

DZ22 多孔板蠕变有限元与试验研究

北京航空航天大学 岳彦芳* 饶寿期

【摘要】 本文选用航空发动机涡轮叶片用正交各向异性材料 DZ22 在不同温度下进行蠕变三阶段试验, 拟合出能反映三阶段蠕变的本构方程。利用试验结果验证了有限元程序分析正交各向异性材料蠕变的有效性。然后, 针对气冷叶片的特点, 探讨多孔构件的简化蠕变有限元分析方法。经对密布小孔板状试件的试验与有限元对比分析, 两者结果吻合较好。

关键词: 涡轮叶片 正交各向异性材料 蠕变试验 有限元

1 前言

航空发动机涡轮叶片蠕变变形及蠕变断裂寿命是影响发动机大修期及叶片寿命的重要因素之一。为了改善其蠕变性能, 人们一方面采用耐高温、抗蠕变性能较好的定向凝固镍基高温合金 DZ22, 另一方面, 在叶盆、叶背上用激光打出许多密布小孔, 使得冷空气从叶片内腔经这些小孔喷出, 在叶片表面形成一层冷空气保护膜, 以降低叶片的实际温度。然而, 即使采取这些措施, 叶片的温度仍可高达 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$, 其蠕变仍不可避免。因此, 分析这种带有密布小孔的气冷叶片的蠕变应变及预测其断裂寿命便成为当前发动机结构完整性研究的一个重要课题。DZ22 是一种正交各向异性材料, 目前, 它的蠕变数据还很缺乏, 能对这种材料进行蠕变分析的有限元程序也不多。本文首先利用光滑圆柱试件, 在 850°C 、 900°C (这是研究叶片蠕变时感兴趣的温度范围) 下进行不同载荷的蠕变三阶段试验。利用曲线拟合方法得出反映蠕变三阶段的本构方程。利用有限元法进行计算, 并同试验进行对比证明有限元计算的正确性。然后, 在 850°C 下对 DZ22 多孔板状试件进行蠕变变形有限元分析, 并据此预测其寿命。

2 蠕变试验与曲线拟合

为了得到 DZ22 材料在叶片工作温度范围内的蠕变规律, 特进行 850°C 、 900°C 下不同载荷的光滑圆柱体蠕变三阶段试验。试件直径为 6mm, 标距长 25mm, 试件轴线取为结晶方向, 电炉加热, 杠杆法码加载。

图 1(a)、(b) 中实线所示分别为 850°C 、 900°C 时的试验结果。从图 1 (—实验值, —拟合值, * 计算值) 的试验曲线可以看出, 当蠕变应变大于 6%, 试件的剩余寿命将小于 10%。因此, 可将 $\epsilon = 6\%$ 看作临界蠕变应变。以此预测 DZ22 构件的蠕变寿命。蠕变应变方程设为:

$$\epsilon = \sum_{i=1}^K A_i \sigma^{m_i} t^{n_i} \quad (1)$$

其中, ϵ 为蠕变应变, σ 为等效应力, t 为蠕变总时间, A_i 、 m_i 、 n_i 为材料常数。Norton 方程:

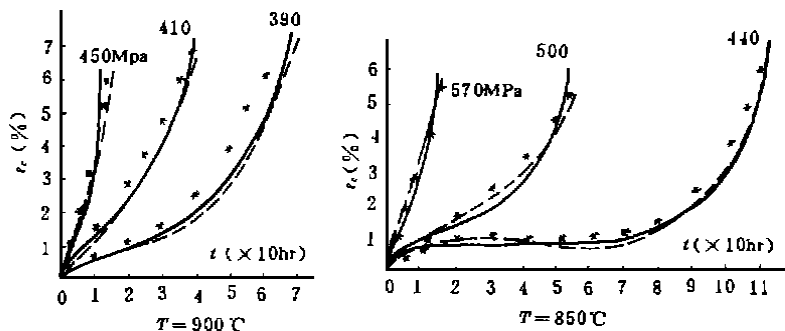


图 1 不同温度的蠕变应变—时间曲线

$\epsilon = A \sigma^n t^n$ 是方程 (1) 的最简形式, 但它不能反映蠕变第三阶段。在方程 (1) 中取 K 足够大, 就能保证拟合曲线与实验曲线有足够多的相交点。但由于方程 (1) 是 m_i, n_i 的非线性方程, 实践证明: 当 K 较大时, 求解 (1) 式便成为非常困难的工作。为简单起见, 取 m_i, n_i 为自然数。式 (1) 变为只是 A_i 的线性方程。但如果要保证拟合曲线与实验曲线有足够多的相交点, 就要求有很多项, 应用起来不方便。为既用尽可能少的项, 又能使拟合曲线较好地逼近实验曲线。应采用最小二乘法: 设在实验曲线上取 L 个实验点, 分别代入方程 (1) 形成如下方程组:

$$[\epsilon] = [f(\sigma, t)] \cdot [A] \quad (2)$$

当 L 大于 K 时, 式 (2) 为超静定方程组。在式 (2) 两端同时左乘 $[f(\sigma, t)]^T$ 得:

$$[f(\sigma, t)]^T \cdot [\epsilon] = [f(\sigma, t)]^T \cdot [f(\sigma, t)] \cdot [A] \quad (3)$$

式 (3) 为 K 维线性方程组, 不难求解。观察蠕变实验曲线容易发现, 当 σ 一定时, 蠕变应变近似于时间的三次函数。假设蠕变应变也是应力的三次函数, 那么, $\max(m) = \max(n) = 3$ 。因此, 有

$$\epsilon = \sum_{i=0}^2 (A_i \sigma^i + B_i t^i + C_i \sigma) \sigma \quad (4)$$

上式实际上只有 6 项, 本文分别在不同温度下的三条蠕变试验曲线上各取 19 个点, 利用最小二乘法可以拟合出式 (4) 中的常数 A_i, B_i, C_i , 如表 1 所示。

表 1 不同温度下 DZ22 蠕变常数

常数	$A_0 + B_0$	A_1	A_2	B_1	B_2	$C_0 + C_1 + C_2$
850 °C	.1091E-3	-.4523E-6	-.2886E-6	.4754E-9	.5270E-9	.4265E-9
900 °C	.1639E-2	-.8323E-5	-.1212E-4	.1071E-7	.2920E-7	.1131E-7

将表 1 各温度下的常数分别代入方程 (4), 得到相应温度下的蠕变本构方程。图 1 虚线为拟合后的蠕变曲线。从图中可以看出, 拟合曲线能够较好地逼近试验曲线。

本文还用有限程序模拟试件试验的情况进行了计算。图 1 中* 为计算值。可以看出, 计算值基本上能反映蠕变三阶段的蠕变应变。证明有限元法计算的有效性。

3 多孔板有限元分析方法

前已提到, 叶片的蠕变变形及蠕变断裂寿命是直接关系到发动机大修期的重要问题。然

而,众所周知,用有限元法进行蠕变分析是十分耗费机时的。为了保证计算的精确性,整个气冷叶片的有限元模型至少需要几百个三维单元,约 1000 个节点^[1]。如对其进行蠕变三阶段分析,所耗时太多。

为了探索可行的气冷叶片蠕变分析方法及研究密布小孔对构件蠕变性能的影响,本文对有密布小孔的 DZ22 板进行有限元分析及试验验证。试件孔的分布取现行叶片孔的分布方式,即斜正方形排列,孔径/孔间距比为 $R = 0.17$,试件标距长仍取 25mm,厚度为 1.5mm,边孔中心到试件边沿的距离为 1mm,沿长度方向分布 5 排孔,试验的轴线方向为 DZ22 的结晶方向。图 2 所示为试件图。

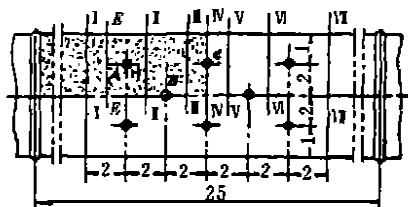


图 2 多孔板试件上的孔的分布

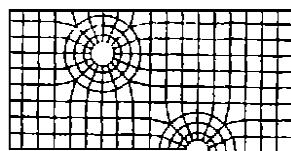


图 3 有限元模型

为了简化有限元计算量,考虑试件的对称性,有限元计算模型可以只取试件的四分之一,如图 2 阴影部分所示。能否进一步简化计算模型?本文作如下尝试:模型左边界只取到距试件最左孔 A 的孔中心 2mm 的 I-I 截面,认为 I-I 截面已离孔 A 足够远,即孔对 I-I 截面的应力分布的影响可忽略不计;模型的右边界取在 III-III 截面处,但在孔分布很密的情况下,III-III 截面的应力会受到孔 B 较大的影响,边界条件难以确定。故此将右边界从 III-III 截面移至离孔 B 足够远的 IV-IV 截面,但模型中不包含 C 孔,这样形成如图 3 所示的有限元模型,由 210 个八节点等参元组成,共 800 个节点。虽然由于人为去掉 C 孔,使得计算后的 III-III 截面的应力、应变等不真实。但如果假设 C 孔对 II-II 截面的影响可以忽略,那么 II-II 截面的应力、应变、位移等可以认为是真实的。可以认为 B、C 孔间的干涉与 A、B 孔间的干涉相同,III-III、V-V、VI-VI 截面(见图 2)的应力、应变可以认为与 II-II 截面对应点的应力、应变相同,而 VII-VII 截面的应力、应变认为与 I-I 截面相同。从 I-I 截面向左和 VII-VII 截面向右的试件有效部分(即标距界限以内的部分)则可以认为不受孔的影响,直接取光滑试件的试验结果既可。即使使用有限元计算,因这部分载荷均布,也只需要一、二个 4 节点四边形二维元即可。蠕变分析时,取表 1 相应常数代入方程(4)作为蠕变方程。鉴于本文只是方法性探讨,只分析 850℃ 时的蠕变。图 4 为孔 A 边缘应力最大点 H 处的蠕变应变—时间曲线。从图 4 可以看出,当 $t = 100$ 小时,蠕变应变达到 6%。预计此时试件将在孔边产生裂纹。文献[2]指出:空气中镍合金的蠕变裂纹扩展时间只占蠕变裂纹起裂时间的很短一部份。所以可以初步预计试件将在 $t = 100$ 小时左右断裂。

为验证上述分析方法的正确性。对上述多孔板试件在 850℃ 下进行蠕变试验。试验仍用电炉加热,杠杆法码加载。因目前尚无法测得孔边极小区域的应变,所以仍在 25mm 标距长度上测量宏观的蠕变应变。其蠕变应变—时间曲线如图 5 所示。

可认为: III-III 截面(见图 2)相对于 II-II 截面对应各点的位移,或 V-V 截面相对于 III-III

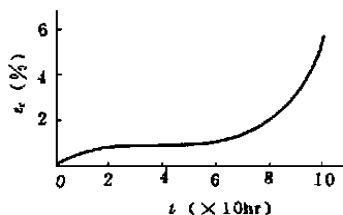


图 4 孔边应力最大点处的蠕变应变—时间曲线

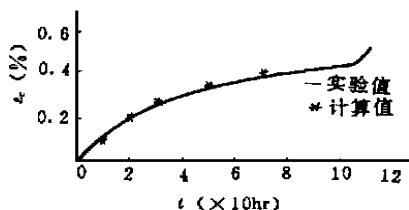


图 5 多孔板宏观蠕变应变—时间曲线

截面相应各点的位移, 或 VI-VI 截面相对于 V-V 截面相应各点的位移都等于 II-II 截面相对于 E-E 截面相应各点的位移。而 VII-VII 截面的位移等于 II-II 截面相对于 I-I 截面相应各点的位移。这样可计算出 VII-VII 相对于 I-I 截面的位移, 再加上标距长度内其它部分的相对位移, 然后除以标距长, 则得到平均蠕变应变, 它应与试验值相同。计算结果仍用 * 标在图 5 上。可以看出, 有限元计算与试验曲线吻合较好。证明上述算法是可行的。同时可看出: 试件断裂时间为 110 小时, 所预测的断裂时间与实验值比较接近, 预测值稍短于实验值可作如下解释: ①材料蠕变应变到 6% 时, 还有一部分剩余寿命; ②裂纹扩展也需要一部分时间。从图 5 还可以看出, 多孔构件的宏观蠕变几乎没有第三阶段, 呈蠕变“脆性”断裂。但从图 4 可知, 在孔边应力较大的点处却完全经历了蠕变的三个阶段, 以至裂纹首先在这里产生, 然后迅速扩展至断裂。

4 结 论

(1) 采用指数多项式能够较好地拟合蠕变三阶段试验数据。将这样的蠕变方程用于有限元蠕变分析, 则可根据计算结果, 利用临界蠕变应变预测构件的蠕变寿命。

(2) 多孔板蠕变呈“脆性”断裂状态, 本文对多孔板进行的简化有限元分析不仅可大大节省计算机时, 而且与试验结果吻合较好。

参 考 文 献

- 1 饶寿期等. 气冷叶片应力分析—进展报告之一. 中国航空学会第六届发动机结构强度振动学术会议论文集, 1992, 宁波
- 2 Theodore H H Pian. Finite Element and Experimental Studies of Creep Crack Initiation of RENE-95 Superalloy. AD A169948

(责任编辑 朱梓根)

FINITE ELEMENT ANALYSIS AND EXPERIMENTS ON CREEP OF MULTIHOLED PLATE DZ-22

Yue Yanfang and Rao Shouqi

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

Experiments on tension creep behavior of the ortho-anisotropic material DZ-22 have been performed at 750°C, 850°C and 900°C. This material is applied to directionally-solidified air-cooled turbine blade. A constitutive equation of the creep is formulated by fitting with the experimental data. The equation shows three stages of the creep behavior. Effectiveness of the FEM analysis for the creep behavior of the ortho-anisotropic material is proved by the experimental results. Then, in consideration of the features of the air-cooled blade, a simplified FEM is presented for analysis of the creep of a multiholed component and is proved by the creep experiments with densely multiholed plate specimens.

TRANSIENT BEHAVIOUR OF CRACKED ROTOR THROUGH PARAMETRIC RESONANCE RANGE

Zhu Xiaomei, Gao Jianmin, Guo Yi

(*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT

In order to diagnose the existence of a crack in rotating machinery, the transient vibration of a cracked rotor through parametric resonance range is investigated. By means of primary harmonic transformation, the normal motion equation of the cracked rotor is transformed into a new differential one. From direct solution of this equation, the amplitude of primary harmonic vibration can be obtained under nonstationary or stationary excitation. In respective consideration of ideal and nonideal sources of energy, it is found that: (1) Whether the source of energy is ideal or not, the largest amplitude of transient vibration near $2\omega/3$ and 2ω (Parametric resonance range) of the rotor with crack is bigger than that without crack (where ω is the critical speed of the rotor without crack). And the deeper the crack, the larger the amplitude in the case of the ratio of crack depth to shaft diameter less than 0.4. (2) When the source of energy is ideal, the larger the acceleration, the less the largest amplitude of transient vibration through parametric resonance ranges of the cracked rotor. Because parametric resonance is the exclusive characteristic of cracked rotor according to the authors' previous work, the authors believe that the transient vibration behaviors near $2\omega/3$ and 2ω may be a basis of diagnosing cracks on a shaft of rotating machinery.

A NEW METHOD FOR EXTENDING VECTOR EQUATIONS OF VISCOUS FLOW IN TURBINE IN CURVILINEAR COORDINATES

Zhang Chiping and Feng Guotai

(*Harbin Institute of Technology*)

ABSTRACT

A new idea is suggested to extend the viscous vector equations in non-orthogonal curvilinear coordinates. In the expansion equation obtained with the help of this new method, the number of terms is greatly decreased, so that it is easy to apply to engineering calculation. Meanwhile the expanded forms of compressible and incompressible equations are also presented and a generalized expression is given. Finally, by the aid of this new method, the numerical calculations have been carried out for 2-dimensional compressible viscous cascade flow and 3-dimensional compressible viscous cascade flow. It is shown that the new expansion equation is of great value to engineering practice.