

文章编号: 0253-9993(2009)03-0410-05

前混合式磨料水射流喷嘴外流场仿真与实验

崔俊奎^{1,2}, 赵 军¹, 李国威², 郭仁宁², 武春晓²

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 通过建立磨料水射流喷嘴有限元模型, 对2种不同直径的前混合式磨料水射流的喷嘴外流场进行仿真分析. 结果表明, 在喷嘴其它几何条件相同的情况下, 出口直径对喷嘴的出口速度影响比较大, 出口直径越大, 出口速度越小; 在一定程度上将混合管适当地加长, 可以提高磨料射流在喷嘴出口处的速度; 磨料水射流最佳的切割距离为喷嘴出口直径的2.0~5.0倍. 磨料水射流切割靶体实验结果与靶体冲击仿真结果基本吻合.

关键词: 前混合式; 磨料水射流; 喷嘴; 流场仿真; 有限元法

中图分类号: TP601 文献标识码: A

Flow field simulation and experiment of pre-mixed abrasive water jets outside the nozzle

CUI Jun-kui^{1,2}, ZHAO Jun¹, LI Guo-wei², GUO Ren-ning², WU Chun-xiao²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Based on the finite element model of the pre-mixed abrasive water jet (AWJ) nozzle, numerical simulation of flow field outside AWJ nozzle with two different diameters was studied. The results indicate that exit diameter influences the nozzle velocity relatively larger, and the nozzle velocity decreases with increasing diameter while keeping other geometry construction parameters changeless. It would increase the AWJ velocity at nozzle exit by increasing the length of nozzle mixing tube properly. The optimal cutting distance of the AWJ is 2.0~5.0 times the nozzle exit diameter. The AWJ experimental cutting target results accord with the impacting simulation device on the whole.

Key words: pre-mixed; abrasive water jet (AWJ); nozzle; flow field simulation; finite element method

磨料水射流 (Abrasive Water Jet, 简称 AWJ) 是将一定数量的磨料微粒与高压水互相混合而形成的液固两相射流. 在相对较低压力下, 高压水的部分动能传递给磨料, 从而把水射流对靶物的持续作用变为磨料粒子流对靶物的高频冲击、磨削作用, 提高了射流的品质和工作效率^[1-2]. AWJ 切割装置包括泵站、增压装置、蓄能装置、切割喷嘴、磨料供应系统、导管和回收装置等, 如图 1 所示.

前混合式磨料水射流从根本上改变了磨料与水介质的混合机理, 大大提高了能量传输效率. 由于磨料射流基于流态化原理进行直接供料, 磨料粒子从喷嘴喷出时

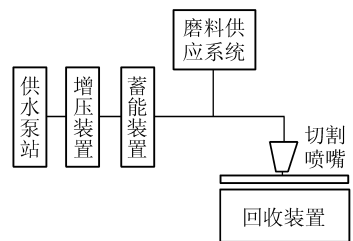


图 1 AWJ 切割靶体

Fig. 1 Abrasive water jet (AWJ) cutting device

收稿日期: 2008-04-08 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50490275)

作者简介: 崔俊奎 (1974—) 男, 内蒙古凉城人, 副教授, 博士研究生. Tel: 0418-3350517, E-mail: cuijunkui@yahoo.com.cn

已经达到水流速度的95%以上,高速度的磨料粒子冲击和切割破碎能力必然很强,切割物件所需的水压降低很多^[3]。近年来,前混合式磨料水射流的仿真与实验研究引起了国内外众多专家和学者的关注^[4-5]。

1 模型的建立

磨料微粒与高速流动的水流互相混合而形成的液固两相介质射流属于两相流研究范畴,本文运用两相流理论来进行模拟计算。目前,紊流模型的仿真研究已成为解决工程射流问题的一个有效手段^[6-7]。

对前混合式磨料水射流进行分析仿真,分析采用2种不同出口直径的喷嘴,即2,4 mm,并建立2个喷嘴和环境的整体有限元模型。有限元模型整体采用二维单元,映射方法剖分网格,网格单元均为四边形。

图2为喷嘴及喷嘴外部流动分析所建立的有限元模型的网格剖分,左侧为前混合式喷嘴的有限元模型,而右侧的方形区域为喷嘴外无限大环境有限元模型,用以模拟磨料水射流喷射出喷嘴后进入的环境状况。喷嘴模型的基本几何尺寸:左侧是固液两相流入口,直径为8 mm;右侧是两相流的出口,其直径为4 mm;混合腔长度为15 mm,混合管的长度为10 mm。

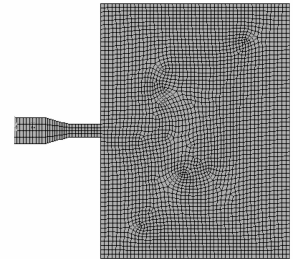


图2 喷嘴内外射流流场有限元模型
Fig.2 Finite element model of the AWJ flow field inside and outside the nozzle

2 边界条件和初始条件

磨射流进入喷嘴的边界条件:入口速度 $v = 500$ m/s,其中磨料颗粒体积分数为0.1,水的体积分数为0.9;出口边界条件:喷嘴出口压力处压力 $p = 101\ 325$ Pa;壁面条件:无滑动壁面条件。计算时两相流材料特性:水密度为 998 kg/m³,黏度为 8×10^{-4} Pa·s,磨料颗粒为石英砂,其密度为 $2\ 660$ kg/m³,黏度为 1×10^{-5} Pa·s;环境模型的分析条件:该环境模拟普通大气环境,方形区域尺寸相对喷嘴口径可近似看作无限大空间区域,目的在于忽略环境模型边界对流体流动的影响。

根据初始条件,本问题采用流固耦合分析方法。两相流会出现湍流现象,本次模拟采用 RNG 湍流模型,该模型在大应变区域能产生真实和可靠的结果,特别适合于分析有强烈加速度的流动问题。

3 模拟结果与分析

基于不同口径情况下,对前混合式喷嘴及环境模型进行了射流在外部空间流动的模拟,迭代次数为800次,计算收敛并提取计算结果。

图3为喷嘴出口直径为2,4 mm时,喷嘴产生的射流在空间流动时的速度分布。射流以初始流速 v 进入喷嘴,经过加速后,自喷嘴出射后与周围静止流体间形成速度不连续的间断面,并形成了锥形的射流主体段。由图3可知,不同口径喷嘴喷出的射流在空间均形成了相似的锥形体,在纵向断面上,流速分布显示出相似性质,轴线上流速最大,距轴越远流速越小;在轴线方向上,随着射流长度的增加,射流与周围流体掺混,产生的阻力使射流速度逐渐减小。

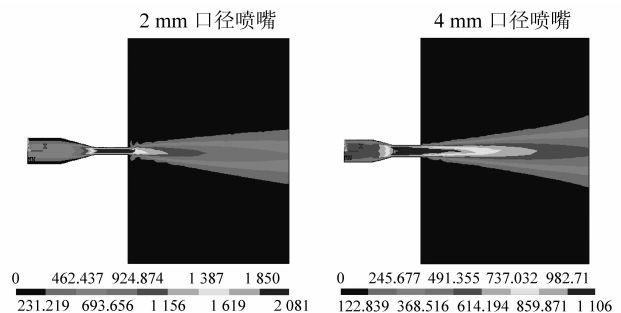


图3 不同出口直径喷嘴模型外流场速度分布
Fig.3 Velocity contour of AWJ with different diameters nozzles

图4为射流从不同口径喷嘴喷出后,在空间沿轴线方向上的速度分布。由于卷吸现象,紊动迅速向射流中心发展,导致射流端面流动均成紊动状态,并且速度沿轴线方向迅速下降,在5.0倍出口直径的距离

上速度下降为原来的 1/2. 在计算过程中, 忽略射流周围空气的黏性摩擦以及一些随机扰动, 模拟较为理想化. 如果按实际情况分析, 射流的轴向速度会下降得更快.

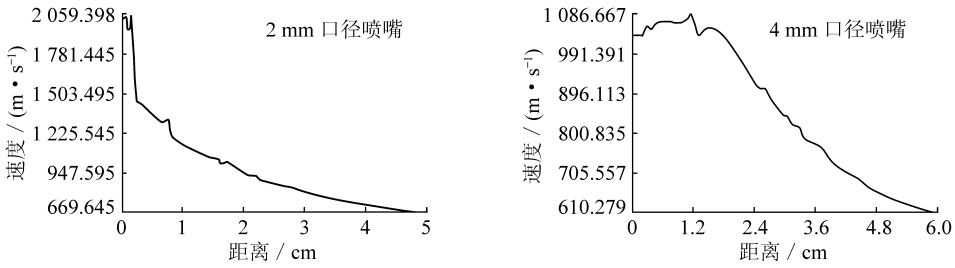


图 4 不同口径喷嘴外流场轴线速度分布曲线

Fig. 4 Axial velocity distribution curves of AWJ with different diameters nozzles

4 仿真与实验研究

4.1 射流最佳切割距离仿真

利用在不同距离上射流冲击固定壁面的方法来求得最佳切割距离. 建立射流冲击模型, 如图 5 所示. 调整使冲击射流冲击到固定壁面上, 不断调整固定靶体壁面与喷嘴出口间的距离, 且固定壁面每次前移靠近喷嘴的单位距离均为 1 倍于喷嘴出口直径距离; 将喷嘴附近的自由壁面向后移, 加大纵向壁面距喷嘴的距离, 减小环境设置对射流冲击壁面过程的不稳定影响. 提取不同距离上的固定壁面上的压力变化值, 确定最佳切割距离的范围^[4-5].

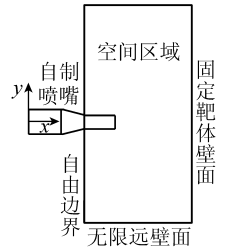


图 5 磨料射流冲击靶体
Fig. 5 AWJ impinging target

对出口直径分别为 2, 4 mm 的喷嘴产生的射流冲击壁面进行仿真模拟, 得到 2 个不同口径喷嘴, 在不同喷距上对靶体的最大冲击压力值曲线, 如图 6 所示. 可以看出, 在 4 倍于出口直径距离点压力值下降较大, 而在 4 倍于出口直径距离内压力值下降趋势比较缓慢.

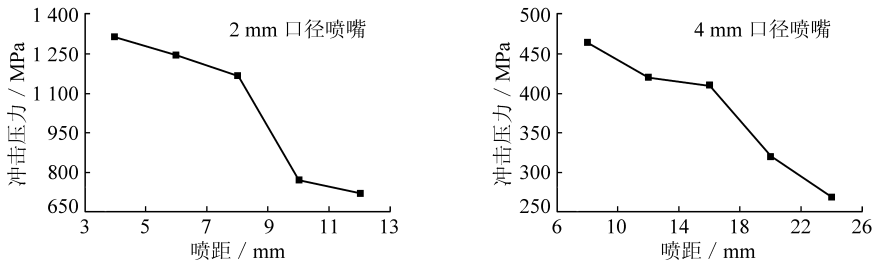


图 6 不同口径喷嘴射流最大冲击压力值曲线

Fig. 6 Maximum impinging pressure variation curves of AWJ with different diameters nozzles

图 6 为不同口径喷嘴射流最大冲击压力值曲线, 采集得到的冲击靶体壁面最大压力值, 见表 1. 由表 1 知, 随着不同喷距处距离的减小, 中心冲击压力值在增加, 增加的幅度较小; 且随着喷距值的减小, 压力值增加的比例逐渐减少, 因此得出最佳的切割距离在 2~5 倍口径距离范围内.

表 1 不同口径喷嘴射流对靶体的冲击压力

Table 1 Impinging pressures of AWJ with different diameters nozzles
MPa

| 出口直径 D/mm | 喷 距/mm | | | | |
|-------------|--------|--------|----------|----------|----------|
| | $6D$ | $5D$ | $4D$ | $3D$ | $2D$ |
| 2 | 721.37 | 771.89 | 1 172.19 | 1 250.41 | 1 319.97 |
| 4 | 268.41 | 320.10 | 419.67 | 420.56 | 463.99 |

4.2 射流冲击靶实验

4.2.1 AWJ 实验方法

实验时，采用压电晶体传感器测量磨料水射流对靶体的冲击压力，换算成速度与仿真结果比较，间接地验证仿真方法的可行性^[5]，验证速度场仿真结果。实验仪器：磨料水射流装置、压电晶体传感器、信号放大器、信号处理器、微机处理器、高硬度钢板靶体和卡尺等。实验装置如图7所示。

在微机处理系统中，采用振动及动态信号采集分析系统对实验结果进行分析，分析时取样频率为2 000 Hz，校正因子为40 × 10，分析数据块选用32，磨料粒度为80 目，材料为石英砂，密度为2 660 kg/m³，采用自制前混合水射流喷嘴，喷嘴直径为5 mm。

4.2.2 实验结果

统计实验数据，将磨料射流压力平均最大值转化为速度和单位面积冲击压力，见表2。

表2 不同靶距处最大速度和冲击压力

Table 2 Maximum velocity and impinging pressure of AWJ at different target distances

| 参 数 | 靶 距/mm | | | | | |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| 速度/(m·s ⁻¹) | 232.27 | 211.59 | 188.02 | 167.65 | 151.84 | 139.22 |
| 单位面积冲击压力/MPa | 28.26 | 23.46 | 18.52 | 14.72 | 12.08 | 10.15 |

4.2.3 实验结果与仿真结果比较

图8(a)为AWJ喷嘴外速度的仿真结果与实验结果对比曲线，2条曲线变化趋势基本一致。磨料射流流出喷嘴后速度衰减较快，整条曲线衰减趋势没有明显的变化。仿真数据略大于实验数据，经分析可能与实验中磨料分布不均匀性有关。

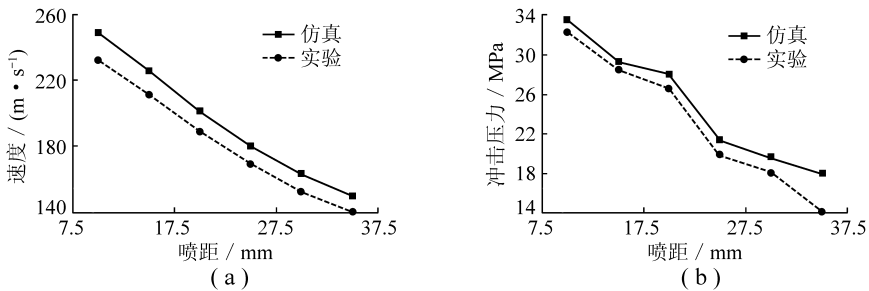


图8 射流喷嘴外速度值和射流对靶体冲击压力的仿真与实验对比曲线

Fig. 8 Velocity variety curves of outside AWJ nozzle and impinging pressure variety curves of AWJ between simulation and experiment

图8(b)为AWJ冲击靶体压力的仿真与实验结果对比曲线，仿真数值稍大于实验数值。射流的冲击压力在20 ~ 25 mm 范围内衰减较快，由26.52 MPa 下降到19.72 MPa；而在其他范围内下降趋势则较缓慢。两曲线在10 ~ 30 mm 的变化趋势基本一致，比较吻合，但在30 ~ 35 mm 相差较大。因此，在10 ~ 20 mm 距离段，冲击压力下降趋势较缓，尤其在15 ~ 20 mm，下降趋势更缓。因此，可以验证AWJ切割的最佳距离应该在10 ~ 20 mm，在4倍喷嘴左右。

AWJ速度场和对靶体冲击压力场的实验与仿真结果比较吻合，两者的变化规律基本一致。仿真结果

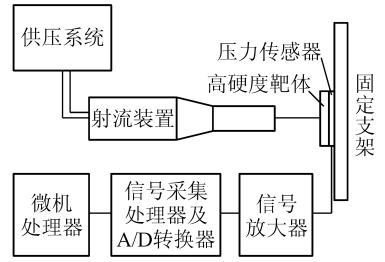


图7 AWJ 切割靶体实验装置

Fig. 7 Installation sketch on AWJ cutting target

和实验结果之间的误差主要因为仿真条件和实验条件存在较大的差别,在仿真过程中,AWJ 横截面积、磨料和水的体积分数均为估计值,且忽略了许多流动中的不确定因素带来了一定的误差.因此,有待于进一步合理设定边界条件,提高仿真的精确度和可信度.同时,磨料水射流的加工精度有待于进一步提高;磨料水射流喷嘴的内部结构有待于进一步优化,以延长喷嘴寿命;喷嘴仿真模型和边界条件的设置需要进一步修正,使仿真结果更准确可靠.

5 结 论

(1) 在其他喷嘴几何条件相同的情况下,AWJ 出口直径对喷嘴的出口速度影响比较大,出口直径越大,出口速度越小;在一定程度上,混合管加长可以提高 AWJ 喷嘴出口处的速度,但是如果混合管太长,AWJ 与混合管壁面摩擦时间增加,摩擦阻力增加,反而会使 AWJ 喷嘴出口处流速降低.

(2) 采用前混合式喷嘴,不同口径喷嘴喷出的射流在空间均形成了相似的锥形体,在纵向断面上,流速分布显示出相似性质,轴线上流速最大,距轴越远流速越小.在轴线方向上,随着射流长度的增加,射流与周围流体的掺混,产生的阻力使射流的速度逐渐减小.

(3) 前混合式喷嘴磨料水射流最佳的切割距离在 2.0 ~ 5.0 倍喷嘴出口直径范围内,AWJ 冲击切割实验结果与射流空间靶体冲击仿真实验相吻合,验证了仿真分析的合理性.

参考文献:

- [1] 董志勇. 射流力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Dong Zhiyong. Water jets mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 崔漠慎, 孙家骏. 高压水射流技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
Cui Moshen, Sun Jiajun. High pressure water jets technology [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.
- [3] 李宝玉, 郭楚文. 用于煤矿安全切割的前混合磨料射流加速机理研究 [J]. 中国安全科学学报, 2005, 15 (4): 52 - 55.
Li Baoyu, Guo Chuwen. Study on acceleration mechanism of abrasive particles of DIA jet in coalmine safe cutting [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15 (4): 52 - 55.
- [4] 胡贵华, 俞 涛, 刘小健. 前混合磨料水射流喷嘴内液固两相流的数值模拟 [J]. 机电一体化, 2005 (6): 20 - 24.
Hu Guihua, Yu Tao, Liu Xiaojian. The numerical simulation of two phase flow about the liquid and solid in nozzle of DID jet [J]. Mechatronics, 2005 (6): 20 - 24.
- [5] 侯国荣. 磨料水射流切割性能和喷嘴内外流场的仿真研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
Hou Guorong. Study on the cutting performance of abrasive water jet and simulation of the velocity field inside and outside the nozzle [D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [6] Mabrouki T. Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high velocity water jet and targets, contribution to investigate the decoating process [J]. Wear, 2000, 239 (2): 260 - 273.
- [7] Kosiwczuk W Cessou, Trinite A, Lecordier M B. Simultaneous velocity field measurements in two-phase flows for turbulent mixing of sprays by means of two-phase PIV [J]. Experiments in Fluids, 2005, 39 (3): 895 - 908.