研 究

スプレイフォーミングにより製造した Al-Si 系合金の組織と機械的性質

時實 直樹, 佐野 秀男
 渋谷 和久, 大久保喜正

住友軽金属工業株式会社技術研究所, 〒455 名古屋市港区千年3-1-12.

Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si Alloy
 Prepared by Spray Forming

Naoki Tokizane, Hideo Sano
 Kazuhisa Shibue and Yoshimasa Ohkubo

Technical Research Laboratories, Sumitomo Light Metal Industries, Ltd., 3-1-12 Chitose Minato-ku, Nagoya 455.

Received June 9, 1994

Aluminium alloy materials prepared by rapidly solidification process are expanding applications with their superior properties such as lightness, strength and wear resistance. In this prospective field, spray forming (SF) is now a matter of the special interest because of its simpler process, lower cost and lower oxygen content in products.

In this experiment, we prepared three SF preforms of Al-Si alloy sprayed with various "gas to metal (G/M) ratio". The microstructure and mechanical properties of the preforms and extruded materials were investigated, and found to be controlled by G/M ratio. The increase of G/M ratio reduces primary Si size and hence lowers wear resistance. On the contrary, strength of the extruded materials increases with G/M ratio.

1 緒言

粉末冶金法(PM法)をはじめとする急冷凝固法によって製造されたアルミニウム合金は、その高い比強度や耐摩耗性等により、家電・自動車部品の分野で用途を拡大している。中でもスプレイフォーミング法(SF法)は最新プロセスのひとつとして近年特に注目されており、当社でも英国Osprey Metals社との技術契約に基づいて開発・実用化を進めている。

Fig.1にSF法と当社が標準的に採用しているPM法の工程比較を示した。溶湯からプリフォーム(予備

成形体)を直接製造できるSF法が、エアアトマイズ・分級・封缶・加熱真空脱ガス・ホットプレス・缶除去と非常に多くの工程を要するPM法に対し、製品の短納期化、工程数削減に伴う品質管理の容易さやコストダウンといった多くのメリットを有することがわかる¹⁾。また、アトマイズからビレット形成までが一貫して不活性ガス雰囲気中で行われるため、製品中に酸化物が少ない点も大きな特長である。

本稿ではVTRのヘッドシリンダに実績のあるAl-Si系合金をSF法によって製作し、プリフォームおよび

押出材の組織と機械的性質について調査した結果を報告する。

Fig.1 Comparison between SF and PM process.

2 実験

2.1 装置

Fig.2に今回の素材作製に用いたスプレイフォーミング設備の構成を示す。本設備は傾動式高周波誘導溶解炉、溶湯処理(脱ガス、濾過および保温)装置、SF装置本体、サイクロン式集塵機からなり、円柱状のプリフォームを垂直に製造する。溶解能力は最大600kg、製作可能なプリフォームは質量にして380kg、最大径500mm、最大長さ1600mmである。溶湯の脱ガスにはアルゴン、濾過にはセラミックフォームフィルタを使用し、アトマイズは窒素ガス(液体窒素を気化)にて行う。なお、プリフォーム上に堆積しなかった溶湯は、粉末(オーバースプレイパウダー)として集塵機にて回収される。

①Induction furnace ②Melt-filtration unit ③Tundish
④SF unit ⑤Cyclone ⑥Over-spray container

Fig.2 Spray forming equipment.

2.2 プリフォームの製作

SF法による円柱状プリフォーム作製の原理は次のようにまとめられる(Fig.3)。

- 1) 溶湯をコレクタ(ステンレス製受け皿)の半径上に向けてアトマイズし、コレクタを自転させることで面状に均一に堆積させる。アトマイズ条件やアトマイズとコレクタの距離を適正に設定することにより、溶湯はコレクタ上に半融半凝固の状態で到達し、急冷凝固するとともに緻密なプリフォームを形成する。
- 2) プリフォームの成長速度に合わせてコレクタを下降させることにより堆積面は常に半融半凝固の状態に保持され、また溶湯の堆積する面積も一定となって、寸法変化の少なく組織の均一なプリフォームが得られる。

本研究においてはいくつかの主たるアトマイズ条件のうち、アトマイズガス流量と溶湯流量の比であるガスメタル比(溶湯1kgをアトマイズするのにどれだけのガスを用いたかの指標、以下G/M比)を2.9–4.4m³/kgの範囲で変化させ、製品性能への影響を調査した。ただしガス流量(m³)は0℃、0.10MPa(1気圧)換算の値である。G/M比の調節はアトマイズガスの圧力を変化させて行い、溶湯流量をはじめ他のスプレイ条件は全て一定とした。

今回は供試プリフォームとして3本を製作したが、プリフォームがある程度成長した時点でG/M比を変化させる(Fig.3中の破線位置)ことで、一本のプリフォームから複数スプレイ条件のサンプルを得た。

Fig.3 Schematic explanation of spray forming.

なお押出およびプリフォーム評価用の素材は、各 G/M 比において堆積が完全に定常状態に達したと判断される部位より採取している。

2.3 押出および熱処理

各 G/M 比によって製作したプリフォームの長手方向より $\phi 90\text{mm} \times 200\text{mm}$ のピレットを切り出し、直接押出によって $\phi 25\text{mm}$ (押出比 14.1) とした。押出温度は 400°C 、速度は 1m/min (製品) である。

押出材には $495^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ の溶体化処理、 $175^\circ\text{C} \times 6\text{h}$ の人工时效処理を施した。

2.4 評価

2.4.1 組織観察

プリフォームおよび押出材(いずれも長手方向に対する直角断面)より採取したサンプルを樹脂に埋め込んで研磨し、その組織を光学顕微鏡を用いて観察した。

2.4.2 初晶 Si 粒径測定

2.4.1 の試料について、画像解析装置を用いて初晶 Si 粒径 (HEYWOD 径 = 円相当径) を測定した。観察範囲は $5.0 \times 10^4 \mu\text{m}^2 \times 5$ 視野とした。

2.4.3 引張試験

プリフォームおよび押出材の長手方向について、インストロン型試験機による常温引張試験を行った。試験片の平行部寸法は $\phi 8\text{mm} \times 30\text{mm}$ 、クロスヘッドスピードは耐力まで 1mm/min 、その後は 20mm/min とした。

2.4.4 摩耗試験

摩耗試験に使用した pin-on-disk 式摩耗試験装置の概略を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 Schematic drawing of pin-on-disk wear testing apparatus.

試験片形状は $\phi 5\text{mm} \times 8\text{mm}$ であり、押出材 (T6 材) の長手方向より作製した。試験条件は荷重 4.9MPa 、相手材との相対速度 0.5m/s とし、潤滑油 (ISO VG7) にて行った。

なお耐摩耗性は、1h 試験終了後の 3 本の試料の平均摩耗量 (体積) で評価した。

3 結果および考察

3.1 プリフォーム諸元

3 本のプリフォームの直径は $297\text{--}316\text{mm}$ 、全長 $1100\text{--}1450\text{mm}$ であった。代表的なものの外観を Photo. 1 に示す。外径は通常量産材であれば目標値 $\pm 5\text{mm}$ 以内の精度で製造可能²⁾であるが、本実験ではアトマイズ条件を種々に変化させたためにバラツキが大きくなったものである。

各プリフォームの化学成分分析値は Table 1 に示した通りであり、バラツキは極めて小さかった。

Photo. 1 Appearance of preform.

Table 1 Chemical compositions

No.	Si	Cu	Mg
1	20.0	1.83	0.77
2	20.0	1.83	0.78
3	20.0	1.80	0.76

Photo. 2 にプリフォーム長手断面のマクロ組織を示す。表層から約 5mm の範囲には空孔が多く存在していたが、それ以外のプリフォーム内部にマクロ的欠陥は認められなかった。表層のポーラスな部分は、堆積後のプリフォーム側面に粉末が付着して生じたと考えられ、このことは Photo. 3 に示したプリフォーム表面の SEM 組織によっても確認できる。

アルキメデス法により測定した真密度比 (vs 押出材) も $99.1\text{--}99.5\%$ (平均 99.1%) と高い値を示した。

Photo.2 Macrostructure of preform (longitudinal section).

Photo.3 SEM image of preform's surface.

Photo.4 Microstructure of preforms.

Photo.5 Microstructure of extruded materials (T6).

3.2 ミクロ組織

Photo.3にプリフォームの、Photo.4に押出材(T6材)の断面ミクロ組織を示す。またFig.4に、画像解析によって求めたプリフォーム及び押出材(T1材、T6材)の初晶Si粒径の変化を示す。

G/M比の増大に伴い、プリフォームの組織中に観察される濃灰色の初晶Si粒子が微細になっていた。これはアトマイズで生じる液滴の径の減少、飛行中の液滴の冷却速度増大、堆積後のプリフォームの冷却速度増大という3つの相乗効果によるものと考えられる。また、押出材組織においても初晶Si粒径はG/M比の増大に伴って小さくなっており、押出加工、熱処理を経てもスプレイ時のG/M比の影響は保持されることが確認された。

これはすなわち、スプレイ時のG/M比を制御することによりプリフォーム中の、ひいては最終製品中の初晶Si粒径を制御できることを示す。

Fig.4 Relation between average primary Si size and G/M ratio (preforms, T1 and T6 extrudates).

3.3 機械的性質

3.3.1 引張特性

Fig.5に、G/M比の変化に伴うプリフォームおよび押出材(T6材)の引張特性の変化を示す。ただし、ここではプリフォームにも押出材同様のT6処理を施した上で供試している。

プリフォームの耐力はほぼ一定の値を示し、引張強さや伸びについてはG/M比が3.5の付近までは上昇するものの、その後再下降する傾向を示した。G/M比の高い領域で引張強さや伸びが低下したのは、スプレイ時に堆積面が固相過多となって生じたポアによるものと考えられるが、詳細については今後更に検討の予定である。

一方押出材については伸びがほぼ一定であるのに対し、耐力および引張強さはG/M比に応じて上昇する傾向を示した。プリフォームと特性を比較すると伸びの増大が顕著であり、また引張強さについても高G/M比側で明らかな改善が認められた。これらは、前述したポアが押出によって消滅したためであると推定される。

Fig.5 Relation between mechanical properties and G/M ratio (T6 heat treated preforms and extrudates).

3.3.2 摩耗試験

Fig.6に摩耗試験の結果を示す。G/M比に伴って摩耗量が増加、すなわち耐摩耗性が低下していた。

既報³⁾においてAl-Si系合金の耐摩耗性がSi粒径の増大とともに向上することを報告しており、本実験結果についても、G/M比の増大に伴うSi粒径の減少によるものと考えられた。

Fig.6 Relation between wear loss and G/M ratio (T6 extrudates).

3.4 SF材とPM材の機械的性質の比較

SF材とPM材の性能を比較するに当たり、後者にはG/M比という概念が存在しない点がまず問題となる。そこでSF押出材(T6材)の引張特性および耐摩耗性を、初晶Si粒径との関係で整理した結果をFig. 7に示す。PM材通常量産品(T6押出材)の平均初晶Si粒径は約 $2\mu\text{m}$ 程度であり、その機械的性質を図中にプロットすると△のようになった。すなわち同等組織のSF材とPM材を比較した場合、その機械的性質はほぼ等しいといえる。

Fig. 7 Relation between mechanical properties and average primary Si size (T6 extrudate of SF and PM materials).

4 結論

スプレイフォーミング法を用いてAl-Si系合金の製作を試みるとともに、そのプリフォームおよび押出

材の組織と機械的性質について調査した結果、以下の結論を得た。

- 1) 直径約300mm, 全長1100–1450mmのAl-20Si-Cu-Mg合金プリフォームを作製できた。
- 2) プリフォーム内部にマクロ的欠陥は認められなかったが、表層部約5mm以内の範囲に限り多くのポロシティが存在していた。
- 3) スプレイ時のガスメタル比の増大に従って、プリフォーム中の平均初晶Si粒径が減少した。この傾向は押出加工、熱処理を経ても保持されており、ガスメタル比によって最終製品の組織を制御できることが確認された。
- 4) 押出加工によって引張性質の向上がみられ、中でも伸びの上昇が著しかった。押出材の引張強さはガスメタル比に応じて向上し、耐摩耗性は反対に低下した。
- 5) SF材を同等組織のPM材と比較した場合、その機械的性質はほぼ等しいことが判明した。

文献

- 1) H. Sano, N. Tokizane, Y. Ohkubo, K. Shibue :
Proceedings of Second International Conference of Spray Forming, Swansea, UK (1993), 363.
- 2) 佐野秀男, 時實直樹, 渋谷和久 : 軽金属学会
第85回秋期大会講演概要(1993), 137.
- 3) 大久保喜正, 渋谷和久, 山内重徳 : 軽金属学会
第73回秋期大会講演概要(1987), 103.