

文章编号: 1001-4322(2006)04-0587-04

微球动态涂敷状态实时监测光学系统的设计*

郑娟娟¹, 沈剑峰², 陈直¹, 施柏焯¹

(1. 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027; 2. 浙江大学 城市学院, 杭州 310027)

摘 要: 介绍了一种可用于实时监测直径 0.2~1.0 mm 激光核聚变靶球涂敷状态的光学系统的设计, 系统采用环形 LED 照明系统以适合特殊的照明要求, 用 Petzval 型物镜使 500 mm 处的微球清晰成像于 CCD 像面上, CCD 输出的图像电信号经图像采集卡转换成数字信号, 最后该数字信号由计算机进行处理, 实现了系统对靶球膜层涂敷作业的自动监控, 大大提高了涂敷效率。所设计的系统轴上点最大弥散斑直径为 12.6 μm , 轴外最大弥散斑直径为 15.8 μm , 整个视场的像质比较均匀, 分辨率较高, 对于波长 522 nm 的光线, 场曲和畸变分别小于 15 μm 和 0.012%, 像质优良。

关键词: ICF 靶微球; 光学系统; 环形 LED; Petzval 型物镜; 实时监测; 传递函数

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

激光核聚变靶球涂敷过程就是将靶球(直径 0.2~1.0 mm)置于真空室内, 采用等离子体聚合方法在其表面涂敷一层有机薄膜^[1-2]。涂敷时, 微球置于弹盘中, 弹盘背面紧贴的 PZT 在周期电场作用下作周期振荡, 使靶球在弹盘内上下跳动^[3]。所以, 微球在涂敷时必须保持运动状态, 一旦停止运动涂敷质量将受影响。由于涂敷的微球数量较多, 涂敷时间很长^[4], 如果单靠人眼去判别各个微球的运动情况, 容易疲劳而且很难及时发现其中停止的微球。由此设计了一套涂敷作业自动监测系统, 一旦发现有微球停止运动便给出警告, 本文着重介绍该系统的光学设计部分, 包括特殊照明系统及摄像系统, 使微球以较高分辨率清晰成像于 CCD 面上, 再通过信号转换和计算机处理, 达到监测涂敷状态的目的。

1 照明系统设计

在微球动态涂敷状态实时监测中, 光源的选择是保证实验成功的关键。本实验装置需要克服两个技术难点: (1) 在涂敷时由于射频线圈的作用, 通入真空室内的有机气体会激发出荧光^[5], 在没有照明的情况下从玻璃小窗口看进去, 只能看到等离子体荧光而看不到目标; (2) 利用外光源照明时, 观察窗口的光学玻璃表面会产生比较强的反射光, 形成眩光, 成像面一片眩白, 不能使弹盘和微球成像。同时, 弹盘和微球处于镀膜机的金属真空室内, 真空室有一定的深度, 因此必须用外光源照明, 且外光源和光学系统处于同轴状态。另外, 实验对照明系统的基本要求是要保证被观察弹盘有足够的照度, 对比度好, 并保证被照明的视场比较均匀, 尽可能减少杂光, 光源的发光强度稳定且寿命长。

基于以上几方面的要求, 提出采用环形 LED 照明系统。LED 排列成环状并控制各个方向的发光强度, 使其对相距 340 mm 直径为 20 mm 的弹盘均匀照明, 并尽可能接近玻璃观察窗口, 以减少窗口面反射光的影响。LED 外环恰与真空室窗口契合, 使照明光全部照到真空室中的微球上, 而且尽量保证内环足够大, 使由弹盘反射后的光线不受阻拦, 该反射光再经置于真空室上方的反射镜反射后全部进入 Petzval 摄影物镜。通过分析所测得的荧光光谱曲线, 发现其在 520~550 nm 范围内比较弱, 因此对应地应选用中心波长为 522 nm 的 LED 照明以穿透荧光区, 照射到微球上, 同时加入 LB2 滤色片进一步摒除荧光对摄像系统的干扰。

此照明系统控制简单, 并且通过可变电阻可以灵活地调节亮度, 捕获的弹盘和微球的图像结果表明: 设计的环形 LED 照明系统照度均匀, 同时有效地克服了眩光和荧光的影响, 满足照明设计要求。

2 CCD 的选择

本系统中, 微球由一个摄像光学系统成像到面阵 CCD 的传感面上, CCD 输出图像的模拟电信号, 然后由

* 收稿日期: 2005-07-22; 修订日期: 2005-11-10

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 郑娟娟(1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电检测方面的研究; juanzju@yahoo.com.cn。

图像采集卡转化为数字信号并由计算机进行处理。采用 Olympus 的 E-20 黑白 2/311CCD, 其光敏面积为 $8.8 \text{ mm} \times 6.6 \text{ mm}$, 像素尺寸 $3.4 \mu\text{m} \times 3.4 \mu\text{m}$ 。

常用的微球直径在 $0.2 \sim 1.0 \text{ mm}$ 之间, 现取极限情况: 微球最小直径为 0.2 mm , 弹盘直径为 20 mm , 则微球成像后占空比最小, 在 CCD 传感面上的像最小, 设其像直径为 d , 则由

$$20/6.6 = 0.2/d \quad (1)$$

可求得 $d = 66 \mu\text{m}$, 微球像的直径尺寸可占的像素数 $n = 66/3.4 = 19.4$, 所以图像采集系统分辨率足够分辨微球像的细节, 可以观察涂敷状态。

3 摄影物镜的设计

3.1 系统分析

摄影物镜的设计, 首先确定焦距、相对孔径和视场, 这些是决定其光学性能的基本参数^[6]。真空室外壁窗口和弹盘中心相距 340 mm , 因此取反弹面到摄影物镜第一面的距离为 500 mm , 根据物距像距关系, 初定系统有效焦距为 100 mm 。相对孔径主要决定所摄像的照度, 相对孔径越大, 光能越多, 但是同时也会增加宽光束像差校正的难度。本系统所选用的 CCD 灵敏度比较高, LED 的亮度也比较高, 因此选定入瞳直径为 45 mm , 实验证明可以满足照度要求。初步计算可知摄影物镜的视场角比较小, 只有 5° , 使轴外像差的控制比较简单。

3.2 结构选型

鉴于以上分析, 并结合成本综合考虑, 选用 Petzval 型物镜作为初始结构, 它由两组分离的双胶合镜组组成^[7]。这种物镜由两个正的镜组承担光焦度, 各组的偏角负担相对减轻, 其高级球差不大, 轴上点和近轴区有较高的成像质量, 相对孔径可做到 $1:2 \sim 1:1.6$ 。但 Petzval 物镜为使其在消像散时, 不致使两个双胶合镜组导致过小半径的不合理弯曲, 两镜组间须有较大的分离间隔。而当两正镜组分离的间隔越大时, 其 Petzval 和也将越大, 再由于这种物镜结构的不对称性, 轴外点的成像质量必然会受到严重影响, 因而这种物镜的视场很小, 一般在 16° 以下。Petzval 物镜的这种大孔径小视场的性能特征, 正好适用于该光学系统的要求。在系统优化中, 结合 Petzval 物镜的成像特点, 需要校正球差和慧差。由于用绿色光源 LED 照明, 又加入了滤色片, 所以色差的校正可以忽略, 主要考虑对 522 nm 波长单色像差的校正(为了把此镜组扩展到其他应用领域, 在实际优化过程中还是考虑了色差的校正)。

另外, 平场 CCD 成像系统需校正场曲以改善轴外点像质, 由于 Petzval 物镜的原始结构中两分离胶合镜组均为正光焦度, 因此不利于场曲的校正。薄透镜组的场曲系数 $\sum S_{IV} = \sum j^2 (\Phi/n)$, 即场曲的正负由光焦度 Φ 决定, 故场曲只能由像散的平衡而得到部分校正。为进一步减小场曲, 我们在近焦面处放置一负场镜, 它对系统总光焦度和球差、慧差的影响很小, 但可产生负的像面弯曲以抵消前面的正场曲, 同时它镜面的弯曲还可用来平衡整个物镜的畸变。

3.3 设计结果及像质评价

初步计算参数后, 用 ZEMAX 光学设计软件进行 Petzval 物镜的像差校正和平衡, 选用国产 BK7, F2 和 F4 玻璃, 各半径参数适中, 保证了镜头的可实现性及较低的成本。自动设计完成后, 作为一个实际的光学系统还必须把自动校正所得到的球面半径按国标的光学零件球面半径数值系列换成最接近的标准半径, 并使各项参数符合加工工艺条件, 得到的系统结构如图 1 所示。最后全面地计算一次像差, 光线像差曲线如图 2 所示。从图中可以看出, 视场中心(图(a))和视场边缘(图(b))都有比较好的像差, 尤其是对于波长 522 nm 的光。对摄像系统像质的评价, 通常以有效弥散斑直径的倒数(即系统能分辨的线对数)或者以 MTF 值为 0.5 所对应的空间频率作为质量指标^[8]。由点列图分析可知, 所设计的系统轴上点最大弥散斑直径为 $12.6 \mu\text{m}$, 轴外弥散斑直径最大为 $15.8 \mu\text{m}$, 整个视场的像质比较均匀, 分辨率较高。

系统的调制传递函数(MTF)曲线如图 3 所示, 图中 T 和 S 分别表示光学系统的子午和弧矢方向。光学系

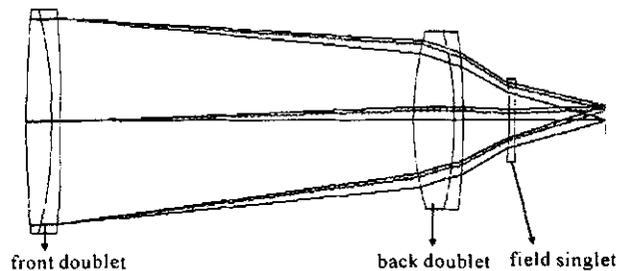
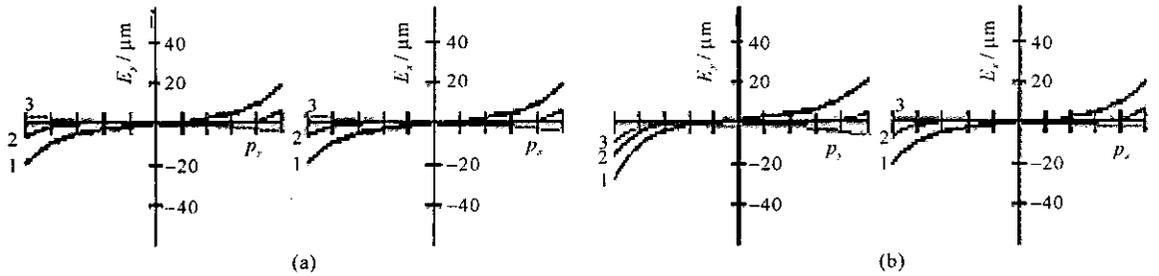


Fig. 1 System in layout

图 1 系统结构图



1, 2 and 3 curves represent wavelengths of 486, 522 and 588 nm

Fig. 2 Ray fan curves

图 2 光线像差曲线

统视场中心 MTF 的值为 0.5 时, 所对应的空间频率大于 50 lp/mm, 边缘视场在空间频率为 50 lp/mm 处 MTF 值也接近 0.4。该图同样表明这样的像质能满足微球在 CCD 像面清晰成像的要求, 并可分辨微球细节。考察平场 CCD 成像系统的场曲和畸变可得, 对于波长 522 nm 的光, 场曲和畸变分别小于 15 μm 和 0.012%。

综上所述, 此 Petzval 物镜系统能较好地校正正像差, 微球清晰成像, 分辨率较高, CCD 像面上像质优良。图 4 是微球跳动状态下捕获的一帧图像, 明显可见: 弹盘及微球的图像清晰, 分辨率和观察视场完全达到要求, 有利于后面的数字图像处理工作, 满足实时监测微球涂敷状态的要求。

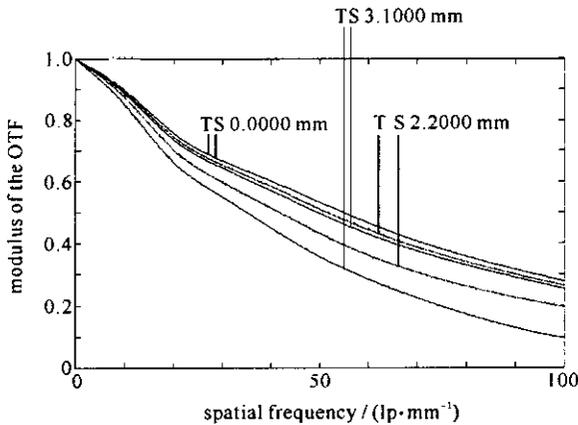


Fig. 3 MTF curves

图 3 传递函数曲线图

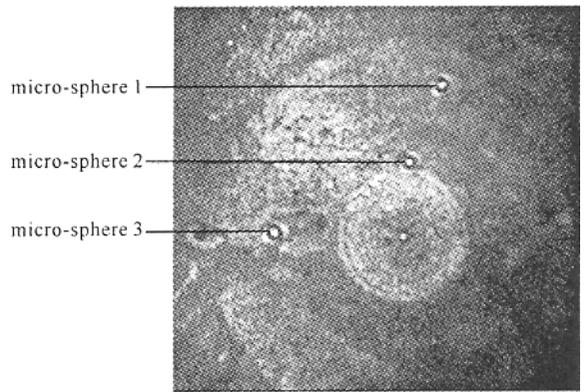


Fig. 4 Image of micro-spheres in a pan

图 4 弹盘微球图像

4 结 论

采用以上环形 LED 照明系统和摄像光学系统, 可以获得靶球涂敷实时状态的清晰图像, 该图像信号由 CCD 接收并进行光电转换, 得到相应的视频信号, 图像采集卡将视频信号数字化后送入计算机, 由计算机对数字图像进行处理, 由此进行微球的实时监控, 一旦发现有微球停止运动则立即给出警告, 实现涂敷作业的自动监视, 大大提高了靶球膜层的涂敷效率。所设计的系统轴上点最大弥散斑直径为 12.6 μm, 轴外最大弥散斑直径为 15.8 μm, 整个视场的像质比较均匀, 分辨率较高, 对于波长 522 nm 的光, 场曲和畸变分别小于 15 μm 和 0.012%, 像质优良。本系统还具有一定的通用性, 稍加改动后还可以应用于医学界(进行显微手术)、精密加工、微电子器件生产等行业。

参考文献:

[1] Gram R Q, Kim H, Mason J F, et al. Ablation layer coating of mechanically nonsupported inertial fusion targets[J]. *J Vac Sci Technol*, 1986, **A4**(3):161-163.

[2] Liepins R, Campbell M. Plastic coating of microsphere substrates[J]. *J Vac Sci Technol*, 1981, **18**(3):74-78.

[3] 施柏焯, 李彩凤, 殷浩. 实时监测激光核聚变靶球涂敷状态的 CCD 成像系统设计[J]. *光电工程*, 2002, **29**(1):30-33. (Shi B X, Li C F, Yin H. Design of a CCD imaging system for monitoring status of micro-sphere in laser fusion target at real-time. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(1):30-33)

[4] Yamanaka C. Laser driven implosion[J]. *Laser and Particle Beams*, 1990, **8**(1-2):192-196.

[5] Wang G C. Inertial confinement fusion[M]. Hefei: Anhui Educational Publishing House, 1996.

- [6] 王子余. 几何光学和光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,1989. (Wang Z Y. Geometrical optics and optical design. Hangzhou: Zhejiang University Press,1989)
- [7] 王肇圻,张轶楠,傅儒廉,等. 折/衍混合 Petzval 光电摄影物镜设计[J]. 光学精密工程,2005, **13**(1):5-8. (Wang Z Q, Zhang Y N, Fu R L, et al. Design of hybrid refractive-diffractive Petzval objective in visible band. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(1):5-8)
- [8] 周杰,邱胜根,刘旭. 应用 CCD 的投影物镜调制传递函数测量系统[J]. 光学学报,2004, **24**(2):260-263. (Zhou J, Qiu S G, Liu X. Measurement system of projection lens based on CCD modulation transfer function. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):260-263)

Design of optical system for monitoring coating status of micro-sphere at real-time

ZHENG Juan-juan¹, SHEN Jian-feng², CHEN Zhi¹, SHI Bai-xuan¹

(1. *State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;*

2. *School of City, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: An optical system was designed. It can be applied in monitoring the real-time bouncing status of ICF target micro-sphere with 0.2~1.0 mm in diameter. A ring Light Emitting Diode (LED) for specific illumination was designed, and through the Petzval objective system, the micro-sphere was imaged onto the CCD with details resolution. Video detection system by personal computer captured and disposed every video image. Monitoring the real-time status of micro-sphere was realized and the coating efficiency improved greatly. The optical system had very good image quality, with the maximum spot diameter on-axis and off-axis of 12.6 μm and 15.8 μm , respectively. The fields were uniform and had high resolution. Particularly, the field curvature less than 15 μm and the distortion less than 0.012% for the wavelength of 522 nm.

Key words: ICF target micro-sphere; Optical system; Ring LED; Petzval objective; Real-time monitor; MTF