

# 弹性磨具磨抛 M300 曲面多目标磨削参数研究

吴晓君, 杨洋, 舒晓, 张凤勇, 张露

(西安建筑科技大学 机电工程学院, 西安 710055)

**摘要:** **目的** 通过 M300 模具钢曲面磨抛加工实验研究, 解决传统抛光工艺效率低下等问题。**方法** 采用弹性球头磨具对 M300 钢进行了曲面抛光加工, 设计单因素实验和正交实验, 研究主轴转速、磨具粒度、进给速度、切削深度等主要工艺参数对表面粗糙度与材料去除率的作用。使用 Hilbert 路径走刀方式进行加工, 可均匀遍历整个待抛曲面, 利用五轴加工中心作为试验平台, 电子分析天平、三维表面形貌仪作为检测仪器, 得到优化的工艺参数和优选区间。**结果** 在 9 组选取的磨抛参数中, 能够获得较为理想的表面粗糙度 ( $0.078\ \mu\text{m}$ ), 材料去除率和磨耗比分别为  $2.152\ \text{mm}^3/\text{min}$ 、0.07。对表面粗糙度影响较大的因素为切深, 对材料去除率影响较大的因素为切深和进给速度。对于多目标优化, 切深、主轴转速、进给速度、磨具粒度的影响程度逐次降低。优化后的工艺参数组合为: 球头磨具 320#, 主轴转速 4500 r/min, 切深 0.4 mm, 进给速度 80 mm/s。**结论** 采用弹性球头磨具磨抛可提高 M300 模具钢的材料去除率, 改进加工表面质量, 进而提高加工效率。

**关键词:** 球头磨具; 表面粗糙度; 材料去除率; 磨耗比; 多指标优化; 灰色系统

**中图分类号:** V261.2+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)06-0361-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.044

## Multi-objective Polishing Parameter of M300 Steel by Elastic Abrasive

WU Xiao-jun, YANG Yang, SHU Xiao, ZHANG Feng-yong, ZHANG Lu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problems of low efficiency of traditional polishing process through the experimental research on the surface grinding and polishing of M300 steel. The elastic ball type abrasive tool was used to polish and grind M300 steel. Single factor experiment and orthogonal experiment were designed to study the influence of main process parameters on the surface roughness and material removal, such as spindle speed, abrasive grain size, feeding depth and cutting depth. In the experiment, the Hilbert path was used to evenly process the entire surface. The five-axis machining center was used as the test platform, and the electronic analytical balance and three-dimensional surface topographer were used as testing instruments to obtain the optimal process parameters and preferred interval. Among the selected 9 sets of polishing parameters, the ideal surface roughness of  $0.078\ \mu\text{m}$  was obtained, the optimized removal rate was  $2.152\ \text{mm}^3/\text{min}$ , and the wear ratio was 0.07. The factor significantly affecting the surface roughness was the cutting depth. The factor having greater influence on the material removal rate was the change in cutting depth and feeding speed. For multi-objective optimization, the influence of cutting depth, spindle speed, feeding speed and abrasive size decreased in turn. The optimum combination of process parameters was: ball type

收稿日期: 2018-10-30; 修订日期: 2019-02-14

Received: 2018-10-30; Revised: 2019-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目支持 (51375361)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51375361)

作者简介: 吴晓君 (1964—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事先进制造技术与机械电子研究。邮箱: wuxiaojun@xauat.edu.cn

Biography: WU Xiao-jun (1964—), Female, Doctor, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: mechatronic engineering and advanced manufacturing technology. E-mail: wuxiaojun@xauat.edu.cn

abrasive tool: 320#, spindle speed: 4500 r/min, cutting depth: 0.4 mm and the feeding rate: 80 mm/min. The use of ball type abrasive tool can increase the material removal rate of M300 steel and improve the quality of the machined surface, thus enhancing the processing efficiency.

**KEY WORDS:** ball type abrasive tool; surface roughness; material removal rate; wear ratio; multi-index optimization; grey system

M300 作为一种抗腐蚀性高、耐磨性强的高 Cr 合金钢材料, 经热处理, 硬度可达 31~35HRC, 淬火后硬度达到 62HRC, 被广泛应用于复杂型面模具和航天军工设备 (如导弹架关键零部件) 的制造。但由于其硬度高, 脆性大, 导热性差, 且精加工过程中影响因素较多, 对需要镜面粗糙度的产品表面, 研磨抛光费时且效果差<sup>[1]</sup>, 极大影响产品性能发挥。

硬质合金简单型面工件的超精加工, 目前已经有了较成熟的装备和工艺手段<sup>[2-4]</sup>。而对其微小型面高质量工件表面的获取, 采用传统的人工抛光精加工手段已经难以满足当前低成本、短周期、高质量的现代加工制造要求<sup>[5-6]</sup>。为了应对曲面抛光表面质量和加工效率之间的矛盾, 近年来国内外学者在机械抛光方面进行了广泛研究, 并取得了很大突破, 但目前对于 M300 材料尚缺乏完整的磨抛加工实验研究。针对目前 M300 加工中存在的问题和不足, 本文应用球形抛光工具对 M300 模具进行表面超精加工, 研究球头磨具曲面抛光材料去除机理和相关磨削参数优化, 为完善球头磨具曲面抛光加工相关理论和工艺规划方法提供理论和技术支持。

## 1 弹性磨具工作机理分析

图 1 为弹性球头磨具与待加工曲面的接触简图, 其中  $R$  为半径,  $F_n$  为压力,  $\omega$  为转速,  $\alpha$  为球头磨具主轴方向与曲面法线方向的进给角, 以此参数对曲面工件进行表面抛光。

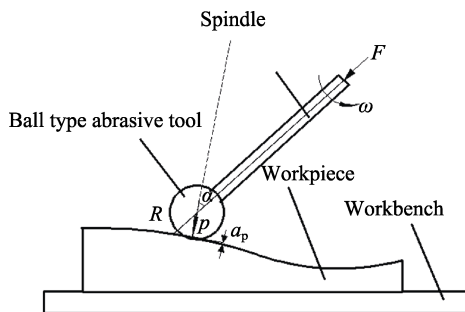


图 1 球头磨具与自由曲面的接触简图  
Fig.1 Contact diagram of spherical grinding head and complex curved surface

简化抛光过程为弹性球体和刚性曲面接触, 依据 Hertz 理论, 如图 2 所示, 两者的接触面近似为椭圆, 接触面间压力服从椭圆赫兹分布<sup>[7]</sup>, 如式 (1) 所示:

$$p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{y}{a}\right)^2 - \left(\frac{x}{b}\right)^2} \quad (1)$$

其中  $p_0 = \frac{3F_n}{2\pi ab}$  为两接触区中心压强,  $F_n$  为研抛压力。

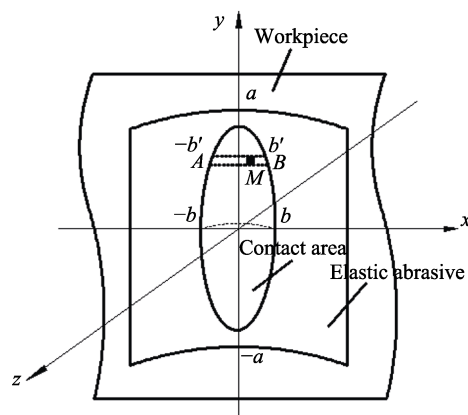


图 2 接触区域示意图  
Fig.2 Diagram of contact area

科研人员以各种磨抛工艺为载体, 对材料去除机理进行了广泛的研究。Preston<sup>[8]</sup>提出了众所周知的 Preston 方程, 该方程假设磨粒去除深度正比于接触压力和相对速度, 按照该假设, 如图 2 单位长度  $M$  上材料的去除量可用式 (2) 表示:

$$\frac{dh}{dl} = k_p \cdot \frac{v_s + v_f}{v_f} \cdot p \quad (2)$$

式中:  $K_p$  为修正系数, 与磨具和工件的硬度等因素相关;  $v_s$  为磨具某点切向线速度;  $v_f$  为磨具沿工件进给速度;  $P$  为抛光工具和工件之间的接触压力。

对工件和磨具接触区域建立如图 3 所示坐标系, 坐标原点  $O$  点为抛光接触区中心, 其速度为:

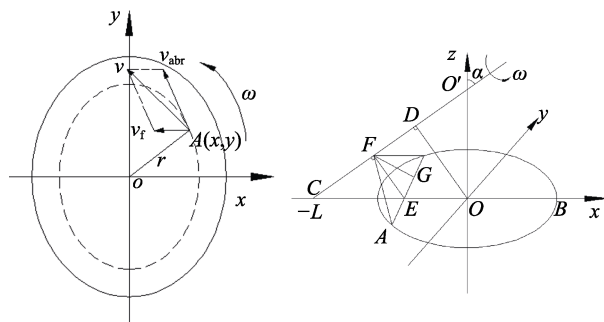


图 3 工件与球头磨具接触区域矢量速度简图  
Fig.3 Speed vector diagram of the contact area between the workpiece and the ball head

$$v_{os} = \omega \cdot |OO'| \cdot \cos \alpha \tag{3}$$

因此，接触面内任一点  $A(x,y)$  的速度为：

$$v_s(x,y) = \omega \cdot \sqrt{[(R-h)\sin \alpha + x \cos \alpha]^2 + y^2} \tag{4}$$

如图 2 所示，对式（2）在  $(-b',b')$  区域积分可得接触区域  $AB$  沿  $x$  方向微元  $M$  的材料去除量：

$$h(x) = \int_{-b'}^{b'} \frac{dh}{dl} dx = \int_{-b'}^{b'} k_p \cdot p \cdot \frac{v_s + v_f}{v_f} dx \tag{5}$$

其中  $b' = b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}$ 。将式（1）、式（5）带入

式（2）中，得到接触区域表面材料去除方程：

$$h(x) = -k_p \cdot \frac{v_s + v_f}{v_f} \cdot \frac{3F_n}{4a} \left[ 1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 \right] \tag{6}$$

由式（6）确定表面材料去除率受到进给速度  $v_f$ 、主轴切向运动速度  $v_s$ 、磨抛压力  $F_n$  的影响。其中，在进动角不变的前提下， $v_s$  具体表现为主轴转速  $W_t$ ，对于弹性磨具而言，磨抛压力  $F_n$  与切削深度  $a_p$  近似线性正比关系<sup>[9-10]</sup>。由此确定本文研究球头磨具抛光工艺主要控制参数为：主轴转速  $W_t$ 、切深  $a_p$ 、进给速度  $v_f$ 、磨具粒度  $S$ 。

2 试验条件和方法

2.1 材料

实验所用工件材料为 M300 模具钢，工件尺寸为 70 mm×70 mm×30 mm。化学组成如表 1 所示。经前期铣削加工，保证工件表面  $Ra$  在 1 μm 左右，再进行抛光实验。

表 1 M300 钢的化学组成  
Tab.1 Chemical composition of M300 steel

wt%						
C	Cr	Mo	Mn	Si	V	S
1.4	11.5	1.0	0.4	0.3	0.3	0.002

2.2 试验方案

试验在 HSC75linear 五轴加工中心进行。该加工中心  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴行程分别为 885、600、600 mm， $B$  轴可实现 10°~110°的转角， $C$  轴 360°旋转。直线轴可实现 90 m/min 的快速移动速度。

本试验设定 Hilbert 曲线走刀轨迹。因为在超精加工阶段对磨具要求能够均匀历经整个工件曲面，普通的单向、往复路径难以达到较高的抛光需求。为满足要求，采用具有无序性和均匀遍历性<sup>[11]</sup>特点的 Hilbert 路径作为走刀轨迹。图 4 所示为本实验设定走刀轨迹。

试验采用直径 10 mm 的不同粒度弹性球头磨具，对工件 70 mm×70 mm 的面进行单因素切削实验和依

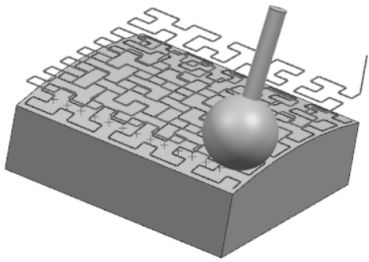


图 4 球头磨具抛光轨迹  
Fig.4 Feeding track of ball type abrasive tool

据田口法<sup>[12]</sup>设计抛光实验。设定轨迹间距为 1 mm，抛光工具主轴方向与曲面法线方向的进动角  $\alpha=15^\circ$ ，研究切深  $a_p$ 、主轴转速  $W_t$ 、进给速度  $v_f$ 、磨具粒度  $S$  对加工工艺的影响。单因素试验参数、正交试验因素水平与正交试验结果分别如表 2—4 所示。

表 2 抛光试验参数  
Tab.2 Experimental parameters for polishing

Name	Condition
Abrasive and grain size	320#, 600#, 1000#
Grinding speed/(r·min <sup>-1</sup> )	1500~12 000
Feed rate/(mm·s <sup>-1</sup> )	20~160
Cutting depth/mm	0.05~0.4
Polishing time/s	30~240
Polishing line spacing/mm	1

表 3 抛光参数优化试验因素水平表  
Tab.3 Factors and levels of the polishing parameter optimization experiment

Process parameter	Level		
	1	2	3
A Grain size	320	600	1000
B Grinding speed/(r·min <sup>-1</sup> )	4500	6000	7500
C Cutting depth/mm	0.1	0.2	0.4
D Feed rate/(mm·s <sup>-1</sup> )	40	80	160
Polishing line spacing	1		
Processing cycles	3		

表 4 正交试验结果  
Tab.4 Results of the orthogonal experiment

No.	Process parameter				Experiment data			
	$S$	$W_t$	$a_p$	$v_f$	MRR/(mm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	$Z_w$	$Ra/\mu\text{m}$	GRC
1	1	1	1	1	0.063	0.10	0.086	0.5508
2	1	2	2	2	0.949	0.39	0.134	0.4365
3	1	3	3	3	2.152	0.51	0.105	0.3465
4	2	1	2	3	0.266	0.11	0.104	0.5439
5	2	2	3	1	0.278	0.07	0.115	0.4933
6	2	3	1	2	0.177	0.11	0.088	0.8331
7	3	1	3	2	0.189	0.37	0.078	0.3881
8	3	2	1	3	0.139	0.08	0.133	0.4757
9	3	3	2	1	0.291	0.13	0.162	0.6148

## 2.3 测量方法

使用 alicon a INFINITE Focus 三维形貌仪检测工件和磨具表面质量。在实验前后对工件和磨具用超声波清洗机清洗 20 min 后烘干,使用精密电子分析天平(精度 0.1 mg)测量工件和磨具质量。为减少随机因素带来的影响,试验结果取三次的均值。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同磨削参数对工艺的影响

#### 3.1.1 工艺参数对材料去除率的影响

影响球头磨具材料去除能力的磨抛参数为切深  $a_p$  和主轴转速  $W_t$ 。图 5a 表明,总体 MRR 随加工时间  $t$  的增加而降低,粒度  $S$  越小, MRR 越高。这是

由于加工前期磨粒尖锐,数量较多的磨粒参与切削,材料去除率较高;随着加工的进行,磨粒磨钝减少了参与切削的磨粒数量,材料去除率下降。同等条件下粒度大的磨具参与切削的磨粒多,单颗磨粒受压力小,更多的磨粒处于滑擦和耕犁阶段<sup>[9]</sup>,降低整体材料去除能力。图 5b 表明,材料去除率随主轴转速的增加而增加,这是由于过短的接触时间使得切削作用减弱,滑擦、耕犁作用增强,减弱了磨具的材料去除能力,材料去除率降低。图 5c 表明,总体上进给速度  $v_f$  对 MRR 的影响较小,这是由于当切深、主轴转速不变时,  $v_f$  增大使得行距增大,单位长度刀具走刀次数降低,增加的工件表面残留高度<sup>[13]</sup>使得材料去除率下降。图 5d 表明, MRR 和切深  $a_p$  近似正比关系,这是由于接触面积和参与抛光过程的磨粒数随着  $a_p$  的增加而增加, MRR 上升。

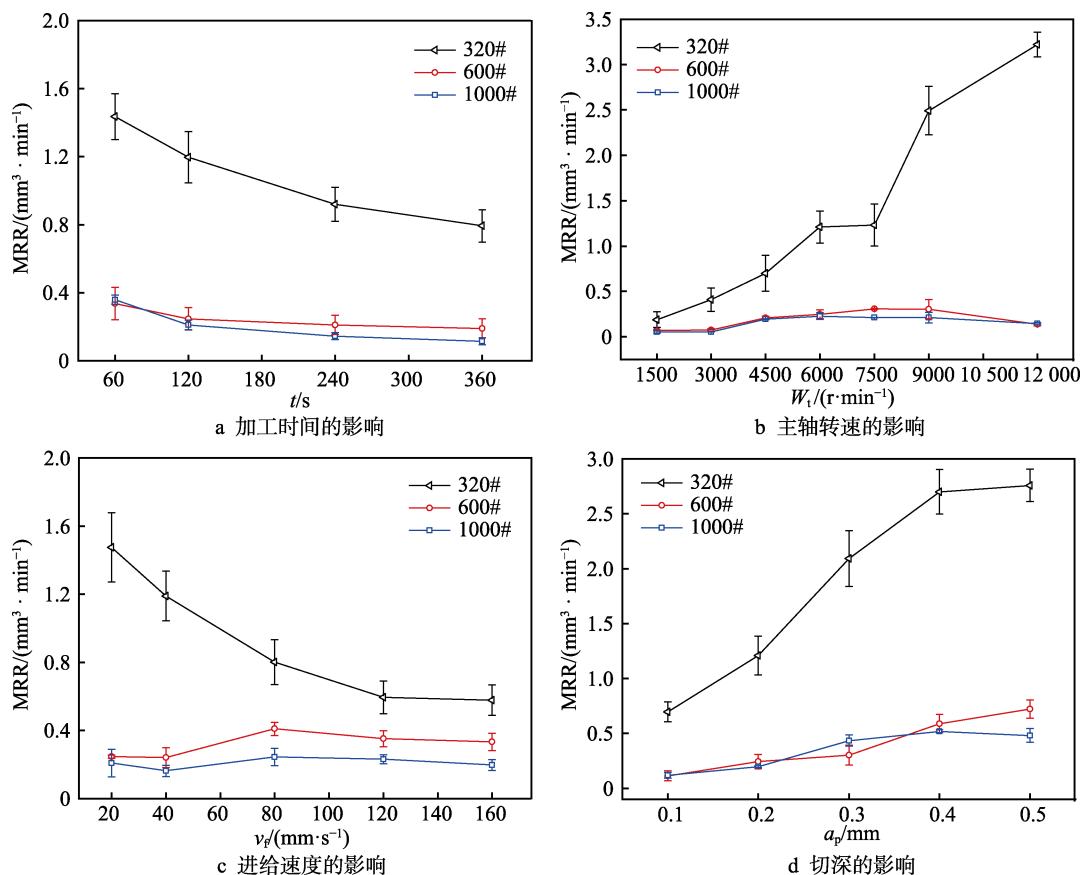


图 5 磨抛参数对材料去除率的影响

Fig.5 Influence of polishing parameters on MRR: a) processing time; b) grinding speed; c) feed rate; d) cutting depth

#### 3.1.2 工艺参数对磨具磨损和表面质量的影响

图 6 为碳化硅磨粒磨损过程,该过程由结合剂破碎和磨粒磨损构成:锋利的磨粒顶部首先钝化形成小平面,然后逐渐扩展变大,增大接触区域的摩擦而减少磨粒切削作用,并且加速磨粒磨损。磨抛之后的碳化硅磨粒顶部产生较大的钝化平面,其周围出现有少量的磨粒破碎和脱落现象,及较大的磨损小平面和严重的粘着磨损<sup>[14]</sup>。

图 7 为球头磨具磨抛 M300 钢后的微观表面,对比图 6 可以看出,球头磨具磨粒的磨损过程和碳化硅一样,大多数磨粒顶部出现表面较平滑的磨损小平面。此外,粘附磨损现象随着粒度的不同而有所差异,320#磨具相比 600#磨具,表面细小,磨屑覆盖更多,结合剂无法清晰识别。这说明粒度小的磨具在参与磨抛加工时,磨屑粘附现象更严重,会影响工件表面磨抛效果。

图 8a 表明, 总体上  $M_t$  随着  $W_t$  的增加而增加, 其中 320# 磨具的磨损量呈先减后增趋势。由于 320# 磨具粒径远大于 600# 和 1000# 磨具, 其单颗磨粒承受

压力较大, 故磨损程度较大, 在转速大于 6000 r/min 后, 该现象减少。图 8b 表明, 磨具磨损量  $a_p$ - $M_t$  随着切深  $a_p$  的增大而增大。这是由于增加  $a_p$  会使得参与

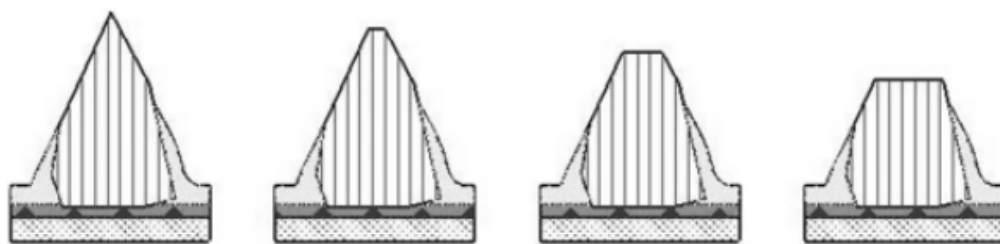


图 6 碳化硅磨粒磨损过程  
Fig.6 Wear process of SiC abrasive

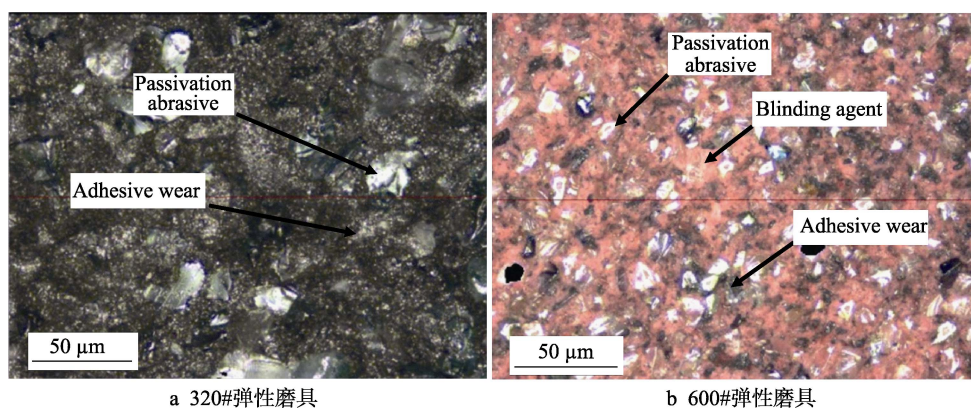


图 7 弹性磨具磨抛后微观形貌图

Fig.7 Microscopic images of elastic abrasive surface after polishing: a) 320# elastic abrasive; b) 600# elastic abrasive

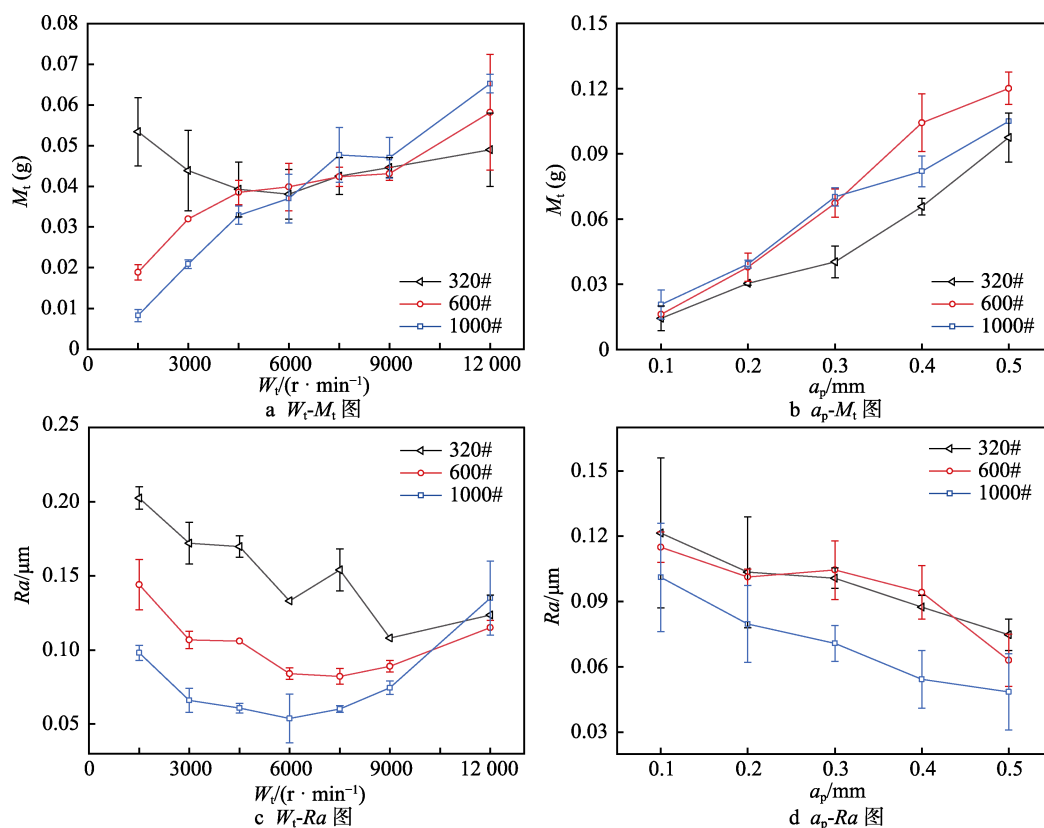


图 8 工艺参数对磨具磨损和表面质量的影响

Fig.8 Influence of process parameters on abrasive wear and surface quality: a) grinding speed; b) cutting depth



工作的磨粒数增加,加剧磨损现象,增加磨损量。 $a_p$  大于 0.3 mm 后,总体  $M_t$  上升幅度增加,说明在保证加工效率和磨具较长使用寿命的前提下,切深界于 0.2~0.4 mm 之间。

由图 8c 可知,对于球头弹性磨具抛光加工,磨具转速存在临界值,在临界范围内转速增大,会使单位时间内经过接触区的磨粒增多,有效切削刃数目增多<sup>[7]</sup>,粗糙度逐渐降低;转速大于 7500 r/min 后,较高的工件切向线速度会使磨具与工件间产生较高温,此时结合剂磨损加剧,实际磨粒切入深度减小,磨具去除能力下降<sup>[7,15]</sup>, $Ra$  下降趋势减缓,随后逐步上升。因此,为获得良好抛光表面质量,本文所用弹性球头主轴转速不应超过 9000 r/min。图 8d 表明,表面粗糙度  $Ra$  随着  $a_p$  的增大而下降。这是由于  $a_p$  较小时,材料去除能力较低,表面去除深度浅,未能有效去除前道工序铣削痕迹,故  $Ra$  值较大;随着切深的增加,磨具能有效去除材料表面凹凸峰,粗糙度  $Ra$  随之下降。

### 3.2 曲面抛光磨削参数优化

#### 3.2.1 优化实验结果分析

将表面粗糙度、材料去除率和磨耗比作为目标,对实验数据进行信噪比分析,结果如表 5—7 所示。表 5 表明各参数对表面粗糙度影响水平按 B 主轴转速、D 进给速度、C 切深、A 磨具粒度逐渐降低。表 6 表明各因素对材料去除率的影响水平,表 7 表明各因素对磨耗比的影响水平。

表 5 对粗糙度的信噪比 (SNR)  
Tab.5 SNR values on surface roughness

Process parameter	$S$	$W_t$	$a_p$	$v_f$
Level 1	19.4480	21.8021	19.9811	18.6353
Level 2	19.8519	17.9223	17.6423	21.0017
Level 3	19.2565	18.8321	20.9331	18.9195

表 6 对材料去除率的信噪比 (SNR)  
Tab.6 SNR values on material removal rate

Process parameter	$S$	$W_t$	$a_p$	$v_f$
Level 1	8.333	1.367	1.000	1.667
Level 2	1.900	3.600	3.967	3.467
Level 3	6.700	5.533	5.900	5.067

表 7 各参数水平对磨耗比的信噪比 (SNR)  
Tab.7 SNR values of parameters on wear ratio

Process parameter	$S$	$W_t$	$a_p$	$v_f$
Level 1	-11.34	-15.94	-20.37	-20.27
Level 2	-20.48	-17.74	-15.02	-11.99
Level 3	-16.1	-14.25	-12.53	-15.65

为实现高效高质量磨抛加工,采用多目标优化思路,灰色关联分析法根据行为特征数据建立因素之间数学关系模型,可解决多目标优化设计问题<sup>[16]</sup>。

在对实验数据无量纲化处理后,采用层次分析法得到表面粗糙度、材料去除率、磨耗比的权重系数矩阵{0.2297, 0.1220, 0.6483},表 8 为各方案灰色关联度。采用正交极差分析法分析可知,优化工艺组合为 A1B1C3D2。由表 8 可知,对于多目标优化,影响水平按降序排列应为:切深  $a_p$ 、磨具转速  $W_t$ 、进给速度  $v_f$ 、粒度  $S$ 。

表 8 目标函数平均关联度  
Tab.8 Mean GRC values of the target function

Process parameter	$S$	$W_t$	$a_p$	$v_f$
Level 1	0.0529	0.6199	0.4943	0.4446
Level 2	0.4854	0.4393	0.4385	0.6234
Level 3	0.5226	0.5017	0.6281	0.4929
Range value	0.0675	0.1806	0.1896	0.1788

#### 3.2.2 曲面抛光参数区间优选

球头磨具抛光机理较为复杂,对于抛光参数的选用尚缺乏统一共识,且实际生产中各优化目标之间交互影响。基于正交实验对各工艺参数及参数区间的范围进行研究和优化分析,对于多目标优化,采用灵敏度分析法转化为单目标优化问题,得到  $Ra$  和 MRR 的预测模型:

$$Ra = 0.0038S^{0.01}W_t^{0.323}a_p^{0.008}v_f^{-0.0608} \quad (7)$$

$$MRR = 124.771S^{-1.419}W_t^{0.911}a_p^{0.739}v_f^{0.411} \quad (8)$$

检验预测模型的显著性,得到  $Ra$  的置信区间为 (-0.148,0.145),相关系数  $r^2=0.8172$ ;MRR 的置信区间为 (-0.56,4.220),相关系数  $r^2=0.9601$ 。两组模型的相关系数均接近 1,  $F=168.56$ ,  $P=3 \times 10^{-6} < 0.05$ ,说明回归模型显著。

根据公式 (6) — (8),在实验参数区间范围内,平均主轴转速  $W_t=6000$  r/min,平均切深  $a_p=0.25$  mm,工件进给速度  $v_f=80$  mm/s,当磨具粒度  $S$  为 600#时,表面粗糙度  $Ra$  的绝对灵敏度模型为:

$$\begin{aligned} S_{Ra}^{W_t} &= 7.324 \times 10^{-4} W_t^{-0.677} \\ S_{Ra}^{a_p} &= -3.5343 \times 10^{-4} a_p^{-1.152} \\ S_{Ra}^{v_f} &= -3.502 \times 10^{-3} v_f^{-1.061} \end{aligned} \quad (9)$$

$$S_{Ra}^S = 4.336 \times 10^{-4} S^{-0.99}$$

材料去除率 MRR 的绝对灵敏度模型为:

$$\begin{aligned} S_{MRR}^S &= -15.377S^{-2.419} \\ S_{MRR}^{W_t} &= 3.496\omega_t^{-0.261} \\ S_{MRR}^{a_p} &= 94.992a_p^{-0.089} \\ S_{MRR}^{v_f} &= 1.026v_f^{-0.589} \end{aligned} \quad (10)$$

根据上述模型得到如图 9 所示表面粗糙度和材料去除率对主轴转速、切深、进给速度、粒度的灵敏度曲线，总体上  $R_a$  对切深变化更敏感，MRR 对切深和进给的变化更敏感。由图 9 各图的上图可知，对于主轴转速， $R_a$  的灵敏度区间分为[1500, 4500]、[4500, 7500]、[7500, 9000]三个区间，[1500, 4500]区间的灵敏度较大， $R_a$  受切深影响较大；切深在[0.2, 0.4]

范围内曲线较平缓，进给速度处于[300, 500]区间时，灵敏度变化幅度较小，表明在此区间表面粗糙度变化不明显。根据图 9 各图的下图可知，总体上 MRR 对进给速度和切深变化较敏感，进给速度区间[20, 80]、切深区间[0.1, 0.2]以及粒度大于 400 后区间上的灵敏度较大，转速大于 4500 r/min 后，灵敏度变化幅度相较平缓。

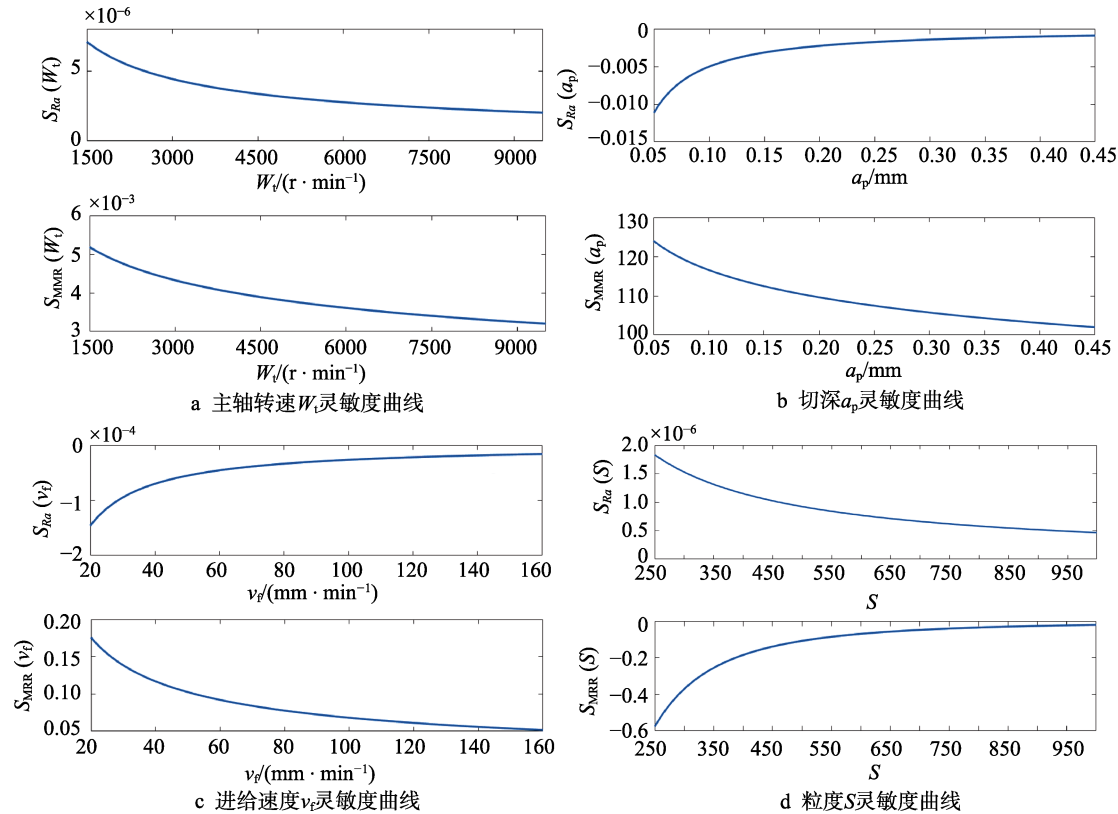


图 9 表面粗糙度、材料去除率对磨削参数灵敏度  
Fig.9 Sensitivity of surface roughness and material removal rate on grinding parameters:  
a) spindle speed; b) cutting depth; c) feed rate; d) abrasive size

根据图 9 的参数可在实验参数范围内得到其稳定域与非稳定域，通过正交实验数据极差分析，可得到各参数在总区间范围内  $R_a$  的变化情况，如表 9 所示。

表 9 各参数水平下  $R_a$  均值  
Tab.9 Mean  $R_a$  of each parameter level

Process parameter	$S$	$W_t$	$a_p$	$v_f$
Level 1	0.108	0.083	0.102	0.121
Lever 2	0.102	0.127	0.133	0.094
Level 3	0.118	0.118	0.093	0.114

考虑实际加工中获得稳定表面粗糙度的同时保证较高材料去除率，确定如表 10 的优选区间，主轴转速优选区在材料去除稳定域前中段，切深、磨具粒度、进给速度优选区间在材料去除非稳定域。

表 10 磨削参数优选区间  
Tab.10 Preferred interval of grinding parameter

Process parameter	Optimization interval	Stability	Surface roughness trend
$S$	[300,600]	Unsteady	0.102~0.108
$W_t/(r \cdot min^{-1})$	[4500,7500]	Stable	0.083~0.118
$a_p/mm$	[0.1,0.3]	Unsteady	0.093~0.102
$v_f/(mm \cdot s^{-1})$	[20,80]	Unsteady	0.094~0.121

3.3 实验验证

由表 4 可知，单目标优化组合为 A2B1C3D2，多目标优化参数组合为 A1B1C3D2。分别对两组合进行重复性对比实验，测得  $R_{a_{min}}$  和多目标组合的平均材料去除率分别是 3.9 mg/min 和 1.5 mg/min，磨耗比分别是 0.6 和 0.4。

图 10b、c 为多目标优化组合下 M300 表面形貌

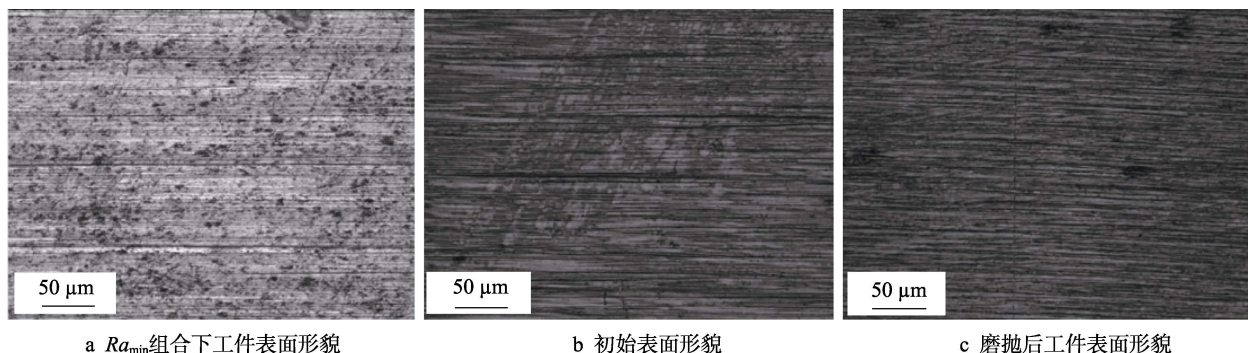


图 10 优化参数组合下磨抛后表面形貌图

Fig.10 Surface topographies of the workpiece by optimized parameters after polishing: a) surface topography of the workpiece by  $Ra_{min}$  parameter combination; b) initial surface topography; c) surface topography of the workpiece after polishing

加工前后对比图,可以看出很大程度上减少了铣削纹路,改善表面损伤情况。加工后  $Ra$  为  $0.056 \mu\text{m}$ ,相比图 10a 中  $Ra_{min}$  参数组合下的表面样貌,材料去除率提高了 2.6 倍,总体加工工艺得到很大改善,说明用该参数优化方法有效。

## 4 结论

1) 弹性球头磨具应用于 M300 抛光是可行的。在加工后大幅度降低了工件表面粗糙度,使其达到镜面级要求,并且相比原工艺,提高了 MRR,加快了加工效率。

2) 在四个主要工艺参数中,对多目标优化的影响水平由大到小排列为切深、进给速度、主轴转速、粒度。得到了多指标优化组合: 粒度 320#, 主轴转速 4500 r/min, 切深 0.4 mm, 进给速度 80 mm/s。加工后  $Ra$  降至  $0.056 \mu\text{m}$ , MRR 相比  $Ra_{min}$  参数组合提高了 2.6 倍。

3) 在保证磨具使用寿命的前提下,切深应界于 0.1~0.3 mm 之间,磨具转速为 4500~7500 r/min; 切深临界值范围为 0.4~0.5 mm,超过临界值的材料去除率下降,磨具磨损量大幅上升;相比小粒度磨具,大粒度磨具粘附磨损现象较明显,影响磨抛性能。

### 参考文献:

- [1] FANG J S, HONG S C. Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2008, 48: 721-732.
- [2] LIEW P J, SHAARONI A, SIDIK N A C, et al. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel[J]. International journal of heat & mass transfer, 2017, 114: 380-394.
- [3] 周小灵. YG8 硬质合金高速磨削工艺实验及优化研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2011.  
ZHOU Xiao-ling. Experimental and optimization study of YG8 cemented carbide high speed grinding process[D]. Hunan: Hunan University, 2011.
- [4] 詹友基. 陶瓷结合剂金刚石砂轮高速磨削硬质合金的机理研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2013.  
ZHAN You-ji. Mechanism of high-speed grinding of cemented carbide by ceramic bond diamond grinding wheel [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2013.
- [5] 李静, 赵吉宾, 关丽荣, 等. 球形抛光工具的研抛工艺研究[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(6): 5-8.  
LI Jing, ZHAO Ji-bin, GUAN Li-rong et al. Research on grinding and polishing process of spherical polishing tools[J]. Aviation precision manufacturing technology, 2015, 51(6): 5-8.
- [6] KLOCKE F, NOVOVIC D, ELFIZY A, et al. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites [J]. CIRP Annals-manufacturing technology, 2015, 64(2): 581-604.
- [7] 徐造坤. 不锈钢薄壁材料工件自动化机械磨抛技术研究和工艺优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
XU Zao-kun. Research on automatic mechanical polishing technology and the process optimization for stainless steel thin-wall material workpieces[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [8] PRESTON F W. The theory and design of glass plate polishing machine[J]. Journal of the society of glass technology, 1927(11): 214-57.
- [9] 瓦伦丁 L 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 李强译. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
VALENTI L P. Contact mechanics and friction physical principles and applications[M]. LI Qiang, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [10] 路勇, 黄云. 砂带磨削磨损性能实验研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(12): 1865-1867.  
LU Yong, HUANG Yun. Experimental investigation in the grinding and wear performance of abrasive belt grinding [J]. Mechanical science and technology, 2014, 33 (12): 1865-1867.
- [11] 李静. 复杂曲面精密研抛加工技术理论及实验研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016.



- LI Jing. Theoretical and experimental research on precision grinding and polishing technology for complex surfaces[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2016.
- [12] 吴晓君, 于兴展, 刘睿平, 等. 弹性磨具磨削 M330 钢材实验研究[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(3): 199-204.
- WU Xiao-jun, YU Xing-zhan, LIU Rui-ping, et al. Experimental study on flexible abrasive grinding of M330 steel[J]. Nanotechnology and precision engineering, 2015, 13(3): 199-204.
- [13] 王亚杰. 基于接触理论的精准砂带磨削基础研究[D]. 重庆: 重庆大学出版社, 2015.
- WANG Ya-jie. Precision abrasive belt grinding research based on contact theory[D]. Chongqing: Chongqing University Press, 2015.
- [14] 黄云, 杨春强, 黄智. 304 不锈钢砂带磨削实验研究[J]. 中国机械工程, 2011(3): 291-295.
- HUANG Yun, YANG Chun-qiang, HUANG Zhi. Experimental research on abrasive belt grinding for 304 stainless steel[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2011(3): 291-295.
- [15] 谢晋. 孙晋祥, 黎宇弘, 等. F-Theta 自由曲面透镜的精密与镜面磨削[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 72-77.
- XIE Jin, SUN Jin-xiang, LI Yu-hong, et al. Precision and mirror grinding of F-Theta free-form surface lens[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(17): 72-77.
- [16] 计时鸣, 韦伟, 金明生, 等. 面向多因素多目标的模具光整加工工艺[J]. 中国机械工程, 2016, 27(20): 2802-2806.
- JI Shi-ming, WEI Wei, JIN Ming-sheng, et al. Mold finishing for multi-factor and multi-objective[J]. China mechanical engineering, 2016, 27(20): 2802-2806.
- 
- (上接第 360 页)
- [7] 韩利国. 金属材料磁流变光整加工技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015.
- HAN Li-guo. Study on magnetorheological finishing for metal material[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.
- [8] KHERADMAND S, ESMAILIAN M, FATAHY A. Numerical simulation of the combination effect of external magnetic field and rotating workpiece on abrasive flow finishing[J]. Journal of mechanical science and technology, 2017, 31(4): 1835-1841.
- [9] 贾向义, 张宇, 陈敏. 永久磁体在磁力研磨中的应用[J]. 机械工程师, 2003(1): 64-65.
- JIA Xiang-yi, ZHANG Yu, CHEN Min. The application of permanent in magnetic grinding[J]. Mechanical engineer, 2003(1): 64-65.
- [10] 杨胜强. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- YANG Sheng-qiang. Surface finishing theory and new technology[M]. Beijing: National defense industry press, 2011.
- [11] CHANG G W, YAN B H, HSU R T. Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2002, 42(5): 575-583.
- [12] 王兴祥. 基于自由曲面磁性研磨永磁磁极头开发与实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2003.
- WANG Xing-xiang. The development of permanent magnetic poles based on freeform surface magnetic abrasive finishing and experimental studies on their working performance[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003.
- [13] 计时鸣, 李琛, 谭大鹏, 等. 基于 Preston 方程的软性磨粒流加工特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 156-163.
- JI Shi-ming, LI Chen, TAN Da-peng, et al. Study on machinability of softness abrasive flow based on Preston equation[J]. Journal of mechanical engineering, 2011, 47(17): 156-163.
- [14] 姚新改, 景毅, 张银喜. 用强永磁磁极实现磁性研磨的研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(6): 655-657.
- YAO Xin-gai, JING Yi, ZHANG Yin-xi. The investigation of magnetic lapping with strong permanent magnet poles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(6): 655-657.
- [15] 代国义, 陈红玲, 李文辉. 镶嵌式磁性磨粒光整加工磁极设计与研究[J]. 制造技术与机床, 2016(2): 86-90.
- DAI Guo-yi, CHEN Hong-ling, LI Wen-hui. Design and study of embedded magnet pole on magnetic abrasive finishing[J]. Manufacturing technology & machine tool, 2016(2): 86-90.
- [16] 代国义. 分布式永磁极的设计及其光整加工不锈钢薄板的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- DAI Guo-yi. The design of distributed permanent magnet pole and experimental study of stainless steel sheet finishing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [17] 吴战成. 集群磁流变效应超光滑抛光加工过程研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- WU Zhan-cheng. Study on the cluster MR-effect super-smooth plane polishing process[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.
- [18] 蔡长春, 徐志锋, 刘新才, 等. 通用永磁研磨极头的研制[J]. 机械, 2003, 30(5): 83-85.
- CAI Chang-chun, XU Zhi-feng, LIU Xin-cai, et al. The develop of universal permanent magnet finish pole[J]. Machinery, 2003, 30(5): 83-85.