

无取向硅钢及其制备方法

本申请要求了申请日为 2023 年 11 月 27 日，申请号为 202311588428.8，发明名称为“无取向硅钢的制备方法”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本发明属于钢铁材料制备技术领域，涉及一种无取向硅钢，以及一种无取向硅钢的制备方法，尤其是一种新能源驱动电机定子铁芯用的超薄无取向硅钢及其生产方法。

背景技术

新能源电动汽车是正在迅速崛起的全球新能源经济的驱动力之一，正在给全球汽车制造业带来历史性变革，也给其他行业带来重大影响。新能源驱动电机是新能源电动汽车的三大核心部件之一，其驱动特性直接决定汽车行驶的爬坡、加速、最高速度等主要性能指标，是新能源电动汽车的重要部件。

驱动电机主要由定子、转子和壳体部件构成，其驱动原理大致为：基于电磁感应现象，利用定子产生旋转磁场并作用于转子，以形成磁动力，进而驱动汽车行驶。因此，铁芯的磁性能，例如铁损、磁感应强度等，尤其是定子铁芯的铁损，决定了驱动电机的驱动特性。再者，铁芯的力学强度，尤其是转子铁芯的强度，也会影响到驱动电机在高速驱动中的可靠性。

然而，驱动电机定子铁芯用的无取向硅钢的现有技术中，例如申请号为 CN201711204222.5、CN202010143200.8、CN201710670723.6 等，普遍存在着产品磁性能差、合金元素高而导致生产成本大的缺陷。而另一类现有技术中，例如申请号为 CN201910612755.X、CN202010143200.8 等，为了改善磁性能而采用常化工艺，但是却又因此引发了冷轧困难的风险，相应的冷轧前必须进行预热，使得工艺路线长、工序复杂，设备成本和工艺成本均居高不下。

发明内容

为了解决现有技术的技术问题，本发明的目的在于提供一种无取向硅钢及其制备方法。

为实现上述发明目的，本发明一实施方式提供了一种无取向硅钢。所述无取向硅钢的基材的化学成分以质量百分比计为：C≤0.0020%，S≤0.0015%，Si:3.30~3.60%，

Al:0.40~0.80%, Mn:0.50~1.00%, $P \leq 0.015\%$, Sn:0.03~0.06%, $Nb \leq 0.003\%$, $V \leq 0.003\%$, $Ti \leq 0.003\%$, $Cr \leq 0.02\%$, $Ni \leq 0.02\%$, $Cu \leq 0.02\%$, $N \leq 0.0030\%$, 余量为 Fe 及不可避免的夹杂。

优选地, 无取向硅钢的化学成分以质量百分比计: $4.00\% \leq Si+Al \leq 4.20\%$ 。

优选地, 无取向硅钢的磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64T$, 中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0W/kg$, 高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0W/kg$ 。

优选地, 无取向硅钢的厚度为 0.15mm, 磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64T$, 中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 11.0W/kg$, 高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 27.0W/kg$ 。

优选地, 无取向硅钢的厚度为 0.20mm, 磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64T$, 中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0W/kg$, 高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0W/kg$ 。

优选地, 无取向硅钢的平均晶粒尺寸为 60~120 μm 。

为实现上述发明目的, 本发明一实施方式提供了一种无取向硅钢的制备方法。所述制备方法包括:

炼钢, 并制备出厚度为 220~240mm 的连铸坯; 该连铸坯的化学成分以质量百分比计为: $C \leq 0.0020\%$, $S \leq 0.0015\%$, $Si: 3.30 \sim 3.60\%$, Al:0.40~0.80%, Mn:0.50~1.00%, $P \leq 0.015\%$, Sn:0.03~0.06%, $Nb \leq 0.003\%$, $V \leq 0.003\%$, $Ti \leq 0.003\%$, $Cr \leq 0.02\%$, $Ni \leq 0.02\%$, $Cu \leq 0.02\%$, $N \leq 0.0030\%$, 余量为 Fe 及不可避免的夹杂;

将连铸坯加热到 1080~1120°C 并保温 150~200min, 而后轧制成厚度为 35~45mm 的中间坯, 再将中间坯经过精轧、卷取得到厚度为 2.00~2.70mm 的热轧卷板; 其中, 精轧开轧温度 930~970°C, 终轧温度 820~860°C, 卷取温度 580~620°C, 精轧压下率 93~95%;

将所述热轧卷板直接进行酸洗处理, 然后通过 3~5 道次的首阶段冷轧制成 0.50~0.70mm 的一次冷轧板, 之后该一次冷轧板在 25% H_2 +75% N_2 的混合气氛和 820°C~860°C 条件下保温 2~5min, 得到一次退火板; 其中, 首阶段冷轧的开始温度 20~40°C, 总压下率为 70~80%, 每道次的压下率为 15~30%;

将一次退火板通过 2~3 道次的二阶段冷轧制成 0.15~0.20mm 的二次冷轧板, 之后该二次冷轧板在 25% H_2 +75% N_2 的混合气氛和 900°C~1000°C 条件下保温 2~5min, 得到二次退火板; 其中, 二阶段冷轧的开始温度 20~40°C, 总压下率为 65~75%, 每道次的压下率为 25~45%;

将二次退火板经冷却、涂层和精整, 得到无取向硅钢成品。

优选地，连铸坯的化学成分以质量百分比计： $4.00\% \leq \text{Si} + \text{Al} \leq 4.20\%$ 。

优选地，在炼钢时，先采用铁水和废钢进行转炉冶炼，之后经过真空冶炼及合金化，得到连铸坯所用的钢水；其中，转炉冶炼终点以质量百分比计 $\text{C}: 0.020 \sim 0.050\%$ 、 $\text{S} \leq 0.0020\%$ 、 $\text{P} \leq 0.015\%$ 。

优选地，所述铁水的化学成分以质量百分比计为： $\text{C} \geq 3.5\%$ ， $\text{S} \leq 0.0015\%$ ， $\text{Si}: 0.20 \sim 0.80\%$ ， $\text{Al} \leq 0.10\%$ ， $\text{Mn} \leq 0.60\%$ ， $\text{P} \leq 0.15\%$ ， $\text{Nb} \leq 0.003\%$ ， $\text{V} \leq 0.03\%$ ， $\text{Ti} \leq 0.10\%$ ， $\text{Cr} \leq 0.03\%$ ， $\text{Ni} \leq 0.02\%$ ， $\text{Cu} \leq 0.02\%$ ，余量为 Fe 及不可避免的夹杂。

优选地，所述废钢采用以质量百分比计满足 $\text{C} \leq 0.0050\%$ 、 $\text{S} \leq 0.0025\%$ 、 $\text{Si}: 0.50 \sim 3.60\%$ 、 $\text{Al} \leq 1.0\%$ 、 $\text{Mn}: 0.20 \sim 1.50\%$ 、 $\text{P} \leq 0.05\%$ 、 $\text{Sn} \leq 0.20\%$ 、 $\text{Nb} \leq 0.003\%$ 、 $\text{V} \leq 0.003\%$ 、 $\text{Ti} \leq 0.003\%$ 、 $\text{Cr} \leq 0.02\%$ 、 $\text{Ni} \leq 0.02\%$ 、 $\text{Cu} \leq 0.02\%$ 的废钢材。

优选地，所述废钢的重量占所述废钢和所述铁水的总重量的 20~25%。

优选地，首阶段冷轧所用轧机的工作辊粗糙度 R_a 为 $3.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 。

优选地，二阶段冷轧所用轧机的工作辊粗糙度 R_a 为 $0.6 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 。

优选地，一次退火板的平均晶粒尺寸为 $50 \sim 80 \mu\text{m}$ 。

优选地，二次退火板的平均晶粒尺寸为 $60 \sim 120 \mu\text{m}$ 。

优选地，无取向硅钢成品的磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64\text{T}$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0\text{W/kg}$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0\text{W/kg}$ 。

优选地，无取向硅钢成品的厚度为 0.15mm ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64\text{T}$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 11.0\text{W/kg}$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 27.0\text{W/kg}$ 。

优选地，无取向硅钢成品的厚度为 0.20mm ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64\text{T}$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0\text{W/kg}$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0\text{W/kg}$ 。

与现有技术相比，本发明的有益效果为：

(1) 在化学成分方面，以 Nb、V、Ti、Cr、Ni、Cu 等元素作为杂质元素（炼钢期间的合金化时不予添加），同时结合高硅高铝的设计思路，在合金成本低的情况下，从化学成分方面为成品的优异磁性能奠定基础；

(2) 在化学成分的基础上，进一步结合热轧、首阶段冷轧和退火、二阶段冷轧和退火的工艺路线和具体参数设置，一方面，实现晶粒尺寸、夹杂物、织构等多方面的控制，并能够获得超薄钢板，同时降低成品的中频铁损和高频铁损，保证优异的磁性能，再一方面，相较于现有技术取消了常化工序和冷轧前预热，解决了现有技术的工艺路线长、工序复杂、设备成本和工艺成本均居高不下的问题，另一方面，

避免因高硅高铝、成品超薄等因素所导致的冷轧难度大的问题，实现以低冷轧难度来实现稳定的生产顺行；

(3) 无取向硅钢成品可以用作新能源驱动电机定子铁芯的材料，解决了现有技术中磁性能差、合金元素高、工艺路线长、工序复杂的技术问题。

具体实施方式

为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明具体实施方式对本发明技术方案进行清楚、完整地描述。显然，所描述的实施方式仅是本发明一部分实施方式，而不是全部的实施方式。基于本发明中的实施方式，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施方式，都属于本发明保护的范围。

本发明一实施方式提供了一种无取向硅钢的制备方法，所述制备方法采用包含炼钢、连铸、加热、热轧、酸洗、首阶段冷轧和退火、二阶段冷轧和退火、冷却、涂层、精整的工艺路线，制备得到无取向硅钢成品。

所得无取向硅钢成品为超薄板材，例如厚度为 0.15~0.20mm，该厚度也就是二阶段冷轧时所得二次冷轧板的厚度。在此需要说明的是，本领域所公知的，鉴于二次冷轧板之后会经历涂层工序，因此严格意义上，无取向硅钢成品的厚度为二次冷轧板的厚度与涂层厚度之和；但是，因为涂层厚度相较于二次冷轧板而言非常薄，即近乎于无，故而本领域常规在描述无取向硅钢成品的厚度普遍是不考虑涂层厚度，因此，本发明中二次冷轧板的厚度即可认定为成品的厚度。

具体而言，该制备方法通过化学成分设计和工艺设计两方面，在生产方面实现了工艺路线短、工序简单易于品控、合金成本和生产设备成本低的优势，而在产品性能方面，所制得的无取向硅钢成品的磁性能优异，适用于制作新能源驱动电机的铁芯，尤其是用作定子铁芯的材料时相较于现有技术具有显著优势。

具体地，所述制备方法包括以下步骤 1 至步骤 5 等各个步骤。

步骤 1，炼钢和连铸

该步骤 1 中，先进行炼钢，炼制所得钢水通过连铸方式，制备出厚度为 220~240mm 的连铸坯。

其中，在炼钢的合金化过程中，不添加 Nb、V、Ti、Cr、Ni、Cu。连铸坯的化学成分以质量百分比计为：C≤0.0020%，S≤0.0015%，Si:3.30~3.60%，Al:0.40~0.80%，Mn:0.50~1.00%，P≤0.015%，Sn:0.03~0.06%，N≤0.0030%，余量为 Fe 及不可避免的

夹杂。也即，Nb、V、Ti、Cr、Ni、Cu 等元素在该本制备方法中是作为杂质元素，例如这些元素在连铸坯中的质量百分比可以分别为：Nb $\leq$ 0.003%，V $\leq$ 0.003%，Ti $\leq$ 0.003%，Cr $\leq$ 0.02%，Ni $\leq$ 0.02%，Cu $\leq$ 0.02%。

而可以理解的，为了获得具有上述化学成分的连铸坯，在炼钢过程中需要按照上述化学成分为目标炼制钢水，也即，炼钢所得钢水的化学成分与所述连铸坯的化学成分相同。再者，所述连铸坯的化学成分，也就是最终所得无取向硅钢成品的基材的化学成分。

也即，本发明一实施方式提供了一种无取向硅钢，其基材的化学成分以质量百分比计为：C $\leq$ 0.0020%，S $\leq$ 0.0015%，Si:3.30~3.60%，Al:0.40~0.80%，Mn:0.50~1.00%，P $\leq$ 0.015%，Sn:0.03~0.06%，Nb $\leq$ 0.003%，V $\leq$ 0.003%，Ti $\leq$ 0.003%，Cr $\leq$ 0.02%，Ni $\leq$ 0.02%，Cu $\leq$ 0.02%，N $\leq$ 0.0030%，余量为 Fe 及不可避免的夹杂。

以下对以上化学成分中所提到的部分化学元素的作用进行介绍。

Si、Al: Si 和 Al 能够增加钢板的电阻率，进而同时降低成品中频铁损和高频铁损；但 Si、Al 含量增加会降低磁感，且造成冷轧困难。而本发明中，通过工艺改进，在将 Si 含量控制在 3.30~3.60%、Al 含量在 0.40~0.80%的高硅高铝基础上，实现了低难度冷轧；

Mn: 能改善热轧板组织和织构，对提高磁性有利；

Sn: 易在晶界处偏聚，可改善磁性。

而在上述化学成分的基础上，作为进一步地优选设计，连铸坯的化学成分以质量百分比计还满足：4.00% $\leq$ Si+Al $\leq$ 4.20%，这种实施情况下，相较于满足 Si:3.30~3.60%、Al:0.40~0.80%条件下的 Si+Al 含量的其它实施情况（例如 Si+Al $<$ 4.00%，或者 Si+Al $>$ 4.20%）而言，可以获得更加优异的磁性能。

步骤 2，加热和热轧

在该步骤 2 中，先将连铸坯在加热炉中加热到 1080~1120℃并保温 150~200min。而后，连铸坯出加热炉之后，进入热轧工序，具体地：先轧制成厚度为 35~45mm 的中间坯；再将中间坯经过精轧、卷取得到厚度为 2.00~2.70mm 的热轧卷板。

其中，精轧的开轧温度 930~970℃，终轧温度 820~860℃，卷取温度 580~620℃，精轧压下率 93~95%。

如此，采用低温加热、低温热轧、低温卷取的技术，一方面，在加热工序中采用较低温度，避免如 MnS、AlN 等粗大的析出物在加热过程中发生固溶，进而可以

避免后续热轧过程中形成细小的析出物而劣化磁性能；再一方面，通过热轧温度和卷取温度的控制，从而在热轧卷板中得到均匀的变形铁素体组织，提高轧材的可轧性，为高硅高铝成分下的稳定冷轧奠定顺行基础，使得高硅高铝成分下的优异磁性产品的制备成为可能。

步骤 3，酸洗、首阶段冷轧和退火

该步骤 3 中，将所述热轧卷板开卷后直接进行酸洗处理。也就是说，本发明中，热轧卷板在酸洗之前不需要进行常化。

在酸洗之后，通过 3~5 道次的首阶段冷轧制成 0.50~0.70mm 的一次冷轧板。也即，该首阶段冷轧中，对酸洗后的板材进行 3~5 道次的冷轧，得到 0.50~0.70mm 的板材。本申请为了便于理解，将此处首阶段冷轧所得板材命名为一次冷轧板。

之后进行退火处理，也即，所得一次冷轧板在 25% H_2 +75% N_2 的混合气氛和 820°C~860°C 条件下保温 2~5min，得到退火板。与前面类似的，本申请为了便于理解，将此处所得板材命名为一次退火板。

在该步骤 3 中，首阶段冷轧的开始温度 20~40°C，可见，本发明的板材在酸洗之后、首阶段冷轧之前，无需如背景技术所提的现有技术一样进行冷轧前预热。

再者，首阶段冷轧的总压下率为 70~80%，每道次的压下率为 15~30%。

如此，经过前述热轧、首阶段冷轧和退火，使得所得一次退火板的平均晶粒尺寸为 50~80 μm 。

步骤 4，二阶段冷轧和退火

在该步骤 4 中，将前面步骤 3 所得的一次退火板，通过 2~3 道次的二阶段冷轧制成 0.15~0.20mm 的二次冷轧板。也即，该二阶段冷轧中包括 3~5 道次的冷轧，得到 0.50~0.70mm 的板材。本申请为了便于理解，将此二阶段冷轧工序所得板材命名为二次冷轧板。

之后该二次冷轧板在 25% H_2 +75% N_2 的混合气氛和 900°C~1000°C 条件下保温 2~5min，得到退火板。与前面类似的，本申请为了便于理解，将此处所得板材命名为二次退火板。

在该步骤 4 中，二阶段冷轧的开始温度 20~40°C，可见，本发明的板材在首阶段冷轧和退火之后、二阶段冷轧之前，无需如背景技术所提的现有技术一样进行冷轧前预热。

另外，二阶段冷轧的总压下率为 65~75%，每道次的压下率为 25~45%。

如此，经过前述热轧、首阶段冷轧和退火，再结合该步骤的二阶段冷轧和退火，使得二次退火板的平均晶粒尺寸为 60~120 μm ，不仅实现了高硅高铝的成分下的优异磁性能，而且轧制难度小，避免了因冷轧难度大、断带的风险。而可以理解的，该二次退火板的平均晶粒尺寸即最终成品的平均晶粒尺寸。

步骤 5，冷却、涂层和精整

将步骤 4 中所得的二次退火板，经冷却、涂层和精整，得到无取向硅钢成品。在本发明中，冷却、涂层和精整采用本领域已知的惯用技术，不再赘述。

如此，本发明通过上述制备方法，包括化学成分和生产工艺的两方面的结合，以 Nb、V、Ti、Cr、Ni、Cu 等元素作为杂质元素（炼钢期间的合金化时不予添加），同时结合高硅高铝的设计思路，在合金成本低的情况下，从化学成分方面为成品的优异磁性能奠定基础；并且再进一步结合热轧、首阶段冷轧和退火、二阶段冷轧和退火的工艺路线和具体参数设置，一方面，实现晶粒尺寸、夹杂物、织构等多方面的控制，并能够获得超薄钢板，同时降低成品的中频铁损和高频铁损，保证优异的磁性能，再一方面，相较于现有技术取消了常化工序和冷轧前预热，解决了现有技术的工艺路线长、工序复杂、设备成本和工艺成本均居高不下的问题，另一方面，避免因高硅高铝、成品超薄等因素所导致的冷轧难度大的问题，实现以低冷轧难度来实现稳定的生产顺行。

另外，从原理方面而言，本发明的有益效果包括：

- （1）采用高 Si、高 Al 成分设计和成品薄规格设计，增加了无取向硅钢的电阻率，同时为降低成品的中频铁损和高频铁损奠定基础；
- （2）取消冷轧前常化工艺，提高了轧材的冷轧可轧性，并结合首阶段冷轧和退火、二阶段冷轧和退火，降低了断带风险，实现稳定的生产顺行；
- （3）通过对杂质元素控制，结合首阶段冷轧和退火，减少夹杂物对磁畴壁移动的阻力，增加有利织构的比例，实现中频铁损和高频铁损的降低和磁感提升；同时，通过二阶段冷轧和退火，实现二次退火板的晶粒控制，避免电机高频运行条件下磁畴壁移动时磁化迅速变化而大幅加剧涡流损耗，由此，实现高频铁损进一步降低；
- （4）另外，通过化学成分和工艺方法的结合，在提升磁性能的同时，还可以提升表面质量，避免瓦楞缺陷。

综上所述，本发明所得无取向硅钢成品的磁性能优异，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64\text{T}$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0\text{W/kg}$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0\text{W/kg}$ ，在用于制作新能源高速驱

动电机的定子铁芯时，同时满足新能源汽车在市内道路上中速行驶和在高速公路上高速行驶时的高效率，增加续航里程。

而更为具体地，一实施方式中，所得无取向硅钢成品的厚度为 0.20mm，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64\text{T}$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0\text{W/kg}$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0\text{W/kg}$ 。而一更优的实施方式中，所得无取向硅钢成品更薄、磁性能更优，其厚度为 0.15mm，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64\text{T}$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 11.0\text{W/kg}$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 27.0\text{W/kg}$ 。

进一步地，在所述步骤 1 中，炼钢时，先采用铁水和废钢进行转炉冶炼，之后经过真空冶炼及合金化，得到连铸坯所用的钢水；其中，转炉冶炼终点以质量百分比计 C:0.020~0.050%、S $\leq$ 0.0020%、P $\leq$ 0.015%。

其中，所述铁水的化学成分以质量百分比计为：C $\geq$ 3.5%，S $\leq$ 0.0015%，Si:0.20~0.80%，Al $\leq$ 0.10%，Mn $\leq$ 0.60%，P $\leq$ 0.15%，Nb $\leq$ 0.003%，V $\leq$ 0.03%，Ti $\leq$ 0.10%，Cr $\leq$ 0.03%，Ni $\leq$ 0.02%，Cu $\leq$ 0.02%，余量为 Fe 及不可避免的夹杂。

所述废钢采用以质量百分比计满足 C $\leq$ 0.0050%、S $\leq$ 0.0025%、Si:0.50~3.60%、Al $\leq$ 1.0%、Mn:0.20~1.50%、P $\leq$ 0.05%、Sn $\leq$ 0.20%、Nb $\leq$ 0.003%、V $\leq$ 0.003%、Ti $\leq$ 0.003%、Cr $\leq$ 0.02%、Ni $\leq$ 0.02%、Cu $\leq$ 0.02%的废钢材。

所述废钢的重量占所述废钢和所述铁水的总重量的 20~25%。

如此，通过炼钢时铁水和废钢的成分、配比的设计，可以大大降低炼钢难度，非常容易地实现对夹杂物的精准、优异地控制，实现低杂质、高纯净度。当然，本发明的炼钢过程不限于该优选地低难度炼钢方案，也可以选用其它成分的铁水和/或废钢、废钢占比，同样可以达成本发明前文所述的成品磁性能和冷轧难度等方面的优势。

另外，首阶段冷轧所用轧机和二次冷轧所用轧机均为单机架冷轧机。优选地，在首阶段冷轧所用轧机的工作辊粗糙度 Ra 为 3.5~3.0 μm ；二次冷轧所用轧机的工作辊粗糙度 Ra 为 0.6~0.3 μm 。如此，除了磁性能之外，还可以进一步改善成品的表面质量，避免成品表面出现“瓦楞状”缺陷。

再者，一实施方式中，步骤 4 中的二阶段冷轧和退火时，采用恒速生产。

上文所列出的详细说明仅仅是针对本发明的可行性实施方式的具体说明，它们并非用以限制本发明的保护范围，凡未脱离本发明技艺精神所作的等效实施方式或变更均应包含在本发明的保护范围之内。

下面通过 6 个实施例和 5 个对比例来对本发明的有益效果予以展示。当然，以

下 6 个实施例并非本发明技艺宗旨下的全部实施例，仅为直观展示本发明一实施方式而列举了众多实施例中的一部分，并不能基于这些实施例而否认在本发明一实施方式中的其它实施例的可行性。并且，下面 5 个对比例仅仅是为了说明本发明一实施方式的有益效果，这些对比例并非现有技术。

具体地，这些实施例和对比例采用以下方法制备无取向硅钢成品。

(1) 先进行炼钢，炼制所得钢水通过连铸方式，制备出连铸坯；各实施例和对比例的连铸坯的厚度、化学成分如表 1 所示。

[表 1]

	化学成分以质量百分比计，%															厚度 ， m m
	C	S	N	Si	Al	M n	P	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	Sn		
实 施 例 1	0.00 15	0.0 010	0.0 011	3. 46	0. 67	0. 81	0.0 10	0.0 023	0.0 019	0.0 021	0.0 11	0.0 16	0.0 10	0.0 45	22 6	
实 施 例 2	0.00 17	0.0 009	0.0 013	3. 51	0. 53	0. 73	0.0 08	0.0 018	0.0 015	0.0 017	0.0 09	0.0 13	0.0 12	0.0 52	22 9	
实 施 例 3	0.00 12	0.0 012	0.0 013	3. 56	0. 46	0. 77	0.0 11	0.0 021	0.0 022	0.0 020	0.0 15	0.0 12	0.0 11	0.0 48	22 2	
实 施 例 4	0.00 15	0.0 010	0.0 010	3. 48	0. 70	0. 68	0.0 09	0.0 015	0.0 019	0.0 014	0.0 12	0.0 08	0.0 12	0.0 53	22 7	
实 施 例 5	0.00 14	0.0 012	0.0 012	3. 41	0. 52	0. 70	0.0 10	0.0 018	0.0 021	0.0 023	0.0 10	0.0 11	0.0 12	0.0 51	22 3	
实 施 例 6	0.00 14	0.0 008	0.0 011	3. 58	0. 75	0. 74	0.0 12	0.0 017	0.0 018	0.0 021	0.0 12	0.0 13	0.0 13	0.0 44	22 6	
对	0.00	0.0	0.0	3.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22	

比例 1	13	011	014	51	64	78	11	024	014	025	12	16	12	53	3
对比 比例 2	0.00 11	0.0 015	0.0 012	3. 54	0. 62	0. 81	0.0 11	0.0 020	0.0 016	0.0 021	0.0 13	0.0 13	0.0 10	0.0 50	22 3
对比 比例 3	0.00 12	0.0 014	0.0 012	3. 23	0. 28	0. 70	0.0 11	0.0 023	0.0 016	0.0 022	0.0 11	0.0 16	0.0 10	0.0 55	22 7
对比 比例 4	0.00 12	0.0 013	0.0 015	3. 67	0. 84	0. 82	0.0 12	0.0 018	0.0 020	0.0 024	0.0 10	0.0 14	0.0 12	0.0 52	22 5
对比 比例 5	0.00 11	0.0 014	0.0 012	3. 85	1. 03	0. 84	0.0 12	0.0 020	0.0 017	0.0 021	0.0 11	0.0 16	0.0 12	0.0 50	22 3
对比 比例 6	0.00 37	0.0 028	0.0 033	3. 53	0. 52	0. 72	0.0 13	0.0 016	0.0 021	0.0 017	0.0 14	0.0 12	0.0 11	0.0 47	22 4

(2) 先将连铸坯在加热炉中加热并保温；而后，连铸坯出加热炉之后，先轧制成中间坯；再将中间坯经过精轧、卷取得到热轧卷板。

其中，加热温度、保温时长、中间坯厚度、精轧的开轧温度和终轧温度、卷取温度、热轧卷板厚度分别如表 2 所示。

[表 2]

	加热温度，℃	保温时长，min	中间坯厚度，mm	精轧压下率，%	精轧开轧温度，℃	精轧终轧温度，℃	热轧卷板厚度，mm
实施例 1	1103	174	38	93.8	953	844	2.34
实施例 2	1111	183	38	94.0	961	849	2.28
实施例 3	1100	188	40	94.1	958	845	2.37
实施	1113	179	42	94.3	949	840	2.40

例 4							
实 施 例 5	1097	176	40	94.1	945	842	2.35
实 施 例 6	1108	182	41	94.4	952	845	2.31
对 比 例 1	1110	180	41	94.3	963	849	2.32
对 比 例 2	1111	182	40	94.5	961	848	2.35
对 比 例 3	1115	177	40	94.1	966	850	2.36
对 比 例 4	1112	181	41	94.3	957	843	2.33
对 比 例 5	1110	179	42	94.4	960	846	2.32
对 比 例 6	1118	183	39	94.1	968	851	2.29

(3) 实施例 1 至 6，将前面步骤 2 的热轧卷板开卷后，在不进行常化的情况下直接进行酸洗处理；而后在不进行预热的情况下，直接通过 3~5 道次的首阶段冷轧制成一次冷轧板，每道次的压下率控制在 15~30%；所得一次冷轧板在 25%H₂+75%N₂ 的混合气氛中进行首次退火，得到一次退火板。

所述一次退火板在不进行预热的情况下，通过 2~3 道次的二阶段冷轧制二次冷轧板，每道次的压下率控制在 25~45%；之后该二次冷轧板在 25%H₂+75%N₂ 的混合气氛下进行二次退火，得到二次退火板。

其中，各个实施例中，首阶段冷轧的开始温度、轧机工作辊粗糙度、一次冷轧板的厚度、一次退火温度、一次退火时长分别如表 3 所示；二阶段冷轧的开始温度、轧机工作辊粗糙度、二次冷轧板的厚度、二次退火温度、二次退火时长也分别如表 3 所示。

[表 3]

	首阶段冷轧	一次退火	二阶段冷轧	二次退火
--	-------	------	-------	------

	开始温度, °C	粗糙度 Ra, μm	板的厚度, mm	温度, °C	时长, min	开始温度, °C	粗糙度 Ra, μm	板的厚度, mm	温度, °C	时长, min
实施例 1	32	3.1	0.63	848	3	28	0.4	0.20	988	2
实施例 2	28	3.3	0.58	846	4	33	0.4	0.15	979	3
实施例 3	25	3.3	0.61	851	3	27	0.5	0.17	983	3
实施例 4	30	3.1	0.60	845	4	31	0.4	0.18	986	2
实施例 5	33	3.1	0.58	845	4	35	0.5	0.17	985	3
实施例 6	29	3.2	0.59	852	3	33	0.4	0.17	981	3

而对比例 1, 2, 将前面步骤 2 的热轧卷板开卷后, 先进行常化处理, 之后进行酸洗处理; 并且——对比例 1 冷轧前进行预热处理, 预热温度 200°C, 预热后经 9 道次冷轧至 0.16mm; 该冷轧板经 990°C 退火 3min, 得到退火板; 对比例 2 冷轧前没有进行预热处理, 冷轧过程中发生多次断带, 最终未获得冷轧板。

对比例 3~6, 将前面步骤 2 的热轧卷板开卷后, 在不进行常化的情况下直接进行酸洗处理; 而后再不进行预热的情况下, 直接通过 3~5 道次的首阶段冷轧制成一次冷轧板, 每道次的压下率控制在 15~30%; 而其中的对比例 5 在该首阶段冷轧过程中发生多次断带, 最终未获得一次冷轧。

对比例 3、4 和 6 所得一次冷轧板在 25%H₂+75%N₂ 的混合气氛中进行首次退火, 得到一次退火板; 所述一次退火板通过 2~3 道次的二阶段冷轧制二次冷轧板, 每道次的压下率控制在 25~45%; 之后该二次冷轧板在 25%H₂+75%N₂ 的混合气氛下进行二次退火, 得到二次退火板。

(4) 将步骤 3 中, 实施例 1~6 和对比例 3, 4, 6 所得的二次退火板, 以及对比例 1 所得的退火板, 分别经冷却、涂层和精整, 得到无取向硅钢成品。

对实施例 1~6 和对比例 1, 3, 4, 6 所得无取向硅钢成品进行金相组织、磁性能和表面质量检测, 包括:

A、采用 GB/T 6394 标准测量成品的平均晶粒尺寸, 实施例 1~6 和对比例 3、4、6 的成品的平均晶粒尺寸也即二次退火板的平均晶粒尺寸, 对比例 1 的成品的平均晶粒尺寸也即退火板的平均晶粒尺寸; 另外, 对于实施例 1~6 和对比例 3、4、6 还额

外测量了一次退火板的平均晶粒尺寸；

- B、采用 GB/T 3655 标准检测铁损和磁感应强度；
- C、采用 GB/T 3076 标准检测抗拉强度、屈服强度；
- D、采用康耐视表面质量在线监测系统方法测量表面质量，结果如表 4 所示。

[表 4]

	成品厚度，mm	一次退火板的平均晶粒尺寸， μm	成品平均晶粒尺寸， μm	$P_{1.0/400}$ ，W/kg	$P_{1.0/1000}$ ，W/kg	B_{5000}/T	瓦楞
实施例 1	0.20	68	90	11.4	28.3	1.663	无
实施例 2	0.15	68	96	10.3	26.8	1.658	无
实施例 3	0.17	71	95	10.7	27.4	1.661	无
实施例 4	0.18	65	92	11.1	27.7	1.662	无
实施例 5	0.17	60	84	11.9	29.7	1.663	无
实施例 6	0.17	73	96	10.8	27.6	1.641	无
对比例 1	0.16	/	93	11.0	27.7	1.657	无
对比例 2	冷轧过程断带，未获得成品						
对比例 3	0.17	53	73	15.7	36.8	1.662	无
对比例 4	0.16	72	96	10.8	28.2	1.636	有
对比例 5	冷轧过程断带，未获得成品						
对比例 6	0.18	34	57	17.4	38.3	1.624	无

通过以上可见，对比例 1，2 虽然在化学成分方面和本发明一实施方式的化学成分相匹配，但采用传统生产工艺流程，即炼钢，连铸，热轧，常化，酸洗，冷轧，退火，也即酸洗前需要常化。并且，对比例 1 冷轧前进行了 200℃预热处理，冷轧过程未发生断带，但依然需要进行 9 道次冷轧至 0.16mm，轧制效率低、冷轧难度大；而对比例 2 冷轧前未进行预热处理，冷轧过程发生多次断带，最终未获得成品。

对比例 3~6 采用本发明所述一次冷轧与退火、二次冷轧和成品退火的工艺进行

生产；但：

对比例 3 中 Si 含量为 3.23%，Al 含量为 0.28%，成品中频铁损为 $P_{1.0/400}$ 为 15.7W/kg，高频铁损为 $P_{1.0/1000}$ 为 36.8W/kg，中频铁损和高频铁损不满足要求；

对比例 4 中 Si 含量为 3.67%，Al 含量为 0.84%，成品磁感应强度 B_{5000} 为 1.636T，磁感应强度不满足要求，并且由于 Si，Al 含量较高，导致成品表面出现瓦楞状缺陷，表面质量不满足要求；

对比例 5 中 Si 含量为 3.85%，Al 含量为 1.03%，由于 Si，Al 含量过高，热轧卷板脆性增加，在首阶段冷轧过程中出现多次断带，未获得成品；

对比例 6 中 C 含量为 0.0037%，S 含量为 0.0028，N 为 0.0033%，C、S、N 不满足本发明所述无取向硅钢的成分要求，成品磁性能较差，中频铁损 $P_{1.0/400}$ 为 17.4W/kg，高频铁损 $P_{1.0/1000}$ 为 38.3W/kg，磁感应强度 B_{5000} 为 1.624T，均无法满足本发明所述无取向硅钢的磁性能要求。

实施例 1~6 采用本发明所述无取向硅钢的制备方法进行生产，其中：

实施例 1~6 在成分、工艺、组织等方面控制均满足本发明的设计，成品表面质量良好，磁性能优异，满足本发明所述无取向硅钢成品的磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64T$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0W/kg$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0W/kg$ ，无表面瓦楞缺陷，且生产流程短、工艺简单、易于生产顺行；

其中，实施例 1~4 采用了 $4.00\% \leq Si+Al \leq 4.20\%$ 的最优实施方式，而实施例 5 中 $Si+Al < 4.0\%$ ，对比实施例 1~4，中频铁损 $P_{1.0/400}$ 为 11.9W/kg 和高频铁损 $P_{1.0/1000}$ 为 29.7W/kg，中频铁损和高频铁损相较于同规格的实施例 3 偏高；类似的，实施例 6 中 $Si+Al > 4.2\%$ ，对比实施例 1~4，磁感应强度 B_{5000} 为 1.641T，磁感应强度偏低。

权利要求书

1. 一种无取向硅钢的制备方法，其特征在于，所述制备方法包括：

炼钢，并制备出厚度为 220~240mm 的连铸坯；该连铸坯的化学成分以质量百分比计为：C≤0.0020%，S≤0.0015%，Si:3.30~3.60%，Al:0.40~0.80%，Mn:0.50~1.00%，P≤0.015%，Sn:0.03~0.06%，Nb≤0.003%，V≤0.003%，Ti≤0.003%，Cr≤0.02%，Ni≤0.02%，Cu≤0.02%，N≤0.0030%，余量为 Fe 及不可避免的夹杂；

将连铸坯加热到 1080~1120℃并保温 150~200min，而后轧制成厚度为 35~45mm 的中间坯，再将中间坯经过精轧、卷取得到厚度为 2.00~2.70mm 的热轧卷板；其中，精轧开轧温度 930~970℃，终轧温度 820~860℃，卷取温度 580~620℃，精轧压下率 93~95%；

将所述热轧卷板直接进行酸洗处理，然后通过 3~5 道次的首阶段冷轧制成 0.50~0.70mm 的一次冷轧板，之后该一次冷轧板在 25%H₂+75%N₂ 的混合气氛和 820℃~860℃条件下保温 2~5min，得到一次退火板；其中，首阶段冷轧的开始温度 20~40℃，总压下率为 70~80%，每道次的压下率为 15~30%；

将一次退火板通过 2~3 道次的二阶段冷轧制成 0.15~0.20mm 的二次冷轧板，之后该二次冷轧板在 25%H₂+75%N₂ 的混合气氛和 900℃~1000℃条件下保温 2~5min，得到二次退火板；其中，二阶段冷轧的开始温度 20~40℃，总压下率为 65~75%，每道次的压下率为 25~45%；

将二次退火板经冷却、涂层和精整，得到无取向硅钢成品。

2. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，连铸坯的化学成分以质量百分比计：4.00%≤Si+Al≤4.20%。

3. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，在炼钢时，先采用铁水和废钢进行转炉冶炼，之后经过真空冶炼及合金化，得到连铸坯所用的钢水；其中，转炉冶炼终点以质量百分比计 C:0.020~0.050%、S≤0.0020%、P≤0.015%。

4. 根据权利要求 3 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，所述铁水的化学成分以质量百分比计为：C≥3.5%，S≤0.0015%，Si:0.20~0.80%，Al≤0.10%，Mn≤0.60%，P≤0.15%，Nb≤0.003%，V≤0.03%，Ti≤0.10%，Cr≤0.03%，Ni≤0.02%，Cu≤0.02%，余量为 Fe 及不可避免的夹杂。

5. 根据权利要求 3 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，所述废钢采用以质量百分比计满足 C≤0.0050%、S≤0.0025%、Si:0.50~3.60%、Al≤1.0%、

Mn:0.20~1.50%、P≤0.05%、Sn≤0.20%、Nb≤0.003%、V≤0.003%、Ti≤0.003%、Cr≤0.02%、Ni≤0.02%、Cu≤0.02%的废钢材。

6. 根据权利要求3所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，所述废钢的重量占所述废钢和所述铁水的总重量的20~25%。

7. 根据权利要求1所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，首阶段冷轧所用轧机的工作辊粗糙度Ra为3.5~3.0μm；二阶段冷轧所用轧机的工作辊粗糙度Ra为0.6~0.3μm。

8. 根据权利要求1所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，一次退火板的平均晶粒尺寸为50~80μm。

9. 根据权利要求1所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，二次退火板的平均晶粒尺寸为60~120μm。

10. 一种无取向硅钢，其特征在于，所述无取向硅钢的基材的化学成分以质量百分比计为：C≤0.0020%，S≤0.0015%，Si:3.30~3.60%，Al:0.40~0.80%，Mn:0.50~1.00%，P≤0.015%，Sn:0.03~0.06%，Nb≤0.003%，V≤0.003%，Ti≤0.003%，Cr≤0.02%，Ni≤0.02%，Cu≤0.02%，N≤0.0030%，余量为Fe及不可避免的夹杂。

11. 根据权利要求10所述的无取向硅钢，其特征在于，无取向硅钢的磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64T$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0W/kg$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0W/kg$ 。

12. 根据权利要求10所述的无取向硅钢，其特征在于，无取向硅钢的厚度为0.15mm，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64T$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 11.0W/kg$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 27.0W/kg$ 。

13. 根据权利要求10所述的无取向硅钢，其特征在于，无取向硅钢的厚度为0.20mm，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.64T$ ，中频铁损 $P_{1.0/400} \leq 12.0W/kg$ ，高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 30.0W/kg$ 。

14. 根据权利要求10所述的无取向硅钢，其特征在于，无取向硅钢的平均晶粒尺寸为60~120μm。

15. 根据权利要求10所述的无取向硅钢，其特征在于，无取向硅钢的基材的化学成分以质量百分比计：4.00%≤Si+Al≤4.20%。