

文章编号: 1000-8055(2001)03-0287-04

# 轴流式轮盘破裂转速的数值计算方法

古爱军, 张学仁, 王 屏, 刘思永  
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 对3种轴流式轮盘在常温和高温下进行了非线性有限元计算, 提出了一种应用有限元法计算轮盘破裂转速的破裂准则, 得出了3种轮盘的破裂转速, 并将计算结果与大变形解析法及试验值作了对比分析。

关键词: 轮盘; 破裂; 转速; 数值计算

中图分类号: V 231.95 文献标识码: A

## 1 前 言

轮盘是航空发动机的关键部件之一, 由于发动机在加速过程中因各种异常原因, 均可能导致轮盘超转甚至破裂, 因此对于轮盘破裂转速的预测就相当重要了。目前, 国内外预测轮盘破裂转速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素法, 各种方法均有其相应的应用条件和范围。大变形解析法<sup>[1]</sup>是目前国内在预测轮盘破裂转速方面的一种较为简单适用的工程方法; 而有限元法在发动机的强度计算中占有相当重要的地位, 能够计算轮盘强度的各种复杂情况。本文应用有限元程序包ALGOR 软件, 对3种轴流式轮盘在常温和高温下进行了二维非线性有限元计算, 确立了相应的破裂准则, 并将计算结果与大变形解析法及试验值作了对比分析。

## 2 破裂准则的选取

轮盘破裂时, 盘体大部分均已进入塑性区, 而是一个大变形问题, 大变形破裂准则可采用:  $\gamma_8 \geq (\gamma_8)_b$ , 即当单元体的8面体剪应变  $\gamma_8$  达到单向拉伸状态下的8面体极限应变  $(\gamma_8)_b$ , 则认为材料断裂。

考虑到一般有限元的计算输出结果为应力值, 单调加载时, 8面体剪应力  $\tau_8$  与8面体剪应变  $\gamma_8$  有一一对应关系, 所以本文所采用的破裂准则为

$$\tau_8 = (\tau_8)_b$$

又因为Von Mises 当量应力:

$$\sigma_e = (1/\sqrt{2}) \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

而8面体剪应力:

$$\tau_8 = (1/3) \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

因此有:

$$\tau_8 = (\sqrt{2}/3) \sigma_e$$

而  $(\tau_8)_b$  又与材料的单向拉伸机械强度有关<sup>[2]</sup>:

$$(\tau_8)_b = (\sqrt{2}/3) \sigma_b (1 + \epsilon_b)$$

由  $\tau_8 = (\tau_8)_b$ , 则有:  $\sigma_e = \sigma_b (1 + \epsilon_b)$

即: 破裂准则为  $\sigma_e = \sigma_b (1 + \epsilon_b)$ , 也就是说在进行有限元计算时, 当盘体内任一点的最大当量应力达到  $\sigma_b (1 + \epsilon_b)$  时, 则认为轮盘破裂。

## 3 轴流式轮盘破裂转速的有限元计算

计算所采用的3种轮盘是取自文献[2]中的3种模型盘, 所用材料为A 3钢, 其韧性和塑性较好, 材料数据见文献[2, 6]。

等厚轮盘及变厚轮盘的原始结构尺寸如图1和图2所示。

轮盘在工作时所承受的载荷主要有轮盘本身质量所产生的离心力, 叶片及塔形块所产生的作

收稿日期: 2000- 09- 28; 修订日期: 2001- 02- 20  
基金项目: 本文涉及的研究课题系发动机结构完整性的重大课题之一; 曾获部级科技进步二等奖  
作者简介: 古爱军(1969- ), 女, 北京航空航天大学动力系硕士研究生

用于轮盘外缘的离心力, 以及轮盘受热不均匀所

引起的热应力。

等厚轮盘及变厚轮盘的有限元模型如图3和图4所示: 采用4节点等参元。

3 1 轮盘在常温下破裂转速的有限元计算

在二维非线性分析中, 载荷步分为20步, 载荷步增量为2, 每一步允许平衡迭代, 迭代精度为0.001, 最大迭代次数不超过50次。所采用的分析列式为完全的Lagrangian列式, 材料模式为弹塑性VonMises屈服条件, 线性各向同性硬化的流动法则。VonMises屈服条件认为, 当应力偏张量的第二不变量达到一定的值时, 材料就进入屈服:

$$f = 3J_2 - \sigma_s = 0$$

计算结果如下: 等厚轮盘及变厚轮盘的最大当量应力 $\sigma$ 随转速 $n$ 的变化关系如图5和图6所示。

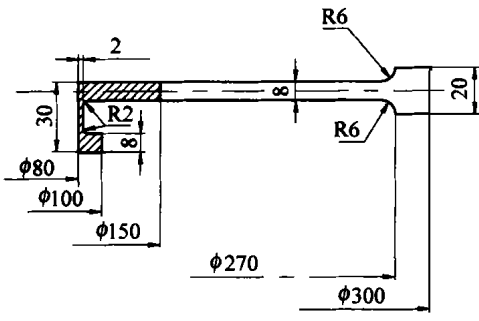


图1 等厚轮盘的原始几何尺寸

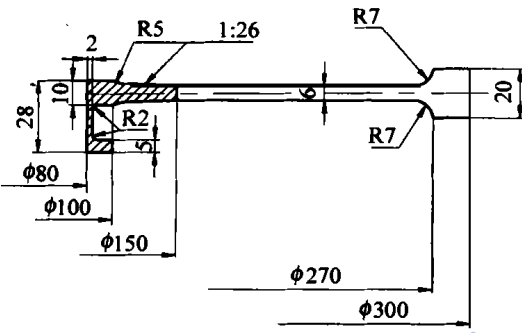


图2 变厚轮盘的原始几何尺寸

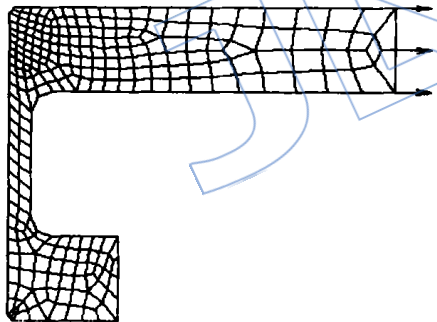


图3 等厚轮盘的有限元模型

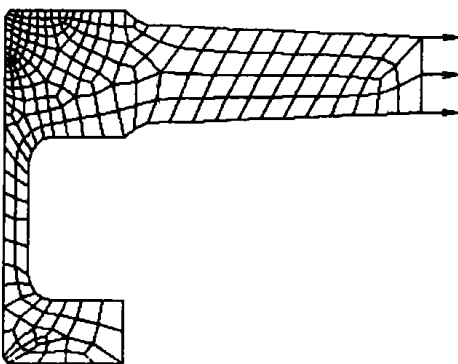


图4 变厚轮盘的有限元模型

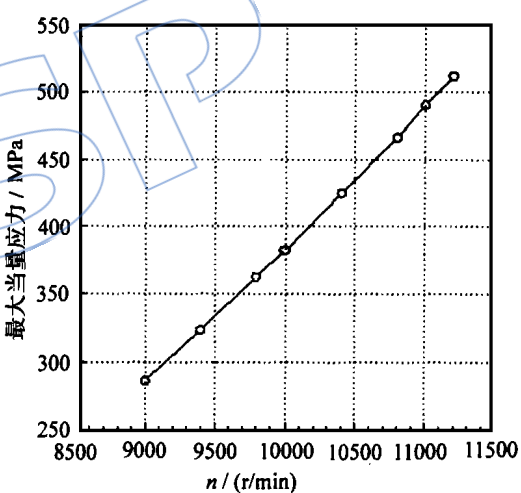


图5 等厚盘最大当量应力随转速的变化关系

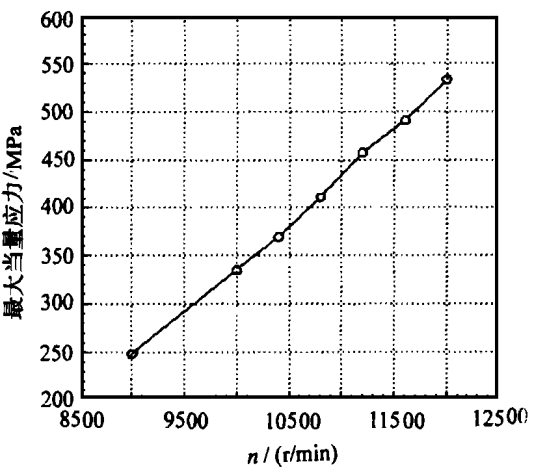


图6 变厚盘最大当量应力随转速的变化关系

当  $\sigma_r = \sigma_\theta(1 + \epsilon_\theta) = 487 \text{ MPa}$  时轮盘破裂, 此时所对应的转速即为轮盘的破裂转速。如上图所示, 对于等厚轮盘  $n = 10980 \text{ r/min}$ , 对于变厚轮盘  $n = 11550 \text{ r/min}$ 。

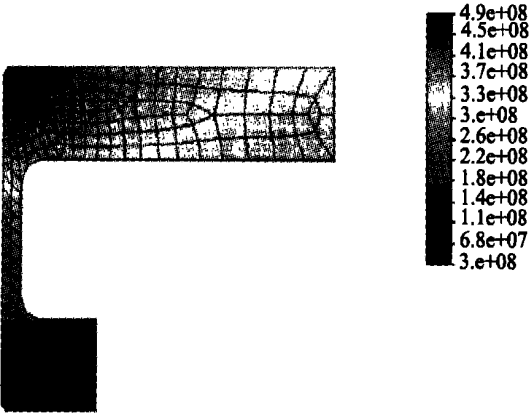


图7 等厚盘当量应力色值图

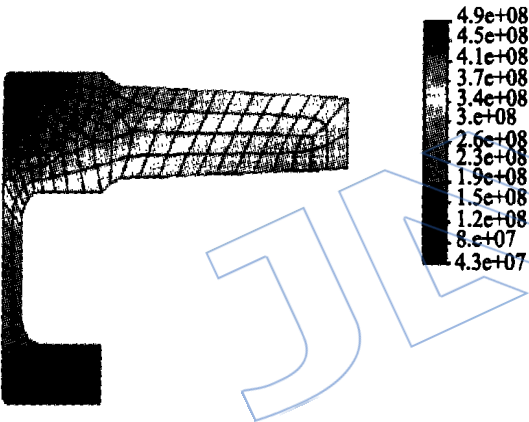


图8 等厚盘当量应力色值图

在转速为轮盘的破裂转速时, 其等厚盘及变厚盘  $V_{onMises}$  当量应力分布色值图如图7和图8所示, 最大当量应力发生在盘内缘上部。

3.2 轴流式轮盘在高温下破裂转速的有限元计算

等厚轮盘径向温度分布曲线如图9所示。

由于轮盘内外径的温差较大, 所以在盘内产生的热应力不容忽视。在用有限元计算等厚轮盘的应力分布之前, 先要将温度分布加到各节点上, 为了准确地把温度分布加到各节点上, 所以先通过二维热传导有限元计算来得到轮盘的温度场分布。然后把温度场代入应力分析中去, 来考虑热应力的影响。

最大当量应力  $\sigma_r$  随转速  $n$  的变化关系如图

10所示。

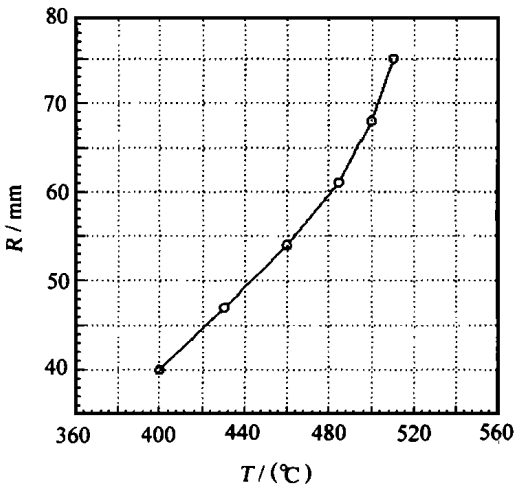


图9 等厚轮盘径向温度分布曲线

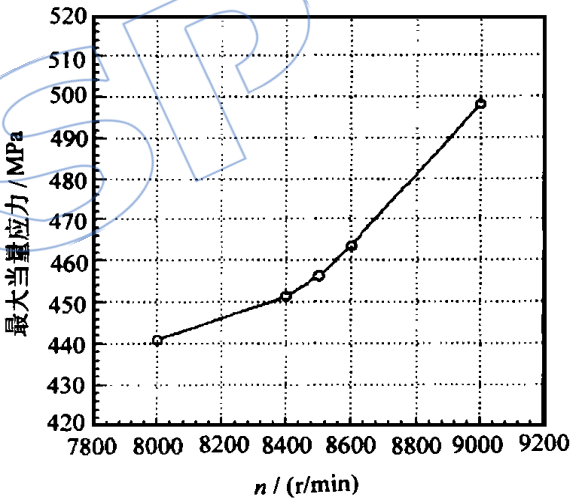


图10 最大当量应力随转速的变化关系

在盘内缘上部应力最大位置处, 盘的温度为  $400^\circ\text{C}$  ( $673 \text{ K}$ ), 而此温度下的材料力学性能为

$\sigma_b = 359.66 \text{ MPa}$  ,  $\epsilon_b = 0.2740$

所以此时:

$\sigma_\theta(1 + \epsilon_\theta) = 458.2 \text{ MPa}$

由上图可以得出: 当  $\sigma_r = \sigma_\theta(1 + \epsilon_\theta) = 458.2 \text{ MPa}$  时轮盘破裂, 此时所对应的转速即为轮盘的破裂转速  $n = 8530 \text{ r/min}$ 。

4 有限元法与大变形解析法的对比分析

有限元法、大变形解析法的破裂转速  $n_p$  与试验值的比较如表1所示。

表1 有限元法、大变形解析法的  $n_p$  与试验值的比较

|       | 有限元法                |         | 大变形解析法              |           | 试验值<br>(r/m in) |
|-------|---------------------|---------|---------------------|-----------|-----------------|
|       | 破裂转速 $n_p/(r/m in)$ | 误差*/(%) | 破裂转速 $n_p/(r/m in)$ | 误差*/(%) * |                 |
| 等厚盘   | 10980               | 2. 64   | 10849               | 3. 80     | 11278           |
| 变厚盘   | 11550               | 2. 45   | 11426               | 3. 58     | 11850           |
| 等厚加温盘 | 8530                | 12. 51  | 8525                | 12. 56    | 9750            |

注: \* 与试验值相比的误差。

由上面的计算结果及对比分析得出以下结论:

(1) 对于常温等厚盘及变厚盘,应用有限元计算的轮盘破裂转速比大变形解析法更接近试验结果,与试验结果的误差低于3%,比大变形解析法的计算误差低1个百分点,说明采用有限元计算有更高的精确度;同时也表明本文所提出的破裂准则是可行的及合理的。

(2) 对于等厚加温盘,有限元法与大变形解析法的结果十分接近,但都与试验结果有一定误差(误差为12. 5%),分析其原因文献[1]中指出:在对加温盘试验时,因所用高频炉功率不够,致使轮盘高速旋转后温度急剧下降,为了使轮盘在规定的温度下破裂,故在加温后快推动力装置油门,使转速急速上升,加载速率过大,致使试验值增大。因此对于加温轮盘的计算精度尚需通过符合操作规程的准确试验结果验证。

(3) 应用有限元法计算轮盘的破裂转速,可以更好地模拟轮盘的真实情况,得到更准确的计算精度,特别是对型面结构、载荷较为复杂的轮

盘;但有限元法计算量大。因此在计算轮盘的破裂转速时,对于型面结构、载荷较为简单的轮盘并符合大变形计算前提的条件下,采用大变形解析法更为方便;而对于型面结构、载荷较为复杂的轮盘,则必须采用有限元法。

参考文献:

[1] 洪其麟,王屏 计算轮盘破裂转速大变形解析法[J] 航空动力学报, 1990, 5(4): 321- 324

[2] 王屏 [D] 北京航空航天大学研究生院, 1990

[3] 殷有泉 固体力学非线性有限元引论[M] 北京: 北京大学出版社, 清华大学出版社, 1987.

[4] 蒋友谅 非线性有限元法[M] 北京: 北京工业学院出版社, 1988

[5] 朱以文 ALGOR FEAS (Super SAP91年版) 软件的分析计算模块数据文件格式[S] 1991

[6] 机械材料性能数据手册[S] 北京: 机械工业出版社, 1995: 43

[7] 古爱军 [D] 北京航空航天大学研究生院, 1999

(责任编辑 王震华)

Numerical Method for Calculating the Burst Speed  
of Axial-Flow-Type Discs

GU Ai-jun, ZHANG Xue-ren, WANG Ping, LI Si-yong

(4th Dept., Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Two-dimension non-linear finite element calculation has been done for three kinds of axial-flow-type discs at normal and high temperatures. A burst criterion is presented for calculating the burst speed of rotating disc using finite element method, and the burst speed of the rotating discs is obtained. The results are compared with experimental data and analytic results according to large deformation theory.

**Key words:** disc; burst speed; numerical calculations