

文章编号: 1001-3806(2008)03-0308-04

选区激光熔化中激光束的传输变换及聚焦特性

师文庆^{1,2}, 杨永强^{1*}

(1. 华南理工大学 机械工程学院, 广州 510640; 2. 广东海洋大学 理学院, 湛江 524088)

摘要: 为了获得光束质量较好、光斑尺寸较小、功率密度较高的、适合于在选区激光熔化快速成型技术中应用的激光束, 对应用于选区激光熔化快速成型技术中的高斯光束进行传输与变换。对其传输变换及聚焦特性进行了理论分析与实验验证, 实验结果与理论分析的结果相符。取得了功率密度达 $10^6 \text{W}/\text{cm}^2$ 以上的、光斑尺寸较小的、满足于在选区激光熔化技术中应用的光斑。将其应用于镍基合金 (Ni25) 和铜磷合金粉末的三维选区激光熔化快速成型。结果表明, 这种传输变换及聚焦特性是可行有效的, 得到了满足要求的光斑尺寸和功率密度。

关键词: 激光技术; 选区激光熔化; 传输与变换; 高斯光束; 聚焦特性

中图分类号: TN012 TG495 文献标识码: A

Laser beam's focused properties and its transmission and transformation in selective laser melting

SHI Wen-qing^{1,2}, YANG Yong-qiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. College of Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract In order to obtain the laser beam with better beam quality, smaller spot diameter and higher power density in rapid prototyping for selective laser melting (SLM), Gaussian beam used in SLM was transmitted and transformed. The theoretic and experimental transmission, transformation and focused characteristic properties were analyzed. The experimental results are consistent with the theoretic ones. The smaller spot with power density above $10^6 \text{W}/\text{cm}^2$ which is applicable in SLM, was obtained. When used in 3-D rapid prototyping for SLM of Ni-based alloy and Cu-P alloy powder, it also indicated feasible and effectual and met the demands of spot diameter and power density.

Key words laser technique; selective laser melting; transmission and transformation; Gaussian beam; focused properties

引 言

选区激光熔化 (selective laser melting, SLM) 技术是最近 10 年来发展起来的一种新的快速成型技术。它利用高功率密度的激光器将光斑聚焦到几十微米的范围内, 把金属或合金的粉末逐层熔化、逐层堆积成一个具有冶金结合的、相对密度接近 100% 的组织致密的实体。从目前国内外的研究现状看, 这项技术目前主要存在着精度不高、质量难保证、部分金属或合金的“球化”现象比较突出以及成型的设备费用昂贵等问题^[1-2]。其中的设备费用问题是一个很实际的问题, 高费用限制了 SLM 技术的发展。一个具有高光束质量和高功率密度的激光器的价格是较贵的, 所以, 如何对激光束进行传输变换而得到功率密度较高且质量较好

的激光束, 是一个值得研究的问题。

在 SLM 技术中, 要求激光束的功率密度高、光束质量好, 这样才有利于对高熔点的金属或合金进行熔化并成型。激光束的光斑越小, 其功率密度越大, 所以对激光束进行光路变换以得到较小的光斑。一般地, 激光束要经过一定距离的传输才能进行 SLM 加工, 所以传输问题也要解决。鉴此, 下面对 SLM 技术中常用的高斯光束在传输与变换中的一些问题进行研究。

1 高斯光束在均匀介质中的传播规律及其描述参数

在标量场近似下, 激光电磁波稳态传播时其电矢量所满足的亥姆霍兹方程在缓变振幅近似下的一个特解是高斯光束, 在近轴条件下, 可得到高斯光束在均匀介质中的传播规律为:

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp \left\{ - \left[i k z + \frac{\pi r^2}{\lambda \rho(z)} - \eta(z) \right] \right\} \times \exp \left[- \frac{r^2}{w^2(z)} \right] \quad (1)$$

作者简介: 师文庆 (1971-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事物理电子及激光技术的教学与研究。

* 通讯联系人。E-mail: meiyqiang@scut.edu.cn

收稿日期: 2007-01-29; 收到修改稿日期: 2007-08-23

式中, E_0 为一定值, w_0 是其束腰半径, $Z_0 = \pi w_0^2 / \lambda$ 叫做瑞利长度。 $w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{Z_0} \right)^2 \right]^{1/2}$ 表示光斑半径, 在以 $w(z)$ 围绕 z 轴旋转后的包围 z 轴的空间中集中了总能量的 86.5%; $\rho(z) = z \left[1 + \left(\frac{Z_0}{z} \right)^2 \right]$ 表示其等相位面曲率半径; $\eta(z) = \tan^{-1} \frac{z}{Z_0}$ 表示附加相移。上面 (1) 式反映了高斯光束的场分布及其传播规律^[3]。

远场发散角 θ_0 反映了激光束的平行程度, 对高斯光束, $\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0}$, 得 $w_0 \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi}$, 即其束腰半径与远场发散角的乘积是一个传输不变量。

光束质量因子 M^2 定义为: $M^2 = \frac{w_{\text{actual}} \theta_{\text{actual}}}{w_{\text{ideal}} \theta_{\text{ideal}}}$ 是表征激光束光束质量的重要参数, 光束通过近轴 ABCD 光学系统时, M^2 因子是一个传输不变量^[4]。

2 对高斯光束的几种变换

2.1 高斯光束经平面镜反射

高斯光束经平面镜反射后的变换矩阵为: $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 即经平面镜反射后其 M^2 因子、等相位面曲率半径和远场发散角不发生变化。经镜面反射后仍延续其高斯特性。故引入振镜系统控制光路不会改变其特性, 但能大大提高其自动控制的程度。

2.2 高斯光束经过一个焦距为 f 的薄透镜

高斯光束经过一个焦距为 f 的薄透镜变换后的束腰位置^[5]:

$$z' = f - \frac{(z+f)f^2}{(z+f)^2 + Z_0^2} \quad (2)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{l_2 l_3}{f_1 f_2} - \frac{l_3}{f_2} - \frac{l_2}{f_1} - \frac{l_1}{f_1} & l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_1 l_2 l_3}{f_1 f_2} - \frac{l_2 l_3}{f_2} - \frac{l_1 l_3}{f_2} - \frac{l_1 l_2}{f_1} - \frac{l_1 l_3}{f_1} \\ \frac{l_2}{f_1 f_2} - \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} & 1 + \frac{l_1 l_2}{f_1 f_2} - \frac{l_1}{f_1} - \frac{l_2}{f_2} - \frac{l_3}{f_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (5)$$

当高斯光束通过傍轴光学系统后, 取 $z_0 = 0$ 为坐标原点时, $\rho(z_0) = \infty$ 。对望远系统, $l_2 = f_1 + f_2$, 代入 (5)

式, 并令 $l_1 - f_1 = u$, $l_3 - f_2 = v$, $m = \frac{f_1}{f_2}$, 得: $T =$

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{m} & -\left(\frac{u}{m} + mv\right) \\ 0 & -m \end{bmatrix}, \text{再用 } Z_0 = \frac{\pi w_0^2(z)}{\lambda}, \text{由文献 [6] 得:}$$

$$\rho(z) = \frac{Z_0^2 + (u + m^2 v)^2}{m^2 (u + m^2 v)} \quad (6)$$

新的束腰半径 w_0' :

$$w_0' = w_0 \left[\left(1 + \frac{z}{f} \right)^2 + \left(\frac{Z_0}{f} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

式中, z 和 z' 是变换前后束腰到透镜的距离, 正数表示束腰在透镜的右方, 负数表示在透镜的左方; λ 是激光波长; f 是透镜焦距, 正数表示正透镜, 负数表示负透镜。把 (3) 式对 z 求导, 并令 $\frac{dw_0'}{dz} = 0$, 得 $z = -f$, 将 $z = -f$ 代入 (2) 式, 可得 $z' = f$ 。将 $z = -f$ 代入 (3) 式, 可得:

$$w_0' = w_{0 \text{ max}}' = \frac{f \lambda}{\pi w_0} \quad (4)$$

说明, 当透镜的前焦距在高斯光束的束腰处时, 则经过一个透镜变换后能得到最大的束腰半径, 最大的束腰半径意味着其远场发散角最小; 且由 (4) 式可知, 透镜的焦距越大, 经过一个透镜变换后的束腰半径越大, 对应的远场发散角越小, 光束的平行性越好, 这种光束有利于较远距离的传输。

在 (2) 式中, 若 $z \gg f$, $z \gg Z_0$, 则有 $z' \approx f$ 。说明当一束高斯光束经过较长的距离传输后再通过一个透镜时, 其束腰定位于像方焦平面附近, 这有利于后续变换。要想得到较小的光斑, 由 (3) 式知应该选用焦距较小的透镜, 且将透镜放置在离束腰较远的位置上。

2.3 高斯光束经过两个薄透镜的变换

如图 1 所示的两镜系统, 其 ABCD 变换矩阵为:

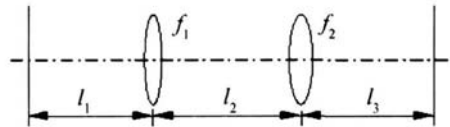


Fig 1 Two lens system

$$T = \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{l_2 l_3}{f_1 f_2} - \frac{l_3}{f_2} - \frac{l_2}{f_1} - \frac{l_1}{f_1} & l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_1 l_2 l_3}{f_1 f_2} - \frac{l_2 l_3}{f_2} - \frac{l_1 l_3}{f_2} - \frac{l_1 l_2}{f_1} - \frac{l_1 l_3}{f_1} \\ \frac{l_2}{f_1 f_2} - \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} & 1 + \frac{l_1 l_2}{f_1 f_2} - \frac{l_1}{f_1} - \frac{l_2}{f_2} - \frac{l_3}{f_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$w(z) = \frac{w(z_0)}{m Z_0} \cdot [Z_0^2 + (u + m^2 v)^2]^{1/2} \quad (7)$$

(5) 式中, 若令 $u = 0$, $v = 0$ 则 (5) 式变为 $T =$

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{m} & 0 \\ 0 & -m \end{bmatrix}, \text{由 (6) 式得 } \rho(z) = \infty, v = 0 \text{ 处就是其束腰, 即束腰在第 2 个透镜的后焦平面上。由 (7) 式得,}$$

$$w(z) = \frac{w(z_0)}{m}, \text{即变换后的束腰半径是变换前束腰半}$$

径的 $1/m$ 倍。

在 SIM 技术中, 由于所用激光束的能量密度很高, 在传输过程中可能对光路中的振镜系统等光学元件造成损坏, 且激光束要经过一定距离的传输后才能到达被加工物体的表面, 所以一般要对激光束进行扩束, 以达到降低能量密度、提高光束平行性的目的。实际上, 焦平面上的激光功率密度 G 与激光束的远场发散角 θ_0 有以下关系^[7]:

$$G = \frac{4P}{\pi(f\theta_0)^2} \quad (8)$$

即 θ_0 越小, G 越大, 聚焦光斑必然越小, 说明扩束还有利于在最后的加工面上形成较小光斑。

一个透镜变换后的远场发散角为 $\theta' = \frac{\lambda}{\pi w_0}$, 将 (3) 式代入, 知 θ' 不可能为 0 即单个透镜无法使高斯光束变换为平面波。但当 $z = -f$ 时, $\theta' = \frac{w_0}{f}$, 说明要想减小 θ' , 可减小 w_0 和增大 f 。因此, 可将望远镜系统倒置使用进行扩束, 如图 2 所示。第 1 个用短焦距的透

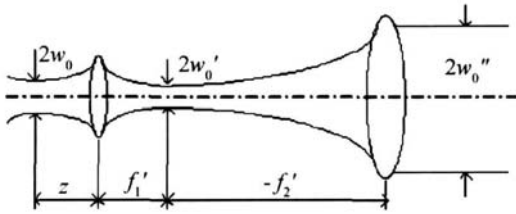


Fig 2 Kepler's telescope

镜压缩高斯光束的束腰半径, 第 2 个用长焦距的透镜变换以减小其发散角。

由于以上的开普勒望远系统存在光束会聚作用, 会使激光束局部的能量密度很高, 且相对尺寸较大。所以一般用于扩束作用的都是伽利略望远系统, 如图 3 所示^[8]。

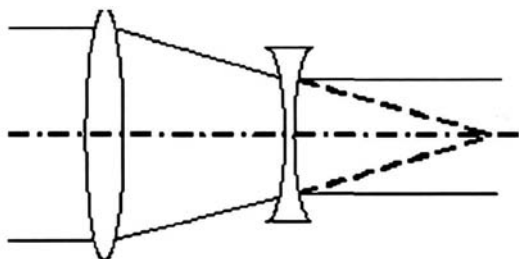


Fig 3 Galilei's telescope

3 SLM 中激光束的传输变换及聚焦特性

在 SLM 技术中, 要求激光束具有很好的光束质量和很小的光斑尺寸, 这样就可以用额定功率不太高的激光器获得较高的功率密度进行 SIM 加工。在单透镜对高斯光束进行聚焦时, 考虑衍射效应和像差的共同影响, 聚焦后的光斑直径应为以下二者之和^[9]:

$$d = d_r + d_s = \frac{4M^2 f}{\pi a} + \frac{ba^3}{f^2} \quad (9)$$

式中, d_r , d_s 分别为衍射引起的艾里斑直径和球差引起的弥散圆直径。 a 为透镜上入射光束的直径, b 是与透镜折射率有关的系数。常用的聚焦方式有两种, 如图 4 所示。

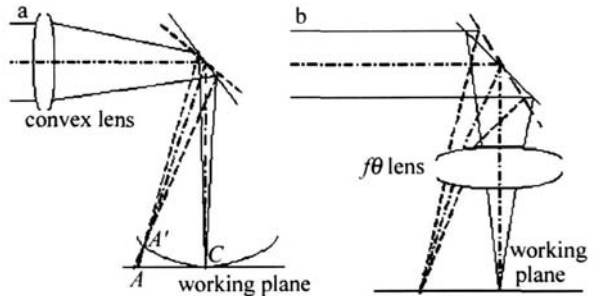


Fig 4 a- focus before scanning b- focus after scanning

对如图 4a 所示的前聚焦方式, 由 (9) 式可得 $b = \frac{d - d_r f^2}{a^3}$, 其中 d 由实际应用 SIM 中的熔池尺寸得出^[10], d_r 由 $d_r = \frac{4M^2 f}{\pi a}$ 计算得出, 由此可以估算出对于某一 SIM 设备的 b 值, 进而反过来可由 (9) 式计算光斑直径。由于这种聚焦方式所用的透镜的焦距较大和球差的因素, 其光斑尺寸较大, 且在 A' 点聚焦后又在 A 点发散, 存在扫描质量不高的问题。对如图 4b 所示的后聚焦方式, 能在其焦平面上形成直线轨迹与工作平面重合, 因此, 这种聚焦方式能得到更高的扫描质量^[9]。这种聚焦透镜具有适中的视场和相对孔径要求, 称为 $f\theta$ 透镜。它既要校正孔径像差 (球差和彗差), 也要校正视场像差 (像散、场曲、畸变等)。校正后的 (9) 式变为:

$$d = d_r = \frac{4M^2 f}{\pi a} \quad (10)$$

计算出不同聚焦方式的光斑直径比较, 见表 1。

Table 1 The spot diameters of different focusing methods/ μm

	focus before scanning ($f = 550\text{mm}$)	focus after scanning ($f = 550\text{mm}$)	focus after scanning ($f = 264\text{mm}$)
$M^2 = 1$	81	31	15
$M^2 = 1.68$	102	52	25
$M^2 = 5$	205	155	74

beam diameter after expanded $a = 24\text{mm}$; $\lambda = 1.06\mu\text{m}$

从表 1 可知, 后聚焦方式能获得较小的光斑尺寸, 从后聚焦方式校正像差后的 (10) 式知, 要减小光斑尺寸, 应使 $a \uparrow, M^2 \downarrow, f \downarrow$ 。也说明 a 较大有利于光斑聚焦, 故用望远系统对其进行扩束以增大 a , 用 f 较小的短焦距透镜作为最后激光光斑的聚焦以及用 M^2 较小的激光束如基模高斯光束作为加工光束都有利于缩小最后的聚焦光斑。

画出在 SLM 技术中的实际光路如图 5 所示。

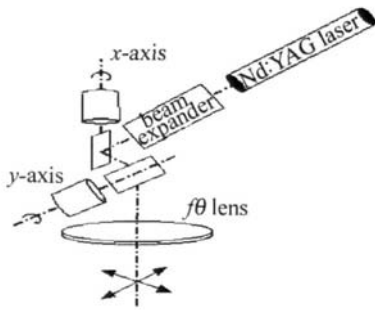


Fig 5 Optical system in SLM

选用波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的半导体抽运 Nd:YAG 固体激光器,能得到较小的光斑,当 M^2 在 $1\sim 1.68$ 范围内、扩束后光斑直径为 24mm 、透镜焦距为 550mm 时、计算得到的光斑直径为 $31\mu\text{m}\sim 52\mu\text{m}$,当激光器功率为 100W 时,在聚焦光斑处的功率密度达 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 以上,能达到对一些金属或合金进行 SLM 加工的功率密度要求。将其应用于镍基合金 (Ni25)、铜磷合金粉末进行三维选区激光熔化快速成型,得到冶金结合的、相对密度为 94% 以上的、符合实际要求的金属实体^[10-11]。

4 结 论

(1) 高斯光束由平面镜反射后是在改变了的方向上原光束特性的延续,在 SLM 快速成型技术中,引入振镜系统提高了光束的可控性;用望远镜系统对高斯光束进行扩束;短焦距 $f\theta$ 透镜作用于短波长的、扩束后的、接近于基模的高斯光束能得到较小的光斑。

(2) 用功率为 100W 、波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的、光束质

量因子 M^2 为 $1\sim 1.68$ 的半导体抽运 Nd:YAG 固体激光器,将扩束后直径为 24mm 的光斑用焦距为 550mm 的 $f\theta$ 透镜聚焦,能获得功率密度达 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 以上的较小光斑。这种光束适合于对镍基合金 (Ni25)、铜磷合金粉末等进行选区激光熔化快速成型。

参 考 文 献

- [1] LI P, XIONG W H. Principles and applications of selective laser sintering [J]. Materials Review, 2002, 16(6): 55-58 (in Chinese).
- [2] QI H B, YAN Y N, LI N F, et al. Metal powders of selective laser sintering [J]. Laser Technology, 2005, 29(4): 183-186 (in Chinese).
- [3] LIU Y X, YANG Y P, CHEN S F. Laser transmission and transform technology [M]. Chengdu Press of University of Electronic Science and Technology of China, 1997: 53-59 (in Chinese).
- [4] LÜ B D, JIX L, LIU S R, et al. Parametric characterization of laser beams and beam quality [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 14-17 (in Chinese).
- [5] ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN T R, et al. Principles of laser [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2000: 69-84 (in Chinese).
- [6] LI J C. Diffraction of laser and calculation on thermal acting [M]. Beijing Science Press, 2002: 196-199 (in Chinese).
- [7] ZHANG G S. Modern laser manufacturing technology [M]. Beijing Chemical Industry Press, 2006: 284-310 (in Chinese).
- [8] YU D X, TAN H Y. Engineering optics [M]. Beijing Mechanical Industry Press, 2002: 125-128 (in Chinese).
- [9] ZHU L Q, BAI P K, ZHU J M. Rapid prototyping and rapid manufacturing technology [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2003: 260-267 (in Chinese).
- [10] WU W H, YANG Y Q, HUANG Y L. Direct manufacturing of Cu-based alloy parts by selective laser melting [J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1): 37-40.
- [11] XU L M, YANG Y Q, WU W H. Scanning path generating algorithm for selective laser melting rapid prototyping system [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2006, 35(9): 46-48 (in Chinese).
- [12] ABBAS G, LIL, GHANZANFARU, et al. Effect of high power diode laser surface melting on wear resistance of magnesium alloys [J]. Wear, 2006, 260(1): 175-180.
- [13] ABBAS G, LIU Z, SKELDON P. Corrosion behaviour of laser melted magnesium alloys [J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1): 347-353.
- [14] MA JUMDARA J D, GALUN R, MORDIKE B L, et al. Effect of laser surface melting on corrosion and wear resistance of a commercial magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A361(1): 119-129.
- [15] GALUN R, WEISHEIT A, MORDIKE B L. Laser surface alloying of magnesium base alloys [J]. Journal of Laser Applications, 1996, 8(6): 299-305.
- [16] MURAYAMA K, SUZUKI A, TAKAGI T, et al. Surface modification of magnesium alloys by laser alloying using Si power [J]. Materials Science Forum, 2003, 419(2): 969-974.
- [17] MA JUMDAR J D, CHANDRA B R, GALUN R, et al. Laser composite surfacing of a magnesium alloy with silicon carbide [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(6): 771-778.
- [18] MA JUMDAR J D, CHANDRA B R, MORDIKE B L, et al. Laser surface engineering of a magnesium alloy with Al_2O_3 [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 179(2): 297-305.
- [19] YUE T M, WANG A H, MAN H C. Corrosion resistance enhancement of magnesium ZK60/SE composite by Nd:YAG laser cladding [J]. Scripta Materialia, 1999, 40(3): 303-311.
- [20] YUE T M, HU Q W, MEIZ, et al. Laser cladding of stainless steel on magnesium ZK60/SE composite [J]. Materials Letters, 2001, 47(3): 165-170.
- [21] YUE T M, SU Y P, YANG H O. Laser cladding of $\text{Zr}_{65}\text{Al}_{15}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{7.5}$ amorphous alloy on magnesium [J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 209-212.
- [22] WANG A H, XIA H B, WANG W Y, et al. YAG laser cladding of homogeneous coating onto magnesium alloy [J]. Materials Letters, 2006, 60(6): 850-853.
- [23] CHEN C J, WANG D S, GUO W Y, et al. Laser multi-layer cladding of magnesium base alloys [J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 76-79 (in Chinese).

(上接第 295 页)