

九州大学 正 村上 敬宜 九州大学[院] ○植田 徹
九州大学[院] 野本 哲志 日本精工 村上 保夫

1. 緒言

S-N曲線の2段折れ曲がり現象を解明するには、内部破壊の破壊機構を把握することが重要である。

本研究では、SCM435 浸炭窒化・焼入れ焼戻し材の引張圧縮疲労試験を行い、疲労破面を AFM および SEM を用いて観察した。そして、観察結果をもとにフィッシュ・アイ破壊の破壊機構を解明することを目的とする。

2. 供試材、実験方法および実験結果

供試材はクロムモリブデン鋼 SCM435 の浸炭窒化・焼入れ焼戻し材(直径 7mm, 試験部 20mm)である。応力比 $R=-1$, 繰返し速度 30~80Hz で引張圧縮疲労試験を行った。表面硬化層を有しているため、表面は $HV \approx 780$ で内部は $HV \approx 560$ である。試験片表面は 500MPa 程度の圧縮残留応力を有している。

図1に S-N 線図を示す。破断起点はすべて内部であった。これは、硬さの分布と表面付近の圧縮残留応力の影響によるものである。破断面には典型的なフィッシュ・アイが観察され、その中心部には介在物が存在した。

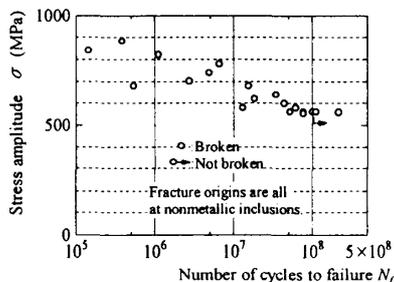


Fig.1 S-N data for SCM435.

3. 破断面の観察および考察

3.1 破壊起点近傍の破面

著者らのさきの報告¹⁾によれば、低応力・長寿命域でフィッシュ・アイ破壊の破壊起点となった介在物のまわりの破面には高応力・低寿命の場合には見られない粗い領域が存在している(図2の黒く見える部分)。この破面は、マルテンサイト組織に典型的な疲労破面とは全く異なる様相を呈している。概算した初期き裂進展速度が格子間隔より小さいことや、介在物寸法に対して相対的に大きな粗い領域をもつ試験片ほど長寿命の傾向があることを考慮すると、この粗い領域は介在物周辺にトラップされた水素の影響と繰返し応力との連成による遅れ破壊に類似の機構で、き裂が不連続に進展し

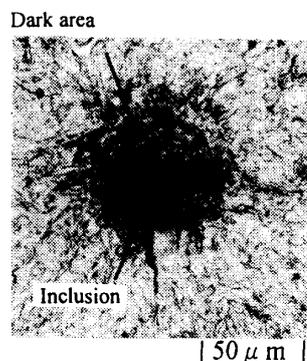


Fig.2 The dark area beside the inclusion at the fracture origin.
 $\sigma = 601$ (MPa), $N_f = 4.39 \times 10^7$

Table1 The conditions to determine m and C of equation(3).

σ (MPa)	N_f	a_{inc} (μ m)	a_f (μ m)
682	5.40×10^5	27.5	1800
883	3.82×10^5	19.2	930

σ : Stress amplitude. N_f : Cycles to failure.
 a_{inc} : Radius of inclusion. a_f : Radius of Fish-eye.

た結果生じたものと考えられる¹⁾。

3.2 疲労破断面

粗い領域すなわち図2で黒く見える部分の寸法が $\sqrt{\text{area}}$ パラメーターモデル²⁾によって評価される欠陥寸法の限界値を超えると、水素の助けが必要でない通常の疲労破壊が開始すると考えた。この疲労破断面を定量的に評価するために、AFM を用いて粗い領域の端からフィッシュ・アイの境界まで、平均粗さ R_a を求めた。図3に応力拡大係数幅 ΔK_I と R_a の関係を示す。 R_a は次の式によって表される。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

ここで $f(x)$ は粗さ曲線、 l は測定範囲で $l=10$ (μ m) で測定した。 ΔK_I は次式を用いた。

$$\Delta K_I = \frac{2}{\pi} \Delta \sigma \sqrt{\pi r} \quad (2)$$

ここで r は介在物中心から粗さ R_a 測定点までの距離である。図3に示すように、 ΔK_I の増加とともに R_a がほぼ単調に増加している。また、ばらつきはあるが応力が異なっても ΔK_I が同じであればおおまかに言って R_a がほぼ等しいことがわかる。

次に、水素の影響がないと考えられる粗い領域より外の疲労破断面のき裂進展速度に注目した。Paris 則が成立すると仮定すれば応力比 R が一定の条件のもと、 ΔK_I と da/dN の間には次式が成り立つ。

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_I^m \quad (3)$$

ここで、 C と m は定数である。短寿命で破断した介在物近傍の粗い領域のない試験片は、き裂が介在物の端からフィッシュ・アイ境界までほぼ1サイクルごとに進展したと考えられるので、粗い領域のない2つの試験片を用いて式(3)の C と m を表1に示す条件で積分($a: a_{inc} \rightarrow a_f, N: N_0=0 \rightarrow N_f$)し、連立方程式を解いて $m=2.18$ を得た。ここで Dugdale モデルによれば、小規模降伏条件下では、き裂先端塑性域の大きさやき裂先端開口変位が K の2乗に比例する。そこで、破面粗さおよびき裂進展速度が ΔK の2乗に比例すると仮定すれば、式(3)の m は $m=2$ となる。ばらつきをもつ実験結果から計算した m は $m=2.18$ であり、ほぼ $m=2$ に近い。次に式(3)に、 $m=2$ と表1の条件を代入して得られた2つの C を平均して C の値を求め、き裂進展速度の推定式を次のように決めた。

$$\frac{da}{dN} = 2.92 \times 10^{-12} (\Delta K_1)^2 \quad \text{..... (4)}$$

水素の影響を受けていない部分のき裂進展速度が求まったので、粗い部分の端からフィッシュ・アイ境界までのき裂進展に費やされたと推定される繰返し数 N_{p2} を次式により求めた。

$$N_{p2} = \int_{a_{start}}^{a'} \frac{1}{2.92 \times 10^{-12} (\Delta K_1)^2} da \quad \text{..... (5)}$$

ここで a_{start} は介在物近傍の粗い領域の半径である。図4に $S-N_{p2}$ 線図を示す。この計算が妥当なものと仮定すると、介在物近傍の粗い領域の端からフィッシュ・アイ境界までの推定繰返し数は $N_{p2} = 3.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^6$ 程度である。このことから介在物近傍の粗い領域のき裂進展に寿命の大部分が費やされており、寿命が長いほど粗い領域の形成に費やす繰返し数が大きいことがわかる。

図3より ΔK_1 と R_a 、式(4)より ΔK_1 と da/dN の関係が求まったので、 da/dN と R_a の関係が求まる。それを図5に示す。き裂進展速度の増加とともに疲労破壊面の粗さも増加していることがわかる。すなわち、疲労破壊面の粗さはき裂進展速度の程度を示していることがわかる。このことは破面解析からき裂進展速度を推定する場合に実用上の価値がある。

3.3 フィッシュ・アイの境界および静的破壊面

図6にフィッシュ・アイ境界の AFM 写真とそれを A-A' で切断した時の断面図を示す。フィッシュ・アイの外部が内部より高くなっている。また、破断したもう一方の破面を観察しても同様にフィッシュ・アイの外部は内部より高くなっていた。高低差は片側約 $2.0 \mu\text{m}$ であり、寿命の長短、フィッシュ・アイの大きさにかかわらずほぼ一定であった。このことから、フィッシュ・アイの境界は疲労破壊から静的不安定破壊に移行する一種のストレッチゾーンであることがわかる。

図7(a), (b)にフィッシュ・アイ境界からその外側の破面を観察した SEM 写真を示す。図7(a)に示すように試験片の内部の方ではディンプルが観察され微視的に見るとミクロ的には延性的な破面になっている。一方、図7(b)に示すように表面に近くなるにつれてディンプルの様子は薄れてきて、擬へき開面の様相を呈しており脆性的な破面になっている。これは、試験片の内部から表面側になるにつれて徐々に硬い組織になっているためであると考えられる。したがって SEM 観察からもフィッシュ・アイの外側は静的破壊面であると結論できる。

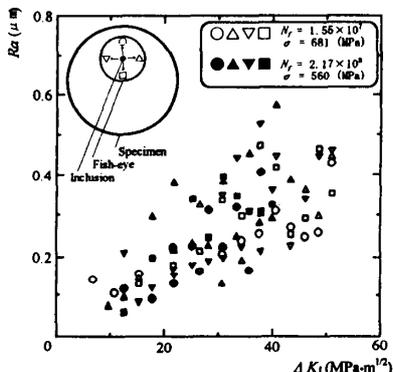


Fig.3 ΔK_1 vs. R_a

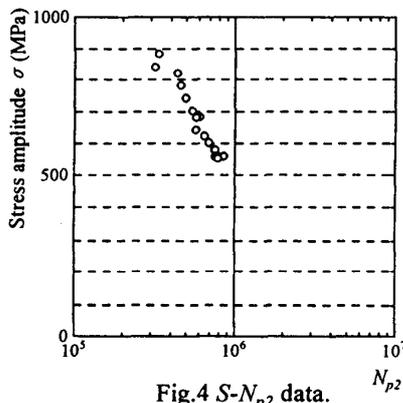


Fig.4 $S-N_{p2}$ data.

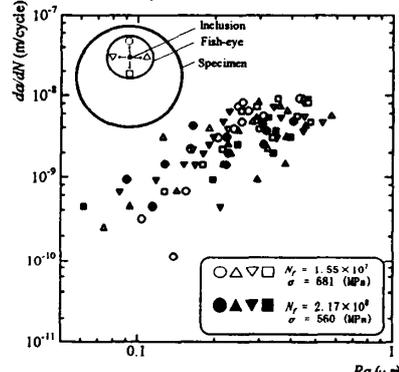


Fig.5 R_a vs. da/dN

4. 結言

- (1) 介在物近傍の粗い領域の端からフィッシュ・アイ境界までの破面の粗さはき裂が進展して応力拡大係数が増加し、き裂進展速度が速くなるにつれて増加する。この疲労破面形成に費やされた繰返し数 N_{p2} を大まかに推定すると $N_{p2} = 3.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^6$ であった。
- (2) フィッシュ・アイの境界ではき裂開口変位が一定の値に達して不安定な状態になり、疲労破壊から不安定破壊に移行する。またフィッシュ・アイの外側を微視的に観察すると、延性あるいは脆性的な様相を呈しており、静的破壊によってもたらされた破面である。

参考文献

- 1) 村上敬宜, 植田徹, 野本哲志, 村上保夫, 第24回疲労シンポジウム講演論文集, 111(1998)
- 2) 村上敬宜, "金属疲労: 微小欠陥と介在物の影響" (1993) 養賢堂

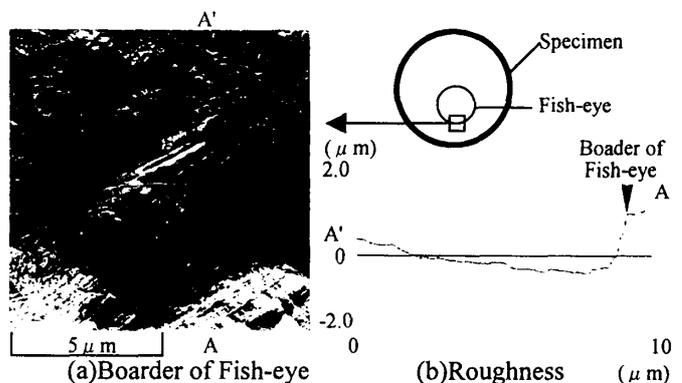


Fig.6 AFM observation at boarder of fish-eye.
 $\sigma = 560(\text{MPa}), N_f = 2.17 \times 10^6$

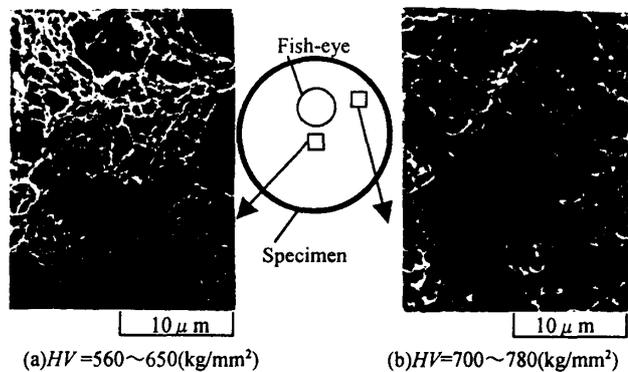


Fig.7 SEM observation at outside of fish-eye.
 $\sigma = 560(\text{MPa}), N_f = 2.17 \times 10^6$