

Fe-30%Cr合金単結晶の疲労き裂伝播の結晶学的方位依存性

同志社大学	院 (現 京都大学 院)	学	○ 兼子佳久
京都大学	工	正	橋本 敏
同志社大学	院	学	天野 幸治
同志社大学	工	正	御牧 拓郎
京都大学	工	正	三浦 精

I. 緒言

金属における疲労き裂は結晶学的異方性の影響を大きく受けると考えられるが、その挙動の基礎的な機構の研究を行う場合、多結晶材料よりもモデル化しやすい結晶学的方位の明確な単結晶試験片を用いて実験を行うのが有効である。単結晶⁽¹⁻³⁾や方向性粗大粒結晶試験片⁽⁴⁾を用いた疲労き裂伝播の結晶学的方位依存性の研究によって、き裂伝播は結晶方位結晶学的方位依存性が報告されている。ただし、系統的な調査が行われたわけではないために、き裂伝播挙動の結晶方位依存性は依然不明瞭な点が多い。特にbcc金属の単結晶の報告は我々の知る限り皆無であり、その機構については実験的にほとんど解明されていない。

本研究では異なる8種類の異なる引張軸を持つFe-30%Cr合金(フェライト系ステンレス鋼)単結晶および多結晶CT試験片を用いて疲労き裂伝播試験を行い、破壊様式、き裂伝播の抵抗、およびき裂伝播の形態に及ぼす結晶方位の影響を系統的に調査・検討する。

II. 実験方法

単結晶はFe-30%Cr合金の棒材からBridgman法を用いて作製した。疲労試験にはそれらの単結晶から切り出したCT試験片(20×20×1.5mm³)を用いた。表面方位は[1 1 0]とした。試験片は[0 0 1]~[1 1 1]~[1 1 0]の間に異なる8種類の引張軸を持つように作製した。疲労試験は大気中、室温で油圧制御試験機を用いて行った。負荷荷重は1 Hzの片振り繰返し引張荷重である。

III. 実験結果および考察

疲労き裂伝播試験を行った結果、引張軸によって破壊形態が大きく異なることがわかった。

引張軸が[0 0 1]の場合、比較的低い負荷荷重レベルで(0 0 1)に沿ってへき開破壊した。引張軸が[1 1 3]~[2 2 1]の試験片は、切欠き先端部から、Stage I 疲労き裂が発生・伝播し、最終的には延性的に変形していった。引張軸が[1 1 0]の試験片は、比較的高い負荷荷重レベルでなければ、疲労き裂が発生・伝播しなかった。また、ある程度き裂が伝播すると、高い負荷荷重レベルのために、き裂先端前方に軸に対し水平な方向に双晶が発生し、き裂伝播の障害となった。き裂は双晶での停留、再進展を繰返し、試験片は最終的に、引張軸と平行な(0 0 1)面に沿って脆性破壊した。

試験片の表面付近では全ての試験片において、き裂は単一または複数のすべり面に沿って伝播した。

各試験片におけるき裂進展速度da/dNとエネルギー解放率Δgとの関係をFig.1に示す。引張軸[0 0 1]の試験片はへき開破壊したので、Fig.1には記載していない。き裂伝播の抵抗は明らかに方位依存性が認められ、引張軸が[1 1 0]に近くなるほど大きくなる傾向がある。引張軸が[2 2 1]と[1 1 0]の試験片では多結晶よりも強いき裂伝播の抵抗を示した。

表面観察から全ての試験片のStage I き裂はFig.2に示すように2つの形態に分類された。1つはき裂面に対し非対称な降伏領域が発達しているき裂形態で、もう1つはき裂先端でき裂面と同一の面上に直線状のすべり帯が見られるものである。

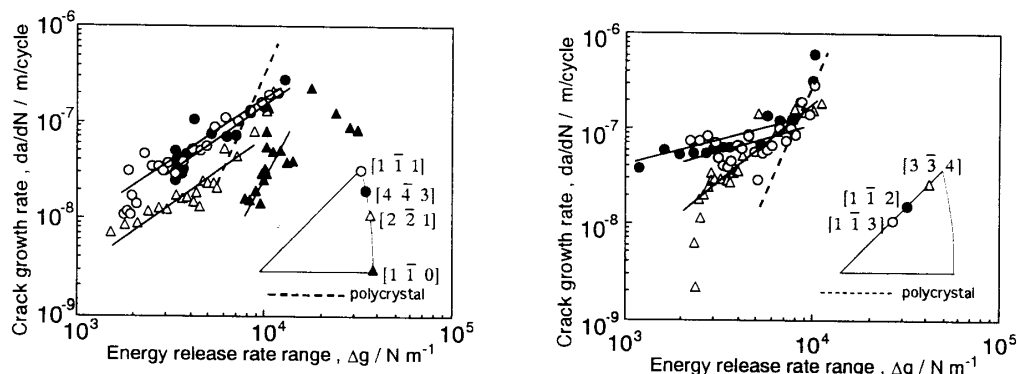


Fig.1 Relationships between crack growth rate and energy release rate range of Fe-30%Cr single crystal specimens.

Stage I き裂の伝播は、き裂先端から放出された転位がすべり帯を形成し、そのすべり帯が分離することが機構である⁽⁵⁾と提案されている。非対称降伏をともなうき裂では、降伏領域を形成しているすべり線はbcc金属でよく見られる波状であったため、き裂先端で交差すべりが頻繁に生じていると考えられる。したがって、ハークスベクトルが $[1\ 1\ 1]$ または $[\bar{1}\ \bar{1}\ \bar{1}]$ の交差すべりが可能ならせん転位の放出がき裂の伝播に関係すると考えられる。直線状のすべり帯をともなうき裂では、試験片表面におけるき裂進展方向は $[\bar{1}\ \bar{1}\ 1]$ 方向であり、き裂先端で交差すべりが見られなかったことから、ハークスベクトルが $[\bar{1}\ \bar{1}\ 1]$ の交差すべりが不可能な刃状転位の放出がき裂伝播に関係すると考えられる。伝播していったき裂はどちらか一方の形態をともなうき裂でほぼ構成されるかまたはそれぞれの形態をともなうき裂の混合で構成された。それらの選択には方位依存性があり、引張軸が $[1\ \bar{1}\ 1]$ を境に領域が分かれ、例えば $[1\ \bar{1}\ 2]$ 引張軸ではき裂は非対称降伏をともなうもののみであり、 $[2\ \bar{2}\ 1]$ 引張軸では両方の形態のき裂が選択されるが、主に直線状のすべり帯をともなうき裂が選択された。上記の2つのき裂形態ではき裂伝播の機構が異なることが予想され、それぞれの固有のき裂伝播の抵抗が異なることが考えられる。直線状のすべり帯をともなうき裂が支配的な試験片は比較的高いき裂伝播の抵抗を示すことから、直線状のすべり帯をともなうき裂の固有の抵抗の方が非対称な降伏領域をともなうものより高いと考えられるが、そのような差異が生じる機構の詳細については現在のところ不明である。

非対称降伏をともなうき裂先端のすべり線の発達に対し、らせん転位に作用する剪断応力の解析を応力拡大係数をもとに行った。非対称に発達したすべり線は、混合モードのき裂の先端からき裂面と同一面に放出されたらせん転位が最も剪断応力の高いすべり面に交差すべりするために形成されると仮定する。単位引張応力下で、交差すべり可能なすべり面上におけるき裂先端からの距離がき裂長さの1/2の位置での応力を評価の基準とした。Fig. 2(a)のき裂の場合で、すべり面を $\{1\ 1\ 0\}$ と $\{2\ 1\ 1\}$ に限定した解析結果をTable 1に示す。解析ではせん断応力の高いすべり面は $(0\ 1\ 1)$ と $(1\ 1\ 2)$ であった。試験片表面で観察されたすべり系はFig. 2(a)に見られるように $(0\ 1\ 1)$ や $(0\ 1\ 1)$ と $(1\ 1\ 2)$ の中間であり、解析結果とよく一致した結果となっている。

IV. 結言

1. 破壊形態に方位依存性があり、引張軸が $[0\ 0\ 1]$ の試験片は $(0\ 0\ 1)$ 面でへき開破壊し、 $[1\ \bar{1}\ 3]$ ～ $[2\ \bar{2}\ 1]$ はStage I 疲労き裂が発生・伝播後、延性的に変形し、 $[1\ \bar{1}\ 0]$ はき裂が発生・伝播後、 $(0\ 0\ 1)$ 面で脆性破壊した。
2. き裂伝播の抵抗に方位依存性があり、引張軸が $[1\ \bar{1}\ 0]$ に近づくにつれ高くなる。
3. き裂先端の形態は非対称な降伏をともなうものと直線状のすべり線をともなうものに分類された。非対称な降伏をともなうき裂に対し、らせん転位の交差すべりに着目したき裂モデルを提案した。

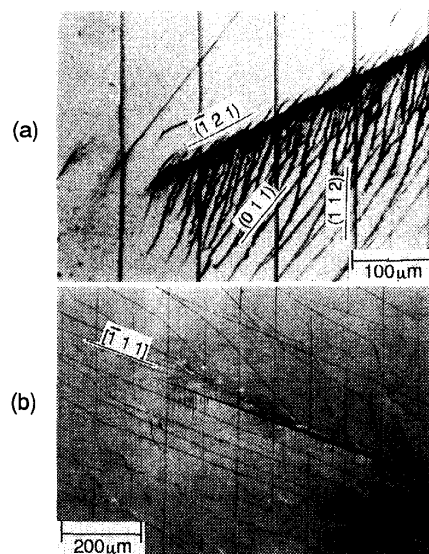


Fig. 2 Two forms of Stage I fatigue cracking observed at specimen surface.

- (a) The cracking with an asymmetrical yielding.
(b) The cracking with a planar slip band.

Table 1 Shear stress resolved on each slip plane at the distance of half of crack length from the crack tip under a unit tensile stress.

Slip plane	(011)	(112)	(101)	(21 $\bar{1}$)	($\bar{1}\bar{1}$ 0)	($\bar{1}$ 21)	(011)
Shear stress	0.1220	0.2670	0.1865	0.1856	0.0244	0.1615	0.2693

参考文献

- (1) H. Ishii and J. Weertman; Metall. Trans., **2**(1971), 3441.
- (2) R. A. Yeske and J. Weertman; Metall. Trans., **5**(1974), 2033.
- (3) P. Rieux, J. Driver and J. Rieu; Acta Metall., **27**(1979), 145.
- (4) C. E. Richards; Acta Metall., **19**(1971), 583.
- (5) K. Tanaka and T. Mura; Acta Metall., **32**(1984), 1731.