

文章编号: 1008-2336 (2026) 02-0079-06

海洋平台大尺寸双层套管射孔工艺研究与应用

侯先杰¹, 黄 涛¹, 李 渊¹, 孟元真¹, 黄 佩¹, 张志强¹, 石 俊²

(1. 中石化海洋石油工程有限公司, 上海 200137; 2. 新疆科技学院, 新疆库尔勒 841000)

摘 要: 随着我国近海浅层油气藏的不断发现以及老井改造需求日益增长, 部分储层被封固于 9-5/8" 与 13-3/8" 双层套管重叠段内, 传统单层射孔技术难以实现地层有效沟通。针对该问题, 文章系统开展了双层套管射孔可行性研究, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立多介质耦合动力学模型, 模拟聚能射流穿越内层套管、水泥环及外层套管的动力学过程, 结合全尺寸地面模拟试验验证穿孔, 最终在 X 井的 DST1 测试过程中实施现场应用。结果表明: 在相同射孔弹条件下, 相较于单层射孔工况, 双层套管条件下的穿透深度下降达 31%, 平均外层套管成孔孔径缩小至 5.88 mm; 但试验与现场作业均实现了内外套管完全贯通, 成功获取地层气样及可靠地层参数。研究表明, 通过优选超深穿透型射孔弹, 优化相位布置与装药结构, 双层套管射孔技术具备良好的工程可行性。该成果可为深水高温高压气田开发、回注井建设及复杂结构井完井提供关键技术支撑。

关键词: 双层套管; 全尺寸试验; 海上油气田射孔; 完井技术

中图分类号: TE257.1

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1008-2336.2026.02.079

Research and application of large-size dual-casing perforation technology for offshore platforms

HOU Xianjie¹, HUANG Tao¹, LI Yuan¹, MENG Yuanzhen¹, HUANG Pei¹, ZHANG Zhiqiang¹, SHI Jun²

(1. SINOPEC Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Shanghai 200137, China; 2. Xinjiang College of Science and Technology, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: With the continuous discovery of shallow offshore oil and gas reservoirs and increasing demands for old well stimulation, certain pay zones are sealed within the overlapping section of 9 5/8" and 13 3/8" dual casings, making traditional perforation techniques ineffective in establishing communication with the formation. This paper presents a systematic feasibility study on dual-casing perforation technology. A multi-medium coupled dynamic model was established using ANSYS/LS-DYNA to simulate the dynamic process of shaped charge jets penetrating through inner casing, cement sheath, and outer casing. Full-scale surface simulation tests were conducted to verify penetration performance, culminating in successful field application in the DST1 test of Well X. Results show that under identical charge conditions, compared to single-casing perforation, penetration depth decreases by up to 31% in dual-casing scenarios, while the average hole diameter in the outer casing reduces to 5.88 mm. Nevertheless, both laboratory tests and field operations achieved complete penetration of both casing layers, yielding high-quality gas samples and reliable formation data. The study demonstrates that with optimized ultra-deep penetration charges, phase arrangement, and charge structure, dual-casing perforation is technically viable and the result provides critical technical support for deepwater high-temperature high-pressure (HTHP) gas field development, reinjection well construction, and completion of complex structure wells.

Key words: dual-casing; full-scale test; offshore oil and gas field perforation; well completion technology

近年来, 我国近海区域相继发现多个浅层构造油气藏, 受限于地质条件与钻井工艺, 此类井普遍采用大尺寸钻头逐级下入套管的方式建井, 针对探井与评价井的典型配置包括 13-3/8" 表层套管和 9-5/8" 技术套管^[1]。在此类井型中, 部分目的层位于两层套管重叠区。此外, 在老旧油田开发后期, 存在由采油井转为

注水或回注井的需求^[2]。在部分深水高温高压气田, 常采用复合套管结构完井, 双层套管射孔作为突破瓶颈的关键技术, 亟需开展系统的理论分析与工程实践验证。目前国内关于射孔机理的研究主要集中于单层套管条件下的穿孔性能评估^[3-5]。陈华彬等采用先锋射孔弹在地面进行两层及三层套管立式打靶试验^[6]。刘

收稿日期: 2025-12-30; 改回日期: 2026-03-01

第一作者简介: 侯先杰, 男, 1986 年生, 本科, 工程师, 2011 年毕业于西南石油大学石油工程专业, 从事海上油气藏试油工作。E-mail: houxi.shhy@sinopec.com。

云刚等对不同规格射孔器材进行打靶试验,研究各种壁厚套管及双层套管对射孔性能的影响^[7-8]。在套管井射孔穿深实验中,前期主要进行地面试验研究,逐渐在常温常压下开展了部分双层套管射孔试验、同孔重复射孔^[9]等。后续开始进行高温高压环境下的射孔弹性能、套管射孔强度的研究^[10-11]。为解决 13-3/8"和 9-5/8"套管重叠段射孔工程难题,综合运用软件模拟和常温常压地面全尺寸双层套管射孔试验验证射孔作业参数,并开展现场应用。

1 数值模拟研究

1.1 模型构建

基于 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学求解器,建立三维轴对称有限元模型,用于模拟聚能射流在多介质环境中的穿透过程。采用参数如下:套管, L-80 钢级,技术套管尺寸取值 0.244 5 m (9-5/8"),表层套管尺寸取值 0.339 7 m (13-3/8");弹性模量取值 2×10^5 MPa;泊松比取值 0.3;屈服强度取值 550 MPa,抗拉强度取值 650 MPa;环空间填充水泥环,抗压强度取值 40 MPa。采用 MAT_CONCRETE_DAMAGE (混凝土损伤模型)本构模型,考虑损伤演化行为。海水密度: $1\ 030\ \text{kg/m}^3$ 。射孔弹: 178 型超深穿透射孔弹,孔密 40 孔/m,相位角 135° 。本构模型设置:套管采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC (随动硬化塑性)模型,考虑应变率效应,射流粒子使用 SPH (smoothed particle hydrodynamics, 光滑粒子流体动力学)方法模拟其连续变形与高速侵彻过程,时间步长控制在 $0.1\ \mu\text{s}$ 以内,确保计算精度与稳定性。

1.2 模拟结果分析

给定的射孔弹类型后,对单层与双层套管射孔进行模拟,结果见图 1、图 2 与表 1、表 2。图 1 是单层套管射孔时在 8 个相位上的射孔深度;图 2 是双层套管射孔时在 8 个相位上的射孔深度;表 1 展示射孔深度具体数值;表 2 展示套管被射穿时的孔径大小。

(1) 穿深结果

对比单层(图 1)与双层套管(图 2)的射孔结果,在水泥环的影响下,双层射孔穿深由 1 430.29 mm 降至 985.98 mm,下降幅度达到 31% 以上,这主要归因于射流在穿越多层不同密度介质(尤其是高强度水泥环)时产生的能量耗散与界面反射。另外,有研究表明固结良好的水泥环可使射孔套管的强度大幅度提高^[12],这也会降低穿深。值得注意的是,最大总穿深出现在第 5 相位,尽管该相位枪壁入口孔径为零,但因局部应力集中仍实现贯通,提示结构布局对射流聚

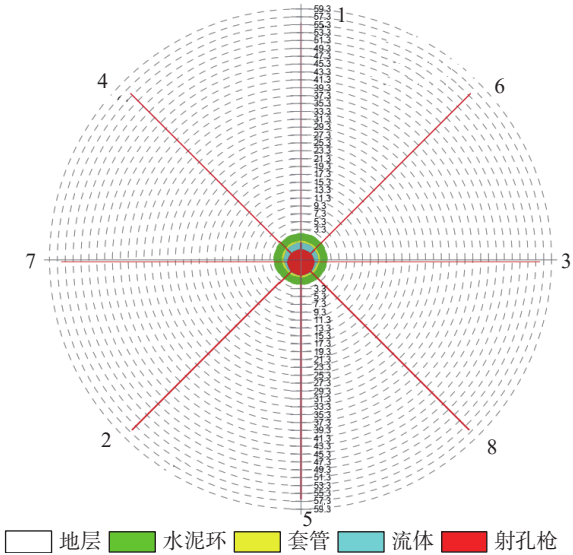


图 1 单层套管射孔模拟结果

Fig. 1 Single-casing perforation simulation results

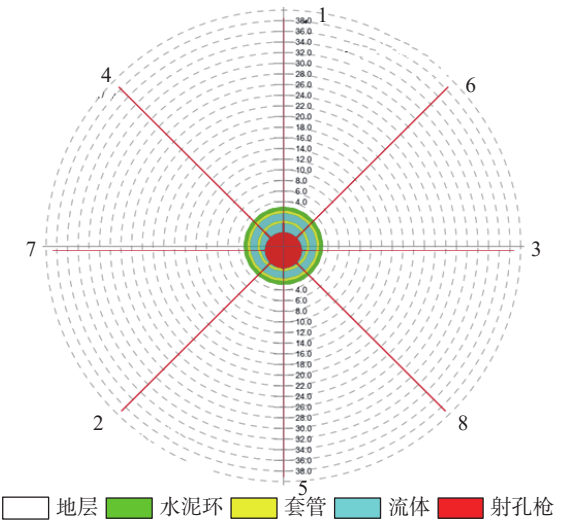


图 2 双层套管射孔模拟结果

Fig. 2 Double-casing perforation simulation results

表 1 射孔穿深

Table 1 Perforation penetration depth

相位	单层套管射孔穿深/mm	双层套管射孔穿深/mm	穿深下降幅度/%
1	1 418.36	977.35	31.09
2	1 438.49	991.93	31.04
3	1 430.65	986.22	31.06
4	1 422.10	980.04	31.08
5	1 441.52	994.16	31.03
6	1 422.10	980.04	31.08
7	1 430.65	986.22	31.06
8	1 438.49	991.93	31.04
平均值	1 430.29	985.98	31.06

焦有一定影响。

(2) 穿孔孔径结果

对比单层与双层穿孔孔径,技术套管孔径稳定在

表 2 套管穿孔孔径

Table 2 Casing perforation hole diameter

相位	单层套管穿孔孔径/mm	双层套管穿孔孔径/mm	
		技术套管	表层套管
1	10.64	10.44	5.28
2	10.52	10.32	6.43
3	10.23	10.04	5.80
4	9.60	9.42	5.39
5	11.30	11.08	6.76
6	9.60	9.42	5.39
7	10.23	10.04	5.80
8	10.52	10.32	6.43
平均值	10.33	10.14	5.91

9.42~10.64 mm, 表现出良好一致性, 说明在不同相位下, 聚能射流对 L-80 钢级的 9-5/8" 套管具备可靠的穿透能力。而外层套管平均穿孔孔径为 5.91 mm, 明显小于常规单层射孔工况下的平均值, 说明经过多层介质能量衰减后, 射流发生一定程度发散, 可能影响后期流动效率。

此外, 相位分布显示一定非对称性, 部分相位穿透略低, 可能与枪体居中度或水泥环均匀性有关, 建议在实际施工中配置有效扶正器以提升作业一致性。

2 地面全尺寸试验

2.1 试验设计与器材配置

为验证模拟结果并评估实际穿孔能力, 开展常温常压条件下全尺寸地面试验。射孔弹: 178 型 40 孔/m 超深穿透弹 (图 3)。射孔枪: $\phi 177.8\text{ mm}$ (7"), 孔密 40 孔/m, 8 个相位, 相位角 135°, 有效射孔段 1 m (图 4), 半装 20 发射孔弹。导爆索: 80RDXHV 型高爆速导爆索。混凝土靶: 依据 API RP 19B Section I 标准制作, 尺寸为 $\phi 2\ 500\text{ mm}$ (外径) $\times 1\ 400\text{ mm}$

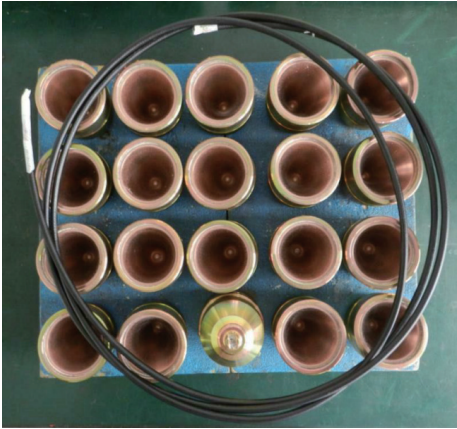


图 3 试验用射孔弹和导爆索
Fig. 3 Test perforating charges and detonating cord

(高) 圆柱体, 养护 30 d, 实测抗压强度 38.4 MPa。双层套管系统: 内层 9-5/8", 外层 13-3/8", 皆为 P110 钢级 (图 5)。



图 4 射孔弹与弹架管
Fig. 4 Perforating charges and carrier tube

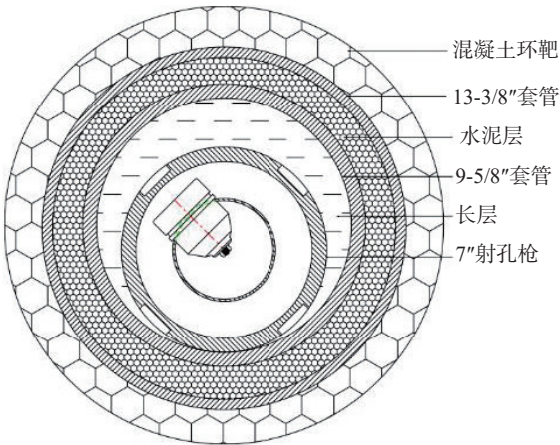


图 5 混凝土靶与双层套管射孔示意图
Fig. 5 Schematic diagram of concrete target and dual-casing perforation

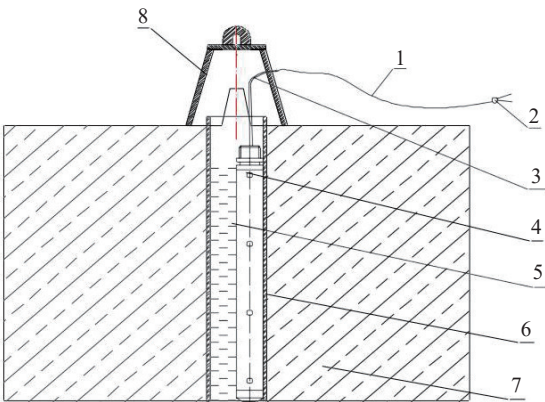
按照图 6 所示方式组装实验器材, 使用 178 射孔枪半装 20 发射孔弹, 在 9-5/8" 和 13-3/8" 双层套管进行环状混凝土靶射孔试验。

2.2 试验结果

按照 API 标准进行试验, 结果数据见表 3、表 4。表 3 展示了 20 发射孔弹的穿深结果与外层套管的射孔孔径, 由于射孔枪并未完全居中, 距离套管较远一面的平均穿深比距离套管较近的穿深小 11%, 平均射孔孔径小 8.8%, 反映出清水介质对射流传播存在一定削弱作用。整体来说, 所有相位均实现双层套管完全贯通, 平均穿深达 919.5 mm, 略低于模拟值 985.98 mm, 误差为 6.76%, 表明前期建立的数值模型具有较高的预测精度与工程可信度。

表 4 展示了其它射孔结果, 表明射孔结果均符合 GB/T 20489—2006《油气井聚能射孔器材通用技术条件》的要求, 进一步证实射孔试验的成功。

图 7、图 8 展示了射孔后混凝土靶的剖切面, 射孔通道规则, 无明显偏转或分叉现象。外层套管穿孔边缘整齐, 未见撕裂或鼓包, 表明射孔过程未对井筒结构造成损伤, 验证了双层套管射孔的安全性与可行性。



注：1—导爆管雷管；2—接雷管起爆仪；3—导爆索；4—射孔枪；5—清水；6—套管；7—混凝土靶；8—防护罩。
a. 环靶射孔试验安装示意图



b. 环靶射孔试验现场安装图
图 6 环靶射孔试验安装图

Fig. 6 Installation diagram of annular target perforation test

3 现场应用案例

3.1 工程背景

海上 X 井为探井，DST1 测试层位于 9-5/8" 与 13-3/8" 双层套管重叠段，射孔枪位于 9-5/8" 套管内（图 9），射孔枪处于双层套管内，必须采用双层套管射孔方式打开储层。

图 10 为固井质量测井解释结果，显示射孔井段固井质量评价整体为良-优，水泥胶结具备封隔性。

3.2 施工参数

7" 射孔枪，40 孔/m，抗外压 85 MPa，抗拉强度 170 000 kg。射孔弹 SDP44HMX39-7，药型 HMX，装药量 39 g，射孔弹穿深打靶试验结果为 1 629 mm，单层套管射孔孔径试验结果为 11.17 mm，相位布置 45°/135° 螺旋排列，装弹数量 832 发，射孔方式为负压射孔。起爆器 HQBQ1-1，药型 HMX，耐温 160 ℃/48 h，耐压 70 MPa。导爆索 80HMXLS，药型 HMX，80 gr/ft（1 gr=64.8 mg，1 ft=0.304 8 m），耐温 160 ℃/48 h。传爆管 CBG-HMX-5.5/6.0-1，药型 HMX，耐温 160 ℃/48 h。延时火药 HGMP-28/1-0，药型 HMX，延

表 3 试验穿深与外层套管孔径

Table 3 Test penetration depth and outer casing hole diameter

相位	穿深/ mm	穿深均值/ mm	孔径/ mm	孔径均值/ mm
高边 (枪管距离 套管内壁较远)	860	864	5.5	5.61
	770		5.5	
	900		5.4	
	850		5.5	
	980		5.5	
	850		5.9	
	890		5.7	
	780		6	
	980		5.3	
	780		5.8	
低边 (枪管距离 套管内壁较近)	900	975	6.3	6.15
	850		6.5	
	980		5.8	
	1 100		6	
	1 100		6.3	
	1 000		6	
	940		6.4	
	1 050		5.4	
	1 050		6.2	
	780		6.6	
总均值/mm	919.5		5.88	

表 4 其它射孔结果

Table 4 Other perforation results

序号	检验项目	要求值	实测值
1	枪上孔眼处单侧裂纹	≤30 mm	无裂纹
2	枪外径胀大量	≤5 mm	1.5 mm
3	射孔枪损坏情况	应无横向裂纹，枪头、枪尾不得脱落	无横向裂纹，枪头、枪尾未脱落
4	穿孔率	≥95%	100%
5	对位率	≥90%	100%



图 7 射孔后的混凝土靶

Fig. 7 Concrete target after perforation

时 6 min，耐温 160 ℃/48 h。后效体 F5，耐温 160 ℃/48 h。射孔方式为环空加压射孔。传压通道：环空加压装置上接头。生产通道：环空加压装置下接头。减



图 8 混凝土靶细节展示
Fig. 8 Concrete target detail view

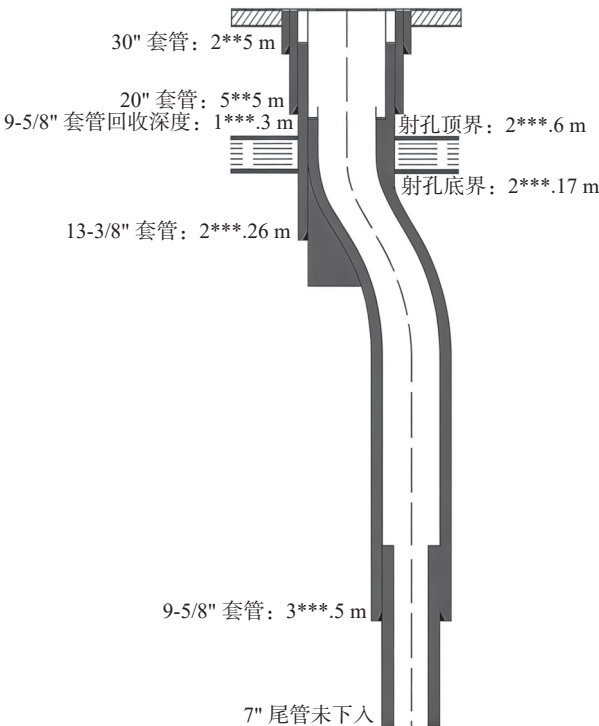


图 9 海上 X 井井身结构图
Fig. 9 Casing program of offshore Well X

震组合：2-7/8"EUE 厚壁油管+纵向减震器。射孔监测：TCP 射孔井口震动监测装置。

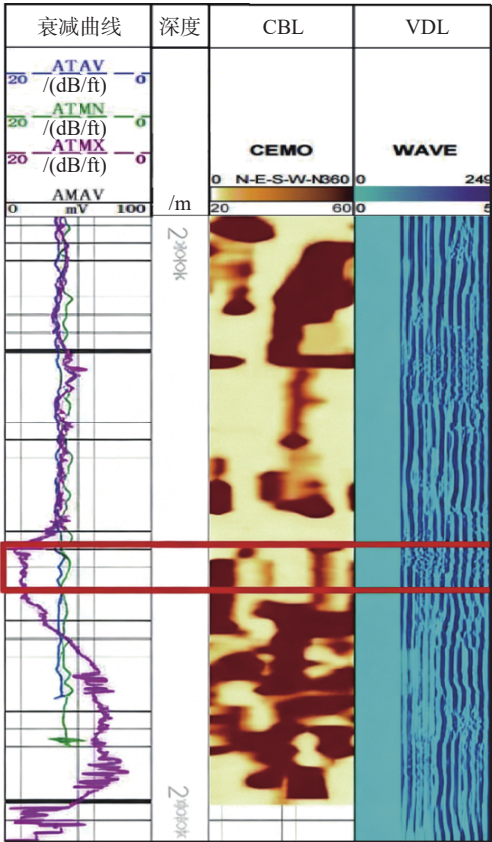


图 10 射孔井段固井质量
Fig. 10 Cementing quality of perforated interval

3.3 应用效果

该井采用 TCP+APR 射孔测试联作工艺，环空加压至预定射孔压力值后延时 5 min30 s，地面监测仪器监测到射孔震动信号明显，射孔枪发射正常。

射孔后立即按照“两开两关”的测试程序进行测试求产作业，初开井泡泡头见气泡，且逐渐强烈。表 5 展示了二开井其中一个油嘴的测试结果。测试过程中顺利获得有代表性气样，井下电子压力计准确获取地层压力、温度等关键参数，达到预期的测试目的。

表 5 测试成果表
Table 5 Test results

测试序号	射孔 顶界/m	射孔 底界/m	开井 序号	油嘴/mm	井口 压力 /MPa	井口 温度 /℃	日产量/(m ³ /d)			相对密度			气油比/(m ³ /m ³)
							气	油	水	气	油	水	
DST1	2 ***.6	2 ***.17	二开	4.76	0.61	16	2 145	0	0	0.624	—	—	—

该井试油测试在工程上的成功，证明射孔弹的效果基本符合数值模拟的结果，穿透了两层套管并连通了储层。测试结束后，封隔器解封正常，起出的枪身未出现明显的变形。整个过程未出现井下工具卡阻或其他异常，证实该工艺技术在现场复杂工况下的可靠性与实用性。

4 结论

- (1) 9-5/8"与 13-3/8"双层套管重叠段射孔的理论研究与工程实践表明海上双层套管射孔在实践中可以实现。
- (2) 数值模拟与全尺寸试验结果高度一致，证

实了 ANSYS/LS-DYNA 在复杂射孔动力学分析中的有效性,工程实际问题的解决可以借助数值模拟的结果。

(3) 在双层套管射孔作业中,由于射流需依次穿越射孔枪体、内层套管、环空水泥、外层套管及地层岩石,每一界面均造成能量反射、折射与耗散。因此,应优先选用高装药量、长药型罩、低发散角的超深穿透型射孔弹,并配合全闭合相位布弹设计以提升能量利用率。

(4) 现场 DST 测试选用 SDP44HMX39-7 超深穿透型射孔弹进行双层套管射孔,作业验证了该技术的实际有效性,为后续深水高温高压气田开发、老井改造与复杂结构井测试及完井提供了可靠解决方案。

参考文献:

- [1] 覃建宇,刘永峰,秦世利,等.海上导管架平台深井特殊浅层套管设计探索与实践[J].*新型工业化*,2020,10(5):134-135,151.
- [2] 于长广,王攀,王佳昌,等.海上油田浅层气钻井作业方法及防控措施[J].*中国石油和化工标准与质量*,2022,42(24):29-31.
- [3] 荆立英,郭金荣,张会之.聚能射孔器混凝土靶穿深稳定性影响因素分析[J].*石油工业技术监督*,2022,38(2):5-9.
- [4] 吴焕龙,唐凯,彭科普,等.聚能射孔弹侵彻应力砂岩穿深预测[J].*钻采工艺*,2020,43(2):135-138.
- [5] 国家能源局.GB/T 20489-2006 油气井聚能射孔器材通用技术条件[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [6] 陈华彬,杨向同,陈建波,等.多重叠套管射孔性能试验与现场应用[J].*石油矿场机械*,2018,47(4):64-67.
- [7] 刘云刚,张林,刘云兰.套管壁厚对穿孔深度影响试验[J].*科技资讯*,2013(14):94-95.
- [8] 李茂华,徐守余,牛卫东.水泥环套管射孔力学的有限元法分析计算[J].*海洋石油*,2007,27(4):73-77.
- [9] 李东传,曹振斌.聚能射孔器同孔重复射孔作用效果试验研究[J].*油气井测试*,2019,28(2):40-44.
- [10] 李云,吴焕龙,付代轩,等.超高温射孔弹高温高压条件下穿深性能试验研究[J].*测井技术*,2017,41(1):123-126.
- [11] 王木乐,邹霞,尚磊.射孔套管抗外挤压模拟试验研究[J].*长江大学学报(自然科学版)理工卷*,2009,6(2):57-59.
- [12] 陈林,柳军,张艺,等.页岩气超深井射孔套管强度影响因素分析[J].*石油机械*,2025,53(10):31-39.

(上接第 73 页)

- [10] 龙学莉,白莹雪,曹红燕,等.润湿乳化型含氟表面活性剂的制备及其性能研究[J].*石油与天然气化工*,2023,52(1):79-83,90.
- [11] 钟传蓉,王祥程,曾光玉,等.磺酸型含氟表面活性剂的表、界面活性和润湿性行为[J].*油田化学*,2020,37(4):701-706.
- [12] 代轩瑞.含氟聚醚破乳剂的合成与评价[D].大庆:东北石油大学,2021.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB/T 5559—2010 环氧乙烷型及环氧乙烷-环氧丙烷嵌段聚合型非离子表面活性剂 浊点的测定[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [14] 周家华,崔英德.表面活性剂 HLB 值的分析测定与计算 I. HLB 值的分析测定[J].*精细石油化工*,2001(2):11-14.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB/T 8929—2006 原油水含量的测定 蒸馏法[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [16] 国家石油和化学工业局.SY/T 5281—2000 原油破乳剂使用性能检测方法(瓶试法)[S].北京:国家石油和化学工业局,2000.
- [17] 赵士乐.聚醚类原油破乳剂的制备及性能[D].济南:山东大学,2016.
- [18] 张春玲,林梅钦,宗华,等.破乳剂浓度对聚合物驱原油乳状液破乳及界面性质影响[J].*应用化工*,2006,35(1):24-26.