

引文格式: 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(23/24): 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(23/24): 86-93.

伺服交叉孔零件磨粒流去毛刺仿真研究及试验验证*

汤张喆¹, 孙玉利¹, 王利峰², 朱力敏², 柯泰龙¹, 左敦稳¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

[摘要] 针对伺服机构交叉孔零件头部壳体存在的毛刺去除工艺效率低、去除均匀性、一致性差的问题, 本文提出采用磨粒流去毛刺工艺。在工件内部结构分析、去毛刺加工路径规划的基础上, 建立起各加工路径流道仿真模型, 通过对各入口流道组对应路径的流场特性优化得出较优加工路径, 并在头部壳体工件上进行了磨粒流去毛刺验证试验。结果表明, 在大孔出口处增加引流段结构、延长流道长度, 可有效改善流道内部流线分布不均匀、流线压力相差较大的缺点, 最终解决了加工中毛刺去除效果不一致的问题, 并有效保护了入口与出口处的锐边。流道内部毛刺实现了去除, 内部小孔道边缘出现倒圆, 提高了工件的表面质量及使用性能。

关键词: 磨粒流加工; 去毛刺加工; 伺服交叉孔零件; 头部壳体; 流场仿真

Simulation Research and Experimental Verification of Abrasive Flow Deburring for Servo Intersecting-Holes Parts

TANG Zhangzhe¹, SUN Yuli¹, WANG Lifeng², ZHU Limin², KE Tailong¹, ZUO Dunwen¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problems of low efficiency, poor uniformity, and poor consistency of the existing burr removal process for the intersecting-hole parts top shell in the servo mechanism, a suggestion of using the abrasive flow deburring process was proposed. Through the analysis of the internal structure of the workpiece and the planning of the deburring processing path, the runner simulation model of each processing path was established, and the flow field characteristics of the corresponding path of each inlet runner group were compared, analyzed and optimized for better process path. Deburring verification experiments were carried out on the top shell workpiece. The results show that the uneven distribution of the streamline inside the flow channel and the large difference in the streamline pressure can be effectively improved by increasing the drainage section structure at the exit of the large hole and extending the length of the flow channel. Finally, the problem of inconsistent burr removal effect during processing can be solved and the sharp edges at the entrance and exit can also be effectively protected. After the experiment, the internal burrs of the runner are removed, and the edges of the internal small holes are rounded, which improves the surface quality and performance of the workpiece.

Keywords: Abrasive flow machining; Deburring process; Servo intersecting-holes parts; Top shell; Flow field simulation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.23/24.086

* 基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2022150); 校企合作项目(FdRW107-2019)。

伺服产品常见复杂多孔系结构的壳体类零件,精度要求高、结构复杂。在机械加工过程中,不可避免地会产生毛刺^[1]。对于伺服机构零件,毛刺的存在不仅会影响产品的质量与性能,更有可能由于其脱落产生多余物,影响管路流量或造成运动卡滞,进而影响伺服机构的运转效果。因此,毛刺的去除是伺服产品生产加工的重要工序。毛刺的去除方式有多种,如手工去毛刺^[2]、电化学去毛刺^[3]、热能去毛刺^[4]、磨粒流去毛刺^[5]等物理化学手段。对于本研究中的伺服交叉孔零件,在实际加工中最常用的毛刺去除方法是手工去毛刺,但是由于工件结构复杂,手工去毛刺加工效率低且质量不稳定,亟须一种能够实现高效高质去除伺服交叉孔零件毛刺的工艺。经研究对比发现,采用电化学去毛刺工艺时需制作专用电极,成本较高;采用热能去毛刺则存在一定的危险性;而采用磨粒流去毛刺操作方便、费用较低、效率较高,且可用于加工具有多交叉孔结构的工件。因此,本研究选用磨粒流工艺对毛刺进行去除。

磨粒流去毛刺是通过压力挤压使磨料(磨粒与介质混合)流经毛刺所在位置,实现对毛刺的去除。该种工艺是一种柔性加工方式,磨料的流动性可以使磨粒流工艺对工件内部难加工区域进行加工^[6-8]。对于内部具有交叉孔结构的零件,当磨料介质流经工件内部交叉孔位置时,切削作用会比磨料在直线通道内流动时更强,实现对交叉孔位置处毛刺的去除及倒圆,被去除的毛刺会随磨料排出工件外^[9]。因此,磨粒流工艺非常适用于去除伺服机构中具有多交叉孔结构工件的毛刺。国内的研究人员针对磨粒流工艺去除航空多通道零件毛刺进行了研究与探索^[10]。目前这类研究更多的是针对孔道较少的阀门类零件^[11-13],对于如何去除结构更为复杂、孔道数量更多的壳体类零件内部的毛刺还没有进行深入的探索研究。

对于伺服机构壳体类零件,交叉孔多且尺寸不一,若加工路径、磨料流向等规划不合理,会造成加工一致性差的情况^[14]。因此,在实际加工前需要首先规划出初

步加工路径,通过仿真模拟研究各路径流道内部流场特性,并对比分析各路径优缺点、挑选出较优的加工路径,进而提高磨粒流去毛刺质量^[15-17]。

本文针对一种典型的多孔系壳体类零件——伺服机构头部壳体零件,通过建立其内部流道模型,进行流场仿真优化磨粒流去毛刺的工艺路径,使得流过各毛刺点的磨料的流量、压力与速度趋于一致,并进行了头部壳体磨粒流去毛刺验证试验。

1 工件分析及加工路径规划

对于伺服机构壳体类零件而言,内部存在大量结构、直径、深度不同且相互交叉的孔道,在进行磨粒流去毛刺加工时,良好的加工路径(即磨料流动路径)规划有以下优势:(1)可以保证加工过程中每个孔道的流量均匀;(2)可以使加工中的磨料在各毛刺点处的流线压力及流线速度接近,保证毛刺去除的均匀性与一致性。

在进行加工路径规划前,需要对工件的整体外形及待加工区域进行分析,设置加工路径中的磨料出入口并结合出入口设置确定夹具及各孔道挡板、引流板的安装位置。头部壳体轮廓如图1所示。该工件体积较大且外形不规则,无法采用上下缸合模方式将工件及夹具夹紧,因此采用工件外置的方式对其进行加工。磨料从机床磨料缸中流出,并通过高压油管从安装在工件上的磨料引入头进入工件待加工区域,完成磨粒流去毛刺加工。

提取的工件内部待加工区域如图2所示,该流道共

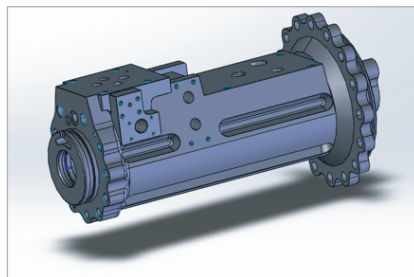


图1 头部壳体外观示意图

Fig.1 Appearance sketch of the top shell

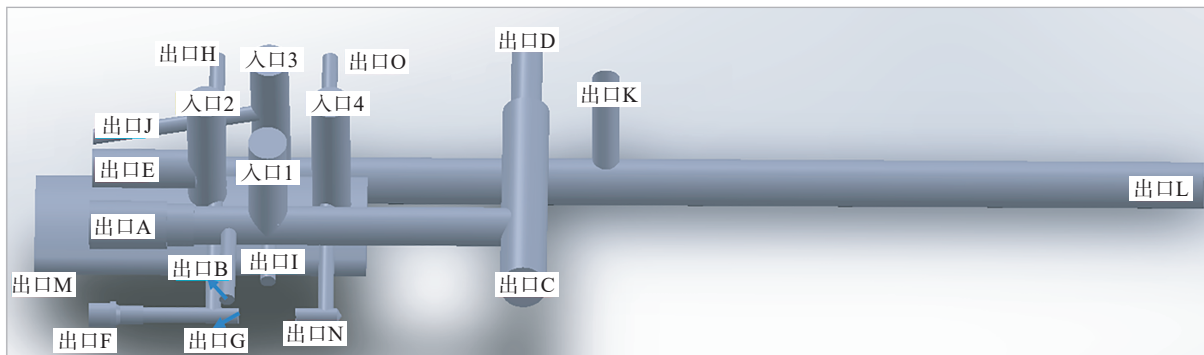


图2 待加工区域及孔口标注图

Fig.2 Marking diagram of the area to be processed and the mark of holes

有 19 个孔口,整体可分为 4 个部分。综合分析头部壳体外形及其待加工区域模型后,可以发现入口 1、入口 2、入口 3、入口 4 这 4 个孔(待加工区域模型及孔号标注如图 2 所示)相互独立,位置集中且处于同一平面,因此可以选作磨粒流去毛刺工艺的磨料入口孔。故总的加工路径确定为磨料分别从入口 1、入口 2、入口 3、入口 4 这 4 个孔进入,从其相对应的各个出口流出。

根据所提取的流道模型结合工件外形、工件表面的螺纹孔位置,所制定的初步加工路径如下。

入口 1 的加工路径。路径 1:入口 1 进磨料,A、B、C、D 口出磨料;路径 2:入口 1 进磨料,A、D 口出磨料;路径 3:入口 1 进磨料,B、C 口出磨料。其中路径 2 和路径 3 需组合使用。

入口 2 的加工路径。路径 4:入口 2 进磨料,E、F、G、H 口出磨料;路径 5:入口 2 进磨料,E、F 口出磨料;路径 6:入口 2 进磨料,G、H 口出磨料。其中路径 5 和路径 6 需组合使用。

入口 3 的加工路径。路径 7:入口 3 进磨料,I、J、K、L 口出磨料;路径 8:入口 3 进磨料,I、J、L 口出磨料;路径 9:入口 3 进磨料,K、L 口出磨料。其中路径 8 和路径 9 需组合使用。

入口 4 的加工路径。路径 10:入口 4 进磨料,M、N、O 口出磨料。

根据加工路径的制定及入口的选取,在工件表面安装磨料引入装置后将完整的待加工流道模型进行提取,得到如图 3 所示的三维仿真模型。

2 流场特性仿真分析与加工路径优化

采用 ANSYS Fluent15.0 进行流场仿真,研究中所使用的磨料属于非牛顿流体,根据式(1)计算雷诺数得^[18]

$$Re = (8^{(1-n)} \rho D^n V^{(2-n)}) / (K((3n+1)/4n)^n) \quad (1)$$

式中,黏度指数 K 为 $67920 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$; 密度 ρ 为 1628 kg/m^3 ; 幂律指数 n 为 0.4 ; 在样件上测试的流速 V 约为 5 mm/s 。计算可得雷诺数为 2.4×10^{-6} ,远小于临界雷诺数,因此在加工过程中磨料处于层流状态,在仿真中选择 Laminar 层流模型。在多相流模型中选择 Mixture 两相流模型,

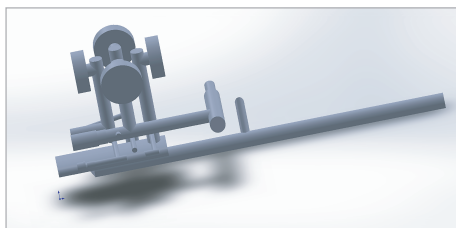
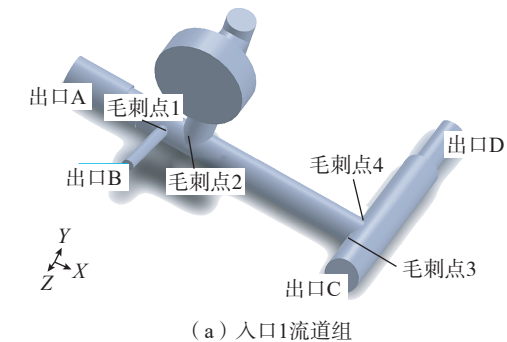


图 3 仿真模型
Fig.3 Simulation model

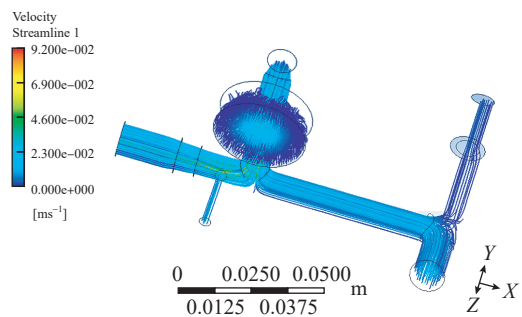
第一相为磨料介质,第二相为碳化硅颗粒,含量为 40%,粒径为 0.2 mm 。在不同的加工路径中,均设置边界条件入口压力为 3 MPa ,出口压力为 0 ,分别进行各路径的流场特性仿真。

2.1 入口 1 所在流道组仿真分析及路径优化

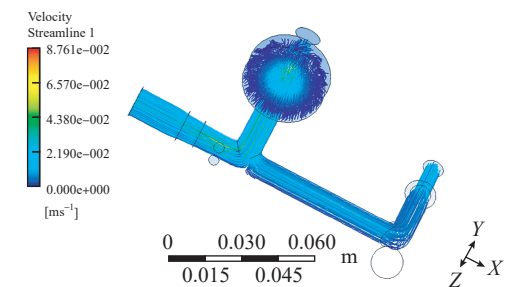
对入口 1 的 3 条加工路径进行仿真分析,流线分布结果如图 4 所示。可以看出路径 1 中的流线分布不均匀,A、C 两个大孔单位面积内的流线数量明显大于 B、



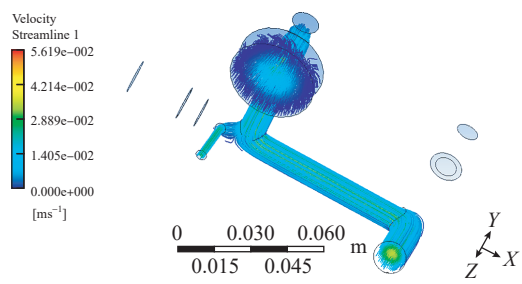
(a) 入口 1 流道组



(b) 路径 1 流线



(c) 路径 2 流线



(d) 路径 3 流线

图 4 入口 1 各路径流线分布

Fig.4 Streamline distribution of entrance 1 paths

D 两孔的流线数量,这是由于小孔道相对于大孔道给予磨粒的阻力更大,导致磨料流量的下降,在加工中会出现 B、D 两孔内部毛刺去除不完全,整体加工效果不一致的问题。对于路径 2 与路径 3 而言,两种路径的各孔道的磨料流量相较于路径 1 有所增加,但是两种路径在实际加工过程中需要结合起来进行使用,仅从拆装挡板及加工所需时间而言,路径 1 的加工效率要高于路径 2 与路径 3。

表 1 和 2 为入口 1 流道组各路径中各毛刺点的流线压力与流线速度表。可以看出靠近磨料入口的两个毛刺点的压力数值远大于另外两点,这是由于磨料的流线压力在流道内部呈现出从入口到出口逐渐下降的趋势。压力值差异较大同样会造成加工不一致的情况。从流速表看出,磨料在加工过程中流速均较慢。

针对路径 1 流场特性分布不均、路径 2 和路径 3 加工效率低下的问题,提出了一种优化思路:在 A、C、D 3 个出口增加与 B 口直径相同,长度为 10 mm 的引流段,即通过减小大直径孔道的出口进而对磨料施加背压,产生磨料分流现象,将大孔道的磨料部分分流至小孔道实现磨料流动的均匀性。图 5 为优化后的路径 1 流道组毛刺点标注及仿真流线分布图。

优化后的路径的流线分布相较于优化之前要更均匀,从而使各毛刺点所流经的磨料流量均匀,改善了路径 1 各毛刺点加工不一致的缺点;B、D 两个出口的流线数量明显增多,对 B、D 两孔道内的毛刺的去除效果也有增强,提高了加工质量。表 3 为优化后的毛刺点的压力与速度表。

根据表 3 分析,优化后的路径 1 的流线压力与前 3 种加工路径相比有了明显的提高,代表磨粒作用在毛刺

表 1 入口 1 流道各毛刺点流线压力

Table 1 Streamline pressure at each burr point of each path of entrance 1 MPa

路径名称	点 1	点 2	点 3	点 4
路径 1	0.57	0.55	0.12	0.09
路径 2	0.6	0.61	0.47	0.47
路径 3	N/A	1.54	0.28	0.26

表 2 入口 1 流道组各毛刺点流线速度

Table 2 Streamline velocity at each burr point of each path of entrance 1 (mm·s⁻¹)

路径名称	点 1	点 2	点 3	点 4
路径 1	20	25	12	3
路径 2	16	8	5	5
路径 3	N/A	6	7	5

上的压力增加,毛刺的去除效果提升。在流线速度方面,各毛刺点无明显差距。因此该种优化思路可行,可提高毛刺的去除效果。优化后的路径 1 选取为入口 1 流道组的加工路径。

2.2 入口 2、入口 3、入口 4 流道组流场特性分析及路径优化

图 6~8 分别为入口 2、入口 3、入口 4 各路径的流线分布图。可以看出,路径 4、路径 7 存在与路径 1 相同的缺点,即大孔磨料流量大于小孔的磨料流量进而造成加工不均,路径 5、路径 6、路径 8、路径 9 存在需要结合使用即加工效率偏低的缺点,路径 10 中的磨料可以充满整个流道,充足的磨料流量保证了毛刺去除的效果。

通过采用与路径 1 相同的优化方式,分别在路径 4 与路径 7 中的出口 E、出口 K 增加直径 4 mm、长度 10 mm 的引流段。优化后的流线分布如图 9 和 10 所示。可知,优化后的磨料流线分布相较于优化前有了明显改善,证明了该优化思路在流线分布方面的可行性。

分别对 3 组流道组的各毛刺点的流线压力、流线速度进行提取,探得在毛刺点 5 至毛刺点 17 中,除去毛刺

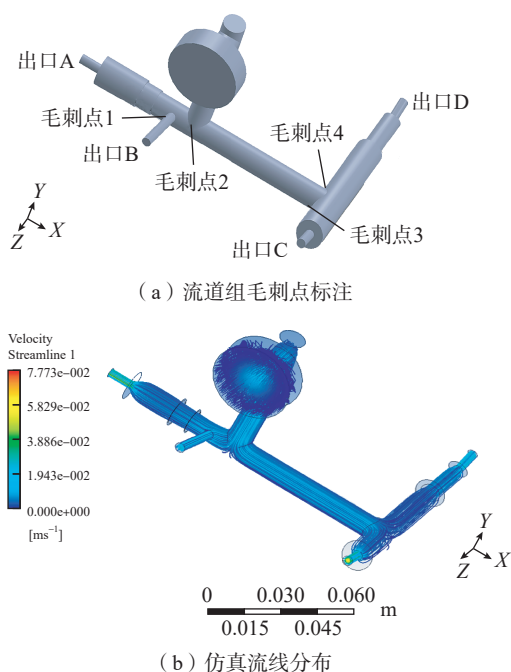


图 5 优化后的路径 1 流道组毛刺点标注及仿真流线分布

Fig.5 Burr points mark and optimized streamline distribution of path 1

表 3 优化后的路径 1 各毛刺点流线数据

Table 3 Streamline data at each burr point of optimized path 1

参数	点 1	点 2	点 3	点 4
压力 /MPa	2.08	2.1	1.71	1.7
速度 / (mm·s ⁻¹)	10	6	6	4

点6、毛刺点7与毛刺点17外,其余各点的压力均接近于1 MPa,而毛刺点6、毛刺点7、毛刺点17的流线压力则相对偏小,平均为0.1 MPa,这是由于该3点到流道出口0压处的距离极近,流线压力由入口向流道出口逐渐下降,使得这3点的压力接近于0,因此,针对毛刺点6、毛刺点7、毛刺点17所存在的问题需提出新的优

口0压处的距离极近,流线压力由入口向流道出口逐渐下降,使得这3点的压力接近于0,因此,针对毛刺点6、毛刺点7、毛刺点17所存在的问题需提出新的优

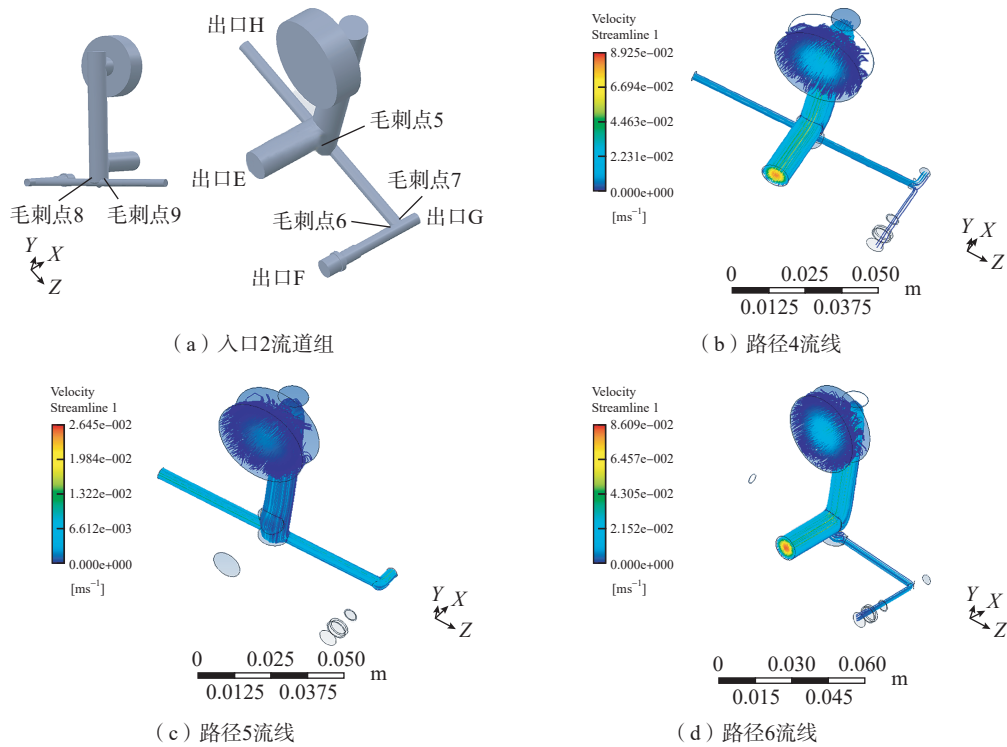


图6 入口2各路径流线分布
Fig.6 Streamline distribution of entrance 2 paths

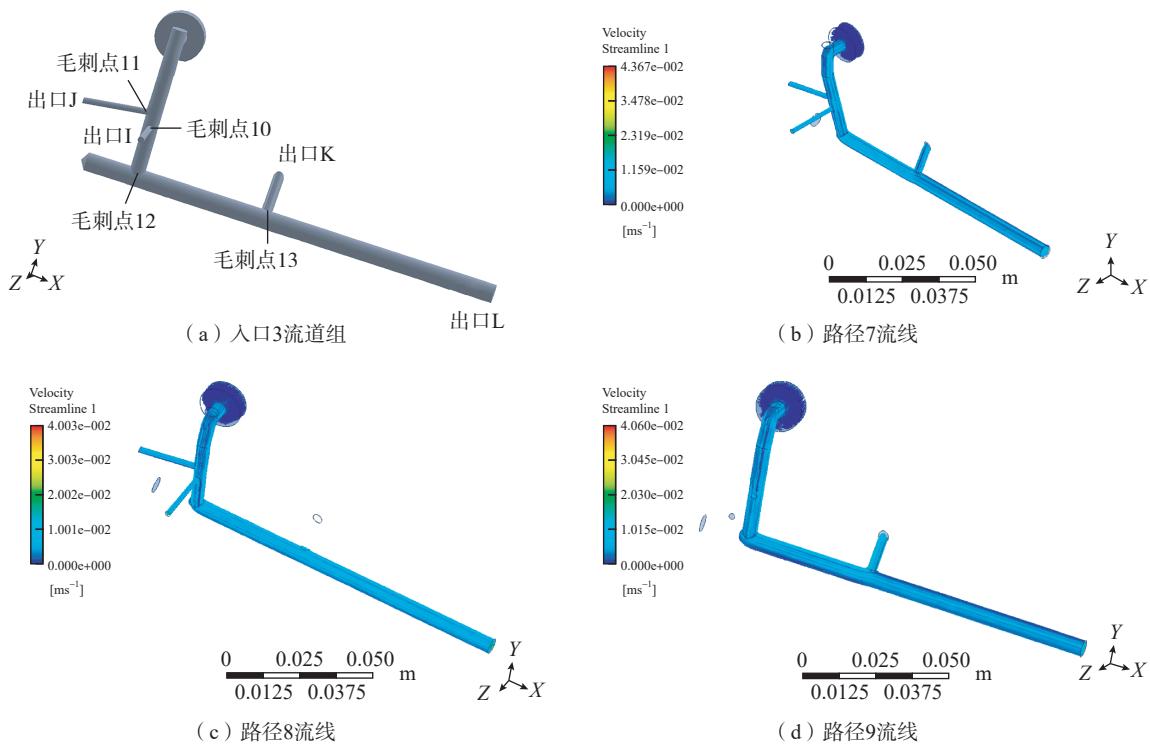


图7 入口3各路径流线分布
Fig.7 Streamline distribution of entrance 3 paths

化思路。

2.3 毛刺点 6、毛刺点 7、毛刺点 17 的路径优化

在前文中提到,磨料流线压力呈现出沿流道由入口向出口逐渐下降的趋势,因此第 2 种优化思路为通过增长流道的长度,使压力较低的毛刺点距离磨料出口的距离增长,减弱压降程度。对头部壳体工件重新分析可知,磨料出口 I、出口 G、出口 N 位于同一个可被挡板封闭的圆柱筒表面,如图 11 所示,当该部分被挡板封闭时,选取磨料入口为入口 4,磨料的出口会变更为 F 口,延长了磨料的流动长度,使毛刺点 6、毛刺点 7、毛刺点 17 远离磨料出口。对该加工路径进行流场仿真,路径毛刺点标注及流线分布图如图 12 所示,可知,该路径的流量

分布满足整体的均匀性要求,同时从压力对比表 4 中可以看出,路径 11 中的毛刺点流线压力有了明显的提高,均接近 1 MPa,因此通过安装挡板将出口 I、出口 G、出口 N 所处的圆柱面封闭的优化思路具有可行性,可以提高对毛刺点 6、毛刺点 7、毛刺点 17 的加工质量。

综上所述,头部壳体磨粒流去毛刺加工工艺路径的选取结果如下。

入口 1 流道组的加工路径:入口 1 进磨料,A、B、C、D 4 个出口同时出磨料,其中 A、C 两口处增加直径为 4 mm、长 10 mm 的引流段。

入口 2 流道组的加工路径:入口 2 进磨料,E、F、G、

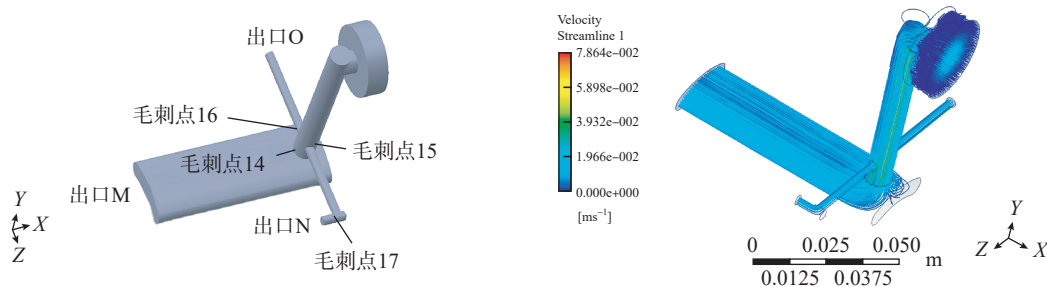


图 8 入口 4 路径 10 流线分布

Fig.8 Streamline distribution of entrance 4 path 10

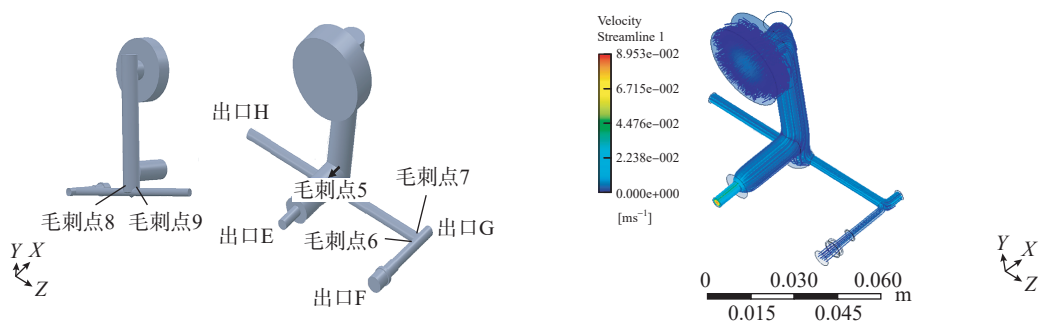


图 9 优化后的路径 4 毛刺点标注及仿真流线分布

Fig.9 Burr points mark and streamline distribution of optimized path 4

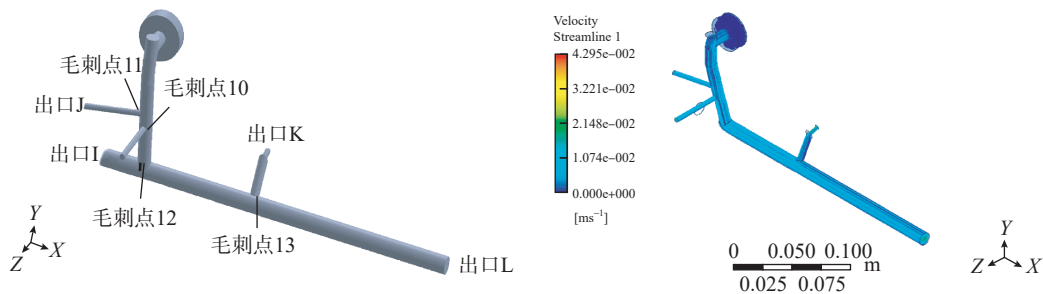


图 10 优化后的路径 7 毛刺点标注及仿真流线分布

Fig.10 Burr points mark and streamline distribution of optimized path 7

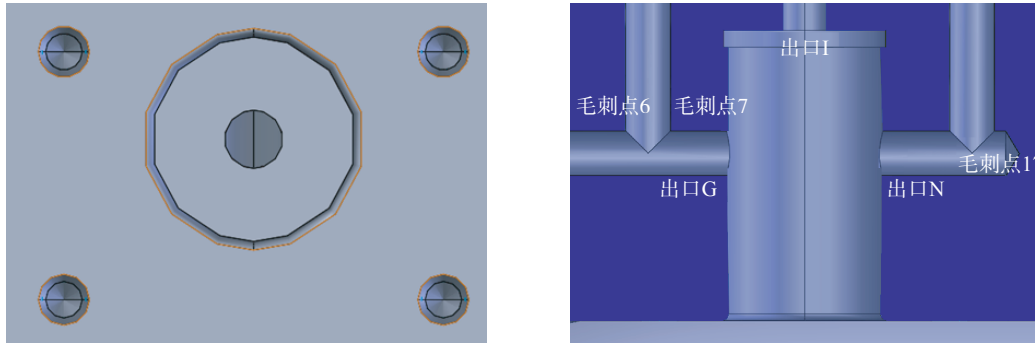


图 11 出口 I、出口 G、出口 N 位置分布
Fig.11 Distribution of exit I, exit G, exit N

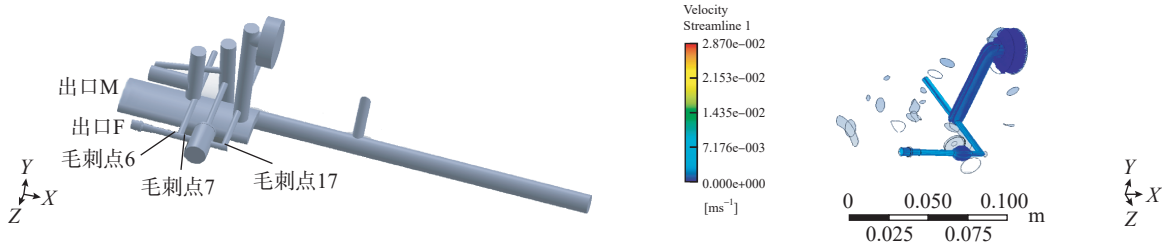


图 12 路径 11 毛刺点标注及流线分布
Fig.12 Burr points mark and optimized streamline distribution of path 11

H 4 个出口同时出磨料,出口 E 增加直径为 4 mm、长度 10 mm 的引流段。

入口 3 流道组的加工路径:入口 3 进磨料, I、J、K、L 4 个出口同时出磨料,出口 K 增加直径 4 mm、长度 10 mm 的引流段。

入口 4 流道组的加工路径:(1)入口 4 进磨料, M、N、O 3 个出口同时出磨料;(2)入口 4 进磨料,出口 F 出磨料。

3 头部壳体磨粒流去毛刺试验验证

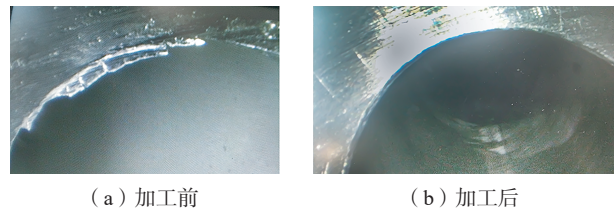
对头部壳体工件进行磨粒流去毛刺加工,用以验证优化后的工艺路径的可行性。根据优化后的加工路径,设计出一套用于头部壳体磨粒流去毛刺的挡板、引流板及磨料引入头。使用 Extrude Hone-Easyflow 机床,加工压力为 3 MPa,磨料磨粒类型为 SiC,粒径为 0.2 mm,加工时间为每组路径 90 s,加工方式为单向加工,对头部壳体工件进行加工试验。

加工完成后,先使用清洗剂对工件进行浸泡,再使用超声波清洗机对工件进行清洗。使用内窥镜(Karl-Storz)观测工件内部交叉孔毛刺去除情况。图 13 和 14 为加工前后头部壳体内部毛刺所在位置孔道图。可以看出,加工后,工件内部交叉孔的毛刺均实现了去除。对于小孔道而言,小孔道毛刺去除的同时,小孔边缘出现了倒圆现象,表明在相同的加工条件下,小孔边缘的

表 4 3 个毛刺点流线压力对比

Table 4 Comparison of streamline pressure at three burrs MPa

路径名称	点 6	点 7	点 17
路径 11	0.77	0.91	1.4
路径 4	0.11	0.086	N/A
优化后的路径 4	0.4	0.39	N/A
路径 10	N/A	N/A	0.15



(a) 加工前 (b) 加工后

图 13 大孔道去毛刺加工前后对比

Fig.13 Comparison before and after deburring of large channels

毛刺相对于大孔边缘的毛刺更容易去除,毛刺去除完成后,磨粒流工艺具有的切削作用会将孔口锐边加工出圆角,提高了产品的工艺性能。

4 结论

(1)建立了头部壳体各入口流道组的加工路径的流道模型,进行了流场仿真,获得了各工艺路径的流线

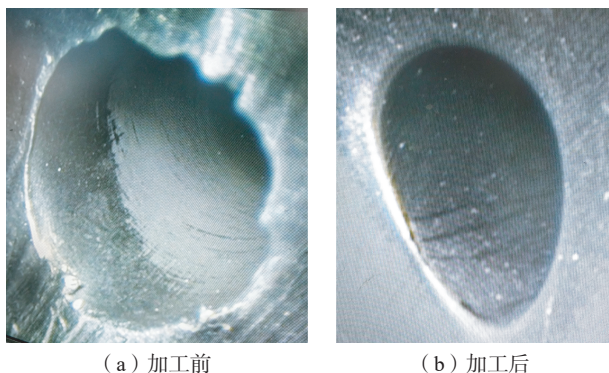


图 14 小孔道去毛刺加工前后对比

Fig.14 Comparison before and after deburring of small channels

分布、流线压力及流线速度,并通过路径优化及仿真证明了采用增加引流段的方式可以有效改善工件内部磨粒流流场。

(2)通过试验验证,实现了头部壳体内部交叉孔位置毛刺的去除,提高了工件的加工质量与产品性能,证明了本研究所优化的工艺路径在实际加工中的可行性。本研究中所应用的优化思路可以推广至其他具有交叉孔结构的多孔系零件磨粒流去毛刺加工中。

参考文献

- [1] AURICH J C, DORNFELD D, ARRAZOLA P J, et al. Burrs—Analysis, control and removal[J]. CIRP Annals, 2009(2): 519–542.
- [2] 徐支凤. 机械零件毛刺去除工艺现状[J]. 机床与液压, 2010, 38(8): 111–113, 110.
- XU Zhifeng. Present status of deburring processing for mechanical parts[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(8): 111–113, 110.
- [3] 郑乾坤. 小型机械构件电化学去毛刺研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
- ZHENG Qiankun. Research on the electrochemical deburring of small mechanical components[D]. Maanshan: Anhui University of technology, 2018.
- [4] 温从众, 耿艳娟, 李苹. 液压腔体零件交接孔热能去毛刺工艺研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(16): 33–35.
- WEN Congzhong, GENG Yanjuan, LI Ping. Thermal energy deburring process for transition hole in hydraulic chamber parts[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(16): 33–35.
- [5] UHLMANN E, MIHOTOVIC V, SZULCZYNSKI H, et al. Developing a process model for abrasive flow machining[J]. Burrs—Analysis, Control and Removal, 2010(1): 73–78.
- [6] RHOADES L. Abrasive flow machining: a case study[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1991(28): 107–116.
- [7] 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.
- [8] UHLMANN E, SCHMIEDEL C, WENDLER J. CFD simulation of the abrasive flow machining process[J]. Procedia CIRP, 2015, 31: 209–214.
- [9] 胡敬磊, 李俊焯, 赵伟宏, 等. 固液两相磨粒流抛变口径管的数值模拟研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 38–42.
- HU Jinglei, LI Junye, ZHAO Weihong, et al. Study on the polishing of variable diameter tube with solid liquid two phase abrasive flow[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 40(3): 38–42.
- [10] 张晶, 韩彬, 杜静. 航空发动机精密零件去毛刺技术研究[J]. 中国新技术新产品, 2019(13): 51–52.
- ZHANG Jing, HAN Bin, DU Jing. Research on deburring technology of aero-engine precision components[J]. New Technology & New Products of China, 2019(13): 51–52.
- [11] 刘志刚, 孙玉利, 余泽, 等. 多通道零件磨料流加工夹具设计及试验研究[J]. 航空精密制造技术, 2018, 54(5): 1–4, 13.
- LIU Zhigang, SUN Yuli, YU Ze, et al. Research on designing fixtures of machining multichannel workpiece in AFM[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2018, 54(5): 1–4, 13.
- [12] 刘晓, 李林洮, 赵光志, 等. 运载火箭阀门交叉孔去毛刺特种加工技术[J]. 电加工与模具, 2018(6): 58–61.
- LIU Xiao, LI Lintao, ZHAO Guangzhi, et al. Non-traditional machining deburring of valve crosshole in launch vehicles[J]. Electromachining & Mould, 2018(6): 58–61.
- [13] 张磊, 唐少楠, 朱小明, 等. 液压阀块毛刺的预防与去除[J]. 机械工程与自动化, 2015(1): 212–213, 215.
- ZHANG Lei, TANG Shaonan, ZHU Xiaoming, et al. Burr preventing and deburring process of hydraulic manifold blocks[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(1): 212–213, 215.
- [14] ZHANG L, HUANG Y, CHEN G D, et al. Experimental study of coverage constraint abrasive flow machining of titanium alloy artificial joint surface[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(13): 2399–2409.
- [15] VENKATESH G, SHARMA A K. Finishing of bevel gears using abrasive flow machining[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 320–328.
- [16] JI S M, GE J Q, GAO T, et al. Study on machinability of surface-constrained softness abrasive flow based on CFD–DEM coupled method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(54): 129–41.
- [17] WAN S, ANG Y J, SATO T, et al. Process modeling and CFD simulation of two-way abrasive flow machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5–8): 1077–1086.
- [18] 刘志刚. 精密接头磨料流光整加工机理与工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- LIU Zhigang. Research on mechanism and technology of machining precision joint by abrasive flow machining[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

通讯作者: 孙玉利, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为精密/超精密加工技术、现代表面工程技术。

(责编 古系)