

引用格式:魏瑞玲,王光彪,魏凤玲,等.彭水区块水平井简化全井段流态模拟及流型图版优选[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):71-76.
WEI R L, WANG G B, WEI F L, et al. Simulation of wellbore flow pattern and optimization of flow pattern of simplified horizontal well in Pengshui block[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 71-76.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.01.011

彭水区块水平井简化全井段流态模拟及流型图版优选

魏瑞玲¹,王光彪²,魏凤玲¹,段承琰¹,刘静¹,吴小丁¹

(1.中国石化中原油田石油工程技术研究院,河南濮阳457000;2.西南石油大学石油与天然气工程学院,四川成都610500)

摘要:准确判断产水水平气井井筒流型是预测井筒生产动态、合理选取人工举升措施的关键。基于彭水区块气井实际生产情况,设计了一套可视化、可变角度的空气、水两相流动模拟实验装置,并且采用相似准则开展5种管斜角、6种气速、5种液速共150组两相流动模拟实验,归纳出4种流型类型,再分析角度、气速、液速对流型的影响:气速对垂直、倾斜管段流型影响较大,随气速的降低,流型依次表现为环状流、搅动流、段塞流;而液流速对各管段流型影响较小。最后将实验流型与文献中典型流型图板进行对比优选,确定了适用于彭水区块的两相流流型图板:垂直管AZIZ流型图+倾斜管GOULD流型图+水平管GOIVER流型图。其研究成果能有效预测井筒流态变化,为后续人工举升工艺的选取提供技术支持。

关键词:彭水区块;水平井;两相管流;实验;流型图

中图分类号:TE33

文献标识码:A

Simulation of wellbore flow pattern and optimization of flow pattern of simplified horizontal well in Pengshui block

WEI Ruiling¹, WANG Guangbiao², WEI Fengling¹, DUAN Chenglian¹, LIU Jing¹, WU Xiaoding¹

(1. Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457000, China;

2. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Accurate judgement of the wellbore flow pattern of water producing horizontal gas wells is the key to predict the wellbore production dynamics and reasonable selection of artificial lift measures. Based on the gas well production data of Pengshui block, a set of visual air-water two-phase flow simulation experimental device with variable deviation angle is designed. And the similarity criterion is used to carry out 150 groups of two-phase flow simulation experiments, including five pipe bevel angles, six gas velocities and five liquid velocities. Finally, four flow types are summarized and the influences of angle, gas velocity and liquid velocity on the convection type are analyzed. Gas velocity has a great influence on flow pattern in vertical and inclined pipe sections. With the decrease of gas velocity, flow pattern shows in turn as annular flow, agitating flow and slug flow. However, the liquid velocity has little effect on the flow pattern of each section. By comparing the experimental flow pattern with the typical flow pattern chart of the reference articles, the two-phase flow pattern chart suitable for the Pengshui block is optimized, that is, AZIZ flow pattern chart of vertical pipe + GOULD flow pattern chart of inclined pipe + GOIVER flow pattern chart of horizontal pipe. The research results can effectively predict wellbore flow pattern changes and provide technical support for the adoption of subsequent artificial lifting process.

Key words: Pengshui block, horizontal well, two-phase tube flow, experiment, flow pattern

水平井井筒中流体流动属于气液两相管流的研究范畴,其两相界面变化性较强,流动现象较单相管

流复杂得多,因而通常需借助实验手段进行观测和定义^[1-3]。针对水平井两相流问题,国内外学者采取

收稿日期:2019-07-22。

第一作者简介:魏瑞玲(1975—),女,本科,高级工程师,主要从事采气工艺研究与推广工作。通讯地址:河南省濮阳市中原油田石油工程技术研究院,邮政编码:457000。E-mail:308645178@qq.com

基金项目:国家科技重大专项“高效排水采气工艺技术应用研究”(2016ZX05061-017)。

各种方法来开展流态模拟实验,从而推进两相管流模拟实验的发展^[4-5]。黄建勇^[6]建立了国内第一套小曲率半径水平井井筒多相流流动规律模拟实验装置;谢宾^[7]研制出水平井井筒连续油管沉砂携带与孔眼分流室内模拟实验装置;肖高棉^[8]观测到“L”型水平气井连续携液模拟实验装置管段中的连续携液与积液过程;高升^[9]研制了可调节造斜段任意角度定向井连续携液模拟实验装置;王琦等^[10]建立了水平井井筒流动模拟实验装置以研究水平井各井段的携液能力。预测方法即流型图板,水平井井筒流动涉及垂直管、倾斜管和水平管的上升流动,其中比较典型的研究:垂直管方面,DUNS和ROS^[11]在常压条件下开展了约4 000次气液两相流动实验,且采用无因次气相、液相速度准数绘制了垂直管两相流型图;ORKISZEWSKI^[12]基于148口油井实测数据,对比分析了多个垂直管气液两相流模型,分不同流型择其优者,给出了垂直管泡状流、段塞流、过渡流、雾状流流型形成界限关系式;AZIZ^[13]引入修正系数 X 、 Y ,绘制了油-气两相混合流动时的垂直管流型图,流型分别为泡状流、段塞流、过渡流、环状流与雾状流;TAITEL^[14]基于各流型转变的物理机理,综合考虑流体物性、管径等影响,建立了垂直管气液两相流流型预测模型;高庆华等^[15]根据雷诺相似原理,以井筒两相流室内模拟试验为基础,研究了垂直管流型和两相流流动特性,并分别以两相混合物雷诺数和气液相表观速度比为横纵坐标绘制了垂直管流型图。同时,GOULD、BARNEA、DIAZ等的研究发现为倾斜管的两相流型界定提供了参考。GOULD^[16]采用空气和水作为流动介质在管径25 mm、管斜角45°的倾斜上升管中进行了气液两相流动实验,得出了一幅倾斜管流型图;BARNEA等^[17]在常压下采用空气和水作为流动介质,分别在管径为19.5 mm和25.5 mm的倾斜管段内开展了流型实验,得出了倾角在-10°~10°范围内的倾斜管中的气液两相流流型和流型图;DIAZ等^[18]以空气-水为流动介质,开展倾角为14.6°和25°、内径60 mm、管长16 m的两相流流型实验,重点研究了段塞流的段塞频率和分布长度。水平管方

面,GOIVER^[19]根据26 mm水平管内空气-水混合物流动实验绘制了水平管两相流型图;MANDHANE等^[20]基于空气-水小管径实验,以气、液表观流速为横、纵坐标绘制了水平管流型图;邵奇^[21]基于TAITEL和DUKLER^[22]提出的流型判别准则,利用Java语言开发了流型边界计算软件,绘制了相应流型图。综上所述可以看出,水平井井筒流动涉及垂直管、倾斜管和水平管的上升流动,而3种管段由于角度不同,流型现象差异较大,尤其是倾斜管流型规律复杂,目前其相关研究较少。现有流型预测方法多是针对低气液比油井条件提出的,不适用于高气液比水平气井条件,尤其各流型图对彭水区块水平井的适用性尚待验证。

本文基于彭水区块水平井生产参数,开展室内两相管流模拟实验,分析各因素的影响规律,并与工程常用的两项流型图版进行拟合,优选出适用于彭水区块水平井的两相流型图板,为彭水区块水平井井筒流态判断与预测提供依据,也给后续工艺措施的选择和实施提供参考。

1 实验方案

1.1 实验参数确定

彭水区块生产井数据见表1。

采用弗劳德数(Fr)对实际高压气井的气液两相流动与实验条件下低压的流动进行转换。

$$Fr = \frac{\rho u^2}{gD\Delta\rho} \quad (1)$$

式中: ρ 为气、液密度,kg/m³; u 为流速,m/s; g 为重力加速度,m/s²; D 为管径,m; $\Delta\rho$ 为气液密度差,kg/m³。

基于弗劳德数相似理论,本文以井口、井底的压力、温度数据对气液流速进行折算,以涵盖生产过程中参数的最大、最小值,力图含纳全井筒生产动态变化。实验条件(压力0.1 MPa,温度20℃,实验管段内径40 mm)下的气液相表观流速分布范围如图1。

由相似准则折算出气相表观流速范围分别为0.03~20.4 m/s、0.18~9.4 m/s。结合液流速计算和倾

表1 彭水区块水平井生产参数

Table 1 Production parameters of horizontal wells in Pengshui Block

油管内径/mm	井垂深/m	油压/MPa	井底流压/MPa	日产气量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	日产量/(m ³ ·d ⁻¹)
62/76	3 248	0.12~19.84	1.72~13.75	0.16~6.44	0~94.7

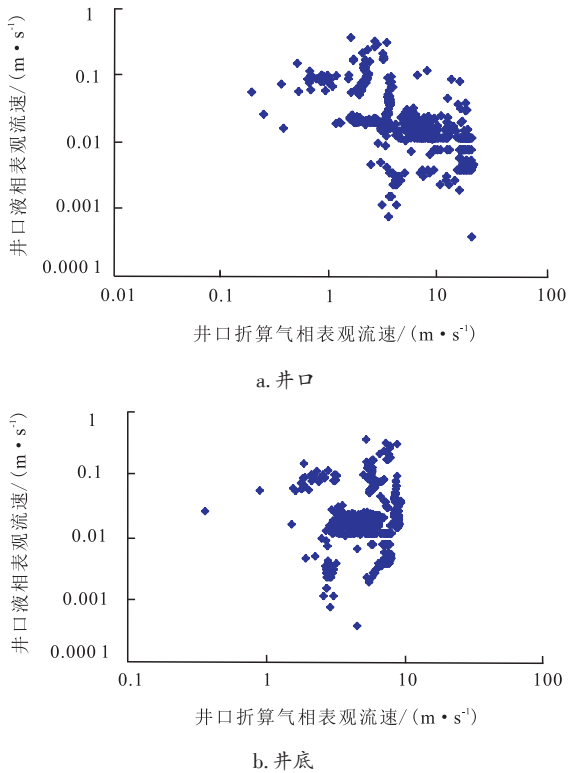


图1 实验气相表观流速计算

Fig. 1 Calculation of apparent velocity for experimental gas phase

斜角度对流动型态的影响,以微元体方法选取典型气液速作为流态模拟参数,气水两相实验参数范围如表2。

表2 气水两相实验参数

Table 2 Experimental parameters of gas-water two-phase

液速 $v_{sl}/(m \cdot s^{-1})$	气速 $v_{sg}/(m \cdot s^{-1})$	倾斜角度 $\theta/(^\circ)$
0.01/0.05/0.1/0.2/0.4	1/7/13/19/22/25	0/15/45/75/90

1.2 水平井模拟实验装置

整个实验流程为一闭合回路,采用空气和水作为实验介质(图2)。水由柱塞计量泵自水箱抽出,经流量调节阀调控,通过液体流量计测定水量;空气则通过空气压缩机加压后,经气体流量计计量,然后进入T型管与水混合,一同流入水平井模拟实验装置,观察水平井垂直段、斜井段、水平段内气液两相流流型,利用高速摄像机捕捉典型流型现象,探索相同参数条件下井斜角对流型的影响规律,并实时测试入口气/水流量、压力温度等参数。

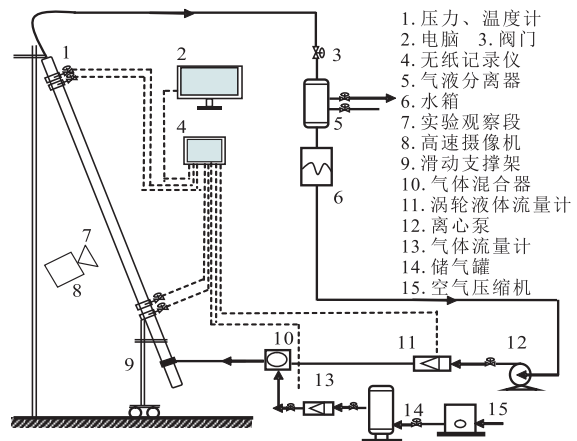


图2 水平井井筒气液两相流动模拟实验装置

Fig. 2 Experimental device for simulating gas-liquid two-phase flow of horizontal wellbore

2 实验结果与分析

开展150组水平井井筒流动模拟实验,分别捕捉了垂直管段、倾斜管段、水平管段的典型流型现象,详见表3。

2.1 管斜角

定流速(气速 $v_{sg}=1$ m/s,液速 $v_{sl}=0.01$ m/s)变管斜角时观察到的流型现象见图3。随着管斜角的增加,分层流逐渐变为段塞流,如图3a~3e,表明水平管段气液在重力分异作用下更容易分层,角度增大导致

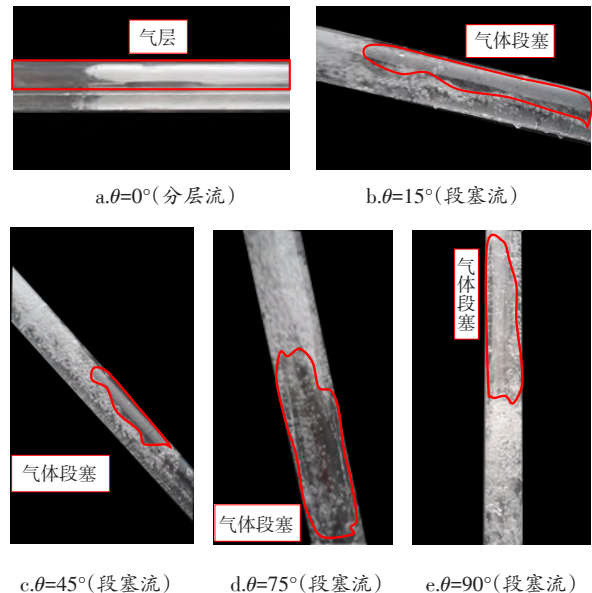


图3 不同管斜流型分布 ($v_{sg}=1$ m/s, $v_{sl}=0.01$ m/s)

Fig. 3 Flow patterns with different angles ($v_{sg}=1$ m/s, $v_{sl}=0.01$ m/s)

表3 实验结果
Table 3 Experimental results

液速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	气速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	实验观测流型				
		90°	75°	45°	15°	0°
0.01	1	段塞流	段塞流	段塞流	段塞流	分层流
	7	搅动流	搅动流	段塞流	段塞流	分层流
	13	搅动流	搅动流	搅动流	环状流	分层流
	19	环状流	环状流	搅动流	环状流	分层流
	22	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
	25	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
0.05	1	段塞流	段塞流	段塞流	段塞流	分层流
	7	搅动流	搅动流	搅动流	段塞流	分层流
	13	搅动流	搅动流	搅动流	环状流	分层流
	19	环状流	环状流	搅动流	环状流	环状流
	22	环状流	环状流	搅动流	环状流	环状流
	25	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
0.1	1	段塞流	段塞流	段塞流	段塞流	分层流
	7	搅动流	搅动流	搅动流	段塞流	分层流
	13	搅动流	搅动流	搅动流	环状流	分层流
	19	环状流	搅动流	搅动流	环状流	环状流
	22	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
	25	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
0.2	1	段塞流	段塞流	段塞流	段塞流	分层流
	7	搅动流	搅动流	搅动流	段塞流	分层流
	13	搅动流	搅动流	环状流	环状流	分层流
	19	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
	22	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
	25	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
0.4	1	段塞流	段塞流	段塞流	段塞流	分层流
	7	搅动流	搅动流	环状流	段塞流	分层流
	13	搅动流	搅动流	环状流	环状流	分层流
	19	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
	22	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流
	25	环状流	环状流	环状流	环状流	环状流

气液混合更加充分,容易出现气液交替上升的段塞流。

同时,分层流仅存在于0°条件下(图3a),管斜角略微增加,造成液膜回流堆积,分层结构被破坏;搅动流仅出现在管斜角大于15°条件下(图3c),原因在于当管斜角小于15°时,气液重力分异作用使得气体趋向于聚集在管子上部,难以出现气液混杂、搅动、震荡上升的搅动流型,且随着管斜角的增大,搅动流形成的临界气量变低;环状流在各管斜角条件下均存在。

2.2 气量

管斜角75°、液流速0.1 m/s时,不同气流速下观

察到的流型现象(图4)。气流量足够高时,液体沿管壁形成一个流动的液环,气流占据主要空间,在实验管中心汇合形成气柱,支撑管壁四周液膜向上运动,并将气液界面上部分液体撕裂成液滴夹带在中心气流中,呈现环状流流型特征(图4a)。含气率减小时,气相从连续相逐渐过渡到分散相,液相则相反,气体连续向上流动并举升液体,部分液体下落、聚集,而后又被气体举升,呈现混杂、振荡式的搅动流型特征(图4b)。气速进一步减小,气泡的趋中效应导致管内众多小气泡聚集,以大气泡形式分布在连续液相内(图4c)。随着气量增大,大气泡直径增大,栓塞状气泡几乎充满实验管段过流断面,较长的2个大气泡间由塞状液相隔开,形成一段气一段液的交替结构,呈现段塞流流型特征。

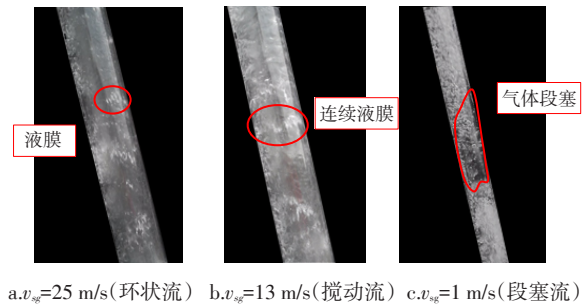


图4 不同气体流速流型分布($\theta=75^\circ, v_{li}=0.1 \text{ m/s}$)

Fig. 4 Flow patterns with different gas velocities
($\theta=75^\circ, v_{li}=0.1 \text{ m/s}$)

2.3 液量

管斜角75°、气流速1 m/s时,不同液流速下观察到的流型现象如图5,液相表观速度在0.01~0.4 m/s之间变化时,倾斜管段并筒均呈现一段气一段液的交替上升的段塞流流型特征。液量对并筒流型类型影响较小。

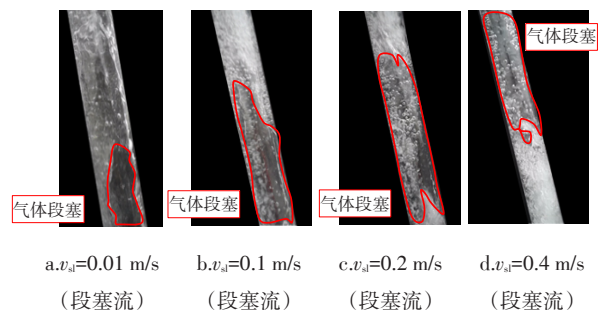


图5 不同液体流速流型分布($\theta=75^\circ, v_{sg}=1 \text{ m/s}$)

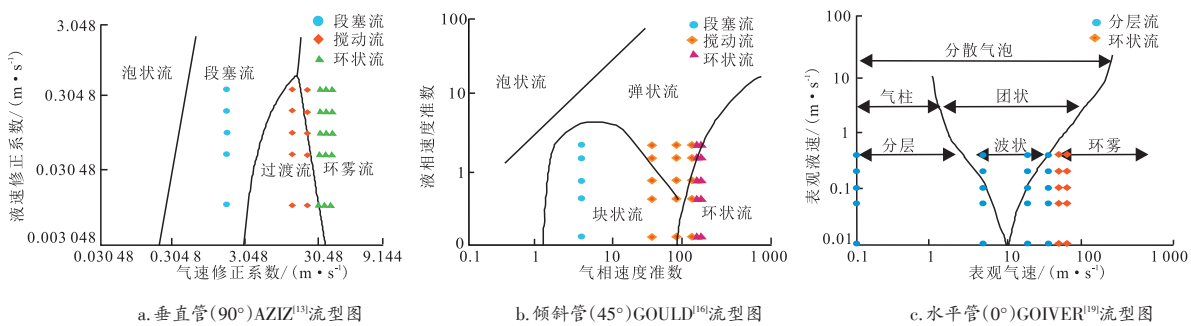
Fig. 5 Flow patterns with different liquid velocities
($\theta=75^\circ, v_{sg}=1 \text{ m/s}$)

3 流型图评价

基于上述实验数据,在工程常用气液两相流型图版的理论计算值中,各流型界限范围内即为理论预测流型,将其与表3中水平(0°)、倾斜(45°)、垂直(90°)管段下实测结果进行比较,结果见表4。因此,根据表4准确度高低,彭水区块水平井流型推荐为:垂直管 AZIZ 流型图+倾斜管 GOULD 流型图+水平管 GOIVER 流型图,图中各点为理论计算值,图例即为同气液速条件下表3中实验观测结果,各角度下对比结果见图6。

表4 流型图版准确率比较
Table 4 Accuracy comparison of flow patterns

管段类型	实验数据点	模型	超出预测范围数据点	预测范围内准确度/%
垂直管段(90°)	30	DUNS-ROS	21	30.00
		HWITT	12	60.00
		AZIZ	2	93.33
倾斜管段(45°)	30	GOULD	13	56.67
		GOULD	7	76.67
水平管段(0°)	30	GOIVER	3	90.00
		MANDHANE	7	76.67



注:倾斜段块状流处理为段塞流,弹状流处理为搅动流;水平段分层流和波状流处理为分层流,环雾流处理为环状流

图6 流型图评价结果

Fig. 6 Evaluation results of flow pattern

4 结论

1) 流型影响因素分析表明:气量对垂直、倾斜管段流型影响较大,随气量的降低,流型依次表现为环状流、搅动流、段塞流;而液流速对各管段流型影响较小。

2) 基于实验测试数据,以及分段评价工程常用的气液两相流型图,推荐彭水区块为水平井组合流型图:垂直管 AZIZ 流型图+倾斜管 GOULD 流型图+水平管 GOIVER 流型图,其中倾斜段流型预测正确率最低,正确率为76.67%。

实际条件中,由于水平井的水平管段是由旋转导向钻井形成,因而其带有起伏和蛇曲形状,该实验中水平段使用直管进行模拟,两者之间存在一定的差异,后续研究及在实际应用中可适当考虑此差异对实验结果进行调整。

参考文献

- [1] 孙玉平,陆家亮,巩玉政,等.我国气藏水平井技术应用综述[J].天然气技术与经济,2011,5(1):24-27.
SUN Y, LU J L, GONG Y Z, et al. Review and suggestion on application of horizontal-well technology to gas reservoirs in China[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2011, 5(1): 24-27.
- [2] 吴月先,钟水清,徐永高,等.中国水平井技术实力现状及发展趋势[J].石油矿场机械,2008,37(3):33-36.
WU Y X, ZHONG S Q, XU Yonggao, et al. Present condition of horizontal well technique strength and its development trend in China[J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(3): 33-36.
- [3] BAGHERIAN B, SARMADIVALEH M, GHALAMBOR A, et al. Optimization of multiple-fractured horizontal tight gas well[C]// paper SPE- 127899- MS presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, 10-12 February 2010, Lafayette, Louisiana, USA.
- [4] 袁照永.水平井环空泡沫携岩流动规律研究[D].北京:中国石油大学,2009:53-55.
YUAN Z Y. Research on cuttings transport phenomenon with foam in annulus of horizontal wells[D]. Beijing: China University Of Petroleum, 2009: 53-55.
- [5] 宋红伟,郭海敏,戴家才.水平井生产测井气水两相流流型试

- 验分析[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(12): 96-101.
- SONG H W, GUO H M, DAI J C, et al. Experimental analysis of gas-water flow pattern during production well logging in horizontal wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(12): 96-101.
- [6] 黄建勇, 李明忠. 水平井井筒流动模拟实验装置[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(S1): 56-60.
- HUANG J Y, LI M Z. Development Of The Experimental Facility For Modelling Multiphase Flow In Horizontal Wellbore[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1994, 18(S1): 56-60.
- [7] 谢宾, 陆灯云, 张剑, 等. 水平井连续油管冲砂与分流实验装置的研制[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 67-69.
- XIE B, LU D Y, ZHANG J, et al. Development of experimental facilities for sand washing and fluid diverting of coiled tubing in horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(11): 67-69.
- [8] 肖高棉, 李颖川, 喻欣. 气藏水平井连续携液理论与实验[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 122-126.
- XIAO G M, LI Y C, YU X. Theory and experiment research on the liquid continuous removal of horizontal gas well[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(3): 122-126.
- [9] 高升. 定向气井携液临界流量实验及应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2012: 6-18.
- GAO S. Critical gas flow rate experiment and application in slant wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012: 6-18.
- [10] 王琦. 水平井井筒气液两相流动模拟实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014: 26-31.
- WANG Q. Experimental study on gas-liquid flow in the wellbore of horizontal well[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014: 26-31.
- [11] DUNS H, Jr, ROS N C J. Vertical flow of gas and liquid mixtures in wells[C]// paper WPC-10132 presented at the 6th World Petroleum Congress, 19-26 June 1963, Frankfurt am Main, Germany.
- [12] ORKISZEWSKI J. Predicting two-phase pressure drops in vertical pipes[J]. Journal of Petroleum Technology, 1967, 19(6): 829-838.
- [13] AZIZ K, GOVIER G W. Pressure drop in wells producing oil and gas[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1972, 11(3): 38-47.
- [14] TAITEL Y, BORNEA D, DUKLER A E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes[J]. AIChE Journal, 1980, 26(3): 345-354.
- [15] 高庆华, 李天太, 赵亚杰, 等. 井筒气液两相流流动特性模拟试验研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(14): 84-87.
- GAO Q H, LI T T, ZHAO Y J, et al. Simulated experiment of flow characteristics with gas-liquid two-phase flow in wellbore[J]. Journal of Yangtze University (Nature Science Edition), 2014, 11(14): 84-87.
- [16] GOULD T. Vertical two-phase flow in oil and gas well[D]. Michigan: University of Michigan, 1972.
- [17] BARNEA D, SHOHAM O, TAITEL Y, et al. Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes. Comparison of experimental data with theory[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1980, 6(3): 217-225.
- [18] DIAZ M, NYDAL O J. Inlet effects on flow regimes in downwards inclined pipes[C]// paper OTC-26121-MS presented at the OTC Brasil, 27-29 October 2015, Rio de Janeiro, Brazil.
- [19] GOVIER G W, AZIZ K. The flow of complex mixtures in pipes[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
- [20] MANDHANE J M, GREGORY G A, AZIZ K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1973, 1(4): 537-553.
- [21] 邵奇. 基于Taitel-Dukler方法的气液两相流型边界计算软件开发[J]. 当代化工, 2015, 45(8): 1981-1983.
- SHAO Q. Development of gas-liquid two-phase flow boundary calculation software based on Taitel-Dukler method[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 45(8): 1981-1983.
- [22] TAITEL Y, DUKLER A E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow[J]. AIChE Journal, 1976, 22(1): 47-55.

(编辑 李青)