

取向硅钢 27Q110 初次再结晶退火对组织和织构的影响

黄利¹ 董磊² 黄禄璐¹ 董丽丽¹

(1 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 包头 014010; 2 内蒙古包钢金属制造有限公司, 包头 014010)

摘要 通过检测取向硅钢 27Q110 一次冷轧板再结晶温度退火试验后的硬度及显微组织, 确定取向硅钢脱碳退火(初次再结晶)阶段最佳退火温度为 850 ℃。对冷轧硅钢厂取向硅钢 27Q110 脱碳退火后显微组织和织构进行检测和分析。结果表明, 取向硅钢 27Q110 脱碳最佳退火温度为 850 ℃, 且主要织构 γ 在 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 处最强。

关键词 取向硅钢 27Q110 再结晶 显微组织 铁损值

Effect of Primary Recrystallization Annealing on Structure and Texture of Oriented Silicon Steel 27Q110

Huang Li¹, Dong Lei², Huang Lulu¹ and Dong Lili¹

(1 Technology Center, Steel Union Co Ltd, Inner Mongolia Baotou Steel (Group) Corp, Baotou 014010; 2 Inner Mongolia Baotou Steel Metal Manufacturing Co Ltd, Baotou 014010)

Abstract Based on the hardness and microstructure of the primary cold-rolled sheet of oriented silicon steel 27Q110 recrystallization temperature annealing test, the optimal annealing temperature of decarburization annealing (primary recrystallization) of oriented silicon is determined to be 850 ℃. The microstructure and texture of the oriented silicon steel 27Q110 produced at cold rolling works after decarburization annealing are detected and analyzed. The results show that the optimum annealing temperature of decarburization of oriented silicon steel 27Q110 is 850 ℃, and the main γ texture is the strongest at $\{111\} \langle 112 \rangle$.

Material Index Oriented Silicon Steel 27Q110, Recrystallization, Microstructure, Iron Loss Value

热轧取向硅钢的碳含量为 0.025% ~ 0.040%, 经一次冷轧厚度减薄至 0.63 mm, 然后在连续炉内进行脱碳退火完成初次再结晶, 脱碳退火后碳含量一般控制在 0.003% 以下。初次再结晶退火是取向硅钢生产流程中较为重要的环节, 是保证取向硅钢成品性能的关键所在^[1]。

取向硅钢初次再结晶退火是使基体中有足够数量的 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 初次再结晶晶粒作为二次再结晶的晶核, 并形成有利于初次再结晶晶粒长大的组织和初次再结晶织构^[2]。初次再结晶是一个为二次再结晶提供高斯晶核的过程。二次再结晶的顺利进行需要两个条件: 一方面在高温退火时要提供适宜的环境(包括抑制剂分布、升温速度、退火气氛等), 让高斯晶粒选择性长大; 另一方面初次再结晶组织能够提供位向精准、数量较多的高斯晶核^[3]。

本文选用冷轧硅钢厂生产一次冷轧取向硅钢板的试样, 在试验室的条件下探究取向硅钢在初次再结晶退火过程中发生初次再结晶的开始温度, 观察各温度下显微组织转变, 以便优化脱碳退火工艺。

1 试验与研究方法

试验材料为一次冷轧取向硅钢板, 牌号为 27Q110 化学成分如表 1。试验用取向硅钢板尺寸(长×宽×厚度)为 65 mm×25 mm×0.63 mm。在制定脱碳退火工艺时如果初次再结晶温度设定较低, 初次再结晶退火过程取向硅钢再结晶不完全, 设定过高又会导致抑制剂失效。在试验室利用退火试验机做取向硅钢再结晶温度测试, 试验再结晶加热温度为 720 ~ 850 ℃, 初次再结晶退火保温时间设定为 6 min。

通过退火后试样硬度变化曲线和显微组织观察确定取向硅钢的初次再结晶转变温度, 以便制定工业化试生产时初次再结晶退火温度。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

表 1 取向硅钢 27Q110 化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of oriented silicon steel 27Q110 / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Als	Cu	N	O
标准	0.025 ~ 0.040	3.00 ~ 3.25	0.15 ~ 0.25	≤ 0.015	0.009 ~ 0.013	0.010 ~ 0.025	0.45 ~ 0.55	0.008 0 ~ 0.013 0	≤ 0.003 0
试验钢	0.031	3.10	0.22	0.010	0.009	0.015	0.49	0.011	0.002

对初次再结晶取向硅钢组织观察面为硅钢板轧向及法向组成的侧面。图 1(a) 为一次冷轧取向硅钢的显微组织,即在再结晶退火试验前的硅钢原样显微组织。

从图 1 中可看出,经初次再结晶退火后取向硅钢的显微组织主要由铁素体晶粒组成。图 1(b) 加热温度为 720 °C 时,再结晶已经开始发生,硅钢近表层区域出现细小的再结晶晶粒,但冷轧变形带依然存在。图 1(c) 当温度升高至 760 °C 时,硅钢中心层也开始出现再结晶晶粒,冷轧变形带减少。图 1(d) 加热温度为 780 °C,再结晶分数继续提高,约为 60%。随着加热温度升高再结晶晶粒开始长大,但晶粒分布不均匀。

图 1(e) 加热温度为 820 °C 时,在组织中仍能看到形变的痕迹,大尺寸晶粒所占比率明显升高,平均

晶粒尺寸较小且组织不均匀。图 1(f) 随着加热温度升高至 850 °C,平均晶粒尺寸增大且均匀性提高,几乎完全再结晶。

2.2 硬度测试

由表 2 可以看出,再结晶温度测试为 720 ~ 780 °C 保温 6 min 时 HRB 硬度值一直保持在 85.5 ~ 91.4,退火温度为 820 °C 时硬度下降 10% 左右,退火温度达到 850 °C 以后 HRB 硬度值为 73.4。

通过检测硅钢的硬度及显微组织,利用软件计算退火后硅钢再结晶晶粒的体积分数,综合分析得出取向硅钢脱碳最佳退火温度为 850 °C。

3 初次再结晶退火工艺的工业应用

3.1 初次再结晶退火工艺流程

27Q110 取向硅钢初次再结晶退火(脱碳退火)

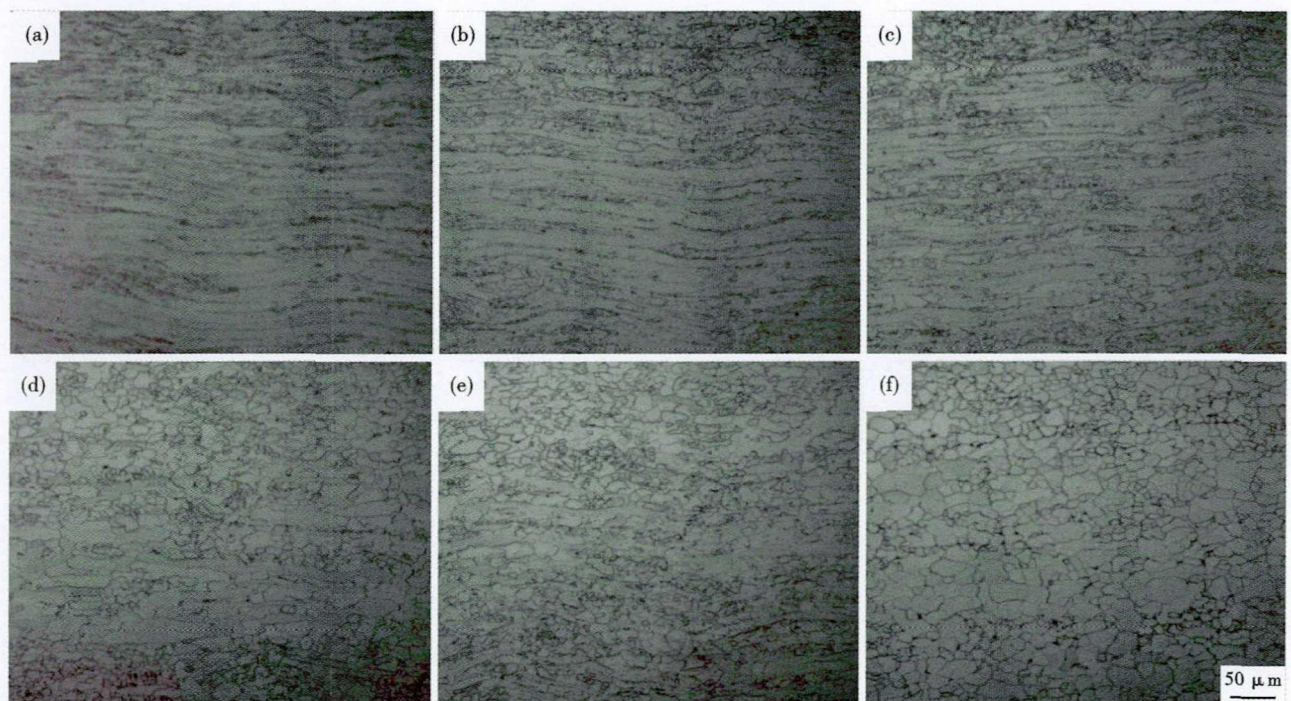


图 1 退火温度对 27Q110 钢再结晶的影响;温度,再结晶分数:(a)冷轧,0%;(b)720 °C,11%;(c)760 °C,23%;(d)780 °C,60%;(e)820 °C,84%;(f)850 °C,100%,保温 6 min

Fig. 1 Effect of annealing temperature on recrystallization of steel 27Q110; temperature, recrystallization percentage: (a) cold rolled, 0%; (b) 720 °C, 11%; (c) 760 °C, 23%; (d) 780 °C, 60%; (e) 820 °C, 84%; (f) 850 °C, 100%, for 6 min

表 2 退火温度对 27Q110 钢硬度的影响

Table 2 Effect of annealing temperature on hardness of steel 27Q110

工艺 编号	退火温度/ °C	HRB 硬度值		再结晶 分数/%
		测试值	平均值	
1	0	104.3, 104.1, 104.6	104.5	0
2	720	90.7, 93.2, 90.2	91.4	11
3	760	86.8, 91.4, 80.6	86.3	23
4	780	85.1, 86.8, 84.5	85.5	60
5	820	73.8, 85.1, 72.6	77.2	84
6	850	72.2, 72.6, 75.5	73.4	100

炉中的气氛反应式为 $H_2O + C \rightarrow H_2 + CO$, 将钢中的碳脱到 0.003% 以下。脱碳退火过程完成取向硅钢的初次再结晶,使基体中有足够数量的 $\{110\} <001>$ 初次晶粒(二次晶核)有利于晶粒长大的初次再结晶织构和组织。

初次再结晶退火工艺流程为:钢卷开卷→1#张力机→刷洗→挤干、烘干→2#张力机→3#张力机→马弗炉→电炉→收卷活套。

表3 取向硅钢 27Q110 脱碳(初次再结晶)退火工艺
Table 3 Decarburization annealing process (primary recrystallization) of oriented silicon steel 27Q110

保温温度/℃	速度/(m·s ⁻¹)	炉区气氛
850	11	氮分解气

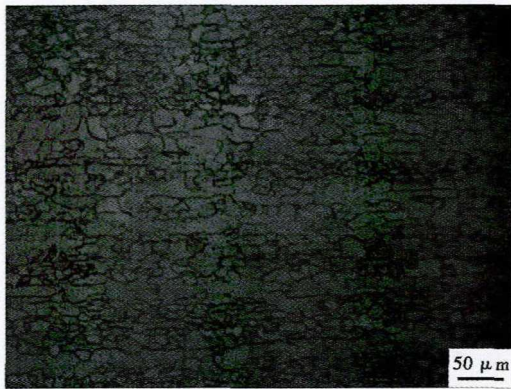


图2 冷轧厂 27Q110 钢初次再结晶退火后的显微组织
Fig. 2 Microstructure of steel 27Q110 after primary recrystallization annealing at cold rolling mill

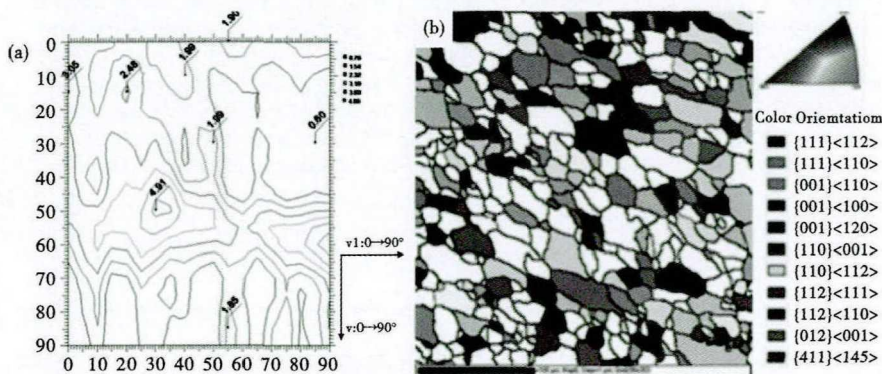


图3 27Q110 钢脱碳退火织构取向分布图 ($\psi_2 = 45^\circ$)

Fig. 3 Distribution diagram of decarburizing annealing texture orientation of steel 27Q110, ($\psi_2 = 45^\circ$)

生产线采用的初次再结晶退火工艺如表3所示。钢卷为厚度 0.63 mm、宽度 1200 mm 的取向硅钢一次冷轧卷。

3.2 初次再结晶退火后显微组织

在冷轧硅钢厂按照表3所示的脱碳退火工艺在生产线上开展初次再结晶退火工业试生产。初次再结晶退火后显微组织见图2。在初次再结晶退火过程中,伴随着初次再结晶过程的发生,一次冷轧过程所形成的变形带几乎消失,出现大量初次再结晶等轴晶粒。初次再结晶晶界较为清晰,等轴晶粒的分布较均匀,最小晶粒尺寸为 5 μm ,最大晶粒尺寸为 41 μm ,平均晶粒尺寸约为 26 μm 。

3.3 初次再结晶退火后织构

采用 X 射线衍射仪检测轧面表层织构,图3(a)

为取向硅钢的取向分布函数 ODF 图在 $\psi_2 = 45^\circ$ 时的截面图。通过扫描电镜电子背散射衍射仪器 (EBSD) 检测初次再结晶退火后的晶粒取向见图3(b)。初次再结晶退火后织构类型主要为 γ 织构,且 γ 织构在 $\{111\} \langle 121 \rangle$ 处最强,强度为 4.91。 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构次之,还有少量的 $\{411\} \langle 148 \rangle$,高斯织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 组分强度较低。 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构与高斯织构的夹角分别为 35° 和 45° 。这种晶界是具有较高扩散率的高能晶界,为二次再结晶中高斯织构的发展提供了便利,促进 Goss 晶核的异常长大,提高最终成品的磁性能^[4]。旋转铜型 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 取向不利于二次再结晶的发生^[5]。

4 结论

(1) 初次再结晶退火后取向硅钢主要由铁素体晶粒组成,等轴晶粒分布较均匀,最小晶粒尺寸 5 μm ,最大晶粒尺寸 41 μm ,平均晶粒尺寸约 26 μm 。

(2) 根据取向硅钢的硬度及显微组织,确定取向硅钢初次再结晶阶段的最佳退火温度为 850 $^\circ\text{C}$,保温 6 min。

(3) 初次再结晶退火后硅钢织构类型主要为 γ 织构,且 γ 织构在 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 处最强,强度为 4.91。 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构次之,还有少量的 $\{411\} \langle 148 \rangle$,高斯织构 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 组分强度较低。

参考文献

- [1] 唐刚,赵刚,鲍思前,等.初次再结晶退火工艺对 3% Si 取向硅钢组织和织构的影响[J].特殊钢,2014,35(3):62-64.
- [2] 党宁,李志超,唐获,等.0.20 mm CGO 硅钢高温退火 Goss 晶粒起源及异常长大行为研究[J].材料工程,2016,44(5):1-7.
- [3] 王洋,许云波,张元祥,等.冷轧工艺对取向硅钢初次再结晶织构的影响[J].东北大学学报,2014,35(2):217-219.
- [4] 张思雨.脉冲磁场退火对取向硅钢组织及织构的影响[D].包头:内蒙古科技大学,2019.
- [5] 赵尖.稳恒磁场退火对取向硅钢组织与织构的影响[D].包头:内蒙古科技大学,2015.

黄利(1981-),男,硕士(2017年内蒙古科技大学),高级工程师,板材新产品开发。E-mail:hl_19810812@126.com

收稿日期:2020-12-14