

苏里格气田不同动力介质射流泵效率模拟研究

张永才¹, 石书强^{1*}, 汪雄雄², 赵峥延², 王亚宁¹, 王鑫¹

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院 重庆

²中国石油长庆油田公司油气工艺研究院 陕西西安

【摘要】针对苏里格气田高含水区平面上气水分布复杂多变, 气井生产周期内产气、产水量变化较大、排液困难问题, 现场进行了射流泵排水采气工艺先导性试验, 取得了一定效果, 但在射流排采先行试验中, 气动与液动射流泵泵效高低不明确为排采制度及模式的确立带来不便。为明确气动与液动射流泵效高低, 本文采用CFD数值模拟技术, 利用多面体网格划分技术, 模拟了天然气和地层水作为动力流体的射流泵在不同流量比下的效率。结果表明, 在流量比小于1.0时, 液动射流泵的最大泵效为16.7%, 而气动射流泵在流量比小于0.5时的最大泵效为9.8%, 单考虑射流泵内部能量转换时, 液动射流泵在效率和工作区间上均优于气动射流泵。

【关键词】苏里格气田; 射流泵; 数值模拟; 排水采气; 泵效

【收稿日期】2026年4月15日 **【出刊日期】**2026年5月14日 **【DOI】**10.12208/j.pngc.20260001

Simulation study on efficiency of jet pumps with different power media in Sulige Gas Field

Yongcai Zhang¹, Shuqiang Shi^{1*}, Xiongiong Wang², Zhengyan Zhao², Yaning Wang¹, Xin Wang¹

¹School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²Oil and Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Xi'an, Shaanxi

【Abstract】In response to the complex and variable gas-water distribution in the high water-cut area of the Sulige Gas Field, the large variations in gas and water production during the well production cycle, and the difficulty in liquid drainage, a pilot test of jet pump drainage and gas production technology was conducted in the field, achieving certain results. However, the unclear pump efficiency between pneumatic and hydraulic jet pumps in the pilot test hindered the establishment of drainage systems and models. To clarify the efficiency of pneumatic and hydraulic jet pumps, this paper uses CFD numerical simulation technology and polyhedral mesh generation technology to simulate the efficiency of jet pumps using natural gas and formation water as power fluids at different flow ratios. The results show that when the flow ratio is less than 1.0, the maximum pump efficiency of the hydraulic jet pump is 16.7%, while that of the pneumatic jet pump is 9.8% when the flow ratio is less than 0.5. Considering only the internal energy conversion of the jet pump, the hydraulic jet pump is superior to the pneumatic jet pump in both efficiency and operating range.

【Keywords】Sulige Gas Field; Jet pump; Numerical simulation; Drainage gas recovery; Pump efficiency

前言

射流泵是利用伯努利原理将地面的高压低速动力流体的能量通过井筒传递到井底, 并通过射流泵喷嘴转化为低压高速的能量排液采气的举升技术^[1]。射流泵举升最突出优点是整体没有运动部件, 射流

泵整体部件包含喷嘴、喉管、扩散管等, 其结构简单, 整个构造形成一个整体, 密封性好, 不易损坏, 检修周期长, 起下泵方便, 几乎可以适用于任意工作筒当中^[2]。由于这种举升技术依靠流体传递能量, 比较容易发挥流体的独特优势, 对气田的开发有非

*通讯作者: 石书强(1990-)男, 博士, 硕士导师, 主要从事排水采气理论与技术研究。

常强的适应性^[3]。

VOGEL 通过理论分析与室内实验,对射流泵的自身性能进行了优化,发现射流泵的效率最高可以达到 40% (现实中实际泵效一般为 30%左右)^[4],但在现场实际应用时,泵效基本低于 30%。因此本文确定射流泵结构参数,利用 CFD 方法数值模拟射流泵更换天然气与地层水等不同的动力流体,不断增大流量比范围时,气动与液动射流泵喷嘴入口、吸入口与扩散管出口端面上的压力,由射流泵泵效计算公式确定气动与液动射流泵泵效高低。

1 建模与网格划分

根据常用射流泵的结构特征,抽取射流泵内部



图 1 射流泵流体域建模及网格划分

2 控制方程

射流泵内部流体受到质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律的控制,若流动中包含不同组分或相间相互作用,需遵循组分守恒定律,当流体流动为湍流流动时,还要增加湍流的输运方程,即基本控制方程就是对上述定律的数学描述,在流体流动的过程中,使用下列基本控制方程对流体进行描述:连续性方程、动量守恒方程和能量方程。射流泵内部流体的运动控制方程主要为连续性方程、动量守恒方程和能量方程。本文主假设流动过程中不存在热量传导,忽略能量方程。连续性方程为^[5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

式中, ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u_x 、 u_y 、 u_z 分别为流体微元在 x 、 y 、 z 轴方向上的速度分量, m/s 。

动量守恒方程^[6]:

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial P_0}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial P_0}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_z \end{cases} \quad (2-2)$$

流体域,构建三维流道模型。为保证建模的准确性和仿真效果,模型将按照实际尺寸进行建立,并考虑到流体流动的复杂性。几何模型的建立过程中,重点关注射流泵内各个流道的形状、尺寸及其相互关系,射流泵喷嘴直径 2.3mm,喉管直径 3.9mm,喉管长度 114mm。完成建模后,将模型网格划分为多面体网格,网格数量 54000。

根据现场基本工况,设置喷嘴入口为速度入口,引射流体入口为速度入口,扩散管出口为压力出口。动力液流量 $100\text{m}^3/\text{d}$,动力气流量 $10000\text{m}^3/\text{d}$,射流泵扩散管出口压力为大气压,由流量比计算公式分别计算得到 0.1~3.0 时引射流体流量。

动量守恒方程又称纳维—斯托克斯方程。式中, P_0 为静压值, Pa ; τ_{ij} (i 、 j 分别取 x 、 y 、 z) 为应力的张量, Pa ; f_k (k 分别取 x 、 y 、 z) 为重力的体积力, N/m^3 。

VOF 模型通过求解多相流体积分数来追踪界面,对于第 m 相流体,模型方程^[7]:

$$\frac{1}{\rho_m} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_m \rho_m) + \frac{1}{\rho_m} [\nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \mathbf{v}_m)] = 0 \quad (2-3)$$

式中, ρ_m 为 m 相的密度, \mathbf{v}_m 为 m 相的速度, α_m 为 m 相的体积分数 (在网格内,取值为 0, 1 或介于两者之间)。

$\alpha_m = 0$: 网格单元中没有第 m 相流体

$\alpha_m = 1$: 网格单元中充满第 m 相流体

$0 < \alpha_m < 1$: 网格单元中存在第 m 相流体与其他相流体

主相体积分数由下式计算:

$$\sum_{m=1}^n \alpha_m = 1 \quad (2-4)$$

取决于所有相体积分数的动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + F_{vol} \quad (2-5)$$

式中, F_{vol} 为体积力, \mathbf{g} 为重力加速度。

Realizable k-ε模型自带旋流修正, 其对旋转流动、流动分离、平板与圆柱射流、复杂二次流等具有精确模拟结果^[8-9], Realizable k-ε方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_\varepsilon S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} C_3 G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2-6)$$

其中 $C_\varepsilon = \max \left[\frac{0.43}{\eta + 5} \right]$, $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$ 。

式中, S_{ij} 为时均应变率, s^{-1} ; S 为平均应变率的张量模量。

计算模型为 VOF 模型, 湍流模型为 Realizable k-ε模型, 进口边界为速度入口, 出口边界为压力出口, 压力为大气压力, 流体介质为气液两相。

3 压力比及泵效计算公式

射流泵的性能大小通过射流泵泵效大小来反映。不同结构参数的射流泵, 存在不同的工作特性, 使得射流泵计算泵效方式没有标准化。因此在分析其工作特性时, 通常用无量纲的参数描述射流泵的工作特性^[10]。

$$H = \frac{P_2 - P_3}{P_1 - P_2} \quad (3-1)$$

$$M = \frac{q_3}{q_1} \quad (3-2)$$

$$E = \frac{q_3(P_2 - P_3)}{q_1(P_1 - P_2)} = M \times H \quad (3-3)$$

式中, E 为射流泵泵效; M 为无量纲流量比; H 为无量纲压力比; q_3 为被引射流体体积流量, m^3/d ; q_1 为被动力流体体积流量, m^3/d ; P_1 为喷嘴入口压力, Pa; P_2 为扩散管出口压力, Pa; P_3 为吸入口压力, Pa。

4 泵效对比分析

4.1 液动射流泵泵效分析

提取不同流量比的液动射流泵内部流场速度云图, 如图 2 所示, 随着流量比的增大, 流体在喉管内的流速逐渐降低, 且降低幅度变大, 由伯努利定理得, 喷嘴出口流速越大, 喷嘴出口压力越低, 即泵效定义式中压力比越低。

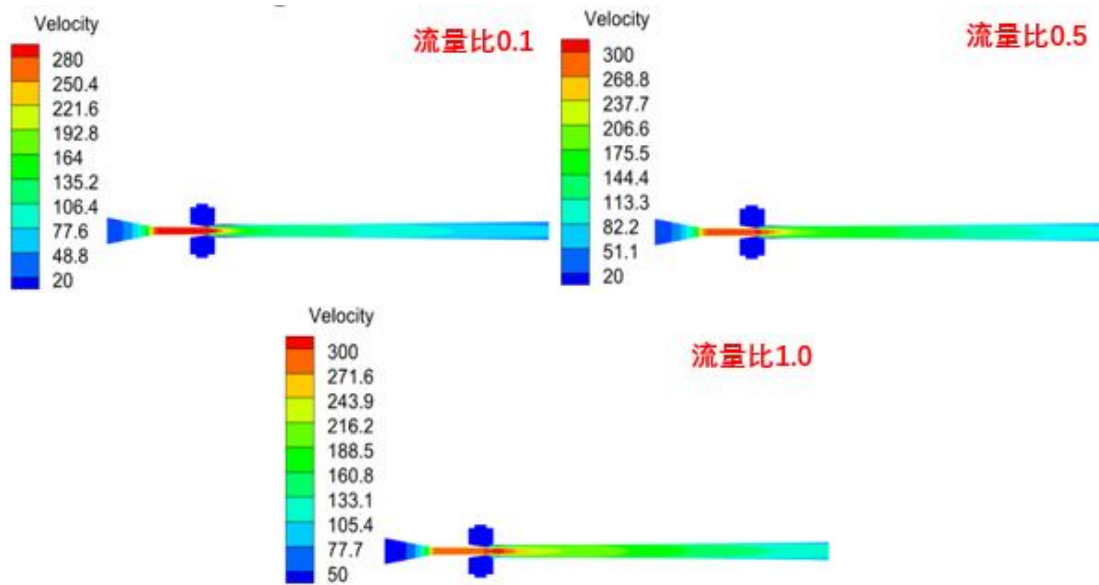


图 2 流量比 0.1、0.5、1.0 时液动射流泵内部流场速度分布

4.2 气动射流泵泵效分析

提取不同流量比的气动射流泵内部流场速度云图, 如图 1-3 所示, 随着流量比的增大, 流体在喉管内的流速逐渐降低, 且降低幅度变大, 由伯努利定理得, 喷嘴出口流速越大, 喷嘴出口压力越低, 即泵效定义式中压力比越低。

由表 1 及图 5 所示, 液动射流泵流量比工作区间小于 3, 随着流量比的增大, 泵效先增大后减小, 在流量比 0.5 时泵效最大, 最大泵效为 16.7%; 气动射流泵流量比工作区间小于 0.5, 随着流量比的增大, 泵效先增大后减小, 在流量比 0.2 时泵效最大, 最大泵效为 9.8%。

4.3 气动液动射流泵泵效对比

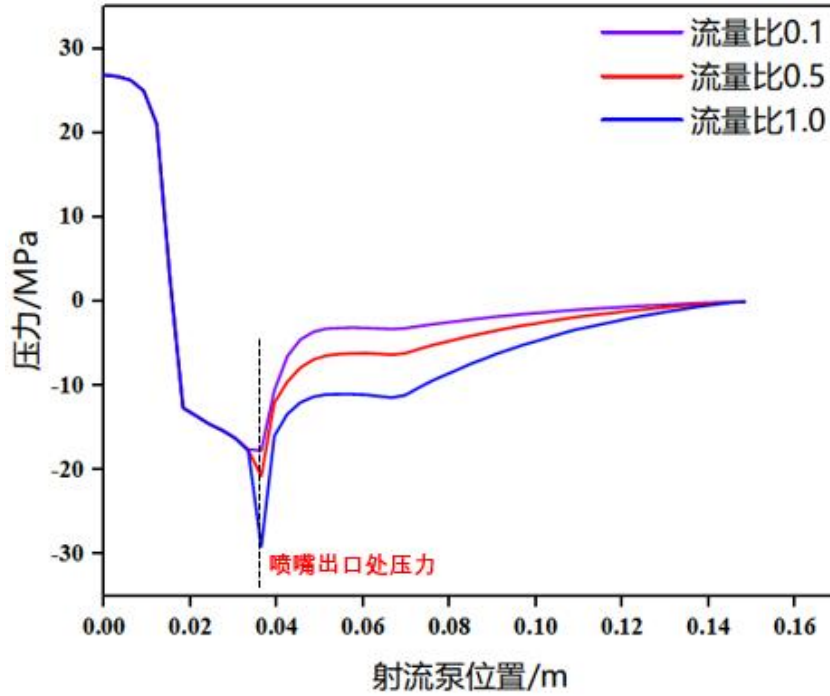


图 3 流量比 0.1、0.5、1.0 时液动射流泵中心轴线压力分布

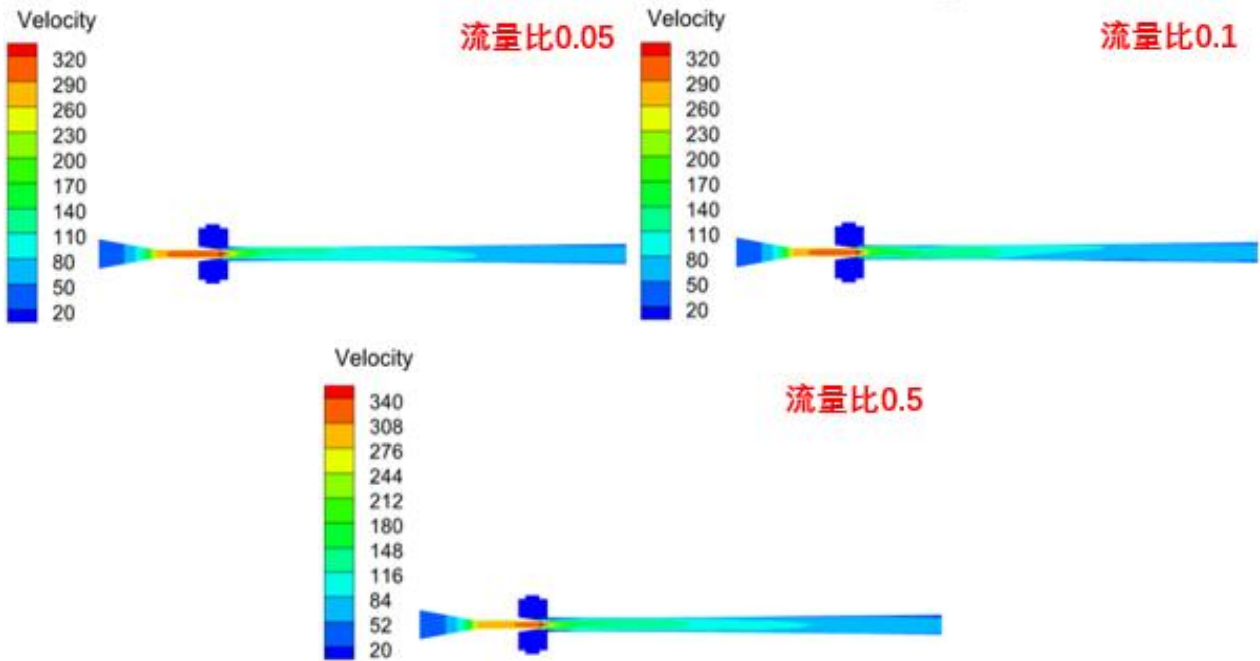


图 4 流量比 0.05、0.1、0.5 时气动射流泵内部流场速度分布

表 1 气动液动射流泵压力比及泵效

流量比	气动射流泵压力比	气动射流泵泵效 (%)	液动射流泵压力比	液动射流泵泵效 (%)
0.1	0.51	5.1	0.72	7.2
0.2	0.49	9.8	0.60	12.0
0.3	0.30	9.2	0.50	15.0
0.4	0.15	6.0	0.41	16.5
0.5	0.01	0.5	0.33	16.7
0.6	-	-	0.25	15.5
0.7	-	-	0.18	13.2
0.8	-	-	0.12	9.9
0.9	-	-	0.06	5.8
1.0	-	-	0.007	0.7

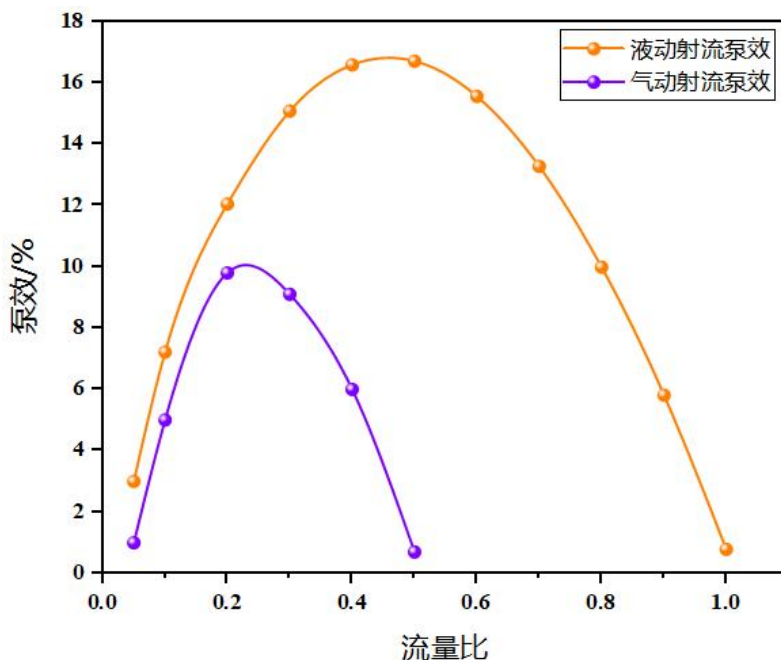


图 5 气动与液动射流泵泵效对比

5 结论

(1) 气动射流泵流量比工作区间小于 0.5, 最大泵效为 9.8%; 液动射流泵流量比工作区间小于 1, 最大泵效为 16.7%;

(2) 分别选择天然气与水作为动力流体对同一结构参数的射流泵进行数值模拟分析, 并根据泵效定义式计算气动与液动射流泵泵效, 模拟结果表明液动射流泵泵效与工作区间都优于气动射流泵;

(3) 研究结果不仅为苏里格气田的排采制度和模式的确立提供了理论依据, 也为类似气田的排水采气工艺提供了技术支持。液动射流泵的优越性能表明, 在高含水气田中, 选择适当的动力流体对提高排采效率具有重要意义。

参考文献

- [1] 张琪.采油工程原理与设计[M].东营:中国石油大学出版社,2000.
- [2] 王鸿勋,张琪.采油工艺原理[M].北京:石油工业出版社,1989.
- [3] 布朗 KE.升举法采油工艺[M].卷二下.孙学龙等译.北京:石油工业出版社,1987.
- [4] 李同卓.蒙特卡罗法对射流泵内部流场的数值模拟[D].武汉大学,2005.
- [5] 王志亮,周东慧,褚浩元,等.射流泵对高低压储层的共采流场仿真分析[J].机床与液压,2023,51(04):127-134.

- [6] Batchelor, G.K., 1967. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge Univ.Press, Cambridge, England
- [7] Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comput. Phys. 39 (1), 201–225.
- [8] Yokoi, K., 2007. Efficient implementation of THINC scheme: a simple and practical smoothed VOF algorithm. J. Comput. Phys. 226 (2), 1985–2002.
- [9] Launder, B.E., Spalding, D.B., 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England.
- [10] 王常斌,林建忠,石兴.射流泵湍流场的数值模拟与实验研究[J].高校化学工程学报,2006,(02):175-179.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS