

纤维增强树脂基复合材料部件 在航空涡扇发动机上的应用

沈阳发动机设计研究所 梁春华



梁春华

研究员。主要研究方向：航空发动机情报研究。荣获“九五”、“十五”国防科技情报研究成果奖 3 等奖各 1 项，中国一航 95 优秀科技情报成果 1 等奖和 3 等奖各 1 项，所科技进步 2 等奖 3 项，所科技进步 3 等奖 14 项。发表论文 30 多篇。

随着气动热力学、结构力学和材料科学等的飞速发展，较高的性能、良好的经济性、极好的环保特性和很高的可靠性已经成为运输机用大涵道比涡扇发动机研制的主要目标，而较高的推重比、较低的油耗、较少的

随着气动热力学、结构力学和材料科学等的飞速发展，较高的性能、良好的经济性、极好的环保特性和很高的可靠性已经成为运输机用大涵道比涡扇发动机研制的主要目标，而较高的推重比、较低的油耗、较少的信号特征、极高的可靠性已经成为战斗机用小涵道比加力涡扇发动机研制的主要目标。

信号特征、极高的可靠性已经成为战斗机用小涵道比加力涡扇发动机研制的主要目标。

研究表明，在不改变目前航空涡扇发动机结构布局的前提下，上述目标要想取得突破，创新的材料和新颖的结构方案是极其关键的因素。树脂基复合材料以其具有：(1) 制件质量轻、强度高，具有突出的比强度和比模量；(2) 制件成型方便，成本较低；(3) 成型工艺成熟等明显优势，并已经成为航空涡扇发动机设计与制造商所青睐的高性能冷端部件的重要候选材料，已经广泛地应用在大涵道比涡扇发动机和小涵道比加力涡扇发动机的外涵机匣、转子叶片、静子叶片、包容机匣以及发动机短舱和反推力装置等部件上。

纤维增强树脂基复合材料部件的开发和应用

纤维增强树脂基复合材料在航空涡扇发动机上的应用研究始于 20 世纪 50 年代。目前，英国的 R·R 公司、美国的 GEAE 公司和 P&W 公司、德国的 MTU 公司和法国的 SNECMA 公司都进行了大量的开发和验证工作，也都取得了很大的进展，已经将树脂基复合材料成功地应用到部分大涵道比和小涵道比航空涡扇发动机上。

1 GEAE 公司

为了减轻发动机质量，降低生产成本，GEAE 公司已经将先进的纤维增强树脂基复合材料应用到航空涡扇发动机的较多低温部件中，如外涵

机匣、风扇转子叶片、包容机匣。公司还进行了应用于静子叶片、风扇框架、整流罩、叶冠等部件的大量开发和研究工作。

(1) 外涵机匣。

20世纪70年代,在NASA赞助的安静清洁短途试验发动机(Quite Clean Short Haul Experimental Engine)研究计划下,GEAE公司开发了PMR-15聚酰亚胺树脂基复合材料外涵机匣,积累了一些经验和数据。20世纪70年代末、80年代初,在空军材料试验室合同(F33615-78-C-5086)下,GEAE公司作为主合同商与Rohr工业公司合作,选择TF34发动机的复杂的多种金属复合材料风扇机匣低成本制造技术。

20世纪80年代,GEAE公司在NASA和美国海军的资助下,按照NAS3-21854号合同,选择碳纤维增强的PMR-15聚酰亚胺树脂基复合材料设计、制造和验证了F404发动机外涵机匣。F404发动机复合材料外涵机匣的壳体由实心复合材料层板组成,两端分别与钛合金法兰边铆接;所选的材料为联合碳化物公司的T300纤维织成的石墨纤维布,再用PMR-15为基体的化学制剂浸泡。制造外涵机匣的基本原理是在1个钢制圆筒模具外表面上,用真空热压袋制出圆柱形碳纤维增强的PMR-15复合材料层压板壳。圆筒模具要便于铺设Gr/PMR预浸料,并且要保证完成的零件流道表面与模型一致。根据不同的强度、刚度和结构要求,层压板在厚度、材料方向上要有各种变化。成型之后,外涵壳体要切成上下2个半圆筒体,前后钛安装边铆接到位,纵向复合材料安装边及其他所有零件都装上,组成一台外涵机匣。经试验验证,该机匣满足了设计要求,并成功地替代了F404发动机的原钛合金机匣。经试验和使用验证,与原钛合金机匣相比,F404发动

机复合材料外涵机匣质量减轻15%~20%,费用降低30%~35%,强度和寿命方面没有损失,且阻燃能力优良。

在F404发动机上取得成功,该复合材料外涵机匣又推广应用到F414、F110-GE-132和F136发动机等小涵道比涡扇发动机,以及GE90-115B、GENX等大涵道比涡扇发动机和联合涡轮先进燃气发生器(JTAGG)验证机上。F136发动机树脂基复合材料外涵机匣与F110-GE-132发动机的相似,质量较金属材料的减轻9kg。

(2) 风扇转子叶片。

20世纪60年代,GEAE公司研制的TF39发动机就曾尝试采用碳纤维增强的树脂基复合材料风扇叶片,因没有通过吞鸟(0.68kg)试验而失败。尔后,GEAE公司又相继在F103、QCSEE等发动机

上开展了复合材料风扇叶片的应用研究;特别是装有复合材料风扇叶片的GE36UDF(无涵道风扇)发动机,在地面台架和飞行试验台上进行了700h的试验,并通过了吞入3.63kg鸟的试验。

20世纪90年代,GEAE公司在上述工作经验和数据的基础上,成功地地为GE90发动机开发了先进树脂基复合材料风扇转子叶片。GE90发动机风扇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,将钛合金薄片用3MAF191胶粘在叶片前缘上;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。为了解决腐蚀问题,GE90发动机风扇的复合材料叶片采用小的叶尖切线速度;风扇叶片上涂覆已在CFM56、CF6等发动机上验证过的聚氨酯防腐涂层



等防护措施。这样,该风扇叶片不但明显减轻了本身的质量,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,进而达到了降低油耗和提高效率的目的。

在GE90发动机上取得成功,GEAE公司又将树脂基复合材料风扇转子叶片技术应用到了GENX发动机上。GENX发动机树脂基复合材料风扇转子具有叶片数量少(18片)、效率高、噪声低等特点。

(3) 包容机匣。

GEAE公司开发的芳纶纤维缠

绕的风扇机匣包容环技术已经逐步成熟,现在已经成功地应用于CF6-80C2、GE90、CFM56等发动机上。与不锈钢风扇机匣包容环相比,其质量减轻了35%~50%。

CF6-80C2和GE90发动机采用相似的铝合金与Kevlar复合材料复合加工的风扇机匣包容环。GE90发动机风扇包容环在很薄的铝合金壳体上,缠绕几十层Kevlar织成的条带,条带外面再覆以环氧树脂。采用铝机匣,并在其外表面纵横铣出许多减质的槽道,主要用于保持一定圆度的环腔。GE90发动机复合材料风扇叶片被设计成当叶片从叶根断裂被甩出、撞到包容环上时,在径向冲击的压缩负荷作用下容易碎断,变成几块碎片,这种设计对包容环特别有利。这种包容环包容能力强,厚度虽很大,但由于主要是用复合材料制作的,因此质量很轻。

CFM56发动机风扇机匣由几节不锈钢环采用电子束焊焊接而成,并采用以Nomex为芯的玻璃纤维蜂窝夹层结构。为了增强其包容性,还特意加厚机匣壁和前安装边,并在机匣外壁上做出4圈特别的整体加强肋,以增强机匣的安全性,能起到包容碎片的作用。

此外,GEAE公司还尝试将树脂基复合材料应用到其他部件上。如YF120发动机的风扇静子和静子叶片采用碳纤维增强的PMR-15基复合材料制造。在IHPDET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部件的可行性,并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,并准备应用于F120发动机。

GEAE公司还采用碳纤维

(T650-35)增强的VCAP-75基复合材料,加工了F110 IPE发动机原型的后部整流部件,并在海平面条件(最高温度达到330℃)进行了300h的试验验证。试验结果表明,该部件材料性能良好,抗微裂纹特性优良,热氧化稳定性优于PMR-15的。

2 P&W公司

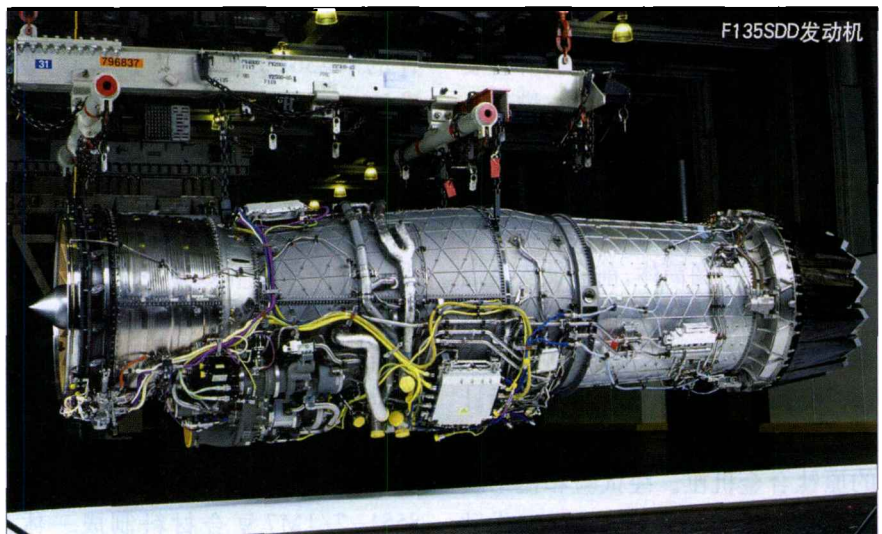
树脂基复合材料在P&W公司涡轮发动机上的应用始于20世纪70年代。至80年代,P&W公司首先从外部部件入手,尝试研究了喷管外部调节片、加力燃烧室筒体、风扇包容环、风扇机匣等部件。尔后,一直在开发和尝试用于其他一些低温部件。

1993年,P&W公司领导的研究小组在美国国防先进项目管理局(DARPA)起动的经济可承受的树脂基复合材料研究计划下,承担了推进系统经济可承受的复合材料(ACP)研究项目。该项研究的目的是开发能够使未来超大涵道比发动机制件质量减轻和费用降低的先进加工工艺和技术。P&W公司负责部件的集成、组装和试验;Northrop Grumman公司负责开发发动机短舱(核心机整流锥和风扇进口整流锥);DuPont公司负责开发风扇叶片包容结构、相关的材料和加工工艺;McDonnell Douglas公司负责将纤

维放置在风扇整流锥门(FCD)上;Alliant Tech公司提供纤维放置技术;Dow-UT公司负责采用RTM工艺,加工风扇出口机匣(FEC)和风扇进口机结构件(FIC)。受投资决策的影响,美国国防先进项目管理局于1995年决定停止FY96~FY99的投资,因此,所有6个项目受到不同程度的影响:风扇出口机匣项目和风扇包容机匣2个项目停止研究;风扇转子叶片和风扇进口结构2个项目的研究和验证工作转移到JSF计划中进行;风扇整流罩门和核心机整流罩2个项目的研究与验证工作转移到C-17计划中进行。目前,P&W公司已经成功地将树脂基复合材料应用到外涵机匣、喷管外调节片、静子叶片等部件上。

(1) 外部部件。

1975-1977年间,在美国海军赞助的研究计划下,P&W公司委托TRW和CHI公司设计并制造了树脂基复合材料发动机外部部件。这些部件包括采用玻璃纤维增强的NR-150B2与PMR-15基复合材料制造的盖板,采用连续玻璃纤维增强的NR-150B2与PMR-15基复合材料制造的油箱垫片和采用HT-5纤维增强的Kerimid 601基复合材料制造的传输管等。这些部件质量减轻和费用降低的潜在在F100发动机上得到了验证。



(2) 喷管调节片。

1976年, P&W公司在自己投资的研究计划下, 开始尝试开发树脂基复合材料战斗机发动机喷管外调节片。汉密尔顿标准分公司(HS1)最初采用HMS/NR-160B2加工了15片喷管外调节片, 并在F-15战斗机/F100发动机上成功地进行了飞行试验; 尔后, 在美国空军研究计划下采用C-6000/NR-150B2加工了52片喷管外调节片, 在F100发动机和在F-15战斗机/F100发动机上成功地进行了地面和飞行试验。经验证, 该调节片质量减轻22%, 但由于NR-150B2很难获得, 费用很高, 最后改换成了PMR-15材料。经过多年的验证和发展, 于20世纪90年代, 碳纤维增强的PMR-15基复合材料喷管外调节片应用到了F100-PW-229发动机上。

近期, P&W公司在研究采用AFR700B制造后机身多用途喷管等, 以提高发动机的隐身性能。这种材料将可能应用于配装在F-22战斗机上的F119发动机的推力矢量喷管和IHPTET计划JTDE验证机发动机的球形收敛调节片喷管(SCFN)的外调节片上。F119发动机喷管周围的一些金属件也可能以陶瓷基复合材料来代替, 以提高红外及雷达隐身能力。

(3) 风扇机匣。

树脂基复合材料风扇机匣技术在P&W公司已经发展得比较成熟。目前, PW4000发动机采用了RTM工艺加工的风扇机匣, PW2000和PW4000发动机采用了复合材料制造的风扇出口机匣内衬, F119和F135发动机采用了树脂基复合材料外涵机匣, 都收到了减轻质量和降低成本的明显效果。

采用碳纤维增强聚酰亚胺基复合材料的F119发动机外涵机匣由Dow-UT公司研发的先进树脂转移成型技术制造, 工作温度为316℃,

质量减轻15%~20%, 成本降低30%~35%。这种制造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。

美国空军还在研究AFR700B超高温树脂基复合材料。AFR700B以氟单体为基, 耐温能力比PMR-15聚酰亚胺基复合材料的高出55℃, 具有更高的热稳定性和工艺性, 在371℃下可工作1000h, 在316℃下可工作10000h, 可用来取代钛合金。P&W公司正在采用该材料研制F119发动机外涵机匣等静止部件, 以替代原部件; 还正在研究将Avimid K热塑性复合材料用于F119发动机和综合高性能涡轮发动机验证机的中介机匣, 希望使其足能承受347℃的高温及 4×10^5 Pa(4个大气压)的压力, 并具有极好的热稳定性。

另外, P&W公司先是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ACP研究项目上与Dow-UT公司合作, 采用RTM工艺制造风扇进口结构和风扇出口机匣。已经成功地验证了风扇出口机匣所具有的承受叶片掉块造成的动力载荷的能力、抗疲劳与损伤容限能力、抗鸟撞能力、抗硬体外来物损伤能力、抗冰雹能力和弯曲能力, 但是, 受不能继续投资的影响, 风扇出口机匣在叶片飞出事件中可生存性的包容试验和加速耐久性试验停止; 按PW4168发动机的几何形状确定了风扇进口的结构, 加工了3个带整体A形安装边和后隔板安装边的内套筒方案验证部件; 为F119发动机设计了复合材料风扇进口机匣(由Dow-UT复合材料产品公司采用先进RTM技术一次成形制造),

现正在JSF计划下进行研究和验证。经验证, 与钛合金的相比较, 该机匣费用降低了32%, 质量减轻了44%。

(4) 风扇叶片。

P&W公司已经将树脂基复合材料应用于涡扇发动机的风扇和压气机的叶片上。PW2000和PW4000发动机的风扇出口导向叶片的内外环和低压压气机的内环采用了注射成形的Ultem材料; PW4056/4168/4084发动机风扇出口导向叶片采用了压制成型的碳纤维增强的环氧树脂基复合材料; PW4084和PW4168发动机压气机采用了3M公司的PR500环氧树脂基复合材料风扇静子, 较钛合金的质量减轻了39%, 成本降低了38%。

P&W公司采用Dow-UT公司研发的先进树脂转移成型技术制造复合材料静子组件, 即对风扇机匣上的44片静子叶片, 按每4片一组成型, 再由空心的内外环将11块连成一体, 形成静子组件。P&W公司采用这一方法制造了PW4084直径为3.04m的全碳风扇静子、PW4168直径为2.71m的风扇静子和F119发动机的导向器叶片。另外, P&W公司还采用耐温能力比PMR-15树脂基复合材料高55℃的AFR700B高温树脂基复合材料研制F119发动机压气机静子。

P&W公司在经济可承受的树脂基复合材料研究计划(后转至JSF计划)的ACP研究项目下, 开发和验证了采用2D纤维结构的复合材料风扇转子叶片。为了适应鸟撞试验的需要, 对该叶片作了改进: 在高应力区增加了材料; 改变了叶根角和叶根曲度, 以软化叶根到叶型的转变; 采用3D编织和其他纤维结构, 加强结构韧性。目前, 该叶片正按照JSF研究计划进行评估和验证, 准备改进F119和F135发动机。

(5) 风扇包容机匣。

在P&W公司, 树脂基复合材料

应用于涡扇发动机风扇包容机匣已经较为成熟。PW2000和PW4000发动机采用复合材料制造了风扇包容环。PW4084等发动机采用芳纶纤维缠绕的风扇机匣包容环替代不锈钢,使质量减轻了35%~50%;其包容环结构与GE90发动机的基本相同。

另外,P&W公司在经济可承受的树脂基复合材料研究计划的ACP研究项目下,开发和验证了风扇包容机匣。采用ATP技术加工了3个风扇包容机匣,形成等格栅结构的搭接肋。经验证,机匣实现了减轻质量的目标;冲击试验则表明,等格栅加强肋到壳体的界面成功地承受了叶片掉块的冲击。但由于1996年投资中断,没有进行进一步的性能试验。

此外,PW4168发动机采用了蜂窝夹层结构的复合材料的短舱,双马来酰亚胺核心机整流罩及碳纤维增强的环氧树脂复合材料反推力装置。

3 R·R公司

20世纪60年代,R·R公司开始开发玻璃纤维增强的树脂基复合材料部件。1977年投入使用的第一代垂直起飞战斗机的升力发动机RB162发动机,就采用了Kerimid 60材料制造的压气机机匣、静子和转子叶片。虽然该发动机仅用于起飞时的几分钟,但是,到目前为止,仍是唯一采用全复合材料压气机的投入使用的航空发动机。

20世纪60年代,R·R公司开发了Hyfil结构的碳纤维增强的树脂基复合材料风扇叶片,并在Conway发动机上得到验证,但将这一结构放大并尝试应用于RB211发动机风扇叶片时没有通过抗鸟撞试验,最后不得不改用钛合金叶片。20世纪70年代,R·R公司在相对简单的部件,如RB211-524发动机的整流罩门上,应用了树脂基复合材料,然后逐步扩展到整个发动机短舱;70年代后期,短舱和相关部件采用了碳

纤维增强的树脂基复合材料部件。尔后,R·R公司在中小型涡扇发动机——Tay发动机和BR700发动机上采用了树脂基复合材料的外涵机匣。近期,R·R公司又将其进一步扩展到TRENT系列发动机的风扇出口导向叶片。

R·R公司已经将芳纶纤维缠绕的风扇机匣包容环发展得较为成熟,应用到大多数TRENT发动机上。TRENT700发动机风扇包容环采用了类似RB211-535E4发动机的结构,但进行了一些改进;在铝制的环形壳体上缠绕多层用Kevlar材料织成的条带,然后用环氧树脂包覆。为了减轻铝壳体的质量且又具有一定的刚性,壳体上纵横交叉地铣出多道凹槽,形成具有格栅的薄机匣,称为“等格栅铝环”。这种新的包容环既具有较好的刚性,又具有足够的韧性,质量较轻(比RB211-535E4发动机的轻35%,比RB211-22B发动机的轻55%)。TRENT800发动机采用与GE90和PW4084发动机相同结构的芳纶纤维缠绕的风扇机匣包容环,替代了以前的不锈钢结构,使质量减轻了35%~50%。

R·R公司还在民用发动机验证计划中开发树脂基复合材料风扇机匣和风扇轴承支撑结构件,在军用发动机验证计划中开发碳纤维增强的树脂基复合材料中介机匣。

4 MTU公司

(1)为齿轮驱动涡扇发动机开发的复合材料部件技术。

MTU公司开展的齿轮驱动大涵道比涡扇发动机的研制工作,始于1985年起动的德国国家反转闭式整体桨扇发动机(CRISP)技术研究计划支持的CRISP项目。20世纪80年代中期,MTU公司在CRISP项目下开展了树脂基复合材料压气机静子叶片和转子叶片的设计、加工和验证工作。据资料ISABE-2005-1077报道,为了满足高性能压气机

的高气动性能、高结构强度、轻质量,以及短寿命周期和低费用的要求,MTU公司近期设计了新的CFRP静子气动试验件。为了降低2个端壁的负荷,该静子采用:明显的弓形结构;从叶根到叶尖叶片前缘弯掠;叶片前缘采用端弯设计(考虑附面层影响)。经过数值计算,与用经验获得的静子结构相比,该静子的近节流特性几乎相同,峰值效率略有降低,喘振线附近的损失大大减小。这些技术为后来开展的齿轮驱动涡扇发动机——PW8000的低压压气机复合材料部件研究和验证打下了很好的基础。

(2)为EJ200发动机未来改进开发的纤维复合材料结构件。

按照一项军用发动机技术研究计划(为改进EJ200发动机),2000年12月,MTU公司开始进行设计点总增压比为5.1的3级低压压气机试验件的试验。在从慢车到起飞的整个工作转速范围内,该试验件具有令人格外欣喜的喘振裕度和性能。

进口导流叶片(IGV)具有由碳纤维增强塑料(CFRP)制作的可调襟叶。其前支板是固定的钛叶片,有供油和供气通道;钛支板起机械支承结构的作用,以至在直接的高速冲击下也有足够的抗鸟撞能力。与实心钛叶片设计相比,可调CFRP襟叶能减轻总质量7kg。采用树脂转换模技术,其加工费用与空心钛襟叶设计的加工费用相当。结构设计阶段和在相关的部件机械试验表明:CFRP襟叶的振动水平较低;耐磨能力足够;支板/襟叶设计合理,可以确保具有抗鸟撞和抗喘振能力。

5 SNECMA公司

SNECMA公司开发的M88-2发动机的外涵机匣完全由PMR15树脂基复合材料制造,大大减轻了质量。该机匣前部3/5圆形扩散机匣分为上下两半,然后变成圆锥形;上下两半机匣由位于发动机水平中心

面下的法兰组装在一起。为了发挥复合材料的抗疲劳特性,复合材料外涵机匣的周向和纵向均采用了复合材料翻边结构;为了减少外涵机匣安装座的连接件数量,安装座采用了铆接结构。

树脂基复合材料涡扇发动机部件发展特点

综上所述,经过几十年的发展,纤维增强的树脂基复合材料已经被美国、英国、法国等航空发动机技术先进国家广泛应用在航空涡扇发动机的低温部件上。回顾与总结此类部件的研制历程和应用情况,可以发现其发展具有以下特点。

1 耐高温能力提高,应用范围扩大

目前,应用在涡扇发动机部件上的较为成熟的纤维增强树脂基复合材料主要包括纤维增强 PMR-15 基复合材料和凯芙拉增强环氧树脂基复合材料等。由于耐高温能力较差,这些材料还仅限于应用在工作温度较低的冷端部件上。

为了扩大纤维增强树脂基复合材料的应用范围,世界航空发动机技术先进国家开发了耐更高温度的多种树脂基复合材料,如 HT-S/LaRC-160、AS4/PMR-II、T40R/PMR-II、T40R/V-CAP-50、QuaHZ/AFR-700B、Celion 6K/LaRC-RP46 等,并在航空涡扇发动机或验证机上对其进行了验证。具体实例包括:在 F110 IPE 发动机上,对 VCAP-75 基复合材料后整流部件进行了验证;在 IHPTET 计划验证机上,对 AFR700B 基复合材料支板进行了验证,并准备应用于 F136 发动机上;在 IHPTET 计划验证机上,对 AFR700B 基复合材料外涵机匣等静止部件进行了验证,并准备用于 F119 发动机上。

由航空涡扇发动机性能不断提高和质量不断减轻的明显发展趋势决定,未来涡扇发动机不得不大量

采用先进复合材料和相应的新颖结构,因此,有理由相信,随着耐高温能力更强的新型树脂基复合材料的验证和成熟,树脂基复合材料涡扇发动机部件的工作温度将得到提高,应用范围也将逐步扩大,最终将应用到工作温度稍高的核心机上。

2 制造技术自动化,成本降低

经过多年的开发和研究,国外树脂基复合材料制件的制造技术已经发展得较为成熟,部分实现了自动化。采用自动化纤维铺放技术,可以取代手工铺放,降低成本 38%,减少劳动工时 60%,减少零件数量 80%;采用自动化 RTM 成形技术,可以降低纤维铺放成本,制造出形状复杂的制件,提高生产的可重复性,并将材料消耗降低到最低程度;采用先进的自动化纤维引导铺放、树脂膜浸渍和真空辅助 RTM 成型技术,可以实现复杂几何形状、大尺寸、厚截面和高精度的航空涡扇发动机部件的低成本制造。

与 RTM 相关的制造技术,如树脂膜浸渍技术(RFI)和真空辅助树脂转移成型(VARTM)技术尚在发展之中。2020年前,国外将进一步开发更加高效、可靠、低成本的制造方法和设备,探索研究具有良好加工性能和优良热稳定性的新聚合物合成技术。

3 设计与制造一体化,综合能力提高

复合材料的形成过程就是复合材料制件的加工过程。复合材料制件的应用不是简单的材料替代,而是需要设计、制造和材料研究人员针对特定的结构,共同选择和确定材料的组分比例与取向、制件的形状和质量等,使材料和制件在同一工艺操作过程中达到整体优化。

随着复合材料 3D 设计方法和设计制造一体化思想的形成和不断成熟,复合材料发动机部件将实现结构设计与材料选择的真正融合,综合性能潜力将得到充分发挥。

结束语

纤维增强树脂基复合材料在航空涡扇发动机部件上的应用,既是复合材料本身发展的需要,更是涡扇发动机增推减质的需要。由于具有质量轻、强度高、优越性能,且加工工艺较为成熟,纤维增强树脂基复合材料已经被航空发动机技术先进国家广泛地应用在涡扇发动机的低温部件上。

在纤维增强树脂基复合材料应用于涡扇发动机部件方面,我国已经开展了大量的开发和验证工作,并取得了较大的进展。北京航空制造工程研究所自行研制的以中等强度碳纤维为增强体、以 648 酚醛为基体的航空喷气发动机叶片是第 1 种国内自主开发的复合材料航空零件。该叶片长 365mm,扭角为 56°,根部有 1 个安装榫头槽,是用阴阳模一次成型出来的,基本上无需再加工。其质量是钛的 56%,离心力减小,对盘的要求也降低了;其榫头拉断强度是设计载荷的 5 倍。由于碳纤维的铺层取向可以调整,因而叶片的扭角、特别是动载条件下的扭角是可作调整的,修正设计的裕度较大。北京航空制造工程研究所等单位合作开发和验证的树脂基复合材料外涵机匣已经成功地应用到某型航空发动机上。

尽管如此,在纤维增强树脂基复合材料航空涡扇发动机部件的开发和应用方面,我国较国外先进水平还有很大差距。因而,很好地借鉴国外已经验证的先进材料和制造技术,充分地吸取国外成功的管理经验,全面地做好高性能纤维增强树脂基复合材料的开发,以及先进制造技术的研究、设计与制造一体化方法的应用等工作,对加快我国在纤维增强树脂基复合材料航空涡扇发动机部件的开发和应用工作具有非常重要的意义。

(责编 依然)