

the mechanisms of creep and creep fracture is already in place and there is opportunity for detailed physical modelling to assist the prediction of behaviour in practical situations.

Creep Deformation of Engineering Alloys—Developments from Physical Modelling— (Review)

By B. F. DYSON *et al.*

Differences in the creep behaviour of particle-strengthened engineering alloys relative to simple solid solutions are reviewed and their implications for the mechanisms of high temperature deformation in these materials are considered. Constitutive equations describing the shapes of creep curves, based on physical models of the important types of damage are considered. These are incorporated in a computer software package, designated CRISPEN, that allows the analysis of creep data, the development of a database of model parameters and the simulation of the strain/time trajectory for arbitrary loading conditions. Examples of the application of CRISPEN to a range of alloys and loading conditions are described.

Prediction of Long-term Creep and Rupture Life

By A. PLUMTREE *et al.*

Continuum damage mechanics has been applied to develop a constitutive equation which expresses the strain time relation for the weakening effects occurring during long-term creep, caused by processes such as cavity formation and precipitate coarsening. Stress-life relations have been developed in a similar manner. This approach was found to accurately describe and predict creep curves as well as the rupture lives of low alloy steels. It is shown that long-life creep rupture and the time to achieve the minimum creep rate may be predicted satisfactorily from short-term tests.

Prediction of Long Term Creep Curve and Rupture Life of 2.25Cr-1Mo Steel

By Koichi MARUYAMA *et al.*

本論文は、次のクリープ構成式に基づいて、2.25Cr-1Mo 鋼の長時間クリープ曲線を予測することを目的としている。

$$\epsilon = \epsilon_0 + A \{1 - \exp(-at)\} + B \{\exp(at) - 1\}$$

ここで、 ϵ_0 、 A 、 B と a は、実測クリープ曲線を最もよく再現するように決めるパラメータである。これらパラメータは応力と温度の単純な関数として表現され、低応力あるいは低温、すなわち長時間使用条件へ容易に外挿することができる。そして、外挿値を上記構成式に代入

すれば、三次域までの長時間クリープ曲線が得られる。

上記構成式から導かれる次の破断パラメータと破断寿命の間には、比例関係がある。

$$P = (1/a) \ln \{(\epsilon_r - \epsilon_0 - A)/B\}$$

ここで、 ϵ_r は破断歪みである。このパラメータを使って、破断寿命も予測できる。

このようにして予測されたクリープ曲線と破断寿命は、400 Ms (13年)までの長時間クリープ試験結果とよく一致した。

Evaluation of Long-term Creep Strength of 2.25Cr-1Mo Heat Transfer Tube in Actual Service Stress Level Range

By Masashi NAKASHIRO *et al.*

金属材料技術研究所で発行されている2.25Cr-1Mo 鋼のクリープデータシートはボイラ伝熱管の寿命評価データとして広く用いられている。本データシートは応力が30 MPa以下の低応力、10万h以上の超長時間クリープデータが含まれているので、実機使用条件での寿命評価の信頼性が高い。一方、超長時間クリープ試験は高温酸化の影響が無視できない。特に管の試験片は直径が6 mmなので、10 mmのものと比較して酸化の影響が大きく、クリープ破断時間が短めの傾向になる。本研究はクリープ試験中の酸化生成式から真応力を計算し、線形損傷則によるクリープ破断時間の修正を試みた。6 mmと10 mmの試験片による修正マスターカーブはほぼ同じになり、この修正方法は妥当であることを確認できた。ASTMとISOのデータについても検討した結果、これらのデータには酸化の影響が無いことを明らかにした。そして、NRIMの修正マスターカーブとはほぼ同じカーブになることを示した。

Creep Deformation and Creep-rupture Behavior of Cr-Mo-V Steel Forgings

By Yosikuni KADOYA *et al.*

Cr-Mo-V 鋼のクリープ変形および破壊機構を解明することを目的として、500-675°Cの温度範囲で長時間のクリープ試験を行い、クリープ変形とクリープ破断特性を調べた。さらに、破断した試験片を用いて微細組織観察を行った。得られた結果は、次の通りである。

(1)定常クリープ速度-応力線図で、500-650°Cのすべての温度領域では、応力指数が二つの値となるようにある応力レベルで定常クリープ速度の応力依存性が急変し、この遷移する応力レベルでは粒内破壊から粒界破壊へと変化する領域に対応する。

(2)瞬間塑性ひずみ開始点 (Orowan 応力とみなす) は、 $\sigma/E = 1.5-2.0 \times 10^{-3}$ と推定される。このOrowan 応力付近は、(1)項における定常クリープ速度の応力依存性が急変するところとほぼ一致している。

(3)Orowan 応力より高応力レベルでは転位組織がOrowan の bowing 機構として認められるようにダイナ

ミックに動くことにより主に転位の粒内運動の結果として結晶変形が生じる形でクリープする。また、破断延性も大きい。

(4)一方、Orowan 応力より低応力レベルでは、転位は粒子をクライムして運動し、サブグレインを形成しながら変形が起こる。そして、クリープ変形は、粒界すべりに依存する割合が増し、さらに、キャビティションを伴う粒界すべりの結果、破断延性が低下するものと考えられる。

Crack Extension

Surface Crack Propagation in Plate Specimens of 1Cr-1Mo-1/4V Turbine Rotor Steel under Creep-fatigue Condition

By Ryuichi OHTANI *et al.*

高温構造物の安全性確保のためには、クリープ疲労下の部材の破損過程を明らかにする必要がある。本論文では、蒸気タービン・ロータから切りだした 1Cr-1Mo-1/4V 鍛鋼を用いてクリープ疲労き裂伝ば試験を行い、表面き裂伝ばに対する非線形破壊力学の適用可能性を中心に検討した。まず、寸法が異なる大小 2 種類の試験片を用いて貫通き裂伝ば試験を行い、き裂伝ば速度の支配力学量としてのクリープ J 積分範囲の有効性を明らかにした。なお、弾性応力拡大係数や正味断面応力は有効なパラメータではないことが明らかになった。次に、表面き裂を有する大小 2 種類の試験片を用いてクリープ疲労試験を行った。き裂伝ば速度はクリープ J 積分範囲と良い対応関係を示し、かつ、その関係は貫通き裂伝ばの結果に一致した。さらに、同関係を基に表面き裂のクリープ疲労き裂伝ばを数値シミュレーションする方法を提案した。

Characterization of Creep Crack Growth Behaviour of 316 Stainless Steel in Terms of Microscopical Fracture Mechanism

By Masaaki TABUCHI *et al.*

高温機器部材には、潜在欠陥や疲労、応力腐食等によって生じたき裂が存在し、これらの高温での成長挙動を詳細に把握することが寿命評価において重要である。クリープ条件下では、き裂先端の応力、歪み速度はクリープ変形によって支配されるので、金属組織やクリープ損傷様式の変化は、き裂の成長挙動に影響すると考えられる。本研究は、316 ステンレス鋼について、CT 試験片を用いて、種々の温度応力条件下でクリープき裂成長試験を行い、き裂成長の微視的メカニズムとき裂成長特性との関連について検討したものである。その結果、

(1)CT 試験片のき裂先端の破壊メカニズムは、低温高応力側から高温低応力側にかけて、くさび型き裂による粒界破壊 (W-type)、粒内破壊 (T-type)、粒界キャビティの生成成長による粒界破壊 (C-type) と変化する。

(2)クリープき裂成長速度 da/dt を、非線形破壊力学パラメータ C^* で評価した結果、W-type と C-type の破壊をした条件では、T-type の破壊をしたものに比べ da/dt が 5 倍速く、 $da/dt-C^*$ 関係は破壊様式によって二群に分かれることがわかった。

Residual Life Assessment

Assessment of Remaining Life of Fossil Power Plant Parts by means of Miniature Creep Rupture Test

By Yoshikuni KADOYA *et al.*

近年火力プラントの長寿命化を図る動きが盛んであるが、プラント機器部材の寿命評価は解析計算や非破壊評価法 (NDE 法) により実施してきている。しかしながら、寿命評価精度向上の観点からは、直接部材よりサンプルを採取し、上記手法と併せて材料試験等を実施することが望まれている。そこで、サンプリングが容易にできる装置の開発を行うとともに、ミニチュア試験片を用いたクリープ試験による寿命評価法について検討した。その結果、パラメータ法および Iso-stress 法いずれの手法でもミニチュア試験片によるクリープ寿命評価が可能となり、本手法による寿命評価の見通しが得られた。さらに、サンプリング装置の開発を図ったことから本手法による新しい寿命診断技術の実用化が可能となった。今回開発したミニチュアクリープ試験法を積極的に実機へ適用し、データの蓄積を今後とも図っていきたいと考えている。

Creep Damage Evaluation for Boiler Tubes by Internally Pressurized Creep Tests

By Atsuro ISEDA *et al.*

ボイラチューブの多軸応力クリープ損傷を明らかにするために、T22 (2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo) および TP321H (18Cr-10Ni-Ti) 鋼管について、内圧および単軸クリープ試験を行った。外径測定による内圧クリープ歪みは小さいものの、内圧/単軸クリープ歪み比 (k) は、クリープ寿命比 (t/t_r) 約 0.7 までほぼ一定値で、よい相関を示した。しかし本結果では T22 鋼管が $k=0.13$ 、TP321H 鋼管が $k=0.28$ と、従来の報告に比べ小さい値であった。また、クリープ損傷形態は鋼種ごとに異なり、延性の高い T22 鋼管ではクリープ末期ですらボイドを生成せず、粒内変形主体であるのに対し、TP321H 鋼管では延性が低く、クリープ初期から管外表面に粒界クラックが認められた。これらの損傷は管外表面側が高い不均一な分布を示した。クリープ寿命比と損傷 (変形) 量の対応付けが、管外表面のレプリカ組織観察によりある程度可能であることがわかった。

Evaluation of Creep Properties of Degraded Cr-Mo-V Turbine Cast Steels through Hardness Measurement and Its Application of Life Assessment

By Kazunari FUJIYAMA *et al.*

火力発電プラントにおいて長時間使用された蒸気タービンの 1.25Cr-1Mo-0.25V 鋳鋼製ケーシング、弁およびノズルボックスにつき、クリープ特性に及ぼす時効の影響を明らかにするため、高温かつ低応力の部位から試験片を採取し、金属組織観察、硬さ計測、クリープ破断試験およびクリープ速度試験に供した。

その結果、経年使用材には、炭化物の凝集粗大化と転位組織の回復に起因すると考えられる軟化が未使用材と比較して顕著に認められた。また、軟化した材料のクリープ破断寿命は未使用材に比べて低下し、クリープ速度は上昇する傾向を示した。これらのデータ解析から、硬さとクリープ破断寿命およびクリープ速度との間には、Cr-Mo-V 鍛鋼ロータ材で得られたのと類似の定量的関係が存在することが判明した。

以上の結果をもとに、硬さ計測から時効により変化したクリープ特性を推定し、蒸気タービン鋳鋼部品のクリープ損傷評価に反映させる寿命評価法を示した。

Interaction of Creep Damage and Low Cycle Fatigue Damage in a 1Cr0.5Mo Steel

By Jan STORESUND *et al.*

Non-destructive replica studies of creep cavitation in power plant components of low alloy steels is a frequently used tool in order to estimate the remnant life. In addition to creep such components are exposed to thermal stresses and strains during start-ups and shut-downs, which can lead to fatigue damage. In order to study the role of creep-fatigue interactions, the influence of creep damage on low cycle fatigue (LCF) in a 1Cr0.5Mo steel was investigated. LCF-specimens were creep tested to 5 % elongation at 560 and 600°C resulting in carbide precipitation, bainite coarsening and a significant amount of creep cavitation. The damage development during LCF was studied using replicas for test series of pre-crept and virgin material. In addition, the influence of a hold time was investigated. The development of creep cavities and micro-cracks, as well as the amount of intergranular crack propagation were evaluated. Creep exposure resulted in a reduction of the number of cycles to failure. The relationship between this reduction and the amount of creep damage as well as the consumed creep life fraction was analysed. The

influence of softening and increased inelastic strain range due to creep exposure was also studied.

Creep Damage Simulation Test and Creep Life Assessment System for Elevated Temperature Plant Components

By Fujimitsu MASUYAMA *et al.*

実際の運転条件下でのクリープ損傷は一般に歪みをとまわずに発生、進展することが多い。そこでこのような実機で経験されるクリープ損傷を実験室で再現するためのクリープ損傷シミュレーション試験法を開発した。この試験では厚肉大径の 2¼Cr-1Mo 鋼の内外径にそれよりも熱膨張係数の大きな 18Cr-8Ni 鋼のリングを嵌合して 600°C で繰り返し加熱による熱サイクルを与えた。その結果、焼戻しマルテンサイト組織の溶接熱影響部にはサイクル数の増加に伴ってクリープポイドの発生とその連結による亀裂の発生が認められた。しかし、フェライト・パーライト組織の母材部にはこのような損傷は認められず、クリープ損傷機構とそれに基づく寿命評価法は材料の組織状態を、例えば焼戻しマルテンサイトをクリープ脆性材、またフェライト・パーライトをクリープ延性材と区別して考える必要があることを明らかにした。また最後にクリープ寿命評価システムとその運用法を提案した。

Evaluation of Creep Damage Progress by Metallogurgical Examination in Aged Power Boiler Pressure Parts

By Yuji SUGITA *et al.*

金属組織学的な手法に基づく非破壊寿命評価法の実用性を確認することを目的として、10 万 h 以上運転された火力発電用ボイラ高温耐圧部材を対象に、この手法によって 1~2 年間の運転前後の実機部材寿命評価を行うとともに、その結果を破壊試験による寿命評価結果と比較した。

この手法では、クリープ損傷の蓄積に伴う組織的な劣化を、炭化物の形状と種類の変化、合金元素の分布状況の変化およびクリープポイドの生成数の変化を定量化することによって寿命評価した。その結果、炭化物の形状を定量化した手法以外は、実機の 1~2 年間の運転期間中に蓄積されたクリープ損傷の蓄積を精度良く検出できることが確認できた。また、その結果は破壊試験の結果ともよく対応していたことから、この手法が十分実用可能な非破壊寿命評価手法であることが検証できた。さらに、破壊試験結果との比較に基づいて各手法の適用範囲について検討した。

会員には「鉄と鋼」あるいは「ISIJ International」のいずれかを毎号無料で配布いたします。「鉄と鋼」と「ISIJ International」の両誌希望の会員には、特別料金 5 000 円の追加で両誌が配布されます。