

旋转盘弹塑性应力分析的光测法研究

沈阳航空发动机研究所 董本涵 高鹏飞

【摘要】 本文介绍了光贴片法及光塑性法的原理及在旋转盘弹塑性应变测量中的应用。作者用上述方法设计了等色线条纹的实测系统,测定了旋转模型盘及发动机压气机盘在榫槽、偏心孔、中心孔等应力集中区的弹塑性应变分布及塑性区。试验结果表明:研究的技术成果可应用于旋转盘在试验器上试验或模型试验中的弹塑性应变测定。

一、前 言

在航空发动机旋转盘的非线性设计中,要求精确的弹塑性应力分布数据。当前,除着力发展各种计算方法以外,还寻求各种实验方法进行模型试验分析或在试验器上对试件进行实际测定。本文介绍利用光贴片法及光塑性法测定旋转盘弹塑性应变的方法。在本研究课题中重点解决许多技术问题,如测量系统的设计与硬件系统的配置,满足传递大应变要求的粘贴技术,光塑性材料的选择与基本性能测定等。因篇幅有限,本文不能详细叙述。

光贴片法是将光敏材料粘于结构表面,传递粘结面处的应变,利用测量贴片内的双折射而测得应变。贴片材料的应力—应变关系的线性范围很大,结构进入塑性时,贴片内的应力仍在弹性范围。所以利用贴片法测量结构弹塑性应变时,适用于弹性范围的光—力定律仍然适用。光塑性法则是利用具有物理非线性的光敏材料制造模型,建立适合塑性范围的光—力定律,根据受力模型的双折射,测定模型的弹塑性应力分布,再根据塑性相似条件转换得到原型应力分布。光塑性法分为两个分支,其一是研究结构小弹塑性变形下的弹塑性应力、应变分析,此处结果弹性影响不可忽略。其二是以研究物体在大塑性或特大塑性变形情况下卸除外载荷时的残余应变。本试验主要是前者。

本研究工作包括旋转盘三维应力分析及热应力分析,首先结合过去各种旋转盘的三维光弹性试验结果,分析确定旋转盘的关键部位为榫槽、偏心孔、中心孔,并设计试验模型,使这些部位产生塑性区。偏心孔、中心孔附近的塑性应变测定,通过平面旋转盘模型试验进行,为使离心负荷加大,轮缘处的离心块较大。榫槽处的弹塑性应力模拟由平面光塑性模型试验进行,由三维光弹性试验得到的凸台及腹板处的离心应力作为力的边界条件,以集中力的形式施加。叶片的离心力也以集中力的形式施加。

本研究所发展的旋转盘的光测方法具有非接触,全场性的特点。不仅在模型试验器上成功的应用,还在转子循环试验器上对发动机压气机盘进行了弹塑性应变测定。

二、光贴片法在旋转盘弹塑性应变测定中的应用

1. 光贴片法原理^[1] 偏振光射入光敏材料贴片达到结构表面,被反射第二次通过贴片,

本文于 1990 年 4 月收到。

返回的偏振光经检偏振片进行干涉, 可以观察到干涉条纹 (等色线, 等倾线), 记录到的条纹场反应了贴片内的应变场, 其关系为光—力定律:

$$\epsilon_i - \epsilon_e = mf d 2hc \quad (1)$$

式中: $f\epsilon$ 为贴片材料的应变条纹值, h_c 为贴片厚度, m 为等色线条纹序。

贴片中的应变分离可用窄条法或直接用栅片测量应变分量, 也可用补充方程计算方法分离应变。本研究中分别采用了窄条法和补充方程算法。

由于贴片和结构粘接面的应变相等, 因此 $\epsilon_i = \epsilon_i^c$, $\epsilon_e = \epsilon_e^s$, 即 $\epsilon_i - \epsilon_e = \epsilon_i^c - \epsilon_e^s$ 。角标中的 c 代表贴片, s 代表结构。因为贴片较薄, 可以认为贴片处于平面应力状态, 贴片的另一主应变为

$$\epsilon_3 = - \left[\nu / (1 - \nu) \right] (\epsilon_i + \epsilon_e) \quad (2)$$

当选用的贴片材料的泊松比 ν^c 与结构的 ν^s 值接近时, $\epsilon_3 = \epsilon_3^s$, 可由贴片双折射得到粘结面处结构的三个应变分量。

2. 原型应力的计算 当由贴片测出结构表面应变场后, 可根据应力应变关系进行应力分析, 应力偏量与应变偏量的张量表达式为:

$$S_{ij} = 2G' e_{ij} \quad (3)$$

式中: $G' = E' / 2 (1 + \nu)$, S_{ij} 为应力偏量, e_{ij} 为应变偏量, E' 为塑性区各点的割线模数, ν 为塑性区各点的泊松比。(3) 式可改写为

$$\sigma_1 - \sigma_m = 2G' (\epsilon_1 - \epsilon_m) \quad , \quad \sigma_2 - \sigma_m = 2G' (\epsilon_2 - \epsilon_m) \quad , \quad \sigma_3 - \sigma_m = 2G' (\epsilon_3 - \epsilon_m) \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = G' r_{xy} \quad , \quad \tau_{yz} = G' r_{yz} \quad , \quad \tau_{zx} = G' r_{zx}$$

式中 $\sigma_m = (1/3)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, $\sigma_m = \epsilon_m E' / (1 + 2\nu)$, $\epsilon_m = (1/3)(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)$

由于 E' 、 ν 随各点塑性应变大小而变化, 所以 G' 不是定值。

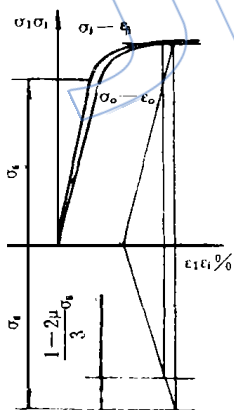


图 1 $\sigma_0 - \epsilon_0$ 曲线及图解法得到的 $\sigma_i - \epsilon_i$ 曲线

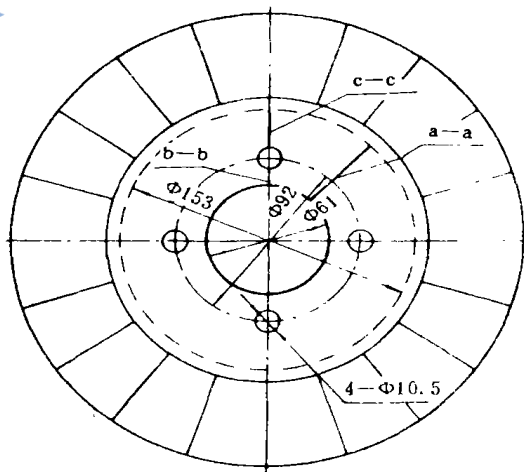


图 2 平面盘试验模型

本研究的结构材料服从米赛斯屈服条件, 其应力强度与应变强度的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= 1 / \sqrt{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \\ \epsilon_i &= \sqrt{2/3} \left[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将 (4) 式代入 (5) 式可得

$$\sigma_i = 3G'\epsilon$$

(6)

σ - ϵ 曲线确定后, 可由 ϵ 值从曲线上查对应的 σ 值得到 G' 值。 σ - ϵ 曲线可由材料的简单拉伸曲线 (σ_0 - ϵ_0) 得到。图 1 表示求 σ - ϵ 曲线的图解法。可由该曲线求得各点的 G' 值。

在应力分析过程中, 首先由 σ - ϵ 曲线查出与材料屈服应力 σ_s 相应的 ϵ_s , 当 $\epsilon < \epsilon_s$ 时, 用弹性应力计算公式计算应力, 当 $\epsilon > \epsilon_s$ 时, 根据该点 ϵ 值由 σ - ϵ 曲线得到 σ_i 值和 G' 值, 再由 (5) 式解得应力分量。如果仅作强度校核, 只需查得 σ 值即可。

3. 旋转盘弹塑性应变测量 根据对各类旋转盘三维应力分析的综合分析, 设计了图 2 所示的平面盘模型, 在轮缘处开长槽以产生较大离心负荷, 并且偏心孔位置靠近中心孔, 目的是使孔边产生塑性区。在轮缘处开径向长孔, 此处与转接段联接, 使盘旋转时, 径向不受约束。试验转速分别为 5000r/min、6000r/min、7000r/min、7800r/min, 对模型的估算在 7000r/min 时偏心孔处产生塑性应变。等色线条纹场的实时采集方法将在本文第三部分介绍。图 3 为模型盘在 7800r/min 下的等色线。应用前述分析方法可以得到各截面应力分布 (图 4), 在 b-b 截面上的应力 σ_θ 为塑性应力。

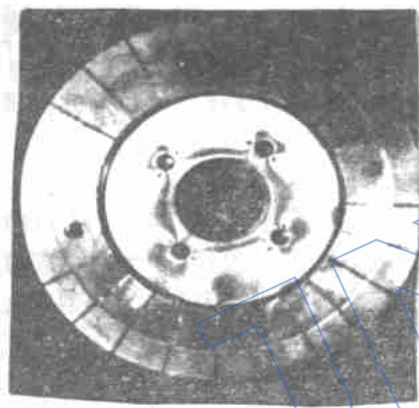


图 3 模型盘在 7800r/min 时的等色线图

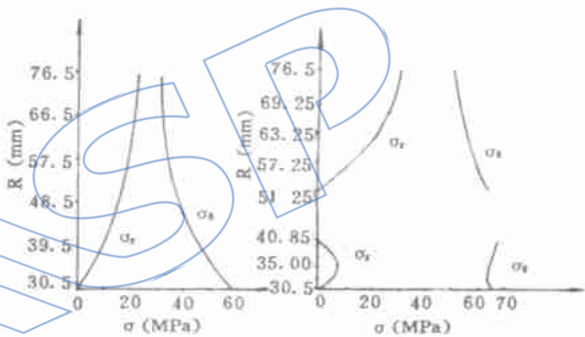


图 4 平面盘弹塑性应力分布

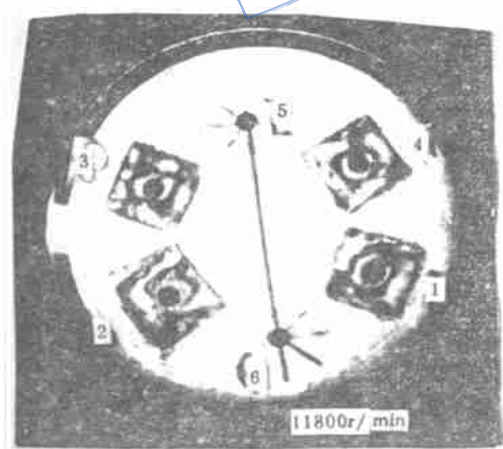


图 5 压气机盘等色线照片

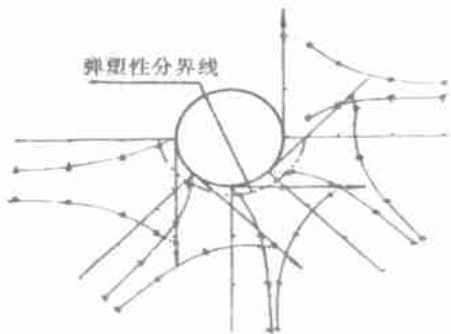


图 6 压气机盘在 11800r/min 时的应力分布

4. 发动机压气机盘偏心孔处的弹塑性应变测定 某发动机压气机盘的偏心孔处粘结光贴片及窄条, 在转子循环试验器上进行应变场的测定。窄条用来直接分离应变^[2]。等色线见图 5,

应力分析结果见图 6。试验结果表明该压气机在其最大工作转速时偏心孔处将出现塑性区。

三、结构光塑性法及其应用

1. 光塑性法原理 结构光塑性试验是用具有物理非线性的材料制造模型, 测量模型在受力状态下的双折射, 建立模型弹塑性应力状态下的光—力定律, 采用不同方法分离应变和应力。最后可根据相似条件将模型应力换算得到原型应力。光塑性试验应遵从下列相似条件才能保证模型的弹塑性应力与原型弹塑性应力相似。

(1) 模型与原型材料的应力、应变关系相似, 即用 Ramberg-Osgood 三参数方法^[3]表示的材料无量纲应力 (σ/σ_s)、应变 ($E\epsilon/\sigma_s$) 曲线相等。三参数方程为

$$E\epsilon/\sigma_s = \sigma/\sigma_s + (3/7)(\sigma/\sigma_s)^n \quad (7)$$

(2) 模型与原型材料有相同的屈服行为和流动准则。

(3) 在塑性变形过程中, 模型与原型各点的泊松比 ν 同步相等。

本研究中对 PC 塑料进行了材料物理性能及双折射性能的测定, 它的无量纲应力、应变曲线与常用金属材料曲线基本相同, 而且遵循米赛斯屈服准则。材料试验结果得到的 ν 与 ϵ_1 有关, 其值及变化规律与普通金属相近, 所以近似认为它满足上述相似条件 (3)。因此本研究采用 PC 塑料做光塑性模型。

光塑性中的光—应力关系为非线性, 其双折射定律为 (8) 式^[4]

$$m = m_{st} + m_{or} = \{[(\sigma - \sigma_s)/f + (\epsilon - \epsilon_e) - (\epsilon - \epsilon_e)/f_p]h\} \quad (8)$$

式中: m 为双折射条纹序, m_{st} 为应力双折射条纹序, m_{or} 为定向双折射条纹序, f 为材料应力条纹值, f_p 为材料应变条纹值, $(\epsilon - \epsilon_e)$ 为总应变差, $(\epsilon - \epsilon_e)_e$ 为弹性应变差, h 为模型厚度。

在实际问题中应用上式是很困难的, 本文作者建议由标准件直接测定等色线条纹强度与主应变差曲线, 即 $m/h - (\epsilon - \epsilon_e)$ 曲线。根据实验所得条纹场可由标定曲线查得 $(\epsilon - \epsilon_e)$, 然后由补充方程分离主应变。PC 塑料的 $m/h - (\epsilon - \epsilon_e)$ 曲线见图 7^[5], 由曲线可见主应变差与材料条纹强度呈线性关系。在研究结构弹塑性应变时, 属于小弹塑性范围, 此范围内应变条纹值 f_ϵ 为常数, 故可直接用公式 (9) 计算主应变差

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = mf_\epsilon/h \quad (9)$$

光塑性模型应力的计算与前述光贴片法类似。当应变测定后, 根据屈服条件及小变形理论的应力偏量与应变偏量的关系式计算应力强度和应力分量。可以用混合法^[3]或切力差法^[6]进行应力的分离。

模型应力与原型应力的转换公式为

$$\sigma = \sigma_m(\sigma_s)_p/(\sigma_s)_m \quad (10)$$

脚标 p 及 m 各指原型与模型, σ_s 为屈服应力。

2. PC 塑料模型盘的弹塑性应变测定 PC 塑料旋转模型结构同前述贴片法模型, 仅材料不同, 试验装置亦相同。由于该塑料进入非线性变形区的等色线条纹太多, 故采用相同材料的薄贴片, 用反射光路进行条纹场的记录。图 8 为 PC 塑料盘的 m/h 分布图。

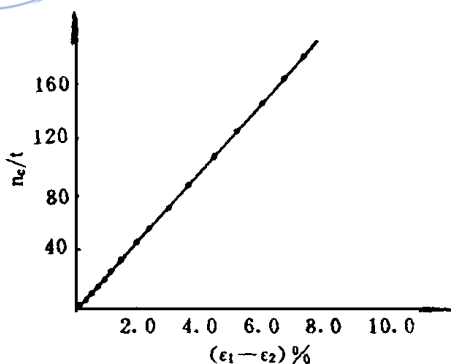


图 7 PC 塑料 $m/n - (\epsilon_1 - \epsilon_2)$ 曲线

由图 8 可求模型盘上各截面的主应变差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$)，由于盘的轴对称性，在分析截面处 $\epsilon_1 = \epsilon_\theta$ ， $\epsilon_2 = \epsilon_r$ ，由几何协调方程的差分形式建立等色线与应变的关系，分离出主应变 ϵ_θ 及 ϵ_r 。

$$(\epsilon_\theta)_i = (\epsilon_\theta)_o + \sum_0^i (\epsilon_r - \epsilon_\theta) / R_i \Delta R \tag{11}$$

自由边界处 $(\epsilon_\theta)_i = m_0 f d h_c (1 + \nu) + \sum_0^i m_i f d 2 h_c R_i \Delta R$, $(\epsilon_\theta)_o = m_0 f e l h_c (1 + \nu)$ (12)

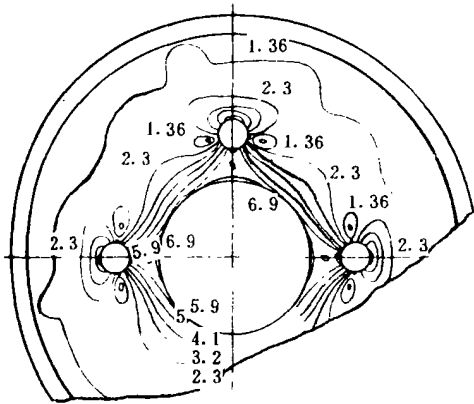


图 8 PC 塑料盘条纹强度 (m/n) 分布图

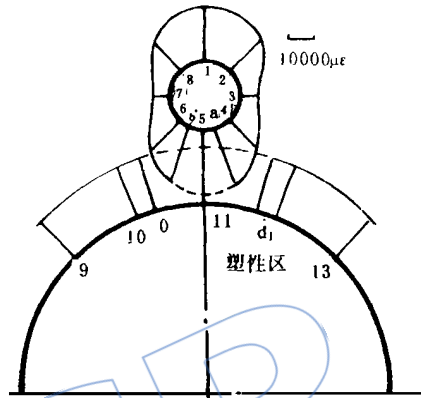


图 9 PC 塑料模型盘孔边应力分布图

$$(\epsilon_r)_i = (\epsilon_\theta)_i - m_i f d 2 h_c \tag{13}$$

它们的应力计算方法与光贴片法相同，不再赘述。模型盘在偏心孔边和中心孔边的弹塑性应力分布见图 9。

3. 轮盘榫槽的光塑性试验^[6] 由于旋转盘榫槽处应力水平较高，槽底应力集中处常常进入塑性变形。本试验用平面光塑性法分析槽底处的弹塑性应力分布。试验模型用 PC 塑料制造，叶片及凸台的离心负荷用集中力模拟，凸台的中截面及腹板处的周向应力作为力的边界条件，它由三维光弹性试验得到，并将周向应力沿半径合成离散的集中载荷。等色线条纹场见图 10。

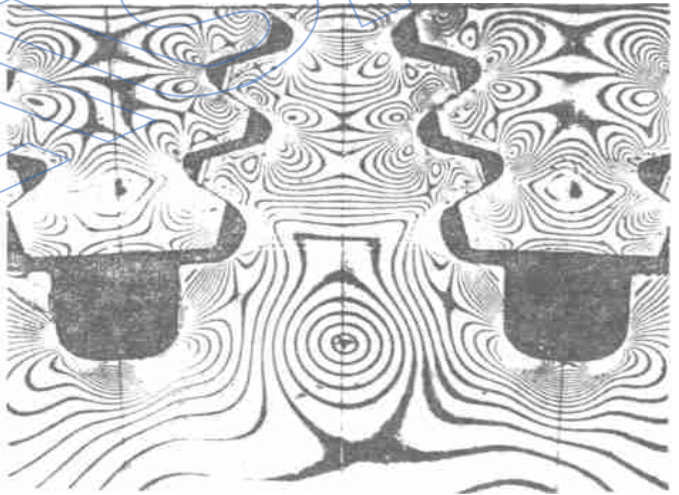


图 10 榫槽等色线条纹场

四、若干试验技术

1. 实验数据采集系统设计 光贴片及光塑性试验模型在旋转状态条纹场的实时采集系统分别采用了消转器系统及频闪系统。框图见图 11，前者要采用锁相器保持消转器与旋转件的同步，后者要根据试件转速选择合适的频闪光源，如本试验件最大转速为 8000r/min，最大观察直径为 150mm，所选光源的闪光持续时间为 3μs 时，可保证等色线条纹的最大移动量为

0.2mm, 这对于本试验所估算的条纹数及条纹分布梯度是允许的。

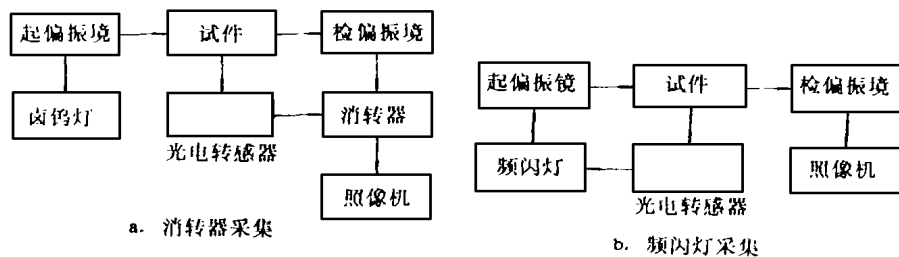


图 11 实时采集系统

2. 连续贴片及窄条在应变分析中的边界处理 贴片是由其边界传递剪力, 窄条由纵向两端传递剪力, 其剪力在边界区域 (大约为贴片厚度的四倍距离内) 分布不均匀, 故应在离开贴片边界一定距离处测取数据。窄条只传递试件沿窄条纵向的应变, 但窄条上的等色线条纹反映了其本身的纵横向应变差, 所以在计算试件沿窄条纵向应变时, 应对材料条纹值修正, 修正条纹值为 $f_{\epsilon}^1 = f_{\epsilon} / (1 + \nu)$ 。 f_{ϵ} 为贴片材料条纹值, ν 为其泊松比。

参 考 文 献

- [1] F. Zandman, "Photoelastic Coating", SESA Monograph, No. 3, 1976.
- [2] O. Regan, "New Method for Determining Strain on the Surface of a Body with Photoelastic Coating", EXP. Mech., 5 (8), 1965.
- [3] Ramberg, W. and Osgood, W. R., "Description of Stress-Strain Curves by Three-Parameters", NACA, Tech Note 902, 1943.
- [4] 云大真等, "结构弹性应力分析的光塑性数值计算的混合解法", 第六届全国实验力学学术会议论文集 1989 年。
- [5] 张祖巡, "现代光学方法应用于光塑性研究", 第六届全国实验力学学术会议论文集, 1989 年。
- [6] 吕忠久等, "发动机涡轮盘榫槽的光弹性应力分析", 第六届全国实验力学学术会议论文集, 1989 年。

hardening range. So the concepts of material and geometrical nonlinearities are employed, but it is very difficult to obtain the solution of the double-nonlinear problems. An approximate large deformation large analytical method is proposed firstly. The basic equations are derived according to the variable thickness and temperature of the disks. Secondly, the computational procedure is described and the burst speeds of four tested disks are obtained from the calculations. At last, the calculated results are compared with the test data, and the differences are less than four percent. Therefrom, it is proved that the new method is simple, convenient and accurate for engineering application as well as it is applicable to a wide variety of disks.

APPLICATION OF PHOTOELASTIC COATING AND PHOTOPLASTICITY TO ELASTOPLASTIC STRESS ANALYSIS OF A ROTATING DISK

Dong Benhan and Gao Pengfei

(Shenyang Aeroengine Research Institute)

ABSTRACT

A experimental method is developed for elastoplastic stress analysis of a rotating disk by means of photoelastic coating and photoplasticity. The experimental results are obtained from elastoplastic strain measurements of a model disk and a compressor disk. The isochromatic fringe fields of rotating disks are recorded by two systems which are designed by authors and composed of derotator, strobe light, photoelectric detector and camera. Strips method and difference method are proposed to separate strains in the photoelastic coating. The elastoplastic stresses of the rotating disk are calculated from experimental data according to small deformation elastoplastic theory. This experimental method has the advantage over other methods in noncontact measurement of the whole field.

A THREE-DIMENSIONAL ELASTIC STRESS ANALYSIS FOR AIR-COOLED TURBINE BLADES OF ORTHOTROPIC MATERIAL WITH CONTOURED PASSAGE

Xu Heshan, Wang Zhengtao, Hao Yanhua

(Shenyang Aeroengine Research Institute)

ABSTRACT

A three-dimensional elastic stress analysis method is provided for air-cooled turbine blades of orthotropic material with contoured passages. The analytical results are presented for a real air-cooled turbine blade. The sectional linear and nonlinear assumptions are adopted to divide a blade into elements and to form the geometrical and mechanical models, the coordinate transformation is employed to set up an elastic matrix of the elements, and the sectional linear interpolation is used to consider the effect of the temperature on the blade metal, so as to calculate the directionally-solidified air-cooled turbine blades with complicated contoured passages and the high temperature differences between the inner and outer walls. The method and the program have been verified and the accuracy could meet the requirements of engineering.