

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、高周波域における鉄損が低い無方向性電磁鋼板に関する。また、本発明は前記無方向性電磁鋼板の製造方法に関する。

背景技術

[0002] 電気自動車やハイブリッド電気自動車などに用いられるモータは、小型化、高効率化の観点より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、高周波域における鉄損が低いことが求められる。

[0003] そこで、高周波域における低鉄損化のために、S i や A l などの合金元素の添加や、板厚の低減など、様々な手法が検討されてきた。

[0004] 例えば、特許文献 1 では、鋼板に対して浸珪焼鈍を施すことにより、板厚方向における S i 濃度分布を制御することが提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献 1：特開平 1 1－2 9 3 4 2 2 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、特許文献 1 で提案されているような従来の方法によれば、高周波域における鉄損に一定の改善が見られるが、依然として十分とはいえなかった。具体的には、前記従来の方法で得られる無方向性電磁鋼板を、ヒステリシス損の影響が大きい 4 0 0 H z 程度の周波数で駆動される電気機器の鉄心材料として使用した場合、鉄損を十分に低減できないという問題があった。

[0007] 本発明は、上記実状に鑑みてなされたものであり、4 0 0 H z 程度の周波数域における鉄損がさらに低減された無方向性電磁鋼板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] 本発明者らは、上記課題を解決する方法について鋭意検討した結果、400 Hz程度の周波数域における鉄損を低減するためには、鋼板の表層部と内層部の格子定数差によって生じる応力を低減すること、および不可避不純物として鋼中に含有されるNの平均含有量を低減することが重要であることを見出した。本発明は前記知見に基づいてなされたものであり、その要旨構成は以下のとおりである。

[0009] 1. Si含有量が全板厚の平均Si含有量未満の領域として定義される内層部と、前記内層部の両側に設けられた、Si含有量が全板厚の平均Si含有量以上の領域として定義される表層部とからなる無方向性電磁鋼板であって、

Siと、

全板厚における平均含有量で、

C : 0.020質量%以下、

Mn : 0.010質量%～2.0質量%、および

S : 0.0100質量%以下とを含有し、残部がFeおよび不可避不純物からなり、

前記表層部における平均Si含有量 $[Si]_1$ が2.5～7.0質量%であり、

前記内層部における平均Si含有量 $[Si]_0$ が1.5～5.0質量%である成分組成を有し、

前記表層部が5～50 MPaの面内引張応力を有し、

前記無方向性電磁鋼板の板厚 t が0.01～0.35 mmであり、

前記板厚 t に対する前記表層部の合計厚さ t_1 の比 t_1/t が0.10～0.70であり、

前記無方向性電磁鋼板の全板厚における平均N含有量 $[N]$ が40 ppm以下であり、

最大磁束密度：1.0 T、周波数400 Hzにおける鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)と、前記板厚 t (mm)とが下記(1)式を満たす無方向性電磁鋼板。

$$W_{10/400} \leq 8 + 30t \quad \cdots (1)$$

[0010] 2. 前記成分組成が、全板厚における平均含有量で、

Al : 0.10質量%以下、

P : 0.10質量%以下、

Sn : 0.10質量%以下、および

Sb : 0.10質量%以下からなる群より選択される少なくとも1つをさらに含有する、上記1に記載の無方向性電磁鋼板。

[0011] 3. さらに、前記無方向性電磁鋼板の表面から板厚の1/4の深さの面における方位分布関数の $\Phi_2 = 45^\circ$ 断面において、 $\{111\}$ 面集積度に対する $\{100\}$ 面集積度の比 $\{100\} / \{111\}$ が55~90%である集合組織を有する、上記1または2に記載の無方向性電磁鋼板。

[0012] 4. 前記成分組成が、さらに下記(2)式を満たす、上記1~3のいずれか一項に記載の無方向性電磁鋼板。

$$[Mn][S] \leq 0.0030 \quad \cdots (2)$$

ただし、 $[Mn]$ 、 $[S]$ はそれぞれMn、Sの全板厚における平均含有量(質量%)である。

[0013] 5. 上記1~4のいずれか一項に記載の無方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

Si含有量が1.5~5.0質量%である鋼板に、SiCl₄雰囲気中、1000℃以上、1300℃以下の浸珪処理温度で浸珪処理を施し、

前記浸珪処理後の鋼板にN₂雰囲気中、950℃以上、1300℃以下の温度で拡散処理を施し、

前記拡散処理後の鋼板を、拡散処理温度から900℃までの温度域における平均冷却速度 v_1 : 5~20℃/s、900℃から100℃までの温度域における平均冷却速度 v_2 : 30~100℃/sの条件で冷却する、無方向性電磁鋼板の製造方法。

発明の効果

[0014] 本発明によれば、400Hz程度の周波数域における鉄損がさらに低減された無方向性電磁鋼板を提供することが出来る。

図面の簡単な説明

[0015] [図1]本発明の一実施形態における無方向性電磁鋼板の構造を示す模式図である。

[図2]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]板厚 t に対する前記表層部の合計厚さ t_1 の比 t_1/t と鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)との相関を示すグラフである。

[図4]面内引張応力 (MPa) と鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)との相関を示すグラフである。

[図5]冷却工程における拡散処理温度から900℃までの温度域における平均冷却速度 v_1 ($^{\circ}C/s$) と鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)との相関を示すグラフである。

[図6]冷却工程における900℃から100℃までの温度域における平均冷却速度 v_2 ($^{\circ}C/s$) と鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)との相関を示すグラフである。

[図7]冷却工程における900℃から100℃までの温度域における平均冷却速度 v_2 ($^{\circ}C/s$) と無方向性電磁鋼板の全板厚における平均N含有量 [N] (ppm)との相関を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0016] 以下、本発明を実施する方法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。

[0017] [無方向性電磁鋼板]

図1は、本発明の一実施形態におけ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、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。

[0018] 図2に示した例では、本発明の無方向性電磁鋼板1（以下、単に「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Si含有量が連続的に減少するSi含有量分布を有している。なお、前記Si含有量分布は、鋼板の板厚方向全域にわたってSi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、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Si含有量分布であってもよい。また、鋼板表面付近のSi量が若干低下していてもよく、つまり、全板厚の平均Si含有量未満となる内層部と、前記内層部の両側に設けられた、Si含有量が全板厚の平均Si含有量以上となる表層部とからなればよい。

[0019] ここで、Si含有量が全板厚の平均Si含有量以上の領域を表層部、Si含有量が全板厚の平均Si含有量未満の領域を内層部と定義すると、図1に示すように、本発明の無方向性電磁鋼板1は、内層部10と、内層部10の両側に設けられた表層部20からなるということができる。

[0020] [成分組成]

まず、本発明の無方向性電磁鋼板の成分組成について説明する。本発明の一実施形態における無方向性電磁鋼板は、Si、C、Mn、およびSを含有し、残部がFeおよび不可避不純物からなる成分組成を有する。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、以下の説明において、Siを除く各元素の含有量は、鋼板の全板厚における当該元素の平均含有量を指すものとする。

[0021] C：0.020%以下

Cは磁気特性に対して有害な元素であり、C含有量が0.020%を超えると磁気時効により鉄損が著しく増大する。したがって、C含有量は0.020%以下とする。一方、磁気特性の観点からはC含有量が低ければ低いほど好ましいため、C含有量の下限はとくに限定されない。しかし、過度の低減は製造コストの増加を招くことから、C含有量は0.0001%以上とす

ることが好ましく、0.001%以上とすることがより好ましい。

[0022] Mn : 0.010%~2.0%

Mnは熱間加工性を改善するのに有効な元素である。また、Mnは鋼板の固有抵抗を増加させ、その結果、鉄損を低減する効果を有する。前記効果を得るために、Mn含有量を0.010%以上とする。一方、Mn含有量が2.0%を超えると製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、Mn含有量は2.0%以下とする。

[0023] S : 0.0100%以下

Sは、微細な析出物の形成および粒界への偏析により、鉄損を増大させる。そのため、S含有量は0.0100%以下とする。一方、鉄損の観点からはS含有量が低ければ低いほど好ましいため、S含有量の下限はとくに限定されない。しかし、過度の低減は製造コストの増加を招くことから、S含有量は0.0001%以上とすることが好ましい。

[0024] $[Si]_1$: 2.5~7.0%

Siは、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。表層部の平均Si含有量 ($[Si]_1$) が2.5%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、表層部における平均Si含有量は2.5%以上、好ましくは3.0%以上、より好ましくは3.5%超とする。一方、表層部における平均Si含有量が7.0%を超えると、飽和磁化の低下により磁束密度が低下することに加え、無方向性電磁鋼板の製造性が低下する。そのため、表層部における平均Si含有量は7.0%以下、好ましくは6.5%未満、より好ましくは6.0%以下とする。なお、表層部における平均Si含有量が2.5~7.0%であるとは、無方向性電磁鋼板の一方の面における表層部（第1の表層部）における平均Si含有量が2.5~7.0%であり、かつ該無方向性電磁鋼板の他方の面における表層部（第2の表層部）における平均Si含有量が2.5~7.0%であることを意味する。第1の表層部における平均Si含有量と第2の表層部における平均Si含有量とは同じであっても、異なってもよい。

[0025] $[Si]_0$: 1.5 ~ 5.0%

内層部における平均Si含有量 ($[Si]_0$) が1.5%未満であると渦電流損が増加する。そのため、内層部における平均Si含有量は1.5%以上とする。一方、内層部における平均Si含有量が5.0%を超えると、モータコアの打ち抜き時にコアが割れるといった問題が生じる。そのため、内層部における平均Si含有量は5.0%以下、好ましくは4.0%以下とする。

[0026] 本発明の一実施形態では、無方向性電磁鋼板が、上記元素を含み、残部がFeおよび不可避不純物からなる成分組成を有する。

[0027] [任意添加成分]

本発明の他の実施形態においては、上記成分組成が、さらに任意に、Al、P、Sn、およびSbからなる群より選択される少なくとも1つを、以下に記す含有量で含有することができる。なお、以下に記す各元素の含有量は、鋼板の全板厚における当該元素の平均含有量を指すものとする。

[0028] Al: 0.10%以下

Alは鋼板の固有抵抗を増加させる作用を有する元素であり、Alを添加することにより鉄損をさらに低減することができる。しかし、Al含有量が0.10%を超えると製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、Alを添加する場合、Al含有量は0.10%以下とする。一方、Al含有量の下限はとくに限定されないが、Alを添加する場合、添加効果を高めるという観点からは、Al含有量を0.01%以上とすることが好ましい。

[0029] P: 0.10%以下

Pを添加することにより、集合組織を大きく改善し、磁束密度をさらに向上させるとともにヒステリシス損をさらに低下させることができる。また、Pを添加することにより、高温焼鈍時における鋼板の窒化を抑制し、鉄損の増加をさらに抑制することができる。しかし、P含有量が0.10%を超えると効果が飽和することに加えて、製造性の低下を招く。そのため、Pを添加する場合、P含有量は0.10%以下とする。一方、P含有量の下限はと

くに限定されないが、Pの添加効果を高めるという観点からは、P含有量を0.001%以上とすることが好ましい。

[0030] Sn : 0.10%以下

Pと同様に、Snを添加することにより、集合組織を大きく改善し、磁束密度をさらに向上させるとともにヒステリシス損をさらに低下させることができる。また、Snを添加することにより、高温焼鈍時における鋼板の窒化を抑制し、鉄損の増加をさらに抑制することができる。Sn含有量が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を添加する場合、Sn含有量は0.10%以下とする。一方、Sn含有量の下限はとくに限定されないが、Snの添加効果を高めるという観点からは、Sn含有量を0.001%以上とすることが好ましい。

[0031] Sb : 0.10%以下

PおよびSnと同様に、Sbを添加することにより、集合組織を大きく改善し、磁束密度をさらに向上させるとともにヒステリシス損をさらに低下させることができる。また、Sbを添加することにより、高温焼鈍時における鋼板の窒化を抑制し、鉄損の増加をさらに抑制することができる。Sb含有量が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、Sbを添加する場合、Sb含有量は0.10%以下とする。一方、Sb含有量の下限はとくに限定されないが、Sbの添加効果を得るという観点からは、Sb含有量を0.001%以上とすることが好ましい。

[0032] [Mn][S] ≤ 0.0030

MnとSを含有する鋼では、1000℃未満といった比較的低温での焼鈍中にMnSが析出する。そして、析出したMnSにより結晶粒成長が阻害され、最終的に得られる無方向性電磁鋼板の結晶粒サイズが小さくなり、その結果、ヒステリシス損が増加する。これに対して、本発明では1000℃以上の比較的高温で浸珪処理を行うため、MnSが固溶して粒成長を促すこと

ができる。しかし、Mnの平均含有量とSの平均含有量の積[Mn][S]が0.0030を超えると、析出したままのMnSによって浸珪処理時の粒成長が阻害され、ヒステリシス損が増加する。したがって、浸珪処理中のMnSの析出に起因するヒステリシス損の増加を抑制するという観点からは、上記成分組成が、さらに下記の式の条件を満たすことが好ましい。

$$[Mn][S] \leq 0.0030$$

ただし、[Mn]、[S]はそれぞれMn、Sの全板厚における平均含有量（質量%）である。一方、[Mn][S]の下限は特に限定されないが、製造性およびコストの観点から、0.000005以上とすることが好ましい。

[0033] [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り、製造コストが増大する。そのため、無方向性電磁鋼板の板厚 t は0.01mm以上とする。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。そのため、 t は0.35mm以下とする。

[0034] [t_1/t]

次に、無方向性電磁鋼板の板厚 t に対する表層部の合計厚さ t_1 の比 t_1/t （複層比）が磁気特性に与える影響について検討するために、 t_1/t が異なる無方向性電磁鋼板を以下の手順で作製し、その磁気特性を評価した。ここで、「表層部の合計厚さ」とは、無方向性電磁鋼板の両面に設けられている表層部の厚さの和を指す。また、表層部とは、上述したように、Si含有量が全板厚の平均Si含有量以上の領域として定義される。

[0035] まず、C：0.005%、Si：2.0%、Mn：0.05%、S：0.001%、Sn：0.04%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スラブを熱間圧延して熱延鋼板とした。前記熱延鋼板に対して、950℃×30sの熱延板焼鈍を施し、その後、前記熱延板焼鈍後の鋼板を冷間圧延し、板厚：0.2mmの冷延鋼板とした。次に、前記冷延鋼板に、SiCl₄雰囲気中、浸珪処理温度1200℃で浸珪処理を施

し、鋼板表面にSiを堆積させた後に、N₂雰囲気中、拡散処理温度1200℃で拡散処理を行って表層部平均Si含有量 $[Si]_1$ を4.0%、内層部平均Si含有量 $[Si]_0$ を2.2%とした。その後、前記拡散処理温度から900℃までの温度域における平均冷却速度 v_1 : 15℃/s、900℃から100℃までの温度域における平均冷却速度 v_2 : 40℃/sの条件で、100℃以下まで冷却した。得られた無方向性電磁鋼板における比 t_1/t は0.05~0.80であった。

[0036] 得られた無方向性電磁鋼板のそれぞれから試験片を採取し、エプスタイン試験を行って最大磁束密度: 1.0T、周波数400Hzにおける鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)を評価した。具体的な評価方法は、実施例に記載した方法と同様とした。

[0037] 図3に、 t_1/t と $W_{10/400}$ (W/kg)との相関を示す。この結果より、 t_1/t が0.10~0.70の場合に鉄損が大きく低下していることがわかる。この鉄損の低下は、以下の理由によると考えられる。まず、 t_1/t が0.10未満である場合、高抵抗である表層部の割合が低いため、表層部に集中する渦電流を効果的に低減することができない。一方、 t_1/t が0.70を超える場合には表層部と内層部の透磁率差が小さくなるため、内層部にまで磁束が浸透し、内層部からも渦電流損が発生する。したがって、 t_1/t を0.10~0.70とすることによって鉄損を低減できる。以上の理由から、本願発明では板厚 t に対する表層部の合計厚さ t_1 の比 t_1/t を0.10~0.70とする。

[0038] [面内引張応力]

無方向性電磁鋼板のさらなる低鉄損化を図るべく検討したところ、無方向性電磁鋼板には内部応力として、面内引張応力が生じていることがわかった。前記面内引張応力が無方向性電磁鋼板の磁気特性に及ぼす影響について検討するために以下の試験を行った。

[0039] まず、C: 0.004%、Si: 2.5%、Mn: 0.07%、S: 0.002%、Sn: 0.04%、およびP: 0.01%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スラブを熱間圧延して熱延鋼板とした。前記熱延鋼板に対して、 $950^{\circ}\text{C} \times 30\text{ s}$ の熱延板焼鈍を施し、その後、前記熱延板焼鈍後の鋼板を冷間圧延し、板厚： 0.2 mm の冷延鋼板とした。次に、前記冷延鋼板に、 SiCl_4 雰囲気中、浸珪処理温度 1250°C で浸珪処理を施し、鋼板表面に Si を堆積させた後に、 N_2 雰囲気中、拡散処理温度 1100°C で拡散処理を行ってその後、前記拡散処理温度から 900°C までの温度域における平均冷却速度 $v_1: 15^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、 900°C から 100°C までの温度域における平均冷却速度 $v_2: 40^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の条件で、 100°C 以下まで冷却した。得られた無方向性電磁鋼板における表層部平均 Si 含有量 $[\text{Si}]_1$ は $3.0 \sim 7.0\%$ 、内層部平均 Si 含有量 $[\text{Si}]_2$ は $2.2 \sim 2.7\%$ 、 t_1/t は 0.30 であった。

[0040] 得られた無方向性電磁鋼板のそれぞれから試験片を採取し、エプスタイン試験を行って最大磁束密度： 1.0 T 、周波数 400 Hz における鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)を評価した。具体的な評価方法は、実施例に記載した方法と同様とした。

[0041] 次に、面内引張応力の測定を以下の手順で行った。まず、得られた無方向性電磁鋼板の片面からフッ酸による化学研磨を施し、研磨後のサンプルの表面が表層部と内層部になるよう、前記サンプルの板厚 t_s が 0.1 mm になるまで研磨した。化学研磨後のサンプルは、表層部が内側になるように反ることから、研磨前のサンプルには表層部の面内に引張応力が生じていることが分かる。そこで、得られたサンプルの反り量の指標である曲率半径 r から、下記の式を用いて前記無方向性電磁鋼板の面内引張応力を算出した。

$$\text{面内引張応力 (MPa)} = t_s \times E / (4 \times r)$$

ここで、

t_s ：サンプルの板厚 $= 0.1\text{ mm}$

E ：ヤング率 $= 190\text{ GPa}$

r ：曲率半径 (mm) である。

[0042] 図4に、面内引張応力 (MPa) と $W_{10/400}$ (W/kg) との相関を示す。こ

の結果より、面内引張応力が5～50 MPaの場合に鉄損が低下していることがわかる。これは次のような理由によると考えられる。すなわち、表層部の面内に生じている引張応力によって、磁化容易軸が面内方向となることで、表層に磁束が集中し、渦電流損が減少する。しかし、内部応力が過度に大きいと、表層部へ磁束が集中して渦電流損は低下するが、ヒステリシス損が大幅に増加するため、結果的に鉄損が増加する。400 Hz程度の周波数域における鉄損には、渦電流損だけでなくヒステリシス損も大きく影響するため、本願発明では400 Hz程度の周波数域における鉄損低減のため、表層部の面内引張応力を5～50 MPaとする。

[0043] なお、表層部の面内引張応力は主として表層部と内層部のSi濃度差： ΔSi ($[Si]_1 - [Si]_0$)によって生じていると考えられるため、本願発明の内部応力を得るためには ΔSi を1.0%以上とすることが好ましい。一般的には、 $[Si]_1$ が $[Si]_0$ より高いため、言い換えると、 $[Si]_1 \geq \{[Si]_0 + 1.0 \text{ 質量\%}\}$ とすることが好ましい。

[0044] [平均N含有量]

本発明においては、無方向性電磁鋼板の全板厚における平均N含有量[N]を40 ppm以下とする。その限定理由については後述する。

[0045] [鉄損]

本発明における鉄損は、最大磁束密度1.0 T、周波数400 Hzにおける鉄損（全鉄損） $W_{10/400}$ (W/kg)で評価した。本発明の無方向性電磁鋼板は、 $W_{10/400}$ (W/kg)と、板厚 t (mm)とが、下記の式を満たす。これは、下記の式の関係を満たさない場合、ステータコアの発熱が非常に大きくなり、モータ効率が著しく低下してしまうためである。なお、鉄損は板厚に依存するため、下記の式では板厚の影響を考慮して鉄損の上限値を規定した。

$$W_{10/400} \leq 8 + 30t$$

[0046] 電磁鋼板では、通常、磁束密度を高くすると鉄損が増大してしまうため、一般的なモータコアは磁束密度が1.0 T程度となるように設計される。これに対して、本発明の無方向性電磁鋼板は、上述したように鋼板の表層部と

内層部の成分組成、面内引張応力および複層比を制御することにより、相反する性質である高磁束密度と低鉄損とを両立させている。

[0047] [集合組織]

無方向性電磁鋼板において $\{100\}$ 面を増やし、 $\{111\}$ 面を減らすことで該無方向性電磁鋼板の面内に磁化しやすくなるため、磁束密度がさらに向上するとともにヒステリシス損を一層低下させることができる。そのため、前記無方向性電磁鋼板の表面から板厚 t の $1/4$ の深さの面における方位分布関数 (ODF) の $\Phi_2 = 45^\circ$ 断面において、 $\{111\}$ 面集積度に対する $\{100\}$ 面集積度の比 $\{100\} / \{111\}$ を 55% 以上とすることが好ましい。一方、前記 $\{100\} / \{111\}$ が過度に大きくなるとコアの加工性が低下するおそれがある。そのため、 $\{100\} / \{111\}$ は 90% 以下とすることが好ましい。

[0048] なお、 $\{100\}$ 面の割合を増加させるためには、浸珪処理の際に昇温過程での 200°C から浸珪温度までの平均昇温速度を $20^\circ\text{C}/\text{s}$ 以上とすることや、偏析元素である P、Sn、Sb の少なくとも 1 つを適量添加することが有効である。

[0049] [製造方法]

本発明の無方向性電磁鋼板は、特に限定されることないが、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、Si 含有量が厚さ方向に一定である鋼板に対して浸珪処理および拡散処理を施すことにより、鋼板両面の表層部の Si 含有量を高めることができる。浸珪法により製造される無方向性電磁鋼板は、例えば、図 2 (a) に示したような Si 含有量プロファイルを有する。

[0050] 以下、本発明の一実施形態における、浸珪法を用いた無方向性電磁鋼板の製造方法について説明する。

[0051] 本発明の一実施形態における無方向性電磁鋼板の製造方法においては、鋼板に対して次の (1) ~ (3) の工程を順次施すことにより、無方向性電磁鋼板を製造する。

(1) 浸珪処理

(2) 拡散処理

(3) 冷却

[0052] 前記処理を施す対象である鋼板としては、Si含有量が1.5～5.0%である鋼板を用いればよい。前記鋼板は、板厚方向に略均一な組成を有する鋼板を用いることが好ましい。前記鋼板のSi以外の成分組成は、とくに限定されないが、上述した無方向性電磁鋼板と成分組成と同様とすることができる。

[0053] 本発明の一実施形態においては、前記処理対象の鋼板としては、
Si : 1.5～5.0%、
C : 0.020%以下、
Mn : 0.010～2.0%、および
S : 0.0100%以下を含有し、残部がFeおよび不可避不純物からなる成分組成を有する鋼板を用いることが好ましい。

[0054] また、本発明の他の実施形態においては、前記鋼板の成分組成は、
Al : 0.10質量%以下、
P : 0.1質量%以下、
Sn : 0.10質量%以下、および
Sb : 0.10質量%以下からなる群より選択される少なくとも1つをさらに含有することができる。

[0055] 前記鋼板の成分組成は、さらに下記の式を満たすことが好ましい。

$$[Mn][S] \leq 0.0030$$

ただし、[Mn]、[S]はそれぞれMn、Sの全板厚における平均含有量（質量%）である。

[0056] (1) 浸珪処理

まず、前記鋼板に対して浸珪処理を施す。前記浸珪処理は、SiCl₄雰囲気中、1000℃以上、1300℃以下の浸珪処理温度で行う。浸珪処理温度が1000℃未満である場合、SiCl₄と母材の反応が遅くなるため、製

造性が低下し、コストが増加する。また、浸珪処理によって鋼板表層部の S i 含有量が増加すると融点が低下するため、1300℃を超える高温で浸珪処理を施すと、鋼板が炉内で破断し、製造性が低下する。したがって、浸珪処理温度は1000℃以上、1300℃以下とする。

[0057] (2) 拡散処理

次に、前記浸珪処理後の鋼板に拡散処理を施す。前記拡散処理は N₂ 雰囲気中、950℃以上、1300℃以下の温度で行う。拡散処理は A r 雰囲気で行うこともできるが、コストが上がるため現実的ではなく、工業的な観点から N₂ 雰囲気下で行うこととする。また、拡散処理を950℃未満の温度で行うと、拡散速度が遅くなるため、製造性が低下する。一方、浸珪処理によって鋼板表層部の S i 含有量が増加すると融点が低下するため、1300℃を超える高温で拡散処理を施すと、鋼板が炉内で破断し、製造性が低下する。したがって、拡散処理の温度は950℃以上、1300℃以下とする。

[0058] (3) 冷却

次いで、前記拡散処理後の鋼板を、拡散処理温度から900℃までの温度域における平均冷却速度 v_1 : 5~20℃/s、900℃から100℃までの温度域における平均冷却速度 v_2 : 30~100℃/s の条件で冷却する。

[0059] ここで、前記冷却工程における平均冷却速度を決定するために行った実験について説明する。

[0060] まず、C : 0.005%、S i : 2.5%、M n : 0.06%、S : 0.003%、S n : 0.06%、および P : 0.06% 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スラブを熱間圧延して熱延鋼板とした。前記熱延鋼板に対して、950℃×30s の熱延板焼鈍を施し、その後、前記熱延板焼鈍後の鋼板を冷間圧延し、板厚 : 0.2mm の冷延鋼板とした。次に、前記冷延鋼板に、S i C l₄ 雰囲気中、浸珪処理温度1200℃で浸珪処理を施し、鋼板表面に S i を堆積させた後に、N₂ 雰囲気中、拡散処理温度1100℃で拡散処理を行って表層部平均 S i 含有量 [S i]₁ を4.5%とした。その後、前記拡散処理温度から900℃までの温度域

における平均冷却速度 v_1 : $5 \sim 35^\circ\text{C}/\text{s}$ 、 900°C から 100°C までの温度域における平均冷却速度 v_2 : $5 \sim 120^\circ\text{C}/\text{s}$ の条件で、 100°C 以下まで冷却した。得られた無方向性電磁鋼板における比 t_1/t は 0.30 であった。

- [0061] 得られた無方向性電磁鋼板のそれぞれから試験片を採取し、エプスタイン試験を行って最大磁束密度: 1.0 T 、周波数 400 Hz における鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg) を評価した。具体的な評価方法は、実施例に記載した方法と同様とした。
- [0062] 図5に、平均冷却速度 v_2 を $45^\circ\text{C}/\text{s}$ で一定とした際の、平均冷却速度 v_1 ($^\circ\text{C}/\text{s}$) と鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg) との相関を示す。この結果から分かるように、平均冷却速度 v_1 が $20^\circ\text{C}/\text{s}$ を超えると鉄損が増加する。これは、平均冷却速度 v_1 が $20^\circ\text{C}/\text{s}$ を超える場合、急速な冷却により鋼板に歪が生じ、その結果、ヒステリシス損が増加したためと考えられる。そのため、本発明では平均冷却速度 v_1 を $20^\circ\text{C}/\text{s}$ 以下とする。一方、 v_1 が $5^\circ\text{C}/\text{s}$ 未満であると、製造効率が低下し、コストが増加する。そのため、 v_1 は $5^\circ\text{C}/\text{s}$ 以上とする。
- [0063] また、図6に、平均冷却速度 v_1 を $10^\circ\text{C}/\text{s}$ で一定とした際の、平均冷却速度 v_2 ($^\circ\text{C}/\text{s}$) と鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg) との相関を示す。この結果から分かるように、平均冷却速度 v_2 が $30^\circ\text{C}/\text{s}$ 未満では鉄損が増加した。
- [0064] この原因を調査するため、各条件で得られた無方向性電磁鋼板の全板厚における平均N含有量 $[\text{N}]$ を測定した。平均冷却速度 v_2 ($^\circ\text{C}/\text{s}$) と測定された平均N含有量 $[\text{N}]$ (ppm) との相関を、図7に示す。なお、前記平均N含有量 $[\text{N}]$ は、実施例に記載した方法で測定した。図7に示した結果から、平均冷却速度 v_2 が $30^\circ\text{C}/\text{s}$ 未満の条件では、 v_2 が $30^\circ\text{C}/\text{s}$ 以上の場合に比べて $[\text{N}]$ が高いことがわかった。この結果より、平均冷却速度 v_2 が $30^\circ\text{C}/\text{s}$ 未満では鋼板の窒化によって鉄損が増加したと考えられる。そのため、本発明の一実施形態における無方向性電磁鋼板においては、全板厚における平均N含有量 $[\text{N}]$ を 40 ppm 以下とする。また、本発明の一実

施形態における無方向性電磁鋼板の製造方法においては、平均冷却速度 v_2 を $30^\circ\text{C}/\text{s}$ 以上とする。

- [0065] 一方、図 6、7 に示した結果から、平均冷却速度 v_2 が $100^\circ\text{C}/\text{s}$ を超えると、鋼中窒素量は 30 ppm 以下であるにも関わらず、鉄損が増加していることが分かる。これは、平均冷却速度 v_2 が $100^\circ\text{C}/\text{s}$ を超える場合、冷却歪によって鉄損が増加したためと考えられる。そのため、本発明においては、平均冷却速度 v_2 を $100^\circ\text{C}/\text{s}$ 以下とする。

実施例

- [0066] (実施例 1)

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。

- [0067] まず、 Si : $2.0 \sim 4.0\%$ を含有する鋼スラブを用意した。前記鋼スラブの成分組成は、転炉で吹錬した後に脱ガス処理を行うことによって調整した。次いで、前記鋼スラブを 1140°C で 1 時間加熱した後、熱間圧延を行って板厚 2 mm の熱延鋼板とした。前記熱間圧延における熱延仕上げ温度は 800°C とした。前記熱延鋼板を巻取り温度 : 610°C で巻取り、次いで、 $900^\circ\text{C} \times 30\text{ s}$ の熱延板焼鈍を施して熱延焼鈍板とした。その後、前記熱延焼鈍板に、酸洗および冷間圧延を施して、冷延鋼板とした。

- [0068] 次いで、得られた冷延鋼板に、 SiCl_4 雰囲気中、浸珪処理温度 1200°C で浸珪処理を施した。なお、浸珪処理の昇温過程では 200°C から浸珪処理温度までの昇温速度を $10 \sim 40^\circ\text{C}/\text{s}$ の間で変更した。その後、 N_2 雰囲気中で表 1、2 に示す条件で拡散処理、冷却を行い、表 1、2 に示した板厚 t を有する無方向性電磁鋼板を得た。ここで、平均冷却速度 v_1 は拡散処理温度から 900°C までの平均冷却速度を表し、平均冷却速度 v_2 は 900°C から 100°C までの平均冷却速度を表す。

- [0069] (組成)

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、EPM A (Electron Probe Micro Analyzer) を用いて板厚方向断面における Si 含有量分

布を測定した。鋼板の板厚におけるS i含有量の平均値を算出し、前記平均値よりもS i濃度が高い部分を表層部、低い部分を内層部とした。得られた結果から、板厚 t に対する表層部の合計厚さ t_1 の比 t_1/t 、表層部における平均S i含有量： $[S i]_1$ 、および内層部における平均S i含有量： $[S i]_0$ を求めた。また、ICP発光分析法を用いて無方向性電磁鋼板の全板厚の平均N含有量： $[N]$ を測定した。測定結果を表1、2に併記する。

[0070] また、得られた無方向性電磁鋼板に含まれるS i、N以外の成分についても、ICP発光分析法を用いて全板厚における平均含有量を測定した。測定結果を表1、2に示す。

[0071] (内部応力)

内部応力の測定には幅30mm、長さ180mmの試験片を使用し、サンプルを片面からフッ酸による化学研磨を施し、研磨後のサンプルの表面が表層部と内層部になるよう、該サンプルの板厚 t_s が $t/2$ になるまで研磨した。その後、サンプルの反り量から、下記(2)式を使用して面内引張応力を算出した。

$$\text{面内引張応力 (MPa)} = t_s \times E / (4 \times r) \cdots (2)$$

ここで、

t_s : サンプルの板厚

E : ヤング率 = 190 GPa

r : 曲率半径 (mm) である。

[0072] (集合組織)

また、得られた無方向性電磁鋼板の集合組織を調査するため、無方向性電磁鋼板の表面から板厚 $1/4$ まで化学研磨し、X線を用いてODF解析を行って、方位分布関数の $\Phi_2 = 45^\circ$ 断面における $\{111\}$ 面集積度に対する $\{100\}$ 面集積度の比 $\{100\} / \{111\}$ を求めた。測定結果を表1、2に併記する。

[0073] (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180mm

の試験片を採取し、エプスタイン試験を行って、最大磁束密度：1.0 T、周波数：400 Hzにおける鉄損： $W_{10/400}$ (W/kg) を測定した。前記エプスタイン試験は、JIS C 2550-1 に準じて、25 cmエプスタイン枠を用いて行った。また、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1、2に併記する。

[0074] 表1、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、400 Hzにおける鉄損が低いという、優れた特性を有していた。これに対し、本発明の条件を満たさない比較例においては、鉄損が劣っていた。なお、一部の比較例では、製造途中で鋼板が破断したため、鉄損の評価を行えなかった。

[0075]

[表1]

No.	成分組成 (質量%) *										製造条件				t _f /t _t	内部応力 面内 引張応力 (MPa)	集合組織 {100}/[111] (%)	数員 W _{10/400} (W/kg)	備考
	[Si] ₁	[Si] ₀	C	S	Mn	Al	P	Sn	Sb	[N] (ppm)	[Mn][S]	加熱処理 温度 (°C)	v ₁ (°C/s)	v ₂ (°C/s)					
1	3.4	2.0	0.0046	0.0008	0.051	—	—	—	—	30	0.0000	1050	16	33	0.20	0.30	56	13.4	本発明例
2	4.0	2.0	0.0180	0.0006	0.050	—	—	—	—	28	0.0000	1000	13	60	0.20	0.30	58	13.2	本発明例
3	4.6	2.0	0.0029	0.0010	0.680	0.035	—	—	—	31	0.0009	1100	15	43	0.20	0.30	64	11.6	本発明例
4	5.0	2.0	0.0045	0.0008	0.090	—	—	—	—	23	0.0001	1250	14	95	0.20	0.30	68	13.4	本発明例
5	6.6	2.0	0.0027	0.0007	0.030	—	—	—	—	23	0.0000	1230	20	81	0.20	0.60	100.4	21.6	比較例
6	6.2	2.0	0.0023	0.0012	0.072	—	—	—	—	28	0.0001	1200	7	63	0.10	0.50	79	10.2	本発明例
7	5.0	2.0	0.0040	0.0011	0.067	—	—	—	—	42	0.0001	1280	11	25	0.10	0.30	86	15.4	比較例
8	3.0	2.3	0.0036	0.0009	0.054	—	—	—	—	28	0.0000	1180	13	50	0.20	0.30	72	13.4	本発明例
9	4.2	2.3	0.0041	0.0010	0.055	—	—	—	—	37	0.0001	1100	19	44	0.20	0.30	77	12.5	本発明例
10	4.2	2.3	0.0027	0.0004	0.080	—	—	—	—	24	0.0000	1260	6	110	0.10	0.30	74	15.0	比較例
11	4.3	2.5	0.0022	0.0003	1.540	—	—	—	—	27	0.0005	1200	14	46	0.20	0.30	66	12.2	本発明例
12	—	2.5	0.0031	0.0018	2.310	—	—	—	—	—	0.0042	—	—	—	0.10	冷間圧延時に破断			
13	4.0	2.5	0.0041	0.0004	0.040	—	0.01	0.01	0.001	24	0.0004	1200	12	70	0.20	0.30	78	12.3	本発明例
14	5.5	2.5	0.0038	0.0016	0.167	—	0.02	0.01	0.001	26	0.0003	1050	10	64	0.20	0.30	73	14.6	比較例
15	3.4	2.5	0.0045	0.0020	0.050	—	0.08	—	—	22	0.0001	1000	18	82	0.10	0.30	73	9.2	本発明例
16	5.0	2.5	0.0028	0.0031	0.061	—	0.001	0.001	0.06	22	0.0002	1025	14	96	0.10	0.30	72	8.0	本発明例
17	4.4	3.0	0.0038	0.0005	1.200	—	0.01	0.01	0.001	30	0.0006	1000	17	31	0.20	0.05	63	14.8	比較例
18	5.1	3.0	0.0046	0.0016	0.160	—	—	0.06	—	29	0.0003	1010	11	37	0.20	0.30	76	10.1	本発明例
19	5.5	3.0	0.0036	0.0009	0.038	0.07	0.05	0.01	0.001	30	0.0000	1025	8	68	0.20	0.30	73	11.2	本発明例
20	4.2	3.0	0.0020	0.0013	0.020	—	—	—	—	32	0.0000	1050	10	78	0.20	0.30	51	13.9	本発明例
21	6.3	3.0	0.0046	0.0004	0.180	—	0.05	0.01	0.001	23	0.0001	1200	14	92	0.10	0.30	77	10.7	本発明例

* 残部はFeおよび不可避不純物。

[0076] [表2]

表2

No.	成分組成 (質量%) *											製造条件				t ₁ /t ₂	内部応力 引張応力 (MPa)	集合組織 [100]/[111] (%)	鉄損 W _{10/400} (W/kg)	備考
	[Si] ₁	[Si] ₀	C	S	Mn	Al	P	Sn	Sb	[N] (ppm)	[Mn]/[S]	拡散処理 温度 (°C)	v ₁ (°C/s)	v ₂ (°C/s)						
												τ (mm)								
22	6.4	3.0	0.0190	0.0108	0.060	-	-	-	-	-	23	0.0006	1160	17	99	0.10	56.2	63	14.1	比較例
23	4.2	3.3	0.0094	0.0004	0.610	-	-	-	-	-	38	0.0002	1000	12	63	0.10	5.9	61	9.6	本発明例
24	5.0	3.3	0.0083	0.0020	0.063	-	-	-	-	-	32	0.0001	1000	15	34	0.20	15.9	58	11.9	本発明例
25	6.4	3.3	0.0140	0.0013	0.064	-	0.05	0.01	0.001	29	0.0001	1000	8	39	0.20	47.2	65	13.5	本発明例	
26	-	3.3	0.0160	0.0008	0.600	-	0.15	-	-	-	0.0005	-	-	-	-	0.20	冷間圧延時に破断			比較例
27	4.2	3.3	0.0054	0.0008	0.611	-	0.05	0.01	0.001	24	0.0005	1200	10	83	0.20	5.9	68	12.2	本発明例	
28	5.1	3.5	0.0022	0.0013	0.089	-	0.05	0.01	0.001	27	0.0001	1280	8	40	0.20	14.4	64	13.7	本発明例	
29	5.0	3.5	0.0036	0.0007	0.061	-	0.05	0.01	0.001	27	0.0000	1140	23	48	0.20	12.9	69	16.0	比較例	
30	5.6	3.5	0.0026	0.0005	0.399	-	0.05	0.01	0.001	25	0.0002	1160	17	86	0.20	23.1	67	12.8	本発明例	
31	6.3	3.5	0.0047	0.0020	0.090	-	0.04	0.01	0.08	26	0.0002	1000	19	62	0.20	39.0	73	12.6	本発明例	
32	-	3.5	0.0045	0.0018	0.068	-	-	0.16	-	-	0.0001	-	-	-	-	0.20	ロール-バー通過時に破断			比較例
33	-	3.5	0.0038	0.0004	0.710	-	-	-	0.13	-	0.0003	-	-	-	-	0.10	冷間圧延時に破断			比較例
34	6.6	3.5	0.0021	0.0011	0.066	-	0.01	0.001	0.05	28	0.0001	1100	13	40	0.20	47.2	66	13.4	本発明例	
35	4.9	4.0	0.0033	0.0012	0.090	-	-	0.02	0.03	28	0.0001	1210	18	66	0.20	5.9	77	9.3	本発明例	
36	6.6	4.0	0.0049	0.0006	0.103	-	0.01	0.03	0.01	27	0.0001	1060	19	53	0.20	34.0	75	12.7	本発明例	
37	5.4	4.0	0.0034	0.0007	0.319	-	0.001	0.10	0.001	23	0.0002	1190	10	84	0.20	11.5	89	10.8	本発明例	
38	4.3	4.0	0.0041	0.0007	0.185	0.02	-	-	-	22	0.0001	1020	19	96	0.20	2.2	81	14.2	比較例	
39	5.8	4.0	0.0045	0.0013	0.865	0.03	-	-	-	26	0.0011	1000	16	52	0.10	17.6	84	8.7	本発明例	
40	6.3	4.0	0.0250	0.0008	1.210	0.04	-	-	-	34	0.0010	1000	13	64	0.20	33.7	61	14.3	比較例	
41	3.3	2.5	0.0031	0.0010	1.980	0.04	-	-	-	29	0.0020	1280	16	32	0.20	5.1	70	13.1	本発明例	
42	4.1	2.5	0.0022	0.0009	0.080	0.08	-	-	-	31	0.0001	1050	18	84	0.20	14.4	56	11.5	本発明例	
43	-	2.3	0.0038	0.0007	0.120	0.15	-	-	-	-	0.0001	-	-	-	-	0.10	冷間圧延時に破断			比較例

* 残部はFeおよび不溶不純物。

[0077] (実施例2)

表3に示す成分を含有する鋼スラブを1140℃で1時間加熱した後、熱延仕上温度が800℃の熱間圧延を施し、板厚2mmの熱延鋼板とした。得られた熱延鋼板を610℃で巻き取り、次いで、950℃×30sの熱延板焼鈍を施して、熱延焼鈍板とした。その後、熱延焼鈍板に酸洗および冷間圧延を施して、表3に示した板厚を有する冷延鋼板とした。

[0078] 次いで、得られた冷延鋼板に、 $\text{SiCl}_4 + \text{N}_2$ 雰囲気中、浸珪処理温度1200℃で浸珪処理を施した。その後、 N_2 雰囲気中、1150℃で拡散処理を施し、1150℃から900℃までを平均冷却速度 $v_1: 20^\circ\text{C}/\text{s}$ 、900℃から100℃までを平均冷却速度 $v_2: 6^\circ\text{C}/\text{s}$ で冷却した。また、浸珪処理は表層と内層の板厚比 t_1/t が0.40となるように処理を施した。

[0079] 得られた無方向性電磁鋼板のそれぞれについて、組成、内部応力、集合組織、および鉄損を、上記実施例1と同様の方法で評価した。評価結果を表3に併記する。

[0080] 表3に示した結果からわかるように、 $[\text{Mn}][\text{S}]$ が0.0030以下である無方向性電磁鋼板は、 $[\text{Mn}][\text{S}]$ が0.0030を超えている無方向性電磁鋼板に比べ、さらに鉄損が低減されていた。

[0081]

[表3]

No.	成分組成 (質量%) *										製造条件				内部応力	集合組織	鼓膜	備考		
	[Si] ₁	[Si] ₀	C	S	Mn	Al	P	Sn	Sb	[N] (ppm)	[Mn][S]	加熱処理 温度 (°C)	v ₁ (°C/・s)	v ₂ (°C/・s)					t (mm)	t ₁ /t
																	面内 引張応力 (MPa)	[100]/[111] (%)	W ₁₀₋₄₀₀ (W/kg)	
44	4.2	2.0	0.0064	0.0015	0.150	-	-	-	-	33	0.0002	1150	20	6	0.10	0.40	21.5	63	10.1	本発明例
45	4.0	2.1	0.0061	0.0020	1.800	-	-	-	-	21	0.0036	1150	20	6	0.10	0.40	21.8	71	11.9	本発明例
46	4.2	2.0	0.0066	0.0080	0.520	-	-	-	-	28	0.0042	1150	20	6	0.10	0.40	21.1	70	12.4	本発明例
47	4.1	2.3	0.0061	0.0031	0.220	-	-	-	-	27	0.0020	1150	20	6	0.10	0.40	21.4	61	10.8	本発明例
48	4.1	2.0	0.0063	0.0018	1.600	-	-	-	-	29	0.0029	1150	20	6	0.10	0.40	21.6	63	10.6	本発明例
49	4.0	2.0	0.0062	0.0096	0.290	-	-	-	-	34	0.0028	1150	20	6	0.10	0.40	21.6	64	10.7	本発明例
50	4.0	2.0	0.0056	0.0098	0.320	-	-	-	-	35	0.0031	1150	20	6	0.10	0.40	21.9	68	12.6	本発明例
51	4.2	2.1	0.0060	0.0014	1.980	-	-	-	-	31	0.0028	1150	20	6	0.10	0.40	22.3	65	10.8	本発明例
52	4.1	2.2	0.0055	0.0016	1.990	-	-	-	-	33	0.0032	1150	20	6	0.10	0.40	21.7	67	12.5	本発明例
53	4.2	2.0	0.0060	0.0099	0.010	-	-	-	-	32	0.0001	1150	20	6	0.10	0.40	22.1	65	10.7	本発明例
54	4.0	2.6	0.0034	0.0015	0.080	-	-	-	-	32	0.00012	1150	20	6	0.30	0.40	11.3	74	15.3	本発明例
55	4.1	2.6	0.0034	0.0015	0.080	-	-	-	-	32	0.00012	1150	20	6	0.20	0.40	12.2	70	13.2	本発明例
56	4.0	2.6	0.0034	0.0015	0.080	-	-	-	-	32	0.00012	1150	20	6	0.10	0.40	12.1	68	10.4	本発明例
57	4.2	2.6	0.0034	0.0015	0.080	-	-	-	-	32	0.00012	1150	20	6	0.05	0.40	11.7	65	9.3	本発明例

表3

* 残部はFeおよび不可溶不純物。

符号の説明

- [0082] 1 無方向性電磁鋼板
- 1 0 内層部
- 2 0 表層部

請求の範囲

[請求項1] Si含有量が全板厚の平均Si含有量未満の領域として定義される内層部と、前記内層部の両側に設けられた、Si含有量が全板厚の平均Si含有量以上の領域として定義される表層部とからなる無方向性電磁鋼板であって、

Siと、

全板厚における平均含有量で、

C : 0.020質量%以下、

Mn : 0.010質量%～2.0質量%、および

S : 0.0100質量%以下とを含有し、残部がFeおよび不可避免不純物からなり、

前記表層部における平均Si含有量 $[Si]_1$ が2.5～7.0質量%であり、

前記内層部における平均Si含有量 $[Si]_0$ が1.5～5.0質量%である成分組成を有し、

前記表層部が5～50MPaの面内引張応力を有し、

前記無方向性電磁鋼板の板厚 t が0.01～0.35mmであり、

前記板厚 t に対する前記表層部の合計厚さ t_1 の比 t_1/t が0.10～0.70であり、

前記無方向性電磁鋼板の全板厚における平均N含有量 $[N]$ が40ppm以下であり、

最大磁束密度：1.0T、周波数400Hzにおける鉄損 $W_{10/400}$ ($W/k g$) と、前記板厚 t (mm) とが下記(1)式を満たす無方向性電磁鋼板。

$$W_{10/400} \leq 8 + 30t \quad \dots (1)$$

[請求項2] 前記成分組成が、全板厚における平均含有量で、

Al : 0.10質量%以下、

P : 0.10質量%以下、

S_n : 0.10質量%以下、および

S_b : 0.10質量%以下からなる群より選択される少なくとも1つをさらに含有する、請求項1に記載の無方向性電磁鋼板。

[請求項3] さらに、前記無方向性電磁鋼板の表面から板厚の $1/4$ の深さの面における方位分布関数の $\Phi_2 = 45^\circ$ 断面において、 $\{111\}$ 面集積度に対する $\{100\}$ 面集積度の比 $\{100\} / \{111\}$ が55～90%である集合組織を有する、請求項1または2に記載の無方向性電磁鋼板。

[請求項4] 前記成分組成が、さらに下記(2)式を満たす、請求項1～3のいずれか一項に記載の無方向性電磁鋼板。

$$[Mn][S] \leq 0.0030 \quad \dots (2)$$

ただし、 $[Mn]$ 、 $[S]$ はそれぞれMn、Sの全板厚における平均含有量(質量%)である。

[請求項5] 請求項1～4のいずれか一項に記載の無方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

Si含有量が1.5～5.0質量%である鋼板に、SiC₁₄雰囲気中、1000℃以上、1300℃以下の浸珪処理温度で浸珪処理を施し、

前記浸珪処理後の鋼板にN₂雰囲気中、950℃以上、1300℃以下の温度で拡散処理を施し、

前記拡散処理後の鋼板を、拡散処理温度から900℃までの温度域における平均冷却速度 v_1 : 5～20℃/s、900℃から100℃までの温度域における平均冷却速度 v_2 : 30～100℃/sの条件で冷却する、無方向性電磁鋼板の製造方法。