

# 光波导端面的准分子激光刻蚀技术研究

贾娜娜<sup>1,2</sup> 邓传鲁<sup>1,2</sup> 庞拂飞<sup>1,2\*</sup> 顾鑫<sup>1,2</sup> 王廷云<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室,上海 200072

<sup>2</sup>上海大学通信与信息工程学院,上海 200072

**摘要** 面向光印刷互连背板的应用需求,提出基于准分子激光消融原理对光波导的刻蚀技术进行研究,在背板上任意位置获得光波导端面实现光耦合。采用193 nm波长的准分子激光作为光源,通过方形掩模孔径投影在互连背板光波导上,研究了激光能量、激光脉冲次数与刻蚀深度、端面粗糙度等参量之间关系,通过刻蚀参数的优化,刻蚀后端面光耦合损耗增加量约1.3 dB。

**关键词** 激光技术;准分子激光;光波导;激光消融;光互连;光印刷背板

中图分类号 TN252 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0303012

## Research on Excimer Laser Etching Technology for Achieving Optical Waveguide End Face

Jia Nana<sup>1,2</sup> Deng Chuanlu<sup>1,2</sup> Pang Fufei<sup>1,2</sup> Gu Xin<sup>1,2</sup> Wang Tingyun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Lab of Specialty fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

<sup>2</sup>School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** Based on the excimer laser ablation principle, etching technique for achieving optical waveguide end face is proposed for application requirements of optical printed circuit backplane interconnect. With the laser etching technique, optical coupling end face can be fabricated at any position on optical printed circuit backplane. An excimer laser with the wavelength of 193 nm is used as the ablation light source. The laser beam is projected onto the optical waveguide for etching through a square aperture mask. The relationship among the laser energy, laser pulse times and etching depth, surface roughness has been studied experimentally. After optimizing the etching parameters, the coupling loss increase of the waveguide end face is approximate 1.3 dB after the etching process.

**Key words** laser technique; excimer laser; optical waveguide; laser ablation; optical interconnect; optical printed circuit backplane

**OCIS codes** 130.5460; 200.4650; 130.2790

## 1 引言

近年来,由于宽带通信、超级计算机及大数据中心的快速发展,极大地推动了宽带、高速互连技术的发展,光互连技术与传统的电互连技术相比具有低串扰、低能耗、高带宽、高速率等优点,是未来互连技术发展的趋势<sup>[1-4]</sup>。尤其在中短距离互连背板应用中,聚合物光波导互连技术既可以解决现有电互连所面临的带宽问题,又可以解决光纤互连的高密度集成的问题。因此,聚合物光波导作为光互连技术的核心器件越来越受到人们的关注<sup>[5-9]</sup>。在复杂的平面光波导互连背板应用中,如何实现光器件间的高效耦合是光互连技术的

收稿日期:2014-10-14;收到修改稿日期:2014-11-18

基金项目:上海市科学技术委员会重点科技攻关项目(13511500500)、上海市教育委员会科研创新项目(14ZZ093)

作者简介:贾娜娜(1989—),女,硕士研究生,主要从事互连光波导的制备技术方面的研究。

E-mail: 18817872809@163.com

导师简介:王廷云(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和特种光纤等方面的研究。

E-mail: tywang@mail.shu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: ffpang@shu.edu.cn

重要核心技术之一<sup>[10-14]</sup>,耦合主要包括不同层光路耦合、出入背板光耦合等,对于尺寸较大的背板,如600~1000 mm,如何实现背板上任意位置的光波导耦合更是一个关键的难点,这些耦合点的光波导端面处理,由于空间限制而无法利用传统机械抛光加工技术来实现。

本文提出基于紫外激光消融原理,采用准分子激光对光互连背板上光波导进行刻蚀,以获得光波导耦合端面。准分子激光刻蚀技术为非接触加工模式,与精密机械位移平台配合,可以在较大面积平面上进行精确定位和刻蚀加工,对于在大尺寸光互连背板上获得任意位置光耦合端面的应用需求具有重要实用价值。通过对准分子激光微加工参数的优化,初步验证了实现低粗糙度端面的可行性。

## 2 准分子激光器刻蚀光波导端面技术研究

采用波长为193 nm的ArF准分子激光器进行光波导端面微加工研究,脉冲宽度约为5 ns,最高脉冲能量为8 mJ,单个激光脉冲可以刻蚀固定厚度的材料。该系统采用模板投影写入原理,光路如图1所示,准分子激光所发出的光束依次经过均匀化处理、金属光阑以及成像系统后投影到被加工样品表面,单脉冲加工形状由光阑通光孔形状决定。互连光波导材料为聚合物材料,成份为丙二醇甲醚醋酸酯和有机硅氧烷,对193 nm激光具有较高的吸收率<sup>[15]</sup>。由于准分子激光波长为193 nm,具有强的光子能量,被高分子聚合物吸收,将引起聚物分子键发生断裂,从而消融去除聚合物材料<sup>[16]</sup>。本研究先利用标准的接触式光刻工艺在PCB基底上制备互连光波导,之后再利用准分子激光投影刻蚀系统对光波导进行微加工,以获得光波导耦合端面。

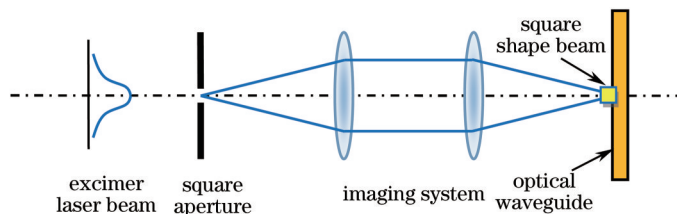


图1 准分子激光模板投影光路原理图

Fig.1 Schematic diagram of projection of shaped excimer laser beam

### 2.1 光互连条形光波导的制备

实验中采用标准的紫外(UV)光刻技术,其原理是利用芯层材料的光敏性和抗蚀性,通过掩模板进行紫外曝光,经显影直接形成条形光波导结构,主要包括基底清洗、涂下包层、涂芯层、紫外曝光、显影和涂上包层六个步骤。光刻机(URE-2000/35,中国科学院光电技术研究所)以汞灯作为光源,光波导芯层和包层材料由Dow公司提供,芯层胶具有负性光敏性,在850 nm波长,波导芯层和包层折射率分别为1.51、1.48,在850 nm具有低吸收率,吸收系数仅为0.05 dB/cm。紫外光刻法制备光波导的具体流程如图2所示。

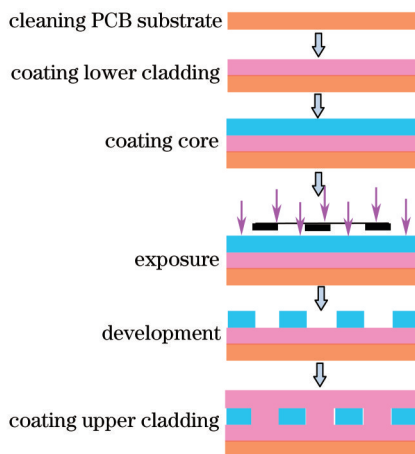


图2 紫外光刻法制备光波导工艺流程

Fig.2 Fabrication of optical waveguide with UV lithography

如图3所示,为所制备的光波导的端面 and 俯视显微照片,光波导尺寸(宽与高)为50 μm×50 μm。在

850 nm 波长,测试得到光波导传输损耗为 0.6 dB/cm。

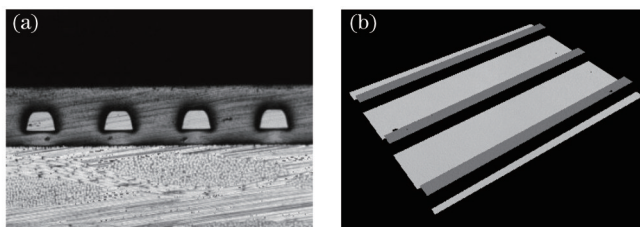


图3 波导形貌。(a)抛光后端面形貌;(b)三维显微照片

Fig.3 Photograph of waveguide. (a) Endface surface after polishing; (b) three-dimensional photography

## 2.2 准分子激光器刻蚀光波导端面参数研究

利用准分子激光系统(LSV3, OPTEC),将准分子激光脉冲光束通过方形通光孔径,垂直投影入射到所制备的条形光波导上。由于光波导宽度为  $50\ \mu\text{m}$ ,相邻波导间距为  $250\ \mu\text{m}$ ,为了保证刻蚀区域宽度既能完全覆盖单个光波导而又不会影响到相邻波导的完整性,通光孔径的宽度应选择  $250\ \mu\text{m}$  为宜。因此实验中选择  $250\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$  的方形通光孔径进行刻蚀。通过改变准分子激光脉冲能量、脉冲次数和脉冲频率研究刻蚀深度的变化。图4(a)为三维轮廓仪(S NEOX, Sensofar)观测到准分子激光刻蚀处的三维立体图样,不同灰度分别代表不同的高度,光波导芯层中间凹陷部分即为准分子激光器刻蚀区域。借助光学轮廓仪,可以对刻蚀深度及刻蚀断面粗糙度做准确测量,如图4(b)所示。

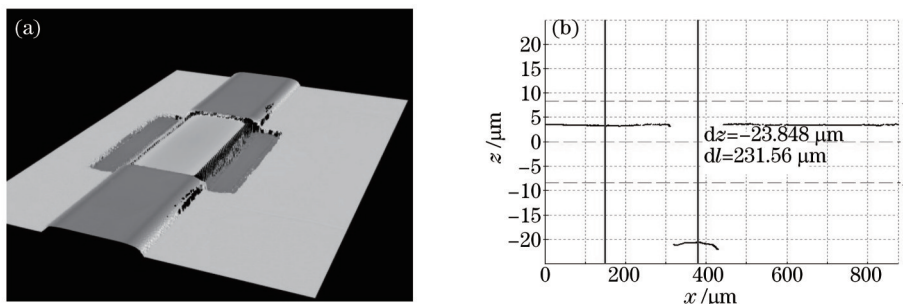


图4 刻蚀后波导图样。(a)三维显微照片;(b)深度测量

Fig.4 Photograph of etching region. (a) Three-dimensional photograph; (b) depth measurement

采用 1.3 mJ 能量为,频率为 50 Hz 的激光光束,研究了准分子激光器脉冲次数与刻蚀波导深度的关系,如图5(a)所示。刻蚀深度随脉冲次数的增加呈线性增长趋势,刻蚀速率为  $0.125\ \mu\text{m}/\text{pulse}$ ,表明被刻蚀光波导材料具有良好均匀性,且与 193 nm 激光器作用的消融特性呈现线性增长的关系;当准分子激光脉冲次数设置为 150,脉冲频率为 50 Hz 时,刻蚀深度随准分子激光器脉冲能量变化趋势如图5(b)所示,可以看出刻蚀深度随着脉冲能量的增加近似呈线性增长的趋势,刻蚀速率约为  $11.1\ \mu\text{m}/\text{mJ}$ 。改变激光器的脉冲频率,脉冲次数设为 150,能量为 1.3 mJ,得到图5(c)所示关系,可以看出深度随着脉冲频率的变化在一个固定的值附近上下浮动,即脉冲频率对刻蚀深度影响较小。

## 2.3 准分子激光脉冲能量与光波导端面粗糙度关系

光纤与波导耦合过程中耦合损耗受波导端面粗糙度影响较大,端面粗糙度越小,光在耦合过程中产生的散射损耗就越小,耦合效率就越高。因此激光刻蚀参数与光波导端面粗糙度关系是一个重要研究参量。通过改变准分子激光能量,研究了刻蚀后激光能量对光波导端面粗糙度的影响,采用光学轮廓仪分析表面粗糙度,实验中粗糙度的采样区域选取为  $29.15\ \mu\text{m} \times 21.93\ \mu\text{m}$  矩形,在此范围内包含五个以上的起伏峰谷值,即可准确地估测被刻蚀整个表面的粗糙度<sup>[17]</sup>。为了更准确地得出粗糙度值,选取波导端面五个不同的区域,测量其粗糙的大小并取其平均值作为粗糙度结果,所选区域如图6所示。

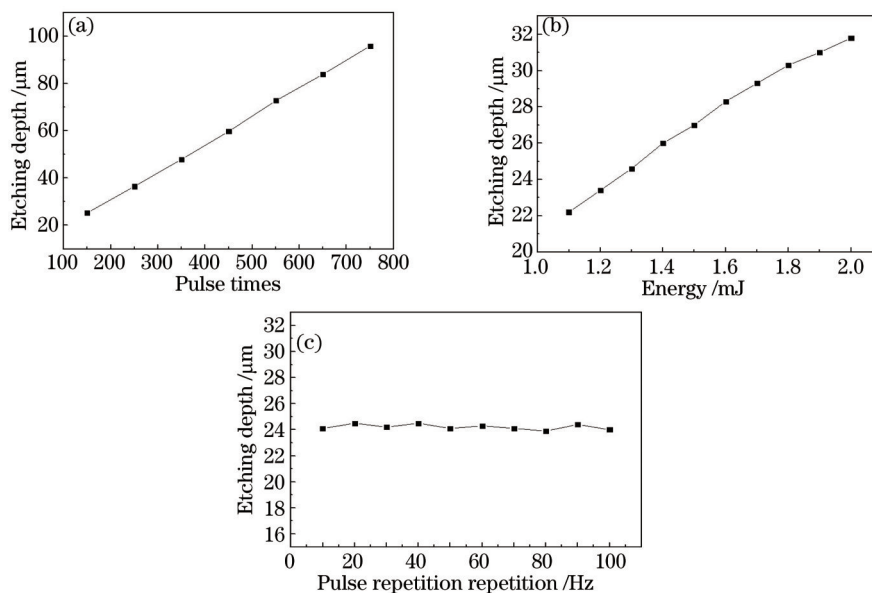


图5 激光刻蚀工艺参数。(a) 刻蚀深度随脉冲次数变化;(b) 刻蚀深度随脉冲能量变化;(c) 刻蚀深度随脉冲频率变化  
Fig.5 Laser etching process parameters. (a) Change of etching depth with laser pulse times; (b) change of etching depth with laser pulse energy; (c) change of etching depth with pulse repetition frequency

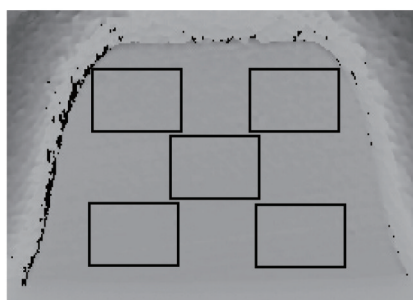


图6 粗糙度测量区域位置

Fig.6 Sampling of roughness measurement region

轮廓仪直接测出的粗糙度参数是  $S_a$ , 为粗糙度的三维算术平均偏差, 其定义为在采样区域内, 表面粗糙度相对基准高度偏距绝对值的算术平均值<sup>[18]</sup>, 即

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |Z(x_k, y_l) - \mu|, \quad (1)$$

式中  $M, N$  分别为在采样区域内  $x$  向和  $y$  向的离散采样点数。

在使用准分子激光器对波导端面进行刻蚀之前, 首先对其进行了研磨抛光处理, 并对其粗糙度进行测量, 发现粗糙度  $S_a$  在 10 nm 以内。然后用不同的能量值对其端面进行激光刻蚀处理。研究发现 193 nm 的准

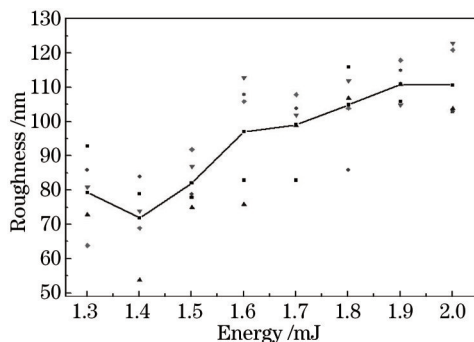


图7 波导端面粗糙度随能量的变化趋势

Fig.7 Variation trend of end face roughness with different etching energy

分子激光器刻蚀波导芯层的能量上限阈值在 2.1 mJ,当能量大于 2.1 mJ时,侧面粗糙度急剧增加,因此在研究过程中将能量控制在 2.1 mJ 以内。图 7 为刻蚀之后波导端面粗糙度随着激光器能量变化的整体趋势,横坐标代表准分子激光器的脉冲能量,纵坐标代表三维算术平均偏差  $S_a$  的值,五个区域的具体粗糙度值均在图中得以体现。可以看出,刻蚀之后的端面粗糙度随着能量的增加呈逐步变大的趋势,脉冲能量越大,单个脉冲的刻蚀率也就越大,刻蚀凹槽侧面及波导端面的粗糙度也随之增大。

### 3 光纤与波导的耦合损耗测试

对准分子激光器刻蚀之后的波导进行损耗测试,并且将其和刻蚀之前损耗值进行对比。在进行损耗测试时,系统采用 850 nm 的光源,输入端使用芯径为 50  $\mu\text{m}$  的多模光纤,输出端使用芯径为 62.5  $\mu\text{m}$  的多模光纤进行接收,并用光功率计(型号为 AV6334B)对其进行损耗测试。图 8(a)为光波导和光纤对接耦合结构图,收发端裸光纤直接嵌入到准分子激光刻写凹槽中进行耦合,图 8(b)为耦合处的显微照片,为了直观地看出刻蚀凹槽处耦合效果,对波导进行隔根刻蚀处理。

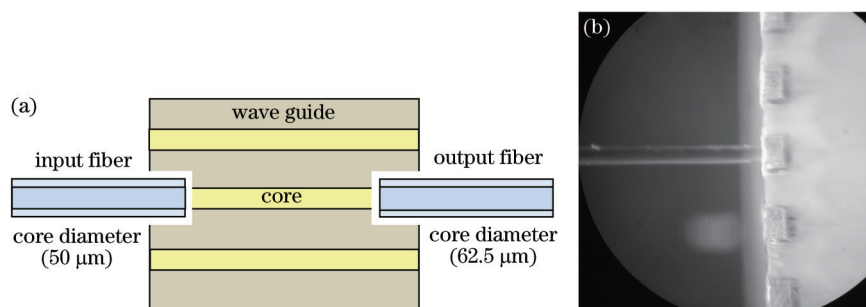


图 8 光纤与光波导对接耦合结构。(a) 耦合示意图; (b) 显微照片

Fig.8 Coupling of optical fiber and optical waveguide. (a) Schematic diagram of coupling; (b) micrograph

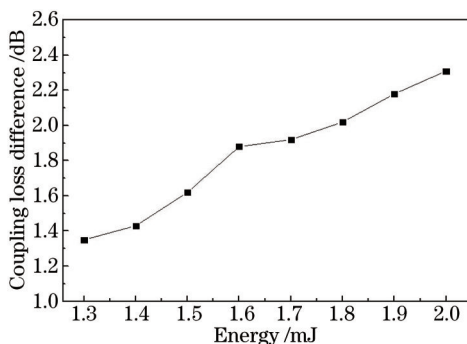


图 9 刻蚀前后损耗变化情况

Fig.9 Optical coupling loss difference before and after etching

图 9 为刻蚀前后损耗增加的情况,可以看出随着激光脉冲能量的增加,刻蚀前后的损耗差值也成逐渐上升的趋势。当脉冲能量为 1.3 mJ 时损耗差值较小,约为 1.3 dB,随着能量的增加,损耗差值逐渐上升到 2.3 dB,这与不同能量刻蚀出的凹槽侧面粗糙度有关,脉冲能量越大,侧面粗糙度也越大,当光从光纤耦合到波导时,波导端面粗糙度越大,光在端面处的散射越严重,其耦合损耗也随之增加。

### 4 结 论

面向大尺寸光互连背板光耦合的需求,研究了一种利用准分子激光器加工光波导端面的技术,可以在大尺寸背板上任意位置获得耦合端面。通过对准分子激光参数的设置,发现光波导刻蚀深度随着激光能量和激光脉冲次数的增加呈线性增大关系,激光脉冲频率对刻蚀深度的影响较小。光波导端面的粗糙度及光耦合损耗随激光能量的增加而变大,在 1.3 mJ 时,光耦合损耗的增加量约为 1.3 dB。随着光印刷互连背板技术的应用推广,准分子激光微加工方法将成为解决背板光耦合难题的关键技术。

- 1 Schmidtke K, Flens F, Worrall A, *et al.*. 960 Gb/s optical backplane ecosystem using embedded polymer waveguides and demonstration in a 12G SAS storage array (June 2013)[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(24): 3970–3975.
- 2 Taubenblatt M A. Optical interconnects for high-performance computing[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(4): 448–457.
- 3 Li Rongling, Shang Huiliang, Lei Yu, *et al.*. Design research of key enabling technologies for high-speed visible-light communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050003.  
李荣玲, 商慧亮, 雷雨, 等. 高速可见光通信中关键使能技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050003.
- 4 Hou Peipei, Zhi Yanan, Sun Jianfeng, *et al.*. Crossbar optical switching network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010003.  
侯培培, 职亚楠, 孙建锋, 等. Crossbar光交换网络[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010003.
- 5 Zhang X, Hosseini A, Lin X, *et al.*. Polymer-based hybrid-integrated photonic devices for silicon on-chip modulation and board-level optical interconnects[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(6): 3401115.
- 6 Luo F, Cao M, Zhou X, *et al.*. 3D optical interconnect mesh network for on-board parallel multiprocessor system based on EOPCB [C]. *SPIE*, 2007, 6795: 67954V.
- 7 Jin W, Chiang K S, Lor K P, *et al.*. Industry compatible embossing process for the fabrication of waveguide-embedded optical printed circuit boards[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(24): 4045–4050.
- 8 Bamiedakis N, Penty R V, White I H. Compact multimode polymer waveguide bends for board-level optical interconnects[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(14): 2370–2375.
- 9 Doany F E, Schow C L, Baks C W, *et al.*. 160 Gb/s bidirectional polymer-waveguide board-level optical interconnects using CMOS-based transceivers[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2009, 32(2): 345–359.
- 10 Tan M R, Rosenberg P K, Mathai S, *et al.*. Low cost, injection molded 120 Gbps optical backplane[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2011. PDPA4.
- 11 Pitwon R C A, Hopkins K, Milward D, *et al.*. Passive assembly of parallel optical devices onto polymer-based optical printed circuit boards[J]. *Circuit World*, 2010, 36(4): 3–11.
- 12 Baghsiahi H, Wang K, Kandulski W, *et al.*. Optical waveguide end facet roughness and optical coupling loss[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(16): 2959–2968.
- 13 Q Xia, M Immonen, J Wu. Optical backplane demonstrator with 10 Gbps video transmission link on printed circuit board using optical waveguides[C]. *International Microsystem Packaging Assembly and Circuits Technology Conference*, 2013.
- 14 Papakonstantinou I, Selviah D R, Pitwon R C A, *et al.*. Low-cost, precision, self-alignment technique for coupling laser and photodiode arrays to polymer waveguide arrays on multilayer PCBs[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2008, 31(3): 502–511.
- 15 MICRO·CHEM. Developmental Products[OL]. <http://www.microchem.com/Prod-LightLink.htm>. [2014-12-19].
- 16 Zakariyah S S. Laser ablation for polymer waveguide fabrication[J]. *Micromachining Techniques for Fabrication of Micro and Nano Structures*, 2012, 6(1): 109–130.
- 17 Li Yu. The reasonable choice of sample length and evaluation length in roughness measurement[J]. *Dongfang Electrical Machine*, 2007, 35(4): 63–65.  
李育. 粗糙度测量中取样长度、评定长度的合理选用[J]. *东方电机*, 2007, 35(4): 63–65.
- 18 Li Bokui. 3D roughness parameter arithmetic average deviation and root mean square deviation of law research[J]. *Tool Engineering*, 2008, 42(9): 107–110.  
李伯奎. 三维粗糙度参数算术平均偏差与均方根偏差的规律研究[J]. *工具技术*, 2008, 42(9): 107–110.

栏目编辑: 何卓铭