

# TC4 钛合金孔的磁粒研磨试验

焦安源<sup>1,2</sup>, 张国富<sup>2</sup>, 丁浩东<sup>2</sup>, 刘伟军<sup>3</sup>  
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁科技大学 应用技术学院, 辽宁 鞍山 114051;  
3. 沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘 要:** 采用内置磁极吸附磁性磨粒的方法,研究了工艺参数对高效去除 TC4 钛合金孔毛刺和切痕,降低表面粗糙度  $R_a$ ,以及改善微观表面形貌的影响.首先,开展磁极与孔同轴研磨正交试验,通过极差和方差分析,获得磁极转速、磨料直径和磨料填充量对孔表面粗糙度  $R_a$  和微观形貌的影响程度,确定了较优的工艺参数组合;其次,开展磁极与孔偏心研磨试验,进行了三维力检测 and 数据分析.结果表明:对于  $\phi 10\text{ mm}$  的 TC4 钛合金孔,使用  $\phi 6\text{ mm}$  的径向磁极,偏心距  $1\text{ mm}$  研磨  $30\text{ min}$  后,孔的毛刺和切痕得以去除,表面形貌均匀平整,与同轴方案比较,表面粗糙度  $R_a$  下降  $13.7\%$ ,研磨效率提升  $25.0\%$ .

**关 键 词:** 磁粒研磨;表面粗糙度;正交试验;工艺参数;微观形貌  
中图分类号: TH 161      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2020)09-1304-07

## Experiment of Magnetic Abrasive Finishing on TC4 Titanium Alloy Hole

JIAO An-yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Guo-fu<sup>2</sup>, DING Hao-dong<sup>2</sup>, LIU Wei-jun<sup>3</sup>  
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. School of Applied Technology, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China.  
Corresponding author: LIU Wei-jun, E-mail: liuwj@huiyuanrobot.com)

**Abstract:** The effects of process parameters on the efficient removal of burrs and cuts of TC4 titanium alloy hole, reduction of surface roughness  $R_a$ , and improvement of micromorphology were studied by using the built-in magnet to attract magnetic abrasive particles. Firstly, the orthogonal experiment of coaxial grinding of the magnetic pole and hole was carried out. According to the analysis of the range and variance, the effect of the magnetic pole speed, the abrasive diameter and the filling amount of abrasive on the surface roughness  $R_a$  and micromorphology were obtained, and a better combination of process parameters was determined. Secondly, the eccentric grinding test of magnetic poles and holes was carried out, and three-dimensional force testing was performed on the eccentric grinding and the test data was analyzed. The results show that: for  $\phi 10\text{ mm}$  holes of TC4 titanium alloy, a radial magnetic pole of  $\phi 6\text{ mm}$  is used, the surface burrs and cuts are removed, and the surface topography is uniform and flat after  $30\text{ minutes}$  grinding with an eccentricity of  $1\text{ mm}$ . Compared with the coaxial grinding, the surface roughness  $R_a$  is reduced by  $13.7\%$  and the grinding efficiency is increased by  $25.0\%$ .

**Key words:** magnetic abrasive finishing (MAF); surface roughness; orthogonal experiment; process parameters; micromorphology

TC4 钛合金因具有比强度高、失稳临界值高、韧性 and 焊接性好等优点,在航空和航天等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>.但其强度高、导热性差和易变形,属于难加工材料<sup>[3-4]</sup>,制孔后,孔内表面易有

加工纹理和毛刺,这将严重影响零件的装配精度与使用寿命<sup>[5]</sup>.为了消除这些缺陷,本文基于磁粒研磨(MAF)工艺对孔进行后处理.MAF 主要利用磁极的磁场束缚磁性磨料形成具有一定切削能力的磁粒刷压附在工件表面,通过磁粒刷对工件进行划擦与切削,实现研磨.Zhou 等采用超声振动辅助磁粒研磨技术对钛合金进行表面处理,有效地提高了钛合金零件的表面完整性<sup>[6]</sup>.Choopani 等通过对 MAF 工艺研究,得出加工间隙和工件转速对提高表面粗糙度  $R_a$  有显著影响<sup>[7]</sup>.Lin 等采用 MAF 工艺对不锈钢 SUS304 材料进行自由表面研磨,并利用田口法进行试验设计,研究了磁场、主轴转速、进给速度和工作间隙等因素对自由表面光整效果的影响<sup>[8]</sup>.MAF 工艺所用磁性磨粒作为多刃的磨削刀具<sup>[9]</sup>,在磁场中被磁化并积聚形成磁粒刷,其具有柔性好、自锐性强、加工质量高等优点,可用于研磨平面、曲面和管内表面等<sup>[10-11]</sup>.

本文主要是对 TC4 钛合金孔的研磨工艺进行试验研究,将表面粗糙度  $R_a$  和微观形貌作为衡量表面质量的标准.首先以  $A$ (磁极转速  $n_1$ )、 $B$ (磨料直径)和  $C$ (磨料填充量)这三个参数进行磁极与孔同轴的研磨试验,分析不同工艺参数对表面粗糙度  $R_a$  的影响.使用正交法设计试验,拟通过对试验数据的极差与方差分析,找出高效高质量研磨 TC4 钛合金孔的最佳工艺参数组合.另外,因合理规划磁粒刷的抛光轨迹可以提高平面均匀性<sup>[12]</sup>,本文提出偏心研磨孔的试验方案,拟研究其对孔研磨质量和效率的影响.

## 1 磁粒研磨加工机理

图 1 为 MAF 研磨孔的基本原理.图中  $n_1$  为磁极转速, $n_2$  为磁极绕孔轴线转速, $e$  为磁极轴线与孔轴线的距离.加工方式为磁极与孔轴线重合( $e=0, n_2=0$ )或磁极与孔轴线偏心( $e\neq 0, n_2\neq 0$ ).当主轴带动磁极旋转时,磁性磨料在磁场作用下形成磁粒刷,不断扫过待加工表面,由于磁粒刷与工件表面存在压力,磁粒刷末端的磨粒会对孔件表面产生划擦、摩擦等微量切削作用,从而实现对孔件表面研磨<sup>[13]</sup>.

## 2 试验设计

### 2.1 试验方法

通过分析前期磁粒研磨光整加工试验,确定

了本次研磨孔的参数和水平如表 1 所示.本文采用正交试验法,评价各工艺参数对表面粗糙度  $R_a$  的影响程度.

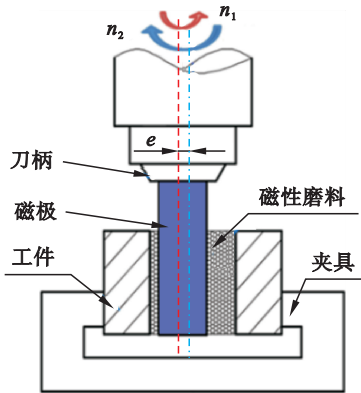


图 1 MAF 工艺研磨孔的原理  
Fig. 1 Principle of MAF process for hole

表 1 试验参数和水平					
Table 1 Parameters and levels used in experiments					
参数	水平				
	-2	-1	0	1	2
$A/(r\cdot\min^{-1})$	500	1 000	1 500	2 100	3 000
$B/\mu\text{m}$	380	250	180	150	120
$C/\text{g}$	6	8	10	12	14

### 2.2 试验装置

图 2 为 MAF 研磨孔的试验装置.磁极由 VMC850E 数控加工中心(最高转速 8 000 r/min)的夹头刀柄夹持,工件由虎钳可靠定位.使用对刀仪找到孔中心,磁极吸附磨料后,通过导入含工艺参数信息的程序,控制磁极进入工件孔内开始研磨.

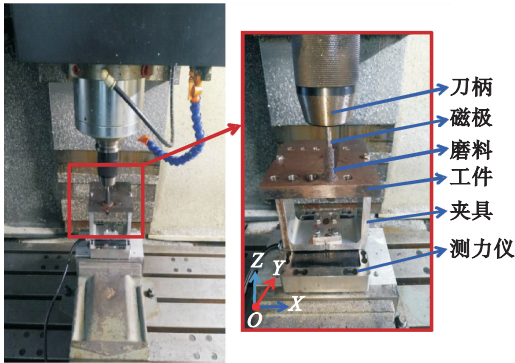


图 2 磁粒研磨试验装置  
Fig. 2 Experimental device of MAF

## 3 磁极与孔同轴研磨试验

### 3.1 试验条件

为了保证试验的科学性,在磁粒研磨前,利用

研磨棒和砂纸对钻削孔进行预磨,保证所有孔内壁的表面粗糙度 $R_a\approx2.5\text{ }\mu\text{m}$ .同轴研磨的试验条件如表 2 所示,试验时间为 40 min.

表 2 同轴研磨试验条件	
Table 2 Experimental conditions for coaxial grinding	
名称	参数
工件	TC4 钛合金, $\phi 10\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 通孔
磁极	钕铁硼,径向充磁, $\phi 8\text{ mm}\times 30\text{ mm}$
研磨间隙	1.0 mm
磨料/研磨液	Fe 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 烧结磨料/水基研磨液

表 3 MAF 正交试验数据汇总									
Table 3 Orthogonal experiment data of MAF									
No.	$A/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$B/\mu\text{m}$	$C/\text{g}$	$R_a/\text{nm}$	No.	$A/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$B/\mu\text{m}$	$C/\text{g}$	$R_a/\text{nm}$
1	500	380	6	748	14	1 500	150	6	740
2	500	250	8	608	15	1 500	120	8	749
3	500	180	10	632	16	2 100	380	12	694
4	500	150	12	739	17	2 100	250	14	590
5	500	120	14	847	18	2 100	180	6	671
6	1 000	380	8	742	19	2 100	150	8	693
7	1 000	250	10	605	20	2 100	120	10	710
8	1 000	180	12	649	21	3 000	380	14	929
9	1 000	150	14	694	22	3 000	250	6	823
10	1 000	120	6	708	23	3 000	180	8	861
11	1 500	380	10	739	24	3 000	150	10	892
12	1 500	250	12	620	25	3 000	120	12	977
13	1 500	180	14	710					

面粗糙度 $R_a$ 降速变缓;转速过低时,磁粒刷的稳定性好,但磨料与孔表面相对速度较低,使得切削效率下降,最终导致 $R_a$ 降速较慢.由图 3b 可知,随着 $B$ (磨料直径)的减小,孔的表面粗糙度 $R_a$ 值呈现出先减小后增大的趋势. $B$ 的转折点为 $250\text{ }\mu\text{m}$ , $B$ 越大,单个粒子所受的磁场力增大,切削深度增大,孔件表面的初始切痕得以去除,但磨粒自身造成的划痕也很大,因此加工后工件表面粗糙度 $R_a$ 值也很大. $B$ 过小时,所受的磁场力较小,单颗研磨粒子的吃刀量较小,研磨切削功能低下,虽然能够研磨孔表面上的原始切痕,但是无法彻底去除,最终的表面粗糙度 $R_a$ 不会显著降低.由图 3c 可知,随着 $C$ (磨料填充量)的增加,孔表面粗糙度 $R_a$ 值呈现先减小后增大的规律.若 $C$ 过多,部分磨料由于小于离心力的作用而脱离加工区域向外飞散;如果 $C$ 过少,实际参与研磨的磨料数量过少,导致研磨能力下降,工件表面粗糙度 $R_a$ 下降缓慢.因此,当磁感应强度(主要取决于磁极)和加工间隙固定后, $A$ 、 $B$ 和 $C$ 这三个因素要合理配置,才能得

每组试验结束后,利用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪分别在孔圆周的 4 个均布位置采集 $R_a$ 值,取其平均值作为试验结果,具体如表 3 所示.

根据表 3 数据,用 Origin 软件绘制表面粗糙度 $R_a$ 与参数 $A$ 、 $B$ 和 $C$ 的关系曲线,如图 3 所示.

由图 3a 可知,随着 $A$ (磁极转速 $n_1$ )的增加,孔的表面粗糙度 $R_a$ 值呈现出先减小后增大的趋势. $A$ 过高导致磁性磨料严重飞溅,加工区域内参与研磨的磁性磨料减少,使磁粒刷的刚度减弱,对孔件表面形成的有效压力减小,研磨效率下降,表

到良好的研磨效率和研磨质量.

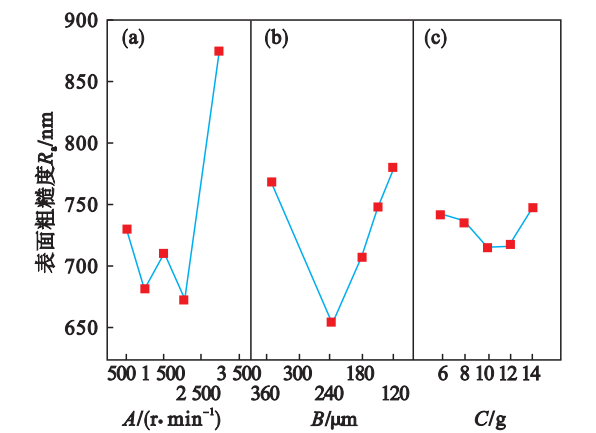


图 3 工艺参数与表面粗糙度 $R_a$ 的变化关系  
Fig. 3 Relationship between process parameters and surface roughness  $R_a$

### 3.2 工艺参数优化分析

通过正交试验的极差分析法可以找到影响表面粗糙度 $R_a$ 的主要因素,以及最佳因素水平组合.方差分析法可以找出有显著作用的因素,以及

推算出指标最优的水平和工艺条件. 表 4 为 TC4 的正交试验数据分析, 其中  $T_i$  为各因素的同一水平试验指标之和;  $T$  为 25 个试验号对应的试验指标之和;  $X_i$  为各因素同一水平试验指标的平均数; 该试验的 25 个观测值总变异由  $A$ 、 $B$  和  $C$  三个因素及误差变异  $E$  四部分组成. 表 5 为 TC4 试验数据的极差分析, 表 6 为 TC4 试验数据的方差分析.

表 4 试验数据分析				
Table 4 Analysis of experimental data				
指标	因素			试验指标
	$A/(r \cdot \min^{-1})$	$B/\mu\text{m}$	$C/\text{g}$	$R_a/\text{nm}$
$T_1$	$T_{A1} = 3\ 574$	$T_{B1} = 3\ 852$	$T_{C1} = 3\ 690$	$T = 18\ 370$
$T_2$	$T_{A2} = 3\ 398$	$T_{B2} = 3\ 246$	$T_{C2} = 3\ 653$	
$T_3$	$T_{A3} = 3\ 558$	$T_{B3} = 3\ 523$	$T_{C3} = 3\ 578$	
$T_4$	$T_{A4} = 3\ 358$	$T_{B4} = 3\ 758$	$T_{C4} = 3\ 679$	
$T_5$	$T_{A5} = 4\ 482$	$T_{B5} = 3\ 991$	$T_{C5} = 3\ 770$	
$X_1$	$X_{A1} = 714.8$	$X_{B1} = 770.4$	$X_{C1} = 738.0$	
$X_2$	$X_{A2} = 679.6$	$X_{B2} = 649.4$	$X_{C2} = 730.6$	
$X_3$	$X_{A3} = 711.6$	$X_{B3} = 704.6$	$X_{C3} = 715.6$	
$X_4$	$X_{A4} = 671.6$	$X_{B4} = 751.6$	$X_{C4} = 735.8$	
$X_5$	$X_{A5} = 896.4$	$X_{B5} = 798.2$	$X_{C5} = 754.0$	

表 6 试验数据方差分析					
Table 6 The variance analysis of experimental data					
因素	偏差平方	自由度	均方值	$F$ 值	$F_\alpha$
$A$	170 470.4	4	42 617.6	17.639	$F_{0.01}(4, 12) = 5.41$
$B$	69 042.8	4	17 260.7	7.144	$F_{0.05}(4, 12) = 3.26$
$C$	3 830.8	4	957.7	0.396	$F_{0.1}(4, 12) = 2.48$
$E$	2 899.4	12	241.6		
和	246 243.4	24			

表 5 试验数据极差分析			
Table 5 The range analysis of experimental data			
影响因素	$A/(r \cdot \min^{-1})$	$B/\mu\text{m}$	$C/\text{g}$
优化级别	$A_4$	$B_2$	$C_3$
极差 $R$	$R_A = 224.8$	$R_B = 149.0$	$R_C = 38.4$
影响关系	$A > B > C$		

通过表 5 和表 6 中极差与方差的试验数据分析可知, 3 个工艺参数影响程度的顺序为:  $A > B > C$ , 说明  $A$  与  $B$  对表面粗糙度  $R_a$  的影响程度高于  $C$ . 基于 MAF 工艺研磨 TC4 孔的最佳参数组合为  $A_4B_2C_3$ , 即当磁极转速为 2 100 r/min, 磨料直径为 250  $\mu\text{m}$ , 填充量为 10 g 时, 研磨后的 TC4 孔表面粗糙度  $R_a$  最小.

### 3.3 试验结果分析

试验结束, 试件经过超声波清洗机清洗、吹干、线切割机床切割等工序处理, 利用 JB-8E 表面粗糙度测量仪和 VHX-500FE 超景深电子显微镜分别检测孔的表面粗糙度  $R_a$  值和微观纹理. 原始孔和研磨后的表面粗糙度和形貌对比如图 4 所示.

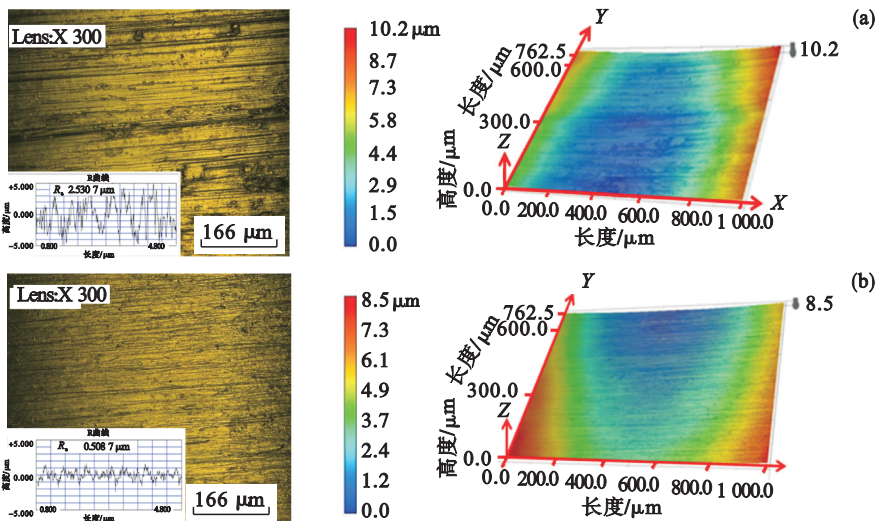


图 4 同轴研磨前后孔的表面粗糙度  $R_a$  与形貌

Fig. 4 Comparison of surface roughness  $R_a$  and topography of holes before and after coaxial grinding  
(a)—孔原始表面; (b)—孔研磨后表面.

从图 4a 中可以看到孔内表面有较深的切痕、黑色斑点以及零星分布的凹坑, 其表面粗糙度  $R_a$  曲线波动较大, 表面形貌极差. 如图 4b 所示, TC4 孔研磨后, 表面粗糙度  $R_a$  值由 2.53  $\mu\text{m}$  下降到



0.51  $\mu\text{m}$ ,且曲线波动幅度明显减小;毛刺以及加工痕迹被有效去除,表面形貌更加均匀平整.

## 4 磁极与孔偏心研磨试验

### 4.1 试验条件

考虑到磁极与孔偏心研磨时,可能会促进磁粒刷的不断变形,加速磨粒的翻滚更替,从而可以提升研磨效率,因此基于同轴试验得到的最佳工艺参数,开展偏心试验研究.为了保证磨料与工件间的加工间隙为1~2 mm,本文采用 $\phi 6\text{ mm}$ 的径向磁极试验,磁极自转速度 $n_1=2\ 100\text{ r/min}$ ,同时绕孔中心线进行公转的速度 $n_2=30\text{ r/min}$ ,偏心距 $e$ 分别为0.5,1.0,1.5 mm,具体加工条件如表7所示,在每公转一周后,磁极都要回到孔中心,以使偏心研磨时被排挤到外缘的磨粒,在磁场约束下重新聚集形成新的磨粒刷,再进行下一周研磨.

### 4.2 试验结果分析

采用同轴研磨最佳的参数组合,进行偏心研磨试验,检测结果如图5所示.

通过对比可以发现,如图5a所示,在 $e=$

0.5 mm加工后,表面粗糙度 $R_a$ 为0.99  $\mu\text{m}$ ,孔内表面形貌明显改善,黑色斑点被有效地去除,但仍存在较浅的切痕及凹坑;如图5b所示,在 $e=1.0\text{ mm}$ 加工后, $R_a$ 为0.44  $\mu\text{m}$ ,孔内表面的切痕及斑点几乎被完全去除,微观纹理均匀、细密,表面质量显著提高,表面粗糙度减小;如图5c所示,在 $e=1.5\text{ mm}$ 加工后, $R_a$ 值为0.57  $\mu\text{m}$ ,表面形貌显著改善,斑点及凹坑被有效地去除,但个别处仍存在较浅的切痕.

表 7 偏心研磨试验条件  
Table 7 Experimental conditions for eccentric grinding

名称	参数
工件	TC4 钛合金, $\phi 10\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 通孔
磁极	钕铁硼, 径向磁极, $\phi 6\text{ mm} \times 40\text{ mm}$
磨料/研磨液	Fe 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 烧结磨料/水基研磨液
$A(n_1)/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 100
$n_2/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	30
$e/\text{mm}$	0.5, 1.0, 1.5
$B/\mu\text{m}$	250
$C/\text{g}$	10
总研磨时间/min	30

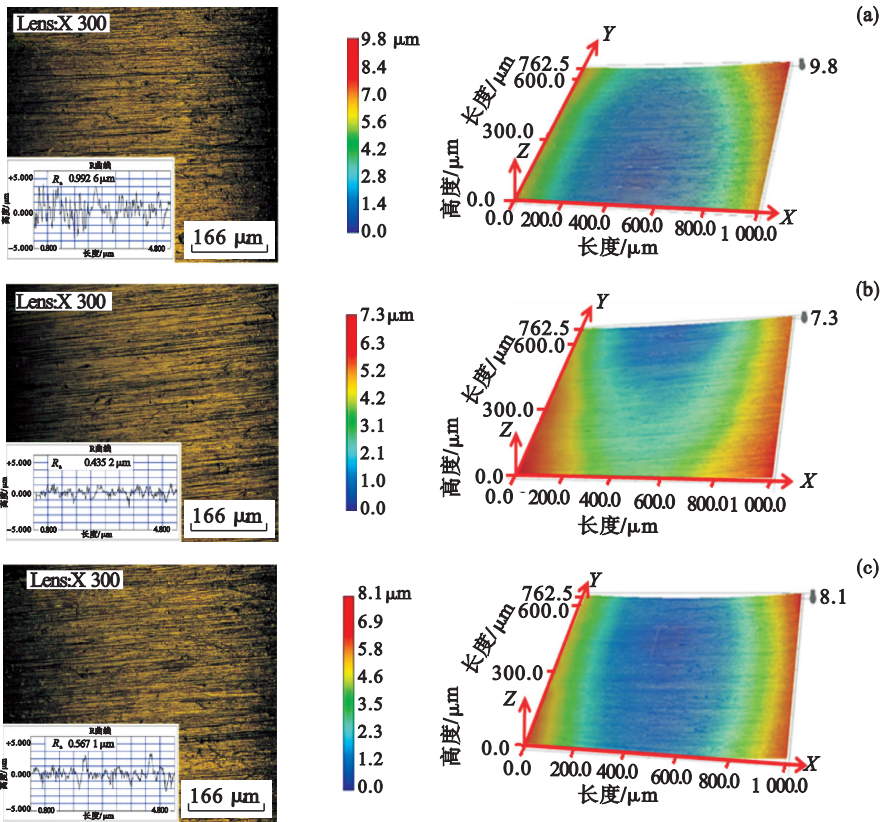


图 5 偏心研磨后孔的表面粗糙度  $R_a$  与表面形貌

Fig. 5 Comparison of surface roughness  $R_a$  and topography of holes before and after eccentric grinding

(a)— $e=0.5\text{ mm}$  研磨后表面; (b)— $e=1.0\text{ mm}$  研磨后表面; (c)— $e=1.5\text{ mm}$  研磨后表面.

分析可知,当 $e=1.0\text{ mm}$ 时效果较好,与 $e=0$ 方案比较,表面粗糙度 $R_a$ 下降13.7%,而研

磨效率提升25.0%.

4.3 研磨切削力测定

基于以上试验结果可知,偏心距对孔表面质量有着重要影响.为进一步研究,本文在进行偏心试验时,采用 FC3D60 三分力测试传感器(精度等

级为 1% FS) 和 FC - SC3200 数据采集器对不同偏心距时的  $X,Y,Z$  三轴(坐标见图 2) 力进行采集,分别提取了不同偏心距研磨时三个周期左右的切削力变化曲线来分析,如图 6 所示.

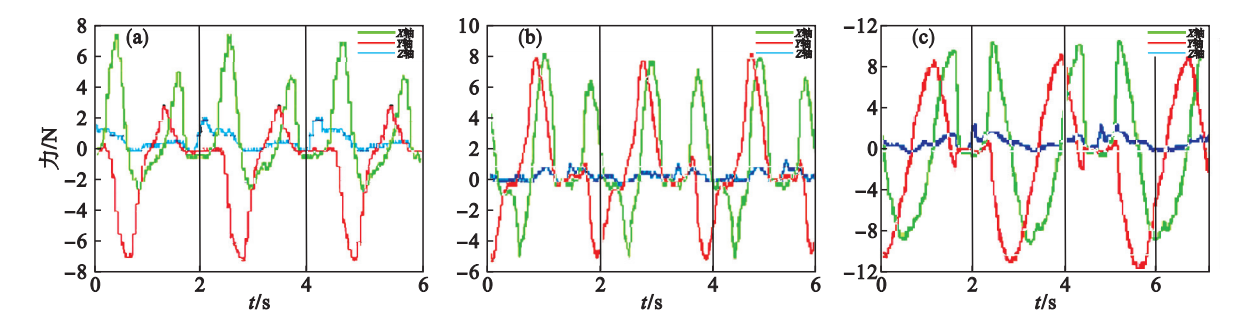


图 6 偏心研磨时的切削力测量  
Fig. 6 Measurement of cutting force during eccentric grinding  
(a)— $e=0.5\text{ mm}$  时的切削力; (b)— $e=1.0\text{ mm}$  时的切削力; (c)— $e=1.5\text{ mm}$  时的切削力.

由图 6a 可知, $X$  轴的切削力呈周期性变化,幅值介于  $+7.5\text{ N} \sim -2.5\text{ N}$ ,振幅为  $10\text{ N}$ , $Y$  轴的切削力幅值范围为  $+3\text{ N} \sim -7\text{ N}$ ,振幅也为  $10\text{ N}$ ;由图 6b 可知, $X$  轴和  $Y$  轴的切削力幅值范围均为  $+8\text{ N} \sim -5\text{ N}$ ,振幅为  $13\text{ N}$ ;由图 6c 可知, $X$  轴和  $Y$  轴的切削力幅值均介于  $+10\text{ N} \sim -10\text{ N}$ ,振幅均为  $20\text{ N}$ . 在每圈研磨完成后,磁极回到孔中心时, $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴的切削力均降至 0 附近. 可以看出,随着偏心距  $e$  的增大, $X$  轴和  $Y$  轴的切削力变化幅度也增大,而  $Z$  轴的切削力均约为 0. 当  $e=0.5\text{ mm}$  时,孔受到的切削力较小,磁粒刷的刚性不强,磨料的翻滚和切削刃更替能力降低,使得磁性磨料对孔表面毛刺、切痕及凹坑的切削作用减弱,研磨效率不高,因此,孔的表面质量较差. 当  $e=1.5\text{ mm}$  时,孔受到较大的切削力,磁粒刷的刚性较强,对孔内壁的切削作用增大,在研磨过程中,磨粒之间相互挤压、碰撞,对孔表面造成较深的新划痕,此时会产生过磨现象,因此,研磨加工后,孔的表面形貌并不理想. 当  $e=1.0\text{ mm}$  时,孔受到切削力较合适,磨料能够很好地翻滚换位,从而提高了磨粒切削刃的更替,有效地去除了孔表面的切痕及斑点,孔的表面质量较均匀平整,表面粗糙度  $R_a=0.44\text{ }\mu\text{m}$ ,获得了比较好的研磨效果.

相对于偏心研磨,同轴研磨过程中  $Z$  轴的切削力也为 0. 理论上磁粒刷对孔表面接触区域均有切向作用力,即  $X$  轴和  $Y$  轴的正负方向均受到切削力,且合力大小相等,方向相反,相互抵消. 而偏心加工时, $Z$  轴方向不受力, $X$  轴和  $Y$  轴受到的切削力均随着磁极的转动呈现类正弦的周期性变化. 虽然偏心研磨时,其瞬时研磨的有效区域小于同轴研磨,但因其切削力显著增大,且偏心研磨

时,磁极频繁回到孔的中心,促进了新的磁粒刷形成,从而加速了磨粒翻滚和切削刃更新,使得最终的研磨效率显著提升.

5 结 论

- 1) 同轴研磨时,通过正交试验及极差与方差分析可知,磁极转速、磨料直径和填充量三个工艺参数中,磁极转速影响最大,优选工艺参数组合为磁极转速  $2\text{ }100\text{ r/min}$ 、磨料直径  $250\text{ }\mu\text{m}$ 、填充量  $10\text{ g}$ ,研磨  $40\text{ min}$ ,TC4 钛合金孔的表面粗糙度  $R_a$  降至  $0.51\text{ }\mu\text{m}$ ,微观形貌均匀.
- 2) 偏心研磨时,在同轴最佳工艺参数组合上增加偏心运动,偏心距  $e=1.0\text{ mm}$  时,研磨  $30\text{ min}$ ,TC4 钛合金孔的表面粗糙度  $R_a$  降至  $0.44\text{ }\mu\text{m}$ ,微观形貌均匀. 与同轴研磨方案对比,表面粗糙度  $R_a$  下降  $13.7\%$ ,研磨效率提升  $25.0\%$ .
- 3) 通过对偏心研磨时的切削力分析,随着偏心距  $e$  的增大, $X$  和  $Y$  轴的切削力变化幅度也增大,切削力过小会影响研磨效率,而切削力过大则会影响 TC4 钛合金孔表面粗糙度  $R_a$  和微观形貌.

参考文献:

[1] Adib A M L, Baptista C A R P, Barboza M J R, et al. Aircraft engine bleed system tubes: material and failure mode analysis [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14 (8): 1605 - 1617.  
[2] 李继云. 钛合金超声振动深孔研磨机理及其表面加工质量研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2010.  
(Li Ji-yun. Research on ultrasonic vibration deep-hole lapping mechanism and surface processing quality of titanium alloy [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2010.)