



一代材料 一代飞机

——曹春晓院士从材料进化史看中国大飞机项目

本刊记者 钟 元



曹春晓

中国科学院院士,材料科学家,北京航空材料研究院研究员、博士生导师,南昌航空大学学术委员会主任。长期从事金属材料研究(以钛合金及金属间化合物为主),2001年获航空最高奖——航空报国金奖。现任先进高温结构材料国防重点实验室学术委员会主任,兼任国防科工委专家咨询委员会委员,中国航空工业第一集团公司科技委顾问。

[编者按] 2006年10月19日,中央军委曹刚川副主席在视察一航材料院时强调“一代材料,一代装备”,阐明了材料在飞机研制中的重要地位。2007年2月26日,温总理主持召开国务院常务会议,原则批准大型飞机研制重大科技专项正式立项,引起了国内外的高度关注。在中国航空业又将迎来一个蓬勃发展年之际,本刊记者就大飞机和先进材料技术的相关问题对材料科学家曹春晓院士进行了专访。

二: 在2007年10月SAMPE北京年会上,您的报告“一代材料技术,一代大型飞机”引起了我们的极大兴趣,请您从材料发展的角度谈谈材料在飞机上的应用历程。

曹春晓:100多年来,材料与飞机一直在相互推动下不断发展,飞机机体和发动机的材料结构经历了4个阶段的发展,正在跨入第五阶段(见表1)。

其中,从第四阶段到第五阶段的显著特点是复合材料用量的根本性

变化(见图1)。A380和B787分别是第四阶段和第五阶段的代表性机型。A380在复合材料用量上有很大突破(22%),但铝合金用量还高达61%,仍占首位;B787的复合材料用量创历史最高纪录(50%),铝合金只占20%。上述占比都指重量百分比,由于复合材料密度小,如果按体积百分比计算,这个数据就更悬殊了。为了与竞争对手的B787项目抗衡,空中客车将正在研制中的A350XWB的复合材料比例提高到52%。此外,

A320、B737 后继机的复合材料用量也将大幅提高。

总体上看,复合材料在军民用飞机上的用量正逐年增加,但从安全方面考虑,在民机领域的应用一直落后于军机。与复合材料用量不断创新高的过程相对应,复合材料的应用也从民机的次承力件扩展到主承力件,其应用部位从尾翼扩展到机翼,直至机身,可以说,这是一种从量变到质变的革命性变化。

☞:目前,波音和空客的新一代大型飞机上都有哪些有新意的材料技术应用?

曹春晓:在波音和空客的新一代大型飞机上应用的一些有新意的技术包括:

(1) B787 采用复合材料整体机身段。

(2) A380 率先在中央翼盒上大量采用复合材料(原为全金属结构),波音 787 则发展全复合材料翼盒直至全复合材料机翼。A380 中央翼盒重 8.8t,其中复合材料占 5.3t,总体减重 1.5t。

(3) 液态复合成型(LCM)已作为成熟的工程技术应用于新一代大型飞机上。由于 LCM 技术具有成本低、周期短、质量高、工作环境好和有利于结构整体化等优点,增强了原来在减重方面就占优势的树脂基复合材料相对于金属材料的竞争力。LCM 可分为 RTM(树脂转移模型)和 RFI(树脂薄膜浸渗)2 种制备技术。比如 A380 中央翼盒的 5 个工字梁采用 RTM 制成,并率先采用 RFI 技术制造复合材料襟翼滑轨梁,波音 787 机身的很多地板横梁采用 RFI 技术制造,其起落架撑杆则采用 RTM 技术制造。

(4) B787、A350 等大型客机用的 GenX 发动机采用了复合材料前风扇机匣和带钛前缘的复合材料风扇叶片。复合材料风扇叶片在 GE90 上使用近 10 年来未出现任何问题,

其成功使用为 GenX 正式选用带钛前缘的复合材料风扇叶片奠定了基础。

(5) A380 和 B787 分别选用了层间混杂复合材料(纤维金属层板)GLARE 和 TiGr。其演变过程为:第一代 ARALL → 第二代 GLARE → 第三代 CARE → 第四代 TiGr。与 ARALL 相比,GLARE 的密度较高、模量较低、成本降低,而且显著提高了疲劳性能、拉伸强度、压缩性能、冲击性能和阻尼性能。因此,GLARE 层板一问世,就引起世界各大飞机制造公司的关注。“九五”期间北京航空材料研究院的疲劳试验结果表明,3/2GLARE 的疲劳寿命为胶接铝板的 23 ~ 35 倍,这是

由于纤维的桥接作用降低了铝板裂纹尖端的应力强度因子。另外,在 A380 上 GLARE 机身壁板一共有 27 块,最长的一块为 11m,总覆盖面积达 470m²。由于 CARE 很难彻底解决碳纤维与铝合金之间的接触腐蚀问题,因此迄今无商业化产品;而 TiGr 既无电化学腐蚀问题,又可进一步提高综合性能(特别是高温性能),前景广阔。据报道,波音公司将选用 TiGr 制造 B787 的机翼和机身蒙皮, TiGr 还可以用作蜂窝夹层的面板。实践表明,用自动铺放的 TiGr 层板的性能高于手工铺叠的 TiGr 层板。

(6) A380 是首次推出全钛挂架的飞机, A350 也采用全钛挂架,均

表1 飞机机体和发动机的材料结构变化

发展阶段	年代	机体材料结构	发动机材料结构
第一阶段	1903-1919	木,布	钢
第二阶段	1920-1949	铝,钢	钢,铝
第三阶段	1950-1969	铝,钛,钢	镍,钛,钢,铝
第四阶段	1970-21 世纪初	铝,钛,钢,复材料结构(以铝为主)	镍,钛,钢*
第五阶段	21 世纪初-	复合材料,铝,钛,钢结构(以复合材料为主)	镍,钛,钢,复合材料

* 第四阶段后期复合材料开始逐步进入发动机。

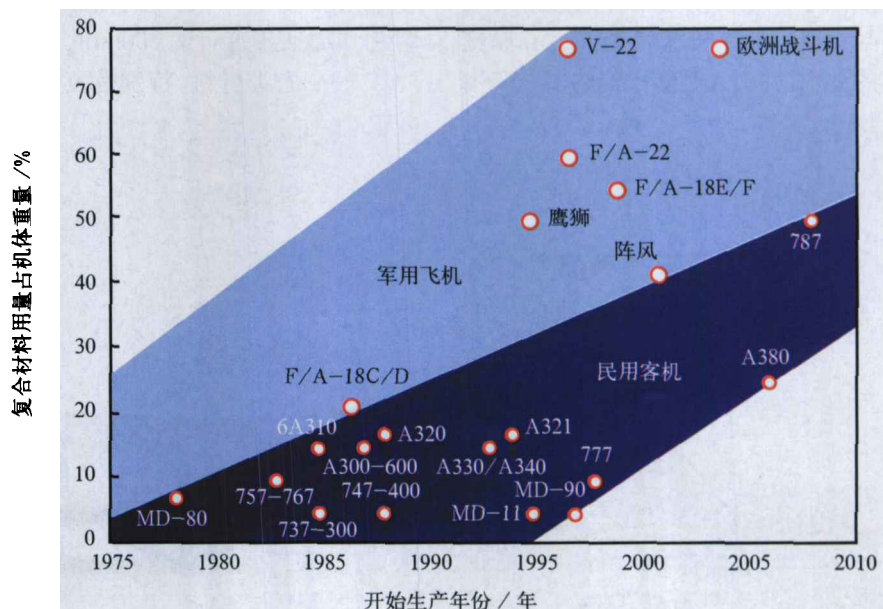


图1 复合材料在军民用飞机上的应用增长趋势

选用 β 退火的Ti-6Al-4V(ELI,超低间隙型杂质元素)合金。

(7) 新型高强高韧近 β 型钛合金Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-1Zr首次在A380上应用。这种新型合金是空客公司与俄罗斯合作在BT22(Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe)基础上研发的,已被选用于A380机翼与挂架的连接装置。

(8) 在F/A-22, V-22等军用飞机上迅猛崛起的钛合金精铸技术正逐步进入大型飞机领域。1999年,发动机后安装框架钛合金精铸件在零件静力试验成功之后已应用于B777上,这是钛合金精铸件首次在民机上获得成功的应用,由于客机在安全可靠性方面的更高要求,故这一开端具有重要意义。

近期, A380客机的钛合金刹车扭力管已由英国Doncasters公司采用离心熔模精铸技术制成,这是欧洲首次采用钛合金刹车扭力管精铸件取代以往的锻件。最近, Howmet公司、波音公司与美国空军研究实验室联合进行薄壁钛铸件的开发,选择C-17军用运输机发动机挂架为对象,各用一个整体铸件取代由17个Ti-6Al-4V钣金件组成的鼻帽和由多个零件和很多紧固件组成的防火封严件,目前已达到1.27mm厚度的要求,并引入到新生产的C-17飞

机,见图2。60个鼻帽铸件在全寿命期可节约320万美元,防火封严件改用薄壁铸件后可降低成本70%以上。

(9) 第三代铝锂合金在A350、A380上的大量应用是空客新一代飞机的一大特色。A380已正式选用铝锂合金制造地板梁,正打算用作机身蒙皮和下翼面的桁条。A350已选用铝锂合金制造机身蒙皮和地板结构等,其用量高达总结构重量的23%。铝锂合金再次应用的主要原因是在不断优化成分的基础上推出了2094、2195、2097、2197等第三代合金。这些合金的共同特点是降低了锂含量和优化了铜等合金元素的含量,从而控制了 Al_3Li 相的析出,解决了第二代合金出现的上述问题。另一个原因是第三代铝锂合金取代了2124、2024铝合金而制成的零部件在F-16战斗机上的成功验证。

(10) 新型高强铝合金7085的出现为特大锻件在A380上的应用开辟了道路。已有高强铝合金的锻件或厚板的厚度均有一定限制,例如7055限于38mm,7150虽较理想,其厚度也不允许大于120mm。为了能获得更大厚度的高强铝合金锻件或厚板,美国Alcoa公司开创了一个具有专利权的7085铝合金,由于淬透性好,其最大厚度可达300mm。

☞: 先进材料,特别是复合材

料在民用大飞机上的应用体现了一个国家的技术水平、工业水平乃至综合国力。大飞机的立项对我国航空材料技术发展提出了怎样的要求?对我国航空制造业又有何重要意义?

曹春晓:我国航空材料技术与国际先进水平相比还存在一定的差距,包括应用水平、材料基础、制造工艺、设计方法等方面,大飞机的立项为我们提供了很好的发展机遇,我们应该抓住这个机遇,自主创新,提高我国自主研发能力。国外高强度碳纤维生产能力很强,有很多是T800,而我国目前只能生产供应T300,而且年产量较小,因此要不断提高我国先进材料的生产能力。钛合金在国外大型飞机中的用量也不断创新高,这主要由于钛合金抗腐蚀并且比强度高,可用于很多锻件、铸件。而作为连接件,钛合金与复合材料最匹配,而铝合金如果与复合材料相互接触,铝与复合材料中的碳纤维会发生电化学腐蚀,这也是钛合金用量不断增加的原因之一。

大飞机的立项对我国航空制造业有很大的带动作用。航空工业具有产业链长的特点,涉及的先进技术很多。作为产业链的高端,大飞机项目具有很高的技术含量,会带动我国制造业的技术升级。大飞机制造作为高技术产业,可以说是制造业的一



图2 C-17运输机

个制高点,发达国家都在争夺这个制高点。占领了这个制高点,就说明这个国家具有很高的技术水平、很高的工业水平乃至强大的综合国力。材料是航空制造业的前提,材料、设计、工艺在航空制造业中的关系非常密切,这一点尤其体现在复合材料上。在大飞机上不断加大复合材料的使用,也需要设计、材料和加工技术的不断升级。

问:从我国实际情况出发,并借鉴国外先进经验,我国大型飞机在选材方面应遵循哪些原则,注意哪些问题?

曹睿晓:首先,为了提高我国大型飞机的市场竞争力,其选材原则必须在更高的层次上综合评估安全性、经济性、舒适性和环保性。与战斗机等小型飞机相比,大型飞机对于材料有更高的要求,可以归纳为4个特点:更高的安全性、更高的经济性、更高的舒适性和更高的环保性。下面就以B787大量选用复合材料为例来介绍一下这4个特点。

(1) 更高的安全性。

这首先取决于材料的技术成熟度,美国把成熟度分为10级,级别越高,成熟度越高,在工程化研究与试验验证阶段完成后材料才算比较成熟。从表2可知,A321在90年代时复合材料应用比例接近20%;B777在90年代时复合材料应用为11%;军机F-22和F-35复合材料分别达到24%和36%;轰炸机B-1和B-2复合材料用量高达29%和38%,为民用飞机积累了可贵的经验。在波音公司看来,复合材料经过30多年的研究和应用,技术上已十分成熟,当前在B787上将复合材料用量扩大至50%是安全的。与铝合金相比,复合材料的损伤容限和抗蚀性要好得多,显著提高了耐久性,同时也提高了安全性。

(2) 更高的经济性。

现在飞机的成本不仅仅是一次

表2 几种型号飞机复合材料应用比例

飞机型号	复合材料应用/%
A321	近20
B777	11
F-22	24
F-35	36
B-1	29
B-2	38

性的购买价格,还要考虑油耗、维修成本、寿命延长等,成本的概念已经扩大为全寿命成本,这就是为什么很多航空公司对B787都很感兴趣的原因。虽然复合材料比铝合金贵得多,但飞机结构重量大幅度减轻所带来的经济效益(包括耗油率降低等)远远超过了它的负面效应。另外,B787的外场维护间隔时间从B767的500h提高到1000h,维修费用比B777降低了32%等,这些都带来了可观的经济效益。

(3) 更高的舒适性。

由于采用了整体结构的复合材料机身,使B787客舱的舷窗尺寸加大了30%,达280mm×480mm,这意味着旅客可以拥有更大的视野。由于复合材料结构具有优于铝合金的抗疲劳和抗腐蚀特性,可使客舱湿度和气压有所提高,从现有客机相当于外界2400m高度的气压改善至相当于外界1800m高度的气压,让旅客享受更舒适的空中旅行。

(4) 更高的环保性。

B787在首次隆重向世界亮相之前,就已获677架订单(中国订购60架),其总价值高达1100亿美元。能够获得如此好的市场效应,非常重要的原因是由于机身轻和发动机特性好而节省了20%的燃油,有利于经济性和环保性。B787预计每座百公里油耗比同类竞争机型低20%,这是通过发动机、气动、复合材料等多方面综合设计达到的。其中油耗降低的20%中有8%是依靠应用复合材

料实现的。

我国大型飞机的选材也必须充分考虑这4个“性”。我国的大型客机在将来推出之时,仍应具有当时的国际竞争力,也就是说,在4个“性”方面要具有届时能与波音、空客同类客机竞争的能力。同时还要充分考虑大运与大客“材料共用,成果共享”的原则,尽早具备自主供应关键材料的能力,重视先进材料特别是具有中国特色的先进材料的选用。

问:您对“要实现跨越式发展,不能以国外的现有水平为目标,而是要瞄准下一个目标,同时起跑,从而超越”这种观点有何看法?在材料方面我们又该做些什么?

曹睿晓:国外在飞机上大量应用复合材料来减轻机体重量的技术,也是经过长期实践得来的,技术已经比较成熟,而我国在这方面还处在起步阶段,所以首先应考虑我们现有的基础,借鉴国外的经验教训,通过预研、设计、验证、试航等一步步实干,不断减小与国外先进技术的差距,逐步接近或达到国外的先进技术水平。但在我们发展的同时,国外也在不断进步,这就需要瞄准下一个目标,用比别人更快的速度同时起跑,才能赶上并超越。虽然难度很大,但我们有信心在若干年以后能够拿出与国外有竞争力的飞机。目前国内复合材料市场供不应求,因此比铝合金的价格要高得多,所以我们要加快速度提高复合材料国内生产能力,多做一些高端产品,产量和质量同时提高。

中国要有自己设计制造的大飞机,是我国人民特别是几代航空人的梦想和愿望。在大型飞机上用更多自主研发生产的航空材料又是我国材料界和航空界特别关注的问题。只要我们所有参与大型飞机工程的工作者志在超越,脚踏实地,创新图强,团结和谐,中国自主设计制造的大型飞机就会在不久的将来展翅翱翔!

(责编 晓霖)