

# 高含硫油气井测试作业安全控制技术

于跃<sup>1</sup>,黄生松<sup>2</sup>,刘伟<sup>2</sup>,关键<sup>3</sup>,徐文光<sup>4</sup>

- 1.中国石油集团长城钻探工程有限公司物资分公司 北京 100101
- 2.中国石油集团长城钻探工程有限公司工程技术处 北京 100101
- 3.中国石油集团渤海钻探工程公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007
- 4.中国石油集团渤海钻探工程公司石油工程总承包分公司 陕西西安 710016

通讯作者:Email:yuyue.gwde@cnpc.com.cn  
项目支持:中国石油集团长城钻探工程有限公司科技研究项目“海外复杂油气井测试工艺技术研究及应用”(GWDC201802-05)

引用:于跃,黄生松,刘伟,等. 高含硫油气井测试作业安全控制技术[J]. 油气井测试,2019,28(5):21-26.  
Cite: YU Yue, HUANG Shengsong, LIU Wei, et al. Safety control technology for testing operation of high-sulphur oil and gas wells [J]. Well Testing, 2019,28(5):21-26.

**摘要** 针对地层天然气中硫化氢含量等于或大于 1500 mg/m<sup>3</sup> 的高含硫油气井,测试作业时存在硫化氢泄漏风险的实际情况,从硫化氢特性、典型案例入手,研究测试行业预防硫化氢的通用做法和惯例,进而对设备、工具、材料、设施等的选择、调试提出具体的要求,制定了硫化氢井测试作业“十大”禁令。现场作业人员坚持“救人优先”、“两权相害取其轻”的原则,通过不断演练和优化最终形成 X-15 井硫化氢风险识别、防护与控制技术,确保了重点井安全高效完成测试作业。该井形成的油气井测试作业硫化氢风险识别控制技术,确保了集团公司重点井达到预期的勘探目标,为国内外同类井测试作业提供了范例。

**关键词** 硫化氢; 高含硫井; 泄露; 试油; 风险评估; 安全控制; 安全防护  
**中图分类号**:TE353      **文献标识码**:B      DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.05.004

## Safety control technology for testing operation of high-sulphur oil and gas wells

YU Yue<sup>1</sup>, HUANG Shengsong<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, , GUAN Jian<sup>3</sup>, XU Wenguang<sup>4</sup>

- 1.Material Branch, CNPC Great Wall Drilling Engineering Limited Company, Beijing 100101, China
- 2.Engineering Technology Department, CNPC Great Wall Drilling Engineering Limited Company, Beijing 100101, China
- 3.Well Testing Company of CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang, Hebei 065007, China
- 4.General Contracting Branch of Petroleum Engineering, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Xian, Shannxi 710016, China

**Abstract:** Because the content of hydrogen sulfide in natural gas is equal to or greater than 1500mg/m<sup>3</sup> in high-sulfur oil and gas wells, there is a risk of hydrogen sulfide leakage during test operation. Ten prohibitions on hydrogen sulfide well testing operations have been formulated. These prohibitions are the specific requirements for the selection of equipment, tools, materials, facilities and testing, by analyzing the characteristics of hydrogen sulfide and typical case and studying the general practice and practice of hydrogen sulfide prevention in test industry. Field workers adhere to the principle of “saving people first” and “harming each other lightly”. Through continuous drilling and optimization, hydrogen sulfide risk identification, protection and control technology is finally formed in Well X-15, which ensures the safe and efficient completion of testing operations in key wells. The technology of hydrogen sulfide risk identification and control in oil and gas well test operation formed by this well ensures that the key wells of the group company achieve the expected exploration target, and provides an example for similar well test operation at home and abroad.

**Keywords:** hydrogen sulfide; high-sulfur well; leakage; oil testing; risk assessment; safety control; safety protection

试油测试是一种以渗流力学为基础、以各种测试仪表为手段,通过对油、气、水井生产动态的测试来研究和确定油、气、水层和测试井的生产能力、物性参数、生产动态,判断测试井附近的边界情况,以

及油、气、水层之间的连通关系的方法<sup>[1-4]</sup>。李相方<sup>[5]</sup>、尹邦堂等<sup>[6]</sup>研究认为,油气完井测试技术是钻完井关键技术之一,复杂的作业环境使油气完井测试作业面临许多新的挑战。对于高含硫油气井

测试作业来说,其作业风险不仅仅是测试作业面临的高温高压地层流体,也是高含硫化氢的天然气带来的巨大风险。

据李志生等<sup>[7]</sup>的研究,全世界各大天然气藏中几乎都含有硫化氢,多数气田中硫化氢含量小于5%。据统计,美国南德克萨斯气田硫化氢含量居世界之首,高达98%;加拿大艾尔伯特气田硫化氢含量为81%;俄罗斯、伊朗、法国等国都有不同硫化氢含量的气田。我国高含硫气田占总探明储量的四分之一,主要分布在四川、渤海湾、鄂尔多斯和塔里木盆地,绝大多数硫化氢含量小于0.5%。因此,含硫气藏的开发已成为天然气开采的重要组成部分。硫化氢的剧毒性是高含硫气田的主要风险,而硫化氢危险临界浓度仅为150 mg/m<sup>3</sup>。因此,一旦高含硫油气井发生井喷事故,大量的硫化氢会随着井内流体,以高压形式向外喷出,在空气中扩散,造成非常严重的后果。震惊世界的“12.23”重庆开县井喷事故,造成大量人员伤亡,主要原因是井喷发生后,大量的硫化氢气体不受限制向空气中进行扩散<sup>[8]</sup>。

因此,深入研究高含硫油气井测试作业安全控制技术是非常必要的。笔者从硫化氢特性、典型案例入手,研究了国内外测试行业预防硫化氢通用做法,对高含硫油气井测试提出具体技术要求,并通过作业现场的不断演练与优化,形成了X-15井硫化氢防护与控制十大禁令,确保中国石油海外重点井安全高效完成7层次测试作业,为国内外同类井的测试作业提供了典型的范例。

## 1 概述

硫化氢是一种剧毒、可燃气体,常在天然气生产、高含硫原油生产、原油馏分、伴生气和水的生产中遇到。因硫化氢比空气重,所以能在低洼地区聚集。硫化氢无色、带有臭鸡蛋味,在低浓度下,通过硫化氢的气味特性能检测到它的存在。但不能依靠气味来警示危险浓度,因为处于高浓度(超过150 mg/m<sup>3</sup>)的硫化氢环境中,人会由于嗅觉神经受到麻痹而快速失去嗅觉。长时间处于低硫化氢浓度的大气中,也会使嗅觉灵敏度减弱<sup>[9]</sup>。因而,在硫化氢环境下,施工作业人员的安全防护尤为重要。

### 1.1 阈值与临界浓度

Q/SY 1650-2013《含硫化氢井测试安全技术规范》<sup>[9]</sup>、AQ 2012-2007《石油天然气安全规程》<sup>[10]</sup>、SY/T 6277-2017《硫化氢环境人身防护规范》<sup>[11]</sup>等

标准规定:

在硫化氢环境中,未采取任何人身防护措施,不会对人身健康产生伤害的空气中,硫化氢最大浓度值为15 mg/m<sup>3</sup>,即阈值。

在硫化氢环境中,8 h内未采取任何人身防护措施,可接受的空气中硫化氢最大浓度值为30 mg/m<sup>3</sup>,即安全临界浓度。

在硫化氢环境中,未采取任何人身防护措施,对生命和健康产生不可逆转的或延迟性的影响的空气中硫化氢最小浓度值为150 mg/m<sup>3</sup>,即危险临界浓度。

### 1.2 硫化氢暴露极限与危害

美国职业安全与健康规定,硫化氢可接受的上限浓度为30 mg/m<sup>3</sup>;8 h可接受的上限浓度为75 mg/m<sup>3</sup>。美国政府工业卫生专家联合会推荐的阈限值为15 mg/m<sup>3</sup>(与国内标准一致),15 min短期暴露极限为22.5 mg/m<sup>3</sup>。每天暴露于短期暴露极限下的次数不应超过4次,连续2次间隔时间至少为60 min。根据美国内政部矿产管理部门规定,对于海上油气作业,即使偶尔短时暴露于30 mg/m<sup>3</sup>的硫化氢环境,也要求使用呼吸保护装置<sup>[12-13]</sup>。

### 1.3 二氧化硫暴露极限与危害

美国职业安全与健康局规定,二氧化硫8 h允许暴露极限值13.5 mg/m<sup>3</sup>。而美国政府工业卫生专家联合会推荐二氧化硫阈限值为5.4 mg/m<sup>3</sup>,15 min短期暴露极限为13.5 mg/m<sup>3</sup><sup>[14]</sup>。

## 2 硫化氢泄露典型案例

硫化氢泄露事件多发生在实验室、制药厂、石油天然气处理厂、油气田钻井和井下作业现场。现列举油气田钻井和井下作业现场两个典型案例。

### 2.1 赵48井硫化氢泄露

赵48井是冀中坳陷晋县凹陷中部、南古庄背斜上钻探的一口预探井。1993年9月28日15:00该井2 964.0~2 968.8 m射孔作业后,发生井喷,大量含硫化氢气体喷出,造成6人立即死亡(此外,在10多万人的紧急疏散过程中,因年老体弱、惊吓、颠簸、中风、交通事故等原因死亡15人),24人中等中毒,440余人轻度中毒,轻质油污染庄稼近700亩,直接经济损失约60万元<sup>[15-16]</sup>。

造成此次事故的主要原因是,试油作业前未能预见硫化氢的存在,作业队执行制度不严,未能按照试油设计进行施工。

2.2 罗家 16H 井硫化氢泄露

罗家 16H 井位于重庆市开县高桥镇北约 1.2 km 的晓阳村境内,是罗家寨气田的开发井,也是集团公司重点科技攻关项目的试验井。罗家 16H 井与同井场的罗家 2 井井距 3.8 m。罗家 2 井测试产量为  $62.3\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,硫化氢含量  $125.53\text{ g}/\text{m}^3$ 。该井由川东钻探公司川钻 12 队承钻。2003 年 12 月 23 日 02:29,钻至井深 4 049.68 m,层位为飞仙关组,设计密度  $1.37\sim1.45\text{ g}/\text{cm}^3$ ,实钻密度  $1.43\text{ g}/\text{cm}^3$ 。21:55 在起钻至井深 209.31 m 时发生强烈井喷,22:01 钻杆内喷出的天然气被碰击出的火星引燃,22:03 井口失控,22:32 井场柴油机和发电机熄火,后重新启动柴油机开泵打泥浆,23:30 停泵,钻井队人员全部撤离井场,井喷处于失控状态。高浓度的剧毒硫化氢气体喷涌而出,迅速随风蔓延扩散,造成井场周边居民硫化氢中毒,导致重大人员伤亡。次日 11:20,在高桥镇大气中硫化氢含量超过  $150\text{ mg}/\text{m}^3$ 。经专家测算,罗家 16H 井地层中硫化氢含量为  $151\text{ g}/\text{m}^3$ ,属于高含硫油气井<sup>[16]</sup>。

本井从井喷到点火,历时 17 小时 55 分钟。点火时,天然气火焰高达 50 m 之多,天然气喷射燃烧的烈焰发出海啸般的怒吼,邻近的建筑物也在声浪中颤抖。经统计,这场灾难造成 243 人死亡,26 000 多人因硫化氢中毒,65 632 人被紧急疏散撤离,直接经济损失 9 262.71 多万元,属于特大井喷事故。通过调查组分析,造成此次恶性井喷、泄漏事故,一系列严重违规操作的叠加是引发此次井喷失控事故的直接原因;对高含硫水平井井控工艺技术特点认识不足是造成井喷失控事故的原因之一。

3 高含硫油气井测试作业安全防护技术研究

马来西亚石油,斯伦贝谢、艾斯普罗等油公司和服务公司的含硫油气井测试作业指导书,均对硫化氢作业环境下的安全防护要求进行了明确规定(表 1)。**SY/T 6277** 第 7 章也明确规定了硫化氢作业环境下的安全要求(表 2)。

表 1 马来西亚石油硫化氢作业环境下安全防护要求\*

Table 1 Safety protection requirements for petroleum H <sub>2</sub> S operating environment in Malaysia				
管线中 H <sub>2</sub> S 浓度/ (mg·m <sup>-3</sup> )	空气中 H <sub>2</sub> S 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )			
	小于 15	15~30	30~75	大于 75
750~3 750	非必要人员转移到安全区域			
	携带正压呼吸器	携带正压呼吸器,佩戴好面具		
	可持续放喷,检测空气中 H <sub>2</sub> S 含量	查找漏点并修复	查找漏点并修复,如不能修复,关井	立即关井
	H <sub>2</sub> S 区域做好标示	其他人转移到集合点		所有人转移到集合点
	夜晚可以持续放喷	只可在白天放喷		执行相关应急预案
3 750~75 000	非必要人员转移到安全区域			
	携带正压呼吸器,佩戴好面具			
	可持续放喷,检测空气中 H <sub>2</sub> S 含量	查找漏点并修复	查找漏点并修复,如不能修复,关井	立即关井
	H <sub>2</sub> S 区域做好标示	其他人转移到集合点		所有人转移到集合点
	夜晚可以持续放喷	只可在白天放喷		执行相关应急预案
大于 75 000	非必要人员转移到安全区域			
	携带正压呼吸器,佩戴好面具			
	可持续放喷,检测空气中 H <sub>2</sub> S 含量	查找漏点并修复,如不能修复,关井	立即关井	
	H <sub>2</sub> S 区域做好标示	其他人转移到集合点	所有人转移到集合点	
	只可在白天放喷		执行相关应急预案	

\* 数据来源:马来西亚石油公司测试作业操作程序。

表 2 硫化氢作业环境下的安全要求

Table 2 Safety requirements in H<sub>2</sub>S operating environment

序号	空气中 H <sub>2</sub> S 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	采取措施
1	小于 15	应立即进行告知
2	15~30	应及时通知现场人员,加密观察和检测,准备好正压式空气呼吸器
3	30~150	无防护人员进行应急撤离;海上作业时,守护船起锚待命
4	大于 150	有防护的现场工作人员进行应急撤离

为了进一步保护周边公众的安全,避免恶性事故发生,SY/T 6277 第 8.3 章规定了含硫化氢天然

气井井口失控点火程序,点火条件以及采取的措施见表 3。

表 3 含硫化氢天然气井井口失控点火条件

Table 3 Uncontrolled ignition conditions at wellhead of natural gas wells containing H<sub>2</sub>S

序号	点火条件	采取措施
1	含硫化氢油气井出现井喷事故征兆	现场作业人员应立即进行点火准备工作
2	含硫化氢油气井出现井喷,且符合下述条件之一: (1) 油气井发生井喷失控,且距井口 500 m 范围内存在未撤离的公众; (2) 距井口 500 m 范围居民点的硫化氢 3 min 平均检测浓度达到 150 mg/m <sup>3</sup> ,且存在无防护措施的公众; (3) 井场 1 000 m 范围内无有效硫化氢检测手段。	应在 15 min 内实施点火
3	井场周边 1 500 m 范围内无常住居民	可适当延长点火时间

4 含硫化氢井测试作业风险分析与安全要求

含硫化氢油气井属于高风险井,建议按照 SY/T 6631-2005《危害辨识、风险评价和风险控制推荐作法》或壳牌 HEMP (Hazard and Effects Management Process) 程序,对危险源及管理过程进行分析,即风险识别、评价与确认,进而制定预防措施和应急措施。针对可能发生的设备、工艺、材料、仪表、操作、管理等问题,从设计、安装、投产、试车等环节进行查找;再通

过量化分析与研究,制定技术对策,以便将这些问题在作业前逐一解决和消除,最终确保施工安装、日常运行的稳定性、可靠性、安全性<sup>[17]</sup>。HEMP 程序分析流程如图 1 所示。顶级事件的左侧是风险源、防止顶级事件发生的预防措施(屏障),顶级事件的右侧是应急措施(屏障)和造成的后果。预防措施和应急措施可进一步展开为潜在路径、关键活动、关键任务<sup>[9]</sup>,构成了风险与顶级事件之间的安全屏障。通过构建若干个经济、有效的安全屏障,执行有效的关键活动、关键任务,即可尽最大可能避免顶级事件发生。

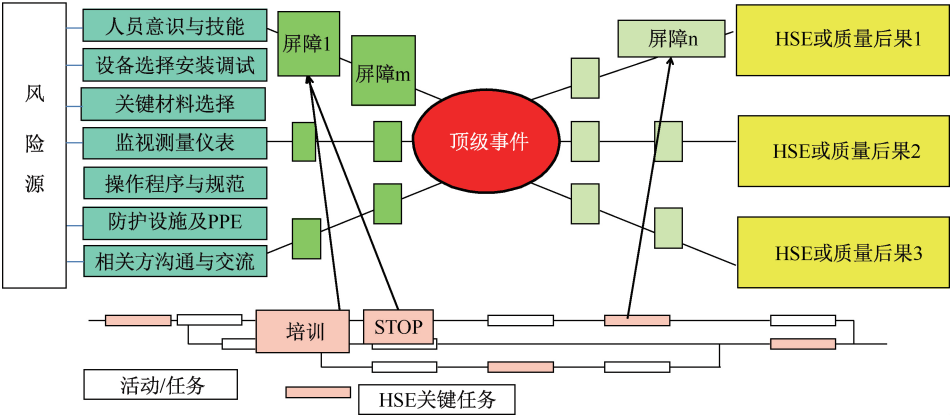


图 1 HEMP 程序分析流程示意图

Fig.1 HEMP program analysis processing diagram

对于含硫化氢油气井测试作业,硫化氢泄露和井喷失控等属于不可容忍事件之一,即图 1 顶级事件<sup>[9]</sup>。对于此顶级事件的风险源是硫化氢,而人员中毒伤亡、井喷着火、油气井报废和环境污染等是顶级事件发生后未能有效控制造成的后果。

根据油气井测试工作经验与 HEMP 程序分析,预防硫化氢泄露和井喷失控这一顶级事件发生,潜在路径应包括:人员意识与技能、设备选择安装调试、关键材料选择、监视测量仪表、操作程序、防护设施与 PPE、相关方沟通交流等。针对设备选择安

装调试这一潜在路径:油层套管应考虑耐压性能和防腐性能<sup>[18]</sup>;井下工具、地面设备、钢丝设备应具有防硫化氢、二氧化硫腐蚀的能力,满足正常工况和恶劣工况下的作业;在井温小于 93 ℃ 时,还应具有防硫化氢氢脆的能力<sup>[19]</sup>;所有与流体接触的设备及管线均防硫,防硫级别在 EE 级以上。针对操作程序这一潜在路径:放喷管线、气管线和安全阀卸压管线的出口均集中在燃烧池,且燃烧池内设置长明火,保证含硫天然气及时燃烧,防止硫化氢扩散;燃烧池距离井场 100 m 以上,防止硫化氢余气伤人;测

试放喷求产过程中的产出油及时运走,污水集中处理,防止污染环境<sup>[20]</sup>。针对相关方沟通交流这一潜在路径:测试作业前,应召开技术交底会议,界定各相关方工作界面;测试期间撤离井场 2 km 以内居民,确保居民人身安全。

5 现场应用实例

X-15 井位于乌兹别克斯坦费尔甘纳盆地,是该区块的一口勘探评价井。本井完钻井深 5 918.00 m, 127.00 mm Q125 钢级、壁厚 11.1 mm 尾管悬挂在 177.8 mm 套管内,悬挂器深度为 5 389.94 m。本井具有高温、高压、高硫、高二氧化碳、高盐“五高”特点;预测井底温度 163 ℃、井口预测最大关井压力 105 MPa、硫化氢含量 5.42%、二氧化碳含量 4.62%、地层水氯根含量 21%。根据地质要求,对上、下第三系进行 7 层次试油测试,进而落实产油气能力,获得油、气、水样品,提供储量计算和开发需要的数据,为油田大规模开发提供数据支撑。

根据区域邻井 X-13 井实测硫化氢浓度为 5.42%和本井地质风险提示,在开工之前,开展了组织机构建立、施工设计评审、设备安装调试、作业风险辨识、应急预案完善、模拟测试作业等各项准备工作。

(1)项目启动初期,各级领导高度重视。根据区域邻井 X-13 井实测硫化氢浓度为 5.42%,充分评估地质风险,制定硫化氢井测试作业“十大”禁令:第一,严禁未经硫化氢取证进行作业;第二,严禁无预案、无演练开工作业;第三、严禁不按设计选择、安装、调试设备;第四、严禁夜间射孔、一开井测试;第五,严禁未携带硫化氢报警仪进入测试区域;第六,开井期间,燃烧头严禁熄灭;第七,严禁开井期间不监测硫化氢、二氧化硫浓度;第八,管线浓度大于等于 150 mg/m<sup>3</sup> 时,严禁未穿戴正压呼吸器进行关键作业,且不执行双人作业;第九,管线浓度大于等于 150 mg/m<sup>3</sup> 时,严禁发现硫化氢意外泄漏不立即关井;第十,严禁坐岗观察人员脱岗。从设计、设备、人员、工艺、防护等方面预防硫化氢泄露顶级事件发生;根据风险辨识结果,制定 698 项预防措施和 225 项应急措施。

(2)施工准备阶段,根据识别的高含硫风险,选择符合要求的测试设备、工具、材料及其相应的监视测量设备,安全防护设施见表 4。编制了硫化氢意外泄露、井喷失控、人员伤害、火灾等应急预案。

表 4 安全防护设施  
Table 4 Safety protection facilities

名称	技术要求	数量
正压呼吸器	6.8 L	12 套
逃生式呼吸器	5/10 min	20 套
便携式 SO <sub>2</sub> 报警器	0~150 mg/m <sup>3</sup>	3 套
便携式 H <sub>2</sub> S 报警器	0~150 mg/m <sup>3</sup>	12 套
便携式多种气体报警器	0~150 mg/m <sup>3</sup>	3 套
固定式多路气体检测报警装置及探头	硫化氢、二氧化硫、可燃性气体探头类型	6 套
消防器材	35/8 kg	各 5 套
消防车	甲方提供	1 辆
救护车	甲方提供	1 辆

(3)模拟测试阶段,组织测试队、钻井队进行联合演练,重点是硫化氢意外泄露、井喷失控和人员伤害,并坚持“救人优先”、“两权相害取其轻”的原则,优化完善硫化氢一到四级的泄露应急处置措施,确保优先救人、以人为本。

(4)测试作业阶段。落实坐岗观察,严格落实交接班制度、巡检制度;在开井流动期间,管线浓度大于等于 150 mg/m<sup>3</sup> 时,作业人员穿戴正压呼吸器进行关键操作,且执行双人作业制度;专门安排两名作业人员穿戴正压呼吸器随时待命,一旦发现有人中毒,第一时间开展施救工作。

2018 年 10 月 19 日-11 月 4 日,进行第一层测试作业,射孔深度 5 800.00 m。求产期间,分别采用 2 mm、3 mm、3.97 mm 油嘴求产,求取原油、天然气稳定产量。其中天然气中硫化氢含量 44%,二氧化碳含量 2%,创造了中国石油海外试油测试最高硫化氢记录。在 44%硫化氢、2%二氧化碳环境下,安全、可控测试求产 3 331 min。

6 结论

高含硫油气井测试作业面临硫化氢泄露造成人员伤害和环境污染等风险,作业前应从人员意识与技能、设备选择安装调试、关键材料选择、监视测量仪表、操作程序、防护设施与 PPE、相关方沟通交流等方面识别潜在风险,制定预防和控制措施,进而通过构建若干个经济、有效的安全屏障,执行有效的关键活动、关键任务,尽最大可能避免硫化氢泄露、井喷失控等顶级事件发生。

通过 X-15 井实践表明,严格落实作业风险辨识,制定安全防护措施,尤其是刚性执行硫化氢井测试作业“十大”禁令,坚持“救人优先”、“两权相害取其轻”的原则不断优化应急预案,可有效提高工程技术人员和管理人员对硫化氢风险的认识与重视程度,能够有效应对高含硫油气井测试作业风险。



建议类似井施工时,借鉴本井成功经验,从而控制风险,避免硫化氢泄露、井喷失控、人员伤亡等事件的发生,实现安全、高效的测试作业。

**致谢:**本文通过单位保密审查;在本文撰写过程中,长城钻探工程技术处和测试公司给予了很大帮助与技术指导,在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 宋树亮. 试油测试技术现状与发展[J]. 中国科技博览, 2017(30):35-37.  
SONG Shuliang. Current situation and development of well testing technology [J]. China Science and Technology Expo, 2017,30: 35-37.
- [2] 程时清,唐恩高,李相方. 试井分析进展及发展趋势评述[J]. 油气井测试,2003,12(1):66-68,72.  
CHENG Shiqing, TANG Engao, LI Xiangfang. The advance of well test analysis [J]. Well Testing, 2003,12(1): 66-68,72.
- [3] 蒋晓波. 国内井下作业技术现状及发展趋势[J]. 油气井测试,2012,21(1):72-74.  
JIANG Xiaobo. Current situation and development trend of domestic down-hole technology [J]. Well Testing, 2012, 21(1):72-74.
- [4] 李传新. 油气井测试工艺新趋势及新技术介绍[J]. 油气井测试,2016,25(3):56-58.  
LI Chuanxin. Ineroduction of new trend of oil and gas well test technology and its new technology [J]. Well Testing, 2016,25(3):56-58.
- [5] 李相方. 高温高压气井测试技术[M]. 北京:石油工业出版社,2007:103-114.
- [6] 尹邦堂,李相方,杜辉,等. 油气完井测试工艺优化设计方法[J]. 石油学报,2011,32(6):1072-1077.  
YIN Bangtang, LI Xiangfang, DU Hui, et al. An optimization design for the well completion test technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(6):1072-1077.
- [7] 李志生,李谨,王东良,等. 四川盆地含硫化氢气田天然气地球化学特征[J]. 石油学报,2013,34(S1):84-91.  
LI Zhisheng, LI Jin, WANG Dongliang, et al. Geochemical characteristics of natural gas in H<sub>2</sub>S bearing gas fields in Sichuan basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(S1):84-91.
- [8] 李环,杨威,郭晓晓,等. 高含硫气井硫化氢泄露扩散模拟和应急处置[J]. 科技视界,2015(24):72,121.  
LI Huan, YANG Wei, GUO Xiaoxiao, et al. Simulation and emergency disposal of hydrogen sulfide leakage and diffusion in gas wells with high sulfurous content [J]. Science & Technology Vision, 2015(24):72,121.
- [9] 于铁峰. Q/SY 1650-2013《含硫化氢井测试安全技术规范》[S]. 中国石油天然气集团公司,2013.  
YU Tiefeng. Q/SY 1650-2013 Safety specification for well testing involving hydrogen sulfide [S]. China National Petroleum Corporation, 2013.
- [10] 李俊荣. AQ 2012-2007《石油天然气安全规程》[S]. 国家安全生产监督管理总局,2007.
- LI Junrong. AQ 2012-2007 Safety specification for petroleum & gas [S]. State Administration of Work Safety, 2007.
- [11] 梁永超. SY/T 6277-2017《硫化氢环境人身防护规范》[S]. 国家能源局,2017.  
LIANG Yongchao. SY/T 6277-2017 Code for personal protection in hydra sulfide environment [S]. National Energy Administration, 2017.
- [12] 29CFR Part 1910-Occupational safety and health standards [L]. US Department of Labor, 1993. 职业安全健康标准[L]. 美国劳动部,1993.
- [13] Recommended standard for occupational exposure to hydrogen sulfide [L]. The National Institute for Occupational Safety and Health, 1994. 职业接触硫化氢的推荐标准[L]. 美国国家职业安全卫生研究所,1994.
- [14] RP 55-1995 (R2007) Recommendation practice for petroleum and natural gas production and natural gas treatment plants involve hydrogen sulfide [S]. American Petroleum Institute, 2007. RP 55-1995 (R2007)《石油和天然气生产和天然气处理厂业务涉及硫化氢推荐做法》[S]. 美国 API 协会,2007.
- [15] 贵海,法生,群虎. 难忘的 9.28——赵-48 号油井井喷抢险纪实[J]. 瞭望周刊,1993(47):24-25.  
GUI Hai, FA Sheng, QUN Hu. Unforgettable 9.28——Zhao-48 oil well blowout rescue documentary [J]. Lookout, 1993(47):24-25.
- [16] 张凤山. 石油石化行业典型事故案例应急经验分享[M]. 北京:石油工业出版社,2015:17-25.
- [17] 蔡丰. 亲历壳牌——企业帝国的经营细节[M]. 北京:机械工业出版社,2010:17-25.
- [18] 杨延玉,黎洪. 川东北高含硫气井测试作业安全控制技术浅谈[J]. 油气井测试,2012,21(3):72-75.  
YANG Yanyu, LI Hong. A brief discussion on security control technology of gas well testing operation containing high sulfur in northeastern Sichuan gas field [J]. Well Testing, 2012,21(3):72-75.
- [19] 梁锋,高少华. 浅谈川东北高含硫天然气井试气的安全措施[J]. 安全、健康和环境,2008(7):12-14.  
LIANG Feng, GAO Shaohua. Discussion on gas test measures on natural gas well with high hydrogen sulfide content in Northeastern Sichuan [J]. Safety Health & Environment, 2008(7):12-14.
- [20] 项培军,张明友,贺秋云,等. 四川高温高压含硫井测试技术[J]. 油气井测试,2007,16(S1):53-56.  
XIANG Peijun. Testing tech of HT-HP and containing sulfur in Sichuan Oilfield [J]. Well Testing, 2007,16(S1):53-56.

编辑 刘振庆

**第一作者简介:**于跃,女,1973年出生,工程师,1996年毕业于大庆石油学院矿场机械专业,主要从事油气井测试工艺技术、井下作业技术标准、物流管理等研究工作。电话:010-84860828,13911155317; Email: yuyue.gwdc@cnpc.com.cn。通讯地址:北京市朝阳区北四环中路北京国际会议中心,邮政编码:100101。