摩擦現象を利用したアルミニウムフォームの表面改質*

権 湧 宰¹ 重 松 一 典² 斎 藤 尚 文²

¹韓国蔚山大学先端素材工学部

²独立行政法人産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門

J. Japan Inst. Metals, Vol. 73, No. 7 (2009), pp. 527-532

© 2009 The Japan Institute of Metals

Surface Modification of Aluminum Foams Using Friction Phenomena

Yong-Jai Kwon¹, Ichinori Shigematsu² and Naobumi Saito²

¹School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Republic of Korea

²Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Nagoya 463-8560

The surface region of the aluminum foams (trade name ALPORAS) was modified through the friction stir processing (FSP) which was performed by using friction phenomena with a high-speed rotating tool. The tool was rotated at speeds ranging from 820 to 2400 rpm, and plunged from the top surface of the aluminum foam, and then traversed at speeds ranging from 50 to 300 mm/min. The surface-modified zone (SMZ) had considerably smoother surface in comparison to the unprocessed zone (UZ). Especially for 1390 rpm and 150 mm/min, the smoothest surface was obtained, which was attributed to the smaller amount of pores in the SMZ. In addition, a very dense layer was formed near the surface of the SMZ through the localized collapse and densification of the cell structure near the surface region, which was attributed to the friction phenomena with the high-speed rotating tool. The mechanical properties of the aluminum foams were significantly improved through the FSP. Especially for 1390 rpm and 150 mm/min, the SMZ exhibited the highest average maximum indentation strength and energy absorption ability, which were equivalent to about 2.2 times the values of the UZ. The tool rotation speed and the tool traverse speed were very important parameters not only in controlling the surface morphology, but also in improving the mechanical properties of the aluminum foams. The FSP was a very effective technology for the remarkable improvement in the mechanical properties through the cell structure control of the surface region of the aluminum foams, without any dense skin materials.

(Received January 6, 2009; Accepted April 20, 2009)

Keywords: friction stir processing, porous metal, friction phenomena, surface modification, cell structure, aluminum foam, surface morphology, mechanical properties, indentation test, energy absorption

1. 緒 言

多孔質金属材料は、多量の気孔を含むセル構造を形成しているため、優れた軽量性、衝撃吸収性、吸音性、断熱性などの多様で有益な特性を有している¹⁻⁷⁾。また、高分子多孔質材料に比べても、比強度が高い、熱伝導率が優れる、融点が高い、リサイクルが容易であるなどの様々な特長を示す。そこで、このような多孔質金属材料は、自動車、医療、建築、土木などの多くの産業分野で注目され、これらの材料に関する研究が盛んに行われてきている。特に、多孔質金属材料の作製プロセスにおいては、再現性の向上などのために新しい製造技術の開発や従来技術の改善に関する研究が多く行われた⁸⁻¹³⁾。また、設計上の理由などで多孔質金属材料の特性を調べるための研究も多く行われた¹⁴⁻¹⁸⁾。このような努力の成果として、高効率でコストの低減が可能な製造プロセスが開発されるとともに、多孔質金属材料の様々な特性が明らかとなってきた。しかしながら、多孔質金属材料が示す多

様で有益な特長を生かし、より多くの産業分野で実用部材として実用化するためには、セル構造制御技術の確保や機械的特性の改善など構造設計上要求される課題もまだ多く残されている。

一方、自然界でも長年にわたって進化しつづけ、優れた機能を発揮しているセル構造がハチの巣や木や骨などで多く観察できる。このような自然界におけるセル構造体を観察してみると、セルの大きさや分布などがセル構造体中で均一ではなく、必要に応じて局部的に不均一になっている。骨の構造を一例として挙げてみると、骨は外殻である緻密骨と中心部の多孔質の海綿骨から構成された複合構造となっている。さらに、海綿骨の中でもセルの構造が均一ではなく、セルの大きさや骨密度が局部的に異なる不均一な構造となっている。すなわち、骨の中心部ではセルが大きくて骨密度が低いが、外側に移るにつれてセルが小さくなるとともに骨密度が高くなっている。骨は、このようなセル構造を有することにより、必要な強度を確保しながら、重量を軽減できる。自然界に存在しているこのような有効なセル構造を応用し、多孔質金属材料におけるセル構造を骨のように局部的に不均質化あるいは傾斜化させることが可能になると、多孔質金属材料の

* Mater. Trans. 50(2009) 192-196 に掲載

Fig. 1 Schematic illustration showing the basic principle of the friction stir processing (FSP) in this study. The surface modified zone and the unprocessed zone are labeled SMZ and UZ, respectively. And then, X, Z and Y represent the tool traverse direction, the tool rotation axis direction, and the width direction of porous metal, respectively.

有益な特長を最大限に生かしながら、機械的特性の向上や構造部材の軽量化などが期待できる。

そこで著者らは、Fig. 1 に示したように、多孔質金属材料の表面改質方法として高速回転する工具と多孔質金属材料との間で起こる摩擦現象を利用した摩擦攪拌プロセス (Friction Stir Process; FSP)^{19,20)}に着目した。本プロセスでは、円柱状の非消耗性工具を高速回転させながら多孔質金属材料の表面から深さ方向に挿入した後、移動させる。この間、高速回転している工具と多孔質金属材料との摩擦現象により摩擦熱が発生し、多孔質金属材料の温度が上昇するとともに軟化する。また、このように軟化した多孔質金属材料は高速回転している工具により塑性変形される。その結果、多孔質金属材料表面付近のセル構造が局部的に潰されることにより緻密化が起こり、表面改質領域 (Surface Modified Zone; SMZ) が形成されることになる。すなわち本プロセスは、高速回転する工具と多孔質金属材料との間で起こる摩擦現象を利用して多孔質金属材料の表面付近を改質する方法である。

本研究では、アルミニウムフォームの機械的特性を向上するために、高速回転する工具とアルミニウムフォームとの間で起こる摩擦現象を利用してアルミニウムフォームの表面付近を改質するとともに、工具の回転速度および移動速度が表面改質部の表面形状、セル構造および機械的特性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

供試材料として用いた多孔質金属材料は、主に閉気孔から構成されたアルミニウムフォーム (ALPORAS, 神鋼鋼線工

業株式会社)であった。アルミニウムフォームは、溶融アルミニウムの粘性を向上させるためにカルシウム (Ca) を添加し、水素化チタン (TiH_2) を発泡剤として用いて作製したものであった²¹⁾。アルミニウムフォームの形状は、Fig. 1 に示したように、長さ 100 mm、幅 50 mm および厚さ 30 mm の直方体であった。表面改質用工具は、材質が焼入れした工具鋼 SKD61 であり、直径 15 mm の円柱状であった。工具をそれぞれ 820 から 2400 rpm までの速度で右回りに回転させながら、アルミニウムフォームの表面から 2.6 mm の深さまで挿入した後、アルミニウムフォームの長さ方向 (X 軸方向) に 50 から 300 mm/min の速度で移動させた。この際、工具の回転軸 (Z 軸) は工具の移動方向 (X 軸方向) に対して 10 度傾けた。また、すべての実験は大気中で室温下にて行った。

表面改質部付近のセル構造を調べるために、放電加工機を利用してアルミニウムフォームの表面に垂直な方向に切断した後、切断面を研磨した。アルミニウムフォームの機械的特性を調べるために押込み試験を行った。押込み試験では、直径 10 mm の鋼球をアルミニウムフォームの表面から深さ 5 mm まで 1.0 mm/min の一定な速度で圧入し、荷重および変位の変化を調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 アルミニウムフォームのセル構造

Fig. 2 は、供試材料であるアルミニウムフォームの典型的なセル構造を示す。アルミニウムフォームは、約 91% の気孔率および約 0.24 g/cm^3 の見かけ密度を示した。供試材料のセル構造を調べるために、放電加工機を利用して供試材料を切断し研磨した後、画像解析を行った結果、閉気孔の約 70% が直径約 1 から 4 mm の範囲で分布し、平均直径が約 2.4 mm であった。また、セル壁の厚さは主に 100 から 250 μm の範囲で分布し、平均厚さが約 190 μm であった。

3.2 表面形状

Fig. 3 は、工具の移動速度を 150 mm/min に一定とし、工具の回転速度をそれぞれ (a) 820, (b) 1390 および (c) 2400 rpm に変化させ表面改質したアルミニウムフォームの表面外観を示す。未加工部 (Unprocessed Zone; UZ) においては、表面改質前の供試材料のセルおよび表面構造がそのまま観察される。一方、表面改質部 (SMZ) では、いずれの工具回転速度においても、高速回転する工具との摩擦により未加工部とはまったく異なる表面外観を示した。すなわち、表面改質部においては供試材料におけるセル構造は観察されず、表面が平坦化されることにより金属光沢が観察された。また、表面改質部における金属光沢部と開気孔部の比率を調べるために画像解析を行った結果、工具の回転速度 (a) 820, (b) 1390 および (c) 2400 rpm において開気孔部がそれぞれ約 50, 32 および 46% の面積率を示し、(b) 1390 rpm において最も開気孔の少ない平坦な表面改質部が得られたことが分かった。このような結果から、本プロセスにおいて表面改質用工具の回転速度はアルミニウムフォームの表面形状に影響を

Fig. 2 Optical macrograph showing a typical cell structure of the aluminum foam used as the starting material in this study.

Fig. 3 Surface appearances of the aluminum foams surface-modified at the tool rotation speeds of (a) 820, (b) 1390 and (c) 2400 rpm under the constant tool traverse speed of 150 mm/min.

Fig. 4 Surface appearances of the aluminum foams surface-modified at the tool traverse speeds of (a) 50 and (b) 300 mm/min under the constant tool rotation speed of 1390 rpm.

及ぼす重要なパラメータであることが明らかとなった。

Fig. 4 は、工具の回転速度を 1390 rpm に一定とし、工具の移動速度をそれぞれ (a) 50 および (b) 300 mm/min に変化させ表面改質したアルミニウムフォームの表面外観を示す。この場合においても、Fig. 3 と同様に、表面改質部では供試材料におけるセル構造は観察されず、平坦な表面が形成されたことにより金属光沢の表面改質部が得られた。また、表面改質部における金属光沢部と開気孔部の比率を調べるために画像解析を行った結果、工具の移動速度 (a) 50 および (b) 300 mm/min において開気孔部がそれぞれ約 58 および 56% の面積率を示した。すなわち、工具の回転速度を 1390 rpm に一定とした場合には、Fig. 3 (b) に示した工具の移動速度 150 mm/min において最も開気孔の少ない平坦な表面改質部が得られた。このような結果から、表面改質用工具の移動速度も本プロセスにおいてアルミニウムフォームの表面形状に影響を及ぼす重要なパラメータであることが明らかとなった。

以上の結果から、摩擦攪拌プロセスはアルミニウムフォームの表面改質に有効であり、表面改質用工具の回転速度およ

Fig. 5 Typical optical macrograph of the cross-sections perpendicular to the tool traverse direction of the surface-modified aluminum foam.

び移動速度は本プロセスにおいてアルミニウムフォームの表面形状に影響を及ぼす重要なパラメータであることが明らかとなった。

3.3 表面改質部のセル構造

Fig. 5 は、摩擦攪拌プロセスを利用して表面改質したアルミニウムフォームにおける表面改質部付近のセル構造を示す。未加工部は、表面付近の開気孔および内部の閉気孔から構成されていた。一方、表面改質部では、未加工部の表面構造とは異なり、表面付近で非常に緻密な表面層が形成されていた。このような結果から、摩擦攪拌プロセス中に高速回転する工具との摩擦により、アルミニウムフォームの表面付近でセル構造が局部的に潰されるとともに、セル壁が塑性変形することにより緻密な表面層を有する表面改質部が形成されたと考えられる。また摩擦攪拌プロセスを利用すると、他の緻密なスキン材を用いずに、アルミニウムフォームの表面付近に緻密な表面層の形成が可能であることが明らかとなった。

3.4 機械的特性

Fig. 6(a) は、(1)未加工部とともに、工具の移動速度を 150 mm/min に一定とし、工具の回転速度をそれぞれ(2)820, (3)1390 および(4)2400 rpm に変化させ作製したアルミニウムフォームの表面改質部の押込み試験における加重-変位曲線を示す。また Fig. 6(b) は、工具の回転速度を 1390 rpm に一定とし、工具の移動速度をそれぞれ(5)50 および(6)300 mm/min に変化させ作製したアルミニウムフォームの表面改質部の押込み試験における加重-変位曲線を示す。いずれの場合においても、加重-変位曲線は同様な傾向を示した。すなわち、押込み加重は明瞭な降伏現象を伴わず、変位量の増加とともに徐々に増加する傾向を示した。

Fig. 7 は、(a)工具の回転速度および(b)工具の移動速度がアルミニウムフォームの表面改質部の最大押込み加重に及ぼす影響を示す。ここで、最大押込み加重は Fig. 6 に示した加重-変位曲線においてもっとも高かった荷重を示し、エラーバーは押し込み試験をそれぞれ 3 回ずつ行って得られた最大値および最小値を示す。また、(a)および(b)は、それぞれ工具の移動速度を 150 mm/min に一定とした場合および工具の回転速度を 1390 rpm に一定とした場合を示す。

Fig. 6 Indentation Load-displacement curves of (1) the unprocessed zone (i.e., starting material), and the surface-modified zones of the aluminum foams produced at the tool rotation speeds of (2) 820, (3) 1390 and (4) 2400 rpm under the constant tool traverse speed of 150 mm/min, and at the tool traverse speeds of (5) 50 and (6) 300 mm/min under the constant tool rotation speed of 1390 rpm, respectively.

Fig. 7 Influences of (a) the tool rotation speed and (b) the tool traverse speed on the maximum indentation load of the surface-modified zone of the aluminum foams produced at the constant tool traverse speed of 150 mm/min and tool rotation speed of 1390 rpm, respectively. The positive and negative error bars indicate the maximum and minimum values, respectively.

Fig. 8 Influences of (a) the tool rotation speed and (b) the tool traverse speed on the energy absorption ability of the surface-modified zone of the aluminum foams produced at the constant tool traverse speed of 150 mm/min and tool rotation speed of 1390 rpm, respectively. The positive and negative error bars indicate the maximum and minimum values, respectively.

すべての表面改質条件において、表面改質部が未加工部より高い最大押込み加重を示した。特に、工具の移動速度および回転速度がそれぞれ 150 mm/min および 1390 rpm であった条件においては、未加工部よりも約 2.2 倍高い最大押込み加重を示し、本研究において最も高い最大押込み加重が得られた。

Fig. 8 は、(a) 工具の回転速度および (b) 工具の移動速度がアルミニウムフォームの表面改質部のエネルギー吸収能力に及ぼす影響を示す。ここで (a) および (b) は、それぞれ工具の移動速度を 150 mm/min に一定とした場合および工具の回転速度を 1390 rpm に一定とした場合を示す。また、エラーバーは押し込み試験をそれぞれ 3 回ずつ行って得られた最大値および最小値を示す。エネルギー吸収能力は、Fig. 6 に示した押し込み試験における加重-変位曲線を積分することにより得られた。エネルギー吸収能力においても、Fig. 7 に示した最大押込み加重と同様に、すべての加工条件で表面改質部が未加工部より高いエネルギー吸収能力を示した。また、工具の移動速度および回転速度がそれぞれ 150 mm/min および 1390 rpm であった条件においては、未加工部よりも約 2.2 倍高いエネルギー吸収能力を示し、本研究において最も高いエネルギー吸収能力を示した。

これらの結果から、本研究における摩擦現象を利用したアルミニウムフォーム表面改質プロセスは、アルミニウムフォームの表面形状制御だけではなく、最大押込み加重やエネルギー吸収能力などの機械的特性を向上することにより、ア

ルミニウムフォームの表面近傍における外力に対する変形抵抗の向上に有効であり、表面改質用工具の回転速度および移動速度は表面改質部の多様な特性に影響を及ぼす重要なパラメータであることが明らかとなった。

4. 結 言

本研究では、高速回転する工具と多孔質金属材料との間で起こる摩擦現象を利用してアルミニウムフォーム表面付近を改質するとともに、工具の回転速度および移動速度が表面改質部の表面形状、セル構造および機械的特性に及ぼす影響を調べた。以下に主な結果を示す。

(1) 表面改質部の表面は、未加工部より平坦化されることにより金属光沢が観察された。特に、工具の移動速度および回転速度がそれぞれ 150 mm/min および 1390 rpm であった場合において、最も開気孔の少ない平坦な表面改質部が得られた。

(2) 高速回転する工具との摩擦により、アルミニウムフォームの表面付近でセル構造が局部的に潰されるとともに、セル壁が塑性変形されることにより緻密な表面層を有する表面改質部が形成された。

(3) 表面改質部の最大押込み加重およびエネルギー吸収能力はすべての加工条件において未加工部より向上できた。特に、工具の移動速度および回転速度がそれぞれ 150 mm/min および 1390 rpm であった場合においては、最大押込み加重およびエネルギー吸収能力が未加工部よりそれぞれ約 2.2 倍も向上できた。

(4) 高速回転する工具と多孔質金属材料との間で起こる摩擦現象を利用したアルミニウムフォーム表面改質プロセスは、アルミニウムフォームの表面形状制御だけではなく、最大押込み加重やエネルギー吸収能力などの機械的特性の向上にも非常に有効であり、表面改質用工具の回転速度および移動速度は表面改質部の多様な特性に影響を及ぼす重要なパラメータであることが明らかとなった。

本研究は、2007 年蔚山大学研究費の支援を受けました。

文 献

- 1) L. J. Gibson and M. F. Ashby: *Cellular Solids: Structures and Properties*, 2nd ed., (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- 2) M. Ashby, N. Fleck, H. Wadley, J. Hutchinson and L. Gibson: *Metal Foams: A Design Guide*, (Butterworth-Heinemann, Boston, 2000).
- 3) J. Banhart: *Prog. Mater. Sci.* **46** (2001) 559-632.
- 4) F. Yi, Z. Zhu, F. Zu, S. Hu and P. Yi: *Mater. Charact.* **47** (2001) 417-422.
- 5) C. M. Moran, J. A. Ross, C. Cunningham, M. Butler, T. Anderson, D. Newby, K. A. A. Fox and W. N. McDicken: *Ultrasound Med. Biol.* **32** (2006) 421-428.
- 6) Z. Xie, T. Ikeda, Y. Okuda and H. Nakajima: *Mater. Sci. Eng. A* **386** (2004) 390-395.
- 7) W. Jiejun, L. Chengong, W. Dianbin and G. Manchang: *Compos. Sci.* **63** (2003) 569-574.
- 8) T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama and A. Kitahara: *Porous and Cellular Materials for Structural Applications*, ed. D. S. Schwartz, D. S. Shih, A. G. Evans and H. N. G. Wadley, (MRS, San Fran-

- cisco, 1998).
- 9) L. Ma and Z. Song: *Scr. Mater.* **39**(1998) 1523–1528.
 - 10) A. E. Simone and L. J. Gibson: *Acta mater.* **46**(1998) 3109–3123.
 - 11) V. Gergely and T. W. Clyne: *Adv. Eng. Mater.* **2**(2000) 175–178.
 - 12) V. Gergely, H. P. Degischer and T. W. Clyne: *Comprehensive Composite Materials, Vol. 3: Metal Matrix Composites*, ed. T. W. Clyne, (Elsevier, Amsterdam, 2000).
 - 13) O. Prakash, H. Sang and J. D. Embury: *Mater. Sci. Eng. A* **199**(1995) 195–203.
 - 14) Y. Sugimura, J. Meyer, M. Y. He, H. B. Smith, J. Grenestedt and A. G. Evans: *Acta mater.* **45**(1997) 5245–5259.
 - 15) J. T. Beals and M. S. Thompson: *J. Mater. Sci.* **32**(1997) 3595–3600.
 - 16) W. Sanders and L. J. Gibson: *Porous and Cellular Materials for Structural Applications*, ed. D. S. Schwartz, D. S. Shih, A. G. Evans and H. N. G. Wadley, (MRS, San Francisco, 1998).
 - 17) E. Andrews, W. Sanders and L. J. Gibson: *Mater. Sci. Eng. A* **270**(1999) 113–124.
 - 18) H. Fusheng and Z. Zhengang: *J. Mater. Sci.* **34**(1999) 291–299.
 - 19) Y. J. Kwon, I. Shigematsu and N. Saito: *J. Japan Inst. Metals* **66**(2002) 1325–1332.
 - 20) Y. J. Kwon, I. Shigematsu and N. Saito: *J. Japan Inst. Metals* **67**(2003) 547–554.
 - 21) T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama and A. Kitahara: *Adv. Eng. Mater.* **2**(2000) 179–183.