

表面优良的高牌号无取向硅钢及其制备方法

本申请要求了申请日为 2023 年 10 月 27 日，申请号为 202311403107.6，发明名称为“表面优良的高牌号无取向硅钢及其制备方法”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，涉及一种表面优良的高牌号无取向硅钢，以及一种可提高表面质量的高牌号无取向硅钢的制备方法。

背景技术

无取向硅钢主要用于制造电机核心部件——定子铁芯。与中低牌号无取向硅钢相比，高牌号无取向硅钢具有更低的铁损、更高的磁感和更高的强度，是电机能效升级的关键用材。

在无取向硅钢的化学成分中，Si 和 Al 元素是影响铁损的主要元素，通常随着 Si 和 Al 含量的增大，无取向硅钢的铁损值减小，也即，高牌号无取向硅钢的化学成分通常为高硅高铝钢。然而，Si 和 Al 含量的增大使得奥氏体-铁素体相变温度升高（或无相变），同时铁素体再结晶温度大幅升高。为实现退火过程中的完全再结晶，高牌号无取向硅钢的成品退火温度通常需要达到 950℃ 以上，甚至 1000℃ 以上。但是，高温退火带来一系列的问题：一是引起炉辊结瘤，二是因为炉辊结瘤而造成了高牌号无取向硅钢成品的表面出现黑色点状缺陷甚至划伤，三是生产成本低。

其中，为了避免炉辊结瘤，目前已有的做法主要分以下三种。

第一，改善炉辊材质，例如申请号为 201520355268.7 的中国专利申请。

第二，改变退火炉的气氛，例如申请号为 202010086938.5、201110160021.6 的中国专利申请。

第三，通过成分设计，从而避免高温退火；例如申请号为 200710042541.0 的中国专利申请，其采用 B 作为合金化元素并控制 B、C、N 的比例关系，这种方法经验证，尽管退火温度有一定程度的降低，但磁性能只有在退火温度 970℃ 以上时才可以保证，并且生产难度大；再例如申请号为 201110341815.2 的中国专利申请，其添加高达 0.6~0.8% 的 Sn、0.3~0.6% 的 Cu、0.008~0.015% 的 B、0.04~0.08% 的 Bi 作为合金化元素，其虽然可以降低退火温度以解决炉辊结瘤的问题，但是合金成本却是大

大地增加，也提高了生产时的炼钢难度。

发明内容

本发明的目的在于提供一种无取向硅钢，以及一种无取向硅钢的制备方法。

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。所述无取向硅钢的化学成分以质量百分比计为： $C \leq 0.0025\%$ ， $Si: 1.80 \sim 2.40\%$ ， $Al: 0.40 \sim 0.60\%$ ， $Mn: 1.5 \sim 2.0\%$ ， $P \leq 0.02\%$ ， $N \leq 0.003\%$ ， $Al/N \geq 200$ ， $0.058 \leq 11 \times [Si] - 14 \times [Mn] + 21 \times [Al] + 24 \times [P] \leq 0.078$ ，余量为 Fe 及不可避免的夹杂；其中， $[Si]$ 、 $[Mn]$ 、 $[Al]$ 、 $[P]$ 分别为 Si、Mn、Al、P 的质量百分比。

作为一实施方式的进一步改进，所述无取向硅钢表面直径 $1.0 \sim 3.0mm$ 尺寸黑色点状缺陷 ≤ 10 个/ km^2 ，所述无取向硅钢表面宽度 $1.0 \sim 3.0mm$ 且长宽比为 $3.0 \sim 10.0$ 的划伤 ≤ 2 处/ km^2 。

作为一实施方式的进一步改进，所述无取向硅钢的化学成分以质量百分比计的杂质元素 $S \leq 0.0015\%$ ， $Nb \leq 0.003\%$ ， $V \leq 0.003\%$ ， $Ti \leq 0.003\%$ ， $Cr \leq 0.02\%$ ， $Ni \leq 0.02\%$ ， $Cu \leq 0.02\%$ 。

作为一实施方式的进一步改进，所述无取向硅钢的厚度为 $0.35 \sim 0.50mm$ ，屈服强度 $\geq 350MPa$ ，抗拉强度 $\geq 450MPa$ 。

作为一实施方式的进一步改进，所述无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50} \leq 3.1W/kg$ ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.69T$ 。

作为一实施方式的进一步改进，所述无取向硅钢的平均晶粒尺寸为 $80 \sim 100\mu m$ 。

与现有技术相比，本发明的有益效果为：在不需要如背景技术一样添加 Sn、Cu、B、Bi 等合金化元素，而只需要设计常规元素 Si、Al、Mn 的含量，就可以降低奥氏体-铁素体相变温度（具体是 $930 \sim 950^\circ C$ ）以及铁素体再结晶温度，从而实现低温成品退火（例如不高于 $900^\circ C$ ），以解决现有技术中炉辊结瘤的问题，还可以保证磁性能，并能够兼顾到轧制可行性，如此，实现无取向硅钢在整体上具有优异的磁性能、强度以及表面质量，并且在生产上实现低合金成本、低设备损耗、低工艺成本和工艺难度。

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：

1) 炼钢，并制备出厚度为 $220 \sim 240mm$ 的连铸坯；连铸坯的化学成分以质量百分比计为： $C \leq 0.0025\%$ ， $Si: 1.80 \sim 2.40\%$ ， $Al: 0.40 \sim 0.60\%$ ， $Mn: 1.5 \sim 2.0\%$ ， $P \leq 0.02\%$ ，

$N \leq 0.003\%$, $Al/N \geq 200$, $0.058 \leq 11 \times [Si] - 14 \times [Mn] + 21 \times [Al] + 24 \times [P] \leq 0.078$, 余量为 Fe 及不可避免的夹杂; 其中, $[Si]$ 、 $[Mn]$ 、 $[Al]$ 、 $[P]$ 分别为 Si、Mn、Al、P 的质量百分比;

2) 将连铸坯进行热轧、常化、酸洗、冷轧、成品退火、冷却、涂层和精整, 制备得到无取向硅钢成品; 其中, 在成品退火的工序中, 退火温度为 $880 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 且在此温度下保温 $60 \sim 90\text{s}$ 。

作为一实施方式的进一步改进, 在炼钢的过程中, 合金化时不添加 Sn、Cu、B、Bi;

连铸坯的化学成分以质量百分比计的杂质元素 $S \leq 0.0015\%$, $Nb \leq 0.003\%$, $V \leq 0.003\%$, $Ti \leq 0.003\%$, $Cr \leq 0.02\%$, $Ni \leq 0.02\%$, $Cu \leq 0.02\%$ 。

作为一实施方式的进一步改进, 在加热的工序中, 加热温度为 $1100 \sim 1150^{\circ}\text{C}$ 并在此温度下保温 $150 \sim 200\text{min}$;

在热轧的工序中, 先粗轧得到中间坯, 再精轧得到热轧卷板, 精轧开轧温度为 $950 \pm 20^{\circ}\text{C}$, 终轧温度为 $830 \pm 20^{\circ}\text{C}$, 精轧压下率 $94 \sim 95\%$, 卷取温度为 $630 \pm 20^{\circ}\text{C}$;

在常化的工序中, 常化温度为 $850 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 并在此温度下保温 $180 \sim 200\text{s}$, 常化后组织的平均晶粒尺寸 $80 \sim 100\mu\text{m}$;

所得无取向硅钢成品的厚度为 $0.35 \sim 0.50\text{mm}$ 、平均晶粒尺寸 $80 \sim 100\mu\text{m}$ 。

作为一实施方式的进一步改进, 在热轧的工序中, 中间坯的厚度为 $35 \sim 45\text{mm}$, 热轧卷板的厚度为 $2.0 \sim 2.5\text{mm}$ 。

作为一实施方式的进一步改进, 在热轧的工序中, 精轧结束后进行层流冷却, 卷取后空冷至室温, 所得热轧卷板的组织为纤维状变形组织;

在常化的工序中, 钢板发生完全再结晶。

作为一实施方式的进一步改进, 在冷轧的工序中, 经过酸洗的钢板无需预热直接进行冷轧。

作为一实施方式的进一步改进, 在成品退火的工序中, 退火炉采用 N_2 和 H_2 的保护气氛, 且其中 H_2 的体积百分比为 $20 \sim 60\%$;

在冷却的工序中, 退火后的钢板先随炉冷却至 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$, 再空冷至室温。

作为一实施方式的进一步改进, 在成品退火的工序中, 退火炉采用 N_2 和 H_2 的保护气氛, 且其中 H_2 的体积百分比为 $20 \sim 30\%$ 。

与现有技术相比, 本发明的有益效果为: 结合成分设计, 采用 $880 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 的成品退火温度, 可以避免炉辊结瘤, 还可以保证成品退火中发生充分再结晶, 以保证磁

性能，并能够兼顾到轧制可行性，如此，实现无取向硅钢在整体上具有优异的磁性能、强度以及表面质量，并且在生产上实现低合金成本、低设备损耗、低工艺成本和工艺难度。

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表面优良的高牌号无取向硅钢。

所述无取向硅钢的化学成分以质量百分比计为： $C \leq 0.0025\%$ ， $Si: 1.80 \sim 2.40\%$ ， $Al: 0.40 \sim 0.60\%$ ， $Mn: 1.5 \sim 2.0\%$ ， $P \leq 0.02\%$ ， $N \leq 0.003\%$ ， $Al/N \geq 200$ ， $0.058 \leq 11 \times [Si] - 14 \times [Mn] + 21 \times [Al] + 24 \times [P] \leq 0.078$ ，余量为 Fe 及不可避免的夹杂；其中， $[Si]$ 、 $[Mn]$ 、 $[Al]$ 、 $[P]$ 分别为 Si、Mn、Al、P 的质量百分比。

以下对本实施方式中所述无取向硅钢的部分化学元素的作用进行详细介绍。

Si：是提高电阻率、降低铁损的有效元素之一。

Al、N：Al 是提高电阻率、降低铁损的有效元素之一；并且，Al 容易与 N 形成 AlN，粗大的 AlN 有利于晶粒长大降低铁损；而 N 通常认为是影响磁性能的有害元素，而本发明中，通过控制 Al 在 $0.40 \sim 0.60\%$ 之间并且 $Al/N \geq 200$ ，利于 AlN 的充分析出长大，进而提升磁性能。

Mn：Mn 容易与 S 形成 MnS，粗大的 MnS 有利于晶粒长大降低铁损。

Si、Al、Mn、P：本发明中，通过控制 Si、Al、Mn、P 的各自含量，以及进一步控制 $0.058 \leq 11 \times [Si] - 14 \times [Mn] + 21 \times [Al] + 24 \times [P] \leq 0.078$ ，从而既可以降低奥氏体-铁素体相变温度以及铁素体再结晶温度，从而实现低温成品退火，以解决现有技术中炉辊结瘤的问题，从而保证无取向硅钢的表面质量，进而实现低合金成本和低生产成本（包括工艺成本、设备成本），另外，又能够在低温成品退火的情况下保证磁性能，另外还可以兼顾到轧制可行性。

综上所述，本发明的化学成分设计上，在不需要如背景技术一样添加 Sn、Cu、B、Bi 等合金化元素，而只需要设计常规元素 Si、Al、Mn 和 P 的含量，就可以降低奥氏体-铁素体相变温度（具体是降至 $930 \sim 950^\circ\text{C}$ ）以及铁素体再结晶温度，从而实

现低温成品退火（例如不高于 900°C），以解决现有技术中炉辊结瘤的问题，还可以保证磁性能，并能够兼顾到轧制可行性，如此，实现无取向硅钢在整体上具有优异的磁性能、强度以及表面质量，并且在生产上实现低合金成本、低设备损耗、低工艺成本和工艺难度。

进一步地，所述无取向硅钢的化学成分以质量百分比计的杂质元素 $S \leq 0.0015\%$ ， $Nb \leq 0.003\%$ ， $V \leq 0.003\%$ ， $Ti \leq 0.003\%$ ， $Cr \leq 0.02\%$ ， $Ni \leq 0.02\%$ ， $Cu \leq 0.02\%$ 。

在本实施方式中，所述无取向硅钢的厚度为 0.35~0.50mm，例如厚度具体是 0.35mm，或者具体是 0.50mm。

所述无取向硅钢具有优异的磁性能，铁损 $P_{1.5/50} \leq 3.1W/kg$ ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.69T$ 。具体例如，所述无取向硅钢的厚度为 0.35mm，其铁损 $P_{1.5/50} \leq 2.8W/kg$ ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.69T$ ；又例如，所述无取向硅钢的厚度为 0.50mm，其铁损 $P_{1.5/50} \leq 3.1W/kg$ ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.70T$ 。

在本实施方式中，所述无取向硅钢的平均晶粒尺寸为 80~100 μm 。

再者，在一实施方式中，基于低温成品退火（例如不高于 900°C），可以解决现有技术中炉辊结瘤的问题，从而在保证磁性能的同时还可以改善无取向硅钢的表面质量，例如，所述无取向硅钢表面直径 1.0~3.0mm 尺寸黑色点状缺陷 ≤ 10 个/ km^2 ，所述无取向硅钢表面宽度 1.0~3.0mm 且长宽比为 3.0~10.0 的划伤 ≤ 2 处/ km^2 。而可以理解的，如果炉辊结瘤，所导致的黑色点状缺陷的尺寸和数量、以及划伤的 lengths 和数量，都远远大于此。

另外，所述无取向硅钢具有优异的力学性能，屈服强度 $\geq 350MPa$ ，抗拉强度 $\geq 450MPa$ 。

进一步地，本发明一实施方式还提供了所述无取向硅钢的制备方法。该制备方法是所述无取向硅钢的一种优选制备方法，当然，前文所述无取向硅钢的制备方法不限于此。

具体地，所述制备方法包括：

- 1) 炼钢，并制备出厚度为 220~240mm 的连铸坯；连铸坯的化学成分以质量百分比计为： $C \leq 0.0025\%$ ， $Si: 1.80 \sim 2.40\%$ ， $Al: 0.40 \sim 0.60\%$ ， $Mn: 1.5 \sim 2.0\%$ ， $P \leq 0.02\%$ ， $N \leq 0.003\%$ ， $Al/N \geq 200$ ， $0.058 \leq 11 \times [Si] - 14 \times [Mn] + 21 \times [Al] + 24 \times [P] \leq 0.078$ ，余量为 Fe 及不可避免的夹杂；其中， $[Si]$ 、 $[Mn]$ 、 $[Al]$ 、 $[P]$ 分别为 Si、Mn、Al、P 的质量百分比；
- 2) 将连铸坯进行热轧、常化、酸洗、冷轧、成品退火、冷却、涂层和精整，制

备得到无取向硅钢成品；其中，在成品退火的工序中，退火温度为 880~900℃且在此温度下保温 60~90s。

如此，本发明的化学成分设计上，在不需要如背景技术一样添加 Sn、Cu、B、Bi 等合金化元素，而只需要设计常规元素 Si、Al、Mn 和 P 的含量，就可以降低奥氏体-铁素体相变温度以及铁素体再结晶温度，如此结合 880~900℃的成品退火温度，可以避免炉辊结瘤，还可以保证成品退火中发生充分再结晶，以保证磁性能，并能够兼顾到轧制可行性，如此，实现无取向硅钢在整体上具有优异的磁性能、强度以及表面质量，并且在生产上实现低合金成本、低设备损耗、低工艺成本和工艺难度。

进一步地，在炼钢的过程中，合金化时不添加 Sn、Cu、B、Bi，如此即可降低奥氏体-铁素体相变温度以及铁素体再结晶温度，以便于低温成品退火的情况下保证磁性能，合金成本大大降低、冶钢难度也大大降低。

连铸坯的化学成分以质量百分比计的杂质元素 $S \leq 0.0015\%$ ， $Nb \leq 0.003\%$ ， $V \leq 0.003\%$ ， $Ti \leq 0.003\%$ ， $Cr \leq 0.02\%$ ， $Ni \leq 0.02\%$ ， $Cu \leq 0.02\%$ 。也即，在炼钢的过程中，合金化时不添加 Nb、V、Ti、Cr、Ni 等元素。

进一步地，在加热的工序中，加热温度为 1100~1150℃并在此温度下保温 150~200min；

在热轧的工序中，先粗轧得到中间坯，再精轧得到热轧卷板，精轧开轧温度为 $950 \pm 20^\circ\text{C}$ ，终轧温度为 $830 \pm 20^\circ\text{C}$ ，精轧压下率 94~95%，卷取温度为 $630 \pm 20^\circ\text{C}$ ；

在常化的工序中，常化温度为 850~900℃并在此温度下保温 180~200s，常化后组织的平均晶粒尺寸 80~100 μm ；

所得无取向硅钢成品的厚度为 0.35~0.50mm、平均晶粒尺寸 80~100 μm 。

如此，采用低温加热、低温轧制、低温卷取、低温常化，即可获得优异的磁性能，生产难度低且热轧稳定性强；另外还可以避免钢板表面氧化，提升表面质量以及提升成材率。

其中，在热轧的工序中，精轧结束后进行层流冷却，卷取后空冷至室温，所得热轧卷板的组织为纤维状变形组织，从而为后续常化提供变形能；在常化的工序中，钢板发生完全再结晶。

进一步地，在冷轧的工序中，经过酸洗的钢板无需预热直接进行冷轧。

冷轧的工序中，总压下率 $81 \pm 2\%$ 。如此，冷轧的压下率和精轧压下率的协同，为退火工艺稳定创造条件，利于稳定退火工序的工艺窗口及保证成品性能稳定性。

具体地，在热轧的工序中，中间坯的厚度为 35~45mm，热轧卷板的厚度为 2.0~2.5mm。例如，中间坯的厚度为 35mm，热轧卷板的厚度为 2.0mm，所得无取向硅钢成品的厚度为 0.35mm，冷轧的总压下率 82.5%；又例如，中间坯的厚度为 45mm，热轧卷板的厚度为 2.5mm，所得无取向硅钢成品的厚度为 0.50mm，冷轧的总压下率 80.0%。

优选地，在成品退火的工序中，退火炉采用 N₂ 和 H₂ 的保护气氛，且其中 H₂ 的体积百分比为 20~60%。更优选地，在成品退火的工序中，退火炉采用 N₂ 和 H₂ 的保护气氛，且其中 H₂ 的体积百分比为 20~30%。如此，可以进一步地改善表面质量，并提高成材率。

在冷却的工序中，退火后的钢板先随炉冷却至 400~500℃，再空冷至室温。

另外，常化的工序和成品退火的工序，均采用恒速生产。

进一步地，在一优选实施方式中，酸洗的工序中，采用盐酸酸洗，酸液温度为 80~85℃，酸液中盐酸的浓度 140~160g/L、Fe²⁺的质量浓度≤80g/L。

综上所述，本发明的制备方法具有以下有益效果：（1）结合成分设计，采用 880~900℃的成品退火温度，可以避免炉辊结瘤，还可以保证成品退火中发生充分再结晶，以保证磁性能，并能够兼顾到轧制可行性，如此，实现无取向硅钢在整体上具有优异的磁性能、强度以及表面质量，并且在生产上实现低合金成本、低设备损耗、低工艺成本和工艺难度；（2）生产难度低且热轧稳定性强；另外还可以避免钢板表面氧化，提升表面质量以及提升成材率；（3）可轧制性强，例如，可以采用低温轧制、低温常化，并且常化和成品退火均可实现恒速生产，且冷轧可以采用单机架或连轧机实施，轧制可行性高，在能够保证综合性能（包括力学性能、磁性能和表面质量）的同时提升生产效率。

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 6 个对比例来对本发明的具体实施方式予以介绍。这些实施例和对比例的化学成分见表 1。

表 1 实施例和对比例的化学成分

	化学成分以质量百分比计/%														特殊要求	
	C	S	N	Si	A	M	P	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	B	Al	X

					1	n									/N	
实 施 例 1	0.0 015	0.0 008	0.0 013	1. 8 3	0. 4 2	1. 5 5	0.0 12	0.0 008	0.0 005	0.0 008	0.0 12	0.0 15	0.0 10	0.0 06	32 3	0.0 754
实 施 例 2	0.0 015	0.0 008	0.0 013	1. 8 3	0. 4 2	1. 5 5	0.0 12	0.0 008	0.0 005	0.0 008	0.0 12	0.0 15	0.0 10	0.0 06	32 3	0.0 754
实 施 例 3	0.0 012	0.0 009	0.0 023	2. 0 2	0. 4 8	1. 8 2	0.0 09	0.0 013	0.0 012	0.0 011	0.0 13	0.0 15	0.0 13	0.0 03	20 9	0.0 704
实 施 例 4	0.0 012	0.0 009	0.0 023	2. 0 2	0. 4 8	1. 8 2	0.0 09	0.0 013	0.0 012	0.0 011	0.0 13	0.0 15	0.0 13	0.0 03	20 9	0.0 704
实 施 例 5	0.0 016	0.0 011	0.0 018	2. 2 3	0. 4 7	1. 9 8	0.0 08	0.0 006	0.0 010	0.0 009	0.0 10	0.0 10	0.0 14	0.0 04	26 1	0.0 687
实 施 例 6	0.0 016	0.0 011	0.0 018	2. 2 3	0. 4 7	1. 9 8	0.0 08	0.0 006	0.0 010	0.0 009	0.0 10	0.0 10	0.0 14	0.0 04	26 1	0.0 687
对 比 例 1	0.0 013	0.0 016	0.0 020	2. 0 1	0. 4 6	1. 6 3	0.0 01	0.0 011	0.0 010	0.0 008	0.0 18	0.0 09	0.0 21	0.0 05	23 0	0.0 897
对 比 例 2	0.0 026	0.0 07	0.0 010	1. 6 3	0. 3 5	1. 3 2	0.0 14	0.0 009	0.0 012	0.0 013	0.0 23	0.0 12	0.0 15	0.0 03	35 0	0.0 714
对 比 例 3	0.0 014	0.0 012	0.0 014	2. 5 5	0. 6 8	2. 5 1	0.0 12	0.0 008	0.0 008	0.0 014	0.0 14	0.0 06	0.0 14	0.0 06	48 6	0.0 748
对 比 例 4	0.0 018	0.0 012	0.0 015	2. 5 3	0. 6 5	0. 5 2	0.0 13	0.0 006	0.0 009	0.0 012	0.0 15	0.0 13	0.0 12	0.0 05	43 3	0.3 451
对 比 例	0.0 022	0.0 012	0.0 011	2. 8 6	0. 6 8	0. 5 5	0.0 12	0.0 010	0.0 012	0.0 015	0.0 15	0.0 10	0.0 16	0.0 01	61 8	0.3 833

5																
对 比 例 6	0.0 015	0.0 008	0.0 014	3. 2 8	0. 7 4	0. 4 9	0.0 15	0.0 008	0.0 005	0.0 013	0.0 12	0.0 16	0.0 10	0.0 03	52 9	0.4 512

注：X=11×[Si]-14×[Mn]+21×[Al]+24×[P]

对各个实施例和对比例进行金相组织、磁性能、力学性能和表面质量检测，包括：采用 GB/T 6394 标准测量常化后平均晶粒尺寸和成品平均晶粒尺寸；采用 GB/T 3655 标准检测铁损和磁感应强度；采用 GB/T3076 标准检测抗拉强度、屈服强度；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 2 所示。

可见，各实施例高牌号无取向硅钢常化后组织的平均晶粒尺寸为 80~100μm，退火后成品的平均晶粒尺寸为 80~100μm；同时，各实施例高牌号无取向硅钢的磁性能、力学性能和表面质量良好。铁损 $P_{1.5/50} \leq 3.1 \text{W/kg}$ ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.69 \text{T}$ ；屈服强度 $\geq 350 \text{MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 450 \text{MPa}$ ；表面直径 1.0~3.0mm 尺寸黑色点状缺陷 $\leq 10 \text{个/km}^2$ ，所述无取向硅钢表面宽度 1.0~3.0mm 且长宽比为 3.0~10.0 的划伤 $\leq 2 \text{处/km}^2$ 。进一步地，因实施例 2、4 和 6 成品厚度薄，为 0.35mm，故其铁损更低，分别为 2.74、2.61 和 2.54W/kg。本发明借助化学成分、热轧工艺、常化工艺、冷轧工艺和退火工艺的整体组合设计，实现了高牌号无取向硅钢磁性能、力学性能和表面质量的优质控制。

表 2 实施例和对比例的晶粒尺寸、磁性能、力学性能和表面质量

	成品厚度/mm	常化后平均晶粒尺寸/μm	成品平均晶粒尺寸/μm	$P_{1.5/50}(\text{W/kg})$	B_{5000}/T	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	黑色点状缺陷数量(个/ km^2)	划伤数量(处/ km^2)
实施例 1	0.50	85	84	3.05	1.717	358	456	0.1	0
实施例 2	0.35	92	87	2.74	1.708	362	458	0.5	0
实施例 3	0.50	95	94	2.91	1.715	380	468	1.3	0
实施	0.35	92	90	2.61	1.703	385	472	2.4	0

例 4									
实 施 例 5	0.50	88	92	2.78	1.710	398	482	0.5	0
实 施 例 6	0.35	85	96	2.54	1.695	392	488	3.2	0
对 比 例 1	0.50	75	68	3.41	1.685	386	475	2.6	0
对 比 例 2	0.50	89	93	3.32	1.715	334	438	1.4	0
对 比 例 3	冷轧过程断带，未获得成品								
对 比 例 4	0.35	96	95	2.76	1.705	364	455	25	5
对 比 例 5	0.35	90	92	2.63	1.703	378	469	39	10
对 比 例 6	0.35	93	98	2.56	1.694	395	481	83	17

以上，各个实施例的无取向硅钢以前文所述制备方法予以生产而得，其中实
施例 1 和实施例 2、实施例 3 和实施例 4、实施例 5 和实施例 6 分别采用相同的炼钢成
分；实施例 1、实施例 3 和实施例 5 成品厚度为 0.50mm，相对应热轧中间坯厚度 45mm，
热轧卷板厚度 2.5mm；实施例 2、实施例 4 和实施例 6 成品厚度为 0.35mm，相对应
热轧中间坯厚度 35mm，热轧卷板厚度 2.0mm。具体如下：

(1)炼钢并制备连铸坯，实施例 1~6 在炼钢期间对钢水进行合金化时不添加 Sn、
Cu、B、Bi；

(2) 连铸坯入加热炉进行加热，加热温度为 1100~1150℃并在此温度下保温 150~200min；而后，先粗轧得到中间坯，再精轧得到热轧卷板，精轧开轧温度为 950±20℃，终轧温度为 830±20℃，精轧压下率 94~95%，精轧结束后进行层流冷却，卷取温度为 630±20℃，卷取后空冷至室温；对冷却至室温的所得热轧卷板进行取样检测，各实施例的钢板组织均为纤维状变形组织；

(3) 所得热轧卷板进入常化炉进行常化处理，常化温度为 850~900℃并在此温度下保温 180~200s；常化结束后，对常化后的钢板进行取样检测，各实施例的钢板组织的平均晶粒尺寸均为 80~100μm；

(4) 而后，对钢板进行酸洗，之后无需预热直接进行冷轧，总压下率 81±2%，得到冷轧卷板；

(5) 所得冷轧卷板在退火炉内进行成品退火，退火温度为 880~900℃且在此温度下保温 60~90s，退火炉采用 N₂ 和 H₂ 的保护气氛，且其中 H₂ 的体积百分比为 20~60%；退火后的钢板先随炉冷却至 400~500℃，再空冷至室温；

(6) 最后，对钢板进行涂层和精整，制备得到无取向硅钢成品。

以上，各个实施例的无取向硅钢在制备过程中的部分关键参数请参看表 3。

表 3 实施例和对比例在制备过程中的部分关键参数

	连铸坯厚度/mm	加热温度×保温时间/℃×min	中间坯厚度/mm	热轧卷板厚度/mm	精轧压下率/%	精轧开轧温度/℃	精轧终轧温度/℃	卷取温度/℃	常化温度×保温时间/℃×s	成品退火温度×保温时间/℃×s	退火 H ₂ 体积百分比/%
实施例 1	223	1120×182	45	2.5	94.4	965	834	628	892×189	884×78	25
实施例 2	223	1118×181	35	2.0	94.3	958	838	634	886×189	888×78	25
实施例 3	223	1115×182	45	2.5	94.4	955	842	643	874×188	886×78	25
实施例 4	223	1124×181	35	2.0	94.3	962	846	621	872×188	892×78	25

实 施 例 5	223	1128×182	45	2.5	94.4	945	825	615	865×192	898×78	25
实 施 例 6	223	1119×182	35	2.0	94.3	939	823	626	858×192	883×78	25
对 比 例 1	223	1123×181	45	2.5	94.4	961	836	638	882×189	885×78	25
对 比 例 2	223	1117×182	45	2.5	94.4	958	844	633	884×188	886×78	25
对 比 例 3	223	1125×181	45	2.5	94.4	948	823	625	875×190	冷轧过程断带，未退火	
对 比 例 4	223	1121×181	35	2.0	94.3	978	858	664	976×189	982×78	25
对 比 例 5	223	1128×181	35	2.0	94.3	982	866	661	952×189	995×78	25
对 比 例 6	223	1115×182	35	2.0	94.3	979	873	656	938×190	1005×78	25

本发明提供一种高牌号无取向硅钢，以及一种高牌号无取向硅钢的制备方法。

具体来说，本发明提供了一套从化学成分、热轧工艺、常化工艺、冷轧工艺和退火工艺的整体组合设计方案，用于制备本发明所述高牌号无取向硅钢，其中涉及的众多参数是一个关联的整体。

对比例 1、对比例 2 和对比例 3 采用与实施 1~6 相同的热轧工艺、常化工艺、冷轧工艺和退火工艺（见表 3），但成分设计不同。

对比例 1 炼钢成分中 C:0.0013%，Si:2.01%，Al:0.46%，Mn:1.63%，P:0.001%，满足 C≤0.0025%，Si:1.80~2.40%，Al:0.40~0.60%，Mn:1.5~2.0%，P≤0.02%的要求，但其 $11\times[\text{Si}]-14\times[\text{Mn}]+21\times[\text{Al}]+24\times[\text{P}]=0.0897$ ，不满足 $0.058\leq 11\times[\text{Si}]-14\times[\text{Mn}]+21\times[\text{Al}]+24\times[\text{P}]\leq 0.078$ 的要求，即对比例 1 中 Si、Al、Mn 和 P 的搭配不合理。结果导致对比例 1 无取向硅钢的奥氏体-铁素体相变温度较高，具体是 962℃。在此情况下，采用与实施例 1~6 相近的常化和退火工艺进行后续生产，具体是常化温度 882℃、常化保温时间 189s、退火温度 885℃、退火保温时间 78s。虽然因退火温度低于 900℃，避免了因炉辊结瘤导致的表面问题；但因常化温度和退

火温度远低于对比例 1 无取向硅钢的奥氏体-铁素体相变温度，导致常化和退火后铁素体晶粒细小，常化后平均晶粒尺寸为 $75\mu\text{m}$ ，退火后成品平均晶粒尺寸为 $68\mu\text{m}$ ，较实施例 1~6 显著细小。晶粒细小，导致成品磁性能较差，对比例 1 铁损 $P_{1.5/50}$ 为 3.41W/kg ，磁感应强度 B_{5000} 为 1.685T 。

对比例 2 炼钢成分中 C:0.0026%，Si:1.63%，Al:0.35%，Mn:1.32%，P:0.014%，满足 $0.058 \leq 11 \times [\text{Si}] - 14 \times [\text{Mn}] + 21 \times [\text{Al}] + 24 \times [\text{P}] \leq 0.078$ 的要求。显然，对比例 2 无取向硅钢的奥氏体-铁素体相变温度与实施例 1~6 相近，较对比例 1 低，具体是 943°C 。在此情况下，采用与实施例 1~6 相近的常化和退火工艺进行后续生产，具体是常化温度 884°C 、常化保温时间 188s、退火温度 886°C 、退火保温时间 78s。因退火温度低于 900°C ，避免了因炉辊结瘤导致的表面问题；同时因常化温度和退火温度控制合理，常化和退火后铁素体晶粒正常长大，常化后平均晶粒尺寸为 $89\mu\text{m}$ ，退火后成品平均晶粒尺寸为 $93\mu\text{m}$ ，与实施例 1~6 接近。但是对比例 2 炼钢成分中 C:0.0026%，Si:1.63%，Al:0.35%，Mn:1.32% 不满足 $C \leq 0.0025\%$ ，Si:1.80~2.40%，Al:0.40~0.60%，Mn:1.5~2.0% 的要求。特别是作为提高电阻率、降低铁损的最有效元素 Si 和 Al，均低于实施例 1~6，导致对比例 2 磁性能较差，对比例 2 铁损 $P_{1.5/50}$ 为 3.32W/kg 。

为了降低铁损，对比例 3 试图规避对比例 1 和对比例 2 遇到的问题，提高 Si 和 Al 的含量，炼钢成分中 C:0.0014%，Si:2.55%，Al:0.68%，P:0.012%，同时为满足 $0.058 \leq 11 \times [\text{Si}] - 14 \times [\text{Mn}] + 21 \times [\text{Al}] + 24 \times [\text{P}] \leq 0.078$ 的要求，Mn:2.51%，具体是 $11 \times [\text{Si}] - 14 \times [\text{Mn}] + 21 \times [\text{Al}] + 24 \times [\text{P}] = 0.0748$ 。显然，对比例 3 无取向硅钢的奥氏体-铁素体相变温度与实施例 1~6 相近，较对比例 1 低，具体是 947°C 。在此情况下，可以采用与实施例 1~6 相近的常化和退火工艺进行后续生产；但由于对比例 3 中 Si+Al+Mn 含量高达 5.7%，热轧钢卷强度高、韧性差，实际冷轧过程发生断带，无法完成后续生产。

对比例 4~6 采用常规高牌号无取向硅钢高温常化-高温退火工艺，具体炼钢成分见表 1；对比例 4、对比例 5 和对比例 6 的奥氏体-铁素体相变温度均高于 1000°C 。以对比例 1 为参考，如对比例 4~6 采用实施例 1~6 相近常化和退火工艺，其铁素体晶粒显然无法长大，影响铁损。故对比例 4~6 后续采用高温常化和高温退火工艺，具体为对比例 4 常化温度 976°C 、常化保温时间 189s、退火温度 982°C 、退火保温时间 78s；对比例 5 常化温度 952°C 、常化保温时间 189s、退火温度 995°C 、退火保温时间 78s；对比例 6 常化温度 938°C 、常化保温时间 188s、退火温度 1005°C 、退火保

温时间 78s。高温常化，特别是高温退火工艺实现了对比例 4~6 无取向硅钢常化和退火后铁素体晶粒的正常长大，常化后平均晶粒尺寸分别为 96、90 和 93 μm ，退火后成品平均晶粒尺寸分别为 95、92 和 98 μm ，与实施例 1~6 接近。因对比例 4~6 成品厚度为 0.35mm，其磁性能较成品厚度 0.50mm 实施例 1、3 和 5 更优，与成品厚度 0.35mm 实施例 2、4 和 6 接近。但由于对比例 4~6 采用常规高牌号无取向硅钢高温常化-高温退火工艺，其退火温度 980 $^{\circ}\text{C}$ ，特别是对比例 6 的退火温度高于 1000 $^{\circ}\text{C}$ ，造成退火炉辊结瘤问题。

由于高温退火，造成炉辊结瘤问题，故对比例 4~6 成品的表面质量差，对比例 4~6 表面直径 1.0~3.0mm 尺寸黑色点状缺陷数量分别为 25、39 和 83 个/ km^2 ，显著高于实施例 1~6（具体是 ≤ 5 个/ km^2 ）；对比例 4~6 表面宽度 1.0~3.0mm 且长宽比为 3.0~10.0 的划伤数量分别为 5、10 和 17 处/ km^2 ，显著高于实施例 1~6（具体是无划伤）。

权利要求书

1. 一种无取向硅钢，其特征在于，所述无取向硅钢的化学成分以质量百分比计为： $C \leq 0.0025\%$ ， $Si: 1.80 \sim 2.40\%$ ， $Al: 0.40 \sim 0.60\%$ ， $Mn: 1.5 \sim 2.0\%$ ， $P \leq 0.02\%$ ， $N \leq 0.003\%$ ， $Al/N \geq 200$ ， $0.058 \leq 11 \times [Si] - 14 \times [Mn] + 21 \times [Al] + 24 \times [P] \leq 0.078$ ，余量为 Fe 及不可避免的夹杂；其中， $[Si]$ 、 $[Mn]$ 、 $[Al]$ 、 $[P]$ 分别为 Si、Mn、Al、P 的质量百分比。
2. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢，其特征在于，所述无取向硅钢表面直径 $1.0 \sim 3.0mm$ 尺寸黑色点状缺陷 ≤ 10 个/ km^2 ，所述无取向硅钢表面宽度 $1.0 \sim 3.0mm$ 且长宽比为 $3.0 \sim 10.0$ 的划伤 ≤ 2 处/ km^2 。
3. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢，其特征在于，所述无取向硅钢的化学成分以质量百分比计的杂质元素 $S \leq 0.0015\%$ ， $Nb \leq 0.003\%$ ， $V \leq 0.003\%$ ， $Ti \leq 0.003\%$ ， $Cr \leq 0.02\%$ ， $Ni \leq 0.02\%$ ， $Cu \leq 0.02\%$ 。
4. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢，其特征在于，所述无取向硅钢的厚度为 $0.35 \sim 0.50mm$ ，屈服强度 $\geq 350MPa$ ，抗拉强度 $\geq 450MPa$ 。
5. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢，其特征在于，所述无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50} \leq 3.1W/kg$ ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.69T$ 。
6. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢，其特征在于，所述无取向硅钢的平均晶粒尺寸为 $80 \sim 100\mu m$ 。
7. 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：
 - 1) 炼钢，并制备出厚度为 $220 \sim 240mm$ 的连铸坯；连铸坯的化学成分以质量百分比计为： $C \leq 0.0025\%$ ， $Si: 1.80 \sim 2.40\%$ ， $Al: 0.40 \sim 0.60\%$ ， $Mn: 1.5 \sim 2.0\%$ ， $P \leq 0.02\%$ ， $N \leq 0.003\%$ ， $Al/N \geq 200$ ， $0.058 \leq 11 \times [Si] - 14 \times [Mn] + 21 \times [Al] + 24 \times [P] \leq 0.078$ ，余量为 Fe 及不可避免的夹杂；其中， $[Si]$ 、 $[Mn]$ 、 $[Al]$ 、 $[P]$ 分别为 Si、Mn、Al、P 的质量百分比；
 - 2) 将连铸坯进行热轧、常化、酸洗、冷轧、成品退火、冷却、涂层和精整，制备得到无取向硅钢成品；其中，在成品退火的工序中，退火温度为 $880 \sim 900^\circ C$ 且在此温度下保温 $60 \sim 90s$ 。
8. 根据权利要求 7 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，在炼钢的过程中，合金化时不添加 Sn、Cu、B、Bi；
连铸坯的化学成分以质量百分比计的杂质元素 $S \leq 0.0015\%$ ， $Nb \leq 0.003\%$ ， $V \leq 0.003\%$ ， $Ti \leq 0.003\%$ ， $Cr \leq 0.02\%$ ， $Ni \leq 0.02\%$ ， $Cu \leq 0.02\%$ 。
9. 根据权利要求 7 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，在加热的工序

中，加热温度为 1100~1150°C 并在此温度下保温 150~200min；

在热轧的工序中，先粗轧得到中间坯，再精轧得到热轧卷板，精轧开轧温度为 950±20°C，终轧温度为 830±20°C，精轧压下率 94~95%，卷取温度为 630±20°C；

在常化的工序中，常化温度为 850~900°C 并在此温度下保温 180~200s。

10. 根据权利要求 9 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，在热轧的工序中，中间坯的厚度为 35~45mm，热轧卷板的厚度为 2.0~2.5mm，所得无取向硅钢成品的厚度为 0.35~0.50mm。

11. 根据权利要求 9 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，在热轧的工序中，精轧结束后进行层流冷却，卷取后空冷至室温。

12. 根据权利要求 9 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，在冷轧的工序中，经过酸洗的钢板无需预热直接进行冷轧。

13. 根据权利要求 7 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，在成品退火的工序中，退火炉采用 N₂ 和 H₂ 的保护气氛，且其中 H₂ 的体积百分比为 20~60%；

在冷却的工序中，退火后的钢板先随炉冷却至 400~500°C，再空冷至室温。

14. 根据权利要求 7 所述的无取向硅钢的制备方法，其特征在于，在成品退火的工序中，退火炉采用 N₂ 和 H₂ 的保护气氛，且其中 H₂ 的体积百分比为 20~30%。