

文章编号: 0258-7025(2008)02-0195-05

大功率固体激光器高效率光纤耦合

王宝华 姜梦华 惠勇凌 李 强

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 光束质量参数对大功率固体激光器光纤耦合系统的设计起着关键作用。大功率固体激光器输出的为多模激光束,引入等效基模光束来计算多模激光束的光束质量是一种有效的方法,并定义包含光斑能量 98% 的光斑半径为束宽,以此计算多模激光束的光束质量,是准确有效的。结合大功率固体激光器的光纤耦合原理和光束变换理论设计了高效耦合系统,并对系统内透镜的通光孔径及焦距等参量做了数值优化。实验证明,此光纤耦合系统能够进行大功率固体激光高效率耦合,成功地实现了输入功率为 2000 W 时,耦合效率大于 94% 的激光输出,并给出了光纤耦合的效率曲线及分析。

关键词 激光技术; 固体激光; 光纤耦合; 光束质量; 束宽

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Improving Coupling Efficiency of Optical Fiber for High-Power Laser Beam

Wang Baohua Jiang Menghua Hui Yongling Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Beam quality parameter plays an important role in the optical fiber coupling for the high-power laser. For high-power laser, its laser beam is always multimode, so it is an effective method to use equivalent basic mode to replace multimode for calculating. The beam width of this equivalent basic mode is measured by including 98% of the beam energy, and this is an effective way to calculate the beam quality parameter. A high-efficiency coupling system was designed by using theory of optical fiber coupling for the high-power laser and the beam transform, and in the system numerical values of lens' aperture and focus were optimized. Experiment proves that the coupling system has a high coupling efficiency. The efficiency is more than 94% when the input power is 2000 W, and the figure of the experiment on coupling efficiency was displayed and analyzed.

Key words laser technique; solid-state laser; optical fiber coupling; beam quality; beam width

1 引 言

大功率固体激光在金属材料的切割、焊接、熔覆等工业加工中有重要的应用价值,其主要优势在于它可在光纤中传输,实现柔性化三维激光加工^[1]。大功率固体激光光纤耦合效率的提高,不仅可将激光器输出的激光有效地传输到工件,最大限度地利用激光器输出功率,而且耦合损耗的降低可提高光纤耦合、传输系统的可靠性。大功率固体激光光纤传输系统的高传输效率包括光纤的传输效率和激光与光纤耦合的效率。由于传输大功率固体激光所用

的多模光纤只有十几米,自身损耗很低^[2],因此大功率固体激光光纤传输系统的效率,主要取决于激光与光纤耦合的效率。对于工业用大功率固体激光器,输出激光功率较大,达数千瓦;为满足加工过程对不同功率的需要,输出功率有较大的范围,从额定功率到额定功率的 10%;输出激光的模式为多模,光束质量随着输出功率的增加而变化。本文针对工业用大功率固体激光的特点,对光纤耦合系统的光束变换、大功率激光聚焦耦合的束宽等影响光纤耦合效率的问题进行了分析。

收稿日期:2007-06-21; 收到修改稿日期:2007-10-12

作者简介:王宝华(1981—),男,河北人,硕士研究生,主要从事大功率固体激光器的研究。

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

导师简介:李 强(1965—),男,教授,博士,主要从事激光、光电子技术方面的研究。E-mail: ncltlq@bjut. edu. cn

2 大功率激光光纤耦合系统理论分析

2.1 光纤耦合条件

将激光功率全部耦合进光纤,必须满足光纤耦合条件(如图 1 所示)

$$\begin{cases} d_{in} < d_{core} \\ \theta_{in} < \theta_{max} = 2\arcsin(NA) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 d_{in} , θ_{in} 分别为入射光束的光斑直径和全角发散角, d_{core} 为光纤芯径, NA 为光纤的数值孔径。由于光纤的孔径角很小(一般在 $0.2 \sim 0.3$ rad),可近似认为

$$\theta_{in} < 2NA. \quad (2)$$

工业用激光器的光束质量常用光束参数积 BPP 表征,其定义为: $BPP = \text{束腰光斑半径} \times \text{远场发散角}$, 光束参数积 BPP 与光束质量因子 M^2 的关系为

$$M^2 = \pi \cdot BPP / \lambda, \quad (3)$$

选择光纤时应使激光光束参数积 BPP 小于光纤参数积,由于 M^2 因子在无畸变光学系统中保持不变,故 BPP 亦为一常数,有

$$BPP_{laser} < \frac{d_{core} \cdot NA}{2}, \quad (4)$$

即光纤耦合条件为

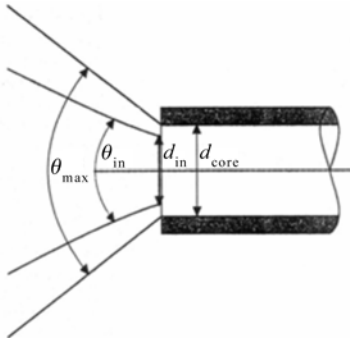


图 1 光纤耦合条件

Fig. 1 Requirements for optical fiber coupling

$$\begin{cases} BPP_{laser} < \frac{d_{core} \cdot NA}{2} \\ d_{in} < d_{core} \\ \theta_{in} < 2NA \end{cases}. \quad (5)$$

2.2 光纤耦合系统光束变换

对于工业用数千瓦大功率固体激光器,一般采用多棒串接方式,其谐振腔一般为平-平腔结构,出射的模式为多模,出射光束的束腰位置是固定的。随输出功率的增加,光束质量变化,表现为发散角 θ 和束腰大小的变化,故大功率激光光纤耦合系统应具备很好的适应性,即耦合系统要不受光束质量变化的影响,对不同功率的激光,尤其是在高功率范围,都要有较高的耦合效率。常用的耦合方式有两种:单透镜直接聚焦;进行光束变换后再聚焦,分别如图 2(a), (b) 所示。其中进行光束变换后再聚焦的方式中有一种望远镜准直聚焦方式^[3],此方式能够明显提高基模激光束的耦合效率,但不适用于光束质量变化的多模激光束。

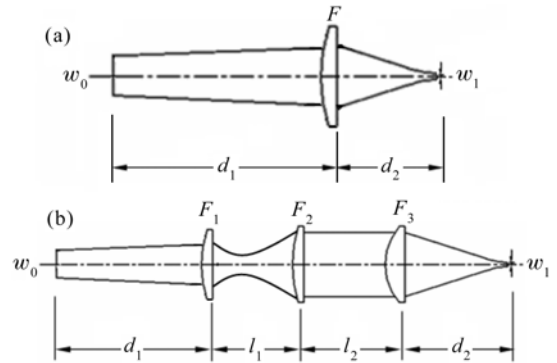


图 2 (a) 单透镜聚焦; (b) 变换后再聚焦

Fig. 2 Focusing with single lens (a) and after beam transformed (b)

比较两种聚焦方式,根据 ABCD 传输定律,可得到基模高斯光束经过两种方式聚焦后的光斑半径表示为

$$w_1^2 = (1 - d_2/f)^2 w_0^2 + (d_1 + d_2 - d_1 \cdot d_2/f)^2 \theta_0^2, \quad (6)$$

$$w_1^2 = \left[\frac{f_2}{f_1} - \frac{f_2 \cdot d_2}{f_1 \cdot f_3} \right]^2 w_0^2 + \left[\frac{f_2}{f_1} (1 - d_2/f_3) d_1 - l_1 + l_1 d_2/f_3 + \frac{f_1}{f_2} (l_2 - l_2 d_2/f_3 + d_2) \right]^2 \theta_0^2, \quad (7)$$

多模光束束腰半径 w 与基模光束束腰半径 w_0 之间有

$$w \cdot \theta = M^2 \cdot w_0 \cdot \theta_0,$$

式中 f, f_1, f_2, f_3 分别为透镜 F, F_1, F_2, F_3 的焦距, θ_0 为基模光束发散角。大功率固体激光器工作物质的输出激光孔径一定,随着光束质量的变化,输出的原始光束束腰的半径也会在某一定值附近微小变化。为方便分析、比较,假定其束腰光斑半径大小不变,只有发散角变化,所以对于多模光束, (6), (7) 式可改写为

$$w_1^2 = (1 - d_2/f)^2 w_0^2 + (d_1 + d_2 - d_1 \cdot d_2/f)^2 (M^2 \theta_0)^2, \quad (8)$$

$$w_1^2 = \left[\frac{f_2}{f_1} - \frac{f_2 \cdot d_2}{f_1 \cdot f_3} \right]^2 w_0^2 + \left[\frac{f_2}{f_1} (1 - d_2/f_3) d_1 - l_1 + l_1 d_2/f_3 + \frac{f_1}{f_2} (l_2 - l_2 d_2/f_3 + d_2) \right]^2 (M^2 \theta_0)^2. \quad (9)$$

通过计算机数值模拟,得到在不同光束质量下两种方式对聚焦光束束腰半径大小及束腰位置的影响,如图 3 所示。

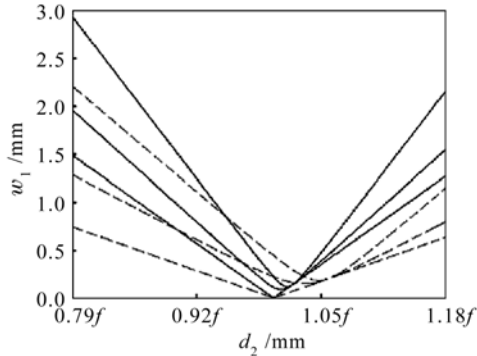


图 3 模拟计算

Fig. 3 Simulation computation

图 3 中虚线对应单透镜聚焦光斑 w_1 相对于 d_2 的变化,实线对应变换后再聚焦 w_1 相对于 d_2 的变化,其中 w_1 为聚焦光斑半径, d_2 和 f 分别为聚焦光斑到聚焦镜主面的距离和聚焦镜的焦距,实线和虚线各对应三条曲线的光束质量因子 M^2 自上而下依次为 120,60 和 1。模拟计算表明单透镜聚焦后的光斑在光束质量变化时,半径和束腰位置的变化都比变换后再聚焦的情况大,因此,光纤耦合系统需要在光束变换后再进行聚焦耦合,以适应光束质量的变化。

2.3 等效束宽

大功率固体激光器输出激光为多模光束,高斯光束束宽定义的是基模光束,不能直接应用于多模光束的光束质量计算,可在多模光束内嵌入一等效基模高斯光束,其束宽等效为:将包含光斑 98% 能量的环围圆径作为束宽的直径。

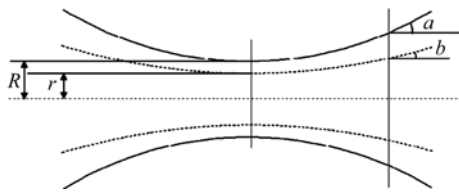


图 4 两束宽的比较

Fig. 4 Comparison of two different beam widths

图 4 中虚线部分为基模高斯光束,对应的束腰处的半径为 r ,远场发散角为 b ,实线部分为多模光束的等效基模光束,对应的束腰处的半径为 R ,远场发散角为 a ,分析基模高斯光束功率密度分布为^[4]

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/\omega^2), \quad (10)$$

式中 I_0 为入射光束功率密度。当 $r = \omega$ 时对应的为高斯定义下的束宽,当 $r = 1.4\omega$ 时对应的为包含光

斑 98% 能量的束宽,即 $R/r = 1.4$,两种定义下所得到的光束参数积 BPP 比值为

$$\frac{\text{BPP}_e}{\text{BPP}} = \frac{R}{r} \cdot \frac{a}{b} = 1.96 = \frac{M_e^2}{M^2}, \quad (11)$$

BPP_e , M_e^2 分别为等效光束的光束参数积和光束质量因子。

3 实验研究

3.1 耦合系统的设计及优化

根据图 2(b) 设计耦合系统。首先根据等效束宽的定义采集光斑后利用双曲线拟合来确定原始光束束腰的大小和位置^[5,6],进而计算得到 BPP 或者光束质量因子 M^2 ,束腰半径 w_0 ,共焦参数 Z_0 。

由单透镜的变换公式^[7]

$$w_{\text{out}} = w_{\text{in}} \cdot \frac{f}{[Z_{\text{in}}^2 + (d_{\text{in}} - f)^2]^{1/2}}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{d_{\text{out}}} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_{\text{in}}} \cdot \frac{1}{1 + \{Z_{\text{in}}^2/[d_{\text{in}} \cdot (d_{\text{in}} - f)]\}}, \quad (13)$$

$$Z_{\text{out}} = Z_{\text{in}} \cdot \frac{f^2}{Z_{\text{in}}^2 + (d_{\text{in}} - f)^2}, \quad (14)$$

$$w(z) = w_{z=0} \cdot \sqrt{1 + (z/Z)^2}, \quad (15)$$

式中 w_{out} , d_{out} , Z_{out} 分别为经过透镜变换后的激光束的束腰半径、束腰到透镜主面的距离以及共焦参数(或者叫作瑞利长度), w_{in} , d_{in} , Z_{in} 分别为入射激光束的束腰半径、束腰到透镜主面的距离以及共焦参数。

(15) 式为自由空间光束变换公式, $w(z)$ 为光束沿光轴传播距离 z 处的束宽半径, $w_{z=0}$ 为光束束腰半径, z 为传输距离, Z 为光束的共焦参数。

图 2(b) 中, $l_1 = f_1 + f_2 - \Delta$, Δ 为离焦量,可表示为

$$\Delta = \frac{f_1^2(f_1 - d_1)}{Z_0^2 + (f_1 - d_1)^2}, \quad (16)$$

$$Z_0 = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot M^2}, \quad (17)$$

式中 d_1 为激光束束腰到透镜 F_1 主面的距离。确定已有参数,可对经过每个透镜变换后的光束进行计算,即可得到最终进入光纤的束腰半径及发散角。

为了保证光纤稳定工作,做以下优化:

1) 使透镜 F_3 的主面在透镜 F_2 的束腰处,保证入射到透镜 F_3 的激光束的准直度尽量好,从而使聚焦激光束的束腰到透镜 F_3 主面的距离保持为稳定值,这样即使光束质量变化,透镜 F_3 也有一定的调节范围。

2) d_2 的大小由透镜 F_3 的焦距 f_3 确定, f_3 的大小由光束质量(便于计算, 选取光束参数积 BPP 描述)、光纤芯径 d_{core} 和数值孔径 NA 决定, 在满足光纤耦合条件(5)式的前提下, 对光纤的接收端面优化, 使光纤芯径的 90% 为通光范围

$$0.9 \cdot \frac{d_{\text{core}}}{2} \cdot \text{NA} = \text{BPP}_{\text{laser}}, \quad (18)$$

$$\text{NA} = \frac{\phi}{2 \cdot f_3}, \quad (19)$$

式中 ϕ 为激光束在透镜 F_3 主面上的光斑直径, 由(18), (19) 式得

$$f_3 = 0.225 \cdot \frac{d_{\text{core}} \cdot \phi}{\text{BPP}_{\text{laser}}}. \quad (20)$$

3) 优化透镜的通光孔径减小衍射损耗, 使透镜 F_3 主面的 90% 范围为最大通光面。透镜直径一般为 20 mm, 所以 $\phi = 20 \times 90\% = 18$ mm, 工业用大功率固体激光器的光束质量变化范围一般为 $10 \sim 24$ mm · mrad, 光纤芯径为 600 μm , 选取最差时的光束质量进行计算确定 f_3 , 将 $\text{BPP}_{\text{laser}} = 24$ mm · mrad, $\phi = 18$ mm, $d_{\text{core}} = 600$ μm 代入(20)式计算有: $f_3 = 101.25$ mm。

4) 根据透镜 F_1 的通光孔径和损伤阈值优化图 2(b) 中 d_1 的取值。

表 1 是在进行光纤耦合时的实验数据, 激光器由北京工业大学激光工程研究院研制, 型号: NCLT CW 2000, 选择光纤的芯径为 $d_{\text{core}} = 600$ μm , 数值孔径 $\text{NA} = 0.22$, 材料为石英, 长度为 15 m, 光纤端面镀 1064 nm 增透膜, 连续 YAG 激光对石英光纤抛光平面的损伤阈值^[8]为 3×10^{11} W/cm²。

表 1 参数选择

Table 1 Parameters determined

Power /W	2000	d_1 /mm	318
Wavelength / μm	1.064	f_1 /mm	120
BPP /mm · mrad	24	f_2 /mm	350
Beam waist /mm	1.9	f_3 /mm	100

根据公式和表 1 数据计算得: 聚焦到光纤端面的光斑半径 $\omega_1 = 270$ μm , 透镜 F_3 上的光斑直径 $\phi = 9.18$ mm, 即在光束质量变化为 $\text{BPP}_{\text{laser}} = 24$ mm · mrad 时, 耦合系统仍然满足光纤耦合的条件。

3.2 实验结果

图 5 为耦合系统的光纤耦合效率与输入功率曲线。

图 5 中耦合效率随着抽运灯输入功率的增加所体现出来的下降与上升主要是光束质量的变化造成

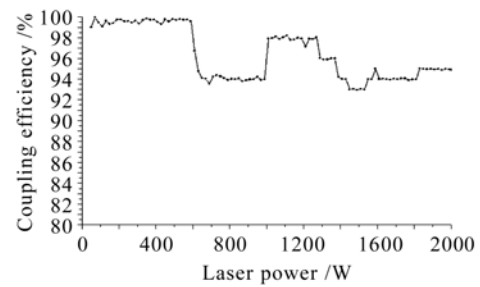


图 5 耦合效率曲线

Fig. 5 Relation between coupling efficiency and laser power

的。随着激光器抽运灯输入功率的增加, 工作物质的热透镜效应就越明显, 激光器的工作状态由稳区进入非稳区再过渡到稳区^[9]。在稳区工作时, 激光器的输出功率随激光器抽运灯输入功率的增加而增加, 且光束质量优于非稳区状态下的光束质量。此外, 透镜的球差和镀膜、光纤端面倾斜、激光与光纤机械对准误差、轴向误差、纵向间隙、角度误差等因素^[10]也会影响光纤耦合效率, 因此, 图 5 中耦合效率曲线的变化是多种因素共同作用的结果。

4 结 论

光纤耦合技术的关键在于准确获得激光器的光束质量因子 M^2 , 针对大功率固体激光器输出的多模激光束的特征准确计算了 M^2 因子, 并优化透镜、光纤等相关参数的取值, 设计出高效率的耦合系统, 成功地实现了输入激光功率为 2000 W 时, 耦合效率大于 94% 的激光输出。影响光纤耦合效率的因素很多, 如何减少或避免这些因素的影响对进一步提高大功率固体激光器的耦合效率有重要的研究价值。

参 考 文 献

- 1 Th. Beck, K. Richter, H. Weber. Beam addition of Nd:YAG-high-power-lasers [C]. SPIE, 1996, **2788**:157~166
- 2 Wang Limeng, Zhang Tingrong, Qin Dajia. Special optical fiber for infrared high-power transmitting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(3):31~38
王黎蒙, 张廷荣, 秦大甲. 用于大功率红外传输的特种光纤[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(3):31~38
- 3 Wei Rong, Wang Yuzhu. Telescope system used to the single mode fiber coupling of the laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):687~690
魏 荣, 王育竹. 望远镜准直系统应用于激光的单模光纤耦合[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):687~690
- 4 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang trans.. Beijing: Science Press, 2002. 174~176
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 174~176
- 5 Lei Hong, Li Qiang, Zuo Tiechuan. Measurement method of

- high-power laser beam parameters [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(4):372~374
- 雷 甸,李 强,左铁钊. 大功率激光光束参数的测量方法[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(4):372~374
- 6 Niu Yanxiong, Wang Yuefeng, Liu Xin *et al.*. Laser beam quality factor M^2 and its measurement [J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(1):38~41
- 牛燕雄,汪岳峰,刘 新 等. 激光光束质量因子 M^2 及其测量 [J]. *激光技术*, 1999, **23**(1):37~41
- 7 Lü Baida. *Laser Optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1986. 117~119
- 吕百达. *激光光学* [M]. 北京:高等教育出版社, 1986. 117~119
- 8 Sheila Galt, Mats Sjoberg, Manuel Lopez Quiroga-Teixeiro *et al.*. Optical breakdown in fused silica and argon gas: application to Nd:YAG laser limiter [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(3):579~584
- 9 Fang Mingxing, Li Qiang, Jiang Menghua *et al.*. Four-rod resonator for krypton lamp pumped CW Nd:YAG laser with high power output [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2005, **17**(11):1644~1648
- 房明星,李 强,姜梦华 等. 四棒串接连续灯泵浦 Nd:YAG 大功率激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11):1644~1648
- 10 Li Yu, Zhang Kuohai, Li Qiang *et al.*. Research on fiber optic coupling for the high - power laser beam [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(5):276~278
- 李 钰,张阔海,李 强 等. 大功率激光光纤耦合技术研究[J]. *应用激光*, 2004, **24**(5):276~278