

先进航空涡扇发动机 风扇 / 压气机的先进结构与新材料

沈阳航空发动机设计研究所 梁春华 李宏新 凌 瑶



梁春华:

高级工程师, 1991年毕业于郑州航空工业管理学院科技情报管理专业, 一直在沈阳航空发动机设计研究所从事航空发动机情报研究工作。获部级科技成果奖3项, 所级科技成果奖15项, 发表论文近30篇

未来高推重比航空涡扇发动机的风扇和压气机, 正在向级增压比更高、结构更紧凑、质量更轻、气动稳定性更好、费用更低的方向发展。20世纪80年代后期以来, 美国、欧洲按照IHPTET、UEET、ACME等航空发动机先进技术研究和发展计划开发了大量的风扇和压气机新结构(如整体叶盘/环、空心叶片等)与新材料部件(如树脂基复合材料机匣、金属基复合材料整体叶环等), 为研制未

高推重比是先进发动机性能的重要指标, 减轻质量是提高这一指标的重要途径。减轻质量要求采用新的轻质结构, 而轻质结构的实现又离不开新工艺和新材料。航空涡扇发动机风扇/压气机的先进结构及新材料部件的研制和应用, 将为研制未来的风扇/压气机打下坚实的基础

来的先进风扇和压气机打下了坚实的技术基础。

风扇和压气机新结构

在大量开发掠形转子叶片、弓形静子叶片、吹吸叶片、分流小叶片等先进气动叶片的同时, GE公司、PW公司等也在不断探索整体叶盘、整体叶环和空心叶片等新颖的结构技术(特别在减轻风扇和压气机的质量方面), 以进一步提高风扇和压气机的性能, 提高发动机推重比。

1 整体叶盘

整体叶盘结构是采用先进的连接工艺将叶片和盘成一体, 省去常规的叶盘联接的榫头和榫槽的一种结构。这种结构省掉了叶片榫头和榫槽连接的自重和支撑这些质量所需的结构,

从而大大减轻风扇和压气机转子的质量; 没有榫槽泄漏通道, 确保叶根处的流路不中断, 并减少级间凹处的风阻损失, 从而提高性能; 无榫槽泄漏, 使压气机转子温度较低, 从而提高转子的寿命; 省去安装边以及螺栓、螺



母、锁片等连接件,从而大大减少零件的数量;没有榫槽,避免了出现榫槽损伤以及断裂等潜在故障隐患,从而大大提高可靠性。

整体叶盘结构的研究工作始于20世纪60年代。为了解决影响其应用的加工和修理问题,GE、PW和R·R等公司开展了探索和研究,开发出大量的新工艺方法。这些方法包括电子束焊接、扩散连接、线性摩擦焊接、惰性焊接、五坐标数控铣削加工或电解加工,还采用热等静压法将钛合金粉末与精锻叶片复合成形为整体叶盘、采用热等静压法将粉末高温合金盘和精铸叶片扩散连接成整体叶盘。PW公司还在IHPTET计划下为F119发动机开发了采用多种高性能机加工方案(工艺建模技术、先进切削工具、应用冷却剂和工艺控制等)的低费用制造技术,收到了降低费用和缩短时间的效果。开发的修理工艺包括:预先去除叶片前端的小卷边,然后打磨使之圆滑过渡;预先切掉叶片前缘的大卷边,用电子束焊或其他焊接方法补焊,再按叶型样板进行打磨;对一些小掉块,可用钨极惰性气体焊修补;采用激光扭曲焊接、扩散连接等修理技术修理整体叶盘。这些方法目前已经发展得较为成熟。

目前,风扇和/或高压压气机整体叶盘结构已经大量应用于航空涡扇发动机上,如GE公司的YF120、F110-132、F414增推型、F136、GEnx等发动机;PW公司的F119、F100-229A、F135发动机和IHPTET计划验证发动机;R·R公司的EJ200、BR715、TRENT1000等发动机;俄罗斯留里卡设计局的AL-31F、AL-37FU等发动机。可以预见,整体叶盘结构不但现在是,而且未来也是航空涡扇发动机风扇和压气机的关键技术。

2 整体叶环

受均质材料的制约,传统的金属材料压气机盘质量很大。为了减轻质

量,世界知名的航空发动机设计与制造商在发展整体叶盘的基础上,利用金属基复合材料密度低、强度高、高温性能好、刚度大等优点,进一步发展了金属基复合材料整体叶环。由于去掉了轮盘部分,加之较轻的支撑结构、较小的陀螺力矩或较低的轴承载荷,使整体叶环质量大大减轻,最多可减轻70%。

美国空军的金属基复合材料转子研究工作始于20世纪80年代。20世纪90年代初,AADC公司IHPTET计划XTC-16系列核心机4级压气机的第3和第4级采用碳化硅纤维增强的钛基复合材料整体叶环,大大减轻了转子质量,如第3级整体叶环转子质量只有4.5kg左右,而同样的镍基合金转子质量为25kg。20世纪90年代中期,与GE公司合作研制的ATEG验证机XTC76/2核心机5级高压压气机采用外圈增强的金属基复合材料的压气机转子,满足了高转速和高温的要求,减轻了盘的质量,降低了制造费用,改善了可维护性。

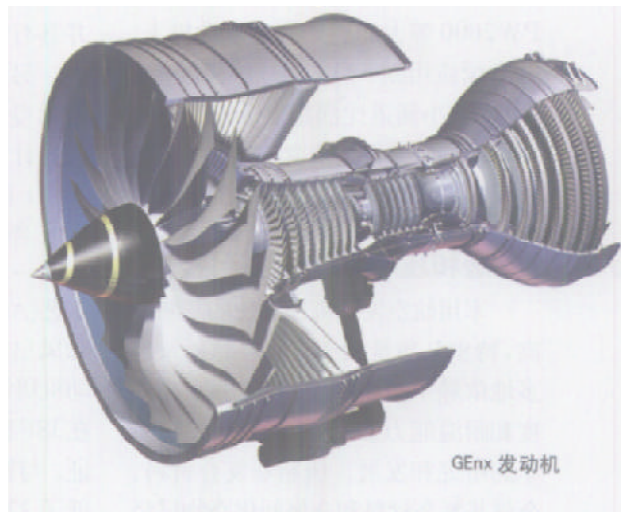
20世纪90年代,MTU公司研究的碳化硅纤维增强钛基复合材料整体叶环,已经完成了低循环疲劳旋转试验,计划将其应用到EJ200改进型发动机的前2级高压压气机上。SNECMA公司也采用基体涂覆纤维的方法制造了碳化硅纤维增强的钛合金基复合材料压气机整体叶环插件。

在1993年启动的先进材料燃气发生器(AMG)研制计划中,日本采用热压和热等静压方法加工了高压压气机金属基复合材料整体叶环,并成功地完成了破裂试验和循环寿命旋转地坑试验,验证了其破裂强度和目标寿命。在1999年启动的下一代超声速运输机环保推进系统研制(ESPR)计划下,日本开发并验证了采用基体涂覆

单丝带工艺加工的碳化硅纤维(SCS-6)增强的钛基(SP-700)复合材料风扇整体叶环转子。

3 空心叶片

为了满足高效高负荷高裕度风扇和压气机性能要求,低展弦比的宽弦叶片设计技术得到推广应用。但宽弦实心叶片质量过大,带来一系列强度



问题,为了减轻宽弦叶片质量,空心结构宽弦叶片应运而生。风扇空心叶片是通过采用新工艺方法实现能够减轻宽弦发动机叶片质量的一项新结构技术。但是,风扇空心叶片并不是绝对空心的,为了提高叶片的强度,在空腔内采用了一些加强结构。

风扇宽弦空心叶片的研究工作始于20世纪60年代。80年代初,R·R公司成功地开发了蜂窝内芯的第1代风扇钛合金宽弦空心叶片,并应用到RB211-535E4、V2500、RB211-524G、RB211-524H和BR710发动机上。该叶片由2块钛合金面板和1块蜂窝芯板经过专用的活性扩散连接工艺加工而成。在质量和结构完整性两个方面实现了最佳的折衷。部件抗疲劳和抗冲击的能力需要板与板间和板与蜂窝内芯连接处母体材料的特性来保证。

20世纪80年代末90年代初,R·R、PW、GE、SNECMA公司成功地开发了超塑成形/扩散连接(SPF/

DB)的钛合金宽弦空心叶片。该风扇叶片采用钛合金毛坯经切削加工成2半叶片,用真空扩散焊接成1个整体空心平板叶身,然后在真空炉内通过蠕变、弯扭初步成形,最后经超塑成形加工成最终叶型。由于具有气动性能先进、抗振能力较强、质量较轻、加工成本较低等特点,该叶片已经应用在TRENT、PW4084、GP7000、PW2000等大涵道比涡扇发动机上,并陆续应用到F414、F119、F135、F136等小涵道比涡扇发动机上。相信风扇和压气机宽弦空心叶片将成为未来涡扇发动机的标志性技术之一。

风扇和压气机先进材料技术

军用航空发动机推重比的不断提高,特别是质量的不断减轻将越来越多地依赖于高比强度、低密度、高刚度和耐高温能力强的先进材料。经过多年的研究和发展,树脂基复合材料、金属基复合材料和金属间化合物已经成为航空涡扇发动机风扇和压气机部件的理想候选材料。

1 树脂基复合材料机匣

由于具有质量轻、费用低、阻燃能力优良等特点,树脂基复合材料外涵机匣已经广泛地应用在涡扇发动机上,例如GE公司的F404、F414、F110-132、F136、GE90-115B、GENx等发动机;PW公司的F119、F135、PW4084等发动机;SNECMA公司的M88-2发动机。

F119发动机的碳纤维增强的聚酰亚胺基复合材料外涵机匣采用Dow-UT公司研发的先进树脂转移造型技术制造,工作温度为316,质量减轻15%~20%,成本降低30%~35%。该技术可以制造形状复杂的进气机匣,其所有外部气流通道的表面粗糙度、最终尺寸精度可与经机械加工的钛合金进气机匣相媲美,并可使进气机匣减少零件总数和取消许多劳动密集的装配工序,因而可以大幅度减轻结构质量和降低成本。PW公司

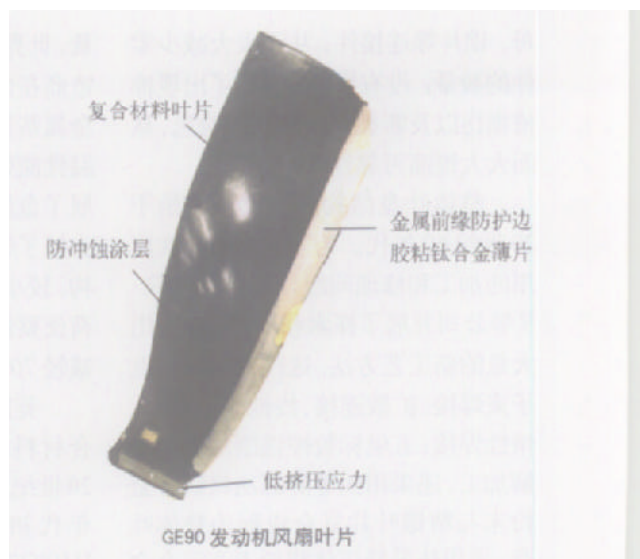
还在采用AFR700B超高温树脂基复合材料研制F119发动机外涵机匣等静止部件,研究F119发动机和综合高性能涡轮发动机验证机采用的Avimid K热塑性复合材料中介机匣,希望使后者完全能够承受347的高温 and 400kPa的大气压,并具有极好的热稳定性。

另外,PW公司在经济可承受的树脂基复合材料研究计划(后转至JSF研究计划)下的推进系统可承受的复合材料研究项目(ACP),与Dow-UT公司合作采用先进RTM工艺(AdvRTM™)制造风扇进口结构和风扇出口机匣。现在,为F119发动机研制的复合材料风扇进口机匣正在JSF计划下进行研究和验证。经验证,与钛合金的机匣相比较,费用降低了32%,质量减轻了44%。

2 树脂基复合材料风扇叶片

树脂基复合材料风扇叶片是实现高性能宽弦风扇叶片推广应用的又一种途径,它以GE90发动机复合材料风扇叶片为代表。

20世纪90年代,GE公司吸取GE36UDF(无涵道风扇)发动机的研制经验,成功地开发了GE90发动机树脂基复合材料风扇转子叶片,目前又推广应用到GENx发动机上。该叶片的叶身和叶根由IM7中长碳纤维与增强的8551-7环氧树脂组成的称为“大力神”的8551-7/IM7复合材料制成一体。叶片的压力面涂覆聚氨酯防腐涂层,叶身的吸力面涂覆一般的聚氨酯涂层;为了提高叶片抗大鸟撞击的能力,在叶片前缘胶粘钛合金薄片;为了避免工作中复合材料叶片脱层,在叶尖与后缘处采用Kevlar细线缝合。采用该材料和工艺,不但明显减轻了风扇叶片本身的质量,还减轻了其包容系统、盘以及整个转子系统的质量,收到了成本低、抗振(抗颤



振)性能好、抗损伤能力强等效果。

GE公司还尝试将树脂基复合材料应用到其他部件上。在IHPTET计划下,在涡轮发动机疲劳设备(TEFF)上,进行了全尺寸AFR700B复合材料支板的静态拉伸试验,验证了采用树脂转换压模工艺制造AFR700B高温聚酰亚胺基复合材料零件的可行性,这种结构具有扩大此类风扇支板零件的工作温度范围、质量减轻39%(与钛机匣相比)、成本降低40%(与钛机匣相比)等效果,并准备用于F120发动机上。

PW采用Dow-UT公司研发的先进树脂转移造型技术制造复合材料静子组件,即按每4片静子叶片一组成型,再由空心的内外环将其连成一体,形成静子组件。PW公司采用这一方法制造了F119发动机的导向器叶片。

3 金属基复合材料风扇/压气机转子叶片

金属基复合材料风扇/压气机转子叶片的研究工作始于20世纪60年代。20世纪80年代后期,GE公司设计、制造、试验了1组超塑成形/扩散连接工艺加工的空心碳化硅纤维(SCS-6)增强的钛基(Ti-6-4)复合材料转子叶片,并于90年代进行了优化和改进。目前,GE公司在美国政府投资的钛基复合材料涡轮发动机部

件联合体(TMCTECC)研究计划下开发并验证了F110发动机的金属基复合材料风扇转子叶片;在IHPTET研究计划下开发并验证了2级金属基复合材料和复合空心叶型的高增压比风扇,准备用于F414增推型发动机上。

20世纪90年代初,PW公司F119发动机的3级宽弦风扇叶片也曾计划采用由PW公司和汉密尔顿标准公司联合研究和开发的复合材料风扇叶片。PW公司在IHPTET研究计划核心机验证机——XTC66核心机5级高压压气机第2和第3级上也曾采用过金属基复合材料。

此外,MTU公司与德国航天中心(DLR)和Chemnitz技术大学材料与冲击工程研究所(LWM)也合作研究用于军用喷气发动机低压压气机

高的比刚度,允许去掉跨距中点的轴承腔;(3)静子件的减重带来的质量减轻。

20世纪70年代末,GE公司和特里达因CAE公司验证了金属基复合材料发动机轴的可行性。20世纪80年代末至90年代初,美国陆军为GE和达信集团来科明公司提供资金进一步研制金属基复合材料发动机轴。GE公司F110发动机的低压轴,如果采用金属基复合材料制造,质量可减轻68kg。

20世纪90年代,GE公司在IHPTET计划联合技术验证发动机(JTDE)计划下开发和验证的钛基复合材料发动机低压轴技术,在XTC-76上得到了验证。该低压轴采用碳化硅增强的钛基合金材料制造,质量较Incol合金轴的轻30%,刚度较钛

合金轴的高40%,寿命和耐用性也有所改善。另外,欧洲国家在VITAL计划下也在开发和验证金属基复合材料的发动机轴技术。
5 金属间化合物压气机外环和叶片

由于具有密度低、刚度高、高温强度

好以及防火能力强等突出特点,美国在IHPTET计划下较多研究了镍铝和钛铝金属间化合物基复合材料涡轮发动机部件。高强度纤维增强的斜方晶的钛铝基复合材料压气机后转子,满足了IHPTET计划第2阶段的质量减轻40%、出口温度提高93(200F)的目标。钛铝压气机外环和叶片在部件和发动机结构评估研究计划(CAESAR)下进行了研究和验证,验

证了其质量轻、耐温度能力强等特点。

结束语

推重比已经成为先进发动机性能的重要指标,减轻质量是提高这一指标的重要途径;减轻质量离不开新颖的轻质结构,而轻质结构的实现又离不开新工艺和新材料。

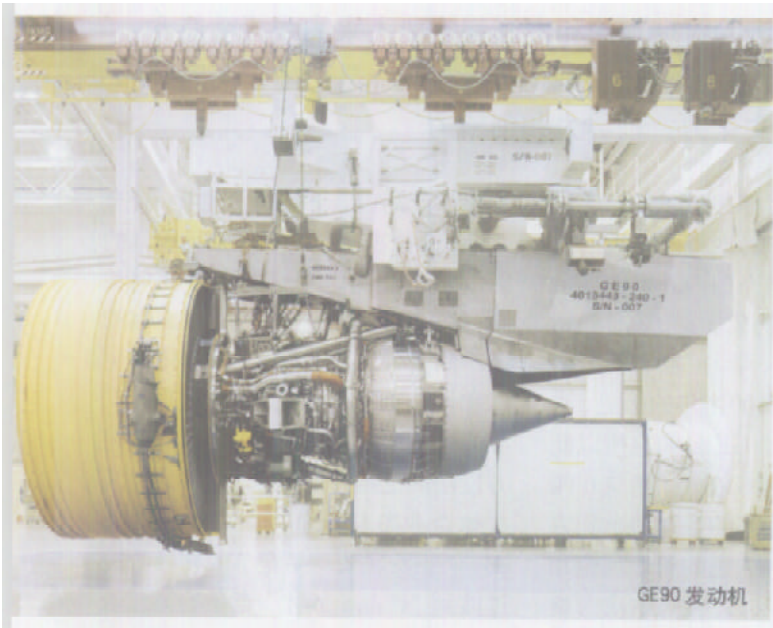
先进的结构和新材料对于未来风扇和压气机的发展来说具有非常重要的作用,随着整体叶环、金属基复合材料转子叶片等技术的验证和成熟,这些部件必将成为未来航空涡轮发动机的关键技术。

提升航空工业核心能力的过程,是一个漫长的投入产出过程,关键技术达到工程应用需要花费10年、20年,甚至30年的探索和预研时间,投入的经费也是巨大的,对此我们必须采取分期计划、分步实施的研究方式,实现探索一代、预研一代、应用一代的可持续发展。

参考文献

- 1 梁春华,杨锐.航空发动机宽弦空心风扇叶片的发展及应用.航空发动机,1999(2):54~58
- 2 Kuriyama T, Miyagawa H, Ugama M, et al. Status of AMG(Advanced Material Gas-generator) research and development program. ASME 2001-GT-0219
- 3 Kono A, Yamada T, Tsuzuku T, et al. Manufacturing process development of titanium matrix composite ring. ISABE 2003-1139
- 4 Veitch L C, Crowe C R. An assessment of the DARPA affordable polymer matrix composite program. 29th International SAMPE Technical Conference, Orlando, FL(1997).
- 5 Ginty C A, Gray H R. Emerging applications of advanced materials in NASA's HITEMP program. 40th International SAMPE Symposium, Anaheim, CA(1995)
- 6 Walther R, Frischbier J, Selmeier R. Aeromechanical design of engine compressors. ISABE-2001-1241

(责编 根山)



的整体叶盘的碳化硅增强的钛基复合材料叶片。在AMG研究与研制计划中,日本采用超塑成形和等热铸造工艺,制造了金属基复合材料高压压气机叶片。

4 金属基复合材料低压轴

金属基复合材料轴能够大幅度地减轻新型发动机的质量。这得益于以下方面:(1)采用复合材料轴本身的质量减轻;(2)金属基复合材料具有很