某低压涡轮盘破裂转速分析与试验验证

邵 帅,刘秀芝,魏 峰,邱 丰

(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为了研究轮盘破裂转速分析方法并提高破裂转速预测精度,基于有限元计算结果,采用平均应力法和局部塑性应变法 对某低压涡轮盘破裂转速和破坏起始部位进行预测,并与试验和失效分析结果进行对比分析。结果表明:平均应力法和局部塑性应 变法预测的破裂转速与试验结果吻合较好;局部塑性应变法预测轮盘破裂起始部位与失效分析结果吻合较好;对于研究的轮盘及 其工作环境,平均应力法预测破裂转速偏低,局部塑性应变法预测破裂转速偏高;局部塑性应变法预测精度相对更高。

关键词: 轮盘;破裂转速;试验验证;低压涡轮;航空发动机

中图分类号: V232.3 文献标识码:A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.02.004

Analysis and Test Verification of Burst Speed of a Low-pressure Turbine Disk

SHAO Shuai, LIU Xiu-zhi, WEI Feng, QIU Feng

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to study the analysis method of turbine disk burst speed and improve the accuracy of burst speed prediction, the average stress method and local plastic strain method were used to predict the burst speed and the failure initial site of a low-pressure turbine disk based on the results of finite element calculation. The results were compared with the results of test and failure analysis. The results show that the burst speed predicted by the average stress method and the local plastic strain method is in good agreement with the test results. The local plastic strain method is in good agreement with the failure analysis results in predicting the initial site of disk burst. For the disk and its working environment, the average stress method is lower in predicting the burst speed. The local plastic strain method is higher in predicting the burst speed, and the prediction accuracy of local plastic strain method is relatively higher.

Key words: disk; burst speed; test verification; low-pressure turbine; aeroengine

0 引言

轮盘作为航空发动机的关重件,必须确保轮盘在 可能出现的超转范围内工作而不破裂。对于双转子发 动机,由于低压涡轮轴较细,考虑到加力燃烧室对其 的影响,低压涡轮盘发生超转的概率较高。因此,低压 涡轮盘最需要受到破裂转速的限制,并优先考虑低压 涡轮盘的破裂试验^[1]。目前,国内外破裂转速的预测方 法主要有理论计算方法和基于有限元的多种计算方 法,包括平均应力法、最大应力法、局部应变法及残余 变形法等^[2-8]。目前,工程上常用的破裂转速计算方法 是平均应力法^[9],文献[10-12]对破裂转速预测方法进 行了试验验证。 本文为实际工程问题,结合有限元计算结果,采用平 均应力法和局部塑性应变法对涡轮盘进行破裂转速 分析,对轮盘破坏起始部位进行预测,并与试验和失 效分析结果进行对比分析。

1 轮盘破裂转速预测

1.1 平均应力法

轮盘的破裂模式主要有子午面破裂和圆柱面破 裂。子午面破裂是在轮盘子午面以周向应力为主的情 况下发生的;圆柱面破裂则是在轮盘某半径高度上以 径向应力为主的情况下发生的。平均应力法是从轮盘 平均承载角度分析轮盘子午面和圆柱面失效的破裂 转速预测方法。

收稿日期:2018-03-21 基金项目:航空动力基础研究项目资助 作者简介:邵帅(1987),女,硕士,工程师,主要从事航空发动机强度设计工作;E-mail:593556568@qq.com。

引用格式: 邵帅,刘秀芝,魏峰,等. 某低压涡轮盘破裂转速分析与试验验证 [J].航空发动机, 2019, 45(2): 19-22. SHAO Shuai, LIU Xiuzhi, WEI Feng, et al. Analysis and test verification of burst speed of a low-pressure turbine disk[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 19-22.

采用加权平均周向应力法,基于轮盘2维轴对称有限 元计算结果求解平均周向应力公式¹³为

$$\overline{\sigma_{\theta}} = \frac{\int_{A_1}^{A_m} \sigma_{\theta} dA}{\int_{A_1}^{A_m} dA}$$
(1)

式中: σ_{θ} 为按面积加权的平均周向应力; σ_{θ} 为相应 各单元的周向应力; A_1 和 A_m 分别为各单元面积。

基于轮盘2维轴对称有限元计算结果,针对平均 径向应力最高截面,根据径向应力沿截面线积分的方 法可求得最大平均径向应力。

基于有限元计算结果,采用平均应力法计算破裂 转速储备公式⁽⁴⁾为

$$k_{\rm b} = \sqrt{\frac{k\sigma_{\rm b}}{\sigma}} \tag{2}$$

式中:k_b为轮盘破裂转速储备; σ_b为材料的强度极限; σ为轮盘最大稳态转速下的平均周向应力; k 为材料利用系数。

低压涡轮盘材料选用高温合金 GH4169^[13],破裂 试验环境为常温,有限元分析时考虑了叶片的作用和 离心载荷。采用 PLANE183 单元建立 2 维轴对称有限 元模型进行弹性应力分析^[5],定义槽底以上的轮缘凸 块部位为具有一定厚度的平面应力单元。

通过对轮盘子午面和圆柱面进行破裂转速储备 分析可知,轮盘子午面破裂转速储备较低,轮盘的主 要破坏模式为子午面破坏。考虑材质的分散性,根据 可靠性要求,选取轮盘随炉试件拉伸性能的最低值、 最高值和平均值进行破裂转速分析,假定材料利用系 数为1.0,基于平均应力法预估轮盘破裂转速,见表1。

随炉试件 实测数据	室温强度	平均周向	破裂转速	预估破裂转
	极限	应力	储备	速相对值
	$\sigma_{ m b}/{ m MPa}$	$\sigma_{ m heta}/{ m MPa}$	$k_{ m p}$	n/%
最低值	1410	649	1.474	147
最高值	1520	649	1.530	153
均值	1447	649	1.493	149

表 1 破裂转速分析

1.2 局部塑性应变法

对轮盘进行局部应力应变分析,采用的应力 - 应 变曲线根据随炉试件实测力学性能数据的平均值获 得,将材料手册⁶⁶数据绘制的应力 - 应变曲线与随炉 试件实测力学性能数据平均值绘制的应力 - 应变曲 线进行对比,如图 1 所示。 建立局部塑性应变分 析3维有限元模型,计算 相对转速154%时轮盘局 部塑性应变分布,如图2 所示。从图中可见,局部塑 性应变较大部位位于榫槽 槽底,且该部位应变以周



向应变为主,各转速下槽底局部塑性应变分析结果见 表 2,塑性应变 – 转速关系如图 3 所示。从塑性应变 变化规律可见,当转速由 157%上升至 158%时,榫槽 槽底局部塑性应变大幅度提高,按照局部塑性应变法 预测在该转速范围内轮盘可能发生破裂,起裂位置为 榫槽槽底。



表 2 塑性应变随转速变化趋势

相对转速 /%	槽底塑性应变	相对转速/%	槽底塑性应变
126	0.000013	154	0.002301
139	0.000089	156	0.003025
144	0.000436	157	0.003361
146	0.000806	158	0.005273
149	0.001236	159	0.019123

2 试验结果与分析

2.1 应变计算结果与测量结果对比

为了验证轮盘局部塑性应变法分析模型的正确 性,在轮盘榫槽附近布置应变片测量周向应变,由于 局部应变最大部位位于槽底,该部位不便于粘贴应变 片,将应变片布置在轮盘前端面靠近槽底的位置,如 图 4 所示。各转速下应变计算结果、测量结果及相对 误差见表 3,计算结果与各测点实测应变值绘制曲线 如图 5 所示。从图中可见,应变计算结果与测量结果 较为吻合。

2.2 高速摄像记录

在试验过程中,采用高速摄像记录轮盘的整个试 验历程。当试验转速上升至154%时,轮盘发生子午



图 4 榫槽附近应变测点位置 图 5 榫槽附近应变测点位置

表 3 应变计算结果与测量结果对比

相对 转速 /%	计算 结果	测点 1	测点 2	测点 3	测量 均值	误差 /%
100	0.002802	0.002896	0.002913	0.002870	0.002893	-3.15
126	0.004654	0.004882	0.004911	0.004811	0.004868	-4.40
139	0.007094	0.008097	0.008314	0.008508	0.008306	-14.60
142	0.012447	0.010921	0.011101	0.011513	0.011178	11.35

面破裂。按时间顺序选取 具有代表性的高速摄像照 片如图6所示,整个试验 过程如下:



(1)第1排5幅照片记录了试验转速升至

图 6 高速摄像记录

154%时试验件运行过程。转速升至154%前,试验件运行状态正常,目视整个轮盘的塑性变形不明显。当试验转速升至154%后,轮盘子午面发生破裂;

(2)第2排5幅照片记录了轮盘子午面首断截面 破裂的过程。轮盘开始发生破裂后,轮盘变形明显,按 逆时针旋向90°位置轮盘发生第2次破裂,轮盘第1 个部分彻底断开;

(3)第3排5幅照片记录了轮盘第2个部分破裂的过程。轮盘第1个部分发生破裂后,轮盘变形进一步变大。从第2次破裂位置起,按逆时针旋向90°位置轮盘发生第3次破裂,轮盘第2个部分彻底断开;

(4)第4排4幅照片记录了轮盘发生破裂后的过程。整个轮盘破裂之后,破裂的轮盘撞击到防护层,产 生明显的火花。

2.3 计算与试验结果对比

轮盘在相对转速达到 154%时发生子午面破裂, 破裂后整体形貌如图 7 所示,首断截面形貌如图 8 所 示。将实测破裂转速与预测破裂转速进行对比,结果 见表 4。

从对比结果可见,在常温条件下,当材料利用系

数取 1.0 时,采用平均应力法预测破裂转速仍然低于 实测破裂转速,采用实测力学性能最高值预测破裂转 速与实测值最为接近,误差为 -0.65%,采用实测力学 性能平均值预测破裂转速误差为 -3.25%,由于实测 破裂转速高于预测破裂转速,本文数据不能给出材料 利用系数;采用局部塑性应变法预测破裂转速高于实 测值,采用实测力学性能平均值预测破裂转速误差为 1.95% ~ 2.60%;本文采用 2 种方法预测低压涡轮盘 (常温条件下)破裂转速与实测破裂转速较为接近,局 部塑性应变法预测精度相对更高。



图 7 轮盘破裂后整体形貌图 8 首断截面形貌表 4 破裂转速实测与预测对比

材料	平均应	实测值	22 半 101	局部塑性	实测值	迟举 101
数据	力法 /%	1%	庆左1%	应变法 /%	1%	庆左1%
均值	149	154	-3.25	157 ~ 158	154	$1.95\sim 2.60$
最低值	147	154	-4.55			
最高值	153	154	-0.65			

3 失效分析[14-15]

轮盘首断截面端口分为盘缘侧断口和盘心侧断 口,断口宏观图像如图9所示。断口靠近盘缘榫槽槽 底及辐板中心区域为纤维区,安装边及辐板两侧区域 为剪切唇区,断口表面可见放射线形貌,放射线由槽 底向辐板方向扩展。盘心侧断口纤维区形貌主要为等 轴韧窝形貌,剪切唇区形貌为剪切韧窝,表明该断口 为瞬断断口。



根据剪切唇区的剪切韧窝方向判断,断裂由盘缘 侧向盘心侧扩展,扩展方向如图 10 中红色箭头所示。 因此,随着转速提高至轮盘破裂转速,低压涡轮盘发 生瞬断破坏,由榫槽槽底部位起裂,后扩展至盘心。该 分析结果与第1.2节预测 轮盘破坏起始位置一致。

本文采用平均应力法



图 10 裂纹扩展方向

和局部塑性应变法进行破裂转速预测,并与试验结果 和失效分析结果进行对比分析,得出结论如下:

(1)采用平均应力法和局部塑性应变法进行破裂 转速预测的结果与试验结果吻合较好;

(2)采用局部塑性应变法预测轮盘破裂起始部位 与失效分析结果吻合较好:

(3)对于本文研究的轮盘及其工作环境,平均应 力法预测破裂转速低于实测值,局部塑性应变法预测 破裂转速高于实测值,且局部塑性应变法预测精度相 对更高。

参考文献:

[1] 吕文林,陈俊粤,田德义,等.航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则: 第二册[M].北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997: 59 - 106

LYU Wenlin, CHEN Junyue, TIAN Devi, et al. Aviation turbojet, turbofan engine structural design guidelines:volume 2 [M]. Beijing:System Engineering Bureau of China Aviation Industry Corporation, 1997: 59-106. (in Chinese)

[2] 冯引利,何云,陈伟,等.轮盘径向破裂转速计算方法分析及修正[J]. 航空动力学报,2014,29(11):2729-2734.

FENG Yinli, HE Yun, CHEN Wei, et al. Analysis and correction of computational methods on disk radial burst speed [J]. Journal of Aerospace Pwoer, 2014, 29(11): 2729-2734. (in Chinese)

[3] 古爱军, 张学仁, 王屏, 等. 轴流式轮盘破裂转速的数值计算方法 [J]. 航空动力学报,2001,16(3):287-290.

GU Aijun, ZHANG Xueren, WANG Ping, et al. Numerical method for calculating the burst speed of axial-flow-type discs [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 287 - 290. (in Chinese)

- [4] 孙国维.几种材料和结构的轮盘转子破裂准则的试验应用[J]. 热能 动力工程,1988,3(3):30-35. SUN Guowei. Experiment application of the fracture criteria of disc rotors of different materials and structures [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1988, 3(3): 30-35. (in Chinese)
- [5] Wilterdink P I, Holms A G, Manson S S. A theoretical and experimental investigation of the influence of temperature gradients on the deformation and burst speeds of rotating disks[R]. NACA-1952-2803.
- [6] 洪其麟,王屏. 计算轮盘破裂转速的大变形解析法[J]. 航空动力学 报,1990,5(4):321-324.

HONG Qilin, WANG Ping. A large analytical deformation method for prediction of disk burst speed [J].Journal of Aerospace Power ,1990,5 (4): 321-324. (in Chinese)

[7] 王屏,刘思永. 用大变形解析法和小变形解析法计算轮盘破裂转 速的比较[J]. 机械强度,1998,20(2):95-98.

WANG Ping, LIU Siyong. A comparison of disk burst speeds calculated by analytical large deformation method and analytical mini-deformation method [J]. Journal of Mechanical Strength, 1998, 20 (2):95-98. (in Chinese)

[8] 赵俊生,马朝臣,胡辽平. 车用涡轮增压器叶轮破裂转速的弹塑性 数值分析[J]. 机械科学与技术,2008,27(1):45-49.

ZHAO Junsheng, MA Chaochen, HU Liaoping. Elastoplasticity numerical analysis of the burst speed of vehicular turbocharger impeller [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008,27(1):45-49. (in Chinese)

[9] 邵帅,郭秩维,储建恒.基于 Workbench 的多级轮盘组件优化设计[J]. 航空发动机,2018,44(2):40-43.

SHAO Shuai, GUO Zhiwei, CHU Jianheng. Optimum design of multistage disk based on workbench [J]. Aeroengine, 2018, 44(2): 40-43. (in Chinese)

[10] 郑祺选. 轮盘破裂转速试验研究 [J]. 航空动力学报,1990,5(4): 318-320.

ZHENG Qixuan. An experimental study on disc bursting speed [J]. Journal of Aerospace Power, 1990, 5(4): 318-320. (in Chinese)

- [11] 吴长波,卿华,冯引利,等.某高压涡轮整体叶盘破裂转速计算方法 及试验验证[J].燃气涡轮试验与研究,2006,19(3):33-36. WU Changbo, QING Hua, FENG Yinli, et al. Investigation on the prediction and experiment of high-pressure turbine blisk burst speed [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2006, 19 (3): 33-36. (in Chinese)
- [12] 冯引利,吴长波,高鹏,等.某粉末冶金高温合金涡轮盘破裂转速分 析[J].航空动力学报,2013,28(3):501-506. FENG Yinli, WU Changbo, GAO Peng, et al. Analysis of power metallurgy superalloy turbine disc's burst speed [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 501-506. (in Chinese)
- [13] 吴学仁,杨士杰,韩希鹏,等.航空发动机设计用材料数据手册:第 三册[M].北京:航空工业出版社,2008: 363-557.

WU Xueren, YANG Shijie, HAN Xipeng, et al. Aeroengine design material manual: volume 3 [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008:363-557.(in Chinese)

[14] 徐锐,李鸿,张宗林,等. TC25 钛合金四级压气机盘失效分析[J].失 效分析与预防,2012,7(1):34-37.

XU Rui, LI Hong, ZHANG Zonglin, et al. Failure analysis of 4th compressor disk of TC25 titanium alloy [J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(1): 34-37. (in Chinese)

[15] 郭峰,刘德林,梁伟,等. TC17 钛合金叶盘破裂分析[J].失效分析与 预防,2015,10(1):62-66.

GUO Feng, LIU Delin, LIANG Wei, et al. Breakage analysis of impeller disk of TC17 titanium alloy [J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(1):62-66. (in Chinese)

> (编辑:刘 亮)

4

结论

