

热轧板初始组织对冷轧无取向硅钢织构演变的影响

刘朋成¹ 金自力¹ 任慧平¹ 闫志飞¹ 张磊²

(1 内蒙古科技大学材料科学与冶金学院, 包头 014010; 2 包钢集团无缝钢管厂, 包头 014010)

摘要 研究了 27.5 mm 热轧板的初始组织(热轧态, 850 °C 退火, 950 °C 退火)对冷轧态和 870 °C 退火的 0.5 mm 冷轧无取向硅钢 50W600 薄板(∕% : 0.004C, 0.33Si, 0.38Mn, 0.099P, 0.007S, 0.32Al)织构演变的影响。结果表明, 经冷轧后冷轧板织构中 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 织构密度明显增大, 未退火热轧板轧成的冷轧板织构密度较退火热轧板轧成的冷轧板强; 经未退火热轧板冷轧成的薄板再结晶退火后的织构中主要为 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 、 $\{110\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$, 退火热轧板冷轧成的薄板再结晶退火后的织构除 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{110\} \langle 011 \rangle$ 外还有密度较强的高斯织构。

关键词 无取向硅钢 热轧板初始组织 冷轧板 再结晶退火 织构

Effect of Original Structure of Hot Rolled Plate on Texture Evolution of Cold Rolled Non-Oriented Silicon Steel

Liu Pengcheng¹, Jin Zili¹, Ren Huiping¹, Yan Zhifei¹ and Zhang Lei²

(1 Materials and Metallurgy Engineering College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010; 2 Seamless Steel Tube Plant, Baogang Group, Baotou 014010)

Abstract The effect of original structure of 27.5 mm hot rolled plate (hot rolled status, 850 °C annealed, 950 °C annealed) on evolution of texture of cold rolled status and 870 °C annealed 0.5 mm cold rolled non-oriented silicon steel 50W600 sheet (∕% : 0.004C, 0.33Si, 0.38Mn, 0.099P, 0.007S, 0.32Al) has been studied. Results show that after cold rolling the texture density of $\{100\} \langle 011 \rangle$ and $\{112\} \langle 110 \rangle$ in texture of cold rolled sheet increases obviously, and the texture density of sheet cold-rolled by non-annealed hot rolled plate is larger than that cold-rolled by annealed hot rolled plate; in texture of recrystallization annealed sheet cold-rolled by non-annealed hot rolled plate, the main texture is $\{100\} \langle 011 \rangle$, $\{110\} \langle 011 \rangle$ and $\{111\} \langle 112 \rangle$, while in texture of recrystallization annealed sheet cold-rolled by annealed hot rolled plate, besides $\{100\} \langle 011 \rangle$ and $\{110\} \langle 011 \rangle$ there is higher density Goss-texture.

Material Index Non-Oriented Silicon Steel, Original Structure of Hot Rolled Plate, Cold Rolled Sheet, Recrystallization Annealing, Texture

无取向硅钢主要用于大中型电机、发电机以及微电机、镇流器和小型变压器等的铁芯,其主要磁性能要求是低铁损、高磁感。铁损和磁感属于组织敏感磁性,它们除与化学成分有关外,还与内部组织结构有关^[1]。如晶粒大小、杂质和合金元素含量、夹杂物数量和分布、织构分布和内应力等因素都会对无取向硅钢的磁性能产生明显的影响^[2]。在无取向硅钢生产中,主要是使晶体中含有较多易磁化 $\langle 100 \rangle$ 方向的 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 面织构平行于轧面,减少难磁化 $\{111\}$ 及 $\{112\}$ 织构的强度^[3],影响上述织构强度的主要因素与无取向硅钢的内部组织结构与生产工艺密切相关,文献[4,5]表明,冷轧基料组织、织构和第二相存在形式分别对成品的磁性能有重要的影响,其中,热轧织构会直接影响到电工钢的最终织构^[6]。

1 试验材料和方法

材料源于国内钢厂生产 50W600 硅钢的原料,

其成分(∕%)为:0.004C、0.33Si、0.38Mn、0.099P、0.007S、0.32Al。

为了获得不同组织状态冷轧基料,热轧板分别在 850、950 °C 保温 30 min,退火过程均采用到温装炉加热,保温后空冷至 600 °C 然后在箱式炉中保温 40 min。调整后试样(长 7 000 mm、宽 800 mm、厚 27.5 mm)酸洗后用带有张力的轧机,在同一冷轧工艺下轧至 0.5 mm,然后模拟现场连续退火过程,退火温度为 870 °C,退火时间 3.5 min,退火过程均采用到温装炉加热,保温后水淬。由于材料原始碳含量较低,退火气氛使用干的分解氨。用光学显微镜观察热轧、冷轧和退火后试样的金相组织;用 Image-tool 软件测量试样的平均晶粒大小,观察面为与轧制方向平行的纵截面;用西门子 D-5000 型 X 射线衍射仪对不同冷轧基料和冷轧板试样的表面织构进行测试(Mo 靶)。首先检测试样的 $\{110\}$ 、 $\{200\}$ 和 $\{211\}$ 三个不完全极图,然后采用极数展开法计算

试样的取向分布函数(ODF)。

2 试验结果及分析

2.1 冷轧基料的组织及织构特征

2.1.1 组织特征

从图 1(a)中可以看出,原始热轧板组织、晶粒尺寸和分布状态从边部至中心有一定的差异。边部晶粒主要为铁素体等轴晶,形状呈不规则的多边形;而从边部稍向中心处晶粒长大,呈条状变形晶粒;到中心处的晶粒更加拉长,基本呈拉长的纤维状分布并且有明显的热轧形变带。图 1(b)显示热轧板经 850 °C 保温后晶粒明显长大,纤维状组织消失,晶粒大小还不均匀,经测量晶粒平均尺寸约为 53.09 μm。图 1(c)为热轧板经 950 °C 保温,晶粒更加粗化平均晶粒尺寸达到 72.83 μm。

2.1.2 织构特征

从图 2(a)中可以看出,原始热轧板表面织构种

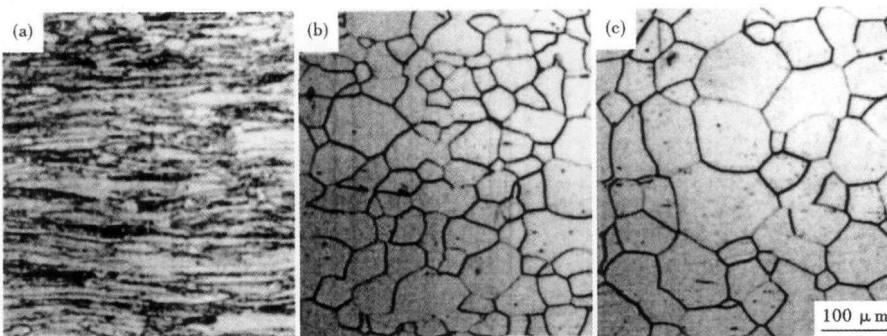


图 1 27.5 mm 热轧板的组织形貌:(a)原始未退火组织;(b)850 °C 退火;(c)950 °C 退火
Fig.1 Morphology of structure of 27.5 mm hot rolled plate: (a) original non-annealed; (b) annealed at 850 °C; (c) annealed at 950 °C

类较多,并且比较分散。其中旋转立方织构 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 密度比较强。由图 2(b)可以看出,热轧板经 850 °C 保温后,织构主要集中在 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 附近,其他织构比较均匀比图 2(a)中更分散。图 2(c)得出热轧板经 950 °C 保温后织构主要聚集在 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 附近。与图 2(a)(b)相比,经 950 °C 退火后织构种类明显减少。

2.2 冷轧退火织构特征

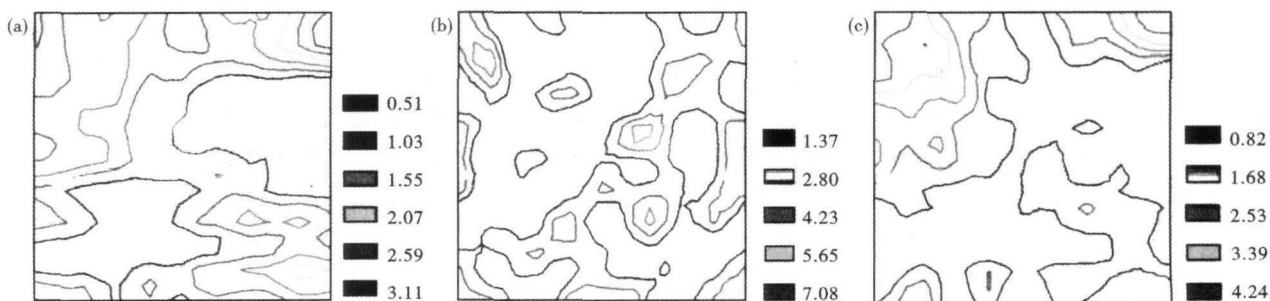


图 2 无取向硅钢热轧板取向分布函数(ODF)截面图($\phi_2 = 45^\circ$):(a)原始未退火组织;(b)850 °C 退火;(c)950 °C 退火
Fig.2 Texture ODF section diagram of non-oriented silicon steel hot rolled plate ($\phi_2 = 45^\circ$): (a) original non-annealed; (b) annealed at 850 °C; (c) annealed at 950 °C

图 3(a)中织构主要聚集在 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{114\} \langle 110 \rangle$ 附近,织构强度达到 16,其他织构种类较少且强度低,图 3(b)显示经 850 °C 组织调整的冷硬板与图 3(a)对比, γ 线上织构明显增强, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构组分取向密度大约在 3.5。 α 线上织构仍是主要织构,其中 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 织构密度较大,但较图 3(a)相比有所降低,取向密度为 6.5。图 3(c)与图 3(b)比较, γ 线上织构基本消失, α 线上的织构强度增加但与图 3(a)相比较低, $\{100\} \langle 011 \rangle$ 附近织构取向密度达到 13, $\{112\} \langle 110 \rangle$ 织构组分变化不大。以上试验结果可以看出,冷轧前后的织构类型基本相同,主要

织构为 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$,说明织构有继承性。冷轧后织构强度明显增高且 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 最强是由于形变诱发晶界迁移造成的。不同取向的晶粒在形变过程中将储存能按以下顺序增高 $\{100\} \langle 011 \rangle < \{112\} \langle 110 \rangle < \{111\} \langle 110 \rangle$,变形过程中晶界将向具有较高储存能的晶粒移动^[6],这样具有较低储存能的 $(100)[011]$ 织构逐渐吞噬掉储存能高的 $(111)[011]$ 和 $(111)[112]$ 织构最后形成较强的 $(100)[011]$ 织构。

由图 4 可以看出,3 种冷轧基料退火后的织构强度明显弱于其冷轧态的织构强度,但是 3 种冷轧基料退火后的织构强度基本相当。图 4(a)所示没

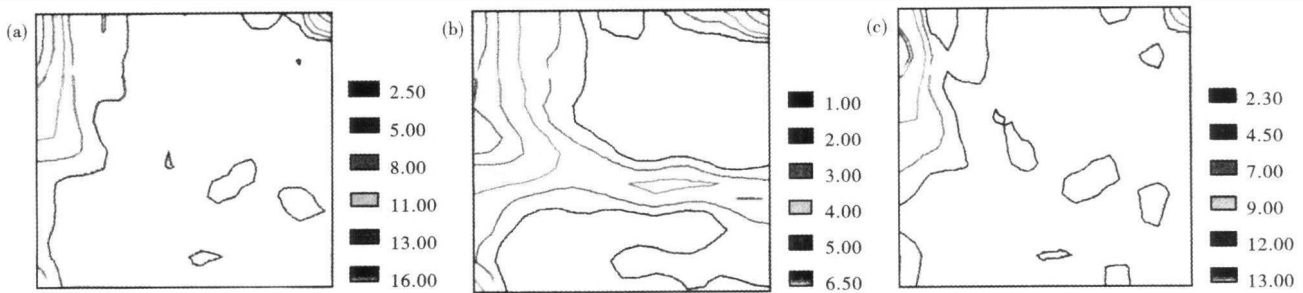


图3 不同状态热轧板轧成的冷轧板组织的 ODF 截面图($\phi_2 = 45^\circ$),热轧板状态:(a)原始未退火组织;(b)850 °C退火;(c)950 °C退火
Fig. 3 Texture ODF section diagram ($\phi_2 = 45^\circ$) of cold rolled sheet rolled by hot rolled plate with different status: (a) original non-annealed; (b) annealed at 850 °C; (c) annealed at 950 °C

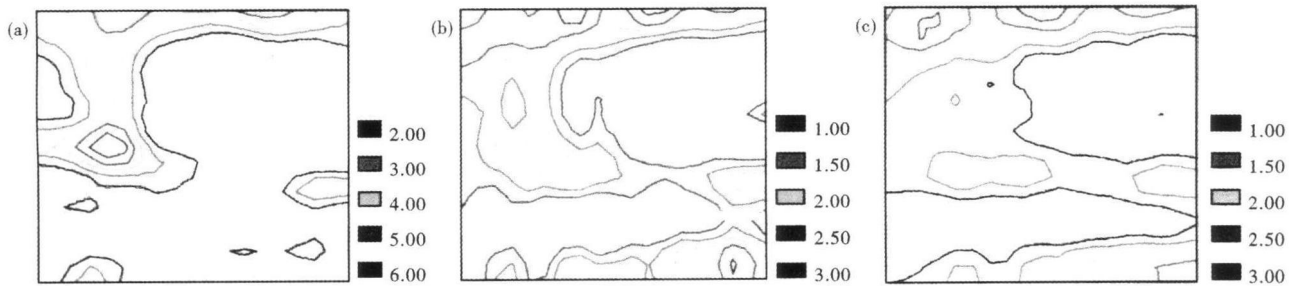


图4 不同状态热轧板轧成冷轧板再结晶组织的 ODF 截面图($\phi_2 = 45^\circ$),热轧板状态:(a)原始未退火组织;(b)850 °C退火;(c)950 °C退火

Fig. 4 Recrystallization texture ODF section diagram ($\phi_2 = 45^\circ$) of cold rolled sheet rolled by hot rolled plate with different status: (a) original non-annealed; (b) annealed at 850 °C; (c) annealed at 950 °C

有明显的 γ 线和 α 线织构,主要有 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 $\{110\} \langle 011 \rangle$ 织构,其中 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构最强达到6。冷轧基料经调整后织构如图4(b)(c)所示有 γ 纤维,但织构较弱,主要织构还是集中在 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{110\} \langle 011 \rangle$ 织构附近,此外,高斯织构附近密度约2.5。这说明热轧板经850 °C和950 °C组织调整后晶粒长大,在以后的冷变形过程中形成较多的剪切带,由于剪切带的密度较高,再结晶过程中高斯取向晶核容易在此形核^[7,8],所以在图4(b)(c)中发现高斯织构取向。另外, γ 线上织构容易在热轧板的原始晶界处形核,850 °C和950 °C组织调整后晶粒变大,原始晶界变少,图4(a)(b)(c)显示 γ 线上织构强度逐渐降低。

3 结论

(1)冷轧织构中 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 织构密度明显增大,其中原始热轧板轧成的冷轧板织构密度最强达16,经950 °C退火调整的基料次之为13。

(2)原始热轧板再结晶织构主要在 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 、 $\{110\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构附近,其中 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 、 $\{110\} \langle 011 \rangle$ 织构强度为4.5

左右, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构强度为6,但是,调整后的冷轧基料再结晶织构中除 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 和 $\{110\} \langle 011 \rangle$ 外还有密度较强的高斯织构。

内蒙古自然科学基金资助(200308020202)

参考文献

- 何忠治. 电工钢的现状与展望. 中国冶金, 2001, 53(4): 14
- 毛卫民. 金属材料的晶体学结构与各向异性. 北京: 科学出版社, 2002
- 金自力, 任慧平, 张红杰. 无取向硅钢退火组织的演变与磁性性能关系的研究. 材料热处理学报, 2007, 28(2): 77
- 何忠治. 电工钢. 北京: 冶金工业出版社, 1996
- 康永林, 傅杰, 柳得樽, 等. 薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- Marcos F de Campos, Fernando J G Landgraf, Ivan G S Falleiros. Texture Evolution during the Processing of Electrical Steels With 0.5% Si and 1.25% Si. ISIJ International, 2004, 44(10): 1733
- Yang P, Xie Q, Meng L, et al. Dependence of Deformation Twinning on Grain Orientation in a High Manganese Steel. Scripta Material, 2006, 55(10): 629
- Park J T, Szpunar J A. Texture Development during Grain Growth in Non-oriented Electrical Steels. ISIJ International, 2005, 45(5): 743

刘朋成(1987-),男,硕士研究生,硅钢组织组织和性能研究。

收稿日期:2011-10-10