

圧延ロールの損傷予測法の開発

名古屋大学 工学研究科 機械工学専攻

教授 田中啓介

(平成7年度研究開発助成AF-95009)

キーワード：疲労き裂、混合モード、破壊力学

1. 研究の目的と背景

金属の冷間圧延や熱間圧延に使用されるロールは、損傷の補修として表面を改削して再使用するが、現在は損傷の進行を予測する技術が確立されておらず、作業中にスポーリングと呼ばれる表面はく離や折損などの事故を起こすことが大きな問題となっている。このスポーリングは、表面の材料硬化層中に発生した疲労き裂が、混合モード負荷を受けながら、円周方向に進展して表面はく離に至るものであり、現象的には繰返し応力と残留応力による金属疲労である。

本研究では、この種の疲労き裂進展挙動が混合モードで進展することに注目し、破壊力学的な観点から混合モード疲労き裂進展の評価法を検討した。この結果をもとに、ロール損傷の予測法を検討した。

2. 研究方法

2.1 材料および試験片

実験材料にはオーステナイト系ステンレス鋼(SUS 316NG)を用いた。0.2%耐力は254 MPa、引張強さは564 MPaで、結晶粒径は54 μmである。

試験片は、図1に示すように直径16mmの丸棒に、環状の切欠き試験片でこれに片振り圧縮で予き裂を導入した。疲労前に予き裂による残留応力を除く焼鈍をした。

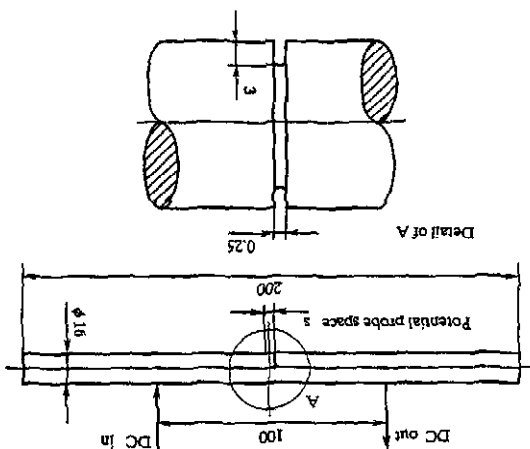


図1 環状切欠き疲労試験片

2.2 疲労試験

疲労試験は電気油圧サーボ式引張ねじり複合疲労試験機(島津製作所製EHF-ED10/TQ-40L)を使用し、モードIおよびモードIIIおよび混合モードでのき裂進展試験を行った。

き裂の観察は直流電位差法で行った。図1に電流の入出力点および、電位差測定プローブの位置を示す。予めき裂長さや電位差の関係を求めておき、電位差の測定値からき裂長さを求めた。

2.3 破面の観察

疲労破面は、走査型電子顕微鏡で行った。また、破面画像を画像解析して、予き裂長さおよびストライエーション間隔の高精度計測を行った。

2.4 X線観察

破面下の微視構造をX線観察した。オーステナイト鋼の場合X線源はMn-K α 線で、311回折を測定した。X線パラメータとして残留応力および半価幅を計測した。なお、残留応力はsin² ψ 法によった。

3. 研究成果

3.1 下限界近傍の疲労き裂進展挙動

予き裂材に対して、モードIIIを応力比R=-1で、モードI荷重をR=0で負荷した。このときの疲労限界線図を図2に示す。

予き裂に負荷する応力拡大係数が低いときにはき裂は進展しないが、ある限界値以上であると進展を開始する。この進展破面は、結晶粒オーダーの微視的なせん断破面である。モードIII成分が負荷されている場合、応力拡大係数が高くなると、ファクトリループ型の破面に遷移する。これは、モードI形の引張形疲労破面である。さらに大きくなると、ファクトリループを形成しながらも進展し、最終破壊に至る。また、負荷する応力がさらに高くなると、破面はマクロにせん断形に遷移する。このき裂は、弾塑性応力状態で進展しておりこれについては次項で述べる。

図2において、き裂進展開始条件は次式で与えられる。

$$\left(\frac{\Delta K_I}{\Delta K_{Ith}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta K_{III}}{\Delta K_{IIIth}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

ここで、 ΔK_{III} はモードIの疲労下限界、 ΔK_{IIIth} はモードIIIの疲労下限界である。

図中に破線で示す、き裂の連続進展限界も同様な関係式で与えられる。

負荷される応力拡大係数が、図におけるき裂進展開始に対応する実線より大きく、連続進展に対応する破線より

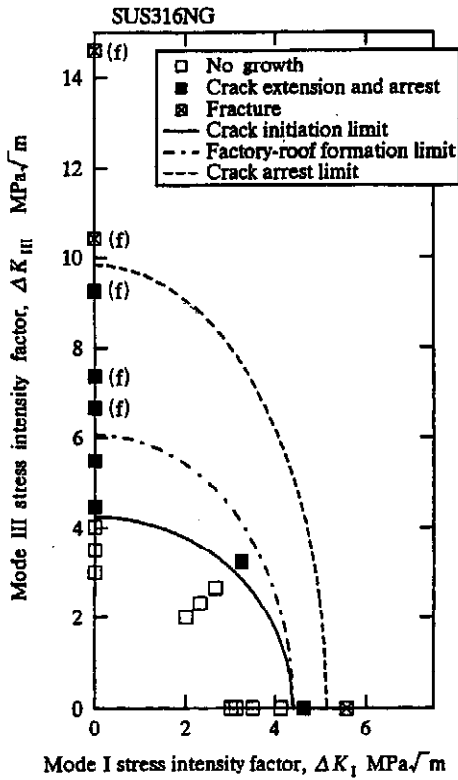


図2 モードIとIIIにおける疲労き裂進展限界曲線

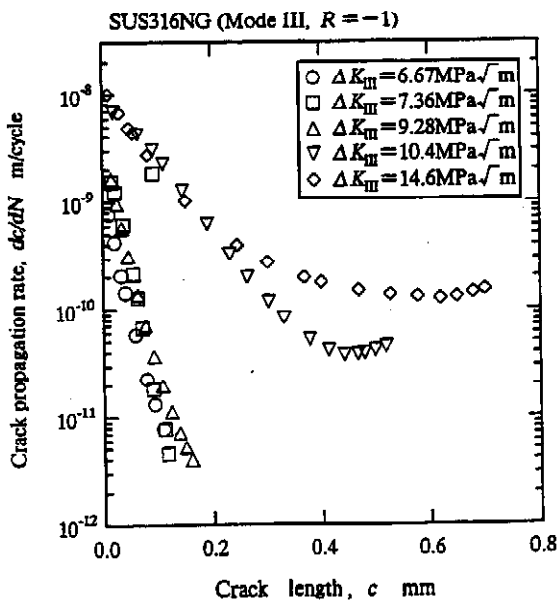


図3 疲労き裂進展曲線 (モードIII負荷の場合)

り小さい中間の場合には、発生したき裂は進展と共に速度を低下させやがて停留する。この結果を図3に示す。この原因はき裂が進展するに伴い、破面同志の接触が増大するため、見かけの応力拡大係数 ΔK_{app} が増大するにも関わらず、き裂先端の真の応力拡大係数 ΔK_{tip} が低下するためである。つまり、 ΔK_{tip} と ΔK_{app} の関係は次式で与えられる。

$$\Delta K_{tip} = \Delta K_{app} - \Delta K_{sh} \quad (2)$$

ΔK_{sh} がき裂面の接触到起因する遮蔽項である。

この ΔK_{sh} はき裂の進展と共に、き裂の面が増大するため上昇する。き裂が停留する下限界においては ΔK_{tip} が一定であると仮定し、 ΔK_{IIIth} とき裂長さとの関係を求めることができる。図4に ΔK_{IIIth} のき裂長さに対する変化を示す。図中には、フェライト系鉄鋼材料(S45C)の結果²⁾もあわせて示すが、フェライト鋼の方が遮蔽効果は大きい。

き裂の進展限界を決定するところの下限界の応力拡大係数 ΔK_{IIIth} は次式となる。

$$\Delta K_{IIIth} = \Delta K_{tipth} + \Delta K_{shth} \quad (3)$$

この下限界値の上昇とき裂進展量との関係をき裂進展抵抗法(R曲線法)と称する。このR曲線は、試験片の幾何学形状に依存しない。従って、設計で考えている負荷応力状態での部材中のき裂に対する応力拡大係数が求められると、これをR曲線に適用して限界の負荷を決定することが出来る。あるいは、設計変更に伴う、疲労強度への影響を計算で求めることが可能である。実際、ねじり荷重を受ける寸法の異なる丸棒の疲労強度の予測に適用したが、予測と実験結果はよく一致した。さらに、き裂が、混合モードI+IIIの負荷を受ける場合に対して

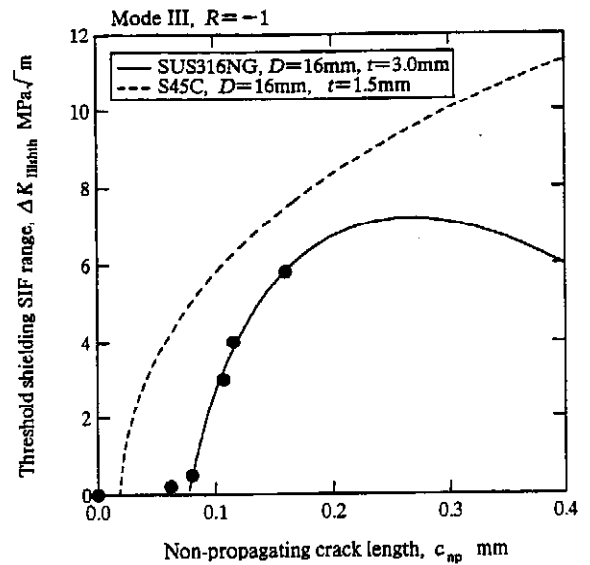


図4 き裂進展に伴う下限界応力拡大係数の増大

もこの手法を展開することは可能であると考えられる。

3.2 弾塑性疲労き裂進展挙動

繰返しねじり荷重が負荷される場合では荷重が大きくなると、破面はマクロにせん断形となる。このとき、き裂先端の塑性変形が大きくなり、荷重と変位の関係にも非線形性が表れるため、前項で用いた線形破壊力学パラメータである応力拡大係数は適用できない。本研究では、き裂進展を支配するパラメータとしてJ積分範囲を提案した。

疲労試験は、変位範囲を制御し両振りで行った。このとき、モードIIIではトルクとねじれ角との関係、モードIは軸荷重と変位の関係を試験中に記録し、それからき裂の開口点を定めると共に、開口点以上のループから簡便法を使用しJ積分範囲を求めた⁴⁾。

モードIII単独およびモードI単独の場合の、疲労き裂進展速度と応力拡大係数の関係を図5に示す。ステンレス鋼に関して、伝ば速度da/dN (m/cycle)とJ積分範囲ΔJ(N/m)との関係はそれぞれ次式で与えられる。

$$(dc/dN)_m = 7.70 \times 10^{-13} (\Delta J_m)^{1.41} \quad (4)$$

$$(dc/dN)_I = 4.25 \times 10^{-13} (\Delta J_I)^{1.57} \quad (5)$$

また、図中にはフェライト鋼の結果も示すが、上式と大差ない。同一のΔJでは、モードIIIの場合の方がき裂進展速度は遅い。

混合モードI+IIIの場合、き裂進展速度は、両単独モードの場合の中間にある。ここで、混合モードパラメータとして

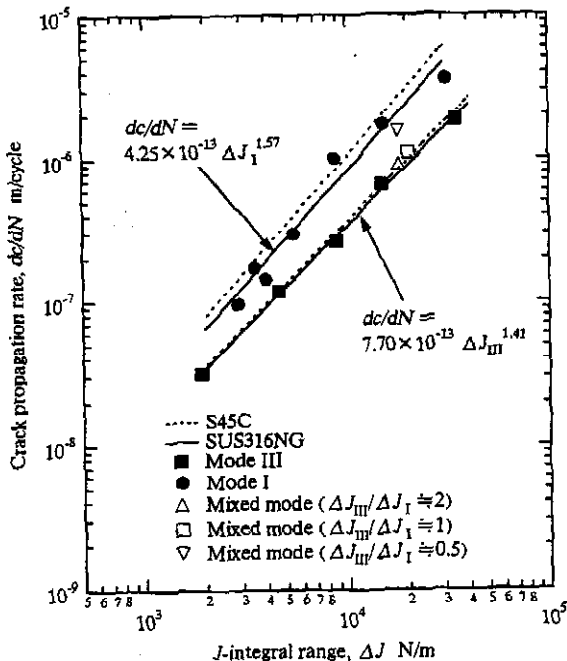


図5 疲労き裂進展速度とJ積分範囲との関係

$$\beta = \tan^{-1}(\Delta J_m / \Delta J_I) \quad (6)$$

をとり、き裂進展速度との関係を図6に示す。混合モードでのき裂進展速度が式(4)と(5)の線形加算で与えられることがわかる。

$$dc/dN = 4.25 \times 10^{-13} (\Delta J_I)^{1.57} + 7.70 \times 10^{-13} (\Delta J_m)^{1.41} \quad (7)$$

混合モードにおいては、モードI単独の場合と同様に疲労破面にはストライエーションが認められる。この間隔とマクロき裂進展速度との関係を図7に示す。図より、混合モードにおいても両者は一致する。つまり、モードIIIが重畳することによりストライエーションの形成がモードI単独の場合より大きくなっている。ただし、モー

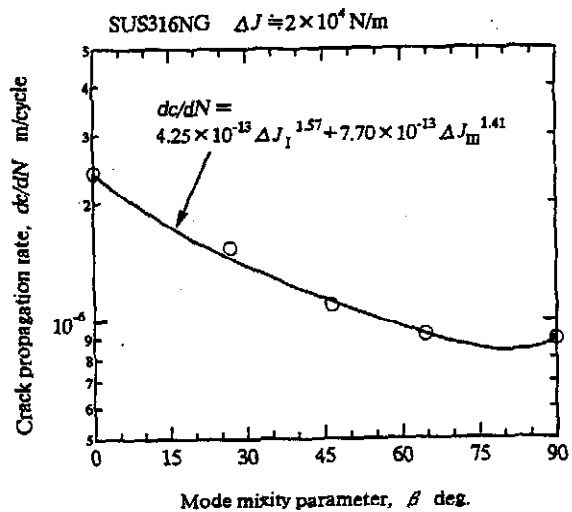


図6 き裂進展速度の混合モード比による変化

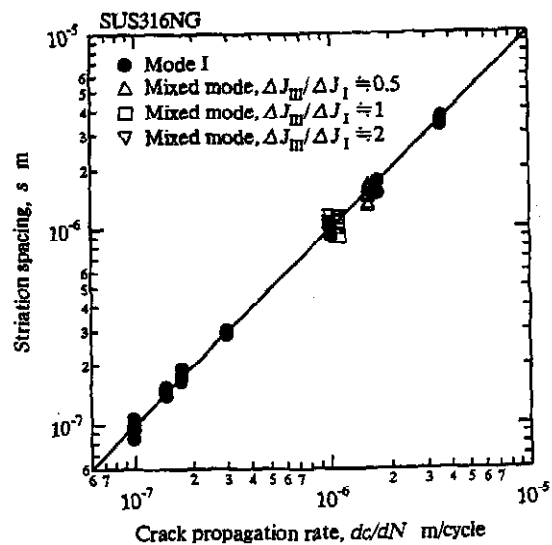


図7 ストライエーション間隔とマクロき裂進展速度との関係

モードIII単独の場合には、ストライエーションは認められず、破面上には破面のこすれによる条痕が認められる。

3.3 疲労破面 X線観察

疲労破面をX線法で観察し、破面上の残留応力および回折線半価幅を測定した。図8に残留応力とJ積分の関係を示す。残留応力はき裂進展方向（半径方向、 r 方向）と、それに垂直な方向（接線方向、 θ 方向）を測定した。モードI破面ではき裂進展方向に引張の残留応力が大きく、 θ 方向はゼロに近い。一方、モードIIIの場合は、いずれの方向も圧縮残留応力であるが、 θ 方向の方が圧縮が大きい。この、モードIの圧縮残留応力は、き裂先端での軸方向の塑性的な伸びに伴う r 方向への縮み変形が原因である。このとき、 θ 方向には平面ひずみのため変形量は小さくしたがって残留応力も小さい。これに対して、モードIIIで圧縮となるのは、摩擦こすれが原因であり、この変形は θ 方向が大きいため大きな圧縮になったものと考えられる。

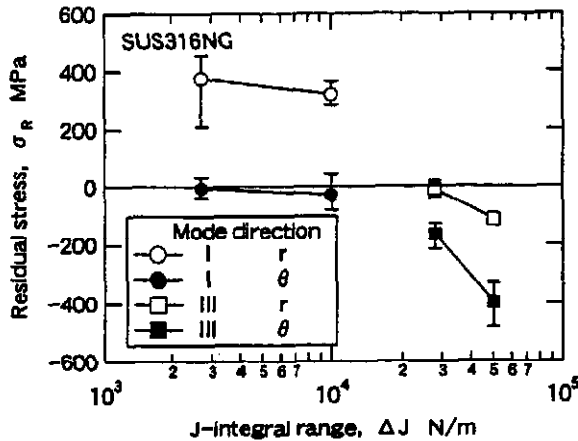


図8 疲労破面上の残留応力とJ積分の関係

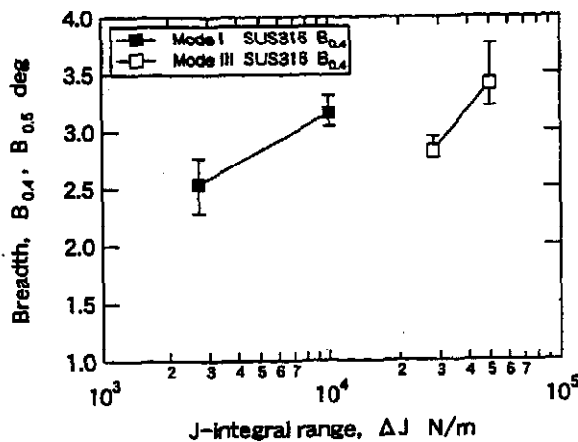


図9 疲労破面上の半価幅とJ積分の関係

図9には回折線半価幅の結果である。モードによらずJ積分が大きくなるほど、半価幅は大きくなる。このことはフェライト鋼においても観察されている。半価幅は材料中のマイクロ応力に対応しており、き裂先端での塑性変形の程度に起因する。J積分値が大きいほど塑性変形の程度は大きいことに対応する。

以上のように、破面およびその近傍の材料の内部構造を観察し、破壊の条件あるいは機構を推定する方法はX線フラクトグラフィと称されており、特に電子顕微鏡によるフラクトグラフィが困難にも適用できる可能性があり、破壊の解析や機構の検討に利用することができる。

4. 結言

モードIおよびIII単独あるいはこれらが重畳した場合の予き裂からの疲労き裂進展挙動を検討した結果をまとめると次のようになる。

- (1) き裂進展開始条件は、コードIとIIIで大きく異なる。また、混合モードの場合は4分の1楕円則で表せる。低応力ではき裂は進展とともに減速し、ついには停留する。この挙動は、R曲線法で持って予測が可能である。
- (2) 高応力では、マクロ的にせん断形でき裂進展するが、このき裂の進展速度はJ積分のべき乗に比例する。また、同一のJ積分値ではモードIIIの方がIより進展速度が低い。また、混合モード負荷における進展速度は、モードIとIIIの線形加算則で与えられる。
- (3) 疲労破面の残留応力はモードIで引張、モードIIIで圧縮となる。引張残留応力は、おもにき裂先端での引張塑性変形によるものであり、圧縮残留応力は破面の摩擦接触によるものである。

本研究によって混合モード下のき裂進展を解析する基礎は固められた。今後、この基礎的結果をロール損傷の解析に応用することによって、破損および破壊の防止技術が一層発展するものと考えられる。

謝辞 本研究に対する天田金属加工機械技術振興財団の助成に感謝いたします。

参考文献

- 1) 武知弘, 難波和郎, 川崎宏一, 藤原圭三, 鉄と鋼, 65 (1979) 2067.
- 2) 田中啓介, 秋庭義明, 于慧臣, 日本機械学会論文集 (A編) 64 (1998) 1812.
- 3) 秋庭義明, 田中啓介, 張洛明, 日本機械学会論文集 (A編) 42 (1996) 356.
- 4) 田中啓介, 秋庭義明, 中村弘文, 寺田篤志, 材料 46 (1997) 1248.
- 5) 田中啓介, 広瀬幸雄, 材料 37 (1988) 1240.