

带 CFRP 箍环整体叶盘强度和寿命分析及试验*

王卫国^{1,2}, 古远兴², 黄庆东², 胡仁高², 温卫东¹

(1 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016

2 中国燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500)

摘 要: 针对带碳纤维增强复合材料 (CFRP) 箍环整体叶盘结构, 对其强度和低循环疲劳寿命进行了数值分析和试验研究。首先, 在进行 CFRP 力学行为数值模拟和性能测试的基础上, 进行了带箍环整体叶盘应力应变分析、振动特性分析和低循环疲劳寿命预测。其次, 成功地完成了叶盘的应变测量、模态试验和低循环疲劳试验。最后, 数值分析与试验数据的对比分析表明二者吻合较好, 从而验证了上述数值分析方法的有效性。

关键词: 整体叶盘结构⁺; 碳纤维增强复合材料⁺; 强度; 疲劳寿命

中图分类号: V231.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2006) 05-0441-04

Numerical analysis and experiment on the strength and life of the blisk with CFRP ring

WANG Wei-guo^{1,2}, GU Yuan-xing², HUANG Qing-dong², HU Ren-gao², WEN Wei-dong¹

(1 Coll. of Energy and Power Nanjing Univ. of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016 China

2 China Gas Turbine Establishment Chengdu 610500, China)

Abstract Numerical analysis and experimental investigation were carried out to study the strength and low cycle fatigue life of the BLISK with carbon fiber reinforced plastics (CFRP) ring. Firstly, based on the mechanical behavior analysis and properties test of CFRP, the numerical analysis on the stress-strain, vibration modal and LCF life of the BLISK with CFRP ring were presented. Secondly, strain measure, modal test and LCF spin test were performed successfully. Finally, the comparison of the numerical results with the experimental data shows good consistency.

Key words Blisk structure⁺; Carbon fiber reinforced plastics⁺; Strength; Fatigue life

1 引 言

随着叶轮机叶尖切线速度的日益提高, 传统转子材料和结构的使用已经达到了极限。带碳纤维增强复合材料 (CFRP) 箍环整体叶盘 (blisk) 结构是上世纪 90 年代国外在风扇转子设计中采用的一种新型结构形式^[1,2], 其特点是在整体叶盘叶尖位置有金属外环, 在外环上带有 CFRP 箍环, 叶片的部分离心力可由 CFRP 箍环承担, 其优点是可减轻转子重量和叶片变形量, 防止叶片颤振和提高风扇效率。在国内, CFRP 在飞机结构设计中已得到较好使用, 而在发动机上的应用还仅限于外涵机匣等静止件。对于一般

的整体叶盘结构, 人们已经提出和发展了许多设计分析方法^[3~5], 但均未涉及带 CFRP 箍环的整体叶盘结构。如何进行带 CFRP 箍环的整体叶盘结构强度及寿命设计分析, 是一个迫切需要解决的工程问题。本文从数值分析和试验研究两个方面对带 CFRP 箍环整体叶盘结构进行强度和寿命研究。

2 带 CFRP 箍环整体叶盘强度和寿命数值分析

2.1 带 CFRP 箍环整体叶盘结构强度分析

针对带 CFRP 箍环整体叶盘结构的特点, 其强度分析采用比较成熟的循环对称有限元方法。在进行带 CFRP 箍环整体叶盘结构数值分析时, 首先需解决

* 收稿日期: 2005-09-05 修订日期: 2006-05-15。

获奖情况: 国防科学技术工业委员会国防科学技术三等奖。

作者简介: 王卫国 (1966—), 男, 博士生, 高级工程师, 研究领域为发动机强度寿命研究。

Email: gtekj@mail.sc.cninfo.net

CFRP力学行为的数值模拟。本文基于各向异性宏观模拟方法,对CFRP力学行为进行数值模拟^[6]。CFRP是由碳纤维缠绕经固化处理而成的,纤维方向单一,其主要的失效模式是纤维断裂。针对这些特点,在进行有限元分析时,采用三维等参元,没有区分复合材料厚度方向的层合特性,而是把它从宏观上简化为各向异性材料来处理。对于复合材料箍环与金属叶环之间的过盈配合,采用常用的当量温度法模拟。在复合材料箍环与金属外环的配合面上,根据其

结构特点,认为其侧面位置重合,节点各自独立,而箍环与外环在其相接触的底面上不发生相对位移。

CFRP箍环是针对带箍环整体叶盘结构的使用环境和受力特点而研制的高模量高强度复合材料结构件。在完成纤维选型、缠绕和固化工艺筛选后,按照GB4550 GB1458和GB1446进行了层合板、NOL环的制备和试样加工,并参照相关标准进行力学性能测试,主要试验工作在WDW 100材料试验机上完成。层合板主要的力学性能见表1,CFRP材料密度为1.64g/cm³。

Table 1 Main properties of the CFRP laminate at different temperatures

Temperature/ ℃	Coeff of thermal expansion/(10 ⁻⁷ ℃ ⁻¹)		Tensile modulus/ GPa		Shear modulus/ GPa		Poisson's/ ratio		Tensile strength/ MPa	
	L	T	L	T	LT	LT	In plane		L	T
0	0	0	305	61	6.17	0.33	0.34		1890	34.4
150	-0.63	32.6	288	8.61	4.31	0.32	0.27		1787	29.6
200	-0.69	3.41	272	4.28	1.28	0.35	0.34		1636	9.47

由于叶片空间弯扭度较大,工作时几何非线性非常突出,这时已经不能把叶盘按小变形来处理,而应考虑大变形引起的结构刚度矩阵的变化,因此,在应力分析时考虑了几何非线性。同时,由于叶根局部区域应力水平已超过了屈服极限,计算中也考虑了材料塑性(图1)。

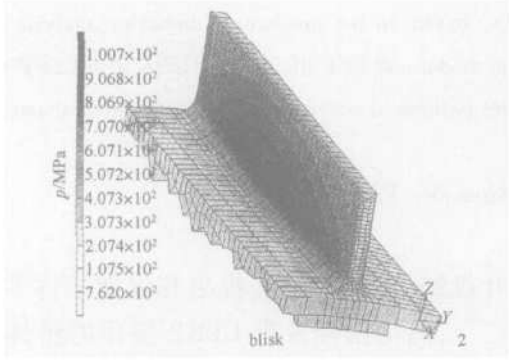


Fig 1 Equivalent stress distribution of blisk with CFRP ring

带箍叶盘振动分析实质上归结为计算大型矩阵的特征值问题,采用循环对称有限元模型可大大减少自由度数目^[4]。计算了两种有限元模型,第一种为带CFRP箍环整体叶盘自由悬挂模型,第二种为通过转接段把带CFRP箍环整体叶盘固支的模型。图2是带箍环整体叶盘固支模型的3节径第1阶振型,可见带箍叶盘的振动既有一般叶盘结构的特点,又有柱壳的特点。

2.2 带CFRP箍环整体叶盘低循环疲劳寿命预测

整体叶盘由CFRP箍环和TC11钛合金叶盘组

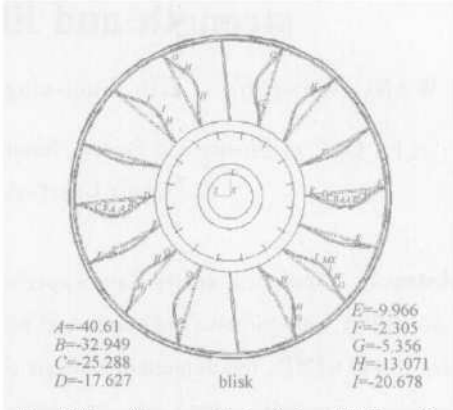


Fig 2 Vibration modal of the blisk with CFRP ring at fixation

成,其低循环疲劳寿命预测也应分为两部分。

复合材料在交变应力作用下,常常在高应力区中呈现较大规模的损伤。目前,对复合材料低循环疲劳寿命预测大致有以下两类方法:即局部应力应变法和基于疲劳累积损伤理论的方法。应力分析表明,复合材料箍环最大应力小于其拉伸强度的一半,可见CFRP箍环有足够的低循环疲劳寿命,因此只对钛合金叶盘部分进行寿命预测。

由应力应变分析可知,钛合金叶根是可能萌生低循环疲劳裂纹的危险部位。在TC11合金盘锻件室温低循环疲劳的Manson-Coffin公式基础上,对其进行Morrow平均应力修正,得到如下方程^[7]

$$\Delta \epsilon_f / 2 = \frac{1568 - \sigma_m}{121000} (2N_f)^{-0.10} + 0.338 (2N_f)^{-0.83} \tag{1}$$

式中 $\Delta \epsilon_f$ 为考虑卸载的总应变范围, σ_m 为考虑卸载

的平均应力, N_f 为低循环疲劳寿命预测值。

从单元积分点上读取应力应变数据, 求得叶片根部等效应变幅为 0.00794, 平均应力为 406.6 MPa, 由 (1) 式可得 $N_f = 5119$ 。由于一个叶盘沿周向均匀布有 16 个叶片, 需要考虑叶片数目对疲劳寿命进行修正。根据文献 [8], 假设叶盘每一个叶片根部具有相同的疲劳寿命, 疲劳寿命的 Weibull 形状参数 e 相同, 带 n 个叶片整体叶盘的低循环疲劳预测值 N_{sys} 为

$$N_{sys} = \frac{N_f}{n^e} \quad (2)$$

式中 N_f 为整体叶盘有 1 个叶片时的预测寿命。在疲劳寿命服从对数正态分布时, $e = 3.57$ 。这时, 带 16 个叶片整体叶盘的低循环疲劳预测值 N_{sys} 为 2354。

3 带 CFRP 箍环整体叶盘模型试验研究

3.1 带 CFRP 箍环整体叶盘模型试验件设计

带 CFRP 箍环整体叶盘模型试验件如图 3 所示。图中整体叶盘是由 TC11 钛合金锻件经线切割加工再抛光处理而成的。复合材料箍环是由一步法缠绕, 经固化处理成型。箍环与叶盘之间在半径方向有 0.05~0.08 mm 的过盈配合。装配时先用液氮冷却叶盘, 再把箍环轻轻套上。叶盘与转接段之间的过盈配合采用先加热转接段再装配的方法, 柔性轴一端与转接段相连, 另一端通过莫氏锥与设备刚轴联接。

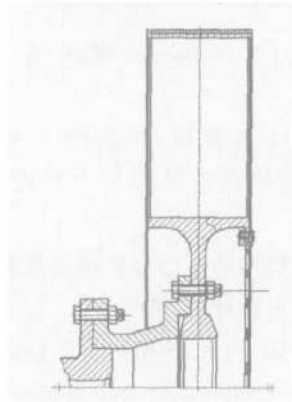


Fig 3 Experimental model rotor of blisk with CFRP ring

3.2 带 CFRP 箍环整体叶盘模态试验

带 CFRP 箍环整体叶盘模态试验在非旋转状态下进行。模态试验的基本原理是通过试验方法将叶盘的振动分解为许多阶系统固有模态的迭加。试验约束条件采用自由悬挂和通过转接段把叶盘固定在反力墙上两种方式。试验可分为系统建模、动态数据采集、参数识别和画振型图等步骤。本试验采用南京汽轮高新技术公司开发的 CRAS 随机信号与振动分

析系统, 最高采样频率达 51.2 kHz。

3.3 带 CFRP 箍环整体叶盘应变测量

应变测量在地坑式低循环疲劳试验器上进行, 温度为室温。用“三圆法”在 10000 r/min 转速下对试验件进行本机平衡, 振动监测采用 YD-1 加速度传感器。应变测量采用“东华测试”的 DH3815 静态应变仪, 其精度大于 0.5% $\pm 3 \mu\epsilon$ 。测量转速分别为 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 11000, 12000, 13200 r/min。每个转速下重复测 3 次, 记录测量转速下及停车回零时的应变值。从应变测量可以发现, 叶根位置在 12000 r/min 时停车回零值明显增大, 说明这时材料已进入塑性变形。

3.4 带 CFRP 箍环整体叶盘低循环疲劳试验

低循环疲劳试验在室温下进行, 转速谱为 2000~13200~2000 r/min。在 13200 r/min 时, 叶片根部的应力水平与某风扇试验件第一级整体叶盘叶根相当, 13200 r/min 的转速控制精度不超过 $\pm 0.5\%$ 。采用微机进行转速循环控制和数据采集, 同时限制振动加速度值不超过 3g。当完成了 3600 个循环后, 开箱着色检查, 在 8 号叶片叶根位置发现了明显的疲劳裂纹, 而在完成 3400 个循环时, 着色检查, 未发现试验件裂纹, 因此, 认为带复合材料箍环整体叶盘低循环疲劳寿命在 3400~3600 个循环之间, 且裂纹扩展较为迅速 (图 4)。在试验前和试验过程中, 分别用内径表和千分尺测量叶盘中心孔和外径, 发现叶盘尺寸变化很小。

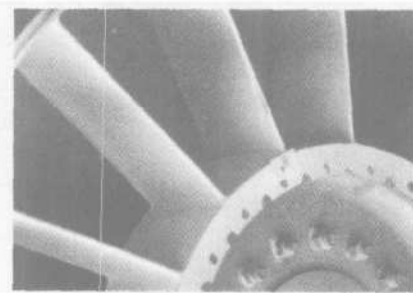


Fig 4 Crack of blade root

4 数值分析与试验数据对比分析

带 CFRP 箍环整体叶盘应变数值分析结果与测量结果的对比见图 5。从图 5 可见, 应变计算值与测量值相对误差在 10% 之内。误差产生的原因, 一方面是因为测点位置的应力应变梯度较大, 另一方面是由于贴片位置误差所致。频率数值分析与测量结果对比见表 2 和表 3。由表可见, 频率计算值与测量值的相对误差在 5% 以内; 随着节径数的增加, 在同一振动阶次下, 频率值趋于一致, 这是因为随着节径数

增加, 振型以叶片振动为主。低循环疲劳寿命预测值与试验值对比见表 4 可见, 寿命预测精度在 2 倍散度以内, 可满足工程设计要求。

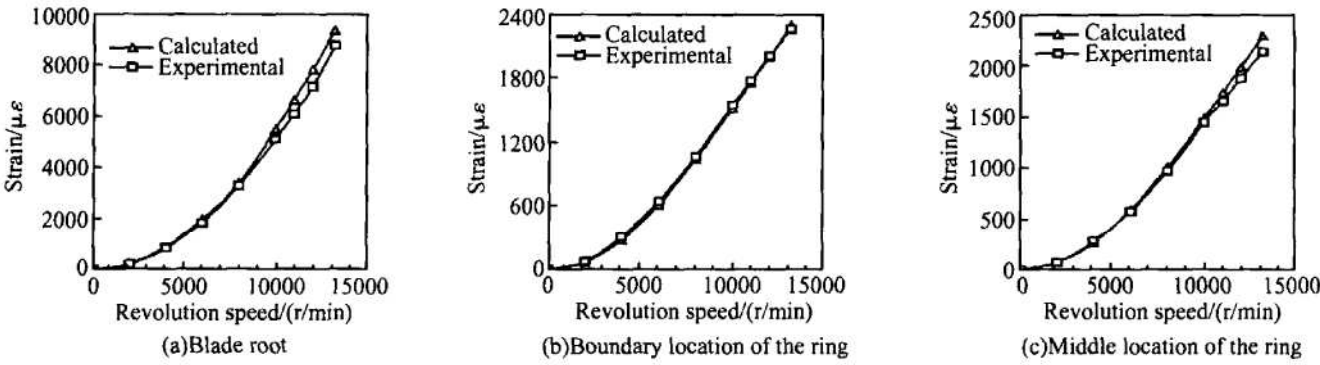


Fig 5 Comparison of blisk strain between the calculated and experimental results

Table 2 Comparison of blisk frequency at free condition/Hz

Modal diameter	No 1 order		No 2 order		No 3 order	
	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental
1	859	859	1258	1223	1393	1383
2	565	569	822	827	1262	1071
3	822	809	1233	1245	1403	1402
4	820	813	1251	1284	2122	-

Table 3 Comparison of blisk frequency fixed by transition part/Hz

Modal diameter	No 1 order		No 2 order		No 3 order		No 4 order	
	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental
1	301	310	797	797	1198	1205	1261	1265
2	568	582	822	823	1269	1266	2175	1704
3	817	820	1233	1266	1344	1433	2208	-
4	820	833	1251	1273	2122	-	2204	-

Table 4 Comparison of blisk life between the predicted and experimental results/cycles

Predicted result	Experimental result	experimental result/ predicted result
2354	3400~ 3600	1.44~ 1.53

5 结 论

(1) 针对带 CFRP 箍环整体叶盘结构, 完成了其应力应变分析、振动特性分析和低循环疲劳寿命预测。

(2) 设计了带 CFRP 箍环的整体叶盘模型试验件, 并成功地完成了模态试验、应变测量及低循环疲劳试验, 验证了分析方法的有效性; 同时, 也为 CFRP 箍环的缠绕固化和装配工艺积累了经验。

参考文献:

[1] 陈 光. 新型发动机的一些新颖结构 [J]. 航空发动机, 2001(1), 3~ 10

[2] Stanley W. Kandebo General elective tests forward swept

fan technology [J]. Aviation Week & Space Technology, 1996 9

[3] 王建军, 李其汉, 朱梓根. 失谐叶片-轮盘结构系统振动局部化问题的研究进展 [J]. 力学进展, 2000 30(4): 517~ 528

[4] 张 锦. 叶轮机振动模态分析理论及数值方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001

[5] Kosing O E, Scharl R, Schuhl H J Design improvement of the EJ200 HP compressor from design verification engine to a future all blisk version [R]. ASME 2001-GT-0283

[6] 张志民. 复合材料结构力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992 6

[7] 北京航空材料研究所 编著. 航空发动机设计用材料数据手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993

[8] Melis M E, Zaretsky E V, August R. Probabilistic analysis of aircraft gas turbine disk life and reliability [R]. NASA / TM 1999-107436.

(编辑: 刘 萝 威)