CrMoV 鋳鋼のクリープき裂進展*

佐々木良一** 志賀正男**
 幡谷文男*** 高橋慎太郎***

Creep Crack Growth in CrMoV Cast Steel

by

Ryoichi SASAKI, Masao SHIGA, Fumio HATAYA and Shintaro TAKAHASHI
 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi)

The influences of specimen geometry and temperature upon the creep crack growth rate of 1Cr 1Mo/4V steel casting have been studied. The main results obtained are summarized as follows.

(1) In the SEN specimen without side grooves, the creep crack tends to tunnel at its center, and consequently, it is difficult to measure the creep crack growth rate accurately. However, in the SEN specimen with proper side grooves, the creep crack front is kept straight during its propagation without tunneling, and it is easy to measure the crack growth rate accurately.

(2) The relation between the creep crack growth rate and temperature can be described by the equation of so-called Arrhenius type and is similar to the relation between the steady creep rate and temperature in the temperature range of the present experiment.

(Received Nov. 28, 1975)

1 結 言

クリープ条件下で使用される部材の設計許容応力は平滑クリープ破断試験およびクリープ試験データによって定められている。しかしこれらのデータでは微小欠陥（溶接割れ、铸造欠陥など）が存在する場合の構造物の破壊寿命を論ずることができない。

微小欠陥を有する高温部材の破壊寿命を論ずるためにはクリープき裂進展速度と応力または応力拡大係数との関係を求める必要があるが、クリープき裂進展に関する研究はまだ萌芽の段階であり、きわめて限られた鋼種のデータがみられるにすぎない現状である。

そこで蒸気タービンの高温ケーシングなどに広く使用されている 1Cr 1Mo 1/4 V 鋳鋼について、クリープき裂進展速度に及ぼす試験片形状および試験温度の影響を実験的に調べたので報告する。

2 実 験

2・1 供試材

Table I は供試材の組成および熱処理条件を、Table II は室温の機械的性質を示す。試験片は外径

Table I. Chemical composition (%) and heat treatment.

C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti
0.16	0.45	0.75	0.11	0.10	1.11	1.02	0.24	0.018

Normalize: 1025°C Fog. fan.
 Temper: 690°C FC

Table II. Mechanical properties.

σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.02}$ (kg/mm ²)	El. (%)	R.A. (%)	Hardness (HB)
73.2	54.3	19.7	67.5	228

1100 mmφ, 270 mm^t 厚肉鋳鋼品の中央部から接線方向に採取した。Fig. 1 には試験片の寸法を示す。Fig. 1 (a)の Single edged notch (以下 SEN と略称する) 試験片および(b)の側面溝付 SEN 試験片には、それぞれ放電加工により、10 mm および 7 mm 深さの 45°V 形状切欠きを入れた。

2・2 実験方法

一般に、疲労やぜい性破壊試験におけるき裂長さ測定は目視法（表面き裂を拡大鏡で測定する方法）によっているが、大気中クリープ試験では試験片表面が酸

* 原稿受理 昭和50年11月28日

** 正 会 員 (株)日立製作所日立研究所 日立市幸町

*** (株)日立製作所日立研究所 日立市幸町

Fig. 1. Details of the specimen.

化し、また後述のようにクリープにおいてはき裂のトンネリングが生ずるのでこの方法では測定が困難である。

そこで本報でのき裂長さは、き裂進展に伴う試験片の電気抵抗増加現象を利用した電位法により測定した。Fig. 2 は電位法によるき裂長さ測定要領および測定例を示す。き裂長さは試験片に直接通電し、き裂長さ測定電圧 V_a と基準電圧 V_0 を連続記録して、 V_a/V_0 の変化から求めた。

試験はレバー式クリープ試験機を用い、温度 538℃、566℃および600℃において一定荷重で行なった。試験温度は試験中 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内に調節した。

3 実験結果および考察

3・1 き裂進展曲線および破面

Figs. 2 および 3 はき裂長さと時間の関係を示す。き裂の発生は全クリープ破断寿命のごく初期であり、寿命の大部分はき裂進展に費やされている。538℃における Fig. 3 TP No. 11 のき裂進展が 500 hr のところで不連続になっているのは地震の影響による。

Fig. 4 はき裂前縁の状況を調べるために、き裂進展途中でクリープ試験を中断し、液体窒素で充分冷却後に強制的に破断させた試験片の破面写真を示す。SEN 試験片のき裂前縁は板厚中央部で凸となる曲線状を呈しており、表層部にはせん断縁が現われ、その領域はき裂進展につれて広がる。この板厚中央部で凸となる現象はき裂のトンネル化と呼ばれており、この原因は試験片表層部のクリープ変形による試験片厚さ方向の応力分布状態の変化および平面応力と平面ひずみ状態のき裂進展速度の相違によると考えられる。SEN 試験片のき裂進展速度は平面ひずみ状態に近い内部のほうが平面応力状態に近い表層部より著しく速いことがわかる。

Fig. 2. Crack growth curve of SEN specimen.

Fig. 3. Typical crack growth curves of side grooved specimens.

(b) SEN specimen with side grooves

Fig. 4. Appearances of fractured surfaces.

Fig. 5. Microstructure of specimen tested at 538°C.

一方、側面に適当な深さのV溝をつけた SEN 試験片のき裂進展速度は、Fig. 4 (b)の破面酸化色から、き裂前縁がき裂進展方向に垂直であり、表層部と内部がほぼ同じである。これらのことから側面溝付 SEN 試験片のき裂前縁における試験片厚さ方向の応力分布はほぼ一定であると考えられ、本実験においては、側面溝の応力拡大係数に及ぼす影響は非常に小さいと思われる。側面溝の深さが深すぎたり、溝底半径が鋭すぎると試験片表層部のほうが内部よりき裂進展速度が速くなってしまふであろう。最適溝寸法は材質によっても異なると考えられ、他の鋼種についても実験と検討が必要である。

3・2 顕微鏡観察

Fig. 5 は温度 538℃、荷重 3500 kg で1009時間試験した側面溝付 SEN 試験片のき裂の状況を光学顕微鏡で観察した結果を示す。これらの顕微鏡写真から、き裂の発生も進展も結晶粒界であることがわかる。他の試験片についても観察したが、すべて結晶粒界進展であった。き裂先端の状況からクリープき裂は、主き裂前方のある結晶粒界に微視的き裂が形成され、この微視的き裂と主き裂が連結することを繰り返しながら成長していくものと思われる。これと同じクリープき裂²⁾進展過程は18-8オーステナイト鋼でも認められている。

3・3 き裂進展速度

き裂進展速度はき裂進展曲線の接線から求めた。き裂進展速度は正味応力との関係で整理したほうがよい相関が得られる場合と、応力拡大係数とのほうがよい場合があるが、^{3,4)}構造物の欠陥評価のためには応力拡大係数で整理したほうが便利であり、本実験のようにき裂長さに比し非弾性領域が小さい条件にある単一き裂進展の場合には破壊力学の適用が可能であると考えられているので、⁷⁾本報では応力拡大係数との関係で整理した。^{8,9)}応力拡大係数の計算は次式によった。

$$K_I = Y \frac{P\sqrt{a}}{B \cdot W} \quad (1)$$

$$Y = 1.99 - 0.41 \left(\frac{a}{W} \right) + 18.70 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 38.48 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 53.85 \left(\frac{a}{W} \right)^4$$

ここで

P : 荷重, B : 試験片の厚さ,
 W : 試験片の幅

3・4 き裂進展速度に及ぼす試験片形状の影響

Fig. 6 は 566℃における SEN 試験片および側面溝付 SEN 試験片のき裂進展速度と応力拡大係数の関係を示す。初期のき裂進展速度には切欠きの影響があるものと思われるので、切欠き底から 0.5 mm までのデータは Fig. 6 に記入していない。

Fig. 6. Effect of specimen geometries on crack growth rate.

クリープき裂進展速度は応力拡大係数の関数として次式で表わされることが知られており、^{2,5)}

$$\frac{da}{dt} = AK_I^n \quad (2)$$

ここで A , n : 定数

566℃における側面溝付 SEN 試験片の平均線から(2)式における定数を求めると $A = 1.0 \times 10^{-19}$, $n = 9$ となる。

これに対し、SEN 試験片の $da/dt-K_I$ 線図は曲線となり、高 K_I 側で da/dt が側面溝付 SEN 試験片よりかなり遅くなる。これは3・2節で述べたき裂のトンネル化に原因していると考えられる。またき裂のトンネル化が起こった場合、電位法により測定されるき裂は平均長さであり、 K_I 評価に問題がある。これらのことから側面溝をつけない SEN 試験片では正確なクリープき裂進展速度データを求めるのがむずかしい。

3・5 き裂進展速度の温度依存性

Fig. 7 は側面溝付 SEN 試験片のクリープき裂進展曲線から求めたき裂進展速度 da/dt に及ぼす試験温度 T の影響を示す。この図の△⊕田印は、き裂長さが切欠き底から 0.5 mm 未満のデータであり、切欠きの影響を受け低目のき裂進展速度になっている。538℃の da/dt は 566℃の約 1/10、600℃の da/dt は 566℃の約10倍である。

Fig. 8 は応力拡大係数を一定にしたときの da/dt と試験温度の逆数との関係を示す。 $\log(da/dt) - 1/T$ 線図は1本の直線となり、 da/dt はアレニウス型の温度依存性を示し次式で表わされる。

$$\frac{da}{dt} = A_1 \exp \left(\frac{\Delta H_c}{RT} \right) \quad (3)$$

ここで

A_1 : 定数, T : 絶対温度, R : ガス定数
 ΔH_c : 見掛けの活性化エネルギー

Fig. 7. Effect of temperature on creep crack growth rate.

Fig. 8. Plot of crack growth rate as a function of test temperature.

Fig. 8 の $\log(da/dt) - 1/T$ 線図のこう配から求めた ΔH_c は 106 Kcal/mol になる。本実験範囲内での ΔH_c は応力拡大係数による差があまりないが、川崎らの 304 型ステンレス鋼についての実験では応力拡大係数が小さくなるにつれて ΔH_c が大きくなっており、この点についてはさらに広い K_I 範囲の実験を行ない確認する必要がある。

大谷らの研究により da/dt は定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ に比例することが明らかにされている。また $\dot{\epsilon}_s$ は (3) 式と同形の式で表わされることもよく知られているので、Fig. 8 には比較のため本供試材の $\dot{\epsilon}_s$ データも記入した。 $\log \dot{\epsilon}_s - 1/T$ 線図のこう配は $\log(da/dt) - 1/T$

線図とほぼ同じであり、本実験範囲内での da/dt の温度依存性はクリープデータ $\dot{\epsilon}_s$ から推定できるといえよう。

微小欠陥が存在する高温構造物の破壊寿命および潜在欠陥の限界寸法評価のためには、本実験より低 da/dt 側のデータも必要であるが 1 桁以上の da/dt 推定は危険であり、さらに低荷重長時間の da/dt 測定を行なう必要がある。

4 結 言

1 Cr 1 Mo 1/4 V 鋳鋼についてクリープき裂進展速度に及ぼす試験片形状および試験温度の影響を実験的に調べた。その結果を要約すると次のとおりである。

(1) SEN 試験片ではき裂のトンネル化が起り、正確なクリープき裂進展速度データを求めるのがむずかしいが、側面に適当な深さの V 溝を入れた SEN 試験片によればき裂前縁がき裂進展方向に垂直であり、正確なき裂進展速度を求めることができる。

(2) クリープき裂進展速度はアレニウス型の温度依存性を示し、ほぼ定常クリープ速度の温度依存性に等しい。

最後に本研究を遂行するにあたりご指導、ご協力いただいた当社日立工場二宮部長、安元主任技師、勝田工場小野部長、伏見主任技師および日立研究所飯塚部長、正岡主任研究員に深く感謝いたします。

(昭和50年10月9日 第13回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 坂田 勝, 日本機械学会誌, **78**, 389 (1975).
- 2) 川崎 正, 堀口正一, 日本機械学会講演論文集, No. 740-2, 219 (1974).
- 3) Harrison, C. B., and G. N. Sandor, Eng. Fracture Mech., **3**, 403 (1971).
- 4) 大谷隆一, 新田明人, 中村貞行, 米倉隆行, 第12回高温強度シンポジウム前刷集, 87 (1974).
- 5) Neate, G. J., and M. J. Siverns, Int. Conf. on Creep and Fatigue in Elevated Temp. Appl., Paper No. C 234/73, Philadelphia (1973).
- 6) 小寺沢良一, 岩田泰男, 日本材料学会第24期学術講演会前刷, 1-8, 21 (1975).
- 7) McEvily, A. J., and C. H. Wells, Int. Conf. on Creep and Fatigue in Elevated Temp. Appl., Paper No. C 230/73, Philadelphia (1973).
- 8) Brown, W. F., and J. E. Srawlay, ASTM S. T. P. No. 410, 12 (1967).
- 9) BISRA Open Report MG/A/53/68 (1968).
- 10) Garofalo, F., 足立正雄訳, “金属クリープの基礎”, p. 66 (1968) 丸善
- 11) 平 修二編, “金属材料の高温強度”, p. 15 (1968) 養賢堂