

多角度汇聚射孔技术

于开勋¹, 刘明², 王九州³

- 1. 中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412
- 2. 中国石油大庆油田有限责任公司开发事业部 黑龙江大庆 163002
- 3. 中国石油国际勘探开发有限公司 北京 100034

通讯作者: Email: 379192860@qq.com

引用: 于开勋, 刘明, 王九州. 多角度汇聚射孔技术[J]. 油气井测试, 2022, 31(4): 13-17.

Cite: YU Kaixun, LIU Ming, WANG Jiuzhou. Multi-angle convergent perforating technology[J]. Well Testing, 2022, 31(4): 13-17.

摘要 常规的聚能射孔一般采用螺旋布孔方式, 压裂时, 部分孔道产生转向缝, 甚至在孔道以外的方向产生多条裂缝, 一定程度上影响压裂效果。对水平井压裂施工中常用的 89 型射孔器的射孔弹与枪身不同夹角对穿深影响规律进行分析, 排列了定面射孔布弹方式, 结合地应力及射孔参数等影响因素, 设计出结构合理的汇聚定面射孔器, 经地面检测和现场试验, 分析井下工艺适应性, 形成汇聚定面射孔技术。该技术射孔后能够在择优裂缝面上形成多个稳定的射孔孔眼排布, 压裂时能够产生更为有效的、单一的平整光滑裂缝; 现场试验数据表明, 与常规射孔相比, 注入井平均注入强度提高 14.75%, 平均降低施工破裂压力 6.4%, 对提升压裂施工效果起到了较好作用。该技术为油田难采储量动用提供了一种新的技术手段。

关键词 聚能射孔; 螺旋布孔; 定面射孔; 汇聚定面射孔器; 地面检测; 孔眼排布; 破裂压力; 压裂效果

中图分类号: TE257 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.04.003

Multi-angle convergent perforating technology

YU Kaixun¹, LIU Ming², WANG Jiuzhou³

- 1. Well Testing & Perforation Company, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China
- 2. Development Division of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163002, China
- 3. China National Oil and Gas Exploration and Development Co., Ltd., Beijing 100034, China

Abstract: Conventional jet perforating generally create perforations in spiral arrangement; therefore, fracturing treatment may induce reoriented fractures at some perforations or even multiple fractures in the direction beyond the perforations, which affects the fracturing effect to a certain extent. The influence of different angles between the perforating charge and the perforating gun of the HSD89 perforator, which is commonly used in the fracturing operation of horizontal wells, on the penetration depth was analyzed, and the arrangement pattern of perforating charges in definite plane perforating was determined. Combining with the factors such as in-situ stress and perforating parameters, a well-structured convergent definite plane perforator was designed. Through ground inspection and field test, the adaptability of the perforator to downhole process was analyzed. Finally, the convergent definite plane perforating technology was formed. This technology generates multiple stably-arranged perforations on preferred fracture surfaces, so that fracturing process can induce more effective, single and smooth fractures. Field test data show that compared with conventional perforating technologies, the convergent definite plane perforating technology helps the average injection strength of the injection wells increase by 14.75% and the fracturing pressure reduce by 6.4% on average, greatly improving the fracturing effect. This technology provides a new option for producing hard-to-recover reserves in oilfields.

Keywords: jet perforating; spiral perforations; definite plane perforating; convergent definite plane perforator; ground inspection; perforation arrangement; fracture pressure; fracturing effect

油田开发正从常规油气藏向低渗透、非常规油气藏发展, 对于这些油气藏目前主要依靠常规射孔+水力压裂方式进行开发。通过岩石力学分析可知, 裂缝的延伸总是趋向于平行最大地应力的方向^[1]。当射流方向与最大水平应力方向不一致, 压

裂时, 在井筒周围任何不连续的点上都能产生裂缝, 进而形成复杂的近井筒流动通道, 增大了在水力压裂过程中地层的破裂压力或液体摩擦阻力。定向射孔水力压裂模拟实验结果表明, 射流方向与最大水平主应力方向成 0~30°角时, 水力压裂施工

效果最好。目前国内常规的聚能射孔一般采用螺旋布孔方式,压裂时,在部分孔道产生转向缝,甚至在孔道以外的方向产生多条裂缝,一定程度影响压裂效果。为解决此问题,国外 Allied-Horizontal Wire-line Services 公司研发了 FocusShot 射孔技术^[2]。该技术设计使用有角度的射孔弹,把射孔孔道和能量汇聚至射孔枪/分簇的中心位置,能更有效地产生横向裂缝,减少孔道产生轴向和多裂缝的可能性,获得更好的产量^[3]。但该技术只停留在室内试验阶段,并未进行现场试验。国内开发的等孔径射孔技术^[4]、三射流射孔技术^[5]、扩容射孔技术^[6]、偏心射孔技术^[7]等,但未在压裂井施工中见到应用。

文中介绍的汇聚定面射孔技术,射孔后在平行于最大主应力的平面上形成多个有效、稳定的射孔孔眼排布,压裂时能够产生更为有效的、单一的平整光滑裂缝,降低了施工时破裂压力,提高了注入井注入强度,具有较好的压裂施工效果。

1 射孔参数对水力压裂影响机理研究

在进行钻井及射孔之前,地层应力处于平衡状态,射孔后,原来的平衡状态被破坏,井眼周围应力重新分布。当相邻地层间的主应力差达 2~3 MPa 时,便会对垂向水力压裂裂缝的延伸起阻挡作用,这就需要对其影响因素进行分析。

1.1 射孔方位、间距对裂缝的影响

合理选择射孔方位,可以确保裂缝沿垂直于最小水平主应力方向延伸,裂缝宽度足够大,单一主裂缝向地层远处发展,避免裂缝转向,降低地层起裂压力。

目前在射孔作业中,为保证套管强度,射孔密度大多保持在 20 孔/m 以下。裸眼情况下裂缝起裂位置具有随机性,套管井中裂缝在射孔段起裂,裂缝延伸平面方位垂直于加载的最小应力方向^[8]。与井眼连通的裂缝,其长度与井眼方位角有关,方位角越小,裂缝越长。同时,为保证压出的裂缝最大程度地连通,套管井中的射孔间距在 180°相位时不应大于 0.3 m。射孔方位位于最优起裂面 20°的范围内有利于裂缝扩展。裂缝起裂后,将在一个井眼直径的距离内转向最优起裂面方向。当射孔间距大于 4 倍井眼直径、射孔方位角(射孔轴线和最小水平主应力夹角)小于 75°的情况下,容易在射孔孔眼周围出现多条微裂缝,进而影响单一主裂缝向地层远处发展^[9]。

水平井压裂过程中会出现 3 种裂缝几何形状:平行多裂缝、T 型裂缝和转向裂缝。90°相位角最不

利于相邻射孔间裂缝的连通,射孔最好沿 0°或 180°相位成直线排列。射孔间距对裂缝连通性的影响受最大与最小水平应力比的影响,当二者之比增大时,相邻两个射孔压出的裂缝连通的可能性增加。180°相位布孔,射孔方位和最优起裂面成 30°夹角射孔,即可保证射孔和地层裂缝具有良好的连通性,避免了多裂缝和裂缝弯曲,并提高了裂缝宽度。

1.2 泵排量及压裂液性能对裂缝的影响

压裂液黏度对裂缝扩展影响很大,而排量的影响极小。一旦裂缝形成,提高排量仅会增加地面泵压,裂缝宽度几乎保持不变。提高压裂液排量和黏度会使起裂压力增加,而且不会提高裂缝的连通性;相反,参数过高时裂缝将不再连通。射孔孔道流动阻力对近井地带多裂缝的形成起着非常关键的作用。当射孔孔道较小、排量增大时,沿射孔形成单一裂缝的流动阻力增大。

由此可以看出,改善射孔工艺,扩大射孔孔眼直径,对单一主裂缝的形成以及提高压裂效果非常有利。目前,对于高渗透性、胶结疏松的地层,最大水平应力和最小水平应力差别很小,不必考虑裂缝弯曲、转向问题,裂缝起裂位置及方向主要沿已有的射孔发展。为避免压裂作业时多裂缝的出现,直井中应按 180°相位射孔,而斜井中应沿井眼横断面高、低端 180°相位射孔,更有利于单一主裂缝的形成和发展。

2 射孔弹夹角对穿深影响规律研究

目前常规的聚能射孔一般采用螺旋布孔方式,压裂时,在部分孔道产生转向缝,甚至在孔道以外的方向产生多条裂缝,一定程度影响压裂效果(图 1)。

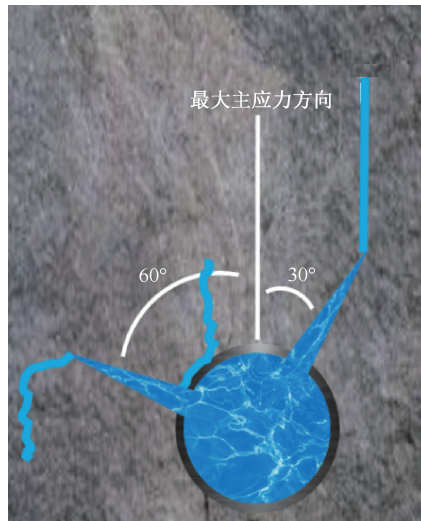


图 1 地应力图

Fig. 1 In-situ stress graph

2.1 射角对射孔器穿孔性能的影响试验

选用同一批次射孔弹,孔密 12 孔/ m,同一混凝土靶,选取多角度进行试验。根据汇聚定面射孔器结构特点,第一发聚能射孔弹射流方向与常规射孔器中的一样(与射孔枪垂直,90°),其相邻的聚能射孔弹的射流方向与原射流方向有夹角,通常称为汇聚定面射孔器的射角。由于射角的影响,汇聚定面射孔器具有与正常聚能射孔器不同的穿孔特点,为了确定射角对汇聚定面射孔器性能的影响,进行了 15°、30°、40°和 45°汇聚定面射孔弹组地面穿孔性能

对比试验。

经检测,15°射角的聚能射孔弹的平均穿孔深度、穿孔孔径与直射的聚能射孔弹的指标基本相同。15°、30°、40°和 45°射角的聚能射孔弹的平均穿孔深度由 832 mm 下降到 547 mm,标准差由 64 mm 上升到 147 mm,平均穿孔深度波动幅度增大。四组试验中直射的聚能射孔弹的平均穿孔深度由 825 mm 下降到 678 mm,标准差由 48 mm 上升到 104 mm,平均穿孔深度波动幅度增大,平均穿孔孔径有所减少,但幅度不大(表 1)。

表 1 汇聚定面射孔弹组试验结果统计
Table 1 Statistics of test results of converging planar perforating charge group

射孔 方向	穿深/ mm	标准差/ mm	孔径/ mm	标准差/ mm	射角/ (°)	穿深/ mm	标准差/ mm	孔径/ mm	标准差/ mm
直射	825	48	9.5	0.1	15	832	64	9.5	0.3
直射	799	90	9.1	0.3	30	715	89	9.3	0.1
直射	743	118	8.9	0.3	40	673	69	9.3	0.5
直射	678	104	9.2	0.6	45	547	147	9.3	0.6

2.2 多角度射流穿深影响因素分析

试验用的混凝土靶的抗压强度为 53.6~54.6 MPa(表 2),稳定性好,对试验结果的影响小。汇聚定面射孔装置射角由 15°、30°、40°到 45°的聚能射孔弹的平均穿孔深度与同枪中直射的聚能射孔弹的平均穿孔深度比最大下降了 19.3%,平均孔径变

化不大(小于 5%)。射角影响射孔装置的平均穿孔深度,随着射角的增加影响程度增大,同时标准差也在增大,表明带射角聚能射孔弹性能下降不仅是射流以某一角度撞击射孔枪壁、套管壁造成的,还可能是由于射孔器内部结构形成的某种程度的弹间干扰造成的^[10]。

表 2 汇聚定面射孔弹组射角影响分析
Table 2 Analysis of the angle effect of converging planar perforating charge group

射孔方向	穿深/mm	孔径/mm	射角/(°)	穿深/mm	孔径/mm	穿深比/%	孔径比/%	靶强度/MPa
直射	825	9.5	15	832	9.5	100.8	100.0	54.6
直射	799	9.1	30	715	9.3	89.5	102.2	53.6
直射	743	8.9	40	673	9.3	90.6	104.5	54.2
直射	678	9.2	45	547	9.3	80.7	101.1	53.9

外径 89 mm 汇聚定面射孔器,15°射角的聚能射孔弹的平均穿孔深度与同枪中直射的聚能射孔弹的穿孔深度基本一致,标准差较小(48~62 mm),表明基本未受影响;45°射角的直射的聚能射孔弹的穿孔深度与 15°射角的枪中直射的聚能射孔弹的穿孔深度比下降了 17.8%,标准差上升到 104 mm,标准差上升表明直射聚能射孔弹也受到了某种程度的影响。可见,汇聚定面射孔器中带射角聚能射孔弹引起的某种程度的弹间干扰也影响到了同枪中直射的聚能射孔弹,使其平均穿孔深度逐渐下降,最大达到了 17.8%。如果考虑汇聚定面射孔器中直射的聚能射孔弹穿深性能的下降,45°射角聚能射孔弹的平均穿孔深度总体下降了 33.7%。

2.3 汇聚穿深效果分析

射角影响汇聚定面射孔器的穿孔深度,随着射角的增加穿孔深度逐渐下降。外径 89 mm 汇聚定面射孔器,15°射角与直射的聚能射孔弹的穿孔深度基本一致;45°射角聚能射孔弹与同一射孔器中直射的聚能射孔弹的穿孔深度比下降了 19.3%、与 15°汇聚定面射孔器中直射的聚能射孔弹的穿孔深度比下降了 33.7%。

3 汇聚定面射孔器结构设计

汇聚定面射孔技术采用多种聚能射孔弹及特殊布弹方式^[11],射孔后,在垂直于套管轴向同一横截面的内壁圆周上形成多个孔眼,圆周上多个孔

眼的排布可形成沿井筒横向的应力集中,能够有效控制裂缝走向,降低地层破裂压力和摩阻。

3.1 汇聚定面射孔器结构

设计了由不同穿深 89 型射孔弹组合,12 孔/m、2 相位、相位角 180°,89 型汇聚定面射孔器^[12](图 2)。

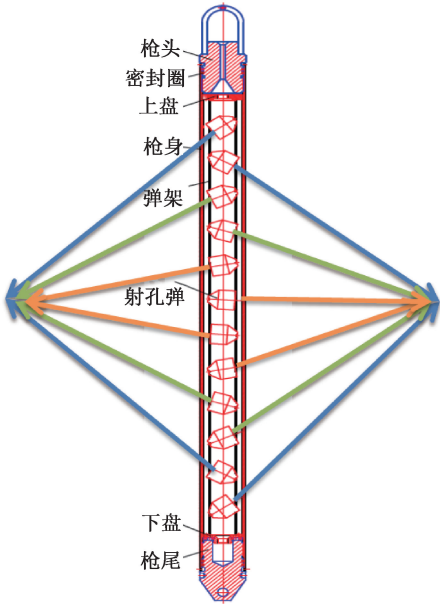


图 2 汇聚定面射孔器
Fig. 2 Converging planar perforator

3.2 汇聚定面射孔器混凝土靶检测

试验过程:地面组装 1 m 汇聚定面射孔器一支,装配 12 发弹、2 相位、相位角 180°,装好后检查对位是否良好,射孔器放入混凝土靶套管后将套管内加满水,人员撤离后点火,取出射孔器,观察穿孔情况及射流定面效果^[13]。

试验器材:混凝土靶 1 块(直径 2 m);导爆索 2 m;高频安全磁电雷管 1 发;89 射孔弹 12 发;89 型枪头、枪尾及密封组件一套。

试验结果见表 3。

表 3 汇聚射孔器检测数据表

Table 3 Inspection data sheet of converging perforator	
定面点至端面距离/mm	(3,9 发)上端面 750、下端面 671
	(4,10 发)上端面 775、下端面 646
	(5,11 发)上端面 817、下端面 613
定面点至套管壁距离/mm 460(3,9 发)487(4,10 发)490(5,11 发)	

经检测,汇聚定面射孔器各项指标满足行业标准要求,达到了预期效果,可以进行现场应用^[14]。

4 现场应用

经过攻关研制、现场试验,汇聚定面射孔工艺技术能够实现射孔后在有利于水力压裂的平面内,

射流孔形成预应力,使后续的压裂裂缝沿着预订的方向扩展,降低地面施工压力,提高压裂效果和单井产量。

4.1 应用概况

现场应用 5 口井(表 4),射孔成功率达到 100%,与常规射孔相比,注入井平均注入强度提高 14.75%,降低施工破裂压力 6.4%^[15]。

表 4 汇聚定面射孔试验数据表

Table 4 Test data sheet of converging planar perforating				
井号	射孔方式	射孔井段/m	孔密/(孔/m)	相位角/(°)
XF××X218	汇聚定面射孔	1 732.6~1 949.0	12	180
XF××X220	汇聚定面射孔	1 753.0~1 894.9	12	180
XF××219	汇聚定面射孔	1 659.3~1 867.2	12	180
PF××X109	汇聚定面射孔	1 492.9~1 638.0	12	180
PF××X118	汇聚定面射孔	1 483.3~1 610.0	12	180

4.2 效果分析

对采用汇聚定面射孔技术施工井与相邻的常规射孔井进行施工压力射后数据分析,从试验结果看出,汇聚定面射孔技术施工后破裂压力平均分别降低 6.2%和 6.6%,见到了较好效果(表 5)。

表 5 施工压力对比表

Table 5 The comparison table of operation pressure			
井号	施工方式	破裂压力/MPa	平均降低
XF××X218	汇聚定面射孔	21.09	6.2%
XF××X219	常规射孔	22.09	
XF××X222	常规射孔	22.86	
XF××219	汇聚定面射孔	21.16	6.6%
XF×41X218	常规射孔	22.65	

对采用汇聚定面射孔技术施工井与相邻的常规射孔井进行注入强度射后数据分析,试验结果表明,汇聚定面射孔技术施工后注入井注入强度平均分别提高 13.7%和 15.8%,有效提高了注入井施工效果(表 6)。

表 6 注入强度对比表

Table 6 The comparison table of injection intensity					
井号	井别	平均日注入量/(m ³ ·d ⁻¹)	有效厚度/m	注入强度/(m ³ /(d·m))	提高率/%
XF××X218	汇聚定面射孔	14	2.9	4.83	13.7
XF××X219	常规射孔	29	6.7	4.33	
XF××X222	常规射孔	40	9.6	4.17	
XF××X220	汇聚定面射孔	27	5.0	5.40	15.8
XF××219	汇聚定面射孔	12	2.2	5.45	
XF××221	常规射孔	37	7.4	5.00	
XF××X418	常规射孔	30	6.7	4.48	
XF×41X218	常规射孔	35	8.1	4.32	
XF××419	常规射孔	40	8.1	4.94	

5 结论

(1)该技术可有效改善近井筒地层液体摩擦阻力,射孔后能够在平行于最大主应力的裂缝平面上形成多个有效、稳定的射孔孔眼排布,对后续压裂施工及地层测试起到了积极引导作用。

(2)经初期试验效果分析,该技术有效提高了注入井的注入强度,同时降低了施工破裂压力,下一步还需加大应用规模,掌握基础数据,全面分析适应性,形成可参考的理论依据。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司同意本论文公开发表。

参考文献

- [1] 李志明,张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京:石油工业出版社,1997,28-73.
- [2] HOSSAIN M M, ROHMAN M K, RAHMAN Sheik S. A comprehensive monograph for hydraulic fracture initiation form deviated wellbore under arbitrary stress regimes. SPE 54360, 1999.
- [3] CHEN Zhongming, ECONOMIDES M J. Effect of near wellbore fracture geometry on fracture execution and post treatment well production of deviated and horizontal wells. SPE 39425, 1999.
- [4] 杨坤,王九州,于秋来,等. 孔径射孔工艺技术[J]. 油气井测试,2021,30(3):25-31.
YANG Kun, WANG Jiuzhou, YU Qiulai, et al. Perforating technology with equal aperture[J]. Well Testing, 2021,30(3):25-31.
- [5] 于开勋. 三射流射孔技术研究与应用[J]. 测井技术, 2015,39(5):665-668.
YU Kaixun. Research and application of triple-jet perforating technology[J]. Well Logging Technology, 2015,39(5):665-668.
- [6] 于书新,吴丹丹,程晓刚,等. 大庆油田浅层气井扩容式射孔技术[J]. 油气井测试,2020,29(5):21-26.
YU Shuxin, WU Dandan, CHENG Xiaogang et al. Expandable perforating technology for shallow gas wells in Daqing Oilfield[J]. Well Testing, 2020,29(5):21-26.
- [7] 谢荣华,王文军. 偏心射孔对水平井压裂的影响[J]. 测井技术,2015,39(5):660-664.
XIE Ronghua, WANG Wenjun. Effect of eccentric perforation on the horizontal well fracturing[J]. Well Logging Technology, 2015,39(5):660-664.

- [8] 李海涛,王永清,李洪建,等. 压裂施工井的射孔优化设计方法[J]. 天然气工业,1998,18(2):43-46.
LI Haitao, WANG Yongqing, LI Hongjian, et al. An optimum perforation design method for prefracturing wells [J]. Natural Gas Industry, 1998,18(2):43-46.
- [9] 窦益华,闫蓉,李明飞. 基于有限元分析的高泵压压裂井射孔参数优选[J]. 油气井测试,2016,25(1):1-3,8.
DOU Yihua, YAN Rong, LI Mingfei. Optimization of perforating parameter for high pressure fracturing well based on finite element analysis[J]. Well Testing, 2016,25(1):1-3,8.
- [10] 李东传,金成福,刘亚芬,等. 射孔弹间干扰消除方法初探[J]. 测井技术,2006,30(5):476-478.
LI Dongchuan, JIN Chengfu, LIU Yafen, et al. On avoidance of interference among charges in perforation [J]. Well Logging Technology, 2006,30(5):476-478.
- [11] 杨爱军. 大斜度井射孔技术的探讨[J]. 石油工业技术监督,2015,31(10):46-48.
YANG Aijun. Discussion of perforating technology of high angle wells [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2015,31(10):46-48.
- [12] 张少程,张锋,周翌等. 定射角定方位射孔新技术[J]. 测井技术,2012,36(1):68-72.
ZHANG Shaocheng, ZHANG Feng, ZHOU Zhao, et al. On set shoot angle compass perforating technology [J]. Well Logging Technology, 2012,36(1):68-72.
- [13] GB/T 20488-2006 油气井聚能射孔器材性能试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [14] 杨其彬,马利成,黄侠. 复合压裂技术[J]. 断块油气田, 2004,11(1):74-76.
YANG Qibin, MA Licheng, HUANG Xia. A technology of compound fracturing [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2004,11(1):74-76.
- [15] 张树人,罗蕊,钟平. 复合压裂现场试验与研究[J]. 大庆石油地质与开发,1998,17(2):38-40.
ZHANG Shuren, LUO Rui, ZHONG Ping. Field test & study for composite fracturing[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1998,17(2):38-40.

编辑 苏璇

第一作者简介:于开勋,男,1981年出生,硕士研究生,高级工程师,2011年毕业于浙江大学地质学专业,现从事射孔工艺研究。电话:0459-5691552, 13804688835; Email: 379192860@qq.com。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区乘南十八街试油试采分公司,邮政编码:163412。