

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.201502010

固井滑套端口参数对压裂影响的试验研究 及模拟分析

杨焕强¹, 王瑞和¹, 周卫东¹, 李罗鹏¹, 桂 捷²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安 710021)

摘 要: 为了解固井滑套端口参数对裂缝起裂压力和裂缝形态的影响, 利用全尺寸水力压裂模拟试验系统, 进行了 $\phi 168.3$ mm 固井滑套不同类型端口下的滑套固井地面压裂试验, 采用有限元数值模拟方法对试验结果进行了分析。结果表明: 在端口面积相同的条件下, 槽型端口与翼型端口的起裂压力相差较小; 随着端口角度的增大, 起裂压力呈升高的趋势; 端口长度与端口数量对起裂压力的影响较大, 随端口长度的增大及端口数量的增多, 起裂压力降低; 翼型端口及角度为 0° 槽型端口的试验样本, 压裂后形成了较宽的单一对称裂缝, 带角度端口的试验样本破裂后形成的裂缝较为复杂。研究表明, 端口角度及端口长度与起裂压力分别满足二次函数关系; 端口数量与起裂压力呈线性关系。研究成果可为固井滑套端口参数的优选提供理论依据及参考。

关键词: 滑套固井 端口参数 起裂压力 裂缝形态 压裂试验

中图分类号: TE357.1⁺1; TE925⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2015)02-0054-05

Testing and Simulating the Effect on Fracturing of Port Parameters of a Cemented Sliding Sleeve

Yang Huanqiang¹, Wang Ruihe¹, Zhou Weidong¹, Li Luopeng¹, Gui Jie²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Oil and Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710021, China)

Abstract: In order to understand the effect of port parameters on fracture initiation pressure and fracture geometry, a fracturing test with $\phi 168.3$ mm cemented sliding sleeve that has different types of ports was conducted by theoretical and experimental studies. A ground test of cemented sliding-sleeve fracturing was carried out by use of full-size hydraulic fracturing simulation system, and the test result has been analyzed by using a finite element numerical simulation (FEM). The results show that fracture initiation pressure difference between slot-type port and wing-type port is smaller. The fracture initiation pressure rises with increase of the port angle. The length and quantity of the ports have a large effect on the fracture initiation pressure and the fracture initiation pressure decreases with increase of the port quantity and tube length. A test sample with a wing-type port and 0° slot-type port can form a single symmetric crack after fracturing, and the test sample of port with an angle can form a more complex one. The research results show that the port angle and tube length follow a quadric function relationship with the fracture initiation pressure, and the port quantity follows a linear relationship with the fracture initiation pressure. The results provide a basis and reference for optimizing the port parameters of $\phi 168.3$ mm cemented sliding-sleeve and other sleeves.

Key words: sliding sleeve cementing; port parameters; fracture initiation pressure; fracture geometry; fracturing test

非常规油气资源普遍具有渗透率低、产层薄、层数多和层间物性差异较大等性质^[1], 分层压裂为开发该类油气藏的主要技术^[2-6], 但现有分层压裂技术压裂层数有限, 存在较大的局限^[7]。滑套固井分段压裂技术是在固井技术的基础上、结合了开关式固井滑套而形成的多层分段压裂完井技术, 与常规分层压裂技术相比, 具有不受层级限制、层数越多优势越明显等

收稿日期: 2014-09-05; **改回日期:** 2015-02-09。

作者简介: 杨焕强(1985—), 男, 山东安丘人, 2007年毕业于中国石油大学(华东)信息与计算科学专业, 2010年获长江大学油气井工程专业硕士学位, 油气井工程专业在读博士研究生, 主要从事水力压裂试验及数值模拟研究工作。

联系方式: yhq840310@sina.com。

基金项目: 国家科技重大专项“山西沁水盆地南部煤层气直井开发示范工程二期”(编号: 2011ZX05060)资助。

特点^[7-9],成为开发非常规油气资源的有效技术手段^[10]。国外石油公司已在滑套固井压裂技术的研究上取得了较大的进展,并在现场进行了大规模的应用,取得了较好的效果^[11-14]。

固井滑套端口是压裂液向水泥环或地层流通的通道,其合理的设计可以降低起裂压力,减轻含砂流体对滑套孔眼周边的冲蚀磨损^[15],减少复杂裂缝的产生和生成较宽的单一对称裂缝。国外已针对 $\phi 139.7\text{ mm}$ 套管开展了固井滑套端口参数对起裂压力影响的试验研究,然而该研究的端口类型及试验样本数较少,且端口面积不尽相同。因此,笔者对国内油田现场常用的 $\phi 168.3\text{ mm}$ 固井滑套设计了不同类型的端口,并进行了滑套固井压裂试验,对试验得到的各类型端口下的起裂压力进行了有限元数值模拟分析,从降低起裂压力的角度优选了端口参数,以期为 $\phi 168.3\text{ mm}$ 及其他尺寸固井滑套端口参数的优选提供依据及参考。

1 滑套固井压裂试验

1.1 试验方案

固井滑套的端口基本参数主要包括角度、长度、数量及有无侧翼,综合考虑以上参数,共设计 11 种端口。为了使相同压力条件下端口水泥环处得到的水力能量相同,设计的各种类型端口面积相同,则各端口类型宽度不同。其中,翼型端口及带角度槽型端口如图 1 所示。

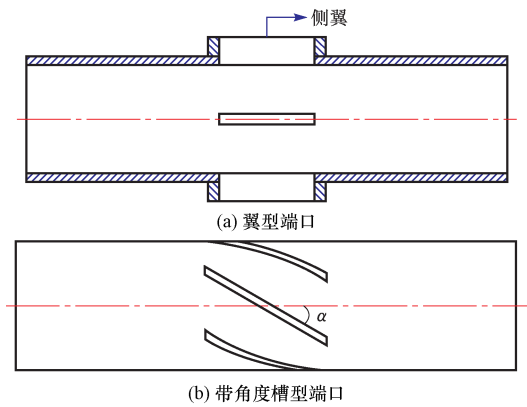


图 1 翼型端口及带角度槽型端口

Fig. 1 Wing-type port and slot-type port with angle

将端口角度为 0° 、长度为 160 mm 、数量为 6 的槽型端口作为基准端口,设计其余 10 种端口的参数(见表 1),将其余 10 种端口的试验结果与基准端口进行比较,分析端口参数变化对起裂压力的影响。

表 1 不同类型滑套端口的基本参数

Table 1 Basic parameters of different ports

端口类型	端口角度/ $(^\circ)$	端口长度/mm	端口数量/个
槽型(基准)端口	0	160	6
翼型端口	0	160	6
不同角度槽型端口	15	160	6
	30		
	45		
不同长度槽型端口	0	120	6
		200	
		240	
不同数量槽型端口	0	160	2
			3
			4

其中,基准端口与翼型端口用于比较端口有无侧翼对起裂压力的影响;基准端口与不同角度、不同长度、不同数量槽型端口,分别研究端口角度、端口长度及端口个数对起裂压力的影响。

1.2 试验样本制备

采用水泥砂浆岩样代替天然岩心进行水力压裂模拟试验。将水与 G 级油井水泥按质量比 $0.4 : 1.0$ 混合制成模拟固井用水泥环;将水泥型号为 425 的水泥与黄沙、水按质量比为 $1.00 : 2.00 : 0.42$ 混合制成模拟地层。在试验样本制作过程中,先将 $\phi 168.3\text{ mm}$ 带端口的滑套与直径为 240 mm 、高为 1.5 m 的模具内部环空用水泥浆胶结,养护 72 h 后拆除模具,以模拟固井水泥环;再将制好的水泥环置于直径为 0.9 m 、高为 1.5 m 的模具中,并在环空内灌注水泥砂浆,养护 28 d ,以模拟地层。按照上述岩样制备方法,每种类型的端口制作 3 个试验样本,共计 33 件。

1.3 试验方法

将高压泵、高压软管、试验样本、压力变送器和数据采集系统连接安装完毕。开泵进行压裂试验,同时启动数据采集系统记录泵注压力数据,试验样本破裂后观察裂缝形态,并沿裂缝面剖开试验样本,记录裂缝断面。

2 起裂压力试验结果及分析

2.1 起裂压力试验结果

根据以上试验方法,依次对 33 个试验样本进行

水力压裂试验,记录试验过程中的压力曲线,得到了33个试验样本的起裂压力(见表2)。

表2 起裂压力试验结果

Table 2 Test results of fracture initiation pressure

端口类型	起裂压力/MPa			平均起裂压力/MPa
	样本1	样本2	样本3	
槽型(基准)端口	4.21	4.16	4.28	4.22
翼型端口	4.24	4.46	4.62	4.44
15°槽型端口	4.56	4.48	4.67	4.57
30°槽型端口	4.78	4.83	4.9	4.86
45°槽型端口	4.85	4.90	5.02	4.92
120 mm 槽型端口	5.48	5.41	5.55	5.48
200 mm 槽型端口	3.83	3.72	3.64	3.73
240 mm 槽型端口	3.55	3.48	3.42	3.48
2 端口	6.50	6.38	6.46	6.45
3 端口	5.79	5.55	5.65	5.66
4 端口	5.03	4.95	4.86	4.95

由表2可知,槽型端口起裂压力略低于翼型端口。将端口角度、端口长度及端口数量对起裂压力影响的试验数据采用最小二乘法进行数据拟合,结果如图2—图4所示。

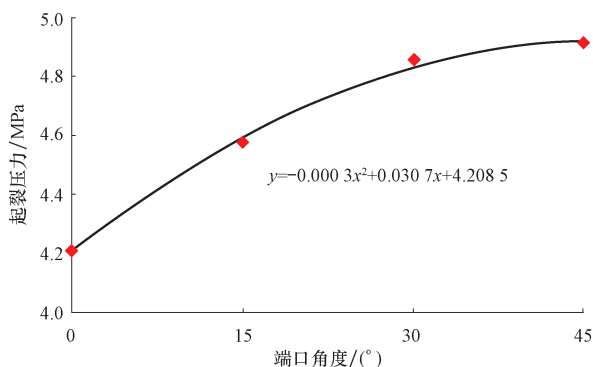


图2 端口角度对起裂压力的影响

Fig. 2 Effect of angular port on fracture initiation pressure

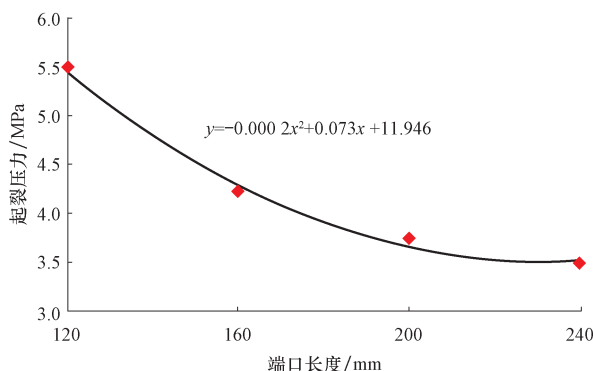


图3 端口长度对起裂压力的影响

Fig. 3 The effect of the end length of port on fracture initiation pressure

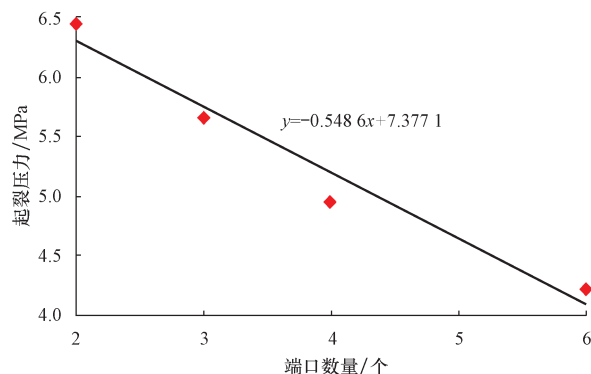


图4 端口数量对起裂压力的影响

Fig. 4 The effect of port quantity on fracture initiation pressure

由图2—图4可以看出,端口角度与起裂压力的关系满足二次函数关系,起裂压力随端口角度的增大而增大,当端口角度达到一定值时,对起裂压力的影响减弱;端口长度与起裂压力之间呈二次函数关系,起裂压力随端口长度的增大而减小,当端口长度达到一定值时,对起裂压力的影响减弱;端口数量与起裂压力呈线性关系,随着端口数量的增加,起裂压力降低。

2.2 滑套端口参数对起裂压力的影响分析

采用有限元数值模拟方法对起裂压力试验结果进行分析。根据文献[16-17]等的研究,当井壁存在的最大周向应力大于其抗拉强度时出现初始裂缝,因此可以用端口水泥环处的最大周向应力的来衡量起裂压力的大小。试验样本的套管、水泥环及地层材料参数见表3。

表3 材料的基本物理性质

Table 3 Basic physical properties of materials

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	渗透率/ mD	孔隙度/ %
套管	206	0.30			
水泥环	11	0.25	5.2	0.002	13
地层	28	0.27	3.4	0.067	11

根据基准端口的有限元数值模拟结果,端口水泥环处产生了周向应力集中,当端口水泥环处的最大周向应力为5.27 MPa时,达到了水泥环的抗拉强度(见图5),此时压裂液压力为3.80 MPa,即起裂压力为3.80 MPa,与试验得到的4.22 MPa的平均起裂压力相比,误差仅为9.8%。

当向其他类型端口的套管内壁及端口水泥环处施加3.80 MPa压力时,各类型端口试验样本的水泥环上产生的最大周向应力见表4。

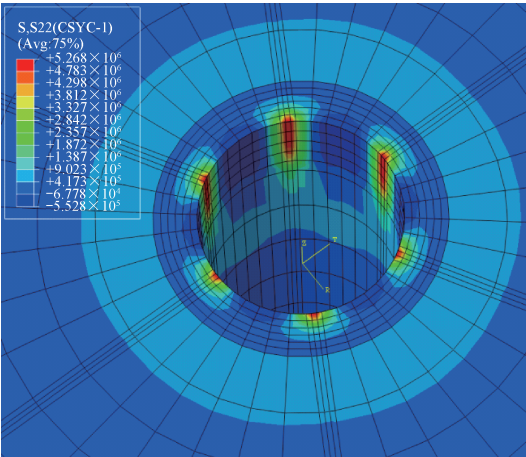


图 5 基准端口试验样本的周向应力分布

Fig. 5 Circumferential stress distribution of the reference port test sample

表 4 各类型端口试验样本的最大周向应力

Table 4 The maximum circumferential stress of different types of port

端口类型	最大周向应力/MPa
槽型(基准)端口	5.27
翼型端口	4.64
15°槽型端口	4.81
30°槽型端口	4.47
45°槽型端口	4.12
120 mm 槽型端口	3.62
200 mm 槽型端口	7.06
240 mm 槽型端口	7.92
2 端口	2.96
3 端口	3.79
4 端口	4.34

从表 4 可以看出,翼型端口在水泥环处产生的最大周向应力比槽型端口小 12%,即翼型端口不利于降低起裂压力;随着端口角度的增大,端口水泥环处产生的最大周向应力有减小的趋势,即起裂压力随着端口角度的增大而升高;端口长度对最大周向应力的影响较大,随着端口长度的增大,最大周向应力增大,即增大端口长度可明显降低起裂压力;随着端口数量的增加,最大周向应力有增加的趋势,即起裂压力随着端口数量的增加而降低。这与试验得到的各类型端口对起裂压力的影响规律一致。

3 裂缝形态分析

复杂的水力裂缝形态(包括弯曲缝、多裂缝等)可能会导致缝宽变窄、压裂液效率降低、脱砂和压裂施工净压力过高等问题^[18-19],因此需要对生成的裂

缝形态进行研究,优选出能生成较宽的单一对称裂缝的端口。

翼型端口及 0°槽型端口沿端口方向产生周向应力集中,且固井水泥环脆性较强,因此裂缝由端口处起裂后迅速扩展形成了 2 条较大的单一对称裂缝(见图 6)。对于带角度的端口,由于水泥环在沿端口角度方向产生周向应力集中,因此试验样本破裂后,裂缝沿端口角度方向扩展,在多个角度方向上形成了至少 2 个裂缝面的裂缝(见图 7)。以上分析可知,角度为 0°的端口有利于生成较宽的单一对称裂缝。

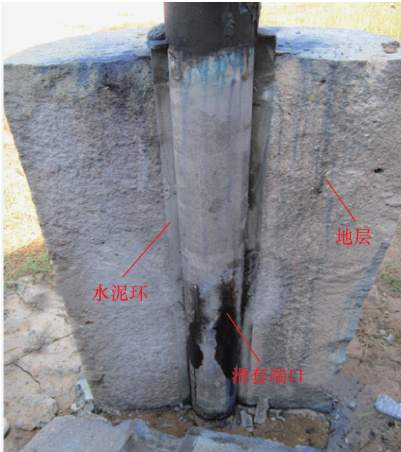


图 6 0°槽型端口试验样本压裂后的裂缝形态

Fig. 6 Fracture geometry after fracturing of 0° slot-type ports test sample



图 7 带角度端口压裂后的裂缝形态

Fig. 7 Fracture geometry after fracturing of angular port test sample

4 结论及建议

1) 在端口面积相同的条件下,翼型端口与槽型端口起裂压力相差较小;端口角度及长度与起裂压

力分别满足二次函数关系,起裂压力随端口角度、长度的增大或端口数量的增多而降低;端口数量与起裂压力呈线性关系,随着端口数量的增加,起裂压力降低。

2) 翼型端口及端口角度为 0° 的槽型端口试验样本的裂缝由端口处起裂后,形成了较宽的单一对称裂缝;带角度端口的试验样本破裂后,裂缝沿端口角度方向扩展,在多个角度方向上形成了至少2个裂缝面的裂缝。

3) 研究时未考虑固井滑套与水泥环间第一界面的胶结情况,后续研究中将考虑第一界面胶结质量对起裂压力的影响。

参考文献

References

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(2):129-136.
- [2] 王永辉,卢拥军,李永平,等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. 石油学报,2012,33(增刊1):149-158.
Wang Yonghui, Lu Yongjun, Li Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(supplement 1): 149-158.
- [3] 周德华,焦方正,贾长贵,等. JY1HF 页岩气水平井大型分段压裂技术[J]. 石油钻探技术,2014,42(1):75-80.
Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Jia Changgui, et al. Large-scale multi-stage hydraulic fracturing technology for shale gas horizontal Well JY1HF[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1):75-80.
- [4] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 页岩地层压裂改造的非常规理论与技术构想[J]. 四川大学学报:工程科学版,2012,44(6):1-5.
Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, et al. Unconventional theories and strategies for fracturing treatments of shale gas strata[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012,44(6):1-5.
- [5] 陈惟国,孙敏,梁利平,等. 提高分压选压效果技术研究[J]. 石油钻采工艺,2003,25(4):55-59.
Chen Weiguo, Sun Min, Liang Liping, et al. Study of improving the effect of multiple fracturing and selective fracturing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003,25(4):55-59.
- [6] 吕志凯,何顺利,罗富平,等. 射孔水平井分段压裂起裂压力理论研究[J]. 石油钻探技术,2011,39(4):72-76.
Lü Zhikai, He Shunli, Luo Fuping, et al. Study on hydraulic fracture initiation pressure of staged fracturing in perforated horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4):72-76.
- [7] 秦金立,吴姬昊,崔晓杰,等. 裸眼分段压裂投球式滑套球座关键技术研究[J]. 石油钻探技术,2014,42(5):52-56.
Qin Jinli, Wu Jihao, Cui Xiaojie, et al. Key technology on ball-activated sleeve for open hole staged fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(5):52-56.
- [8] Rytlewski Gary L. Multiple-layer completions for efficient treatment of multilayer reservoirs[R]. SPE 112476, 2008.
- [9] 王建鹰,王成旺,余兴国,等. PSK 多级滑套水力喷射分段压裂技术的应用:以镇北油田水平井为例[J]. 断块油气田,2014,21(1):107-109.
Wang Jianhui, Wang Chengwang, Yu Xingguo, et al. Application of staged fracturing technology with PSK multistage sliding sleeve jet; taking horizontal well in Zhenbei Oilfield as an example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(1): 107-109.
- [10] 肖刚,唐颖. 页岩气及其勘探开发[M]. 北京:高等教育出版社,2012:35-37.
Xiao Gang, Tang Ying. Shale gas and its exploration and development[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012:35-37.
- [11] Stegent Neil Alan, Howell Matt. Continuous multistage fracture-stimulation completion process in a cemented wellbore[R]. SPE 125365, 2009.
- [12] Bozeman Tim, Degner Dennis Lee. Cemented, ball-activated sliding sleeves improve well economics and efficiency[R]. SPE 124120, 2009.
- [13] 白建文,胡子见,侯东红,等. 新型 TAP 完井多级分层压裂工艺在低渗气藏的应用[J]. 石油钻采工艺,2010,32(4):51-53.
Bai Jianwen, Hu Zijian, Hou Donghong, et al. Application of new TAP multi-level hierarchical fracturing completion technique in low-permeability gas reservoir[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010,32(4):51-53.
- [14] 魏辽,韩峰,陈涛,等. 套管固井滑套冲蚀磨损模拟分析与试验研究[J]. 石油钻探技术,2014,42(3):108-111.
Wei Liao, Han Feng, Chen Tao, et al. Analysis and experimental research on erosion of cementing sliding sleeve[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(3):108-111.
- [15] Rytlewski Gary Lawrence, Cook John Mervyn. A study of fracture initiation pressures in cemented cased-hole wells without perforations[R]. SPE 100572, 2006.
- [16] Hossain M M, Rahman M K, Rahman S S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2000, 27(3/4): 129-149.
- [17] 程远方,王桂华,王瑞和. 水平井水力压裂增产技术中的岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(14):2463-2466.
Cheng Yuanfang, Wang Guihua, Wang Ruihe. Rock mechanics problems in horizontal well fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2463-2466.
- [18] 常兴浩. 富县区块浅层致密油藏压裂裂缝扩展形态研究[J]. 石油钻探技术,2013,41(3):109-113.
Chang Xinghao. Fracture propagation in shallow tight reservoirs of Fuxian Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(3):109-113.
- [19] 彭春耀. 层状页岩水力压裂裂缝与岩体弱面的干扰机理研究[J]. 石油钻探技术,2014,42(4):32-36.
Peng Chunyao. Mechanism of interaction between hydraulic fractures and weak plane in layered shale[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(4):32-36.

[编辑 滕春鸣]