

射流泵排水采气工艺参数优化设计与应用经济性

李 刚 (中国石化华北油气分公司采气一厂, 河南 郑州 450006)

摘 要: 大牛地气田构造位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部, 储层具有低孔低渗特征, 北部大 28 井区产液量大、水气比高, 部分气井举升压力不足, 现有泡排工艺难以稳产。针对以上现状, 近几年引进了多种机械排水采工艺, 释放高产液气井产能。本文对射流泵排水采气工艺进行了深入的研究, 对不同面积比条件下经济性对比分析, 对射流泵工艺喷嘴、喉管组合进行参数优化, 为提高射流泵排采效率与经济效益提供一定的参考。

关键词: 射流泵; 喷嘴; 喉管组合; 参数; 经济效益

中图分类号: TE937

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 023-0064-03

Optimization Design and Application Economy of Process Parameters for Water Drainage and Gas Recovery by Jet Pumps

Li Gang (Sinopec North China Oil and Gas Branch Gas Production Plant No. 1, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: The structure of the Daniodi Gas Field is located in the northern part of the Yishan Slope in the Ordos Basin. The reservoir has the characteristics of low porosity and low permeability. The liquid production in the Da 28 well area in the north is large and the water-gas ratio is high. The lifting pressure of some gas Wells is insufficient, and the existing bubble drainage process is difficult to achieve stable production. In view of the current situation, a variety of mechanical drainage and production processes are introduced to release the production capacity of high-yield liquid and gas Wells. This paper conducts an in-depth study on the drainage and gas production process of jet pumps, compares and analyzes the economic conditions under different area ratios, and optimizes the parameters of the nozzle and throat combination of the jet pump process, providing certain references for improving the drainage and gas production efficiency and benefits of jet pumps.

Key words: Jet pump Nozzle Laryngeal tube assembly Parameter Economic benefit

1 射流泵排采工艺原理

射流泵的运作机理主要是基于流体动力学中的文丘里效应 (图 1), 其通过调控流体速度与压力梯度实现介质间的能量传递。具体工作流程表现为: 当高压工作介质经收缩喷嘴加速喷射时, 在出口区域形成局部负压区, 由此产生的压力差将周围流体吸入管路系统 (图 2)。在这个过程中, 被引射流体通过动能传递从工作介质中获取能量, 其运动速度逐步提升; 而作为能量源的工作介质因动能损耗速度逐渐降低。当两种介质流经喉管混合段后, 最终达到速度均衡状态, 从而实现高效的能量耦合与介质输运功能。

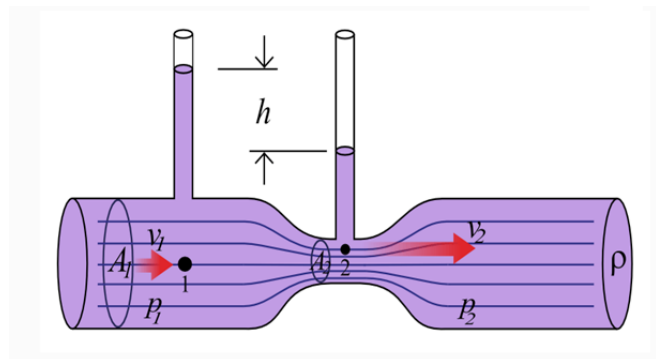


图 1 文丘里效应

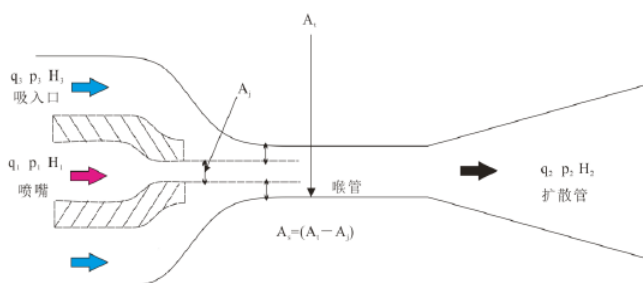


图 2 射流泵喷嘴示意图

2 喷嘴、喉管尺寸计算及优化

2.1 喷嘴、喉管尺寸计算

按照多层管柱结构原理, 以及射流泵工艺的技术要求, 能够按照以下的步骤计算出射流泵喷嘴和喉管的尺寸:

①吸入压力 p_4 计算

$$P_x = G_4 h_4 \quad (1)$$

式中: p_4 为吸入压力, MPa; h_4 为泵沉没深度, m; G_4 为流体压力梯度, MPa/m。

②排出压力 p_3 计算

$$P_3 = G_3 h_1 + F_3 + p_{wh} \quad (2)$$

式中: P_3 为排出压力, MPa; G_3 为流体压力梯度, MPa/m; h_1 为泵下入深度, m; F_3 为通道内摩擦力,

MPa; p_{wh} 为地面出气管回压, MPa。

③举升率 H (压头比) 计算

$$H = \frac{p_4 - p_3}{p_1 - p_3} \quad (3)$$

式中: p_1 为动力液注入泵筒压力, MPa; H 为举升率 (压头比)

④流量比 M 和喷嘴 / 喉管面积比 R 确定

如果已知举升率 H (压头比), 可通过特性曲线和查表 1 获得 M 和 R 。

⑤排出流量 Q_e 计算

$$Q_e = \frac{Q_p}{M} \quad (4)$$

式中: Q_e 为排出流量, m^3/h ; Q_p 为动力液量, m^3/h ; M 为排出流量和动力液量的比值。

表 1 射流泵相关参数对照表

举升率 H	流量比 M	面积比 R
<0.15	>1.5	0.17
0.15-0.25	1.5-1.0	0.21
0.25-0.3	1.0-0.7	0.26
0.3-0.45	0.7-0.5	0.33
0.45-0.8	0.5-0.1	0.53

通过以上计算和对比, 最终选择合适的喷嘴和喉管。

2.2 喷嘴、喉管尺寸优化

2.2.1 泵效影响因素

泵效的核心影响因素在于举升率与流量比两个参数。具体表现为: 其一, 当面积比增大时, 流量比呈递减趋势, 详见表 1 数据, 这直接导致泵效水平随之降低; 其二, 举升率参数却随面积比增加呈正向增长。基于这种反向关联特性, 通过科学设定面积比值可实现泵效的有效提升。

2.2.2 喷嘴、喉管优化设计

经过数值模拟验证, 为了有效防止井下天然气及杂质腐蚀作用, 该工艺系统需要同时满足以下技术指标: ①维持足够的液柱静压: 沉没度与吸入压力需达到较高标准; ②严格控制水气比参数; ③工艺运行边界条件: 井底压力阈值 $\geq 6\text{MPa}$, 日排液能力 $\leq 350\text{m}^3$, 单井日产气量 $\leq 5 \times 10^4\text{m}^3$, 适用温度范围 $\leq 120^\circ\text{C}$, 泵体下深极限 $\leq 3500\text{m}$; ④工作介质: 油、气、水混合物, 其中硫化氢含量小于等于 100g/m^3 , 水的矿化度小于等于 50g/m^3 。

3 现场实例

3.1 参数设计和优化

首先计算出不同喷嘴、喉管组合下的理论出液量, 见表 2。结合生产特征以及动液面数据及地面注入压力的变化, 对该井的施工参数重新进行了优化设计。

X-64 井的压头比为 0.6, 面积比 R 为 0.53, 流量比位于 0.1-0.5 之间; 其次, 根据射孔段位置, 确定了泵的最佳深度为 2550m, 只有达到这个深度, 才有利于井内气液的分离, 最后, 根据泵深、面积比 R 和泵效公式, 确定了合理的工作压力, 具体施工参数优化结果如下: 喷嘴 $\Phi 2.57$, 喉管 $\Phi 3.49\text{mm}$; 泵工作位置 2550m。

表 2 X-64 井数据统计

序号	喷嘴	喉管	压头比	面积比 R	质量比 M	喷嘴面积 A_N	动力液量 Q_p	地层产液量 m^3
1	2.57	3.90	0.600	0.434	0.3	5.18	114.00	34.20
2	2.57	4.36	0.600	0.347	0.27	5.18	114.00	30.78
3	2.57	3.49	0.600	0.542	0.26	5.18	114.00	29.64
4	2.88	3.90	0.600	0.545	0.38	6.51	143.16	54.40
5	2.88	4.36	0.600	0.436	0.48	6.51	143.16	68.71
6	2.88	3.49	0.600	0.681	0.25	6.51	143.16	35.79

3.2 效果分析

通过同心双管管柱射流泵排采工艺, 该井自 2024 年 10 月 1 日 -11 月 16 日的日产气 1500m^3 , 日产液 22m^3 , 11 月 16 至 12 月 10 日的日产气 3000m^3 , 日产液 25m^3 , 排采期间累计产气 $12.89 \times 10^4\text{m}^3$, 累计排液 1647.47m^3 , 具体生产运行情况见表 3。

表 3 X-64 实际生产情况统计

井号	阶段	喷嘴面积比	喷嘴喉管组合	运行天数	工作压力	生产状态	日产气 (方/天)	日产液 (方/天)	污水回注
X-64	一	0.347	2.57/4.36	6	23	较差	0	20	定期拉液
	二	0.434	2.57/3.9	39	24-26	稳定	1500	22	
	三	0.545	2.88/3.9	1	28	较差	865	8	
	四	0.542	2.57/3.49	19	27	稳定	3000	25	

3.3 应用经济性分析

射流泵排水采气工艺在气田开发中应用广泛, 其经济性对气田开采效益意义重大。从初始投资看, 射流泵结构简洁, 主要由喷嘴、喉管、扩散管等构成, 无复杂转动部件, 制造工艺不繁琐, 采购成本低于部分复杂机械泵, 初期设备购置费用就相对节省。安装时也较为简便, 无需大型复杂安装设备与大量人力投入, 进一步降低了前期成本。

运行成本方面, 射流泵通过高压动力液传递能量, 效率一般在 21-25%, 能耗较高。在持续运行的高产液气井中, 长期的动力液消耗会带来高额电费支出。不过其维护成本低, 因无机械磨损, 不需要频繁更换易损件, 也无需复杂的机械调试保养, 减少了人力与

配件更换费用, 延长了设备的使用周期。

与其他排水采气工艺对比, 电潜泵虽排量大、效率高, 但初期投资高、对电缆等配套设施要求高, 且在复杂井况下易故障; 气举工艺需高压气源, 设备投入和运行成本也较高。射流泵在初期投资和复杂井况适应性上有一定的优势。

在出砂气井中, 射流泵井下无运动部件, 避免了砂卡等故障, 相比其他有转动部件的泵, 可减少因故障导致的停产损失与维修成本。对于高含硫等特殊气井, 射流泵工作可靠、无泄漏, 无需额外复杂的防腐、防爆措施, 节省成本。

整体而言, 射流泵排水采气工艺在出砂、特殊气体环境等特定场景下, 结合其低维护成本和相对低的初始投资, 具备较好经济性。但在能耗方面存在短板, 未来需在提升能量转换效率上改进, 以进一步增强其经济性, 以便在气田开发中发挥出更大的价值。

3.4 小结

分析可知, 在压头比一定时, 大面积比条件下, 对应的流量比较低, 小面积比条件下, 对应的流量高, 采用绝对值小的喷喉组合, 降低了对注入压力的要求, 但同时也抑制了气井产量上升。

喷喉组合面积比存在上限值, 过大的面积比容易发生气蚀效应; 同时也存在下限值, 过小的面积比要求过高的注入压力, 当通过降低喷喉组合的尺寸绝对值来降低注入压力需求时, 会抑制产气量, 增产效果不明显。通过分析不同喷喉面积比条件下流量比与压头比的对应关系曲线可知:

第一, 当喷嘴型号为 2.88mm 时, 不管搭配 3.49mm 或 3.9mm 或 4.36mm 的喉管型号, 其计算出的理论出液量都比较大, 同时其对应的面积比也较大, 所需的注入压力也较高, 但目前实际注入压力最高只能达到 28MPa, 因此型号为 2.88mm 的喷嘴不适用于 X-64 井。

第二, 当喷嘴型号为 2.57mm 时, 搭配 3.49mm 或 3.9mm 或 4.36mm, 其计算出的理论出液量均在 30m³ 左右, 结合实际运行情况分析, 本文将不同面积比下的理论出液量与实际出液量进行了对比分析, 如图 3 所示。当面积比为 0.347 (2.57/4.36) 时, 其注入压力较低, 但生产不稳定, 实际日均排液量为 20m³; 当面积比为 0.434 (2.57/3.9) 时, 其生产状态比较稳定, 所需注入压力在 24~26MPa 之间, 但其日产气量为 1500m³, 相同条件下, 产生的经济效益较差; 目前使用的面积比为 0.542 (2.57/3.49), 其所需的注入压力稳定在 27MPa, 已连续稳定生产 27 天, 实际日产液为 26m³, 与理论日产液相差 3m³, 日产气量为 3000m³, 较面积比为 0.434 时的日产气量增加

1500m³, 相同条件下, 产生的经济效益较好。总的来说, 目前所使用的喷喉面积比 (0.542) 对于 X-64 井来说是截止到目前为止最优喷喉比组合, 且具有较高的应用经济效益。

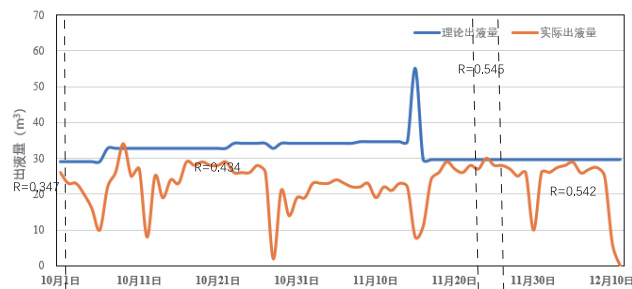


图 3 产液量对比分析

4 结论

①通过对射流泵喷嘴、喉管尺寸的优化得出, 当 X-64 井嘴喉面积比为 0.542, 喷嘴直径为 2.57mm, 喉管相应取值为 3.49mm 时为最优喷喉比组合, 能够产生较高的应用经济效益; ②在压头比一定时, 大面积比条件下, 对应的流量比较低, 小面积比条件下, 对应的流量高, 采用绝对值小的喷喉组合, 降低了对注入压力的要求, 但同时也抑制了气井产量上升, 应用经济效益较差; ③通过现场应用得出, 采用优化后的工艺参数设计, 能够有效提高同心双管射流泵排采效率, 弥补了现场仅依靠经验进行工艺参数设计的不足, 为该工艺的进一步推广应用提供了一定的参考和指导意义。

参考文献:

- [1] 薛清祥, 王大星, 刘常军, 等. 同心双管水力泵排水采气工艺 [J]. 油气井测试, 2013, 22(5): 45-47.
- [2] 郭瑞祥, 向欣, 李勇龙, 等. 论柱塞气举排水采气工艺关键技术 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(17): 251-252.
- [3] 张霖, 李学康, 刘伟, 等. 水力射流泵排水采气工艺技术及应用 [J]. 钻采工艺, 2005, 28(4): 74-75.
- [4] 张世德, 黎桢安, 刘利军, 等. 同心管射流泵排水采气工艺技术及应用 [J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(12): 103-104.
- [5] 王爱利, 李忠城, 毛文胜. 射流泵排液技术在冀东油田试油中的应用 [J]. 油气井测试, 2006, 15(2): 50-52, 55.
- [6] 张浩, 张志全, 刘捷, 等. 页岩气井射流泵排水采气工艺下泵深度优化设计 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11087-11091.
- [7] 郭邦瑞. 气动力射流泵排水采气装置设计及工艺技术研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [8] 蔡昌明, 王林, 樊庆阳. 苏 11 区块射流泵排水采气工艺措施效果分析及前景展望 [J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(07): 106-111.