

流体动压超光滑加工关键工艺参数优化*

彭文强¹, 关朝亮², 胡旭东¹, 王卓²

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 流体动压超光滑加工材料去除主要受工件表面流体动压和剪切分布的影响, 根据材料去除的理论模型分析了影响材料去除的关键工艺参数。基于流体动力学仿真和具体实验对抛光轮浸没深度、抛光轮转速和抛光轮间隙对流体动压超光滑加工的材料去除速率的影响规律进行了研究。分析结果表明: 抛光轮的浸没深度对材料去除速率影响不大; 材料去除速率随着抛光轮转速的减小、抛光间隙的增大而减小; 考虑实际使用条件, 最优抛光轮转速为 300 r/min、抛光间隙为 25 μm 、抛光轮浸没深度为 $(2/3)R$ 。同时对抛光头温度稳定性进行了具体实验测试, 其在装置启动后 4 h 基本达到热平衡, 通过试运行预热的方式可有效避免温升变化对抛光间隙的影响。

关键词: 流体动压超光滑加工; 工艺参数; 材料去除速率; 稳定性

中图分类号: TH161 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2017)04-179-06

Key process parameters optimization of hydrodynamic effect polishing

PENG Wenqiang¹, GUAN Chaoliang², HU Xudong¹, WANG Zhuo²

(1. College of Basic Education, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The material removal rate of HEP (hydrodynamic effect polishing) was mainly affected by the distribution of hydrodynamic pressure and shear stress on the workpiece surface, and the key process parameters were sought out accordingly. Based on the fluid dynamic simulation and experiment exploration, it investigated in detail how the material removal rate was affected by the wheel immersed depth, the wheel rotated speed and the polishing clearance. The analysis results show that the wheel immersed depth has little effect on the removal rate while the removal rate decreases along with the reduction of the speed and the increase of the polishing clearance. Considering the practical process condition, the optimal wheel immersed depth, speed and polishing clearance are $(2/3)R$, 300 r/min and 25 μm respectively. Meanwhile, the temperature stability of the polishing head was monitored, and it reached thermal equilibrium within 4 hours at start of the device. Therefore the stability of polishing clearance affected by the temperature can be guaranteed by idling with preheating section.

Key words: hydrodynamic effect polishing; process parameters; material removal rate; stability

现代光学技术的发展对光学元件表面质量的要求不断提高。以极紫外光刻技术为例, 不仅要求光学元件的表面粗糙度达到原子级水平, 同时还要求表面无任何缺陷近乎晶格完美。然而, 传统的以塑性域范围内材料去除为主的超光滑表面加工方法虽然容易在一定程度上获得较低的表面粗糙度, 但难以避免表面和亚表面损伤、加工变质层、残余应力层等问题^[1-3]。为满足现代光学系统飞速发展对超光滑表面的需求, 突破零缺陷超光滑表面加工技术已经成为超精密加工领域研究的热点。

弹性发射加工是最早由日本大阪大学 Mori 等^[4-7]提出的原子级超光滑表面加工方法, 目前

其已经被公认为世界上加工精度最高的加工方法, 但是该方法主要缺陷是材料去除效率低, 同时外界对于其关键加工技术还不甚了解, 从而导致对其加工结果难以复现。在浮法加工的基础上, 基于弹性发射加工原理提出了流体动压超光滑加工方法。流体动压超光滑加工通过控制纳米抛光颗粒与光学元件表面的弹性域碰撞, 利用界面化学吸附反应可以实现光学元件表面原子级水平材料去除, 可以获得超低损伤、原子级光滑的超光滑表面^[8-10]。流体动压超光滑加工是利用界面化学吸附实现光学表面的原子级材料去除, 低的材料去除速率是限制其在实际工程中应用的主要问

* 收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61505259)

作者简介: 彭文强(1984—), 男, 湖南永州人, 讲师, 博士, Email: plxhaz@126.com

题,同时加工过程中稳定的材料去除速率也是获得超光滑表面加工的前提。本文通过对流体动压超光加工材料去除机理进行分析,对影响流体动压超光滑材料去除速率的关键工艺参数进行了研究,为后续实际推广应用选择最优的加工参数提供理论依据。

1 流体动压超光滑加工材料去除机理

流体动压超光滑表面加工方法的加工原理如图 1 所示。抛光轮和光学元件都浸泡在含有纳米抛光颗粒的抛光液中。流体动压超光滑加工利用抛光轮高速旋转在抛光轮与光学元件之间形成一层流体动压润滑薄膜实现抛光工具与光学元件之间的非接触加工。纳米抛光颗粒随流体运动在流体润滑区实现光学元件表面的碰撞和分离。纳米抛光颗粒在流体动压作用下与光学元件表面在弹性域范围内产生界面化学吸附反应,在流体剪切力作用下与光学元件表面分离从而拽离光学元件表层原子。

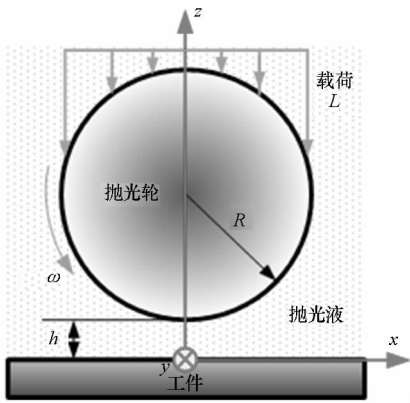


图 1 流体动压超光滑加工原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydrodynamic effect polishing

一般认为在抛光区域流体动压越大,纳米抛光颗粒与光学元件表面碰撞的概率越大,相互作用越明显,导致接触面积越大。在流体动压润滑区存在较大的流体剪切力,抛光颗粒在流体剪切力作用下克服表层原子结合键能从光学元件表面拽离光学元件表层原子,实现光学元件表面的原子级去除。基于理论分析,根据流体动力仿真分析和定点抛光实验结果,得到流体抛光的材料去除的理论模型为^[8]:

$$M_R(x, y) = \begin{cases} C\tau(x, y) + C_1P(x, y) + e & \tau \geq \tau_{\min} \\ 0 & \tau < \tau_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M_R(x, y)$ 为工件表面的材料去除速率; C 和 C_1 为与材料相关的正常数; $\tau(x, y)$, $P(x, y)$

为光学元件表面的流体剪切力和流体动压; e 为与材料和加工工艺相关的常数。

流体动压超光滑加工过程中,纳米抛光颗粒在流体动压作用下克服光学元件表面势垒发生界面化学反应,同时动压作用越强光学元件表面与抛光颗粒接触面积越大发生界面吸附反应的原子数量越多,流体剪切作用力越强纳米抛光颗粒越容易将工件表层原子拽离工件表面实现较快的材料去除速率。然而,当施加在纳米抛光颗粒的流体剪切作用力小到无法克服工件表面原子与次表层原子的结合力时,即使动压作用再强材料去除过程也不会发生。由流体动压润滑理论^[8]可知:当流体条件一定时,工件表面流体动压和流体剪切力的分布主要受抛光轮转速和抛光间隙的影响。实验中抛光轮的中心为强度和刚度较好的金属结构,外圈为具有一定弹性和高耐磨性的聚合物材料,抛光轮的旋转径向跳动小于 $2 \mu\text{m}$ 。纳米抛光液是由平均粒径为 20 nm 和去离子水组成的稳定悬浮液。

2 不同工艺参数的影响规律分析

2.1 抛光轮浸没深度对材料去除速率的影响

抛光轮完全浸没对抛光头的密封性提出了很高的要求,同时也会增加对抛光液的需求量,因此有必要分析不同浸没深度对流体动压超光滑加工材料去除速率的影响。Hamrock^[11]在对不同浸没深度润滑模型类型进行研究时发现球形元件在不同浸没深度下形成的最小流体动压膜厚基本一致,完全浸没形成的最大流体动压稍微比低浸没深度的大,差别不明显,最适宜的浸没深度定义为:

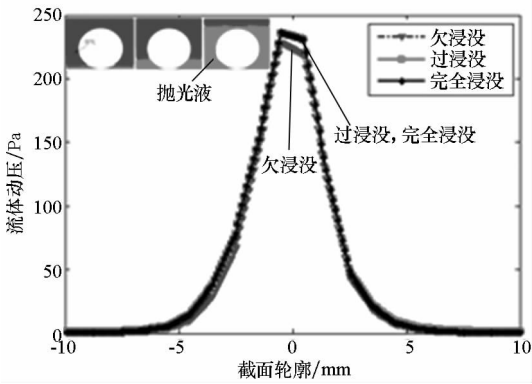
$$H_{\text{in}}^* = 4.11 (H_{\text{min}})^{0.36} \quad (2)$$

H 为相对浸没深度,定义为 h/R ,其中 h 为实际浸没深度, R 为抛光轮的半径。当 $H > H_{\text{in}}^*$ 为过浸没状态,当 $H < H_{\text{in}}^*$ 为欠浸没状态。上述润滑模型与流体动压超光滑加工模型相一致,因此加工过程中只要将抛光轮浸没到一定深度就可以达到完全浸没的加工效果。

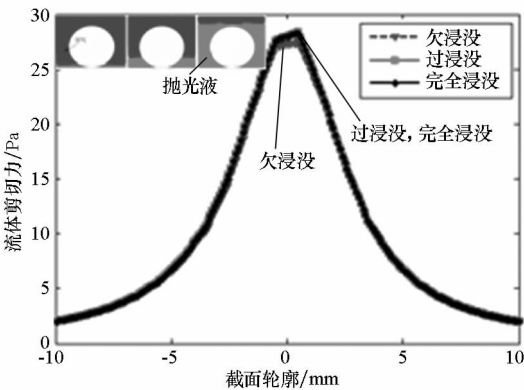
流体动压超光滑加工材料去除速率主要受流体剪切力和流体动压作用的影响。针对抛光轮的不同浸没深度,本节利用流体动力学仿真对光学元件表面流体动压和流体剪切力的分布和大小进行了分析。仿真参数设计如下:最小抛光间隙为 $30 \mu\text{m}$,抛光轮直径为 80 mm ,抛光轮浸没深度分别为 5 mm , 20 mm 以及 85 mm 。根据式(2)可得上述参数条件下最适宜的浸没深度为 12.3 mm ,

因此上述不同浸没深度的模型分别为欠浸没、过浸没以及完全浸没状态。

图2为抛光轮不同浸没状态下流体动压和流体剪切力的仿真结果。由仿真结果可知:三种不同浸没状态下的流体动压和剪切力分布基本一致,欠浸没状态的峰值动压和剪切力比其他两种浸没状态的稍小一点。这说明浸没深度的不同并不会对抛光过程中的材料去除速率造成很大影响。然而,一方面,实际加工过程中抛光液在抛光轮旋转离心力作用下会发生溅射现象,溅射作用会对抛光膜形成的稳定性造成一定影响,从而影响最终的加工效果。另一方面,抛光轮的高速旋转会卷吸部分空气进入抛光区域,卷入空气形成的气泡在抛光区域动压作用下破裂产生的微射流现象会对加工表面质量造成严重影响。而仿真过程中并未考虑这两种因素的影响。实验发现这两种现象会随着浸没深度的增加而逐渐被抑制。通过实验发现当抛光轮转速小于450 r/min、浸没深度在(2/3)R左右时溅射现象和空气卷吸现象非常不明显。



(a) 流体动压
(a) Hydrodynamic pressure



(b) 流体剪切力
(b) Shear stress

图2 不同浸没状态下流体动压和剪切力仿真结果
Fig.2 Simulation results of hydrodynamic pressure and shear stress at different immersed depth

2.2 抛光轮转速对材料去除速率的影响

在考察抛光轮转速对材料去除速率的影响时,抛光间隙保持20 μm不变,抛光轮转速分别设定为200 r/min,250 r/min,300 r/min和400 r/min。

图3为通过实验得到的抛光轮旋转速度对材料去除速率的影响关系曲线。实验结果表明:在一定范围内,抛光轮转速与材料去除速率呈现近线性关系,即转速越高,材料去除速率越大。随着抛光轮转速的增加,抛光颗粒的运动速度增大,抛光颗粒与光学元件表面在单位时间内的碰撞频率增加,从而材料去除速率提高。图4为在相同抛光间隙作用下,光学元件表面最大流体剪切力和最大流体动压与抛光轮转速之间的关系曲线。

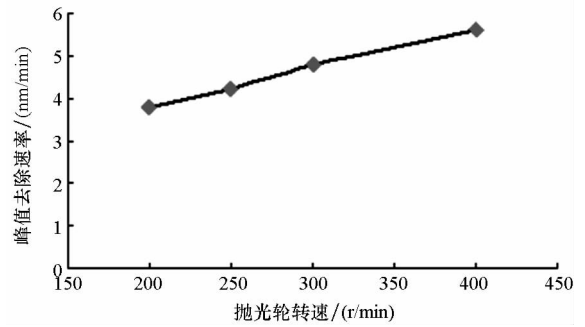
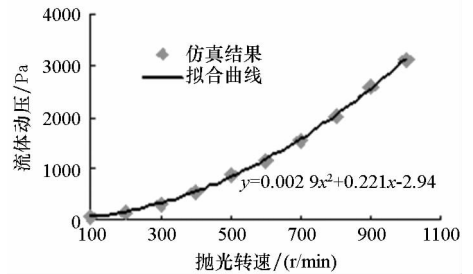
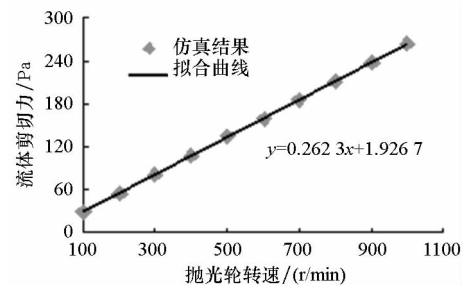


图3 峰值去除速率与抛光轮转速的关系
Fig.3 Relationship between peak removal rate and wheel speed



(a) 流体动压
(a) Hydrodynamic pressure



(b) 流体剪切力
(b) Shear stress

图4 最大流体剪切力和动压与转速变化的关系
Fig.4 Shear stress and hydrodynamic pressure affected by rotation speed

从仿真结果可以看出:光学元件表面流体动压随着转速的增加近二次线性增加,流体剪切力随着抛光轮转速线性增加。当抛光轮转速在 200 r/min 与 500 r/min 之间时,流体动压也可以认为随转速近线性增加。由式(1)可知流体动压超光滑加工中材料去除率随光学元件表面流体动压和流体剪切力线性增加。实验结果与流体动压超光滑加工的材料去除模型相一致。为了提高加工效率获取较大材料去除速率,在加工条件允许的前提下可以选择较大的抛光轮旋转速度。然而,一方面,抛光轮转速过高会受安装偏心误差的影响导致抛光轮旋转精度降低影响加工表面的质量;另一方面,加工过程中抛光轮部分浸泡在抛光液中,过高的抛光轮转速会卷吸一部分空气进入流体动压润滑区产生气泡对动压薄膜的稳定性造成影响。因此,一味地增加抛光轮旋转速度在实际加工过程中并不可取,抛光轮转速一般选择 300 r/min 为宜。

2.3 抛光间隙对材料去除速率的影响

在研究抛光间隙对材料去除率影响时,抛光轮转速保持 200 r/min 不变,抛光间隙分别选择 10 μm, 15 μm, 20 μm, 30 μm, 40 μm 和 60 μm。实验过程中定点抛光时间为 30 min。图 5 为不同抛光间隙作用下的材料去除速率。从实验结果可以看出在抛光轮转速一定的情况下,材料去除速率随抛光间隙的增大而减小,当抛光间隙增大到一定值后,材料去除基本不发生。

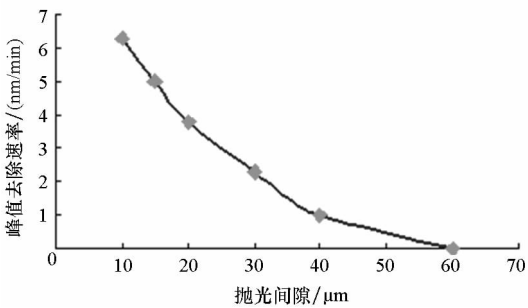
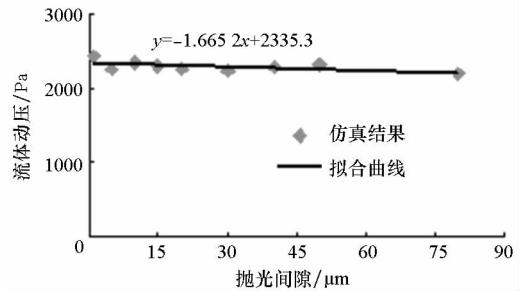


图 5 峰值去除速率与抛光间隙的关系
Fig. 5 Relationship between peak removal rate and polishing clearance

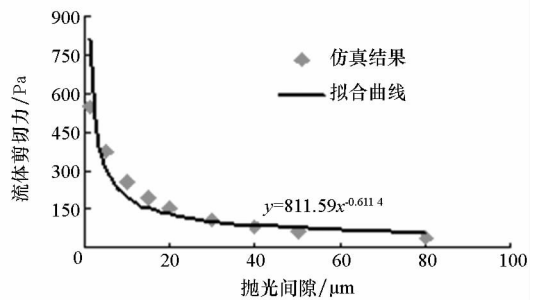
实验结果表明:当抛光间隙小于 40 μm,材料去除速率随着抛光间隙的增大迅速减小;当抛光间隙大于 40 μm 时,材料去除率减小的趋势明显趋于缓和。图 6 是在相同抛光轮转速作用下光学元件表面最大流体剪切力和最大流体动压与抛光间隙的关系曲线。从仿真结果可以看出:抛光间隙的变化对流体动压最大值基本不造成影响,而

流体剪切力随抛光间隙的增大迅速减小直至趋于缓和。材料去除速率随抛光间隙变化的曲线与光学元件表面流体剪切力随抛光间隙变化曲线具有一定程度的相似性。当抛光间隙增大到 60 μm 时,材料去除基本消失表明光学元件表面的流体剪切力已经下降到无法满足流体动压超光滑加工的材料去除模型中实现材料去除对剪切力最小值的要求。



(a) 流体动压

(a) Hydrodynamic pressure



(b) 流体剪切力

(b) Shear stress

图 6 最大流体剪切力和动压与抛光间隙变化的关系

Fig. 6 Shear stress and hydrodynamic pressure affected by polishing clearance

通过上面分析可知为了获取较大的材料去除量,必须选择较小的抛光间隙。但同时受抛光轮旋转精度的影响,为了避免抛光轮与光学元件之间碰撞,抛光间隙不可能太小;另外,抛光间隙过小,抛光轮表面形状误差会在流体动压作用下复印到加工表面从而影响加工表面质量^[9]。因此综合考虑加工效率与加工表面质量,抛光间隙选择 25 μm 比较合适。

2.4 抛光头温度稳定性测试

抛光过程中光学元件与抛光轮之间的间隙是在不考虑抛光头的热膨胀效应作用下通过高精度进给 z 轴进行控制的。抛光头座是由不锈钢材料加工而成的长臂结构。温度的变化会对长臂结构的长度造成影响,从而导致的抛光间隙的变化是不可忽略的。抛光头上端的驱动电机和下端的轴

承高速转动产生的热量都会直接传递到抛光头座上导致其温度升高使其长度伸长,致使抛光间隙减小。抛光头座的热致伸长量可以表示为:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中, α 为线性膨胀系数, L 为抛光头座的有效长度, Δt 为平均温升。实际设计抛光头座的有效长度为 156 mm, 本文中抛光头座使用的材料是机械性能优良的镍铬不锈钢, 其在常温下的线性膨胀系数为 $14.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [12]。在洁净间中将温控设备打开, 使系统环境温度稳定在 25°C , 抛光轮转速设定为 400 r/min, 然后利用红外测温仪每隔一段时间分别对抛光头上端和下端进行温度测试。测试结果如图 7 所示。

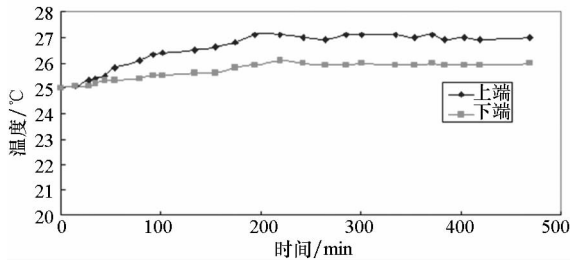


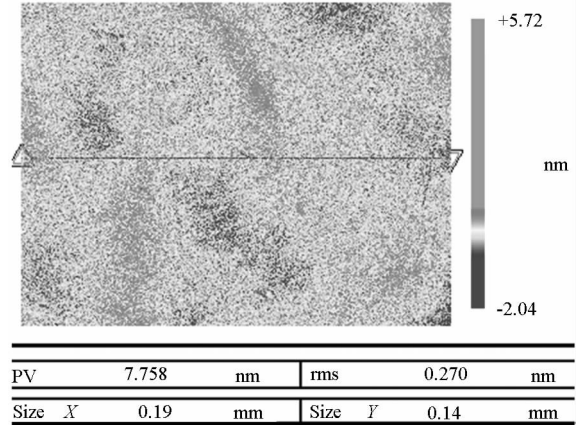
图7 抛光头温度随时间变化关系

Fig.7 Temperature of the polishing head changing along with the time

流体动压超光滑加工属于非接触加工, 实现抛光轮稳定旋转所需要提供的功率相当小, 因此在空载状态与实际加工过程状态可以认为是基本一致。从图中可以看出抛光头上端受驱动电机热量扩散的影响, 在 8 h 内温度升高了将近 2°C ; 由于轴承转动产生的热量小, 下端温度在测量时间范围内温升不超过 1°C 。因此可以推测抛光头座的平均温升为 1.5°C 。根据式(3)可以计算得到抛光头受温度变化影响导致的伸长量约为 $3.4 \mu\text{m}$, 相应的抛光间隙将减少相当的热伸长量。这说明加工过程中的抛光头热胀效应对抛光间隙造成严重影响。从图 7 中可以看出, 抛光头温升变化主要集中在初始运动过程的前 4 h, 当与系统环境温度达到热传递平衡后, 抛光头温度基本保持稳定。因此在加工前可以提前通过试运行预热的方式有效避免温升变化对抛光间隙的影响。由于实际加工过程中抛光间隙一般不小于 $10 \mu\text{m}$, 因此在抛光头的温度变化范围内仍可以实现抛光轮对光学元件表面的非接触加工。

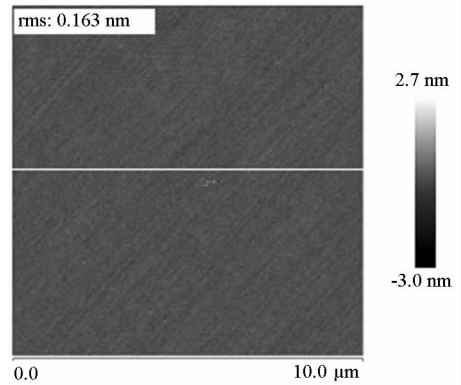
利用上述优化的工艺参数对一块石英玻璃进行加工, 分别采用 Zygo 的白光干涉仪和 Burke 的原子力显微镜对加工表面的微观形貌和中高频表面粗糙度进行观测。观测结果如图 8 所示(图中

PV 为峰谷值, rms 为均方根), 加工表面光滑, 中频表面粗糙度 rms 达到 0.270 nm , 高频表面粗糙度 rms 达到 0.163 nm 。



(a) 中频表面粗糙度白光干涉仪测试结果

(a) Middle-frequency surface roughness measured by white-light interferometer



(b) 高频表面粗糙度原子力显微镜测试结果

(b) High-frequency surface roughness measured by atomic force microscopy

图8 加工表面粗糙度测试结果

Fig.8 Processed surface roughness

3 结论

抛光轮的浸没深度对工件表面流体动压和剪切力分布影响不大, 但过低浸没深度会造成流体溅射和空气卷吸现象, 同时为避免对抛光液过多的浪费, 最佳的浸没深度为 $(2/3)R$ 。材料去除速率随着抛光轮转速的减小、抛光间隙的增大而减小, 其中抛光间隙的影响作用最为显著。考虑实际使用情况, 最佳的抛光轮转速为 300 r/min, 最合适的抛光间隙为 $25 \mu\text{m}$; 理论分析以及仿真结果均表明抛光轮浸没深度的变化对材料去除速率的影响非常小。对抛光头的热膨胀效应进行了分析, 抛光头在 4 h 内达到热传递平衡, 因此在加工前可以提前通过试运行预热的方式有效避免温升

变化对抛光间隙的影响。

参考文献 (References)

- [1] Feit M D, Rubenchik A M. Influence of subsurface cracks on laser induced surface damage[J]. Proceedings of the SPIE, 2004, 5273: 264 – 272.
- [2] Bifano T G, Dow T A, Scattergood R O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials[J]. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113 (2): 184 – 189.
- [3] Preston F W. The structure of abraded glass surfaces[J]. Transactions of the Optical Society, 1922, 23 (3): 141 – 164.
- [4] Mori Y, Yamauchi K, Endo K. Elastic emission machining[J]. Precision Engineering, 1987, 9(3): 123 – 128.
- [5] Mori Y, Yamauchi K, Endo K. Mechanism of atomic removal in elastic emission machining [J]. Precision Engineering, 1988, 10(1): 24 – 28.
- [6] Kanaoka M, Takinoa H, Nomura K, et al. Removal properties of low-thermal-expansion materials with rotating-sphere elastic emission machining [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2007, 8(3): 170 – 172.
- [7] Kanaoka M, Liu C L, Nomura K, et al. Processing efficiency of elastic emission machining for low-thermal-expansion material[J]. Surface & Interface Analysis, 2008, 40(6/7): 1002 – 1006.
- [8] Peng W Q, Guan C L, Li S Y. Ultrasmooth surface polishing based on the hydrodynamic effect[J]. Applied Optics, 2013, 52(25): 6411 – 6416.
- [9] Peng W Q, Guan C L, Li S Y. Efficient fabrication of ultrasmooth and defect-free quartz glass surface by hydrodynamic effect polishing combined with ion beam figuring[J]. Optics Express, 2014, 22 (11): 13951 – 13961.
- [10] Peng W Q, Guan C L, Li S Y. Surface evaluation and evolution during hydrodynamic effect polishing for quartz glass[J]. Applied Optics, 2014, 53(29): 6913 – 6919.
- [11] Hamrock B J. Fundamentals of fluid film lubrication [D]. Columbus, US: The Ohio State University, 1990.
- [12] 朱龙根. 简明机械零件设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
ZHU Longgen. Handbook for concise mechanical parts designing[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1997. (in Chinese)