ロータス型ポーラス金属の疲労強度

Fatigue Strength of Lotus-type Porous Metals

関 宏 範*・多根正和*・中嶋英雄*

Hironori SEKI, Masakazu TANE and Hideo NAKAJIMA

Key Words: Porous metals, Fatigue, Copper, Magnesium

1. 緒言

多数の気孔を金属内部に含むポーラス金属は、軽量性・制振性に優れる機能性材料である。このために、ポーラス金属はサンドイッチパネルなどの軽量化構造部材として使用されている¹⁻²⁾。構造部材として使用する場合、安全性を確保するため、疲労特性を把握する必要がある。このような理由から、ポーラス金属の疲労強度の研究が行なわれている³⁻⁵⁾。この結果、70%以上の気孔率を有する従来のポーラス材料の疲労強度は気孔率や気孔形態に依存すること、疲労強度はプラトー応力の約0.2～1.0であることなどが明らかにされている。近年、盛んに研究が行なわれているロータス型ポーラス金属（ロータス金属）の気孔は円柱状であり、一方向に並んでいるため、気孔の長手方向に荷重を負荷した場合、ほとんど応力が集中しない。また、作製時のガス圧の制御を行なうことにより、気孔率の制御が可能である。これらのことから、ロータス金属の強度は従来のポーラス金属の強度に比べて高いことが明らかにされている⁶⁻⁸⁾。この強度の高いロータス金属は多孔質の特性を有する材料として、工作機械などの軽量化構造部材や、生体用材料として使用することが期待されている。

このようにロータス金属を荷重の作用する箇所へ使用することが考えられるため、機械的特性の研究が行なわれている。ロータス金属の機械的特性の研究の結果として、弾性特性⁹⁻¹⁰⁾・内部摩擦特性¹¹⁾・引張特性¹²⁾・圧縮特性¹³⁾・曲げ特性¹⁴⁾が明らかにされている。特に、使用する上での安全性の確保のため、疲労特性の把握は重要である。そこで、ロータス金属の疲労特性について研究が進められており、この結果、ロータス銅およびロータスマグネシウムの疲労特性が明らかにされている¹⁵⁻¹⁶⁾。

本稿では、ロータス金属の疲労強度を中心に、疲労の特徴が顕著に現れる銅をモデル材として、疲労強度に及ぼす気孔率および荷重の方向の影響、引張強度と疲労強度の関

係、さらに、純マグネシウムについても同様の試験を行ない、疲労強度に及ぼすマトリックスの影響を紹介する。

2. 実験方法

2.1 試料および試験片の作製

固液相間に水素の溶解度差を有する金属を高圧水素雰囲気中で凝固した場合、固液相界面に水素の気泡が生成する。このことを利用して、水素の加圧雰囲気中で原料の電解銅(99.99 wt%)またはマグネシウム(99.9wt%)を高周波溶解し、一方向凝固させることにより円柱状の気孔が一方向に並んだロータス銅およびロータスマグネシウムの鋳塊を作製した。また、比較材として、アルゴンガスの雰囲気中において同様に一方向凝固によりノンポーラス銅とノンポーラスマグネシウムの鋳塊を作製した。**Table 1**に(a)ロータス銅および(b)ロータスマグネシウム鋳塊の作製条件、気孔率および気孔径をそれぞれ示した。なお、ここで、気孔率 p の計算には(1)式を用いた。

$$p = 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1)$$

ここで、 ρ はロータス金属の密度、 ρ_0 はノンポーラス金属の密度である。**Fig. 1**にロータス銅およびロータスマグネシウムの気孔の長手方向（凝固方向）に対して平行および垂直な断面の気孔形態を示す。気孔は凝固方向に成長している。

作製したロータス銅およびロータスマグネシウムの鋳塊から機械加工によりゲージ長さ6 mm、ゲージ直径4 mmを有するドックボーン型試験片を切り出した。ここで、試験片の切り出し方向は気孔の長手方向に対して平行および垂直である。機械加工時の切削痕が応力集中箇所になることを防ぐため、# 400～# 2000番のエメリー紙を用いて、試験片の長手方向に対して平行に研磨を行い、切削痕を除去した後、3 μm と1 μm のダイヤモンドペーストを含ませた

*大阪大学産業科学研究所（〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘8-1）

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University (8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan)

Table 1 Pressure inside a chamber for preparing (a) copper and (b) magnesium ingots, the average porosity and pore diameter of specimens taken from each ingot.

Pressure [MPa]			Porosity (%)	Pore diameter [μm]
Partial pressure	Ar	Total pressure		
H ₂	Ar	H ₂ +Ar		
0	0.3	0.3	0	–
0.9	0	0.9	23	61
0.4	0	0.4	30	85
0.3	0	0.3	40	108

Pressure [MPa]			Porosity (%)	Pore diameter [μm]
Partial pressure	Ar	Total pressure		
H ₂	Ar	H ₂ +Ar		
0	0.3	0.3	0	–
0.9	0	0.9	29	156
0.4	0	0.4	41	194
0.3	0	0.3	44	215

Fig. 1 Pore structures of cross sections of lotus (a) copper with porosity p of 40% and (b) magnesium with porosity p of 44%. Cross sections perpendicular and parallel to the longitudinal axis of pores (solidification direction) are shown in left and right rows, respectively.

脱脂綿を用いて、鏡面になるまでゲージ表面を研磨した。その後、機械加工による加工ひずみ除去のため、ロータス銅およびノンポーラス銅に対して 873 K で 3.6 ks の熱処理、ロータスマグネシウムおよびノンポーラスマグネシウムに対しては 543 K において 1.8 ks の熱処理を行なった。

2.2 疲労試験の方法

疲労試験機には油圧サーボ疲労試験機 (V-1912, Saginomiya Corp.) を用いた。制御は応力制御である。最小最大応力比 R ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) を -1 の両振り、荷重の波形を正弦波形とした。周波数は 2-5 Hz、試験環境は室温大気中である。気孔を含む断面積を用いて応力振幅 (S) を計算した。一定の応力振幅を負荷したときの試験片の破断までのサイ

Fig. 2 Log plots of stress amplitude σ_a against the number of cycles to failure N_f for lotus copper, where the cyclic stress was applied in the direction (a) parallel and (b) perpendicular to the longitudinal axis of cylindrical pores.

クル数 (N) を調べ、応力振幅と破壊までのサイクル数の関係 (S - N) を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労強度に及ぼす負荷方向・気孔率の影響

Fig. 2 にロータス銅の応力振幅 σ_a と破壊までのサイクル数 N_f の関係を示す。ここで (a) は気孔の長手方向に対して平行な方向から荷重を加えたときの結果、(b) は垂直な方向から荷重を加えたときの結果である。各気孔率において、応力振幅と負荷方向に直線関係が成り立つことが分かる。この直線関係は、(2) 式で表すことができる。

$$\log \sigma_a = C \log N_f + D \quad (2)$$

ここで、 C と D はフィッティング係数である。また、気孔率の増加に伴い、疲労強度は低下することが分かる。これは、気孔率の増加に伴い、荷重を支える支持面積が低下するためである。気孔の長手方向に対して平行な方向から荷重を加えた場合の疲労強度は、垂直な方向から荷重を加えた場合の疲労強度に比べて高い。これは、気孔の長手方向と応力の負荷の方向の位置関係により、気孔の長手方向に対して平行な方向から荷重を加える場合応力が集中しにくいに対して、垂直な方向から荷重を加える場合気孔近傍に応力が集中しやすいためである。

Fig. 3 にロータスマグネシウムの応力振幅 σ_a と破壊までのサイクル数 N_f の関係を示す。ここで (a) は気孔の長手方向に対して平行な方向から荷重を加えたときの結果、(b) は垂直な方向から荷重を加えたときの結果である。ロータス銅の結果と同様、各気孔率において応力振幅と破壊までのサイクル数には直線関係が存在する。また、気孔率の増加に伴う疲労強度の低下、および、負荷方向により強度異方性が生じている。これらの理由は、ロータス銅の場合と同様である。ノンポーラスマグネシウムにおいて、凝固方向に対して平行な方向から荷重を加えたときの疲労強度は、

Fig. 3 Log plots of stress amplitude σ_a against the number of cycles to failure N_f for lotus magnesium, where the cyclic stress was applied in the direction (a) parallel and (b) perpendicular to the longitudinal axis of cylindrical pores.

垂直な方向から荷重を加えたときの疲労強度よりも高い。これはマグネシウムの集合組織の影響と考えられる。マグネシウムの結晶構造は hcp であるため、底面の臨界分解せん断応力 (CRSS) は、非底面のそれに比べて数十分の一である。またマグネシウムの優先成長方向は $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ であるため、マグネシウムを一方向凝固させた場合、底面が凝固方向に平行に並ぶ。したがって、凝固方向に対して、平行な方向から荷重を加えた場合、シュミット因子の計算により、底面にせん断応力は作用しない。このため、CRSS の低い底面はき裂の形成面にならない。一方、垂直な方向から荷重を加えた場合、底面にせん断応力が作用するため、弱い底面が破壊面となることが可能である。この負荷方向による底面に作用するせん断応力の違いが負荷方向による疲労強度の違いの原因である。

3.2 気孔率と疲労強度の関係

Fig. 4 に、(a) ロータス銅および (b) ロータスマグネシウムの 10^5 サイクルにおける疲労強度と気孔率の関係を示す。ここで、 10^5 サイクルの疲労強度とは、**Fig. 2, 3** において、 10^5 サイクルと各気孔率の直線との交点の応力振幅の値である。マトリックスに関係なく、ロータス金属の疲労強度 σ と気孔率 p の関係は (3) 式によって表される。

$$\sigma = \sigma_0 (1 - p)^m \quad (3)$$

ここで、 σ_0 はノンポーラス金属の疲労強度、 m は負荷方向およびマトリックスに依存する指数である。なお、ロータス銅の場合、気孔の長手方向に対して平行および垂直な方向の m 値は、それぞれ 0.9 および 2.7、ロータスマグネシウムの場合、それぞれ 2.0 および 2.8 である。

ロータス銅において、気孔の長手方向に対して平行な方向から荷重を加えた場合、気孔率の増加に伴い、疲労強度はほぼ直線的に低下する。このため、ロータス銅の比疲労強度 (疲労強度 / 密度) は緻密体の比疲労強度とほぼ等しい。

Fig. 4 Fatigue strength at $N_f = 10^5$ of (a) lotus copper and (b) lotus magnesium as a function of porosity p , where the stress was applied in the directions parallel and perpendicular to the longitudinal axis of cylindrical pores. The lines denote the fittings of Eq (3) to the experimental data.

Fig. 5 The fracture surface of lotus (a) copper with porosity of 30% and (b) magnesium with porosity of 44%. The cyclic stress was applied in the direction parallel to the longitudinal axis of cylindrical pores.

一方、ロータスマグネシウムにおいて、気孔の長手方向に対して平行な方向から荷重を加えた場合、気孔率の増加に伴い、疲労強度は急激に低下する。このため、ロータスマグネシウムの比疲労強度はノンポーラスマグネシウムの比疲労強度と比べて低い。これは、マトリックスの影響であると考えられる。**Fig. 5** に (a) ロータス銅および (b) ロータスマグネシウムの疲労試験後の試験片の破面を示す。ロータス銅の破面には延性ストライエーション、ロータスマグネシウムの破面には激しい凹凸を観察することができる。これは、銅の延性は高く、マグネシウムの延性は低いことを示している。気孔の近傍に平行な方向から荷重を加えた場合、気孔の末端等に応力が集中することが考えられるが、ロータス銅の場合、マトリックスである銅の延性は高いため、その塑性変形によって応力の集中をある程度緩和することができる。一方、ロータスマグネシウムの延性は低いため、塑性変形によって応力の集中をほとんど緩和することができない。このため、ロータスマグネシウムの気孔の長手方向に対して平行な方向から荷重を加えた場合、気孔率の増加に伴い、疲労強度は急速に低下したと考えられる。

気孔の長手方向に対して垂直な方向から荷重を加える場合、気孔近傍に強く応力が集中する。このため、マトリッ

クスの延性によって応力の集中を完全には緩和することが出来ず、ロータス銅およびロータスマグネシウムの疲労強度は、気孔率の増加に伴い、急速に低下すると考えられる。

3.3 疲労強度と引張強度の関係

現在までの疲労の研究において、疲労強度と引張強度には密接な関係が存在することが知られている¹⁷⁾。そこで、Fig. 6 に (a) ロータス銅および (b) ロータスマグネシウムの 10^5 サイクルの疲労強度と引張強度の関係を示す。ここで、ロータス銅とロータスマグネシウムの引張強度と気孔率の関係は既に明らかにされているため^{12,16)}、その結果を用いた。ロータス銅、ロータスマグネシウムともに負荷の方向や気孔率に関係なく、 10^5 サイクルの疲労強度と引張強度は正の相関を示すことが経験的に明らかとなった。正の相関を示したことから、各負荷方向において、気孔率の変化に伴う疲労強度と引張強度の変化率は等しい。これは、引張強度と疲労強度はともに材料の延性や応力の集中に敏感なためであると考えられる。なお、ロータス銅の 10^5 サイクルの疲労強度は引張強度の 1/2、ロータスマグネシウムの 10^5 サイクルの疲労強度は引張強度の 1/3 であることが判断できる。

4. 結論

ロータス型ポーラス銅およびマグネシウムの疲労強度におよぼす気孔率・負荷方向の関係および疲労強度と引張強度の関係について調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 気孔の長手方向に対して、平行な方向から荷重を加える場合の疲労強度は、垂直な方向から荷重を加える場合の疲労強度よりも高い。
- (2) ロータス金属の疲労強度と気孔率の関係は次の式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_0 (1 - p)^m,$$

ここで、 σ はロータス金属の疲労強度、 σ_0 はノンポーラス金属の疲労強度、 p は気孔率、 m は負荷方向・マトリックスに依存する指数である。

- (3) ロータス型ポーラス金属の疲労強度は、マトリックスの延性に影響される。
- (4) 負荷方向に関係無く、引張強度の増加に伴い、ロータス金属の疲労強度は増加する。

謝辞

本研究は、平成 19 年度グローバル COE プログラム「構造・機能先進材料デザイン教育研究拠点」(大阪大学)、若手研究の研究費支援のもとに実施された。

Fig. 6 The fatigue strength at $N_f = 10^5$ of nonporous and (a) lotus copper and (b) lotus magnesium as a function of the ultimate tensile strength of lotus copper and magnesium, respectively.

参考文献

- 1) M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley: Metal Foams. (Butterworth-Heinemann Press, America, 2000).
- 2) J. Banhart: Prog. Mater. Sci., 46 (2001), 559-632.
- 3) L.J. Gibson and M.F. Ashby: Cellular Solids, 2nd ed. (Cambridge University Press, U.K., 1997).
- 4) A.-M. Harte, N.A. Fleck and M.F. Ashby: Acta Mater. 47 (1999) 2511-2524.
- 5) Y. Sugimura, A. Rabiei, A.G. Evans, A.M. Harte and N.A. Fleck: Mater. Sci. Eng. A269 (1999) 38-48.
- 6) H. Nakajima: Prog. Mater. Sci. 52 (2007) 1091-1173.
- 7) H. Nakajima, S.K. Hyun, K. Ohashi, K. Ota and K. Murakami: Colloids Surf. A: Physicochemical and Eng. Aspects. 179 (2001) 209-214.
- 8) H. Nakajima, T. Ikeda and S.K. Hyun: Adv. Eng. Mater. 6 (2004) 377-384.
- 9) M. Tane, T. Ichitsubo, H. Nakajima, S.K. Hyun and M. Hirao: Acta Mater. 52 (2004) 5195-5201.
- 10) M. Tane, T. Ichitsubo, M. Hirao, T. Ikeda and H. Nakajima: J. Appl. Phys. 96 (2004) 3696-3701.
- 11) K. Ota, K. Ohashi and H. Nakajima: Mater. Sci. Eng. A341 (2003) 139-143.
- 12) S.K. Hyun, K. Murakami and H. Nakajima: Mater. Sci. Eng. A299 (2001) 241-248.
- 13) S.K. Hyun and H. Nakajima: Mater. Sci. Eng. A340 (2003) 258-264.
- 14) S.K. Hyun, H. Nakajima, L.V. Boyko and V.I. Shapovalov: Mater. Lett. 58 (2004) 1082-1086.
- 15) H. Seki, M. Tane, M. Otsuka and H. Nakajima: J. Mater. Res. 22 (2007) 1331-1338.
- 16) H. Seki, M. Tane, M. Otsuka and H. Nakajima: J. Mater. Res. 22 (2007) 3120-3129.
- 17) S. Suresh: Fatigue of materials, 2nd ed., (Cambridge University Press, U.K., 1998) pp. 224-227.