

用于阀芯类零件去毛刺的磁极板 优化设计与实验研究

张露匀^{1,2}, 丁宇亭³, 李文辉^{1,2}, 丁忠军³, 李秀红^{1,2}, 李唯东^{1,2}, 李博^{1,2}

(1.太原理工大学 机械与运载工程学院, 太原 030024; 2.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024; 3.北京精密机电控制设备研究所, 北京 100000)

摘要: **目的** 为解决阀芯类零件节流边毛刺去除不均匀和效率低下的问题, 对磁极板尺寸和曲率进行规律性研究和实验验证。**方法** 首先, 用 Maxwell 仿真软件对磁极板的各个参数进行规律性仿真, 得出合适的磁极板尺寸; 其次, 为提高加工区域的磁感应强度值, 设计了曲面磁极板, 并对其相关参数进行仿真; 最后对优化后的装置进行磁感应强度测试, 并使用液体磁性磨具对 45 钢和阀芯棱边毛刺进行去除实验。**结果** 根据仿真结果发现, 磁极板长度比工件大 20 mm 时, 工件轴向磁场分布最均匀, 磁极板厚度对磁场影响较小, 磁极板宽度应根据加工间隙进行选择。曲面磁极板可以加强加工区域的磁感应强度值, 曲率半径越小, 加工区域获得的磁感应强度值越大, 其中半圆形磁极板效果最佳。对装置的磁感应强度测试也表明, 将工件置于磁场中后, 其表面磁感应强度值最高达 600 mT 左右, 满足加工需求。最后通过加工实验发现, 在转速为 500 r/min 的条件下, 阀芯节流边的毛刺去除效果理想, 且轴向加工均匀。**结论** 该装置可以对阀芯这类磁性回转类零件产生良好的加工效果。

关键词: 阀芯类零件; Maxwell; 液体磁性磨具; 磁极板参数; 磁感应强度; 毛刺

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0342-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.040

Optimal Design and Experimental Study of Magnetic Pole Plate for Deburring Spool Parts

ZHANG Lu-yun^{1,2}, DING Yu-ting³, LI Wen-hui^{1,2}, DING Zhong-jun³,
LI Xiu-hong^{1,2}, LI Wei-dong^{1,2}, LI Bo^{1,2}

(1.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan 030024, China;

3.Beijing Institute of Precise Electro Mechanic Controls, Beijing 100000, China)

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-10-19

Received: 2020-01-03; Revised: 2020-10-19

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(201802038); 山西省青年科技研究基金(201901D211016); 山西省自然科学基金(201701D121076)

Fund: Supported by Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institution in Shanxi (201802038), Natural Science Foundation for Young Scientists of Shanxi Province, China (201901D211016), The Natural Science Foundation of Shanxi Province of China (201701D121076)

作者简介: 张露匀(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。

Biography: ZHANG Lu-yun (1995—), Female, Master, Research focus: finishing technology of the precision surface.

通讯作者: 李文辉(1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。邮箱: wenhui_li7190@126.com

Corresponding author: LI Wen-hui (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: Finishing technology of the precision surface. E-mail: wenhui_li7190@126.com

引文格式: 张露匀, 丁宇亭, 李文辉, 等. 用于阀芯类零件去毛刺的磁极板优化设计与实验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 342-350.

ZHANG Lu-yun, DING Yu-ting, LI Wen-hui, et al. Optimal design and experimental study of magnetic pole plate for deburring spool parts[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 342-350.

ABSTRACT: The work aims to carry out regularity study and experimental verification on the size and curvature of magnetic pole plate to solve the non-uniformity and low efficiency in deburring of throttling edge of spool parts. Firstly, the Maxwell software was used to simulate the changes in different parameters of magnetic pole plate, and then the appropriate size of the magnetic pole plate was obtained. Secondly, in order to improve the magnetic induction intensity in the processing area, curved magnetic pole plate was designed, and the related parameters were simulated and analyzed. Finally, the magnetic induction intensity of the improved device was measured, and the edge burrs of 45 steel and spool were removed by fluid magnetic abrasive. According to the simulation results, when the length of the magnetic pole plate was 20 mm larger than the workpiece, the axial magnetic field distribution of the workpiece was the most uniform, and the thickness of the magnetic pole plate had little influence on the magnetic field. The width of the magnetic pole plate should be selected according to the machining gap. The magnetic induction intensity in the processing area could be enhanced by the curved magnetic pole plate. The smaller the radius of curvature was, the larger the value of magnetic induction intensity was, among which the semicircular magnetic pole plate had the best effect. The magnetic induction intensity test of device showed that after the workpiece was placed in the field, the magnetic induction intensity of the spool surface in the processing area could reach up to 600 mT, which met the processing requirements. Finally, it was found that when the speed of workpiece reached 500 r/min, the deburring effect of throttling edge of spool parts was ideal and the axial processing was even. The device has good processing effect on the magnetic rotating parts such as spool.

KEY WORDS: spool parts; Maxwell; fluid magnetic abrasives; magnetic pole plate parameters; magnetic induction intensity; burr

零件表面由于各种原因形成的毛刺是最常见的一种表面缺陷,其存在会降低整个机械系统的可靠性和稳定性^[1]。尤其在航天航空等高速、高压,要求低噪声、高可靠性的工作环境中,如果阀芯等液压产品的毛刺脱落,并滞留于各液压元件微小的工作间隙内,将影响其配合精度,严重的还会引起流体紊流或层流,降低系统的工作性能^[2]。同时航天航空液压产品种类多、批量小,且其材料经过特殊的热处理后,硬度较高,进一步增大了毛刺的去除难度。目前,阀芯等精密偶件的毛刺去除一般采用人工清理,用涂有细研磨膏的研磨套在工件外圆上轻轻转动,或用竹片和烧结油石反复多次研磨尖边处。这些方法虽可去除部分毛刺,但效率低下,且无法保证各个位置加工的一致性^[3]。所以如何高效率、高质量、均匀地去掉阀芯节流边处毛刺,已经成为当前业界急需解决的问题。

液体磁性磨具去毛刺技术是一种非传统的精密表面光整加工方法。该方法具有对工件表面适应性强、可控性好、温升小且加工质量高等优点^[4],用途广泛^[5-8],目前国内外已经有很多学者对其进行过深入的研究^[9-10]。李唯东等人^[11-14]对磁场发生装置进行改进,并通过了仿真和实验验证。孙恒五^[15]使用液体磁性磨具对圆柱试件内外表面进行加工,提出了评价指标与加工工艺参数,验证了液体磁性磨具表面光整加工技术的可行性。Kheradmand 等人^[16]发现,即使在磁感应强度值低于 0.2 T 时,也可以在足够的加工时间下使圆柱形工件的 Ra 值降低 60%。李益民、焦安源等人^[17-21]也对磁性磨具去毛刺的各相关因素进行了理论分析和实验探究,均达到了良好效果。太原理工大学表面光整技术研究所多年来致力于液体磁

性磨具去毛刺技术的研究,已针对很多实际问题在理论研究、装置设计、工艺参数优化方面等进行了大量模拟和实验研究。该技术可以用于加工阀芯这种形状复杂、精度要求高的精密偶件。但以上研究多数针对液体磁性磨具光整加工的原理和各因素对加工效果的影响规律,极少涉及对光整加工均匀性的改进。此外,考虑到阀芯零件对表面质量的高要求,本文对液体磁性磨具光整加工的均匀性进行了深入研究。

磁场发生装置是实现液体磁性磨具光整加工的关键,以往的电磁场发生装置磁极板尺寸普遍较小,工件轴向表面磁场分布不均匀,导致无法同时实现对各个型号的阀芯零件的均匀加工。但若增大磁极板尺寸,则会增加装置的漏磁,从而削弱装置性能,降低加工效率。本文基于以往的电磁场发生装置,结合阀芯类零件的加工需求,通过对磁极板各项参数的模拟仿真,设计了可用于阀芯类零件去毛刺的磁极板,并结合理论计算,设计了一套磁场发生装置,最后进行了实验验证。

1 液体磁性磨具去毛刺原理及对磁场的要求

液体磁性磨具是一种同时拥有导磁性能和加工性能的黏稠状悬浮液。不施加磁场时,液体磁性磨具中的各项微粒处于自由运动状态,施加磁场后,其中的磁性微粒迅速被磁化,沿磁感线方向排列为链状结构,同时将绿碳化硅等非磁性微粒夹持在链间。液体磁性磨具光整加工过程中,工件在充满液体磁性磨具的容器中进行回转、往复等运动,利用液体磁性磨

具在磁场作用下所产生的作用力,使其对工件表面产生微量磨削、挤压和滑擦等作用,达到去除毛刺的目的^[22]。加工原理如图1所示。

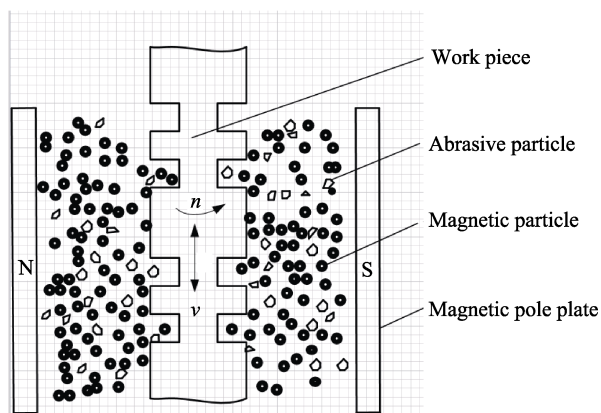


图1 液体磁性磨具加工原理
Fig.1 Processing principle of fluid magnetic abrasives

结合阀芯零件规格多、加工要求高等特点,磁场发生装置的设计应同时满足以下两个条件:①加工区域磁场强度满足液体磁性磨具的加工需求;②工件表面加工区域磁场分布均匀,以保证阀芯轴向加工的一致性。

2 磁极板设计及仿真

电磁场发生装置所产生的磁场强弱主要取决于线圈匝数和装置结构。但线圈匝数过多会导致装置发热严重,影响使用寿命。在匝数一定的情况下,改变磁极板尺寸和形状均可通过影响加工区域磁场强度和磁场分布,而改变液体磁性磨具对工件的作用力,进而影响加工效果。LI等人^[23]在探究N、S极磁极头间的最优角度时,验证了Maxwell软件的可靠性。因此本文针对阀芯类零件的加工需求,运用该软件对磁极板尺寸、形状等参数进行模拟仿真,分析各个参数对磁场的影响,从而得出合理的磁极板参数。

为了方便调节磁极板间距来适应不同规格的阀芯类零件加工,选择对位式磁场发生装置(即两磁极板夹角为180°)。仿真模型如图2所示,仿真结果从两个角度进行分析:1)首先通过仿真云图对比不同参数下磁场的分布和强弱;2)其次通过对比磁场内关键线段的磁感应强度值,以进一步分析。取值线段位置如图3所示:线①垂直于磁极板,两端点分别距

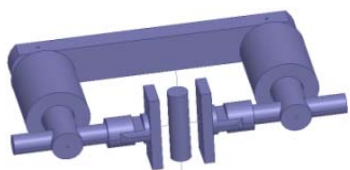


图2 仿真模型
Fig.2 Simulation model

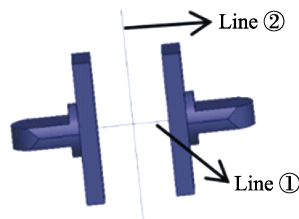


图3 取值线段位置示意图
Fig.3 Schematic diagram of position of value line segment

磁极板5 mm;线②平行于磁极板,为全面分析磁极周围磁场,线②长度大于磁极板长度,为260 mm,两线段交叉于两磁极板中心。

2.1 磁极板尺寸

阀芯类零件的加工要求是,去除外圆各环槽口处毛刺,并保证圆周各处加工均匀,因此首先对磁极板长宽高(图4)进行模拟仿真,选出使加工区域磁场分布最均匀、强度最高的磁极板参数。

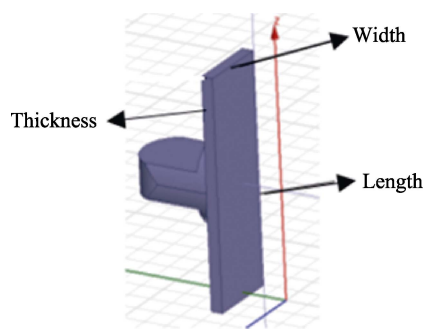


图4 磁极板示意图
Fig.4 Schematic diagram of magnetic pole plate

2.1.1 磁极板长度

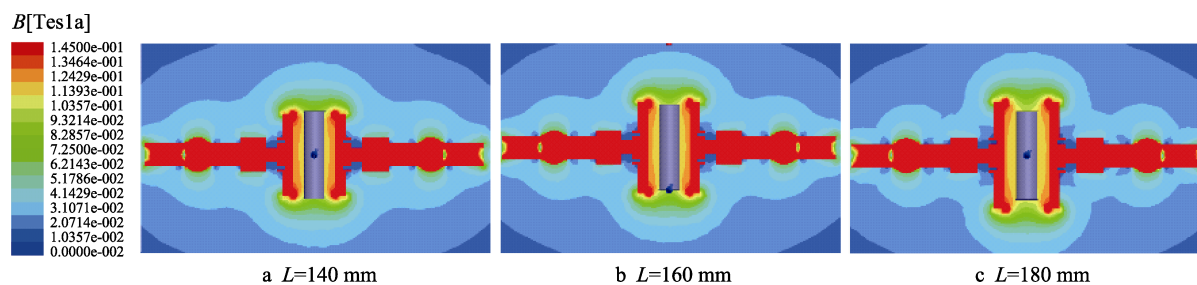
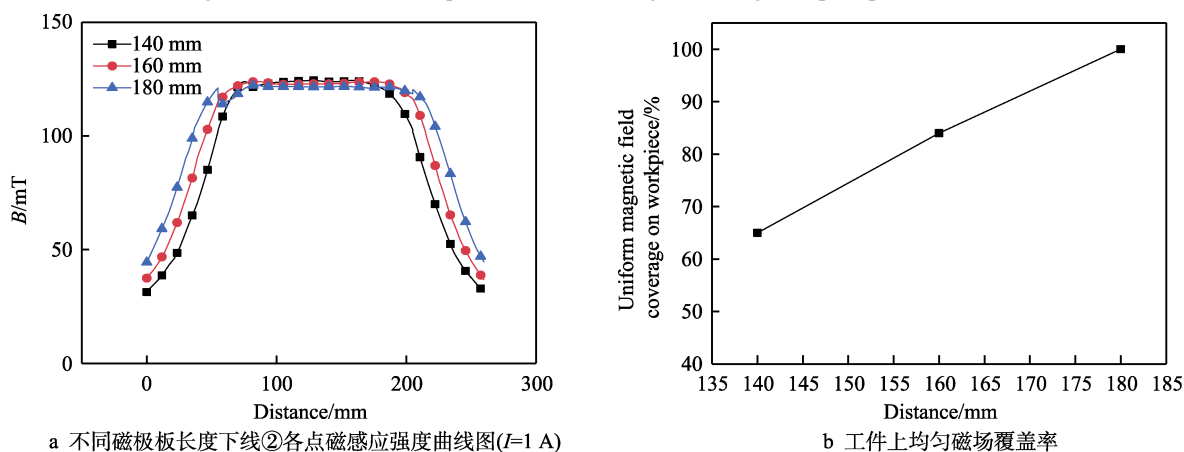
改变磁极板长度的目的是尽可能减小工件轴向各处磁感应强度差值,使轴向各处液体磁性磨具受力均匀,从而使其加工均匀。以长160 mm的工件为分析对象,对140、160、180 mm的磁极板进行磁场仿真分析,仿真时磁极板间距为80 mm。仿真云图见图5。

从图中可以看出,磁极板长度值越大,工件两端磁感应强度值与工件中部越相近。为了更精确地对比,对图3中线段②在不同磁极板长度下的磁感应强度值作比较,并用工件上的均匀磁场覆盖率(式(1))来衡量。结果如图6。

$$u = l_1 / l \times 100\% \quad (1)$$

式中, u 为均匀磁场覆盖率; l_1 为工件上磁感应强度值相同的区间长度(mm); l 为工件长度(mm)。

图6a中,横坐标对应线②上各点位置,曲线上斜率几乎为0的线段即为工件上磁感应强度值分布均匀的区域,该区间两端磁感应强度值开始减小,超出磁极板后,减小速率增大,距磁极板30 mm处,磁感应强度值已低于50 mT。结合6b图可以看出,

图 5 不同磁极板长度时的仿真云图 ($I=1\text{ A}$)Fig.5 Simulation cloud maps with different lengths of magnetic pole plates ($I=1\text{ A}$)a 不同磁极板长度下线②各点磁感应强度曲线图($I=1\text{ A}$)

b 工件上均匀磁场覆盖率

图 6 线②磁感应强度值对比

Fig.6 Comparison of line ② magnetic induction intensity: a) curves of magnetic induction intensity at each point on line 2 of different length of magnetic pole plate ($I=1\text{ A}$); b) uniform magnetic field coverage on workpiece

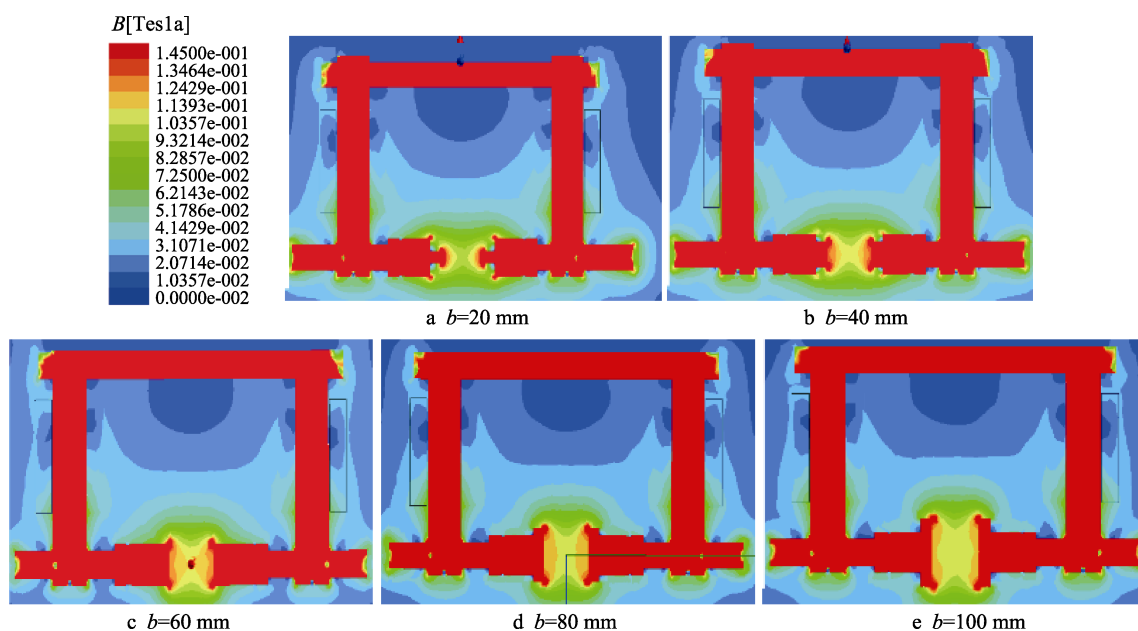
磁极板越长, 工件上均匀磁场覆盖率越高, 当磁极板长度比工件大 20 mm 时, 均匀磁场覆盖率达到 100%, 即工件轴向各处磁感应强度一致, 可达到使工件轴向加工均匀的目的。

2.1.2 磁极板宽度

磁极板宽度主要影响两磁极板间的磁场强弱及

其分布, 对宽度值分别为 20、40、60、80、100 mm 的磁极板进行对比分析, 仿真时磁极板间距为 80 mm。仿真云图见图 7, 不同磁极板宽度下, 线①各点磁感应强度对比见图 8。

由云图(图 7)和曲线图(图 8)可以看出, 在磁极板间距为 80 mm 的情况下, 磁极板宽度越小,

图 7 不同磁极板宽度仿真云图 ($I=1\text{ A}$)Fig.7 Simulation cloud maps of magnetic pole plate with different width ($I=1\text{ A}$)

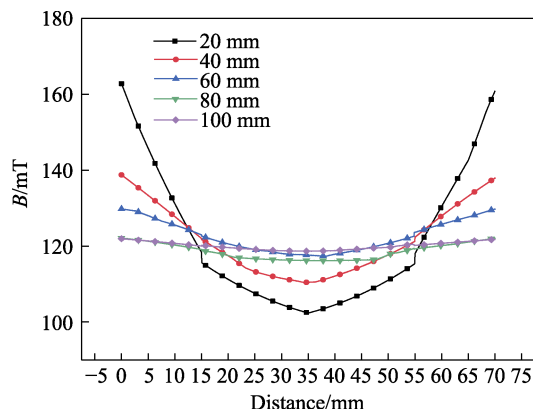
图 8 线①磁感应强度值对比 ($I=1\text{ A}$)

Fig.8 Comparison of line ① magnetic induction intensity ($I=1\text{ A}$)

磁极板间的磁场分布越不均匀。因为板宽越小,靠近磁极板的位置磁感应强度值就越大,差值最大达到 40 mT,但远离磁极板位置的磁感应强度值也越小(最大相差 20 mT)。图 8 中 5 条曲线交叉于距磁极板约 20 mm 的位置(线段两端点距磁极板 5 mm),也就是说,若工件与磁极板间距小于 20 mm,则磁极板宽度越小,可利用的磁感应强度值越高;若工件与磁极板间距大于 20 mm,磁极板附近的高强度磁场无法被充分利用。因此,可选择宽度为 60 mm 的磁极板,因为板宽大于 60 mm 后,中间区域的磁场强度几乎不再降低。

2.1.3 磁极板厚度

对厚度分别为 10、20、30 mm 的磁极板进行模拟仿真(图 9)。由图 9 可看出,不同厚度磁极板产生的磁感应强度曲线几乎重合,即在这个取值范围内,磁极板厚度对磁感应强度影响微弱,考虑到质量因素,选用 10 mm 厚的磁极板即可。

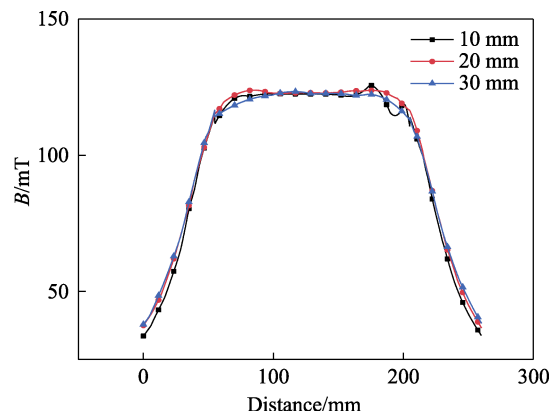


图 9 不同磁极板厚度下线①各点磁感应强度曲线图

Fig.9 Magnetic induction intensity curves of each point on line ① at different thickness of magnetic pole plate

2.2 磁极板形状

尺寸较大的磁极板虽然可以改进加工均匀性,却减弱了加工区域的磁感应强度值,导致磁场对液体磁性磨具的控制力降低,从而减弱加工效果。为使尽可能多的磁场能量聚集在加工区域,且得到充分利用,本文提出将平面磁极板改进为曲面磁极板(图 10)的方式,并探究不同曲率对磁感应强度值的影响规律。图 11 为曲率半径分别 30、40、50、60、80、100 mm 时的云图对比。图 12 为不同磁极板曲率下的线①各点磁感应强度曲线分布。

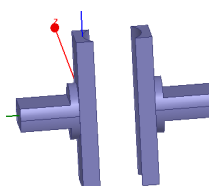


图 10 曲面磁极板

Fig.10 Curved magnetic pole plate

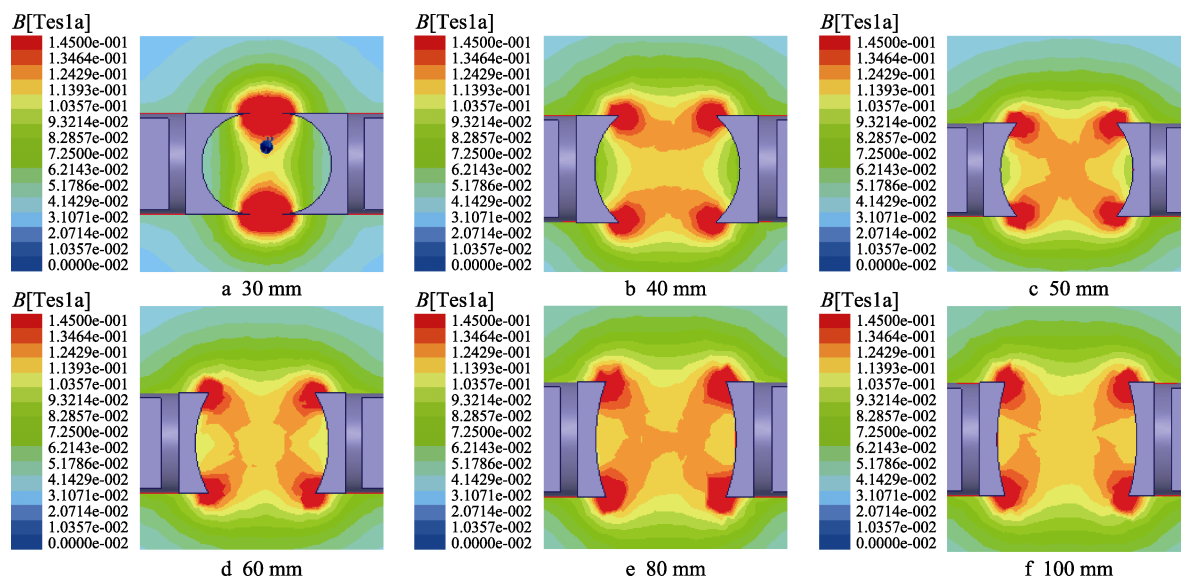
图 11 不同曲率半径云图对比 ($I=1\text{ A}$)

Fig.11 Comparison of cloud maps with different curvature radii ($I=1\text{ A}$)

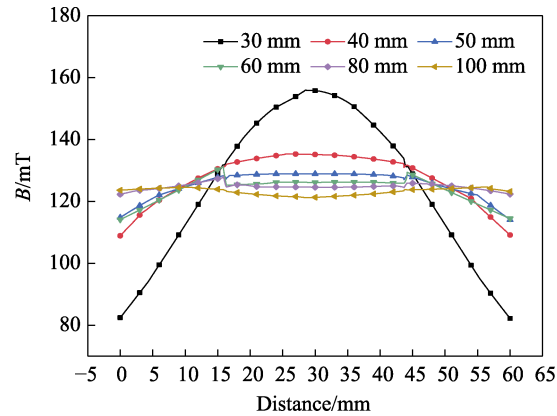


图 12 不同磁极板曲率半径下线①各点磁感应强度曲线
Fig.12 Magnetic induction intensity curves at each point on line 1 of magnetic pole plate with different curvature radii

从图 11 可以直观地看出，当磁极板曲率半径为 100 mm 时，云图中代表更高强度磁场的深色区域分布在板面附近，并随曲率半径的减小，向两磁极板中间靠近。对比图 8 与图 12 中线①在不同形状的磁极板的磁感应强度也可以看出，磁极板为平板时，曲线下凹，即越靠近磁极板，磁感应强度值越大；而磁极板为曲面时，曲线上凸，即越远离磁极板，磁感应强度值越小。同时随着曲率半径的减小，磁极板面附近的磁感应强度值逐渐减小，而磁极板中间区域的磁场却逐渐增强，当曲率半径从 100 mm 减小到 30 mm 时，磁感应强度最多增大 40 mT 左右。这是因为曲面磁极板改变了磁感线的方向，曲率半径越小，交汇于加工区域的磁感线越密集，磁感应强度也就越高。此外，由图 11 可看出曲率半径为 30 mm 时，两磁极板尖角相对处的磁感应强度也显著增强，这是因为在不改变磁极板间距和容器尺寸的前提下，缩小了该部位的磁极间距。综上所述，曲面磁极板，尤其是半圆形磁极板，可以在不改变电源电流、磁极板间距等条件的情况下，增强加工区域的磁感应强度值，且加工时应使加工位置尽可能靠近磁极板棱边处。

3 结构设计及结果测试

磁场发生装置设计包括励磁线圈设计和铁芯、磁轭、极柱等部位的尺寸设计。其中励磁线圈设计最为重要。本文计算线圈激励安匝数的方法是磁路法^[24]。

由于液体磁性磨具的磁饱和强度为 0.5 T 左右，所以计算时，将气隙磁感应强度值 B 设计为 0.5 T。

根据仿真得出磁极板尺寸和阀芯零件的加工需求，可得最大气隙截面积和气隙长。根据需求，设定极柱和铁芯的总长和截面积，便可算得磁轭尺寸。然后根据 $\varphi=BS$ ，计算气隙和磁轭的磁通，进一步由 $R=L/(\mu s)$ 得出磁路上各部位磁阻，最后通过磁动势（式（2））即可算得线圈所需安匝。

$$F = R\phi = NI \tag{2}$$

式中： F 为磁路所需磁动势， R 为整个磁路的磁阻（ H^{-1} ）； ϕ 为通过气隙的磁通量（Wb）； N 为线圈所需安匝数（匝）； I 为电流（A）。安匝数确定后，便可计算线圈骨架尺寸，最终设计结果见表 1。

表 1 磁场发生装置尺寸
Tab.1 Size of device forming magnetic field

Name	Value
Length/width/height of magnetic pole plate /mm	160/60/20
Radius/length of iron-core/mm	30/332
Radius/length of pole/mm	20/180
Length/width/height of magnetic yoke/mm	520/45/80
Turns per coil	6413
Height of coil/mm	156
Inner/outer diameter of coil frame/mm	64/124
Range of magnetic pole plate spacing adjustment/mm	0~150

参考以往设计磁场发生装置时所选材料，结合上述装置参数搭建磁场发生装置^[25]。在不同磁极板间距下，用 SJ700 数字高斯计测试不同电流下两磁极板中间点位置的磁感应强度值，测试结果见图 13。当磁极板间距为 15 mm 时，沿磁极板长的不同位置（见图 14）的磁感应强度值测试结果见图 15。由于阀芯为导磁类零件，放入磁场后会影 响 磁 场 分 布，因此进一步测试了磁极板间距为 30 mm，在有无阀芯两个条件下同一位置的磁感应强度值，具体结果见图 16。

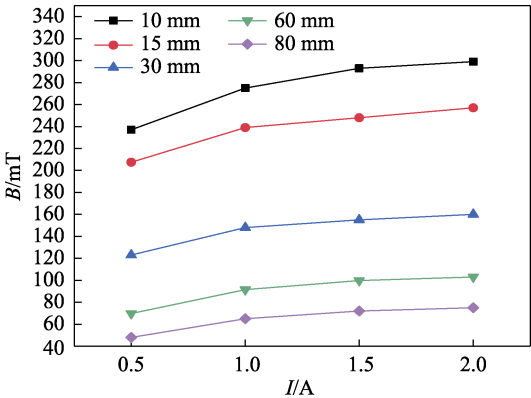


图 13 两磁极板中心处磁感应强度值随电流和磁极板间距的变化

Fig.13 Variation of the magnetic induction intensity at the center of the two pole plates with the current and the distance between the pole plates

根据图 13 可得，两磁极板中心点处磁感应强度值随磁极板间距的增大而减小，随电流的增大而增大，间距为 10 mm 时，该值最大，可达到 300 mT。但图 16 中放入阀芯后，工件表面磁感应强度值最高提高至 600 mT 左右，已达到液体磁性磨具的工作要求。且由图 15 可知，当磁极板长度为 160 mm 时，沿其长度方向 140 mm 的区域，磁感应强度值上下浮

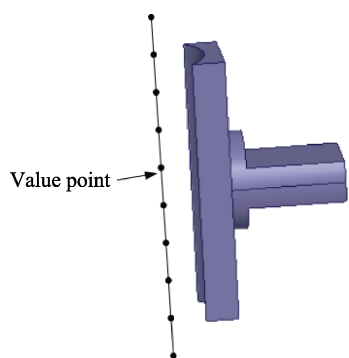


图 14 测试点位置分布图

Fig.14 Distribution map of test point location

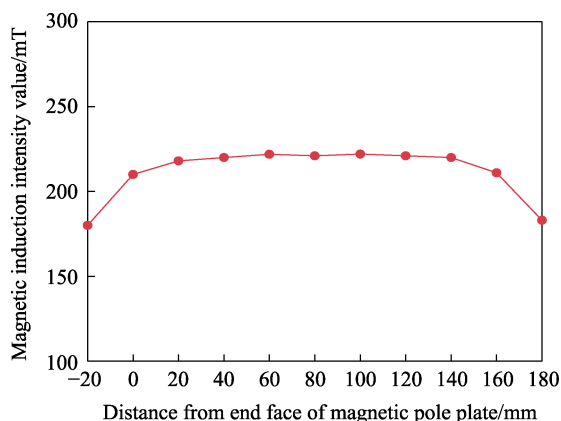


图 15 磁极板表面不同位置磁感应强度曲线图

Fig.15 Magnetic induction intensity curves at different positions on the surface of the magnetic pole plate

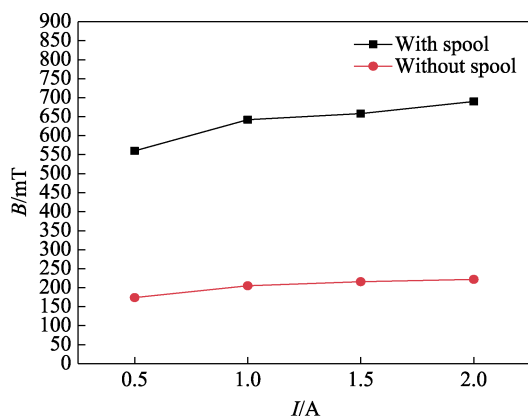


图 16 有无阀芯时的磁感应强度对比

Fig.16 Contrast of magnetic induction intensity with and without a spool

动不超过 5 mT, 可以满足最大规格阀芯 (长度为 120 mm) 对磁场均匀性的要求。因此, 本文设计的磁场发生装置可以用于阀芯零件的去毛刺光整加工。

4 加工实验与结果分析

4.1 试验性实验

4.1.1 实验条件

由于阀芯零件工艺复杂、造价较高, 本实验先对

同样导磁的 45 钢零件进行试验性实验, 以确定去除毛刺所需的最佳转速, 最后在该转速下, 用阀芯零件验证装置的表面光整效果。实验所用零件如图 17 所示, 为便于加工结束后超声清洗 (以防磨具附着在试件表面, 影响结果分析), 将试件分为两部分: 包含环槽的被加工部分 (图左) 和装夹部分 (图右)。两部分采用螺纹连接。

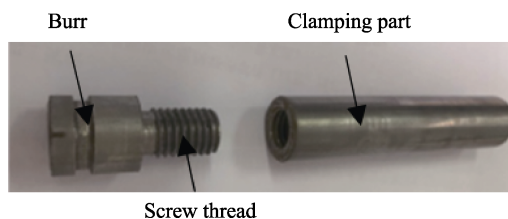


图 17 45 钢试件

Fig.17 45 steel test sample

实验时, 先配制水基液体磁性磨具 (羰基铁粉粒径 $5\ \mu\text{m}$, 一级白刚玉粒径 $100\ \mu\text{m}$), 并在实验前后分别使用超景深显微镜观察试件同一位置的棱边情况。表 2 是加工实验参数。

表 2 实验条件

Tab.2 Experimental conditions

Name	Value
Workpiece	45-steel
Magnetic pole plate spacing/mm	40
Rotation speed/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	100, 300, 500
Finishing time/min	30
Current/A	2

4.1.2 实验结果

图 18 是 3 个 45 钢试件加工前后的棱边超景深显微镜图 (放大倍数 100 倍), 可见原始试件表面有大量划痕和缺陷, 纹理混乱, 棱边处存在外翻的毛刺和积屑瘤等问题。以表 2 所列实验参数为条件, 试件在不同转速下加工后可以看出, 试件的表面形貌均有所改善, 但转速较低时, 表面杂乱的纹理和微型凹坑只是变浅, 并未完全去除。当转速达到 $500\ \text{r}/\text{min}$ 时, 试件原始纹理几乎完全去除, 没有任何凹坑和缺陷, 表面纹理细密均匀, 表面质量得到了大幅度提升。从毛刺形貌来看, 毛刺的高度和宽度都明显降低, 且转速越高, 毛刺去除效果越好, 在 $500\ \text{r}/\text{min}$ 时, 棱边处毛刺、积屑瘤基本去除干净。这是由于, 提高转速增大了磁刷与工件之间的相对速度, 从而提高了加工效率。综上所述, 工件转速为 $500\ \text{r}/\text{min}$ 时已经可以达到良好的加工效果。

4.2 阀芯实验验证

根据试验性实验的结果, 将阀芯转速确定为 $500\ \text{r}/\text{min}$, 其余试验参数同 45 钢试件。图 19 为阀芯

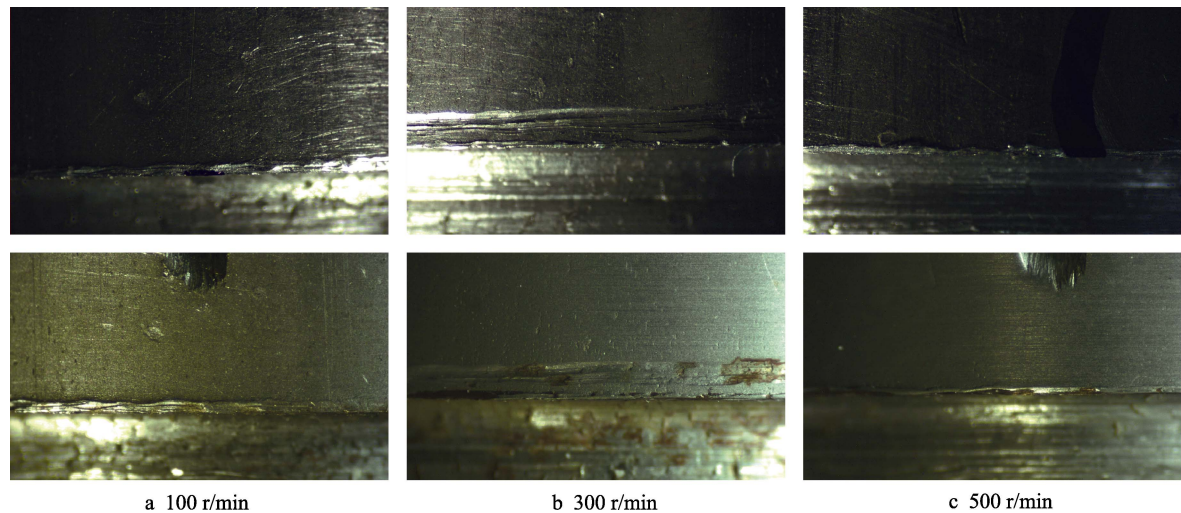


图 18 加工前后工件表面形貌
Fig.18 Surface morphology of workpiece before processing

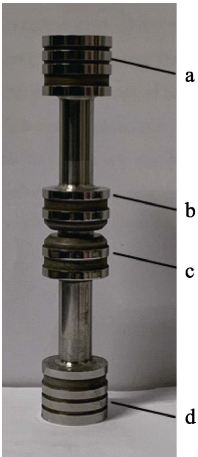


图 19 阀芯示意图
Fig.19 Schematic diagram of spool

零件示意图。加工前后分别使用超景深显微镜观察阀芯同一位置的毛刺情况，并采用德国马尔 Mahr Perthometer M2 粗糙度仪对阀芯外圆表面 a、b、c、d 四处进行表面粗糙度测量。

图 20 为阀芯零件加工前后的超景深显微镜图片（放大倍数 500 倍）。可以看出，原始阀芯表面质量

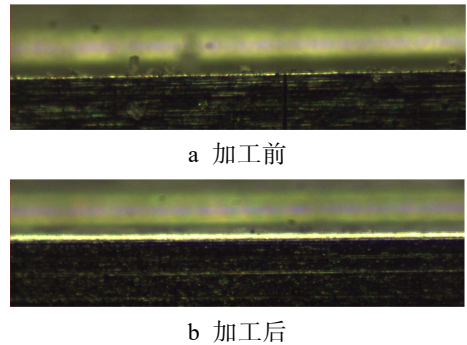


图 20 阀芯加工前后表面形貌
Fig.20 Surface morphology of spool before (a) and after (b) processing

较高，节流边处只有极少数微小毛刺，毛刺在加工后几乎完全被去除，并且产生均匀的倒圆。表明本文设计的电磁场发生装置对阀芯节流边毛刺去除效果良好。

从粗糙度测量结果来看，加工后阀芯 a 处圆表面的粗糙度平均值从加工前的 $0.262\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.096\text{ }\mu\text{m}$ ，阀芯 b 处圆表面的粗糙度平均值从 $0.259\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.097\text{ }\mu\text{m}$ ，阀芯 c 外圆表面的粗糙度平均值从 $0.262\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.097\text{ }\mu\text{m}$ ，阀芯 d 外圆表面的粗糙度平均值从 $0.263\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.099\text{ }\mu\text{m}$ ，四个位置的表面粗糙度差值 ΔRa 小于 $0.003\text{ }\mu\text{m}$ ，证明阀芯四个位置的加工效果相近，即液体磁性磨具在加工过程中所受的磁场力几乎一致，也就是说阀芯表面加工区域磁场分布均匀。因此，本文设计的磁场发生装置满足阀芯轴向加工均匀性的要求。

5 结论

1) 针对阀芯类零件的尺寸需求，对磁极板尺寸进行了仿真分析，发现磁极板长度比工件大 20 mm 时，工件轴向磁场分布最均匀。磁极板宽度应根据加工间隙进行选择，若工件与磁极板间距小于 20 mm ，选择 20 mm 磁极板；若工件与磁极板间距大于 20 mm ，则应选择宽度为 60 mm 的磁极板。磁极板厚度对磁场影响较小，考虑质量因素，选择了 10 mm 厚的磁极板。

2) 曲面磁极板可以增大加工区域的磁感应强度值，曲率半径越小，磁场强化越明显。其中，半圆形磁极板效果最佳。

3) 阀芯置于磁极板中间时，磁感应强度值最大可达 600 mT 左右，满足液体磁性磨具的加工需求。

4) 加工装置对 45 钢等导磁性回转类零件有良好的加工效果，并且提高工件转速可以提高加工效率。转速为 500 r/min 时，工件毛刺去除和表面质量改善效果最佳。

5) 转速为 500 r/min 时, 阀芯节流边毛刺被完全去除, 且产生了均匀倒圆。加工前后阀芯轴向不同位置的 ΔRa 值仅相差 0.003 μm , 轴向加工均匀性得以保证。因此, 本文设计的磁场发生装置可以满足阀芯节流边毛刺去除的要求。

参考文献:

- [1] 杨胜强. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
YANG Sheng-qiang. Surface finishing theory and new technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [2] 赵文胜. 精密零件去毛刺技术应用与具体工艺分析[J]. 科学家, 2016(18): 42.
ZHAO Wen-sheng. Application and specific process analysis of deburring technology for precision parts[J]. Scientist, 2016(18): 42.
- [3] 刘高群. 航空液压产品毛刺清理技术探讨[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(1): 34-36.
LIU Gao-qun. Discussion on deburring technology for aeronautical hydraulic product[J]. Aviation precision manufacturing technology, 2013, 49(1): 34-36.
- [4] 曹杏, 张宏, 梁国星. 液体磁性磨具对工件表面光整加工机制及试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40 (11): 41-45.
CAO Xing, ZHANG hong, LIANG Guo-xing. Polishing mechanism of liquid-magnetic grinding tool and work surface polishing experiment[J]. Light alloy fabrication technology, 2012, 40(11): 41-45.
- [5] ZHAO Feng-xuan. Research on surface processing of quartz wafer based on magnetorheological finishing and ion beam figuring[J]. Procedia CIRP, 2018, 56(11): 156-158.
- [6] GUAN F, HU H, LI S, et al. A novel lap-MRF method for large aperture mirrors[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 95(9/12): 4645-4657.
- [7] ZHANG Yun-fei, WEN Huang, CHAO Wang, et al. Polishing technique for potassium dihydrogen phosphate crystal based on magnetorheological finishing[J]. Procedia CIRP, 2018, 47(2): 21-24.
- [8] WANG Yu-yue, ZHANG Yun, FENG Zhi-jing. Analyzing and improving surface texture by dual-rotation magnetorheological finishing[J]. Applied surface science, 2016, 360: 224-233.
- [9] WANG Y, YIN S, HUANG H. Polishing characteristics and mechanism in magnetorheological planarization using a permanent magnetic yoke with translational movement[J]. Precision engineering, 2016, 43: 93-104.
- [10] 江宏亮, 姚巨坤, 田欣利, 等. 磁流变液在机械加工中的研究进展[J]. 工具技术, 2018, 52(2): 3-7.
JIANG Hong-liang, YAO Ju-kun, TIAN Xing-li, et al. Technology of magneto-rheological fluid and its application in machining[J]. Tool engineering, 2018, 52(2): 3-7.
- [11] 尹韶辉, 陈越, 王宇, 等. 磁流变抛光头形状对加工表面粗糙度的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 45-48.
YIN Shao-hui, CHEN Yue, WANG Yu, et al. Influence of the shape of polishing tools on the surface roughness in magneto-rheological finishing[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2010, 37(1): 45-48.
- [12] LUO H, GUO M, YIN S, et al. An atomic-scale and high efficiency finishing method of zirconia ceramics by using magnetorheological finishing[J]. Applied surface science, 2018, 444: 569-577.
- [13] 李唯东. 液体磁性磨具光整加工性能及制备工艺研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
LI Wei-dong. Study on the performance and preparation process of fluid magnetic abrasive finishing technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [14] 周亚旗, 王栋, 叶恒宇, 等. 磁力研磨外圆面的磁极设置及工艺参数优化[J]. 机械设计与制造, 2018(12): 113-116.
ZHOU Ya-qi, WANG Dong, YE Heng-yu, et al. Study on magnetic pole arrangement and process parameters optimization of external surface finishing of cylinder using magnetic abrasive finishing[J]. Machinery design & manufacture, 2018(12): 113-116.
- [15] 孙恒五. 液体磁性磨具光整加工技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
SUN Huan-wu. Study on the fluid magnetic abrasive finishing technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [16] KHERADMAND S, ESMAILIAN M, FATAHY A. Numerical simulation of the combination effect of external magnetic field and rotating workpiece on abrasive flow finishing[J]. Journal of mechanical science and technology, 2017, 31(4): 1835-1841.
- [17] 李益民, 杨曙光, 孙允臣. 阀芯棱边毛刺的控制与磁力研磨去除法[J]. 磨料磨具与磨削, 1991(2): 2-6.
LI Yi-min, YANG Shu-guang, SUN Yun-chen. Controlling and magnetic abrasive finishing of valve spool edge burr. diamond & abrasives engineering[J]. Abrasive grinding tool and grinding technology, 1991(2): 2-6.
- [18] 焦安源, 张龙龙, 刘新龙, 等. 磁粒研磨去除 Al 7075 交叉孔棱边毛刺的试验研究[J]. 表面技术, 2019(4): 302-309.
JIAO An-yuan, ZHANG Long-long, LIU Xin-long, et al. Experimental study of deburring in Al 7075 cross hole edge based on magnetic particles grinding[J]. Surface technology, 2019(4): 302-309.
- [19] 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(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(3): 283-290.
- [20] 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 Yan-jun, CHEN Yan, GUO Long-wen. Study of deburring on edge of micro nozzle by magnetic abrasive finishing[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2014(9): 88-90.