

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.201706009

海上耐高温井下安全控制管柱系统的研制

王 通¹, 孙永涛¹, 白健华², 马增华¹, 蒋召平², 李海涛²

(1. 中海油田服务股份有限公司油田生产事业部, 天津 300459; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459)

摘要:海上石油安全生产规定海上生产井必须下入井下安全控制管柱,然而现有井下安全控制管柱的耐温性能达不到注热井的要求。为此,在分析海上注热井对井下安全控制管柱要求的基础上,通过优选密封材料和密封方式,研制了由Y241型热采封隔器、耐高温井下安全阀、隔热型补偿器和井口穿越装置等关键工具组成的耐高温井下安全控制管柱。室内试验及现场试验均表明:Y241型热采封隔器、耐高温井下安全阀、隔热型补偿器和井口穿越装置在常温和350℃高温下的密封性能良好;Y241型热采封隔器的单流阀和耐高温井下安全阀开启、关闭操作灵活。这表明,耐高温井下安全控制管柱系统的结构设计合理,耐温性能、密封性能等能满足注热井的要求,可以提高注热井的安全性。

关键词:稠油热采;注热管柱;高温;井下安全阀;封隔器;补偿器;现场试验;渤海油田

中图分类号:TE934⁺.5 文献标志码:A 文章编号:1001-0890(2017)06-0049-06

The Development and Testing of Heat-Resistant Subsurface Safety Control Devices in Offshore Operations

WANG Tong¹, SUN Yongtao¹, BAI Jianhua², MA Zhenghua¹, JIANG Zhaoping², LI Haitao²

(1. Oilfield Production Department, China Oilfield Services Limited, Tianjin, 300459, China; 2. Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC (China) Co. Ltd., Tianjin, 300459, China)

Abstract: According to safety regulations for offshore oil production, all offshore producers are required to be equipped with subsurface safety control devices. But all available subsurface safety control devices currently available may not meet the heat-resistant demands for wells with thermal production. Considering the demands of offshore heat-injection wells for subsurface safety control devices, Y241 type thermal packer, heat-resistant subsurface safety valve, insulated compensator, wellhead crossovers and other heat-resistant subsurface safety control devices were developed through a combination of optimal sealing materials and sealing modes. Laboratory and field tests showed that Y241 type thermal packer, heat-resistant subsurface safety valve, insulated compensator and wellhead crossovers presented outstanding sealing performances under room temperature and excellent performance with high temperatures up to 350°C. The results demonstrate that the newly-developed heat-resistant subsurface safety control devices possess rational structural design, desirable heat-resistant and sealing performances to satisfy the demands of heat-injection wells, the application of these devices can effectively enhance safety performances of heat-injection wells.

Key words: thermal recovery of heavy oil; heat-injection pipe; high temperature; subsurface safety valve; packer; compensator; field test; Bohai Oilfield

渤海油田自2008年开始先后在N区块和L区块推广应用稠油热采技术,截至2016年11月已应用了近30井次,取得了良好的开采效果。但由于国内外现有井下安全控制管柱系统达不到耐温350℃的要求^[1-7],其采用的注热管柱是没有井下安全控制工具的简易注热管柱,而海洋石油相关安全生产规

收稿日期:2017-05-28;改回日期:2017-10-30。

作者简介:王通(1987—),男,宁夏中卫人,2008年毕业于中国石油大学(华东)过程装备与控制工程专业,2011年获中国石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位,主要从事海上稠油开采、井下完井工具方面的研究工作。E-mail: wangtong3@cosl.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(编号:2016ZX05058)和中海油田服务股份有限公司科研项目“海上稠油热采射流泵举升工艺研究”联合资助。

定要求海上生产井的生产管柱需采用井下安全控制管柱。因此,为了保证稠油热采的安全,笔者通过优选耐高温密封材料、采用全金属密封等方法研制了耐温 350 ℃的井下安全控制管柱系统,其关键工具包括 Y241 型热采封隔器、耐高温井下安全阀、隔热型补偿器和井口穿越装置。室内试验和现场试验均表明,所研制的井下安全控制管柱系统的结构设计合理,常温和高温下的密封性能可靠、操作灵活,均达到了海上热采作业的要求。

1 注热井对井下安全控制管柱性能的要求

符合海洋安全生产规定的井下安全控制管柱(自下而上)为引鞋、普通油管(含若干配注阀)、变扣、加压球座和隔热油管(含 Y241 型热采封隔器+补偿器+耐高温井下安全阀),如图 1 所示。其中,井下安全控制包含油管通道安全控制和油套环空安全控制 2 方面。

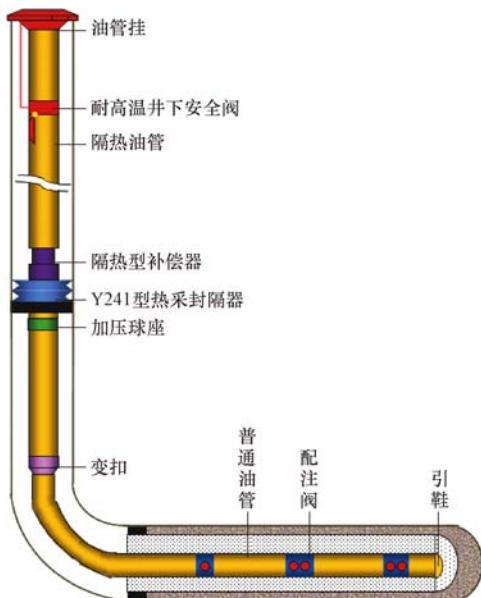


图 1 海上热采井下安全控制管柱系统的结构

Fig. 1 Structure of down-hole safe control pipe in off-shore well with thermal production

油管通道安全控制主要是通过井下安全阀控制油管通道的开启关闭,但目前常规井下安全阀只能耐温 150 ℃,而注热期间井下温度最高可达 350 ℃,因此要求井下安全阀能耐温 350 ℃,且要求其在注热结束后的放喷期间依然能正常开启关闭。由于井下安全阀需要通过液控管线在地面进行控制,因此

要求液控管线井口穿越装置能够在常温及高温下均具有良好的密封性能。注热期间液控管线井口穿越装置一旦发生刺漏,将危及平台人员及设备的安全,因此液控管线井口穿越装置的耐温耐压性能应与采油树相同,即能耐温 350 ℃和耐压 35 MPa,以保证注热期间的井口安全。

油套环空安全控制是通过 Y241 型热采封隔器封闭油套环空。海上油井在注蒸汽或注多元热流体期间会连续或间断地从油套环空内注入氮气,以达到减少井筒热损失、提升管柱隔热性能等目的^[8-10],因此,要求 Y241 型热采封隔器具有双通道结构,以防止井下流体通过环空上返,允许环空内的氮气由上而下注向井底。此外,隔热型补偿器与 Y241 型热采封隔器连接后一起下入井内,可以补偿管柱的伸长或缩短,防止管柱变形或因管柱热应力引起封隔器失效。隔热型补偿器也要具有良好的隔热性能。

2 耐高温井下安全控制关键工具

耐高温井下安全控制管柱系统的关键工具包括 Y241 型热采封隔器、隔热型补偿器、耐高温井下安全阀和井口穿越装置。

2.1 Y241 型热采封隔器

2.1.1 基本结构

Y241 型热采封隔器(又称双通道热采封隔器)主要由坐封锁紧机构、锚定机构、密封机构、环空注氮机构和解封机构等组成,如图 2 所示。

坐封锁紧机构主要由活塞、缸套、大锁环、小锁环和锁套组成。锚定机构主要由卡瓦、锥体和卡瓦罩组成。密封机构由胶筒、碟簧和坐封套组成。环空注氮机构主要由球阀、弹簧、弹簧罩和下接头组成。解封机构主要由上接头、指形爪套、指形爪管、解封销钉和中心管组成。

Y241 型热采封隔器具有以下特点:

1) 氮气通道末端采用单流阀,在承受井筒下部高压的同时允许油套环空注入的氮气通过封隔器注向井底。

2) 耐高温胶筒采用了分散柔性石墨加改性聚四氟乙烯的组合密封方式,不仅在常温下具有良好的密封性,而且能够在 350 ℃高温下保持密封可靠性,并且经过多轮次高低温后仍能保持密封^[11]。

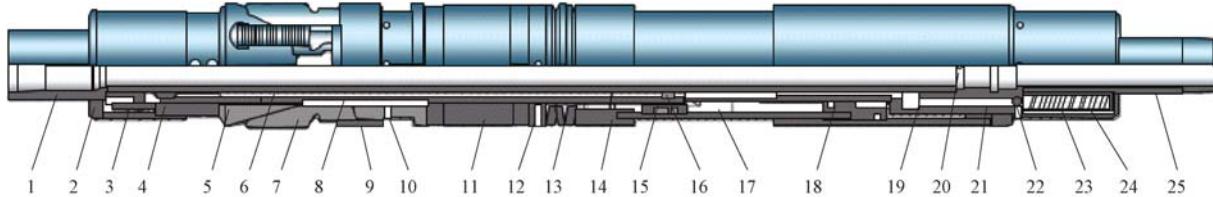


图 2 Y241 型热采封隔器的结构

Fig. 2 Structure of the Y241 type packer for thermal production

1. 上接头; 2. 提拉套; 3. 指形爪套; 4. 解封销钉; 5. 锥体; 6. 中心管; 7. 卡瓦; 8. 指形爪管; 9. 卡瓦护罩; 10. 防坐封销钉;
11. 胶筒; 12. 坐封销钉; 13. 碟簧; 14. 坐封套; 15. 小锁环; 16. 大锁环; 17. 缸套; 18. 活塞; 19. 内孔道; 20. 加压孔;
21. 注氮孔道; 22. 球阀; 23. 弹簧; 24. 弹簧罩; 25. 下接头

2.1.2 工作原理

Y241 型热采封隔器下入井内后,从油管加压,坐封机构依次推动卡瓦撑开锚定机构、坐封胶筒,锁紧机构锁紧以防止密封件回弹,完成坐封。然后,从油套环空注入氮气,当注入压力大于 Y241 型热采封隔器以下环空压力时,Y241 型热采封隔器的注氮阀打开,氮气注向井底。上提管柱即可解封,若遇卡可以顺时针旋转管柱,上接头与中心管脱开,上提取出封隔器以上管柱,再进行打捞。

2.1.3 主要技术参数

Y241 型热采封隔器长 2 105 mm,最大外径为 210.0 mm,内通径为 76.0 mm,适用于内径为 220.5~224.4 mm 的套管,两端为 $\phi 88.9$ mm EU 螺纹,坐封压差 24~26 MPa,耐温 350 °C,耐压 21 MPa。

2.2 隔热型补偿器

2.2.1 基本结构

隔热型补偿器^[5]主要由中心管、隔热上接箍、内密封组件、隔热管、承重接头、中间接箍和下接头组成,如图 3 所示。隔热上接箍包括接箍本体、隔热体和接箍外管。内密封组件包括压环、隔热环、密封材料、压帽和密封盒。隔热管组件包括内管、外管和隔热体。隔热型补偿器的本体及接箍均采取复合隔热结构,具有良好的隔热性能,能减少热损失,提高注热效果。

2.2.2 工作原理

隔热型补偿器用于补偿注热期间高温引起的井下管柱的伸长,同时具有隔热和传递扭矩的功能。注热时,随着温度升高,注热管柱会伸长,此时注热

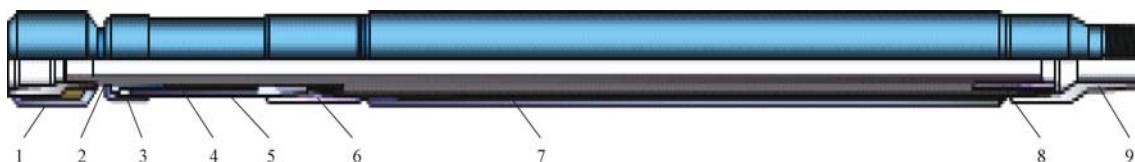


图 3 隔热型补偿器的结构

Fig. 3 Structure of thermodynamic insulated tubing compensator

1. 隔热上接箍; 2. 中心管; 3. 压帽; 4. 内密封组件; 5. 密封盒; 6. 中间接箍; 7. 隔热管; 8. 承重接头; 9. 下接头

管柱中隔热型补偿器的内中心管缩进隔热外管内;注热结束或注热过程中由于其他原因停注导致温度下降时,隔热型补偿器的内中心管就会伸出,以补偿注热管柱的缩短。补偿器上提时,补偿内管上的凹凸槽与密封机构上的凸凹槽啮合,此时内外管可同时旋转,以满足管柱传递扭矩的要求^[12]。

2.2.3 主要技术参数

隔热型补偿器长 4 326 mm(含补偿距 2 000 mm),

最大外径为 145.0 mm,内通径为 62.0 mm,两端为 $\phi 88.9$ mm EU 螺纹,耐温 350 °C,耐压 21 MPa。

2.3 耐高温井下安全阀

2.3.1 基本结构

耐高温井下安全阀主要由上接头、液控接头、内密封、柱塞、弹簧、外筒、中心管、阀座、阀门、扭簧和下接头组成,如图 4 所示。

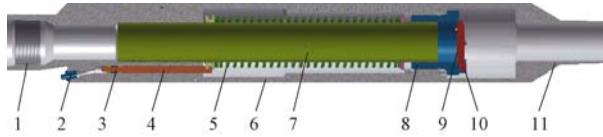


图 4 耐高温井下安全阀的结构

Fig. 4 Structure of heat-resistant down-hole safety valve

1. 上接头; 2. 液控接头; 3. 内密封; 4. 柱塞; 5. 弹簧; 6. 外筒;
7. 中心管; 8. 阀座; 9. 阀门; 10. 扭簧; 11. 下接头

目前井下工具常用的弹性密封材料,如丁腈橡胶、氢化丁腈橡胶、氟橡胶和环氧树脂等在350℃高温下均会失去密封作用,所以耐高温井下安全阀采用了全金属密封结构。耐高温井下安全阀的柱塞与柱塞腔体采用C形金属密封,阀门与阀座采用锥面对锥面的金属密封;耐高温井下安全阀的主体(包括上接头、外筒和下接头)均采用金属密封螺纹连接。

2.3.2 工作原理

井下安全阀的上接头设计有液压孔,从液压孔处加压,液压驱动柱塞向下移动,柱塞推动连接的弹簧和中心管向下运动,当中心管接触到阀门上的平衡塞时,阀门上下液体连通建立压力平衡,继续加压,中心管向下顶开阀门,井下安全阀处于打开状态。当需要关闭安全阀时,泄掉上接头处液压孔的压力,弹簧回位,中心管和柱塞在弹簧的作用下回至初始位置,阀门失去支撑,在扭簧回复扭矩的作用下阀门与阀门座紧密贴合,井下安全阀关闭,达到隔离井下油气的目的。

2.3.3 主要技术参数

耐高温井下安全阀长度1 260 mm,最大外径为160.0 mm,内通径为71.45 mm,两端为Φ88.9 mm EU螺纹,耐温350℃,耐压35 MPa。

2.4 井口穿越装置

2.4.1 基本结构

井口穿越装置由内卡套、外卡套、NPT接头和压紧螺母组成。为满足耐高温350℃的要求,井口穿越装置也采用了金属密封。

2.4.2 工作原理

在热采井采油树上开有Φ6.35 mm液控管线通孔,通孔的上端制有Φ19.05 mm NPT接头螺纹,在外卡套与NPT接头压紧密封,

内卡套分别与外卡套密封、液控管线外表面压紧密封。

2.4.3 主要技术参数

井口穿越装置长50 mm,内通径为8.0 mm,端部为Φ19.05 mm NPT螺纹,适用于Φ6.35 mm液控管线,耐温350℃,耐压35 MPa。

3 室内试验

为检验各井下安全控制管柱系统关键工具的运动部件是否动作良好,以及在常温和高温下的密封是否可靠,是否能达到注热的要求,进行了室内试验。

3.1 Y241型热采封隔器性能测试

3.1.1 常温试验

以水为试验介质,参照文献[13-14]在常温下进行地面试验和井下试验,检验封隔器的坐封性能、解封性能、承压性能、锚定性能和解封负荷。

试验过程中,封隔器坐封动作灵活、无卡阻,封隔器整体耐压35 MPa,不渗不漏,钢件不变形。封隔器的坐封力为23~25 MPa,坐封距为94~97 mm;其锚定力超过1 050 kN,锚定可靠;封隔器承受的单向工作压差达到32 MPa;解封顺利,解封力为100~120 kN。这表明,封隔器动作设计合理,坐封与解封顺利,常温下密封可靠。

3.1.2 高温试验

以高温氮气为试验介质,参照文献[10-11]将Y241型热采封隔器下入到试验井进行耐高温试验,结果见表1。

表 1 高温下 Y241 型热采封隔器承压试验结果

Table 1 Data of pressure-bearing of the Y241 type packer for thermal production under high temperatures

序号	试验	油管	封隔器下	封隔器上	备注
	温度/℃	压力/MPa	压力/MPa	压力/MPa	
1	350.0	22.56	22.32	0	第一轮高温
2	350.0	21.10	20.93	0	保温8 h
3	350.0	21.21	21.03	0	
4	62.8	21.57	21.39	0	第一轮降温
5	350.0	21.63	21.45	0	第二轮高温
6	350.0	21.26	21.05	0	保温8 h
7	350.0	21.48	21.30	0	
8	28.6	21.65	21.46	0	第二轮降温

由表 1 可以看出: Y241 型热采封隔器能耐 350 °C 高温、21 MPa 压力; 经过高低温交替, 密封压差仍能达到 21 MPa。这表明, Y241 型热采封隔器的耐温、耐压和密封性能均达到了设计要求。

3.2 耐高温井下安全阀性能测试

以高温导热油为介质, 参照文献[15-16]在常温和 350 °C 高温下进行耐高温井下安全阀开关和密封试验, 结果为: 井下安全阀的开启压力为 11.0 ~ 11.7 MPa, 关闭压力为 9.6 MPa, 阀门开启和关闭顺畅, 开关液控压力符合要求; 工作压力为 35 MPa; 整体耐压达 50 MPa; 密封良好, 液控管线无渗漏。这表明, 耐高温井下安全阀的启闭灵活性、密封性、耐温性及开启和关闭的灵活性达到了设计要求。

3.3 井口穿越装置性能测试

热采井井口设备体积较大, 且影响因素复杂, 因此根据井口穿越装置的结构, 设计了液控管线穿越模拟试验装置, 如图 5 所示。以高温导热油为试验介质, 利用该装置进行井口穿越装置常温和高温 350 °C 下的密封试验, 发现无论是在常温下还是在高温 350 °C 下, 加压至 35 MPa 后均稳压 10 min 以上。这表明, 井口穿越装置在常温和高温 350 °C 下的密封性能可靠, 达到了设计要求。

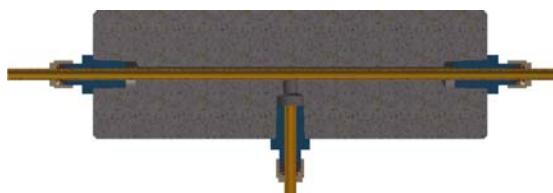


图 5 液控管线穿越模拟试验装置

Fig. 5 Testing devices for crossing of hydraulic pipelines

4 现场试验

为了检验耐高温井下安全控制管柱系统能否在高温下长时间正常工作, 该管柱系统在渤海油田 A 区块的 B27 井进行了 5 个月的试验。B27 井完钻井深 2 813.05 m, 水深 12.20 m, 采用 $\phi 508.0$ mm 隔水导管、 $\phi 339.7$ mm 表层套管和 $\phi 244.5$ mm 生产套管与防砂筛管完井。耐高温井下安全阀、隔热型补偿器和 Y241 型热采封隔器分别位于井深 191.38, 222.03 和 227.22 m 处。

注入多元热流体的温度 244 ~ 289 °C, 注入水

排量 3.0 ~ 5.6 t/h, 注入水当量 2 600 t, 油管压力 9.0 ~ 17.6 MPa, 套管压力 9.0 ~ 18.0 MPa, 注入时间 30 d; 油套环空注入常温氮气用于隔热, 注入速度 3 040 m³/d。焖井 3 d 后, 放喷生产, 平均日产液量 44.75 m³, 日产油量 24.09 m³, 放喷生产时间 44 d。

注热期间, 测试了耐高温井下安全阀、Y241 型热采封隔器和井口穿越装置的性能: 1) 当注入水当量达到 200 t 时, 停止注热, 通过地面液控管线开启、关闭耐高温井下安全阀 3 次, 当开启压力和关闭压力达到设计压力时, 耐高温井下安全阀能正常开启和关闭; 2) 关闭耐高温井下安全阀, 将耐高温井下安全阀以上油管压力泄掉, 测试 30 min 后的油管压力, 油管压力为 0, 这表明耐高温井下安全阀在高温下的密封性能可靠; 3) 当注入水当量达到 300 t 时, 油套环空停止注入氮气, 此时套管压力为 12.0 MPa, 将套管压力泄至 5.0 MPa, 测试 90 min 后的套管压力为 5.0 MPa, 这表明 Y241 型热采封隔器和隔热型补偿器在高温下整体密封性能良好, Y241 型热采封隔器的单流阀开启和关闭灵活; 4) 在 30 d 的注热期间, 巡检采油树未发现井口穿越装置发生泄漏, 表明井口穿越装置在高温下密封可靠。

5 结论与建议

1) 为提高海上热采井的安全性, 考虑海上热采井的具体特点, 研制了适用于海上热采井的耐高温井下安全管柱系统。

2) 室内试验及现场试验结果均表明, 耐高温井下安全控制管柱系统的性能达到了设计要求, 能满足海上热井的需求。

3) 目前耐高温井下安全控制管柱系统只试验了 1 井次, 建议增加试验井次, 根据试验结果完善耐高温井下安全控制管柱系统的性能, 为海上热采井提供安全保障。

参 考 文 献

References

- [1] 唐晓旭, 马跃, 孙永涛. 海上稠油多元热流体吞吐工艺研究及现场试验[J]. 中国海上油气, 2011, 23(3): 185-188.
TANG Xiaoxu, MA Yue, SUN Yongtao. Research and field test of complex thermal fluid huff and puff technology for offshore viscous oil recovery[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(3): 185-188.
- [2] 刘敏, 高孝田, 邹剑, 等. 海上特稠油热采 SAGD 技术方案设计[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(4): 94-96.

- LIU Min, GAO Xiaotian, ZOU Jian, et al. SAGD technology conceptual design of thermal recovery explore for offshore extra-heavy oil[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(4):94-96.
- [3] 林涛,孙永涛,孙玉豹,等.多元热流体返出气增产技术研究[J].断块油气田,2013,20(1):126-128.
- LIN Tao, SUN Yongtao, SUN Yubao, et al. Enhanced recovery technique of return gas from multiple thermal fluids[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(1):126-128.
- [4] 梁丹,冯国智,曾祥林,等.海上稠油两种热采方式开发效果评价[J].石油钻探技术,2014,42(1):95-99.
- LIANG Dan, FENG Guozhi, ZENG Xianglin, et al. Evaluation of two thermal methods in offshore heavy oilfields development [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1):95-99.
- [5] 王通,孙永涛,邹剑,等.海上多元热流体高效注入管柱关键工具研究[J].石油钻探技术,2015,43(6):93-97.
- WANG Tong, SUN Yongtao, ZOU Jian, et al. Key tools for assuring a high efficiency heat injection string for multiple thermal fluids in offshore wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(6):93-97.
- [6] 胡厚猛,孙永涛,刘花军,等.海上热采井防污染工艺管柱及配套工具[J].石油钻采工艺,2016,38(1):118-122.
- HU Houmeng, SUN Yongtao, LIU Huajun, et al. Research on contamination-proof technique strings and supporting tools for offshore thermal recovery wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(1):118-122.
- [7] 孙逢瑞,姚约东,李相方,等.基于R-K-S方程的同心双管注多元热流体传热特征研究[J].石油钻探技术,2017,45(2):107-114.
- SUN Fengrui, YAO Yuedong, LI Xiangfang, et al. An R-K-S equation-based study on the heat transmission features of multi-component thermal fluid injection through concentric dual-tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2):107-114.
- [8] 赵利昌,林涛,孙永涛,等.氮气隔热在渤海油田热采中的应用研究[J].钻采工艺,2013,36(1):43-45.
- ZHAO Lichang, LIN Tao, SUN Yongtao, et al. Application of Nitrogen insulation thermal recovery technology in the Bohai Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(1):43-45.
- [9] 欧阳波,陈书帛,刘东菊.氮气隔热助排技术在稠油开采中的应用[J].石油钻采工艺,2003,25(增刊1):1-3.
- OUYANG Bo, CHEN Shubo, LIU Dongju. Appliance of nitrogen gas insulating heat and aiding flow technology in Liaohe heavy oil production[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(supplement 1):1-3.
- [10] 王德有,陈德民,冉杰,等.氮气隔热助排提高稠油蒸汽吞吐热采效果[J].钻采工艺,2001,24(3):25-28.
- WANG Deyou, CHEN Demin, RAN Jie, et al. Using aid to drain technology by nitrogen heat-proof to improve oil producing effect by viscous crude steam soak[J]. Drilling & Production Technology, 2001, 24(3):25-28.
- [11] 刘花军,孙永涛,王新根,等.海上热采封隔器密封件的优选试验研究[J].钻采工艺,2015,38(3):80-83.
- LIU Huajun, SUN Yongtao, WANG Xingen, et al. Optimization test on seal elements of packers for offshore thermal recovery[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(3):80-83.
- [12] 刘花军,王通,孙永涛,等.新型油管高保温热力补偿器[J].石油机械,2014,42(9):69-71.
- LIU Huajun, WANG Tong, SUN Yongtao, et al. The new-type thermodynamic tubing compensator with high heat insulation[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(9):69-71.
- [13] GB/T20970—2007/ISO 14130:2001 石油天然气井工业:井下工具:封隔器和桥塞[S].
- GB/T20970—2007/ISO 14130:2001 Petroleum and natural gas industries:downhole equipment:packers and bridge plugs [S].
- [14] SY/T 6304—2013 注蒸汽封隔器及井下补偿器技术条件[S].
- SY/T 6304—2013 Technical standard of thermal packer and expansion joint[S].
- [15] GB/T 28259—2012 石油天然气工业:井下设备:井下安全阀[S].
- GB/T 28259—2012 Petroleum and natural gas industries:downhole equipment:subsurface safety valve equipment [S].
- [16] API Spec 14A-2000 井下安全阀设备规范[S].
- API Spec 14A-2000 Subsurface safety valve equipment specification[S].

[编辑 刘文臣]