

石英光纤与空芯光纤损伤特性(对比)研究

成波¹, 郭宁², 吴立志¹, 沈瑞琪¹, 姚艺龙¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094;

2. 上海航天动力技术研究所, 上海 201109)

摘要: 高功率密度脉冲激光的光纤耦合性能一直制约着激光飞片起爆技术的工程化应用。针对 106 W/cm² 级功率密度脉冲激光在光纤中的耦合特性, 设计了一套光纤对准夹具, 用于开放光路下脉冲激光的光纤耦合。使用波长为 1 064 nm, 脉宽 6 ns 的调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光, 研究了其在大功率石英光纤和 AgI/Ag 空芯光纤中的能量传输效率和损伤阈值。结果显示: 在焦点前后 10 mm 范围内, 石英光纤的传输效率平均值为 76.2%, AgI/Ag 空芯光纤的传输效率平均值为 61.8%; 在焦点前 2 mm 处, 测得石英光纤损伤阈值为 22.3 mJ, AgI/Ag 空芯光纤损伤阈值为 29.4 mJ。通过对比结果可知, AgI/Ag 空芯光纤拥有较高的损伤阈值, 然而 AgI/Ag 空芯光纤的传输效率比石英光纤低约 15%, 其工程化应用潜力还有待进一步开发。

关键词: 光纤传能; 高功率激光; 空芯光纤; 石英光纤

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1221002

Damage characteristics of silica fibers and hollow fibers

Cheng Bo¹, Guo Ning², Wu Lizhi¹, Shen Ruiqi¹, Yao Yilong¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Power delivery characteristics of fibers for high power density pulse laser makes it difficult to apply laser-driven miniflyer system into practice. In order to investigate the power delivery characteristics of fibers, an optical fiber fixture was designed in the experimental set up, which was useful to alignment of the laser beam. The transmission efficiency and damage threshold of high-peak power density laser pulses with width of 6ns and wavelength of 1 064 nm via both silica fiber and AgI/Ag hollow fibers with core diameter of 600 μ m are demonstrated. It is found that, within 10 mm from the focal, the average transmission efficiency of the silica fiber is 76.2%, which were 61.8% of the hollow fiber. 2 mm before the focal, the damage threshold of silica fiber and AgI/Ag hollow fiber are 22.3 mJ and 29.4 mJ. By comparing the results that, AgI/Ag hollow fiber has a higher damage threshold, its transmission efficiency is about 15% lower than the silica fiber, its engineering potential still needs to be further developed.

Key words: fiber optic transmission; high power laser; hollow fiber; silica fiber;

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(11202105); 中央高校基本科研业务费专项资金(30920140121002)

作者简介: 成波(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光点火与起爆技术方面的研究。Email: chengbody@163.com

导师简介: 吴立志(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光与含能材料相互作用机理、爆炸测试技术方面的研究。

Email: wulizhi82@163.com

0 引言

激光飞片起爆技术具有时间控制精确,快速响应,抗电磁干扰的特点^[1],满足直列式火工品的应用需求。飞片的驱动通常需要较高峰值的激光功率($< 106 \text{ W/cm}^2$),这对光纤提出了很高的要求,因为现有的传能光纤在传输此量级的激光时,经常发生烧蚀损伤,激光能量很难在光纤中实现有效传输,这一问题严重制约了激光飞片起爆技术的工程化进度。早期的激光能量传输基本都是通过空气传输,直到 20 世纪 70 年代才有人使用光纤来传递激光能量, Landry^[2]发现对于单根光纤,损伤首先发生在光纤内部,而不是在端面;对于光纤束,损伤首先发生在入口端面处的粘结材料上; Allison 等人^[3]发现当使用一个短焦距透镜时,光纤拥有更高的损伤阈值。他们认为不均匀的光分布、激光-光纤对准、以及光纤端面的质量是造成损坏的关键因素,其中改善光纤端面质量是最可行的方法; Trott 和 Meeks^[4]发现导光锥可以降低输入端的对准要求,并且较短的导光锥对于对准误差更敏感,实验中还观察到在大多数情况下损伤首先发生在光纤的后部或出射面; Setchell 等人^[5]观察到损伤最初发生在光纤的出射面,这种损伤通常是更严重的; Su 等人^[6]测试了不同的输入条件(如光束直径和横向对准)对于阶跃折射率的石英光纤的传能影响; Bowdens^[7]发现当光束束腰与光纤端面的相对位置对于光纤的传输效率和损伤阈值的影响; Joshi 等人^[8]通过延长调 Q 激光的脉宽(例如从 10 ns 延长到 50 ns),将阶跃光纤的损伤阈值从通常的小于 5 GW/cm^2 提升到 100 GW/cm^2 以上。国内对光纤传能特性的研究相对还较少,陈吉祥等^[9]开展了关于 Nd:YAG 脉冲(10 ns)激光的光纤耦合传输特性实验,获得了塑料包层石英光纤的一些基本损伤特性;徐世祥等^[10]实验研究了 XeCl 准分子高峰值功率脉冲激光对石英光纤的损伤阈值并对其损伤机理进行了探讨,中国工程物理研究院赵兴海等^[11]人对于高峰值激光的光纤注入、耦合、以及传能特性做了较为系统的研究。2002 年,日本 Matsuura 等^[12]研制出了 COP/Ag 空芯光纤,这种类型的光纤传输高峰值功率激光时显示出了高稳定性和低传输损耗,用直径为 1 mm,长度为 2 m 的 COP/Ag 涂层的光纤可

以得到输出能量 75 mJ,并且在经过 10 万次 80 mJ 脉冲能量的辐射,依然没有发现明显的性能下降。随后 2005 年, Yalin A P 等人^[13]第一次用这种光纤传输纳秒级 Nd:YAG 并在空气中形成火花,2013 年,上海复旦大学石艺尉等人^[14]发明了可用于近红外低损耗的 AgI/Ag 空芯光纤。无论是空芯光纤还是石英光纤,激光在光纤传输系统中的传输效率和损伤阈值较低是制约激光能量利用的两个关键因素,文中在相同的条件下对芯径为 $600 \mu\text{m}$ 的石英光纤和 AgI/Ag 空芯光纤的传输效率和损伤阈值分别进行了测量和对比,以期为激光飞片起爆系统的工程化应用提供实验数据支持。

1 实验装置与方法

选用调 Q 脉冲固体 YAG 激光,脉宽 6 ns,波长 1064 nm,最大单脉冲能量 380 mJ,凸透镜焦距 25 cm,实验所用光纤分为两种:第一种是春晖光纤公司生产的阶跃折射率石英光纤,芯径 $600 \mu\text{m}$,数值孔径 (NA)0.22;第二种是由复旦大学提供的 Ag/AgI 空芯光纤,芯径 $600 \mu\text{m}$ 。光纤的端面质量是影响光纤传输效率和损伤阈值的重要因素,实验中所用石英光纤经过机械抛光,在显微镜下看不到明显的划痕。图 1 为两种光纤的结构示意图。

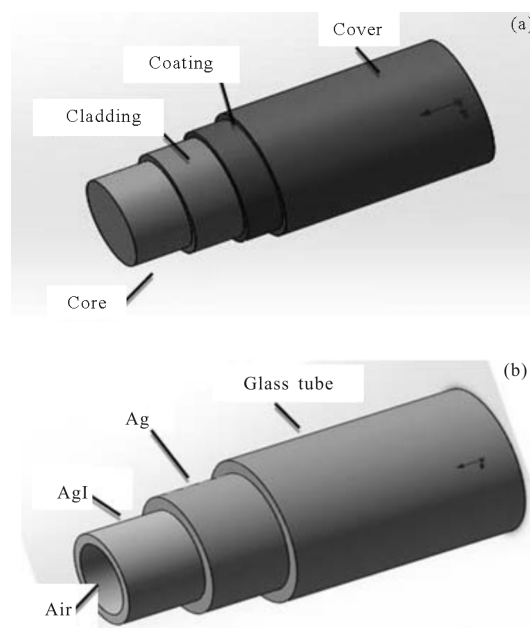


图 1 (a)石英光纤结构图和(b)空芯光纤结构图

Fig.1 Structure diagram of (a) silica optical fiber and (b) hollow fiber

光纤对准环节是实验中的重点和难点,激光与光纤的对准误差对于实验结果有严重的影响,常见的对准误差分为三种:径向偏移,轴向偏移和角度偏移。赵兴海等人^[15]通过模拟发现,当偏移角度小于 5° 时,光纤的传能效率较高。实验中为了控制对准误差,设计了一套光纤夹具,图 2 为光纤对准夹具的尺寸图,令 a 等于光纤的芯径 $600\ \mu\text{m}$, $a/b < \tan 5^\circ$, c 等于光纤的包层外径,用于夹持光纤,为防止光纤松动,同时不能对光纤造成损坏,选择合适的过盈量,采用过盈配合。

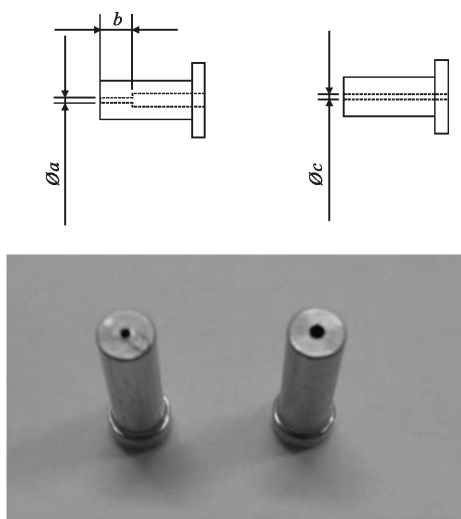


图 2 光纤对准夹具结构及实物图

Fig.2 Image of the optical fiber fixture

光纤传输性能测试装置原理如图 3 所示。实验时,首先调节 5 维调整架,让激光束通过孔 a ,观察小孔两侧能量计的读数,如果读数一致则认为激光对准良好,实验结果表明,用此种方法进行光纤对准节省时间,并且可以重复利用,更换光纤时不需要重新对准。通过能量计 1 和能量计 2,可以实时地检测光纤两端的能量变化情况,并且结合实验现象,对光纤的传能情况进行初步判断。

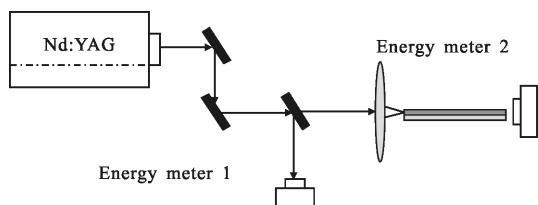


图 3 光纤传输性能测试装置图

Fig.3 Diagram of optical fiber transmission characterization testing device

根据图 3 的实验原理,实验测试了光纤入射端面位置(相对于透镜焦点)对于光纤传输性能的影响,调节激光器的输出能量为 $14\ \text{mJ}$ 的条件下,测试了焦点前后 $10\ \text{mm}$ 范围内两种光纤的传能效率,实验中取焦点位置为 0 点位置,焦点往后方向记为位移正方向。每次移动 $1\ \text{mm}$,每个位置测量三发数据取平均值。

对于光纤的损伤阈值的测量,目前还没有统一的标准,实验中采用多次测量取平均值的方法,测试了距离焦点前 $2\ \text{mm}$ 位置处的光纤能量损伤阈值,每种光纤测试 5 发数据取平均值,每一根光纤的损伤数据是采用 N-ON-1 的测试方法^[16],从单脉冲能量 $5\ \text{mJ}$ 开始,每次增加 $2.5\ \text{mJ}$ 的能量,重复频率小于 $0.5\ \text{Hz}$, (时间间隔为 $2\ \text{s}$),直到第 N 发脉冲发出,光纤出现不可逆性损伤,将第 N 发的脉冲能量记录实验数据。

2 实验结果及分析

2.1 光纤传输效率

光纤入射端面位置(相对于透镜焦点)对于光纤传输性能的影响实验结果如图 4 所示,相同能量下,在距离焦点 $\pm 10\ \text{mm}$ 范围内,两种光纤的传输效率波动不大;石英光纤的传输效率平均值为 76.2% ,空芯光纤的传输效率平均值为 61.8% 。实验结果表明,石英光纤比空芯光纤的传输效率高约 15% 。

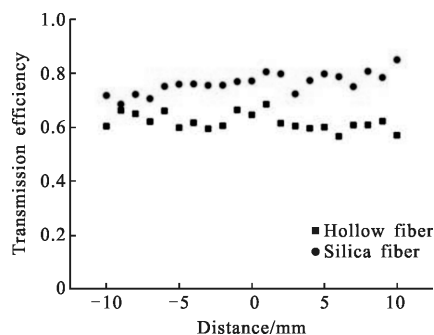


图 4 距离焦点的距离对于光纤传输效率的影响

Fig.4 Influence of fiber transmission efficiency in different distances

选用单个透镜对激光束进行聚焦,可以减少传输过程中的损耗,在理想状态下,激光通过光学系统时,光束参数乘积是一个定值,追求较小的光斑会使光束的发散角变大不利于激光的耦合,所以在激光聚焦时务必满足以下条件^[17]:

$$\omega(z) < d/2 \quad (1)$$

$$\theta < 2NA \quad (2)$$

式中： ω 为光纤端面处光斑半径； d 为光纤芯径； θ 为激光聚焦后的发散角； NA 为光纤的数值孔径。实验中测得离焦点 ± 10 mm 处的光斑直径为 $489 \mu\text{m}$ ，小于光纤的芯径，所以在此范围内移动光纤端面，传能效率基本不变。该实验中在相同条件下，空芯光纤的传输效率比石英光纤低约 15%，与参考文献[18-19]也说到空芯光纤的传输效率较石英光纤低相一致，认为影响光纤传输效率因素主要有数值孔径 NA 和入射条件。文中由于是相同的实验条件下进行对比实验，入射条件的影响可以认为是一样的； NA 一般是针对全反射而言，空芯光纤的传光原理为非涅耳反射，为表示光纤接收光能力的大小，空芯光纤也可用 NA 表示，该实验所用的石英光纤的 NA 为 0.22，根据参考文献[18]的测试结果，同样为日本 Yuji Matsuura 团队做的芯径为 1 mm 的 Ag 层空芯光纤 NA 约为 0.037（传输效率为 57.7%），空芯光纤的 NA 比石英光纤小太多，接收光的能力相应的就小，所以传输效率较低。

2.2 损伤阈值

测量光纤的损伤阈值，需要将激光能量从小到大依次增加，实验中发现当激光能量增加到 20 mJ 时，就会发生空气电离现象，伴随着火花和爆炸声^[20]，如图 5 所示是在 52 mJ 能量下，焦点前后每隔 1 mm 位置对应的光斑烧蚀相纸的形貌，可以看出，以焦点

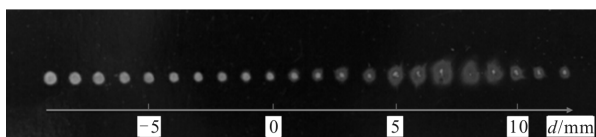


图 5 距离焦点不同位置的光斑形貌
Fig.5 Shape of the spot in different distance

为分界点，焦点前光斑的形貌基本为规整的圆形，并随着离焦点的距离增大烧蚀斑点的直径增大；焦点后，因为在焦点位置发生空气电离，烧蚀光斑的形貌变得不规则，有一个较大的能量中心，向外辐射较小的能量，并且随着距离焦点距离的增加，外围的烧蚀直径先增大后减小。空气电离会产生等离子体屏蔽效应，损耗大量的能量，对于光纤传输效率以及损伤阈值结果的测量有很大的影响，所以该实验在测量

光纤的损伤阈值时，选择将光纤端面位置固定在焦点前 2 mm。

对于光纤的损伤阈值的测量，目前还没有统一的标准，实验中采用多次测量取平均值的方法，测试了距离焦点前 2 mm 位置处的光纤能量损伤阈值，每种光纤测试 5 根数据，测得石英光纤损伤阈值为 22.3 mJ，这与赵兴海^[21]在 2010 年测得同样芯径为 $600 \mu\text{m}$ 的石英光纤 50% 概率损伤阈值为 24 mJ 的实验结果相差不大；单纯从能量大小上考虑，测得空芯光纤损伤阈值为 29.4 mJ 与日本 Yuji Matsuura 等^[12]测得芯径 1mm 的 COP/Ag 膜空芯光纤可以多次传输 75 mJ 激光能量的结果相差甚远，对于芯径不同的光纤，从能量密度角度，计算出 COP/Ag 空芯光纤的损伤阈值为 $9.6 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，AgI/Ag 空芯光纤的损伤阈值为 $10.4 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，AgI/Ag 空芯光纤的损伤阈值比文献中 COP/Ag 空芯光纤的损伤阈值要高。

发现光纤的损伤首先发生在光纤的端面和输入端内部，如图 6 所示，无论是空芯光纤还是石英光纤，发生体损伤的位置离光纤入射端面约 10 mm，并且有高度的一致性。两种光纤的损伤前后形貌如图 7 所示，图 7(a)和(b)分别是空芯光纤和石英光纤的端面损伤前形貌图，图 7(c)和(d)可以看出，两个端面都发生不同程度的损伤，其中，图 7(c)石英光纤端面呈烧蚀型损伤，存在众多的烧蚀坑，并且有很多类似“气泡”形状的损伤，总体这种损伤是由于光纤表层烧蚀气化后形成。图 7(d)空芯光纤的毛细管壁很不平整，发生很多破碎和炸裂的痕迹，内壁的薄膜也发生烧蚀，剥离的现象。图 7(e)和(f)为石英光纤和空芯光纤的输入端体损伤形貌，如图 7(f)所示，空芯光纤的薄膜层发生大面积的烧蚀，整个表面漏光严重，实验中激光无法再继续传播。如图 7(e)所示，石英光纤内部发生断裂式的破坏，光纤内部组织结构完全被损伤，激光传输在此处发生终止。参考文献[3,5,23]的结果也多认为光纤的损伤首先发生在入射端面，损伤位置在 5~20 mm 之间，并且发生损伤的位置和使用的透镜的焦距、对准误差以及光纤夹具有关，文中使用的透镜焦距为 250 mm，损伤位置发生在距离入射端面 10 mm 处，认为是光纤内部自聚焦效应和光纤夹具挤压的共同结果。当进行激光耦合时，在第一次全反射区域附近集中了大量的能量，它可能是未被调制时的数倍或数 10 倍^[22]，当超

过了光纤能承受的范围,发生相应的损伤,通过一定的积累,最终成为结构性的破坏。而距离光纤端面 10 mm 处又恰巧是光纤夹具的末端,此处是承担光纤自重的一个支点,局部受力较大,容易发生弯曲挤压,大大增加了发生损伤的概率。

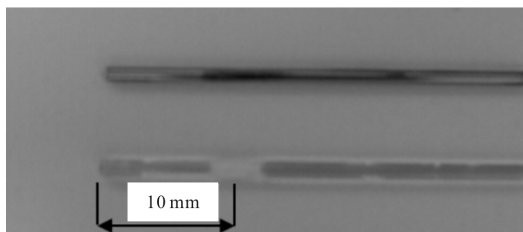


图 6 空芯和石英光纤体损伤位置

Fig.6 Inside damage location of the hollow silica and fibers

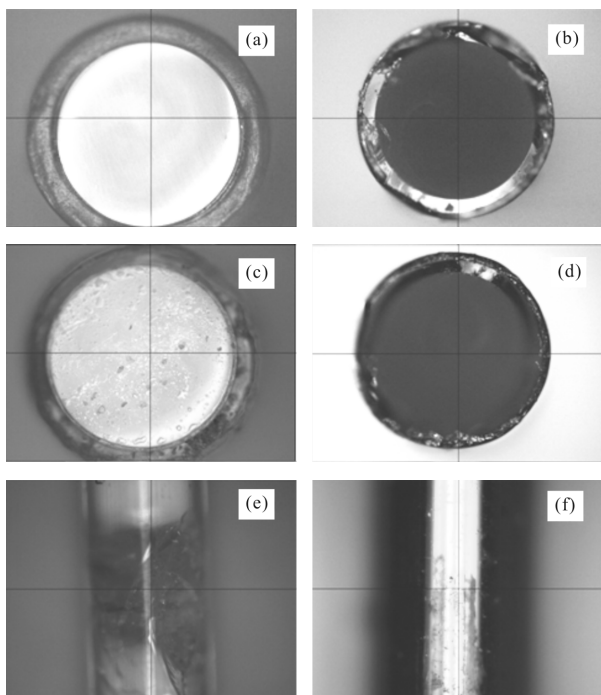


图 7 石英光纤(a)、(c)、(e)和空芯光纤(b)、(d)、(f)损伤前后形貌图

Fig.7 Damage image of the silica(a), (c), (e) and hollow fiber (b), (d), (f)

3 结论

利用波长为 1064 nm, 脉宽 6 ns 的调 Q Nd:YAG 激光, 研究兆瓦级功率密度脉冲激光在芯径为 600 μm 的石英光纤和空芯光纤的耦合特性,设计了一套光纤对准夹具,不仅对准效果良好,而且当更换光纤时可以重复利用,节省时间;实验测得在 14 mJ 能量下, 焦点前后 10 mm 范围内石英光纤的传输效

率平均值为 76.2%, 空芯光纤的传输效率平均值为 61.8%。发现光纤损伤首先发生在入射端面以及初始入射端内部 10 mm 处。在距离焦点前 2 mm 位置处测得石英光纤损伤阈值为 22.3 mJ;空芯光纤损伤阈值为 29.4 mJ。总体上,空芯光纤拥有较高的损伤阈值,然而空芯光纤的传输效率比石英光纤低约 15%, 其工程化应用潜力还有待进一步开发。

致谢: 感谢上海复旦大学石艺尉教授在中空光纤和结果分析方面提供的帮助。

参考文献:

- [1] Kennedy J E. Motivation for laser detonator and firing system developments[C]//SPIE, 2006, 6287: 8-9.
- [2] Landry M J, Large giant and free-running laser pulse energy and power densities through optical fibers in laser [J]. *Laser Induced Damage in Optical Materials*, 1978, (12): 362-541.
- [3] Allison S W. Pulsed laser damage to optical fibers [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(19): 3140-3145.
- [4] Trott W M, Meeks K D. High-power Nd:Glass laser transmission through optical fibers and its use in acceleration of thin foil targets [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, (67): 3297-3301.
- [5] Setchell R E, Meeks K D, Trott W M. High-power transmission through step-index, multimode fibers [J]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 1990, 67 (7): 3297-3301.
- [6] Su D, Boechat A A P, Jones J D C. Beam delivery by large-core fibers: effect of launching conditions on near-field output profile[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(27): 5816-5821.
- [7] Bowden M D, Singleton C A, Drake R C. Characterization of novel optical fibers for use in laser detonators[J]. *Optical Technologies for Arming, SPIE*, 2006, 6287: 1-14.
- [8] Joshi S, Yalin A P, Galvanuskas A. Use of hollow core fibers, fiber lasers, and photonic crystal fibers for spark delivery and laser ignition in gases [J]. *Appl Opt*, 2007, 46 (19): 4057-4064.
- [9] Chen Jixiang, Wang An, Zheng Rong, et al. Characteristics of Q switched Nd:YAG pulsed laser-multi mode fiber coupling and transmission system [J]. *Chinese J Quantum Electron*, 1994, 11(3): 144-149. (in Chinese)
陈吉祥, 王安, 郑荣, 等. 调 Q Nd:YAG 脉冲激光-光纤耦合与传输特性的研究 [J]. 量子电子学报, 1994, 11(3): 144-149.
- [10] Xu Shixiang, Li Xishan, Zhang Guoxuan. The XeCl excimer

- laser induced damage properties of the UV silica fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 1994, 21(8): 645-648. (in Chinese)
- 徐世祥, 李锡善, 张国轩. 紫外石英光纤 XeCl 准分子激光感生破坏特性的实验研究 [J]. 中国激光, 1994, 21(8): 645-648.
- [11] Zhao Xinghai. Power delivery characteristics of fibers for high peak power pulse laser [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2007. (in Chinese)
- 赵兴海. 高峰值功率激光的光纤传能特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007.
- [12] Matsuura Y, Takada G, Yamamoto T, et al. Hollow fibers for delivery of harmonic pulses of Q-switched Nd:YAG lasers [J]. *Appl Opt*, 2002; 41(3): 442-445.
- [13] Yalin A P, DeFoort M, Willson B, et al. Use of hollow-core fibers to deliver nanosecond Nd:YAG laser pulses to form sparks in gases[J]. *Opt Lett*, 2005(16): 2083-2085.
- [14] Zeng Xuan, Liu Binghong, He Yujing, et al. Fabrication of Low-Loss AgI/Ag hollow fibers for laser light delivery in the near infrared region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 72-76. (in Chinese)
- [15] Zhao Xinghai, Gao Yang, Cheng Yongsheng, et al. Analyses on effects of fiber misalignment on transmission characteristics of fiber-optical switch [C]//SPIE, 2006: 374-378. (in Chinese)
- [16] Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian, et al. Experimental methods of pulsed laser induced damage to fibers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(10): 1627-1632. (in Chinese)
- 赵兴海, 高杨, 徐美健, 等. 脉冲激光诱导光纤损伤的测试方法[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(10): 1627-1632.
- [17] Lu Yi, Ke Youjin, He Jiancun, et al. Study of the adjustable focusing optic system for Gaussian Beam [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, 21(4): 5-6. (in Chinese)
- 卢毅, 何友金, 何建存, 等. 高斯光束聚焦系统研究[J]. 光电技术应用, 2006, 21(4): 5-6.
- [18] Parry J P, Stephens T J, Shephard J D, et al. Analysis of optical damage mechanisms in hollow-core waveguides delivering nanosecond pulses from a Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(45): 9160-7.
- [19] Nubling R K, Harrington J A. Launch conditions and mode coupling in hollow-glass waveguides [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(9): 2454-2458.
- [20] Fan Xinyan, Liu Jingjiao. Air breakdown in coupling area of high peak power laser pulse and silica optical fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(9): 1291-1293. (in Chinese)
- 范馨燕, 刘京郊. 高峰值功率脉冲激光与石英光纤耦合的空气击穿问题[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(9): 1291-1293.
- [21] Zhao Xinghai, Hu Jianping, Gao Yang, et al. Experiment on delivery of Megawatt Nd:YAG laser pulses by large-core optical fibers[J]. , 2010, 37(8): 1934-1938. (in Chinese)
- 赵兴海, 胡建平, 高杨, 等. 大芯径光纤传输兆瓦级 Nd:YAG 激光脉冲实验[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1934-1938.
- [22] Zhao Xinghai, Gao Yang. Effect of injection misalignment to multimode fiber power delivery characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1842-1847. (in Chinese)
- 赵兴海, 高杨. 激光注入误差对多模光纤传能特性影响分析[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1842-1847.
- [23] Lu Laiping. Where and why optic fibers fail. How to prevent it[J]. *Laser Medical*, 1995(3): 112-114. (in Chinese)
- 陆来平. 光纤在什么部位容易损坏? 为什么? 如何防止? [J]. 激光医学, 1995(3): 112-114.