



厦门大学学报(自然科学版)  
*Journal of Xiamen University(Natural Science)*  
ISSN 0438-0479,CN 35-1070/N

## 《厦门大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 磁性抛光对 3D 打印微结构的参数影响  
作者: 林龙侨, 王振忠, 陈世平  
收稿日期: 2018-03-20  
网络首发日期: 2018-12-04  
引用格式: 林龙侨, 王振忠, 陈世平. 磁性抛光对 3D 打印微结构的参数影响[J/OL]. 厦门大学学报(自然科学版).  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.n.20181129.1345.008.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 磁性抛光对 3D 打印微结构的参数影响

林龙侨, 王振忠✉, 陈世平

(厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361000)

✉通信作者 wangzhenzhong@xmu.edu.cn

**摘要** 对微结构精密加工时要能够控制高低不平的材料去除, 以保证不破坏微结构原来的三维形貌特征。通过自行搭建的实验平台对 3D 打印出来的微结构工件进行抛光实验, 主要研究了机床主轴转速、加工间隙、抛光时间和抛光路径等工艺参数对微结构抛光后的三维轮廓材料去除特性以及微结构的保形情况。实验结果表明: 微结构保形系数随着抛光时间增加而变小, 而主轴转速和加工间隙的变化对保形系数影响较小; 采用等高线移动式抛光的保形系数比采用水平移动式大; 相同工艺参数抛光对包体状和圆环阵列微结构工件保形效果较好, 对三棱锥工件保形效果较差。

**关键词** 材料去除特性; 保形系数; 表面微结构; 磁性抛光; 精密加工; 工艺参数

中图分类号 TH161+1 文献标志码 A

## Experimental study on the influence of processing parameters for 3D printing microstructure by magnetic polishing

LIN Longqiao, WANG Zhenzhong✉, CHEN Shiping

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

**Abstract** In the precision processing of microstructures, the uneven material removal must be skillfully controlled such that the original three-dimensional morphology of the microstructure is not destroyed. The test platform for 3D printed microstructure work-pieces polishing is established. Effects of spindle speed, machining gap, polishing time and polishing path on microstructure conformal polishing and three-dimensional profile removal characteristics are primarily studied. Experimental results show that the conformal coefficient decreases with the increase of polishing time, while the change of spindle speed and machining gap exerts little effect on the conformal coefficient. The method of contour line moving polishing exhibits greater conformal coefficients than the horizontal moving counterpart does. The conformal effect is better for the microstructure work linear array with hemispheroid and circular array with rings, but not for triangular pyramid work piece.

**Key words** Material removal characteristic; Conformal coefficient; Surface microstructure; Magnetic polishing; Precision machining; Process parameter

微结构表面特有的形状特征使其具有了一些特定的物理、化学等功能, 并广泛应用于各个领域<sup>[1]</sup>。传统的微结构加工方法如: 微机电系统(MEMS)技术<sup>[2]</sup>、特种加工技术<sup>[3]</sup>、复制技术等存在材料使用受到很大限制要么生产周期长, 且加工成本都相对较高, 而采用 3D 打印成型技术加工具备生产周期短、加工方便、制造成本低等优势。为了保证微结构的表面功能, 对微结构进行后续的精密加工处理时要求不仅要能够改善微结构表面质量同时要不破坏微结构原来的三维特征。现有的抛光技术如数控小磨头抛光<sup>[4]</sup>, 由于抛光工具表面无法与微结构工件表面完全吻合而一定程度上影响了抛光工件的表面质量。离子束抛光<sup>[5]</sup>设备由于关键部件的技术复杂性及集成度高, 使其造价昂贵, 不利于

收稿日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51675453); 深圳市科技计划项目(JCYJ20160517103720819)

网络首发时间: 2018-12-04 08:54:27 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.n.20181129.1345.008.html>

普及应用。

磁场辅助抛光作为一种新型的超精密抛光技术近年来备受重视，由于其抛光工具为柔性的磁性抛光体，能够与各种曲面工件高度贴合，因此能够实现对复杂曲面、微小结构等<sup>[6-9]</sup>难以加工的工件表面进行抛光，而且抛光压力小不会产生表面损伤，也不会破坏工件表面结构，因此适用于对微结构进行精密加工处理。磁场辅助抛光方式主要有磁流体 (magnetic fluid, MF) 抛光技术<sup>[10]</sup>、磁流变 (magnetorheological fluid, MRF) 抛光技术<sup>[11-12]</sup>和磁性复合流体 (magnetic compound fluid, MCF) 抛光技术<sup>[13-15]</sup>。MF 抛光技术具有磨料分布性好的特点，但是磁化强度低、抛光效率低，因此没有得到广泛应用；MRF 抛光技术的磁场作用力大，但是磨料分布性不均匀，而且对抛光设备要求高；MCF 抛光技术则是结合了前两者的优势同时具备较大的磁化强度和较好的磨料分散性，具有良好的抛光性能，而且对设备要求简单，加工成本适宜。因此，本研究在 MCF 抛光技术的研究基础上<sup>[16]</sup>利用羧基铁粉、磁流变液、氧化铈抛光粉，及  $\alpha$ -纤维素等几种材料自行配制了磁性抛光体，并用其对 3D 打印微结构工件进行抛光实验。主要研究了主轴转速、加工间隙、抛光时间等不同工艺参数对 3D 打印微结构抛光后的材料去除特性以及微结构的保形情况。

## 1 实验条件与实验设计

本研究磁性抛光实验所使用的实验装置是 4 轴数控铣床，如图 1 所示。该机床的主轴箱由立柱和横梁合成一体，分别由两个独立的滚珠丝杆和直线导轨支撑，能够实现上下和左右的移动，同时有单独的伺服电机驱动主轴旋转，整机由北京 KND2000M4 系统控制，能够实现四轴联动功能。实验采用的抛光工具如图 2 所示，由 11 部分组成：偏心块、滚动轴承、轴套、垫圈、卡环、M8 螺栓、磁铁端盖、永磁体、磁铁容器、M3 螺栓、M3 螺母。偏心块长杆部分通过刀柄与机床主轴连接，永磁体产生外部磁场用以吸附配制好的磁性抛光体，本研究采用的是牌号为 N38 的 Nd-Fe-B 圆柱状永磁体(直径  $\Phi$  20 mm，厚度 20 mm，剩磁感应强度 1 210 mT，最大磁能面积 310 kJ/m<sup>3</sup>)。磁性抛光体由羧基铁粉( $\omega$ :62%)、磁流变液( $\omega$ :28%)、氧化铈抛光粉( $\omega$ :7%)，及  $\alpha$ -纤维素( $\omega$ :3%)混合搅拌配制而成。抛光原理为：将微结构工件装夹在数控抛光机床的工作台上，取定量的抛光体吸附在装有永磁体的抛光工具下面，抛光体由机床主轴带动产生旋转运动，抛光工具下压使柔性的抛光体与工件接触，这样抛光体便与工件表面接触且相对运动，进而对工件表面产生切削作用，实现抛光过程。



图 1 磁性抛光实验装置

Fig.1 Experimental equipment of magnetic polishing

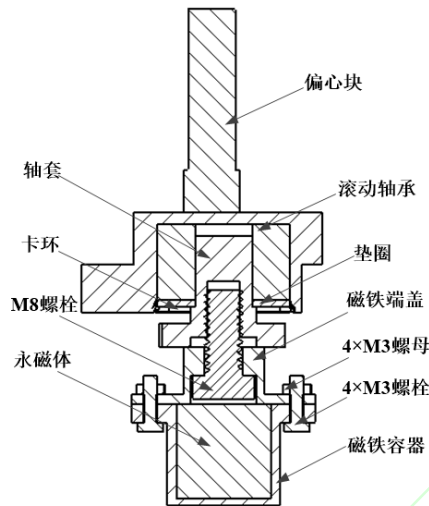


图 2 磁性抛光工具结构图  
Fig.2 The structure of magnetic polishing tool

为重点研究三维微结构的保形均匀抛光，本研究采用的抛光对象是用光敏树脂材料 3D 打印出来的微结构工件，具有黏度低、硬度低、韧性好的特点，刚性去除容易破坏这种工件表面的三维微结构，因此该材料的微结构工件更适用于柔性抛光研究。3D 打印微结构工件包含包体状微结构线性阵列工件、正三棱锥微结构线性阵列工件和半圆环圆周阵列工件。包体状线性阵列工件每个微结构直径 1.5 mm,高 0.5 mm, 相邻微结构间距 2.5 mm, 如图 3(a)所示；正三棱锥线性阵列工件每个微结构底面是边长 1.5 mm 的正三角形，高 0.5 mm, 相邻微结构间距 2 mm, 如图 3(b)所示；圆周阵列工件每个圆环宽 1.5 mm,高 0.5 mm,相邻圆环间距 2.5 mm, 如图 3(c)所示。前两种线性阵列工件抛光方式为抛光体与工件接触后工具头沿微结构线性阵列方向水平移动式往返抛光，实验中固定进给速度是 1 mm/min, 抛光行程 10 mm, 故抛光时间由抛光次数决定(每往返抛光一次为 20 min), 实验检测位置为抛光行程中间位置的微结构；圆周阵列工件抛光时抛光工具与工件偏心 10 mm(工具头半径), 主轴自转的同时以一定的进给速度绕工件圆心抛光一圈，抛光区域内每一点的抛光时间是从抛光体开始接触到抛光体离开的时间，实验观测位置为距离工件圆心 8.75 mm 的同一处圆环，可计算抛光时间为 19.56 min。

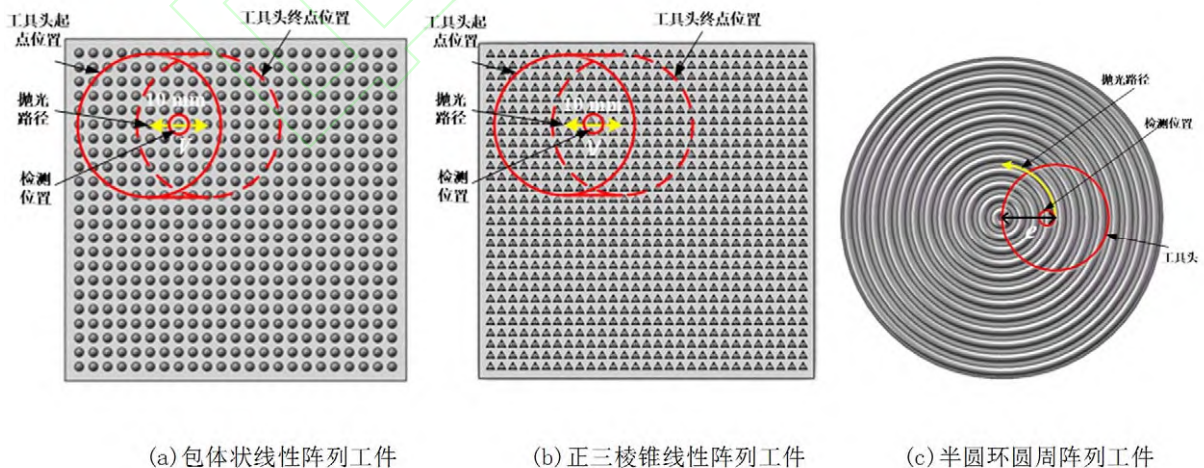


图 3 3D 打印微结构工件  
Fig.3 The workpiece of 3D printed microstructure

实验条件如表 1 所示，加工间隙  $\Delta$  是指工具头端面与工件表面的距离，由于微结构工件表面不是



平面, 工件表面上各点到工具头端面的距离不相同, 实验对刀时以工具头刚好接触到工件表面的位置为基准点, 故实验中设定的加工间隙即为工具头端面到微结构轮廓最高点的距离。每次实验抛光体取量相同, 各实验只改变当组实验要研究的工艺参数, 其余参数保持不变。其中, 实验 I、II、III 为不同工艺参数下对包体状微结构的保形均匀抛光研究; 实验 II 和 IV 为两种抛光路径对包体状微结构的保形抛光研究, 由于采用水平移动往返式对线性阵列工件抛光, 微结构轮廓上各点到工具头表面距离不相等, 所受到的压力也不相等, 故抛光后轮廓上各点的材料去除效率差别较大。若采用抛光工具头端面始终与微结构轮廓相切且保持一定距离的抛光路径, 那么就可以使工件轮廓上各点受到的压力相同。但由于实验条件限制工具头只能上下移动, 本实验采用等高线移动抛光方式对包体状微结构抛光, 即工具头移动的同时保持抛光工具头端面中心点到微结构轮廓的高度距离不变, 始终为 1 mm, 等高线移动抛光示意图如图 4 所示, 其他工艺参数与水平移动式抛光实验 II 相同, 如表 1 实验 IV 所示; 实验 II、V、VI 研究了不同微结构的保形抛光, 采用相同的工艺参数分别对 3 种微结构抛光实验。

表1 抛光工艺参数  
Tab.1 Experimental parameters of polishing

组别	抛光方式	工件类型	加工间隙 $\Delta/mm$	主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	抛光时间 $t/min$	进给速度 $v/(mm \cdot \min^{-1})$
实验 I	水平移动	包体状	0.5/1/1.5	600	20	1
实验 II	水平移动	包体状	1	450/600/750	20	1
实验 III	水平移动	包体状	1	600	20/40/60	1
实验 IV	等高线移动	包体状	1	450/600/750	20	1
实验 V	水平移动	正三角锥	1	450/600/750	20	1
实验 VI	圆周进给	圆周阵列	1	450/600/750	19.56	1

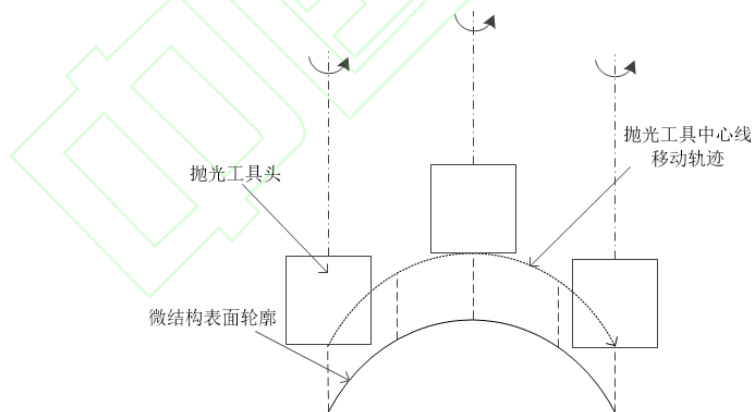


图4 等高线移动式抛光示意图  
Fig.4 Schematic diagram of contour line moving polishing

将抛光前后的微结构工件置于基恩士 VHX-5000 系列超景深三维显微系统下检测表面质量和微结构轮廓。抛光前后微结构表面形貌如图 5 所示, 显微镜 2 000 倍率下可以看出经过抛光微结构表面质量得到了很大的改善, 每组实验检测得到的表面质量均能够得到很好的改善。材料去除测量方法: 通过在微结构工件上做标记保证每次检测的位置相同, 在 500 倍率下通过图像拼接方式拍摄出微结构的三维形貌如图 6(a), 并画线得到微结构表面轮廓的高度值如图 6(b), 将每次检测得到的数据导入到 Matlab 进行多项式拟合, 把拟合得到抛光后的轮廓减去抛光前的轮廓便得到了抛光材料去除量, 如图

7 所示。通过这种检测方法可以计算出各组实验抛光后微结构工件表面的材料去除效率。

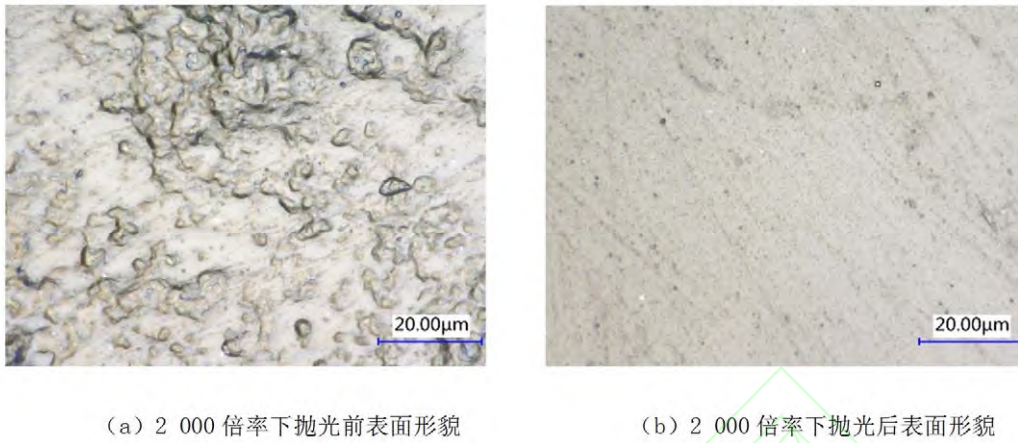
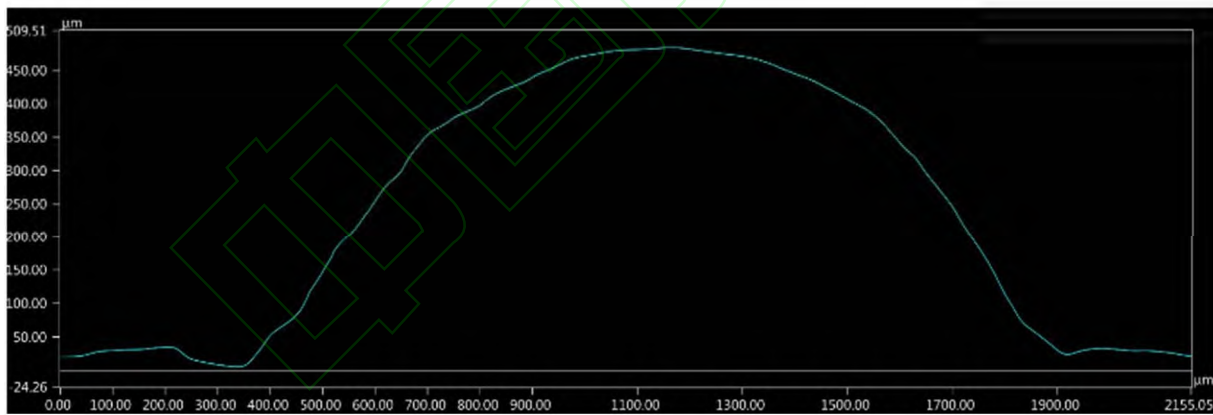


图 5 显微镜 2000 倍下检测抛光前后表面形貌  
Fig.5 The surface texture before and after polishing observed at the 2 000 magnification



(a) 包体微结构三维形貌



(b) 包体微结构表面三维轮廓

图 6 基恩士显微镜 500 倍下检测微结构的表面轮廓  
Fig. 6 The surface profile of microstructures observed at the 500 magnification

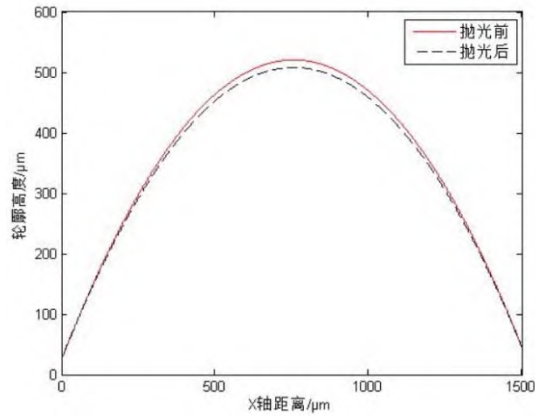


图 7 抛光前后微结构的表面轮廓  
Fig. 7 The surface profile of microstructures before and after polishing

## 2 实验结果与分析

### 2.1 不同工艺参数对包体状微结构的保形抛光实验

不同工艺参数对包体状微结构的保形抛光实验结果如图 8 所示, 采用任一组工艺参数对包体状微结构抛光材料去除效率均是沿着微结构表面轮廓先增大后减小, 在包体最高处材料去除效率最大。从图 8 还可以看出, 材料去除效率与主轴转速成正相关, 与加工间隙成负相关, 与抛光时间相关性不大。由于抛光水平移动时, 工件轮廓高的地方间隙小, 轮廓低的地方间隙大, 沿着微结构表面轮廓加工间隙先减小后增大, 包体最高处加工间隙最小。抛光体等量的条件下, 加工间隙的大小会影响抛光体与工件接触压力的大小, 加工间隙越小, 压力越大。

根据 Preston 方程<sup>[17]</sup>,

$$R = KPv, \quad (1)$$

其中,  $R$  表示材料去除效率,  $K$  为 Preston 系数,  $P$  表示正压力,  $V$  为相对速度。其他条件不变时, 材料去除效率与压力成正比, 故加工间隙越小, 材料去除效率越大; 反之, 材料去除效率越小。

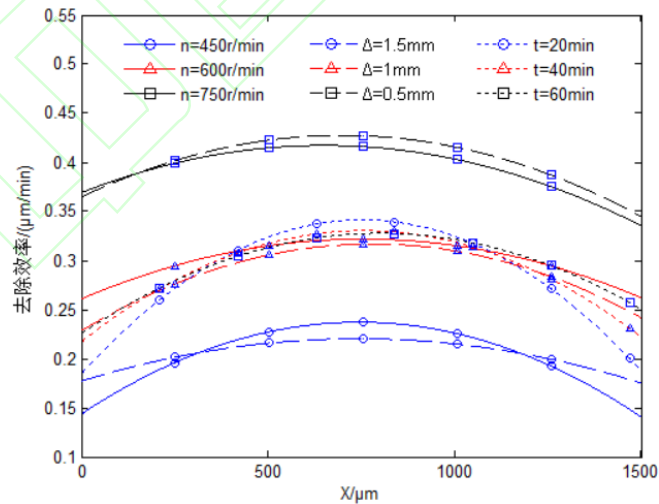


图 8 不同工艺参数对包体状微结构抛光表面材料去除效率  
Fig. 8 The material removal efficiency of inclusion microstructure workpiece at the different process parameters

为了评价经过抛光后微结构三维轮廓的保形情况, 引入保形系数  $k$ , 保形系数等于抛光前微结构轮廓的高宽比值除以抛光后微结构轮廓的高宽比值。式 (2) 中,

$$k = \frac{h'/d}{h/d} = \frac{h'}{h} = \frac{h - Rp \cdot t + Rv \cdot t}{h} = 1 - \frac{Rp - Rv}{h} \cdot t \quad (2)$$

其中,  $R_p$  和  $R_v$  分别表示微结构轮廓上最大和最小去除效率,  $t$  为抛光时间,  $h$  和  $h'$  是抛光前后微结构轮廓高度值,  $d$  为微结构轮廓的宽度 (抛光前后一样)。

由式 (2) 及图 8 实验结果可计算出各抛光参数实验微结构轮廓的保形系数, 如表 2 所示, 可以看出: 其它工艺参数不变时, 3 种加工间隙的保形系数差别不大, 在 0.996 5~0.998 2 之间; 3 种主轴转速的保形系数同样是差别较小, 在 0.996 2~0.997 6 之间; 抛光时间对微结构保形效果影响较大, 随着抛光时间增加, 保形系数变小, 抛光 20 min 保形系数为 0.993 7, 而抛光 60 min 保形系数则降到了 0.987 7。

表2 各工艺参数抛光后微结构保形系数

Tab2. The conformal coefficient of microstructure workpiece after polishing at the different process parameters

实验 I ( $n=600, t=20$ )		实验 II ( $\Delta=1, t=20$ )		实验 III ( $\Delta=1, n=600$ )	
$\Delta$	$k$	$n$	$k$	$t$	$k$
1.5	0.9982	450	0.9962	20	0.9937
1	0.9965	600	0.9976	40	0.9909
0.5	0.9967	750	0.9967	60	0.9877

## 2.2 不同抛光路径对包体状微结构的保形抛光实验

两种路径下微结构轮廓上材料去除效率和保形系数的实验结果如图 9 和图 10 所示, 可以看出, 采用等高线移动式抛光材料去除效率仍然是轮廓中间较高, 两端较小, 但是相比于水平移动式各转速下的抛光去除效率极差值均有所减少, 水平移动式差值在 0.061 2~0.096 1  $\mu\text{m}/\text{min}$  之间, 等高线移动式则降到 0.036 1~0.044 9  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。从图 11 可以看出, 相比于水平移动式抛光, 采用等高线移动式抛光的保形系数由 0.996 2~0.997 6 增加到 0.998 2~0.998 6。这是采用等高线移动式抛光微结构轮廓高低位置的加工间隙差距相对较小, 导致抛光压力相差也较小, 所以去除效率差值变小, 保形效果较好。

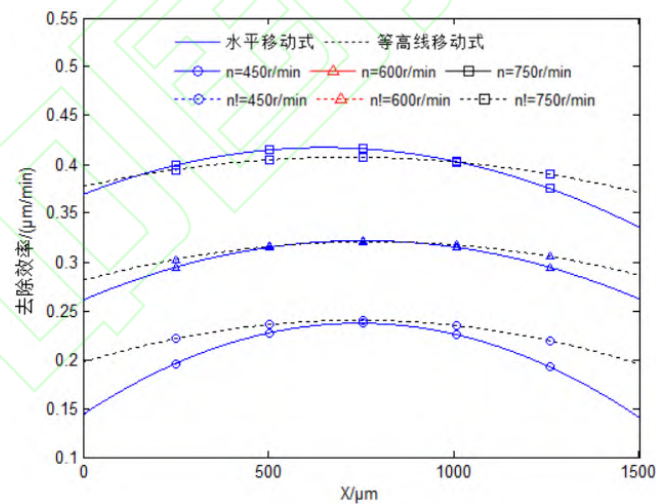


图9 两种抛光路径微结构表面材料去除效率

Fig.9 The material removal efficiency of microstructure workpiece at the two polishing path



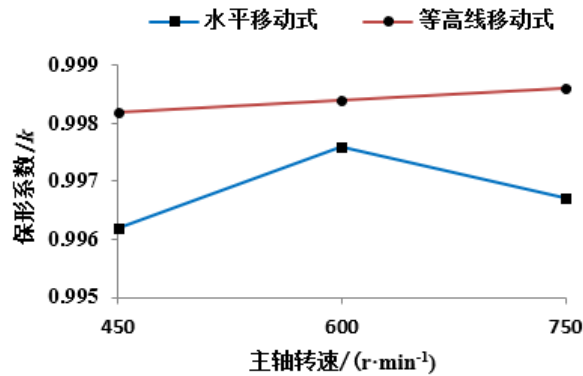


图 10 两种抛光路径抛光后微结构的保形系数  
Fig.10 The conformal coefficient of microstructure workpiece at the two kinds of polishing path

### 2.3 相同工艺参数对不同微结构的保形抛光实验

实验得到各微结构轮廓上的去除效率如图 11 所示，其中，正三棱锥横向轮廓约为 1.2 mm。圆环微结构的材料去除效率均比包体状的小，这是由于工具头边沿的去除效率较低，圆周抛光时抛光区域内任一点抛光开始和结束时都经过工具头边沿，而线性阵列微结构所研究的微结构在工具头中间区域抛光。通过式 (2) 计算得到包体状微结构、正三棱锥微结构、圆环圆周阵列微结构保形系数分别在 0.996 2~0.997 6, 0.996 2~0.996 5, 0.989 7~0.995 0 之间，如图 12 所示，可以看出采用同样的工艺参数抛光后，对包体状微结构和圆环微结构的保形效果较好，而对正三棱锥微结构工件的保形效果较差。这是由于相比另外两种微结构，正三棱锥微结构的棱角比较分明，微结构比较容易受到破坏，所以保形效果较差。

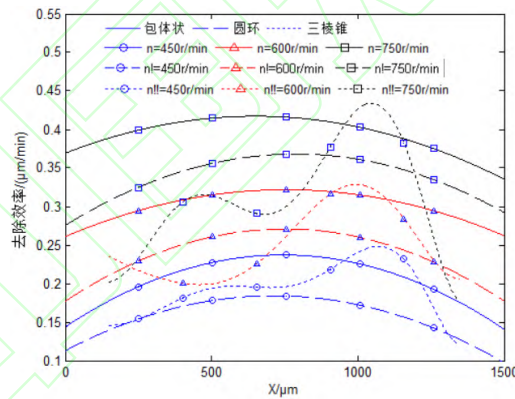


图 11 3 种微结构工件抛光后的材料去除效率  
Fig.11 The material removal efficiency of three kinds of microstructure workpieces after polishing

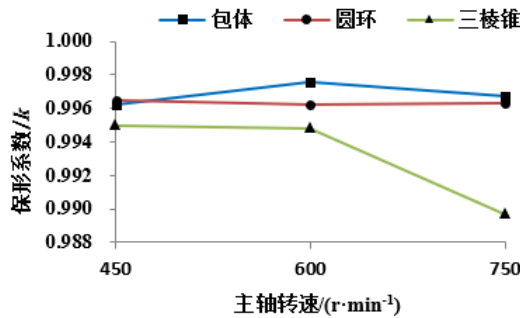


图 12 3 种微结构工件抛光后的保形系数  
Fig.12 The conformal coefficient of three kinds of microstructure workpieces after polishing

### 3 结 论

为了保证微结构的功能表面,对微结构工件精密加工时,改善表面质量的同时还要保证微结构的三维形貌不被破坏,本文中主要研究了工艺参数、抛光路径对微结构的保形抛光,以及同样的工艺参数对 3 种微结构抛光的保形效果,并得到如下结论:

1) 由于微结构高低不平,任一参数抛光时轮廓上各处都达不到完全均匀去除。不同加工间隙和主轴转速对微结构抛光的保形效果影响不大,加工间隙为 0.5~1.5 mm 时,保形系数在 0.996 5~0.998 2 之间;主轴转速在 450-750 r/min 时,保形系数在 0.996 2~0.997 6 之间。而抛光时间对微结构保形效果影响较大,随着抛光时间的增加,保形系数减少,保形效果越差,抛光时间从 20 min 增加到 60 min 后,保形系数从 0.993 7 降到了 0.987 7。

2) 相同工艺参数抛光时,相比于水平移动式,采用等高线移动式对包体状微结构工件抛光相比保形系数由 0.996 2~0.997 6 之间增加到 0.998 2~0.998 6,保形效果较好。

3) 相同工艺参数抛光时,对包体状微结构和圆环微结构的保形效果较好,而对正三棱锥微结构工件的保形效果较差。

4) 通过各组实验的结果可以得出:采用磁性抛光方法能够改善微结构阵列工件的表面质量,而且能较好的维持原来的三维微结构形貌,因此该抛光方法适用于微结构阵列工件的光整加工。

#### 参考文献:

- [1] 杨辉,张彬,张利鹏.微结构功能表面的应用及制造[J].航空精密制造技术,2015,51(5):1-6.
- [2] 黄红光,郭钟宁,王冠,等.模具钢表面阵列微结构蚀刻工艺的实验研究[J].腐蚀科学与防护技术,2014,26(2):194-196.
- [3] 宋满仓,于超,张建磊,等.多工位组合电极电火花成形微结构镶块试验研究[J].机械工程学报,2013,49(15):186-191.
- [4] 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.
- [5] XIE X. High thermal expansion optical component machined by ion beam figuring[J]. Optical Engineering, 2012, 51(51):3401.
- [6] 宋辞.离轴非球面光学元件磁流变抛光技术研究[D].长沙:国防科技大学,2012.
- [7] Ido Y, Asakura K, Nishida H. Behavior of particles in the process of magnetic compound fluid polishing of inner surface of micro-tube with axial flow[J]. Materials Science Forum, 2014, 792(December):27-32.
- [8] WANG Y, WU Y, Mitsuyoshi N. A novel magnetic field-assisted polishing method using magnetic compound slurry and its performance in mirror surface finishing of miniature V-grooves[J]. Aip Advances, 2016, 6(5):173.
- [9] WANG Y, WU Y, Nomura M. Feasibility study on surface finishing of miniature V-grooves with magnetic compound fluid slurry[J]. Precision Engineering, 2016, 45:67-78.
- [10] Tani Y, Kawata K, Nakayama K. Development of high-efficient fine finishing process using magnetic fluid[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1984, 33(1):217-220.
- [11] 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.
- [12] Singh A K, Jha S, Pandey P M. Mechanism of material removal in ball end magnetorheological finishing process[J]. Wear, 2013, 302(1):1180-1191.
- [13] Shimada K, Akagami Y, Fujita T, et al. Characteristics of magnetic compound fluid (MCF) in a rotating rheometer[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252(none):235-237.
- [14] Wu Y B, Shimada K, Wong Y C, et al. Effects of particles blend ratio on surface quality in surface polishing using magnetic polishing liquid (MPL)[J]. Key Engineering Materials, 2005, 291-292(6):337-342.
- [15] 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.
- [16] 林龙侨,王振忠,陈世平.自由曲面结构磁性抛光去除试验研究[J].航空制造技术,2017,531(12):94-98.
- [17] 彭小强,戴一帆,李圣怡.磁流变抛光的材料去除数学模型[J].机械工程学报,2004,40(4):67-70.