塑性不好,难加工。

纤维增强金属基复合材料,如铝合金基、钛合金基、镁合金基及镍铝化合物基等,由于其优异的高比强度和比模量及抗氧化和抗腐蚀性能优良,成为一种理想的航空、宇航材料,主要用于飞机齿轮箱壳体、飞机蒙皮、直升机旋翼桨叶、重返大气层运载工具的防护罩、涡轮发动机的压气机叶片、航空发动机叶片,如风扇叶片等和飞机或航空器蒙皮的大型壁板,以及一些长梁和加强筋等。

高分子材料在航空航天上的应用主要以复合材料的形式出现,主要有玻璃纤维增强塑料、碳纤维增强塑料、芳纶纤维增强塑料、混合纤维增强塑料被大量作为结构件使用,例如雷达罩、副翼、平尾、垂尾、机翼、机身壁板等。特别是芳纶纤维增强塑料被称为宇航级复合材料,比强度优于其他纤维增强塑料,比刚度优于铝合金,线膨胀系数小,介电性能和耐腐蚀性能优良,成形工艺简便,可在 180°C 以下温度长期使用。在航空和宇航中使用的纤维增强塑料的基体主要有环氧树脂、酚醛树脂、不饱和树脂和有机硅树脂等类型。另外,塑料还在透明件、耐烧蚀件及其他结构上亦有广泛应用。例如飞机透明件,包括风挡、座舱盖和窗玻璃等,要求具有良好的光学性能,足够的结构强度和使用寿命。塑料透明件主要有两种:有机玻璃、玻璃—塑料复合透明件。

无机非金属材料,特别是新型的结构陶瓷材料,具有质量轻、压缩强度高(接近或超过某些金属材料),耐高温、耐磨性好、硬度高、化学稳定性好,且有很好的耐蚀性、绝缘、绝热性,因此常用做航空航天中的耐烧蚀件。航天飞机在进入太空或返回大气层时,经受剧烈温度变化,在几分钟内从室温达到 1000°C 以上,为保护机体不受损伤,采用陶瓷作为热绝缘材料,设计中用 SiO_2 纤维编织成 2 万多个陶瓷片,覆盖机体表面约 70% 的面积。玻璃主要应用于各种透明件,如玻璃—塑料复合透明件适用于制造各种飞机的防弹玻璃和抗鸟撞击玻璃等。

高温材料在航空、航天技术中占有重要地位。由于战争的需要,20 世纪 40 年代出现了喷气技术,该技术的实现是以高温材料及高性能结构材料为依托,特别是高温合金和钛合金的发展,不断提高了歼击机的性能,而且为今天大型客机的安全及有效载荷的提高、持续航行时间的延长及飞机与发动机的长寿命提供了可能。20 世纪 50 年代以来,喷气式发动机的推重比增加 2 倍、燃烧效率提高 1 倍、两次大修间隔时间延长近 100 倍,在很大程度上得益于高温材料的进步。

作为航空航天所用的材料,其比强度、比刚度尤为重要,因为飞机发动机每减重 1kg ,飞机可减重 4kg ;航天飞行器每减重 1kg ,可使运载火箭减重 500kg 。所以对高速飞行器来说,要不惜一切代价来减轻质量。新开发出来的高强度高分子纤维芳纶,其比强度较之高强度钢高出近 100 倍。设想用这种材料制成飞机,飞行速度可达 15 马赫,从纽约到东京只需 2h。比刚度对于飞行器也是十分关键的,高比刚度材料,在相同受力条件下变形量小,从而保证了原设计的气体动力性能,这就是为什么要大力发展纤维增强的树脂基及金属基复合材料的重要原因。另外,热机的工作温度越高,其效率也越高,但是目前所用的金属材料由于熔点及抗氧化能力所限,不能保证更高的使用温度。因此,现代功能陶瓷就成为当前研究的重点。

4. 航空材料的发展趋势

航空材料的发展趋势是种类增多,成本降低,性能提高。具体体现为:传统材料大有

可为;新型材料亟待应用;新兴材料层出不穷;材料的通用化、标准化势在必行;可靠性、可维修性、低成本和环保性要求日趋严格。

1) 传统材料大有可为

传统航空材料凝结了大量的研究成果,也积累了可供的使用经验,不能轻易放弃这些传统材料。目前,先进材料的应用准则发生了重大的变化,从而使材料性能不再是选材的首要标准。这种渐进演化式发展反映为,在复合材料改进、传统金属材料超纯熔炼,以及铸、锻件的研制、试验和生产过程中,抛弃了传统方法,代之以材料性能和产品制造一体化的可设计和可预测的全新概念,广泛引入仿真及人工智能技术,特别是在制造技术方面不断取得进展和开拓创新。这种高技术含量、高附加值的航空材料的发展以信息技术、自动化技术和先进制造技术的高速发展为依托,将对航空材料的发展产生着深远的影响。

2) 新型材料亟待应用

冷战时期的积累和长期的超前研究储备了相当数量的新材料,但它们至今仍在候选名单上等待应用,典型例子有高性能的双马来醚亚胺树脂基复合材料、热塑性树脂基复合材料和各种金属基复合材料等。暂时不应用这些材料的原因很复杂,原因之一是新材料过高的成本效益比,包括采购、制造、取证和全寿命等。因此,工业界出于技术和安全风险的考虑,缺乏了解先进材料的热情,也没有使用先进材料的经验,更没有等待先进材料发展成熟的耐心。

3) 新兴材料层出不穷

新技术,特别是纳米技术为航空材料的发展开拓了新的思路,人们充满热情地研究由片状纳米黏土改性的环氧树脂、双马来醚亚胺树脂和聚醚亚胺树脂,研究纳米改性的铝合金,期望在性能上获得显著提高。英、德等国对由碳纳米管增强的树脂基复合材料开展了许多研究工作,结果表明,无论力学性能还是电磁性能均有改进。纳米技术的发展还有力地带动了航空材料的发展,如雷达罩纳米防雨涂层以及隐身材料的纳米化等。

4) 材料标准化、通用化势在必行

随着国际经济的一体化,航空材料在国际材料市场上的流通以标准化、通用化为前提。目前,国际航空材料的发展趋势是在国内取消军用标准,而代之以军民两用标准。在国际范围内实施国际化标准,有利于国际合作与交流及市场开拓,如俄罗斯在铝锂合金和钦合金的出口问题上,以往因未与国际标准接轨,使上述材料出口受阻。为扩大出口,俄罗斯已逐步改用国际标准。

5) 低成本和可维修性成为趋势

航空材料的高技术特征必然带来高成本。环氧树脂的价格大约是每磅 7 美元,钛为每磅 10 美元,先进复合材料为每磅 60 美元。降低航空产品采购成本的主要途径是改变设计概念、采用低成本材料和成形加工技术等;降低航空产品使用成本或全寿命成本的主要途径是提高材料的可靠性和寿命。航空产品在选材时不仅要考虑使用性能,而且还必须考虑可维修性。如果航空产品的全寿命成本及维修费用为采购成本的两倍时,就需重新考虑选材问题。发展高可靠性、维修性能好的航空材料,以延长结构使命寿命和简化维修越来越受到重视。

5. 中国航空材料的发展现状、存在的问题及发展思路

中国航空产业经历了从修理、引进、仿制到改进、改型和自行设计研制的发展历程,用以制造航空产品的材料也经历了相似的发展历程。到目前为止,我国已定型生产的航空用金属、有机高分子材料、无机非金属材料以及复合材料的牌号约 2000 余个;已建成具有一定规模的航空材料研究与生产基地,拥有生产航空产品所需各类材料牌号、品种与规格的生产设备及检测仪器;先后制订了 1000 余份各类航空材料、热工艺及理化检测标准(包括国标、国军标与航空标准);编写出版了《中国航空材料手册》、《发动机结构设计用材料性能数据手册》及《航空材料选用目录》等;颁布了“航空工业材料及热工艺技术工作规定”、“航空材料技术管理办法”等法规性文件。从总体上看,我国目前已定型生产的航空材料及其相应的标准与规范,基本上能满足第二代航空产品批生产的需求。针对第三代航空产品所需关键材料,如热强钛合金、高强铝合金、超高强度结构钢不锈钢、树脂基复合材料、单晶与粉末高温合金等,从技术上已具备试用条件,但要转化为在特定工况下使用的零部件,并体现出第三代航空产品的总体效能,尚需做大量的工作。

我国航空材料的现状与新一代航空产品(飞机以 F-22 为代表,发动机以推比 10 为代表)对材料的需求之间尚存在较大的差距,主要有如下三方面:①前沿材料研究滞后,新材料储备小,第三代、第四代航空产品所需的一些关键材料,如快速凝固材料、高强轻质结构材料、热强钛合金、超高强度钢、金属间化合物及以其为基的复合材料、树脂基复合材料等的研究滞后,与国外先进新材料研制水平的差距约为 15 年~20 年;②新材料研制、生产和应用研究的基础条件较差,如超纯熔炼、高温整体扩散连接、喷射成型、等温锻造、电子束沉积涂层、纳米材料制备、超高温检测、超声显微镜、激光无损检测等先进的合成与加工设备、质量检测与控制手段等不能满足新材料研制、生产与应用的需要;③一些常用结构材料的质量不稳定,性能数据分散,表面质量差,尺寸精度低,有些品种规格不能正常供货,满足不了生产使用要求。

当前我国航空材料存在的问题,主要有如下几方面。

1) 材料牌号多、乱且重复

各类材料均没有形成具有不同性能水平档次的牌号序列。我国先后从原苏联、英国、法国、美国及俄罗斯等引进过航空产品,每引进一个航空产品均要仿制一大批相关国家的材料与标准,致使多国材料云集我国,造成了“四多四少”的严重局面,即低水平材料多,高水平材料少;仿制国外材料多,国内新研材料少;用途单一材料多,一材多用材料少;研制材料成果多,工程化应用材料少。

我国现有各类航空材料牌号约 2000 余个,居世界之首。如研制和生产的高温合金牌号有近 100 个,几乎是世界航空用高温合金牌号之总和。仅涡轮盘用高温合金先、后共研制 13 个牌号,其中仿苏 4 个,仿美、英、法 6 个,自行研制 3 个。处在同一性能水平有 7 个,真正适应并具有不同性能水平档次的只有 4 个牌号。根据《航空材料选用目录》所载,在我国各类航空产品上所用的结构钢共有 131 个牌号,不锈钢有 81 个牌号。编入《航空材料手册》的结构钢只有 47 个牌号、不锈钢 36 个牌号。纳入国军标的结构钢与不锈钢分别仅有 38 个和 32 个。大部分钢号是在近 10 多年引进国外航空产品过程中仿制的,有的仅在 1 个~2 个产品上制作 1 个~2 个零件,用途单一,用量极少,目前大部分是按企业

标准或型号标准进行试生产。

在所仿制的国外材料中,存在严重的重复仿制现象。如主要用做齿轮的渗碳钢,重复仿制了7个钢号;主要用做轴类零件的结构钢,重复仿制了5个钢号;主要用作压气机叶片与盘的马氏体不锈钢,重复仿制了6个。

2) 没有形成适合我国国情的材料、工艺及理化检测标准系列

在仿制各国材料的同时,也相应地引进了各个国家的标准。由于各国的标准体系、格式、内容及要求各不相同,因此在国内形成了多国标准并存,互不兼容,难以贯彻的复杂局面。

由于材料的重复引进造成多国材料云集,不仅无法建立起中国自己的材料牌号系列,也不可能建立起相互联系与协调配套的材料、工艺及理化检测等标准系列。

3) 材料性能数据“少、缺、散”现象严重

大多数材料只有表征其性质与特征的基本性能数据,少数仿制材料甚至只有技术标准中规定的五大力学性能(σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 、 δ 、 ϕ 、 α_k)数据;某些用作关键件、重要件的材料,缺少按损伤容限设计的性能数据和按可靠性概率设计所需的统计性能数据。零部件在使用环境温度、介质及应力综合作用下的使用性能数据更是缺少。

4) 材料的实物质量低

从总体上看,当前国内生产的航空材料,其标准质量(指技术标准规定的质量指标)基本上达到或接近国际水平,但材料的实物质量却普遍低于国际水平。主要表现在不同炉批的材料,其成分与性能虽然符合标准规定,但波动范围大,材质的一致性、均匀性和稳定性较差。

上述问题的存在,原因是多方面的,主要是我国航空产业科学技术基础薄弱、起点低,所经历的发展道路曲折;其次是在材料选用、材料研制及材料采购等领域没有引入和形成一整套科学而有效的运行机制,没有制订出相应的行为规范与程序,没有建立起符合我国国情的航空材料体系。

在深入分析研究我国航空材料的现状与问题、需求与差距的基础上,应把建立起符合我国国情的航空材料体系作为发展我国航空材料的总体思路。建立我国航空材料体系的具体思路应包括以下几个层次:逐步理顺和建立我国航空用各类材料的牌号序列,正确处理并逐步解决多国材料并存、重复、互不兼容的复杂局面;加大对现有定型材料的改进改型研究力度,通过调控成分或变更工艺等手段,充分挖掘现有材料的潜力,做到“一材多用”;加强对树脂基复合材料、陶瓷基复合材料、金属间化合物、高强高韧、可焊、耐蚀合金钢、高强铝合金、耐热钛合金等新材料的研究;在制订材料标准的同时,制订相应的特种工艺及理化检测标准,形成完整的标准系列,达到扩大材料应用范围,提高材料的应用技术经济效益;在有关材料选用、材料研制和材料采购等方面,建立和完善与市场经济相适应的运行机制及一套行之有效的行为规范,理顺材料选用、材料研制材料采购等部门之间的关系,使这方面的工作走上科学化、规范化和程序化的轨道。

建立我国航空材料体系是当前发展我国航空材料的关键步骤,是繁杂的系统工程,是一项开拓性的工作,应本着循序渐进、逐步实施的原则,先搞发动机材料体系,取得经验后,再搞飞机(含直升机)机体材料体系和机载设备材料体系,最后汇总、合并形成中国航空材料体系。