タングステン粉体カプラントを用いた マグネシウム合金の超音波試験†

森 和也* 森 輝幸** 徳臣 佐衣子***

江良 和久*** 橋本 健司*** 山下 佳***

Ultrasonic Testing of Magnesium Alloy Using Tungsten Powder Couplant

by

Kazuya MORI*, Teruyuki MORI**, Saeko TOKUOMI*,

Kazuhisa ERA***, Kenji HASHIMOTO*** and Kei YAMASHITA***

A new immersion testing method has been developed where the water of the conventional immersion method was replaced with powder. In this method, ultrasonic testing is carried out while compressing the powder couplant between probes and object surfaces. Even though the powder usually prevents the transmission of elastic waves, they can be transmitted through it under pressurized conditions. In addition, the acoustic impedance can be matched to that of the objects being tested by controlling the pressure applied to the powder couplant. In this paper, an ultrasonic Tungsten powder couplant with a high acoustic impedance was applied to testing magnesium alloy specimens with three different surface properties: a smooth surface, a surface with a man-made defect and a surface with V-shaped grooves. The results were that the reflections from the specimen surfaces were eliminated by suitably adjusting the pressure of the powder. The man-made defect located just below the surface could be successfully detected.

Key words:

Ultrasonic testing, Powder immersion testing, Magnesium alloy, Tungsten powder couplant

1 緒 言

材料の破壊は、材料内部の欠陥を起点として発生することがある。そのため、材料の欠陥を調べることは、破壊の予防の観点から重要である。材料内部の欠陥を探す方法としては、超音波試験が一般的である。超音波試験は、大きく分けると、探触子を直接試験片に接触させる垂直法や斜角法と、探触子と試験片との間を水等の液体を介して試験をおこなう水浸法¹⁾がある。探触子を直接接触さ

せる方法は、不感帯²⁾が存在するために検査表面直下の欠陥の検出が難しいとされている。また、水浸法においても、Fig. 1 に示すように、試験片表面での超音波の反射のため、表面近くに存在する欠陥を見落とすことがある。これらの問題点は試験体表面での超音波の反射を低下させ、透過する割合を上げることができれば解決できる。

著者らは、水浸法における水を粉体に置き換え、粉体の音響インピーダンスと試験体の音響インピーダンスを一致させて非破壊試験をおこなう「粉浸法」を提案した。³⁾ 先の研究において、粉浸法をエンジニアリングプラスチックの超音波試験に適用した。本研究では、粉浸法のマグネシウム合金への適用を試みた。マグネシウム合金の音響インピーダンスは、エンジニアリングプラスチックの音響インピーダンスのおよそ4倍で、エンジニアリングプラスチックで用いたアルミナ粉体はマグネシウム合金には有効ではない。そこで、様々な粉体を試みた結果、タングステン粉体を用いてマグネシウム合金の超音波試験に成功した。本論文では、タングステン粉体を用いて、欠陥の無い試験片、人工欠陥のある試験片、表面にV溝を有する試験片の超音波試験をおこなった。

Fig. 1 Water immersion testing. Ultrasonic waves are reflected by the surfaces of a test specimen and a defect.

† 原稿受理 令和2年5月11日 Received May 11, 2020 ©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 熊本大学大学院 先端科学研究部 〒860-8555 熊本市中央区黒髪
Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami Chuo-ku, Kumamoto 860-8555.

** (株)菱友システムエンジニアリング 明石事業所 〒674-8686 明石市魚住町清水
Ryoyu System Engineering Co., Ltd., Shimizu Uozumi, Akashi, 674-8686.

*** 熊本大学大学院 自然科学研究科 〒860-8555 熊本市中央区黒髪
Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami Chuo-ku, Kumamoto 860-8555.

2 粉 浸 法

Fig. 2 に示すように、二つの材料が密着して、一方から超音波が入射し境界面に達すると、一部は透過し一部は反射する。入射する超音波の音圧を P_i 、反射する超音波の音圧を P_r 、透過する超音波の音圧を P_t とすると、これらの関係は次式で表すことができる。⁴⁾

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

ここで、 Z_1 と Z_2 は、入力側と透過側の材料の音響インピーダンスで、それぞれの材料の密度 ρ_1 、 ρ_2 と音速 c_1 、 c_2 の積で次式のように表される。

$$Z_1 = \rho_1 c_1 \quad (3)$$

$$Z_2 = \rho_2 c_2 \quad (4)$$

透過側の材料を試験片とすると、入射側の材料の音響インピーダンス Z_1 を試験片の音響インピーダンス Z_2 に一致させることができれば、試験片表面での超音波の反射は起きず、試験体表面近くの欠陥の検出が可能にな

Fig. 2 Transmission and reflection of ultrasonic wave at an interface.

Fig. 3 Powder immersion testing.

る。筆者らは Fig. 3 に示す「粉浸法」を提案した。³⁾これは水浸法における水を粉体に置き換えて超音波試験をおこなうものである。超音波探触子を底面に配置した圧力容器の中に、粉体カプラントを入れて、その中に試験片を入れる。粉体カプラントを加圧した状態で、超音波試験をおこなう。液体では、液体金属を除いて、機械などに用いられる材料の音響インピーダンスに達するものは見当たらないが、粉体では加圧するとその値に達するものがある。粉体は加圧すると密度が上昇し、音響インピーダンスも上昇する。圧力を調整することによって試験片の音響インピーダンスに粉体カプラントの音響インピーダンスを一致させることができる。

3 マグネシウム合金の音響インピーダンス

粉体カプラントの音響インピーダンスを試験片の音響インピーダンスに一致させるためには、まず試験片の材料の音響インピーダンスを知る必要がある。材料の音響インピーダンスは式(4)から求められる。

縦波の音速 c_p は次式から求められる。⁵⁾

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5)$$

ここで、 E は材料のヤング率、 ν はポアソン比である。

したがって、試験片の縦波に対する音響インピーダンス Z_p は次式のように表される。

$$Z_p = \rho c_p = \rho \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{\rho E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

マグネシウム合金 AZ31 の物性値とその値を用いて式(5)と式(6)から算出した縦波の速度 c_p と音響インピーダンス Z_p を Table 1 に示す。

先の研究³⁾で示したエンジニアリングプラスチックの音響インピーダンスは、2.1 から 2.6 MPa・s/m であるのに対し、マグネシウム合金 AZ31 の音響インピーダンスは 11.3 MPa・s/m に達する。したがって、エンジニアリングプラスチックで用いたアルミナ粉体は、マグネシウム合金の粉浸法による超音波試験には適用できないと考えられる。マグネシウム合金の超音波試験にはさらに大きな音響インピーダンスの値を示す粉体が必要である。

4 タングステン粉体の音響インピーダンス

エンジニアリングプラスチックの粉浸法で用いた微粒アルミナ（粒径 1 μ m）は、1.8 から 3.6 MPa の圧力に

Table 1 Mechanical properties of materials.

Material	Symbol	Density	Young's modulus	Poisson's ratio	Velocity of longitudinal wave	Acoustic impedance
		ρ	E	ν	c_p	Z_p
		(kg/m ³)	(GPa)	(-)	(m/s)	(MPa・s/m)
Magnesium alloy	AZ31	1780	45	0.35	6370	11.3
Aluminum alloy	A5052	2680	69	0.30	5887	15.8
Carbon steel	S45C	7840	205	0.30	5933	46.5

Table 2 Mechanical properties of candidate materials for powder couplant in powder immersion testing.

Material	Symbol	Density	Young's modulus	Poisson's ratio	Velocity of longitudinal wave	Acoustic impedance
		ρ	E	ν	c_p	Z_p
		(kg/m ³)	(GPa)	(-)	(m/s)	(MPa·s/m)
Alumina	Al ₂ O ₃	3940	390	0.24	10800	42.6
Molybdenum	Mo	10220	329	0.31	6680	68.3
Tungsten	W	19300	411	0.28	5220	100.7

Table 3 Grain size of Tungsten powder.

Type	Grain size (μm)
Fine powder	0.82
Medium powder	3.2
Coarse powder	12

対して, 1.8 から 2.6 MPa·s/m の音響インピーダンスを示した³⁾. Table 2 に示すように, 固体のアルミナの音響インピーダンスは 42.6 MPa·s/m であり, 粉体の音響インピーダンスは固体の音響インピーダンスの十分の 1 から数十分の 1 になる. マグネシウム合金の音響インピーダンスは 11.3 MPa·s/m であるので, アルミナよりも高い音響インピーダンスを示す粉体が必要であると推測された.

音響インピーダンスは, 式(6)に示すように, ヤング率 E と密度 ρ の平方根に比例する. したがって, 音響インピーダンスの高い材料とは, 密度が高くヤング率が高い材料である. 密度が高くヤング率が高い材料として, モリブデンやタングステンがある. Table 2 にモリブデンとタングステンの物性値とその値に基づいて算出した縦波の音速と音響インピーダンスを示している. モリブデンの音響インピーダンスはアルミナの約 1.5 倍, タングステンは約 2.5 倍に達する. そこで, 本研究ではタングステン粉体を用いて粉浸法によるマグネシウム合金の超音波試験を試みた. タングステンは, 焼結材料として用いられることから多様な粒径の粉体が容易に入手できることも, 粉浸法への利用に適している.

本研究では, 粉浸法による超音波試験をおこなう前に, 粒径の異なる三種類のタングステン粉体の音響インピーダンス特性を調べた. 粉体の粒径を Table 3 に示している.

粉体の音響インピーダンスは, Fig. 3 の粉浸法試験装置に粉体だけを入れて測定した. 圧力容器の内径は 20 mm であった. 超音波探触子は 2 MHz を用いた. 音響インピーダンスは密度と音速の積で表されるが, 密度 ρ は, 粉体の質量 m を容積 Ah で割って求められる.

$$\rho = \frac{m}{Ah} \quad (7)$$

ここで, A は容器断面積, h は容器底面よりピストンまでの高さである.

粉体の音速 c は, Fig. 4 のようなエコー波形から求め

Fig. 4 Reflectogram for determination of acoustic impedance.

Fig. 5 Acoustic impedance of Tungsten powder vs pressure.

られる. 加圧ピストンからの反射波の到着時刻を t_1 とすると, 粉体の音速 c は次式のようにになる.

$$c = \frac{2h}{t_1} \quad (8)$$

式(7)と式(8)を式(3)に代入すると次式を得る.

$$Z_1 = \frac{2m}{At_1} \quad (9)$$

したがって, 音響インピーダンスの測定には, 粉体の高さ h は不要で, 粉体の質量 m と圧力容器断面積 A および反射波の到着時刻 t_1 で求めることができる.

粒径 0.82 μm の微粉, 3.2 μm の中間粉, 12 μm の粗粉の圧力に対する音響インピーダンスの変化を Fig. 5 に示している. それぞれの粒径に対する最低の圧力点 (データの左端) 以下は, 超音波の伝播が確認できず, 音響インピーダンスがゼロとなった.

Fig. 5 より, 粒径が大きいほど, 同一圧力に対しては大きな音響インピーダンスを示すことがわかる. また, 今回超音波試験をおこなうマグネシウム合金の音響インピーダンスは 11.3 MPa·s/m で, 粒径 3.2 μm の中間粉は安定してこの音響インピーダンスを実現できることから, 粒径 3.2 μm の中間粉がこの試験には最適であった.

5 マグネシウム合金の超音波試験

Fig. 6 に示すマグネシウム合金 AZ31 の三種類の試験片を用いて、粉浸法による超音波試験をおこなった。Fig. 6(a)は欠陥の無い試験片で、直径 19.5 mm、厚さ 3.1 mm の円板で、表面は滑らかであった。この試験片を用いて試験片表面での超音波反射が最低となる圧力を調べた。Fig. 6(b)は、Fig. 6(a)の試験片を基盤とし、その上に基盤と同一材料の AZ31 の直径 6.0 mm 厚さ 0.6 mm の円板状の薄板を乗せた試験片である。0.6mm の薄板の基盤と接触する面は、やすりで粗くして、基盤との密着を防いだ。薄板と基盤の間が人工欠陥となる。この試験を用いて試験片表面近くの欠陥が検出可能であるか検証した。Fig. 6(c)は、片面に開口角が 90 度の V 溝を施した試験片である。表面に凹凸のある試験片の内部に超音波が入射可能であるか検証した。

Fig. 3 に示すように、粉浸法試験機に Fig. 6(a) の試験片を粒径 3.2 μm のタングステン粉体で挟むように埋めた。最初に 20 g の粉体を圧力容器に入れ、試験片を入れて、その上から 20 g の粉体を入れた。粉体への圧力を上

Fig. 6 Test specimens for the powder immersion testing.

Fig. 7 Reflectogram of a smooth specimen (Fig. 6(a)).

Fig. 8 Acoustic impedance of Tungsten powder vs pressure.

げながら超音波試験をおこなった。

Fig. 7 は、圧力が 32 MPa、41 MPa、51 MPa、61 MPa のときのエコー波形である。反射時間が 20 μs 以降のピークはピストンによるエコーである。圧力が上昇すると反射時間が短くなるのは、探触子とピストンの間隔が狭くなるからと、音速が早くなるからである。10 μs から 20 μs の間のピークは試験片表面のエコーである。タングステン粉体に加える圧力が 51 MPa のとき、試験片の表面のエコーはほぼ消失した。

Fig. 8 は、Fig. 7 におけるピストンの背面エコー高さに対する試験片の表面エコー高さの比を、圧力に対してプロットしたものである。粉体に加える圧力を上昇させるにしたがって、エコー高さは減少し、51 MPa のときエコー高さは最小値を示した。さらに圧力を上昇させると、エコー高さは上昇に転ずる。

Fig. 5 において、粒径 3.2 μm のタングステン粉体は、粉体に加える圧力が 51 MPa のとき、11.5 MPa $\cdot\text{s/m}$ 程度となる。この値は、Table 1 に示すようにマグネシウム合金 AZ31 の音響インピーダンスに一致する。このとき、超音波はマグネシウム合金の表面で反射をほとんど起こさないで、欠陥が表面近くに存在しても検出が可能と考えられる。

Fig. 9 は、Fig. 6(b) 試験片のエコー波形である。試験方法は、Fig. 6(a) 試験片と同じである。粉体に加える圧力は、Fig. 8 の結果から、超音波の反射が最低となる 51 MPa とした。Fig. 9 において人工欠陥からのエコーが明確に表れている。このエコーは、薄板の材料が試験片と同じ AZ31 であることから、薄板表面エコーとは考えられない。この結果から、粉体カプラントの音響インピーダンスを試験片に一致させれば、試験片表面から 0.6 mm の位置の欠陥も検出可能であることがわかる。

試験片の表面が粗い場合や凹凸がある場合、超音波の伝達効率が低下し、超音波試験が難しい場合がある。水浸法においても、試験片表面の凹凸が激しい面では超音波が複雑に反射・屈折し、超音波試験は難しい。このような試験片においても、粉体カプラントを用いた方法が有効であるかどうか V 溝試験片を用いて検証した。

Fig. 10 は、Fig. 6(c) の試験片のエコー波形である。V 溝の深さを $s = 0.2, 0.6, 1.0$ mm の三種類とした。試験方法は他の試験片と同じで、粉体の圧力は 51 MPa とした。

Fig. 9 Reflectogram of a specimen with a man-made defect (Fig. 6(b)).

Fig. 10 Reflectogram of a specimen with V-grooves (Fig. 6(c)).

Fig. 11 High density and high elasticity by mixing powder with multi-sized grains.

V 溝の深さ s が 0.6 mm 以上では, 超音波が凹凸面を直進することができず, 背面のエコーが確認できない. $s = 0.2$ mm 以下では, 凹凸面のエコーはなくなり, 背面エコーが明確に確認できる. したがって, 表面に V 溝を有する試験片においては, V 溝の深さが $h = 0.2$ mm 以下では超音波試験が可能といえる.

今回用いている探触子の周波数は 2 MHz で, 圧力が 51 MPa におけるタングステン粉体の音速は約 1200m/s であるので, 超音波の波長は約 0.6 mm である. 表面の凹凸が波長の半分程度以下の場合に超音波試験が可能になると思われる.

6 考 察

水を粉体に置き換えて超音波試験をおこなう粉浸法においては, 粉体と試験片の音響インピーダンスの一致による試験片表面での超音波の反射を低下させることができるものの, そのためにはかなり高い圧力で粉体を加圧する必要がある. この加圧の必要性は, 実用化の障害となる. 加圧力を低下させるには, より高い密度, 高いヤング率の粉体を用いることが有効である. このような粉体を得る方法としては, サイズの異なる粉体の混合が有効であると考えられる. Fig. 11 に示すように, サイズの異なる粉体を混合すると, 大きな粒子の隙間に小さな粒子が入り密度が上昇する. 粒子間の接点も多くなり, 弾性率も向上する.

二種類の粉体の粒子を球形と仮定すると, 直径比が 1:10.7 のとき密度は最大となり, 均一寸法の粉体に比べ密度は 53% 高くなる.⁹⁾ 本研究においても三種類の異なる粒径のタングステン粉体を用いたが, これらの粉体の混合によっても, 密度およびヤング率の上昇が期待できる. 粉体を加圧する大きさをどの程度低下させることができるかは, 今後検討する予定である.

粉体の圧力を低下させることができれば, アルミ合金の粉浸法による超音波試験も実用性が見えてくる. アル

ミ合金 A5052 と炭素鋼 S45C の音響インピーダンスを Table 1 に示しているが, Fig. 5 から粒径 12 μm の粗粒の音響インピーダンスは, アルミ合金の 15.8 MPa·s/m に達する. したがって, この粗粒を用いればアルミ合金 A5052 の粉浸法による超音波試験は可能である. しかしながら, 必要な圧力は 55 MPa 程度とかなり高い.

一方, 炭素鋼 S45C の音響インピーダンス 46.5 MPa·s/m は, アルミ合金 A5052 の三倍になる. この値に達する粉体は実現する見込みがないことから, 炭素鋼の粉浸法による超音波試験は困難であると思われる.

7 結 言

水浸法における水を粉体に置き換える「粉浸法」によって, マグネシウム合金の超音波試験をおこなった. その結果以下のことが確認された.

- (1) マグネシウム合金 AZ31 の粉浸法による超音波試験には, タングステン粉末が適用できる. 粒径 3.2 μm のタングステン粉体に 51 MPa の圧力を加えると, 粉体はマグネシウム合金の音響インピーダンスに一致し, マグネシウム合金の表面での超音波の反射がほぼなくなった.
- (2) 粉浸法では, マグネシウム合金の表面から 0.6 mm の距離の人工欠陥を検出できた.
- (3) V 溝を持つ面では, 超音波の波長の半分程度の深さの V 溝であれば超音波は貫通可能であった. また, 結果以下のことが推定された.
- (4) 粒径の異なる粉体の混合によって, 粉体の密度およびヤング率を上昇させることができると考えられる. その結果, 音響インピーダンスの一致に必要とされる粉体の加圧力の低下が期待できる.
- (5) 加圧力の低下によって, アルミニウム合金の粉浸法による超音波試験が可能になる見込みがあるが, 炭素鋼の粉浸法による超音波試験は困難である.

参 考 文 献

- 1) J. Krautkramer and H. Krautkramer, in "Ultrasonic testing of materials," 4th Edition, Springer-Verlag, p. 187, 356, (1990).
- 2) Japan Industrial Standards Committee, in "Japanese industrial standard," JIS Z3060, pp. 21-22, (1988).
- 3) K. Mori, K. Hashimoto, K. Era and K. Yamashita, "Ultrasonic testing using powder couplings and its application to engineering plastics," Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, Vol. 62, No. 5, pp. 227-232, (2013).
- 4) W. T. Thomson, "Transmission of elastic waves through a stratified solid medium," Journal of Applied Physics, Vol. 21, No. 89, pp. 89-93, (1950).
- 5) S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, in "Theory of Elasticity," 3ed Edition, McGraw-Hill Book Company, p. 487, (1970).
- 6) S. Yamada, J. Sugano and M. Miyauchi, "Multi-sized sphere packing," Information Processing Society of Japan Technical Report, 2009-MPS-73, pp. 157-160, (2009).