

冲击挤压式脉冲射流动力特性数值模拟

陆朝晖^{1,2}, 卢义玉¹, 夏彬伟¹, 刘勇¹, 葛兆龙¹, 左伟芹¹

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 国土资源部页岩气资源勘查重点实验室, 重庆 400042)

摘要:基于 Fluent 软件建立以流体体积函数(VOF)模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型组合的二维多相流瞬态数值计算模型,采用定义瞬态压力入口边界的方法,对冲击挤压式脉冲射流的形成过程进行模拟计算。结果表明:基于此组合模型和方法计算得出的动态射流结构与试验结果具有较高的吻合度;喷嘴出口的水动力特征是影响射流结构及变化的最主要外在因素;射流前部生成的伞状结构能限制射流中心区表面气体涡的发展,有利于提高有效中心射流的收敛度;射流前部轴心速度发展至最大时,射流前端形成一层厚度约为 2 倍喷嘴直径的低速高湍动层。

关键词:射流; 挤压式水射流; 流体体积函数; Realizable $k-\varepsilon$ 模型; 水动力特征

中图分类号:TE 921

文献标志码:A

Numerical simulation on hydrodynamic characteristics of percussion pulsed jet

LU Zhao-hui^{1,2}, LU Yi-yu¹, XIA Bin-wei¹, LIU Yong¹, GE Zhao-long¹, ZUO Wei-qin¹

(1. State Key Laboratory of Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Land and Resources Engineering, Chongqing 400042, China)

Abstract: Based on Fluent software, a two-dimensional transient computational fluid dynamic (CFD) model was established by combining volume of the fluid (VOF) model and Realizable $k-\varepsilon$ model. The formation process of the percussion pulsed water jet was numerically simulated by defining transient pressure inlet boundary. The results show that the dynamic structure data of percussion water jet obtained by this model agree well with the experimental results. The outlet hydrodynamic characteristics are the most important factor affecting the jet structure and its change with time. The development of air vortexes on the central jet surface is restricted by the umbrella-shape structure which is beneficial to improve jet convergence. And a high turbulent zone with the size of two times jet diameter can be achieved when the axial velocity of the jet front edge reaches to its maximum magnitude.

Key words: jet; percussion water jet; volume of fluid; Realizable $k-\varepsilon$ model; hydrodynamics characteristics

冲击挤压式脉冲射流能实现对射流的瞬间加速,具有较强的冲蚀破碎硬岩的能力,被广泛应用于石油、采矿等工业领域^[1-4]。高速摄像研究中发现,冲击挤压式脉冲射流一般具有一个伞状的结构,其特殊射流结构的形成机制至今未被揭示。通过建立基于有限差分法等数值方法的数学模型^[5-6],可预测挤压腔体内压力和喷嘴处流场特征,但应用此类方法不能分析和研究射流喷出后所涉及的射流

压力、速度等物理量。现有试验方法如高速摄像、测速计等,亦难于获得射流结构进行较为完整而详细的研究^[1-2,4]。近年来,采用 CFD 技术模拟气液两相流并辅之湍流模型,可对射流流场进行定性、定量的可视化研究^[7-9]。研究者对射流喷出模拟大多针对连续射流,未发现针对喷嘴处具有动态动力特性的挤压式射流方面的模拟^[10]。笔者选用 Fluent 软件,由流体体积函数(VOF)多相流模型和 Realizable $k-\varepsilon$

ε 湍流模型组合建立二维动力学瞬态计算模型,并应用 UDF 文件定义压力喷嘴入口处的水动力特征,对现有文献[6]中冲击挤压式单脉冲射流的形成过程进行模拟。本方法忽略射流形成过程中腔体内流场的湍动、震荡波以及空化效应对射流结构的影响,考虑射流形成过程中的气液边界的液滴解裂和雾化,重点研究该类型射流伞状头部形态的形成机制及射流形成过程中的作用,以数值模拟的方法对现有理论及测试条件无法得到的射流流场形态可视化,研究射流内部流场及其随时间变化的特点。

1 冲击挤压式射流的形成机制

冲击挤压式射流生成装置有多种类型,一般结构如图1所示,其差异主要在于冲击动力源、喷嘴结构和最高射流速度等方面。一定体积的液体最初密封在一个一端为相对直径较小的喷嘴、另一端为可移动活塞的腔体内,当动力源冲击活塞时,腔体内液体在活塞的快速挤压下从喷嘴处喷出,形成每秒千米以上的高速液体射流。射流喷嘴处的液体压力随时间的变化一般通过压力传感器测试或理论计算的方法得出。该类型射流在喷嘴处的压力-时间曲线一般具有典型的抛物线状^[2,6]。本研究以自由落体重锤为动力源,射流速度小于 600 m/s,用于岩石破碎领域的射流生成装置。在流体动力学研究中,若射流速度超过音速,就需要考虑流体的可压缩性^[10]。在射流冲击固定靶面形成侧向射流的初期,射流靠近靶面的中心区域在流动束缚下形成压缩区,所以在模拟计算中水的可压缩性不可忽略。

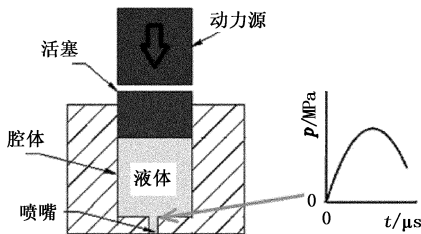


图1 冲击挤压式射流装置示意图

Fig. 1 Sketch map of percussion jet device

2 数学模型

2.1 VOF 多相流模型

对互不相容的水与空气, Fluent 中采用 VOF 多相流模型用以追踪流场中的两相界面。VOF 模型通过求解单独的动量方程和处理经过网格区域的每一流体的体积分数来模拟多相混合流体^[11]。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; t 为时间; \mathbf{v} 为速度矢量。

动量方程为

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}. \quad (2)$$

式中, \mathbf{u} 为微元体表面黏性应力; p 为压力; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{F} 为体积力。

为追踪相间界面, 体积分数连续性方程与动量方程联立求解得,

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_q = 0. \quad (3)$$

其中 $\sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1$, 则空气的体积分数可自动获得。输运方程的物理属性由组合分数表征。在气液两相流中 q 相的密度表达式为

$$\rho = \sum_{q=1}^2 \alpha_q \rho_q. \quad (4)$$

对两相间界面的追踪采用在界面计算预测中具有较高精度的几何重建方案。表面张力与重力在高速运动中影响较小, 但涉及到射流发散、解裂与雾化又是不可忽略的主要参数, 所以本模型中将两参数设为常量。Fluent 中所采用的表面张力模型是由 Brackbill 等建立的连续表面力模型 (CSF)。通过此连续表面模型, 表面张力被看作穿过表面的压力跳动^[11]。表面力被表述为体积力, 并作为源项被合并入动量方程中:

$$\mathbf{F}_{\text{vol}} = 2\sigma \frac{\rho \kappa_1 \nabla \alpha_1}{\rho_1 + \rho_2}. \quad (5)$$

表面曲率 κ 由界面法向局部梯度计算:

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{\mathbf{n}}. \quad (6)$$

其中

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}, \quad \mathbf{n} = \nabla \alpha_1.$$

2.2 湍动模型

Realizable $k - \varepsilon$ 湍动模型是可以满足流场中对雷诺应力的数学约束并与湍流物理规律相一致带旋流修正的双方程模型, 在圆口射流模拟中与其他双方程模型相比能获得更好的湍流比率精度^[10]。 k 和 ε 的输运方程为

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + G_k + G_b -$$

$$\rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{7}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \tag{8}$$

其中

$$C_{1\varepsilon} = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ji}}$$

式中, G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; σ_k 和 σ_ε 为湍动能 k 与耗散率 ε 对应的 Prandtl 数; S_k 和 S_ε 为源项。

3 数值计算及结果分析

3.1 计算区域与边界条件

Rehbinder 在试验中采用了 Leach 和 Walker 试验验证通过的收敛喷嘴结构。喷嘴直径为 2 mm, 收敛角为 13°, 有效长度为 30 mm。采用 ICEM 软件绘制 2D 轴对称四边形结构网格, 喷嘴外空气区域长 60 mm。在近喷嘴壁面边界层绘制了边界层网格, 对射流喷出后流经区域的网格进行了细化处理, 网格总数量为 10 150 个。按照试验初始条件将喷嘴区域的流体设定为水, 喷嘴外区域设定为空气。在文献[6]中, 分别通过试验和理论计算获得活塞挤压作用下腔体内压力的变化。计算模型定义喷嘴入口为压力入口边界, 将腔体内压力随时间的变化曲线写入 UDF 文件, 用于定义射流入口的瞬态射流动力特征。空气区域的侧面采用压力出口, 喷嘴壁面及距喷嘴出口 60 mm 处的靶面设定为无滑移光滑壁面。由于在装置的冲击动力源触发之前整个研究区域的流场为静止状态, 所以出入口边界初始压力设为 0, 湍动参数采用水力半径与湍动强度设定。根据水的密度与声速及体积模量的关系写入 UDF 文件来定义水的可压缩性。

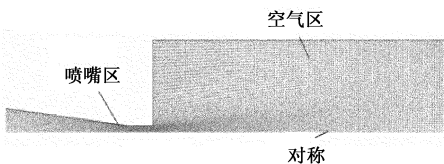


图2 计算区域及网格

Fig. 2 Computing domain and grid

3.2 离散方法

所有空间离散格式均采用高阶离散格式, 运用体力重度格式离散压力方程, 用二阶迎风格式离散连续方程。对时间离散采用基于压力的耦合求解器, 使用 PISO 算法耦合压力-速度场。针对在轴对称的计算域中模拟微秒量级内的瞬态问题, 为在每个时间步得到收敛结果并提高计算效率, 选用小时间步求解至关重要。整个计算过程采用固定时间步, 以方便与试验数据采集时刻相对应的模拟结果的保存。通过估算库朗数的合理值, 将时间步设定为 1×10^{-6} , 同时为使运算的每一步获得收敛解, 把每个时间步的最大迭代次数设定为 50 次。采用计算残差曲线来评测整个计算区域内所有守恒方程是否满足要求, 判断解的收敛性。

3.3 计算结果分析

3.3.1 对比验证

计算共运行 250 μs , 所得残差曲线表明每个时间步所得解均收敛。为验证计算模型的可靠性, 模拟获得与试验中所拍摄图片时刻相对应的流体体积分数云图, 如图 3 所示。高速摄像从射流侧面拍摄, 所拍摄图片(图 4)无法反映伞状区域内部情况, 与模拟的射流结构对比发现两者具有较高的相似度。由图 3、4 可知, 射流开始速度较小, 射流的伞状在 40 μs 时刻已初步形成, 伞状薄层随着长度的发展从后部逐步解裂, 解裂后液滴向射流中心集聚。

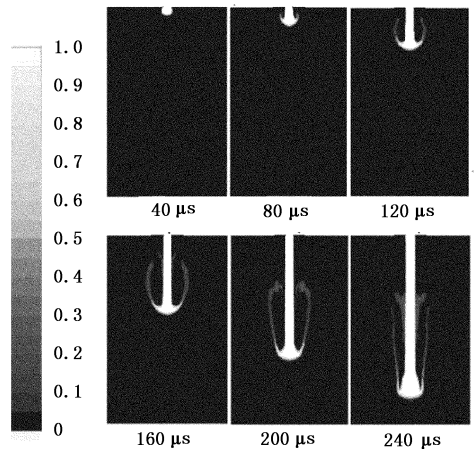


图3 不同时刻射流体积分数云图

Fig. 3 Cloud chart of jet volume fraction at different time

图 5 为模拟和试验的射流结构主要特征尺寸的对比。从图 5 中数据可知, 射流头部向前运动位置基本一致, 射流伞状结构的宽度在射流形成后期稍有偏差。由射流长度随时间变化曲线的斜

率可知,射流头部的速度在射流的发展过程中呈加速状态。射流发展至 160 μs 后,模拟的伞状区域与试验图片相比在长度和宽度方面逐渐变小。除试验与计算误差外,这也是腔体内激波引起的压力波动和空化效应对射流结构的影响所致。前期大量冲蚀试验表明,相对有效中心射流,向后滑移的伞状所形成的作用较小,所以有效中心射流的流场将作为随后射流特性研究分析的重点。

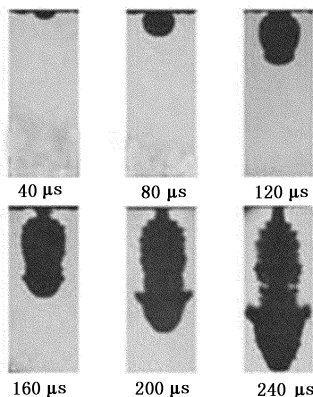


图 4 射流形成过程中的高速摄像图片 (Rehbinder, 1983)

Fig. 4 Images taken during jet generating process

(Rehbinder, 1983)

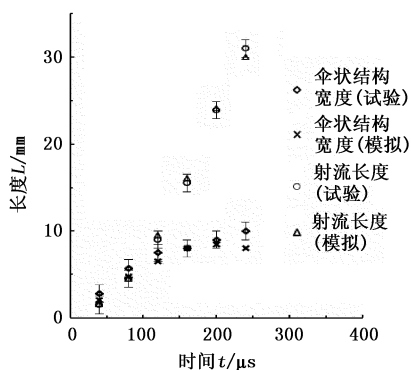


图 5 射流结构尺寸模拟与试验对比

Fig. 5 Comparison of structure demotions between simulation results and experimental data

3.3.2 射流产生过程中的流场演变

图 6 为射流周边空气流场在 120 μs 和 160 μs 的速度分布。具有高于射流速度的空气从射流后部流入伞状区域内部,因周边射流的限制而形成涡状气流。由于中心射流的边界层外形成了一个与射流速度方向相同但速度大于射流速度的空气层,抑制了边界层大涡的发展。Bloor 的理论研究^[12]认为,液体射流喷入大气后,当空气涡尺度大于流动液体的有效尺度,可导致射流解裂。这说明由伞状结构限制而伴随射流发展的气体大涡,可起到提高有效中心射流收敛度的作用。结合图 3、4 分析得出,随

着射流的发展,伞状结构后部的液层被解裂,并在空气涡的卷吸作用下向射流中心聚集,这是由气体大涡尺度大于伞状液层的有效尺度、高雷诺数流动下的瑞利不稳定性以及表面张力等作用引起的。

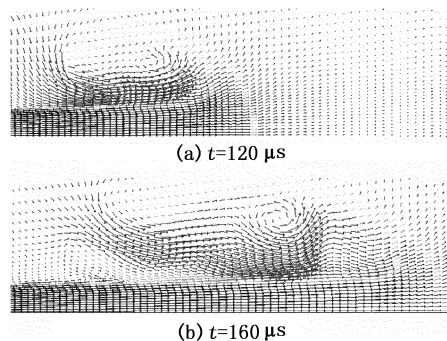


图 6 射流周边空气涡尺度的演变

Fig. 6 Development of air eddy near jet

图 7 为射流轴线速度随时间的变化。在 40 μs 时射流轴心最大速度为 50 m/s,当射流发展到约 240 μs ,喷嘴出口压力开始下降,前方射流已被加速至最大速度。喷嘴出口压力到达其峰值时刻之前,射流前端的速度始终低于随后而来的射流。射流前端的流体在后端较高速流体和前端空气摩擦阻力的共同作用下侧向发展而离开有效中心射流区。侧向移动的流体在失去后来流体的加速动力之后,相对射流中心区域向后滑移,从而形成伞状空心薄层结构。以上分析表明,射流结构特性主要由喷嘴处流场的水动力变化性质决定。理论上,在 240 μs 时刻射流充分发展,平均轴向速度为 480 m/s,应最具冲蚀能力。将图 3 与图 7 结合分析发现,此时在射流的前端形成一层厚度约为喷嘴直径 2 倍、速度约为后部有效中心射流速度 1/2 的低速区。另外发现,该区域具有较高的湍动能(约 1 200 m^2/s^2),如图 8 所示。这标志着该区域脉动程度较大,而相对低速则可能在冲蚀靶物时与靶体相互作用形成“水垫效应”,从而影响冲蚀效力。

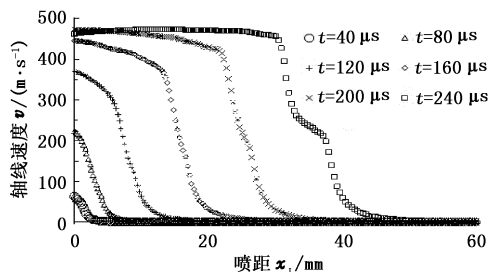


图 7 射流形成过程中轴线速度的变化

Fig. 7 Variation of axial velocity during jet development

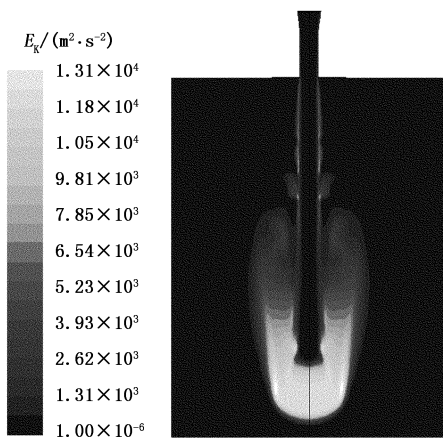


图8 240 μs 时刻射流湍动能云图

Fig.8 Cloud chart of turbulent kinetic energy at 240 μs

4 结论

(1) 组合 VOF 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍动模型, 并采用 UDF 文件定义入口压力边界的方法, 计算获得了与试验结果一致的动态射流结构。

(2) 喷嘴出口的水动力特征是影响射流结构及变化的最主要外在因素, 射流前部生成的伞状结构能限制射流中心区表面气体涡的发展, 有利于提高有效中心射流的收敛度; 射流前部轴心速度发展至最大时, 射流前端形成一层厚度约为 2 倍喷嘴直径的低速高湍动层。

(3) 冲击挤压式脉冲射流装置的腔体内水的动力学特征可较容易地由理论推导或测试的办法获得, 将获得信息定义到 CFD 数值模拟的入口边界, 对射流流场进行瞬态分析, 可为冲击挤压式脉冲射流生成装置的设计及优化提供参考依据。

参考文献:

[1] BOWDEN P F, BRUNTON J H. The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds[J]. *Mathematical and Physical Sciences (ser A)*, 1958, 263 (1315): 433-450.

[2] O'KEEFE D J, WRINKLE W W, SCULLY N C. Supersonic liquid jets[J]. *Nature*, 1967, 213:23-25.

[3] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 北京:石油大学出版社, 2000.

[4] MATTHUJAK A, HOSSEINI R H S, TAKAYAMA K, et al. High speed jet formation by impact acceleration method, shock waves [J]. *Shock Waves*, 2007, 16 (6): 405-419.

[5] RYHMING L I. Analysis of unsteady incompressible jet nozzle flow[J]. *Zeitschrift Für Angewandte Mathematik and Physik (ZAMP)*, 1973, 24(2):149-164.

[6] REHBINDER G. Investigation of water jet pulses generated by an impact piston[J]. *Applied Scientific Research*, 1983, 40(1):7-37.

[7] 徐立, 汪志明, 王瑞和, 等. 高速超高压水射流喷管内外湍流流场的数值模拟[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 1997, 21(4):18-22.

XU Li, WANG Zhi-ming, WANG Rui-he, et al. Numerical simulation for the ultra-high water jet flow and out of the pipes[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1997, 21(4):18-22.

[8] 陈春, 聂松林, 吴正江, 等. 高压水射流的 CFD 仿真及分析[J]. *机床与液压*, 2006, 2:103-105.

CHEN Chun, NIE Song-lin, WU Zheng-jiang, et al. A study of high pressure water jet characteristics by CFD simulation[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006, 2:103-105.

[9] SRINIVASAN V. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35 (8): 3710-3730.

[10] FLUENT. *Fluent 6.3 documentation* [M]. Lebanon: Fluent Inc, NH, 2006.

[11] WILCOX C D. *Turbulence modeling for CFD* [M]. La Cañada: DCW industries, 2006.

[12] BLOOR M. Hypersonic liquid jets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 84(2):375-384.

(编辑 李志芬)

(上接第 103 页)

[13] 史玉才, 苑燕燕, 武春芳. 应用相似方法模拟研究底部钻具组合的公转运动规律[J]. *广西大学学报:自然科学版*, 2006, 31(增刊):159-162.

SHI Yu-cai, YUAN Yan-yan, WU Chun-fang. Setting up a simulate device on motion behavior of bottom-hole assembly according to similitude principles [J]. *Journal of Guangxi University (Edition of Natural Science)*, 2006, 31(sup):159-162.

[14] 屈维德. *机械振动手册* [M]. 北京:机械工业出版社,

1992:9-10.

[15] 王文军, 张景生, 杨瑞雪, 等. 两个互相垂直的简谐振动合成的几个问题[J]. *聊城师院学报:自然科学版*, 1997, 10(4):40-43.

WANG Wen-jun, ZHANG Jing-sheng, YANG Rui-xue, et al. Several question about composition of two mutual vertical simple harmonic vibration [J]. *Journal of Liaocheng Teachers College (Edition of Natural Science)*, 1997, 10(4):40-43.

(编辑 李志芬)