

淹没条件下长圆喷嘴流场数值模拟

周卫东¹, 李罗鹏¹, 孔垂显², 王静双¹

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 新疆油田公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:为了提高径向水平井扩孔效率,将长圆喷嘴引入磨料射流扩孔技术,建立射流流场的流动控制方程,结合 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对方程组进行求解,并将结果与锥形喷嘴射流结果进行对比。结果表明:长圆喷嘴射流具有一定的扩散性,且短轴剖面上的扩散角比长轴剖面上大;喷嘴内射流速度及出口速度随长宽比增大而减小,随出口直径增加而增加;在喷嘴入口速度和出口直径相同的情况下,长圆喷嘴出口速度小于锥形喷嘴;无因次喷距大于 11.3 时,长圆喷嘴外射流轴线速度大于锥形喷嘴的;射流出口断面宽度随喷距增大而增大,在相同条件下长圆喷嘴扩孔宽度大于锥形喷嘴,且射流具有自模性;数值计算结果与磨料射流扩孔试验结果基本吻合。

关键词:射流;扩孔;长圆喷嘴;数值模拟

中图分类号:TE 248

文献标志码:A

Numerical simulation of flow field of nozzle with elliptical exit under submerged condition

ZHOU Wei-dong¹, LI Luo-peng¹, KONG Chui-xian², WANG Jing-shuang¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

Abstract: In order to improve the reaming efficiency of radial horizontal well bore, the elliptical exit nozzle was introduced into the abrasive jet reaming technology. The Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model was applied to the simulation of the nozzle with elliptical exit. Numerical results were compared with results of conical nozzle. The results show that the jet has a certain spreading and the diffusion angle on short shaft section is greater than that on the longitudinal profile. The jet velocity in the nozzle and the outlet velocity gradually decrease along with the length-width ratio increasing, while increase with the outlet diameter increasing. When the nozzle entrance velocity and outlet diameter are the same, the outlet axial velocity of the nozzle is less than that of the conical nozzle. When dimensionless nozzle distance is greater than 11.3, the jet velocity is greater than that of the conical nozzle. The nozzle export section width increases with the distance from nozzle increasing, and the reaming width of the elliptical exit nozzle is greater than that of conical nozzle under the same conditions. The jet has self-moldability. The numerical results agree well with the experimental results of abrasive jet reaming.

Key words: jet; reaming; nozzle with elliptical exit; numerical simulation

井下扩孔是径向水平井增产技术中的关键环节。传统的扩孔技术主要采用机械的方式,很难达到井下转向设备所需的转向空间。同时,当主井眼的井斜较大时,很容易造成钻具的严重蹩跳,甚至会发生井下事故^[1-7]。磨料射流扩孔技术主要采用携带磨料的高压水射流对已包括套管的施工井段进行径向扩孔。笔者对于磨料射流扩孔技术中的长圆喷嘴进行数

值模拟研究,揭示其射流流动规律,并与锥形喷嘴射流进行对比,为水力扩孔工具的改进提供理论依据。

1 喷嘴设计

1.1 喷嘴结构

长圆喷嘴在结构上不同于锥形喷嘴,其出口截面为椭圆形、矩形或扁圆形^[8],图 1 为出口截面为扁

圆形喷嘴的内流道结构,主要参数有出口截面长度 a 、截面宽度 b 、扁圆柱段长度 l 和喷嘴总长 h 。

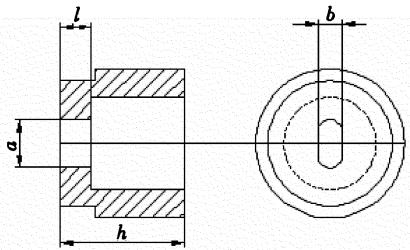


图 1 长圆喷嘴结构

Fig. 1 Structure diagram of nozzle with elliptical exit

1.2 喷嘴内部参数的确定

假设 A_1 、 A_2 分别为喷嘴入口和出口处的两点,由伯努利方程得

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \tag{1}$$

式中, p_1 和 p_2 分别为点 A_1 和 A_2 处的压力,Pa; z_1 和 z_2 分别为点 A_1 和 A_2 处的高度,m; v_1 和 v_2 分别为点 A_1 和 A_2 处的流速,m/s; g 为重力加速度; ρ 为流体密度,kg/m³。

由式(1)得

$$v_2 = \sqrt{2g(z_1 - z_2) + v_1^2 + 2(p_1 - p_2)/\rho} \tag{2}$$

$2g(z_1 - z_2)$ 与 $2(p_1 - p_2)/\rho$ 相比较小,可以忽略,令 $\Delta p = p_1 - p_2$,则喷嘴出口流速为

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{3}$$

喷嘴流量可以表示为

$$Q = C_d A_p v_2 = C_d A_p \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{4}$$

式中, Q 为体积流量,m³/s; A_p 为喷嘴过流断面面积,m²; C_d 为流量系数, $0 < C_d < 1$; Δp 为喷嘴内外压力差,即喷嘴压力,Pa。

喷嘴出口过流断面面积^[9]为

$$A_p = \frac{Q}{C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} \tag{5}$$

由图 1 可知,长圆喷嘴出口截面面积为

$$A_p = \pi r^2 + (a - b)b \tag{6}$$

式中, r 为半圆半径,m。

由于 $b = 2r$,令 $e = a/b$ 为喷嘴出口截面长宽比,则式(6)可以表示为

$$A_p = \pi r^2 + 2r(2re - 2r) \tag{7}$$

由于喷嘴出口长宽比对射流特性有影响^[8],因此对于预先给定的一组 e 、 A_p ,可由公式(7)确定其

截面半圆半径 r ,进而确定截面长度 a 及宽度 b 。

图 2 为设计的长圆喷嘴的实物图。表 1 为设计的 7 种长圆喷嘴的结构参数值,其中扁圆柱段均为 $1.5d$ (d 为喷嘴出口当量直径),喷嘴总长 h 为 23 mm。

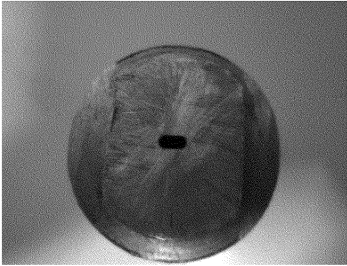


图 2 长圆喷嘴实物图

Fig. 2 Physical diagram of nozzle with elliptical exit

表 1 长圆喷嘴结构参数

Table 1 Structural parameters of nozzle with elliptical exit

编号	长宽比 e	出口直径 d /mm
1	1.2	2.5
2	1.6	2.5
3	2.0	2.5
4	2.4	2.0
5	2.4	2.5
6	2.4	3.0
7	2.4	3.5

2 数值计算方法

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对流场进行模拟。Realizable $k-\varepsilon$ 模型与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比,不仅能够更好地预测射流的扩散性,而且能够表现出射流流场中漩涡、强流线的弯曲等现象。Realizable $k-\varepsilon$ 模型中采用了 Reynolds 等提出的新的涡黏公式,公式中的系数 c_u 不再为常数,而是随着时均流动以及湍流变化而相应变化。对于不可压缩流体,不考虑浮力项,Realizable $k-\varepsilon$ 模型的湍动能 k 方程和湍动能耗散率 ε 方程的时间平均输运方程^[10-11]为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho c_1 \varepsilon \sqrt{2s_{ij}s_{ij}} - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\mu_t \varepsilon / \rho}} \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t s_{ij}s_{ij} - \rho \varepsilon \tag{9}$$

其中

$$c_1 = \max \left(0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \quad s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\eta = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}} \frac{k}{\varepsilon}, c_u = \frac{1}{A_0 + A_x \frac{k\sqrt{s_{ij}s_{ij}}}{\varepsilon}},$$

$$A_x = \sqrt{6} \cos \varphi, \mu_1 = \rho c_u \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

式中, μ 为液体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ 为液体密度, kg/m^3 ; μ_1 为液体湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。各常数的取值如为: $c_2 = 1.9$, 湍动能耗散率的湍流 Prandtl 数 $A_0 = 4.04$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, 湍动能的湍流 Prandtl 数 $\sigma_k = 1.0$ 。

采用有限体积法对流动的各控制方程进行离散, 其中对流项采用二阶迎风格式进行离散, 扩散项采用中心差分进行离散。连续性方程与动量方程的联立耦合求解则采用 SIMPLE 算法^[12]。

3 模拟结果分析

模拟中喷嘴入口压力为 20 MPa。为了能够更清晰地显示出长圆喷嘴射流流动结构的不同, 选取了锥形喷嘴做对比, 其出口直径与长圆喷嘴的出口直径相同, 为 2.5 mm。

3.1 射流扩散性

图 3 中给出了长圆喷嘴和锥形喷嘴速度等值线。从图 3 中可以看出: 沿长轴和短轴方向长圆喷嘴射流均具有一定的扩散性, 且短轴剖面上的扩散角大于长轴剖面上的扩散角; 相同条件下长圆喷嘴扩散性大于锥形喷嘴。因此在相同条件下扩孔时, 长圆喷嘴射流覆盖面积要大于锥形喷嘴的。

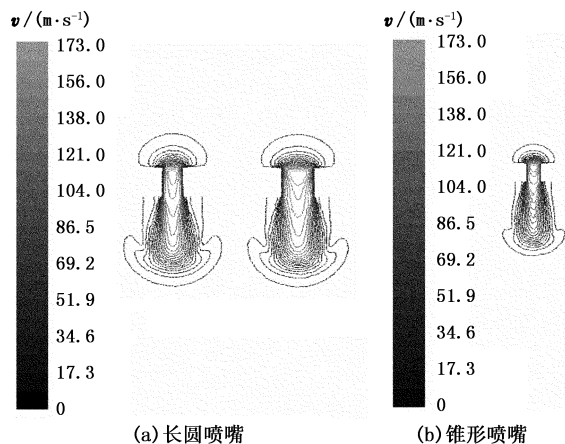


图 3 长圆喷嘴和锥形喷嘴剖面速度等值线

Fig. 3 Velocity contour of nozzle with elliptical exit and cone nozzle

3.2 喷嘴内部流场

图 4 为喷嘴内部压力分布。可以看出, 在喷嘴内部流场中, 压力的改变主要是在扁圆柱段。在扁圆柱段之前喷嘴内流场的压力损失很小, 主要是喷

嘴内壁对水流的阻力引起的。在靠近扁圆柱段时压力急剧减小, 在喷嘴出口处出现负压, 此时射流速度达到最高。

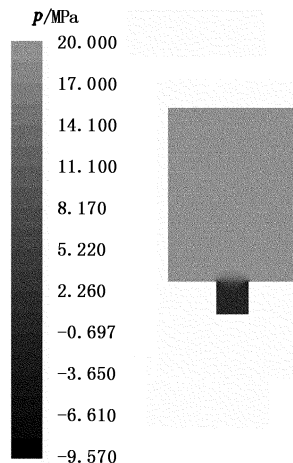


图 4 喷嘴内部压力分布

Fig. 4 Pressure distribution in nozzle interior

喷嘴内沿轴线不同位置处射流速度分布如图 5 所示。可以看出长圆喷嘴内部速度的变化趋势为: 入口段射流速度基本保持不变, 当接近扁圆柱段时速度急剧增加, 这是因为压能转化为动能的缘故; 长宽比不同的 3 种喷嘴内沿轴线不同位置处, 射流速度随着长宽比增加而减小, 且喷嘴出口速度随着长宽比的增加而减小。这是因为长宽比越大, 短轴长度越小, 喷嘴出口越狭小, 射流阻力越大, 紊流强度变大, 喷嘴内部能量损失较大; 在喷嘴入口速度和出口直径相同的情况下, 长圆喷嘴射流出口速度小于锥形喷嘴的。

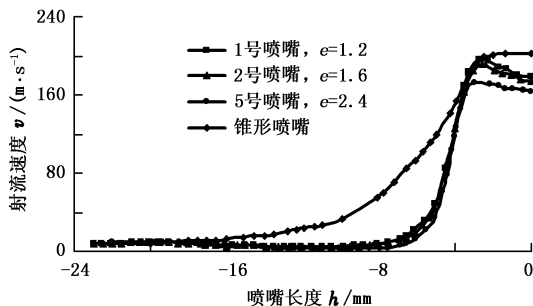


图 5 喷嘴内部轴线上速度分布

Fig. 5 Axis velocity distribution in nozzle interior

图 6 为不同出口直径下的长圆喷嘴内沿轴线不同位置处射流速度分布。由图 6 可以看出, 在入口速度和出口长宽比相同的条件下, 喷嘴内轴线速度变化趋势相同, 随着喷嘴出口直径的增大喷嘴出口速度增加。因为喷嘴出口直径增加, 使得出口断面面积增加, 射流流道变宽, 有利于流体的加速运动。

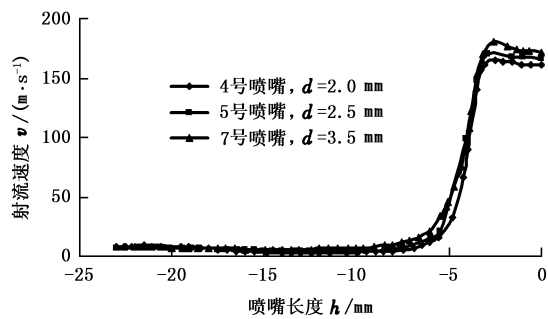


图 6 不同出口直径喷嘴内部轴线上速度分布
Fig. 6 Axis velocity distribution of nozzle with different outlet diameter

3.3 喷嘴外部流场

图 7 为长圆喷嘴和锥形喷嘴外射流轴线速度变化趋势。从图 7 中可以看出:长圆喷嘴射流速度衰减趋势同锥形喷嘴,喷嘴外轴线上的速度均随喷距增加而减小;当无因次喷距小于 11.3 时,长圆喷嘴外轴线射流轴线速度小于锥形喷嘴的,但当无因次喷距大于 11.3 时,长圆喷嘴外射流轴线速度大于锥形喷嘴的,因此长圆喷嘴比锥形喷嘴更适合应用于喷距较大的情况下破岩;在出口速度相同的情况下,

当无因次喷距小于 1.8 时,3 种长圆喷嘴轴线速度基本相同,当无因次喷距大于 1.8 时,在相同的喷距处,出口截面长宽比越大,射流速度衰减越快,且相同位置处轴线速度越小。

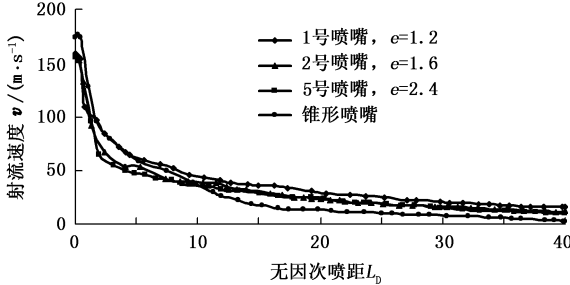


图 7 喷嘴外射流轴线速度分布
Fig. 7 Axis velocity distribution in nozzle external

3.4 射流断面速度分布

图 8 为不同喷距处射流断面的速度($r_{0.5}$ 为断面上速度为轴心速度 1/2 处的径向距离, v_m 为射流轴心处速度)分布。从图 8 中可以看出,喷距越大,速度分布越平坦,射流宽度也越大,即射流的扩散性;3 个断面上的无因次速度曲线几乎重合,体现了射流的自模性^[13]。

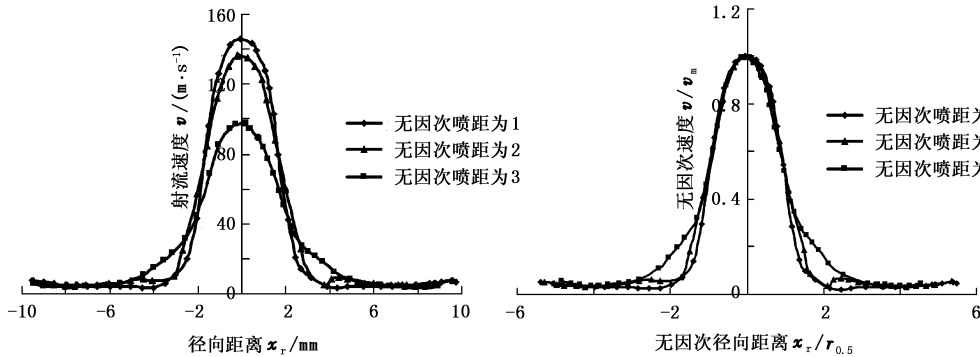


图 8 喷嘴外射流断面速度分布
Fig. 8 Jet sectional velocity distribution in nozzle external

4 数值方法的试验验证

对长圆喷嘴进行了磨料射流扩孔试验,并与锥形喷嘴进行对比。在相同的试验条件下,选取出口直径均为 2.5 mm 的长圆喷嘴和锥形喷嘴。图 9 为试验结果。从图 9 可以看出,长圆喷嘴的扩孔宽度大于锥形喷嘴,即长圆喷嘴的扩散性大于锥形喷嘴。这与数值模拟结果相吻合。

图 10 为长圆喷嘴在不同喷距下的试验结果。可以看出,随着喷距的增加射流扩孔宽度增加。由

此可知随着喷距增大射流的宽度增大,这与数值模拟结果相互吻合。

目前径向水平井大直径扩孔中通常选用的是锥形喷嘴,这种喷嘴射流覆盖面积较小,因此扩孔时需要安装多个喷嘴,这就增加了地面泵的排量。在相同排量下长圆喷嘴射流覆盖面积较锥形喷嘴大,因此扩孔宽度较锥形喷嘴大,故在一定喷距范围内适当的选取长圆喷嘴能够减小地面泵的排量,提高扩孔效率。

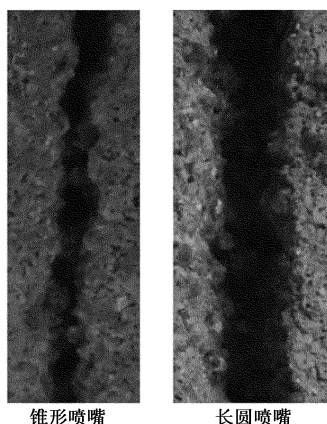


图9 锥形喷嘴和长圆喷嘴扩孔结果对比

Fig.9 Contrast of reaming effect of cone nozzle and nozzle with elliptical exit

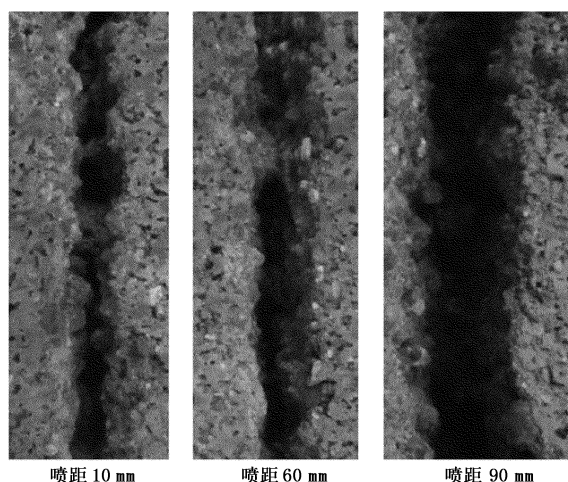


图10 不同喷距下长圆喷嘴扩孔结果

Fig.10 Reaming results of nozzle with elliptical exit for different standoff distance

5 结 论

(1)长圆喷嘴射流具有一定的扩散性,且短轴剖面上的扩散角比长轴剖面上大。喷嘴内射流速度及出口速度随着长宽比的增大而减小;出口直径越大射流出口速度越大;射流断面宽度随喷距增大而增大,且射流具有自模性。

(2)在出口直径及压降相同的条件下,长圆喷嘴的扩散角大于锥形喷嘴的;模拟条件下,当无因次喷距小于11.3时,锥形喷嘴轴线速度大于长圆喷嘴的,无因次喷距大于11.3时,锥形喷嘴轴线速度则小于长圆喷嘴的,故长圆喷嘴比锥形喷嘴更适合应用于所需喷距较大的情况下破岩。

(3)相同条件下长圆喷嘴较锥形喷嘴射流宽度大,故一定喷距范围内适当的选取长圆喷嘴,能够减

小地面泵的排量,提高扩孔效率。

参考文献:

- [1] 施连海,李永和,郭洪峰,等. 高压水射流超短半径水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2001,29(5): 21-22.
SHI Lian-hai, LI Yong-he, GUO Hong-feng, et al. Radial horizontal drilling techniques with high pressure water jet[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001,29(5):21-22.
- [2] 杨永印,杨海滨,王瑞和,等. 超短半径辐射分支水平钻井技术在韦5井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2006,28(2): 11-14.
YANG Yong-yin, YANG Hai-bin, WANG Rui-he, et al. Application of ultra-short radius radial wells drilling technology in Wei-5 well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(2):11-14.
- [3] 黎亮,郑双进. TK1202井盐上裸眼井段扩孔工艺技术[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版, 2008,10(5):32-35.
LI Liang, ZHENG Shuang-jin. Open hole uppevaporite bed reaming technology on TK1202 well[J]. Journal of Chongqing Institute of Science and Technology (Edition of Natural Science), 2008,10(5):32-35.
- [4] 梁运培,孙东玲,董钢锋. 高压水射流扩孔技术的研究[J]. 煤炭科学技术, 2001,29(10):28-31.
LIANG Yun-pei, SUN Dong-ling, DONG Gang-feng. Research on bore hole enlarging technology with high water jet[J]. Coal Science and Technology, 2001,29(10):28-31.
- [5] 李应有,崔砚英,张万隆,等. 秋南1井巨厚盐膏层扩孔技术[J]. 石油钻采工艺, 2008,30(4):103-110.
LI Ying-you, CUI Jian-ying, ZHANG Wan-long, et al. Reaming techniques for huge gypsums in Qiunan-1 well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008,30(4):103-110.
- [6] 唐世春,崔龙兵. 小井眼扩孔技术在塔河油田的应用[J]. 石油钻探技术, 2001,29(3):35-36.
TANG Shi-chun, CUI Long-bing. Applications of the slim-hole reaming techniques in Tahe oil field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001,29(3):35-36.
- [7] 于海平,刘虎. HR型液压式扩孔器在埃及GPC油田的应用[J]. 石油钻探技术, 2005,33(4):56-57.
YU Hai-ping, LIU Hu. Applications of the HR type of hydraulic reamer to the GPC Oilfield in Egypt[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005,33(4):56-57.

(下转第90页)