研 究

Fe-Si-Al系圧粉磁心の透磁率に及ぼす成形密度および粉末形状の影響

齊藤 貴伸, 武本 聡

大同特殊鋼(株), 〒457-8545 名古屋市南区大同町二丁目30.

Effects of Density and Particle Shape on the Permeability of Fe-Si-Al Compressed Core

Takanobu Saito and Satoshi Takemoto

Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho, Minami-ku, Nagoya 457-8545.

Received March 3, 2005

SYNOPSIS

In this study initial permeability and permeability under applying DC bias were investigated with several Fe-Si-Al compressed cores made by changing green densities and particle shapes. We concluded as follows.

Initial permeability depends on not only green density but also particle shape. It becomes high as packing density becomes high, and it is high with the particle that has larger aspect ratio. As a result of analysis using Ollendorf's equation, it is suggested that effective demagnetizing factor is small with the particle that has large aspect ratio, resulting in high permeability.

Permeability under applying DC bias can be explained in the view of magnetizing magnetic flux density. Permeability at high magnetic flux density is independent of particle shape, and depends on only green density.

KEY WORDS

Fe-Si-Al, powder core, permeability, density, particle shape

1 緒 言

スイッチング電源やDC-DCコンバータはパーソナルコンピュータなどのOA機器, プラズマディスプレイなどの映像機器のほか, 近年では自動車の電子制御化や高機能化に伴ってインジェクタの制御用や, 高輝度ヘッドライトの点灯回路などの電源としての用途が広がっている。

一般にセンダストと呼ばれるFe-Si-Al系の圧粉磁心はこれらの電源のチョークコイルやトランスに多用されている。この磁心の原料粉末は鋳造されたインゴットを粉砕して作製することが多いが, 最近では噴霧法による製造も広がってきた。著者らはこれまでに, 噴霧粉を用いて磁心を作製しその電磁気特性を調査した結果, 噴霧方法, 粉末形状に依存して透磁率やその直流重畳特性^{1,3)}, また粉末粒径によってコアロス^{2,4)}が変化することが判ってきた。最近では電源回路の高効率化のニーズから, 個々の実際の使用条件に適合した磁心が求められてきており, 原料粉末の特性と磁心特性を関連づけることは重要な意味を持つ。

本研究では噴霧条件を連続的に変化させることにより, 粉

末形状を変化させた。また, 磁心の密度も変化させながら, 透磁率およびその直流重畳特性を調査した。重畳特性に及ぼす磁性粉の充填密度および粉末形状の影響を磁心の反磁界係数の観点から解析したのでその結果について報告する。

直流重畳特性とは直流バイアスを印加した状態での透磁率の変化を指し, チョークコイルとして実際の電源に搭載された際に重要な特性である。

2 実験方法

2.1 原料粉末の作製方法

原料粉末は一般的な水噴霧法およびガス噴霧法に改良を加えた改良型噴霧法で作製した。噴霧条件を連続的に変化させて, 粉末形状を5条件で変化させた。成分はFe-Si-Al系で最も軟磁気特性が良好といわれている9.5mass%Si, 5.5mass%Alに近い成分とした。また, 粒度は100メッシュ以下, 重量で積算した平均粒径は50~60 μm であった。

2.2 粉末形状の調査

粉末形状は以下のようにして調査した。次節で述べるよう

な工程で磁心を作製し、プレス面と直角方向の断面を光学顕微鏡で観察した。ランダムに400個以上の粒子の長軸と短軸を測定して平均し、その比であるアスペクト比(長軸/短軸)を粉末形状を表す指標とした。

Fig.1 Microstructure of compressed cores made with powders changing aspect ratio.

Fig.1に代表的な3種類の圧粉磁心の断面組織を示す。写真の左右方向が磁路方向である。アスペクト比が大きくなるにつれてピーナツ状の粒子が増え、また粒子の長軸方向が磁路方向に配向していることがわかる。

2.3 圧粉磁心の作製

まず、粉末粒子間の電氣的絶縁のため、かつバインダーとして液体状のシリコン樹脂を1.0 mass% 各粉末に添加して混合した。続いて潤滑剤としてヘガネス社製のケノループを0.5 mass%添加した。成形は一軸油圧プレス機を用い、室温で1080~1960 MPaの間で変化させた。磁心サイズは外径28 mm, 内径20 mm, 高さ約5 mmのトロイダル状とした。成形時の歪を除去して軟磁気特性を良好にするために、成形後Ar雰囲気中で973 Kで保持時間3.6 ks(1時間)熱処理した。

2.4 磁気特性評価

LCRメータ(アジレント・テクノロジー製4284A)を用いて、0~8000 A/mの間で直流バイアスを変化させて印加しながら0.4 A/mの振幅で周波数20 kHzの交流磁界を重畳させて透磁率を測定した。この直流重畳特性はその測定原理から考えて、初磁化曲線の磁界Hでの一次微分に相当する特性である。

3 結果および考察

3.1 初透磁率に及ぼす成形密度および粉末粒子形状の影響

以下では直流印加磁界ゼロにおける透磁率を初透磁率と呼ぶことにする。Fig.2に粉末粒子のアスペクト比と圧粉磁心の相対密度を変化させた場合の初透磁率 μ_i の変化を示す。相対密度が増すとともに μ_i は増大している。また、粒子のアスペクト比にも大きく依存し、アスペクト比が大きい、すなわち楕円形状であるほど初透磁率は高いことがわかる。

そこで、アスペクト比および相対密度と初透磁率の関係を圧粉磁心の有効反磁界係数の観点からOllendorfの式を用いて解析する^{1,3,5)}。Ollendorfによると、初透磁率は式(1)のように

Fig.2 Relative density dependency of initial permeability. Dotted lines show the estimations using Ollendorf's equation with several demagnetizing factor N.

表現される.

$$\mu_i = \frac{\eta(\mu - 1)}{N(1 - \eta)(\mu_i - 1) + 1} + 1 \quad (1)$$

ここで,

N: 磁心中の有効反磁界係数 η : 磁性粉末の相対充填密度

μ_i : 粉末の真の透磁率 μ_0 : 磁心の初透磁率

である.

図中の破線はNをさまざまに変化させて計算した初透磁率の変化を示す. この計算では実験値の変化によくフィットする値として $\mu_0 = 1000$ と仮定した. 粉末形状によって初透磁率が異なる原因は, 磁心中の有効反界係数が異なるためであると言える. アスペクト比が大きい楕円状の粉末は有効反磁界係数が小さいため初透磁率が高く, 逆にアスペクト比が小さい球状の粉末は有効反磁界係数が大きいため初透磁率が低いという関係にある.

アスペクト比が1である真球が他の磁性体との作用がなく独立して存在する場合には, 良く知られているように反磁界係数は1/3である. しかし, この磁心では有効反磁界係数はそれより1桁小さい0.06程度の値が見積もられる. その理由は, 磁性粉末の充填率が高くなってくると粉末同士が近接し合い, 計算上4個程度の粒子が連続してより大きなアスペクト比をもつ集合体として振舞っているため実質の反磁界係数が低下しているものと考えられる³⁵⁾.

3.2 直流重畳特性に及ぼす成形密度および粉末粒子形状の影響

次に直流バイアスを印加した状態での透磁率について議論する. Fig.3にはアスペクト比が1.83の粉末を用い, 磁性体の充填密度を変化させた場合の重畳特性を示す. 充填密度が高いほど初透磁率のみならず, 直流磁界を印加した状態での透磁率も高いことが判る. しかし, 印加磁界が大きくなるに従い, 透磁率の差は狭まり, 8000 A/m程度の印加磁界ではほと

んど同じ透磁率になっている.

また, Fig.4には充填密度を約0.84とほぼ一定にして, 粉末のアスペクト比を変化させた場合の重畳特性を示す. 粉末のアスペクト比が大きいほど初透磁率が高いが, 直流を印加していくと急激に低下し, 約3000 A/m以上の直流を印加した場合の透磁率は, 逆にアスペクト比の小さな粉末の方が高くなっている.

3.3 直流重畳特性の近似式

直流重畳特性に及ぼす磁性粉の充填密度, 粉末形状の影響をさらに統一的に解析する. Fig.3とFig.4では透磁率を印加磁界の関数として表したが, 反磁界という観点から見ると磁化している磁束密度と透磁率の関係で議論した方が理にかなっている.

そこで重畳特性を近似式を用いて表現することを試みた. まず, 磁束密度Bと印加磁界Hとの関係である初磁化曲線を次の式で近似する.

$$B = I_s \eta \{1 - \exp(-k_1 H)\} - k_2 H \exp(-k_3 H) + \mu_0 H \quad (2)$$

ここで,

I_s : 磁性材自身の飽和磁化 [T] η : 磁性粉末の相対充填密度

μ_0 : 真空の透磁率 ($= 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]) k_1, k_2, k_3 : 定数

である. この式はケイ素鋼板などのバルク磁性体の磁化曲線を精度良く近似できることが報告されている⁹⁾. 印加磁界を非常に大きくしていくと, 第2項は減衰し, 第1項のみが指数関数的に磁心の飽和磁化である $I_s \eta$ に漸近していく. 第2項は主に弱い印加磁界の部分で修正するために加えられている.

さて, 重畳特性は式(2)を磁界Hで微分したものであることから,

$$\mu/\mu_0 = I_s \eta k_1 \exp(-k_1 H) - k_2 \exp(-k_3 H) (1 - k_3 H) + 1 \quad (3)$$

と表される.

Fig.3 DC bias magnetic field dependency of permeability in case of fixed aspect ratio of 1.83 and changing relative density.

Fig.4 DC bias magnetic field dependency of permeability in case of fixed relative density of 0.84 and changing aspect ratio.

次に、この式(3)を用いて、実験で測定した重畳特性を近似した。 I_s は用いたFe-Si-Al合金の飽和磁化である1.0Tとし、 η はそれぞれの試験片磁心の充填密度を用いた。 k_1, k_2, k_3 の定数は、最小二乗法により実験値と式(3)による計算値の残差の平方和が最も小さくなるように決定した。その一例としてFig.3およびFig.4の一部のデータに近似式の各係数を記載してある。測定値と計算値は誤差1%以内で極めて良い一致を示し、重畳特性は k_1, k_2, k_3 の定数を最適に選定することにより式(3)で精度良く近似できることが判った。

3.4 励磁磁束密度と透磁率の関係

重畳特性に及ぼす充填率と形状の影響について式(3)でそれぞれ求めた近似式を用いてさらに解析する。各磁心について求めた k_1, k_2, k_3 を式(2)へ代入すると、磁束密度が計算できる。この磁束密度の値を用いると、 H - μ の関係を B - μ の関係

に変換することができる。Fig.3に対応して同じアスペクト比1.83の粉末で粉末充填密度を変化させた場合において、Fig.5は初磁化B-H曲線およびFig.6は横軸を各々の直流磁界を印加した際に磁化している磁束密度でプロットした B - μ の関係を示す。Fig.5を見ると8000 A/mの印加磁界でも磁心はまだ飽和していないが、B-H曲線の立ち上がり方から判断すると当然ながら充填密度の高い磁心は飽和磁化が高いといえる。またFig.6から透磁率を励磁磁束密度の観点から見ると、充填密度が高いほど初透磁率が高いが、磁束密度が高いところでの透磁率も同様に充填率が高いほど高くなっている。つまり、磁心の飽和磁化が高いほど透磁率は全体的に高いと言える。

また同様にFig.4に対応して充填率を0.84とほぼ一定にし、アスペクト比を変化させた場合においてFig.7はB-H曲線、Fig.8は B - μ の関係を示す。この場合も先と同様に8000 A/m

Fig.5 Magnetization curves in case of fixed aspect ratio of 1.83 and changing relative density.

Fig.7 Magnetization curves in case of fixed relative density of 0.84 and changing aspect ratio.

Fig.6 Magnetic flux density dependency of permeability in case of fixed aspect ratio of 1.83 and changing relative density.

Fig.8 Magnetic flux density dependency of permeability in case of fixed aspect ratio of 0.84 and changing relative density.

Fig.9 Relative density dependency of permeability at magnetic flux density of $B=0.3$ T.

Fig.10 Relative density dependency of permeability at magnetic flux density of $B=0.5$ T.

の印加磁界では磁心はまだ飽和に至っていないが、さらに磁界を強めていくと飽和磁化の値である 0.84 T に漸近していくものと考えられる。また透磁率の変化を見ると、同じ充填率であっても初透磁率は粉末形状によってさまざまに変化するが、磁束密度が高くなってくるとその差は小さくなり、 0.5 T 程度まで磁化された状態での透磁率はほぼ同じになっている。つまり、磁束密度が高くなると、粉末形状の影響は次第に小さくなっていくと言える。

3.5 高い励磁磁束密度における透磁率に及ぼす成形密度および粉末粒子形状の影響の整理

励磁磁束密度が高い場合における粉末充填率と粉末形状の影響を全体的に整理した。式(2)および(3)で求めた近似式を用いて、磁束密度 0.3 T と磁束密度 0.5 T における透磁率を粉末充填密度およびアスペクト比をパラメータとしてプロットしたものを Fig.9 と Fig.10 に示す。Fig.3 と比較すると、Fig.3 の初透磁率は粉末充填密度のみならず、粒子のアスペクト比にも大きく依存しているが、磁束密度が高い状態での透磁率は粉末形状の影響が弱くなり、粉末充填密度の依存度が大きくなる。特に 0.5 T まで磁化した状態での透磁率は、粉末アスペクト比の依存性はほとんどなくなり、充填密度だけに依存し、密度が高いほど、つまり磁心の飽和磁化が高いほど透磁率は高くなっている。

4 結 論

Fe-Si-Al 系圧粉磁心において、成形密度および粉末の形状をいくつかの条件で変化させて初透磁率および直流バイアスを印加した状態での透磁率を調査した。その結果、以下の結論を得た。

初透磁率は粉末充填密度が高いほど高いが、粉末形状にも大きく依存し、粉末のアスペクト比が大きいほど高い。Ollendorf の式(1)を用いて解析した結果、アスペクト比が大

きいほど磁心の有効反磁界係数が低下して初透磁率が高くなることが示唆された。

直流バイアスを印加した状態での透磁率は、その際磁化している磁束密度で整理すると現象が理解できる。励磁磁束密度が高くなるに従い粒子形状の影響は少なくなり、粉末充填密度だけに依存するようになる。

また、解析の一環として、初磁化曲線および直流重畳特性の近似式を求めたところ、式(2)および(3)を用いると非常に高い精度で近似できることが判った。

文 献

- 1) T.Saito and S.Yahagi: "Electromagnetic Properties of Compressed Cores with Fe-Si-Al System Atomized Powders", Electronic Furnace Steel (Denki Seiko), 69(1998)181-187.
- 2) T.Saito and S.Takemoto: "Core Loss Reduction of Powder Cores with Fe-Si-Al Atomized Powders", Electronic Furnace Steel (Denki Seiko), 71(2000)287-294.
- 3) S.Takemoto and T.Saito: "Effects of Particle Shapes on Magnetic Properties of Compressed Cores with Fe-Si-Al Atomized Powders", Electronic Furnace Steel (Denki Seiko), 73(2002)229-234.
- 4) S.Takemoto and T.Saito: "Fe-Si-Al Low Core Loss Compressed Cores with Atomized Fine Powders", Electronic Furnace Steel (Denki Seiko), 74(2003)241-245.
- 5) H.Taketomi and T.Fujiwara: "Analysis of Frequency Dependency of Permeability in Fe-Si-Al Gas-atomized Powder Cores", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 49(2002)696-700.
- 6) N.Shimayani and H.Fujita: "Approximation of Magnetization Curves by Exponential Series", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, A101(1981)463-470.