

討36

アルミニウム系材料の超塑性と加工

東京都立大学工学部

西村 尙

1. まえがき

最近、超塑性応用技術の一つとして、難加工性材料の加工性改善法が注目されている。機械的、電氣的、あるいは化学的特性が優れていながら、加工性が劣っているために、工業用材料として利用されにくい材料、あるいは、加工性が劣っているために、鑄造、粉末焼結などに加工法が限られていた材料などに超塑性を付与して、容易に塑性加工する技術が多く開発されている。

たとえば、チタン系合金、ニッケル基超耐熱合金、さらに、2000系、7000系の高力アルミニウム合金の超塑性成形がその代表である。

本稿では、このうち、アルミニウム合金を中心として最近の超塑性材料の開発状況を述べるとともに、超塑性を加工へ応用する場合の基本的考え方及び最近の事例について示す。

2. アルミニウム超塑性材料の製造法 — 結晶粒微細化技術 —

超塑性を示す材料を得るためには、まず、その材料の結晶粒径が少くとも $15\mu\text{m}$ 以下であることが必要である。さらに、その状態が成形中安定に保たれていること、成形中に空孔(キャビティー)が生じないことなども必要条件である。しかも、その手法が工業的に安定でコスト面でも問題がない方法でなければならない。

このような観点から、国内外でいくつかの方法が発表されている。

まず、Rockwell社の方法では、7075、7475に加工熱処理を施して結晶粒を微細化し、超塑性が得られることを明らかにした。同社の製造工程を図1に示す。この方法の特徴は溶体化処理後、過時効処理により析出相を $0.75\mu\text{m}$ 以上に粗大化させて水焼入れし、その後温間圧延することである。しかし、この方法は工業的に量産化するときに多くの技術的、コスト的問題が生ずる。時効処理後の水焼入れの技術、 200°C での温間圧延時の圧延油への引火の問題など困難が多い。

国内では、軽圧メーカー各社独自の工夫をこらして、これらの問題点を改善している。

まず、住友軽金属㈱の方法は、連続鑄造法で造塊した 300mm 厚の大型鑄塊を $480^\circ\text{C}\times 30\text{hr}$ の均質化熱処理を行い、偏析をなくした。その後、片面 15mm の面削を行い、熱延により 6mm 厚の板を作る。結晶粒微細化はこの 6mm の熱延板を加工熱処理することにより行った。

図2にその工程図を示す。この方法により、結晶粒径を $15\mu\text{m}$ 程度にすることができた。この方法によれば、コイルを水焼入れする必要もなく、また、焼入れ直後に冷延する必要もない。

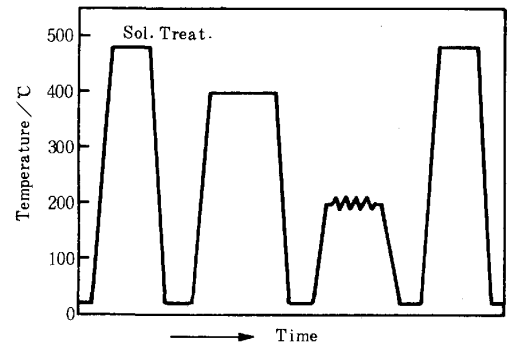


Fig. 1 Thermomechanical Processing Sequence (Rockwell International)

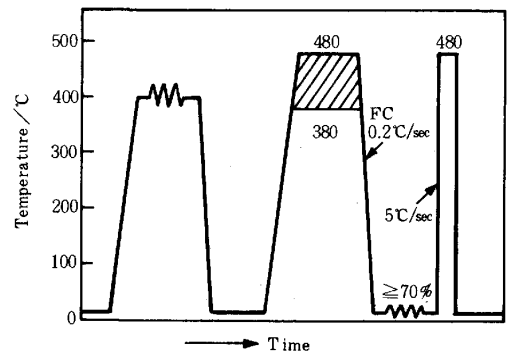


Fig. 2 Thermomechanical Processing Sequence (Sumitomo Light Metals)

三菱アルミニウム鋳造の方法は、6mm厚の熱延板を冷延し、中間再結晶処理からさらに冷延する方法をとった。この方法による工程図を図3に示す。

この他、鋳神戸製鋼所等においても独自の方法を開発しているが、おおむね類似の方法である。

3. アルミニウム系超塑性材料

表1に現在開発されているアルミニウム合金系の超塑性材料の一覧を示す。最初に超塑性が見出された合金はAl-3.3%Cuの共晶合金で、共晶または共析点を使うと容易に微細化が可能なためである。その後、2004のSupralが、Superform Metal社で開発された。Zrを入れるのは結晶粒を微細化するためである。

我が国の軽圧各社が相続いで超塑性合金を発表しはじめて、3年程になるが、なるべくZrを使わないで微細化できる合金を開発する傾向が強い。Al-Mg-Cu, Al-Si-Mg系などがその例である。

一方、航空機用素材として、アルミニウムでは最高の強度を示す7075, 7475に超塑性を付与して加工性を改善しようとする研究が最近とくに多くなってきた。現状では、まだ微細化が不十分で成形時間が長い上に成形品にキャビティが多く、今後の改善が望まれる。超急冷が可能なP/M材からホットプレス、冷延の工程により製造する方法も発表されている。

4. 超塑性材料の成形

超塑性材料は一般に大きな延性と小さな流動応力で特徴づけられている。

しかし、実際の加工例を見てみると、それほど単純なものではなく、以下に示すように数多くの特徴を使って製品を生み出している。なかには、電波の遮へい性、吸振性など加工中に利用する特性でなく、製品に付与された機能として注目されているものもある。

4.1 超塑性成形採用の条件

- a) 形状の複雑さ：普通のプレス成形、スピニング成形では不可能な複雑な形状品は有利である。
- b) 大きさ：非常に大きく（たとえば、1m×2m）、しかも薄いものは有利である。
- c) 生産量：成形時間が長いので、50～10,000コが有利とされている。型代との関係で決めるので一概には云えない。

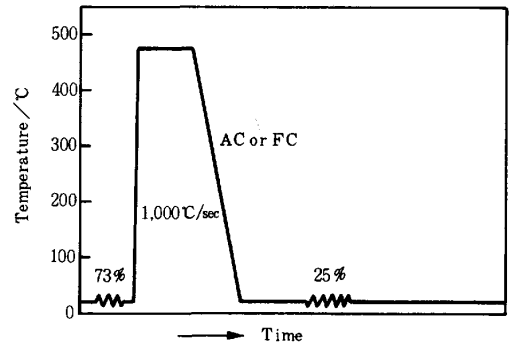


Fig. 3 Thermomechanical Processing Sequence (Mitsubishi Aluminum)

Table 1 Superplastic Alloys of Aluminum

Alloy Identity	Composite (wt%)	Temperature (°C)	m-Value	Elongation (%)
Alcan 08050	Al-5Ca-5Zn	400 ~ 540	0.36	800
Al-Cu	Al-33Cu	440 ~ 520	0.8	500
Al-Cu-Mg	Al-25Cu-11Mg	420 ~ 480	0.7	600
Al-Cu-Si	Al-25Cu-5Si	500	0.43	1300
Supral 100, 150	Al-6Cu-0.5Zr	350 ~ 475	0.5	1200
Al-Mg-Zr	Al-6Mg-0.4Zr	400 ~ 520	0.6	900
Al-Mg-Cu-Mn	Al-5Mg-0.6Cu-0.6Mn	550	0.7	700
Al-Mg-Si	Al-8.2Mg-4.7Si	500	0.4	580
Al-Mg	Al-4.5Mg	540	0.73	800
Al-Si-Mg	Al-9Si-1Mg	540	0.5	600
A 7075	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.3Cr	510	0.41	600
A 7475	Al-5.6Zn-2.3Mg-1.6Cu-0.2Cr	515	0.75	600
Al-Zn-Mg-Zr	Al-10.7Zn-0.9Mg-0.42Zr	550	0.9	1500

d) 型：型代にあまりコストを掛けないもの、設計変更によるコストアップが避けられるものが有利である。

e) 設計：超塑性の特徴を生かすように設計変更が可能なもの。

4.2 型

アルミニウム合金の多くは、400℃前後で成形できるので、アルミニウム型で十分である。鋳鉄または、工具鋼は形状的にみてアルミニウムでは不十分な場合にのみ使用する（するどい角による摩耗等）。鉄系型は7000系のように成形温度が高いときに使用する。いくつかのセグメントを組合せる組合せ型の使用も考慮する必要がある。サイクル・タイムを伸ばさないために、型を予熱しておく。

4.3 超塑性特性の加工への利用法

表2は現在超塑性材料に広く利用されている加工法と超塑性特性との関係を示している。i)とii)は流動応力、iii)とiv)は延性の温度及びひずみ速度依存性を表している。この両者が、一般的に超塑性特性と呼ばれているものである。v), vi)は製品の特性として利用されるもので、結晶性が細かいことの副産物である。viii)は接合が同時に行え、Ti合金を中心に広く利用できる。ix)は流動応力が低いことから生ずる特性で、微細で複雑な形状を転写するので大きな特性の一つである。

加工法別に見ると、板材では真空ブロー成形が中心的技術で、最も多くの超塑性特性を利用している。ホットプレス、深絞りには型費が高くつくのでプレス加工の方が有利な場合が多く、利用度は低い。

アルミニウムではまだ利用されていないが、SPF/DB、粉末成形、超塑性鍛造は新しい技術である。これらは、難加工材の加工に利用されるもので、Ti, Niベースの高強度材に実用されている。粉末については、HIPの利用、さらに恒温鍛造する方法が用いられる。いずれにしても、生産量からみて型をなるべく少くするか、型材を低級化できるときに有利である。ダイレス引抜きはその極値であるが加工上のノウハウは多い。

5. 加工事例

5.1 薄板の加工例

薄板の加工法としては、真空・ブロー成形、ホットプレス、加熱・冷却深絞り法粉末成形が主なもので、真空ブロー成形がもっとも多用されている。

真空ブロー成形は、金属でありながらプラスチックと同様わずかな数気圧の圧力で成形できるという大きな利点を有する。そのため、成形機は能力は小さく、型材も低級なものによ

Table 2 Applying of Superplastic Properties for Forming

	i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii	ix
	Temp. Dependency of Stress	Strain Rate Dependency of Stress	Temp. Dependency of Strain	Strain Rate Dependency of Strain	Surface Smoothing of Forming Parts	Damping Capacity	Electrical Screening	Diffusion Bondability	Following Detailed Impression
Vacuum Blow Forming	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Hot Pressing	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Deep Drawing	○	○			○	○	○		
Bulge Forming	○	○	○	○	○	○	○		○
Dieless Drawing	○	○			○				
Coining	○	○						○	○
Hot Hobbing	○	○						○	○
Extruding	○	○							○
SPF/DB	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Powder Metalagy	○	○						○	○
Forging	○	○						○	○

○印は適用技術を示す。

$\sigma = k \dot{\epsilon}^m$ σ : 応力 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度 m : ひずみ速度感受性指数
 m 値が最大となる温度及びひずみ速度の下で加工する。

く、大形薄物パネルの生産には最適な手法である。しかし、成形時間が長いのが欠点で、10分~40分を要する。特に、7000系の超塑性材の場合は1時間を超えるものもある。そのため、成形深さを制限することもある。Zn-Al系の超塑性材の場合は、その点の配慮は必要なく、成形深さも十分とれ、成形時間も数分程度である。図4は、真空成形されたコンピュータ・カバーで、電波の遮へい性に優れている。この場合、成形品の肉厚分布を均一にする技術が必要で、プラグアシスト法等プラスチックの成形と同様の方法が採られる。

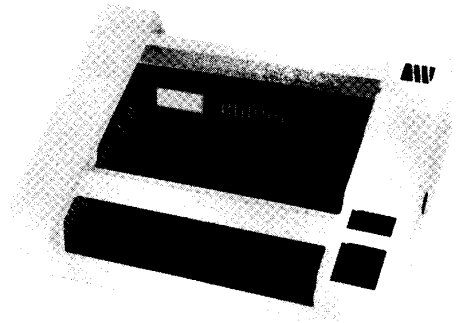


Fig. 4 Computer Cover Produced by Vacuum Forming

加熱・冷却深絞り法は、超塑性材の変形抵抗の温度依存性をたくみに利用した方法で、LDRが6以上という驚異的な値を得ている。この方法は、フランジ部のみを超塑性温度まで加熱して、変形抵抗を下げ、ポンチ頭部は冷却して、強度を向上させて成形限界を大巾に向上させる方法である。図5は、この方法の原理図を示し、図6はこの方法で成形したカップを示す。絞られたカップの表面は平滑で、カップ耳も生ずることはない。

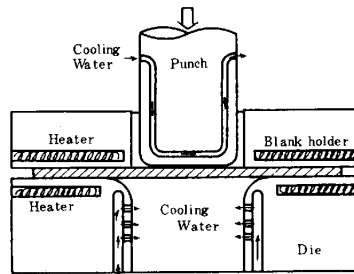


Fig. 5 Deep Drawing Apparatus for Superplastic Alloys

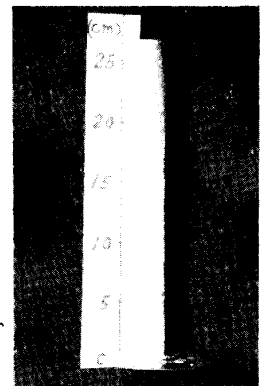


Fig. 6 Deep Drawn Cup Fabricated by Fig. 5 Apparatus

粉末成形はHIP処理から恒温鍛造を施す方法が超合金に適用されている。新しい方法として、FRM製造に際して、超塑性微粉末を結合剤として利用する技術が開発された。その製造工程を図7に示す。この方法によれば、圧着圧力が15 MPaと低く繊維を損傷することはない。また、圧着温度は250℃であり、界面の反応も心配ない。この方法で作られたFRMの高温引張強度を図8に示す。複合則に対して最高80%になり十分な結合が行われている。

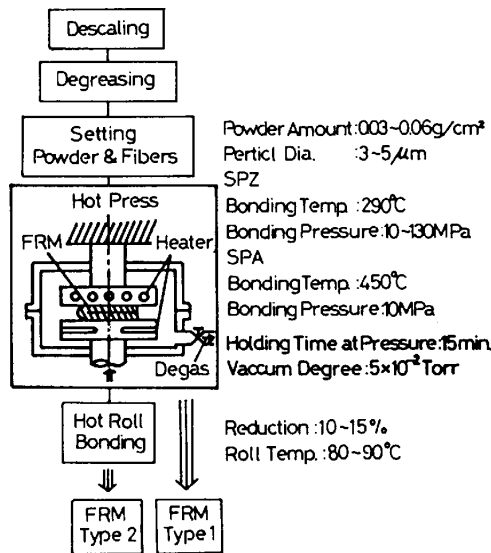


Fig. 7 Fabricating Process of FRM

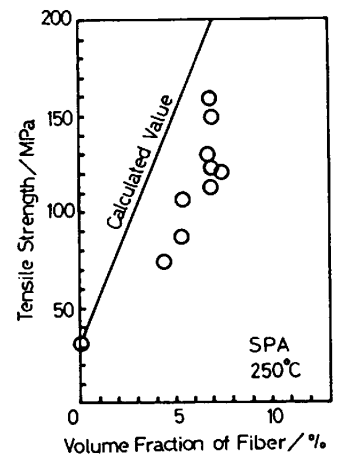


Fig. 8 Tensile Strength of FRM at 250°C

6. あとがき

最近の超塑性材料はAlとTiが主流である。どちらも軽量構造部材として今後の発展が期待できるが、強度を上げると加工性が劣下する。この欠点を超塑性によって改善するもので、巨大伸びを期待しているわけではない。超塑性も新しい利用法が数多く展開されるであろう。

文
献

- 「超塑性と金属加工技術」超塑性研究会編，日刊工業新聞社（昭55年）
- 「超塑性材料及びその成形」西村 尚，設計製図20巻117号（昭60年）
- 軽金属学会第67回秋期大会講演集（昭59年），同第68回春期大会講演集（昭60年）
- "Superplastic Forming of Structural Alloys", by N.E. Paton, Metallurg. S.C. AIME (1983).