1107 双結晶モデルによる局所変形開始およびき裂発生におよぼす 結晶方位依存性評価

Crystal orientation dependence of deformation localization and ductile fracture in FCC bi-crystal materials

○学 土屋 佑太 (北見工大院) 正 三浦 節男 (北見工大) 正 柴野 純一 (北見工大)
正 尾崎 義治 (北見工大) 正・フェロー 小林 道明 (北見工大)

Yuta Tsuchiya, Graduate Student of Kitami Institute of Technology, 127Koen-cho, Kitami
Setsuo MIURA, Kitami Institute of Technology Jun-ichi SHIBANO, ditto
Michiaki KOBAYASHI, ditto Yoshiharu Ozaki, ditto

Key Words : Ductile Fracture, Bi-Crystal, Crystal Orientation, Acceleration Wave Theory, Shock Wave Theory

1. 緒 言

過酷な条件や環境で用いられる機械構造物や機器の健全性の保障と安全性の確保のために、その損傷の程度の把握と余寿命の予知を目的として超音波を用いた超音波非破壊材料評価法の試みが進められている。

本研究では音速分布を基準とした延性損傷クライテリオンを組み込んだ有限要素多結晶モデルを用いて双結晶モデルの局所変形および延性破壊への結晶方位依存性を検討した。

2. 理 論

2-1 加速度波理論に基づく局所変形開始条件

Hill⁽²⁾や Rice⁽³⁾は局所変形開始時において加速度波の速度が0になることを提唱している。このことは、加速度波理論を用いると局所変形開始時における塑性ひずみを決定できる可能性を示す。以下に加速度波理論について記述する。

不連続帯に交差した関数 f の跳びは不連続帯の前 f^+ と後 f^- の値によって定義され、次式のような関係がある

$$[f] = f^- - f^+$$

加速度波は不連続帯を横切る波の加速度の不連続によって得られる。よって、以下の関係が得られる。

$$[x] = [u] = 0, [\dot{x}] = [V] = 0, [\ddot{x}] \neq 0 \quad (1)$$

x は基準座標、 u は変位ベクトルで、 V は加速度波の速度である。

局所変形開始条件はひずみ速度の跳び量 $[\dot{\varepsilon}]$ と応力増分の跳び量 $[\dot{s}]$ を用いて次式で

$$[\varepsilon] = [F] = 0, [\dot{F}] = [\dot{\varepsilon}] = \tilde{U}; n \neq 0, n[\dot{s}] = 0 \quad (2)$$

ここで、 ε はひずみ、 F は変形勾配である。

運動学的適合条件と平衡方程式の跳び形式により次式が得られる⁽²⁾。

$$n[\dot{s}] = (nAn)\tilde{U} = \rho V^2 \tilde{U} = 0 \quad (3)$$

ここで、 ρ は密度、 A は音響テンソルで n は波の伝搬の遮断方向である。したがって、式(2)と式(3)から次式が局所変形開始条件を与える。

$$(nAn) = 0, \rho V^2 = 0 \quad (4)$$

2-2 衝撃波理論に基づく微視き裂発生条件

衝撃波は不連続面を横切る波の速度と加速度の不連続量によって特徴づけられ、次式の条件で表わされる。

$$[x] = [u] = 0, [\dot{x}] = [V] \neq 0, [\ddot{x}] \neq 0 \quad (5)$$

幾何学的、運動学的な適合条件より次式が得られる。

$$[\ddot{x}] = \bar{V}^2 [\nabla \varepsilon] - 2\bar{V} \frac{\delta[\varepsilon]}{\delta t} - \frac{\delta \bar{V}}{\delta t} [\varepsilon] + \frac{\delta^2 [x]}{\delta t^2} \quad (6)$$

ここで、 $\bar{V}$ は衝撃波の速度である。運動方程式より

$$[E \cdot \nabla \varepsilon] = \rho [\ddot{x}] \quad (7)$$

式(6)と式(7)から次式の微分方程式が成り立つ。

$$2\bar{V} \frac{\delta[\varepsilon]}{\delta t} + \frac{\delta \bar{V}}{\delta t} [\varepsilon] + [V^2] (\nabla \varepsilon)^- = 0 \quad (8)$$

その結果、ひずみ不連続量は加速度波の速度の不連続量を用いて次式となる。

$$[\varepsilon] = \frac{(\nabla \varepsilon)^-}{\delta \bar{V} / \delta t} [V^2] \left\{ \exp \left(-\frac{1}{2\bar{V}} \cdot \frac{\delta \bar{V}}{\delta t} t \right) - 1 \right\} \quad (9)$$

ここで、微視き裂発生条件は次式で示すことができる。

$$[x] = 0, [\varepsilon] = [F] \neq 0 \quad (10)$$

ゆえに、式(9)、(10)から、加速度波の速度の不連続は微視き裂発生の原因となることが結論付けられる。

2-3 塑性損傷超音波伝搬速度の理論モデル

本研究では、塑性変形下における材料の力学的挙動に関する理論モデル⁽⁴⁾に基づき定式化された塑性損傷超音波伝搬速度を行い、局所変形解析を試みる。加速度波の伝搬速度 V に関して次式の一般化した Christoffel の方程式は次のようになる。

$$(A_{ijpq} n_j n_q - \rho V^2 \delta_{ip}) \tilde{U}_p = 0 \quad (11)$$

ここで、 $\tilde{U}_i$ は不連続方向の振幅であり、 ρ は初期状態における密度、 n は波動の遮断方向の単位ベクトルである。

3. FEPM による音速損傷シミュレーション

本研究においては結晶方位分布の影響を考慮するために有限要素多結晶モデル⁽⁵⁾(FEPM)に加速度波理論に基づく局所変形開始条件と衝撃波理論に基づく微視き裂発生条件

を組み込むことにより、各要素の局所変形開始、および微視き裂発生を各要素ごとにシミュレーションすることを可能とした。

解析モデルは長方形の平板型モデルで、要素数を 1920 要素とし、本研究では表 1 に示す結晶方位で図 1 に示す Case1, Case2, Case3 から選択した 2 つの結晶方位から構成される双結晶 Reuss モデルと双結晶 Voigt モデルを作成で双結晶を構成した。Reuss モデルは荷重方向に対して直列に結合されるのに対し、Voigt モデルは並列に結合される。これらのモデルを用いて、局所変形および延性破壊への結晶方位依存性を検討した。

4. 解析結果

図 2 に結晶方位 Case1 と Case2 を組み合わせた双結晶 Reuss モデルの相当塑性ひずみ 14% と 24% での延性破壊の進展の様子を示す。図の解析結果は各要素の損傷状態を色ごとに示しており、青色要素が塑性変形した要素、黄色が不連続面がひとつ発生し局所変形状態にある要素、緑色が不連続面が 2 個発生し微視き裂が発生した要素、赤色がき裂発生要素とした。図から結晶方位 Case1 で損傷が進展しすべり帯が発生し、さらに同時に同じ結晶の表面や内部でき裂やボイドが発生している。

図 3 に結晶方位 Case2 と Case3 を組み合わせた双結晶 Reuss モデルの相当塑性ひずみ 9% と 10%、14% での延性破壊の進展の様子を示す。図から延性破壊の進展は荷重方向に対して対称に生じているが、明確なすべり帯の発生は見

Table1 Parameter of each crystal orientation

Crystal orientation	Euler angle, radian			Schmid's factor
	φ	θ	ψ	
Case 1	$\pi/5.104$	$\pi/4$	$-\pi/4$	0.5
Case 2	$\pi/2$	0.0	π	$1/\sqrt{6}$
Case 3	$\pi/2$	$-\pi/4$	π	$1/2\sqrt{6}$

Fig.1 Single crystal model

Fig.2 Simulation result of bi-crystal Reuss model consist of case1 and case2

られなかった。結晶方位 Case2 の結晶の中央でボイドが発生し、き裂もまた結晶の両端の表面で発生している。

以上から FCC 双結晶 Reuss モデルの延性破壊の進展は、主に Schmid 因子の大きい結晶で進展する。

さらに図 4 に結晶方位 Case1 と Case3 を組み合わせた双結晶 Voigt モデルの相当塑性ひずみ 18%、23%、23% での延性破壊の進展の様子を示す。図から初めにき裂が結晶方位 Case3 の結晶で発生し、さらに結晶粒界にも突然発生する。その後、き裂やボイドが結晶内のすべり帯で進展している。FCC 双結晶 Voigt モデルの延性破壊の進展では、き裂やボイドは単一すべり系で発生せずに多重すべり系で発生する。

5. 結言

本研究から以下の結果が得られた。

- 1) 双結晶モデルでは結晶方位によって局所変形および延性破壊の進展の様子が異なる。
- 2) 局所変形および延性破壊への結晶方位依存性を明らかにした。

参考文献

- (1) Kobayashi, M. Analysis of deformation localization based on proposed theory of ultrasonic wave velocity propagating in plastically deformed solids. *Int. J. Plasticity* 26(2010), 107-125.
- (2) Hill, R., Acceleration waves in solids. *J. Mech. Phys. Solids* 10 (1962), 1-16.
- (3) Rice, J. R., The localization of plastic deformation. Theoretical and Applied Mechanics (edited by W.T. Koiter) *Proceedings of the 14th IUTAM Congress*, (1975)207-219.
- (4) Kobayashi, M., Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation -part I. Theory. *Int. J. Plasticity* 14(1998), 511-522.
- (5) 高橋寛, 多結晶塑性論, (1999), 1-76 コロナ社

Fig.3 Simulation result of bi-crystal Reuss model consist of case2 and case3

Fig.4 Simulation result of bi-crystal Voigt model consist of case1 and case3