

一种高速电机用无取向硅钢及其制备方法

相关申请的交叉引用

本申请要求在 2022 年 9 月 13 日提交中国国家知识产权局、申请号为 202211107301.5、发明名称为“一种高速电机用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的方式并入本文中。

技术领域

本申请涉及无取向硅钢技术领域，具体涉及一种高速电机用无取向硅钢及其制备方法。

背景技术

高速电机通常是指转速超过 10000r/min 的电机。高速电机具有转速高、相对尺寸小、功率密度大、效率高等显著优点，在空调和冰箱的离心式压缩机、储能飞轮、高速磨床等诸多场合具有较多应用，在电动汽车、分布式发电系统中具有广阔的应用前景。目前已成为国际电工领域的研究热点之一。

高速电机的主要特点是转子速度高、定子绕组电流和铁芯中的磁通频率高。电机转子上的离心力与线速度的平方成正比。由于高速电机转速超过 10000r/min，故要求其转子铁芯用无取向硅钢具有很高的机械强度；同时，高速电机为满足高转速的技术指标，其体积远小于同等功率的常速电机，故要求其铁芯用无取向硅钢具有较高的磁感。简而言之，为实现高速电机高转速、小体积、高效率控制要求，作为其铁芯核心材料的无取向硅钢应该具有较高的强度、较低的高频铁损 $P_{1.0/1000}$ 及较高的磁感。

现有无取向硅钢生产技术绝大部分仅关注 50Hz~400Hz 频率条件下的铁损，仅有少量生产技术关注 1000Hz 及以上频率条件下的铁损，但生产工艺复杂，难以满足未来高速电机快速发展的需要。

例如，中国专利公开号为 CN111471927A 的专利文献公开了一种汽车

发电机用高磁感无取向硅钢及其制备方法，所述无取向硅钢包括以下重量百分比的化学成分：Si 0.60~1.60%、Mn 0.10~0.65%、P 0.040~0.100%、Als≤0.0080%、Sn 0.01~0.10%、C+S+O+N+Ti≤100ppm，且各元素含量均≤25ppm，其余成分为Fe及不可避免的杂质元素。通过成分和工艺设计优化，最终产品的磁性能满足，铁损 $P_{1.5/50} \leq 4.50 \text{ W/kg}$ ，磁感 $B_{5000} \geq 1.74 \text{ T}$ ；力学性能满足维氏显微硬度 HV1 在 110~120 范围，延伸率 $A_{50} \geq 40\%$ 。

中国专利公开号为 CN 107964631 B 的专利文献公开了一种屈服强度 $\geq 500 \text{ MPa}$ 的高速电机转子用无取向硅钢，其化学成分按 wt% 计为：Si: 4.12~4.5%，Al: 1.62~2.0%，Mn: 0.5~2.0，N≤0.005%，S≤0.002%，C≤0.003%，P≤0.05%，Cu≤0.05%，Ti+Nb+V+Zr≤0.01%。生产方法：转炉冶炼；RH 真空精炼；对铸坯加热；粗轧后精轧；卷取；酸洗；冷轧；退火。该申请公开的高速电机转子用无取向硅钢屈服强度不低于 500MPa，对于 0.35mm 及以下厚度成品铁损为 $P_{1.0/400} \leq 18 \text{ W/kg}$ 。

中国专利公开号为 CN 107974620 B 专利文献公开了一种屈服强度 600MPa 级高速转子用无取向硅钢，其化学成分按 wt% 计为：C 0.001~0.003%、Si 2.6~3.4%、Mn 0.20~0.60%、P≤0.005%、S≤0.005%、Als 0.75~0.95%、N 0.002~0.006%、Nb 0.053~0.20%。生产步骤：经转炉冶炼并浇铸成坯；对连铸坯加热；常规的粗轧及精轧；常化；酸洗后进行冷轧；连续退火。该申请公开无取向硅钢厚度不超过 0.35mm 的成品屈服强度 $\geq 600 \text{ MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 700 \text{ MPa}$ ， $P_{1.0/400} \leq 35 \text{ W/kg}$ ， $B_{5000} \geq 1.60 \text{ T}$ 。

以上专利 CN111471927A、CN 107964631 B 和 107974620 B 提供的普通电机用无取向硅钢尽管在机械强度和磁感方面能够满足高速电机的要求，但仅关注 50Hz~400Hz 频率条件下的铁损。无取向硅钢的铁损包括磁滞损耗、涡流损耗和反常损耗三部分。由于反常损耗在铁损中占比较小，故一般重点关注磁滞损耗和涡流损耗。磁滞损耗 $P_h = k_h * f * B^2$ ，涡流损耗 $P_e = k_e * f^2 * B^2$ 。从磁滞损耗和涡流损耗的公式可以看出，磁滞损耗 P_h 与 f 成正比，涡流损耗 P_e 与 f^2 成正比。所以，随着频率增加，铁损中涡流损耗大幅度增加。在低频（50Hz~400Hz）情况下，磁滞损耗占铁损的大部分比例；在高频（ $\geq 1000 \text{ Hz}$ ）下，涡流损耗占铁损的大部分比例。显然，由于高频和低频条件下铁损组成的不同，低频条件下磁性能良好的无取向硅钢难以保证

高频下仍具有良好的磁性能，也即以上专利所述无取向硅钢及生产方法难以满足高速电机用无取向硅钢高频铁损 $P_{1.0/1000}$ 的使用要求，存在高频率下的铁损较高的缺陷。

中国专利公开号为 CN 104480386 B 专利文献公开了一种高速电机用 0.2mm 厚无取向硅钢，其组分及 wt% 为：C 0.001~0.025%、Si 2.6~3.0%、Al 0.25~0.55%、Mn 0.10~0.30%、 $P \leq 0.015\%$ 、S 0.001~0.0025%、N 0.001~0.0025%。生产步骤：用真空感应炉冶炼并铸成钢锭；开坯加热；经锻打后加热；热轧；常化；酸洗；第一次冷轧；中间退火；第二次冷轧；成品退火；按常规冷却、剪切、制样、磁性与机械性能测量。该申请在保证磁性能 $P_{1.0/1000} \leq 40 \text{W/kg}$ ， $B_{5000} \geq 1.68 \text{T}$ 的前提下，兼顾机械性能屈强比在 0.70~0.73，满足制造高速电机铁芯的使用要求。

中国专利公开号为 CN 112538592 B 专利文献公开了一种用于频率 $\geq 10000 \text{Hz}$ 高速电机的无取向硅钢，其组分及 wt%：C $\leq 0.003\%$ 、Si 2.8~3.5%、Mn 0.05~1.0%、 $P \leq 0.0015\%$ 、N $\leq 0.0008\%$ 、Al 0.75~1.5%、S $\leq 0.0009\%$ 、Sb 0.001~0.1%、Sn 0.001~0.1%，且满足 Sb+Sn 在 0.001~0.1%；步骤：冶炼并浇注成坯；铸坯加热、保温后热轧，卷取；常化、保温、酸洗并卷取；第一次冷轧；第一次连续退火；第二次冷轧；第二次连续退火；第三次冷轧；成品连续退火；缓冷、涂敷绝缘层及卷曲。该申请在厚度 0.02~0.15mm 下，获得磁性能优异，即 $P_{0.1/10000}$ 不超过 15.5W/kg， $P_{0.1/400}$ 不超过 9.5W/kg， B_{5000} 不低于 1.6T。

中国专利公开号为 CN 104480386 B 和 CN 112538592 B 的专利文献分别公开了一种电流频率为 1000Hz 和 10000Hz 的高速电机用无取向硅钢，但是生产工艺复杂，成本高。如中国专利公开号为 CN 104480386 B 专利文献公开了一种高速电机用 0.2mm 厚无取向硅钢，其生产工艺采用二次冷轧+二次退火；而中国专利公开号为 CN 112538592 B 专利文献公开了一种用于频率 $\geq 10000 \text{Hz}$ 高速电机的无取向硅钢，其生产工艺包括三次冷轧+三次退火。

可见，现有无取向硅钢生产技术绝大部分仅关注 50Hz~400Hz 频率条件下的铁损，仅有少量生产技术关注 1000Hz 及以上频率条件下的铁损，但生产工艺复杂，难以满足未来高速电机快速发展的需要。

发明内容

本申请要解决的技术问题在于克服现有技术中高速电机用无取向硅钢存在的生产工艺复杂或者高频率下的铁损较高的缺陷，从而提供一种高速电机用无取向硅钢及其制备方法。

为此，本申请提供了一种高速电机用无取向硅钢，其化学成分按质量百分数计为： $C \leq 0.0020\%$ 、 $S \leq 0.0010\%$ 、 $N \leq 0.0030\%$ 、 $Si: 3.0 \sim 3.4\%$ 、 $Al: 0.80 \sim 1.0\%$ 、 $Mn: 0.2 \sim 0.4\%$ 、 $P \leq 0.01\%$ 、 $Sn+ Sb \leq 0.004\%$ 、 $Nb \leq 0.005\%$ 、 $V \leq 0.005\%$ 、 $Ti \leq 0.005\%$ 、 $Mo \leq 0.005\%$ 、 $Cr \leq 0.05\%$ 、 $Ni \leq 0.05\%$ 、 $Cu \leq 0.05\%$ ，其它为 Fe 及不可避免的夹杂；其中， $0 < C+S+N \leq 0.0050\%$ ；成品厚度为 0.20-0.30mm，成品晶粒尺寸为 80-100 μm 。

进一步地，所述高速电机用无取向硅钢的屈服强度 $\geq 550MPa$ ，磁感 $B_{5000} \geq 1.65$ ，0.30mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 45W/kg$ ，0.25mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 40W/kg$ ，0.20mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 35W/kg$ 。

进一步地， $4.8\% \leq Si+2Al \leq 5.2\%$ 。

本申请中各元素和工序的主要作用如下：

$C \leq 0.0020\%$ 、 $S \leq 0.0010\%$ 、 $N \leq 0.0030\%$ ：在无取向硅钢中 C、S、N 均为有害元素。C 含量增加，铁损高、磁感低；C 高还可引起磁时效问题，其含量越低越好。S 与 Mn 形成细小的 MnS，N 与 Al 形成细小的 AlN，不仅阻碍退火时晶粒的长大，还直接阻碍畴壁移动，提高磁滞损耗。无取向硅钢一般采用真空精炼，控制 C 在 0.002% 以下，N 在 0.003% 以下，难度不高。一般中低牌号无取向硅钢 S 含量控制在 0.0030% 以下，继续降低 S 含量，成本增加。但对本申请高速电机用高牌号无取向硅钢来说，由于 Si 含量控制在 3.0~3.4%，Al 含量控制在 0.80~1.0%，钢液中 O 含量大幅降低。根据脱硫反应 $CaO+S=CaS+O$ ，钢液中 O 含量降低后，脱硫难度降低。故本申请控制 C 在 0.0020% 以下，S 在 0.0010% 以下，N 在 0.0030% 以下，同时控制 $0 < C+S+N \leq 0.0050\%$ 。有害元素 C、S、N 的控制，不仅降低了本申请无取向硅钢在高频运行时的磁滞损耗，还提高了磁感，减少了磁时效。

Si 3.0~3.4%、Al 0.80~1.0%：Si 和 Al 均是提高电阻率、降低铁损、提高强度的有效添加元素。但 Si、Al 含量增加，轧钢难度增加，热轧过程易

出现边裂，冷轧过程易发生断带；特别是当 Si 含量大于 3.5% 后，轧制难度大幅度增加。同时 Si、Al 含量增加，钢板的磁感降低。本申请中 Si 含量控制在 3.0~3.4%，Al 含量控制在 0.80~1.0%，降低高频铁损，提高钢板强度，同时使钢液中 O 含量大幅降低，为超低 S 冶炼创造条件。配合化学成分 (P、Sn+Sb) 控制、将铸坯自然冷却至 400~500°C 后，以不高于 10°C/min 的加热速度加热到 1080~1100°C，然后保温 0.5~1.0h 再热轧、830-870°C 的低温常化以及冷轧前将钢板预热至 100-200°C 的措施，可实现热轧无边裂稳定生产和冷轧大压下率稳定生产，冷轧断带率低于 0.5%。并且，通过上述低温常化工艺，使得成品具有较高的磁感。

Mn 0.2~0.4%: 适量添加 Mn，对提高钢板的磁性能有利，同时可提高钢板强度；Mn 可以抑制 S 引起的热脆性，易与 S 形成粗大的 MnS 析出物而使得钢板的铁损降低。Mn 合金价格较高，基于成本考虑，本申请 Mn 含量控制在 0.2~0.4%。由于本申请 S 含量 $\leq 0.0010\%$ ，Mn/S 较高，可促进 MnS 的析出与长大，对磁性能有利。

P $\leq 0.01\%$: P 对磁性影响不大，提高 P 含量可有效提高钢板强度，但对高牌号无取向硅钢来说，P 含量增加后，冷轧生产难度大幅增加，轧制过程易发生断带。本申请控制思想是采用高 Si、高 Al 成分设计和成品薄规格设计，通过成品细晶控制，获得高强度；通过一次冷轧获得成品厚度，故应控制 P $\leq 0.01\%$ ，提高钢板的可轧性，简化生产工艺。

Sn+Sb $\leq 0.004\%$: Sn 和 Sb 均为晶界偏聚元素，在无取向硅钢中单独添加 Sn、单独添加 Sb 或复合添加 Sn 和 Sb，目的都是通过 Sn 和 Sb 在晶界的偏聚，减少 {111} 不利组织的比例，提高成品的磁感。特别是在无常化工序生产流程中，效果更为明显。但是由于 Sn 和 Sb 的晶界偏聚行为，导致钢板晶界脆化，冷轧易断带，生产难度增加。本申请在冷轧前，热轧卷经过常化处理，可显著降低成品 {111} 不利组织的比例，故成分设计时，不特意添加 Sn 和 Sb，控制 Sn+Sb $\leq 0.004\%$ ，以确保钢板的可轧性，简化生产工艺。

Nb $\leq 0.005\%$ 、V $\leq 0.005\%$ 、Ti $\leq 0.005\%$ 、Mo $\leq 0.005\%$ 、Cr $\leq 0.05\%$ 、Ni $\leq 0.05\%$ 、Cu $\leq 0.05\%$: Nb、V、Ti、Mo、Cr、Ni、Cu 会减小无取向硅钢成品晶粒尺寸，导致低频条件下无取向硅钢的磁性能下降，包括铁损增大、磁感应强度降低；本申请高速电机用无取向硅钢要求成品在高频运行条件下具有低

铁损，需要通过适当减小晶粒尺寸，以减小涡流损耗。故本申请高速电机用无取向硅钢中适当含量 Nb、V、Ti、Mo、Cr、Ni、Cu 的存在，可减小无取向硅钢成品晶粒尺寸，不仅有利于提高强度，还有利于减小高频涡流损耗。但考虑到这些元素的合金价格较高，本申请不特意添加，仅适当放宽其控制要求，降低炼钢难度。控制 $Nb \leq 0.005\%$ 、 $V \leq 0.005\%$ 、 $Ti \leq 0.005\%$ 、 $Mo \leq 0.005\%$ 、 $Cr \leq 0.05\%$ 、 $Ni \leq 0.05\%$ 、 $Cu \leq 0.05\%$ 。

无取向硅钢的铁损包括磁滞损耗、涡流损耗和反常损耗三部分。磁滞损耗是磁性材料在磁化和反磁化过程中，由于材料中夹杂物、晶体缺陷、内应力和晶体位向等因素阻碍畴壁移动，磁通变化受阻，造成磁感应强度落后于磁场强度变化的磁滞现象而引起的能量损耗。涡流损耗是磁性材料在交变磁化过程中，在磁通改变大小或方向时，按照法拉第电磁感应法则，在磁通周围感生出局部电动势而引起涡电流所造成的能量损耗。也就是说磁壁移动时磁化迅速变化而产生涡流损耗，可按经典涡流损耗公式计算。反常损耗是材料磁化时由于磁畴结构不同而引起的能量损耗，在铁损中占比较小。

可见，无论是磁滞损耗、涡流损耗，还是反常损耗，均是磁性材料在磁化和反磁化过程中产生的能量损耗。由于反常损耗在铁损中占比较小，故一般重点关注磁滞损耗和涡流损耗。磁滞损耗 $P_h = k_h * f * B^2$ ，涡流损耗 $P_e = k_e * f^2 * B^2$ 。在工频（50Hz）情况下，磁滞损耗约占 70%、涡流损耗约占 30%。从磁滞损耗和涡流损耗的公式可以看出， P_h 与 f 成正比， P_e 与 f^2 成正比，所以，随着频率增加，铁损中涡流损耗大幅度增加。在低频（50Hz~400Hz）情况下，磁滞损耗占铁损的大部分比例；在高频（ $\geq 1000\text{Hz}$ ）下，涡流损耗占铁损的大部分比例。

由于低频和高频铁损组成的不同，本申请采用与传统无取向硅钢截然不同的设计理念。

传统无取向硅钢的设计理念：低频条件下，对同一成分无取向硅钢来说，由于磁滞损耗占比较高，故工艺设计时一般要求围绕成品大晶粒设计。因为晶界会阻碍畴壁移动，晶粒增大，晶界减少，磁滞损耗较少，铁损低。成品大晶粒设计，有利于降低低频铁损，但晶粒增加后钢板强度降低。即低频条件下，对晶粒尺寸控制来说，低铁损和高强度是矛盾的。为降低铁

损，应增加晶粒尺寸，然后通过固溶强化、沉淀强化及位错强化等其它强化方式来提高强度。比如：在成分设计中添加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 等合金元素；在工艺设计上进行不完全再结晶退火或二次冷轧；或者以上两种方式的组合。

本申请的无取向硅钢的设计理念：高频条件下，对同一成分无取向硅钢来说，由于涡流损耗占比较高，故工艺设计时成品晶粒不再追求大晶粒，因为晶粒变大后，晶界减少，磁畴移动速度增加，导致磁化迅速变化，从而增加了涡流损耗。也就是说，高频条件下，可以通过减小晶粒尺寸，减少占高频铁损最大比例的涡流损耗，虽然磁滞损耗会增加，但整体高频铁损降低。同时可借助晶粒细化，提高钢板强度。即高频条件下，对晶粒尺寸控制来说，低铁损和高强度是有机统一的，可以通过控制晶粒尺寸，同时实现细晶强化和高频低铁损。

本申请还提供了一种高速电机用无取向硅钢的制备方法，包括冶炼并铸成连铸坯、连铸坯冷却与加热、热轧、常化、酸洗、冷轧、退火和涂层处理。

进一步地，常化温度为 830-870℃，保温时间为 3-5min；冷压压下率控制在 89%-90%；退火温度为 880-900℃，保温时间为 120-150s。

进一步地，采用真空感应炉进行冶炼，控制 $0 < C + S + N \leq 0.0050\%$ ，并铸成厚度 200~250mm 连铸坯。

进一步地，所述铸坯冷却与加热步骤为，将铸坯自然冷却至 400~500℃ 后，以不高于 10℃/min 的加热速度加热到 1080~1100℃，然后保温 0.5~1.0h。

进一步地，所述热轧包括 6 道次粗轧和 7 道次精轧工序；和/或，

通过粗轧获得厚度为 30~45mm 中间坯，通过精轧获得厚度为 2.0~3.0mm 的热轧板；和/或，

精轧终轧温度 800~860℃，卷取温度 600~660℃，精轧终轧温度和卷取温度的波动范围为 $\pm 15^\circ\text{C}$ ，精轧的总压下率为 92.5-93.5%。

进一步地，常化后将钢板冷却至 80~150℃ 后，进行抛丸和酸洗工序。

可采用现有常规试剂酸洗，例如采用盐酸进行酸洗，酸液温度为 75~85℃，酸液中盐酸的浓度为 120~160g/L。

进一步地，冷轧前将钢板预热至 100-200℃；和/或，常化后再结晶晶粒

尺寸为 60~80 μm ，再结晶组织体积占比为 100%。

本申请技术方案，具有如下优点：

1. 本申请提供的高速电机用无取向硅钢，其化学成分按质量百分数计为： $C \leq 0.0020\%$ 、 $S \leq 0.0010\%$ 、 $N \leq 0.0030\%$ 、 $Si: 3.0 \sim 3.4\%$ 、 $Al: 0.80 \sim 1.0\%$ 、 $Mn: 0.2 \sim 0.4\%$ 、 $P \leq 0.01\%$ 、 $Sn+Sb \leq 0.004\%$ 、 $Nb \leq 0.005\%$ 、 $V \leq 0.005\%$ 、 $Ti \leq 0.005\%$ 、 $Mo \leq 0.005\%$ 、 $Cr \leq 0.05\%$ 、 $Ni \leq 0.05\%$ 、 $Cu \leq 0.05\%$ ，其它为 Fe 及不可避免的夹杂；其中， $0 < C+S+N \leq 0.0050\%$ ；成品厚度为 0.20-0.30mm，成品晶粒尺寸为 80-100 μm ，通过化学成分精确控制以及成品厚度和晶粒尺寸的控制，在提高强度的同时降低了高频铁损 $P_{1.0/1000}$ ，且冶炼成本低、生产工艺简单、生产成本低，满足高速电机高转速、小体积、高效率的应用要求，既不需要额外添加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 等合金强化元素，又不需要添加 Sn、Sb 等织构控制元素。

2. 本申请提供的高速电机用无取向硅钢，成品屈服强度 $\geq 550\text{MPa}$ ，磁感 $B_{5000} \geq 1.65$ ，0.30mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 45\text{W/kg}$ ，0.25mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 40\text{W/kg}$ ，0.20mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 35\text{W/kg}$ ；满足未来高速电机快速发展的需要。

3. 本申请提供的高速电机用无取向硅钢的制备方法，包括冶炼并铸成连铸坯、连铸坯冷却与加热、热轧、常化、酸洗、冷轧、退火和涂层处理，生产流程短，生产效率高。通过化学成分的控制和上述全流程工艺设计，借助电阻率控制、夹杂物控制、织构控制和晶粒度控制等手段调和高频铁损、磁感和强度之间的矛盾，同时实现高强度、高磁性能和优良的高频磁性能。

4. 本申请提供的高速电机用无取向硅钢的制备方法，通过控制成分设计中 P、Sn、Sb 元素含量，结合控制铸坯自然冷却的温度和加热速度，避免高硅钢铸坯裂纹，确保热轧顺行；通过常化后再结晶晶粒尺寸的控制和冷轧轧前预热，实现高硅钢大压下率一次冷轧，通过一次退火即可获得厚度 0.20~0.30mm 成品，生产流程短，生产效率高。

5. 本申请提供的高速电机用无取向硅钢的制备方法，在 830-870 $^{\circ}\text{C}$ 下保温 3-5min 的常化，低温较长时间加热，既实现热轧板完全再结晶，又避免晶粒过大，使得晶粒尺寸为 60~80 μm 。之所以控制冷压压下率在 89%-90%，

提高储存能和形核点，增加退火形核率，为退火过程精确稳定控制成品晶粒尺寸创造条件。结合在 880-900℃ 下保温 120-150s 的退火，上述三个工序条件的控制结合对化学成分精确控制确保实现完全再结晶，控制成品晶粒尺寸为 80~100μm。

具体实施方式

提供下述实施例是为了更好地进一步理解本申请，并不局限于所述最佳实施方式，不对本申请的内容和保护范围构成限制，任何人在本申请的启示下或是将本申请与其他现有技术的特征进行组合而得出的任何与本申请相同或相近似的产品，均落在本申请的保护范围之内。

实施例中未注明具体实验步骤或条件者，按照本领域内的文献所描述的常规实验步骤的操作或条件即可进行。所用试剂或仪器未注明生产厂商者，均为可以通过市购获得的常规试剂产品。

实施例 1~8 分别提供一种高速电机用无取向硅钢，化学成分以质量百分比计如表 1 所示，其余为 Fe 及不可避免的夹杂；并且，各实施例制备得到的高速电机用无取向硅钢具体为如表 1 所示厚度的钢板。

表 1

	化学成分以质量百分比计(%)																厚度 (mm)
	C	S	N	Si	Al	Mn	P	Sn	Sb	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Ni	Cu	
实施例 1	0.0016	0.0006	0.0018	3.10	0.88	0.35	0.006	0.001	0	0.004	0.002	0.003	0.003	0.04	0.01	0.02	0.30
实施例 2	0.0016	0.0006	0.0018	3.10	0.88	0.35	0.006	0.001	0	0.004	0.002	0.003	0.003	0.04	0.01	0.02	0.25
实施例 3	0.0016	0.0006	0.0018	3.10	0.88	0.35	0.006	0.001	0	0.004	0.002	0.003	0.003	0.04	0.01	0.02	0.20
实施例 4	0.0013	0.0008	0.0021	3.31	0.92	0.25	0.007	0.001	0	0.002	0.002	0.004	0.003	0.02	0.02	0.03	0.30
实施例 5	0.0013	0.0008	0.0021	3.31	0.92	0.25	0.007	0.001	0	0.002	0.002	0.004	0.003	0.02	0.02	0.03	0.25
实施例 6	0.0013	0.0008	0.0021	3.31	0.92	0.25	0.007	0.001	0	0.002	0.002	0.004	0.003	0.02	0.02	0.03	0.20
实施例 7	0.0015	0.0007	0.0015	3.05	0.84	0.38	0.005	0.001	0.001	0.003	0.004	0.003	0.003	0.03	0.01	0.03	0.25
实施例 8	0.0010	0.0006	0.0023	3.35	0.96	0.22	0.004	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004	0.004	0.04	0.02	0.04	0.25

本申请各实施例的高速电机用无取向硅钢均按照如下步骤生产：

（1）采用真空感应炉进行冶炼，控制 $0<C+S+N\leq 0.0050\%$ ，并铸成厚度 220mm 连铸坯；连铸坯的化学成分如表 1 所示；冶炼过程不特意添加 Nb、V、Ti、Mo、Cr、Ni、Cu，但适当放宽其控制要求，控制 $Nb\leq 0.005\%$ ， $V\leq 0.005\%$ ，

Ti≤0.005%，Mo≤0.005%，Cr≤0.05%，Ni≤0.05%，Cu≤0.05%降低炼钢难度。

(2) 将步骤(1)所得连铸坯堆垛，并自然冷却至450℃后，送入加热炉，以5℃/min的加热速度加热后进行保温，加热温度和保温时间如表2所示。

(3) 将步骤(2)加热后的连铸坯进行粗轧和精轧，粗轧采用1+5模式，通过六道次轧制获得中间坯；然后进行7道次精轧和卷取得到热轧卷。粗轧所得中间坯厚度、精轧终轧温度、精轧过程的总压下率、所得热轧板的厚度以及卷取温度如表2所示。

(4) 将步骤(3)所得热轧卷板在纯干N₂气氛下进行常化，常化温度、常化时间如表3所示；常化后钢板冷却至100℃后，先进行抛丸，然后采用盐酸进行酸洗，酸液温度为80℃，酸液中盐酸的浓度为140g/L，酸洗液中Fe²⁺的质量浓度控制在50±20g/L。对各个实施例的常化钢板进行金相组织检测，测量所得的再结晶组织体积占比、再结晶晶粒尺寸分别如表3所示；

(5) 将步骤(4)所得常化酸洗钢板将常化酸洗后钢板进行预热，然后进行冷轧，预热温度、轧前厚度、轧后厚度、冷轧压下率分别如表4所示。

(6) 将步骤(5)所得轧硬钢板在H₂和N₂混合气氛中进行连续退火，H₂含量为15%；退火温度和保温时间如表4所示。

(7) 将步骤(6)所得钢板按常规方法进行涂层及精整。

表 2

	加热温度 (℃)	保温时间 (min)	中间坯厚 度 (mm)	终轧温度 (℃)	精轧总压 下率 (%)	热轧板厚度 (mm)	卷取温度 (℃)
实施例 1	1092	45	40	838	92.50	3.0	635
实施例 2	1090	46	35	836	92.86	2.5	630
实施例 3	1091	44	30	828	93.33	2.0	638
实施例 4	1085	53	40	845	92.50	3.0	652
实施例 5	1088	56	35	849	92.86	2.5	648
实施例 6	1090	55	30	840	93.33	2.0	645
实施例 7	1095	38	35	818	92.86	2.5	610
实施例 8	1085	52	35	855	92.86	2.5	652

表 3

	常化温度 (℃)	常化时间 (s)	再结晶组织体积占比 (%)	再结晶晶粒尺寸 (μm)
实施例 1	852	252	100	70
实施例 2	848	252	100	72
实施例 3	853	252	100	75
实施例 4	856	210	100	75
实施例 5	850	210	100	73
实施例 6	852	210	100	70
实施例 7	846	252	100	64
实施例 8	865	180	100	76

表 4

	预热温度 (℃)	轧前厚度 (mm)	轧后厚度 (mm)	冷轧压下率 (%)	退火温度 (℃)	退火保温时长 (s)
实施例 1	120	3.0	0.30	90	890	135
实施例 2	120	2.5	0.25	90	892	135
实施例 3	120	2.0	0.20	90	895	135
实施例 4	140	3.0	0.30	90	888	135
实施例 5	140	2.5	0.25	90	892	135
实施例 6	140	2.0	0.20	90	895	135
实施例 7	160	2.5	0.25	90	886	125
实施例 8	180	2.5	0.25	90	896	145

对比例

对比例 1~8 分别提供一种无取向硅钢，化学成分以质量百分比计如表 5 所示；并且，各对比例制备得到的无取向硅钢具体为如表 5 所示厚度的钢板。

表 5

	化学成分以质量百分比计(%)																厚度 (mm)
	C	S	N	Si	Al	Mn	P	Sn	Sb	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Ni	Cu	
对比例 1	0.0013	0.0005	0.0016	3.15	0.86	0.33	0.009	0.001	0	0.002	0.003	0.002	0.002	0.01	0.01	0.02	0.30
对比例 2	0.0013	0.0005	0.0016	3.15	0.86	0.33	0.009	0.001	0	0.002	0.003	0.002	0.002	0.01	0.01	0.02	0.25
对比例 3	0.0013	0.0005	0.0016	3.15	0.86	0.33	0.009	0.001	0	0.002	0.003	0.002	0.002	0.01	0.01	0.02	0.20
对比例 4	0.0012	0.0007	0.0018	3.18	0.88	0.30	0.008	0.001	0	0.022	0.002	0.015	0.003	0.04	0.01	0.02	0.30
对比例 5	0.0012	0.0007	0.0018	3.18	0.88	0.30	0.008	0.001	0	0.022	0.002	0.015	0.003	0.04	0.01	0.02	0.25
对比例 6	0.0012	0.0007	0.0018	3.18	0.88	0.30	0.008	0.001	0	0.022	0.002	0.015	0.003	0.04	0.01	0.02	0.20
对比例 7	0.0015	0.0006	0.0020	3.55	0.85	0.34	0.006	0.03	0	0.002	0.002	0.001	0.001	0.02	0.02	0.02	0.30
对比例 8	0.0015	0.0006	0.0020	3.55	0.85	0.34	0.006	0.03	0	0.002	0.002	0.001	0.001	0.02	0.02	0.02	0.35

对比例 1~8 的无取向硅钢均按照低频无取向硅钢设计思路组织生产：

对比例1~3, 通过控制常化温度和保温时间使得常化后再结晶晶粒尺寸较大, 再结合冷压压下率、退火温度和保温时间的控制, 获得成品大晶粒, 具体工艺参数如表6~8所示;

对比例4~6在对比例1~3基础上, 在成分设计时, 增加Nb、Ti含量, 通过微合金元素Nb、Ti的固溶强化和细晶强化效果, 增加钢板强度。

对比例7在成分设计时增加Si含量超出本申请的范围, 冷轧过程易断带, 故对比例8在对比例7基础上增加成品厚度至0.35mm, 降低断带风险。

对比例1~8的无取向硅钢生产步骤如下:

(1) 采用真空感应炉进行冶炼, 并铸成厚度220mm连铸坯; 连铸坯的化学成分如表5所示。

(2) 将步骤(1)所得连铸坯堆垛, 并自然冷却至 450°C 后, 送入加热炉, 以 5°C/min 的加热速度加热后进行保温, 加热温度和保温时间如表 6 所示。

(3) 将步骤(2)加热后的连铸坯进行粗轧和精轧, 粗轧采用 1+5 模式, 通过六道次轧制获得中间坯; 然后进行 7 道次精轧和卷取得到热轧板卷。粗轧所得中间坯厚度、精轧终轧温度、精轧过程的总压下率、所得热轧板的厚度以及卷取温度如表 6 所示。

(4) 将步骤(3)所得热轧卷板在纯干 N₂气氛下进行常化, 常化温度、常化时间如表 7 所示; 常化后钢板冷却至 100°C 后, 先进行抛丸, 然后采用盐酸进行酸洗, 酸液温度为 80°C, 酸液中盐酸的浓度为 140g/L, Fe²⁺的质量浓度控制在 50±20g/L。对各个对比例的常化钢板进行金相组织检测, 测量所得的再结晶组织体积占比、再结晶晶粒尺寸分别如表 7 所示;

(5) 将步骤(4)所得常化酸洗钢板将常化酸洗后钢板进行预热, 然后进行冷轧, 预热温度、轧前厚度、轧后厚度、冷轧压下率分别如表 8 所示。其中对比例 7 冷轧过程断带, 未完成轧制。

(6) 将步骤(5)所得轧硬钢板在 H₂和 N₂混合气氛中进行连续退火, H₂含量≥15%; 退火温度和保温时间如表 8 所示。

(7) 将步骤(6)所得钢板按常规方法进行涂层及精整。

表 6

	加热温度 (℃)	保温时间 (min)	中间坯厚 度 (mm)	终轧温度 (℃)	精轧总压 下率 (%)	热轧板厚度 (mm)	卷取温度 (℃)
对比例 1	1091	45	30	838	92.66	2.2	635
对比例 2	1093	44	30	841	93.33	2.0	640
对比例 3	1095	51	30	835	94.00	1.8	637
对比例 4	1091	53	30	836	92.66	2.2	642
对比例 5	1098	52	30	839	93.33	2.0	648
对比例 6	1094	45	30	840	94.00	1.8	645
对比例 7	1101	50	30	844	92.66	2.2	641
对比例 8	1095	52	30	845	92.33	2.3	642

表 7

	常化温度 (℃)	常化时间 (s)	再结晶组织体 积占比 (%)	再结晶晶粒 尺寸 (μm)
对比例 1	893	215	100	103
对比例 2	888	215	100	102
对比例 3	885	215	100	106
对比例 4	884	215	100	106
对比例 5	890	215	100	103
对比例 6	893	215	100	105
对比例 7	889	215	100	104
对比例 8	895	215	100	106

表 8

	预热温度 (℃)	轧前厚度 (mm)	轧后厚度 (mm)	冷轧压下 率 (%)	退火温度 (℃)	退火保温 时长 (s)
对比例 1	120	2.2	0.30	86.4	992	180
对比例 2	120	2.0	0.25	87.5	992	180
对比例 3	120	1.8	0.20	88.8	991	180
对比例 4	150	2.2	0.30	86.4	987	180
对比例 5	150	2.0	0.25	87.5	993	180
对比例 6	150	1.8	0.20	88.8	995	180
对比例 7	180	2.2	0.30	86.4	-	-
对比例 8	180	2.2	0.35	84.1	996	180

测试实施例1~8、对比例1~6和对比例8制得的无取向硅钢的再结晶晶粒尺寸和再结晶组织体积占比(%)、屈服强度和抗拉强度以及铁损 $P_{1.0/1000}$ ，测试实施例1~8和对比例4~6制得的无取向硅钢的磁感应强度 B_{5000} 。结果见下表所示。

表 9

	再结晶组织 体积占比 (%)	再结晶晶粒 尺寸 (μm)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	铁损 P _{1.0/1000} (W/kg)	磁感 B ₅₀₀₀ (T)
实施例 1	100	85	585	643	42.1	1.671
实施例 2	100	91	574	635	38.8	1.667
实施例 3	100	88	586	645	31.7	1.663
实施例 4	100	92	569	638	40.9	1.673
实施例 5	100	95	576	646	36.6	1.658
实施例 6	100	88	572	642	30.6	1.663
实施例 7	100	84	565	628	39.4	1.662
实施例 8	100	95	588	656	36.2	1.658
对比例 1	100	152	523	577	50.8	-
对比例 2	100	148	530	581	43.2	-
对比例 3	100	145	533	585	38.4	-
对比例 4	100	125	559	621	59.3	1.655
对比例 5	100	122	563	626	50.4	1.648
对比例 6	100	120	568	634	45.2	1.642
对比例 7	-	-	-	-	-	-
对比例 8	100	147	554	625	58.2	-

从上述实施例 1~8 可以看出，采用本申请实施方式的高速电机用无取向硅钢，不仅具有高强度和较高磁感，而且高频铁损 P_{1.0/1000} 低，且冶炼成本低、生产工艺简单、生产成本低，满足高速电机的应用要求。

对比例 1~3 采用与实施例 1~3 相似的化学成分，通过控制常化温度、保温时间、冷压压下率、退火温度和保温时间，获得成品大晶粒。但成品强度显著低于实施例 1~3，相同成品厚度高频铁损 P_{1.0/1000} 显著高于实施例 1~3。

对比例 4~6 在对比例 1~3 基础上，在成分设计时，增加 Nb、Ti 含量，通过微合金元素 Nb、Ti 的固溶强化和细晶强化效果，相比于对比例 1~3 钢板强度略有增加。测试结果显示其晶粒尺寸小于对比例 1~3，强度高于对比例 1~3。与实施例 1~3 相比，对比例 4~6 相同成品厚度强度低、铁损高、磁感低，且合金成本高。

对比例 7 在成分设计时不增加 Nb、Ti 含量，而是增加 Si 含量至 3.5% 以上。结果在轧制目标厚度 0.30mm 钢板时，即使已经将轧前预热温度提升至 180℃，但依然冷轧断带。

对比例8在对比例7基础上增加成品厚度至0.35mm，由于钢板厚度增加，其电阻率降低，造成成品高频铁损显著高于实施例1~8。

显然，上述实施例仅仅是为清楚地说明所作的举例，而并非对实施方式的限定。对于所属领域的普通技术人员来说，在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式的变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。而由此所引伸出的显而易见的变化或变动仍处于本发明创造的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 一种高速电机用无取向硅钢，其化学成分按质量百分数计为： $C \leq 0.0020\%$ 、 $S \leq 0.0010\%$ 、 $N \leq 0.0030\%$ 、 $Si: 3.0 \sim 3.4\%$ 、 $Al: 0.80 \sim 1.0\%$ 、 $Mn: 0.2 \sim 0.4\%$ 、 $P \leq 0.01\%$ 、 $Sn+Sb \leq 0.004\%$ 、 $Nb \leq 0.005\%$ 、 $V \leq 0.005\%$ 、 $Ti \leq 0.005\%$ 、 $Mo \leq 0.005\%$ 、 $Cr \leq 0.05\%$ 、 $Ni \leq 0.05\%$ 、 $Cu \leq 0.05\%$ ，其它为 Fe 及不可避免的夹杂；其中， $0 < C+S+N \leq 0.0050\%$ ；成品厚度为 0.20-0.30mm，成品晶粒尺寸为 80-100 μm 。

2. 根据权利要求 1 所述的高速电机用无取向硅钢，其特征在于，所述高速电机用无取向硅钢的屈服强度 $\geq 550MPa$ ，磁感 $B_{5000} \geq 1.65$ ，0.30mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 45W/kg$ ，0.25mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 40W/kg$ ，0.20mm 厚度时高频铁损 $P_{1.0/1000} \leq 35W/kg$ 。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的高速电机用无取向硅钢，其特征在于， $4.8\% \leq Si+2Al \leq 5.2\%$ 。

4. 一种权利要求 1-3 中任一所述的高速电机用无取向硅钢的制备方法，其特征在于，包括冶炼并铸成连铸坯、连铸坯冷却与加热、热轧、常化、酸洗、冷轧、退火和涂层处理。

5. 根据权利要求 4 所述的高速电机用无取向硅钢的制备方法，其特征在于，常化温度为 830-870 $^{\circ}C$ ，保温时间为 3-5min；冷压压下率控制在 89%-90%；退火温度为 880-900 $^{\circ}C$ ，保温时间为 120-150s。

6. 根据权利要求 4 或 5 所述的高速电机用无取向硅钢的制备方法，其特征在于，采用真空感应炉进行冶炼，控制 $0 < C+S+N \leq 0.0050\%$ ，并铸成厚度 200~250mm 连铸坯。

7. 根据权利要求 4 或 5 所述的高速电机用无取向硅钢的制备方法，其

特征在于，所述铸坯冷却与加热步骤为，将铸坯自然冷却至 400~500°C 后，以不高于 10°C/min 的加热速度加热到 1080~1100°C，然后保温 0.5~1.0h。

8. 根据权利要求 4 或 5 所述的高速电机用无取向硅钢的制备方法，其特征在于，所述热轧包括 6 道次粗轧和 7 道次精轧工序；和/或，

通过粗轧获得厚度为 30~45mm 中间坯，通过精轧获得厚度为 2.0~3.0mm 的热轧板；和/或，

精轧终轧温度 800~860°C，卷取温度 600~660°C，精轧终轧温度和卷取温度的波动范围为 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ ，精轧的总压下率为 92.5-93.5%。

9. 根据权利要求 4 或 5 所述的高速电机用无取向硅钢的制备方法，其特征在于，常化后将钢板冷却至 80~150°C 后，进行抛丸和酸洗工序。

10. 根据权利要求 4 或 5 所述的高速电机用无取向硅钢的制备方法，其特征在于，冷轧前将钢板预热至 100-200°C；和/或，常化后再结晶晶粒尺寸为 60~80 μm ，再结晶组织体积占比为 100%。