

基于 CFD 的柱塞结构与注气制度协同优化

班和¹, 贾洪革², 周宏华², 魏吉凯¹

1. 中国石油吐哈油田分公司采油工艺研究院 新疆哈密 839000

2. 中国石油阿克纠宾油气股份公司 哈萨克斯坦阿克纠宾 030012

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司吐哈油田分公司科技项目“气举关键技术研究与应用”(25THYTSYG015)

引用: 班和, 贾洪革, 周宏华, 等. 基于 CFD 的柱塞结构与注气制度协同优化[J]. 油气井测试, 2025, 34(6): 24-30.

Cite: BAN He, JIA Hongge, ZHOU Honghua, et al. Cooperative optimization of plunger structure and gas injection scheme based on CFD [J]. Well Testing, 2025, 34(6): 24-30.

摘要 哈萨克斯坦让纳若尔油田部分柱塞气举井因柱塞结构与注气节律缺乏定量耦合, 且依赖经验调节注气制度, 导致出现高注气、低携液、运行不稳定等问题。以柱塞气举井为研究对象, 构建柱塞气举全过程动力学模型, 引入结构扰动系数, 通过 CFD 模拟三种柱塞特征, 揭示升速与注气速度非线性规律并建立耦合模型; 以单位举升能耗最小为目标, 构建结构与注气制度协同优化模型。现场试验表明, 井况周期趋稳, 平均日产量提高 19.4%、平均日注气量减少 13.2%。该成果为柱塞气举向机理驱动与参数化控制转变提供技术支撑, 具有一定推广应用价值。

关键词 让纳若尔油田; 柱塞气举; 扰动系数; CFD 仿真; 注气制度; 柱塞结构; 协同优化

中图分类号: TE355.3

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.06.004

Cooperative optimization of plunger structure and gas injection scheme based on CFD

BAN He¹, JIA Hongge², ZHOU Honghua², WEI Jikai¹

1. PetroChina Tuha Oilfield Branch Oil Production Technology Research Institute, Hami, Xinjiang 839000, China

2. China Petroleum Aktobe Oil and Gas Co., Ltd., Aktobe 030012, Kazakhstan

Abstract: In the Zananor oilfield, Kazakhstan, some wells employing plunger gas lift systems face issues such as high gas injection, low liquid lifting capacity, and unstable operation. These problems stem from a lack of quantitative coupling between plunger structure and gas injection cycles, and a reliance on empirical adjustments to the gas injection scheme. Focusing on plunger gas lift wells, a full-cycle dynamic model of the plunger gas lift process was established. By introducing a structural disturbance coefficient and conducting CFD simulations on three characteristic plunger types, the nonlinear relationship between plunger lifting velocity and gas injection rate was revealed, on the basis of which a coupling model was developed. Furthermore, with the objective of minimizing energy consumption per unit volume lifted, a cooperative optimization model integrating plunger structure and gas injection scheme was established. Field tests demonstrate that the well operating cycles became more stable, with a 19.4% average increase in daily oil production alongside a 13.2% average reduction in daily gas injection volume. These findings provide technical support for transitioning plunger lift operations from experience-based to mechanism-driven and parameterized control, offering promising potential for broader application.

Keywords: Zananor oilfield; plunger gas lift; disturbance coefficient; CFD simulation; gas injection scheme; plunger structure; cooperative optimization

气举采油是一种广泛应用的人工举升技术, 适用于低压低能油井^[1]。在碳酸盐岩裂缝型油藏中, 随着地层能量衰减与产气比升高, 常规连续气举因气能利用率低而难以稳定排液; 而间歇气举通过周期性注气可实现能量集中利用, 成为低压井稳产控水的重要手段^[2]。近年来, 柱塞气举因节气、清蜡及运行稳定等优势, 被广泛用于哈萨克斯坦让纳若

尔油田中后期开发井, 以提升举升效率并降低能耗^[3]。

然而, 现场实践表明, 即便气源充足, 部分井仍存在高注气与低排液并存的现象, 表现为能量利用率低、周期不稳等问题^[4]。其根源在于柱塞结构参数与注气节律间缺乏定量耦合, 现行调控多依赖经验调整, 导致冲顶、返程失稳及清蜡周期波动。已

有研究虽基于计算流体力学(CFD)探讨柱塞周围流场特征,但多集中于单一变量,尚未建立结构扰动与注气能量输入的系统耦合机制^[5-7]。

为此,本文以让纳若尔油田间歇柱塞气举井为对象,构建柱塞全过程动力学模型,引入结构扰动系数表征几何特征对流场扰动强度的影响;结合CFD模拟分析柱塞升速与注气速度的响应规律,建立以单位举升能耗最小化为目标的结构-制度协同优化模型,并通过现场试验验证^[8]。研究旨在揭示结构扰动主导的气液驱动机理,为低压低能井柱塞气举制度的优化设计提供理论与工程依据。

1 柱塞气举系统及其控制机制

柱塞气举是广泛应用于低能油井的间歇式人工举升技术,系统结构简单且运行过程高度动态^[9]。为揭示柱塞举升周期内各阶段的能量转换与运行特点,需建立完整动力学模型,分析控制参数与运行特性的关系。

1.1 系统组成与运行原理

柱塞气举系统主要由柱塞本体、止回装置、注气控制单元、井筒套管和井口流量调节部件构成,其运行过程具有明显的周期性。井底液体聚集后,系统通过周期性注入高压气体,将柱塞自井筒底部推至井口,实现携液排液与能量传递。整个举升周期包括三个阶段,见图1。

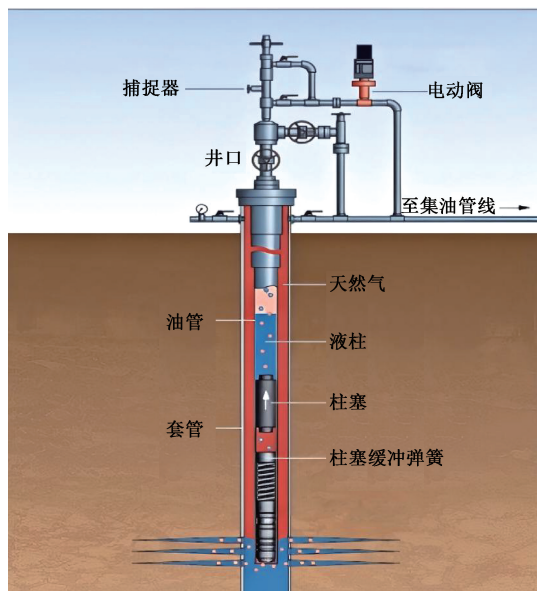


图1 柱塞气举运行过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the plunger lift operating process

(1)套管注气阶段:高压气体经气举阀注入井

筒下部,为柱塞上行提供驱动力。

(2)柱塞携液上升阶段:注气推动柱塞上升并携带上方液体至井口,其升速受注气量、井筒液位及结构扰动能力共同影响。

(3)柱塞自由落下阶段:液体排出后柱塞依重力回落至井底,准备下一循环。为防止“提前顶升”导致空冲程^[10],应保证柱塞下落时间大于注气准备时间。柱塞气举具备结构简单、能耗低、适应性强等优点,特别适用于低压低产井及气源受限区块,但其运行效果依赖于注气节律与柱塞运动规律的精确匹配^[11]。

1.2 柱塞上升阶段受力分析

柱塞上升过程中主要受气体作用力、浮力、液柱重力、摩擦阻力及附加质量力等共同作用,见图2。



图2 柱塞受力示意图

Fig.2 Schematic of forces acting on the plunger

(1)气体作用力 F_g 由环空气柱压力与油管内部液柱压力差产生:

$$F_g = (P_a - P_l)A_p \quad (1)$$

式中: P_a 为环空气柱压力,Pa; P_l 为油管内部流体压力,Pa; A_p 为柱塞受压面积, m^2 。

(2)浮力 F_b 由被排液体产生:

$$F_b = \rho_l g V_p \quad (2)$$

式中: ρ_l 为液体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度; V_p 为柱塞排液体积, m^3 。

(3)液柱重力 F_w 来自油管内液体重量:

$$F_w = \rho_l g h_l A_l \quad (3)$$

式中: h_l 为液柱高度,m; A_l 为油管截面积, m^2 。

(4)摩擦阻力 F_f 由井筒内壁与环空流动摩擦产生,可采用 Darcy-Weisbach 公式计算:

$$F_f = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho_m v_p^2}{2} A_w \quad (4)$$

式中: f 为摩擦系数; L 为井筒长度,m; ρ_m 为混合流

体密度, kg/m^3 ; D_h 为水力直径, m ; A_w 为湿周面积, m^2 。

(5) 附加质量力 F_a 液体随柱塞加速产生的惯性阻力:

$$F_a = C_a \rho_l V_p \frac{dv_p}{dt} \quad (5)$$

式中: C_a 为附加质量系数。

因此, 上升阶段的动力学方程为:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = (P_a - P_l) A_p + \rho_l g V_p - \rho_l g h_l A_l - F_f - F_a \quad (6)$$

式中: m_p 为柱塞质量, kg 。

1.3 柱塞气举全过程力学模型

为系统描述柱塞气举运行全过程, 建立统一动力学模型如下:

(1) 柱塞下落阶段

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \rho_l g h_l A_l - \rho_l g V_p - F_f \quad (7)$$

(2) 液体积聚阶段

柱塞静止, 井筒内液柱高度 h_l 增加, 气液压力重新分布:

$$\frac{dh_l}{dt} = \frac{Q_l - Q_g}{A_l} \quad (8)$$

式中: Q_l 为环空回压气流量, m^3/h ; Q_g 为注气流量, m^3/h 。

(3) 注气加速阶段

环空气柱压力骤增, 柱塞由静止转为加速上升:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = (P_a - P_l) A_p + \rho_l g V_p - F_f - F_a \quad (9)$$

(4) 携液上升阶段

速度趋于稳定, 满足动平衡条件:

$$(P_a - P_l) A_p + \rho_l g V_p = \rho_l g h_l A_l + F_f + F_a \quad (10)$$

2 柱塞结构的 CFD 建模与仿真分析

柱塞结构是影响携液能力与流体扰动强度的关键因素, 其几何特性对气液两相流场影响显著^[12]。为实现结构参数定量化分析, 基于 CFD 方法构建不同结构柱塞仿真模型^[13], 开展湍流状态、压差分布及界面演化的数值分析, 提取结构扰动能力表征参数, 为协同优化提供支撑。

2.1 柱塞模型构建与仿真方法

常见柱塞结构包括圆柱型、锥柱型和变径型; 圆柱型结构简单但扰动能力较弱; 锥柱型在尾部形

成收缩流场, 易产生负压区以增强携液能力; 变径型通过多段直径变化强化流体扰动, 从而提升液体剥离与排水效率。为研究不同柱塞结构对流场扰动及携液性能的影响, 本文对三种几何模型进行了三维气液两相流场数值模拟分析。

模型参数选取基于哈萨克斯坦让纳若尔油田 W1 井实际生产数据(井深 2 530 m, 井筒油管内径 73 mm), 流体性质取自现场测试结果。计算在流体仿真软件平台上完成, 模型采用对称结构, 考虑气液两相在井筒环空与柱塞外壁之间的湍流耦合流动特征。

计算域内网格采用结构化六面体划分并在近壁区进行局部加密, 最小单元尺寸 1.5 mm。湍流采用 RNG k- ϵ 模型, 界面捕捉采用 VOF 方法^[14]。边界条件设定为速度入口(2~8 m/s)与压力出口(0.101 MPa), 气相为空气($\rho_g = 1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\mu_g = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), 液相为原油($\rho_l = 850 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\mu_l = 0.012 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)。时间步长 0.001 s, 采用瞬态求解至残差收敛。仿真结果用于对比分析不同柱塞结构的升速特征与扰动强度。

2.2 仿真工况设置与参数定义

为对比不同柱塞结构的流动特性, 设定统一注气速度 35 m/s、井筒液体为原油+气体混合物(密度 850 kg/m^3 , 动力黏度 3.2 $\text{mPa} \cdot \text{s}$), 模拟井深 30 m 柱塞段的上行过程。柱塞外径设定为 $\Phi 56.5 \text{ mm}$, 柱塞上行速度初始设定为 0.7 m/s, 运行时间取 3 s 内稳定段为比对对象。

主要关注如下流体动力学参数: 压差分布 (ΔP), 反映柱塞前后流动阻力差; 紊流动能 (TKE), 代表扰动强度; 气液界面扰动形态, 影响携液脱附效率; 携液流量 (LPM), 间接衡量柱塞带液能力。

2.3 仿真结果分析与结构性能评价

为探究不同柱塞结构对流场扰动及携液能力的影响, 对圆柱型、锥柱型与变径型柱塞在相同工况下进行了 CFD 模拟。结果表明, 各结构在气液分布、压差梯度及湍流特征方面存在显著差异变径柱塞在上行过程中形成最强紊流扰动层^[15], 边界剪应力峰值达 12.8 Pa, 高于圆柱型 9.3 Pa, 锥柱型 11.2 Pa。气液交界面扰动频率提升至 8.6 Hz, 表现出更优的脱液能力^[16]。

三种柱塞的压差分布特征明显不同。圆柱型柱塞的流线相对平缓, 环空压差梯度较小, 液体受

扰动有限;锥柱型结构在尾部形成收缩流区,但压差集中区域较窄,扰动作用受限;如图 3 所示,变径型柱塞在中下部产生明显的压差突变带,压差峰值达到 880 Pa,较圆柱型提升约 21%,表明其可在井筒内形成更强的驱动压力梯度,强化液体剥离与气液混合过程。

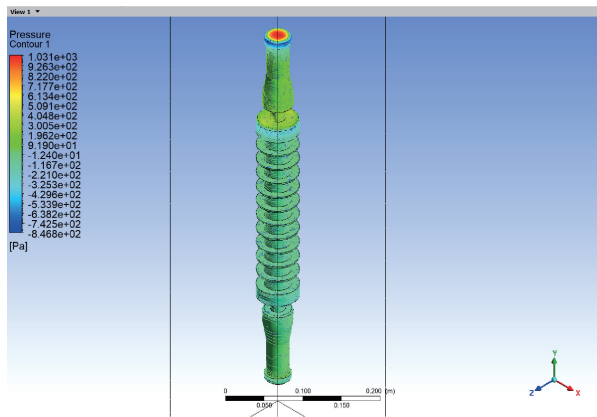


图 3 变径形柱塞在流场中压差分布云图

Fig. 3 Pressure distribution contour of the variable-diameter plunger in the flow field

进一步对比速度与湍流动能分布结果,可发现圆柱型柱塞,见图 4。流体绕流平稳,湍流动能主要集中于壁面附近,扰动范围较窄;而变径型柱塞,见图 5,在多变直径突变处产生明显的交替涡旋区,气液两相呈强耦合状态,湍流动能峰值提升约 48%,动能传递效率显著增强。这表明变径结构能够在柱塞上升阶段产生持续扰动与混合效应,有利于液体携带至地面。

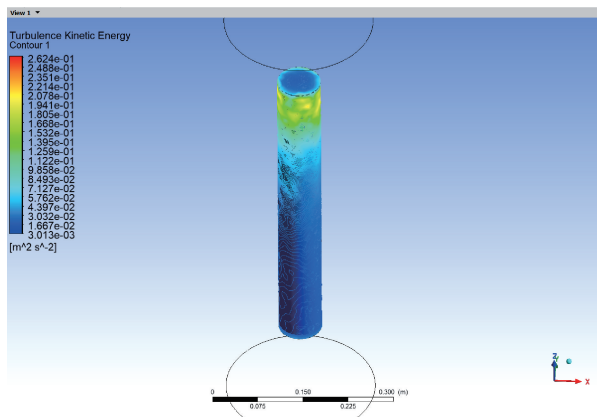


图 4 圆柱形结构柱塞升速与紊流动能图

Fig. 4 Velocity and turbulent kinetic energy distribution of the cylindrical plunger

三种结构在相同注气条件下的携液体积流量,变径型达到了 12.4 t/d,较圆柱型提高约 21%,如图 6 所示。相关对比数据详见表 1。

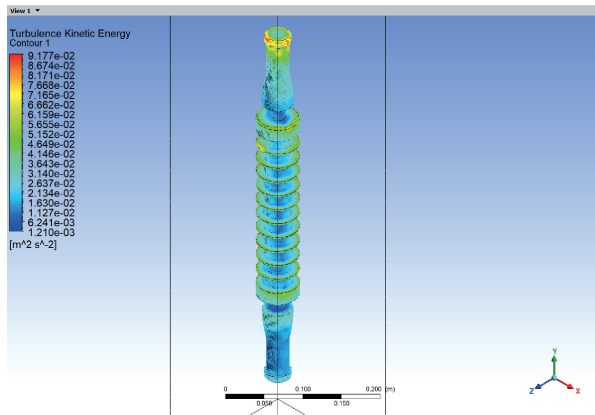


图 5 变径形结构柱塞升速与紊流动能图

Fig. 5 Velocity and turbulent kinetic energy distribution of the variable-diameter plunger

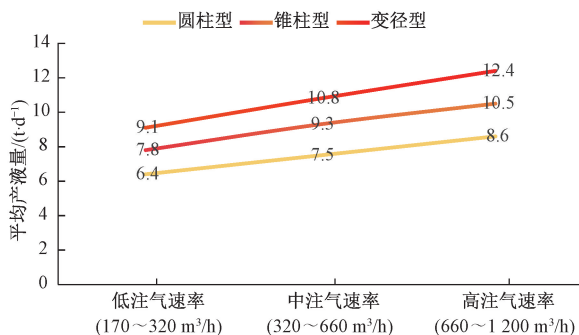


图 6 携液体积流量对比图

Fig. 6 Comparison of liquid-carrying volumetric flow rate

表 1 不同柱塞结构仿真性能对比

Table 1 Comparison of simulation performance of different plunger structures

指标	圆柱型	锥柱型	变径型
平均压差 $\Delta P/\text{Pa}$	725	810	880
紊流动能 $TKE/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	2.3	2.9	3.4
携液流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	14.2	15.8	17.4
气液扰动频率/Hz	6.7	7.4	8.6

综合分析,变径柱塞在携液能力、紊流扰动强度与压差特性上均表现最佳,适用于对携液效率与清蜡能力要求较高的井况场景。此外,仿真获取的柱塞升速与注气速度函数关系曲线,可直接转化为优化模型输入,为结构扰动参数与制度变量的协同匹配提供量化依据,增强 CFD 仿真结果在现场制度设计中的适用性。

3 柱塞结构与注气制度的协同优化设计

柱塞结构与注气制度运行中相互影响,匹配程度直接关系系统能量利用效率。为突破结构优化与制度设计割裂的问题,基于 CFD 分析结果和

注气响应规律,构建联合优化模型,以单位举升能耗最低为目标,开展结构-制度协同调控策略设计。

3.1 柱塞提速的注气响应规律分析

通过前章可知,柱塞提速随注气频率呈非线性上升关系,不同结构响应灵敏度存在显著差异^[17-18]。其中,变径柱塞的提速响应最为敏感,其上行速度与注气周期之间具有明显拐点效应。

根据前文所述 CFD 模拟得到的提速—注气速度关系曲线,将不同注气速度 v_g 对应的柱塞提速 v_p 数据进行非线性回归,得到经验拟合式:

$$v_p = a \cdot v_g^b + c \quad (11)$$

式中: v_p 为柱塞提速, m/s; v_g 为注气速度, m/s; a, b, c 为拟合参数(根据不同柱塞结构分别计算)。

该公式由全过程力学模型的速度平衡方程化简而来,其中系数 a, b, c 的物理意义分别为注气驱动力的放大系数、气液相互作用的非线性程度以及基础提速偏移量。通过引入该公式,可将 CFD 模拟结果直接转化为优化模型输入。

为了量化这一关系,拟合其注气频率与提速的函数形式。以变径柱塞为例,提速 v 与注气频率 f 的关系近似可表达为:

$$v = a \cdot \ln(f) + b \quad (12)$$

式中: a, b 为拟合参数,由仿真数据回归获得。

该响应特性表明,每种柱塞结构均存在最佳注气频率区间,超过后提速增长趋缓甚至振荡,影响携液稳定性。

3.2 协同优化模型构建与参数设定

为实现柱塞结构参数与注气制度的定量匹配,基于柱塞气举全过程动力学模型,建立结构-制度协同优化模型。以单位举升能耗最小为目标函数,选取柱塞扰动系数 k_d 、注气频率 f 、单次注气量 Q_g 与注气阶段持续时间 t_g 为主要优化变量。

约束条件包括气源压力上限、柱塞行程稳定性及井筒液位波动范围。

本文采用响应曲面法(RSM)与遗传算法(GA)相结合的方式求解。RSM用于建立柱塞结构参数与注气变量间的多因素响应方程,分析各变量对单位能耗的敏感性;GA则在响应曲面模型基础上进行全局寻优,以确定最优参数组合。RSM-GA联合方法兼顾局部拟合精度与全局收敛能力,适用于柱塞气举中多变量非线性耦合问题。

优化目标函数可表示为单位气耗举液效率最大化:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_g} \quad (13)$$

式中: Q_1 为携液流量, m^3/h ; Q_g 为注气量, m^3/h 。

优化过程依次包括:①变量设定与初始范围确定;②基于 Fluent 输出数据建立 RSM 拟合模型;③利用 GA 搜索最优解;④验证结果与现场数据一致性。经求解获得不同柱塞结构与注气制度的最优匹配参数,为后续现场调控提供依据。

3.3 现场工况约束与制度优化路径

结合让纳若尔油田现场工况,协同优化模型在求解过程中需考虑以下约束条件:

(1)压缩机气源能力 Q_{max} :控制井群总注气负载,避免过量供气。

(2)柱塞下落周期 T_{drop} :约束注气频率,防止柱塞提前顶升。

(3)清蜡周期约束:在蜡质井段保持适当扰动间隔以利于蜡层剥离与排除。

在满足上述条件下,模型利用 RSM-GA 联合算法输出最优注气制度与结构参数组合,并制定以下优化策略:场景 1,高液量井 → 使用变径柱塞 + 中高频注气。场景 2,低液低气井 → 选用锥柱型柱塞 + 稀疏注气制度,节能优先。场景 3,蜡堵敏感井 → 优先考虑结构扰动系数 k_d 高的结构,强化周期扰动频率。

协同优化求解过程采用双目标权重法,将节气量最大化与产液量最大化同时纳入目标函数:

$$\max f(x) = \omega_1 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{10}} \right) + \omega_2 \cdot \left(\frac{G_s}{G_{s0}} \right) \quad (14)$$

式中: Q_1 为优化后产液量, m^3/h ; Q_{10} 为优化前产液量, m^3/h ; G_s 为优化前后节省的注气量, m^3/h ; G_{s0} 为原注气量, m^3/h ; ω_1, ω_2 为权重系数(可根据现场生产策略调整)。

通过 RSM 拟合与 GA 全局搜索相结合的方法,实现不同工况下的稳定求解。最终获得的最优方案包括注气速度、注气持续时间及匹配柱塞结构,为现场制度制定与动态调控提供参数化依据。

4 现场应用与优化效果分析

为验证协同优化策略的工程适用性与提效效果,选取哈萨克斯坦让纳若尔油田 3 口典型柱塞气

举井(W1、W2、W3)开展现场应用试验,通过结构参数更换与注气制度优化协同实施,对比分析产液能力、运行周期及能量利用指标。

4.1 试验井概况与运行问题

3口试验井均处于中后期开发阶段,油层能量不足、井底易形成液柱,常规持续注气时携液效率偏低。试验前采用固定周期注气方式运行,注气量140~320 m³/h,存在气体利用率低、产液响应不足的“高气耗-低效排液”特征,且井筒无法建立稳定液柱循环,周期运行波动明显。

4.2 协同优化实施与参数设置

基于优化模型,为3口试验井设计匹配的柱塞结构与运行制度,优化原则为:满足携液需求降低注气量、提升周期稳定性以减少冲顶与空程、集中注气能量提高单位气耗效率。根据液量特征,W1井选变径型柱塞增强扰动,适配含液波动井况;W2、W3井因气量受限,选用锥柱型柱塞降低摩擦与回落阻力。注气采用“触发式间歇注气”,按升速-注气响应设时机、优分配、控强度、缩无效阶段,集中驱动柱塞启动。方案实施1周后,井组运行稳定,停止持续人工调参。

4.3 优化效果评价与工程分析

优化后井组平均日产油由4.27 t提高至9.67 t,增幅19.4%;平均注气量由220 m³/h降至186.7 m³/h,减少13.2%,实现控气提效目标,如表2所示。

表2 现场试验井柱塞气举改造前后主要生产参数对比
Table 2 Comparison of main production parameters before and after plunger gas lift transformation in field test well

井号	平均产油量 /(t·d ⁻¹)		平均注气量 /(m ³ ·h ⁻¹)		工作制度	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
W1井	4.2	9.2	320	280	持续注气	间歇注气
W2井	3.8	10.1	170	140	持续注气	间歇注气
W3井	4.8	9.7	170	140	持续注气	间歇注气

优化后呈现四大特征:一是单位气耗效率显著提升,井筒形成稳定气驱循环,无效注气阶段减少;二是运行稳定性增强,冲顶与空行程次数减少超过50%,升降节律更具规律性;三是携液效率提升体现了结构扰动增强液体剥离能力的机理;四是不同井型均表现出提效趋势,表明协同优化策略具备工程可复制性与推广潜力,如图7所示。

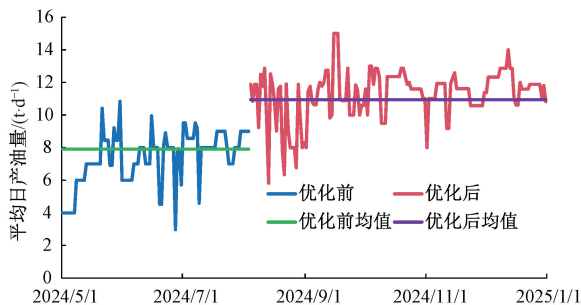


图7 改造前后日产量对比图

Fig. 7 Comparison of daily oil production before and after modification

5 结论

(1) 柱塞结构与注气制度对气举效率协同影响显著。CFD 仿真显示,柱塞几何结构决定流场扰动与携液性能,注气制度节律控制影响气能利用率,结构扰动系数可量化结构扰动贡献,为选型与制度设计提供定量依据。

(2) 构建的协同优化模型实现二者联合调控,以单位举升能耗最小为目标,建立升速与注气能量匹配机制,推动柱塞气举从经验调节转向参数化控制,提升效率与稳定性。

(3) 现场试验验证了方法适用性,优化后三口井产油提高19.4%、注气量降低13.2%,运行周期趋稳,冲顶与空程减少,形成“控气提效”机制,对低压低能井具推广价值。本研究为间歇-柱塞气举向机理化设计与参数优化转变提供支撑。

致谢:衷心感谢中国石油吐哈油田分公司采油工艺研究院领导及同事在论文编写过程中提供的帮助。

参考文献

- [1] 徐志敏,王跃文,孙冰恒.气举采油技术在让纳若尔油田的应用[J].石油钻采工艺,2014,36(2):75-76.
XU Zhiming, WANG Yuewen, SUN Bingheng. Application of gas lift oil production technology in the Zananor oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 36(2):75-76.
- [2] 李丽,田伟,李旭日,等.气井柱塞举液机理 CFD 模拟及工艺参数优化[J].石油机械,2020,48(3):73-78.
LI Li, TIAN Wei, LI Xuri, et al. CFD simulation of plunger lift mechanism in gas wells and optimization of process parameters [J]. Petroleum Machinery, 2020, 48(3):73-78.
- [3] 贾彬.柱塞气举排水采气工艺研究及应用分析[J].兰州石化职业技术大学学报,2025,25(3):5-9.
JIA Bin. Research and application analysis of plunger gas lift drainage gas recovery technology [J]. Journal of Lanzhou Petrochemical University of Vocational

- Technology, 2020,25(3):5-9.
- [4] 王瑞,张宇生,刘晓娟,等. 苏里格气田泡沫和井下工具类排水采气工艺研究现状[J]. 石油科学通报,2016, 31(3): 271-278.
WANG Rui, ZHANG Ningsheng, LIU Xiaojuan, et al. Research status of foam and downhole tool drainage gas recovery technology in the Sulige gas field[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016,31(3):271-278.
- [5] 张凤东,李洪建,康毅力,等. 柱塞气举全过程动力学模拟研究[J]. 钻采工艺,2007,(5):62-64.
ZHANG Fengdong, LI Hongjian, KANG Yili, et al. Dynamic simulation study on the whole process of plunger air lift [J]. Drilling & Production Technology,2007,(5):62-64.
- [6] 鲁小东. 可变径气举柱塞优化设计及工艺技术研究[D]. 西安:西安石油大学,2022:1-45.
LU Xiaodong. Research on optimization design and process technology of variable diameter air lift plunger [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University,2022:1-45.
- [7] 刘永辉,黄麒钧,杜竞,等. 棒状柱塞结构优化模拟[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 181-188.
LIU Yonghui, HUANG Qijun, DU Jing, et al. Optimization simulation of rod-shaped plunger structure[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019, 41(6): 181-188.
- [8] 何顺利,吴志均. 柱塞气举影响因素分析及优化设计[J]. 天然气工业,2005,25(6):97-99.
HE Shunli, WU Zhijun. Analysis of influencing factors and optimization design of plunger gas lift [J]. Natural Gas Industry,2005,25(6):97-99.
- [9] 陈行健. 气举柱塞沟槽结构流场特性及结构优化[D]. 大庆:东北石油大学,2025:1-26.
CHEN Xingjian. Flow field characteristics and structural optimization of air lift plunger groove structure [D]. Daqing: Northeast Petroleum University,2025:1-26.
- [10] 叶安臣. 柱塞气举排水采气系统研究与应用[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2019:1-55.
YE Anchen. Research and application of plunger gas lift drainage gas production system [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China),2019:1-55.
- [11] 汪崎生,廖锐全. 柱塞气举特性分析[J]. 江汉石油学院学报,2000,22(3):61-64.
WANG Qisheng, LIAO Ruiquan. Analysis of gas lifting characteristics of plunger [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2000,22(3):61-64.
- [12] 天工. 长庆气区气井组合生产油管完井柱塞气举排水采气技术获得突破[J]. 天然气工业,2015,35(8):92.
TIAN Gong. A breakthrough has been made in the gas well combined production tubing completion plunger gas lift drainage gas recovery technology in the Changqing gas district [J]. Natural Gas Industry,2015,35(8):92.
- [13] 王瑞,袁晨雨,王亦鑫,等. 智能柱塞及机器人井下排水采气研究进展[J]. 石油工业技术监督,2025,41(1):55-60.
WANG Rui, YUAN Chenyu, WANG Yixin, et al. Research progress of intelligent plunger and robot downhole drainage and gas production [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry,2025,41(1):55-60.
- [14] 张刚,常鹏旭,王小佳,等. 智能柱塞气举排水采气在苏里格西区应用研究[J]. 石油化工应用,2016,35(7):114-115.
ZHANG Gang, CHANG Pengxu, WANG Xiaojia, et al. Application research of intelligent plunger gas lift drainage gas recovery in sulige west district [J]. Petrochemical Industry Application,2016,35(7):114-115.
- [15] 王子敦,陈啸博,崔灿,等. 智能柱塞气举清蜡技术在缝洞型油藏中的应用[J]. 石油机械,2023,51(6):74-82.
WANG Zidun, CHEN Xiaobo, CUI Can, et al. Application of intelligent plunger gas lift wax removal technology in fracture-cavity oil reservoirs [J]. China Petroleum Machinery,2023,51(6):74-82.
- [16] 韩国庆,邢志晟,岳震锋,等. 柱塞气举排水采气研究现状及展望[J]. 天然气工业,2024,44(2):121-129.
HAN Guoqing, XING Zhisheng, YUE Zhenduo, et al. Research status and prospects of plunger lift technology for gas well drainage and production [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 121-129.
- [17] 刘伊浩,陆小龙,同桐,等. 双级柱塞气举技术在苏东北试验效果评价[J]. 石油化工应用,2025,44(11):59-62.
LIU Yihao, LU Xiaolong, TONG Tong, et al. Evaluation of the experimental effect of two-stage plunger gas lift technology in northeastern Jiangsu [J]. Application of Petrochemical Industry, 25,44(11):59-62.
- [18] 杨辉,赵丹,毛珍,等. 川中致密气井柱塞举升工艺模拟与优化[J]. 中国石油和化工标准与质量,2025,45(14):145-147.
YANG Hui, ZHAO Dan, MAO Zhen, et al. Simulation and optimization of plunger lifting process for tight gas wells in central Sichuan [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality,2025,45(14):145-147.

编辑 陈晓微

第一作者简介:班和,男,1987年出生,工程师,本科,2013年毕业于俄罗斯国立航空航天大学仪器制造大学仪器制造专业,主要研究方向为机械采油与石油工程方面。电话:18693701656,Email:banhe1115@sina.com。通信地址:新疆哈密市伊州区吐哈石油基地采油工艺研究院,邮政编码:839000。