

金刚石车削表面微纳结构的气囊抛光改进

王 朋¹ 杜 雪^{2*} 回长顺¹

¹天津航技术物理研究所, 天津 300380

²香港理工大学工业及系统工程学系超精密加工技术国家重点实验室, 香港 00852

摘要 单点金刚石车削技术被广泛应用于光学表面的超精密加工。然而,车削表面固有的周期性残留刀痕结构将增强表面散射效应,恶化元件光学性能。为了抑制散射以获得高质量光学表面,采用气囊抛光技术主动改变车削表面周期性刀痕结构。基于 Taguchi 正交试验,以表面粗糙度及功率谱密度的改善率为设计指标,分析获得了最优抛光参数。采用该最优参数对一精车表面进行了抛光试验,抛光后表面粗糙度 R_a 由 3.81 nm 降到 1.42 nm,各空间频率功率谱密度大幅降低,同时表面的衍射条纹消失。试验结果验证了所采用的抛光及相应优化方法的有效性,具有重要的工程应用价值。

关键词 光学制造;金刚石车削;表面微观形貌;气囊抛光;参数优化

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0322001

Improvement of the Diamond Turned Surface Texture by Bonnet Polishing Process

Wang Peng¹ Suet To² Hui Changshun¹

¹Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300380, China

²State Key Laboratory in Ultra-precision Machining Technology, Department of Industrial and System Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 00852, China

Abstract Single point diamond turning (SPDT) technique is widely employed in ultra-precision machining of optics. However, the inherent tool marks with strong periodicity induce scattering effects of turned surfaces, significantly deteriorating the optical performances. To suppress the scattering and accordingly achieve optical surface with high quality, the bonnet polishing method is adopted herein to actively modify structures of the residual tool marks. Taking advantage of the Taguchi experiments where the roughness and the power spectral density (PSD) of the polished surface are served as the improving criteria, the optimal polishing parameters are obtained. Polishing experiment is conducted on a fine turned surface by adopting the optimal parameters. The results indicate that the roughness R_a reduces from 3.81 nm to 1.42 nm and the PSDs of surface errors in all the spatial frequencies are also significantly reduced. In addition, the inherent scattering fringes of the original surface are well eliminated, demonstrating the efficiency of the polishing method as well as the optimization method.

Key words optical fabrication; diamond turning; surface texture; bonnet polishing; parameters optimize

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 220.1920

1 引 言

由于具备高效制造平面、球面、非球面和自由曲面等多种类型光学表面的能力,单点金刚石车削技术已经广泛应用于光学表面制造等超精密加工领域^[1]。但是,由于加工参数的选择、刀具磨损、机床震动、材料等原因,在车削表面上总会残留一定规律的刀痕微结构,即金刚石车削刀纹。该车削刀纹的存在,将诱发光学

收稿日期: 2014-07-30; 收到修改稿日期: 2014-10-14

基金项目: 香港创新与科技基金(GHP/021/11)

作者简介: 王 朋(1980—),男,主要从事超精密加工与检测技术方面的研究。E-mail: wpeng605@126.com

*通信作者。E-mail: sandy.to@inet.polyu.edu.hk

表面的衍射和散射效应,严重影响光学系统的性能,尤其是在可见光和短波光学系统中更为严重。因此,在一些如软X射线模压用模芯、多模光学系统用光学零件等特殊应用中,需要对金刚石车削表面进行进一步改善处理^[2-3]。

目前,对金刚石车削刀纹的改善处理主要有两种途径。一种是在加工过程中通过改变车削轨迹打破原有车削刀纹的规律,产生具有随机微结构的表面,从而达到抑制车削表面散射效应的目的。这种方式加工效率高,成本低,但是只能起到抑制散射效应的目的,很难从根本上消除刀纹痕迹^[4-5]。另一种方式是通过后续光滑处理工艺去除车削表面刀纹,从而消除表面的散射效应,实际应用中常用抛光的方法来实现。这种方式虽然能够完全去除刀纹痕迹,获得光滑的表面,但是增加了后续工序,降低整个表面的加工效率并增加成本^[6-8]。上述两种途径各有所长,需根据实际应用环境进行合理选择,本文将对后者进行研究。

金刚石车削刀纹的抛光去除工艺须遵循两重要素,一是改善车削表面微观形貌,消除金刚石车削残留刀痕;二是在抛光的过程中尽最大可能保持车削表面的面形精度。在最初的研究中,往往采用手工抛光的方式进行后续光滑处理,这种方式虽能够改善车削表面的微观形貌,但极易破坏表面的面形精度^[6]。随着先进抛光技术的发展,计算机控制“确定性”抛光技术已经得到广泛应用^[9-11],其中部分技术如气囊抛光、水射流抛光、磁流变抛光以及几种方式的组合等已用于后续光滑处理工艺^[7-8],材料去除量的“确定性”控制,保证了抛光过程中的面形精度。目前多集中于抛光效果的研究,而关于抛光参数对车削表面微观形貌影响的研究较少。本文将以前一重要素为研究对象,选用气囊抛光方法,重点考察主要抛光参数对表面微观形貌改善的影响,应用Taguchi正交试验的方法对抛光参数进行优化分析,初步确定了改善微观形貌最佳的工艺参数组合,并用该组合参数进行了实际的抛光试验。

2 车削刀纹的气囊抛光参数优化设计

气囊抛光是一种高效的“确定性”抛光技术,采用高速旋转并充有一定压力气体的球形气囊对工件进行抛光加工,以获取高精度的光学表面。本文采用了英国Zeeko公司的IRP 200七轴气囊抛光机进行试验。该型抛光机抛光运动轨迹有螺旋式、光栅式与随机式3种,为了使本文研究成果能够为其他商用抛光机所借鉴,研究中采用了常用的螺旋式抛光方式,如图1所示。

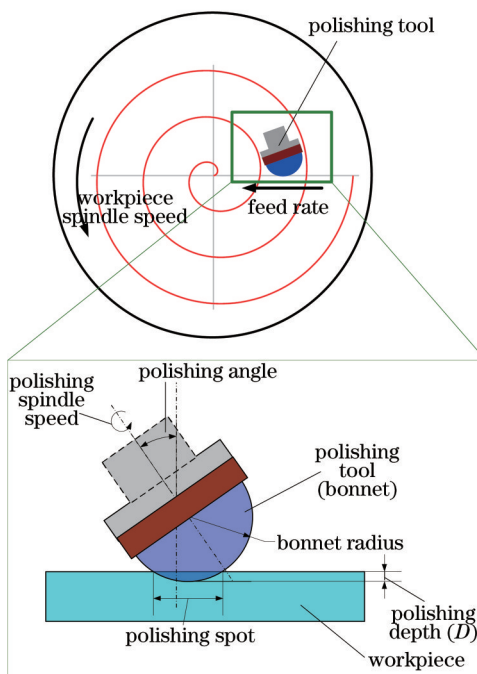


图1 气囊抛光去除刀纹示意图

Fig.1 Turning marks removed by bonnet polishing

2.1 样件的金刚石车削

选取不锈钢材料为基底,粗加工成 $\Phi 20\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的样件,样件的一端面镀厚度约为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 电解镍,然后对电解镍层进行金刚石超精密车削。为了使抛光效果更加明显,便于分析,其中一部分样件进行粗车,用以正交试验,另一部分进行精车,用于后续最优参数组合的验证试验。样品的车削加工在美国Precitech公司的Nanoform 300两轴单点金刚石车床上进行,其主要加工参数如表1所示。

表1 单点金刚石车削参数

Table 1 SPDT parameters for all the samples

	Rough turning	Fine turning
Tip radius of tool /mm	0.5887	0.58877
Spindle speed /rpm	2750	4000
Federate /(mm/min)	100	10
Cutting depth / μm	10	4

2.2 抛光参数的选择

在图1所示的螺旋式抛光方式中,影响车削表面微观形貌改进的参数包括抛光液、抛光布、气囊半径(R)、压深(D)、工件转速(ω_s)、抛光头转速(ω_t)、进给速度(F)、抛光角度(α)、压力(P)等,其中抛光布种类和抛光液与该样件材料传统抛光时一致,本试验中抛光布材料选用了抛光毛毡,抛光液选用了日本FUJIMI公司的Compol 80型抛光液,其规格如表2所示。由于气囊半径和压深仅决定气囊抛光去除区域的大小,因此在整个试验中设定为常数,其中气囊半径选定为 20 mm ,压深为 0.2 mm 。研究中主要考察另外5种参数对微观形貌的影响。

表2 抛光液COMPOL 80的规格参数

Table 2 Typical physical properties of Compol 80

Type	Mass fraction of SiO_2 /%	PH	Specific gravity /(g/mL)	Average particle size /nm
Compol 80	40	10.2	1.3	72

2.3 正交试验设计

本试验采用正交试验方法,目的是要确定5种主要工艺参数(因素)对车削表面微观形貌改善效果(指标)的影响规律,并在此基础上确定出最优的数组组合指导后续研究工作。

试验中考虑的5种因素即 ω_s 、 ω_t 、 F 、 α 和 P ,每种因素选择3个水平如表3所示,由文献[12],设计了五因素三水平的正交表 $L_9(3^5)$,如表4所示,试验方案如图1所示,试验中每个样件抛光一遍。试验结果采用两个指标进行评价,一是抛光前后粗糙度 R_a 的改进率,另一个指标考察功率谱密度(PSD)在特定空间频率(刀纹主频)的改善率,二者综合分析,得到最优的抛光指标组合。

3 结果分析与讨论

为了考察微观表面的改善情况,在抛光前后应用VEECO公司的NT8000光学轮廓仪分别对每一个样件特定区域的表面形貌进行了测试。由测试结果,分析了表面粗糙度 R_a 和刀纹主频 27.5 1/mm 的PSD的改善情况,结果如表5所示。

表3 各因素的取值水平

Table 3 Factors and its' levels select in the experiment

Level	Factor				
	P /MPa	α /($^\circ$)	ω_s /(rpm)	ω_t /(rpm)	F /(mm/min)
1	0	5	800	150	2.5
2	0.05	10	1200	300	5
3	0.1	15	1600	450	7.5

在Taguchi分析法中,信噪比 R_{SN} 常被用来分析正交试验结果的输出特性,其表达式为^[13]

$$R_{SN} = -10 \log(M.S.D), \quad (1)$$

表 4 $L_9(3^5)$ 正交试验表设计

Table 4 Experiment design with $L_9(3^5)$ orthogonal arrays

Trial	P /Bar	α /($^\circ$)	ω_t /(rpm)	ω_s /(rpm)	F /(mm/min)
1	0	5	800	150	2.5
2	0	5	1600	450	5
3	0	15	800	450	7.5
4	0.5	10	1600	150	7.5
5	0.5	15	1200	150	5
6	0.5	15	1600	300	2.5
7	1	5	1200	300	7.5
8	1	10	800	300	5
9	1	10	1200	450	2.5

表 5 试验测试结果

Table 5 Measurement results

Experiment No	$R_{a,b}$ /nm	$R_{s,a}$ /nm	P_{R_a}	R_{SN}/R_a	PSD_b /($\text{mm} \cdot \text{nm}^2$)	PSD_a /($\text{mm} \cdot \text{nm}^2$)	P_{PSD}	R_{SN_PSD}
1	32.61	21.94	0.33	9.70	46.67	24.10	0.48	6.31
2	32.67	19.93	0.39	8.18	46.35	19.76	0.57	4.83
3	34.57	24.65	0.29	10.84	53.80	31.05	0.42	7.48
4	36.56	23.84	0.35	9.17	56.47	26.90	0.52	5.62
5	29.60	15.43	0.48	6.40	32.16	11.20	0.65	3.72
6	33.63	3.81	0.89	1.04	51.98	0.49	0.99	0.08
7	32.72	27.19	0.17	15.44	46.83	39.89	0.15	16.58
8	36.13	22.38	0.38	8.39	62.56	23.16	0.63	4.02
9	34.03	14.10	0.59	4.65	53.18	9.50	0.82	1.71

式中 $M.S.D$ 为输出指标的均方差, 在本试验中为粗糙度 R_a 和 PSD 改进率的均方差, 表示为

$$M.S.D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i^2, \quad (2)$$

式中 $P_i = \frac{T_{bi} - T_{ai}}{T_{bi}}$ 表示改善率, i 表示第 i 次测试, T_b 和 T_a 分别为抛光前后的结果, T 代表 R_a 和 PSD, 试验中, 信噪比 R_{SN} 的值越小越好。

联合(1)式和(2)式对正交试验结果的信噪比 R_{SN} 进行计算, 根据计算结果得到各个因素对指标的影响趋势, 如表 6 所示。综合分析两个指标, 可以看出, 在选用的抛光方式中, 进给速度 F 对微观形貌改善的影响最大, 而工件转速 ω_s 的影响最小, 5 种因素对微观形貌改变影响的主次关系为: $F > \alpha > P > \omega_t > \omega_s$ 。

表 6 粗糙度 R_a 和 PSD 改进率的 R_{SN} 响应

Table 6 R_{SN} response for improvement of surface roughness R_a and PSD

Factor \ Level	P	α	ω_t	ω_s	F
R_{SN} response for improvement of surface roughness R_a					
1	9.58	11.11	9.65	8.42	5.13
2	5.54	7.40	8.83	8.29	7.66
3	9.49	6.10	6.13	7.89	11.82
Max-min	4.04	5.01	3.51	0.53	6.69
Rank	3	2	4	5	1
R_{SN} response for improvement of PSD					
1	6.20	9.24	5.93	5.22	2.70
2	3.14	3.78	7.34	6.89	4.19
3	7.44	3.76	3.51	4.67	9.89
Max-min	4.30	5.48	3.83	2.22	7.19
Rank	3	2	4	5	1

表 7 最优参数组合

Table 7 Optimal combination of the parameters

Parameters	P /bar MPa	α /($^{\circ}$)	ω_1 /(rpm)	ω_2 /(rpm)	F /(mm/min)
Value	0.05	15	1600	450	2.5

为了直观体现各个因素及对应的水平对微观形貌改善的影响情况,以各因素的水平为横坐标,以指标的噪比 R_{SN} 响应为纵坐标作了二者的关系如图 2 所示。根据“越小越好”原则,综合两个指标,从图中可以清楚地找到最优的参数组合,即 $F1.\alpha3.P2.\omega_13.\omega_23$ 组合,具体参数见表 7。这一参数组合和正交试验中第六组试验参数组合比较,除了影响力最小的工件转速 ω_2 外,其余均相同。在正交试验中,正是第六组样件的表面微观形貌获得了最大的改善,这也从侧面验证了该方法的准确性。

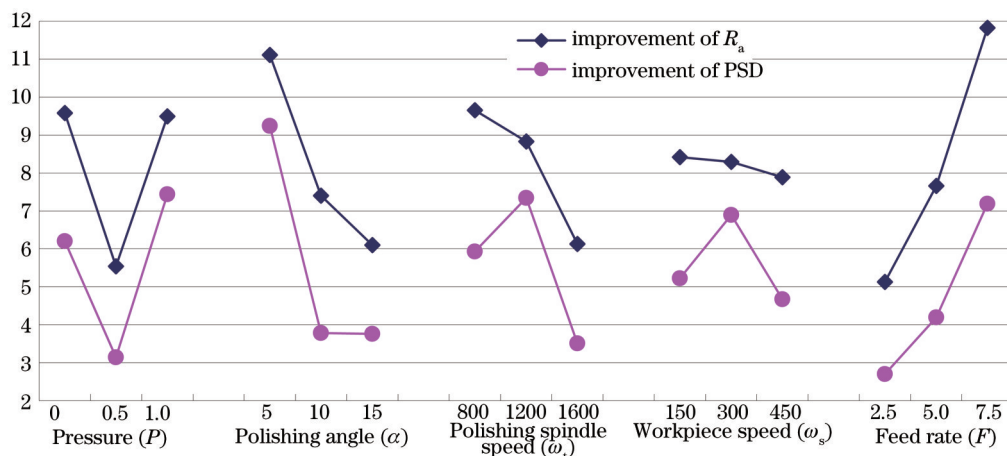


图 2 各因素对微观形貌改善 R_{SN} 响应分布图

Fig.2 R_{SN} responses for improvement of surface texture

4 试验验证

应用所得到的最优抛光参数以及其他固定参数,对精车的样件进行了刀纹抛光去除试验,如图 3 所示。

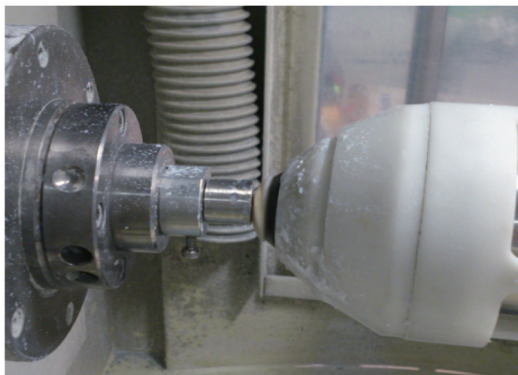


图 3 气囊抛光试验

Fig.3 Bonnet polishing experiment

抛光前后用 NT8000 光学轮廓仪分别对相同的区域进行了检测,其得到的微观形貌如图 4 所示。比较抛光前后的微观形貌可以看出:抛光前,工件表面残留了规律分布的金刚石车削刀纹[见图 4(a)];经过抛光,表面残留的规律性金刚石车削刀纹全部被消除,微观形貌变得相对光滑;通过抛光,表面粗糙度 R_a 由 3.81 nm 降到 1.42 nm 。

通过 NT8000 测试得到的微观形貌数据,对其进行了频谱分析,结果如图 5 所示。抛光前的 PSD 图显示,在 400 mm^{-1} 的位置,有一明显的高峰数值接近 $-2 \text{ mm} \cdot \text{mm}^2$,此与金刚石车削参数正好吻合;抛光后,此频率处的高峰几乎消失,数值接近 $-10 \text{ mm} \cdot \text{mm}^2$,经过抛光,说明刀纹已经去除。同时,抛光后原车削表面上其他频

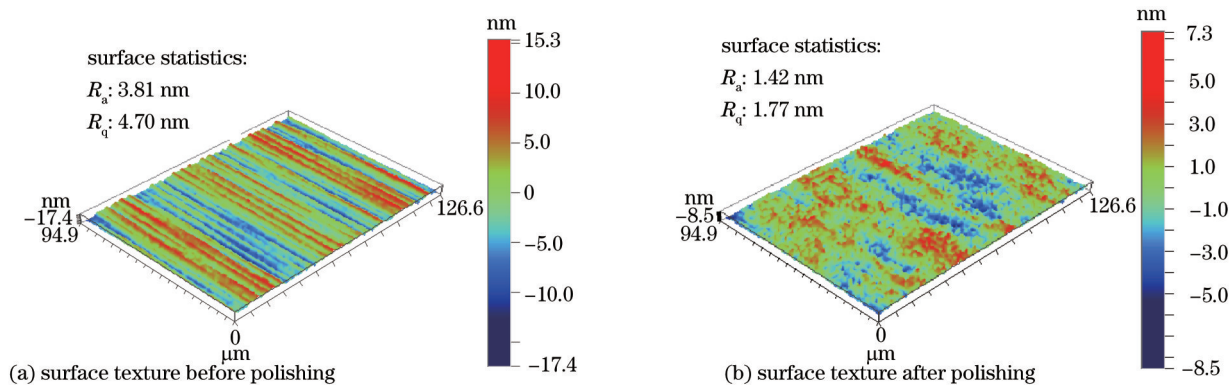


图4 抛光前后表面形貌比较

Fig. 4 Comparison of surface texture before and after polishing

段的峰值都有很大程度的降低, 整个表面微观形貌均得到改善。

图6显示了抛光和未抛光样件表面的对比图片, 未抛光的表面可以看到明显的衍射彩虹纹, 而经过抛光处理后, 彩虹纹消失, 直观地反映出车削表面的改善情况。

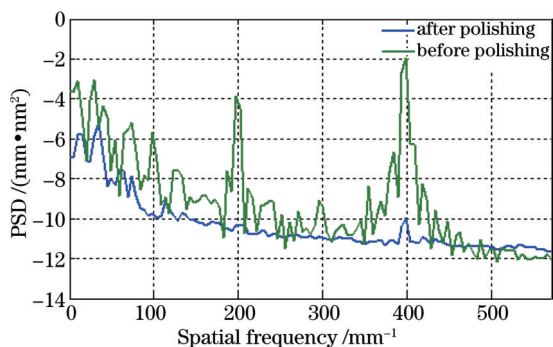


图5 抛光前后功率谱密度比较

Fig.5 Analysis of PSD before and after polishing

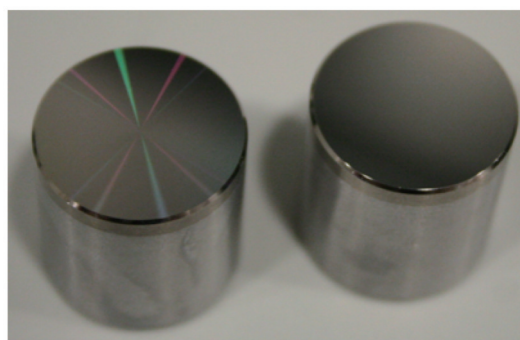


图6 抛光前(左)后(右)彩虹纹比较

Fig.6 Comparison of rainbow before (left) and after (right) polishing

5 结论与展望

金刚石车削技术在获得高精度光学表面的同时, 会在表面残留规律的车削刀纹, 从而诱发散射或衍射效应, 严重降低光学系统的性能。基于上述原因, 本文开展了抛光去除金刚石车削刀纹技术研究, 通过 Taguchi 正交试验的方法, 以表面微观形貌的改善为指标, 获得了气囊抛光去除刀纹的最优抛光参数。应用优化后的抛光参数对一精车不锈钢基底镀电解镍表面进行了抛光试验, 结果表明, 抛光后的表面较抛光前明显光滑, 表面粗糙度 R_a 由 3.81 nm 降低到 1.42 nm, 各空间频率的功率谱密度均大幅降低, 车削表面的衍射七彩纹消失。经过抛光, 金刚石车削表面的微观形貌得到明显改善。

参考文献

- 1 S J Zhang, S To. A theoretical and experimental investigation into multimode tool vibration with surface generation in ultra-precision diamond turning [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 72: 32-36.
- 2 Paul Dumas, Don Golini, Marc Tricard. Improve figure and finish of diamond turned surfaces with magneto-rheological finishing (MRF) [C]. SPIE, 2005, 5786: 296-304.
- 3 Y Namba, T Shimomura, A Fushiki, *et al.*. Ultra-precision polishing of electroless nickel molding dies for shorter wavelength applications [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 337-340.
- 4 Zhu Zhiwei. A Novel Turning Method and Its Device Development for Suppressing Scattering Effects [D]. Changchun: Jilin University, 2013. 8-10.
朱志伟. 散射抑制车削新方法及其装置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. 8-10.
- 5 Zhiwei Zhu, Xiaoqin Zhou, Dan Luo, *et al.*. Development of pseudo-random diamond turning method for fabricating freeform optics

- with scattering homogenization [J]. *Opt Express*, 2013, 21(23): 28470–28482.
- 6 K S Chon, Y Namba, K H Yoon. Precision machining of electroless nickel mandrel and fabrication of replicated mirrors for a soft X-ray microscope [J]. *JSME Int J Ser C*, 2006, 49(1): 56–62.
- 7 Anthony Beaucamp, Yoshiharu Namba, Super-smooth finishing of diamond turned hard X-ray molding dies by combined fluid jet and bonnet polishing [J]. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 315–318.
- 8 Z Z Li, J M Wang, X Q Peng, *et al.*. Removal of single point diamond–turning marks by abrasive jet polishing [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(16): 2458–2463.
- 9 Zhang Jian, Dai Lei, Wang Fei, *et al.*. Restraint of mid–spatial–frequency error aspheric surface by small–tool adaptive polishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0822002.
张 健, 代 雷, 王 飞, 等. 小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0822002
- 10 Ma Zhanlong, Sui Yongxin. Large optical surface error figuring by ion beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0122001.
马占龙, 隋永新. 应用离子束修正大面形误差光学元件[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0122001.
- 11 Zhang Feng. Combined type polishing of silicon modification layer on silicon carbide mirror for space camera [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0716001.
张 峰. 空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层的组合式抛光[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0716001.
- 12 Sorana D Bolboacă, Lorentz Jäntschi. Design of experiments: useful orthogonal arrays for number of experiments from 4 to 16 [J]. *Entropy*, 2007, 9(4): 198–232.
- 13 W H Yang, Y S Tarn. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method [J]. *J Mater Process Technol*, 1998, 84(1): 122–129.

栏目编辑: 张 雁