

# 高压输气站计划性放空天然气引射回收理论研究

张兵强

国家石油天然气管网集团有限公司西气东输分公司郑州输气分公司, 河南 郑州

收稿日期: 2023年6月2日; 录用日期: 2023年8月16日; 发布日期: 2023年8月31日

## 摘要

随着碳达峰碳中和战略目标的实施, 解决高压输气站场计划性检维修天然气放空导致的资源浪费和温室效应势在必行。本文以高压输气站场现有输气工艺和现存天然气回收技术为研究对象, 通过研究现存天然气回收技术的优缺点, 结合引射器工作原理和现场输气工艺特征, 提出了一种计划性放空天然气引射回收工艺流程, 并对流程中引射器各项参数进行了计算和优化。研究表明: 1) 计划性放空天然气引射回收理论切实可行; 2) 设计的引射器可以在给定的工况条件下可以稳定工作, 实现天然气的全部回收利用; 3) 利用fluent软件进行了模拟分析, 进一步优化了引射器结构, 引射回收系数从0.42增长到了0.63, 引射器工作性能提高约50%; 4) 引射天然气回收工艺流程简单, 无动设备引入, 投资小且天然气回收成本低。

## 关键词

引射回收, 引射器, 天然气, 射流效应

# Theoretical Research on Planned Blow-off Natural Gas Ejection Recovery in High Pressure Gas Transmission Station

Bingqiang Zhang

China Oil & Gas Pipeline Network Corporation Pipe China West East Gas Pipeline Company (Zhengzhou), Zhengzhou Henan

Received: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Aug. 16<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

With the implementation of the strategic goal of carbon peaking and carbon neutrality, it is im-

perative to solve the resource waste and greenhouse effect caused by natural gas emptying in the planned inspection and maintenance of high-pressure gas transmission stations. This paper takes the existing gas transmission process and the existing natural gas recovery technology of the high-pressure gas transmission station as the research object, through studying the advantages and disadvantages of the existing gas recovery technology, combining the working principle of the ejector and the characteristics of the on-site gas transmission process, puts forward a planned natural gas ejector recovery process flow, and calculates and optimizes the parameters of the ejector in the process. 1) The research shows that the theory of planned blow-off gas ejection recovery is feasible. 2) The designed ejector can work stably under the given working conditions and realize the full recovery of natural gas. 3) Fluent software was used to conduct simulation analysis, and the ejector structure was further optimized. The ejector recovery coefficient increased from 0.42 to 0.63, and the ejector performance was improved by about 50%. 4) The ejector natural gas recovery process is simple, no moving equipment is introduced, the investment is small and the cost of natural gas recovery is low.

## Keywords

Ejector Recovery, Ejector Skid, Natural Gas, Jet Effect

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国天然气长输管道里程不断增加, 沿线站场也在不断增长, 各类输气站场在运行过程中由于检维修需要, 需要局部对某些设备进行隔离放空, 据不完全统计一座标准压气站每年天然气放空量约 12~20 万标方, 一座标准分输站每年天然气放空量约 1~5 万标方。目前国家管网管辖 100 多座压气站, 500 多座分输站。每年由于各类计划性检维修放空天然气总量超过 3000 万标方[1] [2]。目前采用传统压缩机抽吸, 或者液化等手段回收, 由于单次放空量较少, 回收经济价值较小, 绝大多数都通过冷放空或者点火放空进行处置。因此通过优化高压输气站场工艺, 对计划性放空天然气进行全面回收势在必行, 不仅可以缓解碳排放和碳中和问题, 也可以提高企业经济效益。

## 2. 引射回收技术方案

### 2.1. 方案概述

引射回收方案提出基于输气站场有分输调压设施, 根据国家管网现有场站现状, 目前 95% 以上的站场均有分输调压设施。根据伯努利方程可知, 在流体流经缩小孔径时, 随之截面逐渐减小, 流体的压力势能降低, 动能变大, 这时就在吸附腔的进口处产生一个真空度, 致使周围另一种流体被吸入引射器管内, 可以利用这一原理将计划天然气进行回收[3] [4] [5]。本文基于该原理对现有输气站长工艺进行研究, 为实现回收天然气的商业价值, 可在引射橇上增加流量计, 计量后输送给下游城市燃气用户。引射回收框图, 见图 1, 在原输气站调压橇流程上, 并入引射橇。说明: 引射回收框图中到放空火炬管线不是主放空火炬管线, 代表单台设备独立的放空管线, 根据 GB50183 中“6.8.6 为确保放空管道畅通, 不得在主放空管道上设切断阀或其他截断设施”。

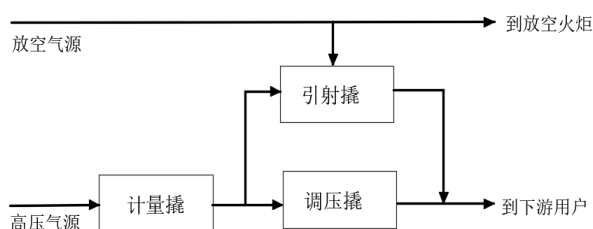


Figure 1. Receiving process scheme  
图 1. 回收流程方案

## 2.2. 工作流程

按照 1.1 节工艺回收方案, 需要对现有站场工艺进行简易改造, 目前高压输气站场所有生产设备均设置有放空管线, 放空管线设置有 1 道球阀(对应 5# 阀门)和 1 道节流截止放空阀或者旋塞阀(对应 1# 阀门), 将天然气回收管线接至两道阀门之间, 不影响原输气工艺。由于本文主要对引射天然气回收理论研究, 暂时不对回收后计量进行分析。正常输气工况下, 放空流程与正常工作流程开启(1#、5# 阀全开), 引射回收流程关闭(2#、3#、4# 阀全关), 见图 2。

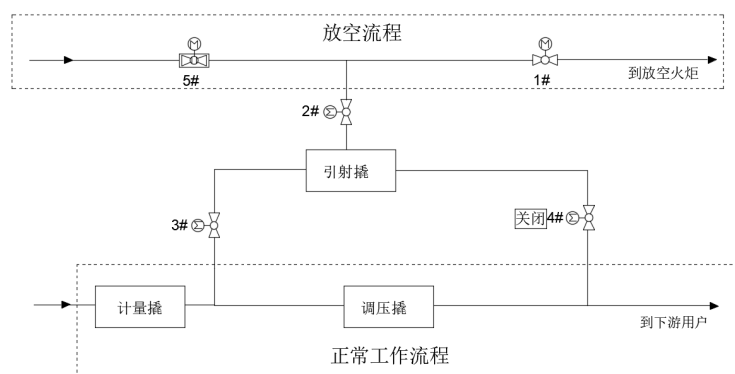


Figure 2. Normal operating process  
图 2. 正常工况流程

计划检修工况下, 引射回收流程与正常工作流程开启(2#、3#、4#、5# 阀全开), 放空流程关闭(1# 全关), 见图 3。

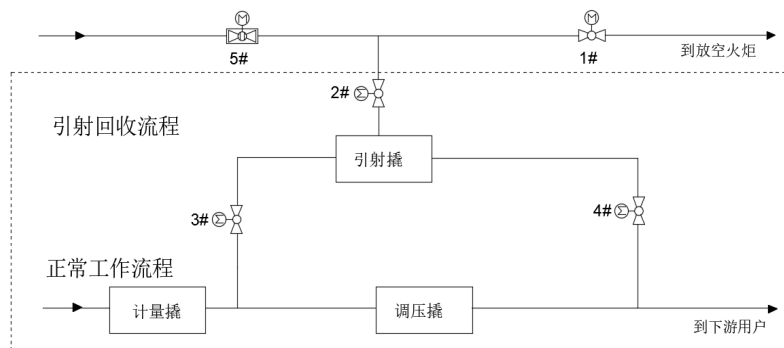


Figure 3. Plan repair operation flow  
图 3. 计划检修工况流程

### 2.3. 引射橇组成

引射橇主要由超声波流量计、引射发生器以及温变，压变等控制系统组成。待回收天然气经过超声波流量计计量后，工作流天然气混合后输送至下游用户，实现商业回收价值。根据现场实际情况，也可使用涡轮流量计，以降低改造成本，引射橇结构框图见图 4。本文主要对引射回收理论进行研究，不再对引射器做详细介绍。

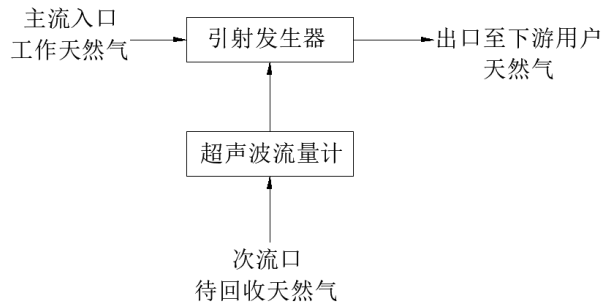


Figure 4. Ejector skid block diagram  
图 4. 引射橇组成框图

### 3. 引射器结构设计

Table 1. Basic data information of ejector skid workflow, ejector jet and mixed flow  
表 1. 引射橇工作流、引射流和混合流等基础数据信息表

项目	参数	单位	说明	项目	参数	单位	说明
运行参数设置				几何参数设置			
工作流体参数 $P$	主流压力 $P_p$	71.5	bar	喷嘴 $N$	喷嘴锥体长度 $L_A$	0.600	m
	主流温度 $t_p$	20.5	°C		喷嘴收敛角 $\theta$	27.0	
	主流流量 $G_p$	3.00	kg/s		喷嘴壁厚 $s$	0.006	m
	主流体积流速 $V_p$	2.86	m <sup>3</sup> /s	扩散室 $M$	扩散角 $\alpha$	20.0	推荐取 20°~30°，一般取 20°
	主流密度 $\rho_p$	0.7	kg/m <sup>3</sup>		扩散器的长度 $L_D$	0.1	m
引射流体参数 $S$	次流压力 $P_s$	10	bar	重力加速度 $g$	9.8	m/s <sup>2</sup>	
	次流温度 $t_s$	45.00	°C	主流通过喷嘴处的流量系数 $\psi_1$	0.950		
	次流流量 $G_s$	0.97	kg/s	液体通过混合式的流量系数 $\psi_2$	0.975		
混流参数 $M$	次流密度 $\rho_s$	0.7	kg/m <sup>3</sup>	公用参数	液体通过扩散室的流量系数 $\psi_3$	0.900	
	出口压力 $P_m$	30.00	bar		液体通过接受室的流量系数 $\psi_4$	0.925	
	出口温度 $t_m$	26	°C	长度与直径比 $B$	2.2	推荐值 2~4，对于容易混合的介质，取小值	

本文设计基础数据以西一线某压气站数据为依据, 目前国家管网所辖场站各种设备的放空管线上至少设置有 1 道球阀 + 1 道节流截止放空阀(或者旋塞阀), 由于是计划性放空天然气作业, 因此可以通过调节节流截止放空阀控制放空流量和速率, 本文只对稳态下引射器工作工况进行模拟。根据引射器的工作原理, 只要有差压存在, 就可以在次流口产生负压, 因此不同工况条件引射器除了在回收速度上有差别外, 对计划放空天然气全部回收功能上并无差别, 可以通过延长回收时间均能实现计划放空天然气的全部回收, 因此不再模拟非稳态工况。工作流体, 引射流体及混合流体等基础数据信息见表 1。

### 3.1. 径向尺寸

#### (一) 喷嘴出口直径

扩张型工作喷嘴的出口面积  $A_n$  计算方程[6] [7] [8] (1)

$$d_n = 1.12838\sqrt{A_n} \quad (1)$$

$$A_n = \frac{G_p}{\psi_1} * \sqrt{\frac{1}{2 * g * \rho_p * P_p}} \quad (2)$$

式中:  $G_p$ ——工作流体的流量, kg/s;

$\Delta P_p$ ——主流与次流压力差, Pa

$\rho_p$ ——工作流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>;

$A_n$ ——喷嘴口截面积, m<sup>2</sup>;

$d_n$ ——喷嘴出口直径, m;

$\psi_1$ ——主流通过喷嘴处的流量系数  $\psi_1$ , 取推荐值 0.95。

计算得到喷嘴直径  $d_n=13.6$  mm。

#### (二) 混合室直径

混合室截面面积  $A_t$  计算方程[9] [10] (3)

$$A_t = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 3.9 * b}}{1.95} * A_n \quad (3)$$

$$a = - \left[ 0.975 + 1.19 * \frac{\rho_p}{\rho_m} * (1 + \mu)^2 - 0.78 * \frac{\rho_p}{\rho_s} * \mu^2 \right] \quad (4)$$

$$b = 1.19 * \frac{\rho_p}{\rho_m} * (1 + \mu)^2 \quad (5)$$

计算得到混合室截面面积  $A_t = 3.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  (即 3260 mm<sup>2</sup>)。

确定混合室直径  $d_t$ :

$$d_t = 1.12838\sqrt{A_t} \quad (5)$$

计算得到混合室直径为 21 mm。

#### (三) 喷嘴入口直径

工作喷嘴入口截面积  $d_p$  计算方程[10] [11] [12] [13] [14] (7)

$$d_p = d_n + 2 * L_A * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (7)$$

式中:  $L_A$ ——喷嘴锥体长度, m;

$\theta$ ——喷嘴收敛角, 推荐取  $20^\circ \sim 30^\circ$  此值会影响  $\psi_1$  的值, 试验证明取  $27^\circ$  最佳。

计算得到工作喷嘴入口截面积  $d_p = 18.2 \text{ mm}$ 。

#### (四) 接受室自由流直径

根据数据计算可知引射系数小于 0.5, 因此可知自由射流直径计算方程[15] (9)

$$\mu = \frac{G_s}{G_p} = 0.42 < 0.5 \quad (8)$$

$$d = 3.4 * d_n * \sqrt{0.083 + 0.76 * \mu} \quad (9)$$

式中:  $G_p$ ——工作流流量, kg/s;

$G_s$ ——引射流流量, kg/s;

$\mu$ ——引射系数(工作流和引射流的混合比例);

$\omega_c$ ——扩散段流体流出引射器的速度, m/s。

计算得到自由射流直径  $d = 33.5 \text{ mm}$ 。

### 3.2. 纵向尺寸

(一) 喷嘴至混合室长度

当引射系数  $\mu < 0.5$  时, 混合室长度计算方程[16] [17] (12):

$$L_{C1} = \left[ \sqrt{0.083 + 0.76 \cdot \mu} - 0.29 \right] * \frac{d_n}{0.32} \quad (10)$$

当  $d > d_i$  时, 有:

$$L_{C2} = \frac{d - d_i}{d_i - d} * L_{C1} \quad (11)$$

$$L_B = L_{C1} + L_{C2} \quad (12)$$

式中:  $L_B$ ——喷嘴至混合室长度, m;

$L_{C1}$ ——接受室锥体由  $d_n$  变至  $d$  的距离, m;

$L_{C2}$ ——接受室锥体由  $d$  变至  $d_i$  的距离, m;

$d_i$ ——锥体起始端直径, m。

计算确定喷嘴距混合室长度  $L_B$  的值为 100 mm。

(二) 混合室长度

当  $\mu < 0.5$  时, 可知混合室长度计算方程(13):

$$L_C = B * d_i \quad (13)$$

式中:  $L_C$ ——混合室长度, m;

$B$ ——长度与直径比, 荐值 2~4, 对于容易混合的介质, 取小值, 本文取 2.2。

计算得到混合室长度为 220 mm。

## 4. 射流流场模拟与引射器结构优化

### 4.1. 射流流场模型

对高压输气站放空天然气回收引射器作为模拟研究对象, 并以输气站相应的实际运行参数作为建模依据的基础参数。构建二维轴对称几何条件下的射流流场模拟模型。

## 4.2. 模拟结果及分析

### 4.2.1. 模拟条件

以输气站计划检维修放空生产参数作为模拟工作条件，即工作流体压力  $P_p = 7.15 \text{ MPa}$ ，引射流体压力  $P_s = 1 \text{ MPa}$ ，混合流体压力  $P_M = 3 \text{ MPa}$ ，工作流体总温  $300 \text{ K}$ ，并根据天然气基础组分，将其组分信息导入模拟软件中，并假定为理想气体。由此，通过构建的引射器模型研究高压输气站放空天然气回收的流场状态和引射效果，天然气物性参数如表 2。

Table 2. Physical parameters of natural gas

表 2. 天然气物性参数

组分	相对密度	甲烷(%)	乙烷(%)	CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
范围	0.610~0.76	89~98.6	1.58~10.6	0.01~0.3	0.01~0.1
平均	0.7	93.8	6.09	0.155	0.055

### 4.2.2. 工作流态分析

为验证引射器计算参数的合理性，在 flunt 软件中输入天然气物性参数，通过运算可以得到引射系数变化趋势，见图 5，引射器速度云图，见图 6。

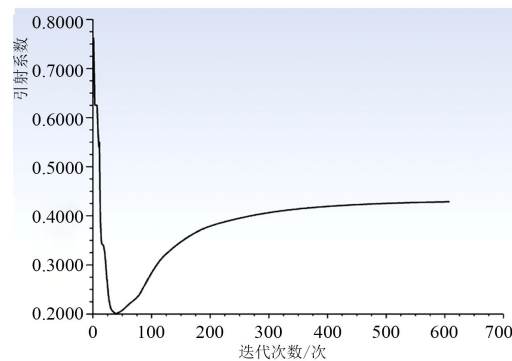


Figure 5. The ejection coefficient simulated value changes

图 5. 引射系数模拟值变化

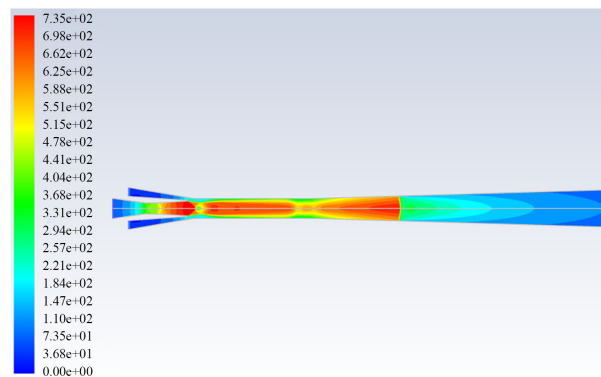


Figure 6. Ejector velocity cloud image

图 6. 引射器速度云图

从图 5 可知随着引射气体流量趋于稳定，引射系数也趋于稳定，表明了该引射器能够在设定工况条

件下正常工作，引射器的引射系数则表征了该引射器的引射回收能力。从速度云图 6，可以直观反映了高压工作流体与低压引射回收流体在引射器中发生了充分的能量和动量交换，在混合室与扩压室之间有段剧烈紊动，这表明可以通过优化引射结构，进而一定程度提升引射回收效率。

### 4.3. 引射系数影响分析

#### 4.3.1. 工作喷嘴结构对引射系数的影响

##### (一) 喷嘴距对引射系数的影响

喷嘴距指喷嘴扩压段出口到等直径混合室进口处的距离。在模拟仿真中，围绕理论设计值 4.7 mm，分别调整喷嘴距为 1.7 mm、2.7 mm、3.7 mm、4.7 mm、5.7 mm、6.7 mm、7.7 mm 变化，观察对提高引射系数的影响，见图 7。

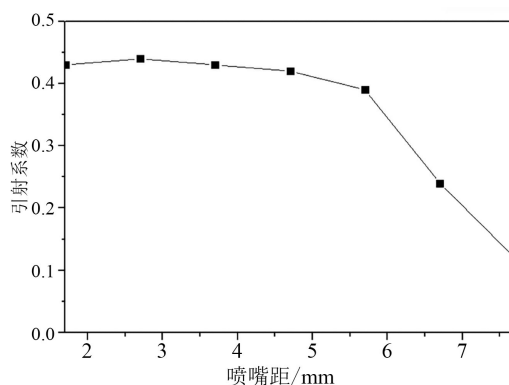


Figure 7. Diagram of the relationship between nozzle distance and ejection coefficient  
图 7. 喷嘴距与引射系数关系图

由图 7 可以看出，通过改变喷嘴距参数对提高引射系数的影响收效甚微，当不断增大喷嘴距时引射系数有下降趋势，因此在结构优化中不予考虑调整喷嘴距参数。

##### (二) 喉部直径对引射系数的影响

在模拟仿真中，围绕理论设计喷嘴出口直径 13.6 mm、喉部直径 10 mm，分别调整喉部直径为 4、6、8、10、12、14、16 mm 变化，观察对提高引射系数的影响，见图 8。

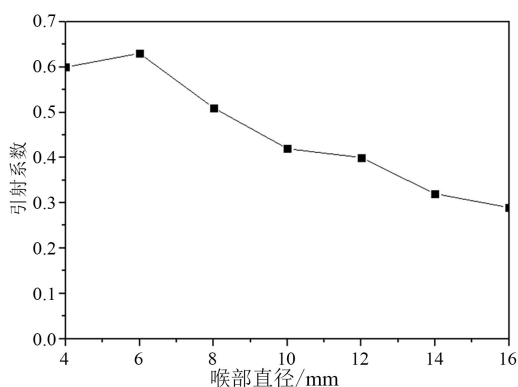
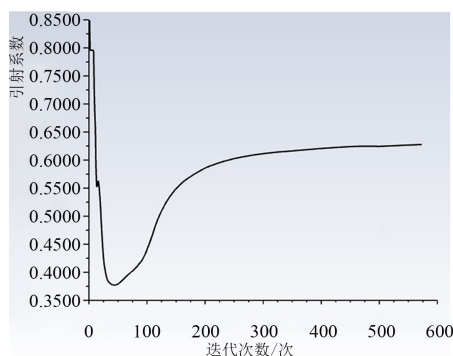


Figure 8. Diagram of throat diameter and ejection coefficient  
图 8. 喉部直径与引射系数关系图

从图 8 可以看出喷嘴出口面积与喉部面积比值对引射器结构设计和性能好坏有着直接影响，随着喉



部直径增加, 引射系数逐渐降低, 在喉部直径为 6 mm 时, 引射系数最大。因此构建当喉部直径为 6 mm 时的引射系数模拟值变化, 见图 9。



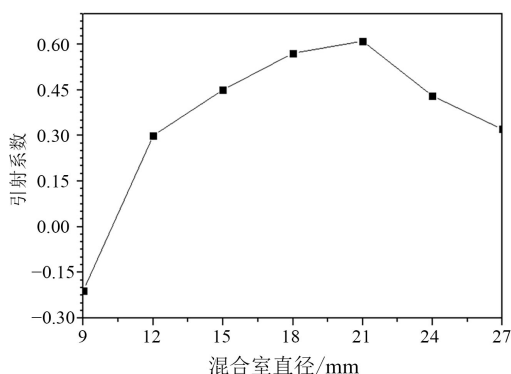
**Figure 9.** The simulated value of ejection coefficient changes when throat diameter is 6 mm  
**图 9.** 喉部直径为 6 mm 时引射系数模拟值变化

从图 9 可以得出, 在模拟工作条件下, 射流流体流速趋于稳定后的引射器的引射系数值为 0.63, 相较原引射系数提高约 50%, 在该工况下引射器可以稳定工作。

#### 4.3.2. 混合室结构对引射性能的影响

##### (一) 混合室面积对引射性能的影响

通过使用混合室与喉部面积比值作为变量进行定量分析引射器内部流场的影响, 见图 10。在模拟仿真中, 围绕理论设计混合室直径值 18 mm、喉部直径值 10 mm, 分别调整混合室直径为 9、12、15、18、21、24、27 mm, 观察对提高引射系数的影响。



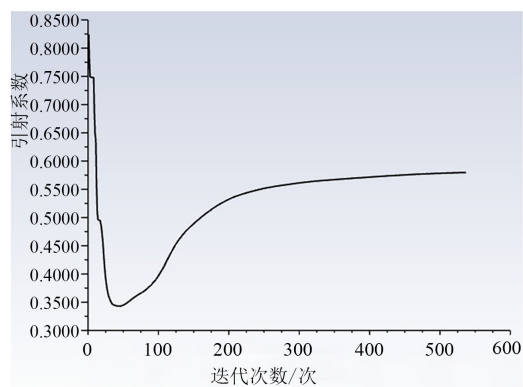
**Figure 10.** Relationship between mixing chamber diameter and ejection coefficient  
**图 10.** 混合室直径与引射系数关系图

从图 10 可以得出引射器的混合室直径为 21 mm 时, 引射系数达到最大值, 为进一步验证其稳定性, 构建当混合室直径为 21 mm 时的引射系数模拟值变化, 见图 11。

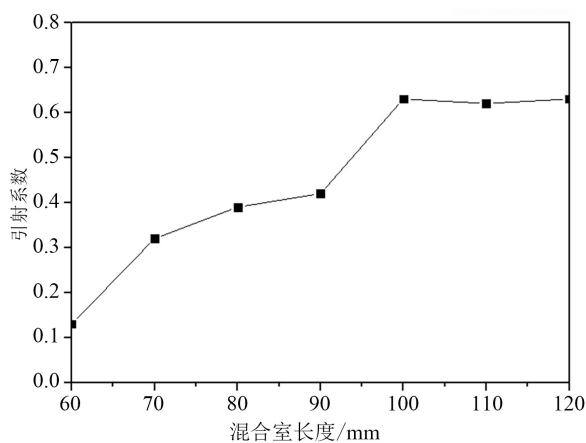
从图 11 可以得出, 在模拟工作条件下, 射流流体流速趋于稳定后的引射器的引射系数值为 0.61, 相较原引射系数提高约 45.2%, 在该工况下引射器可以稳定工作。

##### (二) 混合室长度对引射性能的影响

在模拟仿真中, 围绕理论设计混合室长度 90 mm、喉部长度 10 mm (混合室与喉部长度比值为 9), 分别调整混合室长度为 60、70、80、90、100、110、120 mm 变化, 观察对提高引射系数的影响, 见图 12。

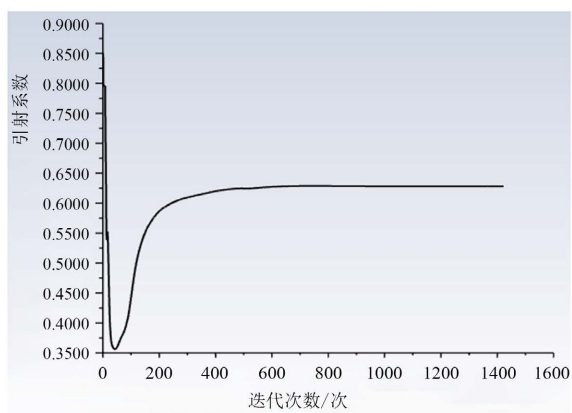


**Figure 11.** The simulation value of ejection coefficient changes when the diameter of mixing chamber is 21 mm  
**图 11.** 混合室直径为 21 mm 时引射系数模拟值变化



**Figure 12.** Relation diagram of mixing chamber length and ejection coefficient  
**图 12.** 混合室长度与引射系数关系图

从图 12 可以看出, 在不断增加混合室长度时, 引射系数逐渐增加, 当混合室长度大于 100 mm 时, 引射系数趋于稳定, 考虑到结构设计合理性以及节约费用等因素, 选择将混合室长度优化为 100 mm。构建混合室长度为 100 mm 引射系数模拟值变化趋势, 见图 13。



**Figure 13.** The simulation value of ejection coefficient changes when the mixing chamber length is 100 mm  
**图 13.** 混合室长度为 100 mm 时引射系数模拟值变化

从图 13 可以得出, 在模拟工作条件下, 射流流体流速趋于稳定后的引射器的引射系数值为 0.63, 相较原引射系数提高约 50%, 在该工况下引射器可以稳定工作。

### 4.3.3. 扩压室结构对引射系数的影响

#### (一) 扩压室长度对引射系数的影响

扩压室处于混合流体的出口位置, 在扩压室中混合流体达到合理背压后输出。在模拟仿真中, 围绕理论设计扩压室长度 220 mm、喉部长度 10 mm, 分别调整扩压室长度为 190、200、210、220、230、240、250 mm 变化, 观察对提高引射系数的影响, 见图 14。

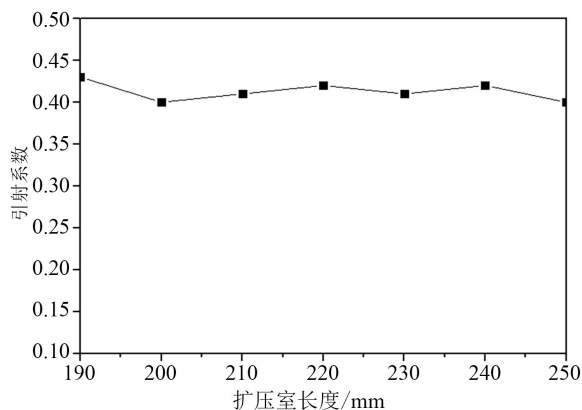


Figure 14. Relation between diffuser length and ejection coefficient

图 14. 扩压室长度与引射系数关系图

从图 14 可以得出, 通过扩压室长度对引射器性能的影响极小, 因此在结构优化中不予考虑调整设计值。

#### (二) 扩压室直径对引射系数的影响

在模拟仿真中, 围绕理论设计值扩压室出口直径 33.5 mm、喉部直径 10 mm, 分别调整扩压室出口直径为 18.5、23.5、28.5、33.5、38.5、43.5、48.5 mm 变化, 观察对提高引射系数的影响, 见图 15。

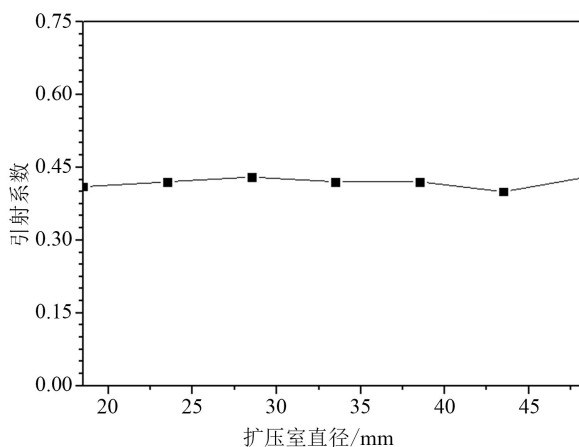


Figure 15. Relationship between diffuser diameter and ejection coefficient

图 15. 扩压室直径与引射系数关系图

从图 15 可以得出, 扩压室直径变化对引射系数的影响较小, 在变化范围内引射系数的变化可近视认

为趋于稳定值。因此，在结构优化中保持设计理论值不变。

#### 4.4. 引射器几何尺寸优化结果

根据 3.3 节计算分析结果可知，喉部直径，混合室直径和混合室长度三个关键参数对引射器的引射系数影响较大，分别将引射系数提升了 50%，45.2%和 50%，优化后的引射系数值从 0.42 增长到了 0.63，具体优化后数据见表 3。

**Table 3.** Optimized size of ejector structure

**表 3.** 引射器结构优化尺寸

部位	尺寸(mm)	部位	尺寸(mm)
喷嘴入口直径	18.2	喷嘴距	4.7
喷嘴喉部直径	6	混合室直径	21
喷嘴渐缩长度	24.2	混合室长度	100
喷嘴出口直径	13.6	扩压室长度	220
喷嘴渐扩长度	22.4	扩压室出口直径	33.5

## 5. 结论

(一) 本文通过对现有高压输气站场工艺流程分析，提出了一种引射天然气回收工艺流程，该流程便于改造实施，对站内原有流程影响较小，也适用于新建有调压设备的输气站场，可以实现计划性放空天然气的全部回收。

(二) 引射天然气回收工艺不需要外加压缩机等动设备，通过一组阀门的开关组合即可实现计划放空天然回收，经济高效。

(三) 本文对引射器机构进行了理论设计，并通过数值模拟对引射器的喉部直径，混合室直径和混合室长度三个关键参数进行了优化，优化后的引射回收系数值从 0.42 提高到 0.63，工作性能提高了 50%。

(四) 本文提出的引射回收计划放空天然气工艺，以及引射器的计算数据可以为高压输气站场计划放空天然气回收提供参考，具有一定指导价值。

## 参考文献

- [1] 刘朝全, 姜学峰. 2020 年国内外油气行业发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021: 109-151.
- [2] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
- [3] 丁进善, 张磊, 李建秋, 等. 小断块油田 VOCs 回收利用系统设计实践[J]. 油气田地面工程, 2023, 42(1): 85-88.
- [4] 张兵强, 何士杰, 薛大帅, 等. 逆流高压喷射处理剂注入技术[J]. 天然气与石油, 2012, 30(2): 29-31.
- [5] 栾晓堃. 零散伴生气回收及电加热集输节电措施探讨[J]. 油气田地面工程, 2022, 41(6): 41-45.
- [6] 申屠云奇, 宋煜晨, 尹俊连, 等. 扩散角对文丘里管内湍流影响的试验研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(2): 16-22.
- [7] 吕超, 孙铭赫, 殷宏鑫, 刘芳. 文丘里热解反应器结构对流场影响的模拟研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 821-826.
- [8] 王海军. 文丘里管射流装置的结构及工作原理[J]. 西南科技大学学报, 2004, 19(2): 41-44.
- [9] 梁郑岳, 朱万冬, 谢正良, 等. 基于文丘里管测量的 EGR 闭环控制试验研究[J]. 天津科技, 2020, 47(2): 43-46+49.
- [10] 江庆梅, 樊耀南, 杨东东. 文丘里引射器回收天然气管网压力能的应用[J]. 煤气与热力, 2009, 29(7): 28-31.
- [11] 刘博. 天然气分公司放空天然气回收技术应用探索[J]. 石油石化节能, 2022, 12(8): 18-22.

- [12] 张时佳, 张斌. 渤西终端放空天然气回收工艺方案研究[J]. 天然气与石油, 2014, 32(4): 24-27.
- [13] 郑志, 王树立, 王婷, 等. 天然气输配过程流体压力能回收技术现状与展望[J]. 天然气与石油, 2009, 27(1): 11-15.
- [14] 王博, 徐鑫, 陈一鸣, 等. 文丘里型气动喷砂喷嘴冲蚀模拟分析[J]. 天然气与石油, 2019, 37(5): 91-97.
- [15] 皮嘉立, 杜娟, 吴杰, 等. 不同喷嘴结构油罐旋转喷射搅拌器数值模拟[J]. 油气储运, 2016, 35(4): 422-426.
- [16] 耿欢, 周书仲, 任永磊. 干气密封放空天然气回收系统设计[J]. 油气储运, 2018, 37(5): 591-596.
- [17] 张时佳, 张斌. 渤西终端放空天然气回收工艺方案研究[J]. 天然气与石油, 2014, 32(4): 24-27.