



(21) 申请号 202011032175.2

(22) 申请日 2020.09.27

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114277308 A

(43) 申请公布日 2022.04.05

(73) 专利权人 宝山钢铁股份有限公司

地址 201900 上海市宝山区富锦路885号

(72) 发明人 章华兵 李国保 刘宝军 刘德胜

韩丹 杨勇杰 陈建兵 吴美洪

赵自鹏 崔光华

(74) 专利代理机构 上海东信专利商标事务所

(普通合伙) 31228

专利代理师 杨丹莉 李丹

(51) Int. Cl.

C22C 38/02 (2006.01)

C22C 38/04 (2006.01)

C22C 38/06 (2006.01)

C22C 38/12 (2006.01)

C22C 38/14 (2006.01)

C22C 38/20 (2006.01)

C22C 38/44 (2006.01)

C22C 38/60 (2006.01)

C23C 8/26 (2006.01)

C21D 8/12 (2006.01)

C22C 33/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 110318005 A, 2019.10.11

CN 110318005 A, 2019.10.11

CN 107460293 A, 2017.12.12

CN 102758127 A, 2012.10.31

CN 102041440 A, 2011.05.04

CN 109055861 A, 2018.12.21

审查员 畅敏杰

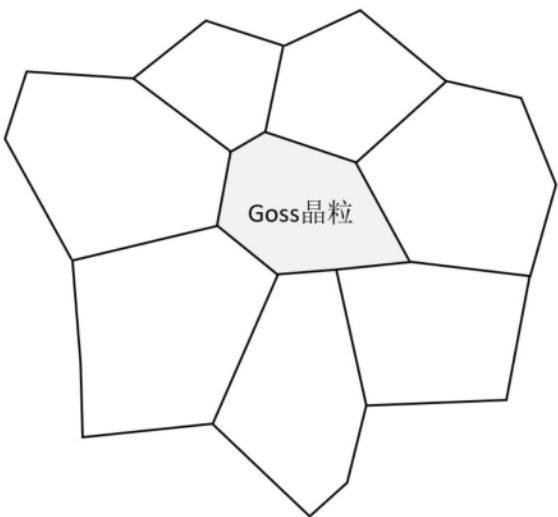
权利要求书2页 说明书21页 附图2页

(54) 发明名称

一种高磁感取向硅钢及其制造方法

(57) 摘要

本发明公开了一种高磁感取向硅钢,其除了Fe及不可避免的杂质元素以外还含有质量百分含量如下的下述各化学元素:Si:2.9~4.5%;C:0.03~0.08%;Als:0.015~0.035%;N:0.002~0.010%;Mn:0.05~0.20%;S:0.001~0.020%;V≤0.0100%;Ti≤0.0100%;其中,高磁感取向硅钢的二次晶粒尺寸为8~20mm。此外,本发明还公开了上述高磁感取向硅钢的渗氮工艺及制造方法,其渗氮工艺包括步骤:在脱碳退火炉内进行第一渗氮过程和第二渗氮过程,其中第一渗氮过程后钢板氮含量为100~180ppm,使第二渗氮过程后钢板氮含量为180~260ppm。其制造方法包括步骤:(1)冶炼和铸造(2)板坯加热(3)热轧(4)热轧板退火(5)冷轧(6)脱碳退火和上述渗氮工艺(7)涂覆MgO涂层(8)高温退火(9)绝缘涂层和平整退火。



1. 一种高磁感取向硅钢, 其特征在于, 其除了Fe及不可避免的杂质元素以外还含有质量百分含量如下的下述各化学元素:

Si: 2.9~4.5%;

C: 0.03~0.08%;

Als: 0.015~0.035%;

N: 0.002~0.010%;

Mn: 0.05~0.20%;

S: 0.001~0.020%;

V ≤ 0.0100%;

Ti ≤ 0.0100%;

其中, 所述高磁感取向硅钢的二次晶粒尺寸为8~20mm;

所述高磁感取向硅钢经由渗氮工艺而制得, 其中在脱碳退火炉内进行第一渗氮过程和第二渗氮过程, 所述渗氮工艺使得钢板的平均初次晶粒尺寸为8~16μm, 初次晶粒尺寸变动系数大于2.0, 其中初次晶粒尺寸变动系数 = 平均初次晶粒尺寸 / 初次晶粒尺寸的标准偏差; 所述第一渗氮过程在初次晶粒充分长大前在所述脱碳退火炉内的脱碳区和/或初次再结晶区进行, 所述第二渗氮过程在初次再结晶区下游的加热段进行。

2. 如权利要求1所述的高磁感取向硅钢, 其特征在于, 其各化学元素质量百分含量为:

Si: 2.9~4.5%;

C: 0.03~0.08%;

Als: 0.015~0.035%;

N: 0.002~0.010%;

Mn: 0.05~0.20%;

S: 0.001~0.020%;

V ≤ 0.0100%;

Ti ≤ 0.0100%;

余量为Fe和其他不可避免的杂质。

3. 如权利要求1所述的高磁感取向硅钢, 其特征在于, 还含有下述化学元素的至少其中之一:

P: 0.01~0.08%, Cr: 0.05~0.40%, Sn: 0.03~0.30%, Cu: 0.01~0.40%, Sb: 0.001~0.100%, Bi: 0.001~0.100%, Nb: 0.001~0.100%, Mo: 0.001~0.100%。

4. 如权利要求1或2所述的高磁感取向硅钢, 其特征在于, 其典型铁损 $P_{17/50} \leq 0.9 + 2.1 \times \text{板厚} - 16 \times \text{Si}$, 典型磁感应强度 $B_8 \geq 2.14 - 6.5 \times \text{Si}$, 其中板厚的单位参量为mm, Si代入Si元素质量百分含量, $P_{17/50}$ 的单位参量为W/kg, B_8 的单位参量为T。

5. 一种用于如权利要求1-4中任意一项所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺, 其特征在于, 包括步骤: 在脱碳退火炉内进行第一渗氮过程和第二渗氮过程, 其中第一渗氮过程后钢板的氮含量为100~180ppm, 使第二渗氮过程后钢板的氮含量为180~260ppm; 所述渗氮工艺使得钢板的平均初次晶粒尺寸为8~16μm, 初次晶粒尺寸变动系数大于2.0, 其中初次晶粒尺寸变动系数 = 平均初次晶粒尺寸 / 初次晶粒尺寸的标准偏差; 其中所述第一渗氮过程在初次晶粒充分长大前在所述脱碳退火炉内的脱碳区和/或初次再结晶区进行, 所述第二

渗氮过程在初次再结晶区下游的加热段进行。

6. 如权利要求5所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺, 其特征在于, 所述第一渗氮过程和/或第二渗氮过程采用注入 NH_3 的方式进行渗氮。

7. 一种高磁感取向硅钢的制造方法, 其特征在于, 其包括步骤:

- (1) 冶炼和铸造;
- (2) 板坯加热;
- (3) 热轧;
- (4) 热轧板退火;
- (5) 冷轧;
- (6) 脱碳退火和权利要求5-6中任意一项所述的渗氮工艺;
- (7) 涂覆 MgO 涂层;
- (8) 高温退火, 其中控制二次再结晶温度为 $1000\sim 1100^\circ\text{C}$;
- (9) 绝缘涂层和平整退火, 以得到成品。

8. 如权利要求7所述的制造方法, 其特征在于, 其工艺参数满足下述各项的至少其中之一:

在步骤(2)中, 板坯加热温度 $\leq 1250^\circ\text{C}$;

在步骤(5)中, 冷轧压下率 $\geq 85\%$;

在步骤(6)中, 脱碳退火温度和第一渗氮过程的温度为 $800\sim 900^\circ\text{C}$, 第二渗氮过程的温度为 $750\sim 900^\circ\text{C}$;

在步骤(6)中, 脱碳退火时间为 $90\sim 200\text{s}$;

在步骤(6)中, 脱碳退火前的冷轧板加热速度为 $30\sim 150^\circ\text{C}/\text{s}$ 。

一种高磁感取向硅钢及其制造方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种钢种及其制造方法,尤其涉及一种取向硅钢及其制造方法。

背景技术

[0002] 取向硅钢是电力和国防工业不可或缺的软磁材料。取向硅钢由具有被称为Goss织构的晶粒组成,其Goss织构用Miller指数表示为 $\{110\}\langle 001\rangle$,晶粒的 $\{110\}$ 晶面平行于轧制平面,晶粒的 $\langle 001\rangle$ 晶向平行于轧制方向,从而在定向磁场下具有最佳的易磁化性能,充分利用磁晶各向异性实现多晶体材料的最佳磁性能。采用取向硅钢制成的变压器铁心,在定向磁场的工况下,其极高的磁感应强度和极低的铁损可显著节省材料和电能。

[0003] 一般来说,通常采用铁损 $P_{17/50}$ 和磁感应强度 B_8 来表征取向硅钢磁性能水平,其中 $P_{17/50}$ 表示在磁感应强度为1.7T、频率为50Hz时,单位kg试样的铁损; B_8 表示对应于磁场强度为800A/m时的磁感应强度。

[0004] 为了提升变压器效率,根本措施是要改善铁心材料的磁性能,这需要铁心的材料具有铁损低、磁感应强度高的性能。其中,铁损既决定于材料本身,也决定于材料在交变磁场中的工作频率和磁感应强度等的影响。磁感应强度则主要受晶粒取向度的影响,材料的磁感应强度可以随晶粒取向度增高而增加。

[0005] 按照磁感应强度 B_8 进行区分,取向硅钢可分为普通取向硅钢($B_8 < 1.88\text{T}$)和高磁感取向硅钢($B_8 \geq 1.88\text{T}$)两大类。其中,传统的高磁感取向硅钢为高温板坯加热工艺,以AlN与MnS为抑制剂,其不足之处在于:为了使抑制剂充分固溶,板坯的加热温度通常需达到1400℃,而这是传统加热炉的极限水平。此外,由于板坯加热温度高,导致能源消耗大,加热炉利用率低、寿命短,板坯烧损大、热卷边裂严重、成材率低,因此,制造成本非常高。

[0006] 鉴于现有技术中存在的缺陷与不足,越来越多的研究人员致力于如何降低取向硅钢板坯加热温度。目前,按照板坯加热温度范围来对改进方法进行区分,其主要改进路径有两种:一种是中温板坯加热工艺,板坯加热温度在1250~1320℃,采用 Cu_2S 作为主要抑制剂;另一种是低温板坯加热工艺,板坯加热温度在1100~1250℃,在后工序采用渗氮方法导入AlN等抑制剂。其中,由于低温板坯加热工艺,可以实现较低成本地生产制造高磁感取向硅钢,因而其应用较多。

[0007] 低温板坯加热工艺根据获取来源将抑制剂细分为:一次抑制剂和二次抑制剂。其中,一次抑制剂来源于板坯中已有的析出物,对初次再结晶有着重要影响从而也会影响最终产品的磁性能;二次抑制剂主要来源于脱碳退火后通过渗氮处理,使氮与钢中原有的铝结合,形成细小弥散的 Si_3N_4 、 $(\text{Mn},\text{Si})\text{N}$ 、 $(\text{Al},\text{Si})\text{N}$ 、 $(\text{Al},\text{Si},\text{Mn})\text{N}$ 、 $(\text{Al},\text{Si})\text{N}$ 、AlN等形态的质点,其中 Si_3N_4 和 $(\text{Mn},\text{Si})\text{N}$ 不稳定,在750~900℃间会转变为 $(\text{Al},\text{Si})\text{N}$ 。在高温退火过程中,二次抑制剂与一次抑制剂共同促进二次再结晶。抑制剂控制贯穿整个取向硅钢制造流程,不但影响轧制过程中的织构组分,还影响初次晶粒尺寸及二次再结晶前的晶粒长大行为,对二次再结晶开始温度影响较大,可以说抑制剂控制是取向硅钢制造技术的核心和主要难点。

[0008] 尽管低温板坯加热工艺具有明显的制造成本与成材率优势,但与高温板坯加热工艺相比,其抑制剂的不稳定因素显著增多。例如,在浇铸过程中形成的粗大析出物,以TiN为核心的MnS+AlN复合析出物在后续退火中难以固溶,抑制剂的抑制效果减弱,导致初次晶粒尺寸的控制难度增大,还可能存在渗氮量分布不均匀等问题,这导致在高温退火过程中通过氮扩散形成的氮化物抑制剂分布不均匀,反映在产品质量上表现为沿板宽和卷长方向的磁性能不均匀。与高温板坯加热工艺相比,低温板坯加热工艺要求抑制剂形成元素如成分Al_s等元素的控制范围达ppm级,并对脱碳退火后的初次晶粒尺寸和渗氮量提出苛刻要求,对制造工艺与技术装备要求高。由于技术难度显著增加,通常低温板坯加热工艺的高磁感取向硅钢典型磁感应强度 B_8 介于1.88~1.92T,低于同类高温板坯工艺产品的磁感应强度,且氧化膜等缺陷发生率也相对较高。

[0009] 在某些低温板坯加热的改进工艺中,如减薄带钢厚度、提高硅含量、刻痕细化磁畴、快速感应加热、板坯夹杂物形态控制等陆续被应用,这使得该工艺产品的等级不断提升,厚度为0.23mm的产品刻痕前铁损 $P_{17/50}$ 可达到0.85W/kg以下,磁感应强度 B_8 可达到1.93T以上,对应的<001>平均偏离角约3~4°,取向度高达95%,但低温板坯加热工艺的一些深层次问题仍没有得到有效解决,主要表现在与高温板坯加热工艺相比,初次晶粒尺寸相对更大且不均匀,导致成品二次晶粒尺寸整体粗大也不均匀,限制了产品等级的进一步提升。

[0010] 例如:公开号为CN102787276,公开日为2014年4月30日,名称为“一种高磁感取向硅钢及其制造方法”的中国专利文献公开了一种低温板坯加热工艺方案。在该技术方案中,板坯中添加了微量元素Sb、Bi、Nb和Mo的至少其中之一,且控制微量元素Sb、Bi、Nb和Mo满足 $Sb+Bi+Nb+Mo:0.0015\sim0.0250\%$, $(Sb/121.8+Bi/209.0+Nb/92.9+Mo/95.9)/(Ti/47.9+V/50.9)$ 为0.1~15,可减少板坯中MnS+AlN复合夹杂物数量,增加细小弥散AlN数量,并配合脱碳退火工艺的调整,使初次晶粒尺寸 $\leq 30\mu m$ 且初次再结晶的再结晶度 $\geq 90\%$,获得的高磁感取向硅钢的磁感应强度 $B_8 > 1.93T$ 。该技术方案中成品的二次晶粒尺寸粗大,异常涡流损耗增加,限制了产品铁损的进一步改进。

[0011] 又例如:公开号为CN1529764A,公开日为2004年9月15日,名称为“高磁场铁损和涂层特性优异的超高磁通密度单取向电工钢板及其制造方法”的中国专利文献公开了一种高温板坯加热工艺方案。在该专利文献的技术方案中,通过使钢板表面和一次涂层界面存在0.01~1000ppm的Bi元素,并通过控制最终冷轧前退火最高温度、最终冷轧钢板退火升温制度、MgO退火分离剂中TiO₂添加量等方法,获得超高磁感应强度取向硅钢,其磁感应强度 $B_8 \geq 1.94T$ 。该技术方案高温板坯加热工艺所述的制造成本高外,还含有制约产业化的难题。

[0012] 再例如:公开号为CN102361993A,公开日为2012年2月22日,名称为“方向性电磁钢板的制造方法、卷绕铁芯用方向性电磁钢板及卷绕铁芯”的中国专利公开了一种高温板坯加热工艺方案。该技术方案中板坯含有5~1000ppm的Te元素,在脱碳退火时或在脱碳退火前将冷轧板升温速度控制在30~100℃/s之间,并在最终高温退火750℃至1150℃之间的升温速度控制在20℃/h以下,获得一种“轧向长度/横向长度”形状比平均值为2以上的高磁感取向硅钢,其磁感应强度 $B_8 \geq 1.94T$ 。该技术方案中Te元素成本高,且也存在难以稳定均匀添加等产业化难题。

发明内容

[0013] 本发明的目的之一在于提供一种高磁感取向硅钢,该高磁感取向硅钢通过合理的化学成分及工艺设计,具有十分优异的磁性能,其二次晶粒尺寸在8~20mm之间,典型铁损 $P_{17/50} \leq 0.9 + 2.1 \times \text{板厚} - 16 \times \text{Si}$,典型磁感应强度 $B_8 \geq 2.14 - 6.5 \times \text{Si}$,具有良好的使用前景和价值。其中板厚的单位参量为mm,Si代入Si元素的质量百分含量, $P_{17/50}$ 的单位参量为W/kg, B_8 的单位参量为T。

[0014] 为了实现上述目的,本发明提出了一种高磁感取向硅钢,其除了Fe及不可避免的杂质元素以外还含有质量百分含量如下的下述各化学元素:

[0015] Si:2.9~4.5%;

[0016] C:0.03~0.08%;

[0017] Als:0.015~0.035%;

[0018] N:0.002~0.010%;

[0019] Mn:0.05~0.20%;

[0020] S:0.001~0.020%;

[0021] V $\leq$ 0.0100%;

[0022] Ti $\leq$ 0.0100%;

[0023] 其中,所述高磁感取向硅钢的二次晶粒尺寸为8~20mm。

[0024] 进一步地,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,其各化学元素质量百分含量为:

[0025] Si:2.9~4.5%;

[0026] C:0.03~0.08%;

[0027] Als:0.015~0.035%;

[0028] N:0.002~0.010%;

[0029] Mn:0.05~0.20%;

[0030] S:0.001~0.020%;

[0031] V $\leq$ 0.0100%;

[0032] Ti $\leq$ 0.0100%;

[0033] 余量为Fe和其他不可避免的杂质。

[0034] 在本发明所述的技术方案中,各化学元素的设计原理具体如下所述:

[0035] Si:在本发明所述的高磁感取向硅钢中,Si是取向硅钢中的基础元素,其可以提高电阻率并降低铁损。需要注意的是,当钢中Si元素的质量百分含量低于2.9%时,会使材料的电阻率下降,不能有效降低取向硅钢的涡流损耗;相应地,钢中Si元素含量也不宜过高,当钢中Si元素的质量百分含量高于4.5%时,由于Si有沿晶界偏聚的倾向,其会导致钢板脆性增加,使可轧性变差,还会使再结晶组织和抑制剂变得不稳定,造成二次再结晶不完善。基于此,在本发明所述的高磁感取向硅钢中将Si元素的质量百分含量控制在2.9~4.5%之间。

[0036] C:在本发明所述的高磁感取向硅钢中,钢中C元素含量需要与钢中Si元素含量相匹配,以确保材料在热轧过程获得适当比例的 γ 相。当钢中C元素的质量百分含量低于0.03%时,在热轧过程中获得的 γ 相比比例低,不利于利用相变轧制形成均一精细的热轧织构;但若钢中C元素的质量百分含量高于0.08%时,则会出现粗大的碳化物质点,这些粗大

的碳化物很难在脱碳工序被去除,因而降低脱碳效率进而增加脱碳成本。基于此,在本发明所述的高磁感取向硅钢中将C元素的质量百分含量控制在0.03~0.08%之间。

[0037] Al_s:在本发明所述的高磁感取向硅钢中,Al_s可以在材料进行后续渗氮处理中形成二次抑制剂,其可以与一次抑制剂共同作用,从而形成足够的钉扎强度促进二次再结晶。但需要注意的是,当钢中Al_s的质量百分含量低于0.015%时,则会导致抑制剂的钉扎强度不够,使一些非有利织构也会发生二次再结晶,劣化材料的磁性能,甚至不能发生二次再结晶;而若钢中Al_s的质量百分含量高于0.035%时,则会使Al_s的氮化物粗化,使抑制剂效果下降。基于此,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,将Al_s的质量百分含量控制在0.015~0.035%之间。

[0038] N:在本发明所述的高磁感取向硅钢中,N元素可以形成AlN等形式的氮化物,其是形成一次抑制剂的重要元素。需要说明的是,N元素能够形成一次抑制剂AlN,使得一次抑制剂的钉扎强度和脱碳退火温度匹配,进而获得细小均匀的初次晶粒尺寸。钢中添加的N元素含量以稳定控制初次晶粒尺寸为主要目的,虽然本案也通过分段渗氮的方式控制初次晶粒尺寸,但发明人通过大量试验研究发现,当钢中N元素的质量百分含量低于0.002%,一次抑制剂量不足,难以形成细小均匀的初次晶粒尺寸;而当钢中N元素的质量百分含量超过0.010%时,则冷轧钢板容易出现气泡类缺陷,并增加炼钢负荷。在本发明所述的高磁感取向硅钢中将N元素的质量百分含量控制在0.002~0.010%之间。

[0039] Mn:在本发明所述的高磁感取向硅钢中,Mn元素与Si元素类似,均可以提高电阻率降低涡流损耗。此外,Mn元素还可以扩大 γ 相区,具有改善热轧塑性和组织的效果,从而有效提高材料的热轧可轧性。但是,需要注意的是,当钢中Mn元素的质量百分含量低于0.05%时,则不能有效地发挥上述作用;而若钢中添加的Mn元素的质量百分含量高于0.20%时,则容易出现 α 和 γ 混合双相组织,从而在退火时造成相变应力并产生 γ 相,造成二次再结晶不稳定。基于此,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,将Mn元素的质量百分含量控制在0.05~0.20%之间。

[0040] S:在本发明所述的高磁感取向硅钢中,S是形成MnS、Cu₂S等析出物的元素。合适的MnS、Cu₂S等析出物有利于抑制初次晶粒尺寸变动。当钢中S元素含量低于0.001%,即使在铸坯被加热至硫化物完全固溶的温度时,所产生的硫化物量仍然很少,不利于获得细小均匀的初次晶粒尺寸,同时也会增加炼钢负荷;而当钢中S元素含量超过0.020%时,生成的硫化物会增多,会导致初次晶粒尺寸不均匀,使成品磁感下降、磁性能波动大。此外,钢中S元素含量过高还会增加高温退火净化S元素的成本。基于此,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,将S元素的质量百分含量控制在0.001~0.020%之间。

[0041] V和Ti:在本发明所述的高磁感取向硅钢中,V元素在材料进行渗氮处理后会形成VN,影响二次再结晶,不利于材料的磁性能。而Ti元素由于其能够优先析出TiN,而MnS会依附TiN析出,随后AlN又会依附MnS析出,从而容易形成粗大的MnS+AlN复合夹杂物,也不利于材料的磁性能。相应地,降低Ti、V的含量,还可以降低成品中TiN以及VN的有害夹杂物。因此,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,需要严格控制Ti和V元素的含量,将Ti元素的质量百分含量限定为 $Ti \leq 0.0100\%$,将V元素的质量百分含量限定为: $V \leq 0.0100\%$ 。

[0042] 进一步地,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,其各化学元素的质量百分含量满足下列各项的至少其中之一:

[0043] P:0.01~0.08%,Cr:0.05~0.40%,Sn:0.03~0.30%,Cu:0.01~0.40%,Sb:0.001~0.100%,Bi:0.001~0.100%,Nb:0.001~0.100%,Mo:0.001~0.100%。

[0044] 在上述技术方案中,P、Cr、Sn、Cu、Sb、Bi、Nb和Mo均可以进一步提高在本发明所述的高磁感取向硅钢的性能。

[0045] P:在一些优选的实施方式中,添加P是因为:P为晶界偏聚元素,其具有辅助抑制剂的作用。P元素在二次再结晶过程中,即使在约1000℃的高温下仍有晶界偏聚的作用,可以延缓AlN过早氧化分解,有利于二次再结晶。但若钢中P元素添加的质量百分含量低于0.01%,则不能有效地发挥上述作用;相应地,P元素还可以明显提高电阻率,起到降低涡流损耗的作用,但若钢中P元素的添加质量百分含量高于0.08%,不但会降低渗氮效率,还会使冷轧可轧性变差。基于上述理由,在一些优选的实施方式中,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,添加P的质量百分含量可以优选地设置为0.01~0.08%。

[0046] Cr:在一些优选的实施方式中,添加Cr元素既可以提高电阻率,又有利于改善材料的力学性能,并通过促进钢板氧化,可明显改善表面质量。为了使Cr元素的作用充分发挥出来,钢中Cr元素的质量百分含量可以高于0.05%,但考虑到当添加Cr高于0.40%,会在脱碳过程中形成致密的氧化物层,进而影响脱碳和渗氮效率,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,在一些优选的实施方式中,添加Cr的质量百分含量可以优选地设置为0.05~0.40%。

[0047] Sn:在一些优选的实施方式中,添加Sn是因为:Sn是晶界偏聚元素,其具有辅助抑制剂的作用,可以弥补因Si含量提高或带钢厚度减薄等情况下,AlN析出物粗化导致的抑制力下降的问题,扩大工艺窗口,有利于成品磁性能稳定。但需要注意的是,钢中Sn元素的质量百分含量添加量低于0.03%时,不能有效获得上述效果;而Sn的质量百分含量添加量高于0.30%时,不但会影响脱碳效率,还会造成表面质量不良,磁性能也不会得到改善,制造成本增加。基于此,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,在一些优选的实施方式中,Sn的质量百分含量可以优选地设置为0.03~0.30%。

[0048] Cu:在一些优选的实施方式中,添加Cu是因为:Cu元素与Mn元素类似,均可以扩大 γ 相区,有助于获得细小AlN析出物。Cu元素除扩大 γ 相区外,其还能够比Mn优先与S元素结合形成 Cu_2S ,从而有利于抑制初次晶粒尺寸变动。考虑到钢中添加Cu元素的质量百分含量低于0.01%,不能发挥其上述作用;但若钢中添加Cu元素的质量百分含量高于0.40%,则会使制造成本增加,磁性能也不会得到改善。基于上述理由,在一些优选的实施方式中,Cu的质量百分含量可以优选地设置为0.01~0.40%。

[0049] Sb和Bi:在一些优选的实施方式中,添加Sb、Bi是因为:Sb和Bi也是晶界偏聚元素,均具有辅助抑制剂的作用,可以改善Goss晶核的晶界迁移条件,有助于扩大工艺窗口,改善成品磁感。考虑到当Sb、Bi的质量百分含量添加量低于0.001%,则不能有效获得上述效果;而Sb、Bi的质量百分含量添加量高于0.100%时,不但会影响脱碳效率,还会造成表面质量不良,磁性能也不会得到明显改善,制造成本增加。基于上述理由,在一些优选的实施方式中,Sb的质量百分含量可以优选地设置为0.001~0.100%,Bi的质量百分含量同样可以优选地设置为0.001~0.100%。

[0050] Nb和Mo:在一些优选的实施方式中,添加Nb和Mo是因为:Nb和Mo均是有效的细化晶粒微合金化元素,可以促进形成细小均匀的初次晶粒尺寸,同时形成的碳氮化物还可以作为辅助抑制剂,降低了对一次抑制剂形态的调整难度。当Nb、Mo的质量百分含量低于

0.001%时,不能有效地发挥上述作用;但若Nb、Mo的质量百分含量超过0.100%时,则对再结晶有强烈的阻止作用,二次再结晶不完善。基于上述理由,在一些优选的实施方式中,Nb的质量百分含量可以优选地设置为0.001~0.100%,Mo的质量百分含量可以优选地设置为0.001~0.100%。

[0051] 进一步地,在本发明所述的高磁感取向硅钢中,其典型铁损 $P_{17/50} \leq 0.9 + 2.1 \times \text{板厚} - 16 \times \text{Si}$,典型磁感应强度 $B_8 \geq 2.14 - 6.5 \times \text{Si}$,其中板厚的单位参量为mm,Si代入Si元素质量百分含量, $P_{17/50}$ 的单位参量为W/kg, B_8 的单位参量为T。

[0052] 相应地,本发明的另一目的在于提供上述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺,该渗氮工艺通过采用第一渗氮过程和第二渗氮过程的分段渗氮方式,既保证二次抑制剂的量,又改善了初次晶粒尺寸均匀性,为减小初次晶粒尺寸创造了条件。

[0053] 为了实现上述目的,本发明提出了上述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺,其包括步骤:在脱碳退火炉内进行第一渗氮过程和第二渗氮过程,其中第一渗氮过程后钢板的氮含量为100~180ppm,使第二渗氮过程后钢板的氮含量为180~260ppm。

[0054] 在本发明所述的技术方案中,需要说明的是,高磁感取向硅钢各工序之间衔接紧密,每一个工序均对组织、织构和抑制剂分布有严格的要求,其中初次再结晶的优劣直接决定了Goss晶核能否发展完善的二次再结晶。

[0055] 为了改善初次再结晶组织和织构,在研究热轧组织控制、冷轧和初次再结晶退火等工艺的基础上,本案发明人还详细研究了渗氮方式对初次晶粒尺寸分布的影响,发现可通过改进渗氮方式提高初次晶粒尺寸均匀性,进而可以进一步减小初次晶粒尺寸,由此可实现在不增加甚至降低成品Goss取向偏离角的情况下,减小二次晶粒尺寸。

[0056] 因此,本发明所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺采用了采用第一渗氮过程和第二渗氮过程的分段渗氮方式。第一渗氮过程的目的是,在初次晶粒尺寸充分长大前,通过在基板中渗入少量氮,形成 $(\text{Al}, \text{Si})\text{N}$ 、 AlN 等形态的质点,以弥补一次抑制剂的不足,改善初次晶粒尺寸均匀性。第二渗氮过程的目的是,如果第一渗氮过程渗氮量过高,对初次再结晶有强烈的阻止作用,反而不利于初次晶粒尺寸均匀性,也不利于表面质量的稳定控制。

[0057] 采用第一渗氮过程和第二渗氮过程的分段渗氮方式,既保证二次抑制剂的量,又改善了初次晶粒尺寸均匀性,为减小初次晶粒尺寸创造了条件。

[0058] 进一步地,在本发明所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺中,所述渗氮工艺使得渗氮后钢板的平均初次晶粒尺寸为8~16 μm ,初次晶粒尺寸变动系数大于2.0,其中初次晶粒尺寸变动系数=平均初次晶粒尺寸/初次晶粒尺寸的标准偏差。

[0059] 进一步地,在本发明所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺中,其中所述第一渗氮过程在所述脱碳退火炉内的脱碳区和/或初次再结晶区进行,所述第二渗氮过程在初次再结晶区下游的加热段进行。

[0060] 进一步地,在本发明所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺中,所述第一渗氮过程和/或第二渗氮过程采用注入 NH_3 的方式进行渗氮。

[0061] 此外,本发明的又一目的在于提供一种高磁感取向硅钢的制造方法,该制造方法生产成本低,且能够在不增加甚至降低成品Goss取向偏离角的情况下,减小二次晶粒尺寸,获得磁性能特别优异的高磁感取向硅钢。

[0062] 为了实现上述目的,本发明提出了上述的高磁感取向硅钢的制造方法,其包括步

骤:

- [0063] (1) 冶炼和铸造;
- [0064] (2) 板坯加热;
- [0065] (3) 热轧;
- [0066] (4) 热轧板退火;
- [0067] (5) 冷轧;
- [0068] (6) 脱碳退火和如权利要求5-8中任意一项所述的渗氮工艺;
- [0069] (7) 涂覆MgO涂层;
- [0070] (8) 高温退火,其中控制二次再结晶温度为1000~1100℃;
- [0071] (9) 绝缘涂层和平整退火,以得到成品。
- [0072] 进一步地,在本发明所述的制造方法中,其工艺参数满足下述各项的至少其中之一:
 - [0073] 在步骤(2)中,板坯加热温度 $\leq 1250^{\circ}\text{C}$;
 - [0074] 在步骤(5)中,冷轧压下率 $\geq 85\%$;
 - [0075] 在步骤(6)中,脱碳退火温度和第一渗氮过程的温度为800~900℃,第二渗氮过程的温度为750~900℃;
 - [0076] 在步骤(6)中,脱碳退火时间为90~200s;
 - [0077] 在步骤(6)中,脱碳退火前的冷轧板加热速度为30-150℃/s。
- [0078] 本发明所述的一种高磁感取向硅钢及其制造方法相较于现有技术具有如下所述的优点以及有益效果:
 - [0079] 本发明所述的高磁感取向硅钢通过合理的化学成分及工艺设计,具有优异的磁性能,其二次晶粒尺寸为8~20mm,典型铁损 $P_{17/50} \leq 0.9 + 2.1 \times \text{板厚} - 16 \times \text{Si}$,典型磁感应强度 $B_8 \geq 2.14 - 6.5 \times \text{Si}$,具有良好的使用前景和价值。其中板厚的单位参量为mm,Si代入Si元素质量百分含量, $P_{17/50}$ 的单位参量为W/kg, B_8 的单位参量为T。
 - [0080] 本发明所述的高磁感取向硅钢通过在初次晶粒充分长大前,在基板中进行第一次渗氮,渗入一定量氮后形成(Al,Si)N、AlN等形态的质点,弥补一次抑制剂的不足,改善初次晶粒尺寸均匀性;在初次晶粒长大到要求的范围后,进行第二次渗氮,保证了二次抑制剂量,由此实现在不增加甚至降低成品Goss取向偏离角的情况下,减小二次晶粒尺寸,进而可以获得磁感和铁损都特别优异的高磁感取向硅钢。
 - [0081] 相应的,采用了本发明上述渗氮工艺的高磁感取向硅钢的制造方法,其不仅生产成本较低,且同样具有以上优点及有益效果。

附图说明

- [0082] 图1示意性地显示了钢原有初次晶粒尺寸分布示意图。
- [0083] 图2示意性地显示了采用了本发明所述渗氮工艺的钢的初次晶粒尺寸分布示意图。
- [0084] 图3为本发明所述的高磁感取向硅钢的制造方法中的一种具有分段渗氮功能的脱碳退火炉示意图。

具体实施方式

[0085] 下面将结合说明书附图以及具体的实施例对本发明所述的高磁感取向硅钢及其制造方法做进一步的解释和说明,然而该解释和说明并不对本发明的技术方案构成不当限定。

[0086] 实施例1-12以及对比例1-8

[0087] 表1列出了实施例1-12的高磁感取向硅钢以及对比例1-8的对比钢的各化学元素的质量百分比。

[0088] 表1. (wt%, 余量为Fe和其他不可避免的杂质)

[0089]

编号	钢号	化学元素															
		Si	C	Als	N	Mn	S	V	Ti	P	Cr	Sn	Cu	Sb	Bi	Nb	Mo
实施例 1	A1	3.75	0.06	0.0154	0.0086	0.052	0.004	0.002	0.006	—	0.06	0.12	0.02	—	—	—	—
实施例 2	A2	3.2	0.031	0.0328	0.003	0.124	0.0197	0.004	0.004	—	—	0.03	0.27	0.1	—	—	—
实施例 3	A3	3.5	0.049	0.0346	0.0083	0.095	0.0012	0.006	0.008	—	0.22	—	—	0.075	0.059	—	—
实施例 4	A4	3.89	0.056	0.0304	0.0059	0.168	0.0104	0.009	0.002	—	—	—	—	0.031	0.002	0.008	—
实施例 5	A5	3.35	0.047	0.0152	0.0078	0.172	0.0089	0.004	0.004	0.01	0.39	—	0.17	—	—	—	0.028
实施例 6	A6	2.91	0.079	0.0341	0.0021	0.089	0.0091	0.009	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—
实施例 7	A7	3.57	0.075	0.0224	0.0093	0.06	0.0149	0.005	0.01	0.07	0.18	—	0.2	—	—	—	0.097
实施例 8	A8	3.51	0.078	0.0244	0.0092	0.104	0.0051	0.006	0.006	0.03	—	0.22	—	0.094	0.08	0.075	0.059
实施例 9	A9	4.15	0.067	0.0308	0.0077	0.112	0.0094	0.003	0.001	—	0.08	—	—	—	0.099	—	0.002
实施例 10	A10	3.42	0.045	0.0256	0.0097	0.198	0.0088	0.005	0.004	0.06	—	0.29	0.14	0.002	0.072	0.093	—
实施例 11	A11	2.99	0.048	0.029	0.008	0.156	0.0156	0.002	0.006	0.03	0.08	0.07	0.15	—	—	0.002	—
实施例 12	A12	3.5	0.062	0.027	0.0094	0.055	0.0121	0.001	0.007	0.05	—	0.2	0.39	—	0.06	—	—
对比例 1	B1	4.19	0.053	0.0359	0.0087	0.127	0.0161	0.009	0.017	0.08	—	0.2	0.009	—	0.081	0.061	0.077
对比例 2	B2	3.35	0.066	0.0202	0.0036	0.045	0.0092	0.002	0.003	0.04	—	0.31	—	0.008	0.043	0.105	—
对比例 3	B3	4.1	0.09	0.0306	0.0048	0.126	0.0079	0.011	0.008	0.07	0.33	—	0.04	0.018	0.102	—	0.0009
对比例 4	B4	3.25	0.08	0.0277	0.0074	0.095	0.0204	0.005	0.002	—	0.41	0.26	—	0.087	0.029	0.031	0.088
对比例 5	B5	3.29	0.051	0.0341	0.0018	0.119	0.0153	0.013	0.004	0.009	0.24	—	0.37	0.0009	—	0.035	—
对比例 6	B6	3.49	0.053	0.0145	0.005	0.135	0.0008	0.003	0.009	0.01	0.36	0.02	0.16	0.103	0.075	0.0007	0.089
对比例 7	B7	3.25	0.077	0.0344	0.0082	0.205	0.0039	0.001	0.001	0.081	0.04	0.25	0.02	—	—	0.003	0.109
对比例 8	B8	3.87	0.0025	0.0176	0.0103	0.132	0.0016	0.002	0.011	0.02	0.17	0.17	0.41	0.068	0.0007	0.052	0.008

[0090] 实施例1-12的高磁感取向硅钢和对比例1-8的对比钢均采用以下步骤制得:

[0091] (1) 按照表1所示的化学成分进行冶炼和铸造:采用转炉或电炉冶炼,连铸成板坯;

[0092] (2) 板坯加热:控制板坯加热温度为1220℃,并控制加热200min。

[0093] (3) 热轧:热轧轧制成2.5mm的热轧板;

[0094] (4) 热轧板退火:控制热轧板退火温度为1150℃,控制退火时间为150s,随后冷却;

[0095] (5) 冷轧:冷轧得到成品厚度为0.29mm,控制冷轧压下率为88.4%;

[0096] (6) 脱碳退火和渗氮工艺:控制脱碳退火温度为830℃,时间为120s;控制脱碳退火前的冷轧板加热速度为90℃/s;实施例1-12和对比例1-8渗氮工艺均采用两阶段渗氮方式,两阶段渗氮方式包括步骤:脱碳退火炉内进行第一渗氮过程和第二渗氮过程,其中使第一渗氮过程后钢板的氮含量为100~180ppm,使第二渗氮过程后钢板的氮含量为180~260ppm。第一渗氮过程的温度可以控制为与脱碳退火温度相同的830℃,第二渗氮过程的温度可以控制为800℃。具体渗氮量参见表2。

[0097] 渗氮工艺可以使渗氮后钢板的平均初次晶粒尺寸为8~16μm,初次晶粒尺寸变动

系数大于2.0。

[0098] (7) 涂覆MgO涂层：在钢板上涂覆MgO涂层；

[0099] (8) 高温退火：在气氛为100% H_2 、对二次再结晶温度进行控制的条件下进行20h的二次再结晶退火；

[0100] (9) 绝缘涂层和平整退火，以得到成品。

[0101] 结合参考图3可知，在本发明中，本发明所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺的第一渗氮过程可以在脱碳退火炉内的脱碳区和/或初次再结晶区进行，第二渗氮过程可以在初次再结晶区下游的加热段进行，第一渗氮过程和/或第二渗氮过程可以采用注入 NH_3 的方式进行渗氮。

[0102] 表2列出了实施例1-12的高磁感取向硅钢和对比例1-8的对比钢采用上述步骤(6)中的渗氮工艺所涉及的第一渗氮过程后钢板的氮含量、第二渗氮过程后钢板的氮含量、平均初次晶粒尺寸、初次晶粒尺寸变动系数、二次再结晶温度、二次晶粒尺寸。

[0103] 需要说明的是，各实施例和对比例的平均初次晶粒尺寸和初次晶粒尺寸的标准偏差是在获得初次晶粒尺寸金相照片后，通过面积法分析获得的。

[0104] 表2.

[0105]

编号	钢号	第一渗氮过程后的氮含量 (ppm)	第二渗氮过程后的氮含量 (ppm)	平均初次晶粒尺寸 (μm)	初次晶粒尺寸变动系数	二次再结晶温度 ($^{\circ}C$)	二次晶粒尺寸 (mm)
实施例 1	A1	136	239	8	2.8	1097	11.7
实施例 2	A2	158	201	14.5	2.7	1001	8.2
实施例 3	A3	155	215	12.1	3.1	1041	16.1
实施例 4	A4	154	233	9.3	2.1	1065	12.4
实施例 5	A5	128	213	15.9	3.5	1054	14.3
实施例 6	A6	140	250	12	2.5	1095	13.1
实施例 7	A7	178	223	14.8	2.2	1035	15.7
实施例 8	A8	128	217	8.8	2.7	1086	14.6
实施例 9	A9	112	189	12.3	3.7	1098	16
实施例 10	A10	100	234	10.7	3	1033	10.8
实施例 11	A11	145	258	15.4	3.8	1017	13.8
实施例 12	A12	172	244	11	3.9	1075	19.9
对比例 1	B1	138	218	8.2	2.6	988	有<2mm 细晶
对比例 2	B2	169	244	7.2	3.4	1111	有<2mm 细晶
对比例 3	B3	118	247	9.9	2.7	1034	12.6
对比例 4	B4	103	255	12.9	3.5	1063	7.9
对比例 5	B5	131	235	23.7	1.8	1031	10.6
对比例 6	B6	120	248	13.8	1.7	1056	23.8
对比例 7	B7	176	205	10.9	2.1	1029	11.4
对比例 8	B8	121	240	21.7	1.9	1079	12.9

[0106] 将得到的成品实施例1-12的高磁感取向硅钢和对比例1-8的对比钢板分别取样，并进行各项性能测试，将所得的测试结果列于表3中。

[0107] 需要说明的是，在本发明中，针对各实施例和对比例钢材的相关性能测试方法如下所述：

[0108] (1) 非刻痕产品钢的 $P_{17/50}$ 和 B_8 :采用标准GB/T 3655中规定的用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法获得 $P_{17/50}$ 和 B_8 。

[0109] (2) 刻痕产品钢的 $P_{17/50}$ 和 B_8 :采用标准GB/T 13789中规定的用单片测试仪测量电工钢片(带)磁性能的方法获得 $P_{17/50}$ 和 B_8 。

[0110] 本发明所述实施例1-12的高磁感取向硅钢和对比例1-8的对比钢板样品采用上述性能测试方法(1)进行各项性能测试。

[0111] 表3列出了实施例1-12的高磁感取向硅钢和对比例1-8的对比钢的性能测试结果。

[0112] 表3.

[0113]

编号	铁损 $P_{17/50}$ (W/kg)	磁感 B_8 (T)
实施例 1	0.907	1.928
实施例 2	0.959	1.959
实施例 3	0.939	1.927
实施例 4	0.886	1.919
实施例 5	0.935	1.938
实施例 6	0.923	1.962
实施例 7	0.931	1.927
实施例 8	0.931	1.935
实施例 9	0.842	1.913
实施例 10	0.948	1.938
实施例 11	0.965	1.957
实施例 12	0.901	1.933
对比例 1	0.992	1.871
对比例 2	1.063	1.832
对比例 3	0.998	1.883
对比例 4	0.979	1.898
对比例 5	0.972	1.911
对比例 6	0.976	1.906
对比例 7	1.074	1.902
对比例 8	0.979	1.892

[0114] 由表1、表2和表3可以看出,实施例1-12的高磁感取向硅钢的化学成分设计和相关渗氮工艺均符合本发明设计规范要求;而对比例1-8对比钢在第一渗氮过程和第二渗氮过程后的氮含量虽然满足本发明渗氮工艺的要求,但对比例1-8在化学成分设计中均存在未能满足本发明设计要求的参数。

[0115] 如表3所示的,本发明实施例1-12的高磁感取向硅钢的板坯成分、平均初次晶粒尺寸、初次晶粒尺寸变动系数、二次再结晶温度和二次晶粒尺寸均满足本发明所述高磁感取向硅钢的化学成分设计和渗氮工艺的优选方案,因此其铁损 $P_{17/50}$ 均低于基于公式 $0.9+2.1 \times \text{板厚}-16 \times \text{Si}$ 计算获得的基准铁损,并且磁感均高于基于公式 $2.14-6.5 \times \text{Si}$ 计算获得的基准磁感。与之相反,对比例1-8的铁损和/或磁感则不好于上述计算获得的基准值。

[0116] 实施例13-22以及对比例9-17

[0117] 表4列出了实施例13-22的高磁感取向硅钢以及对比例9-17的对比钢的各化学元素的质量百分比。

[0118] 表4. (wt%, 余量为Fe和其他不可避免的杂质)

[0119]

编号	钢号	化学元素															
		Si	C	Als	N	Mn	S	V	Ti	P	Cr	Sn	Cu	Sb	Bi	Nb	Mo
实施例 13-17、 对比例 9-10、 对比例 12-14	A1	3.75	0.06	0.0154	0.0086	0.052	0.004	0.002	0.006	—	0.06	0.12	0.02	—	—	—	—
实施例 18-22、 对比例 11、对 比例 15-17	A2	3.2	0.031	0.0328	0.003	0.124	0.0197	0.004	0.004	—	—	0.03	0.27	0.1	—	—	—

[0120] 由表4可以看出, 本案实施例13-17、对比例9-10和对比例12-14的钢均选用A1钢种; 相应地, 本案实施例18-22、对比例11和对比例15-17的钢均选用A2钢种。结合参考表1可知, 实施例13-22的高磁感取向硅钢和对比例9-17的对比钢的化学成分设计均满足本发明设计规范控制要求。

[0121] 实施例13-22的高磁感取向硅钢和对比例9-17的对比钢均采用以下步骤制得:

[0122] (1) 按照表4所示的化学成分进行冶炼和铸造: 采用转炉或电炉冶炼, 连铸成板坯;

[0123] (2) 板坯加热: 控制板坯加热温度 $\leq 1150^{\circ}\text{C}$, 并控制加热180min;

[0124] (3) 热轧: 热轧轧制成2.7mm的热轧板;

[0125] (4) 热轧板退火: 控制热轧板退火温度为 1180°C , 控制退火时间为150s, 随后冷却;

[0126] (5) 冷轧: 冷轧得到成品厚度为0.25mm, 控制冷轧压下率为90.7%;

[0127] (6) 脱碳退火和渗氮处理: 控制脱碳退火温度为 840°C , 脱碳时间为135s, 控制脱碳退火前冷轧板加热速度在 $70^{\circ}\text{C}/\text{s}$; 实施例13-22和对比例12-17采用两阶段式渗氮, 而对比例9-11则采用一阶段式渗氮。两阶段渗氮方式包括在脱碳退火炉内进行第一渗氮过程和第二渗氮过程, 其中使第一渗氮过程后钢板的氮含量为100~180ppm, 使第二渗氮过程后钢板的氮含量为180~260ppm。第一渗氮过程的温度可以控制为与脱碳退火温度相同的 840°C , 第二渗氮过程的温度可以控制为 780°C 。具体渗氮量如表5所示。

[0128] 渗氮工艺可以使渗氮后钢板的平均初次晶粒尺寸为8~16 μm , 初次晶粒尺寸变动系数大于2.0。

[0129] (7) 涂覆MgO涂层: 在钢板上涂覆MgO涂层;

[0130] (8) 高温退火: 在气氛为100% H_2 、控制二次再结晶温度的条件下进行23h的二次再结晶退火;

[0131] (9) 绝缘涂层和平整退火, 以得到成品。

[0132] 需要说明的是, 实施例13-22的高磁感取向硅钢的化学成分设计和相关渗氮工艺均符合本发明设计规范要求; 而对比例9-17的对比钢的化学成分设计虽然满足本发明设计规范要求, 但其在渗氮工艺中均存在未能满足本发明设计要求的部分。其中对比例9-11并未采用两阶段式渗氮方法, 而是采用一阶段式渗氮方法; 对比例12-17虽然采用了两阶段式渗氮方法, 但是其在第一渗氮过程和第二渗氮过程后的氮含量存在不满足本发明设计要求的参数。

[0133] 表5列出了实施例13-22的高磁感取向硅钢和对比例9-17的对比钢所涉及的第一阶段渗氮后的氮含量、第二阶段渗氮后的氮含量、初次晶粒尺寸、初次晶粒尺寸变动系数、二次再结晶温度和二次晶粒尺寸。

[0134] 表5.

[0135]

编号	钢号	第一渗氮过程 后的氮含量 (ppm)	第二渗氮过程 后的氮含量 (ppm)	平均初次晶粒 尺寸 (μm)	初次晶粒尺寸 变动系数	二次再结晶温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	二次晶粒尺寸 (mm)
实施例 13	A1	150	184	10.6	3.7	1050	19.7
实施例 14	A1	121	238	13.1	3.9	1048	18.3
实施例 15	A1	133	246	9.2	2.1	1014	11.1
实施例 16	A1	179	258	8.1	3.4	1081	9.2
实施例 17	A1	116	228	14.5	2.8	1030	8.1
实施例 18	A2	137	209	19.2	2.4	1097	14.6
实施例 19	A2	103	191	10.3	2.8	1026	10.5
实施例 20	A2	161	220	12.6	2.3	1044	13.4
实施例 21	A2	145	217	13.9	3.2	1003	15.2
实施例 22	A2	140	232	11.8	4.1	1067	16.9
对比例 9	A1	174		18.5	2.3	987	15.6

[0136]

对比例 10	A1	265		8.1	1.7	1113	有<2mm 细晶
对比例 11	A2	234		18.6	1.9	1040	25.9
对比例 12	A1	189	227	8.8	3.3	992	7.5
对比例 13	A1	154	276	14.2	3.6	1108	有<2mm 细晶
对比例 14	A1	84	230	19.2	2.4	1066	23.5
对比例 15	A2	184	268	7.8	1.9	1041	有<2mm 细晶
对比例 16	A2	97	250	18.7	1.8	1052	13.3
对比例 17	A2	96	177	17.1	2.1	1005	18.9

[0137] 对实施例13-22的高磁感取向硅钢和对比例9-17的对比钢取样并进行相关性能测试,相关性能测试结果列于表6中。

[0138] 需要说明的是,实施例13-22的高磁感取向硅钢和对比例9-17的对比钢采样并进行性能测试的检测方法和手段与上述实施例1-12和对比例1-8钢的铁损及磁感的检测手段相同,均采用性能测试方法(1)进行测试,此处不再赘述。

[0139] 表6列出了实施例13-22的高磁感取向硅钢和对比例9-17的对比钢的性能测试结果。

[0140] 表6.

[0141]

编号	铁损 $P_{17/50}$ (W/kg)	磁感 B_8 (T)
实施例 13	0.806	1.919
实施例 14	0.821	1.936
实施例 15	0.823	1.929
实施例 16	0.793	1.938
实施例 17	0.819	1.923
实施例 18	0.862	1.958
实施例 19	0.835	1.946
实施例 20	0.867	1.952
实施例 21	0.88	1.947
实施例 22	0.903	1.959
对比例 9	0.869	1.915
对比例 10	0.997	1.731
对比例 11	0.911	1.935
对比例 12	0.889	1.902
对比例 13	0.878	1.871
对比例 14	0.894	1.924
对比例 15	0.926	1.856
对比例 16	0.934	1.916
对比例 17	0.917	1.921

[0142] 结合表5和表6可以看出,本发明所述实施例13-22采用两阶段渗氮的方法进行渗氮处理,且渗氮量均控制在本发明要求的范围内,可以更好地获得合适的平均初次晶粒尺寸、初次晶粒尺寸变动系数、二次再结晶温度和二次晶粒尺寸,因此其铁损 $P_{17/50}$ 均低于基于公式 $0.9+2.1\times\text{板厚}-16\times\text{Si}$ 计算获得的基准铁损,并且磁感均高于基于公式 $2.14-6.5\times\text{Si}$ 计算获得的基准磁感。与之相反,对比例9-17的铁损和/或磁感则不好于上述计算获得的基准值。

[0143] 实施例23-33以及对比例18-26

[0144] 表7列出了实施例23-33的高磁感取向硅钢以及对比例18-26的对比钢的各化学元素的质量百分比。

[0145] 表7. (wt%, 余量为Fe和其他不可避免的杂质)

[0146]

编号	钢号	化学元素															
		Si	C	Als	N	Mn	S	V	Ti	P	Cr	Sn	Cu	Sb	Bi	Nb	Mo
实施例 23-27、 对比例 18-21	A5	3.35	0.047	0.0152	0.0078	0.172	0.0089	0.004	0.004	0.01	0.39	—	0.17	—	—	—	0.028
实施例 28-33、 对比例 22-26	A6	2.91	0.079	0.0341	0.0021	0.089	0.0091	0.009	0.004	—	—	—	—	—	—	—	—

[0147] 由表7可以看出,本案实施例23-27和对比例18-21的钢均选用A5钢种,本案实施例28-33和对比例22-26的钢均选用A2钢种。由此可见,本发明所述的实施例23-33的高磁感取向硅钢和对比例18-26的对比钢的化学成分设计均满足本发明设计规范控制要求。

- [0148] 实施例23-33的高磁感取向硅钢和对比例18-26的对比钢均采用以下步骤制得：
- [0149] (1) 按照表7所示的化学成分进行冶炼和铸造：采用转炉或电炉冶炼，连铸成板坯；
- [0150] (2) 板坯加热：控制板坯加热温度 $\leq 1180^{\circ}\text{C}$ ，并控制加热190min；
- [0151] (3) 热轧：热轧轧制成2.6mm的热轧板；
- [0152] (4) 热轧板退火：控制热轧板退火温度为 1090°C ，控制退火时间为200s，随后冷却；
- [0153] (5) 冷轧：冷轧得到成品厚度为0.27mm，控制冷轧压下率为89.6%；
- [0154] (6) 脱碳退火和渗氮处理：按照表8所示的脱碳温度、脱碳时间、脱碳退火前冷轧板加热速度进行；实施例23-33和对比例18-26渗氮处理均采用两阶段式渗氮方式，其中第一渗氮过程的温度可以控制为与脱碳温度相同的温度，第二渗氮过程的温度可以控制为 830°C ，第一渗氮过程后的氮含量与第二渗氮过程后的氮含量可以控制为如表8所示；
- [0155] (7) 涂覆MgO涂层：在钢板上涂覆MgO涂层；
- [0156] (8) 高温退火：在气氛为100% H_2 、对二次再结晶温度进行控制的条件下进行20h的二次再结晶退火；
- [0157] (9) 绝缘涂层和平整退火，以得到成品。

[0158] 需要说明的是，本发明所述的实施例23-33的高磁感取向硅钢的化学成分设计和渗氮等相关工艺均符合本发明设计要求，而对比例18-26的对比钢的化学成分和渗氮工艺均符合本发明设计要求，但其冷轧板加热速度、脱碳温度或脱碳时间的一个或多个不符合本发明优选的设计方案，因此对比例18-26属于本技术方案中非优选的实施例。

[0159] 表8列出了实施例23-33的高磁感取向硅钢和对比例18-26的对比钢所涉及的脱碳退火工艺参数以及第一渗氮过程后的氮含量、第二渗氮过程后的氮含量、平均初次晶粒尺寸、初次晶粒尺寸变动系数、二次再结晶温度和二次晶粒尺寸。

[0160] 表8.

[0161]

编号	冷轧板加热速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)	脱碳温度 ($^{\circ}\text{C}$)	脱碳时间 (s)	第一渗氮过程后的氮含量 (ppm)	第二渗氮过程后的氮含量 (ppm)	平均初次晶粒尺寸 (μm)	初次晶粒尺寸变动系数	二次再结晶温度 ($^{\circ}\text{C}$)	二次晶粒尺寸 (mm)
实施例 23	97	800	200	137	234	15.6	3.6	1076	17.3
实施例 24	83	810	190	120	241	13.1	2.4	1099	15.9
实施例 25	54	820	180	121	215	8.1	2.6	1049	16.7
实施例 26	119	830	150	150	239	9.5	2.1	1083	10.6
实施例 27	62	840	165	122	222	15.7	3.3	1091	11.7
实施例 28	43	850	120	123	243	12.1	3.5	1016	8.4
实施例 29	146	860	130	127	230	14.6	2.8	1066	13.9
实施例 30	105	870	140	139	246	11	4.1	1021	19.8
实施例 31	78	880	100	129	215	12.8	2.9	1003	9.4
实施例 32	132	890	110	131	233	10.9	3	1038	18
实施例 33	32	900	90	146	248	12.3	3.8	1054	12.8
对比例 18	128	790	80	132	246	6.5	3	1048	23.6

[0162]

对比例 19	94	<u>785</u>	150	141	236	<u>7.2</u>	2.8	1009	16.1
对比例 20	63	<u>780</u>	<u>215</u>	142	248	8	<u>1.9</u>	1045	16.6
对比例 21	143	<u>920</u>	<u>75</u>	133	238	17.2	2.2	<u>1123</u>	11.5
对比例 22	38	<u>915</u>	140	150	210	<u>18.9</u>	3.7	1062	<u>7.5</u>
对比例 23	69	<u>910</u>	<u>215</u>	133	243	<u>19.2</u>	<u>1.8</u>	1002	<u>26.5</u>
对比例 24	56	860	<u>80</u>	134	250	7.8	2.2	<u>987</u>	18.4
对比例 25	141	860	<u>210</u>	136	245	8.6	<u>1.2</u>	<u>984</u>	19.9
对比例 26	<u>27</u>	840	140	138	240	16.8	<u>1.6</u>	1074	8.2

[0163] 对实施例23-33的高磁感取向硅钢和对比例18-26的对比钢取样并进行相关性能测试,相关性能测试结果列于表9中。

[0164] 需要说明的是,实施例23-33的高磁感取向硅钢和对比例18-26的对比钢进行性能测试的检测方法和手段与上述实施例1-12和对比例1-8钢的铁损及磁感的检测手段相同,均采用性能测试方法(1)进行测试,此处不再赘述。

[0165] 表9列出了实施例23-33的高磁感取向硅钢和对比例18-26的对比钢的性能测试结果。

[0166] 表9.

[0167]

编号	成品 $P_{17/50}$ (W/kg)	成品 B_8 (T)
实施例 23	0.928	1.941
实施例 24	0.918	1.943
实施例 25	0.909	1.937
实施例 26	0.894	1.944
实施例 27	0.93	1.94
实施例 28	0.971	1.965
实施例 29	0.969	1.962
实施例 30	0.923	1.962
实施例 31	0.961	1.966
实施例 32	0.979	1.964
实施例 33	0.959	1.962
对比例 18	0.925	1.928
对比例 19	0.925	1.913
对比例 20	0.962	1.906
对比例 21	0.953	1.895
对比例 22	1.024	1.929
对比例 23	1.011	1.903
对比例 24	0.991	1.921
对比例 25	1.033	1.871

[0168]

对比例 26	0.987	1.901
--------	-------	-------

[0169] 由表8和表9可以看出,相较于对比例18-26,实施例23-33采用合适的脱碳温度、脱碳时间、脱碳退火前冷轧板加热速度,均满足本发明所述高磁感取向硅钢制造方法的优选

技术方案要求,可以更好地获得合适的平均初次晶粒尺寸、初次晶粒尺寸变动系数、二次再结晶温度和二次晶粒尺寸,进而获得更优异的磁性能。虽然对比例18-26以及实施例23-33的铁损 $P_{17/50}$ 均低于基于公式 $0.9+2.1 \times \text{板厚}-16 \times \text{Si}$ 计算获得的基准铁损,并且磁感均高于基于公式 $2.14-6.5 \times \text{Si}$ 计算获得的基准磁感,但是在满足该基准值的基础上,实施例22-23的综合磁性能要更优。

[0170] 实施例34-43以及对比例27-32

[0171] 表10列出了实施例34-43的高磁感取向硅钢以及对比例27-32的对比钢的各化学元素的质量百分比。

[0172] 表10. (wt%, 余量为Fe和其他不可避免的杂质)

编号	钢号	化学元素															
		Si	C	Als	N	Mn	S	V	Ti	P	Cr	Sn	Cu	Sb	Bi	Nb	Mo
[0173] 实施例 34-38、 对比例 27-29	A7	3.57	0.075	0.0224	0.0093	0.06	0.0149	0.005	0.01	0.07	0.18	—	0.2	—	—	—	0.097
实施例 39-43、 对比例 30-32	A8	3.51	0.078	0.0244	0.0092	0.104	0.0051	0.006	0.006	0.03	—	0.22	—	0.094	0.08	0.075	0.059

[0174] 由表10可以看出,本案实施例34-38和对比例27-29的钢均选用A7钢种,本案实施例39-43和对比例30-32的钢均选用A8钢种。由此可见,本发明所述的实施例34-43的高磁感取向硅钢以及对比例27-32的对比钢的化学成分设计均满足本发明设计规范控制要求。

[0175] 实施例34-43的高磁感取向硅钢以及对比例27-32的对比钢均采用以下步骤制得:

[0176] (1) 按照表10所示的化学成分进行冶炼和铸造:采用转炉或电炉冶炼,连铸成板坯;

[0177] (2) 板坯加热:控制板坯加热温度 $\leq 1200^{\circ}\text{C}$,并控制加热150min;

[0178] (3) 热轧:热轧轧制成2.5mm的热轧板;

[0179] (4) 热轧板退火:控制热轧板退火温度为 1120°C ,控制退火时间为170s,随后冷却;

[0180] (5) 冷轧:冷轧得到成品厚度为0.23mm,控制冷轧压下率为90.8%;

[0181] (6) 脱碳退火和渗氮处理:控制脱碳退火温度为 850°C ,脱碳时间为120s,脱碳退火前冷轧板加热速度控制在 $130^{\circ}\text{C}/\text{s}$;实施例34-43和对比例27-32渗氮处理均采用两阶段式渗氮方式,两阶段渗氮方式包括步骤:脱碳退火炉内进行第一渗氮过程和第二渗氮过程,其中,使第一渗氮过程后钢板的氮含量为110~140ppm,使第二渗氮过程后钢板的氮含量为200~250ppm,第一渗氮过程的温度可以控制为与脱碳退火温度相同的 850°C ,第二渗氮过程的温度可以控制为 800°C ,渗氮工艺可以使渗氮后钢板的平均初次晶粒尺寸为 $8\sim 16\mu\text{m}$,初次晶粒尺寸变动系数大于2.0;

[0182] (7) 涂覆MgO涂层:在钢板上涂覆MgO涂层;

[0183] (8) 高温退火:在气氛为100% H_2 、对二次再结晶温度进行控制的条件下进行20h的二次再结晶退火;

[0184] (9) 绝缘涂层和平整退火,以得到成品。

[0185] 需要说明的是,本发明所述的实施例34-43的高磁感取向硅钢的化学成分设计和渗氮等相关工艺均符合本发明设计要求,而对比例27-32的对比钢虽然化学成分、渗氮工艺、平均初次晶粒尺寸、初次晶粒尺寸变动系数等工艺符合本发明设计要求,但二次再结晶

温度不符合本发明设计要求的参数。

[0186] 表11列出了实施例34-43高磁感取向硅钢以及对比例27-32的对比钢所涉及的第一渗氮过程后的氮含量、第二渗氮过程后的氮含量、平均初次晶粒尺寸、初次晶粒尺寸变动系数、二次再结晶温度和二次晶粒尺寸。

[0187] 表11.

[0188]

序号	第一渗氮过程后的氮含量 (ppm)	第二渗氮过程后的氮含量 (ppm)	平均初次晶粒尺寸 (μm)	初次晶粒尺寸变动系数	二次再结晶温度 ($^{\circ}\text{C}$)	二次晶粒尺寸 (mm)
实施例 34	123	235	15.9	3.2	1061	8.2
实施例 35	138	232	15.2	2.2	1099	11.9
实施例 36	115	228	9.8	3.7	1028	17.8
实施例 37	132	217	10.4	2.8	1039	16.1
实施例 38	118	250	14.1	3.5	1019	14.6
实施例 39	110	205	12.8	2.6	1060	10.6
实施例 40	126	213	12.9	3.4	1003	13.3

[0189]

实施例 41	128	209	8.1	3.5	1054	15.4
实施例 42	119	200	13.4	2.6	1040	17.9
实施例 43	140	236	12.1	2.4	1079	9.6
对比例 27	137	231	16	3.9	969	12.8
对比例 28	126	224	13.9	4.2	1183	16.9
对比例 29	129	216	14.7	2.5	1175	7.6
对比例 30	125	216	15.1	3.7	951	21.3
对比例 31	117	237	10.2	2.2	1159	13.1
对比例 32	131	219	15.3	2.5	997	8.4

[0190] 对实施例34-43的高磁感取向硅钢和对比例27-32的对比钢取样并进行相关性能测试,相关性能测试结果列于表9中。

[0191] 需要说明的是,实施例34-43的高磁感取向硅钢和对比例27-32的对比钢采样并进行性能测试的检测方法和手段与上述实施例1-12和对比例1-8钢的铁损及磁感的检测手段相同,均采用性能测试方法(1)进行测试,此处不再赘述。

[0192] 表12列出了实施例34-43的高磁感取向硅钢和对比例27-32的对比钢的性能测试结果。

[0193] 表12.

[0194]

编号	铁损 $P_{17/50}$ (W/kg)	磁感 B_8 (T)
实施例 34	0.81	1.921
实施例 35	0.803	1.925
实施例 36	0.795	1.938
实施例 37	0.789	1.922
实施例 38	0.807	1.928
实施例 39	0.802	1.925
实施例 40	0.786	1.926
实施例 41	0.782	1.933
实施例 42	0.8	1.934
实施例 43	0.797	1.929
对比例 27	0.869	1.903
对比例 28	0.858	1.909
对比例 29	0.907	1.917
对比例 30	0.904	1.901
对比例 31	0.854	1.918
对比例 32	0.848	1.908

[0195] 由表10、表11和表12,可以看出,实施例34-43的二次再结晶温度满足本发明所述高磁感取向硅钢制造方法的要求,可以更好地获得合适的二次晶粒尺寸和更优异的磁性能,因此其铁损 $P_{17/50}$ 均低于基于公式 $0.9+2.1 \times \text{板厚}-16 \times \text{Si}$ 计算获得的基准铁损,并且磁感均高于基于公式 $2.14-6.5 \times \text{Si}$ 计算获得的基准磁感。与之相反,对比例27-32的铁损和/或磁感则不好于上述计算获得的基准值。

[0196] 实施例44-48以及对比例33-43

[0197] 表13列出了实施例44-48的高磁感取向硅钢以及对比例33-43的对比钢的各化学元素的质量百分比。

[0198] 表13. (wt%, 余量为Fe和其他不可避免的杂质)

[0199]

编号	钢号	化学元素															
		Si	C	Als	N	Mn	S	V	Ti	P	Cr	Sn	Cu	Sb	Bi	Nb	Mo
实施例 44-48	A10	3.42	0.045	0.0256	0.0097	0.198	0.0088	0.005	0.004	0.06	—	0.29	0.14	0.002	0.072	0.093	—
对比例 33-37	A10	3.42	0.045	0.0256	0.0097	0.198	0.0088	0.005	0.004	0.06	—	0.29	0.14	0.002	0.072	0.093	—
对比例 38-40	B5	3.29	0.051	0.0341	<u>0.0018</u>	0.119	0.0153	<u>0.013</u>	0.004	<u>0.009</u>	0.24	—	0.37	<u>0.0009</u>	—	0.035	—
对比例 41-43	B6	3.49	0.053	<u>0.0145</u>	0.005	0.135	<u>0.0008</u>	0.003	0.009	0.01	0.36	<u>0.02</u>	0.16	<u>0.103</u>	0.075	<u>0.0007</u>	0.089

[0200] 由表13可以看出,本案实施例44-48和对比例33-37的钢均选用A10钢种,本案对比例38-40的钢均选用B5钢中,对比例41-43的钢均选用B6钢种。由此可见,本发明所述的实施例44-48的高磁感取向硅钢以及对比例33-37的对比钢的化学成分设计均满足本发明设计规范控制要求。相应地,对比例38-40和对比例41-43的钢在化学成分设计中均存在未满足

本发明设计要求的参数。

[0201] 实施例44-48的高磁感取向硅钢以及对比例33-43的对比钢均采用以下步骤制得：

[0202] (1) 按照表13所示的化学成分进行冶炼和铸造：采用转炉或电炉冶炼，连铸成板坯；

[0203] (2) 板坯加热：控制板坯加热温度 $\leq 1120^{\circ}\text{C}$ ，并控制加热200min；

[0204] (3) 热轧：热轧轧制成2.4mm的热轧板；

[0205] (4) 热轧板退火：控制热轧板退火温度为 1100°C ，控制退火时间为180s，随后冷却；

[0206] (5) 冷轧：冷轧得到成品厚度为0.23mm，控制冷轧压下率为90.4%；

[0207] (6) 脱碳退火和渗氮处理：控制脱碳退火温度为 830°C ，脱碳时间为160s，脱碳退火前冷轧板加热速度控制在 110°C/s ；实施例44-48和对比例38-40均采用两阶段式渗氮进行渗氮处理，两阶段渗氮方式包括步骤：脱碳退火炉内进行第一渗氮过程和第二渗氮过程，其中使第一渗氮过程后钢板的氮含量为100~180ppm，使第二渗氮过程后钢板的氮含量为180~260ppm。第一渗氮过程的温度可以控制为与脱碳退火温度相同的 830°C ，第二渗氮过程的温度可以控制为 830°C ，对比例33-37和对比例41-43均仅采用一阶段式渗氮进行渗氮处理。

[0208] (7) 涂覆MgO涂层：在钢板上涂覆MgO涂层；

[0209] (8) 高温退火：在气氛为100% H_2 、二次再结晶温度为 1200°C 的条件下进行18h的二次再结晶退火；

[0210] (9) 绝缘涂层和平整退火，以得到成品。

[0211] 需要说明的是，得到本案所述实施例44-48的高磁感取向硅钢以及对比例33-43的对比钢后，可以分别取样并检测上述各实施例和对比例的铁损 $P_{17/50}$ 和磁感 B_8 ，测试方法采用性能测试方法(1)。测试完成后，可以采用激光刻痕细化磁畴，而后采用性能测试方法(2)再次测试各实施例和对比例刻痕后的铁损 $P_{17/50}$ ，以获得铁损改善率。

[0212] 表14列出了实施例44-48的高磁感取向硅钢以及对比例33-43的对比钢所涉及的渗氮方式、第一渗氮过程后的氮含量、第二渗氮过程后的氮含量、刻痕前铁损和磁感、刻痕后铁损以及铁损改善率。

[0213] 表14.

[0214]

序号	渗氮方式	第一渗氮过程 后的氮含量 (ppm)	第二渗氮过程 后的氮含量 (ppm)	刻痕前 $P_{17/50}$ (W/kg)	刻痕前 B_8 (T)	刻痕后 $P_{17/50}$ (W/kg)	铁损改善率 (%)
实施例 44	两阶段式	145	210	0.794	1.932	0.673	15.2%
实施例 45	两阶段式	100	223	0.817	1.938	0.683	16.4%
实施例 46	两阶段式	123	217	0.806	1.939	0.693	14.0%
实施例 47	两阶段式	180	258	0.82	1.942	0.704	14.1%
实施例 48	两阶段式	156	222	0.807	1.947	0.689	14.6%
对比例 33	一阶段式	202		0.843	1.922	0.754	10.6%
对比例 34	一阶段式	250		0.866	1.917	0.813	6.1%

[0215]

对比例 35	一阶段式	235		0.848	1.929	0.765	9.8%
对比例 36	一阶段式	249		0.852	1.921	0.771	9.5%
对比例 37	一阶段式	247		0.854	1.916	0.752	11.9%
对比例 38	两阶段式	135	251	0.883	1.898	0.805	8.8%
对比例 39	两阶段式	125	227	0.906	1.897	0.83	8.4%
对比例 40	两阶段式	160	243	0.888	1.897	0.793	10.7%
对比例 41	一阶段式	207		0.892	1.912	0.826	7.4%
对比例 42	一阶段式	229		0.894	1.883	0.816	8.7%
对比例 43	一阶段式	241		0.909	1.902	0.837	7.9%

[0216] 由表14可以看出,相较于对比例33-43,实施例44-48采用了合适的成分和两阶段渗氮方式,因此在采用激光刻痕细化磁畴后,铁损改善率更高。

[0217] 图1示意性地显示了钢原有初次晶粒尺寸分布示意图。

[0218] 如图1所示,Goss晶核并不具备超出基体晶粒平均尺寸的优势,发生异常长大的能力与周围晶界的性质有关,且周围晶粒尺寸应小于一临界尺寸。取向硅钢的二次再结晶过程,实际上是Goss位向竞争和择优长大的过程。

[0219] 图2示意性地显示了采用了本发明所述渗氮工艺的钢的初次晶粒尺寸分布示意图。

[0220] 如图2所示,采用了本发明所述渗氮工艺,改进后的初次晶粒尺寸更均匀细小。通过改善初次晶粒尺寸分布,可以更好地发挥抑制剂的抑制效应,促进更多Goss位向发展成有效的Goss晶核,从而扩大二次再结晶窗口,二次晶粒尺寸减小,并可在一定程度抑制大偏差角Goss晶粒和非Goss晶粒的异常长大。相应地,如果在没有提高初次晶粒尺寸均匀性的情况下减小初次晶粒尺寸,会造成二次再结晶的驱动力与抑制力不匹配,二次再结晶的条件窗口会显著缩小,反而会导致磁性能不稳定。

[0221] 图3为本发明所述的高磁感取向硅钢的制造方法中的一种具有分段渗氮功能的脱碳退火炉示意图。

[0222] 如图3所示,图3示意性地显示了一种具有分段渗氮功能的脱碳退火炉,本发明所述的高磁感取向硅钢的制造方法能够在图3所示的脱碳退火炉中完成脱碳退火和分段渗氮工艺过程。

[0223] 继续参阅图3可知,沿带钢1的移动方向V,脱碳退火炉可以依次被划分为:加热段2、加热段3、加热段4和冷却段5。其中,加热段2可进一步分为第一加热段2-1、第二加热段2-2、第三加热段2-3,加热段3可进一步分为脱碳区3-1和初次再结晶区3-2。

[0224] 需要注意的是,在某些实施方式中,脱碳退火炉中的第二加热段2-2可以优选采用电磁感应加热方式进行加热。

[0225] 需要说明的是,在图3所示的脱碳退火炉中,本发明所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺中的第一渗氮过程可以在脱碳区3-1和/或初次再结晶区3-2中进行。在第一渗氮过程中,可以借助采用喷管6-1和/或喷管6-2向炉中注入 NH_3 的方式进行渗氮。

[0226] 相应地,本发明所述的高磁感取向硅钢的渗氮工艺中的第二渗氮过程可以在脱碳退火炉中的加热段4中进行。在第二渗氮过程中,可以借助采用喷管6-3向炉中注入 NH_3 的方式进行渗氮。

[0227] 完成脱碳退火和分段渗氮工艺过程后,脱碳退火炉中的冷却段5可以将带钢1冷却至合适的温度,以方便后续对带钢1涂覆MgO涂层。

[0228] 需要说明的是,本案中各技术特征的组合方式并不限本案权利要求中所记载的组合方式或是具体实施例所记载的组合方式,本案记载的所有技术特征可以以任何方式进行自由组合或结合,除非相互之间产生矛盾。

[0229] 还需要注意的是,以上所列举的实施例仅为本发明的具体实施例。显然本发明不局限于以上实施例,随之做出的类似变化或变形是本领域技术人员能从本发明公开的内容直接得出或者很容易便联想到的,均应属于本发明的保护范围。

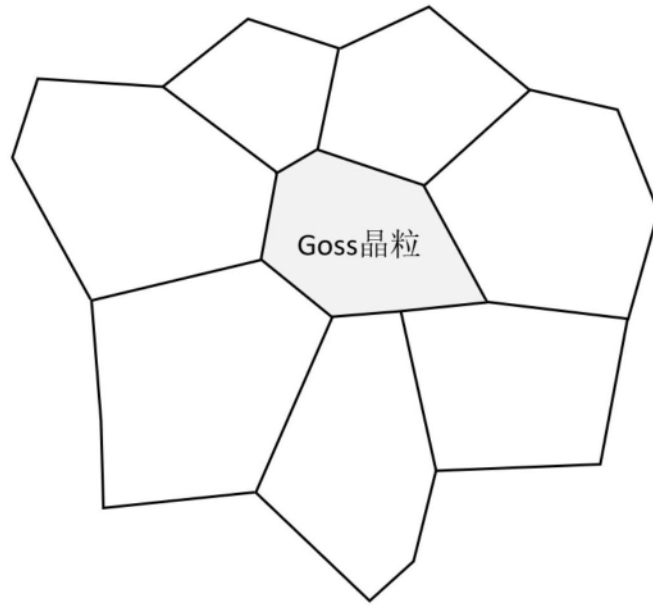


图1

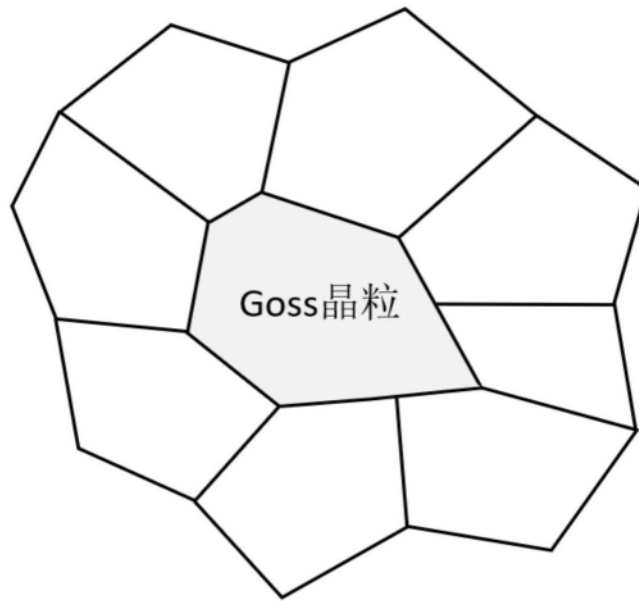


图2

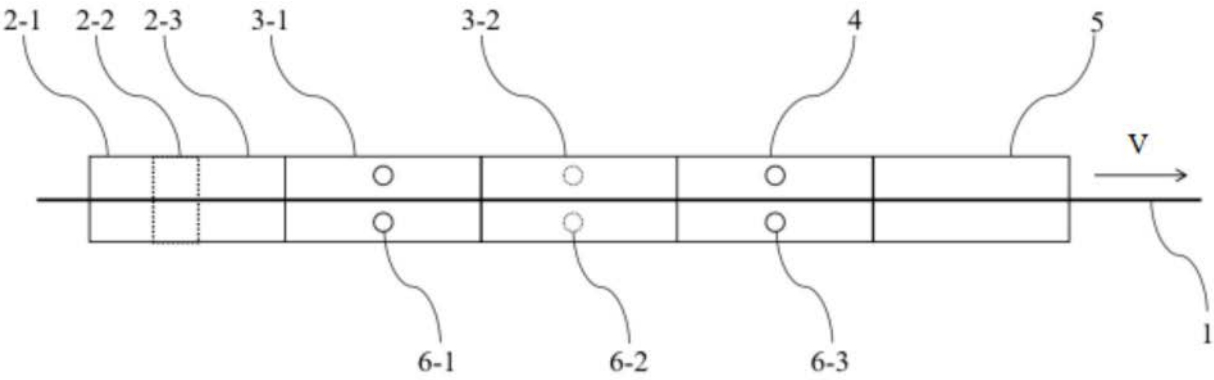


图3