

脱碳退火温度对晶粒取向纯铁组织、织构及磁性能的影响

王海军¹, 尹萍¹, 牛宇豪¹, 乔家龙^{1,2}, 仇圣桃^{1,2}

(1. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽马鞍山 243032; 2. 钢铁研究总院有限公司连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘要:为促进晶粒纯铁制造过程获得更高的磁性能,以实验室自制晶粒取向纯铁冷轧板为研究对象,对其进行脱碳退火实验,利用金相显微镜、电子背散射衍射扫描电子显微镜、磁性能测量仪测试表征其组织性能,研究脱碳退火温度对晶粒取向纯铁初次再结晶组织、织构及高温退火样品磁性能的影响。结果表明:脱碳退火板中仍存在部分聚集分布的细小晶粒,多数集中在样品中心位置附近;脱碳退火 2 min、退火温度为 775, 800 °C 时,部分聚集的细小晶粒导致平均晶粒尺寸分别为 6.12, 6.39 μm, 825 °C 时平均晶粒尺寸为 6.85 μm;不同温度脱碳退火板的主要织构类型基本相同,α取向线上主要织构分布在{112}<223><110>附近,γ取向线上主要织构分布在{111}<112>和{111}<110>附近,其中{111}<112>织构强度始终最高,其余织构强度随脱碳退火温度升高变化不大;825 °C×2 min 脱碳退火时,成品板表现出最佳的磁感应强度,其中 B_{800} 为 2.00 T, B_{10000} 为 2.13 T;成品中存在“孤岛”,织构类型为{110}<112>~<115>，“孤岛”的产生与均热温度较低有关,铸锭中的抑制剂质点没有完全固溶,抑制能力不足,在高温退火过程中导致{110}<112>~<115>位向的晶粒不同程度长大。“孤岛”的存在侧面表明晶粒取向纯铁的磁感应强度有进一步提升的空间。

关键词:晶粒取向;纯铁;脱碳;退火温度;磁感应强度;组织;织构

中图分类号: TG 142.77 文献标志码: A doi: 10.12415/j.issn.1671-7872.24038



Effect of Decarbonization Annealing Temperature on Microstructure, Texture and Magnetic Properties of Grain-oriented Pure Iron

WANG Haijun¹, YIN Ping¹, NIU Yuhao¹, QIAO Jialong^{1,2}, QIU Shengtao^{1,2}

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Iron and Steel Research Institute Co., Ltd, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to promote the manufacturing process of grain-oriented pure iron to obtain higher magnetic properties, the cold-rolled sheet of grain-oriented pure iron made in the laboratory was taken as the research object, and the decarburization annealing experiments were carried out. Metallographic microscope, electron backscatter diffraction scanning electron microscope, and magnetic property measurement instrument were used to characterize its microstructure and properties. The effect of decarburization annealing temperature on the primary recrystallization microstructure, texture and magnetic properties of high temperature annealed sample of grain-

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(518040032, 52374316); 安徽省高校自然科学基金重点项目(2022AH050291)

作者简介: 王海军(1988—), 男, 安徽亳州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为高效电工钢及连铸新技术开发。

引文格式: 王海军, 尹萍, 牛宇豪, 等. 脱碳退火温度对晶粒取向纯铁组织、织构及磁性能的影响[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(4):365-371.

oriented pure iron was investigated. The results show that there are still some small grains in the decarburization annealing sheet, most of which are concentrated near the central region of the sample. When the decarburization holding time is 2 min and the annealing temperature is 775, 800 °C, the average grain sizes are 6.12, 6.39 μm, respectively, due to the partial aggregation of small grains, and the average grain size is 6.85 μm at 825 °C. The main texture type of the decarburized sheet at different temperatures is approximately the same. The main textures on the α orientation line are distributed around $\{112-223\}\langle 110\rangle$, and the main textures on the γ orientation line are distributed around $\{111\}\langle 110\rangle$ and $\{111\}\langle 112\rangle$. The intensity of $\{111\}\langle 112\rangle$ texture is always the highest, and the intensity of other textures doesn't change much with the increase of decarburizing annealing temperature. The finished product annealed at 825 °C for 2 min show the best magnetic induction, of which B_{800} is 2.00 T and $B_{10\ 000}$ is 2.13 T. There are "isolated" points in the finished product, which have texture types of $\{110\}\langle 112\rangle\langle 115\rangle$. The generation of "isolated" is related to the lower homogenization temperature, and the inhibiting agent particles in the ingot aren't completely dissolved, resulting in insufficient inhibiting ability. So, the grains with $\{110\}\langle 112\rangle\langle 115\rangle$ orientations grow to different extents during high temperature annealing. Furthermore, the presence of "isolated" suggests the potential for further enhancement in the magnetic induction of grain-oriented pure iron.

Keywords: grain-oriented; pure iron; decarbonization; annealing temperature; magnetic induction; microstructure; texture

随着现代科技和工业的不断发展,磁性材料已成为促进国民经济和人类社会发展的基础材料。电磁纯铁作为磁性材料中应用最广泛的功能材料之一,长期被用于航空航天器及无人机的关键部位(飞行器工程控制系统各类继电器、仪表仪器屏蔽等)^[1]。随着我国航天事业的高速发展,以及军用、民用无人机、电动汽车的推广应用,普通电磁纯铁已不能满足高初始磁导率、高磁感应强度及低矫顽力的电磁性能要求^[2]。因此,亟需开发在磁感应强度、磁导率、矫顽力等方面具有优势的晶粒取向纯铁。取向纯铁不同于普通电磁纯铁,以磁场强度 800 A/m 时的磁感应强度 B_{800} 为例,DT4E 普通电磁纯铁在 1.50 T 左右,一般取向纯铁大于 1.80 T,目前实验室自制晶粒取向纯铁样品 B_{800} 接近 2.00 T。取向纯铁是通过添加抑制剂,经二次再结晶形成锋锐的 $\{110\}\langle 001\rangle$ 织构(Goss织构),获得的磁性能沿轧向优异。因其直流磁性优异,被用于制作磁屏蔽、电磁铁、继电器、磁开关和小型变压器,特别是高磁场下工作的变压器和电机^[3]。

目前,世界范围内针对取向纯铁的研究主要集中在美国、日本以及我国。美国西屋电气,日本新日铁开发出了适用于工业生产的晶粒取向纯铁生产技术,并成功用于电器设备、基础科学研究设备的制造。西屋电气^[4-5]采用二次、三次冷轧工艺制备了适用于变压器铁芯材料的低合金取向电磁纯铁。新日铁^[6-14]采用 AlN+MnS 作抑制剂制成 1 mm 厚 0.8%Si 取向电磁纯铁,后用于制作 12 GeV 质子同

步加速器电磁铁,将质子同步加速器主环的饱和磁通密度提高约 50%。新日铁(原住友金属)^[15-18]采用一次冷轧/两次冷轧+中间退火的方法成功开发了 $B_{800}=1.85, 1.89$ T 的取向纯铁。我国戴礼智等^[19-20]以国产工业纯铁为原料,通过一次冷轧、二次冷轧和热处理得到二次再结晶组织样品,样品织构类型主要为 (110)[001], (100)[110] 织构,但样品二次再结晶并不理想,成品的磁导率虽有大幅提升,但磁感应强度并未得到较大改善。自此之后,我国针对取向纯铁的研究基本处于空白状态。国外新日铁等厂家开发的取向纯铁生产技术虽已工业化量产,但其制备工艺与应用场景均处于保密状态;制备的晶粒取向纯铁 B_{800} 基本分布在 1.80~1.91 T,仅少数 B_{800} 能够达到 1.92~2.03 T,相比纯铁的饱和磁感应强度 2.16 T(纯铁理论饱和磁感应强度)仍有较大的提升空间。仇圣桃等^[21]对晶粒取向纯铁的生产技术进行了关注,但对各工序的工艺参数、原理特征乃至关键的二次再结晶行为机理和控制仍缺乏清晰结论。当前,我国钢铁行业正处在适应新常态,进入转型升级、提质增效的重要阶段,技术创新对产业发展的支撑和引领作用日益突出。因此,无论是从改善材料本身的磁性能出发还是从优化我国现有产品结构、引领技术创新等方面考虑,开展适用于强磁场磁屏蔽、直流电磁铁芯、低频输电用晶粒取向纯铁的研发具有重要意义。

在取向纯铁冶炼过程中材料需保持一定的碳含量,以保证在热轧、冷轧、退火等阶段材料有合适的

组织、织构演变,以便获得均匀、大小适宜的初次再结晶晶粒及足够数量的 $\{110\}<001\}$ 高斯晶粒晶核,确保成品的磁性能^[22]。晶粒取向纯铁脱碳退火的目的主要涉及两方面:完成初次再结晶过程,使基体中有足够数量的 $\{110\}<001\}$ 初次晶粒(二次晶核)和有利于高斯晶粒晶核长大的初次再结晶组织和织构;将钢中碳含量脱除到0.003%(质量分数,下同)以下,保证后续高温退火时处于单一的 α 相,发展完善二次再结晶组织、去除钢中的S和N、消除产品的磁时效。晶粒取向纯铁的脱碳原理:高温加热过程中水由液态向气态转变,样品中的[C]与水蒸气发生反应生成氢气及一氧化碳,且通过流动的气体被带出炉外,不影响炉内气氛。Hiroyoshi等^[17]研究表明,当晶粒取向纯铁中的碳含量高于0.01%时,二次再结晶将不稳定,磁性能显著恶化。美国西屋电器^[4]研究表明,在不损害磁性能的条件下,钢中碳含量要尽可能地脱至0.03%以下。住友金属^[16,18]研究表明,晶粒取向纯铁中的碳含量应低于0.01%,采用700~950℃少于10min进行中间退火处理,得到的产品磁性能较低。因此,为探究脱碳退火工艺对晶粒取向纯铁组织、织构及磁性能的作用,优化制备

工艺与提升产品性能,在实验室试制晶粒取向纯铁冷轧板,开展脱碳退火实验研究,以期为晶粒取向纯铁工业化技术研发提供参考。

1 实验材料与方法

在实验室制备晶粒取向纯铁冷轧板,设计化学成分如表1。采用50kg真空感应炉熔炼,将熔化的钢水浇注至尺寸为155mm×155mm×400mm的铸模中,自然冷却至室温脱模,将脱模的铸锭装入均热炉加热后热轧至2.3mm厚度时取出,采用高压水除鳞。待热轧板卷曲后在100%N₂气氛下经两段式常化再以100℃沸水淬火处理,随后采用东北大学设计开发的550,350mm可逆轧机将热轧板冷轧至0.3mm,即为晶粒取向纯铁冷轧板。基于晶粒取向纯铁特性与本课题组^[22-23]研究基础,制定表2所示的脱碳退火方案。在露点为40℃的25%H₂+75%N₂湿气气氛条件下分别以775,800,825℃对样品进行脱碳退火实验,保温时间固定为2min;脱碳退火后的样品在25%(体积分数,下同)H₂+75%N₂干气氛条件下进行二次再结晶退火,最终退火板随炉冷却至室温,清洗干净退火板表面后检测其磁性能。

表1 实验材料的化学成分

w/%

Tab.1 Chemical composition of experimental materials

w/%

C	Si	Mn	S	Als	N	Fe
0.02~0.06	0.05~1.00	0.02~0.05	≤0.006	0.010~0.025	≤0.010	Bal

表2 脱碳退火方案

Tab.2 Scheme of decarburization annealing

样品编号	温度/℃	时间/min	露点/℃	气氛
A	775	2	40	25%H ₂ +75%N ₂
B	800	2	40	25%H ₂ +75%N ₂
C	825	2	40	25%H ₂ +75%N ₂

将实验样品沿轧制方向取样,制成尺寸为10mm×8mm矩形块试样,其中10mm为沿轧向(roll direction, RD)的长度。通过镶嵌、研磨、抛光,直至试样表面呈镜面,采用体积分数为4%的硝酸酒精腐蚀获得高温退火显微组织,采用ZEISS-200MAT型金相显微镜观察试样组织形貌并采集图像,根据GB/T 6394—2002规定的步骤分析脱碳板的平均晶粒度,其中平均晶粒直径采用Imagepro-Plus软件测量。

采用型号为NIM-2000E硅钢片磁性能测量仪测量高温退火样品的磁性能,样品尺寸为100mm×30mm,具体指标为样品在50Hz时磁场强度分别为800,10000A/m时的磁感应强度,分别记作 B_{800} ,

B_{10000} 。采用配有EDAX OIM电子背散射衍射(electron back scatter diffraction, EBSD)系统的ZEISS SUPRA 55VP扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)测定样品轧面表层织构,采用CHANNEL 5软件进行取向分布函数(orientation distribution function, ODF)分析。

2 结果与分析

2.1 组织特征

晶粒取向纯铁冷轧板脱碳退火后形成的初次再结晶组织如图1,图中ND(normal direction)表示轧制面的法向。由图1可知:无论是以775℃×2min,800℃×2min还是以825℃×2min进行脱碳退火,冷轧板脱碳退火后均发生了完全再结晶,再结晶组织主要由铁素体组成,且随温度的升高,晶粒大小逐渐均匀、晶界更加晰;775,800℃脱碳退火时,在脱碳板心部细小晶粒较多,表层晶粒较大。主要是因为脱碳退火过程中,脱碳板发生回复再结晶,表层

晶粒得到较多的能量用于晶粒长大,而心部温度低于表层,可用于晶粒长大的驱动力低于表层;但随着温度的升高,晶粒的平均尺寸逐渐增大,冷轧板在厚度方向上均有足够的能量用于再结晶及晶粒长大,尺寸较大的晶粒不仅分布在表层,心部也有。

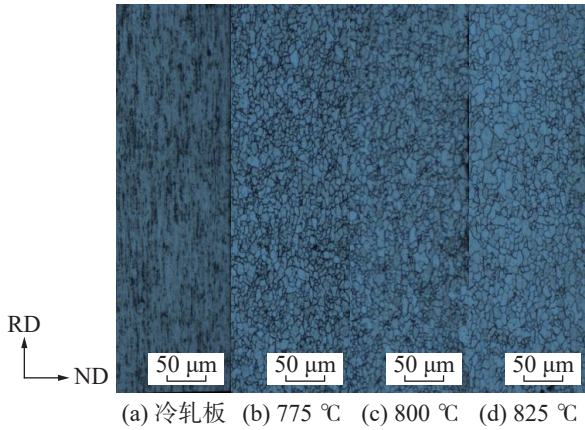


图1 脱碳退火板的显微组织

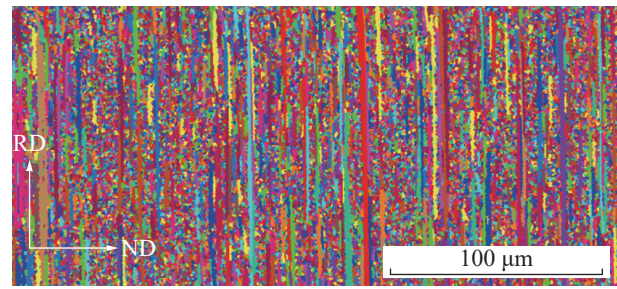
Fig. 1 Microstructure of decarburization annealing sheet

采用截线法对脱碳退火板的晶粒尺寸进行统计,结果显示:775 °C×2 min 脱碳退火时,退火板平均晶粒尺寸为 6.12 μm;800 °C×2 min 时,退火板平均晶粒尺寸为 6.39 μm;825 °C×2 min 时,退火板平均晶粒尺寸为 6.85 μm。脱碳退火温度为 775,800 °C 时退火板的平均晶粒尺寸均低于 825 °C,主要是因为测量区域细小晶粒聚集较多,即组织不均匀引起。随脱碳退火温度的升高,脱碳退火板的平均晶粒尺寸逐渐增大,825 °C 脱碳退火时,组织均匀性得到明显改善,平均晶粒尺寸最大。

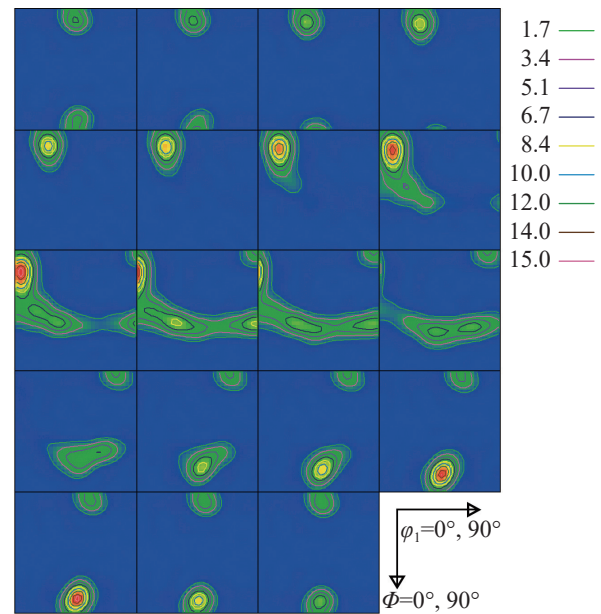
2.2 织构特征

冷轧结构的形成与初始结构类型密切相关,冷轧前常化板中的{001}<110>织构是一种亚稳定织构类型,进行1次大压下冷轧时,位于{100}面织构内的取向会在冷轧初期道次形成{001}<110>织构,然后沿 α 取向线逐步转向{112}<110>取向。晶粒取向纯铁常化板经冷轧后,织构类型发生显著变化,图2为冷轧板的取向成像(orientation imaging microscopy, OIM)与ODF图。其中 φ_1 , Φ , φ_2 为自由变量,立方晶体[100]-[010]-[001]坐标系CCS相对于样品坐标系SCS的位置关系为轧向(rolling direction, RD)-横向(transverse direction, TD)-法向(normal direction, ND), φ_1, φ_2 为绕ND转的角度, Φ 为绕RD转的角度。由图2可看出:在冷轧压力及摩擦力作用下存在于常化板中的织构类型向{110}<111>, {123}<111>, {112}<111>滑移,最终形成冷轧织构类型;晶粒取向纯铁的冷轧板织构类型主要有{001}<110>, {112}<110>

{113~115}<110>, {111}<110>, {111}<112>等。



(a) OIM

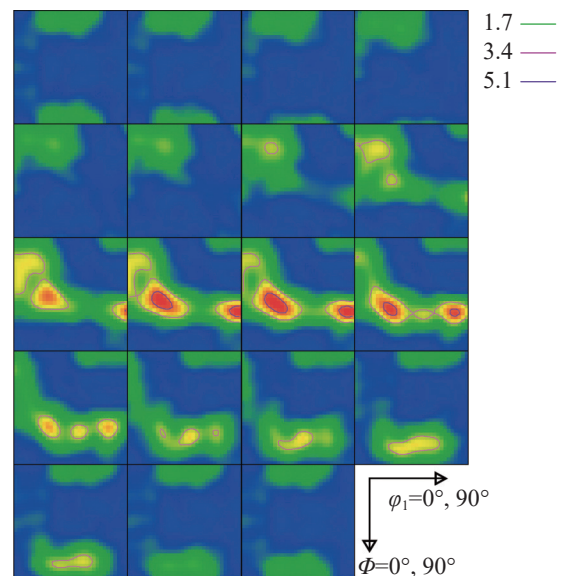


(b) ODF

图2 冷轧板的 OIM 与 ODF 图

Fig. 2 ODF and OIM diagrams of cold-rolled sheet

图3为脱碳退火板表层的初次再结晶 ODF 截面图。



(a) 775 °C

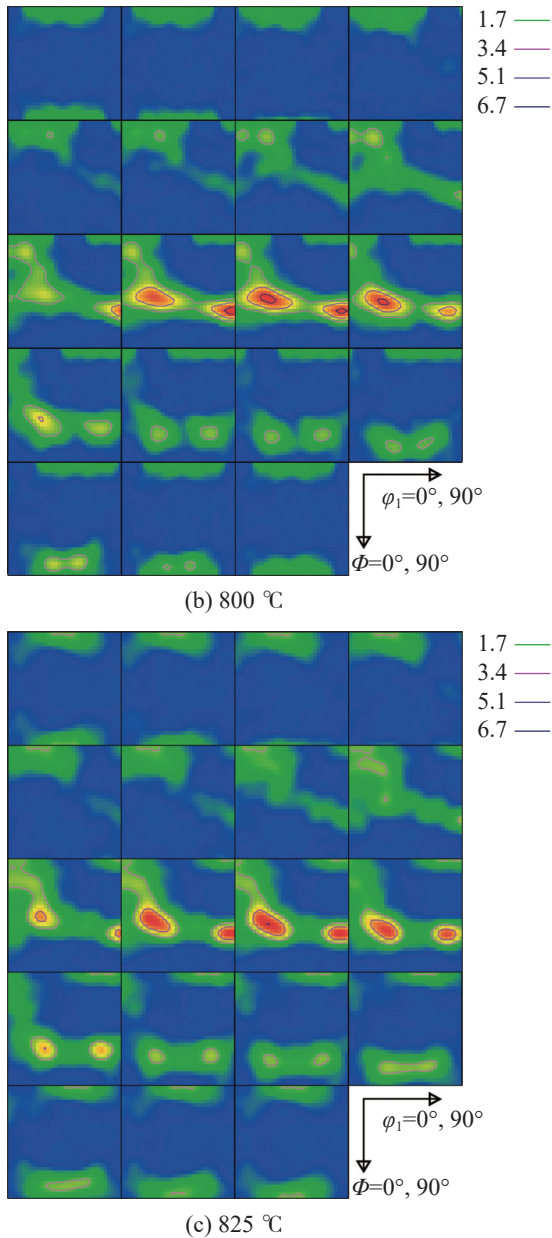


图3 脱碳退火板的 ODF 图

Fig. 3 ODF diagram of decarburization annealing sheet

由图 3 可发现: 冷轧板经不同温度退火后织构类型无明显变化, 仅织构强度存在差异; 退火板织构以 α 纤维织构和 γ 纤维织构为主, 还存在微弱的 $\{001\}\langle 110\rangle$ 织构。其中: α 纤维织构集中在 $\{112\}\langle 110\rangle$, $\{114\}\langle 110\rangle$, $\{223\}\langle 110\rangle$ 附近; γ 纤维织构主要包括 $\{111\}\langle 112\rangle$, $\{111\}\langle 110\rangle$, $\{111\}\langle 132\rangle$ 。值得注意的是, 退火板中还存在微弱的 $\{114\}\langle 481\rangle$ 织构, 根据罗海文等^[24] 的报道, Goss 织构取向在初次再结晶阶段极大程度地受到其他织构取向的抑制而没有得到发展, 而 $\{114\}\langle 481\rangle$ 织构取向由于 AlN 颗粒的抑制而出现。因此在退火板的 ODF 图中没有观察到 Goss 织构, 这也是采用本文轧制工艺制造晶粒取向纯铁的关键织构特征。

在初次再结晶织构类型中, $\{111\}\langle 112\rangle$ 和 $\{111\}\langle 110\rangle$ 能够促进二次再结晶过程获得强而尖锐的 Goss 织构, 有效提高材料的磁性能, 这也是脱碳退火过程中的主要控制对象; $\{112\}\langle 110\rangle$ 和 $\{001\}$ 织构取向不利于二次再结晶的发生, 含量应尽可能降低^[25]。由图 3 可看出: 775 °C×2 min 脱碳退火时 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构强度峰值达到 5.1; 随脱碳退火温度的升高, 800 °C×2 min 脱碳退火时 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构强度峰值升至 6.7; 脱碳退火温度持续升高至 825 °C, $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构强度峰值达到 6.7, 且取向密度在 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构附近更密集。整个脱碳退火过程中, $\{114\}\langle 481\rangle$ 织构附近强度在 1.7 上下波动, $\{001\}\langle 110\rangle$ 织构强度随脱碳退火温度的升高而变化不大。因此适当提高脱碳退火温度, 有利于增强 $\{111\}\langle 112\rangle$ 和 $\{111\}\langle 110\rangle$ 织构的强度。不同晶面的晶粒其储能也不同, $\{111\}$ 晶粒比 $\{100\}$ 晶粒的储能高, 具有 $\{111\}\langle uvw\rangle$ 位向的晶粒在脱碳退火中优先形核长大, 致使 $\{100\}\langle 011\rangle$ 织构减弱。不同取向晶粒的形变储能 (E) 顺序^[26] 为 $E_{\{001\}\langle 110\rangle} < E_{\{112\}\langle 110\rangle} < E_{\{111\}\langle 110\rangle} < E_{\{111\}\langle 112\rangle}$, $\{001\}\langle 110\rangle$ 晶粒最易滑移、位错密度低、储能低, 不易发生再结晶; $\{111\}\langle 112\rangle$ 晶粒由于具有较高的储能, 率先发生再结晶而吞噬周围较低储能晶粒, 致使 $\{111\}$ 织构强度明显增强; $\{111\}\langle 110\rangle$ 晶粒储能介于两者之间。因此, 脱碳退火板中 $\{001\}\langle 110\rangle$ 织构强度较低, $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构强度较高, $\{111\}\langle 110\rangle$ 织构强度介于两者之间。

2.3 磁性能与宏观组织

表 3 为不同脱碳退火温度条件下晶粒取向纯铁脱碳退火样品的磁性能。由表 3 可看出: 退火温度在 775~825 °C 范围, 随脱碳退火温度的升高, 样品磁性能整体变优, 除 800 °C×2 min 脱碳退火时 $B_{10\,000}$ 略微降低外, 磁感 B_{800} , $B_{10\,000}$ 均逐渐增大。

表 3 不同脱碳退火温度条件下退火样品的磁性能

Tab. 3 Magnetic properties of annealed samples under different decarburization annealing temperature conditions

样品编号	温度/°C	B_{800}/T	$B_{10\,000}/T$
A	775	1.88	2.09
B	800	1.96	2.08
C	825	2.00	2.13

图 4 为最终退火后样品的宏观组织形貌。由图 4 可见: 采用不同温度进行脱碳退火, 退火产物均发生了不同程度的二次再结晶, 775 °C×2 min 脱碳

退火板在高温退火过程中二次再结晶不完善,较多的晶粒得不到充分长大,导致平均磁感应强度 B_{800} 仅为 1.88 T, $B_{10\,000}$ 为 2.09 T; 相较于 775 °C×2 min 脱碳退火板, 800 °C×2 min 脱碳退火板经高温退火后二次再结晶充分发展, 初次再结晶晶粒较少, 平均磁感应强度 B_{800} 较好 (1.96 T), $B_{10\,000}$ 略微降低 (2.08 T); 825 °C×2 min 脱碳退火板在二次再结晶过程中, 仍有少量孤立的初次再结晶晶粒分布于板材边缘, 但平均磁感应强度 B_{800} 和 $B_{10\,000}$ 最高, 分别为 2.00, 2.13 T。对比可发现: 不同温度脱碳退火处理后样品的平均晶粒尺寸存在明显差异, 其中 800 °C×2 min 和 825 °C×2 min 的脱碳退火板发生了较为完全的二次再结晶; 3 种脱碳退火板中, 825 °C×2 min 脱碳退火板的平均磁感应强度 B_{800} 和 $B_{10\,000}$ 较高, 成品磁性能最优, B_{800} 达到 2.00 T, $B_{10\,000}$ 达到 2.13 T。

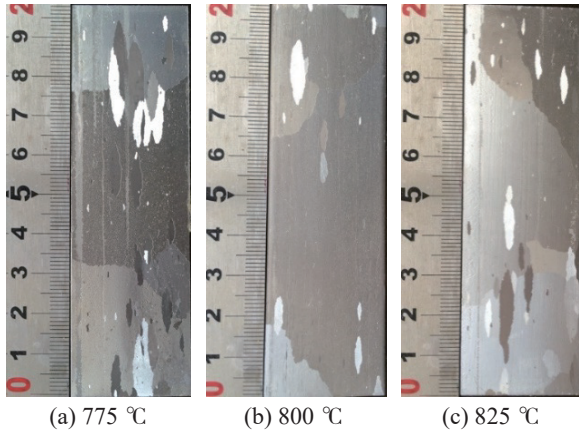
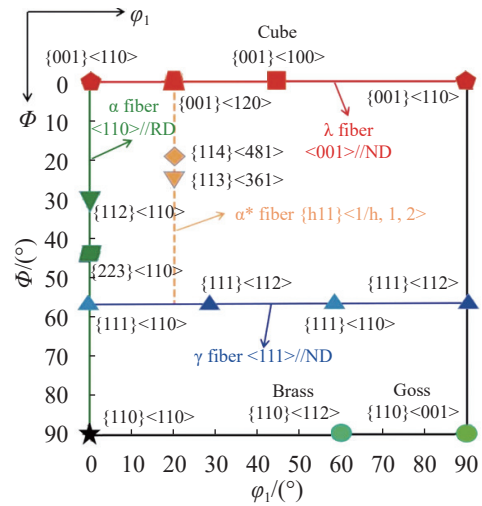


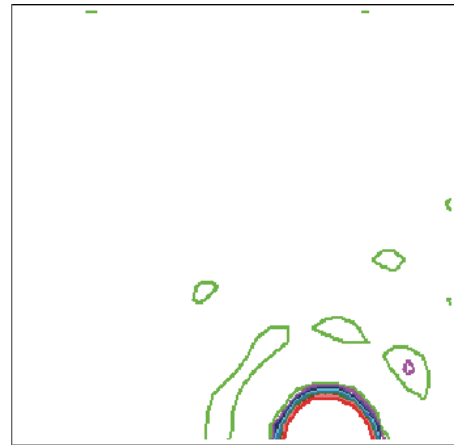
图4 高温退火后成品宏观组织

Fig.4 Macrostructure of finished product after high temperature annealing

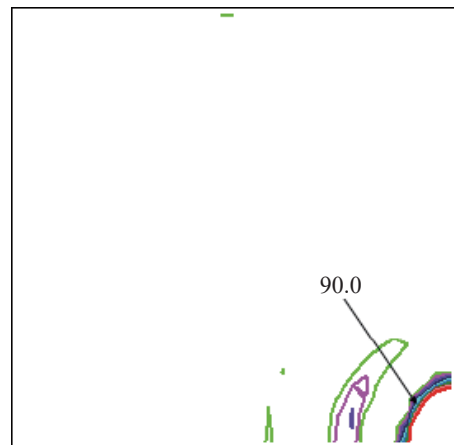
图 5 为晶粒取向纯铁成品与成品中“孤岛”(未发生二次再结晶的初次再结晶晶粒)的 ODF 图, 成品的 ODF 图检测区域为二次再结晶晶粒内部, “孤岛”的 ODF 图检测区域为初次再结晶晶粒内部。由图 5 可知: 成品结构主要为 Goss 结构, 强度达 90.0, 同时含少量黄铜结构, 强度较弱, 成品结构不是单一的 Goss 取向, 说明晶粒取向纯铁的磁性能仍有提升空间; “孤岛”结构类型为 $\{110\}\langle 112\rangle\sim\langle 115\rangle$, 产生“孤岛”的原因为均热温度较低, 铸锭中的抑制剂质点没完全固溶, 使后续工序中第二相质点减少, 抑制能力下降, 初次再结晶晶粒未能发生二次再结晶, 同时, 在高温退火过程中, $\{110\}\langle 112\rangle\sim\langle 115\rangle$ 位向的晶粒有不同程度的长大, 形成“孤岛”。后续可尝试通过提高热轧压下率, 或采用二次冷轧法及适当提高碳含量等措施消除“孤岛”。



(a) 取向分布函数 $\phi_2=45^\circ$ 截面的主要结构



(b) 孤岛晶粒 ODF 图



(c) 成品的 ODF 图

图5 成品与成品中“孤岛”的 ODF 图 ($\phi_2=45^\circ$)

Fig.5 ODF diagrams of finished product and “isolated” in finished product ($\phi_2=45^\circ$)

3 结论

1) 晶粒取向纯铁冷轧板脱碳退火后发生了完全再结晶, 退火温度为 775~825 °C, 随退火温度的升

高,退火板平均晶粒尺寸逐渐增大。775, 800 °C 脱碳退火时,细小晶粒聚集于退火板心部,平均晶粒尺寸分别为 6.12, 6.39 μm ; 825 °C 脱碳退火时组织均匀性得到改善,平均晶粒尺寸为 6.85 μm 。

2) 随脱碳退火温度 (775~825 °C) 的升高,退火板中的主要织构类型基本相同,但强度存在差异, γ 纤维织构强度始终最高且显著高于 α 纤维织构强度。 γ 纤维织构主要是 $\{111\}\langle 110\rangle$ 织构和 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构; α 纤维织构主要分布在 $\{112\}\langle 223\rangle\langle 110\rangle$ 织构附近,此外还存在微弱的 $\{114\}\langle 481\rangle$ 织构。

3) 高温脱碳退火板发生了不同程度的二次再结晶,但部分初次再结晶晶粒出现未完全长大情况,不同温度脱碳退火处理后成品板中组织平均晶粒尺寸差异明显,成品板的平均磁感应强度 B_{800} , $B_{10\,000}$ 随脱碳退火温度 (775~825 °C) 的升高整体呈逐渐增大的趋势,825 °C \times 2 min 脱碳退火的成品板表现出最佳的磁感应强度, B_{800} 为 2.00 T, $B_{10\,000}$ 为 2.13 T。

参考文献:

- [1] 付玉田,李慧,梁精龙,等.铁基软磁材料的制备与性能研究现状[J]. *功能材料*, 2022, 53(9):9073-9079.
- [2] 段美琪,王瑞珍,曹建春,等.合金元素和退火工艺对电磁纯铁矫顽力的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(1): 130-134.
- [3] 何忠治. *电工钢*[M]. 北京:冶金工业出版社, 2012.
- [4] THORNBURG D R. Method of producing primary recrystallized textured iron alloy member having an open gamma loop: US, 3892605A[P]. 1975-07-01.
- [5] BLAUGHER R D, HOPKINS R H. Development of grain-oriented iron sheet for electrical apparatus: US, 4265683[P]. 1981-05-05.
- [6] WADA T, TAKASHIMA K, KAWASHIMA M. (110)[001] textured 0.80%Si-Fe for the proton synchrotron[C]//Magnetism and Magnetic Materials: Nineteenth Annual Conference. AIP Publishing, 1974:1363-1366.
- [7] YOSHIO N, YASUO O. Production of unidirectionally oriented electrical steel sheet having high magnetic flux density: Japan, 03-47920A[P]. 1991-02-28.
- [8] HODAKA H, YOZO S. Production of grain-oriented electrical steel sheet having high magnetic flux density: Japan, 04-17617A[P]. 1992-01-22.
- [9] YOSHIO N, YASUO O. Grain-oriented pure iron excellent in magnetic permeability and coercive force in coil-width direction and its production: Japan, 04-301052A[P]. 1992-10-23.
- [10] YOSHIO N, YASUO, TADA O N, et al. Grain-oriented silicon steel sheet having excellent magnetostrictive characteristic: Japan, 07-062501[P]. 1995-03-07.
- [11] RYUTARO K, TAKEAKI W. Production of grain-oriented silicon steel sheet extremely high in magnetic flux density: Japan, 10-298651[P]. 1998-11-10.
- [12] RYUTARO K, TAKEAKI W. Manufacture of grain oriented silicon steel sheet having stable and extremely high magnetic flux density in longitudinal direction of coil: Japan, 10-306318[P]. 1998-11-17.
- [13] RYUTARO K, TAKEAKI W. Manufacture of grain oriented silicon steel sheet having extremely high magnetic flux density: Japan, 10-306319[P]. 1998-11-17.
- [14] RYUTARO K, TAKEAKI W. Production of grain-oriented silicon steel sheet with extremely high magnetic flux density: Japan, 11-50151[P]. 1999-02-23.
- [15] HIROYOSHI Y, MASASHI T. Manufacture of grain oriented electrical steel sheet: Japan, 61-091329[P]. 1986-05-09.
- [16] HIROYOSHI Y, ATSUKI O. Production of grain oriented electrical steel sheet: Japan, 62-83421[P]. 1987-04-16.
- [17] HIROYOSHI Y, TERUO K. Production of grain-oriented magnetic steel sheet: Japan, 1-309923[P]. 1989-12-14.
- [18] HIROYOSHI Y, TERUO K. Grain-oriented magnetic steel sheet and its production: Japan, 1-309924[P]. 1989-12-14.
- [19] 戴礼智. 工业纯铁的再结晶与磁性[J]. *金属学报*, 1958, 3(3):227-230.
- [20] 戴礼智,张信钰. 国产纯铁的轧制与再结晶织构[J]. *物理学报*, 1958(1):17-22.
- [21] 仇圣桃,王海军,荣哲,等. 晶粒取向纯铁研究现状及技术分析[J]. *钢铁*, 2016, 51(12):1-7.
- [22] WANG H J, RONG Z, XIANG L, et al. Effect of decarburization annealing temperature and time on the carbon content, microstructure, and texture of grain-oriented pure iron[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2017, 24(4):393-400.
- [23] DENG J J, WANG H J, RONG Z, et al. Texture and inhibitor features of grain-oriented pure iron produced by different cold-rolling processes[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2018, 25:1026-1032.
- [24] 罗海文,向睿,陈凌峰,等. 取向硅钢中脱碳工艺的数值模拟[J]. *科学通报*, 2014, 59(10):866-871.
- [25] 付勇军,蒋奇武,杨平,等. 脱碳退火保温时间对取向硅钢组织、织构及磁性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(7):157-161.
- [26] PARK J T, SZPUNAR J A. Evolution of recrystallization texture in nonoriented electrical steels[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(11):3037-3051.