

新能源驱动电机用无取向硅钢及其生产方法

技术领域

本发明属于钢铁材料制备技术领域，涉及一种新能源驱动电机用无取向硅钢及其生产方法。

背景技术

无取向硅钢是在旋转磁场中工作的电动机和发电机转子的铁芯材料，要求良好的磁性能，包括较低的铁损和较高的磁感应强度，而磁性能的改善也是本领域技术人员一直以来对无取向硅钢的核心研究课题。通常，在化学成分方面，通常会严格限制 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 等一系列合金元素的添加，以避免这些合金元素含量高而导致对无取向硅钢的磁性能的劣化。

随着新能源汽车在近些年的高速发展，对于驱动电机的无取向硅钢提出了更高的性能要求。具体地，新能源汽车的驱动电机相对于其它常规电机而言转速高，且随着技术发展，新能源汽车的驱动电机的转速还在不断提升，这就要求所用的无取向硅钢除了具有良好磁性能的基础上，还需要具备高强度。

然而，关于钢材的强度提高的现有技术中，化学成分方面，通常需要增加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 等一系列合金元素的添加量，以达到提升钢材强度的目的。而结合前述可知，这些合金元素的增加会劣化无取向硅钢的磁性能。

由此可见，对无取向硅钢的磁性能和强度的影响上，化学成分的设计方向相矛盾。故此，如何同时保证无取向硅钢的磁性能和强度，是无取向硅钢在应用于新能源汽车的驱动电机上所面临的重要问题。

发明内容

本发明的目的在于提供一种新能源驱动电机用无取向硅钢及其生产方法，在保证磁性能的同时，提高了强度，解决了现有技术所存在的磁性能和强度的兼顾问题。

为实现上述发明目的，本发明一实施方式提供了一种新能源驱动电机用无取向硅钢，其化学成分以质量百分比计包括：Si:2.95%~3.15%，Al:0.75%~0.95%，Si+2Al:4.6%~4.9%，Mn:0.5%~0.7%，Sn:0.03%~0.04%，Cu≤0.03%，Cr≤0.03%，Ni≤0.03%，Cr+Ni+Cu≤0.07%，Nb≤0.004%，V≤0.004%，Ti≤0.004%，Nb+V+Ti≤0.008%，C≤0.0025%，P≤0.015%，S≤0.0015%，N≤0.004%，C+S+N≤0.007%，其余为 Fe 及不可避免的夹杂；并且，Mn/S≥380，Al/N≥200。

进一步地，所述无取向硅钢的再结晶晶粒尺寸为 $50\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$ 。

进一步地，所述无取向硅钢为厚度 $0.25\text{mm}\sim 0.35\text{mm}$ 的钢板，屈服强度 $\geq 460\text{Mpa}$ ，抗拉强度 $\geq 550\text{Mpa}$ ，铁损 $P_{1.0/400}\leq 18.5\text{W/kg}$ ，磁感应强度 $B_{5000}\geq 1.67\text{T}$ 。

进一步地，所述无取向硅钢为厚度 0.25mm 的钢板，铁损 $P_{1.0/400}\leq 17.5\text{W/kg}$ ；或者，为厚度 0.30mm 的钢板，铁损 $P_{1.0/400}\leq 18.0\text{W/kg}$ ；或者，为厚度 0.35mm 的钢板，铁损 $P_{1.0/400}\leq 18.5\text{W/kg}$ 。

为实现上述发明目的，本发明一实施方式提供了一种新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，无取向硅钢的化学成分以质量百分比计包括：Si:2.95%~3.15%，Al:0.75%~0.95%，Si+2Al:4.6%~4.9%，Mn:0.5%~0.7%，Sn:0.03%~0.04%，Cu $\leq$ 0.03%，Cr $\leq$ 0.03%，Ni $\leq$ 0.03%，Cr+Ni+Cu $\leq$ 0.07%，Nb $\leq$ 0.004%，V $\leq$ 0.004%，Ti $\leq$ 0.004%，Nb+V+Ti $\leq$ 0.008%，C $\leq$ 0.0025%，P $\leq$ 0.015%，S $\leq$ 0.0015%，N $\leq$ 0.004%，C+S+N $\leq$ 0.007%，其余为Fe及不可避免的夹杂；并且，Mn/S $\geq$ 380，Al/N $\geq$ 200；

所述无取向硅钢的再结晶晶粒尺寸为 $50\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$ ；

所述生产方法通过依序进行的炼钢、连铸、热轧、常化、酸洗、单机架冷轧、退火、冷却、涂层和精整，制备出无取向硅钢；

在热轧工序中，将连铸工序所得连铸坯加热到 $1080^{\circ}\text{C}\sim 1110^{\circ}\text{C}$ 并保温 $160\text{min}\sim 180\text{min}$ ，而后依次经过粗轧、精轧、卷取，得到热轧卷板；精轧时的开轧温度为 $950\pm 20^{\circ}\text{C}$ 、终轧温度为 $840\pm 20^{\circ}\text{C}$ 且总的压下率为 $94\sim 95\%$ ，卷取时的卷取温度为 $620\pm 20^{\circ}\text{C}$ ；

在常化工序中，常化温度为 $840^{\circ}\text{C}\sim 860^{\circ}\text{C}$ 并保温 $180\text{s}\sim 200\text{s}$ ；

在退火工序中，退火温度为 $960^{\circ}\text{C}\sim 980^{\circ}\text{C}$ 并保温 $40\text{s}\sim 45\text{s}$ 。

优选地，在单机架冷轧工序中，进行多道次轧制，总的压下率为 $85\pm 3\%$ ，除了最后一道次之外的其余各个道次的压下率均不小于 30% 。

优选地，所得无取向硅钢为厚度 $0.25\text{mm}\sim 0.35\text{mm}$ 的钢板；在所述热轧工序中，将厚度为 220mm 的连铸坯粗轧成厚度为 $35\text{mm}\sim 40\text{mm}$ 的中间坯，再精轧成厚度为 $2.00\text{mm}\sim 2.30\text{mm}$ 的热轧板。

优选地，所得无取向硅钢为厚度 0.25mm 的钢板，所述中间坯的厚度为 35mm ，所述热轧板的厚度为 2.00mm ；或者，所得无取向硅钢为厚度 0.30mm 的钢板，所述中间坯的厚度为 37.5mm ，所述热轧板的厚度为 2.15mm ；或者，所得无取向硅钢为厚度 0.35mm 的钢板，所述中间坯的厚度为 40mm ，所述热轧板的厚度为 2.30mm 。

优选地，所述单机架冷轧工序中，将所述酸洗工序之后的钢板不进行预热而直接开轧。

与现有技术相比，本发明的有益效果为：

(1) 在化学成分方面，不添加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 等合金元素，并结合 Si、Al、Mn、Sn 等元素含量的设计，提高无取向硅钢的磁性能，保证无取向硅钢具有较低的铁损、较高的磁感应强度；同时，在化学成分基础上，通过将晶粒尺寸控制在 $50\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$ ，实现钢板的细晶强化，保证无取向硅钢具有高强度，从而在低成本和低生产难度的情况下，实现无取向硅钢的磁性能和强度的综合优化，以使得无取向硅钢能够满足新能源汽车的驱动电机上的应用要求；

(2) 进一步地，在化学成分的设计基础上，通过热轧工序、常化工序、单机架冷轧工序、退火工序的一系列工艺控制，一方面，实现了无取向硅钢的再结晶晶粒尺寸的细小化，保证得到磁性能优异且强度高的无取向硅钢；再一方面，避免了冷轧中的裂纹断裂问题，省去了现有生产流程中的常用的轧前预热或二次冷轧，以免预热单机架冷轧工序即可完成最终轧制，保证了生产的低难度、低成本和稳定连续；另一方面，通过加热温度、开轧温度、常化温度等的低温控制，可以大大降低生产能耗；另外，常化温度低且保温时间短，还可以减少酸洗工序前钢板表面的氧化铁皮厚度，利于提高酸洗效率，并提高最终无取向硅钢的表面质量和成材率。

具体实施方式

下面结合具体的实施方式来对本发明的技术方案做进一步的介绍。

在本发明一实施方式提供了一种无取向硅钢。该无取向硅钢的化学成分以质量百分比计包括：Si:2.95%~3.15%，Al:0.75%~0.95%，Si+2Al:4.6%~4.9%，Mn:0.5%~0.7%，Sn:0.03%~0.04%，Cu≤0.03%，Cr≤0.03%，Ni≤0.03%，Cr+Ni+Cu≤0.07%，Nb≤0.004%，V≤0.004%，Ti≤0.004%，Nb+V+Ti≤0.008%，C≤0.0025%，P≤0.015%，S≤0.0015%，N≤0.004%，C+S+N≤0.007%，其余为 Fe 及不可避免的夹杂；并且， $\text{Mn/S}\geq 380$ ， $\text{Al/N}\geq 200$ 。

其中，化学成分中各个元素的作用和效果说明如下。

C、S、N、Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti、P：这些元素的含量增加会导致无取向硅钢的磁性能下降，包括铁损增大、磁感应强度降低；本发明中，在不增加炼钢难度和炼钢成本的前提下适当降低这些元素的含量上限，C≤0.0025%，S≤0.0015%，N≤0.004%，C+S+N≤0.007%，Cu≤0.03%，Cr≤0.03%，Ni≤0.03%，Cr+Ni+Cu≤0.07%，

$Nb \leq 0.004\%$, $V \leq 0.004\%$, $Ti \leq 0.004\%$, $Nb+V+Ti \leq 0.008\%$, $P \leq 0.015\%$ 。

Si、Al: Si 是固溶强化元素, 其含量增加会增加钢板强度, 还可以使钢板的电阻率提高、铁损降低, 本发明中 Si 含量(以质量百分比计)控制在 2.95%~3.15%; Al 含量增加会使钢板的电阻率提高、铁损降低, 但是会降低磁感应强度, 本发明中 Al 含量(以质量百分比计)控制在 0.75%~0.95%; 并且, Al 易与 N 形成粗大的 AlN 析出物而使得钢板的铁损降低, 本发明中 Al 含量(以质量百分比计)和 N 含量(以质量百分比计)还满足 $Al/N \geq 200$, 如此可以充分将 N 元素对钢板磁性能的不利影响转化为有利影响, 降低炼钢中控制 N 元素的难度; 另外, Si 和 Al 的含量增加还会导致冷轧困难, 为避免生产难度增大而引起的生产成本提升, 本发明中 Si 含量(以质量百分比计)和 Al 含量(以质量百分比计)还满足 $Si+2Al: 4.6\% \sim 4.9\%$ 。

Mn: 适量添加 Mn, 对提高钢板的磁性能有利; 并且, 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, 本发明中 Mn 含量(以质量百分比计)和 S 含量(以质量百分比计)还满足 $Mn/S \geq 380$, 如此可以充分将 S 元素对钢板磁性能的不利影响转化为有利影响, 降低炼钢中控制 S 元素的难度和成本。

Sn: 为晶界偏聚元素, 可以改善磁性能, 本发明中 Sn 含量(以质量百分比计)为 0.03%~0.04%。

如上, 本实施方式在化学成分方面, 在保证合金成本低、生产难度小、生产成本低的情况下, 不添加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 等合金元素, 并结合 Si、Al、Mn、Sn 等元素含量的设计, 提高无取向硅钢的磁性能, 保证无取向硅钢具有较低的铁损、较高的磁感应强度。

并且, 本实施方式中, 所述无取向硅钢的再结晶晶粒尺寸为 $50\mu m \sim 80\mu m$ 。如此, 在前述化学成分来保证无取向硅钢具有低铁损、高磁感应强度的同时, 通过将晶粒尺寸控制在 $50\mu m \sim 80\mu m$, 实现钢板的细晶强化, 保证无取向硅钢具有高强度, 从而, 在低成本和低生产难度的情况下, 实现无取向硅钢的磁性能和强度的综合优化, 以使得无取向硅钢能够满足新能源汽车的驱动电机上的应用要求。

具体地, 所述无取向硅钢为厚度 0.25mm~0.35mm 的钢板, 屈服强度 $\geq 460\text{Mpa}$, 抗拉强度 $\geq 550\text{Mpa}$, 铁损 $P_{1.0/400} \leq 18.5\text{W/kg}$, 磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.67\text{T}$ 。

其中, 进一步地, 所述无取向硅钢具体可以为厚度 0.35mm 的钢板, 其铁损 $P_{1.0/400} \leq 18.5\text{W/kg}$; 或者也可以为厚度 0.30mm 的钢板, 铁损 $P_{1.0/400} \leq 18.0\text{W/kg}$; 又或

者可以为厚度 0.25mm 的钢板，铁损 $P_{1.0/400} \leq 17.5 \text{ W/kg}$ 。

进一步地，本实施方式还提供了所述无取向硅钢的一种优选地生产方法，该生产方法通过依序进行的炼钢、连铸、热轧、常化、酸洗、单机架冷轧、退火、冷却、涂层和精整而制备出所述无取向硅钢。也即，所述无取向硅钢可以采用该优选地生产方法制备而成。本实施方式的生产方法，除了能够顺利制得前文所述的磁性能优异、强度高的无取向硅钢，还具有生产难度低、生产成本低等优点，保证了无取向硅钢的稳定生产。

具体地，在炼钢工序中将铁水炼制成钢水，在连铸工序中将炼钢工序所得钢水采用连铸机制成连铸坯。可以理解的，炼钢工序所得钢水的化学成分和连铸工序所得连铸坯的化学成分，均与所述生产方法最终所得无取向硅钢的化学成分相一致，也即，以质量百分比计包括：Si:2.95%~3.15%，Al:0.75%~0.95%，Si+2Al:4.6%~4.9%，Mn:0.5%~0.7%，Sn:0.03%~0.04%， $\text{Cu} \leq 0.03\%$ ， $\text{Cr} \leq 0.03\%$ ， $\text{Ni} \leq 0.03\%$ ， $\text{Cr}+\text{Ni}+\text{Cu} \leq 0.07\%$ ， $\text{Nb} \leq 0.004\%$ ， $\text{V} \leq 0.004\%$ ， $\text{Ti} \leq 0.004\%$ ， $\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti} \leq 0.008\%$ ， $\text{C} \leq 0.0025\%$ ， $\text{P} \leq 0.015\%$ ， $\text{S} \leq 0.0015\%$ ， $\text{N} \leq 0.004\%$ ， $\text{C}+\text{S}+\text{N} \leq 0.007\%$ ，其余为 Fe 及不可避免的夹杂；并且， $\text{Mn/S} \geq 380$ ， $\text{Al/N} \geq 200$ 。

本实施方式，在热轧工序中，将连铸工序所得连铸坯加热到 $1080^{\circ}\text{C} \sim 1110^{\circ}\text{C}$ 并保温 160min~180min，而后依次经过粗轧、精轧、卷取，得到热轧卷板，精轧时的开轧温度为 $950 \pm 20^{\circ}\text{C}$ 、终轧温度为 $840 \pm 20^{\circ}\text{C}$ 且总的压下率为 94~95%，卷取时的卷取温度为 $620 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ；在常化工序中，常化温度为 $840^{\circ}\text{C} \sim 860^{\circ}\text{C}$ 并保温 180s~200s；在退火工序中，退火温度为 $960^{\circ}\text{C} \sim 980^{\circ}\text{C}$ 并保温 40s~45s。

如此，本实施方式的生产方法，通过控制热轧工序中较低的加热温度，来避免连铸坯中的 MnS、AlN 等粗大析出物发生固溶，进而保证后续粗轧、精轧过程中的析出物控制，以便于为最终所得无取向硅钢的磁性能奠定基础；通过控制精轧时的开轧温度、终轧温度、总的压下率以及卷取时的卷取温度，结合化学成分中 Si+2Al:4.6%~4.9% 的设计，使得热轧卷板的组织稳定且储存能一致，进而保证热轧卷板在后续常化工序中的再结晶温度维持稳定，以便于为后续常化工序的再结晶程度的精确控制创造条件；在热轧工序的基础上，通过常化工序中的常化温度和保温时长的设计，以使得常化工序发生部分再结晶（也即尚未全部完成再结晶、或者说未发生完全再结晶），从而使所得钢板中的未再结晶组织面积占比、再结晶晶粒尺寸得到精确管控，具体地未再结晶组织面积占比约为 5%~20%、再结晶晶粒尺寸 $\leq 50 \mu\text{m}$ ，

如此一方面可以为退火工序中对再结晶晶粒尺寸控制创造条件，再一方面还可以基于未再结晶组织和再结晶晶粒之间的大量晶界，来避免后续冷轧中的裂纹扩展，以降低冷轧工序的轧制难度、保证冷轧工序的稳定生产，而省去了现有技术中常用的轧前预热或二次冷轧，以低成本的免预热单机架冷轧工序即可完成最终轧制；并且，在常化工序所创造的基础下，通过退火温度和保温时长的设计，在退火工序中发生完全再结晶、且再结晶晶粒并未明显长大，保证最终无取向硅钢的成品中的再结晶晶粒尺寸较小。

综上，本实施方式的所述生产方法，在化学成分的设计基础上，通过热轧工序、常化工序、单机架冷轧工序、退火工序的一系列工艺控制，一方面实现了无取向硅钢的再结晶晶粒尺寸的细小化，保证得到磁性能优异且强度高的无取向硅钢，再一方面避免了冷轧中的裂纹断裂问题，省去了现有生产流程中的常用的轧前预热或二次冷轧，以免预热单机架冷轧工序即可完成最终轧制，保证了生产的低难度、低成本和稳定连续，另一方面通过加热温度、开轧温度、常化温度等的低温控制，可以大大降低生产能耗，另外，常化温度低且保温时间短，还可以减少酸洗工序前钢板表面的氧化铁皮厚度，利于提高酸洗效率，并提高最终无取向硅钢的表面质量和成材率。

进一步优选地，基于最终钢水所需的化学成分，在炼钢工序中，不添加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 的合金化材料。如此，可以降低合金化材料的成本。

再优选地，在所述单机架冷轧工序中，将所述酸洗工序之后的钢板不进行预热而直接开轧。现有技术中通常需要在冷轧之前先对钢板进行预热方可轧制，而本实施方式，在常化工序所创造的基础下，可以实现不进行预热而直接开轧，节约生产成本。

在单机架冷轧工序中，进行多道次轧制，总的压下率为 $85\pm 3\%$ ，如此控制，可以使得不同厚度的无取向硅钢在单机架冷轧工序中的冷轧储存能基本一致，进而在后续的退火工序中能够以相同的退火温度和保温时长进行实施，以达到在同一生产线上对不同厚度的无取向硅钢进行连续生产时无需频繁变更操作的效果。

并且，在单机架冷轧工序中，进行多道次轧制，除了最后一道次之外的其余各个道次的压下率均不小于 30%。例如进行 5 道次轧制，则第 1~4 道次分别压下率 $\geq 30\%$ ，第 5 道次的压下率选择性地可以小于 30%。如此，既有效避免单机架冷轧工序中发生冷轧断带，又减少轧制道次，还保证了最终无取向硅钢的板形良好。

如前所述,所述无取向硅钢为厚度 0.25mm~0.35mm 的钢板。一优选实施方式中,连铸工序所得的连铸坯厚度为 220mm;在所述热轧工序中,将厚度为 220mm 的连铸坯粗轧成厚度为 35mm~40mm 的中间坯,再精轧成厚度为 2.00mm~2.30mm 的热轧板。可以理解的,在单机架冷轧工序中,再将厚度为 2.00mm~2.30mm 的热轧板进一步轧制为目标厚度的无取向硅钢的成品。

例如,所述生产方法最终所得无取向硅钢为厚度 0.25mm 的钢板,则在所述热轧工序中,将厚度为 220mm 的连铸坯粗轧成厚度为 35mm 的中间坯,再精轧成厚度为 2.00mm 的热轧板;再例如,所述生产方法最终所得无取向硅钢为厚度 0.30mm 的钢板,则在所述热轧工序中,将厚度为 220mm 的连铸坯粗轧成厚度为 37.5mm 的中间坯,再精轧成厚度为 2.15mm 的热轧板;再例如,所述生产方法最终所得无取向硅钢为厚度 0.35mm 的钢板,则在所述热轧工序中,将厚度为 220mm 的连铸坯粗轧成厚度为 40mm 的中间坯,再精轧成厚度为 2.30mm 的热轧板。当然,这些仅为优选的实施,本发明具体实施时并不限于此。

优选地,在常化工序中,在纯干 N_2 气氛下进行常化,且恒速生产,也即针对钢板的头部、中部、尾部进行常化时的辊速恒定不变。

再者,在退火工序中,在 H_2+N_2 的混合气氛下进行退火,且恒速生产,也即针对钢板的头部、中部、尾部进行退火时的辊速恒定不变。

另外,所述生产方法中,酸洗工序、冷却工序、涂层工序和精整工序采用现有公开的可行技术予以实施即可,不再赘述。

综合前述,与现有技术相比,本发明一实施方式的有益效果在于:

(1) 在化学成分方面,不添加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 等合金元素,并结合 Si、Al、Mn、Sn 等元素含量的设计,提高无取向硅钢的磁性能,保证无取向硅钢具有较低的铁损、较高的磁感应强度;同时,在化学成分基础上,通过将晶粒尺寸控制在 $50\mu m \sim 80\mu m$,实现钢板的细晶强化,保证无取向硅钢具有高强度,从而在低成本和低生产难度的情况下,实现无取向硅钢的磁性能和强度的综合优化,以使得无取向硅钢能够满足新能源汽车的驱动电机上的应用要求;

(2) 进一步地,在化学成分的设计基础上,通过热轧工序、常化工序、单机架冷轧工序、退火工序的一系列工艺控制,一方面,实现了无取向硅钢的再结晶晶粒尺寸的细小化,保证得到磁性能优异且强度高的无取向硅钢;再一方面,避免了冷轧中的裂纹断裂问题,省去了现有生产流程中的常用的轧前预热或二次冷轧,以免

预热单机架冷轧工序即可完成最终轧制，保证了生产的低难度、低成本和稳定连续；另一方面，通过加热温度、开轧温度、常化温度等的低温控制，可以大大降低生产能耗；另外，常化温度低且保温时间短，还可以减少酸洗工序前钢板表面的氧化铁皮厚度，利于提高酸洗效率，并提高最终无取向硅钢的表面质量和成材率。

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。

下面提供本发明的 6 个实施例来对本发明的技术方案进一步说明。当然，这些实施例仅为本发明所含众多变化实施例中的一部分，而非全部。

实施例 1~6 分别提供一种无取向硅钢，化学成分以质量百分比计如表 1 所示；并且，各实施例的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	Si	Mn	P	Sn	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	Al	N	
实施例 1	0.0015	0.0011	3.05	0.65	0.012	0.034	0.002	0.002	0.003	0.03	0.01	0.02	0.88	0.0018	0.35
实施例 2	0.0015	0.0011	3.05	0.65	0.012	0.034	0.002	0.002	0.003	0.03	0.01	0.02	0.88	0.0018	0.30
实施例 3	0.0015	0.0011	3.05	0.65	0.012	0.034	0.002	0.002	0.003	0.03	0.01	0.02	0.88	0.0018	0.25
实施例 4	0.0018	0.0014	3.11	0.59	0.011	0.036	0.002	0.002	0.002	0.02	0.02	0.02	0.78	0.0031	0.35
实施例 5	0.0018	0.0014	3.11	0.59	0.011	0.036	0.002	0.002	0.002	0.02	0.02	0.02	0.78	0.0031	0.30
实施例 6	0.0018	0.0014	3.11	0.59	0.011	0.036	0.002	0.002	0.002	0.02	0.02	0.02	0.78	0.0031	0.25

对实施例 1~6 的无取向硅钢分别进行取样检测，包括：（1）金相组织检测，测量所得的再结晶晶粒尺寸分别如表 2 所示；（2）力学性能检测，测量所得的屈服强度和抗拉强度分别如表 2 所示；（3）磁性能检测，测量所得的铁损 $P_{1.0/400}$ 和磁感应强度 B_{5000} 分别如表 2 所示。

[表 2]

	再结晶晶粒尺寸 (μm)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	铁损 $P_{1.0/400}$ (W/kg)	磁感 B_{5000} (T)
实施例 1	62	483	595	18.1	1.681
实施例 2	65	485	584	16.8	1.677
实施例 3	58	505	596	15.7	1.673
实施例 4	65	478	579	17.9	1.683
实施例 5	71	486	586	16.6	1.678
实施例 6	68	482	582	15.6	1.673

实施例 1~6 的无取向硅钢的生产方法如下：

(1) 将铁水炼制成化学成分如表 1 所示的钢水，炼钢期间不添加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 的合金化材料；而后将所炼制的钢水采用连铸坯制成厚度为 220mm 的连铸坯，连铸坯的化学成分同样如表 1 所示；

(2) 将步骤 1 所得连铸坯在加热炉中进行加热，加热温度和保温时长如表 3 所示；而后依次经过粗轧、精轧、卷取，得到热轧卷板；粗轧所得中间坯厚度、精轧时的开轧温度、终轧温度、总的压下率、所得热轧板的厚度以及卷取时的卷取温度如表 3 所示；

[表 3]

	加热温度 (°C)	保温时间 (min)	中间坯厚 度 (mm)	精轧开轧 温度 (°C)	终轧温度 (°C)	总压下率 (%)	热轧板厚度 (mm)	卷取温度 (°C)
实施例 1	1095	165	40	955	848	94.25	2.30	625
实施例 2	1105	166	37.5	950	836	94.26	2.15	620
实施例 3	1089	164	35	953	828	94.29	2.00	618
实施例 4	1094	173	40	945	845	94.25	2.30	632
实施例 5	1105	176	37.5	948	839	94.26	2.15	628
实施例 6	1100	175	35	939	830	94.29	2.00	615

(3) 将步骤 2 所得热轧卷板在纯干 N₂ 气氛下进行常化，常化过程采用恒速生产，常化温度、保温时长如表 4 所示；

常化结束后，对各个实施例的钢板进行金相组织检测，测量所得的未再结晶组织面积占比、再结晶晶粒尺寸分别如表 4 所示，其中，未再结晶组织面积占比，为未再结晶组织面积在钢板取样截面的总面积中所占比值；

[表 4]

	常化温度 (°C)	常化时间 (s)	未再结晶组织面积占比 (%)	再结晶晶粒尺寸 (μm)
实施例 1	852	192	10	40
实施例 2	848	192	10	42
实施例 3	853	192	10	45
实施例 4	856	192	15	45
实施例 5	850	192	15	43
实施例 6	852	192	15	40

(4) 将步骤 3 所得钢板进行酸洗，酸洗之后，不进行预热的情况下直接进行单机架冷轧；其中，单机架冷轧期间，进行五道次轧制，总的压下率为 85±3%，除了最后一道次之外的其余各个道次的压下率均不小于 30%，所得钢板的厚度如表 1 所示，各道次压下规程如表 5 所示；

[表 5]

		1	2	3	4	5
实施例 1、4	入口厚度 (mm)	2.300	1.510	1.020	0.673	0.444
	出口厚度 (mm)	1.510	1.020	0.673	0.444	0.350
	道次压下率 (%)	34.2	32.5	34.0	34.0	21.2
实施例 2、5	入口厚度 (mm)	2.150	1.410	0.900	0.576	0.380
	出口厚度 (mm)	1.410	0.900	0.576	0.380	0.300
	道次压下率 (%)	34.4	36.2	36.0	34.0	21.1
实施例 3、6	入口厚度 (mm)	2.000	1.300	0.850	0.540	0.350
	出口厚度 (mm)	1.300	0.850	0.540	0.350	0.250
	道次压下率 (%)	35.0	34.6	36.5	35.2	28.5

(5) 将步骤 4 所得钢板在在 H_2+N_2 的混合气氛下进行退火，且退火过程采用恒速生产，退火温度、保温时长如表 6 所示；退火完成后，对钢板依序进行冷却、涂层和精整，得到各个实施例的无取向硅钢的成品。

[表 6]

	退火温度 (°C)	退火保温时长 (s)
实施例 1	970	43
实施例 2	972	43
实施例 3	975	43
实施例 4	968	43
实施例 5	972	43
实施例 6	965	43

从上述实施例 1~6 可以看出，采用本发明一实施方式的无取向硅钢，不仅具有优异的磁性能，而且强度高，且合金成本低、生产难度小、生产成本低，满足新能源汽车的驱动电机上的应用要求。

权利要求书

1. 一种新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，通过依序进行的炼钢、连铸、热轧、常化、酸洗、无预热单机架冷轧、退火、冷却、涂层和精整，制备出 0.25mm~0.35mm 任意厚度的无取向硅钢；

在连铸工序中，所得连铸坯的化学成分以质量百分比计包括：Si:2.95%~3.15%，Al:0.75%~0.95%，Si+2Al:4.6%~4.9%，Mn:0.5%~0.7%，Sn:0.03%~0.04%，Cu≤0.03%，Cr≤0.03%，Ni≤0.03%，Cr+Ni+Cu≤0.07%，Nb≤0.004%，V≤0.004%，Ti≤0.004%，Nb+V+Ti≤0.008%，C≤0.0025%，P≤0.015%，S≤0.0015%，N≤0.004%，C+S+N≤0.007%，Mn/S≥380，Al/N≥200，其余为 Fe 及不可避免的夹杂；

在热轧工序中，将连铸工序所得连铸坯依次经过加热、粗轧、精轧、卷取，得到热轧卷板；精轧时的开轧温度为 950±20℃、终轧温度为 840±20℃且总的压下率为 94~95%，卷取时的卷取温度为 620±20℃；

在常化工序中，使未再结晶组织面积占比为 5%~20%。

2. 根据权利要求 1 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，在热轧工序中，将连铸工序所得连铸坯加热到 1080℃~1110℃并保温 160min~180min。

3. 根据权利要求 1 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，在常化工序中，常化温度为 840℃~860℃并保温 180s~200s。

4. 根据权利要求 1 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，在退火工序中，退火温度为 960℃~980℃并保温 40s~45s。

5. 根据权利要求 1 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，在单机架冷轧工序中，进行多道次轧制，总的压下率为 85±3%，除了最后一道次之外的其余各个道次的压下率均不小于 30%。

6. 根据权利要求 1 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，在所述热轧工序中，将厚度为 220mm 的连铸坯粗轧成厚度为 35mm~40mm 的中间坯，再精轧成厚度为 2.00mm~2.30mm 的热轧板。

7. 根据权利要求 6 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，所述无取向硅钢为厚度 0.25mm 的钢板，所述中间坯的厚度为 35mm，所述热轧板的厚度为 2.00mm；或者，所述无取向硅钢为厚度 0.30mm 的钢板，所述中间坯的厚度为 37.5mm，所述热轧板的厚度为 2.15mm；或者，所述无取向硅钢为厚度 0.35mm

的钢板，所述中间坯的厚度为 40mm，所述热轧板的厚度为 2.30mm。

8. 根据权利要求 1 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，在炼钢工序中，不添加 Cu、Cr、Ni、Nb、V、Ti 的合金化材料。

9. 一种新能源驱动电机用无取向硅钢，其特征在于，采用权利要求 1 所述的生产方法制备而成。

10. 根据权利要求 9 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，所述无取向硅钢的再结晶晶粒尺寸为 $50\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$ 。

11. 根据权利要求 9 所述的新能源驱动电机用无取向硅钢的生产方法，其特征在于，所述无取向硅钢屈服强度 $\geq 460\text{Mpa}$ ，抗拉强度 $\geq 550\text{Mpa}$ ，铁损 $P_{1.0/400}\leq 18.5\text{W/kg}$ ，磁感应强度 $B_{5000}\geq 1.67\text{T}$ 。

12. 根据权利要求 11 所述的无取向硅钢，其特征在于，所述无取向硅钢为厚度 0.25mm 的钢板，铁损 $P_{1.0/400}\leq 17.5\text{W/kg}$ ；或者，为厚度 0.30mm 的钢板，铁损 $P_{1.0/400}\leq 18.0\text{W/kg}$ ；或者，为厚度 0.35mm 的钢板，铁损 $P_{1.0/400}\leq 18.5\text{W/kg}$ 。