

基于 TRIZ 理论的钢丝试井防喷活塞卡阻分析与改进

金毅浪¹, 杨国¹, 金子一², 程小虎¹, 吴兴林¹, 王沿³

1. 中国石油西南油气田分公司川西北气矿 四川江油 621700

2. 四川页岩气勘探开发有限责任公司 四川成都 610051

3. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院 四川成都 610041

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司川西北气矿科研项目“液压防喷盒活塞杆技术改进”(2020-10)

引用: 金毅浪, 杨国, 金子一, 等. 基于 TRIZ 理论的钢丝试井防喷活塞卡阻分析与改进[J]. 油气井测试, 2026, 35(1): 59-65.

Cite: JIN Yilang, YANG Guo, JIN Ziyi, et al. Analysis and improvement of wireline well testing blowout preventer piston jamming based on TRIZ theory [J]. Well Testing, 2026, 35(1): 59-65.

摘要 针对 70 MPa 国产液压防喷装置在高压高温含砂井况下, 顶密封活塞因污物堆积频发卡阻, 导致密封失效及施工复杂停工等问题, 开展失效机理分析与结构改良研究。运用 TRIZ 九屏幕法界定系统边界, 构建功能模型与因果链, 识别出“致密砂壳粘附、构件间隙过小、排污通道缺失”为卡阻核心要因。依据空间分离与预先作用原理, 提出活塞 4° 漏斗状扩孔与活塞杆侧向三孔均布的复合改良方案; 通过有限元模拟与力学模型校核, 验证了改良结构在 70 MPa 极限压力下的强度安全性。现场试验表明: 改良后活塞组件安全系数满足 $n > 1.5$ 的工程要求; 钢丝起下过程运行平稳, 上提张力平均降低 23.3%, 污物排出能力显著提升, 有效消除了因卡阻引发的作业停滞与张力异常波动。该改良方案在不改变原有密封逻辑的前提下, 有效解决了高压密封与污物排放的技术矛盾, 具有成本低、适配性强等特点, 为提升复杂井况钢丝试井作业可靠性提供了有效的技术途径。

关键词 TRIZ 理论; 钢丝试井; 防喷装置; 顶密封活塞; 卡阻分析; 结构改良; 排污设计

中图分类号: TE932

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.01.008

Analysis and improvement of wireline well testing blowout preventer piston jamming based on TRIZ theory

JIN Yilang¹, YANG Guo¹, JIN Ziyi², CHENG Xiaohu¹, WU Xinglin¹, WANG Yan³

1. Northwest Sichuan Gas District of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Jiangyou, Sichuan 621700, China

2. Sichuan Shale Gas Exploration and Development Company Limited, Chengdu, Sichuan 610051, China

3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: To address the frequent jamming of top sealing pistons caused by debris accumulation in 70 MPa domestic hydraulic blowout preventers under high-pressure, high-temperature and sandy well conditions—which typically results in sealing failures and operational downtime—failure mechanism analysis and structural improvement research were conducted. System boundaries were defined using the TRIZ nine-window method, followed by the construction of functional models and cause-effect chains. Through these analytical tools, “compacted sand shell adhesion, insufficient component clearances, and the absence of drainage channels” were identified as the core factors contributing to jamming. Based on the principles of spatial separation and preliminary action, a composite improvement scheme was proposed, featuring a 4° funnel-shaped reaming of the piston and a lateral three-hole uniform distribution on the piston rod. The structural integrity and safety of the improved design under an ultimate pressure of 70 MPa were validated through finite element simulations and mechanical model verifications. Field trials demonstrate that the safety factor of the improved piston assembly satisfies the engineering requirement of $n > 1.5$. During the wireline tripping process, smooth operation was observed with a 23.3% average reduction in lifting tension and a significant enhancement in debris discharge capacity, effectively eliminating jamming-induced operational interruptions and abnormal tension fluctuations. Without altering the original sealing logic, the technical contradiction between high-pressure sealing and debris discharge was successfully resolved. This improvement is characterized by low cost and high adaptability, providing an effective technical pathway for enhancing the reliability of wireline well testing operations in complex environments.

Keywords: TRIZ theory; wireline well testing; blowout preventer; top sealing piston; jamming analysis; structural improvement; debris discharge design

钢丝试井是油气藏评价与生产动态监测的关键手段,其获取的压力、温度等数据直接决定储量计算与开发方案调整^[1]。70 MPa 国产液压防喷装置作为高压高温井试井作业的核心井口装备,其顶密封活塞的运行稳定性直接制约着工具串起下效率及数据质量。当前国内广泛使用的同类设备多采用密封控制头一级密封设计,缺乏注脂循环回流系统^[2]。在 40~50 MPa 高压及高温工况下,密封盘根受钢丝摩擦与流体挤压产生碎屑,加之井筒砂粒、腐蚀产物在高温下粘附于钢丝表面形成致密砂壳,随钢丝上行堆积于活塞构件的狭小间隙处,最终诱发钢丝卡阻^[3]。值得注意的是,尽管 105 MPa、140 MPa 等高压等级防喷装置已逐步推广,但国内存量最大的仍是 70 MPa 级设备。受限于早期设计理念,此类设备普遍未配置主动除污系统和密封回流系统,在面对井筒污物较多和含砂量较多的复杂钢丝作业工况时。即便配备注脂系统的先进设备,在极端含砂工况下仍面临固结卡阻挑战^[4]。

此类卡阻导致处置成本和非生产等待时间大幅增加,处置不当易导致活塞杆与缸筒内壁的永久性磨损,还会造成密封失效、井口刺漏、环境污染等安全事故。本研究以 TRIZ 理论为核心分析工具,聚焦于钢丝防喷装置顶密封活塞卡阻这一行业共性难题,通过系统分析定位根本原因,设计并验证了一种低成本、易实施的结构改良方案,旨在从设备层面提升作业安全性,为同类技术升级提供参考。

1 基于 TRIZ 的卡阻原因分析

为系统识别顶密封活塞卡阻的根本原因,首先厘清该系统的组成与工作原理,进而运用 TRIZ 系统分析工具(九屏幕法、功能模型与因果链分析)对其进行逐层解析,最终锁定导致卡阻的核心矛盾与关键要因,为后续针对性改良设计提供明确方向^[5-6]。

1.1 顶密封活塞系统组成与工作原理

顶密封液压活塞系统是 70 MPa 液压防喷装置防喷盒的核心功能单元,主要由活塞、活塞杆、支撑 O 环、密封环、液压油腔、柱状盘根及防喷塞等部件组成。其中,活塞构件分为上下两部分,上部为活塞(长 86 mm,直径 $\Phi 18.9$ mm,孔径 $\Phi 5.5$ mm),四周环绕液压油腔;下部为活塞杆(长 43.6 mm,直径

$\Phi 12.6$ mm,孔径 $\Phi 3.6$ mm),下端与柱状盘根直接接触,钢丝在防喷盒内依次穿过防喷塞(铜顶丝)、柱状盘根、活塞杆及活塞通道。活塞构件在防喷盒的位置与活塞构件局部见图 1、图 2。该系统工作原理为:通过操作手压泵向活塞上部液压油腔泵入液压油,产生驱动力推动活塞构件下行,盘根在液压驱动下产生径向接触应力,与钢丝(外径 $\Phi 2.74$ mm)实现密封。该系统额定承压等级 70 MPa,实际使用压力小于 56 MPa,适用于低含硫气井的试井、投捞等作业,核心作用是密封井口高压流体并稳定钢丝起下运行^[7]。

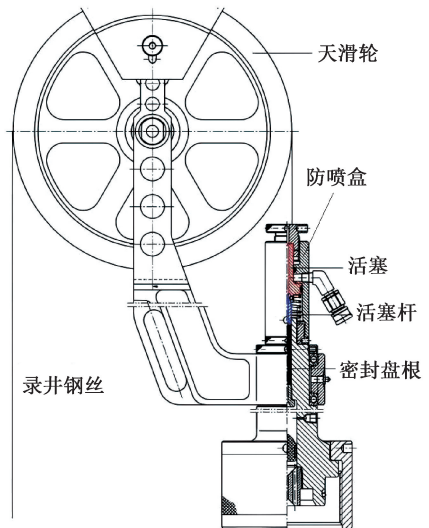


图 1 活塞构件在防喷盒的位置

Fig. 1 Position of the piston component in the blowout preventer box

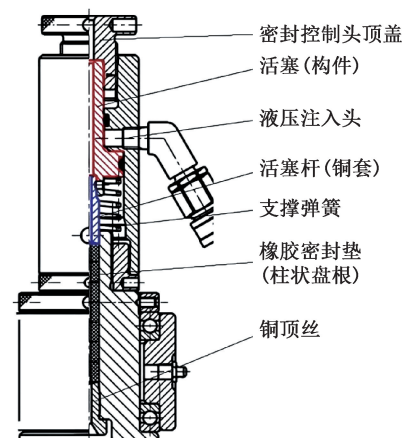


图 2 活塞构件局部放大图

Fig. 2 Partial enlarged view of the piston component

1.2 典型卡阻案例分析

为揭示顶密封活塞卡阻的深层机理,选取川西

地区大兴场 QXZ 气藏 DS-X1 井作为典型研究对象。该井在 2019 年 11 月及 2022 年 1 月、6 月多次发生类似卡阻事件。通过对作业张力曲线、顶密封活塞部件以及污物的微观特征进行关联分析,归纳出以下关键机理^[8]。

1.2.1 张力突变卡阻

由作业数据显示,仪器上起至 4 500 m 时地面张力出现高频的波动,说明了钢丝和密封组件之间已经产生不稳定的摩擦。随着上提深度减小,摩擦阻力呈非线性增长:在 438.5 m 处,以 3 m/min 低速上提时,张力由 0.7 kN 骤升至 2.0 kN (增幅达 185%),且伴随剧烈振动。张力跃升的现象,表明钢丝外径因附着物增加已超出密封间隙容许范围,导致“钢丝-污物-活塞”三者的间隙由滑动摩擦转变为剧烈的机械嵌合与犁削作用,现场通过常规润滑措施(涂抹黄油、柴机油)无法消除硬质颗粒引起的刚性卡阻^[9]。

1.2.2 污物高温固结卡阻

拆解顶密封防喷盒后开展分析,钢丝表面粘附的黑色点状物与黄色细砂(粒径 1~3 mm)并非松散的无序堆积,而是在仪器经长时间的井筒高温(>80℃)与高压流体的作用下测试完成后,污物经脱水固化形成硬度极高的致密砂壳,揭示了卡阻的核心在于污物的物理形态演变^[10]。

经过现场实测发现,附着砂壳后的钢丝的等效直径增至 3 mm 以上,远超活塞杆内孔设计的通过间隙($\Phi 3.6$ mm)。这种“硬质致密砂壳”在通过狭窄通道时,不仅直接堵塞流道,更会导致盘根内孔在此切削作用下孔眼扩大破损,也进一步降低了密封系统的容错能力和可靠性^[11-12]。盘根失效后上部顶密封防喷盒出现泄漏,为维持密封作业人员通过手液压泵推动活塞杆下行以压实盘根。然而这一人为干预措施进一步加剧了机械干涉,使卡阻程度持续升级,最终形成“泄漏-压紧-卡阻加剧”的恶性循环。

1.2.3 结构性缺陷

对该类型国产防喷装置近 10 年的作业数据统计,累计发生遇卡 15 井次、遇阻 76 井次、张力异常 141 井次,故障高发区集中于防喷盒至活塞杆段。相关性分析显示,井筒含砂量与卡阻概率呈显著正相关,出砂井的卡阻频次是常规井的 3.5 倍。这表明现有单通道、小间隙的结构设计在面对高温含砂工况时,缺乏有效的污物容纳与排放空间,存在先

天性的结构适配缺陷^[13]。

1.3 TRIZ 系统分析建模

1.3.1 九屏幕法系统边界界定

运用 TRIZ 九屏幕法构建活塞构件多维模型(见图 3)。当前系统以活塞、活塞杆及密封组件作为核心,承担着液压驱动、密封及导向功能;子系统(防喷盒)通过“驱动-密封-过滤”链实现高压密封和初步除污功能;超系统涵盖 70 MPa 防喷装置整体及高温高压含污环境。时间维演化表明,系统由依赖人工紧固的手动低压结构,向集成注脂循环的一体化系统演进;子系统亦升级为自紧式密封与多通道排污协同结构,旨在解决致密砂壳过滤不足及卡阻难题。超系统则由基础型手动控制向集成远程液控、化学注入及循环除污的复合型系统发展。

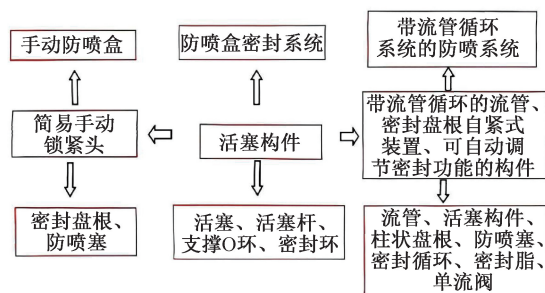


图3 活塞构件系统九屏图

Fig. 3 Nine-screen diagram of piston member system

1.3.2 功能模型与有害功能识别

构建防喷盒密封系统功能模型,明确有益与有害功能。有益功能:液压压紧、O 环支撑及密封阻断等动作有效保障了基础密封性能。有害功能:井口致密污物随钢丝侵入;活塞与钢丝间卡阻力剧增引发振动卡阻;摩擦磨损导致盘根失效。核心不足在于通过能力低:构件间隙小于污物粒径且缺乏排污通道,诱发了“过滤不足-污物堆积-卡阻加剧”恶性循环。系统核心矛盾在于“高压密封需求”与“污物处置能力”的失衡。

1.3.3 因果链分析关键影响因素

追溯卡阻问题传导路径:最终表现为试井钢丝起下过程中工具串卡阻,严重制约了作业效率;直接原因为井内脏污在活塞通道及内部堆积形成机械阻挡;中间原因包括过滤不彻底、构件间隙不足及排污通道缺失;根本因素为盘根快速磨损、高温致污物粘附、孔径设计缺陷及设备缺乏主动除污手段。梳理后确定六大关键影响因素:污物附着钢丝、污物附着构件、活塞孔径过小、排污能力不足、材质硬度及盘根粉末进入。

1.4 核心要因确认

结合现场试验、拆解分析及多井次统计,对六项潜在因素进行验证。确认为核心要因三项:(1) 污物高温粘附:长期出砂井中污物经高温烘干形成致密砂壳,致使常规过滤失效,国产设备遇卡率高达60%;(2) 活塞孔径偏小:活塞杆与活塞内径间隙小于常见污物粒径,拆解证实后部常被污物填满;(3) 活塞杆排污缺失:现有单通道结构无额外排污设计,而具备注脂循环的进口设备遇卡率仅16.7%。排除非要因三项:(1) 污物直接附着:试验证实污物主要源于钢丝携带,无法直接进入活塞上部;(2) 材质过硬:45钢与黄铜组合兼顾强度与密封,软质替换将导致不可逆形变;(3) 盘根粉末:其质地软、粒径小,可顺利通过构件,无单独致卡案例。综上,顶密封活塞卡阻的核心机理为“致密砂壳随钢丝侵入、构件间隙滞留污物、排污通道缺失”三者的协同作用^[14]。

2 改良方案设计与验证

针对防喷盒卡阻成因及结构局限,本研究引入TRIZ理论,在维持原有密封逻辑与外观形态的前提下,设计改良方案以平衡技术、成本与结构约束,重点提升排污能力并缓解卡阻。

2.1 改良设计约束与 TRIZ 原理适配

改良设计遵循三项约束:技术上不增加密封部件,成本上避免新增管路设备,结构上保持外观适配性。据此匹配三类TRIZ原理:(1) 空间分离原理:通过分区设计化解“大孔径排污”与“小孔径护钢丝”的物理矛盾;(2) 预先作用原理:预设排污通道,变被动清理为主动预防;(3) 未达到或过度作用原理:以“有效降低卡阻”为目标,平衡功能效率与系统稳定性。该策略在规避技术风险的同时,精准解决工程痛点。

2.2 核心结构改良方案

2.2.1 活塞4°漏斗状扩孔设计

针对污物滞留问题,采用数控车削工艺将活塞上部内孔加工为4°漏斗状(见图4、图5)。设计保留原 $\Phi 5.5$ mm内孔9 mm基准段及1.4 mm宽支撑环以确保结构强度与轴向压紧力;扩孔段长77 mm,入口端设C0.5倒角(斜角)以防应力集中及划伤钢丝。该设计在不改变密封功能前提下,显著增大污物暂存空间,并利用漏斗效应引导污物侧向流动。

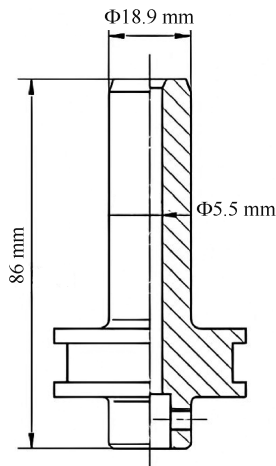


图4 原活塞结构图

Fig. 4 Original piston structure diagram

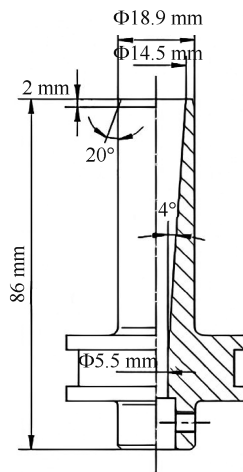


图5 改进后活塞结构图

Fig. 5 Improved piston structure diagram

2.2.2 活塞杆侧向三孔排污设计

针对排污能力不足,在活塞杆圆周方向呈120°均布开设三个 $\Phi 3.6$ mm侧向排污孔(见图6、图7)。孔径与内孔直径一致以避免台阶,孔口经去毛刺处理确保钢丝安全。三孔均布设计保证了钢丝任意旋转角度下均有排污通道,提升了排污的及时性与可靠性。

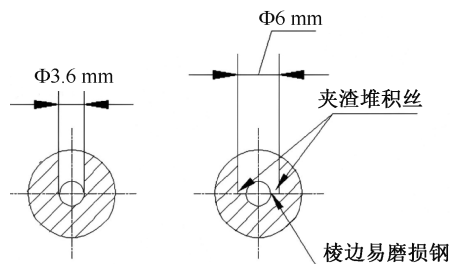


图6 活塞端面扩孔剖面图

Fig. 6 Cross-sectional view of piston end face expansion

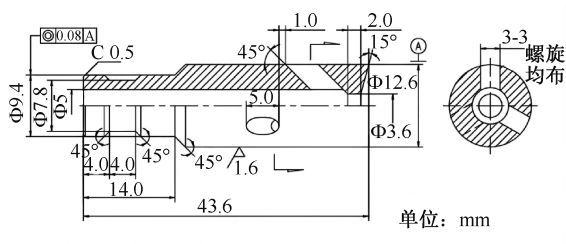


图7 活塞侧面开内孔效果图

Fig. 7 Structure of internal hole on piston side

2.2.3 高压工况下的密封与摩阻平衡验证

有限元模拟表明,在 40~50 MPa 工况下,改良后盘根接触应力由 78.3 MPa 降至 73.4 MPa (降幅 6.2%),仍高于 70 MPa 额定承压所需的安全阈值 (≥ 65 MPa),且背压工况下无泄漏,密封带完整性良好。现场试验(B井,井口压力 42~48 MPa)显示,改良后上提张力降低 20%且全程无振动。机理分析表明,侧向排污孔及时排出盘根下端积存污物,消除了“污物-高压”协同导致的局部应力集中,使盘根始终处于弹性工作区,有效抑制了附加摩阻。

2.3 结构强度校核与安全性验证

为验证改良方案在高压工况下的可靠性,基于 70 MPa 极限工作压力(P_0)构建力学模型进行强度校核。井内高压流体作用于盘根产生轴向挤压力 F_0 ,该力经由盘根传递至活塞及活塞杆组件,是结构失效的主要载荷源。计算得 $F_0 = P_0 \cdot S_{\text{seal}} \approx 8.72$ kN (S_{seal} 为盘根有效密封面积)。

2.3.1 活塞组件强度校核

活塞采用 45#钢调质处理(屈服强度 $\sigma_s = 716$ MPa)。原始结构:内径 $d_1 = \Phi 5.5$ mm,外径 $D_1 = \Phi 18.9$ mm。计算得其抗内挤压极限强度 $P_{n1} = 651.8$ MPa,实际工作应力 $\sigma_1 = F_0/S_1 \approx 107.9$ MPa,安全系数 $n_1 \approx 6.0$ 。改良结构:为增大排污间隙,内孔扩至 $d_2 = \Phi 14.5$ mm(带 4°倒角过渡),最薄壁厚处成为受力薄弱点。校核显示,其抗内挤压极限强度降至 $P_{n2} = 159.4$ MPa,实际工作应力 $\sigma_2 = F_0/S_2 \approx 77.6$ MPa。结论:尽管改良后截面削弱导致极限强度下降约 75%,实际工作应力同步降低,且 $\sigma_2 < P_{n2}$,安全系数 $n_2 \approx 2.05$,仍满足高压密封结构的强度储备要求(通常 $n \geq 1.5$)。

2.3.2 活塞杆组件强度校核

活塞杆选用 QA19-4 青铜(挤压屈服强度 $\sigma_s = 300$ MPa)。原始结构:中心通孔 $d_3 = \Phi 3.6$ mm,外径 $D_3 = \Phi 12.6$ mm。抗内挤压极限强度 $P_{n3} = 159.2$ MPa,实际工作应力 $\sigma_3 \approx 76.2$ MPa,安全系数

$n_3 \approx 2.09$ 。改良结构:增设 $\Phi 3.6$ mm 径向排污侧孔,导致有效承载截面 S_4 进一步减小。计算得实际工作应力上升至 $\sigma_4 \approx 88.7$ MPa。结论:开孔虽使工作应力增加约 16.4%,但 σ_4 仍远低于材料极限强度 P_{n3} ,修正后的安全系数 $n_4 \approx 1.7$,处于安全区间。

2.3.3 综合安全性评价

校核结果表明,改良设计通过“空间分离”原理增大排污通道时,虽不可避免地削弱了构件截面并降低了理论极限强度,但各关键部位的实际工作应力均控制在许用范围内,且保留了充足的安全裕量 ($n > 1.5$)。结合 40~50 MPa 实际作业工况的模拟测试,改良结构未出现塑性变形或密封失效现象。该验证证实了改良方案在解决“排污-卡阻”矛盾的同时,并未牺牲系统的结构完整性与高压安全性,具备工程推广应用条件。

3 现场应用

在完成活塞构件的结构改良与强度验证后,为检验方案的实际工程价值,开展了系统的现场应用试验。通过对比改良前后关键性能指标,重点评估其在真实作业环境下的排污效能与卡阻抑制能力,为技术推广提供数据支撑与实践依据。

3.1 现场试验设计与实施

现场试验选取了 3 口井进行。为精确评估改良效果,试验严格控制变量:在同一口易卡阻井的相同深度段(2 000~3 500 m),采用相同的工具串与起下速度(40~45 m/min),分别使用改良前、后的活塞构件进行作业对比。关键参数“上提张力”的测量,通过安装于地滑轮基座处的数字张力传感器实时采集,采样频率为 10 Hz,数据经由采集系统同步记录,确保了数据的客观性与可比性。每口井累计作业时间不少于 8 h,作业后立即拆解防喷盒,检查并记录活塞、活塞杆内部及液压腔室的污物残留情况。

3.2 验证结果

3.2.1 运行稳定性与排污效果

改良后,3 口易卡阻井的钢丝在全程起下中均未出现肉眼可见的振动或弹跳现象,运行平稳。拆检发现,污物主要积聚在活塞杆侧向排污孔周围及液压腔室底部,活塞通道内无明显堆积。定量收集排出的污物,A、B、C 三口井的排出量分别比改良前平均增加 3 至 4 g,且污物形态多呈流动态,验证了改良结构的有效排污能力。

3.2.2 上提张力降幅统计

张力数据显示改良效果显著:A井上提张力由2.9 kN降至2.2 kN(降幅24%),B井由3.0 kN降至2.4 kN(降幅20%),C井由2.3 kN降至1.7 kN(降幅26%),平均降幅达23.3%。张力下降直接反映了钢丝运行阻力的减小,证明了卡阻风险得到根本性缓解。改良后活塞杆半剖图效果如下(见图8)。

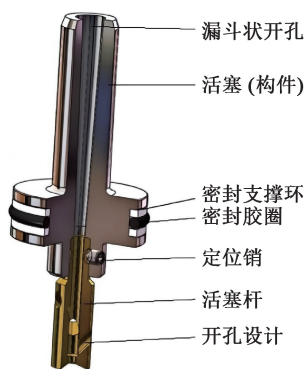


图8 改良后活塞杆半剖图效果对比

Fig. 8 Comparison of modified piston rod half-section effect

3.3 成本效益与行业推广价值

成本效益方面,改良方案制作成本低,经济性显著。直接效益体现在有效规避因卡阻引发的应急处置成本,并显著降低对外委作业的依赖;间接效益则表现为设备运行效率与可用率的提升,有效减少因卡阻导致的井口占用及生产中断,保障试井作业的连续性与气井生产的稳定性。行业推广价值方面,川渝油气田及国内同类区域有多套70 MPa国产液压防喷装置,其卡阻问题具有共性,改良方案无需改变设备整体结构,仅替换活塞构件即可实现升级,适配性强,推广应用后可有效解决行业共性痛点。

3.4 技术局限性与优化展望

本研究虽以70 MPa典型设备为对象,但所揭示的“固结砂壳-微小间隙”卡阻机理及基于TRIZ的空间分离改良策略,本质上解决了密封与排污的物理矛盾,其设计逻辑不依赖于特定的压力等级,经强度校核适配后,完全适用于同类高压级别设备的升级改造,具有显著的行业通用性与推广价值。本次改良属于“被动排污”设计,其效果依赖于钢丝起下带来的机械刮带作用,在污物量极大或粘性极强的井况下可能存在局限。此外,方案尚未在高含硫、高矿化度或富含凝析油的复杂井液环境中进行长期验证,这些介质的腐蚀性或结垢倾向可能对排

污孔的长期通畅性构成挑战。建议在极端高含砂或高杂质工况井作业后,可尝试使用低压油脂或清洗液进行简易冲洗维护,以防微杜渐。

针对行业内提出的“采用光面电缆施工”替代方案,本研究分析认为其无法根本解决此类卡阻问题。其根本原因为:卡阻的核心机理并非单纯源于钢丝表面粗糙度,而是压力恢复试井及等时试井过程中含砂流体在缆体表面经长时间高温作用下发生脱水固化,形成了硬度极高的致密砂壳。光面电缆虽初始摩擦系数较低,但其较大的比表面积更易吸附污物,且在高温固化后同样会形成尺寸大于密封间隙的硬质外壳。因此,无论采用钢丝还是光面电缆,只要缺乏有效的排污通道与间隙匹配设计,均无法避免此类结构性卡阻。

优化展望包括:(1)源头治理:进一步提升防喷塞与盘根的材料与结构设计,增强前端过滤能力;(2)主动-被动结合:未来探索将本被动排污结构与主动注脂循环系统进行耦合,形成协同防卡机制;(3)长期监测:建立改良部件的长期跟踪与定期更换标准;(4)拓展验证:在更广泛的复杂井况(如含硫气井)中开展试验,积累数据,明确方案的适用边界。

4 结论

(1)基于此类钢丝作业卡阻情况的多场耦合机理,明确了污物高温固化形成的致密砂壳与活塞组件的狭窄间隙不匹配,是诱发机械卡阻的决定性因素。运用TRIZ理论提出了基于空间分离原理的结构创新方案。创新设计了4°漏斗状扩孔+侧向三孔均布的复合结构,在保障密封和结构可靠性的同时大幅提升过流排污能力。

(2)验证改良方案后的工程实效性与经济性。经强度校核和现场试验双重验证,改良后活塞组件安全系数满足 $n > 1.5$ 的工程要求,钢丝上提运行张力平均降低23.3%。该方案无需改动主体设备,仅通过关键部件改良替换即可实现无缝升级,具有低成本、高适配性的推广优势。

(3)明确技术适用边界与维护策略。该被动排污机制在常规出砂井况下效果显著,但在高黏度、强腐蚀等极端复杂井液中仍存在孔隙堵塞风险。后续应建立“定期冲洗维护+极端工况主动注脂耦合”的长效运行机制,为智能化防喷装备研发提供理论依据与技术路径。

致谢:感谢中国石油西南油气田分公司川西北气矿同意本文公开发表,感谢各级领导和同事在论文编写过程中提供的帮助。

参考文献

- [1] 张明. 井下钢丝试井作业过程中遇阻遇卡判断的全新理念[J]. 油气井测试, 2015, 24(5): 64-65.
ZHANG Ming. New concept for the judgment of resistance and sticking during downhole wireline well testing operation [J]. Well Testing, 2015, 24(5): 64-65.
- [2] 胡厚猛, 孙永涛, 刘花军, 等. 海上热采井防污染工艺管柱及配套工具[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(1): 118-122.
HU Houmeng, SUN Yongtao, LIU Huajun, et al. Pollution prevention process string and matching tools for offshore thermal recovery wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(1): 118-122.
- [3] 关明军. 钢丝井下工具在深层气井的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(23): 77-78.
GUAN Mingjun. Application of wireline downhole tools in deep gas wells [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(23): 77-78.
- [4] 李会会, 周生福, 刘练, 等. 塔河油田试井作业遇阻卡原因及防治措施[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 66-72.
LI Huihui, ZHOU Shengfu, LIU Lian, et al. Causes and preventive measures of sticking during well testing operation in Tahe oilfield [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 66-72.
- [5] 王江红, 冯辉霞, 谭琳, 等. TRIZ 理论在提高石油钻井平台涂料耐腐蚀性方面的应用[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 299-306.
WANG Jianghong, FENG Huixia, TAN Lin, et al. Application of TRIZ theory to improve the corrosion resistance of oil rig coatings [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(1): 299-306.
- [6] 唐历. 基于多方法融合的复杂冲压模具系统化创新设计与优化[J]. 机械管理开发, 2026, 41(2): 246-247.
TANG Li. Systematic innovation design and optimization of complex stamping dies based on multi method integration [J]. Mechanical Management and Development, 2026, 41(2): 246-247.
- [7] 窦明洁. 注水用井下工具对套管柱的力学影响分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022: 1-72.
DOU Mingjie. Mechanical influence analysis of downhole tools for water injection on casing string [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2022: 1-72.
- [8] 王存飞, 刘建宇, 胡勇. WC35Y 排水泵车转向机构卡阻失稳分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(增刊 2): 304-308.
WANG Cunfei, LIU Jianyu, HU Yong. Analysis and stuck of steering mechanism of WC35Y drainage pump truck [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50 (Suppl. 2): 304-308.
- [9] 黄云, 刘清友, 赵华, 等. 一种基于能量法的三维弯曲井眼管柱力学模型研究[J]. 钻采工艺, 2012, 35(5): 80-82.
HUANG Yun, LIU Qingyou, ZHAO Hua, et al. A study on mechanical model of 3D curved borehole string based on energy method [J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(5): 80-82.
- [10] 邹鹏, 石俊亮, 张龙, 等. 连续油管金属减摩剂减摩性能与机理[J]. 应用化工, 2021, 50(增刊 2): 201-206.
ZOU Peng, SHI Junliang, ZHANG Long, et al. Anti-friction performance and mechanism of metal friction-reducing agent for coiled tubing [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(Suppl. 2): 201-206.
- [11] 刘昱彤, 樊朋飞, 姜雪清, 等. 油基钻井液用抗高温可酸溶高滤失堵漏剂的研制及应用[J]. 钻井液与完井液, 2026, 43(1): 51-56.
LIU Yutong, FAN Pengfei, JIANG Xueqing, et al. Development and application of a high temperature high filtration rate acid soluble lost circulation agent for oil based drilling fluids [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2026, 43(1): 51-56.
- [12] 徐胜玲, 王辉, 张波. 修井管柱及井下工具通过能力计算——以吴起油田 W41-534 井为例[J]. 非常规油气, 2019, 6(4): 99-102.
XU Shengling, WANG Hui, ZHANG Bo. Calculation of passing ability of workover string and downhole tools——taking well W41-534 in Wuqi oilfield as an example [J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4): 99-102.
- [13] 杨国. 试井作业复杂情况分析与技术措施优选[J]. 油气井测试, 2012, 21(4): 69-70.
YANG Guo. Complex situation analysis and technical measures optimization of well testing operation [J]. Well Testing, 2012, 21(4): 69-70.
- [14] 平恩顺, 周大龙, 赵大明, 等. 带压作业钢丝投送电液伺服释放式堵塞器工艺技术[J]. 油气井测试, 2025, 34(2): 23-28.
PING Enshun, ZHOU Dalong, ZHAO Daming, et al. Technology of electro-hydraulic servo release plug conveyed by wireline in pressure operation [J]. Well Testing, 2025, 34(2): 23-28.

编辑 方志慧

第一作者简介:金毅浪,男,1989 年出生,工程师,2011 年毕业于重庆科技学院石油工程专业,现从事油气田开发及试修井工艺管理工作。电话:0816-3612868,18780558799,Email:304162784@qq.com。通信地址:四川省江油市川西北气矿江油应急抢险维修大队,邮政编码:621700。