

doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2023.01.014

# 天然气引射器流场特性及有效工作区间研究

吴奇霖<sup>1</sup>, 刘 硕<sup>2</sup>, 许晶禹<sup>2,3</sup>(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518000; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;  
3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100149)

**摘要:**为了降低天然气开采成本,探索天然气引射器重复使用的可行性,对不同工况下天然气引射器的内部流场开展分析,探究流场特性和有效工作区间,并通过现场生产数据对数值模拟方法进行了验证。研究表明,引射器喷嘴附近出现压力、温度和速度极值点;固定出口压力 5 MPa,当高压井压力从 6 MPa 提升至 13 MPa 时,可携带的低压井压力可从 5 MPa 降至 3.5 MPa,期间,引射器内部负压区压力降低,速度峰值提高,且峰值附近温度降低;有效工作区间内,通过匹配入口条件可改善引射效果,提高被引射井开发效率,即在该参数范围内可重复使用引射器。

**关键词:**天然气引射器;压力;流量;引射效果;工作区间

**中图分类号:** TH48

**文献标志码:** A

## Research on flow field characteristics and effective working range of natural gas ejector

WU Qilin<sup>1</sup>, LIU Shuo<sup>2</sup>, XU Jingyu<sup>2,3</sup>

(1. Shenzhen Branch of CNOOC, Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China)

**Abstract:** In order to investigate the feasibility of natural gas ejector reuse and reduce the cost of natural gas extraction, the internal flow field of the natural gas ejector under different working conditions was analyzed through systematic numerical simulation, the flow field characteristics and effective working range were investigated and the numerical simulation method was verified through the field production data. Research shows that there are extreme points of pressure, temperature and velocity near the ejector nozzle. When the outlet pressure is fixed at 5 MPa and the high pressure well pressure is increased from 6 MPa to 13 MPa, the portable low-pressure well pressure can be reduced from 5 MPa to 3.5 MPa, accompanied with pressure decrease in low pressure zone, increase of velocity peak value and decrease of temperature thereby. In the effective working range, properly matched boundary condition can help enhance ejection performance and improve development efficiency of the ejector well, that is, the ejector can be re-used in the range of this parameter.

**Key words:** natural gas ejector; pressure; flow rate; ejection effect; working range

## 0 引言

天然气开采过程中,由于地质条件和生产阶段的不同,会出现各个气井压力不一致的现象。如靖边气田的上、下古藏气井平均井口压力为 11.70 MPa,中、高产区气井压力仅有 9.37 MPa,最小气井井口压力甚至小于 6.40 MPa,井口剩余压力差异较大<sup>[1]</sup>。由于天然气外输管线压力一定,因此高压气井需要节流降压才能满足输运要求,而低压气井由于压力不足需间歇生产甚至停产。

为提高生产效率,充分利用现有气井,可采用天然气引射技术。该技术不仅可以用来提高换热量,也可节能升压,促进低压气井气体流出<sup>[2-3]</sup>。其中的核心部件,也就是天然气引射装置主要由高压气入口、低压气入口、喷嘴、混合室、扩散室等 5 部分组成<sup>[4]</sup>。

经过多年发展,天然气引射技术形成了等截面混合空气室和等压混合喷射 2 个理论模型体系<sup>[5]</sup>,之后逐渐发展出结构尺寸预测数学模型,并陆续引入超临界膨胀等引射工具工作特点,形成

收稿日期: 2021-06-29 修稿日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(12102436);中海石油(中国)深圳分公司基金项目(CCL2021SZPS0332)

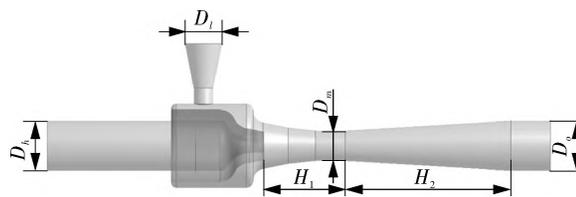
临界状态下的数学表达方程。后续更引入相变,形成较为完备的计算理论和方法<sup>[6-7]</sup>,也有学者通过测试手段研究引射器结构参数对引射效果的影响<sup>[8]</sup>。同时,数值模拟也逐渐应用到引射器流场特性分析中,例如 WANG 等<sup>[9-10]</sup>使用水蒸气的理想气体模型和实际气体模型进行模拟,所得结果与实验结果比较接近。龙学渊等<sup>[11]</sup>通过数值模拟分析天然气引射器内部流场特性并进行了现场测试,实现了低压气井增压开采。张文辉<sup>[12]</sup>在理论模型的基础上,结合数值模拟以嫡产为指标对引射器结构参数进行了系统优化。以上研究表明,引射器的理论分析和数值模拟技术已较为成熟,可开展系统的参数设计和流场分析工作。然而到目前为止,大部分天然气引射器并未实现规范化生产,需要针对特定气井设计结构参数。事实上,对给定气井,引射器使用时间有限,当气井失去生产潜力后,引射器便失去使用价值。如能在工况相近的气井继续使用,则可降低生产成本,因此急需探究天然气引射器的有效工作区间。

另一方面,在以往的研究中,作者所在团队设计形成了蒸汽引射器,并成功应用于辽河油田稠油开采<sup>[13]</sup>。通过将蒸汽以自由射流形式注入到输油管道中,利用蒸汽释放的热量提高稠油温度以降低输送压降<sup>[14]</sup>。后续工作中,该种引射器结构已拓展应用于井下气液分离领域,通过气液分离-回注,保护电潜泵正常运转<sup>[15]</sup>。近两年,该种引射器结构也已应用于涪陵气田低压气井增产<sup>[16]</sup>。基于前文所述天然气引射器应用中面临的问题,本文将依托于该种引射器结构,对其适用范围开展系统的数值模拟分析,以挖掘潜在天然气引射器的应用价值,延长气井生产周期,降低开发成本。

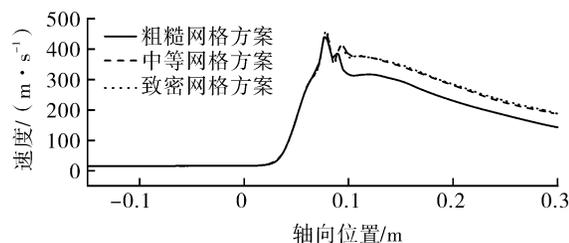
## 1 天然气引射器结构参数及数值模拟设置

### 1.1 天然气引射器结构参数

以某海上气井天然气引射器为例,已知高压入口(引射井)、低压入口(被引射井)和引射器出口条件(温度、压力和管径),采用的引射器外形如图 1 所示。图中的高压入口直径  $D_h$  为 21 mm, 低压入口直径  $D_l$  为 16 mm, 出口直径  $D_o$  为 21 mm, 喷嘴直径 7 mm, 喷喉距 9.5 mm, 喉部直径为 13.5 mm, 混合段  $H_1$  为 36 mm, 扩压段长度  $H_2$  为 72 mm<sup>[11-13]</sup>。



(a) 天然气引射器结构参数示意



(b) 网格方案对比

图 1 天然气引射器结构参数示意及网格方案对比

Fig.1 Schematic diagram of structural parameters of natural gas ejector and comparison of grid schemes

### 1.2 天然气引射器数值模拟设置

根据以上结构参数,在 Workbench Design Modeler 模块创建引射器流场几何模型。如图 1 (a) 所示,将引射器内部流场划分为引射管、喷嘴、腔体、低压入口和混合段 5 部分。在 Meshing 模块中,设置以上部分的网格尺寸,重点细化喉管附近流场,得到网格划分方案。为筛选出最优网格方案,设置了粗糙(网格数 82 523)、中等(网格数 155 944)和致密(220 954) 3 种不同网格方案。图 1 示出了引射器轴线流场速度分布,可见中等和致密网格方案获得的轴线速度分布曲线差值很小,远小于粗糙-中等网格方案间的差值。即中等网格方案既能保证计算精度,也具有较高的计算精度,因此,本文采用中等网格划分方案作为数值模拟的网格。

模型选择方面,由于引射器内部的压力在兆帕量级,气体可压缩性不可忽略,因此选择理想气体模型,温度、压力和密度的变化符合理想气体状态方程。湍流模型选择方面,标准  $k-\varepsilon$  模型已广泛应用于类似结构的数值模拟中。由于本文中的引射器结构不涉及高速旋转,同时考虑到其使用范围广、精度合理等优势,因此采用标准  $k-\varepsilon$  模型作为引射器模拟的湍流模型<sup>[17-19]</sup>。

工况设置方面,为考察天然气引射器的工作范围,高压入口压力介于 6.0~13.0 MPa 之间,低压入口压力介于 3.0~5.0 MPa 之间,出口压力统一为 5.0 MPa,共计 37 个工况。边界条件设置方面,对给定工况,引射器高压入口和低压入口采用压力

入口边界条件,指定边界压力和温度;引射器出口采用压力出口边界条件,同样指定边界压力和温度;其余面采用固定无滑移动壁面。

求解设置方面,考虑到模拟工况下气体的可压缩性,采用基于密度的求解器对流场开展定常分析。离散格式设置方面,流动、湍流动能和能量耗散率方程采用二阶迎风格式离散,基于格林-高斯单元体的梯度插值方案,Roe-FDS 通量插值方案,在 ANSYS Fluent 中开展数值求解工作。

## 2 结果与讨论

### 2.1 数值模拟验证

基于以往成果中的现场气井测试数据,对照数值模拟与现场测试的引射比,以验证数值模拟的准确性<sup>[16]</sup>。如表 1 所示,在 2 个对比工况中,模拟引射比略小于测试的引射比,相对误差在 7% 以内,表明本研究中的模型选用满足计算准确性需求,可以据此开展后续的分析工作。

表 1 气井现场测试与数值模拟的引射比对比

Tab.1 Comparison of ejection ratios between field tests of gas wells and numerical simulations

工况	高压入口压力 /MPa	低压入口压力 /MPa	现场引射比 (%)	模拟引射比 (%)	误差 (%)
1	10.0	4.4	45.0	42.1	6.4
2	10.0	3.7	9.2	8.7	5.4

### 2.2 流体运动轨迹及速度分布

图 2 示出了高压入口压力为 10.0 MPa, 低压入口压力为 4.0 MPa, 出口压力为 5.0 MPa 条件下的流场流动轨迹。由图可见, 高压入口流体进入流场后均匀流动, 在缩颈附近加速, 跨越声障。低

压管路气体自负压区流入引射器, 在喉管与来自高压管路的流体汇合。从图 2 中可看到, 喉管区域流体出现了明显加速, 速度峰值已接近 400 m/s。来自 2 个入口的流体在喉管段逐渐掺混进入扩散室, 在扩散室中掺混的同时速度有所降低, 最终从出口流出, 实现低压气井的引射。

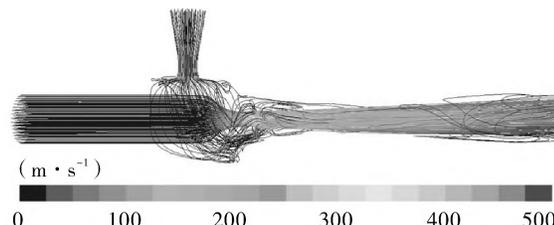
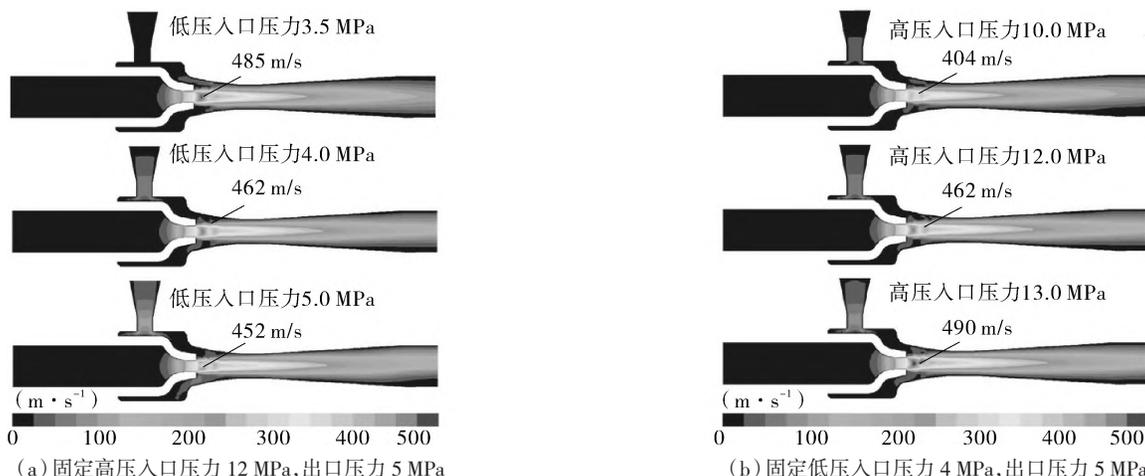


图 2 流场流动轨迹

Fig.2 Flow trajectory of flow field

图 3(a) 示出了固定高压入口压力、改变低压入口压力时流场速度分布状况, 可见从高压气井流出的气体在高压入口缩颈段逐渐加速, 与来自低压气井的气体汇合后即达到速度峰值。后在喉管区间附近高压和低压气体逐渐掺混, 进行动量和能量交换, 最终再扩散室速度有所降低, 经出口流出。进一步对比研究可以发现, 随着低压气井压力逐渐升高, 高压气井喷嘴出口附近的的速度峰值逐渐降低, 这是由于随着高压和低压气井压差的减小, 低压气井产出天然气流量逐渐降低, 因此混合速度峰值逐渐减少。图 3(b) 示出了固定低压入口压力, 改变高压入口压力时流场剖面速度分布变化状况。高压入口下游喷嘴与喉管间出现了速度峰值。随着高压入口压力升高, 流场中的速度峰值之间提高, 同样与高压-低压入口压差有关, 压差越大, 2 个入口进入流场的流体越多, 因此速度峰值增加。



(a) 固定高压入口压力 12 MPa, 出口压力 5 MPa

(b) 固定低压入口压力 4 MPa, 出口压力 5 MPa

图 3 固定高压入口和固定低压入口时流场速度分布

Fig.3 Flow field velocity distribution with fixed high pressure inlet and fixed low pressure inlet

图4示出了引射器内流场轴心速度沿程变化,可见高压入口附近的直管段内,天然气速度较低;进入缩颈后,高压气井进入引射器的天然气流速逐渐提高;当天然气流经喷嘴与喉管间的区域时,与低压气井流出的天然气混合,达到速度峰值,此时混合流体速度已超过局部声速,达到超音速;随后流体进入扩散室,随着管径逐渐增加,天然气速度逐渐降低,但总体仍维持在100 m/s以上,远大于高压气井的气体流速。对比不同入口条件下的流场分布,可发现固定高压入口压力时

(图4(a)),低压入口压力降低有利于提升速度峰值,但在扩散室至引射器出口区间内,天然气流速较其他对照工况低。这是由于低压气井压力降低,产出的天然气能量较少,相同高压入口和出口条件下,给定能量可携带的天然气量减少,导致产量降低。而当低压气井压力固定,高压气井压力逐渐变化时(图4(b)),被引射天然气能量给定,引射天然气能量提高,可携带天然气总量提升,产量增加。

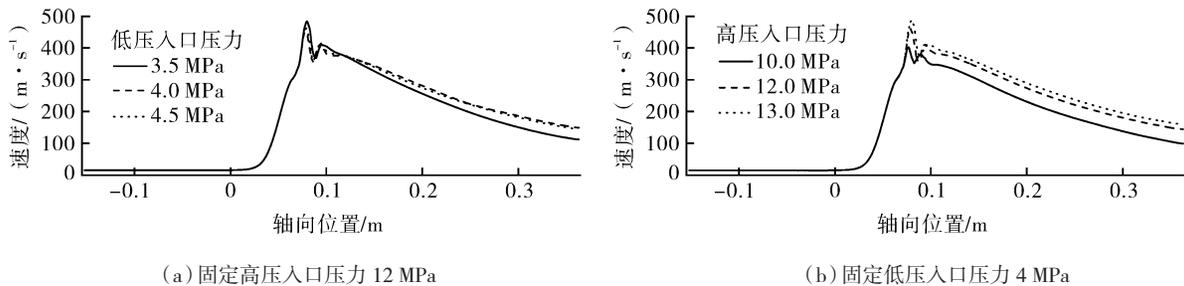


图4 引射器轴心速度沿程变化

Fig.4 The variation of velocity of the ejector axis along the path

### 2.3 流场压力分布

压力对引射器内部流动具有重要影响,同时也是反应引射器内部流动的重要流场参数。图5示出了流场剖面压力分布云图。对所有工况,引射器高压入口下游直管段压力较高;进入缩颈段后,压力逐渐降低;在喷嘴下游和喉道间出现了压力极低点,远低于低压入口压力。这种压力作用

可促进天然气自低压气井向引射器内部流动,实现低压气井引射增产效果。来自两个气井的天然气在压力极低点下游相遇,在扩散室逐渐交换能量动量,并随着管径增加而减速,使得压力略有回升。对比所有工况可以看到,高压和低压入口间的压差越大,引射器内部低压区的负压越明显。

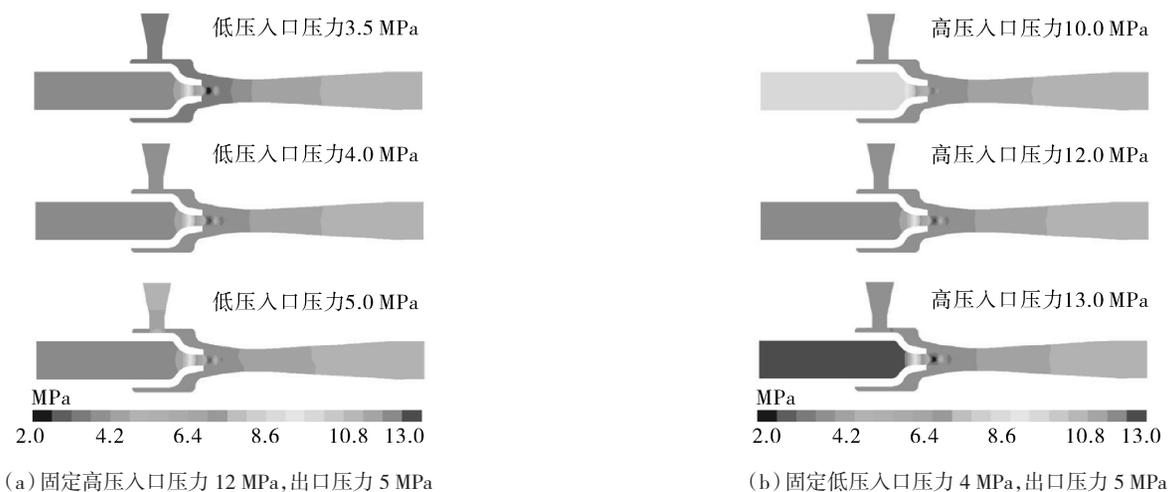


图5 固定高压入口和固定低压入口时流场压力分布

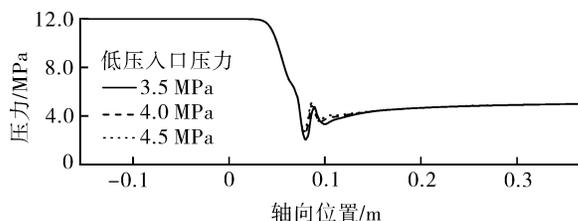
Fig.5 Flow field pressure distribution with fixed high pressure inlet and fixed low pressure inlet

图6示出了引射器轴心压力的沿程变化。高压入口下游直管段内压力均保持较高水平;进入缩颈段后,随着流速增加,压力逐渐下降,在喷嘴

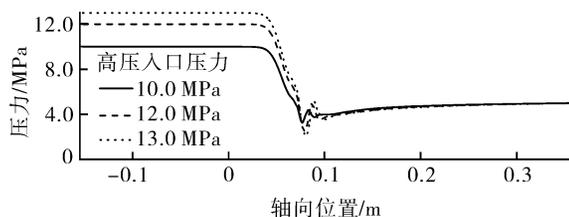
附近出现了极低值;随后在喉管段附近与来自低压气井的天然气汇合,掺混过程中出现了压力波动;后续压力略有上升,保持较平稳的水平流出引

射器。当固定高压入口压力时(如图 6(a)), 随着低压入口压力降低, 喷嘴-喉管附近压力波动区间的压力水平略有下降且发生位置有所滞后。这是由于低压入口压力减小, 降低了整体流体能量水平; 同时由 3.1 节所述, 此时流动速度略有提升, 进一步降低了压力水平, 且需要更长的距离

平稳压力波动。而当固定低压入口压力时(如图 6(b)), 随着高压入口压力增加, 压力波动幅值提高, 且压力波动区域长度增加。这是由于高压入口压力水平提高, 使得高压天然气在喷嘴附近速度增加, 进一步降低了局部压力, 需要更长的距离平稳压力波动。



(a) 固定高压入口压力 12 MPa



(b) 固定低压入口压力 4 MPa

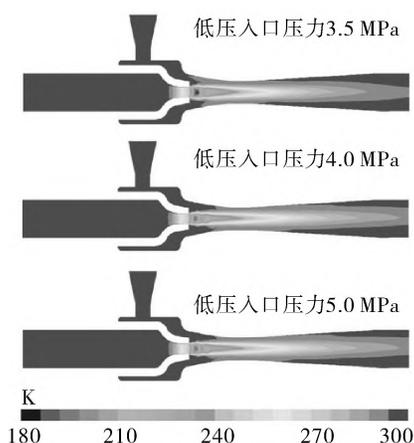
图 6 引射器轴心压力沿程变化

Fig.6 The variation of axial pressure of the ejector along the path

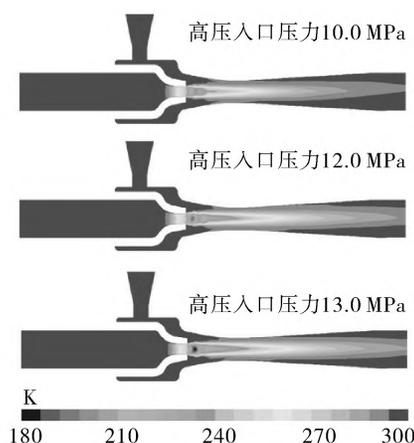
#### 2.4 引射器内流场温度分布

图 7 示出了流场内部温度分布云图。可见高压入口喷嘴和喉道附近均出现了低温区域, 温度可从 300 K 降至 200 K 左右。结合前文关于速度和压力场分布的讨论, 低温区流体速度较高, 说明低温区的能量转化为动能, 因此温度降低较多。当固定高压入口压力, 改变低压入口压力

(图 7(a))时, 可见随着低压入口压力降低, 流场温度最低值逐渐降低, 这于前文相同工况下对速度的讨论一致, 即压差增加, 流动速度增加, 转化为动能的能量损耗增加, 因此温度更低。同理, 给定低压入口压力、改变高压入口压力(图 7(b))时, 更大的入口压差也导致了更低的喷嘴局部温度。



(a) 固定高压入口 12 MPa, 出口压力 5 MPa



(b) 固定低压入口 4 MPa, 出口压力 5 MPa

图 7 固定高压入口和固定低压入口时流场温度分布

Fig.7 Temperature distribution of flow field with fixed high pressure inlet and fixed low pressure inlet

图 8 示出了不同入口条件下引射器内流场轴心温度沿程变化。从图中可以看到, 在高压入口及直管段, 温度维持在 300 K 左右, 自进入缩颈段后温度剧烈下降, 经过喷嘴和喉管间的混合段与来自低压井的天然气混合, 温度急剧降低, 后逐渐趋于平稳并缓慢回升。当固定高压入口压力(图 8(a))时, 入口压力越低, 波动段温度变化幅

值越大, 扩散室的温度越高。这是由于低压入口压力较低的情况下, 被引射天然气流量较小, 引射天然气能量损耗较小, 因此温度略高。当固定低压入口压力, 改变高压入口压力(图 8(b))时, 高压入口压力越低, 引射器扩散室温度越高。这同样与能量损失有关, 高压入口压力越低, 引射器内流速越小, 因此能量损失越小, 所以温度越高。

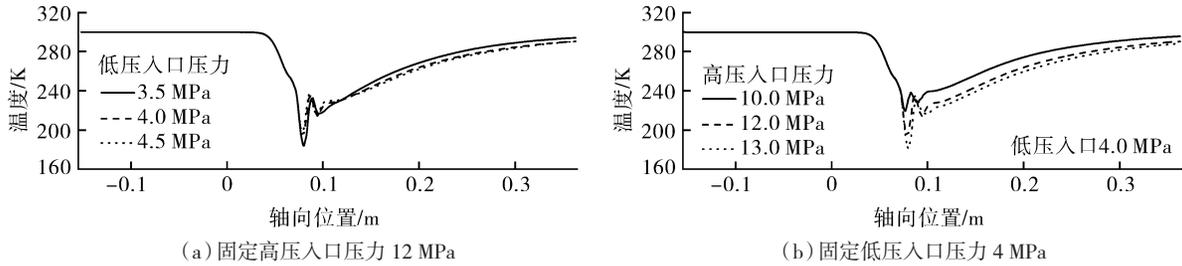


图8 引射器轴心温度沿程变化

Fig.8 The variation of temperature of the ejector axis along the path

### 2.5 引射器有效工作区间

改变入口压力进行模拟计算,直至引射器不能正常工作携带低压气井。如果以低压入口压力与高压入口压力的比值为低压相对入口压力,低压气井流量与高压气井流量的比值为引射比,如图9所示。从图中可见,给定高压入口压力,低压气井相对流量随低压气井相对压力增加逐渐增加,这是由于低压气井压力增加,所含能量提高,引射难度逐渐降低。同时,随着高压入口压力增加,低压气井相对流量增加幅度逐渐减小,可见存在一个界限,决定该种结构引射性能的上限,低压气井相对压力与相对流量对应的数据点总在界限之下,如图9中虚线右下的区间,表明引射器可在该区间内的气井中重复使用。这种现象由引射器工作原理和能量转换效率决定,曲线参数与引射器结构参数有关。

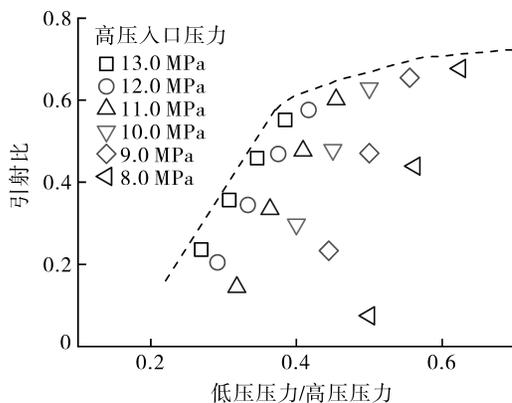


图9 引射器引射效果与入口条件间的关系

Fig.9 Relationship between ejection effect and inlet conditions of ejector

## 3 结论

(1) 固定出口压力 5 MPa, 高压井压力越高,可携带的低压井压力越低,当高压井压力从 6 MPa 提升至 13 MPa 时,可携带的低压井压力可

从 5 MPa 降至 3.5 MPa。期间,引射器内部负压区压力降低,速度峰值提高,且峰值附近温度降低。

(2) 当高压井压力介于 8~13 MPa, 提高低压井相对压力,有助于提高低压气井产量,引射比可从 0.2 提升至 0.6。

(3) 受引射原理和结构形式限制,引射器工作区间存在限制,有效范围内,可通过匹配入口条件改善引射效果,提高被引射井开发效率,该范围内可循环使用引射器。

### 参考文献:

- [1] 周艳杰,池坤,徐广军,等.靖边气田延长稳产期的地面集输工艺技术[J].石油工程建设,2012,38(2):23-25.  
ZHOU J Y, CHI K, XU G J, et al. Surface gathering technology for prolonging period of stabilized production in Jingbian Gas field [J]. Petroleum Engineering Construction. 2012, 38(2):23-25.
- [2] 张振迎,杨建军,郝佳伟,等.双温蒸发压缩/引射 CO<sub>2</sub> 热泵系统的热力学分析[J].流体机械,2021,49(11):48-53.  
ZHANG Z Y, YANG J J, HAO J W, et al. Thermodynamic analysis of dual-temperature evaporation compression/ejection CO<sub>2</sub> heating pump system [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(11):48-53.
- [3] 张丹丹,郭宪民,吴琦琦.电动汽车引射热泵系统性能模拟研究[J].流体机械,2021,49(6):79-85.  
ZHANG D D, GUO X M, WU Q Q. Simulation study on performance of heat pump system with ejector for electric vehicle [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(6):79-85.
- [4] 张书平,刘双全,陈德见,等.天然气喷射引流技术在靖边气田的应用试验[J].新疆石油天然气,2008,4:113-119.  
LIU S P, LIU S Q, CHEN D J, et al. Application test of natural gas jet drainage technology in Jingbian Gas Field [J]. Xinjiang Oil and Natural Gas, 2008, 4:113-119.

- [5] 吴渊. 二维超声速引射器数值仿真与实验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.  
WU Y. Numerical simulation and experimental research of two-dimensional supersonic ejector [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [6] 索科洛夫. 喷射泵[M]. 北京:科学出版社,1977.  
SOKOLOV E Я. Ejector pump [M]. Beijing: Science Press, 1977.
- [7] 王杰. 引射器技术在非平衡态热力学理论中的应用[J]. 流体机械,1996,24(10):39-41.  
WANG J. Application of ejector technology in non-equilibrium thermodynamics theory [J]. Fluid Machinery, 1996, 24(10): 39-41.
- [8] 唐建峰,史明亘,刘杨,等. 结构参数对气体引射器性能的影响研究[J]. 流体机械,2012,40(12):1-5.  
TANG J F, SHI M G, LIU Y, et al. Research on the impact of structural parameters on the air ejector performance [J]. Fluid Machinery, 2012, 40(12): 1-5.
- [9] WANG X D, DONG J L, WANG T, et al. Numerical analysis of spontaneously condensing phenomena in nozzle of steam-jet vacuum pump [J]. Vacuum, 2012, 86(7): 861-866.
- [10] VARGA S, LEBRE P M S, OLIVEIRA A C. CFD study of a variable area ratio ejector using R600a and R152a refrigerants [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(1): 157-165.
- [11] 龙学渊,李志军,田园. 喷射引流技术在低压气井上的数值模拟及现场试验[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(2): 28-29.  
LONG X Y, LI Z J, TIAN Y. Numerical simulation and field test of jet drainage technology in low pressure gas well [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2013, 32(2): 28-29.
- [12] 张文辉. 基于熵产原理的天然气引射器结构优化研究[D]. 北京:中国石油大学,2019.  
ZHANG W H. Optimization of ejectors based on entropy production theory [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [13] 赖英旭,郑之初,吴应湘. 蒸汽引射稠油输送新技术[J]. 流体力学实验与测量,2003,17(2):78-83.  
LAI X Y, ZHENG Z C, WU Y X. A new transportation method for heavy oil by steam injector [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(2): 78-83.
- [14] 赖英旭,郑之初,吴应湘. 用于稠油输送的新蒸汽引射器[J]. 力学与实践,2003,25(2):19-21.  
LAI X Y, ZHENG Z C, WU Y X. A new steam injector for heavy oil transportation [J]. Mechanics and Practice, 2003, 25(2): 19-21.
- [15] 王信鹏,邢树宾,马志涛,等. 高含气井下气液混合输送技术研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(6): 759-765.  
WANG X P, XING S B, Ma Z T, et al. Study on downhole gas-liquid conveying technology with high gas fraction [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (A), 2018, 33(6): 759-765.
- [16] 柯文奇,何焱,张怀力. 喷射引流工艺在涪陵页岩气井组的应用[J]. 天然气技术与经济,2020,14(5): 40-43.  
KE W Q, HE Y, ZHANG H L. Application of jet drainage technology to shale gas well group in Fuling shale gasfield [J]. Natural Gas Technology and Economy. 2020, 14(5): 40-43.
- [17] 张梦. 供热系统用液-汽引射器性能数值模拟与实验研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2019.  
ZHANG M. Numerical simulation and experimental research of the performance of liquid-vapor ejector for heating system [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.
- [18] 孙哲. 页岩气井井口引射式增压工具优化研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.  
SUN Z. The study on injection booster tool optimization at wellhead of shale gas well [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [19] 郑智嘉. 大面积比喷管高模式试验技术研究[D]. 北京:中国运载火箭技术研究院,2020.  
ZHENG Z J. Research on altitude simulation test technology of large area ratio nozzle [D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2020.
- [20] 苏闽闯,张凤鸣,陈顺权,等. 海水淡化双级真空引射器的射流和混合特性研究[J]. 集成技术,2021, 10(2): 39-49.  
SU M C, ZHANG F M, CHEN S Q, et al. Study on jet and mixing characteristics of a two-stage vacuum ejector for desalination [J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(2): 39-49.

作者简介:吴奇霖(1981),男,高级工程师,主要从事油气储运方面的研究,通信地址:518000 广东省深圳市南山区后海滨路(深圳湾段)3168号中海油大厦B座中海石油(中国)有限公司深圳分公司,E-mail:wuql5@cnooc.com.cn.

#### 本文引用格式:

吴奇霖,刘硕,许晶禹,等. 天然气引射器流场特性及有效工作区间研究[J]. 流体机械,2023,51(1):85-91.  
WU Q L, LIU S, XU J Y, et al. Research on flow field characteristics and effective working range of natural gas ejector [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(1): 85-91.