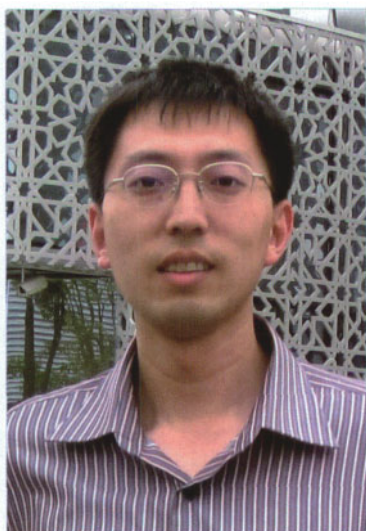


先进树脂基复合材料在大涵道比发动机上的应用

Advanced Polymer Matrix Composites for High Bypass Ratio Engines Application

中航工业沈阳发动机设计研究所 沈尔明 王志宏 滕佰秋 李晓欣



沈尔明

硕士,中航工业沈阳发动机设计研究所通用技术研究中心工程师。主要从事航空发动机的复合材料和非金属材料的设计、应用与研究。

进入 21 世纪以来,随着空客 A380、波音 787 等大型飞机的使用,大飞机的研制越来越受到世界各国的重视,并逐渐成为国家综合国力的重要组成部分。大涵道比涡扇发动机是大型飞机的重要组成部分,是决

大量使用树脂基复合材料大幅提高了大涵道比发动机多方面的优异性能。树脂基复合材料的使用需要材料、设计、工艺一体化协作。采用先进的复合材料制造技术,可提高性能、降低制造成本。要想为民用航空市场提供安全、舒适、节能、环保、具有竞争力的中短航程单通道商用干线飞机,使用复合材料是必经之路。

定大型飞机研制能否成功的关键,是制约大型飞机发展的“瓶颈”。

大涵道比涡扇发动机是指涵道比大于 4 的涡扇发动机,它具有大推力、低油耗和低噪声等优点,是军用和民用大型飞机广泛使用的发动机。20 世纪 70 年代以来,为满足大型军用和民用飞机对载重(客)量、航程距离、经济性、舒适性、安全性、环保性等要求的不断提高,大涵道比涡扇发动机也向大推力、低油耗、低噪声、高安全性、高可靠性、易维护要求的方向不断迈进^[1-3]。

国外复合材料的应用

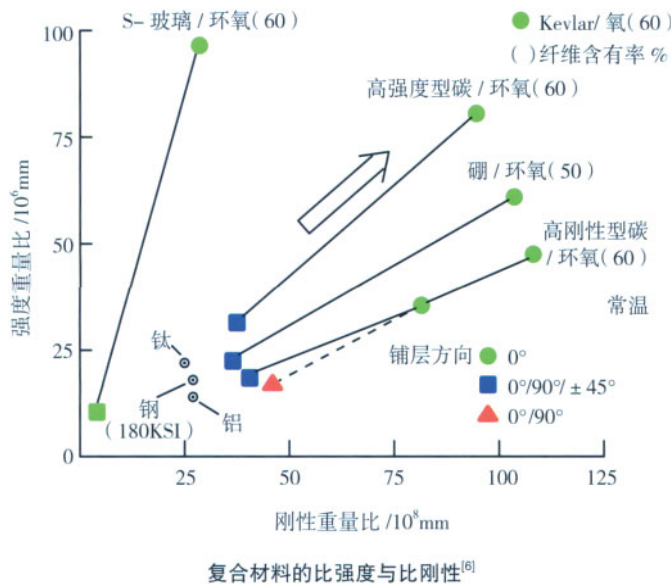
为了达到发动机的高推重比、低

耗油率、低噪声、低维修成本的需要,世界各主要发动机厂商都在大力推广复合材料在大涵道比涡扇发动机上的使用。原因在于复合材料具有金属材料无法比拟的低密度、高比强度和比刚度,复合材料与其他材料的力学性能比较见表 1,其中树脂基复合材料由于重量轻、技术较成熟等特点被最大程度地应用于一直以减重为需要的航空领域^[4]。树脂基复合材料在大涵道比发动机上的帽罩前锥、风扇转子叶片、风扇机匣及包容环、风扇出口导流叶片、风扇静子叶片、发动机短舱及反推装置、消音结构等部件上得到广泛应用^[5]。

1 帽罩前锥

表1 复合材料力学性能比较^[6-7]

材 料	比重 S	拉伸模量 E/ GPa	拉伸强度 X'/ MPa	抗压强度 X ^c / MPa	比拉伸模量 (E/S)/ GPa	比拉伸强度 (X'/S)/ MPa	比抗压强度 (X ^c /S)/GPa
玻璃纤维 复合材料	2.0	40	1650	1400	20.00	825.0	700.0
碳纤维 复合材料	1.6	140	1450	1050	87.50	906.3	656.3
芳纶纤维 复合材料	1.5	90	1650	300	60.00	1100.0	200.0
钢	7.8	206	400~2500	400~2500	26.40	50~320	50~320
钛合金	4.5	103	360~1400	360~1400	22.90	80~310	80~310
铝合金	2.8	69	55~700	55~700	24.60	20~250	20~250



复合材料的比强度与比刚性^[6]

发动机的帽罩前锥属于非承力结构件, CFM56、V2500、PW4000、PW6000 等系列发动机都较早采用了树脂基复合材料前锥以减轻发动机重量, 比如 PW4084 和 CFM56-3 发动机前锥使用了 Kinel 5504 复合材料。该材料是由法国 Rhone-Poulenc 公司以 Kerimid 601 双马来酰亚胺预聚体为基体, 用 6mm 的长玻璃纤维为增强体的聚双马来酰亚胺复合材料。该材料在减重的同时, 具有良好的力学性能、耐热性、电绝缘性、耐辐照特性, 成型加工也较容易^[8]。

2 风扇转子叶片

对于大飞机, 主要考虑其燃油经济性和续航能力, 航速要求没有战斗机高。而采用大涵道比涡轮风扇发

动机所具有良好的推进效率和低速性能, 正好可以满足这一需要。由于大涵道比涡扇发动机的主要推力来自流经外涵道的冷空气, 要满足较大的涵道比, 必须采用较大尺寸的风扇, 以达到提高流经外涵道空气流量。

以 GE90 发动机风扇为例, 它是世界上尺寸最大的风扇之一, 直径达到 3.12m, 转子由 22 片无凸台宽全复合材料叶片组成, 每片叶片长为 1.22m, 叶尖弦长为 0.533m, 榫头宽 0.305m。另外, 该风扇采用小增压比(1.52)、低叶尖切线速率(371m/s), 起飞时进入风扇的空气流量

为 1313kg/s。如此大的风扇叶片即使采用钛合金制造的空心叶片结构, 风扇重量仍然很大, 作用在轮盘上的离心力也十分巨大, 以至于轮盘无法承受, 榫头处的强度问题也难以解决。GE 公司吸取了 GE36UDF 发动机风扇叶片的研制经验, 采用树脂基复合材料制造风扇叶片。

GE90 发动机风扇叶片的叶身和叶根均采用赫克塞尔(Hexcel)公司的 8551-7 高强度抗损伤结构用增韧改性环氧树脂作为基体材料, 用 IM7 高强度、大伸长、中模量碳纤维作为增强体, 制造成被称为“大力神”的 IM7/8551-7 碳纤维增强环氧树脂复合材料预浸料。再由 400 层预浸料带从叶根到叶尖采用铺层逐渐减薄的铺层方式制成风扇叶片。为了提高叶片抗大鸟撞击的能力, 将钛合金薄片用 3M^RAF191 胶粘在叶片前缘上, 在叶尖与后缘处用 Kevlar 细线进行缝合, 这种结构不仅可以分散外物撞击能量, 还可以防止复合材料在叶片转动时发生脱层。

1994 年 9 月 26 日在位于俄亥俄州皮布斯(Peebles)的 GE 飞机发动机试验基地成功地完成了 GE90 发动机复合材料叶片的中等鸟撞取证试验。这标志着从 20 世纪 60 年代 R&R 公司研制 RB211 发动机、GE 公司的 TF90 发动机开始, 采用复合材料风扇叶片不能通过抗鸟撞击试验的历史成为过去。GE90 风扇采用了复合材料后, 该发动机的可靠性也大大加强, 以 GE90-115B 为例, 累计的 800 万飞行小时内只有 3 次因



GE90发动机复合材料叶片

鸟撞或外物打伤而更换3个复合材料风扇叶片。据统计,GE90发动机在投入使用的9年中,曾遭遇过85次鸟撞击,但都没有对风扇叶片造成明显损伤^[8]。

GENx风扇叶片设计方法与GE90-115B相同,但叶片数量降到18片(GE90-115B为22片),直径为2.82m的风扇又进一步降低了噪声。由于尖锐边缘的复合材料有磨损的趋向,在叶片的前缘、叶尖及后缘增加了可以更换的钛金属包覆层。这种叶片边缘也可以将外物打伤能量分散到风扇复合材料中去。复合材料风扇的使用除减重外,叶片数量的减少还可减少空气阻力、降低噪音(比CF6降低30%)。由于复合材料本身具有耐腐蚀、耐疲劳的特性,GE公司认为复合材料风扇叶片在使用中可以免维护。由于复合材料叶片受到外物撞击后,易于破碎成几块,在吸收了撞击能量的同时,还降低对风扇机匣和包容环的撞击程度,这使得复合材料叶片在减轻自身重量的

同时,还减轻了风扇包容系统、风扇盘以及整个转子系统的重量。另外,复合材料叶片还在抗颤振等方面优于金属叶片,更利于实现大涵道比,进而达到降低油耗和提高效率的目的^[9]。

SNECMA公司最新研制的LEAP-X发动机同样采用碳纤维复合材料制造的18片风扇叶片,其数量比CFM56-5C减少一半,是CFM56-7B的3/4。1.8m直径的叶片采用三维编织、树脂传递模塑技术(RTM)制造,可以给每架飞机节省超过450kg的重量^[10-11]。

3 风扇机匣及包容环

风扇机匣位于发动机的低压系统外侧,包容环位于风扇机匣的前部、风扇叶片的外侧。包容环的作用是防止因外物撞击或其他原因导致的风扇叶片断裂后飞出机匣外,保护飞机机体(尤其是客机)不会因飞出的断裂碎片的高速撞击而带来安全隐患。大涵道比发动机的第一级风扇叶片长度甚至达到1.22m(如

GE90叶片),如果采用金属材料制造的叶片从根部折断,断片飞出的离心力高达50~60t,直接撞击到飞机机体上,其后果可想而知。

欧美国家现役的大涵道比发动机的包容环基本采用相似的结构,即在铝制机匣壳体外侧用树脂基复合材料加强包容性。GE公司的CF6-80C2发动机,其包容环由铝合金和Kevlar复合材料组成。在冲压加工制造的6060铝合金机匣外,围有铝合金蜂窝层(蜂窝内腔尺寸为3.18mm,蜂窝最大厚度为70mm),在蜂窝结构外缠裹了67层Kevlar纤维条带,其外再复以一层Kevlar/环氧树脂复合材料保护层,蜂窝层与缠裹层间夹有碳纤维/环氧树脂复合材料。蜂窝结构的作用是增加机匣的刚性并起到部分包容作用,Kevlar缠裹层是包容环的核心,当风扇叶片的断片甩出并打到该层时,缠裹层会被拉伸向外鼓出,吸收断片的撞击能量,从而将断片包容住。这种设计不仅包容能力强,而且重量轻,因而得到广泛应用。R&R公司的RB211-535E4、RB211-524G/H与Trent 700、Trent800、P&W公司的PW4084发动机和GE公司的GE90均采用了这一设计方法^[8]。

再以GE90发动机为例,该发动机风扇包容环延续了CF-80C2发动机的设计,即在很薄的铝合金壳体外表面铣出很多纵横交错的深槽,铣后的壳体被称为“等格栅铝环”,再在壳体外侧缠绕65层Kevlar芳纶纤维织成的编织带,并覆以环氧树脂制成复合材料包容环。利用铝合金壳体保证机匣的圆度,利用强度高、韧性好的环氧树脂增强芳纶纤维复合材料提高对叶片碎片的抗冲击能力,在具有良好包容能力的同时,大大减轻了风扇机匣的重量,其重量比金属包容环减轻近50%^[12-13]。

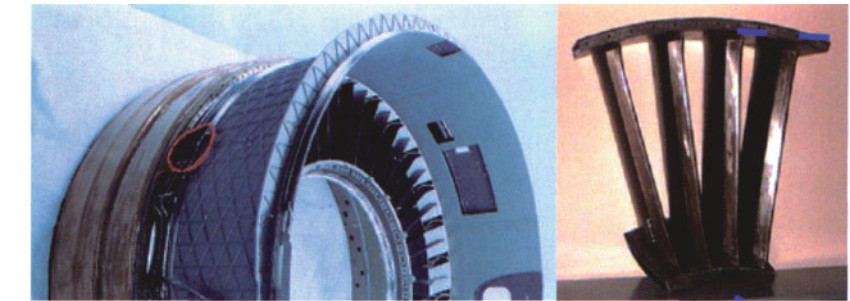
用于波音787的GENx-1B的风扇占发动机总重的33%,随着风扇叶



LEAP-X的复合材料风扇

片的重量减轻, GE 公司也要求 GEnx 发动机的风扇机匣减轻重量。为此, 该发动机的风扇机匣也采用了树脂基复合材料制造, 这是首次将复合材料用于大涵道比发动机的风扇机匣。GEnx 发动机风扇前机匣采用复合材料纤维织物以人字形的模式编织而成类似于草席的结构, 形式类似于鞋带的交叉排列, 并在交叉处铺上第 3 种织物来提高强度。风扇机匣采用 7.62mm 厚的三维织物以 $\pm 60^\circ$ 方式编织, 并在边角及弯曲处与二维织物混编在一起。编织采用自动化工艺, 织物绕一个风扇机匣形状的模具编织成平面状。在中部编织厚层作为风扇叶片的包容层, 从而取消了铝合金机匣上用的 Kevlar 垫。织物一经铺成, 便从机匣外引入树脂固化成型。其中 GEnx-1B70 风扇尺寸为 2.82m, 可减重 160kg。试验表明复合材料风扇机匣抗外物打伤能力优于铝机匣, 而且复合材料包容环是具有韧性、有回弹力的结构, 消除了腐蚀, 进而使发动机耐久性得以显著提高^[9, 14-18]。

P&W 公司的 PW2000、PW4084 发动机和 R&R 公司的 TRENT 800、TRENT 900、TRENT 1000 发动机也采用与 GE90 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, 使重量减轻了



复合材料风扇机匣出口导流叶片

35%~50%^[19]。

4 风扇出口导流叶片

大涵道比发动机的风扇出口导流叶片是用来消除风扇排出的旋流的, 并且使气流沿着涵道流出。另外, 该叶片作为中介机匣的承力件, 即在中介机匣中心轮毂处通过导流叶片与外环连接, 并传递负荷。

IAE 公司的 V2500 发动机风扇出口导流叶片采用玻璃纤维增强的复合材料制造。这些叶片的抗外物损伤能力、抗振动特性、抗腐蚀性和结构完整性已经得到验证。

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风扇出口导流叶片, 即对风扇机匣上的 44 片导流叶片, 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。PW4084 和 PW4168 发动机采用了 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%^[11]。

R&R 公司也将复合材料应用到 Trent 系列发动机的风扇出口导流叶片上^[16]。

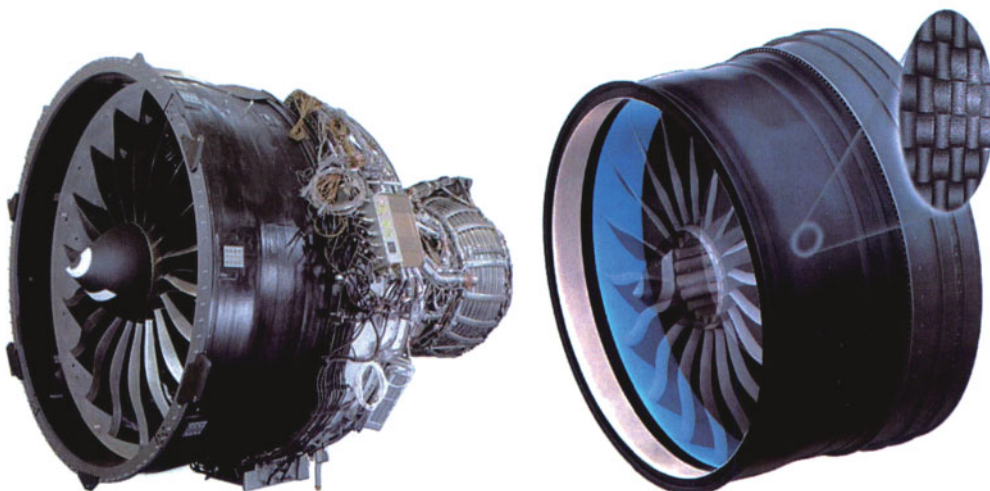
5 发动机短舱及反推装置

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。Trent 800 发动机采用双马来酰亚胺复合材料制造反推力装置, Trent 700 发动机采用碳纤维复合材料的反推力装置, 与金属件相比, 零件数量明显减少, 重量减轻 20%^[19]。

V2500 的发动机短舱进气道采用带有共固化加强肋的碳纤维增强环氧树脂外蒙皮和碳纤维增强环氧树脂泡沫蜂窝夹层结构, 风扇整流舱门采用整体碳纤维复合材料内嵌经防腐处理铝蜂窝夹芯结构。反推装置叶栅中采用碳纤维增强复合材料模压成型制造。反推移动罩上采用碳纤维护板。

PW4168 发动机也采用了蜂窝夹层结构的复合材料短舱、双马来酰亚胺整流罩及碳纤维增强环氧树脂反推力装置及格栅。此外, GE90 发动机的短舱也采用了复合材料短舱制造技术。CFM56 的发动机短舱同样采用碳纤维/聚酰亚胺和碳纤维材料混合复合材料结构^[20-21]。

6 消音结构



GEnx的复合材料风扇机匣^[9, 12]

CFM56-3 发动机的消音结构采用 Kevlar-49 纤维增强环氧树脂复合材料层压板制造,内嵌在风扇机匣内侧的消音衬板,其表面加 Hytre15526 和 4659 加强肋。V2500 发动机短舱内采用碳纤维 / 环氧树脂复合材料做低衬,用双层 Nomex 阻燃蜂窝材料夹芯制造线性消声衬板。GENx 的前风扇机匣内有整体式的降噪衬套,同样采用 Nomex 蜂窝芯子上包有玻纤增强环氧树脂复合材料的结构^[8]。

7 其他

GE 除了风扇叶片及前风扇机匣外,在增压级出口处的可调放气阀门管道也采用了复合材料,采用复合材料编织件及树脂转移模塑(RTM)制造技术,每一台发动机有一套复合材料管道,重量小于 3.63kg。这种由编织与 RTM 组成的工艺可使纤维应用自动化。通过自动化的环形编织过程,将纤维编成复杂形状,不留下导致应力集中的缝隙。只要有 3 层连续的编织物即可承受高的内压释放出的热空气。



复合材料反推装置

PW2000 和 PW4000 发动机的风扇出口导向叶片的内外环、低压压气机的内环都采用了注射成型的复合材料制造。

R&R 公司在民用发动机验证计划中开发复合材料风扇轴承支撑构件,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^[8,19]。

复合材料在国外大涵道比民用发动机构件上的选材情况见表 2。

表2 国外大涵道比民用发动机复合材料构件与选材表

序号	使用部位	复合材料体系	发动机型号	公司
1	帽罩前锥	玻纤 / 双马	PW4000、PW6000	P&W
2	风扇转子叶片	碳纤 / 环氧	GE90、GENx、LEAP-X1C	GE
3	风扇机匣及包容环	6060 铝合金 + 芳纶纤维 / 环氧	CF6-80C2、GE90、RB211、Trent 700、Trent800、PW4084	GE、R&R、P&W
		碳纤 / 环氧	GENx	GE
4	风扇出口导流叶片	碳纤 / 环氧	PW4084、PW4168	P&W
5	发动机短舱及反推装置	碳纤 / 环氧 + 铝蜂窝夹芯	V2500	IAE
		碳纤 / 双马	Trent 700、Trent 800	R&R
		碳纤 / 环氧	PW4168	P&W
6	消音结构	芳纶纤维 / 环氧	CFM56-3	SNECMA
		碳纤 / 环氧 + Nomex	V2500	IAE
		玻纤 / 环氧 + Nomex	GENx	GE

国内复合材料展望

经过近半个世纪的发展,树脂基复合材料已经被世界航空发动机技术先进国家的各大发动机公司广泛采用,并逐步应用于大涵道比发动机的各种低温部件上。以上复合材料在国外民用航空发动机上的应用情况的分析,可以指导国内大飞机发动机用复合材料选材的发展方向。

1 帽罩前锥

航空发动机的帽罩在发动机的最前端,属于非承力件,工作温度主要是大气温度,要具有耐冲刷、防冰的功能,可以采用玻纤增强双马树脂来制造。

2 风扇转子叶片

由于风扇转子叶片位于发动机的前端,是高速旋转部件,既要具有抗鸟类、冰雹撞击的特点,还要具有

耐气流和雨水冲刷的功能。而普通复合材料的缺点之一就是抗冲击性差、层件结合强度差。从我国现阶段情况看,先期采用钛合金制造空心叶

片以解决大尺寸叶片带来的重量过大问题,待国内复合材料制造技术水平提高后,采用高强碳纤维和增韧环氧树脂,采用三维编织和树脂传递模塑技术制造成型,再结合钛合金包边,是解决风扇叶片复合材料化的较好办法,既解决了大涵道比发动机风扇叶片尺寸过大带来的重量过大问题,也克服了复合材料本身不耐冲击,易分层的弱点^[22-24]。

3 风扇机匣及包容环

风扇机匣与包容环是保证飞机及乘客安全极为重要的组件之一。为防止断裂的风扇叶片飞出发动机而影响飞机机体安全,风扇机匣及包容环应具有高韧性。国内发动机在采用钛合金叶片阶段,风扇机匣采用铝基匣、包容环采用芳纶纤维增强环氧树脂复合材料能够满足需要。在将来若采用复合材料叶片,从国外发

动机的情况来看,随着叶片重量的大幅减轻,和转速相应的降低,以及复合材料叶片所具有的吸收撞击能量的特点,采用碳纤维增强环氧树脂复合材料制造风扇机匣与包容环就可以满足工况要求^[25-26]。

4 风扇出口导流叶片

风扇出口导流叶片属于静止件,其性能要求具有抗振颤、抗冲击损伤性。因此选用具有高振动频率的碳纤维增强耐高温环氧树脂复合材料,并注意在前缘采用金属包边就可以满足发动机的需要。

5 发动机短舱及反推装置

发动机短舱有外涵冷气流和内

(3) 采用先进的复合材料制造技术,可提高性能、降低制造成本。

(4) 要想为民用航空市场提供安全、舒适、节能、环保、具有竞争力的中短航程单通道商用干线飞机,使用复合材料是必经之路。

参 考 文 献

- [1] Kruckenberg T, Paton R. 李宏运译. 航空航天复合材料结构件树脂传递模塑成形技术. 北京: 航空工业出版社, 2009.1-14.
- [2] Charles H P. Composites for Propulsion Applications—An Overview. AIAA/ASTM/SAE/ASEE 24th JOINT PROPULSION CONFERENCE, Boston, Massachusetts: 1988.11-13.
- [3] 方昌德, 马春燕. 航空发动机的发

表3 国内大涵道比发动机复合材料选用表

序号	复合材料体系	使用部位	难度级别
1	玻纤 / 双马	帽罩前锥	易
2	碳纤 / 环氧	风扇转子叶片	难
3	6060 铝合金 + 芳纶纤维 / 环氧 碳纤 / 环氧	风扇机匣及包容环	一般 难
4	碳纤 / 环氧	风扇出口导流叶片	易
5	碳纤 / 环氧 + 铝蜂窝夹芯 碳纤 / 双马 碳纤 / 环氧	发动机短舱及反推装置	易
6	芳纶纤维 / 环氧 碳纤 / 环氧 + Nomex 玻纤 / 环氧 + Nomex	消音结构	易

涵热气流通过,在共用喷管组件里混合产生向前的推力,再利用叶栅反推力装置折返风扇气流,使飞机在着陆期间减速。由于其使用温度较低,采用碳纤维增强环氧树脂复合材料和蜂窝材料制造短舱及反推装置就可以满足需要,国内大涵道比发动机复合材料选用表见表3。

结 论

(1) 大量使用树脂基复合材料大幅提高了大涵道比发动机多方面的优异性能。

(2) 树脂基复合材料的使用需要材料、设计、工艺一体化协作。

展历程. 北京: 航空工业出版社, 2002:20-22,97-103.

[4] 刘长福, 邓明. 航空发动机结构分析. 西安: 西北工业大学出版社, 2006:66-70,88-91,438-440.

[5] 张津, 洪杰, 陈光. 现代航空发动机技术与发展. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 147-170.

[6] 陈博. 纤维增强环氧树脂复合材料成型工艺及其应用. www.newmaker.com.

[7] Sinha P K. Composite Materials And Structures. India Kharagpur: Composite Centre of Excellence, AR & DB, Department of Aerospace Engineering I.I.T. Kharagpur, 2006.5-10.

[8] 陈光. 航空发动机结构设计分析. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006:137-156,205-208,226-229,240-254,276-287,348-

351, 411-415,427-453,542-545.

[9] 陈光. 用于波音 787 客机的 GENx 发动机设计特点. 沈阳: 航空发动机, 2010,36(1): 1-6.

[10] 胡晓煜. 下一代窄体客机发动机最新进展. 沈阳: 航空发动机, 2010,36(1):53-57.

[11] 益小苏. 先进复合材料技术研究与发展. 北京: 国防工业出版社, 2006: 1-16, 84-146.

[12] <http://www.ge.com/geae/ge90>.

[13] Horibe Kyohei, Kawahira Kouji, Sakai Jun, et al. Development of GE90-115B Turbofan Engine. IHI Engineering Review, 2004,37(1):1-8.

[14] 陈亚莉. GENx 发动机在材料应用上的创新. 北京: 航空维修与工程, 2007,238(4): 54-56.

[15] 赵云峰. 先进纤维增强树脂基复合材料在航空航天工业中的应用. 北京: 军民两用技术与产品, 2010, 37(1): 4-6.

[16] Julia King. Composites for Aeroengines. London: Materials World, 1997, 5(6): 324-327.

[17] Meacham M. GENx Development Emphasizes Composites, Combustor Technology. Aviation Week & Space Technology, 2006, April 16.

[18] General Electric Performs F Aviation Week & Space Technology First Run of New GENx Engine. London: Flight International, 2006, March 21.

[19] 梁春华. 复合材料在航空发动机上的应用. 国际航空, 2005, 2: 60-62.

[20] 刘和善. 复合材料与未来航空发动机. 航空制造工程, 1995, 9: 6-8.

[21] 周瑞发. 未来航空发动机材料的发展. 燃气涡轮试验与研究, 1992, 4:44-55.

[22] 李杰. GE 公司复合材料风扇叶片的发展和工艺. 航空发动机, 2008, 34(4): 54-55.

[23] 陈光. 波音 787 用发动机设计特点. 沈阳发动机设计研究所, 2007.

[24] 陈光. 飞机发动机的防鸟撞设计与试验. 国际航空, 2009.11.

[25] 梁春华. 纤维增强树脂基复合材料部件在国外航空发动机上的应用. 航空制造技术, 2008(4): 32-37.

[26] 梁春华, 李宏新, 凌瑶. 先进航空涡扇发动机风扇和压气机的先进结构与新材料. 航空制造技术, 2007(1): 60-63.

(责编 小颖)