

# 自由曲面结构磁性抛光去除试验研究<sup>\*</sup>

林龙侨,王振忠,陈世平

(厦门大学航空航天学院,厦门 361000)

**[摘要]** 磁性抛光因柔性工具的工件表面适应性高而具有较好的应用潜力。自行设计抛光工具头,制备磁性抛光体,搭建试验平台,并对不锈钢平面工件进行定点抛光试验,平均去除效率为  $0.231 \mu\text{m}/10\text{min}$ ,且工件表面质量得到了很大的改善,验证了该磁性抛光方法的可行性。继而对两种自由曲面结构工件进行抛光:一是采用工具头水平移动式、工具头等高线移动式两种不同的抛光进给运动方式对不同曲率的不锈钢工件进行抛光去除试验,试验证明:两种抛光方式对每个曲率的轮廓均有去除能力,去除量在  $0.14\sim 1.33 \mu\text{m}$  之间;二是对 3D 打印的光敏树脂微结构自由曲面定点抛光,单位时间去除效率在  $8.957\sim 12.587 \mu\text{m}/10\text{min}$  之间,且改善了轮廓的光滑度。初步试验表明,磁性抛光方法对两种自由曲面结构均有一定的去除能力,可进一步探索磁性抛光技术应用于自由曲面结构确定性抛光。

**关键词:** 自由曲面;微结构;磁性抛光;去除效率

## Study on Remove of Free-Form Surface Structure by Magnetic Polishing

LIN Longqiao, WANG Zhenzhong, CHEN Shiping

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China)

**[ABSTRACT]** Magnetic polishing technique has wide application potential due to the high adaptability of flexible tool to the workpiece surface. The relevant polishing tools were developed, and a test platform was established in the paper. The workpiece finish had been greatly improved after spot polishing on stainless steel flat parts, and the average removal efficiency was  $0.231 \mu\text{m}/10 \text{min}$ , which verified the feasibility of the magnetic polishing method. Then two kinds of free-form surface structures were polished by magnetic polishing method. First, stainless steel parts with different curvatures were polished by two different polishing feed movement ways. Experimental results showed that two polishing methods had the ability to remove the contours of each curvature, and the removal amount falls between  $0.14\sim 1.33 \mu\text{m}$ . Secondly, the removal efficiency was between  $8.957\sim 12.587 \mu\text{m}/10\text{min}$  after spot polishing the microstructured free-form surface, and the smoothness of the contour is improved. Preliminary experiments showed that the magnetic polishing method had the ability to remove both free-form surface structures, so it can explore further magnetic polishing technology used in deterministic polishing of free-form surface structure.

**Keywords:** Free-form surface; Microstructure; Magnetic polishing; Removal efficiency

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.12.094

自由曲面及 3D 打印微结构零部件在航空航天、机械电子、光电成像、生物医学等领域具有重要的应用价值和广阔的应用前景。自由曲面的精密加工是衡量一个国家制造行业的重要指标,随着产品需求的不断提高,大部分自由曲面元件要求达到纳米级的表面粗糙度,亚微米级的形状精度及较好的表面完整性<sup>[1]</sup>。随着数控加工及 3D 打印等成形技术的日趋完善,已基本可以实现自由曲面的自动化加工<sup>[2-4]</sup>,但由于自由曲面的

<sup>\*</sup> 基金项目:深圳科技计划项目(JCY20160517103720819)。

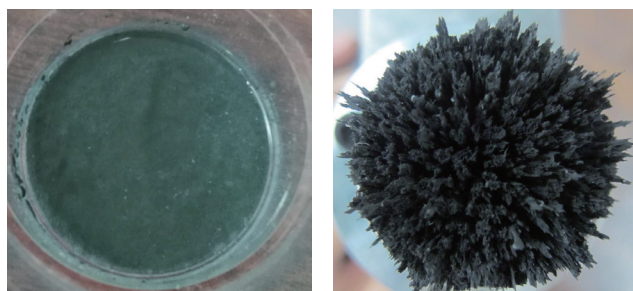
结构特点,现有的数控小磨头抛光<sup>[5]</sup>、磁流变抛光<sup>[6-7]</sup>、离子束抛光<sup>[8-9]</sup>等技术并不适应自由曲面抛光需求,加工成形后元件的超精密研磨及抛光技术仍有待加强。作为一种新型的加工方式,磁场辅助抛光近年来受到高度重视,广泛应用于高精度高表面质量零件的加工中。日本的 Tain 等<sup>[10]</sup>研发的磁流体(Magnetic Fluid, MF)抛光技术磨料分散性好,但磁化强度小,去除效率低。而磁流变(Magnetorheological Fluid, MRF)抛光技术磁场作用力大,但磨料分散性差。Shimada 等<sup>[11-12]</sup>结合了 MF 和

MRF 两者的优势,提出了一种新的磁性抛光介质——磁性复合流(Magnetic Compound Fluid, MCF),并在随后的试验中验证了在微观抛光生产中,相同浓度下的磁性复合液比磁流变液和磁性液体更有效<sup>[13]</sup>。大连理工大学的王续跃等<sup>[14]</sup>研究了磁性复合抛光体配制与检测方法,并对不同配比的磁性复合抛光体的抛光性能进行了试验研究。Guo 等<sup>[15]</sup>用磁性混合流体对光学镜头模具的镍-磷(Nickel Phosphorus, Ni-P)镀层表面进行抛光,验证了磁性混合流体抛光亦可用于较软的磁性材料表面的纳米级光整加工研究。磁性抛光技术应用对象多样,具有良好的应用潜力。本研究在参考 MCF 的基础上自行配制了磁性复合抛光体,由于抛光体为柔性体,与自由曲面工件表面的接触吻合性好,能够实现材料的去除且改善表面纹理。为探索磁性抛光技术的应用,本研究中自行设计抛光工具头并搭建试验平台,对不锈钢平面做定点打斑试验,并对不同曲率的不锈钢工件、3D 打印光敏树脂表面微结构进行试验研究,初步验证磁性抛光对自由曲面的材料具有去除能力。

## 1 磁性抛光技术的抛光原理

本研究采用的磁性抛光体是由羰基铁粉、磁流变液、磁流变抛光粉及  $\alpha$ -纤维素按一定的比例混合配制而成。抛光体常态下为悬浮液,而在磁铁的吸附下为柔性的链状磁性簇,如图 1 所示。这是因为当施加外磁场后,磁性微粒受磁场力作用,磁偶极矩方向逐渐与外磁场方向相同,所有磁性微粒形成的磁偶极子沿磁力线方向排列,使磁性微粒从无序状态向定向的有序状态变化,最终互相连接形成链状结构<sup>[16]</sup>。磁性抛光体的内部作用力主要来源于磁铁对铁粉的吸附力,铁粉像是夹具一样夹住抛光粉和  $\alpha$ -纤维素,并使其吸附在磁铁上, $\alpha$ -纤维素增加了抛光体的粘稠度,同时起到了联结各个磁性抛光体束的作用,而磁流变液就像胶水一样,将铁粉、磨粒、植物纤维素粘在一起<sup>[14]</sup>。

本研究依据的磁性抛光原理如图 2 所示,上部分为



(a) 无磁场作用下的状态

(b) 磁铁吸附下的状态

图1 抛光体在有无磁场作用下的状态

Fig.1 Status of the polishing head in the presence or absence of a magnetic field

自行设计的磁性抛光工具头:一圆柱状永磁体装于专用的铝合金容器里,避免抛光体与永磁体直接接触,由 4 个 M3 螺钉将磁铁容器与容器端盖连接,容器端盖内螺纹孔通过 M8 螺钉与工具头主轴体连接,工具头主轴体由直径 10mm 的细长杆通过刀柄与机床主轴连接。取定量的抛光体,将其吸附在装有永磁体的工具头下面,由于磁场力及重力的作用,非磁性抛光粉多聚集在磁性簇的末端,主轴旋转带动抛光体旋转,工具头下压使柔性抛光体与工件接触,且产生相对运动,实现材料的去除。

## 2 试验装置与试验条件

由磁性抛光工具头与自主研制的数控抛光机床组成的试验装置如图 3 所示,吸附着抛光体的工具头通过刀柄与机床主轴连接,工件表面和工具头的距离(即加工间隙  $\Delta$ )可以通过调节机床 Z 轴的上下移动来实现。

试验中采用了一个 Nd-Fe-B 圆柱状永磁体,直径  $\Phi$  20mm,厚度 20mm,牌号 N38,剩磁感应强度 1210mT,最大磁能面积  $310\text{kJ}/\text{m}^3$ 。抛光试验对象分别是不锈钢平面工件;慢走丝加工得到的不同曲率不锈钢工件如图 4 (a) 所示,该工件长 105mm,宽 60mm,从左到右曲率分别为 R20、R30、R40、R50、R60、R70、R80,每个曲率的长度 15mm,其中 R20、R40、R60、R80 为凸的轮廓,其余 3 个为凹的轮廓。光敏树脂 3D 打印得到的表面微结构如图 4 (b) 所示,直径 60mm,高 6.7mm,表面为沿直径方向阵列的凸轮廓体圆环结构,每个轮廓宽 2mm,高 0.7mm,圆环间距 0.5mm。试验用的抛光体由羰基铁粉、磁流变液、磁流变抛光粉及  $\alpha$ -纤维素 4 种成分构成,各部分分配比如表 1 所示。试验采用的各个抛光工艺参数如表 2 所示。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 对磁性抛光材料去除能力的验证

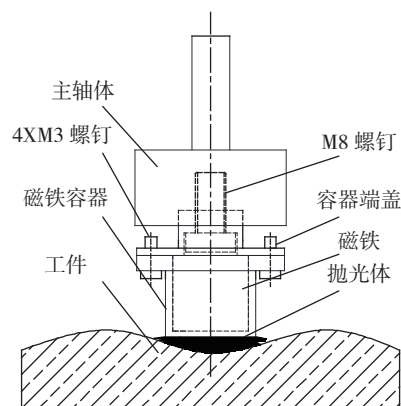


图2 自由曲面磁性抛光原理图

Fig.2 Principle of magnetic polishing for free-form surfaces

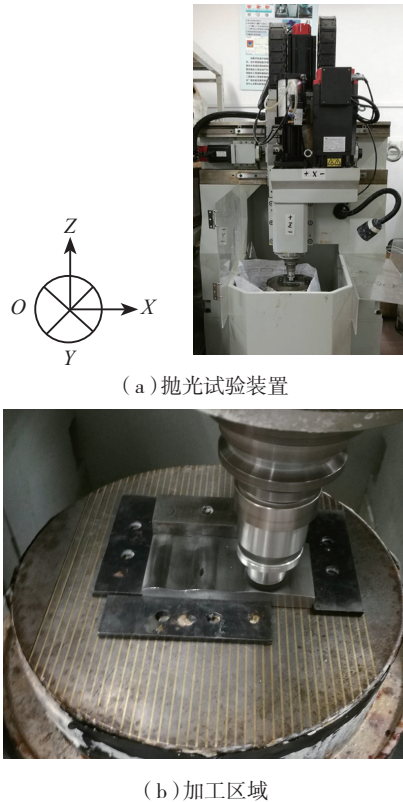


图3 磁性抛光试验装置

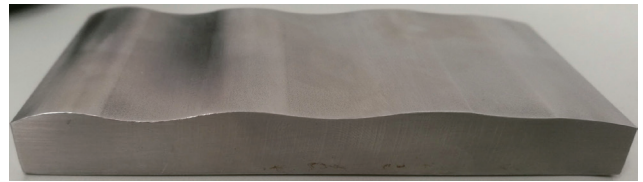
Fig.3 Experimental equipment of magnetic polishing

采用表 2 所示的工艺参数对不锈钢平面做定点抛光试验,抛光时间分别为 30min、60min、90min。将每次抛光完的工件清洗后,置于基恩士 VHX-2000 系列超景深三维显微系统下观测工件表面纹理及同一点处的材料去除量,将结果分别与抛光前所观测到的结果进行对比分析。慢走丝加工后的不锈钢工件表面残留许多凹坑,通过检测同一个凹坑抛光前后的深度差值来作为评测材料去除量的指标。

图 5 所示为抛光前后工件表面纹理,经过 90min 抛光后,工件表面残留的切削痕已被消除,残留凹坑的深度有变浅的现象,并且表面质量有很明显的改善。由图 6 可见,随着抛光时间的增加,材料去除量逐渐变大;抛光 30min、60min、90min 的去除效率分别为  $0.223 \mu\text{m}/10\text{min}$ 、 $0.245 \mu\text{m}/10\text{min}$ 、 $0.231 \mu\text{m}/10\text{min}$ ,验证了磁性抛光方法具有材料去除能力。

### 3.2 空间曲面结构磁性抛光的的结果分析

采用工具头水平移动式 and 工具头等高线移动式两种不同的抛光进给运动方式对不同曲率的不锈钢工件抛光(图 7),水平移动式加工间隙随进给过程产生变化,等高线移动式保持工具头端面中心到工件的间隙不变,工艺参数见表 2。图 8 为采用工具头水平移动式抛光方式,在显微镜放大 200 倍下观测曲率 R80 中点处前后的表面纹理及凹坑的深度对比,可以看出,相对于抛光



(a)不同曲率的不锈钢工件



(b)树脂微结构工件

图4 自由曲面工件

Fig.4 Workpiece of free-form surface

表1 抛光体成分

成分	质量 /g	质量分数 /%
羰基铁粉	12.1	41
磁流变液	7.7	26
$\alpha$ -纤维素	1.0	3
磁流变抛光粉	9.1	30

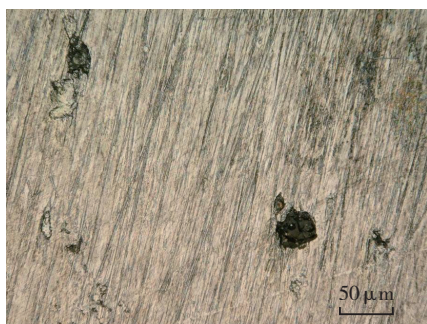
表2 抛光工艺参数

工艺参数	试验 I	试验 II	试验 III
工件	不锈钢平面	不锈钢自由曲面	树脂表面微结构
主轴转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	500	500	500
加工间隙 $d/\text{mm}$	1.5	—	1.5
进给速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	—	0.5	—
抛光时间 $t/\text{min}$	30, 60, 90	—	30
磁铁规格 $d \times t/(\text{mm} \times \text{mm})$	20 $\times$ 20	20 $\times$ 20	20 $\times$ 20
抛光体一次取量 /g	1.7	1.7	1.7

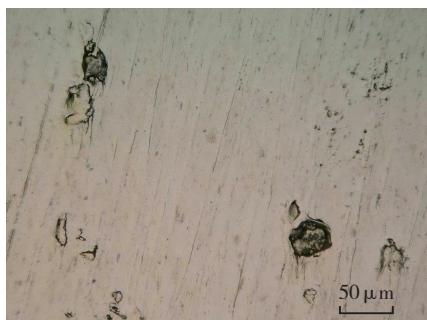
前,抛光后工件表面有明显的去除痕迹,且相同的凹坑深度也有变浅的迹象。对同一个凹坑的深度进行测量,由抛光前的  $2.96 \mu\text{m}$  降低到抛光后的  $1.6 \mu\text{m}$ 。用同样的方法可以分别得到两种进给抛光方式下各个曲率中点位置抛光前后的表面纹理及材料去除量,如表 3 和图 9 所示。

两种进给抛光方式对不锈钢工件每个曲率的轮廓均有去除能力,去除量在  $0.14 \sim 1.33 \mu\text{m}$  之间(见表 3)。图 9 可以看出:两种抛光方式下凸轮廓曲率的材料去除率均比凹轮廓的大,这是由于凸轮廓的加工间隙较小,





(a) 抛光前



(b) 抛光 90min 后

图5 VHX-2000 观测到的不锈钢工件表面纹理

Fig.5 Surface texture of the stainless steel workpiece observed by VHX-2000

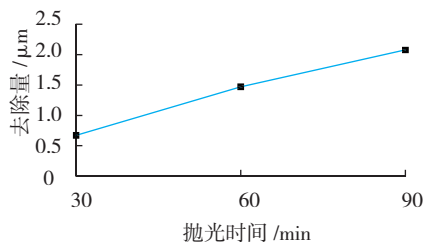
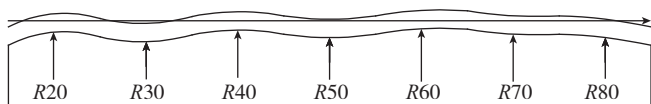


图6 材料去除量与抛光时间的关系

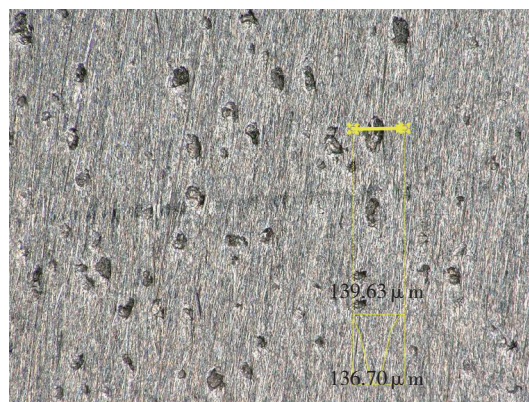
Fig.6 Relationship between material removal and polishing time



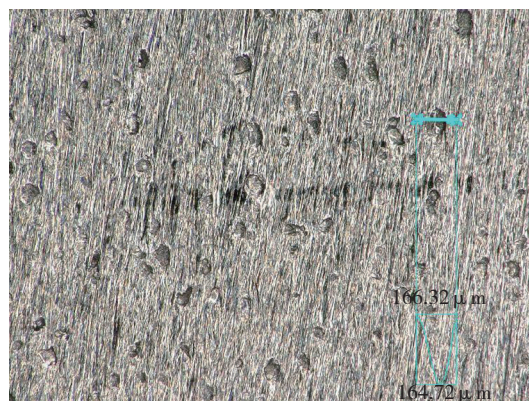
注：直线表示工具头水平移动式、曲线表示工具头等高线移动式。

图7 抛光路径示意图

Fig.7 Polishing path diagram



(a) 抛光前



(a) 抛光后

图8 200倍显微镜观测抛光前后R80中点处的表面纹理及去除深度

Fig.8 Surface texture and removal depth of the R80 mid-point before and after polishing at the 200 magnification

表3 各个曲率中点处在两种进给运动方式抛光前后凹坑深度

μm

运动方式	曲率	R20	R30	R40	R50	R60	R70	R80
工具头水平移动式	抛光前	1.18	0.82	0.9	3.30	5.18	2.55	2.93
	抛光后	0.53	0.68	0.1	3.08	4.17	2.21	1.6
	去除量	0.65	0.14	0.8	0.22	1.01	0.34	1.33
工具头等高线移动式	抛光前	2.87	3.92	4.77	7.58	1.85	2.39	2.18
	抛光后	2.45	3.68	4.18	7.12	0.9	2.10	1.25
	去除量	0.42	0.24	0.59	0.46	0.95	0.29	0.93

件定点抛光试验,抛光前调整主轴使得工具头中心轴线与工件的中心轴线重合。在超景深三维显微系统放大500倍下观测工件表面微结构抛光前后的轮廓以及各轮廓高度值(图10),从左往右的轮廓最高点与微结构圆心的距离分别为1.5mm、4mm、6.5mm、9mm、11.5mm(由于分段拼接,图10仅展示前3个轮廓)。将抛光前后轮廓高度的差值作为评测材料去除量的指标,各轮廓的去除量如图11所示。

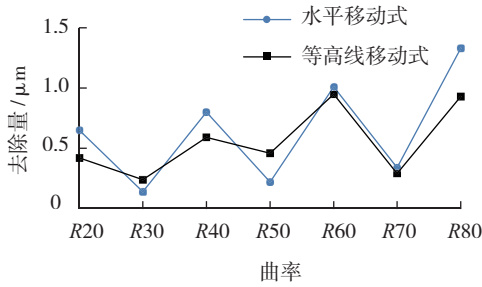
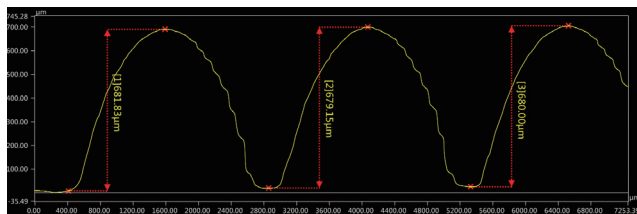
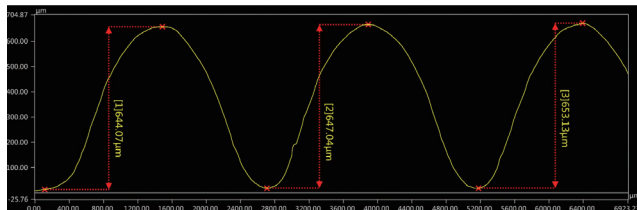


图9 两种进给抛光方式抛光后各曲率中点位置的材料去除量  
Fig.9 Material removal at the midpoint of each curvature after polishing with two feed polishing modes



(a) 抛光前



(b) 抛光后

图10 500倍显微镜下观测表面微结构抛光前后的轮廓以及各轮廓高度值

Fig.10 Contour and height value of the surface microstructure before and after polishing at 500 magnification

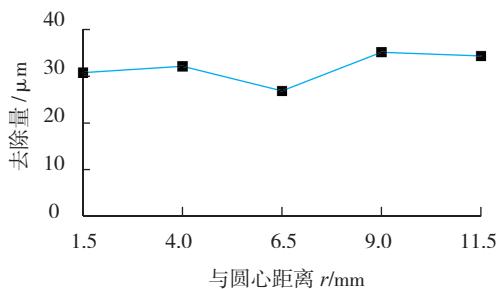


图11 抛光30min后距圆心r处轮廓的去除量

Fig.11 Removal of the contour from the center of the circle r after polishing 30 minutes

图10可见,抛光30min后工件表面轮廓的高度值均变小,且原工件各轮廓表面右边有凹凸不平的条纹,经过抛光后变得光滑、均匀。图11可见,在整个抛光工具头(半径12mm)区域内的工件各轮廓均有去除,去除效率在 $8.957\sim 12.587\mu\text{m}/10\text{min}$ 之间。

## 4 结论

(1)采用磁性抛光方法对不锈钢平面工件定点抛光90min后,去除效率为 $0.231\mu\text{m}/10\text{min}$ ,且表面质量得到了很大的改善,从而验证了磁性抛光方法的可行性,为自由曲面结构磁性抛光提供了试验依据。

(2)用工具头水平移动式、工具头等高线移动式两种不同的抛光进给运动方式对不同曲率的不锈钢工件抛光,由试验结果可以看出:工件各曲率处均有去除,且抛光进给方式和抛光工具头的尺寸均会影响到材料去除率。说明通过对抛光运动方式及工具头尺寸的控制可以实现磁性抛光技术应用于空间曲面结构抛光。

(3)用磁性抛光方法对3D打印光敏树脂微结构自由曲面定点抛光30min,工件各轮廓表面均有去除,去除效率在 $8.957\sim 12.587\mu\text{m}/10\text{min}$ 之间,且原来不平整的轮廓变光滑、平整。验证了磁性抛光技术能较好地适用于微结构自由曲面抛光,为下一步进行复杂面型的确定性抛光研究打下基础。

## 参考文献

[1] 潘龙,宫虎,房丰洲.大尺寸自由曲面铝反射镜超精密抛光工艺[J].纳米技术与精密工程,2015,13(2):108-112.  
PAN Long, GONG Hu, FANG Fengzhou. Ultra-precision polishing process of large free-form surface aluminum mirror[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2015, 13(2): 108-112.

[2] 许树新,赵继,王洪刚.自由曲面数控加工中刀具破损的小波分析[J].光学精密工程,2000,8(4):360-364.  
XU Shuxin, ZHAO Ji, WANG Honggang. Analysis of tool breakage in CNC manufacturing using wavelet transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(4): 360-364.

[3] 李荣彬,孔令豹,张志辉,等.微结构自由曲面的超精密单点金刚石切削技术概述[J].机械工程学报,2013,49(19):144-155.  
LI Rongbin, KONG Lingbao, ZHANG Zhihui, et al. An overview of ultra-precision diamond machining of microstructured free-form surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 144-155.

[4] 包琼琼,王宇,潘骏,等.关于自由光学曲面的超精密慢刀伺服车削技术研究[J].现代制造工程,2013(11):60-63.  
BAO Qiongqiong, WANG Yu, PAN Jun, et al. The processing of optical element for free-form surface ultra-precision machining technology of slow tool servo[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(11): 60-63.

[5] 肖光辉,李新南.椭圆形小磨头特性曲线研究[J].光学仪器,2011,33(1):83-88.

XIAO Guanghui, LI Xinnan. Research on the characteristic curve of

(下转第109页)

electron beam bombardment furnace beam [J]. Cemented Carbide, 2009, 26(4): 240–245.

[4] 韦寿祺, 莫金海, 何少佳. 大功率电子束轰击炉电子枪电源控制策略 [J]. 真空科学与技术报, 2008, 28(2): 58–62.

WEI Shouqi, MO Jinhai, He Shaojia. Power supply control strategy of electron gun for high power electron beam bombardment [J]. Vacuum Science and Technology, 2008, 28(2): 58–62.

[5] 张向东, 郝胜智, 高泰瑞. 强流脉冲电子束处理纯钛的表面组织与性能 [J]. 核技术, 2011, 34(1): 22–26.

ZHANG Xiangdong, HAO Shengzhi, GAO Tairui. The surface microstructure and properties of titanium treated by high current pulsed electron beam [J]. Nuclear Technology, 2011, 34(1): 22–26.

[6] 郝胜智, 吴平生, 张向东, 等. 强流脉冲电子束表面处理 [J]. 金属热处理, 2008, 33(1): 77–81.

HAO Shengzhi, WU Pingsheng, ZHANG Xiangdong, et al. Surface treatment of high current pulsed electron beam [J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(1): 77–81.

[7] 高玉魁. 脉冲电子束改性 TC4 钛合金微观组织和性能 [J]. 材料热处理学报, 2010(4): 120–124.

GAO Yukui. Microstructure and properties of TC4 titanium alloy modified by pulsed electron beam [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010(4): 120–124.

[8] 曹辉, 郝仪, 孙树臣. 电子束表面改性对镁合金耐磨性的影响 [J]. 轻金属, 2011(4): 45–49.

CAO Hui, HAO Yi, SUN Shuchen. Effect of electron beam surface modification on wear resistance of magnesium alloys [J]. Light Metals, 2011(4): 45–49.

[9] 许洪斌, 胡建军, 陈元芳, 等. 脉冲电子束照射下材料表面熔化深度的数值解析 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2008, 31(12): 1351–1354.

XU Hongbin, HU Jianjun, CHEN Yuanfang, et al. Numerical analysis of melting depth of material surface under pulsed electron beam irradiation [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008, 31(12): 1351–1354.

[10] 王泽庭. 高压电子束焊机电源的研究与实现 [D]. 北京: 北方工业大学, 2011.

WANG Zeting. Research and implementation high voltage electron beam welding machine power [D]. Beijing: North China University of Technology, 2011.

通讯作者: 范恺, 硕士, 研究方向为新型特种电源, E-mail: 273160798@qq.com。

(责编 铃兰)

(上接第98页)

an elliptical pad [J]. Optical Instruments, 2011, 33(1): 83–88.

[6] 肖晓兰, 阎秋生, 潘继生, 等. 超精密磁流变复合抛光技术研究进展 [J]. 广东工业大学学报, 2016, 33(6): 28–33.

XAO Xiaolan, YAN Qiusheng, PAN Jisheng, et al. A review on ultra-precision compound polishing technology of magnetorheological [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2016, 33(6): 28–33.

[7] SINGH A K, JHA S, PULAK M P. Mechanism of material removal in ball end magnetorheological finishing process. Wear, 2013, 302(1–2): 1180–1191.

[8] XIE X H, HAO Y, ZHOU L, et al. High thermal expansion

optical component machined by ion beam figuring [J]. Optical Engineering, 2012, 51(1): 13401–13401.

[9] 焦长君, 李圣怡, 王登峰, 等. 离子束加工光学镜面的材料去除特性 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1520–1526.

JIAO Changjun, LI Shengyi, WANG Dengfeng, et al. Material removal property in ion figuring process for optical components [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1520–1526.

[10] TAIN Y, KAWATA K. Development of high efficiency fine finishing process using magnetic fluid [J]. Annals of the CIRP, 1984, 33(1): 217–220.

[11] SHIMADA K, AKAGAMI Y. Characteristics of magnetic compound fluid (MCF) in a rotating rheometer [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252(1): 235–237.

[12] WU Y B, SHIMADA K. Effects of particles blend ratio on surface quality in surface polishing using magnetic polishing liquid (MPL) [J]. Advances in Abrasive Technology, 2005, 291–292(6): 337–342.

[13] SHIMADA K, AKAGAMI Y, KAMIYAMA S, et al. New microscopic polishing with magnetic compound fluid (MCF) [J]. J. Intell. Mater. Syst. Struct, 2002, 13(7): 405–408.

[14] 王续跃, 吴勇波. 磁性复合抛光液配制及其抛光性能试验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(6): 832–836.

WANG Xuyue, WU Yongbo. MPT development and polishing characteristics test [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(6): 832–836.

[15] GUO H R, WU Y B. Ultrafine polishing of electroless nickel-phosphorus-plated mold with magnetic compound fluid slurry [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(11–12): 1502–1509.

[16] 李文妹, 姜晨, 许继鹏, 等. 光学玻璃磁性复合流体抛光液研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 266–273.

LI Wenmei, JIANG Chen, XU Jipeng, et al. Research for magnetic compound fluid slurry of optical glass [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 266–273.

通讯作者: 王振忠, 博士、副教授, 主要研究方向为精密加工装备及系统控制、精密检测, E-mail: wangzhzhong@xmu.edu.cn。

(责编 铃兰)

(上接第103页)

Technology, 2014, 70: 227–236.

[15] BAUFELD B, BRANDI E, BIEST O. Wire based additive layer manufacturing: comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1146–1158.

[16] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2016(22): 16–22.

ZHANG Anfeng, LI Dichen, LIANG Shaoduan, et al. High performance metal parts laser additive technology research progress [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(22): 16–22.

通讯作者: 夏然飞, 硕士、初级工程师, 研究方向为增材制造、汽车制造, E-mail: xiaranfei1@163.com。

(责编 铃兰)