

高Al无取向硅钢卷绕铁芯及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明属于钢铁冶炼技术领域,涉及一种高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,还涉及一种采用所述制备方法制备得到的高Al无取向硅钢卷绕铁芯。

背景技术

[0002] 随着经济的发展和科技的进步,电动自行车、电动三轮车、电动滑板车、平衡车等小型电动车越来越受到广大消费者的欢迎,在日常短距离出行以及外卖、快递行业得到了普遍的应用。电机作为电动车的动力来源,是电动车必不可少的结构。

[0003] 目前的小型电动车的轮毂主要采用外转子型永磁无刷直流电机,该类轮毂电机直径小、转速高,但是电机铁芯的损耗较高。

[0004] 为了降低铁芯损耗,提高转子铁芯冲压叠片的材料利用率,轮毂电机通常采用薄规格无取向硅钢进行卷绕式叠片,但是在卷绕过程中无取向硅钢的外侧受拉应力、内侧受压应力,磁轭部会发生塑性变形,甚至开裂,导致铁芯的损耗增加,性能恶化,产品合格率降低。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,以解决现有技术中无取向硅钢的电磁性能和塑韧性无法同时满足转子卷绕铁芯的应用要求的技术问题;并且本发明的目的还在于提供一种采用所述制备方法制备得到的高Al无取向硅钢卷绕铁芯。

[0006] 为实现上述目的之一,本发明一实施方式提供了一种高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,包括依序进行的钢水冶炼、连铸、热轧、酸洗、冷轧、一次退火、卷绕成型、二次退火工序;

[0007] 所述钢水冶炼工序中,冶炼最终所得钢水的化学成分以质量百分比计包括: $C \leq 0.0025\%$, $Si \ 1.0 \sim 1.5\%$, $Al \ 1.0 \sim 2.0\%$, $Mn \ 0.2 \sim 0.4\%$, $Nb \leq 0.002\%$, $V \leq 0.002\%$, $Ti \leq 0.002\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.01\%$, $N \leq 0.002\%$, $P \ 0.015 \sim 0.020\%$, $S \leq 0.0015\%$,以及Sn或Sb,其余为Fe及不可避免的杂质,其中 $Sn = 0.01 \times Si + 0.04 \times Al$, $Sb = 0.01 \times Si + 0.04 \times Al$,且 $Al/Si = 1.0 \sim 1.4$, $C + S + O + N \leq 0.007\%$;

[0008] 所述热轧工序中,将所述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,加热温度 $T_1 = 1160 - 20 \times [Si] - 10 \times [Al]$,加热时间为160~180min,精轧的开轧温度为910~960℃,精轧的终轧温度 $T_2 = 880 - 20 \times [Si] - 15 \times [Al]$,卷取温度 $T_3 = 600 + 5 \times [Si] - 30 \times [Al]$;

[0009] 所述酸洗工序中,采用三个阶段进行酸洗,第一阶段的酸洗液采用 $NH_4HF_2 + HCl$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为60~80g/L, HCl 的浓度为150~200g/L;第二阶段的酸洗液采用 $NH_4HF_2 + HCl$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为80~100g/L, HCl 的浓度为200~250g/L;第三阶段的酸洗液采用 $H_2O_2 + HCl$ 混合溶液, H_2O_2 的浓度为30~50g/L, HCl 的浓度为100~120g/L;三个阶段各自的酸洗

时间 t 、酸洗温度 T_4 一一对应且满足:

$$[0010] \quad [Si] + 1.2 \times [Al] \leq t \cdot B \cdot \exp\left(-\frac{1268}{0.475 \times (T_4 + 274.15)}\right) \leq 0.3 \times [Si] + 0.2 \times [Al] + 4,$$

[0011] 其中, $B = -0.01 \times [NH_4HF_2]^2 + 2 \times [HCl] - 75$, t 的单位为 s , 温度的单位均为 $^{\circ}C$ 。

[0012] 作为本发明一实施方式的进一步改进, 所述一次退火工序中, 在纯 N_2 保护气氛下将所述冷轧工序所得冷硬卷进行高温退火, 退火温度 $T_5 = 900 + 30 \times [Si] + 20 \times [Al]$, 单位为 $^{\circ}C$, 退火时间为 $80 \sim 100s$, 控制高温退火后的钢卷完成充分再结晶, 且平均晶粒尺寸为 $70 \sim 90 \mu m$ 。

[0013] 作为本发明一实施方式的进一步改进, 所述一次退火工序中, 对高温退火后的钢卷进行冷却、涂层和精整, 得到无取向硅钢, 控制冷却至 $400 \sim 550^{\circ}C$ 前的冷却速度 $\leq 10^{\circ}C/s$ 。

[0014] 作为本发明一实施方式的进一步改进, 所述一次退火工序得到的无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50} \leq 3.0W/kg$, 磁感 $B_{5000} \geq 1.67T$, 屈服强度 YS 为 $200 \sim 260MPa$, 延伸率 $\geq 25\%$ 。

[0015] 作为本发明一实施方式的进一步改进, 所述二次退火工序在纯 N_2 保护气氛下进行, 且退火温度 $T_6 = 800 + 2000 \times \sigma$, 单位为 $^{\circ}C$, σ 为卷绕成型过程中铁芯的应变。

[0016] 作为本发明一实施方式的进一步改进, 所述卷绕成型工序中, 将所述一次退火工序所得的无取向硅钢分条后, 对齿槽部进行冲片加工, 之后对磁轭部进行卷绕式加工成型, 得到高 Al 无取向硅钢卷绕铁芯, 控制卷绕成型过程中铁芯的应变 σ 为 $2 \sim 8\%$ 。

[0017] 作为本发明一实施方式的进一步改进, 所述热轧工序中, 将所述连铸坯送入加热炉中进行加热, 所述连铸坯的入炉温度为 $500 \sim 600^{\circ}C$, 粗轧采用双机架进行6道次粗轧, 包括在第一机架进行的1道次粗轧和在第二机架进行的5道次粗轧, 精轧采用七机架精轧机进行7道次精轧, 控制精轧的总压下率为 $93 \sim 94\%$, 所述热轧卷板的厚度为 $1.8 \sim 2.0mm$ 。

[0018] 作为本发明一实施方式的进一步改进, 所述冷轧工序中, 采用五机架冷轧机对所述酸洗工序后的热轧带钢进行连续式冷轧, 得到厚度为 $0.3 \sim 0.4mm$ 的冷硬卷, 控制每个道次的压下率为 $25 \sim 35\%$, 控制总压下率为 $80 \sim 90\%$ 。

[0019] 为实现上述发明口的, 本发明一实施方式还提供了一种高 Al 无取向硅钢卷绕铁芯, 其采用如上所述的高 Al 无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法制备而成。

[0020] 作为本发明一实施方式的进一步改进, 所述高 Al 无取向硅钢卷绕铁芯的铁损 $P_{1.5/50} \leq 2.5W/kg$, 磁感 $B_{5000} \geq 1.72T$ 。

[0021] 与现有技术相比, 本发明的有益效果为:

[0022] (1) 基于化学成分设计方案, 一方面, 通过合理控制 Si 、 Al 合金元素含量及二者的含量关系, 不仅可以在获得良好铁损的条件下, 改善成品磁感应强度, 同时成品可以具有良好的塑性和延伸率, 满足卷绕式铁芯加工的生产要求; 进一步通过添加微合金元素 Sn 或 Sb 并限定其含量与 Al 、 Si 含量的关系, 可以利用 Sn 或 Sb 易于在带钢表面富集的原理, 避免带钢在退火过程中形成致密的 AlN , 促进最终制备的无取向硅钢基体的组织优化, 使其获得优异的延伸率和电磁性能, 满足卷绕铁芯的生产要求; 整体来讲, 通过上述化学成分设计方案, 不仅可以提高无取向硅钢的电阻率, 降低涡流损耗, 提高磁性能, 而且可以使所述无取向硅钢具有优异的热加工性和冷加工性, 实现稳定轧制和可卷绕加工。

[0023] (2) 一次退火工序后得到的无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50} \leq 3.0W/kg$, 磁感 $B_{5000} \geq 1.67T$, 屈服强度 YS 为 $200 \sim 260MPa$, 延伸率 $\geq 25\%$, 不仅具有优异的磁性能, 而且具有良好的

力学性能,为铁芯的卷绕成型加工奠定了基础。

[0024] (3)上述制备方法在低Si高Al的化学成分设计方案基础上,合金成分简单,降低了成本,制备得到的无取向硅钢的铁损低,磁感高,屈服强度低,延伸率高,有利于铁芯的卷绕成型,卷绕无开裂;进一步通过在铁芯卷绕成型后进行二次退火,可以利用铁芯卷绕成型过程中产生的塑性变形诱导铁素体晶粒二次长大,降低铁芯铁损,从而解决卷绕式铁芯在卷绕弯曲变形的过程中产生的塑性应变对铁芯磁性能损伤的问题,提高了轮毂电机铁芯的成材率和工作效率,最终制备的高Al无取向硅钢卷绕铁芯,其铁损 $P_{1.5/50} \leq 2.5 \text{ W/kg}$,磁感 $B_{5000} \geq 1.72 \text{ T}$,磁感应性能优异,应用于轮毂电机等产品时电磁性能合格,能够满足轮毂电机等产品的应用能效的需求;而且取消了冷轧前的常化工序,简化了生产流程,不仅降低了轮毂电机的生产成本,还大幅提高了轮毂电机的性能。

具体实施方式

[0025] 以下将结合具体实施方式对本发明进行详细描述。但这些实施方式并不限制本发明,本领域的普通技术人员根据这些实施方式所做出的结构、方法、或功能上的变换均包含在本发明的保护范围内。

[0026] 本发明一实施方式提供了一种高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,以及采用所述制备方法制得的高Al无取向硅钢卷绕铁芯。

[0027] 在本实施方式中,所述高Al无取向硅钢卷绕铁芯的化学成分设计方案如下,其化学成分以质量百分比计包括: $C \leq 0.0025\%$, $Si \ 1.0 \sim 1.5\%$, $Al \ 1.0 \sim 2.0\%$, $Mn \ 0.2 \sim 0.4\%$, $Nb \leq 0.002\%$, $V \leq 0.002\%$, $Ti \leq 0.002\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.01\%$, $N \leq 0.002\%$, $P \ 0.015 \sim 0.020\%$, $S \leq 0.0015\%$,以及Sn或Sb,其余为Fe及不可避免的杂质,其中 $Sn = 0.01 \times Si + 0.04 \times Al$, $Sb = 0.01 \times Si + 0.04 \times Al$, $Al/Si = 1.0 \sim 1.4$, $C+S+O+N \leq 0.007\%$ 。

[0028] 也就是说,在上述化学成分设计方案中,包括Sn或Sb的其中之一。

[0029] 具体地,本发明的所述高Al无取向硅钢卷绕铁芯的化学成分以质量百分比计包括: $C \leq 0.0025\%$, $Si \ 1.0 \sim 1.5\%$, $Al \ 1.0 \sim 2.0\%$, $Mn \ 0.2 \sim 0.4\%$, $Nb \leq 0.002\%$, $V \leq 0.002\%$, $Ti \leq 0.002\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.01\%$, $N \leq 0.002\%$, $P \ 0.015 \sim 0.020\%$, $S \leq 0.0015\%$,以及 $Sn = 0.01 \times Si + 0.04 \times Al$,其余为Fe及不可避免的杂质,且 $Al/Si = 1.0 \sim 1.4$, $C+S+O+N \leq 0.007\%$ 。

[0030] 或者,本发明的所述高Al无取向硅钢卷绕铁芯的化学成分以质量百分比计包括: $C \leq 0.0025\%$, $Si \ 1.0 \sim 1.5\%$, $Al \ 1.0 \sim 2.0\%$, $Mn \ 0.2 \sim 0.4\%$, $Nb \leq 0.002\%$, $V \leq 0.002\%$, $Ti \leq 0.002\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.01\%$, $N \leq 0.002\%$, $P \ 0.015 \sim 0.020\%$, $S \leq 0.0015\%$,以及 $Sb = 0.01 \times Si + 0.04 \times Al$,其余为Fe及不可避免的杂质,且 $Al/Si = 1.0 \sim 1.4$, $C+S+O+N \leq 0.007\%$ 。

[0031] 基于上述化学成分设计方案,一方面,通过添加Si、Al、Mn,可以提高无取向硅钢的电阻率,降低铁损,但随着其含量的增加,饱和磁感应强度也随之降低,导磁性下降,且随着Si含量的增加,钢材的韧性急剧下降,在冷轧过程中极易出现断带的问题,本发明通过合理控制Si、Al合金元素含量及二者的含量关系,不仅可以在获得良好铁损的条件下,改善成品磁感应强度,同时成品可以具有良好的塑性和延伸率,满足卷绕式铁芯加工的生产要求;进一步通过添加微合金元素Sn或Sb并限定其含量与Al、Si含量的关系,可以利用Sn或Sb

易于在带钢表面富集的原理,避免带钢在退火过程中形成致密的AlN,促进最终制备的无取向硅钢基体的组织优化,使其获得优异的延伸率和电磁性能,满足卷绕铁芯的生产要求。

[0032] 整体来讲,通过上述化学成分设计方案,不仅可以提高无取向硅钢的电阻率,降低涡流损耗,提高磁性能,而且可以使无取向硅钢具有优异的热加工性和冷加工性,实现稳定轧制和可卷绕加工。

[0033] 下面对所述高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法进行具体介绍,包括依序进行的钢水冶炼、连铸、热轧、酸洗、冷轧、一次退火、卷绕成型和二次退火等工序。

[0034] (1) 钢水冶炼

[0035] 冶炼最终所得钢水的化学成分以质量百分比计包括: $C \leq 0.0025\%$, $Si \ 1.0 \sim 1.5\%$, $Al \ 1.0 \sim 2.0\%$, $Mn \ 0.2 \sim 0.4\%$, $Nb \leq 0.002\%$, $V \leq 0.002\%$, $Ti \leq 0.002\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.01\%$, $N \leq 0.002\%$, $P \ 0.015 \sim 0.020\%$, $S \leq 0.0015\%$, 以及Sn或Sb,其余为Fe及不可避免的杂质,其中 $Sn = 0.01 \times Si + 0.04 \times Al$, $Sb = 0.01 \times Si + 0.04 \times Al$, 且 $Al/Si = 1.0 \sim 1.4$, $C + S + O + N \leq 0.007\%$ 。

[0036] 也就是说,钢水冶炼工序按照上述高Al无取向硅钢卷绕铁芯的化学成分设计方案进行钢水冶炼,从而使冶炼最终所得钢水的化学成分与最终制备的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的化学成分完全相同。

[0037] 具体地,所述钢水冶炼工序包括依序进行的如下步骤:

[0038] a. 铁水KR脱硫

[0039] 将铁水在KR脱硫装置中进行脱硫处理,控制扒渣率 $> 95\%$,出站时铁水中S含量 $\leq 0.001\%$ 。

[0040] b. 转炉冶炼

[0041] 将脱硫后的铁水送入转炉中与废钢混合成钢液并进行脱磷脱硅,至钢水中的 $S \leq 0.002\%$, $P \leq 0.02\%$, $N \leq 0.0025\%$ 时出钢。其中,废钢全部采用无取向硅钢回收料,废钢重量占转炉总装入量的12~16%。

[0042] c. RH真空精炼

[0043] 采用RH真空循环脱气设备对转炉冶炼后的钢水进行真空脱碳、脱氧、合金化和去除夹杂物处理。

[0044] 在RH真空精炼过程中,利用转炉出钢中的O元素进行脱碳,再利用合金元素Si脱氧。在合金化过程中,先添加合金元素Si,再添加合金元素Al,再基于实际的Si/Al含量添加金属Sn或Sb;最后在真空条件下,进行净循环,有效去除钢水中的夹杂物。

[0045] (2) 连铸

[0046] 将钢水冶炼工序所得钢水采用连铸设备连续浇铸成厚度为220mm的连铸坯,所得连铸坯的化学成分与钢水冶炼工序最终所得钢水的化学成分相一致,与最终制备的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的化学成分也完全相同。

[0047] 连铸结晶器采用专用保护渣,保护渣的化学成分以质量百分比计包括: $SiO_2 \ 28 \sim 36\%$, $MgO \leq 5\%$, $CaO \ 16 \sim 24\%$, $Fe_2O_3 \leq 5\%$, $Al_2O_3 \leq 5\%$, $Na_2O \ 13 \sim 15\%$, $CaF_2 \ 8 \sim 14\%$, $Li_2O \ 1.1 \sim 1.5\%$, $B_2O_3 \ 4.5 \sim 5.5\%$, $T.C \leq 1.5\%$, 发热剂1.9~2.1%。通过保护渣的成分设计,在其中添加 Li_2O 、 B_2O_3 以及发热剂,不仅可以抑制连铸过程中钢水中的Al和保护渣中的 SiO_2 发生氧化还原反应,而且可以改善连铸过程中的传热,起到润滑效果,以免连铸坯表面出现裂纹等缺陷。

[0048] 优选地,发热剂为钙硅合金,其中,Ca的质量百分比为40%,Si的质量百分比为60%。

[0049] 优选地,保护渣的二元碱度为0.61~0.63,熔点为 $1000 \pm 40^\circ\text{C}$,粘度为 $0.2 \pm 0.05\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

[0050] 优选地,连铸过程中,在二冷区采用电磁搅拌,搅拌电流为400A,搅拌频率为8Hz,连铸拉速为 $1.2 \pm 0.1\text{m/min}$ 。

[0051] (3) 热轧

[0052] 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。其中,加热温度 $T_1 = 1160 - 20 \times [\text{Si}] - 10 \times [\text{Al}]$,加热时间为160~180min,精轧的开轧温度为 $910 \sim 960^\circ\text{C}$,精轧的终轧温度 $T_2 = 880 - 20 \times [\text{Si}] - 15 \times [\text{Al}]$,卷取温度 $T_3 = 600 + 5 \times [\text{Si}] - 30 \times [\text{Al}]$ 。

[0053] 其中,[Si]表示连铸坯中Si元素的质量百分比,[Al]表示连铸坯中Al元素的质量百分比,例如,若连铸坯中Si元素的含量为1.2%,则[Si]=1.2。后文中均与此相同。

[0054] 如此,基于化学成分中的Si、Al元素含量,控制热轧工序中各步骤温度,可以控制 Al_2O_3 和 SiO_2 复合氧化物的类型及厚度。

[0055] 优选地,将所述连铸坯送入加热炉中进行加热,所述连铸坯的入炉温度为 $500 \sim 600^\circ\text{C}$,粗轧采用双机架进行6道次粗轧,包括在第一机架进行的1道次粗轧和在第二机架进行的5道次粗轧,精轧采用七机架精轧机进行7道次精轧,控制精轧的总压下率为93~94%,所述热轧卷板的厚度为 $1.8 \sim 2.0\text{mm}$ 。

[0056] (4) 酸洗

[0057] 采用三个阶段进行酸洗,第一阶段的酸洗液采用 $\text{NH}_4\text{HF}_2 + \text{HCl}$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为 $60 \sim 80\text{g/L}$,HCl的浓度为 $150 \sim 200\text{g/L}$;第二阶段的酸洗液采用 $\text{NH}_4\text{HF}_2 + \text{HCl}$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为 $80 \sim 100\text{g/L}$,HCl的浓度为 $200 \sim 250\text{g/L}$;第三阶段的酸洗液采用 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl}$ 混合溶液, H_2O_2 的浓度为 $30 \sim 50\text{g/L}$,HCl的浓度为 $100 \sim 120\text{g/L}$;三个阶段各自的酸洗时间 t 、酸洗温度 T_4 ——对应且满足:

$$[\text{Si}] + 1.2 \times [\text{Al}] \leq t \cdot B \cdot \exp\left(-\frac{1268}{0.475 \times (T_4 + 274.15)}\right) \leq 0.3 \times [\text{Si}] + 0.2 \times [\text{Al}] + 4,$$

[0059] 其中, $B = -0.01 \times [\text{NH}_4\text{HF}_2]^2 + 2 \times [\text{HCl}] - 75$, t 的单位为s,温度的单位均为 $^\circ\text{C}$ 。

[0060] $[\text{NH}_4\text{HF}_2]$ 表示混合溶液中 NH_4HF_2 的浓度值,[HCl]表示混合溶液中HCl的浓度值,例如, NH_4HF_2 的浓度为 80g/L 时, $[\text{NH}_4\text{HF}_2] = 80$;第三阶段中因不添加 NH_4HF_2 ,故 $[\text{NH}_4\text{HF}_2] = 0$ 。

[0061] 通过上述酸洗方式,用 $\text{NH}_4\text{HF}_2 + \text{HCl}$ 混合溶液替代传统的HCl酸洗工艺,结合对 NH_4HF_2 浓度、HCl浓度、以及酸洗时间、酸洗温度与 NH_4HF_2 浓度、HCl浓度之间关系的控制,可以将热轧卷板表面的 Al_2O_3 和 SiO_2 氧化层清洗干净,解决高Al钢表面的 Al_2O_3 难以酸洗的问题;进一步在第三阶段酸洗时采用 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl}$ 混合溶液,从而可以避免热轧卷板表面出现晶间腐蚀。

[0062] (5) 冷轧

[0063] 优选采用五机架对所述酸洗工序后的热轧带钢进行连续式冷轧,得到厚度为 $0.3 \sim 0.4\text{mm}$ 的冷硬卷,控制每个道次的压下率为25~35%,控制总压下率为80~90%。

[0064] (6) 一次退火

[0065] 将冷轧工序所得冷硬卷进行连续式高温退火,并在带钢上下表面涂敷绝缘涂层,得到无取向硅钢。涂层的具体操作采用现有的可行涂层技术即可实现,于此不再赘述。

[0066] 优选地,在纯 N_2 保护气氛下对所得冷硬卷进行高温退火,退火温度 $T_5=900+30\times[Si]+20\times[Al]$,单位为 $^{\circ}C$,退火时间为80~100s,控制高温退火后的钢卷完成充分再结晶,且平均晶粒尺寸为70~90 μm 。通过采用纯 N_2 保护气氛,可以减少带钢在高温退火过程中与碳套炉辊反应而出现结瘤。

[0067] 优选地,冷却时,控制冷却至400~550 $^{\circ}C$ 前的冷却速度 $\leq 10^{\circ}C/s$ 。

[0068] 所述一次退火工序得到的无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50}\leq 3.0W/kg$,磁感 $B_{5000}\geq 1.67T$,屈服强度 YS 为200~260MPa,延伸率 $\geq 25\%$,不仅具有优异的磁性能,而且具有良好的力学性能,为铁芯的卷绕成型加工奠定了基础。

[0069] (7) 卷绕成型

[0070] 将所述一次退火工序所得的无取向硅钢分条后,对齿槽部进行冲片加工,之后对磁轭部进行卷绕式加工成型,得到高Al无取向硅钢卷绕铁芯,控制卷绕成型过程中铁芯的应变 σ 为2~8%。

[0071] (8) 二次退火

[0072] 将卷绕成型得到的高Al无取向硅钢卷绕铁芯在纯 N_2 保护气氛下进行二次退火,且退火温度 $T_6=800+2000\times\sigma$,单位为 $^{\circ}C$ 。

[0073] 通过二次退火工序,可以利用铁芯卷绕成型过程中产生的塑性变形诱导铁素体晶粒二次长大,降低铁芯铁损,从而解决卷绕式铁芯在卷绕弯曲变形的过程中产生的塑性应变对铁芯磁性能损伤的问题,提高了轮毂电机铁芯的成材率和工作效率;进一步通过退火温度与卷绕成型铁芯的应变 σ 的定量关系,改善铁芯的电磁性能,以利于最大程度地发挥材料自身的物理电磁性能。

[0074] 上述制备方法在低Si高Al的化学成分设计方案基础上,合金成分简单,降低了成本,制备得到的无取向硅钢的铁损低,磁感高,屈服强度低,延伸率高,有利于铁芯的卷绕成型,卷绕无开裂;进一步通过在铁芯卷绕成型后进行二次退火,可以利用铁芯卷绕成型过程中产生的塑性变形诱导铁素体晶粒二次长大,降低铁芯铁损,从而解决卷绕式铁芯在卷绕弯曲变形的过程中产生的塑性应变对铁芯磁性能损伤的问题,提高了轮毂电机铁芯的成材率和工作效率,而且取消了冷轧前的常化工序,简化了生产流程,不仅降低了轮毂电机的生产成本,还大幅提高了轮毂电机的性能。

[0075] 本发明一实施方式还提供了一种高Al无取向硅钢卷绕铁芯,采用上述制备方法制备而成。

[0076] 经检测,采用上述制备方法制备的高Al无取向硅钢卷绕铁芯,其铁损 $P_{1.5/50}\leq 2.5W/kg$,磁感 $B_{5000}\geq 1.72T$,磁感应性能优异,应用于轮毂电机等产品时电磁性能合格,能够满足轮毂电机等产品的应用能效的需求。

[0077] 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。

[0078] 下面通过3个实施例来进一步说明本发明的有益效果,当然,这3个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。

[0079] 3个实施例分别提供了一种高Al无取向硅钢卷绕铁芯,每个实施例中钢水冶炼所得钢水、连铸坯以及最终制备的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的化学成分均相同,3个实施例的

化学成分具体参表1。另,除表1所示的化学元素外,3个实施例的化学成分中, $C \leq 0.0025\%$, $Nb \leq 0.002\%$, $V \leq 0.002\%$, $Ti \leq 0.002\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.01\%$, $N \leq 0.002\%$, $P 0.015 \sim 0.020\%$, $S \leq 0.0015\%$, $C+S+O+N \leq 0.007\%$,其余为Fe及不可避免的杂质。

[0080] 表1

实施例	化学成分, wt%				
	Si	Al	Mn	Sn	Sb
1	1.0	1.0	0.40	0.05	-
2	1.2	1.5	0.32	-	0.072
3	1.5	2.0	0.21	0.095	-

[0082] 实施例1

[0083] 高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法包括如下工序:

[0084] (1) 钢水冶炼

[0085] 冶炼最终所得钢水的化学成分如前文所述,具体请参表1。

[0086] 具体地,所述钢水冶炼工序包括依序进行的如下步骤:

[0087] a. 铁水KR脱硫

[0088] 将铁水在KR脱硫装置中进行脱硫处理,控制扒渣率为97%,出站时铁水中S含量为0.0008%。

[0089] b. 转炉冶炼

[0090] 将脱硫后的铁水送入转炉中与废钢混合成钢液并进行脱磷脱硅,至钢水中的S含量为0.0018%,P含量为0.02%,N含量为0.0016%时出钢。其中,废钢全部采用无取向硅钢回收料,废钢重量占转炉总装入量的15%。

[0091] c. RH真空精炼

[0092] 采用RH真空循环脱气设备对转炉冶炼后的钢水进行真空脱碳、脱氧、合金化和去除夹杂物处理。在RH真空精炼过程中,利用转炉出钢中的O元素进行脱碳,再利用合金元素Si脱氧。在合金化过程中,先添加合金元素Si,再添加合金元素Al,再基于实际的Si/Al含量添加金属Sn或Sb;最后在真空条件下,进行净循环,有效去除钢水中的夹杂物。

[0093] (2) 连铸

[0094] 将钢水冶炼工序所得钢水采用连铸设备连续浇铸成厚度为220mm的连铸坯,连铸坯的化学成分亦如前文所述,具体请参表1。

[0095] 连铸结晶器采用专用保护渣,保护渣的化学成分以质量百分比计包括: $SiO_2 28 \sim 36\%$, $MgO \leq 5\%$, $CaO 16 \sim 24\%$, $Fe_2O_3 \leq 5\%$, $Al_2O_3 \leq 5\%$, $Na_2O 13 \sim 15\%$, $CaF_2 8 \sim 14\%$, $Li_2O 1.1 \sim 1.5\%$, $B_2O_3 4.5 \sim 5.5\%$, $T.C \leq 1.5\%$,发热剂1.9~2.1%。发热剂为钙硅合金,其中Ca的质量百分比为40%,Si的质量百分比为60%;保护渣的二元碱度为0.61~0.63,熔点为 $1000 \pm 40^\circ C$,粘度为 $0.2 \pm 0.05 Pa \cdot s$ 。

[0096] 连铸过程中,在二冷区采用电磁搅拌,搅拌电流为400A,搅拌频率为8Hz,连铸拉速为 $1.2 \pm 0.1 m/min$ 。

[0097] (3) 热轧

[0098] 将连铸工序所得连铸坯先送入加热炉中进行加热,连铸坯的入炉温度为 $580^\circ C$,加

热温度 $T_1=1130^{\circ}\text{C}$,加热时间为160~180min;之后送入双机架粗轧机进行6道次粗轧,具体在第一机架进行1道次粗轧后送入第二机架进行5道次粗轧;之后送入七机架精轧机进行7道次精轧,精轧的开轧温度为 940°C ,精轧的终轧温度 $T_2=845^{\circ}\text{C}$,精轧的总压下率为93%;最后卷取得到厚度为2.0mm的热轧卷板,卷取温度 $T_3=575^{\circ}\text{C}$ 。

[0099] (4) 酸洗

[0100] 采用三个阶段进行酸洗,第一阶段的酸洗液采用 $\text{NH}_4\text{HF}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为80g/L, HCl 的浓度为155g/L,酸洗温度 T_4 为 80°C ,酸洗时间 t 为20s;第二阶段的酸洗液采用 $\text{NH}_4\text{HF}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为95g/L, HCl 的浓度为200g/L,酸洗温度 T_4 为 90°C ,酸洗时间 t 为15s;第三阶段的酸洗液采用 $\text{H}_2\text{O}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, H_2O_2 的浓度为30g/L, HCl 的浓度为100g/L,酸洗温度 T_4 为 95°C ,酸洗时间 t 为30s。

[0101] (5) 冷轧

[0102] 采用五机架对酸洗工序后的热轧带钢进行连续式冷轧,得到厚度为0.35mm的冷硬卷,控制每个道次的压下率为25~35%,控制总压下率为82.5%。

[0103] (6) 一次退火

[0104] 将冷轧工序所得冷硬卷送入退火炉中并在纯 N_2 保护气氛下进行高温退火,退火温度 $T_5=950^{\circ}\text{C}$,退火时间为82s,控制高温退火后的钢卷完成充分再结晶,且平均晶粒尺寸为 $83\mu\text{m}$ 。之后对高温退火后的钢卷进行冷却、涂层和精整,得到无取向硅钢。冷却时控制冷却至 $400\sim 550^{\circ}\text{C}$ 前的冷却速度 $\leq 10^{\circ}\text{C/s}$ 。

[0105] 经检测,一次退火工序后的无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50}$ 、磁感 B_{5000} 、屈服强度YS、延伸率参表2所示。

[0106] (7) 卷绕成型

[0107] 将一次退火工序所得的无取向硅钢分条后,对齿槽部进行冲片加工,之后对磁轭部进行卷绕式加工成型,得到高A1无取向硅钢卷绕铁芯,控制卷绕成型过程中铁芯的应变 σ 为2%。

[0108] (8) 二次退火

[0109] 将卷绕成型得到的高A1无取向硅钢卷绕铁芯在纯 N_2 保护气氛下进行二次退火,退火温度 $T_6=840^{\circ}\text{C}$ 。

[0110] 经检测,二次退火工序后的高A1无取向硅钢卷绕铁芯的铁损 $P_{1.5/50}$ 、磁感 B_{5000} 参表2所示。

[0111] 实施例2

[0112] 高A1无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法包括如下工序:

[0113] (1) 钢水冶炼

[0114] 冶炼最终所得钢水的化学成分如前文所述,具体请参表1。

[0115] 具体地,所述钢水冶炼工序包括依序进行的如下步骤:

[0116] a. 铁水KR脱硫

[0117] 将铁水在KR脱硫装置中进行脱硫处理,控制扒渣率为98%,出站时铁水中S含量为0.0009%。

[0118] b. 转炉冶炼

[0119] 将脱硫后的铁水送入转炉中与废钢混合成钢液并进行脱磷脱硅,至钢水中的S含

量为0.0016%,P含量为0.017%,N含量为0.0014%时出钢。其中,废钢全部采用无取向硅钢回收料,废钢重量占转炉总装入量的16%。

[0120] c. RH真空精炼

[0121] 采用RH真空循环脱气设备对转炉冶炼后的钢水进行真空脱碳、脱氧、合金化和去除夹杂物处理。在RH真空精炼过程中,利用转炉出钢中的O元素进行脱碳,再利用合金元素Si脱氧。在合金化过程中,先添加合金元素Si,再添加合金元素Al,再基于实际的Si/Al含量添加金属Sn或Sb;最后在真空条件下,进行净循环,有效去除钢水中的夹杂物。

[0122] (2) 连铸

[0123] 将钢水冶炼工序所得钢水采用连铸设备连续浇铸成厚度为220mm的连铸坯,连铸坯的化学成分亦如前文所述,具体请参表1。

[0124] 连铸结晶器采用专用保护渣,保护渣的化学成分以质量百分比计包括: SiO_2 28~36%, $\text{MgO} \leq 5\%$, CaO 16~24%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 5\%$, Na_2O 13~15%, CaF_2 8~14%, Li_2O 1.1~1.5%, B_2O_3 4.5~5.5%, $\text{T.C} \leq 1.5\%$,发热剂1.9~2.1%。发热剂为钙硅合金,其中Ca的质量百分比为40%,Si的质量百分比为60%;保护渣的二元碱度为0.61~0.63,熔点为 $1000 \pm 40^\circ\text{C}$,粘度为 $0.2 \pm 0.05 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

[0125] 连铸过程中,在二冷区采用电磁搅拌,搅拌电流为400A,搅拌频率为8Hz,连铸拉速为 $1.2 \pm 0.1 \text{m/min}$ 。

[0126] (3) 热轧

[0127] 将连铸工序所得连铸坯先送入加热炉中进行加热,连铸坯的入炉温度为 600°C ,加热温度 $T_1=1121^\circ\text{C}$,加热时间为160~180min;之后送入双机架粗轧机进行6道次粗轧,具体在第一机架进行1道次粗轧后送入第二机架进行5道次粗轧;之后送入七机架精轧机进行7道次精轧,精轧的开轧温度为 950°C ,精轧的终轧温度 $T_2=834^\circ\text{C}$,精轧的总压下率为93%;最后卷取得到厚度为2.0mm的热轧卷板,卷取温度 $T_3=561^\circ\text{C}$ 。

[0128] (4) 酸洗

[0129] 采用三个阶段进行酸洗,第一阶段的酸洗液采用 $\text{NH}_4\text{HF}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为70g/L, HCl 的浓度为170g/L,酸洗温度 T_4 为 88°C ,酸洗时间 t 为20s;第二阶段的酸洗液采用 $\text{NH}_4\text{HF}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为90g/L, HCl 的浓度为220g/L,酸洗温度 T_4 为 92°C ,酸洗时间 t 为15s;第三阶段的酸洗液采用 $\text{H}_2\text{O}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, H_2O_2 的浓度为40g/L, HCl 的浓度为110g/L,酸洗温度 T_4 为 95°C ,酸洗时间 t 为35s。

[0130] (5) 冷轧

[0131] 采用五机架对酸洗工序后的热轧带钢进行连续式冷轧,得到厚度为0.30mm的冷硬卷,控制每个道次的压下率为25~35%,控制总压下率为85%。

[0132] (6) 一次退火

[0133] 将冷轧工序所得冷硬卷送入退火炉中并在纯 N_2 保护气氛下进行高温退火,退火温度 $T_5=966^\circ\text{C}$,退火时间为90s,控制高温退火后的钢卷完成充分再结晶,且平均晶粒尺寸为 $90\mu\text{m}$ 。之后对高温退火后的钢卷进行冷却、涂层和精整,得到无取向硅钢。冷却时控制冷却至 $400\sim 550^\circ\text{C}$ 前的冷却速度 $\leq 10^\circ\text{C/s}$ 。

[0134] 经检测,一次退火工序后的无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50}$ 、磁感 B_{5000} 、屈服强度YS、延伸率参表2所示。

[0135] (7) 卷绕成型

[0136] 将一次退火工序所得的无取向硅钢分条后,对齿槽部进行冲片加工,之后对磁轭部进行卷绕式加工成型,得到高Al无取向硅钢卷绕铁芯,控制卷绕成型过程中铁芯的应变 σ 为5%。

[0137] (8) 二次退火

[0138] 将卷绕成型得到的高Al无取向硅钢卷绕铁芯在纯 N_2 保护气氛下进行二次退火,退火温度 $T_6=900^{\circ}C$ 。

[0139] 经检测,二次退火工序后的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的铁损 $P_{1.5/50}$ 、磁感 B_{5000} 参表2所示。

[0140] 实施例3

[0141] 高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法包括如下工序:

[0142] (1) 钢水冶炼

[0143] 冶炼最终所得钢水的化学成分如前文所述,具体请参表1。

[0144] 具体地,所述钢水冶炼工序包括依序进行的如下步骤:

[0145] a. 铁水KR脱硫

[0146] 将铁水在KR脱硫装置中进行脱硫处理,控制扒渣率为98%,出站时铁水中S含量为0.0008%。

[0147] b. 转炉冶炼

[0148] 将脱硫后的铁水送入转炉中与废钢混合成钢液并进行脱磷脱硅,至钢水中的S含量为0.0018%,P含量为0.02%,N含量为0.0016%时出钢。其中,废钢全部采用无取向硅钢回收料,废钢重量占转炉总装入量的12%。

[0149] c. RH真空精炼

[0150] 采用RH真空循环脱气设备对转炉冶炼后的钢水进行真空脱碳、脱氧、合金化和去除夹杂物处理。在RH真空精炼过程中,利用转炉出钢中的O元素进行脱碳,再利用合金元素Si脱氧。在合金化过程中,先添加合金元素Si,再添加合金元素Al,再基于实际的Si/Al含量添加金属Sn或Sb;最后在真空条件下,进行净循环,有效去除钢水中的夹杂物。

[0151] (2) 连铸

[0152] 将钢水冶炼工序所得钢水采用连铸设备连续浇铸成厚度为220mm的连铸坯,连铸坯的化学成分亦如前文所述,具体请参表1。

[0153] 连铸结晶器采用专用保护渣,保护渣的化学成分以质量百分比计包括: SiO_2 28~36%, $MgO \leq 5\%$, CaO 16~24%, $Fe_2O_3 \leq 5\%$, $Al_2O_3 \leq 5\%$, Na_2O 13~15%, CaF_2 8~14%, Li_2O 1.1~1.5%, B_2O_3 4.5~5.5%, $T.C \leq 1.5\%$,发热剂1.9~2.1%。发热剂为钙硅合金,其中Ca的质量百分比为40%,Si的质量百分比为60%;保护渣的二元碱度为0.61~0.63,熔点为 $1000 \pm 40^{\circ}C$,粘度为 $0.2 \pm 0.05 Pa \cdot s$ 。

[0154] 连铸过程中,在二冷区采用电磁搅拌,搅拌电流为400A,搅拌频率为8Hz,连铸拉速为 $1.2 \pm 0.1 m/min$ 。

[0155] (3) 热轧

[0156] 将连铸工序所得连铸坯先送入加热炉中进行加热,连铸坯的入炉温度为 $500^{\circ}C$,加热温度 $T_1=1110^{\circ}C$,加热时间为160~180min;之后送入双机架粗轧机进行6道次粗轧,具体在

第一机架进行1道次粗轧后送入第二机架进行5道次粗轧;之后送入七机架精轧机进行7道次精轧,精轧的开轧温度为930℃,精轧的终轧温度 $T_2=820^{\circ}\text{C}$,精轧的总压下率为94%;最后卷取得到厚度为1.8mm的热轧卷板,卷取温度 $T_3=547^{\circ}\text{C}$ 。

[0157] (4)酸洗

[0158] 采用三个阶段进行酸洗,第一阶段的酸洗液采用 $\text{NH}_4\text{HF}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为60g/L, HCl 的浓度为190g/L,酸洗温度 T_4 为95℃,酸洗时间 t 为18s;第二阶段的酸洗液采用 $\text{NH}_4\text{HF}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为80g/L, HCl 的浓度为240g/L,酸洗温度 T_4 为90℃,酸洗时间 t 为15s;第三阶段的酸洗液采用 $\text{H}_2\text{O}_2+\text{HCl}$ 混合溶液, H_2O_2 的浓度为50g/L, HCl 的浓度为120g/L,酸洗温度 T_4 为95℃,酸洗时间 t 为38s。

[0159] (5)冷轧

[0160] 采用五机架对酸洗工序后的热轧带钢进行连续式冷轧,得到厚度为0.30mm的冷硬卷,控制每个道次的压下率为25~35%,控制总压下率为83.3%。

[0161] (6)一次退火

[0162] 将冷轧工序所得冷硬卷送入退火炉中并在纯 N_2 保护气氛下进行高温退火,退火温度 $T_5=985^{\circ}\text{C}$,退火时间为100s,控制高温退火后的钢卷完成充分再结晶,且平均晶粒尺寸为70 μm 。之后对高温退火后的钢卷进行冷却、涂层和精整,得到无取向硅钢。冷却时控制冷却至400~550℃前的冷却速度 $\leq 10^{\circ}\text{C/s}$ 。

[0163] 经检测,一次退火工序后的无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50}$ 、磁感 B_{5000} 、屈服强度YS、延伸率参表2所示。

[0164] (7)卷绕成型

[0165] 将一次退火工序所得的无取向硅钢分条后,对齿槽部进行冲片加工,之后对磁轭部进行卷绕式加工成型,得到高A1无取向硅钢卷绕铁芯,控制卷绕成型过程中铁芯的应变 σ 为8%。

[0166] (8)二次退火

[0167] 将卷绕成型得到的高A1无取向硅钢卷绕铁芯在纯 N_2 保护气氛下进行二次退火,退火温度 $T_6=960^{\circ}\text{C}$ 。

[0168] 经检测,二次退火工序后的高A1无取向硅钢卷绕铁芯的铁损 $P_{1.5/50}$ 、磁感 B_{5000} 参表2所示。

[0169] 表2

实施 例	一次退火后的无取向硅钢				卷绕铁芯		
	铁损 $P_{1.5/50}$ /W/Kg	磁感 B_{5000} /T	屈服强 度 YS/MPa	延伸率 /%	铁损 $P_{1.5/50}$ /W/Kg	磁感 B_{5000} /T	
[0170]	1	2.83	1.72	208	30	2.30	1.76
	2	2.65	1.70	233	27	2.18	1.73
	3	2.38	1.68	241	26	2.01	1.70

[0171] 此外,实施例1~3的无取向硅钢的表面质量均合格,无表面发黑等缺陷,在制备卷绕铁芯的过程中均无开裂,应用于轮毂电机时电机的电磁性能也全部合格。

[0172] 应当理解,虽然本说明书按照实施方式加以描述,但并非每个实施方式仅包含一

个独立的技术方案,说明书的这种叙述方式仅仅是为清楚起见,本领域技术人员应当将说明书作为一个整体,各实施方式中的技术方案也可以经适当组合,形成本领域技术人员可以理解的其他实施方式。

[0173] 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。

权利要求

1. 一种高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,其特征在于,包括依序进行的钢水冶炼、连铸、热轧、酸洗、冷轧、一次退火、卷绕成型、二次退火工序;

所述钢水冶炼工序中,冶炼最终所得钢水的化学成分以质量百分比计包括: $C \leq 0.0025\%$, $Si \ 1.0 \sim 1.5\%$, $Al \ 1.0 \sim 2.0\%$, $Mn \ 0.2 \sim 0.4\%$, $Nb \leq 0.002\%$, $V \leq 0.002\%$, $Ti \leq 0.002\%$, $Ni \leq 0.03\%$, $Cr \leq 0.03\%$, $Cu \leq 0.01\%$, $N \leq 0.002\%$, $P \ 0.015 \sim 0.020\%$, $S \leq 0.0015\%$, 以及Sn或Sb, 其余为Fe及不可避免的杂质,其中 $Sn=0.01 \times Si+0.04 \times Al$, $Sb=0.01 \times Si+0.04 \times Al$, 且 $Al/Si=1.0 \sim 1.4$, $C+S+O+N \leq 0.007\%$;

所述热轧工序中,将所述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,加热温度 $T_1=1160-20 \times [Si]-10 \times [Al]$,加热时间为160~180min,精轧的开轧温度为910~960℃,精轧的终轧温度 $T_2=880-20 \times [Si]-15 \times [Al]$,卷取温度 $T_3=600+5 \times [Si]-30 \times [Al]$;

所述酸洗工序中,采用三个阶段进行酸洗,第一阶段的酸洗液采用 NH_4HF_2+HCl 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为60~80g/L, HCl 的浓度为150~200g/L;第二阶段的酸洗液采用 NH_4HF_2+HCl 混合溶液, NH_4HF_2 的浓度为80~100g/L, HCl 的浓度为200~250g/L;第三阶段的酸洗液采用 H_2O_2+HCl 混合溶液, H_2O_2 的浓度为30~50g/L, HCl 的浓度为100~120g/L;三个阶段各自的酸洗时间 t 、酸洗温度 T_4 一一对应且满足:

$$[Si]+1.2 \times [Al] \leq t \cdot B \cdot \exp\left(-\frac{1268}{0.475 \times (T_4+274.15)}\right) \leq 0.3 \times [Si]+0.2 \times [Al]+4,$$

其中, $B=-0.01 \times [NH_4HF_2]^2+2 \times [HCl]-75$, t 的单位为s,温度的单位均为℃; $[Si]$ 表示连铸坯中Si元素的质量百分比, $[Al]$ 表示连铸坯中Al元素的质量百分比; $[NH_4HF_2]$ 表示混合溶液中 NH_4HF_2 的浓度值, $[HCl]$ 表示混合溶液中 HCl 的浓度值。

2. 根据权利要求1所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,其特征在于,所述一次退火工序中,在纯 N_2 保护气氛下将所述冷轧工序所得冷硬卷进行高温退火,退火温度 $T_5=900+30 \times [Si]+20 \times [Al]$,单位为℃,退火时间为80~100s,控制高温退火后的钢卷完成充分再结晶,且平均晶粒尺寸为70~90 μm ;其中, $[Si]$ 表示连铸坯中Si元素的质量百分比, $[Al]$ 表示连铸坯中Al元素的质量百分比。

3. 根据权利要求2所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,其特征在于,所述一次退火工序中,对高温退火后的钢卷进行冷却、涂层和精整,得到无取向硅钢,控制冷却至400~550℃前的冷却速度 $\leq 10^\circ C/s$ 。

4. 根据权利要求3所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,其特征在于,所述一次退火工序得到的无取向硅钢的铁损 $P_{1.5/50} \leq 3.0W/kg$,磁感 $B_{5000} \geq 1.67T$,屈服强度 YS 为200~260MPa,延伸率 $\geq 25\%$ 。

5. 根据权利要求1所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,其特征在于,所述二次退火工序在纯 N_2 保护气氛下进行,且退火温度 $T_6=800+2000 \times \sigma$,单位为℃, σ 为卷绕成型过程中铁芯的应变。

6. 根据权利要求1所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法,其特征在于,所述卷绕成型工序中,将所述一次退火工序所得的无取向硅钢分条后,对齿槽部进行冲片加工,之后对磁轭部进行卷绕式加工成型,得到高Al无取向硅钢卷绕铁芯,控制卷绕成型过程中铁芯

的应变 σ 为2~8%。

7. 根据权利要求1所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法, 其特征在于, 所述热轧工序中, 将所述连铸坯送入加热炉中进行加热, 所述连铸坯的入炉温度为500~600℃, 粗轧采用双机架进行6道次粗轧, 包括在第一机架进行的1道次粗轧和在第二机架进行的5道次粗轧, 精轧采用七机架精轧机进行7道次精轧, 控制精轧的总压下率为93~94%, 所述热轧卷板的厚度为1.8~2.0mm。

8. 根据权利要求1所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法, 其特征在于, 所述冷轧工序中, 采用五机架冷冷轧机对所述酸洗工序后的热轧带钢进行连续式冷轧, 得到厚度为0.3~0.4mm的冷硬卷, 控制每个道次的压下率为25~35%, 控制总压下率为80~90%。

9. 一种高Al无取向硅钢卷绕铁芯, 其特征在于, 采用如权利要求1~8任一项所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯的制备方法制备而成。

10. 根据权利要求9所述的高Al无取向硅钢卷绕铁芯, 其特征在于, 其铁损 $P_{1.5/50} \leq 2.5 \text{ W/kg}$, 磁感 $B_{5000} \geq 1.72 \text{ T}$ 。