

含铜取向硅钢磁性能波动成因分析

杨平^{1)✉}, 王子良¹⁾, 刘恭涛¹⁾, 沈雪梅²⁾, 薄丹青²⁾, 毛卫民¹⁾, 汤曙光³⁾

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 无锡晶龙华特电工有限公司, 无锡 214151

3) 马钢股份有限公司第一钢轧总厂, 马鞍山 243011

✉ 通信作者, E-mail: yangp@mater.ustb.edu.cn

摘要 含铜取向硅钢是一种成本低、成品率高的新型 CGO 取向硅钢。其制备工艺明显区别于主流的低温加热渗氮高磁感 (HiB) 取向硅钢, 其产品的磁性能波动范围显著高于低温渗氮钢。本文对实际生产中收集到的一些含铜 CGO 钢成品板中的组织与磁性能进行研究分析, 尝试建立不同组织和磁性能相互间的对应关系, 并对磁性能波动现象进行分析。分析结果表明, 含铜 CGO 钢成品板组织与抑制剂有明确的对应关系, 而晶粒尺寸与 Goss 晶粒取向度并不完全呈对应关系。同时对热轧板中的异常组织进行了深入研究, 认为热轧板表层脱碳区和中心层粗大形变晶粒的存在, 直接影响了抑制剂的分布, 导致最终成品板中组织和磁性能的波动。

关键词 取向硅钢; 铜; 磁性能; 织构

分类号 TG142

Analyses of magnetic properties fluctuation in conventional grain oriented silicon steels containing copper

YANG Ping^{1)✉}, WANG Zi-liang¹⁾, LIU Gong-tao¹⁾, SHEN Xue-mei²⁾, BO Dan-qing²⁾, MAO Wei-min¹⁾, TANG Shu-guang³⁾

1) School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Wuxi Jing-Long Hua-Te Electrical Materials Co., Ltd., Wuxi 214151, China

3) First Steel Rolling Plant, Maanshan Iron & Steel Co., Ltd., Maanshan 243011, China

✉ Corresponding author, E-mail: yangp@mater.ustb.edu.cn

ABSTRACT The conventional grain-oriented (CGO) silicon steel containing copper is a type of grain-oriented steel with low cost and high productivity. The processing parameters in CGO steels are quite different to those of low temperature heating and nitriding high permeability (HiB) grain oriented silicon steels, the fluctuation range of the magnetic properties in CGO is much higher than that of nitrided HiB steels. In this study, typical final sheets from production lines of CGO steels containing copper during early stage production were collected, and the structure, texture, and magnetic properties were determined and compared to establish a relationship between the structure of the steels and inhibitors and to elucidate the reasons for property fluctuation. The results indicate that the macrostructure in the final sheets has a relationship with inhibitors and that the grain sizes do not show monotonous behavior. In addition, the defective microstructure in hot-rolled bands and intermediately annealed sheets are investigated and a coarse grain region and a decarburized surface layer are observed. Such regions are considered to influence the inhibitor distribution and impact the fluctuation in structure and its properties.

KEY WORDS grain-oriented silicon steels; copper; magnetic properties; texture

含铜普通取向钢(简称含铜 CGO 钢)的特点是 其磁性能明显高于早期的传统 CGO 取向钢,例如磁

感一般为 $B_8 = 1.88 \sim 1.90$ T, 而传统 CGO 钢为 $1.80 \sim 1.85$ T. 含铜 CGO 钢以固溶温度较低的 Cu_2S 作为主要抑制剂, 免去热轧板的常化工艺, 二次冷轧后直接进行二次再结晶退火, 因此生产成本显著降低. 近 10 年来我国开始尝试生产含铜 CGO 钢, 如今已掌握该取向钢制备工艺, 虽然对其组织、抑制剂、结构与磁性能关系有一定研究^[1-8], 但并不完善, 相比之下更多的研究集中于低温渗氮 HiB 钢. 我国对目前取向钢的研究现状, 各种取向钢的工艺、成分、磁性能对比综述见文献[9]. 含铜取向钢在生产初期常出现磁性能波动现象, 本文对收集到的一些成品板中的组织、结构和磁性能关系进行分析. 含铜取向钢与目前低温渗氮钢的本质差别是: 热轧后不常化, 渗氮钢需要常化; 含铜取向钢为两次轧法, 渗氮钢为一次轧法; 含铜取向钢的一次再结晶组织在非常缓慢的升温速度下完成, 渗氮钢的一次再结晶组织在快速加热下形成. 含铜取向钢固有抑制剂分布相对均匀, 总体抑制剂含量少(但远高于传统 CGO 钢), 而渗氮钢采用追加抑制剂技术, 板材表层到中心层内的抑制剂不均匀分布, 总含量高, 约为 2.70×10^{-4} 的氮(质量分数), 此外还有偏析元素 Sn 的抑制晶粒长大作用, 更有效提高了抑制剂的钉扎能力. 虽然文献[1-8]已对含铜 CGO 钢进行了组织、结构特征及演变规律的分析, 但对实际生产线上的异常情况缺乏介绍. 虽然在实际生产中, 板坯加热、热轧、冷轧、退火都采用了固定的工艺路线, 但实际组织及磁性能仍然存在波动, 这说明抑制剂也应存在波动, 本文就此问题开展研究, 力图找到磁性能波动的原因. 但要真正完全掌握波动原因及解决办法, 还需深入研究各个阶段工艺、抑制剂、组织等的关联性.

1 实验材料与方法

本文收集了不同性能的含铜 CGO 成品板, 其设计成分相同, 实际成分略有偏差, 化学成分(质量分数)如下: $\sim 0.04\%$ C, $\sim 3.1\%$ Si, $\sim 0.1\%$ Mn, $\sim 0.008\%$ S, $\sim 0.02\%$ Al, $\sim 0.008\%$ N, $\sim 0.5\%$ Cu, 剩余成分为 Fe. 大量数据统计表明, 微量成分波动不会产生系统的磁性能单向变化. 对部分样品的对应前期工艺下的样品以及非对应的样品进行分析. 样品形貌采用光学显微镜分析, 取向特征采用扫描电镜(Zeiss Ultra 55 型)下的电子背散射衍射(牛津仪器公司的 EBSD 系统)分析. 现场磁性能测试样品尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 单片(长沙天恒仪器公司), 由企业测出. 实验室磁性能测试(中国计量院

2000E 型)样品尺寸为 $30 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$.

2 实验结果及分析

2.1 不同类型的成品组织及对应的磁性能关系

不同类型的成品组织及对应的磁性能关系数据见图 1 所示, 图 1(a) ~ 图 1(e) 给出 5 种不同的组织并列出对应的磁性能数据. 图 1(a) 为典型含线晶组织成品板, 均匀长大的细晶区呈线状沿轧向分布, 这表明抑制剂沿横向分布明显不均匀. 线晶区较多, 磁感只有 $B_8 = 1.80$ T. 抑制剂缺乏的位置对应均匀长大的初次再结晶晶粒, 二次晶粒无法吞食这些一次晶粒, 只能沿轧向继续生长成为长条形状. 推测抑制剂分布不均匀及择优沿轧向分布是这种成品板磁性能差的主要原因(后文将对含有线晶区的成品板二次晶粒进行取向分析). 图 1(b) 中线晶数目明显减少, 绝大多数区域二次再结晶完全, 磁性能显著提高, 达到 $B_8 = 1.86$ T, 铁损降到 $P_{1.7} = 1.215 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. 长条形二次晶粒比例减少, 等轴状的二次晶粒增加, 这表明抑制剂分布比图 1(a) 样品明显均匀. 图 1(c) 为本组磁性能最高样品, 磁感达到 $B_8 = 1.91$ T, 铁损降到 $P_{1.7} = 1.08 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. 此时样品中没有线晶, 对应 100% 晶粒异常长大. 注意到此时多数二次晶粒形貌为沿轧向椭圆形, 右侧区域还稍遗传沿轧向择优生长的特点, 说明抑制剂还有沿轧向不均匀分布的特点, 只是不均匀程度不高. 这三张照片表明, 在长条状二次晶粒样品中, 磁性能与线晶所占面积比例成对应关系, 随线晶区域面积减小, 磁性能呈线性上升规律变化. 这也间接表明已长大的二次晶粒高斯取向度很高. 图 1(d) 显示的成品板为 100% 晶粒异常长大, 没有线晶区, 也没有长条状二次晶粒. 晶粒尺寸大于图 1(c) 成品板, 等轴晶比例也大于图 1(c). 说明抑制剂分布均匀, 但磁感值开始下降, 为 $B_8 = 1.86$ T; 该磁感的下降不是由于线晶的存在, 而是二次晶粒的高斯取向度变差, 磁性能虽与图 1(b) 相似, 但成因不同; 因成品板二次晶粒尺寸偏大, 可推测其二次再结晶温度偏高是由于抑制剂过量引起的. 成品板中二次晶粒不是优先沿轧向生长, 而是均匀长大, 且偏高斯取向的晶粒也能长大, 导致 Goss 晶粒取向度低, 磁感下降; 同时, 晶粒尺寸过大, 磁畴变宽, 铁损升高. 根据文献[6-7], 二次再结晶温度过低或过高, 都会有偏高斯取向晶粒的生长, 如 $\{110\} \langle 227 \rangle$ 、 $\{210\} \langle 001 \rangle$ 取向晶粒($\{210\} \langle 001 \rangle$ 取向不会降低磁性能^[10]). 如果二次再结晶温度低, 二次晶粒尺寸就应该小, 而该成品板晶粒尺寸大, 故认为二次再结晶温度高. 图 1(e) 成

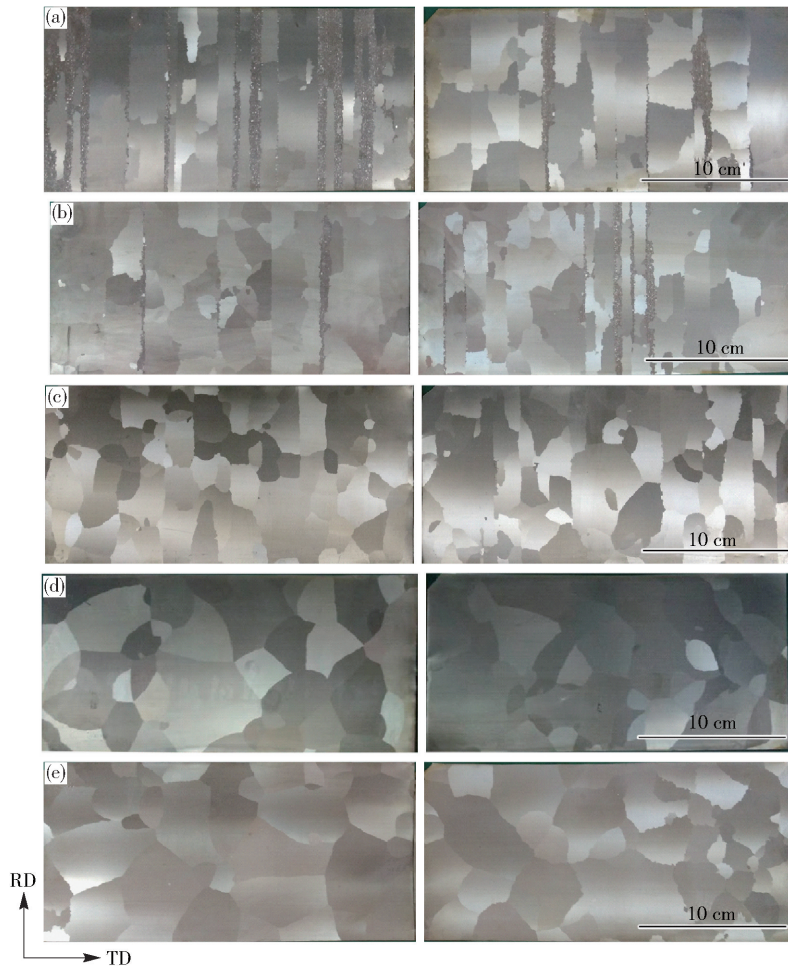


图 1 不同成品板组织. (a) $B_8 = 1.80 \text{ T}, P_{1.7} = 1.362 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; (b) $B_8 = 1.86 \text{ T}, P_{1.7} = 1.215 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; (c) $B_8 = 1.91 \text{ T}, P_{1.7} = 1.08 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; (d) $B_8 = 1.86 \text{ T}, P_{1.7} = 1.257 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; (e) $B_8 = 1.84 \text{ T}, P_{1.7} = 1.292 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$

Fig. 1 Secondary recrystallization structures of samples: (a) $B_8 = 1.80 \text{ T}, P_{1.7} = 1.362 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; (b) $B_8 = 1.86 \text{ T}, P_{1.7} = 1.215 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; (c) $B_8 = 1.91 \text{ T}, P_{1.7} = 1.08 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; (d) $B_8 = 1.86 \text{ T}, P_{1.7} = 1.257 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; (e) $B_8 = 1.84 \text{ T}, P_{1.7} = 1.292 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$

品板也是 100% 晶粒异常长大, 但二次晶粒尺寸更大, 且二次晶粒均为等轴晶, 而磁性能却进一步下降, 磁感 $B_8 = 1.84 \text{ T}$, 说明大晶粒的取向度并不高, 取向钢中并非晶粒尺寸越大的晶粒, 高斯取向度越高. 推测该样品抑制剂继续过量, 更显著地推迟了二次再结晶温度; 二次再结晶温度越高, 二次晶粒越大.

对比 5 组成品板宏观组织、磁性能数据可知, 随抑制剂的增加或抑制剂更均匀的分布, 二次再结晶比例增加, 磁性能提高, 到刚好能完成二次再结晶时, 磁性最好; 而抑制力过度增加时, 虽然二次再结晶完全, 但磁性能下降. 抑制剂过量时, 磁性能下降缓慢, 这是因为线晶以 $\{111\}$ 或 α 取向线附近的不利于磁性的取向为主, 直接降低整体 Goss 取向度. 推测长条形二次晶粒的取向度最高, 暂时并不能完全根据二次晶粒的占比确定磁性能的高低. 含铜 CGO 钢的二次晶粒尺寸和形状都不同于低温渗氮

HiB 钢, 这里的规律可能不适用于其他体系的取向钢.

对企业提供所有成品板观察侵蚀后二次再结晶组织情况、有无线晶、线晶严重程度、二次晶粒尺寸异常情况等进行分类. 统计发现: 成品板磁感 $B_8 > 1.88 \text{ T}$ 时, 所有成品板组织中均未出现线晶. 但成品板磁感 $B_8 < 1.88 \text{ T}$ 时, 出现线晶的几率极高, 所有成品铁损值均偏高, 部分样品无线晶, 可以判断与其 Goss 取向度较差有关.

成品板组织差异、磁性能变化规律性见表 1 (只分析磁感在 1.8 T 以上情况).

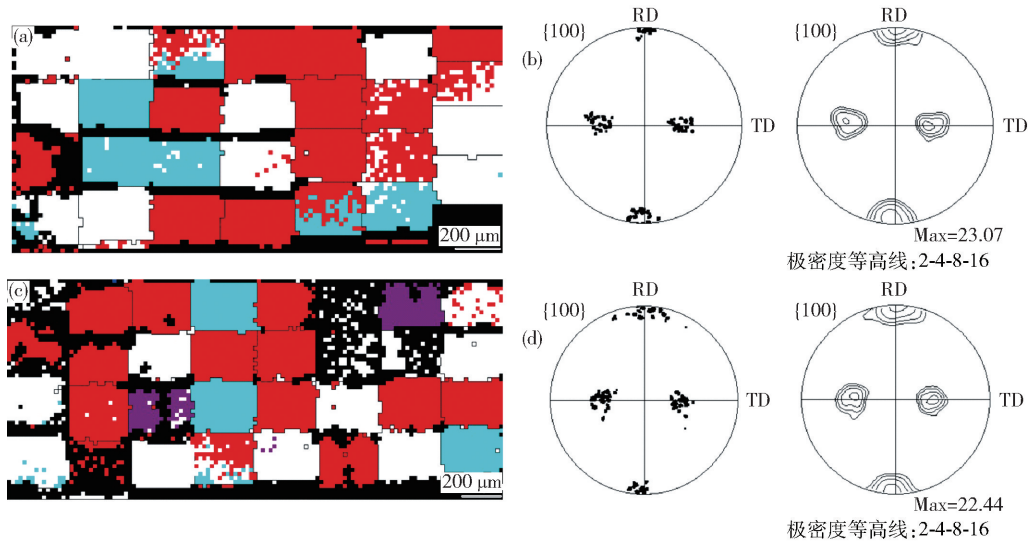
2.2 取向偏离度的分析

图 2 显示二次晶粒尺寸均较大的等轴晶组织中两种成品板取向测定结果, 其中图 2(a) 为图 1(d) 成品板中二次晶粒. 因成品板中晶粒尺寸很大, 故采用不同区域分别进行小区域取向成像的方法, 增加统计性. 两成品板平均晶粒尺寸均比较大, 铁损

表 1 成品板组织差异、磁性能变化规律性

Table 1 Relationship between magnetic properties and feature of recrystallization grains of different samples

样品编号	组织特点	磁性能特点	可能的抑制剂状态
(a)	较多线晶,二次晶粒主要为长条形	1.80 T, 1.362 W·kg ⁻¹ ; 磁性能低; 细晶区引起磁性能下降	铸坯柱状晶过多; 加热时晶粒过度长大, 导致抑制剂不均匀分布
(b)	很少量的线晶, 95% 以上的异常长大晶粒, 长条晶为主	1.86 T, 1.215 W·kg ⁻¹ ; 磁性能较高; 细晶区引起磁性能下降	抑制剂分布稍不均匀, 抑制剂量偏大, 二次再结晶温度稍低
(c)	100% 异常长大, 多数为长条晶粒, 少数为等轴状二次晶粒	1.91 T, 1.08 W·kg ⁻¹ ; 磁性能最高	抑制剂较均匀, 抑制剂量合适, 二次再结晶温度合适
(d)	100% 异常长大, 主要是等轴晶	1.86 T, 1.257 W·kg ⁻¹ ; 磁性能稍低; 部分二次等轴晶取向不正	抑制剂量稍过, 或一次晶粒稍大, 二次再结晶温度推迟
(e)	100% 异常长大, 非常粗大的等轴晶粒	1.84 T, 1.292 W·kg ⁻¹ ; 磁性能稍低; 部分粗大等轴晶取向不正; 晶粒越大, 取向不正时, 磁感下降越快	抑制剂稍过量, 或一次晶粒尺寸大, 二次再结晶较晚, 出现偏高斯取向晶粒



注: $\{110\}\langle 001\rangle$, $\{110\}\langle 227\rangle$, $\{210\}\langle 001\rangle$ 允许取向偏差 $<10^\circ$

图 2 两种大晶粒成品板取向成像(a)(c)及{100}极图(b)(d). (a, b) $P_{1.7} = 1.377 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, $B_8 = 1.89 \text{ T}$; (c, d) $P_{1.7} = 1.257 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, $B_8 = 1.858 \text{ T}$

Fig. 2 EBSD orientation images (a)(c) and {100} pole figures (b)(d) of two different kinds of samples: (a, b) $P_{1.7} = 1.377 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, $B_8 = 1.89 \text{ T}$; (c, d) $P_{1.7} = 1.257 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, $B_8 = 1.858 \text{ T}$

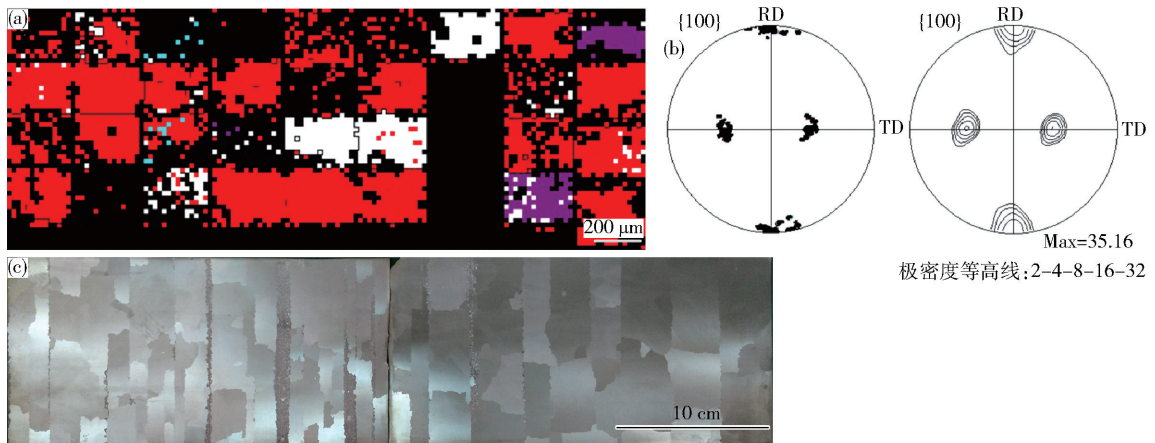
偏高,质量已低于 120 牌号. 样品(a)中二次晶粒 Goss 取向度较高,样品(b)中二次晶粒 Goss 取向度偏低, Goss 取向晶粒绕轧制方向(RD)偏转较大. 说明大晶粒尺寸成品板并不能保证 Goss 取向偏差小,且大晶粒尺寸使铁损升高,因此应该避免二次晶粒尺寸过大. 所以完全二次再结晶并非能保障磁性能达标.

图 3 为一定量线晶成品板宏观侵蚀图像及电子背散射衍射(EBSD)取向成像,其组织类似图 1(b);成品板主要为长条形二次晶粒,线晶所占面积约为 1/16,从取向成像中发现长条晶粒的取向度与图 2 两个成品板相比偏差更小,即高斯取向对应的红色区域更多,且{100}极图最高强度(35.16)明显高于图 2 两组样品(23.07, 22.44). 这说明图 3 成品板

磁性能的降低主要是线晶存在所致,二次再结晶晶粒的取向度是可以达到磁性能指标的.

图 4 为磁性能最高的图 1(c)样品的电子背散射衍射取向成像, Goss 取向度很高,准确高斯取向对应红色区域的比例较高. 这个样品的多数晶粒为长条形. 从图 3、图 4 中可推断出沿轧向生长的长条形二次晶粒取向度较高. 这种组织对应的抑制剂分布虽不均匀,但可以保障高斯取向晶粒有效生长,阻碍高偏差度的高斯取向晶粒的长大. 且不均匀抑制剂抑制高斯取向晶粒沿横向生长,限制晶粒尺寸,降低铁损.

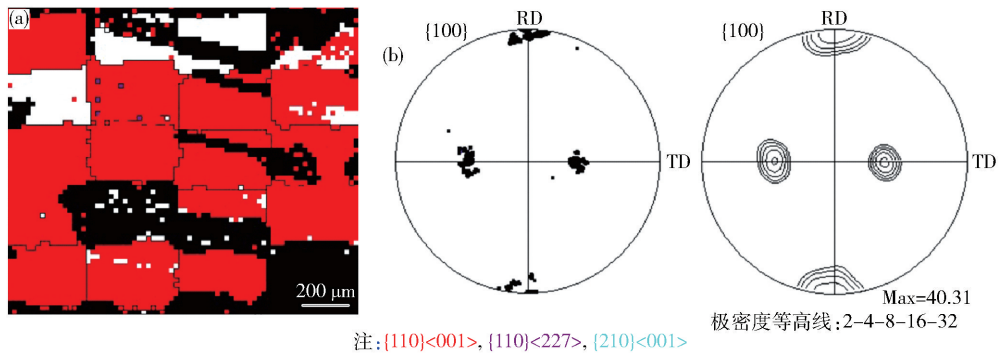
图 5 为类似于图 1(d),图 1(e)但有更大尺寸的等轴二次晶粒取向的测定图. 宏观组织照片见图 5(a),平均晶粒尺寸 3.3 cm,个别晶粒尺寸超过 5



注: $\{110\}\langle 001\rangle$, $\{110\}\langle 227\rangle$, $\{210\}\langle 001\rangle$

图 3 含线晶成品板 ($B_8 = 1.859 \text{ T}$, $P_{1.7} = 1.229 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的取向成像 (a), $\{100\}$ 极图 (b) 及宏观组织 (c)

Fig. 3 EBSD orientation images (a); $\{100\}$ pole figures (b) and secondary recrystallization structures (c) of the sample, which show the linear grains ($B_8 = 1.859 \text{ T}$, $P_{1.7} = 1.229 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$)



注: $\{110\}\langle 001\rangle$, $\{110\}\langle 227\rangle$, $\{210\}\langle 001\rangle$

图 4 长条形二次晶粒取向度的测定 ($B_8 = 1.91 \text{ T}$, $P_{1.7} = 1.08 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的取向成像 (a) 与 $\{100\}$ 极图 (b)

Fig. 4 EBSD orientation images (a) and $\{100\}$ pole figures (b) of elongated secondary recrystallization grains ($B_8 = 1.91 \text{ T}$, $P_{1.7} = 1.08 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$)

cm. $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 板单片磁性能为 $P_{1.7} = 1.11 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, $B_8 = 1.89 \text{ T}$. 从该板中沿轧向切出 $30 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 单片样品测磁性, 取出磁性高和磁性低的 2 片, 高磁性板的磁性为 $P_{1.7} = 1.007 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, $B_8 = 1.928 \text{ T}$, 低磁性能的板子磁性为 $P_{1.7} = 1.287 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, $B_8 = 1.84 \text{ T}$. 可见含铜取向钢的磁性能波动较大. 图 5 (b) ~ 5 (e) 分别给出高、低磁性能样品的取向测定数据, 可见高磁性样品其晶粒取向度也高 (图 5 (b), 5 (c)), 低磁性能样品其晶粒取向度也低 (图 5 (d), 5 (e)). 也就是说, 特大尺寸晶粒中的一部分取向偏差很大. 一般认为, 二次晶粒取向度越高, 长大越有利, 尺寸也就越大^[5]; 但在含铜 CGO 钢中, 二次晶粒尺寸与高斯取向度并不总是成正比关系.

线晶的取向特征与一次晶粒取向特点相似, 主要是 α 及 γ 取向线附近的晶粒, 将另文分析.

2.3 中间组织的分析

从图 1 到图 5 的最终磁性能、组织和局部电子

背散射衍射取向数据的成因分析还只是推测, 并不能说明实际情况. 以下分析中间工艺阶段的一些组织异常特点, 从而给出更多的信息, 使分析更接近实际情况. 不论是前期的冶炼和热轧过程, 还是后期的冷轧、中间退火、二次冷轧及高温退火过程, 尽管企业尽量控制工艺条件使其相同, 但仍做不到每批次的各阶段组织相同, 尤其是抑制剂分布的均匀性和抑制剂的尺寸难以有效检测. 连铸坯加热、均热等过程参数亦难以做到一致, 均热温度可有 17 min 的差异, 但通常认为这些差异不足以引起成品板磁性能的明显变化, 毕竟这类含铜 CGO 钢工艺成熟, 工艺窗口宽, 成品率很高.

图 6 (a), 6 (b) 显示个别热轧板上、下表层存在的脱碳层和粗晶组织. 脱碳造成晶粒尺寸粗大, 同时改变了抑制剂的析出状态, 这种区域处于板材表面时危害性更大, 它会造成中间退火后晶粒粗大且尺寸不均匀, 从而影响磁性能. 此外, 热轧板材表层附近区域再结晶程度太低, 也容易造成抑制剂沿轧

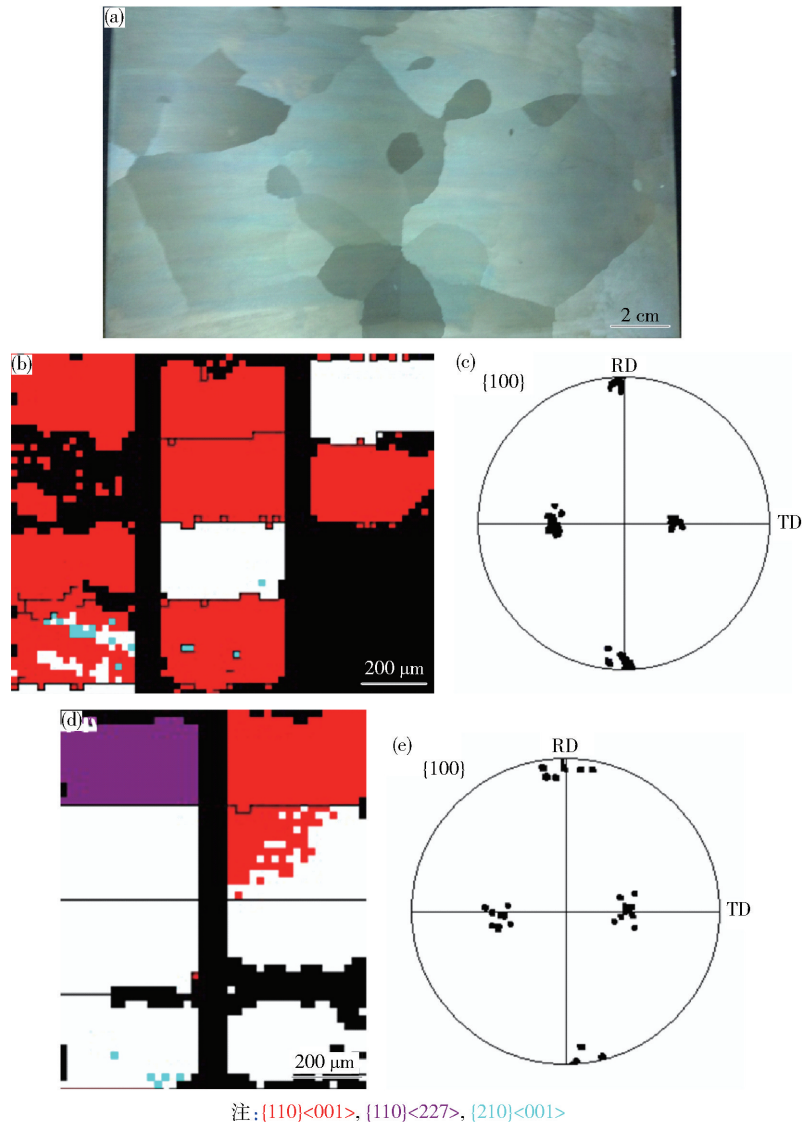


图5 成品板组织及大等轴二次晶粒取向成像与极图。(a) 成品板宏观侵蚀组织; (b) 高磁性能样品取向成像; (c) 高磁性能样品{100}极图; (d) 低磁性能样品取向成像; (e) 低磁性能样品{100}极图

Fig. 5 Secondary recrystallization structures and EBSD orientation images and {100} pole figures of large equiaxial grains: (a) macroscopical etched structures; (b) EBSD orientation images with higher magnetic properties; (c) {100} pole figures of grains with higher magnetic properties; (d) EBSD orientation images with lower magnetic properties; (e) {100} pole figures of grains with lower magnetic properties

向不均匀分布,提高成品板中出现线晶的可能性。图6(c)为另一热轧板中心层组织,可见存在粗大长条形变晶粒,如箭头所示。电子背散射衍射测定表明(见图6(d),6(e)),该晶粒取向正好是旋转立方取向{100}⟨011⟩。这些晶粒内部抑制剂分布不同于正常区域(很可能少于正常区域的抑制剂密度),尺寸较大的晶粒往往是{100}类或α取向线附近的取向。二次冷轧后在高温慢速加热退火时,{100}晶粒尺寸大于{111}晶粒,随后的二次再结晶过程中,这种{100}晶粒就可能不能被高斯取向晶粒吃掉,从而成为线晶区的一部分。

图7给出用电解法萃取抑制剂时不同热轧板及不同位置的表面低倍形貌。左侧为最终磁性能差样

品对应的热轧板边部位置的表层形貌,可见电解后表面组织很不均匀,出现呈沿轧向分布的条形组织,即电解时出现不均匀溶解;中间样品为取自该样品热轧板中心位置表层的形貌,可见表面光滑均匀,即电解时表面均匀溶解;右侧为磁性能高的样品对应的热轧板表层形貌,也表现出均匀溶解。由此可见,热轧板边部与中心部位表层的组织均匀性不同,这应与热轧板边部、中心位置温度不同有关。而右侧取自性能好的样品,对应热轧板边部表层电解萃取后表面形貌是均匀的,说明不同批次热轧板相同位置的组织的不同,即热轧工艺稳定性还不够。表面形貌的差异不仅对应晶粒形貌的不同,还应对应抑制剂分布的差异。图7中左侧热轧板表层应是形变

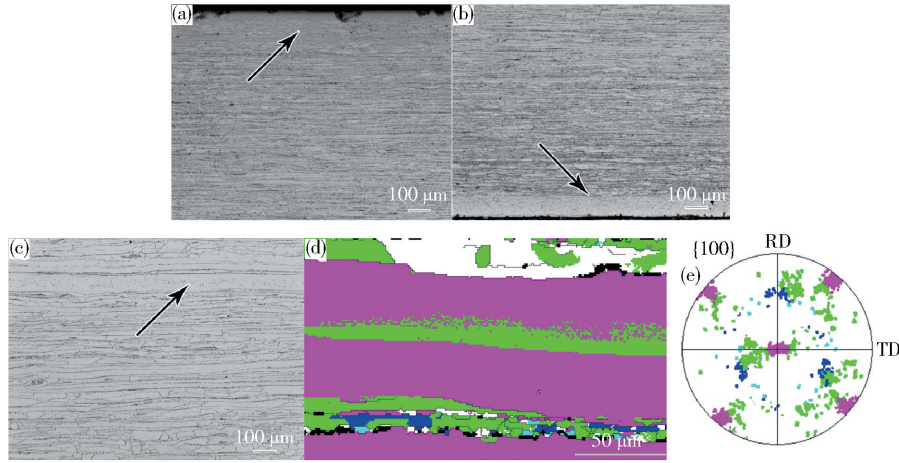


图 6 热轧板表面组织异常(a)(b), 热轧板中心处组织异常(c)以及热轧板中心处形变晶粒取向成像(d)和{100}极图(e)

Fig. 6 Optical micrographs of defective hot rolling band in the edge position (a)(b) and center (c), and the EBSD orientation map (d) and {100} pole figure (e) of coarse deformed grains in the center of defective hot rolling band

组织,而右侧表层是再结晶组织,这也是造成磁性能波动的原因之一。



图 7 电解法萃取抑制剂时不同热轧板及不同位置的表面低倍形貌(左:缺陷热轧板边部;中:缺陷热轧板边部;右:正常热轧板边部)

Fig. 7 Images of different hot rolling bands after electrolytic extraction(Left: edge position of defective hot rolling band; Middle: center of defective hot rolling band; Right: edge position of normal hot rolling band)

图 8(a)为中间退火板表层观察到的粗大晶粒。可见,图 6 显示的热轧板表层的粗晶组织会遗传给中间退火板。因为热轧板中的粗晶储能低,形变后再结晶形核率低,晶粒粗大。图 8(b)、8(c)为同一样品另一区域表层的大晶粒取向及 ODF(取向分布函数,φ₁、Φ、φ₂为欧拉角)图像,发现大晶粒主要为

{100}〈001〉附近取向晶粒(红色晶粒),这种晶粒储能低,非常稳定,在二次冷轧之后的二次再结晶阶段易形成较大尺寸晶粒,无法完全被 Goss 晶粒吞噬,最终形成细晶区域,即线晶。

2.4 单片板内磁性能波动的分析

含铜 CGO 钢的另一个缺点是同一块板不同部位磁性能波动范围比低温渗氮钢大的多。图 9 是三个不同组织成品板磁性能波动数据。1#表示较小等轴晶组织;2#表示较大等轴晶组织;3#表示长条晶组织。测定方法是单片 500 mm × 500 mm 磁性能已知的样品沿板横向依次裁成 30 mm × 300 mm 单片,测出小单片的磁性能,变异系数(标准差/均值)见表 2。可见个别位置磁性能低于标准值。铁损的变异系数高于磁感值。大晶粒组织的磁性能波动大于小晶粒组织。这种系统的大波动来源于与含铜取向钢相关的如下几个原因:(1)二次冷轧法下,中间退火后第二次形变量偏小,造成高斯种子较多,这些高斯取向种子的取向偏差大;(2)因为一次再结晶是在很缓慢的升温速度下完成的,一次晶粒尺寸过大,二次再结晶温度被推迟,不同取向偏差度的高斯晶粒都能生长,降低整体高斯晶粒取向度,导致磁性能

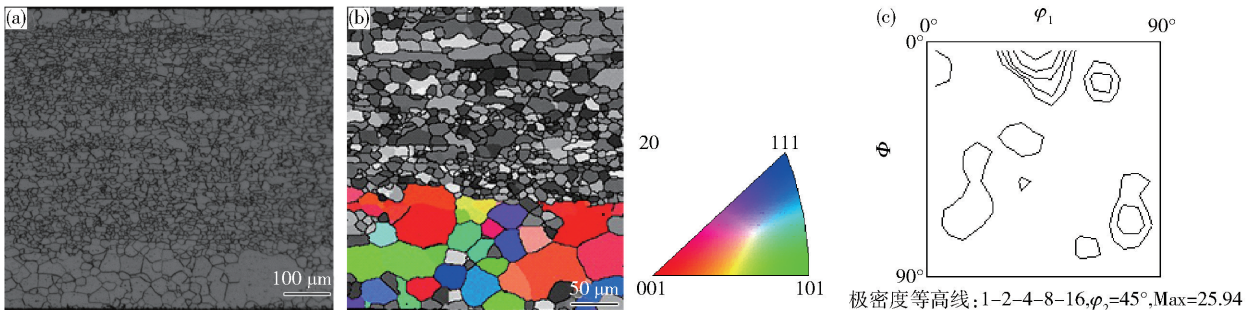


图 8 中间退火板表层粗大晶粒光学组织(a), 电子背散射衍射成像(b)及 ODF 图(c)

Fig. 8 Optical image (a), EBSD orientation map (b) and ODF (c) of intermediate annealing specimens at the side region of defective band

变差;(3)含铜取向钢的晶粒尺寸波动范围,抑制剂分布均匀程度都比渗氮钢差,最终造成含铜取向钢偏大的磁性能值分布。

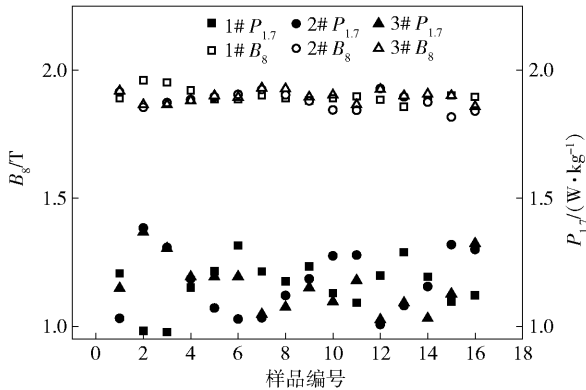


图9 3种不同组织的含铜CGO钢磁性能波动情况图

Fig. 9 Magnetic properties and fluctuation data of three types of final samples

表2 三种含铜取向钢单片样品内磁性能波动分析基本数据

Table 2 Magnetic properties and fluctuation data of three types of final samples

编号	晶粒尺寸(晶粒类型)/cm	$P_{1.7}/(W \cdot kg^{-1})$	B_8/T	$P_{1.7}$ 变异系数	B_8 变异系数
1#	2.06(等轴晶)	1.07	1.91	0.079	0.013
2#	3.3(等轴晶)	1.11	1.89	0.103	0.017
3#	2.31(长条晶)	1.11	1.90	0.086	0.012

3 结论

(1)根据成品板中不同的组织与磁性能关系归纳出各自的成因以及相互间的联系;分析认为,组织的异常与抑制剂有明确的对应关系。

(2)电子背散射衍射取向测定证实磁性高的样品中高斯晶粒取向偏差一定小,但粗大等轴晶粒高斯取向偏差并不是一定小;略微长条形晶粒和等轴晶混合的二次晶粒组织磁性能最好。

(3)热轧过程更容易出现组织波动,热轧板表层与中心层晶粒尺寸差异、脱碳区的存在与否,表层区再结晶程度高低,它们影响了抑制剂的分布,从而最终影响成品板组织和磁性能。

参 考 文 献

[1] Xia Z S, Kang Y L, Ni X J, et al. Influence of slab reheating temperature on inhibitors and magnetic properties of grain-oriented electrical steel produced by low slab reheating temperature techniques. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(4): 439

(夏兆所,康永林,倪献娟,等.板坯加热温度对低温技术取向电工钢抑制剂与磁性的影响.北京科技大学学报,2009,31(4):439)

[2] Zhou Y J, Xia Z S, Wang Q L, et al. Precipitating characteristics of inhibitors in grain-oriented electrical steel produced by low slab reheating temperature techniques during secondary recrystallization annealing. *Heat Treat Met*, 2012, 37(1): 42
(周谊军,夏兆所,王全礼,等.取向硅钢低温板坯加热高温二次再结晶退火中抑制剂的析出特点.金属热处理,2012,37(1):42)

[3] Liu G T, Yang P, Mao W M. Effect of final annealing atmosphere on secondary recrystallization behavior in thin gauge medium temperature grain oriented silicon steel. *Acta Metall Sinica*, 2016, 52(1): 25
(刘恭涛,杨平,毛卫民.高温退火气氛对薄规格中温取向硅钢二次再结晶行为的影响.金属学报,2016,52(1):25)

[4] Dang N, Zhang W K, Li Z C, et al. Influence of high temperature annealing process on Goss texture and magnetic property of CGO silicon steel. *Heat Treat Met*, 2016, 41(1): 24
(党宁,张文康,李志超,等.高温退火工艺对CGO硅钢Goss组织及磁性能的影响.金属热处理,2016,41(1):24)

[5] Dang N, Zhang W K, Li Z C, et al. Texture evolution of copper bearing CGO silicon steel during high temperature annealing. *Heat Treat Met*, 2016, 41(2): 88
(党宁,张文康,李志超,等.含铜CGO硅钢高温退火过程中的组织演变规律.金属热处理,2016,41(2):88)

[6] Dang N, Li Z C, Zhang W K, et al. Influence of secondary cold rolling reduction on Goss texture of a CGO silicon steel. *Trans Mater Heat Treat*, 2016, 37(5): 138
(党宁,李志超,张文康,等.二次冷轧压下率对CGO硅钢Goss组织形成规律的影响.材料热处理学报,2016,37(5):138)

[7] Liu G T, Li H J, Yang P, et al. Deformation and recrystallization texture features of medium temperature reheated grain oriented silicon steel containing copper. *Chin J Eng*, 2016, 38(6): 812
(刘恭涛,李海蛟,杨平,等.中温含铜取向硅钢的形变和再结晶组织特征.工程科学学报,2016,38(6):812)

[8] Ling C, Xiang L, Qiu S T, et al. Behaviors of solution and precipitation of inhibitor bearing copper in grain-oriented silicon steel. *Special Steel*, 2013, 34(3): 30
(凌晨,项利,仇圣桃,等.取向硅钢中含铜抑制剂的固溶析出行为.特殊钢,2013,34(3):30)

[9] Dong A F, Zhang W K. Analysis on process and technology of grain oriented silicon steel and development trend. *Special Steel*, 2013, 34(5): 20
(董爱锋,张文康.取向硅钢生产工艺技术分析和发展趋势.特殊钢,2013,34(5):20)

[10] Wang Y, Xu Y B, Zhang Y X, et al. On abnormal growth of $\{210\} \langle 001 \rangle$ grain in grain-oriented silicon steel. *Mater Res Bull*, 2015, 69: 138