

水力喷射压裂中环空水力封隔全尺寸实验

范鑫¹, 李根生¹, 黄中伟¹, 牛继磊², 宋先知¹, 盛茂¹

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学高压水射流实验室, 山东东营 257061)

摘要:多级水力喷射压裂技术依靠水力封隔实现层段间隔离。通过地面全尺寸实验, 提出从环空压力变化的角度评估水力封隔效率。实验中对喷射速度、围压、喷嘴直径和射孔入口直径以及环空注液对水力封隔效率的影响进行测试。实验结果表明:射流速度和围压是影响环空压力降低的两个主要因素, 环空压力降低的幅度与射流速度呈线性增长关系, 与围压呈指数递减关系;水力封隔效率与射流动能和孔道入口直径的比值成正比, 可通过增大喷嘴直径和减小孔道入口直径的方法提高水力封隔能力;环空注液降低水力封隔效率。

关键词:水力喷射; 多级压裂; 水力封隔; 环空压力

中图分类号:TE 357 **文献标志码:**A

引用格式:范鑫, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射压裂中环空水力封隔全尺寸实验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015, 39(2):69-74.

FAN Xin, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Field-scale testing of hydraulic isolation in wellbore during hydra-jet fracturing [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2):69-74.

Field-scale testing of hydraulic isolation in wellbore during hydra-jet fracturing

FAN Xin¹, LI Gensheng¹, HUANG Zhongwei¹, NIU Jilei², SONG Xianzhi¹, SHENG Mao¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Laboratory of High Pressure Water Jet in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Hydraulic isolation can be used to isolate the wellbore sections during multiple hydra-jet fracturing. A field-scale testing on the hydraulic isolation was conducted to evaluate its isolation efficiency based on annulus pressure measurement. In the testing, the effects of jet velocity, ambient pressure, diameter of nozzle and perforation inlet, and annulus injection on isolation efficiency were investigated. The results show that the jet velocity and ambient pressure are the two key parameters to affect the annulus pressure drop-down, and it has a linear relationship with the jet velocity and an exponential relationship with the ambient pressure. In addition, the hydraulic isolation efficiency is directly proportional to the ratio of kinetic energy of the jet to the diameter of perforation inlet. Therefore, the isolation efficiency can be improved by enlarging the nozzle diameter or reducing the perforation inlet diameter, while the annulus injection can reduce the hydraulic isolation efficiency.

Keywords: hydra-jet; multistage fracturing; hydraulic isolation; annulus pressure

水平井多级压裂已成为世界上开发非常规天然气资源尤其是致密气和页岩气的主要技术^[1-3]。多级分段压裂技术的关键点在于确保段与段之间的有效分隔, 在实践中机械分隔是一种常见的方法, 例如封隔器、复合桥塞和砂塞^[4]。水力喷射辅助压裂方

法已成功地应用于世界各地油气藏的增产改造中^[5-7]。当射孔孔道内的滞止压力加上环空静压力超过地层破裂压力时, 地层起裂产生裂缝^[8]。射向射孔孔道内的高速流体卷吸环空中的液体进入待压裂层位, 促使裂缝向前扩展^[9]。水力喷射辅助压裂

收稿日期:2014-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51210006, 51234006)

作者简介:范鑫(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事油气钻完井与油气增产方面的研究。E-mail:fanxin08@126.com。

通讯作者:李根生(1961-), 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事石油工程和高压水射流的教学和研究工作。E-mail:ligs@cup.edu.cn。

方法靠水力喷射产生动态封隔而无需机械封隔,但在井下复杂环境下很难定量分析水力封隔效果。学者们利用 CFD 模拟研究了水力喷射压裂过程中的井下流场,结果表明在高速射流束附近存在低压区^[10-11]。前人利用室内实验研究了喷射压力、喷嘴直径和套管开孔直径等参数对封隔机制的影响^[12]。无量纲的方法也被用于解释水力封隔的变化规律^[13]。上述研究仅对沿喷射轴线的压力变化进行了分析而并未考虑由于喷射造成的环空压力的变化。环空压力差值是促使环空流体流向射孔孔道的动力,因此有必要通过实验研究喷射过程中环空压力分布。笔者利用全尺寸地面实验研究喷射压裂过程中环空水力封隔效率,根据实际工况设计加工实验装置,测试射流速度、围压、喷嘴和射孔入口直径以及环空注液等参数对封隔效率的影响,并基于环空压力变化对实验结果进行分析讨论。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示,主要包括测试单元、数据采集单元、高压泵车和循环单元。其中测试单元根据相似原理设计,用于监测环空压力(图 2)。实验中采用锥形喷嘴,其结构如图 3 所示,喷嘴出口直径为 3 和 4 mm 两种, $L=10\text{ mm}$, $\alpha=60^\circ$, $\beta=12^\circ$ 。多个喷嘴被均匀布置在同一平面内,喷嘴出口与套管内壁间距为 7 mm。模拟射孔孔道采用与实际类似的纺锤形^[14-15],其孔径为 25、38 和 25 mm,孔深为 100 mm(图 2)。测压接头上连接高灵敏度压力传感器(测压 0~60 MPa,精度 0.1 MPa)沿套管和射孔孔道分布,均与数据采集板相连接,采集板每秒记录一个压力数据。

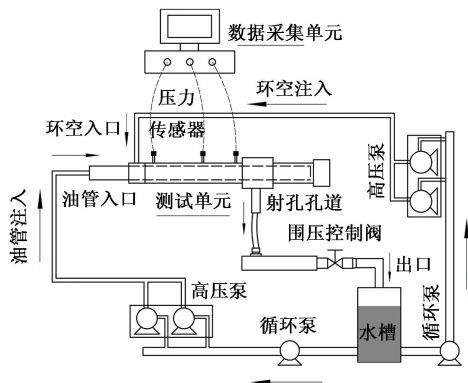


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental devices

该实验装置可以模拟不同喷射参数对环空压力

的影响。根据实际高压泵的工作能力和实验中对射流出口速度的要求,设计了 6 个喷嘴和 4 个喷嘴的组合方案,分别为 $6 \times \Phi 4\text{ mm}$ 、 $6 \times \Phi 3\text{ mm}$ 和 $4 \times \Phi 4\text{ mm}$ 。环空泵注排量设计为 0 或 $0.15\text{ m}^3/\text{min}$;围压为 0、3、5、7 和 9 MPa;孔道入口直径为 15 或 25 mm,分别模拟套管完井和裸眼完井;由于压裂液和清水的射流形态一致^[13],因此本文中油管和环空中泵注的液体均为清水。

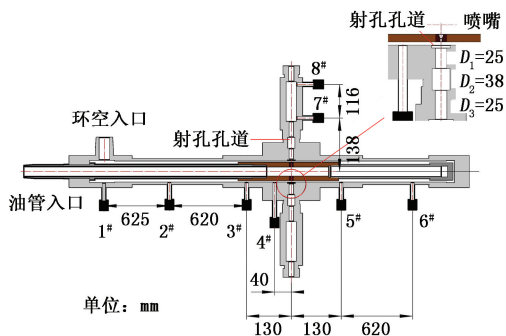


图 2 测试单元剖面

Fig. 2 Cross-sectional view of test device

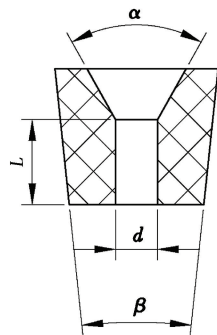


图 3 锥形喷嘴结构

Fig. 3 Structure of conical nozzle

不同喷嘴组合下泵注排量与射流速度间的关系式为

$$Q_t = 60vA = 1.5 \times 10^{-6} vN\pi d^2 \quad (1)$$

式中, Q_t 为油管泵注排量, m^3/min ; v 为射流速度, m/s ; N 为喷嘴个数; d 为喷嘴出口直径, mm 。

1.2 实验步骤

为了在数据处理过程中考虑传感器误差的影响,在实验前对每只传感器进行校准。根据不同喷嘴组合实验分为 3 组(表 1)。在每组实验中改变射孔孔道入口直径和环空泵注排量。第 I 组实验:安装 $6 \times \Phi 4\text{ mm}$ 喷嘴和 $D=25\text{ mm}$ 射孔孔道,关闭环空注液阀门(环空不注液),完全打开控制围压的回流阀门。实验步骤如下:

(1) 油管排量逐渐提高到 $0.6\text{ m}^3/\text{min}$,待排量稳定后开始采集压力数据;缓慢关小回流阀门,调节

围压到 3 MPa 后再进行采集;重复此步骤,采集排量为 0.6 m³/min、围压分别为 5、7、9 MPa 时各点的压力数据,各围压下的数据采集结束之后完全打开回流阀门,使围压恢复为 0。

(2) 提高油管泵注排量,重复步骤(1)。

(3) 当环空泵注排量为 0.15 m³/min 时,重复步骤(1)和(2)进行 5 种排量下不同围压下的数据采集。

将 $D=25$ mm 射孔孔道更换为 $D=15$ mm 射孔孔道,模拟套管完井。重复(1)、(2)和(3)步骤测试油管泵注排量、围压和环空注入排量对水力封隔效率的影响。

第 II 和第 III 组实验根据表 1 按照以上相同步骤进行。

表 1 实验分组

Table 1 Testing classification

组	$N \times \Phi$	射孔孔道直径 D/mm	环空泵注排量 $Q_a/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
I	6×4	25	0
	6×4	25	0.15
	6×4	15	0
	6×4	15	0.15
	6×3	25	0
II	6×3	25	0.15
	6×3	15	0
	6×3	15	0.15
	4×4	25	0
III	4×4	25	0.15
	4×4	15	0
	4×4	15	0.15
	4×4	15	0.15

1.3 数据处理方法

利用环空压力降低幅度(w)评价喷射过程中水力封隔效率:

$$w = \frac{p_{\text{amb}} - \bar{p}_{\text{annul}}}{p_{\text{amb}}} \quad (2)$$

其中

$$\bar{p}_{\text{annul}} = (p_1 + p_2 + p_3) / 3.$$

式中, p_{amb} 为围压,MPa; \bar{p}_{annul} 为射孔孔道附近环空压力平均值,MPa; p_1 、 p_2 和 p_3 分别对应 1 号、2 号和 3 号传感器的压力值。

在井下条件, p_{amb} 为正常的环空压力, \bar{p}_{annul} 为由高速射流产生的环空中低压区平均压力。 w 表征水力喷射隔离环空层段的封隔能力,环空压力降低幅度越大说明水力封隔效果越好。

实验还测试了射流在射孔孔道内产生的增压效果,增压值定义为

$$\Delta p = p_{\text{perf}} - p_{\text{annul}} \quad (3)$$

式中, Δp 为射流增压值,MPa; p_{perf} 和 p_{annul} 分别为射孔孔道内压力和喷嘴处环空压力,MPa。

2 实验结果分析

套管井完井是一种常见的完井方式,在工程实际中往往需要向环空泵注液体以辅助裂缝向前延伸,主要分析 $D=15$ mm 和 $Q_a=0.15$ m³/min 两种情况。在现场工艺中射流速度须超过 200 m/s 才能达到切割套管和地层的目的,研究 $v=v_{\text{max}}$, $v_{\text{max}} > 200$ m/s 时不同因素对水力封隔效率的影响。

2.1 射流速度的影响

图 4 为 3 种不同喷嘴组合下射流速度对环空压力降低幅度的影响。实验结果显示随着射流速度的增加 w 呈线性增长,在 3 MPa 围压下环空压力降低幅度最高可达 34%,当围压升高时变化规律类似。由伯努利原理可知,流体流速增加的同时将会伴随静压力降低。随着射流速度增加,射流周围低压区的相对差值增大,导致环空静压力降低幅度增加,因此提高射流速度有助于增强水力封隔效率;但是由于喷嘴压降与射流速度的平方成正比^[16],射流速度不能无限制提高。当喷嘴压降超过 50 MPa 后喷嘴会脱落,同时地面泵压将超过极限值。建议实际喷射压裂中流速控制在 220 ~ 250 m/s。

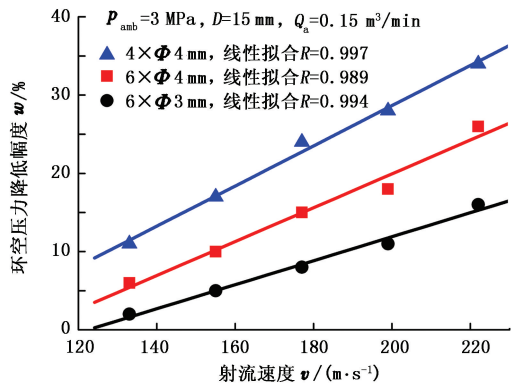


图 4 环空压力降低幅度和喷射速度的关系

Fig. 4 Relationship between annulus pressure drop-down and jet velocity

2.2 围压的影响

图 5 为喷射速度达到最大时 3 种不同喷嘴组合下围压对环空压力降低幅度的影响。由图 5 可以看出,在每一种喷嘴组合下围压与 w 均呈指数递减关系。当围压为 3 ~ 5 MPa 时,随围压升高 w 迅速降低;当围压为 5 ~ 7 MPa 时, w 降低趋势变缓;当围压为 7 ~ 9 MPa 时,曲线趋于水平。围压对射流速度的发展具有很强的抑制作用^[17-19],环空静压力直接受

射流速度的影响,因此对围压十分敏感。可通过向环空内注入如泡沫溶液及含氮气溶液之类的含气液体降低环空围压,含有气体的液体进入地层后不仅可提高水力封隔效率,还有助于压裂后流体从地层内快速返排,降低对地层的伤害。根据射流增压值和地层起裂压力精确设计环空围压,使井底环空压力在水射流的辅助作用下促使裂缝起裂和扩展。

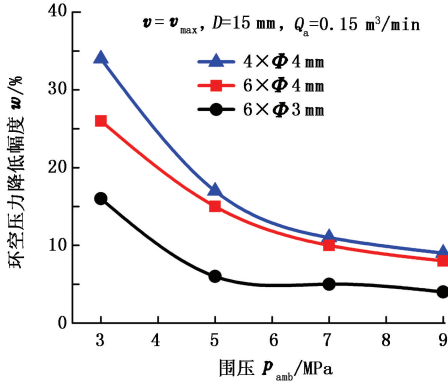


图5 环空压力降低幅度和围压的关系
Fig.5 Relationship between annulus pressure drop-down and ambient pressure

2.3 射孔直径和喷嘴直径的影响

图6为相同射流速度条件下不同射孔孔道入口直径和喷嘴直径对环空压力降低幅度的影响。由图6可以看出,在不同喷嘴组合下15 mm孔道产生的压力降低效果均优于25 mm孔道,但在高围压情况下两种孔道之间的差别不明显。4 mm喷嘴产生的压力降低效果明显优于3 mm喷嘴,即增大喷嘴直径、减小射孔孔道入口直径有利于提高水力封隔效率,这与前人研究结果^[12]一致。

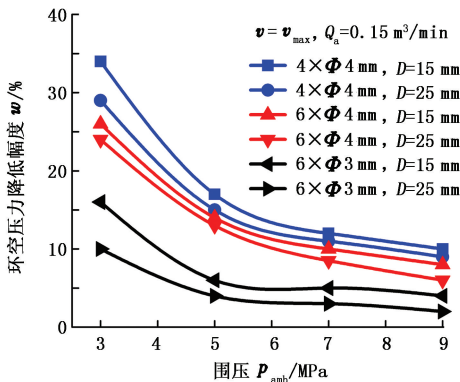


图6 环空压力降低幅度和射孔孔道入口直径之间的关系
Fig.6 Relationship between reduction percentage of annulus pressure and perforation inlet diameter

研究发现水力封隔效率与喷嘴直径和射孔孔道入口直径的比值(即d/D)成正比^[13,20-21]。本实验中4 mm喷嘴在25 mm射孔孔道条件下产生的封隔效

率要优于3 mm喷嘴在15 mm射孔孔道条件下产生的封隔效率,但前者的直径比小于后者。实际上在水力喷射过程中,射流的动能对环空压力的影响起主导作用,因而应考虑射流动能与射孔孔道入口直径之比。射流动能(E_d)可表示为

$$E_d = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\left(\rho v \frac{\pi d^2}{4}\right)v^2 = \frac{\pi \rho d^2 v^3}{8} \quad (4)$$

水力封隔效率应与(d^2/D)成正比。据此可解释4 mm喷嘴在25 mm射孔孔道条件下产生的封隔效率优于3 mm喷嘴在15 mm射孔孔道条件下产生的封隔效率。

2.4 环空注液的影响

由于实验的复杂性,仅测试了两组不同环空泵注排量时的水力封隔效率。图7为3种不同喷嘴组合情况下环空压力降低幅度和注入流量的关系。当环空注入排量由0.15 m³/min降低到0时,环空压力降低幅度升高2%~7%。这里仅给出了围压3 MPa时环空注液的影响,当围压值升高时仍遵循此规律。环空流体流动方向与射流速度方向垂直,在一定程度上削弱了射流动能因而降低了水力封隔效率。

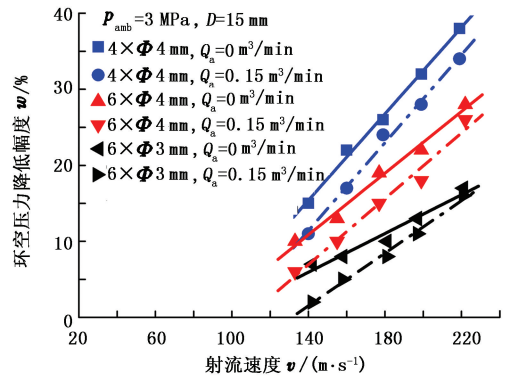


图7 环空压力降低幅度和环空注入流量的关系

Fig.7 Relationship between reduction percentage of annulus pressure and annulus injection rate

在现场作业中,环空排量的确定须考虑地层滤失能力。若地层滤失能力较弱,环空注入排量应降低,避免由于环空注液而降低封隔效率。若地层滤失性能力较强,环空排量可适当提高。现场实验证明,当射流速度超过220 m/s时环空注入排量约为油管注入排量的3/10。

2.5 孔内射流增压与封隔性能评价

实验中测试了射孔孔眼入口直径为15 mm时孔内增压与射流速度和围压间的关系,如图8、9所示。孔道内增压值随射流速度增加呈抛物线关系增加(图8),即与喷嘴压降呈线性关系,这与文献

[22]的实验结果相一致。同时,由图9可知孔道内增压值基本不受围压的影响,当射流速度达到220 m/s时,孔道内增压值可达到7.5 MPa。由此可知在实际多层/多段压裂中,若待压层位的裂缝起裂压力减去已闭合裂缝的延伸压力的差值小于7.5 MPa,水力射流可有效保证层段间封隔;在该差值大于7.5 MPa后,部分泵注的流体将会流入已压开的层位。对于后者,在实际中可采用带有底部封隔器的喷射装置,以保证层段间的有效封隔。

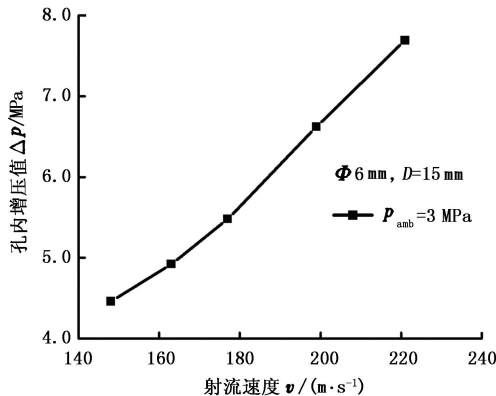


图8 孔道内射流增压值与射流速度的关系

Fig. 8 Relationship between boosting pressure and jet velocity

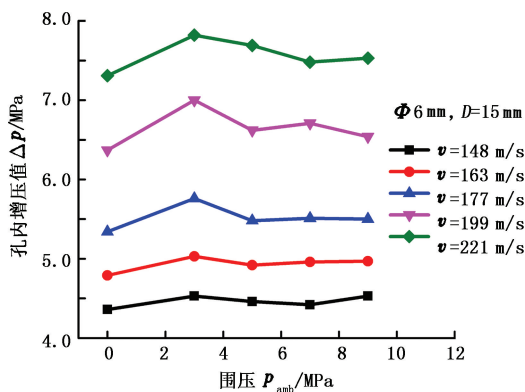


图9 孔道内射流增压值与围压的关系

Fig. 9 Relationship between boosting pressure and ambient pressure

3 结论

(1)水力喷射能够有效降低射孔孔道附近的环空压力,保证环空流体进入射孔孔道。

(2)射流速度和环空围压是影响环空压力降低幅度(w)的两个主要因素, w 与射流速度呈线性增长关系,与围压呈指数递减关系。水力封隔效率与射流动能和射孔孔道入口直径的比值成正比,环空注液削弱了水力封隔效率。

(3)套管井中的水力封隔效率优于裸眼井,建议在裸眼井中实施水力喷射压裂工艺时采用大直径喷嘴提高封隔效率。

参考文献:

- [1] SOLIMAN M Y, HUNT J L, AZARI M. Fracturing horizontal wells in gas reservoirs [J]. SPE Production & Facilities, 1999,14(4):277-283.
- [2] MEDEIROS F, OZKAN E, KAZEMI H. Productivity and drainage area of fractured horizontal wells in tight gas reservoirs [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008,11(5):902-911.
- [3] CHENG Y. Impacts of the number of perforation clusters and cluster spacing on production performance of horizontal shale-gas wells [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2012,15(1):31-40.
- [4] SOLIMAN M Y, DAAL J, EAST L. Fracturing unconventional formations to enhance productivity [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012,8:52-67.
- [5] SURJAATMADJA J B, OKLA D. Subterranean formation fracturing methods: USA, 5,765,642 [P]. 1998-06-16.
- [6] MCDANIEL B W, SURJAATMADJA J B, EAST L E. Use of hydramjet perforating to improve fracturing success sees global expansion [R]. SPE 114695, 2008.
- [7] LI Gensheng, HUANG Zhongwei, TIAN Shouceng, et al. Investigation and application of multistage hydramjet-fracturing in oil and gas well stimulation in China [R]. SPE 131152, 2010.
- [8] SURJAATMADJA J B, GRUNDMANN S R, MCDANIEL B. Hydramjet fracturing: an effective method for placing many fractures in openhole horizontal wells [R]. SPE 48856, 1998.
- [9] SURJAATMADJA J B, MCDANIEL B W, SUTHERLAND R L. Unconventional multiple fracture treatments using dynamic diversion and downhole mixing [R]. SPE 77905, 2002.
- [10] GARZON F O, FRANCO C A, GINEST N H, et al. First successful selective stimulation with coiled tubing, hydramjetting tool, and new isolation sleeve in an openhole dual-lateral well completed in a Saudi Arabia carbonate formation: a case history [R]. SPE 130512, 2010.
- [11] SURJAATMADJA J B. Multioriented fracturing in unconventional reservoirs offers improved production by better connectivity [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2012,51(1):20-31.
- [12] 曲海,李根生,黄中伟,等.水力喷射分段压裂密封机理[J].石油学报,2011,32(3):514-517.

- QU Hai, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Sealing mechanism of the hydrjet stepwise fracturing [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011,32(3):514-517.
- [13] SHENG M, LI G, HUANG Z, et al. Experimental study on hydraulic isolation mechanism during hydra-jet fracturing [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013,44:722-726.
- [14] 胡强法,朱峰,李宪文,等.水力喷砂射孔与起裂大型物理模拟试验[J].*中国石油大学学报:自然科学版*, 2011,35(6):81-87.
- HU Qiangfa, ZHU Feng, LI Xianwen, et al. Physical simulating experiments of hydrjet perforating and fracture initiation process [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(6):81-87.
- [15] 李根生,牛继磊,刘泽凯,等.水力喷砂射孔机理实验研究[J].*中国石油大学学报:自然科学版*, 2002,26(2):31-34.
- LI Gensheng, NIU Jilei, LIU Zekai, et al. Experimental study on mechanisms of hydraulic sand blasting perforation for improvement of oil production [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2002,26(2):31-34.
- [16] GABOLDE G, NGUYEN J P. *Drilling data handbook* [M]. Paris: Technip Press, 1991:311.
- [17] 艾池,沈忠厚.围压下射流动压力分布规律的实验研究[J].*石油钻探技术*, 1995,23(增刊):6-7.
- AI Chi, SHEN Zhonghou. Study of pressure distribution in jets under ambient pressure condition [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 1995,23(sup):6-7.
- [18] HUANG Z, LI G, TIAN S, et al. Mechanism and numerical simulation of pressure stagnation during water jetting perforation [J]. *Petroleum Science*, 2008, 5(1):52-55.
- [19] LIAO H, LI G, YI C, et al. Experimental study on the effects of hydraulic ambient pressure on impacting characteristics of jets [J]. *Atomization and Sprays*, 2012, 22(3):227-238.
- [20] WINOTO S, LI H, SHAH D. Efficiency of jet pumps [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(2): 150-156.
- [21] NETO I E L. Maximum suction lift of water jet pumps [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011,25(2):391-394.
- [22] 曲海,李根生,黄中伟,等.水力喷射压裂孔道内部增压机制[J].*中国石油大学学报:自然科学版*, 2010, 34(5):73-76.
- QU Hai, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Boosting mechanism in hydrjet-fracturing cavity [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010,34(5):73-76.

(编辑 李志芬)