

大阪大学工学部 正 城野 政弘 , 菅田 淳
○楊 徳統

1 緒言

機械や構造物に使用される鉄鋼材料は、使用目的に応じて何らかの熱処理が施されるのが普通であるが、これらの材料の疲労き裂進展速度に及ぼす微視組織の影響については、多くの研究者により研究されている^{1)~6)}ものの、変動荷重下の疲労き裂進展挙動については不明な点が多い。本報では、実用上比較的良く使用される低合金鋼SCM440について熱処理を変え、一定振幅と2段繰返し変動荷重下の疲労き裂進展試験を行い、微視組織に起因する破壊機構とき裂進展速度の関係およびき裂開閉口挙動などについて検討を行った。

2 試験材料および試験方法

供試材料は低合金鋼SCM440である。その化学成分を表1に示す。熱間圧延材(供試材)のほか、熱処理として850℃油焼入れ後、600℃、400℃、200℃で焼戻しを行った。各材料の機械的性質を表2に、組織写真を図1に示す。熱間圧延材のフェライト結晶粒径と層状パーライトの層間距離はそれぞれ31.4μmおよび3.8μmである。600℃、400℃、200℃焼戻し材の組織はそれぞれソルバイト、トルスタイト、マルテンサイトであり、旧オーステナイト結晶粒径はそれぞれ21.6μm、14.0μm、13.5μmであった。

試験は中央き裂引張り試験片(CCT)[板幅W=100mm, 初期き裂長さ $2a_0=13$ mm, 板厚B=7mm, 28%サイドグループ付]を用い、容量±100kNの電気油圧サーボ疲労試験機により、周波数10~2Hzの片振引張りで行った。き裂長さおよび開閉口挙動は線形性、安定性を良くしたクリップゲージ⁷⁾を使用し、除荷弾性コンプライアンス法により試験速度を変えることなく、ミニコンピュー

表1 供試材料の化学成分(%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.40	0.22	0.79	0.013	0.003	0.01	0.02	0.98	0.20

表2 供試材料の機械的性質

熱処理	σ_y	σ_B	δ	ψ	H_{RC}	H_U
	MPa	MPa	%	%		
AS ROLL	62.0	94.4	18.6	58.6	27.7	280.3
600℃	84.6	95.9	23.3	66.1	29.4	292.8
400℃	131.5	145.8	15.9	61.0	42.0	402.5
200℃	140.6	214.3	11.9	34.2	55.0	595.0

タを用い実時間で、動的に自動計測を行った⁸⁾。

3 試験結果および考察

3.1 一定振幅荷重下の疲労き裂進展挙動

図2に4種類の材料における一定振幅荷重下のき裂進展速度を応力拡大係数幅 ΔK で整理して示す。中間進展速度領域では、熱間圧延材と600℃、400℃焼戻し材の結果は極く近傍に集まり、き裂進展速度はほぼ同じになるが、低 ΔK 領域では若干き裂進展速度の相違が認められ、400℃、600℃焼戻し材、熱間圧延材の順に

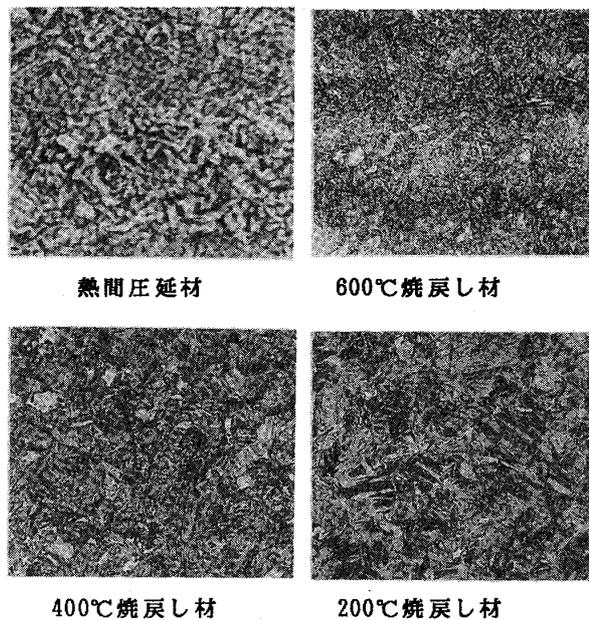
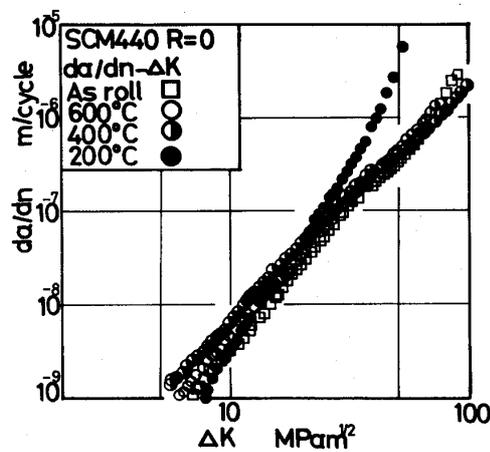


図1 材料の組織写真

図2 $da/dn - \Delta K$ 関係

き裂進展速度が遅くなっている。三種類の材料の回帰直線の傾きはそれぞれ2.9、2.8、2.6でほぼ等しい。これに対し200℃焼戻し材の回帰直線の傾きは3.9と高く、特に $\Delta K=20\text{MPam}^{1/2}$ 以上の領域での進展速度は速くなっている。

き裂開口比 U の挙動を図3に示す。熱間圧延材では K_{max} の増加とともに、 U が単調に上昇し、その後一定値を示すのに対して、600℃、400℃焼戻し材では $K_{max}=20\text{MPam}^{1/2}$ 付近で、 U が最大値をとり、その後 K_{max} の増加につれて下がり、後一定値になる。Paulらによれば、中炭素Cr-Mo鋼では繰返し応力により、転位の形態と分布の変化および転位密度の低下のため繰返し軟化を示すことが報告されている⁹⁾。ここで示した400℃、600℃焼戻し材の U の挙動は、繰返し軟化のため、引張塑性域が増大し、除荷時の圧縮残留応力の増加を通じて K_{op} が高くなったことによるものと考えられる。図3に示したように、400℃焼戻し材は U の低下幅が最も大きく、Paulら⁹⁾、W.J.Prumbridgeら¹⁰⁾の400℃焼戻し材の繰返し軟化が他の熱処理材より大きいという結論と一致している。

図4に da/dn をき裂開口挙動を考慮した有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} で整理した結果を示す。熱間圧延材と600℃、400℃焼戻し材のき裂進展速度曲線はさらに近づき、中間進展速度領域でほぼ一本の直線となっ

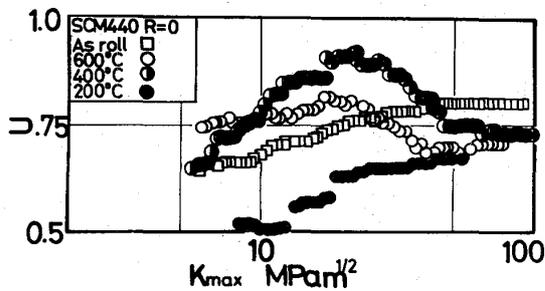


図3 $U - K_{max}$ 関係

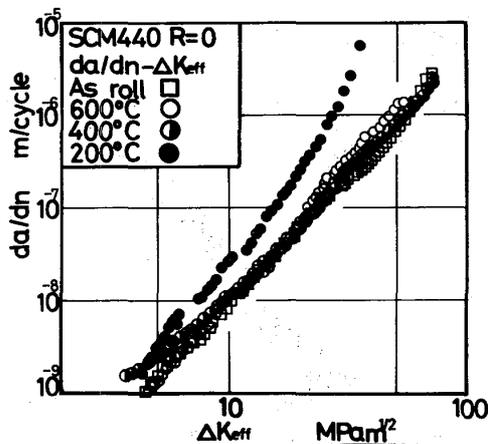


図4 $da/dn - \Delta K_{eff}$ 関係

た。しかし200℃焼戻し材の進展速度は他の材料より速くなり、浅見らの報告⁶⁾と同様に非常に硬い材料のき裂進展速度は、 ΔK_{eff} で整理しても、他のものとは異なることがわかった。

図5~7に走査型電子顕微鏡により観察した微視的破面写真の例を示す。600℃、400℃焼戻し材について、 $\Delta K < 20\text{MPam}^{1/2}$ の場合、破面は山谷の筋状模様になる。白い筋がセメントイトである。計算による繰返し塑性域寸法はフェライトと旧オーステナイト粒径の大きさと同じオーダーであり、パーライトの層間距離より大きいことから繰返し塑性域にいくつかのフェライト(F)と Fe_3C があり、き裂が弱い相のフェライトでセメントイトに沿って進展する。このように低 ΔK 領域ではき裂進展抵抗が弱いフェライト相で決まることになる。このことが、600℃、400℃焼戻し材と、もとも

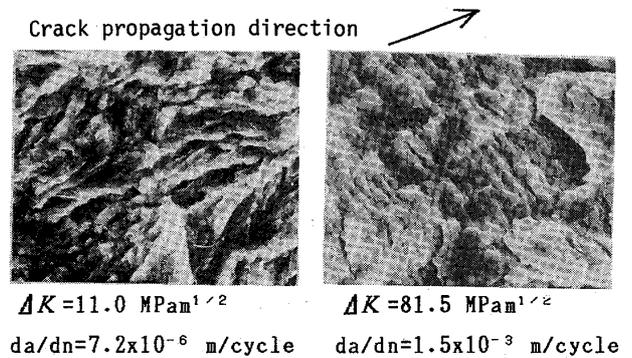


図5 600℃焼戻し材の微視的破面様相 $5\mu\text{m}$

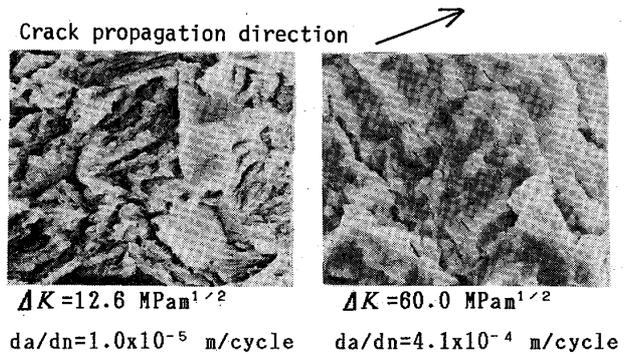


図6 400℃焼戻し材の微視的破面様相 $5\mu\text{m}$

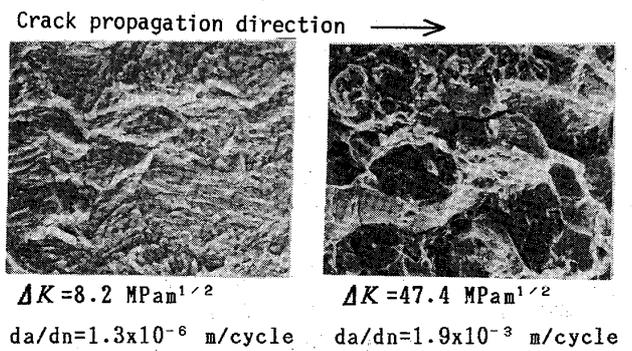


図7 200℃焼戻し材の微視的破面様相 $10\mu\text{m}$

とF+Fe₃Cの組織をもっている熱間圧延材とのき裂進展速度が低中ΔK領域ではほぼ一致する原因だと考えられる。

200℃焼戻し材の組織はマルテンサイトで、他の材料とは異なり、破面様相も異なったものとなっている。低ΔK領域では繰返し塑性域は結晶粒径より小さいので、破面は粒内掘へき開の様相を呈し、き裂進展速度は他の材料とほぼ等しくなるが、ΔKが20 MPam^{1/2}を越えると、き裂進展方向と垂直な二次き裂が多くなるとともに、粒界へき開割れの破面率も高くなり、進展速度が速くなる。なお、測定した200℃焼戻し材の開口比Uは試験範囲を通じて0.5~0.7であり、このような硬い材料では、Uが1となると報告している他の研究者の結果より⁶⁾小さい。この原因は現在不明である。

3.2 2段繰返し変動荷重下の疲労き裂進展挙動

試験は高、低両レベルの応力比をともにR=0とし、高、低レベルΔK値の比をΔK_H/ΔK_L=3に、頻度比をN_H/N_L=1/100に固定して行った。荷重レベルは繰返し軟化挙動の異なる2つの領域にまたがるように、高レベルΔK値を30MPam^{1/2}から60MPam^{1/2}までに選んだ。表3に試験条件とともに試験結果を示す。荷重-変位ヒステリシスの例は省略するが、2段繰返し変動荷重下のき裂開口点は変動荷重1ブロックを通じてほぼ一定で変化しなかった。熱間圧延材、400℃焼戻し材の場合は2段繰返し変動荷重下のU_Hは高レベルのΔK_Hと同じΔKを持つ一定振幅荷重下のU₀とほぼ等しいが、

600℃焼戻し材の場合はU_HがU₀より大きい。これはPaulら⁹⁾が報告しているように600℃焼戻し材の軟化が転位密度の低下ではなく、セル転位組織の形成であることから、軟化にいくらかの時間とエネルギーを要すると考えられ、本実験で行った頻度比1/100では、繰返し軟化が十分起こらなかったため、K_{op}の上昇が少なく、結局2段繰返し荷重下のU_Hは一定振幅荷重下のU₀より大きくなったものと思われる。

本実験で行った頻度比、荷重レベルでは高低各レベルでのき裂進展量は微小であり、それぞれを分離して測定することは困難であるため、低レベル荷重での進展速度の推定値(da/dn)^{*}_Lは次式により求めた。

$$(da/dn)^*_{L} = [(da/dn)_{HL} \times (N_H + N_L) - (da/dn)^*_{H} \times N_H] / N_L$$

ここで(da/dn)_{HL}は変動波形1ブロックに対する実測された平均き裂進展速度であり、(da/dn)^{*}_Hは(ΔK_{eff})_Hと同じ大きさを持つ一定振幅荷重下のき裂進展速度である。表3から(da/dn)^{*}_Lは低レベル荷重のΔK_{eff}と同じΔK_{eff}を持つ一定振幅荷重下のき裂進展速度(da/dn)_Lとほぼ等しくなっていることが分かる。

次に変動荷重下のき裂進展速度の推定法の定量的評価のため、実測されたき裂進展量ΔaとΔK_{eff}に基づく線形加算則により推定された予想き裂進展量Δa^{*}との比で定義されるλを求め、表3の最右欄に示す。λ値の範囲は0.84~1.26で、繰返し軟化を示す材料でも、き裂開口挙動を考慮した(da/dn)-ΔK_{eff}関係を用いて、ΔK_{eff}に関する線形加算則で変動荷重下のき裂進展速度を良く推定できることが分かる。

なお200℃焼戻し材の2段繰返し変動荷重下の疲労試験については現在試験中である。

4 結言

低合金鋼SCM440材について、熱処理を変え、一定および2段繰返し変動荷重下の疲労き裂進展試験を行った。得られた主な結果は次の通りである。

- 1) 熱間圧延材と600℃、400℃焼戻し材の疲労き裂進展速度はほぼ等しい。
- 2) 熱処理で強化した600℃、400℃焼戻し材では繰返し軟化のため、UはあるK_{max}で最大値をとり、その後K_{max}の増加につれて低下する。
- 3) 200℃焼戻し材の破壊機構は他の材料とは異なり、粒界へき開割れを示し、き裂進展速度は速くなる。特にΔKが大きくなるにつれてこの差は大きくなる。
- 4) 繰返し軟化を示す材料でも、き裂開口挙動を考慮した有効応力拡大係数幅ΔK_{eff}に基づく線形加算則で、変動荷重下のき裂進展速度を推定できる。

参考文献省略

表3 2段繰返し変動荷重試験条件および試験結果

	ΔK _H MPam ^{1/2}	U _V	U ₀	(da/dn) [*] _L m/cycle	(da/dn) _L m/cycle	λ
熱間 圧延材	30.80	0.78	0.78	1.4x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶	1.23
	35.80	0.78	0.78	1.4x10 ⁻⁶	1.5x10 ⁻⁶	0.95
	41.00	0.78	0.79	1.5x10 ⁻⁶	2.2x10 ⁻⁶	0.84
	44.80	0.78	0.80	1.6x10 ⁻⁶	1.6x10 ⁻⁶	1.00
	50.00	0.78	0.80	2.3x10 ⁻⁶	2.0x10 ⁻⁶	1.06
	54.30	0.78	0.80	2.4x10 ⁻⁶	2.8x10 ⁻⁶	0.95
	60.60	0.78	0.80	3.4x10 ⁻⁶	3.2x10 ⁻⁶	1.03
600℃ 焼戻し材	30.10	0.81	0.76	3.4x10 ⁻⁶	2.8x10 ⁻⁶	1.18
	36.00	0.81	0.74	1.9x10 ⁻⁶	1.6x10 ⁻⁶	1.08
	40.00	0.80	0.71	2.3x10 ⁻⁶	1.7x10 ⁻⁶	1.14
	45.30	0.79	0.70	2.8x10 ⁻⁶	2.1x10 ⁻⁶	1.14
	49.60	0.79	0.70	2.8x10 ⁻⁶	2.8x10 ⁻⁶	1.02
	52.70	0.79	0.69	2.7x10 ⁻⁶	3.1x10 ⁻⁶	0.96
	59.00	0.78	0.68	3.5x10 ⁻⁶	3.5x10 ⁻⁶	1.00
400℃ 焼戻し材	32.00	0.87	0.87	5.4x10 ⁻⁶	4.6x10 ⁻⁶	1.13
	36.00	0.83	0.84	3.7x10 ⁻⁶	3.7x10 ⁻⁶	1.01
	40.20	0.81	0.81	3.2x10 ⁻⁶	3.2x10 ⁻⁶	1.00
	45.00	0.80	0.79	2.8x10 ⁻⁶	2.9x10 ⁻⁶	0.98
	49.50	0.78	0.75	3.8x10 ⁻⁶	3.0x10 ⁻⁶	1.12
	54.00	0.78	0.75	5.8x10 ⁻⁶	3.7x10 ⁻⁶	1.26
	60.00	0.78	0.75	7.6x10 ⁻⁶	4.8x10 ⁻⁶	1.26