



## (12) 发明专利申请



(10) 申请公布号 CN 120265808 A

(43) 申请公布日 2025. 07. 04

(21) 申请号 202380078743.8

(22) 申请日 2023.11.15

(30) 优先权数据

2022-182571 2022.11.15 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2025.05.13

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2023/041072 2023.11.15

(87) PCT国际申请的公布数据

W02024/106462 JA 2024.05.23

(71) 申请人 日本制铁株式会社

地址 日本

(72) 发明人 片冈隆史 山县龙太郎

菊月真悠子 中村润纪 諏访嘉宏

竹田和年

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司  
72002

专利代理师 刘凤岭 陈建全

(51) Int. Cl.

G22C 38/00 (2006.01)

G21D 8/12 (2006.01)

G21D 9/46 (2006.01)

G22C 38/60 (2006.01)

H01F 1/147 (2006.01)

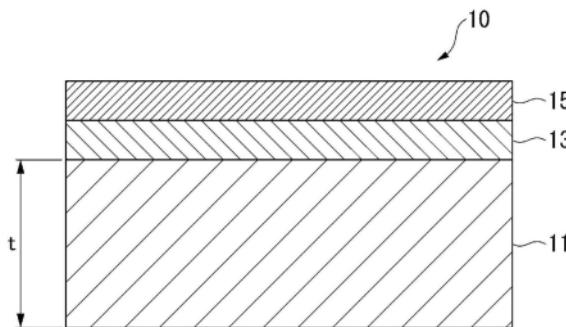
权利要求书2页 说明书24页 附图3页

## (54) 发明名称

方向性电磁钢板及其制造方法

## (57) 摘要

该方向性电磁钢板具备:具有规定的化学组成的母材钢板、设置于母材钢板的表面的玻璃覆盖膜、以及设置于玻璃覆盖膜的表面的张力赋予性绝缘覆盖膜。母材钢板具有定向于Goss取向的集合组织。在母材钢板中,当将从以轧制面法线方向ND为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\alpha$  (°)、将从以轧制直角方向TD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\beta$  (°)、将从以轧制方向RD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\gamma$  (°)时, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 满足下述式(1)。 $0.0 \leq |\beta| < 2.5 < |\alpha| < 4.0 \leq |\gamma| \leq 10.0$  (1)



1. 一种方向性电磁钢板, 其特征在于, 具备:  
母材钢板, 其所具有的化学组成以质量%计, 含有  
C: 0~0.010%、  
Si: 3.00~4.00%、  
Sol.Al: 0~0.010%、  
Mn: 0.01~0.50%、  
N: 0.010%以下、  
S+Se: 0.0100%以下、  
P: 0.005~0.100%、  
Sn: 0~0.50%、  
Cu: 0~0.50%、  
Cr: 0~0.50%、  
Sb: 0~0.20%、  
Mo: 0~0.10%、  
Ni: 0~0.20%、  
Nb: 0~0.0200%、  
B: 0~0.0200%、  
Ti: 0~0.0200%、  
Bi: 0~0.0200%、  
剩余部分包括Fe和杂质;  
玻璃覆盖膜, 其设置于所述母材钢板的表面; 以及  
张力赋予性绝缘覆盖膜, 其设置于所述玻璃覆盖膜的表面;  
所述母材钢板具有定向于Goss取向的集合组织,  
在所述母材钢板中,  
当将从以轧制面法线方向ND为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\alpha(^{\circ})$ 、  
将从以轧制直角方向TD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\beta(^{\circ})$ 、  
将从以轧制方向RD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\gamma(^{\circ})$ 时,  
所述 $\alpha$ 、所述 $\beta$ 、所述 $\gamma$ 满足下述式(1),  
$$0.0 \leq |\beta| < 2.5 < |\alpha| < 4.0 \leq |\gamma| \leq 10.0 \quad (1)。$$
2. 根据权利要求1所述的方向性电磁钢板, 其特征在于, 所述 $\beta$ 满足下述式(2),  
$$0.0 \leq |\beta| \leq 2.0 \quad (2)。$$
3. 根据权利要求1或2所述的方向性电磁钢板, 其特征在于, 所述母材钢板的板厚为0.16mm以上且低于0.20mm。
4. 一种方向性电磁钢板的制造方法, 其特征在于, 包括以下工序:  
加热工序, 其对钢坯进行加热, 所述钢坯以质量%计, 含有  
C: 0.020~0.150%、  
Si: 3.00~4.00%、  
Sol.Al: 0.010~0.050%、  
Mn: 0.01~0.50%、

N:0.001 ~ 0.020%、

S+Se:0.0010 ~ 0.0400%、

P:0.005 ~ 0.100%、

Sn:0 ~ 0.50%、

Cu:0 ~ 0.50%、

Cr:0 ~ 0.50%、

Sb:0 ~ 0.20%、

Mo:0 ~ 0.10%、

Ni:0 ~ 0.20%、

Nb:0 ~ 0.0200%、

B:0 ~ 0.0200%、

Ti:0 ~ 0.0200%、

Bi:0 ~ 0.0200%、

剩余部分包括Fe和杂质；

热轧工序,其对所述加热工序后的所述钢坯进行热轧而得到热轧钢板；

热轧板退火工序,其对所述热轧钢板进行退火而得到热轧退火钢板；

冷轧工序,其对所述热轧退火钢板进行冷轧而得到冷轧钢板；

脱碳退火工序,其对所述冷轧钢板实施脱碳退火而得到脱碳退火钢板；

最终退火工序,其将退火分离剂涂布于所述脱碳退火钢板上,然后实施最终退火,从而得到最终退火钢板；以及

绝缘覆盖膜形成工序,其在所述最终退火钢板的表面形成绝缘覆盖膜；

所述脱碳退火工序包括升温工序和均热工序，

在所述升温工序中，

将550 ~ 800℃的温度区域中的平均升温速度设定为400℃/秒 ~ 3000℃/秒，

将最高加热温度T1(℃)设定为850℃ ~ 950℃，

将800 ~ 所述最高加热温度T1(℃)的温度区域的平均升温速度设定为100℃/秒 ~ 1500℃/秒，

将800 ~ 所述最高加热温度T1(℃)的温度区域的气氛的露点设定为0℃以下。

5. 根据权利要求4所述的方向性电磁钢板的制造方法,其特征在于，

所述退火分离剂含有MgO作为主要成分，

在所述退火分离剂中,相对于MgO的重量含有0.10 ~ 10.00%的选自Ti、Sb、Sr、Cl之中的1种以上。

## 方向性电磁钢板及其制造方法

### 技术领域

[0001] 本公开涉及方向性电磁钢板及其制造方法。

[0002] 本申请基于2022年11月15日提出的日本专利申请特愿2022-182571号主张优先权,在此引用其内容。

### 背景技术

[0003] 一般地说,方向性电磁钢板由母材钢板、形成于母材钢板的表面的一次覆盖膜(有时称为玻璃覆盖膜)、以及形成于一次覆盖膜的表面的张力赋予绝缘性的二次覆盖膜这三层结构构成。方向性电磁钢板是软磁性材料,主要用作变压器的铁芯材料。因此,对方向性电磁钢板要求高磁化特性以及低铁损这样的磁特性。

[0004] 所谓铁损,是指在利用交流磁场对铁芯进行励磁的情况下,作为热能而消耗的电力损耗,从节能的观点出发,要求铁损尽可能低。磁化率、板厚、覆盖膜张力、杂质量、电阻率、晶体粒径、磁畴尺寸等影响铁损的高低。方向性电磁钢板的铁损是依赖于电阻率、板厚、磁畴的大小等的涡流损耗与依赖于晶体取向、表面的平滑性等的磁滞损耗之和。关于板厚,例如,将母材钢板薄化(例如低于0.22mm)对于通过降低涡流损耗来降低铁损是有效的。然而,令人担心由于薄化,二次再结晶自身的行为发生变化,Goss取向的聚集度劣化。

[0005] Goss取向的聚集是通过基于对集合组织(织构:texture)和析出物(抑制剂)的严格控制所产生的现象(二次再结晶)而显现出来的。织构优选为Goss取向(二次再结晶的核)较多、Goss取向所蚕食的取向(对应取向)较多的状态。另一方面,抑制剂优选在二次再结晶退火中处于抑制剂的钉扎力逐渐降低的状态(抑制剂的耐热性高)。换句话说,在二次再结晶退火中,从促进Goss取向的生长的观点出发,抑制剂的钉扎力急剧降低是不优选的。

[0006] 在此,为了得到薄料,需要提高冷轧中的压下率(冷轧率)。如果在冷轧率较高的条件下进行轧制,则作为二次再结晶的核的Goss取向减少,从而二次再结晶不稳定化。

[0007] 另外,在薄料中,原因虽不明确,但抑制剂的耐热性降低而不能确保Goss取向优先生长的时间,从而二次再结晶不稳定化。

[0008] 也就是说,在薄料中,从织构、抑制剂这两者的观点出发,存在二次再结晶不稳定化的问题。

[0009] 根据这样的状况,以往进行了用于使薄料的二次再结晶稳定化的各种研究。

[0010] 例如,在专利文献1、专利文献2中,公开了通过利用预备冷轧对冷轧率进行最优控制来避免织构劣化的技术。

[0011] 另外,例如在专利文献3中,公开了经由一次覆盖膜控制的抑制剂控制技术。在专利文献3中,通过涂布含有0.15~2.0%的C1和/或SO<sub>3</sub>的MgO作为退火分离剂,显著提高玻璃覆盖膜的形成反应,从而将一次覆盖膜控制为对磁性优选的形态。

[0012] 现有技术文献

[0013] 专利文献

[0014] 专利文献1:日本特开昭59-126722号公报

[0015] 专利文献2:日本专利第2562254号公报

[0016] 专利文献3:日本专利第3021241号公报

## 发明内容

[0017] 发明所要解决的课题

[0018] 在专利文献1、2的方法的情况下,冷轧工序的工序数增加,因而产生生产上的课题。

[0019] 另外,根据专利文献3的方法,虽然能够进行抑制剂控制,但没有考虑织构的控制。因此,例如在将本技术适用于母材钢板板厚低于0.22mm的薄电磁钢板的情况下,不能得到高品质的二次再结晶取向的可能性较高。

[0020] 如上所述,没有公开在不降低生产率的情况下使薄料的二次再结晶稳定化、从而得到具有良好的磁特性的方向性电磁钢板的方法。

[0021] 另外,近年来,对于方向性电磁钢板,除了要求高磁化特性以及低铁损这样的磁特性以外,还要求降低将钢板适用于变压器等时产生的噪音。

[0022] 由上可知,本公开的课题在于:提供一种不会使生产率降低且具有良好的磁特性以及噪音特性的方向性电磁钢板及其制造方法。

[0023] 用于解决课题的手段

[0024] 本发明人等为了在薄料中兼顾由通过二次再结晶的Goss取向的聚集而带来的良好的磁特性和良好的噪音特性,从控制集合组织(织构)和析出物(抑制剂)两者的观点出发进行了研究。

[0025] 其结果是,在一部分的薄料中,不会导致二次再结晶的不稳定化而可以确认远比以往的方向性电磁钢板的磁特性更为优良的磁特性,并且可以确认还能够兼顾良好的噪音特性。更详细地进行调查的结果,发现在二次再结晶组织的从理想Goss取向偏移的平均分散角(average variance angle)中,使从以轧制直角方向TD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角 $\beta$ (°)、从以轧制面法线方向ND为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角 $\alpha$ (°)、以及从以轧制方向RD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角 $\gamma$ (°)分别满足下述式(1)所示的序列,从而即使在薄料中,二次再结晶也稳定化,可以实现良好的磁特性和良好的噪音特性的兼顾。

[0026] 迄今为止,作为影响磁特性的要素,已知有平均分散角 $\beta$ (°)以及平均分散角 $\alpha$ (°)。但是,在现有技术中,充分降低平均分散角 $\beta$ 、 $\alpha$ 是有限度的,期望进一步降低这些平均分散角。再者,单凭降低平均分散角 $\beta$ 、 $\alpha$ ,有时难以获得磁特性和噪音特性的高水平的兼顾。于是,本发明人进行了潜心的研究,结果查明,为了兼顾薄料的磁特性和噪音特性,除了进一步降低平均分散角 $\beta$ 以外,平均分散角 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 的平衡也会产生强烈的影响,此外还发现了可以进一步降低平均分散角 $\beta$ 的新手段。

[0027] 具体地说,发现通过适当地控制织构以及抑制剂这两者,可以大幅降低平均分散角 $\beta$ ,并且可以谋求平均分散角 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 的平衡。更具体地说,发现通过提高脱碳退火时的升温工序中规定的温度区域的升温速度,能够形成可以充分确保Goss取向、并且在二次再结晶退火时可以稳定地发挥抑制剂的功能的致密的氧化膜。

[0028] 以下,对本发明人等的研究结果进行详细叙述。

[0029] 首先,本发明人等从抑制剂控制的观点出发,调查了在薄料中由抑制剂引起的二次再结晶稳定化的效果发生劣化的原因。其结果可知,在薄料中,由于钢材自身的表面积比例的相对增加,抑制剂的分解速度加快,从而二次再结晶不稳定化。另外,本发明人等查明,抑制剂分解的触发是作为一次覆盖膜(玻璃覆盖膜)的 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 与作为抑制剂的 $\text{AlN}$ 的相互作用。而且基于该得到的新颖的见解,发现通过降低一次覆盖膜的形成速度(即提高一次覆盖膜的生成温度),可以抑制由抑制剂引起的二次再结晶稳定化效果的劣化。

[0030] 另外,本发明人等进一步进行了研究,结果获得了如下的见解,一次覆盖膜的生成温度的高温化可以通过在脱碳退火时(特别是升温工序时)使形成于冷轧钢板表面的 $\text{SiO}_2$ 厚膜化且致密化来实现。通过 $\text{SiO}_2$ 的厚膜化以及致密化而可以使二次再结晶时的一次覆盖膜的生成温度高温化的机理尚不明确,但可以认为其原因在于,厚膜化而且致密化的 $\text{SiO}_2$ 使 $\text{SiO}_2$ 中的 $\text{Mg}$ 离子的迁移率降低。

[0031] 再者,本发明人等从织构的观点出发,发现通过加快脱碳退火时的规定的温度区域的升温速度,Goss取向得以增加。再者,通过使钢中含有P(磷),可知在冷轧时,可以得到对于二次再结晶优选的织构。

[0032] 本发明是鉴于上述的见解而完成的。本发明的要旨如下所述。

[0033] [1]本发明的一实施方式涉及一种方向性电磁钢板,其具备:

[0034] 母材钢板,其所具有的化学组成以质量%计,含有

[0035] C:0~0.010%、

[0036] Si:3.00~4.00%、

[0037] Sol.Al:0~0.010%、

[0038] Mn:0.01~0.50%、

[0039] N:0.010%以下、

[0040] S+Se:0.0100%以下、

[0041] P:0.005~0.100%、

[0042] Sn:0~0.50%、

[0043] Cu:0~0.50%、

[0044] Cr:0~0.50%、

[0045] Sb:0~0.20%、

[0046] Mo:0~0.10%、

[0047] Ni:0~0.20%、

[0048] Nb:0~0.0200%、

[0049] B:0~0.0200%、

[0050] Ti:0~0.0200%、以及

[0051] Bi:0~0.0200%、

[0052] 剩余部分包括Fe和杂质;

[0053] 玻璃覆盖膜,其设置于所述母材钢板的表面;以及

[0054] 张力赋予性绝缘覆盖膜,其设置于所述玻璃覆盖膜的表面;

[0055] 所述母材钢板具有定向于Goss取向的集合组织,

[0056] 在所述母材钢板中,

- [0057] 当将从以轧制面法线方向ND为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\alpha$  (°)、
- [0058] 将从以轧制直角方向TD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\beta$  (°)、
- [0059] 将从以轧制方向RD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\gamma$  (°)时,
- [0060] 所述 $\alpha$ 、所述 $\beta$ 、所述 $\gamma$ 满足下述式(1),
- [0061]  $0.0 \leq |\beta| < 2.5 < |\alpha| < 4.0 \leq |\gamma| \leq 10.0$  (1)。
- [0062] [2]根据上述[1]所述的方向性电磁钢板,其中,所述 $\beta$ 也可以满足下述式(2),
- [0063]  $0.0 \leq |\beta| \leq 2.0$  (2)。
- [0064] [3]根据上述[1]或[2]所述的方向性电磁钢板,其中,所述母材钢板的板厚也可以为0.16mm以上且低于0.20mm。
- [0065] [4]本发明的一实施方式涉及一种方向性电磁钢板的制造方法,其包括以下工序:
- [0066] 加热工序,其对钢坯进行加热,所述钢坯以质量%计,含有
- [0067] C:0.020~0.150%、
- [0068] Si:3.00~4.00%、
- [0069] Sol.Al:0.010~0.050%、
- [0070] Mn:0.01~0.50%、
- [0071] N:0.001~0.020%、
- [0072] S+Se:0.001~0.040%、
- [0073] P:0.005~0.100%、
- [0074] Sn:0~0.50%、
- [0075] Cu:0~0.50%、
- [0076] Cr:0~0.50%、
- [0077] Sb:0~0.20%、
- [0078] Mo:0~0.10%、
- [0079] Ni:0~0.20%、
- [0080] Nb:0~0.0200%、
- [0081] B:0~0.0200%、
- [0082] Ti:0~0.0200%、以及
- [0083] Bi:0~0.0200%,
- [0084] 剩余部分包括Fe和杂质;
- [0085] 热轧工序,其对所述加热工序后的所述钢坯进行热轧而得到热轧钢板;
- [0086] 热轧板退火工序,其对所述热轧钢板进行退火而得到热轧退火钢板;
- [0087] 冷轧工序,其对所述热轧退火钢板进行冷轧而得到冷轧钢板;
- [0088] 脱碳退火工序,其对所述冷轧钢板实施脱碳退火而得到脱碳退火钢板;
- [0089] 最终退火工序,其将退火分离剂涂布于所述脱碳退火钢板上,然后实施最终退火,从而得到最终退火钢板;以及
- [0090] 绝缘覆盖膜形成工序,其在所述最终退火钢板的表面形成绝缘覆盖膜;
- [0091] 所述脱碳退火工序包括升温工序和均热工序,
- [0092] 在所述升温工序中,

- [0093] 将550~800℃的温度区域中的平均升温速度设定为400℃/秒~3000℃/秒,
- [0094] 将最高加热温度T1(℃)设定为850℃~950℃,
- [0095] 将800~所述最高加热温度T1(℃)的温度区域的平均升温速度设定为100℃/秒~1500℃/秒,
- [0096] 将800~所述最高加热温度T1(℃)的温度区域的气氛的露点设定为0℃以下。
- [0097] [5]根据上述[4]所述的方向性电磁钢板的制造方法,其中,所述退火分离剂也可以含有MgO作为主要成分,在所述退火分离剂中,相对于MgO的重量,含有0.10~10.00%的选自Ti、Sb、Sr、Cl之中的1种以上。
- [0098] 发明效果
- [0099] 根据本公开的上述方式,可以提供不使生产率降低而具有良好的磁特性以及噪声特性的方向性电磁钢板及其制造方法。

## 附图说明

- [0100] 图1A是示意性地表示本实施方式的方向性电磁钢板的结构的图。
- [0101] 图1B是示意性地表示本实施方式的方向性电磁钢板的结构的图。
- [0102] 图2是例示偏移角 $\alpha$ 、偏移角 $\beta$ 以及偏移角 $\gamma$ 的示意图。
- [0103] 图3是表示本实施方式的方向性电磁钢板的制造方法的流程的一个例子的流程图。

## 具体实施方式

- [0104] 下面参照附图,就本公开优选的实施方式进行详细的说明。在本说明书以及附图中,对于具有实质上相同的功能构成的构成要素,通过标注相同的符号而省略其重复说明。
- [0105] 本公开的一个实施方式的方向性电磁钢板(本实施方式的方向性电磁钢板)具备:母材钢板,其具有后述规定的化学组成;玻璃覆盖膜,其形成于所述母材钢板上;以及张力赋予绝缘覆盖膜,其形成于所述玻璃覆盖膜上。另外,所述母材钢板具有定向于Goss取向的集合组织。另外,在所述母材钢板中,当将从以轧制面法线方向ND为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\alpha$ (°)、将从以轧制直角方向TD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\beta$ (°)、将从以轧制方向RD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\gamma$ (°)时,所述 $\alpha$ 、所述 $\beta$ 、所述 $\gamma$ 满足下述式(1)。
- [0106]  $0.0 \leq |\beta| < 2.5|\alpha| < 4.0 \leq |\gamma| \leq 10.0$  (1)
- [0107] 下面就本实施方式的方向性电磁钢板进行说明。
- [0108] [方向性电磁钢板]
- [0109] 图1A以及图1B是示意性地表示本实施方式的方向性电磁钢板的结构的图。
- [0110] 如图1A所示,本实施方式的方向性电磁钢板10具有母材钢板11、形成于母材钢板11的表面的一次覆盖膜(玻璃覆盖膜)13、以及形成于玻璃覆盖膜13的表面的作为绝缘覆盖膜的一个例子的二次覆盖膜(张力赋予性绝缘覆盖膜)15。玻璃覆盖膜13以及张力赋予性绝缘覆盖膜15只要形成于母材钢板11的至少一个面即可,但通常如图1B示意性地所示的那样,形成于母材钢板11的两面。
- [0111] 下面对于本实施方式的方向性电磁钢板10,以特征性的结构为中心进行说明。在

以下的说明中,对于公知的结构、本领域技术人员能够实施的一部分结构,有时省略详细的说明。

[0112] (母材钢板11)

[0113] 母材钢板11通过由含有以下详细叙述的化学成分的钢坯制造,从而能够显示出优良的噪音特性和磁特性。关于该母材钢板11的化学成分,以下重新详细叙述。

[0114] (玻璃覆盖膜13)

[0115] 玻璃覆盖膜13是配置于母材钢板11的表面且以硅酸镁为主要成分的无机质覆盖膜。玻璃覆盖膜13通过在最终退火中使涂布于母材钢板的表面的包含氧化镁(MgO)的退火分离剂与母材钢板11的表面的成分反应而形成。也就是说,玻璃覆盖膜13具有来源于退火分离剂以及母材钢板的成分的组成(更详细地说,以 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 为主要成分的组成)。

[0116] (张力赋予性绝缘覆盖膜15)

[0117] 张力赋予性绝缘覆盖膜15配置于玻璃覆盖膜13的表面。通过利用张力赋予性绝缘覆盖膜15对方向性电磁钢板10赋予电绝缘性,可以降低涡流损耗,从而提高方向性电磁钢板10的铁损。另外,张力赋予性绝缘覆盖膜15除了上述那样的电绝缘性以外,还实现耐蚀性、耐热性、滑动性等各种特性。

[0118] 再者,张力赋予性绝缘覆盖膜15具有对方向性电磁钢板10赋予张力的功能。通过张力赋予性绝缘覆盖膜15对方向性电磁钢板10赋予张力,使方向性电磁钢板10中的磁畴壁移动变得容易,由此可以提高方向性电磁钢板10的铁损。

[0119] 也可以使用连续波激光束或者电子束对张力赋予性绝缘覆盖膜15的表面实施磁畴细化处理。在此情况下,与相对于轧制方向正交的方向即板宽方向成规定的角度 $\varphi$ 的线状的热应变沿着轧制方向以规定的间隔周期性地形成。由此,在本实施方式的方向性电磁钢板中,可以进一步提高磁特性。

[0120] 张力赋予性绝缘覆盖膜15例如通过将以磷酸金属盐和二氧化硅为主要成分的涂布液涂布于玻璃覆盖膜13的表面并进行烘烤而形成。

[0121] (板厚)

[0122] 本实施方式的方向性电磁钢板10的母材钢板的板厚(图1A以及图1B中的板厚 $t$ )没有特别限定,例如可以设定为 $0.16\text{mm} \sim 0.30\text{mm}$ 。另外,在本实施方式中,冷轧后的冷轧板(母材钢板11)的板厚越小,越可以充分得到铁损的降低效果。因此,方向性电磁钢板10的母材钢板的板厚 $t$ 优选为 $0.24\text{mm}$ 以下,更优选为 $0.23\text{mm}$ 以下。另外,例如,在冷轧板为板厚低于 $0.22\text{mm}$ 的薄材料(即薄料)的情况下,上述效果变得显著,铁损变得更加优良。因此,从磁特性的观点出发,方向性电磁钢板10的母材钢板的板厚 $t$ 例如进一步优选为低于 $0.20\text{mm}$ 。板厚 $t$ 的下限也可以为 $0.16\text{mm}$ 以上,也可以为 $0.17\text{mm}$ 以上。

[0123] (化学成分)

[0124] 接着,对本实施方式的方向性电磁钢板10的母材钢板11以及制造方向性电磁钢板10时所使用的钢坯的化学成分进行详细说明。以下,只要没有特别说明,“%”的记载就表示“质量%”。

[0125] 在具有以下的化学成分的钢坯(例如板坯)经过以下详细叙述的制造工序而成为方向性电磁钢板的情况下,对于母材钢板11的除碳(C)、酸可溶性铝(sol.Al)、氮(N)、硫(S)以及铋(Bi)以外的成分,保持与钢坯时同样的含量。也就是说,母材钢板11的除碳(C)、酸可

溶性铝(sol.Al)、氮(N)以及硫(S)以外的成分的含量在钢坯时和制品板时大致相同。另一方面,对于母材钢板11的碳(C)、酸可溶性铝(sol.Al)、氮(N)、硫(S)以及铋(Bi),通过经由以下详细叙述的制造工序,与钢坯时的组成相比,其含量发生变化。另外,关于母材钢板11的硅(Si)、锰(Mn)、铬(Cr)、硼(B)以及钛(Ti),由于在制造中途被吸收到玻璃覆盖膜中,因而与钢坯时的组成相比,有时其含量会稍微减少。

[0126] C:0.020~0.150%

[0127] C(碳)是具有提高磁通密度的效果的元素。在钢坯的C含量低于0.020%的情况下,不能得到磁通密度的改善效果。因此,钢坯的C含量设定为0.020%以上。C含量优选为0.040%以上,更优选为0.050%以上。

[0128] 另一方面,在钢坯的C含量超过0.150%的情况下,在二次再结晶退火(即最终退火)中钢发生相变,二次再结晶未充分进行,不能得到良好的磁通密度和铁损特性。因此,将钢坯的C含量设定为0.150%以下。C含量越少,对于铁损降低越优选。从铁损降低的观点出发,C含量优选为0.120%以下,更优选为0.100%以下。

[0129] 上述那样的钢坯中的C含量通过经由以下详细叙述的工序而成为本实施方式的方向性电磁钢板10,母材钢板11中的C含量成为0.010%(100ppm)以下。母材钢板11中的C含量也可以为0%。但是,在实用钢板中将C含量设定为0%在制造上是困难的,因而C含量也可以设定为超过0%。

[0130] Si:3.00~4.00%

[0131] Si(硅)对于提高钢的电阻(电阻率)而降低构成铁损的一部分的涡流损耗是极其有效的元素。在钢坯的Si含量低于3.00%的情况下,在二次再结晶退火中钢发生相变,二次再结晶未充分进行,不能得到良好的磁通密度和铁损特性。因此,钢坯的Si含量设定为3.00%以上。钢坯的Si含量优选为3.10%以上,更优选为3.20%以上。

[0132] 另一方面,在钢坯的Si含量超过4.00%的情况下,钢板脆化,制造工序中的通板性显著劣化。因此,钢坯的Si含量设定为4.00%以下。钢坯的Si含量优选为3.80%以下,更优选为3.50%以下。

[0133] 上述那样的钢坯中的Si含量有时通过经由以下详细叙述那样的工序,成为本实施方式的方向性电磁钢板10而减少。例如,由于Si作为玻璃覆盖膜而被消耗,母材钢板11中的Si含量有时可能会稍微减少。但是,其减少量在不阻碍本实施方式的作用效果的范围内,通过将钢坯的Si含量设定在上述范围内,可以享有本实施方式的效果。此外,考虑到上述Si含量的减少量,母材钢板11的Si含量也可以设定为2.80~3.80%。

[0134] sol.Al:0.010~0.050%

[0135] sol.Al(酸可溶性铝)是在方向性电磁钢板中左右二次再结晶的被称为抑制剂的化合物中的主要的抑制剂的构成元素,在本实施方式的母材钢板中,从二次再结晶显现的观点出发是必须的元素。在钢坯的sol.Al含量低于0.010%的情况下,不能充分生成作为抑制剂发挥功能的AlN,二次再结晶变得不充分,从而铁损特性不会提高。因此,钢坯中的sol.Al含量设定为0.010%以上。sol.Al含量优选为0.020%以上。

[0136] 另一方面,在sol.Al含量超过0.050%的情况下,钢板的脆化变得显著。因此,钢坯的sol.Al含量设定为0.050%以下。sol.Al含量优选为0.040%以下,更优选为0.030%以下。

[0137] 上述那样的钢坯中的sol.Al含量经由以下详细叙述的工序而成为本实施方式的方向性电磁钢板10,由此母材钢板11中的sol.Al含量成为0.010% (100ppm) 以下。母材钢板11中的sol.Al含量的下限值没有特别限定,因而也可以为0%。

[0138] Mn:0.01 ~ 0.50%

[0139] Mn (锰) 是形成作为主要抑制剂之一的MnS的重要元素。在钢坯的Mn含量低于0.01%的情况下,产生二次再结晶所需的MnS的绝对量不足。因此,钢坯的Mn含量设定为0.01%以上。Mn含量优选为0.03%以上,更优选为0.06%以上。

[0140] 另一方面,在钢坯的Mn含量超过0.50%的情况下,在二次再结晶退火中钢发生相变,二次再结晶未充分进行,不能得到良好的磁通密度和铁损特性。因此,钢坯的Mn含量设定为0.50%以下。Mn含量优选为0.20%以下,更优选为0.10%以下。

[0141] 上述那样的钢坯中的Mn含量有时通过经由以下详细叙述那样的工序,成为本实施方式的方向性电磁钢板10而减少。例如,由于Mn被吸收到玻璃覆盖膜中,母材钢板11中的Mn含量有时会稍微减少。但是,其减少量在不阻碍本实施方式的作用效果的范围内,通过将钢坯的Mn含量设定在上述范围内,可以享有本实施方式的效果。此外,考虑到上述Mn含量的减少量,母材钢板11的Mn含量也可以设定为0 ~ 0.40%。

[0142] N:0.001 ~ 0.020%

[0143] N (氮) 是与上述酸可溶性Al反应而形成作为抑制剂发挥功能的AlN的元素。为了与Al键合而形成作为抑制剂发挥功能的AlN,钢坯的N含量设定为0.001%以上。N含量优选为0.004%以上,更优选为0.006%以上。

[0144] 另一方面,在钢坯的N含量超过0.020%的情况下,冷轧时,钢板中产生鼓泡 (孔隙),而且强度上升,制造时的通板性恶化。因此,将钢坯的N含量设定为0.020%以下。N含量优选为0.015%以下,更优选为0.010%以下。

[0145] 上述那样的钢坯中的N含量经由以下详细叙述的工序而成为本实施方式的方向性电磁钢板10,由此母材钢板11中的N含量成为0.010% (100ppm) 以下。母材钢板11中的N含量的下限值没有特别限定,因而也可以为0%。

[0146] S+Se:0.0010 ~ 0.0400%

[0147] S (硫) 以及Se (硒) 是通过与上述Mn反应而形成作为抑制剂的MnS或者MnSe的重要元素。在钢坯的S含量和Se含量的合计低于0.0010%的情况下,不能得到充分的抑制剂效果。因此,将钢坯中的S含量和Se含量的合计设定为0.0010%以上。S含量和Se含量的合计优选为0.0100%以上,更优选为0.0150%以上。

[0148] 另一方面,在钢坯的S含量和Se含量的合计超过0.0400%的情况下,成为热脆性的原因,热轧变得明显困难。因此,钢坯的S含量和Se含量的合计设定为0.0400%以下。S含量和Se含量的合计优选为0.0300%以下。

[0149] 此外,上述那样的钢坯中的S含量有时通过经由以下详细叙述那样的工序,成为本实施方式的方向性电磁钢板10而减少,在此情况下,母材钢板11中的S含量有时成为0.0100% (100ppm) 以下。母材钢板11中的S含量和Se含量的合计的下限值没有特别限定,也可以为0.0005%。母材钢板11中的S含量和Se含量的合计的下限可以包含0%。此外,低于0.0005%的S或者Se的鉴定需要予以细心注意。在S含量或者Se含量低于分析装置的检测下限的情况下,有时S含量和Se含量的合计也被看作为0%。在实用钢板中,实质上的S含量和

Se含量的合计的下限值为0.0005%。

[0150] P:0.005~0.100%

[0151] P(磷)有助于得到对于二次再结晶优选的织构,是具有改善磁特性的效果的元素。因此,将钢坯的P含量设定为0.005%以上。优选设定为0.010%以上。

[0152] 另一方面,P是使轧制中的加工性降低的元素。在P含量超过0.100%的情况下,轧制加工性降低,制造时有可能导致钢板的断裂。因此,P含量设定为0.100%以下。P含量优选设定为0.070%以下,更优选为0.030%以下。

[0153] 剩余部分:Fe和杂质

[0154] 本实施方式的钢坯以及母材钢板11的化学组成含有上述元素(基本元素),剩余部分基本上为Fe和杂质。然而,以提高磁特性等为目的,也可以在以下所示的范围内进一步含有选自Sn、Cu、Cr、Sb、Mo、Ni、Nb、B、Ti以及Bi之中的1种以上(任选元素)。Sn、Cu、Cr、Sb、Mo、Ni、Nb、B、Ti以及Bi在本实施方式的钢坯以及母材钢板11中为任选元素,因而其含量的下限值为0%。

[0155] Sn:0~0.50%

[0156] Sn(锡)是具有磁特性改善效果的元素。因此,也可以含有。在含有Sn的情况下,为了良好地发挥磁特性改善效果,优选将Sn含量设定为0.01%以上。考虑到兼顾磁特性和覆盖膜密合性,Sn含量更优选为0.03%以上。

[0157] 另一方面,如果Sn含量超过0.50%,则玻璃覆盖膜的密合性显著劣化。因此,在含有的情况下,将Sn含量设定为0.50%以下。Sn含量优选为0.40%以下,更优选为0.30%以下。

[0158] Cu:0~0.50%

[0159] Cu(铜)是有助于二次再结晶的组织中的Goss取向占有率的增加,并且有助于玻璃覆盖膜密合性的提高的元素。在得到上述效果的情况下,优选将Cu含量设定为0.01%以上。Cu含量更优选为0.05%以上。

[0160] 另一方面,在Cu含量超过0.50%的情况下,热轧中钢板脆化。因此,在含有的情况下,将钢坯的Cu含量设定为0.50%以下。Cu含量优选为0.40%以下,更优选为0.30%以下。

[0161] Cr:0~0.50%

[0162] Cr(铬)与Sn以及Cu同样,是有助于二次再结晶组织的Goss取向占有率的增加而提高磁特性、并且有助于玻璃覆盖膜密合性的提高的元素。为了得到上述效果,优选将Cr含量设定为0.01%以上。Cr含量更优选为0.03%以上。

[0163] 另一方面,在Cr含量超过0.50%的情况下,形成Cr氧化物,磁特性降低。因此,在含有的情况下,Cr含量设定为0.50%以下。Cr含量优选为0.40%以下,更优选为0.30%以下。

[0164] Sb:0~0.20%

[0165] Sb(锑)是具有磁特性改善效果的元素。因此,也可以含有。在含有Sb的情况下,为了良好地发挥磁特性改善效果,优选将其含量设定为0.01%以上。

[0166] 另一方面,如果Sb含量超过0.20%,则玻璃覆盖膜显著劣化。因此,在含有的情况下,将Sb含量的上限设定为0.20%。Sb含量优选为0.15%以下,更优选为0.10%以下。

[0167] Mo:0~0.10%

[0168] Mo(钼)是具有磁特性改善效果的元素。因此,也可以含有。在含有Mo的情况下,为

了良好地发挥磁特性改善效果,优选将Mo含量设定为0.01%以上。

[0169] 另一方面,如果Mo含量超过0.10%,则冷轧性劣化,有可能导致断裂。因此,在含有的情况下,将Mo含量设定为0.10%以下。Mo含量优选为0.05%以下,更优选为0.03%以下。

[0170] Ni:0~0.20%

[0171] Ni(镍)是用于对冷轧时产生的晶体取向旋转造成影响、得到对于二次再结晶优选的织构的有效元素。另外,也是对提高电阻率而降低铁损有效的元素。因此,也可以含有。在含有Ni的情况下,为了得到这些效果,优选将Ni含量设定为0.01%以上。

[0172] 另一方面,在Ni含量超过0.20%的情况下,有时二次再结晶变得不稳定。因此,在含有的情况下,Ni含量设定为0.20%以下。Ni含量优选为0.15%以下,更优选为0.10%以下。

[0173] Nb:0~0.0200%

[0174] Nb(铌)是对强化抑制剂的作用而稳定地得到二次再结晶有效的元素。因此,也可以含有。在含有Nb的情况下,为了稳定地得到二次再结晶,优选将Nb含量设定为0.0005%以上。Nb含量更优选为0.0010%以上。

[0175] 另一方面,在Nb含量超过0.0200%的情况下,有时二次再结晶变得不稳定。因此,在含有的情况下,Nb含量设定为0.0200%以下。Nb含量优选为0.0100%以下,更优选为0.0050%以下。

[0176] B:0~0.0200%

[0177] B(硼)是对强化抑制剂的作用而稳定地得到二次再结晶有效的元素。因此,也可以含有。在含有B的情况下,为了稳定地得到二次再结晶,优选将B含量设定为0.0005%以上。B含量更优选为0.0010%以上。

[0178] 另一方面,在B的含量超过0.0200%的情况下,有时二次再结晶变得不稳定。因此,在含有的情况下,B含量设定为0.0200%以下。B含量优选为0.0100%以下,更优选为0.0050%以下。

[0179] Ti:0~0.0200%

[0180] Ti(钛)是提高Goss取向的聚集度、改善磁性的元素。原因尚不明确,但有可能通过与N键合而形成TiN,作为抑制剂发挥功能。在含有Ti的情况下,将Ti含量设定为0.0005%以上,优选设定为0.0010%以上。

[0181] 另一方面,在Ti的含量超过0.0200%的情况下,TiN过量析出,铁损劣化。因此,Ti含量设定为0.0200%以下。优选为0.0100%以下。更优选设定为0.0050%以下。

[0182] Bi:0~0.0200%

[0183] Bi(铋)是提高Goss取向的聚集度、改善磁性的元素。在含有Bi的情况下,将Bi含量设定为0.0010%以上,优选设定为0.0020%以上。

[0184] 另一方面,在Bi超过0.0200%的情况下,覆盖膜密合性劣化。因此,Bi含量设定为0.0200%以下。优选设定为0.0100%以下。

[0185] 此外,上述那样的钢坯中的Bi含量通过经由以下详细叙述那样的工序而成为本实施方式的方向性电磁钢板10,由此母材钢板11中的Bi含量成为0.0100%(100ppm)以下。母材钢板11中的Bi含量的下限值没有特别限定,因而也可以设定为0%。也可以设定为超过0%。

[0186] 在此,上述那样的钢坯中的Cr、B、Ti的各含量有时通过经由以下详细叙述那样的工序,成为本实施方式的方向性电磁钢板10而减少。例如,通过在玻璃覆盖膜中吸收Cr、或者形成BN、TiN等夹杂物,有时母材钢板11中的这些元素的各含量会稍微减少。但是,其减少量均为不影响本实施方式的作用效果这种程度的范围。

[0187] 另外,为了由方向性电磁钢板10得到母材钢板11中的化学成分的总量,使用ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry)进行测定即可。具体地说,首先对方向性电磁钢板10实施利用碱液的清洗处理而除去张力赋予性绝缘覆盖膜15,进而通过酸洗除去玻璃覆盖膜13,然后,使用ICP-AES进行测定。此时,C以及S可以采用燃烧-红外吸收法,N可以采用不活泼气体熔融-热导率法,O可以采用不活泼气体熔融-非分散型红外线吸收法进行测定。

[0188] 作为张力赋予性绝缘覆盖膜的除去方法,可以适用将具有覆盖膜的方向性电磁钢板浸渍于高温的碱溶液中的方法。具体地说,将具有覆盖膜的方向性电磁钢板在80℃~90℃的氢氧化钠水溶液(NaOH:30~50质量%+H<sub>2</sub>O:50~70质量%)中浸渍5分钟~10分钟,然后进行水洗并干燥。由此,可以从方向性电磁钢板除去张力赋予性绝缘覆盖膜。浸渍于氢氧化钠水溶液的时间根据张力赋予性绝缘覆盖膜的厚度适当变更即可。

[0189] 另外,作为玻璃覆盖膜的除去方法,将除去了张力赋予性绝缘覆盖膜的状态的方向性电磁钢板在80~90℃的盐酸(浓度30%~40%)中浸渍1分钟~5分钟后,进行水洗并使其干燥。由此,可以从方向性电磁钢板除去玻璃覆盖膜。

[0190] 这样一来,最好以在张力赋予性绝缘覆盖膜的除去中使用碱溶液、在玻璃覆盖膜的除去中使用盐酸等方式分开使用而除去。通过除去张力赋予性绝缘覆盖膜以及玻璃覆盖膜,能够使母材钢板显现,能够测定母材钢板的化学组成。

[0191] 另外,板坯(钢坯)的钢成分只要从铸造前的钢水采集样品而进行组成分析、或者从铸造后的板坯除去表面氧化膜等而进行组成分析即可。

[0192] 本实施方式的钢坯以及母材钢板11的化学成分的除上述元素(基本元素、任选元素)以外的剩余部分基本上为Fe和杂质。在此,“杂质”与添加的意图无关,存在于钢坯以及母材钢板11中。也就是说,是指在工业上制造母材钢板时,从作为原料的矿石、废料或者制造环境等混入的元素,是允许以不对本实施方式的方向性电磁钢板的作用造成不良影响的含量含有的元素。

[0193] (集合组织)

[0194] 本实施方式的母材钢板11具有沿{110}<001>取向(Goss取向)聚集的二次再结晶集合组织。另外,在母材钢板11中,当将从以轧制面法线方向ND为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\alpha$ (°)、将从以轧制直角方向TD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\beta$ (°)、将从以轧制方向RD为旋转轴的理想Goss取向偏移的平均分散角定义为 $\gamma$ (°)时,所述 $\alpha$ 、所述 $\beta$ 、所述 $\gamma$ 满足下述式(1)。所述 $\beta$ 优选满足下述式(2)。

[0195]  $0.0 \leq |\beta| < 2.5 < |\alpha| < 4.0 \leq |\gamma| \leq 10.0$  (1)

[0196]  $0.0 \leq |\beta| \leq 2.0$  (2)

[0197] 在本实施方式中,将“实际晶体的{110}<001>取向”与“理想的{110}<001>取向”这2种{110}<001>取向区别开来。其原因在于,在本实施方式中,需要将表示实用钢板的晶体取向时的{110}<001>取向与作为学术上的晶体取向的{110}<001>取向区别处理。

[0198] 一般地说,在再结晶后的实用钢板的晶体取向的测定中,不严格区分 $\pm 2.5^\circ$ 左右的角度差而规定晶体取向。如果是以往的方向性电磁钢板,则将以几何学上严格的 $\{110\}<001>$ 取向为中心的 $\pm 3.0^\circ$ 左右的角度范围区域作为“ $\{110\}<001>$ 取向”。但是,在本实施方式中,还需要明确地区分 $\pm 3.0^\circ$ 以下的角度差。

[0199] 因此,本实施方式中,在实用意义上是指方向性电磁钢板的取向的情况下,如以往那样,简记为“ $\{110\}<001>$ 取向(Goss取向)”。另一方面,在是指作为几何学上严格的晶体取向的 $\{110\}<001>$ 取向的情况下,为了避免与以往的公知文献等中使用的 $\{110\}<001>$ 取向的混淆,将其记载为“理想 $\{110\}<001>$ 取向(理想Goss取向)”。

[0200] 在本实施方式中,方向性电磁钢板的实际的晶体取向与理想Goss取向的偏移使用以下3个角度 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ (单位:°)来定义。

[0201] 平均分散角(偏移角) $\alpha$ :绕轧制面法线方向(ND)旋转的偏移角。

[0202] 平均分散角(偏移角) $\beta$ :绕轧制直角方向(TD)旋转的偏移角。

[0203] 平均分散角(偏移角) $\gamma$ :绕轧制方向(RD)旋转的偏移角。

[0204] 上述偏移角 $\alpha$ 、偏移角 $\beta$ 以及偏移角 $\gamma$ 的示意图如图2所示。

[0205] 如图2所示,偏移角 $\alpha$ 是指从轧制面法线方向ND观察时投影于轧制面的晶体的 $<001>$ 方向与轧制方向RD所成的角。偏移角 $\beta$ 是从轧制直角方向TD(板宽方向)观察时投影于L断面(以轧制直角方向TD为法线的断面)的晶体的 $<001>$ 方向与轧制方向RD所成的角。偏移角 $\gamma$ 是从轧制方向RD观察时投影于C断面(以轧制方向RD为法线的断面)的晶体的 $<110>$ 方向与轧制面法线方向ND所成的角。

[0206] 已知偏移角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 中的偏移角 $\alpha$ 、 $\beta$ 对磁特性产生影响。其中,偏移角 $\beta$ 对磁致伸缩产生影响。所谓磁致伸缩,是指磁性体通过磁场施加而发生形状变化的现象。在变压器的变压器等中使用的方向性电磁钢板中,磁致伸缩成为噪音的原因,因而要求磁致伸缩较小。一般地说,为了减小磁致伸缩,以使偏移角 $\beta$ 减小的方式(具体地说,以使偏移角 $\beta$ 的绝对值 $|\beta|$ 的最大值以及平均值减小的方式)控制晶体取向。但是,在以往的方向性电磁钢板中,偏移角 $\beta$ 的降低存在极限,期望进一步降低。

[0207] 于是,本发明人等进行了研究,结果发现通过稳定地确保由抑制剂引起的二次再结晶稳定化的效果,并且提高脱碳退火条件中升温工序的升温速度,可以比以往大幅降低偏移角 $\beta$ ,并且可以充分确保Goss取向。

[0208] 本实施方式在母材钢板的二次再结晶集合组织中,满足上述式(1),优选满足上述式(2)。

[0209] 在式(1)中偏移角 $\gamma$ 超过 $10.0^\circ$ 的情况下,磁特性有可能劣化。另外,与偏移角 $\gamma$ 相比,偏移角 $\alpha$ 、 $\beta$ 对磁特性产生较大的影响。因此,使偏移角 $\alpha$ 、 $\beta$ 小于偏移角 $\gamma$ 。但是,偏移角 $\gamma$ 对噪音特性产生影响,因而不优选过于增大。因此,在式(1)中偏移角 $\gamma$ 设定为 $10.0^\circ$ 以下。另外,如果欲将偏移角 $\gamma$ 控制为低于 $4.0^\circ$ ,则偏移角 $\beta$ 有可能超过 $2.5^\circ$ 。如果偏移角 $\beta$ 超过 $2.5^\circ$ ,则噪音特性有可能劣化。因此,将偏移角 $\gamma$ 的下限设定为 $4.0^\circ$ 以上。进而通过将偏移角 $\alpha$ 以及 $\beta$ 控制为低于 $4.0^\circ$ ,相对于轧制方向的磁通密度得以改善,可以得到良好的磁特性。从提高磁特性的观点出发,偏移角 $\alpha$ 以及 $\beta$ 优选低于 $3.5^\circ$ ,更优选低于 $3.0^\circ$ 。但是,如果欲将偏移角 $\alpha$ 控制为 $2.5^\circ$ 以下,则偏移角 $\beta$ 会成为 $2.5^\circ$ 以上。其原因尚不明确,但可以推测这是因为可以降低偏移角 $\alpha$ 的一次再结晶集合组织与可以降低偏移角 $\beta$ 的一次再结晶集合组织彼

此存在折衷的关系。如果偏移角 $\beta$ 为 $2.5^\circ$ 以上,则噪声特性有可能恶化。因此,将偏移角 $\alpha$ 的下限设定为超过 $2.5^\circ$ ,将偏移角 $\beta$ 的上限设定为低于 $2.5^\circ$ 。如上所述,从兼顾磁特性以及噪声特性的观点出发,在本实施方式中偏移角 $\alpha$ 、 $\beta$ 以及 $\gamma$ 满足下述的关系是有效的。

[0210]  $0.0 \leq |\beta| < 2.5 < |\alpha| < 4.0 \leq |\gamma| \leq 10.0$  (1)

[0211] 另外,在上述式(2)中,如果偏移角 $\beta$ 超过 $2.0^\circ$ ,则噪声特性有可能劣化。因此,偏移角 $\beta$ 优选设定为 $2.0^\circ$ 以下,更优选设定为 $1.8^\circ$ 以下。偏移角 $\beta$ 越小越优选,因而其下限值没有限定。偏移角 $\beta$ 即使为 $0^\circ$ 也没有关系。

[0212] 方向性电磁钢板的晶体取向例如可以使用劳厄衍射(Laue diffraction)装置(RIGAKU RASCO-L II V)而通过实验获得。例如,对宽度方向60mm×长度方向300mm的方向性电磁钢板以长度方向5mm、宽度方向5mm的间隔照射X射线,得到劳厄衍射斑点。然后,利用PC上的分析软件对所得到的劳厄衍射斑点进行拟合,由此可以得到欧拉角 $\phi 1$ 、 $\Phi$ 、 $\phi 2$ 。例如,Goss取向的欧拉角在Bunge表示法中用 $\phi 1=0^\circ$ 、 $\Phi=45^\circ$ 、 $\phi 2=0^\circ$ 或者 $\phi 1=90^\circ$ 、 $\Phi=90^\circ$ 、 $\phi 2=45^\circ$ 给出,因而通过比较由实验得到的取向角度和Goss取向的角度,可以得到偏移角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。

[0213] [方向性电磁钢板的制造方法]

[0214] 接着,参照图3对本发明的一实施方式的方向性电磁钢板及其制造方法(本实施方式的方向性电磁钢板的制造方法)进行说明。图3是表示本实施方式的方向性电磁钢板的制造方法的流程的一个例子的流程图。

[0215] 本实施方式的方向性电磁钢板的制造方法包括:

[0216] (I) 对具有规定的化学组成的钢坯进行加热的加热工序,

[0217] (II) 对所述加热工序后的所述钢坯进行热轧而得到热轧钢板的热轧工序(步骤S101),

[0218] (III) 对所述热轧钢板进行退火而得到热轧退火钢板的热轧板退火工序(步骤S103),

[0219] (IV) 对所述热轧退火钢板实施冷轧而得到冷轧钢板的冷轧工序(步骤S105),

[0220] (V) 对所述冷轧钢板实施脱碳退火而得到脱碳退火钢板的脱碳退火工序(步骤S107),

[0221] (VI) 对所述脱碳退火钢板涂布退火分离剂之后,进行最终退火而得到最终退火钢板的最终退火工序(步骤S109),以及

[0222] (VII) 在所述最终退火钢板的表面形成绝缘覆盖膜的绝缘覆盖膜形成工序(步骤S111)。

[0223] 以下,对各工序的优选条件进行说明。关于未说明的条件,可以适用公知的条件。

[0224] (加热工序)

[0225] 加热工序在热轧之前,对具有上述化学组成的板坯等钢坯进行加热。钢坯的加热温度没有特别限定,优选设定在 $1100 \sim 1450^\circ\text{C}$ 的范围内。加热温度更优选为 $1300 \sim 1400^\circ\text{C}$ 。

[0226] (热轧工序:S101)

[0227] 在热轧工序(步骤S101)中,对加热工序后的钢坯进行热轧而得到热轧钢板。关于热轧条件,没有特别限定,基于所要求的特性而适当地设定即可。通过热轧而加工后的热轧钢板的板厚例如优选在 $2.0\text{mm} \sim 3.0\text{mm}$ 的范围内。

[0228] (热轧板退火工序:S103)

[0229] 热轧板退火工序是对经由热轧工序而制造的热轧钢板进行退火,制成热轧退火钢板的工序。通过实施这样的退火处理,钢板组织发生再结晶,能够实现良好的磁特性。

[0230] 在本实施方式的热轧板退火工序中,按照公知的方法,对经由热轧工序而制造的热轧钢板进行退火即可。关于退火时对热轧钢板进行加热的方法,没有特别限定,可以采用公知的加热方式。另外,对于退火条件也没有特别限定,例如可以对热轧钢板在900~1200℃的温度区域进行10秒钟~5分钟的退火。

[0231] (冷轧工序:S105)

[0232] 在冷轧工序(步骤S105)中,对热轧退火钢板实施包括至少一次以上的道次的冷轧,从而得到冷轧钢板。冷轧也可以在各轧制道次之间不包含一次以上的中间退火。也可以在冷轧工序的最终道次之前,中断冷轧而实施至少一次以上的中间退火,从而实施夹着中间退火的多次冷轧。

[0233] 在进行中间退火的情况下,优选在1000~1200℃的温度下保持5~180秒钟。退火气氛没有特别限定。考虑到制造成本,中间退火的次数优选在3次以内。

[0234] 另外,冷轧工序在进行压下之前,也可以在公知的条件下对热轧钢板的表面实施酸洗。

[0235] 冷轧条件没有限定,例如最终压下率可以设定在80%~95%的范围内。在最终压下率低于80%的情况下,不能得到{110}<001>取向在轧制方向上具有高的聚集度的Goss核的可能性升高而不优选。

[0236] 另一方面,在最终压下率超过95%的情况下,在后段的最终退火工序中,二次再结晶变得不稳定的可能性升高,因而不优选。通过将最终压下率设定在上述范围内,可以得到{110}<001>取向在轧制方向具有高的聚集度的Goss核,并且可以抑制二次再结晶的不稳定化。

[0237] 最终压下率是指冷轧的累积压下率,在进行中间退火的情况下,是指最终中间退火后的冷轧的累积压下率。

[0238] 在此,实施了冷轧的冷轧钢板的板厚(冷轧后的板厚)通常与最终制造的方向性电磁钢板的板厚(包括张力赋予性绝缘覆盖膜的厚度在内的制品板厚)不同。方向性电磁钢板的制品板厚正如之前提及的那样。

[0239] (脱碳退火工序:S107)

[0240] 脱碳退火工序(步骤S107)是对冷轧钢板实施脱碳退火而得到脱碳退火钢板的工序,在本实施方式中,是为了适当地控制织构以及抑制剂这两者而降低平均分散角 $\beta$ 的重要工序。

[0241] 在脱碳退火工序中,使冷轧钢板一次再结晶,并且从钢板中除去对磁特性造成不良影响的C(碳)。另外,在脱碳退火工序中,促进后续的最终退火工序中的稳定的二次再结晶,因而使Goss核增加,并且使通过退火形成的SiO<sub>2</sub>厚膜化并且致密化。本实施方式的方向性电磁钢板的制造方法在该脱碳退火工序中,按照规定的热处理条件而实施退火处理,由此可以在接下来的最终退火工序中精细地控制二次再结晶组织。

[0242] 本实施方式的脱碳退火工序为了得到所希望的二次再结晶组织,包括升温工序(步骤S131)和均热工序(步骤S133)这2个工序。

[0243] 升温工序(步骤S131)是将冷轧工序中得到的冷轧钢板以规定的升温速度从室温升温至850℃~950℃的范围内的温度(最高加热温度)T1(℃)的工序。另外,均热工序(步骤S131)是将以规定的升温速度升温后的冷轧钢板冷却至规定的温度,在规定的温度区域保持规定时间,由此进行退火的工序。

[0244] <升温工序>

[0245] 本实施方式的升温工序是用于精细地控制二次再结晶晶粒的集合组织的重要工序。

[0246] 对于薄料,由于使板厚减薄,因而冷轧中的压下率(冷轧率)升高,但如果冷轧率增加,则Goss取向减少,二次再结晶不稳定化。与此相对照,本实施方式在脱碳退火工序的升温工序中,将550~800℃的温度区域的平均升温速度设定为400℃/秒以上,从而使Goss取向增加。另外,550~800℃的温度区域对再结晶、即转变的行为产生影响。在升温工序中,经由组织的恢复而在最高到达温度下使再结晶结束。对作为后工序的最终退火工序(二次再结晶退火工序)影响最大的是该恢复和再结晶,在本实施方式中,通过将550~800℃的温度区域的平均升温速度设定为400℃/秒以上,可以使几何学上严格的具有{110}<001>的Goss取向的核增加。另一方面,在该温度区域中的平均升温速度低于400℃/秒时,不能使几何学上严格的具有{110}<001>的Goss取向的核充分增加。

[0247] 550℃~800℃的温度区域的平均升温速度的上限从特性的观点出发不需要限定,但从对使用的设备以及装置的负荷的观点出发,不希望使该平均升温速度过度上升。因此,将550~800℃的温度区域的平均升温速度设定为3000℃/秒以下。

[0248] 如上所述,之所以将控制平均升温速度的温度区域设定为550~800℃,是因为该温度区域对于Goss取向的富集以及恢复是重要的温度区域。该温度区域是本发明人等调查各温度下的滞留时间对Goss取向的存在频率以及恢复造成的影响而发现的范围。

[0249] 也就是说,本发明人等调查了各温度下的滞留时间对Goss取向的存在频率以及恢复造成的影响,结果发现,由于550~800℃的温度区域的滞留,一次再结晶集合组织中的Goss取向频率减少。换句话说,通过提高550~800℃的温度区域的升温速度,可以提高Goss取向的存在频率。如果可以提高Goss取向的存在频率,则在最终退火工序中,可以提高Goss取向的粗大化概率,进而导致磁特性的提高。

[0250] 进而发现,在本实施方式的升温工序中,通过将800~850℃的温度区域的平均升温速度设定为100℃/秒以上,可以使形成于钢板表层的SiO<sub>2</sub>厚膜化并且致密化。

[0251] 以下,对SiO<sub>2</sub>的生成形态与二次再结晶稳定化的关系进行说明。

[0252] 在薄料中,表面积的比例较多,因而抑制剂的分解速度较快,二次再结晶不稳定化。抑制剂分解的触发是作为一次覆盖膜的Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>与AlN的相互作用。为了抑制抑制剂的分解,降低一次覆盖膜的形成速度、即提高一次覆盖膜的生成温度是有效的。另外,一次覆盖膜的形成速度受到脱碳退火钢板中的SiO<sub>2</sub>的存在量的影响。

[0253] 另外,本发明人等更详细地进行了研究,结果获得了如下的见解,一次覆盖膜的生成温度的高温化可以通过使脱碳退火工序的升温工序中形成的SiO<sub>2</sub>厚膜化且致密化来实现。通过SiO<sub>2</sub>的厚膜化以及致密化而可以使一次覆盖膜的生成温度高温化的机理尚不明确,但可以认为其原因在于,厚膜化且致密化的SiO<sub>2</sub>使SiO<sub>2</sub>中的Mg离子的迁移率降低。

[0254] 升温工序中形成的SiO<sub>2</sub>的形态大致分为在钢板表面形成的“外部氧化膜”、在钢板

表层形成的“内部氧化膜”，“内部氧化膜”进一步分为“球状氧化物”和“片状氧化膜”。本发明人等特别着眼于其中的“外部氧化膜”，发现通过在升温工序中形成厚膜且致密的外部氧化膜，可以在接下来的最终退火工序中，降低一次覆盖膜的形成速度（即提高一次覆盖膜的生成温度），可以实现抑制剂的稳定化（分解速度的降低）。抑制剂的分解得到抑制而可以谋求稳定化的机理尚不明确，但可以认为通过厚膜且致密地形成的 $\text{SiO}_2$ 的外部氧化膜，Mg向钢板内部的侵入得到抑制，有可能延迟一次覆盖膜（玻璃覆盖膜）的生成。可以认为其原因在于， $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 的生成本身延迟，因而 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 与AlN的反应（即AlN的分解反应）也延迟。AlN的分解反应高温化关系到Goss取向的晶粒生长速度的确保，因而作为磁特性是优选的方向。

[0255] 另外，在本实施方式的升温工序中，将冷轧钢板升温至 $850^\circ\text{C} \sim 950^\circ\text{C}$ 的范围内的温度（最高加热温度）T1（ $^\circ\text{C}$ ）。最高加热温度T1是在接下来的均热工序中抑制内部氧化方面有效的要素。为了在升温工序中使冷轧钢板充分地进行外部氧化而利用外部氧化膜充分地覆盖钢板表面，将最高加热温度T1设定为 $850^\circ\text{C}$ 以上。由此，可以谋求均热工序中的内部氧化的抑制（球状氧化物以及片状氧化膜的生成抑制）。最高加热温度T1优选为 $870^\circ\text{C}$ 以上，更优选为 $900^\circ\text{C}$ 以上。另一方面，过度地提高最高加热温度T1会导致设备的过度负担，因而最高加热温度T1设定为 $950^\circ\text{C}$ 以下。

[0256] 在升温工序中，通过将 $800 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）的温度区域的平均升温速度设定为 $100^\circ\text{C}/\text{秒}$ 以上，如上所述，可以厚膜且致密地形成在钢板表面形成的 $\text{SiO}_2$ 的外部氧化膜。另一方面，在 $800 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）的温度区域的平均升温速度低于 $100^\circ\text{C}/\text{秒}$ 的情况下，除了 $\text{SiO}_2$ 的外部氧化膜的厚度变得不充分以外，还可能导致 $\text{SiO}_2$ 以外的氧化膜（例如 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 等）的生成。 $\text{SiO}_2$ 以外的氧化膜在最终退火工序时有可能促进抑制剂的分解。其原因尚不明确，但可以列举出 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 等氧化膜与 $\text{SiO}_2$ 相比，与AlN的亲合性有可能较高。因此，将 $800 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）的温度区域的平均升温速度设定为 $100^\circ\text{C}/\text{秒}$ 以上，优选设定为 $200^\circ\text{C}/\text{秒}$ 以上，更优选设定为 $400^\circ\text{C}/\text{秒}$ 以上。为了进一步抑制 $\text{SiO}_2$ 以外的氧化膜（特别是 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ）的生成，进一步促进 $\text{SiO}_2$ 的外部氧化膜的生成，在升温工序中，平均升温速度的控制区域优选设定为 $550 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）。也就是说，优选将 $550 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）的温度区域的平均升温速度设定为 $100^\circ\text{C}/\text{秒}$ 以上。从抑制生成 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 的观点出发，应控制的优选温度区域为 $600 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ），更优选为 $650 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）。

[0257] 另一方面， $800 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）的温度区域的平均升温速度的上限从特性的观点出发不需要限定，但为了得到超过 $1500^\circ\text{C}/\text{秒}$ 的平均升温速度，需要特别的装置，因而将平均升温速度设定为 $1500^\circ\text{C}/\text{秒}$ 以下。

[0258] 另外，在本实施方式的升温工序中，将从 $800^\circ\text{C}$ 至所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）的温度区域的升温时的气氛的露点设定为 $0^\circ\text{C}$ 以下。升温工序中的露点也对 $\text{SiO}_2$ 以外的氧化膜的形成产生影响。为了促进 $\text{SiO}_2$ 的形成，抑制 $\text{SiO}_2$ 以外的氧化膜的形成，降低升温工序中的气氛的氧化度是有效的。因此， $800 \sim$ 所述最高加热温度T1（ $^\circ\text{C}$ ）的温度区域的气氛的露点设定为 $0^\circ\text{C}$ 以下，优选设定为 $-5^\circ\text{C}$ 以下，更优选设定为 $-10^\circ\text{C}$ 以下。此外，在升温工序中，将室温以上且低于 $800^\circ\text{C}$ 的温度区域中的气氛的露点设定为 $0^\circ\text{C}$ 以下并不损害本发明的效果。

[0259] <均热工序>

[0260] 在升温工序之后，实施均热工序。

[0261] 在钢板中残留有碳的情况下,铁损特性随时间推移而劣化(已知为磁时效)。因此,为了减少碳量,脱碳退火时的气氛通常设定为较高的氧势。然而,在退火工序时,在气氛的氧势较高的情况下, $\text{SiO}_2$ 生成量增多,一次覆盖膜形成速度增加。

[0262] 因此,均热工序需在较低的氧势的退火气氛中进行。由此,降低一次覆盖膜的形成速度。

[0263] 具体地说,均热工序优选在温度为 $780 \sim 860^\circ\text{C}$ 且氧势( $\text{PH}_2\text{O}/\text{PH}_2$ )为 $0.20 \sim 0.60$ 的气氛中,将冷轧钢板保持100秒 $\sim$ 300秒。此外,本实施方式在所述升温工序中,超过均热过程的保持温度而进行加热,因而在向均热工序转移时,通过空冷、自然放冷等进行冷却直至达到规定的均热保持温度,但该冷却并不损害本实施方式所示的效果。

[0264] 如果均热工序中的保持温度低于 $780^\circ\text{C}$ ,则受到扩散控制步骤的制约而发生脱碳不良。如果发生脱碳不良,则在钢板内残留碳,成为铁损劣化的原因。或者,由于发生相变,因而不会发生二次再结晶本身。

[0265] 另一方面,如果保持温度超过 $860^\circ\text{C}$ ,则受到界面速度控制步骤的制约,仍然成为脱碳不良。这是因为生成对脱碳有害的覆盖性的氧化膜。

[0266] 另外,如果均热过程中的氧势低于 $0.20$ ,则成为脱碳不良。脱碳是钢板中的碳与退火气氛中的氧的化学反应。氧势低与氧分压低同义,意味着难以发生脱碳反应的状况。

[0267] 另一方面,如果均热工序过程中的氧势超过 $0.60$ ,则仍成为脱碳不良。这是因为会生成阻碍脱碳的覆盖性的氧化膜。

[0268] 另外,在不控制氧势的情况下,作为氮与氢的混合气体或者氮气,也可以将气氛露点温度设定为 $30^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 。

[0269] (氮化处理工序)

[0270] 在本实施方式的方向性电磁钢板的制造方法中,也可以在脱碳退火工序与后述的最终退火工序之间进行氮化处理。

[0271] 在氮化处理工序中,例如将脱碳退火工序后的冷轧钢板在氮化处理气氛(含有氢、氮以及氨等具有氮化能力的气体的气氛)内维持在 $700 \sim 850^\circ\text{C}$ 左右。在此,优选以冷轧钢板的N含量以质量基准计为 $40 \sim 1000\text{ppm}$ 的方式对钢板实施氮化处理。在氮化处理后的冷轧钢板的N含量低于 $40\text{ppm}$ 时,冷轧钢板内 $\text{AlN}$ 不会充分析出,从而 $\text{AlN}$ 有可能不能作为抑制剂发挥功能。因此,在将 $\text{AlN}$ 用作抑制剂的情况下,冷轧钢板的N含量优选设定为 $40\text{ppm}$ 以上。

[0272] 另一方面,在冷轧钢板的N含量超过 $1000\text{ppm}$ 的情况下,在最终退火中二次再结晶结束后也在钢板内过量地存在 $\text{AlN}$ 。这样的 $\text{AlN}$ 成为铁损劣化的原因。因此,钢板的N含量优选设定为 $1000\text{ppm}$ 以下。

[0273] (最终退火工序(二次再结晶退火工序):S109)

[0274] 在最终退火工序(步骤S109)中,对脱碳退火钢板(脱碳退火工序后或者氮化处理工序后)涂布退火分离剂,然后进行最终退火,从而得到最终退火钢板。

[0275] 最终退火条件没有限定,例如只要在含有氢和氮的气氛气体中,升温至 $1150 \sim 1250^\circ\text{C}$ ,在该温度区域退火(保持)10 $\sim$ 60小时的条件下进行即可。

[0276] 一般地说,最终退火在将钢板卷绕成卷材状的状态下长时间进行。因此,在最终退火之前,以防止卷材的卷绕的内和外的烧接为目的,将退火分离剂涂布于冷轧钢板并使其干燥。作为涂布的退火分离剂,使用以 $\text{MgO}$ 为主要成分的退火分离剂。通过使用以 $\text{MgO}$ 为主要

成分的退火分离剂,可以在母材钢板的表面形成玻璃覆盖膜。在不以MgO为主要成分的情况下,不会形成一次覆盖膜(玻璃覆盖膜)。究其原因,这是因为一次覆盖膜为 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 或者 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 化合物,因而缺乏形成反应所必需的Mg。

[0277] 在本实施方式的方向性电磁钢板的制造方法中,涂布于脱碳退火钢板的退火分离剂优选含有相对于MgO的重量合计为0.10~10.00%的选自Ti、Sb、Sr以及Cl之中的1种以上。

[0278] 通过在以MgO为主要成分的退火分离剂中含有选自Ti、Sb、Sr以及Cl之中的一种以上,可以抑制一次覆盖膜与AlN的反应性,从而改善磁特性。其机理尚不明确,但可以认为其原因在于,这些元素在一次覆盖膜与母材钢板的界面偏析,从而抑制一次覆盖膜与AlN的反应。Ti、Sb、Sr、Cl的合计含量以重量%计优选为0.10~10.00%。在Ti、Sb、Sr、Cl的合计含量相对于MgO的重量低于0.10%时,有时不能充分得到磁特性的改善效果。另一方面,在Ti、Sb、Sr、Cl的合计含量超过10.00%的情况下,不能形成充分的一次覆盖膜量,不能确保对磁特性改善有效的覆盖膜张力,从而铁损有可能处于劣势。

[0279] 此外,退火分离剂中的Ti、Sb、Sr以及Cl的存在形态(即添加手段)既能够以化合物的形式存在,也能够以单质的形式存在。例如,在退火分离剂中含有Ti的情况下,既能够以Ti单质的形式含有,也能够以Ti氧化物(例如 $\text{TiO}_2$ )的形式含有。

[0280] (绝缘覆盖膜形成工序:S111)

[0281] 在绝缘覆盖膜形成工序(步骤S111)中,在最终退火钢板的表面(单面或者两面)形成绝缘覆盖膜(张力赋予绝缘覆盖膜)。关于绝缘覆盖膜的形成条件,没有特别限定,使用公知的绝缘覆盖膜处理液,通过公知的方法进行处理液的涂布以及干燥即可。通过在钢板表面形成绝缘覆盖膜,能够进一步提高方向性电磁钢板的磁特性。

[0282] 形成绝缘覆盖膜的钢板的表面既可以是在涂布处理液之前实施了利用碱等的脱脂处理、利用盐酸、硫酸、磷酸等的酸洗处理等任意的预处理后的表面,也可以是未实施这些预处理后的保持最终退火后的状态不变的表面。

[0283] 形成于钢板的表面的绝缘覆盖膜只要是作为方向性电磁钢板的绝缘覆盖膜使用的绝缘覆盖膜,就没有特别限定,能够使用公知的绝缘覆盖膜。作为这样的绝缘覆盖膜,例如可以列举出以磷酸盐以及胶体二氧化硅为主要成分的覆盖膜。另外,可以举出以无机物为主体、进而含有有机物的复合绝缘覆盖膜。在此,复合绝缘覆盖膜是指例如以铬酸金属盐、磷酸金属盐或者胶体二氧化硅、Zr化合物、Ti化合物等无机物中的至少任一种为主体且分散有微细的有机树脂的粒子的绝缘覆盖膜。特别地,从近年来的需求提高的制造时的环境负荷降低的观点出发,有时可以使用将磷酸金属盐、Zr或者Ti的偶联剂、或者它们的碳酸盐、铵盐用作起始物质的绝缘覆盖膜。

[0284] (磁畴细分化工序)

[0285] 在本实施方式的方向性电磁钢板的制造方法中,也可以在绝缘覆盖膜形成工序之后具备磁畴细分化工序。

[0286] 在磁畴细分化工序中,通过在轧制方向上以规定的间隔对绝缘覆盖膜的表面照射激光束、电子束等能量线,从而导入多个线状的应变(通过基于能量线照射的快速加热和之后的快速冷却而产生的热应变)。形成多个线状的应变的间隔(即相邻的应变的间隔)优选在轧制方向上设定为3.0~9.0mm。作为能量线,可以列举出激光束以及电子束。激光束可以

是连续波激光,也可以是脉冲激光。激光束的种类例如可以列举出光纤激光、YAG激光或者CO<sub>2</sub>激光。电子束可以是连续束,也可以是断续束。

[0287] 实施例

[0288] 如表1所示,准备每个钢编号(No. a ~ 1)的化学组成不同的板坯。接着,使用各板坯制造方向性电磁钢板(试验编号1 ~ 19)。

[0289] 具体地说,将板坯加热至1100 ~ 1380℃的温度,然后进行热轧,由此制作出板厚为2.3mm的热轧钢板。

[0290] 接着,对得到的热轧钢板实施热轧板退火。具体地说,在退火温度1100℃、保持时间20秒的条件下对热轧钢板进行退火。

[0291] 接着,对热轧退火后的热轧钢板(热轧板退火钢板)通过酸洗等除去表面氧化皮,然后进行不含中间退火的包含多个道次的冷轧,从而制作出板厚为0.16 ~ 0.23mm的冷轧钢板。

[0292] 对于得到的冷轧钢板,以表3所示的条件进行脱碳退火。均热过程的保持时间在均热过程中设定为120秒。

[0293] 对于试验No. No. 1、2、9、10、14、15,进一步实施将氮量提高至200ppm的氮化处理。

[0294] 接着,对脱碳退火钢板实施最终退火工序。具体地说,在冷轧钢板的表面,采用水料浆涂布将以MgO为主体且含有表3中记载的元素的退火分离剂涂布于钢板表面。此外,表3中记载的退火分离剂的含有成分表示元素单质的重量分数。

[0295] 接着,将涂布有退火分离剂的脱碳退火钢板在1200℃下保持20小时,从而制作出在母材钢板上具有一次覆盖膜(玻璃覆盖膜)的钢板(最终退火钢板)。

[0296] 接着,对该钢板形成绝缘覆盖膜。具体地说,在钢板的表面(更详细地说,作为一次覆盖膜的玻璃覆盖膜的表面)涂布以胶体二氧化硅以及磷酸盐为主体的绝缘覆盖膜形成液并进行热处理(烘烤)。由此,得到具备母材钢板、形成于母材钢板上的玻璃覆盖膜和形成于玻璃覆盖膜上的绝缘覆盖膜的方向性电磁钢板。得到的方向性电磁钢板的母材钢板的化学组成如表2所示。此外,表2的化学组成中的记载“-”是指对应的元素含量在实施方式中规定的有效数字(直至最小位的数值)中为0%。

[0297]

表1

| No. | 板坯的化学组成 (质量%, 剩余部分: Fe和杂质) |      |      |        |         |       |       |      |      |      |        |        |        |
|-----|----------------------------|------|------|--------|---------|-------|-------|------|------|------|--------|--------|--------|
|     | C                          | Si   | Mn   | S+Se   | sol. Al | N     | P     | Cu   | Sn   | Cr   | B      | Ti     | Nb     |
| a   | 0.031                      | 3.05 | 0.01 | 0.0050 | 0.038   | 0.003 | 0.085 | 0.45 | -    | -    | -      | -      | -      |
| b   | 0.132                      | 3.85 | 0.40 | 0.0301 | 0.014   | 0.016 | 0.055 | -    | -    | -    | -      | 0.0078 | -      |
| c   | 0.055                      | 3.30 | 0.05 | 0.0155 | 0.023   | 0.005 | 0.040 | 0.20 | -    | -    | -      | -      | 0.0051 |
| d   | 0.063                      | 3.40 | 0.20 | 0.0220 | 0.032   | 0.015 | 0.043 | 0.15 | -    | -    | 0.0051 | -      | -      |
| e   | 0.079                      | 3.45 | 0.08 | 0.0231 | 0.026   | 0.008 | 0.015 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | -      | 0.0052 | -      |
| f   | 0.085                      | 3.50 | 0.15 | 0.0205 | 0.034   | 0.009 | 0.023 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.0033 | 0.0040 | -      |
| g   | 0.045                      | 3.45 | 0.11 | 0.0154 | 0.022   | 0.007 | 0.010 | -    | -    | -    | -      | -      | -      |
| h   | 0.050                      | 3.33 | 0.15 | 0.0168 | 0.029   | 0.008 | 0.011 | -    | -    | -    | -      | -      | -      |
| i   | 0.061                      | 3.25 | 0.09 | 0.0152 | 0.028   | 0.007 | 0.012 | -    | -    | -    | -      | -      | -      |
| j   | 0.072                      | 3.42 | 0.07 | 0.0255 | 0.024   | 0.009 | 0.015 | -    | -    | -    | -      | -      | -      |
| k   | 0.084                      | 3.39 | 0.08 | 0.0241 | 0.026   | 0.008 | 0.013 | -    | -    | -    | -      | -      | -      |
| l   | 0.086                      | 3.38 | 0.10 | 0.0223 | 0.025   | 0.007 | 0.025 | -    | -    | -    | -      | -      | -      |

[0298]

表2

| No. | 母材的化学组成 (质量%, 剩余部分: Fe和杂质) |      |      |        |         |       |       |      |      |      |        |        |        |      |
|-----|----------------------------|------|------|--------|---------|-------|-------|------|------|------|--------|--------|--------|------|
|     | C                          | Si   | Mn   | S+Se   | sol. Al | N     | P     | Cu   | Sn   | Cr   | B      | Ti     | Nb     | Ni   |
| a   | -                          | 3.00 | 0.01 | -      | -       | 0.001 | 0.085 | 0.45 | -    | -    | -      | -      | -      | -    |
| b   | -                          | 3.74 | 0.38 | 0.0009 | -       | 0.001 | 0.055 | -    | -    | -    | -      | 0.0075 | -      | -    |
| c   | -                          | 3.25 | 0.04 | 0.0010 | -       | 0.001 | 0.040 | 0.20 | -    | -    | -      | -      | 0.0051 | -    |
| d   | -                          | 3.35 | 0.19 | 0.0013 | -       | -     | 0.043 | 0.15 | -    | -    | 0.0049 | -      | -      | 0.05 |
| e   | -                          | 3.31 | 0.08 | 0.0008 | -       | -     | 0.015 | 0.10 | 0.10 | 0.03 | -      | 0.0049 | -      | 0.05 |
| f   | -                          | 3.39 | 0.14 | -      | -       | -     | 0.023 | 0.10 | 0.20 | 0.25 | 0.0030 | 0.0038 | -      | -    |
| g   | -                          | 3.39 | 0.09 | -      | -       | -     | 0.010 | -    | -    | -    | -      | -      | -      | -    |
| h   | -                          | 3.25 | 0.12 | -      | -       | -     | 0.011 | -    | -    | -    | -      | -      | -      | -    |
| i   | -                          | 3.05 | 0.08 | -      | -       | -     | 0.012 | -    | -    | -    | -      | -      | -      | -    |
| j   | -                          | 3.25 | 0.06 | 0.0010 | -       | -     | 0.015 | -    | -    | -    | -      | -      | -      | -    |
| k   | -                          | 3.25 | 0.07 | 0.0009 | -       | -     | 0.013 | -    | -    | -    | -      | -      | -      | -    |
| l   | -                          | 3.19 | 0.08 | 0.0011 | -       | -     | 0.025 | -    | -    | -    | -      | -      | -      | -    |

[0299]

表3

| 试验<br>No. | 组成<br>No. | 板厚<br>(mm) | 脱碳退火                           |                          |                                         |                                   | 退火分离剂       |             |             |            |                             |
|-----------|-----------|------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------------------------|
|           |           |            | 平均升温速度<br>(550~800℃)<br>(°C/秒) | 最高<br>加热温度<br>T1<br>(°C) | 平均升温速度<br>(800℃~<br>最高加热温度T1)<br>(°C/秒) | 露点<br>(800℃~<br>最高加热温度T1)<br>(°C) | Ti<br>(重量%) | Sr<br>(重量%) | Cl<br>(重量%) | B<br>(重量%) | Ti+<br>Sr+<br>Cl+B<br>(重量%) |
| 1         | a         | 0.23       | 400                            | 850                      | 200                                     | 0                                 | -           | -           | -           | -          | 0.00                        |
| 2         | b         | 0.23       | 400                            | 850                      | 200                                     | 0                                 | -           | -           | -           | -          | 0.00                        |
| 3         | c         | 0.22       | 700                            | 880                      | 500                                     | -15                               | -           | -           | -           | -          | 0.00                        |
| 4         | d         | 0.22       | 700                            | 880                      | 500                                     | -15                               | -           | -           | -           | -          | 0.00                        |
| 5         | e         | 0.19       | 1000                           | 920                      | 800                                     | -20                               | 3.50        | -           | -           | -          | 3.50                        |
| 6         | f         | 0.19       | 1000                           | 920                      | 800                                     | -20                               | 3.50        | 1.65        | -           | -          | 5.15                        |
| 7         | c         | 0.19       | 2000                           | 950                      | 1100                                    | -30                               | 3.00        | 1.43        | 0.10        | -          | 4.53                        |
| 8         | d         | 0.19       | 2000                           | 950                      | 1100                                    | -30                               | 3.00        | 1.43        | 0.10        | 0.10       | 4.63                        |
| 9         | a         | 0.22       | 1000                           | 950                      | 500                                     | 5                                 | 2.50        | -           | -           | -          | 2.50                        |
| 10        | b         | 0.22       | 200                            | 900                      | 400                                     | 0                                 | -           | 1.90        | -           | -          | 1.90                        |
| 11        | c         | 0.22       | 400                            | 830                      | 400                                     | 0                                 | -           | -           | 0.05        | -          | 0.05                        |
| 12        | d         | 0.22       | 200                            | 830                      | 600                                     | 0                                 | -           | -           | -           | 0.05       | 0.05                        |
| 13        | e         | 0.22       | 400                            | 950                      | 50                                      | 0                                 | -           | -           | -           | -          | 0.00                        |
| 14        | g         | 0.18       | 1200                           | 850                      | 700                                     | -15                               | 3.00        | 1.43        | 0.08        | 0.07       | 4.58                        |
| 15        | h         | 0.18       | 1200                           | 850                      | 700                                     | -15                               | 3.00        | 1.43        | 0.08        | 0.07       | 4.58                        |
| 16        | i         | 0.18       | 1200                           | 880                      | 1000                                    | -30                               | 3.00        | -           | 0.08        | 0.07       | 3.15                        |
| 17        | j         | 0.17       | 1000                           | 880                      | 1000                                    | -30                               | 4.20        | -           | 0.03        | 0.03       | 4.26                        |
| 18        | k         | 0.17       | 1000                           | 920                      | 1400                                    | -30                               | 4.20        | -           | 0.03        | 0.03       | 4.26                        |
| 19        | l         | 0.16       | 1000                           | 920                      | 1400                                    | -30                               | 4.20        | -           | 0.03        | 0.03       | 4.26                        |
| 20        | a         | 0.23       | 400                            | 850                      | 200                                     | 0                                 | -           | -           | -           | 0.20       | 0.20                        |
| 21        | b         | 0.23       | 400                            | 850                      | 200                                     | 0                                 | 0.07        | -           | 0.15        | 0.35       | 0.57                        |
| 22        | c         | 0.22       | 400                            | 850                      | 200                                     | 0                                 | -           | 0.05        | 0.15        | 0.35       | 0.55                        |
| 23        | d         | 0.22       | 400                            | 850                      | 200                                     | 0                                 | 0.05        | 0.05        | 0.15        | 0.05       | 0.30                        |
| 24        | a         | 0.22       | 400                            | 850                      | 200                                     | 0                                 | 9.50        | -           | 0.75        | -          | 10.25                       |
| 25        | b         | 0.22       | 400                            | 850                      | 200                                     | 0                                 | 9.50        | -           | 0.75        | -          | 10.25                       |

表4

[0300]

[0301]

| 试验<br>No. | 平均分散角      |            |             | 特性          |              |             | 备注  |
|-----------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-----|
|           | $\beta$    | $\alpha$   | $\gamma$    | 磁通密度<br>(T) | 铁损<br>(W/kg) | 噪音<br>(dBA) |     |
|           | (°)        |            |             |             |              |             |     |
| 1         | 2.3        | 3.4        | 4.3         | 1.91        | 0.77         | 59.5        | 发明例 |
| 2         | 2.4        | 3.1        | 4.5         | 1.91        | 0.76         | 58.4        | 发明例 |
| 3         | 1.8        | 3.3        | 4.5         | 1.92        | 0.72         | 57.2        | 发明例 |
| 4         | 1.9        | 3.5        | 4.3         | 1.92        | 0.71         | 56.9        | 发明例 |
| 5         | 1.4        | 2.8        | 4.6         | 1.95        | 0.68         | 54.5        | 发明例 |
| 6         | 1.3        | 2.8        | 4.9         | 1.96        | 0.67         | 54.3        | 发明例 |
| 7         | 1.5        | 3.0        | 4.8         | 1.96        | 0.67         | 54.8        | 发明例 |
| 8         | 1.3        | 2.8        | 4.7         | 1.93        | 0.66         | 54.4        | 发明例 |
| 9         | 2.1        | 3.3        | <u>11.2</u> | 1.90        | 0.74         | 62.3        | 比较例 |
| 10        | <u>2.8</u> | 3.8        | <u>3.5</u>  | 1.89        | 0.86         | 61.4        | 比较例 |
| 11        | 1.8        | <u>4.3</u> | 4.8         | 1.89        | 0.87         | 57.8        | 比较例 |
| 12        | <u>3.2</u> | <u>2.3</u> | 4.2         | 1.92        | 0.76         | 63.0        | 比较例 |
| 13        | <u>3.0</u> | 3.5        | 4.5         | 1.89        | 0.87         | 64.2        | 比较例 |
| 14        | 1.5        | 2.7        | 4.5         | 1.95        | 0.66         | 53.2        | 发明例 |
| 15        | 1.3        | 2.8        | 4.5         | 1.95        | 0.65         | 53.4        | 发明例 |
| 16        | 1.5        | 2.8        | 4.6         | 1.96        | 0.65         | 52.9        | 发明例 |
| 17        | 1.2        | 2.6        | 4.3         | 1.94        | 0.62         | 52.5        | 发明例 |
| 18        | 1.2        | 2.7        | 4.5         | 1.96        | 0.61         | 53.1        | 发明例 |
| 19        | 1.1        | 2.6        | 5.1         | 1.97        | 0.60         | 51.5        | 发明例 |
| 20        | 1.7        | 3.7        | 4.7         | 1.91        | 0.74         | 57.3        | 发明例 |
| 21        | 1.7        | 3.4        | 4.8         | 1.91        | 0.75         | 57.4        | 发明例 |
| 22        | 1.9        | 3.6        | 4.8         | 1.91        | 0.74         | 56.8        | 发明例 |
| 23        | 1.6        | 3.6        | 4.6         | 1.91        | 0.74         | 55.9        | 发明例 |
| 24        | 2.4        | 3.6        | 4.9         | 1.92        | 0.78         | 58.8        | 发明例 |
| 25        | 2.4        | 3.7        | 5.1         | 1.92        | 0.76         | 59.2        | 发明例 |

[0302] 对于得到的方向性电磁钢板,按照以下的要领评价了磁特性(铁损以及磁通密度)。结果如表4所示。

[0303] [铁损]

[0304] 对于得到的钢板样品,以平行于板宽方向的方向上为60mm、平行于轧制方向的方向上为300mm的尺寸切出,将这些样品在 $800 \pm 50^\circ\text{C}$ 下保持2小时,从而实施消除应力退火。然后,通过激光照射进行磁畴细化。

[0305] 将激光照射后的样品供于利用单板磁测定试验(SST)装置的磁性评价,从而测定了铁损( $W_{17/50}$ )。另外,对样品施加800A/m的磁场,也测定了磁通密度 $B_8$ (T)。

[0306] 铁损( $W_{17/50}$ )按照以下的基准进行评价,如果为A~C评价,则判断为铁损特性优良(铁损较低),如果为D评价,则判断为铁损特性较差。

[0307] 低于0.70:A评价

[0308] 0.70以上且低于0.75:B评价

[0309] 0.75以上且低于0.80:C评价

[0310] 0.80以上:D评价

[0311] 另外,关于磁通密度( $B_g$ ),将1.88T以上设定为合格,将低于1.88T设定为不合格。

[0312] [噪音特性]

[0313] 对于实施了上述磁畴控制的宽度60mm×长度300mm的样品,使用磁致伸缩测定装置,通过交流磁致伸缩测定法测定了磁致伸缩。磁致伸缩测量装置规定为具备激光多普勒振动仪、励磁线圈、励磁电源、磁通检测线圈、放大器和示波器的装置。

[0314] 具体地说,以在轧制方向上最大磁通密度为1.7T的方式对样品施加交流磁场。利用激光多普勒振动仪测量由磁畴的伸缩引起的样品的长度的变化,从而得到磁致伸缩信号。对得到的磁致伸缩信号进行傅立叶解析,求出磁致伸缩信号的各频率成分 $f_n$ ( $n$ 为1以上的自然数)的振幅 $C_n$ 。使用各频率成分 $f_n$ 的A修正系数 $\alpha_n$ ,求出下式所示的磁致伸缩速度等级LVA(dB)。

[0315] 
$$LVA = 20 \times \text{Log} \left( \sqrt{\sum (\rho_c \times 2\pi \times f_n \times \alpha_n \times C_n / \sqrt{2})^2} / P_{e0} \right)$$

[0316] 这里, $\rho_c$ 为固有声阻抗,规定 $\rho_c = 400$ 。 $P_{e0}$ 为最小可听声压,使用 $P_{e0} = 2 \times 10^{-5}$ (Pa)。A修正系数 $\alpha_n$ 使用JIS C 1509-1(2005)的表2中记载的值。

[0317] 基于得到的磁致伸缩速度等级(LVA),按照以下的基准评价了噪音特性。

[0318] 如果磁致伸缩速度等级为60.0dBA以下,则判断为“噪音特性优良”(C评价)。如果为57.5dBA以下,则判断为更优良(B评价),如果为55.0dBA以下,则判断为特别优良(A评价)。在磁致伸缩速度等级超过60.0dBA的情况下,判定为“噪音特性并不充分(D评价)”。

[0319] 将磁通密度( $B_g$ )为1.88T以上且铁损以及噪音特性为C评价以上的样品设定为合格。

[0320] 由表1~表4可知,在偏移角 $\alpha$ 、 $\beta$ 以及 $\gamma$ 满足上述式(1)的钢板中,能够兼顾良好的磁特性以及噪音特性。

[0321] 符号说明:

[0322] 10方向性电磁钢板、11母材钢板、13一次覆盖膜(玻璃覆盖膜)、15二次覆盖膜(张力赋予性绝缘覆盖膜)

[0323] 产业上的可利用性

[0324] 根据本公开的上述方式,能够提供不使生产率降低而具有良好的磁特性以及噪声特性的方向性电磁钢板及其制造方法,因而产业上的可利用性较高。

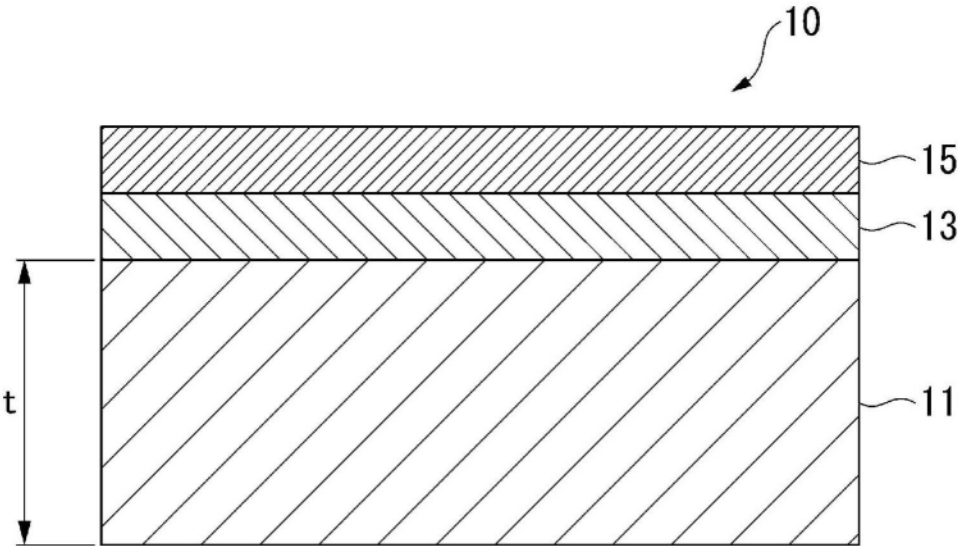


图1A

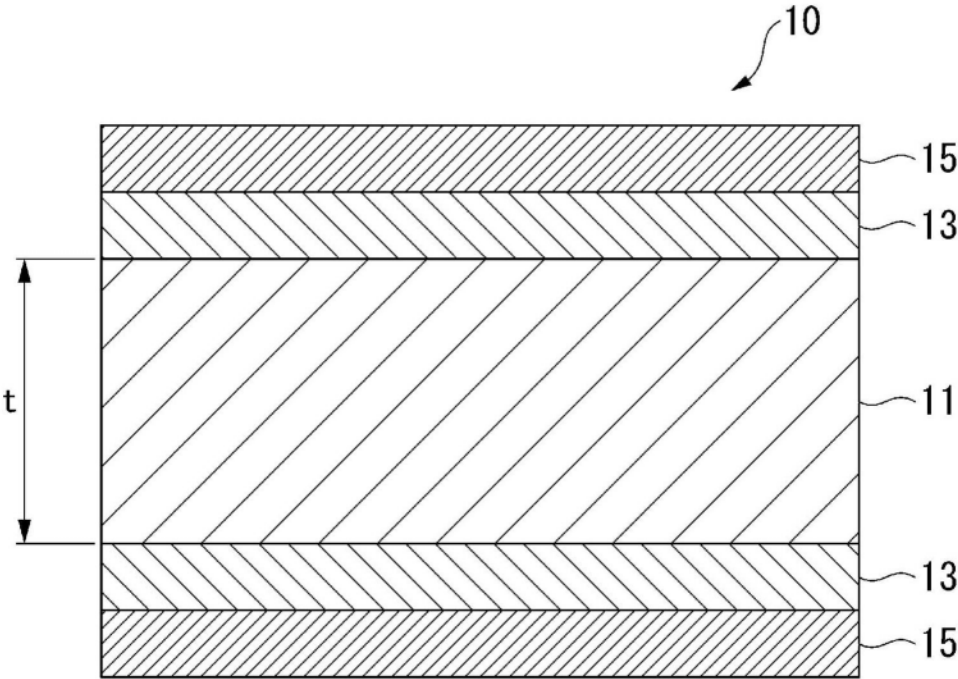


图1B

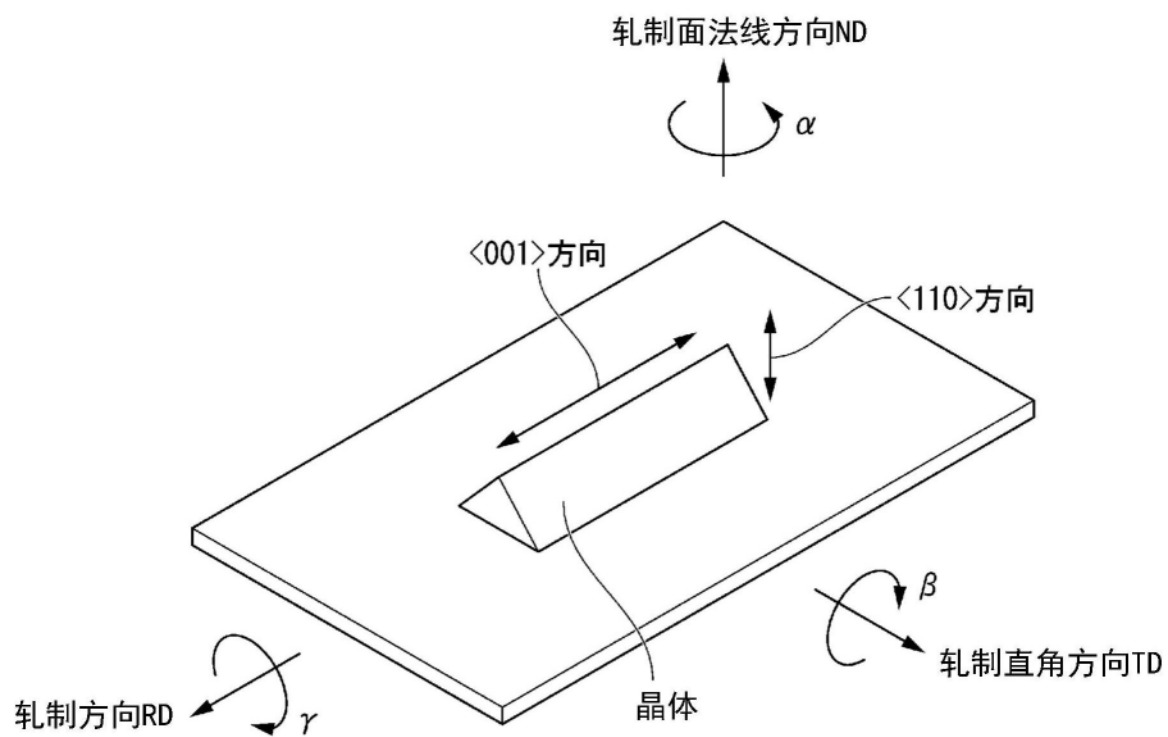


图2

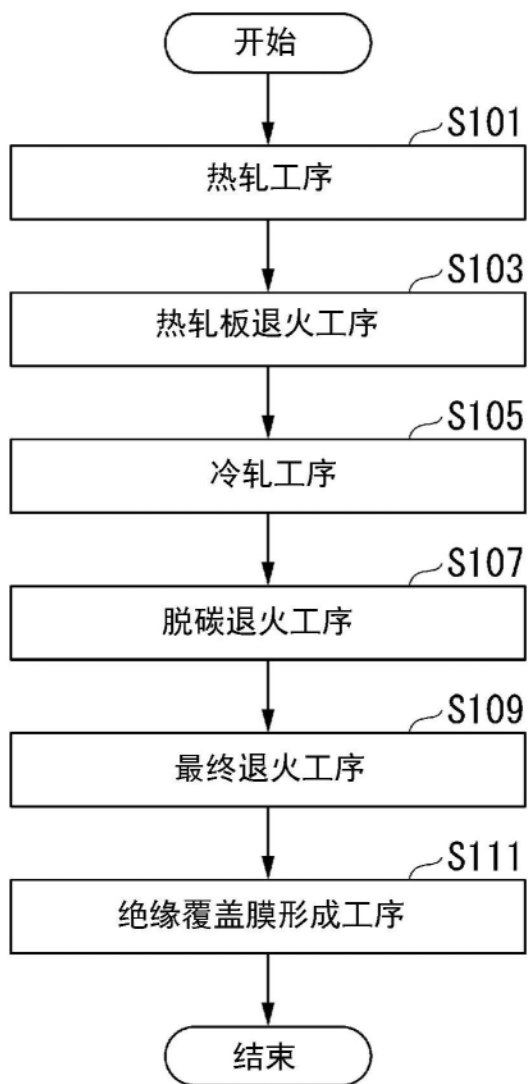


图3