

蠕变恢复的试验与应用研究

西安交通大学 穆霞英 刘西瑞

摘 要

本文简介镍基合金蠕变恢复试验情况, 得出材料蠕变恢复规律及算式。同时, 对高温结构提出一种简便可行的蠕变恢复应力分析方法, 并通过算例说明蠕变恢复的影响。

一、前 言

航空发动机主要部件涡轮盘, 在高温环境下承受反复载荷。由于一次飞行过程中, 从起航(升温升速)经巡航(恒温恒载下蠕变)到停机(降温减速)时, 涡轮盘还保持相当高的温度。在计算一次飞行循环应力应变幅值时, 有必要考虑蠕变恢复问题, 类似的情况在化工、动力等行业中亦存在。因此对蠕变恢复问题的研究有其实际意义。

Jhnsn〔1〕及Davis〔2〕和Zener〔3〕及Lubahn〔4〕等曾对此问题得到一些有价值的规律, 在理论上, 按经典蠕变理论只有用滞后理论能够描述蠕变恢复过程〔5〕, 需求解复杂的非线性积分方程, 或者用粘弹性理论求解。但不管那一种方法在计算蠕变恢复时都需另立一套方程, 而不能沿用原有的热弹塑性蠕变本构关系继续计算。本文提出的方法, 解决了这一矛盾。

我们还对某涡轮盘材料(镍基合金)进行蠕变恢复试验, 得出材料蠕变恢复试验规律及算式。以厚壁筒为例进行应力分析(包括加载、蠕变、卸载及蠕变恢复)。

二、试验情况及数据处理

1. 试验 (1)蠕变恢复试验在ZST3/3型蠕变试验机上进行, 在热工所完成, 试验温度分650℃、675℃、700℃三档, 每个温度采取4个应力水平, 考虑高温合金试验数据的分散性, 每个应力水平作两根, 蠕变150~200小时后卸载, 蠕变恢复20小时左右。(2)在试样的工作长度上固定三对镍铬-镍锰热电偶测温, 试验期间工作长度上温度波动小于±3℃, 温度梯度小于3℃。(3)试样的变形测量精度为0.0005mm。(4)试验予负荷为30kg(约0.6kg/mm²应力), 在予负荷作用下保温时间不小于10小时。蠕变终了时, 先卸主负荷, 进行蠕变恢复试验, 最终卸去予负荷、关炉。

2. 试验规律 由试验观察得: (1)在保温卸载时, 初始弹性变形 ϵ_0 即时恢复, 蠕变变形 ϵ^0 则随时间的

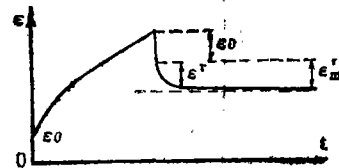


图1 蠕变恢复现象

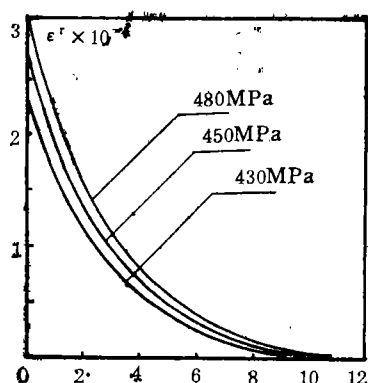


图2 不同应力水平蠕变恢复曲线 (675°C)

增长而逐渐恢复, 此即“蠕变恢复现象”。试验材料初始恢复速度较快, 约15小时后蠕变恢复量 ϵ_r 就比较稳定了(图1)。因此只进行20小时左右蠕变恢复试验。(2)蠕变恢复总量 ϵ_M^r 在恒温条件下与卸载前应力水平成正比, 在同样应力条件下, 则随温度升高而增大。(3)蠕变恢复总量 ϵ_M^r 均未超过第一阶段蠕变量, 因此可以说蠕变恢复仅恢复其第一阶段所积聚蠕变量的一部分。(4)蠕变恢复曲线明显受温度与应力的影响, 在恒温或恒应力条件下, 大致可看作存在几何相似性(图2)。

3. 数据处理 根据恒温恒应力下蠕变恢复曲线特征, 可按如下函数形式逼近^[3]

$$\epsilon^r = a(1 - e^{-bt'}) \quad (1)$$

在中 a 、 b 为常数, a 即蠕变恢复总量受应力及温度影响剧烈, 而 b 受影响较小, 可忽略之。因此在变温变应力条件下, 一般表达式为

$$\epsilon^r = \Phi(\sigma, T, t') \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}^r = \phi_1(\sigma, T, t') \quad (3)$$

式中 σ 、 T 、 t' 分别表示应力、绝对温度及恢复时间。

据规律(4)、公式(2)可采取如下形式

$$\epsilon^r = C f_1(\sigma) f_2(t') f_3(T), \text{ 或 } \epsilon^r = a_1 \sigma^n e^{-d/T} (1 - e^{-bt'}) \quad (4)$$

在恒温恒应力条件下, 上式可简化成公式(1)。

数据处理采用最小二乘法回归拟合, 得到常数 a_1 、 n 、 d 、 b 等值, 拟合曲线见图3。

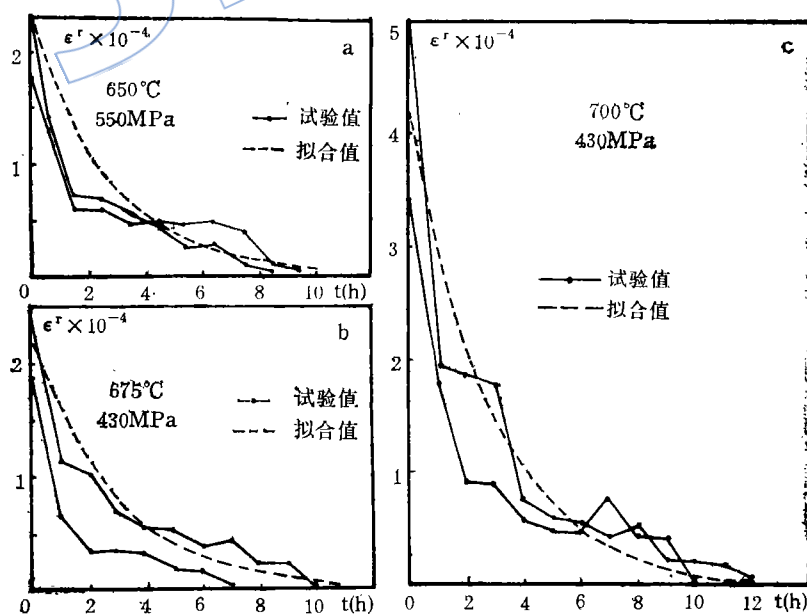


图3 试验曲线与拟合曲线比较

三、计算方法及算例

1. 蠕变分析 为了说明计算方法, 简述蠕变应力分析的途径。

一维应力的蠕变规律, 一般可表达为

$$\varepsilon^c = \Phi(\sigma, T, t) \quad (5)$$

或

$$\dot{\varepsilon}^c = \Phi_1(\sigma, \varepsilon^c, T, t) \quad (6)$$

对于空间应力, 按Mises型增量理论, 其等效蠕变增量 $d\bar{\varepsilon}^c$ 为:

$$d\bar{\varepsilon}^c = \Phi_1(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^c, T, t) dt \quad (7)$$

$$d\varepsilon_{ij}^c = (3\Phi_1/2\bar{\sigma})S_{ij}dt \quad (8)$$

式中 $\bar{\varepsilon}^c$ 、 $\bar{\sigma}$ 、 S_{ij} 及 t 各为等效蠕变应变、等效应力、应力偏量及蠕变时间。

蠕变问题属非线性问题。若用有限元方法分析, 则以“时间增量法”为基础, 把所需计算时间分成 n 段。如把时间步取得适当小, 则可假定每一时间步 Δt 内应力不变, 按 Δt 初的应力作为常应力, 考虑 Δt 时间内产生的蠕变量, 把变应力蠕变看作逐段常应力蠕变的累积。

以初始弹性状态为例, 按增量形式虎克定律

$$\{\Delta\sigma\} = [D](\{\Delta\varepsilon\} - \{\Delta\varepsilon^c\} - \{\Delta\varepsilon^T\}) \quad (9)$$

式中有上标 C 、 T 各量分别表示蠕变应变增量及热应变增量。根据虚功原理

$$[K]\{\Delta U\} = \{\Delta R\} + \{\Delta R^c\} + \{\Delta R^T\} \quad (10)$$

其中 $[K]$ 、 $\{\Delta U\}$ 为刚度矩阵及位移增量, $\{\Delta R\}$ 为节点载荷向量。 $\{\Delta R^c\}$ 及 $\{\Delta R^T\}$ 分别为蠕变及温度变化所引起的等效节点向量。

$$\{\Delta R^c\} = \int_V [B]^T [D] \{\Delta\varepsilon^c\} dv \quad (11)$$

$$\{\Delta R^T\} = \int_V [B]^T [D] \{\Delta\varepsilon^T\} dv \quad (12)$$

把 $\{\Delta\varepsilon^c\}$ 及 $\{\Delta\varepsilon^T\}$ 作为弹性体的初应变处理。首先建立初瞬弹性解, 作为蠕变起点, 即 $(\Delta t)_1$ 的初始应力, 按(7)式计算 $d\bar{\varepsilon}^c$, 按(8)式计算 $\{\Delta\varepsilon^c\}$, 再按(11), (12)式计算 $\{\Delta R^c\}$ 及 $\{\Delta R^T\}$ 。由(9)(10)等式解得 $(\Delta t)_1$ 末的 $\{\Delta U\}$ 、 $\{\Delta\varepsilon\}$ 、 $\{\Delta\sigma\}$, 求得 $(\Delta t)_1$ 末的应力, 作为下一时间步的初值。重复如上, 算到所需蠕变时间为止。

2. 蠕变恢复分析 如把坐标换取图4形式来描述蠕变恢复, 则公式(2)与公式(5)在形式上类同, 只是 t 为另时间算起, 而 t' 则由开始蠕变恢复时刻 t_1 算起, 且对总应变而言 ε^c 为随时间而增的增加量, 则 ε^r 为随时间增加的减少量。设想在结构计算中同样可采用Mises型增量本构理论。这样, 蠕变恢复的计算完全可沿用原有蠕变计算的本构关系及有限元格式进行, 只是把算式中的 ε^c 换成 ε^r (或 $\dot{\varepsilon}^c$ 换成 $\dot{\varepsilon}^r$)而已。即

空间应力, 公式(3)可写成

$$\dot{\varepsilon}^r = \Phi_1(\bar{\sigma}, T, t')$$

应力应变关系

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^r = (3\Phi_1/2\sigma_1)S_{ij},$$

或

$$d\varepsilon_{ij}^r = (3\Phi_1/2\sigma_1)S_{ij}dt$$

采用时间增量法求得 $(\Delta t')_1$ 时间步的 Φ_1 值, 这里 $\bar{\sigma}$ 、 S_{ij} 始终按卸载量所对应的弹性解

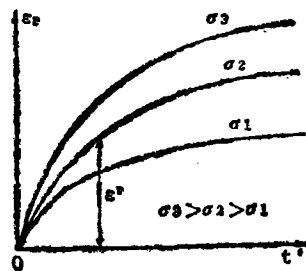


图4 蠕变恢复曲线另一表示

计算。令 $d\epsilon_{ij}^c = -d\epsilon_{ij}^e$, 即可沿用原有计算蠕变的程序计算。即在有限元计算格式中因蠕变引起的等效节点向量 $\{\Delta R^c(\Delta \epsilon_{ij}^c)\}$ 代之以 $\{\Delta R^c(-\Delta \epsilon_{ij}^e)\}$ 。解得 ΔU 后, 相继得到 $\Delta \epsilon_{ij}$ 、 $\Delta \sigma_{ij}$, 叠加 $(\Delta t')_1$ 的应力初值, 即得 $(\Delta t')_1$ 末的应力解, 作为下一步的初值, 如此重复进行即可。

3. 算例 一个受内压厚壁筒的数据见文献[6], 若蠕变恢复方程为

$$\epsilon^r = 1.373 \times 10^{-12} \sigma^{2.5} (1 - e^{-0.35 t'})$$

经计算初始瞬态属弹性应力状态, 蠕变阶段数值解与文献[6]及理论解一致。图 5 绘出 1 为弹性解, 2、3、4 为 $t = 0.01, 0.04, 0.13$ 小时的不稳定蠕变解和 5 为稳态蠕变解的周向应力 σ_θ 变化。并给出稳态蠕变卸载后残余应力及蠕变恢复 2 小时后的结果。可以看出蠕变恢复的影响。

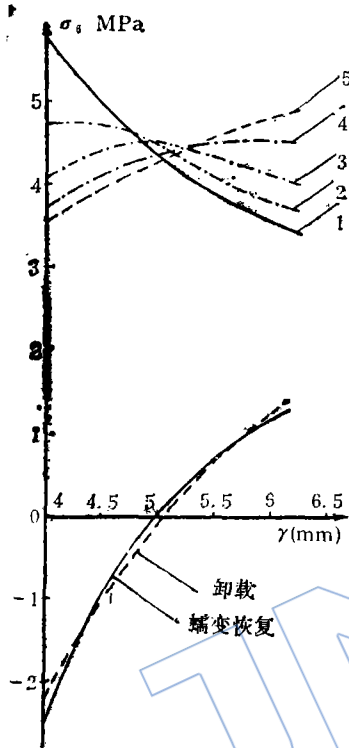


图 5 蠕变及恢复过程 σ_θ 的变化

四、讨 论

1. 本次试验予蠕变时间较长, 且均已进入第三阶段, 所得资料, 蠕变恢复开始阶段迅速, 约 1.5 小时左右已趋近稳定, 蠕变恢复总量大体与卸载前应力水平成正比, 所得恢复量均未超过第一阶段其蠕变量。上述规律与前人所作工作基本吻合, 至于恢复量与予蠕变时间关系本文未曾研究。

2. 蠕变恢复一般是指卸载后零应力情况。但实际上另件在初始状态即使是弹性的, 因蠕变变形使卸载后仍有残余应力。Davis 曾对无氧铜作过予蠕变后大部分卸载、保温 200 小时再加载的试验, 发现保温期间有明显的

蠕变恢复发生, 并符合一般蠕变恢复规律。本文因条件所限, 未能进行部分卸载恢复试验, 只是根据此现象推广应用到有残余应力情况。若再进行部分卸载试验可以获得更可靠的依据。

3. 厚壁筒算例说明蠕变恢复亦会引起另件应力的变化, 有可能使应力状态恶化, 因此对于反复载荷下的高温负荷另件考虑蠕变恢复是非常必要的。

4. 本文计算方法简易可行, 如能以简单零件作进一步试验验证则更能令人信服, 但这是比较困难的。

参 考 文 献

- [1] Johnson, A.E., "The Creep Recovery of a 0.17 cent Carbon Steel", Proceedings of the Institution of mechanical Engineers, vol. 145, PP. 210—220, 1941.
- [2] Davis, E.A., "Creep and Relaxation of Oxygen-free Copper", Journal of Applied Mechanics, vol. 10, No. 2, A-101, 1943.
- [3] Zener, C., "Elasticity and Anelasticity of metals", Univ., Chicago Press, 1948.
- [4] Lubahn, J.D. and Felgar, R.P., "Plasticity and Creep of metals", John-Wiley & Sons, New York, P. 363, 1961.
- [5] Качано, Л.М., "ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ", ФИЗМАТГЕЗ, 1960.
- [6] 穆霞英、胡互让, "材质随温度变化的热弹塑性蠕变有限元分析", 应用力学学报, 第 3 卷, 第 3 期, 1986 年。

which imitates a cyclic loading in flight. Considering the influence of factors of creep, change of material's properties, and process of temperature elevation, the stress analysis of the disk-body is accomplished under various working conditions. Moreover, the residual stress resulting from a cyclic loading is calculated. Some useful conclusions have been drawn for engineering design.

EXPERIMENTAL AND APPLIED RESEARCH ON CREEP-RECOVERY

Mu Xiaying and Liu Xirui
(Xian Jiaotong University)

Abstract

Creep recovery testing of nickel-alloy at three temperatures is reported, from which some useful rules are found. A simple and efficient analytical method of creep recovery stress is provided. The effect of creep recovery is demonstrated by a numerical example.

TEST RESEARCH ON MAIN SHAFT SERVICE LIFE OF AEROENGINE

Fang Zuying and Liu Dunhui
(Chendu Aeroengine Company)

Abstract

The method for determining damage conversion of main shaft of aeroengine is introduced. In accordance with the linear accumulating fatigue damage theory and S-N curve, the standard damage cycles per flight hours, or damage conversion ratio A_p for flight can be obtained from the comparative residual life tests of the shafts with different service life. The main shaft fatigue life tests indicate that even the worst main shaft can resist the standard load cycle, or predicted safe standard cycle life. If it is divided by A_p , the service life (hours) of a main shaft can be determined. Further, the determination method of target service life is provided for general maneuver flight load combined with spin flight load.