

鸟撞对商用发动机风扇叶片选材影响

The Influence of Bird Strike to the Material Selection of Commercial Aero Engine Fan Blades

■ 沈尔明 王刚 王宇 高山 / 中国航发动力所

鸟撞是一个令业界头疼的全球性问题。当飞鸟随空气一同被吸入发动机时，会与风扇叶片发生高速碰撞，如果叶片选材不当，轻者会造成转子系统失去平衡或与机匣碰撞，重者会导致发动机故障而威胁飞机安全。

全球每年会发生1万余起鸟撞事件，造成的经济损失约100亿美元。1960年，美国东方航空公司的民用客机在波士顿机场起飞后不久，撞上大约20000只紫翅掠鸟，密集的鸟群撞坏了4台发动机中的3台，飞机因失去动力而坠入水中，机上有72人，最终导致62人丧生。鸟类一旦被吸入发动机，与风扇叶片发生高速碰撞，会带来叶片的塑性变形。如果叶片变形过大或严重损坏，转子系统会失去平衡或与机匣碰撞，撞断的风扇叶片进入发动机内涵道，会损伤压气机叶片等零件，导致发动机发生故障而威胁飞机安全。

适航要求

发动机是保障飞机安全飞行的关键部件，直接影响飞机和机上人员的安全。发动机作为飞机上受鸟撞影响最严重的部位之一，随着鸟撞事件的增加，逐渐成为适航性审查的重要专项之一。

1960年，美国联邦航空局（FAA）颁布了AC33-1《涡轮发动机外物吸入和转子叶片包容性型号合格审定程序》，列出了由发动机外物吸入导



GE9X发动机风扇

致的潜在不安全条件，而鸟类就属于重要外物之一。为了适应航空发动机技术的不断发展，FAA不断对联邦航空条例（FAR）33部中有关飞机和发动机的吸鸟条款进行修订，其中的33.75条和33.76条与发动机吸鸟相关，分别是吸鸟后限制出现的发动机故障和吸鸟适航取证的具体规定等给出了发动机吸鸟的适航要求，规定了发动机吸入大型鸟类和中等型鸟类后不得出现具有危害性的发动机故障，并且在取证时，根据不同发动机迎风面积，对吸入的

飞鸟数量、质量及试验流程等提出了具体要求^[1]。

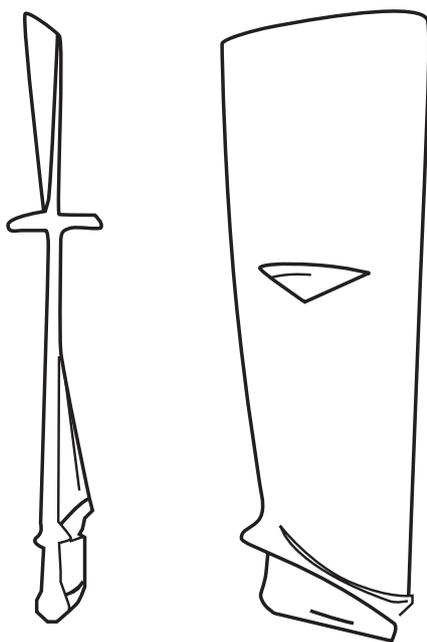
风扇叶片的设计选材要求

20世纪60年代以来，民用航空逐渐采用大涵道比涡扇发动机作为民用客货运输飞机的动力装置。大涵道比涡扇发动机80%以上的推力都来自于风扇，因此风扇结构受损将严重影响发动机的推力，威胁飞机的飞行安全。受鸟撞影响最大的是风扇叶片。风扇叶片作为大涵道比涡扇发动机上的重要零件之一，它

的好坏直接影响着发动机的工作效率、气动性能、安全性、可靠性、质量和成本等。风扇叶片不仅受到较高的气动载荷、离心载荷和发动机振动的交变载荷影响，同时还要受到包括鸟类在内的外物冲击影响，以及受到风沙、潮湿的侵蚀，导致在使用过程中风扇叶片比风扇和压气机的其他零部件故障要多得多，因而在设计、制造和使用维护时，风扇叶片的成本较高。

风扇叶片作为发动机上重要的转动零件，材料的选用应满足在工作温度及受力条件下，具备一定的强度且具有较轻的质量，同时要考虑叶片的环境介质、使用寿命、制造工艺性和材料的经济性。由于风扇叶片在高速工作时，离心力很大，因此需要选用的材料应在工作温度范围内，具有较高的强度持久性、抗环境腐蚀性，较高的疲劳强度和抗振动性能。同时，为了减轻叶片的惯性，还必须选择比强度高的材料。由于风扇叶片是发动机的第一级转子叶片，虽然工作温度低，但为了预防飞鸟、沙石和冰块等外来物的打击和损坏，防止零件腐蚀和提高零件的抗振性，一般采用强度高的钛合金或不锈钢。

鸟撞对风扇叶片的影响，轻者导致叶片颤、进口气流畸变；重者叶片断裂、甩脱，风扇结构会因质量分布不均而发生振动，进而降低发动机结构的整体稳定性。增加风扇叶片的厚度，可以提高叶片自身的抗鸟撞能力，但是作为发动机结构上高速旋转运动零件中尺寸最大的悬臂梁结构，增加叶片质量会加大风扇盘和风扇轴的质量。同时，为了保证对叶片的包容能力，还会



窄弦带凸肩实心叶片

增加风扇机匣包容结构的质量，进而增加包括中介机匣、发动机安装吊挂等一系列结构的质量，最终会大幅降低发动机的工作效率，影响飞机性能，导致耗油率增加，承载能力降低。据普惠公司研究，风扇叶片增加两页纸的厚度，会间接导致发动机增加50kg的整体质量。早期的大涵道比发动机风扇叶片设计成细长薄的叶片并增加凸肩结构，凸肩位于距叶尖1/3叶高处，采用钛合金制造。这种叶片结构的优点是在提高叶片的抗外物打击能力的同时还能够减少风扇叶片自重，并且改善了叶片的振动特性，叶片两侧的凸肩能在叶片出现振动时，通过相互接触摩擦来吸收振动能量，降低叶片断裂的风险。但是带凸肩结构的叶片缺点也很明显，给叶片的加工制造增加了很多难度，叶片质量增加，使得叶根和风扇盘均要承受更大负荷，凸肩与叶身连接部位还会增加一个附加力矩。凸肩会

减少气流通道面积，在凸肩后部形成回流气流旋涡，影响风扇结构的气动性能，降低风扇和发动机效率。为了提高发动机的风扇效率，取消凸肩，就必须采用宽弦（小展弦比）风扇叶片，才能提高叶片的抗外物撞击和抗振动能力。但是如果采用金属材料直接制造实心的宽弦风扇叶片，会大大增加叶片榫头受到的离心负荷，榫槽的设计强度也要随之增大，进一步增加风扇盘、轴和机匣的厚度及设计强度，最终会大幅增加发动机的整体质量。如果不能在满足设计强度的同时降低叶片质量，就无法实现大尺寸风扇叶片的正式应用，发动机的大涵道比设计要求就不能实现^[2]。

为了解决宽弦风扇叶片的轻量化问题，罗罗公司、GE公司、普惠公司、赛峰集团等都开展了各种研发和改进。

罗罗发动机风扇叶片的选材

20世纪60年代，罗罗公司曾经采用玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料制造大尺寸风扇，鸟撞试验是唯一没有通过的部件试验，无法满足FAR 33部的规定，导致复合材料叶片的研制失败，这也成为导致公司面临破产的直接原因之一。直到钛合金空心叶片的研制成功，才让罗罗公司起死回生。

20世纪80年代，罗罗公司采用两片Ti-6Al-4V钛合金板夹上钛合金蜂窝芯材，在高温下经过扩散连接成一体结构，再在模具中一体扭转成风扇叶片。该空心叶片具有质量轻、抗外物打击能力强、抗振性好和喘振裕度大等优点，耗油率比常规叶片低2.5%。

20世纪90年代, 罗罗公司研究出采用超塑性成形/扩散连接 (SPF/DB) 工艺制造的夹芯结构宽弦空心叶片, 其芯部采用Ti-6Al-4V钛合金薄板制造截面为三角形的桁架结构代替原来的蜂窝结构。1995年在A330上投入使用的遛达700发动机采用了这种叶片, 这种桁架结构不仅能提高风扇叶片抗外物撞击能力, 而且比前一代蜂窝结构的叶片质量减轻15%, 该叶片成功通过了质量分别为0.68kg、1.14kg、1.81kg及3.63kg的吸鸟试验。遛达800、遛达900、遛达1000发动机上都采用了该种叶片^[2]。

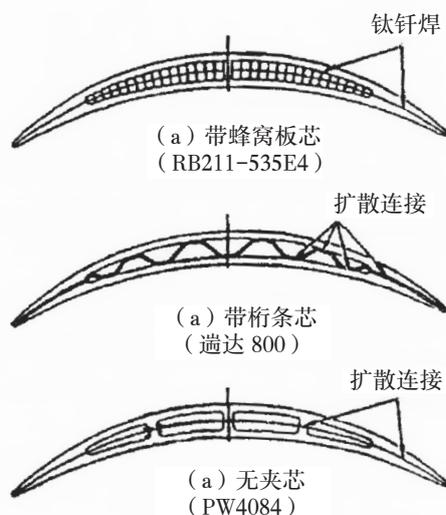
随着复合材料风扇叶片的技术成熟, 罗罗公司也开始研制复合材料-钛合金 (CTi) 风扇叶片。该公司与吉凯恩 (GKN) 公司共同开发碳纤维风扇叶片, 用于代替空心钛合金叶片, 计划用在遛达XWB之后的下一代发动机^[3]。

普惠发动机风扇叶片的选材

普惠公司研制的金属宽弦空心叶片结构与罗罗公司有所不同。

普惠公司的金属宽弦空心叶片仅由两块钛合金面板组成, 但在面板内侧结合面上铣出多道纵向槽道, 没有夹心结构, 再采用超塑性成形/扩散连接工艺连接两块面板成一体, 制造成金属宽弦空心叶片。这种叶片结构比罗罗公司的夹心结构叶片容易加工, 降低了叶片的制造难度和成本, 但叶片质量较大, 普惠公司的宽弦空心叶片首先被用于PW4084发动机上。

随着发动机的长期使用, 该结构的问题逐渐暴露出来。先后发生3起事故都是风扇叶片纵槽根部出现



罗罗公司与普惠公司的空心叶片结构差别

疲劳裂纹导致高速旋转的叶片断裂所致。

普惠公司和美国铝业公司还合作研发新的铝合金风扇叶片。金属叶片可以制造更薄的前后缘, 可提高2%的气动效率。新种类的锻造铝合金具有特殊的微观结构, 比钛合金质量更轻, 成本更低, 这种铝合金风扇叶片比钛合金空心叶片具有更高的抗拉强度和更好的抗疲劳性能。该铝合金风扇叶片已经应用于PW1100G-JM发动机上^[4]。

GE 发动机风扇叶片的选材

20世纪60年代末, GE公司采用碳纤维增强树脂基复合材料制造TF39发动机的风扇叶片, 但没有通过0.68kg小鸟的吸鸟试验。GE公司后续又在F103、QCSEE等发动机上继续开展相关研究, 一直等到在UDF发动机上开展的复合材料风扇叶片研制改进后, 才终于通过了3.63kg大鸟的吸鸟试验, 这一系列的研制经验为GE90及其后续发动机采用树脂基复合材料制造风扇叶片奠定了坚实的

基础。

GE公司研制的GE90发动机风扇结构是世界上最大的发动机风扇结构之一, 直径达到3.12m, 风扇叶片每片长为1.22m。该风扇叶片即使采用罗罗公司的钛合金空心叶片的设计结构, 风扇叶片的质量仍然很大, 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公司选用树脂基复合材料制造风扇叶片来解决大尺寸风扇叶片的难题。GE90发动机的风扇叶片最终选用赫氏 (Hexcel) 公司的8551-7增韧环氧树脂作为树脂基体材料, 采用IM7高强中模碳纤维作为增强体, 制造成IM7/8551-7树脂基复合材料单向带预浸料, 再将1000层左右的预浸料按照设计要求铺放在模具中, 最终采用热压罐固化工艺制造风扇叶片。为了提高叶片前缘抗鸟撞能力, 还将Ti-6Al-4V钛合金包片用3M公司的RAF191胶粘结在叶片边缘上。这种金属包边结构不仅可以分散外物撞击能量, 还可以防止在叶片转动时复合材料分层。

1994年11月, GE90发动机通过了3.63kg大鸟的适航吸鸟试验, 并于1995年2月通过了FAA的适航认证^[5]。随后, GE公司在GE90-115b、GENx和GE9X发动机上均采用碳纤维增强增韧环氧树脂基复合材料制造单向带预浸料, 再通过热压罐固化工艺成形制造风扇叶片, 从此推动了世界各国采用树脂基复合材料制造大尺寸风扇叶片的发展。

赛峰发动机风扇叶片的选材

赛峰集团采用新技术实现了小尺寸叶片的复合材料制造, 并成功应用

表1 航空发动机用复合材料风扇叶片选材情况

研发公司	罗罗公司			普惠公司		GE公司	赛峰集团
典型发动机	RB211-535E4	遑达700	“超扇”	PW4077	PW1100G-JG	GE90	LEAP
材料	Ti-6Al-4V 钛合金	Ti-6Al-4V 钛合金	C/Ti	Ti-6Al-4V 钛合金	铝合金	IM7/8551-7 复合材料	IM7/PR520 复合材料
制造方式	超塑性成形/扩散连接	超塑性成形/扩散连接	—	超塑性成形/扩散连接	—	铺层+热压罐固化	三维编织+RTM
结构	蜂窝芯夹层结构	三角形桁架夹层结构	—	芯部铣纵槽结构	铝合金空心叶片	Ti-6Al-4V 钛合金包边的铺层复合材料	Ti-6Al-4V 钛合金包边的三维编织复合材料
叶片数目/片	22	26	18	22	20	22	18
直径/cm	188	247	356	280	206	312	180
首次使用时间/年	1984	1995	待定	1995	2015	1995	2016

于LEAP发动机。与GE公司风扇叶片采用热压罐固化的铺层预浸料方式不同，赛峰集团先将IM7碳纤维三维编织成叶片的平面结构，再采用树脂传递模塑成形（RTM）工艺加注PR520树脂并加温加压固化直接成形的方式来制造风扇叶片。LEAP发动机风扇叶片成为世界上首个通过适航吸鸟试验的中小推力涡扇发动机复合材料风扇叶片。LEAP发动机已被应用于C919、737MAX、A320neo等飞机上^[6]。

民用发动机风扇叶片选材建议

随着民用大型飞机对大涵道比涡扇发动机的需求日益迫切，发动机风扇叶片如何选材、如何减少鸟撞的危害，已经成为一个急需解决的重要问题。从各发动机公司对风扇叶片选材情况的讨论与分析（见表1），结合国内的技术水平，建议采取两步走方案：一方面采用超塑性成形/

扩散连接技术开展钛合金空心叶片的研制；另一方面在开发高性能碳纤维增强增韧环氧树脂预浸料的基础上开展复合材料叶片的设计和制造。此外，应与适航当局紧密配合，从材料研制阶段就开展抗鸟撞设计，尽快实现新型发动机风扇叶片的研发与制造。

结束语

鸟撞是威胁航空安全，尤其是民用发动机安全的重要因素之一，应采用各种办法减少鸟类撞击发动机带来的安全隐患。金属材料空心风扇叶片和树脂基复合材料风扇叶片都具有优异的抗鸟撞能力，值得借鉴。鸟撞成为航空发动机设计选材中的重要考虑因素，也成为民用涡扇航空发动机风扇叶片选材革命性变化的推动力之一。

（沈尔明，中国航发动力所，高级工程师，主要从事发动机选材设计及材料应用技术研究工作）

参考文献

- [1] FAA. Advisory circular No:33-76-1A—bird ingestion certification standards[S]. 2009.
- [2] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [3] Horsley J. The Rolls-Royce way of validation fan integrity[C]//AIAA/SAE/ASME/ASEE 29th Joint propulsion conference and exhibit. Monterey CA, 1993.
- [4] Atsushi S, Mistsuo I, Tetsuji F. Development of PW1100G-JM turbofan engine[J]. IHI engineering review, 2014, 47(1): 23-27.
- [5] Lironi P. The GE90 powerplant, the engine yearbook[J]. UBM aviation publications ltd, 2010, 16(1): 20-23.
- [6] Cojan J. LEAP-X, a trailblazer for tomorrow's aero-engines[J]. Paris: safran magazine, 2009, 5(1): 8-9.