

带孔插入密封检测工具缝隙流动规律研究¹⁾

高永华^{*,2)} 刘华伟[†] 史仕荧^{**,3)} 刘全刚[†] 李华^{**} 刘磊^{*} 李孟超[†]

^{*}(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

[†](中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452)

^{**}(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 带孔插入密封检测工具对密封筒的定量验封对于油田实现分层注水具有重要意义, 而定量验封需要研究验封时的缝隙流动流量、密封筒破损当量直径和压降之间的关系。本文利用室内试验对缝隙流动流量、压降和当量直径之间的关系进行了系统研究。研究表明, 入口到上出口的压降随分流比的增大而增大, 入口到下出口的压降随分流比的增大而减小; 压降与缝隙流动的流量也有关, 当流量增大, 压降增大; 压降随密封筒的破损当量直径增大而减小。本文的研究为石油工业分层开采定量验封提供了指导, 对提高分层开采效率具有重要理论指导意义和应用价值。

关键词 密封筒, 插入密封检测工具, 试验, 缝隙流动

中图分类号: O35, TQ423 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-20-187

INTERLAYER LEAKAGE FLOW IN THE SEALING TEST OF INSERT SEAL TOOL WITH HOLES¹⁾

GAO Yonghua^{*,2)} LIU Huawei[†] SHI Shiyong^{**,3)} LIU Quangang[†] LI Hua^{**} LIU Lei^{*} LI Mengchao[†]

^{*}(CNOOC Tianjin Branch Company, Tianjin 300459, China)

[†](CNOOC EnerTech-Drilling & Production Company, Tianjin 300452, China)

^{**}(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In order to ensure an effective separated-layer water injection in the oil production, it is essential to eliminate the interlayer leakage. The main factor leading to the interlayer leakage is the damage on the surface of the seal cylinder in the separated-layer packer. To evaluate the leakage degree, a special downhole sealing-check tool is needed. After acquiring the relative pressure and flowrate data, a model to evaluate the equivalent diameter of damage on the seal cylinder, based on the related leakage flowrate and pressure drop should be established. This paper carries out the experimental study and the numerical simulations to obtain the above relationship under the conditions of different damage situations. After a comprehensive data analysis, a functional relationship between the damage state and the leakage extent is established, and checked by actual experimental data. The results show that the error between the established model and the test data is no more than 10%, which shows that the model proposed in this paper can be used for the sealing-check of the seal cylinder. The study in this paper provides a novel technology predicting and evaluating the damages of the seal cylinder effectively, as well as for optimizing the seal tool and increasing the separated-layer oil-production efficiency.

Key words sealing cylinder, insert sealing check tool, experiment, leakage flow

2020-05-08 收到第 1 稿, 2020-07-01 收到修改稿。

1) 中海油能源发展科研基金资助项目 (GCJSLZBG-J1708)。

2) 高永华, 高级工程师, 现从事海上油田采油工程、井下作业、机采井管理等研究工作。E-mail: gaoyh5@cnooc.com.cn

3) 史仕荧, 助理研究员, 主要研究方向为工程流体力学。E-mail: shishiyong@imech.ac.cn

引用格式: 高永华, 刘华伟, 史仕荧等. 带孔插入密封检测工具缝隙流动规律研究. 力学与实践, 2020, 42(6): 695-700

Gao Yonghua, Liu Huawei, Shi Shiyong, et al. Interlayer leakage flow in the sealing test of insert seal tool with holes. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(6): 695-700

在油田开发中,封隔器是实施分层注水等工艺的关键部件^[1],封隔器的密封性能决定上述工艺是否能够实现,封隔器的密封性能与其关键部件——密封筒的完好程度密切相关,密封筒在井下长年运行,产液腐蚀、下油管作业时刚蹭等因素都会使密封筒产生损伤^[2]。密封筒破损贯通后,在破损处就会形成缝隙流动,在井下因缝隙流动造成的漏失会形成无效注水等后果,进而影响生产效率。为此,对于实施分层注水工艺的井,需要对封隔器的密封筒进行验封作业^[3]。

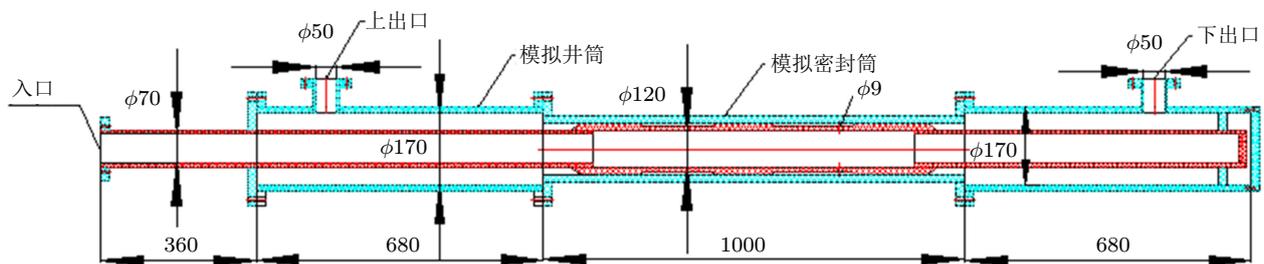
目前,验封作业大部分都是定性的判断封隔器是否完好。如海上油田利用带孔插入密封的管插入到隔离密封段,然后向管内泵入流体并观察井口压力,若压力不能够稳住,则封隔器有破损,否则封隔器没有破损^[4]。张磊等^[5]提出利用脉冲中子氧活化测井探测油管、套管、油套环形空间等地层内水的流动速度和方向,从而推断封隔器是否失效,但这种方法成本高、不实用。赵勇等^[6]通过研制出可以检验封隔器座封可靠性的新型管柱,即增添沉砂进液器,通过停泵观察井口压力是否稳定不降来判断封隔器的密封性能。朱华^[7]在传统的验封工艺上增设洗井机构,使得验封和洗井一体化。从上述调研可以看出,目前对于井筒中验封一般都是定性的,而且大部分是关于封隔器整体的验封,很少有关于密封筒的验封,而封隔器的失效绝大部分是由其部件密封筒破损造成的^[6]。

在上述背景下,通过在自主研发的带孔插入密封检测工具的压力采集装置,可以实现对生产管柱密封段与井下密封筒构成的隔离密封总成的密封缺陷判断,从而实现密封筒的验封^[8]。而为了得到密封筒破损的定量信息,需要研究压力、流量和破损当量直径之间的关系^[9-10],即针对自主研发的带孔插入密封检测工具验封时的缝隙流动开展研究。缝隙流动是一种广泛存在于机械结构中的流动,如柱塞与缸筒间相对均匀的环状间隙、轴与轴承间的不均匀间隙等^[11]。缝隙流动只有在流道几何形状比较简单的情况下才能得到解析解,而机械结构中的缝隙流道几何形状往往比较复杂且各不相同,很难统一解,前人针对具体流道得到经验关系式,但这些关系式往往在应用上并不具备普适性^[12]。故本文针对带孔插入密封检测工具与密封筒之间缝隙流动中压降随流量和破损当量直径变化的规律进行了研究,从而为密封筒的定量验封奠定基础。

1 试验研究

1.1 试验对象

为了对带孔插入密封检测工具在井下进行定量验封时的缝隙流动规律进行研究,加工了比例为1:1的带孔插入密封检测工具和破损密封筒的有机玻璃模型,如图1所示,在结构示意图中,红色部分为插入式密封检测工具,蓝色部分中间内径120 mm的部分为模拟密封筒,管径为170 mm的蓝色部分为



(a) 结构示意图 (单位: mm)



(a) 模型组装实物图



(c) 破损当量直径: 9.70 mm, 10.81 mm, 13.31 mm

图1 插入式密封检测工具、密封筒模型图和实物图

模拟井筒。分层注水操作时,水从左端红色入口进入插入密封检测工具的内部,在插入式密封检测工具中段靠右的管壁上有 2 个直径为 9 mm 的小孔,水从这两个小孔流出检测工具,进入检测工具外表面与模拟密封筒破损内表面形成的流道内。密封筒和插入式密封检测工具之间的流动既包括前者内径和后者外径差异所造成的环状缝隙流动,也包括前者内径和后者外径一致时密封筒管壁上破损处的缝隙流动,最终水从密封筒上的上出口和下出口流出。入口模拟实际验封操作时的油管,上出口模拟密封筒上面的地层,下出口模拟密封筒下面的地层。为了进行密封筒不同破损情况的试验研究,总共加工了 3 个具有不同密封筒破损当量直径(4 倍破损面积与破损周长之比)的密封筒模型,当量直径分别为 9.7, 10.81, 13.31 mm。

1.2 试验系统

组装完成后的插入式密封检测工具和模拟密封筒模型安装在中国科学院力学研究所多相流实验室的多相流综合试验平台上,形成缝隙流动循环试验管路(图 2)。该试验系统由动力循环系统、控制系统和测量系统组成。动力循环系统包括入口水箱、主水泵、 $\phi 50$ mm 透明有机玻璃管路等;控制系统包括控制台、电磁阀、变频器等;测量系统包括电磁流量计、压力传感器及数据采集系统等。试验时,通过控制台控制开启水泵和电磁阀,使水相由水箱经过水泵输送至安装有插入密封检测工具的循环管路中,水流过后,从插入式密封检测工具和模拟密封筒模型的两个出口流入中转取样桶中。两个出口的流量由于测试工况变化范围较大,会出现很小的流量值,所以采用体积取样法计量,入口的流量由电磁流量计计量,入口和两个出口均安装有压力传感器测试压力变化。

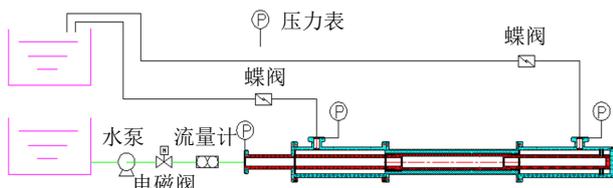


图 2 缝隙流动试验管路示意图

1.3 试验方法

试验所用介质与实际井下分层验封时所用介质一致,均为水。试验时,环境温度约为 20°C ,压力为

常压,所用自来水的密度 $\rho_w = 998.2 \text{ kg/m}^3$,动力黏度 $\mu_w = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

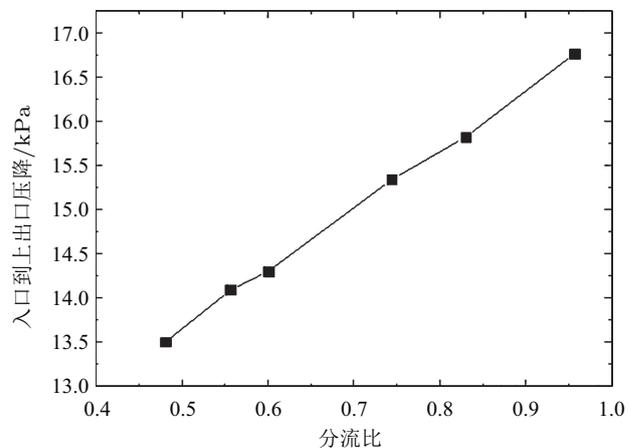
试验工况按总入口流量分为 7 种,分别为 2, 5, 8, 10, 20, 30, $40 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在每种入口流量下,控制两个出口的分流比变化,共 5 种工况。每一个密封筒模型均重复上述试验工况。

本试验所设置的入口流量范围与现场实际作业流量工况一致,主要的条件差异在于现场地层压力可高达 10 MPa,而室内试验的压力范围在几个大气压以内。但该方面差异带来的影响并不大,首先,在 N-S 方程中,两者仅相差一个静压值,计算时可通过引入广义压强消除;其次,水的黏度、密度随压力变化并不剧烈,其相对变化很小,研究时为简单计算可不予考虑。

2 试验结果

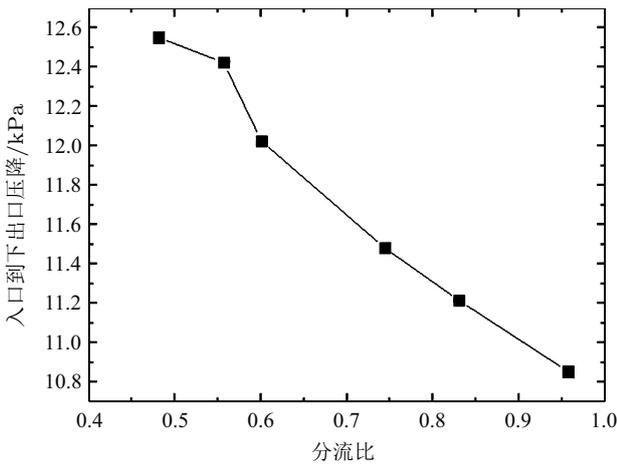
2.1 分流比影响

井下分层验封试验装置有一个入口、两个出口,属于变质量流动。为模拟两地层压力差异造成的两出口流出流量的变化,在试验中通过调节两分支出口管路中的阀门来实现。显然,入口到两出口的压降也各不相同,需要分别测量。为便于研究,将从上出口流出的流量与入口流量之比定义为分流比。分流比对入口到出口压降的影响规律如图 3 所示,结果表明,当密封筒破损当量直径为 10.81 mm,入口流量为 $40 \text{ m}^3/\text{d}$,随分流比增大,入口到上出口压降随分流比的增大而增大,入口到下出口压降随分流比的增大而减小,且近似呈线性关系。这是由于压降与通道内的流速有关,流速增大,压降自然增大。



(a) 入口到上出口压降随分流比变化规律

图 3 分流比对入口到出口压降的影响规律



(b) 入口到下出口压降随分流比变化规律

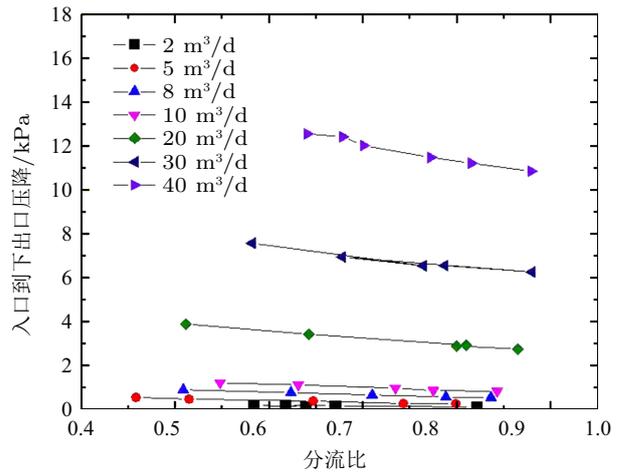
图3 分流比对入口到出口压降的影响规律(续)

2.2 入口流量影响

图4显示了当模拟密封筒的破损当量直径为10.81 mm,变化入口流量对模型内缝隙流动压降的影响规律。由图可见,当分流比增大时,入口到上出口的压降在所有分流比下都随入口流量的增大而增大,相应的,入口到下出口的压降在所有分流比下都随着入口流量的增大而减小。且随流量增大,曲线整体向上平移,从平移幅度可以看出流量的影响是比较显著的。这是由于压降与流速有关,当入口流量增大,相同分流比下,缝隙中的流速必然增大,从而摩擦压降、局部压降等必然增加,故压降增大。

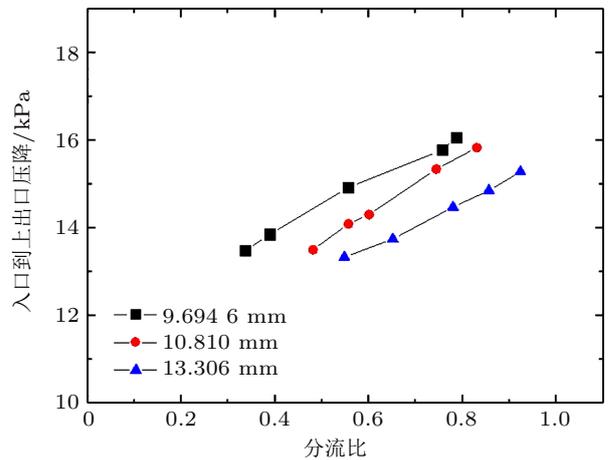
2.3 破损当量直径的影响

本研究中加工的3个带有不同破损的密封筒,都根据破损的实际情况和流道的实际形状对当量直径进行了计算,具体数值显示在图5中。试验结果

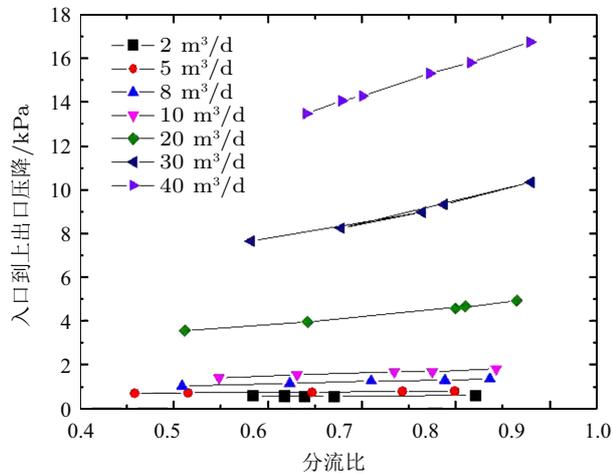


(b) 入口到下出口压降随入口流量变化规律

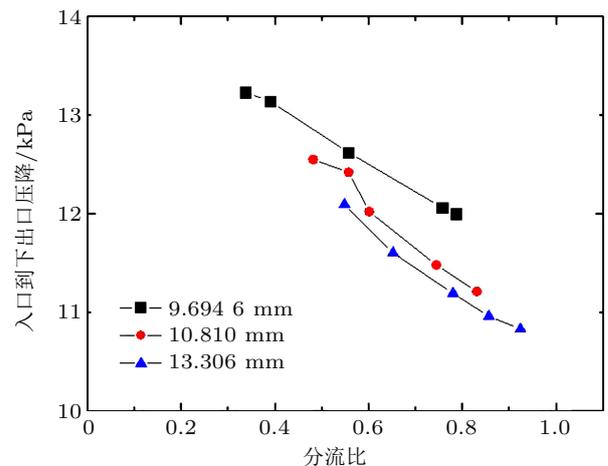
图4 入口流量对压降的影响



(a) 入口到上出口压降随破损当量直径的变化规律



(a) 入口到上出口压降随入口流量变化规律



(b) 入口到下出口压降随破损当量直径的变化规律

图5 破损当量直径对压降的影响

表明,随着破损当量直径的增大,在所有分流比下,入口到上出口的压降均增大,而入口到下出口的压

降整体下降。图 5 中显示的是入口流量为 40 m³/d 时压降的变化情况，其他入口流量时压降的变化趋势都是相似的。这是由于当入口流量一定时，当量直径越大，则流通面积越大，流过破损处的流速越低，流体在流动过程中的摩阻压降越小，破损处前后的局部损失也越小，因而总体压降损失也越小。

3 试验结果分析

3.1 量纲分析

由于插入式密封检测工具与密封筒之间的缝隙流道结构复杂，这种缝隙流动既没有解析解，目前也没有可以直接应用的经验关系式。本研究试图通过将试验获取的实际测试数据与数值模拟结果相结合，得到便于在工程上直接应用的压降计算关系式。为此，先通过量纲分析方法确定对压降有关键影响的参数是十分必要的。决定压降的因素主要有：水相密度 ρ ，水相黏度 μ ，入口流量 Q ，当量破损直径 D ，粗糙度 e ，分流比 F 。利用 π 定理可以得到

$$\Delta P = f(\rho, \mu, Q, D, e, F) \quad (1)$$

式中， ρ 为水相密度，kg/m³； ΔP 为压降，Pa； μ 为黏度，Pa·s； Q 为总入口流量，m³/s； D 为当量破损直径，m； e 为粗糙度，m； F 为分流比。

对于因密封筒破损造成的缝隙流动，粗糙度 e 的影响可以合并到当量破损直径 D 中。因此，取 Q ， ρ 和 D 为基本量纲，则可以通过量纲分析得

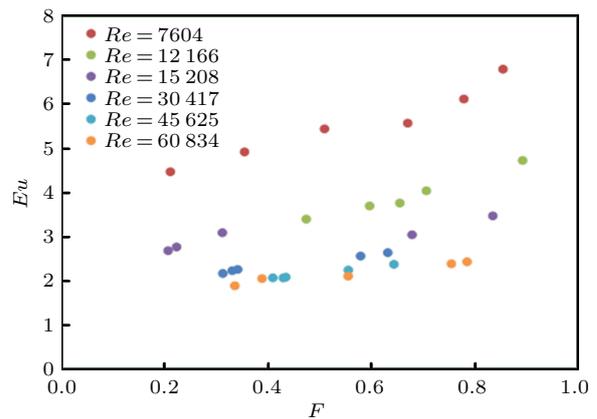
$$Eu = \frac{\Delta P}{0.5\rho V^2} = \frac{2\Delta P}{\rho(Q/(\pi d_{\text{hole}}^2))^2} = f\left(Re = \frac{4\rho Q}{\pi D\mu}, F\right) \quad (2)$$

式中， V 为入口平均速度，m/s； d_{hole} 为小孔直径，m。

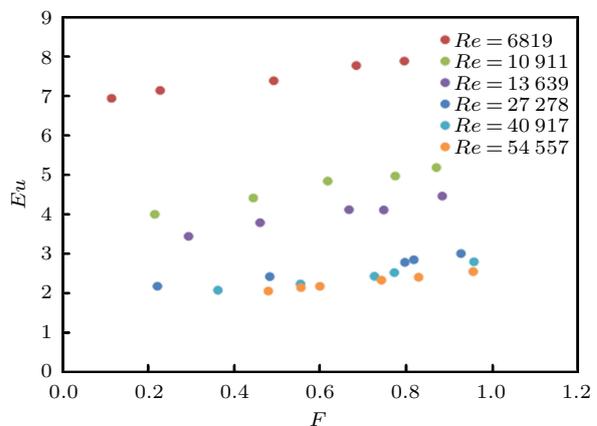
3.2 经验公式

为了得到量纲分析后的经验关系式，需要对所有不同破损当量直径的密封筒实验数据进行处理，处理结果如图 6 所示，可以看出，当密封筒破损当量直径不同时，所有的实验数据均呈现相同的变化规律，即随着 Re 的增大， Eu 随分流比 F 的整体分布向下移动；在相同的 Re 时， Eu 与分流比 F 的关系均近似呈现线性变化规律。

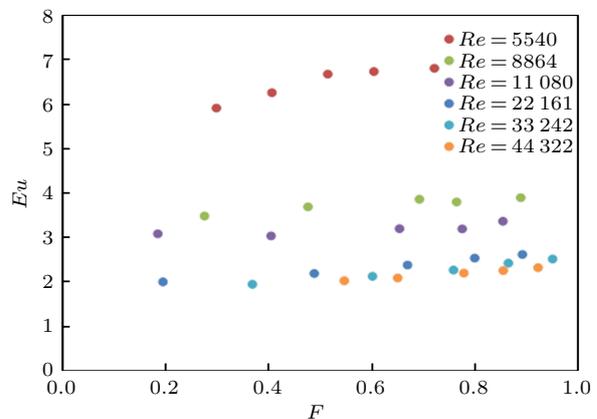
通过上述分析，回归得到关于入口到上出口的



(a) 密封筒破损当量直径为9.6946 mm



(b) 密封筒破损当量直径为10.810 mm



(c) 密封筒破损当量直径为13.306 mm

图 6 无量纲化的参数关系规律图

压降 Eu ， F 和 Re 之间的关系为式 (3)，其中数据的相关度达到 0.97。

$$Eu = a + bF + \frac{c}{1 + [(Re - d)/e]^2} \quad (3)$$

式中， $0 < F < 1$ ， $0 < Re < 150000$ 。式 (3) 反算后的数据和实验数据对比结果如图 7 所示，可以看出，误差在 $\pm 20\%$ 以内，可以用于指导插入密封检测工具的工程应用。

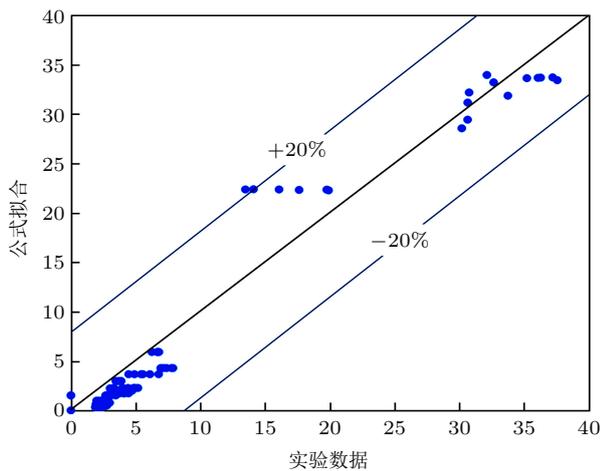


图7 经验公式与实验数据对比

4 结论

(1) 当密封筒破损当量直径、入口流量一致时,插入密封检测工具与破损密封筒之间的缝隙流动压降与分支流量有关,即入口到出口的压降与分流比有关,研究发现,随着分流比增大,入口到上出口压降增大、入口到下出口压降减小。

(2) 当密封筒破损当量直径不变时,随着入口流量的增大,缝隙流动的压降在同一入口流量下随分流比的变化规律不变,但在所有分流比下,随着入口流量的增大,入口到上出口的压降随分流比增大整体增大,入口到下出口的压降随分流比的增大整体增大。

(3) 当入口流量、分流比一致时,随模拟密封筒的当量直径增大,入口到上出口压降和入口到下出口的压降均整体减小;当入口流量一致时,所有破损当量直径下的压降变化规律随分流比的变化趋势一致。

(4) 通过无量纲分析方法,获得了插入密封检测工具中缝隙流动的关键无量纲参数,并基于室内试验数据得到了经验关系式,该研究为其未来定量验封奠定了基础。

参 考 文 献

- 陈俊国,袁云,黎明志等. 逐级验封器的研制与应用. *石油机械*, 2010, 38(7): 56-57
Chen Junguo, Yuan Yun, Li Mingzhi, et al. Development and application of the cascade sealing detector. *Petroleum Machinery*, 2010, 38(7): 56-57 (in Chinese)
- 颜俊虎,袁得芳,张久文等. 地层测试管柱中封隔器漏失原因分析. *青海石油*, 2013, 31(4): 100-102
Yan Junhu, Yuan Defang, Zhang Jiuwen, et al. Analysis of packer leakage in formation test string. *Qinghai Petroleum*, 2013, 31(4): 100-102 (in Chinese)
- 孙合营,刘云滔,谢桂青等. 注水井多级封隔器逐级验封技术研究与应用. *石油天然气学报*, 2008, 30(3): 411-412
Sun Heying, Liu Yuntao, Xiu Guiqing, et al. Study and application of step-by-step testing technology of multistage packer in water injection well. *Journal of Petroleum and Natural Gas*, 2008, 30(3): 411-412 (in Chinese)
- 方志刚,刘颖,周波等. 分层注水井封隔器验封新技术研究与应用. *油气井测试*, 2016, 25(4): 64-66
Fang Zhigang, Liu Ying, Zhou Bo, et al. Research and application of new sealing technology of packer for stratified water injection wells. *Oil and Gas Well Testing*, 2016, 25(4): 64-66 (in Chinese)
- 张磊,张立,黄强. 氧活化测试技术在中原油田的应用. *内蒙古石油化工*, 2012(4): 108-109
Zhang Lei, Zhang Li, Huang Qiang. Application of oxygen activation test technology in Zhongyuan oilfield. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2012(4): 108-109 (in Chinese)
- 赵勇,高国强,付路长等. 可验封管柱的研制与应用. *石油机械*, 2007, 35(8): 51-52
Zhao Yong, Gao Guoqiang, Fu Luchang, et al. Development and application of verifiably sealed pipe string. *Petroleum Machinery*, 2007, 35(8): 51-52 (in Chinese)
- 朱华. 可洗井封隔器堵塞式压力计验封工艺改进. *石油管材与仪器*, 2019, 5(5): 39-42
Zhu Hua. Improvement of packer plug pressure gauge sealing technology for washable wells. *Petroleum Tubing and Instruments*, 2019, 5(5): 39-42 (in Chinese)
- 李康,刘明发,刘华伟等. 海上油田井下密封筒检测工具试验评价研究. *中国石油和化工标准与质量*, 2018, 38(8): 155-156, 159
Li Kang, Liu Mingfa, Liu Huawei, et al. Study on test and evaluation of downhole seal detection tool in offshore oilfield. *Standard and Quality of China Petroleum and Chemical Industry*, 2018, 38(8): 155-156, 159 (in Chinese)
- 方志刚,刘颖,周波等. 分层注水井封隔器验封新技术研究与应用. *油气井测试*, 2016, 25(4): 64-66, 78
Fang Zhigang, Liu Ying, Zhou Bo, et al. Research and application of new sealing technology of packer for stratified water injection wells. *Oil and Gas Well Testing*, 2016, 25(4): 64-66, 78 (in Chinese)
- 胡亚安,柴恭纯,郑楚佩. 理想缝隙流的初步分析和试验研究. *水利水运科学研究*, 1987(4): 1-12
Hu Ya'an, Chai Gongchun, Zheng Chupei. Preliminary analysis and experimental study of ideal gap flow. *Scientific Research on Water Conservancy and Transportation*, 1987(4): 1-12 (in Chinese)
- 赵海峰,侯友夫. 微元体分析法在偏心环状缝隙流动公式推导中的应用. *液压与气动*, 2005(11): 49-51
Zhao Haifeng, Hou Youfu. Application of microanalysis in derivation of flow formula of eccentric annular gap. *Hydraulic and Pneumatic*, 2005(11): 49-52 (in Chinese)
- 李健,江体乾. Oldroyd 黏弹性流体缝隙流问题的解析解. *力学与实践*, 1989, 11(5): 17-20
Li Jian, Jiang Tiqian. Oldroyd analytical solution for slot flow of viscoelastic fluid. *Mechanics in Engineering*, 1989, 11(5): 17-20 (in Chinese)

(责任编辑:胡漫)