

討14-1 フェライト系鉄合金における疲労クラック伝播速度と塑性域について

東北大学大学院

○鈴木 芳春

東北大金研(現在:日本カドビック) 熊谷真一郎

東北大金研

増本 健

I. 緒言 実用鋼の重要な母相組織の一つであるフェライト組織における疲労クラック伝播速度の定量化は実用鋼の疲労クラック伝播挙動を理解する上で重要である。本研究ではクラック伝播速度の定量化の一つの試みとしてクラック先端に形成される塑性域の大きさを測定し、これとクラック伝播速度との関係を調べた。その際、同一組成の合金(Fe-10G-2Ni)が各種の二相多結晶組織(フェライト, マルテンサイト, 冷間加工フェライト)を制作して、クラック伝播挙動におよぼす組織の影響を、さきFe-3%Si合金を用いてクラック伝播速度におよぼす試験雰囲気(760~1x10⁻⁵mmHg)の影響もあわせて検討した。

II. 実験方法 試料の化学組成を表-1に、試験片の熱処理条件および機械的性質を表-2に示す。クラック長さの測定は顕微鏡(精度0.01mm, X200)を用いて行った。塑性域の大きさはヌー7°硬度(荷重50g)およびetch pit法で決定した。疲労試験には容量1tonの電子油圧サーボ機構の疲労試験機を使用し、室温の大気中および真空中(1~1x10⁻⁵mmHg)にて繰返し速度30Hz, 平均応力0の定応力引張圧縮疲労を行った。

III. 結果および考察 図1は各組織の耐力域の室温大気中における疲労クラック伝播速度(da/dN)と応力拡大係数(K_I)との関係を示す。いずれの組織系においてもda/dNのある範囲でlog K_Iとlog(da/dN)との間には直線関係が認められ

$$da/dN = C(K_I)^m \quad m = \begin{matrix} 2.3 & (\text{マルテンサイト系}) \\ 2.3 & (\text{冷加工系}) \\ 3.1 & (\text{フェライト系}) \\ 3.6 & (\text{純鉄系}) \end{matrix} \quad (1)$$

の関係が成り立つ。この直線関係が成り立つ範囲においてda/dNは冷間加工系, マルテンサイト系, フェライト系, 純鉄系の順に大きい。また、いずれの組織系においてもK_{th}が存在しその値は平滑域の耐久限と直線関係にあり、純鉄系, フェライト系, 冷間加工系, マルテンサイト系の順に大きい。

同一K_I値におけるクラック近傍の硬度分布を 図2に示す。

図から明らか
な様にクラック
近傍の硬度
分布の様相は
組織により異
なる。すなわち
フェライト系
においてクラ
ック近傍の硬
度値はクラッ

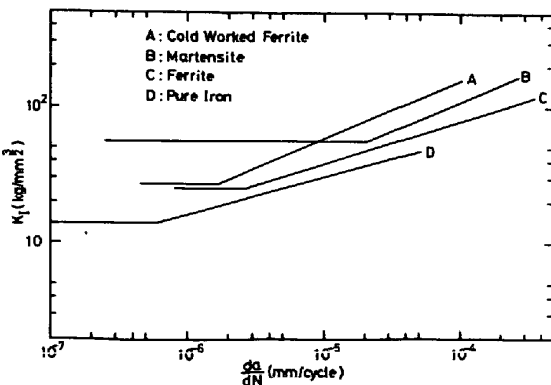


図1 クラック伝播速度のK_I依存性

表-1 試料の化学組成

	C	Si	Ni	Cr	P	S
Fe-10G-2Ni	0.004	0.03	2.05	9.98	0.006	0.013
Fe	0.012	0.009	0.002	0.01	-	-
Fe-Si	0.009	2.96	-	-	0.001	0.008

表-2 試験片の熱処理条件と機械的性質

マルテンサイト	1000°C 1hr W.Q.			
フェライト	1000°C 1hr W.Q. → 670°C 30hr F.C.			
冷間加工フェライト	フェライト → 35% Cold Rolling			
純鉄	800°C 6hr F.C.			
シリコン鉄	850°C 5hr F.C.			
	σ_b (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	δ (%)	grain size (μ)
マルテンサイト	60.9	47.6	28	~60
フェライト	38.4	23.6	-	~60
冷間加工フェライト	62.4	52.1	23	-
純鉄	24.7	14.8	64	~65
シリコン鉄	52.2	37.9	47	~85

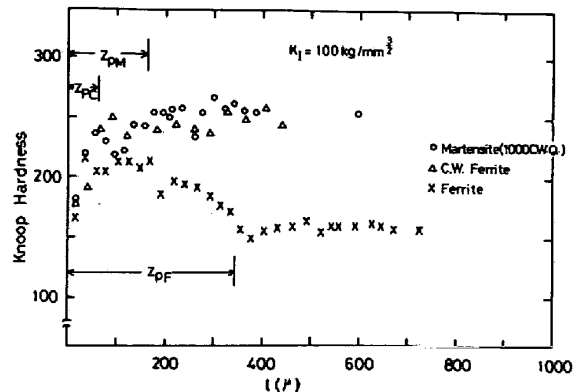


図2 クラック近傍における硬度分布

クガシ離水た場所よりも高くなっているが、マルテンサイト材と冷間加工材においては低くなっている。なおクラックのごく近くの硬度値はこれら組織によるおぼろしい値を示していることは興味深い結果である。この様にクラック近傍で硬度値が変化している領域を塑性域とすると同一 \$K_I\$ 値における塑性域の大きさ (\$Z_p\$) は各組織により異なり、冷間加工材、マルテンサイト材、フェライト材の順に大きくなっていく。

Bilby-Cottrell-Swindenの理論(以下B-C-S理論と記す)によれば長さ \$2a\$ のクラック先端に形成される塑性域の大きさを \$Z_p\$ と降伏応力 \$\sigma_y\$、負荷応力 \$\sigma_a\$ を用いて

$$Z_p/a = \sec(\pi/2 \cdot \sigma_a/\sigma_y) - 1 \quad (2)$$

で与えられる。この式における \$Z_p/a - \sigma_a/\sigma_y\$ の関係を本研究結果から整理してみると図3の様になる。これより本研究で測定した \$Z_p\$ はB-C-S理論が予想する値よりも小さいことがわかる。ただし本研究で測定した \$Z_p\$ は(2)式における \$a\$ を \$2a\$ とするこにより大略満足させることができ次式が得られる。

$$Z_p/a = \sec(\pi/2 \cdot \sigma_a/2\sigma_y) - 1 \quad (3)$$

次に、\$K_I\$ と \$Z_p\$ との関係を図4に示す。いすれの組織材においても \$\log Z_p\$ と \$\log K_I\$ の間には直線関係を近似でき、次式の様になりあせる。

$$Z_p = B(K_I)^n \quad n = \begin{matrix} 1.2 & (\text{マルテンサイト材}) \\ 1.2 & (\text{冷間加工材}) \\ 1.5 & (\text{フェライト材}) \\ 1.9 & (\text{軟鉄材}) \end{matrix} \quad (4)$$

(4)式における指数 \$n\$ は組織により変化しており、一方向荷重下において第1近似的に得られる値2にならな。次にクラック伝播速度と塑性域の大きさとの関係を求めてみる。(4)式と(5)式から

$$da/dN = A(Z_p)^l \quad l = \begin{matrix} 1.9 & (\text{マルテンサイト材}) \\ 1.9 & (\text{冷間加工材}) \\ 2.1 & (\text{フェライト材}) \\ 1.9 & (\text{軟鉄材}) \end{matrix} \quad (5)$$

(5)式において指数 \$l\$ は組織によるおおよそ2に近。 (3)式を用いて(5)式を置き換えると

$$da/dN = C \cdot a^2 \{ \sec(\pi/2 \cdot \sigma_a/2\sigma_y) - 1 \}^2 \quad (6)$$

すなわちクラック伝播速度 \$da/dN\$ はクラック長さ \$a\$、降伏応力 \$\sigma_a\$、降伏応力 \$\sigma_y\$ および係数 \$C\$ によって決定される。

(6)式および(6)式の一般性については仮-3%S:合金を用いて種々の条件下で現在検討中である。その一例としてクラック伝播速度におよぼす試験雰囲気の影響を調べた結果を図5に示す。いすれの試験雰囲気においても \$da/dN\$ と \$K_I\$ の間には(4)式が成り立ち、同一 \$K_I\$ 値における \$da/dN\$ は最大5~6倍程度変化している。クラック伝播速度が急激に変化する臨界は \$10^{-1} \text{ mmHg}\$ 付近に存在する。さらにいすれの試験雰囲気においても応力拡大係数 \$K_I\$ と塑性域の大きさ \$Z_p\$ との間には(4)式が、またクラック伝播速度 \$da/dN\$ と塑性域の大きさ \$Z_p\$ との間には(5)式が成り立つことが確認された。

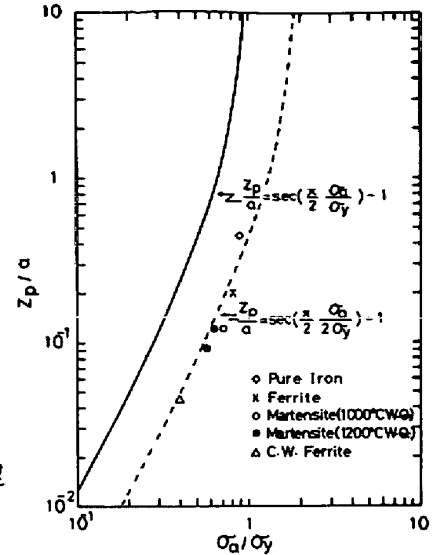


図3 \$Z_p/a\$ と \$\sigma_a/\sigma_y\$ の関係

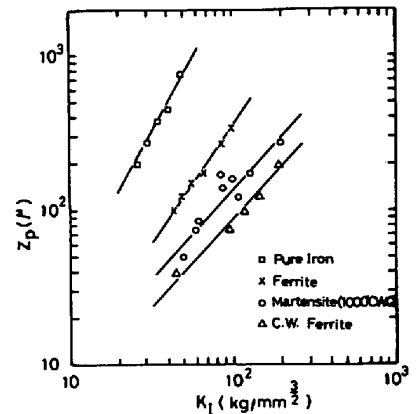


図4 塑性域の大きさ \$Z_p\$ と応力拡大係数 \$K_I\$ の関係

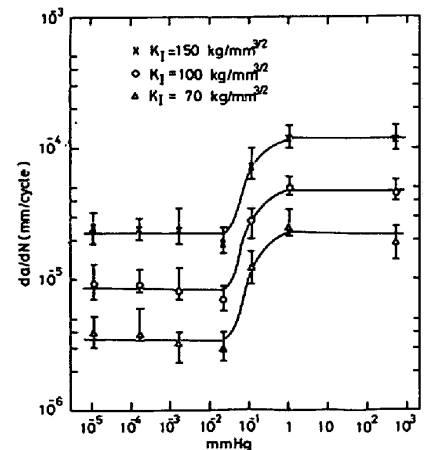


図5 クラック伝播速度の雰囲気依存性