

射流抛光误差分析与材料去除稳定性研究

施春燕^{1,2} 袁家虎¹ 伍 凡¹ 万勇建¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 研究了射流抛光材料去除面形不呈理想的对称形和重复抛光材料去除量的波动不稳定性, 分析认为射流抛光过程稳定性和误差因素会影响材料去除的不稳定性。分析了射流系统的误差影响因素, 其主要由压力波动、磨粒沉降作用和流体的紊动作用等部分组成, 并研究了各误差影响因素的产生机理和对材料去除的影响。通过仿真和实验分析, 得到压力波动、磨粒沉降作用和流体紊动作用的波动范围, 构建了基于各误差的材料去除稳定性的完整表达式, 理论计算误差范围与实验误差范围吻合。

关键词 光学制造; 射流抛光; 误差分析; 材料去除稳定性

中图分类号 TH74; TP60 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0112012

Research of Errors Analysis and Material Removal Stability in Fluid Jet Polishing

Shi Chunyan^{1,2} Yuan Jiahu¹ Wu Fan¹ Wan Yongjian¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Experiments is designed to research the instability of fluid jet polishing system. The results show that the material removal shape is dissymmetrical, and the material removal ratio is fluctuating with different polishing regions even on the same polishing condition. Then the influence factors of the instability is analyzed, such as pressure fluctuation, abrasive particles deposition, turbulent intensity and so on. The fluctuation of those error factors are acquired from experiments and simulation. Based on these data, the uncertainty is established for material removal ratio, showing that the theoretical uncertainty accords with the experiments' error. Polishing precision can be improved by error factors' compensation.

Key words optics fabrication; fluid jet polishing; error analysis; material removal stability

OCIS codes 120.4610; 220.0220; 220.4610; 240.5450

1 引 言

射流抛光是通过混有磨料粒子的抛光液高速作用于工件表面来实现材料去除抛光的, 它是一种比较新的光学抛光技术。与传统的抛光技术相比, 射流抛光技术具有能加工任意曲面形状的光学元件、抛光精度高、易控制和加工成本低等许多优点, 在光学表面加工领域中已取得了一定的应用和发展^[1~3, 9, 10]。

荷兰 Delft 大学的 Fähnle 等^[3]曾进行过射流抛光技术研究。他们的实验结果表明, 利用液体喷射抛光, 可使平面样板玻璃(BK7)的表面粗糙度由初始的 475 nm 降到 5 nm, 这说明射流抛光技术具有较高的精度。射流抛光技术一般用于抛光后期, 修正工件面形中低频误差, 但在修抛的同时会产生高频面形误差, 这种高频误差是由射流抛光材料去除特点和误差影响因素造成的。为实现对射流抛光材料去

收稿日期: 2010-03-18; **收到修改稿日期**: 2010-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(60808017)资助课题。

作者简介: 施春燕(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: yancshi@163.com

导师简介: 袁家虎(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: jhyuansz@163.com(通信联系人)

除更加精确的控制,使抛光过程更加稳定和可控,提高抛光精度。本文结合实验结果和理论,对射流抛光材料去除稳定性进行分析,研究误差影响因素的产生机理和对材料去除的影响,分析材料去除的稳定性精度。

2 抛光精度实验研究

材料去除精度主要受系统稳定性和误差的影响,为研究射流抛光稳定性和误差影响因素对抛光精度的影响,实验从两个方面展开:1)在相同时间和其他参数条件下,研究材料去除的稳定性;2)在不同时间但其他参数相同情况下,研究材料去除的变化特性。实验抛光设备采用基于实验室 $\Phi 400$ mm 数控抛光机床研发的射流抛光机,抛光结果采用 Zygo 激光干涉仪进行测量,结果如图 1~3 所示,其中图 1 是对同一抛光去除点过中心取不同截面的轮廓曲线对比图,图 2 是抛光时间都为 1.33 min 条件下不同去除点的材料去除量对比图(其他实验条件为:材料为 K9 平面玻璃;压力 $P=0.4$ MPa;喷嘴口径 $d=1$ mm;喷射距离 $h=10$ mm;磨粒浓度为 3%),图 3 是不同时间条件下(压力 $P=0.3$ MPa,其它实验条件同图 2 的实验),材料去除量的变化分布图。

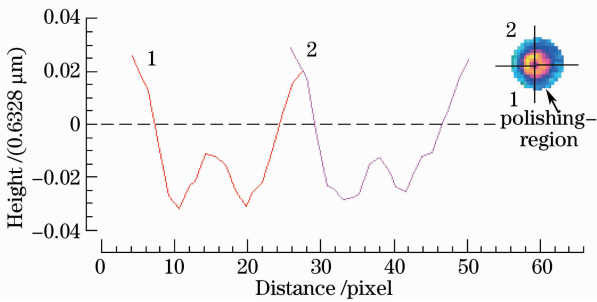


图 1 材料去除点的轮廓曲线比较图

Fig. 1 Removal profiles in same polishing location

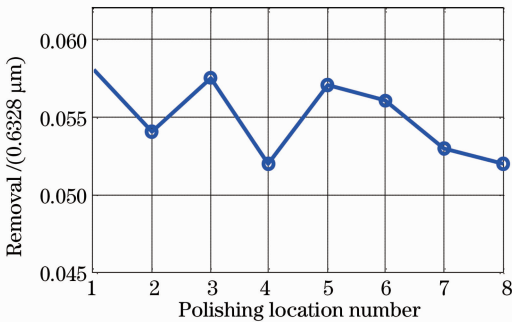


图 2 相同条件下的不同点的材料去除量

Fig. 2 Removals with different location, polishing time: 1.33 min

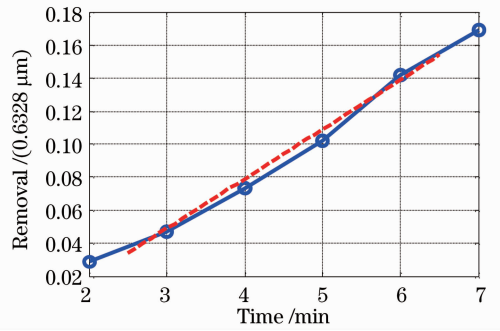


图 3 材料去除量随时间的分布

Fig. 3 Removal distribution with time, polishing pressure: 0.3 MPa

从图可知,受系统稳定性和误差的影响,材料去除不稳定性主要表现为三个方面:1)磨粒在去除范围内各点的去除不均匀,材料去除面形不是呈理想的对称形分布,经过中心的轮廓曲线无论大小和形状都有变化;2)在相同抛光条件下,对工件不同点抛光的材料最大去除量表现是不稳定的,有波动变化;3)在相同抛光条件下,材料的去除量随抛光时间呈近似线性递增关系。从图 2 实验数据对材料去除的不稳定变化进行分析,以相同条件下重复性材料去除量的平均值为准值,可得材料去除波动变化误差均方根(RMS)值为 0.0023λ (λ 为检测光波长, $\lambda=632.8$ nm)。

3 误差因素分析

射流抛光系统由液压驱动装置、管路稳压装置、喷嘴、机床和抛光液回收装置等部分组成,如图 4 所示^[6]。抛光中的材料去除受流体在工件壁面上的冲击作用和剪切作用的影响,根据以前的研究成果可知,单位时间内垂直冲击射流的二维材料去除深度分布函数表示为^[7]

$$f(x) \propto K_1 c \left[\frac{5.76}{0.86h/d - 2.5} p - p_k \right] \times \exp \left[-0.693 \left(\frac{x_1}{b} \right)^2 \right] + K_2 c \left[\frac{2.40}{\sqrt{0.86h/d - 2.5}} u(x) - u_k \right]^2, \quad (1)$$

式中 $-0.2h \leq x_1 \leq 0.2h$; h 为冲击距离; K_1 是与喷射距离和压力等无关的比例因子; p_k 为材料去除的临界冲击压力; b 为常数; c 为磨粒浓度分布; K_2 是与喷射距离和速度等无关的比例因子; $u(x)$ 为磨粒在工件壁面上的速度分布, u_k 为材料去除的临界速

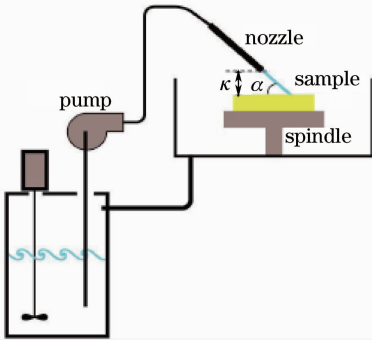


图4 射流抛光装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the FJP setup

度。由(1)式可知,在不考虑机床精度情况下,去除函数的误差影响因素主要有几个部分组成:磨粒浓度不均、压力波动和流体的紊动作用,下面将具体分析这些误差影响因素。

3.1 磨粒浓度不均性

在射流抛光过程中,抛光液是循环流动利用的,磨粒随抛光液流动的过程是个空间非均匀、时间非稳态的动力学演变过程^[8]。通过仿真可得图5所示的工件壁面上的浓度分布^[9],可知浓度在抛光区域内的分布是不均匀的,这种不均匀性主要由沉降作用导致。磨粒沉降动力学事件存在整个循环运动中,沉积过程中存在各种复杂的动力学机理,如重力作用、布朗扩散、湍流扩散和输运等。

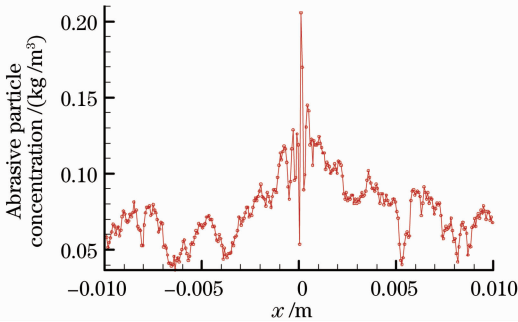


图5 工件壁面上磨粒浓度分布

Fig. 5 Abrasive particles' concentration distribution on workpiece wall

射流抛光的材料去除主要是通过磨粒的冲击和壁面碰撞等动力学作用来实现,在其他条件相同情况下,浓度越大,材料去除越多,磨粒浓度的分布不均匀会导致去除分布不均匀,从而引起图1中去除不对称性,去除分布不呈光滑曲线分布。通过仿真分析显示,磨粒浓度分布在任意时刻分布都不同的,无法准确对浓度分布进行预测。由于单位时间内抛光区域磨粒数量不变,磨粒浓度的分布不均对抛光区域的材料去除总量没有影响,因此在进行材料去

除量计算时,忽略浓度变化的因素,以浓度均值进行计算。

3.2 压力波动

射流抛光过程中所采用压力为低压范围,一般在0.3~1 MPa内,而且喷嘴口径小,流量小,因此系统液压驱动装置采用柱塞计量抽运。但柱塞计量抽运出口压力极不稳定,脉冲波动很大,需要在管路中接入脉冲阻尼器,以调节和抑制压力波动。根据仪器和环境情况,压力波动幅度能抑制在0.5%~5%范围内,则实际抛光管路压力可表示为

$$p = p_0(1 + f_p \sin \omega t), \quad (2)$$

式中 p_0 为均值压力, f_p 为波动幅度系数, ω 为波动圆频率, t 为时间。实验系统压力波动幅度系数测得为 $f_p = 2.1\%$ 。

从(1)式可知,材料去除随着压力的波动而变化,这种变化是导致图2,3中材料去除不稳定因素之一。压力波动对材料去除不稳定的影响主要体现在两方面:1)压力的变化导致每时刻的材料去除率不同;2)压力波动会导致流体在工件壁面上的紊动强度更大,材料的去除量会有更多的不可预测性。在射流抛光过程中,射流冲击工件后,流体的壁面流动是由冲击压力梯度作用引起的,冲击压力的脉冲波动也会引起壁面速度的波动,根据流体力学知识可知,壁面速度波动幅度系数为

$$f_v = \frac{1}{2} f_p = 1.05\%. \quad (3)$$

3.3 流体紊动

射流抛光中的流体是紊动冲击射流,紊流的特点是流体质点有不规则的近乎随机的脉动运动,沿主流方向及横向有宏观掺杂。流体的紊动性对抛光中的磨粒浓度分布和速度分布都有影响。这种紊流脉动运动大小一般用紊动强度表示,紊动强度越大,磨粒随流体的运动随机脉动越大,材料的去除越不均匀和不稳定。根据以前研究研究成果可知^[9],射流抛光中工件壁面上的紊动强度分布可通过计算仿真而得,如图6所示。从图可知,由于冲击作用,紊流在射流冲击区比较强烈,随着壁面射流运动,流体紊动强度逐渐减小。设紊动强度分布函数为 $f_t(x)$,考虑紊动强度对速度的影响,则工件壁面上的速度分布为

$$u(x) = u_0(x)[1 + f_v \sin \omega t \pm f_t(x)], \quad (4)$$

式中 $u_0(x)$ 为理想的没有脉动的速度分布。由于磨粒在工件壁面上速度大小和方向的随机脉动,实际抛光的去除函数不再是光滑的曲线,去除分布也不

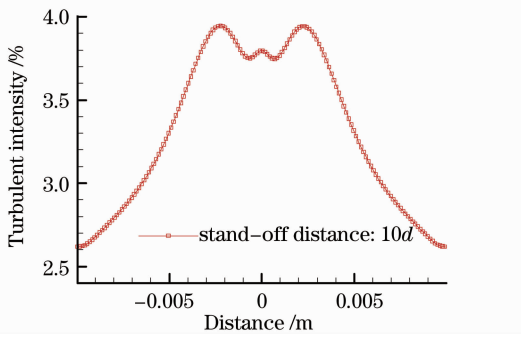


图6 工件壁上紊动强度分布

Fig. 6 Turbulent intensity distribution on the workpiece's wall

会程理想的对称分布。

4 误差控制与精度分析

通过以上分析可知,射流抛光去除不稳定性主要由压力、速度和浓度波动引起的。为提高射流抛光的去除稳定精度,须通过优化方法,减小甚至消除参数的波动误差。对于磨粒浓度不均匀分布问题,要防止磨粒沉降,可在抛光液回收装置里,加入搅拌机防止沉降,但抛光液从回收装置输送到抽运、再由管路中从喷嘴喷出及在工件台上都存在沉降,尤其在工件台处,没有搅拌设置,磨粒冲击工件后,会在其周围沉积的数量越来越多,最后导致抛光液浓度逐渐下降。因此,磨粒沉降是无法消除的,只能尽量减小和补偿。对于工件台上磨粒沉积问题,一方面可在系统设计上,使工件台周围壁面光滑陡斜,磨粒由于重力作用更容易随流体流到回收装置里;另一方面通过实验测出一定时间内磨粒的沉积重量,计算出沉积速度,动态在回收装置里补充相应磨粒重量,以使浓度平衡。

系统中的压力波动是由抽运的工作原理造成的,通过接入脉冲阻尼器等管路调节,使波动幅度在1%或更小时,由于抽运运转快,波动周期小,这一影响可忽略,计算材料去除量时用压力均值代入计算。磨料粒子微观运动的紊动性造成材料的去除不稳定,一般情况下,可以通过优化喷嘴结构和喷射距离来减小冲击射流的紊动性对材料去除的影响,通过实验和仿真分析可知,采用锥柱型喷嘴和喷射距离为喷嘴口径的10~12倍时,冲击射流的紊动强度低^[10],另一方面可通过理论仿真计算紊动强度(计算方法详见文献[9]),进行预测和补偿。

通过分析各参量的误差,射流抛光系统精度的

完整表达可参照量值的完整表达。材料去除深度函数为 f ,压力波动对壁面速度影响幅度为 f_v ,紊动强度为 f_t ,则材料去除的不确定度为

$$u_c^2(f) = \left[\frac{\partial f}{\partial p} f_p \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial v} (f_v + f_t) \right]^2, \quad (5)$$

根据(1)式和文献[6]中的材料去除函数关系,把实验参数、压力波动误差和速度波动误差代入求得实验条件下的不确定度为 $u_c(f) = 1.32 \text{ nm}(0.00208\lambda)$ (计算参数: $f_t = 3.95\%$; $f_v = 1.05\%$; $P = 0.4 \text{ MPa}$; $d = 1 \text{ mm}$; $h = 10 \text{ mm}$; K9材料),此理论值与实验结果比较符合,说明射流抛光材料去除不稳定性的影响因素主要是磨粒浓度不均、压力波动和流体的紊动作用。材料去除的完整表达式为

$$\Gamma_{\text{MRR}} = f(x) \pm k_p u_c(f), \quad (6)$$

式中 $k_p u_c(f)$ 为不确定度取值区间。

5 结 论

研究射流抛光稳定性和误差影响因素对抛光精度的影响,结果显示射流抛光材料去除不稳定性表现有去除面形不是呈理想的对称形分布、材料去除量的波动变化等三个方面,分析了系统的误差影响因素主要有压力波动、磨粒沉降作用和流体的紊动作用等部分组成。通过仿真和实验得到各误差因素的波动范围,分析了各误差影响因素的产生机理和对材料去除的影响作用,提出误差控制方法。构建了基于各误差的材料去除不确定度表达式,得到了材料去除稳定性的完整表达式,理论计算误差范围与实验误差范围吻合。

参 考 文 献

- O. W. Fahnle, Hedser van Brug, H. J. Frankena. Fluid jet polishing of optical surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(28): 6671~6673
- Silvia M. Booij, Hedser van Brug. Nanometer deep shaping with fluid jet polishing [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(8): 1926~1931
- O. W. Fahnle, Fluid jet polishing: removal process analysis, optical fabrication and testing [C]. *SPIE*, 1999, **3739**: 68~77
- Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan *et al.*. Influence analysis of impact angle on material removal profile in fluid jet polishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 513~517
施春燕, 袁家虎, 伍凡等. 冲击角度对射流抛光中材料去除面形的影响分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 513~517
- Zhang Baoan, Bao Lei, Zhu Jianqiang. Influence of slurry particle size on materials removal rate and roughness in high power laser glass material polishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1905~1911
张宝安, 包蕾, 朱健强. 抛光粉颗粒度对高功率激光玻璃材料抛光效率和粗糙度的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1905~1911
- S. M. Booij, H. van Brug, M. Singh *et al.*. Nanometer accurate shaping with fluid jet polishing [C]. *SPIE*, 2001, **4451**: 222~

- 7 C. Shi, J. Yuan, F. Wu *et al.*. Research on material removal model of vertical impinging model in fluid jet polishing [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 323~325
- 8 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan *et al.*. Study of abrasive particles discrete system in fluid jet polishing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(s): 73~76
施春燕, 袁家虎, 伍凡等. 射流抛光中磨粒离散系统的研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(s): 73~76
- 9 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan *et al.*. Numerical simulation of turbulent flow field in fluid jet polishing [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(1): 6~10
施春燕, 袁家虎, 伍凡等. 射流抛光多相紊流流场的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(1): 6~10
- 10 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan *et al.*. Design the nozzle of fluid jet polishing [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(12): 131~135
施春燕, 袁家虎, 伍凡等. 射流抛光喷嘴的设计[J]. *光电工程*, 2008, **35**(12): 131~135