

一种综合性能优异的无取向电工钢及其制造方法

技术领域

本发明涉及一种钢板及其制造方法，尤其涉及一种无取向电工钢板及其制造方法。

背景技术

随着电动汽车的快速发展，对作为其核心部件驱动电机的磁芯材料的无取向硅钢提出了更高要求，该无取向硅钢必须具备足够高的强度来抵抗高转速下的离心力，保证转子不变形、不断裂，同时还要具有优异的电磁性能，特别是 400Hz-2000Hz 高频范围铁损要尽可能低，以及磁感应强度要高，以满足电机启动或加速时的高扭矩要求。

公开号为 CN101490294A，公开日为 2009 年 7 月 22 日，名称为“高强度无方向性电磁钢板”的中国专利文献公开了一种强度超过 650MPa 的无取向电工钢板，虽然其强度较高，但这种电磁钢板的铁损 $P_{10/400}$ 高达 70W/kg，电磁性能不佳。

公开号为 CN112930412A，公开日 2021 年 6 月 8 日，名称为“无取向性电磁钢板及其制造方法以及电动铁芯及其制造方法”的中国专利文献公开了一种强度和铁损优良的无取向电工钢板，其主要解决手段是对含 Si 量 2.8-6.5% 的冷轧板进行 700-820°C 退火，通过再结晶面积率在 40-95% 的非完全再结晶组织进行强化，使得钢板屈服强度超过 500MPa。但该方法不能同时兼顾驱动电机的高频低铁损、高磁通密度要求。

基于此，期望获得一种综合性能优异的无取向电工钢及其制造方法，其在具有高强度的同时还具有优异的电磁性能。

发明内容

本发明的目的之一在于提供一种综合性能优异的无取向电工钢，该无取向电工钢的磁各向异性小，磁感应强度高，中高频铁损低，同时兼顾高屈服强度，可广泛的应用于电动汽车驱动电机、高速电机、无人机等铁芯材料。

为了实现上述目的，本发明提出了一种无取向电工钢，除了 Fe 和不可避免的杂质之外，其还含有以质量%计的下述化学元素：

$C \leq 0.0050\%$ ，Si：3.10-4.50%，Al：0.10-2.00%，Mn：0.10-2.50%；并且

$3.75\% \leq \text{Si} + \text{Al} \leq 5.22\%$, 优选满足 $3.75\% \leq \text{Si} + \text{Al} \leq 5.00\%$;

优选地, 本发明提供了一种无取向电工钢, 其含有以质量%计的下述化学元素:

$\text{C} \leq 0.0050\%$, Si : $3.10\text{--}4.50\%$, Al : $0.10\text{--}2.00\%$, Mn : $0.10\text{--}2.50\%$, 余量为 Fe 和不可避免的杂质; 并且满足 $3.75\% \leq \text{Si} + \text{Al} \leq 5.22\%$, 优选满足 $3.75\% \leq \text{Si} + \text{Al} \leq 5.00\%$ 。

在本发明所述的无取向电工钢中, 各化学元素的设计原理如下所述:

C : 在本发明所述的用无取向电工钢中, C 元素为杂质元素, 其对于无取向硅钢的磁性有害, 因此必须将 C 元素含量严格控制为 $\text{C} \leq 0.0050\%$, 例如 $\text{C} \leq 0.0042\%$ 、 $\text{C} \leq 0.0030\%$ 。

Si : 在本发明所述的无取向电工钢中, Si 可以增加无取向电工钢板电阻率, 降低铁损, 同时作为固溶强化元素, 也可以提升钢板强度。当 Si 含量超过 4.50% 时, 会出现有序相 Fe_3Si 或 FeSi , 材料室温塑性急剧劣化, 无法进行工业化大规模冷轧生产, 同时磁感应强度也会劣化。当 Si 含量不足 3.10% 时, 达不到高屈服强度、高频低铁损效果。基于此, 将 Si 元素含量控制在 $3.10\text{--}4.50\%$ 。例如, Si 含量的上限可以为 4.00% 、 3.78% 等, Si 含量的下限可以为 3.25% 等。

Al : 在本发明所述的无取向电工钢中, Al 也是增加电阻率降低铁损的有效元素, 但过量添加对材料磁感应强度不利, 且会造成炼钢浇铸困难, 钢板冷加工性能也会恶化, 因此添加量控制不超过 2.00% , 同时考虑到该元素改善铁损的作用, 控制添加量在 0.10% 以上。基于此, 将 Al 元素含量控制在 $0.10\text{--}2.00\%$ 。例如, Al 含量的上限可以为 1.50% 、 1.35% 等, Al 含量的下限可以为 0.15% 、 0.50% 、 0.65% 等。

另外, 本发明特别控制 Si 、 Al 两种合金元素的总含量为 $3.75\%\text{--}5.22\%$, 优选 $3.75\%\text{--}5.00\%$, 这是因为: 这两种元素都是固溶强化元素, 且提升材料电阻率, 若总含量低于 3.75% , 无法实现本发明的无取向硅钢板性能, 而超过 5.22% 后则会造成冷轧生产困难, 磁感也会降低。例如, $\text{Si} + \text{Al}$ 含量的上限可以为 5.00% 、 4.80% 等, $\text{Si} + \text{Al}$ 含量的下限可以为 3.95% 、 4.10% 等。

Mn : 在本发明所述的无取向电工钢中, Mn 可以提高电阻率, 同时可以与杂质元素 S 反应形成 MnS , 改善电磁性能, 因此 0.10% 以上 Mn 的加入是必要的, 而超过 2.50% , 会降低钢的塑性, 导致冷轧断带。因此, Mn 含量被控制为 $0.10\text{--}2.50\%$, 优选为 $0.10\text{--}2.00\%$ 。例如, Mn 含量的上限可以为 1.84% 、 1.51% 等, Mn 含量的下限可以为 0.15% 、 0.35% 、 0.65% 等。

优选地, C 元素含量为 $\text{C} \leq 0.0030\%$ 。

优选地, 在不可避免的杂质中, $\text{P} \leq 0.040\%$, $\text{S} \leq 0.0030\%$, $\text{N} \leq 0.0050\%$, $\text{O} \leq 0.0030\%$,

$Nb+V+Ti \leq 0.0050\%$ 。

更优选地，在不可避免的杂质中， $P \leq 0.020\%$ ， $N \leq 0.0035\%$ 。

在本发明所述的无取向电工钢中，元素 P、S、N、O 以及 Nb、V 和 Ti 均为杂质元素，在技术条件允许情况下，为了获得性能更好且质量更优的钢材，应尽可能降低钢中杂质元素的含量。其中：

P： P 是晶界偏聚元素，对于本发明这种 Si 含量超过 3.10% 成分体系，磷含量如果超过 0.040%，会加剧电工钢板脆性，难于轧制。例如，P 含量可以为 $P \leq 0.034\%$ 、 $P \leq 0.024\%$ 、 $P \leq 0.020\%$ 。

S： 在本发明中，S 是磁性有害元素，其会与 Mn 结合生成细小 MnS，从而阻碍成品退火时晶粒长大，劣化钢板的磁性能。为此，将 S 元素的质量百分含量控制为： $S \leq 0.0030\%$ 。例如， $S \leq 0.0018\%$ 、 $S \leq 0.0015\%$ 等。

N： 在本发明中，N 是磁性有害元素，其会与 Al、Ti、Nb、V 形成细小氮化物，阻碍晶粒长大。为此，在本发明所述的无取向电工钢中，将 N 元素的质量百分含量控制为： $N \leq 0.0050\%$ 。例如， $N \leq 0.0035\%$ ， $N \leq 0.0015\%$ 。

O： 在本发明中，O 为有害元素，对于 $3.75\% \leq Si+Al \leq 5.22\%$ 的成分体系，材料冷加工性能对晶界氧偏聚非常敏感，同时形成的硅、铝、锰氧化物也会使材料磁性劣化。为此，在本发明将 O 元素的质量百分含量控制为： $O \leq 0.0030\%$ 。例如， $O \leq 0.0021\%$ 、 $O \leq 0.0015\%$ 。

Nb、V、Ti 会与钢中残留的 C、N 结合，形成细小的碳化物、氮化物，严重影响退火过程晶粒长大，对材料磁性能不利，因此本发明控制 Nb、V、Ti 三种元素质量百分含量总量在 0.0050% 以下，例如 0.0045% 以下、0.0035% 以下。

优选地，本发明所述的无取向电工钢还含有 B：0.0003-0.0100%。

在本发明上述技术方案中，为了进一步优化本发明所述的无取向电工钢的性能，钢中还可以优选地添加有适量的 B 元素。

B： 在本发明所述的无取向电工钢中，B 为晶界强化元素，其可以增强高硅成分体系晶界结合能力，从而提升材料冷轧加工性能。但当 B 元素过量添加时，其会细化晶粒组织，不利于磁性能，因此质量百分含量不宜超过 0.0100%；而当钢中的 B 元素含量低于 0.0003% 时，则又起不到晶界强化作用。例如，B 含量的上限可以为 0.0080%，B 含量的下限可以为 0.0010%。

优选地，本发明所述的无取向电工钢含有 Sn、Sb 中的至少一种，Sn 和 Sb 的合计含量为 0.005-0.300%。例如，Sn 和 Sb 的总含量可以为 0.010-0.300%。

Sn 和 Sb 都是晶界偏析元素,其一方面可以阻碍热轧板常化退火过程微量氧沿晶界扩散,防止钢板内氧化和塑性劣化,另一方面可以改善成品板退火过程{100}面织构、Goss 织构等磁性有利织构。

优选地,在本发明所述的无取向电工钢中,其还含有 Co、Ni、Cu、Cr 中的至少一种,并且这些元素的质量百分含量总量控制在 0.02-3.00%。例如,Co、Ni、Cu、Cr 的总含量可以为 0.30-3.00%、例如 0.40-2.00%。

Co、Ni、Cu、Cr 元素可以起到固溶强化作用,这些元素在不损害钢板冷加工性能的前提下,可以进一步改善材料电磁性能和强度。

优选地,本发明所述的无取向电工钢的晶粒平均尺寸为 10-110 μm 、优选 35-98 μm 。

如果成品板的晶粒尺寸小于 10 μm ,则达不到本发明铁损 $P_{10/600}$ 性能要求,如果成品板的晶粒尺寸超过 110 μm ,则屈服强度会降低,而且生产效率较低,对生产设备要求较高,成本升高。

优选地,本发明所述的无取向电工钢的厚度为 0.10 至 0.30mm、例如 0.15 至 0.30mm。

本发明所述的无取向电工钢具有优异的综合性能,其具有高强度、低铁损、高磁感和低磁各向异性。

优选地,本发明所述的无取向电工钢的屈服强度 $\geq 430\text{MPa}$ 、优选 $\geq 455\text{MPa}$ 。

优选地,本发明所述的无取向电工钢在磁通密度 1.0T、频率 600Hz 下的铁损 $P_{10/600} \leq 35.0\text{W/kg}$ (优选 $P_{10/600} \leq 29.3\text{W/kg}$),磁感应强度 $B_{50} \geq 1.640\text{T}$ (优选 $B_{50} \geq 1.654\text{T}$),且纵向磁感应强度 B_{50L} 与横向磁感应强度 B_{50C} 差值 ΔB 不超过 1000 高斯(优选 ΔB 不超过 822 高斯)。

相应地,本发明的另一目的还在于提供一种用于制造上述无取向电工钢的方法。该制造方法简单可行,可以获得综合性能优异的无取向电工钢板。

为了达到上述发明目的,本发明提出了一种制造无取向电工钢的方法,其包括步骤:

(1) 制得铸坯;

(2) 热轧:其中控制粗轧的最后一道轧制压下率为 35%-55%,粗轧得到的中间板坯在进入精轧机之前,先保温停留 50s-80s,中间板坯进精轧机时的温度为 960-1100 $^{\circ}\text{C}$ (优选 965-1100 $^{\circ}\text{C}$),中间板坯带头带尾的温差 $\Delta T \leq 40^{\circ}\text{C}$ (优选 $\leq 35^{\circ}\text{C}$);

(3) 常化退火;

(4) 冷轧;

(5) 最终退火;

(6) 涂覆绝缘涂层。

优选地，在步骤(2)中，进入精轧机前的中间板坯的距离板坯表层厚度四分之一处的{001}面织构强度与{111}<112>织构强度比值 $I \geq 0.55$ 。

在本发明中，发明人优化了钢材的化学成分设计，同时限定了合理的制造工艺，其根据设计的化学成分制得连铸坯后，依次经过热轧、常化退火、冷轧（可以为一次冷轧或含中间退火的二次冷轧）、最终退火及涂覆绝缘涂层，以获得综合性能优异的无取向电工钢。

优选地，连铸板坯在热轧粗轧轧制时，控制最后一道次轧制压下率为 35-55%，获得中间板坯，该中间坯在进入热轧精轧机之前，需要在带有保温罩的辊道停留 50-80s，或者也可以利用粗轧机后的热卷箱装备重新卷取和开卷，以实现保温停留 50-80s，中间板坯进入精轧机第一机架的温度控制在 960-1100°C，且中间板坯带头和带尾的温度差 $\Delta T \leq 40^\circ\text{C}$ 。

对上述工艺参数进行限定，主要是为了使中间板坯发生充分再结晶，同时减少 AlN、MnS、TiC 等第二相的固溶析出，增加磁性有利织构组分，特别是控制距离中间板坯表层四分之一位置的{001}面织构强度，使其与{111}<112>织构强度比值 $I \geq 0.55$ ，从而达到改善成品退火板织构效果，减小磁各向异性，纵向磁感应强度 B_{50L} 与横向磁感应强度 B_{50C} 差值 ΔB 不超过 1000 高斯，且磁感应强度 B_{50} 超过 1.64T 的技术效果。

另外，中间板坯带头带尾温差控制在 40°C 以内，一方面可以保证带钢产品整卷性能的一致性，另外一方面可以实现后续精轧机组恒速恒温轧制，大幅降低精轧机生产薄规格高牌号无取向硅钢时的马达过流风险，保证持续生产的稳定性。

优选地，在步骤(2)中，粗轧得到的中间板坯的厚度为 25-40mm。

优选地，在步骤(3)中，常化温度为 850-1050°C，常化保温时间为例如 90s。

优选地，在步骤(5)中，最终退火温度为 750-1000°C，最终退火时间为 11s-125s。

最终退火工艺旨在更好地实现成品无取向电工钢板的目标晶粒尺寸为 10-110 μm ，若退火温度太低或退火时间太短，使得成品板晶粒尺寸小于 10 μm ，则达不到本发明铁损 $P_{10/600}$ 性能要求，而退火温度太高或者退火时间太长，造成成品钢板的晶粒尺寸超过 110 μm ，则屈服强度会降低，而且生产效率较低，成本升高。

本发明所述的无取向电工钢及其制造方法具有如下所述的优点以及有益效果：

本发明所述的无取向电工钢的磁各向异性小，磁感应强度高，中高频铁损低，同时兼顾高屈服强度，可广泛的应用于电动汽车驱动电机、高速电机、无人机等铁芯材料。

优选地，本发明所述的无取向电工钢的屈服强度 $\geq 430\text{MPa}$ （优选 $\geq 455\text{MPa}$ ），铁损 $P_{10/600} \leq 35.0\text{W/kg}$ （优选 $P_{10/600} \leq 29.3\text{W/kg}$ ），磁感应强度 $B_{50} \geq 1.640\text{T}$ （优选 $B_{50} \geq 1.654\text{T}$ ），

且纵向磁感应强度 B_{50L} 与横向磁感应强度 B_{50C} 差值 ΔB 不超过 1000 高斯(优选 ΔB 不超过 822 高斯)。

除非另有明确说明或存在明显矛盾,否则可以对本文描述的范围的端点值进行任意组合以产生又一个范围或子范围。例如,在某些实施方式中,针对某个特征所描述的上限值也可以作为该特征的下限值;针对某个特征所描述的下限值也可以作为该特征的上限值。

具体实施方式

下面将结合具体的实施例对本发明所述的无取向电工钢及其制造方法做进一步的解释和说明,然而该解释和说明并不对本发明的技术方案构成不当限定。

实施例 1-10 以及比较例 1-5

表 1 列出了实施例 1-10 和比较例 1-5 的成品电工钢的各化学元素的质量百分含量。

表 1 (wt%, 余量为 Fe 和除 P、S、O、N、Nb、V、Ti 以外的不可避免的杂质)

编号	C	Si	Al	Mn	P	S	N	O	B	Sn、Sb	Co、Ni、Cu、Cr	Nb+V+Ti	Si+Al
实施例 1	0.0042	3.10	0.85	1.95	0.005	0.0018	0.0012	0.0015	-	-	-	0.0035	3.95
实施例 2	0.0021	3.25	0.50	1.84	0.007	0.0015	0.0004	0.0008	-	Sn+Sb: 0.050	-	0.0041	3.75
实施例 3	0.0014	3.22	2.00	0.85	0.019	0.0015	0.0005	0.0021	0.0100	Sn: 0.300	-	0.0028	5.22
实施例 4	0.0019	3.25	1.51	0.55	0.018	0.0005	0.0015	0.0019	0.0003	-	Ni+Cr: 0.80	0.0031	4.76
实施例 5	0.0015	3.45	1.35	1.51	0.034	0.0016	0.0014	0.0009	0.0010	Sn: 0.130	Ni+Cr: 0.40	0.0038	4.80
实施例 6	0.0015	3.49	1.50	0.65	0.014	0.0016	0.0015	0.0008	0.0050	-	Cu+Cr+Co: 2.00	0.0045	4.99
实施例 7	0.0015	3.78	0.65	0.35	0.024	0.0004	0.0015	0.0014	0.0080	-	Ni: 0.50	0.0042	4.43
实施例 8	0.0018	4.00	0.10	0.15	0.009	0.0003	0.0008	0.0005	0.0080	-	Ni+Co: 0.30	0.0035	4.10
实施例 9	0.0017	4.50	0.15	0.10	0.007	0.0005	0.0009	0.0005	0.0080	Sb: 0.010	Cu+Ni+Cr: 3.00	0.0027	4.65
实施例 10	0.0014	3.15	0.75	2.5	0.004	0.0002	0.0021	0.0010	-	-	Co+Ni+Cu+Cr: 0.02	0.0031	3.90
比较例 1	0.0020	<u>2.60</u>	1.50	0.50	0.022	0.0027	0.0021	0.0015	-	-	-	0.0048	4.10
比较例 2	0.0021	<u>2.10</u>	0.50	0.50	0.019	0.0018	0.0022	<u>0.0032</u>	-	-	-	0.0041	<u>2.60</u>
比较例 3	0.0037	<u>3.00</u>	0.20	0.50	0.021	0.0013	0.0020	0.0023	0.0010	-	-	<u>0.0075</u>	<u>3.20</u>
比较例 4	0.0015	3.20	0.80	0.20	0.024	0.0020	0.0026	0.0020	-	-	-	0.0045	4.00
比较例 5	0.0018	3.30	0.75	0.20	0.026	0.0028	0.0020	0.0021	-	-	-	0.0045	4.05

实施例 1-10 的无取向电工钢采用以下步骤制得：

(1) 对钢水进行冶炼和铸造，制得铸坯。

(2) 热轧（包括粗轧和精轧）：控制粗轧的最后一道轧制压下率为 35%-55%，获得厚度为 25-40mm 的中间板坯；中间板坯在进入精轧机之前，先保温停留 50s-80s，进入精轧机前的中间板坯的距离板坯表层厚度四分之一处的{001}面织构强度与{111}<112>织构强度比值 $I \geq 0.55$ ；中间板坯进精轧机时的温度为 960-1100℃，并且控制中间板坯带头带尾的温差 $\Delta T \leq 40^\circ\text{C}$ 。

(3) 常化退火：实施例 1-4 常化温度为 1050℃，实施例 5-7 常化温度为 920℃，实施例 8-10 常化温度为 850℃；比较例 1-5 的常化温度 920℃；实施例 1-10 和比较例 1-5 的常化保温时间均为 90s。

(4) 冷轧：经一次冷轧轧制成目标厚度，或者经过一次冷轧+中间退火+二次冷轧轧制成 0.10 至 0.30mm 厚度的板材。

(5) 最终退火：最终退火温度为 750-1000℃，最终保温时间 11s-125s。

(6) 涂覆绝缘涂层。

需要说明的是，比较例 1-5 虽然也采用上述步骤流程制得，但其具体工艺参数和/或化学元素组成中的一种以上存在不符合本发明控制要求的情况。

表 2 列出了实施例 1-10 和比较例 1-5 的电工钢的具体制造工艺参数和最终成品厚度。

表 2

编号	成品厚度 (mm)	粗轧最后一道次压下率 (%)	保温停留时间 (s)	I	中间板坯进精轧机温度 (°C)	中间板坯带头带尾温差 (°C)	冷轧工艺	最终退火温度 (°C)	最终退火时间 (s)
实施例 1	0.27	40	55	0.55	990	35	一次冷轧	890	20
实施例 2	0.30	35	50	0.78	1100	20	一次冷轧	910	20
实施例 3	0.30	55	65	0.89	1032	30	一次冷轧	850	35
实施例 4	0.15	40	65	1.1	980	28	二次冷轧	900	70
实施例 5	0.25	50	55	0.95	990	32	二次冷轧	980	25
实施例 6	0.25	38	70	0.65	1035	15	二次冷轧	750	15
实施例 7	0.25	40	68	1.35	965	20	二次冷轧	900	125
实施例 8	0.30	38	54	0.56	996	18	二次冷轧	1000	11
实施例 9	0.30	39	80	0.58	1085	10	二次冷轧	950	15
实施例 10	0.30	40	60	0.72	1050	25	一次冷轧	980	35
比较例 1	0.25	40	55	0.95	1000	40	一次冷轧	1050	20
比较例 2	0.30	37	55	0.65	1000	40	一次冷轧	960	60
比较例 3	0.30	37	60	1.35	990	40	二次冷轧	920	60
比较例 4	0.25	<u>60</u>	<u>45</u>	<u>0.33</u>	<u>950</u>	<u>80</u>	一次冷轧	840	20
比较例 5	0.25	<u>25</u>	<u>130</u>	<u>0.42</u>	<u>940</u>	<u>115</u>	一次冷轧	960	30

注：表 2 中的中间板坯距表层四分之一处{001}面织构强度与{111}<112>织构强度比值 I 采用 XRD 衍射仪测试得到。

将最终制得的实施例 1-10 和比较例 1-5 的成品电工钢分别取样，分别测试在磁通密度 1.0T 和频率 600Hz 下的铁损 $P_{10/600}$ 、在磁场 5000A/m 下磁化时的磁感应强度 B_{50} 、纵向磁感应强度 B_{50L} 和横向磁感应强度 B_{50C} 以及屈服强度，所得的测试结果列于下述表 3 中。其中相关性能测试手段，如下所述：

成品板晶粒尺寸测量基于标准《GB/T6394-2017 金属平均晶粒度测定方法》的面积法。

铁损 $P_{10/600}$ 测试是基于标准《GB/T10129-2019 电工钢带（片）中频磁性能测量方法》的方圈法。

磁感应强度是基于标准《GB/T3655-2008 用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法》的方圈法，分别测试 B_{50} 、纵向 B_{50L} 、横向 B_{50C} 。

屈服强度性能指标是基于标准《GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》。

表 3 列出了实施例 1-10 和比较例 1-5 的成品电工钢的测试结果。

表 3

编号	晶粒平均尺寸 (μm)	$P_{10/600}$ (W/kg)	B_{50} (T)	ΔB (Gs)	屈服强度 (MPa)
实施例 1	55	34.1	1.660	520	435
实施例 2	62	31.3	1.665	452	441
实施例 3	35	29.3	1.654	625	455
实施例 4	85	28.6	1.701	750	445
实施例 5	98	24.1	1.676	620	485
实施例 6	10	31.5	1.665	350	495
实施例 7	108	22.4	1.652	473	504
实施例 8	88	23.1	1.648	565	512
实施例 9	75	21.3	1.642	822	521
实施例 10	95	32.6	1.648	745	440
比较例 1	<u>140</u>	32.2	1.685	410	<u>372</u>
比较例 2	100	<u>51.5</u>	1.701	550	<u>305</u>
比较例 3	85	<u>42.1</u>	1.675	755	<u>365</u>
比较例 4	30	31.5	<u>1.631</u>	<u>1150</u>	465
比较例 5	95	25.2	<u>1.628</u>	<u>1100</u>	485

结合上表 1、表 2 和表 3 可以看出,比较例 1 和比较例 2 中, Si 含量不在本发明范围内,导致比较例 1 的成品晶粒尺寸超出上限,其屈服强度较低,同时导致比较例 2 的铁损也偏高。

比较例 3 中 Si 含量不满足本发明,且 Si+Al 含量小于 3.75%,导致其屈服强度较低。

比较例 4 和比较例 5 虽然成分满足本发明的要求,但是其热轧工艺参数、织构比值 I 不在规定范围内,因此其没有获得本发明所希望的成品磁感应强度和磁各向异性。

本发明的实施例 1-2 采用了一次冷轧工艺,其化学成分控制、粗轧最后一道次压下率、保温停留时间、中间板坯进入精轧机温度、中间板坯的带头带尾温差、成品晶粒尺寸都在本发明设计范围内,所以可以得到高屈服强度、磁性能优异的综合性能优良的无取向硅钢。

本发明的实施例 2 进一步添加了 Sn 和 Sb,其强度和铁损较之实施例 1 更优。

本发明的实施例 3 进一步添加了 B,其强度和铁损较之实施例 1 也更优。

本发明的实施例 4-9,通过进一步添加 Sn、Sb、Co、Ni、Cu、Cr 这些微合金元素中的至少一种以及二次冷轧工艺,使得成品钢板性能进一步提升。

本发明的实施例 10 进一步添加了 Co、Ni、Cu、Cr 这些微合金元素,其强度和铁损较之实施例 1 更优。

需要说明的是,本发明的保护范围中现有技术部分并不局限于本申请文件所给出的实施例,所有不与本发明的方案相矛盾的现有技术,包括但不限于在先专利文献、在先公开出版物,在先公开使用等等,都可纳入本发明的保护范围。

此外,本案中各技术特征的组合方式并不限本案权利要求中所记载的组合方式或是具体实施例所记载的组合方式,本案记载的所有技术特征可以以任何方式进行自由组合或结合,除非相互之间产生矛盾。

还需要注意的是,以上所列举的实施例仅为本发明的具体实施例。显然本发明不局限于以上实施例,随之做出的类似变化或变形是本领域技术人员能从本发明公开的内容直接得出或者很容易便联想到的,均应属于本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1. 一种无取向电工钢，除了 Fe 和不可避免的杂质之外，其还含有以质量%计的下述化学元素：

$C \leq 0.0050\%$ ，Si：3.10-4.50%，Al：0.10-2.00%，Mn：0.10-2.50%；并且 $3.75\% \leq Si+Al \leq 5.22\%$ ，优选满足 $3.75\% \leq Si+Al \leq 5.00\%$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的无取向电工钢，其中，其含有以质量%计的下述化学元素：

$C \leq 0.0050\%$ ，Si：3.10-4.50%，Al：0.10-2.00%，Mn：0.10-2.50%；余量为 Fe 和不可避免的杂质；并且满足 $3.75\% \leq Si+Al \leq 5.22\%$ ，优选满足 $3.75\% \leq Si+Al \leq 5.00\%$ 。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的无取向电工钢，其中， $C \leq 0.0030\%$ 。

4. 根据权利要求 1 或 2 所述的无取向电工钢，其中，在不可避免的杂质中， $P \leq 0.040\%$ ， $S \leq 0.0030\%$ ， $N \leq 0.0050\%$ ， $O \leq 0.0030\%$ ， $Nb+V+Ti \leq 0.0050\%$ 。

5. 根据权利要求 4 所述的无取向电工钢，其中， $P \leq 0.020\%$ ， $N \leq 0.0035\%$ 。

6. 根据权利要求 1 或 2 所述的无取向电工钢，其中，所述无取向电工钢还含有 B：0.0003-0.0100%。

7. 根据权利要求 1 或 2 所述的无取向电工钢，其中，所述无取向电工钢还含有 Sn 和 Sb 中的至少一种，Sn 和 Sb 以质量%计的合计含量为 0.005-0.300%。

8. 根据权利要求 1 或 2 所述的无取向电工钢，其中，所述无取向电工钢还含有 Co、Ni、Cu 和 Cr 中的至少一种，Co、Ni、Cu 和 Cr 以质量%计的合计含量为 0.02-3.00%，优选为 0.30-3.00%。

9. 根据权利要求 1 或 2 所述的无取向电工钢，其中，所述无取向电工钢的晶粒平均尺寸为 10-110 μm 。

10. 根据权利要求 1 或 2 所述的无取向电工钢，其中，所述无取向电工钢的厚度为 0.10 至 0.30mm。

11. 根据权利要求 1 或 2 所述的无取向电工钢，其中，所述无取向电工钢的屈服强度 $\geq 430\text{MPa}$ ，铁损 $P_{10/600} \leq 35.0\text{W/kg}$ ，磁感应强度 $B_{50} \geq 1.640\text{T}$ ，且纵向磁感应强度 B_{50L} 与横向磁感应强度 B_{50C} 差值 ΔB 不超过 1000 高斯。

12. 一种制造权利要求 1-11 中任一项所述的无取向电工钢的方法，其包括如下步骤：

(1) 制得铸坯；

(2) 热轧：粗轧的最后一道轧制压下率为 35%-55%，粗轧得到的中间板坯在进入精轧机之前，先保温停留 50s-80s，中间板坯进精轧机时的温度为

960-1100°C，中间板坯带头带尾的温差 $\Delta T \leq 40^\circ\text{C}$ ；

- (3) 常化退火；
- (4) 冷轧；
- (5) 最终退火；
- (6) 涂覆绝缘涂层。

13. 根据权利要求 12 所述的方法，其中，在步骤（2）中，进入精轧机前的中间板坯的距离板坯表层厚度四分之一处的 $\{001\}$ 面织构强度与 $\{111\}<112>$ 织构强度比值 $I \geq 0.55$ 。

14. 根据权利要求 12 所述的方法，其中，在步骤（2）中，粗轧得到的中间板坯的厚度为 25-40mm。

15. 根据权利要求 12 所述的方法，其中，在步骤（3）中，常化温度为 850-1050°C。

16. 根据权利要求 12 所述的方法，其中，在步骤（5）中，最终退火温度为 750-1000°C，最终退火时间为 11-125s。