

# 渐开线槽磁极改进磁粒研磨毛刺效果的试验研究

杨子彧<sup>a</sup>, 焦安源<sup>b</sup>, 丁浩东<sup>a</sup>, 韩冰<sup>a</sup>

(辽宁科技大学 a.机械工程与自动化学院 b.应用技术学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** 目的 改善传统磁粒研磨去除毛刺时磁感应强度变化率小、磨粒飞溅损耗严重等问题, 设计带渐开线槽的磁极, 通过优化磁场分布和逆渐开线展开转动的方式提高毛刺去除的效率和质量。方法 基于渐开线原理, 设计不同基圆直径的磁极沟槽, 仿真了磁感应强度云图及磁感应强度曲线, 并与传统磁极进行平面研磨对比试验, 通过综合分析优选磁极槽类型。对镍基高温合金 GH3128 螺旋铣孔板开展磁粒研磨孔切出毛刺的试验研究, 分析主轴转速、磨粒填充量和磨粒粒径对孔缘毛刺去除的影响, 得到渐开线槽磁极磁粒研磨孔切出毛刺的较佳工艺参数方案。结果 使用基圆直径为 8 mm 的渐开线槽磁极研磨平面时, 其有效研磨面积更大, 在主轴转速为 1 600 r/min、磁性磨粒平均粒径为 250  $\mu\text{m}$ 、进给速度为 0.05 mm/s、磁性磨粒填充量为 30 g、加工间隙为 2 mm 的工艺条件下研磨镍基高温合金 GH3128 孔板 18 min 后, 孔切出毛刺平均高度由原始的 29.6  $\mu\text{m}$  降至 10.2  $\mu\text{m}$ , 毛刺的平均宽度从原始的 288.6  $\mu\text{m}$  降至 169.4  $\mu\text{m}$ 。结论 带渐开线槽的磁极改善了磁感应强度变化梯度, 抑制了磁性磨粒的飞溅损耗, 加速了磨粒切削刃的更新, 使研磨效率和研磨均匀性都得到提高。此外, 该加工方案可为其他类型毛刺的去除提供参考。

**关键词:** 磁粒研磨; 磁极; 镍基高温合金; 孔; 毛刺去除; 渐开线槽

中图分类号: TG580.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)04-0329-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.029



扫码查看文章讲解

## Experimental Study on Improving Grinding Burrs Effect by Magnetic Abrasive Finishing Using Magnetic Pole with Involute Grooves

YANG Zi-yu<sup>a</sup>, JIAO An-yuan<sup>b</sup>, DING Hao-dong<sup>a</sup>, HAN Bing<sup>b</sup>

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

**ABSTRACT:** There are many deficiencies for burrs removal in the traditional method by magnetic abrasive finishing, such as the small change rate of magnetic induction intensity in the grinding area, the splash and serious loss of magnetic abrasives. The work aims to design the magnetic pole of involute groove based on the involute principle, optimize the magnetic field distribution, and rotate the magnetic pole against the involute expansion direction, to improve the efficiency and quality of burrs

收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2022-10-25

Received: 2022-05-09; Revised: 2022-10-25

基金项目: 辽宁省教育厅项目 (LJKZ0295); 辽宁省自然科学基金 (2019-ZD-0029)

Fund: Project of Liaoning Province Department of Education (LJKZ0295); Natural Science Foundation of Liaoning Province (2019-ZD-0029)

作者简介: 杨子彧 (1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Biography: YANG Zi-yu (1996-), Male, Master, Research focus: precision and special processing.

通讯作者: 焦安源 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为磁粒研磨加工、精密铣削加工及相关自动化设备开发。

Corresponding author: JIAO An-yuan (1978-), Male, Doctor, Professor, Research focus: magnetic abrasive grinding, precise milling and Development of automation equipment.

引文格式: 杨子彧, 焦安源, 丁浩东, 等. 渐开线槽磁极改进磁粒研磨毛刺效果的试验研究[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 329-337.

YANG Zi-yu, JIAO An-yuan, DING Hao-dong, et al. Experimental Study on Improving Grinding Burrs Effect by Magnetic Abrasive Finishing Using Magnetic Pole with Involute Grooves[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 329-337.

removal. The grinding area of the involute groove pole was compared with that of the traditional unslotted pole. The effective area of the unslotted pole accounted for about 60.7%, and the effective area of the involute groove pole accounted for more than 90%. Magnetic field simulation of magnetic poles with involute groove for three different base circle diameters: 4, 8 and 24 mm was carried out. A radial reference line with length of 50 mm was drawn at 2 mm above the magnetic pole model, and the variation law of magnetic induction intensity was analyzed and compared. Compared with other magnetic poles, the magnetic field distribution of the involute groove pole with a base circle of 8 mm was more uniform and the magnetic induction intensity gradient changed more greatly. Therefore, the magnetic pole of this specification was selected for subsequent experiments. Using response surface method (RSM), an experimental study on the burrs removal by magnetic abrasive finishing on the helical-milling holes of nickel-based superalloy GH3128 plate was carried out. The effects of spindle speed, abrasives filling amount and average abrasives size on the finishing effect were analyzed, and the optimum combination of process parameters were selected. It was verified by experiments that the average height of the cutting burrs decreased from the original 29.6  $\mu\text{m}$  to 10.2  $\mu\text{m}$ , and the average width of the burrs decreased from the original 288.6  $\mu\text{m}$  to 169.4  $\mu\text{m}$  after 18 min grinding for holes in nickel-based superalloy GH3128 plate by involute groove pole with base circle diameter of 8 mm at spindle speed of 1 600 r/min, average abrasives size of 250  $\mu\text{m}$ , feed speed of 0.05 mm/s, filling amount of magnetic abrasives of 30 g and machining gap of 2 mm. The results show that the magnetic pole with involute groove can improve the change rate of magnetic induction intensity, suppresses the splash loss of magnetic abrasives, accelerate the cutting edge renewal of abrasives, and improve the grinding efficiency and uniformity. In addition, the machining plan can provide reference for the removal of other types of burrs.

**KEY WORDS:** magnetic abrasive finishing; magnetic pole; nickel-based superalloy; hole; burr removal; involute grooves

采用机械加工金属零件后残留在零件表面的余屑被称为金属毛刺<sup>[1]</sup>。金属毛刺的存在极大地影响工件的定位精度,造成整体不稳定性和耐用性降低,进而影响加工效率和整体质量<sup>[2]</sup>。尤其在加工精度要求较高或尺寸较小的零件时,毛刺的存在会大幅降低零件的使用性能,甚至会损坏零件<sup>[3-4]</sup>。为了减小毛刺对零件的不良影响,减少额外成本<sup>[5]</sup>,通常采用人工、机械、电解(化学)<sup>[6]</sup>、热能(高温)<sup>[7]</sup>和磁粒研磨<sup>[8]</sup>等去毛刺方法。磁粒研磨去毛刺与传统去毛刺的方式不同,它属于一种柔性加工方式,即磁性磨粒在外加磁场中沿磁力线方向有规律地排布,形成柔性且具有一定刚度的磁粒刷,受研磨压力的作用被压覆在工件表面,随着磁极的运动对工件表面进行研磨,进而去除工件表面的毛刺<sup>[9-10]</sup>。在加工过程中,磁性磨粒易受到磁场强度变化的影响,当磁场强度变化较大时,磁性磨粒翻滚剧烈,促使切削刃不断更新,研磨效率提高;当磁感应强度变化较小时,磁性磨粒翻滚更新性能较弱,这会大大降低研磨效率<sup>[11]</sup>。另外,磁极形状、磁极排布、加工间隙等也是影响加工的主要因素<sup>[12]</sup>。焦安源等<sup>[13]</sup>使用偏心磁粒研磨方式对 TC4 钛合金孔棱边毛刺进行了研磨试验,基于研究结果对工艺参数进行了优化组合,使其研磨效率提升了 25.0%,工件的表面形貌得到明显改善。

研究表明,在永磁极的研磨面设计沟槽,可以改变磁场强度和磁场梯度,从而提高磁性磨粒在加工区域内的研磨力<sup>[14]</sup>。邓曰明等<sup>[15]</sup>在磁极表面开矩形槽,改善了加工区域内磁场强度的分布,提高了镍钛合金

血管支架管材内壁的表面质量。陈春增等<sup>[16]</sup>通过对磁极开槽,进行磁极优化,获得了较高的研磨效率和表面质量。文中在传统磁极研磨面开槽的基础上,提出一种在磁极研磨面开渐开线槽的新方式,并开展毛刺去除试验研究。该试验方案采取磁极转向与渐开线展开方向相反的运动方式,以抑制磁粒在离心力作用下的脱离,实现回笼聚集,维持磁粒刷的刚度,从而达到提升毛刺去除效率、提高研磨质量的目的。

## 1 渐开线槽磁极研磨机理

### 1.1 磁性磨料受力分析

磁粒研磨去除毛刺的加工过程,即磁性磨粒在磁场作用下沿磁力线排布,形成磁粒刷,并将毛刺层层包裹,从而对毛刺进行研磨加工。在研磨过程中,磁性磨料随着磁极的转动而不断翻滚更新,通过其切削刃对毛刺的碰撞、刻划,实现切削加工。另外,磁粒刷将毛刺紧紧包裹,对毛刺产生挤压和裹挟等作用,部分毛刺易发生疲劳折断或被裹挟拉断。磁粒刷由磁性磨粒汇聚而成,选取单颗磁性磨粒进行受力分析(如图 1 所示), $n$  为磁极的转速,磁性磨粒本身的重力为  $G$ ;在磁场中受到的磁场力  $\Delta F$  可以分解为  $x$  轴和  $y$  轴 2 个方向的分力  $\Delta F_x$ 、 $\Delta F_y$ <sup>[17-19]</sup>;磨粒随着磁极旋转,此时还受到离心力  $F_c$  的作用。最后,在这些力的共同作用下毛刺被去除。

由于单颗磁性磨粒的质量较小,因此在计算过程中可忽略重力  $G$ ,则磁性磨粒所受力可简化为式(1)。

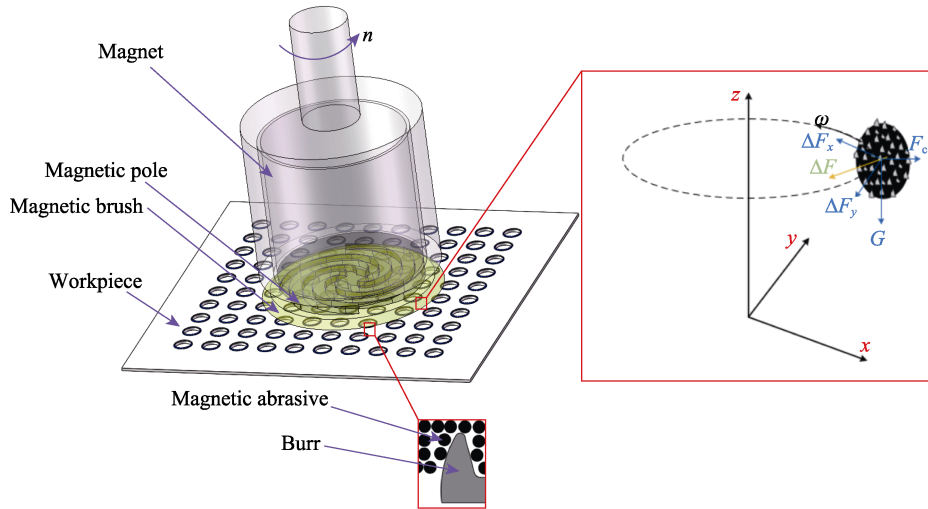


图 1 磁性磨粒受力分析  
Fig.1 Force analysis of magnetic abrasives

$$\begin{cases} \Delta F_x = V_0 \chi H \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) \\ \Delta F_y = V_0 \chi H \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right) \\ \Delta F = \sqrt{\Delta F_x^2 + \Delta F_y^2} \\ F_c = m \frac{v^2}{r} = m \omega r^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\chi$  为磁性磨粒的磁化率;  $V_0$  为磁性磨粒的体积;  $H$  为磁性磨粒所受的磁场强度;  $\frac{\partial H}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial H}{\partial y}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的磁场梯度<sup>[20]</sup>;  $v$  为磁性磨粒的线速度;  $r$  为磁性磨粒的旋转半径;  $\omega$  为磁性磨粒的角速度。

在研磨时, 单个磨粒施加给工件的研磨力为  $F_N$ , 表达式如式 (2) 所示。

$$\begin{aligned} F_N &= \Delta F \cos \theta + G \cos \alpha + F_c \\ &= \Delta F \cos \theta + G \cos \alpha + m \omega r^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为磁场力与法向作用力的夹角;  $\alpha$  为重力与法向作用力的夹角;  $\mu$  为摩擦因数。

在磁粒研磨加工时需要选择合适的主轴转速, 研磨间隙一般为 1~2 mm。若将单个磁性磨粒视作直径为  $d$  的球体, 则磁性磨粒的体积可表示为  $V_0 = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{1}{6} \pi d^3$ 。铁磁相与研磨相组成了磁性磨粒, 使得铁磁相占磁性磨粒的体积分数为  $\beta$ , 铁磁相的体积可表示为  $V_f = \beta \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{\beta}{6} \pi d^3$ , 对式 (2) 进一步推导后, 表达式如式 (3) 所示。可知, 磁性磨粒对工件表面的研磨压力  $P$  和磁感应强度  $B$  成正比。

$$P = \frac{B^2}{4\mu_0} \cdot \frac{3\pi(\mu_r - 1)\beta}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)\beta} \quad (3)$$

式中:  $\mu_0$  为空气磁导率;  $\mu_r$  为 Fe 的相对磁导率。通过在磁极表面加工沟槽, 可以改变磁极表面的

磁场分布, 改善磁粒刷的形态和刚度, 从而提高研磨压力  $P$ 。张国富<sup>[21]</sup>在磁粒研磨去除高温镍基合金 GH3128 群孔毛刺中, 仿真并对比了锥形槽、环形槽、矩形槽等几种槽型, 结果表明, 开槽尺寸为 2 mm×2 mm 的矩形槽, 其磁感应强度明显增大, 解决了磁场中磁性磨粒边缘化效应问题。仿真结果表明, 在一定程度上实现了磁场强度的优化分布。为了进一步提升研磨效率和质量, 文中基于渐开线的形成原理, 设计了渐开线槽磁极方案, 以改进磁感应强度和磁场分布。如图 2 所示, 渐开线  $AK$  由直线  $KN$  在基圆上做纯滚动形成, 渐开线的起点位于基圆上, 并逐渐向外延伸。直角坐标系下渐开线的表达式如式 (4) 所示, 可知基圆的大小决定了渐开线的形状。这里选取  $\phi 40$  mm×5 mm 的磁极, 分别以基圆直径为 4、8、24 mm 由磁极中心加工出均布的 4 条渐开线槽, 槽的高度和宽度均为 2 mm, 并进行了比较。

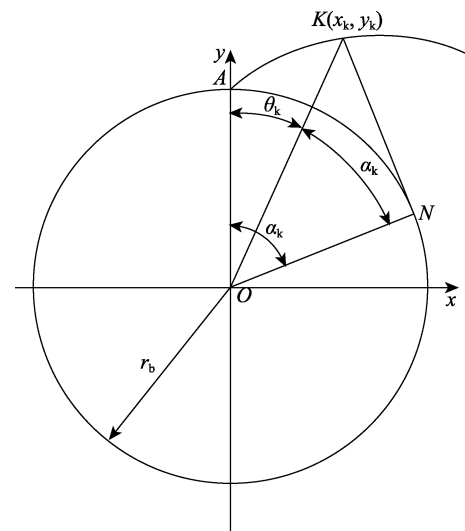


图 2 渐开线的形成  
Fig.2 Formation of involute

$$\begin{cases} x_k = r_b \sin u_k - r_b u_k \cos u_k \\ y_k = r_b \cos u_k - r_b u_k \sin u_k \\ u_k = \theta_k + \alpha_k \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_k$  为渐开线横坐标;  $y_k$  为渐开线纵坐标;  $r_b$  为基圆半径;  $\theta_k$  为渐开线上  $k$  点的展角。

## 1.2 磁场仿真分析

为了比较在磁极端面沿渐开线制备矩形槽对磁场分布的影响,选定  $\phi 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的钕铁硼圆柱磁石与磁极相连接,对以上 3 个规格的磁极进行仿真比较分析。具体步骤:在 SolidWorks 软件中建立磁石与磁极的装配模型,再导入 Ansys Maxwell 中的 Maxwell 3D 模块,设定磁石为轴向充磁;绘制将二者完全包括在内的球形区域作为仿真实空间。将 2 个区

域进行布尔运算,最终确定边界条件;选中模型,使用自适应加密网格划分,网格的大小直接关系到计算的精确性。将磁极设置为四边形应变单元,将工件设置为  $0.1 \text{ mm}$  的正方体网格,节点数为 115 956 个,单元数为 95 352 个,迭代次数设置为 20,计算后其收敛精度可达  $0.1\%$ ;经自我检测后进行仿真计算,结果如图 3 所示。

对比图 3a—c 中的磁感应强度分布,可以明显看出,在基圆直径为  $24 \text{ mm}$  时,基圆边缘处呈深红色,磁感应强度高,而基圆中心呈浅蓝色,且占比较大,磁感应强度较低;基圆直径为  $4 \text{ mm}$  和  $8 \text{ mm}$  时,磁感应强度均沿渐开线槽向外扩散,有效解决了磁极边缘磁感应强度高、磁极中心磁感应强度低的问题,通过对比,在基圆直径为  $8 \text{ mm}$  时磁感应强度分布更加均匀。

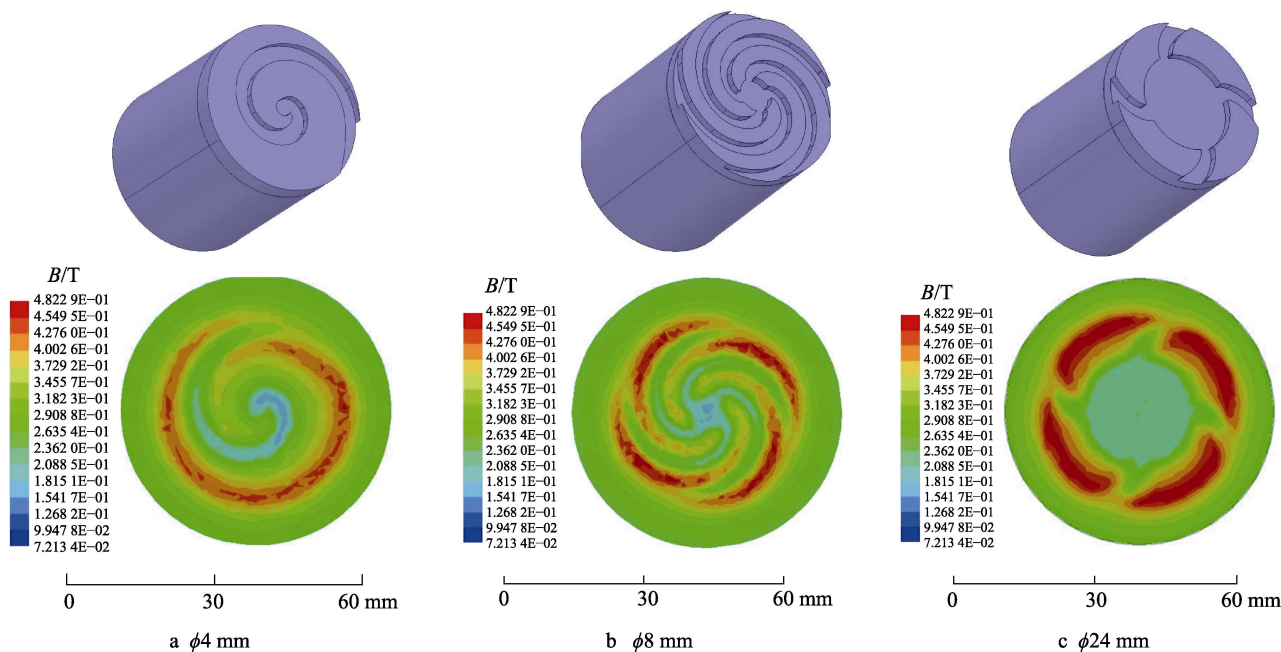


图 3 不同基圆直径的磁感应强度云图

Fig.3 Magnetic induction intensity pattern of different base circle diameters

## 1.3 磁感应强度分布云图对比分析

基圆直径不同时磁感应强度的径向分布曲线如图 4 所示。可以看出,在基圆直径不同时,磁感应强度的分布不同,且磁场梯度变化幅度存在明显差异。以基圆直径为  $8 \text{ mm}$  的渐开线槽磁极为例,在基圆直径上方  $2 \text{ mm}$  处设置与原点对称且长度为  $50 \text{ mm}$  的直线作为取样长度。在基圆直径为  $24 \text{ mm}$  时,磁感应强度的最高值为  $442.5 \text{ mT}$ ,但其分布如“浴盆”状,磁场梯度变化较小,导致磁性磨粒翻滚更新较慢,这不利于研磨。在基圆直径为  $4 \text{ mm}$  时,磁感应强度的最高值为  $440.9 \text{ mT}$ ,最低值为  $167.8 \text{ mT}$ ,其分布曲线变化明显,但变化频率较低。在基圆直径为  $8 \text{ mm}$  时,磁感应强度的最高值为  $421.3 \text{ mT}$ ,最低值为  $182.6 \text{ mT}$ ,分布曲线的变化更为明显,变化频率较大,即磁场梯

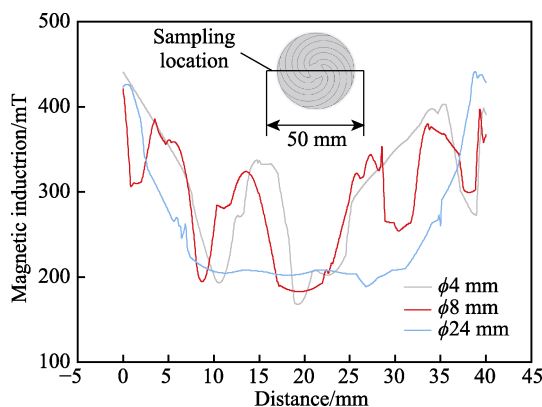


图 4 不同基圆直径的磁感应强度分布曲线

Fig.4 Magnetic induction intensity curves of different base circle diameters



度较强。在磁感应强度较大、磁场梯度较强时会促进磁性磨粒的翻滚更新,有利于切削刃的加工,这在一定程度上提高了研磨效率。

综合分析仿真结果可以看出,磁极磁场从中心向外侧扩散分布,并呈现明显由弱变强的趋势。在较大梯度磁场作用下,研磨压力会提高。另外,在磁极转向与渐开线槽展开方向相反时,形成的渐开线磁粒带会裹挟磨粒,并向中间区域聚集。这不仅可以抑制磨粒的飞溅损耗,也可缓解磁力刷刚度的下降,更有利于去除毛刺,因此文中选择基圆直径为 8 mm 的渐开线槽磁极来进行后续试验研究。

## 2 试验条件及结果分析

### 2.1 平面研磨试验

采用 JC3040 数控机床开展试验,试验装置如图 5 所示。将工件固定在数控铣床的工作台上,在磁极

与工件间预留 2 mm 的加工间隙。将磁性磨料与研磨液混合搅拌均匀后填充到加工间隙中,磁极上的磁性磨料沿着磁力线的方向形成柔性磁粒刷,磁粒刷表面为明显的渐开线槽形状。主轴带动磁粒刷旋转,从而实现对工件表面的研磨加工。首先选取未开槽磁极、米字槽磁极和渐开线槽磁极,在工艺参数为主轴转速 1 600 r/min、磁性磨粒平均粒径 250  $\mu\text{m}$ 、填充量 30 g 的工艺条件下,对 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 1 mm 的镍基高温合金 GH3128 板件进行平面研磨试验。在研磨 15 min 后,对比工件的表面质量和研磨区域面积,选取研磨效果较好的一组磁极进行后续的毛刺去除试验。

此试验采用广州市广精精密仪器生产的 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪,采用钻石触针无导头式 640  $\mu\text{m}$  线性范围传感器,有效灵敏度为 0.001  $\mu\text{m}$ ,最大测量长度为 50 mm,测量工件的最大高度为 300  $\mu\text{m}$ 。在相同试验条件下,对不同磁极的研磨区域进行对比,结果如图 6 所示。在研磨前,工件的表面粗糙度

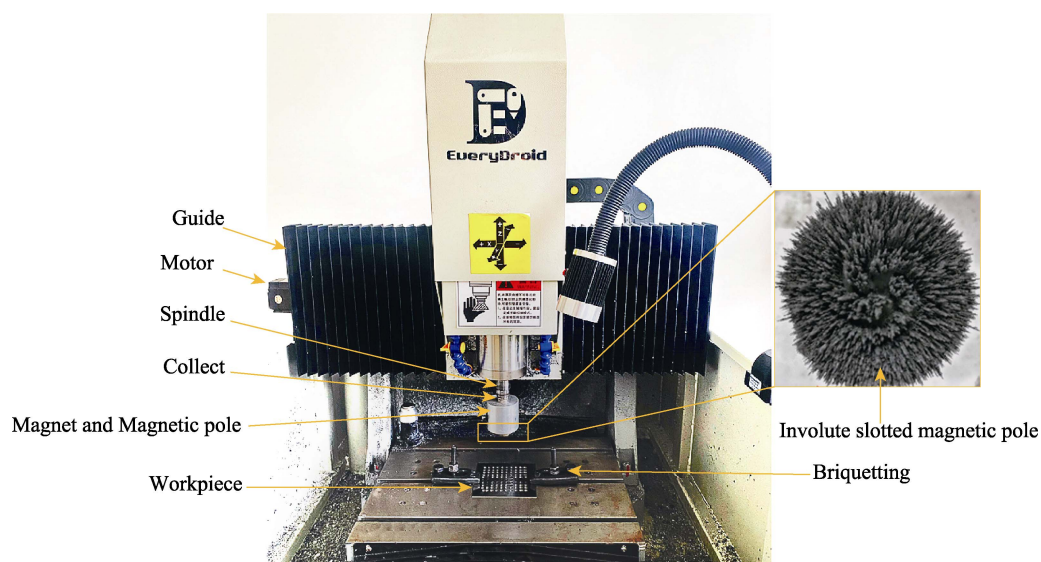


图 5 试验装置  
Fig.5 Test device

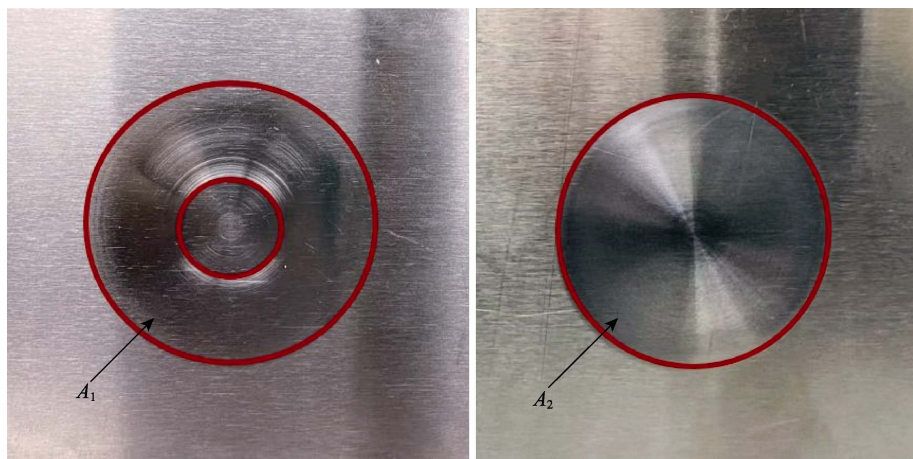


图 6 研磨区域对比  
Fig.6 Comparison of grinding area

为  $0.32\text{ }\mu\text{m}$ 。使用未开槽磁极研磨后,工件的表面粗糙度为  $0.17\text{ }\mu\text{m}$ ,表面粗糙度的下降率约为 47%。使用渐开线开槽磁极研磨后,工件的表面粗糙度为  $0.13\text{ }\mu\text{m}$ ,表面粗糙度的下降率约为 59%。通过对比可以看出,渐开线开槽磁极比未开槽磁极对毛刺的去除效率更高。对比研磨区域,未开槽磁极的有效研磨面积为  $A_1$ ,而渐开线开槽磁极的有效研磨面积为  $A_2$ ,通过计算有效研磨区域占比可知,未开槽磁极的有效研磨区域占比约为 60.7%,渐开线开槽磁极的有效研磨区域占比达到 90%以上。通过对比分析,使用渐开线开槽的磁极加工区域面积更大,且工件表面更加均匀,研磨效果更佳。由此选用基圆直径为 8 mm 的渐开线开槽磁极来进行镍基高温合金孔毛刺去除试验。

## 2.2 毛刺去除研磨试验

使用直径为 3 mm 的硬质合金铣刀对  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  镍基高温合金 GH3128 板件进行螺旋铣孔,孔径为 4.6 mm,孔距为 16 mm。选取制孔工件上同列的 3 个孔进行毛刺去除试验,研究孔出口毛刺高度和宽度的变化规律。这里选择基圆直径为 8 mm 的渐开线开槽磁极与未开槽磁极进行对比,试验装置如图 5 所示,具体试验条件如表 1 所示。

使用基恩士 VHX-500F 显微镜检测孔法线方向的高度和宽度,从而得到该位置毛刺的高度和宽度。磁极类型对毛刺平均高度和平均宽度的影响如图 7 所示,使用渐开线开槽磁极-1 号与未开槽磁极-2 号进行研磨对比试验,毛刺平均高度和平均宽度随着研磨时间的增加均呈逐渐下降的趋势。孔切出毛刺原始高度的平均值为  $29.6\text{ }\mu\text{m}$ ,毛刺原始宽度的平均值为  $288.6\text{ }\mu\text{m}$ 。在研磨开始 6 min 内,由于毛刺顶端的厚度较薄,磁粒刷切削刃的利用率较高,经过磁粒研磨后毛刺的高度下降得较快,渐开线开槽磁极研磨后孔毛

表 1 研磨试验条件  
Tab.1 Experimental conditions of grinding

Components	Numerical value
Workpiece ( $l\times b\times h$ )/mm	$100\times 100\times 1$
Axial magnet type $D$ /mm	(Nd-Fe-B magnet) $\phi 40\times 40$
Magnetic pole $D_1$ /mm	$\phi 40\times 5$ (Q235)
Pole slot size /mm	$2\times 2$
Spindle speed $n_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 600
Size of abrasives $d/\mu\text{m}$	250
Abrasive filling amount $M/\text{g}$	30
Feed rate $f/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	0.05
Machining gap $H/\text{mm}$	2
Acting time $t/\text{min}$	18
Grinding fluid $Q/\text{mL}$	6

刺平均高度的下降量为  $6.9\text{ }\mu\text{m}$ ,毛刺平均宽度的下降量为  $45.6\text{ }\mu\text{m}$ ;未开槽磁极研磨后孔毛刺平均高度的下降量为  $6.15\text{ }\mu\text{m}$ ,毛刺平均高度的下降量为  $37.15\text{ }\mu\text{m}$ 。随着加工的进行,在研磨结束前 6 min,1、2 号磁极研磨后孔毛刺的平均高度出现明显差异,渐开线开槽磁极研磨后孔毛刺的平均高度下降至  $14.2\text{ }\mu\text{m}$ ,下降幅度约为 52%,毛刺的平均宽度下降至  $207.1\text{ }\mu\text{m}$ ,下降幅度约为 28.2%;未开槽磁极研磨后两孔毛刺平均高度缓慢降至  $15.95\text{ }\mu\text{m}$ ,下降幅度约为 46.1%,毛刺的平均宽度降至  $226.05\text{ }\mu\text{m}$ ,下降幅度约为 21.7%。这是因为未开槽磁极存在一定的空心化问题,磁极边缘的磁感应强度较大,而磁极中心位置的磁场强度较低,磁极吸附的磨粒较少。另外,在加工过程中,磁性磨粒受到离心力的作用,发生了边缘聚集和飞溅损耗,致使参与研磨的磨粒减少,研磨区域不均匀,研磨力下降,进而导致研磨效果变差。

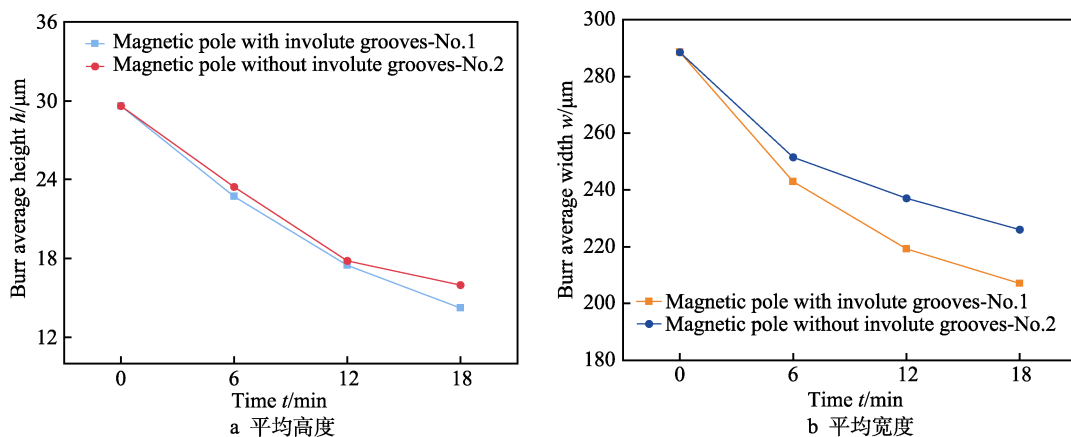


图 7 磁极类型对毛刺的影响

Fig.7 Effects of pole type on burrs: a) average height; b) average width

## 3 工艺参数对毛刺去除的影响

为了探究工艺参数对毛刺去除效果的影响,选择

主轴转速、磨粒填充量和磨粒平均粒径 3 种工艺参数进行响应面试验,具体试验装置见图 5。使用毛刺的高度和宽度来评价试验结果。建立响应面因素水平,

如表 2 所示。

表 2 因素水平  
Tab.2 Factor level

Test No.	Spindle Speed (A) $n_1/(r \cdot \min^{-1})$	Size of abrasives (B) $d/\mu\text{m}$	Abrasive filling amount (C) $M/\text{g}$
1	1 200	125	20
2	1 600	250	30
3	2 000	375	40

将 3 种工艺参数与毛刺高度分别进行多元回归拟合, 得到多元回归方程, 如式 (5) 所示。

$$y_{\text{毛刺高度}} = 10.2 + 1.51A - 0.4B + 0.5875C - 0.5AB + 0.225AC + 0.15BC + 4.21A^2 + 0.3875B^2 + 1.56C^2 \quad (5)$$

工艺参数对毛刺高度的影响规律如图 8 所示。当磨粒填充量为 30 g 时, 主轴转速和磨粒平均粒径对毛刺高度的影响如图 8a 所示。当主轴转速在 1 600 r/min 附近时, 毛刺高度较低。当主轴转速继续增大时, 磁性磨粒受到的磁场力逐渐小于磁粒的离心力, 磨粒失去磁场力的束缚, 少量磨粒被甩飞, 无法参与后续研磨, 导致研磨效果较差。当磨粒的平均粒径为 125 μm 时, 磨粒刷对毛刺的研磨压力不足, 毛刺的去除效率较低。当磨粒平均粒径为 375 μm 时, 研磨压力较大, 在研磨初期毛刺下降较快, 随着研磨的进行, 磁粒刷与毛刺的研磨间隙变大, 切削刃对毛刺的切削作用下降, 部分毛刺无法较好地研磨。在磨粒平均粒径为 250 μm 时, 主轴转速和磨粒填充量对毛刺高度的影响较大, 如图 8b 所示。当磨粒填充量小于 30 g 时, 磁极中心区域吸附的磨粒过少, 无法对毛刺进行有效研磨。当磨粒填充量过大时, 减小了研磨间隙, 使得磨粒的翻滚更新性能降低, 减弱了毛刺的去除效果。当磨粒填充量为 30 g、主轴转速为 1 600 r/min 时, 交点处的毛刺高度最低为 10.2 μm, 毛刺高度的下降

率约为 44.6%。在此工艺参数下, 毛刺研磨效果最佳。当主轴转速为 1 600 r/min 时, 磨粒填充量和磨粒平均粒径对毛刺高度的影响如图 8c 所示, 可以看出, 毛刺高度的曲面波动较小, 说明磨粒填充量和磨粒平均粒径对毛刺高度的影响较小。当磨粒填充量为 30 g、磨粒平均粒径为 250 μm 时, 毛刺高度出现了最小值。

将 3 种工艺参数与毛刺宽度进行多元回归拟合, 得到多元回归方程, 如式 (6) 所示。

$$y_{\text{毛刺宽度}} = 169.4 + 8.81A - 3.52B + 4.91C - 2.23AB + 4.85AC + 1.22BC + 40.8A^2 + 1.57B^2 + 8.9C^2 \quad (6)$$

毛刺宽度与毛刺高度的变化规律基本一致, 随着主轴转速的提高, 毛刺宽度呈现中间低、两边高的变化趋势, 毛刺宽度在磨粒平均粒径的坐标轴内波动较小, 即磨粒平均粒径对毛刺宽度的影响小于主轴转速。当主轴转速为 1 600 r/min、磨粒填充量为 30 g、磨粒平均粒径为 250 μm 时, 毛刺的平均宽度约为 169.4 μm, 毛刺平均宽度的下降率约为 28.9%。当磨粒平均粒径与磨粒填充量相互作用时, 毛刺宽度的最高点和最低点仅相差 14.5 μm, 说明磨粒填充量和磨粒平均粒径的工艺参数组合对毛刺宽度的影响较小。由此可见, 根据响应面法计算分析结果, 得到最佳的工艺参数组合: 主轴转速 1 600 r/min、磨粒粒径 250 μm、磨粒填充量 30 g。

使用基恩士 VHX-500F 型号显微镜对毛刺研磨前后的微观形貌进行检测, 结果如图 9 所示。研磨前孔的微观形貌如图 9a 所示, 可以看出, 孔的毛刺分布在棱边处, 毛刺的形状清晰可见, 且孔周围存在明显的划痕、凹坑等表面缺陷。使用最佳工艺参数组合研磨 18 min 后, 毛刺的平均高度约为 10.2 μm, 毛刺的平均宽度约为 169.4 μm, 微观形貌如图 9b 所示。与图 9a 相比, 毛刺明显减少, 工件表面划痕得到明

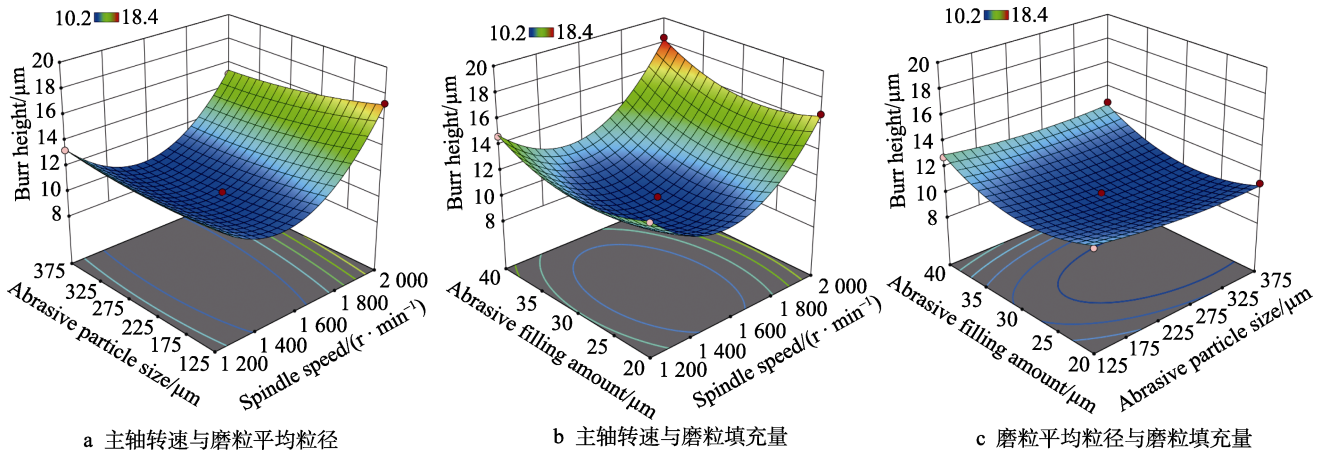


图 8 工艺参数组合对毛刺高度的影响  
Fig.8 Effects of process parameters combination of burr height: a) spindle speed and average particle size; b) spindle speed and abrasive filling amount; c) average particle size and abrasive filling amount



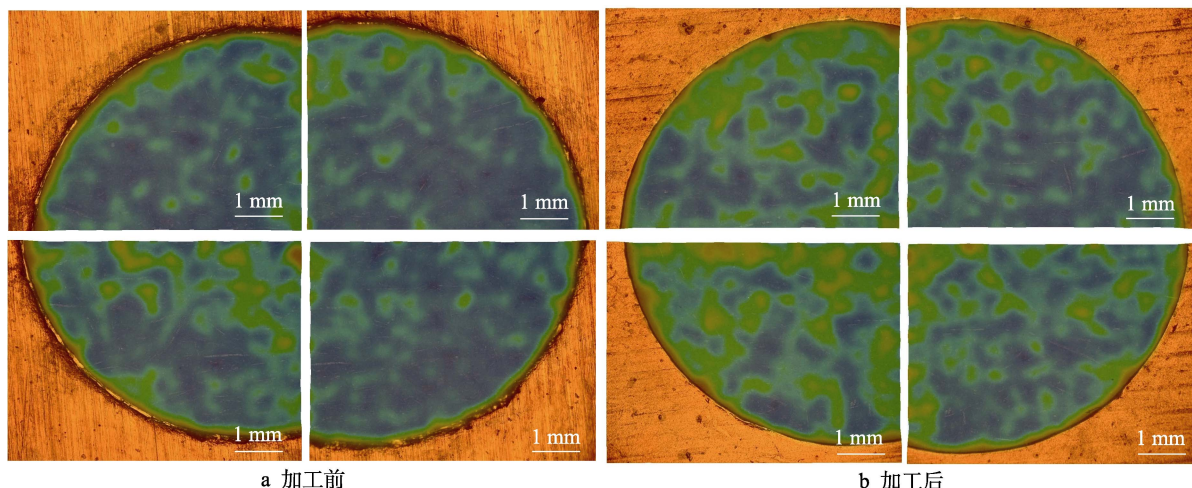


图9 加工前后孔缘的微观形貌

Fig.9 Micromorphology of hole edge before and after processing: a) before processing; b) after processing

显改善,工件表面尺寸较小的凹坑已被去除,孔的棱边无明显的倒圆角,孔内无翻入的毛刺,孔的边缘也未出现过磨现象,孔的完整性较好,工件的表面质量得到了较大提升。另外,对比米字形开槽磁极<sup>[22]</sup>在同等工艺参数组合下的研磨结果,在研磨加工 40 min 后,毛刺高度约为 20.5  $\mu\text{m}$ ,毛刺平均宽度约为 162.1  $\mu\text{m}$ 。由此可知,在达到相同研磨效果时,渐开线开槽磁极的研磨时间更短、效率更高。通过对比文献和试验验证可知,使用渐开线开槽磁极研磨去除毛刺的效率更佳、质量更好。

## 4 结论

1) 通过仿真分析不同基圆直径下渐开线开槽磁极的磁感应强度云图及分布曲线得出,当基圆直径为 8 mm 时,磁感应强度分布更均匀,且分布曲线变化更明显,磁场梯度更强。

2) 通过平面研磨对比试验可知,基圆直径为 8 mm 的渐开线开槽磁极的平面研磨效果好于未开槽磁极。通过镍基高温合金 GH3128 群孔切出毛刺去除对比试验,分析出切出毛刺的平均高度和平均宽度的变化规律,可知渐开线开槽磁极的研磨效率和毛刺去除质量均高于未开槽磁极。利用响应面法对渐开线槽磁极开展孔切出毛刺的去除试验研究,得到了最佳的工艺参数组合:主轴转速 1 600 r/min、磨粒粒径 250  $\mu\text{m}$ 、磨粒填充量 30 g、进给速度 0.05 mm/s、磁性磨粒填充量 30 g、加工间隙 2 mm。

### 参考文献:

- [1] 张浩,刘玉德,石文天,等.微细切削加工表面质量的研究综述[J].表面技术,2017,46(7):219-232.  
ZHANG Hao, LIU Yu-de, SHI Wen-tian, et al. Quality of Micro Machined Surface[J]. Surface Technology, 2017,

- 46(7): 219-232.
- [2] 刘斌,彭满华,邹仕放.制品表面毛刺去除技术综述[J].表面技术,2010,39(5):100-102.  
LIU Bin, PENG Man-hua, ZOU Shi-fang. Overview of Burr Removing Techniques[J]. Surface Technology, 2010, 39(5): 100-102.
- [3] 曲海军,王贵成,朱云明,等.金属切削毛刺生成机理与预报技术研究进展[J].煤矿机械,2007,28(11):9-11.  
QU Hai-jun, WANG Gui-cheng, ZHU Yun-ming, et al. Research Advance of Burr Formation Mechanism and Prediction in Metal Cutting[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(11): 9-11.
- [4] 姜俊,舒鑫,雍建华,等.金属切削毛刺形成与控制技术研究进展[J].工具技术,2021,55(7):3-10.  
JIANG Jun, SHU Xin, YONG Jian-hua, et al. Development of Metal Cutting Burr Formation and Control Technology[J]. Tool Engineering, 2021, 55(7): 3-10.
- [5] 骆彬,张开富,李原,等.钛板刚度对钻削轴向力和出口毛刺的影响[J].航空学报,2016,37(7):2321-2330.  
LUO Bin, ZHANG Kai-fu, LI Yuan, et al. Influence of Stiffness on Thrust Force and Exit Burr in Drilling Titanium Plates[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2321-2330.
- [6] 李豪威,李祥祥,常伟杰.纯钼与纯钛电化学去毛刺实验研究[J].组合机床与自动化加工技术,2020(4):139-141.  
LI Hao-wei, LI Xiang-xiang, CHANG Wei-jie. Experimental Study on Electrochemical Deburring of Pure Molybdenum and Titanium[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(4): 139-141.
- [7] 沈晓安.热能去毛刺的实验研究[J].航空精密制造技术,2010,46(4):35-37.  
SHEN Xiao-an. Experimental Research on Thermal Energy Deburring[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(4): 35-37.
- [8] 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(3):283-290.  
JIAO An-yuan, ZHANG Long-long, CHEN Yan, et al.



- Mechanism and Experimental Study of TC4 Hole Burr by Magnetic Particle Grinding[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 283-290.
- [9] YIN Shao-hui, SHINMURA T. Vertical Vibration-Assisted Magnetic Abrasive Finishing and Deburring for Magnesium Alloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(12/13): 1297-1303.
- [10] ZOU Y, SHINMURA T. Study on a New Plane Magnetic Abrasive Finishing Process by Application of a Constant Pressure Magnetic Brush[J]. Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 2009, 53: 31-34.
- [11] 朱子俊, 韩冰, 陈燕, 等. 复合磁极磁粒研磨平面机理及试验探究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 352-360.  
ZHU Zi-jun, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Mechanism Analysis and Experimental Study of Plane of Compound Magnetic Pole Magnetic Abrasive Lapping[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 352-360.
- [12] 赵杨, 陈燕, 吕旖旎, 等. 球形开槽磁极辅助研磨 H63 黄铜弯管内表面[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 360-367.  
ZHAO Yang, CHEN Yan, LYU Yi-ni, et al. Spherical Magnet with Ring Grooves Assisted Grinding Inner Surface of H63 Brass Bend Pipe[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 360-367.
- [13] 焦安源, 张国富, 丁浩东, 等. TC4 钛合金孔的磁粒研磨试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(9): 1304-1309.  
JIAO An-yuan, ZHANG Guo-fu, DING Hao-dong, et al. Experiment of Magnetic Abrasive Finishing on TC4 Titanium Alloy Hole[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(9): 1304-1309.
- [14] 崔运涛, 张桂香, 崔同磊, 等. 磁力研磨 75° 梯形开槽永磁极研究[J]. 制造技术与机床, 2020(8): 109-113.  
CUI Yun-tao, ZHANG Gui-xiang, CUI Tong-lei, et al. Research on Magnetic Grinding 75° Trapezoidal Slotted Permanent Magnet[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(8): 109-113.
- [15] 邓曰明, 赵玉刚, 宋壮, 等. 磁极开槽对磁粒研磨加工镍钛合金血管支架管材内壁表面质量的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 322-330.  
DENG Yue-ming, ZHAO Yu-gang, SONG Zhuang, et al. Study on Surface Quality of Inner Wall of Ni-Ti Alloy Cardiovascular Stents by Magnetic Abrasive Finishing by Magnetic Pole Slotting[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 322-330.
- [16] 陈春增, 张桂香, 赵玉刚. 磁力研磨加工的永磁极结构优化设计[J]. 现代制造工程, 2017(1): 7-11.  
CHEN Chun-zeng, ZHANG Gui-xiang, ZHAO Yu-gang. Simulation Design of Permanent Magnetic Pole on Magnetic Abrasive Finishing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(1): 7-11.
- [17] NATSUME M, SHINMURA T. Study on the Mechanism of Plain Magnetic Abrasive Finishing Process (Elucidation of Normal Force Characteristics)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 2008, 74(737): 212-218.
- [18] 尹韶辉. 磁场辅助超精密光整加工技术[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2009: 17-24.  
YIN Shao-hui. Magnetic Field Assisted Ultra-Precision Finishing Technology[M]. Changsha: Hunan University Press, 2009: 17-24.
- [19] 吴金忠, 邢百军, 邹艳华, 等. 低频交变磁场超精密平面磁力研磨加工研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 281-289.  
WU Jin-zhong, XING Bai-jun, ZOU Yan-hua, et al. Ultra-Precision Surface Magnetic Grinding by Low Frequency Alternating Magnetic Field[J]. Surface Technology, 2018, 47(11): 281-289.
- [20] 王金龙, 陈燕, 张泽群, 等. 瓦形磁极对磁粒研磨加工管件内表面的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 158-166.  
WANG Jin-long, CHEN Yan, ZHANG Ze-qun, et al. Influence of Tile Type Magnetic Pole on Inner Surface of Magnetic Abrasive Finishing Grinding Pipe Fittings[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 158-166.
- [21] 张国富. 基于磁粒研磨法去除群孔棱边毛刺的机理及实验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021: 34-36.  
ZHANG Guo-fu. Mechanism and Experimental Research of Removing Edge Burrs of Group Holes Based on Magnetic Abrasive Finishing[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2021: 34-36.
- [22] 丁浩东, 张国富, 焦安源, 等. 磁粒研磨镍基高温合金群孔切出毛刺的研究[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 82-89.  
DING Hao-dong, ZHANG Guo-fu, JIAO An-yuan, et al. Study on Exit Burrs in Group Holes of Nickel-Based Superalloy by Magnetic Abrasive Finishing[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(4): 82-89.

责任编辑: 彭颀