

平均応力を有する同位相組合せ荷重下における き裂成長および疲労寿命

法政大学 大川 功 法政大学[院]○神 孝喜 成蹊大学 三角 正明

1. 緒論

実機に作用する繰返し荷重には、平均応力を伴う事例が多く、き裂成長及び疲労寿命に及ぼす平均応力の影響について、これまでに多くの研究がなされている。

本研究では、炭素鋼を用いて軸力とねじりの同位相組合せ荷重下で平均応力を付加した場合について疲労試験を行い、平均応力が寿命初期の微小き裂の分布、主き裂の成長挙動及び疲労寿命に及ぼす影響について検討した。

2. 試料及び実験方法

供試材は機械構造用炭素鋼 S45C で、浅く鈍い切欠きを有する薄肉中空試験片(試験部長さ 30mm, 外径 16mm, 内径 13mm)に機械加工し、真空中で 850°C, 1 時間保持後炉冷の熱処理を施した。

疲労試験には電気油圧サーボ式試験機を用い、軸力とねじりの荷重制御の正弦波応力振幅 σ_m, τ_m 及び平均応力 σ_n, τ_n を付加した。試験条件を Table 1 に示す。組合せ応力比 $\lambda = \tau_m / \sigma_m$ は 0(軸力), 0.5, 2 および ∞ (純ねじり)とし、各場合につき完全両振りでの疲労寿命が 10^6 回および 10^6 回付近となる 2 つの応力振幅を設定した。また平均応力は、組合せの場合、実験 I では軸力とねじりの応力振幅に対する平均応力の比率 $\alpha_n = \sigma_n / \sigma_m$ と $\alpha_s = \tau_n / \tau_m$ がともに 0, 0.333, 1(完全片振り)となる

ように設定した。この場合、き裂が発生、成長する最大せん断面および最大主応力面上での応力はいずれも α_n (あるいは α_s) に応じて直線的に増加する。実験 II は 2 方向で等しい引張りの最大応力を生ずる場合、実験 III は 4 方向で等しい最大せん断応力を生ずる特別の場合である。

疲労過程における表面き裂の観察にはレプリカ法を用い、き裂の両端間の距離をき裂長さとし、また、き裂が試験片周方向となす角度をき裂方向とした。

3. 実験結果および考察

3.1 繰返し初期における微小き裂の分布

組合せ応力比 $\lambda = 0.5$ と 2 の各平均応力下において、寿命の 25% の時点で試験部の $0.5 \sim 3 \text{ mm}^2$ の領域に発生したおよそ 100 個の微小き裂の分布を Fig. 1(a)~(f) に示す。縦軸はき裂密度を、横軸はき裂方向を表しており、各方向でのせん断応力と垂直応力の 1 サイクル中での変化幅をそれぞれ実線と破線で示す。平均き裂長さは $20 \mu\text{m}$ 程度で、いずれの組合せ応力比でも平均応力の付加によりき裂密度は増加するとともに、き裂の発生は最大せん断応力方向に集中する傾向が明瞭となる。Fig. 1(c) は図中 A~D で示す方向に 4 つの等しい最大せん断応力を生ずる特別な場合であり、き裂の発生方向もこれに対応して広い範囲にばらついている。

Table 1 Summary of test conditions

	Axial loading			torsion			Combined loading					
	$\alpha_n = \sigma_n / \sigma_m$	$\alpha_s = \tau_n / \tau_m$	$\lambda = \tau_m / \sigma_m$	$\alpha_n = \sigma_n / \sigma_m$	$\alpha_s = \tau_n / \tau_m$	$\lambda = \tau_m / \sigma_m$	$\alpha_n = \sigma_n / \sigma_m$	$\alpha_s = \tau_n / \tau_m$	$\lambda = \tau_m / \sigma_m$	$\alpha_n = \sigma_n / \sigma_m$	$\alpha_s = \tau_n / \tau_m$	$\lambda = \tau_m / \sigma_m$
Group I	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	0.277	1
Group II	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group III	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group IV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group V	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group VI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group VII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group VIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group IX	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group X	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XIV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XVI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XVII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XVIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XIX	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XX	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXIV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXVI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXVII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXVIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXIX	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXX	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXIV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXVI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXVII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXVIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XXXIX	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XL	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLIV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLV	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLVI	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLVII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLVIII	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group XLIX	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1
Group L	0	0	0	0	0.333	1	0	0.333	1	-0.243	-0.277	-1

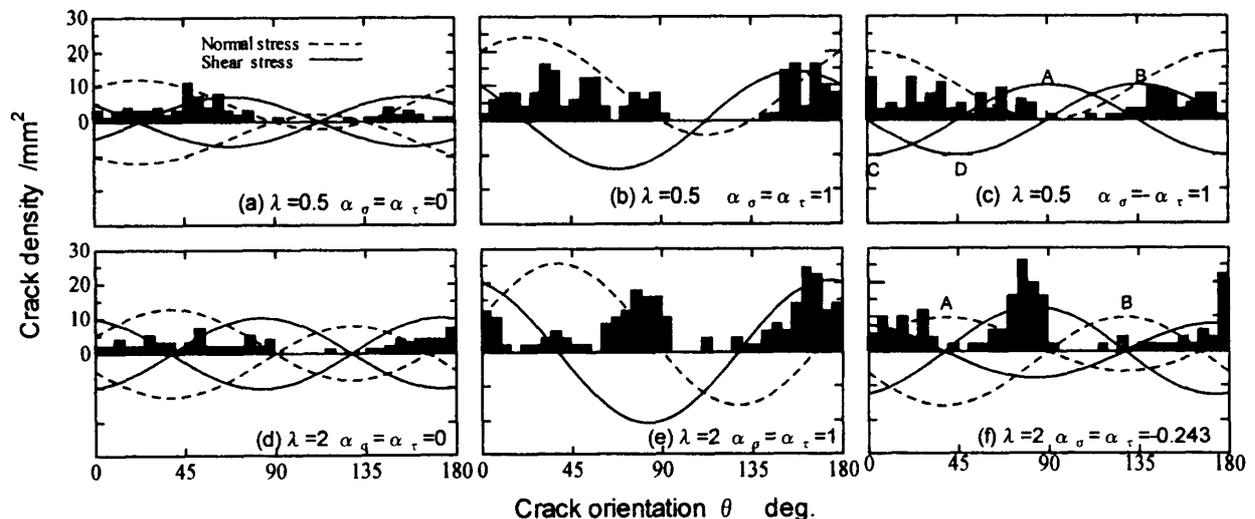


Fig. 1 Distribution of microcracks

3.2 主き裂の発生

実験を行った高、低 2 つの応力振幅について、主き裂の発生時期の平均応力付加による変化を Fig. 2 に示す。主き裂は複数発生したき裂個々の成長とこれらの合体により成長したが、ここで、これら破壊に関与したき裂のうち最も早く発生し、かつ停留することなく成長したき裂が 20 μm の長さには達したときをき裂発生とした。主き裂は組合せ応力比が大きいほど、また応力振幅が大きいほど発生が早く、平均応力の付加によりき裂の発生寿命は短くなると同時に、全寿命に対する比率も小さくなる傾向がある。

Fig. 3 は各応力条件下におけるき裂発生寿命を $\tau_{max0} f(\alpha_n, \alpha_s)^\gamma$ なるパラメータを用いて整理したものである。ここで τ_{max0} は $\alpha_n = \alpha_s = 0$ での最大せん断応力振幅、 $f(\alpha_n, \alpha_s)$ は平均応力がある場合の最大せん断応力の τ_{max0} に対する比率である。定数 γ を 0.437 とすると、図中に示す両振りの場合に対する直線を用いて、平均応力下でのき裂発生寿命を求めることができる。

3.3 主き裂の成長

破壊に関与したき裂のうち 10 本程度を選び、その成長にともなう方向と長さの変化の一例を示したものが Fig. 4 である。Fig. 4(a) では、最大せん断応力方向が 4 つあることに対応して (Fig. 1(c)), 種々の方向でき裂が発生し、その合体により $\theta = 0^\circ$ の最大主応力面の近傍で破断した。Fig. 4(b) は 2 方向で等しい引張りの最大応力を生ずる場合であるが (Fig. 1(e)), 最大せん断面の近傍で発生したき裂は $\theta = 38^\circ$ の主応力面上でのみ成長し、顕著な分岐はみられなかった。

Fig. 5 は組合せ応力比 $\lambda = 0.5$ および 2 の各平均応力条件下でのき裂成長速度を

$$K_e = 1.12 \sqrt{(E\epsilon_\theta)^2 + (G\gamma_\theta)^2} \sqrt{\pi c} \quad (1)$$

なるパラメータを用いて表示したものである。E, G は弾性係数、 $\epsilon_\theta, \gamma_\theta$ は角度 θ のき裂面に生ずる垂直およびせん断ひずみ振幅である。荷重制御下では繰返しクランプを生ずるため、繰返し応力-ひずみ関係は平均応力の付加により相違するが、ここでは、他の研究者の 0.4% C 鋼に関する結果^{1), 2)}を利用して、これらのひずみを求めた。 $\lambda = 2$ ではとくに低成長速度域でのばらつきが大きい、式(1)のパラメータを用いることにより、特殊な平均応力条件の場合も含め、応力振幅、平均応力の影響を考慮する事ができる。

4. 結論

炭素鋼の同位相軸力-ねじり荷重下において正の平均応力を付加すると、最大せん断応力の増加に対応して破壊き裂の発生寿命は短くなると同時にその全寿命に対する比率も減少する。破壊き裂の成長に及ぼす平均応力の影響はき裂面上に生ずるひずみに基づくパラメータを用いて評価することができる。

参考文献

- (1) V. Kliman et al., Mat. Sci. Eng., 44, 73(1980).
- (2) F. Lorenzo et al., Mat. Sci. Eng., 62, 205(1984)

