

単軸引張および等二軸引張における集合組織の発達の測定と解析

静岡大学工学部機械工学科 Mi3 福田 匠吾
指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

アルミニウム合金は、軽量で強度が優れるため輸送機器への採用が拡大している。しかし、しわや割れが発生しやすく成形性に劣る。そのため、数値解析を行い、スプリングバックによる形状不良や応力集中による破断などの成形不良を事前予測することが重要である。数値解析の一つに結晶塑性解析¹⁾がある。この解析では結晶粒の微視的変形をモデル化し、初期結晶方位と任意の境界条件を設定することで、多結晶金属の変形挙動を予測することが可能である。井上ら²⁾は、Taylor モデルによる R 値の面内異方性の研究を行い、高い R 値を得るには主方位として R 方位、副方位として Goss 方位を発達させることが有効と報告した。橋本ら³⁾は、均質化法に基づく 2 軸引張条件での結晶塑性有限要素法を行い、より高精度な解析を行うには、X 線回折で測定される集合組織から結晶方位の抽出方法の検討が必要であると報告した。このように、結晶塑性解析で使用する集合組織は、異方性や変形特性の情報を有している。また、材料の変形に伴い集合組織が発達することで主方位が変化し、異方性の現れ方が変化する。そのため、集合組織の発達の測定ならびに発達の予測を行うことは重要である。

本研究では、材料の変形による集合組織の発達の測定および結晶塑性解析による集合組織の予測を目的とした。A5022-O を供試材とし、単軸引張試験および張出試験を行い、ひずみの進展に伴う集合組織の発達を X 線回折法で測定した。結晶塑性解析では、単軸引張条件および等 2 軸引張条件での解析を行った。各変形条件で、初期集合組織からひずみの進展に伴う集合組織の発達を予測し、実験結果との比較を行った。

2. 実験方法

2.1 単軸引張試験

本研究では、供試材として厚さ 1 mm の A5022-O 板材を使用した。試験片の寸法は、JIS5 号と相似形状で、平行部長さを 120 mm、幅を 50 mm とした。単軸引張試験機は、サーボパルサーを使用した。チャック変位速度は 0.2 mm/s とした。この時、ひずみ速度は 0.01 s^{-1} であった。単軸引張試験によって長手方向に対数ひずみ ϵ が 0.1, 0.2 となるように付与し、各ひずみにおける集合組織を X 線回折法で測定した。引張方向は、圧延方向(RD)と圧延直角方向(TD)とした。

2.2 張出試験

張出試験では、直径 100 mm の平頭パンチを持つ試験機を使用した。供試材とパンチの間に、円孔を有する駆動板を挟む Marciniak 法による試験を行った。パンチの上昇速度は 1 mm/s とした。この時、相当ひずみ速度は 0.01 s^{-1} であった。試験片は 1 辺 220 mm の正方形であり、等 2 軸引張状態を再現した。張出試験によって相当ひずみ ϵ が 0.1, 0.2, 0.3 となるように付与し、各ひずみにおける集合組織を X 線回折法で測定した。

3. 実験結果

供試材の初期集合組織を測定した。Fig. 1 に {111} 面の正極点図を示す。正極点図は、X 線の強度分布を 2 次元投影したものであり、強度が強いほど多くの結晶が同じ向き方向に配向している。図中の記号は、主要方位を示し、□が cube 方位、○が Goss 方位、△が copper 方位である。Fig. 1 より初期

集合組織は cube 方位の強度が最も強く、主方位であった。

RD に引張負荷した試験片の集合組織を測定した。Fig. 2 に対数ひずみを $\epsilon = 0.1, 0.2$ 負荷した試験片の {111} 面の正極点図を示す。ひずみの増加に伴い cube 方位の強度は、 $\epsilon = 0.1$ では初期より 1.1 弱まり、 $\epsilon = 0.2$ では初期より 0.8 弱まった。一方、copper 方位の強度は、ひずみの増加に伴い初期より 2 増加した。また、Goss 方位の強度の変化は、cube 方位の変化に比べ小さかった。以上より、単軸引張試験では、cube 方位の強度が弱まり、copper 方位の強度が強くなった。また、主方位は、cube 方位から変化しなかった。なお、TD に単軸引張した集合組織も同様の傾向を示した。

Fig. 3 に張出試験によって相当ひずみを $\epsilon = 0.1, 0.3$ 負荷した試験片の {111} 面の正極点図を示す。相当ひずみの増加に伴い、cube 方位の強度は減少した。それに対し、Goss 方位の強度は強くなった。 $\epsilon = 0.1$ では cube 方位と Goss 方位の強度は等しく、 $\epsilon = 0.3$ では Goss 方位の強度が cube 方位より強まった。また、copper 方位の強度の変化は他の方位の変化に比べ小さかった。このように、張出試験では、cube 方位の強度が弱まり、Goss 方位の強度が強くなった。また、方位分布が円形状となった。

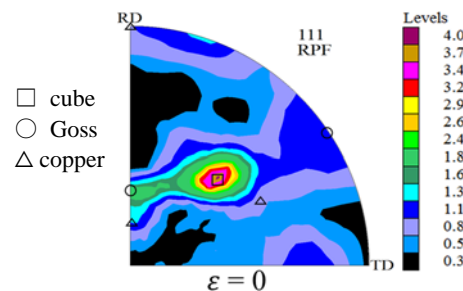


Fig. 1 {111} pole figure of initial texture

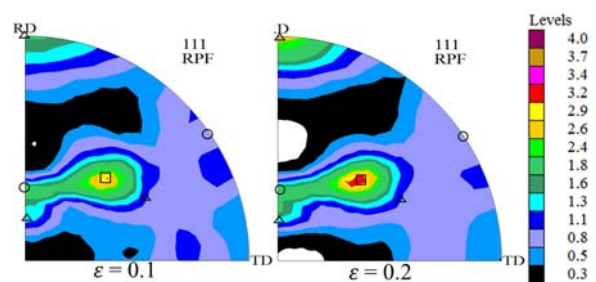


Fig. 2 {111} pole figure under uniaxial tension

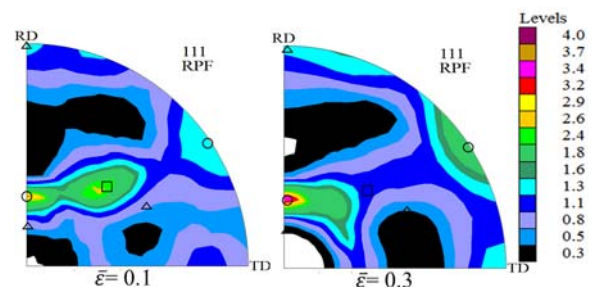


Fig. 3 Texture evolution under biaxial tension

4. 結晶塑性解析

結晶塑性解析には、弾粘塑性型の結晶塑性モデルを使用した。すべり速度は式(1)で表される。

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right) \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^{\frac{1}{m}-1} \quad (1)$$

ここで $\dot{\gamma}_0$ はすべり系のすべり速度、 $\tau^{(\alpha)}$ は分解せん断応力、 $g^{(\alpha)}$ はすべり抵抗、 m はひずみ感受性指数である。すべり抵抗の発展則は Voce 型を使用し、以下の式で表される。

$$g^{(\alpha)} = \sum_{\beta}^{N_{slip}} h |\dot{\gamma}^{(\beta)}| \quad (2)$$

$$h = h_0 \exp\left(\frac{-h_0 \gamma_A}{\tau_{\infty} - \tau_0}\right), \quad \gamma_A = \sum_{\alpha}^{N_{slip}} |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| \quad (3)$$

ここで N_{slip} はすべり系の数、 h_0 は初期硬化率、 τ_{∞} は飽和応力、 τ_0 は初期降伏応力である。解析は、結晶粒の速度勾配と巨視的な速度勾配が一致する Taylor モデルを使用した。

5. 解析結果

初期集合組織の結晶方位分布関数(ODF)を離散化し、2000個の結晶を創成した。材料定数は、RD に単軸引張した真応力-対数ひずみ曲線を再現できるように、 $h_0 = 240$ MPa、 $\tau_{\infty} = 135$ MPa、 $\tau_0 = 47$ MPaとした。

結晶塑性解析の結果を基に{111}面の正極点図を作成した。Fig. 4 に初期集合組織の{111}面の正極点図を示す。黒色の点は{111}面の極であり、緑色の点は cube 方位、赤色の点は Goss 方位、青色の点は copper 方位である。初期集合組織の ODF から{111}面の正極点図を作成したため、cube 方位の極が多い。Fig. 5 に単軸引張によって対数ひずみを $\varepsilon = 0.1, 0.2$ 負荷した後の{111}面の正極点図を示す。、copper 方位は、ひずみの増加に伴い極が増加した。一方で、cube 方位と Goss 方位の極のひずみの進展に伴う変化は、copper 方位の変化に比べ小さい。この結果は、Fig. 2 で示した主要方位の強度の推移と同じである。

Fig. 6 に等 2 軸引張によって相当ひずみを $\bar{\varepsilon} = 0.1, 0.3$ 負荷した後の{111}面の正極点図を示す。Fig. 6 より、ひずみの増加に伴い cube 方位の極が減少した。一方、Goss 方位の極は増加した。また、方位分布の形状は、円環状に広がった。この結果は、Fig.3 に示した主要方位の強度が推移する特徴と同じである。また、方位分布の特徴も同じである。

Fig. 6 の黒の実線で囲まれた領域において、cube 方位と Goss 方位近傍の極の動きを確認した。Fig. 7 に cube 方位と Goss 方位近傍の数点の極の移動を示す。Fig. 7 の■は初期位置であり、□は最終位置である。極点図より cube 方位近傍の極は四方に広がった。また、Goss 方位近傍の極は、Goss 方位に近づく動きを示した。

7. 結言

張出試験および単軸引張試験を行い、集合組織の発達を測定した。また結晶塑性解析で集合組織の予測を行い、以下の知見を得た。

- (1) 単軸引張試験では、ひずみの増加による主方位の変化はなく、copper 方位の強度が強くなった。
- (2) 張出試験では、相当ひずみの増加に伴い、cube 方位の強

度が弱まり、Goss 方位の強度が強くなった。

- (3) 結晶塑性解析で得られた{111}面の正極点図は、実験結果と同様の傾向を表した。

参考文献

- 1) 浜孝之, 日本試験機工業会, 44(2017), 3-5
- 2) 井上博史ら, 軽金属, 44(1995), 97-103
- 3) 橋本圭右ら, 軽金属, 65(2015) 196-203

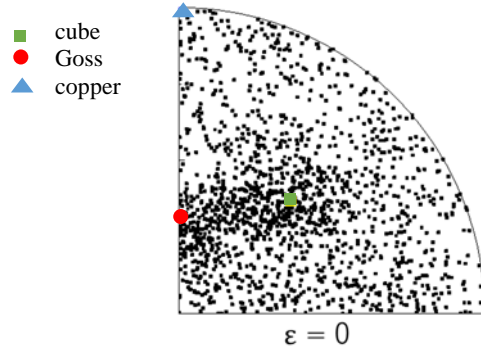


Fig.4 Analysis for {111} pole figure of initial texture

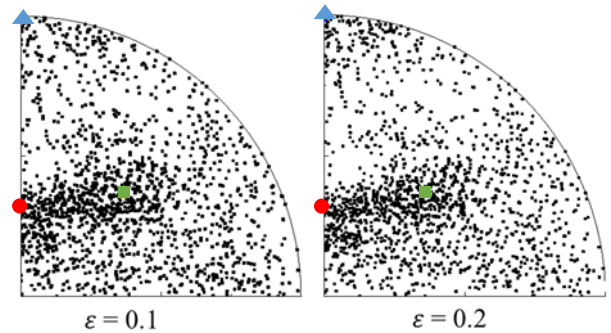


Fig. 5 Analysis for {111} pole figure under uniaxial tension

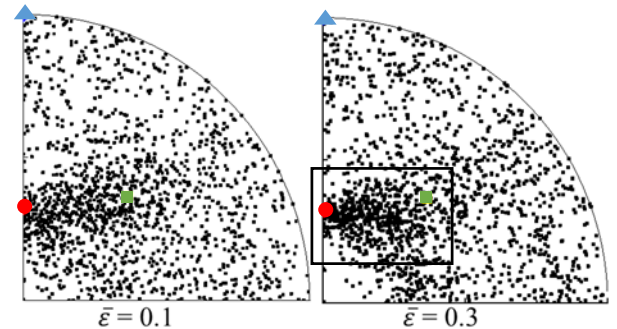


Fig. 6 Analysis for {111} pole figure under biaxial tension

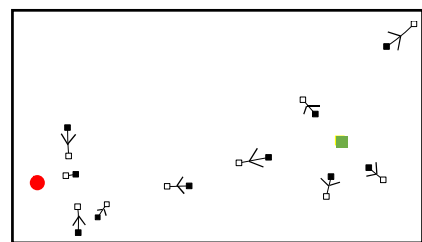


Fig. 7 Pole transition