

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0240-04

用于双面烧结陶瓷的激光均束装置的设计

李 智 季凌飞 蒋毅坚

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 利用几何光学原理,设计了一套应用于大功率 CO₂ 激光陶瓷烧结的均束装置。采用光波导进行均束,分光镜进行分光,使得此装置可以应用于陶瓷的双面烧结。其中,光波导为长 200 mm,横截面为 10 mm×10 mm 的中空柱形。采用两块呈一定夹角的平面镜组成分光镜。经模拟,该装置均束效果良好,基本不受原始激光束光斑质量的影响。用傅里叶光学对光学系统进行分析,讨论了增加光斑均匀性的方法。由于所有元件都采用反射型,能量损失低,光路校正方便,符合大功率 CO₂ 激光器使用要求。

关键词 光学设计;激光均束;光波导;分光镜

中图分类号 TG665 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0240

Design of Laser Beam Homogenizing Instrument for Ceramic Sintering on Double Sides

Li Zhi Ji Lingfei Jiang Yijian

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract Using geometrical optics, a laser beam homogenizer for high power CO₂ has been designed. Laser beam is homogenized by means of waveguide, separate beam with spectroscopy, so the device can be used to sintering ceramics on double sides. The waveguide is composed of a square-section tube with four flat rectangular mirrors, and its length is 200 mm, cross section 10 mm×10 mm. Two mirrors that has an angle with each other forms the spectroscopy. The uniformity of the power distribution is stable without being affected by original laser beam. Using Fourier optics to analyze system, the method to improving the uniformity has been discussed. Because all the elements have reflecting surface, energy loss is not serious, optical path adjusting is convenient.

Key words optical design; laser beam homogenizing; waveguide; spectroscopy

1 引 言

激光器自诞生以来在很多领域得到了广泛的应用,如光信息存储,激光加工,热处理等。在一些领域的应用中对激光光斑的大小,形状,能量分布等提出了要求,这就必须要求对光束进行整形。所谓光束整形,是指把光束或光斑由一种能量密度分布形式转换为另一种能量密度分布形式(如将高斯分布变为均匀分布或反之),或者把一种光斑形状变成另一种光斑形状,以达到应用的目的。很多时候要求

激光输出的光斑为能量均匀分布,这也就是激光的均束问题。激光光束整形问题最早由 Frieden 和 Kreuzer 在 20 世纪 60 年代提出,他们用几何光学原理设计了一套光学系统,可以把高斯分布的光束变成能量分布均匀的光斑^[1]。

目前已有多种激光均束方法被提出并应用于激光技术当中。常用的几种均束方法,有非球面均束技术^[2~4],透镜阵列法均束^[5,6],衍射光学均束^[7,8],光波导均束^[9,10]等。各种均束方法都有各自的优缺点,实

基金项目: 国家自然科学基金(10674041,50875006)、北京市人才强教一拔尖创新人才项目(05313999200601)、北京市科委科技新星(2006B11)和北京市自然科学基金(2082005)资助课题。

作者简介: 李 智(1983—),男,硕士研究生,主要从事激光材料加工与改性等方面的研究。

E-mail: winterlover@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 蒋毅坚(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料加工与改性、激光拉曼光谱等方面的研究。

E-mail: yijiang@bjut.edu.cn

际应用中,将根据不同的要求采用不同的均束方法。

光波导方法是应用较为广泛的一种均束方法。它设计和加工较为简单,在均束效果要求不是十分严格的时候,可以用这种方法,作为材料加工,如熔覆,焊接,烧结的激光光斑整形装置。近年来,激光应用的一个新领域,就是激光烧结陶瓷的制备技术^[11]。在烧结陶瓷的过程中,需要激光束的能量分布均匀,为此,曾设计出双带式积分镜来对原始光斑均束^[12]。但由于其加工工艺不成熟,设计难度较大,使应用受到一定影响。并且只能对陶瓷单面烧结,其温度梯度导致的变形乃至裂纹很难控制。本文在此基础上,设计了光波导均束方法,并巧妙运用带式积分镜的原理将光束进行分束,经会聚和反射以后,可以对陶瓷片的两面同时辐照,辐照效果有所提高。

2 光波导均束的原理与设计

2.1 光波导均束原理分析

光波导均束装置的构成如图 1 所示,基于此原

理做成的各种均束装置都可以看作是这种装置的变形。它由两个成像透镜和一个波导腔构成。首先由透镜 L_1 将一束准直光汇聚到 s 点,由 s 点发出的光经过光波导数次反射,其反射光线的反向延长线可以汇聚到 L_1 的焦平面,形成数个虚像(s^*),这些像再经过透镜 L_2 成像到像平面,在像平面的后方一段距离是由这些像点发散的区域的重叠区,在这个重叠区里可以近似认为辐照是均匀的。透镜 L_2 的焦距要小于 $d_0 + d_3$,使得 s 和 s^* 在透镜右侧可以会聚。图中, $d_0 \sim d_3$ 都是可调的,可以根据实际情况做出调整。例如增大 d_1 ,可以增加光线在腔内的反射次数,增加光斑均匀性,但是同时也增加了光损耗。根据实际应用,在不同的场合需要将光斑整形形成不同的形状,如条型,圆形,方型等,而且,根据所使用的激光器不同,有时需要对波导腔进行冷却,有时需要把透射镜变成反射镜以满足大功率激光器的使用。

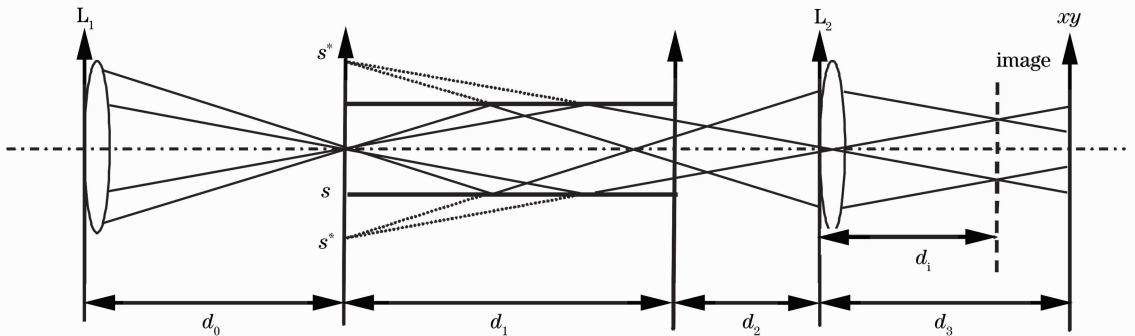


图 1 光波导均束装置原理图

Fig. 1 Principle of waveguide homogenizing

在本设计中,为了避免温度过高导致透镜变形,因此将图 1 中的 L_2 透镜变为凹面反射镜,同时将轴上光线变为离轴光线。这样做的好处是既可以减少光能损失,又有利于光路的校正,在必要时可以水冷,在

对光斑形状和均匀性要求不十分严格的时候,这种做法是可行的。如图 2,将透镜 L_2 变为凹面反射镜,将光线会聚到 x_1y_1 平面上。在其后面一段距离的平面 xy 上,其能量分布近似看做是均匀的。

2.2 光波导的参数确定

前面提到,如果增大腔长,可以增加光线在腔内

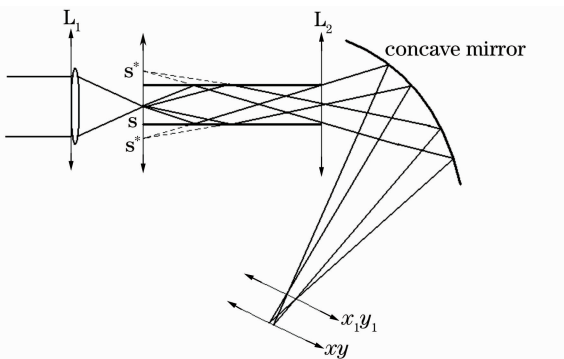


图 2 光波导均束装置的变形

Fig. 2 Layout of waveguide homogenizing transmutation

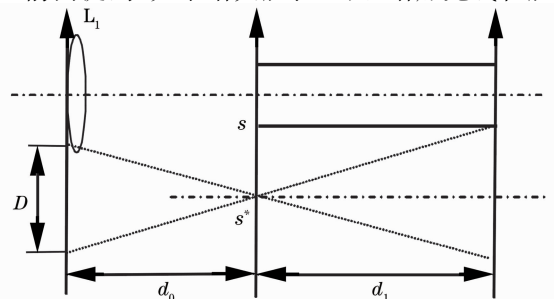


图 3 像光源数目 N 的计算光路图

Fig. 3 Layout of imagine and light resources number N

的反射次数,但是由此带来增大能量损失,能量利用率低。关于光线在腔内的反射次数,有文献给出了计算公式^[13],从图 3 不难计算,设方形光波导的横截面的长度为 $2a$,激光束的通光口径为 D ,要使焦点 s 下方的第 N 个像点 s^* 能够通过光波导,必须满足

$$\frac{Dd_1}{2d_0} \geq (2N-1)a + \frac{1}{2}, \quad (1)$$

即

$$N \leq \frac{Dd_1}{4ad_0} + \frac{1}{2}, \quad (2)$$

计算时, N 根据不等式右边取整数。

2.3 傅里叶光学的光学系统分析

根据傅里叶光学理论,光线经过光学系统后的传播可以看做由光波导腔入口平面上—序列点光源发出的球面波在反射腔出口的衍射和叠加。

设在工作平面,即 xy 平面上的能量密度为 $E(x, y)$, 则有^[9]

$$E(x, y) = \sum_{m=-N}^N \sum_{n=-N}^N \sum_{p=-N}^N \sum_{q=-N}^N F_{mnpq} |U_{mm}(x, y)| |U_{pq}(x, y)| \times \cos\left[\frac{2\pi}{T_{mp}}\left(x - M_i \frac{x_m + x_p}{2}\right)\right] \cos\left[\frac{2\pi}{T_{nq}}\left(y - M_i \frac{y_n + y_q}{2}\right)\right], \quad (3)$$

其中相干因数 F_{mnpq} 有

$$\begin{cases} F_{mnpq} = 1, & (m = p \text{ and } n = q) \\ F_{ch}(0 < F_{ch} < 1), & (m \neq p \text{ or } n \neq q) \end{cases} \quad (4)$$

可以由实验确定。

$$T_{mp} = \frac{(d_3 - d_i)}{M_i(x_p - x_m)}, \quad (5)$$

$$x_m = 2am \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N), \quad (6)$$

$$M_i = \frac{-d_i}{(d_1 + d_2)}, \quad (7)$$

即 M_i 为像平面上的横向放大率。

从上面公式可以看出,在工作平面上,沿着垂直于光轴的 x 和 y 方向上均形成若干组干涉条纹,其叠加效果就是横向和竖向均匀分布的方形光斑。从局部来看,能量密度分布并不均匀,但是激光与材料相互作用时间较长时,热作用主要依赖于光斑局部的平均值,在这种起伏分布的间隔不大时,可以得到均匀的热作用^[14]。为增加均匀性,减小局部的能量起伏,可以增加 d_3/d_2 的比值,或减小波导腔长与横截面边长的比值^[9]。

根据计算,最终确定各参数如下表(设透镜 L_2 的焦距为 f_2):

表 1 均束装置的光学参数

Table 1 Optical parameters of homogenization device

d_0/mm	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	a/mm	f_2/mm
127	200	254	254	5	127

如果调整入射光斑的直径 D 为 10mm,则由(2)式计算可得, N 只能取 1,即光线最多在波导腔中反射一次,横向和纵向各有 3 个虚像,共有 9 个子光束发出

的光在像面叠加。

3 分光镜的设计

为了达到陶瓷的双面烧结,需要在合适的位置,将光束分为两束光,并且调整光线的方向,使两束光能同轴反向照射到陶瓷片的两个表面。采用带式积分镜的切割光束的方法^[15,16],采用一块楔形平面镜(由两块呈一定夹角的平面镜组成),如图 4,光线投射到分光镜上,将分成两束光分别传播。

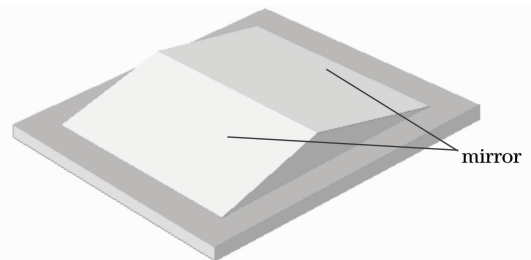


图 4 分光镜示意图

Fig. 4 Layout of spectroscop

在优化过程中,我们发现,随着 d_3 的变化,光斑均匀性的变化比较明显,在加入分光镜以后,为了不改变光程,但同时要保证器件与被烧结陶瓷有足够

的距离以便于加工,因此将此分光镜放到凹面镜的前面,从光波导出射的光,经分光镜反射分光,再由凹面镜会聚成像,相当于两个光波导分别进行均束。

本设计中采用一个凹面镜,必要时可以将一个凹面镜分成两个,而且分光镜的两个平面镜夹角可以设计成可调,以满足不同的加工需要。

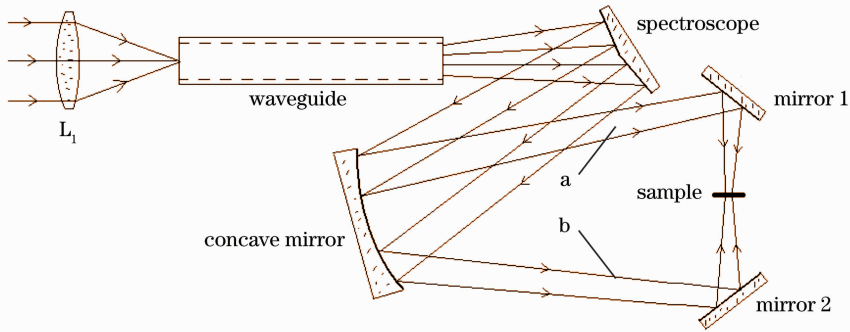


图 5 光波导均束装置

Fig. 5 Layout of waveguide homogenizing

如图 5,在波导腔和凹面镜之间加入分光镜,经会聚后变为 a,b 两束光。为了照射到陶瓷片的两个表面,需要将光线改变方向,因此在陶瓷片的上方和下方各放置了一个平面镜 1 和 2,使两束光能够同轴反向传播,最终照射到陶瓷片的两个表面。在凹面镜取代原来的透镜以后,光斑质量会有一定影响,但这种影响在材料内部的长时间相互作用以后可以减弱甚至消除。凹面镜的等效焦距可以由光线追迹法求得,这里不再赘述。

4 结 论

光波导均束装置的设计较为成熟,加工比较容易,可以方便的应用在激光加工方面,同时可以满足激光烧结陶瓷中对热源的要求。采用分光镜,将一束光分为两束光,可以对陶瓷片两面同时烧结,相对于单面烧结来说,效果要好。

参 考 文 献

- David L. Shealy, Fred M. Dickey. Laser beam shaping [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(11): 3077~3079
- Patrick W, David L. Shealy. Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation: Their design and analysis[J]. *App. Opt.*, 1980, **19**(20): 3545~3553
- Scott C. Holswade, F. M. Dickey. Laser beam shaping via conventional design software[C]. *SPIE*, 2001, **4443**: 36~46
- Toshimitsu TAKAOA, et al.. Design of a reflective aspherical surface of a compact beam-shaping device[J]. *Opt. Rev.*, 2006, **13**(2): 77~86

- Fred M. Dickey, et al.. Laser beam shaping Techniques [C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 338~348
- E. Tefouet Kana, et al.. Laser beam homogenization: Modeling and comparison with experimental results [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **264**: 187~192
- L. A. Romero, F. M. Dickey. Lossless laser beam shaping [J]. *Opt. Soc. Am.*, 2000, **13**(4): 751~760
- Kenichi Kursu et al.. Development of SiO₂ multistep diffractive optical element for beam-homogenizing [C]. *SPIE*, 2004, **5347**: 5461
- Chongguang Li, et al.. An optical device to homogenize a laser beam [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(12): 698~700
- Yifan Huang, et al.. Research for uniform illumination system [C]. *SPIE*, 2002, **4832**: 534~537
- Ji lingfei, et al.. Improving dielectric properties of Ta₂O₅ ceramics by laser irradiation [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(10): 1242~1245
- Huang Yazheng, Ji Lingfei, Jiang Yijian. Design of crossed double strip integrators for high power laser beam homogenizing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.): 264~267
- 黄雅峥, 季凌飞, 蒋毅坚. 一种反射型正交双带式积分镜均束装置的设计 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(Suppl.): 264~267
- A. Delmas, et al.. Study of an optical device used to homogenize a laser beam. Application to emissivity measurements on semitransparent materials at high temperature [J]. *International J. of Thermophysics*, 2003, **24**(5): 1427~1439
- Li Junchang. A study on the thermal effect of the interference and diffraction fringes of laser beam in the process of laser heat treatment [J]. *Laser Technology*, 1994, **17**(6): 329~334
- 蒋毅坚等. 一种用于获得大面积均匀方形光斑的激光均束装置 [P]. 中国专利, 200520127504.6
- Wang Zhiyong, Chen Hong, Zuo Tiechuan. Design of strip integral mirror for high power laser processing [J]. *J. Beijing Polytechnic University*, 2002, **28**(3): 334~336
- 王智勇, 陈虹, 左铁钊. 一种大功率激光加工用带式积分镜的设计 [J]. *北京工业大学学报*, 2002, **28**(3): 334~336