

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.013

三通阀门内腔磨粒流光整加工流场仿真分析与 试验验证

刘彦磊¹, 孙玉利¹, 杨范轩¹, 汪洪峰², 范武林³, 胡 鸿¹, 左敦稳¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 黄山学院机电工程学院, 黄山 245041;

3. 江苏集萃精密制造研究院有限公司, 南京 210016)

摘要: 目前,三通阀门内腔多采用手工抛光技术,加工效率低,劳动强度大且环境友好性差。针对上述问题,本文开展三通阀门内腔磨粒流光整加工流场仿真分析与试验验证。通过建立流场仿真模型,对比了有芯模和无芯模情况下的流场分布,研制了专用的仿形夹具,并进行了试验验证。试验结果显示,使用芯模时阀门内壁面的粗糙度显著降低,大端降低率为 77.79%,小端为 77.26%,远超过无芯模加工的降低率(大端 15.05%,小端 11.62%)。因此,使用芯模不仅显著提高了加工质量,还提升了加工效率。

关键词: 三通阀门;磨粒流;仿真分析;夹具设计;表面粗糙度

中图分类号: TG580.692 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)01-0130-09

Simulation Analysis and Experimental Verification of Abrasive Particle Feeding Flow Field in the Inner Cavity of a Three-Way Valve

LIU Yanlei¹, SUN Yuli¹, YANG Fanxuan¹, WANG Hongfeng², FAN Wulin³,
HU Hong¹, ZUO Dunwen¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016,

China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Huangshan University, Huangshan 245041, China;

3. Jiangsu Jitri Precision Manufacturing Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210016, China)

Abstract: The inner cavity of three-way valves is mostly polished by hand, which holds low processing efficiency, high labor intensity and poor environmental friendliness. In this regard, this paper carries out simulation analysis and experimental verification of the flow field of abrasive flow finishing in the inner cavity of a three-way valve. By establishing a flow field simulation model and comparing the flow field distribution with and without core molds, a special profiling fixture is developed and experimentally verified. The experimental results show that the roughness value of the inner wall surface of the valve is significantly reduced when the mandrel is used, with the reduction rate of the big end of 77.79% and the small end of 77.26%, which far exceeds the reduction rate of the coreless processing (15.05% for the big end and 11.62% for the small end). Therefore, using the mandrel can significantly improve the processing quality, as well as the processing efficiency.

Key words: three-way valve; abrasive flow; simulation analysis; fixture design; surface roughness

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(产业前瞻与关键核心技术)(BE2022150);安徽省黄山市揭榜挂帅项目(2022KG-02);南京航空航天大学 2024 年度省级优秀毕业设计培优项目。

收稿日期: 2024-04-15; **修订日期:** 2024-09-26

通信作者: 孙玉利,男,教授, E-mail: sunyuli@nuaa.edu.cn。

引用格式: 刘彦磊,孙玉利,杨范轩,等.三通阀门内腔磨粒流光整加工流场仿真分析与试验验证[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(1):130-138. LIU Yanlei, SUN Yuli, YANG Fanxuan, et al. Simulation analysis and experimental verification of abrasive particle feeding flow field in the inner cavity of a three-way valve[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition),2025, 57(1):130-138.

磨粒流加工(Abrasive flow machining, AFM)是一种精密加工技术,其使用含有高硬度磨粒的黏弹性介质,在压力的作用下流过待加工表面,以实现微量材料去除。该工艺主要用于复杂结构,如腔体、交叉孔的研磨、抛光、倒角和去毛刺^[1]。图1为磨粒流光整加工的机床工作原理。通过上下液压缸推动活塞往复运动,使磨料不断划擦工件表面。通过这一过程,流体磨料中的磨粒充当了无数个磨削工具,利用锐利边缘对零件表面进行研磨、抛光和去毛刺,达到降低表面粗糙度的目的^[2-4]。

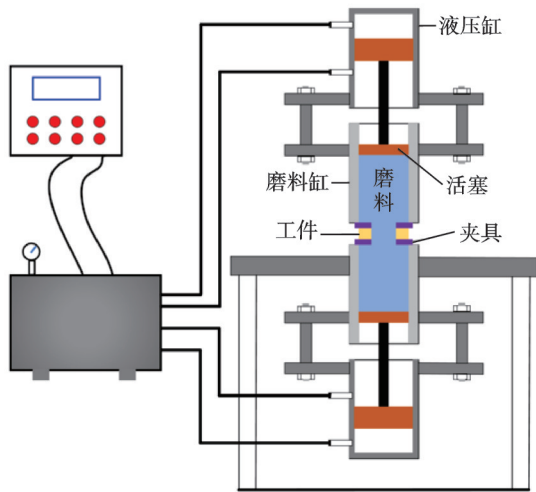


图1 磨粒流加工原理图

Fig.1 Schematic diagram of abrasive flow processing

三通阀门是一种常用的流体控制零件,主要用于控制流体的流向和分配流体。随着工业制造技术的不断发展,阀门的表面质量要求也越来越高。因此,三通阀门的抛光工艺需要不断改进,以满足更高的表面粗糙度和光洁度要求^[5]。然而现有的阀门抛光方式多为手工抛光。尽管手工抛光在某些情况下能够达到良好的效果,但也存在明显的缺点:劳动强度大,产生的粉尘污染环境,工作环境差,内腔加工均匀性难以控制,加工可达性差^[6]。本研究根据工业实践提出的技术需求,采用磨粒流光整加工技术代替手工抛光。

阀门的密封性能对流体控制至关重要。磨粒流加工相较于手工抛光来说不会产生粉尘污染,加工可达性好,能够确保内腔平滑度和精度,从而提高密封性能,减少泄漏风险^[7]。磨粒流可用于消除阀门零件表面的粗糙度和不均匀性,从而降低表面粗糙度并提高表面质量。对于某些卫生级阀门或食品加工设备中的阀门尤为重要^[8-9]。

国内外学者针对磨粒流加工仿真做了大量的研究。目前,针对三通阀门磨粒流加工的仿真研究较少。在实际加工中,如何利用流体仿真软件辅助设计磨粒流加工夹具以实现材料的均匀去除,还没

有较好的解决方案。本文以某型三通阀门为例,基于材料去除机理,以流场仿真为工具,模拟磨粒流加工流场,建立阀门夹具模型,进行夹具优化后的仿真分析及试验验证。

1 单颗磨粒受力与材料去除机理分析

为了构建抛光过程中材料去除的模型,应分析单个磨粒与工件表面接触时的切削行为。如图2(a)所示,磨粒在抛光过程中由载体推动接触工件,载体对磨粒的压强定义为 P_a 。通常情况下,载体具有较高的黏度和硬度,导致 P_a 的数值较大且在磨粒接触面上分布不均。通过简化 P_a 对磨粒接触面的作用力,可以分解为两个主要的力(F_n 和 F_t)以及一个力矩 M ,如图2(b)所示。垂直分力 F_n 将磨粒压入工件表面,而水平分力 F_t 促使磨粒划擦工件表面。将工件对磨粒施加的垂直力和水平力分别记为 F_z 和 F_x ,如图2(c)所示。 F_n 和 F_t 的计算为^[10]

$$F_n = \iint P_a d\delta_x \quad (1)$$

$$F_t = \iint P_a d\delta_z \quad (2)$$

式中: $d\delta_z$ 为磨粒表面垂直微分量; $d\delta_x$ 为磨粒表面水平微分量。

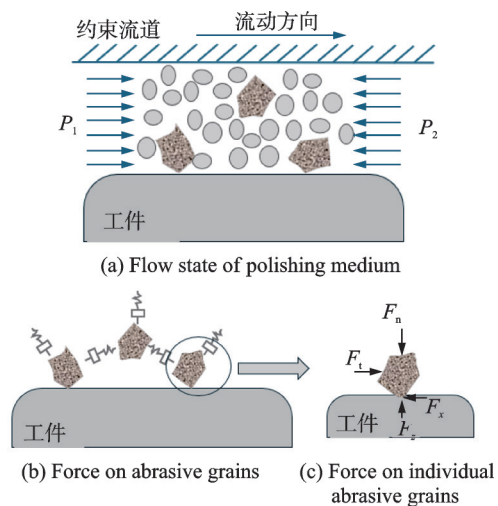


图2 AFM中单颗磨粒受力分析与简化^[10]

Fig.2 Analysis and simplification of the force acting on single abrasive in AFM^[10]

在磨粒流光整加工过程中,材料的去除通常涉及磨粒对工件表面的切割。磨粒切割工件表面的过程是在垂直压力 F_n 的作用下发生的,而磨粒穿透的深度不仅受到垂直压力 F_n 的影响,还与工件材料的硬度密切相关,硬度通常用维氏硬度 H_v 来衡量。

如图3所示,将磨粒在工件表面切割所产生的痕迹最大直径记为 d_0 。根据维氏硬度的概念,垂直压力 F_n 为

$$F_n = \iint P_a d_0 d\delta_x = c_v H_v d_0^2 \quad (3)$$

式中： H_v 为工件材料的维氏硬度； c_v 为与工件材料维氏硬度相关的常数。

根据式(3)， d_0 可以表示为

$$d_0 = \sqrt{\frac{\iint P_a d\delta_x}{c_v H_v}} \quad (4)$$

图 3^[10]中的压痕深度 h 可以表示为

$$h = \sqrt{\frac{\iint P_a d\delta_x}{4c_v H_v}} \cot \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

式中 θ 为压痕底部与压痕边缘连线的最大夹角。

在图 3 中，压痕部分的截面面积可表示为

$$s = \lambda^2 \cdot \arcsin \frac{d_0}{2\lambda} - \frac{(\lambda - h)d}{2} \approx \lambda^2 \cdot \frac{d_0}{2R} \Big|_{d_0 \rightarrow 0} - \frac{(\lambda - h)d_0}{2} = \frac{hd_0}{2} \quad (6)$$

式中 λ 为磨粒切削刃的钝圆半径。

考虑到压痕深度与压痕直径的关系，式(6)还可表示为

$$s = \frac{d_0^2 \cot \frac{\theta}{2}}{4} \quad (7)$$

单颗磨粒在工件表面去除材料的过程中，需要磨粒嵌入工件材料并随着磨粒流抛光介质移动。假设磨粒的切削速度与基体的流动速度相同，在 dt 时间内，单颗磨粒对工件表面材料的去除量可表示为

$$dV_0 = \frac{d_0^2 \cot \frac{\theta}{2}}{4} v dt \quad (8)$$

式中： dV_0 为单颗磨粒在 dt 时间内的材料去除体积； v 为磨粒运动速度。

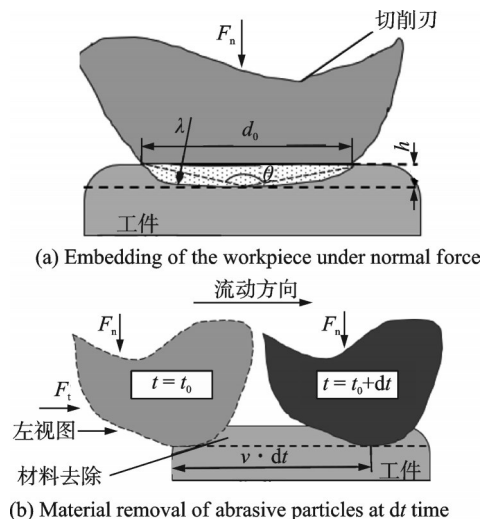


图 3 单颗磨粒材料去除示意图^[10]

Fig.3 Schematic diagram of material removal model of single abrasive^[10]

将式(4)代入式(8)，单颗磨粒在 dt 时间内对工件表面的材料去除量为

$$dV_0 = \frac{\iint P_a d\delta_x \cot \frac{\theta}{2}}{4c_v H_v} v dt \quad (9)$$

令 $\frac{\cot \frac{\theta}{2}}{4c_v} = k_1$ ，单颗磨粒在时间 t 内的材料去除量为

$$V_0 = k_1 \int \frac{\iint P_a d\delta_x}{H_v} v dt \quad (10)$$

从式(10)可以看出，单颗磨粒对工件表面的材料去除率与该点的压强和流动速度成正比。参数 k_1 是一个与磨粒类型及被加工材料硬度相关的常数，其数值仅随磨粒性能和工件材料的不同而变化。因此可得出结论，相同的工件材料，当磨粒流速(V)和壁面压强(P)越大，工件表面的材料去除率就越高。

2 工件分析及夹具设计

夹具是一种用于夹紧工件以便进行加工、装配、检测或其他制造工序的工具或设备。在设计夹具前应对工件进行分析。图 4(a)为三通阀实物图，图 4(b)为三通阀建模剖面图，阀门制造工艺为铸造，材料为碳素钢，其有 3 个出入口，口径均为 100 mm 以上，且内腔流道轮廓不规则。



(a) Physical drawing of a three-way valve (b) Modeling profile of a three-way valve

图 4 三通阀门示意图

Fig.4 Schematic diagram of three-way valve

针对三通阀进行夹具设计，通过在阀门流道内放置芯模，形成跟随阀体内腔的磨料流道，使得流经阀体内壁面的磨料流速更快、压强更大，从而提高材料去除率。芯模所用材料为树脂，采用 3D 打印制造。根据阀门形状特征进行夹具设计。图 5(a)为无芯模夹具装配示意图，为方便观察，隐藏了部分零件。图 5(b)为无芯模装配剖面图。从图 5(b)无芯模装配剖面图中观察到，在 3 处通孔可以加装芯模结构来改变流道的形状，磨粒流的加工效果也会改变。芯模结构的设计以降低粗糙度值为目的，由普林斯顿方程可知， PV 值反映了材料去除率(Material removal rate, MRR)。因此本文将芯模

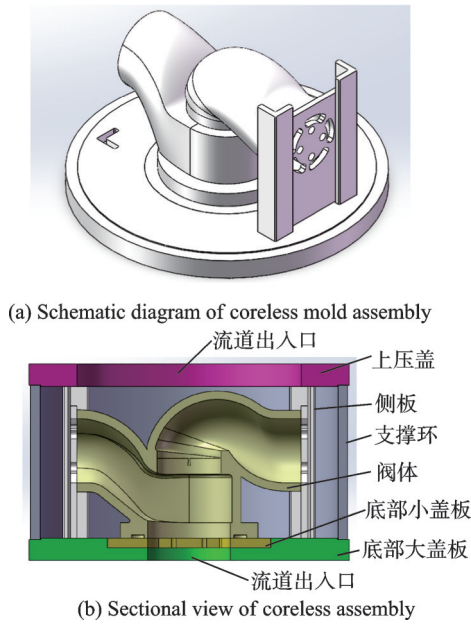


图 5 无芯模夹具装配图
Fig.5 Assembly drawing of coreless mold fixture

设计成内腔仿形结构,以期增加 PV 值,从而增加 MRR,获得更好的加工效果。进行芯模加装后的夹具结构如图 6 所示。

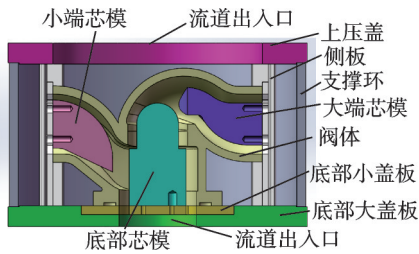


图 6 有芯模装配剖面图
Fig.6 Mandrel assembly section

为了探究不同流动间隙下的材料去除效果,本文调整了芯模的尺寸,改变 3 处芯模与阀体内壁面的间距,分别为增大 2 mm、缩小 2 mm,如图 7 所示。图 7(a)为初始芯模间隙示意图,其芯模与阀体内腔的间隙分别为:小端 10 mm、大端 15 mm、底端 17 mm。图 7(b,c)分别为将芯模尺寸缩小和增大后的剖面图,其与阀体内腔的间隙尺寸如图中所示。后续对使用不同尺寸芯模的夹具进行了流场仿真分析,合并其 PV 值,对三者的材料去除效果进行了仿真对比,其结果讨论详见第 3 节。

完成磨粒流光整加工专用夹具的装配后,工艺流程如下:在上行程中,磨粒流机床从下磨料缸挤出磨料,经过底部流道进入阀体内腔,通过安装在侧板的扇形孔流出,并进入支撑环,然后从顶部流道进入上磨料缸;在机床的下行程中,流道出入口互换,磨料从上磨料缸挤出,经由顶部流道进入支撑环,再通过侧板的扇形孔进入阀体内腔,最终通

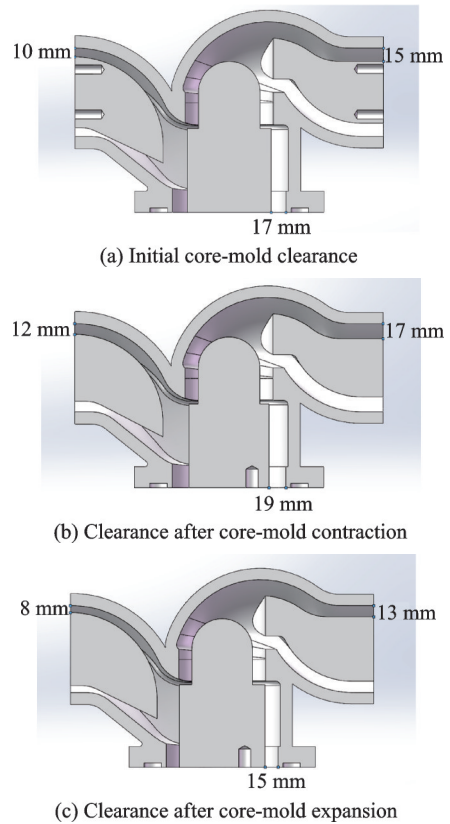


图 7 不同尺寸芯模的剖面示意图
Fig.7 Schematic diagram of the cross section of core molds of different sizes

过底部流道进入下磨料缸。经过多次反复加工,直至阀体内壁抛光达到技术要求。为了降低加工成本并提高试验成功率,在制作夹具之前进行流场仿真,初步验证加工效果。

3 仿真分析

仿真分析可以模拟磨粒流加工中流体磨料和工件之间的流动情况^[11-13],这有助于了解流体磨料的速度、流动方向和流场均匀性等,从而优化加工参数以确保均匀磨削并减少不均匀磨损。仿真分析可以在实际加工前测试不同的加工参数,如压强、流速和磨粒浓度等^[14]。这有助于确定最佳的参数组合,以获得所需的表面光滑度和精度。仿真分析可以在实际加工前进行虚拟测试,减少了试验试错的需要,特别是对于工装夹具的设计和调整具有指导作用,大大降低了成本和时间,这也有助于优化资源利用,减少废品和能源消耗^[15-16]。

本仿真基于 ANSYS 软件,使用 CFX 插件进行速度场和压强场的仿真,相较于常用的 Fluent 插件,CFX 适合简单“物理模型复杂结构”的流场仿真,收敛(计算速度)较快。网格划分如图 8 所示,网格平均质量为 0.90。磨料密度为 1 890 kg/m³,磨料粘度设置如下:低剪切黏度 5 713.13 Pa·s,高剪切黏度 542.88 Pa·s,时间常数 0.001 3 s,幂律指数

—6.84。选取磨料为 24 目, 粒径为 0.8 mm, 碳化硅体积含量为 70%。在边界条件设置时, 加工压强设为 5.5 MPa, 试验采用的机床为希桦 HXS-350 流体抛光机, 其液压缸有杆腔横截面积与活塞横截面积之比为 0.337, 则入口压强应设为 $5.5 \times 0.337 = 1.9$ MPa, 出口压强设为一个大气压强, 即 0.1 MPa。检查雷诺数为 $0.001 < 2\ 300$, 则磨料流动为层流。设置上行程为磨料从阀体底端流入, 从左右两端流出; 下行程为磨料从阀体两端流入, 从底端流出。无夹具流场只进行上行程仿真, 用于后续与带夹具流场的对比。图 8 为无夹具阀体流场网格划分。

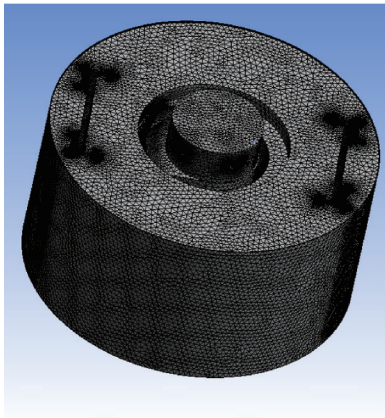


图 8 无夹具阀体流场网格划分

Fig.8 Meshing of flow field without fixture valve body

导入三维模型到 ANSYS 软件中, 网格划分完成后设置磨料流动边界条件如图 9 所示, 磨料出入口应为双向流通。经过计算后得到磨料流动速度场与压强场, 如图 10 所示。两图均为上行程仿真, 即磨料从下磨料缸流入工装夹具底部, 再由顶部流出至上磨料缸。后续将会合并上下行程结果进行对比。图 10(a) 为无芯模的阀体速度场, 由速度云图可以看出, 在阀体中心处磨料流速较高, 在近壁面的磨料流速较低, 这表明大量磨料快速在阀体内部流过而不与内壁面接触, 导致加工效率大打折扣; 图 10(b) 为无夹具的阀体压强场, 由压强云图

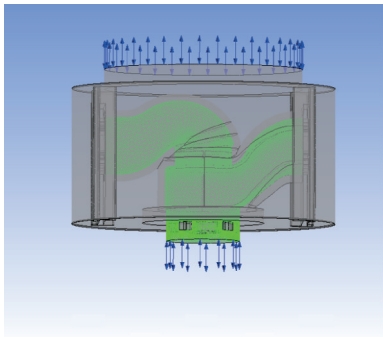
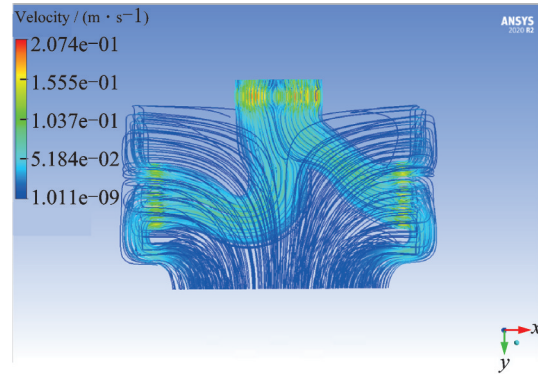


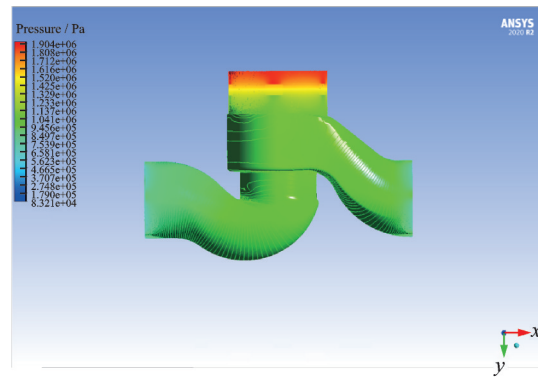
图 9 边界条件示意图

Fig.9 Schematic diagram of boundary conditions

可知, 仅底部入口处压强较大, 阀门内腔所受压强较低, 无法达到较好的粗糙度降低率。



(a) Velocity field



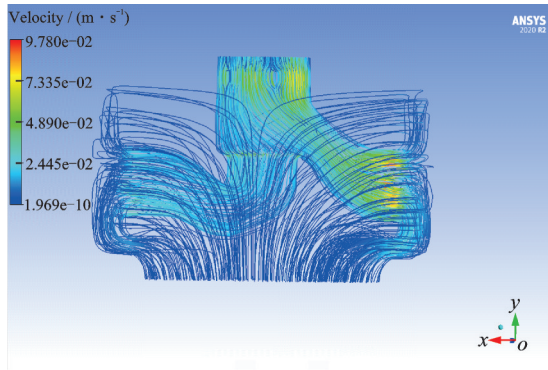
(b) Pressure field

图 10 无芯模流场

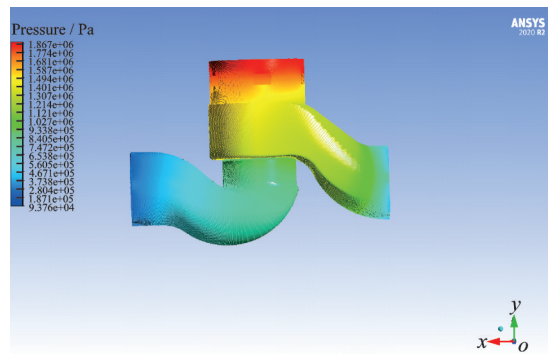
Fig.10 No core mold flow field

由图 9 看出, 在无夹具情况下进行磨粒流加工, 其流场表面, 即三通阀内腔接触的磨料流速很低, 所受压强也很小。由第 1 节中对材料去除机理的探讨可知, 壁面压强和磨料速度是影响去除量最重要的两个因素。为了提高 PV 值, 常用方法为加装夹具。图 6 为有芯模夹具装配剖面图, 将阀门 3 处入口加装相应芯模, 以增大内腔所受的压强与流速。将模型导入 ANSYS 后进行网格划分与边界条件设置, 其网格质量、磨料密度、加工压强等因素均与前述无芯模仿真相同。图 11 为加装芯模后的速度场与压强场上行程仿真。

对比图 10、11 的速度场和压强场云图可知, 在加装芯模之后, 通过阀体内腔的磨料流速降低, 而阀体内壁面所受压强升高。内壁面所受压强在入口处更大, 出口处更小。仅凭单一数值的模拟仿真无法得到明显结论。因此考虑将 PV 值与上下行程仿真合并。由第 1 节式 (10) 可知, MRR 与压强和流动速度的乘积成正比。为简化仿真云图, 便于直观比较无芯模和有芯模的加工效果, 采用 Tecplot 将磨粒流场仿真的上行程和下行程云图中的变量 ($P \cdot V$ 即压强·流速) 求和后以云图形式展示, 克服了 ANSYS 只能单独查看单一行程云图的缺陷^[17]。本文重点探究阀体内壁面的材料去除量, 因此, 将上



(a) Velocity field



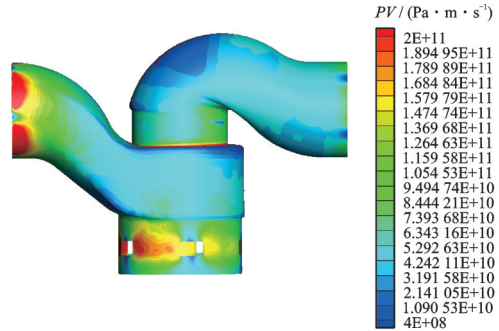
(b) Pressure field

图 11 有芯模流场

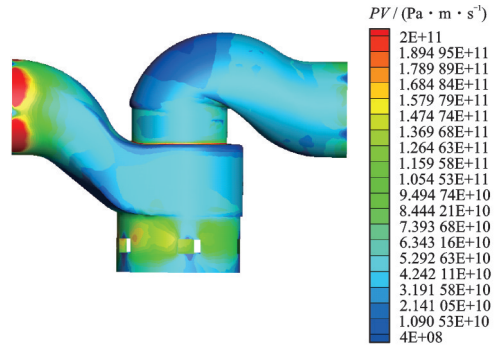
Fig.11 Mandrel flow field

下行程的壁面云图数据求和后,得图 12。

将图 12 中 4 张图的坐标系颜色分布与梯度数均调整为相同,可以直观看出,有芯模夹具云图的平均 PV 值更高。这是因为加装芯模后,磨料的流动间隙变小。而使用的磨料为非牛顿流体,具有剪切增稠效应,在流经间隙较小的地方时,剪切力增



(c) Contour plot of PV value distribution after core mold contraction



(d) Contour plot of PV value distribution after core mold expansion

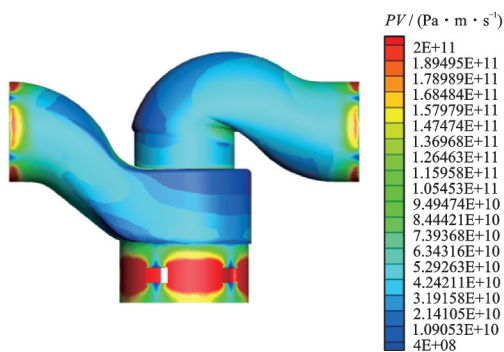
图 12 完整循环合并 PV 值云图

Fig.12 PV value cloud in a complete cycle

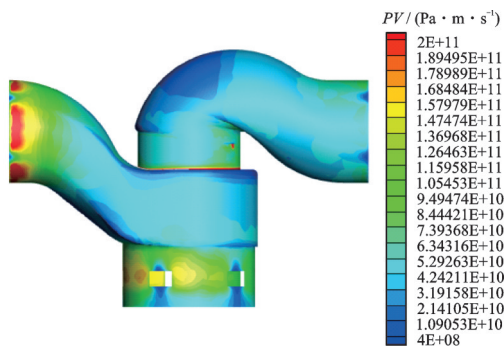
大,流体的黏性随之增大,使得流动阻力增加,压强也会相应增大,从而需要更大的压强来推动流体流动,因此壁面压强会有升高。而从图 10、11 中的速度梯度对比可知,加装芯模后的流速降低不明显。据此推测加装芯模后的 PV 值会更大,由普林斯顿方程($MRR=kPV$)可知,PV 值反映了 MRR,因此预测加装芯模能够增大材料去除率。对比图 12 (b,c,d)3 图可知,芯模缩小和芯模增大后的 PV 值在小端入口处去除效果更不均匀,且芯模增大后的 PV 值在阀体大端深处的去除更不均匀。因此,经过仿真对比后最终确定为使用初始芯模结构。

4 试验验证

通过对 DN100 口径阀门进行磨粒流加工试验,验证有无芯模对阀门内腔粗糙度与表面形貌的影响。对三通阀门进行试加工,验证两套夹具方案。使用 HXS-350 机床,如图 13 所示,试验用磨料如图



(a) Contour plot of PV value distribution without core mold



(b) Contour plot of PV value distribution with initial core mold



图 13 希桦 HXS-350 机床外观图

Fig.13 Appearance of Xihua HXS-350 machine tool

14所示。参照图7有芯模装配剖面图,图15为夹具实物图,为便于观察芯模位置,未安装阀门。

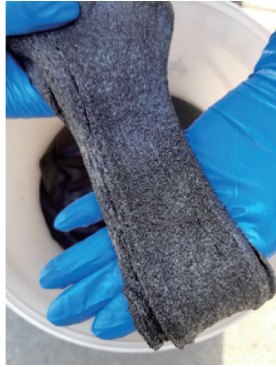


图14 试验用磨料

Fig.14 Abrasive media used in tests

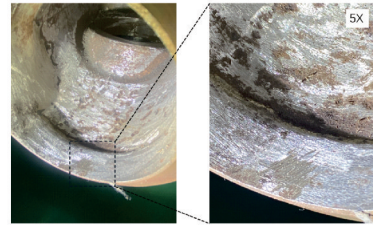


图15 夹具及工件实物图

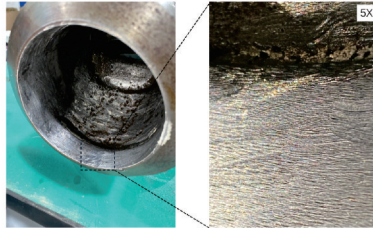
Fig.15 Fixture physical drawing

加工用磨粒类型为SiC,粒径选用24目,加工时间2 h,加工压强为5.5 MPa。开展三通阀门磨粒流光整加工验证试验。由于阀门底部入口具有车削台阶,粗糙度本身较低,且粗糙度仪无法测量,因此本文仅对阀门大端,小端入口处进行加工前后的粗糙度与形貌表征。阀门1和阀门2在铸造完成后均使用手工打磨去除了阀体内表面明显的铸造缺陷。

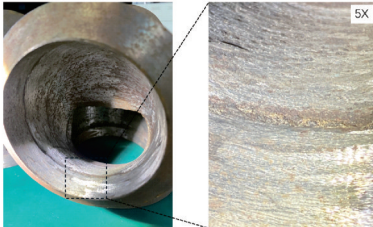
使用三丰粗糙度测量仪对阀门的大小两端进行测量,选用测量仪的取样长度 $l_r=0.8\text{ mm}$,评定长度 $l_n=5\times l_r=4\text{ mm}$ 。测量在同一位置加工前后的粗糙度值。在该区域随机选取了5个测量点,试验数据为3次测量后取平均值所得。首先测量阀门1大端、小端入口处粗糙度并拍摄表面形貌,如图16所示;之后将阀门1安装固定后置于希桦HXS-350机床滑台上。使用24目流体磨料,不加装芯模,设置加工时间2 h,加工压强为5.5 MPa。加工完毕



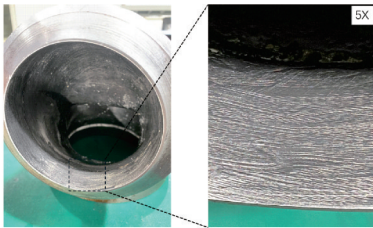
(a) Surface topography of valve 1 major end before machining



(b) Surface topography of valve 1 major end after machining



(c) Surface topography of valve 1 minor end before machining



(d) Surface topography of valve 1 minor end after machining

图16 阀门1加工前后表面形貌对比图

Fig.16 Comparison of surface morphology before and after processing of valve 1

后,再测量阀门大端、小端的入口处粗糙度数值,并拍摄表面形貌。加工前后的粗糙度数值如表1所示。其次,测量阀门2大端、小端的入口处粗糙度,并拍摄表面形貌;之后将阀门2安装固定后置于希桦HXS-350机床滑台上。使用24目流体磨料,加装芯模,设置加工时间2 h,加工压强为5.5 MPa。加工完毕后,测量阀门大端、小端的入口处粗糙度数值,并拍摄表面形貌。比较加工前后两端口处的

表1 粗糙度数值对比表

Table 1 Comparison of roughness values

阀门序号	是否装夹芯模	加工状态	大端/小端	粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$			平均粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$
1	否	加工前	大端	5.479	5.683	6.481	5.881
1	否	加工前	小端	6.947	5.481	6.474	6.301
1	否	加工后	大端	4.557	5.308	5.124	4.996
1	否	加工后	小端	5.235	5.209	6.260	5.568
2	是	加工前	大端	5.550	5.661	5.460	5.557
2	是	加工前	小端	5.793	6.133	5.594	5.840
2	是	加工后	大端	1.163	1.308	1.230	1.234
2	是	加工后	小端	1.382	1.415	1.186	1.328

粗糙度数值及形貌变化,如图 17 所示。

将加工前后两阀门的表面形貌进行对照,其中右侧区域形貌均为 5 倍放大。图 16(a~d)为阀门 1 试样在不加装芯模使用 24 目磨料和加工压强为 5.5 MPa 的条件下,阀门大小两端加工前、后的表面形貌图。从图 16 可以看出,加工前阀门内表面存在大量凹坑和较严重的砂轮打磨痕迹,加工后阀门内表面呈现金属本色,砂轮打磨痕迹有所改善,但整体仍较为粗糙。

图 17(a~d)为阀门 2 在加装芯模使用 24 目磨料和加工压强为 5.5 MPa 的条件下,阀门大小两端加工前、后的表面形貌图。从图 17 可以看出,加工前阀门内表面存在较严重的砂轮打磨痕迹和未能完全去除的锈迹以及一些较浅的凹坑,加工后阀门内表面呈现金属本色,砂轮打磨痕迹明显改善。

计算两阀门的粗糙度降低率,以验证有无芯模对阀门内腔粗糙度的影响。根据表 1 中的数据分别计算两个阀门的粗糙度降低率,公式计算为

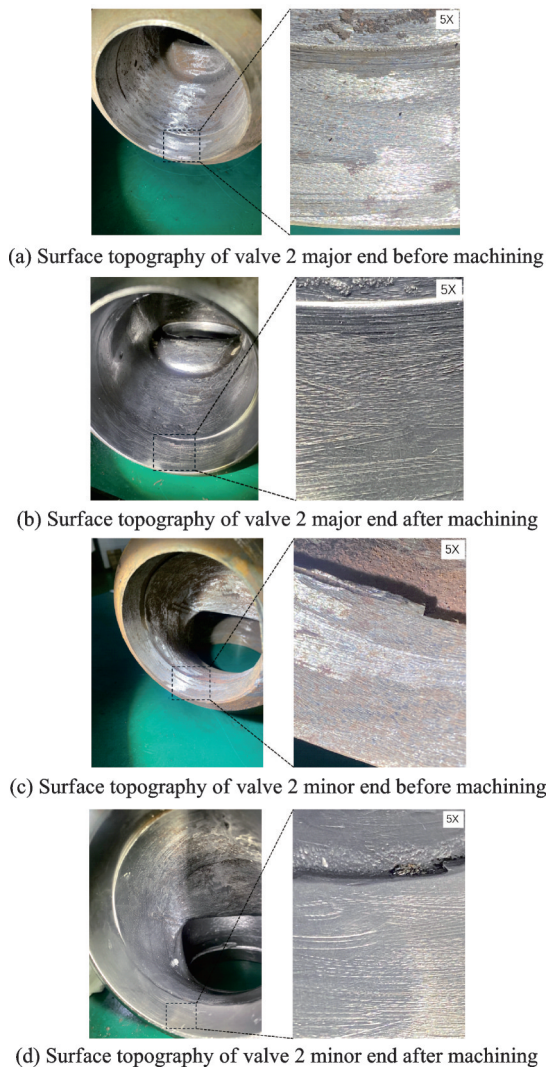


图 17 阀门 2 加工前后表面形貌对比图

Fig.17 Comparison of surface morphology before and after processing of valve 2

$$\Delta Ra = \frac{Ra - Ra'}{Ra} \times 100\% \quad (11)$$

式中: ΔRa 为阀体内腔表面粗糙度降低率; Ra 为工件原始粗糙度; Ra' 为加工后粗糙度。

将表 1 中数据代入式(11)中计算。使用无芯模夹具的阀门 1,其粗糙度降低率为:大端 15.05%,小端 11.62%;使用有芯模夹具的阀门 2,其粗糙度降低率为:大端 77.79%,小端 77.26%。由上述粗糙度数值、粗糙度变化率以及表面微观形貌的对比可知,加装芯模对磨粒流加工阀门内腔粗糙度影响显著,即加装芯模可以明显降低阀门内腔粗糙度,提高加工效率。

5 结 论

针对三通阀门内腔多采用手工抛光,加工效率低,劳动强度大且环境友好性差的问题,开展了三通阀门内腔磨粒流光整加工流场仿真分析与试验验证。首先进行了单颗磨粒的受力分析,然后通过建立阀体内腔流场仿真模型,对比了有芯模和无芯模情况下流场的分布,研制了专用的仿形夹具,并进行了有无芯模对材料去除效果影响的试验验证。得到以下结论:

(1)分析了黏弹性磨料中单颗磨粒的受力情况,表明壁面压强和磨料流速为影响 MRR 的两大关键因素,为后续芯模设计和流场仿真提供了理论依据。

(2)针对三通阀门的复杂内腔结构研制了仿形芯模,对不同芯模形状下的材料去除效果进行了仿真对比,优化了芯模结构。

(3)分别进行了磨粒流光整加工有无芯模的流场仿真分析,并采用 Tecplot 仿真后处理软件合并了上下行程的 PV 值,结果表明采用有芯模的夹具更能有效降低阀体内腔 PV 值。

(4)通过试验验证,使用无芯模夹具的阀门 1,其粗糙度降低率为:大端 15.05%,小端 11.62%;使用有芯模夹具的阀门 2,其粗糙度降低率为:大端 77.79%,小端 77.26%。结果表明相对于无芯模夹具,有芯模夹具可以明显降低阀门内腔粗糙度值,提高加工效率。

参考文献:

- [1] 渠晓刚,高杰,韩利萍,等.增材制造弯孔道的磨粒流抛光仿真与试验[J].现代制造工程,2023(7):97-105. QU Xiaogang, GAO Jie, HAN Liping, et al. Simulation and experiment of abrasive flow polishing for curved duct in additive manufacturing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(7): 97-105.
- [2] 汤炉滨,文东辉,孔凡志,等.磨粒流加工壁面效应研究[J].中国机械工程,2023,34(9):1077-1085.

- TANG Lubin, WEN Donghui, KONG Fanzhi, et al. Research on wall effect of abrasive flow machining[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(9): 1077-1085.
- [3] 杨范轩, 孙玉利, 马杰, 等. 航空用不锈钢磨粒流光整加工表面完整性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 452-460.
- YANG Fanxuan, SUN Yuli, MA Jie, et al. Study on surface integrity of aviation stainless steel in abrasive flow machining[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 452-460.
- [4] 王磊, 鄢宇梁, 赵纪元, 等. 增材制件内流道精整加工技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2023, 34(7): 757-769.
- WANG Lei, WU Yuliang, ZHAO Jiyuan, et al. Research progresses of finishing technology for inner channel of additive manufacturing parts[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(7): 757-769.
- [5] 王成武, 丁金福, 袁巨龙, 等. 椭圆内腔表面磨粒流均匀化光整加工研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19): 306-314.
- WANG Chengwu, DING Jinfu, YUAN Julong, et al. Research on uniformity precise finishing process of abrasive grain flow for ellipse inner cavity surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 306-314.
- [6] 尹洪超, 刘宵, 翟镇德, 等. 多角度弯曲管磨粒流加工数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(11): 1299-1306.
- YIN Hongchao, LIU Xiao, ZHAI Zhende, et al. Numerical simulation of abrasive flow machining in multi-angle elbows[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(11): 1299-1306.
- [7] 刘宵. 基于多场耦合的管内固液两相流数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- LIU Xiao. Numerical simulation of solid-liquid two-phase flow in pipe based on multi-field coupling [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [8] 索文华, 王毅, 闻家成, 等. 叶轮零件磨粒流抛光机理与数值模拟的研究[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 287-298.
- SUO Wenhua, WANG Yi, WEN Jiacheng, et al. Mechanism and numerical simulation of abrasive flow polishing for impeller parts[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 287-298.
- [9] 渠晓刚, 高杰, 焦松岩, 等. 磨粒流抛光阀块内孔道的数值模拟与试验研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(7): 70-76.
- QU Xiaogang, GAO Jie, JIAO Songyan, et al. Numerical simulation and experimental study on abrasive flow polishing of inner channel of hydraulic valve block [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(7): 70-76.
- [10] 魏海波. 磨粒流抛光介质性能表征与调控方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- WEI Haibo. Study on characterization and control method of abrasive flow polishing medium[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [11] 柯泰龙, 孙玉利, 汤张喆, 等. 增材制造异形波导管内腔的磨粒流抛光方法研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(1): 86-91.
- KE Tailong, SUN Yuli, TANG Zhangzhe, et al. Research on abrasive flow polishing method of additive manufacturing irregular waveguide inner cavity[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(1): 86-91.
- [12] 赵路, 孙玉利, 施凯博, 等. 整体叶盘磨粒流加工仿真与试验研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(13): 53-59.
- ZHAO Lu, SUN Yuli, SHI Kaibo, et al. Simulations and experiments on blisk by using abrasive flow machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(13): 53-59.
- [13] 汤张喆, 孙玉利, 王利峰, 等. 伺服交叉孔零件磨粒流去毛刺仿真研究及试验验证[J]. 航空制造技术, 2023, 66(23): 86-93.
- TANG Zhangzhe, SUN Yuli, WANG Lifeng, et al. Simulation research and experimental verification of abrasive flow deburring for servo intersecting-holes parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(23): 86-93.
- [14] 刘洋, 李俊烨, 苏宁宁, 等. 磨粒流抛光弯管的数值模拟与试验优化[J]. 机械设计与制造, 2021, 365(7): 137-140.
- LIU Yang, LI Junye, SU Ningning, et al. Numerical simulation and experimental optimization of abrasive flow polishing elbow[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, 365(7): 137-140.
- [15] 高航, 彭灿, 王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 14-22.
- GAO Hang, PENG Can, WANG Xuanping. Research progress on surface finishing technology of aeronautical complex structural parts manufactured by additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 14-22.
- [16] 石岩, 郭志, 刘佳, 等. SLM增材制造微流道内表面磨粒流抛光工艺与机理[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 361-369, 389.
- SHI Yan, GUO Zhi, LIU Jia, et al. Polishing process and mechanism of abrasive flow on inner surface of microchannel by SLM additive manufacturing[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 361-369, 389.
- [17] 张军锋. 整体叶盘叶片前后缘柔性抛光工艺及参数优化[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- ZHANG Junfeng. Flexible polishing process and parameter optimization of leading and trailing edges of integral blisk blades[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.