

铝含量和磁性退火温度对 3.0 mm 电磁纯铁冷轧板矫顽力的影响

王新宇

(山西太钢不锈钢股份有限公司,太原 030003)

摘要 试验电磁纯铁(∕%:0.002~0.004C,0.01~0.02Si,0.04~0.05Mn,0.005S,0.006~0.009P,0.41~1.16Al)由 200 kg 真空感应炉熔炼,热轧成 6.0 mm 板再冷轧至 3.0 mm 板。研究了铝含量(0.41%~1.16% Al)和磁性退火温度(900~1 050 ℃)对冷轧板矫顽力影响。结果表明,随铝含量增加,纯铁的晶粒尺寸增大矫顽力降低;适当提高铝含量,可增加退火板的晶粒尺寸,降低矫顽力;当铝含量提高至 1.16%,采用 1 050 ℃ 退火,纯铁矫顽力可降至 16 A/m。

关键词 电磁纯铁冷轧板 铝含量 磁性退火 晶粒 矫顽力

Effect of Aluminium Content and Magnetic-Performance Annealing Temperature on Coercive Force of 3.0 mm Cold-Rolled Sheet of Magnetic Pure Iron

Wang Xinyu

(Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The tested magnetic pure iron (∕%: 0.002 ~ 0.004C, 0.01 ~ 0.02Si, 0.04 ~ 0.05Mn, 0.005S, 0.006 ~ 0.009P, 0.41 ~ 1.16Al) is melted by 200 kg vacuum induction furnace, hot-rolled to 6.0 mm plate and cold-rolled to 3.0 mm sheet. The effect of aluminium content (0.41% ~ 1.16% Al) and magnetic-performance annealing temperature (900 ~ 1 050 ℃) on coercive force of cold-rolled sheet has been studied. Results show that with increasing aluminium content the grain size of pure iron increases and its coercive force decreases; properly increasing aluminium content in pure iron is available to increase grain size of annealed sheet and decrease coercive force of sheet; as the aluminium content is up to 1.16%, by annealed at 1 050 ℃ the coercive force of pure iron may decrease to 16 A/m.

Material Index Magnetic Pure Iron Cold-Rolled Sheet, Aluminium Content, Magnetic-Performance Annealing, Grain Size, Coercive Force

电磁纯铁热轧板具有良好的磁性能,最低矫顽力可以达到 10 A/m,但冷轧加工后磁性能恶化。提高铝含量有利促进晶粒组织粗化,改善冷轧板磁性退火后的晶粒组织,降低矫顽力。

1 化学成分和试验方法

1.1 化学成分设计

为了研究 Al 含量对矫顽力的影响,根据电磁纯铁国家标准(GB/T6983-2008)对 Al 含量的规定(0.2%~0.8%)设计了 3 种 Al 含量的电磁纯铁,分别为 0.40%、0.80% 和 1.20%,化学成分控制如表 1 所示。设计了 3 种磁性热处理工艺,分别为 900 ℃

1 h、980 ℃ 1 h、1 050 ℃ 1 h。

1.2 试验方法

中间实验室试制的工艺流程为:配料→真空感应炉冶炼→浇铸钢锭→锻造开坯→热轧板材→酸洗→冷轧→磁性退火→性能检验。真空感应炉容量为 200 kg,每炉钢锭重量为 140 kg。

热轧板厚度为 6.0 mm,热轧坯加热温度(1 200±30)℃,终轧温度≥750 ℃。冷轧板厚度为 3.0 mm。试样的磁性退火采用箱式退火炉,氮气防氧化保护,随炉升温至 700 ℃后控制升温速度≤50 ℃/h,升至最高温度保温 1 h,然后控制冷却速度≤50 ℃/h 降温至 700 ℃以下,随炉冷至室温出炉。

矫顽力试样尺寸为 20 mm×200 mm(轧向×横向),采用软磁材料直流磁性能精密测量装置测量矫顽力,型号为 NIM-2000S。金相试样经过研磨、抛光后用 4% 硝酸酒精溶液侵蚀表面,采用金相显微镜观察金相形貌,平均晶粒大小采用 Imagepro-Plus 软件测量。

表 1 试验电磁纯铁冷轧板的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested magnetic pure iron cold-rolled sheet / %

炉号	C	Si	Mn	P	S	Al
1 [#]	0.004	0.01	0.05	0.009	0.005	0.41
2 [#]	0.002	0.01	0.06	0.006	0.005	0.83
3 [#]	0.004	0.02	0.04	0.007	0.005	1.16

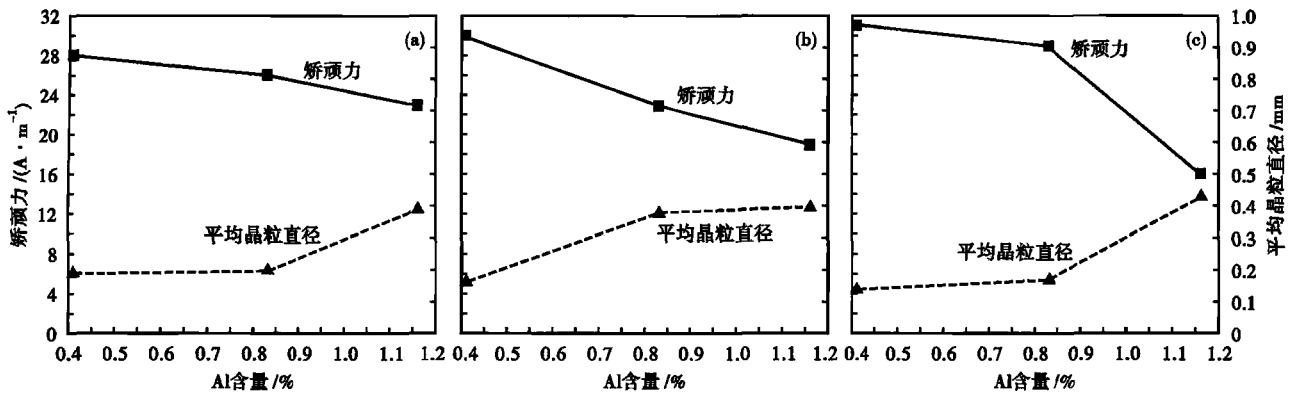


图1 电磁纯铁铝含量对退火后冷轧板矫顽力和平均晶粒直径的影响,磁性退火:(a)900 °C 1 h;(b)980 °C 1 h;(c)1050 °C 1 h
Fig.1 Effect of aluminium content in magnetic pure iron on coercive force and average grain diameter of annealed cold-rolled sheet, magnetic-performance annealing: (a) 900 °C 1 h; (b) 980 °C 1 h and (c) 1050 °C 1 h

2 试验结果

2.1 铝含量对矫顽力的影响

不同铝含量的试样经过不同磁性退火后的矫顽力和平均晶粒直径如图1所示,金相组织如图2所示。

退火温度为900 °C时(图1a),铝含量为0.41%时矫顽力最高(28 A/m),平均晶粒直径最小(0.19 mm),随着铝含量的增加,矫顽力逐渐降低,而平均晶粒直径逐渐增大,铝含量为1.16%时矫顽力最低(23 A/m);980 °C试验结果也表现了与900 °C相同的变化趋势(图1b);但在1050 °C时(图1c),铝含量由0.41%增加到0.83%,矫顽力(由31 A/m降低到29 A/m)和平均晶粒直径(由0.16 mm增加到0.38 mm)的变化都不大,铝含量增加到1.16%时,矫顽力突然降低到16 A/m。总之,在同一磁性退火工艺下,铝含量越高矫顽力越低,晶粒越大。

因此提高电磁纯铁的铝含量,使磁性退火后的晶粒增大,矫顽力降低。

2.2 磁性退火温度对矫顽力的影响

磁性退火温度显著影响材料的晶粒大小,但对于不同铝含量的样品其影响存在明显差异,试验结果如表2所示。

由表2可见,0.41% Al含量的试样在900 °C退火时,矫顽力最低(28 A/m),晶粒最大(0.19 mm),退火温度升高(980 ~ 1050 °C),矫顽力(30 ~ 31 A/m)略升高,平均晶粒直径减小;0.83% Al含量试样在980 °C退火时,具有最大的晶粒尺寸(0.38 mm)和最低的矫顽力(23 A/m),退火温度升高或降

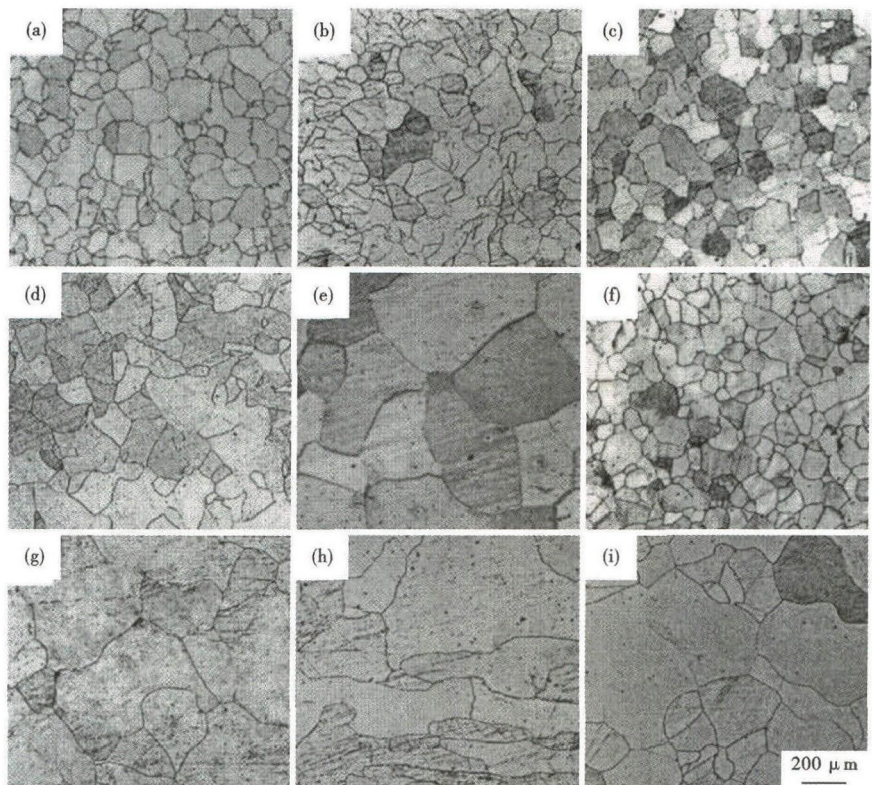


图2 电磁纯铁冷轧板磁性退火后晶粒形貌,磁性退火:1[#],0.41% Al- (a)900 °C 1 h, (b)980 °C 1 h,(c)1050 °C 1 h; 2[#],0.83% Al- (d)900 °C 1 h,(e)980 °C 1 h,(f)1050 °C 1 h; 3[#],1.16% Al- (g)900 °C 1 h,(h)980 °C 1 h,(i)1050 °C 1 h

Fig.2 Morphology of grains in magnetic-performance annealed cold-rolled sheet of magnetic pure iron, magnetic-performance annealing: 1[#], 0.41% Al- (a) 900 °C 1 h and (b) 980 °C 1 h and (c) 1050 °C 1 h; 2[#], 0.83% Al- (d) 900 °C 1 h, (e) 980 °C 1 h and (f) 1050 °C 1 h; and 3[#], 1.16% Al- (g) 900 °C 1 h, (h) 980 °C 1 h and (i) 1050 °C 1 h

表 2 不同 Al 含量电磁纯铁的磁性退火温度对矫顽力和平均晶粒直径的影响

Table 2 Effect of magnetic-performance annealing temperature of magnetic pure iron with different Al content on coercive force and average grain diameter

Al 含量/ %	退火温度/ ℃	矫顽力/ (A·m ⁻¹)	平均晶粒直径/ mm
0.41	900	28	0.19
	980	30	0.16
	1 050	31	0.14
0.83	900	26	0.20
	980	23	0.38
	1 050	29	0.17
1.16	900	23	0.39
	980	19	0.40
	1 050	16	0.43

低晶粒尺寸均减小,矫顽力增加;1.16% Al 含量试样在900℃退火时,晶粒最小(0.39 mm)、矫顽力最高(23 A/m),退火温度升高,晶粒增大、矫顽力减小。

3 试验结果分析

3.1 晶粒大小与矫顽力的关系

对于电磁纯铁软磁材料来说,矫顽力(H_c)来源于磁畴壁不可逆移动,矫顽力的大小与磁畴壁能量、磁晶各向异性常数($K_1^{1/2}$)大体上成正比关系^[1]。晶界处的点阵是畸变的,晶体缺陷多,内应力就大,因此晶界是阻碍畴壁移动的主要因素之一。晶粒尺寸大时,晶界所占面积减少,矫顽力降低^[2-3]。

试验数据分析表明,晶粒尺寸与矫顽力有一定的对应关系,1.16% Al 含量的试样采用1 050℃退火时晶粒最大,矫顽力最低。

3.2 铝含量对矫顽力的影响

从不同铝含量试样的磁性能检验结果来看,试样的铝含量越高,晶粒越大,矫顽力越低。

铝是强脱氧剂,能将钢中氧含量控制在较低水平而提高钢质纯净度;钢中的铝固定氮,解决了细针状氮化铁夹杂引起的磁时效问题^[4]。铝降低磁晶各向异性常数(K_1)和饱和磁滞伸缩 λ_s ^[5-6],有利于改善磁性能,获得较低的矫顽力。随钢中铝含量增加,提高了相变点,扩大了 α 相区^[1],进而随退火温度提高促进夹杂物粗化(特别是 AlN 夹杂的粗化)和退火后晶粒粗化。

3.3 磁性退火温度对磁性的影响

电磁纯铁晶粒大小的主要影响因素是化学成分、加工工艺和磁性退火工艺。当纯铁成分和热加工工艺一定,晶粒大小与磁性退火温度和保温时间有关,其中退火温度的影响更敏感。

对于1#炉0.41% Al 含量试样来说, $\delta \rightarrow \gamma$ 相变温度约910℃^[1],采用较高的退火温度(980,1 050℃)时存在相变,晶粒反而细小,矫顽力高。2#炉0.83% Al 含量试样在980℃退火时不存在相变,因此晶粒较大,矫顽力降低;1 050℃退火时可能发生了相变,导致晶粒减小,矫顽力升高。3#炉1.16% Al 含量试样较高,在高温退火时不存在 $\delta \rightarrow \gamma$ 相变,因此可以采用较高的退火温度,使晶粒粗大。

4 结论

(1)电磁纯铁冷轧板磁性退火后的晶粒大小是影响矫顽力的重要因素,晶粒越大,矫顽力越低。

(2)冷轧板中铝含量不同,获得最低矫顽力的磁性退火温度(即最佳磁性退火温度)不同。铝含量为0.41%、0.83%和1.16%时,其最佳磁性退火温度分别为900、980、1 050℃,因此根据不同铝含量调整磁性退火工艺,能获得最低的矫顽力。

(3)适当提高铝含量可增加磁性退火后晶粒尺寸,降低矫顽力。当 Al 含量提高到1.16%时,采用1 050℃进行磁性退火,矫顽力可降低到16 A/m。

参考文献

- [1] 何忠治. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2012:623-646.
- [2] Kronmüller H, Schrefl T. Interactive and Cooperative Magnetization Process in Hard Magnetic Materials[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1994, 129(1):66-68.
- [3] 刘琼珍. 晶界相及晶界附近显微结构对烧结 NdFeB 永磁材料矫顽力的影响[D]. 上海:上海交通大学,2010:19-20.
- [4] 赵昱臻,王新宇,张文康. 电磁纯铁磁时效现象与人工时效的工艺改进[J]. 山西冶金,2007,30(5):37-38.
- [5] Bøe I, Csébi J, Gróf T, et al. Correlation of Aluminum Content, Inclusion Structure, and Core Loss of Nonoriented Electrical Steels [J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(10):5350-5351.
- [6] Bøe I, Cziráki A, Csebi J, et al. Limit of Al Content in Fe-Si Electrical Steels[J]. Magnetism Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on MAG, 1990, 26(5):2226-2228.

王新宇(1979-),女,硕士(2005年中南大学),工程师,电磁纯铁新产品新工艺研发。E-mail:wangxy2@tisco.com.cn

收稿日期:2015-12-28