

超声波辅助飞秒激光加工光纤材料的工艺探索

刘 斌 戴玉堂 殷广林 李 涛

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 为了研究超声振动对飞秒激光微加工的影响,设计超声辅助装置,进行石英光纤材料的微结构加工试验。探讨不同功率的超声振动对材料加工表面质量及孔深的影响,明确超声辅助飞秒激光加工的作用机理。引入超声振动后,光纤侧面烧蚀的矩形槽壁面更为平整,残留碎屑明显减少,槽或孔的深度有所增加;在超声功率为30 W时,孔的锥度由 7.34° 减小到 4.17° 。结果表明,超声振动能有效改善材料加工表面质量,增加加工孔的深度,提高飞秒激光的加工效率,证明超声振动对飞秒激光加工具有明显的改善作用。

关键词 激光光学; 飞秒激光; 微加工; 超声振动辅助; 表面质量

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0303005

Exploration on Ultrasonic Vibration Aided Femtosecond Laser Machining Process of Fiber Optic Materials

Liu Bin Dai Yutang Yin Guanglin Li Tao

National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology,
Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract To study the effects of the ultrasonic vibration on femtosecond laser micromachining, an ultrasonic aided device is designed, and the laser micromachining experiments of fiber optic materials are carried out. The effects of the ultrasonic vibration with different powers on surface quality and the drilling depth are investigated. And the mechanism of the ultrasonic vibration aided laser machining is analyzed. After introducing the ultrasonic vibration, the inner surface of the ablated trench is cleaner, the residue debris on surface is significantly reduced, and the drilling depth is increased. When the ultrasonic power is 30 W, the taper of the hole is reduced from 7.34° to 4.17° . The results show that, ultrasonic vibrations can effectively improve the surface quality of materials, increase the depth of the drilled hole, improve the efficiency of the femtosecond laser processing. It is also confirmed that, the ultrasonic vibration has significant effect on improving femtosecond laser processing performance.

Key words laser optics; femtosecond laser; micromachining; ultrasonic vibration aided; surface quality

OCIS codes 140.3390; 140.7090; 160.6030; 320.2250

1 引 言

飞秒激光是时域脉冲宽度在飞秒量级的激光。近年来,国内外许多学者从事飞秒激光研究、开发与应用,促进了飞秒激光技术的快速发展^[1-3]。飞秒激光因其具有加工热影响区小、不产生冲击振动、精确靶向聚焦定位、瞬时功率高^[4]等特点而广泛用于微加工领域^[5-8]。然而在飞秒激光加工过程中,烧蚀材料冷却后形成的碎屑有阻碍飞秒激光束辐射效能的倾向,特别是在打深孔和深槽加工中尤其明显,这将影响其最终加工效果。

超声波通常指振动频率大于20 kHz的纵波,因其在媒介中传播会产生机械效应、空化效应、热效应、化

收稿日期: 2015-09-08; 收到修改稿日期: 2015-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(51175393, 61475121)、湖北省自然科学基金(2014CFB260)

作者简介: 刘 斌(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光微加工与光纤传感方面的研究。E-mail: lb199108@126.com

导师简介: 戴玉堂(1965—),男,博士,教授,主要从事激光微加工与光纤传感方面的研究。

E-mail: daiyt68@163.com(通信联系人)

学效应^[9]而广泛用于辅助加工中。超声辅助加工技术是在加工工具与工件相对运动的基础上引入超声振动辅助,以获得更好的加工性能。如今超声振动已被广泛用于深小孔加工、硬脆材料加工、复合加工等领域。与普通磨削加工SiC陶瓷基复合材料相比,超声振动可使磨削力降低约20%,表面粗糙度改善约30%^[10]。目前在激光加工领域,王维等^[11]研究了超声振动对BT20钛合金激光熔覆过程的作用,并且开展了超声辅助钛合金激光沉积成形试验的研究^[12],取得了显著的效果,表明超声辅助在激光加工领域存在较大潜力。

鉴于超声振动在加工领域的显著促进作用,本文旨在飞秒激光微加工过程中引入超声振动辅助,以降低烧蚀碎屑对飞秒激光加工效果的负面作用,重点探讨超声辅助工艺参数对加工表面形貌、打孔锥度和打孔深度的影响。

2 原理与试验装置

2.1 超声振动辅助加工原理

飞秒激光与材料的相互作用包含一系列复杂的物理过程,并最终导致材料结构和形貌的改变。当飞秒激光辐照在待加工石英材料表面时,材料中的自由电子经多光子电离和雪崩电离后获得很高的能量而处于非平衡态,并发生一系列的复杂物理过程,进而发生材料的融化气化和去除。溅射的等离子体在光压、温度骤降等条件下可发生重凝回落,甚至与加工深处电离或气化材料残留物聚合凝结成小液滴,在重力以及电子间的相互吸引下,这些小液滴堆积在加工表面形成固体小颗粒或凸起。超声辅助加工时,超声振动主要以纵波形式传播,加工材料内各质点沿着加工方向按正弦规律振动,从而降低残留颗粒在加工表面的附着度,超声振动也会加快等离子体流动,使气化物质和残留物迅速排出,减少残留碎屑的堆积。碎屑的迅速排出使得激光束可以辐射到更深的部分,从而提高打孔深度。超声辅助的飞秒激光微加工示意图如图1所示。

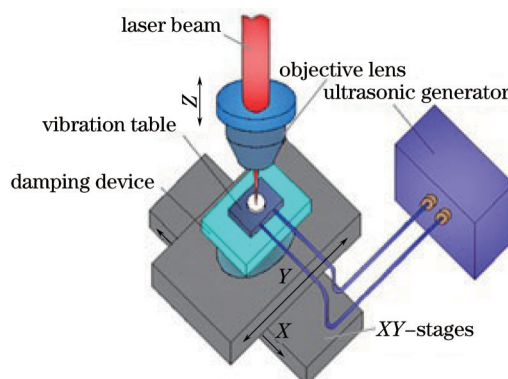


图1 超声振动辅助的飞秒激光微加工系统示意图

Fig.1 Diagram of ultrasonic-aided femtosecond laser micromachining system

2.2 功率超声振动装置设计

功率超声振动装置由功率超声发生器和超声振动系统两部分组成。超声振动发生器实现工频电流与超声频的震荡电流信号的转换,再通过阻抗匹配网络激励换能器实现正弦超声振动的输出。装置的输出端是超声变幅杆,其主要目的是放大输出振幅,结构如图2所示。

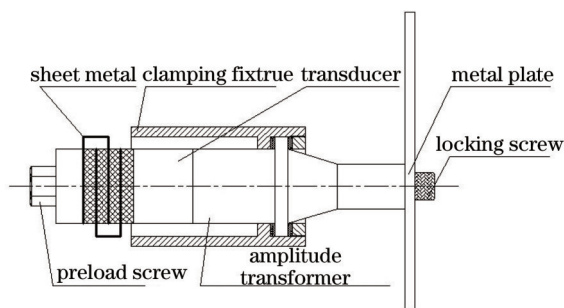


图2 功率超声装置结构示意图

Fig.2 Diagram of ultrasonic vibration device structure

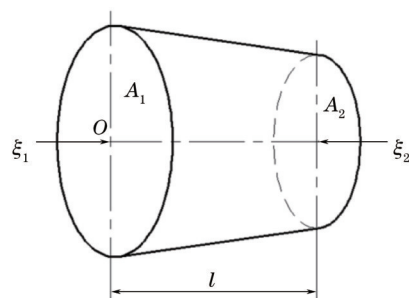


图3 圆锥形变幅杆结构示意图

Fig.3 Diagram of conical amplitude transformer

超声变幅杆的主要作用是把机械振动的质点位移或速度放大,并将超声能量集中在较小的面积上,从而增大振幅。另外,作为机械阻抗变换器,在换能器和声负载之间进行阻抗匹配,从而减小能量的损耗,通常的变幅杆有圆柱形、阶梯形、圆锥形、指数形和悬链形等结构,试验采用圆锥形变幅杆结构^[13],如图3所示。

建立直角坐标系,以大端圆心为坐标原点,设在原点 O 处的直径为 D_1 , $x=l$ 处的直径为 D_2 ,可得到:任意截面 $D=D_1(1-mx)$,面积 $A=A_1(1-mx)^2$ 。其中: $m = \frac{D_1 - D_2}{lD_1} = \frac{n-1}{n}l$, $n = \frac{D_1}{D_2}$ 。

对变幅杆而言,假定任意截面的振幅为 ξ ,则波动方程为

$$\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + k^2 \xi = 0, \quad (1)$$

式中 k 为谐振波数。假设变幅杆两端的振幅分别为 ξ_1 和 ξ_2 , a 为任意截面的振动加速度,经推导波动方程的解为

$$\xi = \frac{1}{x - (l/a)} [c_1 \cos(kx) + c_2 \sin(kx)], \quad (2)$$

式中 $c_1 = -\xi_1/a$, $c_2 = \xi_1/k$,可求解出变幅杆两端振幅的放大系数为

$$M = \frac{\xi_2}{\xi_1} = \left| n \left[\cos(kl) - \frac{n-1}{knl} \sin(kl) \right] \right|. \quad (3)$$

为研究超声辅助飞秒激光微加工工艺,需设计构建对应的超声振动装置。根据试验要求,该装置需要满足以下几点:1)装置终端输出的振动波与激光束方向一致,横向扰动尽可能小;2)装置终端输出的振幅能达到 $6\sim 9 \mu\text{m}$;3)受激光加工平台对载重的限制,装置尺寸应尽可能小巧,且总质量不超过 3 kg ;4)受加工平台在 Z 轴方向上的尺寸限制,装置允许的最大空间长度为 165 mm ;5)在高强度超声应用场合中,谐振频率通常在 $20\sim 40 \text{ kHz}$ 之间。最后,设计的超声装置参数如表1所示。

表1 超声振动装置设计参数

Table 1 Design parameters of ultrasonic vibration device

Name	Parameter
Emission power /W	500
Working frequency /kHz	30
Length of transducer /mm	65.5
Diameter of transducer /mm	30
Output amplitude of transducer ξ_1 / μm	4
Length of amplitude transformer l /mm	88.9
Diameter of transformer larger end D_1 /mm	30
Diameter of transformer smaller end D_2 /mm	18
Amplification factor M	1.65
Output amplitude of transformer ξ_2 / μm	6.5
Total length /mm	154.4

2.3 飞秒激光微加工系统

试验设备为日本 Cyber Laser 公司生产的飞秒激光微加工系统,该系统基于 180 fs 的掺钛蓝宝石再生放大装置,激光的基准波长为 780 nm ,激光脉冲的频率范围为 $1\sim 1000 \text{ Hz}$,最大脉冲能量为 1.1 mJ ,输出最大功率 1.1 W 。飞秒激光加工系统主要包括激光发射系统、光路调节系统、控制与操作系统、三维移动数控平台等。光路调节系统主要包括反射镜、衰减器、光阑、聚焦透镜等器件。控制与操作系统可以实现对脉冲脉宽、脉冲频率、能量大小的调节控制。三维移动数控平台的移动范围为 $(\pm 100 \text{ mm}) \times (\pm 100 \text{ mm}) \times (\pm 25 \text{ mm})$,移动精度为 $1.0 \mu\text{m} \times 1.0 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$,使用高分辨率的 CCD 摄像镜头进行微加工过程的实时监测。

3 试验结果和讨论

3.1 超声振动辅助的飞秒激光加工形貌表征

3.1.1 超声辅助引入前后的矩形槽表面形貌

如图4所示,分别在无超声辅助(功率 $P=0 \text{ W}$)和有超声辅助(功率 $P=60 \text{ W}$)的条件下扫描加工石英光纤侧

面,得到尺寸为 $100\ \mu\text{m}\times 45\ \mu\text{m}$ 的矩形槽,试验选用的加工参数为:光阑直径 $7\ \text{mm}$,加工能量 $220\ \text{mW}$,扫描速度 $1\ \text{mm}/\text{min}$,扫描次数 $n=2$ 。

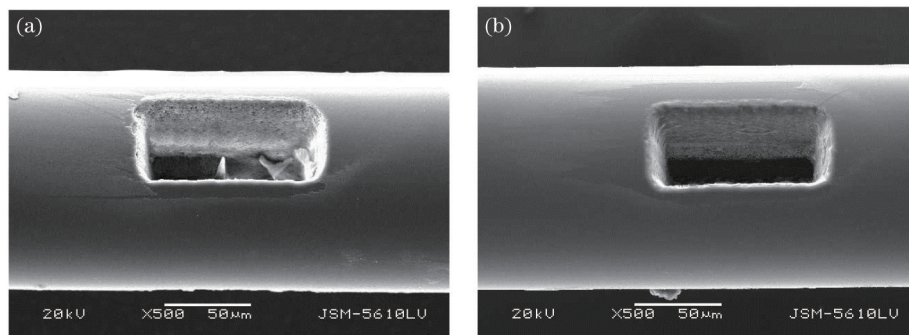


图4 超声波辅助对飞秒激光加工矩形槽形貌的影响。(a) $P=0\ \text{W}$; (b) $P=60\ \text{W}$

Fig.4 Surface topography of rectangular trench ablated by femtosecond laser with ultrasonic-assisted. (a) $P=0\ \text{W}$; (b) $P=60\ \text{W}$

从图4(a)的矩形槽可观察到,没有超声辅助时,激光烧蚀产生的等离子体会遇冷回落,在槽底形成较大的残渣,微槽壁面因回落的细小碎末重凝,壁面明显较为粗糙,而且微槽开口边沿熔化痕迹比较明显。对应地,从图4(b)可以看出,引入超声辅助后激光刻蚀的矩形槽表面质量较无超声辅助情形有明显的改善,底部穿透后看不到烧蚀残渣,微槽壁面更为平整,壁面垂直度更高,开口边沿熔化痕迹较少。上述对照结果表明,超声辅助加工可以有效地减少碎屑残留,改善加工表面质量。

3.1.2 光纤侧面打孔的锥度

为了研究在超声辅助下,飞秒激光加工孔的锥度,在光纤侧面加工穿透孔,测量孔壁的垂直度。如图5所示,分别在无超声辅助($P=0\ \text{W}$)和超声功率为 $P=30\ \text{W}$ 的条件下在光纤侧面加工穿透孔。试验所选用的加工参数:光阑直径 $7\ \text{mm}$,激光功率 $P=220\ \text{mW}$,激光重复频率 $1\ \text{kHz}$,打孔持续时间 $t=0.5\ \text{s}$ 。

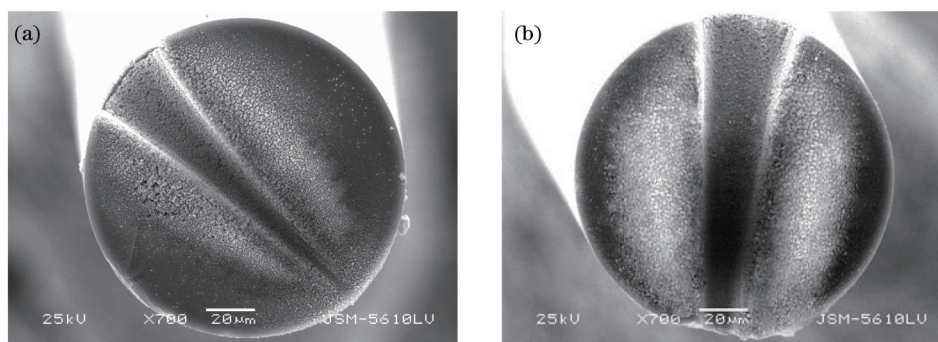


图5 光纤打孔端面图。(a) $P=0\ \text{W}$; (b) $P=30\ \text{W}$

Fig.5 End view of punch in the optical fiber. (a) $P=0\ \text{W}$; (b) $P=30\ \text{W}$

通过光学显微镜测得图5(a)和图5(b)中两侧壁的夹角(即孔的锥度)分别为 7.34° 和 4.17° ,并且图5(b)中平均孔径比图5(a)中明显大一些,说明超声辅助提高了加工孔的垂直度,且从平均孔径增大的角度看,打孔效率也明显提高。实际上,一方面,飞秒激光束能量的高斯分布特性,使得被加工孔壁不可避免产生一定的锥度;另一方面,激光烧蚀产生的等离子体会有一部分回落重凝形成碎屑,随着加工深度增大,碎屑越来越难排出,本质上会增大加工孔的锥度。引入超声辅助后,工件的高频振动将使激光焦平面的作用前沿位置上下移动,使得加工点处能量密度提高,烧蚀率增大,同时超声振动的空化效应将使碎屑更容易排出,减少碎屑对光子的吸收,因而能提高打孔效率,减小孔的锥度。

3.2 超声振动辅助的飞秒激光打孔深度

3.2.1 超声振动辅助下加工深度与激光能量的关系

为方便测量微孔深度,将打孔对象更换为石英光纤类同的高纯石英玻片,使飞秒激光辐照能量在 $33\sim 99\ \text{mW}$ 范围内变化(间隔 $11\ \text{mW}$),在石英玻片上烧蚀微孔。选用的加工参数为:光阑直径 $8\ \text{mm}$,激光重复频率 $1\ \text{kHz}$,实际施与脉冲数 100 ,超声功率分别为 $0, 30, 60, 90\ \text{W}$ 。打孔完成后,利用超景深显微镜(KEYENCE

VHX-100)测量不同参数下的微孔深度,结果如图6所示。

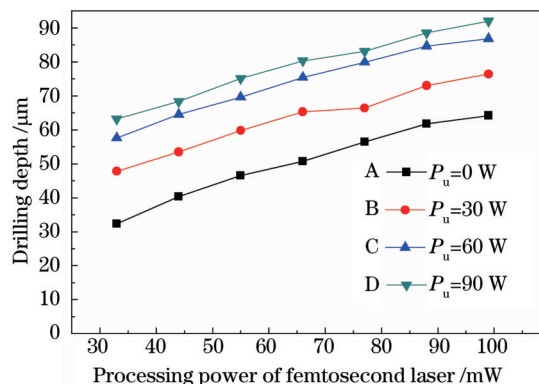


图6 不同超声功率下打孔深度与激光能量的关系

Fig.6 Relationship between drilling depth and laser energy under different ultrasonic powers

从图6可以看出,随着飞秒激光能量的增大,打孔深度也增大,经过线性拟合求出了A、B、C、D四条曲线的斜率分别为0.44、0.45、0.44、0.48。不同的超声功率下,打孔深度随激光能量的增加基本成线性关系。因为在脉冲数不太多的情况下,激光能量越大,材料烧蚀率越高,孔深不大时气化物质很容易飞溅出去,回落重凝较少,所以孔深随能量成比例增加。

3.2.2 超声振动辅助下加工深度与脉冲数的关系

施加不同的激光脉冲数(100, 200, ..., 1000),在高纯石英玻片上烧蚀微孔,然后利用超景深显微镜测量其烧蚀深度。所选用的加工参数为:激光功率66 mW,光阑直径8 mm,超声功率分别为0、30、60、90 W。

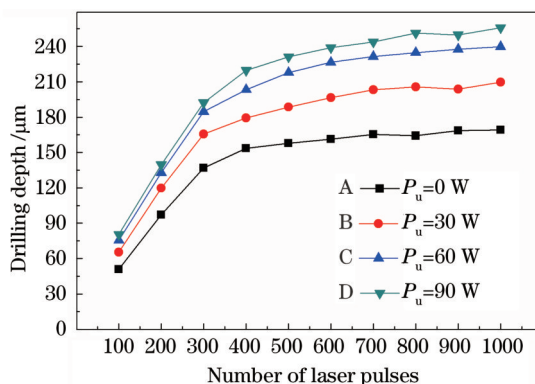


图7 不同超声功率下打孔深度与激光脉冲数的关系

Fig.7 Relationship between drilling depth and pulse number under different ultrasonic powers

从图7可以看出,当脉冲数小于等于300时,打孔深度随加工时间基本呈现线性增加关系;当脉冲数大于300时,打孔深度的增加趋势逐渐减弱;当脉冲数大于600时,打孔深度的变化变得更加平缓。在一定深度范围内,由于激光能量明显大于材料烧蚀阈值,加工孔深度随着加工时间的增长基本成线性增加;当打孔深度达到一定量值时,激光能量虽大于材料烧蚀阈值,但回落的碎屑难以排出孔外,严重阻碍激光束向下烧蚀,从而导致烧蚀深度随着加工时间的增加趋势减缓,烧蚀效率降低,直至完全达到饱和。引入超声辅助,主要在打孔初始阶段显著提高孔深(包括深径比),孔深大于一定值后,超声辅助也存在一定局限性,这可能与等离子体的飞溅高度有关,即超声振动能提高等离子体的飞溅高度,使其更容易飞散出去,但孔深过大时,飞溅高度提升的难度加大。

4 结 论

提出利用超声振动辅助进行飞秒激光微加工的新方法,针对加工平台环境设计了相应的超声辅助装置。试验结果表明,超声振动能够有效提高材料加工表面质量,减少加工碎屑的残留,提高孔腔垂直度,增加孔的深度。但随着超声功率的增加,超声功率对提高打孔深度的影响会逐渐减弱,激光能量和脉冲数对

超声辅助的效果会降低,逐渐出现饱和现象。

参 考 文 献

- 1 Davis K M, Miura K, Sugimoto N, *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(21): 1729-1731.
- 2 Fan Jintao, Hu Minglie, Gu Chenglin, *et al.*. High power femtosecond green-pumped optical parametric oscillator based lithium triborate [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902009.
范锦涛, 胡明列, 顾澄琳, 等. 基于LBO的高功率飞秒绿光抽运的光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902009.
- 3 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2415-2418.
刘博文, 胡明列, 宋有建, 等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2415-2418.
- 4 Rizvi N H. Femtosecond laser micromachining: Current status and applications[J]. *Riken Review*, 2003: 107-112.
- 5 Kawata S, Sun H B. Two-photon photopolymerization as a tool for making micro-devices[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 208: 153-158.
- 6 Long Jiangyou, Wu Yingchao, Gong Dingwei, *et al.*. Femtosecond laser fabricated superhydrophobic copper surfaces and their anti-icing properties[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0706002.
龙江游, 吴颖超, 龚鼎为, 等. 飞秒激光制备超疏水铜表面及其抗结冰性能[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0706002.
- 7 Sundaram S K, Mazur E. Inducing and probing non-thermal transitions in semiconductors using femtosecond laser pulses[J]. *Nature Materials*, 2002, 1(4): 217-224.
- 8 Perrie W, Rushton A, Gill M, *et al.*. Femtosecond laser micro-structuring of alumina ceramic[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 248(1): 213-217.
- 9 Suslick K S, Price G J. Applications of ultrasound to materials chemistry[J]. *Annual Review of Materials Science*, 1999, 29(1): 295-326.
- 10 Kang Renke, Ma Fujian, Dong Zhigang, *et al.*. Ultrasonic assisted machining of difficult-to-cut material[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, (16): 44-49.
康仁科, 马付建, 董志刚, 等. 难加工材料超声辅助切削加工技术[J]. *航空制造技术*, 2012, (16): 44-49.
- 11 Wang Wei, Guo Pengfei, Zhang Jianzhong, *et al.*. Ultrasonic effect on laser cladding BT20 titanium alloy process[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0803004.
王 维, 郭鹏飞, 张建中, 等. 超声振动对BT20钛合金激光熔覆过程的作用[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0803004.
- 12 Qin Lanyun, Wang Wei, Yang Guang. Experimental study on ultrasonic-assisted laser metal deposition of titanium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103001.
钦兰云, 王 维, 杨 光. 超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0103001.
- 13 Lin Zhongmao. Principles and Design of Ultrasonic Horn[M]. Beijing: Science Press, 1987: 84-90.
林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 84-90.

栏目编辑: 宋梅梅