

文章编号:1671-6833(2011)03-0119-05

水力喷砂射孔喷嘴的数值模拟及试验研究

葛兆龙, 卢义玉, 左伟芹, 夏彬伟, 赵艳萍, 汤积仁

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:针对收缩型喷嘴内部结构长径比(直线段长度与直径的比值)严重影响出口射流的冲蚀性能这一关键问题,研究了喷嘴内部射流加速机理,得出长径比是影响喷嘴出口射流速度的最主要因素之一;针对工程中5吋套管常用喷嘴结构,选取不同喷嘴直径和直线段长度,利用FLUENT软件计算了35组模型(直线段长度为6~12 mm,直径为4~6 mm),结果表明:射流速度最大时喷嘴长径比存在一个最佳值,本次计算射流出口速度最大时长径比为1.8;实验室按照数值计算模型加工35个不同长径比喷嘴,利用粒子图像测速系统(PIV)进行非接触式试验,分析实验结果,揭示了长径比对喷嘴出口射流性能的影响规律,验证5吋套管常用喷嘴(总长度为17 mm,收缩角30°)出口射流最大时对应的长径比1.8,试验结果与数值模拟一致。

关键词:射孔;喷嘴;长径比;数值模拟;PIV

中图分类号:TE934 **文献标志码:**A

0 引言

随着石油天然气田开发的不断深入,低渗透气藏开发力度不断加大,越来越多的储量得到动用^[1-2]。但是由于储层地质特征或井身结构不适宜直接进行水力压裂或酸化改造,如对于固井质量不好、上下有水层、地层压力过高而不能进行压裂改造的极小薄层、薄互层等要求射孔位置精度较高的井,为了实现有效挖潜目的层,水力喷射压裂是一种新的增产作业措施,可借助连续油管将高压流体送入到改造层段后,通过喷嘴实现高压射流能量转换产生的高速流体冲击套管和岩石形成射孔通道,完成水力射孔^[3-5]。但是,由于石油天然气井套管和油管之间空间大小的限制,无法利用传统理论和方法进行喷嘴结构优化设计,因此,重新研究和优化水力射孔的关键设备喷嘴的几何参数,对提高水力射孔性能和石油天然气采收率具有很重要的意义。

国内外许多专家学者对无空间限制条件的喷嘴进行了研究,如国内清华大学谢竣石等^[6-7]利用数值计算的方法对不同收缩角对射流流场的影

响进行了研究,收缩角大小会影响其对射流的阻滞效果。国外Quinn, Khan等^[8-9]利用数值计算的方法对不可压的低速射流下不同流道型线的喷嘴进行了研究,指出射流初始段截面上速度的衰减以及轴心速度的衰减与喷嘴内部流道型线有关。笔者针对总长度受限制的具有不同长径比圆锥形喷嘴的内部射流加速机理进行了深入的探讨,分析喷嘴不同长径比对喷嘴出口射流性能的影响机理,得出了喷嘴长径比对高压水射流冲蚀性能影响的关系曲线,为水力射孔提高石油天然气采收率的关键设备喷嘴的优化设计提供了理论依据。

1 收缩型喷嘴射流加速机理研究

大量的试验分析表明:相同收缩角,喷嘴出口直径和直线段长度是影响射流加速的主要因素,射流首先进入高压输送管而得到初始加速,虽然高压管内水流速度较低,加速不明显,但是由于高压管路较长水在其流动中得到充分地加速,到达喷嘴入口处,水射流的速度基本达到速度平衡,然后进入喷嘴,在喷嘴内部,水的加速主要是在喷嘴收缩段和直线段内完成,在喷嘴收缩段内,刚开始

收稿日期:2011-01-05;修订日期:2011-02-23

基金项目:国家自然科学基金委创新群体基金(50621403);重庆市杰出青年基金(CSTC, 2009BA6047);重庆大学研究生科技创新基金项目(201005B1B0010342)

作者简介:葛兆龙(1983-),男,江苏徐州人,重庆大学安全工程及技术专业博士研究生,主要从事高压水射流理论及其应用研究, E-mail:gezhaolong@163.com.

时水射流速度增加缓慢,但随着距离的增加,速度增长越来越快,刚进入直线段时,其速度增加较快,如果直线段不是足够长,水射流离开出口后没有完全加速,喷嘴喷射后形成的射流核心段是一个等速场,特别是核心段的前部是类似于喷嘴直线段,水射流在核心段内还将得到进一步加速,但是当射流速度增加到一定程度以后,其速度的增加却极其缓慢,所以靠增加喷嘴直线段长度来提高射流的速度是不可取的.由此可见,对于相同收缩角和直径的水射流喷嘴而言,直线段长度存在着一个最佳值.

对于相同压力和流量的射流,通过喷嘴时,喷嘴直径越小,压力越大,喷嘴出口流速越大,但是,根据以往实验室试验结果,通常喷嘴直径过小时,射流的冲蚀能力和范围减小,很难达到工程需要.因此,在考虑现场应用需要,喷嘴直径设计也存在一最佳值^[10-12].因此,综合考虑喷嘴的直线段长度和直径,结合收缩型喷嘴内部射流加速理论,在喷嘴出口射流速度最大时,长径比存在一个最优值.

2 不同长径比喷嘴的数值模拟研究

通过对收缩型喷嘴射流加速机理的研究,揭示同一收缩角喷嘴长径比(直线段长度和出口直径比值)是影响出口射流速度至关重要的因素.为进一步揭示喷嘴不同长径比对出口射流的影响情况,采用目前国际上比较流行 Fluent 软件,针对石油天然气井 5 吋套管尺寸建立计算区域,结合收缩型喷嘴射流加速机理研究结论选择计算模型,考察喷嘴不同长径比与出口射流的关系,为下一步加工喷嘴和试验提供理论基础.

2.1 喷嘴结构的确定

目前川东地区天然气藏增产改造最常施工的环境是 5 吋套管(内径为 108 mm),油管内径为 62 mm,根据施工现场安装需要确定喷嘴总长度为 17 mm.为了确定喷嘴的收缩角,实验室加工不同收缩角喷嘴,利用示踪粒子测速系统进行试验,实验结果如图 1 所示,获得喷嘴出口射流速度最大时对应的收缩角为 30°.

综上,确定数值计算喷嘴的总长度为 17 mm,收缩角为 30°,具体结构如图 2 所示.

2.2 模型的建立

(1)计算区域选择.由于喷嘴和油管都是轴对称结构,故采用二维计算区域,根据现场条件和试验结论,油管直径 62 mm,喷嘴总长度为 17 mm、万方数据

收缩角为 30°、直线段长度 L 分别取:6,7,8,9,10,11,12 mm;对应直径 d 分别取:4,4.5,5,5.5,6 mm 圆锥收缩型喷嘴.选择计算区域如图 3 所示.

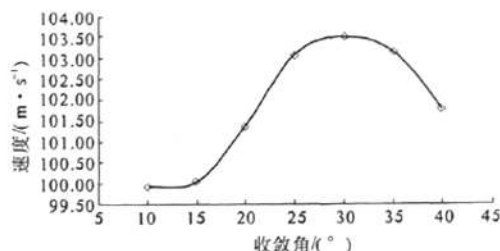
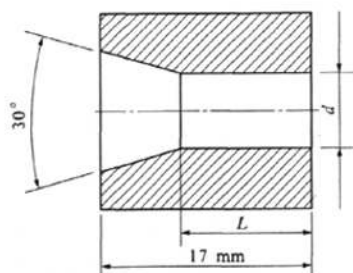
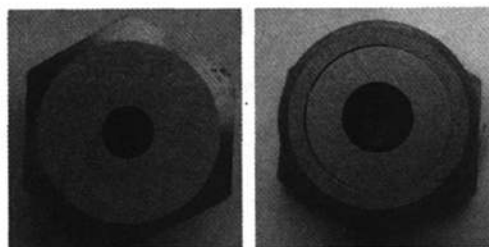


图 1 不同收缩角喷嘴出口速度对比图

Fig.1 Comparison of velocity at nozzle outlet with different contract angle



(a) 喷嘴结构示意图



(b) 喷嘴结构实物图

图 2 喷嘴结构图

Fig.2 The structure of the nozzle

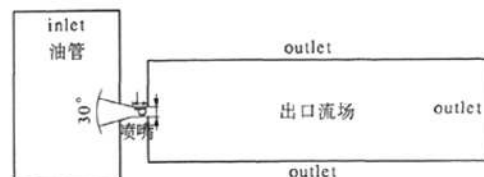


图 3 模型计算区域

Fig.3 Calculation of regional

(2)网格划分.由于模型计算区域不大,为了加快网格划分速度,采用一次性划分网格,全部采用四边形网格,共划分 19 000 个网格.网格划分如图 4 所示.

(3)模拟参数设置.进口压力边界条件设为 5 MPa,出口压力边界条件设为大气压 101 325 Pa.流体材料特性设置:水密度为 998 kg/m³,黏度为

$8e-4 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$. 采用 Simple 压力场修正算法, 考虑到喷嘴内流场湍流强度很大, 且喷嘴入口附近流线弯曲程度比较大, 湍流模型采用 Standard $k-\epsilon$ 模型, 进口湍流强度 10%, 进口水流直径 62 mm.



图4 网格划分示意图

Fig. 4 Mesh diagram

2.3 结果分析

对直线段长度为 6~12 mm, 直径为 4~6 mm 的 35 组收缩型喷嘴进行数值模拟, 对应的长径比为 1~3. 图 5 为直径 6 mm、直线段 9 mm 的计算区域射流速度分布矢量图. 不同长径比喷嘴轴心射流速度图如图 6 所示.

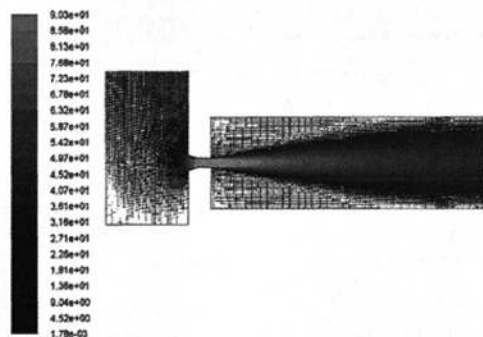


图5 直径 6 mm、直线段 9 mm 速度分布图

Fig. 5 Velocity distribution of calculation of regional with nozzle of diameter 6 mm, straight line 9 mm

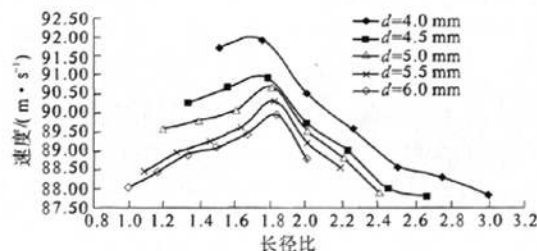


图6 不同长径比喷嘴轴心射流速度对比图

Fig. 6 Comparison of velocity at nozzle axis with different line length-diameter ratio

对 35 组数值模拟计算结果(喷嘴出口射流轴心上速度)进行分析处理, 理论上揭示出总长度受到限制的喷嘴的长径比与出口射流速度之间的变化规律. 即不同直径喷嘴, 出口射流速度随着万方数据

长径比的增加而增大, 出口射流速度达到最大时对应着长径比一个最佳值, 随后长径比继续增加, 射流出口速度逐渐减小. 因为喷嘴直径过大, 长径比就减小, 喷嘴内部压力减小, 出口射流速度减小; 如果喷嘴直径过小, 收敛角和总长度确定, 则喷嘴直线段长度增大, 射流阻力增大, 根据流体力学和收缩型喷嘴射流加速机理研究结论, 出口射流速度减小, 因此, 喷嘴出口射流速度达到最大时对应着一个最佳长径比. 针对本次数值模拟实验总长度为 17 mm, 收缩角为 30° 的喷嘴, 当长径比增大到 1.8 时, 出口射流速度达到最大值, 冲蚀破岩能力最强.

3 粒子图像测速系统(PIV)实验

由于数值模拟计算误差较大, 工程上不能直接用于喷嘴优化设计, 为了验证数值模拟计算结果, 确定不同长径比的喷嘴与出口射流速度之间的相互关系, 实验室加工 35 个直径分别为 4 mm, 4.5 mm, 5 mm, 5.5 mm, 6 mm, 对应直线段长度分别为 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 总长度为 17 mm, 收缩角为 30° 的喷嘴. 利用美国进口仪器粒子图像测速系统(PIV)对喷嘴出口射流流场进行实验室测试, 获得不同长径比喷嘴出口轴心射流平均速度^[13-15].

3.1 PIV 原理

粒子图像测试技术是光学测速技术的一种, 利用激光成像技术瞬时测量流场中多点的速度值, 从而获得流场中一个面(激光片光源照亮平面内)内的速度场(二维或三维速度)某一瞬时整个流动的信息.

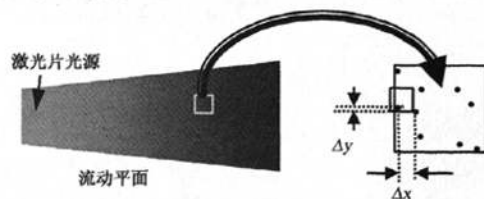


图7 PIV 基本工作原理

Fig. 7 Working principle of PIV

脉冲激光束经组合光学系统形成很薄的片光源(约 2 mm 厚). 在时刻 t_1 用它照射流动的流体形成很薄的明亮的流动平面, 该流面内随流体一同运动的粒子散射光线, 用垂直于该流面放置的相机记录流场内流面上粒子的图像. 经一段时间间隔 Δt 的时刻 t_2 重复上述过程, 得到该流面上第二张粒子图像. 对比两张照片, 识别出同一粒子

在两张照片上的位置,测量出在该流面上粒子移动的距离,则 Δt 中粒子移动的平均速度为: $u_x = \Delta x / \Delta t$, $u_y = \Delta y / \Delta t$. 对该流面所有粒子进行识别、测量和计算,就得到整个流面上的速度分布.

3.2 喷嘴出口流场测试和结果分析

3.2.1 试验装置及条件

采用流量 200 L/min, 压力 31.5 MPa 的柱塞泵, 喷嘴固定在改装的机床上, 激光通过激光发射器由激光臂传送到组合镜头形成片光源, CCD 相机拍摄图片传送到计算机, 通过 Insight 3G 软件处理显示, 利用 Tecplot 获得处理结果. 为确保和数值模拟条件相似, 实验时控制喷嘴入口泵压为 5 MPa. 测速系统装置示意图如图 8 所示.

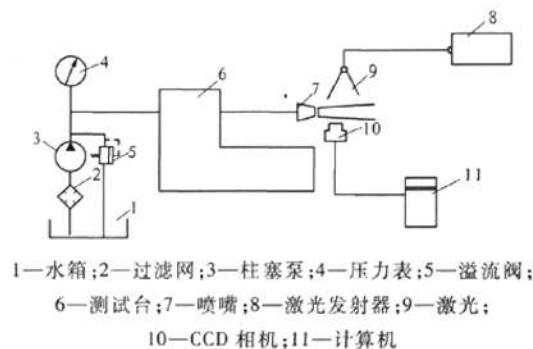


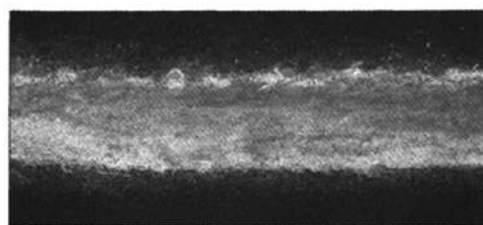
图 8 测速系统装置示意图

Fig. 8 Device schematic of velocity measurement system

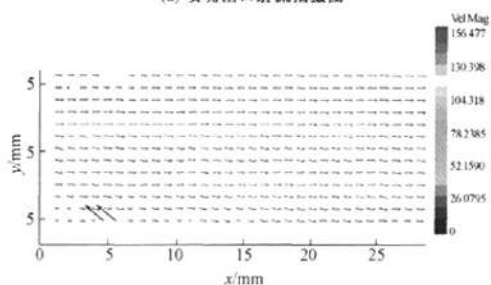
3.2.2 试验过程及结果处理分析

根据实验要求, 连接实验装置, 将片光源打在喷嘴出口射流轴心线上, 相机调在喷嘴出口等速核内, 进行试验, 调节 Insight 3G 软件, 设定实验过程中参数, 获得最佳图像, 依次对实验室加工不同型号的 35 个喷嘴进行出口流场测试, 每一个喷嘴拍摄 100 张图片.

利用软件对存储图像进行处理计算, 从每一个喷嘴出口拍摄的 100 张流场图片中, 选取 50 张拍摄较优图片, 选定喷嘴出口射流核心区域, 用 Tecplot 软件进行平均; 将平均后数据进行分析计算, 获得不同直线段长度和直径的喷嘴出口射流核心区域速度矢量图以及最大速度、最小速度和平均速度值; 将喷嘴不同直径、直线段长度以及对应的出口射流平均速度进行处理, 最终得出不同长径比喷嘴与出口射流速度关系规律 (如图 10 所示). 从图中可以得出, 对于工程中具有限制条件的喷嘴, 其长径比的变化对出口射流的速度及冲蚀能力具有较大的影响, 出口射流速度最大, 冲蚀能力最强时, 喷嘴的长径比存在一个最佳值, 变



(a) 喷嘴出口射流拍摄图



(b) 喷嘴出口射流速度分布图

图 9 PIV 测试图 (直径 6 mm、直线段 9 mm)

Fig. 9 Test results by PIV (nozzle of diameter 6 mm, straight line 9 mm)

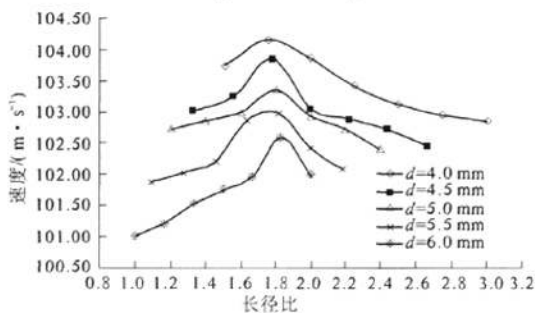


图 10 不同长径比喷嘴射流出口速度对比图

Fig. 10 Comparison of velocity at nozzle axis with different line length-diameter ratio

大或者变小都会导致射流性能变差, 这与数值模拟计算得出结果一致. 例如本次针对天然气藏增产改造常用的总长度为 17 mm、收缩角为 30° 的喷嘴, 当长径比为 1.8 时, 出口射流速度达到最大值, 冲蚀破岩能力最强, 此时对应的喷嘴直径和直线段长度最佳. 研究结论对工程中常用限制总长度的喷嘴的优化设计具有重大的指导意义.

4 结论

笔者针对收缩型喷嘴内部结构影响其工作性能这一重要问题, 选定直线段长度和出口直径比进行系统研究, 通过分析喷嘴内部射流加速机理, 揭示出喷嘴的直线段长度和出口直径的比值是影响射流加速的主要因素. 选定目前天然气藏增产改造过程中最常用的总长度为 17 mm、收缩角度

为30°的喷嘴对不同长径比进行数值模拟和实验室试验,最终得出对于限制总长度的喷嘴优化设计,长径比是影响其冲蚀破碎性能的重要因素,过大和过小都不是最优选择,而存在一个最佳值,针对试验喷嘴,长径比为1.8时,喷嘴出口射流速度最大,动能最大,冲蚀能力最强。这对于低渗油气藏采用水力喷射压裂措施增产改造,根据不同套管和油管尺寸优化设计具有限制条件的喷嘴具有理论指导意义。

参考文献:

- [1] 刘金华,张世奇,孙耀庭,等. 川西前陆盆地层序地层模式与油气成藏[J]. 石油学报,2006,27(5):35-40.
- [2] 杨晓萍,赵文智,邹才能,等. 低渗透储层成因机理及优质储层形成与分布[J]. 石油学报,2007,28(4):57-61.
- [3] 易灿,李根生,郭春阳,等. 自振空化射流改善油层特性实验研究及现场应用[J]. 石油学报,2006,27(1):81-84.
- [4] 李航,桑宇,韩慧芬,等. 超正压射孔与加砂压裂联作技术研究[J]. 天然气工业,2004,24(12):82-85.
- [5] 龙学,宋艾玲. 川西致密砂岩气藏储层改造技术方法选择及效果分析[J]. 钻采工艺,2001,24(5):38-40.
- [6] 谢峻石,何枫. 收缩喷嘴内部流道型线对射流流场的影响[J]. 机械开发,2000(4):42-48.
- [7] 赵伟民,冯欣华,胡长胜. 不同收缩角对喷嘴性能影响的数值模拟[J]. 矿山机械,2007,35(5):112-114.
- [8] QUINN W R, MILITZER J. Effects of nonparallel exit flow on round turbulent free jet international[J]. Heat and Fluid Flow,1989,10(2):139-145.
- [9] KHAN M E H, GESKIN E S. A numerical investigation of turbulent behaviors of water flow inside nozzle [C]//Proc 7th U S Water Jet Conference. Washington; Seattle,1993:217-230.
- [10] 孙家骏. 水射流切割技术[M]. 北京:中国矿业大学出版社,1992:88-89.
- [11] 何枫,谢峻石,杨京龙. 喷嘴内部流道型线对射流流场的影响[J]. 应用力学学报,2001,18(4):114.
- [12] 马艳洁,梁政,陈卓. 磨料射流切割钻杆的喷嘴设计[J]. 机械设计与制造,2009(5):24-26.
- [13] Young Il Jang, Sang Joon Lee. PIV analysis of near-wake behind a sphere at a subcritical reynolds number [J]. Experiments in Fluids,2008,44(6):905-914.
- [14] ASTARITA T. Analysis of velocity interpolation schemes for image deformation methods in PIV [J]. Experiments in Fluids,2008,45(2):257-266.
- [15] Westerweel Jerry, Scarano Fulvio. Universal outlier detection for PIV data[J]. Experiments in Fluids,2005,39(6):1096-1100.

Numerical and Experimental Study for Convergent Nozzles of Hydraulic Sand-Blasting Perforation

GE Zhao-long, LU Yi-yu, ZUO Wei-qin, XIA Bin-wei, ZHAO Yan-ping, TANG Ji-ren

(Key Lab of Ministry of Education for the Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at the key problem that length-diameter ratio of convergent nozzle seriously affected erosion capability of water jet, acceleration mechanism of water jet within the jet nozzles is studied and length-diameter ratio of nozzle is the main factor to affect the acceleration of water jet. According to the structure of 5-inch casing the most commonly used nozzles in engineering, selecting the line segment length of 6~12 mm, a diameter of 4~6 mm. Numerical calculations were conducted for 35 group-type of convergent ejector nozzles by the FLUENT software. The results show that there is an optimum length-diameter ratio value for nozzles. Align to these calculations, when length-diameter ratio reaches 1.8, jet velocity is maximum. Different types of nozzles are machined following the numerical calculation model in the laboratory. Non-contact tests are done by the PIV. Testing results are consistent with numerical simulation results. It reveals the reasons that impact the jet acceleration performance under the different length-diameter ratios.

Key words: perforation; nozzle; length-diameter ratio; numerical simulation; PIV