

基于 FLUENT 的磨料水射流喷嘴内流场的可视化研究*

熊佳 雷玉勇 杨志峰 袁其源

(西华大学机械工程与自动化学院特种加工研究所 四川成都 610039)

摘要: 根据液固两相流理论对磨料水射流喷嘴内的流场进行了分析,并建立了喷嘴内流速度场的可视化模型,利用 FLUENT 分析软件求解磨料水射流喷嘴内各节点的速度。根据速度场分布图,讨论了影响磨粒速度的主要因素。研究表明,存在一个最优磨料喷嘴长度,使得磨料速度最大。喷嘴混合腔的长度对磨料粒子的加速有显著影响,为了达到最大磨料速度,磨料混合腔长度可在水射流喷嘴直径 30~40 倍的区间内选取。磨料粒子最高速度会随磨料混合腔内圆锥角的增加而降低。从降低喷嘴磨损角度看,应减小混合腔内锥角。

关键词: 两相流;磨料水射流;磨粒;流场;速度场

中图分类号: TP601 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150(2008)6-051-3

Visual Research of Flow Field in the Nozzle of Abrasive Water Jet Based on FLUENT

Xiong Jia Lei Yuyong Yang Zhifeng Yuan Qiyuan

(School of Mechanical Engineering & Automation, Xihua University, Chengdu Sichuan 610039, China)

Abstract: According to the theory of solid-fluid two phase flow, the flow field in the nozzle of abrasive water jet was analyzed. The visual model of flow field in the nozzle was established. The velocity of interior nodes inside the nozzle of abrasive water jet was calculated by using the FLUENT. According to the distribution map of velocity field, the major factors to affect velocity of abrasive particles were discussed. The suggestion to design of geometrical dimension of abrasive water jet nozzle was proposed. The results show that there is optimized nozzle length to get maximum velocity of abrasive particles inside nozzle. The length of mixing cavity has influence on the velocity of abrasive particles. In order to enhance the velocity of abrasive particles, the length of mixing cavity should be in the 30~40 times of orifice. The velocity of abrasive particles will be decreased while the inlet conical angle is increased. Therefore the interior inlet conical angle should be adequately small to increase the velocity of abrasive particles inside the nozzle and extend the life of mixing tube.

Keywords: two phase flow; abrasive water jet; abrasive particle; flow field; velocity field

磨料水射流 (Abrasive Water Jet, AWJ) 是 20 世纪 80 年代发展起来的一种切割技术,它将高速水射流束与磨料粒子相混合形成液固两相介质流,利用高速水射流带动磨料粒子,通过本身的水蚀冲击和磨料粒子锋利的棱角进行切割。与纯水射流相比,磨料射流对物料的冲击力和磨削力要大得多,从而在同等的工况下,系统所需要的压力远远小于纯水射流的压力,实现低压或中压条件下的材料切割^[1]。作为一门

新兴的技术,磨料水射流发展十分迅速并日益完善,成为一种新型环保的切割、清洗、破碎工具。在许多材料的切割、破碎及表面预加工中,它具有其独特的优越性。因此,对磨料射流进行研究就显得十分必要。本文作者利用 FLUENT 中的多相流模型对磨料水射流进行模拟分析,并根据分析结果对喷嘴内流场速度的主要影响因素进行讨论,提出了提高磨料水射流加工效率的途径和技术手段。

1 喷嘴内磨料的运动分析

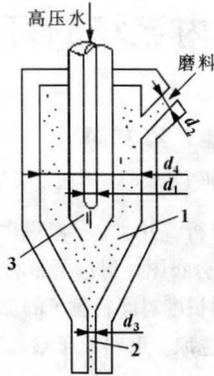
磨料水射流喷嘴内的物理模型如图 1 所示。在喷嘴内高压水经过中央管路水喷嘴喷出而形成高速水射流,因高速水射流在混合腔内产生卷吸作用和形成局部真空,从而在混合腔内将磨料粒子与水束混合,最后经磨料喷嘴喷出而形成磨料水射流^[2-3]。

* 基金项目:人事部项目(07202081);西华大学重点学科建设项目(SBZD0703-1)。

收稿日期:2008-02-15 联系人:雷玉勇, E-mail: yuyong_lei@mail.xhu.edu.cn

作者简介:熊佳(1983—),男,硕士研究生,主要研究方向:机械设计与制造。

在磨料水射流液-固两相流中，磨料粒子的加速依赖于高速水射流，因此磨料粒子与水束通常有不同的运动速度。如果水介质的瞬时速度为 $u(t)$ ，而磨粒在同一瞬间的速度为 $u_s(t)$ 。一般是 $u(t) > u_s(t)$ ，由于有这个速度差，磨料粒子有加速运动并使 $u_s(t)$ 接近 $u(t)$ 的趋势。液固两相介质速度相互逼近的速率也就取决于这个速度差。



1. 混合腔 2. 磨料喷嘴 3. 水喷嘴

图 1 磨料水射流喷嘴物理模型

Fig 1 Physical model of the nozzle of abrasive water jet

磨料水射流（液-固两相流）通过磨料喷嘴时，属于定常的变速运动或非定常流动。若相对加速度为 a ，则牛顿第二定律的表达式可写为欧拉形式的两相流体运动微分方程式^[3-4]：

$$\frac{\pi}{6} D^3 \rho_s \frac{du_s}{dt} = 3\pi \rho \nu D (u - u_s) - \frac{\pi}{6} D^3 \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\pi D^3}{12} \rho a + \frac{3}{2} D^2 \rho \sqrt{\pi \nu} \int_{t_0}^t \frac{a}{\sqrt{t-t'}} dt' + X + F_m + F_s \quad (1)$$

式中： D 为磨料粒子直径，mm； ρ 、 ρ_s 分别为水介质和磨料粒子的密度， g/cm^3 ； u 、 u_s 分别为磨料粒子周围水介质的速度和磨料粒子的运动速度，m/s； ν 为运动粘性系数， m^2/s ； a 为相对加速度， m/s^2 ； t' 、 t_0 分别为积分变量和积分区间上下限。

式（1）右边第 1 项是斯托克斯粘性力；第 2 项是纵向压力梯度引起的作用力；第 3 项是由于固相颗粒加速过程中，其周围流体也随同加速而引起的附加力；第 4 项为贝塞特力，它是一种瞬时流动粘性阻力；第 4 项为质量力（重力、离心力、线加速惯力等）；第 6、7 两项作用力出现在流动的高剪切区内，其中第 6 项是由两邻流层剪切作用而使颗粒旋转，由此引起的马格努斯升力，可用下式估算^[3]：

$$F_m = \frac{\pi}{8} \rho D^3 (u - u_s) \omega \quad (2)$$

式中： ω 为颗粒的旋转速度。

第 7 项为沙夫曼升力，是由于颗粒位于有速度梯度的流场中而引起的升力，但颗粒不旋转。在低雷诺数时，可用下式估算^[3]：

$$F_s = 1.61 D^2 (u - u_s) \rho \sqrt{\nu \frac{du}{dy}} \quad (3)$$

2 仿真模型的建立和参数设置

根据图 1 所示的物理模型，设高压水喷嘴直径为

d_1 ，磨料入口直径为 d_2 ，出口直径为 d_3 ，混合腔最大直径为 d_4 ，混合腔出口处内锥面锥角为 θ ，混合腔长度为 L_1 ，圆柱段（聚焦管）长为 L_2 。

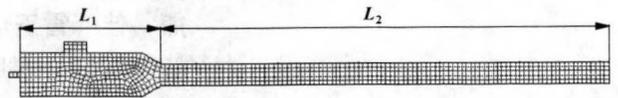


图 2 喷头的网格划分模型

Fig 2 Grid of FEM nozzle

用 FLUENT 的前处理模块 GAMBIT 来完成模型并划分网格^[5]，如图 2 所示。

仿真计算时磨料喷嘴的几何参数如表 1 所示。磨料为石榴石，入口速度为 10 m/s，体积分数为 0.1。其它参数设置如表 2 所示。

表 1 磨料喷嘴的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the nozzle

d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm	$\theta/(^\circ)$	L_1/mm	L_2/mm
0.26	1	1	2	15~75	6~22	50~100

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

$\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	$\nu/$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$\rho_s/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	$\nu/$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$u/$ ($m \cdot s^{-1}$)
998	0.001 003	2 300	0.000 01	500

考虑到液固两相流的特点，模型采用欧拉模型，离散格式采用二阶迎风格式，其它参数默认。湍流流动方程用 $k-\epsilon$ 双方程模式，并用 SIMPLE 算法求解^[6]。将网格模型调入 FLUENT 中并按上述处理边界条件及参数设置。

3 仿真结果分析

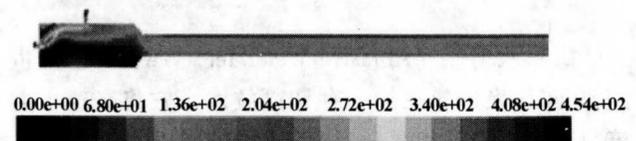


图 3 速度场等值线图 ($d_1 = 0.26$ mm, $d_2 = d_3 = 1$ mm, $d_4 = 2$ mm, $\theta = 30^\circ$, $L_1 = 10$ mm, $L_2 = 50$ mm)

Fig 3 Velocity field inside the nozzle ($d_1 = 0.26$ mm, $d_2 = d_3 = 1$ mm, $d_4 = 2$ mm, $\theta = 30^\circ$, $L_1 = 10$ mm, $L_2 = 50$ mm)

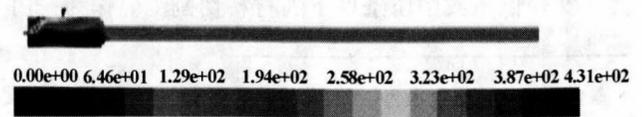


图 4 速度场等值线图 ($d_1 = 0.26$ mm, $d_2 = d_3 = 1$ mm, $d_4 = 2$ mm, $\theta = 30^\circ$, $L_1 = 10$ mm, $L_2 = 80$ mm)

Fig 4 Velocity field inside the nozzle ($d_1 = 0.26$ mm, $d_2 = d_3 = 1$ mm, $d_4 = 2$ mm, $\theta = 30^\circ$, $L_1 = 10$ mm, $L_2 = 80$ mm)

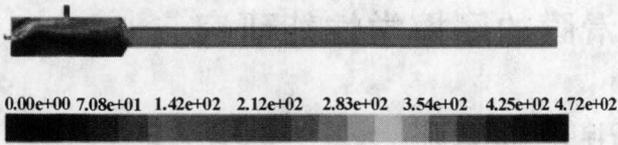


图 5 速度场等值线图 ($d_1=0.26$ mm, $d_2=d_3=1$ mm, $d_4=2$ mm, $\theta=45^\circ$, $L_1=10$ mm, $L_2=50$ mm)

Fig 5 Velocity field inside the nozzle ($d_1=0.26$ mm, $d_2=d_3=1$ mm, $d_4=2$ mm, $\theta=45^\circ$, $L_1=10$ mm, $L_2=50$ mm)

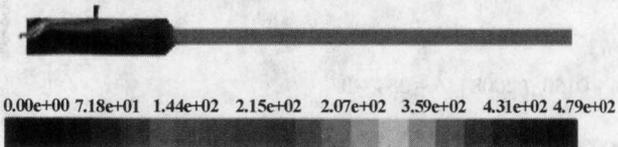


图 6 速度场等值线图 ($d_1=0.26$ mm, $d_2=d_3=1$ mm, $d_4=2$ mm, $\theta=30^\circ$, $L_1=14$ mm, $L_2=50$ mm)

Fig 6 Velocity field inside the nozzle ($d_1=0.26$ mm, $d_2=d_3=1$ mm, $d_4=2$ mm, $\theta=30^\circ$, $L_1=14$ mm, $L_2=50$ mm)

对磨料水射流两相流在二维喷嘴内流场的进行仿真, 结果如图 3 ~ 6 所示, 表明磨料水射流混合腔内以及喷嘴出口圆柱段磨料粒子速度的变化很大。由图 3 可看出, 水喷嘴附近磨料粒子相对速度值较高, 并集中在管壁; 在靠近圆柱管喷嘴时, 有明显的速度变化。因此可推测磨料混合腔出口处以及喷嘴圆柱管的结构与液固两相流中的磨料粒子最高出口速度有关。

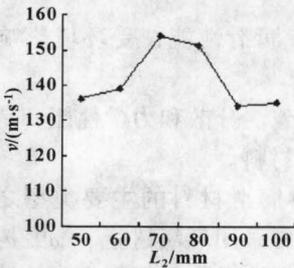


图 7 磨料粒子最高出口速度随磨料喷嘴圆柱段长度 L_2 的变化关系
Fig 7 Variation of the maximum exit velocity of abrasive with the nozzle length

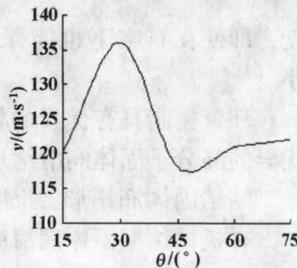


图 8 磨料粒子最高出口速度与磨料喷嘴内锥角 θ 的变化关系
Fig 8 Variation of the maximum exit velocity of abrasive with the angle of nozzle

在相同的人射速度及出口压力下, 对比不同喷头几何尺寸下的磨料粒子速度, 可以得出其变化趋势。比较图 3 和图 4 可以发现, 磨料水射流喷嘴圆柱段的长度对磨料粒子速度有显著影响。喷嘴内磨料粒子出口最高速度随圆柱段长度的变化如图 7 所示。由图 7 可看出, 当圆柱段长度小于 70 mm 时, 磨料最高速度随长度的增加而提高; 当大于 70 mm 时, 速度又

随喷嘴圆柱段长度的增加而减小。由此可知, 速度并非随长度增加而递增。当圆柱段长度为 70 mm 左右时, 喷嘴出口磨料粒子速度最高。

比较图 3、图 5 可知, 磨料喷嘴混合腔出口处内锥角 θ 对磨料速度场有明显影响。磨料粒子最高出口速度随喷嘴内圆锥角 θ 变化如图 8 所示。由图 8 可知, 磨料粒子最高出口速度随着喷嘴内锥角增加呈现先增后降的趋势。其原因在于增大锥角 θ 会使磨料粒子的径向速度增大而轴向速度减小, 从而使磨料射流的动力降低。小内锥角虽然可以增加流体的流动性, 有利于减小喷嘴的磨损, 但它也会影响内部流体漩涡的生成和分布, 即直接影响磨料与水射流的混合效果。当内锥角为 30° 左右时较为理想。

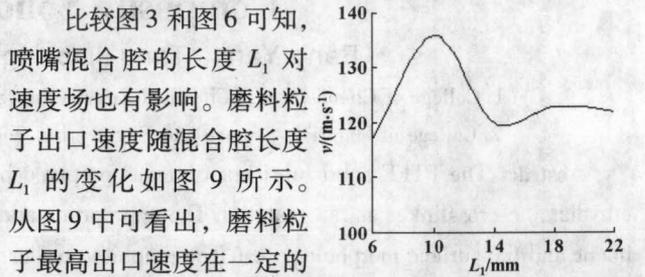


图 9 混合腔长度与磨料粒子最高出口速度关系图
Fig 9 Variation of the maximum exit velocity of abrasive with the length of mixing cavity

比较图 3 和图 6 可知, 喷嘴混合腔的长度 L_1 对速度场也有影响。磨料粒子出口速度随混合腔长度 L_1 的变化如图 9 所示。从图 9 中可看出, 磨料粒子最高出口速度在一定的区间内变化较小, 并不是混合腔越长磨粒就能得到更充分的混合。虽然尺寸较大的混合腔能改善磨料与水的混合效果, 但也会加大水射流的阻力。图 9 也正好印证了经验结论, 即混合腔长度 L_1 一般选取水喷嘴直径的 30 ~ 40 倍。因此, 混合腔尺寸应该根据水射流喷嘴结构来确定。

4 结论

(1) 利用 FLUENT 软件, 对磨料水射流喷嘴内液固两相流的速度场进行计算, 实现了可视化数值模拟, 通过对喷嘴内流场的仿真研究, 为磨料射流喷嘴结构尺寸选取和设计提供参考依据。

(2) 通过在一定入口速度、等直径、不同喷嘴圆柱段长度的条件下对喷嘴内流场的模拟分析, 得知存在一个最优喷嘴直管段长度, 使得磨料得到最高的出口速度。从这个角度出发, 喷嘴直管段长度取 70 mm 左右为佳。

(3) 在水射流入射速度、聚焦管直径和长度都不变的条件下, 磨料粒子最高出口速度随着喷嘴内锥角增加呈现先增后降的趋势。从提高磨料水射流出口速度, 降低喷嘴磨损角度看, 应减小混合腔内锥角, θ 取 30° 左右较理想。

(下转第 62 页)

$$y = 1.491 + 1.397x$$

式中: x 表示标称值, y 表示测定值。方程的相关系数为 0.998 3。对比发动机供应商的工作曲线建立方法, 该表达式可以看作是 MOA 测定进口润滑油的工作曲线表达式, 建立的工作曲线如图 2 所示。

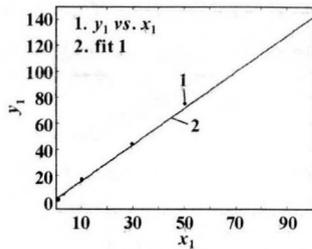


图2 MOA 测定进口润滑油氧化物粉末样品的铁含量的工作曲线

Fig 2 Fe content in oxide powder dissolved in import lube measured by MOA

4 结论

(1) 发动机在正常寿命期的磨损情况是渐进式变化的; 但在接近大修期前, 磨损量值会明显大于早期的磨损含量, 故应将早期的油样分析结果淘汰, 按中、后期的油样重新修改界限值。

(2) 发动机所用的润滑油的牌号允许在几种油品中选择, 不同油品的性能总有一定差别, 应该制定不同界限值。

(3) 对于监测标准的制定, 不仅需要考虑发动机的工作状态和润滑油的使用情况, 而且对于影响检测结果的因素, 如检测设备的适用范围和实验条件的确定, 也应该认真进行研究, 使得监测结果能够更加真实地反映发动机的实际工作情况。

参考文献

- [1] 李柱国. 机械润滑与诊断 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 宋兰琪, 等. 航空发动机润滑油光谱监控与故障分析

[J]. 航空维修, 1999 (12).

Song lanqi, et al. Monitoring and Fault Diagnosis of Aircraft Engine Based on Atomic Emission Spectrometric Techniques [J]. Aviation Maintains, 1999 (12).

- [3] 高经纬, 张培林, 任国全, 等. 油液光谱分析比例模型的建立 [J]. 内燃机工程, 2004, 25 (6): 34-37.
Gao Jingwei, Zhang Peilin, Ren Guoquan, et al. Design of Proportional Model for Oil Spectrum Analysis [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25 (6): 34-37.
- [4] 闫辉, 贺石中, 毛宁, 等. 油液监测界限值传统计算方法的改进 [J]. 润滑与密封, 2005 (4): 81-83.
Yan Hui, He Shizhong, Mao Ning, et al. The Improvement of Computing Formula of Threshold in Oil Analysis [J]. Lubrication Engineering, 2005 (4): 81-83.
- [5] 张晶, 朱子新, 陈栋, 等. 原子发射光谱技术在航空发动机磨损失效分析中的应用 [J]. 失效分析与预防, 2007, 2 (2): 62-64.
Zhang Jing, Zhu Zixin, Chen Dong, et al. Applications of Atomic Emission Spectrometric Techniques on Wear Failure Analysis of Aircraft Engine [J]. Failure Analysis and Prevention, 2007, 2 (2): 62-64.
- [6] X P Yan, C H Zhao, Z Y Lu, et al. A study of information technology used in oil monitoring [J]. Tribology International, 2005, 38: 879-886.
- [7] 张培林. 自行火炮油液光谱分析研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [8] Andrew R Webb. Statistical Pattern Recognition [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 251-262.
- [9] 万耀青, 郑长松, 马彪. 原子发射光谱仪作油液分析故障诊断的界限值问题 [J]. 机械强度, 2006, 28 (4): 485-488.
Wan Yaoqing, Zheng Changsong, Ma Biao. Threshold Problems on Fault Diagnosis of the Atomic Emission Spectrometer Oil Analysis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28 (4): 485-488.

(上接第 53 页)

(4) 为达到理想的速度值, 磨料混合腔长度可在水射流喷嘴直径 30~40 倍的区间内选取。

参考文献

- [1] 孙家骏. 水射流切割技术 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1992.
- [2] A W Momber, R Kovacevic. Principles of abrasive water jet machining [M]. Springer-verlag, London, Appears, 1998.

- [3] 沈忠厚. 水射流理论与技术 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.
- [4] 郭烈锦. 两相与多相流动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [5] 韩占忠. 流体工程仿真计算实例与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [6] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.