炭素鋼の高温回転曲げにおける微小疲労き裂伝ば則*

西 谷 弘 信^{*1}, 皮籠石 紀 雄^{*2}Small Crack Growth Law at Elevated Temperatures
in the Rotating Bending Tests of Carbon Steel

Hironobu NISITANI and Norio KAWAGOISHI

Rotating bending fatigue tests were carried out on specimens of an annealed 0.42 % C steel with a small blind hole at elevated temperatures of 200°C and 375°C. These results show that the small crack growth law, $dl/dN = C_1 \sigma_a^m l^n$ (σ_a : stress amplitude, l : crack length, C_1 and n : constants) holds well at elevated temperatures similarly as at room temperature. Moreover, at all of the tested temperatures, the values of ' n ' in the above stated equation are nearly equal to 8, therefore, the effect of temperature on fatigue crack growth rate can be discussed through the change in C_1 .

Key Words: Fatigue, Rotating Bending, Carbon Steel, Elevated Temperature, Small Crack, Crack Growth Law

1. 緒 言

金属材料の高温疲労の研究は古くから行われており、最近では特にき裂伝ば挙動に関するものが多い^{(1)~(5)}。しかし高温において、平滑材の寿命を支配する微小き裂の挙動を検討したものは比較的少なく、したがって微小き裂の伝ば速度を支配する力学的パラメータについても十分には明らかにされていない。

本論文においては、以上の点を考慮して、S 45 C 焼なまし材の小穴材を用いて高温下の微小き裂伝ば挙動を調べ、伝ば速度を支配する力学的パラメータを明らかにし、それを用いて疲労寿命に及ぼす温度の影響を検討した。

2. 材料、試験片および実験方法

用いた材料は、市販の S 45 C 圧延丸棒である。その化学成分および室温、200°C、375°C における機械的性質をそれぞれ表 1、2 に示す。

素材を 840°C で 1 h 焼なましした後、図 1 に示す形状、寸法の小穴付試験片を作製した。試験片は機械加

工の後 600°C、1 h の焼なましを行い、さらに表面を直径当り約 50 μ m 電解研磨してから試験に供した。なお、室温⁽⁶⁾、高温⁽⁷⁾ともに、平滑材のき裂伝ば挙動は小穴材のそれとほぼ等しく、小穴材により平滑材のき裂伝ば特性は評価できる。

高温における疲労試験は、広瀬らの結果⁽⁸⁾を参照して疲労強度が極大値を示す 375°C と極小値を示す 200°C で行った^{**1}。室温における結果は先に報告したものの⁽⁹⁾である。

き裂長さとしては、試験片表面に沿って測った小穴径 0.3 mm も含めた円周方向長さを取り、その測定に

表 1 化学成分

%				
C	Si	Mn	P	S
0.42	0.27	0.81	0.013	0.016

表 2 機械的性質

Temperature °C	σ_s MPa	σ_B MPa	σ_T MPa	ψ %
R.T.	377	659	1190	54.0
200	310	568	962	51.0
375	273	563	1094	63.2

* 昭和 62 年 4 月 3 日 第 64 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 9 月 29 日。

*¹ 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*² 正員、鹿児島大学工学部 (〒890 鹿児島市郡元 1-21-40)。

はレプリカ法を用いた。

応力レベルを表す記号として、応力振幅 σ_a 、応力幅 $\Delta\sigma$ を用いる ($\Delta\sigma=2\sigma_a$)。

用いた試験機は、室温および高温用の小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 9.8 N・m, 回転数約 3 400 rpm) である。

3. 実験結果および考察

3・1 S-N 曲線 図 2 に各温度における小穴材の S-N 曲線を示す。有限寿命域における疲労寿命 N_f を室温での N_f を基準に比較すると、375°C でのそれは約 5 倍に増大し、200°C でのそれは約 2/5 に減少しており、これまでに報告された多くの結果と同様の傾向を示している。S-N 曲線の傾きは温度に無関係にほぼ等しく、したがって N_f の応力依存性に温度の影響はほとんどみられない。

3・2 き裂伝ば特性 図 3 はそれぞれの温度におけるき裂伝ば曲線である。この図において、縦軸はき裂長さの対数 $\log l$ 、横軸は小穴の影響が消えるき裂長さ 0.5 mm⁽¹⁰⁾ における繰返し数 $N_{0.5}$ を基準とした相対繰返し数 $(N - N_{0.5}) / (N_f - N_{0.5})$ である。

図 1 試験片の形状・寸法 (mm)
(括弧内の数値は高温用を示す)

き裂長さの測定は、所定の繰返しごとに試験機を停止してレプリカ法により行った (高温の場合試験片の加熱、冷却の繰返しおよび運転休止の影響が考えられるが、その解釈については現在明らかでないので以下ではこの影響を無視して検討する)。

図 3 の (a)~(c) を比較してわかるように、相対繰返し数とき裂長さの関係は、応力レベルのみならず、実験温度に対してもほぼ無関係である。このことが図 2 において、温度が異なるときの S-N 曲線が互いにほぼ平行になることの背景である。このことはまたき裂伝ばの全過程が、任意のき裂長さ、例えば 1 mm、のときの伝ば挙動で近似的に推定できることを意味している。すなわち、 $l=1$ mm における伝ば速度が、 σ_{a1} 、 T_1 (実験温度) のときと σ_{a2} 、 T のときとで同じであるとする、 $l=2$ mm のときの伝ば速度も両者で等しいことになる。

図 4 は、375°C の場合に対し、 $\Delta K \{(2/\pi)\Delta\sigma\sqrt{\pi l}/2\}$ で

図 2 S 45 C 小穴材の S-N 曲線

図 3 き裂伝ば曲線

*** 温度制御は、試験片表面より 3 mm 離れた位置の温度を熱電対で検出して SCR 制御にて行った。なお試験片中央部において、試験片表面と表面より 3 mm 離れた箇所との温度差は検定しており、制御範囲は $\pm 3^\circ\text{C}$ であった。

近似する}の有効性を検討したものである。図からわかるように、375°Cにおいても室温の結果⁽¹¹⁾と同様に両者には応力依存性がみられき裂伝ば速度は ΔK で一義的に決まらない(200°Cの場合も結果は同様である)。したがってこのような高応力下の場合、塑性変形を考慮した力学的パラメータを用いる必要がある。

図5は、200°C、375°Cにおけるき裂伝ば速度とき裂長さの関係である。いずれの温度でも、き裂が短いところでは傾き約1の直線で近似される。すなわち高温においても室温の場合と同様に応力レベルが高ければ、き裂伝ば速度はき裂長さにはほぼ比例している($dl/dN \propto l$)。

図6は、各温度におけるき裂伝ば速度の応力依存性をき裂長さ $l=1\text{ mm}$ で比較したものである。き裂伝ば速度は200°Cで最も大きく、室温、375°Cの順に小

さくなっているが、き裂伝ば速度と応力の両対数関係はいずれの温度でも直線でしかもその傾きはすべて約8.2となっている($dl/dN \propto \sigma_a^{8.2}$)。

図5、6の結果から、各温度におけるき裂伝ば速度 dl/dN は $\sigma_a^{8.2}l$ にほぼ比例するものと思われる。実際に両者の関係をプロットすれば図7が得られ、高温においても

$$dl/dN = C_1 \sigma_a^{8.2} l$$

(C_1, n :各温度における定数) ……………(1)

の関係が成り立つことがわかる。すなわち、高温下においても高応力下のき裂伝ば速度は $\sigma_a^{8.2}l$ で一義的に決まる。

図6に示すように式(1)の n の値は温度に関係しないので、同一応力同一き裂長さのもとにおけるき裂伝ば速度の温度依存性は、式(1)の C_1 の差によって評価されることになる。

図8は、 $1/C_1$ の温度依存性を室温を基準に比較したものである。逆数をとったのは、それがき裂伝ば寿命に直接対応するからである。

図2において、同一応力のもとにおける N_f が200°C、室温、375°Cの順序で大きくなっていることと対応して、 $1/C_1$ もそれと同一傾向を示している。このことを降伏応力との関連で検討するため、

$$dl/dN = C_2 (\sigma_a / \sigma_s)^n l$$

(σ_s :降伏応力または耐力) ……………(2)

なる形⁽¹²⁾でき裂伝ば速度を表し、 C_2 の値を比較してみる。式(2)の C_2 の値は、 $l=1\text{ mm}$ のき裂に降伏応力 σ_s を繰返すときのき裂伝ば速度を表している。著者らが室温においてこれまでに行った炭素鋼焼なまし材の結果では、 C_2 と σ_s の関係は図9中の実線で表され

図4 dl/dN と ΔK の関係 (375°C)

(a) 200°C

(b) 375°C

図5 dl/dN と l の関係

図6 dl/dN と σ_a の関係

図7 dl/dN と $\sigma_s l$ の関係

る⁽¹²⁾⁽¹³⁾。200°Cの場合、室温の結果の線上にのるが、375°Cの場合は降伏応力が小さくなっているにもかかわらず N_f が大きくなることを反映してその線よりかなり下方にくる。このことは、200°Cの場合のき裂伝ば挙動が主として静的降伏応力の変化を通じて説明されるのに対し、375°Cのそれは静的降伏応力の変化では説明されないことを意味している。

すなわち、375°Cの場合は応力繰返しの中に起こるひずみ時効に起因するき裂先端付近の局部的降伏応力の増加がき裂伝ば抵抗の増大をもたらすものと思われる⁽²⁾⁽⁷⁾。200°Cの場合でもひずみ時効によりき裂伝ば抵抗は増大するが、その影響は温度上昇による静的降伏応力の変化に比べ大きくないものと思われる。

平滑材の全寿命は高温においても大部分微小き裂伝ば寿命によって占められているので⁽⁷⁾、結局平滑材の疲労寿命の温度依存性は式(1)の C_1 の温度依存性によって評価されることになる。

4. 結 論

S45C焼なまし材を用いて200°Cおよび375°C下で回転曲げ疲労試験を行い、室温下での有効性が確認されている微小き裂の伝ば則 $dl/dN = C_1 \sigma_s^2 l$ の高温下での成否を検討した。得られた結論は次のとおりである。

(1) 高温においても、室温下と同様にき裂伝ば速度は $\sigma_s^2 l$ で一義的に決まる。すなわち、上記の微小き裂の伝ば則は有効である。

(2) 200°C、375°Cでもき裂伝ば速度の応力依存

図8 $1/C_1$ の温度依存性 図9 C_2 と σ_s の関係

性は室温におけるそれとほぼ等しい(いずれの場合も $n \approx 8.2$)。

(3) (1)、(2)より高温における微小き裂の伝ば抵抗は、き裂伝ば則における定数 C_1 で比較できることがわかる。

(4) 375°Cにおいては、降伏応力は室温におけるよりかなり小さいにもかかわらずき裂伝ば抵抗は他の場合よりもかなり大きい。このことはき裂先端付近の材料のひずみ時効に関係しているものと思われる。

終わりに、本実験にご協力いただいた鹿児島大学 生 大津義郎君、鹿児島工業高等専門学校 植村真一郎先生、池田英幸先生に謝意を表す。

文 献

- (1) 宇佐美・ほか2名, 材料, 33-369 (昭59), 685.
- (2) 加藤・ほか3名, 材料, 33-373 (昭59), 1264.
- (3) 金沢・ほか4名, 材料, 32-357 (昭58), 640.
- (4) 小林・ほか4名, 機論, 51-463, A (昭60), 799.
- (5) 小倉・ほか2名, 機論, 51-473, A (昭61), 399.
- (6) 西谷・皮籠石, 機論, 49-440, A (昭58), 431.
- (7) 加藤・ほか2名, 機論, 50-456, A (昭59), 1461.
- (8) 広瀬・ほか3名, 機論, 45-400, A (昭54), 1496.
- (9) 西谷・皮籠石, 機論, 52-484, A (昭62), 2561.
- (10) 西谷・森光, 機論, 42-354 (昭51), 325.
- (11) 西谷・ほか2名, 機論, 50-449, A (昭59), 23.
- (12) 西谷・後藤, 機論, 51-462, A (昭60), 332.