

文章编号: 0258-7025(2009)02-0480-07

# 具有特定光强分布的激光表面硬化技术

虞钢 王恒海 何秀丽

(中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 利用光束变换技术得到不同光斑形状和不同强度分布的光束, 可满足表面硬化所需要的硬化层均匀性等要求。激光硬化在材料表面产生的实际效果与光强分布密切相关, 利用特定光强分布的光束进行激光硬化可以得到所需要的温度场及组织分布, 直接影响材料表面硬化的效果。对高斯光束圆光束、平顶矩形光束、曲边矩形光束、点阵光斑等不同强度分布的激光表面硬化(LSH)技术进行了介绍。硬化层特定的硬度分布及组织结构等硬化效果是特定光强分布激光束与材料相互作用的结果, 要获得所需硬化效果, 则需要利用反求方法设计与硬化效果相对应的特定光强分布的光斑。给出了特定光强分布的激光表面硬化技术的发展趋势。

**关键词** 激光技术; 激光表面硬化; 光束变换; 光强分布; 点阵光斑

**中图分类号** TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0480

## Laser Surface Hardening Using Determined Intensity Distribution

Yu Gang Wang Henghai He Xiuli

(Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Using transformation technology, laser beams with different shape and spatial intensity distribution are gained. Therefore, some required hardened results such as homogeneous hardened layers could be obtained. The quality of laser surface hardening (LSH) is depended strongly on the intensity distribution. Required surface temperature field and hardened layer are formed by special beam intensity of laser hardening. Laser beams applied in surface hardening include Gaussian beam, flat-topped rectangular beam, curved rectangular beam and array spot beam. Inverse method is required to design the intensity distribution profile corresponding to the hardened quality. The trend of LSH with determined intensity distribution is put forward.

**Key words** laser technique; laser surface hardening; beam transformation; intensity distribution; array spot

## 1 引言

激光技术自20世纪70年代开始用于材料表面硬化处理以来, 现已成为高能束表面硬化技术的一种主要手段<sup>[1]</sup>。传统的激光相变硬化技术是利用直接来自激光器或通过简单聚焦的高斯光束进行连续扫描的相变处理方法, 在实际应用中存在以下问题: 1) 材料经热处理后相变硬化带的形状为中央较深的月牙形<sup>[2~4]</sup>, 与一般希望获得的均匀硬化带有较大的差距; 2) 对大面积表面进行激光相变硬化, 一般要通过硬化带搭接来实现, 搭接区常常出现回火软化

现象等<sup>[5~8]</sup>; 3) 工艺参数难以精确控制, 硬化层均匀性难以保证, 严重影响硬化质量<sup>[9]</sup>。

在实际应用中, 对零件强化后的硬化层分布、表面硬度、粗糙度及耐磨性等都有很高的要求, 传统的激光硬化方法难以完全满足这些表面处理要求。因此需要特定光强分布的光束来达到强化效果, 这种特定光强分布的光束只有通过光束变换才能得到。为了满足生产中对激光相变硬化效果的需求, 利用光束变换技术改变光强分布而进行的激光相变硬化得到了越来越广泛的应用。

收稿日期: 2008-09-23; 收到修改稿日期: 2008-10-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10832011)资助课题。

作者简介: 虞钢(1958-), 男, 浙江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用和激光制造工艺力学方面的研究。E-mail: gyu@imech.ac.cn

## 2 光束变换技术

激光相变硬化所要求的光束变换技术, 主要指将激光器输出的光斑变换为不同形状的激光光斑, 或者各种不同的激光束的能量密度再分布。光束变换技术主要有应用非球面透镜或振镜、转镜等实现, 应用全息图来改变光束的形状和能量分布以及应用二元光学技术。传统的非球面透镜、振镜、转镜等的加工工艺复杂, 成本较高, 使用寿命有限。全息图存在衍射效率不高、光能量损失较大、只能离轴使用等缺点。而二元光学技术是一种新的衍射光学技术, 它不需要记录介质就能产生任意波面, 而且可大批量生产, 实现低成本。此外, 由于高的像质、高的光学效率(达 90% 以上)、稳定的尺寸等一系列优点, 有可能取代常规透镜等经典光学元件。这种新型器件可以消除像差, 形成各种平面透镜、反射镜, 形成各种光阵列; 做成像差消正板、激光微腔和高密度微透镜阵列(2000 个/cm)等用于光通信、光计算、光互连、光控制、激光技术等领域<sup>[10]</sup>。

理论上, 光束变换技术可以将激光器输出的原始光束变换成任意形状的光束。例如可以用不同设计方法将高斯光束变换成平顶光束<sup>[11~13]</sup>; 将高斯光束变换成矩形均匀光斑的衍射光学元件(DOE), 矩形(包括线形)均匀光斑已在激光加工中得到应用<sup>[14]</sup>; 还可以利用二元光学技术将激光束整形为正方框光束<sup>[15]</sup>; 将激光束整形成多圆环光束, 并已应用于激光热负荷试验<sup>[16]</sup>; 将激光束变换成点阵光斑并用于激光相变硬化实验等<sup>[17]</sup>。

## 3 光束变换技术在激光表面硬化中的应用

根据激光输出的形式, 激光硬化工艺分为: 连续激光硬化工艺和脉冲激光硬化工艺。在激光相变硬化中, 激光束的尺寸、功率密度的空间分布等参数, 将对硬化后的效果产生直接的影响。高斯光束和变换后的矩形光束等连续分布的光斑一般应用于连续激光硬化工艺; 点阵光斑等非连续分布的光斑一般应用于脉冲激光硬化工艺。按照光强分布的不同, 激光表面硬化(LSH)技术主要有 4 种。

### 3.1 高斯圆光斑的激光表面硬化

利用高斯圆光斑进行的激光表面硬化技术是应用最早、最广泛的表面强化方法, 对很多零件的表面硬化可以得到较好的强化效果。强化后沿层深方向的典型硬度分布如图 1 所示<sup>[17]</sup>, 从图中可看出激光

强化后表面硬度得到了很大的提高。

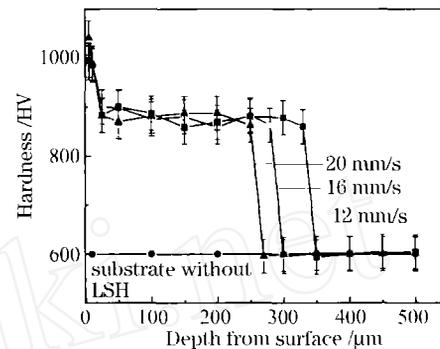


图 1 激光相变硬化沿硬化层深度方向典型硬度分布图

Fig. 1 Typical microhardness profile of laser hardening

一般来说, 利用直接来自激光器的光束或者通过简单聚焦系统的光束, 材料经淬火处理后相变硬化带的形貌为中间厚、向光斑两侧边缘逐渐变薄的“月牙形”硬化层, 其原因在于光斑中心处热量主要向纵深方向传递, 因而等温线涉及的深度较深, 即硬化层较厚; 而越靠近光斑两侧边缘, 基体横向热传导越强烈, 使许多热量向两侧散失, 导致纵向传递的热量减少, 造成等温线涉及的深度逐渐变浅, 即硬化层越来越薄, 如图 2(a) 所示。图 2(b) 为 AISI4140 钢硬化层的形貌图<sup>[18]</sup>。从图中可以看出硬化层呈明显的“月牙形”, 与理论分析结果相吻合。另外, 由于

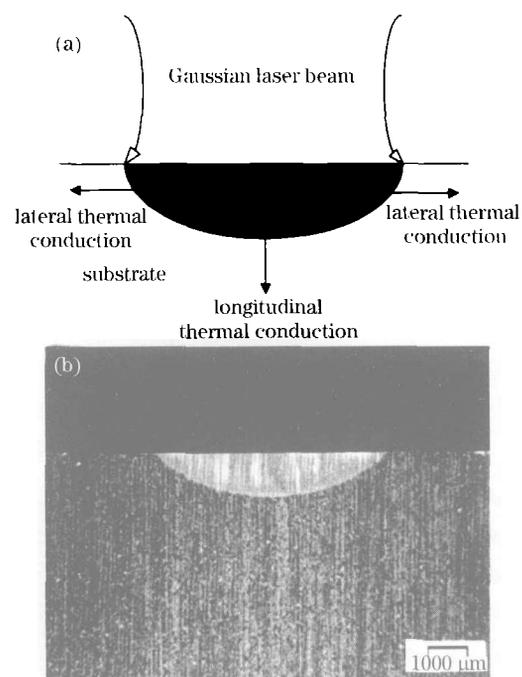


图 2 “月牙形”硬化层形貌示意图(a)以及激光相变硬化 AISI4140 钢的硬化层形貌(b)

Fig. 2 Crescent-shaped hardened layer (a) and the hardened layer of laser treated AISI4140 steel (b)

激光束空间能量分布不均匀,一部分区域激光能量密度特别高,以致经球面反射聚焦系统聚焦后的光斑能量分布不均匀,因此激光淬火后试样截面的硬化层会出现左右两边深度不一致的现象<sup>[10]</sup>。

利用传统的高斯光束进行表面硬化一般要用到搭接工艺,由于搭接区常常出现回火软化现象,所以工艺参数难以精确控制。

### 3.2 平顶矩形光束

由于高斯光束存在硬化层均匀性较差、单道扫描宽度较窄、搭接区易出现回火软化等不足,利用平

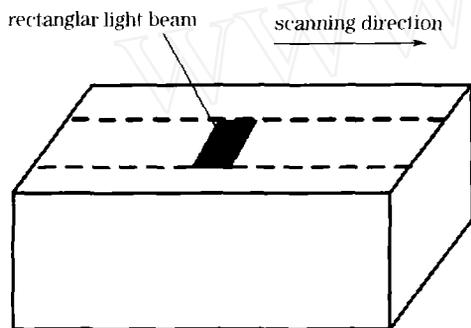


图3 矩形光斑连续扫描激光硬化示意图  
Fig. 3 Continuous scanning of laser hardening with rectangular beam

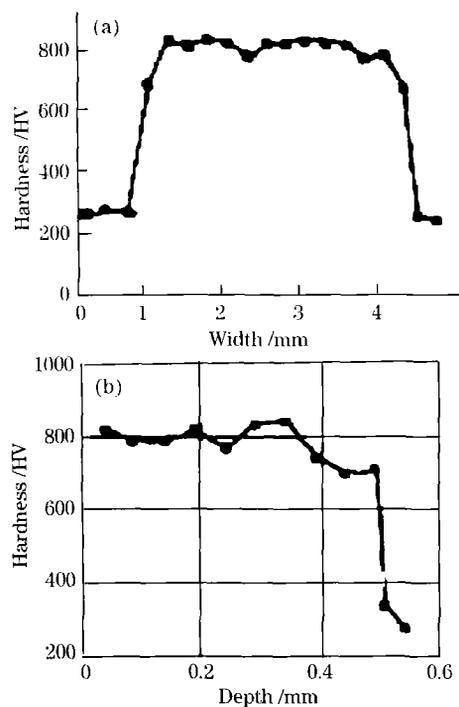


图4 激光硬化层沿横向的硬度分布(a)和沿深度方向的硬度分布(b)

Fig. 4 Hardness distribution of laser hardening in transverse direction (a) and depth direction (b)

顶矩形光束进行宽带扫描应运而生,平顶矩形光束

变换成为现今发展比较成熟、应用广泛的光束变换技术。国内外众多学者已经采用微透镜阵列、衍射光学等方法得到平顶矩形光束。矩形光束的激光相变硬化也已得到广泛的应用<sup>[6, 9, 20]</sup>。用矩形光斑进行连续扫描的示意图如图3所示。

文献[6]利用矩形光束对模具表面进行了激光硬化,图4(a)为激光处理45#钢后的硬化层沿横向的硬度分布,图4(b)为沿深度方向的硬度分布。从图中可以看出,利用矩形光束进行激光硬化,硬化层的硬度分布比较均匀。

文献[4]对CrMo铸铁进行了宽带(线性光斑)和窄带(圆形光斑)两种扫描方式的激光相变硬化试验,扫描淬硬层剖面形貌特征图如图5所示<sup>[1]</sup>,可以看出利用矩形光斑进行宽带扫描激光硬化所得的硬化带更加平整均匀。由于宽带矩形光斑的能量分布比窄带圆光斑要均匀得多,在搭接区的硬化层深度也比窄带扫描更深,如图6所示<sup>[1]</sup>。

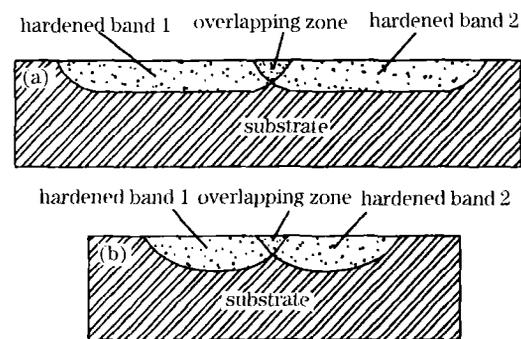


图5 宽带(a)和窄带(b)扫描淬硬层剖面形貌特征  
Fig. 5 Section characters of wide band (a) and narrow band scanning (b) in the hardened zone

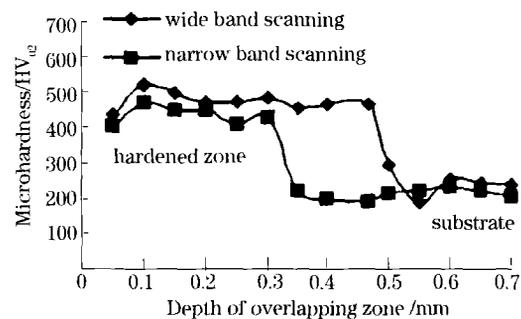


图6 两道搭接处沿深度方向的硬度分布曲线  
Fig. 6 Hardness distribution curves of CrMo cast iron along the depth at overlapping area of two tracks

### 3.3 “马鞍形”功率密度分布及曲边矩形

由于平顶矩形光束中各部分的能量密度是均匀的,与材料相互作用时,光斑中心处热量主要向纵深

方向传递,而光斑边缘处热量向两边传递更剧烈,因此并不能改变温度场的光斑中心温度高、边缘温度低的特点,硬化后的硬化层仍是中心厚边缘薄的“月牙形”。要使激光与材料相互作用时的温度场尽量均匀,从而使靠近光斑边缘处的硬化层厚度增大,改善其硬化层分布的均匀性,必须设法加大光斑两侧边缘的能量注入,以补偿由于横向热传导所带来的部分热损失,增加纵向传递的热量。目前主要有两种方法。

### 3.3.1 改变矩形光斑内的激光功率密度分布

如增大光斑边缘处的功率密度,使其呈“马鞍形”分布<sup>[2]</sup>,如图 7(a)所示。这样就增大了激光与材料作用时光斑边缘处的能量注入,从而使硬化层均匀性得到明显改善,如图 7(b)所示。

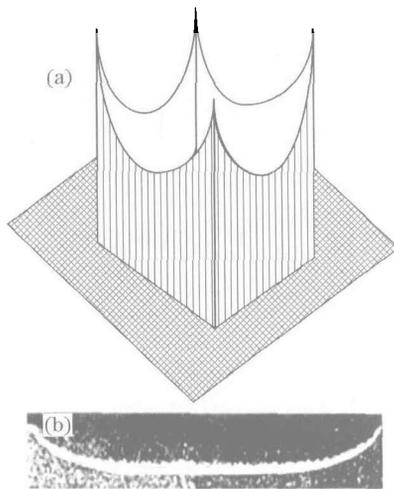


图 7 马鞍形功率密度分布(a)及硬化后的均匀硬化层形貌(b)

Fig. 7 Saddle-shaped intensity distribution of laser beam (a) and the hardened layer (b)

### 3.3.2 改变光斑形状

如图 8 所示,将原矩形光斑的两条直边改为曲边,这种光斑形状称为曲边矩形。在激光功率密度保持均匀的前提下,越靠近边缘,光斑的长度越长,激光硬化时边缘处与工件表面的作用时间也越长,因而注入的能量越多,可达到改善硬化层分布均匀性的目的<sup>[21]</sup>。

图 9 为利用高斯圆光斑、矩形光斑和曲边矩形光斑进行激光相变硬化后的硬化层分布比较示意图。从图中可以看出,在层深基本相同的前提下,采用曲边矩形光斑扫描得到的硬化层分布更为均匀,且硬化宽度也相应增大。

### 3.4 点阵光斑

连续激光表面硬化处理通常由于激光强度的空

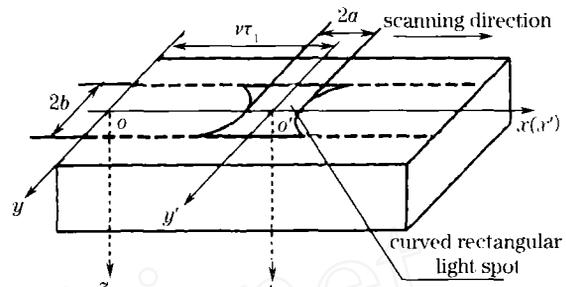


图 8 曲边矩形光斑扫描及坐标系建立

Fig. 8 Scanning with curved rectangular beam and the coordinate system

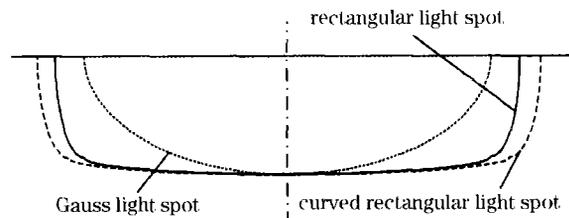


图 9 高斯圆光斑、矩形光斑和曲边矩形光斑激光硬化的硬化层分布比较

Fig. 9 Comparison of hardened layers of Gauss laser beam, rectangular beam and curved rectangular beam

间分布与时间分布难以准确控制,在硬化处理过程中不可避免地会产生淬空比小以及邻近道的搭接回火现象,因此,脉冲激光表面硬化越来越受到重视。利用脉冲激光时空可控性,通过控制激光参数可以较好地控制加工过程和质量,特别是可以通过光束变换来控制激光强度空间分布以满足不同的表面硬化要求,对于优化激光工艺及研究激光材料相互作用过程的物理现象,提高激光加工效率也有重要的意义。

点阵光斑(如图 10)是属于非连续分布的光斑,通过二元光学变换技术,可使单脉冲激光在聚焦透镜的焦平面上产生二维的光斑阵列<sup>[22]</sup>,不但实现了特定的光强空间分布使表面硬化比较均匀,而且大幅度提高处理速度<sup>[1]</sup>。

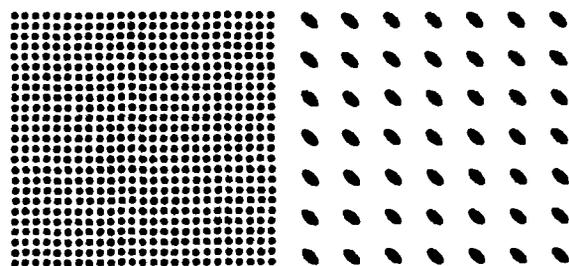


图 10 25×25 和 7×7 光斑阵列

Fig. 10 25×25 and 7×7 array spot

经点阵激光相变硬化后,硬化区域中的树枝状奥氏体、马氏体、残余奥氏体等组织呈周期性分布,使硬化后的表面具有强韧结合的特点<sup>[24~25]</sup>,大大地提高材料表面的耐磨性。文献[23]对球墨铸铁经脉冲点阵激光硬化后的硬化层形貌和组织进行了研究,发现硬化层可分为激光熔化区、过渡区、激光相变硬化区三部分(如图 11(a)所示)。激光相变强化的典型显微组织为石墨球及其周围的辐射状奥氏体树枝晶,以及经固态相变形成的马氏体和残余奥氏体(如图 11(b)所示)。

文献[3]提出了一种合理表征显微硬度分布的统计方法,对球墨铸铁的脉冲点阵激光强化的硬度进行了表征,如图 12 所示。从图中可以看出经激光相变硬化后的材料表面具有与光强分布明确对应的硬度分布特征,这种硬度分布有利于材料表面耐磨性的提高。

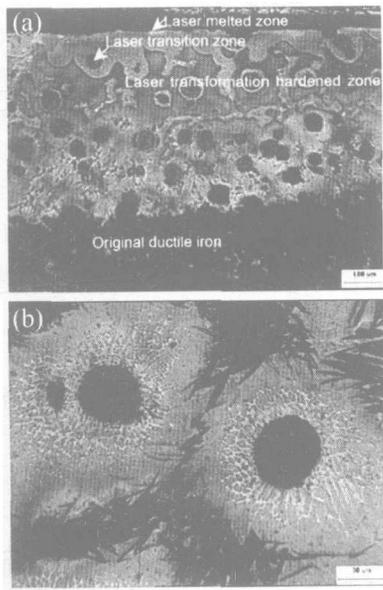


图 11 激光硬化层的截面组织形貌(a)和典型显微组织(b)  
Fig. 11 Optical microscope micrographs showing the cross-section microstructure (a) and the typical microstructure (b) of the laser modified layer

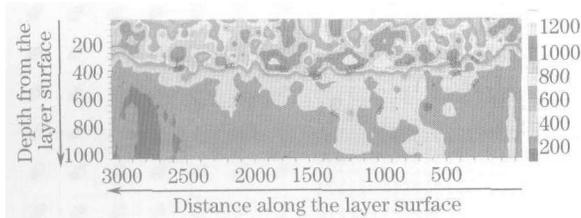


图 12 硬度沿强化层深度方向的二维分布  
Fig. 12 Two dimensional microhardness map along treated depth

由于激光与材料相互作用时,光斑中心处热量主要向纵深方向传递,而光斑边缘处热量向两边传递更剧烈,因此,利用均匀点阵光斑进行激光硬化得到的硬化层并不均匀。在设计点阵光斑时,光斑的形状分布以及各个小光斑的能量密度分布都可以精确控制,因此可以设计光强非均匀分布的点阵光斑,以满足不同的表面硬化效果需求。图 13(a)给出了中心到边缘的小光斑能量密度之比为 1:2:3 的点阵光斑的三维光强分布图,图 13(b)为利用这种光强分布的光束进行激光硬化得到的表面形貌图,从图中可以看出各个小光斑的强化效果比较接近。图 13(c)为利用光强均匀点阵进行激光硬化得到的表面形貌图,从图中可以看出,由于光斑中心处热量主要向纵向传递,边缘处热量横向传递剧烈,均匀的光

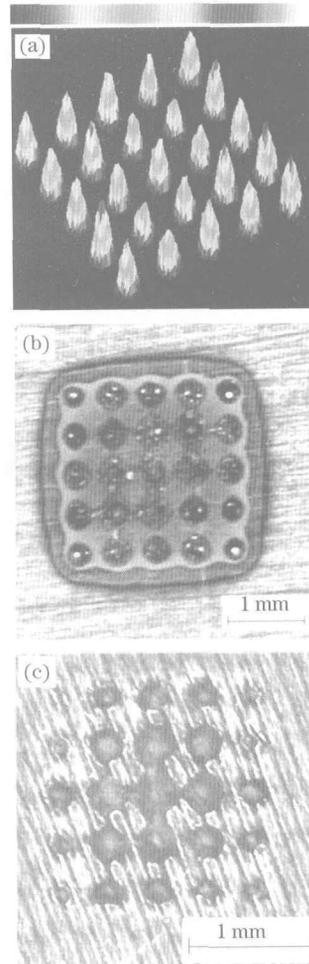


图 13 1:2:3点阵分布光斑的三维光束强度分布(a)和硬化后的表面形貌(b)以及均匀点阵光斑硬化后的表面形貌(c)  
Fig. 13 Three-dimensional intensity distribution (a), the hardened surface of 1:2:3 array spot (b) and the hardened surface of symmetrical array spot (c)

强分布并不能得到均匀的温度场,因此,得到的硬化层分布并不均匀。可见,利用 1:2:3 非均匀点阵光斑可以得到比均匀点阵更均匀的硬化层分布。

尽管点阵光斑可以较好地满足硬化层的硬度、耐磨性等要求,但由于其不连续性,强化后的表面粗糙度会有一定的降低,在实际应用中需要考虑。

#### 4 光强分布的反求设计方法

根据温度场叠加原理,均匀光斑阵列温度场是每个光斑同一时刻温度场的叠加,即使是每个光斑点能量密度均匀,材料表面的温度场也是光斑中心温度高,边缘温度低。为了满足表面硬化层均匀性的要求,需要精确地设计激光光束的空间能量密度

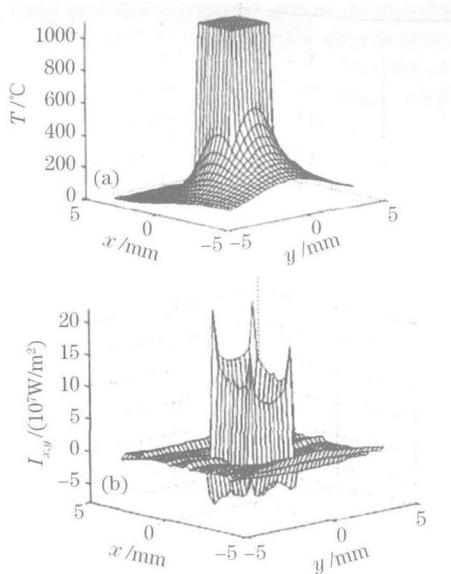


图 14 激光相变强化所需的表面温度场(a)及设计的与其对应的光束能量密度分布(b)

Fig. 14 Desired surface temperature distribution (a) for laser transformation hardening and the designed laser beam power density profile (b)

分布。当前的设计方法主要按以下两个步骤进行迭代逼近:第一步,根据经验或模型假定一种光强分布,进行这种光强分布激光相变硬化的数值模拟,得到其温度场分布;第二步,修正光束的能量密度分布,以使硬化后的温度场接近实际激光相变硬化所需的温度场分布。文献[26]就是用这种方法设计了使激光与材料作用后温度场均匀的点阵光斑的光强分布。文献[27]用类似的方法设计了激光热负荷的光强分布。这种方法需要很多步的迭代,而且个人的主观因素影响比较大,因此难以得到所需的光强分布。

文献[28]介绍了一种利用解析反求算法来设计光束的空间能量密度分布,这种方法基于二维傅里叶变换,利用反求来计算所需要的温度场分布对应的光强分布,取得了较好的效果,如图 14 所示。

设计实际应用中所需的能得到特定温度场及硬化层形貌的光束能量密度分布是当前激光相变硬化研究中的难点和热点。

#### 5 结 论

针对传统激光表面硬化存在的硬化层不均匀、搭接区易出现回火软化等问题,介绍了利用经光束变换技术得到的平顶矩形光束、“马鞍形”及曲边矩形光束、点阵分布光斑等进行的激光硬化技术,阐述了所能达到的硬化效果及存在的不足。为满足实际零件的激光硬化要求,需要特定光强分布的激光束。利用所希望得到的硬化层分布和温度场分布设计所对应的光束的光强分布,反求设计的方法非常重要。随着激光表面硬化技术的发展,针对不同零件硬化需求的光强分布设计方法会得到更多的研究及改进,具有特定光强分布的激光表面硬化技术也会得到更广泛的应用。

#### 参 考 文 献

- 1 Yu Gang, Yu Heji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001. 1  
虞 钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2001. 1
- 2 Li Junchang. Optimized Control of Laser Heat Treatment [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1995. 12  
李俊昌. 激光热处理优化控制研究[M]. 北京:冶金工业出版社, 1995. 12
- 3 Cui Chunyang, Yu Gang, Wang Lixin *et al.*. Properties of ductile iron modified by laser surface hardening with optical changing of laser beam[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, **31**(10): 31~33  
崔春阳, 虞 钢, 王立新 等. 球墨铸铁变换激光束淬火性能的研究[J]. 金属热处理, 2006, **31**(10): 31~33
- 4 Wen Zongyin, Feng Shuqiang, Li Baoling *et al.*. Application of laser transformation hardening for CrMo cast iron automobile moulds[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2007, **32**(1): 40~42  
温宗胤, 冯树强, 李宝灵 等. 激光相变硬化在 CrMo 铸铁汽车磨具中的应用[J]. 金属热处理, 2007, **32**(1): 40~42
- 5 I. D. Pantelis, E. Bouyiouri, N. Kouloumbi. Wear and corrosion resistance of laser surface hardened structural steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **298**: 125~131
- 6 Zhuang Qiren, Zhang Wenzhen, Lu Fengping. Study of the laser heat treatment for mould surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3): 271~276  
庄其仁, 张文珍, 吕凤萍. 模具表面的激光热处理研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(3): 271~276
- 7 Wen Zongyin, Feng Shuqiang, Li Baoling *et al.*. Big automobile over-laying pieces' deep-drawing mold strengthened by laser surface treatment[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(1): 230~232.

- 温宗胤,冯树强,李宝灵等. 大型汽车覆盖件拉伸模具的激光表面硬化处理[J]. *应用激光*, 2006, **26**(4): 230~232
- 8 G. Tani, L. Orazi, A. Fortunato *et al.*. Prediction of hypo eutectoid steel softening due to tempering phenomena in laser surface hardening [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, **57**(1):209~212
- 9 M. K. H. Leung, H. C. Man, J. K. Yu. Theoretical and experimental studies on laser transformation hardening of steel by customized beam[J]. *Int. J. Heat. Mass. Tran.*, 2007, **50**: 4600~4606
- 10 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian *et al.*. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 55~64  
金国藩,严瑛白,邬敏贤等. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. 55~64
- 11 Ido Gur, David Mendlovic. Diffraction limited domain flat-top generator [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **145**: 237~248
- 12 Yajun Li. New expressions for flat-topped light beams [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**: 225~234
- 13 P. Hariharan, Andal Narayanan. Modified pinhole spatial filter producing a clean flat-topped beam [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, **36**: 151~153
- 14 Zhang Yan, Zhang Jingjuan, Situ Guohai. Investigation on diffractive optical elements for converting Gaussian beam into square uniform focused spot [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1183~1187  
张艳,张静娟,司徒国海. 高斯光束变换成方形均匀焦斑的衍射光学元件的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1183~1187
- 15 Dong Meifeng, Song Xinxiang, Li Shen. The designation and experiment of the DOE which applied to shaping the laser beam to square frame shape [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2): 169~171  
董梅峰,宋新祥,李慎. 激光束整形为正方形光束的DOE的设计及实验[J]. *激光技术*, 2005, **29**(2): 169~171
- 16 Song Hongwei, Yu Gang, Alexander F. H. Kaplan *et al.*. Thermal fatigue on pistons induced by shaped high power laser. Part II Design of spatial intensity distribution via numerical simulation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**: 768~778
- 17 A. Basu, J. Chakraborty, S. M. Shariff *et al.*. Laser surface hardening of austempered (bainitic) ball bearing steel [J]. *Sripta Materialia*, 2007, **56**: 887~890
- 18 Marc Heidkamp, Olaf Kessler, Franz Hoffmann *et al.*. Laser beam surface hardening of CVD TiN-coated steels [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, **188-189**: 294~298
- 19 Yao Jianhua, Fu Jibin, Chen Jun. Laser beam mode analysis in laser quenching process[J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(1): 25~29  
姚建华,傅纪斌,陈君. 激光淬火过程中的激光束模式分析[J]. *应用激光*, 2008, **28**(1): 25~29
- 20 Wu Gang, Chen Bingsen. Effects of laser scanning parameters on the uniformity of hardened case distribution [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2003, **24**(3): 84~87  
吴钢,陈炳森. 激光扫描参数对相变硬化层均匀性的影响[J]. *材料热处理学报*, 2003, **24**(3): 84~87
- 21 He Fang, Wu Gang, Song Guangming. Study on laser hardening with curved rectangular beam [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2003, **22**(5): 17~20  
何芳,吴钢,宋光明. 曲边矩形光斑激光淬火的理论研究[J]. *天津工业大学学报*, 2003, **22**(5): 17~20
- 22 Li Shaoxia, Yu Gang, Zheng Caiyun *et al.*. High-power laser beam shaping by inseparable two-dimensional binary-phase gratings for surface modification of stamping dies [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46**: 508~513
- 23 Y. Chen, C. H. Gan, L. X. Wang *et al.*. Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd-YAG laser beam with two-dimensional array distribution [J]. *Applied Surface Science*, 2005, **245**: 316~321
- 24 Ba Fahai, Gan Cuihua, Wu Wei *et al.*. Study of surface modification by pulse laser of ductile iron [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 663~667  
巴发海,甘翠华,吴炜等. 球铁材料脉冲激光表面强化的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 663~667
- 25 Ba Fahai, Yan Guoqiang, Wu Wei *et al.*. Microhardness distribution of ductile iron modified by laser with space array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 287~291  
巴发海,颜国强,吴炜等. 球铁点阵分布激光表面强化的微硬度分布[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 287~291
- 26 Dang Gang, Yu Gang. Intensity distribution design of two-dimensional spot-array for pulsed laser transformation hardening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 287~290  
党刚,虞钢. 脉冲激光相变硬化中的二维点阵光强分布设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 287~290
- 27 Song Hongwei, Li Shaoxia, Yu Gang. Intensity distribution design for laser-induced thermal loading based on numerical simulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 842~845  
宋宏伟,李少霞,虞钢. 基于数值模拟的激光热负荷光强分布设计[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 842~845
- 28 G. R. B. E. Rörner, J. Meijer. Inverse calculation of power density for laser surface treatment [J]. *Annals of the CIRP*, 2000, **49**(1): 135~138