

# 激光精密加工降低取向硅钢铁损的研究进展

杨志昌<sup>1</sup>, 张文帅<sup>1</sup>, 杨尚磊<sup>1, 3</sup>, 郑义<sup>1, 3</sup>, 冯军<sup>2</sup>, 李荣奇<sup>2</sup>, 陈捷狮<sup>1, 3</sup>

1. 上海工程技术大学材料科学与工程学院 上海 201602

2. 上海镭天激光设备有限公司 上海 201615

3. 上海市激光智能制造及质量检测专业技术服务平台 上海 201602

**摘要:** 取向硅钢的发展对电力系统具有至关重要的影响。在国家“双碳”战略的驱动下,通过激光精密加工来实现对取向硅钢的磁畴细化,成为当前降低能耗的主要方法。阐述了磁畴结构为取向硅钢变压器损耗的关键因素,激光精密加工通过高能激光束在硅钢表面形成热应力区来细化磁畴结构,从而降低铁心损耗(以下简称铁损),综述了非耐热型和耐热型两种激光精密加工细化磁畴技术的研究现状,分析了不同的激光功率、激光斑点形状、刻痕速度、刻痕间距及深度等参数加工硅钢表面与其铁损的关系。

**关键词:** 取向硅钢; 激光精密加工; 铁损; 细化磁畴; 磁性能

## Research progress of laser precision machining to reduce the damage of oriented silicon steel

YANG Zhichang<sup>1</sup>, ZHANG Wenshuai<sup>1</sup>, YANG Shanglei<sup>1, 3</sup>, ZHENG Yi<sup>1, 3</sup>, FENG Jun<sup>2</sup>,  
LI Rongqi<sup>2</sup>, CHEN Jieshi<sup>1, 3</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201602, China

2. Shanghai RAYTEE Laser Equipment Co., Ltd., Shanghai 201615, China

3. Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201602, China

**Abstract:** The development of oriented silicon steel has had a crucial impact on power system. Driven by the national “two-carbon” strategy, the magnetic domain refinement of oriented silicon steel by laser precision machining has become the main method to reduce energy consumption. Describe that the domain structure is the key factor in the loss of oriented silicon steel transformers. Laser precision machining refines the domain structure by forming thermal stress zone on the surface of silicon steel with high energy laser beam to reduce iron loss. The research status of two kinds of laser precision machining techniques for refining magnetic domains is reviewed. Different laser power, laser spot shape, scanning speed, notch spacing and depth can obtain different iron loss reduction effects on the surface of silicon steel.

**Keywords:** oriented silicon steel; laser precision machining; iron loss; refined domain; magnetic property

基金项目: 上海市重点学科——材料科学与工程(高能束智能加工与绿色制造); 上海市科委专业技术服务平台(21DZ2294200)。

第一作者: 杨志昌, 硕士研究生, 主要从事材料激光精密加工与磁性研究, E-mail: 15295752760@163.com。

通信作者: 陈捷狮, 教授, 主要从事激光精密加工等研究, E-mail: jschen@sues.edu.cn。

## 1 序言

电能作为国家发展的支柱, 变压器在其中扮演着关键的角色<sup>[1, 2]</sup>, 而硅钢材料在变压器成本中占据了相当大的比例, 通常为30%~40%。硅钢按照其内部晶粒的朝向, 可分为取向硅钢和无取向硅钢两大类, 现阶段我国仍处在稳定发展阶段, 在国家“双碳”战略指导下, 能效升级和新能源产业快速发展, 中国硅钢产业迅速成长<sup>[3-5]</sup>。硅钢具有突出的软磁性能, 因而磁滞损失和涡流损失都较小, 但由于基数过大, 导致变压器在电能转换过程中的损耗巨大。因此, 探索和研究如何进一步减少取向硅钢的铁心损耗(以下简称铁损), 对于降低能耗和提高能效具有重要意义<sup>[6-10]</sup>。降低取向硅钢损耗的方法主要有提高取向硅钢片中Goss织构的锋锐程度、提高取向硅钢中的Si含量、减薄取向硅钢片的厚度和细化磁畴。对于提高取向硅钢片中Goss织构, 随着生产技术的发展, 高磁感取向硅钢片Goss织构的锋锐度已接近理想状态, 提高Si含量和减薄硅钢片厚度技术难以实现取向硅钢片的量产。因此, 细化磁畴技术成为热门研究领域, 其可以分为接触式机械加工方式和非接触式激光加工方式, 对比之下, 激光加工在工业生产中控制难度较低, 不用考虑刀具的损耗, 因此国内外大多数企业均采用激光加工细化磁畴技术来降低取向硅钢损耗<sup>[11-14]</sup>。

本文基于硅钢片在电力行业应用的重要性, 以激光加工硅钢片铁心降低变压器损耗为主, 详细介绍铁损成因、激光加工降低损耗的原理, 以及两种类型的激光加工技术, 最后概括性总结激光加工细化磁畴技术并对其未来的发展进行展望, 旨在推动激光加工硅钢片产品的发展。

## 2 取向硅钢铁损降低机理

### 2.1 铁损

铁损是衡量硅钢材料在交变磁场中能量损耗的重要参数, 铁损为固定损耗, 只要线路电压和交变场频率不变, 其值一般不改变, 由磁滞损耗( $P_h$ )、涡流损耗( $P_e$ )和反常损耗( $P_a$ )3部分组成<sup>[15]</sup>。磁滞损耗是铁心在磁化过程中, 因存在磁滞现象而产生的损耗, 这种损耗的大小与材料的磁滞回线所包围的面积大小成正比, 如图1所示<sup>[16]</sup>。

因为硅钢为软磁性材料, 磁滞回线狭小,

所以磁滞回线接近斜窄长形, 饱和磁感应强度近似等于剩余磁感应强度, 用它做变压器的铁心时磁滞损耗较小, 可使其发热程度大大减小<sup>[17]</sup>。STEINMETZ<sup>[18]</sup>建立了磁滞损耗 $P_h$ 的经验公式, 即

$$P_h = K_1 B_m^n f \quad (1)$$

式中  $B_m$ ——饱和磁感应强度(T);

$f$ ——交变场频率(Hz);

$n$ ——Steinmetz常数;

$K_1$ ——由材料特性和其他相关因素决定的常数。

由于交变磁场的作用, 铁心内部会产生感应电流, 这些电流在铁心内部形成涡流, 如图2所示。

涡流的产生会导致铁心发热, 增加变压器的能量损失, 降低其效率。根据麦克斯韦方程组<sup>[19]</sup>得出的经典涡流损耗 $P_e$ 可表示为

$$P_e = \frac{\pi^2 d^2 f^2}{6\rho} B_m^2 \quad (2)$$

式中  $d$ ——板厚(mm);

$f$ ——频率(Hz);

$\rho$ ——电阻率( $\Omega \cdot m$ )。

由式(2)可知, 涡流损耗主要与磁感应强度、板厚和电阻率有关。通过增加电阻率来降低铁损, 即在硅钢片中增加Si含量, 现在已经生产出来 $\omega_{Si}=6.5\%$ 的特殊硅钢片, 其延展性接近于0<sup>[18, 20-22]</sup>。假设磁畴壁匀速运动(根据Pry~Bean模型<sup>[23]</sup>), 取向硅钢片的反常损耗系数可表示为

$$\frac{P_a + P_e}{P_e} = \eta = 1.628 \frac{2L}{d} \quad (3)$$

式中  $P_a$ ——反常损耗(W/kg);

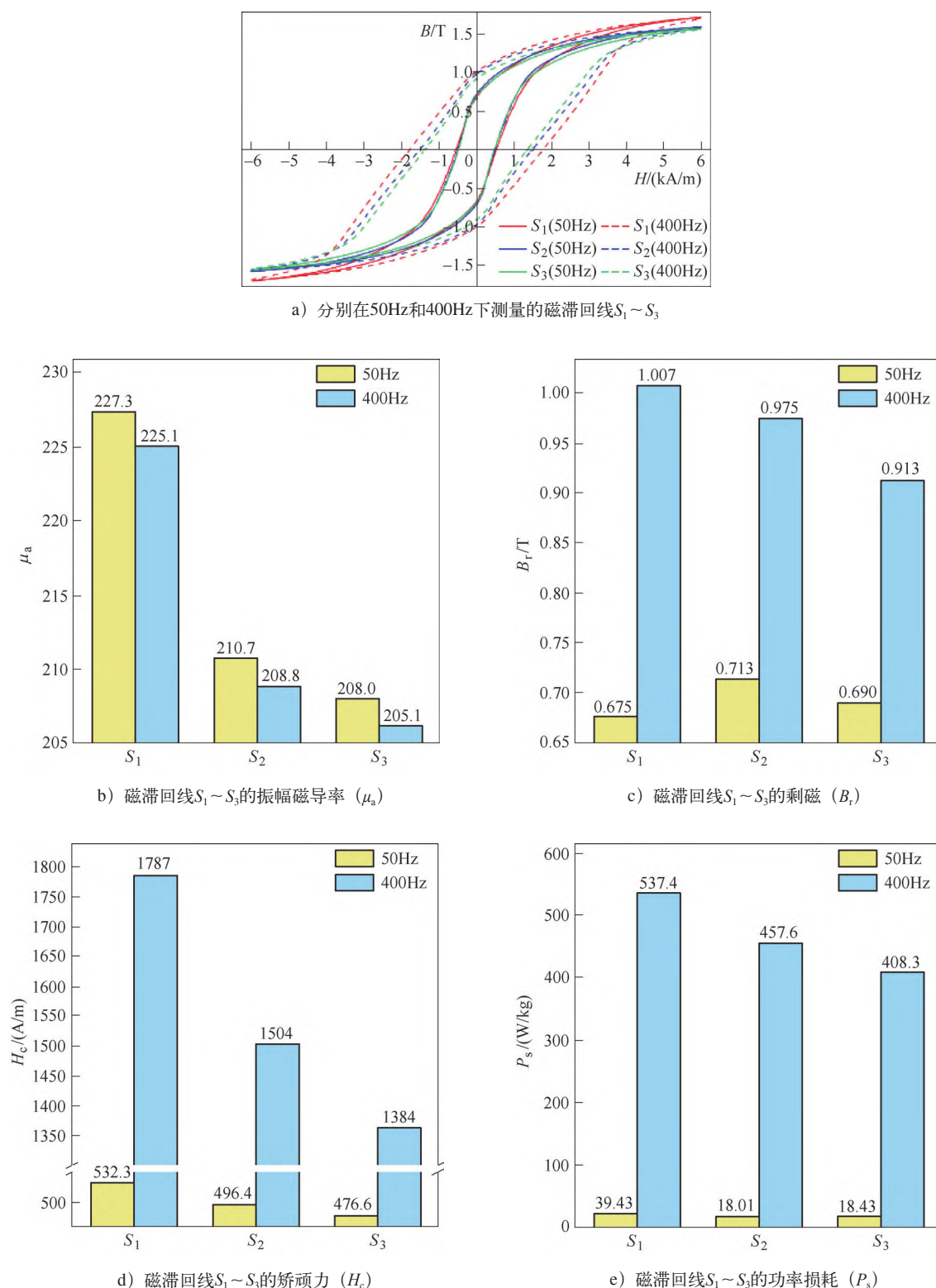
$2L$ ——磁畴宽度(mm);

$\eta$ ——反常涡流损耗系数。

式(3)表明了反常损耗与磁畴宽度和板厚的比值呈一定关系, 由此可知, 可以通过降低磁畴宽度来减小铁损。根据式(2)和式(3), 总涡流损耗为

$$P_a + P_e = \frac{1.628 \pi^2 d f^2 B_m^2 \times 2L}{6\rho} \quad (4)$$

从式(1)~式(4)可看出, 在交变场中给定晶粒取向硅钢的特性、工作频率和磁场强度情况下, 损耗保持不变。通过激光加工在硅钢片上刻痕, 可以有效改变硅钢片的磁畴结构。激光刻痕通过局部加热和快速冷却, 使得硅钢片的磁畴重新排

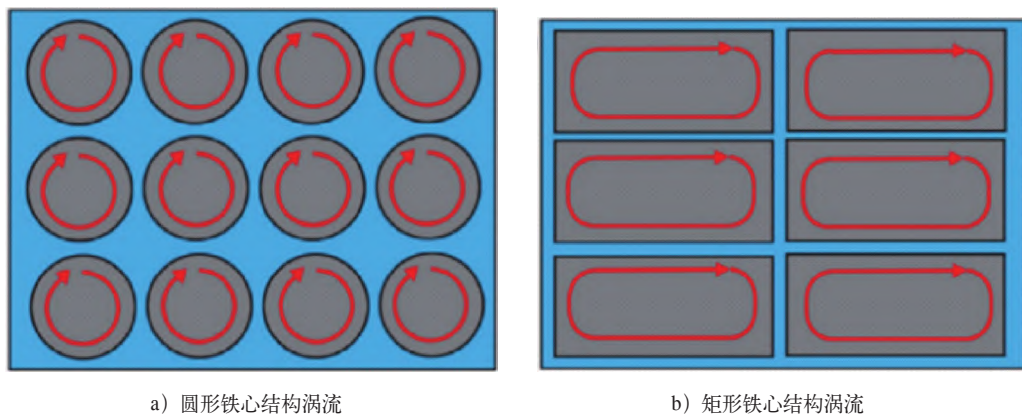
图1 动态软磁性能<sup>[16]</sup>

列和细化,磁畴宽度的细化不仅可以提升磁通量的密度,同时能够有效降低铁心的损耗<sup>[24]</sup>。

## 2.2 磁畴细化的原理

影响磁畴结构的主要因素有杂质、晶粒取向

度、磁通密度和应力状态等,其中杂质和晶粒取向度是由硅钢的整体制备能力所决定的<sup>[25, 26]</sup>。目前的冶炼技术已能将杂质含量严格控制在较低的水平,晶粒取向方面也因为Goss织构的取向偏离角已经十分



a) 圆形铁心结构涡流

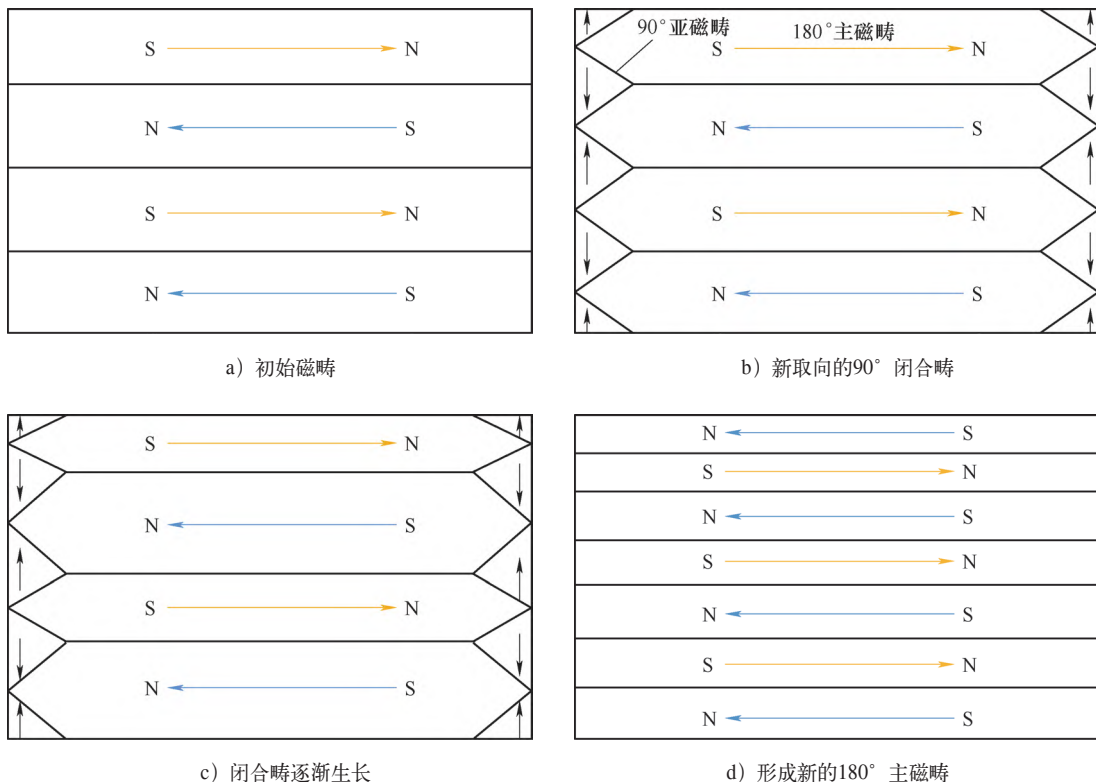
b) 矩形铁心结构涡流

图2 两种铁心结构的涡流<sup>[20]</sup>

接近理想，而通过继续降低杂质含量和提高取向度的方法已经得不偿失<sup>[27]</sup>。因此，利用一定处理方式改变磁畴结构的应力状态变成了主流的研究方向，该方法包括机械划擦、火花烧蚀、等离子体辐照和激光刻痕等。尽管所有的方法都有效果，但激光刻痕因其效率高、易于应用、非接触性以及对外层的损伤较小等优点而最具吸引力。

一般晶粒取向硅钢(110)[001]取向样品可以被视为具有周期性排列的初始磁畴，如图3a所示。这些磁畴呈平行板(180°主磁畴)，相邻的平行板大小相等，方向相反。相邻的磁畴由畴壁隔开，静

磁能、磁弹性和畴壁能量的相互作用确保了高斯纹理的最低自由能，保持了一定程度的稳定性。而一旦受到外加应力的作用，这种平衡就会被打破，当沿垂直于晶粒取向硅钢轧制方向通过激光刻痕施加局部应力时，会有新取向的90°闭合畴(见图3b中的三角形区域)出现。随着激光能量的增加，这些闭合畴逐渐生长并形成新的180°主磁畴(见图3b~d)，导致划线区域内的磁畴细化。根据式(1)~式(4)可知，随着磁畴尺寸的减小，磁畴壁的数量增加，磁畴壁的运动速度减小，硅钢片内磁通变化量减少，涡流损耗会减小<sup>[28, 29]</sup>。



a) 初始磁畴

b) 新取向的90° 闭合畴

c) 闭合畴逐渐生长

d) 形成新的180° 主磁畴

图3 磁畴细化的微观显示

### 3 激光刻痕技术降低铁损

取向硅钢细化磁畴技术分为非耐热型细化磁畴技术和耐热型细化磁畴技术。利用非耐热型细化磁畴技术进行加工的取向硅钢带材在500℃以上退火,产生的应变发生回复,细化磁畴效果消失。利用耐热型细化磁畴技术进行加工的取向硅钢带材细化磁畴效果不因退火而消失<sup>[30]</sup>。下文针对两种类型的激光加工细化磁畴技术分别进行综述。

#### 3.1 非耐热型激光刻痕

激光刻痕技术通过使用半宽脉冲或连续激光束,在取向硅钢表面沿与轧向垂直的方向以一定间隔进行点状或线状照射。该技术的关键参数包括刻痕间距、刻痕速度、刻痕深度、脉冲能量及聚焦光斑斑点的直径等。在激光刻痕过程中,涂层会瞬间蒸发并产生高达几百兆帕的冲击力,作用于带材表面,引发弹塑性变形。这种变形区域附近的残余张应力能够有效细化磁畴结构,从而降低铁损<sup>[31-33]</sup>。不同刻痕间距产生的应力如图4所示。

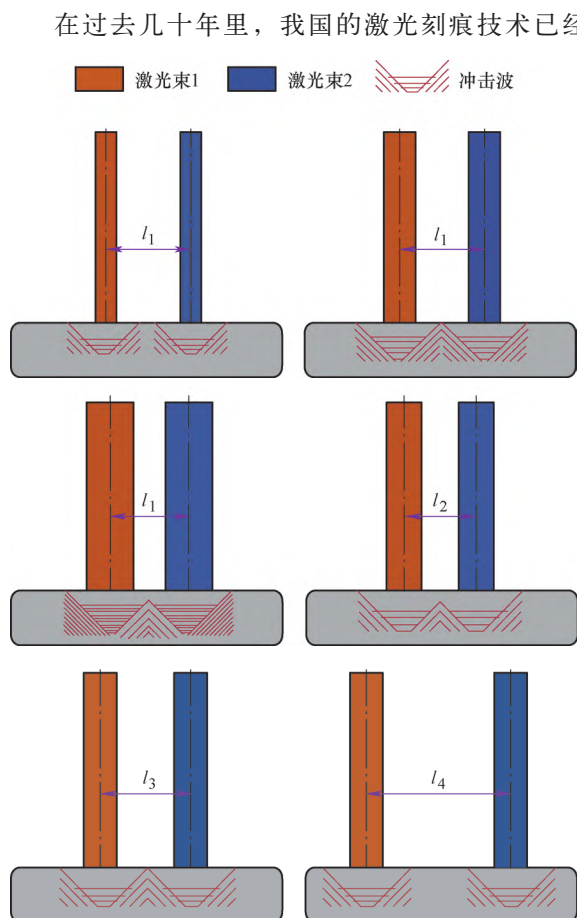


图4 不同刻痕间距产生的应力  
(刻痕间距 $l_2 < l_1 = l_3 < l_4$ )<sup>[34]</sup>

得到了快速发展。李敬东等<sup>[8]</sup>研究结果显示,脉冲激光和连续波激光加工都可以有效地将铁心损耗降低5%以上,而不会损坏涂层或导致板材弯曲。ZHANG等<sup>[34]</sup>研究了激光工艺参数对取向硅钢铁损的影响。该研究集中在27Q120材料上,分析了在两种类型的激光斑点、激光功率(600~2400W)和刻痕间距(3.5~7.5mm)影响下铁损的变化。未使用衍射光学元件DOE的圆形光斑斑点和使用DOE形成的矩形光斑斑点,如图5所示。硅钢刻痕后的磁畴结构如图6所示。结果表明,采用圆形和矩形光斑斑点刻痕可分别实现16.054%和17.116%的铁损改善率,在相同的激光功率和刻痕间距下,较低的能量密度显著降低激光对表面宏观形貌的损伤。本文还分析了磁畴宽度、应力和铁损之间的关系,相应的磁畴宽度分别为0.17754mm和0.1636mm,铁损分别为0.5114W/kg和0.5033W/kg。

RYU等<sup>[35]</sup>研究了不同磁化方向下,激光刻痕前后的交流磁滞回线和铁损变化。结果显示,在1.3T的磁感应强度和60Hz的磁化频率下,平行磁化样品的铁心损耗减少了5.7%,而垂直磁化样品的铁心损耗则显著减少了30.3%。PONNALURI等<sup>[36]</sup>尝试使用不同类型的激光进行表面刻痕处理,特别强调了248ns波长、23ns脉冲宽度的准分子激光在M-4级取向硅钢上的应用,实现了最高达26%的铁损减少,此外利用Bitter技术观察到激光处理后材料内部磁畴结构的变化,发现激光诱导的应力可以细化磁畴,从而减少移动时的能量损失。KRAUSE等<sup>[37]</sup>研究使用连续波CO<sub>2</sub>激光在硅钢上刻痕窄的横向条纹,并改变了刻痕速度和刻痕间距。研究发现,在最佳速度和间距组合下进行激光刻痕可降低铁损,特别是在较高的磁通密度下。PETRYSHYNETS等<sup>[38]</sup>研究使用脉冲和连续光纤激光刻痕来诱导残余热应力并细化磁畴结构,如图7所示。该研究发现了磁畴图案与激光刻痕参数之间的半定量关系,如图8所示。试验结果表明,在优化条件下,连续激光刻痕方式可使损耗最多减少38%,而脉冲激光处理则减少了约15%的损耗。

JAHANGIRI等<sup>[39]</sup>优化了传统激光刻痕的参数,然后探讨了“双面激光刻痕”“激光刻痕期间施加磁场”两个新参数对减少铁心损耗的影响。结果表明,通过优化传统激光刻痕方法,铁损降低

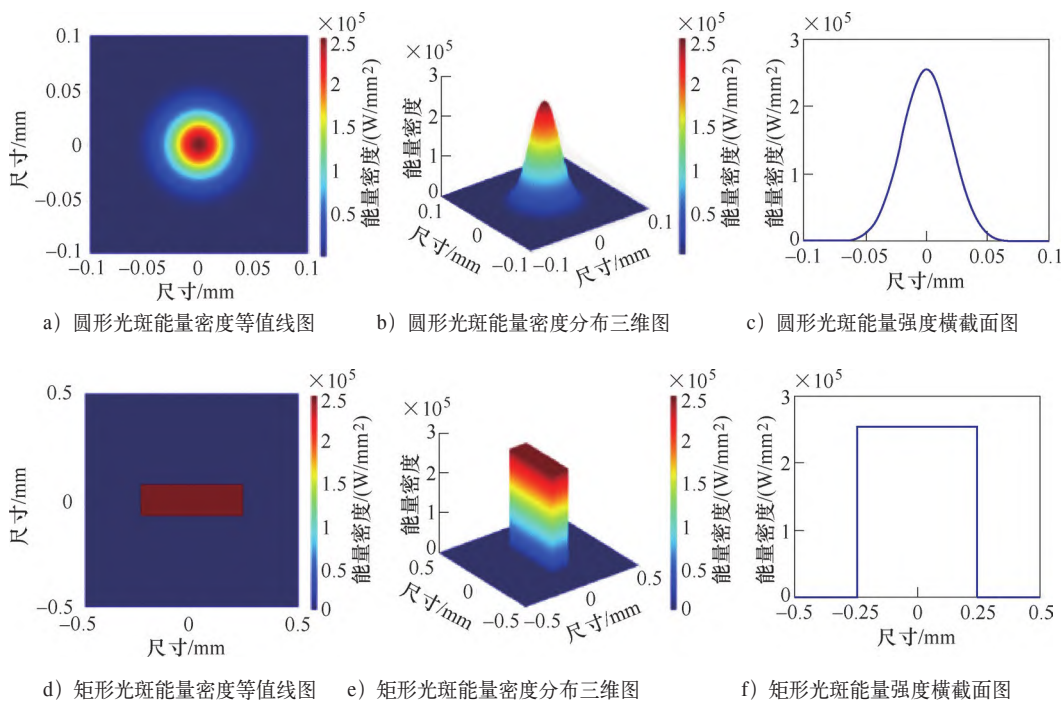


图5 未使用衍射光学元件DOE的圆形光斑斑点和使用DOE形成的矩形光斑斑点<sup>[34]</sup>

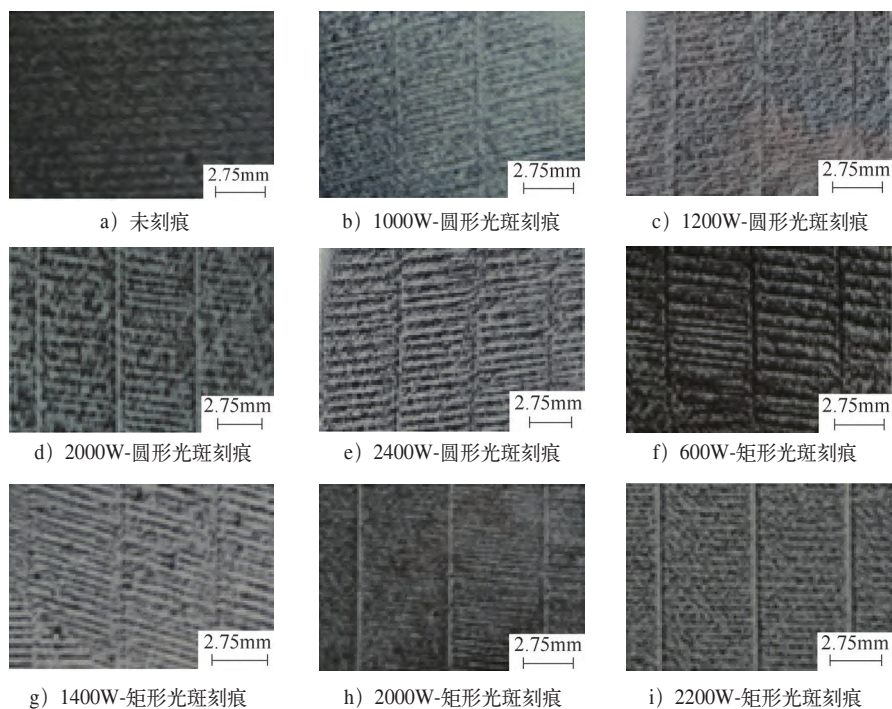
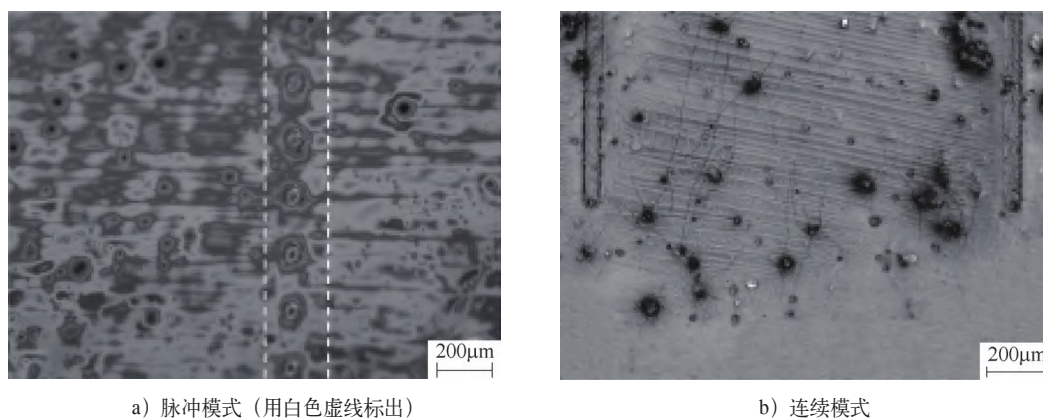
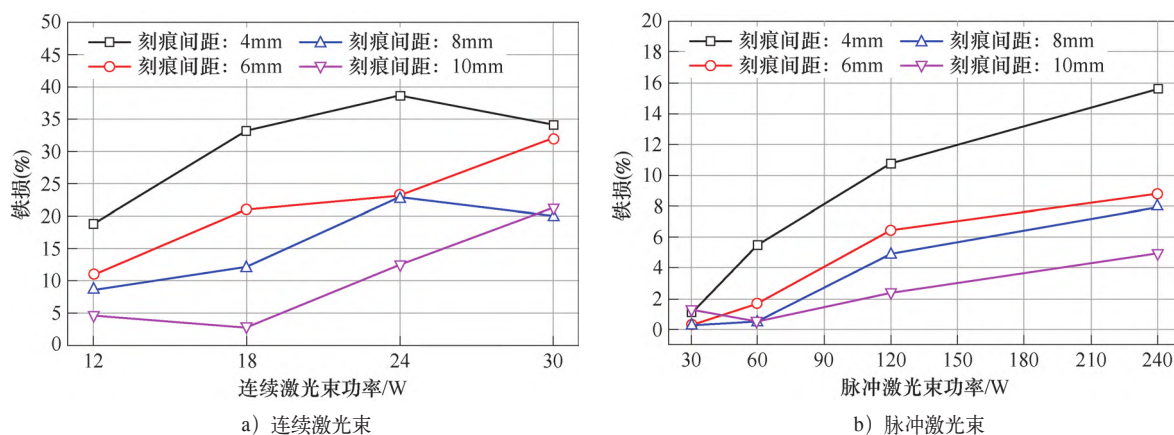


图6 硅钢刻痕后的磁畴结构(刻痕间距5.5mm, 刻痕速度30m/min)<sup>[34]</sup>

了9.7%。对钢板进行双面激光处理使铁损降低了13.7%。在激光刻痕过程中,施加磁场会对铁损产生正面或负面影响,这取决于磁场的方向。在最佳条件下,即在磁场作用下对钢板进行双面激光刻痕,铁损降低了16.8%,明显优于传统方法的9.7%降幅(见图9)。PATIL等<sup>[11]</sup>研究发现,垂直于轧制

方向的激光刻痕导致磁畴壁间距的细化,在最佳条件下可将损耗降低10%以上,脉冲模式激光刻痕比连续波模式更加有效,可实现11%~12%的损耗降低。研究表明,刻痕速度、刻痕间距、脉冲能量,或激光功率、脉冲频率及激光光斑形状等工艺参数,对取向硅钢铁损值具有重要的影响。但是,此

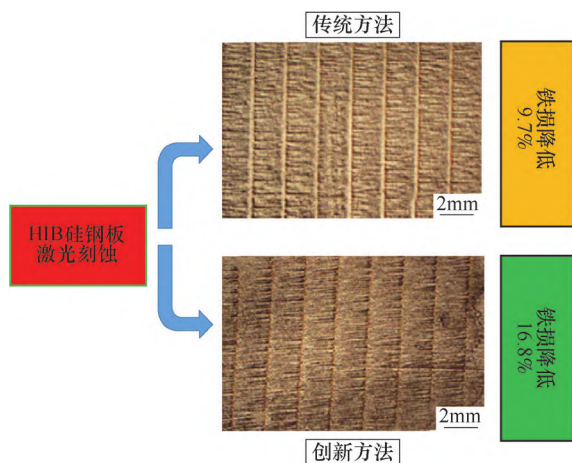
图7 取向硅钢在激光刻痕后的表面畴结构状态<sup>[38]</sup>图8 铁损与连续激光束和脉冲激光束功率及刻痕间距的关系<sup>[38]</sup>

类激光刻痕取向硅钢经去应力退火后,刻痕处的残余应力和细化磁畴效果基本消失、铁损恢复到刻痕前的水平,不具有耐热性,因此更适用于叠片变压器铁心的制备。

### 3.2 耐热型激光刻痕

耐热型激光刻痕技术首先由日本新日铁公司

提出,硅钢带材经Q开关脉冲CO<sub>2</sub>激光或Nd-YAG激光刻痕形成沟槽,沟槽处产生自由磁极使静磁能增高、畴壁能降低,从而使磁畴宽度减小,铁损降低。刻痕所形成的沟槽在去应力退火环节保持稳定,这使其耐热性较为出色<sup>[27]</sup>。HIDEHYKI等<sup>[40]</sup>提供了一种粒状取向硅钢片,利用高能激光对取向硅钢局部加热至熔化温度形成热熔融区,从而产生沟槽,通过沟槽宽度和深度的精准控制实现了磁畴细化和铁损降低,在去应力退火后仍具有优异的磁性特性。目前,该技术被少数企业所垄断,国内仅宝钢掌握大功率激光刻痕细化磁畴技术,而其他耐热型细化磁畴技术更多处于实验室研发阶段<sup>[41, 42]</sup>。朱业超等<sup>[43]</sup>等通过对冷轧取向硅钢板进行预刻和精刻两次激光处理,在单面形成一系列平行布置的线状或点线状刻槽,以实现刻槽深度和宽度的精确控制。这种方法不仅能使铁损显著下降至少8%,而且不会破坏板材形状或降低磁性能,即使经过800℃的去应力退火处理后,其效果仍然保持不变,但在生产实现硅钢表面的重定位难度较大。何承绪等<sup>[30]</sup>

图9 两种激光刻痕方式的对比<sup>[39]</sup>

探讨了退火温度对两种不同工艺（齿状辊沟槽法和激光照射刻痕法）制造的耐热型取向硅钢的微观组织与磁性能的影响，激光照射刻痕法制备的硅钢耐热温度约为850℃，而齿状辊沟槽法制备的硅钢耐热温度约为800℃，前者具有更优异的耐热性能。随着退火温度升高，两种材料的损耗均逐渐增加，对于齿状辊沟槽法，损耗增加主要是由于刻痕区与两侧Goss晶粒取向差降低，而对于激光照射刻痕取向硅钢带材的耐热性原理尚不明确，有待进一步的研究分析。

#### 4 结束语

1) 经过多年的发展，使用激光对取向硅钢表面进行处理的技术已经相对成熟，在工业上实现了一定规模的应用，磁畴细化效果优异，国内外多年研究成果表明，激光刻痕是以后硅钢行业磁畴细化技术应用与发展的主要方向。

2) 非耐热型激光刻痕技术在我国发展迅速，相对比较成熟稳定，其关键技术被国内多家企业掌握，但仍存在一些问题，如硅钢刻痕区域因温度问题而出现再结晶的现象；刻痕过程中破坏了部分张力涂层，需要重新施涂；刻痕产生的沟槽在工作过程中产生漏磁现象；在刻痕后的磁化过程中柳叶畴的重现导致的磁致伸缩和硅钢使用过程中的时效问题等。

3) 目前，耐热型激光刻痕技术被日本的高新技术企业垄断，并且实现了一定规模量产，国内科技企业和研究所也进行了大量研究，但更多还在实验室阶段，仅宝钢集团能实现小规模量产。此类激光刻痕产品在市面上的应用还具有一定的限制。

4) 在国家“双碳”战略的驱动下，电力系统能效升级与新能源产业的高速发展对高性能磁性材料提出了更严苛的需求，作为变压器铁心的核心材料，耐热型取向硅钢在高温退火后仍保持低铁损特性，以适配新能源并网、特高压输电、电动汽车充电桩等高效场景，因此耐热型激光刻痕技术将成为未来的一个重要研究方向。

#### 参考文献：

[1] PATRI S, GURUSAMY R, MOLIAN P A, et al. Magnetic domain refinement of silicon-steel laminations by laser scribing[J]. Journal of Materials

Science, 1996, 31: 1693-1702.

[2] ZHANG L J, NING J, ZHANG X J, et al. Single pass hybrid laser-MIG welding of 4-mm thick copper without preheating[J]. Materials & Design, 2015, 74: 1-18.

[3] 彭孝仁. 中国取向硅钢市场现状及前景分析[J]. 冶金信息导刊, 2024, 61 (6) : 8-11.

[4] 徐劲松. “双碳”战略下取向硅钢的价值与市场机遇[J]. 电工钢, 2021, 3 (5) : 21-24.

[5] 陈卓. “双碳”大背景下的中国电工钢走势[J]. 电工钢, 2022, 4 (1) : 1-4.

[6] KUBOTA T, FUJIKURA M, USHIGAMI Y. Recent progress and future trend on grain-oriented silicon steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, 215-216: 69-73.

[7] IUCHI T, YAMAGUCHI S, ICHIYAMA T, et al. Laser processing for reducing core loss of grain oriented silicon steel[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53: 2410-2412.

[8] LI J, GU Y, GUO Z. Analysis of the phenomena of non-fourier heat conduction in switch-Q laser processing for reducing the core loss of grain-oriented silicon steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 74 (1/3) : 292-297.

[9] 吴树建, 张鹏. 取向硅钢生产及下游行业用材趋势[J]. 冶金管理, 2024 (5) : 44-50, 55.

[10] 董晶, 卢凤喜. 变压器用取向硅钢片的现状及发展趋势预测[J]. 钢铁研究, 2005 (4) : 59-61.

[11] PATIL S C, SWAMINATHAN G, KUMAR M, et al. CO<sub>2</sub> laser processing for reducing core loss of cold-rolled grain-oriented silicon steel[J]. Bulletin of Materials Science, 1991, 14 (5) : 1249-1255.

[12] NGUYEN H T, LIN C K, TUNG P C, et al. Manufacturing motor core lamination from thin non-oriented silicon steel sheet direct by pulsed laser cutting using multi-quality optimized process parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 133 (1/2) : 199.

[13] USHIGAMI Y, MASUI H, OKAZAKI Y, et al. Development of low-loss grain-oriented silicon steel[J]. Journal of Materials Engineering and

- Performance, 1996, 5 (3) : 310-315.
- [14] QIN J, YUE Y, ZHANG Y, et al. Comparison between strong  $\eta$ -fiber-oriented high-silicon steel and grain-oriented high-silicon steel on magnetic properties[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 439: 38-43.
- [15] 杜彦红. 浅谈如何降低变压器损耗[J]. 农村电工, 2022, 30 (9) : 43-44.
- [16] MENG F, HUANG S, LAU K B, et al. Texture components and magnetic properties of laser powder bed fusion fabricated near grain-oriented and near non-oriented silicon steel[J]. Materials & Design, 2023, 231: 112037.
- [17] ENOKIZONO M, TANABE I, KUBOTA T. Local distribution on magnetic properties in grain-oriented silicon steel sheet[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83 (11) : 6486-6488.
- [18] STEINMETZ CHAS P. On the law of hysteresis[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1892, IX (1) : 1-64.
- [19] LI Z, DONG Y, PAULY S, et al. Enhanced soft magnetic properties of Fe-based amorphous powder cores by longitude magnetic field annealing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 706: 1-6.
- [20] OUYANG G, JENSEN B, TANG W, et al. Near net shape fabrication of anisotropic Fe-6.5%Si soft magnetic materials[J]. Acta Materialia, 2020, 201: 209-216.
- [21] GARIBALDI M, ASHCROFT I, SIMONELLI M, et al. Metallurgy of high-silicon steel parts produced using selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2016, 110: 207-216.
- [22] GARIBALDI M, ASHCROFT I, HILLIER N, et al. Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe-6.9%wt Si soft magnets[J]. Materials Characterization, 2018, 143: 144-151.
- [23] PRY R H, BEAN C P. Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model[J]. Journal of Applied Physics, 1958, 29 (3) : 532-533.
- [24] USHIGAMI Y, MIZOKAMI M, FUJIKURA M, et al. Recent development of low-loss grain-oriented silicon steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254-255: 307-314.
- [25] QIN J, YANG P, MAO W, et al. Effect of texture and grain size on the magnetic flux density and core loss of cold-rolled high silicon steel sheets[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 393: 537-543.
- [26] KANG N, EL MANSORI M, GUITTONNEAU F, et al. Controllable mesostructure, magnetic properties of soft magnetic Fe-Ni-Si by using selective laser melting from nickel coated high silicon steel powder[J]. Applied Surface Science, 2018, 455: 736-741.
- [27] 王丽娜, 何承绪, 李萧. 取向硅钢细化磁畴技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2024, 53 (2) : 6-11.
- [28] NAJAFI A, ISKENDER I. Comparison of core loss and magnetic flux distribution in amorphous and silicon steel core transformers[J]. Electrical Engineering, 2018, 100 (2) : 1125-1131.
- [29] CHEN H, LI L, SONG W, et al. Structure optimization design and magneto-mechanical characteristics analysis of amorphous alloy with oriented silicon steel composite wound core[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 590: 171689.
- [30] 何承绪, 高洁, 毛航银, 等. 退火温度对耐热型取向硅钢组织与磁性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37 (8) : 141-145.
- [31] 谢文亮, 程祥威, 张敬, 等. 激光刻痕对取向硅钢铁损及噪音性能的影响[J]. 电工钢, 2021, 3 (3) : 11-16.
- [32] 罗阳, 王振琴. 晶粒取向3%Si-Fe畴结构的应力效应——II. 压应力对畴结构的影响[J]. 金属学报, 1983 (3) : 23-29, 144-146.
- [33] 罗阳, 王振琴. 晶粒取向3%Si-Fe畴结构的应力效应——I. 张力对畴结构的影响[J]. 金属学报, 1983 (2) : 49-57, 153-154.
- [34] ZHANG W S, CHEN J S, LIN M, et al. The influence of laser process parameters on the iron loss of grain-oriented silicon steel[J]. Journal of Materials

- Research and Technology, 2024, 33: 2958-2969.
- [35] RYU K S, PARK Y J, KIM C G, et al. Core loss reduction by laser scribing in grain-oriented 3% Si-Fe under different magnetizing direction[J]. Physica Status Solidi (A), 2004, 201 (8): 1815-1818.
- [36] 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: 199-204.
- [37] KRAUSE R F, RAUCH G C, KASNER W H, et al. Effect of laser scribing on the magnetic properties and domain structure of high permeability 3% Si-Fe[J]. Journal of Applied Physics, 1984 (6): 2121-2123.
- [38] PETRYSHYNETS I, KOVÁČ F, PUCHÝ V, et al. Magnetic losses reduction in grain oriented silicon steel by pulse and continuous fiber laser processing[J]. Aip Advances, 2018, 8 (4): 047604.
- [39] JAHANGIRI M R, BAYANI H, ARDESTANI M, et al. Core loss reduction in grain oriented silicon steel sheets by two-sided laser scribing in the presence of a magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 891: 162080.
- [40] HIDEHYKI H, TATSUHIKO S, NAOYA H. Grain-oriented electrical steel sheet excellent in magnetic properties and method for producing the same: US7045025B[P]. 2006-5-16.
- [41] 储双杰, 赵自鹏, 杨勇杰, 等. 一种耐热磁畴细化型取向硅钢及其制造方法: CN110323044B[P]. 2018-2-19.
- [42] 赵自鹏, 李国保, 杨勇杰, 等. 一种耐热刻痕取向硅钢及其刻痕方法: CN114255971B[P]. 2024-12-10.
- [43] 朱业超, 王向欣, 王若平, 等. 一种取向硅钢多次激光刻槽降低铁损的方法: CN102941413A[P]. 2013-2-27. **MW** 20250216

(上接第6页)

子和医疗设备等各个行业的真实案例反映了激光技术的变革性影响。

人工智能驱动的激光系统、绿色和蓝色激光器与混合制造工艺等新兴趋势, 有望进一步增强激光技术的功能和应用。然而, 要充分发挥激光技术在工业制造中的潜力, 需要解决高成本、对熟练操作人员的需求和环境影响等挑战。

随着激光技术的不断发展, 预计其在各行各业生产高性能、轻量化和可持续产品方面将发挥越来越重要的作用。激光技术在工业制造中的前景光明, 持续的进步和创新推动着行业向前发展。

#### 参考文献:

- [1] STEEN W M, MAZUMDER J. Laser Material Processing[M]. USA: Springer, 2010.
- [2] READY J F. Industrial Applications of Lasers[M]. USA: Academic Press, 2001.
- [3] DAUSINGER F, LICHTNER F, LUBATSCHOWSKI H. Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications[M]. USA: Springer, 2004.
- [4] CHRYSSOLOURIS G. Laser Machining: Theory and Practice[M]. USA: Springer, 2013.
- [5] NOLTE S, MOMMA C, JACOBS H, et al. Ablation of metals by ultrashort laser pulses[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14 (10): 2716-2722.
- [6] KAUTEK W, KRÜGER J. Femtosecond-pulse laser ablation of metallic, semiconducting, ceramic, and biological materials: SPIE Proceedings[C]. USA: SPIE, 1994: 600-611.
- [7] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. Laser Cladding[M]. USA: CRC Press, 2004.
- [8] GEBHARDT A. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing[M]. Germany: Hanser Publishers, 2011.
- [9] ZHANG X, LIOU F. Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications[M]. English: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [10] DAHOTRE N B, HARIMKAR S P. Laser Fabrication and Machining of Materials[M]. USA: Springer, 2008. **MW** 20250216