IN100 合金におけるクリープき裂成長抵抗向上に及ぼすき裂の分岐効果

The effect of branch-cracking behavior on the development of creep crack growth toughness for IN100 alloy

○南雲佳子・東北大院

Yoshiko Nagumo,
Graduate school of Engineering, Tohoku University, Sendai

杉浦隆次・東北大工

Ryuji Sugiura,
Graduate school of Engineering, Tohoku University, Sendai

横堀壽光・東北大工

A. Toshimitsu Yokobori, Jr.,
Graduate school of Engineering, Tohoku University, Sendai

伊藤雄介・東北大院

Yusuke Ito,
Graduate school of Engineering, Tohoku University, Sendai

Key Words: IN100, RNOD, Creep deformation, Creep damage, FEM

1. 緒言

ジェットエンジンに使用されている高温耐熱材料であるNi基超合金 IN100 は, Ni を主体に Cr, Mo, W など置換型に固溶した母相である γ 相に, Ni_3Al を基本組成とする立方体状の γ' 相を析出させて, 高い高温強度を示す¹⁾. そのため, γ 相析出強化組織に依存したクリープ変形挙動および複雑なき裂成長挙動を示すことが知られている²⁾.

本研究では, Ni 基超合金 IN100 を用いた In-situ 観察クリープき裂成長試験および FE-SEM/EBSD 観察により損傷形成挙動とき裂成長挙動の観察を行った. また, クリープき裂成長抵抗向上に及ぼすき裂の分岐効果を明らかにするために, 実験から得られたき裂成長経路を模した解析モデルを用いて二次元弾塑性・クリープ有限要素法解析を行った.

2. 実験方法

2.1. 供試材および試験片

供試材として, 多結晶 Ni 基超合金 IN100 を用いた. 本材料の化学組成, 機械的性質を Table 1 および 2 に示す. また, 試験片は厚さ 1.5mm, 幅 4mm の平板試験片の平行部に深さ 0.25mm の V 型切欠きを両側に有した DEN 試験片を用いた. 試験片形状および寸法を Fig. 1 に示す.

2.2. 試験方法および試験条件

試験機は, In-situ 観察機構を有した高温クリープ・疲労試験機を用いた. 本試験機は, 光学顕微鏡と CCD カメラにて, 炉下部より試験片切欠き近傍の変形および損傷形成挙動をリアルタイムに観察することができる. 試験条件は, 試験温度 $T=900^\circ\text{C}$, 負荷応力 $\sigma_g=327\text{MPa}$ のクリープ条件である. 同条件において 2 回の試験を実施した.

3. 実験結果

2 本の試験片を用いて $T=900^\circ\text{C}$, $\sigma_g=327\text{MPa}$ の条件下でクリープき裂成長試験を実施した. その結果, クリープき裂成長寿命は約 84hr, 111.7hr と相違した. 84hr に対応する試験片を No.1, 111.7hr に対応する試験片を No.2 とし, 以下に実験結果を示す.

3.1. In-situ 観察による高温クリープ損傷・き裂成長機構

高温クリープ試験中に得られた切欠き近傍の In-situ 観察画像より切欠き開口変位を計測し, 試験片の伸びの指標である相対切欠き開口変位(Relative Notch Opening Displacement, RNOD)と時間の関係について整理した結果を Fig. 2 に示す. RNOD は任意時間の切欠き開口変位量を荷重負荷直後の初期切欠き開口量で除した相対切欠き開口量である.

Fig. 2 の(a), (b), (c)の時点における No.1 試験片の切欠き近傍

の In-situ 観察結果を Fig. 3 に示す. Fig. 3(a)に示す荷重負荷直後の切欠き近傍においては, 損傷は確認されなかった. Fig. 3(b) に示す定常領域後半では, 切欠き延長方向から 45° 方向に損傷が形成されるのが確認できた. また, Fig. 3(c) に示す加速領域では, Fig. 3(b)で確認された損傷領域が拡大し, 最終破断に到った.

同温度, 応力条件下で行った No.2 試験片に関しては, In-situ 観察による損傷は, 破断まで明確には観察できなかった. そこで, No.2 試験片について, 定常領域($t/t_f=0.46$)で中断試験を実施し, 詳細な FE-SEM/EBSD 解析を試験片板幅全域にわたって行った.

Table 1 Chemical composition of IN100 in wt %

C	Cr	Co	Mo	Ti
0.18	10.00	15.00	3.00	4.70
Al	B	Zr	V	Ni
5.50	0.01	0.06	0.90	Bal.

Table 2 Mechanical properties

Temp. ($^\circ\text{C}$)	Tensile stress (MPa)	0.2% proof stress (MPa)	Elongation(%)
25	918	781	5.9
	1000	787	8.0
732	1026	861	7.3
850	858	605	5.9

Fig. 1 The geometry and size of a DEN specimen

Fig. 2 Characteristic of creep deformation

3.2. FE-SEM/EBSD 観察による高温クリープ・き裂成長機構

No.2 試験片について、定常領域($t/t_f=0.46$)で中断試験を実施し、試験片板幅全域にわたる FE-SEM/EBSD 解析を実施した。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(i)は、試験片表面の結晶粒方位を色別に表示したマップ、(ii)は結晶方位差の強度を色別に表示したマップであり、損傷が生じると結晶方位の差が大きくなると考えられ、この位置で微視的損傷が形成されていると考えられる。マップではこの箇所は濃い赤色を示す。Fig. 4(i), (ii)の結果より、結晶方位差の大きい箇所、つまり、損傷形成位置は、結晶粒界であることが示された。また、損傷形成領域は、切欠き先端部のみならず試験片全体に分布していることがわかった。

3.3. き裂成長経路観察

両試験片におけるき裂成長経路観察結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(i)に示す No.1 試験片のき裂成長経路観察結果より、No.1 試験片のき裂は、Fig. 3 の In-situ 観察結果で見られた切欠き延長方向に対して 45° 方向の損傷に沿って成長し、その後試験片中央部に生じたき裂と連結し破断に到った。主き裂の発生は $t/t_f=0.81$ 以降の加速領域であった。また、Fig. 5(ii)に示す No.2 試験片のき裂成長経路観察結果より、Fig. 4 で観察された粒界き裂が連結し、最終破断に到ったと考えられる。また、主き裂の発生は見られないが、同じく $t/t_f=0.8$ で RNOD において加速特性の発現が確認できる。

以上のことより、IN100 のクリープき裂は、最終破断に関わる巨視的なき裂が寿命の後半域に生じ、急速成長することが示された。この巨視き裂の発生前には、材料組織強化機構により分岐微視き裂が発生しており、これにより巨視き裂の発生が抑制され、最終破断領域においては、これらが急速に連結したと考えられる。以上のことから本材料では、初期き裂成長に特徴づけられるクリープき裂発生寿命の特定が破壊寿命の予測に重要となる。

4. クリープき裂初期成長抵抗に関する力学的考察

上述の実験結果で明らかとなったクリープき裂初期成長抵抗に及ぼすき裂の分岐効果について、ペナルティ関数を用いた節点開放型二次元弾塑性・クリープ有限要素法解析を実施し、力学的考察を行った。力学的解析モデルの一例として Fig. 6 に示す No.1 試験片のき裂成長経路(45° 斜めき裂)を考えた。その FEM 解析モデルを Fig. 7 に示す。Fig. 8 に示す解析結果より得られた切欠き開口変位特性より、 45° 方向への斜めき裂は、直線き裂成長モデルの解析結果と比較して、切欠き開口変位速度は抑制され、長寿命を示すことがわかった。また、Fig. 9 に示す損傷領域分布の解析結果より、高クリープひずみ領域は、斜めき裂先端から切欠き延長方向に広く分布することが示され、これは Fig. 6 の A として示したクリープ損傷形成位置と対応することが示された。

また、切欠き延長方向に形成されたクリープ損傷領域内で、き裂が発生すると 45° の斜めき裂と連結し、急速破壊に到ると考えられる。

5. 結言

- 1) IN100 合金のクリープき裂の初期成長の抑制とそれに続く最終急速破壊の挙動が明らかとなった。これにより、IN100 合金のクリープ寿命予測には、き裂発生寿命の特定が重要となる。
- 2) FEM 解析により初期き裂成長の抑制効果と最終急速破壊に至る損傷形成機構が示された。

謝辞

本研究は、独立行政法人 物質・材料研究機構との NIMS 学独連携研究プロジェクト(2008)の一環として行われたことを付記する。

参考文献

- 1) H. Harada, T. Yokokawa, Materia Japan, 42-9 (2003) pp.621-625
- 2) H. Takeuchi, A. T. Yokobori, Jr., S. Hosono, D. Kobayashi and K. Sato, J. Japan Inst. Metals, Vol. 71, No. 5 (2007), pp.452-457

Fig. 3 In-situ observational results (No.1 specimen)

Fig. 4 EBSD observational result of No.2 specimen at $t/t_f=0.46$

Fig. 5 Creep crack growth path

Fig. 6 Illustration of crack growth in 45°

Fig. 7 Analytical model for FEM analysis

Fig. 8 FEM analytical results of crack opening displacement

Fig. 9 Regions of creep and unloading obtained by FEM analysis for a running oblique crack.