

文章编号:1000-8055(2013)03-0501-06

某粉末冶金高温合金涡轮盘破裂转速分析

冯引利^{1,2}, 吴长波^{1,2}, 高 鹏², 陈 伟¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院 强度技术研究室, 成都 610500)

摘 要: 介绍了平均应力法、平均径向应力修正法、残余变形法、局部塑性应变法等破裂转速预测方法, 并采用这些方法对某粉末冶金高温合金涡轮盘破裂转速进行了分析。通过理论预测与试验结果的对比得知: 采用平均径向应力修正法、残余变形法、局部塑性应变法预测的破裂转速与试验结果吻合较好, 而采用基于径向应力分布均匀假设的平均应力法推算的破裂转速与试验结果相差较大。

关 键 词: 破裂转速; 平均应力; 平均径向应力修正; 残余变形; 局部塑性应变法

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Analysis of power metallurgy superalloy turbine disc's burst speed

FENG Yin-li^{1,2}, WU Chang-bo^{1,2}, GAO Peng², CHEN Wei¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. The Strength Research Office, China Gas Turbine Establishment,

Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: The average stress method, modified average radial stress method, residual deformation method, and local plastic strain method which were used for burst speed forecast were introduced. power metallurgy (P/M) superalloy turbine disc's burst speed was analyzed with these methods. By comparing the forecast results with test results, it can be found that the forecast results agreed well with the test results using the modified average radial stress method, residual deformation method and local plastic strain method. However, the forecast burst speed by the average stress method based on radial stress distributing equally are not in agreement with test results.

Key words: burst speed; average stress; modified average radial stress; residual deformation; local plastic strain

轮盘是航空燃气涡轮发动机的关键件,工作时处于高速、高温工作状态,承受着轮盘外缘叶片离心力以及轮盘本身的质量离心力^[1]。轮盘的破裂大多是非包容的,往往会引起灾难性后果^[2]。为保证飞行安全,美国军用标准《发动机结构完整性大纲》^[3]建议:在飞行包线内的任何情况下,轮盘最低破裂转速不得低于最大允许的稳态转速

122%。中华人民共和国国家军用标准^[4]也有相应要求。因此,对轮盘破裂转速的准确分析尤为重要。

有关轮盘破裂转速分析有多种方法,常用的方法有平均应力法^[5]、小变形解析法^[6]和大变形解析法^[7],且文献^[8]对大变形解析法进行了验证。文献^[9]中针对不同材料和结构提出了相应的多种破裂准则:最大切向或径向应力准则、第三强

收稿日期:2012-04-08

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.501_004.html

作者简介:冯引利(1974—),女,陕西礼泉人,高级工程师,博士生,主要从事发动机强度研究。

度理论导出的断裂准则、 K_{IC} 准则等;文献[10-11]提出了一种八面体剪应变破坏准则;文献[12-13]建立与材料延伸率相关的轮盘断裂准则。

本文通过平均应力法、平均径向应力修正法、残余变形法和局部塑性应变法等分别对某粉末冶金高温合金涡轮盘的断裂转速进行了分析,揭示了平均应力分析方法预测轮盘断裂转速的局限性,提出并验证了其他断裂转速分析方法的可行性。

1 断裂转速分析方法

1.1 平均应力法

目前,最常用的断裂转速分析方法是平均应力法,此方法使用简单方便。《航空涡轮、涡轮发动机结构设计准则(研究报告):第二册 轮盘》[1]、《航空发动机设计手册》[14]中,有关断裂转速常规计算是基于此方法的。基于有限元计算结果,平均应力法断裂转速储备计算公式见式(1)。

$$k_b = \sqrt{\frac{k\sigma_b}{\sigma}} \quad (1)$$

式中 k_b 为轮盘断裂转速储备系数; σ_b 为材料的拉伸强度; σ 为轮盘最大稳态转速时平均周向应力或平均径向应力; k 为修正系数。

计算周向断裂转速时,平均周向应力按子午面进行面积加权平均,考虑到轮盘几何形状引起的子午面周向应力分布不均匀,以及考虑到材料分散性的影响,修正系数 k 通常取小于 1 的值。文献[1]示出了修正系数 k 值、延伸率、设计因子 F_d ($F_d = \text{平均周向应力}/\text{盘中最大应力}$) 的关系曲线,曲线定性地表示出:随着 F_d 的减小, k 值是减小的。

计算径向断裂转速时,通常认为任一圆柱截面径向应力分布均匀,材料性能均匀, k 通常取值为 1。压气机盘一般比较薄,辐板圆柱面径向应力分布较为均匀,采用平均应力法计算径向断裂转速储备较准确。而涡轮盘一般比较厚,有时辐板上会设置如图 1 用于装配挡板的耳片结构。盘体喉部、耳片与辐板交接处、辐板与轮毂交接处径向应力分布不均匀,这种情况下,若采用基于圆柱截面径向应力分布均匀的假设进行径向断裂转速预估,可能会与试验结果有较大的出入。本文在计算平均径向应力时按所取截面加权平均,此外径向断裂转速计算还应考虑圆柱截面径向应力分布的不均匀性,修正系数 k 应取小于 1 的值,式(1)中的 σ_b 应为 $\sigma_b(r)$,即 σ_b 取所计算圆柱截面沿轴向平均温度所对应的拉伸强度。

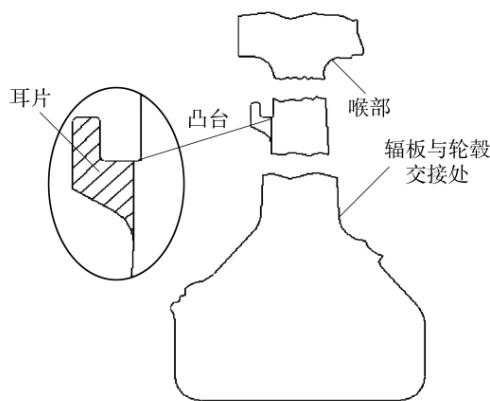


图1 涡轮盘结构

Fig. 1 Structure of turbine disc

1.2 残余变形法

当轮盘在加载时应力超过屈服极限,盘体便会产生不可逆的永久的塑性变形,卸载后,实测轮盘的外径,通过式(2)便可得到残余变形量。

$$\delta_b = (D_{use} - D_{pp}) / D_{pp} \times 100\% \quad (2)$$

式中 D_{use} 为使用后轮盘中间平面的外径; D_{pp} 为轮盘中间平面的原来的外径。

根据文献[1]可知:当进行轮盘超转、断裂试验时,可做出残余变形量-转速的曲线关系,见图 2。当残余变形量的增长速率变得很快,就可不试验到断裂从而推算出断裂转速。本文认为,试验前轮盘断裂转速理论分析也可用此方法。

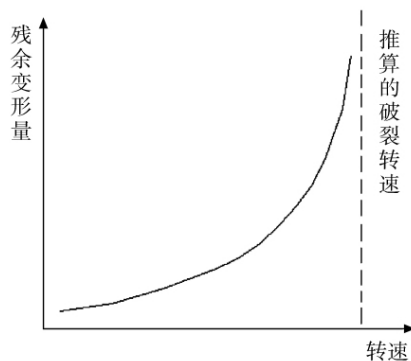


图2 残余变形量-转速曲线

Fig. 2 Residual deformation-speed curve

残余变形量-转速曲线法简单且实用,适合于任何轮盘,可宏观地预估盘的断裂转速,用其预估粉末冶金高温合金涡轮盘断裂转速同样可行,该方法缺点是无法预估首先发生的断裂是周向断裂还是径向断裂。

1.3 局部应力、应变法

文献[9-10,13]均介绍了盘体局部最大应力、应变判断轮盘破裂的方法。

文献[7]中提到的“最大切向或径向应力准则”适用于脆性材料制成的轮盘或虽然塑性好但处于平面应变状态的轮盘。“第三强度理论导出的破裂准则”适合于具有中等塑性材料制成的轮盘。文献[8]中提到的“八面体剪应变破坏准则”认为:当盘体内的最大当量应力达到 $\sigma_b(1+\varepsilon_b)$ 时,则认为轮盘破裂。文献[13]中将轮盘的破裂准则推广为:在单调增加的转速作用下,当轮盘内任意一局部点的当量塑性应变达到材料的延伸率时,这时的转速就是轮盘的破裂转速。

2 某粉末冶金高温合金涡轮盘破裂转速分析

2.1 结构简介

某粉末冶金高温合金涡轮盘结构见图1。图1中阴影部分称之为耳片,在耳片处与挡板连接,其连接结构为文献[15]中提到的“高压锅盖式无螺栓连接结构”。耳片为周向不连续结构,盘体为轴对称结构,在周向不连续的耳片与轴对称的盘体过渡处形成小凸台,小凸台转接圆弧半径 R 为0.5 mm。

2.2 破裂转速分析

2.2.1 平均应力法

1) 基于径向应力分布均匀假设

基于径向应力分布均匀的假设,对某粉末冶金高温合金涡轮盘破裂转速进行了分析。破裂转速分析见表1,表1中 $\bar{\sigma}_r$ 为平均径向应力, n_b 为径向破裂转速。该粉末冶金高温合金涡轮盘100%转速时径向应力分布见图3。

表1 径向破裂转速分析($k=1$)

Table 1 Analysis of burst speed along radial direction ($k=1$)

位置	$\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	$t/^\circ\text{C}$	$n_b/\%$
喉部	777	597	138.5
凸台处	807	592	135.9
辐板与轮毂交接处	815	580	135.3

从表1可知:基于径向应力分布均匀假设的

平均应力法,轮盘最低径向破裂转速是135.3%,且发生在辐板与轮毂交接处。

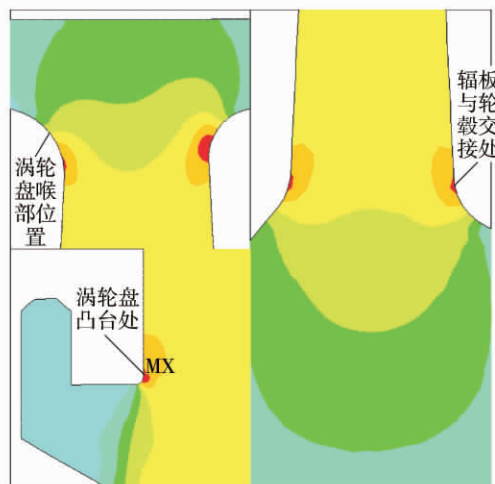


图3 100%转速径向应力分布(单位:MPa)

Fig. 3 Radial stress distribution at 100% speed (unit: MPa)

2) 基于径向应力分布不均匀假设

由图3明显可以看出,在盘体喉部、图1凸台处、辐板与轮毂交接处径向应力分布很不均匀,凸台处应力集中很明显。采用平均应力法分析破裂转速时考虑应力分布的不均匀性可能会更切合实际,见表2,表2中的 σ_b 为用于超转破裂试验的盘体实测性能值, $\bar{\sigma}_r/\sigma_{\max}$ 表示平均径向应力与最大径向应力之比值。由表2知:修正系数 k 若取同一值0.80,则是辐板与轮毂交接处最先发生径向破裂。由计算知,凸台处平均径向应力与最大应力之比值最小,应力集中最严重,凸台处 k 取值应该较其他两处小一些, k 若取值0.76,则是凸台处最先发生径向破裂,破裂时转速为119.4%。

2.2.2 残余变形法

对该粉末冶金高温合金涡轮盘的残余变形进行了计算,盘缘与盘心的残余变形量与转速的曲线图见图4。各转速下盘体的关键部位盘缘与盘心处残余变形值见表3。

从表3可知:超转119%转速后,盘心残余变形量达到0.45%,盘缘残余变形量达到0.419%。从图4可以看出:盘缘残余变形量在118%~119%转速之间出现了突变情况,由此分析破裂转速在此范围之内。

表 2 径向破裂转速分析($k \neq 1$)
Table 2 Analysis of burst speed along radial direction ($k \neq 1$)

位置	k	$\bar{\sigma}_r/\sigma_{\max}$	σ_b/MPa	$t/^\circ\text{C}$	$n_b/\%$
喉部	0.80	1 096/1 418=0.773	1 491	597	125
凸台	0.80	1 143/1 540=0.742	1 491	592	122
凸台	0.76	1 143/1 540=0.742	1 491	592	119.4
辐板与轮毂交接处	0.80	1 191/1 351=0.881	1 492	580	120

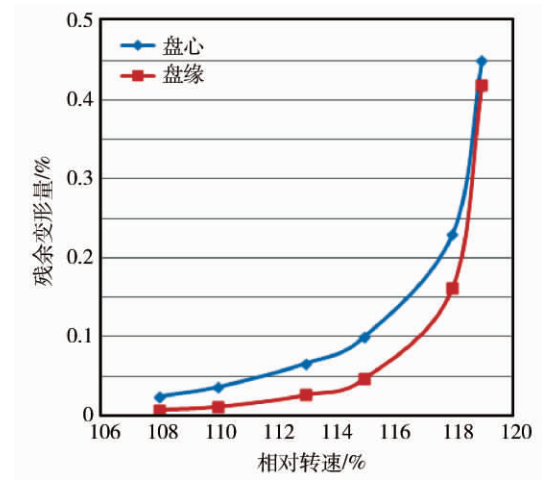


图 4 某粉末冶金高温合金涡轮盘残余
变形量-转速曲线
Fig. 4 Residual deformation-speed curve of
P/M superalloy turbine disc

表 3 残余变形
Table 3 Residual deformation

相对转速/%	盘心残余 变形量/%	盘缘残余 变形量/%
110	0.036	0.011
113	0.066	0.026
115	0.010	0.047
118	0.228	0.162
119	0.450	0.419

2.2.3 局部塑性应变法

本文对轮盘的凸台处、喉部和辐板与轮毂交接处等各关键部位的塑性应变进行了分析,见表 4. 各关键部位的塑性应变-转速关系见图 5. 119%转速时盘体径向塑性应变、子午面周向塑性应变分布见图 6、图 7.

表 4 某粉末冶金高温合金涡轮盘关键部位塑性应变
Table 4 Plastic strain at key position of P/M
superalloy turbine disc

相对 转速/%	凸台处 径向应变	喉部 径向应变	盘心 周向应变	辐板与轮毂 交接处 径向应变
108	0.00168	0.00331	0.00124	0.00116
110	0.00255	0.00393	0.00157	0.00157
113	0.00443	0.00505	0.00221	0.00251
115	0.00585	0.00623	0.00282	0.00344
118	0.01479	0.00926	0.00454	0.00706
119	0.02822	0.01507	0.00692	0.01730

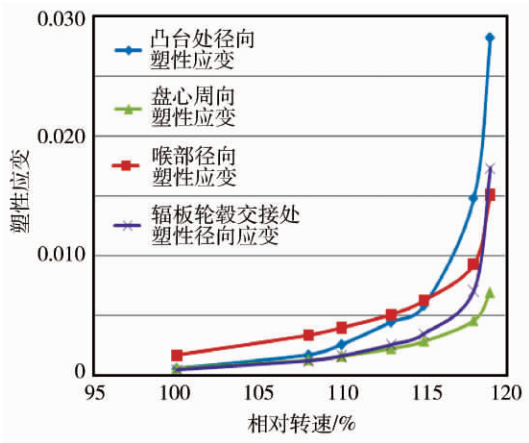


图 5 某粉末冶金高温合金涡轮盘关键部位
塑性应变-转速关系曲线

Fig. 5 Plastic strain-speed curve at key position
of P/M superalloy turbine disc

从图 5 可以看出,在转速 118%~119% 转速之间,凸台、喉部、辐板与轮毂交接处局部塑性应变变化率出现快速增长现象,凸台处径向塑性应变增长速率最快.若按局部点塑性应变确定破裂转速,则凸台处最先发生破裂.

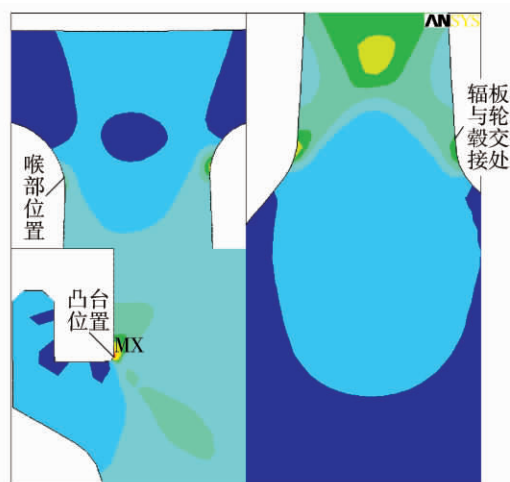


图6 119%转速时径向塑性应变

Fig. 6 Radial plastic strain at 119% speed

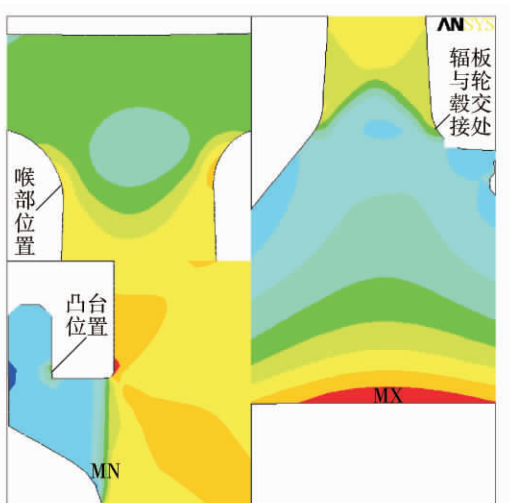


图7 119%转速时周向塑性应变

Fig. 7 Circular plastic strain at 119% speed

3 试验情况

某粉末冶金高温合金涡轮盘超转破裂试验在中国燃气涡轮研究院地坑式轮盘旋转试验器上进行。试验时,盘缘温度、盘心温度及盘缘与盘心之间的径向温度梯度可模拟到轮盘在发动机上的真实情况。

试验结果表明:该粉末冶金高温合金涡轮盘在超过转速 119.9% 时发生径向破裂。破裂外貌见图 8,破裂位置为图 1 的凸台处。

超过转速 115% 转速后,经测量,盘心残余变形与表 3 计算值相当;119.9% 转速破裂后,经测量,盘心残余变形为 0.6%,该值为同类粉末涡轮盘破裂前的最大允许残余变形量提供参考。

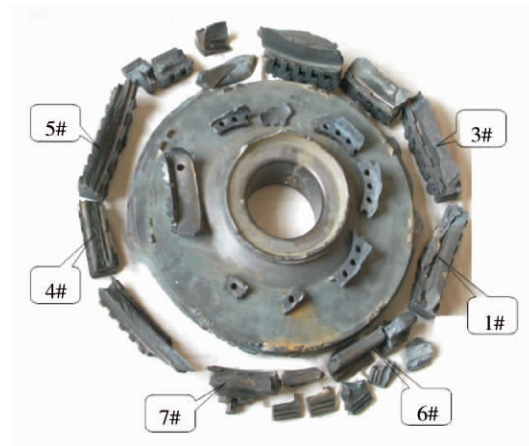


图8 破裂形貌

Fig. 8 Burst appearance

理论分析与试验对比可看出:考虑径向应力分布不均匀的平均应力修正法、残余变形法、局部塑性应变法推算的破裂转速与试验结果吻合较好,而采用常规基于径向应力分布均匀假设的平均应力法推算的破裂转速与试验结果相差甚远。

4 结论

本文介绍了多种破裂转速计算方法,并采用这些方法对某粉末冶金高温合金涡轮盘破裂转速进行了分析,得出以下结论:

- 1) 基于平均周向应力计算周向破裂转速的思想,采用考虑平均径向应力修正法进行破裂转速预测,采用合适的修正系数可使预测结果与试验结果接近。
- 2) 基于试验时破裂转速推算的思想,采用残余变形法进行破裂转速预测,预测结果与试验结果吻合较好。所得残余变形可为同类粉末涡轮盘破裂前的最大允许残余变形量提供参考。
- 3) 采用局部塑性应变法进行破裂转速预测,预测结果与试验吻合较好。

参考文献:

- [1] 吕文林,陈俊粤,田德义.航空涡轮、涡扇发动机结构设计准则(研究报告):第二册 轮盘[M].北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997.
- [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] Standard M. MIL-STD-1783 engine structure integrity program (ENSIP) [M]. Washington, USA: United States Air Force, 1984.
- [4] 国防科学技术工业委员会. GJB241A-2010 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[M].北京:国防科学技术工业委员会,2010.

- [5] 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)
- [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 Qiling, 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 mini-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] 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)
- [9] 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. Experimental application of the fracture criteria of disk rotors of different materials and structures[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1988, 3(3): 30-35. (in Chinese)
- [10] 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, 1990, 5(4): 318-320. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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 Jiangyan, ZHOU Baizhuo. Fracture test of disk simulated specimen and its description of finite element[J]. Aeroengine, 2008, 34(2): 19-21. (in Chinese)
- [13] 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 Jiangyan, ZHOU Baizhuo. Elastic-plastic disc burst criteria establishment and variable thickness disk burst rotational speed prediction[J]. Aeroengine, 2011, 37(5): 4-6. (in Chinese)
- [14] 《航空发动机设计手册》总编委会.航空发动机设计手册:第18册[M].北京:航空工业出版社,2001.
- [15] 马健,黄文周.涡轮盘与挡板的无螺栓连接结构[J].燃气涡轮试验与研究,2008,21(2):24-26.
MA Jian, HUANG Wenzhou. Non-bolted joint between turbine disk and side plate[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(2): 24-26. (in Chinese)