

模拟致密油藏条件下复合射孔系统的试验评价

陈书豪¹, 陈志德¹, 林立明², 梁豪³, 李必红², 杨翕智²

1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术深圳分公司 广东深圳 518064

2. 物华能源科技有限公司 陕西西安 710061

3. 中海石油(中国)有限公司海南分公司 海南海口 570100

通讯作者: Email: 519904653@qq.com

项目支持: 中海油“十四五”重大科技项目“海上深层/超深层油气勘探技术”(KJGC2022-0406)

引用: 陈书豪, 陈志德, 林立明, 等. 模拟致密油藏条件下复合射孔系统的试验评价[J]. 油气井测试, 2024, 33(5): 21-27.

Cite: CHEN Shuhao, CHEN Zhide, LIN Liming, et al. Experimental evaluation of a combined perforation system under simulated tight reservoir conditions [J]. Well Testing, 2024, 33(5): 21-27.

摘要 为评估内置式复合射孔在致密储层中的射孔效能,按照 API-RP 19B 标准的 Part-IV 程序研制了模拟储层复杂压力条件下的射孔试验装置,并设计了一套试验评价方法。选用与实际储层岩石物性特征相近的致密砂岩靶,采用 114 型射孔弹在模拟储层围压、孔隙压力和井筒压力条件下进行射孔试验,使用 CT 扫描和铸体薄片分析进行孔道效能的分析,结果显示,在储层压力条件下,内置式复合射孔对聚能射流存在干扰作用,致使穿孔深度降低,但具有一定的扩孔作用,岩石的单轴抗压强度越低,孔隙度越大,其扩孔效果越明显;内置式复合射孔应用分仓爆炸的设计思路,聚能、后效的两级做功,使孔道末端形成多条 40~100 mm 的裂缝,岩心平均面孔率增大 1.25 倍,疏松地层孔隙,有效的提高了近井地带的流动系数,扩大渗流面积,有利于井的增产增注与后续储层改造措施的实施。

关键词 模拟储层射孔;复合射孔;致密油气藏;增效体;流动效率;损伤评价;射孔效能

中图分类号: TE257.1 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.05.004

Experimental evaluation of a combined perforation system under simulated tight reservoir conditions

CHEN Shuhao¹, CHEN Zhide¹, LIN Liming², LIANG Hao³, LI Bihong², YANG Xizhi²

1. CNOOC Energy Development Co., Ltd., Engineering Technology Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518064, China

2. Wuhua Energy Technology Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710061, China

3. Hainan Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Haikou, Hainan 570100, China

Abstract: To evaluate the perforation efficiency of an internal combined perforation system in tight reservoirs, a perforation test device simulating complex reservoir pressure conditions was developed according to the API-RP 19B Part-IV procedures. Furthermore, a set of experimental evaluation methods was also designed. By using tight sandstone targets with physical properties similar to actual reservoir rocks and 114-type perforating charges, perforation tests were conducted under simulated reservoir confining pressure, pore pressure, and wellbore pressure conditions. CT scanning and thin section casting analysis were performed to analyze perforation channel efficiency. The results show that, under reservoir pressure conditions, the internal combined perforation system interferes with the shaped charge jet, reducing penetration depth but exhibiting a certain degree of hole enlargement effect. The lower the uniaxial compressive strength of the rock and the greater the porosity, the more pronounced the hole enlargement effect. The internal combined perforation system, designed with a compartmentalized explosion concept, uses two stages of energy—shaped charge and post-effect—which create multiple fractures of 40 to 100 mm at the end of the perforation channels. The average pore rate of the cores increased by 1.25 times, loosening the formation and effectively enhancing the flow coefficient in the near-wellbore region. This expansion of the flow area is beneficial for boosting well productivity and injectivity, as well as facilitating subsequent reservoir stimulation measures.

Keywords: simulated reservoir perforation; combined perforation; tight oil and gas reservoirs; efficiency enhancement; flow efficiency; damage evaluation; perforation efficiency

随着石油工业的发展,埋藏浅、储层物性好,易经济高效开发的油藏逐步进入开发的中后期,为了

满足经济发展需要,深层致密低渗油气藏已成为未来开发的重点。由于埋藏深、岩性致密、储层物性差,采用常规射孔弹进行射孔完井形成的储层与井筒的流动通道在射流高冲击力的作用下,孔道周围岩石受到破坏,形成约 6~13 mm 的压实带,降低了岩石的渗透性,增加了射孔孔道的表皮系数,严重影响井的产能及后续的增产改造措施^[1-2]。因而获得清洁的射孔孔道以实现目标产能至关重要,复合体、自清洁等增效射孔技术也随之提出。

内置式复合射孔是在常规射孔弹基础上增加后效体串联组成^[3-4],利用炸药爆炸与推进剂燃烧存在速度差的机理,在聚能射孔的同时,高速射流产生的涡流场引力将破碎的推进剂携带进入孔道内实现二次能量释放,产生大量气体清洁孔道内的压实带并延伸扩展形成裂缝^[5-8]。该技术于 20 世纪 80 年代提出^[9],国内 90 年代初,臧涛成等^[10]开始相关理论研究以及在各油田进行试验,直至 2012 年在中国石油、中国石化、中国海油、延长石油等公司进行了全面推广及应用。目前对该技术的效果评价研究较少,杜亮等^[11]基于 API-RP 19B 推荐的方法测试射孔前后目标靶体的流动性,再切割目标靶物理测量孔道参数进行效果评价。ATWOOD D C 等^[12]基于对采用该技术进行射孔后的试验靶利用扫描电镜分析孔道局部损伤来评估射孔效能。徐新华等^[13]依据复合油藏流量等效原理,建立后效射孔产能评价模型,提出了射孔穿深和径向渗透率是影响射孔效能的主控因素。但目前对致密油藏复合射孔效能的评价主要依赖于油田实际产能的反馈,马英文^[14]、陈学海^[15]和张强^[16]等学者主要通过长庆、渤中和徐深等油气田现场应用效果对复合射孔技术进行评价,缺乏有效的试验评估手段。

现结合致密油气藏储层条件,研制了模拟储层压力条件下的射孔性能测试装置并进行内置式复合射孔试验与流动效率测试,结合 CT 扫描与铸体薄片分析技术对孔道进行表征,实现对内置式复合射孔系统的综合效能评价。

1 试验装置及评价方法建立

目前,国内各大油气田对射孔产品的检测大多是在常温常压条件下进行,不能真实反映射孔器在地层高温高压条件下的工作状态,更无法检验射孔器在储层条件的下的实际效能。因此为了了解内置复合射孔在实际储层条件下的孔道效能,采用先

进的测试设备和测试技术,模拟真实井下环境条件,测试获得射孔、射孔后增产及油气流动等参数,还原射孔弹在井下的实际表现,有利于指导复合射孔完井设计及正确评价油气井的实际储量,同时指导产品的研发与优化设计。

1.1 试验装置

为了模拟实际储层条件下的射孔试验及流动效率评价,根据 API RP 19B 2021 版《Evaluation of Well Perforators》^[17](以下简称为 API RP 19B)中 Section II(应力岩石射孔试验)和 Section IV(模拟储层流动效率测试试验)的要求,设计建造模拟储层射孔效能评价装置,如图 1 所示。该装置可实现模拟储层温度、岩性、复杂压力条件(上覆岩石压力、孔隙压力和井筒压力)和实际工况(射孔器材和井身结构)条件下的射孔试验及流动效率测试。

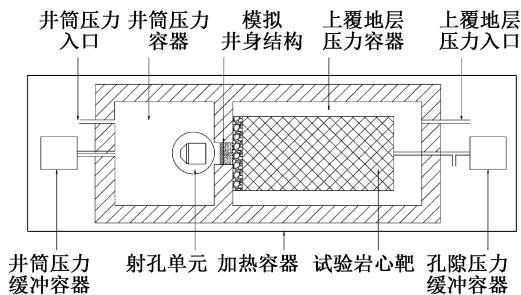


图 1 模拟储层射孔效能评价装置结构图

Fig. 1 Structural diagram of simulation reservoir perforation efficiency evaluation device

1.2 试验岩心

目标储层南海东部 L 油田 W 组主力层段为砂岩储层,细砂为主,岩片中碎屑颗粒以石英为主,其次为长石和岩屑,少许云母。储层岩石密度为 2.3~2.6 g/cm³,泊松比为 0.21~0.35,孔隙度为 8%~11%,渗透率为 $(0.1\sim2.0)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,岩石单轴抗压强度为 60~90 MPa。

由于目标储层岩石采样困难且无法满足大量测试需要,因此根据目标储层特征进行露头岩石调研及岩石特性参数测试,确定试验靶选用四川盆地三叠系须家河组、陕西鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩和山东胶莱盆地白垩系大盛群田家楼组砂岩三种露头岩石(见表 1),并按照 API RP 19B 规定的贝雷砂岩靶尺寸(直径 178 mm,高度 800 mm)进行雕刻。

1.3 试验评价方法

基于建立的模拟储层射孔效能评价装置,以 API RP 19B 为基础,建立内置式复合射孔效能评价方法。具体步骤为:(1)配置模拟地层水对试验靶进行饱和;(2)将饱和后的试验靶装入模拟储层射

表 1 试验岩心岩石特征表

Table 1 Rock Characteristics of Test Cores

岩石类型	平均单轴 抗压强度/ MPa	泊松比	密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙 度/%	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
须家河组砂岩	60	0.29	2.44	7.91	0.19
延长组砂岩	80	0.25	2.39	9.10	0.20
田家楼组砂岩	100	0.26	2.48	5.56	0.14

孔效能评价装置进行射孔前的流动效率测试;(3)在模拟储层压力条件、井身结构条件下,使用单发射孔弹模拟实际装枪对砂岩进行射孔试验;(4)对射孔后的试验靶进行流动效率测试;(5)采用工业CT和高倍显微镜进行孔道损伤分析。

2 射孔效能评价

现主要探讨分析内置式复合射孔技术在均质钢靶、低渗致密储层中的射孔效能,包括孔道穿深、孔道容积、套管孔径和流动效率,并基于铸体薄片技术,设计了一种射孔孔道特征分析方法,进行复合射孔试验后孔道效能的评价。

2.1 模拟装枪侵彻钢靶试验

2.1.1 试验条件

采用常规射孔(超深穿透射孔弹 213SD-114R-3HR)和内置式复合射孔弹(超深穿透射孔弹 213SD-114R-3HR+后效体 ZX1)进行模拟装枪侵彻钢靶试验。

2.1.2 试验结果

试验后孔道侵彻深度、套管孔径和孔道容积如表 2 所示。由试验结果分析可知:后效体对射孔弹的金属射流存在一定的干扰作用,致使穿深降低,但影响程度较低约为 3.3%,对套管入口孔径几乎无影响,但孔道容积提升近 16.7%,具有较好的孔道扩容效果。

表 3 模拟储层温压条件下射孔试验数据分析统计

Table 3 Analysis and statistics of perforation test data under simulated reservoir pressure conditions

岩石类型	编号	单轴抗压强度/MPa	弹型	穿深/mm	套管孔径/mm	孔道容积/mm ³
须家河组砂岩	1	48	常规射孔	370	8.6×8.8	7 753.2
	2	51	内置式复合射孔	340	9.6×9.8	9 360.8
	效果/%			降低 8.1	提高 11.5	提高 20.7
延长组砂岩	3	63	常规射孔	310	8.7×8.9	7 028.9
	4	65	内置式复合射孔	280	9.3×9.5	8 210.7
	效果/%			降低 9.6	提高 6.8	提高 16.8
田家楼组砂岩	5	75	常规射孔	320	9.3×9.5	8 431.8
	6	72	内置式复合射孔	300	9.9×10.1	9 964.8
	效果/%			降低 6.3	提高 6.4	提高 18.6

表 2 内置式复合射孔与常规射孔穿钢靶试验结果

Table 2 Results of steel target penetration tests for built-in composite perforation and conventional perforation

射孔弹	序号	侵彻深度/ mm	孔道容积/ mm ³	套管孔径/ mm
常规射孔弹	1	333	6 528.1	9.4×9.5
	2	334	6 575.8	9.7×10.1
	3	326	6 322.5	10.3×10.6
	4	325	6 278.5	9.2×9.5
	5	331	6 489.1	9.4×9.7
	6	338	6 501.8	10.4×10.8
平均值		331	6 449.3	9.8
内置式复合射孔弹	7	320	7 501.1	9.8×9.9
	8	325	7 838.8	9.1×9.3
	9	323	7 646.6	9.1×9.2
	10	318	7 468.3	9.5×10.2
	11	321	7 650.4	10.4×10.7
	12	311	7 358.2	10.1×10.1
平均值		320	7 577.2	9.7
效果/%		降低 3.3	提高 16.7	降低 1.0

2.2 模拟储层射孔试验

2.2.1 试验条件

基于建立的试验评价方法,根据目标储层温压环境、设置温度 150 ℃、围压 60 MPa、孔隙压力 40 MPa,井筒压力 35 MPa 条件下,采用常规射孔(超深穿透射孔弹 213SD-114R-3HR)和内置式复合射孔弹(超深穿透射孔弹 213SD-114R-3HR+后效体 ZX1),分别对须家河组砂岩、延长组砂岩和田家楼组砂岩进行流动效率测试、模拟储层射孔试验和孔道的微观分析。

2.2.2 试验结果

(1)孔道物理参数分析

模拟储层射孔试验后进行孔道侵彻深度、套管孔径和孔道容积的分析,通过从试验靶端面孔道入口向孔道内注入煤油,直至孔道充满流体,记录此时注入液体的体积即为孔道容积,试验结果见表 3。

由于岩石单轴抗压强度对射孔孔道性能影响较大^[18],在相同条件下射孔孔道穿深随着岩石抗压强度增加而下降,这与试验结果一致,在此基础上针对试验数据分析:在模拟储层温压条件下,内置式复合射孔平均穿深降低 8.0%,套管平均孔径提升 8.2%,孔道平均容积提高 18.6%,说明内置式复合射孔对金属射流存在一定的干扰从而影响穿深,但内置式复合射孔具有较好的扩孔扩容作用。这与鲁坤等^[19]提出的穿孔孔径越大,越有利于裂缝扩展一致。由于须家河组砂岩的单轴抗压强度最低,内置式复合射孔的扩孔作用较明显,但随着岩石抗压强度增加,扩孔作用减弱。

(2) 流动效率测试

为了分析内置式复合射孔的增产效果,将进行模拟储层射孔试验后的三组砂岩靶进行流动效率测试,试验结果如图 2 所示。在温压和流体黏度条件相同情况下,进行内置式复合射孔后其平均流动效率较常规射孔提升 14.6%。

(3) CT 扫描

为了进一步分析内置式复合射孔的增产机理,通过 CT 扫描和高倍显微镜对其孔道形态和岩石微观结构变化进行分析,再将砂岩靶沿孔道中心切割获取其孔道剖面以综合分析内置式复合射孔对孔道的作用。

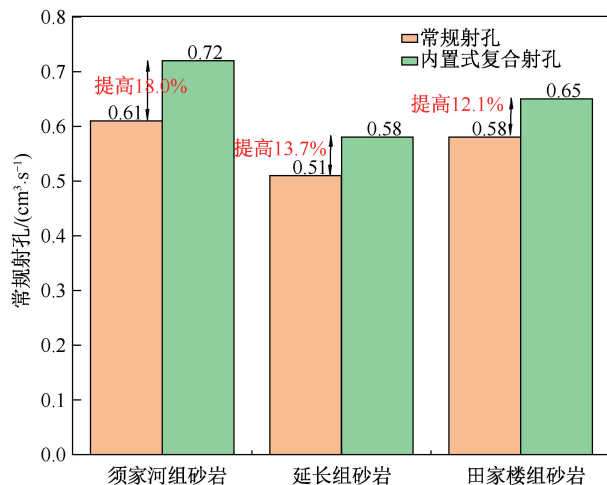


图 2 流动效率试验测试结果对比图

Fig. 2 Comparison of flow efficiency test results

图 3 为 CT 扫描岩心的图像处理结果,其中灰色为岩心,白色为金属,红色为裂缝。由 CT 扫描结果分析可知,射孔孔道从端面到底部清晰可见,射孔弹对砂岩靶射孔时,高速金属射流破岩过程中,金属粒子沿孔道壁沉积并通过裂隙渗入岩心内部造成污染。对比常规射孔和内置复合射孔 CT 扫描结果和岩心孔道剖面(见图 4)分析可知:内置复合射孔形成的孔道内金属残留物减少,孔道清洁程度提高,孔道表皮系数降低,孔道末端形成了开放性孔道形态及裂隙,裂隙长度在 40~100 mm 之间。

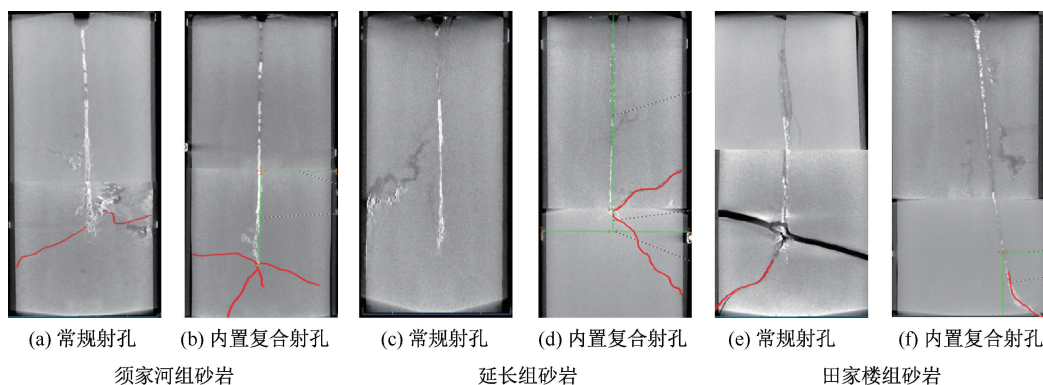


图 3 常规射孔与内置式复合射孔岩石打靶 CT 扫描图

Fig. 3 CT scan of conventional perforation and built-in composite perforation for rock shooting

(4) 微观分析

为了定量评价后效复合射孔的孔道效能,创新设计了微米级多视域缝-孔定量分析方法,对射孔后的孔道特征进行评价。该方法思路如图 5 所示,基于射孔后的试验靶,采用铸体薄片方法,沿射孔孔道方向在不同位置取样进行铸体薄片的制作,薄片尺寸为 80 mm,如图 6 所示;并依托全自动显微镜及微米级数控平台,分析统计薄片

上的孔道特征参数,并根据间距、半径、方位角度不同分类方案分析对比试验前和试验后试验靶孔隙参数的变化情况,从而实现射孔孔道特征的评价。

由薄片分析(见图 7)可知,聚能射流倾彻岩石后,孔道壁受到剪切和塑性挤压的综合作用,原有的孔隙发生压实,孔隙直径变小,岩石颗粒发生破裂产生裂缝。

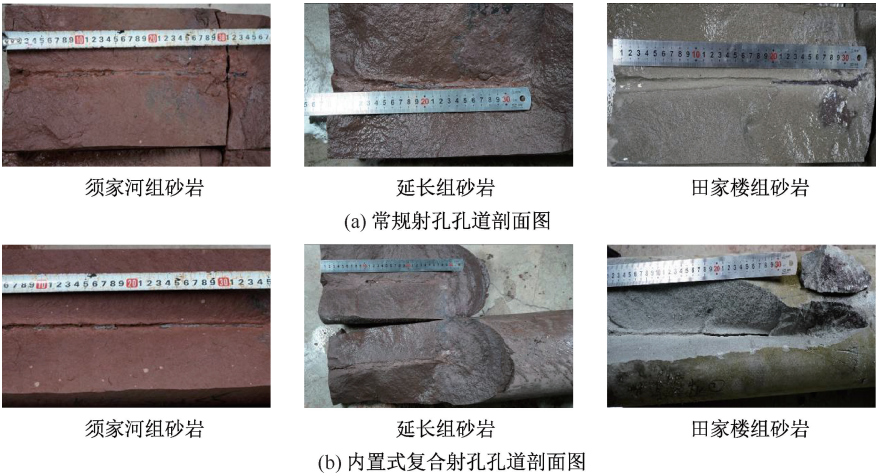


图 4 常规射孔与内置式复合射孔孔道剖面图

Fig. 4 Cross section of conventional perforation and built-in composite perforation channels

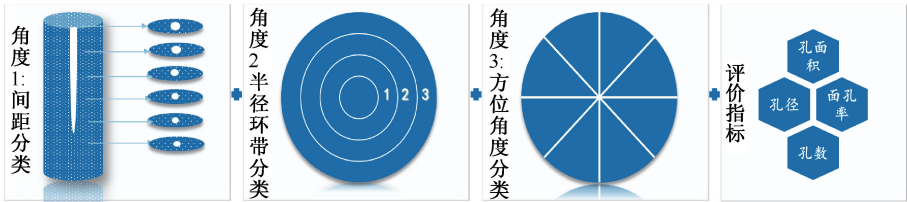


图 5 微米级多视域缝-孔定量评价方法思路

Fig. 5 Quantitative evaluation method for micro scale multi view seam hole



图 6 根据等间距制作大尺寸岩心铸体薄片图

Fig. 6 Production of large-sized rock core casting thin sections based on equal spacing

同时基于微米级多视域缝-孔定量分析方法,通过全自动显微镜及微米级数控平台,分析统计每个薄片上的微观孔隙结构参数,并与试验前的岩心原始状态进行对比,建立了常规射孔和内置式复合射孔两种射孔技术的孔道损伤模式图(见图 8),并对比两种射孔技术射孔孔道效能的差异(见图 9)。

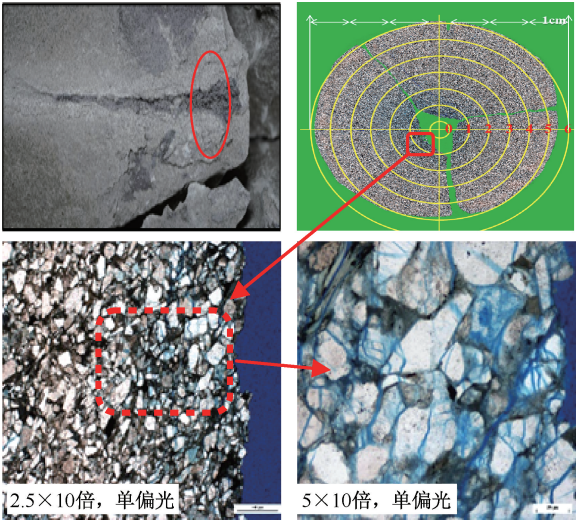


图 7 致密砂岩孔道剖面及薄片分析图

Fig. 7 Dense sandstone pore channel profile and thin section analysis

由图 8 分析可知:常规射孔孔道形态为“圆锥形”,孔道直径逐渐变小,而内置式复合射孔孔道形态整体为“圆柱形”,孔道直径变化较小,且其孔道直径与波及范围明显大于常规射孔。

同时由图 9 分析可知:相同条件下,内置式复合射孔后试验靶的面孔率高于常规射孔,且其整体的破裂增孔效果(试验后岩心面孔率与试验前岩心面孔率比值)为常规射孔的 1.34 倍,与流动效率测

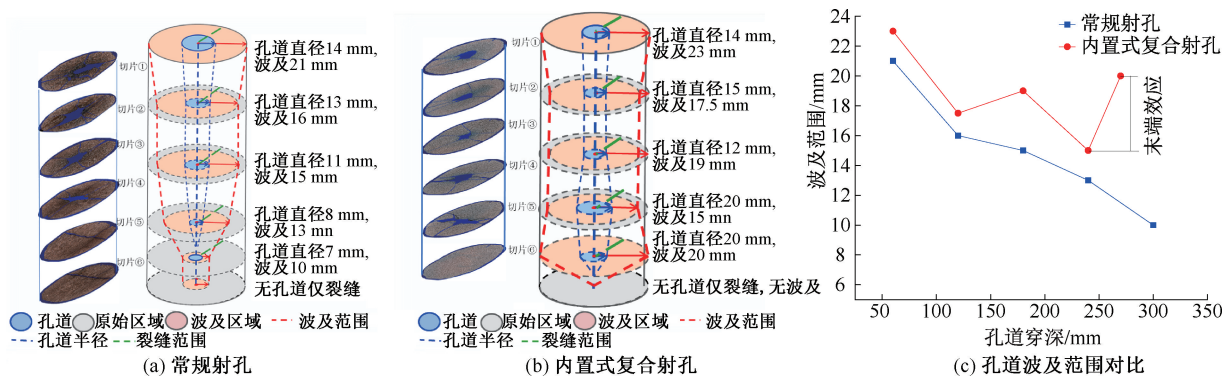


图8 射孔后穿孔道损伤定量评价模式图

Fig. 8 Quantitative evaluation mode diagram of perforation channel damage after perforation

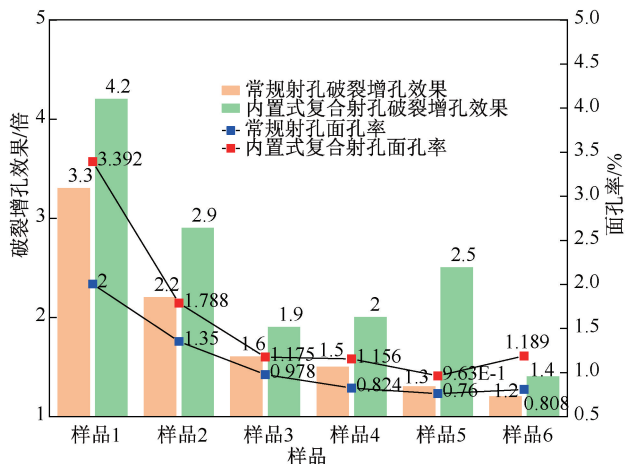


图9 常规射孔与内置复合射孔孔道效能提升对比图

Fig. 9 Comparison of efficiency improvement between conventional perforation and post effect composite perforation channels

试结果规律相似。表明内置式复合射孔由于后效粒子进入孔道,对孔道周围岩石形成了二次爆轰作用,产生较高的侧向压力,疏松地层孔隙,提高近井地带的流动系数,扩大渗流面积,这有利于井产能的提高与后续的储层改造。

3 结论

(1)通过对内置式复合射孔效能的试验评价,表明该技术对致密低渗储层的增产效果明显优于常规射孔,能有效地提高近井地带的流动系数,恢复近井地带渗透率,扩大渗流面积,这有利于井产能的提高与后续压裂酸化等储层改造措施的实施。

(2)内置式复合射孔在常规射孔弹的基础上增加增效体结构,对聚能射流有一定的干扰作用,使穿孔深度降低,但通过聚能、后效的两级做功,有效提高射孔孔径、孔容和孔道的清洁度,并在孔道末端形成多条裂缝,改善孔道的流通条件,提升近井地带流动效率,且在低渗致密砂岩储层中,岩石强

度越低,其提升效果越明显。

(3)基于模拟储层射孔试验,流动效率测试结合微米级多视域缝-孔定量分析建立的内置式复合射孔评价方法,能够较全面评价射孔过程中的关键参数指标,对分析射孔效果、优化射孔工艺、评价生产井的真实产能提供数据基础。

致谢:感谢中海油能源发展股份有限公司工程技术深圳分公司和物华能源科技公司同意本文公开发表。感谢中国兵器集团北方特种能源集团李尚杰、西安恒青信公司庞长旭等人在论文修改、薄片分析方面做出的贡献。

参考文献

- [1] DIAZ N J, BELL M R, HARDESTY J T, et al. An evaluation of the impact of reactive perforating charges on acid wormholing in carbonates[R]. SPE 138434, 2011.
- [2] 李科研. 超深穿透自清洁射孔弹在海上油田的应用[J]. 化学工程与装备, 2021, (11): 121-122.
LI Keyan. The application of ultra deep penetrating self-cleaning perforating charges in offshore oil fields [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021, (11): 121-122.
- [3] 葛俊瑞,李三喜,李艳飞,等. 后效复合射孔技术在海上低孔渗油气藏的探索应用[J]. 海洋石油, 2018, 38 (4): 52-56.
GE Junrui, LI Sanxi, LI Yanfei, et al. Exploration and application of post effect composite perforation technology in offshore low porosity and permeability oil and gas reservoirs [J]. Offshore Oil, 2018, 38 (4): 52-56.
- [4] 杨珂. 复合射孔新技术探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(20): 190-192.
YANG Ke. Exploration of new composite perforation technology [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43 (20): 190-192.
- [5] ALBERT L. Test results field & lab for a new composite perforating method that integrates propellant and shaped

- charges[R]. SPE 199274, 2020.
- [6] 胡文丽,徐新华,闫正和,等.一种新型后效射孔技术及应用[J].长江大学学报(自科版),2019,16(7):31-34.
HU Wenli, XU Xinhua, YAN Zhenghe, et al. A novel post effect perforation technology and its application [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(7):31-34.
- [7] 文良凡.后效集束射孔技术的探讨[J].石油工业技术监督,2015,31(10):39-41.
WEN Liangfan. Exploration of post EFFECT beam perforation technology [J] Technical Supervision in Petroleum Industry, 2015, 31(10):39-41.
- [8] 杨浩,包智魁,张继成.低渗透油藏后效射孔产能模型建立及应用[J].中外能源,2021,26(2):44-49.
YANG Hao, BAO Zhikui, ZHANG Jicheng. Establishment and application of after-effect perforation productivity model in low permeability reservoir [J]. Sino-Global Energy, 2021, 26(2):44-49.
- [9] FORD F C, HILL G A, VINCENT C T. High-velocity jet and propellant fracture device for gas and oil well production; US19810248322[P]. 1983-07-05.
- [10] 臧涛成,刘军.一种带有后效作用的增效射孔弹[J].爆破器材,1996,25(3):32-34.
ZANG Taocheng, LIU Jun. An enhanced perforation bullet with aftereffect [J]. Explosive Materials, 1996, 25(3):32-34.
- [11] 杜亮,吕佳男,刘礼,等.喇嘛甸油田外套式复合射孔技术应用及分析[C]//陕西省石油学会.2023国际石油石化技术会议论文集II.北京:2023:1-6.
DU Liang, LYU Jiannan, LIU Li, et al. Application and analysis of jacket compound perforation technology in Lamadian oilfield [C]//Shaanxi petroleum society. 2023 International Petroleum and Petrochemical Technology Conference Proceedings II, Beijing:2023:1-6.
- [12] ATWOOD D C, YANG W, GROVE B M, et al. Flow performance of perforation tunnels created with shaped charges using reactive liner technology[R]. SPE 121931, 2009.
- [13] 徐新华,戴宗,朱义东,等.基于复合油藏模拟的后效射孔产能评价方法[J].油气井测试,2023,32(2):63-67.
XU Xinhua, DAI Zong, ZHU Yidong, et al. An aftereffect perforation productivity evaluation method based on composite reservoir simulation[J]. Well Testing, 2023, 32(2):63-67.
- [14] 马英文,付团辉,吴泽林,等.渤中34-2/4油田外置式复合射孔技术[J].油气井测试,2018,27(1):31-36.
MA Yingwen, FU Tuanhui, WU Zelin, et al. External composite perforation technology in the Bozhong oilfield [J]. Well Testing, 2018, 27(1):31-36.
- [15] 陈学海,宋静. StimGun复合射孔技术在徐深气田A井的应用[J].采油工程文集,2018,(1):52-56.
CHEN Xuehai, SONG Jing. Application of StimGun compound perforation technology in Well A of Xushen Gas Field [J]. Oil Production Engineering, 2018, (1):52-56.
- [16] 张强,饶志华,秦世利,等.后效负压射孔技术在海上油田的应用分析[J].石化技术,2022,29(5):110-112.
ZHANG Qiang, RAO Zhihua, QIN Shili, et al. Application analysis of post effect negative pressure perforation technology in offshore oil fields [J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(5):110-112.
- [17] American Petroleum Institute. Recommended Practice for Evaluation of Well Perforators; API RP 19B-2021[S]. Rockwell; API-American Petroleum Institute, 2021:9-20.
- [18] 王喜,李尚杰,马英文,等.不同强度致密砂岩对射孔弹穿深的影响[J].测井技术,2018,42(5):602-606.
WANG Xi, LI Shangjie, MA Yingwen, et al. Influence of tight sandstone with different strength on the performance depth of perforating bullet [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5):602-606.
- [19] 鲁坤,李必红,唐英才等.一种平面射孔技术用射孔弹侵彻性能研究[J].火工品,2023(4):28-33.
LU Kun, LI Bihong, TANG Yingcai, et al. Study on the penetration performance of a perforating charge for plane perforation technology [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2023(4):28-33.

编辑 吴志力

第一作者简介:陈书豪,男,1992年出生,工程师,毕业于广西大学机械工程专业,现从事海上油气勘探开发的完井测试工程技术及管理工作。电话:18202919598,Email:chenshh27@cnooc.com.cn。通信地址:广东省深圳市南山区后海滨路3168号中海油大厦A座,邮政编码:518064。