

某燃气轮机高温涡轮盘的破裂转速数值 预测方法研究与试验验证

孙彦博^{1,2}, 何建元^{1,2}, 朱凯迪^{1,2}

(1. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 黑龙江 哈尔滨 150078;
2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 为了确定某燃气轮机涡轮盘的破裂转速, 设计并开展了轮盘破裂转速试验得到了其真实破裂转速, 并与多种数值预测方法预测的轮盘破裂转速进行对比。结果表明: 对于某型燃气轮机高温涡轮盘而言, 最大应力法对破裂转速的预测精度最高, 与试验转速相比, 精度为 0.9%, 可以预测裂纹的起始开裂位置以及轮盘的破裂模式; 极限应变法与残余变形法预测的破裂转速的精度相当, 与试验转速相比, 精度分别为 4.8% 和 6.2%, 由于有限元方法会同时计算应变和应力, 因此建议优先选用应力准则预测; 平均周向应力法计算相比较简便, 计算时间短, 但是精度较差, 精度约为 12.3%, 可以用于粗略估计破裂转速。

关键词: 燃气轮机; 涡轮盘; 破裂转速; 数值预测方法; 试验验证

中图分类号: TK474.7 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.09.024

[引用本文格式] 孙彦博, 何建元, 朱凯迪. 某燃气轮机高温涡轮盘的破裂转速数值预测方法研究与试验验证[J]. 热能动力工程, 2021, 36(9): 188-194. SUN Yan-bo, HE Jian-yuan, ZHU Kai-di. Numerical prediction method and test verification for burst speed of high temperature turbine disk of gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 188-194.

Numerical Prediction Method and Test Verification for Burst Speed of High Temperature Turbine Disk of Gas Turbine

SUN Yan-bo^{1,2}, HE Jian-yuan^{1,2}, ZHU Kai-di^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory
for Marine and Ocean Engineering Power System, Harbin, China,
Post Code: 150078; 2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to determine the burst speed of the turbine disk of a certain gas turbine, the real burst speed was obtained by designing and carrying out the burst speed test of turbine disk, which was compared with the burst speed of turbine disk predicted by various numerical prediction methods. The research results show that for high temperature turbine disk of a certain gas turbine, the maximum stress method has the highest prediction accuracy for the burst speed, the accuracy is 0.9% compared with the test speed, the initial crack position and the burst mode of the disk can be predicted; The accuracy of the burst speed predicted by the ultimate strain method is similar to that of the residual deformation method, the accuracies are 4.8% and 6.2% respectively compared with the test speed. Because the strain and stress can be calculated simultaneously by the finite element method, it is recommended to choose the stress criterion to predict preferentially. The average circumferential stress method is relatively simple to calculate, the calculation time is short, but the accuracy is worse, the accuracy is about 12.3%, which can be used to

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-05-24

基金项目: 国家科技重大专项(2017-I-0011-0012)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017-I-0011-0012)

作者简介: 孙彦博(1992-), 男, 黑龙江巴彦人, 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所工程师。

roughly estimate the burst speed.

Key words: gas turbine, turbine disk, burst speed, numerical prediction method, test verification

引言

涡轮盘作为发动机的核心部件^[1],不仅要承受极高的离心负荷、振动负荷和热负荷,还要承受环境介质的腐蚀与氧化。舰用燃气轮机高温涡轮盘具有尺寸大、重量大、转速高及工作温度高等特点,轮盘的破裂往往是非包容的,轮盘一旦破裂,容易打穿机匣,切断油管等,造成严重事故。因此,在保证发动机性能的情况下,准确评估轮盘的破裂转速就显得尤为重要。

对轮盘破裂转速预测的常用方法有平均应力法、小变形解析法、大变形解析法及有限元法^[2]。万江艳等人^[3-4]建立了与材料延伸率相关的轮盘破裂准则,并对某模拟盘进行破裂试验,计算结果与试验结果一致;孙力等人^[5]建立了一种基于连续损伤力学的预测方法,该模型不仅可以较准确地预测模拟盘的破裂转速,还能有效预测模拟盘的超转破裂模式;邵帅等人^[6]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;蔡全卓^[7]对典型航空发动机轮盘破裂的失效进行了系统研究;吴长波等人^[8-11]对轮盘的破裂转速计算方法进行介绍,并通过不断修正计算方法,提高其计算精度,并对粉末冶金轮盘破裂转速进行了相关研究;王开明等人^[12]利用极限应变法对某轮盘转速进行预测并与试验结果对比,证明了极限应变法用于超转破裂分析的合理性;张春成等人^[13]研究了高温下的材料性质和温度梯度对轮盘超转破裂特性和超转破裂转速的影响。

本文对相关方法进行了汇总,并对某燃气轮机高温涡轮盘的破裂转速进行了详细计算,与轮盘的真实破裂转速进行对比分析,总结了规律。

1 轮盘破裂转速计算方法

1.1 应力应变计算

1.1.1 平均周向应力法

平均周向应力法认为当轮盘子午截面上的周向

应力都达到屈服极限时,轮盘变形已经很大,认为轮盘破坏。

$$k_b = \frac{\omega_p}{\omega_{\max}} = \sqrt{\frac{S\sigma_b}{\sigma_{rb}h_b r_b + \rho\omega_{\max}^2 I}} \quad (1)$$

式中: S —子午剖面的面积, m^2 ; I —子午剖面对旋转轴线的惯性矩, m^4 ; σ_{rb} —轮缘外载, Pa; σ_b —拉伸强度极限, Pa; ω_p —破裂角速度, rad/s; ω_{\max} —最大稳态工作角速度, rad/s; r_b —轮缘半径, m; h_b —轮缘厚度, m; ρ —材料密度, kg/m^3 。

由于解析式方法繁琐,因此提出了简化算法。

$$k_b = \sqrt{\frac{k\sigma_b}{\bar{\sigma}_t}} \quad (2)$$

式中: k_b —破裂转速储备系数; σ_b —拉伸强度极限, Pa; $\bar{\sigma}_t$ —平均周向应力, Pa; k —修正系数。

1.1.2 极限应变法

极限应变法认为当轮盘内任一局部点的等效应变达到材料的极限应变时,轮盘破坏,此时对应的转速即为轮盘的破裂转速,该部位即为轮盘的起始破裂部位。

1.1.3 最大应力法

最大应力法认为当轮盘内任一局部点的第一主应力、等效应力、周向应力或径向应力达到材料的强度极限时,轮盘发生破裂。

1.1.4 残余变形法

残余变形法认为,随着转速的增加,轮盘关键部位的残余变形量逐渐增加,当转速增大到一定程度时,残余变形急剧增加,轮盘处于破裂边缘,当超过某一极限时,轮盘破裂。

$$\delta_b = \frac{D_{\text{use}} - D_0}{D_0} \quad (3)$$

式中: D_0 —轮盘关键部位使用前尺寸, m; D_{use} —轮盘关键部位使用后尺寸, m。

1.2 数据处理

发动机轮盘在发生破裂前会产生较大的塑性变形,必须采用真实应力-真实应变数据才能满足材料真实变形条件。然而材料手册中给出的弹塑性曲

线为工程应力 - 工程应变曲线, 必须将其进行转化。

$$\sigma_t = \sigma_0(\varepsilon_0 + 1) \tag{4}$$

$$\varepsilon_t = \ln(\varepsilon_0 + 1) \tag{5}$$

式中: ε_t —实际应变; ε_0 —工程应变; σ_t —实际应力, Pa; σ_0 —工程应力, Pa。

将试验中获得的工程应力 - 工程应变曲线转换成真实应力 - 真实应变曲线, 将此数据作为后续有限元仿真计算的依据。但是, 部分有限元软件采用塑性模型定义材料的后屈服性能, 即真实应力 - 真实塑性应变, 为了在软件中包含塑性, 当应力 - 应变点超过屈服时, 必须以真实应力和真实塑性应变的形式输入, 即:

$$\varepsilon_t^p = \varepsilon_t - \sigma_t/E \tag{6}$$

式中: ε_t^p —真实塑性应变; E —弹性模量, Pa。

1.3 有限元建模

有限元模型如图 1 所示, 网格单元采用六面体与四面体混合二阶单元, 局部网格加密, 在保证计算精度的同时尽量节省计算成本, 按照随动硬化模型进行弹塑性计算。

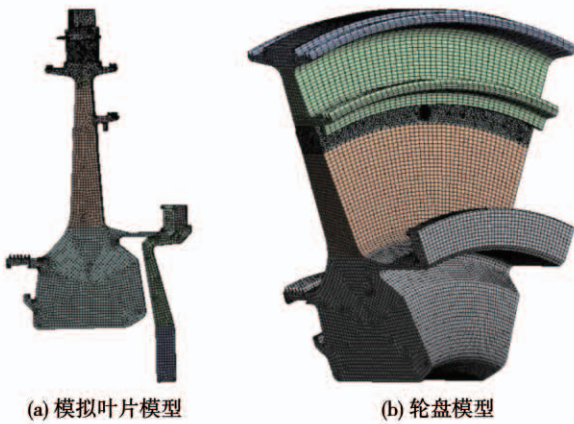


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element models

为了包含尽可能多的结构细节, 有限元模型处理分两部分进行。对于除轮盘通气孔外的其他部位采用带模拟叶片的模型(图 1(a))计算, 切取扇形单元(360°/叶片个数)作为循环对称模型, 在两个子午面处施加循环对称边界条件, 在转接盘的法兰面上施加轴向与周向位移边界条件; 对于轮盘通气孔部位, 为了减少计算资源, 采用去除榫槽和模拟叶

片后的模型(图 1(b))计算, 换算成对应转速下的离心力施加在轮缘处, 切取扇形单元(360°/通气孔个数)作为循环对称模型, 在两子午面处施加循环对称边界条件, 在轮盘法兰面上施加轴向与周向位移边界条件。在轮盘沿径向选取 3 个特征截面施加对应位置的真实温度作为温度边界条件。

本文中后续图横、纵坐标均采用相应的归一化处理, 其中相对转速采用计算转速 n 除以发动机额定转速值 n_0 , 相对应力采用计算应力 σ 除以材料的极限强度 σ_b , 相对应变采用计算应变 ε 除以材料的极限应变 ε_b 的归一化无量纲单位。

2 计算结果分析

2.1 应力应变计算结果

由图 2 可知, 当相对转速低于某一值时, 应变与相对转速呈线性增长, 这是因为此时材料处于屈服极限以下; 当转速继续增加时, 应变随转速增长不成比例, 应变增长较快, 这是因为材料超过屈服极限, 产生塑性变形; 当转速增加到一定程度时, 应变随转速急剧增加, 变形进一步增大。

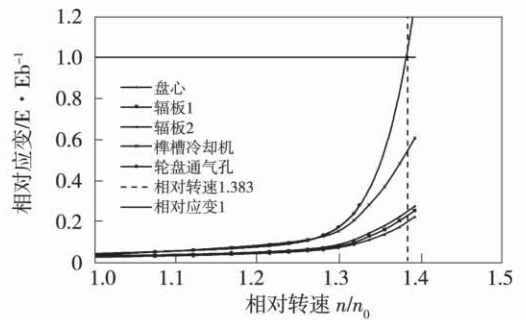


图 2 相对应变随相对转速的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of relative strain with relative speed

由图 3 ~ 图 7 可知, 轮盘各关键部位应力均随转速增加, 先是第 1 主应力最大, 当转速达到一定程度时, 轮盘周向应力急剧增加并大于径向应力, 最终与第 1 主应力几乎相同并且最大, 故可以预测轮盘发生周向破裂。

图 8 为残余变形量随相对转速的变化曲线。由图可知, 轮盘各部位的残余变形量随着转速的增加

首先缓慢增加,当增加到一定程度时,残余变形量急剧增加,残余变形量曲线逐渐与某一定值转速线无限逼近。

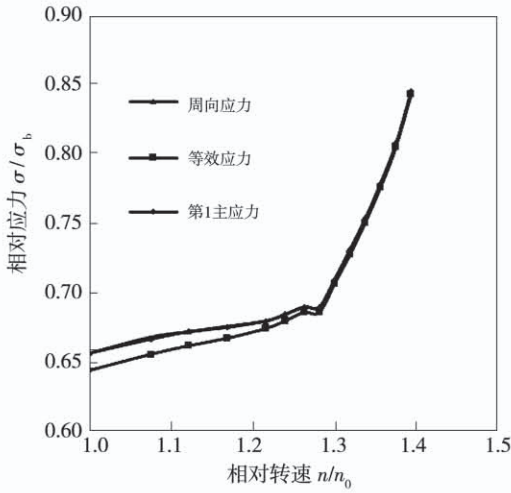


图3 盘心各相对应力随相对转速的变化曲线

Fig.3 Variation curves of relative stress of disk center with relative speed

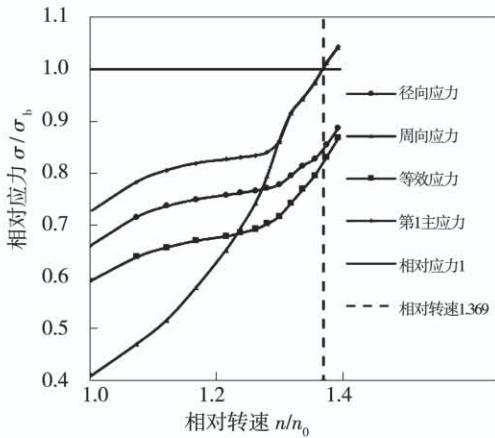


图4 辐板1各相对应力随相对转速的变化曲线

Fig.4 Variation curves of various relative stresses of web plate I with relative speed

2.2 计算方法比较

对于平均周向应力法,由有限元计算结果利用式(2)获得其破裂转速为 $1.483n_0$ 。

对于极限应变法,由图2可以看到,轮盘通气孔的应变后期增长速度远超过轮盘其他部位的应变增长速度,并且应变最大,其次榫槽冷却孔,再次盘心位置。因此可以预测轮盘首先在通气孔部位产

生裂纹,并扩展至轮盘榫槽冷却孔、盘心位置破裂,由材料数据知其极限应变为0.2,对应的相对转速为1.383。

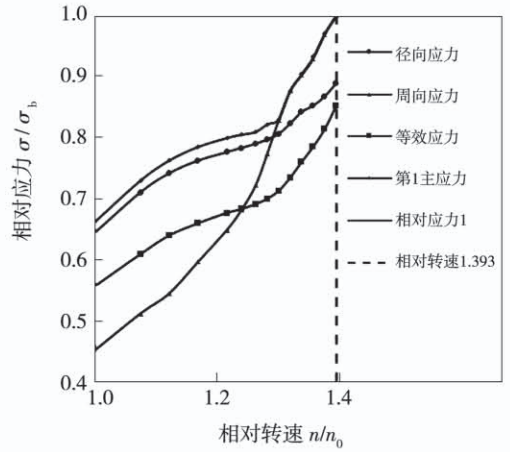


图5 辐板2各相对应力随相对转速的变化曲线

Fig.5 Variation curves of various relative stresses of web plate II with relative speed

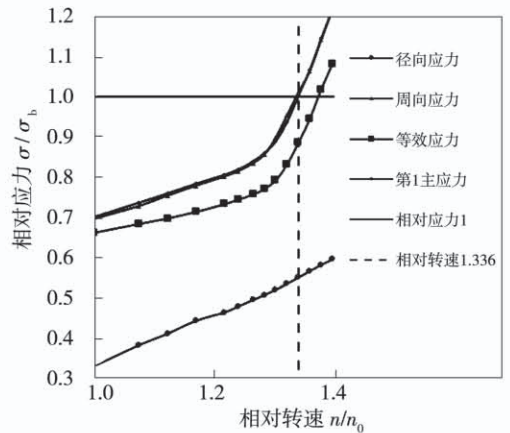


图6 榫槽冷却孔各相对应力随相对转速的变化曲线

Fig.6 Variation curves of various relative stresses of cooling hole in mortise with relative speed

对于最大应力法,由图7可以看出,随着转速的增加,当轮盘相对转速为1.332时,轮盘通气孔周向应力和第1主应力均达到1300MPa,故预测轮盘首先从轮盘通气孔部位产生裂纹,并扩展汇聚,最终延伸至盘心周向破裂。

对于残余变形法,由图8可以看出,当转速增加到一定程度时,盘心的残余变形急剧增加,其曲线几乎无限靠近相对转速为1.402的竖线,故判断其为

轮盘的破裂转速,计算结果如表 1 所示。

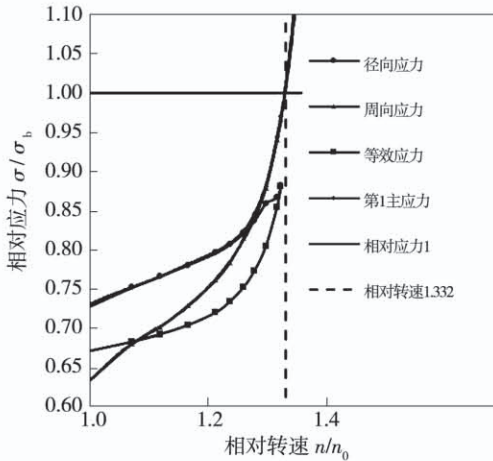


图 7 轮盘通气孔各相对应力随相对转速的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of various relative stresses of disk vent with relative speed

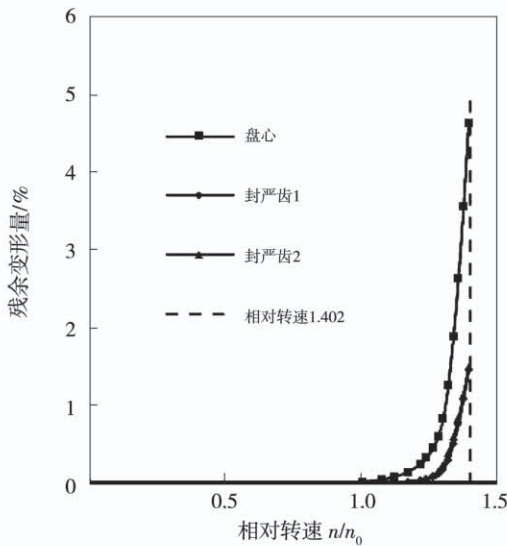


图 8 残余变形量随相对转速的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of residual deformation with relative speed

表 1 各方法预测破裂转速

Tab. 1 The burst speeds predicted by various methods

预测方法	破裂转速
平均周向应力法	1.483n ₀
极限应变法	1.383n ₀
最大应力法	1.332n ₀
残余变形法	1.402n ₀

3 轮盘破裂试验验证

为了获得轮盘的实际破裂转速,设计了该涡轮盘试验件。图 9 为试验前涡轮盘试验件,其中模拟叶片是经过核算与实际叶片产生相同离心力的质量块,其榫根与实际叶片的榫根相同,用来模拟轮盘与叶片的实际接触状态,轮盘试验件分别经由转接盘、芯轴过渡与高速旋转试验器接口连接,通过高温炉进行分区加热模拟轮盘的工作环境,设计过程中校核了模拟叶片、转接盘等陪试件的强度确保大于轮盘的强度,防止试验过程中陪试件先于轮盘破裂。



图 9 涡轮盘试验件

Fig. 9 The test piece of turbine disk

3.1 破裂特征分析

试验结果表明,当转速达到额定转速的 1.32 倍时,轮盘发生破裂,图 10 为试验后状态轮盘破裂残骸。可以看到,转接盘较为完整,工装芯轴与转接盘脱离。整体轮盘周向破裂成 3 块较大的碎片飞出后与包容环撞击,进而破裂成更多的小碎块跌落在试验腔内,各方法数据如表 2 所示。



图 10 轮盘碎片及残骸

Fig. 10 The disk fragments and wreckage

表2 各方法预测破裂转速结果对比

Tab.2 Comparison of burst speeds predicted by various methods

预测方法	破裂转速	试验破裂转速	误差/%
平均周向应力法	$1.483n_0$	$1.32n_0$	12.3
极限应变法	$1.383n_0$	$1.32n_0$	4.8
最大应力法	$1.332n_0$	$1.32n_0$	0.9
残余变形法	$1.402n_0$	$1.32n_0$	6.2

从图 11、图 12 中可以看出,轮盘剩余碎片中盘心、通气孔等部位仍有没扩展完全的裂纹,图中圈红的盘心部位已经发生大的塑性变形,显示为大应力开裂,判断轮盘从此部位破裂。

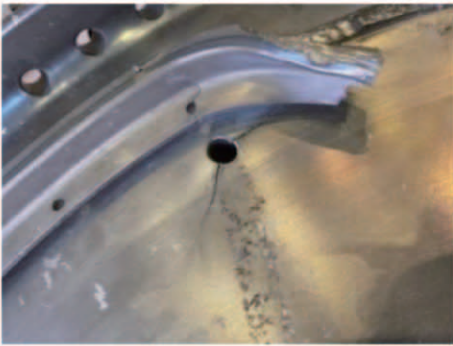


图 11 轮盘破裂后通气孔部位放大图

Fig.11 Enlarged view of vent hole position after disk burst



图 12 轮盘破裂后盘心部位放大图

Fig.12 Enlarged view of disk center position after disk burst

3.32 试验结论

由于高温炉等的遮挡,导致无法进行高速摄像拍照,根据以上特征,推断如下:

从图 13 可以推断,轮盘沿某个榫槽冷却孔、轮盘通气孔部位撕裂开,向外扩展,进而与盘心扩展过

来的裂纹汇聚,导致轮盘整体分离,破裂飞出。这与有限元计算预测的轮盘通气孔等处产生起始裂纹完全一致。同时,图 11、图 12 轮盘残骸中发现通气孔、盘心等部位还没扩展完全的裂纹也证实了预测的准确性。

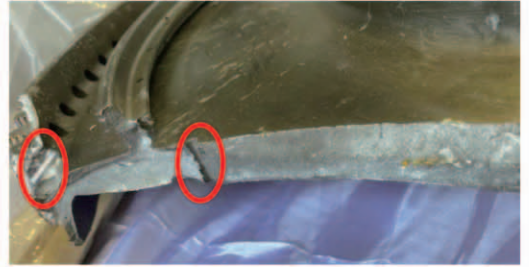


图 13 轮盘局部破裂图

Fig.13 Diagram of partial burst of disk

4 结论

(1) 最大应力法对轮盘的破裂转速的预测精度最高,与实际破裂转速相比,精度为 0.9%。

(2) 极限应变法与残余变形法对轮盘的破裂转速的预测精度相当,与真实破裂转速相比,精度分别为 4.8% 和 6.2%。

(3) 平均周向应力法计算比较简便,但是精度较差,为 12.3%。这是因为最大应力法与极限应变法关注的是单点达到极限,而平均周向应力法关注的是整个面均达到屈服,当单点达到极限后需要继续增加转速才能扩展至面,所以平均周向应力法预测值较大。

(4) 极限应变法仅能预测裂纹的起裂位置,不能预测轮盘的破裂模式;而最大应力法能同时预测轮盘的破裂模式以及裂纹的起裂位置。

(5) 当粗略估算轮盘的破裂转速时可选用平均应力方法,当要获取比较精确的计算结果时建议选用最大应力法。

参考文献:

[1] 李其汉,王延荣.航空发动机结构强度设计问题[M].上海:上海交通大学出版社,2014.

LI Qi-han, WANG Yan-rong. The design problem of aero-engine structure strength[M]. Shanghai: Profile of Shanghai Jiao Tong U-

- niversity Press, 2014.
- [2] 刘大响,程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 490 - 496.
LIU Da-xiang, CHENG Rong-hui. The present situation and development trend of world aviation power technology [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 490 - 496.
- [3] 万江艳,周柏卓. 轮盘模拟件破裂试验及其有限元描述[J]. 航空发动机, 2008, 34(2): 19 - 21.
WAN Jiang-yan, ZHOU Bai-zhuo. Fracture test of disk simulated specimen and its description of finite element [J]. Aero Engine, 2008, 34(2): 19 - 21.
- [4] 万江艳,周柏卓. 轮盘弹塑性盘破裂准则的建立及变厚度轮盘破裂转速预测[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 4 - 6.
WAN Jiang-yan, ZHOU Bai-zhuo. Elastic-plastic disc burst criteria establishment and variable thickness disk burst rotational speed prediction [J]. Aero Engine, 2011, 37(5): 4 - 6.
- [5] 孙力,胡绪腾,宋迎东. 基于连续损伤力学的轮盘超转破裂行为预测与验证[J]. 航空发动机, 2018, 44(4): 39 - 44.
SUN Li, HU Xu-teng, SONG Ying-dong. Prediction and verification of disk over-speed burst behavior based on continuum damage mechanics [J]. Aero Engine, 2018, 44(4): 39 - 44.
- [6] 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 Xiu-zhi, WEI Feng, et al. Analysis and test verification of burst speed of a low-pressure turbine disk [J]. Aero Engine, 2019, 45(2): 19 - 22.
- [7] 蔡全卓. 典型航空发动机轮盘破裂失效研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
CAI Quan-zhuo. Research on burst failure of typical aeroengine disk [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [8] 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 Chang-bo, QING Hua, FENG Yin-li, 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.
- [9] 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 Yin-li, HE Yun, CHEN Wei, et al. Analysis and correction of computational methods on disk radial burst speed [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(11): 2729 - 2734.
- [10] 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 - 505.
FENG Yin-li, WU Chang-bo, GAO Peng, et al. Analysis of power metallurgy superalloy turbine disc's burst speed [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 501 - 505.
- [11] 秦仕勇,冯引利,孙海鹤,等. 粉末冶金涡轮盘破裂转速分析与验证[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2017, 30(5): 36 - 41.
QIN Shi-yong, FENG Yin-li, SUN Hai-he, et al. Burst speed analysis and verification of the powder metallurgy superalloy turbine disk [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2017, 30(5): 36 - 41.
- [12] 王开明,王卫国,陈国光. 基于极限应变法的超转分析验证与应用[J]. 推进技术, 2020, 41(7): 1594 - 1600.
WANG Kai-ming, WANG Wei-guo, CHEN Guo-guang. Validation and application of over-speed analysis using strain-based fracture criteria [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(7): 1594 - 1600.
- [13] 张春成,汪好,陈国光. 温度场对航空发动机转子超转破裂的影响[J]. 航空学报, 2019, 40(10): 136 - 143.
ZHANG Chun-cheng, WANG Hao, CHEN Guo-guang. Impacts of temperature fields on rotor over-speed fracture of aircraft engines [J]. ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(10): 136 - 143.

(金圣迪 编辑)