

# 当前航空材料发展的几个特点

王 峙 南

## 摘 要

本文从航空技术的发展与航空材料的关系,概述了当前航空结构材料发展中的一些特点,即集约化,复合化,定量化,高纯化和一体化。认为:新技术、新工艺的应用是发展航空材料的主要途径;复合材料和复合结构的应用将日益增多;随着对材料微观结构和性能了解的深化,材料研制将趋向定量化;材料将向高纯度、高均匀性方向发展;一体化是航空材料发展的重要特征。针对上述特点,提出了若干对策建议。

世界航空工业的发展历史充分说明,航空技术的发展与航空材料有着密切的关系。一方面航空技术的发展,对材料不断提出新的要求,推动着航空材料的发展;另一方面,航空材料的发展又是航空技术发展的基础和前提。一种先进的飞机、发动机设计方案,必须有相适应的航空材料,才能付诸实现;新材料的发展和运用往往成为航空技术突破的重要因素。

各国对航空材料的研制都非常重视,投入大量的人力和物力。由于航空材料的性能要求比较高,因此航空材料的发展水平在某种程度上反映着一个国家材料科学及工程的水平。分析当前航空材料发展的特点和趋势,确定对策,以便看准方向,不失时机地开展有关研究工作,打基础,上水平,为航空工业的腾飞作好准备是非常必要的。

当代航空材料的发展非常迅速,领域也极为广阔,要概括所有的特点是不可能的。本文试图对现代飞机、发动机的结构材料发展中的某些特点作简单的分析和叙述。

### 1. 新技术、新工艺的应用是发展航空材料的主要途径

航空材料属于知识密集、技术密集的学科。许多事实说明,单纯依靠传统工艺和技术,

只改变材料成分,要满足现代航空技术提出的越来越高的要求是很困难的。因此,各国对新技术、新工艺在航空材料领域中的开发应用都非常重视,成为当前发展航空材料的主要途径。目前,在发展航空材料中,各国正在应用和研究的新技术、新工艺主要有:定向凝固技术,机械合金化,快速凝固技术,复合、剪裁技术,高韧陶瓷,电子束、等离子束、激光束技术,真空双电极重熔,单晶铸造技术以及相应发展的热等静压技术、超塑成形技术、固态焊接技术等。

定向凝固是目前比较成熟的新技术,采用定向凝固工艺可以消除横向晶界(柱晶),甚至消除全部晶界(单晶),从而提高铸造高温合金的热疲劳性能、持久寿命和持久塑性。美国普·惠公司已于1969年使用定向凝固合金制造涡轮叶片,使涡轮进口温度提高近50℃,并使发动机(JT9D59A)翻修寿命超过8000小时。70年代中期以来,单晶合金叶片的应用开始增加。由于单晶合金不含C、B、Zr、Hf等晶界强化元素,固溶温度可以提高80~100℃,从而能够消除共晶 $\gamma'$ 和枝晶,提高合金的性能,使发动机寿命成倍增加(见图1)。

为了进一步提高合金的性能,又发展了所

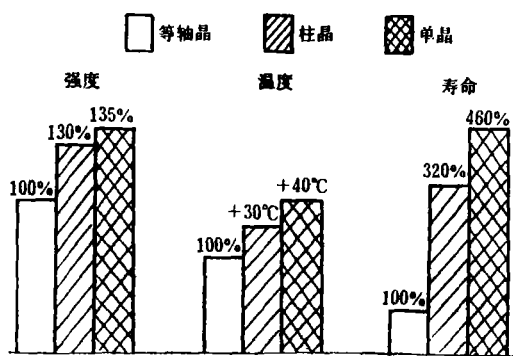


图1 等轴晶、柱晶及单晶叶片的性能比较 (T400发动机)

谓超单晶合金,通过应力时效处理的超单晶MT143合金的使用温度有可能比现有的多晶合金高150℃。

机械合金化合金又称弥散强化合金,是将金属和合金粉末,以及氧化物弥散质点装在高能球磨机中经受反复的破碎和焊合,形成一种均匀的整体,然后装入包套,真空封焊,热挤压成形,再经热处理,制成零件。目前机械合金化高温合金已逐渐形成系列,将作为发动机工作叶片和导向叶片的主要候选材料之一。

快速凝固技术是近十多年来出现的发展新合金的崭新技术,它一般指金属材料以 $10^5 \sim 10^6$  °K/秒的速率进行凝固的方法,包括气动雾化、离心雾化、旋转电极、熔体织带、激光上釉等,可制成粉末、条带、薄片,甚至直接凝固成零件。由于快速凝固合金化学成分均匀,合金元素溶解度增加,组织细化,并能产生新的介稳相,从而引起各国的广泛重视。据报道,美、英、法、西德、日本、苏联等国目前都将其列为重点项目开展研究。美国已将快速凝固高温合金用于涡轮叶片和导向叶片,试车结果表明,叶片工作温度可以提高200℃,涡轮进口温度可达1650℃,预计90年代可以投入正式使用。近年来,快速凝固铝合金发展比较快,研究表明,这种技术可以使铝合金的工作温度由135℃提高到150~250℃,从而可望代替部分钛合金。粉末钛合金也是目前研究的一个重点,英国一家年生产能力为5000吨的钛合金粉末工厂已于

1982年投产。F-18战斗机在1980年失事以后,人们对粉末涡轮盘产生了怀疑,由于快速凝固粉末的冷却速率比一般粉末冶金的高1000倍左右,性能有较大提高,有可能解决现有粉末盘疲劳性能低等问题。

激光快速熔凝技术,是利用高能量密度的激光束连续照射到金属表面,使表面熔化,然后通过自淬或喷射成粉末,达到快速冷却。快速等离子沉积,则是将粉末金属送入低压等离子气流中,使之熔化并由等离子枪加速后打在模胎上,形成高密度的单晶沉淀层。这种方法可以显著改进合金性能,沉积的Rene' 80和In 733合金,拉伸强度分别提高40%和30%,塑性提高一倍,热疲劳强度明显增加。这种技术可望90年代用于涡轮盘、空心叶片和火焰筒。

总之,发展和应用新技术、新工艺是当前发展航空材料的主要途径,这种集约化的特点应该引起我们高度重视。

## 2. 复合材料和复合结构的应用日益增多

近20年来,复合材料的研制和应用发展极为迅速,从70年代初在军用机上开始试用,目前已从军用发展到民用,从非承力件、次承力件发展到主承力构件,用量从占飞机结构重量不到1%发展到占30~40%,并出现了全复合材料飞机。

复合材料基本上可分为三类:树脂基复合材料及其混杂复合材料,金属基复合材料,陶瓷基复合材料。目前树脂基复合材料使用的增强材料主要有玻璃纤维、有机纤维和碳纤维;基体材料主要是环氧树脂,要求耐热的则用聚酰亚胺树脂。玻璃纤维增强塑料应用最早,但刚性较低,不能做主要构件。60年代研究成功的碳纤维复合材料,不但强度高,而且弹性模量大,因此发展迅速。近年来,又发展了高模量的有机纤维(Kevlar)。复合材料的特点,除比强度、比刚度较铝、钢、钛高以外,它可以根据构件各部位受力情况确定纤维的铺层方向和层数,并可一次压成,减少切削加工和零件数目,从而减轻重量,降低加工成本,提高构件

整体性。

但是, 这些高弹性模量纤维的断裂伸长比较小, 用它们制成的复合材料冲击韧性比较低, 同时价格也相当昂贵。为了改善材料的综合性能, 70年代又研究发展了混杂纤维复合材料, 也就是将两种或两种以上的增强纤维混杂于一种基体之中, 其中一种强度较好, 另一种则韧性较好, 例如玻璃纤维和碳纤维混杂的复合材料, 既可发挥玻璃纤维的韧性, 又可发挥碳纤维的刚性, 以满足设计要求。

金属基复合材料使用的增强纤维有硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维以及丝状晶体、钨丝等, 基体则主要有铝、镁、钛及高温合金。硼铝、碳铝复合材料目前已在发动机上进行试用。硼镁复合材料在力学性能上不亚于硼铝复合材料, 而且比重轻, 相容性好, 被视为有前途的复合材料。定向共晶合金是在定向凝固条件下形成自生增强体的一种复合材料, 有 $\gamma/\gamma'-\delta(\text{Ni}_3\text{Nb})$ ,  $\gamma/\gamma'-\text{TaC}$ ,  $\text{Co-TaC}$ ,  $\gamma/\gamma'-\alpha(\text{Mo})$ 等几种类型。其承温能力预计比目前用的定向柱晶高 $80\sim 120^\circ\text{C}$ , 可望作为 $1150^\circ\text{C}$ 工作的涡轮叶片。

陶瓷基复合材料相对于树脂基、金属基来说, 是一种新型复合材料, 包括陶瓷基和陶瓷纤维复合材料两种。在陶瓷基复合材料中值得注意的动向是以玻璃态陶瓷(如硅酸锂铝)为基的高温高韧性复合材料, 如果能够在解决陶瓷脆性问题上取得突破, 陶瓷材料及陶瓷基复合材料是很有前途的。

航空材料复合化趋势的另一个特征是复合结构的广泛应用。航空部件的工作条件是非常复杂的, 同一零件的不同部位, 其受力状态、环境条件也可能是不相同的, 为了充分发挥材料的性能, 减轻结构重量, 采用了各种形式的复合结构。例如气动弹性剪裁技术就是利用复合材料的可拼凑性, 按不同部位的要求, 采用不同的铺层方向和层数, 使这种复合材料机翼既满足强度、刚度要求, 又满足气动弹性变形的要求。涡轮工作叶片的叶根、叶身、叶尖的

工作条件是不同的, 对此美国通用电气公司正在研制一种复合式叶片, 叶根采用高强度细晶材料, 叶身采用抗氧化耐疲劳材料, 叶尖采用抗氧化耐磨材料, 最后用瞬态液相连接成整体叶片。另一种复合叶片是采用金属作芯子, 外层用陶瓷, 其寿命可为一般铸造叶片的10倍, 预计90年代可得到应用。在涡轮盘材料工艺方面则是采用双合金或双工艺的双性能盘, 例如TRW公司采用AF115作轮缘材料, MERL76作轮毂材料, 热等静压组合压实成形。另外采用激光分层上釉工艺制造双性能盘也是当前发展方向之一。燃烧室材料的发展也是一种复合结构的例子, 国外采用的多孔层板是采用二层或多层具有单独冷却通道的合金板焊接而成。据报道, 美国正在研究由金属、纤维金属和陶瓷材料复合制造的燃烧室, 试验结果表明, 这种结构可以显著降低燃烧室的温度。

### 3. 材料研制逐渐走向定量化

随着我们对材料性能与成分、组织和各种影响因素的关系了解越来越深入, 材料研制已逐渐定量化。开始时主要是建立一些经验公式, 以指导材料研究, 如在不锈钢研制中, 根据各种元素对形成奥氏体和铁素体的影响程度, 提出了控制不锈钢组织的镍、铬当量公式。60年代, 人们在实验的基础上, 根据力学性能与晶粒尺寸的关系, 提出了强度( $\sigma_b, \sigma_s, \sigma_{-1}$ )、韧性(冲击转变温度)、断面收缩率和晶粒直径的定量关系, 指导了微合金钢的发展; 在高温合金研制中, 为了得到最佳的高温固溶强化效果, 也建立了计算添加元素对合金固溶体强化程度的当量溶解度公式。以后, 为了控制合金中相的稳定性, 限制和避免在长期使用中析出有害的拓扑密排相, 建立了在电子空位理论基础上的相分计算法, 为评价合金和研制新合金提供了有力的工具。近年来, 随着计算机技术的发展和应用, 合金研制定量化的工作取得了突破性的进展, 提出了全新的合金设计方法, 并在研制新合金中取得了可喜成绩, 做到了按指定性能设计新合金。例如日本金属材料研究所利用

合金设计方法, 对美国M247定向合金进行重新设计, 增加了钴、铬含量, 降低了碳、钛成分, 所获得的定向凝固TMD-5合金, 其性能比M247合金高得多。M247合金在117.5MPa下的寿命为1000小时, 而TMD-5合金为5000小时, 在同一条件下(137MPa, 1000小时), TMD-5合金的承受温度比M247合金高43.5℃。他们还用合金设计法研制出单晶合金TMS-6, 其性能比TMD-5合金又高很多。

#### 4. 材料向高纯、高均匀性方向发展

近年来, 微量元素的作用越来越引起人们的重视, 对杂质元素的控制越来越严, 材料研究正在向高纯度、高均匀性和高精度方向发展。众所周知, 夹杂物对疲劳性能和应力腐蚀性能影响很大, 特别是对缺口敏感的高强度材料更为明显(见图2和图3)。因此国外对超高强度钢的S、P含量及夹杂物的要求越来越严。例如美国有关技术标准中规定300M钢的S、P含量必须小于0.015%, 并且两者之和不得大于0.025%。但是工厂内控的S、P含量则更严, 要求小于0.006%, 而实际上进口的300M钢的S、P含量在0.002%以下, 低倍腐蚀后, 没有发现硫化物, 从而保证超高强度钢的优越性能, 延长使用寿命。高温合金对低熔点杂质元素的要求历来是比较严的, 近年来, 随着使用温度的不断提高, 对合金纯洁度的控制也越来越严。过去要求互害杂质(铅、锑、铋、锑、银)含量

必须小于0.001%, 以后又要求控制在5ppm以下, 最近几年又有升级的趋势, 要求对14种低熔点有害元素进行控制, 有的元素要求控制在0.2ppm以下。

近年来, 美国为了提高铝合金的抗应力腐蚀性能和断裂韧性, 在2024和7075合金的基础上, 降低和精确控制Fe、Si含量(从0.4~0.5%降至0.15%以下), 研制出一系列高纯铝合金, 如2124、2224、2324、7175、7475等, 由于杂质减少, 这些合金的疲劳强度和断裂韧性都有明显提高, 横向性能也得到改善。

为了提高合金的纯度和均匀性, 除了采用高纯原材料外, 还应用了许多新的工艺, 如电渣重熔、真空自耗重熔、电子束熔炼、陶瓷滤网、快凝粉末等, 并且广泛采用计算机控制, 以保证质量的稳定。不少国家在材料的技术标准中不仅规定力学性能的最低值, 而且规定性能的波动范围, 对控制材料的质量起到很好的作用。

#### 5. 一体化是航空材料发展的重要特征

材料工程是一个内容十分广泛的领域, 包括成分设计、配制及成形工艺、选材、加工制造、使用维护、失效分析等, 随着科学技术的发展, 各学科相互交叉、相互渗透、相互促进的现象越来越多。材料、工艺和性能, 设计、制造和材料都越来越趋向一体化。实践证明, 要获得最佳的性能, 必须把材料研制的各个环

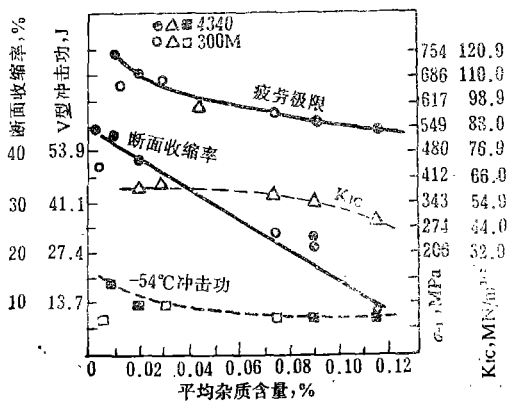


图2 夹杂物含量对4340和300M钢性能的影响

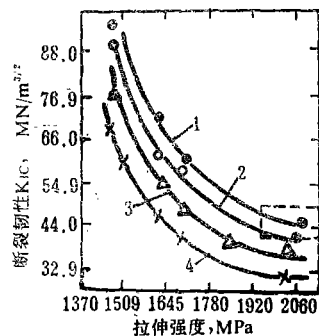


图3 硫对4345钢断裂韧性的影响  
含硫量(%): 1-0.008;  
2-0.016; 3-0.025;  
4-0.049

节很好地结合起来,进行系统工程管理,实行一体化。例如复合材料的应用,由于复合材料的各向异性,要充分发挥复合材料的优势,必须把设计、材料、工艺、检测技术很好地结合起来,对受力状态、纤维铺层方向、铺层数量进行综合考虑,才能获得最佳性能。50年代发展的真空熔炼工艺,为高温合金的发展开辟了一个新时期,整个60年代的工作主要是研制了一系列真空熔炼的高温合金,但是70年代以来,新工艺的发展又成了高温合金研制的主要途径,过去研制材料常常要求工艺满足成分的要求,随着这些新工艺的日趋成熟,又要求发展出适合这些工艺的最佳合金体系,使工艺与材料融为一体。

性能测试,包括力学及理化性能测试是材料研制必不可少的重要组成部分,材料的发展,许多是由于性能测试手段的改善而获得的,性能测试结果常常对材料研制起着极其重要的指导作用。另外,使用及失效分析对深入认识材料的特性,指导老材料的改进和新材料的研制都有着特别的意义,例如GH33A合金就是根据GH33合金盘在使用中伸长的故障而研制成功的。因此,一体化已经成为当前航空材料发展的一个重要特征,也是一条很好途径。

以上是当前航空材料,主要是结构材料发展的五个特点,即集约化,复合化,量化,高纯化和一体化。面对航空材料发展的这些特点和趋势,我们必须认真研究,确定对策。

(1)明确重点,集中力量。当前发展航空材料的主要途径是应用新技术,但新技术的应用一般都需要大的投资,周期也较长,因此对于国外出现的各种新工艺、新技术,不能都盲目上马,必须从中选择最有希望、或者我们比较有基础的项目,集中必要的人力物力,才能突破关键,取得成果。

(2)充分发挥综合研究所的优势。一体化是近代科学技术最主要特征之一,我们要把材料、工艺、性能和检测技术很好地组织起来,并且加强与设计、制造部门的联系,按系统工

程进行管理,做好配套研究。

(3)加强技术基础,提高科研水平。“炒菜式”的研究方法目前已被淘汰,我们必须加强理论基础、试验技术、情报、标准、计量、维修等技术基础工作,扩大微机在成分设计、数据处理、工艺及测试过程的控制以及管理工作中的应用,提高科研水平。

(4)大力加强在职人员的培训。多渠道、多层次、多形式培养各种人才,提高人员素质。大胆选拔和使用年青技术干部,加强考核奖励制度。

(5)进一步改革科研体制,充分调动各类人员的积极性和创造性,实行军民结合,以民养军,树立市场和竞争观念。这样才能缩小与国外先进水平的差距,在打基础、上水平方面作出成绩,为今后航空工业的腾飞做出贡献。

(作者为航空材料研究所副所长。)

※ ※ ※ ※

### LB733耐腐蚀铝合金通过部级科研鉴定

1986年10月26~30日航空部科技局与中国有色金属工业总公司军工办在青岛联合召开了LB733铝合金的科研鉴定会。参加会议的有部内外20多个厂、所、院、校的代表。会议由西北工业大学张宝昌教授担任鉴定小组组长,中南工业大学曹乃光副教授和一三二厂马道中副总工程师担任副组长。会上六二一所有关同志作了LB733耐腐蚀铝合金的研究报告,西南铝加工厂作了该合金的试制总结报告,三七二厂作了工艺成形试验报告。此外六二一所还作了该合金扩大试验研究和微观组织的研究报告。

与会代表对有关报告进行了充分、认真的讨论,一致认为LB733合金达到了国外耐蚀高强铝合金的水平,它的推广应用将会有显著的技术效益和经济效益。用它代替LY12合金作为水上飞机或其他飞机蒙皮和结构件能延长使用寿命、增加安全性、减少维护修理工作量。

代表们一致通过了该合金的部级科研鉴定

(刘存玉报道)