

无取向硅钢的生产方法以及无取向硅钢

本申请要求了申请日为 2020 年 09 月 27 日，申请号为 202011031589.3，发明名称为“无取向硅钢的生产方法以及无取向硅钢”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的生产方法，还涉及一种采用该生产方法制备而成的无取向硅钢。

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。通常为了保证无取向硅钢的磁性能，对化学成分的控制非常严格。其中，在生产制备无取向硅钢时，S 元素在钢中会以 MnS 形式发生固溶和析出，阻碍退火时的晶粒长大，进而影响制得成品的磁性能，具体体现为降低磁感应强度及提高铁损。因此，在现有技术中，无取向硅钢的化学成分设计以及生产过程中，普遍以追求超低 S 控制为任务目标。

进一步地，针对无取向硅钢的超低 S 的化学成分设计，相应的需要在生产过程中铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼等步骤中均进行严格控制，导致生产成本高居不下，甚至会影响工况顺行。

例如，RH 精炼步骤中需要采用脱硫剂对钢水脱硫，脱硫剂会随着钢液的循环与 RH 精炼炉的浸渍管接触，脱硫剂中 CaF_2 会与浸渍管管内衬浇注料中的 CaO 和 Al_2O_3 反应后生成低熔点物质 $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$ 。该产物在钢水冲刷作用下，剥落进入钢水中，也即 RH 精炼过程中的脱硫处理会导致 RH 精炼炉浸渍管的侵蚀严重，造成生产成本的增加，且对工况顺行十分不利。

因此，开发一种无取向硅钢的化学成分设计方案，在可以放宽对 S 含量要求的情况下，同时满足低牌号产品的磁性能，是无取向硅钢的工业化生产中非常有价值的。

发明内容

为解决现有技术中无取向硅钢的超低 S 化学成分设计方案导致生产成本高的技术问题，本发明的目的在于提供一种无取向硅钢的生产方法，还涉及一种采用该生产方法制备而成的无取向硅钢。

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生产方法，其采用铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼、连铸、热轧、酸连轧、退火、涂层及精整的工序制备得到满足如下化学成分设计方案的无取向硅钢成品；

所述化学成分设计方案以质量百分比计为：

$C \leq 0.003\%$ ， $S \leq 0.008\%$ ， $Si: 0.35\% + \Delta 1$ ， $Mn: 0.15 \sim 0.25\%$ ， $P: 0.04 \sim 0.06\%$ ， $Sn: 0.015\% + \Delta 2$ ， $Nb \leq 0.004\%$ ， $V \leq 0.004\%$ ， $Ti \leq 0.005\%$ ， $Mo \leq 0.004\%$ ， $Cr \leq 0.03\%$ ， $Ni \leq 0.03\%$ ， $Cu \leq 0.03\%$ ， $N \leq 0.003\%$ ，其它为 Fe 及不可避免的夹杂；

其中，当钢液到达 RH 精炼时 $S \leq 0.0030\%$ ，则 $\Delta 1 = \Delta 2 = 0$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < S \leq 0.0045\%$ ，则 $\Delta 1 = 0.05\%$ 且 $\Delta 2 = 0.005\%$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < S \leq 0.0060\%$ ，则 $\Delta 1 = 0.15\%$ 且 $\Delta 2 = 0.010\%$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$ ，则 $\Delta 1 = 0.25\%$ 且 $\Delta 2 = 0.020\%$ 。

优选地，所述无取向硅钢成品的厚度为 $0.500 \pm 0.005\text{mm}$ ，其铁损 $P_{1.5/50} \leq 5.5\text{W/kg}$ ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.75$ 。

优选地，铁水脱硫工序时：

控制脱硫前铁水的温度 $\geq 1350^\circ\text{C}$ 且化学成分以质量百分比计满足 $Si: 0.20 \sim 0.70\%$ 、 $S \leq 0.05\%$ 、 $Nb \leq 0.005\%$ 、 $V \leq 0.04\%$ 、 $Ti \leq 0.06\%$ ， $Mo \leq 0.001\%$ 、 $Cr \leq 0.03\%$ 、 $Ni \leq 0.03\%$ 以及 $Cu \leq 0.03\%$ ，将该脱硫前铁水进行脱硫，以控制脱硫后铁水的温度 $\geq 1320^\circ\text{C}$ 且以质量百分比计所含 $S \leq 0.0015\%$ ；

转炉冶炼工序时：

将脱硫后铁水混合废钢在转炉中进行冶炼，出钢过程中，按照所述化学成分设计方案中 $\Delta 1 = \Delta 2 = 0$ 的化学成分基础方案向出钢钢液中加入足量锡锭；出钢结束后，向钢液中加入渣面脱氧剂；

RH 精炼工序中：

检测钢液到达 RH 精炼时所含 S 的质量百分比，并确定所述化学成分设计方案中的 $\Delta 1$ 和 $\Delta 2$ 的取值，以得到化学成分最终方案，在预抽真空的 RH 精炼炉中，对钢液进行脱碳处理，之后按照所述化学成分最终方案，向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰，净循环 7 分钟以上后出钢；在 RH 精炼工序中不添加脱硫剂。

优选地，铁水脱硫工序时，脱硫后铁水的扒渣率控制为 $\geq 98\%$ ；

优选地，转炉冶炼工序时，废钢的加入量占废钢与铁水总和的 20~25%，出钢过

程中先加入石灰，再加入锡锭。

优选地，热轧工序时：将连铸坯依次经过连铸坯加热、轧制中间坯、精轧、卷取制备得到热卷，其中，连铸坯的加热温度为 $1130\sim 1160^{\circ}\text{C}$ 且保温时间 $\geq 180\text{min}$ ，中间坯厚度 $35\sim 40\text{mm}$ ，终轧温度为 $865\pm 15^{\circ}\text{C}$ ，卷取温度为 $680^{\circ}\text{C}\pm 20^{\circ}\text{C}$ ，热卷厚度为 $2.70\pm 0.1\text{mm}$ 。

优选地，酸连轧工序时：将热轧所得的热卷采用 HCl 进行酸洗，漂洗并烘干后，进行冷轧以制得轧硬卷；其中，冷轧压下率为 $80\sim 83\%$ ，轧硬厚度为 $0.501\pm 0.005\text{mm}$ 。

优选地，采用 HCl 进行三级酸洗，其中，第一级酸液浓度为 $50\sim 80\text{g/L}$ 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 130\text{g/L}$ ，第二级酸液浓度为 $90\sim 120\text{g/L}$ 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 90\text{g/L}$ ，第三级酸液浓度为 $140\sim 160\text{g/L}$ 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 50\text{g/L}$ ；

每一级酸洗时，酸液温度 $75\sim 85^{\circ}\text{C}$ ，在酸液中加入硅钢酸洗促进剂，硅钢酸洗促进剂占酸液的重量百分比为 $0.05\sim 0.10\%$ ；

漂洗水温度 $45\sim 55^{\circ}\text{C}$ ，酸洗和漂洗速度控制在 $100\sim 180\text{rpm}$ 。

优选地，退火工序时：将冷硬卷的钢带在连续退火炉的 H_2 和 N_2 混合气氛中进行退火，退火温度 $850\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，退火时间 60 ± 5 秒，采用三段式冷却对退火后的钢带进行冷却，其中：

第一段冷却为高温段缓慢冷却，钢带从退火温度以冷速 $\leq 5^{\circ}\text{C/s}$ 进行冷却到 800°C ；

第二段冷却为循环气体喷射控制冷却，钢带以冷速 $\leq 15^{\circ}\text{C/s}$ 继续冷却到 300°C 以下；

第三段冷却为循环水喷射冷却，钢带继续冷却到 100°C 以下。

优选地，涂层及精整工序时，将退火中冷却至 100°C 以下的钢带进行涂层及精整，得到厚度为 $0.500\pm 0.005\text{mm}$ 的无取向硅钢成品。

一实施方式还提供了一种无取向硅钢，其采用铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼、连铸、热轧、酸连轧、退火、涂层及精整的工序制备而成，所述无取向硅钢的化学成分以质量百分比计为：

$\text{C}\leq 0.003\%$ ， $\text{S}\leq 0.008\%$ ， $\text{Si}:0.35\%+\Delta 1$ ， $\text{Mn}:0.15\sim 0.25\%$ ， $\text{P}:0.04\sim 0.06\%$ ， $\text{Sn}:0.015\%+\Delta 2$ ， $\text{Nb}\leq 0.004\%$ ， $\text{V}\leq 0.004\%$ ， $\text{Ti}\leq 0.005\%$ ， $\text{Mo}\leq 0.004\%$ ， $\text{Cr}\leq 0.03\%$ ， $\text{Ni}\leq 0.03\%$ ， $\text{Cu}\leq 0.03\%$ ， $\text{N}\leq 0.003\%$ ，其它为 Fe 及不可避免的夹杂；

其中，当钢液到达 RH 精炼时 $\text{S}\leq 0.0030\%$ ，则 $\Delta 1=\Delta 2=0$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < S \leq 0.0045\%$ ，则 $\Delta 1=0.05\%$ 且 $\Delta 2=0.005\%$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < S \leq 0.060\%$ ，则 $\Delta 1=0.15\%$ 且 $\Delta 2=0.010\%$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$ ，则 $\Delta 1=0.25\%$ 且 $\Delta 2=0.020\%$ 。

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以及提供了该无取向硅钢的生产方法，所述生产方法采用铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼、连铸、热轧、酸连轧、退火、涂层及精整的工序制备得到厚度为 $0.5 \pm 0.005\text{mm}$ 的无取向硅钢产品，该无取向硅钢产品的铁损 $P_{1.5/50} \leq 5.5\text{W/kg}$ 、磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.75$ ；其中，铁水脱硫工序中：

控制脱硫前铁水的温度 $\geq 1350^\circ\text{C}$ 且化学成分以质量百分比计满足 Si:0.20~0.70%、 $S \leq 0.05\%$ 、 $\text{Nb} \leq 0.005\%$ 、 $\text{V} \leq 0.04\%$ 、 $\text{Ti} \leq 0.06\%$ 、 $\text{Mo} \leq 0.001\%$ 、 $\text{Cr} \leq 0.03\%$ 、 $\text{Ni} \leq 0.03\%$ 以及 $\text{Cu} \leq 0.03\%$ ，将该脱硫前铁水进行脱硫，以控制脱硫后铁水的温度 $\geq 1320^\circ\text{C}$ 且以质量百分比计所含 $S \leq 0.0015\%$ ；

转炉冶炼工序中：

将脱硫后铁水混合废钢在转炉中进行冶炼，在出钢过程中，按照化学成分基础方案向出钢钢液中加入足量锡锭；在出钢结束后，向钢液中加入渣面脱氧剂；其中，所述化学成分基础方案以质量百分比计为： $\text{C} \leq 0.003\%$ ， $S \leq 0.008\%$ ，Si:0.35%，Mn:0.15~0.25%， $\text{P}:0.04 \sim 0.06\%$ ， $\text{Sn}:0.015\%$ ， $\text{Nb} \leq 0.004\%$ ， $\text{V} \leq 0.004\%$ ， $\text{Ti} \leq 0.005\%$ ， $\text{Mo} \leq 0.004\%$ ， $\text{Cr} \leq 0.03\%$ ， $\text{Ni} \leq 0.03\%$ ， $\text{Cu} \leq 0.03\%$ ， $\text{N} \leq 0.003\%$ ，其它为 Fe 及不可避免的夹杂；

RH 精炼工序中：

在预抽真空的 RH 精炼炉中，对钢液进行脱碳处理；

之后，根据钢液到达 RH 精炼时所含 S 的质量百分比，进行合金化处理，其中：若钢液到达 RH 精炼时 $S \leq 0.0030\%$ ，则按照所述化学成分基础方案向钢液中加入超低钛硅铁、低钛磷铁和金属锰；若钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < S \leq 0.0045\%$ ，则将所述化学成分基础方案中的 Si 和 Sn 分别调整为 Si:0.40% 和 Sn:0.020%，若钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < S \leq 0.060\%$ ，则将所述化学成分基础方案中的 Si 和 Sn 分别调整为 Si:0.50% 和 Sn:0.025%，若钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$ ，则将所述化学成分基础方案中的 Si 和 Sn 分别调整为 Si:0.60% 和 Sn:0.035%，并按调整后的化学成分方案向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰；

而后净循环 7 分钟以上后出钢；在 RH 精炼工序中不添加脱硫剂。

与现有技术相比，本发明的有益效果为：

(1) 采用所述生产方法制备得到的厚度为 $0.500\pm 0.005\text{mm}$ 的无取向硅钢成品，铁损 $P_{1.5/50}\leq 5.5\text{W/kg}$ ，磁感应强度 $B_{5000}\geq 1.75$ ，磁性能优异，能够满足中小型电机对低牌号无取向硅钢的需求，并且生产成本低，促进了工况顺行；

(2) 通过控制 C、Nb、V、Ti、Mo、Cr、Ni、Cu、N 等元素的含量，同时，通过优化 Si、Sn 的含量和 S 的对应关系，S 的含量上限可以放宽至 0.0080%，也即控制满足 $S\leq 0.008\%$ 即可，在 $S\leq 0.008\%$ 的基础上，还可以允许 $S>0.0050\%$ 甚至 $\geq 0.0060\%$ ，保证了无取向硅钢的磁性能的稳定，不会因 S 含量的增加而导致磁性能不稳定，实现良率的稳定；

(3) 在保证磁性能的同时，还通过对应设计 Mn 和 P 等元素的含量，兼顾了无取向硅钢的强度和焊接性能；

(4) 所述生产方法中，降低了对 S 含量的要求难度，相应地在铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼等工序的 S 控制难度降低，转炉冶炼中废钢的要求降低、成本降低，RH 精炼工序无需脱硫处理，解决了现有技术中脱硫剂对 RH 精炼炉浸渍管的侵蚀，提升了 RH 精炼炉浸渍管的使用寿命，降低了生产成本，避免因设备损坏还影响工况顺序。

附图说明

图 1 为本发明实施例 1 中无取向硅钢成品样板的金相显微组织照片；

图 2 为本发明实施例 2 中无取向硅钢成品样板的金相显微组织照片；

图 3 为本发明实施例 3 中无取向硅钢成品样板的金相显微组织照片；

图 4 为本发明实施例 4 中无取向硅钢成品样板的金相显微组织照片；

图 5 为本发明对比例 1 中无取向硅钢成品样板的金相显微组织照片。

具体实施方式

在本发明一实施方式提供了一种无取向硅钢的生产方法，所述生产方法包括依序进行如下工序：铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼、连铸、热轧、酸连轧、退火、涂层及精整。本实施方式还提供了采用该生产方法制备而成的无取向硅钢，也即，所述无取向硅钢采用铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼、连铸、热轧、酸连轧、退火、涂层及精整的工序制备而成。

其中，所述无取向硅钢的化学成分设计方案如下，以质量百分比计为：

$C\leq 0.003\%$ ， $S\leq 0.008\%$ ， $Si:0.35\%+\Delta 1$ ， $Mn:0.15\sim 0.25\%$ ， $P:0.04\sim 0.06\%$ ， $Sn:0.015\%+\Delta 2$ ，

$Nb \leq 0.004\%$, $V \leq 0.004\%$, $Ti \leq 0.005\%$, $Mo \leq 0.004\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.03\%$, $N \leq 0.003\%$, 其它为 Fe 及不可避免的夹杂;

其中, 当钢液到达 RH 精炼时 $S \leq 0.0030\%$, 则 $\Delta 1 = \Delta 2 = 0$; 当钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < S \leq 0.0045\%$, 则 $\Delta 1 = 0.05\%$ 且 $\Delta 2 = 0.005\%$; 当钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < S \leq 0.060\%$, 则 $\Delta 1 = 0.15\%$ 且 $\Delta 2 = 0.010\%$; 当钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$, 则 $\Delta 1 = 0.25\%$ 且 $\Delta 2 = 0.020\%$ 。

也即, 在本发明的所述生产方法中, 在自铁水脱硫工序开始、经过转炉冶炼工序和 RH 精炼工序之后, 直至进行连铸工序之前的整个炼钢过程中, 按照如上化学成分设计方案对各个元素含量进行控制, 进而制备得到满足如上化学成分设计方案的连铸坯以及无取向硅钢。

其中, 根据钢液到达 RH 精炼时 (也即 RH 精炼到站时, 即钢液进入 RH 精炼炉之初且尚未开始进行 RH 精炼工序时) 所含 S 的质量百分比, 按照 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 与钢液中 S 含量的对应关系, 调整化学成分设计方案中的 Si 和 Sn 的质量百分比, 进而对各个元素含量进行精确控制。

采用所述生产方法制备得到厚度为 $0.500 \pm 0.005\text{mm}$ 的无取向硅钢成品, 经检测, 该无取向硅钢成品的铁损 $P_{1.5/50} \leq 5.5\text{W/kg}$, 磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.75$, 磁性能优异, 能够满足中小型电机对低牌号无取向硅钢的需求, 并且生产成本低, 促进了工况顺行。

对化学成分设计方案中各个元素的说明如下。

C、Nb、V、Ti、Mo、Cr、Ni、Cu、N: 这些元素越多, 会不利于退火过程中晶粒的长大, 进而恶化无取向硅钢的磁性能, 导致铁损增大和磁感应强度降低, 因此在可控范围内含量越低越好, 例如, $C \leq 0.003\%$, $Nb \leq 0.004\%$, $V \leq 0.004\%$, $Ti \leq 0.005\%$, $Mo \leq 0.004\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.03\%$, $N \leq 0.003\%$ 。

S: 如背景技术所提, 在钢中以 MnS 形式发生固溶和析出, 阻碍退火时的晶粒长大, 进而影响制得成品的磁性能, 现有技术中普通以超低 S 控制为目标, 例如 0.0050% 以下; 而本发明通过优化 Si、Sn 的含量和 S 的对应关系, S 的含量上限可以放宽至 0.0080% , 也即控制满足 $S \leq 0.008\%$ 即可, 在 $S \leq 0.008\%$ 的基础上, 如后文实施例 3、4 所示, 还可以允许 $S > 0.0050\%$ 甚至 $\geq 0.0060\%$;

Si: 控制在 $0.35 \sim 0.60\%$, 其含量增大, 可以提高电阻率、有效降低铁损;

Sn: 控制在 $0.015 \sim 0.035\%$, 其为晶界偏聚元素, 在本发明无取向硅钢中 Sn 的增大可以显著减少不利的 {111} 织构的比例, 提高成品的磁感应强度;

Mn: 控制在 0.15~0.25%，在保证磁性能的同时，抑制 S 引起的热脆性；

P: 控制在 0.04~0.06%，可有效提高无取向硅钢的强度，提升冲片性，同时还保证了焊接性能较佳，特别是对本发明的中低牌号无取向硅钢来说，Si 含量相对较低，P 的强化作用保证了足够的强度。

总得来讲，本发明在化学成分设计方案上，通过控制 C、Nb、V、Ti、Mo、Cr、Ni、Cu、N 等元素的含量，同时，通过设计 Si、Sn、Mn 和 P 等元素的含量，相应打破传统技术将 S 的含量上限要求放宽至 0.0080%，不仅保证了无取向硅钢的磁性能、强度和焊接性能，而且还可以解决现有做法中因超低 S 的严格控制而导致的生产成本高、工况顺行差的问题，降低了生产成本，促进了工况顺行。

具体地，下面对一实施方式的所述生产方法的各个工序进行详细介绍。

(1) 铁水脱硫工序

通过 KR 脱硫技术，对铁水进行脱硫处理。

其中，控制脱硫前铁水的温度 $\geq 1350^{\circ}\text{C}$ ，且脱硫前铁水的化学成分以质量百分比计满足 Si:0.20~0.70%、 $\text{S}\leq 0.05\%$ 、 $\text{Nb}\leq 0.005\%$ 、 $\text{V}\leq 0.04\%$ 、 $\text{Ti}\leq 0.06\%$ ， $\text{Mo}\leq 0.001\%$ 、 $\text{Cr}\leq 0.03\%$ 、 $\text{Ni}\leq 0.03\%$ 以及 $\text{Cu}\leq 0.03\%$ 。

控制脱硫后铁水的温度 $\geq 1320^{\circ}\text{C}$ 且以质量百分比计所含 $\text{S}\leq 0.0015\%$ 。也即，经该铁水脱硫工序，使得铁水中以质量百分比计 S 含量 $\leq 0.0015\%$ 。

优选地，脱硫后铁水的扒渣率控制为 $\geq 98\%$ 。

(2) 转炉冶炼工序

将前述铁水脱硫工序中的出钢（也即脱硫后铁水）移入转炉中，并在转炉中混合废钢，该脱硫后铁水和废钢一并在转炉中进行冶炼成钢水。其中优选地，废钢可以采用洁净废钢，废钢的加入量占废钢与铁水总和的 20~25%。

出钢过程中，按照所述化学成分设计方案中 $\Delta 1=\Delta 2=0$ 的化学成分基础方案向出钢钢液中加入足量锡锭。具体来讲，将所述化学成分设计方案中的 $\Delta 1=\Delta 2=0$ 时的化学成分可看作是一个化学成分基础方案，其具体也就是以质量百分比计：C $\leq 0.003\%$ ， $\text{S}\leq 0.008\%$ ，Si:0.35%，Mn:0.15~0.25%，P:0.04~0.06%，Sn:0.015%， $\text{Nb}\leq 0.004\%$ ， $\text{V}\leq 0.004\%$ ， $\text{Ti}\leq 0.005\%$ ， $\text{Mo}\leq 0.004\%$ ， $\text{Cr}\leq 0.03\%$ ， $\text{Ni}\leq 0.03\%$ ， $\text{Cu}\leq 0.03\%$ ， $\text{N}\leq 0.003\%$ ，其它为 Fe 及不可避免的夹杂。按照该化学成分基础方案，暂时以最终无取向硅钢成品中 Sn:0.015% 计算需要加入的锡锭重量并足量全部加入钢液中。

对此处锡锭重量的确定方式进行举例说明，假定转炉冶炼工序中钢液的总量为

M1, 该转炉冶炼工序中需要加入锡锭的重量设为 M2, 按照 $\Delta 1 = \Delta 2 = 0$ 的基础设计方案, 接下来的 RH 精炼工序中还需要加入超低钛硅铁、低钛磷铁和金属锰的重量设为 M3、M4 和 M5, 则以 $(M1 + M2 + M3 + M4 + M5)$ 作为钢液总量、以该钢液总量中 Sn 的质量百分比为 0.015% 来计算锡锭的重量 M2、以该钢液总量中 Si 的质量百分比为 0.35% 来计算超低钛硅铁的重量 M3、以该钢液总量中 P: 0.04~0.06% 来计算低钛磷铁的重量 M4、以该钢液总量中 Mn: 0.15~0.25% 来计算超低钛硅铁的重量 M5, 可以理解的, 该计算过程中, 其中 M3、M4 和 M5 同样依照所述基础设计方案予以粗略计算, 其仅为用于辅助确定 M2 的临时数据, 而一定条件下 (如后续 RH 精炼到站 S $> 0.0030\%$ 时) 并非接下来 RH 精炼工序中的实际加入量。

优选地, 在出钢过程中先加入石灰, 再加入足量锡锭, 也即在加入锡锭之前先加石灰。

在出钢结束后, 向钢液中加入渣面脱氧剂。

(3) RH 精炼工序

该步骤在 RH 精炼炉内实施, 采用脱碳处理模式, 按照预抽真空、脱碳、合金化、净循环、破真空的顺序进行处理。

其中, 检测钢液到达 RH 精炼时所含 S 的质量百分比, 确定所述化学成分设计方案中的 $\Delta 1$ 和 $\Delta 2$ 的取值, 以得到化学成分最终方案, 以便于合金化中进行相应合金加入量的控制。

具体地, 钢液到达 RH 精炼时 $S \leq 0.0075\%$, 并且, 如前文所述, 当钢液到达 RH 精炼时 $S \leq 0.0030\%$, 则 $\Delta 1 = \Delta 2 = 0$, 此时即对应于所述化学成分基础方案, 也即钢液最终所铸的连铸坯以及最终无取向硅钢成品满足所述化学成分基础方案;

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < S \leq 0.0045\%$, 则 $\Delta 1 = 0.05\%$ 且 $\Delta 2 = 0.005\%$, 此时即对应于调整后的第一种设计方案: Si: 0.40%, Sn: 0.020%; 当钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < S \leq 0.0060\%$, 则 $\Delta 1 = 0.15\%$ 且 $\Delta 2 = 0.010\%$, 此时即对应于调整后的第二种设计方案: Si: 0.50%, Sn: 0.025%; 当钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$, 则 $\Delta 1 = 0.25\%$ 且 $\Delta 2 = 0.020\%$, 此时即对应于调整后的第三种设计方案: Si: 0.60%, Sn: 0.035%。此处的第一种设计方案、第二种设计方案和第三种设计方案均为对所述化学成分基础方案中 Si 和 Sn 进行调整之后所得的化学成分最终方案, 也即, 钢液最终所铸的连铸坯以及最终无取向硅钢成品满足所述化学成分最终方案。

在预抽真空的 RH 精炼炉中, 对钢液进行脱碳处理, 以控制所含 C 的质量百分

比。

之后，根据钢液到达 RH 精炼时所含 S 的质量百分比，按照所述化学成分最终方案对钢液进行合金化。具体地：若钢液到达 RH 精炼时 $S \leq 0.0030\%$ ，则按照所述化学成分基础方案向钢液中加入超低钛硅铁、低钛磷铁和金属锰，也即前述转炉冶炼步骤中计算得到的 M3、M4 和 M5；若钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < S \leq 0.0045\%$ ，则按照调整后的所述第一种设计方案，向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰；若钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < S \leq 0.0060\%$ ，则按照调整后的所述第二种设计方案，向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰；若钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$ ，则按照调整后的所述第三种设计方案，向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰。

前述第一种设计方案、第二种设计方案、第三种设计方案均是在所述化学成分基础方案的情况下进一步增大超低钛硅铁的加入量以及补加锡锭。关于该三种设计方案下超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰的加入量的确定方式，在此以第一种设计方案为例予以举例说明如下。

如前所述，假定转炉冶炼步骤中钢液的总量为 M1，并且通过转炉冶炼工序中已经加入锡锭重量 M2，进而，在该 RH 精炼工序中，按照第一种设计方案，还需要加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰的重量分别设为 M3'、M2'、M4' 和 M5'，则以 $(M1+M2+M3'+M2'+M4'+M5')$ 作为钢液总量、以该钢液总量中 Sn 的质量百分比为 0.020%（也即无取向硅钢成品中 Sn:0.020%）来计算此时需要补加的锡锭的重量 M2'、以该钢液总量中 Si 的质量百分比为 0.40%（也即无取向硅钢成品中 Si:0.40%）来计算超低钛硅铁的重量 M3'、以该钢液总量中 P:0.04~0.06%（也即无取向硅钢成品中 P:0.04~0.06%）来计算低钛磷铁的重量 M4'、以该钢液总量中 Mn:0.15~0.25%（也即无取向硅钢成品中 Mn:0.15~0.25%）来计算超低钛硅铁的重量 M5'；之后，按照计算结果，向钢液中分别加入足量的超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰。

合金化之后，净循环 7 分钟以上，而后出钢。

在本发明中，RH 精炼工序中不添加脱硫剂，也即取消了现有技术中的 RH 精炼工序中的脱硫处理，由此可以看出，本发明通过化学成分的设计，并结合生产方法的改进，打破传统技术将 S 的含量上限要求放宽至 0.0080%，不仅保证了无取向硅钢的磁性能、强度和焊接性能，而且使得在铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼等工序的

S 控制难度降低, 尤其是 RH 精炼工序无需脱硫处理, 解决了现有技术中脱硫剂对 RH 精炼炉浸渍管的侵蚀, 提升了 RH 精炼炉浸渍管的使用寿命, 降低了生产成本, 避免因设备损坏还影响工况顺序。

(4) 连铸工序

将 RH 精炼工序的出钢 (即冶钢完成的最终所得钢液) 采用连铸设备制备成连铸坯, 该连铸工序的具体操作可采用现有的可行连铸技术均可以实现, 不再多加赘述。

(5) 热轧工序

将连铸坯依次经过连铸坯加热、轧制中间坯、精轧、卷取制备得到热卷。

其中, 连铸坯的加热温度为 $1130\sim 1160^{\circ}\text{C}$ 且保温时间 $\geq 180\text{min}$, 中间坯厚度 $35\sim 40\text{mm}$, 这样, 在避免因低温轧制导致加热时间延长、轧制力增加、生产难度增大、生产效率降低、生产成本增大的同时, 通过低温轧制, 防止钢中 MnS 等析出物在加热过程的固溶, 从而进一步保证无取向硅钢成品的磁性能。

终轧温度为 $865\pm 15^{\circ}\text{C}$ 。当 Si 含量小于 1.7% 时, 热轧过程存在奥氏体-铁素体的相变, 通常的, Si 含量为 0.35% 时, 相变温度 $880\sim 910^{\circ}\text{C}$, 并随着 Si 含量增加, 相变温度升高, 由于轧制过程中的热量损失, 终轧温度一般控制在 $800\sim 920^{\circ}\text{C}$ 之间, 并且, 对高硅钢来说, 由于相变温度高, 在 $800\sim 920^{\circ}\text{C}$ 之间终轧, 均为铁素体区轧制, 故为了得到粗大晶粒, 终轧温度通常越高越好。然而, 对于本发明无取向硅钢来说, 终轧温度控制在 $865\pm 15^{\circ}\text{C}$, 却是可以避免终轧道次处于奥氏体区, 进而避免轧后通过相变得到细晶粒而恶化磁性能, 能够确保终轧道次处于两相区或铁素体区轧制, 以保证粗大晶粒的形成而优化磁性能。

卷取温度为 $680^{\circ}\text{C}\pm 20^{\circ}\text{C}$, 利于卷取过程晶粒的长大, 提升磁性能, 同时避免形成难酸洗的氧化铁皮。

热卷厚度为 $2.70\pm 0.1\text{mm}$, 热轧厚度影响冷轧变形量, 热轧厚度越薄冷轧变形量越小, 得到的晶粒越大。

(6) 酸连轧工序

将热轧所得的热卷采用 HCl 进行酸洗, 漂洗并烘干后, 进行冷轧以制得轧硬卷; 其中, 冷轧压下率为 $80\sim 83\%$, 轧硬厚度为 $0.501\pm 0.005\text{mm}$ 。

优选地, 采用 HCl 进行三级酸洗, 其中, 第一级酸液浓度为 $50\sim 80\text{g/L}$ 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 130\text{g/L}$, 第二级酸液浓度为 $90\sim 120\text{g/L}$ 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 90\text{g/L}$, 第三级

酸液浓度为 140~160 g/L 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 50\text{g/L}$;

每一级酸洗时, 酸液温度 75~85°C, 在酸液中加入硅钢酸洗促进剂, 硅钢酸洗促进剂占酸液的重量百分比为 0.05~0.10%;

漂洗水温度 45~55°C, 酸洗和漂洗速度控制在 100~180mpm。

(7) 退火工序

将冷硬卷的钢带在连续退火炉的 H_2 和 N_2 混合气氛中进行退火, 退火温度 850 $\pm 5^\circ\text{C}$, 退火时间 60 ± 5 秒, 采用三段式冷却对退火后的钢带进行冷却, 其中: 第一段冷却为高温段缓慢冷却, 将钢带从退火温度以冷速 $\leq 5^\circ\text{C/s}$ 进行冷却到 800°C; 第二段冷却为循环气体喷射控制冷却, 将第一段冷却后的钢带以冷速 $\leq 15^\circ\text{C/s}$ 继续冷却到 300°C 以下; 第三段冷却为循环水喷射冷却, 将第二段冷却后的钢带继续冷却到 100°C 以下。

钢带冷却速度越慢越有利于降低钢板的冷却内应力, 但冷却段过长会大幅度提高生产成本, 按以上所述的三段式冷却方式进行控制, 可低成本的有效控制钢板的残余应力 $\leq 50\text{MPa}$, 有利于板形的控制。

(8) 涂层及精整工序

将退火中冷却至 100°C 以下的钢带进行涂层及精整, 其具体操作可采用现有的可行涂层及精整技术均可以实现, 不再多加赘述, 最终得到厚度为 0.500 $\pm 0.005\text{mm}$ 的无取向硅钢成品。其中, 通过对热卷厚度、轧硬厚度 (即酸连轧后厚度)、成品厚度的精确控制, 提升磁性能的稳定性的。

与现有技术相比, 本发明的有益效果在于:

(1) 采用所述生产方法制备得到的厚度为 0.500 $\pm 0.005\text{mm}$ 的无取向硅钢成品, 铁损 $P_{1.5/50} \leq 5.5\text{W/kg}$, 磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.75$, 磁性能优异, 能够满足中小型电机对低牌号无取向硅钢的需求, 并且生产成本低, 促进了工况顺行;

(2) 通过控制 C、Nb、V、Ti、Mo、Cr、Ni、Cu、N 等元素的含量, 同时, 通过优化 Si、Sn 的含量和 S 的对应关系, S 的含量上限可以放宽至 0.0080%, 也即控制满足 $S \leq 0.008\%$ 即可, 在 $S \leq 0.008\%$ 的基础上, 如后文实施例 3、4 所示, 还可以允许 $S > 0.0050\%$ 甚至 $\geq 0.0060\%$, 保证了无取向硅钢的磁性能的稳定, 不会因 S 含量的增加而导致磁性能不稳定, 实现良率的稳定;

(3) 在保证磁性能的同时, 还通过对应设计 Mn 和 P 等元素的含量, 兼顾了无取向硅钢的强度和焊接性能;

(4) 所述生产方法中，降低了对 S 含量的要求难度，相应地在铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼等工序的 S 控制难度降低，转炉冶炼中废钢的要求降低、成本降低，RH 精炼工序无需脱硫处理，解决了现有技术中脱硫剂对 RH 精炼炉浸渍管的侵蚀，提升了 RH 精炼炉浸渍管的使用寿命，降低了生产成本，避免因设备损坏还影响工况顺序。

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。

下面选取依照本实施方式的 4 个实施例及未依照本实施方式的 1 个对比例，来进一步说明本实施方式的卓越进步，当然，这 4 个实施例仅为本实施方式所含众多变化实施例中的一部分，而非全部。

具体地，4 个实施例和 1 个对比例均提供了一种无取向硅钢，其生产方法均包括依序进行如下工序：铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼、连铸、热轧、酸连轧、退火、涂层及精整。

其中，4 个实施例和 1 个对比例中无取向硅钢的各自化学成分（也即 RH 精炼出钢钢液的化学成分/连铸坯的化学成分）以质量百分比计经取样检测结果如表 1 所示，并且，4 个实施例和 1 个对比例的生产过程中，钢液到达 RH 精炼时所含 S 的质量百分比也参表 1。

[表 1]

	RH 到站 (%)	化学成分(%)													
	S	C	S	Si	Mn	P	Sn	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Ni	Cu	N
实施例 1	0.0022	0.0021	0.0024	0.34	0.22	0.053	0.014	0.002	0.001	0.002	0.001	0.01	0.01	0.01	0.0015
实施例 2	0.0035	0.0025	0.0038	0.41	0.19	0.048	0.021	0.001	0.002	0.002	0.001	0.01	0.02	0.01	0.0018
实施例 3	0.0052	0.0022	0.0051	0.53	0.21	0.052	0.026	0.002	0.001	0.001	0.001	0.02	0.01	0.01	0.0017
实施例 4	0.0067	0.0018	0.0065	0.59	0.22	0.053	0.033	0.001	0.001	0.002	0.002	0.01	0.01	0.01	0.0021
对比例 1	0.0064	0.0022	0.0066	0.36	0.20	0.055	0.016	0.002	0.001	0.001	0.002	0.01	0.01	0.02	0.0018

进一步地，实施例 1-4 和对比例 1 中，制备得到的无取向硅钢的成品厚度、铁损、磁感应强度分别如表 2 所示，并且，无取向硅钢的金相显微组织照片分别参看图 1 至图 5。

[表 2]

实施例	成品
-----	----

	厚度(mm)	铁损 $P_{1.5/50}(w/kg)$	磁感 $B_{5000}(T)$
实施例 1	0.502	5.25	1.767
实施例 2	0.499	5.31	1.759
实施例 3	0.500	5.36	1.763
实施例 4	0.501	5.41	1.765
对比例 1	0.499	5.84	1.741

将实施例 1~4 与对比例 1 进行比较,可以看出,本发明一实施方式中,根据钢液到达 RH 精炼时 S 含量,进行化学成分的设计,并在 RH 精炼的合金化时补加超低钛硅铁和锡锭,所得到的无取向硅钢的金相组织中晶粒相对粗大,且同样在厚度为 0.5mm 时的铁损 $P_{1.5/50} \leq 5.5W/kg$ 、磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.75$, 优于对比文件 1 的磁性能。

具体地,实施例 1~4 与对比例 1 的生产过程如下:

(1) 铁水脱硫工序

实施例 1-4 和对比例 1,该铁水脱硫步骤均为:控制脱硫前铁水的温度 $\geq 1350^{\circ}C$,且脱硫前铁水的化学成分以质量百分比计满足 Si:0.20~0.70%、S $\leq 0.05\%$ 、Nb $\leq 0.005\%$ 、V $\leq 0.04\%$ 、Ti $\leq 0.06\%$ 、Mo $\leq 0.001\%$ 、Cr $\leq 0.03\%$ 、Ni $\leq 0.03\%$ 以及 Cu $\leq 0.03\%$;控制脱硫后铁水的温度 $\geq 1320^{\circ}C$ 且以质量百分比计所含 S $\leq 0.0015\%$,扒渣率控制为 $\geq 98\%$ 。

(2) 转炉冶炼工序

实施例 1-4 和对比例 1,该转炉冶炼步骤均为:将前述铁水脱硫步骤中的出钢(也即脱硫后铁水)移入转炉中,并在转炉中混合洁净废钢,废钢的加入量占废钢与铁水总和的 20~25%,该脱硫后铁水和废钢一并在转炉中进行冶炼成钢水;出钢过程中,先加入石灰,再按照最终无取向硅钢成品含 Sn:0.015%向出钢钢液中加入足量锡锭;在出钢结束后,向钢液中加入渣面脱氧剂。

(3) RH 精炼工序

实施例 1-4 和对比例 1,该 RH 精炼工序均为:采用脱碳处理模式,按照预抽真空、脱碳、合金化、净循环、破真空的顺序进行处理,合金化之后,净循环 7 分钟以上,而后出钢;并且,该 RH 精炼工序中不添加脱硫剂,也即不进行脱硫处理。

其中,实施例 1-4 和对比例 1,在该转炉冶炼工序中的不同仅在于:

实施例 1 中,如表 1 所示,钢液到达 RH 精炼时 S $\leq 0.0030\%$,按照最终无取向硅钢成品中 Si:0.35%、P:0.04~0.06%、Mn:0.15~0.25%向钢液中加入超低钛硅铁、低钛磷铁和金属锰,其 RH 精炼出钢的实际化学成分的质量百分比参表 1;

实施例 2 中,如表 1 所示,钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < S \leq 0.0045\%$,按照最

终无取向硅钢成品中 Si:0.40%, Sn:0.020%、P:0.04~0.06%、Mn:0.15~0.25%向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰,其 RH 精炼出钢的实际化学成分的质量百分比参表 1;

实施例 3 中,如表 1 所示,钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < S \leq 0.060\%$,按照最终无取向硅钢成品中 Si:0.50%, Sn:0.025%、P:0.04~0.06%、Mn:0.15~0.25%向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰,其 RH 精炼出钢的实际化学成分的质量百分比参表 1;

实施例 4 中,钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$,按照最终无取向硅钢成品中 Si:0.60%, Sn:0.035%、P:0.04~0.06%、Mn:0.15~0.25%向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰,其 RH 精炼出钢的实际化学成分的质量百分比参表 1;

而对比例 1 中,尽管钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$,但依然按照最终无取向硅钢成品中 Si:0.35%、P:0.04~0.06%、Mn:0.15~0.25%向钢液中加入超低钛硅铁、低钛磷铁和金属锰,其 RH 精炼出钢的实际化学成分的质量百分比参表 1。

(4) 连铸工序

实施例 1-4 和对比例 1,该连铸工序均为:将 RH 精炼工序的出钢采用连铸设备制备成连铸坯。

(5) 热轧工序

实施例 1-4 和对比例 1,该热轧工序均为:将连铸坯依次经过连铸坯加热、轧制中间坯、精轧、卷取制备得到热卷。

其中,实施例 1-4 和对比例 1 的各自连铸坯的加热温度、保温时间、中间坯厚度、终轧温度、卷取温度、热卷厚度等具体值参表 3 所示。

(6) 酸连轧工序

实施例 1-4 和对比例 1,该酸连轧工序均为:

将热轧所得的热卷采用 HCl 进行三级酸洗,其中,第一级酸液浓度为 50~80 g/L 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 ≤ 130 g/L,第二级酸液浓度为 90~120 g/L 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 ≤ 90 g/L,第三级酸液浓度为 140~160 g/L 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 ≤ 50 g/L;每一级酸洗时,酸液温度 75~85°C,在酸液中加入硅钢酸洗促进剂,硅钢酸洗促进剂占酸液的重量百分比为 0.05~0.10%;

漂洗并烘干后,进行冷轧以制得轧硬卷;其中,漂洗水温度 45~55°C,酸洗和漂

洗速度控制在 100~180mpm，实施例 1-4 和对比例 1 的冷轧压下率和轧硬厚度分别参表 3 所示。

(7) 退火工序

实施例 1-4 和对比例 1，该退火工序均为：将冷硬卷的钢带在连续退火炉的 H₂ 和 N₂ 混合气氛中进行退火，退火温度和退火时间分别参表 3 所示，采用三段式冷却对退火后的钢带进行冷却，其中：第一段冷却为高温段缓慢冷却，将钢带从退火温度以冷速≤5℃/s 进行冷却到 800℃；第二段冷却为循环气体喷射控制冷却，将第一段冷却后的钢带以冷速≤15℃/s 继续冷却到 300℃以下；第三段冷却为循环水喷射冷却，将第二段冷却后的钢带继续冷却到 100℃以下。

[表 3]

	热轧						酸连轧		退火	
	加热温度(℃)	保温时间(min)	中间坯厚度(mm)	终轧温度(℃)	卷取温度(℃)	热卷厚度(mm)	轧硬厚度(mm)	冷轧压下率(%)	温度(℃)	时间(s)
实施例 1	1130~1150	195	38	868	685	2.73	0.503	81.6	852	61
实施例 2	1130~1150	188	38	862	692	2.69	0.499	81.4	853	63
实施例 3	1130~1150	203	38	875	678	2.72	0.501	81.6	849	60
实施例 4	1130~1150	192	38	865	673	2.70	0.501	81.4	850	62
对比例 1	1130~1150	214	38	870	682	2.68	0.500	81.3	848	59

(8) 涂层及精整工序

实施例 1-4 和对比例 1，该涂层及精整工序均为：将退火中冷却至 100℃以下的钢带进行涂层及精整，最终得到无取向硅钢成品的厚度参表 2 所示。

综上所述可以看出，经实施例 1-4 和对比例 1 的比对，采用本实施方式的所述生产方法制备得到的厚度为 0.500±0.005mm 的无取向硅钢成品，铁损 P_{1.5/50}≤5.5W/kg，磁感应强度 B₅₀₀₀≥1.75，磁性能优异；RH 精炼工序无需脱硫处理，解决了现有技术中脱硫剂对 RH 精炼炉浸渍管的侵蚀，提升了 RH 精炼炉浸渍管的使用寿命，降低了生产成本，避免因设备损坏还影响工况顺序。

需要说明的是，该实验例 1-4 仅为本实施方式中的一个示例，本实施方式并不限定于必要依照该实验例 1-4 予以实施，在未脱离本实施方式的技艺宗旨之下，其它不

同于该实验例的实施均应包含在本发明的保护范围之内。

权利要求书

1. 一种无取向硅钢的生产方法，其特征在于，采用铁水脱硫、转炉冶炼、RH精炼、连铸、热轧、酸连轧、退火、涂层及精整的工序制备得到满足如下化学成分设计方案的无取向硅钢成品；

所述化学成分设计方案以质量百分比计为：

$C \leq 0.003\%$ ， $S \leq 0.008\%$ ， $Si: 0.35\% + \Delta 1$ ， $Mn: 0.15 \sim 0.25\%$ ， $P: 0.04 \sim 0.06\%$ ， $Sn: 0.015\% + \Delta 2$ ， $Nb \leq 0.004\%$ ， $V \leq 0.004\%$ ， $Ti \leq 0.005\%$ ， $Mo \leq 0.004\%$ ， $Cr \leq 0.03\%$ ， $Ni \leq 0.03\%$ ， $Cu \leq 0.03\%$ ， $N \leq 0.003\%$ ，其它为 Fe 及不可避免的夹杂；

其中，当钢液到达 RH 精炼时 $S \leq 0.0030\%$ ，则 $\Delta 1 = \Delta 2 = 0$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < S \leq 0.0045\%$ ，则 $\Delta 1 = 0.05\%$ 且 $\Delta 2 = 0.005\%$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < S \leq 0.060\%$ ，则 $\Delta 1 = 0.15\%$ 且 $\Delta 2 = 0.010\%$ ；

当钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < S \leq 0.0075\%$ ，则 $\Delta 1 = 0.25\%$ 且 $\Delta 2 = 0.020\%$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢的生产方法，其特征在于，所述无取向硅钢成品的厚度为 $0.500 \pm 0.005\text{mm}$ ，其铁损 $P_{1.5/50} \leq 5.5\text{W/kg}$ ，磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.75$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的无取向硅钢的生产方法，其特征在于，

铁水脱硫工序时：

控制脱硫前铁水的温度 $\geq 1350^\circ\text{C}$ 且化学成分以质量百分比计满足 $Si: 0.20 \sim 0.70\%$ ， $S \leq 0.05\%$ ， $Nb \leq 0.005\%$ ， $V \leq 0.04\%$ ， $Ti \leq 0.06\%$ ， $Mo \leq 0.001\%$ ， $Cr \leq 0.03\%$ ， $Ni \leq 0.03\%$ 以及 $Cu \leq 0.03\%$ ，将该脱硫前铁水进行脱硫，以控制脱硫后铁水的温度 $\geq 1320^\circ\text{C}$ 且以质量百分比计所含 $S \leq 0.0015\%$ ；

转炉冶炼工序时：

将脱硫后铁水混合废钢在转炉中进行冶炼，出钢过程中，按照所述化学成分设计方案中 $\Delta 1 = \Delta 2 = 0$ 的化学成分基础方案向出钢钢液中加入足量锡锭；出钢结束后，向钢液中加入渣面脱氧剂；

RH 精炼工序中：

检测钢液到达 RH 精炼时所含 S 的质量百分比，并确定所述化学成分设计方案中的 $\Delta 1$ 和 $\Delta 2$ 的取值，以得到化学成分最终方案，在预抽真空的 RH 精炼炉中，对钢液进行脱碳处理，之后按照所述化学成分最终方案，向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰，净循环 7 分钟以上后出钢；在 RH 精炼工序中不添加脱硫剂。

4. 根据权利要求3所述的无取向硅钢的生产方法, 其特征在于, 铁水脱硫工序时, 脱硫后铁水的扒渣率控制为 $\geq 98\%$;

5. 根据权利要求3所述的无取向硅钢的生产方法, 其特征在于, 转炉冶炼工序时, 废钢的加入量占废钢与铁水总和的 20~25%, 出钢过程中先加入石灰, 再加入锡锭。

6. 根据权利要求1所述的无取向硅钢的生产方法, 其特征在于, 热轧工序时: 将连铸坯依次经过连铸坯加热、轧制中间坯、精轧、卷取制备得到热卷, 其中, 连铸坯的加热温度为 $1130\sim 1160^{\circ}\text{C}$ 且保温时间 $\geq 180\text{min}$, 中间坯厚度 $35\sim 40\text{mm}$, 终轧温度为 $865\pm 15^{\circ}\text{C}$, 卷取温度为 $680^{\circ}\text{C}\pm 20^{\circ}\text{C}$, 热卷厚度为 $2.70\pm 0.1\text{mm}$ 。

7. 根据权利要求1所述的无取向硅钢的生产方法, 其特征在于, 酸连轧工序时: 将热轧所得的热卷采用 HCl 进行酸洗, 漂洗并烘干后, 进行冷轧以制得轧硬卷; 其中, 冷轧压下率为 80~83%, 轧硬厚度为 $0.501\pm 0.005\text{mm}$ 。

8. 根据权利要求7所述的无取向硅钢的生产方法, 其特征在于, 采用 HCl 进行三级酸洗, 其中, 第一级酸液浓度为 50~80 g/L 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 130\text{g/L}$, 第二级酸液浓度为 90~120 g/L 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 90\text{g/L}$, 第三级酸液浓度为 140~160 g/L 且酸液中 Fe^{2+} 浓度 $\leq 50\text{g/L}$;

每一级酸洗时, 酸液温度 $75\sim 85^{\circ}\text{C}$, 在酸液中加入硅钢酸洗促进剂, 硅钢酸洗促进剂占酸液的重量百分比为 0.05~0.10%;

漂洗水温度 $45\sim 55^{\circ}\text{C}$, 酸洗和漂洗速度控制在 100~180mpm。

9. 根据权利要求1所述的无取向硅钢的生产方法, 其特征在于, 退火工序时: 将冷硬卷的钢带在连续退火炉的 H_2 和 N_2 混合气氛中进行退火, 退火温度 $850\pm 5^{\circ}\text{C}$, 退火时间 60 ± 5 秒, 采用三段式冷却对退火后的钢带进行冷却, 其中:

第一段冷却为高温段缓慢冷却, 钢带从退火温度以冷速 $\leq 5^{\circ}\text{C/s}$ 进行冷却到 800°C ;

第二段冷却为循环气体喷射控制冷却, 钢带以冷速 $\leq 15^{\circ}\text{C/s}$ 继续冷却到 300°C 以下;

第三段冷却为循环水喷射冷却, 钢带继续冷却到 100°C 以下。

10. 根据权利要求1所述的无取向硅钢的生产方法, 其特征在于, 涂层及精整工序时, 将退火中冷却至 100°C 以下的钢带进行涂层及精整, 得到厚度为 $0.500\pm 0.005\text{mm}$ 的无取向硅钢成品。

11. 一种无取向硅钢, 其特征在于, 其采用权利要求 1 所述的生产方法制备而成。

12. 一种无取向硅钢的生产方法, 其特征在于, 采用铁水脱硫、转炉冶炼、RH 精炼、连铸、热轧、酸连轧、退火、涂层及精整的工序制备得到厚度为 $0.5 \pm 0.005\text{mm}$ 的无取向硅钢产品, 该无取向硅钢产品的铁损 $P_{1.5/50} \leq 5.5\text{W/kg}$ 、磁感应强度 $B_{5000} \geq 1.75$; 其中,

铁水脱硫工序中:

控制脱硫前铁水的温度 $\geq 1350^\circ\text{C}$ 且化学成分以质量百分比计满足 $\text{Si}: 0.20 \sim 0.70\%$ 、 $\text{S} \leq 0.05\%$ 、 $\text{Nb} \leq 0.005\%$ 、 $\text{V} \leq 0.04\%$ 、 $\text{Ti} \leq 0.06\%$ 、 $\text{Mo} \leq 0.001\%$ 、 $\text{Cr} \leq 0.03\%$ 、 $\text{Ni} \leq 0.03\%$ 以及 $\text{Cu} \leq 0.03\%$, 将该脱硫前铁水进行脱硫, 以控制脱硫后铁水的温度 $\geq 1320^\circ\text{C}$ 且以质量百分比计所含 $\text{S} \leq 0.0015\%$;

转炉冶炼工序中:

将脱硫后铁水混合废钢在转炉中进行冶炼, 在出钢过程中, 按照化学成分基础方案向出钢钢液中加入足量锡锭; 在出钢结束后, 向钢液中加入渣面脱氧剂; 其中, 所述化学成分基础方案以质量百分比计为: $\text{C} \leq 0.003\%$ 、 $\text{S} \leq 0.008\%$ 、 $\text{Si}: 0.35\%$ 、 $\text{Mn}: 0.15 \sim 0.25\%$ 、 $\text{P}: 0.04 \sim 0.06\%$ 、 $\text{Sn}: 0.015\%$ 、 $\text{Nb} \leq 0.004\%$ 、 $\text{V} \leq 0.004\%$ 、 $\text{Ti} \leq 0.005\%$ 、 $\text{Mo} \leq 0.004\%$ 、 $\text{Cr} \leq 0.03\%$ 、 $\text{Ni} \leq 0.03\%$ 、 $\text{Cu} \leq 0.03\%$ 、 $\text{N} \leq 0.003\%$, 其它为 Fe 及不可避免的夹杂;

RH 精炼工序中:

在预抽真空的 RH 精炼炉中, 对钢液进行脱碳处理;

之后, 根据钢液到达 RH 精炼时所含 S 的质量百分比, 进行合金化处理, 其中: 若钢液到达 RH 精炼时 $\text{S} \leq 0.0030\%$, 则按照所述化学成分基础方案向钢液中加入超低钛硅铁、低钛磷铁和金属锰; 若钢液到达 RH 精炼时 $0.0030\% < \text{S} \leq 0.0045\%$, 则将所述化学成分基础方案中的 Si 和 Sn 分别调整为 $\text{Si}: 0.40\%$ 和 $\text{Sn}: 0.020\%$, 若钢液到达 RH 精炼时 $0.0045\% < \text{S} \leq 0.0060\%$, 则将所述化学成分基础方案中的 Si 和 Sn 分别调整为 $\text{Si}: 0.50\%$ 和 $\text{Sn}: 0.025\%$, 若钢液到达 RH 精炼时 $0.0060\% < \text{S} \leq 0.0075\%$, 则将所述化学成分基础方案中的 Si 和 Sn 分别调整为 $\text{Si}: 0.60\%$ 和 $\text{Sn}: 0.035\%$, 并按调整后的化学成分方案向钢液中加入超低钛硅铁、锡锭、低钛磷铁和金属锰;

而后净循环 7 分钟以上后出钢; 在 RH 精炼工序中不添加脱硫剂。

13. 一种无取向硅钢, 其特征在于, 其采用权利要求 12 所述的生产方法制备而成。