研 究

機械構造部品用焼結材料のヤング率について

黄 鶴年^{☆1}, 楊 堅^{☆1}, 後藤 雅樹^{☆1}, 渡辺 侑尚^{☆2}^{☆1} フクイシンター(株), 〒319-0301 静岡県富士郡芝川町上柚野 16.^{☆2} 早稲田大学材料技術研究所, 〒169-0051 新宿区西早稲田 2-8-26.

Young's Modulus of Sintered Materials for Structural Machine Parts

Hao-Nien Huang^{☆1}, Jian Yang^{☆1}, Masaki Goto^{☆1} and Teruhisa Watanabe^{☆2}^{☆1} Fukui Sinter Co., Ltd., 16 Kamiyuno Shibakawa-cho, Fuji-gun, Shizuoka 419-0301.^{☆2} Laboratory for Materials Science and Technology, Waseda University, 2-8-26 Nishiwaseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0051.

Received June 16, 1998

SYNOPSIS

Method for determination of Young's modulus of sintered metal materials is dynamic testing method by the longitudinal oscillations of the specimens, which has been provided in the standard of Japan Powder Metallurgy Association JPMA M 10 in March 1997. This paper shows the testing results of Young's modulus of various sintered metal materials for machine parts of the iron base, the stainless steel base and the bronze base materials, which are introduced in Japanese Industrial Standard JIS Z 2550. For example, the specimens of the iron base (6 × 8 × 60mm) were made from reduced iron powder, atomized iron powder, electrolytic copper powder, natural graphite powder and carbonyl nickel powder, by compressing with 300~600 MPa and sintering at 1423K for 1.8ks in cracked ammonia atmosphere. Consequently, the values of Young's modulus and relations between the values of Young's modulus and the sintered densities of various sintered metal materials could be obtained.

KEY WORDS

Young's modulus, sintered material, iron, stainless steel, bronze

1 緒 言

粉末冶金法による焼結機械部品の用途の約80%は、自動車用を主とした輸送機械向けであって、軸受などの可動機械部品に多く使用されている。それらの使用条件は、負荷を伴う回転など微小な弾性変形が周期的に生じる弾性振動下であり、求められる特性としては一般的な引張強さや伸びなどよりも、使用応力範囲内での使用寿命を示す疲労強さや、その応力での歪み率を示すヤング率の値が重要になってくる。

ヤング率は弾性率の一種で、一様な太さの棒を軸方向に引っ張るかまたは圧縮するとき、棒の断面に働く応力を T 、単位長さあたりの伸びまたは縮みを ϵ とすると、比例限界内で $T=E \cdot \epsilon$ という関係が成り立つが、この場合の比例定数 E をヤング率といい、縦弾性率ともいう。この試験方法には試験中に静荷重を加えて、それによって生じる弾性変形から求める圧縮法、引張法あるいは曲げ法などの静的な方法と、試験片に強制振動を与えて、その共振周波数から求める共振法あるいは超音波パルスの伝播速度から求める超音波パルス法などの動的な方法とがある^{1,2)}。

焼結金属材料のヤング率は多孔質であるから気孔を含む材料

のヤング率であって、見掛けヤング率ともいえるが、この試験方法は縦振動を与える動的な共振法で1997年3月に日本粉末冶金工業会の団体規格JPMA M 10に制定された。本報ではこの共振法を用いて日本工業規格JIS Z 2550に規定されている機械構造用焼結材としての各種鉄系焼結合金、ステンレス鋼系焼結合金及び青銅系焼結合金についてヤング率を測定した結果を報告する。

2 試料及び実験方法

2.1 実験試料

鉄系(SMF 1~5, 7, 8種)の主原料としては還元鉄粉(KIP-255M)とアトマイズ鉄粉(KIP-300A)を用い、銅粉は電解銅粉(CE-25)、炭素粉は天然黒鉛粉(UCP)、そしてニッケル粉はカーボニル・ニッケル粉を用いた。これらをTable 1に示す比率で配合し、小型ダブルコーン・ミキサーで1.2ks混合した。成形は濃度4g/lのステアリン酸亜鉛のアルコール溶液を内壁面に塗布した加圧断面積6 × 60 mmの金型を用いて、圧粉体の寸法が6 × 8 × 60 mmになるように使用粉重量を調節して300~600 MPa

Table 1 Chemical compositions of sintered materials for structural machine parts.

Material	Chemical composition (mass%)									
	Fe	C	Cu	Ni	Sn	Pb	Si	Mn	Cr	Mo
SMF 1	Bal.	≤ 0.01	—	—	—	—	—	—	—	—
SMF 2	Bal.	≤ 0.01	1.5~5	—	—	—	—	—	—	—
SMF 3	Bal.	0.4~0.8	—	—	—	—	—	—	—	—
SMF 4	Bal.	0.4~0.8	1.5~5	—	—	—	—	—	—	—
SMF 5	Bal.	0.4~0.8	1.5~3	4~8	—	—	—	—	—	—
SMF 6	Bal.	≤ 0.5	10~25	—	—	—	—	—	—	—
SMF 7	Bal.	≤ 0.01	—	2~8	—	—	—	—	—	—
SMF 8	Bal.	0.4~0.8	—	2~4	—	—	—	—	—	—
SMS 1	Bal.	≤ 0.03	—	12~15	—	—	≤ 1.0	≤ 2.0	16.0~18.0	2.0~3.0
SMS 2	Bal.	≤ 0.03	—	≤ 0.6	—	—	≤ 1.0	≤ 1.0	11.0~13.5	—
SMK 1	—	≤ 1.5	Bal.	—	8.5~10	≤ 2.0	—	—	—	—

で加圧した。焼結条件は1423K×1.8ksで、アンモニア分解ガス雰囲気である。鉄-炭素(銅溶浸)系[SMF 6種]の原料粉にはアトマイズ鉄粉(KIP-300A)、天然黒鉛粉(UCP)およびアトマイズ銅合金粉(Cu-3%Co)を用いた。化学組成がFe-0.5%Cになるように原料粉を配合し、ミキサーで1.2ks混合した。成形は上記の鉄系と同様に金型を用いて、300~600MPaで加圧した。焼結条件は鉄系と同様である。次に溶浸用Cu-3%Co合金粉を用いて、成形圧力200~400MPaで溶浸用圧粉体を作り、これを焼結体の上にのせてアンモニア分解ガス中1423Kで保持時間1.2ksで溶浸を行った。

ステンレス鋼系の原料粉にはオーステナイト系はDAP-316Lアトマイズ粉、フェライト系はDAP-410Lアトマイズ粉を用いた。成形は鉄系と同様に、金型を用いて、500~750MPaで加圧した。焼結条件は1423K×1.8ksで、雰囲気は水素中、 10^{-5} Torr真空中およびアンモニア分解ガス中である。青銅系の原料粉には、合金粉はCu-10%Sn青銅合金粉(LA-9)、また混合粉は電解銅粉(CE-8)およびアトマイズ銅粉(Cu-At-200)を主原料粉にしてアトマイズ錫粉(Sn-At-w-250)を配合し、更にアトマイズ鉛粉(Pb-At-200)あるいは天然黒鉛粉(UCP)を添加した。成形は鉄系と同様に、金型を用いて、300~550MPaで加圧した。焼結条件は1043K×1.8ksで、水素雰囲気である。

2.2 ヤング率測定装置

本報では動的測定法の一つである縦振動共振法を採用している^{3,4)}。これはFig.1に示すように、角棒状試験片の両端にそれぞれ同種類の振動子が駆動器用および検出器用として取り付けられていて、振動装置側の駆動器用振動子には増幅器および振動数カウンタをともなった発振器が、測定装置側の検出器用振動子には整流・増幅器およびデジタル電圧計が接続されている。まず、試験片支持台は梁より裁縫用細口糸で作った一対の糸の輪で試験片を水平に吊り下げるものである

が、この場合、糸の輪間距離の相違は共振振動数測定値に対して影響しないことが確認されたので、糸の輪間距離は約30mm一定とし、試験片長手方向の中央部を等しくはさんで吊り下げることにした。

次に、ここで使用した振動装置側の駆動器用振動子は圧電ブザー用で、構造は直径約20mm、厚さ約0.2mmのPZT素子に直径約27mm、厚さ約0.2mmの黄銅板をゴム系接着剤で結合させた「たわみ型振動子」である。発振器は正弦波を発生して振動子を駆動させるものである。本器の測定振動数単位は10Hzとし、発振振動数帯20~100KHzをスイープできるようになっている。測定装置側の検出器用振動子は上述の駆動器用振動子と全く同じものである。そして、検出器用振動子より出された電圧は整流・増幅器でAC-DC変換、増幅され、デジタル電圧計で表示されるようになっている。

振動子の共振振動数の測定について、振動子は自身の共振振動数を持っているから、あらかじめ駆動器用および検出器

Fig.1 Schematic diagram of the Young's modulus testing apparatus.

用振動子の共振振動数を測定し、試験片の共振振動数と区別できるようにしておかなければならない。そこで、同種の駆動器用、検出器用振動子を黄銅板側で両面セロテープまたは瞬間接着剤を用いて結合させたのち測定した。ちなみに、本実験に使用された振動子自身の共振振動数は1次が約4kHz、2次が約30kHz、3次が約55kHz、そして4次が約95kHzとなっている。試験片への振動子の取り付けについて、(1)接着面はあらかじめアセトンで清浄にし、充分に乾燥すること。(2)試験片端面への振動子の取付には両者の中心の偏差を2mm以下に保つこと。(3)試験片端面と振動子の黄銅板面との結合は、両面セロテープを間にはさんで圧着する場合と、瞬間接着剤を試験片端面と振動子の黄銅板面とに塗ったのちに圧着する場合などがあったが、とくに瞬間接着剤を塗る場合には、多孔質試験片内の気孔に接着液が浸入しないよう注意するとともに接着後充分に乾燥させることなどを行った。

ヤング率は次の式で計算することができる^{3,5)}。

$$E = 4 \times 10^{-9} \times L^2 \times \rho \times f^2$$

ここに、E: ヤング率 (N/mm²)、L: 試験片の長さ (mm)、 ρ : 試験片の密度 (g/cm³)、f: 試験片の1次共振振動数 (Hz)。

3 実験結果及び考察

Fig.2はSMF1種純鉄系の焼結体のヤング率を示したもので

Fig.2 Relations between Young's modulus and sintered density of pure iron powder compacts, sintered at 1423K for 1.8ks in AX atmosphere.

ある。主原料鉄粉は還元鉄粉 (KIP-255M) とアトマイズ鉄粉 (KIP-300A) の2種類である。両者を比較すると、還元鉄粉とアトマイズ鉄粉との差はほとんどなく、密度約6.5g/cm³でのヤング率は約120GPa、密度約7.0g/cm³でのヤング率は約140GPaである。ちなみに、純鉄の文献値は約206GPaである⁶⁾。Fig.3はSMF2種、3種及び4種の鉄-銅、鉄-炭素及び鉄-炭素-銅系の焼結体のヤング率を示したものである。各文献値において、純鉄のヤング率が約206GPaであるのに対して、純銅のヤング率は約128GPa、黒鉛のヤング率は約11GPaで両方ともに低い値であり⁶⁾、「複合則」に従えば、銅及び黒鉛の添加の分だけ下がるはずであるが、添加量が比較的少ないために、それらの差はほとんどみられなかった。ただし、鉄-炭素系、鉄-銅系、鉄-炭素-銅系の順にヤング率のレベルが少しずつ低い。すなわちヤング率の低い銅の1.5~5%の添加がわずかに影響しているものと考えられる。Fig.4はSMF5種、7種および8種の鉄-炭素-銅-ニッケル系、鉄-ニッケル系及び鉄-炭素-ニッケル系の焼結体のヤング率を示したものである。これらの中にはニッケルが最大8%配合してあるが、ニッケルのヤング率文献値は約207GPaで鉄と全く同じであるので⁶⁾殆どその影響はうけていない。また、Fig.4からでは見にくいですが、概して鉄-ニッケル系、鉄-炭素-ニッケル系と銅が含まれている鉄-炭素-銅-ニッケル系との2つに分けられそうである。これは銅の影響により銅配合のものにヤ

Fig.3 Relations between Young's modulus and sintered density of Fe-Cu, Fe-C, Fe-C-Cu powder compacts, sintered at 1423K for 1.8ks in AX atmosphere.

ング率がわずかに低く出ているためと考えられる。ちなみに、三浦らもこれらのような各種鉄系焼結材のヤング率に対して、添加元素の影響はきわめて少ないことを報告している⁷⁾。

Fig.5はSMF 6種の銅溶浸焼結体のヤング率を示したものである。焼結密度は $6.1\sim 6.8\text{g/cm}^3$ で、多孔率約22~11%のFe-0.5%C焼結骨格に銅を溶浸した各試料のヤング率を示したものであるが、文献値において純銅のヤング率は128GPaと純鉄の206GPaに比べてかなり低いので、この銅溶浸焼結体は銅の溶浸量が増加して高密度になるほど、ヤング率は低いレベルになる。ちなみに銅25%を完全に溶浸した焼結体の密度は約 8.1g/cm^3 で、そのヤング率は約190GPaと実験値および計算から推定できる。Fig.6はSMS1種のオーステナイト系316Lステンレス鋼およびSMS2種のフェライト系410Lステンレス鋼の焼結体のヤング率を示したものである。実験結果から見てわかるようにオーステナイト系316Lのヤング率はフェライト系410Lのヤング率よりレベルが低い。文献値において、オーステナイト系316Lステンレス鋼のヤング率の方が約197GPaと低く、また、フェライト系410Lステンレス鋼のヤング率が約204GPaとほぼ純鉄に近くなっている⁸⁾ことによるものである。次に焼結雰囲気のうち、特にアンモニア分解ガスでは、焼結体内のクロム元素が雰囲気中の窒素ガスと反応してヤング率が高い金属窒化物の窒化クロムを焼結体内に生じるから、ヤング率の上昇を予測したが、水素、真空を含めいずれの雰囲気

Fig.5 Relations between Young's modulus and sintered density of sintered iron-carbon (copper infiltrated) powder compacts, infiltrated at 1423K for 1.2ks in AX atmosphere.

Fig.4 Relations between Young's modulus and sintered density of Fe-C-Cu-Ni, Fe-Ni, Fe-C-Ni powder compacts, sintered at 1423K for 1.8ks in AX atmosphere.

Fig.6 Relations between Young's modulus and sintered density of stainless steel powder compacts, sintered at 1423K for 1.8ks in H₂, vacuum and AX atmospheres.

Fig.7 Relations between Young's modulus and sintered density of bronze powder compacts, sintered at 1043K for 1.8ks in H_2 atmosphere.

気でも差が認められなかった。窒化クロムの分散量が少ないためであろう。Fig.7はSMK1種の青銅系の焼結体のヤング率を示したものである。各焼結体は青銅の文献値であるヤング率約103GPaに⁹⁾向かって密度とともに上昇している形をとっているが、それらのレベルはCu-10%Sn合金粉、Cu-10%Sn混合粉系そして鉛を添加したものの順に高くなっている。詳細は不明であるが、これら混合粉を用いたものでは焼結過程に約10%の錫とさらに約2%の鉛が溶融して液相となるために、液相焼結によって気孔の形状が球形(丸みを帯び)となり

易く⁷⁾、従って、焼結体の強さ(剛性)が増してその結果ヤング率が向上したためと考えられる。

4 ま と め

以上、機械構造部品用各種焼結材料について、それらのヤング率を測定した結果を紹介した。各種焼結材料のヤング率値とそれらヤング率値に及ぼす焼結密度の影響を示しただけで、まだ充分な説明は加えられなかったが、今後それらの裏付けを逐次進めて行きたいと思っている。

謝 辞

実験にご協力いただいた早稲田大学理工学部卒業生の伊藤宏樹、宇野 登、佐藤宗昭、佐藤 宏、小川 博、岡松参次郎、河村徹生、土谷健二、根本 敦の各氏に感謝致すとともに、本報をまとめるにあたり、終始ご支援とご指導をいただいた日産自動車(株)技師藤木章氏、フクイシンター(株)社長西村実氏、部長伊藤敏直氏、部長横山 周氏に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 日本工業標準調査会: JIS Z 2280 "金属材料の高温ヤング率試験方法", (1993)1-10.
- 2) 精機学会, 計測自動制御学会共編: 改訂工業測定便覧, コロナ社, (1964)849.
- 3) 渡辺尙尚: "焼結金属のヤング率に対する動的および静的測定法に関する研究", 材研報告, 50(1994)38-45.
- 4) 日本粉末冶金工業会: JPMA M 10 "焼結金属材料のヤング率試験方法", (1997)3-7
- 5) Inter. Organization for Standard: ISO 3312 "Sintered Metal Materials-Determination of Young's Modulus", (1975)1-2.
- 6) 日本機械学会編: 機械工学便覧改訂5版, 日本機械学会, (1968)4-7.
- 7) 三浦秀士, 坂本愛一郎, 徳永洋一: "鉄系焼結材のヤング率に及ぼす気孔率と気孔形状の影響", 粉体および粉末冶金, 27(1980)82-87.
- 8) 大同特殊鋼(株)編: 特殊鋼ハンドブック, 大同特殊鋼(株), (1993)246.