

文章编号:1001-2486(2007)04-0110-06

基于 CFD 的磁射流抛光去除机理分析*

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,湖南长沙 410073)

摘要:应用计算流体动力学(CFD)方法分析了一种新型精密抛光技术——磁射流抛光的材料去除机理。磁射流抛光中,含有磨料的磁流变液射流被喷嘴出口附近的局部外加纵向磁场磁化,产生准直的硬化射流束来进行相对远距离的精密抛光。介绍了磁射流抛光的原理和实验装置,分析了磁流变液聚束射流的形成,通过一系列定点抛光实验研究了磁射流抛光工艺的材料去除分布特征,利用计算流体动力学的方法分析了垂直冲击和倾斜冲击情况下,磁流变液射流与工件表面相互作用时径向流场功率密度的分布特征。实验结果和仿真计算结果表明:磁流变液射流在工件表面径向扩展流动产生的径向剪切作用导致了材料去除;CFD方法能模拟抛光区去除率的三维分布,因此可以准确地预测抛光区形状。

关键词:磁射流抛光;去除机理;计算流体动力学;剪切去除

中图分类号:TH161;TQ171.6^{*}84 **文献标识码:**A

Analysis of Material Removal Mechanism in Magnetorheological Jet Polishing by CFD

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

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Magnetorheological (MR) jet polishing (MJP), a new type of precision polishing technology in the material removal mechanism, was studied by the method of computational fluid dynamics (CFD). In MJP, the MR jet containing abrasives was magnetized by a local longitudinal magnetic field near the exit of the nozzle so that it could maintain the coherent and stable structure for a long distance. Firstly the mechanism and experiment set-up of MJP were introduced. Secondly the formation of collimated MR jet in a uniform axial magnetic field was analyzed. And then a series of static experiments were conducted to show the characteristics of the distribution of the material removal during the process of MJP. Finally the characteristics of the power density under conditions of both normal and oblique impingements were simulated by CFD method. Simulation and experiment results demonstrate that the material is removed by shearing actions caused by the radial spread flow of the MR jet over the workpiece surface. The method of CFD can accurately predict the 3-D removal rate distribution (polishing spot), thereby facilitating the accurate prediction of spot shapes on surface geometries.

Key words: magnetorheological jet polishing; removal mechanism; computational fluid dynamics; shear removal

自由曲面或高陡度的内腔等复杂形面由于机械干涉和陡峭的局部倾斜度等因素而难以使用传统抛光技术进行抛光,需要寻求新的方法。磨料射流抛光技术是一种有效的抛光复杂形面的方法^[1]。磨料射流使用细小的柔性液体柱作为抛光工具,工具与工件局部表面的匹配性好,可以抛光复杂曲面轮廓。然而普通的液体射流束以一定的速度进入静止大气中时,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,射流沿程发散,可使用距离较短,使得精密抛光高陡度非球面和内腔等变得困难。因此需要一种低粘度且相对高速的稳定射流,使它在撞击到工件表面前保持汇聚以利于精密抛光。美国 QED 公司首先研究了一种磁场辅助稳定射流束的抛光方法——磁射流抛光(MJP)技术^[2]。磁射流抛光技术利用低粘度的磁流变液在外磁场作用下发生磁流变效应,表现粘度增大来增加射流束表面的稳定性,使得射流能在几十厘米的距离上保持汇聚准直。磁射流

* 收稿日期:2007-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50375156)

作者简介:张学成(1976—),男,博士生。

抛光对加工距离的不敏感性使得其对高陡度非球面和内腔等复杂形面进行精密抛光成为可能。

冲击射流在冲击区存在滞止点和流线的径向弯曲,其动力学结构复杂,很难用解析的方法得到其流动状况的详细信息;磁流变液是一种不透明的材料,体积比浓度高时,直接测量粒子速度及其流动轨迹,观察的显微图像对比度差。因此,本文从实验出发,研究磁射流抛光区的特征,并利用计算流体力学的方法,通过使用 Fluent 软件包来模拟冲击流场的流体动力学特征,分析磁射流抛光技术的材料去除机理。

1 磁射流抛光

1.1 磁射流抛光工作原理

磁射流抛光的工作原理如图 1 所示。混合细微抛光剂颗粒的磁流变液在容器中经过机械搅拌均匀后,一个相对低压的压力系统将浆体泵吸流经安装在螺线管内部铁磁材料制作的喷嘴形成射流,经过局部纵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,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。

1.2 磁射流形成分析

磁流变液的一个本质特征是在外磁场的作用下会产生“磁流变效应”,从而能迅速且可逆地由自由流动的牛顿流体状态转化为稠的半固态物质。因此,外磁场可以控制磁流变液的流动状态。实验结果表明,一定强度的外磁场产生的磁流变效应可以抑制射流分散。

磁流变液由喷嘴喷出的时候,在临近喷嘴出口附近的局部纵向磁场的作用下,其中的磁性颗粒被磁化而排列呈链状,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。冲出螺线管后,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,可以用来实现远距离的精密抛光。射流束的稳定性由图 2 的对比可以看出来:没有外磁场作用时候,磁流变液射流只能稳定一小段距离就开始发散;而施加了外磁场后,具有相同初始粘度和速度的磁流变液射流束光滑汇聚,能稳定运行相当远的距离。喷嘴出口附近的局部磁场抑制了扰动力在射流中的发展,从而产生了可用于精密抛光的稳定的、汇聚的射流束。

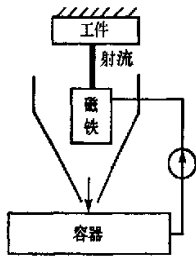


图 1 磁射流抛光原理示意图
Fig.1 Diagrammatic sketch of MJP

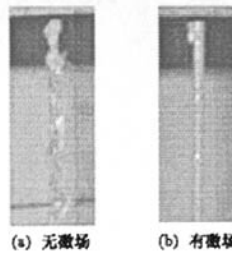


图 2 磁射流束结构对比图
Fig.2 Comparison of MR jet structure

1.3 抛光实验

确定冲击角度对冲蚀磨损的影响是研究冲蚀磨损机理最有效的方法。使用图 1 所示的抛光装置进行了一系列定点抛光实验。这些实验主要考察冲击角对抛光区轮廓的影响。图 3 显示了三种典型的冲击角得到的冲击痕迹的干涉图。

垂直冲击情况下(图 3(a)),抛光区的截面呈现中心高两边低的 W 型形状。随着冲击角的减小,靠近射流水头部分的沟痕逐渐加深,另一侧的材料去除量较少。材料去除的分布由垂直冲击时的圆环状结构逐渐过渡到倾斜冲击时的马蹄状结构。实验结果表明抛光区的形状依赖于冲击角度。



图3 不同冲击角的抛光区干涉图

Fig.3 Interference figures of polishing spot at different impinging angles

2 CFD 仿真

根据电磁理论计算,螺线管端面的磁场强度约为距离该端面 0.5 倍螺线管长度处的 10 倍大小。测量结果也显示,在所使用的磁场强度范围内,端面强度大约几十高斯,而距离端面 0.5 倍长度处只有几高斯大小。由于螺线管磁场只是磁化距离喷嘴很近的一段射流,冲出磁场范围后,射流依靠残余粘度维持准直性,因此,冲击区附近的磁流变液不受磁场作用,可作为一种不可压缩均质牛顿流体处理,它与颗粒和空气不发生质量和热量交换。为了避免 CFD 计算中复杂的动力学问题及由于射流相对于冲击表面运动而产生的剪切压力影响,磁流变射流束静止,没有横向移动。

不论是传统抛光技术,还是计算机控制光学表面成形技术,都建立在被实验所验证了的,并为人们所普遍接受的 Preston 方程基础之上。由 Preston 方程,材料的去除率可表示为:

$$R_m = kPU \quad (1)$$

式中, k 为 Preston 系数; P 为抛光区内抛光液对工件的压力; U 为抛光区内抛光液与工件表面的相对速度。

由 Preston 方程可知,表面材料要发生去除,要求抛光液与材料表面之间必须具有一定的压力和相对速度,且材料的去除率正比于单位面积上的做功率。因此,从冲击流场的压力、速度及两者相互作用而产生的功率密度的分布入手,来讨论磁射流抛光的材料去除机理。在磁射流抛光中使用的抛光颗粒是微米量级大小的,由于液体的粘度大,磨粒的运动方向受到流体铺展效应的影响将趋向于液流的方向。因此,可以认为磨粒与携带它的流体介质具有相同的速度。下面只是针对连续介质在表面的冲击流场分布情况来讨论。

2.1 CFD 建模

磁射流抛光时,磁流变液射流能以没有显著的扩散和结构损耗的状态运动几十厘米(依赖于喷嘴直径),因此射流结构在撞击之前可以保持为圆柱形。为了减少计算时间,建模时使用一个喷管模拟其自由射流后的最终状态,只是考虑冲击区附近的区域。选取 20 倍射流半径($R = 1\text{mm}$)的宽度和距离工件表面 5mm 高度范围内的区域进行分析。考虑到模型的中心对称性,垂直冲击时取其 1/4 部分(后处理时镜像成 1/2)而倾斜冲击时取 1/2 部分进行分析。图 4 显示了一个典型的垂直冲击时的计算模型网格。

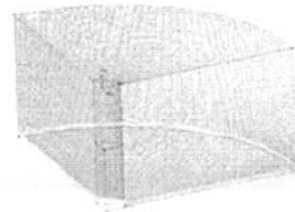


图4 垂直冲击的网格结构图

Fig.4 Mesh grid structure of normal impingement

为了保证分析的精度、稳定性和收敛性,对模型的网格进行了适当的加密处理。文献[4]指出,网格加密测试表明流动预测对于在界面处的网格加密很敏感,而在射流内部相对来讲对网格要求不严格。因此,为了保证分析精度,冲击面采用了边界层方法,轴向采用非均匀间距网格;在径向方向,射流和空气的界面处采用细密的网格而向外区域采用逐渐粗糙的网格。

2.2 结果与讨论

图 5(a)显示,在射流冲击区,流体速度迅速降低为零,致使本区的压力迅速增高,大于周围压力,在滞止点处压力具有峰值,形成较大的压力梯度,迫使射流迅速由轴向流动弯曲沿着固体表面径向向外流动,流线逐渐转折至与壁面平行。垂直冲击流场轮廓显示冲击到刚性表面后,射流中心处于受压状态。这样就导致射流轴心处(滞止点)出现压力分布的峰值,却呈现零表面速度,随着离开轴心距离的增加,压力迅速衰减到环境压力。液体内部的受压状态逐渐减弱的同时加速了径向流动,径向速度向外迅速增大,在作用边缘某处达到峰值,压力梯度消失后,射流向外的速度又随着径向距离的增加而逐渐降低到某一大小。因此导致垂直冲击时候,流体在表面径向扩展流动做功呈现环状结构,其中心截面为 M 型轮廓结构,具体分布情况如图 5(c)所示。倾斜冲击时,压力分布逐渐变为椭圆形,其最大时均动水压力的位置位于射流轴线与平面的交点上游附近某处,见图 6(a),速度场形状也由双峰的 M 型逐渐向单峰的形状过渡,因此,功率密度分布由垂直冲击时的圆环状结构逐渐变成马蹄形,峰值位于射流与壁面相互作用的中心附近,如图 6(b)所示,当倾角减小到 30°时,呈现类似字母“D”的椭圆形状,见图 6(c)。

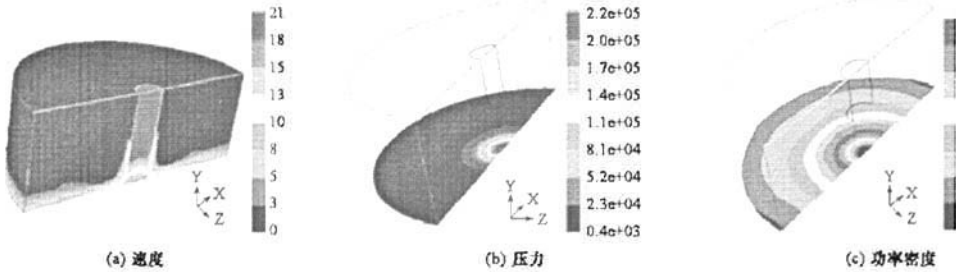


图 5 垂直冲击流场

Fig.5 Flow field of normal impingement

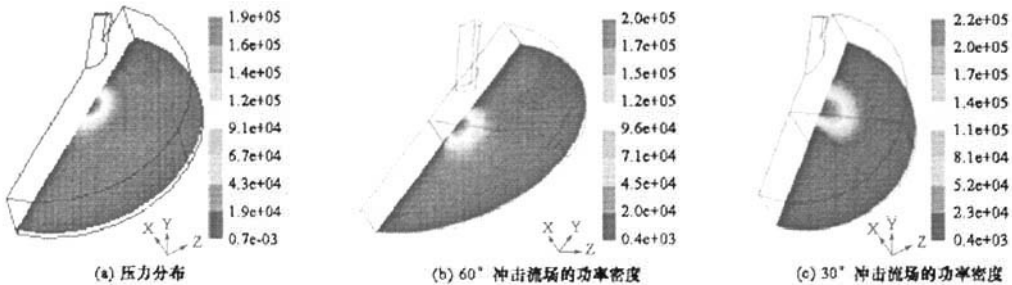


图 6 倾斜冲击流场的压力和功率密度分布

Fig.6 Distributions of pressure and power density for oblique impingement

2.3 去除机理讨论

根据材料破坏的类型,一般分为脆性去除和塑性去除两大类。脆性去除时,主要是冲击压力导致脆性裂纹的不断扩展而使材料被去除,塑性去除一般则是由剪切作用造成的。

根据流体运动的伯努利方程得到稳定流动时固体表面承受的最大法向应力为^[5]:

$$P_m = \rho g u^2 / 2 \quad (2)$$

式中, ρ 为磁流体密度; u 为磁射流冲击速度; g 为重力加速度。

玻璃的抗压强度(0.5~2 GPa)较大^[6],该压应力仅仅使工件产生弹性变形而不足以使其破坏。虽然粒子的尖角会使得其更容易刺入表面,但在脆性固体变形区域周围会产生很高的流体静压力常常足以阻止脆裂。这说明在这样的速度范围内,稳定的连续射流对玻璃表面的撞击不足以引起表面的裂纹破坏。

由图7可以看出,稳定流动时,垂直冲击产生的压应力和流体在表面径向扩展流动产生的剪切应力大约相差一个数量级,而玻璃的抗拉强度(30~85 MPa)相对较小^[6],磨料粒子的尖角可以增加其切削作用,因此,往往是表面上径向流动产生的剪切应力首先造成工件破坏,属于塑性去除范围。

对比材料去除量分布(图3)与射流在工件表面功率密度的分布(图5和图6)可以看出:材料去除量的分布取决于冲击射流在工件表面径向扩展流动所做剪切功的分布:在滞止点处压力最大,但由于表面速度是零,流体做功为零,所以几乎没有材料被去除;由滞止点向外,压力逐渐减小,而速度在压力梯度作用下逐渐增大,流体做功在相互作用的边缘某处达到最大,对应着出现了最大的材料去除量,继续向外扩展时流体做功逐渐减小,材料去除量也逐渐趋于零。剪切应力超过抗拉强度就出现材料去除,并且首先出现在径向扩展流动功率密度最大的冲击边缘,向内外两个方向扩展,这就体现在如图3所示的干涉仪测量得到的去除函数形状上:圆环状的垂直流场产生环状抛光区,而倾斜冲击流场产生马蹄状抛光区。

根据流体力学的知识知道,所受应力为 F 、速度为 V 的流体在控制表面 S 上所做的功率,可由下式表达^[7]:

$$W = \int_S F \cdot V dA \quad (3)$$

冲击颗粒的速度可以分解为水平及垂直分量,前者对切削起作用而后者使粒子透入靶面。如果垂直速度小于临界值,那么材料只发生弹性变形,粒子掠过靶面,而不产生材料去除。水平分量小于临界值则不产生切削作用。实验现象证实存在一个材料去除的最小能量的临界速度值。实验和仿真结果都表明:磁射流抛光中颗粒去除材料所需的能量来源于磁流变液射流的径向扩展流动。因此,磁射流抛光中冲击射流的径向扩展流动做功为:

$$W = f \int_S p (V - V_c) dA \quad (4)$$

式中, f 为摩擦系数; p 为压应力; V_c 为临界速度。

对公式(1)进行变形得:

$$R_m = kPU = k \frac{\tau}{f} U = k \frac{W}{f} \quad (5)$$

式中, k 为准 Preston 常数; τ 为表面剪切应力。

图8显示,根据公式(5)计算得到的材料去除率分布与沿着过抛光区中心的一条直线方向测量得到的轮廓基本一致。由于CFD计算中设置了一个阈值,图8(a)中的仿真曲线在滞止点附近区域呈现了一个平台形状,而实际加工中液体是流动的,因此在边缘材料破坏过程中会向中心扩展,使得抛光区域中心呈现如同实验曲线所表现出的圆滑的尖顶形状。垂直冲击时候,抛光区呈现中心凸起两边凹陷的环状结构,而对于倾斜角度足够小的情况,则只有一个沿着射流流向的弯月形的凹坑。文献[2]计算了平面冲击射流的功率密度分布情况,由于圆形冲击射流不同于平面射流,因此三维条件下的计算更符合实际情况。计算结果表明应用CFD方法可以预测抛光区的去除率三维分布情况。

因此,可以得出结论:磁流变液射流在工件表面的径向扩展流动而产生的剪切作用导致材料去除;应用CFD方法可以准确预测抛光区去除率的三维分布。

文献[8]从速度出发,没有考虑压力的影响,本文也只是考虑了压力的切向作用,没有考虑其冲击作用的影响,所得结论相似,进一步说明剪切作用在材料去除过程中起主要作用。

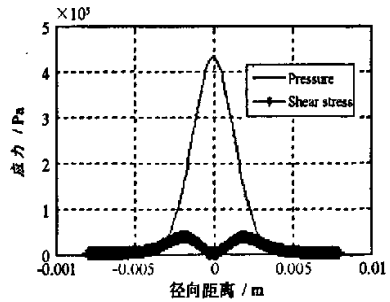


图7 压应力与剪切应力对比

Fig.7 Comparison of pressure and shear stress

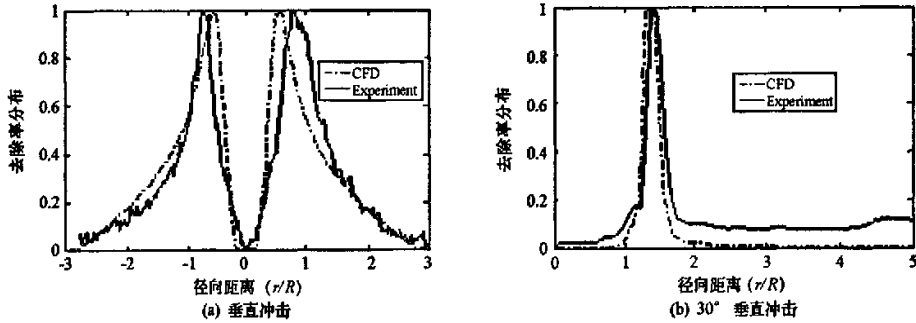


图8 材料去除率的CFD值与实验结果对比

Fig.8 Comparison of material removal rate by CFD and experiment results

3 结论

磁射流抛光技术利用外加纵向磁场在喷嘴出口附近区域稳定射流,获得几十厘米远的汇聚射流,用来对高陡度非球面和内腔等复杂形面进行精密抛光。实验结果与计算流体力学方法模拟的结果表明:磁射流在工件表面径向扩展流动产生的径向剪切作用导致材料去除;应用计算流体力学方法可以准确地预测抛光区去除率的三维分布。

参考文献:

- [1] Faehle O W, Brug H, Frankens H J. Fluid Jet Polishing of Optical Optics[J]. Applied Optics, 1998, 37: 6671 - 6673.
- [2] Kordonski W, Shorey A, Sekeres A. New Magnetically Assisted Finishing Method: Material Removal with Magnetorheological Fluid Jet[J]. SPIE, 2003, 5180: 107 - 114.
- [3] 彭小强, 尤伟伟, 石峰. 磁流变液剪切屈服应力模型的理论分析与实验[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(4): 110 - 114.
- [4] Liu H, Wang J, Kelson N, et al. A Study of Abrasive Waterjet Characteristics by CFD Simulation[J]. J. Mat. Pro. Tec., 2004, 153 - 154: 488 - 493.
- [5] 李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 10.
- [6] 曹天宇, 周鹏飞. 光学零件制造工艺学(修订本)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987(6).
- [7] Blevins R D. Applied Fluid Dynamics Handbook[M]. Van Nostrand Reinhold Co., Inc., 1984.
- [8] 方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光技术材料去除机理的有限元分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 218 - 223.

