



退火温度对薄规格无取向电工钢磁性能和力学性能的影响

刘旭明¹, 耿志宇¹, 李富强², 孙超², 董林硕¹, 李亚东², 郭函¹

(1 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200; 2 鞍钢股份有限公司硅钢事业部, 鞍山 114000)

摘要:对 0.20 mm 厚新能源汽车用无取向硅钢在不同退火温度下的组织、织构、力学性能及磁性能进行了系统研究。结果表明, 780 °C/3 min 时已经完成了再结晶, 在再结晶初始阶段, λ 织构主要在冷轧后的晶内剪切带形成, 同时, 也会形成部分 $\{114\}\langle 841\rangle$ 和 $\{112\}\langle 110\rangle$, 以及 $\{111\}\langle 112\rangle$ 取向晶粒。而冷轧非剪切带区域主要生成 $\{114\}\langle 841\rangle$ 、 $\{112\}\langle 241\rangle$ 取向的 α^* 织构和 $\{100\}\langle 120\rangle$ 织构。退火温度 ≥ 900 °C 时, 随温度升高, $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构占比逐渐减小, $\{100\}\langle 001\rangle$ 织构占比逐渐增多, 退火温度升高会促进 λ 织构的生成, 且抑制 γ 织构的生长。晶粒尺寸随着退火温度的升高而增大, 高频铁损 P1.0/400 先降低再升高, 在 920~960 °C 达到最小值, 此时, 晶粒尺寸在 108~138 μm , 也是最佳晶粒尺寸范围。强度随着退火温度升高逐渐降低, 在 920~960 °C 基本保持恒定。

关键词:无取向电工钢; 薄规格; 微观组织; 织构; 磁性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.2025-00033 **中图分类号:**TG156.21

Impact of the Annealing Temperature on the Magnetic and Mechanical Characteristics of Thin-gauge Non-oriented Electrical Steel

Liu Xuming¹, Geng Zhiyu¹, Li Fuqiang², Sun Chao², Dong Linshuo¹, Li Yadong², Guo Han¹

(1 Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2 Silicon Steel Division, Anshan Steel Co., Ltd., Anshan 114000, China)

Abstract: This study systematically investigates the microstructure, texture, mechanical properties, and magnetic properties of 0.20 mm thick non-oriented silicon steel for new energy vehicles under different annealing temperatures. It is observed that recrystallization had finished at 780 °C. In the initial stage of recrystallization, λ fiber texture mainly formed in the cold-rolled shear bands, and some $\{114\}\langle 841\rangle$ and $\{112\}\langle 110\rangle$, and $\{111\}\langle 112\rangle$ oriented grains are also formed there. The α^* fiber texture of grains with orientation of $\{114\}\langle 841\rangle$, $\{112\}\langle 241\rangle$ and $\{100\}\langle 120\rangle$ is mainly formed in the other zones. When annealing at 900 °C and above, as the annealing temperature rises, the proportion of $\{111\}\langle 112\rangle$ components diminishes gradually, while the proportion of $\{100\}\langle 001\rangle$ components grows slowly. This augmentation in annealing temperature will foster the formation of λ fiber texture and impede the growth of γ fiber texture. Grain size increases with the rise in annealing temperature, yet the high frequency iron loss P1.0/400 initially declines before eventually rising to its lowest value. In the range of 920 °C-960 °C, and the grain size range is 108 μm -138 μm , which is also the best grain size range. As the annealing temperature rises, the strength diminishes gradually and remains nearly invariable in the 920 °C-960 °C range.

Key Words: Non-oriented Electrical Steel; Thin Gauge; Microstructure; Texture; Magnetic Property

在“双碳”背景下,《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》提出至 2035 年实现节能汽车与新能源汽车分别占据市场的一半比例,标志着汽车产业全面电动化转型的开启,显著拉动了硅钢材料的市场需求。驱动电机作为新能源汽车的关键组成部分,正在朝着更快的转速、更高的功率密度、更高的效率、较低的噪音以及更好的安全性发展。相应地,无取

向硅钢材料需具备高磁感特性以确保启动转矩,高频低铁损特性实现高速运行节能,以及高强度特性保障转子安全性。当前市场趋势显示,驱动电机用硅钢材料厚度持续减薄,0.27、0.25 mm 规格已成为主流,而多家新能源汽车制造商已着手研发采用 0.20 mm 乃至 0.15 mm 规格的下一代电机产品^[1]。在制备新能源汽车用无取向硅钢的过程中,退火工

基金项目:辽宁省科学技术计划《新能源汽车驱动电机用无取向硅钢的中试研究项目》(2022 JH24/10200016)

作者简介:刘旭明(1984—),男,博士,工程师; **E-mail:**15832555952@163.com; **收稿日期:**2025-02-11

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

艺是极其重要的一环,退火温度对磁性能起着关键作用。当硅钢厚度减薄至 0.20 mm 以下时,其退火工艺呈现出与常规厚度会显示出不同的特性,相较于常规厚度硅钢,低厚度硅钢在制备过程中面临更为显著的工艺调控挑战,其中,再结晶退火作为调控其组织、晶粒尺寸及磁性能的核心环节,其工艺参数与作用机制亟需针对性研究。目前,针对常规厚度硅钢(0.30~0.50 mm)的退火工艺已形成较为系统的理论体系,但低厚度硅钢因轧制变形量差异、表层与芯部应变梯度效应增强以及薄规格特有的快速传热特性,其再结晶动力学行为、组织演变规律与常规厚度材料存在本质差异。现有研究多集中于常规厚度硅钢的退火机理,针对超薄规格硅钢的再结晶行为特征及其与磁性能的耦合机制仍缺乏系统性认知,特别是对 0.20 mm 及以下厚度材料的组织竞争机制及其对高频铁损的影响机理尚不明确,导致实际生产中常因沿用常规工艺参数而引发磁感降低、铁损波动等问题。

以 0.20 mm 厚新能源汽车用无取向硅钢为研究对象,系统探究了再结晶退火温度对其磁性能、力学性能及显微组织演变的影响规律,为薄规格无取向硅钢的工业化生产提供了理论依据和实践指导。

1 实验材料与方法

某钢铁企业提供的无取向硅钢作为实验材料,其化学成分详见表 1。实验样本包括热轧板材、常化板材及冷轧板材。采用线切割技术将冷轧板材加工成 30 mm×100 mm 的矩形试样,并通过箱式炉实施不同温度的退火处理。为开展对比研究,退火工艺分为低温(780、800 °C)和高温(900、920、940、960、980 °C)两类,保温时间自炉温达到设定值起计

时 3 min。使用 Zeiss G300 场发射扫描电镜和牛津仪器 C-Swift EBSD 系统分别对热轧、常化及退火过程的样品进行显微组织与织构表征,其中,热轧和常化样品的为纵截面,退火样品为轧面 1/4 深度进行检测。依据 GB/T3655—2008《用爱泼斯坦方圈测量工钢片(带)磁性能的方法》,采用单片法测定退火板的磁性能参数 P1.0/400 和 J5000,测试磁密度为 7.6 g/cm³。最后,依据 GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》对退火板进行力学性能测试,试样形状与尺寸按标准中 P5 规格加工。

表 1 实验材料的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of experimental steels %

| C | Mn | Si | Al | Sn | Fe |
|----------|------|---------|---------|------|------|
| ≤0.002 7 | 0.50 | 3.0~3.5 | 0.5~1.0 | 0.05 | Bal. |

2 实验结果与讨论

热轧板纵截面的显微组织和织构如图 1 所示。热轧板在厚度方向上的微观组织表层主要由等轴的再结晶晶粒组成,次表层与中心层主要由条状的变形组织组成。由图 1(b)可知,热轧板中织构主要由 Goss 织构、铜型 {112} <111> 织构、黄铜 {110} <112> 织构、较强的 α 织构和较弱的 γ 织构组成, α 织构的强点位于 {100} <110>。在热轧过程中,带钢与轧辊直接接触,产生较大的摩擦力,导致表层发生严重的剪切变形,使表层晶粒具有高的形变储能和较多晶体缺陷,使再结晶储能升高,因此,在热轧过程中会发生完全动态再结晶,形成细小的等轴再结晶组织。这种剪切变形会随着距热轧板表层深度增加而降低,芯部由于变形量小,积累的能量少,不足以

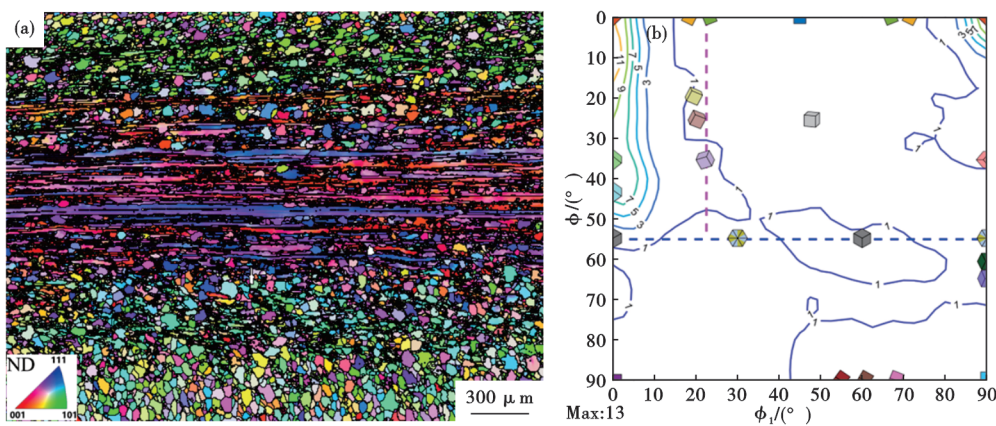


图 1 热轧板的显微组织(a)和织构(b)

Fig. 1 Microstructure (a) and texture (b) of hot-rolled sheet

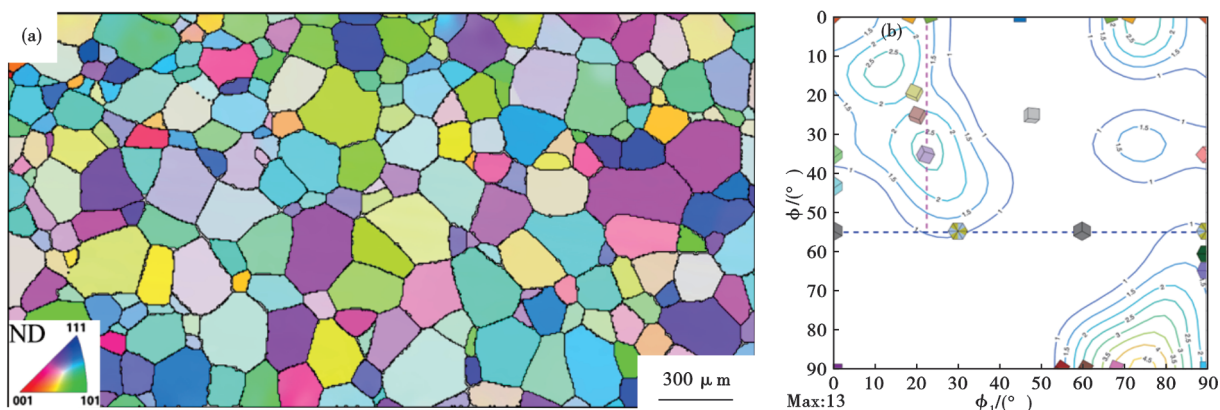


图2 常化板的显微组织(a)和织构(b)

Fig. 2 The microstructure (a) and texture (b) of the normalizing sheet

发生动态再结晶,主要为沿轧向伸长的形变组织、部分回复组织以及部分再结晶晶粒组成。

常化板的显微组织如图2(a)所示。采用的常化工艺为将热轧板加热至950 °C保温4 min后,热轧板表层的再结晶晶粒发生长大,次表层及中心层的变形组织发生回复和再结晶,热轧板常化后的平均晶粒尺寸约为145 μm。对比图1(b)和图2(b)可知,常化板在一定程度上减少了对磁性能不利的γ织构,进而增加了有益的织构比例,优化了织构成分。

如图3所示,经过大压力下的过轧处理后的冷轧板显微结构显示出其原本的等轴晶体组织已被打破,取而代之的是板条形状的冷轧形态,其中位于中间和四分之一部分可以看到明显的剪切带形貌(图中暗蚀刻区域中的“粗糙”晶粒,该晶粒具有较高的高位错密度和储能)。剪切带主要是通过剪切变形形成的,它与轧面呈20~40°角和厚度为1~10 μm的微观结构,它是由不均匀变形形成的。具有较大晶粒的常化板能够促使冷轧后的形成大量

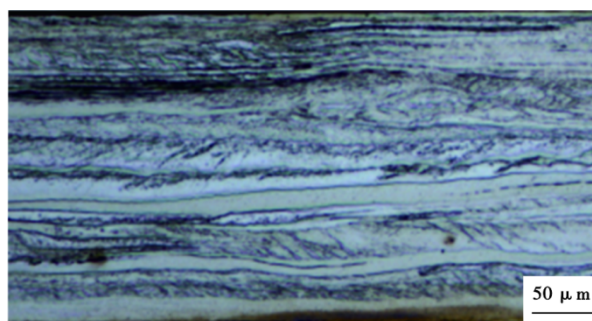


图3 冷轧板的显微组织

Fig. 3 The microstructure of the cold-rolled sheet

的剪切带,由于剪切带具有较高的储能,再结晶晶粒会优先在高储能的剪切带处形核^[2-3]。

780、800 °C退火条件下的微观结构特征如图4所示。图4(a)、(b)分别呈现了780、800 °C退火后的晶粒取向分布情况。研究表明,当退火温度达到或超过780 °C时,材料已完成再结晶过程,但晶粒尺寸呈现不均匀分布,表现为明显的细晶区,图4(a)中的A区与粗晶区B区共存。细晶区的形成与冷轧板的晶内剪切带密切相关,该区域为λ纤维织构的优

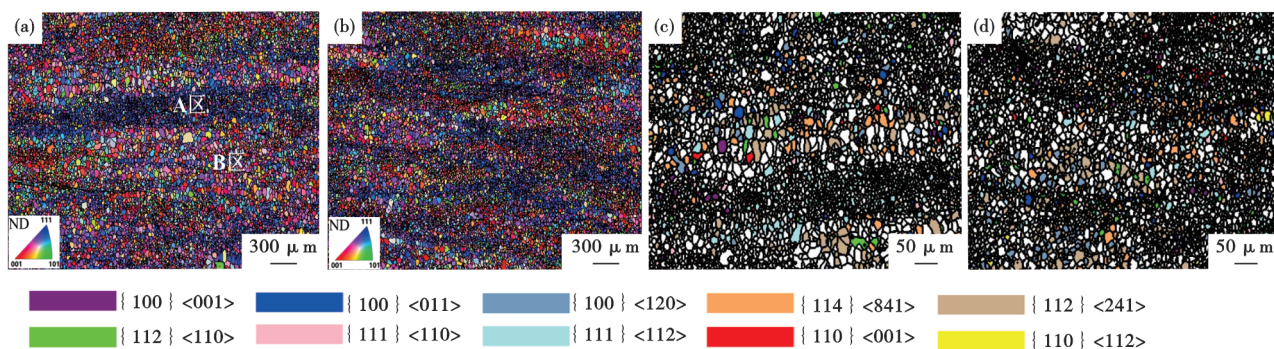


图4 780、800 °C退火后晶粒的取向分布图(a)、(b)和局部放大图(c)、(d)

Fig. 4 Orientation distribution of grains after annealing at 780 °C and 800 °C (a), (b) and local magnification (c), (d)

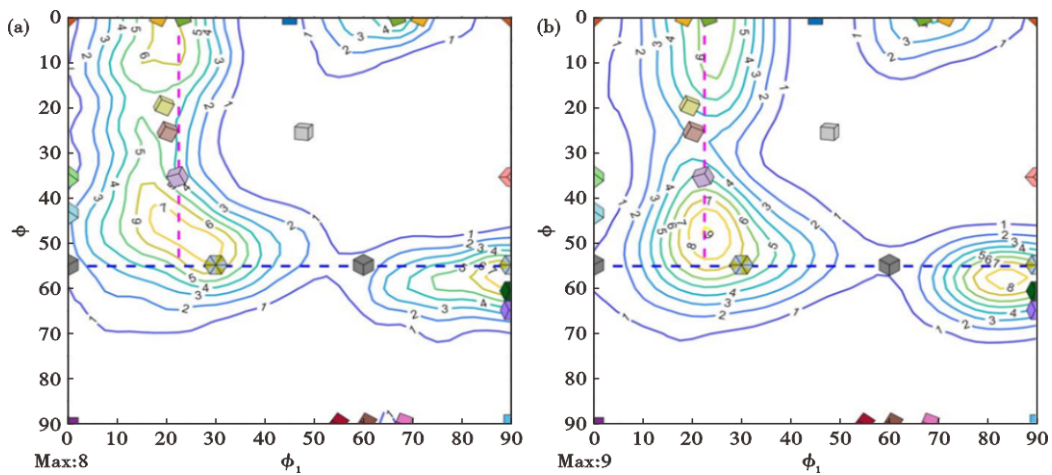


图 5 780 °C(a)和 800 °C(b)退火后的织构 ODF 图
Fig. 5 ODF map of texture after annealing at 780 °C (a) and 800 °C (b)

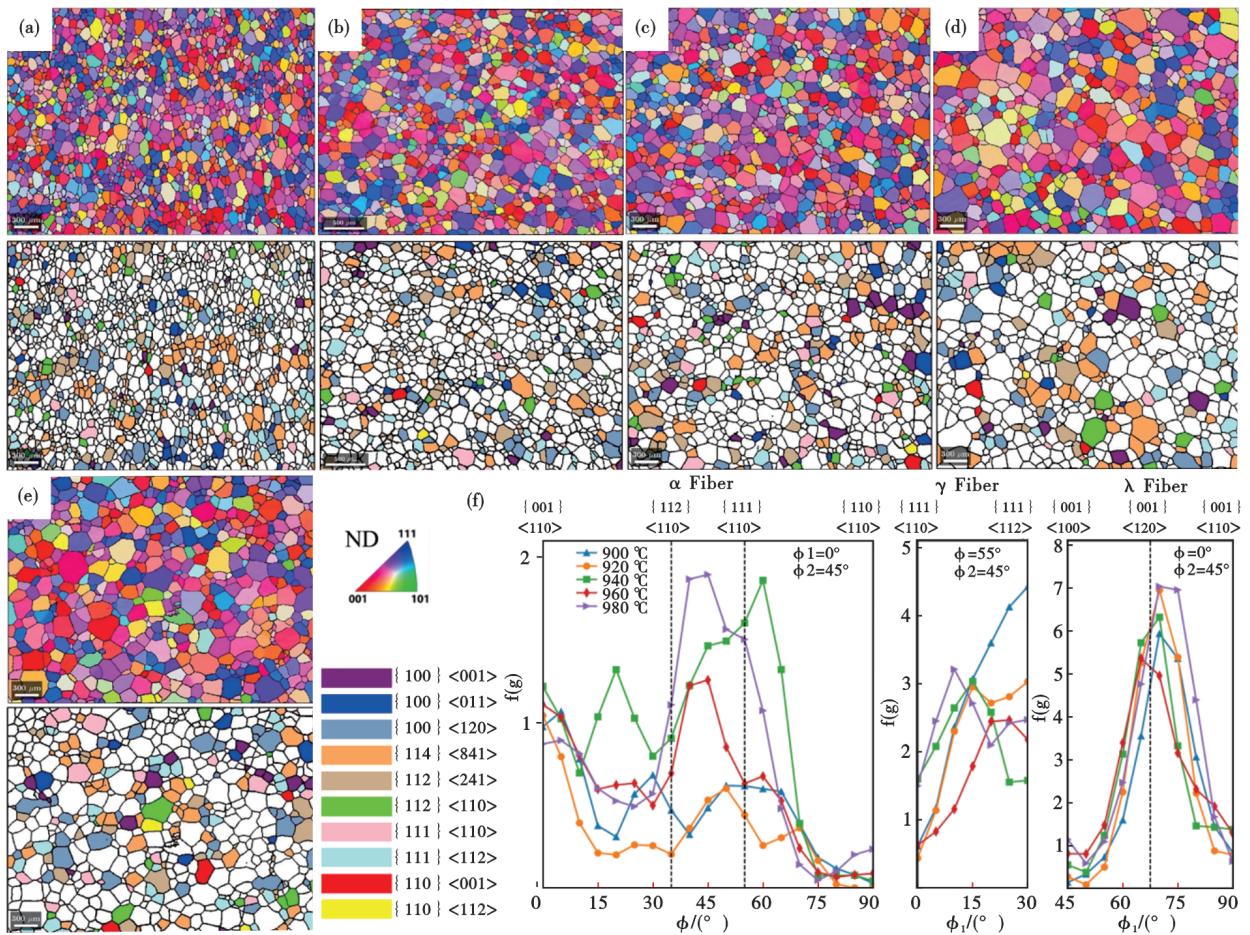


图 6 900 °C(a)、920 °C(b)、940 °C(c)、960 °C(d)和 980 °C(e)退火后的晶粒取向分布图(上)和典型晶粒分布图(下)及取向密度分布图(f)

Fig. 6 Grain orientation distribution maps (top), typical grain distribution maps (bottom), and orientation density distribution maps (f) after annealing at 900 °C (a), 920 °C (b), 940 °C (c), 960 °C (d), and 980 °C (e)

先形成位点,同时,为新生λ晶粒的形核与生长提供了有利条件^[2-3]。通过进一步观察发现,A区和B区不仅在晶粒尺寸上存在差异,其晶粒取向分布也呈

现出显著区别,如图4(c、d)所示。细晶区内主要分布着紫色{100}<001>取向晶粒和蓝色{100}<011>取向晶粒,这些均为λ纤维织构的典型取向,同时还

可观察到少量 $\{114\}\langle 841\rangle$ 、 $\{112\}\langle 241\rangle$ 、 $\{111\}\langle 110\rangle$ 和 $\{111\}\langle 112\rangle$ 取向晶粒。虽然冷轧板中 $\{111\}\langle 110\rangle$ 和 $\{111\}\langle 112\rangle$ 取向的变形晶粒含量较低,但由于其具有较高的冷轧储能,在再结晶初期即表现出优先形核特性^[5-7]。此外,细晶区内 $\{114\}\langle 841\rangle$ 取向晶粒的存在也得到证实。根据文献[2-4]报道, $\{114\}\langle 841\rangle$ 变形晶粒的晶界、晶粒内部残留的 λ 取向晶粒以及 α 取向晶粒附近均被认为是再结晶形核的优先位置,这些区域对退火过程中最终组织的形成具有重要影响。

粗大的再结晶晶粒区域主要由 $\{100\}\langle 120\rangle$ 以及 $\{114\}\langle 841\rangle$ 、 $\{112\}\langle 241\rangle$ 取向 α^* 纤维织构组成。因此,本实验研究结果再次证明,晶粒内剪切带的形成对最终退火后织构类别具有重大影响。经测定,780、800 °C 退火后的晶粒尺寸均为 8~9 μm ,过小的晶粒尺寸不利于磁性能的提升。

图 5 是 780、800 °C 退火后的织构 ODF 图,可见,经过 780、800 °C 退火 3 min 后,织构类型没有明显的区别,均为 λ 纤维织构、 α^* 纤维织构和 γ 纤维织构,且织构的峰值集中在 $\{100\}\langle 120\rangle$ 、 $\{111\}\langle 112\rangle$ 等位置。高强度的 γ 纤维织构的存在对磁性能是不利的。

图 6 上是 900~980 °C 退火后的金相组织,相比<

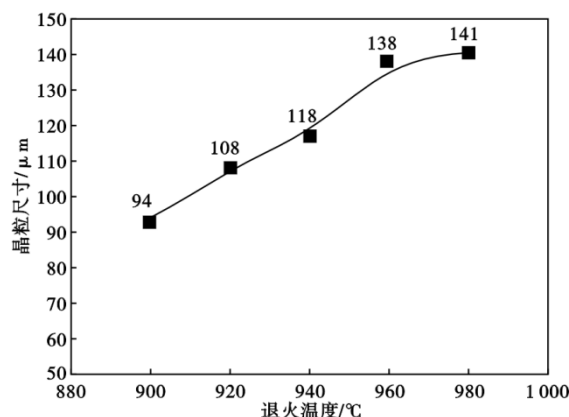


图 7 900~980 °C 退火后的晶粒尺寸

Fig. 7 Grain size after annealing at 900 °C–980 °C

800 °C 温度退火时的组织晶粒明显长大。900 °C 退火时,晶粒的粒径分布不均,随着退火温度升高,晶粒尺寸逐渐增大,且晶粒粒径分布达到均匀。当退火温度超过 960 °C 时,晶粒长大不明显,如图 7 所示。

由图 6 的典型晶粒取向的分布图和图 6(e) 可知,900 °C 以上温度退火后,对最终成品的磁性能较为有利 λ 织构和 α^* 逐渐增强,典型的晶粒取向主要有 $\{100\}\langle 001\rangle$ 、 $\{100\}\langle 011\rangle$ 、 $\{100\}\langle 120\rangle$ 、 $\{114\}\langle 841\rangle$ 、 $\{112\}\langle 241\rangle$,而以 $\{111\}\langle 112\rangle$ 、 $\{111\}\langle 110\rangle$ 为主的 γ 织构有逐渐降低的趋势,说明退火温度升高

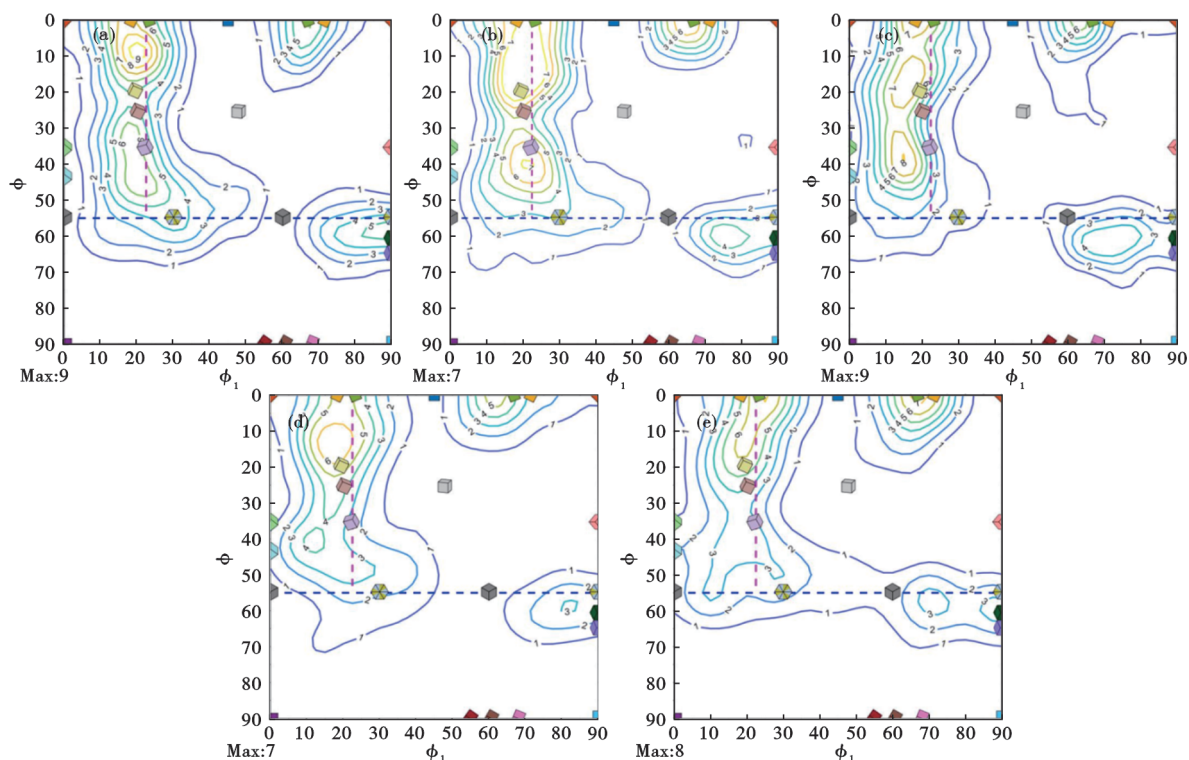


图 8 不同温度退火后的织构 ODF 图:(a)900 °C,(b)920 °C,(c)940 °C,(d)960 °C,(e)980 °C

Fig. 8 ODF map of texture after annealing at different temperatures : (a) 900 °C , (b) 920 °C , (c) 940 °C , (d) 960 °C , (e) 980 °C

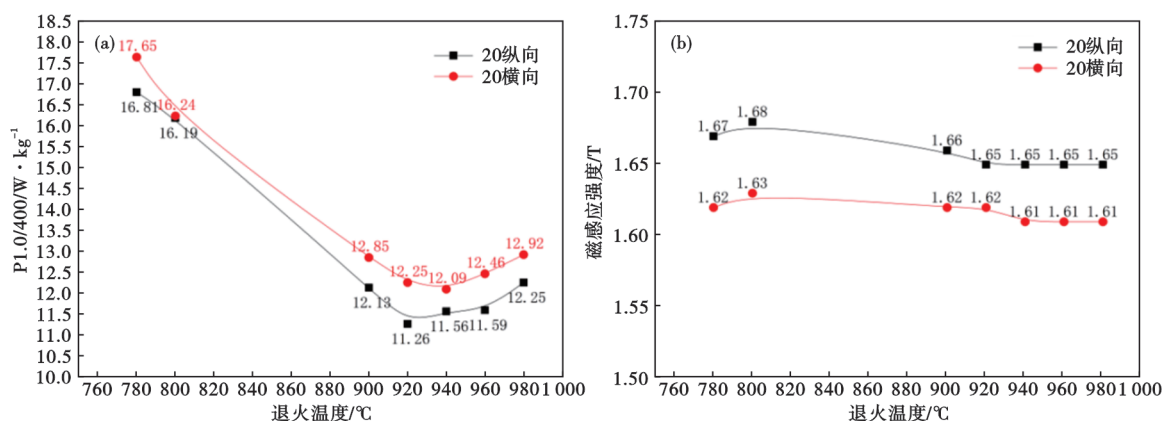


图 9 不同退火温度后的高频铁损(a)和磁感应强度(b)

Fig. 9 High frequency iron loss (a) and magnetic polarization intensity (b) at different annealing temperatures

能够促进λ纤维织构的生成,并抑制γ纤维织构的生长。

图 8 是 900~980 °C 退火后的织构 ODF 图,织构类型均为 λ 纤维织构、α* 纤维织构和 γ 纤维织构。与 ≤800 °C 退火不同的是,当退火温度 ≥900 °C 时织构最强峰值主要集中在 {114} <841> 和 {100} <120> 处,强度几乎不变,但 γ 纤维织构的强度减弱。而且随着退火温度由 900 °C 进一步升高到 980 °C, γ 纤维织构的强度进一步减弱。

由图 9(a) 可知,随着退火温度升高,铁损 P1.0/400 呈先降后升的趋势,在退火温度为 920~960 °C 达到最小,且波动范围较小。当退火温度达到 980 °C 时,高频铁损再一次升高。图 9(b) 为磁感应强度随退火温度的变化曲线,可见,当退火温度由 780 °C 升高至 820 °C,磁感应强度逐渐升高;当退火温度高于 920 °C 时,提升退火温度,磁感应强度几乎不变。而且,在整个退火温度范围内,纵向的高频铁损始终低于横向,且磁感应强度始终高于横向^[8]。

由图 9(b) 可知,随退火温度升高,磁感应强度呈现先升高后降低的趋势。磁感应强度主要与织构和晶粒尺寸有关,无取向硅钢的磁晶各向异性使不同的晶体方向磁化时消耗的磁化能不同,通常较低的磁晶各向异性在易磁化 <100> 的方向,因此,可以通过强化 λ 织构和弱化 γ 织构来提高磁感应强度。由图 8 可知,γ 纤维织构的强度随退火温度的升高逐渐减弱,因此,退火板中的有利织构占比逐渐增高。此外,磁感应强度会随着再结晶晶粒尺寸的升高而下降,当退火温度高于 920 °C 后,晶粒尺寸长大的程度与织构强度的变化有限。因此,在织构和晶粒尺寸的共同影响下,呈现出先升高后降低的趋势。硅钢铁损的组成包括涡流损耗和磁滞损耗,晶粒尺寸的增大会降低磁滞损耗,但使涡流损耗增

大,因此,存在最佳晶粒尺寸范围。从实验的结果看,最佳晶粒尺寸是 108~138 μm,相应的退火温度是 920~960 °C^[9-10]。

如图 10 所示,经过不同温度热处理后的材料力学性能变化明显。随着热处理温度的提升,实验钢的抗拉强度呈现递减趋势,然而在 920 °C 至 960 °C 区间内,强度值基本保持稳定。通过对比图 9 的数据分析可知,该温度区间不仅能够确保材料获得优异的电磁特性,同时可维持稳定的机械性能,实现材料性能的优化平衡。实验表明,采用 920 °C 热处理工艺制备的 0.20 mm 无取向硅钢材料展现出卓越的性能指标:屈服强度达到 426 MPa,纵向磁感应强度为 1.65 T,铁损 P1.0/400 为 11.26 W/Kg。基于该工艺参数生产的新能源无取向硅钢,已成功应用于新能源汽车驱动电机制造,其技术指标与宝钢、首钢等龙头企业同类产品具有同等竞争力。

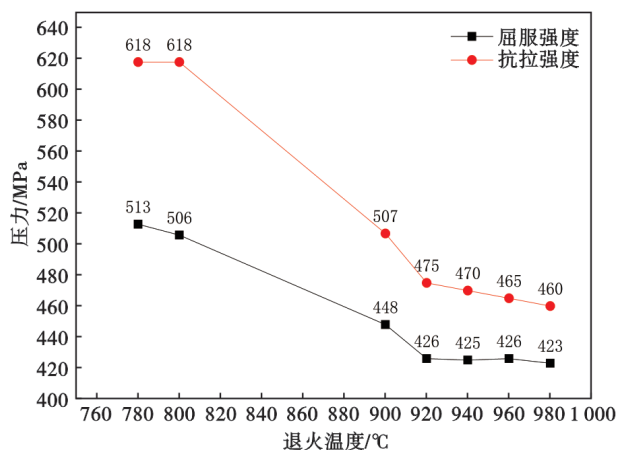


图 10 不同退火温度下的力学性能

Fig. 10 Mechanical properties at different annealing temperatures

3 结论

1)当退火温度 ≤ 800 °C时,晶粒尺寸不均匀,在细晶区主要以 λ 纤维织构为主,同时也会形成部分 $\{114\}\langle 841\rangle$ 、 $\{112\}\langle 110\rangle$ 、 $\{111\}\langle 112\rangle$ 取向晶粒,而粗晶区域主要以 $\{114\}\langle 841\rangle$ 、 $\{112\}\langle 241\rangle$ 、 $\{100\}\langle 120\rangle$ 取向晶粒为主。

2)当温度退火 ≥ 900 °C时,随着退火温度升高, $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构占比逐渐减小,而 $\{100\}\langle 001\rangle$ 织构

的占比逐渐增多,退火温度升高会促进 λ 纤维织构的生成,且抑制 γ 纤维织构的生长。

3)随退火温度的升高,晶粒逐渐长大,但高频铁损P1.0/400先降低再升高,在920~960 °C达到最小值。在本实验的条件下,最佳晶粒尺寸是108~138 μm ,相应的退火温度是920~960 °C。

4)随退火温度的升高,强度逐渐降低,但在920~960 °C范围内变化不明显,可在此温度范围内选择成品的最终退火温度。

参考文献

- [1] 张 鹏. 新能源产业发展与硅钢用材特点浅析[J]. 冶金管理, 2024(7): 23-26+31.
- [2] Li Z H, Xie S K, Wang G D, et al. Ultrathin-gauge high silicon non-oriented electrical steel with high permeability and low core loss fabricated by optimized two-stage cold rolling method[J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111593.
- [3] 柳金龙, 沙玉辉, 柯云海, 等. 轧制复合法制备硅浓度梯度高硅钢薄带的织构演变[J]. 功能材料, 2014, 45(21): 21140-21143.
- [4] Qin J, Liu D F, Yue Y, et al. Effect of normalization on texture evolution of 0.2-mm-thick thin-gauge non-oriented electrical steels with strong η -fiber textures[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(11): 1219-1227.
- [5] 姜世勇, 陈 祥, 林 媛, 等. 退火温度对超高强度无取向硅钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(7): 254-261.
- [6] 黄 俊, 罗海文. 退火工艺对含Nb高强无取向硅钢组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 377-384.
- [7] 张净源, 任慧平, 金自力, 等. 新能源汽车用含稀土无取向硅钢生产过程中组织、织构演变[J]. 金属热处理, 2020, 45(10): 99-103.
- [8] 张兴海, 杨 超, 贾宝瑞, 等. 退火温度对双辊薄带连铸高强度无取向硅钢组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(11): 1000-1005.
- [9] 裴英豪, 王东戈, 夏雪兰. 冷轧方式与退火温度对无取向硅钢组织、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): 372-379+456.
- [10] 何忠治, 赵 宇, 罗海文. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 53-60.