研 究

希土類ボンド磁石の圧縮成形における圧密挙動

石橋 利之, 秋岡 宏治, 下田 達也

セイコーエプソン(株)研究開発本部, 〒392 諏訪市大和3-3-5.

Densification Behavior of Compression Molded Resin Bonded Rare-earth Magnets

Toshiyuki Ishibashi, Koji Akioka and Tatsuya Shimoda

Corporate R & D, Seiko Epson Corporation, Suwa 392.

Received December 2, 1993

Production of resin bonded rare-earth magnets is growing rapidly. Considerable effort has been directed toward improving the properties of the magnetic powder for the purpose of high performance resin bonded rare-earth magnets. Little attention, however, has been paid to the bonding technology.

In this paper, the densification behavior of compression molded resin bonded rare-earth magnets which consist of isotropic Nd-Fe-B powder, epoxy resin and lubricants was studied.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) The local density in the compact decreases linearly and the local pressure drops exponentially with increasing distance from the pressing punch.
- (2) This pressure drop is caused by the friction between the compact and the die walls.
- (3) Suitable lubricants improve compressibility and result in high density and a corresponding high energy product.

1 緒 言

ボンド磁石とは、樹脂結合型磁石とも呼ぶように、磁性粉末を有機バインダーで結合させた磁石である。希土類ボンド磁石は、特に1980年代以降のパーソナルコンピュータやヘッドフォンステレオ、VTRなどの急速な普及に伴い、生産量を大きく伸ばしている。また、Sm-Co系やNd-Fe-B系に次いでSm-Fe-N系が開発されるなど活発な研究開発がなされており、大いに注目を集めている。

希土類ボンド磁石の開発状況としては、組成研究に代表される磁性粉末や、射出や押出成形といった成形方法についての報告が多い。しかし、最も高い磁気特性が得られる圧縮成形技術に関しては、ノウハウ的な面が強く

系統的な研究はほとんどない。また、金属やセラミックス粉末の圧縮成形に関しては、圧縮実験式の観点で古くから多くの研究¹⁾²⁾がなされているが、そのほとんどは円柱状など単純形状のものであり、ボンド磁石で多いリング形状の解析はほとんどなされていない。

本論文では、Nd-Fe-B系急冷粉末³⁾をエポキシ樹脂で結合させたリング形状のボンド磁石について、その圧縮成形における圧密挙動を解析し、それに基づいた成形性の改善を試みたので報告する。

2 試料および実験方法

2.1 試料

試料としては、Nd-Fe-B系急冷粉末(GM社:MQP-B)に

液状のエポキシ樹脂および液状の潤滑剤を約2wt.%加えて混練し、顆粒状に造粒したものをを用いた。これを試料Aとする。

また、試料Aに粉末潤滑剤を加えた試料B、およびエポキシ樹脂と潤滑剤のいずれも粉末タイプとした試料Cも用意した。

2.2 成形方法

成形型は外径12, 内径10mmの超硬製で、油圧のハンドプレスを用い30~110kgf/mm²の成形圧力で圧縮成形を施し、150℃でキュア処理することによりリング形状のボンド磁石とした。また、より精密な実験のために、電動式の万能試験機も併用した。

3 実験結果および考察

3.1 成形条件と密度の関係

Nd-Fe-B系急冷粉末は粉末そのものが磁氣的に等方性である。そのため、Fig.1に示すようにボンド磁石の磁気特性はその密度と強い相関を有しており、高性能化を実現するためには密度を高めることが重要である。

そこで、試料Aについて様々な条件で圧縮成形を行ない、評価した。

ボンド磁石の高密度化は、Fig.2に示すように、成形圧力を上げることにより実現できる。しかし、高成形圧域では効率が悪く、プレスの能力や成形型強度の問題もある。また、Fig.3に示したように、試料高さが高いものや片押成形では密度が低くなり、特にリング形状ではその傾向が著しい。

Fig.1 Magnetic properties of resin bonded magnets as a function of density.

Fig.2 Sample density as a function of pressure.

Fig.3 Sample density as a function of sample height.

Fig.4 Local density as a function of the distance from the pressing punch.

密度の試料高さ依存性に焦点を絞り、成形圧力50kgf/mm²で成形した約15mmの高さの成形体を高さ方向に五等分にスライスし、各々の密度を測定した。結果を

Fig.5 Local density distribution at different pressures.

Fig.4に示した、密度は加圧パンチからの距離でプロットするときれいに直線に沿っており、局部密度分布を表していることが分かる。30~110kgf/mm²と成形圧力を変えたときの結果をFig.5に示したが、その傾きは成形圧力には依存せず、-0.072~-0.079[(g/cm³)/mm]とほぼ一定であることが分かる。また、切片は加圧パンチ直下の密度に対応している。

3.2 圧密挙動の解析

圧力がどのように試料中に伝わり、その結果としてどのような密度が得られるか、すなわち圧密挙動を解析するために、より精密な成形および成形圧力の測定を万能試験機を用い行なった。

低成形圧力領域での成形圧力と試料密度(●)の関係をFig.6に示した。さらに各成形圧力での加圧パンチ直下の密度(○)も局部密度分布の傾きから算出し合わせてプロットした。この加圧パンチ直下の密度の成形圧力依存性と局部密度分布のデータから、各点の局部密度を圧力に換算し求めた局部圧力分布をFig.7に示した。局部圧

Fig.6 Sample density and local density at the pressing punch (x=0) as a function of pressure.

力は加圧パンチからの距離が増すにつれ、急激に減少している。

次に、この局部圧力分布をJannsenの式⁹⁾を応用し解析してみる。この式は、もともと円筒容器に粉粒体を充填した場合の粉粒体の圧力分布を表したものである。成形圧力が成形型の壁との摩擦によって失われると仮定すると、Fig.8中の厚さdxの薄層リングの力の釣合は、以下の式で表すことができる。

$$\pi(r_1^2 - r_2^2)P = \pi(r_1^2 - r_2^2)(P + dP) + \mu k P 2\pi(r_1 + r_2)dx \quad (1)$$

ここで、 r_1 はリング形状の成形体の外半径、 r_2 は内半径、 μ は試料と成形型の壁との間の摩擦係数、 k は垂直圧力を水平方向の圧力に変換させる比例定数である。

成形圧力を P_0 、加圧パンチからの距離 x における圧力を P とし、(1)式を積分すると以下のようにになる。

$$\int_{P_0}^P \frac{1}{P} dP = -\frac{\mu k}{r_1 - r_2} \int_0^x dx \quad (2)$$

Fig.7 Local pressure as a function of distance from the pressing punch.

Fig.8 Schematic representation for the equation of equilibrium.

$$P = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{\mu k}{r_1 - r_2} x\right) \quad (3)$$

(3)式は、試料中の局部圧力が加圧パンチからの距離に対して指数関数で減少することを示しており、Fig.7の結果と良く一致している。Fig.7のデータを(3)式でフィッティングさせると、 $\mu k=0.15\sim0.16$ となった。このように仮定と実験が一致した要因のひとつとして、薄肉のリング形状の場合には半径方向の密度の変化(分布)を事実上無視できたことが挙げられる。

3.3 成形性の改善

成形性の改善のためには、先の結果から μ の低減が必要であることは明らかである。そこで、粉末潤滑剤を加えた試料Bおよび試料Cの評価を行なった。

Fig.9に局部密度分布を、Fig.10に局部圧力分布を示した。粉末潤滑剤を加えた試料BおよびCは、 μk の値が0.08~0.10と試料Aのそれと比較してほぼ半減しており、局部密度分布の傾きも-0.046(試料B)および-0.033(試料

Fig.9 Local density distribution of different samples.

Fig.10 Local pressure distribution of different samples.

Fig.11 Demagnetization curve of a resin bonded ring-shaped magnet having (BH)max of 12.5MGOe.

C)[(g/cm³)/mm]と小さくできた。このことは試料高さが高い場合にも成形圧力が有効に伝わり、高い密度が得られることを示している。この効果はリング形状など試料高さと断面積の比が大きい場合には特に有効である。

最後に、高い密度が得られたときのリング形状のボンド磁石の磁気特性をFig.11に示す。密度は6.40g/cm³で(成形圧60kgf/mm²)、最大エネルギー積は12.5MGOeを示した。また、ブロック形状(φ10×L7mm)では、6.52g/cm³で(70kgf/mm²)、13.5MGOeだった。これは85vol.%以上の粉末充填率を実現したことを示している。

4 まとめ

希土類ボンド磁石の圧縮成形における圧密挙動を解析することにより、以下のことが判明した。

- (1) 成形体中の局部密度は加圧パンチからの距離に対し直線的に、局部圧力は指数関数的に減少した。
- (2) 局部圧力の低下は、成形体と成形成との間の摩擦に起因する。
- (3) 適切な潤滑剤は成形性を改善させ、高密度が実現でき、その結果、高エネルギー積のボンド磁石が得られた。

文 献

- 1) A. R. Cooper and L. E. Eaton: J. Am. Ceram. Soc., 45-3 (1962), 97.
- 2) 川北, 服部, 岸上: 粉体工学研究誌, 11-8 (1974), 453.
- 3) J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee and F. E. Pinkerton: J. Appl. Phys., 55 (1984), 2078.
- 4) H. A. Janssen: V. D. I., 39 (1895), 1045.