

圧延接合と時効熱処理による高強度 ポーラスアルミニウム合金の創製

首都大学東京大学院 システムデザイン研究科 航空宇宙システム工学専修
准教授 北菌 幸一
(平成 17 年度研究開発助成 AF-2005018)

キーワード：発泡金属，気孔率，ジュラルミン

1. 緒言

材料内部に多数の気孔を有するポーラス金属は、衝撃吸収、吸音、断熱特性に優れた軽量材料である。ポーラス金属は、高分子系多孔質材料よりも強度、耐熱性に優れるため、サンドイッチ構造のコア材として輸送機器への応用が期待されている。特にアルミニウムを発泡させて作製された発泡金属であるポーラスアルミニウムは、軽量かつ作製が容易であるため、様々なセル形態を有するポーラスアルミニウムの研究が行われている。

現在実用化されているほとんどのポーラスアルミニウムは純アルミニウム製のため、強度が極めて低く、これを改善することが実用化に向けた課題であった。ポーラスアルミニウムは、発泡後に塑性加工を施すと、セル構造が失われてしまうため、加工硬化等の展伸用金属材料で用いられている高強度化法を適用できない。鋳造法により作製されたポーラス Al-5%Zn-1%Mg 合金は、既存のポーラスアルミニウムより高強度であったが、合金元素の添加は、凝固プロセスに大きく影響するため、セル形態が不均一になりやすい。一方、金属粉末と発泡剤を混合・固化した後に加熱・発泡させる粉末法では、様々な合金粉末を利用できるが、合金粉末は高価であり、硬い合金粉末ほど固化、成形が難しいといった問題がある。

最近、筆者は、安価なアルミニウム合金板からポーラスアルミニウムを作製する圧延接合法を開発した²⁾。このプロセスは、超微細粒組織形成のための強ひずみ加工プロセスの一つである ARB 法³⁾を応用したものである。これまでに 1000 系²⁾、4000 系⁴⁾、5000 系⁵⁾の非熱処理アルミニウム合金から、ポーラスアルミニウム合金の作製に成功している。ポーラスアルミニウムを高強度化する場合、通常のアルミニウム合金で用いられる時効硬化が有効であると考えられる。そこで本研究では、典型的な熱処理合金板である 2017Al 合金(ジュラルミン)板からポーラスアルミニウム合金を作製し、その時効硬化挙動を調べることを目的とする。

2. 実験方法

市販の 2017Al 板から、幅 30mm、長さ 300mm、厚さ 3mm の板を切り出した。圧延接合法によるプリフォームの作製

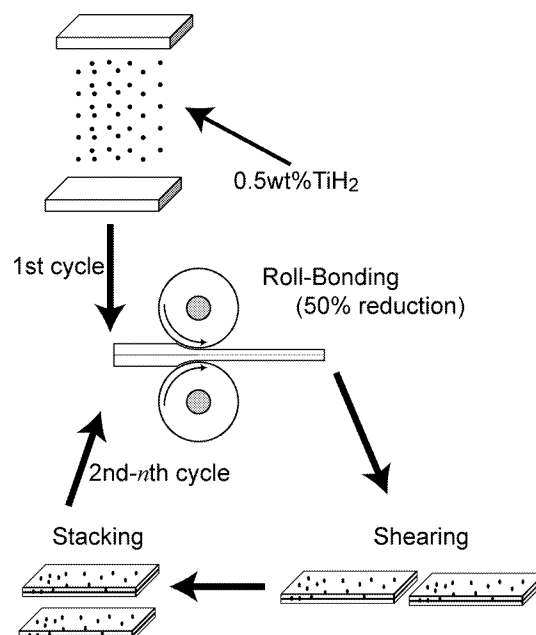
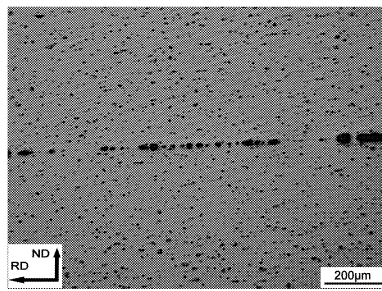


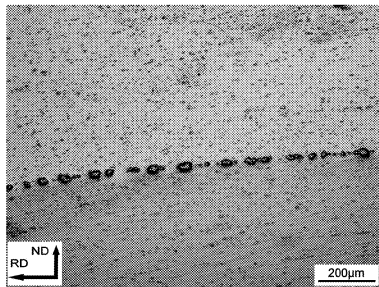
図 1 繰り返し圧延接合法によるアルミニウムプリフォームの作製プロセス。

プロセスを図 1 に示す。2 枚の板を 623 K のマッフル炉で 30 min 焼鈍した後、接合面をアセトンで脱脂し、ステンレススチール製のワイヤブラシで磨いた。次に 0.5wt% の水素化チタン(TiH_2)粉末を界面に挿入し、重ね合わせ、ステンレススチール製のクリップで固定した。この積層板をマッフル炉で 623 K に加熱した後、ロール径 252mm の 2 段式圧延機を用いて圧下率 50% の圧延接合を施した。2 倍の長さになった積層板を半分に切断し、最初と同様の表面処理を施した後、水素化チタン粉末を挿入せずに圧延接合した。このサイクルを 4 サイクル行ったものをプリフォームとした。

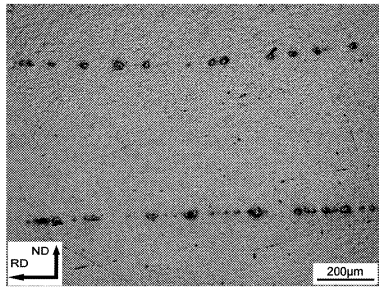
厚さ 3 mm のプリフォーム板からファインカッターで 1 辺 15 mm の正方形板を切り出し、発泡試験用の試験片を作製した。試験片を目標温度まで加熱した電気炉を用いて大気中で加熱・発泡させた。加熱後、試験片を自然冷却し、アルキメデス法によりスキンを含む発泡体の密度 ρ^* を測定した。気孔内のガスの密度を無視すれば、ポーラスアル



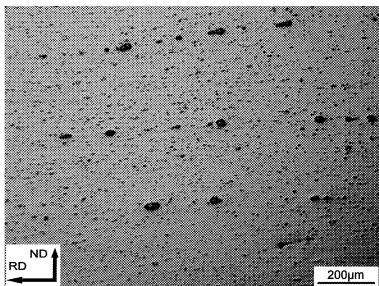
(a) 1 サイクル



(b) 2 サイクル



(c) 3 サイクル



(d) 4 サイクル

図2 サイクル数の増加によるプリフォームの組織変化.

ミニウム合金の気孔率 p は

$$p = 1 - \rho^* / \rho_s \quad (1)$$

と計算される. ここで ρ_s は 2017 アルミニウム合金板の密度 ($\rho_s = 2.79 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) である.

得られた発泡体を 773 K で 60 min 溶体化した後, 水焼入れし, 室温に放置することにより自然時効試験を行った. セル壁の硬さは, マイクロビッカース硬さ試験機により測定された. ここで同一試験片の異なる 7 点の測定値から最大値と最小値を除く 5 点を平均し, ビッカース硬さとした.

3. 結果および考察

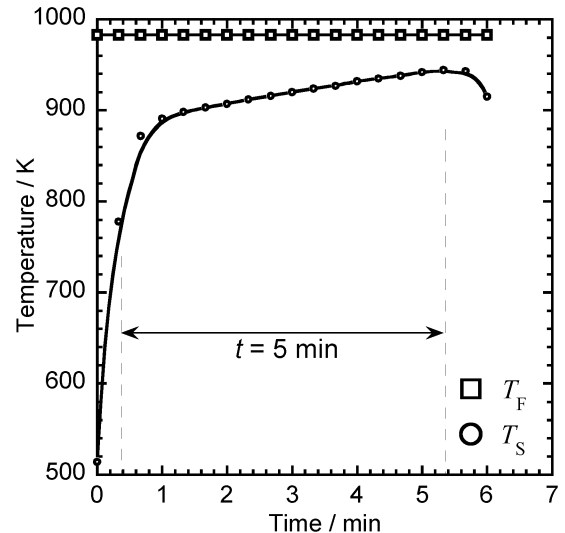


図3 加熱・発泡試験の温度プロファイル. T_F : 炉の温度.

T_S : 試験片温度

図2に圧延接合のサイクル数の増加によるプリフォームの組織変化を示す. サイクル数の増加とともに水素化チタン粒子が, マトリックス中に均一分散することがわかる. また, 接合界面も観察されないため, 圧延接合は良好に行われたと考えられる.

電気炉を用いた加熱・発泡試験の温度プロファイルを図3に示す. 炉内温度 T_F 一定の電気炉中に, 試験片を素早く挿入し, 所定の保持時間 t の後に, 素早く取り出した. ここで, 試験片温度が 773 K になった時点を発泡開始時刻とした. 図のように発泡試験中, 試験片温度 T_S は緩やかに上昇した.

保持時間 t を一定にしたときの炉内温度 T_F と気孔率 p の関係を図4に示す. 気孔率は炉内温度の上昇とともに増加し, ある温度でピークに達し, それ以上温度が上昇すると減少した. これは低温側では固相の割合が多いため, マトリックス金属の変形抵抗が高く, 気孔成長を抑制し, 高温側では液相の割合が多いため, マトリックス金属の粘性が低下し, 気孔の合体・崩壊が生じるためである.

発泡時間が長いほど最大気孔率が得られる温度は, 低温側へ遷移する傾向が見られた. 今回の実験では, 983 K, 5 min の加熱条件で, 最大気孔率 42% の試験片が得られた. これは他のアルミニウム合金の発泡試験結果と比べるとやや低かった.

気孔率 9%, 31%, 42% の発泡体をファインカッターで切断し, その縦断面を実体顕微鏡で観察した[図5]. 試験片は, 板厚方向に優先的に膨張した. 気孔率の増加とともに気孔径も増加し, 気孔率 42% の発泡体中央部には, 大きな気孔が観察できた. このようなセル形態は, Al-Si 合金から作製されたポーラスアルミニウム合金に比べ, 非常に不均一である. この理由は, 2017 アルミニウム合金の粘性が低いために, 発生した気泡が容易に合体したと考えら

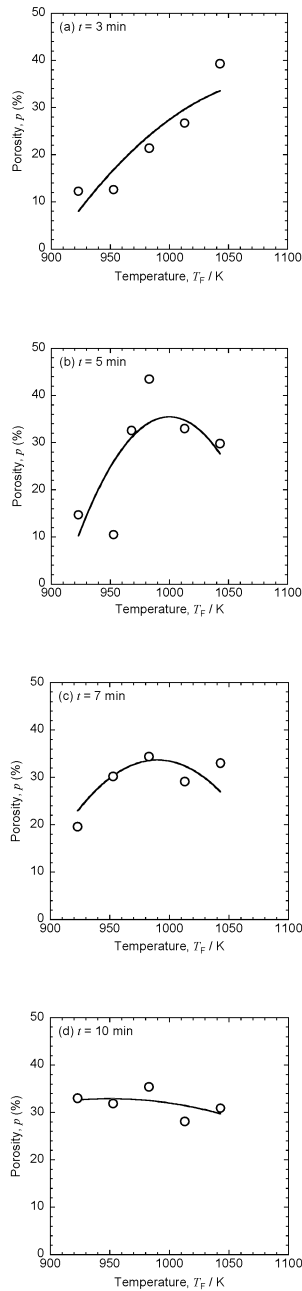
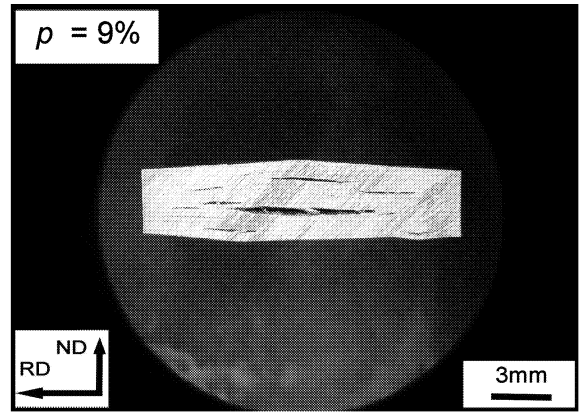


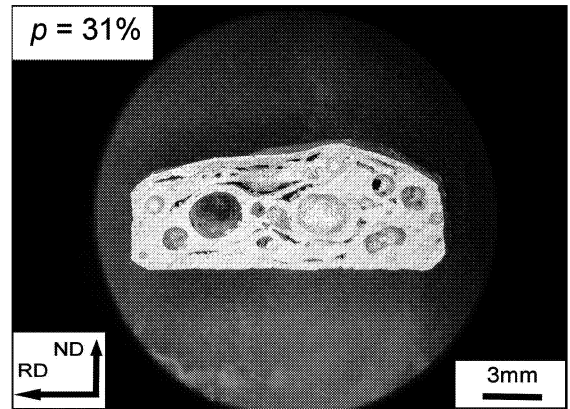
図4 大気中での加熱・発泡試験における気孔率の温度、保持時間依存性.

れる. そのため, 本合金系において均一なセル形態を達成するためには, 微細な酸化物粒子等を添加し, 発泡過程における粘性を上げる必要がある.

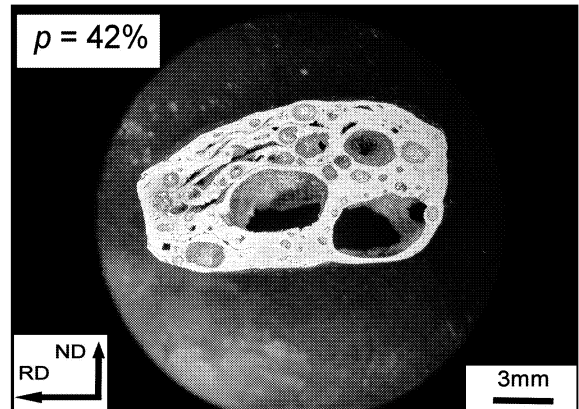
気孔率 39%と 42%の試験片について, 発泡後, 溶体化・自然時効試験を行った. 比較として, 市販の純アルミニウム系ポーラスアルミニウム(神鋼鋼線工業製 ALPORAS)の時効試験も行った. それぞれのビッカース硬さ H_V の室温保持時間に対する変化を図 6 に示す. 気孔率に関係なく, ポーラス 2017 アルミニウム合金は, 時間の経過とともに硬さが増加し, 約 80 時間後にピーク硬さに達した. 一方, ALPORAS は, 全く時効硬化挙動を示さず, その硬さは,



(a) $p = 9\%$



(b) $p = 31\%$



(c) $p = 42\%$

図5 気孔率(a)9%, (b)31%, (c)42%のポーラスアルミニウムの縦断面写真.

ポーラス 2017 アルミニウム合金の約 20%であった. 以上の結果より, 2017 合金のような時効硬化挙動を示すアルミニウム合金を用いることにより, 高強度のポーラスアルミニウムを作製できることがわかった.

4. まとめ

市販の 2017 アルミニウム合金板を出発材料とし, 繰り返し圧延接合を行うことでプリフォームを作製し, 大気中

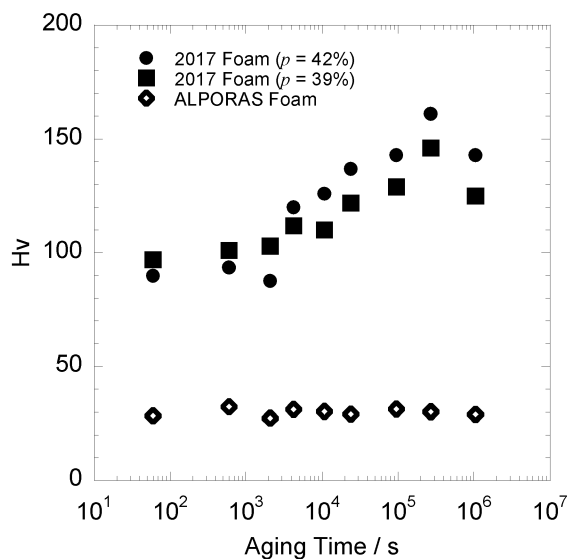


図6 ポーラスアルミニウムの自然時効試験結果.

で加熱・発泡させた。気孔率は、発泡温度と保持時間に依存し、983 K, 5 min の加熱条件で、最大気孔率 42% のポーラスアルミニウム合金が得られた。

発泡体のセル形態を観察した結果、気孔率の増加とともに

に気孔径も増加し、気孔の合体による大きな気孔が存在した。これは、発泡温度における 2017 アルミニウム合金の粘性が低かったためと考えられる。

発泡体に溶体化・時効熱処理を行うことにより、セル壁の硬さを著しく増加させることができた。今回の結果は、最適な時効硬化処理を行うことにより、高強度のポーラスアルミニウム合金を作製可能であることを示している。

謝 辞

本研究は、(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により行われたものであり、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) J. Banhart: *Progress Mater. Sci.* **46**, (2001) 559-632.
- 2) K. Kitazono, E. Sato and K. Kuribayashi: *Scripta mater.* **50**, (2004) 495-498.
- 3) Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji and T. Sakai: *Acta mater.* **47**, (1999) 579-583.
- 4) K. Kitazono, S. Nishizawa, E. Sato and T. Motegi: *Mater. Trans.* **45**, (2004) 2389-2394.
- 5) K. Kitazono, Y. Kikuchi, E. Sato and K. Kuribayashi: *Mater. Letters* **61**, (2007) 1771-1774.