

明 細 書

発明の名称： 無方向性電磁鋼板およびその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、無方向性電磁鋼板に関し、特にモータコア用として好適であり、高周波域での低鉄損と高延性を両立させた無方向性電磁鋼板及びその製造方法に関する。

背景技術

[0002] ハイブリッド電気自動車用や掃除機用のモータは、小型化、高効率化の観点より、400Hz～5kHzといった高周波域での駆動が行われている。そのため、このようなモータのコア材として使用される無方向性電磁鋼板には、高周波鉄損が低い電磁鋼板が要望されている。

[0003] 高周波鉄損を低減するためには、固有抵抗の増大が効果的である。そのため、Si含有量を増加させることによって固有抵抗を増加させた高Si鋼の開発が行われてきた。しかし、Si含有量の増加に伴って硬度が上昇し、延性が低下するため、Si含有量の高い電磁鋼板はモータコア等への加工が難しくなるという課題があった。

[0004] そこで、Si含有量の高い電磁鋼板の加工性をあげる手法として、規則相の形成を抑制した電磁鋼板が開発されている。例えば、特許文献1では、焼鈍後の冷却過程において、600℃超700℃以下の温度範囲で10秒以上保持し、その後600℃以下を60℃/sec以上の冷却速度で少なくとも250℃以下まで冷却することで、D₀₃規則化クラスタのサイズを100nm以下にした上で、さらに、Ni:0.1～5質量%とCu:0.1～3質量%の1種または2種を添加した素材を用いることにより、Si含有量を高めた場合の鋼板の硬度上昇と脆化を抑制した電磁鋼板が提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特許第6375692号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかし、本発明者らが、検討を行った結果、S i含有量が4.0質量%を超えるような範囲において、特許文献1で提案されているようなCuやNiを添加し、焼鈍後急冷する方法を適用した場合、規則相を抑制して加工性を保つためには、多量のCuやNiの添加と急激な冷却が必要であり、その結果、飽和磁束密度の低下や、冷却の歪みによる鉄損の劣化等の課題があった。

[0007] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、高周波域での低鉄損と高延性を両立させた無方向性電磁鋼板及びその製造方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明者らが上記課題について鋭意検討した結果、無方向性電磁鋼板の表層にB2相が一定量以上形成されると、大幅に無方向性電磁鋼板の延性が低下することを確認し、これが無方向性電磁鋼板の延性を低下させる一因であると推論した。

[0009] さらに、詳細な検討により、以下の知見を見出した。無方向性電磁鋼板の表層部と内層部の平均S i含有量（平均S i濃度）の差である $\Delta S i$ を適切な値に制御し、なおかつ製造過程における浸珪拡散処理工程後の冷却過程での冷却速度および鋼板にかかる張力を適切な値に制御する。これにより、無方向性電磁鋼板の表層に生じるB2規則相の形成を抑制し、無方向性電磁鋼板の延性を向上できる。

[0010] 本発明は、上記知見に基づき、さらに検討を加えた末になされたものであり、その要旨は以下のとおりである。

[0011] [1] 板厚 t (mm)を基準として、 $0 \sim t/4$ の範囲および $3t/4 \sim t$ の範囲を表層部、 $t/4$ より大きく、 $3t/4$ 未満の範囲を内層部と定義した際に、

表層部の平均S i含有量と内層部の平均S i含有量に差を有する無方向性電

磁鋼板であって、

質量%で、

全板厚の平均含有量で、

C : 0.010%以下、

Mn : 2.0%以下、

Al : 2.0%以下、

P : 0.20%以下、

S : 0.005%以下、

N : 0.010%以下、および

O : 0.010%以下を含有し、

表層部の平均Si含有量が4.00%以上6.30%以下であり、

内層部の平均Si含有量が2.00%以上6.20%以下であり、

表層部の平均Si含有量と内層部の平均Si含有量の差である ΔSi が0.

10%以上2.00%以下であり、残部がFeおよび不可避免的不純物からなり、かつ

下記(1)式を満たす、無方向性電磁鋼板。

$$IB2 / IFe < 0.030 \quad \dots (1)$$

ここで、(1)式において、IB2は、X線回折で測定した $2\theta = 36.5^\circ$ 付近に現れる Fe_3Si のB2相由来の回折ピーク強度であり、IFeは、X線回折で測定した $2\theta = 77.6^\circ$ 付近に現れるフェライト相由来の回折ピーク強度である。

[2] さらに、質量%で、全板厚の平均含有量で、

Sn : 0.10%以下、

Sb : 0.10%以下、

Cu : 2.0%以下、

Ni : 2.0%以下、

Cr : 2.0%以下、

Ca : 0.01%以下、

Mg : 0.01%以下、および

REM : 0.03%以下

のなかから選択される1種以上を含む、[1]に記載の無方向性電磁鋼板。

[3]さらに、質量%で、全板厚の平均含有量で、

Mo : 0~0.050%、

B : 0~0.0020%、

Ti : 0~0.010%、

Nb : 0~0.0050%、

V : 0~0.050%、

Pb : 0~0.020%、

As : 0~0.020%、

Zn : 0~0.010%、

Co : 0~0.10%、

Ge : 0~0.030%、および

Ga : 0~0.030%

のなかから選択される1種以上を含む、[1]または[2]に記載の無方向性電磁鋼板。

[4]前記[1]~[3]のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板の製造方法であって、

質量%で、

Si : 4.5%以下、

C : 0.010%以下、

Mn : 2.0%以下、

Al : 2.0%以下、

P : 0.20%以下、

S : 0.005%以下、

N : 0.010%以下、および

O : 0.010%以下を含有し、

さらに、任意選択的に、

S n : 0. 1 0 %以下、

S b : 0. 1 0 %以下、

C u : 2. 0 %以下、

N i : 2. 0 %以下、

C r : 2. 0 %以下、

C a : 0. 0 1 %以下、

M g : 0. 0 1 %以下、

R E M : 0. 0 3 %以下、

M o : 0 ~ 0. 0 5 0 %、

B : 0 ~ 0. 0 0 2 0 %、

T i : 0 ~ 0. 0 1 0 %、

N b : 0 ~ 0. 0 0 5 0 %、

V : 0 ~ 0. 0 5 0 %、

P b : 0 ~ 0. 0 2 0 %、

A s : 0 ~ 0. 0 2 0 %、

Z n : 0 ~ 0. 0 1 0 %、

C o : 0 ~ 0. 1 0 %、

G e : 0 ~ 0. 0 3 0 %、および

G a : 0 ~ 0. 0 3 0 %のなかから選択される1種以上を含有し、残部がF eおよび不可避免の不純物からなる成分組成を有する鋼板に対して、

浸珪処理と拡散処理を施す浸珪拡散処理工程と、前記浸珪拡散処理工程後の鋼板を冷却する冷却工程を含み、

前記浸珪拡散処理工程の拡散処理において、1 2 5 0 ~ 1 0 0 0 °Cの温度域で1 0 秒以上保持し、

前記冷却工程において、6 0 0 °Cから2 0 0 °Cまでの温度域を、鋼板にかかる平均張力：4. 0 M P a 以上、かつ平均冷却速度：2 0. 0 °C / 秒以上で冷却し、

なおかつ、前記浸珪処理と前記拡散処理の合計処理時間が $(300 \times t)$ 秒以上、 $(1500 \times t)$ 秒以下(t :鋼板の板厚(mm))を満たし、さらに前記浸珪処理の処理時間と前記拡散処理の処理時間が下記(3)式を満たす、無方向性電磁鋼板の製造方法。

$$4.00 \leq [Si]_{\text{base}} + 2.7 \times \exp(-0.003 \times (T1 + T2) / t) + 0.0085 \times T1 / t \leq 6.30 \quad \dots (3)$$

ここで、(3)式において、 $[Si]_{\text{base}}$ は浸珪拡散処理工程前の鋼板のSi含有量(%)、 t は鋼板の板厚(mm)、 $T1$ は浸珪処理の処理時間(秒)、 $T2$ は拡散処理の処理時間(秒)である。

発明の効果

[0012] 本発明によれば、高周波域での低鉄損と高延性を両立させた無方向性電磁鋼板及びその製造方法を提供することができる。

[0013] 本発明によれば、低鉄損と高延性を両立したモータコア用の材料として好適な無方向性電磁鋼板を得ることができる。本発明の無方向性電磁鋼板は、高周波域、例えば、 $400\text{Hz} \sim 5\text{kHz}$ といった高周波域での低鉄損特性を有している。本発明の無方向性電磁鋼板は、このような高周波域で駆動が行われるハイブリッド電気自動車用や掃除機用のモータの材料として好適である。本発明の無方向性電磁鋼板は、打抜きやカシメ加工によって発生する割れなどの欠陥を低減できる材料であるため、打抜きやカシメ加工によって製造されるモータの鉄損を低減できるという利点がある。

図面の簡単な説明

[0014] [図1]図1は、本発明の一実施形態にかかる無方向性電磁鋼板の構造を示す模式図である。

[図2]図2は、無方向性電磁鋼板の板厚方向における、Si含有量プロファイルの例を示す模式図である。

[図3]図3は、無方向性電磁鋼板の表層部の平均Si含有量と $IB2 / IFe$ の関係を示すグラフである。

[図4]図4は、無方向性電磁鋼板の $IB2 / IFe$ と全伸びの関係を示すグラ

フである。

[図5]図5は、無方向性電磁鋼板の表層部と内層部における平均 S_i 含有量の差(ΔS_i)と $IB2/IFe$ の関係を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0015] 以下、本発明について具体的に説明する。なお、以下の説明は、本発明の好適な実施形態の例を示すものであって、本発明はこれに限定されない。

[0016] 図1は、本発明の一実施形態にかかる無方向性電磁鋼板の構造を示す模式図である。また、図2は、前記無方向性電磁鋼板の板厚方向における、 S_i 含有量プロファイルの例を示す模式図である。図2における縦軸は板厚方向の位置を示しており、0が無方向性電磁鋼板の一方の表面を、 t が該無方向性電磁鋼板の他方の表面を、それぞれ表している。

[0017] 図2に示したように、本発明の無方向性電磁鋼板（以下、単に「電磁鋼板」という場合がある）は、表面から板厚中心方向に向かって S_i 含有量が減少する S_i 含有量分布を有している。なお、前記 S_i 含有量分布は、電磁鋼板の板厚方向全域にわたって S_i 含有量が連続的に変化する分布であってもよいが、例えば、電磁鋼板の表面側において連続的に変化し、板厚中央部では一定である S_i 含有量分布であってもよい。

[0018] ここで、電磁鋼板の全板厚 t (mm)を基準として、 $0 \sim t/4$ の範囲および $3t/4 \sim t$ の範囲を表層部、 $t/4$ より大きく、 $3t/4$ 未満の範囲を内層部と定義すると、図1に示すように、本発明の一実施形態にかかる無方向性電磁鋼板1は、内層部10と、内層部10の両側に存在する表層部20からなるということが出来る。後述するように、無方向性電磁鋼板1は、表層部20の平均 S_i 含有量と内層部10の平均 S_i 含有量に差を有している。

[0019] [成分組成]

まず、本発明の無方向性電磁鋼板の有する成分組成について説明する。なお、以下の説明において、各元素の含有量を表す「%」は、特に断らない限り「質量%」を表すものとする。また、各元素の含有量は、特に断らない限り

り、全板厚の平均含有量を示す。ただし、S i については、表層部と内層部で含有量に差を有するため、それぞれの領域における平均S i 含有量を示す。

[0020] 本発明の無方向性電磁鋼板は、S i、C、M n、A l、P、S、NおよびOを含有し、残部がF eおよび不可避免の不純物からなる成分組成を有することができる。はじめに、C、M n、A l、P、S、NおよびOについて説明する。

[0021] C : 0.010%以下

電磁鋼板中に含まれるCは、炭化物を形成して磁気時効を起こし、鉄損特性を劣化させる。また、鋼板中に形成された炭化物が破断の起点となり、延性を低下させる効果のある元素である。そのため、C含有量の上限は0.010%に制限する。C含有量は、好ましくは、0.007%以下である。なお、C含有量の下限は、特に規定しないが、精錬工程での脱炭コストを抑制する観点からは、0.0001%とするのが好ましい。C含有量は、より好ましくは0.0005%以上である。

[0022] M n : 2.0%以下

M nは、電磁鋼板の固有抵抗を増加させ、鉄損を低減する効果のある元素である。また、M nは、硫化物の微細析出を抑制する効果を有する。一方、M n含有量が2.0%を超えると、スラブ割れ等を起こし、製鋼工程での操業性を悪化させる。そのため、M n含有量の上限は2.0%とする。M n含有量の下限は、特に規定せず、例えば0.001%であってよい。上記のような効果をより有効に享受する観点からは、M n含有量は0.01%以上が好ましい。

[0023] A l : 2.0%以下

A lは、鋼の固有抵抗を高め、鉄損を低減する効果がある有用な元素である。しかし、A l含有量が2.0%を超えると、圧延することが困難になるため、A l含有量の上限は2.0%とする。なお、A lを低減し0.01%以下とすると、集合組織が改善され磁束密度が向上する。このため、磁束密

度を重視する場合は、A l 含有量を 0.01%以下とするのが好ましい。A l 含有量は、より好ましくは 0.003%以下である。A l 含有量の下限は、特に規定しないが、過度の低減は精錬コストの増加を招くため、A l 含有量は、0.0001%以上とするのが好ましい。

[0024] P : 0.20%以下

P は、鋼の強度調整に用いられる有用な元素である。しかし、P 含有量が 0.20%を超えると、鋼が脆化し、圧延することが困難となるため、P 含有量の上限は 0.20%とする。なお、P 含有量の下限は、特に規定しないが、精錬工程での脱 P コストを抑制する観点からは、0.001%とするのが好ましい。

[0025] S : 0.005%以下

S は、MnS 等の微細析出物を形成し、焼鈍時の粒成長を阻害して鉄損特性に悪影響を及ぼす。また、前記析出物が破断の起点となり延性を低下させる効果のある元素である。特に、S 含有量が 0.005%を超えると、その悪影響が顕著になるため、S 含有量の上限を 0.005%に制限する。S 含有量は、好ましくは 0.003%以下である。S 含有量の下限は、特に規定しないが、精錬工程での脱 S コストを抑制する観点からは、S 含有量は、0.0005%以上とするのが好ましい。

[0026] N : 0.010%以下、O : 0.010%以下

N および O は、微細析出物を形成し、歪取焼鈍時の粒成長を阻害して鉄損特性に悪影響を及ぼす元素である。特に、N および O の含有量が、それぞれ 0.010%を超えると、その悪影響が顕著になるため、N および O の上限をそれぞれ 0.010%に制限する。N および O の含有量は、好ましくはそれぞれ 0.003%以下である。N および O 含有量の下限は、特に規定しないが、精錬工程での精錬コストを抑制する観点からは、N および O 含有量は、それぞれ 0.0001%以上とするのが好ましい。

[0027] 次に、Si について説明する。

[0028] 表層部の平均 Si 含有量が 4.00%以上 6.30%以下、内層部の平均

S i 含有量が2.00%以上6.20%以下

S i は、電磁鋼板の電気抵抗を高め、渦電流損を低減する作用を有する元素である。表皮効果のため渦電流は電磁鋼板の表層部に集中しやすく、内層部に比べて表層部のS i 含有量を高くした方が効果的に鉄損を低減することができる。表層部の平均S i 含有量が4.00%未満または内層部の平均S i 含有量が2.00%未満であると、効果的に渦電流損を低減することができない。そのため、表層部の平均S i 含有量は、4.00%以上とする。表層部の平均S i 含有量は、好ましくは4.20%以上、より好ましくは4.50%以上である。また、内層部の平均S i 含有量は、2.00%以上とする。内層部の平均S i 含有量は、好ましくは2.50%以上、より好ましくは3.00%以上である。一方、表層部の平均S i 含有量が6.30%を超えると、後述する本発明の $\Delta S i$ の条件および製造方法を適用しても、高延性を保つことが困難になる。このため、表層部のS i 含有量は6.30%以下とする。また、内層部の平均S i 含有量は、後述の $\Delta S i$ の条件から上限を6.20%とする。表層部の平均S i 含有量は、好ましくは6.10%以下、より好ましくは6.00%以下とする。また、内層部のS i 含有量は、好ましくは6.00%以下、より好ましくは5.80%以下とする。

[0029] 本発明の一実施形態にかかる鋼板は、上記成分を基本成分として含有し、残部がF eおよび不可避免的不純物からなる成分組成とすることができる。ここで、本発明の一実施形態にかかる鋼板は、上記基本成分および残部のみを含有し、残部がF eおよび不可避免的不純物であることが好ましい。不可避免的不純物とは、原料、製造プロセス又は製造設備等から不可避免的に混入される不純物であり、本発明の目的・効果を阻害しない範囲で含有することが許容される不純物である。原料としては、鉄鉱石、還元鉄、スクラップ等が挙げられる。

[0030] 本発明の一実施形態にかかる無方向性電磁鋼板は、上記成分に加え、さらにS n、S b、C u、N i、C r、C a、M g、R E Mのなかから選択される1種以上を任意に含むことができる。なお、これらの成分は、任意に含有

できる成分であり、これらの成分の含有量は、それぞれ0質量%であってもよい。

[0031] Sn : 0.10%以下、Sb : 0.10%以下

SnおよびSbは、いずれも集合組織を大きく改善し、磁束密度を向上するとともにヒステリシス損をさらに低下させる効果がある。しかし、Sn、Sbの含有量がそれぞれ0.10%を超えると効果が飽和することに加えて、製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、Sn、Sbを含有する場合、Sn、Sbの含有量は、それぞれ0.10%以下とする。Sn、Sbを含有する場合、それぞれの含有量の下限は、特に限定されないが、上記効果が得られやすくなる点からは、Sn、Sbの含有量は、それぞれ0.001%以上が好ましい。

[0032] Cu : 2.0%以下、Ni : 2.0%以下、Cr : 2.0%以下

Cu、NiおよびCrはそれぞれ、鋼の固有抵抗を上昇させ、鉄損を低減させる効果がある元素である。しかし、Cu、Ni、Crの含有量が、それぞれ2.0%を超えると、鉄損低減の効果が飽和し、コストの上昇を招く。そのため、Cu、Ni、Crを含有する場合、それぞれの含有量を2.0%以下とする。Cu、Ni、Crを含有する場合、それぞれの含有量の下限は、特に限定されないが、上記効果が得られやすくなる点からは、Cu、Ni、Cr含有量は、それぞれ0.001%以上が好ましい。

[0033] Ca : 0.01%以下、Mg : 0.01%以下、REM : 0.03%以下

Ca、MgおよびREM（希土類金属）はそれぞれ、硫化物を形成してSを固定し、歪取焼鈍時の粒成長性を改善し、鉄損低減に寄与する元素である。ただし、過剰に含有させると経済性が悪化するおそれがあるため、Ca、Mg、REMを含有する場合、CaおよびMgの含有量をそれぞれ0.01%以下、REM含有量を0.03%以下とする。Ca、Mg、REMを含有する場合、それぞれの含有量の下限は、特に限定されないが、上記効果が得られやすくなる点からは、Ca、Mg、REMの含有量は、それぞれ0.001%以上が好ましい。なお、REMは、Sc、Y、およびランタノイド元

素の合計 17 元素の総称である。REM としては、これらの 17 元素のうちの 1 種以上を含有することができ、ここでいう REM 含有量は、これらの元素の合計含有量である。

[0034] 本発明の一実施形態にかかる無方向性電磁鋼板は、上記成分に加え、さらに Mo、B、Ti、Nb、V、Pb、As、Zn、Co、Ge、Ga のなかから選択される 1 種以上を任意に含むことができる。

[0035] Mo : 0 ~ 0.050%、B : 0 ~ 0.0020%

Mo および B は、鋼板の靱性を向上させる効果のある元素である。しかし、Mo の含有量が 0.050%、B の含有量が 0.0020% を超えると、鉄損が大幅に増加する。このため、Mo および B を含有する場合、Mo 含有量の上限は 0.050%、B 含有量の上限は 0.0020% とする。Mo および B を含有する場合、それぞれの含有量の下限は、特に限定されないが、上記効果が得られやすくなる点からは、Mo および B の含有量は、それぞれ 0.0005% 以上が好ましい。

[0036] Ti : 0 ~ 0.010%、Nb : 0 ~ 0.0050%、V : 0 ~ 0.050%、Pb : 0 ~ 0.020%

Ti、Nb、V および Pb は、微細析出物を形成し、結晶粒を微細化させることで、鋼板の硬度を向上させる効果のある元素である。しかし、Ti の含有量が 0.010%、Nb の含有量が 0.0050%、V の含有量が 0.050%、Pb の含有量が 0.020% を超えると、ヒステリシス損が著しく増加する。このため、Ti、Nb、V、Pb を含有する場合、Ti 含有量の上限は 0.010%、Nb 含有量の上限は 0.0050%、V 含有量の上限は 0.050%、Pb 含有量の上限は 0.020% とする。Ti、Nb、V、Pb を含有する場合、それぞれの含有量の下限は、特に限定されないが、上記効果が得られやすくなる点からは、Ti、V および Pb の含有量はそれぞれ 0.002% 以上、Nb 含有量は 0.0005% 以上が好ましい。

[0037] As : 0 ~ 0.020%

As は、鋼板の硬度を向上させる効果のある元素である。しかし、As の

含有量が0.020%を超えると、鋼が脆化し、圧延することが困難となる。このため、Asを含有する場合、As含有量の上限は0.020%とする。なお、As含有量の下限は、特に限定されないが、精錬工程での精錬コストを抑制する観点からは、0.0005%とするのが好ましい。

[0038] Zn : 0~0.010%

Znは、介在物を粗大化させ、鉄損を低減させる効果のある元素である。しかし、Znの含有量が、0.010%を超えると、上記の効果が飽和するだけでなく、鋼が脆化し、圧延することが困難となる。このため、Znを含有する場合、Zn含有量の上限は0.010%とする。Znを含有する場合、Zn含有量の下限は特に限定されないが、上記効果が得られやすくなる点からは、Zn含有量は、0.0005%以上が好ましい。

[0039] Co : 0~0.10%

Coは、磁束密度を向上させる効果のある元素である。しかし、Coの含有量が、0.10%を超えると、鋼が脆化し、圧延することが困難となる。このため、Coを含有する場合、Co含有量の上限は0.10%とする。Coを含有する場合、Co含有量の下限は特に限定されないが、上記効果が得られやすくなる点からは、Co含有量は、0.0010%以上が好ましい。

[0040] Ge : 0~0.030%、Ga : 0~0.030%

GeおよびGaは、いずれも集合組織を大きく改善し、磁束密度を向上させる効果のある元素である。しかし、Ge、Gaの含有量がそれぞれ0.030%を超えると効果が飽和することに加えて、製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、Ge、Gaを含有する場合、Ge、Gaの含有量は、それぞれ0.030%以下とする。Ge、Gaを含有する場合、それぞれの含有量の下限は特に限定されないが、上記効果が得られやすくなる点からは、Ge、Gaの含有量は、それぞれ0.0005%以上が好ましい。

[0041] なお、上記任意成分の含有量が、それぞれ上述した好適な下限値未満の場合、その成分は不可避免的不純物として含まれるものとする。

[0042] 本発明の電磁鋼板では、以上のような成分組成に加え、X線回折で測定し

た規則相由来の反射強度、および、電磁鋼板の表層部と内層部の平均Si濃度の差である ΔS_i を規定する。 F_e に添加するSi量を増加させて行くと、B2相および DO_3 相の規則相が形成されることはよく知られている。この形成された規則相は転位の動きを抑制するため、材料（電磁鋼板）の加工性低下の要因となる。本発明者らは、電磁鋼板表層に形成されるB2相が、材料（電磁鋼板）の伸びに大きく影響しており、電磁鋼板表層にB2相が一定量以上形成されると大幅に電磁鋼板の延性が低下することを確認した。そして、これが電磁鋼板の延性低下の一因であると推論した。詳細な検討により、以下の知見を見出した。電磁鋼板の表層部と内層部の平均Si含有量の差である ΔS_i を制御し、なおかつ電磁鋼板の製造過程における浸珪拡散処理工程後の冷却過程での冷却速度および鋼板にかかる張力を適切な値に制御する。これにより、表層でのB2相の形成を抑制し、電磁鋼板の延性を向上できる。

[0043] 本発明では上記のような検討結果から、下記（1）式を満たすことを規定する。

$$I_{B2} / I_{Fe} < 0.030 \quad \dots (1)$$

ここで、（1）式において、 I_{B2} は、X線回折で測定した $2\theta = 36.5^\circ$ 付近に現れる Fe_3Si のB2相由来の回折ピーク強度であり、 I_{Fe} は、X線回折で測定した $2\theta = 77.6^\circ$ 付近に現れるフェライト相由来の回折ピーク強度を示す。なお、「付近」とは、回折ピークのシフトを考慮したものである。通常、前記シフトは、 $\pm 0.1^\circ$ 程度の範囲となる。例えば、前記シフトを考慮すると、 Fe_3Si のB2相由来の回折ピークは、通常、 $2\theta = 36.4^\circ \sim 36.6^\circ$ 程度の範囲に現れる。また、フェライト相由来の回折ピークは、通常、 $2\theta = 77.5^\circ \sim 77.7^\circ$ 程度の範囲に現れる。ただし、前記シフトの大きさは、サンプル調整等によって変動する場合がある。本発明では、X線回折で測定した回折ピークから、 $2\theta = 36.5^\circ$ 付近に現れる Fe_3Si のB2相由来の回折ピーク強度と、 $2\theta = 77.6^\circ$ 付近に現れるフェライト相由来の回折ピーク強度を測定すればよい。（1）式

の左辺の I_{B2} / I_{Fe} は、地鉄由来の反射ピーク I_{Fe} を基準にした $B2$ 相由来の反射ピーク I_{B2} の大きさであり、 I_{B2} / I_{Fe} の値が大きいほど電磁鋼板表層に形成された $B2$ 相の量が多いことを示している。

[0044] 図3に、表層部の Si 含有量と I_{B2} / I_{Fe} の関係、図4に、 I_{B2} / I_{Fe} と電磁鋼板の全伸びの関係を示す。測定に使用した電磁鋼板は、以下のように準備した。後掲の表1のサンプル記号Aの成分組成を有するスラブを熱間圧延し、 $950^{\circ}C \times 30$ 秒の熱延板焼鈍を施した後に、冷間圧延を行い、板厚 0.1 mm の冷延板を作製した。該冷延板に、 $1200^{\circ}C$ で浸珪処理を施した後、拡散処理の保持時間（焼鈍時間）を調整することで、電磁鋼板の表層部と内層部の平均 Si 濃度の差である ΔSi を 0.2% 程度とした（浸珪拡散処理工程）。前記浸珪拡散処理工程後、 $600^{\circ}C$ から $200^{\circ}C$ までの温度域を、下記の冷却条件1で冷却し（冷却工程）、電磁鋼板を作製した。

（冷却条件1）平均張力： 5.0 MPa 、平均冷却速度： $50^{\circ}C / \text{秒}$

[0045] なお、 $600^{\circ}C$ から $200^{\circ}C$ までの温度域において鋼板に張力を付与する方法は、特に限定されないが、例えば、鋼板を搬送するロールの周速を制御してロール間で張力を付加する方法や、ロールによる曲げによって張力を付加する方法が挙げられる。また、前記張力は、例えば、ロール左右のロードセルの荷重（ kgf ）の合計値を、鋼板の断面積（＝板厚（ mm ） $\times$ 板幅（ mm ））（ mm^2 ）で割り、 MPa に換算することで得られる。 $600^{\circ}C$ から $200^{\circ}C$ までの温度域における平均張力は、 $600^{\circ}C$ から $200^{\circ}C$ までの温度域において鋼板に加えられた張力の平均値である。具体的には、前記張力の平均値は、 $600^{\circ}C$ から $200^{\circ}C$ に至るまでの間、上記のようにして得られた1秒毎の張力を算術平均したものである。また、上記の各温度は、鋼板の表面温度を意味し、表面温度計等で測定することができる。また、上記の平均冷却速度は、鋼板表面の平均冷却速度を意味する。上記の平均冷却速度は、 $(600^{\circ}C - 200^{\circ}C) / 600^{\circ}C$ から $200^{\circ}C$ までの冷却時間（秒）で求められる。

- [0046] 電磁鋼板の全伸びは、上記のように準備した電磁鋼板からJIS 5号試験片を採取し、ひずみ速度40%/minで引張試験を行い測定した。 $IB2/IFe$ は、前記の電磁鋼板からサンプルを採取し、Cotargetの $K\alpha$ 線源、出力40kV×135mAでX線回折測定を行い、 $2\theta=36.5^\circ$ 付近に現れる Fe_3Si のB2相由来の回折ピーク強度($IB2$)と、 $2\theta=77.6^\circ$ 付近に現れるフェライト相由来の回折ピーク強度(IFe)をもとに計算した。
- [0047] 図3の結果から分かるように、表層部のSi含有量の増加に伴って $IB2/IFe$ の値は0.030付近まで緩やかに増加していき、0.030以上で急激に上昇することが分かる。さらに、図4の結果から分かるように、 $IB2/IFe$ と電磁鋼板の全伸びには相関関係が存在することが分かる。このことから、 $IB2/IFe$ が0.030以上になると、 $IB2/IFe$ の値が急激に上昇し、それに伴って電磁鋼板の全伸びも急激に低下することが分かる。このため、 $IB2/IFe$ を0.030未満とする。一方で、B2相は少ないほど好ましいため、 $IB2/IFe$ の下限は設定しない。一例として、 $IB2/IFe$ は、0.005以上であってよい。
- [0048] 本発明では、さらに、電磁鋼板の表層部と内層部の平均Si含有量の差である ΔSi が0.10%以上2.00%以下であることを規定する。
- [0049] 図5に、冷却時に600℃から200℃までの温度域で鋼板に加わる平均張力を1.0MPa、4.0MPa、5.0MPaとした際の ΔSi と $IB2/IFe$ の関係を示す。測定に使用した電磁鋼板は、上記と同様の方法で作製した。ただし、拡散処理の保持時間(焼鈍時間)を調整することで、表層部の平均Si含有量を6.2%として ΔSi を変化させ、冷却時に600℃から200℃までの温度域の平均冷却速度を50℃/秒とし、鋼板に加わる平均張力を1.0MPa、4.0MPa、5.0MPaとして、電磁鋼板を作製した。 ΔSi はEPMA(Electron Probe Micro Analyzer)を用いて板厚方向断面におけるSi含有量分布を測定し、表層部および内層部の平均Si含有量の差から求めた。

[0050] なお、表層部の平均 S_i 含有量は、E P M A を用いて、表層部（ $0 \sim t/4$ の範囲、または、 $3t/4 \sim t$ の範囲）について、板厚方向に $0.5 \mu m$ 間隔で S_i 濃度を測定し、その平均値を、表層部の平均 S_i 含有量とした。内層部の平均 S_i 含有量は、E P M A を用いて、内層部（ $t/4$ より大きく、 $3t/4$ 未満の範囲）について、板厚方向に $0.5 \mu m$ 間隔で S_i 濃度を測定し、その平均値を、内層部の平均 S_i 含有量とした。

[0051] 図 5 に示すように、浸珪拡散処理工程後の冷却工程において、 $600^\circ C$ から $200^\circ C$ までの温度域における平均張力が $5.0 MPa$ 、および、 $4.0 MPa$ のサンプルでは、 ΔS_i が 0.10 質量% 未満では $IB2/IFe$ が 0.030 以上となるが、 ΔS_i を 0.1 質量% 以上とすることで $IB2/IFe$ が 0.030 未満となった。このことから、電磁鋼板表層の $B2$ 相を抑制し、電磁鋼板の伸びを改善するため、 ΔS_i は 0.10 質量% 以上とする。

[0052] 上記のメカニズムについては、 ΔS_i によって表層に発生する引張応力が規則相の形成を阻害したためと推察するが、必ずしも明らかでない。一方で、 ΔS_i が 2.00 質量% を超えると、 $IB2/IFe$ の低減効果が飽和し、また ΔS_i による内部応力が大きくなり鉄損が上昇するため、 ΔS_i の上限を 2.00 質量% とする。

[0053] [板厚]

無方向性電磁鋼板が薄すぎると、冷間圧延や焼鈍などの製造過程における取り扱いが困難となる場合があり、製造コストが増大する傾向となる。そのため、無方向性電磁鋼板の板厚 t は $0.01 mm$ 以上とすることが好ましい。一方、無方向性電磁鋼板が厚すぎると渦電流損が大きくなり、全鉄損が増加する傾向となる。そのため、無方向性電磁鋼板の板厚 t は $0.35 mm$ 以下とすることが好ましい。

[0054] [鉄損]

本発明においては、周波数： $1 kHz$ 、最大磁束密度： $1.0 T$ における鉄損（全鉄損）： $W10_{1k}$ (W/kg) と、前記板厚： t (mm) とが

、下記（２）式を満たすことが好ましい。

$$W10 \leq 1k / (t + 0.1) < 145 \dots (2)$$

[0055] 無方向性電磁鋼板の鉄損が上記（２）式の関係を満たす場合、該当する無方向性電磁鋼板を用いて作製したステータコアの発熱が抑制され、その結果、モータ効率をさらに向上させることができる。なお、鉄損は板厚に依存するため、上記（２）式では板厚の影響を考慮して鉄損の上限値を規定している。本発明では、無方向性電磁鋼板の鉄損が上記（２）式を満たす場合、高周波域での低鉄損を備えたと判断した。

[0056] [全伸び]

本発明の無方向性電磁鋼板は、全伸びが６．０％以上であることが好ましい。全伸びの測定は、無方向性電磁鋼板からＪＩＳ５号試験片を作製し、ひずみ速度４０％／minで引張試験を行い測定する。無方向性電磁鋼板が上記の条件を満たす場合、打抜きやカシメ加工によってモータコアに加工する際に、材料の割れ等の製品不良の発生を抑制することができる。本発明では、無方向性電磁鋼板の全伸びが上記範囲を満たす場合、高延性を備えたと判断した。

[0057] [製造方法]

本発明の無方向性電磁鋼板は、特に限定されないが、浸珪法を用いて製造することができる。浸珪法を用いる場合は、例えば、Ｓｉ含有量が板厚方向に一定である母材鋼板（浸珪拡散処理を施す前の鋼板）に対して浸珪拡散処理を施すことにより、母材鋼板両面の表層部のＳｉ含有量を高めることができる。

[0058] 浸珪拡散処理の方法は、特に限定されず、任意の方法で行うことができる。例えば、ＣＶＤ法により母材鋼板表面のＳｉ含有量を増加させる浸珪処理を行い、その後、熱処理を行ってＳｉを母材鋼板の内部へ拡散させる拡散処理を行うことができる。表層部と内層部のＳｉ含有量は、ＣＶＤ法による母材鋼板表面のＳｉ含有量の増加量や、拡散処理のための熱処理条件を調整することによって制御できる。ＣＶＤ法による浸珪処理と拡散処理で得られる

無方向性電磁鋼板は、例えば、図2に示したような板厚方向におけるSi含有量プロファイルを有する。

[0059] 浸珪処理に用いるSi含有ガスは、特に限定されるものではなく、 SiH_4 、 Si_2H_5 、 SiCl_4 等を用いることができる。この中でも、 SiCl_4 が好ましい。浸珪処理に用いるガスとして SiCl_4 を用いる場合には、浸珪処理温度を $1000\sim1250^\circ\text{C}$ の範囲にすることが好ましい。より好ましくは $1150\sim1250^\circ\text{C}$ である。また、浸珪処理の際の SiCl_4 の濃度は体積分率で $1.0\sim50\%$ とすることが望ましい。なお、浸珪処理の処理時間は、浸珪処理温度での保持時間である。

[0060] 浸珪処理後、 $1250\sim1000^\circ\text{C}$ の拡散処理温度でSiを含まない非酸化雰囲気中で、10秒以上保持する拡散処理を行う。拡散処理の処理時間（拡散処理温度での保持時間）を調整することで、表層部のSi含有量、内層部のSi含有量、 ΔSi を調整することができる。この際、板厚 t の鋼板では、浸珪処理と拡散処理の処理時間の合計が $(1500\times t)$ 秒を超えると、 ΔSi が 0.10 質量%未満となる。一方で、前記処理時間の合計が $(300\times t)$ 秒未満の場合、 ΔSi が 2.00 質量%超となる。このため、 ΔSi を 0.10 質量%以上、 2.00 質量%以下とするためには、浸珪処理と拡散処理の処理時間の合計を $(300\times t)$ 秒以上、 $(1500\times t)$ 秒以下とする。なお、前記 t は、鋼板の板厚（mm）である。本実施形態において、母材鋼板の板厚と、最終的に得られる無方向性電磁鋼板の板厚は、同じ厚さである。

[0061] また、浸珪処理および拡散処理の処理時間（浸珪処理温度および拡散処理温度での保持時間）は、目標とする浸珪量（表層部のSi含有量）に応じて、Si含有ガスの濃度および流量、母材鋼板のSi含有量および板厚、浸珪処理温度等により調整される。表層部のSi含有量を 4.00% 以上 6.30% 以下に制御するための浸珪処理の処理時間 T_1 （秒）と拡散処理の処理時間 T_2 （秒）は、実験的に求めることができる。一例として、板厚 t （mm）のサンプル（母材鋼板）に、浸珪処理温度 $1000\sim1250^\circ\text{C}$ で浸珪

処理を行い、その後、拡散処理温度 $1000 \sim 1250^{\circ}\text{C}$ で拡散処理を行う場合、好ましくは浸珪処理温度 $1150 \sim 1250^{\circ}\text{C}$ で浸珪処理を行い、その後、拡散処理温度 $1150 \sim 1250^{\circ}\text{C}$ で拡散処理を行う場合には、以下の(3)式を満たすことが好ましい。なお、後述の実施例では、以下の(3)式により、表層部の Si 含有量の制御を行った。

$$4.00 \leq [\text{Si}]_{\text{base}} + 2.7 \times \exp(-0.003 \times (T1 + T2) / t) + 0.0085 \times T1 / t \leq 6.30 \quad \dots (3)$$

ここで、(3)式において、 $[\text{Si}]_{\text{base}}$ は浸珪拡散処理工程前の鋼板（母材鋼板）の Si 含有量（％）、 t は鋼板（母材鋼板）の板厚（mm）、 $T1$ は浸珪処理の処理時間（秒）、 $T2$ は拡散処理の処理時間（秒）である。

[0062] 上記浸珪処理および拡散処理（浸珪拡散処理）を施した後、冷却工程で冷却を行う。本発明の冷却工程では、 600°C から 200°C までの温度域を、鋼板にかかる平均張力： 4.0 MPa 以上、かつ平均冷却速度： $20.0^{\circ}\text{C} / \text{秒}$ 以上で冷却する。

[0063] （母材鋼板の成分組成）

本発明の無方向性電磁鋼板の製造過程における母材鋼板（浸珪拡散処理を施す前の鋼板）の成分組成は、 Si を除き、上述した無方向性電磁鋼板の成分組成と同様の成分組成を有する。 Si を除く各元素の含有量およびその限定理由は、上述したものと同様であるので、ここでは Si を除き、説明を省略する。

[0064] 母材鋼板の Si 含有量（質量％）： 4.5% 以下

Si は、 4.5% を超えると非常に脆くなり、通板や冷間圧延時の破断の原因となる。このため、母材鋼板の Si 含有量は、 4.5% 以下が好ましい。母材鋼板の Si 含有量は、より好ましくは 4.0% 以下である。下限については特に定めないが、母材鋼板の Si 含有量が 1.0% 未満であると、浸珪処理によって目標の無方向性電磁鋼板の Si 含有量とするまでに要する時間が長くなり、製造性が低下する。そのため、CVD法によって無方向性電磁鋼板を製造する場合、母材鋼板の Si 含有量は 1.0% 以上が好ましい。

- [0065] 本発明では、前述の検討結果から、表層でのB 2相の形成抑制の効果を向上するために、浸珪拡散処理工程後の冷却工程で、平均冷却速度および張力を適切な値に制御し、 $IB2/IFe$ を0.030未満とするような熱処理を行う。そのためには、浸珪拡散処理工程の拡散処理において1250～1000℃で10秒以上保持し、なおかつ、浸珪処理と拡散処理の合計処理時間が所定の時間となるように処理した後に、冷却工程において鋼板にかかる平均張力を600℃から200℃までの温度域で4.0MPa以上とし、かつ平均冷却速度を20.0℃/秒以上とする。
- [0066] 浸珪拡散処理工程の拡散処理において1250～1000℃で10秒以上保持するのは鋼板組織を不規則相状態とするためである。保持時間を長くしても効果は飽和するため、長時間の保持は必要ない。
- [0067] 冷却工程においてB 2相は600℃以下の範囲で形成され始め、200℃付近までは規則化変態が生じる。このため、600℃から200℃までの温度域での冷却速度が重要である。600℃から200℃までの温度域の平均冷却速度が20.0℃/秒未満では、B 2相の形成を抑制することができない。このため、600℃から200℃までの温度域の平均冷却速度を20.0℃/秒以上に規定する。一方で、前記温度域の平均冷却速度の上限については規定しないが、200.0℃/秒以下であると、冷却歪みによる鉄損劣化の影響を抑制しやすくなるため、前記温度域の平均冷却速度は、200.0℃/秒以下とすることが好ましい。
- [0068] さらに、本発明者らが検討を行った結果、上記温度域における冷却速度に加えて、上記温度域における冷却過程で鋼板に加わる張力が鋼板表層でのB 2相の形成抑制に影響を与えていることを見出した。再び、図5を参照する。図5に示すように、冷却工程での平均張力が5.0MPa、および、4.0MPaのサンプルでは、 ΔSi が0.10質量%以上の範囲で $IB2/IFe$ が0.030未満の値となった。一方、冷却工程での平均張力が1.0MPaのサンプルでは、 ΔSi が2.00質量%以上でも $IB2/IFe$ が0.030以上となった。このことから、600℃から200℃までの温度

域で鋼板にかかる平均張力を4.0 MPa以上とすることを規定する。

[0069] 一方、上記温度域で鋼板にかかる平均張力の上限については規定しないが、平均張力を100 MPa以上とすると鋼板の破断の原因となる。そのため、前記平均張力は、100 MPa以下が好ましく、50 MPa以下がより好ましい。

[0070] なお、600℃を超える温度域においてはB2相が形成されないため、浸珪拡散処理工程後から600℃までの冷却過程での冷却速度や張力はB2相の形成に影響しない。このため、浸珪拡散処理工程後から600℃までの温度域における冷却速度や張力は特に定めない。ただし、設備負担なく冷却できる速度は300℃/秒以下であることから、前記温度域における平均冷却速度は300℃/秒以下が好ましい。また、製造性の観点から、前記平均冷却速度は1.0℃/秒以上が好ましい。また、前記温度域における張力についても特に規定しない。ただし、前記温度域で鋼板に加わる平均張力が10.0 MPaを超えると鋼板の破断の原因となるため10.0 MPa以下が好ましい。一方で、前記温度域における平均張力が0.5 MPa未満であると、たわみによる形状劣化が生じる場合があるため、前記温度域における平均張力は0.5 MPa以上が好ましい。

実施例

[0071] 本発明の効果を確認するために、以下に述べる手順で無方向性電磁鋼板を製造し、その磁気特性を評価した。ただし、本発明は、以下の実施例に限定されない。

[0072] (鋼スラブ)

まず、表1に示すような成分組成を有するサンプル記号A～Jの鋼スラブを用意した。なお、使用した鋼スラブにおけるSi以外の成分(C、Mn、Al、P、S、N、O、Sn、Sb、Cu、Ni、Cr、Ca、Mg、REM、Mo、B、Ti、Nb、V、Pb、As、Zn、Co、GeおよびGa)の含有量は、製造過程を通じて変化しないため、最終的に得た無方向性電磁鋼板における全板厚の平均含有量に等しい。

[0073] (熱間圧延、熱延板焼鈍)

前記鋼スラブを熱間圧延して熱延鋼板とし、次いで、前記熱延鋼板に 950°C で、 30 s の熱延板焼鈍を施した。

[0074] (冷間圧延)

次に、前記熱延板焼鈍後の熱延鋼板に冷間圧延を施して、表 2 に示した板厚 t の冷延鋼板とした。ただし、サンプル記号 C、F、H および J の鋼スラブを用いた熱延鋼板は、冷間圧延工程において破断したため（表 1 で、冷間圧延時破断「あり」と表記）、冷間圧延より後の処理を行わなかった。これらの熱延鋼板は、Si、Mn、Al、P の少なくとも 1 種の含有量が過剰であったため、冷間圧延工程において破断したと考えられる。

[0075] (浸珪拡散処理)

得られた冷延鋼板（母材鋼板）に、浸珪拡散処理を施して無方向性電磁鋼板を得た。具体的には、まず、 N_2 ガスと SiCl_4 を $10:1$ の体積比で混合させた雰囲気中、 1200°C で CVD 法により浸珪処理を施して鋼板表層部の Si 含有量を上昇させた。次いで、 N_2 雰囲気中、 1200°C で拡散処理（熱処理）を施して、鋼板表層の Si を内部へ拡散させた。浸珪処理、拡散処理の処理時間を表 2 に記載した。

[0076] (冷却工程)

浸珪拡散処理後の鋼板を、表 2 に記載した冷却条件で冷却（急冷）した。拡散処理の処理温度から 600°C までは、全てのサンプルを平均張力 1.0 MPa 、平均冷却速度 $10^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ で冷却し、 600°C から少なくとも 200°C の温度域までは、表 2 に記載した冷却条件の平均冷却速度と平均張力の値になるよう制御しながら冷却した。

以上の工程により、無方向性電磁鋼板を製造した。

[0077] (Si 含有量)

得られた無方向性電磁鋼板をカーボンモールドに埋め込み、EPMAを用いて板厚方向断面における Si 含有量分布を測定した。鋼板全板厚 t (mm) を基準として $0 \sim t/4$ の範囲および $3t/4 \sim t$ の範囲を表層部、 $t/4$

4より大きく、 $3t/4$ 未満の範囲を内層部と定義した。そして、EPMAから得られたSi含有量分布から、無方向性電磁鋼板の表層部と内層部における平均Si含有量、およびこれらの値の差である ΔSi を求めた。測定結果を表2に併記する。

[0078] なお、上述したように、Si以外の成分(C、Mn、Al、P、S、N、O、Sn、Sb、Cu、Ni、Cr、Ca、Mg、REM、Mo、B、Ti、Nb、V、Pb、As、Zn、Co、GeおよびGa)の含有量は製造過程を通じて変化しない。そのため、最終的に得た無方向性電磁鋼板における前記成分の含有量は、使用した鋼スラブにおける前記成分の含有量に等しい。

[0079] (鉄損)

得られた無方向性電磁鋼板のそれぞれから、幅30mm、長さ280mmの試験片を採取し、JIS C2550-1:2011に準拠し、エプスタイン試験で最大磁束密度:1.0T、周波数:1kHzにおける鉄損: W_{10-1k} (W/kg)を測定した。前記エプスタイン試験では、試験片の長さ方向が圧延方向(L方向)となるように採取したL方向試験片と、試験片の長さ方向が圧延直角方向(C方向)となるように採取したC方向試験片を等量用い、L方向とC方向における磁気特性の平均値を評価した。測定結果を表2に併記する。また、表2中、鉄損と板厚 t (mm)が下記(2)式の関係を満たすものを「(2)式判定」において「○」と表記し、満たさないものを「×」と表記した。無方向性電磁鋼板の鉄損が、下記(2)式を満たす場合、高周波域での低鉄損を備えると判断できる。

$$W_{10-1k} / (t + 0.1) < 145 \quad \dots (2)$$

[0080] 表2に示した結果から分かるように、本発明の条件を満たす無方向性電磁鋼板は、高周波鉄損が低いという、優れた特性を有していた。

[0081] (B2相)

得られた無方向性電磁鋼板のそれぞれから、30mm角のサンプルを採取し、サンプル表面に対してX線回折測定を行い、反射強度を測定した。測定

はC oターゲットのK α 線を線源として、出力40 kV $\times$ 135 mAのX線を照射し、測定を行った。上記の測定結果をもとに、 $2\theta = 36.5^\circ$ 付近に現れるF e₃S iのB 2相由来の回折ピーク強度をI B 2、 $2\theta = 77.6^\circ$ 付近に現れるフェライト相由来の回折ピーク強度をI F eとして、I B 2 / I F eを計算から求めた。I B 2 / I F eの算出結果を表2に併記する。また、表2中、下記(1)式を満たすものを、「(1)式判定」において「○」と表記し、満たさないものを「×」と表記した。

$$I B 2 / I F e < 0.030 \quad \dots (1)$$

[0082] 表2に示した結果から分かるように、本発明の条件を満たす無方向性電磁鋼板は、I B 2 / I F eが0.030未満であり、B 2相の形成を抑制できていた。

[0083] (延性)

得られた無方向性電磁鋼板のそれぞれから、圧延方向(L方向)を長手方向としたJ I S 5号試験片(平行部長さ60 mm、平行部幅25 mm)を切削加工により作製し、ひずみ速度40 % / m i nの条件で引張試験を少なくとも5回行い全伸びを測定した。その平均値を表2に併記する。無方向性電磁鋼板の全伸びが6.0 %以上であれば、高延性を備えると判断できる。

[0084] 表2に示した結果から分かるように、本発明の無方向性電磁鋼板は、高周波域での低鉄損と高延性を両立することができる。

[0085]

[表1]

サンプル 記号	成分組成(質量%)																冷間圧延時 破断	
	Si	C	Mn	Al	P	S	N	O	Sn	Sb	Cu	Ni	Cr	Ca	Mg	REM	その他元素	
A	3.62	0.0021	0.123	0.001	0.011	0.0021	0.0019	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
B	0.98	0.0030	0.327	0.001	0.013	0.0017	0.0019	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
C	4.71	0.0010	0.001	0.002	0.011	0.0021	0.0019	0.0016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	あり
D	3.50	0.0143	0.232	0.115	0.011	0.0019	0.0021	0.0013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
E	2.78	0.0041	1.951	0.003	0.011	0.0018	0.0019	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
F	3.40	0.0011	2.475	0.001	0.006	0.0015	0.0018	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	あり
G	3.56	0.0022	0.002	1.980	0.010	0.0014	0.0021	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
H	3.51	0.0019	0.014	2.371	0.021	0.0014	0.0022	0.0013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	あり
I	3.13	0.0088	0.170	0.219	0.196	0.0020	0.0019	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
J	3.52	0.0069	0.220	0.111	0.253	0.0013	0.0019	0.0017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	あり
K	3.95	0.0020	0.101	0.096	0.008	0.0046	0.0019	0.0013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
L	2.52	0.0022	0.089	0.107	0.009	0.0074	0.0018	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
M	2.55	0.0009	0.241	0.099	0.006	0.0018	0.0019	0.0013	0.094	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
N	2.45	0.0011	0.243	0.100	0.008	0.0015	0.0022	0.0015	-	0.087	-	-	-	-	-	-	-	なし
O	3.47	0.0022	0.214	0.113	0.009	0.0020	0.0020	0.0016	-	-	1.827	-	-	-	-	-	-	なし
P	2.99	0.0011	0.117	0.063	0.010	0.0013	0.0019	0.0015	-	-	-	1.891	-	-	-	-	-	なし
Q	4.20	0.0033	0.105	0.161	0.011	0.0014	0.0020	0.0014	-	-	-	-	1.969	-	-	-	-	なし
R	3.77	0.0011	0.080	0.086	0.007	0.0018	0.0022	0.0017	-	-	-	-	-	0.0085	-	-	-	なし
S	2.77	0.0011	0.109	0.081	0.008	0.0017	0.0018	0.0014	-	-	-	-	-	-	0.0087	-	-	なし
T	4.05	0.0018	0.104	0.074	0.012	0.0022	0.0019	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	0.0292	-	なし
U	3.43	0.0020	0.108	0.001	0.011	0.0015	0.0021	0.0017	0.032	0.009	0.221	0.316	0.208	0.0031	0.0006	0.0014	-	なし
V	3.47	0.0020	0.114	0.009	0.009	0.0020	0.0098	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
W	3.53	0.0021	0.090	0.011	0.009	0.0024	0.0124	0.0016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
X	3.52	0.0019	0.100	0.010	0.009	0.0022	0.0022	0.0096	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
Y	3.48	0.0021	0.093	0.011	0.008	0.0020	0.0020	0.0139	-	-	-	-	-	-	-	-	-	なし
Z	3.47	0.0021	0.094	0.010	0.009	0.0026	0.0022	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	-	Mo : 0.048	なし
AA	3.52	0.0020	0.111	0.008	0.009	0.0018	0.0018	0.0013	-	-	-	-	-	-	-	-	B : 0.0019	なし
AB	3.51	0.0021	0.108	0.008	0.009	0.0017	0.0018	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	Ti : 0.0097	なし
AC	3.51	0.0018	0.113	0.011	0.009	0.0018	0.0023	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	Nb : 0.0049	なし
AD	3.53	0.0020	0.083	0.009	0.008	0.0023	0.0023	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	-	V : 0.048	なし
AE	3.47	0.0020	0.088	0.009	0.009	0.0024	0.0018	0.0013	-	-	-	-	-	-	-	-	Pb : 0.018	なし
AF	3.50	0.0018	0.085	0.011	0.010	0.0025	0.0022	0.0016	-	-	-	-	-	-	-	-	As : 0.019	なし
AG	3.48	0.0017	0.116	0.011	0.009	0.0020	0.0022	0.0013	-	-	-	-	-	-	-	-	Zn : 0.0095	なし
AH	3.50	0.0019	0.095	0.009	0.013	0.0023	0.0018	0.0017	-	-	-	-	-	-	-	-	Co : 0.097	なし
AI	3.52	0.0021	0.113	0.010	0.012	0.0026	0.0022	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	-	Ge : 0.029	なし
AJ	3.48	0.0022	0.101	0.008	0.009	0.0025	0.0020	0.0013	-	-	-	-	-	-	-	-	Ga : 0.028	なし

※上記成分組成以外の残部は、Feおよび不可避免的不純物である。
※下線は、本発明の範囲外であることを示す。

[0086] [表2]

No.	母材鋼板		浸炭拡散処理				冷却条件*1		表層部の 平均Si含有量 (質量%)	内層部の 平均Si含有量 (質量%)	ΔSi (質量%)	板厚t (mm)	IB2/IFe	(1)式 判定	鉄損 Wt0.1k (W/kg)	(4)式 判定	全伸びB1 (%)	備考
	サンプル 記号	[Si] _{base} (質量%)	(3)式** の中央 値	浸炭処理 時間 T1(秒)	拡散処理 時間 T2(秒)	合計処理 時間 T1+T2 (秒)	平均冷却 速度 (°C/秒)	平均張力 (MPa)										
1	A	3.62	6.19	29	82	111	21	7.0	6.17	5.91	0.26	0.1	0.023	○	21.3	○	9.2	発明例
2	A	3.62	6.18	29	85	114	80	7.0	6.21	5.98	0.23	0.1	0.015	○	23.5	○	10.3	発明例
3	A	3.62	6.19	29	81	110	200	7.0	6.24	5.93	0.31	0.1	0.014	○	26.5	○	10.2	発明例
4	A	3.62	6.14	29	88	117	10	7.0	6.16	5.99	0.17	0.1	0.050	×	21.1	○	3.6	比較例
5	A	3.62	6.18	30	157	187	50	1.0	6.18	6.16	0.02	0.1	0.064	×	20.7	○	3.3	比較例
6	A	3.62	6.26	30	84	114	50	1.0	6.24	5.97	0.27	0.1	0.057	×	20.9	○	3.5	比較例
7	A	3.62	6.22	16	10	26	50	1.0	6.22	3.90	2.32	0.1	0.048	×	29.9	×	2.9	比較例
8	A	3.62	6.19	30	134	164	50	4.0	6.19	6.13	0.06	0.1	0.054	×	21.1	○	3.6	比較例
9	A	3.62	6.17	28	65	93	50	4.0	6.17	5.84	0.33	0.1	0.024	○	21.3	○	8.6	発明例
10	A	3.62	6.20	20	18	38	50	4.0	6.23	4.43	1.80	0.1	0.020	○	25.7	○	7.2	発明例
11	A	3.62	6.19	30	141	171	50	5.0	6.20	6.17	0.03	0.1	0.054	×	21.3	○	3.7	比較例
12	A	3.62	6.20	30	128	158	50	5.0	6.23	6.16	0.07	0.1	0.046	×	21.4	○	4.6	比較例
13	A	3.62	6.25	30	91	121	50	5.0	6.19	6.05	0.14	0.1	0.027	○	22.2	○	8.7	発明例
14	A	3.62	6.25	30	88	118	50	5.0	6.25	6.03	0.22	0.1	0.021	○	22.8	○	9.9	発明例
15	A	3.62	6.21	21	19	40	50	5.0	6.24	4.51	1.73	0.1	0.013	○	25.9	○	8.1	発明例
16	A	3.62	6.18	15	10	25	50	5.0	6.19	3.79	2.40	0.1	0.012	○	30.1	×	7.2	比較例
17	A	3.62	6.16	20	20	41	50	5.0	6.19	4.52	1.67	0.1	0.016	○	25.4	○	7.9	発明例
18	A	3.62	6.20	50	70	120	50	5.0	6.18	4.50	1.68	0.2	0.018	○	34.2	○	7.7	発明例
19	A	3.62	6.22	75	100	175	50	5.0	6.22	4.51	1.71	0.3	0.016	○	46.0	○	8.1	発明例
20	A	3.62	6.61	22	73	95	50	5.0	5.79	5.80	0.19	0.1	0.012	○	22.8	○	11.5	発明例
21	A	3.62	6.82	24	79	103	50	5.0	6.00	5.78	0.22	0.1	0.014	○	22.1	○	11.2	発明例
22	A	3.62	6.01	27	86	113	50	5.0	6.25	6.01	0.24	0.1	0.021	○	21.6	○	9.9	発明例
23	A	3.62	6.33	31	91	122	50	5.0	6.30	6.15	0.15	0.1	0.046	×	19.9	○	4.6	比較例
24	A	3.62	6.41	32	94	126	50	5.0	6.45	6.22	0.23	0.1	0.053	×	19.5	○	3.7	比較例
25	A	3.62	6.66	35	103	139	50	5.0	6.61	6.43	0.18	0.1	0.074	×	19.3	○	2.7	比較例
26	A	3.62	5.84	25	63	88	50	5.0	5.98	5.51	0.47	0.1	0.012	○	23.3	○	9.8	発明例
27	B	0.98	5.77	56	92	148	50	5.0	6.17	6.01	0.16	0.1	0.019	○	21.4	○	8.8	発明例
28	B	0.98	4.06	36	138	174	1	0.5	4.13	4.09	0.04	0.1	0.041	×	24.2	○	4.9	比較例
29	B	0.98	4.54	37	26	63	50	5.0	4.54	2.69	1.86	0.1	0.014	○	24.6	○	9.4	発明例
30	B	0.98	4.05	30	25	55	50	5.0	4.07	2.23	1.84	0.1	0.010	○	25.3	○	10.2	発明例
31	B	0.98	3.74	26	27	53	50	5.0	3.81	2.27	1.54	0.1	0.009	○	30.3	×	10.9	比較例
32	B	0.98	4.38	25	0	25	50	5.0	4.34	1.81	2.53	0.1	0.012	○	29.4	×	8.2	比較例
33	B	0.98	5.27	47	27	74	50	5.0	5.23	3.51	1.72	0.1	0.014	○	25.1	○	8.7	発明例
34	D	3.50	6.06	28	67	96	50	5.0	6.01	5.54	0.47	0.1	0.015	○	29.3	×	5.7	比較例
35	E	2.78	6.00	37	82	119	50	5.0	6.01	5.46	0.56	0.1	0.009	○	21.5	○	7.2	発明例
36	G	3.56	6.11	28	64	92	50	5.0	6.05	5.54	0.52	0.1	0.011	○	21.0	○	6.6	発明例
37	I	3.13	6.05	33	72	105	50	5.0	6.05	5.46	0.58	0.1	0.012	○	22.9	○	7.0	発明例
38	K	3.95	6.02	21	52	72	50	5.0	6.02	5.50	0.52	0.1	0.013	○	25.5	○	6.4	発明例
39	L	2.52	5.98	40	89	129	50	5.0	6.02	5.45	0.57	0.1	0.011	○	31.2	×	5.3	比較例
40	M	2.55	6.00	40	93	133	50	5.0	6.02	5.52	0.50	0.1	0.010	○	21.2	○	6.2	発明例
41	N	2.45	5.99	41	92	133	50	5.0	6.05	5.48	0.56	0.1	0.012	○	21.7	○	6.4	発明例
42	O	3.47	6.03	28	64	92	50	5.0	6.04	5.49	0.55	0.1	0.010	○	24.5	○	7.9	発明例
43	P	2.99	6.04	35	82	117	50	5.0	6.02	5.54	0.48	0.1	0.009	○	21.7	○	7.4	発明例
44	Q	4.20	6.03	17	48	65	50	5.0	5.96	5.51	0.45	0.1	0.009	○	22.8	○	7.7	発明例
45	R	3.77	5.99	23	55	78	50	5.0	5.98	5.45	0.53	0.1	0.013	○	22.1	○	8.1	発明例
46	S	2.77	5.98	37	87	124	50	5.0	6.01	5.52	0.49	0.1	0.014	○	21.9	○	8.5	発明例
47	T	4.05	6.04	19	46	65	50	5.0	6.02	5.45	0.57	0.1	0.010	○	21.2	○	9.1	発明例
48	U	3.43	5.97	28	68	96	50	5.0	6.01	5.51	0.50	0.1	0.011	○	20.7	○	8.8	発明例
49	V	3.47	6.02	28	65	93	50	5.0	5.95	5.47	0.48	0.1	0.010	○	25.8	○	11.7	発明例
50	W	3.53	6.08	28	65	93	50	5.0	5.97	5.53	0.44	0.1	0.012	○	28.5	×	10.8	比較例
51	X	3.52	6.06	28	65	93	50	5.0	5.97	5.47	0.50	0.1	0.010	○	26.1	○	10.9	発明例
52	Y	3.48	6.03	28	65	93	50	5.0	5.97	5.41	0.56	0.1	0.011	○	29.3	×	10.3	比較例
53	Z	3.47	6.02	28	65	93	50	5.0	5.93	5.49	0.44	0.1	0.009	○	23.8	○	13.9	発明例
54	AA	3.52	6.06	28	65	93	50	5.0	5.95	5.49	0.47	0.1	0.012	○	24.2	○	13.6	発明例
55	AB	3.51	6.05	28	65	93	50	5.0	6.02	5.49	0.53	0.1	0.011	○	24.7	○	9.8	発明例
56	AC	3.51	6.06	28	65	93	50	5.0	6.06	5.46	0.60	0.1	0.010	○	25.2	○	9.2	発明例
57	AD	3.53	6.08	28	65	93	50	5.0	6.01	5.49	0.53	0.1	0.011	○	24.3	○	8.6	発明例
58	AE	3.47	6.01	28	65	93	50	6.0	6.02	5.41	0.60	0.1	0.011	○	24.7	○	8.9	発明例
59	AF	3.50	6.04	28	65	93	50	5.0	5.93	5.43	0.51	0.1	0.012	○	23.8	○	8.7	発明例
60	AG	3.48	6.03	28	65	93	50	5.0	6.04	5.49	0.55	0.1	0.010	○	21.4	○	9.1	発明例
61	AH	3.50	6.04	28	65	93	50	5.0	6.00	5.50	0.51	0.1	0.012	○	22.1	○	8.2	発明例
62	AI	3.52	6.06	28	65	93	50	5.0	5.96	5.50	0.46	0.1	0.013	○	21.3	○	9.3	発明例
63	AJ	3.48	6.02	28	65	93	50	5.0	5.98	5.51	0.47	0.1	0.015	○	21.2	○	7.8	発明例

* 1 600°Cから200°Cまでの温度域における冷却条件
* 2 (3)式: $4.00 \leq [\text{Si}]_{\text{base}} + 2.7 \times \exp(-0.03 \times (T1+T2)/t) + 0.0085 \times T1/t \leq 6.30$
※下線は、本発明の範囲外であることを示す。

符号の説明

- [0087] 1 無方向性電磁鋼板
- 10 内層部
- 20 表層部

請求の範囲

- [請求項1] 板厚 t (mm) を基準として、 $0 \sim t/4$ の範囲および $3t/4 \sim t$ の範囲を表層部、 $t/4$ より大きく、 $3t/4$ 未満の範囲を内層部と定義した際に、
- 表層部の平均 S_i 含有量と内層部の平均 S_i 含有量に差を有する無方向性電磁鋼板であって、
- 質量%で、
- 全板厚の平均含有量で、
- C : 0.010%以下、
- Mn : 2.0%以下、
- Al : 2.0%以下、
- P : 0.20%以下、
- S : 0.005%以下、
- N : 0.010%以下、および
- O : 0.010%以下を含有し、
- 表層部の平均 S_i 含有量が4.00%以上6.30%以下であり、
- 内層部の平均 S_i 含有量が2.00%以上6.20%以下であり、
- 表層部の平均 S_i 含有量と内層部の平均 S_i 含有量の差である ΔS_i が0.10%以上2.00%以下であり、残部がFeおよび不可避免的不純物からなり、かつ
- 下記(1)式を満たす、無方向性電磁鋼板。
- $$IB2/IFe < 0.030 \quad \dots (1)$$
- ここで、(1)式において、 $IB2$ は、X線回折で測定した $2\theta = 36.5^\circ$ 付近に現れる Fe_3Si の $B2$ 相由来の回折ピーク強度であり、 IFe は、X線回折で測定した $2\theta = 77.6^\circ$ 付近に現れるフェライト相由来の回折ピーク強度である。
- [請求項2] さらに、質量%で、全板厚の平均含有量で、
- Sn : 0.10%以下、

S b : 0. 1 0 %以下、
C u : 2. 0 %以下、
N i : 2. 0 %以下、
C r : 2. 0 %以下、
C a : 0. 0 1 %以下、
M g : 0. 0 1 %以下、および
R E M : 0. 0 3 %以下

のなかから選択される1種以上を含む、請求項1に記載の無方向性電
磁鋼板。

[請求項3] さらに、質量%で、全板厚の平均含有量で、

M o : 0 ~ 0. 0 5 0 %、
B : 0 ~ 0. 0 0 2 0 %、
T i : 0 ~ 0. 0 1 0 %、
N b : 0 ~ 0. 0 0 5 0 %、
V : 0 ~ 0. 0 5 0 %、
P b : 0 ~ 0. 0 2 0 %、
A s : 0 ~ 0. 0 2 0 %、
Z n : 0 ~ 0. 0 1 0 %、
C o : 0 ~ 0. 1 0 %、
G e : 0 ~ 0. 0 3 0 %、および
G a : 0 ~ 0. 0 3 0 %

のなかから選択される1種以上を含む、請求項1または2に記載の無
方向性電磁鋼板。

[請求項4] 請求項1～3のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板の製造方法であ
って、

質量%で、
S i : 4. 5 %以下、
C : 0. 0 1 0 %以下、

Mn : 2.0%以下、
Al : 2.0%以下、
P : 0.20%以下、
S : 0.005%以下、
N : 0.010%以下、および
O : 0.010%以下を含有し、
さらに、任意選択的に、
Sn : 0.10%以下、
Sb : 0.10%以下、
Cu : 2.0%以下、
Ni : 2.0%以下、
Cr : 2.0%以下、
Ca : 0.01%以下、
Mg : 0.01%以下、
REM : 0.03%以下、
Mo : 0~0.050%、
B : 0~0.0020%、
Ti : 0~0.010%、
Nb : 0~0.0050%、
V : 0~0.050%、
Pb : 0~0.020%、
As : 0~0.020%、
Zn : 0~0.010%、
Co : 0~0.10%、
Ge : 0~0.030%、および
Ga : 0~0.030%のなかから選択される1種以上を含有し、残部がFeおよび不可避免的不純物からなる成分組成を有する鋼板に対して、

浸珪処理と拡散処理を施す浸珪拡散処理工程と、前記浸珪拡散処理工程後の鋼板を冷却する冷却工程を含み、

前記浸珪拡散処理工程の拡散処理において、 $1250\sim1000^{\circ}\text{C}$ の温度域で10秒以上保持し、

前記冷却工程において、 600°C から 200°C までの温度域を、鋼板にかかる平均張力： 4.0MPa 以上、かつ平均冷却速度： $20.0^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上で冷却し、

なおかつ、前記浸珪処理と前記拡散処理の合計処理時間が $(300\times t)$ 秒以上、 $(1500\times t)$ 秒以下（ t ：鋼板の板厚（mm））を満たし、さらに前記浸珪処理の処理時間と前記拡散処理の処理時間が下記（3）式を満たす、無方向性電磁鋼板の製造方法。

$$4.00 \leq [\text{Si}]_{\text{base}} + 2.7 \times \exp(-0.003 \times (T1 + T2) / t) + 0.0085 \times T1 / t \leq 6.30 \quad \cdots (3)$$

ここで、（3）式において、 $[\text{Si}]_{\text{base}}$ は浸珪拡散処理工程前の鋼板のSi含有量（%）、 t は鋼板の板厚（mm）、 $T1$ は浸珪処理の処理時間（秒）、 $T2$ は拡散処理の処理時間（秒）である。