

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20181522

锥芯可调型引射技术变工况适应性实验研究

刘培启, 何昕琛, 陈佳, 郭江涛, 席建宇, 胡大鹏

(大连理工大学化工机械与安全学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 随着天然气井开发时间的推移, 井口压力逐渐降低, 低压井口的增压集输成为研究热点。目前, 常用的天然气引射技术由于结构尺寸固定, 对气井的压力和流量的变化适应性差, 使其运行效率普遍较低。据此, 设计加工了一台锥芯可调型引射器装置, 并对其变工况性能进行了实验研究。结果表明随着可调锥的深入, 高压口流量减小, 可实现70%左右的流量调节, 而且调节过程中低压口流量几乎保持不变, 从而使得装置引射率 ξ 提高, 可见该引射技术具有很强的抗流量波动能力。随着可调锥的深入, 装置对应的最佳膨胀比增大, 从而提高了装置对大膨胀比工况的适应性。同样压缩比下, 装置引射效率会随着可调锥的深入而提高, 但会降低装置有效引射的压缩比范围。

关键词: 天然气; 实验验证; 优化设计; 引射技术; 可调性

中图分类号: TE 377

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2019) 06-2252-07

Variable working condition adaptability of cone core adjustable ejector

LIU Peiqi, HE Xinchun, CHEN Jia, GUO Jiangtao, XI Jianyu, HU Dapeng

(School of Chemical Machinery and Safety Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: With the development of natural gas wells, the wellhead pressure is gradually reduced, and the pressurized gathering and gathering of low-pressure wellheads has become a research hotspot. At present, the common natural gas injection technology has a poor adaptability to gas well pressure and flow due to its fixed structural size, which makes its operating efficiency generally low. Based on this, the cone core adjustable ejector device was designed and processed, and its performance under variable working conditions was studied experimentally. The results show that with the inward movement of the adjustable cone, the flow rate of the high pressure port is reduced, and a wide range of flow adjustment of about 70% can be achieved; Moreover, the flow rate of the low-pressure port is almost unchanged during the adjustment process, so that the ejector rate of the device is improved, and the cone-core adjustable ejector technology has strong resistance to flow fluctuation. With the deepening of adjustable cone, the optimal expansion ratio of the device increases. Thus, the adaptability of the device to the condition of large expansion ratio is improved. At the same compression ratio, the efficiency of the device's ejection increases with the depth of the adjustable cone, but it reduces the range of compression ratios that the device effectively emits.

Key words: natural gas; experimental validation; optimal design; ejection technique; adjustability

收稿日期: 2018-12-27 修回日期: 2019-02-17

通信作者: 胡大鹏(1963—), 男, 博士, 教授, hudp@dlut.edu.cn

第一作者: 刘培启(1981—), 男, 博士, 副教授, lpq21cn@dlut.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项项目(2016ZX05066005-002); 国家自然科学基金项目(21676048); 大连市高层次人才创新支持计划项目(2016RQ01)

引用本文: 刘培启, 何昕琛, 陈佳, 郭江涛, 席建宇, 胡大鹏. 锥芯可调型引射技术变工况适应性实验研究[J]. 化工学报, 2019, 70(6): 2252–2258

Citation: LIU Peiqi, HE Xinchun, CHEN Jia, GUO Jiangtao, XI Jianyu, HU Dapeng. Variable working condition adaptability of cone core adjustable ejector[J]. CIESC Journal, 2019, 70(6): 2252–2258

引言

随着油气田开发时间的推移,井口压力不断下降,存在高、低压气井混输时低压井无法进入集中生产系统的问题。目前,低压气井常见处理方式是关井、试采生产和增压生产,三种方式均存在一定的弊端:关井会造成气井闲置,影响产能提高;试采生产会造成能源浪费和环境污染;增压生产在实施过程中存在增压过程能耗大、维护成本高等问题。此外,高压天然气井蕴含丰富的压力能,具有较高的利用价值,但实际生产中,高压气井大多采用节流降压^[1]方式进行开采,造成大部分能量浪费,不符合目前倡导的建设节能油田的要求。因此,如何利用高压气井的压力能,解决低压气井集输问题,提高低压气井产量和延长其不增压开采周期,是一个具有极大现实意义的课题。

天然气引射技术^[2-3]是利用高压气井的压力能实现高、低压气体混合输送的气体增压技术。该技术既可以充分利用高压气井的压力能,避免能量浪费;又可以节省低压天然气增压时所需能量,降低开发成本。目前,静态引射器广泛应用于工程领域^[4],天然气开采和输送领域^[5-6]。在国内西北气田^[7]、靖边气田^[8]、长庆气田^[9]均已获得成功应用,有效实现了低压气井的连续稳定生产。然而,目前采用的天然气引射装置都是以喷射泵^[10-11]为基础进行设计的,对高、低压气井的膨胀比和压缩比有一定的要求,当气井压力进一步降低后存在性能大幅恶化的问题^[12-13];同时,高压天然气等实际气体效应对引射装置性能的影响尚无定律,存在偏离设计点的问题^[14-15]。因此,如何提高引射装置的工况适应性成为目前该领域的研究热点。总结以往研究,其调节机制大致分为以下几种:调节锥式、针型节流阀式、调距式和花瓣喷嘴等。调节锥式^[16-17]如图1所示,是在喷口附近增加一个调节锥,通过调整调节锥与喷口的相对位置,进而改变喷口截面积从而调整喷口流量。李熠桥^[18]的研究表明,相同工况下,调节锥对引射流体流量的影响较大。此类引射器结构简单、易加工,但在高压天然气领域,喷针会剧烈振动并产生噪声甚至诱发振动导致无法长期工作^[19]。针型节流阀式引射器^[20-21]可以解决在高压高速情况下喷针剧烈震动导致失效这一问题,但是其节流过程存在较大的能量浪费。调距式(如图2)和花瓣喷嘴式引射器^[22]本身不具备对高、低压气体的

流量和压力进行调节的功能,但是当高、低压气体的流量和压力变化时,可通过调节机构,调整喷嘴与接收室之间的距离以及更换不同花瓣结构喷嘴,进而改善由于工作参数偏离设计值而导致的喷射器效率明显下降的问题^[23-24]。除了上述结构方面的研究进展外,引射技术在相变工况下系统效率分析^[25-26]和介质适应性^[27-28]方面的研究也越来越受到重视,出现了一些新的设计模型^[29-30]和研究结果^[31]。然而,相关研究大多未能将结构尺寸与引射单体性能之间的关系进行深入研究,相关成果较难对天然气工业应用提供指导。

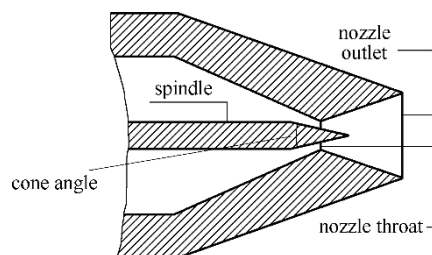


图1 调节锥式可调式引射器

Fig.1 Adjustable cone adjustable ejector schematic

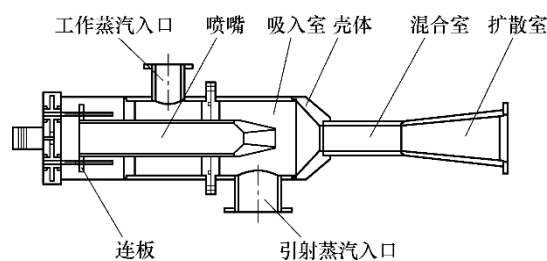


图2 调距式引射器

Fig.2 Schematic diagram of needle throttle type ejector

本文以锥芯可调式引射技术为研究对象,设计加工了一套工业级锥芯可调式引射实验装置,并对该装置的一些关键操作参数的适应性进行了测试,为实现天然气介质的变工况使用提供实验参考。

1 调节锥型引射器实验平台

为了探究锥芯可调式引射器的工况适应性,并使得相关结构更具代表性,本文设计加工了一台实验装置,结构尺寸与8 MPa下10万立方米天然气处理量的装置尺寸一致。具体如图3所示,主要由喷嘴,调节锥,混合段以及进、出口组成。其中,调节锥的前端尖角 β 和喷嘴内轮廓角 α 均为 20° 。实验时,通过调节锥的轴向移动,改变锥芯在喷嘴内的位置尺寸 ΔL ,使喷口的喉部面积发生改变,从而改变引射器的性能,以适应不同工况。

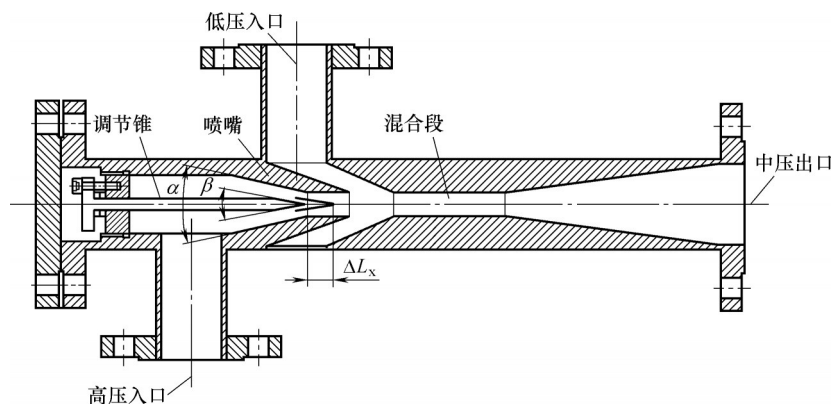


图3 锥芯式引射装置

Fig.3 Relative position of cone core and nozzle

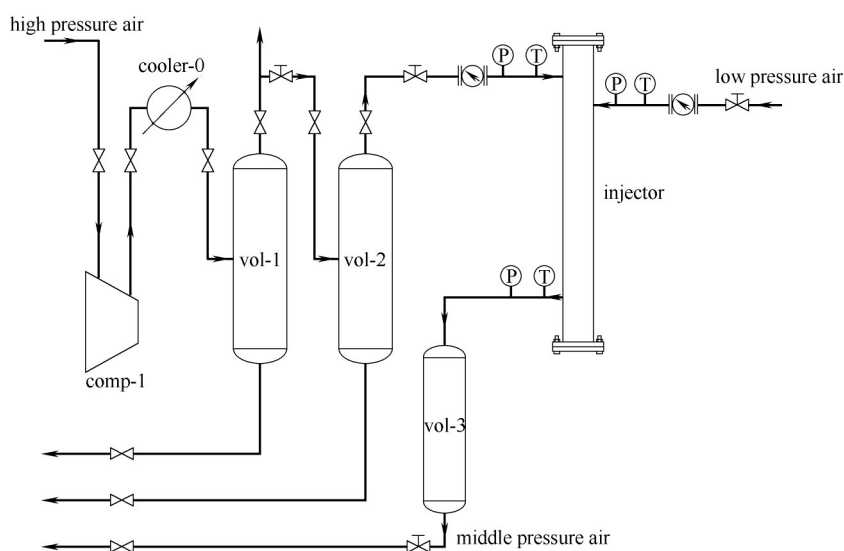


图4 实验流程

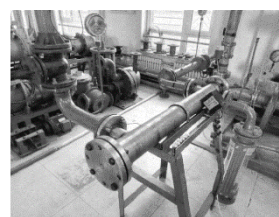
Fig.4 Schematic diagram of experimental process

搭建的实验流程如图4所示,装置实物图如图5所示。实验中,低压端口与外接空气相连,保持0.1 MPa的绝对压力不变。高压端口与压缩机出口相连,可实现压力为1.0 MPa下连续稳定运行。中压出口经过一个闸阀与外界大气相连,通过调节闸阀开度,实现中压压力的调节。各端口压力均采用0.4级高精度压力表进行测量。高压入口的流量 Q_h 利用喷嘴型压差流量计进行测量。低压入口的流量 Q_l 利用浮子流量计进行测量。流量计测量精度为1.5%。文中所有实验数据为三次实验的平均值。

2 锥芯可调型引射器工况适应性研究

2.1 可调锥位置对引射率适应性研究

实验设定压缩比(P_m/P_l)为1.5,当膨胀比(P_h/P_l)



(a) 锥芯可调型引射器实验室设备



(b) 喷嘴零件



(c) 混合段零件

图5 引射器关键结构实物图

Fig.5 Photos of main structure of ejector

为5、6、7、8时,测试可调锥的轴向位置对其引射装置流量和性能的影响。其中, P_m 为中压端口压力, P_l 为低压端口压力, P_h 为高压端口压力。

图6为 ΔL_x 与高压入口流量 Q_h 的关系图,在不同的膨胀比下高压入口流量变化呈同一趋势,即高压入口流量随着可调锥的位置尺寸的减小而减小,在0~20 mm的移动区间内,可实现70%左右的流量改变;在0~10 mm的移动区间内,可实现20%左右的流量改变。

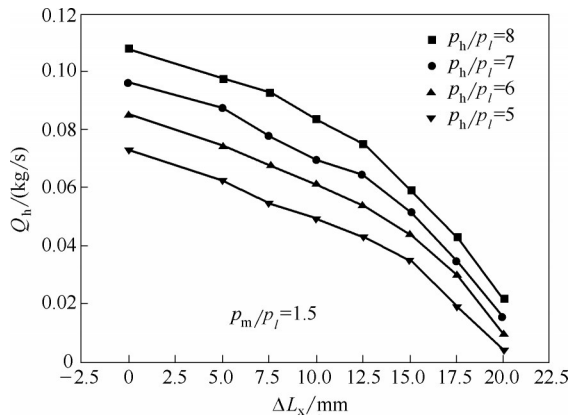


图6 可调锥位置与高压入口流量关系

Fig.6 Relation of position of adjustable cone and high pressure inlet flow

同时,测量低压端口的流量 Q_l ,得到可调锥位置 ΔL_x 与低压入口流量 Q_l 关系图(图7)。由图7可以看出在0~10 mm的移动区间内,可调锥位置几乎不影响该工况下的低压入口流量;在10~20 mm之间,随着调节锥位置尺寸的减小,低压入口流量急剧下降,引射装置逐渐变为无法正常引射。这是由于随着锥芯的移动,喷嘴的过流面积逐渐减小,较小流量的高压气体在喷嘴出口处无法实现较高速度的流动,使得喷嘴出口气体速度降低,当地静压力升高,当压力上升至等于甚至高于低压入口压力时,引射器无法正常引射。

由于高压入口流量逐渐减小,而低压入口流量基本不变,所以锥芯可调型引射装置引射率 ξ 随锥芯位置的关系,如图8所示,引射率 ξ 用式(1)计算。

$$\xi = \frac{Q_l}{Q_h} \quad (1)$$

当 ΔL_x 小于12 mm时,设备引射率呈现逐渐升高状态,当可调锥位置 ΔL_x 过大时,设备无法正常引射,效率急剧降低。

由上述实验结果表明:可调锥的加入能够实现调节高压流量的作用,从而使得装置引射率提高,

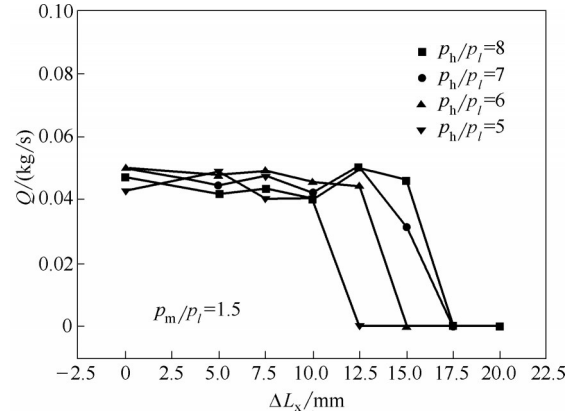


图7 可调锥位置与低压入口流量的关系

Fig.7 Relation between position of adjustable cone and low pressure inlet flow

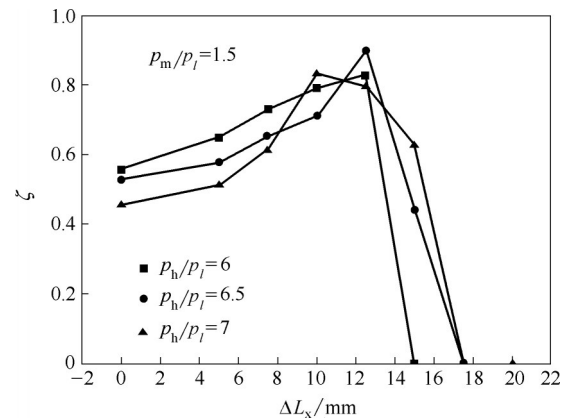


图8 可调锥位置与引射率的关系

Fig.8 Relation of adjustable cone position and ejector rate

提高装置抗流量波动的能力。

2.2 可调锥位置对膨胀比适应性研究

当低压固定为实验室平台大气压力0.1 MPa时,通过改变高压进口压力,进行膨胀比从4~8的性能实验测试。

由图9可知,加入调节锥后,当低压 P_l 和中压 P_m 均保持不变时,引射装置的引射率随着膨胀比的增加,基本呈线性降低。当可调锥在0~10 mm的移动区间内,装置的引射率整体上升,增大幅度约20%左右。如图所示,在高膨胀比 $P_h/P_l=8$, $\Delta L_x=10$ mm时,该装置仍可维持0.5以上的引射率。

当中压出口压力由 $P_m=0.13$ MPa上升至0.165 MPa上升后,如图10所示,引射器的引射率随着膨胀比的增大从先建立引射并增大至最高点,随后逐步降低。区别在于:随着可调锥位置的移动(0~10 mm),其引射率的峰值点向坐标轴右侧移动。引射率峰值对应的最佳膨胀比从 $P_h/P_l=5$ 增至 $P_h/P_l=6.5$ 。在高膨胀比 $P_h/P_l=8$ 的情况下仍可维持0.5以上

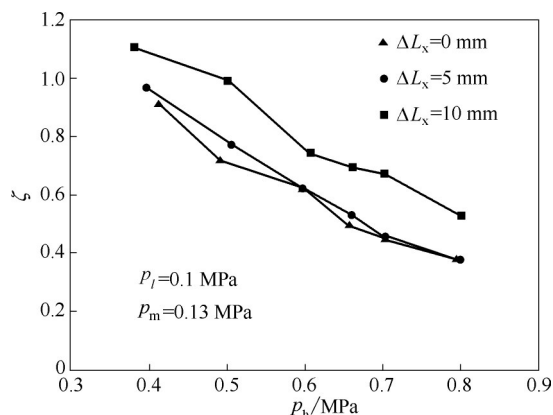


图9 $P_m=0.13$ MPa、 $P_l=0.1$ MPa时,具有可调锥结构的引射器性能曲线

Fig.9 Ejector performance curves with adjustable cone structure when $P_m=0.13$ MPa and $P_l=0.1$ MPa

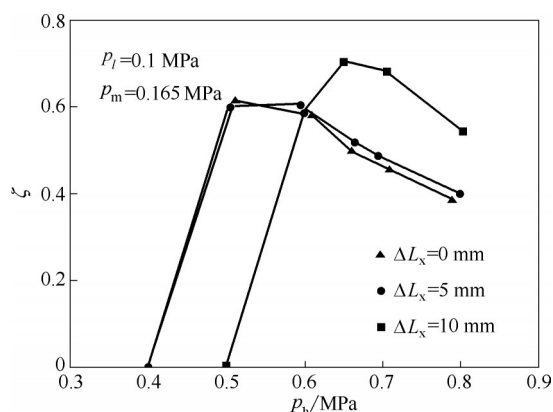


图10 $P_m=0.165$ MPa、 $P_l=0.1$ MPa时,具有可调锥结构的引射器性能曲线

Fig.10 Ejector performance curves with adjustable cone structure when $P_m=0.165$ MPa and $P_l=0.1$ MPa

的引射率。

实验结果表明:当压缩比固定时,随着膨胀比增大,装置从开始建立引射到在最佳膨胀比处达到峰值引射率,随后逐渐恶化。可调锥的引入,可使装置最佳膨胀比提高,有利于其在高膨胀比情况下仍维持较高的引射率,从而提高装置对于高膨胀比的适应性。

2.3 可调锥位置对压缩比适应性研究

实验首先固定可调锥在初始位置,测定引射器在不同膨胀比下引射率随压缩比的变化曲线,结果如图11所示。

由图11可以看出,在膨胀比大于等于6.5时,引射器在压缩比为1.3~2.0的区间可以实现引射作用,当膨胀比小于6.5时,随着压缩比的提高,装置引射率会迅速降低,导致装置不引射,可见小膨胀比下

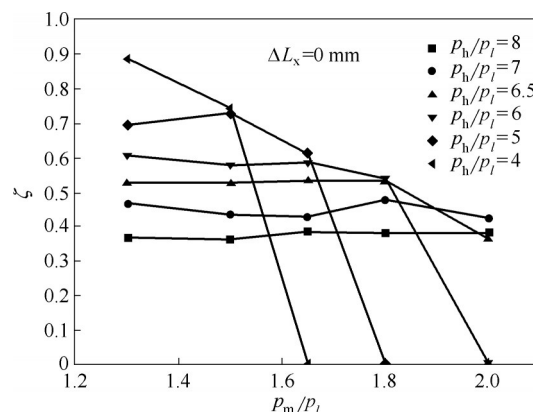


图11 引射率随压缩比的变化曲线

Fig.11 Curves of ejector rate with compression ratio

装置有效引射对应的压缩比范围逐渐缩小。

实验分别设定膨胀比为8.0、6.5、5.0,通过改变可调锥的轴向位置,研究锥芯可调型引射装置引射率随压缩比的变化,测试其工作性能,结果如图12~图14所示。由图12~图14可以看出,无论膨胀比是8.0还是6.5和5.0时,随着锥芯在喷嘴内的位置尺寸 ΔL_x 的减小,引射率曲线整体均呈现上移现象,但同时也出现随着压缩比 P_m/P_l 增加引射率迅速恶化的现象。这是由于随着可调锥位置尺寸 ΔL_x 的减小,高压端通过的流量迅速减少,高低压气体在混合段内不能形成音速流动。此时,随着中压出口压力的上升,喷嘴出口压力将增大,当该处压力等于或高低压进口压力时,引射装置不能正常工作。

当膨胀比为8.0时,调节锥向内移动,引射率由0.38增大至0.54,提升幅度约42%,而且整个实验的压缩比范围内均可实现高效引射。当膨胀比降低

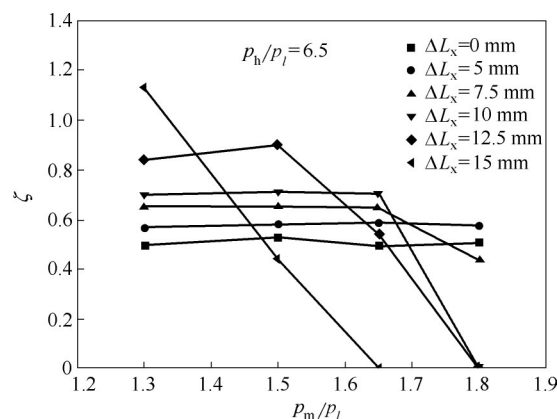


图13 膨胀比为6.5时,不同调节锥位置下引射率随压缩比的变化曲线

Fig.13 Curves of ejector rate with compression ratio at different adjustment cone positions when expansion ratio is 6.5

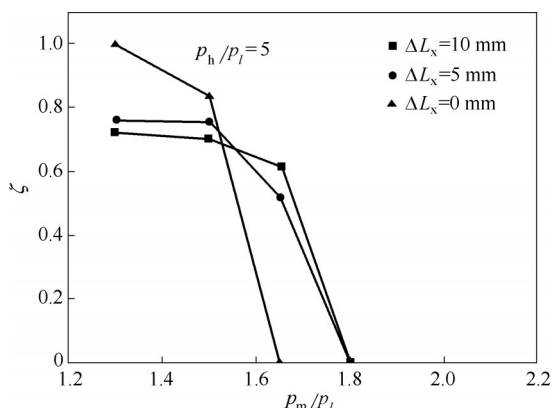


图14 膨胀比为5.0时,不同调节锥位置下引射率随压缩比的变化曲线

Fig.14 Curves of ejector rate with compression ratio at different adjustment cone positions when expansion ratio is 5.0

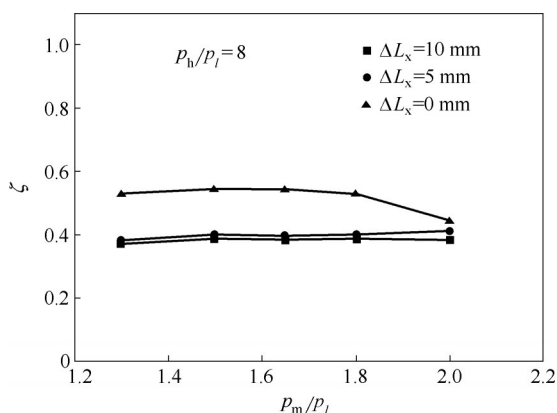


图12 膨胀比为8.0时,不同调节锥位置下引射率随压缩比的变化曲线

Fig.12 Curves of ejector rate with compression ratio at different adjustment cone positions when expansion ratio is 8.0

至6.5时,调节锥向内移动,装置引射效率由0.48最大增大至1.16,最大增加幅度达120%,然而可引射的压缩比上限由1.8减小至1.3。当膨胀比为5.0时,装置引射效率由0.71最大增大至1.0,最大增加幅度约30%,与膨胀比6.5相比降低了很多,同样,可适应的压缩比上限也由1.7减小至1.5。

总结上述实验结果表明:当膨胀比固定,随着压缩比的提高,引射率呈下降趋势。高膨胀比时效率降低得较小;低膨胀比时,效率存在迅速恶化现象。随着调节锥的加入,装置引射率呈大幅上升趋势,个别膨胀比下,设备性能呈现成倍的上升。然而,调节锥的加入使得装置引射率抵抗压缩比的变化能力降低,设备有效引射范围减小。实际应用时,对于压缩比大范围变化的工况,应该谨慎使用

锥芯调节方案。

3 结 论

(1)可调锥的引入能够在维持低压入口流量不变的情况下降低高压入口流量,从而提高装置引射率。

(2)可调锥的引入有利于其在大膨胀比情况下仍维持较高的引射率,从而提高装置对于大膨胀比的适应性。

(3)可调锥的引入可使装置在压缩比变化时,呈现更高的引射效率,但会降低有效引射的压缩比适用范围,降低装置对压缩比变化的适应性。

本文的实验数据和结论可为引射技术在天然气集输工艺中高效应用提供参考。

符 号 说 明

- Q_h ——高压入口的流量, kg/s
- Q_l ——低压入口的流量, kg/s
- ΔL_x ——调节锥位置尺寸, mm
- P_h ——高压端口压力, MPa
- P_l ——低压端口压力, MPa
- P_m ——中压端口压力, MPa
- P_m/P_l ——压缩比(中压端口压力与低压端口压力的比值)
- P_h/P_l ——膨胀比(高压端口压力与低压端口压力的比值)

下角标

- h——高压端口
- l——低压端口
- m——中压端口

参考文献

- [1] 稽国华, 索美娟. 高压气井下节流工艺[J]. 石油机械, 2010, 38(4): 87-88.
Ji G H, Suo M J. Downhole throttling process for high pressure gas wells[J]. Petroleum Machinery, 2010, 38(4): 87-88.
- [2] 张洪杰, 朱琳, 解永海, 等. 天然气引射技术在低压积液气井中的试验与应用[J]. 新疆石油天然气, 2014, 10(2): 76-80+8.
Zhang H J, Zhu L, Xie Y H, et al. Experiment and application of natural gas ejection technology in low pressure liquid-liquid gas well[J]. Xinjiang Oil and Gas, 2014, 10(2): 76-80+8.
- [3] 文昌玉, 苏鹏, 王磊, 等. 低压气井井口增压开采技术[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(5): 124-125.
Wen C Y, Su P, Wang L, et al. Pressurized mining technology of low pressure gas well head [J]. Oil Drilling Technology, 2015, 37(5): 124-125.
- [4] 沈坚, 胡国新. 引射器及引射循环在工程中的应用[J]. 煤气与热力, 2005, (1): 34-38.

- Shen J, Hu G X. Application of ejector and ejection cycle in engineering[J]. Gas & Heat, 2005, (1): 34–38.
- [5] 胡述明. 喷射泵在低压天然气采输中的应用[J]. 石油矿厂机械, 2011, **40**(8): 62–64.
- Hu S M. Application of jet pumps in low pressure gas production and transportation[J]. Machinery for Petroleum Mines, 2011, **40**(8): 62–64.
- [6] 杨德伟, 林日亿, 王弥康, 等. 利用喷射器技术输送低压气层天然气[J]. 油气田地面工程, 2005, **24**(4): 10–12.
- Yang D W, Lin R Y, Wang M K, et al. Injector technology is used to transport gas in low pressure gas layer[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2005, **24**(4): 10–12.
- [7] 胡均志, 王雅萍, 刘慧, 等. 可调式喷射引流装置在榆林气田的应用[J]. 石油化工应用, 2012, **31**(12): 60–61+68.
- Hu J Z, Wang Y P, Liu H, et al. Application of adjustable jet drainage device in Yulin gas field[J]. Petrochemical Industry Application, 2012, **31**(12): 60–61+68.
- [8] 张书平, 刘双全, 陈德见. 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, **10**(2): 113–119.
- Zhang S P, Liu S Q, Chen D J. Application test of jet drainage technology of natural gas in Jingbian gas field[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2008, **10**(2): 113–119.
- [9] 王晓荣, 王惠, 宋汉华, 等. 实现低压气井增压开采的喷射引流技术[J]. 石油化工应用, 2009, **28**(6): 25–27.
- Wang X R, Wang H, Song H H, et al. Jet drainage technology for pressurized exploitation of low pressure gas wells is realized[J]. Petrochemical Industry Application, 2009, **28**(6): 25–27.
- [10] Elrod H G. The theory of ejectors[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1945, **67**: 170–174.
- [11] 索科洛夫. 喷射泵[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- Sokolow. Ejector[M]. Beijing: Science Press, 1977.
- [12] Sun D W, Eames I W. Recent developments in the design theories and application of ejectors—a review[J]. Journal of the Institute of Energy, 1995, **68**: 65–79.
- [13] 宓亢琪. 天然气引射器特性方程与工况的研究[J]. 煤气与热力, 2006, (6): 1–5.
- Fu K Q. Study on characteristic equation and working condition of natural gas ejector[J]. Gas & Heat, 2006, (6): 1–5.
- [14] Pereira P R, Varga S, Soares J, et al. Experimental results with a variable geometry ejector using R600a as working fluid[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, **46**: 77–85.
- [15] Keenan J H, Neumann E P, Lustwerk F. An investigation of ejector design by analysis and experiment[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1950, **72**: 299–309.
- [16] Zheng L X, Deng J Q, Zhang Z X. Dynamic simulation of an improved transcritical CO₂ ejector expansion refrigeration cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2016, **114**: 278–289.
- [17] Liu F, Groll E A, Ren J. Comprehensive experimental performance analyses of an ejector expansion transcritical CO₂ system[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **98**: 1061–1069.
- [18] 李熠桥. 可调式蒸汽喷射器性能计算分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- Li Y Q. Calculation and analysis of adjustable steam ejector performance [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [19] 浦晖. 可调式引射器的流动特性研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- Pu H. Study on flow characteristics of adjustable ejector [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [20] 蒋小丽. 高压气井针形节流阀结构性能分析与优化[D]. 南充: 西南石油大学, 2014.
- Jiang X L. Structural performance analysis and optimization of high pressure gas well needle throttle valve [D]. Nanchong: Southwest Petroleum University, 2014.
- [21] 曾伟, 吴巍巍. 基于Fluent的高压针形节流阀冲刷磨损分析[J]. 内江科技, 2013, **34**(6): 74–79.
- Zeng W, Wu W W. Analysis of erosion wear of high pressure needle throttle valve based on Fluent[J]. NEI JIANG KE JI, 2013, **34**(6): 74–79.
- [22] 张奕, 陈丹丹, 石嵩. 花瓣喷嘴引射器引射系数的数值分析[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2012, **12**(1): 29–32.
- Zhang W, Chen D D, Shi S. Numerical analysis of the injecting coefficient of petal nozzle ejector[J]. Journal of Nanjing Normal University(Engineering & Technology Edition), 2012, **12**(1): 29–32.
- [23] 陆宏圻. 射流泵技术的理论及应用[M]. 沈阳: 水利电力出版社, 1989.
- Lu H Q. Theory and Application of Jet Pump Technology [M]. Shenyang: Water Conservancy and Electric Power Press, 1989.
- [24] Cattadoti G, Galbiati L, Mazzocchi L, et al. A single-stage high-pressure steam injector for next generation reactors test results and analysis[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, **21**(4): 591–606.
- [25] Liu F, Groll E. Study of ejector efficiencies in refrigeration cycles [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, **52**(2): 360–370.
- [26] Chen J Y, Havtun H, Palm B. Parametric analysis of ejector working characteristics in the refrigeration system[J]. Applied Thermal Engineering, August 2014, **69**(1/2): 130–142.
- [27] Zhu Y H, Huang Y L, Li C H. Experimental investigation on the performance of transcritical CO₂ ejector – expansion heat pump water heater system[J]. Energy Conversion and Management, 2018, **167**: 147 – 155.
- [28] Zheng L X, Deng J Q, Zhang Z X. Dynamic simulation of an improved transcritical CO₂ ejector expansion refrigeration cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2016, **114**: 278 – 289.
- [29] Banasiak K, Hafner A. 1D Computational model of a two-phase R744 ejector for expansion work recovery [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, **50**: 2235–2247.
- [30] Ameer K, Aidoun Z, Ouzzane M. Modeling and numerical approach for the design and operation of two-phase ejectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **109**: 809–818.
- [31] Chen J Y, Jarall S, Havtun H, et al. A review on versatile ejector applications in refrigeration systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, **49**: 67–90.