油气工程
复杂油气藏
Complex Hydrocarbon Reservoirs
2022年3月
doi:10.16181/j.cnki.fzyqc.2022.01.018

基于井筒携液实验的临界携液流量预测方法

田　彬[1],王健伟[1],李久娣[2],赵天沛[2],盛志超[1],陈德春[3],刘若雨[1]
(1.中国石化上海海洋油气分公司勘探开发研究院,上海 200120;2.中国石化上海海洋油气分公司,上海 200120;
3.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:Belfroid模型为现场应用较多的临界携液流量预测模型,针对该公式推导过程中对部分参数存在一定的假设条件从而可能影响预测结果准确性的问题,利用倾斜井筒携液实验装置对气井临界携液流量及其影响因素进行了分析,根据实验测试数据,对Belfroid模型进行了修正,并给出了适用条件。利用修正的Belfroid模型预测了东海部分气井的积液状况,预测结果得到了现场实测数据的证实,验证了修正模型的可靠性和准确性。

关键词:斜井;积液;临界携液流量;Belfroid模型
中图分类号:TE377　　**文献标志码**:A

A critical liquid-carrying flow prediction method based on wellbore liquid-carrying experiment

TIAN Bin[1], WANG Jianwei[1], LI Jiudi[2], ZHAO Tianpei[2], SHENG Zhichao[1],
CHEN Dechun[3], LIU Ruoyu[1]
(1. *Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai* 200120, *China*; 2. *Oilfield Development Management Department of SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai* 200120, *China*; 3. *College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao* 266580, *China*)

Abstract: The Belfroid model is a well-known and commonly used liquid-carrying flow prediction model. The critical liquid-carrying flow rate and its influencing factors of gas wells were analyzed using the deviated wellbore liquid-carrying experimental device to address the problem that some parameters have certain assumptions in the process of derivation of this formula, which may affect the accuracy of the prediction results. The Belfroid model was modified and the applicable conditions were provided based on the experimental test data. The fluid accumulation in some gas wells in the East China Sea was predicted using a modified Belfroid model. The reliability and accuracy of the modified model were evaluated by field-measured data, which confirmed the prediction results.

Key words: deviated well; liquid loading; critical liquid carrying flow rate; Belfroid model

气井积液造成井筒压力损失增加、气藏废弃压力上升,影响气藏采收率;因此,及时、准确地预测气井积液时机,并针对性地实施排水采气工艺,是实现边底水气藏高效开发的关键。国内外气井积液实验表明,在气井产水初期,环雾流为井筒中的主导流型,气体携带着液滴从环形液膜中央穿过,液体以两种形态存在:沿管壁流动的液膜和被夹带的气芯中的液滴[1]。人们根据环雾流的流动机理,分别建立了针对液滴和液膜的两种研究气井携液能力的模型[2-17]。其中液滴反转模型由于解析式较为简单,广泛应用于国内外各大气田;而液膜模型由于涉及参数较多且计算过程复杂,因此在现场应用较少。

1　研究背景

Turner最早提出了直井的临界携液流量预测模型,即Turner模型[18]。该模型主要是基于对垂直井筒中的液滴进行受力分析,认为井筒中的液滴主要受到气流向上的拖曳力F和向下的重力G,而两者平衡的状态即为井筒临界携液状态(图1)。

收稿日期:2021-12-27;**改回日期**:2022-01-24。
第一作者简介:田彬(1990—),助理研究员,主要从事油气藏工程方面的研究。E-mail:tianbin.shhy@sinopec.com。

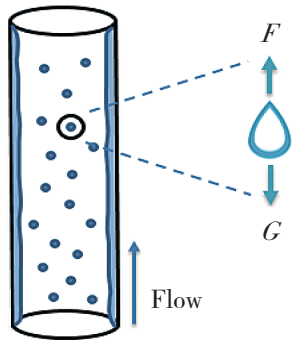


图1 垂直井筒液滴受力

向上的拖曳力F和向下的重力G可分别表示为：

$$F=\frac{1}{2}C_{\mathrm{d}}\left(\frac{\pi}{4}d^{2}\right)\rho_{\mathrm{g}}v^{2} \tag{1}$$

$$G=\left(\frac{\pi}{6}d^{3}\right)g(\rho_{\mathrm{l}}-\rho_{\mathrm{g}}) \tag{2}$$

式中，d代表液滴的直径，m；C_{d}代表曳力系数（取0.44）；V_{sg}代表井筒中的气体流速，m/s；ρ_{g}、ρ_{l}分别代表气体和液体的密度，kg/m^3。

液滴的大小主要受韦伯数N_{we}控制：当韦伯数N_{we}>30时液滴破碎；而当韦伯数N_{we}=30时，对应液滴直井的最大值，即：

$$N_{\mathrm{we}}=\frac{v_{\mathrm{crit}}\rho_{\mathrm{g}}d_{\max}}{\sigma}=30 \tag{3}$$

式中，v_{crit}为气井临界流速，m /s；σ为气水界面张力，N/m。

综合式（1）—式（3），可得Turner模型的临界携液流速：

$$v_{\mathrm{crit}}=5.46k_{\mathrm{s}}\left[\frac{\sigma(\rho_{\mathrm{l}}-\rho_{\mathrm{g}})}{\rho_{\mathrm{g}}^{2}}\right]^{\frac{1}{4}} \tag{4}$$

式中，k_{s}为安全系数（Turner模型取k_{s}= 1.2）。

对于倾斜井筒，在Truner模型的基础上，通过考虑井斜角对拖曳力方向和曳力系数等参数的影响，对Turner模型进行了修正，产生了一系列斜井临界携液流速预测方法，其中较为常用的即Belfroid模型[19]（见图2）。

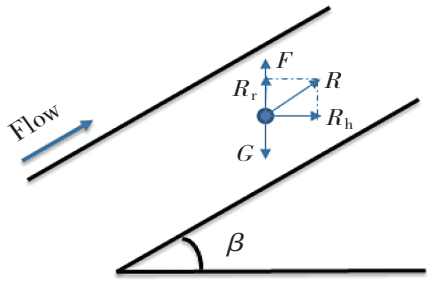


图2 倾斜井筒液滴受力

Belfroid模型主要是考虑井筒倾斜角度对液滴受力的影响，同时通过引入Fiedler形状函数[20]，推导出角度范围在5°≤θ≤90°的倾斜井筒临界携液流速预测公式（式5）。

$$v_{\mathrm{crit}}=5.46\left[\frac{\sigma(\rho_{\mathrm{l}}-\rho_{\mathrm{g}})}{\rho_{\mathrm{g}}^{2}}\right]^{\frac{1}{4}}\frac{\left[\sin(1.7\beta)\right]^{0.38}}{0.74} \tag{5}$$

式中β为井筒与水平方向的夹角，（°）。

可以看出Turner模型即为Belfroid模型在β = 90°时的特殊形式，Belfroid模型作为现场应用较多的临界携液流量预测模型，由于在推导的过程中存在对液滴形状、曳力系数等参数的诸多假设，因此有必要通过室内试验对其适用性及准确性进一步研究。

2 倾斜井筒临界携液流速实验

2.1 实验装置

实验装置如图3所示，由有机玻璃管、供气系统、供液系统、测量系统和数据采集系统组成。有机玻璃管长3 m，内径包括30 mm、45 mm、60 mm和75 mm4种规格，倾斜角可以实现在5~90°范围内任意调整，全管段透明，可观察管中流体的流动和分布情况；液体泵为无脉冲螺杆泵，扬程120 m，排量范围0~45 m^3/h；空气压缩机的最高压力0.8 MPa，最大排量5.1 m^3/min；液体电磁流量计的量程为0.12~1.2 m^3/h，气体质量流量计的量程为0~120 Nm^3/h；压力变送器的量程为0~1.6 MPa，差压变送器的量程为0~0.5 MPa；数据采集系统实现实时数据采集，并形成原始数据报表、曲线图，并输出数据文件。

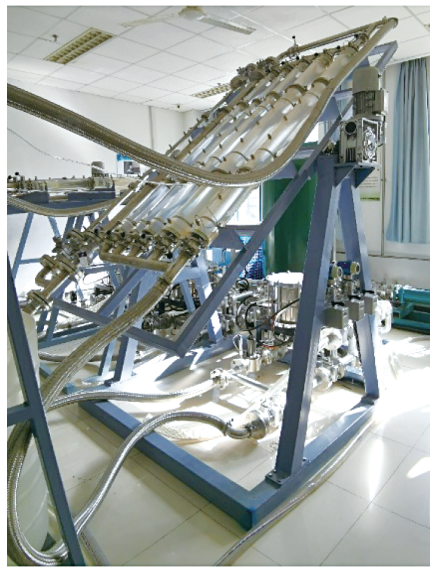


图3 倾斜井筒气液流型实验装置

2.2　实验方案设计

实验以空气和水作为介质，采用60 mm规格的井筒，在井筒倾角分别为90°、75°、60°、45°、30°、15°的条件下，首先调高气体流量至环雾流状态，再由高到低调整气量，观察不同液体流量条件下倾斜井筒从携液到积液的过程中液滴、液膜的流动形态、分布规律以及运动方式，并分别测定临界携液流速，具体实验流程如图4所示。

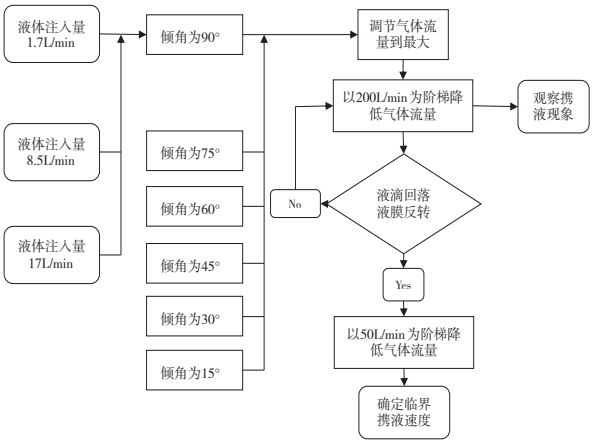


图4　倾斜井筒气液流型实验流程

2.3　实验过程及现象

2.3.1　改变气体流速携液实验

首先设定倾角为90°（井筒垂直于地面），将井筒流态调节至环雾流（气体流量4 200 L/min，液体注入流量1.70 L/min），逐步降低气相流量，观察现象并测定临界携液速度。

气体流量为4 200 L/min时：井筒内液体以管壁上的液膜和气芯中液滴的形式共同向上运移，井筒压降数据稳定，注入液体全部被携带出井筒，未发生积液。

气体流量为2 250 L/min时，发现管壁液膜表面气泡缓慢下行，并且管壁顶部液膜很薄，说明液膜出现反转，部分液膜开始下滑，气芯液滴向上运动，但此时压力数据波动尚不明显。

气体流量为2 100 L/min时：发现管壁大部分液膜均在下滑，管壁顶部观察不到液膜，气芯液滴向上运动，但是观察到下部气芯中有大液滴回落，压降数据波动明显，此时开始形成积液。

气体流量为1 900 L/min时：发现井壁中下部为下行液膜，中上部为聚集的液滴并形成下行的流道，观察到气芯中有较多液滴回落，压力数据波动明显并呈上升趋势，说明已经发生积液（图5）。

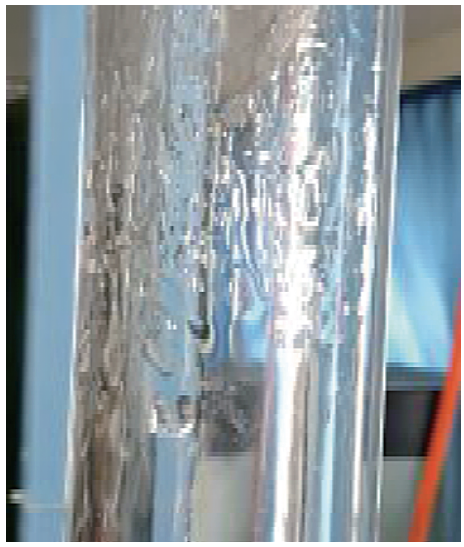


图5　井壁形成下行液膜

2.3.2　改变井筒倾角携液实验

保持液体注入流量仍为1.70 L/min，依次进行倾斜角为75°、60°、45°、30°、15°的携液实验，观察到实验现象与倾斜角为90°时类似：对于管壁液膜，随着气体流量的减小，井壁依次出现上行液膜、波状液膜、部分下行液膜和完全下行液膜；对于气芯液滴，当倾斜角为75°、60°、45°时，液滴回落后，井筒发生积液，说明此时气体携液的模式为“液滴携带”，而当倾斜角为30°、15°时，只有液膜回落时，井筒才会发生积液，说明此时气体携液的模式为“液膜携带”。

2.3.3　改变液体流量携液实验

调整液体注入流量为8.5 L/min进行试验，发现当倾斜角大于60°时，以“液滴携带”模式为主；当倾斜角小于45°时，以“液膜携带”模式为主。再次调整液体注入流量为17.0 L/min进行试验，发现当倾斜角为大于75°时，以“液滴携带”模式为主；当倾斜角小于60°时，以“液膜携带”模式为主，即当液体流量增加时，液膜携液逐渐成为气井携液的主导因素。

不同倾角和不同液体流量携液实验表明：气井携液有液滴和液膜两种方式。当气体携液处于临界携液状态时，液量越小、倾斜角越小则越容易出现以液滴为主导的携液现象；液量越大、倾斜角越大越容易出现以液膜为主导的携液现象。

2.4　实验结果与分析

对比不同液体流量条件下，井筒倾角与临界携液流速的关系曲线（图6）可以看出：临界携液速度随倾斜角增大呈现先增大后减小的规律；同时，气

井产液量同样对临界携液速度存在一定的影响，当液体流量分别为1.7 L/min、17 L/min时，临界携液速度的最大值分别出现在倾斜角40°附近和60°附近，说明对于一口定向井而言，气井产液量越大，携液能力最差的位置越靠近直井段。

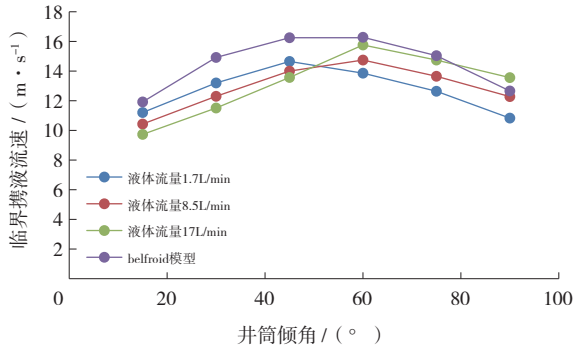


图6 不同倾斜角度井筒临界携液流速数据对比

将实验测得临界携液流量与利用Belfroid预测模型计算的结果进行对比，发现仅在液体流量为1.7 L/min且井筒倾角大于50°时，实验测定值与理论计算值吻合性较好，说明：①当气井倾斜角较小时，即井型越趋近于水平井时，井筒携液模型越符合“液膜携带”模式，此时Belfroid模型适应性较差；②当液体流量较大时，即气井产水量较大时，井筒携液模型同样符合“液膜携带”模式，此时Belfroid模型适用性也较差；③当井筒倾斜角较大且液体流量较小时，即对于直井以及井斜角小于50°的定向井，在产水初期可以利用Belfroid模型预测井筒临界携液流量，并且根据实验测定结果，可以对Belfroid模型加以修正（修正系数0.85）使预测结果更为准确。

3 现场应用

利用修正的Belfroid模型对东海某气田部分产水气井的临界携液流量进行计算，并将其同相应气井的实际产气量进行对比，以此判断气井的积液状况；另一方面，对上述气井进行积液面深度测试，落实井筒内是否存在积液面以及积液面深度，并将其测试结果同理论预测结果进行对比（表1）。实例分析结果表明：在适用范围内，修正的Belfroid模型能够准确地预测气井的积液状况。

表1 东海某气田产水气井积液情况判别统计

井名	时间	最大井斜角/(°)	产气量/($10^4m^3\cdot d^{-1}$)	产水量/($m^3\cdot d^{-1}$)	水气比	井口温度/℃	油压/MPa	临界携液流速/($m\cdot s^{-1}$)	临界携液流量/($10^4m^3\cdot d^{-1}$)	理论判别结果	钢丝作业测试结果
DH-A6	2015	32.0	11.9	8.6	0.7	41	13.8	1.6	9.9	未积液	未积液
	2016	32.0	7.8	12.4	1.6	45	13.1	1.7	9.6	积液	积液
DH-A7	2015	26.4	9.7	6.8	0.7	35	10.0	1.9	8.4	未积液	未积液
	2016	26.4	5.1	8.5	1.7	37	8.1	2.1	7.5	积液	积液
DH-11	2017	33.2	7.2	9.7	1.3	39	6.9	2.2	6.6	未积液	未积液
	2018	33.2	4.4	12.0	2.8	42	6.0	2.4	6.1	积液	积液

4 结语

（1）倾斜井筒临界携液流速实验表明，在气体携液过程中液体以两种形态存在：沿管壁流动的液膜和被夹带的气芯中的液滴；当气体处于临界携液状态时，液量越小、井斜角越小越容易出现以液滴为主导的携液现象，即Belfroid模型可用于大多数产水早期气井的积液预测。

（2）结合实验测试数据，对Belfroid临界携液流量预测模型进行了修正，修正系数0.85，在适用范围内修正后的预测模型能够准确地预测气井的积液状况，判别结果得到现场实测数据的证实。

（3）液滴预测模型虽然形式上较为简单，但实验结果表明其适用范围仍然有限，对于如井斜角较大或产液量较高的气井，由于其携液模式主要以液膜携带为主，因此对于该类气井携液能力的准确预测方法仍有待于进一步研究。

参考文献：

[1] 沈伟伟，邓道明，刘乔平，等. 基于环雾流理论的气井临界流速预测模型[J]. 化工学报，2019，70(4)：1318-1330.

[2] 李闽，郭平，谭光天. 气井携液新观点[J]. 石油勘探与开发，2001，28(5)：105-106.

[3] 王毅忠，刘庆文. 计算气井最小携液临界流量的新方法

[J].大庆石油地质与开发，2007，26(6)：82-85.

[4] 王志彬，李颖川.气井连续携液机理[J].石油学报，2012，33(4)：681-686.

[5] 熊钰，张淼淼，曹毅，等.一种预测气井连续携液临界条件的通用模型[J].水动力学研究与进展A辑，2015，30(2)：215-222.

[6] 潘杰，王武杰，魏耀奇，等.考虑液滴形状影响的气井临界携液流速计算模型[J].天然气工业，2018，38(1)：67-73.

[7] 杨文明，王明，陈亮，等.定向气井连续携液临界产量预测模型[J].天然气工业，2009，29(5)：82-84.

[8] 于继飞，管虹翔，顾纯巍，等.海上定向气井临界流量预测方法[J].特种油气藏，2011，18(6)：117-119.

[9] 李丽，张磊，杨波，等.天然气斜井携液临界流量预测方法[J].石油与天然气地质，2012，33(4)：650-654.

[10] BARNEA D. Transition from annular flow and from dispersed bubble flow-unified models for the whole range of pipe inclinations [J]. International Journal of Multiphase Flow，1986，12(5)：733-744.

[11] 陈德春，姚亚，韩昊，等.定向气井临界携液流量预测新模型[J].天然气工业，2016，36(6)：40-44.

[12] LUO S，KELKAR M，PEREYRA E，et al. A new comprehensive model for predicting liquid loading in gas wells [J]. SPE Production & Operations，2014，29(4)：337-349.

[13] LI J，ALMUDAIRIS F，ZHANG H Q. Prediction of critical gas velocity of liquid unloading for entire well deviation [C]//International Petroleum Technology Conference，Kuala Lumpur，Malaysia，2014：IPTC-17846-MS.

[14] SHEKHAR S，KELKAR M，HEARN W J，et al. Improved prediction of liquid loading in gas wells [J]. SPE Production & Operations，2017，32(4)：539-550.

[15] CHEN D C，YAO Y，FU G，et al. A new model for predicting liquid loading in deviated gas wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering，2016(34)：178-184.

[16] 苑志旺，杨莉，郭平，等.气井及凝析气井连续携液模型的统一[J].科学技术与工程，2013，13(35)：10633-10636.

[17] 杨功田，邹一锋，周兴付，等.定向井携液临界流量模型对比研究[J].新疆石油天然气，2012，8(1)：76-81.

[18] TURNER R G，HUBBARD M G，DUKLER A E. Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquids from gas wells [J]. Journal of Petroleum Technology，1969，21(11)：1475-1482.

[19] BELFROID S，SCHIFERLI W，ALBERTS G，et al. Predicting onset and dynamic behaviour of liquid loading gas wells [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition，Denver，Colorado，USA，2008：SPE-115567-MS.

[20] FIEDLER S，AURACHER H. Experimental and theoretical investigation of reflux condensation in an inclined small diameter tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2004，47(19/20)：4031-4043.

（编辑　韩　枫）