

文章编号: 0258-7025(2008)02-0287-04

# 脉冲激光相变硬化中的二维点阵光强分布设计

党 刚 虞 钢

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 激光强度空间分布是影响脉冲激光相变硬化效果的重要因素。现有的二维点阵光束按强度均匀分布设计, 不能完全满足应用要求。为此提出基于有限元(FE)分析的光强空间分布逆向设计思路, 并给出了实现方法。建立脉冲激光相变硬化有限元模型, 考虑了材料热物性参数随温度的变化和相变过程, 并用实验进行校核。研究了二维点阵分布参数对温度场的影响, 从目标温度场和硬化层形貌出发对二维点阵的分布参数进行调整, 获得优化的强度空间分布。针对汽车冲压模具表面强化的工艺要求, 应用此方法设计出具有实用价值的激光强度空间分布。

**关键词** 激光技术; 脉冲激光相变硬化; 有限元; 光强空间分布; 二维点阵

**中图分类号** TN 249; TG 156.99 **文献标识码** A

## Intensity Distribution Design of Two-Dimensional Spot-Array for Pulsed Laser Transformation Hardening

Dang Gang Yu Gang

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Spatial intensity distribution is a critical factor of pulsed laser transformation hardening. The existing two-dimensional spot-array designed as uniform density distribution cannot satisfy application requirements completely. A reverse method was proposed to design the intensity distribution based on finite element (FE) analysis. A FE model for simulating pulsed laser transformation hardening was established. In the model, temperature-dependent thermo-physical properties of material and transformation were taken into account. Temperature field and shape of predicted hardening calculated from the model was verified with experimental results. Research on relationship between distribution parameters and temperature field was carried out. With the validated FE model, the target temperature field or shape hardening layer was achieved by adjusting distribution parameters of the spot-array, and the optimal design of the intensity distribution was subsequently obtained. Aiming at surface hardening requirements of automobile's stamping die, the method had been applied to gain an intensity distribution design with application value. The results showed that the method was feasible and capable of providing bases for designing shaping lens and making the design more predictable.

**Key words** laser technique; pulsed laser transformation hardening; finite element; intensity distribution; two-dimensional spot-array

### 1 引 言

激光相变硬化作为一种先进的激光表面热处理方法已广泛应用于各个领域。按作用方式不同, 可分为连续激光相变硬化和脉冲激光相变硬化。连续激光相变硬化应用时间较早<sup>[1,2]</sup>。近年来, 随着集

成化制造和光学变换技术的发展, 脉冲激光相变硬化得到广泛的发展和应用<sup>[3,4]</sup>。脉冲激光相变硬化具有良好的可控性, 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工艺要求<sup>[4]</sup>。常见的光束变换有将高斯光束转变为强度均匀分布的

收稿日期: 2007-02-27; 收到修改稿日期: 2007-06-02

基金项目: 中国科学院知识创新工程(KGCX1-11)资助项目。

作者简介: 党 刚(1981—), 男, 四川人, 硕士研究生, 主要从事激光智能制造工艺力学及计算固体力学研究。

E-mail: danggang@gmail.com

导师简介: 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、激光制造的集成化和智能化及其应用等方面的研究。E-mail: gyu@imech.ac.cn (通信作者)

线性或矩形光束<sup>[5,6]</sup>,还有基于二元光学变换转变为二维均匀强度点阵光束<sup>[7]</sup>。

现有的二维均匀强度点阵光束以扩大激光光斑面积、提高处理效率为主要目的,在设计光束变换器件前对光束强度空间分布不作有针对性的考虑,使得变换出的激光束不能完全满足实际要求。二维点阵光束在强度空间分布上具有很好的可控性,可对光斑形状或光斑内强度分布进行调整<sup>[8]</sup>。本文针对工艺要求,提出在设计光束变换器件前对激光强度空间分布进行逆向设计的思路,建立了脉冲激光相变硬化有限元(FE)模型。考虑材料热物性参数随温度和相变过程变化,将计算所得温度场和硬化层相貌用实验结果进行校核。在此基础上研究二维点阵分布参数对温度场的影响,从目标温度场或硬化层形貌出发,对二维点阵的分布参数进行调整,设计出接近或满足工艺要求的强度空间分布形式,为设计相应的光束变换器件提供依据。

## 2 基于有限元的强度空间分布设计方法

### 2.1 有限元模型

在脉宽为毫秒量级的脉冲激光相变硬化过程中,传统的傅里叶定律仍然适用。典型热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho \dot{Q}, \quad (1)$$

式中  $\rho, c, k$  分别为材料密度、比热容和热传导系数,  $T$  为温度,  $Q$  为单位质量内热源生成热,  $t$  为时间。

大部分计算模型常假定材料热物性参数如  $c, k$  为常数,采用一定温度范围内的平均值或采用奥氏体化温度附近参数来确定。而实际材料的热物理性质从室温至熔点一般存在较大差异。对于瞬态分析,需要得到任何时刻的温度场,固定材料物性常数会带来较大误差,因此考虑了  $c, k$  随瞬时温度  $T$  变化。

(1)式结合相应的初始条件和边界条件即可构成瞬态热传导的定解问题。在建立模型时,把材料视为半无限大。对流和辐射引起的热量损失在激光强化过程中可以忽略<sup>[1]</sup>。故边界条件只有两类,分别为在无限远处指定边界温度  $T = T(\Gamma, t)$  和在激光作用界面上指定法向热流  $q = q(\Gamma, t)$ ,其中  $\Gamma$  表示边界。初始条件为  $T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$ 。

激光相变硬化过程中的固态相变是一级相变,伴随着潜热的吸收或释放。对于大多数工程材料,相变是在一定的温度范围内完成的,因此相变潜热可以用等效比热容进行处理。将相变潜热  $Q$  表示为温度  $T$  的函数,由(1)式可以得到

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho \frac{\partial Q}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

定义等效比热容  $c_q = \partial Q / \partial T$ , 则

$$\rho(c + c_q) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (3)$$

最后根据伽辽金法可得到有限元形式为

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}\mathbf{T} = \mathbf{P}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{C}, \mathbf{K}$  和  $\mathbf{P}$  分别为热容矩阵、热传导矩阵和热流载荷向量。解(4)式,可以得到激光作用过程中材料内部的温度场分布。如果结合相变组织演化模型,则可以得到相应的硬化层形貌。

### 2.2 强度空间分布计算

典型的二维点阵式光斑如图 1 所示。每个斑点处的子光束与变换前的光束除了强度和光束直径不同以外其他光学性质均相同。点阵的斑点个数  $N$ , 子光束的直径  $d$ , 间距  $D_1, D_2$  和每个子光束的强度分布  $e_i$  都可以进行单独调整。

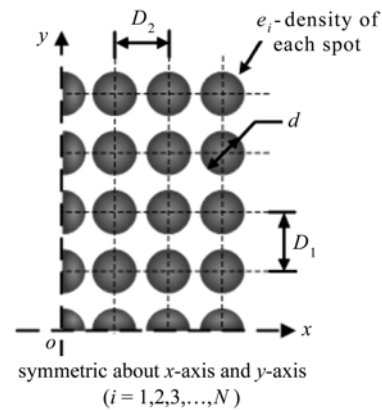


图 1 二维点阵光斑示意图

Fig. 1 Sketch of two-dimensional spot-array

设计过程中,先根据工艺要求的目标温度场或硬化层形貌基本确定斑点的个数  $N$ , 设定一个初始强度空间分布代入模型,通过数值模拟得到将初始分布的脉冲激光作用在材料上的温度场。然后根据该温度场分布特征分析点阵参数对温度场或硬化层形貌的影响,调整  $e_i, D_1, D_2$  或  $d$ , 代入模型计算获得新的温度场。循环此过程,最后使得温度场或硬化层形貌接近或满足工艺要求,获得需要的强度空间分布。

## 3 应用实例

### 3.1 工艺要求

在汽车冲压模具表面强化处理中,除了对硬度、层深、耐磨性等评价指标有要求外,还对处理后的粗糙度提出了严格的要求。现有二维均匀强度点阵光

束能满足硬度和层深的要求,但会在光斑中心区出现少量熔点,导致处理以后材料表面粗糙度不能满足要求。因此,需要控制光斑区材料表面温度分布,避免出现熔点。

### 3.2 计算模型

模具材料为含碳量(质量分数)3.3%的球铁材料 QT700-2,其物性参数  $c, k$  随温度变化取值根据文献[9, 10]获得,奥氏体化温度取 727 °C,熔化温度取 1148 °C。为尽量减小边界的影响并考虑计算规模,整个实体尺寸取为光斑尺寸的 5 倍。上表面激光作用区域指定定向热流,上表面非激光作用区域指定绝热边界条件;侧面和底面指定温度为 20 °C。初始温度设定为 20 °C。实验测得材料对激光的平均吸收率为 23.3%<sup>[11]</sup>。假设点阵中所有子光束均为平顶圆柱形分布,有限元模型如图 2 所示。

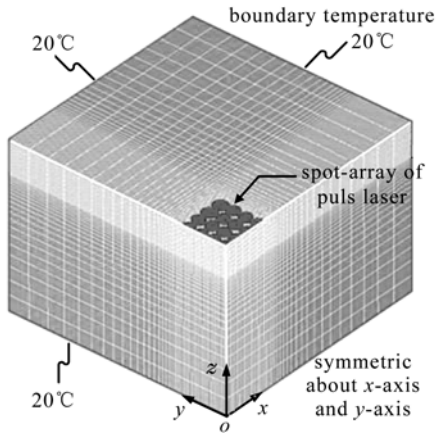


图 2 三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model

$d = 0.37 \text{ mm}$        $N = 7 \times 7$   
 $D_1 = 0.44 \text{ mm}$      $e_i = 360.08 \text{ W/mm}^2$   
 $D_2 = 0.44 \text{ mm}$     ( $i = 1, 2, \dots, 49$ )

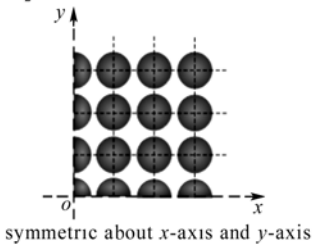


图 3 现有强度空间分布 I 示意图

Fig. 3 Sketch of the existing density distribution I

### 3.3 模型校核

研究采用 YAG 固体激光器,波长为 1064 nm,使用矩形孔径 Dammann 光栅对光束进行变换形成光束点阵分布。现有二维均匀强度点阵分布(分布 I)示意图如图 3 所示。

设激光脉宽  $\tau$  为 75 ms,单脉冲平均功率密度  $e_i$

为 360.08 W/mm<sup>2</sup>,将分布 I 脉冲激光按 23.3% 的吸收率加载到有限元模型。计算得到沿  $oxz$  横截面的硬化层形貌如图 4(a) 所示,层深约为 360  $\mu\text{m}$ 。

使用相同功率密度和脉宽的脉冲激光通过二元光学元件(DOE)变换成点阵分布光斑作用于 QT700-2 材料进行相变强化实验,实验后进行金相组织分析,在对应  $oxz$  截面的位置取剖面形貌如图 4(b) 所示,测得强化区最大深度为 380  $\mu\text{m}$ 。结果表明,模型的计算结果与实验结果较为吻合。

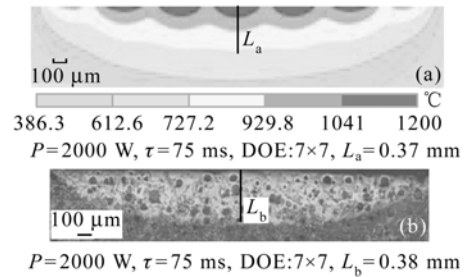


图 4 计算所得硬化层形貌(a)与实验所得硬化层形貌(b)

Fig. 4 Hardening layer shape

(a) numerical results; (b) experiment results

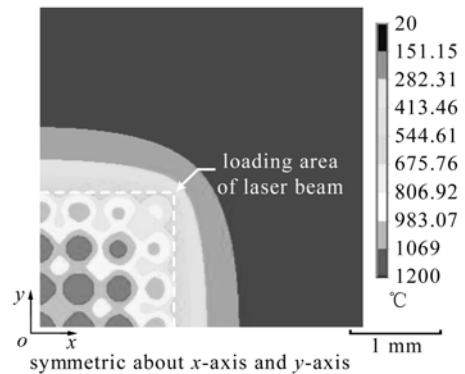


图 5 分布 I 单脉冲激光作用下的表面温度场

Fig. 5 Temperature field generated by single pulse laser beam of distributions I

### 3.4 结果分析及讨论

根据有限元模型计算获得脉宽为 75 ms,功率密度为 360.08 W/mm<sup>2</sup> 的分布 I 脉冲激光作用于材料所产生的温度场,截取部分云图如图 5 所示。从图 5 中可以看出,分布 I 脉冲激光作用下,每个斑点中心处的温度与斑点间隙处的温度相差较大,而光斑中心区的温度与靠近光斑边缘区的温度相差也较大,中心区部分斑点处的峰值温度已超过熔点。

对于 7×7 点阵分布的脉冲激光,整个光斑所产生的温度场是由所有 49 个子光束所产生的温度场叠加而成的。由于材料横向热扩散能力强于纵深方

向的热扩散能力,每个斑点处的子光束所独立产生的温度场都具有中心温度最高,向周围迅速降低的特点。当功率密度  $e_i$  和子光束直径  $d$  一定时,如果间距增大,则斑点间隙处与斑点中心处的温差会增大;当间距一定时,如果增大功率密度  $e_i$  或子光束直径  $d$ ,则这种温差就会减小;其余参数一定时,如果增大光斑边缘区的功率密度,则光斑中心区的温度与靠近光斑边缘区的温度就会减小。因此,为减小光斑区内的温差,应当适当减小分布 I 的斑点间距,同时调整各子光束处的功率密度  $e_i$ 。

按照本文提出的设计方法,对相关参数进行调整,限定表面最高温度不超过熔点,最后得到新的强度空间分布形式(分布 II)如图 6 所示。图中标注了每个子光束处的功率密度值。图 7 是分布 II 单脉冲激光(脉宽为 75 ms)作用下的表面温度场部分云图。

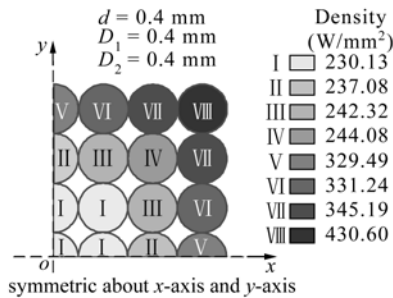


图 6 强度空间分布 II 示意图

Fig. 6 Sketch of density distribution II

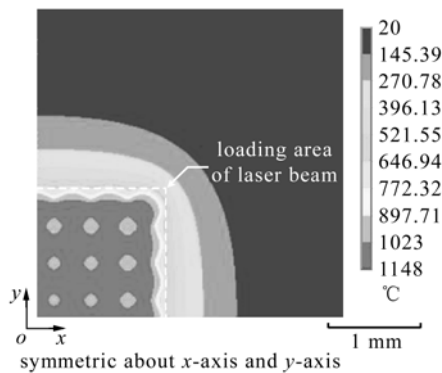


图 7 分布 II 单脉冲激光作用下的表面温度场

Fig. 7 Temperature field generated by single pulse laser beam of distribution II

从图 7 可以看到,在分布 II 的脉冲激光作用下,除光斑边缘部位外,整个光斑内的温差都能维持 100 °C 左右,因此整个光斑绝大部分区域的材料都能得到充分硬化而又不产生熔点,从而能够满足汽车冲压模具表面强化的工艺要求。

由于边缘效应的存在,整个光斑区内不可能完全保持一致,这是激光相变硬化中的必然现象。边

缘部分可通过光斑搭接来修整。从温度场的分布来看,由于分布 II 使得等温线在光斑边缘处较分布 I 平整,因此更有利于光斑的搭接。

## 4 结 论

提出了二维点阵光强空间分布逆向设计思想,并给出了切实可行的设计方法。针对汽车冲压模具激光表面强化工艺要求,通过实验校核后的有限元模型设计出了新的光强空间分布,解决了现有均匀强度点阵分布存在的问题。本文提出的设计方法能针对各种工艺需要为光束变换器件的设计提供依据,从而提高光束变换的预见性,缩短设计周期。设计结果的有效性需要制作相应的光束变换元件进行实验验证并做进一步的改进。

## 参 考 文 献

- 1 Sindo Kou, D. K. Sun, Y. P. LE. A fundamental study of laser transformation hardening [J]. *Metall. Trans. A*, 1983, **14**(3):643~653
- 2 R. C. Reed, Z. Shen, J. M. Robinson *et al.*. Laser transformation hardening of steel: effects of beam mode, beam size, and composition [J]. *Materials Science and Technology*, 1999, **15**(1):109~118
- 3 Paul R. Woodard, John Dryden. Thermal analysis of a laser pulse for discrete spot surface transformation hardening [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(5):2488~2496
- 4 Yu Gang, Yu Heji. *Integrated Laser Intelligent Manufacturing* [M]. Beijing: Metallurgic 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
- 5 L. H. J. F. Beckmann, D. Ehrlichmann. Optical systems for high-power laser applications: principles and design aspects [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, **27**(12):1407~1425
- 6 M. R. Taghizadeh, P. Blair, K. Ballüder *et al.*. Design and fabrication of diffractive elements for laser material processing applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**(4-6):289~307
- 7 Gao Chunlin, Yu Gang. Design of binary phase gratings with specific intensity distribution of output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):365~368  
高春林,虞 钢. 具有特殊衍射强度分布的二元位相光栅设计 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):365~368
- 8 Wu Wei, Liang Naigang, Gan Cuihua *et al.*. Influence of spatial intensity distribution on pulsed laser surface hardening [J]. *Heat Treatment of Metal*, 2005, **30**(10):30~35  
吴 伟,梁乃刚,甘翠华等. 强度空间分布对脉冲激光表面强化的影响 [J]. *金属热处理*, 2005, **30**(10):30~35
- 9 Tan Zhen, Guo Guangwen. *Thermophysical Properties of Engineering Alloys* [M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1994  
谭 真,郭广文. *工程合金热物性* [M]. 北京:冶金工业出版社, 1994
- 10 Zhao Zhiguo, Zhang Liwen, Zhang Zhaobiao *et al.*. Calculation of temperature field of MoCu nodular cast iron in laser quenching process [J]. *J. Dalian University of Technology*, 1995, **35**(2):164~169  
赵志国,张立文,张兆彪等. MoCu 球铁激光淬火过程温度场的数值计算 [J]. *大连理工大学学报*, 1995, **35**(2):164~169
- 11 Cui Chunyang, Wu Wei, Yu Gang *et al.*. On laser absorptivity of ductile iron [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):977~980  
崔春阳,吴 伟,虞 钢等. 球墨铸铁材料对激光的吸收率 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):977~980