◀油气田开发工程▶

泡沫发生器结构设计与优化*

谷子昂[1] 史怀忠[1] 赵子妍[1] 陈 晗[1] 赫文豪[1,2] 史章林[1]
（1. 中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室 2. 中国石油大学（北京）油气光学探测技术北京市重点实验室）

谷子昂，史怀忠，赵子妍，等. 泡沫发生器结构设计与优化［J］. 石油机械，2026，54（9）：93-101.
Gu Ziang，Shi Huaizhong，Zhao Ziyan，et al. Structural design and optimization of foam generator［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：93-101.

摘要：泡沫发生器是氮气泡沫压裂的关键设备，但国内现有泡沫发生器应用场景多集中于冲砂洗井和泡沫驱油作业，其对致密油气藏压裂改造的适用性显著不足，亟需一种适用于氮气泡沫压裂特定工况的高性能泡沫发生器。基于氮气泡沫压裂施工原理与相关施工参数，结合现有发生器类型，设计了一种应用于氮气泡沫压裂的侧对冲式泡沫发生器。采用多相流模型、DPM（discrete phase model）模型及冲蚀损伤模型建立了泡沫发生器气-液-固多相流模型，模拟分析叶轮结构、设置位置、螺距及中心流道直径对气液混合效果的影响；结合固相颗粒对泡沫发生器的冲蚀速率，优化发生器结构参数，并开展现场试验验证其性能。研究结果表明：在泡沫发生器中设置叶轮可改善气液两相混合效果，混合效果随中心流道直径增大先提升后变差，随螺距增大逐渐变差；固相颗粒对泡沫发生器叶轮和流道壁面的冲蚀速率随螺距和中心流道直径增大均呈现降低趋势；叶轮设置位置对混合效果和冲蚀速率影响较小。最优结构参数为叶轮采用双叶片结构，圈数为1圈，螺距90 mm，叶轮距混合腔距离5 mm，中心流道直径80 mm。现场试验中，泡沫发生器成功应用于2段压裂作业，展现了良好的应用效果。研究成果有望为提升氮气泡沫压裂改造效果提供理论与设备支持。

关键词：氮气泡沫压裂；对冲式泡沫发生器；结构优化；多相流；冲蚀速率
中图分类号：TE934 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202508003

Structural Design and Optimization of Foam Generator

Gu Ziang[1] Shi Huaizhong[1] Zhao Ziyan[1] Chen Han[1] He Wenhao[1,2] Shi Zhanglin[1]
（1. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*); 2. *Beijing Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas*, *China University of Petroleum* (*Beijing*)）

Abstract: The foam generator, as a key component of nitrogen foam fracturing, is mainly used domestically in sand washing and foam flooding operations, and is significantly inadequate for fracturing stimulation in tight oil and gas reservoirs. Therefore, there is an urgent need for a high-performance foam generator tailored to the specific operating conditions of nitrogen foam fracturing. Based on the operating principles and relevant parameters of nitrogen foam fracturing, and with reference to existing generator types, a counter-jet foam generator was designed for this application. A gas-liquid-solid multiphase flow model of the foam generator was established using a multiphase flow model, the discrete phase model (DPM), and an erosion model. Simulations were conducted to analyze the effects of impeller structure, installation position, pitch, and central-channel diameter on gas-liquid mixing

* 基金项目：国家自然科学基金企业创新发展联合基金集成项目“三大盆地深层-超深层海相油气高效勘探开发基础研究”（U24B6001）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

efficiency. The structural parameters were then optimized by also considering the erosion rate caused by solid particles on the foam generator. Furthermore, field tests were conducted to validate the performance of the optimized foam generator. The results show that the installation of an impeller in the foam generator promotes gas-liquid mixing. The mixing efficiency first increases and then decreases with increasing central-channel diameter, while it gradually deteriorates with increasing impeller pitch. The erosion rates on the impeller and central-channel wall caused by solid particles decrease with increasing impeller pitch and central-channel diameter. The impeller installation position has little influence on either mixing efficiency or erosion rate. The optimal structural parameters are as follows: a dual-blade impeller with a single turn, an impeller pitch of 90 mm, an installation position 5 mm from the mixing chamber, and a central-channel diameter of 80 mm. In the field test, two-stage fracturing operations were successfully conducted, demonstrating satisfactory application of the optimized foam generator. This research is expected to provide theoretical and technical support for improving the effectiveness of foam fracturing stimulation.

Keywords: nitrogen foam fracturing; counter-jet foam generator; structural optimization; multiphase flow; erosion rate

0　引　言

近年来，随着勘探开发不断推进，我国已探明的油气储量中低渗透油气储量占比达60%~70%，以低孔、低渗、低压为主要特点的致密油气藏将成为今后油气开发的重点[1-5]。目前致密油气藏开发中存在压裂改造效果差、储层易发生水敏与水锁、井下作业困难等问题，导致单井最终可采储量（EUR）和开发效益低[6-9]。针对上述问题，国内外学者提出应用氮气泡沫压裂技术提升致密油气藏开发效果。在氮气泡沫压裂过程中，泡沫压裂液实时性能是影响施工效果的关键因素之一。因此，如何高效配制高性能泡沫压裂液是氮气泡沫压裂技术应用成功的关键。

围绕高效配制高性能泡沫压裂液这一目标，国内外学者从泡沫压裂液配方和泡沫发生器结构2方面开展了优化研究。在泡沫压裂液配方优化方面，已有研究针对不同储层特征有针对性地优化了氮气泡沫压裂液配方，提高了压裂改造效果；在泡沫发生器结构方面，我国油田目前的泡沫发生器分为地面式和井下式2大类，地面泡沫发生器主要有涡轮式、螺旋式、同心管式、孔隙式及挡板式[10]。李松岩等[11]为提升泡沫冲砂洗井效果，对比了射流式和同心管式泡沫发生器的内部流场特点；李家丞等[12]分析了气液比对射流式泡沫发生器内部流场的影响，为疏松砂岩油藏冲砂洗井作业提供了指导；Cummins[13]为实现泡沫高效钻井，发明了一种用于可循环微泡沫钻井的地面泡沫发生器；Halliburton公司[14]为了提升冲砂洗井效果，发明了一种井下泡沫发生器，利用芯体的细长孔径提高发泡液流速，促进气体与发泡液混合，实现井下发泡；Nguyen等[15]和Conn等[16]为提高驱油效率与采收率，利用微泡沫发生器制备微泡沫；闫月娟等[17]为提升氮气泡沫辅助蒸汽吞吐开采效果，设计了一种新型井下氮气泡沫发生器，并采用数值模拟方法分析了其发泡性能；刘承婷等[18-19]为解决稠油油藏出砂问题，根据文丘里管的特点对现有螺旋挡板式泡沫发生装置的结构进行优化，设计出一种适用于水平井冲砂洗井作业的高效螺旋式泡沫发生器；章志轩等[20]为解决涩北气田低压疏松砂岩气藏井筒冲砂困难问题，自主设计了氮气泡沫发生装置，提升了发泡性能和泡沫携砂性能；张承武等[10]设计了一种对冲式泡沫发生器，该装置具有扰动强度大、混合程度高、结构磨损轻等特点；桑小娜等[21-22]优化了自主设计的井下泡沫发生器，提高了泡沫驱油用泡沫性能；金新[23]针对采用空气螺旋钻井技术钻松软煤层存在的粉尘污染严重、钻头寿命短、井筒净化困难等问题，基于螺旋式泡沫发生器增设空气动能转化装置，设计了一种小尺寸泡沫发生器；李源源等[24]针对低压气井连续管钻磨过程中常规钻磨液易漏失、循环难建立、井底泡沫质量难以实时监测等问题，提出了一种新型氮气泡沫发生器结构及其配套的井底泡沫质量实时监测方法。

综上，国内外学者针对泡沫发生器开展了大量研究，设计了多种可用于地面与井下的泡沫发生装置。然而，我国现有泡沫发生器应用场景多集中于冲砂洗井和泡沫驱油作业，对致密油气藏压裂改造的适用性显著不足。为此，笔者结合氮

气泡沫压裂施工原理与相关施工参数，设计了一种应用于氮气泡沫压裂的侧对冲式泡沫发生器，采用数值模拟方法对泡沫发生器结构进行优化，并开展现场试验验证其性能。该研究成果有望为提升氮气泡沫压裂改造效果提供理论与设备支持。

1　结构设计

1.1　设计依据

根据氮气泡沫压裂施工原理与现场施工参数特点，确定泡沫发生器的设计依据如下。

（1）氮气泡沫压裂施工中排量大，宜采用地面式泡沫发生器，且应具有较大直径的携砂液通道和氮气通道，以减少节流压耗和缩扩结构造成的水头损失。

（2）流入氮气泡沫发生器的携砂液压力大、流速高，且含有固相颗粒，易造成内部结构磨损，因此不宜在携砂液通道内设置复杂机械结构。同时，发生器不宜采用正对冲形式，应采用侧对冲形式。

1.2　发生器结构及原理

基于上述设计依据，设计了一种适用于氮气泡沫压裂作业的侧对冲式泡沫发生器，其整体尺寸为 475 mm×400 mm×350 mm，结构如图 1 所示。

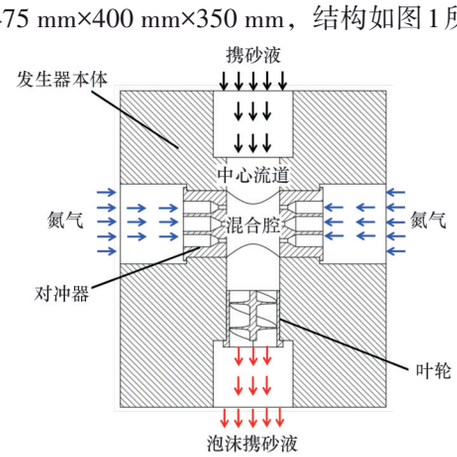


图 1　侧对冲式泡沫发生器结构

Fig. 1　Schematic diagram of the foam generator

泡沫发生器主要由发生器本体、对冲器及叶轮组成，发生器本体内设有混合腔和中心流道，对冲器和叶轮均通过螺纹连接安装于发生器本体之上。其中，对冲器为多孔圆盘，其上均匀安装多个喷嘴，作用是分散氮气，并通过喷嘴将氮气转化为高速射流冲入携砂液中，使氮气与携砂液在混合腔内初步混合；叶轮设置于中心流道上，其作用是使氮气与携砂液充分混合。该发生器工作原理为：携砂液由中心流道流入混合腔，氮气经两侧对冲器进入混合腔，二者在混合腔初步混合后一同流经叶轮充分混合，产生均匀的泡沫携砂液，再经出口流入压裂管线内。该发生器具有结构简单、气液混合效率高等特点。

2　流场特性与结构优化

2.1　模型设置

采用数值模拟方法研究泡沫发生器内流场特性，进而优选结构参数。

2.1.1　物理模型及边界条件

提取泡沫发生器流场结构，其主要包含液体入口部分、气体入口部分、叶轮部分及液体出口部分，并将出口部分加长以避免回流影响，具体物理模型如图 2 所示。基于泡沫发生器原理对模型边界进行划分，液体入口和两侧气体入口（入口 1 和入口 2）均设为速度入口，出口设为自由出流。其余面均为 WALL，设置为无滑移壁面。

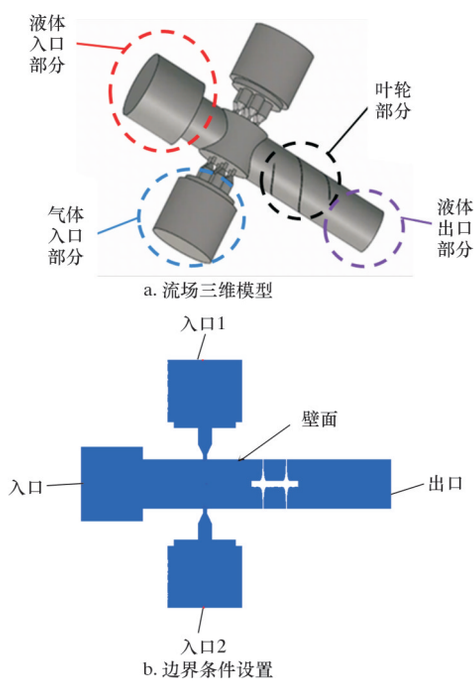


图 2　泡沫发生器物理模型

Fig. 2　Physical model of the foam generator

2.1.2　计算模型

氮气为惰性气体，难溶于水，其密度和体积随温度及压力变化而变化。在压裂作业实际应用过程中，氮气在泡沫发生器中处于 40 MPa 以上压力和 0 ℃以上温度环境，其密度接近液态氮，但流动性类似气体，且与液体混合时间较短，故可假设氮气不与其他流体发生热量交换，即其性质一定；同时，在该模拟中将氮气作为连续相处理，

不考虑能量交换过程。氮气密度为 550 kg/m³，黏度为 0.03 mPa·s，压裂液密度为 1 050 kg/m³，黏度为 100 mPa·s。

由于氮气与压裂液相互混合，故计算流体为气液两相流。考虑在泡沫发生器中气相多以小气泡形式存在于液相中，故选用 Mixture 模型（混合物模型）[12, 25]。压裂液在压裂过程中会携带支撑剂，因此在模拟中须考虑固相颗粒的存在。笔者设置压裂液中固相体积分数为 15%，混合气相后，固相体积分数小于 12%，故在模拟中采用 DPM 模型[26]模拟支撑剂运动。为明确流体中固相颗粒对发生器内部的冲蚀损伤，在 DPM 中考虑冲蚀损伤模型[27]。

在该模拟中，气液两相流动是湍流流动，湍流模型选择 Realizable k-ε 模型，采用 SIMPLEC 算法进行速度-压力耦合；采用有限体积法对控制方程进行离散，压力项采用 PRESTO!方法，体积分数采用 QUICK 方法，动量、湍动能和湍流耗散率采用一阶迎风格式进行离散，壁面区域采用标准壁面函数处理，无滑移边界条件，收敛精度设为 10^{-6}。

2.1.3　模拟参数设置

为明确发生器流场特性和不同结构下起泡效果，基于 3 000~4 000 m 致密砂岩气井氮气泡沫压裂施工参数，设置相应模拟条件。其中，总排量为 3.0 m³/min，携砂液排量 1.8~1.9 m³/min，氮气排量 1.1~1.2 m³/min。颗粒选用粒径 0.3~0.6 mm 石英砂，密度为 1 750 kg/m³，平均粒径 0.5 mm。

由发生器结构原理可知，混合腔和叶轮是影响气液混合效果的关键结构。叶轮结构主要包含叶片数量和圈数；中心流道直径决定混合腔尺寸，进而影响混合效果；叶轮螺距和设置位置也会影响气液的混合效果。考虑固相颗粒冲蚀、发生器压耗及尺寸等因素，结合实际压裂地面管线尺寸，叶轮设置为单叶片和双叶片 2 种结构，叶轮圈数不应超过 1.5 圈，螺距范围为 60~120 mm，中心流道直径范围为 60~100 mm。具体参数如表 1 所示。

2.1.4　网格划分及无关性分析

采用 ICEM 软件对物理模型进行四面体网格划分，并对喷嘴和叶轮区域进行网格加密。为排除网格数量对结果的影响，开展网格无关性分析，监测了 30 万~120 万网格数量下 3 个入口流量和 1 个出口流量。模拟得到不同网格数量下入口与出口流量基本趋于一致，最大偏差仅为 0.26 %，故可排除网格数量对计算结果影响。综合考虑计算精度和计算速度，选用 60 万网格模型开展后续模拟。

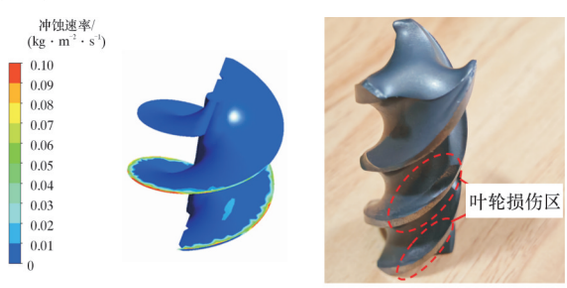
表 1　模拟参数

Table 1　Simulation parameters

序号	叶轮规格	中心流道直径/mm	叶轮距混合腔距离/mm	叶轮螺距/mm
1	无叶轮/单叶片 1 圈/双叶片 1 圈/双叶片 1.5 圈	80	25	75
2	双叶片 1 圈	80	5/15/25/35/45	75
3	双叶片 1 圈	80	25	60/75/90/105/120
4	双叶片 1 圈	60/70/80/90/100	25	75

2.1.5　模型验证

考虑到无法开展室内测试评价泡沫发生器的气液混合效果，笔者采用固相颗粒对叶轮的损伤来验证所建立模型的合理性。选取了对照组（中心流道直径 80 mm，叶轮距混合腔 25 mm，螺距 75 mm，圈数 1 圈）的叶轮冲蚀模拟结果与旋转磨料射流喷嘴叶轮的冲蚀情况进行对比，结果如图 3 所示。



a. 模拟结果　　b. 实际叶轮损伤

图 3　叶轮损伤模拟和实际结果

Fig. 3　Simulated and actual impeller damage

由图 3 可知，虽叶轮结构有所不同，但其损伤位置均位于叶轮边缘，说明固相颗粒在通过叶轮时，受剪切速率、离心力及密度差的影响，在叶轮边缘和流道壁面处切向速率较大，导致该处冲蚀速率较大。鉴于固相颗粒对泡沫发生器叶轮同旋转磨料射流喷嘴叶轮的冲蚀区域趋于一致，表明该模型可较为真实地展现固相颗粒的运移情况，可用于泡沫发生器的结构优化。

2.2　结构优化

2.2.1　叶轮结构

为明确叶轮结构对泡沫发生器气液混合效果的影响，模拟分析了不同叶轮结构下气相分布。

图 4 为有无叶轮的泡沫发生器剖面气相分布云图。由图 4 可知，在无叶轮条件下，由于气液两相互不相容且存在密度差异，两相混合主要集中在靠近壁面区域，流道中心区域无法得到较好的混合，气液混合效果较为有限。在有叶轮条件下，

叶轮的旋转作用引入了额外的动能和流场扰动，显著改变了流场的动力学特性。叶轮的剪切作用促进了气相与液相的混合，使气相在经过叶轮后分布更加均匀。因此，叶轮的存在显著增强了气液两相的混合效果，从而提升了泡沫发生器的整体性能。

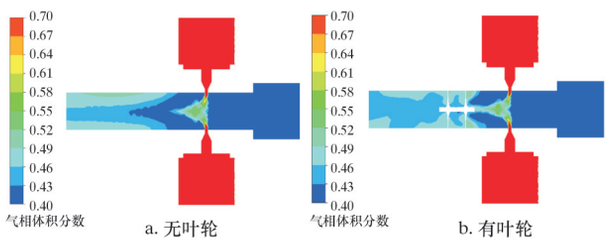


图 4　有无叶轮气相分布云图

Fig. 4　Gas-phase distribution contours with and without impeller

在出口面均匀设置 50 个监测点，基于监测点计算了出口面气相体积方差及叶轮表面、流道壁面的固相冲蚀速率。结果提取面如图 5 所示。

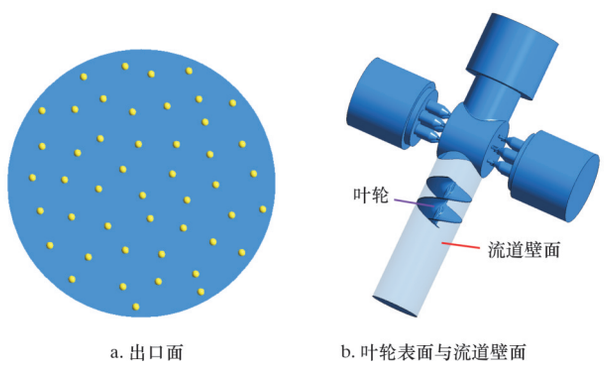


图 5　结果提取面示意图

Fig. 5　Result extraction surface

图 6 为在不同叶轮结构（无叶轮、单叶片 1 圈、双叶片 1 圈、双叶片 1.5 圈）下出口面气相体积分数方差及叶轮表面、流道壁面固相冲蚀速率模拟结果。由图 6 可知，单叶片 1 圈结构的出口面气相体积分数方差大于双叶片 1 圈结构，表明双叶片结构在增强气液混合效果方面优于单叶片结构。其原因在于单叶片结构会出现旋转的不平衡性，气液混合不均匀。随着叶轮圈数的增加，出口面气相体积分数方差趋于稳定，表明进一步增加叶轮圈数对气液混合效果的提升作用有限。增加叶轮叶片数和圈数，会显著增加固相颗粒对发生器内部叶轮和流道壁面的冲蚀速率，缩短发生器寿命，影响发泡效果。综合考虑发生器发泡效果和固相颗粒冲蚀速率，泡沫发生器的最优结构为双叶片 1 圈。

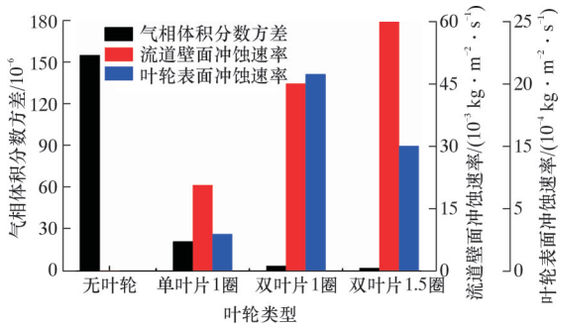


图 6　不同叶轮结构模拟结果

Fig. 6　Simulation results for different impeller structures

2.2.2　叶轮螺距

为探究叶轮螺距对气液混合效果的影响，模拟分析了不同螺距下气液混合效果。计算了出口面气相体积分数方差及叶轮表面、流道壁面的固相冲蚀速率，结果如图 7 所示。

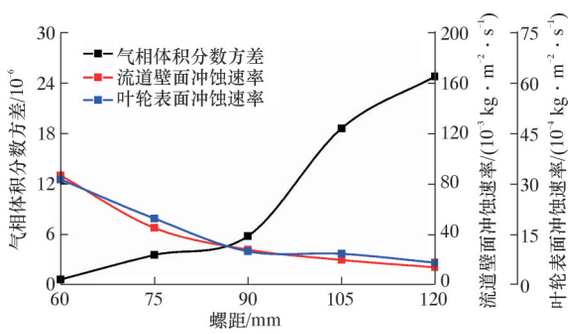


图 7　不同叶轮螺距模拟结果

Fig. 7　Simulation results for different impeller pitches

由图 7 可知，随着叶轮螺距增大，出口面气相体积分数方差呈现增大的趋势，这表明较小的螺距能够提高气液混合效果，使出口面气相分布呈现出较高的均匀性。其原因在于，保持总排量一定时，螺距增大导致叶轮内流体过流截面积增大，降低了气液两相流体的剪切速率和湍流强度，减弱了混合效果。同时，气液两相流体速度减小也降低了固相颗粒的轴向和切向动能，进而减小了其对流道壁面和叶轮的冲蚀。

图 8 为不同螺距下的气相体积分数分布云图。由图 8 可知：尽管叶轮的引入能够促进气液两相的混合，但螺距增大时，叶轮截面内出现明显的区域分离现象，即气液混合均匀区、过渡区及液相集中区。随着螺距增大，区域分离现象趋于明显，气液混合效果变差。其原因在于，在携砂液和氮气排量一定的条件下，螺距较小时，叶轮入口处流道截面收缩系数（中心流道过流面积与叶轮入口处过流面积之比）较大，导致气液进入叶轮的阻力增大，在叶轮入口处进一步促进了气液两相的混合；螺距增大时，截面收缩系数减小，叶轮

入口处阻力减小，导致部分液相未与气相充分混合，从而出现区域分离现象。考虑在实际压裂过程中最高含砂体积分数可达70%，螺距较小会导致摩阻、压耗及固相颗粒冲蚀速率变大，影响压裂效果和发生器寿命。综合气相体积分数方差和冲蚀速率的变化规律，优选泡沫发生器叶轮螺距范围为75~90 mm。

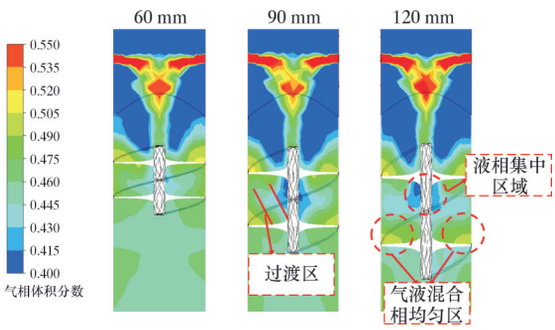


图 8　不同叶轮螺距下气相体积分数分布云图

Fig. 8　Gas-phase volume distribution contours for different impeller pitches

2.2.3　叶轮位置

发生器叶轮设置位置同样影响气液混合效果。模拟分析了不同叶轮位置下气液混合效果，结果如图9所示。由图9可知，随着叶轮位置与混合腔距离的增大，出口面气相体积分数方差呈波动变化。当叶轮距混合腔25 mm时方差最大，气液混合效果最差；距混合腔5 mm时方差最小，混合效果较好；其余位置时方差变化不大。同时，不同叶轮位置下流道壁面和叶轮表面的冲蚀速率基本一致，表明固相颗粒对固体表面冲蚀速率受叶轮位置的影响较小，受叶轮结构影响较大。

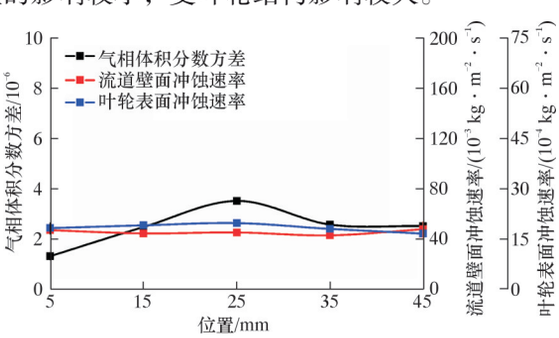


图 9　不同叶轮位置模拟结果

Fig. 9　Simulation results for different impeller positions

2.2.4　中心流道直径

为明确中心流道直径对气液混合效果的影响，模拟分析了不同中心流道直径下出口面气相体积分数方差及叶轮表面、流道壁面的固相冲蚀速率，结果如图10所示。

由图10可知：随着中心流道直径增大，出口面气相体积分数方差呈现出先减小后增大趋势，转折点为80 mm；而流道壁面和叶轮表面冲蚀速率逐渐减小。其原因在于，氮气排量不变时，经对冲器后所产生的气体射流动能不变，即其穿透液流的能力不变。随着中心流道直径的增大，气液两相的混合过程受到双重影响：一方面，中心流道直径的增大导致液流流速降低，增加了气体射流穿透液流的距离，促进了气液混合；另一方面，中心流道直径增大，削弱了气液两相流体的剪切速率和湍流强度，在一定程度上阻碍了气液的混合，故中心流道直径存在最优值。同时，由于气液两相流体的剪切速率和湍流强度随中心流道直径增大逐渐降低，固相颗粒的轴向和切向动能也随之减小，从而导致其对壁面和叶轮冲蚀速率降低。

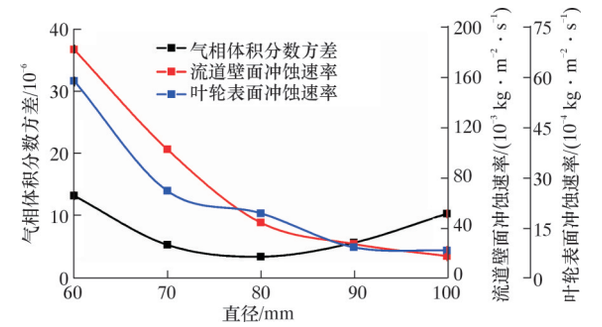


图 10　不同中心流道直径模拟结果

Fig. 10　Simulation results for different central-channel diameters

为进一步明确其影响机理，提取了中心流道直径60、80、100 mm时的气相体积分数分布云图，结果如图11所示。

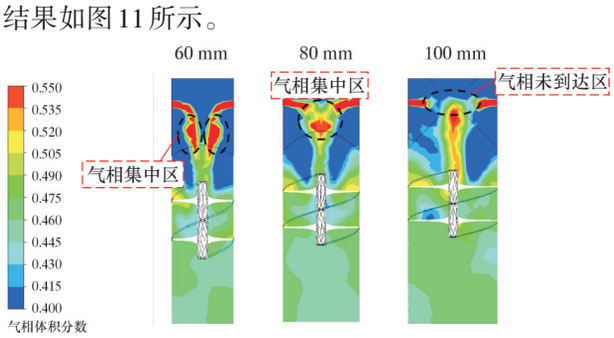


图 11　不同中心流道直径气相体积分数分布云图

Fig. 11　Gas-phase distribution contours for different central-channel diameters

由图11可知：中心流道直径60 mm时，由于液流流速较大，气体射流无法到达流道中心区域，在流道中心附近产生显著的气相集中区域，在一定程度上限制了气液两相之间的混合。相较于60 mm，直径80 mm时液流速度下降，造成气液两相流体的剪切速率和湍流强度降低，在一定程度

上影响了气液混合，但其两侧气体射流均到达了流道中心区域，促进了气液两相的混合。中心流道直径为100 mm时，一方面，在保持排量一定的条件下，液流速度下降，气体射流穿透能力增强，但由于径向距离增大，导致气体射流无法到达流道中心，难以实现气液两相之间的充分混合；另一方面，中心流道过流面积增大，也会使气液两相流体的剪切速率和湍流强度降低，从而进一步导致出口面混合效果变差。综合出口面气相体积分数方差和气相体积分数分布云图，考虑固相颗粒对流道壁面的冲蚀和现场地面管线尺寸，优选中心流道直径为80~90 mm。

2.2.5　结构参数优选

为优选发生器结构，采用响应面分析法对中心流道直径A、叶轮螺距B、叶轮距混合腔距离C三因素，及其对应的出口面气相体积分数方差Y_1、流道壁面冲蚀速率Y_2开展回归方差分析，所对应的多元回归拟合方程如下：

$$Y_1 = 3.43A^2 + 2.45B^2 - 0.15C^2 - 0.65A + 7.27B - 0.36C + 6.71 \quad (1)$$

$$Y_2 = 18.69A^2 + 9.90B^2 - 0.98C^2 - 48.32A - 17.52B + 26.99 \quad (2)$$

三因素与出口面气相体积分数方差、流道壁面冲蚀速率回归模型方差分析结果如表2所示。

表2　回归模型方差分析结果

Table 2　Results of variance analysis of regression model

方差来源	出口面气相体积分数方差			流道壁面冲蚀速率		
	F	p	显著性	F	p	显著性
模型	39.49	<0.000 1	**	438.79	<0.000 1	**
A	1.11	0.313 7		1 554.83	<0.000 1	**
B	170.39	<0.000 1	**	240.15	<0.000 1	**
C	0.31	0.588 1		3.767×10^{-6}	0.998 5	
A^2	54.55	<0.000 1	**	395.82	<0.000 1	**
B^2	27.41	0.003	**	110.70	<0.000 1	**
C^2	0.11	0.745 7		1.10	0.317 2	
	R^2=0.955 6；R^2_{Adj}=0.931 4			R^2=0.995 8；R^2_{Adj}=0.993 6		

注：*代表差异显著（p<0.05）；**代表差异极显著（p<0.01）

结合式（1）、式（2）及表2可得，该回归模型为线性回归模型，无交互项。由模型修正相关系数R^2_{Adj}、模型项p及决定系数R^2可得，模型理论值和结果值相关性较好，可用该模型来分析模拟结果。比较因素的F值可知，影响出口面气相体积分数方差的因素主次顺序为：$B>A>C$；影响流道壁面冲蚀速率的因素主次顺序为：$A>B>C$。

综上所述，以最小出口面气相体积分数方差和较小冲蚀速率为目标，考虑摩阻、压耗及现场施工安全等因素，结合不同参数下出口面气相体积分数方差和冲蚀速率变化规律，优选泡沫发生器结构参数为：叶轮结构为双叶片结构，叶轮圈数为1圈，叶轮螺距90 mm，叶轮距混合腔距离5 mm，中心流道直径80 mm。

3　现场应用

为验证泡沫发生器性能，选取西部某油田一口致密砂岩气井（H井）开展现场试验。H井共完成2段氮气泡沫压裂作业，携砂液阶段具体施工参数如表3所示。

表3　氮气泡沫压裂携砂液阶段施工参数

Table 3　Operating parameters in the sand-carrying fluid stage of nitrogen foam fracturing

压裂段	携砂液排量/（$m^3\cdot min^{-1}$）	液氮排量/（$L\cdot min^{-1}$）	施工压力/MPa	地面最高含砂体积分数/%	加砂量/m^3
第1段	1.5	1 400	54.8~60.9	40.0	47.6
第2段	1.5	1 400	53.1~62.4	55.0	48.4

由表3可知，H井2段压裂整体施工压力较为平稳，地面最高含砂体积分数达到55.0%，累计加砂量96.0 m^3。现场试验结果表明，该泡沫发生器整体性能稳定，能够产生稳定性好的泡沫，可用于致密砂岩气藏氮气泡沫压裂施工作业。

4　结　论

（1）基于现有泡沫发生器结构和类型，结合现场实际应用需求，设计了一种侧对冲式泡沫发生器，该发生器具有结构简单、气液混合效率高等特点，可广泛应用于泡沫压裂、泡沫洗井等油气井作业，具有较高的工程应用价值。

（2）泡沫发生器中叶轮的存在一方面促进了气液两相混合，另一方面增大了固相颗粒对流道壁面和叶轮的冲蚀；气液两相混合效果随中心流道直径增大先提升后变差，随叶轮螺距增大逐渐变差；固相颗粒对泡沫发生器叶轮和流道壁面的冲蚀速率随螺距和中心流道直径增大均呈现降低趋势；叶轮设置位置对气液两相混合效果和冲蚀速率影响较小。

（3）基于数值模拟结果与响应面分析法，明确了泡沫发生器的最优结构参数：叶轮采用双叶片结构，圈数为1圈，螺距90 mm，叶轮距混合腔距离5 mm，中心流道直径80 mm。

（4）优化后的泡沫发生器成功在H井上完成2段压裂作业，证明该泡沫发生器整体性能稳定，能够产生稳定性好的泡沫，可用于致密砂岩气藏氮气泡沫压裂施工作业。

参　考　文　献

[1] 夏铭琪，杨宁. 天然气资源禀赋近似国家价格政策研究及对我国的启示［J］. 当代石油石化，2025，33（7）：8-12.
Xia Mingqi，Yang Ning. Research on the price policies of countries with similar natural gas resource endowments and the implications for China［J］. Petroleum & Petrochemical Today，2025，33（7）：8-12.

[2] 程敏华，雷丹凤，张连群，等. 苏里格致密砂岩气田效益开发技术对策研究［J］. 油气藏评价与开发，2024，14（3）：475-483.
Cheng Minhua，Lei Danfeng，Zhang Lianqun，et al. Technical strategy for beneficial development of tight sand gas in Sulige Gas Field［J］. Petroleum Reservoir Evaluation and Development，2024，14（3）：475-483.

[3] 蒋新立，李明忠，张军义，等. 东胜气田致密气藏经济开发钻完井关键技术［J］. 石油钻探技术，2025，53（1）：10-16.
Jiang Xinli，Li Mingzhong，Zhang Junyi，et al. Key technologies of drilling and completion for economic development of tight gas reservoirs in Dongsheng Gas Field［J］. Petroleum Drilling Techniques，2025，53（1）：10-16.

[4] 张岩，冯海顺，翟勇，等. 低渗透稠油油藏CO_2压驱提高采收率机理及规律研究［J］. 石油钻探技术，2024，52（6）：97－106. DOI：10.11911/syztjs.2024070
Zhang Yan，Feng Haishun，Zhai Yong，et al. Mechanism and law of CO_2 pressure flooding in enhancing oil recovery in low-permeabilityheavy oil reservoirs［J］. Petroleum Drilling Techniques，2024，52（6）：97-106.

[5] 李国欣，雷征东，董伟宏，等. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望［J］. 中国石油勘探，2022，27（1）：1-11.
Li Guoxin，Lei Zhengdong，Dong Weihong，et al. Progress，challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC［J］. China Petroleum Exploration，2022，27（1）：1-11.

[6] Kang Wanli，Zhou Bobo，Issakhov M，et al. Advances in enhanced oil recovery technologies for low permeability reservoirs［J］. Petroleum Science，2022，19（4）：1622-1640.

[7] 王永祥，杨涛，鞠秀娟，等. 中国油气探明经济可采储量状况分析［J］. 中国石油勘探，2023，28（1）：26-37.
Wang Yongxiang，Yang Tao，Ju Xiujuan，et al. Status of proven economic recoverable oil and gas reserves in China［J］. China Petroleum Exploration，2023，28（1）：26-37.

[8] 肖红林，卜春亮，侯甫，等. 基于产气剖面的致密气藏裂缝参数自动反演研究［J］. 油气藏评价与开发，2025，15（5）：815-823.
Xiao Honglin，Bu Chunliang，Hou Fu，et al. Automatic inversion of fracture parameters in tight gas reservoirs based on gas production profile［J］. Petroleum Reservoir Evaluation and Development，2025，15（5）：815-823.

[9] 孔祥伟，许洪星，时贤，等. 致密砂岩气藏暂堵压裂裂缝起裂扩展实验模拟［J］. 油气藏评价与开发，2024，14（3）：391-401.
Kong Xiangwei，Xu Hongxing，Shi Xian，et al. Experimental simulation of fracture initiation and morphology in tight sandstone gas reservoirs temporary plugging fracturing［J］. Petroleum Reservoir Evaluation and Development，2024，14（3）：391-401.

[10] 张承武，武月荣，万向辉，等. 对冲式泡沫发生器的流体建模与有限元仿真［C］//2023国际石油石化技术会议（2023IPPTC），北京，2023：1-7.
Zhang Chengwu，Wu Yuerong，Wan Xianghui，et al. Fluid modeling and finite element simulation of opposite jet foam generator［C］//2023 International Petroleum and Petrochemical Technology Conference（2023IPPTC），Beijing，2023：1-7.

[11] 李松岩，李兆敏，李宾飞，等. 泡沫发生器内部流场的数值模拟［J］. 石油矿场机械，2009，38（2）：5-11.
Li Songyan，Li Zhaomin，Li Binfei，et al. Numerical simulation of flow field in foam generator［J］. Oil Field Equipment，2009，38（2）：5-11.

[12] 李家丞，栾伯川. 射流式泡沫发生器内部流场的数值模拟［J］. 辽宁化工，2017，46（9）：920-922.
Li Jiacheng，Luan Baichuan. Numerical simulation of internal flow field in jet-type foam generator［J］. Liaoning Chemical Industry，2017，46（9）：920-922.

[13] Cummins M A. Foam generating device for wells：US 4457375［P］. 1984-03-07.

[14] Halliburton Company. Downhole foam generator：US 4730676［P］. 1988-03-15.

[15] Nguyen P，Fadaei H，Sinton D. Pore-scale assessment of nanoparticle-stabilized CO_2 foam for enhanced oil recovery［J］. Energy & Fuels，2014，28（10）：6221-6227.

[16] Conn C A，Ma K，Hirasaki G J，et al. Visualizing oil displacement with foam in a microfluidic device with permeability contrast［J］. Lab on a Chip，2014，14（20）：3968-3977.

[17] 闫月娟，曹宇航，刘崇江，等. 井下氮气泡沫发生器结构设计及发泡性能数值模拟［J］. 机械设计，2021，38（1）：64-71.
Yan Yuejuan，Cao Yuhang，Liu Chongjiang，et al. Structural design of the underground nitrogen foam generator and numerical simulation of its foaming performance［J］. Journal of Machine Design，2021，38（1）：64-71.

[18] 刘承婷，张维薇，刘钢，等. 螺旋挡板式泡沫发生器的设计及内部流动特性研究［J］. 数学的实践与认识，2018，48（8）：120-127.
Liu Chengting，Zhang Weiwei，Liu Gang，et al. Design of spiral baffle foam generator and study on internal flow characteristics［J］. Mathematics in Practice and Theory，2018，48（8）：120-127.

[19] 刘承婷，刘钢，闫作秀，等. 气相压力对挡板式泡沫发生器影响的实验研究［J］. 当代化工，2019，48（1）：144-146.
Liu Chengting，Liu Gang，Yan Zuoxiu，et al. Experimental study on influence of gas pressure on baffle foam generator［J］. Contemporary Chemical Industry，2019，48（1）：144-146.

[20] 章志轩，鲁明春，颜廷超，等. 涩北气田连续油管泡沫发生装置的设计与应用［J］. 焊管，2021，44（10）：27-32.
Zhang Zhixuan，Lu Mingchun，Yan Tingchao，et al. Design and application of coiled tubing foam generator in Sebei gas field［J］. Welded Pipe and Tube，2021，44（10）：27-32.

[21] 桑小娜. 井下泡沫发生器内气液两相流的数值模拟及实验研究［D］. 大庆：东北石油大学，2022.
Sang Xiaona. Numerical simulation and experimental study of gas-liquid two-phase flow in downhole foam generator［D］. Daqing：Northeast Petroleum University，2022.

[22] 闫月娟，曹宇航，桑小娜，等. 井下泡沫发生器内流场数值模拟及结构优选［J］. 化工机械，2021，48（1）：89-93.
Yan Yuejuan，Cao Yuhang，Sang Xiaona，et al. Numerical simulation and structural optimization of flow field in downhole foam generator［J］. Chemical Engineering & Machinery，2021，48（1）：89-93.

[23] 金新. 松软煤层用泡沫发生器结构优化及发泡效果模拟［J］. 煤田地质与勘探，2024，52（8）：213-219.
Jin Xin. Structure optimization of foam generator for soft coal seam and foaming effect simulation［J］. Coal Geology & Exploration，2024，52（8）：213-219.

[24] 李源源，刘志尧，方福君，等. 泡沫发生器工作原理与监测方法研究［J］. 石油机械，2025，53（增刊1）：47-53.
Li Yuanyuan，Liu Zhiyao，Fang Fujun，et al. Research on the working principle and monitoring method of foam generator［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（S1）：47-53.

[25] 王万响. 井下微泡沫发生器内气泡破碎的数值模拟及试验研究［D］. 大庆：东北石油大学，2023.
Wang Wanxiang. Numerical simulation and experimental study on bubble breakage in downhole micro foam generator［D］. Daqing：Northeast Petroleum University，2023.

[26] 彭建峰，岳明，楼一珊，等. 基于Fluent-DPM方法的金属网布筛管冲蚀寿命三维仿真研究［J］. 石油钻探技术，2025，53（1）：115-121.
Peng Jianfeng，Yue Ming，Lou Yishan，et al. Three-dimensional simulation of erosion life of metal mesh screen pipe based on Fluent-DPM method［J］. Petroleum Drilling Techniques，2025，53（1）：115-121.

[27] Yang Siqi，Zhang Laibin，Fan Jianchun，et al. Experimental study on erosion behavior of fracturing pipeline involving tensile stress and erosion prediction using random forest regression［J］. Journal of Natural Gas Science and Engineering，2021，87：103760.

第一作者简介：谷子昂，生于1997年，现为在读博士研究生，研究方向为水射流技术在钻井与压裂方面的应用。地址：（102249）北京市昌平区。电话：（010）89732176。email：gza971009@163.com。

通信作者：史怀忠，研究员。email：shz@cup.edu.cn。

修改回稿日期：2026-02-08

（本文编辑　刘海森）