

(137) 非金属介在物と鋼の疲れ性質に関する一考察  
(鋼の疲れ性質と介在物に関する基礎的研究-IX)

金属材料技術研究所  
東京大学工学部

岡田才衛 内山郁  
荒木透

1. 緒言 …… 鋼中非金属介在物と疲れ性質との関係について、基地相に関する問題と介在物に関する問題に分けて系統的研究を行ってきた。そして耐久限の介在物による減少割合は  $\sigma = K \epsilon^n$  で定義される加工硬化指数  $n$  で整理できることを示した。本報では使用試料の  $n$  と球状炭化物の分布との関係を調べ、さらに介在物による耐久限の低下と加工硬化との関係について現象論的説明を試みた。

2. 加工硬化指数  $n$  と球状炭化物 …… 本研究で使用した試料は極低炭素鋼およびそれらに浸炭後焼入れ焼もどしを施した鋼であり、その組織は前者はフェライト、そして後者は球状炭化物を分散した焼もどしマルテンサイトである。後者の場合、焼もどし温度として  $620^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$  および  $400^\circ\text{C}$  の3種類を使用した。それぞれの球状炭化物の分布状態は焼もどし温度により異なっていた。

炭化物粒子の加工硬化への影響に関しては分散強化合金の加工硬化理論を用いて説明できる。この理論には Fisher-Hart-Bry の理論および Ashby の理論があるが、炭化物粒子のように基地に比べて硬いものが存在する場合は後者の理論が支配的であるとされている。したがって、任意のひずみにおける加工硬化量  $\sigma$  は

$$\sigma = A \lambda^{1/2} + A' \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  は炭化物の平均自由距離、そして  $A$  および  $A'$  は材料定数である。一軸引張りの場合、真応力  $\sigma$  と真ひずみ  $\epsilon$  との関係は次式が成立する。

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2)$$

同式を微分すると

$$d\sigma/d\epsilon = n \cdot \sigma / \epsilon \quad (3)$$

(3)式より、加工硬化率  $d\sigma/d\epsilon$  が一定ならば、任意のひずみにおいて  $n$  が小さくなる。この  $\sigma$  と (1)式の  $\sigma$  とは同じ内容を示しているから、両式より

$$1/n = B \lambda^{1/2} + B' \quad (4)$$

ここで、 $B$  は試験条件などに依存する定数。本実験における  $1/n$  と  $\lambda^{1/2}$  との関係は、図1に示すように (4)式を十分に満足している。

3. 介在物による耐久限低下について …… Cowanの疲れ破壊に関する理論は、材料が理性的に不均一である場合(介在物などを含む)、一定応力乗中の繰返応力下ではひずみ乗中は次第に減少するが、応力と全塑性ひずみは繰返しのたびに上昇していき、破壊応力  $\sigma_f$  に達した時割れが発生すると述べている。この理論の類推から、介在物周辺での割れ発生は次のように考えられる。

任意の点のひずみを  $\epsilon$  とすれば、 $1/2$  回の繰返しによる硬化量  $\Delta y$  は

$$\Delta y = d\sigma/d\epsilon \cdot \epsilon \quad (5)$$

一方、介在物のような応力集中物が存在する場合、応力集中係数  $K$  とすれば加工硬化量  $\Delta y'$  は

$$\Delta y' = K d\sigma/d\epsilon \cdot \epsilon \quad (6)$$

(6)式を(3)式に代入すると

$$\Delta y' = K n' \sigma \quad (7)$$

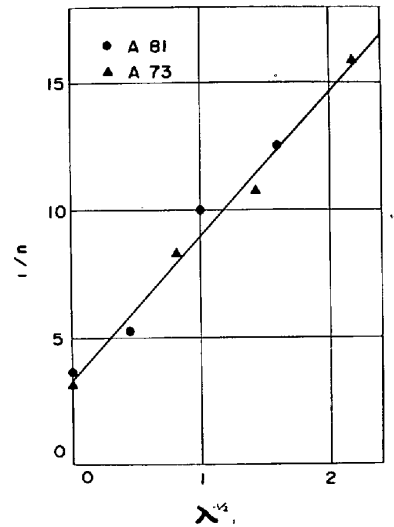


図1 加工硬化指数  $n$  の逆数と球状炭化物の平均自由距離  $(\lambda)$  の平方根の逆数との関係  
A81: Fe-C系介在物を含む  
A73: シリコ系介在物を含む

ここで、 $n$ は動的加工硬化指数、応力振巾を $\sigma_w$ とすれば、最初の $1/2$ 回の繰返しによる内部応力の増加量 $\Delta y_1'$ は

$$\Delta y_1' = K n' \sigma_w$$

同様にして $(N_i - N_{(i-1/2)})$ 回の繰返しによる内部応力の増加量 $\Delta y_{2N_i}$ は

$$\Delta y_{2N_i} = \sigma_w (K n' + K^2 n'^2 + \dots + K^{2N_i} n'^{2N_i}) \quad (8)$$

Orowan の理論が実際のS-N曲線と合うためには $n$ は凡の $10^2 \sim 10^4$ 分の1の大きさでなければならぬ。また、介在物からの割れ発生に先立って塑性変形を生ずるので、 $K$ は塑性応力集中係数( $K_{\sigma}(\rho)$ )に近い値に対応すると考えられる。したがって $K$ の最大値はそれほど大きい値とは考えられないので $K n' \ll 1$ 。したがって(8)式は近似式として

$$\Delta y_{2N_i} = \sigma_w \cdot K \cdot n' \quad (8')$$

Tresca の条件式の類推から、 $\sigma_y$ は最大 $K \sigma_y$ である。そこで、S-N曲線の折曲り点繰返し数 $N_c$ として繰返し応力による加工硬化が極限に達して破壊が開始する応力を $\sigma_f$ とすれば

$$m \cdot 2N_c \cdot \Delta y_{2N_i} = \sigma_f - K \sigma_y \quad (9)$$

$m$ は定数、 $N_c$ は本実験では $10^6$ ぐらいであり、 $n$ として割れ発生は $N_c$ の $1/20$ ぐらいであるから $m = 1/20$

ところで、真破断応力 $\sigma_f'$ 、降伏強度 $\sigma_y'$ と $n$ との間には次の関係が経験的に成立する。

$$\sigma_f' / \sigma_y' = D n + 1 \quad (10)$$

ここで、 $D$ は比例定数である。(9)式の $\sigma_f$ および $\sigma_y$ と(10)式の $\sigma_f'$ および $\sigma_y'$ とはそれぞれ対応すると仮定すれば、(8)式、(9)式および(10)式より

$$\sigma_w = \frac{1}{2mN_c} \left[ \frac{Dn + (1-K)}{K n'} \right] \sigma_y' \quad (11)$$

(11)式は割れが任意の一個の介在物から発生する場合、耐久限 $\sigma_w$ と $n$ および $n'$ との関係が介在物の応力集中係数により、どのように影響を受けるかを示している。(11)式において $n/n' \leq 10^4$ 、 $N_c = 10^6$ 、 $m = 1/20$ として $D$ を実験式より10として、図示すると図2のようになる。介在物の耐久限低下への影響は $1/n$ が大きくなるとともに大きくなり、その傾向は $K$ の増大とともに著しくなることがわかる。実際の $\sigma_w$ と $1/n$ との関係は図3に示すように、図2と同じ傾向を示している。以上のように介在物による耐久限低下や介在物の応力集中係数が大きくなるとともに著しくなることを理論的に説明した。

[文献]

- 1) 岡田, 内山, 荒木 鉄と鋼, 57 (1971) 2, p. 298
- 2) 岡田, 内山, 荒木 鉄と鋼, 57 (1971) 2, p. 335

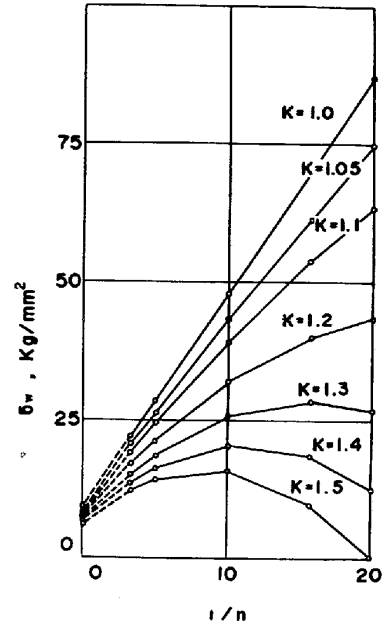


図2 耐久限( $\sigma_w$ )に及ぼす加工硬化指数( $n$ )と介在物の応力集中係数( $K$ )の影響

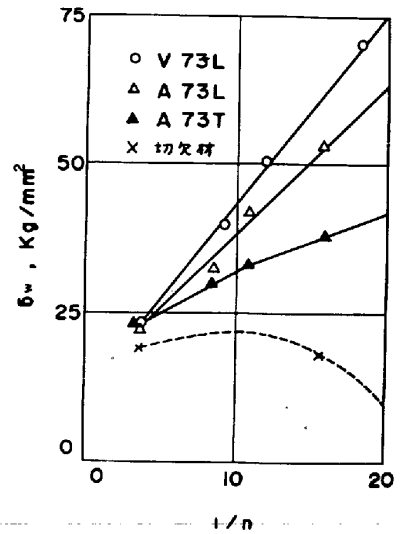


図3 介在物の存在状態の異なる各種試料の耐久限( $\sigma_w$ )と加工硬化指数( $n$ )との関係

V73: 介在物なし

A73L (A+B+C)系介在物を含む  
試験片方向は圧延方向

A73T (A+B+C)系介在物を含む  
試験片方向は圧延方向に  
垂直