

文章编号: 0258-7025(2008)11-1841-06

# 用于激光加工中的矩形孔径 Dammann 光栅 光束变换技术

虞 钢 聂树真 郑彩云 何秀丽

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要** 针对大功率激光加工对光束空间强度分布的实际要求, 提出了一种用二元光学元件对光束进行变换的方法, 即利用均匀采样的矩形孔径 Dammann 光栅对激光高斯光束进行光束变换, 可满足任意点阵分布的输出要求。以线状、均匀、环状和非均匀分布的光强输出为例, 介绍了矩形孔径 Dammann 光栅光束变换技术的设计原理及实现方法, 结果表明输出光强分布具有较高的衍射效率和均匀性。将均匀和非均匀分布的输出光束应用在激光加工技术的表面强化上, 结果表明试样表面的硬度和耐磨性等力学性能均有提高并且强化层具有较好的均匀性。

**关键词** 二元光学; 矩形孔径 Dammann 光栅; 激光加工; 光束变换

**中图分类号** TN 249; O 438

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20083511.1841

## Beam Transformation Technology of Pixellated Dammann Grating in Laser Processing

Yu Gang Nie Shuzhen Zheng Caiyun He Xiuli

(*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

**Abstract** A kind of binary optical elements is introduced to implement the transformation of laser beam for high power laser processing. The even sampling Pixellated Dammann grating is adopted to perform the Gaussian beam transformation in order to obtain the given output spots. The principle and implementation of the beam transformation technology of pixellated Dammann grating is described with examples of the linear, even, annulus and uneven array. Results show that the output spots have high diffractive efficiency and uniformity. The application of the even and uneven array spot in the laser surface modification is investigated, showing the improvement of the hardness and the wear resistance of the sample surface, and the uniformity of the modified surface.

**Key words** binary optics; pixellated Dammann grating; laser processing; beam transformation

### 1 引 言

空间坐标调制型二值相位光栅是由 Dammann 等于 1971 年提出的, 利用特殊孔径函数的衍射光栅产生一维或二维的等光强阵列光束, 目的是在光刻时能同时获得一个物体的多重成像以提高生产效率。这种光栅又被称为“Dammann 光栅”, 是一种傅里叶变换型的分束器, 同时具有光斑阵列光强均匀性不受入射光波分布影响以及可产生任意排列点阵的优点。Dammann 光栅设计和加工都较方便, 因此它的适用面广, 通用性强, 被用于光互连、并行读取

信息或作为逻辑阵列器件的光源等<sup>[1]</sup>。随着对分束比、衍射效率及光斑光强均匀性的不断提高以及制作工艺水平的改善, 也相继提出了各种变异型相位光栅及各种优化方法<sup>[2]</sup>。

目前, 许多大功率激光加工经常需要对激光束的波面、光强分布、光斑形状与大小进行变换来满足应用要求<sup>[3,4]</sup>。由于二元光学元件能灵活、高效地对光束波前进行整形和变换, 能够根据不同的应用要求, 将高斯光束变换为一些特定的光强分布<sup>[5,6]</sup>, 因此在激光加工中应用二元光学元件对激光束进行

收稿日期: 2008-09-23; 收到修改稿日期: 2008-10-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX1-11)资助课题。

作者简介: 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制造工艺力学等方面的研究。

E-mail: gyu@imech.ac.cn

变换,具有比传统光学元件优越的特点。Dammann 光栅由于具有设计简单、无需套刻、制作工艺成熟等优点,在应用中仍然占据重要地位。在传统设计中,为了简化,往往先设计其一维结构<sup>[1]</sup>,然后在正交方向展开而得到二维 Dammann 光栅。在二维设计上存在局限性,不能实现环状点阵等特殊形状的输出光强分布,所以不能满足实际激光加工对激光光斑的多样性需求。而均匀采样型矩形孔径 Dammann 光栅具有更高的设计自由度和更高的衍射效率,并且能实现输出光强分布图样的多样化,所以在激光加工中采用矩形孔径 Dammann 光栅进行光束变换具有较高的应用前景<sup>[7]</sup>。本文利用均匀采样矩形孔径 Dammann 光栅,对高斯分布的激光光束进行光束变换,实现了不同的光强分布图样,主要介绍线状、均匀、环状和非均匀分布的输出光束。

## 2 矩形孔径 Dammann 光栅光束变换的设计原理

矩形孔径 Dammann 光栅光束变换技术总的设计思路是,根据已知入射光束分布和出射光束分布,

来反求矩形孔径 Dammann 光栅的相位分布。实验装置可简化为图 1 所示。

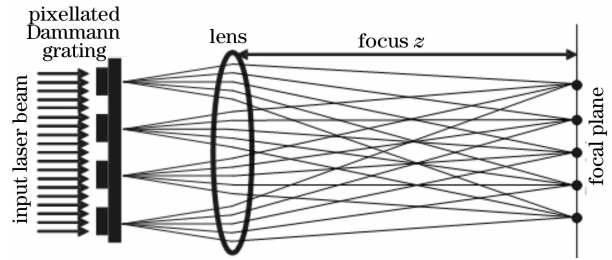


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental arrangement for laser beam transformation

在程序设计中,首先定义一个初始相位分布,根据远场弗朗和费衍射原理,可以推导出输出的光强分布<sup>[8]</sup>。其中,在均匀采样矩形孔径光栅一个周期的相位分布中,使一个周期形成网格型孔径单元,每个矩形孔径单元在设计中可取为 0(白色单元)或者 1(黑色单元),其相位分别取  $\phi_1$  和  $\phi_2$ 。设共有  $L$  个相位延迟为  $\phi_2$  的单元,且第  $L$  个单元距离原点最近的顶点坐标为  $(x_l, x_y)$ 。最后推导出的输出光强分布公式为:

$$\begin{aligned}
 I_{0,0} &= I(0,0) = \left(\frac{A}{\lambda z}\right)^2 \left| [\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)]L + \exp(j\phi_1) \right|^2, \\
 I_{+m,+n} &= I_{-m,-n} = \left(\frac{A}{\lambda z}\right)^2 \left| \exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1) \right|^2 \text{sinc}^2\left(\frac{m}{d}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{n}{d}\right) \times \\
 &\quad \left| \sum_{l=1}^L \exp\left\{-j2\pi\left[\frac{m}{d}\left(x_l + \frac{1}{2}\right) + \frac{n}{d}\left(y_l + \frac{1}{2}\right)\right]\right\} \right|^2, \\
 I_{-m,+n} &= I_{+m,-n} = \left(\frac{A}{\lambda z}\right)^2 \left| \exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1) \right|^2 \text{sinc}^2\left(\frac{m}{d}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{n}{d}\right) \times \\
 &\quad \left| \sum_{l=1}^L \exp\left\{-j2\pi\left[\frac{m}{d}\left(x_l + \frac{1}{2}\right) - \frac{n}{d}\left(y_l + \frac{1}{2}\right)\right]\right\} \right|^2,
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $z$  为透镜焦距,  $d$  为光栅的周期宽,  $m, n$  取  $\pm 1, \pm 2 \dots$ 。在均匀采样型矩形孔径编码方式中,设计令  $\phi_1 = 0, \phi_2 = \pi$ 。

程序设计中要得到所要求的输出结果,需要寻找光栅的最佳结构,即需要对光栅进行调制,也就是对光栅结构进行优化设计。光栅结构的优化设计实质上是寻找一组相位分布,使其满足所要求的输出光束分布,且总衍射效率尽量高。特定义了光束评价函数<sup>[7]</sup>

$$E^2 = \alpha \left[ (I_{0,0} - I_{\Sigma} \hat{I}_{0,0})^2 + 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{m,n} - I_{\Sigma} \hat{I}_{m,n})^2 \right] + (1 - \alpha)(1 - I_{\Sigma})^2, \quad (2)$$

式中  $\hat{I}_{m,n}$  为各级强度分布的理论目标值,  $I_{\Sigma}$  为实际输出的各级能量之和,  $M, N$  为输出衍射级次。  $\alpha$  为在优化过程中所取假设的自由补偿系数,  $\alpha$  值在  $[0, 1]$  范围内变换。评价函数的第一项衡量实际输出值  $I_{m,n}$  与目标值的差异,第二项则是衡量衍射效率。在此衍射效率和均匀度偏差分别表示为

$$\eta = \frac{I_{\Sigma}}{I_0}, \quad \text{uni} = \left[ (I_{0,0} - \bar{I}) + 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{m,n} - \bar{I}) \right] / I_0, \quad (3)$$

式中  $I_0$  为激光束的输入总强度,  $\bar{I}$  为所要求输出光束强度的平均值。通过每次变换相位分布, 来判断评价函数的变化, 如果新的评价函数更小, 则接受新的相位分布, 反之, 则不接受。直到评价函数随迭代次数达到收敛时, 既得到所需的相位分布。在评价函数中  $\alpha$  值选取不同, 评价函数表达式中两项所占权重大小就不同, 设计时根据对光束均匀性及衍射效率所要求的大小来选取一定的  $\alpha$  值。在实际设计元件时, 不同的权重值的分配对衍射效率有较大影响, 如果参数选择不当, 设计结果很难收敛到目标值<sup>[9]</sup>。

一般认为想要得到高的均匀性,  $\alpha$  值越大越好, 最大可以取到 1, 但此时衍射效率较低; 反之想要得到高的衍射效率,  $\alpha$  值越小越好, 但是, 在实际设计时, 情况却不都是如此。例如在设计线状五个点阵分布时, 为了得到均匀性较高的输出光强分布, 第一次取值  $\alpha$  为 1, 得到的均匀度偏差为 1.31%, 衍射效率为 40.49%; 第二次取  $\alpha$  值为 0.98 时, 得到的均匀度偏差为 0.81%, 衍射效率为 81.67%。在这个例子中可以看出, 并不是  $\alpha$  值越大, 均匀性就越高, 所以在实际设计过程中, 要得到均匀性高的输出光强分布,  $\alpha$  值的选取是一个非常关键的问题, 如何才能适当地选择  $\alpha$  的取值问题, 还有待进一步研究。

对光栅进行优化设计时, 选用模拟退火算法进行优化。模拟退火算法是 1982 年由 Kirkpatrick

等<sup>[10]</sup>提出的, 它是一种类似于寻找复杂物理系统的低能态优化算法, 特点是能够避免陷入能量较高的局部极值, 减慢降温速度使系统有可能跳出局部极值点。

### 3 利用矩形孔径 Dammann 光栅进行光束变换的设计

以输出为线状、均匀、环状和非均匀分布为例, 来介绍利用矩形孔径 Dammann 光栅的光束变换技术。

在激光表面热处理、激光金属表面合金化等激光加工中, 过去光束经过聚焦后再进行扫描, 这样每扫描一次的光束宽度有限, 工作效率不高, 而且由于两次扫描线有搭接, 而搭接部分的硬度低于不搭接部分。此外由于光束中央部分的能量高于四周, 影响了加工质量<sup>[11]</sup>。而把激光器输出的圆光斑变换为均匀光强分布的线光斑进行扫描, 就可以大大提高工作效率并取得较好的结果。输出线状五个点阵分布的矩形孔径 Dammann 光栅相位分布图和输出的光强分布图分别如图 2(a) 和 (b) 所示。其中所取的每个周期的设计单元数为 16,  $\alpha$  取 0.98, 衍射效率为 81.67%, 均匀度偏差为 0.81%, 可见具有较高的衍射效率和均匀性。

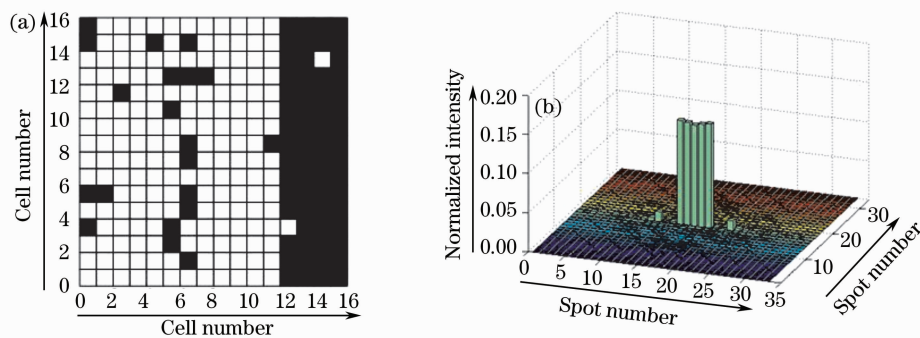


图 2 线状五个点阵分布。(a) 相位图; (b) 输出光强分布图

Fig. 2 Linear 5×1 array spot. (a) phase distribution; (b) output intensity profile

同样取每个周期的设计单元数为 16, 所设计的输出 5×5 点阵的矩形孔径 Dammann 光栅的相位分布和输出的光强分布图分别如图 3(a) 和 (b) 所示。为了得到较好的均匀性,  $\alpha$  值取 1, 得到的衍射效率为 56.4%, 均匀度偏差为 6.34%。

典型的 Dammann 光栅很难设计环状点阵分布, 而应用均匀采样矩形孔径 Dammann 光栅能设计环状点阵分布, 由于其图样比较复杂, 为了得到更为精确的结果, 特取一个周期设计单元为 32,  $\alpha$  值取

为 0.9。其相位分布和输出的光强分布图如图 4(a) 和 (b) 所示, 衍射效率为 78%, 均匀度偏差不超过 5%<sup>[8]</sup>。

同样取每个周期的设计单元数为 16,  $\alpha$  值取 1, 设计了 5×5 非均匀点阵分布, 其中三个光强衍射级上的能量比为  $I_{00} : I_{11} : I_{22} = 3 : 2 : 1$ , 其相位分布和输出的光强分布图如图 5(a) 和 (b) 所示。衍射效率为 75.1%, 一级衍射均匀度偏差为 7.23%, 二级衍射均匀度偏差为 1.4%。

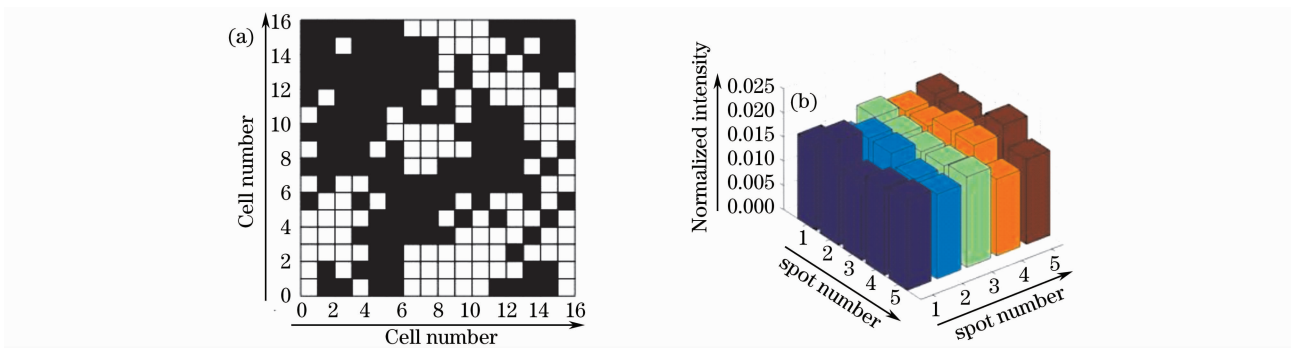


图 3 5×5 点阵分布。(a) 相位分布；(b) 输出光强分布图

Fig. 2 5×5 array spot. (a) phase distribution; (b) output intensity profile

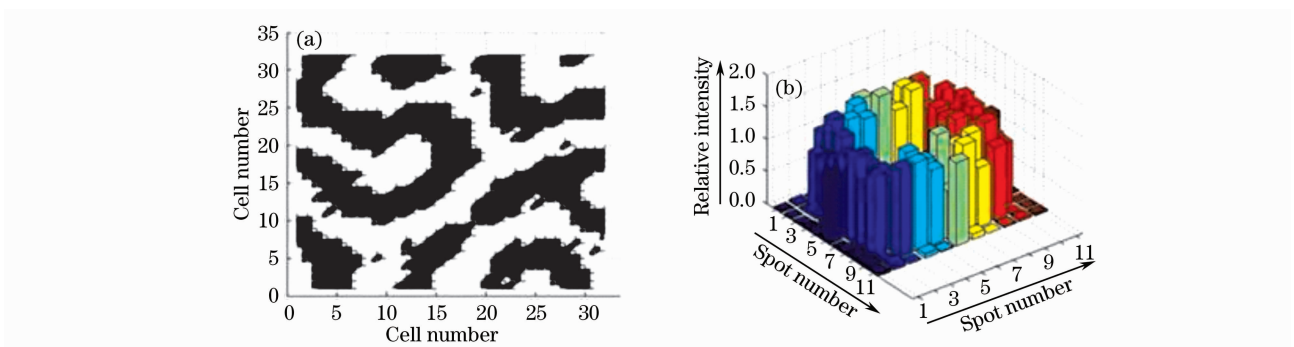


图 4 环状点阵分布。(a) 相位分布，(b) 输出光强分布图

Fig. 4 Annulus array spot. (a) phase distribution, (b) output intensity profile

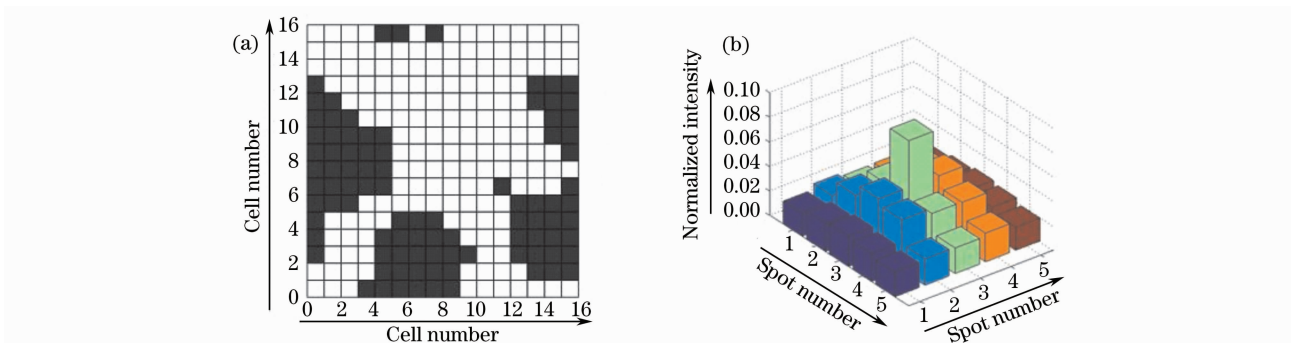


图 5 5×5 非均匀点阵分布。(a) 相位分布；(b) 输出光强分布图

Fig. 5 5×5 uneven array spot. (a) phase distribution; (b) output intensity profile

由设计结果可以看出,应用均匀采样的矩形孔径 Dammann 光栅进行光束变换,尽管输出点阵均匀度略低于传统的 Dammann 光栅,但从输出光强分布图上可以看出输出图样符合设计要求,能基本输出任意点阵分布,并且得到的衍射效率和均匀度也能够满足在大功率激光加工中对高强度光束变换的要求。

#### 4 矩形孔径 Dammann 光栅光束变换技术在激光加工中的应用

在激光表面处理中,由于通常的高斯光束经聚焦后形成直径很小的圆光斑,不管是连续还是脉冲

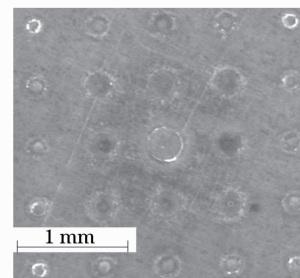


图 6 5×5 非均匀分布的金属表面强化形貌  
Fig. 6 Metal surface morphology modified by  
5×5 uneven array

形式扫描,处理大、中型材料表面都需要较长时间,并且为了完全处理材料表面,难免产生光斑重叠,引

起局部回火软化,影响处理效果。而利用矩形孔径 Dammann 光栅实现的变换光束作用于金属表面,能够起到较好的处理效果<sup>[12]</sup>。将  $5 \times 5$  非均匀分布的输出光束作用在金属表面上,其中三个光强衍射级上的能量比为  $I_{00} : I_{11} : I_{22} = 3 : 2 : 1$ ,得到的表面形貌

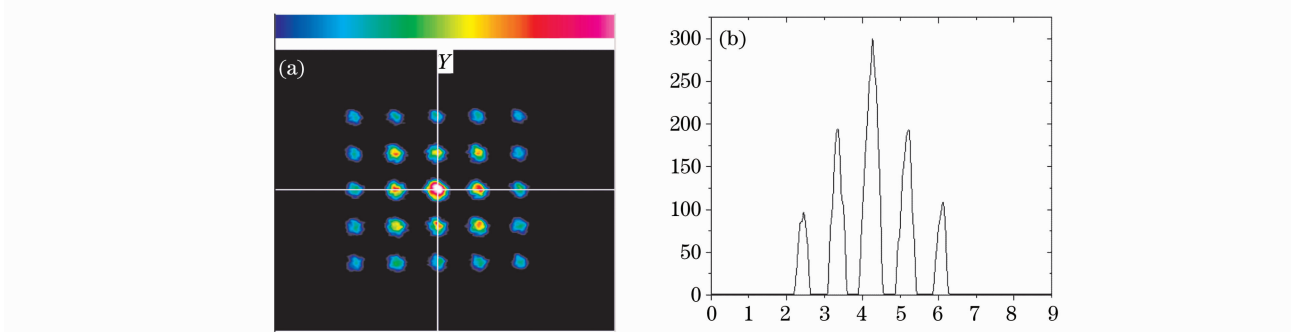


图 7  $5 \times 5$  非均匀分布。(a)二维强度分布图;(b)二维强度曲线图

Fig. 7  $5 \times 5$  uneven array. (a) two-dimensional intensity profile; (b) two-dimensional intensity graph

将变换后光束对金属表面进行强化时,所用的激光参数包括工艺参数和变换参数,工艺参数是指激光功率、总能量、脉宽、气体因素等,变换参数是指光束质量不变化情况下的光斑间距、相对强度等。在设计过程中,根据实际要求设定变换因素(光斑间距和相对强度),以达到所需的光束空间强度分布。

如图 6 所示。用 LS-2000 激光光束分析仪测得的二维光强分布图和曲线图如图 7 所示。可以看出实验结果中三个光强衍射级上的能量比为  $I_{00} : I_{11} : I_{22} = 3 : 2 : 1$ ,满足当初的设计要求。

在相同的激光工艺参数下,将  $5 \times 5$  非均匀分布的输出光束和  $5 \times 5$  均匀分布的输出光束分别对金属表面进行强化,强化后的剖面图如图 8(a)和(b)所示。可以看出强化层都呈现出较好的均匀性,但  $5 \times 5$  非均匀点阵分布的输出光束对金属表面进行强化的强化层深更深,均匀性也更高。

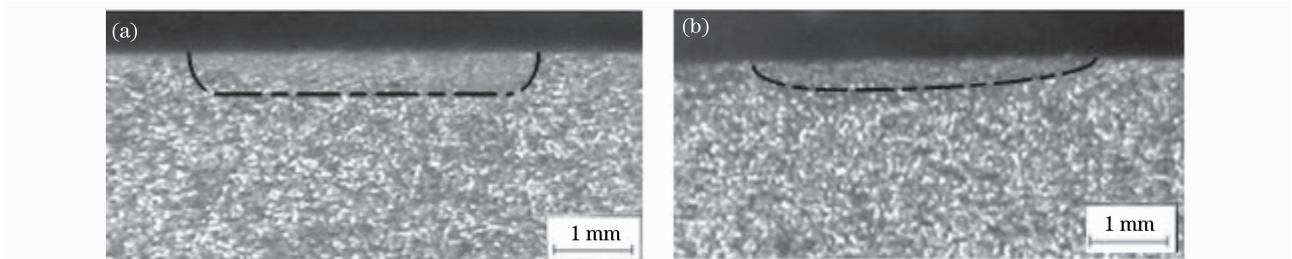


图 8 金属表面强化的剖面图。(a)  $5 \times 5$  非均匀分布,(b)  $5 \times 5$  均匀分布

Fig. 8 Cross-section view of the metal surface modification. (a)  $5 \times 5$  uneven array, (b)  $5 \times 5$  even array

进一步对实验结果进行力学性能分析后得出,金属的硬度、金相组织、耐磨性等许多性质发生了变化<sup>[12]</sup>,不仅能够提高加工效率,还在材料表面产生了马氏体的区域性分布和组织的交错出现,使材料表面形成非均匀、多尺度强化结构,该分布理论上具有良好的强度和韧性组合,可有效地提高金属材料表面的硬度和耐磨性,从而提高承受冲击载荷零件表面的综合力学性能,有效地延长模具的使用寿命。

## 5 结 论

采用扩展的均匀采样矩形孔径 Dammann 光栅对激光束进行光束变换,能够实现输出任意点阵分布的需求。设计中采用弗朗和费原理计算输出光强

分布,优化过程中选用模拟退火算法,并定义评价函数对优化结果进行评定,实际的设计结果表明输出光强分布都能满足实验设计的目的。均匀采样型矩形孔径 Dammann 光栅由于具有二台阶结构、均匀采样和将设计简化为矩形等特点,在简化设计、计算和制作的同时也限制了设计结果,造成输出能量在设计的目标范围内均匀分布及衍射效率无法进一步提高等问题。但在大功率激光加工中,高强度光束变换技术所需的输出光斑对均匀性的要求并不是很高,所以采用矩形孔径 Dammann 光栅进行光束变换的技术能够满足一般大功率激光加工的要求,具有较高的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 Vasara A., Taphizadeh M. R., Turunen J. *et al.*. Binary surface-relief gratings for array illumination in digital optics[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(17): 3320~3336
- 3 N. Sanner, N. Huot, E. Audouard *et al.*. Direct ultrafast laser micro-structuring of materials using programmable beam shaping [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, **45**(6): 737~741
- 4 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
- 5 Heinemann S. Computer generated beam shaping and focusing optical elements for laser material processing [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **119**(5~6): 613~622
- 6 F. B. McCormick. Generation of large spot arrays from a single laser beam by multiple imaging with binary phase gratings[J]. *Optical Engineering*, 1989, **28**(4): 299~304
- 7 Gu Yu, Zheng Caiyun, Yu Gang *et al.*. Design for the pixellated grating in 2D expanding of the Dammann grating[J]. *Laser J.*, 2005, **26**(3): 23~24  
谷 雨, 郑彩云, 虞 钢 等. 对达曼光栅进行二维扩展的矩形孔径光栅设计[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(3): 23~24
- 8 Shaoxia Li, Gang Yu, Caiyun Zheng *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
- 9 Gao Chunlin, Yu Gang. Design of binary gratings with specific intensity distribution of output [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(4): 365~367  
高春林, 虞 钢. 具有特殊衍射强度分布的二元相位光栅设计[J]. *中国激光*, 2001, **28**(4): 365~368
- 10 S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~680
- 11 Y. Chen, C. H. Gan, L. X. Wang *et al.*. Kaplan. Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd:YAG laser beam with two-dimensional array distribution[J]. *Applied Surface Science*, 2005, **245**: 316~321
- 12 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