

气井井筒积液模拟实验研究

柯文奇^{1,2,3}

¹中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京

²国家页岩油气富集机理与有效开发重点实验室, 北京

³中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京

收稿日期: 2023年6月19日; 录用日期: 2023年7月20日; 发布日期: 2023年7月27日

摘要

气井井筒积液成为影响气井稳定生产的关键因素之一。为了优化气井排液采气工艺, 常采用临界携液模型来评价井下积液情况。但气井积液机理一直以来未能得到明确。本文采用多相管流模拟试验, 实现在线液膜、液滴测量, 明确气井生产过程中液滴、液膜的变化情况。通过系列定量, 明确了在气液比233~1463 m³/m³条件下液滴尺寸分布特征。利用液膜剥离、在线ECT和压差测量明确液膜翻转的基本条件, 为气井积液机理认识提供有力借鉴。

关键词

气井, 积液, 实验

Simulation Experiment of Liquid Unloading in Gas Well

Wenqi Ke^{1,2,3}

¹Petroleum Exploration and Production Research Institute of SINOPEC, Beijing

²State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing

³Sinopec Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, Beijing

Received: Jun. 19th, 2023; accepted: Jul. 20th, 2023; published: Jul. 27th, 2023

Abstract

The accumulation of fluid in gas well has become one of the key factors affecting the stable production of gas well. In order to optimize the process of gas well drainage and production, the critical liquid carrying model is often used to evaluate the downhole fluid accumulation. However,

文章引用: 柯文奇. 气井井筒积液模拟实验研究[J]. 矿山工程, 2023, 11(3): 437-445.

DOI: 10.12677/me.2023.113054

the mechanism of fluid accumulation in gas wells has not been clarified. In this paper, the multi-phase pipe flow simulation test is used to realize the on-line measurement of liquid film and liquid drop, and the change of liquid drop and liquid film in the production process of gas well is clear. The characteristics of droplet size distribution under the condition of gas-liquid ratio 233~1463 m³/m³ were determined by series quantification. Using liquid film stripping, on-line ECT and differential pressure measurement to clarify the basic conditions of liquid film turnover, it provides a powerful reference for the understanding of fluid accumulation mechanism in gas wells.

Keywords

Gas Well, Liquid Unloading, Experiment

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气井开采过程中,受反凝析水、压裂液或边底水等影响,常常会发生井筒积液,导致气井减产或停产。为了避免气井停产,常采用优化管柱、泡沫排液、柱塞排液、气举排液等[1]方法,降低井筒积液量,提高气井产量。为了更好的应用排液采气工艺在合适的时机与位置进行干预,就需要明确井筒中的流动特征。前人通过大量的研究,得到临界携液流量的预测模型[2]-[8]为后续研究提供了经验参考。本文搭建了气井井筒携液/积液模拟多相流试验装置,模拟井筒中低气速下两相流动过程中测量液滴尺寸,观测分析液膜流动现象,明确井筒中积液机理。

2. 积液机理实验方法

2.1. 多相流实验循环管路

为在室内条件下,搭建多相流装置模拟气井生产过程中气液两相流动,通过观察和测量来分析和表征液体流动行为特征,重现液体反转行为,对气井积液机理进行研究。

模拟实验装置如图1所示,包含3.2 m高的50 mm可视化测试管,气液混合从底部进入,通过ERT、压力计、马尔文粒径测量仪、液膜剥离装置实现对气液界面、相含率、压降等参数测量。其中,高度为2.5米处采用液膜剥离装置采集管壁液膜携液量,剥离液膜后采用马尔文粒度仪测定气芯中夹带的液滴尺寸。气相供给系统为空气压缩机,最大输入气体流量为220 m³/h。气相流量计量采用玻璃转子流量计,量程为0~160 m³/h;液相流量计量使用涡轮流量计,量程为0~0.25 m³/h。

2.2. 多相流测试参数监测方法

1) 压力测量

在高度1 m和2.5 m处使用压力传感器获取压力信号,使用自研的编译软件将电流信号转换成压力值,将两个压力值相减即可获得流动压降。

2) 液滴粒径测量

在垂直管3 m处对液滴取样,取样头如图2所示,取样管弯头直径5 mm,放置于管道中心。使用马尔文粒度仪(图3)对液滴尺寸进行测量分析,可进行离线和在线粒径分布测量,得到多相流体中离散相的

体积分布曲线及特征粒径(d_{10} 、 d_{50} 、 d_{90} 、 d_{32} 和 d_{43}), 测量粒径的范围为 $1\ \mu\text{m}$ ~ $2500\ \mu\text{m}$ 。

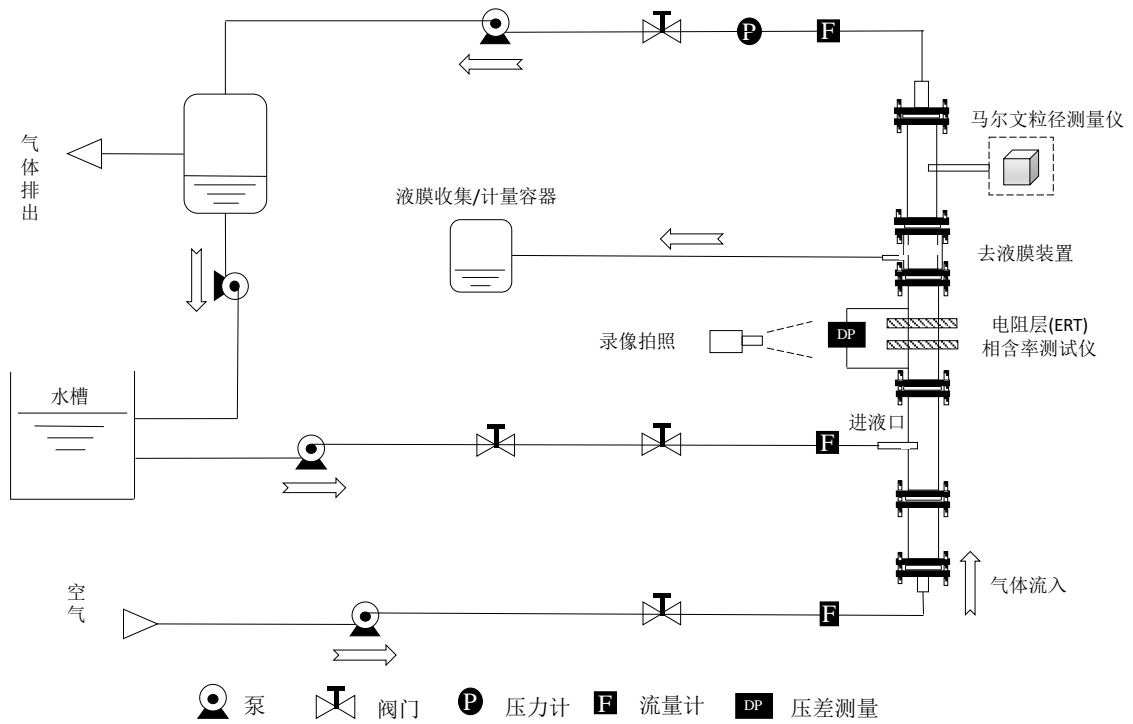


Figure 1. Experimental flow chart
图 1. 实验流程图



Figure 2. Droplet sampling head
图 2. 液滴取样头

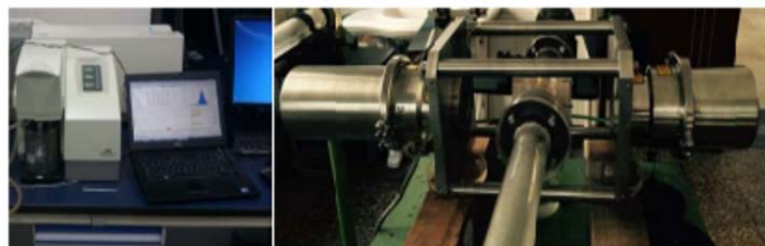


Figure 3. Insitec Malvern tester
图 3. Insitec 马尔文测试仪

3) 相含率测试

在高度 1 m 处安装电阻层成像仪 ERT (Electrical Resistivity Tomography) 装置, 使用电阻层成像技术获得气液两相含率分布。如图 4 所示。实验中应用的 ERT 型号为 EIT3000, 由电极传感器、数据采集系统和采集计算机组成, 最高图像采集速度为 1000 双幅/秒, 电极传感器为双圈传感器, 每圈十六个电极, 横截面图像像素为 20×20 , 数据采集系统包含传感器采集信号。



Figure 4. ERT test electrodes
图 4. ERT 测试电极

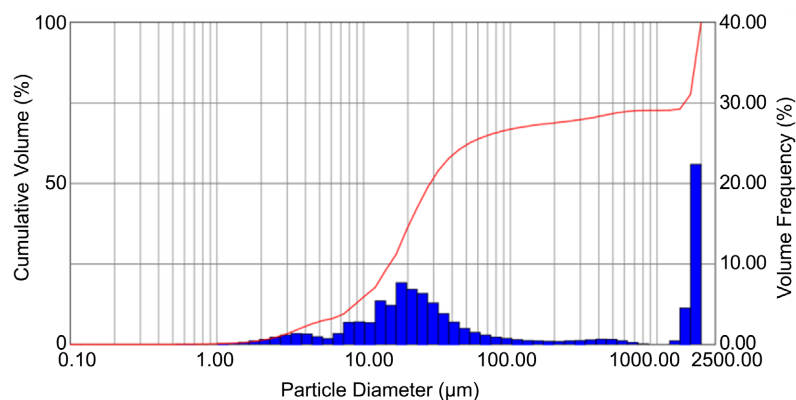
4) 流动现象观测

使用录像机记录液膜流动现象, 观察液膜形状特征及流型过渡转换行为, 使用高速照相机对高速流动下的液膜流动行为拍照记录, 观察不同气液比下液膜流动特征。

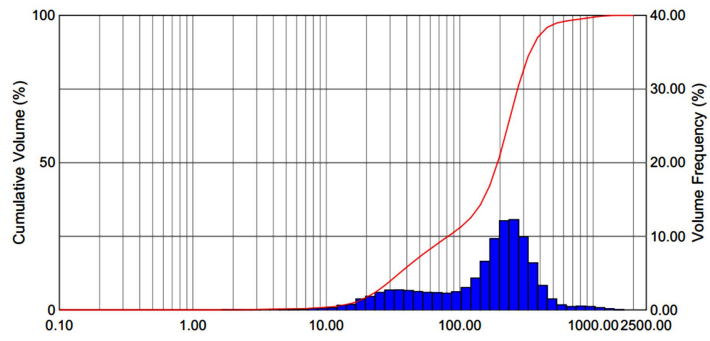
3. 实验结果及分析

3.1. 液滴尺寸测试分析

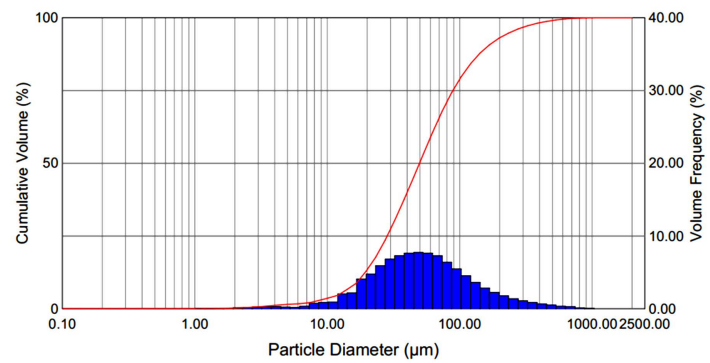
使用马尔文粒度仪对气相中夹带的液滴进行分析, 测量其尺寸分布, 分析液滴形态特征。当气液两相处于环状流时, 气相中会夹带液滴向上流动, 测量在环状流 - 搅拌流过渡区间内展开, 以对比验证液滴反转理论的正确性。图 5 为五个工况下的液滴粒径测量结果, 分别对应气液比为: $1463 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $512 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $375 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $300 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $233 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。



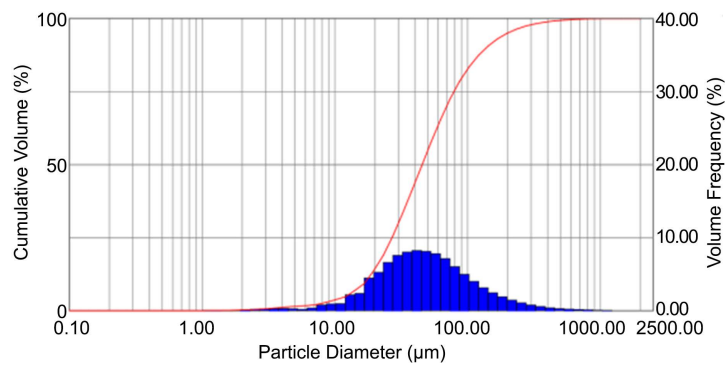
(a) 气液比 = 1463



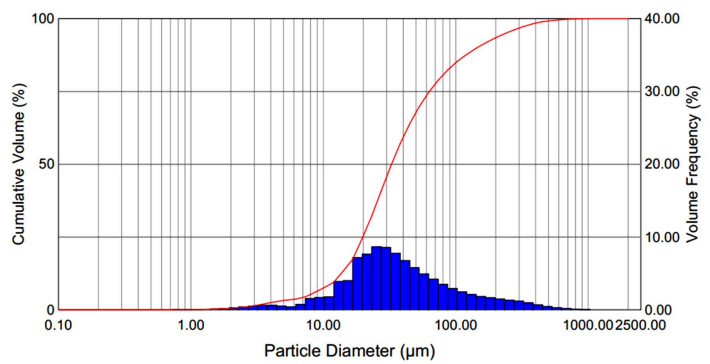
(b) 气液比 = 512



(c) 气液比 = 375



(d) 气液比 = 300



(e) 气液比=233

Figure 5. Droplet size distribution
图 5. 液滴尺寸分布

图中横坐标为液滴尺寸，单位为微米；直方图为该尺寸下的液滴频率，曲线图为液滴尺寸累计体积。合理的液滴尺寸测量结果为正态分布，但图 5(a)显示当气液比为 1463 时，存在 2500 μm 的液滴，可能是高气液比条件下在液滴取样处存在一定的聚并行为，聚并后的液滴尺寸为 2500 μm 。

表 1 为五个气液比对应的液滴尺寸具体数值。测量结果显示，累计体积分数 = 10% 的液滴尺寸范围为 7.56 μm ~30.50 μm ；累计体积分数 = 50% 的液滴尺寸范围为 28.51 μm ~192.41 μm ，累计体积分数 = 90% 的液滴尺寸范围为 144.63 μm ~1863.87 μm 。随着气液比的增加，液滴尺寸呈现增大趋势，携液能力增强，携液液滴直径增大。

Table 1. Droplet size distribution
表 1. 液滴尺寸分布

气液比(m^3/m^3)	液滴尺寸(μm)		
	累计体积分数 = 10%	累计体积分数 = 50%	累计体积分数 = 90%
1463	7.56	28.51	1863.87
512	30.50	192.41	360.20
375	17.55	49.88	161.65
300	17.16	45.46	138.43
233	12.30	32.74	144.63

取已发表文献和本研究的实验数据，求取最大液滴尺寸如表 2 所示。结果显示 Turner 假设的最大液滴尺寸范围为 3201 μm ~9024 μm ，远大于本研究实测的液滴尺寸。由此可见，Turner 提出的液滴反转现象不会出现在实验中，根据液滴反转假设建立的积液预测模型缺乏实验支持。一些研究者也发现了类似现象，Alamu (2012) 的马尔文粒径测试结果和本研究结果相近，van't Westende (2008) 等人通过多普勒测速仪也没有发现液滴出现反转现象[9] [10]，研究表明液滴反转可能不是流体反转和积液的原因。

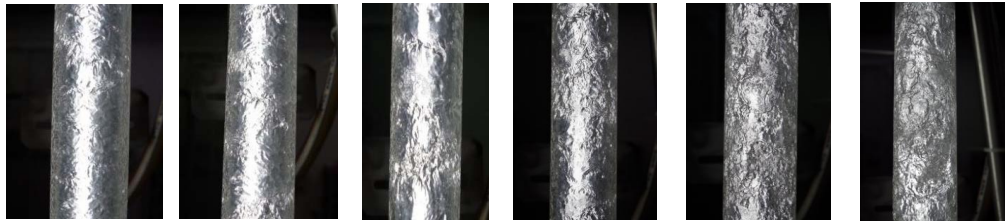
Table 2. Maximum droplet size (droplet inversion theory)
表 2. 最大液滴尺寸(液滴反转理论)

数据来源	流体密度(Kg/m^3)	临界流速(m/s)	表面张力(N/m)	最大液滴尺寸(μm)
Guner (2015)	1.293	20	0.073	4234.339
Guner (2015)	1.293	21.8	0.073	3563.958
Guner (2015)	1.293	21.2	0.073	3768.546
Liu (2018)	1.293	13.7	0.073	9024.112
Liu (2018)	1.293	14.1	0.073	8519.368
Liu (2018)	1.293	14.3	0.073	8282.73
Rastogi (2020)	1.03	25	0.073	3401.942
Skopich (2015)	1.293	15.2	0.073	7330.919
Skopich (2015)	1.293	14.9	0.073	7629.096
Skopich (2015)	1.293	20.5	0.073	4030.305
Skopich (2015)	1.293	23	0.073	3201.768
本实验	1.293	15.99	0.073	6624.432
本实验	1.293	16.41	0.073	6289.678
本实验	1.293	16.41	0.073	6289.678
本实验	1.293	16.7	0.073	6073.131

3.2. 液膜流动行为研究

3.2.1. 液膜流动现象

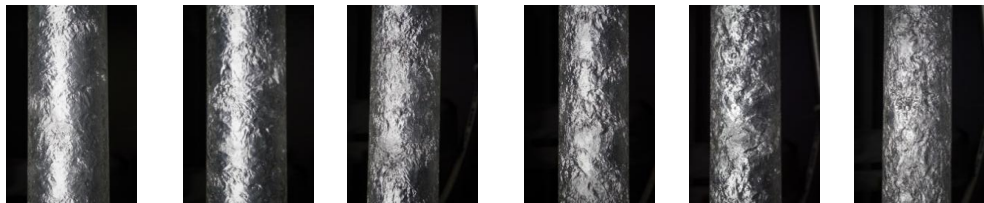
在直径为 50 mm 的实验管道内进行了 24 组携液实验, 实验表观液体流速设置为 0.014、0.028、0.042、0.071 m/s, 表观气体流速为 22.64、19.81、16.98、14.15、11.32、8.49 m/s, 实验工况的气液比范围 1600~120, 测量参数包括流动现象拍照记录、压降、相含率以及液膜流动速度。不同工况下的液膜流动现象拍照记录如下(图 6~9)。



(a) 表观气速 = 22.64 (b) 表观气速 = 19.81 (c) 表观气速 = 16.98 (d) 表观气速 = 14.15 (e) 表观气速 = 11.32 (f) 表观气速 = 8.49

Figure 6. Image recording when superficial liquid velocity = 0.014

图 6. 表观液速 = 0.014 时的图像记录



(a) 表观气速 = 22.64 (b) 表观气速 = 19.81 (c) 表观气速 = 16.98 (d) 表观气速 = 14.15 (e) 表观气速 = 11.32 (f) 表观气速 = 8.49

Figure 7. Image recording when superficial liquid velocity = 0.028

图 7. 表观液速 = 0.028 时的图像记录



(a) 表观气速 = 22.64 (b) 表观气速 = 19.81 (c) 表观气速 = 16.98 (d) 表观气速 = 14.15 (e) 表观气速 = 11.32 (f) 表观气速 = 8.49

Figure 8. Image recording when superficial liquid velocity = 0.042

图 8. 表观液速 = 0.042 时的图像记录



(a) 表观气速 = 22.64 (b) 表观气速 = 19.81 (c) 表观气速 = 16.98 (d) 表观气速 = 14.15 (e) 表观气速 = 11.32 (f) 表观气速 = 8.49

Figure 9. Image recording when superficial liquid velocity = 0.071

图 9. 表观液速 = 0.071 时的图像记录

当气相表观流速为 22.64 m/s 时，高速摄像可以观测到液膜波纹较少，且连续向上流动。随着气相表观流速的降低，液膜逐渐变厚，液膜界面波变得显著。当气相表观流速降低至 16.98 m/s 时，界面波显著，液膜出现反复上升 - 反转震荡并呈现有回落趋势。当进一步相表观流速为 11.32 m/s 和 8.49 m/s 时，液膜形态变化复杂，厚度显著增加，液相以块状向段塞流过渡。

根据试验确定液膜反转范围限定在气体流速为 16.98 m/s 到 14.15 m/s 间，根据视觉观察液膜流动轨迹和拍照，确定液膜流动反转临界气体流速，如表 3 所示：

Table 3. Experimental values of critical gas velocity for liquid film inversion

表 3. 液膜反转临界气体流速实验值

液体流量(m ³ /h)	表观液体流速(m/s)	临界气体流量(m ³ /h)	临界表观气体流速(m/s)
0.1	0.014	113	15.99
0.2	0.028	116	16.41
0.3	0.042	116	16.41
0.5	0.071	118	16.70

3.2.2. 压降

图 10 为压降实验值与表观气体流速的关系。可以看出不同液体流速下的压降曲线变化趋势是一致的，在一定液体流动速度下，压降测量值随着气体流速的降低而减小，当减小至某一极小值时，压降随着气体流速的降低而增加，表观液速 = 0.014 m/s、0.028 m/s、0.042 m/s、0.071 m/s 工况的压降极小值出现分别在表观气速 = 14.15m/s、14.15 m/s、16.98 m/s、16.98 m/s。决定气液两相流动压降有三个因素：重力压降、摩擦压降以及加速压降。大部分情况下加速压降很小可以忽略，因此重力压降和摩擦压降决定着总压降。随着气体流速减小，摩擦压降会降低，而重力压降会因为液膜厚度增加而增加。在压降极小值点右边，摩擦压降减小对总压降的贡献大于重力压降增加对其的贡献，因此总压降呈减小趋势；在压降极小值左边，重力压降增加的贡献大于摩擦压降减小的贡献，因此总压降随气速降低而增加。若进一步减小气速，流型可能过渡为段塞流，此时的压降可能进一步增加。结合液膜反转临界流速发现，液膜反转流动点处于最小压降点附近，表明液膜反转之后可能导致流型出现变化，压降则可能出现复杂的波动趋势。

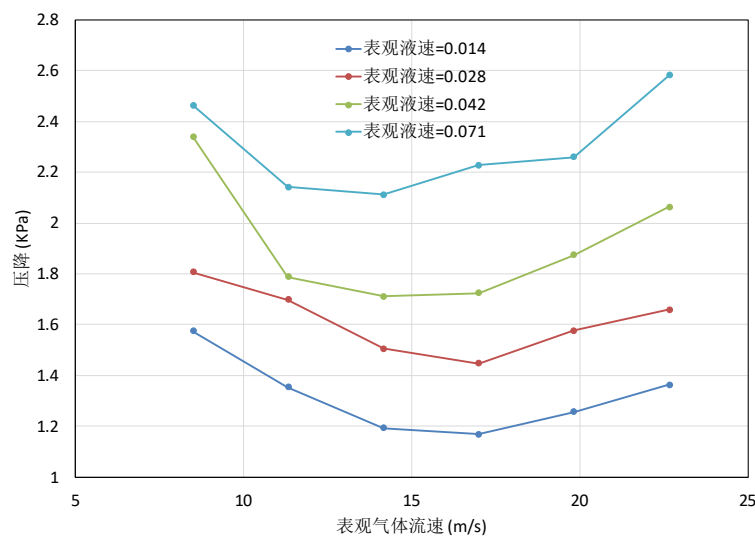


Figure 10. Experimental value of pressure drop

图 10. 压降实验值

4. 结论

通过上述井筒携液模拟实验,可以得到以下结论:

1) 实验测得的累计体积分数为90%的液滴粒径分布为144~1863 μm ,远小于Turner假设的最大液滴尺寸范围为3201 μm ~9024 μm 。

2) 试验分析表明,液滴反转可能不是流体反转和积液的原因,因此液膜反转理论可能是引发积液的主导因素。

3) 通过对液膜流动进行研究,得到了液膜反转流动行为特征、压降波动行为和相含率分布,确定了本实验条件下的临界携液气相流速。

基金项目

中石化科技攻关项目《复兴侏罗系陆相页岩油气采油气技术》(P21078-8)。

参考文献

- [1] 张晓鹏. 排水采气工艺的研究[J]. 化学工程与装备, 2018(11): 88-89.
- [2] 张烈辉, 罗程程, 刘永辉, 等. 气井积液预测研究进展[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 57-63.
- [3] Turner, R.G. (1969) Analysis and Prediction of Minimum Flow Rate for the Continuous Removal of Liquids from Gas Wells. *Journal of Petroleum Technology*, **21**, 1475-1482. <https://doi.org/10.2118/2198-PA>
- [4] Coleman, S.B., Clay, H.B. and McCurdy, D.G. (1991) A New Look at Predicting Gas-Well Load-Up. *Journal of Petroleum Technology, Society of Petroleum Engineers*, **43**, 329-333. <https://doi.org/10.2118/20280-PA>
- [5] Nosseir, M.A. (2000) A New Approach for Accurate Prediction of Loading in Gas Wells under Different Flowing Conditions. *SPE Production and Facilities*, **15**, 241-246. <https://doi.org/10.2118/66540-PA>
- [6] 李闽, 郭平, 谭光天. 气井携液新观点[J]. 石油勘探与开发, 2001(5): 105-106.
- [7] 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(6): 82-85.
- [8] 彭朝阳. 气井携液临界流量研究[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(1): 72-74.
- [9] Alamu, M.B. (2012) Gas-Well Liquid Loading Probed with Advanced Instrumentation. *SPE Journal*, **17**, 251-270. <https://doi.org/10.2118/153724-PA>
- [10] van't Westende, J.M.C., Kemp, H.K. and Belt, R.J. (2007) On the Role of Droplets in Cocurrent Annular and Churn-Annular Pipe Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, **33**, 595-615. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.12.006>