

文章编号: 0258-7025(2010)03-0842-05

# 机器人激光再制造中粉末流浓度场的检测

陈修平 杨洗陈

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 研制了一套低功率、便携、便宜、高精度的粉末流场检测系统,能对激光再制造中同轴送粉条件下金属粉末流浓度场进行检测,能适应激光机器人修复的需要。该系统主要包括532 nm, 100 mW半导体激光器,片光透镜, CCD相机和检测分析软件。实验结果表明,该系统对金属粉末流浓度体积分布检测与理论计算结果有较好的一致性,能有效地指导同轴送粉嘴的设计和机器人在激光再制造中粉末流参数的测定。

**关键词** 激光技术;机器人;激光再制造;粉末流浓度场;CCD相机;Zemax软件

中图分类号 TN249;TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103703.0842

## Detection of Powder Stream Concentration Field in Robot Laser Remanufacturing

Chen Xiuping Yang Xichen

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** A low power, portable, cheap and high precision detection system is developed to measure the concentration field of powder stream, and it is suitable to requirement of laser robot repair. The system mainly consists of 532 nm, 100 mW semiconductor laser, sheet of lens, charge coupled device (CCD) camera and analysis software. It is shown that the consistency in the detection of volume of concentration distribution of metal powder stream and the theoretical calculation is very good. The system could be an effective guiding significance for the design of co-axial nozzle and the determination of powder stream parameter in robot laser repair.

**Key words** laser technique; robot; laser remanufacturing; concentration field of powder stream; CCD camera; Zemax software

## 1 引言

激光再制造技术已发展成为直接制造三维金属实体零件和高精度修复再制造重大设备中贵重零件的有效手段<sup>[1]</sup>。为了提高加工质量,激光同轴熔覆粉末流浓度场的检测受到了广泛的关注<sup>[2~9]</sup>。但是,以往的浓度场检测系统庞大,且价格昂贵,不适用于现场应用。为了满足重大装备现场修复的需要,近年来激光修复再制造机器人获得了快速的发展,它要求粉末流浓度场检测装置体积小,能与机器人耦合进行快速实时检测。本文设计开发了一种激光同轴熔覆粉末流浓度场的检测装置。选用532 nm,

100 mW小功率半导体激光器为光源,运用光学设计软件 Zemax 模拟优化,设计了较薄片光源系统,选用工业数字电荷耦合器件(CCD)相机检测粉末流。

## 2 光学系统设计

### 2.1 薄片光形成原理

选用的 ST-32-100 半导体抽运激光器发出的绿色激光有较好的准直度,发散角小于1.5 mrad,所以不需要再准直,光斑直径约2 mm,然后经过直角棱镜,其中棱镜水平放置,对垂直于纸面的光斑直径进

收稿日期:2009-06-16;收到修改稿日期:2009-06-24

基金项目:国家自然科学基金(60478004)和天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX020300)资助课题。

作者简介:陈修平(1984—),男,硕士研究生,主要从事粉末检测的研究。E-mail:chenxiuping963@163.com

导师简介:杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

行压缩,形成扁平椭圆光斑,注意该棱镜与半导体激光器发出的激光成一定的角度,直到经过棱镜出来的光垂直入射平躺的柱透镜,然后再聚焦,最后通过一个长焦距大孔径的胶合镜,形成平行的片光照亮粉末粒子流场。图 1 所示为片光源形成原理图。

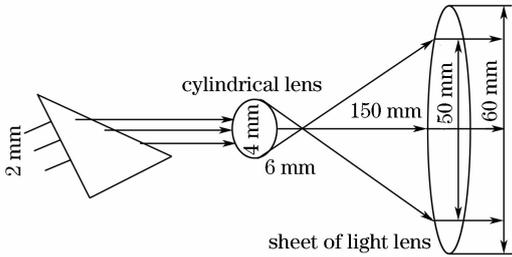


图 1 片光源形成原理

Fig. 1 Principle of sheet laser

在金属粉末流浓度场检测时,片光源光学的质量直接决定成像的质量,因此形成激光片光源时,片光源的厚薄直接决定浓度场计算的准确度,本文能得到的片光厚度约为 0.3 mm,能有效地减少测量误差。

## 2.2 镜片设计和光路设计原理

光束垂直入射棱镜时,如图 2 所示,有

$$\alpha = \varphi, \quad D_1 = a, \quad D_2 = b \cos \beta. \quad (1)$$

若达到压缩光斑直径的目的,就要有  $D_2/D_1$  成立,设其光斑压缩比为  $T$ ,则  $T = D_2/D_1$ ,又因为光束在棱镜中传输满足折射定律,得

$$n_1 \sin \beta = n_2 \sin \varphi. \quad (2)$$

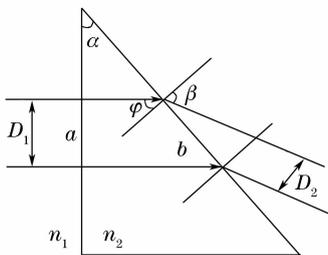


图 2 棱镜压缩光斑直径

Fig. 2 Spot diameter compression with a prism

当光束垂直入射棱镜,且满足(1),(2)式时,可以实现光斑压缩。选择棱镜(K9 玻璃制造)折射率  $n_2 = 1.5168$ ,空气折射率  $n_1 = 1$ ,进而考虑  $T$  随  $\alpha$  的变化情况,有

$$T = D_2/D_1 = \cos \delta / \cos \alpha = \frac{\sqrt{1 - n_2^2 \sin^2 \alpha / n_1^2}}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

根据具体情况选择  $\alpha$  的大小,以压缩光斑,激光的单色性比较好,所以不考虑色散。

棱镜顶角  $\alpha = 40.9^\circ$ ,代入(3)式得  $T = 0.15$ ,所

以形成椭圆光斑长轴直径为 2 mm,短轴直径为 0.3 mm。

光斑被压缩后,通过焦距为 6 mm 的柱面透镜形成厚度为 0.3 mm 的片光源,然后通过一个焦距为 150 mm,孔径为 60 mm 的透镜,最终形成高度为 50 mm,厚度为 0.3 mm 的片光源。可知,光通过大孔径单透镜时会有很大的球差、慧差、相差,常规的方法是将大孔径透镜设计为双高斯镜,但双高斯镜片较多,在本系统中,势必大量减少光强,导致成像不清晰,因此本文设计了胶合透镜(3 片式),利用 Zemax 软件反复进行优化,有效地解决了光强不足以及像差较大的问题。

胶合镜的极限分辨率为

$$N = D / (1.22 \lambda f), \quad (4)$$

当  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $f = 150 \text{ mm}$ ,  $D = 60 \text{ mm}$  时,  $N = 667 \text{ lp/mm}$ ,光学调制函数  $f_{\text{MTF}} \approx 0$ 。经过 Zemax 软件计算在  $N = 40 \text{ lp/mm}$  时,  $f_{\text{MTF}} = 0.7$  左右。设计的 150 mm 长焦距透镜在光斑直径为 2 mm 时,  $f_{\text{MTF}} \geq 0.75$ ;光斑直径为 1 mm 时,  $f_{\text{MTF}} \geq 0.73$ ;光斑直径为 0 mm 时,  $f_{\text{MTF}} \geq 0.72$ ,如图 3 所示。

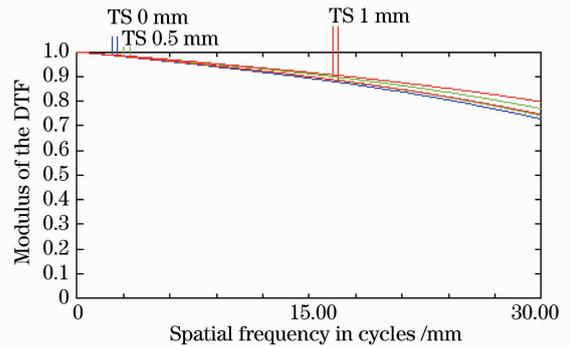


图 3 光学调制函数曲线图

Fig. 3 MTF curves

长焦距透镜的均方根(RMS)弥散直径为  $\Delta d$ 。当光斑直径为 2 mm 时,  $\Delta d = 47.37 \mu\text{m}$ ;光斑直径为 1 mm 时,  $\Delta d = 56.05 \mu\text{m}$ ;光斑直径为 0 mm 时,  $\Delta d = 39.31 \mu\text{m}$ ,如图 4 所示。

从图 3 可以看出,150 mm 大孔径胶合镜具有较高的 MTF,能传递的信息量较多,成像质量好,图像清晰。以图 4 的点列图(镜头对目标成像所形成的几何光斑)为依据来分析该系统的像质,其均方根弥散斑直径包含了 70% 能量圆直径,这是除 MTF 外又一个评价像质的重要标准,所设计的胶合镜,均方根弥散斑均为 2 pixel 以内(1 pixel 约为  $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ )。

经过 Zemax 软件反复计算和优化,最后得到图

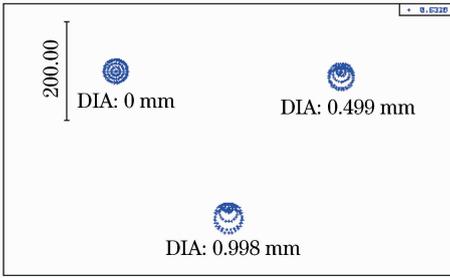


图 4 点列图  
Fig. 4 Spot array diagram

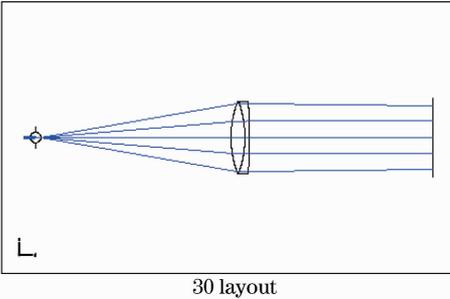


图 5 光学模拟图  
Fig. 5 Picture of optical simulation

5 中的片光源模拟图, 形成高度 50 mm, 厚度 0.3 mm 的片光图, 从图中可以看出, 光线的平行度非常好, 有利于清晰成像。

### 3 粉末流浓度场检测原理

数字图像检测系统检测金属粉末流场的主要原理如图 6 所示。532 nm, 100 mW 半导体激光器发出的激光经过二维片光源透镜组, 转换为二维片光源; 该二维片光源照亮由同轴送粉嘴输出的金属粉末, 在粉末被照亮的同时, 由高分辨率工业 CCD 相机拍得金属粉末流照片, 拍得的照片经过 USB 接口输入到计算机, 由专用软件进行处理。为了减少金属粉末反射等导致激光强度减弱, 在片光源过来的方向放置一面反射镜, 从而利用反射光增强金属粉末的

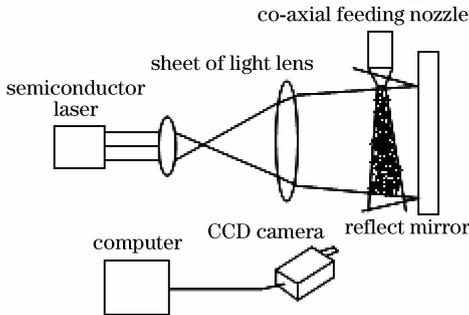


图 6 粉末流浓度场检测原理

Fig. 6 Principle of measuring concentration field of powder stream

亮度。

实验系统构成的各组件技术参数为:

1) 半导体抽运绿光激光器: 型号 ST—532—100, 连续工作模式, 光斑直径 2 mm, 波长 532 nm, 发散角小于 1.5 mrad。

2) 照明用片光源光学元件: 激光经过棱镜将圆形光斑压缩成扁平椭圆光斑, 然后经过一个 6 mm 焦距的柱透镜形成较薄片光源, 最后经过一个 150 mm 焦距的大孔径胶合透镜进行准直得到平行度较好的片光源, 光强足以保证粒子能被清晰拍摄, 片光厚度约 0.3 mm, 这样就只记录在这一层片光内运动的粒子, 增加了测量的精度。

3) CCD 相机: 采用 MV-VS141FM/FC 高分辨率工业数字 CCD 相机, 1392 pixel × 1040 pixel, 256 个灰度级, 帧率 15 frame/s。

4) 分析显示系统: 自主开发了基于 DELPHI 7.0 编制可视化图像计算处理软件, 能进行粉末流浓度分布文本输出程序, 然后运用 mathematical 数学软件进行绘图分析。

## 4 金属粉末流浓度的理论计算及测量

### 4.1 理论模型

由环形同轴粉嘴射出的气体——粉末流在结构上可以通过线段 AA' 和 BB' 分为 3 个区域, 如图 7 所示。图中显示此环形粉嘴和粉末流的纵截面, 其中  $w$  为粉嘴出口宽度,  $r$  为粉嘴内径,  $\alpha$  为粉嘴倾角,  $\phi$  为粒子流发散角。

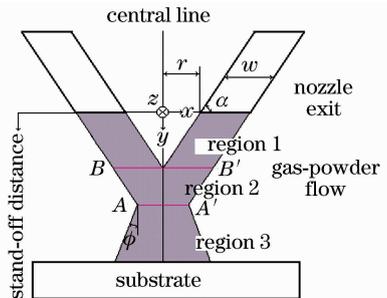


图 7 粉末流和同轴粉嘴的关系  
Fig. 7 Relationship of powder stream and nozzle in co-axial

在实际中, 区域 2 和 3 内的粒子浓度分布更加受到重视。在本文中, 浓度采用体积分数表示。体积分数为在某控制体中, 粉末粒子的总体积与控制体体积的比。在统计意义上, 区域 2 和 3 的粉末粒子的三维个数分布可以表示成高斯式

$$f(x, y, z) = \frac{m(y)}{2\pi\delta^2} \exp\left(-\frac{x^2 + z^2}{2\delta^2}\right), \quad (5)$$

式中  $f(x, y, z)$  为粉末粒子的三维个数分布函数； $m(y)$  为粉末粒子竖直分布函数（即沿着粉嘴轴线不同位置的与之垂直的粒子流横截面上的粒子个数）， $\delta$  为高斯参数。区域 2 和 3 内的粒子都来源于环形粉嘴，所以

$$m(y) = N/v_y, \quad (6)$$

式中  $v_y$  可以由运动方程求得<sup>[10]</sup>， $N$  为单位时间从粉嘴喷出的粒子个数。 $N$  和送粉量  $m_p$  的关系为

$$N = \frac{3m_p}{4\pi(d_p/2)^3 \rho_p}. \quad (7)$$

根据统计学中的  $\pm 3\delta$  原理可知：在区域  $x^2 + z^2 \leq 9\delta^2$  内分布有 99% 以上的粒子。所以粒子流半径可以用  $3\delta$  求得

$$3\delta = R(y), \quad (8)$$

式中  $R(y)$  为区域 2 和 3 中粉末流的半径。将(6)~(8)式代入(5)式得到粒子的三维浓度分布

$$c(x, y, z) = \frac{4}{3}\pi \cdot (d_p/2)^3 \cdot f(x, y, z) = \frac{9m_p}{2\pi \cdot R(y)^2 \cdot v_y \cdot \rho_p} \exp\left[-\frac{9(x^2 + z^2)}{2R(y)^2}\right]. \quad (9)$$

在区域 2

$$R(y) = r + w - x(y), \quad (10)$$

在区域 3

$$R(y) = x_A + (y - y_A) \cdot \tan \phi. \quad (11)$$

#### 4.2 浓度检测原理

将粉末流调整到稳定状态，用 CCD 相机对其进行拍摄，并将图像数据输入计算机，得到该图像的灰度矩阵  $G$ 。

$G$  中任何一尺寸为  $p_x \times p_y$  的子区域的粉末粒子浓度值可以估计为

$$c = \frac{n_p}{p_x \times p_y}, \quad (12)$$

式中  $n_p$  为子区域中存在粉末粒子的像素数； $p_x, p_y$  分别为该子区域横纵方向的像素数。为减小粉末流不稳定性带来的测量误差，在每一测量工况下连续采集 20~30 个图像，并求其体积分数的平均值。

由(9)~(11)式可以看出，粉末流场浓度分布是送粉嘴几何参数( $r, w, \phi, \alpha$ )，送粉工艺参数( $m_p, v_p$ )和坐标的函数。其参数为  $r = 3 \text{ mm}$ ， $w = 2 \text{ mm}$ ， $\alpha = 60^\circ$ 。

图 8 为该同轴送粉头金属粉末的流场图片，图 9 给出了该同轴送粉头金属粉末流在粉嘴出口中心

沿  $y$  轴理论浓度分布和实际检测浓度分布曲线。图 8, 9 中(a)条件为  $m_p = 300 \text{ mg/s}$ ， $v_p = 0.8 \text{ m/s}$ ；(b)条件为  $m_p = 300 \text{ mg/s}$ ， $v_p = 2 \text{ m/s}$ 。

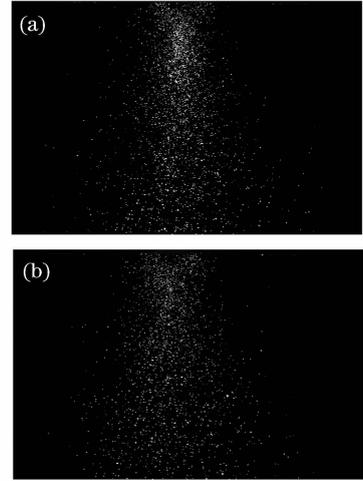


图 8 粉末流场照片

Fig. 8 Picture of powder stream field

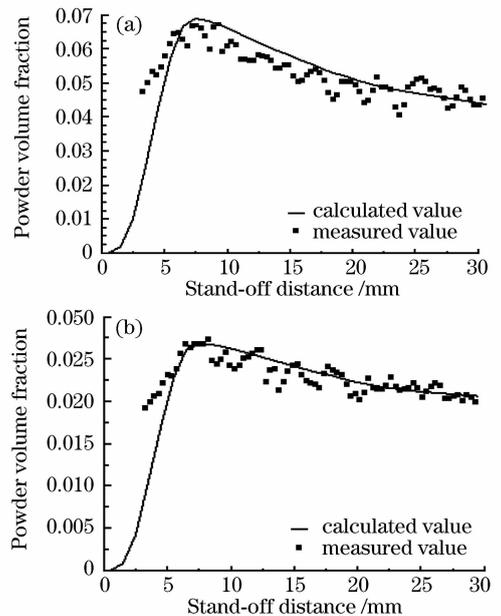


图 9 浓度体积分布的模拟结果和实验结果

Fig. 9 Modelled and experimental distribution of volume concentration

由图 9 可以看出，金属粉末流沿同轴粉嘴中心轴线浓度体积分布的实验测量结果和理论计算模型基本一致，在粉嘴出口环状粉流区， $y$  轴方向粉末流浓度由零逐渐增大，一直到聚焦点，达到最大的粉末浓度，粉末流焦点处(约 7.5 mm)对应粉末流浓度最大值。在粉末流聚焦后，发散的锥形焦柱区，粉末流浓度随着  $y$  的增加而缓慢降低。从图 9(a), (b) 比较可以看到粉末的初始速度对聚焦点的位置影响不

大,但对粉末流浓度体积分布的影响较大,速度越大,浓度体积分布越小。

## 5 结 论

1) 设计了粉末流浓度检测的光学系统,运用 Zemax 软件进行反复优化,最后得到了厚度约为 0.3 mm 的优质片光源,有效地减少了粒子重合带来的检测误差。

2) 研制了一套小功率、便宜、便携的测量金属粉末流浓度场的数字图像检测系统,它可以瞬间测试粉末流浓度场。测试结果和理论分析有比较好的一致,该系统可以用于机器人在激光再制造中粒子浓度的现场检测。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan *et al.*. Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(10):53~57  
杨洗陈,李会山,王云山等. 用于重大装备修复的激光再制造技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(10):53~57
- 2 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):993~997

- 杨洗陈,雷剑波,刘运武等. 激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):993~997
- 3 Liu Zhenxia, Huang Weidong, Wan Baitao. Investigation of basic problems of the numerical model for powder-feed laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):567~570  
刘振侠,黄卫东,万柏涛. 送粉式激光熔覆数值模型基本问题研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):567~570
  - 4 Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1745~1750  
杨楠,杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1745~1750
  - 5 J. Fan, H. Zhao, K. Cen. An experimental study on two-phase turbulent coaxial jet [J]. *Exep. Fluids*, 1992, **13**(4):279~287
  - 6 H. Massah, M. Shahnam, F. Shaffer *et al.*. A comparative application of a particle tracking velocity and laser dopper velocimetry for particle-wall collision measurements [J]. *FED (Am. Soc. Meeh. Eng.)*, 1995, **218**:145~150
  - 7 Jehnming Lin. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *J. Material Processing Technology*, 2000, **105**(1-2):17~23
  - 8 J. Lin, W. M. Steen. Powder flow and catchment during coaxial laser cladding [C]. *SPIE*, 1997, **3097**:517~527
  - 9 A. J. Pinkerton, Li Lin. Modeling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling [J]. *J. Manuf. Sci. ET. ASME*, 2004, **126**(1):33~41
  - 10 Kong Long. Two-Phase Fluid Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004  
孔珑. 两相流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004