

整体叶盘磨粒流加工仿真与 试验研究*

赵 路,孙玉利,施凯博,赵建社,左敦稳

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 针对航空发动机扩压器整体叶盘内流道表面加工成本高和效率低的问题,提出采用磨粒流加工方法。通过建立有无上压盖及引流芯模的流道仿真模型,对比分析了两种模型下仿真流场的分布规律。在此基础上,对工件的夹具结构进行了改进并利用该夹具对扩压器整体叶盘内流道表面进行了磨粒流光整加工试验。结果表明:增加上压盖及引流芯模结构后,有效改善了整体叶盘大端和小端处的局部流场,解决了加工效果不一致和锐边被磨料冲刷的问题,加工后流道表面粗糙度降低了 $0.6\mu\text{m}$,表面质量得到了进一步提高。

关键词: 整体叶盘;磨粒流加工;引流芯模;流体仿真;夹具设计

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.13.053



赵 路

硕士研究生,研究方向为精密超精密加工。

航空发动机扩压器可以保持叶盘流道内气流有均匀的轴向速度,确保气流稳定,降低发动机回流损失。目前采用电解电火花组合加工降低内流道粗糙度会产生重铸层,且加工时间较长^[1],国内采用人工砂带技术打磨^[2-5]闭式叶轮外表面已经比较成熟,但无法对整体叶盘内流道进行加工,如何高效高质进行整体叶盘内流道表面光整加工成为业界亟待解决的难点。

磨粒流技术是通过机床让磨料在压力作用下均匀流过需要加工的表面,从而实现工件表面质量的提高,特别适合于航空复杂零部件的加工^[6-9]。大连理工大学高航等^[10]通过建立有无引流芯模仿真模型,对比分析了两种模型下流场分布规律,优选出适应于螺旋面均匀光整加工的

夹具结构。

国内外对于磨粒流加工仿真做了大量的研究,但针对的工件各有不同,都取得了一定的研究成果^[11-13]。目前,针对整体叶盘磨粒流加工仿真方面的研究主要还集中在理论方面,对于该技术在加工中如何避免损伤特定部位,如何通过流体仿真软件辅助设计磨粒流加工夹具及实现表面粗糙度的均匀去除,即加工一致性方面尚未有人提出有效的解决方案。

本文以某型机整体叶盘为例,基于流体力学仿真,建立了叶盘夹具流道模型,分析了磨料介质在叶盘流道内的分布状况,发现在叶盘大端和小端处的局部流场分布不均会影响加工均匀性,在此基础上优化设计了叶盘磨粒流加工专用夹具,进行了优化结构后的仿真分析及试验验证。有

* 基金项目:校企合作项目(KFA17978-01);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20170507)。

效改善了局部流场的压力、壁面剪切应力和流速分布状况,改善了在大端处流道两侧不均匀现象及小端处锐边易被磨料冲蚀的问题,这些研究成果将为整体叶盘复杂异形通道磨粒流加工提供理论基础与试验支撑。

工件分析及磨料路径规划

夹具在磨粒流加工中起非常重要的作用。优良的夹具设计应具有以下特点:(1)方便工作人员装夹操作;(2)密封良好,避免加工过程中出现磨料泄露;(3)对工件特定易损的特征进行保护;(4)降低磨料使用量,减少加工时间,提高加工效率。因此开展夹具的设计与优化研究是很有必要的。

在进行夹具设计之前需要分析工件待加工的表面及需保护的特征,从而对路径进行规划。整体叶盘如图1所示,四周均布31个径向分布的变截面狭长流道,各流道出口处开阔,中心入口处狭窄,流道各截面面积沿径向有较大变化(流道由25个参数截面光滑连接而成)。

1和2处两个部位锐边,边缘较薄,在加工过程中易出现冲蚀倒圆,因此需要做好保护措施。设计上行程为机床从下磨料缸推动磨料从夹具底部圆形通孔进入内腔,从开阔的叶盘大端处进入,从狭窄的小端处流出实现内流道加工。夹具示意图如图2所示,下行程由上磨料缸推动磨料沿原路径返回,此为一个往复行程。

在图2中,垫块、叶盘底座、上压盖为尼龙材质,其余零件为铝合金材质。夹具底座中心有通孔,四周有

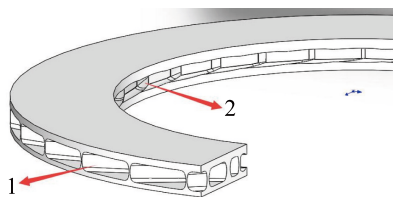


图1 整体叶盘外观示意图
Fig.1 Appearance sketch of the blisk

凹槽放置支撑环,叶盘底座用于夹紧叶盘,垫块用于支撑叶盘底座形成流道,其余零件依次放置和工件配合成约束流道,磨料从流通入口进入约束流道,流经叶盘内流道实现加工,再从流通出口流出。

仿真分析与夹具优化

1 无上压盖及引流芯模时内流道流场分析

本仿真基于 Ansys Fluent15.0, 仿真模型及网格划分如图3所示, 网格平均质量 0.93。试验中单次行程长度 0.5m, 磨料流动时间 4min, 计算得磨料流速约为 0.0021m/s, 计算雷诺系数为

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{1628 \times 0.0021 \times 0.05}{3500} = 0.000048 < 2300$$

所以磨料在运动中为层流状态,选择 Laminar 模型。使用黏度计(博勒飞 DVT2)测量磨料黏度为 3500Pa·s。设置幂律指数 $n=0.4$, 黏度指数 $K=6.792 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, 最小表

现黏度限制 $\eta_{\min}=1000\text{Pa} \cdot \text{s}$, 最大表观黏度限制 $\eta_{\max}=3500\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。模型选择两相流 Mixture, 第1相选择为介质磨料。第2相设置为碳化硅颗粒, 选取实验室已有磨料目数为 60 目, 粒径为 0.3mm, 碳化硅颗粒所占磨料体积分数为 40%。边界条件中设置入口压力为 8MPa, 出口压力设置为 0, 初始化模型选择 Hybrid Initialization。上行程设置为磨料从叶盘大端处进入, 从小端处流出; 下行程设置为磨料从小端处进入, 从大端处流出。迭代次数设置为 1500 次, 分别进行上下行程仿真, 分别在 340 步和 249 步收敛。

在流道平面插入平面 Plane1, 上下行程仿真压力分布结果如图4所示, 分别在流道大端右侧尖角取 1 点, 在流道左侧取 2 点, 在流道小端出口处取 3 点。通过插入探针测得上行程 1、2、3 点的压力值分别为 7.27MPa、6.93MPa、0.52MPa, 上行程流道入口两侧压差 0.34MPa, 在入

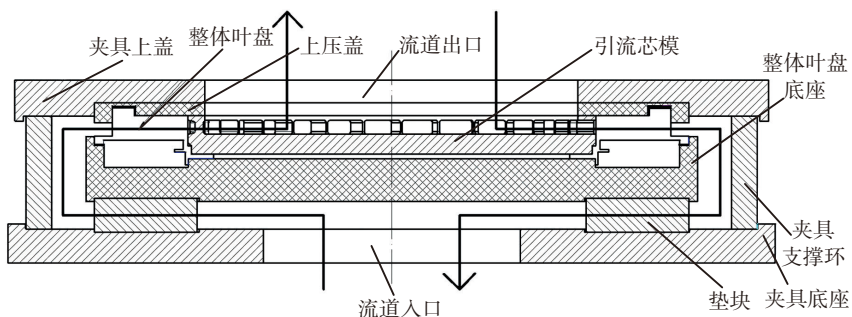


图2 夹具示意图
Fig.2 Sketch of the fixture

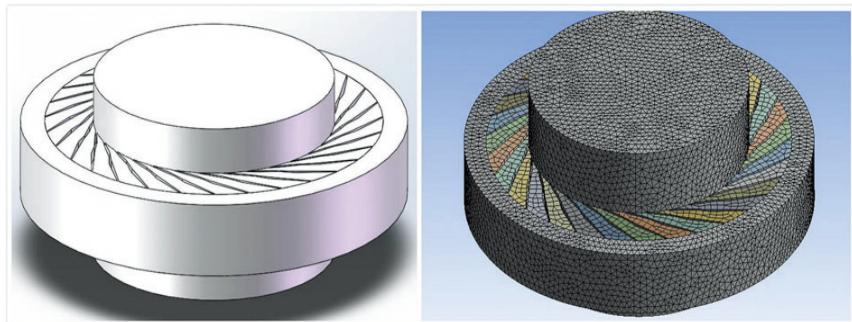


图3 仿真模型及网格划分
Fig.3 Simulation model and mesh

口和出口压差 6.75MPa。图 4 (b) 中下行程 1、2、3 点压力值分别为 0.74MPa、1.13MPa、7.43MPa,在入口处左右侧压差 0.39MPa,流道出入口压差 6.69MPa。

由以上分析可知,在无引流芯模和压盖的情况下,由于内流道大端处左右两侧及内流道出入口侧存在明显压差,因此,加工过程中,内流道表面粗糙度会出现加工不均匀现象。

上下行程速度流线分布如图 5 所示,可以看出,在上行程中,内流道中心处磨料流速大于两侧壁面的速度,因为两侧壁面存在对磨料的黏滞阻力。较多磨料沿着流道左侧进入流道大端口,在实际加工中会造成大端两侧加工不均匀。流出小端口时磨料由于向心力作用出现拐弯现象,易冲蚀小端锐边。下行程中,流道中心速度大于壁面速度,原因同上文。在小端处,磨料垂直进入流道冲蚀锐边,流道内左侧流道明显大于右侧,会造成左右侧加工不均匀,进一步验证了上文对于压力云图的分析结论。

图 6 为上下行程速度流线立体分布情况,可以看到,上行程中磨料沿竖直方向流出小端口,下行程中磨料垂直流入小端口。在实际加工过程中,可能会引起大端口左侧边缘锐边和小端口上边缘锐边的倒圆现象,甚至会出现 C 形豁口,所以必须采取相应措施解决这一问题。

从上文仿真中可以看出扩压器内流道磨粒流加工过程中需要解决如下 2 个问题:(1)在叶盘大端处由于流道较开阔,左右两侧会出现明显的压降及磨料流量差异,进而导致加工效果不一致;(2)在大端和小端处,应避免水平锐边和上锐边被磨料冲蚀,避免出现倒圆甚至 C 形豁口。

2 有上压盖及引流芯模时内流道流场分析

为有效解决上文中发现的问题,如图 7 所示,在大端处加入仿形上压盖,以增加大端处的背压,增加磨料

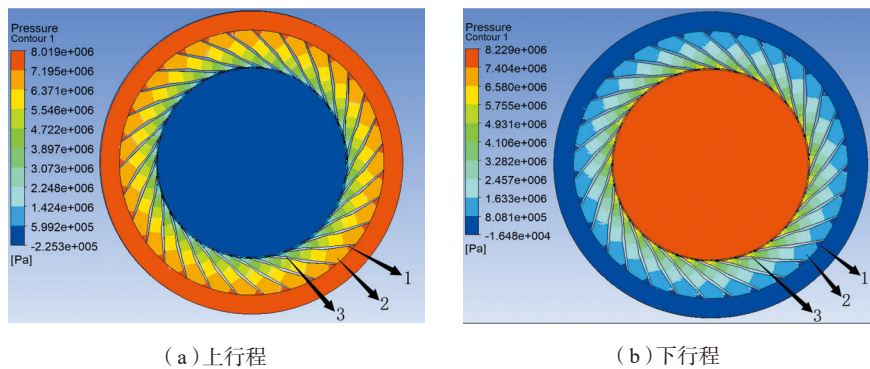


图4 上下行程压力分布云图

Fig.4 Pressure distribution of up-and down-strokes

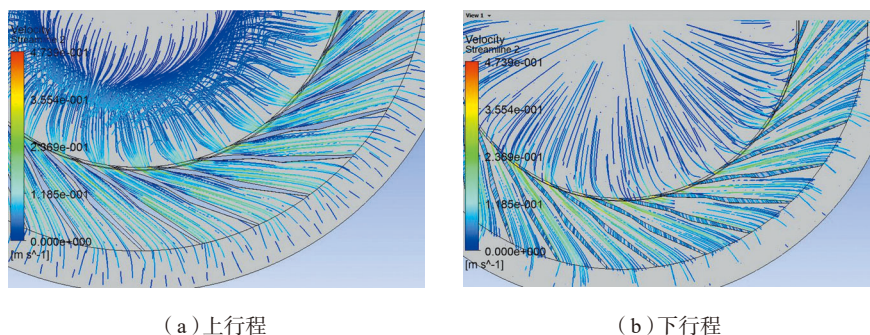


图5 上下行程速度流线平面分布

Fig.5 Streamline plane distribution of up-and down-strokes

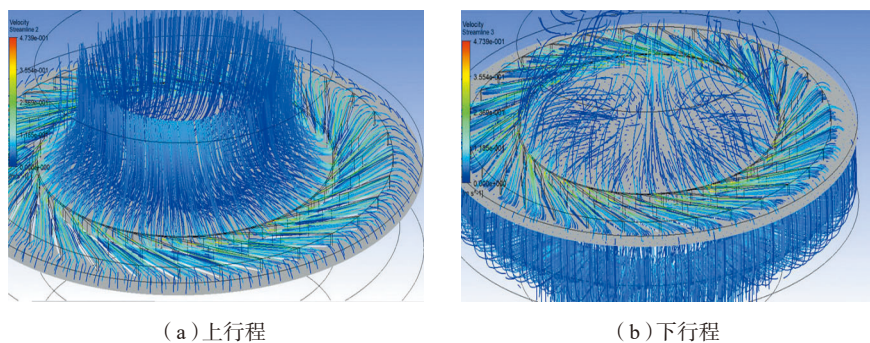


图6 上下行程速度流线立体分布

Fig.6 Streamline stereo distribution of up-and down-strokes

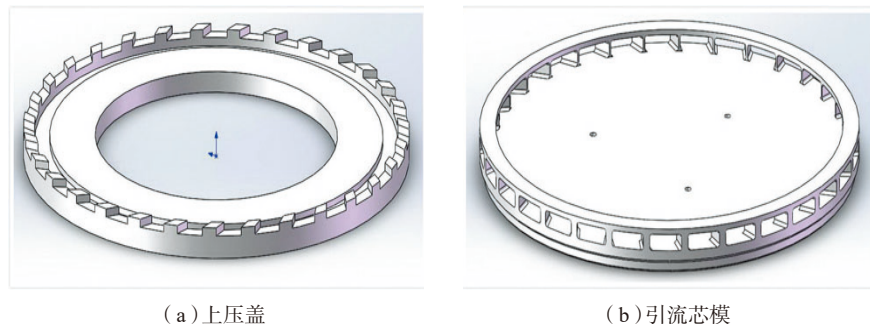


图7 上压盖及引流芯模

Fig.7 Gland and the drainage core mold

Fig.7 Gland and the drainage core mold

在入口处的分散性,降低大端处两侧压差和流量差,并加强磨料在入口处的磨削效果。在小端处加入引流芯模,引流芯模的流道倾角设计同叶盘流道,以延长磨料的流动距离,使磨料在进出小端处缓冲一段距离,避免局部的压力和速度集中,以水平方向速度和较低的压力进入小端处,避免冲蚀锐边。

构建新的流道模型及网格划分

如图8所示,网格平均质量0.88。分别进行上下行程仿真,边界条件设置同上文,因网格质量降低,在亚收敛因子设置中,将密度和体积力系数都设置为0.8,延长收敛时间,提高稳定性。设置1500迭代次数,最终分别于408步和456步收敛。

在相同位置处插入平面Plane2,可以看出优化后上下行程大端处红色和蓝色面积相较优化前明显增大,

说明压差降低。出口处也不再是压力最低的蓝色色块,证明压力相比之前增大。插入探针测得图9(b)中1、2、3点处的压力值分别为7.49MPa、7.34MPa、1.18MPa,图9(d)中1、2、3点处压力值分别为0.56MPa、0.60MPa、6.07MPa,相关数据如表1和表2所示。

从表1和表2可以看出,加入优化结构后上行程左右侧压差已降至0.15MPa,下行程大端左右侧压差降至0.04MPa,相较之前均明显降低。上行程1、2、3点压力相较之前均有增加,说明在加入压盖后可提高上行程加工效率。下行程1、2、3点压力相较之前降低是由于加入引流芯模后,磨料会提前改变流动方向进而提前泄压,所以进入流道的压力相较之前会降低,但可避免磨料在小端处对锐边的冲蚀。

壁面剪切力是由于流体具有黏性,流体流过壁面在接触面产生的滑移力,在一定程度上能够反映磨粒流在该平面加工时的加工效果。优化前后的壁面剪切力如图10所示,可知,在大端处设置上压盖区域和小端出口处壁面剪切力(图10(b))相较于优化前(图10(a))明显增大,即

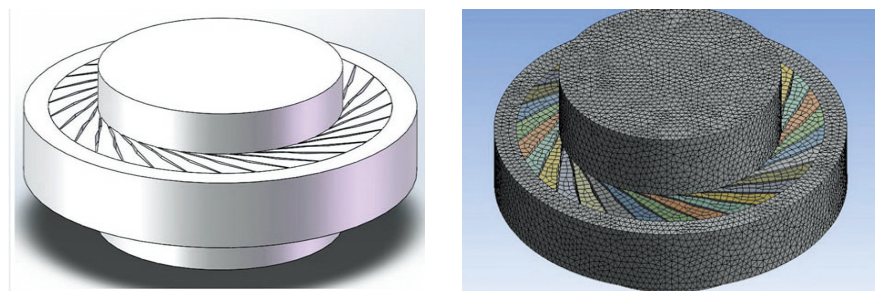


图8 优化后结构及网格划分
Fig.8 Optimized structure and mesh

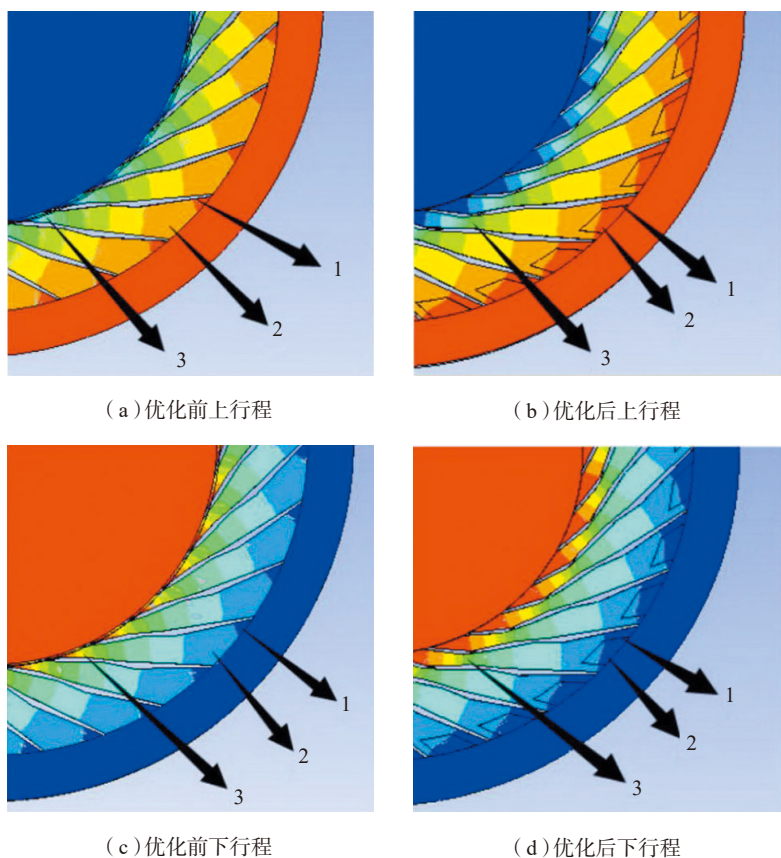


图9 优化结构前后上下行程压力分布

Fig.9 Pressure distribution of up-and down-strokes before and after optimizing structures

表1 上行程优化前后取样点压力值 MPa
Table 1 Up stroke sampling point pressure values before and after optimization

优化前后	1点	2点	3点	1、2点压差
优化前	7.27	6.93	0.52	0.34
优化后	7.49	7.34	0.15	0.15
差值	0.22	0.41	0.19	0.19

表2 下行程优化前后取样点压力值 MPa
Table 2 Down-stroke sampling point pressure values before and after optimization

优化前后	1点	2点	3点	1、2点压差
优化前	0.74	1.13	7.43	0.39
优化后	0.56	0.60	6.07	0.04
差值	0.18	0.53	1.36	0.35

证明上压盖和引流芯模结构的加入可以有效改善大端和小端局部流场的分布。

结构优化后的速度迹线如图 11 和 12 所示,由图 11 (b) 和(d) 可以看出,由于压盖的加入,工件大端处左右侧磨料流量更加均匀。由图 12 (b) 和(d) 可知,工件小端处磨料会沿着芯模流道向前延伸流动一段距离,磨料改变方向的位置出现在芯模终点处,且小端与芯模接触处流线速度增加,避免了大量磨料直接在小端口竖直进出,减小了磨料对小端处锐边的冲蚀。

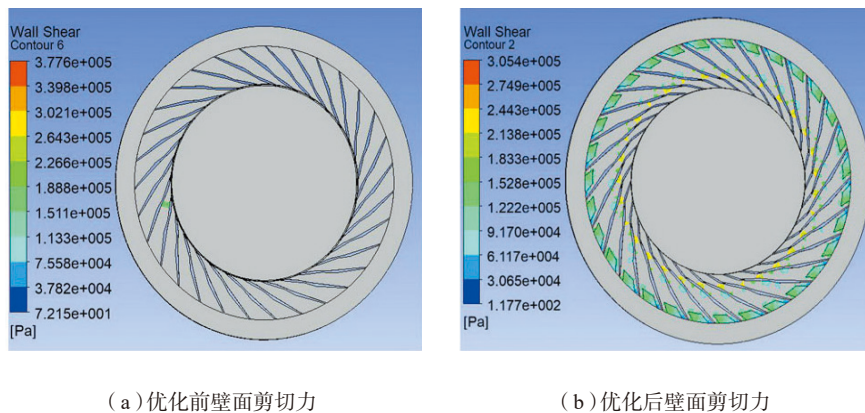
综上所述,设计的上压盖和引流芯模结构有效改善了大端和小端处的局部流场,有效解决了前文中发现的两个问题。在下文中,将通过试验验证仿真结果。

试验验证

对整体叶盘进行试加工,以验证仿真优化的夹具方案。使用普茨迈 PCMA-250 机床,加工工艺参数磨粒类型为 SiC,磨粒粒径为 60 目,加工压力为 8MPa;加工次数为 100 次,磨料用量为 25kg,开展整体叶盘磨粒流加工试验。

加工完成后,使用超声波清洗机对工件清洗,使用粗糙度仪(三丰 SJ210),取样长度设置为 5.6mm,测量整体叶盘大端处内流道下表面粗糙度值,左中右各测 3 次取平均值作为试验测量结果。表 3 为专用夹具优化前工件加工前后表面粗糙度及尺寸。

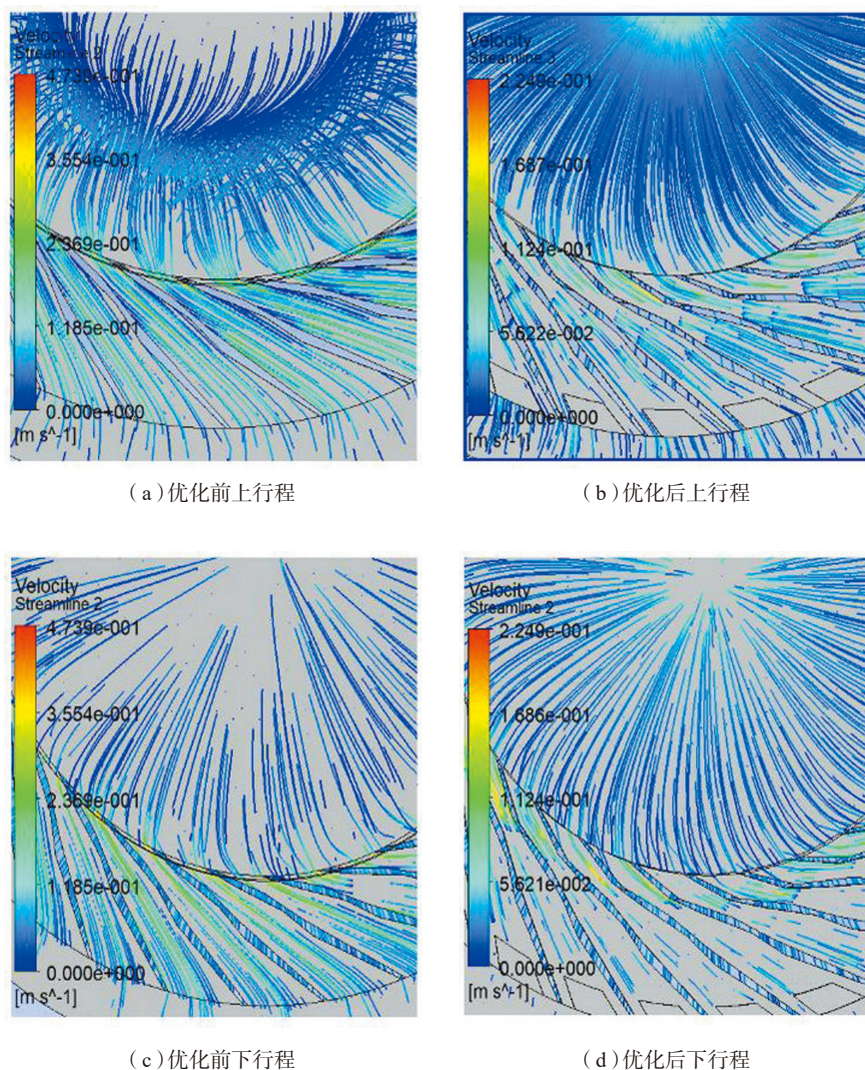
从表 3 中可以看出在前期预试验中出现了加工不均匀现象,加工前整体叶盘 31 个大端处左右粗糙度 R_a 测差值为 0.013,加工后左侧粗糙度平均值高于右侧 $0.3\mu\text{m}$,左右侧粗糙度降低值的差值为 $0.287\mu\text{m}$ 。这说明在加工过程中出现了加工不均匀现象,右侧去除量明显大于左侧,增大了两侧的不均匀现象。



(a) 优化前壁面剪切力 (b) 优化后壁面剪切力

图 10 优化前后壁面剪切力

Fig.10 Wall shear force before and after optimizing structures



(a) 优化前上行程 (b) 优化后上行程
(c) 优化前下行程 (d) 优化后下行程

图 11 优化前后上下行程速度流线平面分布

Fig.11 Streamline plane distribution of up-and down-strokes before and after optimizing structures

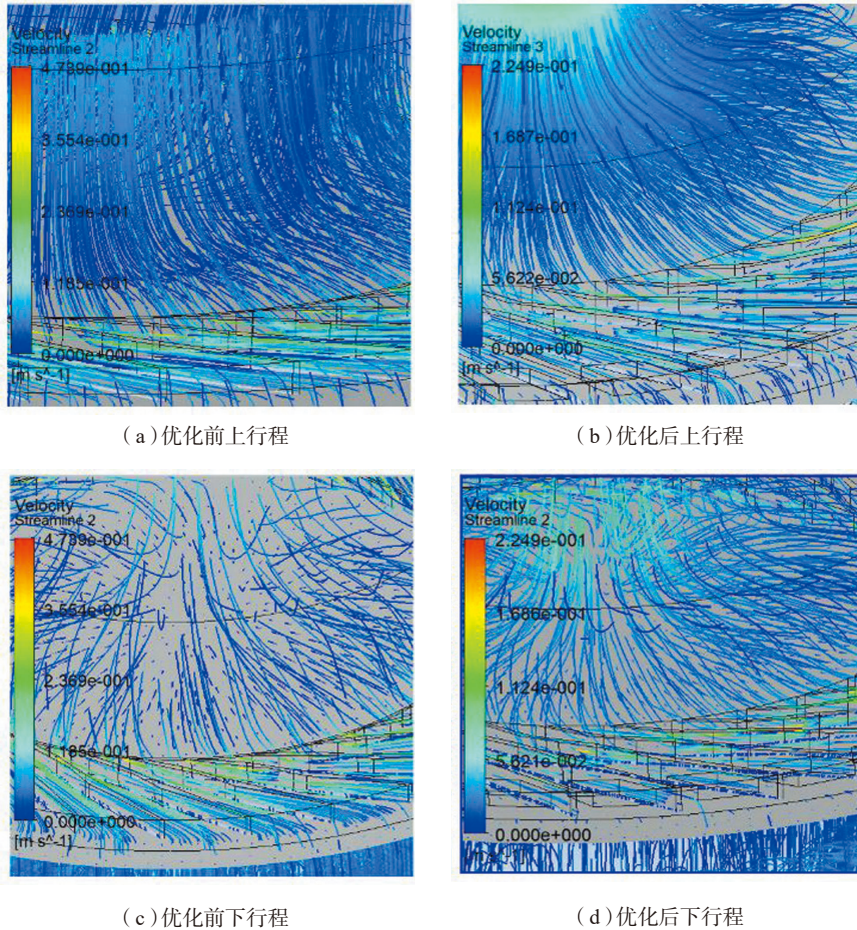


图12 优化前后上下行程速度流线立体分布

Fig.12 Streamline stereo distribution of up-and down-strokes before and after optimizing structures

表3 无上压盖及引流芯模加工前后表面粗糙度及尺寸

Table 3 Throat size and surface roughness before and after processing without gland and drainage core mold

顺序	左侧 $R_a/\mu\text{m}$	中间 $R_a/\mu\text{m}$	右侧 $R_a/\mu\text{m}$	喉道尺寸 / mm
初始值	1.826	1.780	1.813	10.40
加工后	1.282	1.202	0.982	10.40
降低值	0.544	0.578	0.831	0

使用优化的结构进行试验,表4为专用夹具优化后工件加工前后表面粗糙度及尺寸。

从表4可以看出,左侧和右侧 R_a 值的均匀性得到了明显提高,左右侧 R_a 降低值的差值降至 $0.079\mu\text{m}$,相较

表4 有上压盖及引流芯模加工前后表面粗糙度及尺寸

Table 4 Throat size and surface roughness before and after processing with gland and drainage core mold

顺序	左侧 $R_a/\mu\text{m}$	中间 $R_a/\mu\text{m}$	右侧 $R_a/\mu\text{m}$	喉道尺寸 / mm
加工前	1.282	1.202	0.982	10.40
加工后	0.777	0.697	0.398	10.40
降低值	0.505	0.505	0.584	0

优化前 $0.287\mu\text{m}$ 大大降低,说明优化的结构明显降低了右侧的去除量,且左中右粗糙度降低值平均保持在 $0.5\mu\text{m}$ 附近,说明优化的结构未降低加工效率,新夹具可以在保证加工效率的基础上保证加工的一致性,同时

关键的喉道尺寸未出现加工偏差,验证了新夹具的可行性。

结论

(1)建立了有无上压盖及引流芯模结构的流道仿真模型,进行了流体仿真,获得了约束流道内的压力、速度流线、壁面剪切力分布图,证明了加入上压盖及引流芯模结构可以有效改善整体叶盘入口和出口的局部流场。

(2)通过试验验证,采用优化的夹具改善了整体叶盘内流道局部流场,保护了工件特定易损锐边,叶盘大端处左右侧粗糙度 R_a 降低值差值降低至 $0.079\mu\text{m}$,提高了加工一致性,未出现尺寸加工偏差,加工效率相较优化前未降低,明显减小了整体叶盘内流道表面粗糙度,提高了工件表面加工质量。同时该研究方法也适用于其他具有复杂异形通道工件的磨粒流光整加工。

参考文献

[1] 赵建社,汪文峰,吕焱明,等.难加工材料闭式整体构件精密电火花加工技术研究[J].航空制造技术,2017,60(3):22-27.

ZHAO Jianshe, WANG Wenfeng, LÜ Yanming, et al. Research on precision EDM technology for closed integral component of difficult-to-cut material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(3): 22-27.

[2] 黄云,肖贵坚,邹莱.整体叶盘抛光技术的研究现状及发展趋势[J].航空学报,2016,37(7):2045-2064.

HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of polishing technology for blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2045-2064.

[3] 张宏友,吴鸣宇.航空发动机整体叶轮光整加工现状及方法研究[J].机械制造与自动化,2013,42(1):68-69,72.

ZHANG Hongyou, WU Mingyu. Study of current status and method of aeroengine blisk finishing[J]. Machine Building & Automation,

2013, 42(1): 68–69, 72.

[4] 崔海军, 张明岐. 航空发动机叶片抛光技术现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 128–131.

CUI Haijun, ZHANG Mingqi. Current situation and development trend of aircraft engine blade polishing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 128–131.

[5] 肖贵坚. 整体叶盘型面开放式砂带精密磨削方法及其实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

XIAO Guijian. Experimental research on the precision grinding method of blisk with open-loop abrasive belt[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[6] 高航, 李世宠, 付有志, 等. 金属增材制造格栅零件磨粒流抛光[J]. 航空学报, 2017, 38(10): 231–239.

GAO Hang, LI Shichong, FU Youzhi, et al. Abrasive flow machining of additively manufactured metal grilling parts[J]. Acta Aeroautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(10): 231–239.

[7] 朱建辉. 航空叶轮的磨料流加工模拟分析及可行性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

ZHU Jianhui. Simulating analysis and feasibility research of aero-impeller in abrasive flow machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[8] 刘向东, 季田, 庞占元, 等. 离心压缩机叶轮流道磨料流抛光及其对压缩机效率的影响[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(3): 12–15.

LIU Xiangdong, JI Tian, PANG Zhanyuan, et al. Study on AFM polishing of flow passage of centrifugal compressor impeller and its effects on compressor efficiency[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2009(3): 12–15.

[9] 李俊焯, 周立宾, 张心明, 等. 整体叶轮磨粒流抛光数值模拟研究[J]. 制造业自动化, 2016, 38(12): 88–93.

LI Junye, ZHOU Libin, ZHANG Xinming, et al. The numerical simulation research on abrasive flow polishing integral impeller[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(12): 88–93.

[10] 高航, 付有志, 王宣平, 等. 螺旋面磨料流抛光加工仿真与试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5): 920–926.

GAO Hang, FU Youzhi, WANG Xuanping, et al. Simulations and experiments on finishing

process of screw surface by using abrasive flow machining[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(5): 920–926.

[11] TANG B, JI SHI M, TAN D P. Structural surface of mould softness abrasive flow precision polishing machining method based on VOF[J]. Electrical and Control Engineering (ICECE), 2012, 61(9–12): 975–987.

[12] LI J Y, LIU WEI A, YANG L F, et al. Design and simulation for micro-hole abrasive flow machining[J/OL]. Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, 2009–11–10, http: DOI: 10.1109/CAIDCD.2009.5374.

[13] 张利, 陈俊超, 陈国达, 等. 基于湍流分散的磨粒流场分析及加工实验研究[J]. 机电工程, 2018, 35(12): 1266–1272.

ZHANG Li, CHEN Junchao, CHEN Guoda, et al. Turbulent dispersion based flow field analysis and experiment of abrasive flow machining[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(12): 1266–1272.

通讯作者: 孙玉利, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为精密超精密加工技术、现代表面工程技术等, E-mail: sunyuli@nuaa.edu.cn。

Simulations and Experiments on Blisk by Using Abrasive Flow Machining

ZHAO Lu, SUN Yuli, SHI Kaibo, ZHAO Jianshe, ZUO Dunwen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Abrasive flow machining (AFM) was proposed to finish the problems of high capital cost and low efficiency of surface polishing on the aero-engine blisk. By establishing the simulation model based on whether the blisk fixture tool contains the core mold and the gland, and compared the distribution law of the flow field in the simulation, redesigned the fixture structure to fit for the blisk. On this basis, the AFM processing experiment is carried out. The result shows that after adding the core mold and the gland structure, the AFM process can effectively improve the local flow field of the blisk, and solve the problem of the inconsistent processing effect and abrasive erosion on the sharp edge. The surface roughness of the flow channel is reduced by 0.6 μm , and the surface quality has been further improved.

Keywords: Blisk; Abrasive flow machining (AFM); Core mold; Fluid simulation; Fixture tool

(责编 大漠)