

精密加工

# 纳米颗粒胶体射流抛光喷嘴的流场仿真研究\*

张玲花<sup>1</sup>, 张勇<sup>2</sup>, 张飞虎<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**[摘要]** 对空化射流抛光喷嘴的流场整体进行了仿真分析。对锥形射流喷嘴与旋转射流喷嘴的流场进行模拟计算, 得到流场中速度与压力分布图, 工件表面处速度和压力都呈现M形分布。旋转射流因为具有旋转速度而有更好的掺混能力, 空化能力更强。综合比较, 旋转射流喷嘴更适合空化射流的应用。

**[关键词]** 喷嘴; 速度场; 压力场; 旋转速度; 空化

**[中图分类号]** TG580.692: TP391.9

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1003-5451(2011)02-0005-04

## Numerical Simulation of Nanoparticle Colloid Jet Machining Nozzle

ZHANG Ling-hua, ZHANG Yong, ZHANG Fei-hu

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**[Abstract]** Cavitating liquid jet machining nozzle flows was simulated and analyzed. Cone-shaped jet nozzle and swirling jet nozzle flow field distribution characteristics were compared. Axial velocity met the maximum value near the nozzle outlet and decreased. Velocity and pressure were both appeared M form on the workpiece surface, so the removal functions were M form. Swirling jet had better turbulent blending and cavitating capacity due to the tangential velocity. The swirling jet nozzle was more suitable for cavitating jet machining.

**[Keywords]** nozzle; velocity field; pressure field; swirling velocity; cavitation

### 引言

纳米颗粒胶体射流抛光技术是一种新提出的应用于先进光学制造、薄膜科学与微电子领域的超光滑表面加工方法, 通过界面化学反应与流体动力作用实现纳米级粗糙度和原子去除的加工方法。在胶体射流作用区内, 纳米颗粒与工件表面原子发生界面化学反应而粘附在工件表面上, 由于流动胶体的粘滞拖拽作用, 迫使纳米颗粒与发生反应的表面原子一起离开工件表面,

可以有效使工件表面达到一个新的超光滑表面状态, 明显降低工件表面粗糙度<sup>[1]</sup>, 但去除效率仍然不高。

空化水射流在石油钻井、岩石切割、清洗行业中已经得到了很广泛应用, 由于空化现象的存在经验证比普通射流有更高的材料去除效率<sup>[2]</sup>。另外, 空泡溃灭时的瞬时高温高压会导致的直接热分解、自由基反应和超临界水氧化<sup>[3]</sup>, 而使得液体中局部产生高浓度的OH<sup>-</sup>, 这有利于提高胶体射流抛光去除效率。为此提出将空化射流与纳米颗粒胶体射流抛光结合起来, 目标是探索一种新的纳米颗粒胶体空化射流抛光技术, 以提高其去除效率, 为发展一种高效的超光滑表面加

\* 国家自然科学基金(50805039)和高等学校博士学科点专项科研基金(20070213049)的资助

工方法提供基础。

为了描述抛光去除函数,本文用 CFD( 计算机流体力学) 软件 FLUENT 对锥形射流喷嘴与旋转射流喷嘴流场进行模拟计算并作分析与比较,为纳米颗粒胶体空化射流抛光喷嘴的选择以及后期实验结果的分析提供参考。

## 1 纳米颗粒胶体空化射流抛光原理

纳米颗粒胶体空化射流抛光的工作原理从两方面说明:

①工件表面的活性基团会与纳米颗粒胶体中的  $\text{OH}^-$  离子发生化学吸附,胶体射流中有高表面能与化学活性的纳米颗粒与工件碰撞以后会激发界面反应而停留在工件表面,在流动胶体液的粘滞作用下将工件表面原子剥离工件表面,从而实现工件材料的原子级去除。

②空化现象是液体中某处的压强低于在该温度下某特定值(与蒸汽压强相近),在该处将出现的空化气泡的产生、发展、长大与溃灭的整个过程。一方面,空泡溃灭时在空泡周围极小范围内产生瞬时的高温与高压,并形成强烈的冲击波与高速(100m/s 以上)微射流,会大大加强射流与工件表面材料的相互作用;另一方面空泡溃灭时发生水的热分解( $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ )会在局部生成高浓度的  $\text{OH}^-$ ,提高胶体颗粒界面化学反应的速率,从而使得抛光去除速率增加。

## 2 两种射流喷嘴流场仿真与分析

为了找到更适合进行纳米颗粒胶体空化射流抛光的喷嘴,需要了解胶体射流流场相关参数以及抛光去除函数。为此对常用的锥型射流喷嘴和旋转射流喷嘴进行流场模拟计算分析。

对流场的数值模拟计算中,进行了相应的假设:

①假定入口截面与出口截面压力均匀分布,工作环境温度为 300K。

②纳米颗粒胶体为不可压缩的均匀流体。

边界条件与参数设置:

压力入口: 10MPa 泵压; 压力出口: 0. 103MPa (围压); 绝热无滑移壁面条件。

材料特性: 纳米颗粒胶体液的密度为  $1150\text{kg}/\text{m}^3$ ,

粘度为  $0.0013\text{kg}/(\text{m} \times \text{s})$ ; 水蒸气的密度为  $0.5542\text{kg}/\text{m}^3$ ,粘度为  $1.34 \times 10^{-5}\text{kg}/(\text{m} \times \text{s})$

### 2.1 锥形射流喷嘴数值模拟计算与分析

#### 2.1.1 锥形喷嘴结构与网格划分

锥形射流喷嘴结构如图 1 所示,充分考虑流场的实际分布进行建模,网格在喷嘴喉部进行加密,网格划分结果如图 2 所示:

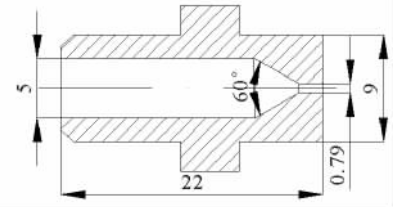


图 1 锥形射流喷嘴结构

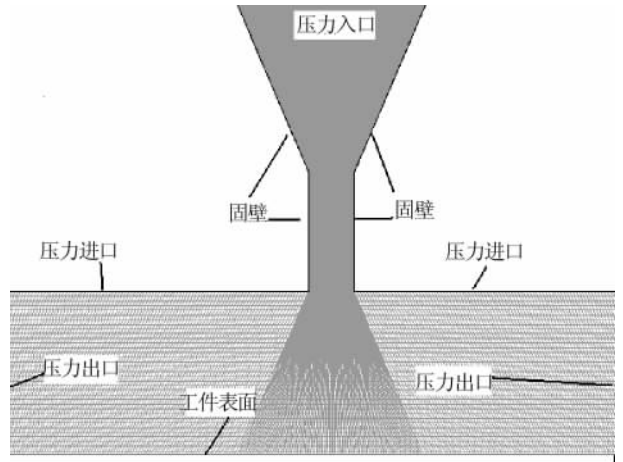


图 2 锥形射流喷嘴网格划分

#### 2.1.2 仿真结果与分析

##### ①速度与压力分布图

选用 Mixture 模型与  $\text{K}-\epsilon$  紊流模型,并采用 SIMPLE 压力速度耦合算法对喷嘴流场进行计算,观察计算残差图,等待计算收敛以后,查看速度场和压力云图如图 3 所示。



(a) 速度云图 (b) 动压云图 (c) 静压云图

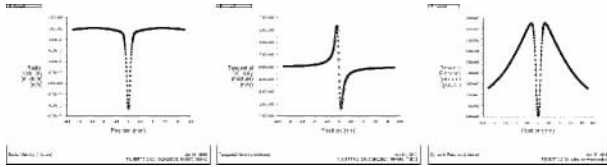
图 3 锥形喷嘴射流流场的速度与压力云图

沿轴向从喷嘴入口到收缩段,流体速度因截面积减小而逐渐增大,动压升高,静压降低。在喷嘴喉部之

外,速度继续增大一段然后减小。这是因为胶体被看作不可压缩流体,在喷嘴出口处,胶体因为膨胀作用速度继续增大。射流因与周围液体发生摩擦剪切作用而使射流速度减小,但因为喷距很短(4mm),速度减少量比较小。

射流冲击到工件表面时,在射流中心与工件表面的交点(滞点),射流将动能一部分转化为滞点的压能。

### ②工件表面处的速度与压力分布



(a) 轴向速度 (b) 径向速度 (c) 动压力

图4 工件表面处沿径向位置的速度与压力分布

从工件表面处的速度分布图可以看出,轴向速度沿半径增大先减小后增大,切向速度在抛光区中心比较大,然后逐渐减小。抛光区动压在抛光中心处最低,沿径向先迅速增大然后减小。

### ③相含量分布图

液体中产生空化现象时,会在产生空化区,也就是气相区。流场中气相含量分布图如图5所示,在射流与工件作用区两侧空化气泡比较多,在工件的表面射流中心两侧产生对称的空化区,但空化气泡的含量很低,射流两侧出现的对称空化区中气含量不足10%。

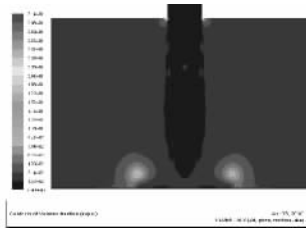


图5 锥形射流喷嘴相含量分布图(水蒸气)

## 2.2 旋转射流喷嘴的流场数值模拟计算与分析

### 2.2.1 旋转射流喷嘴结构与网格划分

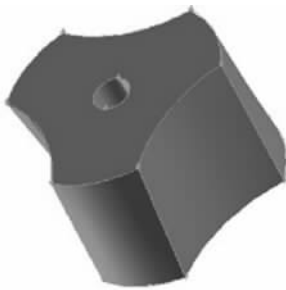


图6 导向叶轮

旋转射流喷嘴是在锥形喷嘴收缩段内放置一个导向叶轮(如图6),液体进入喷嘴内部经过导向叶轮加旋后成为具有一定旋度的旋转射流。用SolidWorks对喷嘴内流体计算域进行建模,导入gambit进行分区域网

格划分,对喷嘴出口处以及旋转叶片周围的流体进行网格细化以后如图7所示。

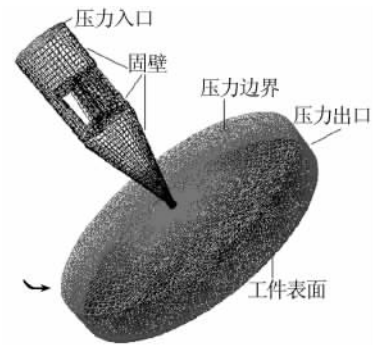


图7 旋转射流喷嘴网格划分

### 2.2.2 仿真结果与分析

选用Mixture多相流模型,并采用SIMPLE压力速度耦合算法对喷嘴流场进行计算。

#### ①中截面速度场与压力场

中截面速度场与压力场云图如图8所示。

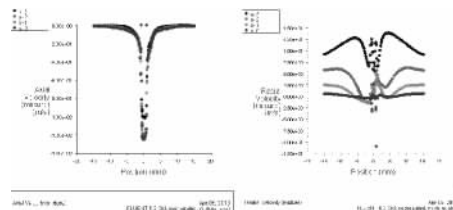


(a) 速度 (b) 动压 (c) 静压

图8 中截面速度场与压力场云图

图8中可以看出,旋转叶片射流喷嘴与锥形喷嘴流场的速度与压力基本趋势一致,在导向叶轮导向作用下,射流成为低旋射流。旋转射流等速核比普通锥形射流喷嘴较小,是因为旋转射流会不断卷入周围静止的液体,发生紊动掺混作用,不断与周围液体发生动量交换,速度快速衰减,等速核较短。

②不同喷距处的速度与压力分布旋转射流由于旋转叶片的导流作用,流体具有旋转速度(切向速度),图9显示了喷嘴出口处与喷距分别为1mm、2mm、3mm的截面上速度随径向位置变化图,该结果与文献<sup>[4-5]</sup>比较符合。



(a) 轴向速度 (b) 径向速度

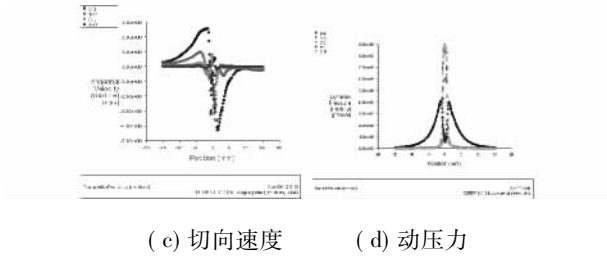


图9 不同喷距速度与压力沿径向位置分布

由图9可以看出,旋转射流速度各分量中轴向速度最大。射流轴向速度为高斯分布,存在一定程度衰减;切向速度呈现以射流中心为对称点的N形对称分布,在轴心处最小,轴心两侧达到峰值后减小。旋转射流的卷吸作用也就是因为切向速度分量引起了角动量通量,因而射流两侧切向速度大的地方射流卷吸混合能力也就越强;射流径向速度,在射流中心处比较小,随半径增大而逐渐增大,到达最大值后开始衰减,以上对于旋转射流速度各分量随径向位置的变化与文献5中描述相符合。射流不同喷距处的动压随着喷距的增加而减小,在工件表面处呈现M形分布。

③工件表面的速度与压力分布

射流动压作用区内的速度与压力分布是射流抛光去除函数的重要影响因素。因在模拟计算中将工件表面视作刚性固壁,选距工件表面0.05mm的表面作为工件表面进行分析其速度与压力分布如图10所示:

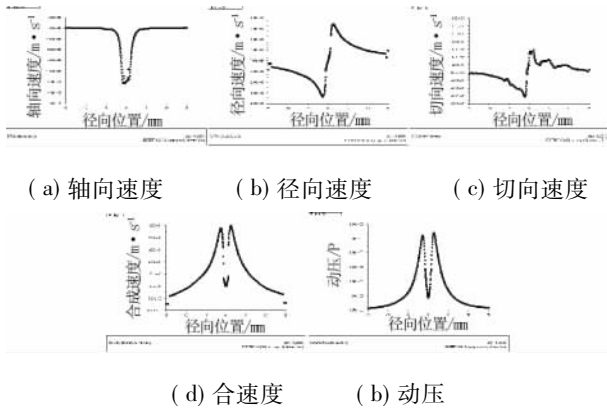


图10 工件表面沿径向位置的速度与压力

图10中看出,工件表面处的轴向速度呈现近似高斯分布,径向速度为N形分布,切向速度为近似N形分布,合速度与动压都呈现M形分布,中心速度与压力都比较小,在抛光中心两侧速度和压力都先增大到最大值然后减小。

④相含量分布图

旋转速度的存在使周围液体紊动掺混能力增强,使射流抛气动压作用区周围压力波动,为空泡的产生与长大创造了很好的条件。流场中空化区分布图如图11所示,在喉部入口处的空化区一直向后发展到淹没射流区,最高含量达99%,空化区的形状与文献[6]中相符。

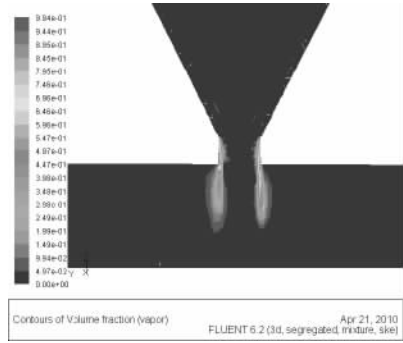


图11 气相含量分布图(空化区)

用纳米颗粒胶体在旋转射流喷嘴流场中对平面光学玻璃K9进行抛光,十分钟后用表面轮廓仪测量垂直入射时纳米颗粒胶体射流抛光的实际材料去除轮廓,如图12所示。图中可以看出,抛光的去除区为近似M形。

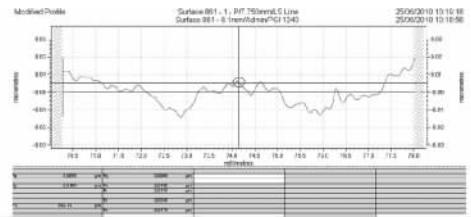


图12 抛光后的平面光学玻璃K9表面轮廓

3 结论

- ① 锥形射流喷嘴流场仿真的结果显示速度沿轴增大,到喷嘴出口之外达到最大值,然后减小。
- ② 锥形射流作用区,工件表面处轴向速度为高斯分布,切向速度为N形对称分布,压力呈现M形,空化程度比较小。
- ③ 旋转射流喷嘴轴向速度与径向速度分布与锥形射流类似,多了旋转速度分量,增强了射流与周围介质的紊动掺混能力,空化区的范围与空化程度大,射流核心段长度比锥形射流短。

(下转第11页)

1200Hz,由于切削激振力的频率小于薄壁回转体工件的1阶固有频率,工件的振幅较小;当切削激振力频率接近1400Hz,振幅迅速增大,这与模态分析得到的工件1固有频率1396.5Hz相对应,当切削激振力频率等于1396.5Hz时,工件产生1阶共振,振幅为0.011mm;切削激振力频率大于1400Hz后,工件振幅迅速减小。

为避免产生共振,切削力频率应远离共振频率。以六齿铣刀加工LY12CZ薄壁回转体工件为例,由切削激振力的频率计算公式 $w = 2\pi nE/60$ 可得到当铣刀转速为2224r/min时,切削力频率与共振频率相等从而产生共振。故选在用六齿铣刀加工LY12CZ薄壁回转体工件时,铣刀转速应远离这个速度,从而使切削力频率避开共振频率区域,避免共振的产生。

#### 4 结论

本文基于商业有限元软件ANSYS,进行了轴向车铣加工薄壁回转体工件的动力学有限元分析。以LY12CZ铝合金薄壁回转体工件为例,计算了工件的一阶固有频率,通过对工件的谐响应分析,得出工件的振幅随刀具转速的变化。有限元分析结果与实验测量结果吻合较好,验证了薄壁回转体工件的动力学有限元分析的合理性。分析结果表明,车铣加工过程中应

合理选择铣刀转速,使切削频率避开共振频率。采用六齿铣刀加工LY12CZ薄壁回转体工件时,铣刀转速应远离,从而使切削力频率避开共振频率区域,避免共振的产生。

#### 参考文献

- [1]李红影. 几何非线性对旋转圆柱壳振型进动的影响[D]. 东北大学,2005
- [2]贾春德,姜增辉. 车铣原理[M]. 北京:国防工业出版社,2003
- [3]陆剑中,周志明. 金属切削原理与刀具[M]. 北京:机械工业出版社,2006
- [4]姜增辉,贾春德. 轴向车铣切屑仿真的研究[J]. 兵工学报,2002,(4):525-528
- [5]祝效华,余志祥. ANSYS高级工程有限元分析范例精选[M]. 北京:电子工业出版社,2004
- [6]孟志华. ANSYS在航空薄壁构件结构设计的应用[J]. 中国航空报,2005,(4):1-3
- [7]姜年朝,张志清,李湘萍,李余冬. 基于ANSYS的复合材料旋翼翼叶动力分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2007,(4):42-44

(收稿日期2010-11-18)

#### (上接第8页)

④ 旋转射流作用区,工件表面处速度和压力都呈现M形,切向速度为近似N形分布。

⑤ 流场中速度与压力分布以及空化区的特征为实验提供一定的理论指导作用。

综合考虑射流场中与工件表面处的速度、压力分布以及空化区的形状与空化程度,旋转射流喷嘴在胶体空化射流中比锥形射流喷嘴具有更优越的特性。

#### 参考文献

- [1]宋孝宗,张勇,张飞虎,栾殿荣. 超精密纳米胶体射流抛光试验研究[J]. 中国机械工程;2008,19(21):2521~2523
- [2]易灿,李根生,胡永堂. 淹没条件下锥形喷嘴射流破岩效

率实验研究[J]. 2001,29(1):9~12

[3]张风华,,廖振方,,唐川林,杨林. 空化水射流的化学效应[J]. 重庆大学学报. 2004,27(1):32~35

[4]董志勇,射流力学[M]. 北京. 科学出版社. 2005:85~95

[5]步玉环,王瑞和,周卫东. 旋转射流流动规律研究[M]. 石油钻采工艺. 1997,19(2):7~10

[6]Vedanth Srinivasan, Abraham J. Salazar, Kozo Saito. Modeling the disintegration of cavitating turbulent liquid jets using a novel VOF-CIMD approach[J]. Chemical Engineering Science,2010,. 65:2782-2796

(收稿日期2010-09-12)