

B09 損傷力学に基づくニオブ合金材のクリープ疲労解析

升岡正, 都井裕 (東京大学), 香河英史, 池田博英 (JAXA)

Tadashi Masuoka, Yutaka Toi(Tokyo University), Hideshi Kagawa, Hirohide Ikeda(JAXA)

1. 諸言

静止衛星や宇宙ステーション補給機等の軌道変換および姿勢制御に使用される二液式スラスタの燃焼器に対し, 従来品より耐熱温度が高く長寿命な材料の適用が進んでいる。燃焼器には従来から表面にシリサイドコーティングを施したニオブ合金材 (C103)¹⁾ が広く使用されており, JAXAでは従来のニオブ合金材の表面に耐熱性および耐酸化性を向上させた新しいコーティング²⁾ を使用したスラスタの開発が進められている。このような, 超高温環境で使用されるスラスタ燃焼器について, 設計段階から寿命を精度よく予測する手法への期待は大きい。クリープ, 疲労を含む材料の弾粘塑性現象を材料内部に発生する損傷や破壊と関連付ける力学体系として, 連続体損傷力学³⁾ (以下, 損傷力学と称する) は高いポテンシャルを有している。しかし, その実験的検証や材料定数値の同定が困難なため, 実際の工業設計および解析の現場において実用性を獲得しているとは言い難い。本研究では, スラスタの高性能化への要求を踏まえ, 使用温度環境を従来よりも高い 1500°Cと想定し, クリープ試験およびクリープ疲労試験を実施し, これを精度よく再現する損傷力学モデルの定式化および材料定数の同定を行なう。さらに, 同定した材料定数をそのまま用いて, 実施したクリープ疲労試験と同様のクリープ疲労解析を実施し, 実験結果と解析結果を比較することで, 損傷力学モデルで使用される構成方程式および材料定数の妥当性を評価したのでこれらについて報告を行う。

2. 損傷力学モデル

弾性構成方程式は, ニオブ合金材を等方性損傷体と仮定し, ひずみ等価性仮説を適用した式(1)により与えられる⁴⁾。

$$\dot{\sigma}_{ij} = (1-D)D_{ijkl}^e (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^{vp} - \dot{\epsilon}_{kl}^c) - \dot{D} \frac{\sigma_{ij}}{1-D} \quad (1)$$

式中, $\dot{\sigma}_{ij}$ は応力変化率, D_{ijkl}^e は弾性体の応力・ひずみマトリックス, $\dot{\epsilon}_{kl}$ は全ひずみ速度, $\dot{\epsilon}_{kl}^{vp}$ は粘塑性ひずみ速度, $\dot{\epsilon}_{kl}^c$ はクリープひずみ速度, D はスカラー損傷変数である。

塑性構成方程式は, ミーゼスの降伏条件を適用した式(2)を用いた^{3), 4)}。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{3}{2} \left\langle \frac{f}{K} \right\rangle^n \frac{\sigma_{ij}^D - X_{ij}^D}{(\sigma_{ij} - X_{ij})_{eq}} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\sigma_{ij}^D - X_{ij}^D}{(\sigma_{ij} - X_{ij})_{eq}} \quad (2)$$

ここに,

$$f = \left(\frac{\sigma_{ij}}{1-D} - X_{ij} \right)_{eq} - R - \sigma_y \quad (3)$$

式中, f はミーゼスの降伏関数, $\langle \rangle$ は Macauley の括弧, K, n は材料定数, p は累積相当粘塑性ひずみ, X_{ij} は移動硬化による背応力, R は等方硬化による応力, σ_y は降伏応力である。上添字^Dは偏差成分, 下添字_{eq}は相当量であることを示す。

等方硬化による応力 R , 背応力 X_{ij} について, 繰り返し载荷への適用を考慮し, 以下の式を用いた^{3), 4)}。

$$R = R_\infty [1 - \exp(-bp)] \quad (4)$$

$$\dot{X}_{ij} = \gamma (X_\infty \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} - X_{ij} \dot{p}) \quad (5)$$

式中、 R_∞ 、 b 、 X_∞ 、 γ は材料定数である。ここでは、移動硬化による背応力は増分形として与えている。

クリープ変形に対しては Perrin らがフェライト鋼(0.5 Cr-0.5Mo-0.25V)に適用した式(6)を用いた⁵⁾。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} A \sinh \left[\frac{B \sigma_{eq} (1-H)}{(1-\Phi)(1-D)} \right] \frac{\sigma_{ij}^D}{\sigma_{eq}} \quad (6)$$

式中、 $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$ はクリープひずみ速度、 A 、 B は材料定数である。 H は硬化変数、 Φ は軟化変数であり、それぞれ式(7)、式(8)で与えた。

$$\dot{H} = \frac{h_c \dot{\varepsilon}_{eq}}{\sigma_{eq}} \left(1 - \frac{H}{H^*} \right) \quad (7)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{K_c}{3} (1 - \Phi^4) \quad (8)$$

硬化変数 H は、第一期クリープ領域のひずみ硬化を表し、クリープひずみの蓄積とともに零から H^* まで増加する。軟化変数 Φ は時効軟化を表し、第三期クリープ領域に影響を及ぼす。 $\dot{\varepsilon}_{eq}^c$ は相当クリープひずみ、 h_c 、 H^* 、 K_c は材料定数である。

弾粘塑性損傷解析において、材料損傷は延性損傷、疲労損傷およびクリープ損傷の和であると仮定し、式(9)を用いて算出した。

$$\dot{D} = \dot{D}_p + \dot{D}_f + \dot{D}_c \quad (9)$$

式中、 \dot{D}_p は延性損傷変化率、 \dot{D}_f は疲労損傷変化率、 \dot{D}_c はクリープ損傷変化率である。

延性損傷および疲労損傷における損傷発方程式は、ニオブ合金を粘塑性損傷体と仮定し式(10)、(11)を用いた。ここでは、延性損傷について、現在の相当粘塑性ひずみの値がそれまでに履歴した同ひずみの最大値を超えた場合のみ損傷が進展する。

$$\dot{D}_p = \left(-\frac{Y}{S_{p1}} \right)^{S_{p2}} \dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} \quad (\varepsilon_{eq}^{vp} \geq \varepsilon_{eq}^{vp MAX} \text{ の場合}) \quad (10)$$

$$\dot{D}_f = \left(-\frac{Y}{S_{f1}} \right)^{S_{f2}} \dot{p} \quad (11)$$

ここに、

$$Y = \frac{1}{2E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3} (1+\nu) \sigma_{eq}^2 + 3(1-2\nu) \sigma_H^2 \right] \quad (12)$$

式中 S_{p1} 、 S_{p2} は延性損傷強度材料パラメータ、 S_{f1} 、 S_{f2} は疲労損傷強度材料パラメータ、 $\varepsilon_{eq}^{vp MAX}$ はそれまでの履歴における相当粘塑性ひずみの最大値、 Y はひずみエネルギー密度解放率、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 σ_H は静水圧応力である。

クリープ損傷における損傷発方程式は式(13)を用いた⁵⁾。

$$\dot{D}_c = CN \dot{\varepsilon}_{eq} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{eq}} \right)^\lambda \quad (13)$$

ここに、

$$N = 1, \quad (\sigma_1 \geq 0) \quad (14)$$

$$N = -1, \quad (\sigma_1 \leq 0) \quad (15)$$

すなわち、最大主応力 σ_1 が引張と圧縮の場合共に(13)に従いクリープ損傷は進展すると仮定した。式中、 C と λ は材料定数である。

3. クリープ試験結果と材料定数同定

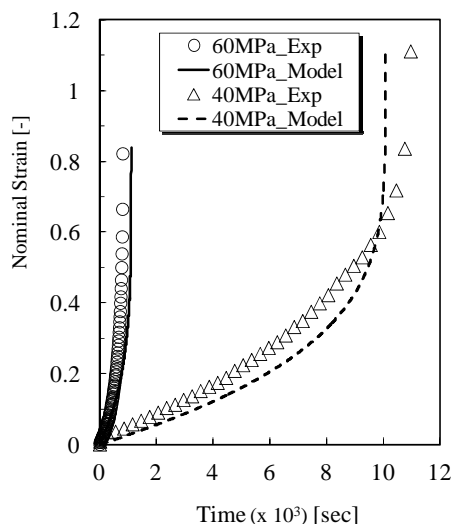
ニオブ合金材 (C103) から平板のクリープ試験片 (幅: 3 mm, 厚さ: 3 mm, 平行部: 6 mm) を製作し, クリープ試験を実施した. 試験環境は 1500°C, アルゴンガス中である. 荷重は試験中一定とし, 2 種類の応力条件の試験 (40 および 60MPa) を実施した. 試験片の変位は CCD カメラによる伸び計により計測した. 第 1 図にクリープ試験で得られたクリープ曲線 (ひずみの時間履歴) について, 実験結果 (図中 Exp と記載) と 2 章の構成方程式を用いて得られた解析結果 (図中 Model と記載) を示す. 構成方程式で使用される材料定数の同定に際しては, クリープ曲線に関する計算結果と実験結果が良好に一致するように, 試行錯誤的反复を行い材料定数を決定した. 実験結果から, 第一期クリープ領域はほとんど見られず第二期および第三期クリープ領域が支配的な傾向が見られた. 2 種類の応力条件について, 解析結果は第 1 表に示す材料定数により実験結果を良好に再現している. 本解析では, 損傷発展に伴う D の値の増加により第三期クリープ領域を良好に再現したことから, 軟化を表現するために式(8)で使用する材料定数の値を零と仮定し材料定数を削減した.

4. クリープ疲労解析

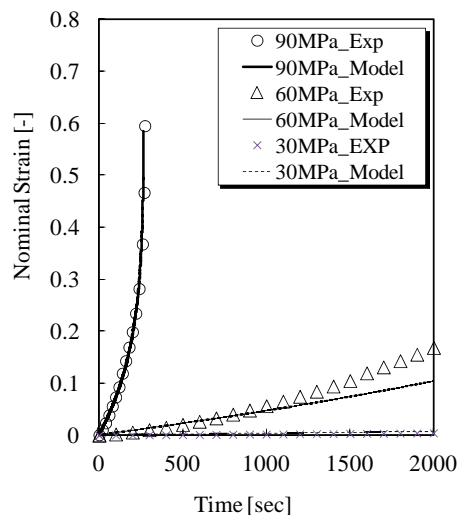
ニオブ合金材 (C103) から平板の疲労試験片 (幅: 10 mm, 厚さ: 3 mm, 平行部: 30 mm) を製作し, 3 種類の異なる応力範囲(0-30,60,90 MPa)でクリープ疲労試験を実施した. 試験環境は 1500°C, 真空中である. 試験は荷重制御とし, 1Hz の正弦波で荷重を与えた. 試験片が未破断の場合は, 最大 2000 サイクルで試験を打ち切った. 第 2 図にクリープ疲労試験で得られたひずみの時間履歴について, 実験結果 (図中 Exp と記載) と 2 章の構成方程式を用いて得られた解析結果 (図中 Model と記載) を示す. クリープ疲労解析で使用した材料定数を第 1 表にまとめて示す. 実験結果が示すように, 引張側に応力サイクルを与えると, 主にクリープ変形によりひずみが正側に進展する. 解析結果は応力サイクルによるひずみの増加と応力範囲の違いによるひずみ増加量の違いをよく再現している. 第 2 表に応力範囲: 0-90MPa の試験に関するクリープ疲労の破断サイクル数に関する実験結果と疲労寿命の解析結果を示す. クリープ疲労寿命の実験結果と解析結果についてほぼ同等の結果が得られた. 一方, 破断時の損傷度について, 解析結果はクリープ損傷が支配的であり, 延性損傷および疲労損傷がほとんど進展しない結果となった.

5. 結言

本研究では, ニオブ合金材 (C103) について, 1500°C の超高温環境でクリープ試験, を実施し得られた実験結果に基づいて損傷力学モデルを同定した. また, クリープ疲労試験を実施し, 構成方程式および同定した材料定数をそのまま用いてクリープ疲労解析を実施した. その結果, ひずみ履歴およびクリープ疲労寿命を良好に再現できており, 本手法の有効性を確認した.



第1図 クリープ曲線の同定結果



第2図 クリープ疲労解析結果
(ひずみの時間履歴)

第1表 解析で使用了材料定数

A [sec ⁻¹]	1.15×10^{-6}	B [MPa ⁻¹]	0.10
h_c [MPa]	4.0×10^3	H^*	0.05
K_c	0	C	0.7
λ	1	E [GPa]	81.3
ν	0.3	σ_y [MPa]	75
R_∞ [MPa]	8	b	3
X_∞ [MPa]	8	γ	12
K [GPa]	50	n	1
S_{p1} [MPa]	1.3	S_{p2}	1.0
S_{f1} [MPa]	125	S_{f2}	1.0

第2表 クリープ疲労寿命の
実験および解析結果

D_{cr}	0.41	D_c^*	0.41
Cycles to Failure (Experiment)	273	D_f^*	0.12×10^{-4}
Cycles to Failure (Model)	267	D_p^*	0.12×10^{-2}

参考文献

- 1) Schoenman, L.: 4000°F Materials For Low Thrust Rocket Engines, 29th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1993, AIAA 93-2406.
- 2) Ohtsuka, M., Hotta, D., Yoshioka, T., Narita, T., Nagata, T., Masuda, I. and Masuoka, T.: Development of Self-Mending Coating System on Nb and Nb-based Alloys, International Symposium on High-temperature Oxidation and Corrosion, 2014, pp. 221-224
- 3) Lemaitre, J.: A Course on Damage Mechanics, 2nd ed., Springer, 1996, pp. 1-228.
- 4) 都井 裕, : 計算固体力学入門, コロナ社, 2008, pp. 1-153
- 5) Perrin, I.J. and Hayhurst, D.R.: Continuum Damage Mechanics Analyses of type IV Creep Failure in Ferritic Steel Crossweld Specimens, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 76, 1999, pp. 599-617.