【环境与能源 / Environment and Energy】

泡沫排水采气适用界限的实验研究

刘永辉¹, 吴朋勃¹, 罗程程¹, 刘通², 倪杰², 王华³

1) 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500; 2) 中国石化西南油气分公司
石油工程技术研究院, 四川德阳 618000; 3) 中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 四川成都 610501

摘要: 为明确各流型下泡沫排水工艺排液效果进而有效指导选井, 设计一套可视化的空气-水-泡沫三相管流模拟实验装置, 通过表面张力实验确定实验起泡剂浓度, 开展不同气相表观流速和液相表观流速的泡沫举升效果实验. 研究发现: 在空气-水两相流动中加入起泡剂能够有效降低两相流动压降, 显著抑制流动振荡; 随着气相表观流速的增加, 泡沫对井筒中压降和持液率的降低幅度呈先增后减; 在泡沫排水有效区域内, 井筒气和水搅动剧烈, 促使加入的起泡剂与水充分接触产生大量泡沫, 降低了井筒压降和持液率; 将携液临界气流速作为泡沫排水有效区域的气相表观流速上限, 该区域的气相表观流速下限为泡状流到段塞流的转换界限, 确定泡沫排水效果最佳区域气相表观流速界限为段塞流到搅动流的转换界限. 泡沫排水适用界限将两相流流型转换界限与泡沫实验结果紧密结合, 明确了泡沫排水适用气量界限, 降低排采成本, 为气田泡沫排水工艺的高效应用提供依据.

关键词: 油气田开发; 泡沫排水; 可视化实验; 表面张力; 流型; 井筒压降; 持液率; 携液临界气流速
中图分类号: TE37 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.05490

Experimental study on the applicable range of surfactant injection technology

LIU Yonghui¹, WU Pengbo¹, LUO Chengcheng¹,
LIU Tong², NI Jie², and WANG Hua³

1) State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University,
Chengdu 610500, Sichuan Province, P. R. China

2) Petroleum Engineering Technology Institute, Southwest Oil & Gas Branch, SINOPEC,
Deyang 618000, Sichuan Province, P. R. China

3) CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., Chengdu 610501, Sichuan Province, P. R. China

Abstract: In order to clarify the drainage effect of the foam drainage process under various flow patterns and effectively guide the well selection, we design a set of visual air-water-foam three-phase pipe flow simulation experimental apparatus. At first we determine the foam concentration by surface tension experiment, and then we conduct different foam lifting experimental tests with different gas superficial velocities and liquid superficial velocities. We obtain the following results. Firstly, adding the surfactant to the gas-water two-phase flow can effectively reduce the two-phase

Received: 2019-04-28; **Accepted:** 2019-06-22

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51534006); National Science and Technology Major Project of China (2016ZX05017-005-003); Open Fund of State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (PLN1517)

Corresponding author: Professor LIU Yonghui. E-mail: swpilyh@126.com

Citation: LIU Yonghui, WU Pengbo, LUO Chengcheng, et al. Experimental study on the applicable range of surfactant injection technology [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(5): 490-496. (in Chinese)

flow pressure drop and significantly suppress the flow fluctuation. Secondly, the degree of decrease in pressure drop and liquid holdup in the wellbore increases first and then decreases with increasing of the gas flow rate. Thirdly, in the effective range of the foam lift, gas and water in the wellbore are vigorously agitated, prompting the added surfactant to fully contact with the water, thereby generating a large amount of foam, reducing the wellbore pressure drop and liquid holdup. Fourthly, the critical gas flow rate to carry the liquid is taken as the upper limit of the effective range of the foam lift. The lower limit in this range is the transition boundary from bubble flow to slug flow, and the optimal flow rate of the foam lift is determined as the transition boundary from slug flow to churn flow. In conclusion, limits of foam drainage application connect the two-phase flow pattern transition boundary with the results of foam experiments. The clarification of limits of foam drainage application will help reduce the cost of gas well deliquification and provide a theoretical basis for the efficient application of the foam drainage technology in gas fields.

Key words: oilfield development; foam deliquification; visual experiment; surface tension; flow pattern; wellbore pressure drop; liquid holdup; critical gas velocity of liquid loading

随着气藏开发的深入,气井产量不断降低,携液能力变弱,使部分液体在井筒中聚集,形成积液,危害气井生产^[1]. 实施合理的排水采气工艺措施及时排出井底积液,对延长气井正常生产时间至关重要. 泡沫排水因见效快、设备简单和适应能力强等优点而被广泛用于各气田. 目前,泡沫排液效果的评价界限尚不明确,且缺乏有效的选井依据,导致现场实施效果参差不齐^[2-5]. 现有的泡沫排水工艺优化评价方法多采用 Rose-Miles 法对起泡剂进行室内静态评价,基本原理是测试起泡剂的起泡能力和稳定性,进而优选性能较好的起泡剂. 但是,在实际气井生产过程中,起泡剂室内评价结果与现场应用效果仍存在较大差别,原因是室内评价忽略了起泡剂在不同流动条件下的排液效果,导致起泡剂在不同气井的运用效果参差不齐^[6-9],故有必要开展空气-水-泡沫三相管流实验,模拟实际气井加注起泡剂后对井筒流动的影响. Van NIMWEGEN 等^[10-13]通过实验研究得到了气液流速、管径和倾角等对空气-水-泡沫三相流动的影响规律,但其最小气相表观流速(简称气流速)设计为 5 m/s,与现场采用泡沫排水工艺的气井的实际气流速相比偏大. AJANI 等^[14-15]基于液膜反转理论,研究泡沫对气井携液临界气流速的影响并建立相应的机理模型,获得了远小于泡沫排水井的工艺参数范围,更多处于积液气井(气体流速低于携液所需的临界气流速). 但是,这些研究均是气液进入实验管段前让起泡剂充分起泡,实际气井则是利用井底产出水和水搅动起泡. 本研究建立了一套可视化的空气-水-泡沫三相管流模拟实验装置,通过可视化管流进行模拟实验,观察起泡剂对两相流动的影响规律,测试大范围气相和液相流速条件下的压降和持

液率. 基于实验数据分析影响起泡的关键因素,给出泡沫排水适用气流速界限,以期气田泡沫排水工艺的高效应用提供理论依据.

1 实验装置及方法

本研究建立的可视化的实验模拟装置如图 1,由进气系统、进液系统和测控系统组成:进气系统由压缩机压缩空气至储气罐中,通过流量调节阀控制入口气量;进液系统水泵从水罐中抽取液体通过流量调节阀泵入管道中;测控系统安装在管道两端的压力计测试流动压差,高速摄像机记录流动过程中的流动形态,同时关闭两个快关阀门记录管道中剩余液体体积进而计算持液率,温度、压力和气、水流量数据均由无纸记录仪采集并传输至计算机进行处理. 实验装置实物图请扫描论文末页右下角二维码查看. 其中,为满足液流速供给要求,分小液量和大液量两种情况由不同的水泵泵入,测试 5.0 m 长管道内的持液率和 2.5 m 长管段的压降数据.

为全面评价起泡剂在不同条件下的举升效果,实验参数范围覆盖了垂直管气液两相流所有流型(环状流、搅动流、段塞流和泡状流). 气流速范围为 0.05 ~ 27.00 m/s,液流速分别为 0.01 m/s 和 0.10 m/s. 每组实验均测量了实验瞬时压差、井筒持液率及气液(泡沫)流动形态.

实验所用起泡剂为川西气田现场用的 XHY-4A 型起泡剂,其表面张力如图 2. 随着起泡剂质量浓度的增大,溶液表面张力迅速降低,在起泡剂质量浓度为 1.5 g/L 时溶液表面张力达到最小,即临界胶束浓度,表面张力为 30.69 mN/m. 继续增大起泡剂质量浓度,表面张力将不再降低. 考虑起泡效

图1 可视化的空气-水-泡沫三相管流实验装置流程图

Fig. 1 Visualized air-water-foam three-phase flow simulation experimental schematic of flow loop

果及现场使用的浓度配比, 本研究采用质量浓度为 2 g/L 的起泡剂水溶液开展实验测试。

图2 XHY-4A 型起泡剂表面张力测试结果

Fig. 2 The result of surface tension test for XHY-4A foamer

2 实验结果

为明确起泡剂对垂直管气液两相流动的影响, 开展空气-水两相和空气-水-泡沫三相管流对比实验。基于实验测得的井筒压降和持液率数据及观察到流型, 首先分析在不同气、液流速条件下起泡剂对两相流动的影响效果。

2.1 气相表观流速

在一定液流速范围内, 气流速是气水两相流动

中影响气和水相互作用最关键参数。首先, 对加入起泡剂前后不同气流速下管道内的表观现象(流动形态)进行评价。图3给出了测定液相表观流速时, 不同气相表观流速下气-水两相和气-水-泡沫三相流型对比。随着气流速的增大, 观察到气-水两相流型依次为泡状流、段塞流、搅动流和环状流。由图3可见, 加入起泡剂后, 实验管道产生的泡沫能有效带出液体并降低持液率, 同时管段波动幅度明显降低, 使流动更规律: 当气相表观流速 $v_{sg} = 0.05 \text{ m/s}$ 时, 三相流动仍为泡状流水相中分散的气泡, 更密集且尺寸更小更均匀; 当 $v_{sg} = 0.40 \text{ m/s}$ 时, 在管壁附着一层气泡尺寸不一的泡沫膜, 其厚度均匀且随气流蠕动; 当 $v_{sg} = 3.00 \text{ m/s}$ 时, 管道中的流动振荡明显减弱, 紧贴管道内壁的泡沫膜变薄且出现尺寸更大的气泡; 当 $v_{sg} = 21.00 \text{ m/s}$ 时, 分散在液膜中的气泡变得小而密, 且泡沫膜上波纹更密集。

图3 空气-水两相与空气-水-泡沫三相流型对比

Fig. 3 Flow patterns of air-water two-phase and air-water-foam three-phase

从实验测到的瞬时压降波动情况可见, 起泡剂能有效抑制实验管道气水两相振荡。图4给出了定液相表观流速时不同气相表观流速下空气-水两相和空气-水-泡沫三相的瞬时压降对比。由图4可见, 加入起泡剂能有效降低两相流动压降, 显著抑制流动振荡, 如 $v_{sg} = 3.00 \text{ m/s}$ 时, 实验某时段内的空气-水两相流动平均压降为 2.12 kPa/m, 而相同条件下空气-水-泡沫三相流动平均压降降至 0.54 kPa/m, 加入起泡剂使两相流压降均值降低 74.5%。但随着气流速增大, 压降降幅减弱, 当 $v_{sg} = 15.00 \text{ m/s}$ 时, 两相流压降均值降幅为 27.8%。

2.2 液相表观流速

在相同实验条件下, 空气-水两相与空气-水-泡沫三相压降或持液率的差值, 即加入起泡剂对气-

图4 空气-水两相与空气-水-泡沫三相流动压降波动对比

Fig. 4 (Color online) Comparison of air-water two-phase and air-water-foam three-phase flow pressure drop fluctuation

水两相流动压降或持液率的降低值,反映了不同气、液相表观流速时的泡沫携液效果.图5对比分析了不同液相表观流速条件下泡沫对压降降低值($D_{\Delta P}$)和持液率降低值(D_H)的影响.由图5可

图5 液量对压降和持液率的影响

Fig. 5 Effect of liquid rate on pressure drop and liquid holdup

见,在气流速低于约20 m/s时起泡剂加入实验管段后均能有效降低井筒压降和持液率,但不同气、液相表观流速时降幅不同.相同液相表观流速时,随着气流速增大,泡沫对压降和持液率的降低值均先增后减.但当液相表观流速 $v_{sl} = 0.01$ m/s时, $D_{\Delta P}$ 最大值为3.06 kPa/m;而当 $v_{sl} = 0.10$ m/s时, $D_{\Delta P}$ 最大值为1.47 kPa/m,液量增加使最大 $D_{\Delta P}$ 减少了52%.这是由于相同条件下 D_H 最大由24.24%降至15.00%,最大 D_H 减少了38%.液量增加导致持液率和压降的降低值均大幅减小,即在 $v_{sl} = 0.10$ m/s时,起泡剂的应用效果变差,在段塞流区域内表现得更加明显.

3 泡沫排水适用界限

3.1 界限划分

图6给出了定液相表观流速时不同气流速下空气-水两相和空气-水-泡沫三相井筒压降和持液对比.随着气流速的增大,泡沫生成对井筒中压降和持液率的降低程度先增后减.这样的变化规律与气

液两相在管道中水动力搅动和井筒持液率变化相关. 为此, 基于泡沫对压降和持液率的影响范围和规律, 本研究将实验气流速范围划分为 3 个区域:

1) 泡沫排水反作用区(D): 当气流速很大时, 管段为环状流, 此时液膜紧贴管壁向上流动, 管道持液率低且流动稳定. 加入起泡剂后, 产生的泡沫降低持液率幅度有限, 却大幅增加管壁摩擦阻, 导致管段压力增大, 反而使泡沫排水工艺不利于生产.

2) 泡沫排水有效区(B): 随着气流速降低, 井筒持液率增加, 气水两相流动逐渐变得不规则, 尤其是在液膜反转后, 气水两相流动变为搅动流, 井筒振荡逐渐增大, 搅动强度增加. 在气量充足和搅动充分的条件下, 加入起泡剂能够有效生成泡沫, 带走实验管道液体, 从而降低持液率和压降.

泡沫排水有效区域内存在一泡沫排水效果最佳区(C). 分析可知, 该区域与气液两相搅动流与段塞流流型转换界限一致. 当气流速低于该界限后, 进一步降低气流速会导致泡沫排水效果迅速降低, 这是因为气水两相由搅动流变成段塞流后, 气相由连续相变为非连续相, 水相逐渐变得稳定, 气水之间的振荡迅速降低, 持液率迅速增大, 导致起泡困难, 起泡剂的起泡效果迅速下降.

3) 泡沫排水失效区(A): 随着气相表观流速的进一步降低, 当气水两相流型从段塞流转换为泡状流后, 水相成为主导的连续相, 管道空隙率很小, 即气水震荡较弱, 加入起泡剂后几乎不能起泡, 故在此区域内泡沫排水失效.

3.2 数学模型

由以上分析可见, 泡沫对井筒压降和持液率的影响与气水流动规律密切相关. 因此, 针对泡沫排水的适用界限, 采用气液两相流相关理论对其进行划分, 为现场泡沫排水工艺提供理论指导.

1) 泡沫排水有效区域气流速上限

高气流速时, 起泡剂加入会增加摩擦阻力, 因此, 泡沫排水工艺的适用上限应以有效降低井筒差降为界限. 通常泡沫排水有效区上限在液膜反转点, 即环状流-搅动流的转换界限附近, 此时持液率较低, 考虑泡沫排水工艺通常针对积液气井, 因此将携液临界气流速作为泡沫排水有效区域的上限. 本研究优选李闰模型^[16]预测泡沫排水有效区域气流速上限

$$v_c = \left[\frac{4g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{-0.25} \quad (1)$$

图 6 两相流与泡沫流的压降及持液率对比曲线

Fig. 6 (Color online) Pressure drop and liquid holdup curves of two-phase flow and foam flow

其中, v_c 为临界携液气流速 (单位: m/s); σ 为气水表面张力 (单位: N/m), ρ_l 为水相密度 (单位: kg/m^3); ρ_g 为气相密度 (单位: kg/m^3).

2) 泡沫排水有效区域气流速下限

将泡状流到段塞流的转换界限确定为泡沫排水有效区域气流速下限, 即泡沫排水失效界限. 通过两相流漂移模型^[17]计算管道中含气率为

$$\alpha = \frac{v_{sg}}{C_0(v_{sl} + v_{sg}) + v_D} \quad (2)$$

其中, C_0 为速度分布系数, 段塞流中取 1.20, 搅动流中取 1.15; v_D 为气相漂移速度 (单位: m/s).

气相漂移速度用 HARMATHY 关系式^[18]计得

$$v_D = 1.53 \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{0.25} \quad (3)$$

其中, g 为重力加速度.

HASAN 等^[19]研究表明, $\alpha = 0.25$ 时对应的 v_{sg} 即泡状流到段塞流的转换界限, 故联立式(2)和式(3)得到泡沫排水有效区域气流速下限为

$$v_{sg} = 0.429v_{sl} + 0.546 \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{0.25} \quad (4)$$

3) 泡沫排水效果最佳区域气流速界限

段塞流到搅动流的转换界限为泡沫排水效果最佳区域气流速界限. OWEN^[20]研究表明,该界限对应 $\alpha = 0.78$,气相漂移速度 v_D 采用 BENDIKSEN^[21] 的泰勒气泡上升速度公式计算

$$v_D = 0.35 \left[\frac{gd(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{0.5} \quad (5)$$

其中, d 为管道直径 (单位: m).

联立式(2)和式(5),取搅动流中 $C_0 = 1.15$,则得到泡沫排水效果最佳区域气流速界限为

$$v_{sg} = 8.71v_{sl} + 2.65 \left[\frac{gd(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{0.5} \quad (6)$$

4 现场验证

选用中国石化集团川西气田3口泡沫排水井对

表1 泡沫排水适用界限现场验证

Table 1 Field verification of the foam application limits

井号	油压/ MPa	产水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	产气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	失效界限/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	$10^{-4} \times$ 最佳界限/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	泡沫排水应用效果
X ₁	1.82	0.79	7 900	4 540	1.08	产量增至 $1.12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,产水量增加,效果较好
X ₂	1.94	0.03	1 100	4 770	1.14	产量无明显增加,油套压降增至 10 MPa,效果不佳
X ₃	2.65	15.00	4 200	8 370	1.92	产量无明显增加,压力波动正常,效果不佳

5 结 论

1) 通过可视化的实验模拟装置进行实验测试,在空气水两相流动中加入起泡剂能够有效地降低两相流动压降,显著抑制流动振荡.

2) 相同液量时,随着气流速增大,泡沫对压降和持液率的降低值均先增加后减小;液量增加使得持液率和压降的降低值均大幅度减少,起泡剂的应用效果变差,在段塞流区域内更加明显.

3) 随着气流速的增大,泡沫对井筒中压降和持液率的降低程度先增加后减小. 通过对比分析实验数据,将实验气流速范围划分为泡沫排水反作用区域、泡沫排水有效区域和泡沫排水失效区域.

4) 将携液临界气流速作为泡沫排水有效区域的上限,该区域的气流速下限为泡沫流到段塞流的转换界限,确定泡沫排水效果最佳区域气流速界限为段塞流到搅动流的转换界限,选用现场实际气井进行现场验证,证明该方法有效.

泡沫排水适用界限进行现场验证,其油管内径均为 62 mm,利用式(4)和式(6)分别计算泡沫排水有效区域气流速下限和效果最佳区域气流速界限,其主要受液相流速和压力的影响,可根据产液量及压力数据计算得到,进而计算不同条件下的泡沫排水有效区域气量下限和效果最佳区域气量界限. 气井生产数据及界限计算结果如表1.

计算结果表明, X₁ 井产气量为 7 900 m^3/d ,接近泡沫排水效果最佳区域气流速界限,应用泡沫排水后产量增加,效果较好. X₂ 和 X₃ 井产气量分别为 1 100 m^3/d 和 4 200 m^3/d ,均远低于其所计算的泡沫排水效果最佳区域气流速界限,现场应用效果不佳. 利用泡沫排水适用气量界限的计算结果,可有效指导气田现场进行泡沫排水选井.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51534006); 国家科技重大专项资助项目 (2016ZX05017-005-003); 国家重点实验室开发基金资助项目 (PLN1517)

作者简介: 刘永辉 (1977—), 西南石油大学教授、博士生导师. 研究方向: 采油采气. E-mail: swpilyh@126.com

引 文: 刘永辉, 吴朋勃, 罗程程, 等. 泡沫排水采气适用界限的实验研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(5): 490-496.

参考文献 / References:

- [1] LEA J F, NICKENS H V. Gas well deliquification [M]. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing, 2011.
- [2] OUDEMAN P. On the flow performance of velocity strings to unload wet gas wells [C]// Proceedings in SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Manama: Society of Petroleum Engineers, 2007: 96-105.
- [3] VEEKEN C A M, BELFROID S P C. New perspective on gas-well liquid loading and unloading [J]. SPE Production & Operations, 2011, 26(4): 343-356.
- [4] 张书平, 白晓弘, 樊莲莲, 等. 低压低产气井排水采气工艺技术[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 106-109.

- ZHANG Shuping, BAI Xiaohong, FAN Lianlian, et al. Techniques of gas recovery by water drainage for gas wells with low pressure and production [J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(4): 106-109. (in Chinese)
- [5] 刘合, 郝忠献, 王连刚, 等. 人工举升技术现状与发展趋势[J]. *石油学报*, 2015, 36(11): 1441-1448.
- LIU He, HAO Zhongxian, WANG Liangang, et al. Current technical status and development trend of artificial lift [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(11): 1441-1448. (in Chinese)
- [6] 李成福, 刘科如, 郭向东, 等. 延长气田排水采气效果分析[J]. *天然气勘探与开发*, 2015, 38(4): 52-56.
- LI Chengfu, LIU Keru, GUO Xiangdong, et al. Effect of drainage gas recovery in Yanchang gasfield [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2015, 38(4): 52-56. (in Chinese)
- [7] 蒋泽银, 李伟, 罗鑫, 等. 长宁页岩气井泡沫排水起泡剂优选及现场应用[J]. *石油与天然气化工*, 2018, 47(4): 73-76.
- JIANG Zeyin, LI Wei, LUO Xin, et al. Optimization and application of foam-dewatering agents in Changning shale gas wells [J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2018, 47(4): 73-76. (in Chinese)
- [8] HEARN W J. Gas well deliquification application overview [C]// Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi, UAE: Society of Petroleum Engineers, 2010: SPE-138672-MS.
- [9] FARINA L, PASSUCCI C, DI LULLO A G, et al. Artificial lift optimization with foamer technology in the Alliance shale gas field [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, USA: Society of Petroleum Engineers, 2012: SPE-160282-MS.
- [10] Van NIMWEGEN A T, PORTELA L M, HENKES R. A first look at the hydrodynamics of air-water-foam flow for gas well deliquification [C]// The 8th North American Conference on Multiphase Technology. Banff, Canada: BHR Group, 2012: BHR-2012-A025.
- [11] Van NIMWEGEN A T, PORTELA L M, HENKES R. The effect of surfactants on air-water annular and churn flow in vertical pipes. Part 2: liquid holdup and pressure gradient dynamics [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 71: 146-158.
- [12] Van NIMWEGEN A T, PORTELA L M, HENKES R. The effect of surfactants on upward air-water pipe flow at various inclinations [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 78: 132-147.
- [13] Van NIMWEGEN A T, PORTELA L M, HENKES R. The effect of the diameter on air-water annular and churn flow in vertical pipes with and without surfactants [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 88: 179-190.
- [14] AJANI A, KELKAR M, SARICA C, et al. Effect of surfactants on liquid loading in vertical wells [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 83: 183-201.
- [15] AJANI A, KELKAR M, SARICA C, et al. Foam flow in vertical gas wells under liquid loading: critical velocity and pressure drop prediction [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 87: 124-135.
- [16] 李闽, 孙雷, 李士伦. 一个新的气井连续排液模型[J]. *天然气工业*, 2001, 21(5): 61-63.
- LI Min, SUN Lei, LI Shilun. A new gas well liquid continuous withdrawal model [J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(5): 61-63. (in Chinese)
- [17] HASAN A R, KABIR C S, SAYARPOUR M. Simplified two-phase flow modeling in wellbores [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2010, 72(1): 42-49.
- [18] HARMATHY T Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent [J]. *Aiche Journal*, 2010, 6(2): 281-288.
- [19] HASAN A R, KABIR C S. A study of multiphase flow behavior in vertical wells [J]. *SPE Production Engineering*, 1988, 3(2): 263-272.
- [20] OWEN D G. An experimental and theoretical analysis of equilibrium annular flows [D]. Birmingham, UK: University of Birmingham, 1986.
- [21] BENDIKSEN K H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1984, 10(4): 467-483.

【中文责编: 英子; 英文责编: 天澜】

补充材料