

Three dimensional simulation of polycrystalline cleavage crack propagation in steel

学籍番号 50757 杉本 圭

指導教員 栗飯原 周二

(平成 19 年 2 月 7 日提出)

Keywords: 劈開き裂、シミュレーション、多結晶、脆性破壊、破面写真、鋼

1. 序論

わが国の環境・エネルギー問題は 21 世紀でもっとも大きな課題のひとつである。燃焼の際、煤塵や SOx をほとんど排出しないことや、原油の中東依存度がきわめて高いことから環境エネルギー問題に天然ガスの普及促進は大きな効果がある。天然ガスのための輸送設備として、わが国で使われている LNG 船と欧米で発達しているパイプラインがあげられる。わが国で今検討されているものとしてサハリンパイプラインモデルというものがあるが技術的問題として建設費の問題、安全性の問題が挙げられ、現状より安い材料費で小径化し、高圧化にも十分に耐えうるものであれば、費用は減少し事故も少なくなり環境負荷も減ることは明白である。現在、上の条件を満たす、細粒化による超鉄鋼という期待される実験段階の新たな材料があるのだが、課題がまだ残っており破壊の吸収エネルギーが低下することや集合組織の問題を始めとして、その解明には至っていない。破壊のマイクロ挙動を解明するために本研究では、マイクロな 3 次元の劈開破壊伝播モデルを用い、伝播経路のシミュレーションを行うことを試み脆性破壊におけるさまざまな現象を統一的に理論化するためを試みた。

2. 理論とモデル化

ひとつの結晶粒内をき裂が伝播する際、3 つの劈開面に作用する垂直応力のうち最も高い垂直応力を有する $\{100\}$ 面を劈開面、き裂伝播経路として選択するものと仮定する。そしてその最大値を持った σ_{normal} がき裂先端から距離 r_c のところで限界応力を超えたならば、劈開き裂は結晶粒の中を伝播すると仮定する。つまり、 $\sigma_{normal}^{max}(r_c, \theta_m) \geq \sigma_c$ と表せる。そして左辺を評価するために局所的な応力拡大係数を考える必要がある。それを $K_{\alpha, \psi}$ とする。これをモデル化する上で考慮する基本原理は次の 3 つである。①き裂先端がまっすぐでないことによる K の不均一さを考慮する、②劈開面の間の隆起 (ridge) によって K を減少させる、③表面の不規則さに由来する K を求める、

3. 実験

3.1 鋼材

熱処理により粒径を 110、20、8 μm と変化させた鋼材 A1, A2, A3 を準備した。

3.2 引張試験とシャルピー試験

ホール・ペッチの法則が認められた。引張りに関しては細粒化による影響はほぼ無視できると判断した。劈開破面を SEM によって観察した。細粒化によって強度だけでなく温度による靱性を高めていることを確認した。

3.3 3 点曲げ試験などによるき裂伝播停止実験

劈開の際、tear-ridge が太いほど、また、両側の破面が近いほど分離しにくいことがわかった。

4. シミュレーションと考察

劈開破面のシミュレーションを行い Fig1 のように三次元に図示した。特性値に必要な値は実験結果を参考にして決定した。シミュレーションにおける特性値を以下にあげる。① x 方向がき裂進展方向、z 方向はき裂前縁に沿った方向である。②結晶粒の劈開面を 1x、1z の辺を持つ長方形とする。③tear-ridge がせん断破壊する限界条件の値 U_{cr} を引張試験より求めた。

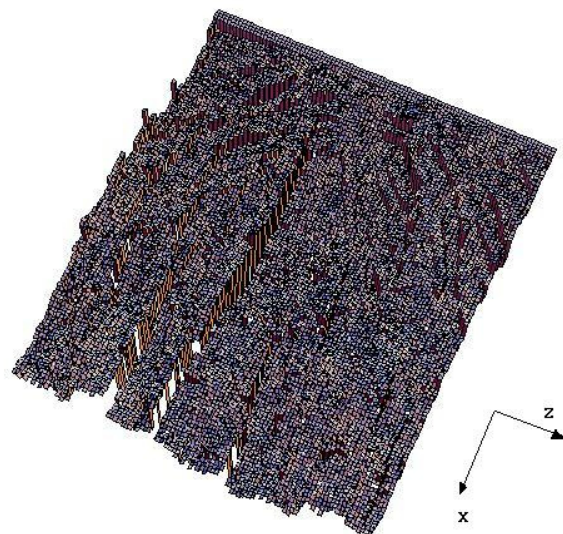


Fig.1 Simulation of cleavage crack propagation grain size 20 μm

4.1 モデルの妥当性

Fig1Fig2 より破面形態が非常に近い。強度や靱性について Fig1Fig3 のように粒径依存性が認められ、き裂伝播経路の複雑さの温度依存も実験値と計算値で同じ傾向にあり、妥当な結果が得られた。

4.2 tear-ridge の影響

Fig5 のようにき裂が進展しにくくする。tear-ridge によってその箇所の延性が大きくなるからと考えられる。tear-ridge によって、局所応力拡大係数 K が減少しき裂の進展を抑制している。だがある一定以上の tear-ridge 数になると影響が少なくなる。それを Fig4 に示す。

4.3 温度の影響

き裂伝播抵抗を下げることで温度を低下させることと同様の効果を出したが、破面の大きさは常に一定であるため、Fig6 のような低温での破面単位減少まではモデル化できなかった。

5. 結論

(1)モデルの妥当性

き裂伝播経路の傾向が同じで、靱性、劈開応力に関しても粒径依存性が認められた。以上のことよりモデルの妥当性が確認された。

(2)tear-ridge の影響

tear-ridge の未分断箇所が多い箇所はき裂進展が遅い。tear-ridge によって局所応力が減少しているためと考えられる。

(3)温度の影響

破面単位が低温に移行すると減少することはひとつの劈開面が二つ以上に割れている面が存在していることを示唆している。今回のモデルではそれが再現されなかった。

6. 今後の展望

今後破壊のミクロ形態をさらに発展させるためには温度に依存した破面単位、粒径の不均一性、集合組織の影響を加味したモデルの拡張が必要になる。

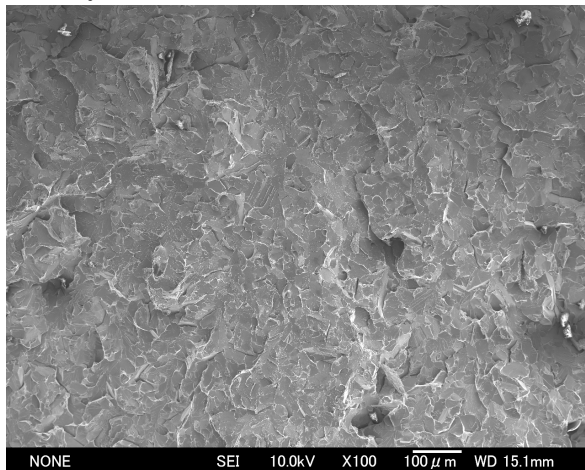


Fig.2 SEM of cleavage crack propagation

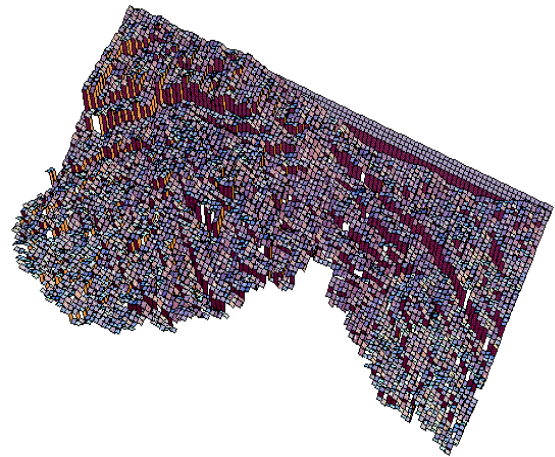


Fig3 Simulation of cleavage crack propagation grain size $8\mu\text{m}$

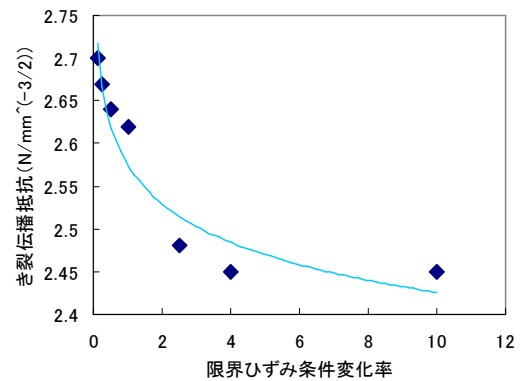


Fig4 Relation of resistance and limit strain

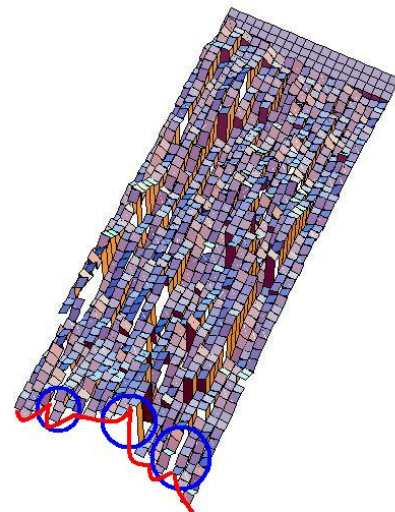


Fig5 Non-straight of front by tear-ridge

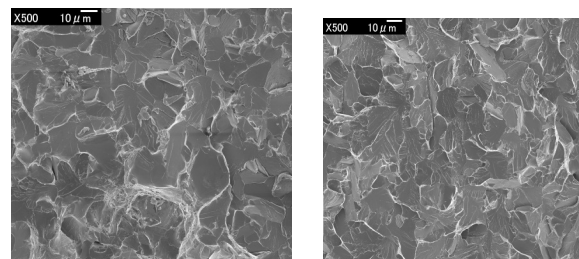


Fig 6 left:A2-9(-70°C)、right:A2-7(-120°C)