

# 基于磁力研磨法对微型槽的精密研磨研究<sup>\*</sup>

吕兴国, 韩冰, 陈燕

(辽宁科技大学机械工程及自动化学院, 鞍山 114051)

**[摘要]** 微型喷嘴旋流槽棱边去毛刺及槽底面光整用传统加工方法难以实现, 利用磁力研磨法能够很好实现旋流槽棱边去毛刺及槽底面的光整加工。文中分析了磁力研磨法对棱边去毛刺及槽底面光整的加工机理, 并进行了有限元理论分析和试验验证, 利用 3D 超景深电子显微镜观察并记录喷嘴旋流槽加工前后照片, 验证结果表明, 永磁研磨机可以很好地实现对微型喷嘴旋流槽棱边去毛刺及槽底面光整研磨。

**关键词:** 磁力研磨; 喷嘴; 旋流槽; 毛刺

## Study on Micro Groove Polishing Based on Magnetic Abrasive Finishing

LÜ Xingguo, HAN Bing, CHEN Yan

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**[ABSTRACT]** The edge deburring and bottom surface polishing of micro nozzle swirl grooves is difficult to be achieved by using traditional processing methods, using magnetic force grinding method can well realize the spiral chute edge deburring and groove bottom surface finishing processing. Processing mechanism of edge deburring and bottom surface polishing of micro nozzle swirl grooves by magnetic abrasive finishing is analyzed; the finite element theory analysis and experiments are conducted for verification. The 3D depth of field electron microscopy is used to observe and record before and after polishing. The results show that using permanent-magnetic mill have a good effect on edge deburring and bottom surface polishing of micro nozzle swirl grooves.

**Keywords:** Magnetic abrasive finishing; Nozzle; Swirl groove; Burr

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.14.093

随着航空航天产业的发展, 微型零部件的应用也越来越广, 且对微型工件的加工精度与使用要求变得更高, 如在航空领域应用的微型燃油喷嘴, 在切削加工后旋流槽棱边会残留毛刺, 同时槽底面出现凸凹不平的切削加工纹理。旋流槽底面不平整, 将导致燃油的雾化油滴不均匀, 造成燃烧室出口温度场不稳定。同时, 棱边毛刺的存在也会对喷嘴口的流量和喷雾锥角产生较大影响, 使燃油流量及雾化不均匀, 降低燃烧室的燃烧性能, 对发动机的推力、耗油量和可靠性造成不良影响<sup>[1-3]</sup>, 微型喷嘴旋流槽的光整表面质量直接影响燃油的雾化质量。在保证微型喷嘴旋流槽尺寸精度的情况下, 对棱边去毛刺及槽底面光整加工, 已成为微型工件光整加工中亟待解决的技术难题。由于微型工件特征尺寸很小(宽度为 0.5~2.5mm), 利用传统加工方法难以去除毛刺; 槽底面光整加工时很有可能造成工件尺寸误

差, 甚至损伤工件, 对其使用性能造成很大影响。

磁力研磨法具有柔性、自适应性好、自锐性强、升温慢并且不需要进行工具磨损补偿等优点, 已成功应用于弯管内外表面、平面及自由曲面光整加工等多种加工领域<sup>[4-7]</sup>。基于磁力研磨法的工艺特点及工件的结构特征, 自行设计了针对微型喷嘴窄槽光整加工的研磨装置, 实现对微型喷嘴旋流槽棱边去毛刺及槽底面光整研磨, 满足零件的尺寸精度和表面质量要求<sup>[8]</sup>。

## 1 磁力研磨加工原理

### 1.1 加工原理

图 1 为磁力研磨加工原理示意图。在永磁铁形成的磁场中, 导磁的工件被磁化, 与磁极形成磁回路, 在磁场的作用下, 磁性研磨粒子被磁化并沿着磁力线形成具有一定强度的磁粒刷。当磁极带动磁粒刷向左进一步接近工件时, 磁粒刷在磁力作用下变形挤压在工件表面, 料筒限制了磁性磨料的溢出, 迫使研磨粒子沿窄槽

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(51105187), 高等学校优秀人才支持计划项目(LJQ 2011025), 教育部留学回国人员科研启动基金。

挤出,完成对工件槽底面的研磨加工。磁极向右返回过程中,磁粒刷在磁力作用下恢复初始状态,完成一次研磨周期,如此反复运动若干个周期,磁性磨料在磁力与料筒约束力的作用下对窄槽进行划擦、研磨,完成对工件窄槽棱边去毛刺及槽底面光整加工。

根据 Preston 经验公式<sup>[9]</sup>:

$$R = K P v \quad (1)$$

式中:  $R$  为材料的去除量,单位  $\text{mg}$ ;  $K$  为与加工条件相关的比例常数;  $P$  为磁性磨粒在工件上的研磨压力,单位  $\text{N}$ ;  $v$  为磁极与工件之间的相对速度,单位  $\text{mm/s}$ 。

由公式(1)可知,完成工件槽底面的研磨加工需具备以下两个条件:

(1) 工件与“磁粒刷”有相对运动(窄槽底面与磁粒刷有接触研磨运动)。

(2) 磁性磨料对工件研磨区域有研磨压力。

如图1所示,研磨压力  $P$  是由磁场力  $F_m$  ( $F_x$  与  $F_y$  合力  $F_m$ ) 与外界挤压力  $F_n$  ( $F_h$  与  $\Delta F_v$  合力  $F_n$ ) 组成。根据磁力研磨静力分析可知,磁力研磨压力  $F_m$  为等磁位线方向的  $F_y$  和磁力线方向的磁力  $F_x$  的合力。外界挤压力  $F_n$  由水平推力  $F_h$  与变力  $\Delta F_v$  合力决定 ( $F_n = \sqrt{F_h^2 + \Delta F_v^2}$ )。在水平推力  $F_h$  不变的情况下,研磨过程中磁性磨料受到的料筒约束力  $\Delta F_v$  随磁性磨料用量、窄槽槽底倾角 ( $0\sim 45^\circ$  之间) 的增加而增大,磁性磨料对工件窄槽底面的挤压力  $F_n$  也会变大。同时工件自转搅动磁性磨料,使磁性磨料粒子能充分翻滚,产生自发的搅拌现象<sup>[10]</sup>,实现磁性磨料粒子切削刃的更新,

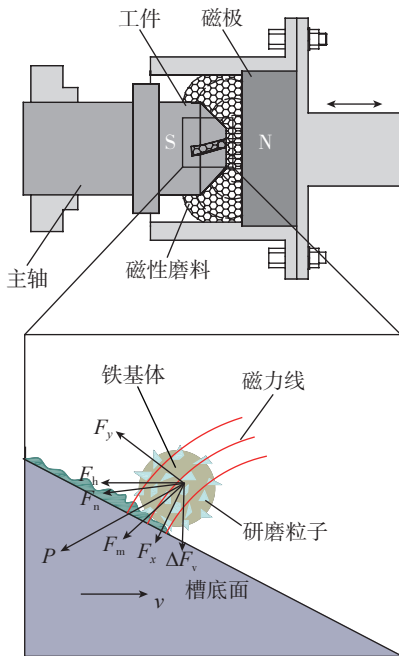


图1 磁力研磨加工原理图

Fig.1 Schematic magnetic abrasive finishing

更有助于提高槽底面加工质量。

## 1.2 磁场强度理论分析

图2为静磁场中喷嘴模型的磁场强度分布有限元模拟图。由图2可知喷嘴旋流槽的棱边处磁场强度为  $0.975\sim 0.709\text{T}$ ,槽底面及其他部分在  $0.709\sim 0.310\text{T}$ 。喷嘴棱边处磁场强度最强。

影响棱边毛刺去除的主要因素是研磨压力  $P_1$ 。研磨压力与磁场力相关公式如下:

$$P_1 = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) \quad (2)$$

式中,  $B$  为作用面处的磁感应强度 ( $\text{T}$ );  $\mu_m$  为磁性研磨粒子团的相对磁导率 ( $\text{H/m}$ );  $\mu_0$  为空气磁导率<sup>[11]</sup>,取  $4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ 。

研磨压力  $P_1$  与磁场强度  $B$  的平方成正比,磁性磨粒会在磁场作用下被磁化并在磁场强度大的区域聚集。由图2可知棱边处磁场强度最大,磁性粒子会在棱边处聚集形成研磨粒子团。研磨粒子团在外部磁极的带动下对窄槽棱边进行往复研磨。整个研磨过程中,微小的磁性磨料粒子作为研磨工具,对窄槽棱边毛刺进行微量磨削去除,确保了工件的尺寸精度。

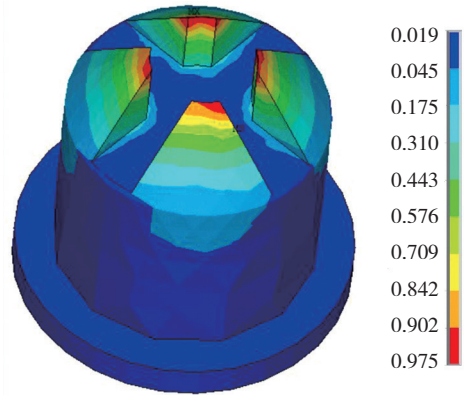


图2 工件模型表面磁场强度分布

Fig.2 Workpiece surface magnetic field intensity distribution

## 2 试验过程

### 2.1 试验装置

图3为磁力研磨装置。将磁性磨料与研磨液混合均匀并填充到料筒内。将工件夹持于主轴夹具上,工件随主轴旋转,转速为  $120\text{r/min}$ ;启动步进电机并调至试验转速,使磁极以  $140\text{n/min}$  频率作往复进给运动。料筒内磁性磨料吸附于内置磁极上并随其运动挤压、研磨工件表面,完成对工件窄槽棱边去毛刺及底面光整加工。主轴的旋转,实现对磁性磨料粒子团的充分搅动,使磁性磨料粒子附加了一个外在搅动翻转辅助功能,完成磁性磨料粒子的自锐更替,充分发挥磁性磨粒的研磨能力,提高研磨质量。

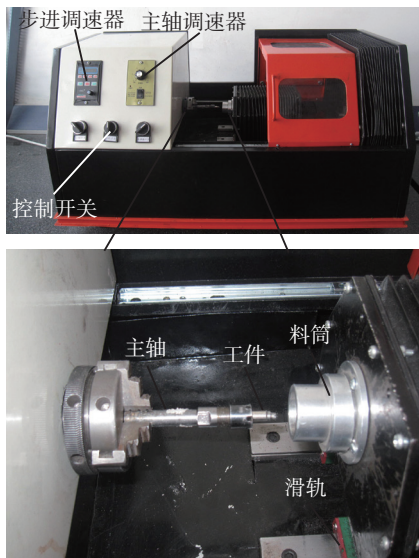


图3 试验装置

Fig.3 Experimental setup

## 2.2 试验条件

试验工件为某航空发动机燃油喷嘴, 硬度高、耐高温、合金导磁材料。试验条件如表 1 所示。磁极选用 Nd-Fe-B 圆柱形永磁体<sup>[12]</sup>; 磁性磨料为自主研发的铁基白刚玉磁性磨料<sup>[13]</sup>; 研磨液为大连盛瑞贝尔化工有限公司生产的劳力恩 SR-9911 研磨液, 在研磨过程中有润滑、散热、防止磨料对工件的干摩擦、有助于降低粗糙度等辅助作用<sup>[14]</sup>; 每次试验前后工件的材料去除量采用精密电子天平称量, 工件窄槽主要尺寸及微观形貌变化由日本基恩士生产的 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜观测。

表1 试验条件

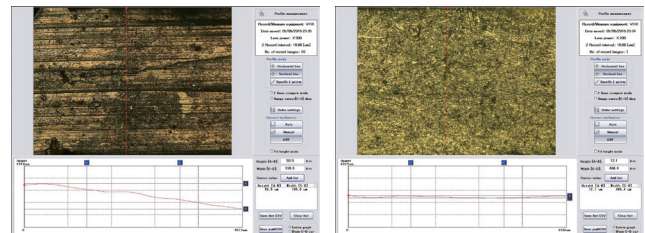
参数名称	条件
磁极类型	Nd-Fe-B: $\phi 21 \times 4.5$
磨料粒径 $D/\mu\text{m}$	250
磁性磨料用量 $m/\text{g}$	7
加工间隙 $l/\text{mm}$	1.5
磁极运动频率 $f/(\text{n} \cdot \text{min}^{-1})$	140
研磨时间 $t/\text{min}$	3
研磨液用量 $L/\text{ml}$	2.5
主轴转速 $v/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	120

## 3 试验结果及分析

### 3.1 槽底表面形貌

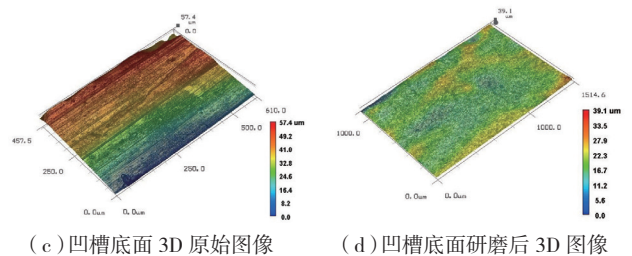
按照试验条件进行一系列研磨试验, 用 3D 超景深电子显微镜观察、记录工件研磨前后加工区域的相关数据。图 4 为喷嘴旋流槽底面研磨前后的表面形貌变化,

红线部分为同一位置处纵向的高度差变化, 由原始高度差  $53.5\mu\text{m}$  研磨后变为  $12.1\mu\text{m}$ , 研磨前后变化显著。由图 4 (a) 可知研磨前工件窄槽底面表面形貌明显的凹凸不平, 表面纹理突出, 且在 3D 图像中颜色的变化较大, 槽底面有较高高度差, 表面质量较差。研磨 3min 后, 如图 4 (b) 工件窄槽底面颜色分布均匀, 工件窄槽底面趋于平整, 且表面加工纹理基本去除, 槽底面高度差变小, 表面质量显著提高。



(a) 凹槽底面原始图像

(b) 凹槽底面研磨后图像



(c) 凹槽底面 3D 原始图像

(d) 凹槽底面研磨后 3D 图像

图4 凹槽底面形貌研磨前后对比

Fig.4 Comparison of groove bottom topography before and after polishing

料筒中填充的磁性磨料粒子在磁场力  $F_m$  与料筒内壁约束力  $F_n$  合力作用下被嵌入到凹槽底面, 磁性磨粒受到的合外力转化为研磨压力  $P$  压附于凹槽底面, 同时磨料在外部磁极带动下以一定速度完成对凹槽底面光整研磨, 最终使得凹槽底面更加平整。验证了理论分析中对凹槽底面加工的可行性。

### 3.2 棱边毛刺

图 5 为 3D 超景深电子显微镜观察工件窄槽棱边毛刺研磨前后的表面形貌变化, 可以看到其原始棱边有明显的毛刺(图中红圈区域)存在, 研磨 3min 后, 棱边毛刺基本去除, 棱刃更加圆整, 棱边 3D 图像显示研磨后棱边趋于平直。

根据对工件表面磁场强度分布进行模拟分析, 得到在凹槽棱边处的磁场强度  $B$  最大, 加工过程中磁性磨料在棱边处聚集最多且磁场力  $P_1$  最大, 使得磨料对棱边的研磨压力最大, 同时在随磁极运动过程中对棱边的研磨更加充分, 最终去除棱边毛刺, 提高了棱边质量。

### 3.3 主要尺寸

微型工件窄槽的光整加工对尺寸要求较高, 不允许窄槽尺寸有过大改变。因整个加工过程, 参与各棱边

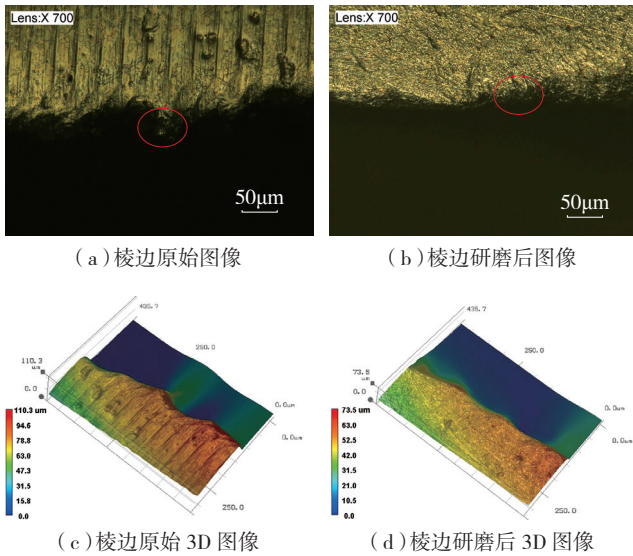


图5 棱边毛刺去除对比

Fig.5 Comparison of edge burr removing before and after polishing

研磨光整的磁性磨料主要受磁场力作用,其研磨为柔性微量磨削研磨,尺寸变化很小。如图6所示,槽宽由原始的 $592.85\mu\text{m}$ 变为 $616.99\mu\text{m}$ ,旋流槽顶端圆周直径从 $1963.38\mu\text{m}$ 变为 $1968.55\mu\text{m}$ 。各棱边毛刺基本去除,棱边更加平滑,主要加工后尺寸无明显变化,符合技术要求。

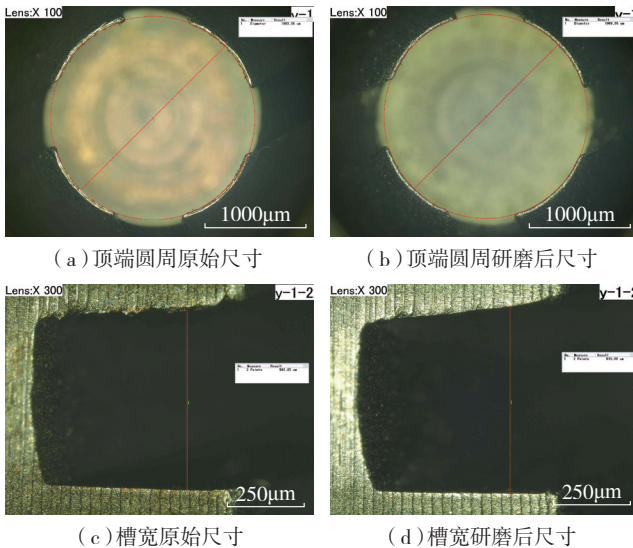


图6 工件主要尺寸变化对比

Fig.6 Comparison of main dimensions

## 4 结论

针对微型喷嘴旋流槽的槽底面光整及棱边毛刺难以去除这一难题,利用磁力研磨法这一研磨光整手段,借助磁极的往复运动带动磁性磨料粒子团运动,对微型喷嘴旋流槽底面进行光整研磨,并用 ANSYS 有限元模拟分析了磁场强度在喷嘴表面的分布,并用试验验证了

磁力研磨法可以很好去除喷嘴微型槽棱边毛刺。以试验结果为依据作分析得到以下结论:

(1) 基于磁力研磨法对喷嘴旋流槽底面进行光整研磨,槽底面更加平整,槽底表面纹理被去除,表面质量显著提高。

(2) 基于磁力研磨法对喷嘴旋流槽棱边进行光整研磨,棱边毛刺被去除,棱边更加圆整。

(3) 基于磁力研磨法对微型喷嘴旋流槽的光整加工效果良好且保证了工件的尺寸精度和形状精度。

## 参考文献

- [1] 刘凯,张宝诚,宋文超,等.加工工艺对航空发动机燃油喷嘴性能的影响研究[J].航空发动机,2012,38(1):55-59.  
LIU Kai, ZHANG Baocheng, SONG Wenchao, et al. Effects of processing on aviation engine fuel nozzle performance[J]. Aeroengine, 2012,38(1):55-59.
- [2] 马洪安.某航空发动机燃油喷嘴对比试验研究[J].航空发动机,2009,35(3):54-57.  
MA Hongan. Experimental study on comparison of an aviation engine fuel nozzle[J]. Aeroengine, 2009, 35(3):54-57.
- [3] HAN Z, PARRISH S, FARRELL P V, et al. Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel spray[J]. Atomization and Spray, 1997,7(5):663-684.
- [4] 韩冰,刘立鑫,陈燕.磁力研磨法加工弯管内表面的工艺参数优化[J].中国机械工程,2015(6):814-817.  
HAN Bing, LIU Lixin, CHEN Yan. The spherical magnet processing of inner surface of bending pipe by magnetic abrasive finishing[J]. China Mechanical Engineering, 2015(6):814-817.
- [5] 陈燕,巨东英.应用磁研磨法对细长管内表面的抛光处理[J].模具制造,2004(10):48-50.  
CHEN Yan, JU Dongying. Application of magnetic abrasive finishing method for polishing the surface of the slender tube[J]. Mold Manufacturing, 2004(10):48-50.
- [6] 李彦俊,陈燕,郭龙文.磁研磨法去除微小喷嘴棱边处毛刺的研究[J].航空制造技术,2014(9):88-90.  
LI Yanjun, CHEN Yan, GUO Longwen. Study of deburring on edge of micro nozzle by magnetic abrasive finishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(9):88-90.
- [7] LIN C T, YANG L D, CHOW H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007,34(1/2):122-342.
- [8] KIM T W, KWAK J S. A study on deburring of magnesium alloy plate by magnetic abrasive polishing[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2010,11(2):189-194.
- [9] 马东雄,丁金福,李晓东.磁研磨法在磨具曲面中的抛光机理与技术研究[J].机械设计与制造,2009(3):242-244.  
MA Dongxiong, DING Jinfu, LI Xiaodong. Magnetic polishing grinding mechanism and technology research in the abrasive surface[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2009(3):242-244.
- [10] 范春利.磁性磨粒的研制及其加工性能的实验分析与研究 (下转第101页)