ハステロイ XR のクリープ構成式の定式化*
(900 および 950°C の場合)菊 地 賢 司^{*1}, Heinz-Josef PENKALLA^{*2}, 西 宏^{*1}Creep Constitutive Equation in Hastelloy XR
(For Cases of 900 and 950°C)

Kenji KIKUCHI, Heinz-Josef PENKALLA and Hiroshi NISHII

A creep constitutive equation in Hastelloy XR was developed at 900 and 950°C, following the previous report at 850°C. In the equation, the inelastic strain rate is written in the form of a flow equation of the Norton-Bailey type and the hardening during deformation under various loads is induced by an internal stress which is subdivided into back stress and friction stress. Parameters were determined by the deformation properties for creep under constant stress conditions at each temperature. In order to confirm the validity of these constitutive equations deformation curves and/or strain rate under creep, stress dip, stress relaxation and tensile tests were compared with the calculated results. The results showed good agreement at 900 and 950°C, respectively. Finally the temperature dependence of two internal parameters q_0 and λ defined as a function of applied stress was discussed to determine those properties given to Hastelloy XR whose boron content was controlled to improve the creep resistance at high temperatures.

Key Words: Creep, Constitutive Equation, Hastelloy XR, Internal Stress, Back Stress, Friction Stress, Stress Dip, Stress Relaxation, Tensile Test

1. 緒 言

ニッケル基耐熱合金ハステロイ XR を構造材料として使用するため、非線形解析に用いる構成式を新粘弾性材料モデルに基づいてすでに 850°C の場合について定式化した⁽¹⁾。この構成式では、一次および二次クリープ領域において非弾性ひずみ速度を内部応力を含む Norton-Bailey 形⁽²⁾のべき乗則で表し、内部応力を背応力と摩擦応力に分離し、含まれる材料定数を応力一定のクリープ試験データより決定する。ORNL モデルの流れ則中のしきい値⁽³⁾⁽⁴⁾を必要としないこと、内部応力を直接測定する必要がないこと、並びに材料定数の決定が明りょうであるため再現性があることに特徴がある。構成式中には、負荷応力に依存する二つの重要なパラメータ λ と q_0 がある。 λ は一次クリープの期間または一次クリープ中のひずみ量を規定し、 q_0 は内部応力に含まれる保存力と散逸力の比率を定めている。保存力は荷重負荷による誘起応力であり、荷重を除去すれば消失するが散逸力が残る。

そこで、本研究では温度がさらに高い 900, 950°C の場合について構成式の導出を試みた。すなわち同じ材料を用いて 900°C の高温変形を表すパラメータを定め、850°C の場合と併せてパラメータの温度依存性を検討した。この材料は含有ホウ素量をコントロールし、延性と強度を高め最小クリープ速度を抑えたハステロイ XR⁽⁵⁾である。さらに、ホウ素量をコントロールしていないハステロイ XR (以下、ハステロイ XR* と記す) をとりあげ、950°C の構成式も併せて導出し、ハステロイ XR とのパラメータ特性の相違を検討した。

2. クリープ構成式

すでに定式化した構成式は、以下の式で表される新粘弾性材料モデルに基づく。

$$\dot{\epsilon}_{in} = K(\sigma - \sigma_i)^N \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_i = \sigma_b + \rho \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\dot{\epsilon}_{in}$ は非弾性ひずみ速度、 K は材料定数、 σ は負荷応力、 σ_i は内部応力、 σ_b は背応力、 ρ は摩擦応力である。単軸クリープ試験では σ_b は一次クリープ領域で増加し、二次クリープ開始点で定常値 σ_b^* になる。背応力の速度は現在値 σ_b と σ_b^* の差、並びにひずみ速度 $\dot{\epsilon}^*$ に独立に比例すると仮定する。

$$\dot{\sigma}_b = \lambda \dot{\epsilon}^*(\sigma_b^* - \sigma_b) \quad \dots\dots\dots (3)$$

* 原稿受付 1996 年 9 月 13 日。

^{*1} 正員, 日本原子力研究所 (〒319 11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)。^{*2} Forschungszentrum Jülich GmbH, FZ (GERMANY)。

Table 1 Material properties in Hastelloy XR at 900°C

σ (MPa)	$\dot{\epsilon}_{init}$ (1/h)	t_p (h)	t_f (h)	ϵ_f (%)
45	7.365×10^{-4}	332	983	33.8
58	3.060×10^{-3}	129	267	40.9
78	8.909×10^{-3}	25	60.2	53.0
100	3.862×10^{-2}	8	18.6	65.9
120	1.175×10^{-1}	3	6.4	70.3

 $\sigma_y = 187.9 \text{ MPa}, E = 94 \text{ GPa}.$

Table 2 Material properties in Hastelloy XR* at 950°C

σ (MPa)	$\dot{\epsilon}_{init}$ (1/h)	t_p (h)	t_f (h)	ϵ_f (%)
24	5.965×10^{-4}	434	1222	37.4
41	5.308×10^{-3}	50	164	41.7
49	9.191×10^{-3}	30	77	44.8
62	2.997×10^{-2}	15	31	66.5
78	8.852×10^{-2}	5.0	10.1	59.7
92	1.748×10^{-1}	2.5	5.0	71.5

 $\sigma_y = 143.7 \text{ MPa}, E = 72.0 \text{ GPa}.$

λ は応力に依存するパラメータ, $\dot{\epsilon}^*$ はクリープひずみ硬化則の場合には $\dot{\epsilon}_{in}$ (非弾性ひずみ速度), また全ひずみ硬化則では $\dot{\epsilon}_{tot}$ (全ひずみ速度) になる. 負荷応力に対する内部応力を保存力と散逸力に関連づけるパラメータが q_o であり, 次式となる.

$$\sigma_b = (1 - q_o) \sigma_i \quad (4)$$

$$\rho = q_o \sigma_i \quad (5)$$

σ_b が定常値 σ_b^* に到達すると内部応力も定常値 σ_i^* になる.

$$\sigma_b^* = (1 - q_o) \sigma_i^* \quad (6)$$

このとき非弾性ひずみ速度は最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{min}$ となる. 最小クリープひずみ速度を式(7)で与えると σ_i^* は式(8)となる.

$$\dot{\epsilon}_{in} = A \sigma^m \exp(a \sigma^b) \quad (7)$$

$$\sigma_i^* = \sigma - (A/K)^{1/N} \sigma^{m/N} \exp\{(a/N) \sigma^b\} \quad (8)$$

ハステロイ XR の最小ひずみ速度は Norton 則で記述できるので, σ_i^* は以下の式で表される.

$$\dot{\epsilon}_{in} = A \sigma^m \quad (7)'$$

$$\sigma_i^* = \sigma - (A/K)^{1/N} \sigma^{m/N} \quad (8)'$$

A は材料定数である. 材料定数 K と N の関係は, 降伏応力 σ_y 以上の応力では, 内部応力の定常値 σ_i^* は増加しないことから次の境界条件式で決定できる.

$$\frac{d\sigma_i^*}{d\sigma} = 0, \quad \sigma \geq \sigma_y \quad (9)$$

$$K = A(m/N)^{-N} \sigma^{m-N} \quad (10)$$

応力履歴のない材料では, 時刻零で $\sigma_b = 0$ となり, 内部応力が散逸力だけになることから, 非弾性ひずみ

Table 3 Parameters of material model for Hastelloy XRs

Temperature	850 (°C)	900 (°C)	950 (°C)
Material	Hastelloy XR	Hastelloy XR	Hastelloy XR*
N	1.8	1.1	1.4
K	2.8955×10^{-4}	2.7782×10^{-2}	4.4696×10^{-4}
a_{qo}	0.4393	0.2602	0.2241
a_{q1}	-1.3956	-2.2878	-0.9153
$a_{\lambda 0}$	12.26	594.67	103.49
$a_{\lambda 1}$	6.4759×10^{-4}	-7.8160×10^{-1}	-5.0559×10^{-2}
$a_{\lambda 2}$	-2.0028×10^{-5}	3.3505×10^{-4}	2.4541×10^{-4}

速度の初期値 $\dot{\epsilon}_{init}$ は

$$\dot{\epsilon}_{init} = K(\sigma - \rho)^N \quad (11)$$

となり, q_o は次式となる.

$$q_o = [\sigma - (\dot{\epsilon}_{init}/K)^{1/N}] / \sigma_i^* \quad (12)$$

$q_o = g(\sigma)$ と $\lambda = h(\sigma)$ の応力依存性は前報⁽¹⁾で考察して得られた次の関数をここでも用いる.

$$g(\sigma) = 1 - a_{q0} \exp(a_{q1}/X), \quad X = \sigma/\sigma_y \quad (13)$$

$$h(\sigma) = a_{\lambda 0} \exp(a_{\lambda 1} \sigma + a_{\lambda 2} \sigma^2) \quad (14)$$

構成式に必要な未定係数は 7 個で, これらは定応力クリープ試験から得られる初期非弾性ひずみ速度, 最小クリープひずみ速度, 一次クリープの期間より定めることができる. 900°C におけるハステロイ XR および 950°C におけるハステロイ XR* の初期ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{init}$, 一次クリープの期間 t_p とともに, 破断時間 t_f , 破断ひずみ ϵ_f をそれぞれ表 1, 2 に示す. 900°C におけるハステロイ XR の最小クリープ速度は $\dot{\epsilon} = A \sigma^m$, $A = 1.976 \times 10^{-14}$, $m = 6.083$, 950°C におけるハステロイ XR* の最小クリープ速度は $\dot{\epsilon} = A \sigma^m$, $A = 4.589 \times 10^{-11}$, $m = 4.758$ と表された. ここに $\dot{\epsilon}$ の単位は h^{-1} , σ は MPa である.

σ_y は降伏応力, E はヤング率である.

境界条件式を満たす N と K の値より最適値を選ぶ方法は前報⁽¹⁾と同じ $\sigma_{b,off}$ の二乗の総和 F を最小にする条件とした. $\sigma_{b,off}$ は式(12)で求めたある N に対する q_o の値 $q_{o,N}$ と式(13)で近似した $q_{o,int}$ より計算される.

$$F = \sum \sigma_{b,off}^2 = \sum \{ (1 - q_{o,int}) - (1 - q_{o,N}) \}^2 \sigma_i^* \quad (15)$$

計算の結果, 900°C における N の最適値を 1.1, ハステロイ XR*, 950°C に対する値を 1.4 と決定した. 900°C, 950°C における 7 個の係数を 850°C の場合と比較するためまとめて表 3 に示す.

3. 計算例

荷重荷形式に対応した応力, ひずみの変形挙動は

次式で計算される。

定応力クリープ変形：

$$\dot{\epsilon}_{tot} = \dot{\epsilon}_{in} = K\{\sigma - (\sigma_b + \rho)\}^N \dots\dots\dots (16)$$

定荷重 (σ_0 : 初期応力) クリープ変形：

$$\dot{\epsilon}_{tot} = K \left\{ \frac{\sigma_0 \exp(\epsilon_{in})}{E} + 1 \right\} \{\sigma - (\sigma_b + \rho)\}^N \dots\dots\dots (17)$$

応力緩和：

$$\dot{\sigma} = -EK\{\sigma - (\sigma_b + \rho)\}^N \dots\dots\dots (18)$$

引張変形 (全ひずみ速度一定)：

$$\dot{\sigma} = E[\dot{\epsilon}_{tot} - K\{\sigma - (\sigma_b + \rho)\}^N] \dots\dots\dots (19)$$

3・1 ハステロイ XR, 900°C の場合 定応力クリープ変形 ($\sigma = 45, 58, 78, 100, 120$ MPa) の実験と計算

結果を図 1～5 に示す。これらの変形曲線は本構成式のパラメータを決定する基礎データであった。いずれの応力でも変形の加速域を除く一次+二次クリープ領域で高温変形挙動を良く表すようにモデルのパラメータが決定されていることがわかる。これらの解析では式(15)の $\sigma_{b,off}$ を σ_b の初期値とした。図 6 の変形曲線、図 7 のひずみ速度の時間変化は定応力クリープ試験開始後 30 時間で 78 MPa から 68 MPa に応力を急減した試験結果である。応力変化による非弾性ひずみ値および非弾性ひずみ速度は計算結果と良く一致していることがわかる。図 8 は初期応力が 90 MPa の荷重一定のクリープ変形曲線であり、負荷応力値は変形と

Fig. 1 Creep deformation under constant stress loading 45 MPa

Fig. 4 Creep deformation under constant stress loading 100 MPa

Fig. 2 Creep deformation under constant stress loading 58 MPa

Fig. 5 Creep deformation under constant stress loading 120 MPa

Fig. 3 Creep deformation under constant stress loading 78 MPa

Fig. 6 Creep deformation for stress dip test : stress was changed from 78MPa to 68 MPa at a time of 30 h

ともに連続的に変化する。この構成式が記述可能な変形の加速域を除いた領域で、計算値は実験値にほぼ一致する結果を得た。図9は初期応力が68 MPaの荷重一定のクリープ変形曲線である。図8の場合とは異なり σ_b の初期値が非零の場合を示している。計算による予測値が実験値からずれたため、 σ_b の初期値をパラメータにして計算した結果、 -0.15 MPaで実験に一致した。高温クリープ変形に影響を及ぼす応力履歴を σ_b の初期値で記述可能なことを示唆するとも考えられる。図10と図11に変形期間中の σ_b および ρ の変化を例示した。 σ_b は変動幅が小さく、変形は σ_b の値に敏感に反応した。これに対し、 ρ の値は大きく変

動幅も大きい。

3・2 ハステロイ XR*, 950°Cの場合 ハステロイ XR*, 950°Cの定応力クリープ変形($\sigma=24, 41, 49, 62, 78, 92$ MPa)の実験結果と計算結果を図12~17に示す。これらの変形曲線は構成式のパラメータを決定した基礎データであり、解析では式(15)の $\sigma_{b,off}$ を σ_b の初期値としたことはハステロイ XRの場合と同様である。やはりいずれの応力でも変形の加速域を除く領域で高温変形挙動を良く表すようにパラメータを決定したことがわかる。

定荷重クリープ変形曲線の実験と計算結果の比較を図18と図19に示す。初期応力20 MPaを負荷した図

Fig. 7 Inelastic strain rate for stress dip test: stress was changed from 78 MPa to 68 MPa at a time of 30 h

Fig. 10 Back stress developed during a constant loading: initial stress loading is 68 MPa

Fig. 8 Creep deformation under constant loading: initial stress loading is 90 MPa

Fig. 11 Friction stress developed during a constant loading: initial stress loading is 68 MPa

Fig. 9 Creep deformation under constant loading: initial stress loading is 68 MPa

Fig. 12 Creep deformation under constant stress loading 24 MPa

Fig. 13 Creep deformation under constant stress loading 41 MPa

Fig. 14 Creep deformation under constant stress loading 49 MPa

Fig. 15 Creep deformation under constant stress loading 62 MPa

Fig. 16 Creep deformation under constant stress loading 78 MPa

18 の場合, 図 9 の場合と同様に σ_b の初期値が零でない場合を示している。実験値にほぼ一致するのは, σ_b の初期値が -0.1 MPa の場合であった。初期応力が 24 MPa の図 19 では計算による予測値は実験に一致した。図 20 は, 全ひずみ速度を一定にして引張試験を行ったときの全ひずみと応力の関係を示す。計算例は 2%/h $\sim$ 100%/h であり, 実験値は丸棒試験片を平行部 30 mm に換算して 20%/h でクロスヘッド制御の引張試験結果である。計算による予測とほぼ一致している。図 21 は, 初期応力 190 MPa の応力緩和曲線を示す。950°C における応力緩和は急速であり, 初めの約 10 s で応力は急激に緩和し 300 s 後には 30 MPa

Fig. 17 Creep deformation under constant stress loading 92 MPa

Fig. 18 Creep deformation under constant loading: initial stress loading is 20 MPa

Fig. 19 Creep deformation under constant loading: initial stress loading is 24 MPa

Fig. 20 Stress-strain curves in tensile tests

Fig. 21 Stress relaxation during a dwell period: initial stress is 190 MPa

に減少することを計算値は精度良く予測していることがわかる。

4. q_0 と λ の温度依存性

q_0 と σ/σ_y , λ と σ の関係を図 22 と図 23 に示す。含有ホウ素量をコントロールし延性と強度を高め、クリープ変形速度を抑えたハステロイ XR では温度が 850°C から 900°C に上昇すると、パラメータ q_0 値はほぼ 1 となりクリープ変形抵抗の散逸力である摩擦応力 ρ が内部応力の大部分を占めることがわかる。この散逸力は粒界すべり、拡散機構、転位の運動、析出物に起因すると考えられる。これに対し、ハステロイ XR* の場合は 950°C の場合でもハステロイ XR の 850°C と 900°C の中間の特性を示しハステロイ XR とはやや異なる傾向を示した。これは q_0 の応力依存性を式 (13) の関数で表したときの応力指数 N の値が、表 3 に示すようにハステロイ XR の場合には温度が 850°C から 900°C に上昇すると N が 1.8 から 1.1 に減少したのに対し、950°C ハステロイ XR* では 1.4 となったことと関連する。パラメータ λ は 850°C のハステロイ XR に比べて、900°C のハステロイ XR および 950°C のハステロイ XR* は低応力側で急激に λ が大きくなっている。 λ は間接的に構成式中の K と N の値に依存しているので一次クリープの期間を直接比較することはで

Fig. 22 Parameter q_0 vs. normalized stress σ/σ_y Fig. 23 Parameter λ vs. stress σ

きないが、900、950°C の場合には λ が低応力側で大きく一次クリープの期間が応力の低下につれて相対的に短くなることがわかる。

5. 結 言

定応力クリープ変形特性より材料定数を決定し内部応力を二つの内部変数として取扱う新粘弾性材料モデルに基づいて、ハステロイ合金のクリープ構成式を 900°C、950°C の場合について定式化し、本構成式が定応力クリープ、定荷重クリープ、応力急減、応力緩和、引張りの各応力履歴に対応する時間依存形の材料変形挙動を記述できることを確認した。ここでは単軸応力に対して定式化したが、実際への応用では多軸応力に拡張する必要がある。今後の課題と考える。

文 献

- (1) Penkalla, H. J., 菊地賢司, 新粘弾性材料モデルに基づく非線形構成式の定式化, 機論, **62**, 593, A (1996), 162-167.
- (2) Riedel, H., *Fracture at high Temperatures*, (1986), 3-13, Springer Verlag.
- (3) Robinson, D. N., *Nucl. Eng. Des.*, **83** (1984), 389-396.
- (4) Blass, J. J., Corum, J. M. and Chang, S. J., *Proc. of the Workshop on Structural Design Criteria for HTR*, Jul-Conference 71, (1989), 206-224.
- (5) Kurata, Y., Sato, K., Nakanishi, T., Sahira, K. and Kondo, T., *Improvement of Creep Resistance of a Ni base Superalloy and its Weld Metal by Controlling Boron Content*, *Int. Conf. on Creep*, (1986), 97-102.