

地形起伏输气管道清管过程动态模拟分析

亢 春, 晁宏洲, 黄明基, 李汉成, 翁乙友, 马亦德, 胡亚军

中国石油塔里木油田公司油气运销事业部, 新疆 库尔勒

收稿日期: 2025年6月11日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年11月17日

摘 要

近期KL管道采用“分段收液 + 隔离收球”方法完成了全线清管作业, 排出大量沉积液体, 表明冬季供气期间管道低洼处积聚了大量威胁管道及其下游站场安全运行的液体。为优化清管作业技术参数, 本文利用OLGA软件建立了KL输气管道清管动态仿真模型, 深入分析了不同工况下清管过程中管内流体状态参数(包括流型、压力、持液率、清管速度、液塞长度及清出液量等)的变化规律, 并对比了清管前后管内关键参数的时变特征。模拟结果显示, 为确保安全, 建议清管输量不超过 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 并推荐使用旁通率不低于4%的旁通清管器。研究成果可为KL管道未来的清管作业提供重要参考和指导。

关键词

输气管道, 清管, 管道积液, 敏感性分析

Dynamic Simulation Analysis of Pipeline Pigging Process in Undulating Terrain

Chun Kang, Hongzhou Chao, Mingji Huang, Hancheng Li, Yiyong Weng, Yide Ma, Yajun Hu

Department of Oil and Gas Transportation and Marketing, Tarim Oilfield Company, CNPC, Korla Xinjiang

Received: June 11, 2025; accepted: September 16, 2025; published: November 17, 2025

Abstract

Recently, the KL pipeline successfully completed its full-line pigging operation using the “segmented liquid collection + isolated ball retrieval” method, discharging a significant amount of accumulated liquid. This demonstrated that large volumes of liquid had accumulated in low-lying sections of the pipeline during the winter gas supply period, posing a serious threat to the safe operation of both the pipeline and its downstream stations. To optimize the technical parameters for pigging operations, this paper employs the OLGA software to establish a dynamic simulation model specifically for pigging in the KL gas transmission pipeline. It then conducts an in-depth analysis of

文章引用: 亢春, 晁宏洲, 黄明基, 李汉成, 翁乙友, 马亦德, 胡亚军. 地形起伏输气管道清管过程动态模拟分析[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1358-1367. DOI: 10.12677/me.2025.136151

the variation patterns of fluid state parameters (such as flow patterns, pressure, liquid holdup, pigging speed, liquid slug length, and the volume of liquid discharged) during pigging under various operating conditions. Furthermore, it compares the time-varying characteristics of key parameters within the pipeline before and after the pigging operation. The simulation results indicate that, to ensure safety, the pigging throughput should be limited to $3000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ or below, and the use of bypass pigs with a bypass rate of at least 4% is recommended. The research findings offer valuable references and guidance for future pigging operations on the KL pipeline.

Keywords

Gas Transmission Pipeline, Pipeline Cleaning, Pipeline Liquid Accumulation, Sensitivity Analysis

Copyright © 2025 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

根据近期 KL 管道通过“分段收液 + 隔离收球”的方式开展管道全线清管作业情况, 排出大量液体说明整个冬供期间沉积, 低洼处管道底部沉积大量液体, 已经严重影响管道和下游相关站场安全运行。并且结合 KL 管道清管排液和放空气量情况统计表发现, 实际排液量和放空量与理论排液量和放空量相差甚远。本文将利用 OLGA 软件, 建立 KL 输气管道清管动态仿真模拟模型, 计算和探究不同工况下清管过程中管内流体状态参数(如流型、压力、持液率、清管速度、液塞长度、清出液量等)的变化规律, 明确清管作业控制参数; 剖析 KL 输气管道清管前、后管内关键参数的时变规律; 进而结合现场管道清管经验, 为提出 KL 管道清管时机的判定准则提供决策参考[1]。

2. 管道清管动态仿真模型建立

首先根据 KL 站出站天然气组分利用 PVTSIM 20.0 软件创建了 OLGA 建模所需的流体物性插值表格文件, 其中气体状态方程采用 SRK Peneloux (T)。然后, 根据 KL 管道的基本属性参数、运行工况数据及流体物性 Tab 文件, 基于 OLGA 软件搭建了管道仿真模拟模型, 如图 1 所示。

3. 清管过程参数时变规律研究

模拟计算当前输量($2030.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中大北输量 $1945.52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、中秋输量 $85.42 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 工况下, 清管过程中各项参数的变化情况。

3.1. 清管器速度和位置的时变情况

在当前输量($2030.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)工况下, 模拟计算得到 KL 管道清管过程中清管器的运行速度(UPIG)和行进位置(ZZPIG)随时间的变化曲线如图 2 所示。清管器在管道内的总运行时长为 12.58 h, 清管器的平均行进速度在 3~4 m/s 之间, 总体上呈逐渐递增的趋势。

3.2. 管道沿线压力温度的时变情况

清管过程中不同时刻 KL 管道沿线压力和温度的剖面曲线如图 3 所示。可以看出, 在当前输量($2030.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)工况下清管作业, 沿程最高压力仍远低于管道设计压力 10.0 MPa, 可满足清管过程中管道的安全运行要求。

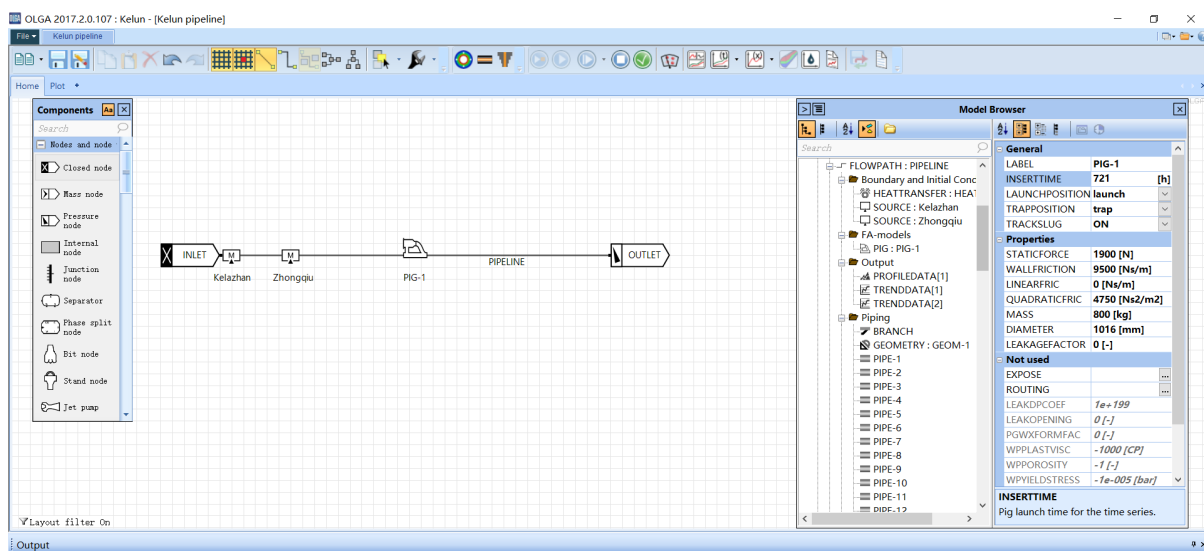


Figure 1. Pipeline pig and related parameter settings

图 1. 清管器及相关参数设置

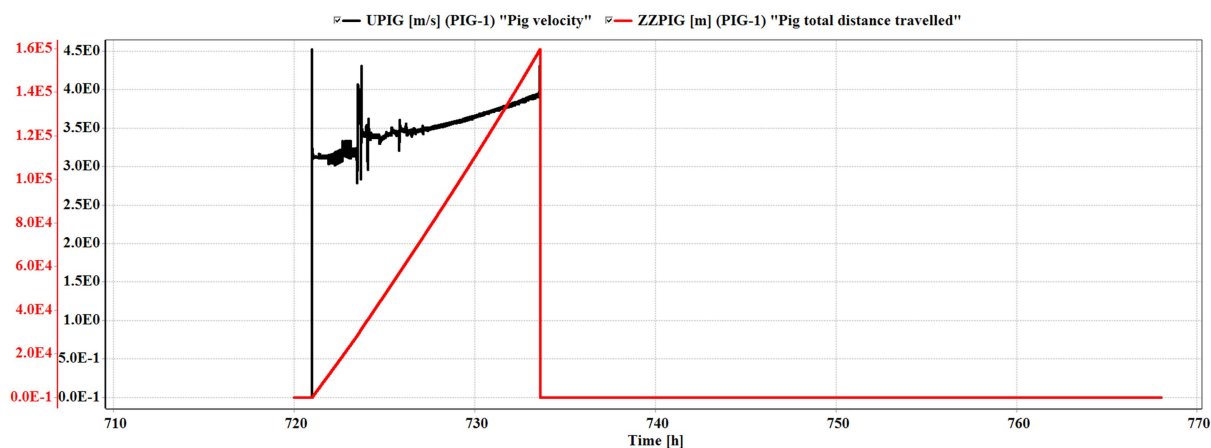
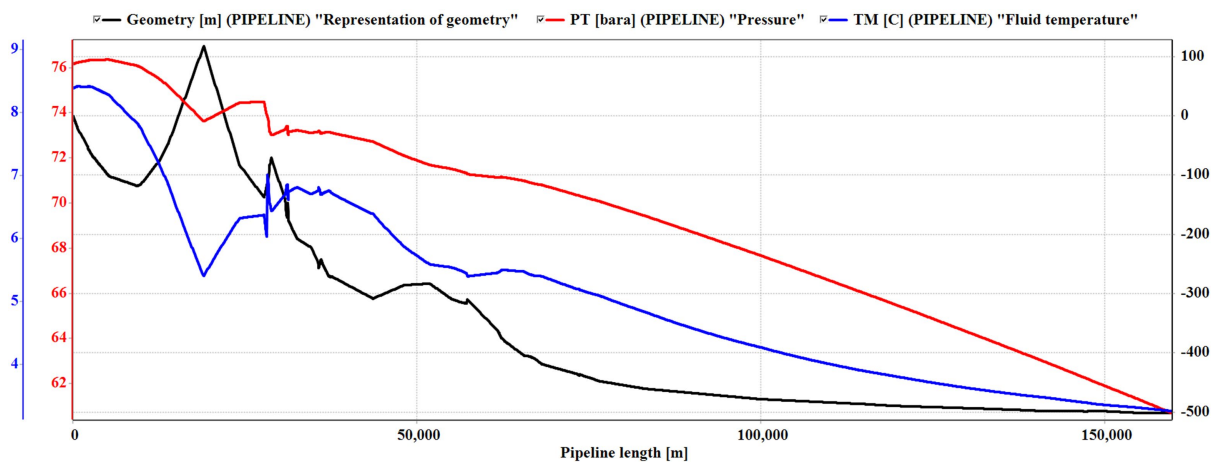


Figure 2. Trend of pig's running speed and position

图 2. 清管器的运行速度和位置的趋势图



(a) 发球时

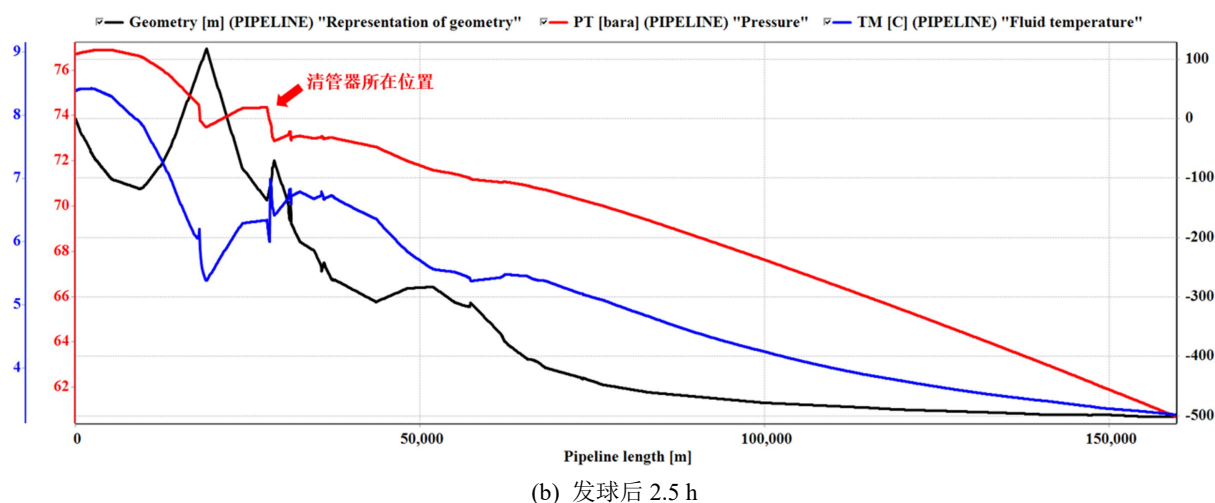


Figure 3. Profile curves of pressure and temperature along the pipeline during the pigging process

图 3. 清管过程中管道沿线压力和温度的剖面曲线

3.3. 管内总积液量的时变情况

清管过程中 KL 管道总积液量(LIQC)随时间的变化曲线如图 4 所示。可以看出,在清管前管内的总积液量已处于稳定状态,总积液量为 238.1 m^3 左右,而清管后(取清管结束时刻)管道中的总积液量下降至 22.7 m^3 左右,根据管道总积液量在清管前后的差值可知清管工况下的排液量约为 215.4 m^3 ,积液清除率约为 90%。

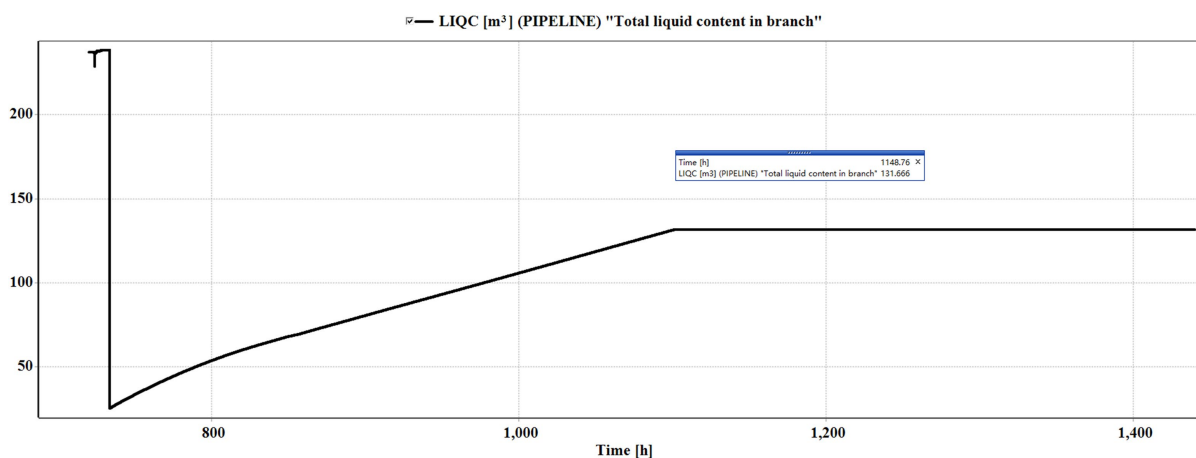


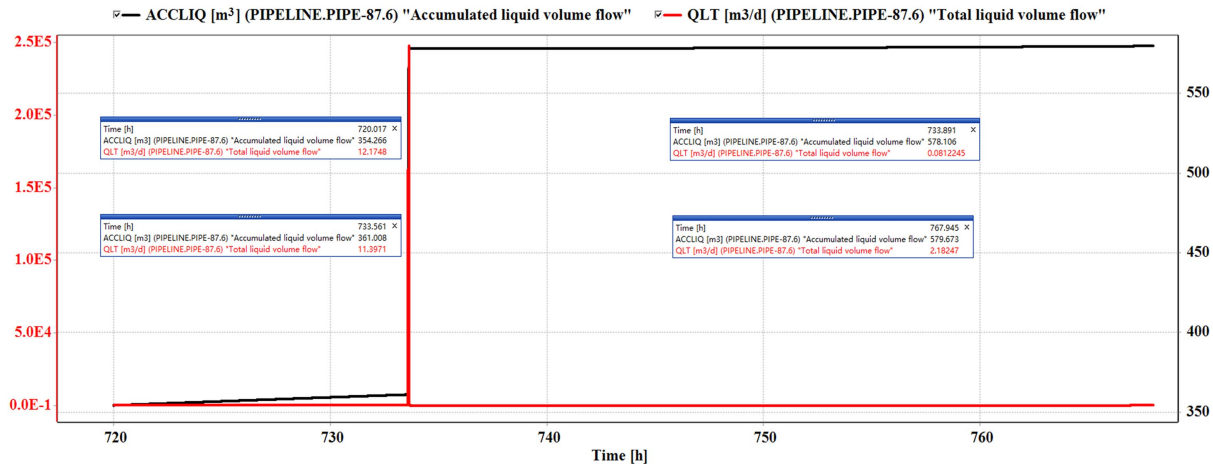
Figure 4. Time-varying curve of total liquid holdup in the pipe during the pigging process (total simulation time 1440 h)

图 4. 清管过程中管内总持液量的时变曲线(总模拟时间 1440 h)

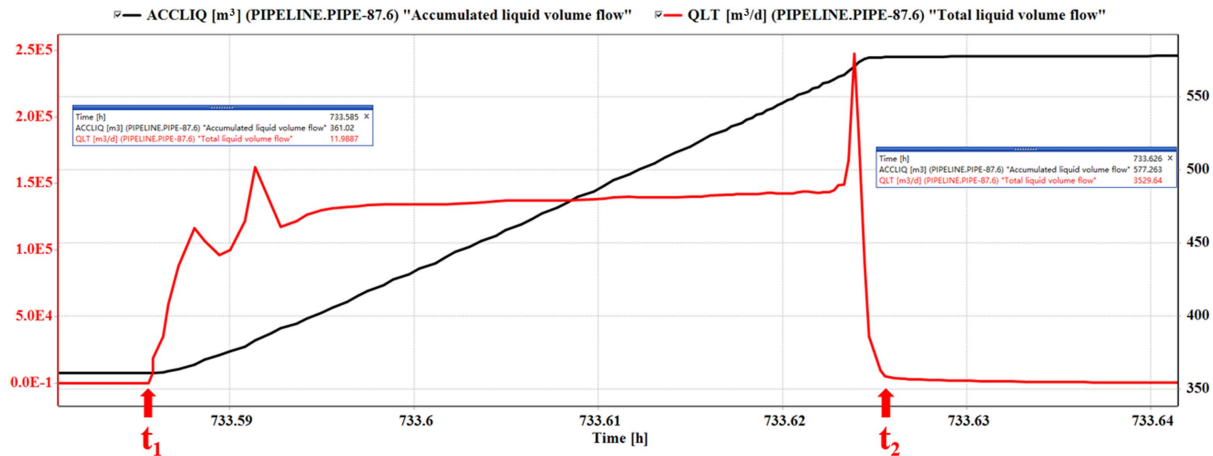
3.4. 管道出口排液量的时变情况

为了确定清管过程中进入管道下游出口气液分离器的最大段塞量[2],模拟计算了管道出口液体流量(QLT)和累计液体流出量(ACCLIQ)在清管过程中的变化规律,结果如图 5 所示。

通过查看管道出口累计液体流出量从均匀增加到急速增加后的差值,可得出清管排液量约为 215.4 m^3 ,积液排出时间约为 2.4 min,也就是说要求下游分离器需要在 2.4 min 内处理约 215.4 m^3 的排液量。根据 SY/T0515-2017《分离器规范》“分离器的液相容积一般按 1 min 滞留时间考虑”[3],那么下游分离器的处理能力至少应达到 $89.75 \text{ m}^3/\text{min}$ 。



(a) 纵轴局部放大图



(b) 横轴局部放大图

t_1 ——液塞开始排出时间； t_2 ——清管收球时间。

Figure 5. Time-varying curves of the liquid flow rate and cumulative liquid outflow at the pipeline outlet during the pigging process

图 5. 清管过程中管道出口液体流量和累计液体流出量的时变曲线

4. 不同工况下清管过程参数敏感性分析

4.1. 清管输量对清管过程参数的影响分析

对不同清管输量工况下的动态清管过程进行模拟计算，分析总结清管过程中清管相关参数(如清管器运行速度、管道压力、出口液体流量、清管液量等)的变化规律，为确定合理的清管作业方案提供科学支撑[4]。根据克 KL 管道近期输气量范围和设计工况，选取输气量分别为 $1500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $2000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $2500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $3500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $4000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，利用 OLGA 软件敏感性分析模块建模进行计算研究。

不同清管输量下 KL 管道清管作业过程中清管器运行速度的时变曲线如图 6 所示，相关数据统计见表 1。可以看出，输量超过 $4000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时，清管器总运行时间为 8.53 h，清管器平均运行速度超过 5.20 m/s，最大速度达到 9.18 m/s；输量 3000~4000 $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时，在部分里程管段内清管器速度超过了规范推荐的最大清管速度 5 m/s。

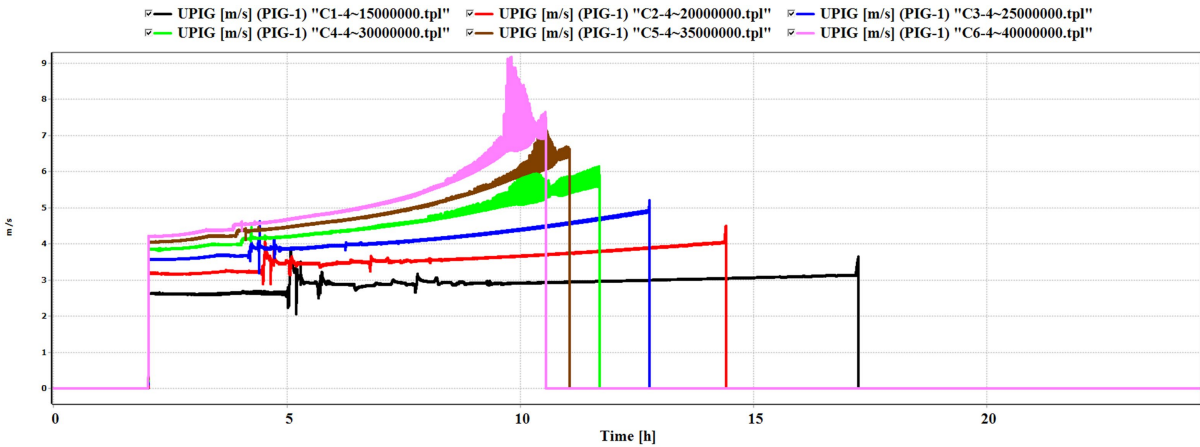


Figure 6. Pig speed trends at different pigging rates
图 6. 不同清管输量下清管器运行速度的趋势图

Table 1. Pig speed and operating time at different pigging rates
表 1. 不同清管输量下清管器的运行速度和运行时间

输量工况($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	清管器运行速度(m/s)		总运行时间(h)
	速度范围	平均值	
1500	2.05~3.88	2.92	15.23
2000	2.89~4.50	3.59	12.39
2500	3.19~5.20	4.13	10.73
3000	3.82~6.22	4.59	9.66
3500	4.04~7.33	4.92	9.03
4000	4.19~9.18	5.21	8.53

不同输量工况下 KL 管道清管过程中管道起点压力的时变曲线如图 7 所示。可以看出，输气量越大，清管过程中管道起点压力越高，当管输量超过 $3500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时，管道起点压力已经超过管道设计压力 10.0 MPa，这会严重影响管道的安全运行；而管输量超过 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时，管道起点的最大压力将达到 9.3 MPa，接近管道设计压力。因此，为安全起见，建议清管输量应控制在 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以内。

不同清管输量下管道出口累计液体流出量(ACCLIQ)和液体流量(QLT)的趋势曲线分别如图 8 和图 9 所示，管道出口排液数据对比见表 2。可以看出，在清管器到达管道末端之前，管道出口累计液体流出量呈线性缓增的趋势，此时段管道出口的液体流量较为稳定。当清管器推动清管液塞到达管道末端时，出口累计液体流出量出现激增，且清管输量越低，液体激增量(即清管排液量)就越大，清管排液持续时间越长[5]。可见，适当提高清管输量可降低管道终端液体接收装置的负担。

4.2. 清管器旁通率对清管过程参数的影响

对日前输量工况下不同旁通率(0%、2%、4%、6%、8%、10%)清管器清管过程参数(如清管器运行速度、管道压力、出口液体流量、清管液量、持液率、流型等)的变化情况进行了模拟计算与分析，以寻求最有利于清管作业的旁通率[6]。

不同旁通率清管器清管作业过程中运行速度的时变曲线如图 10 所示，速度相关数据统计见表 3。可

以看出,在当前输量工况下,随着旁通率的增加,清管器清管运行时长在增加,清管器运行速度在降低(旁通率清管器的平均运行速度均低于规范推荐的 3.3~5.0 m/s)。

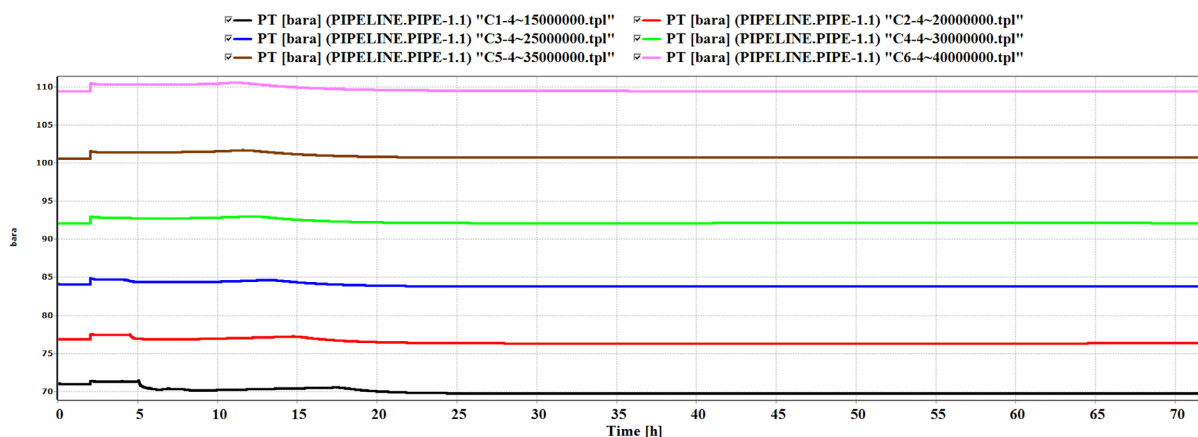


Figure 7. Trend of pipeline starting pressure at different pigging rates

图 7. 不同清管输量下管道起点压力的趋势图

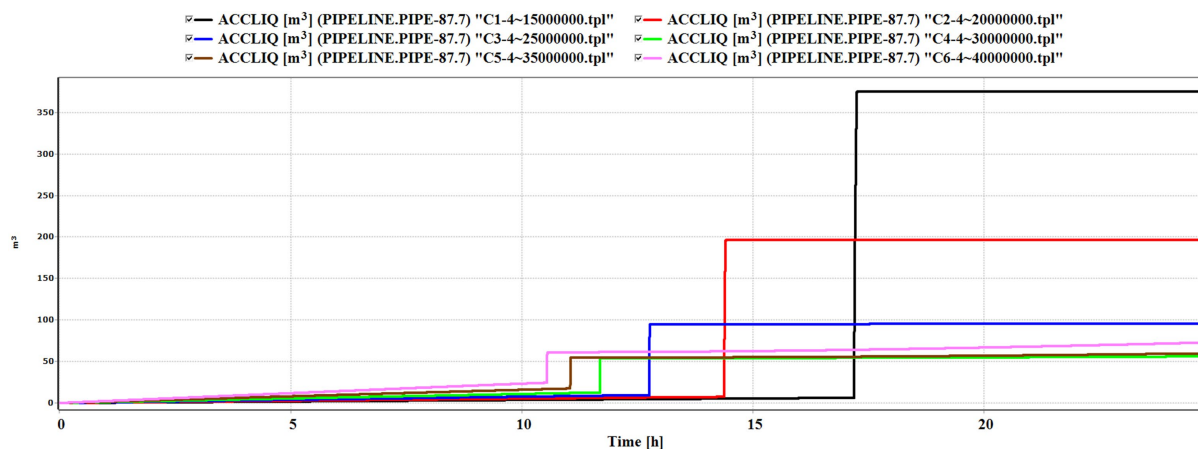


Figure 8. Trend of cumulative liquid outflow at pipeline outlet under different pigging rates

图 8. 不同清管输量下管道出口累计液体流出量的趋势图

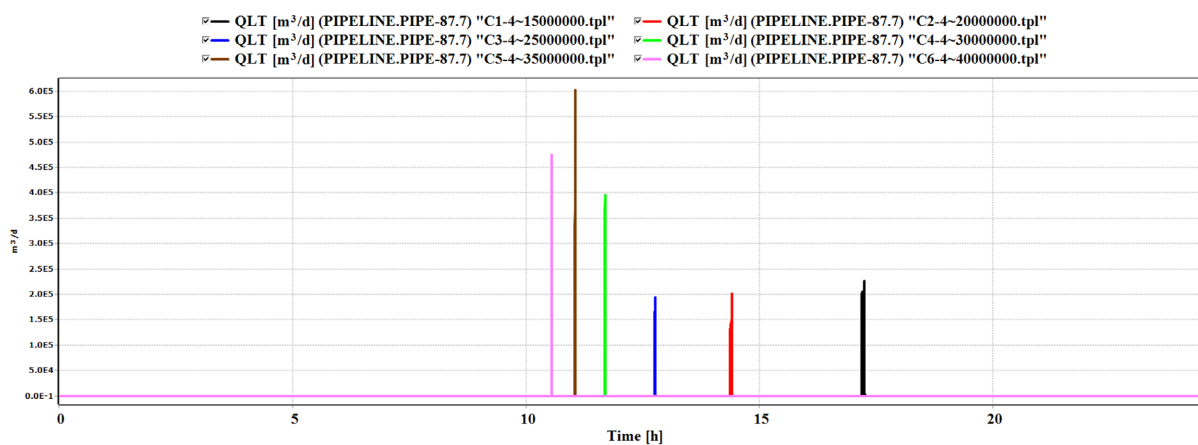


Figure 9. Trends in liquid flow at pipeline outlets at different pigging rates

图 9. 不同清管输量下管道出口液体流量的趋势图

Table 2. Comparison of liquid discharge at pipeline outlets at different pigging rates
表 2. 不同清管输量下管道出口排液情况对比

输量工况($\times 10^4$ m ³ /d)	排液流量瞬态峰值(m ³ /s)	排液量(m ³)	排液时间(min)	平均排液流量(m ³ /min)
1500	2.62	368.26	3.57	103.15
2000	2.33	188.73	1.93	97.79
2500	2.24	85.36	0.93	91.78
3000	4.58	41.26	0.78	52.90
3500	6.96	37.14	0.61	60.89
4000	5.50	36.62	0.49	74.73

注意：排液流量瞬态峰值不宜作为校核液体接收装置能力的依据，因为该峰值的持续时间是非常短的。

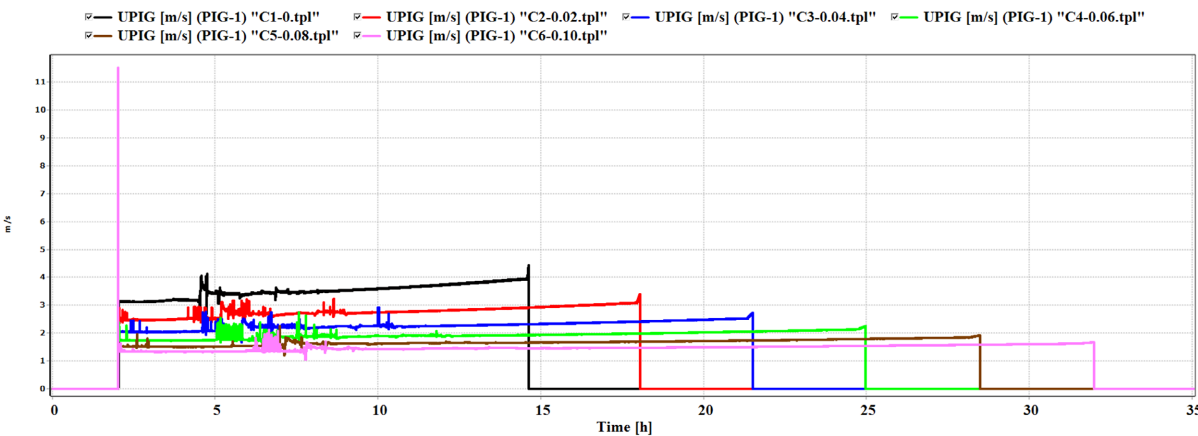


Figure 10. Trends in pig operating speeds for different bypass rates
图 10. 不同旁通率清管器运行速度的趋势图

Table 3. Pig operating speeds and operating durations for different bypass rates
表 3. 不同旁通率清管器运行速度和运行时长

清管器类别	清管器旁通率	清管器运行速度(m/s)		总运行时长(h)
		速度范围	平均值	
普通清管器	0%	2.70~4.13	3.22	12.61
	2%	1.97~3.12	2.51	16.04
	4%	1.95~2.77	2.06	19.49
旁通清管器	6%	1.68~2.54	1.75	22.97
	8%	1.48~1.97	1.52	26.48
	10%	1.31~2.13	1.35	29.99

不同旁通率清管器清管作业时管道起点压力的时变曲线如图 11 所示。可以看出，随着旁通率的增加，管道起点压力水平及压力波动幅度呈逐渐降低的趋势。对于普通清管器，液塞大量积聚于清管器前端，清管器运行所需压差增加；而旁通清管器旁通气流使前端积聚液塞分散，液体静压减小，使得清管过程中管道起点压力增长值也减小，且旁通率越大，分散作用愈强，起点压力增长值愈小。由此可见，旁通清管器对于调控管道起点压力和压力波动是有效的，在高输量清管出现压力超标时可考虑旁通清管器，

并通过敏感性分析确定相适宜的旁通开度[7]。

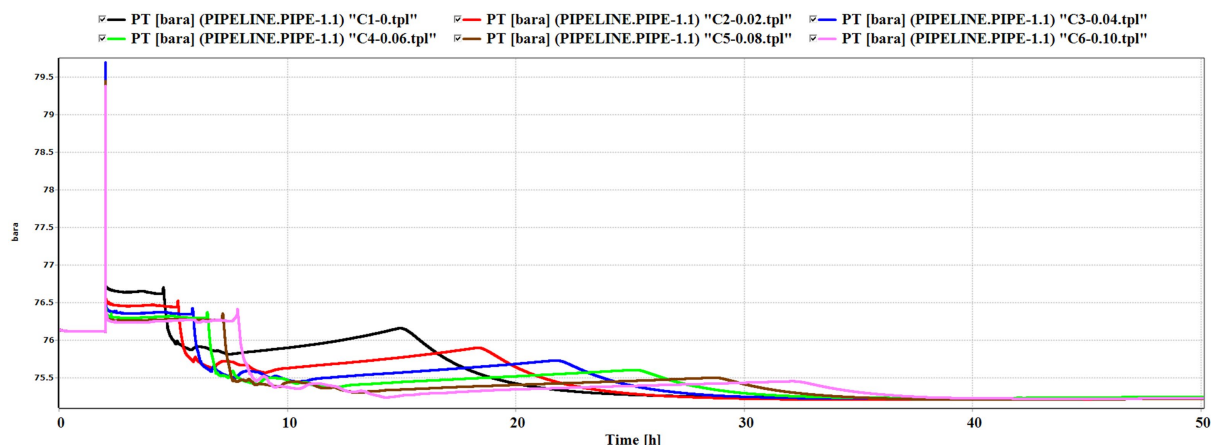


Figure 11. Trend of pipeline starting pressure during pigging operation with different bypass rates

图 11. 不同旁通率清管器清管作业时管道起点压力的趋势图

不同旁通率清管器清管作业时管道出口累计液体流出量(ACCLIQ)和液体流量(QLT)的趋势曲线分别如图 12 和图 13 所示,管道出口排液数据见表 4。可以看出,随着清管器旁通率的增加,清管排液量也在逐渐增加[8],在旁通率较小时(0%~8%)排液量增加幅度不大(排液量基本保持在 210 m^3 左右),但旁通率高于 8%后清管排液量增幅明显(旁通率 10%对应的排液量达到 254.17 m^3)。

5. 结论

(1) 基于 KL 管道清管动态仿真模拟模型,模拟计算了当前输量工况下清管过程中关键状态参数的时变情况。结果表明,清管时沿线最高压力(7.69 MPa)未超过管道设计压力(10.0 MPa),但清管排液量约 215.4 m^3 、排液时间 2.4 min,下游分离器的处理能力至少应达到 $89.75 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

(2) 基于不同输量工况下清管过程参数的敏感性分析模型,模拟计算了清管输量 $1500\sim 4000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时清管状态参数的时变情况。结果表明,清管输量对清管器总运行时间和管道起点压力影响较大;清管输量超过 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 后在部分里程段清管速度已明显超过推荐速度 5 m/s ,起点压力已接近甚至超过管道设计压力 10.0 MPa,严重影响管道安全运行。

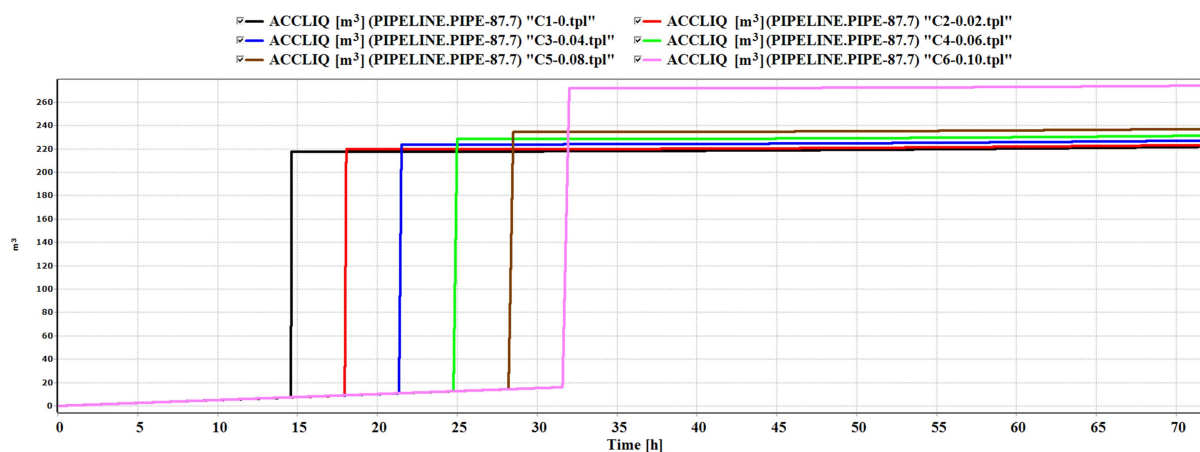


Figure 12. Trend of the cumulative liquid outflow at the pipeline outlet during pigging operations with different bypass rates

图 12. 不同旁通率清管器清管作业时管道出口累计液体流出量的趋势图

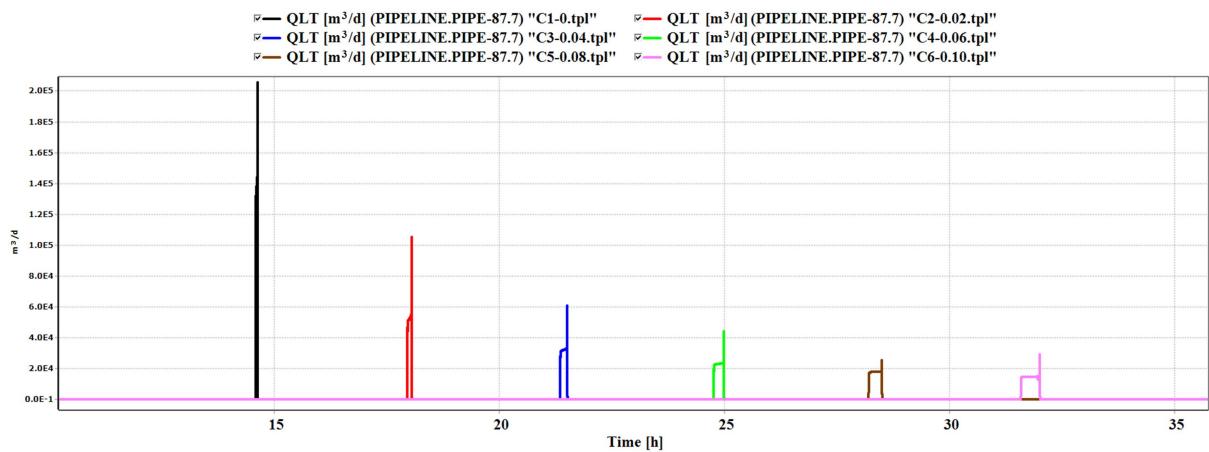


Figure 13. Trends in liquid flow at the pipeline outlet during pigging operations with different bypass rates
图 13. 不同旁通率清管器清管作业时管道出口液体流量的趋势图

Table 4. Liquid discharge data at the pipeline outlet during pigging operations with different bypass rates
表 4. 不同旁通率清管器清管作业时管道出口排液数据

清管器类别	清管器旁通率	排液流量瞬态峰值(m³/s)	排液量(m³)	排液时间(min)	平均排液流量(m³/min)
普通清管器	0%	2.38	209.99	2.76	76.08
	2%	1.22	210.14	6.71	31.32
	4%	0.71	212.39	10.73	19.79
旁通清管器	6%	0.51	214.99	14.90	14.43
	8%	0.29	219.12	19.33	11.34
	10%	0.34	254.17	27.20	9.34

注意：排液流量瞬态峰值不宜作为校核液体接收装置能力的依据，因为该峰值的持续时间是非常短的。

(3) 基于当前输量工况下不同旁通率清管器清管过程参数的敏感性分析模型，模拟计算了旁通率 0%~10%时多项清管状态参数的时变情况。结果表明，随着旁通率的增加，清管器总体运行速度在降低(低于规范推荐的 3.3~5.0 m/s)，清管排液期间出口流型更为稳定，排液时间大幅延长，出口平均排液流量显著降低，但旁通率高于 8%后清管排液量会大幅增加，结合预设分离器的接收能力，推荐采用旁通率为 4% 及以上的旁通清管器。

参考文献

[1] 梁裕如, 李帆, 何鹏, 等. 延 439 井区气液混输管道瞬态变化规律及敏感性分析[J]. 非常规油气, 2024, 11(2): 126-133.
[2] 张一博. 清管器旁通状态下清管过程研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2022.
[3] 诸葛夏侃. 积液管道中气流携液能力研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2022.
[4] 邓俊哲. 某气田集输管网压力敏感性研究及适应性分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆科技学院, 2021.
[5] 冯鑫. 地形起伏湿气管道涡旋流排液工具结构优化[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2021.
[6] 刘淼, 曹学文, 杨文, 等. 清管器运行过程中的旁通特性[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(10): 32-34.
[7] 袁柱. 塔轮气线积液分布规律与腐蚀检测评价研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2016.
[8] 唱永磊. 湿气管线积液与清管数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.