

真空条件下激光诱导光纤损伤特性研究*

赵兴海^{1)†} 胡建平²⁾ 高 杨¹⁾ 潘 峰²⁾ 马 平²⁾

1) (中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621900)

2) (成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

(2009 年 6 月 23 日收到; 2009 年 8 月 30 日收到修改稿)

实验研究并分析了调 Q Nd:YAG 脉冲激光诱导光纤损伤特性. 设计了在真空条件下全石英光纤传输 1064 nm 脉冲激光实验. 通过将激光注入光纤端面气压降低到 10—100 Pa, 光纤端面击穿阈值提高到大气环境下的 1.85 倍. 结合光纤端面损伤形貌分析可知, 光纤端面损伤主要是由于激光驻波场和烧蚀共同作用的结果, 光纤端面或内部大量的缺陷降低了光纤抗激光损伤的能力. 在真空条件下由于光纤端面光学击穿阈值的提高, 激光诱导光纤损伤特性又表现出了另外一种损伤模式——光纤初始输入段损伤. 它发生在光纤输入段附近, 距离光纤输入端面为 5—30 mm 之间, 损伤形貌是长度为 1—3 mm 的炸裂性损伤. 通过理论和仿真分析, 证明光纤初始输入段损伤是由于注入激光在光纤包层和纤芯界面处初次反射造成激光“聚焦”所引起.

关键词: 激光损伤, 光束传输, 真空, 石英光纤

PACC: 4225B, 4281C, 4281D

1. 引 言

通过光纤传输高功率激光到达指定的目标或位置, 所使用的光纤具有柔性好、安全性高、坚固耐用等优点. 在激光加工、光纤探测、光纤激光器和激光点火等方面有重要的应用价值^[1-3]. 目前, 传输高峰值功率的 Nd:YAG 脉冲激光普遍采用大芯径的全石英阶跃折射率光纤, 芯径在 0.4—1.0 mm 之间.

随着人们对激光功率水平需求的不断提高, 光学元件损伤已成为重要的限制因素. 对于光纤传能系统, 激光诱导光纤损伤成为限制光纤传输容量的主要因素. 前期的实验研究表明光纤前端面最易损伤, 这与光纤端面缺陷、瑕疵、杂质微粒等较多以及易受周围环境污染等因素有关^[4-6]. 这些文献中关于光纤损伤研究的实验条件一般是在大气环境下, 而光纤损伤特性还与周围环境, 如气体、压强等有重要的关联. 在真空环境下, 激光与物质的作用机理会有一些的不同, 比如由于真空、准真空条件下蒸气压力远大于环境压力, 汽化不会出现饱和, 汽化表面蒸气粒子动态不平衡, 大部分粒子将因扩散

而离开物质表面^[7]. 本文模拟了一种低真空环境, 实验研究了激光诱导光纤损伤特性, 并与大气环境下的实验结果进行了对比分析, 进一步揭示了激光诱导光纤损伤机理, 包括光纤注入端面损伤和初始输入段损伤机理. 这对光纤传能在真空条件下的适用性研究具有一定的参考价值.

2. 实 验

实验采用芯径/包层为 600/660 μm 的融石英光纤, 数值孔径为 0.22, 光纤端面经过精密机械抛光(图 1); 激光源是波长为 1.064 μm 的调 Q Nd:YAG 脉冲激光器, 脉冲宽度为 5 ns, 空间模式为 TEM_{00} , 光束质量因子 $M^2 \approx 1.2$, 输出光斑直径为 8 mm, 最大输出单脉冲激光能量为 1 J; 透镜焦距为 2 m. 实验装置如图 2 所示, 光纤固定在精密五维调整架上, 放置在真空腔内. 通过能量计测试注入激光能量, 另一能量计检测光纤输出激光能量. 真空腔侧壁有观察窗口, 通过观察窗口可以检测光纤输入端面的损伤情况.

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金重点项目(批准号: 2007A05001)、国防科技预研基金(批准号: 51305070402)和中国工程物理研究院电子工程研究所科技创新基金(批准号: S20070202)资助的课题.

† E-mail: xinghaiestc@126.com



图1 经过机械抛光的光纤端面显微照片

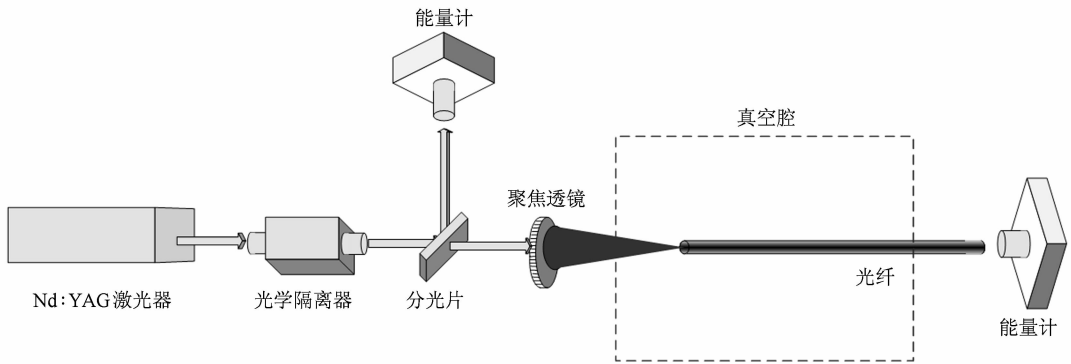


图2 激光诱导光纤损伤实验装置示意图

3. 实验结果

等离子体的产生标志着光学表面已经发生了不可逆转的永久性损伤. 光纤端面发生光学击穿后产生淡蓝色的等离子闪光可以作为光纤端面发生损伤的判据^[1,6-8]. 因此, 在实验中我们以光纤端面连续发生等离子体闪光后的第一次闪光对应的注入激光能量作为损伤能量. 把实验得到的每根光纤端面发生光学击穿时的单脉冲能量从低到高排序, 脉冲编号为 1, 2, 3, ..., I , 其中 I 是某根光纤发生永久性损伤时经历的一个脉冲编号. 在此脉冲能量下光纤被损伤的概率^[9]

$$P(I) = (I - 0.5)/N, \quad (1)$$

式中 N 是实验的光纤总数. 然后对此概率分布进行拟合, 得出零损伤概率下的阈值能量密度或功率密度. 在大气环境和真空条件下光纤端面光学击穿概率曲线如图 3 所示. 大气环境下光纤端面零概率光学击穿阈值能量为 13 mJ, 50% 损伤概率阈值为 24

mJ. 为了更好地对比分析真空条件下的激光诱导光纤损伤特性, 首先在真空腔未抽真空时进行了一组激光诱导光纤损伤实验, 大气气压为 1.01×10^5 Pa. 然后再采用真空泵抽取空气, 制造一种低真空环境, 真空度在 10—100 Pa 之间. 实验时, 激光能量脉冲由小到大逐渐增加到破坏阈值, 激光束以相同的时间间隔多次辐照在元件的同一点上(每个能量段辐照 5 个脉冲), 测试 N 条光纤并统计其损伤概率. 能量逐渐升高的方式, 类似一种激光预处理的过程, 可以部分消除光纤端面的微小缺陷和内应力. 从单脉冲能量 3 mJ 开始, 每次增加 2—3 mJ 直到光纤端面发生不可逆转的损伤.

mJ. 真空条件下线性拟合得到的零概率光学击穿阈值能量为 24 mJ, 50% 损伤概率阈值为 34.7 mJ. 由此可知, 在真空条件下光纤端面发生光学击穿的零概率损伤阈值是其在空气条件下的 1.85 倍, 50% 损伤概率阈值是其在空气条件下的 1.45 倍. 从图 3 还可以看出, 两种情况下的数据拟合曲线基本是平行的, 表明在真空条件下光纤前端面的抗激光损伤能力整体上提高了 10.5 mJ.

光纤端面等离子体的点燃是一个很复杂的过程, 它与激光参数、光纤端面质量、环境等因素有关. 光纤端面气体的等离子体点燃阈值要比气体独立存在时的点燃阈值低得多, 一般要低两个数量级. 光纤端面缺陷的存在可以降低等离子体点燃阈值. 图 4 给出了大气环境下和真空条件下激光诱导光纤端面损伤的显微照片, 它们的损伤形貌无明显差别. 因此, 可以初步判断在大气环境下和真空条件下激光诱导光纤端面损伤的机理并无本质区别. 但是, 光纤端面环境气压的改变会影响激光诱导光纤端面光学击穿阈值^[10].

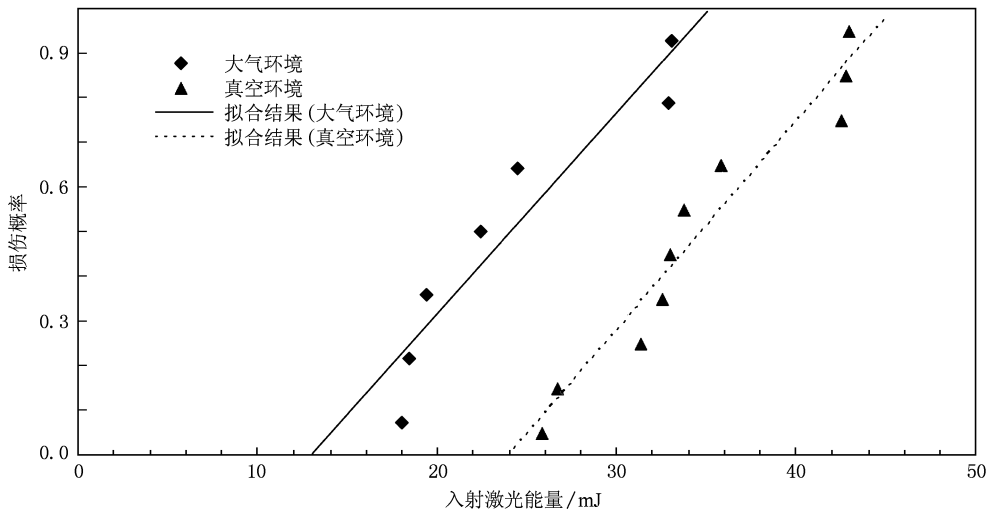


图3 在大气环境和真空条件下光纤端面光学击穿概率

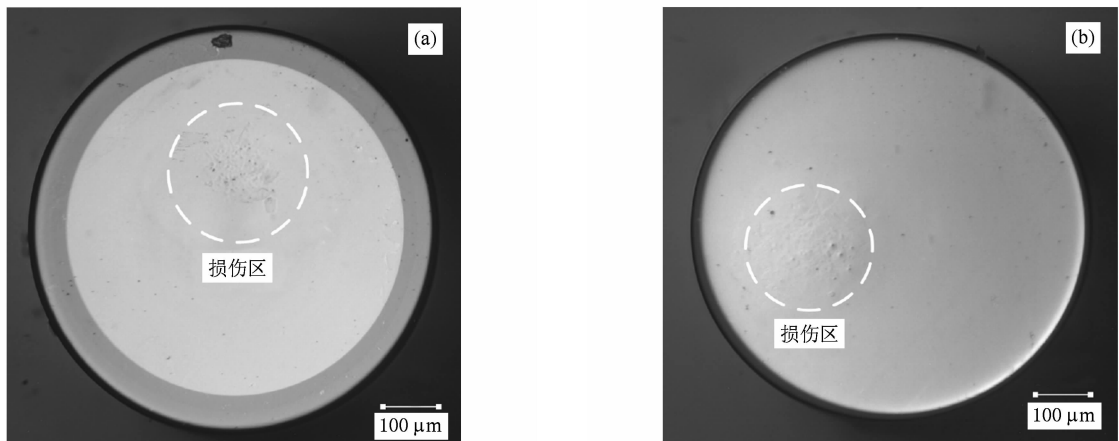


图4 在大气环境和真空条件下的典型损伤形貌 (a)大气环境, (b)真空条件

激光支持爆燃波转激光支持爆轰波(LSDW)的转化阈值判据(数值方程)为^[11]

$$Y = P^m p_0^n \lambda^q, \quad (2)$$

式中 P 为激光功率密度, 单位为 W/cm^2 ; λ 为激光波长, 单位为 μm ; p_0 为环境压强, 单位为 $1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$. 根据大量的实验结果和数值模拟结果, 给出 $m = 2/3, n = 0.2, q = 0.36$, 即

$$Y = P^{2/3} p_0^{0.2} \lambda^{0.36}. \quad (3)$$

根据经验, 当 $Y \geq 3(3-5) \times 10^5$, 就可认为是 LSDW 点火^[11].

通过(3)式可以得出, 当环境气压下降后 Y 值减小, 判据不满足, LSDW 点火概率下降. 这一判据还能作为 LSDW 是否产生的可能性判据或推测, 等离子体点燃和 LSDW 点火除了与以上一些因素有

关外, 还与靶面状况、激光参数等有关. 假设实验环境气压为 10 Pa , 通过(3)式可以计算得出, 在相同的辐照激光功率密度下, 大气环境下光纤端面发生 LSDW 的概率要比真空条件下高 6.3 倍.

文献[12]认为, 等离子体吸收激光能量又推动激波形成激光支持爆轰(LSD), 随着气压的降低, 气体密度减少, 不利于 LSD 的形成, 难以形成温度很高的等离子体. 这应归因于背景气体的热库效应和约束效应.

在本文的真空实验条件下, 60% 的激光诱导光纤损伤部位首先发生在光纤输入段附近, 距离光纤输入端面 $5-30 \text{ mm}$ 之间, 其分布如图 5 所示. 损伤形貌为炸裂性损伤, 损伤形貌如图 6 所示. 从图 6 可见, 一段长度为 $1-3 \text{ mm}$ 的光纤纤芯以及包层全部炸裂.

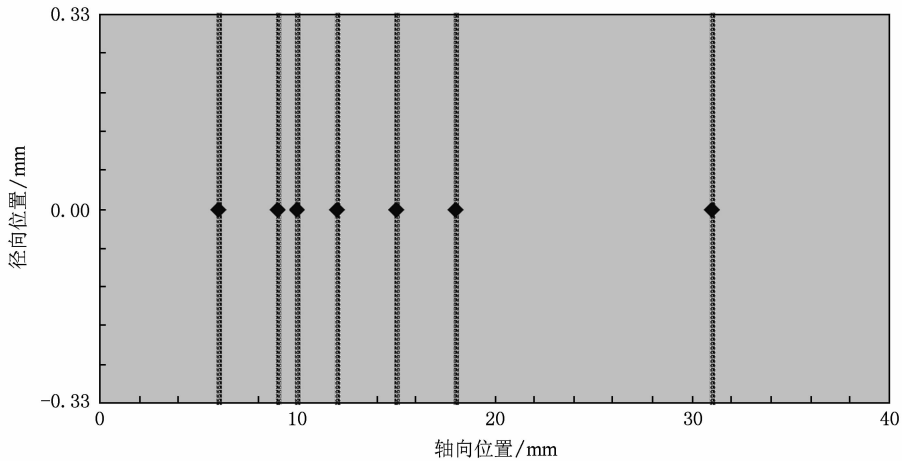


图5 光纤初始输入段损伤截面的位置分布

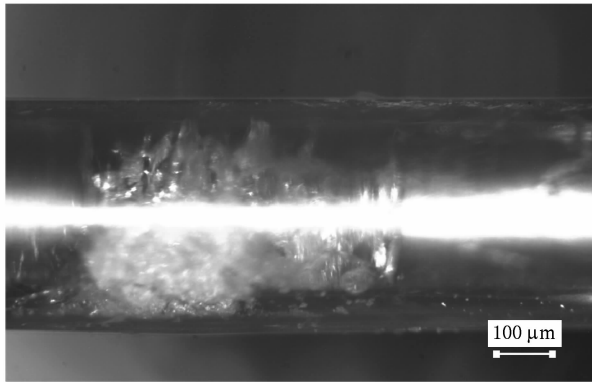


图6 光纤初始输入段由激光引起的炸裂性损伤

4. 结果分析

通过光学显微镜观测得到的光纤端面损伤形貌如图4所示,光纤端面呈现众多麻孔状损伤.进一步的观测发现,损伤整体形貌为烧蚀型坑状损伤,如图7(a)所示.这种坑状损伤为光纤表层烧蚀汽化后形成的,而麻孔状损伤应为亚表层缺陷烧蚀汽化后形成.综合分析表明,这些损伤是由激光驻波场和烧蚀共同作用的结果^[13].

透明介质表面的激光损伤主要由激光产生的电场引起,激光电场会在介质表面和介质内形成驻波场,入射场为

$$E_{\text{ent}} = [2/(n+1)]E_i, \quad (4)$$

式中 E_{ent} 为入射表面的激光电场, E_i 为激光的电场强度, n 为介质的折射率.

当激光入射到光纤输入端面后,由(4)式可得

石英光纤输入端面表面处的入射场为 $0.8E_i$, 入射面的最大电场位于界面的空气侧. 入射激光作用于光纤输入端的表面及亚表层, 介质表面缺陷与其电场相互作用, 吸收激光能量而形成高温等离子体. 激光等离子体形成的高温及激波在空气中得以释放, 将会向外喷溅带走汽化的材料. 高温等离子体闪光区的温度高达 10^5 K 以上, 因而进一步对光纤表面产生热破坏, 通过对石英界面的烧蚀和冲击, 最终形成了烧蚀型坑状损伤. 为了进一步确定光纤端面损伤区域的形貌特征, 采用美国 WYKO 公司生产的白光干涉仪对其进行测量, 结果如图7所示. 由图7可知, 光纤端面形成一个凹坑, 直径为 200—350 μm , 它的大小与注入光斑大小、激光功率密度有关; 深度在 1 μm 左右, 表明了激光对光纤端面的烧蚀和汽化程度.

对于光纤初始输入段, 损伤时该位置遭受的注入激光能量 E_{inj} 为发射激光能量 E_{lan} 与未损伤前耦合效率 C_{eff} 的乘积, 即

$$E_{\text{inj}} = E_{\text{lan}} C_{\text{eff}}, \quad (5)$$

由表1可知, 在大气环境中, 当光纤端面发生等离子体击穿后, 继续增加发射能量会导致光纤初始输入段损伤. 而在真空条件下, 光纤初始输入段首先发生损伤的概率为 60%. 假设耦合效率是一个固定值(60%—75%), 只要对大气环境中和真空条件下发射激光能量作比较, 就可以分析出产生此差异的原因. 通过表1的实验结果可以得出, 光纤初始输入段发生损伤时发射的激光脉冲能量平均值为 34.2 mJ. 与激光诱导光纤端面光学击穿的阈值比较后可知, 空气条件下测试时, 当发射激光能量还

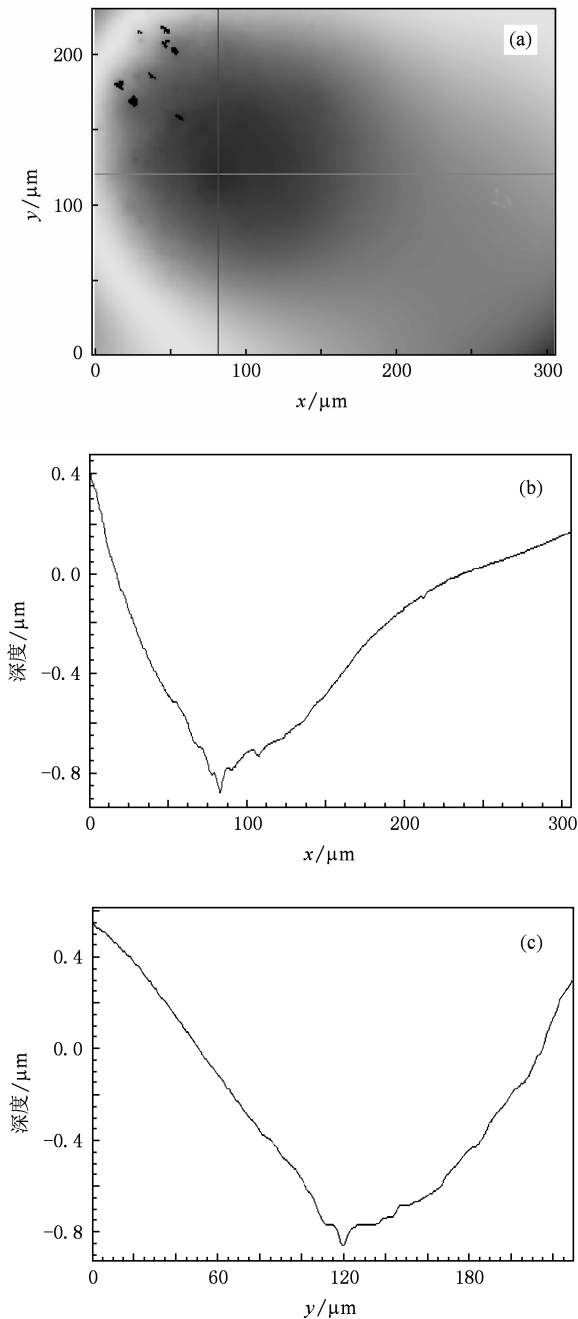


图7 WYKO白光干涉仪测试结果 (a)光纤端面局部凹坑, (b)x方向的粗糙度, (c)y方向的粗糙度

远没有达到光纤初始输入段损伤阈值时,光纤端面首先发生了光学击穿.而在低真空条件下,光纤端面光学击穿阈值得到大大提高,与光纤初始输入段损伤阈值相当,因而频繁出现光纤初始输入段损伤现象.实验结果再次验证了文献[14]关于光纤初始输入段损伤原因的分析结论.如图8和图9所示,当激光与光纤存在对准偏角时,光纤初始输入段就会发生激光“聚焦”现象,出现周期性的激光功率密度

波峰,其中第一个波峰对应着光纤轴向上存在的最大激光功率密度 H_{\max} .一般情况下,我们都能够保证对准偏角小于 5° ,由图8的仿真结果可知, H_{\max} 是完全对准情况下(对准偏角为 0°)在光纤内的峰值激光功率密度的10倍,并且第一个波峰出现的位置分布在0—30 mm之间,如图9所示.这与我们的实验结果相符合.

表1 激光诱导光纤初始输入段损伤特性的实验研究结果

光纤编号	发射能量/mJ	耦合效率/%	注入能量/mJ
1(大气)	34.1	65	22.2
2(大气)	32.3	50	16.2
3	51.9	68	35.3
4	34.0	55	18.7
5	31.3	70	22.0
6	30.2	75	22.7
7	33.8	65	22.0
8	25.7	65	16.7

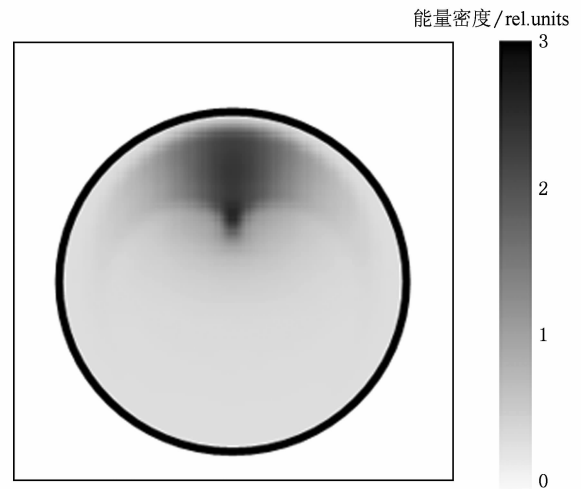


图8 光纤初始输入段初次反射处光纤截面内的能量密度分布

光纤初始输入段损伤形貌为炸裂型,主要是由于基体中的应力超过了材料的抗拉或抗压强度,从而使材料炸裂.这些应力来自于以下两个方面:热应力和杂质汽化蒸气压.在激光能量密度为 $5\text{--}6\text{ J/cm}^2$,脉冲宽度为 10 ns ,Pt杂质汽化后的蒸气压可以达到 31 GPa ,远远超过了石英材料的抗压强度(约为 3 GPa)和抗拉强度(0.5 GPa).而产生的热应力要比石英材料的抗压强度和抗拉强度小1—2个数量级,因而可以忽略^[15].一旦光纤内部发生了炸裂,就会产生大量的微小碎片,这些碎片将强烈

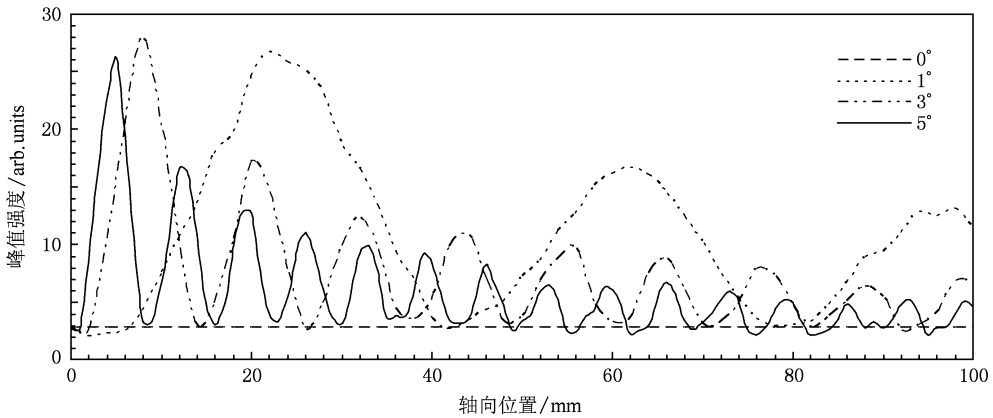


图9 在不同对准偏角情况下光束横截面上存在的峰值功率密度在光纤内轴向的变化

地吸收激光能量,它们对激光的吸收可能比材料的本征吸收高出几个数量级,从而发生更强的炸裂.随着激光能量的不断注入,导致“雪崩式”的炸裂损伤,最终使得光纤断裂.这与我们观测到的以下实验现象相一致:当光纤初始输入段一旦发生损伤后,输出激光能量迅速下降,随后的激光脉冲就可以使得损伤蔓延到整个光纤截面,在光纤轴方向损伤长度为1—3 mm,此时的传输效率降到10%以下,甚至完全无能量输出.

在光纤端面或者内部,特别是在包层与纤芯界面处存在大量的缺陷(如杂质颗粒、微小空洞、微裂纹等),这些缺陷对激光具有强烈的吸收和调制作用.微小空洞、微裂纹等缺陷会使光纤内部局部区域电场增大,从而降低了光纤的损伤阈值.在光纤端面或内部特征尺寸为 $0.1 \mu\text{m}$ 的圆形孔、圆柱形凹槽和椭圆形裂缝处的局部调制电场分别为^[16]

$$E_{\text{sp}} = [3\varepsilon/(2\varepsilon + 1)]E_0, \quad (6)$$

$$E_{\text{cy}} = [2\varepsilon/(2\varepsilon + 1)]E_0, \quad (7)$$

$$E_{\text{cr}} = \varepsilon E_0, \quad (8)$$

式中 E_0 为在均匀电介质内的场强, ε 为材料相对介电常数.由此可知,这些缺陷使得局部场强显著增强.对于石英光纤,它们分别使光纤的损伤阈值降

低到原来的25%,54%和23%.当缺陷的线度小于30 nm后,静电连续理论成立,缺陷区域的电场集中受限,因此对光纤损伤阈值的影响很小^[17].

5. 结 论

采用调Q Nd:YAG激光作为发射源,研究了全石英光纤在大气环境和低真空条件下的光纤损伤特性.低真空条件有利于抑制光纤端面等离子体击穿,光纤端面发生光学击穿的零概率损伤阈值是其在空气条件下的1.85倍.光纤端面损伤是由光纤端面表层烧蚀汽化后形成的,损伤形貌呈现凹坑状.综合分析表明,这些损伤是由激光驻波场和烧蚀共同作用的结果.在真空条件下由于光纤端面损伤阈值的提高,激光诱导光纤损伤特性又表现出了另外一种损伤模式——光纤初始输入段损伤.通过对损伤形貌的实验和理论分析,获得了其损伤的机理.通过对比分析在空气和真空条件下光纤损伤特性,可以更加深入理解光纤损伤机理.本文的研究工作对于一些在真空条件下光纤传能的应用具有一定的参考价值.

- [1] Allison S W, Gillies G T, Magnuson D W, Pagano T S 1985 *Appl. Opt.* **24** 3140
- [2] Richou B, Schertz I, Gobin I, Richou J 1997 *Appl. Opt.* **36** 1610
- [3] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Yu H W 2007 *Proc. SPIE* **6825** 683516

- [4] Setchell R E 1997 *Proc. SPIE* **2966** 608
- [5] Setchell R E 1992 *Proc. SPIE* **1624** 56
- [6] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Yu H W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5027 (in Chinese) [赵兴海、高杨、徐美健、段文涛、於海武 2008 物理学报 **57** 5027]
- [7] Yang Y N, Yang B, Zhu J R, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2007

- Acta Phys. Sin.* **56** 5945 (in Chinese) [杨雁南、杨波、朱金荣、沈中华、陆建、倪晓武 2007 物理学报 **56** 5945]
- [8] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Zhao X, Yu H W 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1627 (in Chinese) [赵兴海、高杨、徐美健、段文涛、赵翔、於海武 2007 强激光与粒子束 **19** 1627]
- [9] Bergman B 1998 *Mater. Sci. Lett.* **3** 689
- [10] Sato S, Ashida H, Arai T, Shi Y W, Matsuura Y, Miyagi M 2000 *Opt. Lett.* **25** 49
- [11] Yuan G, Zhou G Q 1988 *Chin. J. High Pressure Phys.* **2** 182 (in Chinese) [袁钢、周光泉 1988 高压物理学报 **2** 182]
- [12] Man B Y, Miao Y, Guo X X, Wang X T, Zhuo Z 1997 *Chin. Sci. Bull.* **42** 997 (in Chinese) [满宝元、苗勇、郭向欣、万象泰、卓壮 1997 科学通报 **42** 997]
- [13] Hu J P, Zhang W H, Duan L H, Ma P, Xu Q 2006 *Opt. Optoelect. Technol.* **4** 49 (in Chinese) [胡建平、张问辉、段利华、马平、许乔 2006 光学与光电技术 **4** 49]
- [14] Zhao X H, Gao Y 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 1842 (in Chinese) [赵兴海、高杨 2008 光子学报 **37** 1842]
- [15] Hu P, Chen F L 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 961 (in Chinese) [胡鹏、陈发良 2005 强激光与粒子束 **17** 961]
- [16] Bloembergen N 1973 *Appl. Opt.* **12** 661
- [17] Xu S X, Li X S, Zhang G X 1994 *Chin. J. Lasers A* **21** 645 (in Chinese) [徐世祥、李锡善、张国轩 1994 中国激光 A **21** 645]

Laser induced damage and fracture of optical fiber in vacuum chamber^{*}

Zhao Xing-Hai^{1)†} Hu Jian-Ping²⁾ Gao Yang¹⁾ Pan Feng²⁾ Ma Ping²⁾

1) (Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

(Received 23 June 2009; revised manuscript received 30 August 2009)

Abstract

The characteristics of Q-switched Nd:YAG laser induced damage to fused optical fibers has been investigated experimentally. A scheme of laser induced damage to optical fiber in a vacuum chamber was presented and carried out. With this scheme, the air pressures on the input face of optical fiber was reduced to 10—100 Pa, laser-induced breakdown on the optical fiber end face was significantly suppressed, the breakdown threshold increased to 1.85 times that in the atmosphere. The damage morphology of optical fiber end face was analyzed, which was the result of the combined actions of laser pulses standing wave and ablation. The existence of a large number of defects on or under the fiber end face reduces the anti-laser-induced damage ability of the optical fibers. Under the vacuum condition, another damage mode—the fiber “entry” segment damage occurred. This “entry” segment damage mode occurred at 5—30 mm distances from the input end face of optical fiber, the blasting damage area was 1—3 mm long along the fiber core axis. That the initial reflection of laser beam at the interface of fiber cladding and core causes laser focusing which induced the entry damage, was proved by theory and simulations.

Keywords: laser damage, laser beam delivery, vacuum, silica optical fiber

PACC: 4225B, 4281C, 4281D

^{*} Project supported by the Key Program of the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2007A05001), the Advanced Research Foundation for National Defence Science and Technology, China (Grant No. 51305070402) and the Science and Technology Innovation Foundation of Institute of Electronic of Engineering, China Academy of Engineering Physics (Grant No. S20070202).

[†] E-mail: xinghaiuetc@126.com