

稠油热采井防砂筛管失效机理及完整性研究

贾立新^{1,2}, 韩耀图^{1,2}, 陈毅^{1,2}, 陈彬^{1,2}, 徐涛^{1,2}

(1.中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452;

2.海洋石油高效开发国家重点实验室, 天津 300452)

摘要: **目的** 防止热采井筛管损坏, 延长热采井防砂有效期。 **方法** 基于有限元理论, 分别针对基管和外保护套, 开展热采井优质防砂筛管在不同热应力补偿器及其安放间隔条件下的完整性研究, 并开展室内实验, 探究筛管在腐蚀、冲蚀共同影响下的失效规律。 **结果** 目前现场使用的热应力补偿器设计基本满足防砂筛管基管的力学完整性需求, 但无法保证外保护套的力学完整性, 无法避免筛管的热应力损坏, 建议在热应力补偿器设计时应充分考虑外保护套的受力状态及变形情况。纯高流速流体冲刷对管材本体无破坏作用, 却对冲蚀-腐蚀环境中腐蚀产物膜具有冲刷破坏作用, 冲蚀-腐蚀迭加条件是筛管冲蚀损坏的主要因素。 **结论** 合理的热应力补偿器加放及筛管材质选择, 有利于提高筛管完整性, 延长防砂有效期。

关键词: 热采井; 防砂筛管; 热应力; 冲蚀; 腐蚀; 完整性

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)01-0077-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.01.012

Failure Mechanism and Integrity of Sand Control Screen in Heavy Oil Thermal Production Well

JIA Li-xin^{1,2}, HAN Yao-tu^{1,2}, CHEN Yi^{1,2}, CHEN Bin^{1,2}, XU Tao^{1,2}

(1.CNOOC(China)Co., Ltd. Tianjin Branch, Tianjin 300452, China;

2.State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Tianjin 300452, China)

ABSTRACT: This paper aims to prevent screen damage in thermal production well and extend the validity of sand control. Based on the finite element theory, this paper studies the integrity of high quality mesh screen for thermal production well in the condition of thermal stress compensators with different quantity and spaces respectively focusing on central base pipe and outer protective cover, and the laboratory experiments are conducted to explore the failure law of the screen under the influence of corrosion and erosion. The result shows that current arrangement of thermal stress compensator fulfils requirements of mechanical integrity of central base pipe of sand control screen, while the mechanical integrity of the outer protective cover cannot be guaranteed, and screen damage cannot be avoided. It is recommended that the stress state and deformation of the outer protective cover should be fully considered in the design of the thermal stress compensator. High velocity fluid has no destructive effect on the screen, but it has erosion damage on the corrosion product film in the environment of erosion-corrosion. The condition of erosion-corrosion superposition is the main factor of erosion damage. Reasonable allocation of thermal stress compensa-

收稿日期: 2020-04-10; 修订日期: 2020-05-29

Received: 2020-04-10; Revised: 2020-05-29

基金项目: “十三五”国家科技重大专项(2016ZX05058-002-008)

Fund: Supported by the “13th Five-year” Major National Science and Technology Projects(2016ZX05058-002-008)

作者简介: 贾立新(1989-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为完井工程及稠油热采。

Biography: JIA Li-xin(1989-), Female, Master, Engineer, Research focus: well completion engineering and research work related to heavy oil thermal recovery.

tors and material selection of screen are conducive to improving the integrity of screen and prolonging the effective period of sand control.

KEY WORDS: thermal production well; sand control screen; thermal stress; erosion; corrosion; integrity

我国渤海湾具有丰富的海上稠油资源^[1],其中常规稠油开发已经取得了初步成功,但低品位稠油难以通过常规冷采技术取得可观的工业油流,因此必须实现热采开发技术的应用^[2]。然而,热采井防砂有效期成为制约海上热采井经济高效开发的关键因素。据统计^[3],渤海某油田热采开发投产后,裸眼筛管井失效率达45.6%。目前,国内外学者通过借助实验方法^[4-11]和数值模拟方法^[12-19],已经针对海上稠油热采井防砂筛管完整性开展了大量研究。研究发现,稠油热采防砂筛管的主要的失效形式为冲蚀、腐蚀、热应力损坏等。现场实际应用中,优质筛管会发生严重的变形、冲蚀,甚至断裂。为助推海上稠油热采井高效开发,文中在前人研究的基础上,结合渤海油田热采井实际生产及选材情况,分别针对优质筛管中心基管和外保护套开展注热过程中防砂筛管完整性数值模拟研究,分析海上稠油热采井防砂筛管失效机理。同时,探究筛管在腐蚀、冲蚀共同影响下的失效规律,以更系统高效地延长热采井防砂有效期,延长油井寿命,提高稠油动用程度。

1 防砂筛管热应力失效分析

1.1 筛管热应力损坏机理分析

Orourke 等人研究发现^[20],水平热采井发生的筛管失效是由于多轮次注热造成筛管轴向伸长或收缩引起疲劳破坏形成的。热采井防砂筛管在高温注蒸汽过程中,热应变受限所产生的热应力会增大筛管内的应力。考虑钢材为各向同性材料,其热应变表达式为^[21]:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \delta \quad (1)$$

式中: α 为热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; ΔT 为相对无热应变状态时的温度差, $^{\circ}\text{C}$; δ 为材料均匀延伸率, %; ε 为热应变, %。

由式(1)可以看出,热应变膨胀方向均为主应力方向,对于防砂筛管,主应力方向即径向、周向和轴向。径向的热应变体现为管径尺寸的变化,周向热应变体现为管壁切向的位移。径向和周向上的热应变可以与砾石层协调变形,因此不会储存较大热应力,而轴向热应力则会由于位移受限而储存较大热应力。现场通常采用热应力补偿器缓解热采管柱轴向位移受限,以保护热采井管柱的完整性^[17,22-25]。在未安装热应力补偿器或补偿量不足的情况下,热采井防砂筛管在注热过程中,热应变受到限制,轴向上就会储存较大的热应力,使基管及保护套进入屈服状态,严重时甚至发生压杆失稳。中心基管失效位置一般起始于孔眼周围应力集中处,进入屈服状态后,基管孔眼周围

会首先发生塑性变形。外保护套失效位置一般在冲缝两端,一旦发生失效,内部防砂筛网就会失去外保护套的保护作用,致使挡砂介质直接受到冲蚀、腐蚀及非均匀外挤力的破坏。因此考虑到防砂措施的长期有效性,应尽可能使防砂筛管远离屈服状态。

1.2 热应力补偿器加放设计

本研究借助有限元计算软件 ABAQUS 为平台,分别针对复合筛管的基管和外保护套分别进行建模计算。由于六面体网格具有精度高的特性,同时考虑温度-位移场的耦合计算,本研究采用 C3D8T 单元进行计算。由于孔眼周围会有应力集中作用,故在孔眼周围网格进行局部加密,加密半径为 20 mm。具体几何参数见表 1。

表 1 基管、外保护套的几何参数

Tab.1 Geometry parameters of central base pipe and outer protective cover

基管		外保护套	
几何参数	数值	几何参数	数值
基管外径	140.0 mm	冲缝宽度	4.0 mm
基管内径	124.3 mm	冲缝长度	2.0 cm
基管壁厚	7.85 mm	筛缝尺寸	150.0 μm
孔眼直径	10.16 mm	保护套外径	157.7 mm
布孔密度	360 m^{-1}	保护套壁厚	1.5 mm

经计算,在不使用热应力补偿器的条件下,孔眼周围等效塑性应变(PEEQ)大于 0(如图 1 所示),说明此时基管会受热应力发生屈服而破坏结构甚至失效。因此,为保证基管完整性,应根据基管参数选取合适的热应力补偿器与下入间隔。不同的热应力补偿器与下入间隔组合的计算结果见表 2。若每隔 150 m 补偿量低于 200 mm,则在注热过程中基管会进入屈服状态。

与中心基管类似,在没有热应力补偿器的情况下,外保护套会进入屈服状态,并发生严重的变形,

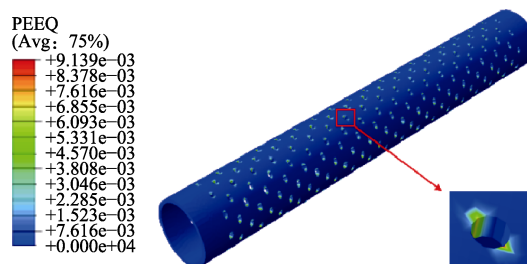


图 1 未使用热应力补偿器条件下基管计算结果
Fig.1 Results of central base pipe without thermal stress compensation

表 2 不同的热应力补偿器与下入间隔条件下中心基管计算结果

Tab.2 Calculation results of central base pipe with different compensator quantity and spaces

补偿器间隔/m	补偿量/mm	安全性
50	200	安全
100	200	安全
150	200	不安全
50	400	安全
100	400	安全
150	400	安全
50	600	安全
100	600	安全
150	600	安全

甚至发生屈曲(如图 2 所示), 因此针对不同的热应力补偿器与下入间隔组合进行计算, 结果见表 3。根据计算结果可以发现, 相比于中心基管, 外保护套对热应力补偿器设计的要求更加苛刻, 仅在每 50 m 间隔补偿量为 400 mm 以上或在每 100 m 间隔补偿量为 600 mm 以上才能保证外保护套不进入屈服状态。

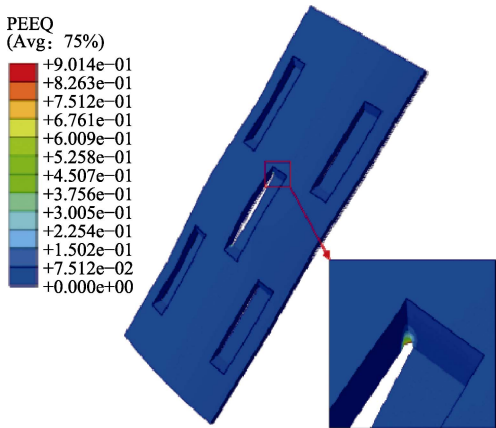


图 2 未使用热应力补偿器条件下的外保护套计算结果

Fig.2 Results of outer protective cover without thermal stress compensation

表 3 不同的热应力补偿器与下入间隔条件下外保护套计算结果

Tab.3 Calculation results of outer protective cover with different compensator quantity and spaces

补偿器间隔/m	补偿量/mm	安全性
50	200	不安全
100	200	不安全
150	200	不安全
50	400	安全
100	400	不安全
150	400	不安全
50	600	安全
100	600	安全
150	600	不安全

在现场热应力补偿器设计中, 一般仅考虑中心基管的应力状态, 很少考虑外保护套。如图 3 所示, 若按照中心基管力学完整性要求提出的补偿量为 50 m 间隔补偿量为 200 mm, 则外保护套冲缝附近就会进入屈服状态。与此同时, 若受到非均匀外挤力、注气压力波动或其他外力, 外保护套就会发生严重的变形破坏。因此, 若未考虑防砂筛管外保护套的受力状态, 而导致热应力补偿器设计不合理, 则外保护套首先会进入屈服状态, 发生较大变形, 甚至屈曲, 导致外保护套的过流缝隙尺寸发生显著变化。一方面, 缝隙尺寸变化会造成流速不均匀, 且容许较大颗粒进入, 会加剧对内部防砂筛网的冲蚀作用; 另一方面, 过流缝隙变窄的冲缝处会发生严重的堵塞, 进一步加剧流速的非均匀性, 导致局部流速过大, 对内部防砂筛网和中心基管造成更严重的破坏。

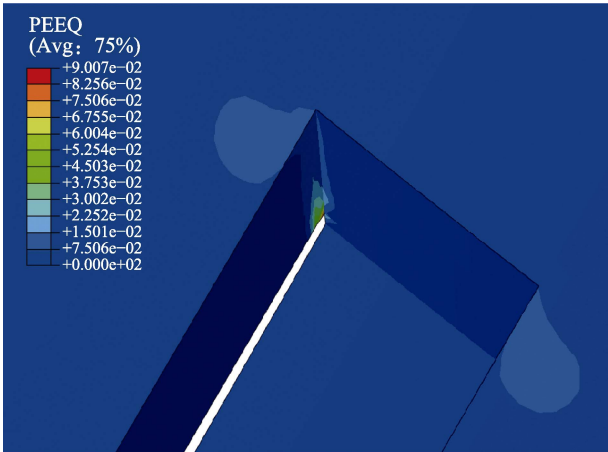


图 3 每隔 50 m 安放 200 mm 热应力补偿器条件下的外保护套计算结果

Fig.3 Results of outer protective cover with thermal stress compensation of 200 mm every 50 m-space

2 防砂筛管冲蚀腐蚀条件下失效分析

筛管金属表面在多相流介质的腐蚀作用下形成保护膜, 同时其在冲蚀作用下发生破坏, 形成一个自催化的加速腐蚀的破坏过程。为弄清稠油多轮次注热吞吐过程中腐蚀和冲蚀对防砂筛管影响程度, 开展防砂筛管冲蚀和腐蚀迭加作用试验研究, 探究筛管在腐蚀、冲蚀共同影响下的失效规律。热采过程中稠油容易次生腐蚀性气体, 如 CO_2 、 H_2S 等^[26-29], 使得井下腐蚀环境更恶劣。文中模拟腐蚀环境为注热阶段考虑次生腐蚀性气体的腐蚀环境: CO_2 分压为 0.2 MPa, H_2S 分压为 0.0023 MPa^[30]。冲蚀破坏是最常见而难预防的破坏形式, 在含水、腐蚀性、多相流作用下引起的冲蚀穿孔更为复杂, 回采过程携砂流体对筛管的冲蚀最严重, 文中冲蚀实验实验温度按照回采井底温度 80 ℃ 设计。

2.1 回采阶段筛管冲蚀试验

试验压差为 1.0 MPa, 模拟石英砂粒径为 100~200 μm , 筛网精度为 300 μm , 单层筛网, 填砂量为 6 kg, 冲蚀时间为 5 h。冲蚀试验后如图 4 所示, 可清晰反映出筛网受冲蚀情况。在冲蚀环境下, 筛网

出现明显局部破坏, 冲蚀清理干净样片表面, 冲蚀磨损破坏区域特别明显。

采用 SEM 扫描电镜观察筛网冲蚀后微观形貌, 如图 5 所示。可知冲蚀条件下, 破坏区域主要集中在正对样片位置, 筛网局部损坏严重, 部分金属丝可见明显的磨蚀痕迹, 筛网存在砂粒堆积情况。

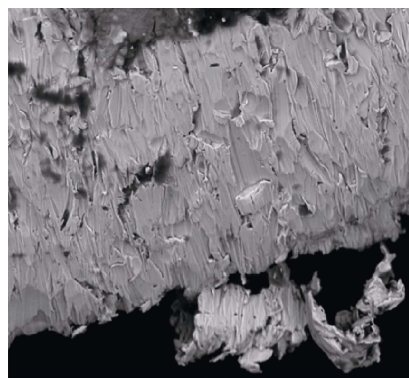


图 4 冲蚀后试样形貌
Fig.4 Morphology of sample after erosion



2 μm

a $\times 200$



50 μm

b $\times 1500$

图 5 筛网冲蚀破坏点不同倍数下的 SEM 微观结构
Fig.5 SEM microstructure at different times of erosion failure point of screen

2.2 注热阶段冲蚀-腐蚀模拟试验

试验材料为热采井常用的 TP100H 钢材, 试样为外径 30 mm、内径 2 mm、厚度 3 mm 的圆状金属块。试验装置采用改进型的 CWYF-1 高温高压釜和冲蚀试验测试装置。先在液相条件下冲蚀 1 h, 然后在最高腐蚀环境中腐蚀 24 h, 再冲蚀 1 h。然后在最高腐蚀环境下腐蚀 24 h, 再冲蚀 1 h, 清洗试样, 测量前后孔径变化。

试样 1: 冲蚀流速保持为 20 m/s, 压差稳定为 1 MPa, 原油中连续冲蚀 3 h, 对比试样前后孔径变化。

试样 2: 冲蚀试验条件为流速 20 m/s, 压差为 1 MPa, 单次 1 h, 原油; 腐蚀环境 CO_2 分压为 0.2 MPa, H_2S 分压为 0.0023 MPa, 测试温度 80 $^\circ\text{C}$, 模拟流速

1.5 m/s 进行腐蚀测试, 单次腐蚀 24 h。

冲蚀-腐蚀试验后照片如图 6 所示。采用 SEM 扫描电镜观察试样 1 和试样 2, 分析孔径的微观形貌变化, 试样 1 见图 7。由图 7 可知, 在纯液相条件冲蚀下, 流速为 40 m/s, 冲蚀 3 h, 未见孔径减小, 说明纯液体对管材本体无冲蚀破坏作用。

试样 2 在冲蚀-腐蚀作用前后的 SEM 形貌如图 8 所示。由图 8 可知, 腐蚀 24 h 后, 孔径由腐蚀前的 2.34 mm 减小至 2.07~2.11 mm, 产物膜增厚 115~135 μm 。然后冲蚀 1 h, 孔径增大至 2.14~2.15 mm, 产物膜厚度减少约 20 μm , 说明流体对产物膜有一定破坏作用。综合热采过程中, 高温引起井下管柱发生微塑性变形, 可能诱发基底产物膜破坏, 进而被高速流体剥落, 加速筛管损坏。

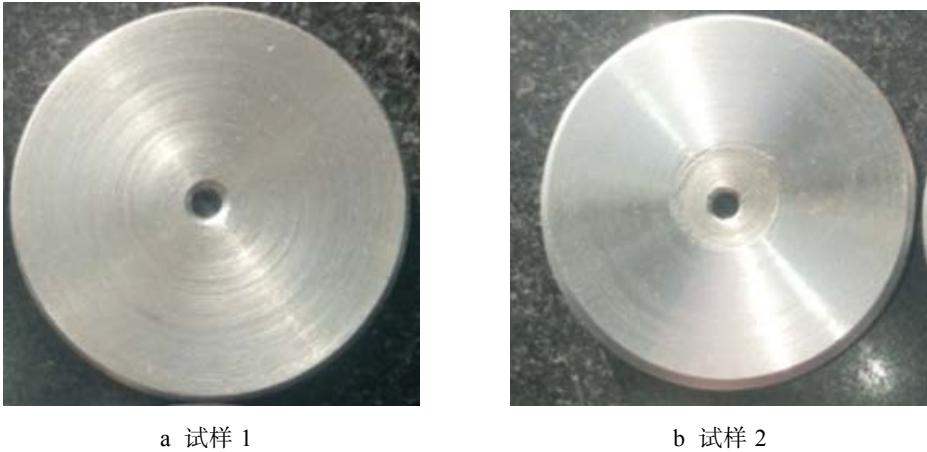


图 6 冲蚀-腐蚀试验后照片
Fig.6 Photos after erosion-corrosion test: a) sample 1; 2) sample 2

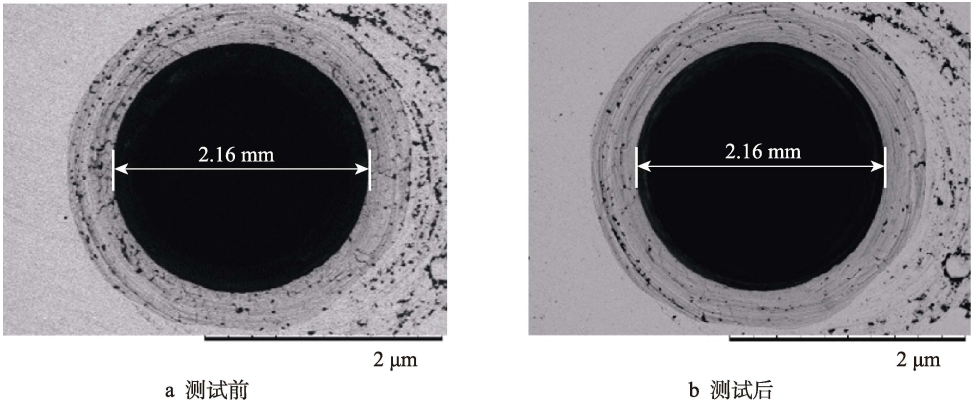


图 7 试样 1 冲蚀前后 SEM 电镜扫描图
Fig.7 SEM scanning picture of sample 1(a)before and(b)after erosion

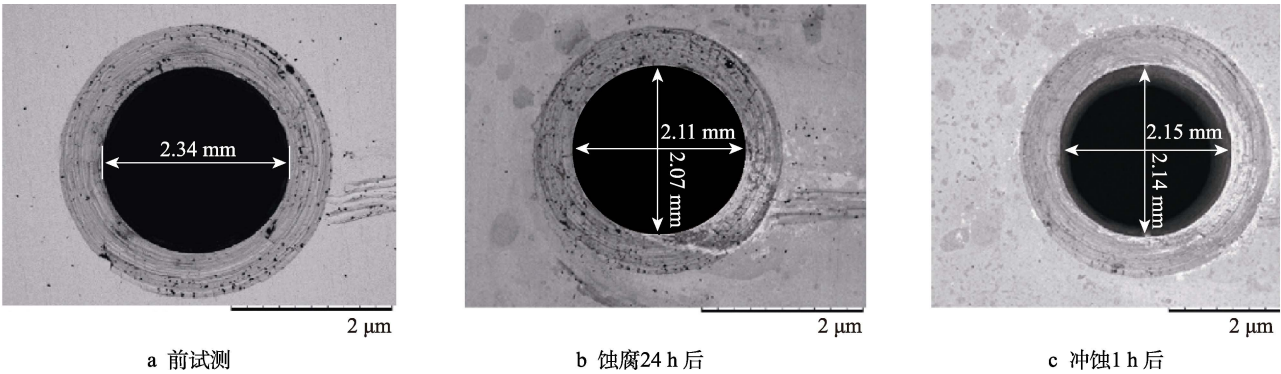


图 8 试样 2 冲蚀-腐蚀后 SEM 电镜扫描图
Fig.8 SEM scanning picture of sample 2 before and after erosion: a) before testing; b) after 24 h corrosion; c) after 1 h erosion

3 结论

- 1) 热采井注入高温蒸汽会导致防砂筛管发生塑性变形失效,需在防砂筛管上加放热应力补偿器避免筛管的热应力损坏。
- 2) 筛管外保护套对于热应力补偿器设计的要求更加苛刻,外保护套的变形会导致筛管破坏的加剧,因此建议在热应力补偿器设计时应充分考虑外保护

- 套的变形情况。
- 3) 高流速纯流体冲刷对管材本体无破坏作用,高速流体会对腐蚀产物膜形成一定的冲刷破坏作用,剥落表面产物膜,腐蚀与冲蚀迭加作用是筛管损坏的主要因素。
 - 4) 热采时高温引起井下管柱发生微塑性变形,可能诱发基体产物膜破坏,进而被高速流体剥落,加速金属材质的损坏。

参考文献:

- [1] 周守为. 海上稠油高效开发新模式研究及应用[J]. 西南石油大学学报, 2007(5): 1-4.
ZHOU Shou-wei. The study and application of new mode of effective development of offshore heavy oil field[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007(5): 1-4.
- [2] 徐文江, 姜维东. 我国海上低品位稠油开采技术进展[J]. 石油科技论坛, 2014, 33(1): 10-14.
XU Wen-jiang, JIANG Wei-dong. China's technological progress in production of offshore low-quality heavy oil[J]. Petroleum science and technology forum, 2014, 33(1): 10-14.
- [3] 陈毅. 渤海海域某油田防砂方式优选及应用[J]. 石化技术, 2016, 23(6): 113-114.
CHEN Yi. The optimization and application of sand control method in an oil field of Bohai bay[J]. Petrochemical industry technology, 2016, 23(6): 113-114.
- [4] SMITH K, BOWEN E. Testing results of an economical mesh screen for thermal applications[C]//SPE Heavy oil conference. Canada, 2014.
- [5] MAHMOUDI M, ROOSTAEI M, FATTAHPOUR V, et al. Standalone sand control failure: Review of slotted liner, wire wrap screen, and premium mesh screen failure mechanism[C]//SPE annual technical conference and exhibition. Canada, 2018.
- [6] MAHMOUDI M, ROOSTAEI M, FATTAHPOUR V, et al. Standalone sand control failure: The role of wellbore and near wellbore hydro-thermo-chemical phenomenon on the plugging and the flow performance impairments of the standalone sand screen[C]//SPE thermal well integrity and design symposium. Canada, 2018: 27.
- [7] 罗蒙, 王琰, 李良庆. 热采井用筛管热应力试验技术研究[J]. 宝钢技术, 2013(3): 39-44.
LUO Meng, WANG Li, LI Liang-qing. Research on thermal stress experiment technique for sieve tubes used in thermal recovery wells[J]. Baosteel technology, 2013(3): 39-44.
- [8] 李效波, 张海龙. 热采筛管冲蚀与腐蚀迭加作用机理[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 49-55.
LI Xiao-bo, ZHANG Hai-long. Erosion and corrosion superposition mechanism of thermal screen[J]. Science & technology review, 2014, 32(3): 49-55.
- [9] 潘志勇, 韩礼红, 王建军, 等. 稠油热采井用防砂筛管温度效应试验研究[J]. 石油管材与仪器, 2017, 3(5): 40-42.
PAN Zhi-yong, HAN Li-hong, WANG Jianjun, et al. Experimental study on temperature effect of sand screen used in heavy oil thermal recovery well[J]. Petroleum instruments, 2017, 3(5): 40-42.
- [10] 武延鑫, 董长银, 李效波, 等. 热采井高温条件下机械筛管强度变化规律模拟研究[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(5): 6-11.
WU Yan-xin, DONG Chang-yin, LI Xiao-bo, et al. Research of influence of high temperature on mechanical screen strength[J]. Oil field equipment, 2017, 46(5): 6-11.
- [11] 王厚东. 防砂管冲蚀失效机理与预测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
WANG Hou-dong. Study on erosion failure mechanism and prediction method of screen[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2017.
- [12] FURUI K, FUH G F, MORITA N. Casing and screen failure analysis in highly compacting sandstone fields[C]//SPE annual technical conference and exhibition. Canada: Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [13] JONES C, WATSON K, MORGAN Q P. Formation loading and deformation of expandable sand screens [C]//SPE european formation damage conference. Canada, 2011.
- [14] VAN VLIET J, HUGHES M J. Comparison of direct-wrap and slip-on wire wrap screens for thermal well applications[C]//SPE thermal well integrity and design symposium. Canada, 2015.
- [15] 车强. 超稠油藏水平井筛管损坏研究与保护对策[D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
CHE Qiang. Study on screen damage of horizontal well in super heavy oil reservoir and protection measures[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009.
- [16] 徐磊. 稠油热采井防砂筛管热稳定性优化仿真分析[J]. 北京石油化工学院学报, 2016, 24(02): 40-45.
Xu Lei. Simulation analysis of the thermal stability optimization of anti-sand sieve tube in heavy oil thermal recovery wells[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2016, 24(02): 40-45.
- [17] 李波. 热采水平井完井管柱力学行为模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
LI Bo. Study on mechanical behavior simulation of completion string in horizontal well of thermal recovery[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [18] 董卫, 闫怡飞, 闫行, 等. 热采水平井完井筛管参数对管柱稳定性影响研究[J]. 石油机械, 2018, 46(3): 65-71.
DONG Wei, YAN Yi-fei, YAN Xing, et al. Influence of completion screen parameters on the stability of the string in horizontal wells of thermal recovery[J]. China petroleum machinery, 2018, 46(3): 65-71.
- [19] 于法浩, 蒋召平, 白健华, 等. 渤海油田稠油水平井防砂筛管耐温能力的确定[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(6): 65-70.
YU Fa-hao, JIANG Zhao-ping, BAI Jian-hua, et al. Determination of the temperature resistance capacity of sand controlscreen liner in horizontal heavy oil wells in the Bohai oilfield[J]. Petroleum drilling techniques, 2018, 46(6): 65-70.
- [20] OROURKE C. The potential for slot closure, screen damage, and collapse of liners in thermal horizontal wells[C]//Canadian unconventional resources and international petroleum conference. Canada: Society of Petroleum Engineers 2010: 25.
- [21] OTTOSEN N S, RISTINMAA M. The mechanics of con-

- stitutive modeling[M]. Amsterdam: Elsevier, 2005.
- [22] 孙迎春, 贾耀惠. 热应力补偿器在超稠油开发中的应用[J]. 特种油气藏, 2002(6): 51-53.
- SUN Ying-chun, JIA Yao-hui. Application of thermal stress compensator in super heavy oil development[J]. Special oil & gas reservoirs, 2002(6): 51-53.
- [23] 刘正伟, 解广娟, 张春杰, 等. 海上稠油热采井防砂筛管热应力分析[J]. 石油机械, 2012, 40(2): 26-29+99.
- LIU Zheng-wei, XIE Guang-juan, ZHANG Chun-jie, et al. A thermal stress analysis of the sand control screen in offshore heavy oil thermal production wells[J]. China petroleum machinery, 2012, 40(2): 26-29+99.
- [24] 孙伟. 热应力补偿器设计和研究[D]. 荆州: 长江大学, 2014.
- SUN Wei. Design and research of thermal stress compensator[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2014.
- [25] 陈新安, 董长银, 李效波, 等. 热采水平井防砂管柱热应力分析及补偿器位置优化[J]. 石油矿场机械, 2015, 44(2): 37-42.
- CHEN Xin-an, DONG Chang-yin, LI Xiao-bo, et al. Thermal stress analysis of sand control string and thermodynamic compensator optimization for thermal recovery horizontal wells[J]. Oil field equipment, 2015, 44(2): 37-42.
- [26] 马增华, 孙永涛, 林涛, 等. 多元热流体中不同钢材的腐蚀行为研究[J]. 石油化工应用, 2012, 31(9): 60-63.
- MA Zeng-hua, SUN Yong-tao, LIN Tao, et al. Study on the corrosion behavior of different steels in multi-element hot fluid[J]. Petrochemical industry application, 2012, 31(9): 60-63.
- [27] ZHU G, ZHANG S, HUANG H, et al. Induced H₂S formation during steam injection recovery process of heavy oil from the Liaohe Basin, NE China[J]. Journal of petroleum science & engineering, 2010, 71(1-2): 30-36.
- [28] 刘新锋, 张海龙, 李效波, 等. 海上稠油热采筛管冲蚀影响因素[J]. 石油钻采工艺, 2012(s1): 73-75.
- LIU Xin-feng, ZHANG Hai-long, LI Xiao-bo, et al. Influence factors study on screen erosion of offshore heavy crude thermal extraction[J]. Oil drilling & production technology, 2012(s1): 73-75.
- [29] LIN R, SONG D, WANG X, et al. Experimental determination of in situ hydrogen sulfide production during thermal recovery processes[J]. Energy & fuels, 2016, 30(7): 5323-5329.
- [30] 陈毅, 许杰, 贾立新, 等. 海上热采井套管热应力强度衰减与高温腐蚀叠加条件下的管材优选研究[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 195-201.
- CHEN Yi, XU Jie, JIA Li-xin, et al. Casing selection for thermal wells under condition of thermal strength attenuation and high temperature corrosion in offshore oil-field[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 195-201.