

液体喷射抛光技术材料去除机理的有限元分析

方 慧, 郭培基, 余景池

(苏州大学 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要: 实验研究了液体喷射抛光技术的材料去除量分布特征, 并利用有限元分析方法, 分析了抛光头(液体柱)与工件表面相互作用时流场的分布特点。实验结果及计算机模拟的结果表明, 材料去除量与射流碰撞工件后流体沿工件表面的速度有关, 即材料去除量的分布与抛光液在工件表面速度场的分布有关, 速度分布最大的边缘部分, 材料去除量最大; 相互作用区外, 速度逐渐减小, 材料去除量也随之渐少。该现象说明, 抛光液中磨料粒子的径向流动对工件产生的径向剪切应力是材料去除的关键。

关键词: 喷射抛光; 有限元法; 去除机理; 冲击磨损

中图分类号: TQ171.684 **文献标识码:** A

Analysis of material removal mechanism in fluid jet polishing by finite element method

FANG Hui, GUO Pei-ji, YU Jing-chi

(Key Laboratory of Modern Optical Technology of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Distribution of removed material in Fluid Jet Polishing (FJP) was investigated in experiments. The characteristics of fluid velocity and pressure on the sample surface were simulated using Finite Element Method (FEM) when the fluid jet impacts the work piece. The experimental and simulating results show that the distribution of removed material is related to that of fluid velocity field after collision of the slurry jet with work piece, that is to say, the maximum amount of removed material appears on the edge of impacted area where the fluid velocity has the maximum value; In the outside, the less material removal is due to the smaller velocity. Thus, it is concluded that the collision and shearing actions caused by the radial flowing of slurry play a dominant role in material removal in FJP.

Key words: Fluid Jet Polishing (FJP); Finite Element Method (FEM); removal mechanism; impact wear

1 引 言

液体喷射抛光 FJP (Fluid Jet Polishing, 简称

FJP) 技术是利用由小喷管喷出的混有磨料粒子的高速抛光液作用于工件表面, 借助磨料粒子与工件表面之间的相互作用达成材料去除的目的, 通过控制液体喷射的压力、方向及驻留时间等量

来定量修正被加工件面形的新型光学加工工艺。

较之于传统的抛光技术,液体喷射抛光技术的优点在于其加工工具是连续流动的液体,不存在磨损情况,易于使去除函数保持恒定,面形精度容易控制;另外,由于在加工过程中抛光液不断循环流动,保证相互作用区域温度不产生较大变化,同时还能自动清除加工下来的碎屑;抛光头是一很小的液体柱,能适合各种形状工件的抛光,抛光特性不受工件位置的影响,像工件局部地区是否适配以及边缘效应等,应用范围较广。

荷兰应用物理研究所的 O. W. Föhnle 和 H. van Brug 等人曾进行过研究^[1-2],其实验结果说明液体喷射抛光技术可使工件表面粗糙度达到 1.5 nm,并具有修正面形精度的能力,说明该技术用于精密光学制造方面是可行的。但对于材料的去除机理,没有开展详细的研究工作^[1-3]。本文从实验出发,研究了液体喷射抛光技术材料去除量的分布特征。并借助流体力学理论及有限元分析方法^[4-6],通过计算机模拟,得出了抛光头在与工件表面相互作用时流场分布的性质特点。进一步分析得到了液体喷射抛光技术的材料去除机理及去除特征,为进一步研究数控液体喷射抛光技术奠定了基础。

2 实验装置及实验结果

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示:混有磨料粒子的抛光液经高压泵加速后,以一定的速度从喷管喷出射向工件表面,与工件发生相互作用,对工件表面进行抛光。碰撞结束后,磨料粒子随水流回流到收集器,循环往复,可对工件进行连续抛光。喷射抛光过程中,磨料粒子如同一把把微小的柔性车刀,对工件表面进行切削、刻划加工。

2.2 实验结果

实验所用工件材料为平面 K9 玻璃,抛光液采用氧化铈(CEROX™ 1650 抛光粉)与水按 1:25 (质量比)混合而成。喷管为长 25 mm、直径 2.5 mm 的圆柱形喷管,并调节其离工件的距离约 6 mm,工作压力为 6 bar,工件固定不动。

图 2 为垂直喷射,作用 5 min 后测得的相互作用范围内(测量区域的直径约为 13 mm)材料去除量的分布特征。可以看出:在抛光液与工件

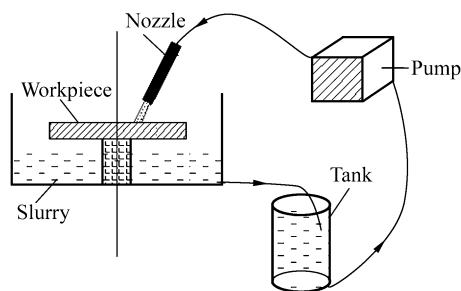


图 1 液体喷射抛光简易装置图

Fig. 1 Schematic diagram of FJP

表面相互作用范围内,材料去除量呈环状结构分布:抛光区中心部分材料去除量几乎为零,而以中心顶点为圆心的同一径向位置处,沿圆周的去除量近似相等,图中的偏差是由于射流体与工件表面不能保证严格垂直引起的。从材料去除量的分布曲线可以更明显地看出:在整个相互作用区域内,中间部分高,材料几乎没有去除;边缘一定位置处低,材料有最大去除量,呈 W 型分布。

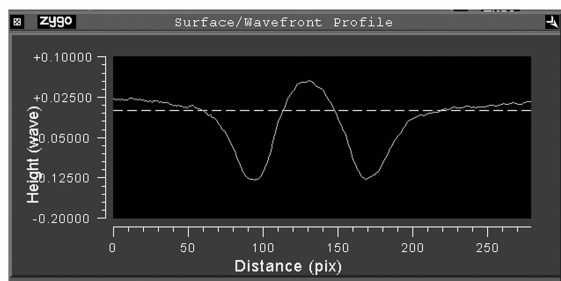
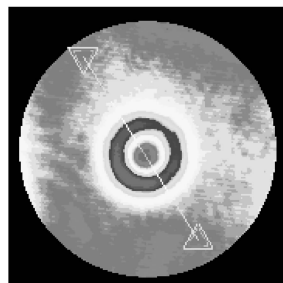


图 2 喷管直径 $d=2.5$ mm 时材料去除量的分布

Fig. 2 Distribution of removed material (nozzle with diameter of 2.5 mm)

减小喷管直径,发现材料去除量分布特征有所变化。如图 3 为采用直径 $d=1.2$ mm 的喷管时得到的材料去除量分布情况(此时测量区域的直径约为 7 mm)。较之于直径 $d=2.5$ mm 的喷管,采用较小直径的喷管时,材料去除量的分布偏离 W 型。在相互作用的中心区域,材料已被部分

去除,但去除量依然小于边缘部分,并不为最大值。

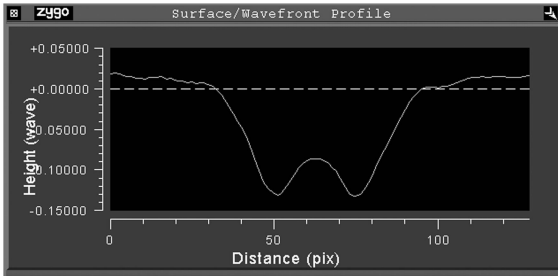
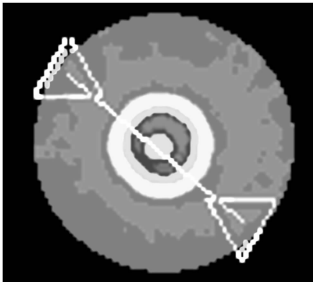


图 3 喷嘴直径 $d=1.2\text{ mm}$ 时材料去除量的分布

Fig. 3 Distribution of removed material (nozzle with diameter of 1.2 mm)

3 流场分布有限元模拟

根据流体力学理论,对于冲击射流,射流体在高的撞击速度下,撞击瞬间是以可压缩的方式起作用的^[4],当运动的液体柱前沿突然受阻而停止,而且没有侧向流动,则在运动液体柱中形成的压力

$$p = \rho CV, \quad (1)$$

式中 V 为液体柱的速度, C 为压缩波在液体中的速度, ρ 为液体的密度。

虽然此时没有物理的约束以防止射流的侧向流动,但是释放波从射流边上蔓延到液柱中心将经过一个有限的时间。释放波的前沿压力将是 p ,在波的后面液体将开始沿径向向外流动,而压力最后降低到稳定流动的值(详细分析参考文献[4])之后流动趋于稳定,形成稳流。所以,最大压力在射流体与工件撞击的瞬间产生,但是对玻璃材料而言,由于其抗压强度大于抗拉强度,并且在材料内部没有危险裂纹时,材料内部的破坏强度很高。通常,轴向的静压力并不能达到材料破坏的值,材料往往是表面上流体径向流动的结果使其发生破坏,为此研究液体喷射抛光技术材料去除机理时只需考虑碰撞冲击结束,稳流建立之后

射流体在工件表面产生的作用力即可。

经过一段时间稳流建立之后,忽略重力场作用^[5],流体的运动满足不可压缩流体动量平衡方程及连续性方程

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (3)$$

其中: ρ 为流体密度; μ 为流体的动力粘滞系数; p 为作用在流体上的压力;

对冲击射流模型进行有限元分析模拟^[6-9],具体包括:建模、网格划分、加载、求解及结果分析。

(1)建模与网格划分:稳流建立之后,从圆柱状喷管出射的射流体在与工件垂直碰撞后,将以碰撞点为圆心,并以圆环状对称结构向外流动。当距离碰撞中心数倍于喷管直径后,射流体失去对材料去除的能力,而且之后的运动具有相似性,为此只需考虑距离碰撞点一定范围内流体的运动情况。在不影响计算精度的情况下,为减小分析范围,建模时可选择 6 倍喷嘴直径 ($d=2\text{ mm}$) 内的区域进行分析,并设喷嘴距离工件表面 3 mm,环形出流边缘区域高度 0.8 mm。

考虑到模型的中心对称性,仅对其 1/2 部分进行分析计算,且为提高计算精度,在冲击中心区域附近网格加密。模型及网格划分情况如图 4。采用三维一次四节点单元,共划分成 7 599 个单元,其中 2 546 个边界单元。

(2)加载:忽略重力场的作用,并设定初始速度 $u_0 = 25\text{ m/s}$,抛光液的动力粘滞系数 $\mu = 1 \times 10^{-3}\text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

代入边界条件(如图 4)并加载。

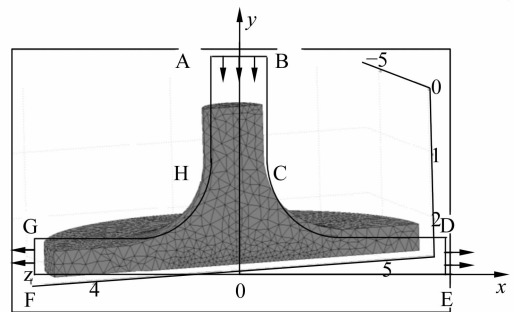


图 4 冲击射流边界条件

Fig. 4 Boundary condition and FEM of fluid jet

(1)、入口边界 AB: 速度均匀且垂直于边界 AB, $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = u_0$;

(2) 出口边界 FG、ED: 均匀出流, $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = u$, 压力 $p = 0$, 压力梯度 $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$;

(3) 管壁边界 AH、BC: 满足无滑移条件 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$;

(4) 冲击壁面 EF: 满足无滑移条件, $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$;

(5) 对称边界 y 轴: $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$;

(6) 气液界面: 自由边界, 压力 $p = 0$ 。求解得到射流体与工件相互作用后流体的运动情况如图 5 所示: 射流体从喷管出射并与工件发生碰撞, 碰撞之后, 射流体速度将改变方向: 沿径向向外流动

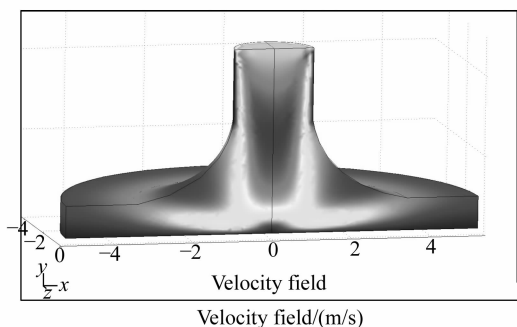


图 5 射流体与工件相互作用后流场的分布特征
Fig. 5 Characteristics of fluid field after impating

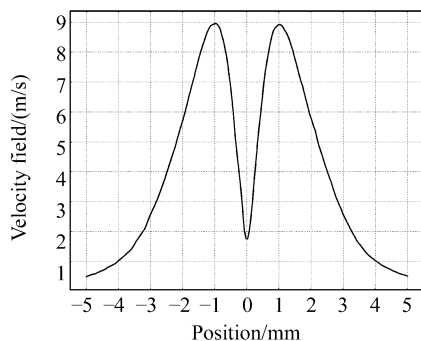
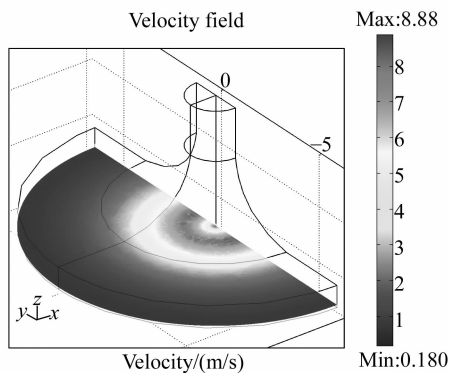


图 7 速度场的分布
Fig. 7 Distribution of fluid velocity on surface

或存在部分反弹。射流体与工件表面的碰撞使射流体头部出现压缩波, 并以碰撞中心为球心向四周传播: 压缩波沿射流反方向传播时, 与射流来流发生相互作用, 并在射流轴心处出现压力分布的最大值点 (如图 6 所示), 随着离轴心距离的增加, 压力迅速衰减, 在两倍喷管半径之外的区域, 压力近乎为零; 压缩波的径向传播使射流体沿径向由轴心向外具有较高的压力梯度, 并导致轴线周围射流在未达到工件表面时, 便在压力梯度的作用下沿径向向外流动。由于压力梯度是产生加速度的原因, 压力梯度一旦消失, 速度达到极大值, 之后射流速度逐渐减小, 具体情况如图 7 所示。同样, 压缩波在向工件内部传播时, 对工件产生静压力, 与图 6 类似, 也为中间有最大值的高斯型分布。

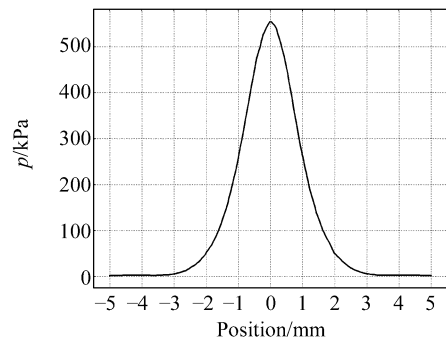
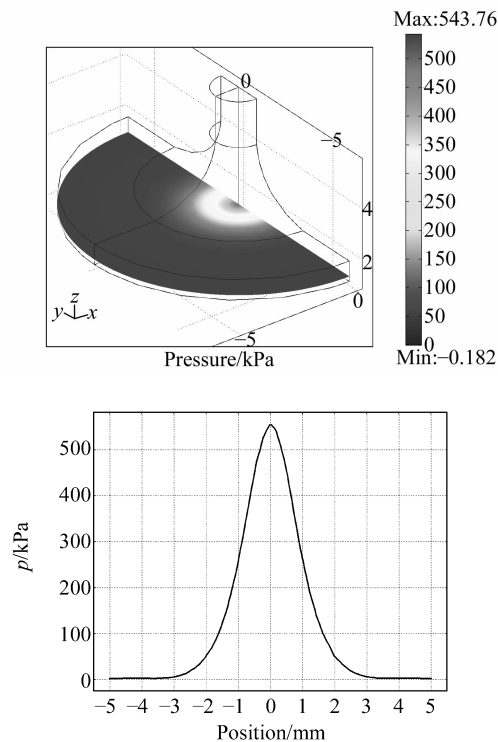


图 6 压力场的分布特征
Fig. 6 Distribution of impact pressure on surface

4 材料去除量分布分析及去除机理的讨论

根据材料的断裂机制及冲击磨损理论^[4-5]: 射流体与工件表面相互作用时, 存在由于射流体连

续不断地冲击而产生的垂直于工件表面的压应力,及射流体流过工件表面时由于运动而产生的平行与工件表面的径向剪切应力,两种应力数量的量级相同^[4]。在射流体与工件相互作用的中心区域,压应力最大,但由于玻璃材料的抗压强度(1.96~4.9 GPa)远远大于其抗拉及抗张强度(34.3~83.3 MPa),该压应力仅在工件内表面产生压缩力而不足以使玻璃材料出现破坏;当射流体在工件表面沿径向流动时,对工件产生沿径向剪切应力,当该剪切应力超过材料的破坏强度时,出现材料的破坏去除,并且破坏首先在作用力最大的冲击边缘产生,向内外两个方向扩展形成 W 型的去除量分布情况。

由实验结果知:当减小喷管直径时,中心部分材料去除量有所增加,该现象可以理解为在冲击边缘产生的材料破坏在向内扩展时,使冲击中心位置材料被部分去除。

由实验结果知:若采用纯水射流^[8],即使工作压力升高到 20 bar 时,也没有发现材料去除。同时从材料的去除量分布和射流体在工件表面速度

场的分布可以看出:材料去除量的分布与射流体在工件表面速度场的分布相似,速度分布最大的边缘部分,磨料粒子对工件的冲击磨损作用最强,材料去除量最大;相互作用区外,速度逐渐减小,材料去除量也随之渐少。该现象进一步说明:磨料粒子在工件表面径向流动时对工件表面产生的沿径向的剪切应力是导致材料破坏去除的关键因素,材料是由两者之间的剪切作用去除的。

5 结 论

液体喷射抛光技术是利用混有磨料粒子的抛光液对工件表面的碰撞冲击、剪切磨损作用去除材料的一种新型加工工艺。实验结果及计算机模拟的结果表明:材料去除量与射流碰撞工件后流体沿工件表面的速度有关,速度分布最大的边缘部分,材料去除量最大;相互作用区外,速度逐渐减小,材料去除量也随之渐少。该现象说明:抛光液中磨料粒子的径向流动对工件产生的径向剪切应力是材料去除的关键。

参考文献:

- [1] FAHNLE Q W, VAN BRUG H, FRANKENA H J. Fluid jet polishing of optical surfaces[J], *Applied Optics*, 1998, 37(28):6671-6673.
- [2] FAHNLE Q W, POLISHING F J, ANALYSIS R P. Part of the EUROPTO conference on optical fabrication and testing[J]. *SPIE*, 1999, 3739:68-77.
- [3] 方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光材料去除机理的研究[J]. *光学技术*, 2004, 30(2):248-250.
FANG H, GUO P J, YU J CH. Research on material removal mechanism of fluid jet polishing [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2):248-250. (in Chinese)
- [4] F. P. 鲍登 D. 泰伯, 固体的摩擦与润滑[M]. 机械工业出版社, 1986:592-621.
BOWDEN F P, TABOR D. *The friction and lubrication of solids*[M]. Beijing: China Machine Press, 1986:592-621. (in Chinese)
- [5] 费祥麟, 高等流体力学[M]. 西安交通大学出版社, 1989.
FEI X L. *Fluid mechanics* [M]. Xi'an Jiaotong University Press, 1989. (in Chinese)
- [6] 夸克工作室. 有限元分析教学范本 FEMLAB 与 Mathematica[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:15.
Quark Studio. *Finite Element Analysis teaching model in FEMLAB and Mathematic* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [7] MABROUKI T, RAISSI K, CORNIER A. Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high-velocity waterjet and targets; contribution to investigate the decoating process[J]. *Elsevier Science ,Wear* 239(2000):260-273.
- [8] SHI H H. The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range[J], *Elsevier Science*, 1995, 186-187:352-359.