

# 激波雾化排水采气流道优化仿真及试验

鲍作帆<sup>1</sup>, 李楠<sup>2</sup>, 张超<sup>3</sup>, 乔晶<sup>3</sup>, 高秀丽<sup>1</sup>

1. 中国石油集团渤海钻探工程有限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有限公司工程技术研究院 天津 300280

3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: baozuofan@126.com

引用: 鲍作帆, 李楠, 张超, 等. 激波雾化排水采气流道优化仿真及试验[J]. 油气井测试, 2022, 31(1): 8-16.

Cite: BAO Zuofan, LI Nan, ZHANG Chao, et al. Optimization analysis on supersonic shock atomization nozzle for gas wells[J]. Well Testing, 2022, 31(1): 8-16.

**摘要** 为解决苏里格气井井筒内积液问题, 采用计算流体力学仿真分析手段, 结合激光流动实验测量技术, 围绕雾化器及安放位置数值优化分析、雾化器流道室内测试等内容, 开展了仿真实验研究。针对激波雾化排水采气的喷管构型, 采用 Bezier 曲线建模方法进行参数化, 利用基于 Fluent/Matlab 协同仿真的自动优化平台对在不同实验环境及外场条件的喷管外形进行了优化, 搭建超声速激波雾化实验系统; 针对优化设计的雾化器及两种常规雾化器, 采用粒子阴影图像测试技术, 对雾化速度、颗粒直径开展实验研究。对比数值仿真分析结果, 表明该研究所采用的数值计算模型、湍流模型、边界设置条件等能够准确模拟出雾化器内部流动特性, 为后续实验验证提供相应的较优喷管外形, 也为在不同天然气井工况下选择合适的喷管外形提供了参考。

**关键词** 气井积液; 排水采气; 激波雾化; 流体力学; 粒子图像测速技术

中图分类号: TE925 文献标识码: A DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.01.002

## Optimization Analysis on Supersonic Shock Atomization Nozzle for Gas Wells

BAO Zuofan<sup>1</sup>, LI Nan<sup>2</sup>, ZHANG Chao<sup>3</sup>, QIAO Jing<sup>3</sup>, GAO Xiuli<sup>1</sup>

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. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling and Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

**Abstract:** In order to solve the problem of liquid accumulation in the wellbore of Sulige gas well, a simulation experiment study was carried out by using computational fluid dynamics simulation analysis method, combined with laser flow experimental measurement technology, centering on numerical optimization analysis of atomizer and its placement position, and indoor test of atomizer flow channel. Aiming at the nozzle configuration of shock atomization drainage gas recovery, Bezier curve modeling method was used to parameterize the nozzle configuration. The automatic optimization platform based on Fluent/Matlab co-simulation was used to optimize the nozzle shape in different experimental environments and field conditions, and a supersonic shock atomization experimental system was established. The atomization speed and particle diameter of the optimized atomizer and two conventional atomizers were experimentally studied by using the particle shadow image testing technology. Comparing the results of numerical simulation analysis, it shows that the study of numerical calculation model, turbulence model, boundary conditions and so on can accurately simulate the internal flow characteristics, atomizer nozzle for subsequent experiment provide a better appearance, also to choose the right nozzle under different working condition of gas Wells shape provides reference.

**Keywords:** liquid accumulation in gas wells; The drainage gas recovery; supersonic atomization; fluid mechanics; particle size measurement

在天然气开采过程中, 随着开采时间的延续, 气井井底压力和天然气流动速度逐步降低, 致使气藏中的产出水或凝析液不能随天然气流携带出井

筒, 从而滞留在井筒中。这些液体在一段时间内聚集于井底形成液柱, 对气藏造成额外的静水回压, 导致气井自喷能量持续下降。通常, 如果这种情况

持续下去,井筒中聚集的液柱会将气体压死,导致气井停产。这种现象便称之为“气井积液”。气井积液严重影响天然气的生产,必须及时排除。王柳等<sup>[1]</sup>针对蜀南气矿低压低产量气井携液能力差、井底易积液等生产现状,气矿引进了撬装式毛细管加注泡沫排水采气设备,对坝17井等井站进行排水采气现场试验。杨涛等<sup>[2]</sup>在论述气井井下涡流排水采气的工艺原理、技术优点,工具组成、下入操作程序的基础上,总结了该技术在松辽盆地、鄂尔多斯盆地所取得的主要成果、经验与认识,并进一步提出了深入进行科研、试验与攻关的可行性建议。

为解决气井井筒内积液问题,国内外开展了较多的研究,取得了较好的效果。郭春伶等<sup>[3]</sup>依据柱塞管柱优选理论,结合苏里格气田井筒实际情况,优选适合该气田的连续油管作为生产管柱,在原 $\phi 73$  mm油管内下入 $\phi 38.1$  mm连续油管,采用连续油管生产后,产气量产水量均明显增加,取得了较好的排水采气效果。周际永等<sup>[4]</sup>对国内外常规排水采气工艺的工作原理、优缺点以及用于排水采气井的应用条件、实际效果进行了介绍。蒋晓荣等<sup>[5]</sup>针对川东气田产水问题提出了“深井、高温井、高矿化度气井泡沫排水采气技术研究”研制了SPI-C1 1(A),SPI-C1 1(B)型起泡剂。

国内外油田近十年来主要采用了以下几种排水采气技术:泡沫排水、同心毛细管技术、涡流排水、连续油管排水、天然气连续循环、速度管柱排水、柱塞(球塞)气举、深抽排水、井间互联井筒激动排液、多级节流阀互助排液、注氮、小直径管采气、小井眼井钻采技术、优选管柱采气、气井深度排水、电潜泵、射流泵、泡排与其他工艺相结合等。白晓弘等<sup>[6]</sup>依据管柱优化理论针对速度管柱排水采气改进了悬挂器、卡瓦及堵塞器等配套工具,优化了降压方式和井口采气树,提高了施工效率和安全性,取得了良好的应用效果。张荣军等<sup>[7]</sup>根据柱塞排水采气的特点和工艺要求,对柱塞气举排水采气工艺进行了研究。李怀庆等<sup>[8]</sup>在对比分析液氮、气举、化排和机抽等各种常规排液复产工艺优缺点的基础上,提出了一种操作方便、复产快捷、长期有效的排液复产新方法—井间互联井筒激动排液复产工艺。只是怎样更有效,更经济解决这个问题。还需要进一步深入研究,开发出经济、高效的排液方法和技术。

刘宏英等<sup>[9]</sup>,高银锁等<sup>[10]</sup>,赵粉霞等<sup>[11]</sup>李文

魁等<sup>[12]</sup>提出了撬装式制氮注氮气举、气井储层分类与气井排液措施制定建立联系、小直径管排水采气的工艺等不同排液方式对气井排液效果进行改进。梅明华等<sup>[13]</sup>孙海军<sup>[14]</sup>于淑珍等<sup>[15]</sup>于超<sup>[16]</sup>分别从可控热化学复合排水技术、优选管柱排水采气技术、柱塞排水、井间互联环空气举排液技术、优化气井排水采气制度、引进新型排水采气技术等方面对积液气井的排水采气技术进行了研究。这些技术各有长处,针对不同气井的工作条件采用不同的排液方法,同时也受到各种生产条件的限制,有的设备庞大复杂,投入费用高,且部分技术尚处于设想和实验室实验,尚未应用到生产中。为此研发了马赫激波雾化器排液增产技术。该技术应用激波震荡与超音速喷射剪切等航空航天原理对气井内的携液气体流动状态进行改变优化,提升排液效率。本文应用计算流体动力学与高保真数值仿真技术对该技术工具最核心的喷射雾化单元进行设计优化,以保证工具合理的发挥最大效能,保证后期现场排液工艺有效性。

## 1 雾化器流道优化设计

分别利用超声速喷管的参数化方法和基于遗传算法优化方法对雾化器流道进行优化分析。

### 1.1 参数化方法

在基础排水采气节流器模型上,利用超声速喷管型面替代传统的板孔喷管,以期获得超声速气流加速作用。图1为超声速喷管的剖面图,图2为超声速喷管的几何示意图。超声速喷管包括渐缩段和渐扩段两部分,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管渐缩段,气流被压缩速度升高,在喉道处达到临界状态,临界状态气流经喷管渐扩段膨胀,气流被加速到超声速状态。为了防止超声速气流经过强转折而产生激波,导致总压恢系数下降,喷管渐扩段与井筒内壁保证水平相切。

为了保证喷管设计合理性,采用空天领域的成熟曲线设计理论 Bezier 曲线对超声速喷管外形进行参数化建模。Bezier 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滑的喷管构型,进一步开展高效的气动优化设计。

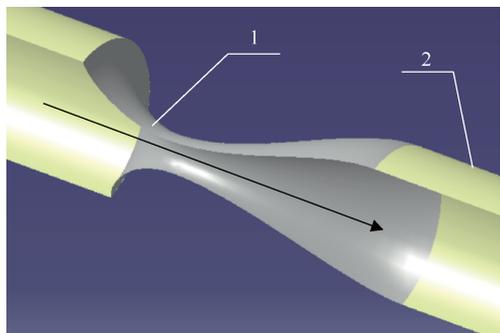


图1 超声速喷管的剖面图

Fig. 1 Section of supersonic nozzle

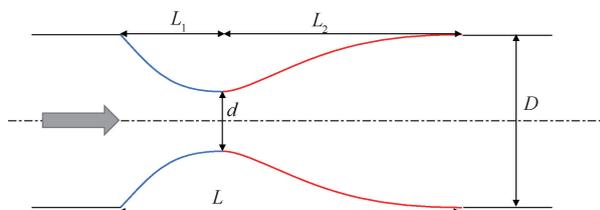


图2 超声速喷管的外形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of supersonic nozzle

## 1.2 基于遗传算法优化

基于遗传算法的优化流程图见图3。

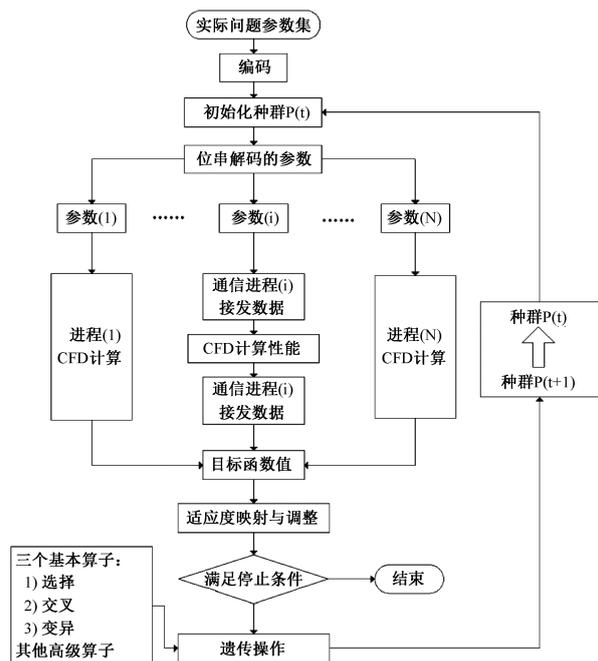


图3 基于遗传算法的优化流程图

Fig. 3 Optimization flow chart based on genetic algorithm

算法以随机生成或直接指定的种群作为父代,以“适应性”作为准则从种群中挑选优良个体进行相应的交叉、复制、变异来生成下一代。随着进化过程的不断推进,种群适应度不断提升,当群体适应度和最优个体适应度不再提升时,进化停止。最

后一代种群中的最优个体,即为优化问题的最优解。

遗传算法的整个流程主要包括以下几个步骤:

**编码:**在使用遗传算法的过程中,首先要解决针对求解的问题选取合适的编码和解码方式,该过程对应的就是遗传中的创造染色体过程。本文采用的编码方式为二进制编码,编码长度取决于自变量的范围和搜索精度,所以围绕它们来考虑如何编码,它的每一维称为一个基因,取值为0或1。

**初始化:**一般初始化就是随机选取一组设计变量作为初始种群,但是对于复杂且庞大的设计空间,初始种群选取十分重要,较优的初始种群可以在一定程度上提高进化的速度,同时降低陷入局部最优的概率,本文的优化参数仅有10个,数量不是特别多,采用随机选取的初始种群,初始种群以及后续种群每代个体数均为20。

**选择:**以个体适应度与种群所有个体适应度之和的比值作为评价指标,从种群中选取优胜的个体,这个值越大,意味着该个体被选择进入下一代的概率越大,在本文的计算中,喷管喉部后轴线上的最大速度值作为个体适应度。

**交叉:**对两个父代个体各自提取部分结构,将提取的子结构进行重组从而生成新的个体,本文中整体的交叉概率选定0.6。

**变异:**变异算子用其他的基因值取代某个个体编码串中相对应的基因值,诞生新的个体。变异算子一方面决定了遗传算法的局部搜索能力;另一方面保持了群体的多样性,避免早熟现象。

**解码:**编码方式与解码方式一一对应,通过解码,将最终搜索得到的最优解的字符串,转为设计空间内各设计变量的取值。

本文基于遗传算法的喷管外形优化主要依托 Matlab/Fluent 平台,其中由 Matlab 的遗传算法工具生成每代每个个体所对应的参数,输入 CATIA 中自动生成相应外形的喷管模型,再通过脚本将模型导入 ICEM 中自动生成网格,生成的网格导入到 Fluent 中自动进行 CFD 仿真,得到该个体所对应的适应度值。

## 2 实验环境优化

为了为实验验证提供最优构型,故计算工况与实验工况相匹配,即管道出口压力为 0.1 MPa,管道入口压力分别为 0.4 MPa、0.45 MPa、0.5 MPa、0.55 MPa 和 0.6 MPa。图4显示了采用遗传

算法对入口压力为 0.5 MPa 下的喷管外形进行优化的历程,由图 4(a)可以看出迭代到 12 代后,每代种群平均适应值与最优适应值基本相等且随迭代次数的增多并无太大变化,相比于初始种群最优个体,最终的最优值最大速度提高了近 100 m/s,优化效果较为明显。由图 4(b)可以看出随着优化的进行,遗传算法所生成的外形基本遍历整个参数范围,在一定程度上保证了优化结果的全局最优性。

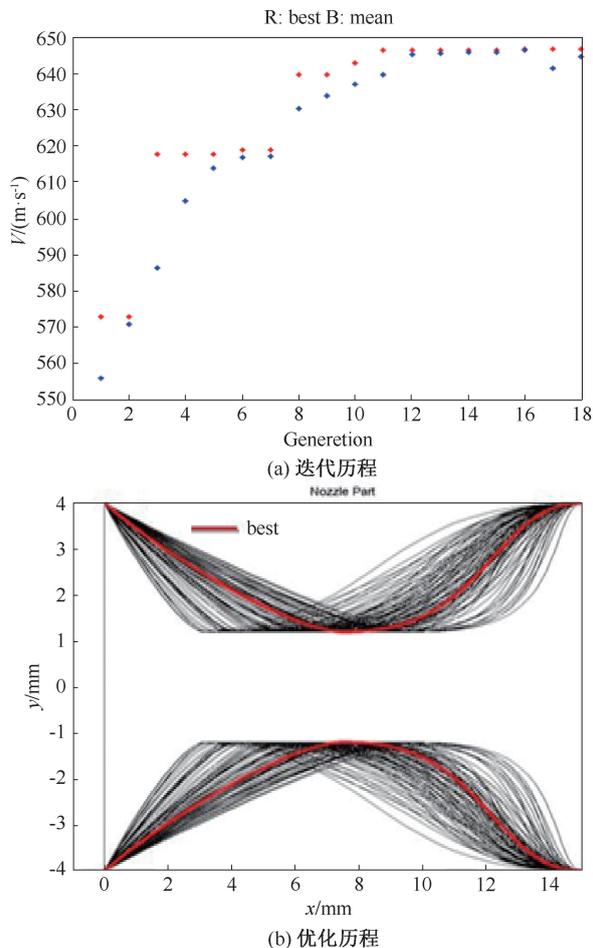


图 4 入口压力 0.5 MPa 下的喷管外形优化历程图  
Fig. 4 Process diagram of nozzle shape optimization under inlet pressure of 0.5 MPa

入口压力 0.5 MPa 下最优喷管外形的流场云图如图 5 所示,图 6 则展示了该最优构型与基础板孔构型的性能对比。可以看出无论是板孔构型还是喷管构型,在喉部下游都会形成超音速区域,且均有激波产生,但是相比于基础板孔构型,拉瓦尔喷管构型的最大速度更高,激波更强,激波的数量更多,喷管下游的速度也相应更大,因而就最终的雾化效果而言,拉瓦尔喷管构型更好。

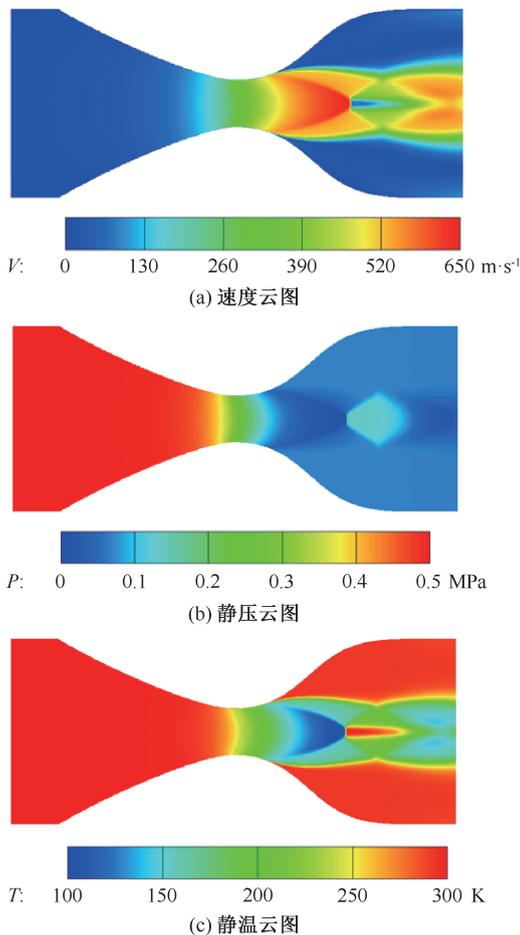


图 5 入口压力 0.5 MPa 下最优喷管外形的流场云图  
Fig. 5 Flow field cloud diagram of the optimal nozzle shape under 0.5 MPa inlet pressure)

### 3 外场条件优化

为了优化设计出未来在不同天然气井工况下投入使用的不同超声速喷管,参考表 1 中的苏里格天然气井现场数据。表 1 可以发现井口的平均油压均在 1 MPa 左右,平均套压范围大概在 5~10 MPa 之间。由此对外场条件下超声速喷管优化设计时,控制管道出口压力为 1 MPa,管道入口压力分别为 6 MPa、8 MPa、10 MPa、12 MPa 和 14 MPa。与实验环境中超声速喷管优化不同的是,此处还将喷管喉径作为参数,针对不同喉径的喷管进行喷管外形参数的优化,为未来针对不同天然气井工况提供更多的喷管外形选择。

现仅列出入口压力为 10 MPa 的优化结果(图 7)。与基础板孔构型相比,喷管构型中超声速区域沿径向更宽,即超声速区域更大;沿轴向,喷管的最高速度高出 50 m/s 左右,喷管最高速度位置后的激波强度更高,反应在速度的降低幅度更大,故喷管

构型的雾化效果要比板孔构型更优。

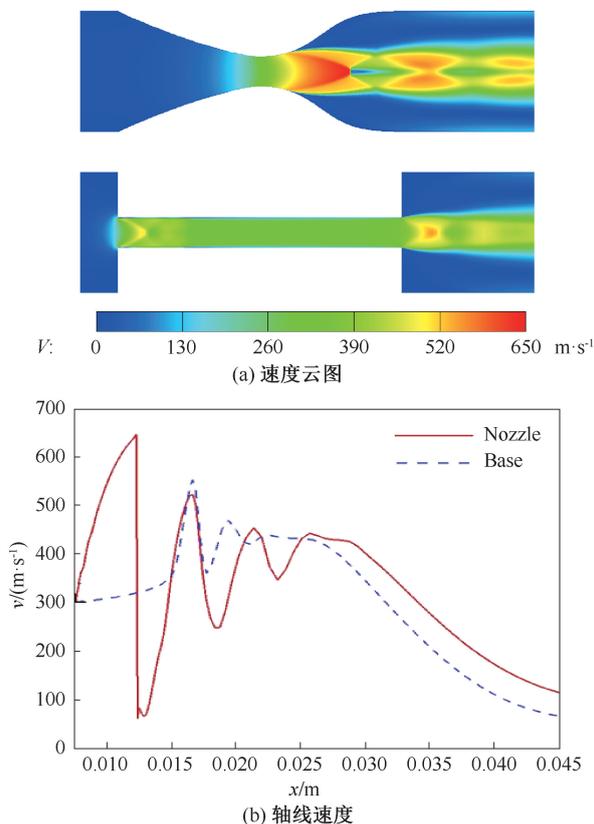


图6 入口压力 0.5 MPa 下最优喷管外形与基础板孔构型性能对比图

Fig. 6 Performance comparison between the optimal nozzle shape and the base plate hole configuration at 0.5 MPa inlet pressure

表1 苏里格天然气井现场数据统计表  
Table 1 Field data statistics of Sulige gas well

区块	产量/ 10 000 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	数量/ 口	平均 油压/ MPa	平均 套压/ MPa	平均产量/ 10 000 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	平均井 口温度/ $^{\circ}\text{C}$
20	>2	2	0.97	10.12	2.72	8.91
	1.5~2	11	1.4	10.08	1.69	8.73
	1~1.5	35	1.2	8.06	1.22	8.65
	0.5~1	93	0.99	7.45	0.77	8.63
	<0.5	65	1.29	6.91	0.23	8.58
25	>2	6	1.25	8.09	2.95	8.91
	1.5~2	7	1.54	8.67	1.68	8.73
	1~1.5	14	1.26	8.64	1.14	8.65
	0.5~1	67	1.84	9.44	0.72	8.63
	<0.5	286	1.6	6.05	0.15	8.58
76	>2	6	1.26	6.43	2.66	8.91
	1.5~2	7	1	5.3	1.71	8.73
	1~1.5	13	0.91	6.45	1.24	8.65
	0.5~1	67	1.08	7.43	0.67	8.63
	<0.5	93	2.92	5.05	0.24	8.58

#### 4 激波雾化器安放位置优选

喷管举升高度即从喷管入口开始加速至管道

下游速度稳定所经过的高度。图8反应了不同入口压力即安装高度下喷管举升高度,可以看出在喉道直径一定的情况下,安装位置的变化对气流抬升动量的影响不大,但对节流器局部的加速比影响剧烈,而产生更加强烈的雾化效果,会产生更加微小直径的液滴,从而影响液滴的排除效率。

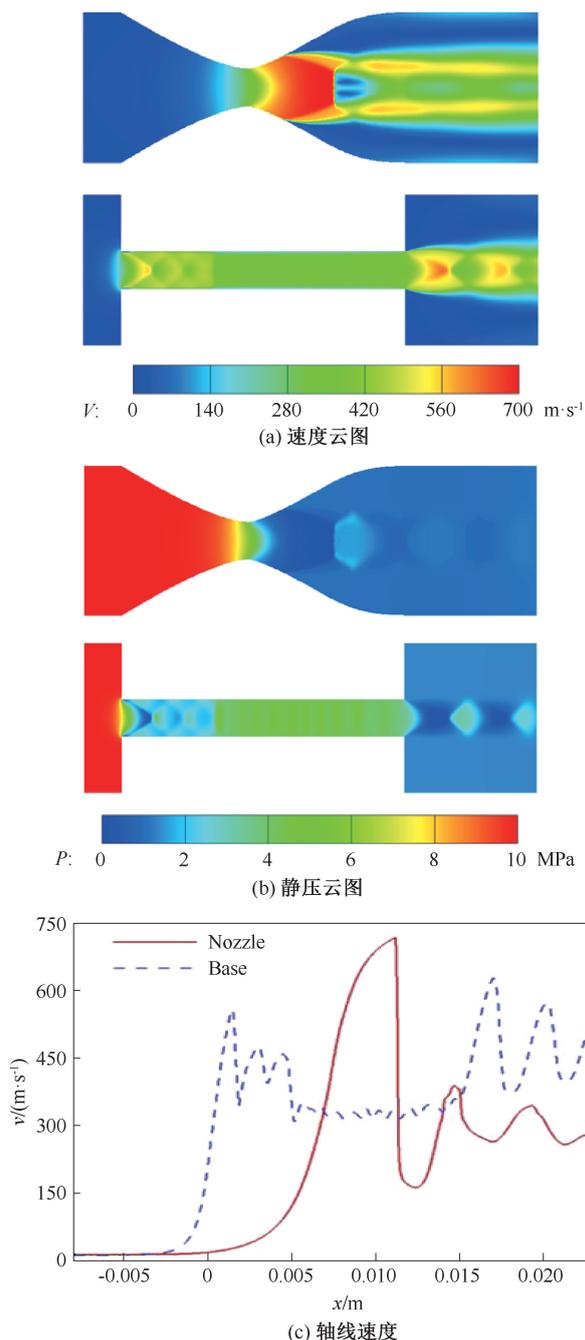


图7 入口压力 10 MPa,喉径 2 mm 下最优喷管外形与基础板孔构型性能对比

Fig. 7 Comparison between optimal nozzle configuration and basic plate hole configuration Inlet pressure 10 MPa, throat diameter 2 mm

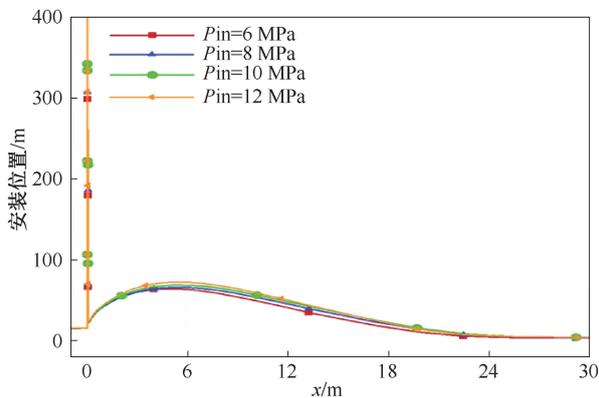


图 8 不同入口压力下喷管举升高度的计算图

Fig. 8 Calculation diagram of nozzle lifting height under different inlet pressures

图 9、图 10 分别对比了不同喉径喷管在不同投放深度(喷管与地面的距离)下的轴线速度分布以及马赫数、静温和静压的分布云图。

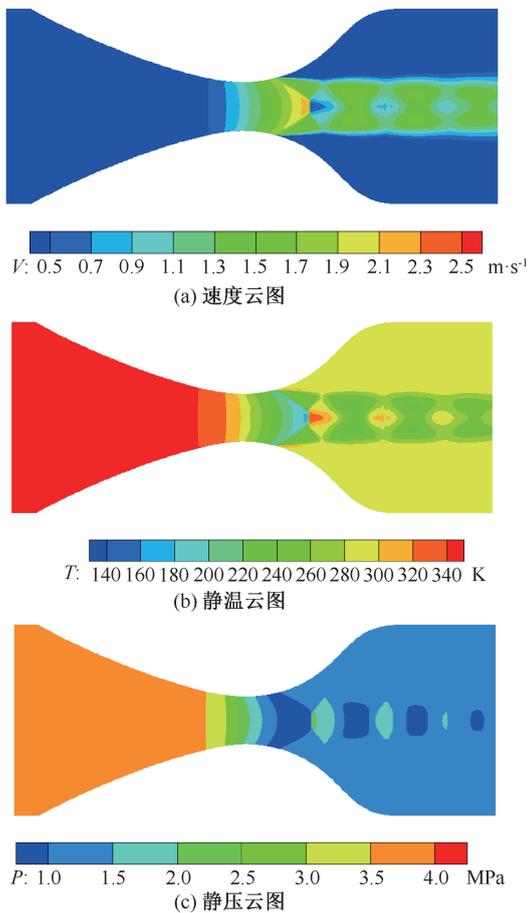


图 9 喉径为 2.0,  $h=1\ 500\ \text{m}$  时,喷管的马赫数、静温、静压分布云图

Fig. 9 Cloud diagram of Mach number, static temperature and static pressure distribution of nozzle when throat diameter is 2.0 and  $h=1\ 500\ \text{m}$

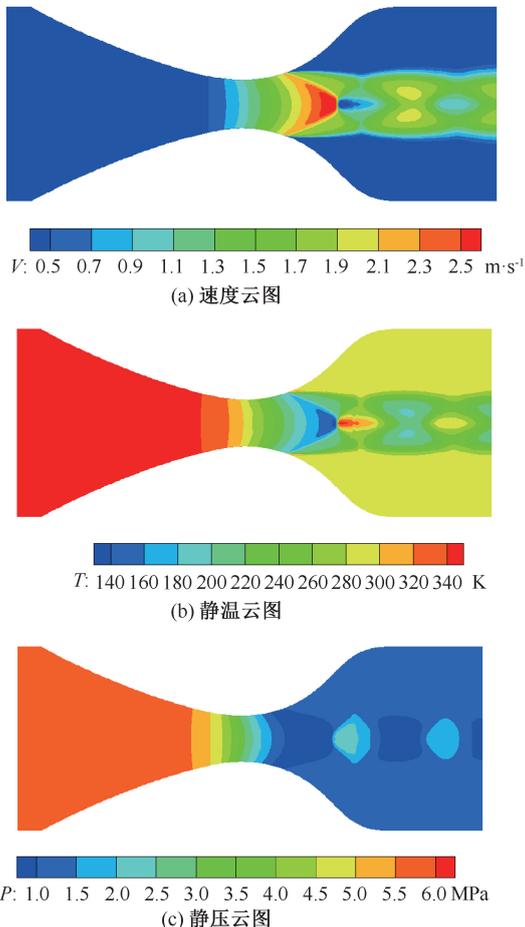


图 10 喉径为 2.0,  $h=2\ 000\ \text{m}$  时,喷管的马赫数、静温、静压分布云图

Fig. 10 Cloud diagram of nozzle Mach number, static temperature and static pressure distribution when the throat diameter is 2.0 and  $h=2\ 000\ \text{m}$

当  $h_1=1\ 500\ \text{m}$ ,  $h_2=2\ 000\ \text{m}$ , 根据对比结果, 可以得出如下结论。

(1) 在喉径固定时, 投放深度越大, 喷管喉部处的超音速区域越大。

(2) 在投放深度固定时, 喉径越大, 喷管喉部处的超音速区域越大, 其下游越易出现强度较大的正激波, 造成较大的压力损失, 不利于天然气运输。

(3) 当投放深度比较小时, 应选择喉径较大的喷管, 可以获得较大的超音区, 从而雾化效果更好。

当投放深度比较大时, 应选择喉径较小的喷管, 以避免喉部后形成正激波, 导致天然气输送能力不足。

## 5 雾化器超声速流场实验

为了探索针对该技术 CFD 计算结果的验证方法, 同时进一步分析拉瓦尔喷管的雾化效果, 利用 PSV 粒子阴影图像测试技术和一种新型的数字图像处理算法, 实现了粒径和液相速度场的同步测

量。分别利用拉瓦尔喷管和直孔喷管对比分析了不同进口压力调节下的雾化效果。

PSV技术的原理:待测速流场中被布撒了示踪粒子,LED光源照射示踪粒子,示踪粒子由于和待测流场介质的密度差异很大,从而在CCD相机上投下阴影,CCD相机采用双曝光模式记录下示踪粒子在一个极短的时间间隔内的连续两帧的图像,再采用互相关算法计算出相机视野内的速度场。由于该技术流程与粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)极其类似,因此PSV技术一般被视为PIV的变种,但与PIV技术不同,其采用的照明光源不是高能量的激光,而是能量较弱的LED光源。

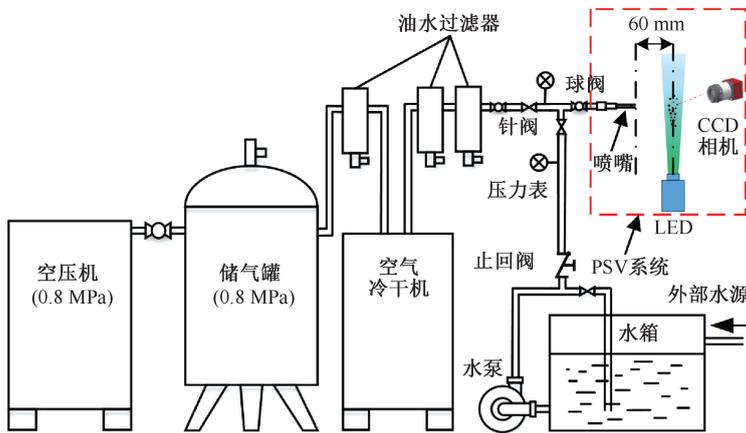


图 11 实验装置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of experimental device

其中,用于超声速雾化的空气由博莱特空压机压缩进入储气罐,空压机最大体积流量为 $5.1 \text{ m}^3/\text{min}$ ,额定气压为 $0.8 \text{ MPa}$ ,气体离开储气罐后流经冷干机(博莱特品牌,工作气压 $0.7 \sim 1.3 \text{ MPa}$ )以去除原有水分,然后进入超声速喷管。气路的空气质量流量约为 $8.74 \text{ kg/h}$ ,且能根据油水过滤器后的针阀开度控制气路的来流压力以及体积流量。

待雾化水由一个最大扬程为 $60 \text{ m}$ 的水泵提供(韩工自动自吸泵功率 $1100 \text{ w}$ ),水压可通过管路中的针阀进行调节,同时为了避免由于雾化碰嘴的液体流量太小而水泵供水流量太大造成的汽蚀现象,水路中有一个循环回路,大部分的水从该回路返回蓄水池中。由于水是透明介质,为了使得液滴的阴影更加明显并降低透光度,向水中添加了绿色染色剂从而增加液滴图像在背景图像中的对比度。

雾化喷管的几何结构如图12所示,喷管分别采用了拉瓦尔喷管和直孔喷管以对比雾化效果,喷管

源,而且LED光束直接射对CCD相机的主镜头。

为了获取粒子阴影图像的速度场,本文中采用的互相关算法是基于快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的互相关系数算法,J Soria<sup>[17]</sup>在图像分析中融入了序列图像迭代互相关方案,完整描述了分析系统在硬件和软件上的应用过程。其算法原理为:将示踪粒子连续两帧的图像矩阵,每帧都分成若干个子区域,即采样窗口,根据互相关公式计算每个子区域对应的位移,然后根据这个位移除以相邻两帧的时间间隔获得该子区域的速度矢量。

本试验研究中的供水、供气、雾化及PSV测量装置系统图如图11所示。

出口与喉部截面积之比为16,从而设计马赫数为4.46。为了模拟实际的气井内部环境,雾化喷管之后还有一段 $30 \text{ mm}$ 直孔管道以模拟雾化后的实际管内流动,同时气相与液相在雾化喷管前进行混合,以模拟气井内的气含水流动状态。

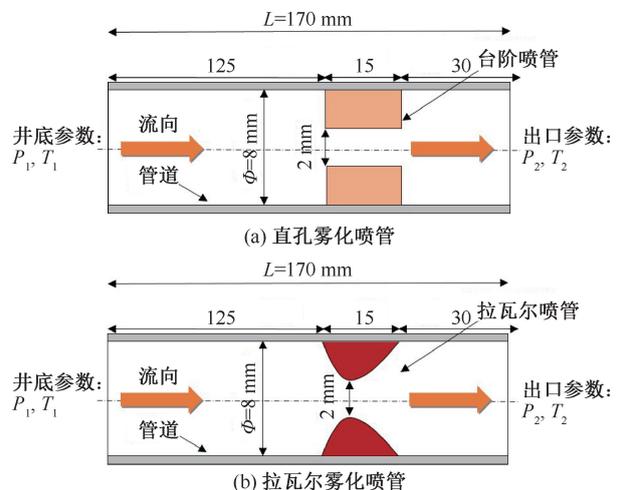


图 12 雾化喷管示意图

Fig. 12 Schematic diagram of atomizing nozzle

## 6 实验结果分析

为了对比分析直孔喷管和拉瓦尔喷管的雾化效果,实验中来流气压总压分别设置为 0.3 MPa, 0.4 MPa 与 0.5 MPa, 雾化喷管的出口压力 0.1 MPa, 因此喷管的压力比 (nozzle pressure ration, NPR) 分别为 3, 4 和 5。互相关算法采用了两重采样窗口,窗口大小为  $256 \times 256 \sim 128 \times 128$  pixel, 窗口重叠率 0.5, 因此单个矢量的空间分辨率为  $0.83 \times 0.83$  mm。

实验有三种压比和两种喷管,即共总 6 个工况,分别拍摄了 150 张液滴图像,每个工况可得到 150 个瞬态粒径分布统计,最终得到的不同入口压力条件下的两种雾化喷管的时均液滴粒径分布如图 13 所示。

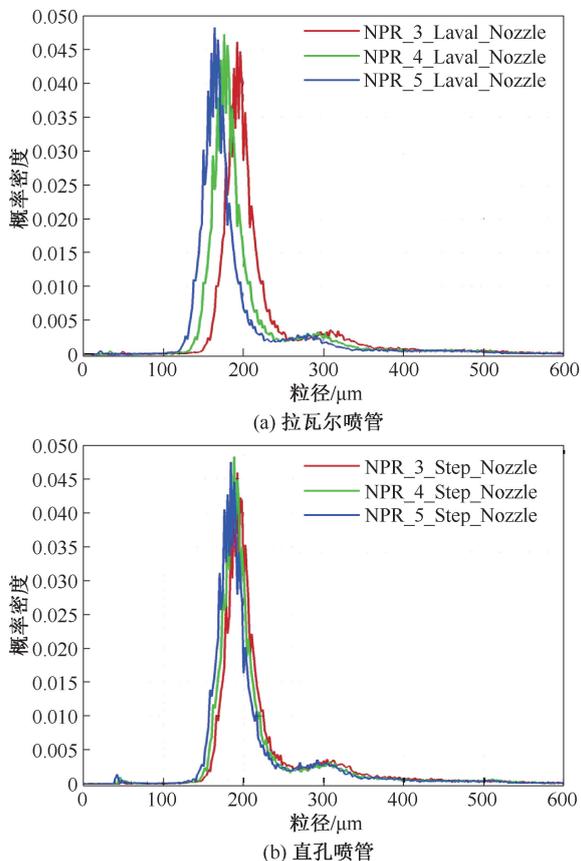


图 13 液滴粒径的概率密度分布函数

Fig. 13 Probability density distribution function of droplet diameter in straight hole nozzle

图 13 表明了对拉瓦尔雾化喷管而言,随着入口压力的增大,雾化后的平均液滴粒径会逐渐降低,当  $NPR=3$  时,粒径的概率密度在  $194 \mu\text{m}$  左右达到最大值,而且粒径的概率密度分布的峰值对应的粒径会逐渐向左偏移(即朝粒径变小的方向偏移);同

时 PDF 曲线在较大粒径处存在一个次高峰,其对应着没有完全雾化好的液滴。

对于直孔喷管,其雾化后的平均粒径要大于拉瓦尔喷管,这表明拉瓦尔喷管具有更好的雾化性能;于此之外,可以看到直孔喷管的液滴粒径概率密度函数分布上在  $240 \sim 400 \mu\text{m}$  处有较小的峰值,表明该类型喷管尚类似于拉瓦尔喷管,存在没有雾化完全的巨型液滴;此外,随着进口压力的增加,雾化粒径的分布并没有类似拉瓦尔喷管出现明显的向左偏移,其机理尚不明确,这一现象的可能原因在于直孔喷管对气相的加速性能不如拉瓦尔喷管,在直孔喷管中的气相速度最大仅能为当地声速,而拉瓦尔喷管在气相达到当地声速后可以继续膨胀。

## 7 结论

(1) 与基础板孔构型相比,超声速喷管的雾化性能更优;

(2) 超声速喷管构型中超声速区域沿径向尺度更宽,即超声速区域被放大;

(3) 沿轴向,超声速喷管的最大速度要更高,产生的喷流加速度及出口动量更强;

(4) 超声速喷管最高速度位置后的激波强度也要更强,激波前后速度差更大,而诱导产生更强的气流剪切效应;

(5) 在喉部直径一定的情况下,安装位置的变化对气流抬升动量的影响不大,但对节流器局部的加速比影响剧烈,而产生更加强烈的雾化效果,理论上会产生更加微小直径的液滴,从而增强液滴的排除效率;

(6) 在喉径固定时,投放越深,喷管喉部处的超音速区域越大,即喷管安装应尽可能的靠近液面,但也要防止与液面直接接触。

致谢:感谢渤海钻探工程技术研究院和油气井测试公司工具研发团队及井下作业工艺团队相关人员的大力支持。

### 参考文献

- [1] 王柳,付善勇,徐境. 毛细管加注泡沫排水采气新技术[J]. 海洋石油, 2009, 29(3): 63-66.  
WANG Liu, FU Shanyong, XU Jing. A new technology of dewatering gas lift by bubble through capillary[J]. Offshore Oil, 2009, 29(3): 63-66.
- [2] 杨涛,余淑明,杨桦,等. 气井涡流排水采气新技术及其应用[J]. 天然气工业, 2012, 32(8): 63-66.  
YANG Tao, YU Shuming, YANG Hua, et al. A new technology

- of vortex dewatering gas recovery in gas wells and its application [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32 (8): 63-66.
- [3] 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, 31(10):293-294.  
GUO Chunling, ZHAO Tao, WANG Xiaojia. Test and effect analysis of coiled tubing drainage gas production in Sulige gas field[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011, 31(10):293-294.
- [4] 周际永,伊向艺,卢渊. 国内外排水采气工艺综述[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(S1):44-45.  
ZHOU Jiyong, YI Xiangyi, LU Yuan. Summary of drainage and gas production technology at home and abroad [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36 (S1):44-45.
- [5] 蒋晓荣,黎洪珍,梁红武,等. 深井、高温、高矿化度泡沫排水采气技术研究[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29 (1):53-55.  
JIANG Xiaorong, LI Hongzhen, LIANG Hongwu, et al. Technique research on gas recovery by foam drainage under the conditions of deep well, high temperature and high salinity[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(1):53-55.
- [6] 白晓弘,李旭日,刘凯文,等. 速度管柱排水采气技术的应用及改进[J]. 石油机械, 2011, 39(12):60-62.  
BAI Xiaohong, LI Xuri, LIU Kaiwen, et al. The application and improvement of the drainage and gas production technology by velocity string [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39 (12):60-62.
- [7] 张荣军,乔康. 柱塞气举排水采气工艺技术在苏里格气田的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(6):118-119.  
ZHANG Rongjun, QIAO Kang. Application of plunger gas lift drainage gas production technology in Sulige gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32 (6): 118-119.
- [8] 李怀庆,耿新中,郝春山,等. 积液停产气井排液复产的新方法[J]. 天然气工业, 2001, 21(1):88-90.  
LI Huaqing, GENG Xinchong, HAO Chunshan, et al. A new method for restoring production of liquid-loading dead gas wells by drainage[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21 (1):88-90.
- [9] 刘宏英,申健,常拥军,等. 橇装式制氮注氮装置的结构与特点分析[J]. 内蒙古石油化工, 2005, (7):123-124.  
LIU Hongying, SHEN Jian, CHANG Yongjun, et al. Analysis on structure and characteristics of skid mounted Nitrogen production and injection device [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2005, (7):123-124.
- [10] 高银锁,崔会贺,张永红. 气井液氮伴注技术效果分析 [J]. 科技咨询导报, 2007, (30):70-72.  
GAO Yinsuo, Cui Huihe, ZHANG Yonghong. Effect analysis of liquid nitrogen assisted technology in gas wells [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2007, (30): 70-72.
- [11] 赵粉霞,吴革生,王效明,等. 长庆气田小直径管排水采气工艺技术[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(6):59-60.  
Zhao Fenxia, Wu Gesheng, Wang Xiaoming, et al. The Technology of Gas Production by Dewatering through Small-Dimension Pipes in Changqing Gasfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(6):59-60.
- [12] 李文魁,陈建军,王云,等. 国内外小井眼井钻采技术的发展现状[J]. 天然气工业, 2009, 29(9):136-137.  
LI Wenkui, CHEN Janjun, WANG Yun, et al. The status-quo of slim hole drilling technology in China and the world [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(9):136-137.
- [13] 梅明华,田喜军,刘淑哲,等. 积液气井排水采气工艺优化研究[J]. 石油化工应用, 2012, 31(8):97-99.  
MEI Minghua, TIAN Xijun, LIU Shuzhe, et al. Study on Optimization of drainage gas production process in effusion gas well [J]. 2012, 31(8):97-99.
- [14] 孙海军. 气田排水采气工艺技术研究[J]. 中国高新技术企业, 2008, (19):118-119.  
SUN Haijun. Study on gas field drainage and production technology [J]. China High-Tech Enterprises, 2008, (19):118-119.
- [15] 于淑珍,胡康,王惠,等. 优选管柱排水采气工艺技术在靖边气田的应用分析[J]. 石油化工应用, 2012, 31 (1):14-16.  
YU Shuzhen, HU Kang, WANG Hui, et al. Application analysis of optimized string drainage gas production technology in Jingbian Gas Field [J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(1):14-16.
- [16] 于超. 气井深度排水采气工艺技术研究与应用[J]. 中国高新技术企业, 2011, (21):41-43.  
YU Chao. Research and application of deep drainage gas production technology in gas wells [J]. China High-Tech Enterprises, 2011, (21):41-43.
- [17] J Soria. An investigation of the near wake of a circular cylinder using a video-based digital cross-correlation particle image velocimetry technique [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 12(2):221-233, 1996.

编辑 穆立婷

第一作者简介:鲍作帆,男,1983年出生,工程师,2012年7月毕业于西南石油大学矿产普查与勘探专业,现从事气田开发采气工艺方面的工作,电话:0477-7229503,15122937515; Email:baozuofan@126.com。通信地址:天津市滨海新区大港东城福源花园14-2-1203,邮政编码:300280。