

排水用马赫激波雾化器喷嘴优化设计

高秀丽¹, 邱晓宁², 侯万滨³, 鲍作帆¹, 李飞², 陈世春²

1. 中国石油集团渤海钻探工程公司油气合作开发分公司 天津 300280

2. 中国石油集团渤海钻探工程公司工程技术研究院 天津 300280

3. 中国石油大港油田公司检测监督评价中心 天津 300280

通讯作者: Email: xiaoning0018@126.com

项目支持: 中国石油集团渤海钻探工程公司项目“苏里格合作区块低产井激波雾化排水技术研究”(2018ZD12K-05)

引用: 高秀丽, 邱晓宁, 侯万滨, 等. 排水用马赫激波雾化器喷嘴优化设计[J]. 油气井测试, 2022, 31(5): 1-5.

Cite: GAO Xiuli, QIU Xiaoning, HOU Wanbin, et al. Structural optimization and application of mach shock atomizer nozzle for drainage[J]. Well Testing, 2022, 31(5): 1-5.

摘要 为解决天然气开采过程中气井的积液问题, 提出了一种基于经典拉瓦尔喷管结构的激波雾化喷管, 该结构的型线可进一步提升携液气流速度, 加强雾化排水效果。通过对第 1 代喷嘴结构型线的重新优化, 设计出第 2 代激波雾化喷嘴, 并应用 CFD 数值方法对新旧两种结构雾化器在不同安放深度下的雾化携液能力进行了对比分析。结果显示, 优化后的拉瓦尔喷管结构相比之前的结构压损更小, 对流经的介质具有一定的提速作用, 取得了较好的现场应用效果。第 2 代激波雾化喷嘴较好地解决了天然气开采过程中气井的积液问题, 对气井排水增产提供帮助。

关键词 气井积液; 排水采气; 激波雾化喷嘴; 拉瓦尔喷管; 型线优化; 安放深度; CFD 数值方法; 携液能力

中图分类号: TE375 文献标识码: A DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.05.001

Structural optimization and application of mach shock atomizer nozzle for drainage

GAO Xiuli¹, QIU Xiaoning², HOU Wanbin³, BAO Zuofan¹, LI Fei², CHEN Shichun²

1. Oil and Gas Cooperative Development Branch, CNPC Bohai Drilling and Engineering Co., Ltd., Tianjin 300280, China

2. Institute of Petroleum Engineering Technology, CNPC Bohai Drilling and Engineering Co., Ltd., Tianjin 300280, China

3. Inspection, Supervision and Evaluation Center of PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjing 300280, China

Abstract: In order to solve the problem of fluid accumulation in gas wells during natural gas extraction, a shock wave atomization nozzle based on the classical Laval nozzle structure was proposed. However, changing the structural profile of the Laval nozzle would cause changes in the shape of the flow path, which would further affect the acceleration ability of the gas flow and eventually affect the effect of shock wave atomization of fluid accumulation. After optimization of the Laval nozzle structure profile, the 2nd generation excited wave atomization nozzle was designed, and the liquid-carrying capacity of the new and old structure atomizers was analyzed by CFD method at different placement depths. The results show that the optimized Laval nozzle structure has lower flow pressure loss and improved speed-up effect compared with the previous structure, and it has achieved better field application results. The 2nd generation shock wave atomization nozzle can better solve the accumulation of liquid in gas wells during natural gas production, and help to drain liquid from gas wells to increase production.

Keywords: fluid accumulation in gas wells; drainage gas recovery; shock wave atomization nozzle; Laval nozzle; profile optimization; placement depths; CFD method; liquid-carrying capacity

天然气井筒在开采过程中容易出现因液体淤积导致的气井积液现象, 这一现象在低产气井尤为显著。马赫激波雾化排水采气技术是一种仅依靠气井自身能量便可实现连续排液生产的新型气井积液排除技术。该技术应用激波震荡与超音速耦合的原理进行雾化携液, 而其中的音速雾化喷嘴携液单元的设计直接关系到雾化与举升扬程的效果。

其利用拉瓦尔喷管加速气体达到超声速状态, 使得液滴被高速气体撕碎以便于随气体排出, 从而保障了气井生产的连续性。

拉瓦尔喷管又称收缩—扩张型喷管, 是一种典型的能量转换结构, 气体在其内部流动过程中将热焓能转变为动能, 最终获得超声速气流。由于在气井底部高温高压流动条件下, 很多动力设备通过合

理的设计后可以将携液速度提升至几倍音速。液体在雾化器扩口处的含液气体在超高音速气流及激波振动作用下被强烈的卷吸、剪切,将液滴撕裂和剪切成极其微小的液滴,气液间急剧混合,卷吸,均匀化,从而达到充分雾化,使携液气体仅依靠气井自身能量便可将雾化的液滴携出井口,实现排液增产。目前,利用拉瓦尔喷管实现雾化的方法已经得到了很多研究。NAGAO 等^[1]对拉瓦尔喷管膨胀的剪切层非平衡压缩进行了研究,结果表明非平衡压缩对喷嘴的卷吸作用产生显著影响。刘智刚^[2]进行了拉瓦尔喷管气动特性虚拟仿真实验,进一步揭示激波诱导边界层分离现象、声速线与正激波形成过程的内在机理。HEMIDI 等^[3]在对超音速喷射器进行数值仿真时发现 $k-\varepsilon$ 模型的精度最高,并通过试验验证了这一结果。刘静等^[4]通过数值模拟和试验对超声速气流中的横向射流雾化过程进行深入研究。赵向锋^[5]进行了基于拉瓦尔效应的气水两相喷雾数值模拟研究,发现液体压力、气液压力比、扩张段半锥角是影响拉瓦尔喷嘴雾化效果的主要应诉。邱晓宁^[6]应用 PSV 技术对气井用激波雾化喷管的效果进行了试验,发现激波喷管可有效降低液滴粒径,提升携液能力。但从目前的文献资料分析,国内外关于拉瓦尔雾化喷嘴方面的研究主要针对不同工质的雾化效果^[7-13],关于拉瓦尔结构型线对雾化效果与举升高度影响的研究较少。

鉴于马赫激波雾化器在研发后现场应用的效果显示,最主要的技术点还是雾化排液量与有效举升高度。因此,为了提升雾化器的适用范围,结合雾化器真实的工作环境,简单照搬经典拉瓦尔喷管结构并不适用,故需对雾化器的音速雾化喷嘴携液举升单元进一步优化设计。通过喷嘴的进口压力数值模拟其在气井下的不同安放深度,应用 CFD 数值模拟方法对优化后的雾化单元进行了效果仿真,并与现在激波雾化器应用的喷嘴进行了对比分析,为井下激波雾化器的设计及使用提供了理论和工程指导。

1 数值模型

为了得到尽量真实的仿真结果,对新旧两代喷嘴模型进行等比例建模,并通过合理的边界条件设置、网格离散化、湍流模型选择与计算方程确定,对模型的流域进行高保真仿真分析。

1.1 喷嘴模型设计及优化

图 1 为基于经典拉瓦尔喷管结构设计的第 1 代激波雾化喷嘴的三维剖面图和二维平面图。

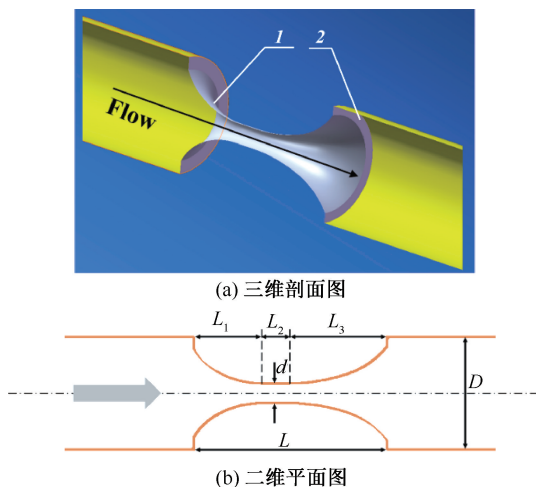


图 1 第 1 代激波雾化喷嘴的三维剖面图和二维平面图
Fig. 1 Full-profile 3D view and 2D plan view of the 1st generation of shockwave atomization nozzle

可以看出,激波喷嘴包括渐缩段(图中标注 1 位置)和渐扩段(图中标注 2 位置)两部分,渐缩段与渐扩段在喉道位置水平相切。根据等熵流动理论,井底高压低速气流经过喷嘴渐缩段,气流被压缩速度升高,在喉道处达到临界状态,临界状态气流经喷嘴渐扩段膨胀,气流被加速到超声速状态。为了进一步提升喷嘴的气动性能,采用 Bezier 曲线对激波喷嘴外形进行参数化建模。贝塞尔曲线是应用于二维图形建模的数学曲线,是 B-Spline 的一种特殊形式。Bezier 曲线由线与控制点组成,控制点可以自由移动,线段首尾相连构成控制多边形。

本文采用 10 个控制点,以确保构造灵活多变且光顺的喷嘴构型,进一步开展高效的气动优化设计,较第 1 代喷嘴,渐缩段和渐扩段的型线变化的更加缓和,优化后的第 2 代激波雾化喷嘴如图 2 所示。

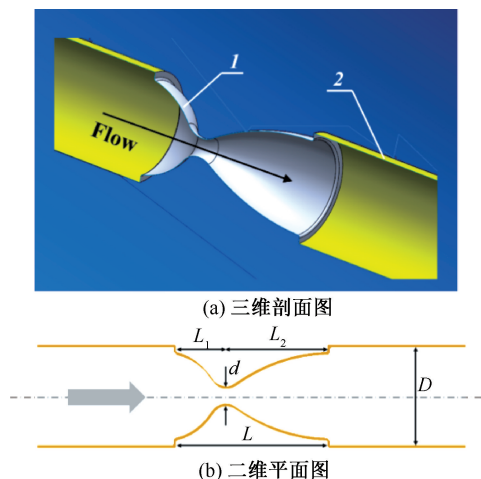


图 2 第 2 代激波雾化喷嘴的三维剖面图和二维平面图
Fig. 2 Full-profile 3D view and 2D plan view of the 2nd generation of shockwave atomization nozzle

1.2 CFD 数值模型及设置

为了简化计算量,在开展 CFD 计算时采用旋转轴对称模型。图 3 为新旧两代喷嘴的网格,网格数目在 8 万左右。为保证计算精度,在喉口部位进行了网格加密。



图 3 新旧两代激波雾化喷嘴的网格示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the grid of the old and new generation of shockwave atomization nozzle

模型的进口边界条件为流量进口,依据 10 000 m³ 的日产气量进行换算获得;出口边界条件为压力出口。分别选取 10 MPa、15 MPa 及 20 MPa 三种不同数值的压力出口来模拟喷嘴的现场安放深度。湍流模型选取 RNG k-ε 模型,该模型修正了湍动黏度,模型常数是利用 RNG 理论推导出来的精确值^[14],考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况,可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动,能够在速度梯度较大的流动问题和低雷诺数粘性流动问题中获得较高的计算精度和收敛速度^[15-16]。

1.3 计算方法

描述流体动力学的方程一般为 3 个:连续方程,动量方程和能量方程,分别从质量、动量和能量守恒定律推导而出。这三个方程也被称为控制方程,是计算流体动力学的基础组成,理论上来说,对任意的流体动力学的物理问题,只要知道了其边界条件,代入到离散的控制方程组中,均可以求得解析解,即流场参数,从而完善人们对这一物理现象的理解。

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) \\ &= -\nabla p + \nabla \cdot \{ \mu [\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{U}] \} + S_M \quad (2) \end{aligned}$$

能量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} h_{tot}) \\ &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{U} \cdot \tau) + \vec{U} \cdot S_M + S_E \quad (3) \end{aligned}$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m³; t 为时间, s; \vec{U} 为流场

中速度矢量, m/s; S_M 为外部动量源, kg/m²s²; h_{tot} 为总能, J/kg, $h_{tot} = h + \frac{1}{2} \vec{U}^2$; $\nabla \cdot (\vec{U} \cdot \tau)$ 为由于黏性摩擦而做的功, J/m³s; $\vec{U} \cdot S_M$ 为外部动量源而做的功, J/m³s; S_E 为外部能量源, J/m³s。

针对湍流的数值模拟,如果直接将这三个方程离散求解湍流问题,网格总数将达到千万级别,这种方法被称为直接数值模拟(DNS),其使用受限于现在的计算机数据处理能力。近年发展的大涡数值模拟(LES),其核心思想是只对湍流结构中的大尺度结构进行直接求解,对小尺度结构进行模型简化,从而大大减少了计算数据量,但现在仍不能用于工程实践中。目前工程实践中应用最广的是雷诺平均法(RANS)求解方法。该方法对网格分辨率要求较低,但对某些特定类型的流动具有很高的准确性和可信性。实际的天然气喷嘴中研究的马赫数大于 1,因此采用可压缩流计算模型,湍流模型采用 RANS 模型^[17]。

2 计算结果

为了更好的分析两种喷嘴的性能,分别对不同工况下的压力、速度与马赫数的云图进行对比分析。

2.1 出口压力 10 MPa 下的计算结果对比

图 4、图 5 分别展示了出口压力 10 MPa 下第 1 代、第 2 代喷嘴的静压、动压、马赫数及速度云图。

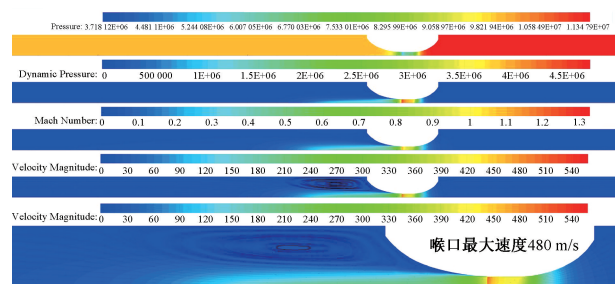


图 4 出口压力 10 MPa 下第 1 代喷嘴的气动性能
Fig. 4 Aerodynamic performance of the 1st generation nozzle at outlet pressure 10 MPa

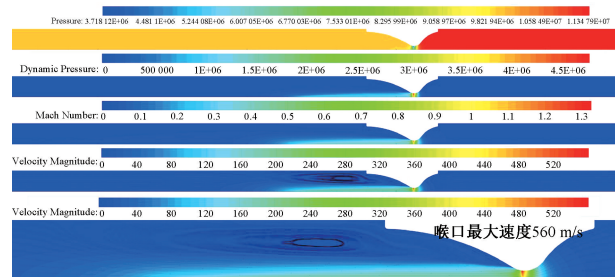


图 5 出口压力 10 MPa 下第 2 代喷嘴的气动性能
Fig. 5 Aerodynamic performance of the 2nd generation nozzle at outlet pressure 10 MPa

对比发现,优化后的第 2 代喷嘴进出口总压差减小 30.175 kPa,喉口速度最大可达 560 m/s,高于第 1 代喷嘴的 480 m/s。同时,喉口部位的马赫数也从 1.1 提升至 1.3。这说明优化后的喷嘴的雾化携液能力更佳,同时压损更小。

2.2 出口压力 15 MPa 下的计算结果对比

图 6、图 7 分别展示了出口压力 15 MPa 下第 1 代、第 2 代喷嘴的静压、动压、马赫数及速度云图。

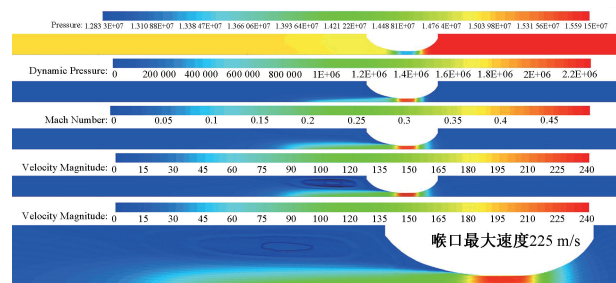


图 6 出口压力 15 MPa 下第 1 代喷嘴的气动性能
Fig. 6 Aerodynamic performance of the 1st generation nozzle at outlet pressure 15 MPa

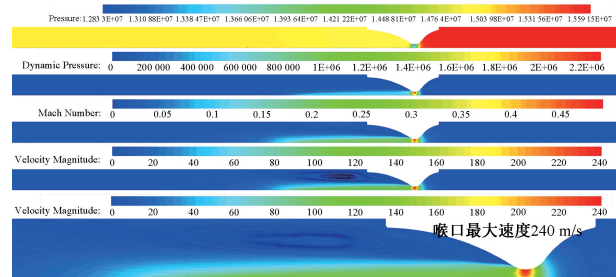


图 7 出口压力 15 MPa 下第 2 代喷嘴的气动性能
Fig. 7 Aerodynamic performance of the 2nd generation nozzle at outlet pressure 15 MPa

对比发现,优化后的第 2 代喷嘴进出口总压差减小 26.412 kPa,喉口速度最大可达 240 m/s,高于第 1 代喷嘴的 225 m/s。同时,喉口部位的马赫数也从 0.45 提升至 0.52,这说明优化后的喷嘴的雾化携液能力更佳。相比出口 10 MPa 工况,喷嘴喉口马赫数有较大的下降,这主要是由于压力高时气体的密度比较大,同样质量流量下气体的速度更小,马赫数减小。这对喷嘴安放深度的选取具有一定的参考意义。

2.3 出口压力 20 MPa 下的计算结果对比

图 8、图 9 分别展示了出口压力 20 MPa 下第 1 代、第 2 代喷嘴的静压、动压、马赫数及速度云图。

对比发现,优化后的第 2 代喷嘴进出口总压差减小 33.442 kPa,喉口速度最大可达 175 m/s,略高于第一代喷嘴的 170 m/s。同时,喉口部位的马赫数也从 0.32 提升至 0.35,提升效果不大。这说明高

压下两种喷嘴的雾化携液能力差距不大。

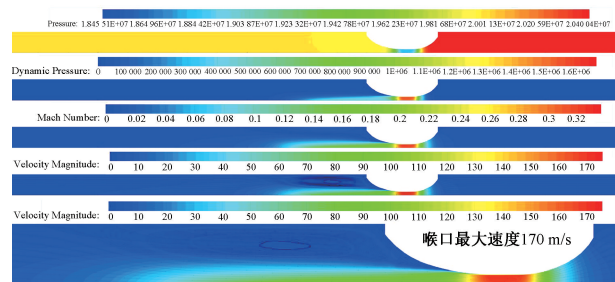


图 8 出口压力 20 MPa 下第 1 代喷嘴的气动性能
Fig. 8 Aerodynamic performance of the 1st generation nozzle at outlet pressure 20 MPa

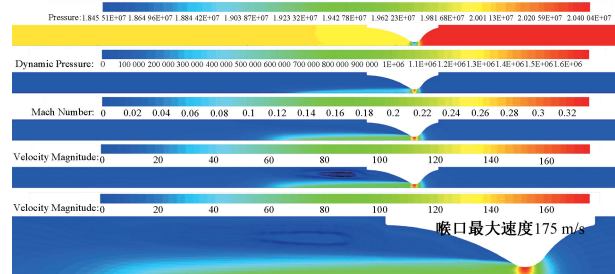


图 9 出口压力 20 MPa 下第 2 代喷嘴的气动性能
Fig. 9 Aerodynamic performance of the 2nd generation nozzle at outlet pressure 20 MPa

3 结论

基于经典拉瓦尔喷管的结构优化设计出第 2 代激波雾化喷嘴结构,通过 CFD 数值方法对新旧两种结构的激波雾化器的雾化携液能力进行了对比分析,为马赫激波雾化器在排水采气工作中的合理化应用提供数据支撑与理论基础,促进了雾化单元的设计认知。

(1)低出口压力下优化后的喷嘴具有更好的气动性能,主要表现在对喉口速度和马赫数的提升,且压力损失更小。高出口压力下优化后的喷嘴气动性能相比优化前提升不明显。

(2)相比出口 10 MPa 工况,出口压力为 15 MPa 和 20 MPa 时喷嘴喉口的马赫数有较大的下降,这主要是由于压力高时气体的密度比较大,同样质量流量下气体的速度更小,马赫数减小。

(3)出口压力越低时马赫数越大,当出口压力为 10 MPa 下,两代喷嘴喉口的马赫数均大于 1,说明当喷嘴安放深度越小时,喷嘴的雾化性能越好。

(4)相比第 1 代喷嘴,第 2 代激波雾化喷嘴较好地解决了天然气开采过程中气井的积液,对气井排液增产提供帮助。

致谢:感谢渤海钻探工程技术与上海交通大学流体实验室对本文的数值仿真工作的支持。

参考文献

- [1] NAGAO J, MATSUO S, HASHIMOTO T, et al. Characteristics of condensing flows in shear layer of axisymmetric supersonic jets [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 56:429-436.
- [2] 刘智刚, 杨晓军, 彭捷. 拉瓦尔喷管气动特性虚拟仿真实验[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(7):106-110.
LIU Zhigang, YANG Xiaojun, PENG Jie. Simulation experiment of aerodynamic characteristics of laval nozzle [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2021, 40(7):106-110.
- [3] HEMIDI A, HENRY F, LECLAIRE S, et al. CFD analysis of a supersonic air ejector Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(8-9):1523-1531.
- [4] 刘静, 王辽, 张佳, 等. 超声速气流中横向射流雾化实验和数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(4):724-729.
LIU Jing, WANG Liao, ZHANG Jia, et al. Experimental and numerical simulation of atomization of liquid jet in supersonic crossflow [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(4):724-729.
- [5] 赵向锋. 基于拉瓦尔效应的气水两相喷雾数值模拟研究[D]. 华北科技学院, 2020.
ZHAO Xiangfeng. Numerical simulation of two-phase air-water spray based on laval effect [D]. North China Institute of Science & Technology, 2020.
- [6] 邱晓宁, 李军. 气井超声速激波雾化喷管的 PSV 试验研究[J]. *石油机械*, 2019, 47(12):106-114.
QIU Xiaoning, LI Jun. PSV experimental study on supersonic shock atomization nozzle for gas well [J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(12):106-114.
- [7] 侯燕. 多喷嘴喷雾冷却实验研究与数值模拟[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2014.
HOU Yan. The experimental study and numerical simulation of multi-nozzle spray cooling [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2014.
- [8] 何志霞, 王芬, 刘菊燕, 等. 柴油机喷嘴结构对喷雾特性影响的耦合模拟研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(24):7-13.
HE Zhixia, WANG Fen, LIU Juyan, et al. Coupled simulation of the effect of diesel nozzle structure on spray characteristics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(24):7-13.
- [9] GERDROODBARY M B, JAHANIAN O, MOKHTARI M. Influence of the angle of incident shock wave on mixing of transverse hydrogen micro-jets in supersonic crossflow [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(30):9590-9601.
- [10] 侯凌云, 侯晓春. 喷嘴技术手册-第2版[M]. 中国石化出版社, 2007:1-13.
- [11] 郑雨国, 李伟鹏, 邱晓宁. 基于改进狼群算法的井下排水采气超声速喷嘴优化[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(31):129-133.
ZHENG Yuguo, LI Weipeng, QIU Xiaoning. Optimization of supersonic nozzle applied to drainage gas recovery based on improved wolf algorithm [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(31):129-133.
- [12] 孔珑. 两相流体力学[M]. 高等教育出版社, 2004:20-35.
- [13] 郭春伶, 赵涛, 王小佳. 苏里格气田连续油管排水采气试验及效果分析[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2011(10):293-294.
GUO Chunling, ZHAO Tao, WANG Xiaojia. Water drainage and gas production test and effect analysis using continuous oil tubes in Surig gas field [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2011(10):293-294.
- [14] 李萍. 内混式空气雾化柴油喷嘴两相流场的 CFD 模拟[D]. 南京工业大学, 2006.
LI Ping. CFD simulation on two-phase flowing of internal airblast diesel atomizer [D]. Nanjing University of Technology, 2006.
- [15] 刘悦闻. 壁面条件对微喷孔内空化流动特性的影响[D]. 大连理工大学, 2019.
LIU Yuewen. Wall conditions effect on cavitation flow characteristics in micro-orifice [D]. Dalian University of Technology, 2019.
- [16] 段福义. 流量可调式喷头理论研究及优化设计[D]. 江苏大学, 2019.
DUAN Fuyi. Design optimization and theoretical research of variable spraying sprinkler [D]. Jiangsu University, 2019.
- [17] CFD-Wiki. Turbulence modeling [EB/OL]. 2021(10):23-29.

编辑 刘振庆

第一作者简介:高秀丽,女,1987年出生,工程师,硕士学位,2014年毕业于西安石油大学矿物岩石学矿床学专业,目前从事采气工程相关工作。电话:022-25928703,13612000808;Email:gxiuli@cnpc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海滨街大港油田宾馆南100米油气合作开发分公司,邮政编码:300280。