

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190121001

纳秒激光微刻蚀取向硅钢的形貌特征及磁性能

陈宗汪¹, 张健^{1,2}, 杨林¹, 吴来新³, 刘文文¹

(1. 温州大学 激光与光电智能制造研究院, 温州 325035; 2. 温州市质量技术监督检测院, 温州 325027; 3. 浙江温医雷赛医用激光科技有限公司, 温州 325011)

摘要: 为有效降低取向硅钢铁损、改善其磁性能, 采用红外纳秒激光对取向硅钢进行微刻蚀试验。利用3D共聚焦显微镜、扫描电镜与能谱仪研究典型工艺参数下的硅钢表面烧蚀形貌特征及表面质量, 利用铁损仪测试不同刻蚀参数下取向硅钢的铁损、相对磁导率等磁性能参数及动态磁滞回线, 对比分析刻痕前后磁性能的变化行为、规律及磁滞特性。结果表明: 激光刻痕后, 硅钢的铁损、相对磁导率、矫顽力及剩磁等性能得到明显改善, 铁损的改善表现在高磁感强度下、相对磁导率的改善表现在低磁场强度下, 回线特性得到优化。扫描速度为800 mm/s、脉冲能量为0.25 mJ时, 刻痕边界呈近似规则的“波浪线”, 且刻痕表面质量较高, 铁损降低高达11.6%、剩磁降低12.8%等; 刻痕后相对相对磁导率明显提高, 提高约为5.7%~15.16%, 最大可达 2.598×10^4 。激光频率与扫描速度的耦合关系是影响刻痕边界形状与磁畴细化效果的重要因素。

关键词: 激光加工; 激光刻蚀; 取向硅钢; 铁损; 纳秒激光

中图分类号: TG174.44; TN305.7

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)03-0011-10

Morphology Features and Magnetic Properties of Micro-ablating Oriented Silicon Steel by Nanosecond Laser

CHEN Zongwang¹, ZHANG Jian^{1,2}, YANG Lin¹, WU Laixin³, LIU Wenwen¹

(1. Intelligent Manufacturing Institute of Laser and Optoelectronic, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. Wenzhou Institute of Technology Testing & Calibration, Wenzhou 325027, China; 3. Winsight Technologies Co., Ltd., Zhejiang, Wenzhou 325011, China)

Abstract: In order to effectively reduce the loss of oriented silicon steel and improve its electromagnetic properties, the oriented silicon steel was scribed by the infrared nanosecond laser. The ablation morphology and surface quality of silicon steel with typical process parameters were studied by 3D confocal microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. The iron loss meter was used to measure the electromagnetic properties of oriented silicon steel after laser scribing with different parameters, such as iron loss, electromagnetic properties and dynamic hysteresis loop. The variation behavior, law and hysteresis property of electromagnetic properties before and after scribing were compared and analyzed. The results show that the iron loss, permeability, coercivity and residual magnetic flux density of silicon steel are obviously improved after laser scribing. The improvement of iron loss is manifested under high magnetic induction. The improvement of permeability is reflected in the low magnetic field intensity. The loop characteristic was optimized. When the scanning speed is 800 mm/s and the pulse energy is 0.25 mJ, the scribe boundary is close to regular “wavy line”, and the high surface quality of the scribe is shown. The iron loss decreases by 11.6%, and the residual magnetic flux density decreases by 12.8%. After the scribe, the relative magnetic permeability obviously increases by 5.7% to 15.16%, and the maximum is

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-05-07

通信作者: 张健(1982—), 男(汉), 讲师, 博士; 研究方向: 激光先进制造; E-mail: zhangjian200623@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(51605338, 11704285); 浙江省质量技术监督系统科研计划(20170247); 温州市科技计划(G20160016)

Fund: Supported by National Science Foundation of China (51605338, 11704285), Zhejiang Provincial Quality and Technical Supervision System Research Project (20170247) and Wenzhou Science and Technology Plan (G20160016)

引用格式: 陈宗汪, 张健, 杨林, 等. 纳秒激光微刻蚀取向硅钢的形貌特征及磁性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 11-20.

CHEN Z W, ZHANG J, YANG L, et al. Morphology features and magnetic properties of micro-ablating oriented silicon steel by nanosecond laser[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 11-20.

2.598×10^4 。The coupling relationship between the laser frequency and the scanning speed is an important factor affecting the shape of the notch boundary and the effect of magnetic domain refinement.

Keywords: laser processing; laser scribing; oriented silicon steel; iron loss; nanosecond laser

0 引言

取向硅钢是电力、电子工业中不可或缺的重要软磁材料, 主要应用于大中型电动机和变压器, 为钢铁工业中的“艺术品”^[1-3]。鉴于能源日趋紧张和电力工业节能降耗的迫切需求, 不断改善其性能, 降低其铁芯损耗(铁损), 成为了硅钢制造行业的竞争焦点与备受关注的研究课题。取向硅钢的铁损主要由磁滞损耗、涡流损耗、反常涡流损耗 3 部分组成, 其中反常涡流损耗约占总损耗的 50%^[4]。影响反常涡流损耗的主要因素是磁畴宽度, 磁畴宽度越大, 畴壁移动的阻力越大, 速率越小, 反常涡流损耗越大^[5-7]。磁畴细化技术就是通过减小取向硅钢磁畴宽度来降低反常涡流损耗的物理方法, 目前常用的方法主要包括机械刻痕法、激光刻痕法、等离子束照射法和局部加热法等^[8-9]。其中激光刻痕法是利用激光使材料局部快速加热和冷却的物理冶金方法, 一方面使得刻痕区组织产生微小塑性变形和高密度位错, 引起刻痕区磁弹性能和静磁能增加, 为使基体处于稳定状态, 沿刻痕边界产生反向闭合磁畴、90°亚磁畴和自由磁极等。在反复磁化过程中, 反向闭合磁畴及自由磁极长大, 使得 180°主磁畴细化; 另一方面由于金属冷却收缩, 在非刻痕区域产生残余拉应力, 拉应力引起表面闭合畴减少和静磁能增大, 为减小能量增高部分, 180°主磁畴细化且 90°亚磁畴消失。最终达到降低铁损、改善磁性能的目的。

日本新日铁 Luchi 等^[10]采用调 Q 模式的纳秒 Nd: YAG 激光器对硅钢表面进行激光刻痕试验, 铁损降低了 10%。美国 Neisheisel 等^[11]采用 3 种不同模式下的 Nd: YAG 激光器对取向硅钢进行刻痕试验, 结果表明调 Q 模式下刻痕得到的效果最好, 铁损降低最大, 达到 10%。韩国 S.Ahn 等^[12]选用 Nd: YAG 激光器, 分别采用调 Q 模式和长脉冲模式(脉宽毫秒级)进行刻痕试验, 结果表明调 Q 模式具有更好的刻痕效果。国内李海娇等^[13-14]采用调 Q 模式 Nd: YAG 激光器对 Q120 牌号取向硅钢成品板进行激光刻痕, 在优化参数条件下, 铁损下降 9.45%。黄禹等^[15-16]采用调 Q 模式 Nd:

YAG 激光器对 Q130 牌号的取向硅钢进行刻痕工艺研究, 结果表明在单脉冲能量为 2.7 mJ、刻痕间距为 3.03 mm、刻痕点间距为 0.22 mm 时效果最佳, 铁损下降高达 13.12%。文献 [10, 13, 17] 研究了 Nd: YAG 脉冲式激光器、CO₂ 连续激光器和光纤激光器对刻痕效果的影响, 结果表明采用各激光器铁损降幅分别可达 10%, 12.5% 和 14.5%, 由于光纤激光器能量转换率高、加工稳定性高、光束质量高等优点, 使得光纤激光器刻痕效果最佳。

从目前研究结果来看, 与传统长脉冲 Nd: YAG 激光、CO₂ 连续激光相比, 在取向硅钢刻蚀方面采用纳秒短脉冲光纤激光易获得较好的刻蚀效果。脉冲激光刻痕工艺中, 影响参数较多且各参数件相互影响制约, 其中脉冲能量、刻痕间距、刻痕点间距等参数对刻痕效果的影响较大。取向硅钢的宏观磁性能参数(铁损、相对磁导率、矫顽力、磁滞回线等)主要取决于晶粒织构、晶粒尺寸、内应力、基体元素及表面状态等, 激光作用取向硅钢表面后势必改变原始状态, 造成磁性能参数的变化^[18-19]。国内外研究者对激光刻痕效果方面做了大量研究工作, 取得了较好的研究成果, 但大都集中在工艺参数对取向硅钢铁损的影响上, 针对刻痕后磁性能的综合分析评价、磁性能的变化行为规律与磁滞特性等方面的研究还较为缺乏, 对工艺参量、刻痕烧蚀形貌特征、磁性能参数 3 者间的内在关联性的认识还不够明晰。

因此, 文中采用纳秒光纤激光对 30Q130 取向硅钢进行表面微刻蚀试验, 研究不同关键工艺参数下的刻痕烧蚀形貌特征与规律, 以及对宏观磁性能的影响; 提取典型形貌特征, 建立刻痕形貌与磁性能的对应关系; 对刻痕试样进行技术磁化, 从磁化过程出发研究不同磁化条件下的磁化行为规律与磁滞特性, 探讨刻痕质量对磁畴细化与技术磁化的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为 30Q130 型取向硅钢成品板材, 尺

寸为 100 mm(轧向)×30 mm(横向)×0.3 mm(厚度)(标准爱泼斯坦测试试样), 化学成分如表 1 所示。在其中心截取 10 mm×10 mm 方形区域进行金相制备后, 观察到的原始晶粒如图 1 所示, 其晶

界清晰、完整, 晶粒尺寸约为 4~8 mm。刻痕前, 首先用细砂纸打磨硅钢片边缘去除毛刺, 然后在通风橱柜中分别用丙酮、无水乙醇擦拭硅钢表面, 去除表面杂质、油污等, 最后风干密封保存。

表 1 30Q130 取向硅钢化学成分
Table 1 Chemical composition of 30Q130 grain oriented silicon steel (w/%)

Element	C	Si	Mn	S	P	Al	N	Fe
Actual value	0.04-0.08	2.80-3.40	0.06-0.12	0.02-0.03	<0.01	0.02-0.03	0.006-0.009	96.3-97.0

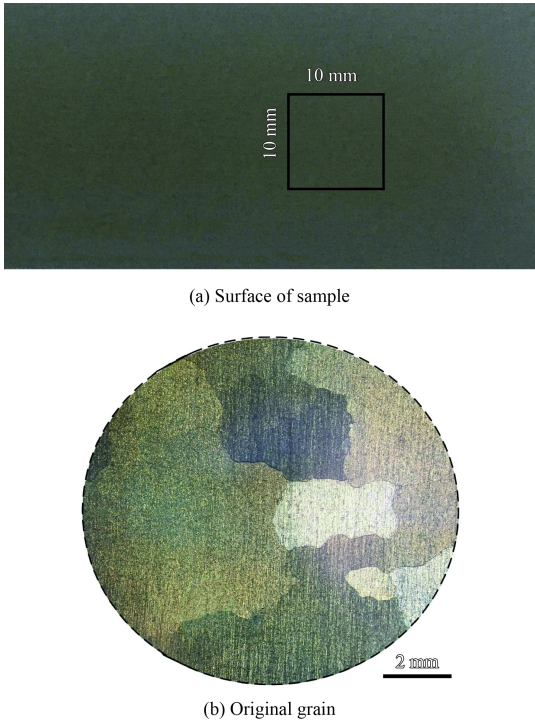


图 1 取向硅钢成品板材形貌

Fig.1 Steel plate products of oriented silicon steel

1.2 试验设备及方法

为实现取向硅钢表面高效精确刻蚀, 采用自行搭建的振镜扫描式激光精密加工系统进行刻蚀试验, 试验原理如图 2 所示。激光器为美国 IPG YLPN-V2 纳秒光纤激光器, 波长 1064 nm, 最大输出功率 20 W, 最大重复频率 80 kHz, 脉宽为 30 ns, 聚焦光斑直径 50 μm。影响激光刻痕质量的主要参数有刻痕间距、输入功率、刻痕速度等。S.V. Ponnaluri 等^[17]研究表明, 当刻痕间距在 4~6 mm 时, 可获得较好的刻痕效果, 当激光频率与扫描速度达到较优的耦合关系, 刻痕效果最佳; Ahn 等^[12]研究表明, 相对于传统毫秒脉冲激光, 采用纳秒脉冲激光进行刻蚀, 可有效降低对硅钢表面绝缘层的烧蚀损伤。因此, 为减小工艺

参数间的交互作用对刻蚀质量的影响、降低对绝缘层的损伤, 刻蚀试验在固定脉宽 30 ns、固定激光频率 20 kHz、固定刻痕间距 4 mm 下, 研究脉冲能量 (0.15~0.40 mJ)、扫描速度 (200~1000 mm/s) 这两个重要参数对刻痕形貌、表面质量与磁性能的影响。其中脉冲能量通过调节激光输出功率设定, 保护气体流量为 5 L/min(99.999% 氩气), 在大量试验的基础上, 选取代表性参数, 如表 2 所示。将试样平放在纳秒激光加工平台, 以振镜扫描方式进行刻痕, 每组参数下重复进行 5 次, 利用 OLS-4100 型共聚焦显微镜, 观察硅钢表面刻痕宏观形貌特征并测量刻痕深、宽等参数; 利用 Hitachi S-3400N 型扫描电镜及其附件能谱仪, 观察硅钢表面微观烧蚀特征与检测元素变化; 配制纳米磁流体溶液, 并利用 Brockhaus DV90 型磁畴观测仪观察磁畴结构; 在 50 Hz 工频交流电下对试样进行技术磁化, 然后利用 FE-30SST 型铁损仪及其自带测量软件 (测量精度为±2.5%), 测量试样刻痕前后铁损、相对磁导率、矫顽力等重要磁性能参数, 得到动态磁滞回线, 绘制 μ-H 曲线。最终结果为 5 次测量数据的平均值。

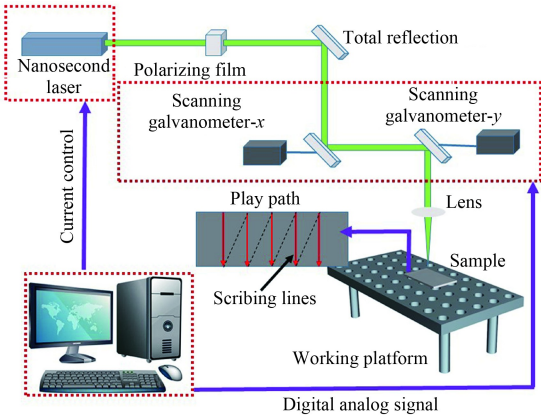


图 2 激光刻痕系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of laser scribing system

表 2 激光刻痕试验参数

Table 2 Experimental parameters of laser scribing				
Sample number	Pulse energy / mJ	Laser frequency / kHz	Scribing speed / (mm·s ⁻¹)	Scribing spacing / mm
1	0.25	20	200	4
2	0.25	20	400	4
3	0.25	20	600	4
4	0.25	20	800	4
5	0.25	20	1000	4
6	0.15	20	800	4
7	0.20	20	800	4
8	0.30	20	800	4
9	0.35	20	800	4
10	0.40	20	800	4

2 结果与讨论

2.1 刻痕形貌特征与表面质量

2.1.1 不同扫描速度下的宏观形貌特征与表面质量

图 3 为脉冲能量为 0.25 mJ 时，不同扫描速度下刻痕的三维形貌与截面参数。当扫描速度为 200~600 mm/s 时，刻痕宽度基本一致(约 60 μm)，刻痕深度随扫描速度增加而减小(6~5.3 μm)；无明显刻蚀点轮廓，刻痕边界近似“直线”，刻痕中

心存在大量凸起的重熔物、表面附着大量飞溅物、粗糙度较大。低的扫描速度与高的重复频率使得激光作用区线能量密度较大、累积破坏效应强，材料瞬间达到过热状态，发生以沸腾和喷溅为形式的相爆炸而形成重熔物、飞溅物乃至孔洞等。而相爆炸过程中伴随的等离子体膨胀对靶材造成的反冲击力大小在一定程度上影响着重熔物、飞溅物的迁移与孔洞的形状尺寸，从而影响刻痕表面质量。当扫描速度达到 800~1000 mm/s 时，深、宽的变化趋势与低扫描速度时一致，但刻蚀点轮廓清晰，刻痕边界近似规则的“波浪线”，而且刻痕中心重熔物、飞溅物与孔洞较少，粗糙度也相对较小，说明激光作用主要以熔融、汽化为主。由如图 3 中刻痕二维局部放大图可知，随扫描速度增大，激光与材料相对作用时间减少、累积破坏效应减弱，相爆炸与等离子体化程度随之减弱甚至消失，飞溅物、重熔物减少，表面粗糙度降低。不同的刻痕形貌与表面质量产生不同的位错密度、应力状态，对刻痕边界处自由磁极、反向闭合磁畴的形成、长大的影响不同，造成主畴细化程度上的差异，宏观表现在铁损值降低的程度上，研究表明如图 3(d) 中所获得的形貌具有较好的磁畴细化效果、有利于降低铁

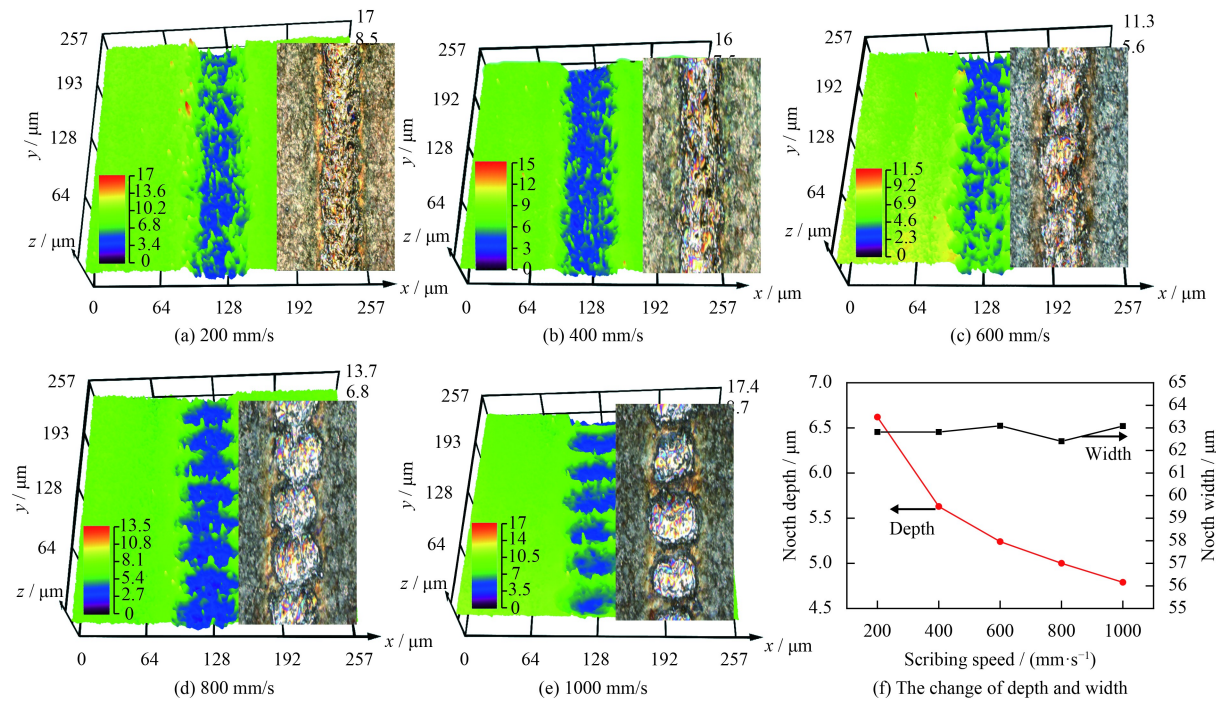


图 3 不同扫描速度下的刻痕形貌与深宽变化

Fig.3 Surface morphologies and the change of depth and width after laser scribing under different scribing speed

损^[13]。因此, 从形貌与表面质量考虑, 扫描速度为 800 mm/s 时易获得较佳效果。

2.1.2 不同脉冲能量下的宏观形貌特征与表面质量

图 4 为扫描速度为 800 mm/s 时, 不同脉冲能量下刻痕的三维形貌与截面参数。由图可知, 随脉冲能量增加, 刻痕深度近似线性增加, 刻痕宽度先增大后减小, 刻蚀表面重熔物、飞溅物及孔洞等逐渐增多, 表面质量下降。当脉冲能量较低时 (≤ 0.25 mJ), 由图 4(a)(b) 可知, 激光作用材料表面主要以熔融、汽化为主, 并伴随微弱的相爆炸, 飞溅物较少。当脉冲能量较高时 (≥ 0.25 mJ), 由图 4(b)(c) 中的烧蚀形貌特征可知, 随脉冲能量

增加, 相爆炸、等离子体化程度明显增强, 刻蚀点之间堆积的大量重熔物构成了重铸层, 使得表面粗糙度明显增大。扫描速度一定时, 随脉冲能量增大, 材料表面熔化、汽化效果显著增强, 深度增加的同时, 重熔物、飞溅物也逐渐增多。若脉冲能量进一步增大, 则会导致不同程度的相爆炸并伴随等离子体的产生, 等离子体膨胀产生的反冲击力使得重熔物迁移形成重铸层, 同时也影响了飞溅物及孔洞的分布与形状, 使得表面粗糙度变大。刻痕形貌、表面质量与工艺参量之间存在一定的对应关系, 不同的对应关系引起刻痕边界不同的应力分布与位错密度, 从而造成磁畴细化程度上的差异, 导致磁性能的不同。

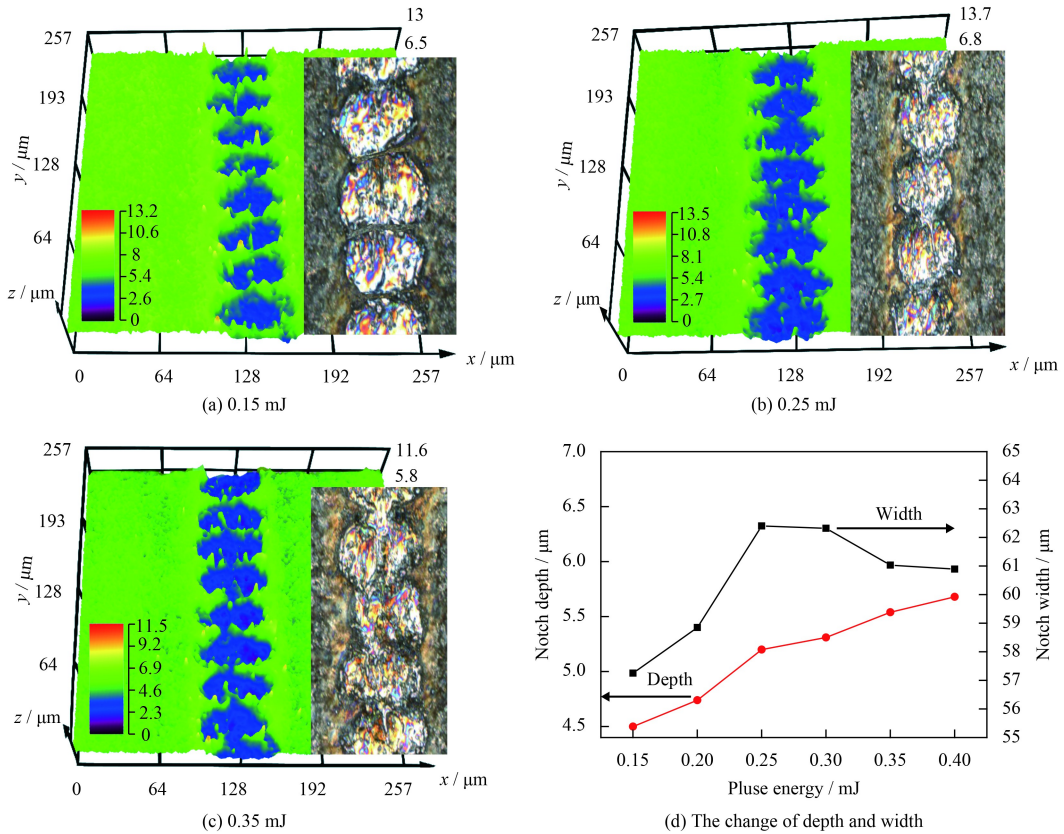


图 4 不同脉冲能量下的刻痕形貌与深宽变化

Fig.4 Surface morphologies and the change of depth and width after laser scribing under different pulse energy

2.1.3 微观形貌特征与表面质量

为进一步探讨刻痕表面烧蚀破坏程度与形貌特征, 取典型工艺参数下 (脉冲能量为 0.25 mJ, 扫描速度为 400 mm/s、800 mm/s) 的试样进行 SEM 观察, 如图 5 所示。由图可知激光作用硅钢表面后, 由于脉冲能量热积累不同引起的熔化、汽化、相爆炸程度不同, 同时产生的冲击波力效

应也不同, 最终使得刻痕表面产生了不同程度的烧损与破坏。扫描速度为 400 mm/s 时, 刻痕中部粗糙、不规则, 无明显的烧蚀点周期结构, 且存在较多、较大密集分布的孔洞与重熔物; 刻痕周围分布着大尺寸颗粒状的飞溅物, 表面整体质量较差。结合 EDS 元素测试结果 (表 3) 可知, 飞溅物含有较高的 O、Mg、Si, 但均低于绝缘涂层中

的含量, 由于试验中采用 99.999% 高纯氩气进行保护, 因此飞溅物中的元素可能来自于烧损破坏的硅酸镁绝缘层 (图中 A 点); 重熔物中含有少量的 O 及 Mg (因 Mg 含量极少, 可忽略不计), 以 Fe、Si 元素为主, 元素成分含量接近基材的元素含量 (表 1), 说明其以硅铁合金的形式存在于刻痕中心 (图中 B 点); 刻痕边缘主要含有 O、Si、Mg 元素, 以及少量的 Fe 元素, 以涂层的重熔物形式附着于刻痕边界, 一方面, 短脉冲激光烧蚀

对绝缘层破坏更小, 另一方面, 影响边界的残余应力分布情况 (图中点 C)。扫描速度为 800 mm/s 时刻痕总体表面质量较好, 具有规则排布均匀的烧蚀点周期结构, 表面飞溅物、重熔物、孔洞明显减少。结合磁性能测试结果来看, 当激光脉冲能量与扫描速度达到较好的耦合关系时, 刻痕表面存在的重熔物、飞溅物及孔洞较少, 可获得较规则的周期性结构, 表面质量较高, 有利于磁性能的改善。

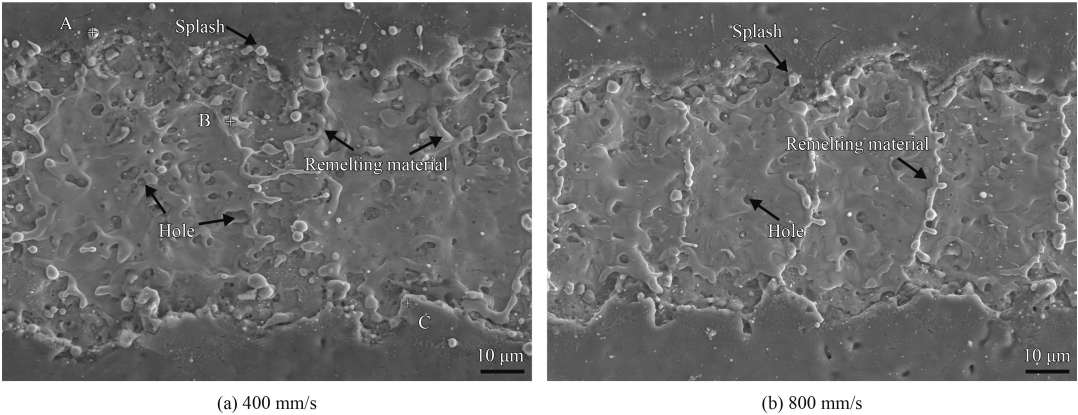


图 5 不同扫描速度下的刻痕微观形貌

Fig.5 Micro-morphologies of scribing under different scanning speeds

表 3 刻痕区域 EDS 测试结果					
Table 3 EDS test results of notch area					
Notch area	Fe	Si	O	Mg	Other elements
Spitting (A)	58	6.2	16.4	3.9	15.5
Remelted substance (B)	92.4	3	1.7	0.2	2.7
Margin (C)	7.5	26.7	29.6	4.8	31.4

2.2 对磁性能及磁化行为的影响

2.2.1 相对磁导率及磁化行为的影响

相对磁导率与基本磁化曲线是表征磁介质材料在外场中磁化能力强弱与微观磁畴结构迁移的重要物理量。将刻痕前后的试样置于工频交变磁场, 进行不同磁场强度下的技术磁化, 以获得基本磁化曲线与 μ - H 曲线如图 6 所示, 根据磁化理论, 将磁化过程分成初始磁化 (图中 AB 段)、急剧磁化 (图中 BC 段)、饱和磁化 (图中 CE 段) 3 个阶段。由图 6 可知, 刻痕前后相对磁导率随磁场强度的总体变化趋势一致, 先增大后减小。在初始磁化阶段、急剧磁化及饱和磁化前期 (图中 CD 段), 刻痕后, 试样相对磁导率明显提高。磁感强度为 30 A/m 时, 相对磁导率提高约 5.7%~

15.16%, 但随脉冲能量增加相对磁导率则降低。

初始磁化阶段后期、急剧磁化阶段, 磁化主要依靠畴壁移动, 畴壁移动的难易主要受磁畴宽度与织构缺陷的影响。刻痕后, 相对磁导率不同程度的提高是畴宽减小程度与织构缺陷阻碍共同作用的结果。脉冲能量为 0.15 mJ 时相对磁导率较大, 为 2.598×10^4 , 由 2.1.2 分析可知, 此时激光

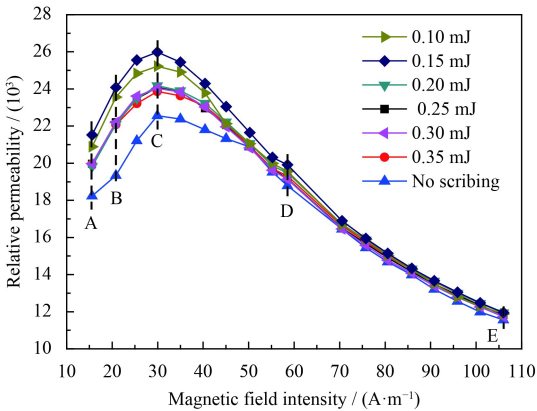


图 6 不同磁场强度下的相对磁导率变化

Fig.6 Change of relative permeability under different magnetic field intensity

作用主要以熔化、轻微汽化为主,刻痕表面缺陷较少,对畴壁移动的阻碍作用较小;当脉冲能量小于 0.15 mJ 时,相对磁导率整体略低于 0.15 mJ 时的相对磁导率,两者具有一致的变化趋势,无明显差异。若脉冲能量过低,硅钢表面得不到有效的刻蚀,刻痕工艺无实际意义。提高脉冲能量,相对磁导率下降且趋于稳定,说明因畴壁移动效果在弱化、而刻痕缺陷产生的钉扎作用则增强,这是由于高脉冲能量下,相爆炸导致较多数量的、较大尺寸的飞溅物、重熔物、孔洞及夹杂物等缺陷,增加了畴壁的迁移能,阻碍了畴壁移动。

在饱和磁化后期(图中 DE 段),相对磁导率曲线均呈下降趋势、近乎重合,说明刻痕对相对磁导率的影响主要表现初始磁化阶段与急剧磁化阶段(磁场强度为 15~35 A/m 范围内),对饱和磁化的影响不明显。由于该阶段的磁化行为主要以畴内磁化向量转动的方式进行,随磁场强度的增加畴内磁化向量开始向其他方向转向,轧制方向的相对磁导率下降,说明激光刻痕改善硅钢磁性能主要受畴壁迁移的影响。

表 4 给出了不同刻痕条件下各种磁性能的参数值,下文将分别进行阐述。

表 4 刻痕前后硅钢的磁性能参数
Table 4 Magnetic parameters of laser scribing silicon steel before and after scribing

	No scribing	0.15 mJ	0.20 mJ	0.25 mJ	0.30 mJ	0.35 mJ
Relative permeability, $\mu_{\max}$	2.24×10^4	2.59×10^4	2.42×10^4	2.39×10^4	2.38×10^4	2.36×10^4
Residual magnetic flux density, $B_{\text{rmax}} / \text{T}$	1.64	1.59	1.52	1.43	1.56	1.58
Coercivity, $H_{\text{cmax}} / (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	27.72	27.68	26.79	25.88	26.44	26.89
Iron loss, $P_{\text{smax}} / (\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.91	0.86	0.83	0.80	0.85	0.83

2.2.2 回线特性及特征参数的影响

回线特性不仅是磁性材料在工程应用中磁化能力及损耗的重要技术指标,更是磁材料内部磁畴结构变化及运动的重要依据。激光作用材料是一个急热急冷的过程,易造成材料内部应力起伏、织构缺陷等,使得回线特性及特征参数有所差异。

选取原试样与较佳工艺参数下(800 mm/s、0.25 mJ)的刻痕试样,根据 GB/T2521-1996,在频率为 50 Hz,交变磁场强度为 800 A/m 下测得动态磁滞回线与特征参数,如图 7 所示。由图可知,刻痕后回线明显变窄,刻痕后回线面积(S)由

405.09 mm² 降低至 372.87 mm²,降低约 8%;矫顽力(H_c)由 27.72 A/m 降至 25.88 A/m,降低约 6.6%;剩磁(B_r)由 1.64 T 降至 1.43 T,降低约 12.8%;饱和磁感应强度无明显变化。上述数据表明,经激光刻痕后硅钢磁特征参数得到优化。 H_c 、 B_r 减小,说明取向硅钢经激光刻痕对外场的响应更加迅速,进一步说明了图 6 测试结果中磁化初始阶段、急剧磁化阶段(AC 段)相对磁导率明显提高的原因。磁特征参数的减小使得回线变窄,刻痕后的试样作为软磁材料用于电机、变压器制造中,可以产生较大的磁通、较低的铁芯损耗,获得有益效果。

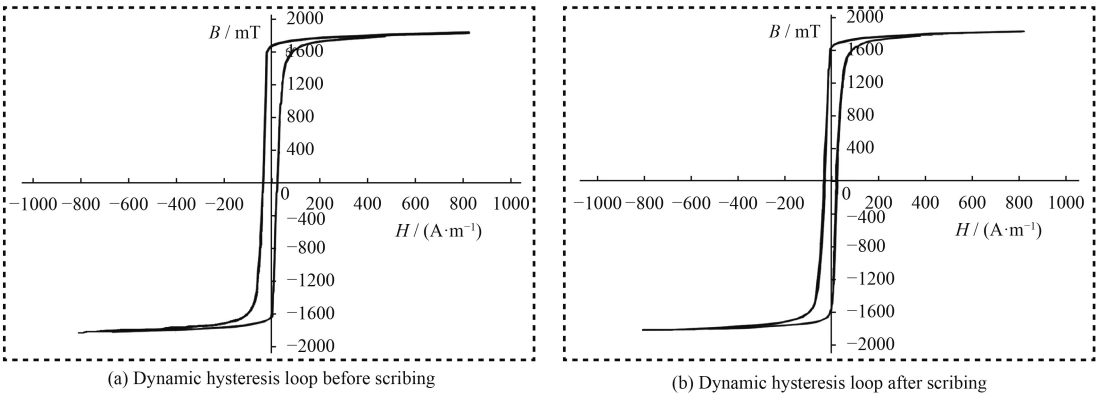


图 7 刻痕前后动态磁滞回线
Fig.7 Dynamic hysteresis loop before and after laser scribing

2.2.3 铁损的影响

铁损是评价取向硅钢品质的主要参数之一,激光刻痕细化磁畴的首要目的是降低铁损。不同脉冲能量下刻痕前后取向硅钢的铁损值 ($P1.6/50$) 与降低率,如图 8 所示。由图 8(a) 可知,刻痕对铁损值的影响主要表现在高磁感强度下,在磁感强度为 1.2~1.6 T 时,铁损值明显下降,脉冲能量为 0.25 mJ 时,铁损值最小,约为 0.803 W/kg。图 8(b) 为磁感强度为 1.6 T 时,不同脉冲能量下的铁损降低率,随能量增加,铁损降低率先增大后减小,铁损的降低主要来自于因磁畴结构不同引起的反常涡流损耗。激光刻痕工艺中,影响铁损降低率的因素很多,铁损降率的大小是各工艺参数相互耦合关联的综合结果,亦决定了磁畴细化程度。图 8(b) 中为在工艺参数为:激光频率 20 kHz、扫描速度 800 mm/s、脉冲能量 0.25 mJ 下所获得刻痕试样,铁损降低率最高,约为 11.6%,说明此时扫描速度、脉冲能量、重复频率三者之间的耦合效果较佳,由前文可知,此工艺参数下,刻痕线内部具有规则排布的烧蚀点周期结构、重熔物及孔洞较少,刻痕边界近似规则的“波浪线”,刻痕区域表面粗糙度相对较小,刻痕总体质量较好。激光频率与扫描速度的耦合关系决定刻痕边界形状,并对刻痕边界应力分布起主要作用,造成刻痕处萌生自由磁极、反向闭合磁畴、90°亚磁畴数量及结构上的差异,使得 180°主磁畴细化程度的不同。对比刻痕前、后的磁畴结构变化如图 9 所示,可以看出 180°主磁畴得到明显细化。刻痕前,磁畴间距较大和畴壁较宽,同一晶粒内 180°主磁畴基本呈平行排列,刻痕后,

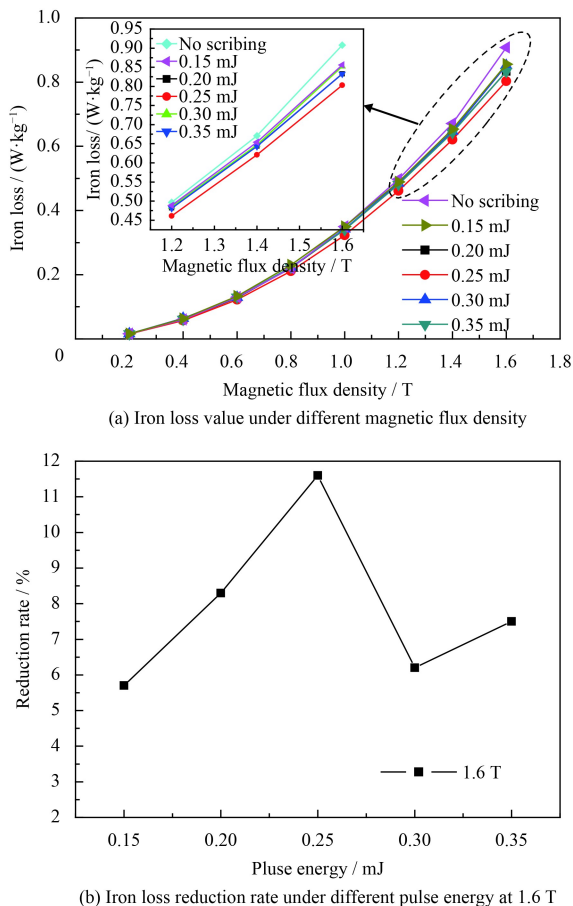


图 8 铁损值与铁损降低率

Fig.8 Iron loss value and reduction rate of iron loss

磁畴间距和畴宽明显减小, 180°主磁畴具有较好的一致均匀性。脉冲能量主要影响着刻痕线残余应力的的大小及其在厚度方向上的渗透深度, 影响自由磁极、反向闭合磁畴的长大程度, 高的脉冲能量产生较大残余应力, 有利于自由磁极、反向闭合磁畴的充分长大, 使得磁畴得到较大程度的

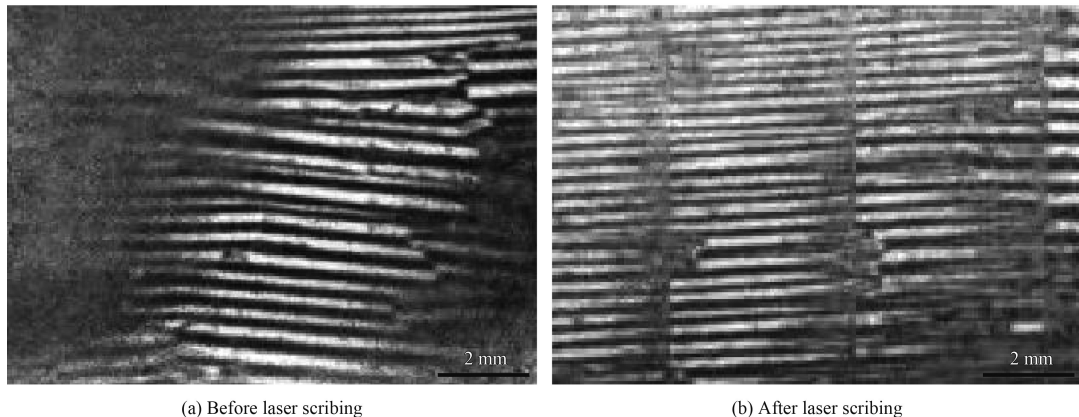


图 9 刻痕前后的磁畴结构

Fig.9 Magnetic domain structure before and after laser scribing

细化;但脉冲能量过高,刻痕表面会产生大量孔洞、飞溅物、重熔物、夹杂等缺陷,表面质量严重恶化,影响了磁畴细化程度与磁化过程中磁畴结构的迁移速率,导致磁性能恶化。

3 结 论

(1) 当激光频率为 20 kHz、扫描速度为 800 mm/s、脉冲能量为 0.25 mJ 时,三者耦合效果较佳,激光对取向硅钢的烧蚀以熔融、汽化为主,可获得较高的表面质量,表面飞溅物、重熔物及孔洞等缺陷较少,刻痕边界近似“波浪线”,具有规则排布的周期性结构,综合磁性能较好。

(2) 激光频率与扫描速度的耦合关系对刻痕边界形状有重要影响,不同的边界形状具有不同的应力分布,造成 180°主磁畴细化程度的不同;脉冲能量主要影响自由磁极、反向闭合磁畴的长大程度。扫描速度为 800 mm/s、脉冲能量为 0.15 mJ 时,相对磁导率增量最大,约为 15.16%。

(3) 刻痕后,动态磁滞回线变窄,磁特征参数得到优化,这是由于空洞等缺陷产生的钉扎作用较小,均匀分布的残余应力有利于刻痕边界自由磁极、亚磁畴的充分长大,使得 180°主畴磁化程度较高,铁损降低最大,降低约 11.6%。

参考文献

- [1] 杨富尧,古凌云,马光,等.激光刻痕对取向硅钢铁损和磁畴的影响规律研究[J].功能材料,2016,2(47):160-170.
YANG F Y, GU L Y, MA G, et al. Effect of laser scribing on core loss and magnetic domain of grain-oriented silicon steel[J]. Functional Materials, 2016, 2(47): 160-170 (in Chinese).
- [2] 周磊,潘应君,徐超,等.PCVD法制备Fe-6.5%Si高硅钢片的工艺研究[J].表面技术,2013,42(3):88-90.
ZHOU L, PAN Y J, XU C, et al. Study on Fe-6.5%Si Steel Slice Prepared by PCVD[J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 88-90 (in Chinese).
- [3] 安恺,王雷,崔珊,等.固化工艺对无取向环保硅钢绝缘涂层性能的影响[J].表面技术,2017,46(5):196-201.
AN K, WANG L, CUI S, et al. Influence of curing process on performance of eco-friendly non-oriented silicon steel insulating coating[J]. Surface Technology, 2017, 46(5): 196-201 (in Chinese).
- [4] 柳勇,朱国力.取向硅钢激光刻痕关键技术研究[D].湖北:华中科技大学,2011:18-22.
LIU Y, ZHU G L. Research on key technology of laser scoring of oriented silicon steel[D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 18-22 (in Chinese).
- [5] 张莉,吴隼,朱军,等.高硅FeSi合金层对普通取向硅钢磁性能的影响[J].表面技术,2014,43(3):48-53.
ZHANG L, WU J, ZHU J, et al. Influence of high-silicon FeSi alloy coatings on the magnetic properties of the common grain-oriented silicon steel[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 48-53 (in Chinese).
- [6] 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.
DONG A F, ZHANG W K. Analysis on process and technology of grain oriented silicon steel and development trend[J]. Special Steel, 2013, 34(5): 20-24 (in Chinese).
- [7] 仇圣桃,付兵,项立,等.高磁感取向硅钢生产技术与工艺的研发进展及趋势[J].钢铁,2013,48(3):1-8.
QIU S T, FU B, XIANG L, et al. Recent research trends and developments of production process and technology for high magnetic induction grain-oriented silicon steel[J]. Iron and Steel, 2013, 48(3): 1-8 (in Chinese).
- [8] FUKAWA K, YAMAMOTO T. Domain structures and stress distributions duo to ball-point scratching in 3% Si-Fe single crystals with orientation near (110)[001][J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1982, 18(4): 963-969.
- [9] 秦利波,吴迪.激光刻痕降低取向硅钢铁损技术研究[D].沈阳:东北大学,2011:1-4.
QIN L B, WU D. Study on the technology of laser irradiation for decreasing the core loss of grain oriented silicon steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011: 1-4 (in Chinese).
- [10] LUCHI T, YAMAGUCHI S, LCHIYAMA T. Laser processing for reducing core loss of grain oriented silicon steel[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(3): 2410-2412.
- [11] NEISHEISEL G L, SCHONEN J W. Laser treatment of electrical steel[P]. US: Patent, 4456812, 1984.
- [12] AHN S, KIM D W, KIM H S, et al. Investigation of core loss characteristics of 3% SiFe using the laser scribing method[J]. Physica Status Solidib-basic Research, 2004, 241(7): 1641-1644.
- [13] 李海蛟,杨平,蒋奇武,等.取向硅钢激光刻痕工艺参数优化及相关原理分析[J].金属功能材料,2015,22(1):11-16.
LI H J, YANG P, JIANG Q W, et al. Optimization of laser scribing parameters and the analysis of underlying mechanism in a grain-oriented silicon steel[J]. Metallic Functional Materials, 2015, 22(1): 11-16 (in Chinese).
- [14] 李海蛟,杨平,蒋奇武,等.取向硅钢激光刻痕对绝缘层的影响及刻痕耐热性分析[J].材料热处理学报,2015,36(3):182-188.
LI H J, YANG P, JIANG Q W, et al. Effect of laser scribing

and post-annealing on insulation layer of grain-oriented silicon steel[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(3): 182-188 (in Chinese).

[15] HUANG Y, MING WUYI, LI M Z. Parameter optimization of Nd: Yag laser scribing process on core loss of grain-oriented magnetic silicon steels[J]. [International Journal of Advanced Manufacturing Technology](#), 2014, 70: 1-9.

[16] HUANG Y, LIU Y, ZHU G L. Investigation of laser scribing technics for reducing core loss of grain-oriented silicon steels[J]. Key Engineering Materials, 2011, 455(4): 141-145.

[17] PONNALURI S V, CHERUKURI R, MOLIAN P A. Core loss reduction in grain-oriented silicon steels by excimer laser scribing part I experimental work[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 112(8): 199-204.

[18] 李平生, 高颖, 陈大凯, 等. PCVD 硅涂层对电工钢磁性的影响[J]. 中国表面工程, 1997(3): 11-12.

LI P S, GAO Y, CHEN D K. Et al Effect of PCVD silicon coating on magnetic properties of electrical steel[J]. China Surface Engineering, 1997(3): 11-12 (in Chinese).

[19] TADEUSZ K, 梁秀兵, JAROS A F, 等. 纳米晶铁钴基软磁材料的研究[J]. [中国表面工程](#), 2004(5): 1-4.

TADEUSZ K, LIANG X B, JAROS A F, et al. Research on nanocrystalline Fe-Co based soft magnetic materials[J]. [China Surface Engineering](#), 2004(5): 1-4 (in Chinese).

— * * * * * —

• 本刊讯 •

2019 第六届海洋材料与腐蚀防护大会暨海洋新材料及防护新技术展览会将于广州召开

为了配合两部委（工信部、财政部）关于新材料平台的建设工作，助力大湾区的未来发展，深入探讨海洋新材料及防腐新技术科技前沿，夯实海洋强国建设的重要支撑能力，由中国腐蚀与防护学会主办的“2019 第六届海洋材料与腐蚀防护大会”定于 2019 年 12 月 7—9 日在深圳大梅沙京基喜来登度假酒店召开，届时为腐蚀领域、材料领域带来最前沿的行业盛宴。此次会议将以“共襄防腐科技盛典•助力大湾区未来发展”为主题，设置“腐蚀与防护高峰论坛、海洋钢铁材料、海洋工程装备及高技术船舶材料、核电装备材料及防护技术、涂层与表面处理技术、航空航天装备材料、先进轨道交通装备材料、跨海大桥用材及防护技术、企业发展交流会”等重要议题。会议将继续保持高规格、大规模、专业化的特色，重点关注海洋领域，延伸陆空领域、材料领域，届时将邀请领域内的院士、知名专家作大会主旨报告，共商行业发展大计。论文摘要及全文投稿截止日期为 2019 年 10 月 31 日，具体要求和提交请登陆中国腐蚀与防护网（<http://www.ecorr.org>）。

(本刊编辑部 供稿)