



· 能源资源的绿色低碳转化与高效利用 ·

【主持人语】能源资源的绿色低碳转化与高效利用,是我国实现“双碳”战略目标、保障能源安全、推动高质量发展的关键路径,其理论与技术突破具有重大战略意义。为充分发挥多学科交叉融合优势,系统探索能源低碳转型的科学基础与关键技术,《西北大学学报(自然科学版)》特组织出版“能源资源的绿色低碳转化与高效利用”专题,聚焦能源高效利用、转化、集成与调控等核心环节,围绕油气开采过程能效提升、低碳制氢关键材料、低碳能源多能互补系统集成、城市综合能源系统优化4个方向展开深入探讨,系统呈现从装备革新、材料创新、系统集成到规划调控的全链条研究成果,旨在深入解析能源系统绿色低碳发展的内在机制,探求效率提升与碳排降低的协同路径,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供科学支撑。希望专题研究成果能够为能源资源的绿色低碳转化与高效利用积累系统的科学认知与实践经验,以期构建现代能源体系提供有益借鉴。

【主持人】屈治国,西安交通大学能源与动力工程学院二级教授;张剑飞,西安交通大学能源与动力工程学院教授,《西北大学学报(自然科学版)》青年编委。

新型可调节多孔节流气嘴压降特性数值模拟研究

山金城¹,王天慧¹,吕国胜¹,邢川衡¹,王殿武¹,刘 宁¹,檀朝东²,李海培³

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300450;2. 中国石油大学(北京)人工智能学院,北京 102249;
3. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院,黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 天然气驱是提高石油采收率的重要手段,有助于油气能源的高效利用,其中节流气嘴是注采系统中的关键部件,目前的节流气嘴多采用固定结构形式,难以实现流量、压降的在线调节。据此提出了一种新型可调节的井下多孔节流装置,通过在线调整流通孔数,实现气嘴嘴损特性的调控。为掌握该新型气嘴内流场特征和节流特性,采用 SST k- ω 湍流模型和 NIST 物性模型模拟了超临界混合流体在气嘴内的流动过程,获得了节流装置内的流场分布特征,分析了不同工况下气嘴的节流特性。结果表明:①井下多孔节流装置的气嘴通道间存在流量非均匀分配,单个气嘴通道内流速呈现先快速增加后减小、压力呈现先快速减小后略微增加的趋势;②获得了不同流量和不同开孔数条件下的气嘴压降,在 4 MPa 的压降需求下,可实现标况下 $1.5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的宽泛流量范围内的调节;③利用计算结果建立了压降预测关系式,能够快速预测气嘴压降,指导该新型气嘴的实际应用。此研究可助力提高原油生产效率,延长油田寿命,实现能源的可持续发展。

关键词 天然气驱;节流气嘴;节流特性;数值模拟

中图分类号: TE943 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-01-005

Numerical simulation study on the pressure drop characteristics of a new adjustable downhole multi-hole throttling device

SHAN Jincheng¹, WANG Tianhui¹, LYU Guosheng¹, XING Chuanheng¹,

收稿日期:2025-05-25 修回日期:2025-06-30

基金项目:“十四五”重大科技项目(KJGG2021-0502);国家自然科学基金(51974327)。

第一作者:山金城,男,高级工程师,从事海上油田开发开采工作研究,shanjch@cnoc.com.cn。

通信作者:檀朝东,男,正高级工程师,教授,从事检测技术与自动化装置、数据驱动理论与方法等研究,tantcd@126.com。

WANG Dianwu¹, LIU Ning¹, TAN Chaodong², LI Haipei³

1. CNOOC (China) Co., Ltd. Tianjin Branch, Tianjin 300450, China;

2. College of Artificial Intelligence, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;

3. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract Natural gas flooding is a crucial technique for enhancing oil recovery and helpful for the efficiency utilization of energy, where throttling nozzles serve as essential components within the injection and production systems. However, most existing throttling nozzles are designed with fixed structures, making it challenging to adjust flow rates and pressure drops online. It proposes a novel adjustable downhole multi-hole throttling device that allows for the regulation of nozzle loss characteristics by adjusting the number of flow-through holes online. The SST k- ω turbulence model and the NIST physical property model were used to simulate the flow of supercritical mixed fluids within the nozzle, obtaining the flow field distribution characteristics inside the throttling device and analyzing the throttling behavior of the nozzle under different operating conditions. The results show that a non-uniform distribution of the flow rate between the nozzle channels was observed, and there is an asymmetric distribution characteristic of the flow field in the nozzles. Besides, the velocity in a single nozzle channel shows a rapid increase and then a decrease, and the pressure shows a rapid decrease and then a slight increase. The pressure drop across the gas nozzles was analyzed under different injection flow rates and varying numbers of holes. Under a pressure drop of 4 MPa, the device can achieve flow regulation over a wide range from 1.5×10^4 to 1×10^5 m³/d under standard conditions. A pressure drop prediction equation was established based on the simulation results, enabling quick prediction of gas nozzle pressure drops according to desired flow rates. Thus, it provides guidance for application of the new nozzle, enhancing oil production efficiency, extending the life of oil fields and achieving sustainable development of energy.

Keywords natural gas flooding; throttling nozzle; throttling characteristics; numerical simulation

随着我国油气田的开发及勘探水平的提高,低渗透油藏的开发量所占比例越来越大,采用注气的方法进行低渗油藏开发的方法越来越受到关注^[1-5]。常用的气驱方法包括氮气驱、减氧空气驱、CO₂ 驱和天然气驱等,这些气体注入油层,能够增加驱油动力,促进混合驱动形成或改善油的流动性能,从而提高采收率^[6-9]。中国工程院院士袁士义等指出,与常规水驱油、气驱油相比,天然气驱可以更大幅度提高原油采收率^[10]。天然气作为伴生气源具有气源相对充足的优点,因此利用天然气资源进行气驱,成为低渗油田提高采收率的重要手段之一。

在天然气气驱过程中,需要对注气压力进行精确控制。注入压力过大可能导致地层损害,而注入压力不足,注入气无法有效进入地层,无法达到提高采收率的目的。注气气嘴在注入流程中起到地层注入压力调节的作用,其压降特性是保证回注系统有效运行的关键^[11-12]。因此,对气嘴节流压降进行研究可以为气嘴在井下注采中的应用提供指导,实现对注入压力和注入量的控制,提升油田开采效率,延长油井寿命,实现我国能源的可

持续利用,保障我国能源安全。

部分学者围绕气嘴压降特性开展了相关研究。岳艳芳等采用数值模拟手段,研究了天然气流过 4 ~ 12 mm 范围内不同直径喷嘴内流场的分布特征^[13]。李烨烨等使用数值模拟的方法研究了定流量下入口压力在 6 ~ 38 MPa 工况下 CO₂ 流过气嘴的流场特性,分析了不同气嘴长度、直径对流场特性的影响规律,得出了不同工况、不同结构尺寸下的嘴损系数^[14]。Huang 等研究了喷嘴不同长径比对 CO₂ 壅塞流的影响^[15]。另有一些学者从温降、注气冷凝等角度研究了气嘴结构尺寸对于流场的影响^[16-18]。除了这些的单孔气嘴结构,部分学者也针对一些新型气嘴结构开展了相应的研究工作。黄小凤等提出了一种可轴向移动的控阀嘴结构,可实现流通孔道从 1 孔到 8 孔的在线调节^[19]。万凤珍等使用数值模拟的方法研究了一种四级串联的气嘴结构,得出了气嘴内流场分布特性,以及不同气嘴结构参数对节流压差的影响^[20]。Wang 等研究了不同级数、不同气嘴直径条件下,压降从 5 ~ 25 MPa 范围内 CO₂ 流过喷嘴时的流场特性^[21]。李璇研究了超临界

CO₂ 流经一种三级偏心气嘴的流场特性,并给出了气嘴的压降系数^[22]。Tang 等研究了一种通过阀芯调控的多级气嘴的流场特性,并得出了压降与开度的关系^[23]。Zhang 等提出了一种多级减压阀,研究了减压阀内速度、压力的分布^[24]。

综上所述,前期学者围绕气嘴的压降特性和内部流场分布特征开展了实验和数值模拟研究工作,获得了气嘴的嘴损系数。然而目前所研究的气嘴结构,大都为固定结构,无法实现压降的在线调控。气嘴前端流量和压力以及地层的压力需求会随开采不断变化,气嘴的嘴损特性也需相应调整。本文提出了一种新型可调节的多孔节流气嘴结构,利用转动部件与固定部件的相互配合实现气嘴大小的无极调节,达到快速调控压降特性的目的,将有助于保证气驱回注系统的长期稳定运行。同时,为进一步获得该新型多孔节流气嘴的压降特性,本文采用了数值模拟的方法,参考实际井下天然气参数,研究该气嘴的流场特性和不同工况以及孔数下的嘴损特性,并建立压降预测关系式,为气嘴的实际应用和调节提供指导。

1 数值模拟方法

1.1 几何模型

本文所研究的可调节多孔井下节流装置的几何模型如图 1 所示,主要由前端转动部分、气嘴孔道,以及环形流道和侧面扇形出口区域构成的固定部分,在实际应用中,可通过转动前端的转动部分与固定的气嘴孔道形成不同的夹角,从而实现不同流动孔数的控制,达到压降特性的调节。主要结构参数如表 1 所示。

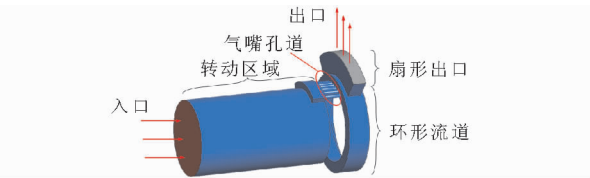


图 1 井下节流装置几何结构
Fig. 1 The structure of downhole multi-hole throttling device

表 1 井下节流装置主要参数

Tab.1 Main parameters of downhole throttling device			
气嘴数量	气嘴直径	气嘴长度	入口直径
/个	/mm	/mm	/mm
6	3	12	56

1.2 计算模型

数值模拟参考了实际气井条件,计算中使用

的流动工质为 CO₂ 和 CH₄ 的混合气体,其质量分数分别为 10% 和 90%。美国国家标准与技术研究院(NIST)气体物性计算模型能够用于 CO₂ 和 CH₄ 单一气体和不同组分混合条件下的物性计算,适用于温度 217 ~ 625 K、压力 0 ~ 800 MPa 范围内的物性计算,覆盖了本文的工况范围^[25],在超临界流体数值模拟中得到了广泛的应用^[26-27]。图 2 为使用 NIST 气体物性计算模型计算的混合气体相态曲线以及井下气嘴的实际运行条件范围。可以看出,在运行工况范围,混合气体的相态区域处在单相超临界态区域,不存在两相状态,因此,采用单相计算模型。

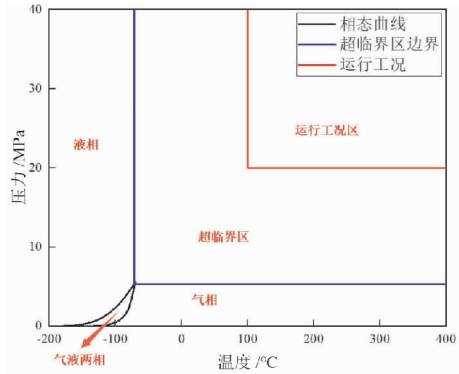


图 2 混合气体相态曲线
Fig. 2 Phase curve of mixed gases

选择合适的湍流模型是保证计算结果准确的关键之一,该节流装置具有流道尺寸变化大、流场变化大等特点,SST k- ω 湍流模型综合了适用于高雷诺数流动的 k- ϵ 湍流模型和近壁低雷诺数流动的 k- ω 模型的优点^[28-30],能够较好地捕捉节流气嘴中突缩突扩的局部压损和孔道内的摩擦阻力,并捕捉湍流剪应力在分离边界层中的输运^[31]。因此本文选用 SST k- ω 湍流模型,其计算方程如下。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - Y_k + S_k \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \tag{2}$$

式中: ρ 为流体的密度,kg/m³; t 为时间,s; u_i 为流体的平均速度分量,m/s; x_i 为空间坐标分量,m; k 为流体的湍流动能,m²/s²; ω 为流体的比耗散率,1/s; G_k 和 G_ω 分别表示 k 和 ω 的生成项; Γ_k 和 Γ_ω 分别表示 k 和 ω 的有效扩散项; Y_k 和 Y_ω 分别表示 k 和 ω 的发散项; S_k 和 S_ω 分别表示 k 和 ω 的

源项; D_ω 表示 ω 的正交发散项。

节流装置计算模型的边界条件包含一个入口和一个出口,其边界条件按照实际物理情况设置,入口设置为质量流量入口,出口设置为压力出口,混合工质的物性选用美国国家标准与技术研究院(NIST)气体物性计算模型。所有壁面均设置为无滑移壁面。求解器采用 Couple 算法对流场内压力-速度场求解,压力离散格式采用 PRES-TO!,动量和能量等离散格式采用高阶 QUICK 格式。

1.3 网格划分及无关性验证

对井下节流装置流体域的网格划分采用以六面体为主的划分方式,对于流场变化较大的区域进行了局部加密,确保能够捕捉到流场特征,同时考虑流动边界的影响,在所有近壁区域均设置了边界层,保证 $y^+ \leq 1$,满足 SST k- ω 模型计算对于边界层网格高度的要求,建立的网格模型示意图如图 3 所示。

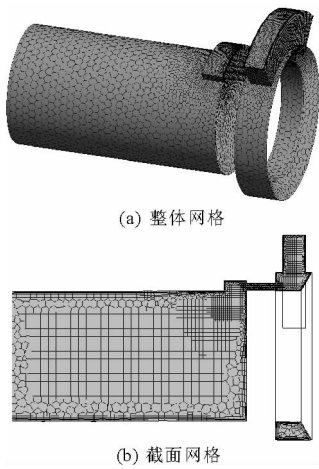


图 3 流体域网格示意图
Fig. 3 Diagram of the mesh

网格数目的多少会影响计算的误差以及经济性,为了确定计算精度高且计算经济性好的网格

数量,需要开展网格的无关性验证。采用相同的计算模型和边界条件分别对 21 万、48 万、70 万和 140 万 4 套不同网格数量的计算模型进行了计算,待计算收敛后,得到了不同网格质量下的计算结果,结果如图 4 所示。可以看出,当网格数量为 70 万和 140 万时进出口压降变化约 1%,此时进一步加密网格对结果影响不大。因此,选择 70 万网格模型开展后续的计算工作。

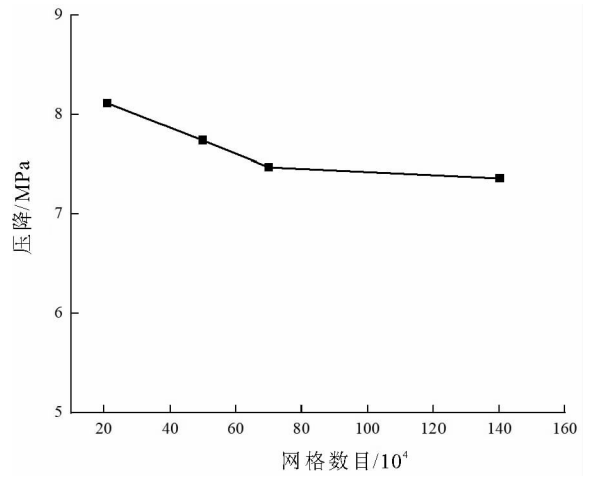


图 4 网格无关性验证
Fig. 4 Grid-independent verification

1.4 模型验证

为了验证计算模型的准确性,使用文献[32]数据开展模型验证。建立与文献[32]相同的几何模型,选用相同的边界条件,使用上文中确定的计算模型进行仿真模拟计算,计算结果与文献中实验结果对比如表 2 所示,计算结果与实验的相对误差小于 3%,说明该计算模型能够较好地模拟气嘴的压降特性,后续可利用该模型开展流场分析和不同条件下的气嘴压降特性研究。

表 2 实验结果^[32]与计算结果对比

Tab. 2 Comparison between experimental results^[32] and numerical results

流量 /($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	嘴前温度 / $^{\circ}\text{C}$	嘴后压力 /MPa	嘴前压力(实验) /MPa	嘴前压力(计算) /MPa	相对误差 /%
40.68	34.5	3.85	4.49	4.60	2.4
44.83	37.5	14.54	14.58	14.68	0.7

2 结果分析与讨论

2.1 节流装置内流场特性

分析节流装置流场特性有助于进一步理解装

置的工作原理,针对标况流量为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、背压 20 MPa、温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 的工况开展流动特性分析。图 5(a)所示为节流装置的剖面图,图中右侧为节流装置入口,左上为出口,在气嘴区域的右侧,即入口侧设有相对位置为 0 mm 的参考截面,

以图中方向向左为正,向右为负。图 5(b)所示为节流装置俯视图,在气嘴区域,从左向右依次将气

嘴通道记为 1 号至 6 号。

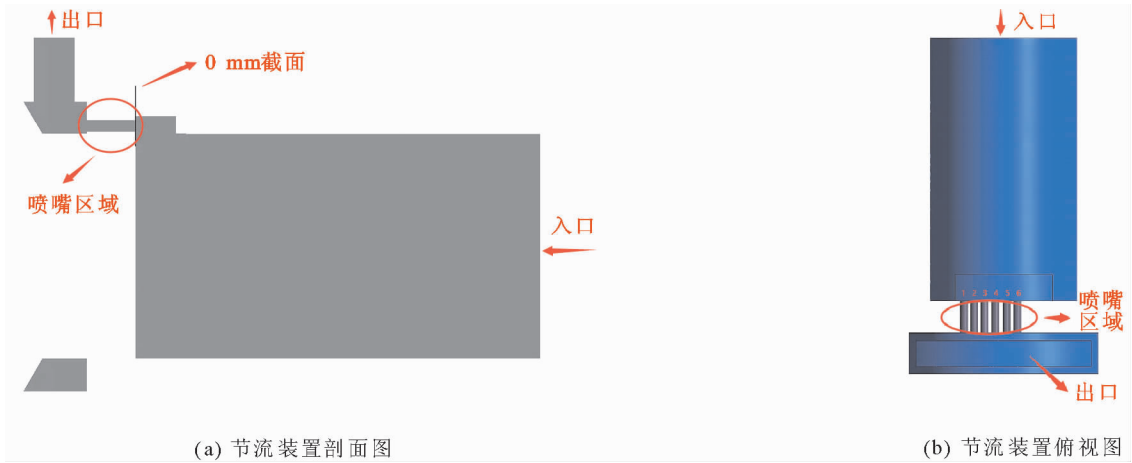


图 5 节流装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the throttling device

图 6 所示为不同气嘴内流线分布图,流体从入口流入装置后,主流折流向上进入气嘴区域,在装置的下部,部分流体被滞留形成回流区。由于惯性的作用,折流进入气嘴区域的流体仍有向上的径向速度,因此在气嘴中,高速流主要集中在上半区,呈现出镰刀型分布。结合图 7 所示不同气嘴通道内流速分布图可以看出,流体在进入气嘴

前就已经开始加速,在流入气嘴时,由于流道截面积的突然缩小,流体速度迅速升高。1 号气嘴通道内流速的镰刀型分布最为明显,不对称的分布使得快、慢流体间的动能交换增加,流动的峰值速度快速下降,在 2 号到 6 号气嘴通道中,流速分布相对更加对称,因此流动更加稳定,其速度的峰值区域从气嘴中一直延伸至气嘴外。

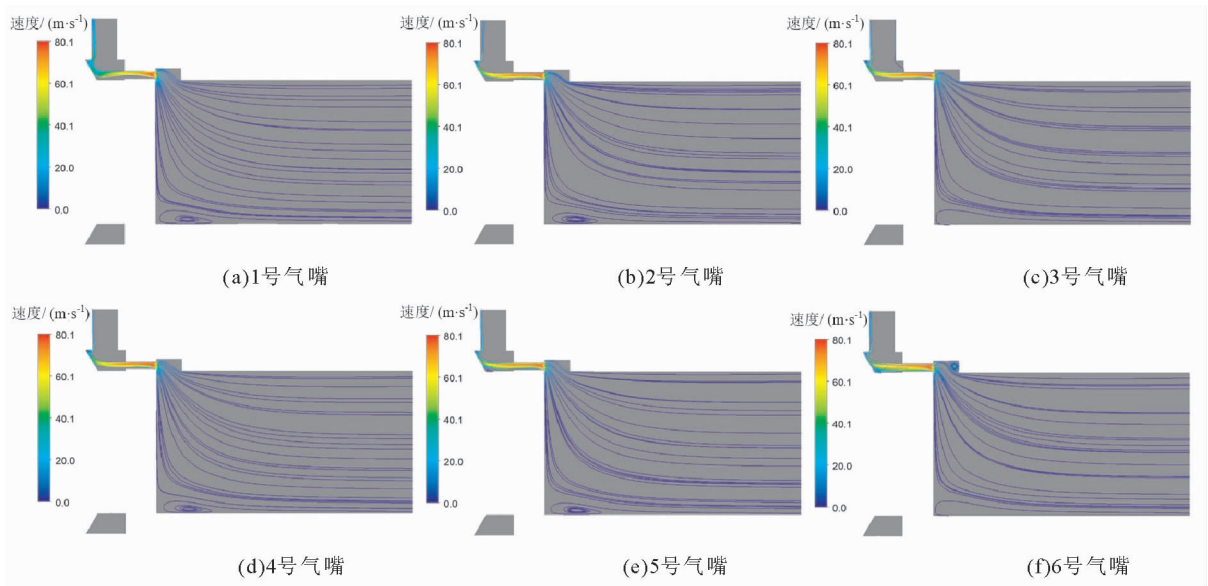


图 6 不同气嘴内流线分布图

Fig. 6 Streamline at different nozzles

图 8(a)所示为 6 个气嘴通道内的流速分布,在 5 mm 的位置前,流体流速下降明显,往后的流速几乎不再变化。在 6 个气嘴通道当中,1 号气嘴通道内的流速是最快的,2 号到 5 号内的流速差异不大,6 号内的流速则是最小的。图 8(b)所

示是 6 个气嘴通道内轴向流速的分布情况,在进入气嘴的初期,流体轴向流速会有明显的上升,随后又下降,在到达 5 mm 的位置后逐渐稳定。在 6 个气嘴通道当中,1 号到 5 号气嘴通道的轴向流速差异不大,6 号内的轴向流速最小。结合图 7、

图 8 可以得出,受到气嘴前折流的影响,流体在进入气嘴时除了轴向速度外,还有径向速度和切向速度的存在。1 号气嘴通道前形成的涡旋使得其流速在所有气嘴中最大,6 号气嘴通道由于处在流体加速的起始区域,其总流速与轴向流速在所

有气嘴通道中均是最小的。在进入气嘴突缩区域,流动存在较大的径向速度,此时流体总流速损失主要来自于工质与气嘴壁冲击导致的径向速度损失。在 5 mm 后,流体的总流速中只剩轴向速度与切向速度,流动逐渐稳定,流速也不再变化。

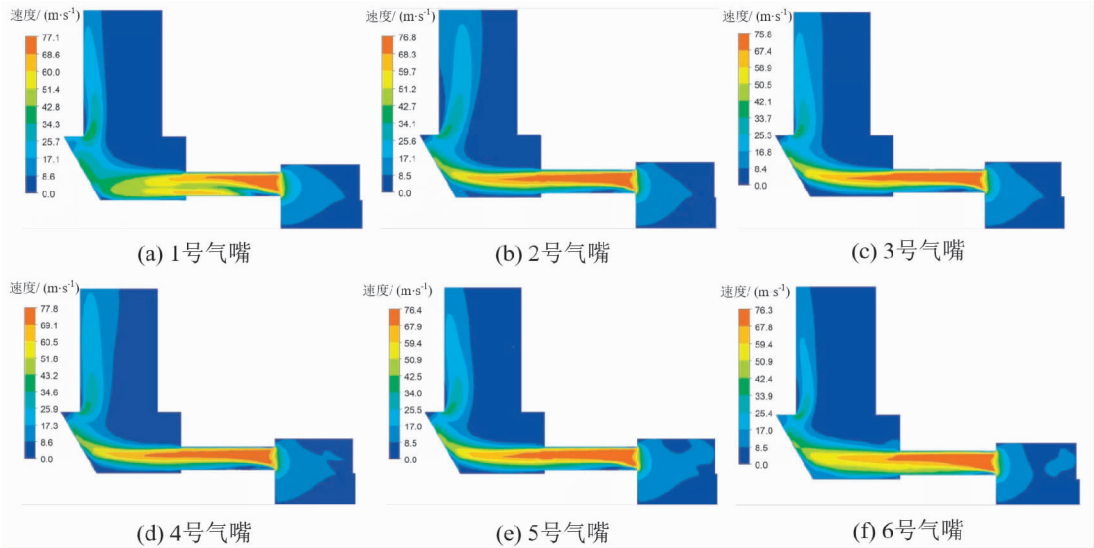


图 7 不同气嘴内流速分布图

Fig. 7 Velocity distribution at different nozzles

图 9 所示为 6 个气嘴通道内静压的分布,结合图 8(b) 气嘴内轴向流速可以看出,在进入气嘴的初期,流体轴向流速增加,静压降低出现低于背压(20 MPa)的情况,而后受到背压的影响,流体的静压开始上升,在升至 20 MPa 时趋于稳定,同时轴向流速下降,并随着流动的发展而趋于稳定,这与 Gulsacan、Wu 等的研究结果一致^[33-34]。

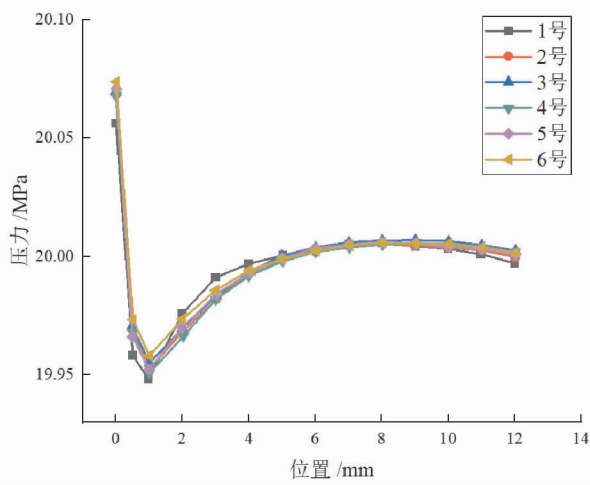


图 9 不同气嘴内压力沿轴向变化

Fig. 9 Pressure distribution in axial direction at different nozzles

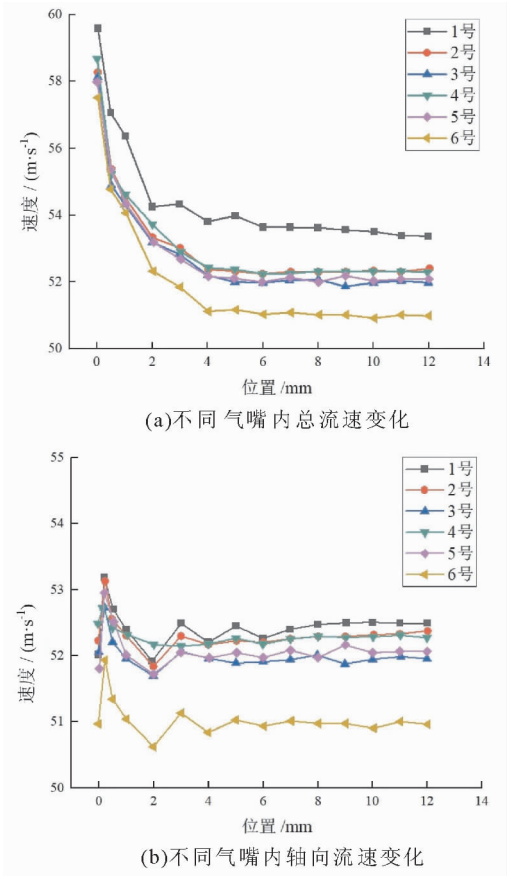


图 8 不同气嘴内流速沿轴向变化

Fig. 8 Axial velocity at different nozzles

2.2 不同流量对气嘴压降的影响规律

图 10 为 6 孔全开时不同运行压力下气嘴压降随注入流量的变化,可以看出,随着流量的增加,节流装置的压降呈现抛物线型增长。这主要是因为是在节流装置内的流动过程中,总压降主要由沿程压降和局部压降组成,沿程压降和局部压降的大小与流体流速的平方成正比,因此随着流量的增加,压降逐渐增加并呈现出抛物线型增长。

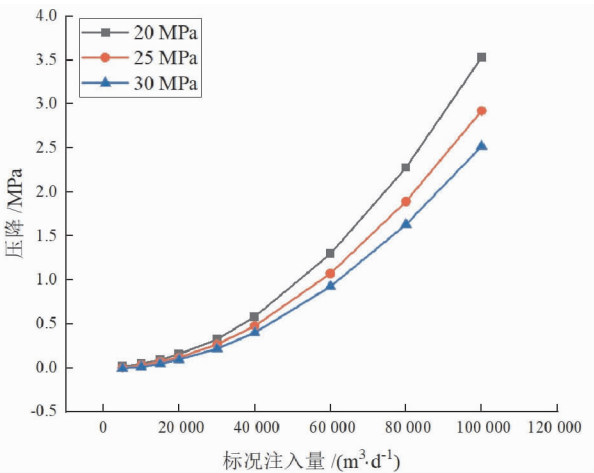


图 10 不同流量下的气嘴压降变化

Fig. 10 Pressure drop at different flow rates

图 11 所示为不同流量下气嘴内流速分布云图,可以看出,随着流量的增加,在气嘴区域内的流速分布趋势基本一致,流体在气嘴前开始加速,并在进入气嘴区域时达到整个流体域内的峰值速度,流体最大流速的增长程度与流量的增长程度成正比。在气嘴后的出口区域内,流速分布出现了变化,在标况流量低于 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工况中,流体在进入出口区域后经过出口壁面的折流沿壁面流出,当标况流量达到 $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,流体在经过出口壁面的折流后不再直接沿壁面流出,而是从壁面脱离,并从另一侧壁面处流出。

2.3 不同孔数对气嘴压降的影响规律

在井下运行时,针对不同的注入地层条件,需要对气嘴进行在线调节,通过调节转动部件,改变流通孔数,实现不同嘴损,因此,有必要分析不同流动孔数对气嘴压降的影响规律,计算结果如图 12 所示,从图中可以看出,在相同流量的情况下,随着开孔数的减少,气嘴前后的压降出现明显的增长,开孔数的减少实质上是气嘴处流通面积的减小,流通面积的减小造成了流速的提升,流速的提升造成了压降的显著增加。当流量一定时,随着孔数的减少,压降的变化越显著,标况流量为 3

$\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,6 孔减少至 3 孔时,压降从 0.383 MPa 变化到 1.539 MPa,孔数从 2 孔变为 1 孔时,压降增大了 9.3 MPa,说明当孔数大于 3 孔时,气嘴的压降调节精度较高,这是因为该多孔气嘴目前采用等孔径布置,当孔数较多时,改变单个孔数,流通截面的变化率较小。同时,在固定压降的情况下,该气嘴能够实现很宽范围内的流量调节,当压降需求为 4 MPa 时,通过调整气嘴孔数,注入标准气量可在 $1.5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 范围内调节。

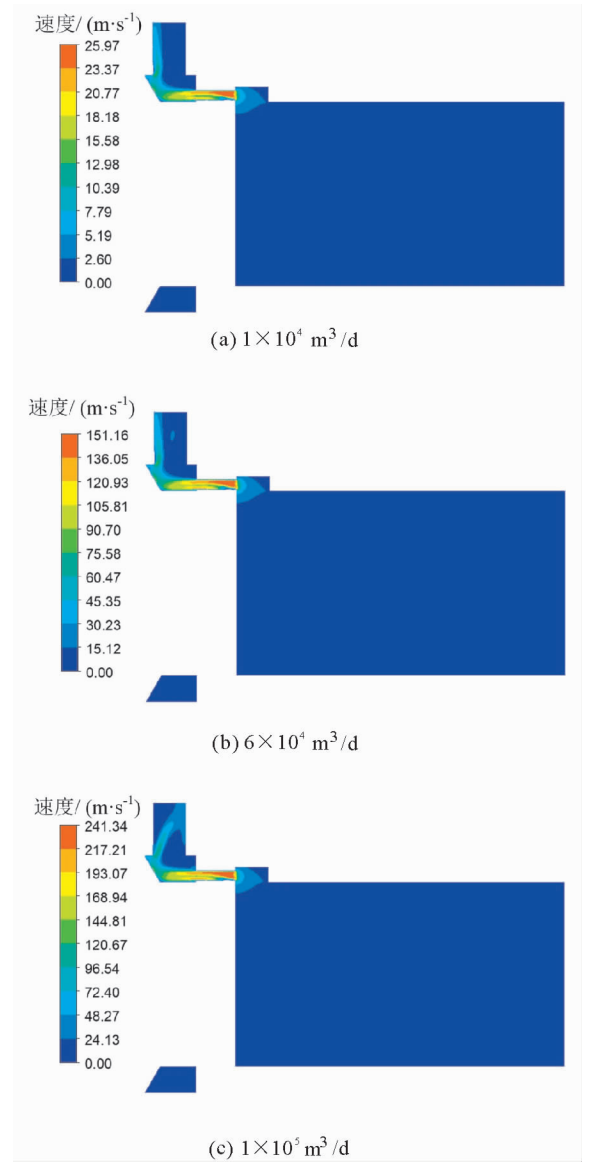


图 11 不同标况流量下气嘴内流速分布

Fig. 11 Flow velocity distribution in the nozzle at different flow rates

2.4 压降预测关系式

为了更好地指导实际应用,针对不同的井下条件能够快速获取气嘴压降,对计算得到的不同

条件下的压差数据进行拟合,建立气嘴压降与开孔数目、出口压力和流量之间的函数关系式,所建立的关系式形式如下,

$$\Delta p = aA^c p^d Q^b \tag{3}$$

式中: a, b, c, d 表示常数; Δp 为气嘴总压降,MPa; A 为气嘴开孔数,取值范围为 1 ~ 6; p 为出口压力,MPa; Q 为标况体积标况流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

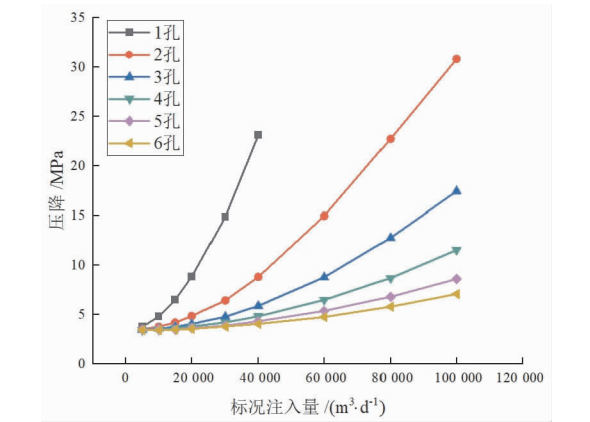


图 12 不同开孔数的气嘴压降变化

Fig. 12 Pressure drop at different hole number

将不同开孔数目、出口压力和流量下的计算结果进行多元线性回归,得到适用于该气嘴结构的关系式

$$\Delta p = e^{2.64} \frac{Q^{1.966\ 88}}{A^{1.976\ 33} p^{0.796\ 45}} \tag{4}$$

为了验证关系式的准确性,分别选取了不同开孔数、标况流量条件下的结果进行对比,如图 13 所示,可以看出,公式计算结果与模拟实验值符合较好,在 1 ~ 6 孔和 $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 标况流量范围内的相对误差均小于 5%。

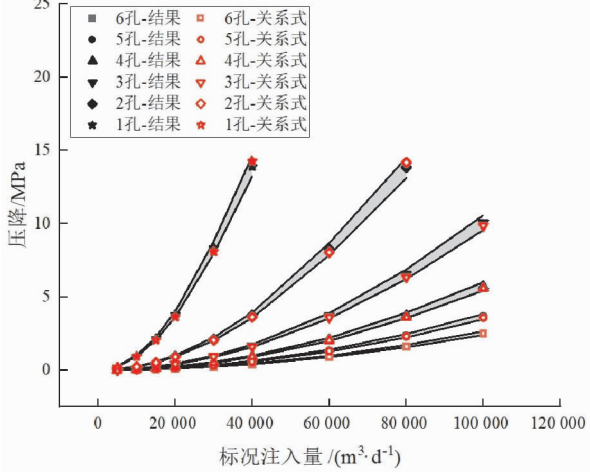


图 13 关系式计算结果及误差对比

Fig. 13 Comparison of equation calculation results and error analysis

3 结论与展望

为实现天然气注采过程中压力的有效与灵活控制,本文设计了一种新型可调节多孔井下节流装置。该装置通过多孔协同调节,在拓宽流量调节能力的同时,改善了传统单一节流方式控制精度不足的问题。本研究采用 SST k- ω 湍流模型和 NIST 真实气体物性模型,对超临界压力条件下混合气体在节流装置内的流动行为与压力变化特性进行了系统模拟,主要结论如下。

1) 节流装置气嘴通道间存在不均匀的流量分布,其中 1 号通道是 6 个流动通道中流量最大的,而 6 号通道则是流量最小的一个,这主要是受到了气嘴前区域流动分配不均匀的影响;各个气嘴通道内流场也呈现出不对称的分布特征,其中,高速流体主要集中在气嘴的上部区域,呈现出镰刀型分布趋势。

2) 流体在流经气嘴前的突缩处时膨胀加速,其压力降低的同时轴向速度增加,而后压力逐渐增加,流速也降低并趋于稳定;流体流过节流装置的压降随流量的增加而增加,随运行压力的增加而减小。

3) 不同开孔数的计算结果表明,注入流量一定时,当孔数大于 3 孔时,气嘴的压降调节精度较高,当流通孔数小于 2 孔时,压降的变化幅度较大,控制难度增加。为实现更好的压降控制,未来可优化孔径排布,采用变孔径布置。

4) 在固定压降的情况下,能够实现很宽范围内的流量调节,当压降需求为 4 MPa 时,通过调整气嘴孔数,标况注气量可在 $1.5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 范围内调节。

5) 通过模拟计算结果拟合了节流装置压降与开孔数、流量以及背压之间的函数关系式,该关系式在运行压力 20 ~ 30 MPa、标况流量 $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 范围内能够较好地预测装置压降。

本文基于数值模拟结果所构建的压降预测关系式,为该类型节流装置的工程设计与运行控制提供了实用参考。研究成果在天然气注入压力与流量的精细调控方面展现出良好的应用潜力,对提升注气作业效率具有实际意义。目前的研究工作仅针对一种气井参数开展,在实际应用中,各个气井参数均不相同,因此,在后续的工作中,还需要针对不同组分气体在气嘴中的节流特性开展研

究,以拓展其应用。

参考文献

[1] 张猛,郭鑫. CO₂ 驱产出气回注工艺及配套压缩装置的应用研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(5): 39-41.
ZHANG M, GUO X. Research on CO₂ flooding production gas reinjection process and application of matching compression equipment[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(5): 39-41.

[2] 娄兆彬,曾贤辉,杨朝光. 低渗透油藏注气吸气能力评价方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(1): 50-52, 83.
LOU Z B, ZENG X H, YANG C G. Evaluation method of gas-injectivity in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(1): 50-52, 83.

[3] 程顺权. 三次采油阶段提高采收率的措施[J]. 石化技术, 2021, 28(10): 71-72.
CHENG S Q. Measures to enhance oil recovery in the third stage of oil recovery[J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(10): 71-72.

[4] 梁金慧,郭玉廷,张百艳,等. 三次采油驱油技术在油田开采中的应用研究[J]. 化工管理, 2021(11): 191-192.
LIANG J H, GUO Y T, ZHANG B Y, et al. Application research on oil displacement technology of tertiary recovery in oilfield[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(11): 191-192.

[5] BAYAT M, LASHKARBOLOOKI M, HEZAVE A Z, et al. Investigation of gas injection flooding performance as enhanced oil recovery method[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 37-45.

[6] SEYYEDSAR S M, FARZANEH S A, SOHRABI M. Enhanced heavy oil recovery by intermittent CO₂ injection[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2015: SPE 175140-MS.

[7] KALRA S, WU X R. CO₂ injection for enhanced gas recovery [C] // SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2014: SPE 169578-MS.

[8] PEI X H, YANG Z P, BAN L, et al. History and actuality of separate layer oil production technologies in Daqing oilfield[C] // International Oil & Gas Conference and Exhibition. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2006: SPE 100859-MS.

[9] 张晓静. 二氧化碳驱油分层注入技术研究[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(11): 73-77.
ZHANG X J. Research on CO₂ layered injection technology[J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(11): 73-77.

[10] 袁士义,韩海水,王红庄,等. 油田开发提高采收率新方法研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 841-854.
YUAN S Y, HAN H S, WANG H Z, et al. Research progress and potential of new enhanced oil recovery methods in oilfield development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 841-854.

[11] ZHANG Z, SUN B J, WANG Z Y, et al. Multiphase throttling characteristic analysis and structure optimization design of throttling valve in managed pressure drilling[J]. Energy, 2023, 262: 125619.

[12] FU Y K, MA H Y, YU C G, et al. Analysis of effective operation performance of wireless control downhole choke[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1-12.

[13] 岳艳芳,全少凯,孙虎,等. 气井井下节流器节流模拟分析技术研究[C] //2023 油气田勘探与开发国际会议论文集. 北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志有限公司,2023:1-10.
YUE Y F, TONG S K, SUN H, et al. Study on choking simulation and analytical technology of down-hole choke in gas well[C] //Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2023. Beijing: China Academic Journals(CD Edition) Electronic Publishing House, 2023: 1-10.

[14] 李烨烨,孟玫好,杨韵桐,等. CO₂ 注入井恒流堵塞器气嘴嘴损系数影响因素研究[J]. 测井技术, 2023, 47(6): 701-709.
LI Y Y, MENG W Y, YANG Y T, et al. On the factors influencing the loss coefficient of the gas nozzle of the constant flow blocker in CO₂ injection wells[J]. Well Logging Technology, 2023, 47(6): 701-709.

[15] HUANG J J, WANG Y L, HUANG Y P, et al. Effect of geometry and upstream stagnation thermodynamic parameters on CO₂ choked flow through orifices[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 165: 108789.

[16] QIAO M Z, JING Z F, ZHOU R, et al. The throttling characteristics of supercritical carbon dioxide in the flowback process of CO₂ fracturing[J]. Gas Science and Engineering, 2024, 121: 205184.

[17] ZHANG C G, LI C J, JIA W L, et al. Numerical study on the differences in condensation characteristics in throttle valves with different structures[J]. Cryogenics, 2023, 133: 103696.

- [18] LI C J, ZHANG C G, LI Z R, et al. Numerical study on the condensation characteristics of natural gas in the throttle valve[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 104: 104689.
- [19] 黄小凤, 胡松. 液控注水阀喷嘴流量特性仿真与试验研究[J]. *石油矿场机械*, 2022, 51(3): 60-64.
HUANG X F, HU S. Simulation and experimental study on flow characteristics of hydraulic valve nozzle [J]. *Oil Field Equipment*, 2022, 51(3): 60-64.
- [20] 万凤珍, 刘朕, 张玥珩, 等. 二氧化碳气嘴的设计与仿真[J]. *采油工程*, 2016(3): 10-13.
WAN F Z, LIU Z, ZHANG Y C. Design and simulation of gas nozzle for carbon dioxide[J]. *Oil Production Engineering*, 2016(3): 10-13.
- [21] WANG H Z, LI G S, ZHAO L C, et al. Throttle characteristics of multi-stage circumfluence nozzle during the separate-layer injection of CO₂ [J]. *Petroleum*, 2018, 4(2): 187-197.
- [22] 李璇. 特低渗透油藏超临界 CO₂ 分层注入工艺技术研究[J]. *采油工程*, 2021(2): 79-84.
LI X. Research on supercritical CO₂ separate layer injection technology in ultra-low permeability reservoirs [J]. *Oil Production Engineering*, 2021(2): 79-84.
- [23] TANG Y, ZHANG Y L, HE Y F, et al. Study on multi-stage adjust mechanism of downhole stratification control tool for natural gas hydrate multi-gas combined production gas lift[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 72: 800-814.
- [24] ZHANG Y H, LIU B, SHE X H, et al. Numerical study on the behavior and design of a novel multistage hydrogen pressure-reducing valve [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(32): 14646-14657.
- [25] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP[M]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (NIST), 2013: 46-49.
- [26] PATIL P, EJAZ S, ATILHAN M, et al. Accurate density measurements for a 91% methane natural gas-like mixture[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2007, 39(8): 1157-1163.
- [27] AUTE V, RADERMACHER R. Standardized polynomials for fast evaluation of refrigerant thermophysical properties[C] // 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference. West Lafayette: Purdue University, 2014: 1499.
- [28] JONES W P, LAUNDER B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, 15(2): 301-314.
- [29] MENTER F. Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows[C] // 23rd Fluid Dynamics, Plasma dynamics, and Lasers Conference. Orlando: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993: AIAA 1993-2906.
- [30] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [31] 曾宇, 汪洪波, 孙明波, 等. SST 湍流模型改进研究综述[J]. *航空学报*, 2023, 44(9): 027411.
ZENG Y, WANG H B, SUN M B, et al. SST turbulence model improvements: Review[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(9): 027411.
- [32] 李裴晨. 超临界 CO₂ 驱嘴流特性及分注工艺研究[D]. 荆州: 长江大学, 2020: 45-57.
- [33] GULSACAN B, TOKGOZ N, KARAKAS E S, et al. Effect of orifice thickness-to-diameter ratio on turbulent orifice flow: An experimental and numerical investigation[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 151: 107213.
- [34] WU X Y, ZHANG Y Q, TAN Y W, et al. Flow-visualization and numerical investigation on the optimum design of cavitating jet nozzle[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(5): 2284-2296.

(编辑 邵煜)