

保磁力発現機構定量化による圧粉磁心の低鉄損化指針提案

高下 拓也¹ G. Takashita¹ | 平谷 多津彦² C. Hiratani² | M. ...
C. ... C. ... A. ... F. ... A. ... C. ...
F. ...

高下 拓也 TAKASHITA Takuya JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼・鉄粉研究部 主任研究員(課長)・博士(工学)
平谷多津彦 HIRATANI Tatsuhiko JFE スチール

が転位周りの応力場に起因した磁気モーメントの変化について検討し、Träuble²¹⁾がこれを磁壁と転位の相互作用へと拡張、保磁力との関係を以下のように導出した。

$$H_{c_dis} = \gamma_{dis} \cdot \rho_d^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 H_{c_dis} は転位に起因する保磁力、 ρ_d は転位密度、 γ_{dis} は磁歪、磁壁および転位の分布状態によって決まる係数である。転位や磁壁の分布状態を詳細に定量化するのは困難であるが、仮に γ_{dis} を定数とした場合、保磁力は転位密度の平方根に比例することが分かる。八重樫²²⁾は種々の引張変形が施された純鉄と実用鋼について、転位密度と保磁力の関係を実験的に求めており、いずれの鋼種においても式(6)のとおり保磁力は転位密度の平方根に比例することを報告している。

2.4 各因子とヒステリシス損の関係

Pfeifer^ら²³⁾は保磁力がそれぞれの寄与の和によって表せるとした保磁力の寄与に関する加算則を提案している。Adler^ら²⁴⁾は本モデル式を用いて実験結果を矛盾なく説明できることを示している。本研究ではPfeiferらのモデルを応用し、前節までで説明してきた寄与に加算則が成立すると仮定して以下の式を提案する。

$$H_c = H_{c_k} + H_{c_dis} + H_{c_ex} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 H_{c_ex} は本章で説明した寄与以外の保磁力増加因子の和である。

上記の式(7)をさらに式(2)に代入することで、ヒステリシス損と微視組織因子を直接的に関連付けたモデル式が導出される。

$$\begin{aligned} W_h &= (4 \cdot c_h \cdot B \cdot f) \cdot (H_{c_k} + H_{c_dis} + H_{c_ex}) / \rho_c \\ &= W_{h_k} + W_{h_dis} + W_{h_ex} \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

ここで、 W_{h_k} は結晶粒界に起因したヒステリシス損、 W_{h_dis} は転位に起因したヒステリシス損、 W_{h_ex} はその他に起因したヒステリシス損である。次章では本式を用いて圧粉磁

心のヒステリシス損の分離を行う。

3. モデル式を用いた実試料の解析

3.1 圧粉磁心の鉄損と製造条件

圧粉磁心の製造工程を図3に示す。製造工程中に鉄損に影響を及ぼす因子は複数存在するが、原料粉の粒子径および成形後の熱処理条件は特に影響が大きく、適正化のための種々の検討が行われている^{5,6)}。これらの因子はヒステリシス損と渦電流損の両方への寄与が明らかになっている。一方、ヒステリシス損と微視組織の関係を関連付けた定量的な議論は少ない。本章では原料粉の粒子径および熱処理温度の異なる圧粉磁心を作製のうえ、前章のモデル式を用いてヒステリシス損を解析し、その低減指針を提案する。

3.2 実験方法

水アトマイズ鉄粉を篩分けした、4種類の原料鉄粉A~Dを用いた。見掛密度、レーザー回折法により測定した平均粒子径 $d_{p,50}$ および化学組成を表1に示す。見掛密度はすべて $3.5 \pm 0.1 \text{ Mg m}^{-3}$ の範囲内であった。また、C, S, O および N 以外の不純物 (Al, Si, P, Cr および Mn) はすべて 0.01 mass% 未満であった。原料鉄粉に対して樹脂固形分がガ 蔗 0.20 mass% となるようにシリコーン樹脂 (東レダウ a 寤 て < 謔 建 協 義

粉を室温で外径 38 mm, 内径 25 mm, 高さ 6 mm のリング状に圧縮成形し, 圧粉磁心 $\sim D$ を得た。この時, 成形体の密度が 7.6 Mg m^{-3} となるように成形圧力を 1150 ~ 1470 MPa の範囲内で調整した。圧粉磁心に対し, 窒素雰囲気中で 2.7 ks の熱処理を施した。均熱温度は 873 K とした。また, D についてはさらに 673 K, 773 K および 973 K での熱処理を実施した。熱処理後の圧粉磁心には熱処理温度ごとに枝記号 -673, -773, -873 および -973 を付与した。

すべての圧粉磁心について, 直流磁化測定機 (メトロン技研製, SK-110 型) により保磁力およびヒステリシス損を測定した。巻線は 1 次側 100 ターン, 2 次側 20 ターンとし, 励磁磁束密度は 1.0 T とした。ヒステリシス損については, B-H ループ面積から一周分の損失を算出, 周波数倍することにより任意の周波数のヒステリシス損を求めた。また, 高周波鉄損測定装置 (メトロン技研製, SK200 型) を用いた鉄損の評価も併せて行った。励磁磁束密度は 1.0 T とし, 周波数 1 kHz とした。式 (1) より, 鉄損とヒステリシス損の差分を渦電流損として算出した。

磁気測定後のすべての圧粉磁心はリングの円周方向断面が観察面となるように埋込み, ナイタルエッチングを施して結晶粒界を現出させた後に光学顕微鏡により組織観察した。得られた組織写真から切断法²⁵⁾により結晶粒径を測定した。また, 組織観察を行った試料に対して, 中島ら²⁶⁾の手法に準じた X 線回折により転位密度を測定した。

3.3 結果と考察

3.3.1 ヒステリシスループの角型比

本研究で作製した圧粉磁心の組織観察結果および磁気測定結果をまとめて表 2 に示す。前章で提案したモデル式を適用し, ヒステリシス損の分離を行うにあたり, 式 (2) におけるヒステリシスループの角型比 c_h を求める必要がある。本研究において, 左辺の W_h は既知の値である。また, B および f はそれぞれ 1.0 T および 1 kHz, さらに保磁力 H_c および成形体密度 ρ_c についても表 2 のとおり, 本研究では既知

の値となる。したがって W_h と, 右辺の c_h を除いた $(4 \cdot B \cdot f \cdot H_c) / \rho_c$ の関係を整理することで c_h が求まる。今回作製したすべてのとび R 徐罵女 (と 停 § 瓦 掃 こと 抄ば 押 て の

となることから図5は圧粉磁心における結晶粒界の保磁力への寄与を示していると示唆される。したがって、本研究において保磁力に及ぼす結晶粒径の寄与 $H_{c,k}$ は実験的に下式で示される。

$$H_{c,k} = 1.7 \cdot 10^3 / d_k \dots\dots\dots (9)$$

次項では本式を用いてさらに転位密度の寄与を定量化する。

3.3.3 保磁力と転位密度の関係

2.4節で示した式(7)に式(6)および式(9)を代入、整理することで、式(10)が得られる。

$$H_c - 1.7 \cdot 10^3 / d_k = \gamma_{dis} \cdot \rho_d^{1/2} + H_{c,ex} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、左辺はすべて既知の値であり、実験結果より算出可

$W_{h,k}$ に着目すると、熱処理温度上昇

nanocrystalline ferromagnets. IEEE Trans. Magn. 1990, vol. 26, p. 1397-1402.

15) Yu, R. H.; Basu, S.; Zhang, Y.; Parvizi-Majidi, A.; Xiao, John Q. Pinning