

文章编号 1004-924X(2006)06-1004-05

# 磁射流抛光时几种工艺参数对材料去除的影响

张学成,戴一帆,李圣怡,彭小强

(国防科技大学 机电工程与自动化学院机电工程系,湖南 长沙 410073)

**摘要:**研究了磁射流抛光时几种工艺参数对材料去除的影响。首先介绍了磁射流抛光的原理和实验装置,然后从实验出发研究了磁射流抛光中材料的去除。利用标准的磁流变液进行了一系列定点抛光实验。重点研究了冲击角、工作距离、射流速度和磁场强度对抛光区形状和去除量的影响,获得了相应的关系曲线。运用计算流体力学方法分析了材料去除机理。为进一步研究磁射流抛光的各种参数的最佳匹配,实现磁射流抛光的数控加工奠定了基础。

**关键词:**磁射流抛光;射流稳定性;抛光区;去除机理

**中图分类号:**TH161 **文献标识码:**A

## Effect on material removal of magnetorheological jet polishing by several parameters

ZHANG Xue-cheng, DAI Yi-fan, LI Sheng-yi, PENG Xiao-qiang

(College of Mechatronic Engineering and Automation,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The effects on material removal of MJP(Magnetorheological Jet Polishing) by several parameters were given. Firstly, the mechanism and experiment set-up of MJP were introduced. Then the material removal of MJP was investigated in the experiment. A series of spot polishing experiments were conducted using the standard magnetorheological fluid. The effects of impact angle, stand-off distance, jet velocity and magnetic intensity on polishing were mainly studied. And the relation curve between each parameter and the amount of removal was obtained. The mechanism of material removal was analyzed by computational fluid dynamics. The experiment results lay a foundation for further research of best parameter matching for MJP, and for the implementation of numerical control of MJP.

**Key words:** Magnetorheological Jet Polishing; jet stabilization; polishing spot; removal mechanism

## 1 引言

现代光学系统中光学零件的形状变得越来越复杂,其形状精度和表面质量要求也越来越严格。

自由曲面、高陡度的凹形光学零件或内腔等由于机械干涉和陡峭的局部倾斜度而难以使用传统抛光技术。使用离散的细小颗粒抛光仍然是抛光的主流方法。近年来,国内外相继出现应用磨料和液体混合物的射流束来抛光这样的曲面<sup>[1-3]</sup>。普

通的液体射流束以一定的速度进入静止大气中时,由于两者的速度差,射流与空气之间形成一个速度不连续的间断面,在急剧的压力梯度、表面张力和空气动力扰动的综合作用下,会产生流体界面的不稳定性问题。液体射流束界面的不稳定性导致冲击区流动的不稳定,相应地出现了抛光区的不稳定性。增大射流液的粘性会减小空气扰动的影响,但流动阻力增大必然会对传递系统和泵的功率等有更严格的要求。降低射流速度会减小冲击的能量,相应的会出现很低的材料去除率。普通液体射流束的这种不稳定性使得其对高陡度光学零件的确定性抛光变得困难。

磁流变液在外磁场的作用下,能在几毫秒时间内快速地由低粘度的牛顿流体转化为类固体的 Bingham 流体,其粘度成数量级的增加,这种液体和固体之间的转换快速且可逆<sup>[4]</sup>。磁射流抛光技术(Magnetorheological Jet Polishing,简称 MJP)是射流技术和磁流变技术的结合,利用低粘度磁流变液在外磁场作用下会发生磁流变效应,表观粘度增大来增加射流束表面的稳定性,混合有抛光粉的磁流变液在磁场中形成准直的硬化射流束喷射到放置在一定距离处的工件表面,借助于磨料颗粒的高速碰撞剪切作用实现材料的去除,以可控的方式实现抛光和修形。美国 QED 公司首先进行了这方面的研究,实验证明磁射流抛光可以产生面形误差为几十纳米(P-V)和表面粗糙度达到数埃(rms)的精密表面<sup>[3]</sup>。本文通过实验研究了磁射流抛光工件表面材料去除情况。

## 2 磁射流抛光装置原理

磁射流抛光的工作原理如图 1 所示。混合细微抛光磨料颗粒的磁流变液在容器中经过机械搅拌均匀之后,一个相对低压的压力系统将浆体泵吸流经一个安装在电磁铁内部铁磁材料制作的喷嘴形成射流,经过局部轴向磁场稳定的硬化的磁流变液射流束喷射到一定距离处的工件表面进行抛光,最后使用过的抛光液经过回收装置过滤后重新回到容器中循环使用。工件安装在一个可以作旋转和直线运动的多轴数控主轴上,可以设定喷嘴轴线与工件表面法线间夹角和工件距离喷嘴

的基准距。喷嘴即螺线管安装在可以相对于工件作一维运动的工作台上。也可以根据具体情况将工件和螺线管位置对调<sup>[5]</sup>。实验装置由混合容器、搅拌设备、泵和收集装置及电磁铁装置等组成,系统还包含检测状态的压力传感器和流量传感器以及冷却装置。

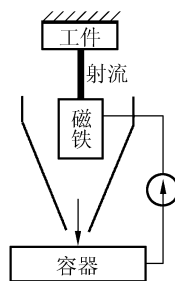
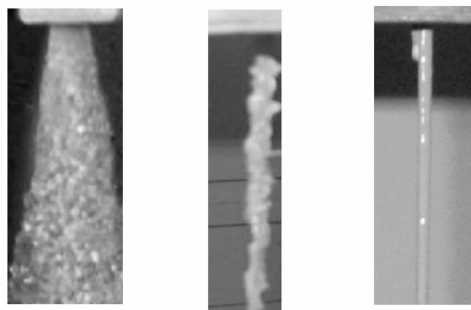


图 1 磁射流抛光原理示意图

Fig. 1 Sketch of MJP set-up

磁流变液由喷嘴喷出的时候,受临近喷嘴出口附近的局部轴向磁场的作用,其中的磁性颗粒排列呈链状,因此表观粘度迅速增大,形成了一个硬的准直射流束。这样就抑制甚至消除了初始扰动对射流结构的破坏。冲出磁场范围后,射流束中的稳定结构开始减弱,但是由于残余的粘性影响仍然可以维持射流束稳定一定时间,这样射流就以没有显著的扩散和结构破坏的准直状态运行相当远的距离,因此可以用来实现远距离的确定性精密抛光。射流束的稳定性由图 2 的对比可以看出,磨料水射流只能稳定一小段距离就开始发散;磁流变液的粘度较大,因此稳定的距离要远一些;而施加了外部磁场后,具有相同初始的粘度和速度的磁流变液射流束却能稳定运行相当远的距离。



(a)磨料水射流 (b)无磁场 (c)有磁场  
(a)Abrasive jet (b)Magnetic off (c)Magnetic on

图 2 射流束结构对比图

Fig. 1 Comparison of jet structure

### 3 抛光实验

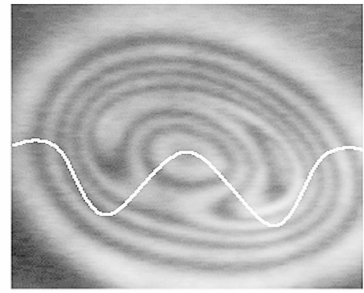
使用自制的水基磁流变液进行定点抛光实验,研究几种主要因素对抛光区的影响。磁流变液的组成成分体积比为 35% 的羰基铁,58% 的水,3% 的稳定剂,4% 的氧化铈。

#### 3.1 冲击角对抛光区形状的影响

具体实验条件是:调整工作压力为 100psi,喷嘴是直径为 3 mm 的圆柱形,喷嘴出口距离工件表面 80 mm,抛光平面 K9 玻璃 15 min。抛光时,工件固定不动,先后调节电磁铁轴线与工件表面之间的夹角,分别为  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ 。垂直冲击时(图 3(a)),抛光区呈现中间高边缘低的环状结构。由通过抛光区中心的测量曲线可以看出呈现 W 型的轮廓结构:在中心顶点处,材料的去除量较少,沿着径向去除量逐渐增加,增大到一定距离之后去除量呈现减小趋势;而在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。倾斜冲击时,射流束与工件表面的作用区域沿射流方向扩展,成为扁圆形;靠近喷嘴一方,射流首先到达工件表面,因此材料去除量多,出现很深的沟痕,并沿着扇形边缘扩展;而另一方由于水头流动的阻挡,材料去除量少,并随距离的增加而趋近于零。从抛光区去除量曲线(图 3(b))可以看出:在垂直于射流方向,材料去除区域的分布为中间去除量较少而边缘去除较多的 W 型;沿着射流方向,在水头冲击处有一个凹坑,去除形状近似为 U 型。随着冲击角的改变,在相互作用范围内,材料去除量的分布由垂直喷射时的圆环状结构逐渐向马蹄形结构过渡,随着冲击角的减小,沟痕的宽度逐渐增加,当冲击角为  $30^\circ$  时(图 3(c)),抛光区形状逐渐趋于优化,去除量分布近似为 D 型(图 3(d))。

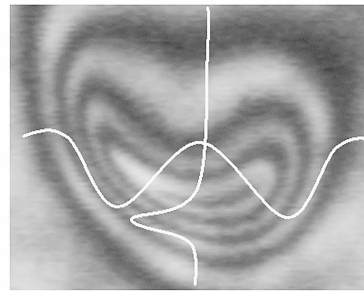
#### 3.2 工作距离对抛光区的影响

轴向磁场可以抑制扰动对射流结构的破坏,射流束能大距离保持汇聚不分散,因此只选择两个相差很大的距离进行实验。工作压力和抛光时间均保持不变,只是改变喷嘴出口到工件表面的距离,选取两个不同的距离进行垂直冲击实验。图 4 显示了去除深度沿着一条通过抛光区中心的直线方向分布的曲线。图中抛光点轮廓是取自两



(a) 冲击角为  $90^\circ$

(a) Impact angle of  $90^\circ$



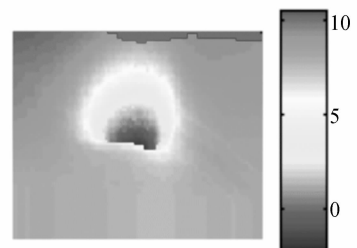
(b) 冲击角为  $60^\circ$

(a) Impact angle of  $60^\circ$



(c) 冲击角为  $30^\circ$

(a) Impact angle of  $30^\circ$



(d) 冲击角为  $30^\circ$  三维立体图

(d) 3D profile for impact of  $30^\circ$

图 3 抛光区干涉图

Fig. 3 Interference figures of polishing spot

个不同距离,分别是 40 mm 和 130 mm,尽管相差了 90 mm,但它们的轮廓总体上保持一致,这个特点使得磁射流抛光有利于精密抛光高陡度的凹形光学零件。

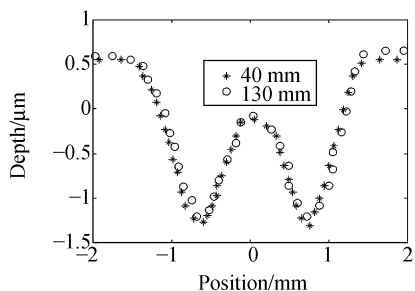


图 4 不同距离抛光区轮廓对比

Fig. 4 Comparison of spot profile of two distances

### 3.3 射流速度对去除量的影响

忽略射流横向速度分布对磨粒的影响,假设流场中颗粒的平均速度等于射流出口速度。保持冲击距离 80 mm、冲击时间 15 min 和冲击角 90° 不变,调节变频器获得不同的射流速度。图 5 为材料去除量随着射流速度变化的关系曲线。材料去除存在一个阈值,低于此,工件发生弹性变形而没有材料被去除。此次实验中最小的平均去除率为 0.012 7 μm/min,而最大的平均去除率峰值为 0.273 8 μm/min,可见使用同样的设备通过调整参数后可获得高达一个量级以上的去除率。材料的去除量与速度近似成立方关系,这是由于材料的去除是磨粒依靠流体在工件表面径向流动产生的剪切运动实现的。

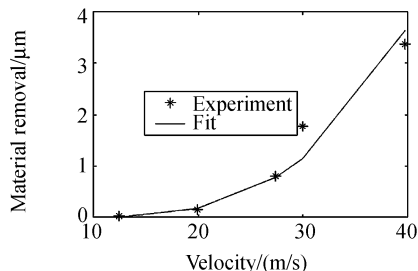


图 5 去除量与速度关系

Fig. 5 Material removal as a function of velocity

### 3.4 磁场强度对去除量的影响

磁场稳定射流不分散,不损失能量,因此需要

磁场强度足够大以抑制射流的破碎。图 6 给出了某一速度下材料去除量与磁场强度之间的关系曲线,在所考察的磁场强度范围内没有发现两者之间有明确的对应关系。

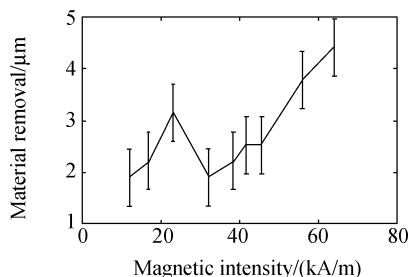


图 6 去除量与磁场强度关系

Fig. 6 Material removal as a function of magnetic intensity

## 4 抛光区材料去除机理的讨论

磨料粒子冲蚀工件的过程中,携带粒子的流体介质的流场起着十分重要的作用。由于磁射流抛光的射流冲击区已经远离磁场,磁流变液在冲击区不受磁场的影响,因此可以作为牛顿流体来考虑。根据射流力学理论,利用计算流体动力学方法求解垂直冲击流场分布如图 7 所示。

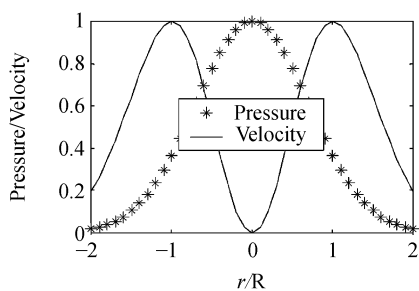


图 7 冲击流场分布

Fig. 7 Flow field of impinging jet

在滞止点处,射流压力迅速上升到最大值,沿着径向迅速减小,约在两倍喷嘴半径处等于环境压力。这样在射流与工件表面冲击处附近区域的射流内部就产生了一个巨大的径向压力梯度分布。该径向压力梯度给流体以径向加速度,促使流线弯曲,射流沿径向向外流动,轴向速度在冲击点处迅速滞止为零,然后速度值沿径向增大,在作

用边缘某处达到最大值,之后速度减小。对比抛光区材料去除的轮廓形状特征(见图 4)和流场特征可以看出:材料去除量的分布与射流在工件表面速度场的分布相似。射流撞击到工件表面之后,流体沿着该平面铺展开来,产生了垂直于工件表面的压应力和径向流动而产生的剪切应力。在射流与工件作用的中心,压应力最大,但产生的压缩力还不能超过玻璃材料的抗压强度,从而只有弹性变形而没有材料去除;由于玻璃的抗拉强度远远小于其抗压强度,当射流在工件表面作径向流动产生的剪切应力足以超过其抗拉强度时,材料开始被去除,这种材料去除的能量与速度密切相关,所以垂直冲击时候就出现了类似 W 型的环状抛光区形状。倾斜冲击的情况类似于垂直冲击。分析和实验结果表明磁射流抛光材料的去除是磨粒依靠流体在工件表面径向流动产生的剪切运动实现的。

## 5 结 论

以实验为基础,研究了磁射流抛光的抛光区的形状特点和材料去除规律,分析了材料去除机理,为下一步各种工艺参数的最佳匹配和数控加工提供了重要的参考。通过研究几种重要的工艺参数对材料去除的影响,得到了以下几点结论:

- (1) 改变冲击角可以获得不同的抛光区形状。
- (2) 在一定的范围内,磁场强度对于去除量没有确定影响,但是磁场对磁流变液射流的集束作用及其对去除量的影响还需要进一步的理论探讨。
- (3) 材料去除的能量来自冲击射流的径向流动,可以通过改变速度获得高达一个量级以上的去除率,说明磁射流抛光也可以用来修整面形。
- (4) 在相差 90 mm 的距离范围内得到一致的抛光区,表明其具有对抛光距离不敏感的特点,磁射流抛光技术可以为精密抛光高陡度的非球面和内腔等复杂形面提供一种有效的途径。

## 参考文献:

- [1] FAEHNLE O W, BG H V, FRANKENA H J. Fluid polishing of optical surface[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(28):6671-6673.
- [2] KORDONSKI W, SHOREY A, SEKERES A. New magnetically assisted; material removal with magnetorheological fluid jet[J]. *SPIE*, 2003, 5180:107-114.
- [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] 尤伟伟,彭小强,戴一帆. 磁流变抛光液的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(3):330-334.  
YOU W W, PENG X Q, DAI Y F. MR fluids for finishing use[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(3):330-334. (in Chinese)
- [5] 张学成,戴一帆,李圣怡. 磁射流抛光中磁场的分析与设计[J]. *航空精密制造技术*, 2006, 42(1):12-15.  
ZHANG X CH, DAI Y F, LI SH Y. Analysis and design of magnetic field for MJP[J]. *Aviation Precision and Manu facturing Technology*, 2006, 42(1):12-15. (in Chinese)
- [6] 张峰,潘守甫,张学军,等. 磁流变抛光材料去除的研究[J]. *光学技术*, 2001, 27(6):522-523.  
ZHANG F, PAN SH F, ZHANG X J, et al. Research on material removal of magnetorheological finishing[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6):522-523. (in Chinese)
- [7] FAEHNLE O W, BRUG H V. Fluid jet polishing; removal process analysis[J]. *SPIE*, 1999, 3739:68-77.
- [8] 姜晓霞,李诗卓,李曙. 金属的腐蚀磨损[M]. 北京:化学工业出版社,2003.  
JIANG X X, LI SH ZH, LI SH. *Corrosive wear of metals*[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 张峰,余景池,张学军. 磁流变抛光技术[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5):1-8.  
ZHANG F, YU J CH, ZHANG X J. Magnetorheological finishing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(5):1-8. (in Chinese)

作者简介:张学成(1976—),男,吉林人,国防科技大学机电工程与自动化学院博士研究生,研究方向为精密工程与计算机控制。E-mail: zxc2u@163.com