

文章编号: 1001-3806(2005)06-0670-03

TEA CO₂ 激光去除光纤涂敷层的实验研究

彭仁翔, 周次明*, 朱海红

(武汉理工大学 光纤传感技术研究中心, 武汉 430070)

摘要: 采用波长为 10.6 μm 的高能 TEA CO₂ 激光去除 SMF28 光纤涂敷层, 研究了激光脉冲数和能量密度与涂敷层去除效果之间的关系。实验证明, 涂敷层去除厚度随激光能量密度的增加成对数增长, 且在某个范围内去除效果存在一个最佳值。

关键词: 激光技术; 激光剥离; 激光去除; 激光蒸发; 光纤加工; TEA CO₂ 激光器

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Experimental research on removing optical fiber coatings using a TEA CO₂ laser

Peng Ren-xiang, Zhou Ci-ming, Zhu Hai-hong

(Fiber Optic Sensing Technology Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract TEA CO₂ laser pulses whose wavelength is 10.6 μm, are used to remove coatings from SMF28 optical fiber. The relationships between laser fluence, the number of pulses and the ablation depth of optical fiber coatings are investigated. It is shown that the ablation depth of fiber coatings increases with laser fluence in logarithm way and there exists an optimum value in some range to obtain a naked fiber.

Key words laser technique; laser stripping; laser ablation; laser steaming; optical fiber processing; TEA CO₂ laser

引 言

光纤 Bragg 光栅在光通讯和传感中的应用越来越广泛, 而在制作这种光纤光栅时通常需要去除光纤涂敷层^[1,2]。当前, 在实际生产中所采用的光纤涂敷层去除方法一般分为 3 种, 即机械式、化学式和热力学机械式^[3]。机械式去除方法是利用刀片或剥线钳剥离光纤涂敷层, 虽然其设备成本低、携带方便、去除时间短, 但是却存在着人为因素过多、工具容易磨损、重复操作性差、裸纤表面质量难以掌握等缺点; 化学式去除方法与机械式去除方法相比有着去除效果好、剥离长度易于控制、所得光纤抗张强度高优点, 不过这种去除方法工序比较复杂(去除—清洗—干燥), 耗时且可能对环境会造成一定的污染, 因此运用不是很广泛; 热力学机械式去除方法是先对光纤表面进行热加工以软化其涂敷层, 然后通过机械式去除的方法进行剥离, 但是它同样也有着机械式和化学剥离普遍存在的不易实

现自动化控制的缺点, 同时温度的传导还可能会损伤到周围未剥离的涂敷层材料。为了克服上述常规方法存在的缺点, BARNIER^[4]最先提出了用激光去除光纤涂敷层的方法, 即利用高能激光束照射到光纤表面使涂敷层瞬间蒸发, 从而获得裸纤的工艺过程。与传统的机械、化学及热力学方法相比, 激光去除工艺有着安全、高效、清洁、方便、对环境无污染及对光纤损伤程度小等优点, 同时, 也因其易于自动控制而在光纤产品的标准化及产业化加工中具有重要的意义。

国外对激光去除光纤涂敷层的研究比较多, OGU-RA 报道了用深紫外准分子激光和中红外 CO₂ 激光去除光纤涂敷层的实验结果^[3], BARBER 等人也报道了在密封的 He 气室中用 CO₂ 激光去除光纤涂敷层的相关情况^[5]。同时 OBATA^[6]和 ZHOU^[7]等人也分别利用准分子激光和 YAG 激光做过类似的研究。但是据作者所知, 国内关于这方面的研究还未曾见报道。比较上述红外与紫外光源, 在保证去除精度的前提下, CO₂ 激光器以其光透射深度大、使用成本相对较低和工业运用比较广泛等优势将会成为激光去除光纤涂敷层工艺的首选。

作者采用单位脉冲输出能量 1.5J~4J, 重复频率 2Hz 的 TEA CO₂ 激光器对光纤涂敷层进行辐照, 验证了 TEA CO₂ 激光去除光纤涂敷层的可行性, 并初步研

基金项目: 国家“八六三”计划基金资助项目 (2002AA313140)

作者简介: 彭仁翔 (1979), 男, 硕士研究生, 研究方向是光电子材料与器件。

* 通讯联系人。E-mail: zhouciming@hotmail.com

收稿日期: 2004-08-31; 收到修改稿日期: 2004-10-15

究了激光能量密度和脉冲数与涂敷层去除效果之间的关系。

1 去除光纤涂敷层的基本原理

光纤一般由纤芯 ($\varnothing 5\mu\text{m} \sim \varnothing 75\mu\text{m}$)、包层 ($\varnothing 100\mu\text{m} \sim \varnothing 200\mu\text{m}$)、涂敷层 ($\varnothing 250\mu\text{m} \sim \varnothing 300\mu\text{m}$)和护套 4 个部分组成^[8]。在本实验中所研究的光纤为单模光纤 (长飞产 SMF28 光纤), 规格为: 纤芯 $\varnothing 9\mu\text{m}$ 、包层 $\varnothing 125\mu\text{m}$ 、涂敷层 $\varnothing 250\mu\text{m}$ (材料为丙烯酸树脂, 分内外两层, 内层较软用于保护包层, 外层较硬, 其化学性质相似)。如图 1 所示。

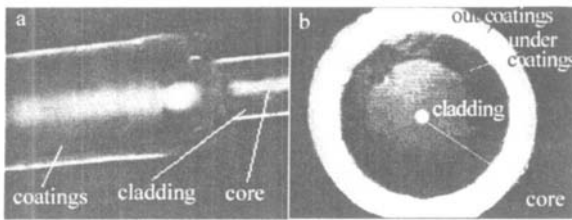


Fig 1 The structure of SMF28 optical fiber
a— side elevation of optical fiber b— section of optical fiber

激光去除也可称为激光蒸发, 其基本原理主要是指经过时间性、空间性聚焦的激光照射到材料表面后, 材料吸收能量瞬间蒸发或汽化并被带动脱离物体表面的过程^[9]。其可以表述为: 能量沉积—涂敷层温升和内能增加—温度达熔化温度及内能达熔化热^{吸收溶解潜热}—涂敷层熔融和喷射—温度和内能继续增加—温度达到汽化温度及内能达到汽化热^{吸收汽化潜热}—涂敷层汽化和喷射^[10]。在此过程中进行有效加热的条件为: 激光的脉冲宽度要小于热辐射时间。

由于光纤涂敷层在 $9\mu\text{m} \sim 11\mu\text{m}$ 的波长范围内存在两个较强的吸收峰 ($9\mu\text{m}$ 和 $10.2\mu\text{m}$)^[4], 且正好可以与 CO₂ 激光波长相匹配, 同时, CO₂ 激光光透射深度较大并在目前工业生产中运用较为广泛, 因此, 实验选用波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的高能 TEA CO₂ 激光以期获得较高的涂敷层去除效率。

2 实验装置及过程

实验使用的 TEA CO₂ 脉冲能量可调谐激光器 (华中科技大学激光技术国家重点实验室研制), 输出波长为 $10.6\mu\text{m}$ (落在涂敷层 $10.2\mu\text{m}$ 的吸收峰中), 重复频率 2Hz (最大 1Hz), 单脉冲最大输出能量为 4J

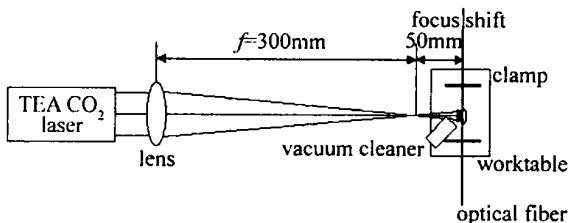


Fig 2 Experimental set up

实验系统如图 2 所示, 光纤 (长飞产 SMF28 型) 放在透镜后焦面处 (焦距 300mm, 离焦 50mm), TEA CO₂ 激光脉冲经聚焦后形成 $\varnothing 7\text{mm}$ 的圆形均匀光斑照射在光纤上, 涂敷层在瞬间汽化脱离光纤并被置于附近的大功率吸尘器吸收。

本次实验反复调节激光器输出能量和脉冲数使之作用在光纤上, 并且采集了多组数据, 其中具有代表性的数据如表 1 所示。表中能量值用能量计 ED-500LR+ (Gentec 公司出品) 测得, 激光能量密度根据公式 $F = E / S$ (E 为单位脉冲的输出能量, S 为光斑面积) 算出。

Table 1 Experimental parameters

Na	1	2	3	4	5	6
energy / (J/pulse)	2.08	2.33	2.60	2.86	3.11	3.30
fluence / (J·cm ⁻²)	5.4	6.05	6.75	7.43	8.08	8.57

3 结果与讨论

根据表 1 中所给的参数值来对光纤涂敷层的去除效果进行讨论和分析。图 3 描绘了在激光能量密度为 $5.4\text{J}/\text{cm}^2$ 3 个脉冲的情况下光纤表面的去除形貌 (利用光学显微镜 Axiovert (德国卡尔·蔡司公司生产) 进行观察)。由图 3 可以看出, 激光辐照光纤表面后形成了一个明显的月牙坑, 且两端 (如图 3a 图 3c 所示) 附着少量残留物, 中段 (见图 3b) 比较光滑, 这是由于涂敷层因导热产生瞬间蒸发并从辐照光斑中心汽化, 而附着溅射物因热扩散不均匀残留在月牙坑两端。

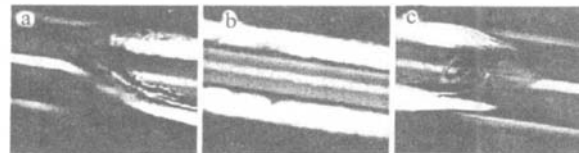


Fig 3 The side elevation of optical fiber at $5.4\text{J}/\text{cm}^2$, 3 pulses
a— left side of crescent pit on optical fiber b— middle part of crescent pit on optical fiber c— right side of crescent pit on optical fiber

图 4 则显示了光纤涂敷层的去除厚度随激光能量密度和脉冲数的变化关系 (通过光纤端面显微镜 (武汉理工大学光纤传感技术研究中心研制) 观测), 所取截面均为激光辐照光纤表面后所形成月牙坑中段平滑处。图 4a 为 $5.4\text{J}/\text{cm}^2$ 、1 个脉冲作用情况下光纤涂敷层的去除效果, 由图可知, 此时光纤外涂敷层去除并不彻底, 内涂敷层完好无损; 而在 2 个脉冲作用下, 光纤外涂敷层全部剥离, 内涂敷层仍然保留 (见图 4b); 到第 3 个脉冲时, 内外涂敷层就已经完全除去 (见图 4c), 且包层表面较为完好。调节激光输出能量密度至 $6.75\text{J}/\text{cm}^2$, 分别使用 1, 2 3 个脉冲作用后, 光纤涂敷层的去除效果如图 4d 图 4e 和图 4f 所示, 可以看到, 在 1 个脉冲的时候 (见图 4d) 光纤外涂敷层已基本

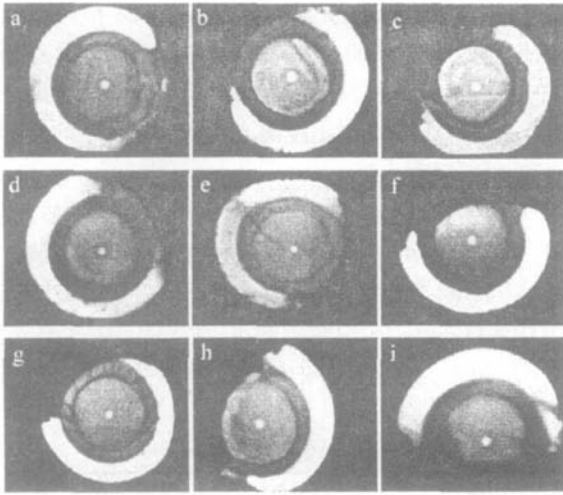


Fig 4 Effects of pulse numbers and fluence on fiber coatings

a b c—the section plane at 1 pulse 2 pulses 3 pulses respectively in $5.4\text{J}/\text{cm}^2$ d e f—the section plane at 1 pulse 2 pulses 3 pulses respectively in $6.75\text{J}/\text{cm}^2$ g h i—the section plane at 1 pulse 2 pulses 3 pulses respectively in $8.08\text{J}/\text{cm}^2$

除去;在 2 个脉冲时(见图 4e)光纤外涂敷层已完全剥离,内涂敷层去除将近 $1/3$;而到第 3 个脉冲时(见图 4f)光纤包层几乎受到了损伤。根据图 4e 和图 4f 中涂敷层的吸收能量可知,去除涂敷层所需能量范围位于 $2.4\text{J} \sim 3.5\text{J}$ 之间。同样,在 $8.08\text{J}/\text{cm}^2$, 1 个脉冲的作用下光纤外涂敷层就已经完全去除(见图 4g);而 2 个脉冲的去除效果与 $5.4\text{J}/\text{cm}^2$, 3 个脉冲时的类似(见图 4h, 图 4c)。在这两种情况下,脉冲数和能量密度的乘积恰好相当,这说明这两者的乘积在某个范围内对涂敷层的去除效果具有等同性。图 4i 是 $8.08\text{J}/\text{cm}^2$, 3 个脉冲的去除效果,此时光纤包层已经受到很大损伤。比较图 4h, 图 4e, 图 4h 可以看出,随着激光能量密度的增加光纤涂敷层的有效去除范围在逐渐变大;同样比较图 4d, 图 4e, 图 4f 也可以看出,随着脉冲数的增加光纤涂敷层的有效去除范围也在逐渐变大。

根据上述讨论的结果:脉冲数和能量密度的乘积在某个范围内对涂敷层的去除效果具有等同性,并且通过光纤端面显微镜的观察,可以得出光纤涂敷层的去除厚度与激光能量密度之间的关系,如图 5 所示。

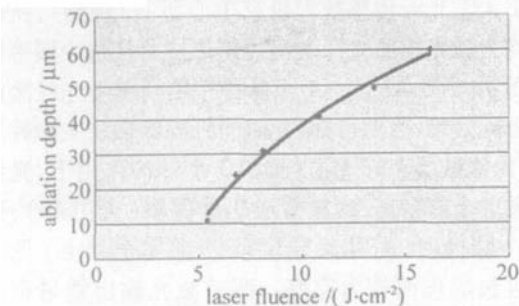


Fig 5 The relation between ablation depth and laser fluence

从图中可以看出,光纤涂敷层的去除厚度随激光能量密度的增加呈对数增长,且正好可以通过 Lambert-Beer

定律^[11] $d = 1/\alpha \ln(F/F_{th})$ (d 为去除厚度, α 为材料吸收系数, F 为激光能量密度, F_{th} 为激光能量密度阈值)进行拟合。通过计算可知,激光在 $16\text{J}/\text{cm}^2$ 的能量密度左右,光纤涂敷层恰好被剥离(去除厚度 $62\mu\text{m}$),这与实验数据刚好吻合,解决了如何控制辐射能量以致不损伤光纤包层的问题。

通过以上的实验数据及现象可以得出以下几点结论:(1)验证了 TEA CO_2 激光去除光纤涂敷层的可行性;(2)光纤涂敷层的有效去除范围随激光能量密度和脉冲数的增加而变大;(3)光纤涂敷层的去除厚度随激光能量密度的增加呈对数增长;(4)光纤涂敷层的去除能量范围位于 $2.4\text{J} \sim 3.5\text{J}$ 之间,且在 $5.4\text{J}/\text{cm}^2$, 3 个脉冲和 $8.08\text{J}/\text{cm}^2$, 两个脉冲作用下去除效果最佳。

4 总 结

在此次实验中,提出了利用 TEA CO_2 激光去除光纤涂敷层的方法,并验证了其可行性。通过在能量密度 $5.4\text{J}/\text{cm}^2 \sim 8.57\text{J}/\text{cm}^2$, 1~3 个不同脉冲数下涂敷层去除效果的比较中,得出在激光器 $10.6\mu\text{m}$ 的输出波长、 2Hz 的重复频率下光纤涂敷层的去除能量范围位于 $2.4\text{J} \sim 3.5\text{J}$ 之间,且在 $5.4\text{J}/\text{cm}^2$, 3 个脉冲和 $8.08\text{J}/\text{cm}^2$, 2 个脉冲作用下去除效果最佳,与国外低能量密度、多脉冲数的加工参数相比,明显地提高了去除效率。如何恰当地选择参数并有效地 360° 去除涂敷层材料将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] 苑立波, ANSARI F. 光纤光栅原理与应用(II)——光纤光栅制作方法[J]. 光通信技术, 1998, 22(4): 312~319
- [2] 冯 鸣,吕可诚,李乙钢 *et al*. 光纤光栅耦合器[J]. 光通信技术, 2003, 27(3): 32~34.
- [3] OGURA G. Laser stripping of optical fibers opens up new applications [J]. Laser Focus World 2001, 37(6): 169~176
- [4] BARNIER F, DYER P E, MONK P. Fibre optic jacket removed by pulsed laser ablation [J]. Appl Phys 2000, 33(7): 757~759.
- [5] BARBER D A, ELBOURN P, GREUTERS J *et al*. A completely laser based production method for fiber Bragg grating devices [J]. Opt & Laser Technol 2003, 35(1): 25~29
- [6] OBATA K, SUGIOKA K, AKANE T *et al*. Influence of laser fluence and irradiation timing of F_2 laser on ablation properties of fused silica in F_2 -Krf excimer laser multiwavelength excitation process [J]. Appl Phys 2001, A73(6): 755~759
- [7] ZHOU X, MASAKI K, FURUKAWA H *et al*. Estimation of laser ablation surface cleaning efficiency [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(9): 642~645.
- [8] 王惠文. 光纤传感器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 1~2
- [9] 中井贞雄. 激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 100~101
- [10] 周 南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 8~9.
- [11] ANDREW J E, DYER P E, FORSTER D *et al*. Direct etching of polymeric materials using a XeCl laser [J]. Appl Phys 1983, 43(8): 717~719