

光纤传输激光喷丸强化的实验研究

安中伟 周建忠 黄 舒 陈明阳 朱兴龙 孟宪凯 冯爱新

(江苏大学激光技术研究所, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了使激光喷丸(LSP)强化技术更有效、灵活、安全地应用于工业加工中,使用光纤作为强激光脉冲的载体,构建了一种基于光纤传输的高功率激光喷丸强化系统。采用 N-ON-1 方法检测光纤的损伤阈值,确定相应激光器的脉冲能量,随后对 6061-T6 铝合金板料进行大面积喷丸强化,使用 X 射线衍射仪在金属表面 $10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的区域内检测残余应力分布,同时对比两种激光光斑搭接率(相切、50%搭接)下喷丸强化后的效果。实验结果表明,此系统的峰值功率为 10 MW,传输效率为 80%,在加工试样表面得到了最大为 -160.55 MPa 的残余压应力,为激光喷丸强化的柔性制造提供了一定的理论依据。

关键词 激光技术;激光喷丸;激光传输;光纤损伤;残余应力

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s114016

Experimental Study on Fiber-Coupled Laser Shock Peening

An Zhongwei Zhou Jianzhong Huang Shu Chen Mingyang Zhu Xinglong
Meng Xiankai Feng Aixin

(Laser Technology Institute, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract In order to broaden the industrial application range of laser shock peening (LSP), a system with 10 MW laser pulses delivered by a standard $1000\text{ }\mu\text{m}$ multi mode optical fiber is developed. The system is composed by three units, laser coupling unit, laser delivery unit and laser collimation unit. First of all, N-ON-1 method is selected to measure optical fiber damage threshold and laser pulse energy is determined accordingly. Then, fiber-coupled LSP is carried out on 6061-T6 aluminum alloy sheet metal, and two spot layout schemes are studied to obtain the optimum residual stress. Residual stress is measured by X-ray diffraction method. The largest residual stress induced by LSP on the surface of sample is -160.55 MPa . This system can provide some strong theoretical basis for the flexible manufacture of laser shock technology.

Key words laser technique; laser shock peening; laser delivery; fiber damage; residual stress

OCIS codes 140.3440; 140.3538; 060.3510

1 引 言

激光喷丸(LSP)强化技术是一种新兴的材料表面改性技术,利用超高功率密度(吉瓦每平方厘米量级)和超短脉冲(纳秒量级)的激光束和材料相互作用,在材料表面诱导产生高幅冲击波,冲击强化材料。这种技术可以显著改善材料表面的硬度和残余应力,抑制裂纹源的产生,从而有效提高零件的使用寿命。从 20 世纪 60 年代起,国内外学者对激光喷

丸的机理和工艺做了大量研究^[1],并成功将其应用在航空航天、核工业、汽车和国防装备等领域。但是,目前已有的工作大多是使用激光器发出的激光经光学折反镜传递后冲击靶材表面,也就是所谓的硬光路,其光学传输系统的柔性较差。实验过程中,这种硬光路的调整较为费时,且对场地的要求很高,给使用和实际应用带来诸多不便。而这个问题需要使用光纤,即软光路来解决。

收稿日期: 2012-12-10; **收到修改稿日期**: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51175236)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201107)、江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新项目(CXZZ120659)和江苏大学学生科研立项(11A373)资助课题。

作者简介: 安中伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: yqan213@126.com

导师简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

在激光喷丸强化中使用光纤传输激光的优点有四个:1)使用光纤长距离传输激光的损耗较小;2)激光在长距离传输中完全在光纤内,可以避免光的发散和工作人员在强光中的暴露;3)光纤细且灵活,可以配合机械手等自动化设备,为激光喷丸在实际工业中的应用提供极大的便利;4)使用多模石英光纤传输激光可以得到能量为平顶分布的光斑,有利于提高激光喷丸的强化效果^[2]。相对于硬光路,使用光纤传输强激光会带来诸多优势,但其在使用过程中也会有较多限制,如光纤的损伤阈值和耦合时的电介质击穿等^[3],为此需要进行光纤尺寸及其传输系统的优化设计。

德国学者 Schmidt-Uhlig 等^[4,5]为了在安全距离外远程强化核工业器件,使用了大芯径石英光纤传输 Nd:YAG 激光,开展了水下喷丸强化 304 不锈钢的实验,获得了理想的残余压应力和塑性影响深度,验证了光纤传输激光喷丸强化的可行性。而国内对于高功率、短脉冲激光的光纤传输研究,主要是应用于激光点火和激光驱动飞片等方面^[6,7],目前

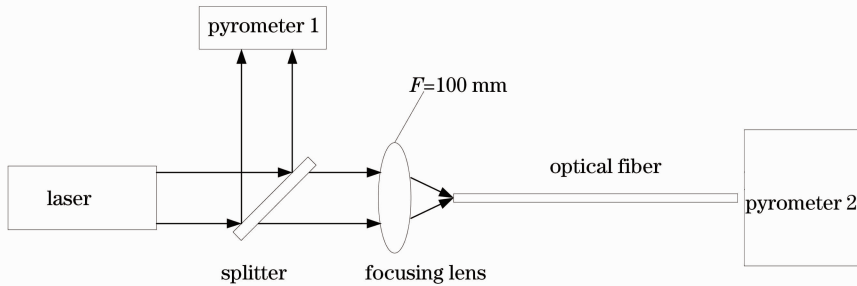


图 1 光纤损伤阈值的测量装置示意图

Fig. 1 Schematic sketch of measurement for fiber damage threshold

光纤端面损伤测试,采用 N-ON-1 方法:激光能量脉冲由小到大逐渐增加到损伤阈值,激光束以相同的时间间隔多次辐照在元件的同一点上。因为能量的逐渐升高方式类似于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^[8]。单脉冲能量从 30 mJ 开始,每次增加 5 mJ,直到光纤出现不可逆性损伤。

Spitlight 型 Nd:YAG 激光器可用的波长有三种,即 1064、532、266 nm,一般激光喷丸强化实验中多采用的波长为 1064 nm,但激光波长的选择不影响激光喷丸的强化效果^[1],可以根据实际条件选择激光器的工作波长。对于一个有效光束直径 d ,其最后的光斑尺寸 W 和波长 λ 成正比,与数值孔径 d_{NA} 成反比,即

$$W = \frac{2\lambda}{\pi d_{NA}}, \quad (1)$$

尚未有采用光纤传输激光喷丸强化的相关报道。

本文进行了光纤传输超短脉冲激光的实验,测量了光纤的损伤阈值,然后搭建了一个基于光纤传输激光的喷丸强化系统,提出了相应的激光喷丸强化的工艺,并通过实验验证了此系统的可行性。

2 光纤传输激光实验

2.1 实验设计

光纤传输激光的实验装置如图 1 所示,主要由 Nd:YAG 激光器、能量计、多模光纤、耦合透镜和分光片构成。光源为德国 Innolas 公司制造的 Spitlight 型 Nd:YAG 脉冲激光器,波长为 532 nm、脉宽为 8 ns、频率为 10 Hz。光纤为北波科技提供的多模阶跃型玻璃包层石英光纤,芯径为 1 mm、长度为 0.3 m、数值孔径(NA)为 0.22。透镜的焦距为 100 mm,能量计为加拿大生产的 Gentec-EO 激光功率能量计。

由(1)式可以看出,在激光器出光有效光束直径一定的条件下(本激光器为 9 mm),波长越短,经过耦合透镜得到的光斑越小,激光进入光纤的耦合率越高^[6]。此外,N-ON-1 方法需要激光脉冲的能量从小到大逐渐增大,而本激光器在波长为 1064 nm 时的最小能量为 80 mJ,不利于光纤端面阈值的测试。最终根据实验中的实际条件,选择 532 nm 作为工作波长。

依据工作波长,最初选择对可见光区具有极高传输效率的液芯光纤。长度为 1 m、直径为 3 mm 的液芯光纤,数值孔径达 0.5,耦合传输效果非常好,但是由于激光喷丸强化对激光脉冲的能量要求太大,液芯光纤无法满足,最终选择数值孔径较小但损伤阈值更高的多模阶跃型玻璃包层石英光纤。由于光纤的直径越大,损伤阈值也相应越大^[5],为了得

到更大的损伤阈值,最终选用国内市面上最粗的芯径为 1 mm 的多模石英光纤。

2.2 实验结果

光纤端面的损伤是从纤维表面的消融(即形成小孔)开始的,损伤引发后,光纤端面在几个脉冲内被完全摧毁,导致输出的能量迅速下降^[5]。实验中单脉冲能量从 30 mJ 开始不断增加,能量计 1 和 2 的示数也不断相应增加,当输入能量在 85~90 mJ 时,能量计 2 的示数突然迅速下降,说明此时光纤端面发生损伤,光纤端面出现明显的烧蚀现象,预估光纤的损伤阈值为 87.4 mJ,光纤损伤阈值的测量示意图如图 2 所示。损伤的光纤端面如图 3 所示,未达到 Richou 等^[3]在实验中测得的 100 mJ,这可能是因为在耦合实验中未使用能进一步提高光纤损伤阈值的真空箱所致。同时,对比能量计 1 和 2 的示数,发现此系统在 30~90 mJ 的能量范围内的传输效率为 80%,与 Schmidt-Uhlig 等^[5]的实验结果一致。

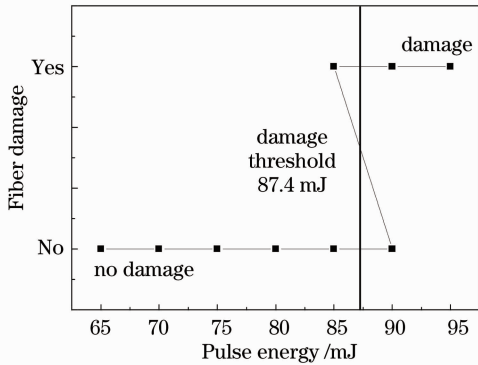


图 2 光纤损伤阈值的测量

Fig. 2 Determination of the fiber damage threshold

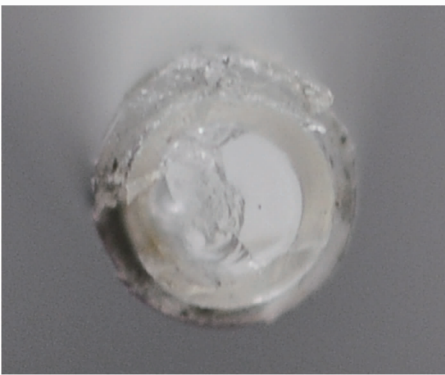


图 3 损伤的光纤端面

Fig. 3 Damaged fiber surface

3 激光喷丸强化实验

3.1 激光喷丸强化的原理

图 4 为激光喷丸强化的原理图^[9],金属试样表

面涂有不透明的吸收层和透明的约束层,通常使用铝箔、黑漆或黑胶带作为吸收层,流水或有机玻璃作为约束层。激光喷丸强化的过程快速且剧烈,实验中激光器发出的一束高能短脉冲经过聚焦透镜会聚到试样表面的吸收层,吸收层吸收激光能量后变为高能等离子体,等离子体迅速膨胀,在约束层的制约下爆炸,形成高能冲击波,冲击波沿金属内部传播,增加金属表面和内部的残余应力,达到强化金属结构、提高金属机械性能的效果。

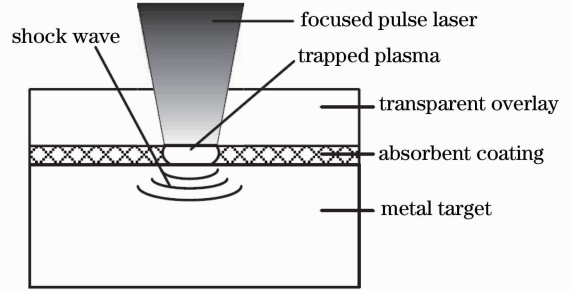


图 4 激光喷丸强化的原理图

Fig. 4 Principle of laser shock peening

3.2 激光喷丸强化实验过程

为了体现光纤灵活便捷的特性,采用 2 m 长的大芯径阶跃型玻璃包层石英光纤弯曲传输激光。由实验可知,此光纤的损伤阈值为 87.4 mJ,为了获得稳定的激光传输,选择 80 mJ 作为激光器的工作能量。激光经光纤传输后,经过准直透镜准直,再通过聚焦透镜将激光会聚到金属试样,光纤传输激光喷丸强化的示意图如图 5 所示。

激光喷丸强化要求激光的功率密度达到吉瓦每平方厘米量级,在光纤传输激光脉冲的能量一定时,为了提高试样表面光斑的功率密度,需要通过调节透镜组减小激光光斑直径。由文献[10]可知,最终光斑的大小与透镜组中准直透镜和聚焦透镜的焦距比有关,即准直透镜的焦距越大、聚焦透镜的焦距越小,最终得到的光斑越小,功率密度越高。但在实验中,由于光纤出光端的发散角一定,准直透镜的焦距越大,需要准直透镜的有效孔径越大,而透镜实际的孔径都是一定的。此外,虽然聚焦透镜的焦距越小,激光喷丸强化的效果越好,但焦距越小,透镜距离加工试样的表面就越近,实验中的高能激光脉冲损伤透镜的可能性越大。综合考虑透镜的孔径和焦距等各种因素,采用焦距为 100 mm 的凸透镜准直和焦距为 50 mm 的凸透镜聚焦。

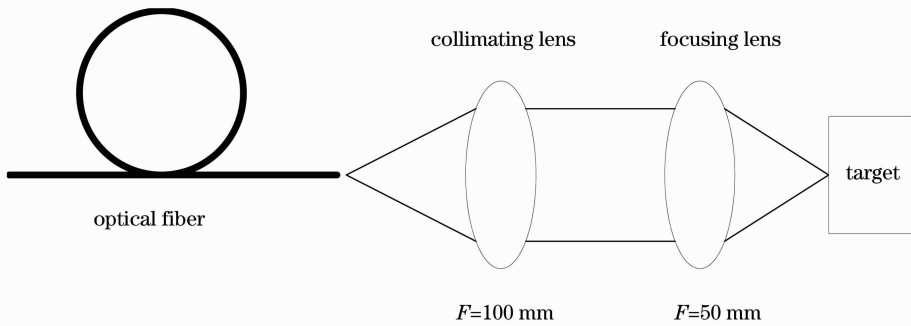


图 5 光纤传输激光喷丸强化的示意图

Fig. 5 Schematic sketch of the setup used for LSP

由实验可知,激光器的工作能量为 80 mJ,整个系统的能量透射率为 80%,最终在金属试样表面得到直径为 0.5 mm、能量为 64 mJ 的圆形光斑。脉冲激光的平均功率密度 I_0 与单脉冲能量 E 、激光脉宽 τ 和光斑直径 d 之间的关系满足

$$I_0 = \frac{4E}{\tau \pi d^2}. \quad (2)$$

由于本激光的脉宽为 8 ns,由(2)式可以计算出此时的功率密度可达 4.07 GW/cm²,满足激光喷丸强化对激光脉冲能量的要求。

实验中,激光喷丸强化的材料为 6061-T6 铝合

金,该材料强度高、延展性好、抗腐蚀性强,广泛应用于机械、航空、汽车和冶金等领域。所选 6061-T6 铝合金平板的尺寸为 100 mm×50 mm×3 mm,黑漆作为吸收层,BK7 玻璃作为约束层。激光处理区域面积为 10 mm×5 mm,由于单个光斑的直径仅仅为 0.5 mm,在实际加工中需要在加工区域中采用多个光斑搭接的方式来达到强化目的。为了对比不同工艺得到的效果,选用相切和 50%搭接两种光斑搭接率实施喷丸强化,如图 6 所示,箭头表示激光光斑的移动路径。

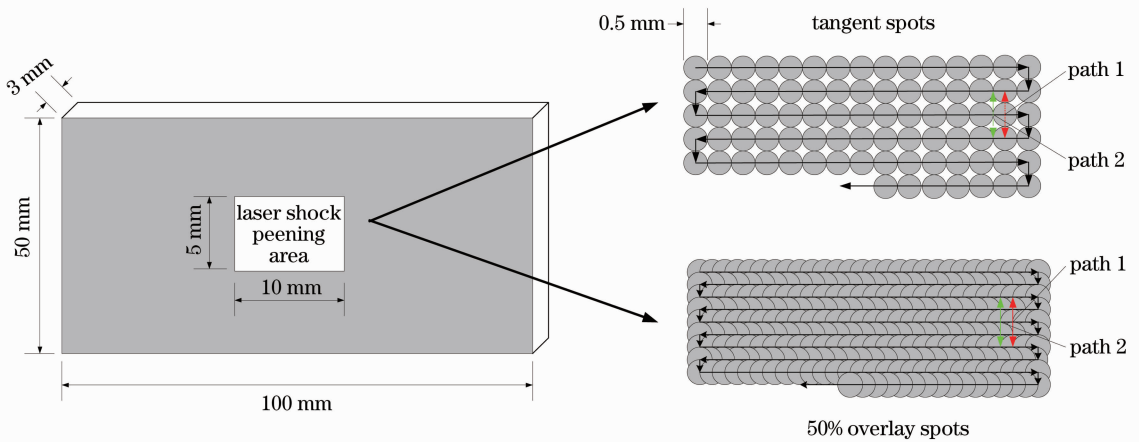


图 6 试样尺寸和喷丸强化的两种工艺

Fig. 6 Sample size and two kinds of techniques of LSP

3.3 激光喷丸实验结果

激光喷丸强化 6061-T6 铝合金后,最终得到的试样如图 7 所示。图 7(a)为光斑相切时喷丸得到的结果,图 7(b)为光斑 50%搭接时喷丸得到的结果。可以看出光斑相切时试样表面的黑漆并未完全气化,但在 50%搭接时表面的黑漆已全部气化,进一步增加光斑的搭接率会使激光直接烧蚀金属表面,不利于激光喷丸的强化效果^[4],因此没有进一步提高激光喷丸的光斑搭接率。

按照图 6 中所选取的两条具有代表性的路径[路径 1 为红色,路径 2 为绿色(彩图见网络电子版)],使用 X-350A 型 X 射线衍射仪分别检测两种光斑搭接率下金属表面的残余应力,结果如图 8 所示。结果表明,光斑相切时在金属表面得到的残余应力主要集中在 -20~-105 MPa 之间,最大残余应力为 -108.62 MPa,而 50%搭接时表面残余应力主要集中在 -120~-160 MPa 之间,最大可达 -160.55 MPa。同时,如图 8(b)所示,光斑 50%搭

接时能在路径二上得到更加平整均匀的残余压应力层,残余压应力也比光斑相切时更大,应力强化效果非常显著,因此光斑 50% 搭接时可以得到更优的应

力强化效果,这说明此方案的效果较好。本实验最终验证了基于光纤传输激光喷丸强化的可行性。

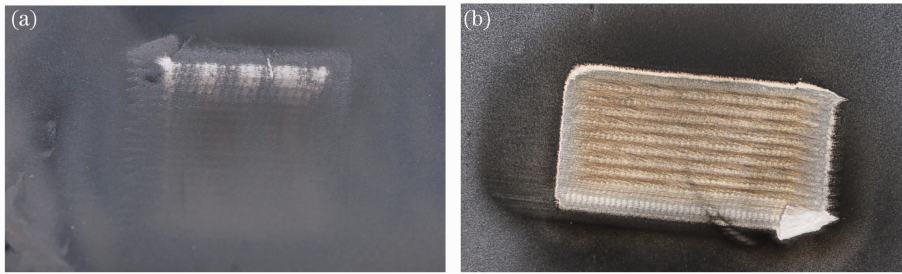


图 7 光斑(a)相切和(b) 50% 搭接下激光喷丸的结果
Fig.7 Results of LSP (a) tangent spots and (b) 50% overlay spots

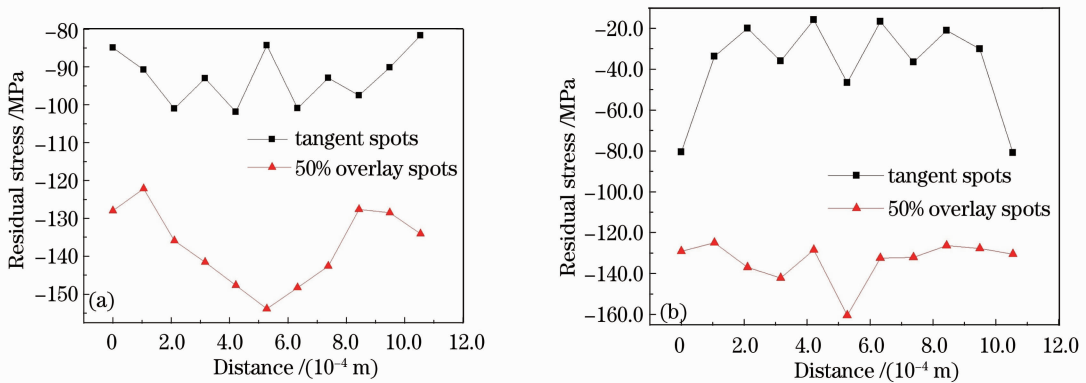


图 8 沿不同路径的残余应力测试结果。(a)路径 1; (b)路径 2
Fig. 8 Results of surface residual stress along (a) path one and (b) path two

4 结 论

采用光纤传输激光技术在金属表面得到了显著的强化效果,为柔性化的激光喷丸强化系统在工业生产中的大规模应用提供了手段。

通过优化光纤传输系统,获得了高达 80% 的传输效率和 10 MW 的峰值功率。设计了用于激光喷丸强化的准直系统,得到了直径为 0.5 mm 的光斑,使光斑上的平均功率密度达到 4.07 GW/cm²,满足了激光喷丸强化对激光脉冲能量的要求。以 6061-T6 铝合金为研究对象,进行了基于光纤传输激光的大面积喷丸强化实验,尝试了两种不同的光斑搭接率,表明光斑搭接率为 50% 时的强化效果较好。使用优化的光纤传输系统和激光喷丸工艺参数,在试样表面获得了最大可达 -160.55 MPa 的残余压应力值,满足了材料表面强化的要求。

参 考 文 献

1 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the

physics and applications [J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 1995, 27(12): 1213~1229

2 Xia Yanwen, Ye Jinxiang, Liu Hua *et al.*. Study one the propagation characteristic of ultraviolet picosecond laser pulse in step-index multimode fiber [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(3): 284~288

夏彦文, 叶金祥, 刘 华等. 激光脉冲在阶跃型多模光纤中的传输[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(3): 284~288

3 B. Richou, I. Schertz, I. Gobin *et al.*. Delivery of 10-MW Nd:YAG laser pulses by large-core optical fibers; dependence of the laser-intensity profile on beam propagation [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 37(7): 1610~1614

4 T. Schmidt-Uhlig, P. Karlitschek, M. Yoda *et al.*. Laser shock processing with 20 MW laser pulses delivered by optical fibers [J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2000, 9(3): 235~238

5 T. Schmidt-Uhlig, P. Karlitschek, G. Marowsky *et al.*. New simplified coupling scheme for the delivery of 20 MW Nd:YAG laser pulses by large core optical fibers [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, 72(2): 183~186

6 Zhao Xinghai. Study on High Power Laser Delivery Characteristics of Fibers [D]. Mianzhu: China Academy of Engineering Physics, 2007. 10~17

赵兴海. 高功率激光的光纤传能特性研究[D]. 绵竹: 中国工程物理研究院, 2007. 10~17

7 Zhao Xinghai, Zhao Xiang, Gao Yang *et al.*. Fiber-coupled laser-driven flyer plates experiments [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011,

60(11): 723~729

赵兴海, 赵翔, 高杨等. 光纤传输激光驱动飞片实验研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(11): 723~729

8 Zhao Xinghai, Hu Jianping, Gao Yang *et al.*. Experiment on delivery of megawatt Nd:YAG laser pulses by large-core optical fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37(8): 1934~1938

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

9 Y. Hu, Z. Yao, J. Hu. 3-D FEM simulation of laser shock processing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(3): 1426~1435

10 US Laser Corp.. User's Manual [M/OL]. <http://www.uslasercorp.com/envoy/fobdstep.html>

栏目编辑: 何卓铭