The Society of Materials Science, Japan

120　304鋼の表面クリープ疲労き裂進展におけるき裂形状計測と進展速度評価

石川島播磨重工業(株)　正　○野中　勇　北川正樹
動力炉･核燃料開発事業団　正　渡士克己
東京大学　正　朝田泰英

1. はじめに

高温疲労下で進展している表面き裂の形状計測技術を確立することは、実験室で表面き裂の進展特性を明らかにする場合だけではなく、実機の表面き裂をモニターする場合においても重要なことである。本研究では、貫通き裂について有効であった電気ポテンシャル法を、室温の軸力疲労と曲げ疲労、および650℃の曲げ疲労と曲げクリープ疲労下の表面き裂形状計測に適用した。

一方、線型破壊力学が適用できない状態での、表面き裂進展速度評価に関する研究は少ないが、本研究では、貫通き裂の進展速度評価において有効であった、繰り返しJ積分範囲とクリープJ積分範囲に基づいて、表面き裂の進展速度を整理することを試みた。

2. 実験方法

供試材はSUS304鋼である。試験片形状を図1に示す。軸力疲労試験片の中央部には、半径2mmの半円切欠および半楕円切欠が放電加工されている。

試験は、室温の軸力疲労と曲げ疲労、さらに、650℃の曲げ疲労と曲げクリープ疲労で、疲労は荷重制御三角波、クリープ疲労は10min保持の荷重制御台形波(き裂を有する面が引張保持)である。曲げ負荷は、図2(a)に示すような方法で付与するが、この時の軸力は無視できる。

図2(b)に示すように、試験片の端から30Aの直流を供給し、き裂をはさんで、y=±1mm, ±2mm, ±3mm, ±5mmのいずれかの点における電圧変化を測定し、ビーチマークから求めたき裂の形状(き裂長さとき裂深さ)と対応させた。また、き裂進展速度(x方向とz方向)を整理するために、軸伸び計で、y=±2.5mmの点におけるき裂開口変位を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1　電気ポテンシャル法による表面き裂形状計測

室温と650℃の曲げ疲労および650℃の曲げクリープ疲労試験における電気ポテンシャル値E/E_0(ただし、E_0は初期切欠に対する初期電圧)とき裂形状因子$\sqrt{ac/a_0c_0}$(ただし、a_0は初期切欠き深さ、c_0は初期切

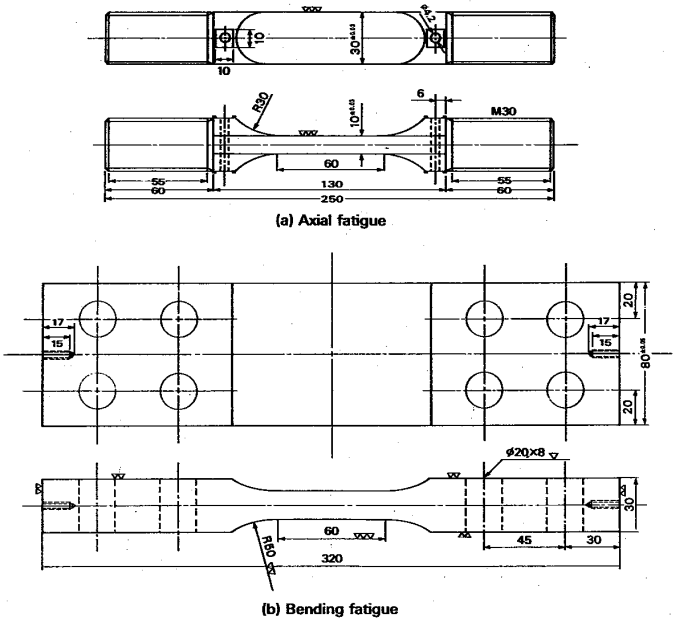
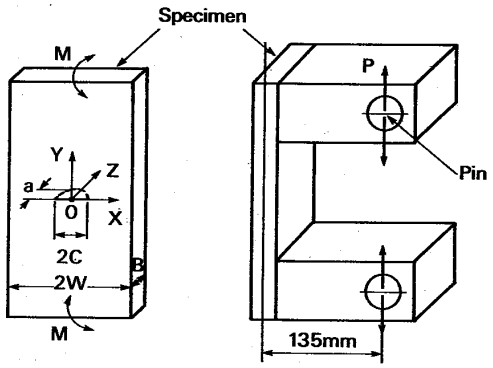
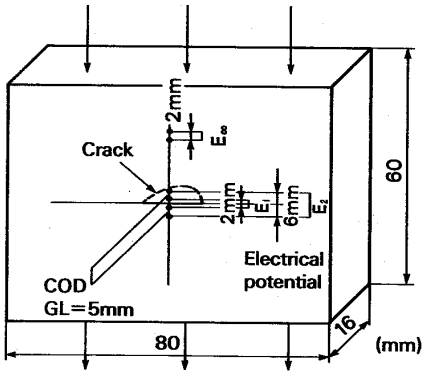


図1　試験片形状



(a) Load conditions



(b) Measurement methods of COD and electrical potential

図2　曲げ疲労試験における開口変位と電気ポテンシャルの測定方法

NII-Electronic Library Service

欠き長さ)の関係を図3に示す。この関係は直線となるが、電圧測定端子間距離yが小さいほど傾きが大きくなり、き裂形状検出感度が高くなることがわかる。

yの依存性をなくすために、$\sqrt{ac}/y$をパラメータ[1]として、E/E_∞(ただし、E_∞は、図2(b)に示したように、き裂のない所での電圧)を整理した結果を図4に示す。$\sqrt{ac}/y$とE/E_∞の関係は、試験片形状や初期切欠き形状さらにはyの値に依存せず、一本の直線になり、この関係を利用して、簡易的にき裂形状を推定できることがわかった。

3.2 表面き裂進展速度評価

(1) 軸力疲労

室温の軸力疲労試験におけるX方向のき裂進展速度dc/dNおよび、Z方向のき裂進展速度da/dNを繰り返しJ積分範囲ΔJで整理した結果を図5に示す。ただし、ΔJは次式で計算した。

$$\Delta J=\frac{\Delta K^2}{E}+\frac{2S_p}{2WB-\pi ac/2} \qquad (1)$$

ここで、ΔK; 応力拡大係数範囲(Newman & Rajuの解析解)[2]、E; ヤング率、B; 試験片板厚、2W; 板幅、S_p; 荷重－開口変位ヒステリシスループから求められる面積[3]である。き裂が小さい時は同一き裂前縁におけるdc/dNとda/dNは、ほぼ等しいが、き裂が大きくなると、その差が大きくなり、dc/dNはda/dNの約2倍になる。図5から、き裂進展速度が10^{-3}mm/cycle以下では、da/dN-ΔJ関係とdc/dN-ΔJ関係は同一直線上にあるが、き裂進展が10^{-3}mm/cycle以上では両者は一致しない。しかし、両者は貫通き裂のda/dN-ΔJ関係とほぼ等しく、半円切欠からの軸力疲労き裂進展速度(da/dNとdc/dN)は(1)式で表されるΔJで整理できることがわかった。これは、Cr-Mo-V鋼の表面クリープ疲労進展速度da/dNがΔJc(=Sc/(2WB－πac/2))で整理できるという坂之上らの研究結果[4]と整合する。

(2) 曲げ疲労

室温の曲げ疲労試験におけるき裂進展速度da/dN及びdc/dNを、次式で求められるΔJで整理した結果を図6に示す。

$$\Delta J=\frac{\Delta K^2}{E}+H_j\frac{n-1}{n+1}\Delta\sigma_b^{max}\Delta\delta \qquad (2)$$

ここで、ΔK; 応力拡大係数範囲(Newman & Raju の解析解)[2]、E; ヤング率、H_j; Newman & Rajuの曲げ乗数[2]、n; 繰り返し応力－ひずみ関係式における加工硬化係数(n=4)、$\Delta\sigma_b^{max}$; 弾性計算による最大曲げ応力範囲、Δδ; 1サイクル中の開口変位変化量)である。曲げ疲労では、同一き裂前縁におけるdc/dNはda/dNより大き

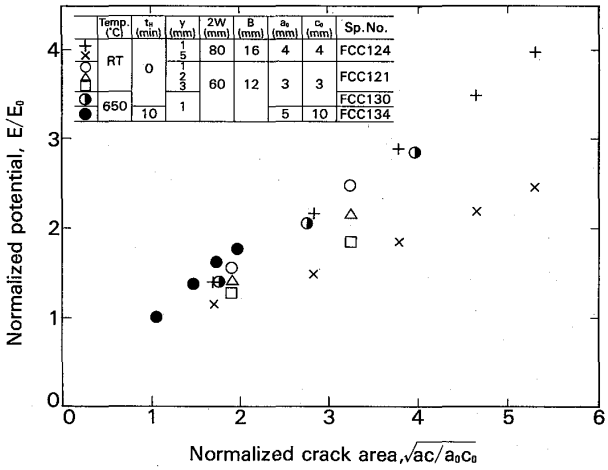


図3　電気ポテンシャル値とき裂形状の関係(1)

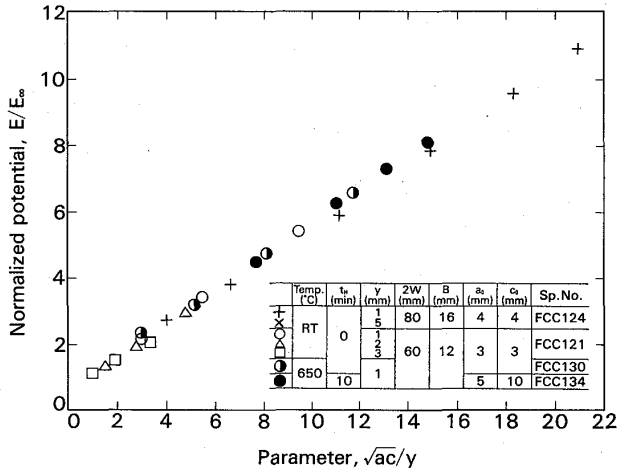


図4　電気ポテンシャル値とき裂形状の関係(2)

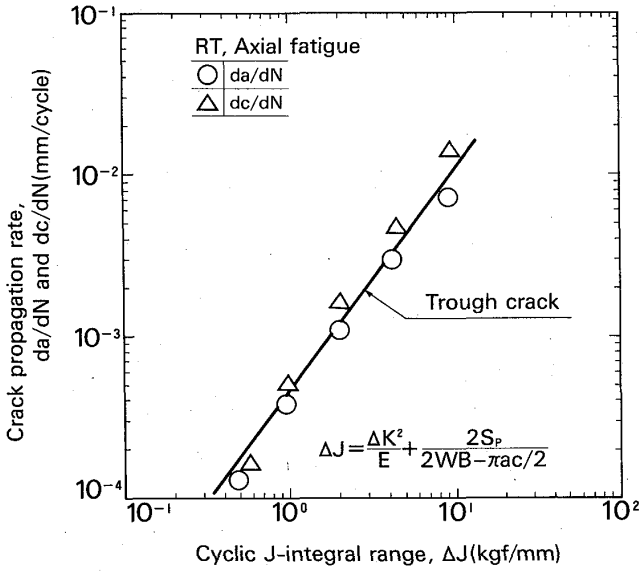


図5　軸力疲労き裂進展速度とΔJの関係

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

く、き裂が大きい場合、dc/dNはda/dNの約10倍である。またda/dN-ΔJ関係とdc/dN-ΔJ関係は、ほぼ一本の直線上にあるが、直線の傾きは、貫通き裂の軸力疲労におけるda/dN-ΔJ 関係の傾きとはやや異なり、(2)式のΔJをさらに補正する必要があると思われる。

(3) 曲げクリープ疲労

650℃、引張荷重保持台形波(t_h=10min)の曲げクリープ疲労試験におけるき裂進展速度da/dNおよびdc/dNを、次式で求められるΔJで整理した結果を図7に示す。

$$\Delta J_c = \frac{\alpha-1}{\alpha+1}\sigma_b^{max}\Delta\delta_c \qquad (3)$$

ここで、α; Norton則における応力指数(α=6)、α_b^{max}; 弾性計算による最大曲げ応力、$\Delta\delta_c$; 荷重保持中の開口変位増分である。表面き裂の$dc/dN\text{-}\Delta J_c$関係は、貫通き裂の軸力クリープ疲労における$da/dN\text{-}\Delta J_c$関係とほぼ一致することがわかった。しかし、表面き裂の$da/dN\text{-}\Delta J_c$関係は、貫通き裂のda/dN-ΔJcと一致しないため、次式を提案した。

$$\Delta J_c = H_j\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\sigma_b^{max}\Delta\delta_c \qquad (4)$$

ここで、H_j; Newman & Raju の曲げ乗数[2]である。(4)式のΔJ_cでき裂進展速度を整理した結果を、図8に示す。表面き裂の$da/dN\text{-}\Delta J_c$関係と$dc/dN\text{-}\Delta J_c$関係は接近し、両者は貫通き裂の軸力クリープ疲労における$da/dN\text{-}\Delta J_c$関係にも接近したが、さらに精度を上げるためには、(4)式を補正する必要があると思われる。

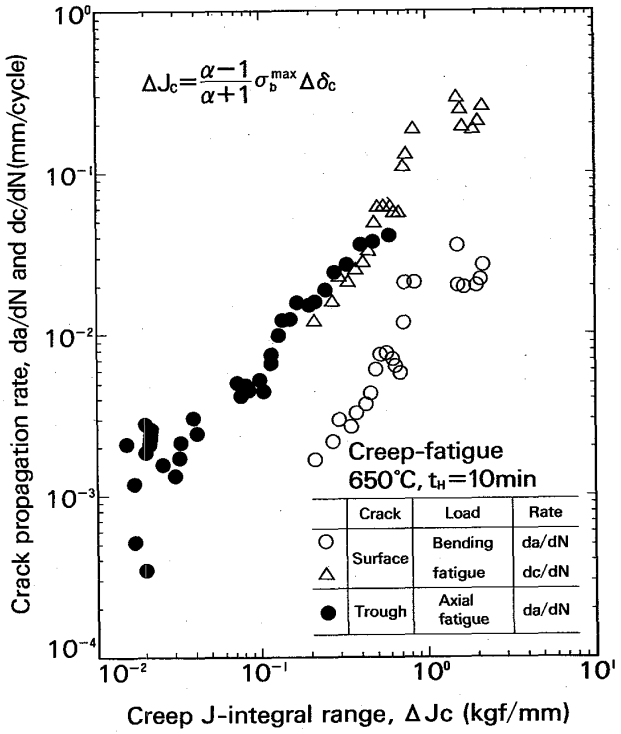


図7 曲げクリープ疲労き裂進展速度とΔJ_cの関係(1)

参考文献

(1) 野中他、第26回高温強度シンポジウム前刷集、p80(1988)
(2) Newman, J.C. et al, NASA TP-1578, (1979)
(3) 平他、材料、28-308, p414 (1979)
(4) 坂之上他、第26回高温強度シンポジウム前刷集、p99(1988)

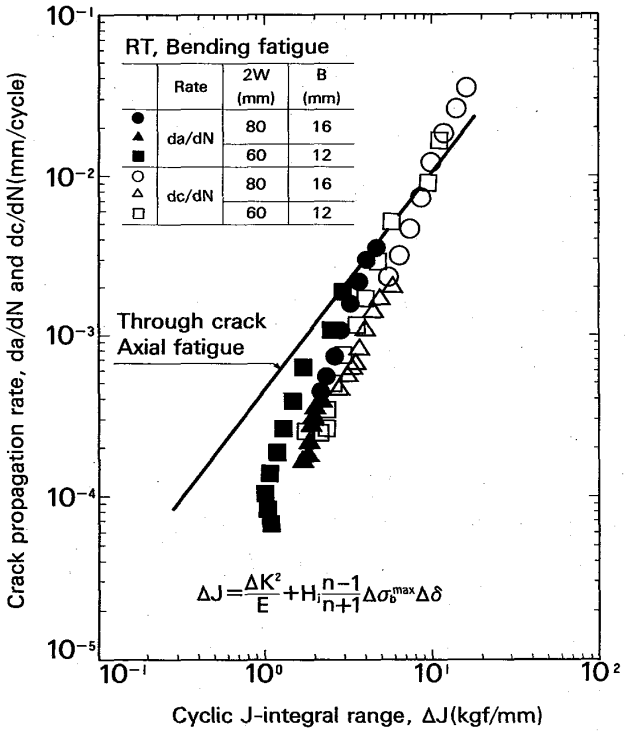


図6 曲げ疲労き裂進展速度とΔJの関係

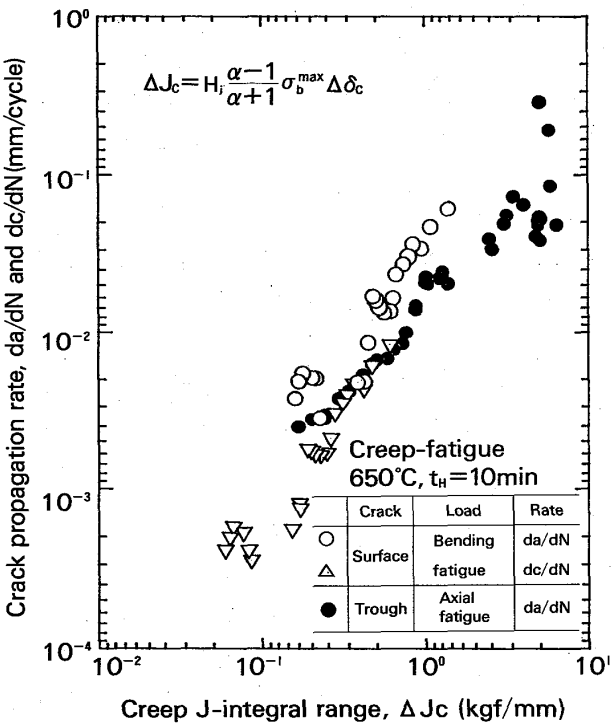


図8 曲げクリープ疲労き裂進展速度とΔJ_cの関係(2)

NII-Electronic Library Service