

文章编号 1004-924X(2018)09-2294-10

纳米胶体自激脉冲空化射流抛光技术

王 星^{1*}, 徐 琴¹, 张 勇², 张飞虎²

(1. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了满足光学复杂曲面的精密、高效加工,提出一种利用空化效应促进射流加工效率的光学表面加工方法——纳米胶体自激脉冲空化射流抛光,并研制了加工系统。采用流体动力学对纳米胶体自激脉冲空化射流抛光中的喷射过程进行了仿真,获得了周期为 0.3 s 的自激脉冲射流典型时刻下加工流场的流体动、静压力、速度、空化效应分布规律。进行了纳米胶体自激脉冲空化射流抛光试验,结果表明该系统能够产生效果良好的自激脉冲空化射流。采用该方法对单晶硅表面进行加工可以得到表面粗糙度为 R_a 0.904 nm (R_{ms} 1.225 nm) 的超光滑表面,此加工表面粗糙度质量与相同加工条件下的普通纳米胶体射流抛光相当,但其加工效率较普通纳米胶体射流抛光能够提升 20% 左右,能够满足光学表面高效精密加工的需要。

关键词:自激脉冲;空化;纳米胶体;射流;抛光

中图分类号: TG664 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182609.2294

Nanoparticle colloid self-induced pulsed cavitation jet polishing

WANG Xing^{1*}, XU Qin¹, ZHANG Yong², ZHANG Fei-hu²

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering,

Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: wangxing@haut.edu.cn

Abstract: An optical surface processing method using the cavitation effect, termed as nanoparticle colloid self-induced pulsed cavitation jet polishing (NPCJP), has been proposed to precisely machine complex optical surfaces with enhanced machining efficiency. The NPCJP system has been developed and simulated by fluid dynamics simulation. The dynamic pressure, static pressure, fluid velocity and cavitation effect of the polishing flow field corresponding to a pulse period of 0.3 s, have been determined. NPCJP jet experiments have been performed and the results show that the NPCJP system can effectively produce self-excited pulsed cavitation jet. NPCJP experiment on a single crystal silicon surface show that supersmooth surface with roughness of R_a 0.904 nm (R_{ms} 1.225 nm) can be obtained. The roughness of the surface obtained using the proposed method is equal to that obtained using the conventional nanoparticle colloid jet polishing method, but the processing efficiency of the

收稿日期: 2018-02-01; **修订日期:** 2018-04-02.

基金项目: 国家自然科学基金河南省联合基金重点项目资助 (No. U1604254); 国家自然科学基金面上项目资助 (No. 51775170); 河南省教育厅自然科学基金项目资助 (No. 17A460009)

NPCJP jet polishing method is higher by about 20%. The results show that the NPCJP method can effectively machine complex optical surfaces.

Key words: self-induced pulse; cavitation; nano particle colloid; jet; polishing

1 引言

1998年荷兰 Föhnle O W 首次将液体射流抛光技术应用在光学自由曲面加工领域,获得了较好的效果^[1]。液体射流加工使用较低的系统压力驱动抛光液,能够使工件表面粗糙度达到极低的水平,并且具有去除函数稳定,加工适用范围广,设备结构简单等优点^[2],一经提出便成为精密超精密加工研究的一个热点。

对材料去除机理的探索 and 材料去除模型的建立是液体射流抛光研究中重点关注的两个方面。液体射流加工材料去除机理较为复杂,目前存在两种不同的材料去除理论。一种是针对使用较大粒度硬质磨料的传统液体射流抛光,材料去除主要依靠抛光液中的磨粒在工件表面的微切削作用^[3-5]。另一种是针对使用粒度小于 30 nm 软质磨料的纳米胶体射流抛光,材料的去除是基于界面化学反应所形成的纳米颗粒对工件表面原子的拖拽作用^[6-7]。而在液体射流加工去除模型的研究中,由于其与射流的喷射状态关系很大,材料模型的建立一般结合流体动力学模拟,获得液体射流抛光加工区域流场的相关特性后,结合加工试验,建立通用的材料去除模型^[8-13]。

液体射流抛光如今已广泛应用在对光学玻璃、蓝宝石等硬脆材料^[14-15],以及模具钢、钛合金等难加工金属^[16]的加工中,也有学者将射流技术应用在金刚石砂轮修整领域^[17]。但是,液体射流抛光有一明显的缺点,即加工效率较低,该缺点在纳米胶体射流抛光中表现得尤为突出,虽然借助于纳米颗粒与工件表面的界面化学反应,可实现工件材料的原子级去除,得到表面粗糙度(R_a 值)低于 0.5 nm 的无损光滑表面^[18-19],但其加工效率却是十分低下。

为了提高液体射流抛光的加工效率,学者们主要从两个方面进行尝试:一方面是增加液体射流抛光中射流束的数量,如 Wang C J 等提出的“多射流联合加工”^[20-21],Tsegaw A A 提出的“自驱动多重射流加工技术”^[22]等;另一方面是在传统液体射流的基础上叠加辅助能场的方式,如 Loc P H 提出的“空气驱动液体射流加工”^[23],吕哲、黄传真等提出了“超声振动辅助磨料水射流抛光技术”,以及利用空化效应辅助液体射流加工的一些方法^[24]。

空化效应作为一种能量的积聚与释放,能起到提高液体射流加工效率的作用,日本 Anthony B 利用超声空化辅助液体射流抛光,其效率较传统液体射流抛光提高了 380%^[25]。陈逢军提出了一种基于负压的空化辅助射流抛光方法,获得了良好的效果^[26]。因此利用空化对纳米胶体射流抛光的加工效率进行提升是可行的方法。本文针对纳米胶体射流抛光加工效率低下的缺点,尝试利用空化效应提高其效率,借助液体在特殊结构腔室内发生自激振荡、进而诱发空化这一特性,提出一种纳米胶体自激脉冲空化射流抛光技术,建立了加工试验系统,并进行了初步的试验。

2 纳米胶体自激脉冲空化射流抛光系统

纳米胶体自激脉冲空化射流抛光系统示意图如图 1 所示。气液增压泵作为整个系统的压力原件,纳米胶体作为抛光介质。自激脉冲喷嘴结构基于亥姆霍兹自振腔式设计,如图 1 右侧所示。纳米胶体以一定压力进入喷嘴后,会在自激腔室特殊结构的影响下发生能量的积聚和释放,形成压力和速度呈周期性变化的脉冲射流,同时引发明显地空化效应。

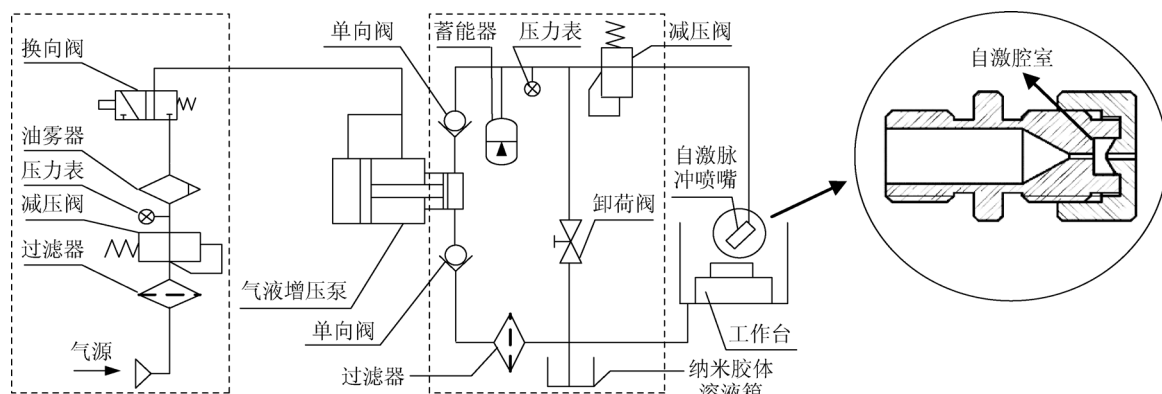


图 1 纳米胶体自激脉冲空化射流抛光系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-induced pulsed cavitation assisted nanoparticle colloid jet polishing system

3 自激脉冲空化射流流场流体动力学仿真

3.1 流体动力学模型

为了了解自激脉冲空化射流的喷射特性,借助流体动力学软件 ANSYS. Fluent 对自激脉冲空化射流流场进行仿真。根据加工系统所选用的自激脉冲喷嘴内部流道的实际尺寸以及加工的实际情况,建立几何模型,如图 2 所示。该模型所模拟的加工状态为:系统压力 2 MPa,喷射距离 1 mm,模拟采用非稳态数值模拟的方法,时间步长设定为 0.000 1 s,迭代步数设置为 1×10^5 步,所有迭代完成后能够模拟流场在 10 s 内的变化情况。其他流体动力学仿真条件设置如表 1 所示。

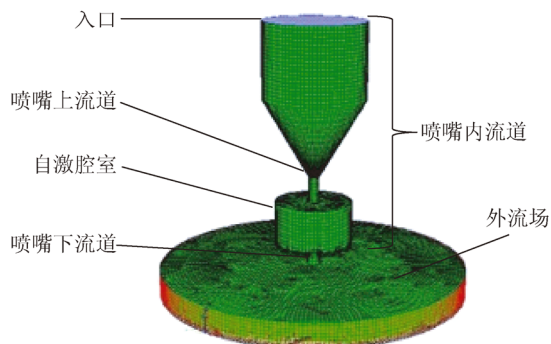


图 2 自激脉冲空化射流流场几何模型和网格划分

Fig. 2 Geometry model and grid generation of flow field of self-induced pulsed cavitation jet

3.2 流体动力学仿真结果

流体动力学模拟结果显示,射流流场呈现明显的周期性变化,每个周期内流场均会经历能量的积聚过程和释放过程,所占时间大概在 0.3 s 左右。由于每个周期中流场状态变化规律基本相同,因此只选择首个周期的典型时刻予以表示。如图 3 所示为首个周期内典型时刻的流场状态静、动压分布。 $t=0.02$ s 时,下流道静压值较高,动压值较低,喷嘴流道内液体被下流道高静压区域阻挡,在自激腔室内形成能量的积聚。 $t=0.1$ s 时,自激腔室内流体能量升高,推动下流道高静压区域向下方移动。 $t=0.2$ s 时,高静压区域被推出下流道,阻碍作用消失,自激腔室中的能量被释放出来,下流道动压升高,静压值较低。释放完成后,一个脉冲周期结束,整个周期所占用时间大概在 0.3 s 左右。

表 1 流体动力学仿真条件设置

Tab. 1 Setting of conditions of CFD simulation

	设定	数值
入口边界条件/MPa	压力入口	2
出口边界条件/MPa	压力出口	0.101
工件表面边界条件	壁面	
湍流模型	k-ε 模型	
多相流模型	Mixture 模型	
纳米胶体溶液密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		1 150
纳米胶体溶液粘度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)		0.001 3

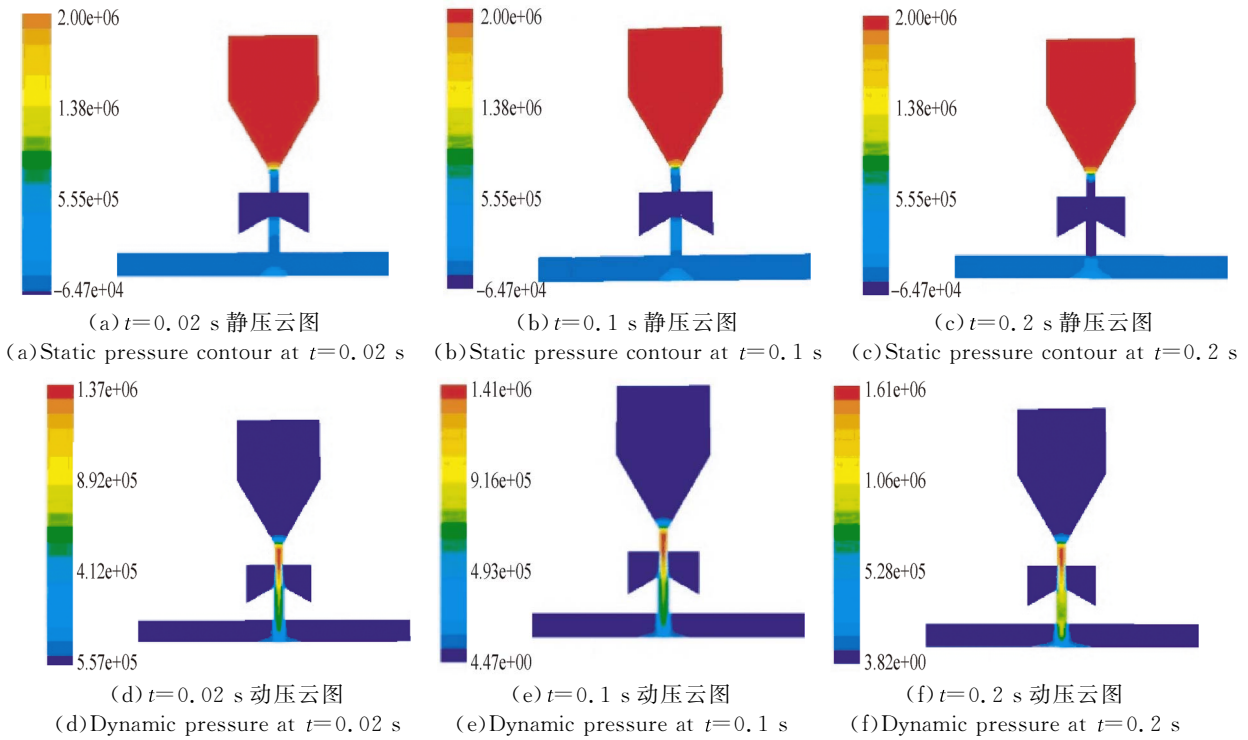


图 3 自激脉冲空化射流喷射流场压力分布情况

Fig. 3 Pressure contours of flow field of self-induced pulsed cavitation jet

如图 4 所示为首个周期内典型时刻自激脉冲空化射流流场速度云图。 $t=0.02$ s, $t=0.1$ s, 由于下流道口高静压区域的阻碍, 下流道液体流速较

低, 上流道进入自激腔室的液体在腔室内沿壁面运动形成环流。 $t=0.2$ s, 下流道口高静压区域的阻碍消失, 下流道液体流速明显高于前两个时刻。

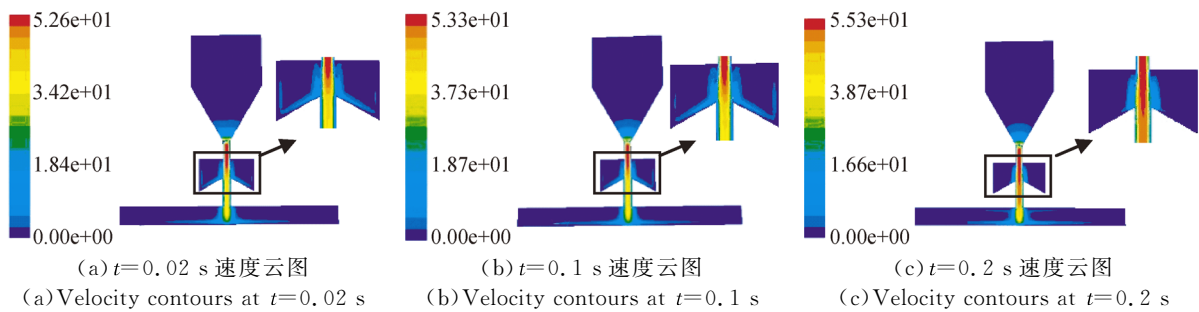


图 4 自激脉冲空化射流喷射流场速度云图

Fig. 4 Velocity contours of flow field of self-induced pulsed cavitation jet

如图 5 所示为首个周期内典型时刻空化射流流场空化云图。 $t=0.02$ s 和 $t=0.1$ s 时刻, 受下流道口高压区域的影响, 液体在自激腔室内积聚形成紊流, 因此自激腔室内空化程度较高, 下流道空化程度较低。 $t=0.2$ s 时刻, 流体突破下流道高压区域的阻碍, 整个腔室连带下

流道空化明显。比较不同时刻的空化模拟数值, $t=0.02$ s 和 $t=0.1$ s 时刻自激腔室内空化相含量最高为 3.63% 和 7.96%, $t=0.2$ s 时刻自激腔室内空化含量达到 90% 以上, 并且随着射流的喷出, 下喷口流道空化相含量达到 30% 左右。

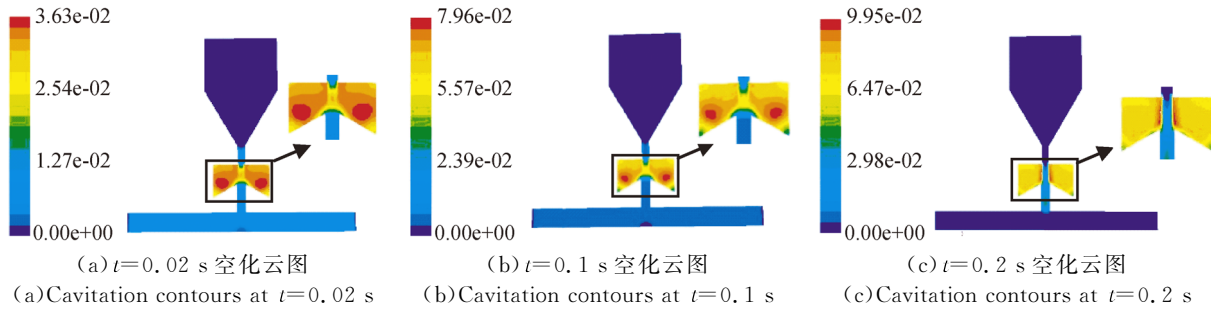


图 5 自激脉冲空化射流喷射流场空化云图

Fig. 5 Cavitation contours of flow field of self-induced pulsed cavitation jet

如图 6 所示为工件表面流场状态云图, $t=0.02\text{ s}$ 和 $t=0.1\text{ s}$ 时刻, 自激腔室液体流动受高压区域阻碍无法顺利进入下流道, 使得工件表面流场状态变化不大, 因此只选择 $t=0.02\text{ s}$ 和 $t=0.2\text{ s}$ 时刻显示。由仿真结果可以看出, 伴随着自激脉冲空化射流的周期性变化, 工件表面流场状态也呈现周期性变化。 $t=0.02\text{ s}$, 下流道的液体流速较小, 工件表面流场压力和速度值较小, 高压和高速度区域面积较小, 空化相含量低。 $t=0.2\text{ s}$

的高压和高速度区域面积增大, 高空化区域和空化含量最大值也较大。

提取自激脉冲空化射流喷射流场工件表面水平截面上的压力、速度数据, 所得曲线如图 7 所示。其中, 动压、径向速度及合成速度 3 条曲线都呈现 M 形分布, 中心区域数值较低, 静压和轴向速度呈现高斯分布。在压力和速度曲线图中, 0.02 s 和 0.2 s 时刻上曲线的形状基本相同, 但其数值最大值不同。

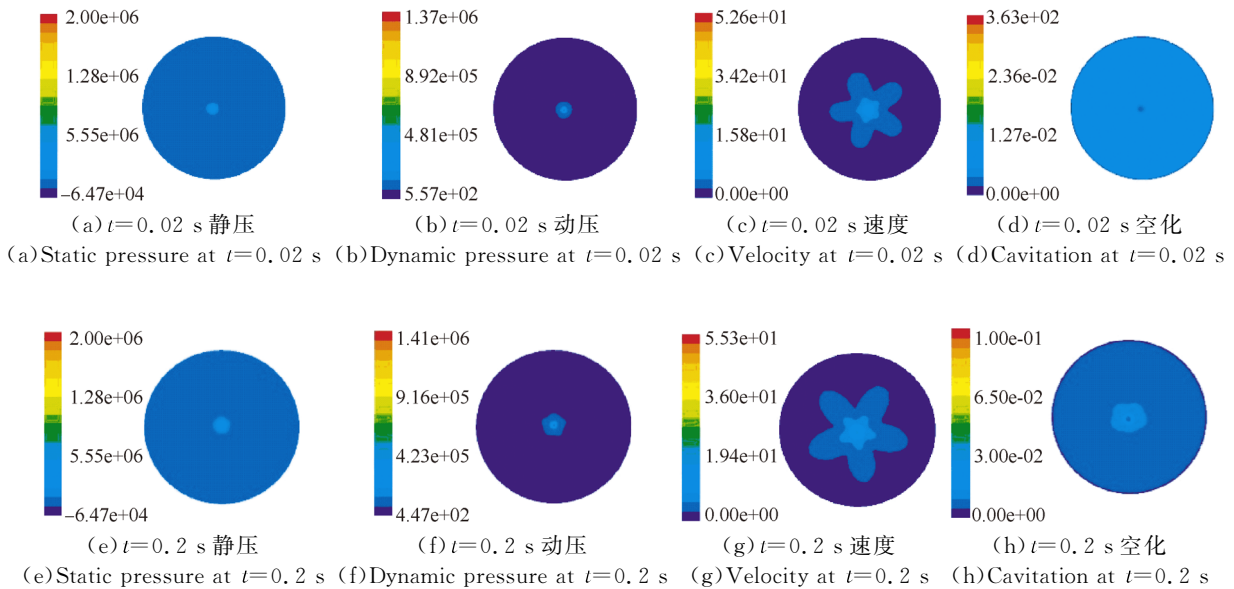


图 6 自激脉冲空化射流喷射流场工件表面水平截面云图

Fig. 6 Horizontal section contours of workpiece surface of flow field of self-induced pulsed cavitation jet

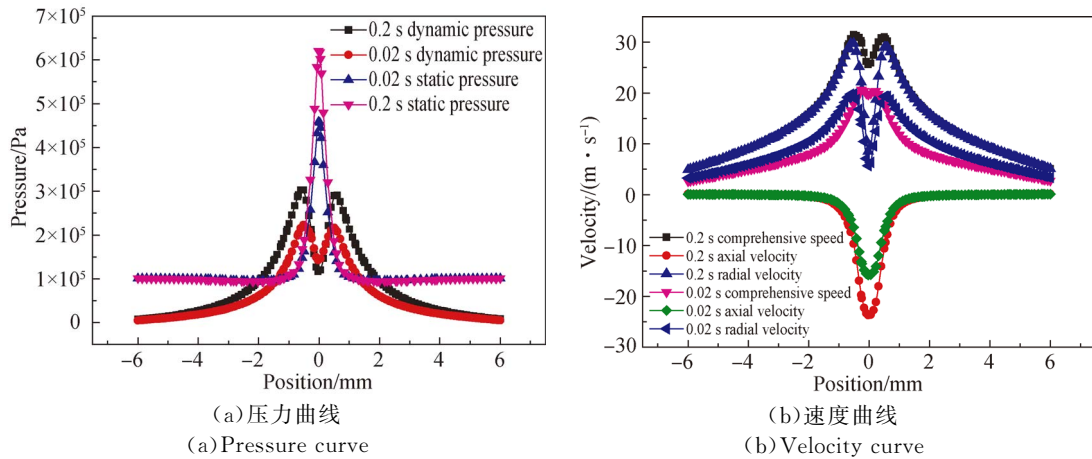


图 7 工件表面流场水平截面直径上的压力与速度曲线

Fig. 7 Pressure and velocity curves on horizontal section diameters of workpiece of flow field

4 试 验

4.1 试验系统

为了确定自激脉冲空化射流系统的性能,验证纳米胶体自激脉冲空化射流抛光加工效果,利用自制的抛光加工系统进行喷射观测试验和加工试验。试验现场图如图 8 所示。



图 8 试验现场图

Fig. 8 Photo of test equipment

4.2 自激脉冲空化射流的高速摄影

利用高速摄影机对自激脉冲空化射流的喷射区域“空化云”进行拍摄,系统压力分别设置为 1.5 MPa 和 2.5 MPa。1.5 MPa 系统压力下,以一个脉冲周期开始时间标记为 0 s,选取 0.09, 0.29, 0.31 s 时刻的喷射区域图片如图 9 所示。 $t=0.09$ s 时刻,喷射区域“空泡云”颜色较浅,长度短(4.15 mm),区域小; $t=0.29$ s 时刻开始,喷

射区域的空化效应突然明显,“空化云”颜色加深,其长度增加至 7.35 mm; $t=0.31$ s 时刻,喷射区域的“空化云”颜色最深,长度最长,达 9.2 mm,区域最大。这 3 个时刻代表了自激脉冲空化射流喷射周期的关键节点, $t=0.9\sim 0.29$ s 时间内,自激脉冲空化射流处于积聚状态,喷射区域流体速度较低,空化效应不明显, $t=0.29\sim 0.31$ s 时间内,自激脉冲空化射流积聚能量释放,射流速度大,空化效应明显。此规律与 Fluent 模拟结果相似。

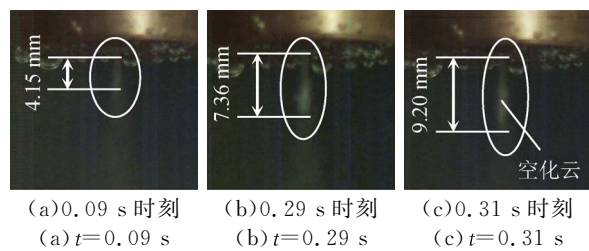


图 9 1.5 MPa 压力下不同时刻自激脉冲空化射流喷射区域图

Fig. 9 Image of self-induced pulse cavitation jet injection at different moment under 1.5 MPa pressure

2.5 MPa 工作压力下,0.01, 0.16, 0.18 s 时刻的喷射区域图片如图 10 所示。由图中可以得到,自激脉冲空化射流喷射区域的喷射规律整体与 1.5 MPa 情况类似,但脉冲周期稍短,每一阶段所对应的空化效应强度稍高。

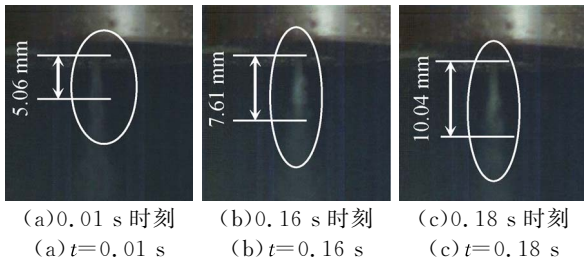


图 10 2.5 MPa 压力下不同时刻自激脉冲空化射流喷射区域图

Fig. 10 Image of self-excited pulse cavitation jet injection at different moment under 2.5 MPa pressure

4.3 纳米胶体自激脉冲空化射流抛光加工试验

利用建立的纳米胶体自激脉冲空化射流抛光系统进行加工试验,加工采用定点加工方式,各项加工参数如表 2 所示。加工 2 h 后,加工区域照片和使用 Form Talysurf PGI1240 表面轮廓仪得到加工区表面轮廓线如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,纳米胶体自激脉冲空化射流抛光后的工件加工痕迹呈现圆环形,加工区

域中心位置材料去除深度稍小,材料去除深度最大的位置处在中心周边区域,整个加工区域表面横截轮廓呈 W 型。此结果与之前的流体动力学仿真结果对应。仿真结果中,工件表面直径方向上流体的合成速度呈现 M 型,中心区域流体速度较低,中心周边区域射流速度较高,因此工件材料的去除呈现中心去除深度小于中心周边区域去除深度的情况。

表 2 加工试验参数设置

Tab. 2 Setting of processing experiment parameter

工件材料	单晶硅
系统压力/MPa	1
抛光液种类	SiO ₂
抛光液浓度/%	25
抛光液 pH 值	10
抛光液平均粒径/nm	10
喷嘴距工件表面距离/mm	1

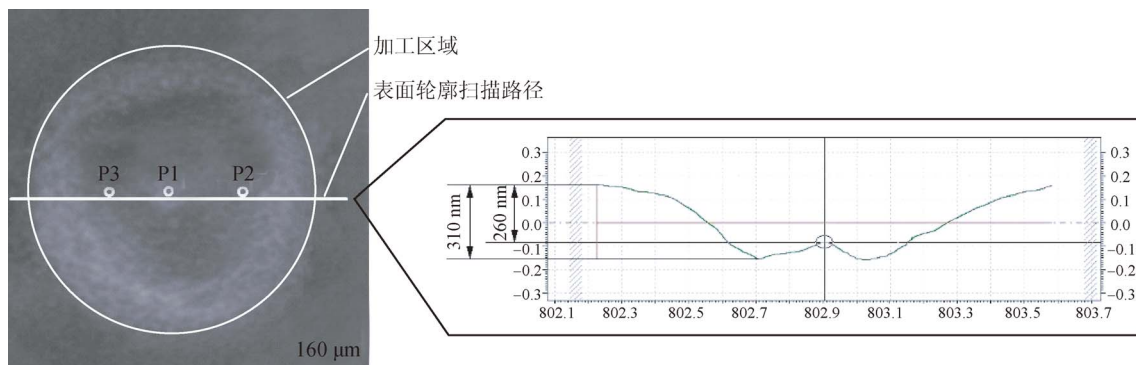


图 11 工件加工区域光学照片及表面轮廓曲线

Fig. 11 Processing area image and Surface profile of workpiece

取加工区域材料去除深度最大值,比较不同加工时间下纳米胶体自激脉冲空化射流抛光与普通纳米胶体射流抛光(NJP)的加工效率,其结果如图 12 所示,在此加工条件下,纳米胶体自激脉冲空化射流抛光的材料去除效率较普通纳米胶体射流抛光提升了 20%。

使用原子力显微镜,对纳米胶体自激脉冲空化射流抛光加工过的工件表面进行检测,并将其结果与传统纳米胶体射流抛光检测结果相比较。检测仪器为美国 Digital instruments Inc 公司 Dimension 3100 型号原子力显微镜,检测位置参照图 11 中标记位置,检测区域设定为 20 μm×20 μm。

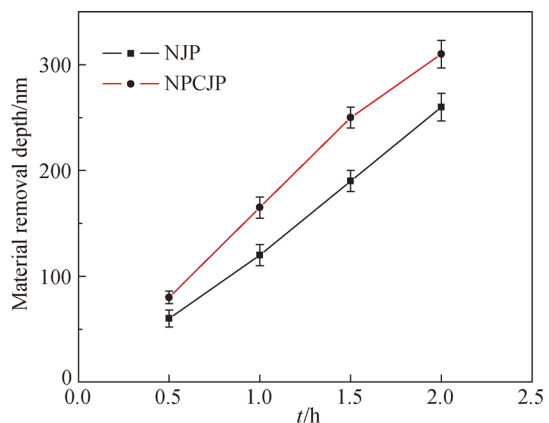


图 12 工件加工区域材料去除深度

Fig. 12 Material removal depth of machining region

利用纳米胶体自激脉冲空化射流抛光加工0.5 h和2 h后,P2位置原子力显微镜检测结果如图13所示。

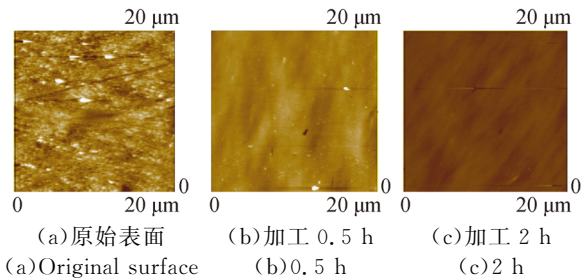


图13 工件表面原子力显微镜检测结果

Fig. 13 Atomic force microscopy inspecting results of workpiece

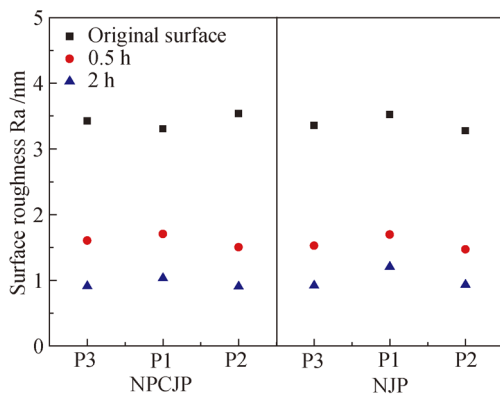


图14 纳米胶体自激脉冲空化射流抛光与传统纳米胶体射流抛光加工工件表面粗糙度

Fig. 14 Surface roughness of workpiece polished by NPCJP and NJP

参考文献:

- [1] FÄHNLE O W, BRUG H, FRANKENA H J. Fluid jet polishing of optical surfaces [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(28):6771-6773.
- [2] FÄEHNLE O W, BRUG H. Fluid jet polishing: removal process analysis [J]. *Korean Journal of Spine*, 1999, 3739(2):61-64.
- [3] 方慧,郭培基,余景池. 液体喷射抛光材料去除机理的有限元分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 218-223.
FANGH, Guo P J, YU J C Y U. Analysis of material removal mechanism in fluid jet polishing by finite element method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):218-223. (in Chinese)
- [4] JAFAR R, NOURAEI H, EMAMIFAR M, *et al.*. Erosion modeling in abrasive slurry jet micro-machining of brittle materials [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 17:127-140.
- [5] FAEHNLE O W, DOETZ M, DAMBON O. Analysis of critical process parameters of ductile mode grinding of brittle materials [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2017, 6(5):1-10.
- [6] SONG J L, SHI F, XIAO Q, *et al.*. Effect of elastic region nanoparticle SiO₂ jet polishing on the laser damage properties of fused silica [C]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, Shanghai, P. R. China:SPIE,2017: 103392E.

加工前工件原始表面粗糙,其粗糙度值为 R_a 3.537 nm (R_{ms} 4.746 nm),加工0.5 h后,工件原始表面上所存在的细小表面突起已经有大量减少,粗糙度值有了明显地降低,测量值为 R_a 1.503 nm (R_{ms} 2.220 nm)。加工2 h后,工件表面进一步改善,其表面粗糙度测量值为 R_a 0.904 nm (R_{ms} 1.225 nm)。如图14所示为纳米胶体自激脉冲空化射流抛光与传统纳米胶体射流抛光表面粗糙度检测结果比较,从中可以看出,相同加工时间内,两种方法所获得的工件表面粗糙度值相当。

5 结论

本文提出了一种新的液体射流抛光方法——纳米胶体自激脉冲空化射流抛光,设计了合适的自激脉冲空化喷嘴,建立了相关的加工系统,并通过流体动力学仿真和试验,得到了如下结论:

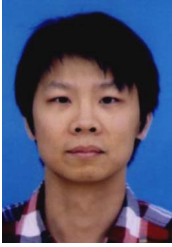
所采用的自激脉冲喷嘴能够生成压力、速度呈周期性变化的自激脉冲射流,本文条件下自激脉冲周期在0.3 s左右,自激脉冲射流能产生明显的空化效应;与普通的纳米胶体射流抛光相比,纳米胶体自激脉冲空化射流抛光能有效提高加工效率,同等条件下较普通纳米胶体射流效率提高20%左右;纳米胶体自激脉冲空化射流抛光能够有效降低工件表面粗糙度,本文条件下在单晶硅表面获得了粗糙度值为 R_a 0.904 nm (R_{ms} 1.225 nm)的超光滑表面,其对工件表面粗糙度值的改善效果与传统纳米胶体射流抛光相当。

- [7] 王星, 张勇, 徐琴, 等. 基于分子动力学仿真的纳米胶体射流抛光材料去除机理[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1):16-25.
WANG X, ZHANG Y, XU Q, *et al.*. Material removal mechanism of nanoparticle colloid jet polishing based on the molecular dynamics simulation [J]. *China Surface Engineering*, 2017, 30(1)16-25. (in Chinese)
- [8] BEAUCAMP A, NAMBA Y, FREEMAN R. Dynamic multiphase modeling and optimization of fluid jet polishing process [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(1):315-318.
- [9] CAO Z C, CHEUNG C F, KONG L B. Computational fluid dynamics-based analysis of material removal characteristics in fluid jet polishing [J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2015, 16(9):993-997.
- [10] SHI C Y, YUAN J H, WU F, *et al.*. Material removal model of vertical impinging in fluid jet polishing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(3):323-325.
- [11] CAO Z C, CHI F C, REN M. Modelling and characterization of surface generation in Fluid Jet Polishing [J]. *Precision Engineering*, 2016, 43:406-417.
- [12] CAO Z C, CHI F C. Theoretical modelling and analysis of the material removal characteristics in fluid jet polishing [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 89:158-166.
- [13] WANG C J, CHEUNG C F, LIU M Y. Numerical modeling and experimentation of three dimensional material removal characteristics in fluid jet polishing [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 133:568-577.
- [14] WANG R J, WANG C Y, WEN W, *et al.*. Experimental study on a micro-abrasive slurry jet for glass polishing [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016:1-12.
- [15] LOC P H. Investigation of optimal air-driving fluid jet polishing parameters for the surface finish of N-BK7 optical glass [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2013, 135(1):228-229.
- [16] BEAUCAMP A, FREEMAN R, WALKER D D. Removal of diamond-turning signatures on x-ray mandrels and metal optics by fluid jet polishing [C]. *SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2008:701835-701835-7.
- [17] 郑立功, 姚鹏, 张志宇, 等. 金属结合剂金刚石砂轮的高压磨料水射流修锐技术[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10):477-483.
ZHENG L G, YAO P, ZHANG ZH Y, *et al.*. High-pressure abrasive water jet dressing of metal bonded diamond grinding wheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10):477-483. (in Chinese)
- [18] SONG X Z, ZHANG Y, ZHANG F, *et al.*. Experimental investigation on polishing of ultrasmooth surface in nanoparticle colloid jet machining [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7282(5):977-986.
- [19] ZHANG F, SONG X, ZHANG Y, *et al.*. Figuring of an ultra-smooth surface in nanoparticle colloid jet machining [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19:1-6.
- [20] WANG C J, CHEUNG C F, HO L T, *et al.*. A novel multi-jet polishing process and tool for high-efficiency polishing [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2017(115):60-73.
- [21] CHEUNG C F, WANG C J, CAO Z C, *et al.*. Development of a multi-jet polishing process for inner surface finishing [J/OL]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635917302635?via%3Dihub>, 2017.
- [22] TSEGAW A A, SHIOU F J, LIN S P. Ultra-Precision Polishing of N-Bk7 Using an Innovative Self-Propelled Abrasive Fluid Multi-Jet Polishing Tool [J]. *Machining Science & Technology*, 2015, 19(2):262-285.
- [23] LOC P H. Investigation of optimal air-driving fluid jet polishing parameters for the surface finish of N-BK7 optical glass [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2013, 135(1):228-229.
- [24] LV Z, HUANG C Z, ZHU H, *et al.*. A research on ultrasonic-assisted abrasive water jet polishing of hard-brittle materials [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(5-8):1361-1369.

[25] BEAUCAMP A, KATSUURA T, KAWARA Z. A novel ultrasonic cavitation assisted fluid jet polishing system[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2017(66):301-304.

[26] CHEN F J, WANG H, TANG Y, *et al.*. Novel cavitation fluid jet polishing process based on negative pressure effects[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018,42:339-346.

作者简介:



王 星(1982—),男,河南平顶山人,博士,讲师,2004年、2009年于河南理工大学分别获得学士、硕士学位,2014年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事精密与超精密加工技术方面的研究。E-mail: wangxing@haut. edu. cn



张飞虎(1964—),男,河南荥阳人,博士,教授,1984年、1987年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,1993年在哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事精密与超精密加工方面的研究。E-mail: zhangfh@hit. edu. cn