

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0605-03

取向硅钢激光后续处理方法的研究*

孙凤久 杨玉玲 齐小龙 张多

(东北大学理学院, 沈阳 110006)

摘要 介绍了几种典型的取向硅钢激光后续处理方法,并加以比较,分析了激光后续处理对取向硅钢的性能影响,研究了激光刻痕(LS)方法及激光局域表面合金化(LLSA)方法细化取向硅钢的磁畴,降低其铁损的机理,并提出了激光氮化(LN)方法。实验结果表明,取向硅钢经激光处理后,磁畴细化从而使得铁损降低,尤其经激光氮化处理,不但可以细化磁畴、降低铁损,还能明显改善其高温时效性能且保证处理后取向硅钢的平整度基本不发生变化。

关键词 取向硅钢, 激光刻痕, 激光局域表面合金化, 激光氮化

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

Study on The Laser Post-treatment Method for Oriented Silicon Steel

SUN Feng-jiu YANG Yu-ling QI Xiao-long ZHANG Duo

(College of Science, Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract Some typical laser post-treatment methods for oriented silicon steel were introduced and compared each other, the effects of laser post-treatment on the oriented silicon steel were analyzed and the mechanism of refining domain structure, hence reducing the total core loss of oriented silicon steel by laser scribing (LS) method and local laser surface alloying(LLSA) method was studied. On the base, a laser nitriding method (LN method) is given. The results show that after laser treatment, domain structure of oriented silicon steel was refined, especially after laser nitriding treatment, not only the domain structure was refined, and the core loss was reduced, but also the aging property was improved and the evenness of oriented silicon steel kept well.

Key words oriented silicon steel, laser scribing, local laser surface alloying, laser nitriding

1 引言

取向硅钢作为一种重要的电工钢材料,其铁损一直是倍受关注的问题。美国和日本每年由于电工钢的铁损所造成的经济损失分别占国民生产总值的 4.5% 和 2.5%^[1]。因此,降低取向硅钢的铁损十分重要,尤其在当今能源危机日趋严重的情况下,就更加紧迫。特别在我国,目前绝大部分取向硅钢依赖进口,且难以获得高质量的材料,因而对取向硅钢后续处理的研究在我国就更具有特殊意义。

降低取向硅钢铁损主要通过细化磁畴来实现的。最早使用的细化磁畴方法是机械刻痕法及电火花方法等,这些方法虽然能使铁损 P_T 降低,但因为机械刻痕使钢板表面不平,叠片系数降低,磁致伸缩

和噪音明显提高,同时也破坏了绝缘膜,因此并没有实用价值。80 年代初,人们研究了一种激光细化磁畴方法,即激光刻痕(LS)法。但这种以激光刻痕处理的硅钢因其刻痕区的热稳定性不佳,时效性能不理想,从而限制了该项技术的应用范围。为此我们曾提出了局域激光表面合金化(LLSA)方法^[4,5]。本文对传统的激光处理方法进行了介绍,并报道我们最近提出的激光氮化(LN)方法。

2 传统的激光处理方法介绍

2.1 激光刻痕方法

激光刻痕法是最基本的取向硅钢后续处理方法。80 年代初以日本的 T. Luchi 等为代表的研究者首先采用红宝石和 YAG 固体脉冲激光对硅钢表面进行垂直于轧向的点线扫描刻痕处理^[2],发现在

* 国家自然科学基金(59974010,59974020)资助课题

适当条件下, $P_{17/50}$ 下降幅度可达 10%, 但绝缘膜被破坏。1985 年美国 G. C. Rauch 等为了改进和发展上述工作, 试验采用 CW- CO_2 激光对取向硅钢进行线扫描刻痕处理^[3]。发现合理的工艺条件下, 连续激光辐照不仅可以使取向硅钢铁损降低, 而且可能不会使取向硅钢表面绝缘膜涂层被破坏, 他们获得铁损 $P_{17/50}$ 下降幅度可达 8% 的水平。我们进行了 CW- CO_2 激光刻痕取向硅钢以降低铁损的研究, 深入探讨了激光功率、扫描速度、扫描间距等参数对取向硅钢铁损的影响^[4], 获得了无损涂层且铁损下降幅度较大的最佳处理条件(尤其是扫描间距对铁损值的影响至关重要), 铁损值 $P_{17/50}$ 在此条件下可下降 12%。激光刻痕方法确实能降低取向硅钢的铁损, 但却存在严重的时效问题, 激光刻痕后的样品经高温退火处理或使用一段时间后, 刻痕逐渐消退, 铁损逐渐回升, 从而失去细化磁畴、降低铁损的目的。为了解决时效问题, 美国曾在取向硅钢表面涂以可热渗透的介质, 但并未根本解决。

2.2 激光局域表面合金化方法

为了从根本上解决激光刻痕所存在的时效问题, 我们曾进行了激光局域表面合金化方法的研究。在刻痕区引入固态合金元素, 在激光热冲击和扩散作用下, 刻痕区的固态合金化元素与硅钢表面形成合金, 从而可以细化磁畴, 降低铁损。另外, 因为在刻痕区形成了合金, 在升温过程中, 刻痕区的合金在一定温度范围内不会发生分解, 从而改善了高温时效性。选用的合金化元素包括 Si、Sb 等, 且都取得了很好的效果。但是这种方法由于采用的是固态合金元素, 因而, 在硅钢表面形成合金带, 使得取向硅钢表面的平整度降低。为了在细化磁畴、降低铁损、改善时效性的同时能保证硅钢片的平整度基本不发生变化, 并降低成本, 我们又提出了激光氮化方法。

3 激光氮化的物理思想及实验结果与讨论

激光氮化方法即引入氮作为合金化元素, 根据 Fe-N 相图可知, 温度在 600~700 °C 时, Fe 和 N 可能结合成高温稳定的铁氮化合物。经聚焦的激光束在焦斑处可达到氮化所需的合适温度, 通过控制激光工艺参数及氮束流量可实现光致铁氮结合。首先将取向硅钢样品进行除膜处理, 用丙酮清洗干净后, 表面进行黑化处理。选取合适的激光工艺参数(激光功率, 扫描速度, 扫描间距等), 其中合适的扫描间

距是至关重要的, 关于这方面的研究, 我们曾在其他论文中进行过报导, 在此不再赘述。在激光氮化处理前, 首先要对氮气进行预处理, 使尽可能多的 N_2 处于激活的等离子体状态, 以利于 Fe 与 N 的结合。实验过程中, 先将 N_2 加热至 400 °C, 然后通入特制的与激光束同轴的通气装置, 在该装置内, 激光束照射到 N_2 分子上, 由于高能激光的作用, 致使部分 N_2 分子离化成等离子体, 随同激光束同轴照射到样品表面, 在光斑处与硅钢化合形成高温稳定的铁氮化合物。处理后的样品利用 X 光光电子能谱(XPS)进行了检测, 图 1 为氮化处理后的取向硅钢中 Fe、N 两种元素的 XPS 谱图。

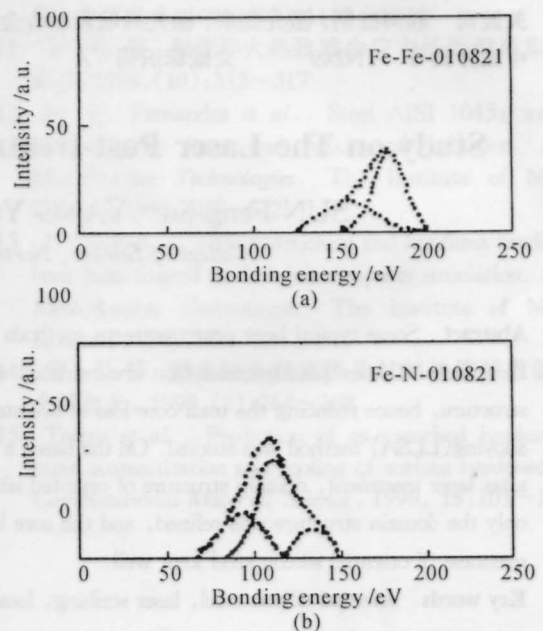
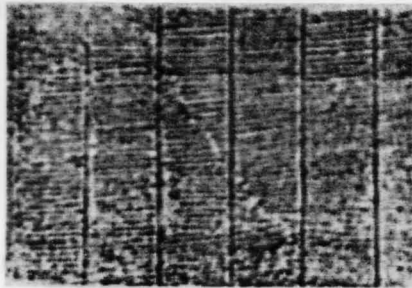


图 1 氮化处理后样品。(a)Fe 的 XPS 谱;(b)N 的 XPS 谱

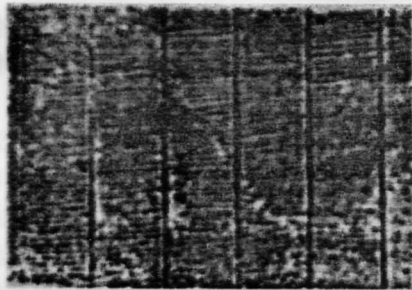
Fig.1 (a)Spectrum of Fe in nitrided sample;

(b) Spectrum of N in nitrided sample

由图可见, 经上述工艺处理的样品表面有氮化物生成。依解谱数据(表 1), 并利用原子灵敏度因子方法可计算出 Fe、N 两种元素的原子浓度之比约为 2.08:1, 由此可知, 氮化物中主要以 Fe_3N 和 Fe_4N 为主, 其它氮化物如 Fe_{3-x}N 和 ϵ -氮化物因其稳定性较差, 存在的可能性较小。对处理后的样品进行 600 °C 保温退火处理和磁畴观测, 图 2 为退火处理前后样品的磁畴结构照片。由图中可知, 氮化处理后的样品在 600 °C 保温退火处理后, 磁畴结构基本不发生变化, 即有良好的高温时效性。这是因为, 在刻痕区形成的铁氮化合物具有高温稳定的特点, 在升温过程中不会分解, 从而对刻痕形成的亚晶界起到钉扎作用, 阻止了亚晶界扩散, 改善了时效性能。



(a)



(b)

图2 氮化处理后,(a)退火前样品的磁畴结构;
(b)退火后样品的磁畴结构

Fig.2 (a) Domain structure before annealing of nitrided sample;
(b) Domain structure after annealing of nitrided sample

表1 激光氮化样品的XPS解谱数据表

Table 1 XPS spectrum data of laser-nitrided sample

Peak position (eV)	Fe		N	
	713.44	709.64	399.82	398.34
Peak area	21.43	54.57	3.16	6.02
Count gene	0.40		0.07	
Facility gene	3.80		0.38	
Peak intensity	30.40		0.79	

4 结 论

激光氮化方法可细化取向硅钢的磁畴,从而降低铁损;可改善取向硅钢的高温时效性;可保证取向硅钢片的表现质量。

参 考 文 献

- 1 何忠治. 电工钢. 北京: 冶金工业出版社
- 2 T. Iuchi, S. Yamaguchi *et al.*. *J. Appl. Phys.*, 1982, 53(3):2410
- 3 G. C. Rauch, R. F. Krause. *J. Appl. Phys.*, 1985, 57(1):4209
- 4 F. J. Sun *et al.*. *Proc. of 4th APPC*, 1990, 2:1457
- 5 F. J. Sun *et al.*. *Proc. PRICM-2*, 1995, 1:613