

基于多物理场耦合的高压页岩气井测试流程防刺技术

李运辉, 陈超, 杨树鑫, 程乾, 李宁, 蒋才虎

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川德阳 618000

项目支持: 中石化石油工程重大专项课题“川南超深层页岩气压裂提效关键技术研究与应用”(SG2102-03K)

引用: 李运辉, 陈超, 杨树鑫, 等. 基于多物理场耦合的高压页岩气井测试流程防刺技术[J]. 油气井测试, 2026, 35(1): 18-27.

Cite: LI Yunhui, CHEN Chao, YANG Shuxin, et al. Erosion-resistant technology for high-pressure shale gas well testing processes based on multiphysics coupling[J]. Well Testing, 2026, 35(1): 18-27.

摘要 为解决超深层页岩气井测试阶段因高速含砂流体导致地面流程刺漏频发、作业风险高的难题, 基于多物理场耦合理论, 建立“管道压降-节流气穴-固粒冲蚀”一体化模型, 提出临界压力比 $P_1/P_2 < 3.5$ 的二级节流判据, 研制 105 MPa+70 MPa 两级固定式节流阀和硬质合金衬里油嘴, 形成了一套超高压测试流程防刺技术。在川南 ZY2 井等 4 口井开展 172 h 连续监测现场试验, 结果表明, 二级节流使气穴系数由 0.18 提至 0.32, 油嘴刺蚀速率从 0.42 mm/h 降至 0.08 mm/h, 平均单井节流阀刺漏数量由 3 支减至 0.5 支, 作业周期缩短 1.5 d, 节约成本 12 万元。该技术为超深层页岩气安全高效试气提供了理论依据与工程模板, 可直接支撑川南-渝西国家页岩气示范区下一步规模建产。

关键词 超深层页岩气; 多物理场耦合; 高压; 测试流程; 二级节流; 防刺蚀; 临界压力比; 川南-渝西

中图分类号: TE273

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.01.003

Erosion-resistant technology for high-pressure shale gas well testing processes based on multiphysics coupling

LI Yunhui, CHEN Chao, YANG Shuxin, CHENG Qian, LI Ning, JIANG Caihu

Downhole Operation Branch, Sinopec Southwest Petroleum Engineering Company, Deyang, Sichuan 618000, China

Abstract: To address the critical challenges of frequent erosion leakage and high operational risks in surface testing processes of ultra-deep shale gas wells—primarily caused by high-velocity sand-bearing fluids—an integrated model encompassing “pipe pressure drop, choking cavitation, and solid particle erosion” was established based on multiphysics coupling theory. A dual-stage choking criterion, defined by a critical pressure ratio of $P_1/P_2 < 3.5$, was proposed. Furthermore, a 105 MPa + 70 MPa two-stage fixed choke valve along with a carbide-lined nozzle were developed, forming a comprehensive erosion-resistant technology suited for ultra-high pressure testing processes. Field trials involving 172 hours of continuous monitoring were conducted across four wells, including the ZY2 well in Southern Sichuan. The results indicate that the implementation of dual-stage choking increased the cavitation coefficient from 0.18 to 0.32, while the nozzle erosion rate was significantly reduced from 0.42 mm/h to 0.08 mm/h. The average frequency of choke valve leakages per well decreased from 3 to 0.5 units, effectively shortening the operational cycle by 1.5 days and saving 120,000 yuan in costs. This technology provides a theoretical foundation and engineering template for the safe and efficient testing of ultra-deep shale gas, directly supporting the next phase of large-scale production buildup in the Southern Sichuan-Western Chongqing national shale gas demonstration area.

Keywords: ultra-deep shale gas; multiphysics coupling; high pressure; testing process; dual-stage choking; erosion resistance; critical pressure ratio; Southern Sichuan-Western Chongqing

在全球能源需求持续增长的背景下,页岩气作为重要的非常规天然气资源,其开发技术的创新与突破已成为能源领域的关键课题。目前,四川盆地超深层页岩气整体勘探程度相对较低^[1],中石油和中石化在该地区筇竹寺组共进行了 14 井次的开发,平均气藏埋深 4 700 m,地层压力高达 96.07 MPa,

地层温度 141 ℃,测试均获得较高产能,证实超深层筇竹寺组层系具有巨大的勘探开发潜力。但在超深、高压、高温的复杂地质条件下,页岩气田的安全高效开发面临严峻挑战,其中,地面测试在开发工艺实施过程中作为关键环节,其重要性日益凸显^[2]。然而,在面对井口高压、高温、高产、地层出

砂等极端工况下的超深层页岩气藏测试作业时,采用除砂器、合金材质等传统防刺蚀技术已不能满足现场需求,测试流程刺漏不仅带来极大安全隐患,同时也制约生产时效的提升^[3]。因此,开展测试流程防刺蚀技术研究,解决测试流程恶劣工况下刺漏难题,保障超深层页岩气安全高效开发意义重大。

目前国内外学者针对节流通道压降问题主要采用实验研究与数值模拟相结合的方法,研究方向主要为三类:流动特性分析、结构优化设计及冲蚀损伤机理。在流动特性方面,魏存祥等^[4]、王国荣等^[5]通过流场可视化手段揭示了节流元件内部复杂的流动状态;李润等^[6]、HAUGENK等^[7]开展的结构优化研究则聚焦于节流装置几何参数对流动特性的影响规律;而冲蚀损伤方向已形成较为系统的研究体系,涉及固相颗粒冲蚀机制^[8-9]、管线磨蚀防护^[10-11]以及腐蚀机理^[12]等多个维度。同时,现有研究仍存在显著的理论空白:对管道压降与节流气穴的耦合作用机制缺乏系统性解析;关于油嘴孔径、管线尺寸等关键参数与压降特征的定量关系尚未建立可操作的数学模型。康国强等^[13-14]对油嘴冲蚀现象进行了初步观测,刘飞等^[15]、何恩鹏等^[16]在除砂技术领域开展研究,但以上研究未能给出定性结论,未能深入揭示结构参数-流动特性-压降特征的动态关联机制。综上,现有成果难以有效指导现场作业中的参数优化与风险防控,亟待建立基于高温-高压-高流速多物理场耦合的压降预测模型与工程决策支持系统。

针对超深层页岩气(垂深>4 500 m、井口压力≥78 MPa)恶劣测试工况,地面测试流程易刺蚀难题仍采用传统除砂技术已无法有效解决。基于此背景,本文将系统地探讨管道压降、节流气穴、油嘴损坏力学分析、油嘴冲蚀分析以及二级节流控制技术,并结合实际案例,深入评估这些技术在超深高压高温页岩气体积压裂井测试过程中的应用效果,研究表明,二级节流技术可同步解决单级节流压降过大引发的油嘴冲蚀磨损和天然气高压差节流冰堵现象^[17],也能保障油气井压力安全可控。测试流程防刺蚀技术的研究为超深层高压页岩气的高效开发提供理论支撑和实践指导。

1 节流模型建立

针对放喷测试地面流程,围绕管道压降、节流气穴及油嘴损坏三大核心问题,明确两类流动形式

与多段压降构成,推导压降计算关系;界定气穴危害与表征参数,提出防治措施;剖析油嘴损伤机制并建立流动模型,给出防护方案,为流程优化与运维提供支撑。

1.1 过管道压降分析与计算

放喷测试过程中,流体在地面流程中的流动可分为“管流”、“节流”(过油嘴)两大种类型。主要存在井口至节流油嘴压降、节流油嘴压降、节流油嘴至三相分离器压降和放喷管线压降与摩阻(拖曳力)。

介质沿地面管路输送,由流动摩擦产生的压降 Δp 涉及以下关键参数:管体直径 d 、流体运动速度 v 、物质密度 ρ 、黏性参数 μ 、管线延伸 l 、管壁粗糙特征 Δ ,上述各量均能以质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 和时间 $[T]$ 三个基本维度表示,包含质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 以及时间 $[T]$ 三个基本量纲,见表1所示。

表1 各物理量的量纲

物理量	符号	单位	量纲
管路直径	d	m	L
管中平均流速	v	m/s	LT^{-1}
流体密度	ρ	kg/m ³	ML^{-3}
压降	Δp	MPa	$ML^{-1}T^{-2}$
流体动力黏度	μ	Pa·s	$ML^{-1}T^{-1}$
管路长度	l	m	L
管壁粗糙度	Δ	m	L

从量纲分析出发,不同量纲的对应性表现的函数关系为

$$\Delta p = f(d, v, \rho, \mu, \Delta) \quad (1)$$

选择 d, v, ρ 作为基本物理量,它们符合基本单位制的两点要求,可得表达式为

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{\Delta p}{d^{x_1} v^{y_1} \rho^{z_1}} \\ \pi_2 = \frac{\mu}{d^{x_2} v^{y_2} \rho^{z_2}} \\ \pi_3 = \frac{l}{d^{x_3} v^{y_3} \rho^{z_3}} \\ \pi_4 = \frac{\Delta}{d^{x_4} v^{y_4} \rho^{z_4}} \end{cases} \quad (2)$$

物理方程量纲一致性原则,得出下式

$$\begin{cases} ML^{-1}T^{-2} = (L)^{x_1}(LT^{-1})^{y_1}(ML^{-3})^{z_1} \\ ML^{-1}T^{-1} = (L)^{x_2}(LT^{-1})^{y_2}(ML^{-3})^{z_2} \\ L = (L)^{x_3}(LT^{-1})^{y_3}(ML^{-3})^{z_3} \\ L = (L)^{x_4}(LT^{-1})^{y_4}(ML^{-3})^{z_4} \end{cases} \quad (3)$$

解得参数 x, y, z 的结果, 推出关系式: $\pi_1 = \frac{\Delta p}{v^2 \rho}$,

$$\pi_2 = \frac{\mu}{d v \rho}, \pi_3 = \frac{l}{d}, \pi_4 = \frac{\Delta}{d}。$$

将所有的 π 值代入公式(1), 即代入: $\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4)$, 可得无因次表达式为

$$\frac{\Delta p}{v^2 \rho} = f\left(\frac{\mu}{d v \rho}, \frac{l}{d}, \frac{\Delta}{d}\right) \quad (4)$$

因为水平等直径管中流体的压力损失: $h_f = \frac{\Delta p}{\gamma}$, 令 $Re = \frac{v d}{\nu} = \frac{v d \rho}{\mu}$, $\gamma = \rho g$ 则有

$$h_f = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{\nu^2}{g} f\left(\frac{1}{Re}, \frac{l}{d}, \frac{\Delta}{d}\right) \quad (5)$$

式中: h_f 为沿程水头损失, m; γ 为不可压缩流体的重度, N/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; Re 为雷诺数, 无量纲; l/d 为管路长径比, 无量纲。

鉴于沿程损失与管道长度 l 呈正相关, 和 d 的大小成反比关系, 从而 l/d 可从函数符号外移, 从数学上看, 雷诺数 Re 的函数与反函数等价, 为采用动能形式表示, 分母乘以 2 的调整不会干扰公式的组成, 故

$$h_f = f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right) \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

式中: 由 Darcy-Weisbach 方程可知 λ 为沿程损失系数, 无量纲; λ 采用实验获取(表 2), $\lambda = f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right)$ 。

因为管中的流体重度是一定的, 所以压降也就取决于管长、管径、流体流速和 λ , 其中 λ 在层流和紊流中的决定因素也是不同的。五个特征明显的阻力区域构成了尼古拉兹实验中沿程损失系数 λ 的变化规律, 各区段的范围定义与 λ 计算关系式见表 2。

表 2 五个区的范围与 λ 计算公式

Table 2 Range of five regions and λ calculation formula

阻力区	范围	λ 的理论或半经验公式	λ 的半经验公式或层流区
层流区	$Re < 2320$	$\lambda = \frac{64}{Re}$	$\lambda = \frac{75}{Re}$
临界区	$2320 < Re < 4000$		$\lambda = 0.0025 Re^{\frac{1}{2}}$
光滑管紊流区	$4000 < Re < 22.2 \left(\frac{d}{\Delta}\right)^{\frac{8}{7}}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8$	$Re < 10^5, \lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$ $10^5 < Re < 3 \times 10^6$ $\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}$
过渡区	$22.2 \left(\frac{d}{\Delta}\right)^{\frac{8}{7}} < Re < 597 \left(\frac{d}{\Delta}\right)^{\frac{9}{8}}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg\left(\frac{\Delta}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}}\right)$	$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0.25}$
粗糙管紊流区	$Re > 597 \left(\frac{d}{\Delta}\right)^{\frac{9}{8}}$	$\lambda = \frac{1}{\left[2 \lg\left(3.7 \frac{d}{\Delta}\right)\right]^2}$	$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0.25}$

注: 混合长度理论、速度分布公式与实验数据三者共同支撑了半经验公式的推导, 其预测结果较为可靠, 但模型稍显繁冗, 表格最右列的经验公式误差较大, 但计算过程简单高效。

层流的速度是抛物线的规律, 流体在起始段的内摩擦力大于完全扩展了的层流中的流体的内摩擦力, 反映在 λ 上则是 $\lambda = A/Re$, 在类似于液压传动的短管中, 管中出现的层流也处于起始段之内, 若用 $\lambda = 64/Re$ 计算结果会偏低, 若用 $\lambda = A/Re$ 计算会更加准确。层流起始段的长度为, 如果 $l > L$, 则起始段的影响可以忽略不计; 如果 $l < L$, 则计算沿程压力损失的公式为: $h_f = A/Re \cdot l/d \cdot v^2/2g$, A 为实验值。

实际作业中, 为便于地面流程压降分析, 放喷测试前准确了解油嘴管汇压力, 为油嘴和测试孔板大小的选择提供依据。流程管线尽可能平直, 除节

流油嘴外流通管径尽可能保持一致, 避免过多的变径和变向造成附加压力损失, 影响压降分析。

1.2 节流气穴分析及其防止

在流体运动过程中, 当遭遇压力下降时, 伴随而来的气泡生成现象被定义为气穴效应^[18]; 气穴中的气体可以是空气或液体的蒸汽。当液体内的压力下降至特定点, 即该特定流体的空气分离压力阈值时, 气体便开始从流体介质中析出, 并以气泡的形式得以分离与显现。在管道系统中, 局部收缩或扩张区域(见图 1 中标识为 B 区的部分)会导致气穴现象的发生。这一现象不仅极大地缩减了管件的使用寿命, 还可能诱发气蚀效应, 对管道结构造

成更为严重的损害。气蚀现象会导致结构材料表面持续侵蚀,形成微小凹坑,其严重程度甚至可能引发地面工艺流程中的弯头、管道以及油嘴出现穿透性泄漏。鉴于此,开展针对节流气穴成因及其抑制策略的专门研究显得尤为必要。

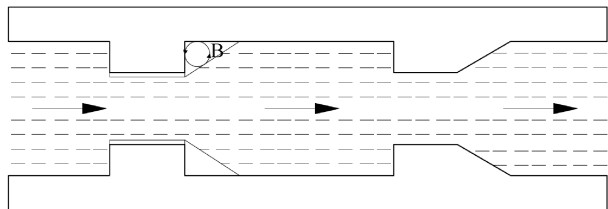


图1 管道局部收缩节流

Fig. 1 Partial contraction flow restriction in pipeline

在管道系统内,当返排液以高速流动时,流速较高的区域呈现出较低的压力状态。一旦该压力降至等于或低于对应工作温度下液体与空气的共沸点所决定的分离压力时,原本溶解于返排液中的空气便开始释放,进而形成气泡。气泡于返排液携带下进入高压环境后,受周围高压的压缩作用,其体积呈现出急剧减小的趋势直至溃灭,这一过程导致局部区域内的压力与温度显著升高,从而会对管道组件产生极其严重的损害效果。气穴现象可细分为三个区域:无气穴区域、气穴转移地带以及显著气穴区域^[19]。

(1) 节流气穴分析

一般可用节流气穴系数来描述气穴发生程度及性质。节流气穴系数 δ 可用下式表达为

$$\delta = \frac{P_2 - P_c}{\rho U_2^2 / 2} = \frac{P_2 - P_c}{P_1 - P_2} \quad (7)$$

在各压力值均用绝对压力表达后,取 $P_c = 0$,公式(7)可简化为

$$\delta = \frac{P_2}{P_1 - P_2} = \frac{1}{P_1/P_2 - 1} \quad (8)$$

式中: δ 为节流气穴系数,无量纲; P_1 为节流油嘴前压力(绝对压力),MPa; P_2 为节流油嘴后压力(绝对压力),MPa。

由公式(8)可知,压力比 P_1/P_2 是决定气穴系数的关键参数。当 P_1/P_2 的比值增大时, δ 值减小,这表明节流现象更容易引发气穴效应。在确保 P_1 至 P_2 区间内参数维持恒定的情况下,通过提升背压 P_2 的设定,能够显著增强节流气穴系数 δ 值,从而大幅度降低气穴效应发生的概率。研究表明^[20]:防止气穴发生的极限气穴系数 $\delta_{\max} = 0.4$,当

$$\delta_{\max} = \frac{1}{P_1/P_2 - 1} > 0.4 \quad (9)$$

由公式(9)可得: $P_1/P_2 < 3.5$

对不同的节流油嘴,其极限背压 $P_{2\max}$ 可依据下式而定

$$P_{2\max} = 2C_v^2 C_e \frac{A_0}{A} \left(1 - \frac{C_e A_0}{A}\right) P_1 \quad (10)$$

式中: C_v 为节流油嘴流速系数,无量纲; C_e 为节流油嘴收缩系数,无量纲; A_0 为节流油嘴过流面积, m^2 ;A为节流油嘴下游断面积, m^2 。

由公式(10)可见,节流油嘴前后压差对气穴的效应受节流面积大小制约,若流量维持不变,节流面积占比缩减,油嘴前后压力落差加剧,因此气穴生成倾向增强。

流场是否存在气穴形成,主要看定义的球形气穴个数 σ

$$\sigma = P_a / (P_n - P_a) \quad (11)$$

式中: σ 为球型气穴数,无量纲; P_a 为环境压力,MPa; P_n 为油嘴入口压力,MPa。

公式(11)表明,调节 P_a 或 P_n (射流速度)会改变 σ 值,若这些参数达到某个临界点,流场临界点出现微米级气泡气穴现象,我们采用初始气穴这一术语,此时 σ 值定义为初始气穴数 σ_1 ,若 P_a 或 P_n 取其他非默认值时,若公式(11)所计算的 σ 值超出 σ_1 值,流场内气穴现象消失,若测量值小于 σ_1 ,该参数强弱与 $\sigma_1 - \sigma$ 的差成正比,因而常采用改变 P_n 值的方式调节气穴强度。

(2) 气穴的防止方法

① 调定背压

为了有效预防气穴现象,合理的配置节流孔径与管道截面面积的比例至关重要,但更重要的是精确设定背压水平。不发生气穴的极限背压(绝对压力)为

$$P_{2\max} = 1 + 0.35(P_1 - 1) \frac{A_0}{A} \quad (12)$$

基于公式(12)可知,气穴现象的消除与进口压力 P_1 及面积比 A_0/A 密切相关。在面对有高进口压力情况时,为确保背压维持适宜以预防气穴与气蚀现象,可实施二级或三级节流(即减压)措施。

采取背压强化来消除气穴的技术,气穴现象的抑制需要采用多级串联的节流油嘴,控制总节流效果始终一致,将压差分配至各节流油嘴,各油嘴压差始终符合安全运行要求,阻断气穴现象的生成机

制,以此规避气穴问题的出现。

②选择合适的油嘴材料

要防止气穴的破坏,在选材上要选用性能好的材料如硬质合金,并需要改进结构使气蚀的产生及其危害降至最低。

③分级压降

采用采用串联方式连接多个节流油嘴,多油嘴串联分担进出口压差,分散降低油嘴两端的压力差, σ 值变大,由此降低油嘴的损耗,若进出口压力比值呈减小趋势, σ 值越大,抗气蚀效果越好,若实施两级节流方案,系统总压差由两个油嘴协同分担,各级进出口的压力比值下降, σ 值变大,该方案比单级节流更能有效抵御气蚀。

1.3 流体过油嘴流动及油嘴损坏力学分析

流体中的颗粒对管壁的破坏如图2所示,主要发生在A区、B区和C区。在A区颗粒高速旋转冲击、磨蚀管壁,最终造成该区域被破坏。在C区颗粒破坏管壁主要是因为颗粒高速冲击的作用,即力 F' (其可分解为垂直方向的法向冲击力 F_1 和水平方向的剪切力 F_2)。在B区会有气穴现象的发生,也会破坏管壁。下面对颗粒在区域中的破坏作用逐一分析。

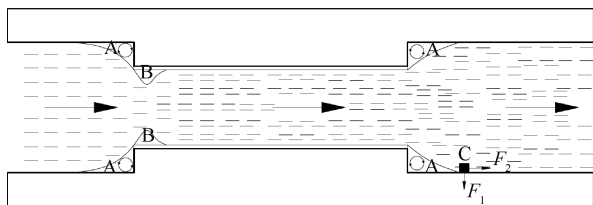


图2 流体过油嘴流动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fluid flow through an oil nozzle

(1) 颗粒的圆周运动磨损管壁

在A区,管壁磨损由颗粒的圆周运动引起,由于 $F=ma$ 可知,管壁所受磨损力与颗粒质量及加速度密切相关,因此当颗粒质量恒定时,降低加速度能有效减少管壁磨损。由公式

$$\alpha = \sqrt{\alpha_t^2 - \alpha_n^2} = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)} \quad (13)$$

若要减轻A区磨损,应减小颗粒速度或增加其圆周半径,从工程简便易行角度出发,故只能对颗粒流速实施调控,即采用特定条件来约束流速。

颗粒在A区作圆周运动磨损管壁,圆周运动的加速度可分解为相互正交的切向量 α_t 和法向分量 α_n : $\alpha_t = dv/dt$, $\alpha_n = v^2/R$ 。式中,切向加速度的大小

dv/dt 表示质点速率变化的快慢,法向加速度的大小 v^2/R 表示质点速度方向变化的快慢。

基于公式(13)得到总加速度的 α 的大小, R 方向可用它和 e_n 间的夹角 α 表示: $\alpha = \arctg(\alpha_t/\alpha_n)$ 。如果质点作匀速圆周运动,即 $\alpha_t=0$,这时质点只有方向加速度 α_n 。该阶段速度方向发生变化但数值维持恒定,影响管壁磨损的力与颗粒质量及加速度密切相关,因而在颗粒质量确定的情况下,降低加速度可缓解管壁损坏,分析公式(13)发现,加速度的减小与速度成反比,与半径成正比。综上,减小B区磨损只要减小速度或增大半径即可。

(2) 过油嘴流动分析

① 气体油嘴处流动

气体通过油嘴时流量与压力关系为

$$q_{sc} = \frac{0.408 p_1 d^2}{\sqrt{r_g T_1 Z_1}} \sqrt{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \quad (14)$$

式中: q_{sc} 为通过油嘴的体积流量(标准状态下), $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; p 为压力,MPa; d 为油嘴嘴眼直径, $\pm 0.1 \text{ mm}$; T 为温度,K;下标1、2表示油嘴嘴前、嘴后位置; p_1/p_2 为压力比,无量纲。

② 液体过油嘴流动

液体在油嘴中的流动过程是极其复杂的,根据连续性方程

$$uA\rho = \text{常数} \quad (15)$$

式中: u 为截面平均流速,m/s; A 为流道截面积, m^2 ; ρ 为流体介质的密度。

对于不可压缩的流体, $\rho=\text{常数}$,因此 $\mu A=\text{常数}$,即流体的流速和通过该截面的截面积成反比。同时,又根据伯努利方程式

$$gZ + P/\rho + \frac{u^2}{2} = \text{常数} \quad (16)$$

式中: Z 为位置标高,m; P 为静压强,MPa。

忽略管道进出口的液位高度差,若截面处的流动速度增加,该截面压力水平下降,流体压力若下降到该温度条件下的饱和压力,液体开始转变为蒸汽,进而出现汽蚀与闪蒸现象,设备面临汽蚀和闪蒸的双重破坏风险。

③ 流体流经油嘴前后的压力变化分析

图3绘制了油嘴内液体流动的简化示意图,其中: P_1 、 P_3 为入口压力及出口压力; P_2 为最小截面处压力; μ_1 、 μ_2 为入口流速及出口流速。液体在油嘴内形成稳定的连续流动,不计液体势能及节流前

后的温差,由流体连续性方程得 $\mu_1 = \mu_2$, 液体流经油嘴时存在三种典型工作状态:

1) 液体穿过油嘴的瞬间,速度上升引起压强下降,若出口端压力 P_2 高于该温度液体的汽化临界值,液体维持非气态,消除气蚀与闪蒸隐患。

2) 若流体压力未超过饱和蒸汽压,在金属基底形成固定汽蚀区域,气泡随流体一起运动,压力重新升高引发气泡爆裂,气泡若在远离金属的位置破裂则影响轻微,邻近金属的气泡破裂将形成金属冲击,引发结构损坏。

3) 若液体压力与油嘴出口压力始终低于饱和蒸汽压临界值,液体出现阶段性汽化,出现气液两相混合物,气泡存在聚结、破碎与蒸汽逃逸的倾向。

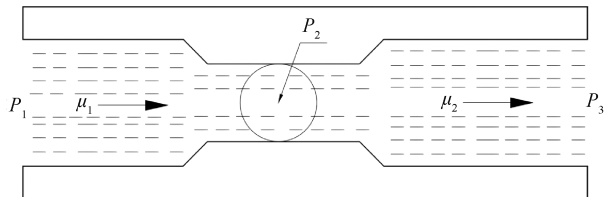


图 3 液体通过油嘴示意图

Fig. 3 Schematic diagram of liquid flow through an oil nozzle

采用多级节流结构保护油嘴完整性,鉴于生产过程中油嘴往往面临高压差工况,对单级节流油嘴而言这具有显著技术难度,采用单级节流方式的油嘴既会出现气蚀问题,又面临被刺坏的可能性,若采用分级节流方案,其累计压降较单级节流更高,分级调节的压降值偏小,将压降分摊至数个串联的油嘴上,因此可防止油嘴遭到破坏。多级节流后压力变化如图 4 所示。

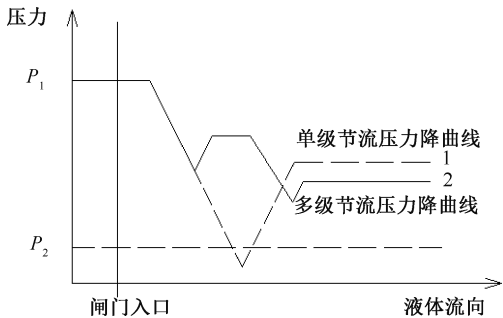


图 4 采用多级节流压力变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pressure variation using multi-stage flow restriction

④颗粒高速冲击损坏管壁

管壁破坏主要归因于颗粒的高速冲击,即力 F' (其可分解为垂直方向的 F_1 和水平方向的 F_2) 如图 5 所示。管壁受到的垂直力 F_1 ,其大小为

$$F_1 = m \frac{v_2^2 - (v_1 \cos \alpha)^2}{2L} \sin \alpha \quad (17)$$

式中: m 为粒子质量,kg; v_2 为粒子末速度,方向同 F' ,m/s; v_1 为粒子初速度,方向水平,m/s。

F' 为作用在管壁水平方向上的力为 F_2 其大小由公式(17)所示,分析可知:油嘴的破坏主要发生在 A 区、B 区和 C 区。在 A 区由于颗粒高速旋转而损坏油嘴,在 B 区因气穴现象损坏油嘴,在 C 区颗粒沿水平方向对油嘴的磨损和垂直方向颗粒的高速运动导致油嘴破坏。

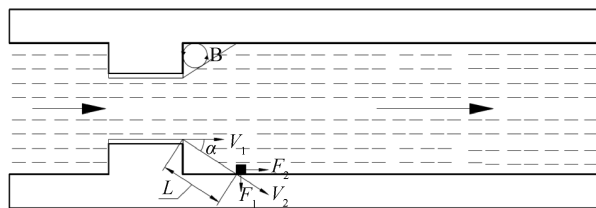


图 5 颗粒冲击管壁受力状况

Fig. 5 Force conditions of particles impinging on pipe wall

通过分级节流设计,合理选择油嘴参数以限制后一级入口压力为前一级入口压力的 3.5 倍以内,还需清除流体中的固相大颗粒,如采用井口除砂器,防止地层返排出的固体颗粒磨损、堵塞流程设备,同时要勤于检查油嘴、节流阀和节流下游管径内壁损伤情况,以便及时更换。

2 节流冲蚀分析

油气井测试节流冲蚀是机械冲刷与电化学腐蚀的耦合效应,受材料、环境及流体参数共同调控,可通过油嘴材质与结构优化、管汇防冲蚀改进及二级节流油嘴组合参数匹配,为现场工艺设计提供支撑。

2.1 流体对油嘴金属的冲刷腐蚀分析

冲刷腐蚀表现为流体高速运动对金属表面的侵蚀性破坏,源于机械冲刷与电化学腐蚀的复合作用,若液体中存在悬浮固体颗粒,引发液体与固体颗粒的混合流冲刷腐蚀。高温高压井测试放喷排液时,地层高压导致液垫、含固相颗粒的泥浆和游离砂高速排出,对油嘴管汇、弯头等节流、转向部位造成严重磨损和冲蚀。

(1) 冲刷腐蚀机理

从机理上看,冲刷腐蚀涉及化学腐蚀和物理冲刷:金属表面腐蚀表现为产物以离子态剥离;冲刷作用引发固态腐蚀产物的颗粒状剥落。液固体系

中,冲刷颗粒的动能或碰撞频率是关键。低流速时,钝化层不易破损;流速增加,冲刷面破损与恢复交替,引发冲刷腐蚀;高流速下,高动能颗粒破坏钝化层及基体金属,导致冲刷磨损。

(2) 冲刷腐蚀的影响因素

多因素共同作用导致冲刷腐蚀现象,可归纳为材料属性、环境参数及流体动力特性:

①材料影响:化学成分配比、耐蚀表现优劣以及硬度高低共同塑造金属的抗冲刷能力,合金的冲刷腐蚀表现随流速改变而呈现材料依赖性变化。例如,铝青铜和高硅铁因其特殊的成分和组织结构,具有较好的抗冲刷性能。在实际应用中,需根据具体的环境条件选择合适的材料,以降低冲刷腐蚀的发生概率。

②环境影响:主要受环境流体种类、温度、pH值等因素影响,pH值的变化会改变金属表面生成膜的性质和成分,影响金属腐蚀率。以90-10铜镍合金为例,在流速为2.7 m/s时,pH值降低至3.6会使其表面难以形成保护膜^[21],导致耐冲刷能力下降。氧对金属腐蚀的作用因金属种类和环境介质而异,具有钝化特性的金属需要足够氧化剂才能形成钝态,氧能加速中性环境中非钝化金属的腐蚀溶解,若将海水和淡水中的溶解氧去除,铜合金的腐蚀率将大幅减小。电化学反应动力学和氧扩散系数随水温升高而增大,但水中溶解氧量降低,将影响金属表面氧化层的特性及其再钝化效率,故温度变化对腐蚀的影响需结合金属特性与环境要素整体分析。此外,悬浮颗粒物浓度、粒径和锋利性等因素会提高电极反应传质系数,加剧金属腐蚀,且颗粒黏附或沉积于金属表面可能引发缝隙腐蚀,进一步加重冲刷腐蚀程度。

③流体力学影响:腐蚀特性与冲刷强度及传质过程的变化密切相关,关键参数包括流速、攻角、颗粒性质(种类、硬度、浓度、形状等)和流体性质(黏度、密度)。

(3) 油嘴结构设计改进

油嘴选材阶段,要考察汽蚀、闪蒸及冲蚀的复合效应,宜采用表面硬度大、抗气蚀性强的材料,可采用4Cr13或钴钨锰钼钒等耐磨合金,也可采用硬质合金喷涂、陶瓷覆层等技术优化性能。为增强耐磨性,高压油嘴流通孔采用硬质合金,本体则用普通金属嵌入耐磨硬质合金,防止高速流体冲蚀,改进后油嘴如图6所示。

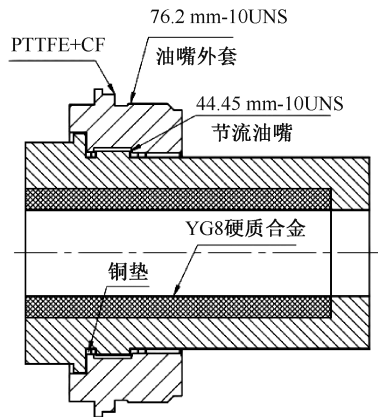


图6 固定式节流阀油嘴结构图

Fig. 6 Structural diagram of fixed-type throttle valve nozzle

(4) 高压管汇防冲刷腐蚀改进

①固定式节流阀

常规固定式节流阀通过冲刷合金堵头抵消流体冲刷,但存在不足:流体通过油嘴后压力降低,易引发气穴和气蚀,导致腐蚀甚至刺漏;压力降低还使流速剧增,尤其在含固相颗粒时,会加剧堵头冲蚀;此外,流体改变流动方向易造成附加压力损失,影响压降分析。改进后的节流阀通过改变流体进出口方向和油嘴方向,将冲蚀位置从堵头转移至管线,减少直接冲蚀。同时,避免在流体出口形成半密闭空间,使气穴产生的气泡随流体运移,降低腐蚀速度,延长使用寿命,并确保流体通过油嘴后不改变运动方向,减少压降。

②流动短节

流体通过油嘴后流体颗粒沿水平方向对油嘴及管壁的磨损和垂直方向颗粒的高速运动导致油嘴及管壁破坏。为减缓流体颗粒对管壁的刺蚀,需要在油嘴套后的法兰短节内部进行改进,优化后节流油嘴套结构如图7所示。在法兰短节内铺焊硬质合金,增强耐磨性,并在法兰短节内安装流动短节,流动短节为合金管,可避免流体颗粒对流程管壁的直接冲蚀,有效的解决流体颗粒在C区对管壁的破坏。

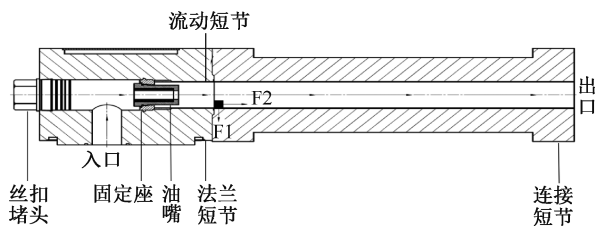


图7 优化后节流油嘴套结构图

Fig. 7 Structural diagram of optimized throttle nozzle holder

2.2 二级节流油嘴组合分析

进行流体排出试验阶段,油嘴损坏的诱因是多维度的,如油嘴几何构型、材质组成、各阶段降压量及分级数目等,预防油嘴故障需掌握管道内高速流体的冲蚀规律,采用无过度冲蚀作为边界条件,明确油嘴各阶段压降量,与开度相关参数,基于已探讨的冲蚀规律、油嘴流态及气穴形成理论,可获得油嘴防蚀直径随压降变化的规律图示用以辅助油嘴直径的筛选。

假设放喷管线为壁厚为 5.51 mm 的 73 mm 油管和壁厚为 6.45 mm 的 88.9 mm 油管、井口压力 80 MPa、天然气产量 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,考察计算了 4~10 mm 油嘴的单级压降,如图 8、图 9 所示。假设两个油嘴之间连接管的长度为 100 mm,油嘴长度为 200 mm。根据前述流体力学理论,计算不同直径油管中雷诺数值为

$$Re = \frac{ud\rho}{\mu} = \begin{cases} = 2.974 \times 10^3 & (d = 73 \text{ mm}) \\ = 2.426 \times 10^3 & (d = 88.9 \text{ mm}) \end{cases} \quad (18)$$

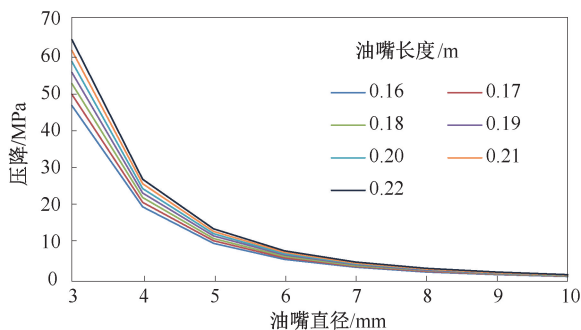


图 8 外径 73 mm 油管放喷时单级压降与油嘴直径关系图

Fig. 8 Relationship diagram of single-stage pressure drop versus nozzle diameter during well unloading in 73 mm tubing

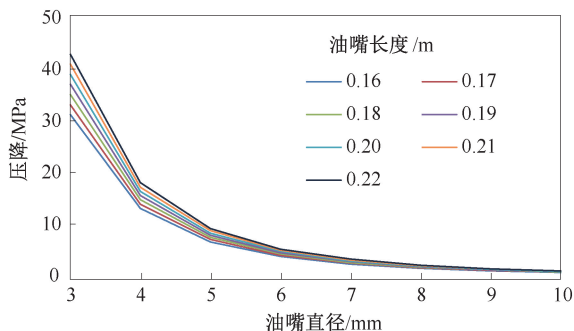


图 9 外径 88.9 mm 油管放喷时单级压降与油嘴直径关系图

Fig. 9 Relationship diagram of single-stage pressure drop versus nozzle diameter during well unloading in 88.9 mm tubing

因为 $2000 < Re < 4000$,所以流态为过渡流,可得下式

$$h_{\text{水头损失}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} = 0.03 \times \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2 \times 9.81} \quad (19)$$

$$P_1 - P_2 = \left(\frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} + h_{\text{水头损失}} \right) \gamma \quad (20)$$

因为 $Q_1 = Q_2$,所以 $u_1 A_1 = u_2 A_2$ 。公式(20)变为

$$\left(\frac{(u_1 A_1 / A_2)^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} + h_{\text{水头损失}} \right) \gamma = \left(\frac{(u_1 A_1 / A_2)^2}{2 \times 9.81} + 0.03 \times \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2 \times 9.81} \right) \gamma = p_1 - p_2 \quad (21)$$

式中: ΔP 为单级节流压降,MPa; Q 为流量, m^3/s ; C_d 为流量系数,无量纲。

3 应用案例分析

超深高压页岩气井测试流程防刺蚀技术已在四川盆地威荣、资阳等区块投入使用 4 井,并取得良好效果,应用新防刺蚀技术后单井固定式节流阀的刺漏数量从过去单级节流的平均 3 支减少到 0.5 支,单井作业工期节省 1.5 d,降本约 12 万元/井。显著减少了高压作业环境下操作人员的安全隐患与体力消耗,优化了地面测试作业的安全管控与效率,实现了超深高压页岩气井安全高效试气作业。

ZY2 井是部署在四川盆地的一口重点预探井,完钻井深 6 666 m,垂深 4 709.76 m,目的层位筇竹寺组。地层压力 92.84 MPa,关井井口压力 78.22 MPa,水平段地层温度约 141 $^{\circ}\text{C}$;压裂改造规模达 67 083 m^3 液量,4 510.11 m^3 砂量,最高施工压力 117.2 MPa,最大施工排量 22 m^3/min 。该井地面测试流程设计时通过管道压降分析,优选流程结构为 105 MPa+70 MPa 管汇二级节流降压,且满足一级油嘴进口压力必须小于二级油嘴进口压力的 3.5 倍。采用改进后具有更强耐刺蚀能力的固定式节流阀和合金油嘴,低压段采用 88.9 mm 油管。同时,为进一步减少固相颗粒对流程管线的损伤,流程配备了 105 MPa 除砂器、105 MPa 捕屑器,最大程度的减少流程管线中的固相物。

在井口温度 78.3 $^{\circ}\text{C}$,砂浓度低于 0.2% 情况下,不同油嘴下节流压降情况,如表 3 所示。

经过 172 h 测试后,测得固定式节流阀刺蚀率为 0.08 mm/h,较常规一级节流测试流程刺蚀率 0.42 mm/h,耐刺蚀能力提高 5.3 倍。

表3 二级节流油嘴直径及压降表

Table 3 Parameter table of nozzle diameter and pressure drop for two-stage flow restriction

一级节流油嘴直径/mm	一级节流压降/MPa	二级节流油嘴直径/mm	二级节流压降/MPa
9	60.3	15	21.7
10	57.5	17	19.2
11	55.5	19	17.3

对比常规的一级节流测试流程,改进后地面流程其刺蚀速度大大降低,可有效管控流程刺漏风险,整个放喷测试期间,地面测试流程未发生刺蚀泄漏,经受住了井口高压 78.22 MPa、地面高温 89 °C、天然气 $125 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、地层出砂等极端工况下的严苛考验,保障了 ZY2 井安全、高效测试作业。

4 结论

(1)超深高压页岩气井测试应采用二级节流方式,且满足一级油嘴进口压力小于二级油嘴进口压力的 3.5 倍可以有效减少气穴影响,同时油嘴材质硬度的提升,可以进一步将气蚀的产生及其危害降至最低。

(2)应用新防刺蚀技术后单井固定式节流阀的刺漏数量从过去单级节流的平均 3 支减少到 0.5 支,防刺蚀效果十分显著,即使在超高压页岩气井高压、高温、高产、出砂这样的极端工况下,只要做好定时的倒换检查,可有效降低地面流程刺漏风险,大大减少人员进入高压区整改作业的时间。

(3)大规模体积压裂改造,支撑剂加入量大的情况下,返排期间固相返出物对地面流程刺蚀极为严重,对设备耐刺蚀能力要求极高,大大增加了工艺实施风险,因此该类井测试,因充分考虑固相返出物的清除。

(4)超深高压页岩气井地面测试流程防刺蚀技术在 ZY2 井的成功应用,为今后在区域同类气井开发过程中的大力推广使用和不断优化完善提供了宝贵经验。

致谢:感谢中石化西南石油工程井下作业分公司、中石化西南油气分公司同意本文发表。感谢《川南超深层页岩气压裂提效关键技术研究与应用》课题组全体成员的支持与帮助。

参考文献

[1] 雍锐, 吴建发, 吴伟, 等. 四川盆地寒武系筇竹寺组页

岩气勘探发现及其意义[J]. 石油学报, 2024, 45(9): 1309-1323.

YONG Rui, WU Jianfa, WU Wei, et al. Exploration and discovery of shale gas in the Cambrian Xiaozhusi formation in Sichuan basin and its significance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(9): 1309-1323.

[2] 王磊. 节流油嘴损坏原因分析[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(5): 38-40.

WANG Lei. Chokes damage analysis [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(5): 38-40.

[3] 徐军, 李世勇, 陈世波. 川南页岩气地面流程测试管线刺漏原因及机理分析[J]. 钻采工艺, 2021, 44(6): 83-87.

XU Jun, LI Shiyong, CHEN Shibo. Analysis of leakage causes and mechanisms in surface process test pipelines for shale gas in southern Sichuan [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(6): 83-87.

[4] 魏存祥, 滕龙, 王勇刚, 等. 固定节流阀流场数值模拟研究[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(5): 47-49.

WEI Cunxiang, TENG Long, WANG Yonggang, et al. Numerical simulation of flow field of fixed throttle valve [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(5): 47-49.

[5] 王国荣, 楚飞, 陶思宇, 等. 控压钻井节流阀液-固两相流冲蚀预测及验证[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 754-759.

WANG Guorong, CHU Fei, TAO Siyu, et al. Prediction and verification of fluid-solid two-phase flow erosion in throttle valve in pressure-controlled drilling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 754-759.

[6] 李润, 潘登, 孟从举, 等. 超高压地面测试流程球阀式紧急泄压装置结构设计[J]. 油气井测试, 2025, 34(4): 28-33.

LI Run, PAN Deng, MENG Congju, et al. Structure design of emergency pressure relief device for ultra-high pressure ground testing process [J]. Well Testing, 2025, 34(4): 28-33.

[7] HAUGEN K, KVERNOLD O, RONOLD A, et al. Sand erosion of wear-resistant materials; erosion in choke valves [J]. Wear, 1995, 186(1): 179-188.

[8] 高胜, 孙文. JLG65-35 节流阀油嘴的流场分布及磨蚀分析[J]. 化工机械, 2013, 40(6): 805-807.

GAO Sheng, SUN Wen. Flow field distribution and abrasion analysis of throttle valve nozzle of JLG65-35 [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2013, 40(6): 805-807.

[9] TAWANCY H M, ALHEMS, LUAI M. Damage analysis of choke bean used in an oil-gas well [J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2016, 7: 56-64.

[10] 何世云, 陈琛. 加砂压裂压后排液的控砂技术[J]. 天然气工业, 2002, 22(3): 45-46.

HE Shiyun, CHEN Chen. Sand control technique of discharge fluids after sand fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(3): 45-46.

- [11] 王健刚,孙巧雷,严淳颀,等. 测试地面流程弯管冲蚀磨损的影响研究[J]. 石油机械,2021,49(1):88-94.
WANG Jiangan, SUN Qiaolei, YAN Chunti, et al. Study on the influences of the erosion wear of bend pipe in testing surface process [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(1): 88-94.
- [12] DARIHAKI F,HAJIDAVALLOO E,GHASEMZADEH A, et al. Erosion prediction for slurry flow in choke geometry [J]. Wear,2017,372:42-53.
- [13] 康国强,刘佩杰,吉礼勇,等. 海上高温高压气田油嘴冲蚀问题研究[J]. 石化技术,2023,30(2):256-257.
KANG Guoqiang, LIU Peijie, JI Liyong, et al. Research on the erosion problem of oil nozzles in offshore high-temperature and high-pressure gas fields [J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(2): 256-257.
- [14] 杜军军,刘海龙,王佳,等. 超深气井地面流程电动节流阀节流冲蚀规律研究及优化应用[J]. 钻采工艺,2025,48(6):122-128.
DU Junjun, LIU Hailong, WANG Jia, et al. Research and optimization application of throttle erosion laws of electric throttle valve in surface processes of ultra-deep gas wells [J]. Drilling & Production Technology, 2025, 48(6): 122-128.
- [15] 刘飞,王勃,潘登,等. 四川盆地页岩气井地面安全返排测试技术[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2013,32(1):31-34.
LIU Fei, WANG Bo, PAN Deng, et al. Surface safety flowback testing technology for shale gas wells in Sichuan basin [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2013, 32(1): 31-34.
- [16] 何恩鹏,潘登,涂敖. 页岩气井地面除砂技术[J]. 油气井测试,2016,25(6):56-58.
HE Enpeng, PAN Deng, TU Ao. Shale gas well surface sand removal technology [J]. Well Testing, 2016, 25(6): 56-58.
- [17] 付玉坤,王娟,张克亮. 油气田钻井节流管汇系统的技术发展[J]. 石油和化工设备,2015,18(6):5-8.
FU Yukun, WANG Juan, ZHANG Keliang. Technological development of throttling manifold system for drilling in oil and gas field [J]. Petro & Chemical Equipment, 2015, 18(6): 5-8.
- [18] 张耀玲. 测试井口油嘴内的流动冲蚀特性研究[D]. 中国石油大学(北京),2017:19-70.
ZHANG Yaoling. Study on flow erosion characteristics in the test wellhead nozzle [D]. China University of Petroleum(Beijing), 2017:19-70.
- [19] 练章华,刘干,龚建文,等. 高压节流阀流场分析及其结构改进[J]. 石油机械,2004,32(9):22-24.
LAN Zhanghua, LIU Gan, GONG Jianwen, et al. Flow field analysis and structural improvement of high-pressure throttle valve [J]. China Petroleum Machinery, 2004, 32(9): 22-24.
- [20] 胡黄卿. 液压系统气穴现象研究[J]. 兰州工业高等专科学校学报,2000,7(4):19-22.
HU Huangqing. Research on cavitation in hydraulic systems [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2000, 7(4): 19-22.
- [21] 迟长云,李宁,薛建军,等. B30铜镍合金在海水中的电化学行为[J]. 材料保护,2009,42(8):19-22.
CHI Changyun, LI Ning, XUE Jianjun, et al. Electrochemical behavior of B30 Cu-Ni alloy in seawater [J]. Material protection, 2009, 42(8): 19-22.

编辑 吴志力

第一作者简介:李运辉,男,1974年出生,高级工程师,本科,1999年毕业于西南石油学院石油工程专业,现主要从事试油气技术研究工作。电话:13881099586,Email:liyh.osxn@sinopec.com,通信地址:四川省德阳市金沙江西路699号,邮政编码:618000。