

引文：韩国庆, 邢志晟, 岳震铎, 等. 柱塞气举排水采气研究现状及展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(6): 52-63.
HAN Guoqing, XING Zhisheng, YUE Zhenduo, et al. Research status and prospect of deliquification and gas recovery by plunger lift[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(6): 52-63.

柱塞气举排水采气研究现状及展望

韩国庆 邢志晟 岳震铎 杨伯客 左昊龙 梁星原

中国石油大学(北京)石油工程学院

摘要：气井积液是大部分天然气井在开发中后期存在的主要问题，排水采气工艺是排出井底积液并恢复和提高气井产量的关键技术之一。柱塞气举是一种可以高效排出井底积液的间歇生产工艺，该工艺具有结构简单、成本低等优点，适用于低产井和高气液比井，是目前我国最主要的排水采气技术之一。为此，系统地从事塞类型及应用场景、柱塞气举速度模型、工作制度优化及故障诊断、新型柱塞气举工艺 4 个方面进行研究综述，分析了不同模型的优缺点，并总结了 8 种新型柱塞的特点和应用场景，进而针对目前气井生产效率低和井底积液难排出的情况，展望了柱塞气举工艺的技术发展方向。研究结果表明：①相比于国外，中国柱塞气举工艺应用广泛，发展较为成熟，新型柱塞气举工艺的发展进一步扩大了其应用范围。②速度模型可精确模拟柱塞在井筒中的运动状态；工作制度优化逐步向智能化发展。③目前仍存在柱塞气举工艺智能化程度低和无法适应复杂油气井生产的问题。结论认为，柱塞气举工艺下一步发展应聚焦 4 个方向：智能化技术的应用、适应复杂井条件下的技术开发、结合其他采气工艺的复合应用、基于气藏—井筒—地面一体化的井群制度优化。该研究成果对进一步推动国内柱塞气举相关研究与应用，具有较好的参考作用，并可以为柱塞气举未来发展方向提供指导。

关键词：柱塞气举；气井积液；排水采气；速度模型；工作制度优化；故障诊断；智能柱塞；新型柱塞工艺

中图分类号：TE375 文献标识码：A DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.06.006

Research status and prospect of deliquification and gas recovery by plunger lift

HAN Guoqing, XING Zhisheng, YUE Zhenduo, YANG Boke, ZUO Haolong, LIANG Xingyuan

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102299, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.6, p.52-63, 6/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Liquid loading in gas wells is a major problem encountered by most gas wells in the middle and late development stages, and the deliquification and gas recovery technology is one of the key technologies to discharge the liquid loaded at a bottom hole, and restore and improve the production of gas wells. Plunger lift is an intermittent production process that can efficiently discharge the liquid loaded at a bottom hole, with the advantages of simple structure, low cost and being suitable for low production wells and high gas-liquid ratio wells, thus it is currently one of the most important deliquification and gas recovery technologies in China. In this paper, research is conducted systematically from four aspects, i.e. plunger types and application scenarios, plunger lift velocity model, work system optimization and fault diagnosis, and new plunger lift process. Besides, the advantages and disadvantages of different models are analyzed, and the characteristics and application scenarios of 8 new types of plungers are summarized. Considering the current situation of gas wells such as low production efficiency and difficult discharge of liquid loaded at the bottom hole, the technological development prospect of plunger lift process is proposed. The results show that the plunger lift process is more widely used and has developed more maturely in China than in other countries. The velocity model can accurately simulate the motion state of the plunger in the wellbore, the working system optimization is gradually developing towards intelligence, and the development of new plunger lift process has further expanded its application scope. The plunger lift process still has practical problems of having low intelligence and being unable to adapt to complex oil and gas well production. It is concluded that the development of plunger lift process in the next step should focus on four directions: the application of intelligent technology; the development of technologies adapting to complex well conditions; composite application together with other gas recovery technologies; and optimization of well cluster system based on gas reservoir - wellbore - surface integration. The research results have a good reference value of further promoting the research and application of plunger lift in China, and can provide guidance for the future development direction of plunger lift.

Keywords: Plunger lift; Liquid loading in gas well; Deliquification and gas recovery; Velocity model; Working system optimization; Fault diagnosis; Intelligent plunger; New plunger technology

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目“致密油储层压裂后渗吸动用程度微观控制机理研究”（编号：52204059）。

作者简介：韩国庆，1969 年生，教授，博士；主要从事采油采气工程理论与技术、油气井智能举升技术研究工作。地址：（102249）北京市昌平区府学路 18 号。ORCID: 0000-0001-9561-6964。E-mail: hanguoqing@163.com

通信作者：梁星原，1990 年生，讲师，博士；主要从事采油采气工程理论与技术、油气井智能举升技术研究工作。地址：（102249）北京市昌平区府学路 18 号。ORCID: 0000-0002-7583-3969。E-mail: xyliang@cup.edu.cn

0 引言

气藏开发进入中后期，地层压力逐渐下降，可能导致边水突进、底水上升与气井见水。若产出水不能及时排出，将会在井底积聚，导致井底回压增加，产气量下降，严重时可能使气井因水淹而停产；长期积液滞留还可能严重污染和伤害储层，进而影响气井产量和气藏采收率。目前排出井底积液的方法包括泵举、速度管柱、泡排和柱塞气举等^[1]，其中柱塞气举具有结构简单、成本低等优点，适用于低产井和高气液比井，因此在全球范围内得到广泛应用。柱塞气举是一种特殊的间歇气举工艺，其原理是利用井内产出流体将柱塞及其上方的液体一起举升至井口；柱塞在气体和液体之间起到隔离作用，以减少气体滑脱和液体回落。该技术可以有效利用地层能量，特别适用于高气液比的井。此外，柱塞气举还能防止结蜡和水合物生成，从而避免井筒堵塞，并有助于减少温室气体排放^[1-2]。

1 柱塞类型及应用场景

柱塞气举在国内外均有广泛应用，该工艺最早在 20 世纪 50 年代由泛美石油公司在美国 San Juan 盆地的间喷井中使用，当时主要应用于油井，作为辅助气举工艺来提高产量，应用于 18 口井后平均日产气量增加了 25%，并且仅用 4 个月便收回成本。Beeson 等^[3]首次对柱塞气举工作原理进行了研究，但未涉及现场应用。直到 20 世纪 80 年代，国外某气田对柱塞气举

进行了现场试验，并验证了前期提出的模型，加深了对柱塞气举的理解，从而促进了其在气井排水采气中的广泛应用。1983 年，辽河油田和四川气田首次从美国引进柱塞气举装置，并在四川气田的威 46 井进行了试验。1984 年 11 月，欢喜岭油田齐 22-308 井也开始进行试验，经过设备和工艺的改进，次年 7 月在欢 9-018、欢 8-019 等 6 口井开展了推广试验，单井产气量从 1 ~ 3 m³/d 增加至 5 ~ 20 m³/d。

柱塞气举装置主要包括柱塞、井下设备和地面设备。根据结构，柱塞主要分为衬垫式、棒状、刷式等几种类型，不同类型各有优缺点，并适用于不同应用场景（表 1）。

2 柱塞气举速度模型

目前柱塞气举研究主要聚焦在 2 个方面：一是柱塞气举的上下行速度模型；二是柱塞气举工作制度优化。关于柱塞上行速度，Foss 等^[4]通过 24 口井的实测数据认为其平均速度为 5.08 m/s；中国石油天然气集团有限公司《柱塞气举技术规范：SY/T 7623—2021》中给出的上行速度经验值为 2.5 ~ 5.0 m/s。至于柱塞下行速度，前者认为在天然气中为 4.58 ~ 15.27 m/s，最优值为 10.28 m/s；在密度为 875 kg/m³ 的原油中，柱塞下行速度为 0.874 m/s。

不同学者对柱塞速度模型进行了研究，主要内容见表 2。

由于柱塞与管壁之间存在一定缝隙，柱塞在上行阶段会发生液体漏失，主要表现为柱塞上部液体从

表 1 不同柱塞类型优缺点及应用场景表

柱塞类型	优点	缺点	应用场景
衬垫式柱塞	外径可随油管内径变化 密封性较好	成本较高	可用于变径的井筒
棒状柱塞	结构可为空心或实心，采用聚乙烯、聚四氟乙烯等轻质材料制成 轻质柱塞运动时间短 成本低 可清除井筒中的石蜡或其他杂质	外径不可变 油管形状不规则或油管变径时，易卡死 举升效率低	常用于气液比较高的气井
刷式柱塞	密封性好 可携砂	成本较高 需频繁更换刷子	适用于出砂严重井、煤层气井或不规则油管
旋转柱塞 带旁路柱塞	下落速度快，关井时间短，生产效率高	下落速度快容易造成油管屈曲	用于气液比高或柱塞辅助气举井
分体式柱塞	减少关井时间，提高举升效率 寿命长 打捞方便	空心球座和球密封易失效 漏失和滑脱现象严重	高产气井

表 2 不同柱塞气举速度模型情况表

作者	主要内容
Lea 等 ^[5]	分析柱塞受力平衡，建立了第一个柱塞气举动态模型
Gasbarri 等 ^[6]	使用相互关联的多级控制体，与常规模型相比该模型不仅考虑了油管和环空内柱塞和液柱的运动特性，还考虑了地面管线和分离器对柱塞运动的影响
Maggard 等 ^[7]	通过建立数值模型，考虑柱塞气举 4 个阶段内井底流压动态变化和开井产气量变化，建立了适用于致密气藏的柱塞气举动态模型
Tang 等 ^[8]	考虑油套压力、井筒积液高度、液体回落以及柱塞所受阻力等变化，提出一种基于 Lea 等 ^[5] 建立的关井阶段油套管液面瞬时变化模型的改进模型
Gupta 等 ^[9]	建立混合动力模型（HSM）模拟柱塞运动，模型使用 9 个连续状态变量和 6 个二进制状态变量来描述柱塞运行的 6 个阶段
Dourado 等 ^[10]	基于扩展卡尔滤波（EKF）算法和柱塞举升动态过程建立柱塞运动模型，该模型由一组离散微分代数方程（拓扑）和考虑了测量信号噪声的状态组成
冯笑雅 ^[11]	根据质量守恒定律，考虑井斜角、柱塞运行始末状态和受力情况，对大斜度井和水平井中柱塞运动全过程进行研究，建立柱塞气举动态速度模型
Zhu 等 ^[12]	以 Gasbarri 等 ^[6] 建立的柱塞气举动态模型为基础，基于力学平衡和井口排液特性计算柱塞气举瞬态速度

缝隙向下流动，同时伴有气体上窜。该现象将直接影响柱塞在上行阶段的运行状态，导致柱塞上部液柱高度降低，柱塞上部的压力减小；同时，上部液柱漏失到井底会增加井底液柱高度，影响井底流压、

产气量以及柱塞下部的受力状态，最终导致柱塞气举排液效率降低，甚至排液失败。目前，大多数柱塞速度模型对漏失现象的描述都相对简单，不同学者对漏失现象的研究见表 3。

表 3 不同漏失模型研究表

作者	主要成果
Zhao 等 ^[14]	开展了柱塞和油管的直径比为 0.90 ~ 0.98 的实验，基于力学平衡和柱塞物理模型建立柱塞举升过程中的液体漏失模型，结合实验中测得的压力损失值以及漏失量，确定了最佳直径比为 0.96
Zhao 等 ^[15-16]	针对前人在稳态条件下建立的柱塞举升液体漏失模型 ^[14] ，基于机理分析和实验，利用有限差分法，建立瞬态物理模型模拟柱塞运行过程中液体和气体的质量变化
王尊策等 ^[17]	以柱塞外壁结构为基础，建立柱塞在油管内举升流场数值模型，对其外壁密封环槽结构的密封性能开展数值模拟研究，对不同环槽柱塞进行密封性能室内实验
赵昆鹏等 ^[18]	以棒状柱塞及其上部含气液柱为研究对象，通过受力分析建立柱塞气举瞬态漏失量物理模型，并利用有限差分方法实现模型求解，结合室内实验进行模型验证与应用
Zhao 等 ^[19]	使用 VOF—CFD 方法模拟柱塞举升过程中柱塞、气体和液体的流动过程，同时开展了室内实验模拟
田柯等 ^[20]	利用气液两相分层流动数值计算方法，讨论了紊流槽内相含率和速度场变化规律，并分析其多道密封机理，获得不同偏心距导致的环空间隙差异条件下的柱塞密封效果
师浩文等 ^[21]	根据柱塞与油管间隙微元体受力平衡建立液体漏失的数学模型，并针对柱塞自身结构特点，结合垂直管段柱塞举升模拟实验结果对模型进行修正，确定了棒状柱塞的漏失修正系数，建立棒状柱塞气举液体漏失模型
赵昆鹏等 ^[22]	构建柱塞与油管内壁环缝间气液两相逆流的数值模型，研究柱塞结构和上行速度对环缝内气液逆流流型的转变以及逆流密封性能的影响规律。揭示了柱塞与油管内壁环缝内的气液逆流密封机理，提出了强化气液逆流密封性能的最佳上行举升速度和柱塞结构优化方向

3 柱塞气举工作制度优化及故障诊断

柱塞气举的应用效果在很大程度上取决于工作制度的合理性。一套合理的工作制度可以确保在很短的关井时间内排出更多的液体，同时在开井后保

证较高的产量。柱塞气举工作制度优化主要集中在调整开关井的时间周期上。目前，常用的柱塞气举工作制度优化方法是采用 Foss 等^[4]基于美国 Ventura Avenue 气田现场数据提出的第一个柱塞气举经验模型。该模型利用高气液比柱塞气举井生产数据，可对

诸如最大套压、最小套压、油压、举升液体量、周期循环次数以及所需注气量等重要工作参数进行预测。

不同学者对柱塞气举工作制度优化的研究成果见表 4。

表 4 不同柱塞气举工作制度优化内容表

作者	主要成果
Ozkan 等 ^[23]	提出了一种气藏与井筒耦合的柱塞气举优化算法，通过拉普拉斯变换和杜哈美原理建立了井筒和气藏流动的解析模型
Parsa 等 ^[24]	采用 Ozkan 等 ^[23] 提出的基于储层性能的柱塞气举产气量和关井时间优化算法，以产气量最大为优化目标，保证关井时积聚的压力可使柱塞举升至地面
Kamari 等 ^[25]	基于最小二乘支持向量机(LSSVM)预测柱塞气举系统举升最大液量。提出一种基于耦合—模拟—退火(CSA)优化特征选择机制调整最优参数，并将 CSA—LSSVM 相结合，利用了帽子矩阵、Williams Plot 和残差识别模型中的异常值
Singh ^[26,27]	基于分类和回归树(CART)算法构建模型，考虑 8 ~ 10 个影响柱塞气举工况的参数，构建了柱塞气举故障诊断工具
Nandola 等 ^[28]	基于 Gupta 等 ^[9] 建立的柱塞气举模型，提出一种二元决策的柱塞气举循环过程，该过程包括连续和离散的状态变量，将地面测量的时间序列数据转换成 cycle-wise 输出，将二进制状态变量转换成连续的阈值，最后将这些变量转换成一个降阶的 cycle-to-cycle 模型和最大产量的时域优化问题
Barros 等 ^[29]	对阿根廷 280 口柱塞气举井自动化系统进行分析，阐述了该自动化装置的诊断决策流程，设计了 SCADA 控制面板的预警算法
Hashmi 等 ^[30-31]	基于柱塞运行过程中的能量平衡，建立了开井所需最小套压计算模型，并且该最小套压值可以保证柱塞气举井持续生产
Xiang 等 ^[32]	通过在不同生产周期下求解扩散方程，使用贝塞尔函数减少储层渗透率低和井底流压呈正弦震动引起的常规稳态 IPR 模型和实际瞬态 IPR 模型的误差，建立柱塞气举井瞬态 IPR 流入动态关系模型
Aires 等 ^[33]	使用模糊控制器和线性模型预测控制器模拟柱塞工作，模糊控制器通过控制井口二级阀门从而调节柱塞运行速度，模糊控制器和预测控制器分别对应 2 种优化流程，保持柱塞在合理速度下运行
Akhiiartdinov 等 ^[34]	通过机器学习模拟柱塞举升过程，将现场测量参数作为输入变量，瞬时产气量作为输出变量，训练前馈神经网络模型(ANN)建立虚拟流量计。开发的模型用于预测柱塞系统开关井时机，并以此为基础对柱塞气举生产制度进行优化
Romero 等 ^[35]	介绍了利用机器学习的柱塞气举系统的故障分类软件开发及实现过程，通过专注于生产损失检测的神经网络为柱塞气举故障提供了分类模型
朱建军等 ^[36-37]	使用瞬态多相流模拟器(OLGA),通过调整气藏储层动态、柱塞参数或管道边界条件,生成几种异常工况(如油管破裂、电动阀故障等)数据,并对模拟结果作相应分析
黄伟明等 ^[38]	采用瞬态多相流软件建立柱塞动态模型。引入近井地层动态描述功能，实现对柱塞运动特征的准确模拟；基于不同柱塞运行周期制度下累计产气量模拟结果，采用基于最小二乘法的最优化方法实现柱塞运行制度的最优化
李泊春等 ^[39]	以长宁区块页岩气井为例，提出了 2 种平台柱塞气举错峰运行模式，优化了错峰开井时机，并构建柱塞气举工艺远程智能管理系统，实现了对柱塞运行状态的实时监测、异常工况诊断与远程处理
Xie 等 ^[40]	训练基于 Transformer 编码器识别连续数据中的周期点，使用深度神经网络的自动编码器联合优化聚类损失和重构损失，提出了一种无监督聚类的方法，用于识别柱塞气举故障工况

4 新型柱塞气举工艺

4.1 智能柱塞

智能柱塞作为一项新技术与常规柱塞在原理上相同(图 1)，但内置了压力、温度、加速度等传感器，能够实时提供柱塞运行过程中的各项数据，数据传输至柱塞内的存储单元，当柱塞被井口捕捉器捕获时，系统会收集整个运行周期内的数据，并通过互联网

远程传输到云服务器或客户端。工程师在客户端接收到这些数据后，可以对其进行分析，判断柱塞的运行状况，并实时调整工作制度，从而提高柱塞运行效率，实现其运行智能化。具有配置灵活、数据采集精度高、采样频率快、适应性强、安全性高等特点，能够实现参数及工作制度自动实时调整，降低现场管理人员的劳动强度，符合现代化数字油田发展趋势。BP 公司在美国 San Juan 盆地北部成功应用了这项技术，

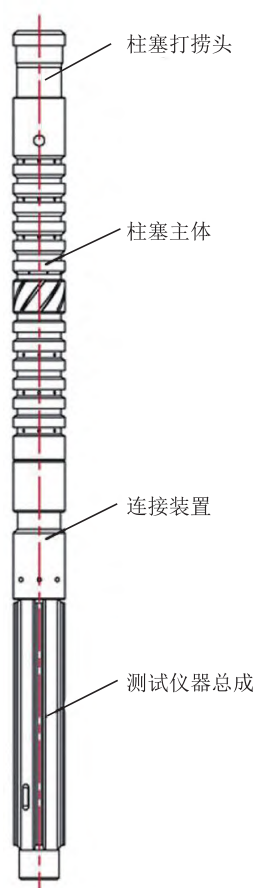


图 1 智能柱塞示意图

(资料来源：据本文参考文献 [43])

并开发了一套数字集成系统。该系统主要由远程终端 (RTU)、监控与数据采集主机 (SCADA-host) 组成, 能够根据预设工作制度控制柱塞运行, 并依据气井生产状态控制井口阀门, 从而进一步提升柱塞举升的自

动控制能力。中国长庆油田在智能柱塞技术上起步较早, 自 2013 年以来, 研发并推广了新型智能柱塞气举系统^[41], 这一系统经过多年的发展现已具备自主知识产权, 目前应用广泛。该系统实现了数据实时传输和精细调参, 无需人员现场调整操作^[42]。与进口智能柱塞相比, 国产智能柱塞具有通信精准、控制简便、运行稳定以及成本低等多个优点。

智能柱塞系统主要包括以下部分: 井口装置、智能柱塞、远程控制系统以及远程控制平台。远程控制系统的构成如图 2 所示。其中, 柱塞控制器执行工作制度控制算法, 并接收远程开关井的指令, 负责管理柱塞运动和工作过程。到达传感器监测柱塞的上下运动情况, 并记录柱塞到达和下落的时间。数字压力计实时监测油压和套压, 提供关键的井下和井口数据。电磁阀用于控制气体和液体的流动, 根据柱塞控制器的指令开关井口阀门。数据传输系统将井内数据传输到远程控制平台, 实现实时监控和控制, 以及远程调整和管理工作制度。远程控制平台的功能是实时查看、监测智能柱塞传递的各种数据, 从而实现柱塞气举的远程控制、实时调参, 以及井场智能化和单井精细化管理。

深度挖掘智能柱塞传感器采集的数据可有效提高举升效率, 降低运行成本。例如利用压力数据精确建立柱塞运动模型, 修正原运动模型中漏失、摩擦系数项和恒定地层流入动态; 利用柱塞运动速度和加速度数据可精确测量井筒中液面高度, 节约液面测试费用; 同时可利用传感器数据建立柱塞气举数字孪生模型, 实现气井完全智能化运行。Chava 等^[44]

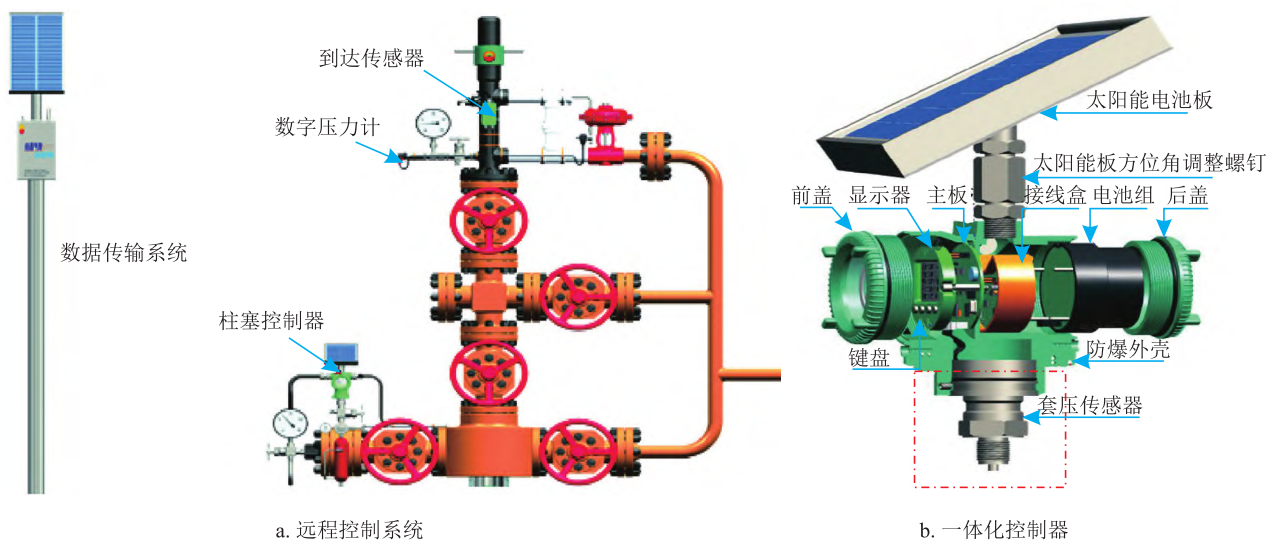


图 2 智能柱塞井口装置图

(资料来源：据本文参考文献 [41-42])

基于智能柱塞传感器所收集的压力和温度数据,对传统柱塞气举速度模型假设条件进行修正,基于质量守恒方程、动量守恒方程和力学平衡建立智能柱塞瞬态速度模型,该模型还考虑了地层流入动态变化以及储层、环空和油管之间的动态相互作用。Hingerl 等^[45]提出了一种智能柱塞举升过程中的数据监控和运行控制方法,该方法包括异常检测和基于人工智能的自动开关井算法。Tang 等^[46]分析了长庆油田致密气田 12 口井使用智能柱塞的现场试验数据,利用智能柱塞内置的加速度传感器获得的加速度、速度等数据精确测量出井筒中液面高度,并建立智能柱塞开关井智能算法,举升效率较常规柱塞提高了 70%。

4.2 组合式柱塞

页岩气藏开发需要大规模压裂改造,以涪陵页岩气田为例,相比压裂时,采气阶段采用的井口装置主通道变小,但仍然保留了压裂使用的井口大阀($\varnothing 177.8\text{ mm}$),导致常规柱塞在运行至大阀时发生偏移,影响举升效果。同时为降低气井生产所需临界携液流量并保证带压作业安全,管柱中部设有 X 型工作筒,其主通道略小于油管直径,常规柱塞无法在变内径情况下运行。生产井口安装的大阀和油管变(缩)径制约了常规柱塞气举在页岩气井的应用^[47]。与常规柱塞气举工艺相比,组合式柱塞气举在解决诸如积蜡严重、液气比高、井筒变径等特殊情况更具优势。组合柱塞如图 3 所示,由弹块和连接杆组成,确保了柱塞在通过变径处时,其余弹块保持张开状态,至少有一组弹块在较小的通道内扶正柱塞,其余弹块保持张开状态确保柱塞正常运行。刘华敏等^[48]针对涪陵页岩气田的气井存在大口径井口和油管变径等问题,

提出了一种弹块式变径组合柱塞的设计,采用了弹块和加长设计,旨在确保柱塞能够通过大口径井口,同时降低柱塞的漏失率。陈晓宇等^[47]对涪陵页岩气井进行了井口改造和组合柱塞的设计。为解决井口扩径的问题,更换了原有的转换法兰,采用内加衬套转换法兰。同时,在井口上部安装了一个回型管,其内通径与油管内通径相同,以解决井口扩径问题。

4.3 分体式柱塞

根据生产方式连续性,柱塞工具主要分为两大类:关井式柱塞和不关井式柱塞。对于高产井,可以使用不关井式柱塞,在不关井的状态下高效排液。对于低产井,则可以采用传统的关井式柱塞,通过间歇生产方式解决积液问题。为提高气井的举升效率并减少关井时间,德士古公司研发了一种不关井、可连续生产的分体式柱塞工具,并在得克萨斯州东部、南部和西部的 10 口井中应用,取得了显著的增产效果。如图 4 所示,分体式柱塞由空心柱塞和密封球两部分组成。在坐落器处,空心柱塞和密封球组合在一起,形成密封状态,此时相当于常规柱塞结构。当井筒内积累了足够的能量,空心柱塞和密封球作为一个整体被举升至井口。柱塞到达井口时,密封球会因井口顶杆(撞击杆)的撞击而与空心柱塞分离,并在重力作用下回落至井底坐落器,而空心柱塞则留在井口开始生产。在关井后,空心柱塞回落至坐落器与密封球再次完成组合密封,构成一次完整的生产循环。这种分体式柱塞具有防止柱塞在上下运动过程中被卡死的优点,并且由于其良好的密封性,能够减少气体上窜和液体漏失,从而有效提高了举升效率。

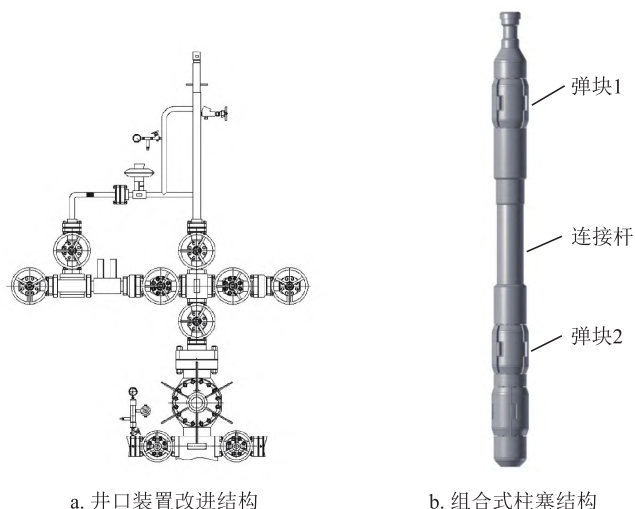


图3 涪陵页岩气田柱塞气举装置改进结构示意图

(资料来源:据本文参考文献[47])

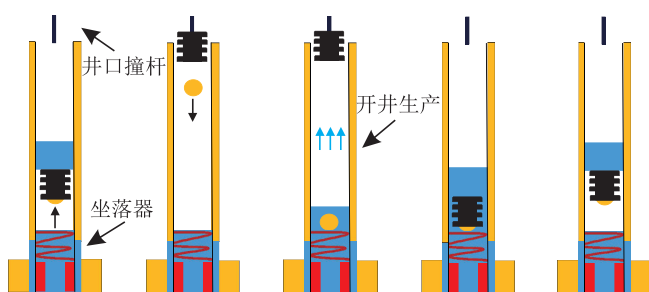


图4 分体式柱塞工作过程示意图

4.4 柱塞辅助气举(PAGL)和气举辅助柱塞(GAPL)

柱塞辅助气举(PAGL)和气举辅助柱塞(GAPL)是将柱塞气举与常规气举相结合的复合工艺。PAGL工艺通常适用于产气量大、套压和气液比较高的井,通过从地面连续注入气体保持井筒中较高的气体流

速（高于临界流速）来举升柱塞和井底积液，从而实现连续生产，因此，该工艺对地面压缩机组的要求较高。Barnett 区块页岩气井中应用了 PAGL 和 GAPL^[49]，通过对比常规柱塞气举和应用 PAGL、GAPL 后的生产效果发现，使用 PAGL 和 GAPL 的井能够有效降低井底流压并提高产量，同时减少注气量和生产成本。由于 PAGL 是一种连续生产工艺，柱塞下落速度较快，可能在下落过程中造成油管屈曲。Sayman 等^[50] 基于柱塞在气体、液体中受到不同阻力的下落模型，分析了柱塞在 4 个阶段的运动过程和对油管的冲击过程，提出了避免油管变形的操作优化程序。

GAPL 与常规柱塞气举相同，是一种间歇生产工艺。GAPL 通过在关井阶段向井筒中注入气体来辅助柱塞举升，从而实现在较低气液比的气井中有效运行。这一工艺需要在地面回收天然气，并在关井期间将天然气回注进井筒。Chacín 等^[51] 首次提出了 GAPL 的设计模型，该模型考虑了柱塞 4 个生产阶段，基于质量和动量守恒原理，考虑地层流体流入动态、油管和柱塞的结构特性、气举注入压力、气举阀性能等，建立了考虑井筒中积液高度和压力变化、柱塞上升以及地面管线压力变化的模型。Kannan 等^[52] 使用瞬态多相流模拟器 OLGA 对 GAPL 工艺井筒进行建模和生产模拟，并比较了 GAPL 工艺与常规柱塞气举的生产效果。

4.5 多级柱塞

对于储层埋深大、地层能量不足、气液比较低的气井，使用多级柱塞可以更有效地排出井底积液，降低柱塞启动压力，并提高举升效率。Wienen^[53] 介绍了 PCS Ferguson 公司开发的多级柱塞工具，以及该工艺在现场的应用情况。多级柱塞工具如图 5 所示，该工具由底部的缓冲弹簧和柱塞举升系统组成。在第一个生产阶段，下部柱塞将流体举升至多级柱塞工具处，流体通过多级工具并依靠气流保持在多级工具上方。关井时工具内球形止回阀关闭以维持流体在工具上方，直到上部柱塞从井口下落，从液体中下沉坐落到多级工具上，同时下部柱塞下落至井底。坐落器在下一个生产阶段，上部柱塞将多级工具上部的流体举升至地面，与此同时下部柱塞将井底流体举升至多级工具上方。下部柱塞向上运动时压缩气体，为上部柱塞提供举升能量。这两个柱塞在井筒中协同工作，而多级柱塞工具在井筒中充当中间的固定阀，通过多次举升少量液体的循环流程，达到主要利用地层自身能量排液和提产的目的。

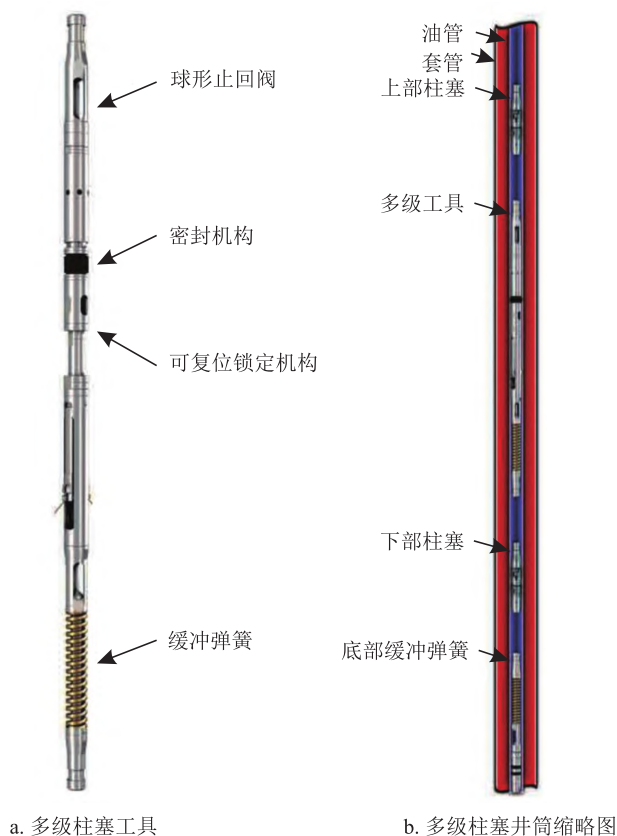


图 5 多级柱塞示意图

（资料来源：据本文参考文献 [53]）

4.6 连续柱塞

连续柱塞系统包括一个活动的中心杆和一个空心柱塞（图 6-a）。当柱塞到达坐落器时，中心杆上的密封装置使柱塞中心流道密封，使该柱塞变成一个类似于常规柱塞的结构，利用下部积累的能量来举升流体。当柱塞到达井口捕捉器时，柱塞底部的压力被释放，导致柱塞上下部的压力达到平衡，中心杆因重力作用下落。此时，柱塞的中心流道解除密封，允许气体通过中心流道和柱塞与油管之间的间隙进行生产。柱塞在重力作用下行至坐落器时，中心杆再次密封中心流道，从而实现不关井连续生产。雷腾蛟等^[54] 和段玉明等^[55] 设计研发的连续柱塞气举工艺，依靠气井天然能量和连续柱塞的独特结构，实现了不关井连续生产。这种工艺的应用为气井生产提供了一种新的解决方案，尤其适用于频繁停产和需要处理井筒积液的情况，从而提高了柱塞气举的整体运行效率，在现场应用效果显著。

带旁路的连续柱塞如图 6-b 所示，其结构特点是包含一个可移动的离合器，用于控制柱塞上下行过程中旁路的开闭。当柱塞到达井口与井口捕捉器发生碰撞时，节流孔会打开，允许气体和液体通过

该节流孔流向柱塞上方,从而使柱塞以较快的速度下落。当柱塞撞击到井底的缓冲弹簧后,节流孔会关闭。Sayman 等^[56]在室内实验条件下,比较了分体式柱塞和带旁路的柱塞在不同油管尺寸和柱塞尺寸下的下落特性。实验中通过连续注入气体和液体来模拟带旁路的柱塞上升过程,并将实验结果与机理模型相结合,以预测现场条件下带旁路的柱塞上行和下行阶段特性。同时,还对比了分体式柱塞和带旁路柱塞的极限使用条件,并评估了节流孔故障特性。

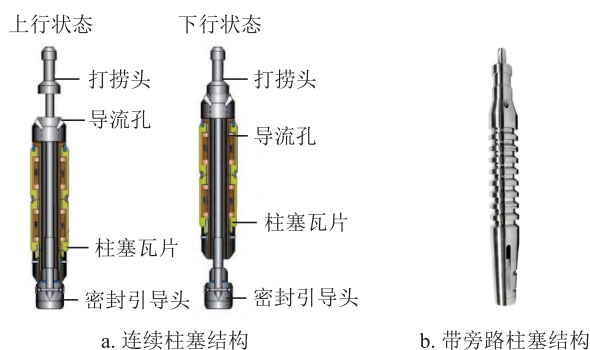


图6 连续柱塞示意图

4.7 单流柱塞

由于柱塞上行过程中存在漏失现象,会降低柱塞举升效率。为了应对这一问题,近年来业内发明了单流柱塞,如图7所示,旨在减少柱塞运行过程中漏失对举升过程的影响。与常规柱塞相比,单流柱塞的独特之处在于坐落器处安装有一单流阀,以防止液体回流进入地层。目前,关于单流柱塞的应用条件和工作机理的研究还相对较少。Tan 等^[57]设计并研制了一套全尺寸的柱塞气举可视化实验装置,用以模拟普通柱塞和单流柱塞的工作过程,并明确了单流柱塞气举技术的特点和局限性。此外,研究团队还使用 OLGA 建立了瞬态模型,对不同工作条件下的单流柱塞进行了模拟,揭示了单流柱塞气举技术的极限应用条件。基于这些模拟结果,进一步建立了单流柱塞失效压力的图版。

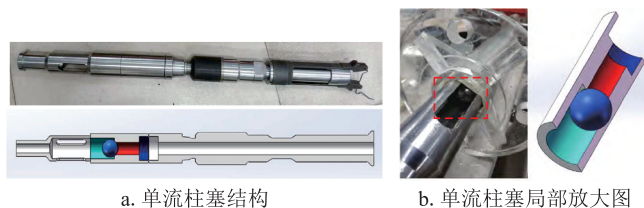


图7 单流柱塞示意图

(资料来源:据本文参考文献[57])

4.8 斜井柱塞

致密气、页岩气等非常规气藏大部分井的井型为定向井和水平井,应用的柱塞坐落器通常下在直井段,无法有效排出斜井段和水平段积液,排采效果不佳。坐落器投放通常由井下钢丝作业完成,水平井、大斜度井在作业过程中存在钢丝断裂、工具丢手失败等风险,目前最大施工井斜角为 70° 。李泊春等^[39]综合考虑页岩气井的主要积液位置、钢丝作业能力、施工风险、柱塞举液效率等因素,认为 $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 井斜角对应的井深是柱塞排液的较优深度,同时优选“带单流阀卡定器+柱状柱塞”工具组合实现斜井柱塞高效排液。杨智等^[58]为减小页岩气大斜度井段工具下入难、施工风险高等问题,研制了预制弹簧工作筒和新型柱塞卡定器,以降低施工作业风险,增加柱塞运行深度并提高柱塞举升效率。

随井斜角的增加,常规柱塞上行过程中会产生偏心现象,使柱塞与油管间隙增大,气体滑脱和液体漏失量增大,使举升效率降低,并且刚性柱塞在运行过程中易卡死在倾斜段。为解决这一问题,Tong 等^[59]发明了一种柔性柱塞,如图8-a所示,各元件通过高密度聚乙烯柔性芯轴串联,柱塞长度和元件数量可根据现场需求进行调整。当柱塞通过斜井段时,柔性芯轴弯曲使所有元件之间发生滚动,同时顶部浮动组件可在打捞头外壳内自由滑动以适应自身的轴向尺寸变化。当柱塞回到垂直井段时,柔性芯轴和元件会自动恢复原状。底部减震器采用螺旋结构,使较慢的两相湍流转变为螺旋流,因此可与泡排工艺组合使用进行排水采气。Wilkes 等^[60]介绍了一种可用于水平井排水采气的 HEAL (Horizontal Enhanced Artificial Lift) 系统,如图8-b所示。该系统由漩涡分离器、固定尺寸的可调节管柱和封隔器组成。通过减小井筒弯曲段的流动截面积使气液流速增加,将流体从水平段举升至直井段。水平段流体经过固定尺寸的调节管柱到达漩涡分离器,通过旋风效应将气液分离到油套环空。气体从环空生产,液体回落并被分离器输送到上方举升系统。该系统可与柱塞气举工艺联作,实现柱塞气举水平段排液。

5 柱塞气举工艺技术展望

未来应持续改进柱塞气举工艺技术及其配套算法,研发适应不同井型和井况的柱塞工具;配套井口控制、测量、传输装置、在线监测和自动优化软件;完善装备工具、控制系统、组合配套工艺,形成完

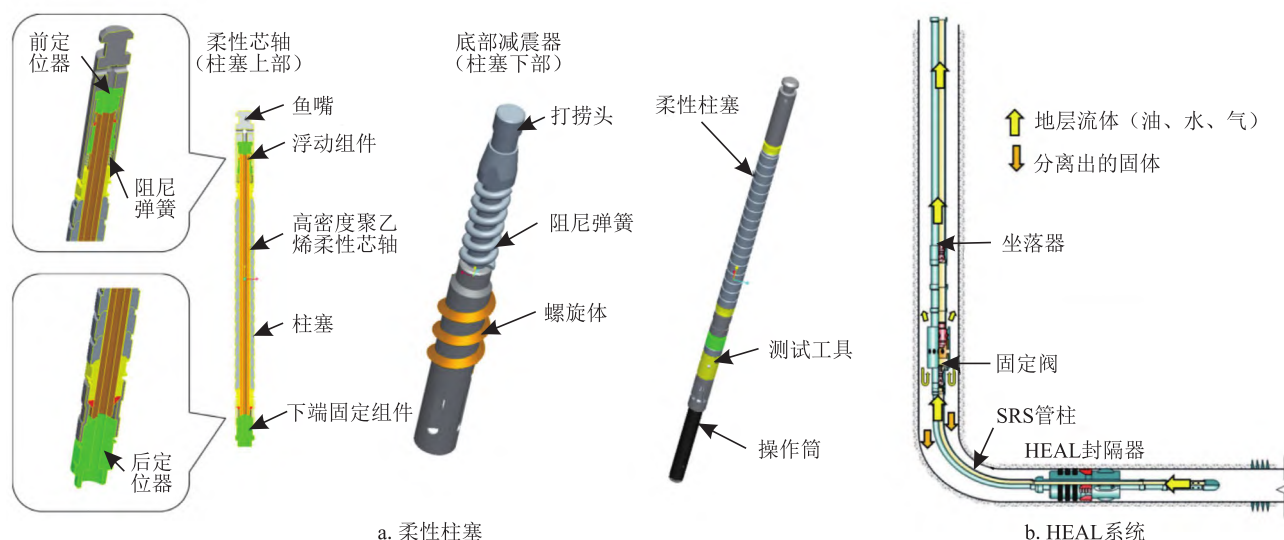


图 8 斜井柱塞示意图

(资料来源：据本文参考文献 [59-60])

整的柱塞气举技术系列，将显著支撑我国天然气高效开发。具体发展方向可聚焦以下几个重点。

5.1 智能柱塞气举工艺

加快信息技术与采气工艺的深度融合，推动气井生产智能化发展和数字化转型，重点在于柱塞气举生产流程物联网化，实现排采过程实时数据传输、液面监测、故障诊断、井筒完整性评价、工作制度自动调整、数字计量等。构建柱塞气举井数字孪生模型，实现基于数字孪生的柱塞气举井异常工况实时预警和生产制度闭环调控，形成不同类型气井在不同生产阶段全生命周期无人值守生产技术，支撑气井精细化智能生产。目前国内已形成多种智能化柱塞气举工具，工艺水平与国际相当，针对智能柱塞采集数据的实时分析、诊断、工作制度调整方法均已实现，但需要针对不同气藏特征持续完善智能算法。特别是以页岩气、致密气为主的非常规气藏，具有能量衰竭快、产气产液能力变化大等特点，因此需要以柱塞气举为代表的排采工艺实现自诊断、自寻优和自调节。未来应加强针对实时数据的分析理论研究，以机理+数据驱动的数字孪生模型为基础，将机器学习和机理模型相融合建立数学模型+深度学习模型，结合智能柱塞获取的井下信息，实时修正预测模型和运行参数，开展非监督分类学习，耦合工况/工艺多参数模型，建立多因素气井异常工况预警、在线智能优化及定量效果评价方法，并通过边缘计算技术形成新型智能柱塞装备与工具，实现柱塞气举工艺完全智能化。

5.2 复杂结构井柱塞气举技术

页岩气、致密气田大部分使用水平井、定向井、大斜度井等复杂结构井型进行开发^[61-62]。柱塞气举排采效果受其工艺工具限制，目前大部分应用于直井。应着力研发新型柱塞工艺，在保证密封作用的同时，还能满足大斜度井、水平井等井斜角要求。随着中国越来越多的深层油气和非常规油气资源的开发，研究深层、超深层条件下影响柱塞气举技术的制约因素和作用机理，形成相关技术对策，使柱塞满足超深井的运行条件，提高复杂油气井柱塞气举工艺适应性，实现超深气井安全长期高效开发。

5.3 复合柱塞气举工艺

由于天然气井不同开发阶段的井况和生产条件不断发生变化，井筒内压力分布、气液比、地层压力、积液高度变化等将直接影响气井产量。为适应高含水气田复杂生产状况，可重点研发柱塞气举复合工艺技术。目前已研发并应用的“节流器+速度管柱+柱塞气举一体化完井技术”，在气井开发初期实施井下节流工艺，中期速度管柱连续携液，后期柱塞气举间歇生产，可实现气井全生命周期生产。开展“柱塞气举+泡排”复合工艺和相关工具研究，可在初期使用泡排进行排水采气，在中后期联合使用泡排柱塞，增加柱塞气举工艺举升深度，满足超深气井排水采气需求；降低油套压差，降低柱塞运行速度需求；延长气井开井生产时间，提高开井时率。应用柱塞气举复合工艺可有效降低采气成本，延长气井自然连续生产期，达到降本增效的作用。

5.4 基于气藏—井筒—地面一体化的平台井柱塞气举生产

包括页岩气井在内的大部分气井生产后期积液属于动态变化过程, 柱塞气举工艺需要间歇生产, 并且开井阶段柱塞到达、地面增压实时进气等会使管线压力发生剧烈波动。由于气藏、井筒和地面的专业特点、数据需求不同, 3个系统间关联性差。实现高效开发迫切需要气藏工程、采气工程和地面工程紧密结合。对于见水气藏, 重点研发柱塞气举井气藏—井筒—地面耦合模型, 结合气藏数模结果, 以气藏整体压力均衡变化、各井气水比稳定为目标, 通过群控各井柱塞气举工作制度优化整个气藏压力水平。同时进行柱塞气举井井群平台化开发, 将平台柱塞井划分生产单元, 以周期开井最长的单元为基准, 对其他生产单元进行周期插空, 形成平台柱塞气举错峰运行模式。

6 结论

目前国内许多气井已进入开发中后期, 井底积液现象越来越严重。在这种情况下, 柱塞气举已逐步成为主要排水采气方式之一。笔者对柱塞类型及应用场景、速度模型、工作制度优化、故障诊断以及新型柱塞气举工艺进行了全面综述, 并展望了柱塞气举工艺技术未来的发展方向。目前, 该项技术研究主要集中在两个方面: 柱塞速度模型和工作制度的优化。速度模型考虑了摩擦、漏失等复杂因素, 能够精确模拟柱塞在井筒中的运行状况; 而制度优化则逐步向智能化、自动化发展, 显著提高了工作制度的合理性和举升效率。新型柱塞气举工艺的发展进一步扩大了其应用范围。未来, 柱塞气举工艺将专注于4个方向的深入研究: ①智能化技术的应用; ②适应复杂井条件下的技术开发; ③结合其他采气工艺的复合应用; ④基于气藏—井筒—地面一体化的井群制度优化。这些研究方向将为天然气的高效生产、绿色和可持续发展提供关键的技术支持。随着技术的不断进步和创新, 柱塞气举技术将在提升气井生产效率和解决积液难题方面发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

[1] HILDENBRAND Z L, SCHUG K A. Reservoir optimized plunger lift technology reduces hydrocarbon emissions from aging gas wells[J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 143475.

[2] OLSZAK E, YOHO M, GREASER R, et al. Case study: Plunger lift optimization leveraging physics-assisted AI and the impact on greenhouse gas emissions reductions[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: SPE, 2022: SPE-210222-MS.

[3] BEESON C M, KNOX D G, STODDARD J H. Short-cut design calculations and field applications of the plunger lift method of oil production[J]. The Petroleum Engineer, 1958.

[4] FOSS D L, GAUL R B. Plunger-life performance criteria with operating experience-ventura avenue field[J]. Drilling and Production Practices, 1965.

[5] LEA J F. Dynamic analysis of plunger lift operations[J]. Journal of Petroleum Technology, 1982, 34(11): 2617-2629.

[6] GASBARRI S, WIGGINS M L. A dynamic plunger lift model for gas wells[C]//SPE Production Operations Symposium. Oklahoma City: SPE, 1997: SPE-37422-MS.

[7] MAGGARD J B, WATTENBARGER R A, SCOTT S L. Modeling plunger lift for water removal from tight gas wells[C]//SPE/CERI Gas Technology Symposium. Calgary: SPE, 2000: SPE-59747-MS.

[8] TANG Yula, LIANG Zheng. A new method of plunger lift dynamic analysis and optimal design for gas well deliquification[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE, 2008: SPE-116764-MS.

[9] GUPTA A, KAISARE N S, NANDOLA N N. Dynamic plunger lift model for deliquification of shale gas wells[J]. Computers & Chemical Engineering, 2017, 103: 81-90.

[10] DOURADO O A, Jr, DÓRIA NETO A D, ALSINA P J. State space estimator for plunger lift[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 161: 147-157.

[11] 冯笑雅. 柱塞气举工艺设计及举升能力分析[D]. 荆州: 长江大学, 2020.

FENG Xiaoya. Process design and lifting capacity analysis of plunger gas lift[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020.

[12] ZHU Jianjun, ZHU Haiwen, ZHAO Qingqi, et al. A transient plunger lift model for liquid unloading from gas wells[C]//International Petroleum Technology Conference. Beijing: IPTC, 2019: IPTC-19211-MS.

[13] ZHAO Qingqi, ZHU Jianjun, CAO Guangqiang, et al. Transient modeling of plunger lift for gas well deliquification[J]. SPE Journal, 2021, 26(5): 2928-2947.

[14] ZHAO Kunpeng, TIAN Wei, LI Xuri, et al. A physical model for liquid leakage flow rate during plunger lifting process in gas wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 49: 32-40.

[15] ZHAO Kunpeng, BAI Bofeng. Transient liquid leakage during plunger lifting process in gas wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 59: 250-261.

[16] ZHAO K, BAI B. Instantaneous liquid and gas leakage flow during plunger lifting process in vertical wells[C]//11th North American Conference on Multiphase Production Technology. Banff: BHR Group, 2018: BHR-2018-313.

[17] 王尊策, 刘春璐, 刘崇江, 等. 气举柱塞外壁密封性能计算与

- 分析[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(6): 7-17.
- WANG Zunce, LIU Chunlu, LIU Chongjiang, et al. Calculation and analysis of outer wall sealing performance of air-lift plunger[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(6): 7-17.
- [18] 赵昆鹏, 慕立俊, 田伟, 等. 柱塞气举过程中气液瞬态密封性研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(5): 1133-1138.
- ZHAO Kunpeng, MU Lijun, TIAN Wei, et al. Transient process of gas liquid flow sealing in plunger lift method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(5): 1133-1138.
- [19] ZHAO Kunpeng, MU Lijun, TIAN Wei, et al. Gas-liquid flow seal in the smooth annulus during plunger lifting process in gas wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 95: 104195.
- [20] 田柯, 高尔斯, 王汉, 等. 气举柱塞偏心环空间隙流场数值分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15446-15453.
- TIAN Ke, GAO Ersi, WANG Han, et al. Numerical analysis of flow field in eccentric annular clearance of gas-lift plunger[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15446-15453.
- [21] 师浩文, 刘捷, 罗威, 等. 棒状柱塞气举液体漏失模型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 101-106.
- SHI Haowen, LIU Jie, LUO Wei, et al. Study on liquid leakage model of rod plunger gas lift[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(1): 101-106.
- [22] 赵昆鹏, 田伟, 张存社, 等. 运动柱塞与油管内壁环缝间的气液逆流特性[J]. 天然气工业, 2023, 43(5): 56-62.
- ZHAO Kunpeng, TIAN Wei, ZHANG Cunshe, et al. Countercurrent gas-liquid flow characteristics in the annular gap between moving plunger and inner tubing wall[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(5): 56-62.
- [23] OZKAN E, KEEFER B, MILLER M G. Optimization of plunger-lift performance in liquid loading gas wells[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE, 2003: SPE-84135-MS.
- [24] PARSA E, OZKAN E, LOWERY B, et al. Enhanced plunger lift performance utilizing reservoir modeling[C]//SPE Production and Operations Symposium. Oklahoma City: SPE, 2013: SPE-164473-MS.
- [25] KAMARI A, BAHADORI A, MOHAMMADI A H. Prediction of maximum possible liquid rates produced from plunger lift by use of a rigorous modeling approach[J]. SPE Production & Operations, 2016, 32(1): 7-11.
- [26] SINGH A. Application of data mining for quick root-cause identification and automated production diagnostic of gas wells with plunger lift[J]. SPE Production & Operations, 2017, 32(3): 279-293.
- [27] SINGH A. Root-cause identification and production diagnostic for gas wells with plunger lift[C]//SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition. Abu Dhabi: SPE, 2015: SPE-175564-MS.
- [28] NANDOLA N N, KAISARE N S, GUPTA A. Online optimization for a plunger lift process in shale gas wells[J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 108: 89-97.
- [29] BARROS J L, CLARAMUNT J I, FERRIGNO E. Novel approach in digital diagnostic for plunger lift in unconventional wells at Vaca Muerta[C]//SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. The Woodlands: SPE, 2018: SPE-190930-MS.
- [30] HASHMI G M, HASAN A R, KABIR C S. Simplified modeling of plunger-lift assisted production in gas wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 52: 454-460.
- [31] HASHMI G M, HASAN A R, KABIR C S. Design of plunger lift for gas wells[C]//SPE North America Artificial Lift Conference and Exhibition. The Woodlands: SPE, 2016: SPE-181220-MS.
- [32] XIANG Z, KABIR C S. Simplified transient-IPR modeling in intermittent gas-lift and plunger-lift systems[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 179: 31-43.
- [33] AIRES J D M, GADELHA J R T, DE A DANTAS A F O, et al. Plunger lift optimization: A comparison of fuzzy and predictive controllers with manipulation of a secondary gas valve[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 192: 107261.
- [34] AKHIIARTDINOV A, PEREYRA E, SARICA C, et al. Data analytics application for conventional plunger lift modeling and optimization[C]//SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. Virtual: SPE, 2020: SPE-201144-MS.
- [35] ROMERO A, FELDMANN C, ALONSO K S, et al. Prescriptive model for automatic online plunger lift unconventional wells optimization[C]//SPE/AAPG/SEG Latin America Unconventional Resources Technology Conference. Virtual: SPE, 2020: URTEC-2020-1427-MS.
- [36] 朱建军, 贾皓, 王浩宇, 等. 基于瞬态多相流模拟器的柱塞排水采气模型及故障诊断[J]. 石油科学通报, 2021, 6(4): 626-637.
- ZHU Jianjun, JIA Hao, WANG Haoyu, et al. Modeling and applications of plunger lift for gas well deliquification via a transient multiphase simulator[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(4): 626-637.
- [37] ZHU Jianjun, CAO Guangqiang, TIAN Wei, et al. Improved data mining for production diagnosis of gas wells with plunger lift through dynamic simulations[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Calgary: SPE, 2019: SPE-196201-MS.
- [38] 黄伟明, 王景芹, 张楠, 等. 基于瞬态模拟的柱塞排采工艺参数优化方法[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(5): 589-593.
- HUANG Weiming, WANG Jingqin, ZHANG Nan, et al. Optimization method of plunger water-drainage process parameters based on transient simulation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(5): 589-593.
- [39] 李泊春, 向建华, 肖帆, 等. 长宁页岩气井柱塞气举工艺规模化应用及效果分析[J]. 钻采工艺, 2023, 46(2): 65-70.
- LI Bochun, XIANG Jianhua, XIAO Fan, et al. Large-scale application and effect analysis of plunger gas lift technology in Changning shale gas reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(2): 65-70.
- [40] XIE Yukun, MA Saifei, WANG Haoyu, et al. Unsupervised

- clustering for the anomaly diagnosis of plunger lift operations[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2023, 231(Part A): 212305.
- [41] 张春, 金大权, 李双辉, 等. 苏里格气田新型柱塞气举系统应用研究[J]. *钻采工艺*, 2017, 40(6): 74-76.
- ZHANG Chun, JIN Daquan, LI Shuanghui, et al. Application research of novel plunger lift system in Sulige Gas Field[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(6): 74-76.
- [42] 郑道明, 贺绍华, 徐武举, 等. 大牛地气田智能柱塞气举工艺技术[J]. *油气井测试*, 2020, 29(3): 19-26.
- ZHENG Daoming, HE Shaohua, XU Wujun, et al. Technology of intelligent plunger gas lift in Daniudi Gas Field[J]. *Well Testing*, 2020, 29(3): 19-26.
- [43] TONG Zheng, PEI Xiaohan, SHEN Zejun, et al. A plunger lift and monitoring system for gas wells based on deployment-retrievement integration[J]. *Natural Gas Industry B*, 2015, 2(5): 449-454.
- [44] CHAVA G K, FALCONE G, TEODORIU C. Development of a new Plunger-Lift model using smart plunger(*) data[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE, 2008: SPE-115934-MS.
- [45] HINGERL F, ARNST B, COSBY D, et al. The future of plunger lift control using artificial intelligence[C]//SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. Virtual: SPE, 2020: SPE-201132-MS.
- [46] TANG Jingfei, AUDREY B, LIN Jin, et al. Intelligent plunger lift: Digital and cost-effective solution to unlock gas potential in a large tight gas field in China[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dubai: SPE, 2021: SPE-206123-MS.
- [47] 陈晓宇, 朱尧辉, 王大江, 等. 柱塞排水采气技术在涪陵页岩气田的试验应用[J]. *钻采工艺*, 2021, 44(4): 52-56.
- CHEN Xiaoyu, ZHU Danghui, WANG Dajiang, et al. Application of plunger drainage gas recovery technology in Fuling shale gas field[J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(4): 52-56.
- [48] 刘华敏, 李牧, 刘乔平, 等. 涪陵页岩气田柱塞气举工艺研究与应用[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(3): 102-107.
- LIU Huamin, LI Mu, LIU Qiaoping, et al. Research and application of plunger gas lift technology in the Fuling shale gas field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 102-107.
- [49] BURNS M. Plunger-assisted gas lift and gas-assisted plunger lift[C]//SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. The Woodlands: SPE, 2018: SPE-190937-MS.
- [50] SAYMAN O, JONES K, HALE R, et al. A field case study of plunger lift related tubing deformation[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 97: 104342.
- [51] CHACÍN J, SCHMIDT Z, DOTY D. Modeling and optimization of plunger lift assisted intermittent gas lift installations[J]. *SPE Advanced Technology Series*, 1994, 2(1): 25-33.
- [52] KANNAN S K, BOYER M, YUAN Ge, et al. Modeling and optimization of gas-assisted plunger lift GAPL by a transient simulator: A case study of a Permian shale well[C]//SPE Eastern Regional Meeting. Charleston: SPE, 2019: SPE-196581-MS.
- [53] WIENEN J. Multistage plunger-lift systems can provide economical alternative to pumping units[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2010, 62(12): 22-24.
- [54] 雷腾蛟, 崔小虎, 胡登强, 等. 轮南油田复合柱塞气举新工艺[J]. *石油钻采工艺*, 2017, 39(4): 472-476.
- LEI Tengjiao, CUI Xiaohu, HU Dengqiang, et al. A new combined plunger lift technology used in Lunnan Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(4): 472-476.
- [55] 段玉明, 王法鑫, 雷腾蛟, 等. 连续柱塞气举工艺设计及在塔里木凝析气田的应用[J]. *钻采工艺*, 2020, 43(1): 35-37.
- DUAN Yuming, WANG Faxin, LEI Tengjiao, et al. Design of continuous plugger gas lift process and its application in Tarim[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(1): 35-37.
- [56] SAYMAN O, TANG Yula, CHOW J, et al. Experimental and field investigations of bypass plunger lift[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: SPE, 2022: SPE-210463-MS.
- [57] TAN Bo, LIU Xingliang, LIU Yi, et al. Mechanism of liquid unloading by single flowing plunger lift in gas wells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(7): 2571-2582.
- [58] 杨智, 陈家晓, 段蕴琦, 等. 页岩气水平井柱塞排采工艺研究与应用[J]. *钻采工艺*, 2020, 43(增刊1): 40-42.
- YANG Zhi, CHEN Jiaxiao, DUAN Yunqi, et al. Plunger lift technology research and application in horizontal shale gas well[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(S1): 40-42.
- [59] TONG Zheng, ZHAO Guangmin, WEI Songbo. A novel intermittent gas lifting and monitoring system toward liquid unloading for deviated wells in mature gas field[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140(5): 052906.
- [60] WILKES G, KIMERY D, SAPONJA J, et al. A new, slickline accessible artificial lift technology to optimize the production strategy in the Permian basin[C]//SPE Liquids-Rich Basins Conference-North America. Midland: SPE, 2017: SPE-187499-MS.
- [61] 祝效华, 李瑞, 刘伟吉, 等. 深层页岩气水平井高效破岩提速技术发展现状[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(4): 1-18.
- ZHU Xiaohua, LI Rui, LIU Weiji, et al. Development status of high-efficiency rock-breaking and speed-increasing technologies for deep shale gas horizontal wells[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(4): 1-18.
- [62] 姜政华, 孙钢, 陈士奎, 等. 南川页岩气田超长水平段水平井钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(5): 20-26.
- JIANG Zhenghua, SUN Gang, CHEN Shikui, et al. Key drilling technologies for horizontal wells with ultra-long horizontal sections in Nanchuan Shale Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(5): 20-26.

(修改回稿日期 2024-04-26 编辑 董莎)



本文互动