

精密与超精密加工

叶轮零件磨粒流抛光机理与数值模拟的研究

索文华, 王毅, 闻家成, 梁翔宇, 刘壮壮, 王善飞, 索红莉

(北京工业大学 材料与制造学部 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: **目的** 解决增材制造 TC4 钛合金 (Ti6Al4V) 叶轮零件表面粗糙度过大的问题。**方法** 采用磨粒流抛光技术对增材制造 TC4 钛合金叶轮零件进行抛光, 研究磨粒粒径、工作压力与抛光时间等因素对叶轮零件表面粗糙度和形貌的影响规律。同时利用 Fluent 软件对磨粒流抛光过程进行仿真, 建立三维叶轮模型, 以实际加工条件为仿真参数, 探究磨粒对近壁面静压、动压、湍动能、湍流强度的作用机理。**结果** 当磨粒流抛光的磨粒粒径为 0.425 mm、加工压力为 9 MPa、抛光时间为 20 min 时, 获得了表面粗糙度 $Ra < 2.5 \mu\text{m}$ 的增材制造叶轮零件。磨粒流抛光后表面摩擦系数从 0.428 1 降低为 0.385 3, 磨损机制由粘着磨损和剥落磨损变为磨粒磨损。仿真结果表明, 随着磨粒流体自上而下运动, 叶片间距逐渐增大, 叶轮表面所受动压、湍流强度及湍动能逐渐减弱, 因与约束装置的作用, 底部的动压、湍流强度和湍动能又增大, 因此叶轮叶片上端抛光较好, 中间部位抛光效果一般, 下端抛光效果也较明显。**结论** 磨粒流抛光过程中, 试样表面因塑性变形产生了加工硬化, 晶粒得以细化, 从而有效提高了其耐磨性能。通过数值模拟与试验分析验证了复杂曲面磨粒流抛光技术的有效性, 为磨粒流抛光技术提供理论基础。

关键词: 增材制造; TC4 钛合金; 磨粒流抛光; 表面粗糙度; 摩擦系数; 数值模拟

中图分类号: TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0287-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.026

Mechanism and Numerical Simulation of Abrasive Flow Polishing for Impeller Parts

SUO Wen-hua, WANG Yi, WEN Jia-cheng, LIANG Xiang-yu,
LIU Zhuang-zhuang, WANG Shan-fei, SUO Hong-li

(Key Laboratory of Advanced Functional Materials of the Ministry of Education, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

ABSTRACT: Additive manufacturing as a new manufacturing technology has significant advantages in producing complex impeller parts, but the surface roughness limits its wide application. Therefore, the work aims to solve the problem of excessive surface roughness of TC4 titanium alloy (Ti6Al4V) impeller parts produced by additive manufacturing. In order to improve the

收稿日期: 2022-04-21; 修订日期: 2022-07-22

Received: 2022-04-21; Revised: 2022-07-22

基金项目: 北京市自然科学基金 (2212025); 北京市教育委员会科技计划一般项目 (KM202010005007)

Fund: Beijing Municipal Natural Science Foundation (2212025); Beijing Municipal Education Commission Science and Technology Plan General Project (KM202010005007)

作者简介: 索文华 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面技术。

Biography: SUO Wen-hua (1994-), Female, Postgraduate, Research focus: surface technology.

通讯作者: 王毅 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面技术。

Corresponding author: WANG Yi (1980-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface technology.

引文格式: 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 Wen-hua, WANG Yi, WEN Jia-cheng, et al. Mechanism and Numerical Simulation of Abrasive Flow Polishing for Impeller Parts[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 287-298.

surface roughness of through-hole or complex outer surface parts caused by powder adhesion and spheroidization defects, abrasive flow polishing technology was applied to polish the surface of TC4 titanium alloy specimens. The effect of abrasive flow polishing on the surface roughness and morphology of TC4 titanium alloy was studied under different abrasive particle size, working pressure and processing time. The polishing process of abrasive was simulated by Fluent software to explore the mechanism of abrasive particles on the static pressure, dynamic pressure, turbulent kinetic energy and turbulence intensity near the wall. A three-dimensional impeller model was built and the actual processing conditions were taken as simulation parameters to verify the effectiveness of abrasive flow polishing method. At the same time, wear resistance of the TC4 titanium alloy before and after abrasive flow polishing were tested and analyzed. The TC4 titanium alloy specimens produced by additive manufacturing were cut into 40 mm×40 mm×5 mm by wire cutting, cleaned and dried. The SMK-600 abrasive flow polishing machine was used to optimize the surface roughness of titanium alloy specimens by cutting the workpiece surface through the reciprocating movement of abrasive media. The solid particles of abrasive medium were SiC abrasive particles, and the mixture of methyl silicone oil and polyacrylamide was used as liquid medium. Experiments verified that titanium alloy parts with surface roughness $Ra < 2.5 \mu\text{m}$ were obtained when the abrasive grain size was 0.425 mm, the processing pressure was 9 MPa and the polishing time was 20 min, meeting the processing requirements. The friction and wear test results demonstrated that the friction coefficient of TC4 titanium alloy specimen surface decreased from 0.428 1 before abrasive flow polishing to 0.385 3 after polishing, and the reduction of friction coefficient represented the improvement of wear resistance. The wear mechanism was changed from adhesive wear and spalling wear to abrasive wear. The reciprocating movement of the abrasive in the process of abrasive flow polishing caused plastic deformation of the material surface, which resulted in changes in work-hardened and the grains were refined, thus effectively improving the wear resistance. Numerical simulation results indicated that the blade spacing gradually increased as the abrasive fluid moved from top to bottom, the dynamic pressure, turbulent kinetic energy and turbulence intensity on the surface of the impeller gradually weakened. When the fluid reached the bottom of the impeller, the dynamic pressure, turbulence strength and turbulence kinetic energy increased due to the role of the restraint device. Therefore, the polishing effect of upper and lower ends of the blade were better than those at the middle part. In the process of abrasive flow polishing, the surface of the specimen is work-hardened due to plastic deformation, and the grains are refined, thus effectively improving the wear resistance. The abrasive flow polishing is suitable for improving the surface quality of complex outer surface parts such as impeller. The effectiveness of abrasive flow polishing technology for complex curved surfaces is verified by numerical simulation and experimental analysis, which provides a theoretical basis for abrasive flow polishing technology.

KEY WORDS: additive manufacturing; TC4 titanium alloy; abrasive flow polishing; surface roughness; friction coefficient; numerical simulation

叶轮零件^[1]是航天发动机的主要部件,其加工精度和质量影响着发动机的使用性能。另外,TC4钛合金(Ti6Al4V)具有耐腐蚀性能优越、密度小、比强度高和韧性良好等一系列优点,是生产轻质高强度叶轮零件的不二选择^[2-4],被广泛地应用于航空航天等领域^[5-7]。增材制造技术,即3D打印技术^[8-10],作为新型制造技术,在生产小批量复杂工件上具有显著的优势。在制造成形过程中,由于复杂的热交换导致能量密度不均匀,零件表面易出现“粉末粘附”与“球化效应”等缺陷,从而导致工件表面粗糙度过大,平整度下降,在航空航天领域,可能会影响高精度零件的装配,难以满足使用要求^[11-16],甚至引发安全问题。就目前的工艺技术来看,很难从调节金属增材制造工艺参数的角度来直接提高表面质量,因此通过后处理加工来改善增材制造零件的表面质量成为了必然选择。常见的增材制造钛合金零件表面光整加工技术主

要有机械抛光、激光熔覆抛光^[17]、电化学抛光及磨粒流加工^[18]等。其中磨粒流加工作为一种新型表面处理方法,因其高加工可达性对通孔型零件的内表面和复杂曲面具有不错的表面处理效果而被广泛应用^[18-19]。

磨粒流加工技术自1960年提出以来,就引起了大量国内外科学工作者的关注。Williams等^[20]采用磨粒流抛光技术增材制造零件表面进行处理,使用扫描电子显微镜观察磨粒流加工后零件的表面形貌,得到了不同加工方法对表面的影响规律,并得出了使用磨粒流抛光可以改善由“阶梯效应”导致的表面粗糙度过大的结论。Sangil等^[21]研究了磨粒流加工技术对由SLM技术制成的保形冷却通道的抛光效果,发现试样内部通道的表面粗糙度整体有所下降,尤其是直形的通道加工效果更明显。

国内大连理工大学和西北工业大学也进行了磨粒流抛光试验的研究。大连理工大学的朱建辉等^[22]

使用碳化硅对航空叶轮的叶片进行磨粒流抛光试验, 提出了旋转磨粒流加工的技术方案。西北工业大学的党稼宁等^[23]对增材制造的燃油喷嘴特征件进行了磨粒流抛光研究, 成功将喷嘴内流道表面粗糙度由 9.10 μm 降至 2.70 μm 。高航等^[24-25]以增材制造格栅零件为对象进行了磨粒流抛光试验, 通过基准孔的方法对比了磨粒流加工前后格栅的表面形貌和表面轮廓, 研究了磨粒流加工对“球化效应”的去除机理。

以上都是针对简单的零部件进行抛光处理, 但实际应用很局限。本文针对复杂异型的通孔型增材制造钛合金叶轮零件的表面质量进行研究, 采用磨粒流加工技术, 研究磨粒流抛光机制, 掌握复杂异型增材制造钛合金零件表面处理的控制技术, 为磨粒流加工技术应用于复杂曲面抛光领域探索出有效途径。

1 试验

本试验所需试样来自中南大学粉末冶金重点实验室, 通过选区激光熔覆技术制造生产的增材制造钛合金样品, 其化学成分见表 1。

表 1 增材制造 TC4 钛合金试样元素组成
Tab.1 Element composition of TC4 titanium alloy specimen by additive manufacturing

wt. %					
N	Fe	O	Al	V	Ti
0.05	0.3	0.2	6.2	4.5	Balance

试验设备选用 SMK-600 型磨粒流抛光机, 磨粒流加工的三要素分别为机床、流体磨料和夹具。机床由主机、液压系统及控制系统组成。主机主要由 2 个水平或垂直相对的料缸组成。液压系统是磨粒流加工的动力, 可以驱动上料缸和下料缸分合以及挤压磨料流动。控制系统是对液压系统的各电磁阀进行控制的装置, 还可以检测温度、压力、速度等各种加工参数。流体磨料介质是由磨粒、高分子聚合物和添加剂组成的具有黏弹性的物质, 有一定的流动性。夹具有着固定工件和密封上下料缸形成加工通道的作用, 但并不是所有磨粒流加工都需要使用夹具。若被加工工件自身存在能够使磨料自由通过的间隙就不需要使用夹具, 磨粒流加工过程如图 1 所示。在加工前, 先将

黏弹性磨料装入下料缸中, 再把工件与夹具装配好, 夹持在上料缸与下料缸之间。这时上下料缸及工件、夹具就形成密闭空间。工作时, 通过液压机驱动下料缸的活塞向上挤压流体磨料介质, 磨料经过工件与夹具形成的通道进入上料缸。然后由上料缸活塞开始向下挤压磨料, 使磨料再经工件加工表面返回下料缸, 这就是一个完整的加工循环。磨粒流加工通过往复运动, 对工件的表面进行切削加工, 金属碎屑随磨粒排出系统。

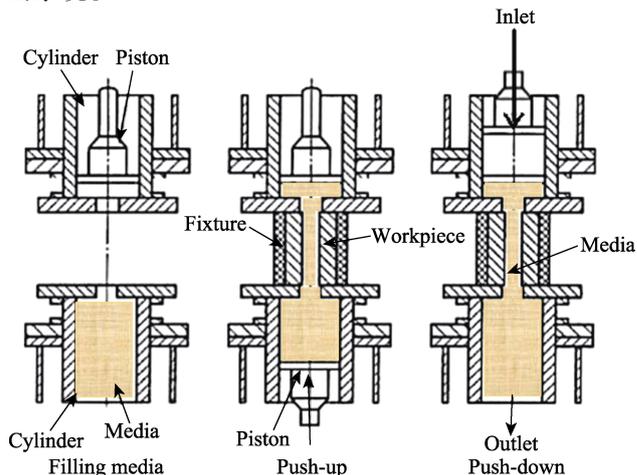


图 1 SMK-600 型磨粒流抛光机的加工原理
Fig.1 Processing principle of SMK-600 abrasive flow polishing machine

在前期大量试验中发现, 磨粒粒径、工作压力和抛光时间等对磨粒流抛光效果的影响较大, 为研究磨粒粒径、工作压力和抛光时间对增材制造钛合金试样表面粗糙度的影响规律, 分别进行磨粒粒径 (0.25~0.71 mm)、工作压力 (8~10 MPa) 和抛光时间 (10~30 min) 等因素试验。磨粒流抛光前, 使用线切割设备将增材制造钛合金试样切割成 40 mm×40 mm×5 mm 大小, 分别使用丙酮和无水乙醇依次进行超声波清洗, 去除表面残余的粉末颗粒和污染物, 最后用去离子水进行清洗后烘干备用。将清洗好的试样安装到设计好的定制夹具 (如图 2 所示) 中, 磨料介质固相颗粒选择常用的 SiC 磨粒 (粒径为 0.25~0.71 mm, 密度为 3 100 kg/m³), 液相介质为甲基硅油 (密度为 880 kg/m³) 和改性的高分子聚合物分散剂 (聚丙烯酰胺) 的混合液, 充分混合后备用, 如图 3 所示。

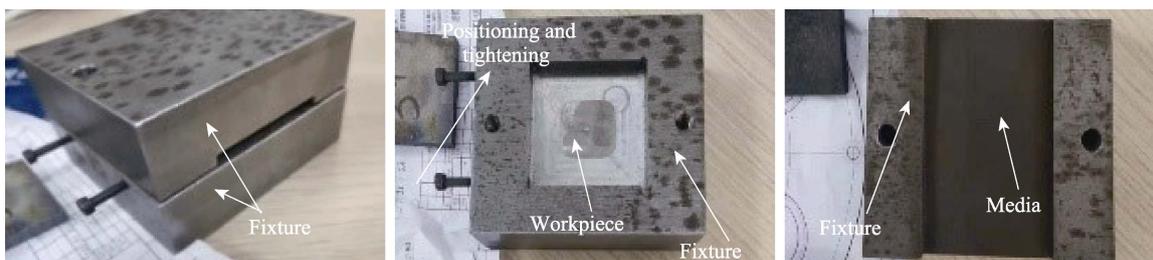


图 2 磨粒流加工夹具和流道
Fig.2 Fixture and runner for abrasive flow polishing



图3 SiC 磨料介质
Fig.3 Abrasive media of SiC

本文采用 XRD (Bruker-D8 Advanced X-ray diffraction) 和 FEISEM (Quanta Feg 450) 对磨粒流加工处理前后的增材制造 TC4 钛合金零件表面进行物相、残余应力和形貌分析。利用激光共聚焦显微镜 (Laser Scanning Confocal Microscopy, 简称 LSCM) 获得磨粒流抛光前后钛合金零件的表面粗糙度。使用 UMT-2 多功能微摩擦磨损试验机 (Bruker UMT-2) 对抛光前后的钛合金零件表面进行摩擦测试分析。

2 结果与讨论

2.1 磨粒粒径对表面质量的影响

在磨粒流抛光过程中,不同工作压力、磨料种类、粒度规格、磨料黏度和抛光时间等均影响表面抛光精度。经研究前期大量试验数据发现,磨粒粒径对抛光的影响最大,因为极差最大,工作压力、抛光时间的影响程度依次减弱^[23,26]。选用合适的磨粒参数会提高磨粒流抛光效果,降低钛合金零件的表面粗糙度。

为了探究磨粒粒径对增材制造 TC4 钛合金表面抛光质量的影响规律,设定加工压力为 10 MPa、加

工时间为 10 min,将磨粒粒径尺寸调节为 0.25、0.425、0.71 mm 进行磨粒流抛光试验,不同磨粒粒径加工后的试样表面微观形貌如图 4 所示。从图 4a 中可以看出,抛光前的试样表面较为粗糙,附着大量未熔融的金属粉末颗粒;经过磨粒流加工后,试样上因球化效应而导致的表面颗粒化已经得到了有效的改善,如图 4b—d。通过观察图 4b 发现,使用粒径尺寸为 0.25 mm 的磨粒抛光,加工后的钛合金表面会出现明显的切削凹坑。使用 0.425 mm 的磨粒抛光后,可以发现,虽然表面凹坑的数量有所减少,但仍存在一些比较明显的痕迹,见图 4c。当使用 0.71 mm 的磨料时,可以看到,虽然试样表面已经没有了明显的切削凹坑,但是钛合金试样表面出现了许多错杂的划痕,见图 4d。

对上述不同磨粒粒径加工后的 TC4 钛合金表面进行表面粗糙度测量,得到表面粗糙度随磨粒粒径的变化曲线,并给出磨粒粒径为 0.425 mm 时的三维形貌,如图 5 所示。从图 5 中看出,在工作压力为 10 MPa 及抛光时间为 10 min 等条件一致时,随着磨粒粒径的增大,零件表面粗糙度呈现先下降、后上升的趋势。未抛光的钛合金零件表面粗糙度值 R_a 为 32.161 μm ,表面质量差;磨粒粒径为 0.25 mm 时, R_a 为 2.767 μm ,表面质量较差;随着磨粒尺寸增加到 0.425 mm 时,所获得的表面最好, R_a 为 2.126 μm ;当磨粒粒径尺寸继续增大时,钛合金零件表面粗糙度表现为增大趋势, R_a 增至 3.5 μm ,表面质量变差。通过激光共聚焦显微镜观察发现,经粒径为 0.425 mm 的磨粒流抛光后,试样在加工前存在的杂质和毛刺已经被消除,表面相对光滑平整,表面质量显著提高,如图 6 所示。根据磨粒对工件表面的去除机理可知,在磨粒流抛光

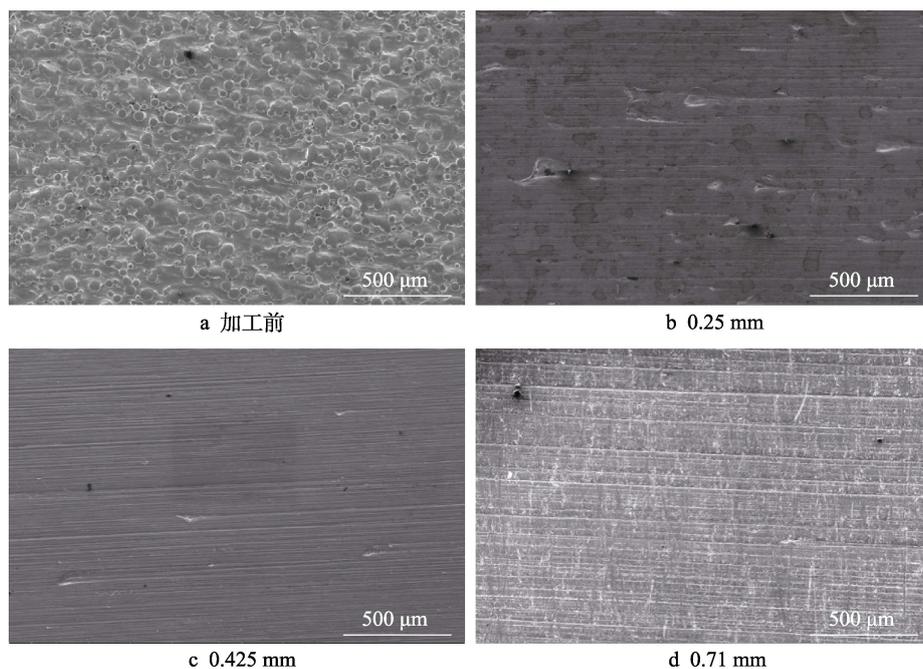


图4 不同磨粒粒径加工后 TC4 钛合金表面微观形貌

Fig.4 Surface micro morphology of TC4 titanium alloy polished with different sizes of abrasive particles: a) before polishing; b) 0.25 mm; c) 0.425 mm; d) 0.71 mm

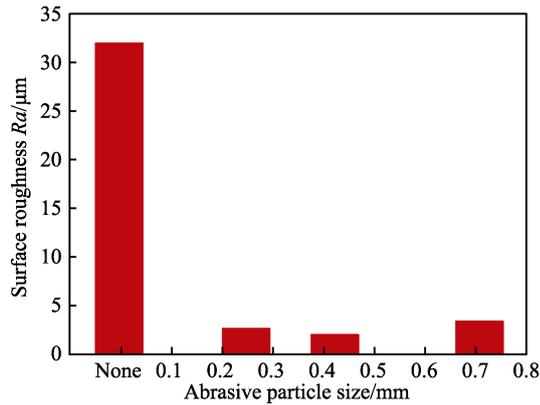


图 5 表面平均粗糙度 Ra 值随不同磨粒粒径的变化曲线

Fig.5 Curve of surface roughness Ra changing with different abrasive particle sizes

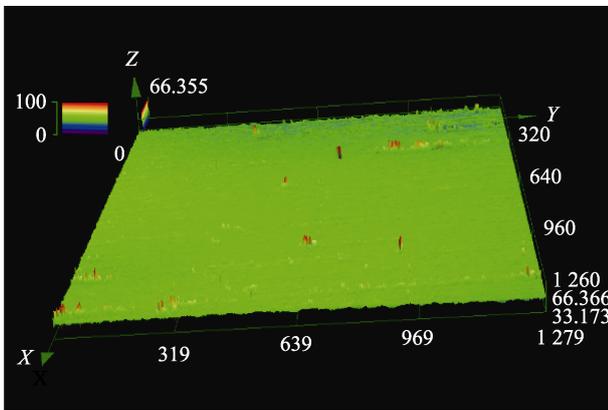


图 6 磨粒粒径为 0.425 mm 加工后 TC4 钛合金表面三维形貌

Fig.6 Three dimensional surface morphology of TC4 titanium alloy processed by 0.425 mm abrasive particle

过程中, 磨粒需要足够大的能量才能通过切削去除材料多余的部分。当磨粒尺寸较小, 所具有的能量不足以完全去除钛合金表面的纹理, 所以获得的表面较为粗糙。当磨粒粒径较大, 所具有的能量也就相对较高, 因此可以有效地去除材料表面纹理, 提高表面质量。但是磨粒过大会使磨粒在加工过程中对材料表面有较大的冲击和摩擦, 形成划痕和坑

洼, 从而导致材料表面更为粗糙。因此, 确定采用尺寸为 0.425 mm 的磨粒可以使 TC4 钛合金表面达到较好的抛光效果。

2.2 工作压力对表面质量的影响

不同工作压力加工后的钛合金表面微观形貌如图 7 所示。设定磨粒粒径为 0.425 mm 及抛光时间为 10 min 等条件一致。从图 7 中可以发现, 工作压力为 8 MPa 时, 钛合金表面的球化效应已经基本被消除, 但表面留有磨粒切削的沟痕, 而且还存在少量凸起的切削杂质, 如图 7a 所示。工作压力为 9 MPa 时, 钛合金表面更加光整, 但仍存在切削杂质, 如图 7b 所示。工作压力为 10 MPa 时, 抛光后的钛合金表面凸起杂质已经完全被去除干净, 但是表面出现了切削凹坑, 使表面平整度有所降低, 如图 7c 所示。

对上述不同工作压力加工后的 TC4 钛合金进行表面粗糙度测量, 得到表面粗糙度随工作压力的变化曲线, 并给出工作压力为 9 MPa 时的三维形貌图, 如图 8 和图 9 所示。从图 8 中可以看出, TC4 钛合金表面粗糙度随着工作压力的增大表现出先减小、后增大的趋势。当工作压力从 8 MPa 增加到 9 MPa 时, 工件表面的粗糙度值 Ra 从 2.347 μm 减小到 2.087 μm , 呈现下降趋势。这是因为工作压力较小时, 磨粒流抛光过程中, 磨粒运动较为缓慢, 所获得的动能相对较小, 所以与试样间的接触压力也就较低, 其切削表面杂质的能力较差。增大工作压力可以使磨粒流流体内部压力增大, 磨粒获得的动能随之增大, 从而使磨粒对工件表面的摩擦作用增强, 改善了工件的表面粗糙度。当工作压力高于 9 MPa 后, 继续增大工作压力, 试样表面粗糙度值反而增大, 压力为 10 MPa 时, 表面粗糙度上升至 2.126 μm 。这可能是由于随着工作压力进一步增大, 磨粒具有更大的动能, 由于磨料的柔软性, 磨粒运动不稳定, 使得试样表面出现少许凹坑, 表面变得不平整, 粗糙度也随之增大。从图 9 中可以看出, 9 MPa 的工作压力下进行磨粒流抛光处理后的表面较为平坦光滑, 且表面划痕较少, 表面质量较佳。根据上述分析, 优化后选定 9 MPa 作为磨粒流抛光工作压力。

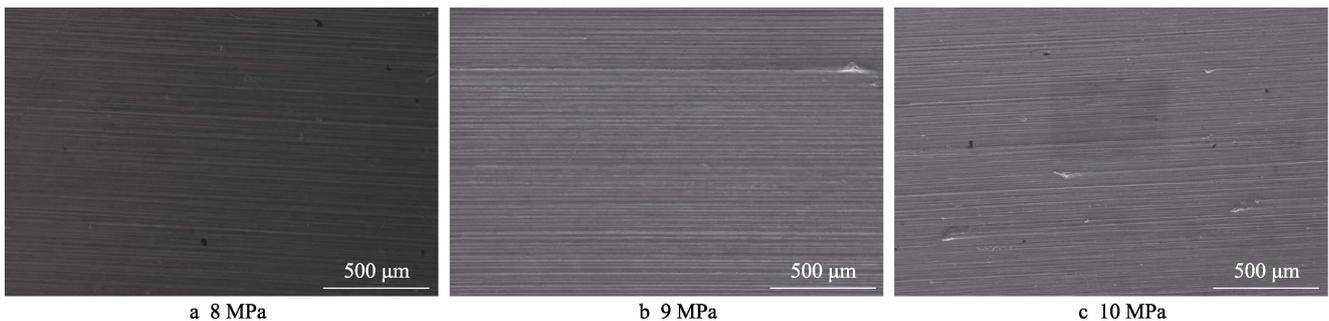


图 7 不同工作压力加工后 TC4 钛合金表面微观形貌

Fig.7 Surface micro morphology of TC4 titanium alloy after polishing at different working pressure

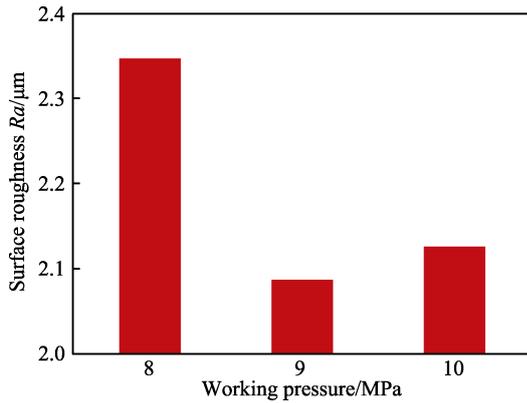


图8 表面平均粗糙度 Ra 值随不同工作压力的变化曲线
Fig.8 Curve of the surface roughness Ra changing with different working pressure

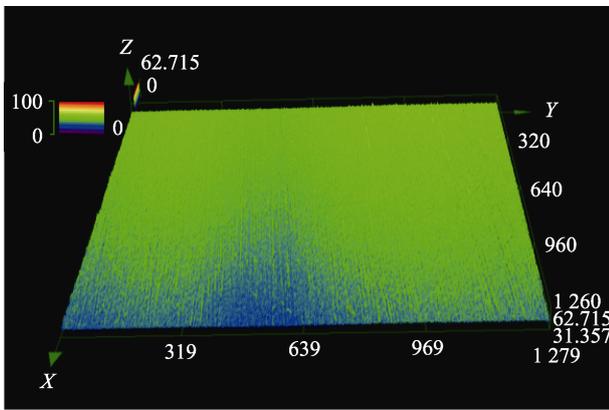


图9 9 MPa 工作压力下 TC4 钛合金表面三维形貌
Fig.9 Three dimensional surface morphology of TC4 titanium alloy after polishing at working pressure of 9 MPa

2.3 抛光时间对表面质量的影响

不同抛光时间加工后,钛合金表面的微观形貌如图

10 所示。从图 10 中可以看出,在磨粒粒径为 0.425 mm 及工作压力为 9 MPa 等条件一致下,当抛光时间为 10 min 时,原始表面存在的大量粉末颗粒已经被完全去除,但试样表面还存在由于切削粉末颗粒脱落留下的凹坑。当抛光时间为 15 min 时,表面出现了磨粒研磨沟痕,而且还存在一些切削瘤。当抛光时间为 20 min 时,试样表面光滑平整,磨粒切削后的沟痕也较浅。随着抛光时间继续增加,试样表面又开始出现明显的磨粒研磨沟痕,并且又出现了少量的切削瘤。当抛光时间为 30 min 时,试样的表面平整度不仅没有得到进一步的提升,还出现了凹坑。

对上述不同抛光时间加工后的 TC4 钛合金进行表面粗糙度测量,得到表面粗糙度随抛光时间的变化曲线,并给出抛光时间为 20 min 时的三维形貌,如图 11 和图 12 所示。从图 11 中看出,随着抛光时间的延长,钛合金的表面粗糙度先减小、后增大。当抛光时间为 10 min 时,试样的粗糙度较大, Ra 为 2.087 μm。这可能是因为磨粒与试样表面的接触时间较短,磨粒切削能力较差。随着抛光时间的增加,试样的抛光效果得到进一步提高。在抛光时间为 20 min 时,试样表面粗糙度最小,具有最好的加工效果,粗糙度值 Ra 为 1.899 μm。当抛光时间超过 20 min,钛合金的表面粗糙度又逐渐上升,这可能是因为随着抛光时间的增加,在开始时具有高黏弹性的磨料的黏度明显下降,使得磨料对钛合金表面的摩擦力减小。从图 12 中可以看出,当抛光时间为 20 min 时,试样表面较为平整光滑,无明显的凹坑和凸起物等缺陷,表面质量较好。综上所述,优化后选定 20 min 的抛光时间,0.425 mm 的磨粒粒径及 9 MPa 的工作压力作为磨粒流抛光参数。

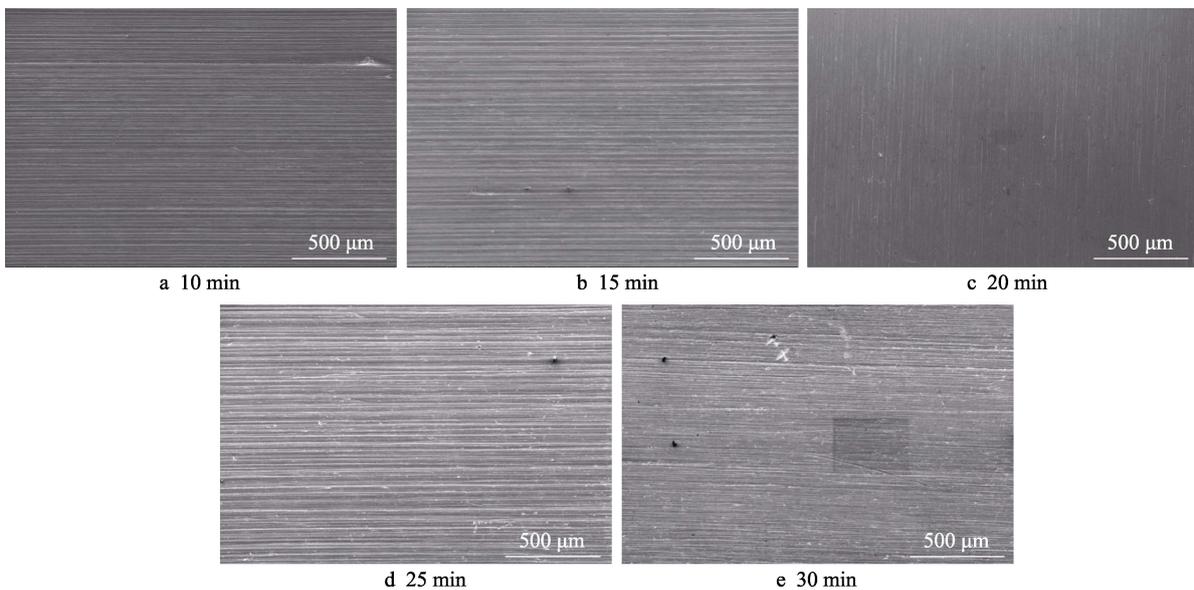


图 10 不同抛光时间加工后 TC4 钛合金表面微观形貌
Fig.10 Surface micro morphology of TC4 titanium alloy after polishing for different time

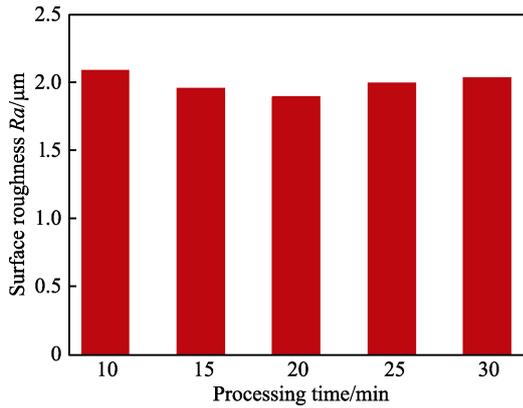


图 11 表面平均粗糙度 R_a 值随不同抛光时间的变化

Fig.11 Curve of the surface roughness R_a changing with different polishing time

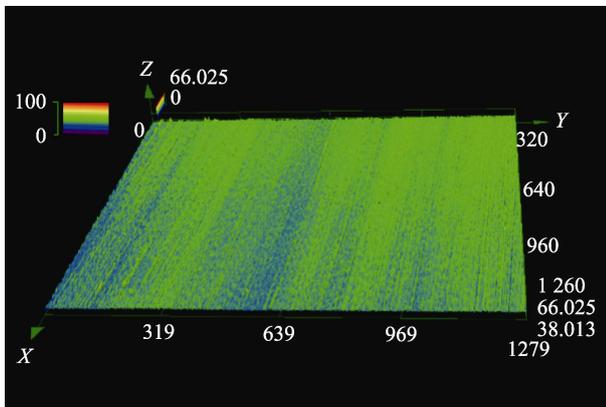


图 12 20 min 抛光时间下钛合金表面的三维形貌
Fig.12 Three dimensional surface topography of titanium alloy after polishing for 20 min

2.4 TC4 钛合金叶轮零件的磨粒流抛光

选择使用 SMK-600 型磨粒流抛光机, SiC 磨料介质, 并将上述磨粒流抛光工艺的试验研究应用于 TC4 钛合金叶轮零件表面, 发现抛光前后的复杂异型叶轮零件的表面有很大的差别。抛光前, 零件表面粗糙不平, 较为暗淡, 无明显光泽, 可以看到凹凸不平的区域, 如图 13a 所示。经过抛光处理后, 可以很明显地看出叶轮零件表面光亮平滑, 表面质量较好, 如图 13b 所示。通过激光共聚焦显微镜的测试, 抛光后的零件表面粗糙度值 R_a 从抛光前的 $6.953 \mu\text{m}$ 降至了 $2.145 \mu\text{m}$, 磨粒流抛光工艺改善了叶轮的表面质量。原始叶轮上端的侧面存在坚硬的金属凸起物 (如图 13c 所示), 经过磨粒流抛光后已经全部去除, 表面较为光亮平整, 反光度较高, 表面粗糙度值 R_a 为 $2.145 \mu\text{m}$, 表面质量相比抛光处理前的试样得到了较大的提升, 如图 13d 所示。抛光后的叶轮下端表面较为光亮平整, 表面粗糙度值 R_a 为 $2.869 \mu\text{m}$, 如图 13e 所示。抛光后的叶轮上端可能因磨粒流能量充足而存在过抛光的现象, 如图 13f 所示。相比于抛光前的叶轮零件, 磨粒流抛光使整体叶轮的表面粗糙度得到大幅下降。

2.5 表面结构与性能分析

磨粒流加工过程中, 在磨料的挤压研磨作用下, 促进了试样表面层塑性变形形成加工硬化, 而塑形变化使得该区域的粗大晶粒发生了一定程度细化。此现象可通过 XRD 测试结果得到验证。磨粒流抛光前后试样表面的 XRD 衍射图谱如图 14 所示, 根据式 (1),

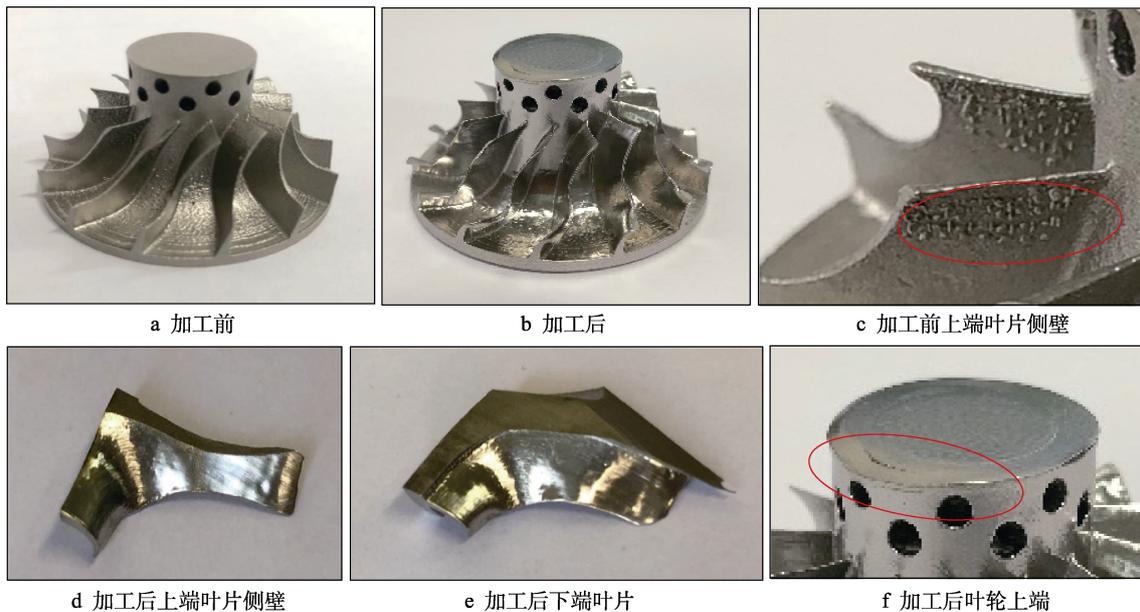


图 13 磨粒流抛光处理前后的叶轮表面

Fig.13 Impeller surface before and after abrasive flow polishing: a) before polishing; b) after polishing; c) side wall of upper blade before polishing; d) side wall of upper blade after polishing; e) lower blade after polishing; f) upper blade after polishing

通过对比衍射峰的峰宽可以计算出晶粒尺寸大小。

$$D = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

式中： k 为固定系数， $k=0.89$ ； β 为半峰全宽 (FWHM)； λ 为 X 射线光的波长； θ 为布拉格衍射角。

根据式 (1) 和 XRD 图谱数据计算出原始试样表面晶粒尺寸 D 为 65.492 nm，磨粒流抛光试样表面晶粒尺寸 D 为 47.632 nm。相比原始试样，晶粒尺寸有了明显的减小。

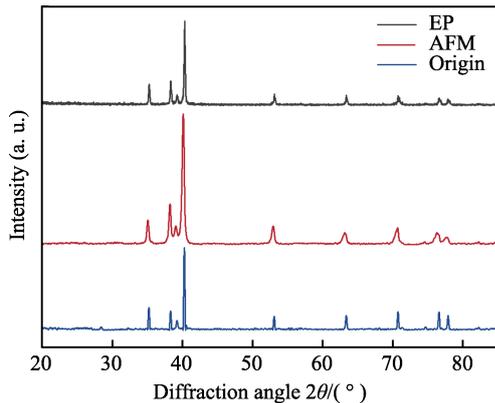


图 14 磨粒流抛光前后试样表面的 XRD 衍射图谱
Fig.14 X-ray diffraction pattern of specimen surface before and after abrasive flow polishing

磨粒流抛光前后 TC4 钛合金试样的摩擦系数随摩擦时间的变化曲线如图 15 所示。试验前，通过线切割将试样截取小块，固定在多功能摩擦磨损试验机平台上，施加载荷使磨球对试样进行往复的滑动，整个过程为干摩擦式。采用轴承钢材制的摩擦球，施加载荷为 5 N，往复摩擦滑动速度为 6 mm/s，摩擦距离为 4 mm 和摩擦时间为 30 min。一般摩擦系数随摩擦时间的变化曲线会经历 3 个阶段：初期磨损（饱和）阶段、稳定（平稳）阶段和磨损阶段。从图 15 中可以看出，磨粒流抛光前后试样的摩擦系数随时间的变化趋势都相同，都经历过一段较长的初期磨损阶段，然后到达一个稳定磨损状态。同时也可以看出，对于抛光前试样，在摩擦 1.5 min 后突然出现一个上升，这可能是因为抛光前的试样表面附着大量未熔融的粉末颗粒松动脱落所导致的。随着摩擦时间继续延长，摩擦系数出现大幅度波动，这是因为试样表面发生剧烈磨损造成的。抛光后的试样，其摩擦系数从一开始小幅度增加之后，就一直保持稳定的波动趋势，随着摩擦时间的延长，摩擦系数波动略微增大。抛光后试样表面的摩擦系数能保持稳定波动趋势是因为相比原始试样，磨粒流抛光后的试样表面因塑性变形而产生加工硬化，试样表面晶粒得到一定程度的细化，表面显微硬度得到提升，试样更加耐磨，因此更加稳定。磨粒流抛光前的摩擦系数为 0.428 1，抛光后的摩擦系数为 0.385 3。造成抛光前的摩擦系数较

大的原因可能是试样表面的金属颗粒较多，且较为松动，在对磨球的摩擦带动下，出现小区域的脱落，导致摩擦系数波动性较大，较不稳定。

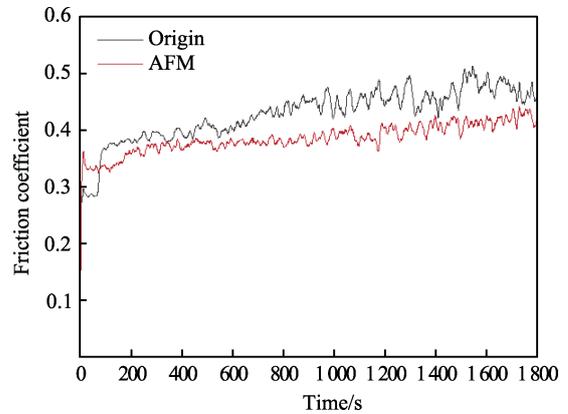


图 15 磨粒流抛光前后 TC4 钛合金试样的摩擦系数随摩擦时间的变化曲线
Fig.15 Friction coefficient versus friction time of TC4 titanium alloy before and after abrasive flow polishing

为了进一步探究摩擦系数发生变化的原因及摩擦机制，对磨粒流抛光前后的摩擦试验试样进行 SEM 测试，如图 16 所示。从图 16 中可以看出，在干滑动条件下，抛光前后的试样都出现不同程度的磨损现象，抛光前的原始试样在摩擦试验后表面出了较为严重的磨损状态，沿着对磨球往复滑动方向上留下较多的凹坑，同时伴随有表面层脱落的情况，对磨球滑动区域也出现了明显的光滑摩擦带，还有少量的犁沟痕迹，此处较为明显的磨损机制为粘着磨损和剥落磨损，如图 16a 所示。经过磨粒流抛光后的试样也出现磨损情况，但其表面未出现严重的磨损凹坑和脱落现象，相反，摩擦后的表面磨痕的宽度较窄，且出现许多深沟状划痕（犁沟），此处的磨损机制为磨粒磨损，如图 16b 所示。

2.6 磨粒流抛光增材制造叶轮零件的有限元仿真研究

2.6.1 三维模型建立与网格划分

叶轮作为系统中的重要组成部分，其异形曲面外观是依据流体力学与空气动力学原理而设计的。利用 SW (solidwork) 软件对零件进行三维建模，得到的三维效果图如图 17a 所示。建模完成后保存为 igs 格式文件，打开有限软件 ANSYS 2019 R2 的前处理模块 ICEM CFD，对模型进行修正简化及网格划分处理。在网格划分处理时，鉴于磨粒通过流体流动研磨叶轮表面，需建立相应的流体运动流道来进行仿真。叶轮外表面为开放式结构，抛光时并无确定流道直接使用，因此需要在叶轮模型外表面添加相适应的约束条件装置，从而形成以叶轮外表面与约束条件装置共同构成的约束流道。考虑到模型可行性和计算要求

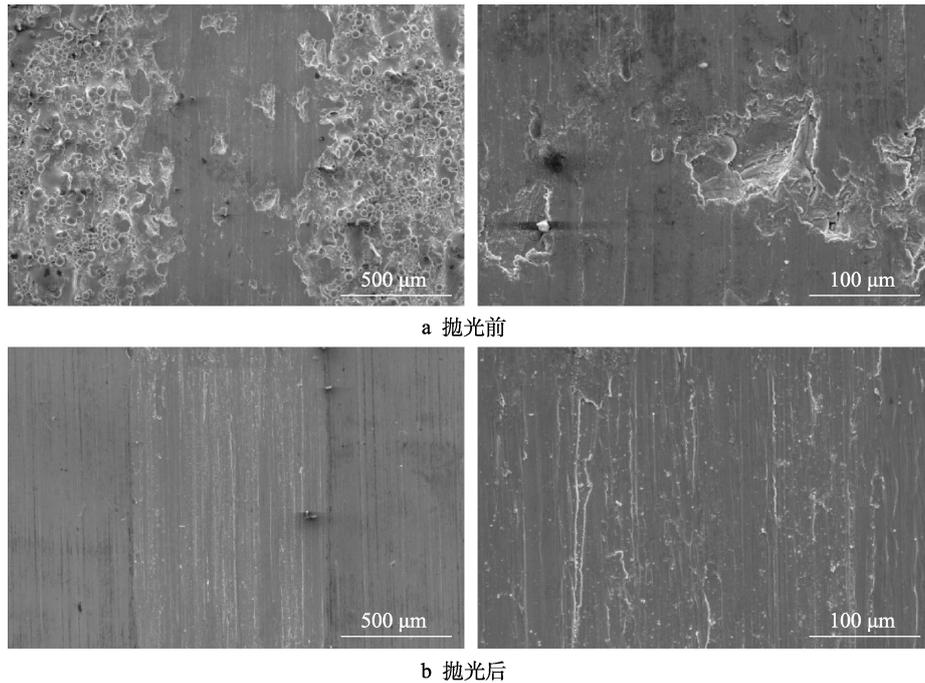


图 16 磨粒流抛光前后的摩擦试验试样表面形貌

Fig.16 Surface morphology of friction test specimen before and after abrasive flow polishing: a) before abrasive flow polishing; b) after abrasive flow polishing

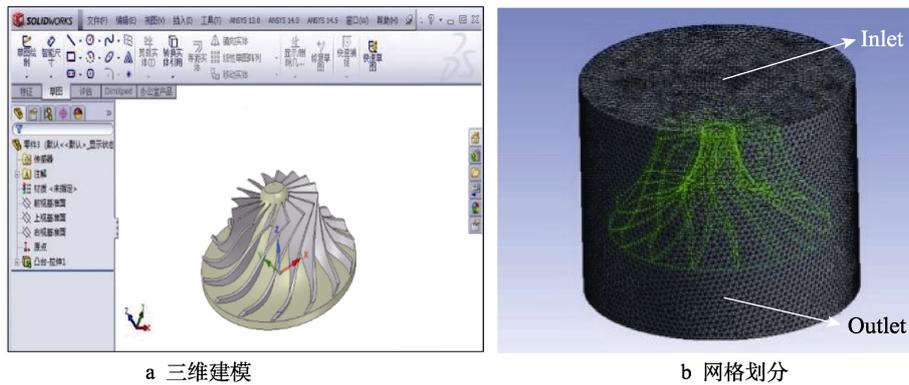


图 17 叶轮的三维建模

Fig.17 Three dimensional modeling of impeller: a) 3D modeling; b) meshing

后, 选择圆柱体为叶轮表面约束条件装置。接着对模型进行网格划分, 这里选择四面体单元网格对模型进行细致的网格划分, 对模型曲率变化较大的区域进行网格加密处理。划分好网格的模型如图 17b 所示, 定义流体入口 Inlet 为模型的上端面、流体出口 outlet 为模型的下端面。

2.6.2 计算模型与参数设置

根据磨粒流加工特性, 磨粒流体运动是一种不被压缩且流速相对缓慢的过程, 因此叶轮的求解模型选择基于压力的求解和湍流模型, 如图 18 所示。湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型, 叶轮表面选择标准壁面方程作为近壁面处理方式, 其他按照系统默认设置, 如图 19 所示。

磨粒流加工技术所采用的磨料介质为甲基硅油、碳化硅颗粒和改性的高分子聚合物按一定比例混合配

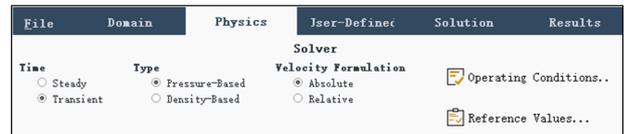


图 18 叶轮求解模型的选择

Fig.18 Selection of solving model of impeller

制的。在计算求解时, 将甲基硅油看作液态流体, 碳化硅颗粒看作离散固相, 具体的物理参数设置见表 2。

2.6.3 模型边界条件设置

液相设置为液态连续相选择的是甲基硅油, 设定初始入口条件为速度入口, 入口速度的方向垂直于边界面, 初始速度为 2 m/s。固相设置为根据磨粒流抛光试验, 离散固相选择体积分数为 0.3 的碳化硅颗粒, 同样采用速度入口条件, 且两个入口速度相同。根据



图 19 湍流模型设置

Fig.19 Turbulence model settings

磨粒流加工试验的工况，设置磨料出口条件为自由出口。壁面边界条件选择为壁面增强函数法和无滑移的壁面边界条件。

表 2 固相与液相材料的物理属性

Tab.2 Physical properties of solid and liquid materials

Physical quantity	Value
Density of liquid $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	886
Dynamic viscosity of liquid $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$0.131e^{-0.026T}$
Specific heat capacity of liquid $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	2 000
Thermal conductivity of liquid $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.15
Density of SiC particle $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	3 100
Thermal conductivity of SiC particle $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	120
Viscosity of SiC particle $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	5×10^{-6}

2.6.4 仿真结果分析

各项湍流状态下的数值分布云图见图 20。图 20a 为流体仿真中的静压云图，可以看出，磨粒流加工过程中，静压在叶轮上的分布不一致，在叶片上的分布差异较为明显，叶片上端与下端的静压分布差别最大。这主要受到叶片形状的影响，因为叶轮从上到下叶片各处的曲率不一样，磨料流体在相邻的叶片间流动会受到较大影响。图 20b 为动压云图，可观察到除叶轮底座的边缘处，动能在叶片上端分布的动压较大，这是因为入口处的流体所带有的动能较大，且上端的相邻叶片间距较小，因此上端叶片侧面受到的动压较大。随着流体往下运动，叶片间距逐渐变大，叶

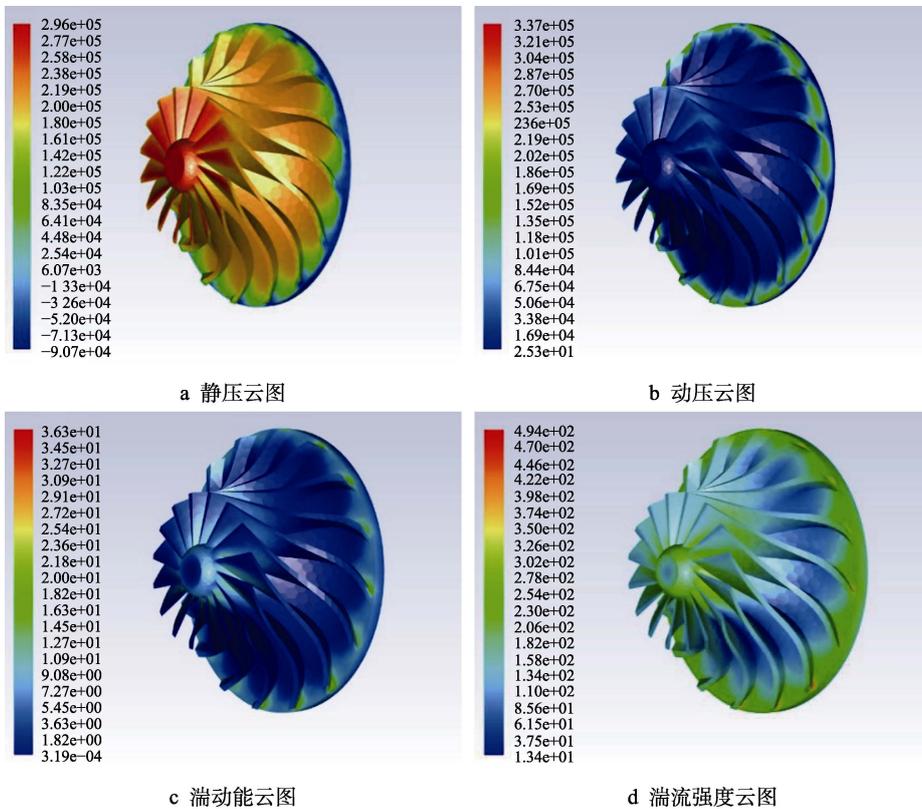


图 20 各项湍流状态下的数值分布云图

Fig.20 Numerical distribution nephogram at various turbulence states: a) static pressure cloud; b) dynamic pressure cloud; c) turbulent kinetic energy cloud; d) turbulence intensity cloud

轮表面的动压减小, 当流体到达叶轮底部, 与外部的约束装置相互作用, 造成动压再次增大。图 20c、d 分别为湍动能和湍流强度云图, 是描述流体运动状态增强或衰落趋势的指标。可以看出, 与动压云图有相似的表现, 流体自上而下运动, 在上端叶片侧面湍流强度较大, 在叶轮中间部位的强度减弱, 因约束装置的作用, 在底部的湍流强度和湍动能又增大很多, 且在顶端的湍动能最大。综上所述, 磨粒流体从叶轮上端流入, 从下端流出, 整体表现为上端所受的动压、湍流强度较大。因此, 叶轮叶片上端抛光较好, 中间部位抛光效果一般, 在下端底座部分抛光效果也较为明显。这与试验分析的结果相同, 相较于抛光前, 整体叶轮零件表面粗糙度改善。综上所述, 磨粒流抛光工艺适用于改善叶轮等复杂外表面零件的表面质量。

3 结论

针对增材制造 TC4 钛合金叶轮零件, 本文采用磨粒流抛光技术来降低其表面粗糙度, 优化零件性能。主要研究结果如下所述。

1) 采用磨粒流抛光技术, 优化后的抛光工艺: 磨粒粒径为 0.425 mm, 加工压力为 9 MPa, 加工时间为 20 min, 使增材制造 TC4 钛合金叶轮零件表面粗糙度值 Ra 从原始的 6.953 μm 降到了 2.145 μm 。

2) 磨粒流抛光前 TC4 钛合金叶轮零件表面摩擦系数为 0.428 1, 抛光后的摩擦系数为 0.385 3。通过 SEM 观察发现, 抛光前表面磨损机制为粘着磨损和剥落磨损, 抛光后为磨粒磨损。主要原因是磨粒流抛光后的试样表面因塑性变形而产生加工硬化, 试样表面晶粒得到细化, 试样更加耐磨, 因此更加稳定。

3) 通过对磨粒流抛光叶轮零件过程进行 Fluent 模拟仿真发现, 磨粒流体从叶轮上端流入, 从下端流出, 整体表现为上端所受的动压, 湍动能及湍流强度较大。叶轮叶片上端抛光效果会较好, 中间部位抛光效果一般, 在下端底座部分抛光效果也较为明显, 底端的湍动能及湍流强度因约束装置的作用而增大。这也验证了叶轮零件磨粒流抛光试验的结果。

参考文献:

- [1] 程果. 钛合金整体叶轮高效加工技术的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
CHENG Guo. Research on High Efficiency Processing Technology of Titanium Alloy Integral Impeller[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [2] 瞿群. 钛合金研究新进展及应用现状[J]. 钛工业进展, 2008, 25(2): 23-27.
ZI Qun. New Development of Titanium Alloy and Its Application Actuality[J]. Titanium Industry Progress, 2008, 25(2): 23-27.
- [3] 丁沛仁. 浅谈钛金属的应用及其前景[J]. 现代工业经济和信化, 2016, 6(11): 116-118.
DING Pei-ren. Application and Prospect of Titanium Metal[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2016, 6(11): 116-118.
- [4] NARAYANA P L, KIM S W, HONG J K, et al. Tensile Properties of a Newly Developed High-Temperature Titanium Alloy at Room Temperature and 650 °C[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 718: 287-291.
- [5] BOYER R R. An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1/2): 103-114.
- [6] 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.
LIU Quan-ming, ZHANG Zhao-hui, LIU Shi-feng, et al. Application and Development of Titanium Alloy in Aerospace and Military Hardware[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(3): 1-4.
- [7] LIU F L, ZHUANG B T, ZHUANG X Y, et al. Quality Control Technology of Wire Manufacturing for Aeronautical Titanium Alloy Fastener[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(11): 66-68.
- [8] HEIDLOFF A J, RIEKEN J R, ANDERSON I E, et al. Advanced Gas Atomization Processing for Ti and Ti Alloy Powder Manufacturing[J]. JOM, 2010, 62(5): 35-41.
- [9] RYAN K R, DOWN M P, BANKS C E. Future of Additive Manufacturing: Overview of 4D and 3D Printed Smart and Advanced Materials and Their Applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 403: 126162.
- [10] HUANG S H, LIU Peng, MOKASDAR A, et al. Additive Manufacturing and Its Societal Impact: A Literature Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5): 1191-1203.
- [11] KHORASANI M, GHASEMI A, AWAN U S, et al. A Study on Surface Morphology and Tension in Laser Powder Bed Fusion of Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111(9): 2891-2909.
- [12] 王黎, 魏青松, 贺文婷, 等. 粉末特性与工艺参数对 SLM 成形的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 20-23.
WANG Li, WEI Qing-song, HE Wen-ting, et al. Influence of Powder Characteristic and Process Parameters on SLM Formability[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(6): 20-23.
- [13] FRAZIER W E. Metal Additive Manufacturing: A Review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [14] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
WANG Hua-ming. Materials' Fundamental Issues of Laser Additive Manufacturing for High-Performance Large

- Metallic Components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [15] MUMTAZ K, HOPKINSON N. Top Surface and Side Roughness of Inconel 625 Parts Processed Using Selective Laser Melting[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, 15(2): 96-103.
- [16] PYKA G, BURAKOWSKI A, KERCKHOFS G, et al. Surface Modification of Ti₆Al₄V Open Porous Structures Produced by Additive Manufacturing[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2012, 14(6): 363-370.
- [17] 刘秀波, 于永民. 激光表面处理 and 快速制造技术的新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(4): 48-52.
LIU Xiu-bo, YU Yong-min. Recent Developments in Laser Surface Treatments and Rapid Manufacturing[J]. *Laser & Optronics Progress*, 2005, 42(4): 48-52.
- [18] 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.
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.
- [19] 胡敬磊, 李俊焯, 赵伟宏, 等. 固液两相磨粒流研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 Jing-lei, LI Jun-ye, ZHAO Wei-hong, 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.
- [20] WILLIAMS R E, MELTON V L. Abrasive Flow Finishing of Stereolithography Prototypes[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 1998, 4(2): 56-67.
- [21] HAN S, SALVATORE F, RECH J, et al. Abrasive Flow Machining (AFM) Finishing of Conformal Cooling Channels Created by Selective Laser Melting (SLM)[J]. *Precision Engineering*, 2020, 64: 20-33.
- [22] 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 Jian-hui. *Simulating Analysis and Feasibility Research of Aero-Impeller in Abrasive Flow Machining*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [23] 党稼宁, 雷力明, 石磊, 等. 增材制造燃油喷嘴特征件磨粒流抛光研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(7): 79-83, 90.
DANG Jia-ning, LEI Li-ming, SHI Lei, et al. Study on Abrasive Flow Machining of Additive Manufacturing Fuel Nozzle Features[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(7): 79-83, 90.
- [24] 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): 421210.
GAO Hang, LI Shi-chong, FU You-zhi, et al. Abrasive Flow Machining of Additively Manufactured Metal Grilling Parts[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(10): 421210.
- [25] 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 Xuan-ping. Research Progress on Surface Finishing Technology of Aeronautical Complex Structural Parts Manufactured by Additive Manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(9): 14-22.
- [26] 施凯博, 孙玉利, 余泽, 等. 钛合金磨料流光整加工表面完整性研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(10): 80-85.
SHI Kai-bo, SUN Yu-li, YU Ze, et al. Study on the Surface Integrity of Titanium Alloy in Abrasive Flow Machining[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(10): 80-85.

责任编辑: 刘世忠