

脉冲激光强化点阵光斑强度分布反求算法

孙培培¹ 虞 钢¹ 王恒海² 何秀丽¹ 郑彩云¹

(¹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)
²中国电子科技集团第十四研究所, 江苏 南京 210039)

摘要 激光强化工程应用对硬化层深度、宽度和均匀性等强化参数有明确要求, 激光强度空间分布是影响硬化层均匀性的重要因素。针对二维点阵光斑的强度空间分布提出一种半定量的数学模型, 从均匀温度场出发, 使每个小光斑处其余小光斑对其能量贡献相等, 从而求出各个小光斑的强度比。给出 3×3 和 5×5 点阵分布光斑情形下激光强度空间分布的反求算例。使用有限元模拟和实验结果对此反求算法进行了验证。结果表明, 此反求算法得出的二维点阵空间强度分布优化了硬化层均匀性。

关键词 脉冲激光强化; 光束变换; 光强反求; 硬化层均匀性

中图分类号 TN249; TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100415

Inverse Method of Intensity Distribution of Spot Array for Pulsed Laser Hardening

Sun Peipei¹ Yu Gang¹ Wang Henghai² He Xiuli¹ Zheng Caiyun¹

(¹Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
²The 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210039, China)

Abstract A comparatively uniform hardened layer affected mostly by dimensional intensity distribution is commonly pursued in laser hardening engineering. A semi-quantitative mathematic model is proposed for two-dimensional spot-array to get uniform hardened layers, in which a homogeneous temperature field is used to get the rates of intensity of every spot. The examples of inverse design of intensity distribution for 3×3 and 5×5 two-dimensional spot-arrays are given. The feasibility of the inverse design method is proved by numerical simulation based on finite element (FE) analysis and experiments. Results show that the uniformity of hardened layers is improved by the inverse method.

Key words pulsed laser hardening; beam transformation; inverse design of intensity distribution; uniformity of hardened layer

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 140.6810

1 引 言

激光表面强化由于其作用时间短、变形小、便于自动化操作以及可小面积局部加工等特点已经被广泛应用于汽车和制造行业^[1]。激光表面强化可分为连续激光表面强化和脉冲激光表面强化。连续激光

表面强化技术应用较早^[2], 是利用直接来自激光器或通过简单聚焦的光束进行连续扫描的处理方法, 光束多为高斯或准高斯分布, 材料经处理后硬化区域为中央较深的月牙形^[3]。为得到工业需要的更为均匀的硬化层, 有研究指出应将激光束变换成两边

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-10

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: 孙培培(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事激光强化工艺试验及数值计算方法等方面的研究。

E-mail: sunpeipei@imech.ac.cn

导师简介: 虞 钢(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用和激光先进制造工艺力学等方面的研究。E-mail: gyu@imech.ac.cn(通信联系人)

高中间低的马鞍形或曲边矩形^[3,4]。脉冲激光表面强化多用于表面形状复杂的工件^[5]。在基于二元光学变换呈点阵分布的脉冲激光表面强化方面已有很多工作^[6~8],但以往采用的是均匀强度分布点阵光斑,得到的硬化层均匀性不能满足实际要求。实际上,通过光束变换技术可实现不同激光强度空间分布,这就需要根据所需的硬化层形状对光强分布进行反求设计。

文献[9]采用有限元模型对激光强度空间分布进行逆向设计,通过对以下两个步骤进行反复迭代来实现:1)通过建模或实验经验,预设一种光强分布,研究这种光强分布所能得到的温度场分布;2)根据温度场分布情况修改光强分布,直至修改后的光强分布所得温度场接近所需温度场。这种方法不但需要反复迭代,而且需要研究工作者凭经验主观修改光束光强的空间分布^[10],因此很难得到满意的结果且过于繁琐。

本文提出一种半定量的基于硬化层几何均匀性的二维点阵光斑强度空间分布反求算法,从均匀温度场出发,使每个小光斑处其余小光斑对其能量贡献相等,从而求出各个小光斑的强度比。给出 3×3 和 5×5 点阵分布光斑情形下激光强度空间分布的反求算例,并采用有限元模拟和实验方法对反求结果进行了验证。

2 光强分布反求算法

2.1 均匀度定义

提出一种硬化层几何均匀度定义^[11],如图1所示,阴影部分为普遍得到的月牙形硬化层形貌示意图,矩形部分为期望得到的均匀硬化层形貌示意图。

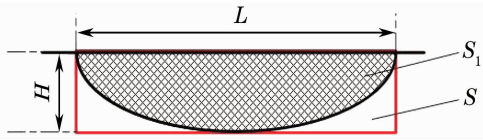


图1 硬化层形貌示意图

Fig. 1 Profile of hardened layer

在此基础上用几何均匀度 R 来描述硬化层的均匀性,定义 R 为

$$R = \frac{S_1}{S} = \frac{S_1}{LH}, \quad (1)$$

式中 S_1 表示硬化层的面积, L 表示硬化层表面的宽度, H 表示硬化层的深度, S 表示以硬化层宽度 L 和深度 H 为边长的矩形面积。

可见,所定义的硬化层几何均匀度 R 越大,硬

化层的几何均匀性越好。

2.2 强度空间分布反求方法

图2所示为 3×3 和 5×5 点阵分布光斑的示意图,其中每个斑点处的子光束与变换前的光束除强度和光束直径不同外其它光学性质都是相同的。点阵光斑的斑点个数、大小和每个小斑点之间的距离均可改变。

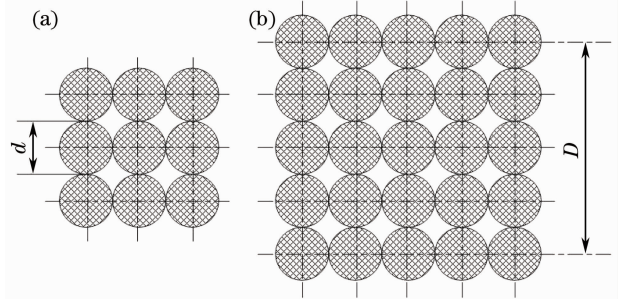


图2 点阵光斑的分布示意图。(a) 3×3 , (b) 5×5

Fig. 2 Sketch of two-dimensional spot-arrays.

(a) 3×3 , (b) 5×5

由传热学理论可知,利用均匀点阵光斑进行激光硬化所获得的硬化层形貌为月牙形^[12]。如图3所示,当均匀强度分布的点阵激光光斑照射到材料表面时,点阵光斑中每1个小光斑的强度相同,但由于光斑中心的纵向热传导占主导作用,而光斑边缘的横向热传导占主导作用,使得激光硬化层呈中间厚两边薄的月牙形形貌。因此,为得到几何均匀性更为优化的硬化层形貌,势必要重新设计每个小光斑的强度比值。

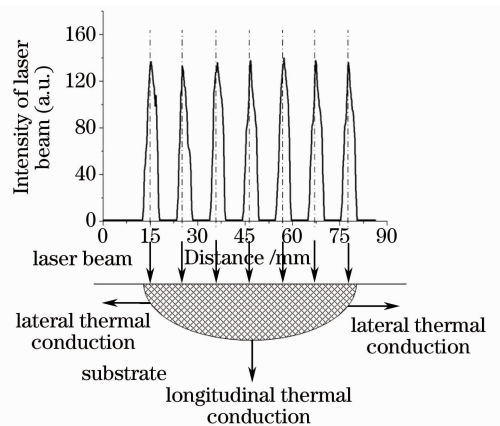


图3 均匀点阵光斑激光硬化产生月牙形硬化层形貌

Fig. 3 Laser hardening with the homogeneous spot array distribution results in a crescent-shaped hardened layer

设计时,先根据待加工工件需求的硬化层形貌基本确定点阵光斑的光斑个数及大小,这里设小光斑个数为 n ,小光斑 i 和小光斑 j 之间的距离为 r_{ij} ,每个小光斑内部为均匀强度分布。假设利用分离变

量法计算两个小光斑之间热作用的相互贡献时,忽略其它小光斑对它们的影响,则小光斑 i 处通过热传递影响小光斑 j 处温升的能量贡献可表示为

$$Q_i(r_{ij}) = Q_i(0)f(r_{ij}), \quad (2)$$

式中 $Q_i(0)$ 表示小光斑照射到材料表面时的初始能量值, $f(r_{ij})$ 表示小光斑 i 处能量对小光斑 j 处的影响关系的传递函数。因此,可以将小光斑 j 处对温升有贡献的总能量表示为点阵光斑中所有小光斑能量对其贡献之和:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n Q_i(r_{ij}) = \sum_{i=1}^n Q_i(0)f(r_{ij}). \quad (3)$$

几何均匀性好的硬化层需要均匀分布的温度场,即各小光斑处温度相等。假设升温过程中比热容为常数,则各小光斑处对温升贡献的总能量相等:

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n. \quad (4)$$

将(2)式和(3)式代入(4)式,即可求出点阵光斑中各小光斑之间的初始能量比 $Q_1(0):Q_2(0):\dots:Q_n(0)$,此处所说能量比值即是激光功率密度比值,也即是光束强度比。

显然,要明确求出点阵光斑中的强度分布,还需知道小光斑 i 处能量强度对小光斑 j 处的影响关系的传递函数 $f(r_{ij})$ 的具体表示,而 $f(r_{ij})$ 的表示受激光光斑大小和材料性能的影响。为方便说明此反求方法,现假设点阵光斑中每个小光斑的直径为 0.6 mm,以 Q235 钢为例来说明 $f(r_{ij})$ 具体表示的求解方法。求解采用文献[9]中的数值模型,由于光斑的对称性,计算过程中只需要取 1/4 光斑,相应的三维有限元模型如图 4(a)所示,所建模型用于模拟无限大的条件已足够大,激光照射区域加定向热流,对称面采用绝热边界条件,其它表面与空气发生自然对流,规定初始温度为 20 °C。Q235 钢的热物性参数依据文献[13]获得,熔点取 1400 °C,奥氏体化温度取 727 °C,材料对激光的吸收率假设为 0.3,激光功率为 1 kW,脉宽为 100 ms。图 4(b)所示为所求温度变化示意图,即从光斑中心开始沿 X 轴方向温度变化曲线,由于光斑的对称性,沿径向各个方向温度变化一致。

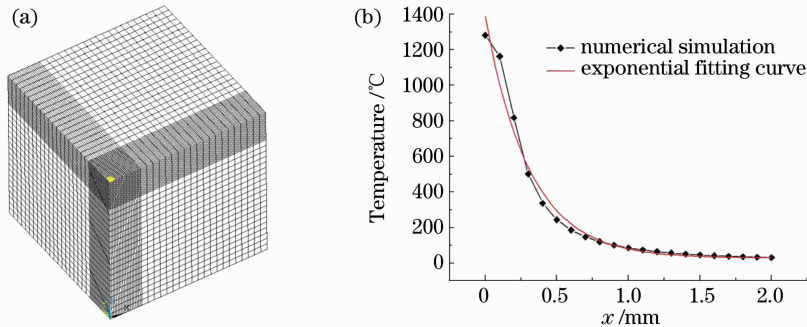


图 4 0.6 mm 直径小光斑作用在 Q235 钢上。(a)有限元模型,(b)温度分布示意图

Fig. 4 Single spot with the diameter of 0.6 mm on Q235 steel. (a) Finite element model, (b) temperature distribution

从图 4(b)可以看出,温度场的数值模拟结果可近似的看作一指数函数:

$$f_1(x) = T_0 \exp(-x/k), \quad (5)$$

式中 k 为比例因子,当基体材料和小光斑直径确定后, k 为常数; x 表示离小光斑中心的距离; T_0 为温度常数。假设比热容恒定,则小光斑的初始能量强度与温升成正比例关系,由于计算结果是求强度之比,因此可省略比例常数,小光斑初始能量对离小光斑距离 x 处的能量贡献近似表示为

$$f(x) = \exp(-x/k). \quad (6)$$

对点阵光斑光强分布进行计算时,(6)式中的 x 可替换为 r_{ij} ,即

$$f(r_{ij}) = \exp(-r_{ij}/k). \quad (7)$$

将(7)式代入(3)式,可得

$$Q_j = \sum_{i=1}^n Q_i(0) \exp(-r_{ij}/k). \quad (8)$$

将(8)式代入(4)式,即可得出点阵光斑中每个小光斑之间的初始能量强度之比 $Q_1(0):Q_2(0):\dots:Q_n(0)$ 。

3 算例及验证

3.1 3×3 和 5×5 点阵分布光斑反求结果

根据以上反求方法,分别给出 3×3 和 5×5 点阵分布的 0.6 mm 小光斑作用在 Q235 钢上的反求结果。由于几何对称性,可以将 3×3 点阵光斑中的小光斑简化为三种不同的强度,如图 5 所示。根据(8)式和(4)式,可得如下方程组:

$$\begin{cases}
 Q_1 = Q_1(0) + 2Q_1(0)\exp(-2d/k) + \\
 Q_1(0)\exp(-2\sqrt{2}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-d/k) + \\
 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + Q_3(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) \\
 Q_2 = 2Q_1(0)\exp(-d/k) + \\
 2Q_1(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + Q_2(0) + \\
 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + Q_2(0)\exp(-2d/k) + \\
 Q_3(0)\exp(-d/k) \\
 Q_3 = 4Q_1(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + \\
 4Q_2(0)\exp(-d/k) + Q_3(0) \\
 Q_1 = Q_2 = Q_3
 \end{cases} \quad (9)$$

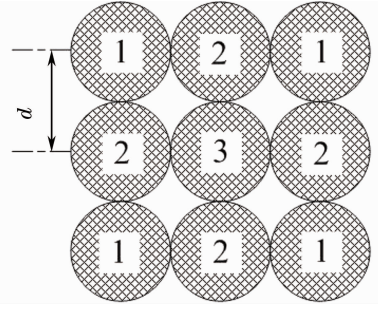


图 5 简化 3×3 点阵光斑中的小光斑为 3 种不同强度
Fig. 5 Three different intensities of the single spots in 3×3 spot array

令 $d = 0.6, k = 1/3$, 代入(9)式可求得点阵中各个小光斑的初始强度之比为

$$Q_3(0) : Q_2(0) : Q_1(0) = 1 : 1.42 : 1.80. \quad (10)$$

同样可以将 5×5 点阵光斑中的小光斑简化为 6 种不同的强度, 如图 6 所示。根据(8)式和(4)式, 可得如下方程组:

$$\begin{cases}
 Q_1 = Q_1(0) + 2Q_1(0)\exp(-4d/k) + Q_1(0)\exp(-4\sqrt{2}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-d/k) + \\
 2Q_2(0)\exp(-3d/k) + 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{17}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-5d/k) + 2Q_3(0)\exp(-2d/k) + \\
 2Q_3(0)\exp(-2\sqrt{5}d/k) + Q_4(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + 2Q_4(0)\exp(-\sqrt{10}d/k) + Q_4(0)\exp(-3\sqrt{2}d/k) + \\
 2Q_5(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + 2Q_5(0)\exp(-\sqrt{13}d/k) + Q_6(0)\exp(-2\sqrt{2}d/k) \\
 Q_2 = Q_1(0)\exp(-d/k) + Q_1(0)\exp(-3d/k) + Q_1(0)\exp(-\sqrt{17}d/k) + Q_1(0)\exp(-5d/k) + Q_2(0) + \\
 Q_2(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + Q_2(0)\exp(-2d/k) + 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{10}d/k) + Q_2(0)\exp(-4d/k) + \\
 Q_2(0)\exp(-3\sqrt{2}d/k) + Q_2(0)\exp(-2\sqrt{5}d/k) + Q_3(0)\exp(-d/k) + Q_3(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + \\
 Q_3(0)\exp(-\sqrt{13}d/k) + Q_3(0)\exp(-\sqrt{17}d/k) + Q_4(0)\exp(-d/k) + Q_4(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + \\
 Q_4(0)\exp(-3d/k) + Q_4(0)\exp(-\sqrt{13}d/k) + Q_5(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + Q_5(0)\exp(-2d/k) + \\
 Q_2(0)\exp(-2\sqrt{2}d/k) + Q_5(0)\exp(-\sqrt{10}d/k) + Q_6(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) \\
 Q_3 = 2Q_1(0)\exp(-2d/k) + 2Q_1(0)\exp(-2\sqrt{5}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-d/k) + 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + \\
 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{13}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{17}d/k) + Q_3(0) + 2Q_3(0)\exp(-2\sqrt{2}d/k) + \\
 Q_3(0)\exp(-4d/k) + 2Q_4(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + 2Q_4(0)\exp(-\sqrt{10}d/k) + Q_5(0)\exp(-d/k) + \\
 2Q_5(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + Q_5(0)\exp(-3d/k) + Q_6(0)\exp(-2d/k) \\
 Q_4 = Q_1(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + 2Q_1(0)\exp(-\sqrt{10}d/k) + Q_1(0)\exp(-3\sqrt{2}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-d/k) + \\
 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-3d/k) + 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{13}d/k) + 2Q_3(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + \\
 2Q_3(0)\exp(-\sqrt{10}d/k) + Q_4(0) + 2Q_4(0)\exp(-2d/k) + Q_4(0)\exp(-2\sqrt{2}d/k) + \\
 2Q_5(0)\exp(-d/k) + 2Q_5(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + Q_6(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) \\
 Q_5 = 2Q_1(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + 2Q_1(0)\exp(-\sqrt{13}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-2d/k) + \\
 2Q_2(0)\exp(-2\sqrt{2}d/k) + 2Q_2(0)\exp(-\sqrt{10}d/k) + Q_3(0)\exp(-d/k) + 2Q_3(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + \\
 Q_3(0)\exp(-3d/k) + 2Q_4(0)\exp(-d/k) + 2Q_4(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + Q_5(0) + 2Q_5(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + \\
 Q_5(0)\exp(-2d/k) + Q_6(0)\exp(-d/k) \\
 Q_6 = 4Q_1(0)\exp(-2\sqrt{2}d/k) + 8Q_2(0)\exp(-\sqrt{5}d/k) + 4Q_3(0)\exp(-2d/k) + \\
 4Q_4(0)\exp(-\sqrt{2}d/k) + 4Q_5(0)\exp(-d/k) + Q_6(0) \\
 Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_5 = Q_6
 \end{cases} \quad (11)$$

令 $d = 0.6, k = 1/3$, 代入(11)式可求得 5×5 点阵中各个小光斑的初始强度之比为

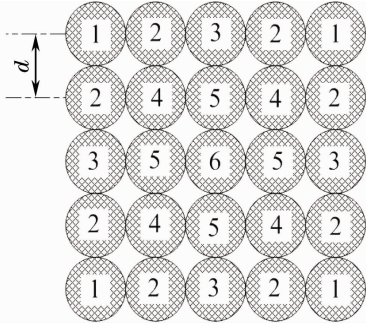
$$Q_6(0) : Q_5(0) : Q_4(0) : Q_3(0) : Q_2(0) : Q_1(0) = 1 : 0.9 : 0.9 : 1.4 : 1.3 : 1.7. \quad (12)$$


图 6 简化 5×5 点阵光斑中的小光斑为 6 种不同强度
Fig. 6 Six different intensities of the single spots in 5×5 spot array

3.2 反求结果数值模拟验证

数值模型和参数选择与求解传递函数时一致, 3×3 点阵光斑选择激光功率为 1 kW, 脉宽为 100 ms, 5×5 点阵光斑选择激光功率为 1 kW, 脉宽为 170 ms, 空间强度分布采用上文所求结果。三维有限元模型如图 7(a)和(b)所示。

图 8(a)和(b)所示为数值模拟所得 3×3 和 5×5 点阵分布光斑激光硬化后的表面温度场及硬化层

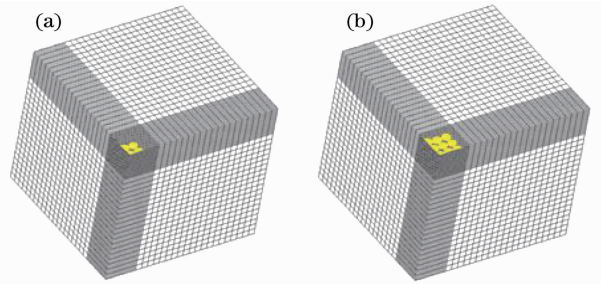


图 7 点阵光斑的三维有限元模型。(a) 3×3 ;(b) 5×5
Fig. 7 Three-dimensional finite element models of spot array. (a) 3×3 ; (b) 5×5

形貌。需要说明的是, 为了更清楚地表达出硬化层均匀性的优化, 图中所给出的硬化层形貌和表面温度场采用的不是同一个比例尺, 已经在图中标出尺寸。根据(1)式, 求得 3×3 点阵分布光斑的硬化层几何均匀度 $R=88.5\%$, 5×5 点阵分布光斑的硬化层几何均匀度 $R=91.7\%$, 可见, 3×3 和 5×5 点阵光斑反求强度分布所得硬化层的均匀性良好。硬化层几何均匀度没有达到设计条件 ($R=100\%$) 的原因有三点: 1) 反求算法假设热物性参数为常数; 2) 反求算法的传递函数求解过程有一定误差; 3) 数值模型本身的误差。 5×5 点阵分布光斑的硬化层几何均匀性大于 3×3 点阵分布光斑的原因在于小光斑数量增多, 计算误差减小。

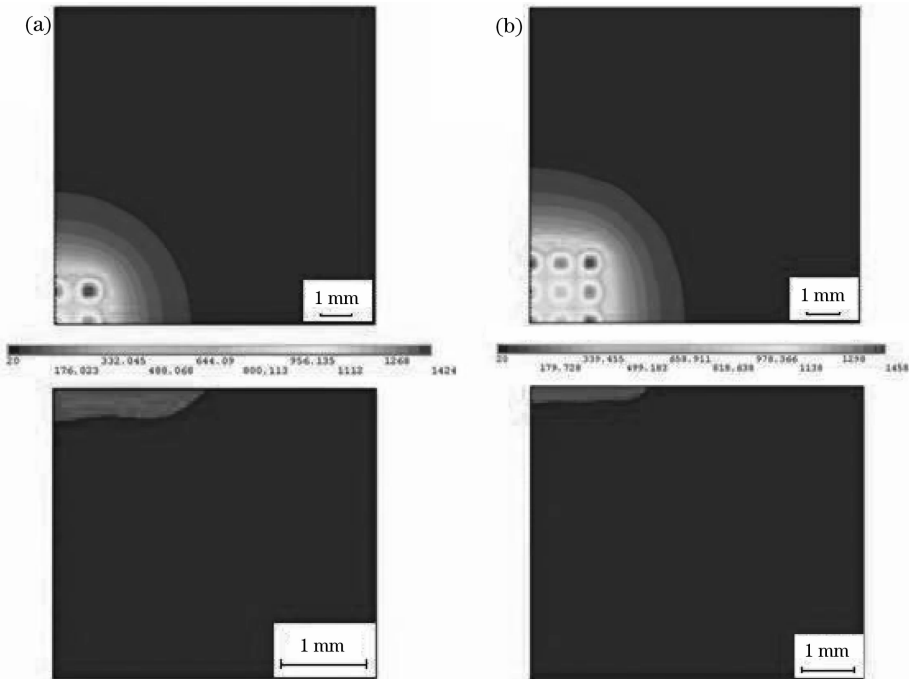


图 8 点阵光斑的表面温度场及硬化层形貌。(a) 3×3 ;(b) 5×5

Fig. 8 Temperature fields and hardened layer profiles of spot array. (a) 3×3 ; (b) 5×5

3.3 反求结果实验验证

试样材料为 Q235 钢, 试块尺寸为 $100 \text{ mm} \times$

$50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。化学成分如表 1 所示。实验设备采用额定输出功率 1 kW 的 Nd:YAG 固体激光器, 光束

模式为多模,聚焦镜头焦距为 150 mm。分别采用均匀强度分布和反求算法所得强度分布的 5×5 点阵光斑进行单脉冲激光硬化实验,均匀强度分布 5×5 点阵光斑所用激光功率为 1 kW,脉宽为 70 ms,设计强度分布所用激光功率为 1 kW,脉宽为 170 ms。

表 1 Q235 钢的化学成分

Table 1 Chemical element in Q235 steel

Chemical element	Mass fraction /%
C	0.14~0.22
Mn	0.30~0.65
Si	0.30
S	0.050
P	0.045
Fe	Bal.

图 9(a)和(b)所示为均匀强度分布和设计强度分布 5×5 点阵光斑所得硬化层形貌。根据(1)式,求得均匀强度分布下硬化层均匀度为 65.0%,设计强度分布下硬化层均匀度为 89.2%。可见,设计强度分布所得硬化层均匀性明显优于均匀强度分布。实验结果与模拟结果存在误差的原因在于:1)除了光束强度分布,硬化层均匀度还受到材料热物性、作用时间等一系列因素的影响;2)反求算法为半定量的算法,传递函数的求解过程存在误差;3)光学元件制作过程存在误差。

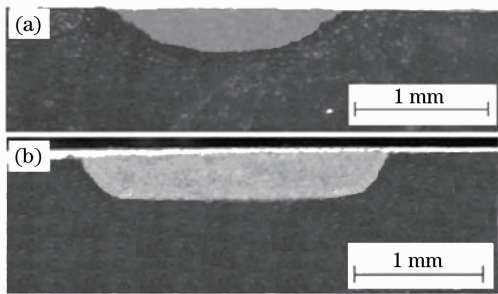


图 9 5×5 点阵光斑的硬化层形貌。(a)均匀强度分布;
(b)设计强度分布

Fig. 9 Hardened layer profiles of 5×5 spot arrays. (a) Homogeneous intensity distribution; (b) designed intensity distribution

4 结 论

基于硬化层几何均匀性提出了一种半定量的数学模型,给出脉冲激光点阵光斑强度分布的反求算法。采用数值模拟方法验证了 3×3 和 5×5 点阵分布光斑作用于 Q235 钢的反求结果,得出 3×3 点阵分布光斑设计强度的硬化层几何均匀度为 $R=88.5\%$, 5×5 点阵分布光斑设计强度的硬化层几何均匀度为

$R=91.7\%$ 。采用实验方法验证了 5×5 点阵分布光斑作用于 Q235 钢的反求结果。结果表明,均匀强度分布下硬化层几何均匀度为 65.0%,而设计强度分布下硬化层几何均匀度为 89.2%。设计结果与实际结果之间存在误差的原因在于,除了光束强度分布,硬化层均匀度还受到材料热物性、作用时间等一系列因素的影响,而反求算法的传递函数确定和二元光学元件的制作过程存在一定误差。

参 考 文 献

- Kennedy E., Byrne G., Collins D. N.. A review of the use of high power diode lasers in surface hardening[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, **155**~**156**: 1855~1860
- Pantelis I. D., Bouyiouri E., Kouloumbi N.. Wear and corrosion resistance of laser surface hardened structural steel[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2002, **161**(2~3): 125~134
- Li Junchang. Optimized Control of Laser Heat Treatment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995
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
- Wang Yunshan, Wang Juanjuan, Zhu Fudong. Beam optimum system for laser heat treatment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1730~1734
王云山, 王娟娟, 朱福栋. 激光热处理光束优化系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1730~1734
- Yu Gang, Yu Heji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002
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, 2002
- 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]. *Opt. Lasers Engng.*, 2008, **46**(7): 508~513
- Ba Fahai, Yan Guoqiang, Wu Wei *et al.*. Study of surface modification by pulse laser of ductile iron[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 287~291
巴发海, 鄢国强, 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, 2005, **32**(2): 287~291
- Yu Gang, Wang Henghai, He Xiuli. Laser surface hardening using determined intensity distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 480~486
虞 钢, 王恒海, 何秀丽. 具有特定光强分布的激光表面硬化技术[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 480~486
- 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
- Crafer R. C., Mackwood A. P.. Flexible 2D CW laser surface treatment model[J]. *Lasers in Engineering*, 2000, **8**(4): 241~249
- Sun Peipei, Yu Gang, Wang Henghai *et al.*. Surface hardening of steel by pulse laser with proportional intensity distribution spots [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, **32**(2): 110~115
孙培培, 虞 钢, 王恒海 等. 特定强度分布脉冲激光钢表面强化实验[J]. 材料热处理学报, 2010, **32**(2): 110~115
- 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]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **245**(1~4): 316~321
- Feng Ke, Chen Dengfu, Xu Chushao *et al.*. Effect of main thermo-physical parameters of steel Q235 on accuracy of concasting transport model[J]. *Special Steel*, 2004, **25**(4): 28~31
冯 科, 陈登福, 徐楚韶 等. Q235 钢主要热物理参数对连铸传输模型精度的影响[J]. 特殊钢, 2004, **25**(4): 28~31