2015年 第39卷 第1期

文章编号:1673-5005(2015)01-0079-04

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2015.01.011

油套环空压耗实验研究

黄中伟,李根生,黄 昭

(中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京102249)

摘要:修井/压裂作业中,油管上多个接箍导致环空流动压耗难以精确预测。按照油田油管和套管的实际尺寸,设计 加工一套实验装置,分别改变油管上接箍数量、接箍直径、油管外径、环空排量等参数,测试不同参数组合条件下环 空出口和入口的压差,该压差即为当前实验条件下的流动压耗。结果表明:流量较大时,油管接箍数与环空压耗呈 线性关系;泵入流量与环空压耗呈二次函数关系。

关键词:环空;压耗;流量;压裂作业

中图分类号:TP 69 文献标志码:A

引用格式:黄中伟,李根生,黄昭.油套环空压耗实验研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(1):79-82. HUANG Zhongwei, LI Gensheng, HUANG Zhao. Experiments on pressure loss along casing-tubing annulus[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015,39(1):79-82.

Experiments on pressure loss along casing-tubing annulus

HUANG Zhongwei, LI Gensheng, HUANG Zhao

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In well workover or fracturing operation, annulus pressure loss is difficult to calculate exactly because of the tubing coupling on tubing. An experimental equipment was designed according to actual size of the tubing and casing in oilfield. The pressure difference between annulus outlet and inlet, which is the pressure loss at current experimental conditions, was measured by changing the number and diameter of collars, as well as the external diameter of tubing and annulus flow. The results indicate that when the flow rate is comparatively higher, the number of tubing coupling presents a linear relationship with annulus pressure loss. The annulus pressure loss shows a quadratic function relationship with the flow rate. **Keywords**; annulus; pressure loss; flow rate; fracturing operation

水力喷射压裂作业中,油套环空需要同步泵注 压裂液,只有精确预测环空压耗才能根据地面套压 较为准确地判断井底压力,从而准确地分层段压 裂^[14]。Cartalos和Dupuis^[5]通过简化模型指出了环 空间隙的几何形状变化对环空压耗的影响;Jeong和 Shah^[6]利用聚合物流体分析了非旋转钻杆条件下工 具接头对环空压耗的影响;Simoes等^[7]研究了不同 的井筒尺寸和接头几何形状对压耗的影响;刘希圣 等^[8-11]对幂律、宾汉和赫-巴流体在同心环空内轴向 层流流动压降进行了精确的理论分析,导出了层流 压降的理论计算公式;汪海阁等^[12-14]提出了非牛顿 流体偏心环空压降经验模式、水平井段环空压耗的 理论和经验模式、小井眼环空压力损失的实验模型; 马明芳^[15]讨论了岩屑床、偏心度、环空返速以及钻 井液流变性能等因素对环空压耗的影响;郭晓乐 等^[16]建立了大位移井循环压耗的精确计算方法;马 东军等^[17]提出了高压软管段压耗计算公式,经理论 推导建立了完整的连续油管侧钻径向水平井循环系 统压耗计算模型;沈海超等^[18]综合考虑了斜井段偏 心环空及岩屑床的影响,总结并建立了一套斜井段 环空压耗分析半经验模型;刁宇^[19]等开展了环空压 耗数值模拟研究,但对比油田实际施工参数,计算结 果偏大。以上研究多集中在环空压耗的模型建立及 数值分析方面。笔者通过设计加工全尺寸实验装 置,测试分析套管中放置不同尺寸的油管、不同数量 及尺寸的接箍及改变排量条件下环空内的压耗。实

收稿日期:2014-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51374220,51210006);教育部"新世纪优秀人才支持计划"项目(NCET-12-097) 作者简介:黄中伟(1972-),男,教授,博士,研究方向为高压水射流技术。E-mail:huangzw@ cup. edu. cn。

验采用清水作为流体介质,套管和油管分别选用与 工程标准尺寸较为接近的无缝钢管和耐高压 PPR 管,确保油管居中、不考虑偏心度的影响。

1 实验装置

图1为实验装置结构示意图。套管采用多组无 缝钢管、两端由法兰连接,其中垫有密封圈,确保装 置连接时的密封性,由此组成一根18m长的套管 串。环空流动的入口和高压泵连接、出口(直径80 mm的钢管短节)敞开在大气中,因此,套管串壁面 上任意一个传感器的读数即为该点到出口之间的环 空压耗。压力传感器采用了较高精度低量程压力变 送器。模拟油管采用了两种外径的PPR管(63和 90 mm),以便减轻整套装置的重量。为了方便安 装,油管接箍设计成一个中空的圆柱体,实验时可根 据需要将接箍套在油管外通过螺栓固定在油管某一 位置,接箍内侧装有密封圈,确保流体不会从接箍与 油管间通过。



环空流动压耗主要分为两部分:一是环空内的 沿程压耗,二是由于接箍引起的局部压耗。实验时, 采用一种套管、两种外径的油管、三种不同外径的接 箍进行组合,实验装置参数见表1。

表1 装置参数

Table 1 Experiment parameters

名称	参数	数 量	总长度 <i>L</i> /m
套管	外径140 mm,内径124 mm,长度1.5m	12	18
油管	①外径 63 mm,内径 45.6 mm,长度 1.5m	12	18
	②外径90 mm,内径65.4 mm,长度1.5m	12	18
油管 接箍	①外径90 mm,内径64 mm,长度130 mm	10	_
	②外径 94 mm,内径 64 mm,长度 133 mm	10	_
	③外径108 mm,内径92 mm,长度143 mm	10	

2 实验方案

油套环空流动压耗实验主要分为三组,每组实 验采用一种油管尺寸和一种接箍尺寸,改变接箍数 量和流量来分析环空流动压耗的变化规律。

方案 1:采用外径 63 mm 的油管和外径 90 mm 的接箍;

方案 2:采用外径 63 mm 的油管和外径 94 mm

的接箍;

方案 3:采用外径 90 mm 的油管和外径 108 mm 的接箍。

3 结果分析

3.1 接箍数量的影响

不同的环空/接箍组合时压耗同接箍数量的关 系如图2所示。可以看出,当流量较小时,环空压耗 随接箍数量的变化并不明显;当流量较大时,环空压 耗随接箍数量的增加而逐渐增大。





以实验方案 3 中 0.3 m³/min 流量为例,对环空 压耗随接箍数的关系进行线性回归,可得出:

 $\Delta p = 0.\ 001n + 0.\ 003,\ R^2 = 0.\ 939.$ (1)

式中, Δp 为环空压耗, MPa;n为接箍数量;R为相 关系数。此时环空压耗与接箍数量的线性相关系 数接近1,可以认为环空压耗与接箍数呈近似线性 关系。

3.2 环空尺寸及泵入流量的影响

油管接箍和油管尺寸会影响环空截面积,当流

量一定时,环空截面积越小,流速越快,雷诺数越大, 此时环空流态、沿程摩擦阻力系数等因素都会随之 改变,从而影响到环空流动压耗。

相同接箍数量下环空压耗随泵入流量的关系如 图 3 所示。







可以看出,环空压耗随着排量的增加而增加,特 别是当环控间隙较小时,压耗增加更为明显。分别 对不同接箍数量下流量与环空压耗的关系进行回 归,四、六、十个接箍时的环空压耗与流量的回归方 程分别为

 $\Delta p_1 = 0.089Q^2 - 0.006Q + 0.001, \qquad (2)$

 $\Delta p_2 = 0.152Q^2 - 0.014Q + 0.002, \qquad (3)$

$$\Delta p_3 = 0.\ 123 Q^2 + 0.\ 008 Q + 0.\ 001. \tag{4}$$

式中,Q为泵入流量,m³/min。相关系数为0.984~ 1.000,表明相关性很好,可以认为环空压耗与泵入 流量呈二次函数关系。

4 计算示例

根据实验结果,按照 90 mm 外径油管、108 mm 外径接箍、5 1/2"套管、单根油管长度 9.7 m,计算 4 km 井深、1.2 m³/min 排量下的环空压耗。

当流量为1.2 m³/min 时,代入式(2),可得此时 的压耗 $\Delta p_1 = 0.12196$ MPa;代入式(4)可得 $\Delta p_3 =$ 0.18772 MPa,由此可推算出单个接箍的局部压耗 为0.01096 MPa,环空沿程压耗为4.34×10⁻³ MPa/ m。

当井深为4000 m 时,油管柱共计412 个接箍, 由于接箍的存在而产生的局部压耗为4.52 MPa,沿 程环空压耗为17.36 MPa,环空总压耗为21.88 MPa。

需要说明的是,上述结果是以清水作为工作介质计算的,实际施工中环空泵注压裂液(基液)时, 其压耗约为清水的 1/3^[20],即本计算条件下的环空 压耗约为7 MPa。

5 结 论

(1)增加油管接箍数,流体经过接箍造成的局 部压耗增加,当流量较大时,接箍数与流动压耗基本 呈线性关系。

(2)增大流量或者油管/接箍外径,环空流速随 之增大,环空沿程压耗和局部压耗都会增大,最终导 致环空流动压耗增大,且环空压耗与泵入流量呈明 显的二次函数关系。

参考文献:

- [1] 李根生,黄中伟,田守嶒,等.水力喷射压裂理论与应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] HUANG Zhongwei, LI Gensheng. Application of abrasive water jet perforation assisting fracturing [J]. Petroleum Science and Technology, 2008, 26(6):717-725.
- [3] JIM B S, LINDSAY S, VENTOSILLA P, et al. New hydra-jet tool demonstrates improved life for perforating and fracturing applications[R]. SPE 113722,2008.
- [4] STANOJCIC M, JARIPATKE O, SHARMA A. Pinpoint fracturing technologies: a review of successful evolution of multistage fracturing in the last decade [R]. SPE 130580,2009.
- [5] CARTALOS U, DUPUIS D. Analyses accounting for the combined effect of drillstring rotation and eccentricity on pressure losses in slim hole drilling [R]. SPE/IADC 25769, 1993.

- [6] JEONG Y, SHAH S. Analysis of tool joint effects for accurate friction pressure loss calculations [R]. SPE 87182,2004.
- [7] SIMOES S, YU M, MISKA S. The effect of tool joints on ECD while drilling[R]. SPE 106647, 2007.
- [8] 刘希圣,樊洪海,丁岗. 幂律流体在定向井偏心环空内 流动规律的研究[J].石油大学学报:自然科学版, 1988,12(5):34-45.

LIU Xisheng, FAN Honghai, DING Gang. A study on the flow properties of power law fluid in annuli of directional well[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),1988,12(5):34-45.

[9] 樊洪海,刘希圣. 宾汉流体在钻井同心环空内轴向层 流核及压降计算[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1993,17(2):27-32.

> FAN Honghai, LIU Xisheng. Core flow and pressure drop of Bingham fluids in drilling well concentric annulus[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1993, 17(2):27-32.

[10] 樊洪海,许震芳. 赫谢尔-巴尔克莱流体同心环空轴 向层流流动规律理论分析[J]. 水动力学研究与进 展,1993,8(3):308-313.

> FAN Honghai, XU Zhenfang. Analytical solution for axial laminar flow of Herschel-Bulkley fluids concentric annuli[J]. Journal of Hydrodynamics,1993,8(3):308-313.

[11] 樊洪海,刘希圣. 赫谢尔-巴尔克莱流体同心环空轴 向流流核及压降计算[J]. 石油大学学报:自然科学 版,1993,17(6):28-34.

> FAN Honghai, LIU Xisheng. Flow plug and pressure drop of Herschel-Bulkley fluids in drilling well concentric annuli[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Editon of Natural Science),1993,17(6):28-34.

[12] 汪海阁,苏义脑. 偏心环空压降的实用求解法[J].石油钻采工艺,1997,19(6):5-9.
WANG Haige, SU Yinao. A practical method of determination of pressure loss in eccentric annulus[J]. Oil

Drilling & Production Technology, 1997, 19(6):5-9.

[13] 汪海阁,刘希圣.水平井段环空压耗研究[J].西部 钻探工程,1995,7(6):25-28.

WANG Haige, LIU Xisheng. Study on the pressure loss in annular space of horizontal well section [J]. West-China Exploration Engineering, 1995, 7(6):25-28.

- [14] 汪海阁,白仰民.小井眼环空压耗的室内试验研究
 [J].石油钻采工艺,1998,20(4):9-15.
 WANG Haige, BAI Yangmin. Laboratory study on pressure in annular of slim hole[J]. Oil Drilling & Production Technology,1998,20(4):9-15.
- [15] 马明芳.水平井的环空压耗及井眼净化[J].西部探 矿工程,2006,11:168-170.
 MA Mingfang. Annulus pressure loss and hole cleaning in horizontal well [J]. West-China Exploration Engi-

neering,2006,11:168-170. [16] 郭晓乐,汪志明. 大位移井循环压耗精确计算方法研 究及应用[J]. 石油天然气学报:江汉石油学院学报, 2008,30(5):99-102.

> GUO Xiaole, WANG Zhiming. Precise method of calculating circulating pressure loss in extended reach wells (ERW) [J]. Journal of Oil and Gas Technology,2008, 30(5):99-102.

[17] 马东军,李根生,黄中伟. 连续油管侧钻径向水平并 循环系统压耗计算模型[J]. 石油勘探与开发,2012, 39(4):494-499.

> MA Dongjun, LI Gensheng, HUANG Zhongwei. A model of calculating the circulating pressure loss in coiled tubing ultra-short radius radial drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4):494-499.

[18] 沈海超,胡晓庆,王磊,等. 定向井欠压值设计中环空 压耗分析模型的建立与应用[J]. 中国海上油气, 2013,25(4):49-53.

SHEN Haichao, HU Xiaoqing, WANG Lei, et al. Development and application of the annular pressure loss analysis model for the negative differential pressure design of directional well [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013,25(4):49-53.

- [19] 刁宇,孙宝龙,王春生,等. 高压压裂油套环空井压降 计算[J]. 石油矿场机械,2014,43(3):26-29.
 DIAO Yu, SUN Baolong, WANG Chunsheng, et al.
 High pressure casing annulus well fracturing oil pressure drop calculation [J]. Oil Field Equipment, 2014, 43 (3):26-29.
- [20] 陈彦东,陆拥军,邱晓慧,等.水基线性压裂液在管路 流动中的摩阻分析[M].北京:中国科学技术出版 社,2002:370-373.

(编辑 刘为清)