

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420759

研究課題名(和文) ポーラス金属の衝撃吸収性と超塑性材料の制振性を併せ持つ多機能亜鉛合金の創製

研究課題名(英文) Development of multifunctional zinc alloy having energy absorption of porous metals and damping capacity of superplastic materials

研究代表者

北園 幸一 (KITAZONO, Koichi)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：20321573

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ポーラス金属のセル構造と超塑性金属の微細結晶粒を有するポーラスZn-22Al超塑性合金を作製した。発泡剤を用いた鋳造法により作製された試料は、気孔率80%平均気孔径2.9 mmであった。溶体化、人工時効により、平均結晶粒径5ミクロンの微細粒組織が得られた。準静的および動的圧縮試験により、ポーラスZn-22Al超塑性合金が高いひずみ速度感受性指数を有することがわかった。本研究により創成した超塑性の特性を有する新しいポーラス金属は、衝撃吸収材料としての応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Porous Zn-22Al superplastic alloy having cell microstructure of porous metals and fine crystal grain of superplastic metals has been manufactured. The samples fabricated through casting process with a foaming agent has the porosity of 80% and average pore size of 2.9 mm. Fine crystal grains with 2.2 micrometer size has been fabricated through solution heat treatment followed by artificial aging. Quasi-static and dynamic compression tests revealed that the porous Zn-22Al superplastic alloy has high strain rate sensitivity. Newly developed porous metal has a potential of energy absorbing material.

研究分野：金属材料工学

キーワード：超塑性 ポーラス材料 ひずみ速度感受性 衝撃吸収

1. 研究開始当初の背景

(1) ポーラス金属は内部に多数の気孔を有する軽量金属材料で、衝撃吸収、断熱性、吸音性、制振等の機能を有する多機能材料である。様々な分野において実用化されているポーラス金属は、発泡アルミニウムに代表されるポーラスアルミニウムである。しかしながら、ポーラスアルミニウムは延性に乏しいため、曲げ加工やプレス加工等の2次加工が不可能である。そこで、超塑性合金であるZn-22Al合金をセル壁材とすることにより、優れた塑性加工性、制振性、衝撃吸収特性等を有すると考えられる。Zn-22Al合金は、熱処理のみで超塑性に必要な微細な等軸結晶粒が得られ、融点が753 Kと低いことから、室温付近においても高いひずみ速度感受性を示す。加工熱処理により結晶粒が超微細化されたZn-22Al合金は、室温にて高速超塑性を示すため、その特性を利用したメンテナンスフリーの住宅用制震ダンパが開発されている。

(2) 研究代表者は、これまでに粉末法により、ポーラスZn-22Al合金の作製に成功している。しかしながら大量生産に適した鋳造法による作製プロセスや、超塑性特性に関する詳細な検討はまだ行われていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、溶湯法により作製されたポーラスZn-22Al超塑性合金に、準静的圧縮試験、落錘式高速圧縮試験を行うことにより、機械的特性におよぼすひずみ速度の影響を調査することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) Zn-22Al合金を黒鉛坩堝に入れ、アドバンテック東洋製FUC150FB電気坩堝炉で溶融させた。溶湯中に攪拌機を設置し、溶湯温度753 Kにおいて、速度900 rpmで強撹拌させながら、発泡剤として水素化チタン粉末を溶湯表面から1 mass%添加した。その後、発泡体を取り出して強制空冷し、凝固させた。

(2) 作製したポーラスZn-22Al合金の平均気孔径を画像解析ソフトImage Jを用いて、切断した発泡体断面写真から算出した。圧縮試験片は、ファインカッターによってそれぞれ切り出され、超塑性発揮に必要な微細組織を得るため、633 Kで15 hの溶体化処理後、氷水で急冷し、533 Kで8 hの人工時効処理を施した。セル壁の微細構造は日本電子製走査型電子顕微鏡(SEM, JSM-6510A)を用いて観察し、切片法により平均結晶粒径を算出した。試験片の質量と寸法から、かさ密度 ρ^* を求め、気孔率を算出した。

(2) 島津製作所製万能試験機(AUTOGRAPH AG-50 kN ISD)を用いクロスヘッド速度0.5~500 mm/minで圧縮試験を行った。高速圧縮試験には、自作の落錘式高速圧縮試験機を用いた。図1に概略図を示す。試験機に取り付けられた加速度計とロード

セルからそれぞれ変位と荷重を算出した。衝突速度は3 m/sとなるように設定し、重錘質量は68 kgとした。また、比較として気孔率90%のポーラスアルミニウムに対しても同様の圧縮試験を行った。

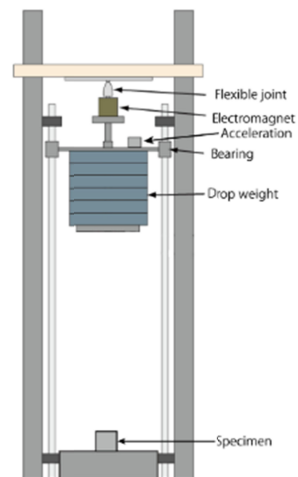


図1 自作の落錘式高速圧縮試験機の模式図。

4. 研究成果

(1) 作製したポーラスZn-22Al合金の気孔率は80%、平均気孔径は2.9 mmであった。熱処理後の試験片のセル壁の反射電子像(BEI)を図2に示す。暗い領域がAl-rich相、明るい領域がZn-rich相であり、平均結晶粒径は2.2 μm と算出された。このサイズは、一般的な超塑性変形に十分微細である。

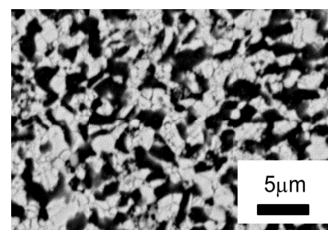


図2 熱処理後のポーラスZn-22Al合金のSEM写真。

(2) 図3に圧縮試験により得られた圧縮応力-ひずみ曲線を示す。弾性変形の後、変形応力がほぼ一定のプラトー領域が観察された。これは、ポーラス金属特有のセル壁の連続的な崩壊によるものである。ポーラスZn-22Al合金は、変形速度が増加するにつれ初期最大圧縮応力も増加した。一般的な金属材料において、変形応力 σ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係は、

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

となる。ここで m はひずみ速度感受性指数、 K は温度や結晶粒径に依存する定数である。ポーラスZn-22Al合金の m 値は、ポーラスアルミニウムに比べて非常に高かった。これは、セル壁の粒界すべりによって誘起された超塑性変形によるものである。高い m 値は、変形速度が増加するほど変形応力が大きく増加することを意味しており、高速変形における衝撃吸収に有効であると考えられる。

(3) ポーラス金属の変形は、セル構造の最も弱い部分から崩壊する不連続変形であり、変形バンドが形成される。そのため、ひずみ速度を定義する場合、試験片全体ではなく、変形バンドのみの局所領域で定義する必要がある。この局所ひずみ速度は、

$$\dot{\epsilon}_L = \frac{L}{B} \dot{\epsilon}_0 \quad (2)$$

となる。

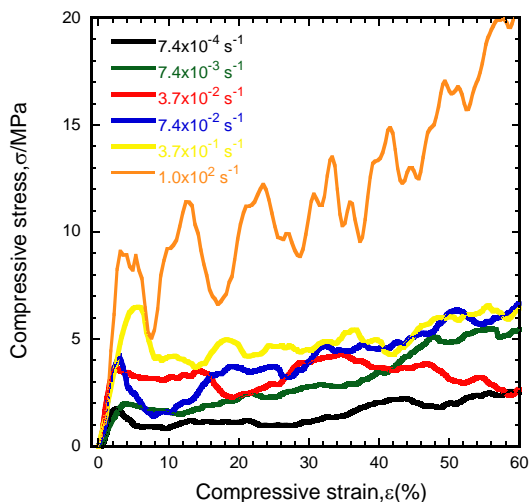


図3 ポーラス Zn-22Al 合金の各ひずみ速度における圧縮応力-ひずみ曲線。

ここで L は試験片の圧縮方向の高さ、 B は変形バンドの幅で、平均気孔径とほぼ等しい。また、変形応力は相対密度依存指数 $n = 2.9$ を用いて規格化した。図4に局所ひずみ速度と規格化した変形応力の両対数プロットを示す。圧縮強度は、初期最大圧縮応力が生じる平均である4%ひずみでの変形応力を用いた。通常の超塑性変形では、ひずみ速度域により Region I, II, III の3つの領域に分けることができる。本研究におけるポーラス Zn-22Al 合金の m 値は、Region II で $m = 0.2$ 、Region III で $m = 0.05$ と緻密体同様の m 値を示した。

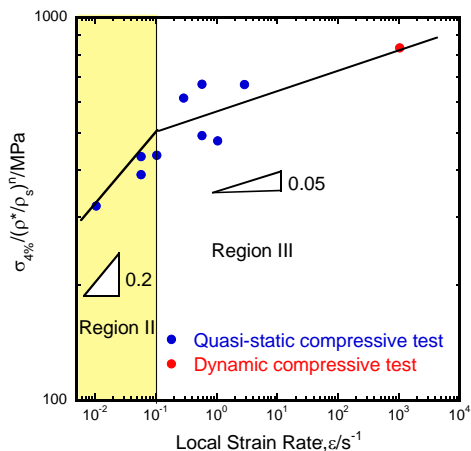


図4 ポーラス Zn-22Al 合金の相対密度で規格化した4%変形応力のひずみ速度依存性。

(4) ポーラス金属の単位重量あたりのエネルギー吸収量 W_s は、応力-ひずみ曲線から、

$$W_s = \frac{1}{\rho} \int_0^{50\%} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

となる。図5にそれぞれの圧縮試験から算出された比エネルギー吸収量の比較のグラフを示す。比較としてポーラスアルミニウムにおける同様の圧縮試験の結果も図中に示す。高速圧縮試験においてポーラス Zn-22Al 合金は非常に高いエネルギー吸収特性を示し、ポーラスアルミニウムと比較してもエネルギー吸収特性に優れていることが明らかとなった。この結果から、高速変形の衝撃吸収において、セル壁を超塑性化することは非常に有効であることがわかった。

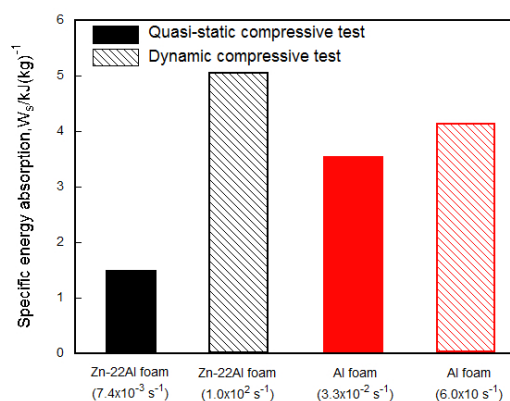


図5 ポーラス Zn-22Al 合金とポーラスアルミニウムの単位重量あたりのエネルギー吸収量の比較。

(5) 本研究では、超塑性特性を有するポーラス金属の一例として、ポーラス Zn-22Al 超塑性合金を作製した。作製した試料に対して、準静的・動的圧縮試験を行った。実験より、初期ひずみ速度の増加と共に、圧縮応力が大きく増加することがわかった。これは、セル壁材である Zn-22Al 合金が高いひずみ速度依存性を示したためである。ポーラス Zn-22Al 合金の室温でも高い m 値を示した。これらの結果は、高速変形において、ポーラス Zn-22Al 合金の高いエネルギー吸収能を示唆している。

<引用文献>

- C. Motz, R. Rippin: Acta Mater., **49**, (2001), 2463-2470.
 榎井浩一、上田宏樹、岡田徹、加藤稔、三村裕一、田淵勝道：神戸製鋼技報, **51**, (2001), 34-37.
 K. Kitazono, Y. Takiguchi: Scr. Mater., **55**, (2006), 501-504.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

S. Ogawa, K. Sekido, K. Kitazono, Energy absorption of superplastic Zn-22Al alloy foam manufactured through melt foaming process, Mater. Sci. Forum, 査読有, 838-839, 2016, 231-236.

DOI:

10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.231

K. Kitazono, Y. Takayama, Y. Motohashi, F. Ono, Constitution of ISO and JIS for method of tensile testing of superplastic materials, Mater. Sci. Forum, 査読有, 838-839, 2016, 453-458.

DOI:

10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.453

関戸健治, 北園幸一, ポーラス Zn-22Al 超塑性合金におけるひずみ速度に依存した高温変形機構の解明, 日本金属学会誌, 査読有, 78 巻, 2014, 68-74.

DOI: 10.2320/jinstmet.J2013050

K. Kitazono, K. Sekido, Strain rate sensitivity and high temperature deformation mechanisms of cast Zn-22Al alloy foams, Procedia Mater. Sci., 査読有, 4, 2014, 175-179.

DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.586

K. Sekido, K. Kitazono, Effect of Porosity on Tensile and Compressive Deformations of Superplastic Zn-22Al Alloy Foam, Mater. Sci. Forum, 査読有, 735, 2013, 73-78.

DOI:

10.4028/www.scientific.net/MSF.735.73

関戸健治, 北園幸一, 溶湯発泡法で作製されたポーラス Zn-22Al 超塑性合金のセル形態に及ぼす発泡条件の影響, 日本金属学会誌, 査読有, 77 巻, 2013, 497-502.

DOI: 10.2320/jinstmet.J2013034

[学会発表](計6件)

K. Kitazono, Y. Takayama, Y. Motohashi, F. Ono: Constitution of ISO and JIS for method of tensile testing of superplastic materials, ICSAM 2015, 2015 年 9 月 10 日, 「東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)」

S. Ogawa, K. Seikido, K. Kitazono: Energy absorption of superplastic Zn-22Al alloy foam manufactured through melt foaming process, ICSAM 2015, 2015 年 9 月 8 日, 「東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)」

小川聡, 北園幸一: 溶湯法で作製されたポーラス Zn-22Al 合金の超塑性特性に及ぼす発泡剤の影響, 塑性加工春季講演会, 2015 年 5 月 30 日, 「慶応大学矢上キャンパス(神奈川県・横浜市)」

小川聡, 北園幸一: 炭酸水素ナトリウムを用いて作製されたポーラス Zn-22Al 合金の圧縮特性, 塑性加工連合講演会, 2014 年 10 月 11 日, 「岡山大学(岡山県・岡山

市)」

小川聡, 関戸健治, 北園幸一: 炭酸水素ナトリウムによるポーラス Zn-22Al 超塑性合金の作製とそのセル形態, 塑性加工春季講演会, 2014 年 6 月 8 日, 「つくば国際会議場(茨城県・つくば市)」

関戸健治, 北園幸一: ポーラス Zn-22Al 合金の超塑性特性に及ぼすセル形態の影響, 塑性加工連合講演会, 2013 年 11 月 2 日, 「大阪大学吹田キャンパス(大阪府・吹田市)」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北園 幸一 (KITAZONO, Koichi)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号: 20321573