

# 磁力研磨法去除微孔边缘毛刺实验研究

梁仕兵 傅永建<sup>\*</sup> 于鹤洋 孙旭

龙岩学院, 中国·福建 龙岩 364000

**摘要:** 为了去除孔类零件内侧的毛刺, 提出了一种磁力研磨工艺。探究了该方法去除毛刺的加工机理, 明确关键加工参数对微孔边缘毛刺的去除影响。通过单因素实验对加工参数进行优化; 利用 ANSYS MAXWELL 有限元分析了磁柱的充磁方向对磁场强度的影响。实验结果表明: 当研磨钻头转速为 800 rpm、加工时间为 60 s、#45 铁粉与 #500 白刚玉组合且磨料的质量比为 1:2 时, 孔类零件内侧的毛刺去除效率最高。仿真结果表明: 径向充磁的磁柱在加工区域可产生更大的磁场强度。

**关键词:** 磁力研磨法; 磁性磨料; 毛刺; 磁力研磨; 加工效率

## Experimental Study on the Removal of Burrs at the Edges of Micro-holes by Magnetic Abrasive Finishing

Liang Shibing, Fu Yongjian<sup>\*</sup>, Yu Heyang, Sun Xu

Longyan University, China Fujian Longyan 364000

**Abstract:** To remove burrs on the inner side of hole-type parts, a magnetic abrasive process is proposed. The processing mechanism of this method for removing burrs was explored, and the influence of key processing parameters on the removal of burrs at the edge of micro-holes was clarified. Optimize the processing parameters through single-factor experiments; The influence of the magnetization direction of the magnetic column on the magnetic field intensity was analyzed by using ansys maxwell finite element method. The experimental results show that when the grinding drill bit rotates at 800 rpm, the processing time is 60 seconds, the combination of #45 iron powder and #500 white corundum is used, and the mass ratio of the abrasive is 1:2, the burr removal efficiency on the inner side of the hole-type parts is the highest. The simulation results show that the radially magnetized magnetic column can generate a greater magnetic field intensity in the processing area.

**Keywords:** Magnetic grinding method; Magnetic abrasive; Burr; Magnetic grinding; Process efficiency

## 0 引言

毛刺是工件在切削、冲压等加工过程后因材料塑性变形产生的刺状物或飞边等缺陷<sup>[1, 2]</sup>, 其存在会降低零件精度, 影响零件的装配和使用性能, 降低产品的使用寿命。例如, 在液压系统中可能引发阀芯卡死, 在电气系统中可能导致短路等系统性危害。为了确保关键零件的正常工作, 毛刺去除已成为精密部件的最关键一道加工工序<sup>[3]</sup>。

图 1 为上海爱卫蓝公司生产的新能源汽车电动涡旋式压缩机的泵体配件。传统的制造工艺中, 加工工序为先对平面进行加工, 后加工孔, 即“先面后孔”; 由于本文的加工对象的形状相对复杂, 特别是微孔的位置距离螺旋壁很近, 其制造工艺采用了与传统的制造工艺相反的加工工序, 即“先孔后面”, 以确保微孔的位置精度。若采用传统的制造工艺加工零件, 加工后孔边缘毛刺的方向通常向外侧; 而本文的工件采用了“先孔后面”的加工工序, 因

此加工后孔边缘毛刺的方向偏向内侧。压缩机工作时, 毛刺在瞬时的强气体 / 液体压力的作用下极易脱离, 从而堵塞微孔, 影响工件的正常使用寿命, 甚至影响压缩机的正常运转<sup>[4]</sup>。受限于该零件微孔毛刺的形成方向与形成位置, 传统机械加工法无法完成毛刺去除。目前该企业主要依靠人工去除微孔边缘的毛刺, 该加工法不但生产效率低, 产品质量也无法保证。为了解决该配件的微孔边缘毛刺难去除的问题, 本研究提出了利用磁力研磨法去除微孔边缘毛刺。

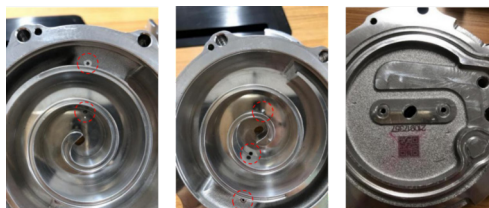


图1 新能源汽车电动涡旋式压缩机的泵体配件

1 试验及方法

1.1 加工原理

本文提出的磁力研磨法对微孔边缘毛刺的去除原理如图 2 所示。工件放置于工作台上，在工件上方一定距离处安装柱状磁极，磁极与工件之间留有一定的间隙，便于填充磁性磨粒，混合磁性磨粒在磁场的作用下沿磁感线排列，并在加工区域形成磁粒刷。主轴带动磁柱执行同步旋转运动，“磁刷”与微孔边缘会发生相互摩擦，使微孔边缘内侧的毛刺发生折断、拉伸、偏移等变形，最终脱离工件表面，从而实现高效的毛刺去除<sup>[5, 6]</sup>。

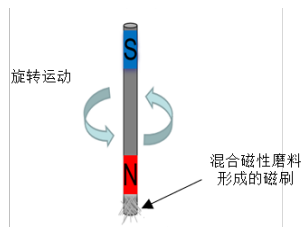


图2

1.2 实验装置及方法

本研究实验装置如图 3 所示，装置主体为一款多级变速的台钻。由于工件的微孔直径为 2.4 mm，加工端采用直径为 2.2 mm 的磁柱。工件通过夹具固定于台钻的工作台上，磁柱的转速由台钻主轴设定，其工作位置（即 Z 轴方向的位置）通过手动控制实现。铁粉、磨料（白刚玉或金刚石）与钻油性研磨液组成的游离混合磁性磨料被吸附于磁柱的前端，形成“磁刷”。当磁针执行高速旋转运动时，通过磨料与毛刺产生的相对摩擦，以实现微孔边缘内侧的毛刺去除。研磨后，对工件进行超声清洗以去除表面残留的磨料和研磨屑，再利用金相显微镜（MRX4）观测微孔边缘的表面形貌以评价加工效果。

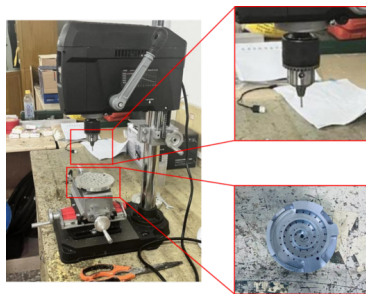


图3 实验装置

1.3 加工条件

加工对象的材料为 A6061，微孔直径为 2.4 mm。混合磁性磨料为 #45（粒径约为 330 μm）电解铁粉分别与 #500（粒径约为 30 μm）、#1000（粒径约为 15 μm）白刚玉磨料的组合。其中，电解铁粉（铁基相）、白刚玉磨

料（研磨相）按照质量比为 2:1 的比例与定量的油性研磨液混合而成。在研磨过程中，为了避免在离心力的作用下游离磨料脱离磁场的束缚飞溅出去，分别将磁极转速设定为 500、800、1000、1200 和 1500 r/min。考虑到人工加工一个工件的毛刺去除时间约为 3 分钟，因此本研究加工的总时间分别定为 30、45、60、75 和 90 s。具体的加工参数如表 1 所示。

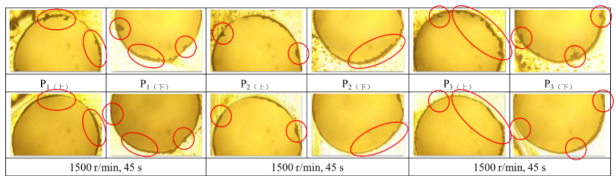
表1 加工条件

| 加工参数           | 数值                                                                                      |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 工件材料           | A6061铝合金                                                                                |
| 微孔直径/(mm)      | 2.4                                                                                     |
| 磁柱材料           | 钕铁硼永磁NdFe35                                                                             |
| 混合磁性磨料组合       | 电解铁粉(Fe3O4): #45 (330 μm)<br>白刚玉(WA, Al2O3): #500 (30 μm)、<br>#1000 (15 μm)<br>金刚石油性研磨液 |
| 磨料质量比          | 2:1                                                                                     |
| 总质量/(g)        | 0.6                                                                                     |
| 磁极主轴转速/(r/min) | 500, 800, 1000, 1200, 1500                                                              |
| 抛光时间/(s)       | 30, 45, 60, 75, 90                                                                      |

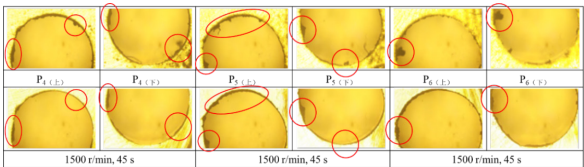
2 实验结果与分析

2.1 磁性磨料组合对毛刺去除的影响

为了防止实验中出现意外情况，我们进行了多次实验、并提取了稳定研磨效果的工件进行对比，实验结果如图 4 所示（其中， $P_{n(上)}$  表示第 n 个孔的上半部分， $P_{n(下)}$  表示第 n 个孔的下半部分）。通过对比研磨前、后微孔边缘的形貌，可以发现：相比于 #45 铁粉 + #1000 白刚玉磨料的混合磁性磨料，采用 #45 铁粉 + #500 白刚玉磨料的混合磁性磨料，可以获得更好的毛刺去除效果。由于铝合金在形成毛刺的过程中，其微观结构发生了变化，导致形成的毛刺硬度升高。粒径较大的磨料（相应的目数较小）在磁场的作用下，会产生较大的切屑力，可以更高效地去除微孔边缘的毛刺。



(a) 采用#45铁粉+#500白刚玉磨料的混合磁性磨料



(b) 采用#45铁粉+#1000白刚玉磨料的混合磁性磨料

图4 不同的磁性磨料组合对毛刺去除的效果  
(红圈表示研磨前、后，突显毛刺的变化)

## 2.2 磁针转速对毛刺去除的影响

通过对比不同的磁针转速条件下的毛刺去除的效果(如图5所示)可知,仅当主轴转速为 800 r/min 时,微孔边缘的毛刺已完全被去除;其它磁针转速条件下,微孔边缘的局部仍残留毛刺,并且随着主轴转速升高,毛刺去除的效果越差。主轴转速过小(500 r/min)会导致研磨压力不足,因此无法有效地去除与微孔边缘粘结较为顽固的毛刺或积瘤。而当主轴转速过大(超过 1000 r/min)时,游离的磁性磨料受离心力的作用,脱离磁场的束缚发生“飞溅”现象,并且主轴转速越高,磨料的“飞溅”现象越显著。这将导致参与毛刺去除的磨料粒子数量减少,因此,过大的主轴转速会使毛刺的去除效率降低。

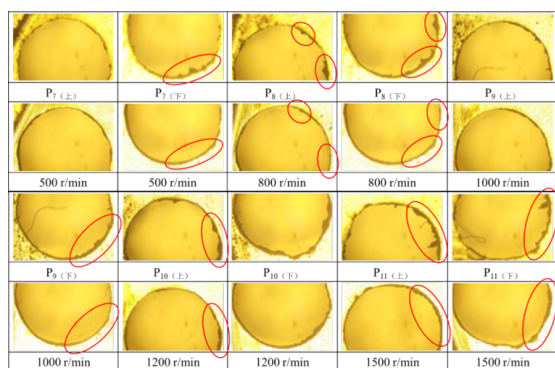


图5 不同的磁针转速对毛刺去除的效果

红圈表示研磨前、后,突显毛刺的变化)

## 2.3 研磨时间对毛刺去除的影响

图6为不同的研磨时间对毛刺去除的效果,观测结果表明:利用磁力研磨法加工 30 s 后,微孔边缘的毛刺已基本被去除。为了确保工件的加工质量,综合考虑了研磨时间对毛刺去除的效果以及加工效率,确定了最佳的研磨时间为 60 s。

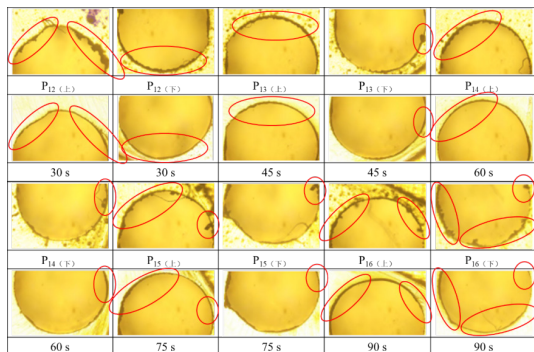


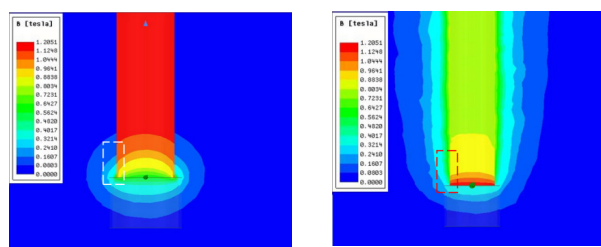
图6 不同的研磨时间对毛刺去除的效果

(红圈表示研磨前、后,突显毛刺的变化)

## 3 讨论

上述实验中,磁柱的充磁方向均为轴向充磁。在实验过程中,当主轴转速超过 1200 r/min 时,发现吸附在磁柱

上形成的“磁刷”会发生“飞溅”现象,并且主轴转速越高飞溅现象越明显。由于游离的磨料粒子在离心力的作用下易脱离磁场的束缚,因此需考虑通过增大磁场力来抑制磨料粒子的“飞溅”现象<sup>[7]</sup>。本文利用 ANSYS MAXWELL 有限元软件分别对轴向、径向充磁的磁柱进行了磁场分布和磁感应强度分析,结果如图7所示。



(a) 轴向充磁

(b) 径向充磁

图7 轴向充磁磁柱与径向充磁磁柱产生的磁场分布和磁感应强度的仿真对比

通过对比可以发现:轴向充磁情况下,磁柱的端面附近产生较大的磁感应强度,约为 0.64T;而磁柱的柱面附近产生较小的磁感应强度,约为 0.4T。相比于轴向充磁,径向充磁的磁柱柱面附近产生的磁感应强度约为轴向充磁的 1.6 倍。由于磁柱产生的磁场力随着磁感应强度的增大而增大,会使磁柱柱面吸附磁性磨料的能力提升、吸附磁性磨料的数量增多,提高了对工件的研磨效率<sup>[8]</sup>。因此,采用径向充磁的磁柱可有效地抑制由离心力引起的磨料粒子飞溅现象。

## 4 结语

本文基于工件的加工工艺分析了毛刺形成原因,并提出了一种磁力研磨法用于微孔边缘毛刺的去除。通过参数实验、工件表征以及对磁柱充磁方式的磁场有限元仿真分析与讨论,得出以下结论:

(1) 通过磁力研磨实验,证明了该加工法可以有效去除微孔边缘毛刺;并且相比于人工毛刺去除,毛刺的去除效率显著提升。

(2) 通过参数的单因素对比实验,明确了磁性磨料组合、主轴转速以及研磨时间的最优条件,即采用 #45 铁粉与 #1000 白刚玉(质量比为 1:2)的磁性磨料组合,磁柱转速为 1000 r/min、研磨时间为 60 s 条件下,微孔边缘的毛刺去除效果最佳。

(3) 利用 ANSYS MAXWELL 有限元软件分别分析了轴向、径向充磁磁柱的磁场分布和磁感应强度,分析结果表明:相比于轴向充磁的磁柱,采用径向充磁方式可有效地抑制由离心力引起的磨料粒子飞溅现象。

**参考文献:**

- [1] 王贵成. 机械加工中毛刺的影响及其控制[J]. 中国安全科学学报, 1996,6(2):40-45.
- [2] 陈世平, 罗辑, 石军. 金属切削加工中的毛刺问题[J]. 机械设计与制造, 2004,(01):99-100.
- [3] 姚敏茹, 万宏强, 李福援. 机械零件毛刺控制及去除工艺现状[J]. 新技术新工艺, 2005(12):20-22.
- [4] 杨校可. 关于机械加工中毛刺的影响分析及其控制探讨[J]. 时代农机, 2018,45(10):80+83.
- [5] 李益民, 高云峰, 杨建军. 磁力研磨法的原理及其应用[J]. 机械工艺师, 1990(12):24-27.
- [6] 路家斌, 余娟, 阎秋生. 磁辅助超精密加工技术[J]. 机械制造, 2006(01):29-32.
- [7] 焦安源, 张龙龙, 陈燕等. 磁粒研磨 TC4 孔棱边毛刺的机理及试验研究[J]. 表面技术, 2019,48(03):283-290.
- [8] 杨燕珍, 孙旭, 李嘉旻等. 利用双磁极平面磁力研磨法对单晶硅表面的抛光实验研究[J]. 机械科学与技术, 2024,43(6):1048-1055.
- 基金项目: 福建省自然科学基金(批准号: 2024J01852)和福建省教育厅中青年项目(批准号: JAT210448)。