

# 国外航空发动机风扇包容机匣研究进展

## Research Development of Containment Casing of Aeroengine Fan Abroad

北京航空材料研究院 纪双英 王 晋 邢 军 益小苏  
空军驻保定地区军事代表室 袁学仁



纪双英

北京航空材料研究院硕士。研究方向为树脂基复合材料。

全复合材料风扇叶片的成功应用为复合材料风扇包容机匣的应用创造了条件,因此 GE 公司自上世纪 90 年代开始着手研究全复合材料风扇包容机匣。研究表明,碳纤维编织结构增强树脂基复合材料比铝合金具有更好的抗裂纹扩展能力,因此 GE 公司重点开发了碳纤维编织结构增强树脂基复合材料的风扇包容机匣,所用材料为 TORAYCA 的 T700 碳纤维和 CYCOM 的 PR520 环氧树脂。

年代,随着复合材料技术的日臻成熟,各种新型的包容技术纷纷发展起来,希望通过复合材料的使用使发动机更轻、燃油效率更高。

了包容住风扇叶片碎片,这种风扇包容机匣结构都比较厚,重量都比较大。CFM56 系列发动机采用的是纯金属风扇机匣。CFM56 系列发

涡扇发动机风扇包容机匣在发动机工作过程中具有重要作用。它不仅为通过风扇的外来空气提供进入的通道,而且对风扇叶片起到一定的保护作用。为防止风扇叶片失效断裂甚至飞出造成飞机坠毁和人员伤亡,还要求对风扇叶片碎片有包容作用。最早的包容机匣采用又笨又重的金属结构,自 20 世纪 70

### 包容机匣研究进展

#### 1 全金属风扇包容机匣

早期的风扇包容机匣全部采用高强度和高韧性的金属结构,这是因为当时金属材料体系和工艺较为成熟。这种设计要求当风扇叶片失效断裂飞出后,不允许穿透风扇包容机匣,为



CFM56 系列发动机风扇包容机匣

动机包容风扇机匣是由 17-4PH 不锈钢制造的 3 个圆环和 12 根加强肋焊接而成的。由于这种风扇包容机匣重量较大,相应的装配成本和燃油消耗都比较高。在大型发动机中金属包容机匣的重量要大于 300kg,是发动机中重量最大的部件,直接影响发动机的效率,所以减重势在必行。

## 2 芳纶包覆金属复合风扇包容机匣

随着复合材料的发展,研究人员发现芳纶纤维具有优异的力学性能、断裂伸长率和抗冲击性能,在风扇包容机匣上使用芳纶纤维,不仅能够有效地包容风扇叶片碎片,而且可以大大减轻发动机的重量。于是人们开始研究利用薄壁金属机匣和多层芳纶织物的复合材料制造新一代风扇包容机匣。



CF6-80C2系列发动机

GE 公司的 CF6-80C2 发动机最早采用了这种结构的风扇包容机匣,即在铝制机匣上包裹一圈铝制的蜂窝层,然后包覆上 65 层芳纶布形成厚轮缘,在芳纶的轮缘外再包覆一层树脂来保护芳纶布层,随后的 GE90 发动机继续采用了这种结构<sup>[1]</sup>。另外,普·惠公司的 PW4084 发动机和罗·罗公司的遛达 800、遛达 900、遛达 1000 发动机也采用了这种芳纶织物包容结构,即在铝合金机匣上先铣出许多纵横交错的深槽,然后在这种被称为“等格栅铝环”的部件上直接缠绕多层芳纶织物,最后用环氧树脂包覆,形成重量

轻、厚度大、韧性好的包容结构。

对于这种芳纶纤维织物缠绕增强风扇包容机匣结构,当风扇叶片碎片撞击到风扇包容机匣后,会穿透薄壁金属机匣却被芳纶织物层捕获,而且整体结构不被破坏。由于采用了多层芳纶纤维织物,因此这种风扇包容机匣也很厚,但是重量比金属结构降低很多,最大减重在 50% 左右。

随着现代商用飞机飞得更高、更快和更安静的需求,发动机的涵道比和推重比不断增加。为了增加发动机的涵道比,采用更大的风扇叶片已经成了发动机的发展趋势,相应的风扇包容机匣尺寸也越来越大,这就使得风扇段在整个发动机中的重量越来越大。因此,降低风扇段的重量对降低发动机重量和提高发动机效率非常关键,而在风扇段采用复合材料可以大大减轻发动机重量,提高比刚度、疲劳性能和损伤容限等,这也为扩大复合材料在发动机上的应用提供了最大的机遇,因此,发动机采用先进复合材料是同时实现大涵道比和减重双重效果的唯一途径。目前,在风扇包容机匣上使用复合材料的技术

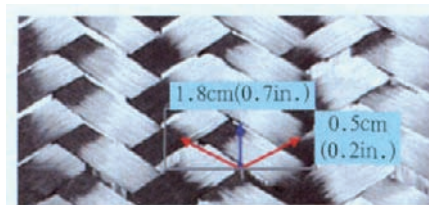


GE90发动机

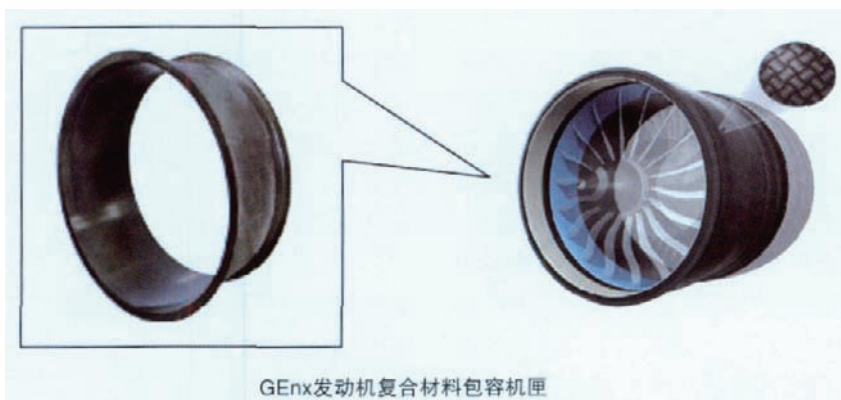
已经比较成熟,复合材料机匣取代金属机匣已经成为一种趋势。

## 3 全复合材料风扇包容机匣

随着复合材料体系和制造技术的不断发展,GE 公司自 20 世纪 70 年代开始研制全复合材料风扇叶片,并于 20 世纪 90 年代成功装备在 GE90 发动机上。全复合材料风扇叶片的成功应用为复合材料风扇包容机匣的应用创造了条件,因此 GE 公司自 20 世纪 90 年代开始着手研究全复合材料风扇包容机匣。研究结果表明,碳纤维编织结构增强树脂基复合材料比铝合金具有更好的抗裂纹扩展能力,因此 GE 公司重点开发了碳纤维编织结构增强树脂基复合材料的风扇包容机匣,所用材料为 TORAYCA 的 T700 碳纤维和



碳纤维二维三轴编织物(蓝色箭头为轴向增强纤维的方向,红色箭头为基础纤维的方向)



GENx发动机复合材料包容机匣



后, GEnx 又在该公司的露天试验设施上成功完成了真实发动机的风扇叶片包容实验。该实验的成功又将复合材料风扇机匣的研制水平推上了一个新的台阶。

GEnx 发动机目前共有两种型号<sup>[6]</sup>, 分别为 GEnx-2B67 和 GEnx-1B70。在 GEnx-1B70 中风扇段占发动机总重的 33%, 复合材料风扇包容机匣直径为 3.05m、轴向长度为 1.22m。与金属结构相比, 采用这种风扇包容机匣可使每台发动机减重 160kg, 加上连接件的减重, 整架飞机减重量可达 360kg。另外由于 RTM 成型的风扇包容机匣尺寸精度高, 还降低了其装配和制造成本。

#### 4 泡沫夹芯结构复合材料风扇包容机匣

GEnx 是世界上第一台使用全复合材料风扇包容机匣的大型发动机。由于该包容采用 3 维编织的平板结构, 运用的是所谓的“硬壁”包容机理, 所以为了包容住风扇叶片, 风扇机匣的结构相当厚重, 而且制造成本也要高出金属机匣很多。

2002 年 GE 公司又与 WebCore 公司合作, 开始研究新一代全复合材料风扇包容机匣。这种风扇包容机匣与芳纶纤维织物缠绕增强风扇包容机匣有异曲同工之妙, 都是利用“软壁”包容概念, 即在刚性的机匣外缠绕一层软的芳纶套。当断裂的叶片撞击到机匣上后, 虽然机匣的强度不足以包容住叶片碎片, 但是外层的芳纶套却可以将其捕捉住。不同的是, 该机匣的刚性内套采用的是 A 夹层结构材料, 其芯子是一种密度比蜂窝还要低的 PMI 泡沫材料。为了提高泡沫芯的

损伤容限, WebCore 公司使用碳纤维在泡沫的厚度方向上缝合, 进行增强<sup>[7]</sup>。这种纤维增强 PMI 泡沫的商品名为 TYCOR。

在 SBIR 计划的资助下, WebCore 已经完成了这种夹层结构风扇机匣的设计工作, 并通过了前几轮试验。试验结果显示, 当受到冲击后这种风扇机匣未发生分层, 只是留下一个非常干净的空洞。研究人员正是利用 PMI 泡沫这种不分层的特点使得风扇机匣在受到叶片冲击后仍能保持结构的完整性。冲击试验是在 NASA 的格伦研究中心进行的, 在专用的风扇机匣试验平台上, 钛合金叶片通过发射枪以 152 ~ 304m/s 的速度被射出。WebCore 的夹层结构机匣成功的通过了所有试验, 目前正在冲击后刚度测试。该机匣将于 2010 年至 2012 年间投入生产, 此时正值下一代大型发动机研发时期。目前该技术正在按部就班的进行。这种机匣的最大优点是在满足设计强度和刚度的同时能最大限度的减轻重量(与金属机匣相比, 减重大于 50%), 而且与金属机匣相比没有成本上的增加。

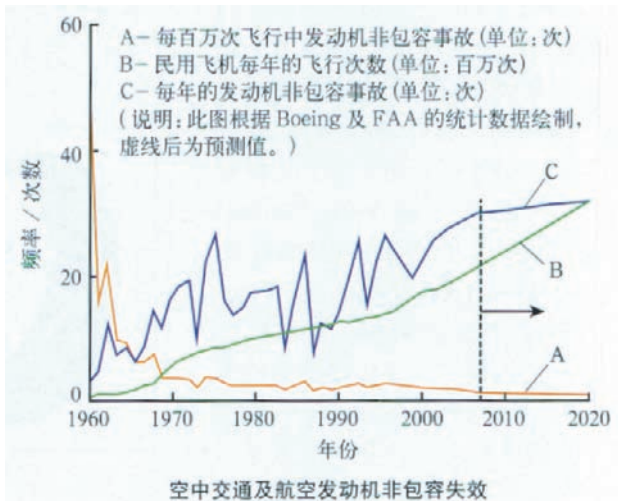
虽然目前公司正在研制的风扇机匣是用于大型商用飞机发动机的, 但是这种结构的机匣同样适用于直径仅有 0.9m ~ 1.2m 的小型喷

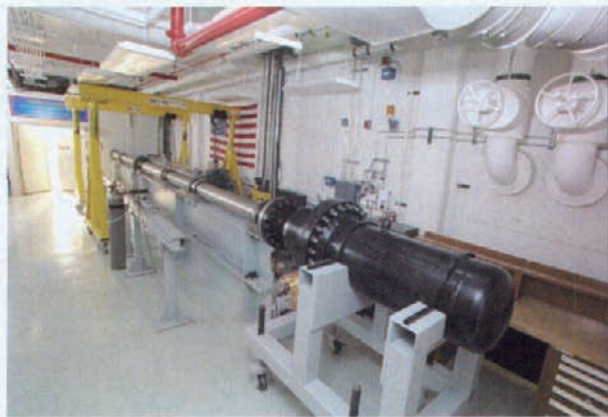
CYCOM 的 PR520 环氧树脂<sup>[2]</sup>。这种风扇包容机匣首先采用二维三轴编织技术制造编织预成型体, 编织角度为  $[0^\circ / +60^\circ / -60^\circ]$ , 然后通过 RTM 技术整体成型<sup>[3-4]</sup>。GE 公司的 GEnx 发动机首次同时采用了这种复合材料风扇包容机匣<sup>[5]</sup>, CFMI 公司正在研制的 LEAP-X 发动机将继续采用这种 RTM 成型的编织结构包容机匣。

用这种成型工艺制造风扇包容机匣有以下几个优点:

- 预成型体芯模的制造成本和运输费用降低;
- 用较小型号的编织机能够制造较大尺寸的风扇包容机匣预成型体, 降低了成本;
- 原材料的利用率和生产效率提高;
- RTM 成型的风扇包容机匣尺寸精度高、表面质量好。

当风扇叶片碎片撞击到包容机匣后, 复合材料叶片碎片会分裂成更小的碎片, 因此对整套体系而言, 复合材料风扇包容机匣具有更高的包容效率, 提高大约 30%。2007 年 7 月 5 日, 在先后完成了缩比件和全尺寸的风扇部件模型的几次试验之





氢气炮打靶试验装置



(a) 铝板



(b) 三维编织复合材料板

GE公司打靶试验结果

气式发动机。另外设计者还计划在  
这种机匣中镶嵌传感器,这样驾驶员  
就可以很清楚风扇包容机匣是否  
被撞击以及撞击的程度如何。

### 包容性试验概况

美国 SAE 的 AIR4003 报告表  
明,1976 至 1983 年间共发生 315 次  
航空发动机非包容事故。为此,航  
空大国对发动机包容问题都非常重  
视,在民用和军用航空发动机规范  
中都有专门条文对包容性做出严格  
规定<sup>[8]</sup>。

随着新材料、新工艺和新技术  
的推广应用,航空发动机非包容事  
故的发生率不断下降。但随着空中  
交通运输量的逐年增大,每年发生  
的非包容事故的总次数仍在增加。  
因此近年来在加强包容机匣研究的

同时,也对风扇包容机匣的试验进  
行了较深入的研究。

《国防科技名词大典》中定义:  
机匣包容试验是验证机匣对折断后  
飞出的转子叶片包容能力的试验。  
如果使用部门确认全部破坏零件均  
被包容,则认为该试验成功通过。包  
容试验通常分 4 步进行<sup>[8]</sup>。

第一步是弹道冲击试验或称打  
靶试验<sup>[9-10]</sup>,主要用于检测机匣材料  
的抗击穿能力,具有方法简单、成  
本低的特点。该试验主要是利用氢  
气炮等高速发射装置将金属弹头或  
者凝胶弹以一定的速度射出<sup>[11-12]</sup>。  
被射击的目标可以是平板试样,也  
可以是环形包容机匣。GE 公司进  
行了平板打靶试验,试验对象为铝  
板和三维编织的复合材料平板。

第二步是在专用的试验台上进  
行旋转冲击试验<sup>[13]</sup>,首先将风扇包  
容机匣固定在试验台上,然后使叶  
片在预定的转速范围内在指定部位  
断裂后撞击机匣,以验证机匣的包  
容能力。根据不同的研究目的,可  
进行单叶片或多叶片飞断试验。

第三步是台架试验,试验装置  
中包含发动机旋转部件及安装附件  
等,利用电机驱动增速齿轮箱后带  
动试验转子。此项试验在验证机匣  
包容性的同时,也可验证发动机安  
装结构件承受冲击载荷的能力。

第四步是在室外试车台上进行  
真实发动机风扇叶片的包容试验,

以获取航管部门颁发的适航许可  
证。由于试验后发动机很难修复再  
使用,此破坏性试验通常被安排为  
最后一项试验。

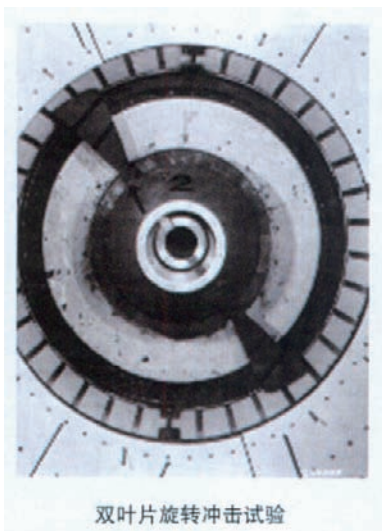
近年来完成的几次具有典型意  
义的试验包括:罗·罗公司于 2003  
年 8 月成功完成了遄达 9000 发动  
机(空客 A380 选用)风扇叶片包容  
试验;2007 年 4 月 20 日完成了遄  
达 1000 发动机的包容试验。GE 公  
司于 2007 年 7 月 5 日完成了 GENx  
发动机(波音 787 选用)的包容试  
验。

### 结束语

随着航空发动机涵道比和推重  
比的不断提高,包容机匣乃至风扇  
段的重量在整个发动机中所占比例  
也不断提高。为了提高燃油效率,  
大规模使用复合材料已经成为各国  
研究人员的不二选择。目前,我国  
大飞机项目正如火如荼地进行。由  
于复合材料风扇包容机匣集设计、  
材料、工艺和考核于一体,技术难  
度较大、周期长,而国内在此方面  
的技术储备却较低,因此迫切需要  
国内设计院所与工艺院所联手攻  
关,争取早日将复合材料包容机匣  
应用到自己的商用发动机上。

本文共有参考文献 13 篇,因篇  
幅所限未能一一列出,读者如有需  
要请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)



双叶片旋转冲击试验