

风扇机匣材料应用现状与发展

Application and Development of Material for Aeroengine Fan Case

中航工业沈阳发动机设计研究所 沈尔明 王志宏 赵凤飞 李晓欣



沈尔明

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用复合材料和非金属材料设计、应用与研究。

大涵道比涡扇发动机主要用于大型客运和货运运输飞机动力装置,其明显外观特点之一是具有较大的风扇进口迎风面积。发动机迎风面积的增加可以大幅提高发动机的进气量和发动机推力,但同时也增加了发动机吸入外来物体,打伤风扇叶片的可能。随着涵道比的增大,风扇转子叶片的尺寸也相应增大,大尺寸叶片在高速、高压的恶劣环境下工作,受到飞鸟、冰块、砂石、轮胎碎片、地面杂物等外来物撞击或因为叶片材

料疲劳等原因导致意外断裂脱离时,就会在巨大的离心力作用下高速撞击到风扇机匣上,若机匣不能阻挡飞出的叶片,就会导致非包容事故发生,轻者飞机丧失部分动力,重者金属碎片会击穿飞机的机舱、油箱、液压管路和控制电路等,导致机毁人亡的事故(图 1^[1-2])。

通过对国外大涵道比涡扇发动机风扇机匣包容事故的对比分析,结合国内外航空发动机适航规定中相关包容要求,对国外大涵道比涡扇发动机风扇机匣材料和结构进行比较分析,整理出风扇机匣材料的应用发展趋势。针对国内大涵道比涡扇发动机研制现状,讨论国内类似材料的研制和生产情况,指出国产大涵道比

通过对国外大涵道比涡扇发动机风扇机匣包容事故的对比分析,结合国内外航空发动机适航规定中相关包容要求,对国外大涵道比涡扇发动机风扇机匣材料和结构进行比较分析,整理出风扇机匣材料的应用发展趋势。针对国内大涵道比涡扇发动机研制现状,讨论国内类似材料的研制和生产情况,指出国产大涵道比



图1 风扇叶片断裂导致风扇机匣和飞机机体损坏

涡扇发动机风扇机匣的选材方案,并对相关风扇转子结构设计、系列试验安排和未来材料发展提出建议。

国外风扇机匣非包容事故与包容结构设计要求

2001年1月31日,一架波音

777-300 飞机(R&R 公司 Trent 892-17 发动机,金属与复合材料包容环组合机匣)在起飞过程中,有一片风扇叶片从叶根部断裂甩出,并将与其相邻的另一片叶片从叶身中部打断。但叶片断片被风扇机匣包容在发动机内,未对飞机造成过大损伤。

可以看出风扇叶片能否被包容对飞机造成的影响大不相同。自从 20 世纪 70 年代,大涵道比涡扇发动机用于民用飞机动力以来,发动机非包容事故时有发生。美国联邦航空局(FAA)和汽车工程师协会(SAE)对 1959~1989 年长达 30 年的航空发动机事故调查表明^[3-5],只能通过完善发动机设计和采取防护措施,将非包容事故的发生概率降低到最小。

1984 年 3 月之前,美国联邦航空局(FAA)发布的《联邦航空条例》第 33 部(FAR-33)中,通过 33.19(耐久性)和一些外物吸入相关条款要求来保障发动机的包容安全;1984 年 3 月,为进一步强化发动机叶片失效带来的安全性影响,提高发动机包容安全性,FAR-33 引入了 33.94 条款(叶片包容性和转子不平衡)要求,随后欧洲航空安全局(EASA),中国民用航空总局也提出专门的要求。这些规定大同小异,对发动机的包容性要求基本相同,以《联邦航空条例》第 33 部(FAR-33)为例,其中的 33.94 条款^[6]要求发动机结构设计要能具有一定的包容能力,发动机机匣、转子、静子、轴、轴承、安装边和安装节要能承受住因转子失效引起的载荷,而不会危害到飞机,同时不能引起发动机着火等相应要求。

发动机的风扇转子叶片在各级转子叶片中的尺寸最长,重量最重,叶片断裂时的离心力最大,能量最高,因此风扇机匣对于风扇叶片的包容能力显得尤为重要。综合考虑适航规定要求及分析,结合国内外发动机研制经验,需要开展发动机整机风扇叶片包容试验。

国外风扇机匣材料现状与发展

为了满足风扇机匣对风扇叶片的包容能力,保证能够通过适航条例中包容性规定的试验考核,各发动机公司都采用带有包容结构的风扇机匣来吸收叶片碎片的能量,阻止碎片的飞出。根据风扇机匣材料的应用,发现应用于风扇机匣的材料主要有 3 类:全金属型、金属与复合材料组合型和全复合材料型。

1 全金属机匣结构

20 世纪 70~80 年代,设计制造的大涵道比涡扇发动机大多采用钢制风扇机匣结构未阻止风扇叶片的飞出,比如 CFMI 公司的 CFM56-2、3、5 发动机采用 17-4ph 马氏体沉淀硬化型不锈钢制造多个环形结构,再采用电子束焊接技术将不锈钢环焊接组合。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^[7]。在大型涡扇发动机上,这种结构甚至重达 227kg(500lb)^[8]。早期的发动机采用这种笨重的结构明显增加了发动机的重量和燃油消耗。随着燃油价格的升高和飞机对发动机推重比的要求日益提高,笨重的钢机匣在风扇机匣的使用逐渐受到限制。

减少风扇机匣重量的办法很多,其中的一种就是直接将钢制材料换成密度低、重量轻的钛合金或是铝合金。例如 CFM56-7 发动机使用的是表面阳极氧化处理后的铝合金制造风扇机匣,R&R 公司的 Trent 1000 发动机采用钛合金制造风扇机匣。但是铝合金和钛合金的强度明显低于不锈钢,因此在结构设计中常常对风扇机匣进行局部加强,即风扇机匣的包容能力主要依靠改进机匣的结构来保证。例如 CFM56-7 发动机通过加强机匣外壁和加强肋的厚度来

提高机匣的包容性,但这些由铝和钛等轻金属制造的“硬壁”结构机匣还有很多薄弱区域存在于机匣的加强肋之间,为了减轻重量,不可能将这个空间填平,因此叶片的碎片有潜在可能从此间隙中飞出。此外,金属机匣还有考虑叶片碎片与“硬壁”结构撞击反弹导致对其他叶片的二次损伤^[9](表 1)。

表1 金属材料性能比较^[10]

材料	密度/($\times 10^{-3}$ kg·m ⁻³)	拉伸模量/GPa	拉伸强度/MPa
钢	7.80	206	400~2500
钛合金	4.50	103	360~1400
铝合金	2.80	69	55~700

2 金属与复合材料包容环组合机匣

为保证风扇机匣包容性,还能减轻重量,GE 发动机公司采取了另一种办法,就是用复合材料进行局部加强。充分利用芳纶纤维韧性高、能力吸收性能好、拉伸强度高、刚度低、密度低的特点,制造出“软壁”结构的包容环,与金属薄壁机匣构在一起构成风扇机匣。

到目前为止,国外各种大涵道比发动机采用的金属与复合材料组合型机匣分为两种,一种是外包容环,一种是内包容环。在这两种结构中,金属机匣主要起到结构圆整度,而包容环主要是由抗冲击性好的芳纤复合材料制造。外包容环是指金属机匣在内侧,复合材料在外侧,有些还在中间夹有蜂窝。内包容环的主要特点是将芳纤复合材料在内侧,金属机匣在外侧。

外包容环机匣被设计成类似三明治的多层结构,每一层具有特定的功能。采用铝合金或钛合金制造最内层薄壁结构的风扇机匣壳体,金属机匣外侧围有蜂窝层,再将干的芳纶纤维缠裹在蜂窝层结构外,组合成包容环的主体结构,最外层为芳纤复合材料包裹层,用于保护和固定芳纶纤维^[7]。其中金属壳体用来防止机匣

变形而刮磨叶片,金属壳体内部表面靠近叶片部位涂覆非金属磨损涂层以减小叶尖间隙,用于保证尽可能小的转子叶尖间隙,提高通过风扇结构的气流压力,减少能量损失。同时,还必须避免当叶片由于振动或者湍流而使叶尖接触到机匣内壁时损伤叶片。在金属机匣和芳纶纤维层之间增加的蜂窝层在受到外物冲击时,允许叶片碎片穿透金属机匣薄壁,芳纶纤维缠裹层是包容环的核心层,当风扇叶片的断片甩出并打到该层时,芳纶纤维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,阻止碎片飞出机匣外,而蜂窝会阻挡纤维被扯入风扇机匣内侧的空气流路中。而且蜂窝会为叶片碎片提供一个可进入的空间,使碎片不会反弹回转子流道而损伤其他叶片,另外蜂窝区域在提高机匣结构刚度的同时又能大幅降低机匣自重。这种由金属制造薄壁机匣与芳纶纤维复合材料制造包容环的组合型风扇机匣可以有效避免叶片碎片对其他转子叶片的二次损伤。缺点是出于包容性能考虑,要保持芳纶纤维的丝束完整性,不能在纤维上加工制孔,需要将外部管路和各种附件装置都集中固定在风扇机匣前安装边和中介机匣的金属结构上,增加了排布管线的难度。

GE 发动机公司的 CF6-80C2 发动机用于波音 767、波音 747-400 和空客 A310 等远程民用飞机的动力装置,其风扇机匣包容环主要由 3 层结构组成(图 2),最内层是由冲压加工

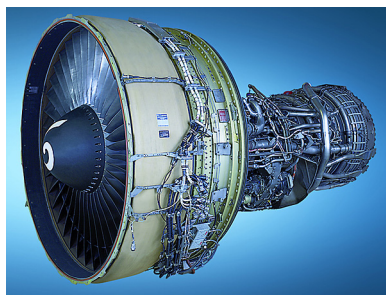


图2 CF6-80C2发动机用包容环

制造的 Al6060-T6 铝合金机匣,外侧围有铝合金蜂窝层(蜂窝内腔尺寸为 3.175mm,蜂窝最大厚度为 70mm),在蜂窝结构外缠裹了 67 层芳纶纤维条带,其外再覆以一层芳纶复合材料保护层,蜂窝层与缠裹层间夹有碳纤维复合材料。这种设计包容能力强,重量轻,因而得到广泛应用^[7]。

CF6-80C2 发动机的包容试验于 1985 年 4 月 21 日进行,当风扇转子达到 3880r/min(为极限转速的 117.5%)时,引爆叶根处炸药,一整片叶片由轮盘上甩出,被包容环包容住。随后,让发动机在全功率工况下保持 15s,这是模拟在实际飞行中发生此类叶片折断事故时留给飞行员的反应时间,然后将发动机油门拉回慢车状态,继而使发动机停车,至此 CF6-80C2 发动机顺利通过风扇叶片甩脱后的包容试验,证明采用芳纶复合材料缠绕制造的包容环是完全可行的^[7]。

空客 A330 飞机采用 R&R 发动机公司的 Trent 700 发动机作为主动力装置,其风扇包容环采用了类似的结构,但进行了一些改进:在薄的铝制环形壳体上缠绕多层用芳纶纤维织成的条带,然后用复合材料包覆固定。为了进一步减轻铝壳体的重量还能保持一定的刚性性能,壳体上纵横交叉地铣出多道凹槽,形成具有格栅的薄机匣。利用铝合金壳体保证机匣的圆度和刚度,利用芳纶纤维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。Trent 700 发动机包容环重量比 RB211-535E4 发动机轻 35%,比 RB211-22B 发动机轻 55%^[3]。R&R 发动机公司的 Trent 800 发动机、P&W 公司的 PW2000 和 PW4084 发动机也采用了相同的金属与复合材料组合机匣替代了以前的不锈钢机匣,使重量减轻了 35%~50%^[10]。

内包容环是将芳纶纤维制造成

复合材料后,整体粘接在金属机匣内侧,并在其表面涂刷磨耗涂层,防止叶片的刮磨。同样是由金属机匣保证机匣的圆整度,由芳纶复合材料来防护叶片碎片的冲击能量。前苏联的发动机上大量使用内包容环,当叶片因意外断裂后,先撞击到包容环上,该种包容机匣的特点是结构简单,组装工艺容易,只需要将复合材料包容环与金属机匣粘接在一起。内包容环的金属机匣处于最外层,有利于为管线等附件装置提供结构支撑。

3 全复合材料风扇机匣

还有一种是风扇机匣采用全复合材料制造,包容结构与机匣采用同种复合材料整体制造,既有包容叶片碎片能力,还能满足圆整度要求。这种机匣和包容结构采用碳纤维复合材料制造。

用于波音 787 的 GENx-1B 发动机风扇结构占发动机总重的 33%,随着风扇叶片的重量减轻,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高强度中模量碳纤维复合材料制造,这是首次将复合材料用于大涵道比发动机的风扇机匣。GENx 发动机风扇机匣采用复合材料纤维织物以人字形的模式编织成交叉结构,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,编织成风扇机匣形状后,再与树脂固化成型(图 3^[13])。其中 GENx-1B70 风扇机匣直径尺寸为 2.82m,采用全复合材料制造可减重 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,而且全复合材料风扇机匣是具有韧性、有回弹力的结构。全复合材料的使用还避免了金属腐蚀现象的发生,显著提高发动机



图3 GE9X的复合材料风扇机匣

的使用寿命^[11-13]。为C919飞机提高动力的Leap-X发动机也采用了此类全复合材料风扇机匣。

国内风扇机匣选材与设计

1 国内风扇机匣材料应用现状

国内应用在航空发动机上的金属材料品种很多,原材料的质量也有保证,能够满足国产大型飞机发动机风扇机匣对原材料性能的需求。大尺寸机匣结构用锻造工艺也相对成熟,制造能力也日益提高,国内的中航安大、中航宏远、贵州航宇、二重万航等公司都具有金属风扇机匣的生产能力。

目前国内现有的芳纶II和芳纶III等有机纤维品种基本可以满足国产发动机金属与复合材料包容环组合机匣的性能要求。工艺和制造能力也能满足技术要求。国内的烟台氨纶、深圳龙邦、航天六院、中化蓝星晨光等单位都能生产出与国外航空发动机用芳纶纤维性能相当的纤维材料,并已经批量生产,原材料来源有保证。由于国内没有芳纶纤维及其复合材料在航空发动机上的使用经验,需要开展相关应用研究工作。还需要进一步提高纤维性能的批次稳定性和产能,满足未来国产大型飞机发动机发展的需要。

国内已经能够生产出稳定的T300级碳纤维,但在高强度中模量碳纤维的开发还处于研制阶段,没有可以批量生产的纤维材料。同时配套的增韧环氧树脂及上浆剂也亟待解决。因而目前还不能制造出满足国产大型飞机发动机风扇机匣需要的碳纤维增强复合材料。

2 风扇转子设计对包容性的影响

风扇包容性设计与风扇转子叶片设计紧密相关。给风扇转子叶片增加突肩或采用宽弦叶片可以减少叶片工作中的振动和颤振,提高抗外物打击的能力,减少叶片因外力导致的折断可能,减少出现包容事故的概率。采用空心叶片或复合材料叶片减轻转子叶片重量,减慢风扇叶片的转速都能减少叶片断裂后的对风扇机匣的冲击能量,减少风扇机匣的尺寸和重量。

GE9X发动机上之所以能够使用碳纤维复合材料制造全复合材料风扇机匣,与发动机风扇叶片采用复合材料制造有重要关系。复合材料叶片重量轻,便于制造更大的宽弦叶片,再通过减慢叶片转速,降低外来物撞击对叶片的危害,因而也减少对风扇机匣的冲击能量,提高了风扇机匣的包容能力。

发动机风扇盘及鼓筒如果发生

破裂,其碎片质量大,甩出的离心力大,即便风扇机匣再厚再坚固也不能将碎片包容住^[7]。这需要提高材料制造和加工水平,以及改进结构设计来加强此类零件的强度储备。

3 包容性设计与验证

包容性设计需要开展包容用材料选择研究、包容材料厚度试验研究、平板打靶试验研究、模拟实际包容结构的撞击强度试验研究、全尺寸风扇结构包容试验研究等一系列设计研究工作,同时开展以上试验的数值仿真研究。只有一步步地做好基础研究,才能保证风扇机匣的安全可靠。

结论

(1) 全金属风扇机匣。

国产大涵道比涡扇发动机可以采用金属制造风扇机匣,材料来源稳定,制造技术相对成熟,但重量大,会降低发动机的推重比。

(2) 金属与复合材料包容环组合风扇机匣。

需要积极开展国产芳纶复合材料在风扇机匣包容环的应用研究工作,以金属和复合材料的混杂结构作为一段时期内航空发动机用风扇机匣的主要首选结构,在满足包容要求的同时减轻发动机的重量,提高发动机的推重比和工作效率。

(3) 全复合材料风扇机匣。

促进高性能碳纤维材料和匹配的增韧树脂的研制,对复合材料风扇叶片和机匣开展预研工作。加强相关研究工作,以期尽快实现发动机风扇机匣的全复合材料化,满足包容要求的同时进一步降低油耗,提高发动机效率。

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 良辰)