

普通取向硅钢板坯低温加热生产工艺及磁性研究

董爱锋¹ 侯鹏飞¹ 张文康²

(太钢不锈钢股份有限公司1技术中心;2冷轧硅钢厂,太原030003)

摘要 研究了以 $\text{Cu}_2\text{S} + \text{AlN}$ 为抑制剂采用低温板坯加热二次冷轧法和中间厚度完全脱碳的工艺生产 0.30 mm 厚普通取向硅钢(%) : 0.03 ~ 0.05C, 3.0 ~ 3.2Si, 0.18 ~ 0.24Mn, 0.005 ~ 0.012S, 0.006 ~ 0.011N, 0.012 ~ 0.024Als, 0.4 ~ 0.55Cu) 的工艺过程。研究表明:加热温度在 1 220 ~ 1 300 °C 时,酸溶铝(Als)和氮(N)(%) 分别在 0.01 ~ 0.022, 0.007 ~ 0.011 时,随着 Als 和 N 含量的增加,磁感升高,铁损降低,成品磁性能呈现逐步优化趋势,产品合格率高;二次冷轧压下率控制在 55% ~ 60% (即一次冷轧后厚度 0.65 ~ 0.70 mm) 可保证得到均匀的一次晶粒和适量的高斯晶核;脱碳退火温度、时间和板厚对脱碳影响较大,退火气氛和加湿水温影响较小;回复退火对磁性能影响不大。通过研究,确定了最佳工艺参数:1 290 °C 加热,1 160 °C 开轧,终轧温度 930 ~ 960 °C;二次冷轧压下率在 55% ~ 60%;中间退火温度 840 ~ 850 °C,加湿水温 65 °C,退火气氛 20% $\text{H}_2 + 80\% \text{N}_2$,退火时间根据冷轧板厚度不同而变化,8 ~ 9 min;回复退火工艺可略去。

关键词 取向硅钢 板坯低温加热 化学成分 中间脱碳退火 第二次冷轧压下率 回复退火 磁性能

Investigation on Process and Magnetic Properties of Low-temperature Heating Common Grain-oriented Silicon Steel Slab

Dong Aifeng¹, Hou Pengfei¹ and Zhang Wenkang²

(1 Technical Center; 2 Silicon Steel Plant, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The investigation was carried out on the process of 0.30mm grain-oriented silicon steel (%) : 0.03 ~ 0.05C, 3.0 ~ 3.2Si, 0.18 ~ 0.24Mn, 0.005 ~ 0.012S, 0.006 ~ 0.011N, 0.012 ~ 0.024Als, 0.4 ~ 0.55Cu) produced by low-temperature slab heating technology, in which the inhibitor of $\text{Cu}_2\text{S} + \text{AlN}$ was used and the two-stage cold rolling technology with completing decarburization in the intermediate thickness of cold sheet was used too. It is proved that when the heating temperature is 1 220 ~ 1 300 °C, the magnetic induction increases as well as the core loss decreases with increasing Als and N in the range of Als (%) 0.01 ~ 0.022 and N (%) 0.007 ~ 0.011, and the ratio of qualified products is higher. The second cold rolling rate within 55% ~ 60% (i. e. the thickness after first rolling being 0.65 ~ 0.70 mm) guarantees the uniform primary grains and proper quantities of Goss crystal nucleus. Temperature, time and thickness affect on decarburization remarkably, while the effect of atmosphere and temperature of water for adding wet is light. In addition, the recovery annealing make for little contribution to improve magnetic properties. The most proper process is heating at 1 290 °C, hot rolling at 1 160 °C, finishing temperature at 930 ~ 960 °C, second cold rolling rate within 55% ~ 60%, intermediate decarburization temperature at 840 ~ 850 °C, water temperature for adding wet at 65 °C, annealing atmosphere with 20% $\text{H}_2 + 80\% \text{N}_2$, annealing for 8 ~ 9 min utes based on thickness, and the recovery annealing process can be removed.

Material Index Grain-oriented Silicon Steel, Slab Low-Temperature Heating, Chemical Composition, Intermediate Decarburization, Second Cold Rolling Rate, Recovery Annealing, Magnetic Properties

取向硅钢按制造工艺特点和磁性能可分为普通取向硅钢(CGO)和高磁感取向硅钢(Hi-B)两类。按铸坯加热温度不同可分为高温加热法(1 380 °C 以上)和低温加热法(1 280 °C 以下)。高温加热法由于加热温度高,能耗高,对加热炉的维护强度大,而且加热板坯在轧制过程中容易产生边裂,成材率低。高温引起热轧带钢表面更多氧化铁皮难以被清除干净,增加了表面缺陷,影响产品实物质量。高温下粗大的铸坯晶粒也易引起产品出现线状细晶缺陷,妨碍磁性的稳定性。近年来更积极地探索节能环保、降低成本的生产方式,其中以低温加热生产取

向硅钢为重要的研究和发展方向^[1-7]。

本文研究了以 $\text{Cu}_2\text{S} + \text{AlN}$ 作为主要抑制剂,经 1 220 ~ 1 300 °C 加热后热轧至 2.20 ~ 2.30 mm 厚热轧带钢,再经二次冷轧和中间厚度完全脱碳退火生产 0.30 mm 厚铸坯低温加热普通取向硅钢片的工艺。

1 试验过程和方法

试验材料为采用低温板坯加热工艺生产的取向硅钢热轧板,厚度为 2.20 ~ 2.30 mm,即采用试验车间 100 kg 真空感应炉冶炼,将钢锭锻成(mm)30 ×

130 × 130 的板坯,锻造加热温度 1 150 °C,均热时间 2 h,一火锻造成型。试验研究材料有五种,分别是炉号 20、21、22、25 和 27,设计以 Cu₂S + AlN 为抑制剂,其设计化学成分和实际冶炼结果如表 1 和表 2。根据实验室设备能力,制定了如下的工艺流程:

真空冶炼→锻造→低温加热→热轧→酸洗→一次冷轧→中间完全脱碳退火→二次冷轧→涂 MgO→高温退火→涂绝缘涂层+热平整。

为了分析加热温度对低温普通取向硅钢磁性的影响,设计了两种加热温度:一种是高温加热,加热温度在 1 350 ~ 1 400 °C;一种是低温加热,加热温度在 1 220 ~ 1 300 °C。热轧开轧温度控制在 1 100 ~ 1 200 °C,终轧温度控制在 910 ~ 990 °C,模拟卷取温度 570 °C,热轧板厚度控制在 2.20 ~ 2.30 mm。热轧硅钢经 2% ~ 5% 稀 HCl 溶液酸洗浸泡,温度 50 ~ 60 °C,酸洗时间约 1.5 h。

由于冷轧板较厚,在中间厚度完全脱碳比较困难,铸坯低温加热生产 CGO 的脱碳退火工艺与高温加热生产 CGO 的脱碳退火工艺有较大的差别。因此,在进行铸坯低温加热生产 CGO 取向硅钢全工序试验以前,专门进行了脱碳退火工艺试验。主要试验了退火温度、时间、加湿水温、气氛以及冷轧板厚度对脱碳的影响,脱碳后碳含量低于 30 × 10⁻⁶。

为了研究第二次冷轧压下率对低温加热 CGO 取向硅钢磁性能的影响,热轧板从 2.20 ~ 2.30 mm 厚一次冷轧后,分别设计了四种中间厚度规格(0.60、0.65、0.70 和 0.75 mm)进行第二次冷轧,最终成品厚度按 0.285 mm 控制,实际厚度在(0.285 ± 0.005) mm。对应于中间厚度 0.60、0.65、0.70 和 0.75 mm 的第二次冷轧压下率 ε 分别为 52.5%、56.2%、59.3% 和 62%。

将第二次冷轧后的冷轧板剪切成 30 mm ×

300 mm 的试样,一部分经过低温回复退火,一部分不经过低温回复退火,以便比较回复退火对成品最终磁性能的影响。回复退火工艺制度为:炉温 550 °C,保护气氛为湿的 5% H₂ + 95% N₂,水温 60 °C,保温 5 min,炉口冷却段停留 2 min 后取出。

将经过低温回复退火和不经过低温回复退火的冷轧板涂敷 MgO 后在德国利亨 KS-80-S 高温退火炉内进行高温净化退火,炉温 1 200 °C,保温时间 8 h。

将高温退火后的样品用酸清洗后在 TYU-2000A 型软磁材料测试仪上进行磁性能测试。磁性能采用单片试验测量方法测试,试样尺寸(mm) 30 × 300,在 1.7 T 和 50 Hz 条件下测量铁损 P₁₇,在磁场强度为 800 A/m 条件下测量磁感应强度 B₈(图 1)。

2 结果与讨论

2.1 化学成分对磁性的影响

取向硅钢化学成分的要求极严格,规定的化学成分范围很窄,成分略有波动对产品性能就有很大影响。

本试验共设计了两种不同的低温加热普通取向硅钢冶炼化学成分(见表 1 所示),在真空感应炉内冶炼 5 炉,实际化学成分见表 2 所示。经过一系列相同的工艺处理后,通过测量磁感应强度 B₈ 和铁损 P₁₇ 值,确定最佳的化学成分,测量结果如图 2 和表 3 所示。

从图 2 可以看到,当酸溶铝(Als)质量分数在 0.01% ~ 0.022%、氮(N)质量分数在 0.007% ~ 0.011% 时,随着酸溶铝含量和氮含量的增加,磁感应强度 B₈ 升高,铁损 P₁₇ 降低,成品磁性能呈现逐步优化趋势。化学成分特别是 Als 对磁性能有较大影

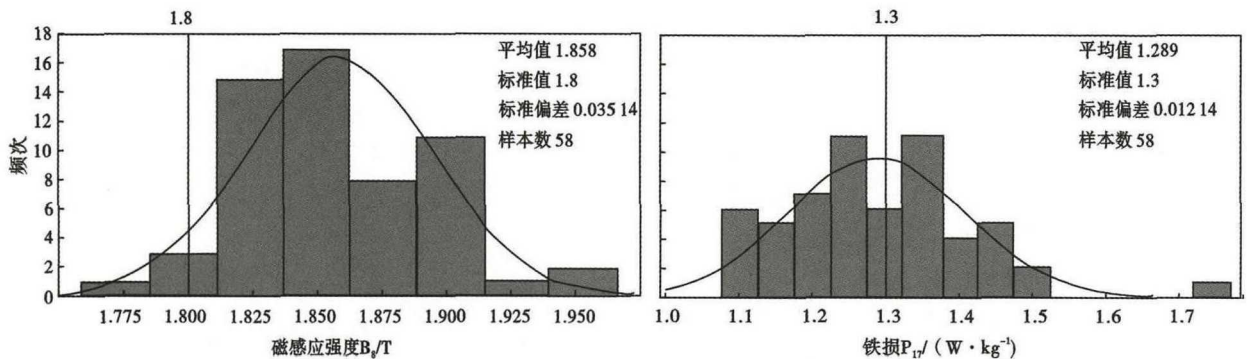


图 1 低温加热普通取向硅钢全部样本磁性能分布情况

Fig. 1 Normal distribution of magnetic properties of slab low-temperature heating common grain-oriented silicon steel

表 1 低温加热普通取向硅钢设计化学成分(以 Cu₂S + AlN 为抑制剂)/%

Table 1 Design Chemical composition of slab low-temperature heating common grain-oriented silicon steel with Cu₂S + AlN inhibitor /%

试验钢	C	Si	Mn	S	Als	N	Cu	Cr
AC1	0.032	3.1	0.21	0.009	0.016	0.008	0.045	-
AC2	0.032	3.1	0.21	0.006	0.020	0.010	0.045	0.05

响,Als 小于 0.01% 时,很难达到较高的性能,结合表 3 可以看到炉号 21 的 Als 偏低,虽然 21 号没有试验对性能非常不利的高温加热工艺,合格率也只有 42%,远低于其它炉号的合格率。

采用低温加热生产普通取向硅钢时,加热温度一般为 1250 ~ 1300 °C,由于加热温度低于铸坯中

表 2 低温加热普通取向硅钢实际冶炼化学成分(以 Cu₂S + AlN 为抑制剂)/%

Table 2 Actual Chemical composition of slab low-temperature heating common grain-oriented silicon steel with Cu₂S + AlN inhibitor /%

炉号	C	Si	Mn	P	S	Als	N	Cu	Cr
20	0.032	3.18	0.20	0.009	0.010	0.015	0.006 8	0.045	-
21	0.032	3.18	0.18	0.008	0.006	0.012	0.008 6	0.045	-
22	0.035	3.18	0.17	0.008	0.006	0.020	0.008 2	0.045	0.05
25	0.032	3.14	0.19	0.007	0.010	0.021	0.009 2	0.043	-
27	0.032	3.18	0.18	0.007	0.007	0.020	0.011 0	0.045	-

表 3 经回复退火与不经回复退火后样品磁性测试结果

Table 3 Test results of magnetic properties of specimen with recovery annealing and without recovery annealing

样品编号	未经回复退火		经过回复退火		样品编号	未经回复退火		经过回复退火	
	P ₁₇ /(W·kg ⁻¹)	B ₈ /T	P ₁₇ /(W·kg ⁻¹)	B ₈ /T		P ₁₇ /(W·kg ⁻¹)	B ₈ /T	P ₁₇ /(W·kg ⁻¹)	B ₈ /T
20111	1.098	1.912	1.300	1.830	2222	1.161	1.883	1.193	1.888
20112	1.382	1.827	1.167	1.888	2241	1.174	1.944	1.115	1.908
2021	1.353	1.859	1.244	1.869	2242	1.272	1.855	1.484	1.815
2022	1.338	1.830	1.350	1.853	2511	1.103	1.922	1.288	1.883
2031	1.393	1.833	1.366	1.852	25111	1.256	1.840	1.158	1.866
2032	1.235	1.857	1.106	1.883	25112	1.197	1.849	1.273	1.833
2111	1.255	1.852	1.219	1.896	2521	1.384	1.836	1.322	1.831
21111	1.436	1.803	1.436	1.828	2522	1.262	1.848	1.435	1.807
21112	1.371	1.840	1.282	1.951	2541	1.286	1.836	1.351	1.832
2112	1.349	1.831	1.430	1.807	2542	1.241	1.852	1.199	1.867
2121	1.355	1.854	1.175	1.903	2721	1.095	1.890	1.326	1.854
2122	1.226	1.901	1.308	1.853	2722	1.360	1.845	1.149	1.897
2221	1.238	1.839	1.378	1.869	2731	1.497	1.836	1.371	1.820
22211	1.274	1.851	1.744	1.774	2732	1.122	1.907	1.450	1.826
22212	1.221	1.870	1.198	1.888					

注:每个样品编号的前两位数字代表炉号,末位数字“1”代表中间厚度为 0.60 mm,“2”代表中间厚度为 0.65 mm。

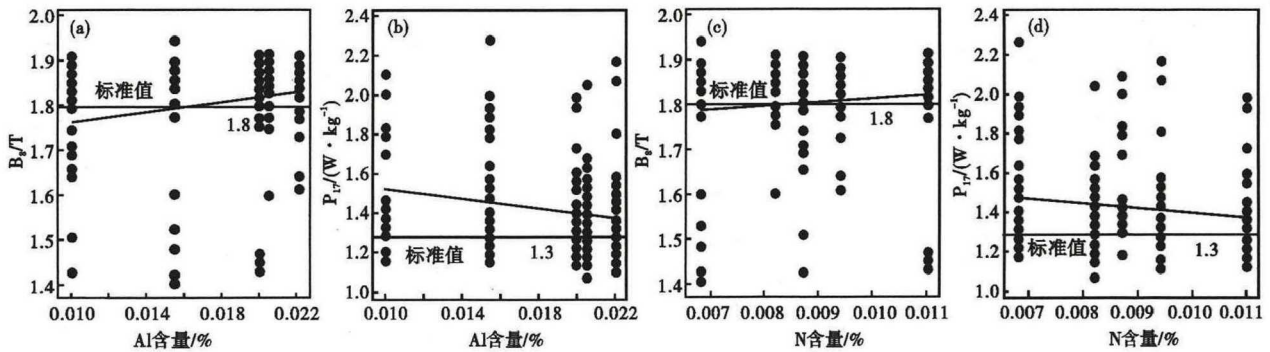


图 2 Als(a)(b)和 N(c)(d)含量对低温加热普通取向硅钢磁性能的影响

Fig. 2 Influence of Als (a) (b) and N (c) (d) content on magnetic properties of low-temperature heating common grain-oriented silicon steel slab

粗大 MnS 的固溶温度,不能以 MnS 作为抑制剂。低温加热普通取向硅钢以 AlN 作为主要抑制剂,Cu₂S 作为辅助抑制剂,这是因为 Cu₂S 和 AlN 的固溶温度

低于 MnS 的固溶温度,在 1 250 ~ 1 300 °C 的加热温度范围内就能够固溶^[8]。低温加热普通取向硅钢产品成分特点是低 C 含量、高 Mn 含量、低 S 含量,

添加约 0.5% Cu,同时加入 Al 和 N,与高温加热高磁感取向硅钢产品成分相比,Als 含量稍低,N 含量稍高。高 Mn、Cu、N 含量,以提高奥氏体量,有利于控制热轧组织;低 C 含量以便于取消最终脱碳退火,在中间退火时作适当脱碳处理。

AlN 是低温加热普通取向硅钢的重要抑制剂,炉号 21 样品成分中 Als 和 N 含量都偏低,这可能会造成抑制剂数量不足,抑制力不强,导致二次再结晶不完善,进而引发磁性较差。

2.2 铸坯加热温度对磁性的影响

共设计了两种加热温度,一种是高温加热,加热温度在 1 350 ~ 1 400 °C;一种是低温加热,加热温度在 1 220 ~ 1 300 °C。

热轧加热温度对产品磁性能的影响如图 3 所示。从图 3 可以明显看到,采用低温加热(1 220 ~ 1 300 °C)法生产的普通取向硅钢较高温加热(1 350 ~ 1 400 °C)法生产的取向硅钢铁损值更低,磁感值更高,产品合格率更高。

低温加热普通取向硅钢的成分设计是在以 $Cu_2S + AlN$ 为抑制剂的基础上进行的。在平衡状态

下 Cu_2S 的固溶温度约为 1 250 °C,AlN 的固溶温度约为 1 280 °C,因此铸坯加热温度在 1 220 ~ 1 320 °C 即可。如果加热温度太高,一方面铸坯厚度方向中心区温度达到 1 360 °C 时,晶粒 100% 长大,产品出现线晶;另外一方面,铸坯表层中铝、硅和碳与氧化合,其含量降低,产品磁性降低和不均匀。因此,控制中心区温度为 1 250 ~ 1 300 °C,若加热温度过高,则会超出此温度范围,造成对成品磁性不利的线晶或混晶。

此外,从图 3 还可以看出,铸坯加热温度在 1 290 °C 时,产品磁性能最佳且均匀。这是因为,当加热温度低于 1 290 °C 时,铸坯中部分粗大的 AlN 难于固溶,在随后的热轧过程中析出的细小弥散状 AlN 数量相应减少,只有固溶温度为 1 250 °C 的 Cu_2S 抑制剂析出,造成抑制力降低,二次再结晶不完善,磁性下降。

2.3 第二次冷轧压下率对磁性的影响

第二次冷轧压下率对磁性能也有比较明显的影响。对比化学成分和其它工艺相同条件下 0.60、0.65、0.70、0.75 mm 四种不同中间厚度的磁性能

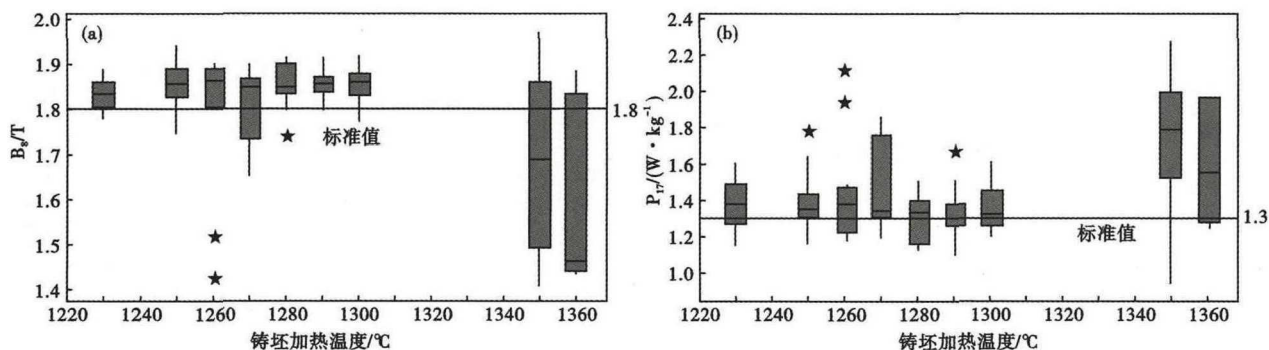


图 3 铸坯加热温度对低温加热普通取向硅钢磁性能的影响:(a) B_8 ; (b) P_{17}

Fig.3 Influence of slab heating temperature on magnetic properties of low-temperature heating common grain-oriented silicon steel slab:(a) B_8 ; (b) P_{17}

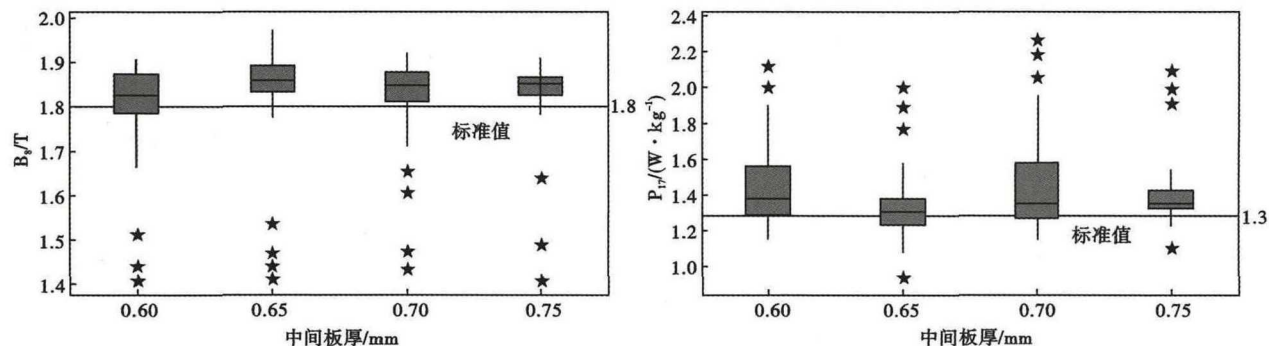


图 4 中间板厚对低温加热普通取向硅钢磁性能的影响:(a) B_8 ; (b) P_{17}

Fig.4 Influence of intermediate slab thickness on magnetic properties of intermediate slab of low-temperature heating common grain-oriented silicon steel:(a) B_8 ; (b) P_{17}

结果,如图4所示,可以看到:0.65 mm和0.70 mm这两种中间厚度的样品最终磁性能较好并且稳定,而0.60 mm和0.75 mm这两种中间厚度样品最终磁性能较差且不稳定。说明压下率太大或太小都不利于磁性能,最终冷轧压下率控制在55%~60%较好。

以 $\text{Cu}_2\text{S} + \text{AlN}$ 为主要抑制剂的低温加热普通取向硅钢一次冷轧总压下率通常为60%~70%,中间完全脱碳退火后再经55%~60%的压下率进行第二次冷轧。第二次冷轧总压下率>60%时,由于抑制能力不足,导致初次晶粒长大,磁性降低^[9]。在本研究中,由于低温加热普通取向硅钢中添加了Cu元素,加强了抑制能力,因此0.65 mm和0.70 mm两种中间厚度、分别对应于二次冷轧总压下率为56.2%和59.2%对最终磁性能影响的区别不是很明显,如图4所示。但厚度增加,不利于后续的脱碳,因此,对于低温加热普通取向硅钢而言,第一次冷轧后板厚一般控制在0.65 mm左右。文献[10-11]研究表明,当控制二次冷轧总压下率为55%时,能保证得到均匀的一次晶粒和适量的高斯晶核,并能积累足够的(110)[001]组分,二次冷轧总压下率控制不当会造成高斯晶粒的不足,甚至不能形成,从而使磁性下降。

2.4 中间完全脱碳退火工艺研究

低温加热普通取向硅钢与高温加热普通取向硅钢工艺的重要区别之一是:低温加热工艺在中间厚度进行完全脱碳,而高温加热工艺在中间厚度进行部分脱碳。如果成分和热轧按低温加热工艺控制,而冷轧、中间退火、脱碳退火按高温加热工艺控制,虽然二次再结晶比较完善,但二次晶粒的取向度很差,成品的磁感 B_8 很难达到1.80 T以上。

由于冷轧板较厚,在中间厚度完全脱碳比较困

难,低温加热CGO脱碳退火工艺与高温加热CGO脱碳退火工艺有较大差别。因此,在进行低温加热工艺全工序试验以前,专门进行了脱碳退火工艺试验。主要试验了退火温度、时间、加湿水温、气氛以及冷轧板厚度对脱碳的影响。试验时选择了热轧卷号为2711的热轧板,酸洗后分别冷轧到0.65、0.75、0.8 mm三个厚度,退火温度选择840℃和860℃两个温度,加湿水温选择55℃和65℃两个温度,退火时间选择5、5.5、7 min三个时间,退火气氛选择10% $\text{H}_2 + 90\% \text{N}_2$ 、25% $\text{H}_2 + 75\% \text{N}_2$ 、40% $\text{H}_2 + 60\% \text{N}_2$ 三种不同的气氛。脱碳退火的试验结果如图5所示。

从试验结果的图5可以看出,脱碳退火温度、时间、加湿水温、气氛以及冷轧板厚度对脱碳都有影响,但它们的影响程度不同:退火时间和冷轧板厚度影响较大,退火气氛和加湿水温影响较小。退火时间5.5 min时,碳含量很难脱到0.005%以下;退火时间7 min时,0.65 mm厚度冷轧板的碳含量都脱到0.005%以下,平均碳含量0.0041%;0.75 mm和0.80 mm厚度冷轧板脱碳后碳含量全部在0.005%以上,对应于0.75 mm和0.80 mm厚度冷轧板脱碳后平均碳含量分别为0.0063%和0.0075%。退火温度对脱碳的影响不大,总的来说,冷轧板较厚时适当提高退火温度有利于脱碳。加湿水温对脱碳的影响与退火气氛有关,退火气氛中氢气比例较高时,提高加湿水温有利于脱碳,退火气氛中氢气比例较低时,提高加湿水温不利于脱碳。

根据脱碳试验结果以及冷轧板厚度的不同,正式全工序试验时设计了不同的中间退火时间,退火的其它参数相同,具体工艺见表4。

2.5 回复退火对磁性的影响

将中间脱碳退火后0.60、0.65、0.70、0.75 mm厚试样进行二次冷轧。成品厚度按0.285 mm控

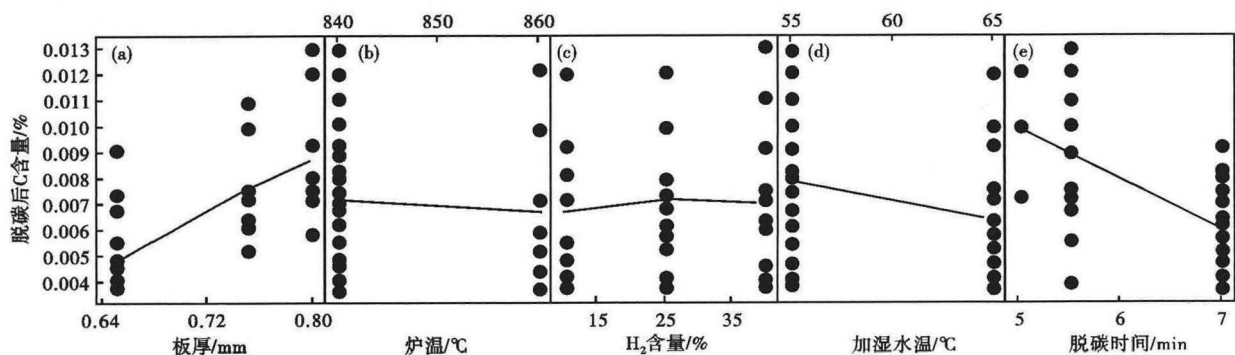


图5 板厚(a),脱碳退火温度(b)、退火气氛(c),加湿水温(d)和脱碳时间(e)对脱碳后碳含量的影响

Fig. 5 Influence of sheet thickness (a) annealing temperature (b) annealing atmosphere (c) water temperature for adding wet (d) and decarburizing time (e) on carbon content after decarburization

表 4 低温加热普通取向硅钢中间脱碳退火工艺
Table 4 Intermediate decarburization annealing process of low-temperature heating common grain-oriented silicon steel slab

炉温/℃	水温/℃	气氛	厚度/mm	时间/min
840	65	20% H ₂ + 80% N ₂	0.60	8.0
840	65	20% H ₂ + 80% N ₂	0.65	8.5
840	65	20% H ₂ + 80% N ₂	0.70	9.0
840	65	20% H ₂ + 80% N ₂	0.75	9.5

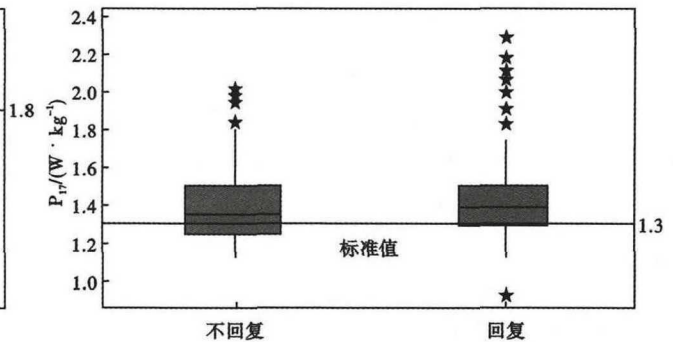
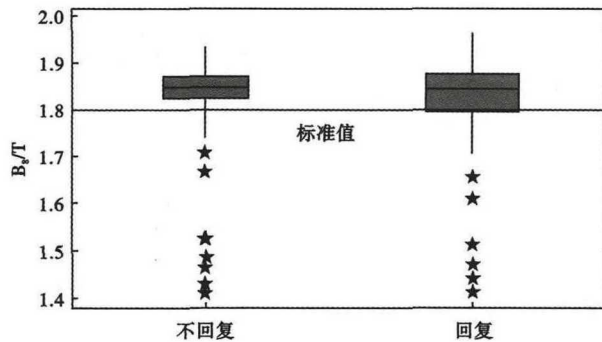


图 6 回复退火对低温加热普通取向硅钢磁性能的影响:(a) B_8 ; (b) P_{17}

Fig. 6 Influence of recovery annealing on magnetic properties of low-temperature heating common grain-oriented silicon steel slab: (a) B_8 ; (b) P_{17}

从表 3 和图 6 可以看出,高温退火前冷轧板是否经过回复退火对磁性能影响不大,经过回复退火时 P_{17} 平均 1.28 W/kg, B_8 平均 1.861 T, 未经过回复退火时 P_{17} 平均 1.273 W/kg, B_8 平均 1.858 T。

3 结论

(1) 在以 $\text{Cu}_2\text{S} + \text{AlN}$ 为抑制剂的低温加热 CGO 取向硅钢化学成分设计中,各主要元素合适的成分范围(%)为:0.03 ~ 0.05C, 3.0 ~ 3.2Si, 0.18 ~ 0.24Mn, 0.005 ~ 0.012S, 0.006 ~ 0.01N, 0.012 ~ 0.024Als, 0.4 ~ 0.55Cu。Als 对磁性能有较大影响,Als 小于 0.01% 时,很难达到较高的磁性能。

(2) 含 Cu 低温加热普通取向硅钢合适的加热温

度,实际厚度在 0.275 ~ 0.290 mm。将第二次冷轧后的冷轧板剪切成 30 mm × 300 mm 的试样,一部分经过低温回复退火,一部分不经过低温回复退火,以便比较回复退火对最终磁性能的影响。回复退火工艺制度为:炉温 550 ℃,保护气氛为湿的 5% H₂ + 95% N₂,保温 5 min。磁性能测量结果见表 3 和图 6。

度和热轧制度为:1 290 ℃ 左右加热,1 160 ℃ 左右开轧,终轧温度控制在 930 ~ 960 ℃。

(3) 在生产 0.30 mm 低温加热普通取向硅钢时,二次冷轧总压下率 ε 在 55% ~ 60% 均可。

(4) 中间退火温度控制在 840 ~ 850 ℃,加湿水温 65 ℃ 左右,退火气氛 20% H₂ + 80% N₂,退火时间根据冷轧板厚度不同而变化,在 8 ~ 9 min。

(5) 回复退火对含 Cu 低温加热普通取向硅钢磁性没有显著改善作用。因此,为降低成本,在实际生产过程中回复退火工艺可省去。

山西省科技攻关项目资助(2007031123-01)

参考文献

- [1] 卢凤喜. 日本取向硅钢板坯低温加热的研制现状[J]. 钢铁研究, 1996, 93(6): 54-59.
- [2] 卢凤喜, 董晶. 节能型取向硅钢生产技术研究[J]. 冶金信息导刊, 2005(6): 12-14.
- [3] 朱文英. 板坯低温加热工艺生产取向硅钢片[J]. 上海金属, 2001, 23(4): 33-37.
- [4] 陈妍, 许营, 王赫男. 新日铁公司在中国申请电工钢专利技术综述[J]. 冶金信息导刊, 2004(6): 8-10.
- [5] Gunther K, Abbruzzese G, Fortunati S, Ligi G. Recent technology developments in the production of grain-oriented electrical steel[J]. Steel Research International, 2005, 76(6): 413-421.
- [6] 李军, 孙彤. 取向硅钢铸坯低温加热技术的开发进展[C]. 第九届全国电工钢专业学术年会论文, 宁波: 电工钢专业学术委员会, 2006: 151-155.
- [7] 董爱锋, 张文康. 取向硅钢生产工艺技术分析和发展趋势[J]. 特殊钢, 2013, 34(5): 20-24.
- [8] 何忠治, 赵宇, 罗海文. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [9] 何忠治, 张信钰, 周宗全. 冷轧晶粒取向硅钢片的研究[J]. 金属学报, 1964, 7(2): 165-173.
- [10] 孙斌, 蒋漫文, 黄雄源. 0.20 mm 取向硅钢薄带的工艺及磁性研究[J]. 湖南冶金, 2004, 32(5): 24-26.
- [11] 王健安. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

董爱锋(1976-), 女, 博士(2006年中科院物理研究所), 高级工程师, 1999年北京科技大学(本科)毕业, 取向硅钢新产品的开发。

收稿日期: 2019-01-11