

# 高温高压气井新技术评估方法

曹立虎, 张宝, 黄锟, 孔嫦娥

中国石油塔里木油田公司油气工程研究院 新疆库车勒 841000

通讯作者: Email: caolh@petrochina.com.cn

引用: 曹立虎, 张宝, 黄锟, 等. 高温高压气井新技术评估方法[J]. 油气井测试, 2023, 32(3): 74-78.

Cite: CAO Lihu, ZHANG Bao, HUANG Kun, et al. A new technology assessment method for high-temperature and high-pressure gas wells [J]. Well Testing, 2023, 32(3): 74-78.

**摘要** 高温高压气井通常存在多种风险影响气井完整性, 需要应用集成新技术解决各类潜在风险。针对塔里木油田库车山前高温高压气井新技术应用面临的各项挑战, 综合技术评估、风险评估和性能评估方法, 建立了一套适合于高温高压气井的新技术评估方法。通过应用高温高压气井新技术评估方法开展新技术的潜在风险、失效模式、技术缺陷、适用条件等评估, 可确定新技术的应用范围、应用要求及改进方案。封隔器应用案例分析表明, 考虑现有技术控制措施对风险降低的影响后, 能快速得到部件的风险及风险零件占比, 方便后续针对性进行验证测试, 提高封隔器使用的可靠性和环境适应性。该新技术评估方法能够有效促进高温高压气井新技术的推广应用和持续改进。

**关键词** 高温高压; 气井; 完整性分析; 新技术评估; 潜在风险; 失效模式; 技术缺陷; 适用性分析

**中图分类号**: TE 355 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.03.014

## A new technology assessment method for high-temperature and high-pressure gas wells

CAO Lihu, ZHANG Bao, HUANG Kun, KONG Chang'e

Petroleum Engineering Research Institute of Petro China Tarim Oil Field Company, Korla, Xinjiang 841000, China

**Abstract:** The integrity of high-temperature and high-pressure (HTHP) gas well is usually vulnerable to multiple risks. It is necessary to integrate new technologies to address the potential risks. In the Kuqa piedmont of the Tarim Oilfield, where the application of new technologies to HTHP gas wells is very challenging, a new technology assessment method for HTHP gas wells was established by integrating technology assessment method, risk assessment method, and performance assessment method. The new technology assessment method can be used to evaluate the potential risks, failure modes, technical defects, and applicable conditions for a new technology, so as to determine the application scope, application requirements, and aspects to be improved. The analysis on packer application shows that after considering the impact of existing technical control measures on risk reduction, the proportions of risky components and risky parts can be quickly obtained for subsequent targeted verification testing and improving the reliability and environment adaptability of the packers. The new technology assessment method can effectively promote the popularization, application, and continuous improvement of new technologies for HTHP gas wells.

**Keywords:** high-temperature and high-pressure; gas well; integrity analysis; new technology assessment; potential risk; failure mode; technical defect; applicability analysis

塔里木油田库车山前高温高压气井具有恶劣的井况条件(超深 6 500 ~ 8 000 m、超高温 160 ~ 190 ℃、超高压 115 ~ 140 MPa)、复杂的工况条件(改造泵压 90 ~ 130 MPa、产量 60 ~ 400 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)和苛刻的腐蚀环境(CO<sub>2</sub> 分压超 2 MPa、Cl<sup>-</sup> 根含量大于 80 000 mg · L<sup>-1</sup> 和鲜酸+残酸+凝析水+地层水交替腐蚀)给建井和开发生产过程中的完整性带来了巨大挑战<sup>[1-4]</sup>。

针对气井完整性问题, 国内外学者对此展开了

研究, 2017 年, 刘欢乐等<sup>[5]</sup> 针对油气井安全高效生产, 研究了一套适用于含硫化氢、二氧化碳等腐蚀性气体的井筒完整性完井技术, 该技术应用效果好, 满足气井正常生产, 且具有防腐、防沥青特点。2018 年宋明哲等<sup>[6]</sup> 针对高压气井的采气井口密封件失效引起的井完整性问题, 分析现场操作难点、优化方法流程, 形成了一套高压气井采油井口套管头卡瓦主密封失效的解决方法, 为高压气井的井筒完整性提供了新的技术支持, 降低了高压气井生产

过程中的安全风险。2019年,Danilo Abreu等<sup>[7]</sup>针对油气井生命周期内的几个阶段,分析了气井可能产生的风险问题,并制定了一个初步风险分析框架。2020年,何雨等<sup>[8]</sup>针对含硫气井开发过程可能出现的井筒完整性问题,建立了井筒完整性风险设计系数预测模型,为含硫气井井筒完整性评估提供了新思路。2021年,OLIVIA Miltonthompson等<sup>[9]</sup>针对水力压裂的天然气开发,利用数据进行定量分析,开发了一个风险框架,并推广到所有井开发阶段的风险评估。调研国内外文献发现,针对高温高压气井井筒完整性问题,未形成一套适用于高温高压气井的新技术评估方法。

通过应用各类最新技术和有效集成现有技术能够有效降低库车山前高温高压气井完整性风险,但新技术本身通常存在极大不确定性而产生潜在的危害。通过建立新技术评估方法,评估新技术本身和相应操作管理上的不确定性,评估新技术的风险程度,可以为新技术的应用和推广提供依据<sup>[10-12]</sup>。针对塔里木油田库车山前高温高压气井新技术应用面临的各项挑战,综合技术评估、风险评估和性能评估方法研究,建立的适合于高温高压气井的新技术评估方法。能够有效促进高温高压气井新技术的推广应用和持续改进。

## 1 新技术评估的概念

新技术是指现有标准或程序不能完全覆盖到的技术、设备或工具,它可以是一种创新的技术,也可以是一种成熟的技术在新环境中的应用。新技术应用所面临的最大挑战是在应用过程中可能会遇到不确定性风险因素。一般可采用新技术评估来系统性地识别新技术在应用过程中存在的不确定性风险因素,并通过充分的验证测试来削减这些风险因素,证明新技术能否可在规定的操作范围内使用,从而达到有效提高新技术应用成功率的目的<sup>[13-14]</sup>。

对于行业内现有标准或程序不能完全覆盖到的技术、设备或工具,应针对使用过程中可能存在的不确定性风险开展技术评估。需开展新技术评估的典型情况包括:

- ① 超过设计温度和压力等新井况条件;
- ② 设备或部件经过改造,工艺流程经过调整;
- ③ 新设备、新操作方案、新工艺流程等。

## 2 新技术评估方法

针对塔里木油田库车山前高温高压气井新技术应用面临的各项挑战,综合技术评估、风险评估和性能评估方法研究,建立了一套适合于高温高压气井的新技术评估流程(如图1所示)。

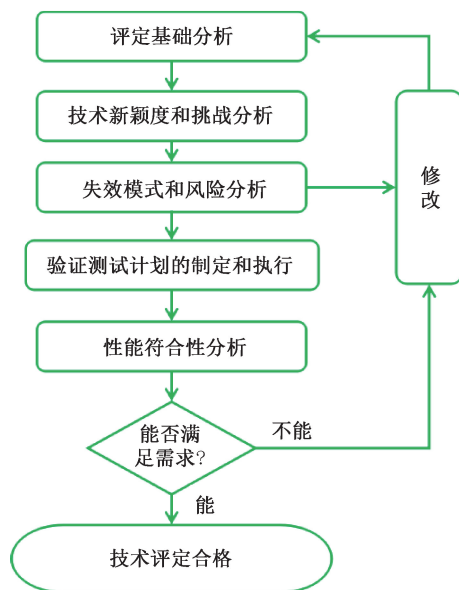


图1 新技术评估流程

Fig. 1 New technology evaluation process

新技术评估方法包括以下5个主要步骤:

- ① 新技术评估基准:考虑新技术的应用范围、适用条件和主要作用,结合新技术评估目标建立新技术评估的基准条件,以此作为后续评估的依据;
- ② 技术评估:通过对技术新颖度的分类对技术进行评估,从而将各主要不确定因素作为评估的重点,同时识别出关键挑战及其不确定性;
- ③ 风险评估:评估新技术的所有潜在风险,针对主要潜在风险开展失效模式和发生概率评估;
- ④ 验证与确认:制定一套评估验证计划,确定评估所发现风险的应对措施,并通过执行新的评估来验证应对措施的效果;
- ⑤ 性能评估:结合新技术评估基准,开展综合评估并最终确定新技术是否满足要求。

### 2.1 技术评估

通过开展技术评估,确定需要开展新技术评估的具体部件,并识别其关键挑战 and 不确定性。技术评估主要包括技术分解、技术分级和主要挑战及不确定性识别三个步骤。

#### 2.1.1 技术分解

为了对技术中的新技术元素有充分地了解,开

展新技术的组成分析。技术组成分析是一种自上而下的评估方法,它从系统层面的功能和程序开始,将技术划分成不同的技术元素。技术组成分析主要考虑以下因素<sup>[15]</sup>:

- ① 主要功能和次要功能;
- ② 设备或硬件的系统组成;
- ③ 工艺流程的顺序或操作;
- ④ 新技术、新设备或新部件在全生命周期内各阶段。

2.1.2 技术分级

在技术组成分析基础上,根据技术成熟度、操作成熟度和整合成熟度进行技术分级,应用最广泛的技术分级方法为技术成熟度。技术成熟度指的是新技术应用前各项准备工作和应用条件的成熟程度。新新技术评估方法按照技术成熟度将新技术分为 8 个等级(见表 1)<sup>[16]</sup>。

表 1 技术成熟度的分级  
Table 1 Classification of technology maturity

等级	阶段	描述
1	概念阶段	未被验证的概念(基本研发,理论概念)
2	概念	概念已被验证(基于研发经验和书面研究验证)
3	已明确	概念已确定(使用物理模型测试得到的经验证据)
4	试用阶段	已完成样机测试(测试了系统功能,性能和可靠性)
5		环境测试(试生产系统环境测试)
6		系统测试(通过生产系统测试)
7	通过现	系统安装(生产系统安装和测试)
8	场验证	现场验证(生产系统现场使用经验)

设备技术成熟度的确定方法为:

- ① 根据以往项目经验确定;
- ② 通过对现有合适的现场应用数据进行评估,确定相应的技术成熟度。

如果设备初始的技术成熟度等级比要求的等级低,那么就应通过一定的评估流程来提升其技术成熟度等级。在新技术评估中,用初始的技术成熟度等级和需要达到的技术成熟度等级来确定评估需要努力的方向。对于一个有特定技术成熟度的部件,该部件应当完成所有技术成熟度所定义的测试。如果之前认为可以使用的设备进行新的应用或应用至新环境中或设备部件发生了改变,都需要有额外的证据来证明其成熟度。

2.1.3 主要挑战及不确定性识别

应用现有的各种分析手段开展新技术主要挑战和不确定性因素识别,对于复杂系统,采用 HAZID(危险源识别)和 HAZOP(危险与可操作性)分析来识别主要挑战和不确定性<sup>[17]</sup>。HAZID 方法用于

识别设计、操作程序和方法的薄弱环节,并对危害进行初步的风险筛选评估,应用于项目的早期阶段,如概念设计和前端设计。HAZOP 方法适用于分析操作流程,提高操作的安全性。

对于高温高压气井典型的风险因素如表 2 所示,实际新技术评估过程中,通常根据可能造成重大伤亡、财产损失或环境污染的事件类型进行分组<sup>[18]</sup>。

表 2 高温高压气井典型风险因素列表  
Table 2 A list of typical risk factors for HP/HT gas Wells

序号	危害因素	序号	危害因素
1	结构性失效	11	噪音
2	设备失效	12	电泄漏
3	高空落物	13	溢流
4	失去承压能力	14	井喷
5	井口落物	15	井漏
6	物体打击	16	浅层气
7	密封失效	17	井壁垮塌
8	火灾	18	井口塌陷
9	爆炸	19	烟雾
10	硫化氢中毒	20	职业意外事件

2.2 风险评估

确定了新技术各潜在失效机理后,针对所有相关失效模式开展风险评估。

首先充分考虑新技术在行业中或项目中的影响,结合不同失效可能性与后果建立风险矩阵,新技术评估通常采用的风险矩阵如图 2 所示。

风险识别		失效可能性				
		非常低	低	中等	高	非常高
失效后果	灾难	M	M	H	H	H
	重大	L	M	M	H	H
	中等	L	L	M	M	H
	一般	L	L	L	M	M
	轻微	L	L	L	L	M

(注: L=低风险, M=中风险, H=高风险)

图 2 典型新技术评估风险矩阵  
Fig. 2 Typical new technologies assess risk matrices

建立风险矩阵后,针对不同评估对象选择合适的风险评估方法确定新技术中出现的所有可能失效模式及其相关失效机理。结合新技术或设备的复杂程度、新颖度来选择适用的评估方法,通常采用的评估方法包括 FMECA、HAZOP、FTA、SWIFT 和 OPERA 等。对于新工艺或工作流程,一般采用 HAZOP 分析,对于设备或工具类的危害识别和风险



评估主要采用 FMECA 的分析方法。

### 2.3 性能评估

性能评估是为了确认与新技术相关的所有风险和不确定性都已降低至可接受水平,满足了技术要求中所需的性能要求,给新技术的应用提供信心。因此,性能评估的结果最终决定了技术是否可用,或是否需要一定的限制条件与措施来保证推广使用的可靠性<sup>[19-20]</sup>。

性能评估主要包括以下步骤:

① 在新技术应用的特殊背景下,对所有证据进行分析,充分考虑证据产生过程中的简化和假设条件以及验证方法的局限性和近似性;

② 确认所有的验证测试活动都已执行,且达到了可接受准则要求。这其中关键的一步就是进行差距分析,以确保所有失效模式的相关证据已满足要求;

③ 对相关影响参数进行敏感性分析;

④ 通过评估验证测试活动中所获得证据的置信度。评估时应考虑到验证测试要求是否经过独立评审,验证测试活动是否由独立第三方进行见证等;

⑤ 将每一种失效模式的失效可能性或性能裕度与评估基础中所需的性能要求进行对比。相关的证据应覆盖到所有单个新技术要素,并已进行审核。

当评估中使用到历史服役记录,应对这些历史记录中的服役条件进行说明,且在进行性能评估时,应考虑到历史服役条件与评估使用条件在哪些方面存在不同。

如果证据来自于部件或样本试验时,性能评估中应考虑到试验真实偏差,以及新技术要求偏差,并应对测试样品和实际应用设备之间的任何偏差进行说明。

如果通过性能评估,确定某些所需功能要求不能达到或满足,则应给出其它的风险控制手段或进一步的验证活动等。如在现有依据的基础上,可通过缩小操作范围,提高检验、维护和修复策略等,以使其满足所需的功能要求。如果确认所有可行的手段都无法使其满足要求,则新技术不能满足使用条件。

## 3 应用案例分析

以某高温高压气井封隔器为例,采用新技术评

估方法,对其进行风险评估,首先根据封隔器部件结构的工作原理,结合其功能对封隔器部件进行分解,将封隔器分为5个子系统和30个部件,其中子系统分别为:卡瓦系统、中心管系统、密封系统、坐封系统、锁紧系统。然后通过 FMECA 分析,统计了失效模式和部件两个层级的风险,其中部件的风险等级为其所有的失效模式中最高风险等级。总计分析了30个部件,在考虑现有控制措施对风险降低的影响下,L风险部件16个,M风险部件12个,H风险部件2个;总计分析了失效模式67个,在考虑现有控制措施对风险降低的影响下,L风险失效模式34个,M风险失效模式31个,H风险失效模式2个。

研究结果表明:在考虑现有技术控制措施对风险降低的影响下,封隔器所存在的风险中,部件低风险占53%,中风险占40%,高风险占7%;而失效模式低风险占51%,中风险占46%,高风险占3%。后续的验证确认环节中应重点对中、高风险的失效模式进行验证测试,以提高封隔器后续使用的可靠性和环境适应性。

## 4 结论

(1)针对新技术在高温高压气井中应用存在的不确定性,建立了一套新技术评估方法,该新技术评估方法通过开展技术评估、风险评估、验证方案和性能评估,可确定新技术的应用范围、应用要求及改进方案。

(2)以一口高温高压气井封隔器为例,开展了技术评估,识别了各个部件的主要功能、失效模式和现有控制措施,为封隔器的安全工作和推广应用提供了依据,对新技术在高温高压气井的应用评估具有重要的参考价值和指导意义。

致谢:感谢中国石油塔里木油田公司油气工程研究院同意本文公开发表;感谢同事对本文撰写提供的帮助与支持。

### 参考文献

- [1] 王招明,谢会文,李勇,等.库车前陆冲断带深层盐下大气田的勘探和发现[J].中国石油勘探,2013,18(3):1-11.  
WANG Zhaoming, XIE Huiwen, LI Yong, et al. Exploration and discovery of large and deep subsalt gas fields in Kuqa Foreland Thrust Belt [J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(3): 1-11.
- [2] 何银达,秦德友,凌涛,等.塔里木油田高压气井油管气密封问题探析[J].钻采工艺,2010,33(3):36-39.  
HE Yinda, QIN Deyou, LING Tao, et al. Analysis of

- tubing hermetic sealing in high pressure gas well of tarim oilfield [J]. *Drilling & Production Technology*, 2010, 33(3): 36-39.
- [3] 刘祥康, 汪传磊, 丁亮亮, 等. 高温高压含硫气井屏障部件失效概率分析[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(12): 4905-4910.
- LIU Xiangkang, WANG Chuanlei, DING Liangliang, et al. Failure probability analysis of barrier components in HTHP sour gas wells [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(12): 4905-4910.
- [4] 高德利, 刘奎. 页岩气井井筒完整性若干研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 602-615.
- GAO Deli, LIU Kui. Progresses in shale gas well integrity research [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 602-615.
- [5] 刘欢乐, 付道明, 郑明学, 等. 腐蚀环境下基于井筒完整性与流动保障的完井技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36(3): 83-88.
- LIU Huanle, FU Daoming, ZHENG Mingxue, et al. Well completing technique based on the wellbore integrity and flow assurance in the corrosive environment [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2017, 36(3): 83-88.
- [6] 宋明哲, 单锋, 卢俊安, 等. 塔里木高温高压气井套管头堵漏技术研究与应用[J]. *石油工业技术监督*, 2018, 34(2): 4-5.
- SONG Mingzhe, SHAN Feng, LU Jun'an, et al. Research and application of casing head plugging technology in Tarim high temperature and high pressure gas well [J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2018, 34(2): 4-5.
- [7] DANILO Abreu, CARLOS Morais, JOAQUIM Santos, et al. Well Integrity: Preliminary Risk Analysis for Different Well Life Cycle Phases [C]. *ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- [8] 何雨, 郑友志, 夏宏伟, 等. 井筒完整性风险评估模型研究[J]. *钻采工艺*, 2020, 43(S1): 12-16.
- HE Yu, ZHENG Youzhi, XIA Hongwei, et al. Study on risk assessment model for wellbore integrity [J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(S1): 12-16.
- [9] OLIVIA Miltonthompson, AKBAR Aggdbjavi, ZORAN Kapelan. Developing a fuzzy logic-based risk assessment for groundwater contamination from well integrity failure during hydraulic fracturing [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 145051.
- [10] DNV. Recommended Practice DNV RP A203. Technology Qualification. Strandveien, 2013.
- [11] 丁亮亮, 杨向同, 张红, 等. 高压气井环空压力管理图版设计与应用[J]. *天然气工业*, 2017, 37(3): 83-88.
- DING Liangliang, YANG Xiangtong, ZHANG Hong, et al. Design and application of annular pressure management charts for high pressure gas wells [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(3): 83-88.
- [12] 汪小平, 王超, 黄船. GM 地区完井试油新技术应用及探讨[J]. *钻采工艺*, 2020, 43(2): 123-125.
- WANG Xiaoping, WANG Chao, HUANG Chuan. New technology application and discussion of completion testing in GM [J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(2): 123-125.
- [13] American Petroleum Institute. API 17TR8, High-Pressure High-Temperature Design Duidelines. Washington DC: API, 2013.
- [14] 蒋永平, 杨松. 鄂尔多斯盆地东缘延川南区块煤层气井排水采气新工艺[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(3): 384-389.
- JIANG Yongping, YANG Song. New technology of dewatering gas recovery for CBM wells in southern Yanchuan Block, eastern margin of Ordos Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(3): 384-389.
- [15] American Petroleum Institute. API RP 100-1, Hydraulic Fracturing-Well Integrity and Fracture Containment. Washington DC: API, 2016.
- [16] API RP 17N. Recommended Practice for Subsea Production System Reliability and Technical Risk Management, 2009.
- [17] Eirik Horpestad. Technology qualification of equipment in subsea production systems [J]. *Norwegian University of Science and Technology*, 2012.
- [18] Harish N Patel, Jay W Bruton, Jing Ji, et al. Systematic technology qualification for HPHT subsea BOP stack equipment and system to improve safety, reliability and availability. OTC 25974, 2015.
- [19] API RP 17Q. Subsea Equipment Qualification—Standardized Process for Documentation, 2010.
- [20] Norwegian Oil Industry Association and Federation of Norwegian Manufacturing Industries. NORSOK D-010 Rev. 4, Well integrity in drilling and well operations. Strandveien, 2013.

编辑 吴志力

**第一作者简介:**曹立虎,男,1989年生,工程师,博士,2015年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发专业,现主要从事井筒工艺技术研究工作。电话:0996-2176709;Email:caolh@petrochina.com.cn。通信地址:新疆库尔勒市石化大道26号,邮政编码:841000