

(774) 変態超塑性に関する最近の研究動向

京都大学工学部

田村今男

1. はじめに

相変態を有する材料に小さな応力を負荷した状態で変態温度区間を上下する温度サイクルを加えると大きな延性を示す。この現象は変態超塑性と呼ばれる。変態超塑性は新しい加工法として注目されているが系統的な研究は少なく、その機構についてもよくわかっていない。本報では主に鋼の変態超塑性現象について概説し、その機構および応用に関する研究について述べる。

2. 繰り返し温度サイクルによる変態超塑性

引張応力を負荷した状態で鋼に温度サイクルを加えるとき、加熱または冷却変態で測定されるひずみには、塑性ひずみ、熱膨張ひずみと変態体積変化によるひずみが含まれる。塑性ひずみは、さらに変態超塑性によるひずみとクリープひずみからなると考えられる。変態1回あたりの塑性ひずみは数%以下であり、温度サイクルを繰り返すと数100%の伸びを生じて破断に至る。一般に金属が超塑性を示すときm値(ひずみ速度感受性指数)は高い値をとる。一定の負荷応力 σ^A の下で変態させたとき、変態中のひずみ速度と σ^A を両対数プロットした傾きからm値を求めると、 σ^A が大ほどm値は小さくなる。Fig.1は破断伸びとm値の関係を示した図で、m値と破断伸びがよく対応することがわかる。

破断形態と組織変化に対する研究は少ない。著者らの研究ではFig.2に示すように、低応力では試料の一部にポイドが集中して発生して破断に至り、くびれは小さい。高応力では大きなくびれにより破断しポイドは少ない。これは低応力ではm値大のため、くびれが発生しにくい、伸びとともに多くのポイドが発生、連結するためである。高応力ではm値小のため伸びの小さい段階でくびれが発生しやすいことによる。

変態超塑性で大きな伸びを得ようとするれば必然的に温度サイクルを繰り返すため、副次的効果として結晶粒の微細化が期待される。繰り返し変態による微細化法としては、 $\gamma \rightleftharpoons$ マルテンサイト変態を利用したGrangeの方法がよく知られている。細見らは応力を負荷することにより微細化が促進されるとし、Kotらは応力の効果はないと報告している。Fig.3はSCM415に負荷応力 $0 \sim 4 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$

の下で $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \text{パーライト}$ 変態、および $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \text{ベイナイト}$ 変態の温度サイクルを与えたときの γ

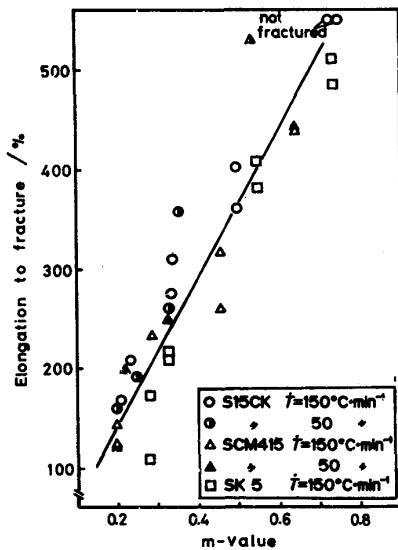


Fig.1. Relation between elongation to fracture and m-value.

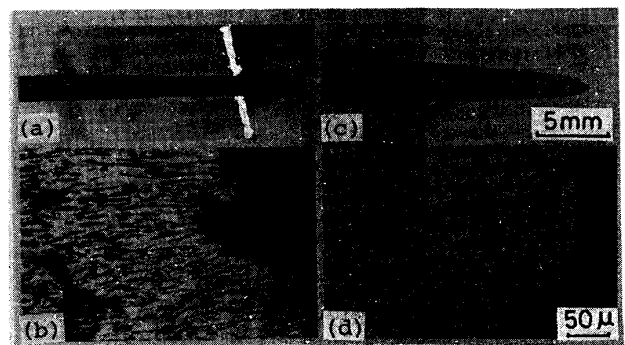


Fig.2 Appearance and microstructure of specimens after temperature cycling to fracture.

(a),(b): $\sigma^A = 3 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$ (c),(d): $\sigma^A = 6 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$

粒径の変化を示す。γの初期粒径にかかわらず数サイクルでγ粒径は一定値に収束する。また負荷応力の効果は認められない。加熱冷却速度を大きくするとγ粒径は小さな値に収束する。最終のγ粒径を微細化するには加熱速度を大きくするより冷却速度を大きくする方が効果がある。

3. 変態1回における現象と諸因子の関係

加熱または冷却変態1回における塑性ひずみ ϵ_L 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_L$ およびm値と、それらに影響を及ぼす諸因子との関係を検討し変態超塑性の特性を明らかにしようとする研究は比較的多い。 ϵ_L は変態の進行に伴ない増加し、両者に対応関係がみられる。1回の変態で生じる ϵ_L は低応力域では負荷応力 σ^A にほぼ比例し、高応力域で急激に増加する。加熱冷却速度 \dot{T} や粒径の影響は報告により結果が異なるが、負荷応力が大きくなる

ほどそれらの影響は顕著になるという結果を得ている。鋼の場合 $\dot{T} = 20 \sim 150^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $\sigma^A = 1 \sim 5 \text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$ で \dot{T} および粒径が小さい方が ϵ_L は大きくなるようである。

高温では相変態が生じなくても材料は応力下でクリープ変形するので、 ϵ_L にはクリープひずみが含まれると考えられている。そこでクリープの影響を除くため $\alpha-\gamma$ 二相域で測定したクリープ速度から ϵ_L 中のクリープひずみを推定したり、クリープひずみが無視できるような急速加熱冷却で変態させるなどの方法がとられている。 ϵ_L からクリープひずみを除いたひずみ(以下、変態塑性ひずみ ϵ_{tp} とよぶ)と諸因子の関係は ϵ_L の場合と同様である。

変態途中のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_L$ と $\alpha-\gamma$ 二相域でのクリープ速度を比較すると、たとえばSCM415で $\dot{T} = 150^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $\sigma^A = 1 \text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$ では $\dot{\epsilon}_L$ はクリープ速度の50倍である。負荷応力大、または加熱冷却速度が小になるにつれ両者の差は数倍程度に小さくなる。また同時にm値もクリープのm値に近づく。つまり負荷応力が大きくなるか加熱冷却速度が小さくなるにつれ変態超塑性としての特性が失われる。

4. 変態超塑性の機構

従来いくつかのモデルが提唱されたが定説はない。定性的なモデルとして、変態体積変化で生じる過剰な格子欠陥によりクリープが助長されるとするClinardらの説、 $\alpha-\gamma$ の粒界すべりを考える井口の説などがある。定量的なモデルとして、変態界面近傍で体積変化により生じる高い内部応力に負荷応力が加わるときの転位運動からマルテンサイト変態超塑性の ϵ_{tp} を求めたKotらの説、内部応力を用いて塑性力学から ϵ_{tp} を求めたGreenwoodらの説がある。最近Wakashima¹⁾は連続体モデルを用い ϵ_{tp} と負荷応力 σ^A が直線関係となることを説明した。 ϵ_{tp} と σ^A が直線関係から外れる比較的高応力域においても変態超塑性現象が生じることから、著者らは連続体モデルにより低~高応力域における ϵ_{tp} と σ^A の関係を定性的に説明できることを示した²⁾。

5. 応用

変形抵抗が小さい変態超塑性の特徴を利用して、塑性加工、接合、粉末成形等への応用が考えられている。たとえばTi-6Al-4Vの板金加工と鍛造加工、変態超塑性と拡散接合を組合わせたTi合金の薄板の一体加工、鋳鉄の固相接合、純鉄または白鋳鉄粉末の焼結などへの応用が検討されている。

文献

- 1) K. Wakashima: Scripta Metall., 19(1985), P.651
- 2) 野崎春男 植杉雄二 西川幸男 田村今男: 日本金属学会誌, 50 (1986), P.56

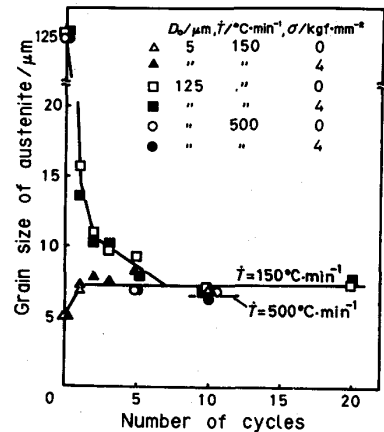


Fig.3 Variation of austenite grain size due to temperature cycling for SCM415.