

文章编号: 1001-3806(2007)05-0456-03

## 基于 CO<sub>2</sub> 激光的双包层光纤端帽熔接实验研究

叶昌庚<sup>1</sup>, 闫平<sup>1</sup>, 欧攀<sup>2</sup>, 巩马理<sup>1\*</sup>

(1. 清华大学精密仪器系, 北京 100084 2 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 光纤端帽可以有效避免高功率脉冲双包层光纤激光器的光纤端面损伤。为了实现大直径双包层光纤端帽的低成本制作, 设计并搭建了基于 CO<sub>2</sub> 激光的光纤端帽熔接实验系统, 研究了光纤端帽的熔接方法和工艺, 利用熔接好端帽的双包层掺铒光纤进行了高功率脉冲光纤激光放大器的实验, 验证了光纤端帽的实际使用效果。实验结果表明, 本装置可以实现高质量、低成本的双包层光纤端帽熔接。采用此方法熔接的光纤端帽可以显著提高光纤的损伤阈值, 同时基本不影响激光输出效率以及光束质量。

**关键词:** 激光技术; 光纤; CO<sub>2</sub> 激光; 熔接; 端帽; 双包层; 脉冲; 损伤

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

### Experimental research of end-cap splicing technique for double-clad fibers based on CO<sub>2</sub> laser

YE Chang-geng<sup>1</sup>, YAN Ping<sup>1</sup>, OUP An<sup>2</sup>, GONG Ma-li<sup>1</sup>

(1. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China 2. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** End cap is effective for avoiding the fiber facet damage of pulsed double-clad fiber lasers under high peak power. In order to achieve end cap assembling of large diameter double-clad fibers with low cost, a fiber end-cap splicing system based on a CO<sub>2</sub> laser was designed and built. The method and process of fiber end-cap assembling was studied. The quality of the end cap was evaluated by testing a high-peak-power pulsed fiber laser, which was assembled with end-caps using our method. The experimental results show that high-quality low-cost splicing of end caps on double-clad fibers can be achieved by our splicing system. The end cap spliced by our method can evidently increase the damage threshold of the fiber. Meanwhile, the influence of the end-cap on the efficiency and beam quality of the laser output is not obvious.

**Key words** laser technique; fiber; CO<sub>2</sub> laser; splicing; end-cap; double-clad; pulse; damage

### 引 言

双包层光纤激光器由于其高效率、高光束质量、简单的热控管理等突出优点, 成为近年来国内外研究的热点<sup>[1]</sup>。相比连续波输出的光纤激光器<sup>[2]</sup>, 具有高峰值功率的脉冲光纤激光器<sup>[3~7]</sup>有着更为广阔的应用前景, 如微机械加工、打标、钻孔、激光雷达、测距等。

由于双包层光纤的纤芯直径仅为 10 μm ~ 30 μm, 在其中传输的高峰值功率激光脉冲的功率密度很高, 因此, 很容易产生光纤的损伤。损伤最容易发生在光纤的端面处, 因为光纤端面在切割或抛光后难以避免残留有缺陷, 使得局部电场加强, 造成材料破坏<sup>[8]</sup>。

为了避免光纤端面损伤的发生, 提高脉冲光纤激

光器的输出能力, 一种简单有效的方法是在光纤端面熔接上端帽<sup>[9]</sup>。端帽的制作需要采用熔接的办法, 使光纤和端帽的材料均匀而完整地结合在一起。电弧型光纤熔接机可以实现这一功能, 但是绝大多数市售的光纤熔接机均是针对 125 μm 直径的标准通讯光纤设计, 由于其光纤夹具、监视器视场、电弧参数等方面的限制, 无法用于熔接双包层光纤激光器中常用的 400 μm 或 600 μm 直径的光纤。只有少数厂家生产可以用于大直径光纤的熔接机, 如 Vytran 公司的 FFS-200Q 爱立信公司的 FSU 15 LD 等, 但是其价格高达数十万人民币。

CO<sub>2</sub> 激光的输出波长为 10.6 μm, 石英光纤对此波长的光具有高吸收系数, 因此可以用作光纤熔接的热源<sup>[10]</sup>。作者利用 CO<sub>2</sub> 激光器自主研制了大直径光纤熔接实验系统, 成功实现了大直径双包层光纤的端帽熔接, 成本仅 1 万元人民币。通过高功率脉冲光纤激光器的实验证明: 采用此方法熔接的光纤端帽可以显

作者简介: 叶昌庚 (1980-), 男, 博士研究生, 现主要从事高功率光纤激光器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: gongn@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-11-24 收到修改稿日期: 2006-12-18

著提高光纤的损伤阈值,同时对激光输出效率以及光束质量的影响不明显。

## 1 端帽结构

端帽是一小段无纤芯、无涂敷层、不掺杂的纯熔融石英光纤,其直径等于双包层光纤的内包层直径,如图 1 所示。在双包层光纤端面熔接上端帽后,纤芯中的

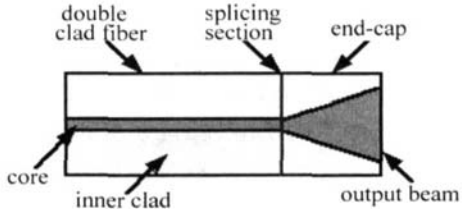


Fig 1 The structure of the fiber end cap

激光进入端帽,失去了纤芯的波导约束作用,使得其在端帽中发散。在端帽的端面处,激光光斑的直径扩大到接近内包层直径,功率密度降低约两个数量级,可以避免端面损伤的发生。

## 2 $\text{CO}_2$ 激光熔接系统实验装置

$\text{CO}_2$  激光熔接系统实验装置示意图如图 2 所示,其中图 2a 为俯视图,图 2b 为熔接部位的侧视图。

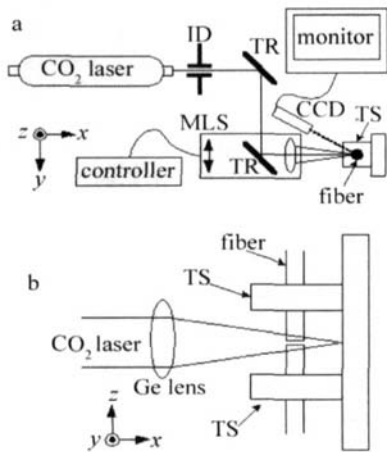


Fig 2 The experimental setup of the fiber splicer based on  $\text{CO}_2$  laser; ID—iris diaphragm; TR—total reflecting mirror; MLS—motorized linear stage; TS—5-dimension adjustable translation stage  
a—top view b—side view

其中  $\text{CO}_2$  激光器输出功率约为 3W,一个可变小孔光阑放置在其前面用来调节通过的激光功率。为了结构紧凑,先用 1 片  $45^\circ$  放置的全反镜将激光反射至图中  $y$  轴方向。另外 1 片  $45^\circ$  放置的全反镜和 1 片 50mm 焦距的锩凸透镜安装在步进电机驱动的一维平移台上,该平移台可以在控制器的控制下沿  $y$  轴方向来回移动,移动的方向、速度都可以由控制器调节。这样通过电控平移台的移动,就可以使  $\text{CO}_2$  激光聚焦光斑的位置沿  $y$  轴方向来回扫描。

双包层光纤和作为端帽的无芯纯石英光纤分别装夹在两个五维光纤调节架中,这样可以保证两根光纤精密对准。光纤的轴向为竖直方向,这样的位置可以避免石英熔化后由重力作用造成的变形。两根光纤的接触部位由一个 CCD 摄像机实时监测,通过监视器可以清晰地看到放大后的图像,方便光纤位置的定位、调节以及熔接状态的观察。

## 3 光纤端帽熔接实验

通过上述实验装置,作者实现了光纤端帽的熔接。实验中采用  $20\mu\text{m}$  纤芯 ( $NA = 0.08$ )、 $400\mu\text{m}$  内包层的掺镜双包层光纤进行端帽熔接实验。端帽的材料为市售的普通国产  $400\mu\text{m}$  纯石英传能光纤。

在熔接之前,必须将两根待用光纤的端面进行仔细处理。先将距光纤端面  $1\text{cm} \sim 2\text{cm}$  的涂敷层用化学方法去除;再用研磨、抛光的方法得到垂直、平整的光纤端面;再用无水乙醇仔细清洁,在 100 倍至 200 倍的显微镜下观察光纤端面,直至无可见的灰尘为止。

将双包层光纤以及纯石英光纤分别装夹在两个五维光纤调节架中,在 CCD 摄像机和监视器的辅助下仔细对准两光纤的位置,并将两光纤端面形成面接触,如图 3a 所示。

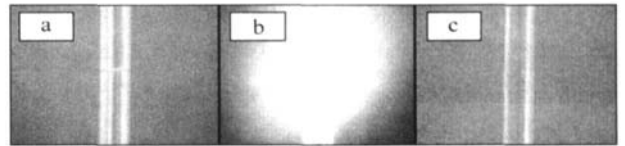


Fig 3 Processes of the fiber end cap splicing

a—precise alignment b—during splicing c—spliced fibers

打开  $\text{CO}_2$  激光器,将小孔光阑的孔径调节至  $0.8\text{mm}$  左右,使较弱的激光通过,用以确定聚焦光斑的位置。调节光纤的位置,使  $\text{CO}_2$  激光通过会聚透镜聚焦在两光纤熔接面附近,并使光纤位置在焦点前方少许,见图 2b,避免焦点处过小的光斑尺寸造成的熔接不均匀。慢慢调节小孔光阑的孔径,根据实践经验确定合适的  $\text{CO}_2$  激光功率。控制电控平移台,使聚焦光斑在熔接面沿  $y$  轴方向多次扫过,如图 3b 所示。在一个位置扫过 2~3 个来回后,转动承载光纤调节架的底板,使光纤绕  $z$  轴方向旋转一定角度,再次重复熔接操作。这样实现了从多个方向熔接,避免了不均匀性。重复数次后,可以得到较均匀的熔接效果,如图 3c 所示。对于非圆形内包层结构的双包层光纤,如 D 形、八边形等,在熔接过程中可以稍微加大激光功率,这样可以增大熔化的石英的流动性,使熔接面附近产生非圆形到圆形的光滑渐变区。

熔接完成后,先在监视器的辅助下在熔接面处做上标记,因为一旦取下光纤,熔接面的位置就不易再找

到。而后,用光纤切割刀在纯石英光纤一侧距熔接面5mm以上距离处将光纤切断,取下熔接有无芯纯石英光纤的双包层光纤。

下一步是使端帽的长度符合要求。将光纤装入卡具中,通过研磨的方法不断减小端帽的长度,间隔一段时间用测量显微镜从侧面测量剩余长度,直至其约为1.7mm,开始精密研磨、抛光。最终,得到长约1.5mm,端面符合输出激光要求的端帽。

#### 4 光纤端帽熔接效果评价

光纤端帽熔接的效果通过脉冲光纤激光放大器的实验进行评价。该光纤放大器采用反向抽运结构,即抽运光和信号光在光纤中反向传输,抽运光输入和放大后的信号光输出都通过熔接有端帽的一端,因此,端帽的熔接质量十分关键。该放大器输出脉冲宽度30ns~40ns,重复频率为40kHz,更详细的参数见参考文献[7]。

##### 4.1 对光纤损伤阈值与激光效率的影响

使用带有端帽的双包层光纤,在输出平均功率大于50W、峰值功率大于40kW、单脉冲能量1.2mJ的情况下没有发生任何端面损伤;而未加端帽的光纤在15W~20W平均功率附近就很容易发生端面损伤。可见端帽的加入大大提高了光纤损伤的阈值。带有端帽情况下光纤放大器在不同抽运功率下输出功率的曲线如图4所示,通过线性拟合,其斜效率为78%,端帽的加入并未明显降低激光器的效率。

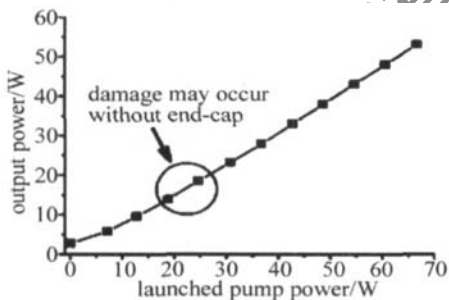


Fig 4 Output power as a function of pump power with end cap

##### 4.2 对输出光束质量的影响

熔接有端帽的双包层光纤利用弯曲损耗的方法滤

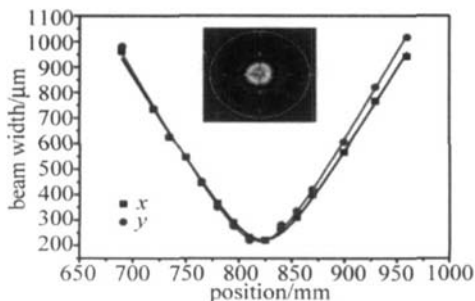


Fig 5 Output beam quality with end cap

除高阶模<sup>[11]</sup>,输出激光的光束质量用 Spiricon M 2-200 光束质量分析仪测试,  $x$  和  $y$  方向的  $M^2$  因子分别为 1.13 和 1.14 接近衍射极限,如图 5 所示。可见端帽熔接均匀,对输出光束质量无明显影响。

#### 5 结 论

采用 CO<sub>2</sub> 激光器设计并搭建了大直径双包层光纤的端帽熔接实验系统,给出了端帽熔接的方法和工艺。利用熔接好端帽的双包层掺镜光纤进行了高功率脉冲光纤激光放大器的实验,验证了光纤端帽的实际使用效果。实验中发现,采用本方法熔接的光纤端帽可以显著提高光纤的损伤阈值,同时对激光输出效率以及光束质量的影响并不明显。实验结果表明,基于 CO<sub>2</sub> 激光的光纤端帽熔接实验系统可以实现高质量、低成本的双包层光纤端帽熔接。

#### 参 考 文 献

- [1] ZENG H, XIAO F. The development of Yb-doped double clad fiber laser and its application [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 438~441 (in Chinese).
- [2] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N *et al.* Ytterbium-doped large core fiber laser with 1.36kW continuous wave output power [J]. Optics Express 2004, 12(25): 6088~6092
- [3] BABUSHKIN A, PLATONOV N S, GAPONTSEV V P. Multi-kilowatt peak power pulsed fiber laser with precise computer controlled pulse duration for materials processing [J]. Proc SPIE, 2005, 5709: 98~102
- [4] MARYASHIN S, UNT A, GAPONTSEV V P. 10mJ pulse energy and 200W average power Yb-doped fiber laser [J]. Proc SPIE, 2006, 6102: 610200-1~610200-5.
- [5] FARROW R L, KLINER D A V, SCHRADER P E *et al.* High peak-power 1.2MW pulsed fiber amplifier [J]. Proc SPIE, 2006, 6102: 61020L-1~61020L-11.
- [6] diTEODORO F, BROOKS C D. Multistage Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses [J]. Opt Lett 2005, 30(24): 3299~3301.
- [7] YE Ch G, GONG M L, YAN P *et al.* Linearly-polarized single-transverse mode high energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50W average power [J]. Optics Express 2006, 14(17): 7604~7609.
- [8] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed. Berlin: Springer, 1999: 667~686
- [9] LMPERT J, HOFFER S, LEM A *et al.* 100W average-power high energy nanosecond fiber amplifier [J]. Appl Phys 2002, B75(4/5): 477~479
- [10] EGASHIRA K, KOBAYASHI M. Optical fiber splicing with a low-power CO<sub>2</sub> laser [J]. Appl Opt 1977, 16(6): 1636~1638.
- [11] KOPILOW J P, KLINER D A V, GOLDBERG L. Single mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. Opt Lett 2000, 25(7): 442~444.