

性的。用传统的弹塑性和蠕变理论不能精确描述高温构件不同时刻的应力应变场。为确定火焰筒的低循环疲劳寿命, Walker 提出了一个各向同性材料的粘塑性统一本构模型^[1]。在该模型中不区分塑性应变和蠕变应变, 认为所有非线性应变都是与时间相关的非弹性应变。定向结晶材料和单晶材料是正交各向异性的, WALKER 模型不能直接应用于由这两种材料制成的构件。为精确预测单晶涡轮叶片的低循环疲劳寿命, 文献 [2] 和 [3] 通过引入一个正交各向异性的四阶张量 M_{ijkl} , 给出了正交各向异性材料的 WALKER 模型的修正公式, 但其非弹性应变率仍显得不合理, 为此提出了正交各向异性材料的统一本构模型。

2 正交各向异性材料的粘塑性统一本构模型

粘塑性理论认为平衡应力 Ω 和阻力应力 K 是决定材料状态的两个关键内变量, 前者为一个二阶张量, 后者为标量。为精确确定单晶和定向结晶材料涡轮叶片的应力应变场和低循环疲劳寿命, 通过引入各向异性张量, 对各向同性材料的 WALKER 粘塑性统一本构模型^[1]进行了修正, 提出了一个正交各向异性材料的粘塑性统一本构模型。在材料主轴坐标系中, 正交各向异性材料的本构方程为:

$$\dot{c}_{ij} = \left[\frac{\sqrt{[M_{ijkl}(\sigma_{kl} - \Omega_{kl})]^2}}{K} \right]^n \frac{M_{ijkl}(\sigma_{kl} - \Omega_{kl})}{\sqrt{[M_{ijkl}(\sigma_{kl} - \Omega_{kl})]^2}} \quad (1)$$

$$\dot{\Omega}_{ij} = (n_1 + n_2)\dot{c}_{ij} + \dot{c}_{ij} \frac{\partial n_1}{\partial q} - (\Omega_{ij} - \Omega_{ij} - n_l c_{ij})(\dot{G} - \frac{1}{n_2} \frac{\partial n_2}{\partial \theta} \dot{\theta}) \quad (2)$$

$$K = K_1 - K_2 e^{-n_7 R} \quad (3) \quad \dot{c}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{e}_{ij} - \alpha_{ij} \dot{\theta} \quad (4)$$

$$\dot{G} = (n_3 + n_4 e^{-n_5 R})\dot{R} + n_6 (M_{ijkl} \Omega_{ij} \Omega_{kl})^{\frac{m-1}{2}} \quad (5)$$

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{c}_{ij} \dot{c}_{ij}} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{c}_{11}^2 + \dot{c}_{22}^2 + \dot{c}_{33}^2 + 2\dot{c}_{12}^2 + 2\dot{c}_{23}^2 + 2\dot{c}_{31}^2)} \quad (6)$$

式中 $\dot{c}_{ij}$ 为非弹性应变率分量; σ_{ij} 为应力分量; Ω_{ij} 为平衡应力分量, 是由弹塑性理论中的随动强化理论中加载面中心在应力空间中的位移衍生出来的, 它表示在无热恢复、非常慢加载下的应力状态, 同时也是松弛达到的最后应力状态; K 为阻力应力, 反应了材料初始屈服及继续屈服性态; $\dot{e}_{ij}$ 为弹性应变率分量, 由弹性应力应变关系^[4] 确定; θ 为温度; α_{ij} 为材料的线膨胀系数, 当 $i \neq j$ 时, $\alpha_{ij} = 0$; 当 $i = j = 1, 2, 3$ 时, α_{ij} 分别为三个材料主轴方向的线膨胀系数; $\Omega, n, m, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, K_1, K_2$ 为与温度相关的材料常数。

3 正交各向异性矩阵元素的确定

对正交各向异性材料, 假设在材料主轴坐标系中, 非弹性正应变率分量只与三个正应力分量及其对应的平衡应力分量有关; 非弹性剪应变率分量只与相应的剪应力分量及其对应的平衡应力分量有关。可将各向异性张量写成矩阵的形式, 令 $[M]$ 为正交各向异性矩阵 (表达式略), 由正交各向异性矩阵的对称性可得: $M_{21} = M_{12}, M_{31} = M_{13}, M_{32} = M_{23}$ 。假设材料的非弹性应变是不可压缩的, 则有: $M_{11} + M_{12} + M_{13} = 0, M_{21} + M_{22} + M_{23} = 0, M_{31} + M_{32} + M_{33} = 0$ 。由此可得, 正交各向异性材料的各向异性矩阵的独立的系数只有 6 个。

对定向结晶材料, 设 3 轴为结晶轴, 则在 1 轴和 2 轴组成的平面内材料具有各向同性性质, 于是可得: $M_{22} = M_{11}, M_{23} = M_{13}, M_{55} = M_{66}$ 。根据材料的非弹性应变的不可压缩性和定

向结晶材料的横观各向同性性质可得: $M_{12} = -M_{11} + M_{33}/2$, $M_{13} = -M_{33}/2$, $M_{44} = -M_{11} - M_{33}/4$ 。对定向结晶材料, 各向异性矩阵的独立的系数降为 3 个, M_{11} , M_{33} 和 M_{55} 。

对单晶材料, 由于在三个材料主轴方向上的材料性能相同, 根据材料的非弹性应变不可压缩性可得: $M_{12} = M_{21} = M_{13} = M_{31} = M_{23} = M_{32} = -M_{11}/2$ 。对单晶材料, 正交各向异性矩阵的独立的系数降为 2 个, M_{11} 和 M_{44} 。

4 非弹性响应预测

用所提出的粘性统一本构模型预测了美国单晶材料 PWA1408 和俄罗斯某单晶材料的粘塑性响应。单晶材料 PWA1480 的部分材料常数和试验结果取自文献 [3]。

图 1 表示单晶材料 PWA1480 在温度 $T = 871^\circ\text{C}$, 应变率 $\dot{\epsilon} = 0.01\% \text{s}^{-1}$ 时, $[100]$ 和 $[111]$ 方向迟滞回线的理论值和试验值。图 2 则为 PWA1480 在温度 $T = 871^\circ\text{C}$, 应变幅 $\epsilon_a = 0.012$, 应变率 $\dot{\epsilon} = 0.01\% \text{s}^{-1}$ 时, $[100]$, $[110]$ 和 $[111]$ 方向的迟滞回线的理论值。

图 3 表示俄罗斯某单晶材料在温度 $T = 1000^\circ\text{C}$, 应力 $\sigma = 215.8 \text{MPa}$ 时, $[100]$ 和 $[111]$ 方向蠕变曲线的理论值和试验值。图 4 该单晶材料在温度 $T = 1000^\circ\text{C}$, 应变 $\epsilon = 0.008$ 时, $[100]$, $[110]$ 和 $[111]$ 方向松弛特性的理论值。

图 5 表示 PWA1480 在温度 $T = 1000^\circ\text{C}$, $[100]$ 方向上迟滞回线不同点的蠕变特性的理论值。第 1 条曲线表示应力从 0 增加到 120MPa, 然后保持应力不变; 第 3 条曲线表示应力从 0 增加到最大, 再下降到 120MPa, 然后保持应力不变; 第 4 条曲线表示应力从 0 增加到最大, 再下降到最小, 之后增加到 120MPa, 然后保持应力不变。

图 6 为 PWA1480 在温度 $T = 1000^\circ\text{C}$, $[100]$ 方向上迟滞回线不同点的松弛特性的理论值。第 1 条曲线表示应变从 0 增加到 0.008, 然后保持应变不变; 第 2 条曲线表示应变从 0 增加到最大, 再下降到 0.008, 然后保持应变不变; 第 3 条曲线表示应变从 0 增到 0.006, 然后保持应变不变; 第 4 条曲线表示应变从 0 增到最大, 再下降到 0.0076, 然后保持应变不变。

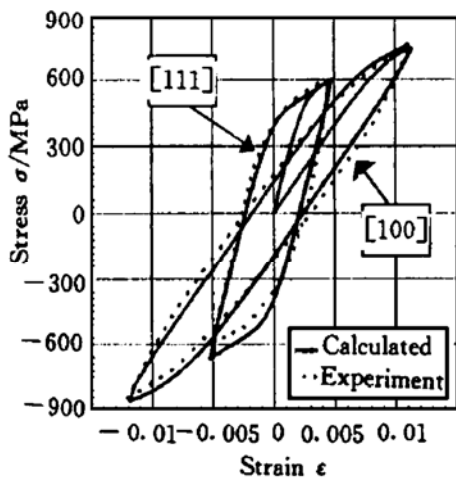


Fig. 1 Calculated and experimental loops in $[100]$ and $[111]$ orientation at strain rate $= 0.01\% \text{s}^{-1}$

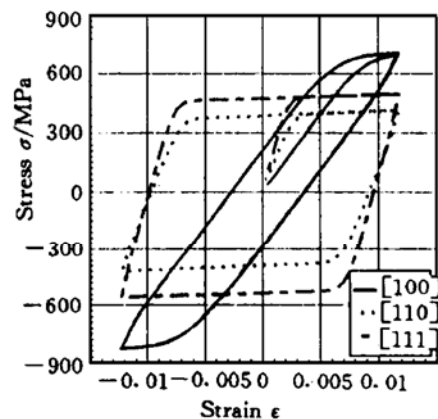


Fig. 2 Predicted loops in $[100]$, $[110]$ and $[111]$ orientation at strain rate $= 0.01\% \text{s}^{-1}$

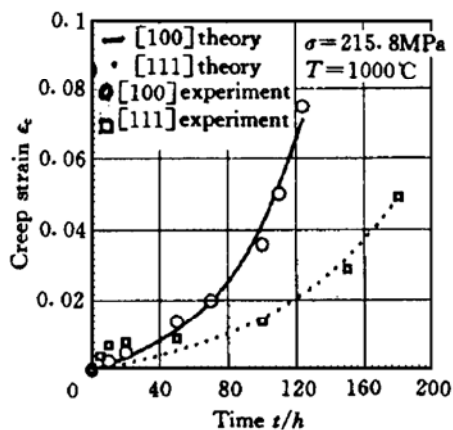


Fig. 3 Calculated and experimental creep behavior in $[100]$ and $[111]$ orientation

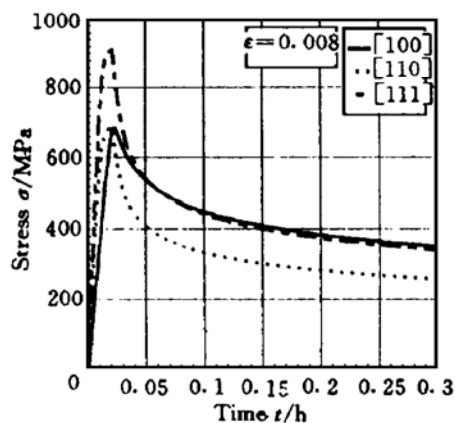


Fig. 4 Relaxation behavior in $[100]$, $[110]$ and $[111]$ orientation

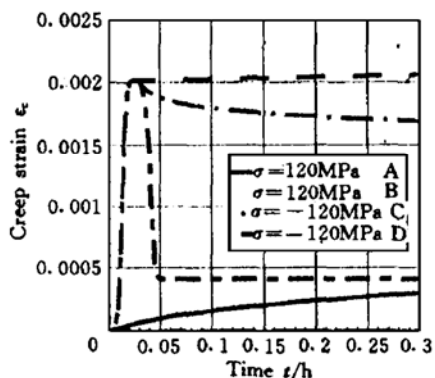


Fig. 5 Calculated creep behavior at various points on a hysteresis loop in $[100]$ orientation

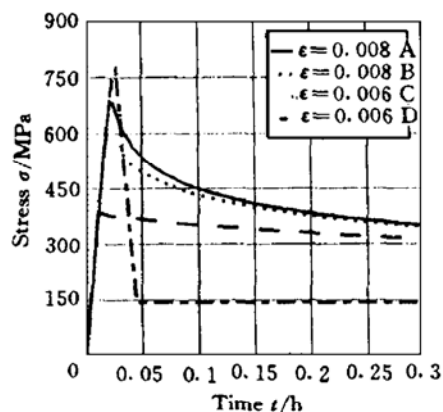


Fig. 6 Calculated relaxation behavior at various points on a hysteresis loop in $[100]$ orientation

5 结 论

- (1) 用所提出的正交各向异性材料的粘塑性统一本构模型能较精确描述单晶材料和定向结晶材料的三维粘塑性响应；能描述单晶材料和定向结晶材料的蠕变和松弛特性；
- (2) 适当选取 K_2 的值可以描述材料的循环和循环硬化特性；
- (3) 用所提出的正交各向异性材料的粘塑性统一本构模型可以描述加载历史对正交各向异性材料蠕变特性和松弛特性的影响。

参 考 文 献

- 1 Wallker K P. Research and development program for nonlinear structural modeling with advanced time-temperature dependent constitutive relationships. NASA-CR-165533
- 2 Swanson G A, Liask I, Nissley D M, et al. Life prediction and constitutive models for engine hot section anisotropic materials program. NASA-CR-174952
- 3 Swanson G A, Liask I, Nissley D M, et al. Life prediction and constitutive models for engine hot section anisotropic materials. NASA-CR-179594

- 4 张晓霞,周柏卓.正交各向异性材料弹性本构关系分析.航空发动机,1997(1)
- 5 何君毅,林祥都.工程结构非线性问题的数值解法.北京:国防工业出版社,1994.

(上接第 19 页)

参 考 文 献

- 1 Habiballah M Dubois I. Numerical analysis of engine instability. First International Symposium on Liquid Rocket Combustion Instability, 1993.
- 2 Kim Y, Chen C P, Ziebarth J P. Numerical simulation of combustion instability in liquid-fueled engines. AIAA-92-0075
- 3 Litchford R J, Jeng S M. Liquid rocket spray combustion stability analysis. AIAA-91-1985
- 4 Prime R J. Round robin calculation of wave characteristic in a fixed geometry-operating condition liquid rocket using given simplified combustion equations. Orlando: JANNAF Workshop on Numerical Method in Combustion Instability, 1990.
- 5 刘卫东. 液体火箭发动机不稳定燃烧数值分析模型研究:[学位论文]. 长沙:国防科技大学, 1996.
- 6 Issa R I. Solution of the implicit discretized reacting flows by a non-iteration by operator-splitting. J Compute Physics, 1991, 93: 388~410.
- 7 刘卫东, 吴晋湘, 王振国, 等. 大流量同轴式喷注器雾化过程及喷两相流数值模拟. 推进技术, 1995(5)
- 8 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧理论、模型及应用. 长沙:国防科技大学出版社, 1995.

(上接第 81 页)

- 4 Anderson K, Hallgren C, Levin J, et al. Liquid Chromatographic determination of hydrazine subparts-per-million levels in workroom air as benzaldazine with the use of chemisorption on benzaldehyde-coated XAD-2. Anal chem, 1984(56): 1730~1731.
- 5 Volltraner H N. Prototype cheminescent analyzer for measurement of hydrazine and nitrogen dioxide. AD-A135622, 1983.
- 6 Leasure C S, Eiceman G A. Continuous detection of hydrazine and monomethylhydrazine using ion mobility spectrometry. Anal chem, 1985(57): 1890.
- 7 权桂香. 空气中肼监测基准方法的研究——固体采样/分光光度法. 见:朱明生等编. 空气和废气监测分析方法. 北京:国家环境保护局, 1990: 225.
- 8 朱明生. 空气中偏二甲基肼监测基准方法的研究——固体吸附/比色法. 见:朱明生等编. 空气和废气监测分析方法. 北京:国家环境保护局, 1990: 227.
- 9 Holtzow J R, Rose S L, Wyatt J, et al. Simultaneous determination of hydrazine, methylhydrazine and 1,1-dimethylhydrazine in air by derivatization/gas chromatography. Anal chem, 1984(56): 2952.
- 10 朱明生. 空气中一甲基肼监测方法——固体吸附/分光光度法. 推进技术, 1997(6)

多孔毛细陶瓷试棒燃油蒸发 与渗透性能的实验研究*

杜声同 孙惠贤 陈建和 陈炳录

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 研究了多孔毛细陶瓷试棒的燃油渗透、蒸发性能与温度、气孔率及气流速度的关系, 并对单直毛细孔的渗透、蒸发及裂解等模型作了分析。

主题词: 陶瓷, 孔隙率, 推进剂蒸发, 渗透率

分类号: V254.2, TB302.1

AN EXPERIMENTAL STUDY OF SOME FUNDAMENTAL PROPERTIES FOR IMPROVING COMBUSTION IN CERAMIC COMBUSTOR

Du Shengtong Sun Huixian Chen Jianhe Chen Binglu

(Dept. of Aeroengine engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: The properties of permeation and evaporation of fuel through porous capillary ceramic rod is investigated. The relation between the permeation, evaporation of fuel and the porosity, air velocity of test rod is studied. The model of permeation evaporation and cracking in a single straight capillary is presented. It is suggested that a new injector or flame stabilizer can be made of porous capillary ceramic material.

Subject terms: Ceramic material, Porosity, Propellant evaporation, Permeability

1 引 言

利用陶瓷在烧结过程中形成的多孔毛细状态进行燃油渗透、蒸发、裂解并组织燃烧, 能使燃烧比较充分, 火焰稳定性也好^[1,2]。用它取代空气喷气发动机中高压喷油雾化蒸发及火焰稳定系统, 可大大节省组织燃烧所需的空間。为此, 研究测定了不同气孔率在不同湿度及不同气流速度下的渗透及蒸发性能, 为下一步深入研究打下基础。

2 静态实验

自制的多孔毛细陶瓷试棒尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$, 气孔率 $\phi = 19.1\% \sim 39.4\%$ 。选取 11 根试棒分别固定在密封的瓶子中间, 瓶中装有一定高度的航空煤油 (见图 1)。在室温下测定煤油的蒸发量 $\dot{m}$ 和渗透高度 h 与 ϕ 的关系 (见图 2 和图 3)。实验条件为, 室温 19.3°C , 油温 18.0°C , 大气压 $p_0 = 96.3\text{kPa}$, 1h 后测渗透高度, 24h 后测蒸发量。

从图 2 和图 3 可以看出, 随着 ϕ 的增加, $\dot{m}$ 和 h 均有所增加。

* 收稿日期: 1997-01-24, 修回日期: 1997-05-10