

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2019075

哈萨克斯坦 SIPC 油田开发主要问题与技术对策

赵全民¹, 何汉平², 何青水², 陈向军², 王宝峰²

(1. 中国石化集团国际石油勘探开发有限公司, 北京 100083; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 哈萨克斯坦 SIPC 油田开发年限较长, 储层地质特征存在较大差异, 开发过程中存在注水效率低、储层无法自然投产且改造难度大、储层易受到伤害、出砂严重、钻井速度低且成本高、环空带压等问题。为此, 在分析问题原因的基础上, 基于油田特点和技术现状, 制定了应用高效注水技术、携砂采油技术、高效钻井技术等成熟技术, 研制智能储层保护剂及研究复杂砂岩可控穿层压裂技术的技术对策。现场应用表明, 该油田采用制定的技术对策, 提高了注水效率和储层压裂改造效果, 解决了地层出砂问题, 降低了储层伤害程度和钻井成本, 实现了低油价条件下降本增效的目的, 支撑了哈萨克斯坦 SIPC 油田项目的顺利实施。

关键词: 分层注水; 压裂; 防止地层损害; 防砂; 钻井成本; 哈萨克斯坦; SIPC 油田

中图分类号: TE34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2019)04-0092-05

Key Problems and Technical Countermeasures in SIPC Operated Oilfield Development in Kazakhstan

ZHAO Quanming¹, HE Hanping², HE Qingshui², CHEN Xiangjun², WANG Baofeng²

(1. Sinopec International Petroleum Exploration & Production Corporation, Beijing, 100083; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101)

Abstract: The SIPC operated oilfield in Kazakhstan have experienced a long development period, and the geological characteristics of reservoirs are quite different. As a result, several problems occurred during the development process such as low water injection efficiency, difficulties in reservoir natural flow and stimulation, reservoir damage, severe sanding, high drilling cost and abnormal annulus pressure presence. Based on the analysis of the existing problems and considering the widely varying characteristics of this oilfield and current status of technology, countermeasures were proposed in which mature technologies such as high-efficiency water injection, sand-bearing oil recovery and high-efficiency drilling were adopted, intelligent reservoir protection agents were developed, and controllable cross-layer fracturing technology for complex sandstone was studied. The field application suggests that the proposed technical countermeasure can effectively improve water injection efficiency and fracturing stimulation effect, and solve the problem of sand production. The implementation of the countermeasures reduced reservoir contamination and drilling cost, and enhanced the development of the fields, and achieved target of cost-reduction and efficiency improvement during times of low oil prices. Further, this study may provide technical support for the smooth implementation of SIPC operated oilfield in Kazakhstan.

Key words: separate layer water injection; fracturing; formation damage prevention; sand control; drilling cost; Kazakhstan; SIPC operated oilfield

哈萨克斯坦中国石化集团国际石油勘探开发有限公司油田项目(以下简称 SIPC 油田项目)位于我国“一带一路”战略合作带上, 是中国石化海外大型油田开发项目之一。SIPC 油田项目开发年限较长, 所属油田地质特征存在较大差异, 在开发过程中存在注水效率低、储层无法自然投产且改造难度大、储层易受到伤害、出砂严重、钻井速度低且成本高、环空带压等问题。为此, 针对该油田油井水驱特点, 开展了周期注水、分层注水和聚合物调剖等高效注水技术适应性评价与应用; 基于油井出砂情

况, 开展了水平井机械分段防砂和螺杆泵携砂采油工艺分析与应用; 根据油田钻遇地层非均质性强特点, 开展了螺杆+单稳定器钻具组合防斜打直一趟钻钻井工艺应用。此外, 还进行了智能储层保护剂

收稿日期: 2019-04-24; 改回日期: 2019-06-18。

作者简介: 赵全民(1966—), 男, 河南许昌人, 1988 年毕业于石油大学(华东)钻井专业, 2013 年获中国石油大学(北京)安全工程与技术专业博士学位, 高级工程师, 主要从事石油工程技术管理工作。E-mail: qmzhao.sipc@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“哈萨克斯坦 BOL、KKM 油田增产关键技术研究”(编号: P18091)部分研究内容。

的研制、复杂砂岩可控穿层压裂技术的研究与应用。通过应用上述成熟技术及研发新技术,解决了该油田项目开发中存在的问题,提高了储层压裂改造效果,降低了钻井成本,达到了低油价条件下降本增效的目的,推动了海外油气资源的高效开发。

1 油田概述

SIPC 油田项目包括 SPC 油田、KKM 油田、

KOA 油田和 NB 油田等 4 个主力油田,采油井近 2 000 口。SPC 油田和 NB 油田为浅层砂岩油藏,物性较好,属高孔高渗边底水油藏^[1];KKM 油田和 KOA 油田分别为中深砂岩油藏和碳酸盐岩油藏,物性均较差,属低压低孔低渗边底水油藏。各油田的油藏物性、开采方式与生产情况见表 1。目前,4 个油田均进入开发中后期,单井产量较低,综合含水率逐年上升,在稳油、增效、降本等方面面临诸多挑战。

表 1 各油田油藏物性、开采方式与生产情况

Table 1 Reservoir physical properties, production methods and production states of each oilfield

油田	埋深/m	孔隙度, %	渗透率/mD	储层压力/MPa	储层温度/℃	采油方式	平均单井产油量/(t·d ⁻¹)	综合含水率, %
SPC油田	300~800	12.3~41.7	0.3~1 986.8	4.0~9.5	23.0~40.1	杆式泵、螺杆泵	3.5	90.5
NB油田	350~500	30.0~32.0	1 900.0~2 000.0	4.0~5.3	29.0~33.0	电动潜油泵	3.9	93.8
KKM油田	2 600~3 160	10.0~15.8	1.0~16.0	22.1~34.2	102.0~115.0	电动潜油泵	9.5	90.1
KOA油田	2 900~3 500	8.3~20.0	1.0~11.0	27.0~38.1	110.0~135.5	部分井自喷,部分井电动潜油泵	21.5	9.5

2 开发过程中存在的主要问题

SIPC 油田项目在开发过程中存在的主要问题体现在 2 个方面:一是注水工艺、储层物性等方面,具体表现为注水开发效率较低、储层易受到伤害、无法自然投产且改造难度大和出砂严重等;二是钻井效率和钻井完井质量方面,具体表现为钻井速度低、成本高和环空带压等。

2.1 注水效率较低

NB 油田、KKM 油田和 SPC 油田均采用注水方式开发,单井含水率普遍较高,注水效果较差,产油量较低。NB 油田油藏为浅层、层状边底水普通稠油油藏,主力区块已基本实现全面注水开发。随着注采比逐渐提高,累计注采比已经接近 0.9,取得了一定的水驱效果,但由于储层非均质性强,大部分注水井仍采用笼统注水方式,纵向上水驱动用程度仅有 38%。2013 年,KKM 油田将注采井网从反九点井网调整为排状井网,地层能量得到补充,但仍处于相对亏空状态,地层压力保持水平不足 0.7;该油田采用笼统注水方式,纵向上吸水差异大,含水率上升快,造成产量下降较快,目前含水率升至 90.0% 左右。分析认为,造成注水效率较低的原因为:一是储层存在优势渗流通道,注入水无效循环;二是地层能量得不到补充。

2.2 储层易受到伤害

由于开发前期对 SPC 油田和 KKM 油田储层特性认识不清,导致钻井完井过程中储层受到了严重的伤害,产量不能达到预期要求。SPC 油田的储层为非均质高渗砂岩储层,黏土矿物含量 7%~10%,伊蒙混层占比高。钻井完井过程中,由于屏蔽暂堵聚合物钻井液的封堵效果较差,导致 SPC 油田储层受到严重伤害。KKM 油田储层的岩性主要为细粒砂岩,属于低压低渗储层,地层压力系数 0.9~1.0,泥质含量高达 15%,地层水矿化度高达 $(13\sim22)\times10^4$ mg/L。钻井过程中钻井液对 KKM 油田储层伤害严重,完钻后表皮系数 2~3。KKM 油田所有井均需要进行酸化解堵、压裂后才能投产。此外,在用的清水修井液对储层的伤害严重,多数油井修井后表皮系数由负值增大为高正值。

2.3 无法直接投产且储层改造难度大

KKM 油田和 KOA 油田均为低渗透油藏,需要进行压裂改造才能投产,其中 KKM 油田储层压裂改造难度较大,压裂效果较差。KKM 油田纵向上发育 10 个油组 37 个小层,单层厚度 2~3 m,岩性为含泥质砂岩。该油田储层改造面临诸多难点:多数储层厚度小,水层及薄夹层多,缝高控制难度大;储层岩性为细砂岩且泥质含量高,支撑剂易嵌入地层;储层地层

压力低(目前地层压力系数小于1.0),压裂后压裂液返排困难。目前,KKM油田绝大多数井进行了储层压裂改造,但产量未达到设计要求,多口井在压裂过程中还出现了砂堵问题;压裂液破胶后残渣多,返排困难,对储层造成的二次伤害较大。

2.4 地层出砂严重

NB油田和SPC油田属浅层疏松砂岩油藏,油井完井方式主要为套管射孔完井,采用常规采油工艺开采。统计油井生产数据发现,这2个油田在生产过程中均存在出砂问题,三分之一的油井一投产就存在出砂现象,含砂量0.1%~20%,出砂程度为中等—严重。从开发现状看,油井出砂带来了一些生产和维护问题:1)对于出砂严重的油井,在很短的生产时间内就会出现砂埋产层的情况,新井会因出砂严重影响投产;2)出砂会增加修井作业工作量,影响油井正常生产,增加油井维护成本。

2.5 钻井速度低、成本高

KOA油田开发井的钻井成本较高。该油田完钻井深2 900.00~3 500.00 m,钻遇的上二叠系地层岩性混杂,泥岩、砂岩、灰质泥岩、砾岩、石膏等频繁交替,部分井段夹层多,地层倾角大,蹩跳钻严重;地层软硬交错,容易发生井斜。灰泥岩地层岩性为致密坚硬的粉砂岩、钙质泥岩和泥板岩,地层可钻性差,钻头使用寿命短,起下钻频繁,断钻具事故时有发生,机械钻速较慢,严重影响了钻井速度,钻井周期为110~130 d(完钻井深3 000.00~3 200.00 m),平均机械钻速低于3.0 m/h。KOA油田平均钻井生产时效为88.3%,非生产时间为11.7%,钻井成本高。

2.6 环空带压

NB油田和KKM油田的油井普遍存在环空带压的问题。NB油田纵向上发育侏罗系、白垩系2套含油气系统,其中,白垩系油层平均埋深350.00 m,油层较薄且饱含浅层气,加之生产中注蒸汽和修井等因素的影响,环空带压问题突出,环空带压井占20%。KKM油田储层埋深2 600.00~3 200.00 m,产出流体含有CO₂,在开发后期造成套管腐蚀损坏,导致环空带压,严重影响了油井服役寿命和开发效果。

3 技术对策

针对SIPC油田项目在开发过程中存在的主要

问题,通过应用成熟技术、研究新技术和采取相应的技术措施,达到了稳产、降低钻井成本和保障井筒完整性的目的。

3.1 提高注水效率

针对储层非均质性强、纵向上油层多的特点,应用周期注水^[2-4]、分层注水^[5-6]和聚合物调剖等注水技术,调整注水剖面 and 油井的产液剖面,提高注水驱油效果。周期注水基于油藏数值模拟和多参数敏感性分析,通过周期性改变注水量,在油层内形成不稳定的压力场,促使高低渗透层间发生油水交换渗透,从而增大水驱波及体积和改善油井见效程度。

2009—2018年,NB油田64口注水井利用现有井网实施了周期注水,注水周期平均4 d,测试数据显示周期注水区域内75%的注水井吸水厚度增加6.0%~12.8%,阶段累计增油 18.9×10^4 t。由于同心双管分注可由地面准确调节分层注水量,且管柱验封简单直观,NB油田136口注水井采用了同心双管分注,分层注水实施有效率75%,累计增油 122.8×10^4 t。NB油田还针对注水开发中存在水窜严重的问题引进了聚合物凝胶调剖技术。聚合物凝胶调剖是在低浓度聚合物溶液中加入适量交联剂,使聚合物发生分子内或分子间交联,从而大幅提高聚合物溶液黏度,对高渗透层形成封堵,使后续液流改向,增大水驱波及系数和波及体积。2006—2018年,NB油田先后进行了50余井次聚合物凝胶调剖,对应受效油井100余口,单井含水率平均下降9个百分点,单井平均日增油2.2 t,累计增油 8.0×10^4 t,取得了较好的控水增油效果。

3.2 降低储层伤害新技术

针对部分油田因储层非均质性强、黏土矿物含量高、水敏性强等导致储层伤害严重的问题,在分析储层伤害机理和现有储层保护技术^[7-8]的基础上,研发了智能储层保护剂^[9]。智能储层保护剂具有在低矿化度盐水中膨胀,在高矿化度盐水及原油中溶解的特点。该保护剂在压差作用下封堵储层中的孔隙和微裂缝,减少固相颗粒和外来流体的侵入;在负压返排过程中溶于高矿化度地层水或原油随之排出,从而达到保护储层的目的,其作用机理见图1。室内试验表明,加入智能储层保护剂后,储层岩心的渗透率恢复率达到95%。该保护剂在KKM油田多口井修井作业中进行了应用,封堵效果良好,能够满足修井作业需要,排水复产期缩短40.0%

以上。现场应用表明,该智能储层保护剂的封堵和储层保护效果良好,具有推广应用价值。

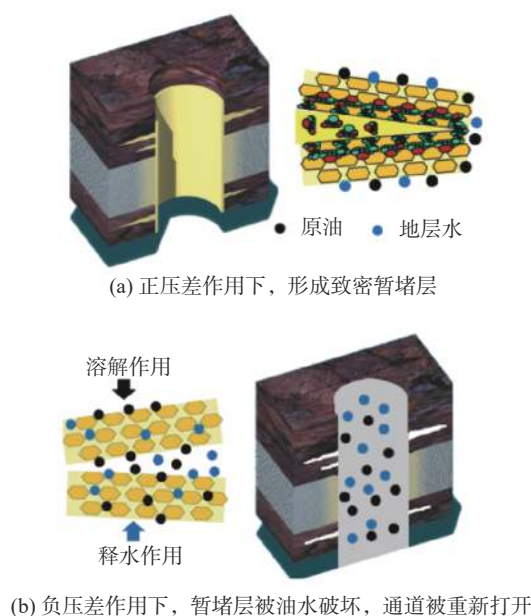


图 1 智能储层保护剂作用机理示意

Fig. 1 Schematic diagram of intelligent reservoir protection agent working mechanism

3.3 提高储层改造效果

针对 KKM 油田储层非均质性强、有效厚度小、储层隔层应力差小和砂泥岩互层等储层改造难题,研究了多薄层小跨度弱遮挡复杂砂岩可控穿层压裂技术。该技术具有以下特点:1)计算具体井压裂层的地应力差和刻画地应力剖面,建立不同层系多薄层储层隔层应力差图版;2)在前置液中加入上浮剂或下沉剂,在裂缝的顶部或底部(顶底部同时)形成一定压降的人工隔层,以控制裂缝高度的延伸;3)应用适当排量、快速起压施工技术,确保压开多薄层储层,使裂缝在横向上延伸,实现多薄层储层的有效穿层改造。另外,针对 KKM 油田的储层特点,研发了耐高温、携砂性能好的低伤害压裂液。KKM 油田 30 余口井应用了多薄层小跨度弱遮挡复杂砂岩可控穿层压裂技术,有效率 100%,设计平均单井产量 23.7 t/d,投产初期平均单井产油量 43.4 t/d,压裂后平均产油量比设计提高 50% 以上,推动了 KKM 油田的高效开发。

3.4 解决油层出砂问题

SPC 油田部分区块油井出砂严重,经常砂埋井筒,需采取先期防砂措施。基于储层温度(26.0~

28.0 ℃)、砂粒粒度中值(0.15~0.20 mm)、黏土含量(3%~10%)和防砂井段长度(直井 10.00~20.00 m,水平井 150.00~200.00 m)等因素,结合室内挡砂精度筛选动态模拟试验结果,形成了以独立筛管为主体的直井机械防砂技术、独立筛管配置遇油膨胀封隔器的水平井机械分段防砂技术。这 2 种防砂技术在 SPC 油田取得良好的应用效果,尤其是水平井的防砂效果尤为明显。统计表明,实施防砂技术的 10 余口水平井投产后稳产期平均长达 4 a,稳定出砂量低于 0.03%。

NB 油田大部分油井出砂轻微,采用了携砂采油技术^[10-11]。携砂采油技术是采用合适的完井工艺和人工举升方式,在适当压差下通过液相将一定粒度的砂粒携带出井筒,同时在近井和远井地带形成稳定的蚯蚓洞网络,保障油井长期正常生产。NB 油田的直井采用套管射孔方式完井,采用中等孔密深穿透射孔,下入螺杆泵携砂采油,出砂量主要在 0.1%~5.0%,但绝大部分油井出砂不连续。

3.5 提高钻井效率

KOA 油田存在开发井钻井速度低、成本高的问题。该油田二叠系地层岩性混杂,部分井段夹层多,蹩跳钻严重,机械钻速慢。基于 KKM 油田地层可钻性分析和破岩原理^[12-13],设计了具有自主知识产权的四刀翼、 $\phi 19$ mm 切削齿的大尺寸强攻击性 PDC 钻头。与此同时,结合钻柱强稳减振设计,三开井段采用 PDC 钻头+双稳定器单弯螺杆+单稳定器的钻具组合进行防斜打直。

KOA 油田采用该钻具组合实现了一趟钻完成三开井段,平均机械钻速 24.3 m/h,较采用该钻具组合前提高了 115.4%;单位进尺钻完井费用平均约 578.0 美元/m,较采用该钻具组合前降低了 35.0%。

3.6 保障井筒完整性

井筒完整性失效一般表现为环空带压^[14-15],导致环空带压的因素包括固井质量欠缺、完井设计不合理及生产过程中作业的影响等。针对 NB 油田和 KKM 油田等存在的环空带压问题,需要采取以下技术措施:1)对于老井,一方面通过流体成分分析、卸压-压力恢复测试、测井分析(包括电磁探伤、多臂和噪声测井组合测井等)及完井工具可靠性分析等^[16],确定压力泄露来源;另一方面采取补救措施密封环空,达到减轻环空带压的目的,如采用可固化树脂封隔环空或更换出现泄露的完井工具;2)对于新

井,采用胶乳水泥浆固井增强防气窜能力^[17],采用合适的固井工艺如塞流顶替固井、环空加压方式候凝等,以确保水泥浆凝固过程中水泥环的完整性。此外,完井和生产过程中采取针对性的防腐措施。

4 结论与建议

1)针对 SIPC 油田项目开发过程中的诸多挑战,通过应用成熟技术、研究新技术、采取针对性的技术措施,提高了油田开发效果,降低了钻井成本,保障了 SIPC 油田项目的顺利运行。

2)在增大 SIPC 油田项目勘探和生产投资的同时,还应依托国内外成熟技术,开展技术的适应性评价,进行成熟技术的推广应用;依托大数据等手段提高管理水平,充分挖掘 SIPC 油田项目增效潜力,提高效率;强化工程技术同勘探、开发的一体化协同作用,以降低开发成本,提高油气产量,保障 SIPC 油田项目开发目标的实现和经济效益的最大化。

参 考 文 献

References

- [1] 何汉平,翁行芳,张培莘,等. 哈萨克斯坦 S 油田浅层水平井完井工艺[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 33-35.
HE Hanping, WENG Xingfang, ZHANG Kaixin, et al. Completion technology for shallow horizontal wells of S Oilfield in Kazakhstan[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(4): 33-35.
- [2] 汪益宁,孟浩,赖枫鹏,等. 周期注水改善高含水期油藏开发效果[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(4): 41-44.
WANG Yining, MENG Hao, LAI Fengpeng, et al. Improving reservoir development effect in high water cut period with cycle injection[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2011, 30(4): 41-44.
- [3] 王玫珠,杨正明,王学武,等. 大庆外围特低渗透油藏非线性渗流周期注水研究[J]. 断块油气田, 2012, 19(3): 327-331.
WANG Meizhu, YANG Zhengming, WANG Xuewu, et al. Study on cycle water injection considering non-linear flow of ultra-low permeability reservoir in periphery part of Daqing Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(3): 327-331.
- [4] 王洪伟. 大规模压裂注水开发一体化技术在特低渗透油藏的应用[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1): 102-106.
WANG Hongwei. Application of integrated large-scale fracturing and water flooding development technology in extra low permeability oil reservoirs[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 102-106.
- [5] 姜兰兰. 注水开发工艺技术应用分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(33): 8321-8324, 8330.
JIANG Lanlan. Application analysis of water injection development technology[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(33): 8321-8324, 8330.
- [6] 滕学清,康毅力,张震,等. 塔里木盆地深层中-高渗砂岩储层钻井完井损害评价[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 37-43.
TENG Xueqing, KANG Yili, ZHANG Zhen, et al. Evaluation of drilling and completion damage in deep medium-to-high permeability sandstone reservoir in Tarim Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 37-43.
- [7] 刘红兰. 分层注水井测调一体化新技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 83-89.
LIU Honglan. A new integrated measuring and adjusting technology of separate layer water injection well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 83-89.
- [8] 向雄,杨洪烈,刘喜亮,等. 南海西部超浅层气田水平井 EZFLOW 无固相弱凝胶钻井液研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 38-43.
XIANG Xiong, YANG Honglie, LIU Xiliang, et al. Research and application of ezflow solid-free weak gel drilling fluid in horizontal wells in shallow gas fields in the western South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 38-43.
- [9] 赵全民,李燕,刘浩亚,等. SXJD-I 型低伤害暂堵修井液技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 109-113.
ZHAO Quanmin, LI Yan, LIU Haoya, et al. The technology of SXJD-I type low damage temporary plugging workover fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(2): 109-113.
- [10] 韩规划. 有杆泵携砂采油井筒配套技术[J]. 石油机械, 2005, 33(5): 42-45.
HAN Guihua. Matching of downhole equipment for sand-carrying rod pumping[J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(5): 42-45.
- [11] 宋玉旺. 螺杆泵携砂采油配套技术在鲁克沁油田的应用[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(2): 114-116.
SONG Yuwang. Application of screw pump sand transport oil production support technology in Lukeqin Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(2): 114-116.
- [12] 许京国,陶瑞东,郑智冬,等. 牙轮-PDC 混合钻头在迪北 103 井的应用试验[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 71-74.
XU Jingguo, TAO Ruidong, ZHENG Zhidong, et al. Pilot tests of a roller-PDC hybrid bit in Well Dibe 103, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 71-74.
- [13] 田家林,朱永豪,吴纯明,等. 新型扭力冲击器的运动特性研究[J]. 机械设计与制造, 2016(3): 75-78.
TIAN Jialin, ZHU Yonghao, WU Chunming, et al. Kinetic characteristic research of a new torque oscillator[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(3): 75-78.
- [14] 何汉平. 油气井环空允许带压值的计算方法探讨[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 16-18.
HE Hanping. Probe on calculation methods for allowable annulus pressure in oil and gas wells[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 16-18.
- [15] 马勇. 固井环空气体窜流原因分析及防控技术[D]. 成都: 西南石油大学, 2009.
MA Yong. Cause analysis of annulus gas cross flow and its prevention technology[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2009.
- [16] 何汉平. 油气井井筒系统可靠性评价方法与应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(2): 139-144.
HE Hanping. Evaluation method of wellbore system reliability for oil and gas wells and its application[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(2): 139-144.
- [17] 陈昌宏,张倩,朱彦飞,等. 外加剂对水泥石力学性能的影响[J]. 油田化学, 2017, 34(3): 428-432.
CHEN Changhong, ZHANG Qian, ZHU Yanfei, et al. Effect of admixtures on mechanical properties of cement[J]. Oilfield Chemistry, 2017, 34(3): 428-432.