

DOI: 10.11779/CJGE2022S1020

超前排气下杭州湾底水浅层气藏的气水界面运移特性

郭江涛^{1,2}, 王 勇^{*1}, 贾鹏飞³, 来向华⁴, 孔令伟¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 陕西核工业工程勘察院有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 4. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 探讨气体释放引起的气藏内部气水界面运移规律, 对于工程超前排气井的布置和高效排气有重要意义。基于弹性水驱气藏渗流规律, 结合两相流原理, 对杭州湾底水浅层气藏的单井有控排气过程进行数值模拟分析, 重点探讨排气过程中气藏内气水界面的“水锥”形成、形态和高度的演化规律。研究表明: 有控排气过程中气藏内出现不同程度的水锥现象; 井口流速是影响气水界面运移的最显著因素, 与水锥波及面宽度呈负相关, 与水锥高度呈正相关; 井口流速越大, 水锥形态越尖锐; 反之, 则越平缓; 相同排气时间内, 水锥波及面积越大, 排气效果越好; 水锥高度越高, 越早发生“淹井”。实际工程中, 工期允许条件下应控制较小的井口流速, 避免过早淹井, 达到高效排气目的。

关键词: 浅层气; 排气井; 水气运移; 水锥; 两相流

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0109-06

作者简介: 郭江涛(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事浅层气地质与工程危害防治方面的研究工作。E-mail: guo163jt@163.com。

Gas-water interface migration characteristics of shallow gas reservoirs in Hangzhou Bay during advanced exhaust

GUO Jiang-tao^{1,2}, WANG Yong¹, JIA Peng-fei³, LAI Xiang-hua⁴, KONG Ling-wei¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071; 2. Shaanxi Nuclear Industry Engineering Survey Institute Co., Ltd., Xi'an, 710054; 3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwestern University, Xi'an, 710069; 4. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012)

Abstract: It is of great significance to study the water-gas interface migration in gas reservoirs caused by gas release for advanced exhaust wells. Based on the theory of elastic water drive gas reservoirs, a theoretical model describing the variation of gas-water interface in reservoirs is derived. The controlling gas exhaust of the reservoirs in Hangzhou Bay is simulated, and the evolution laws of water-coning formation, shape and height in the reservoirs under different wellhead velocities are emphatically discussed. The results show that different degrees of water coning occur in the process of the exhaust, and the water coning directly affects the efficiency of the exhaust wells. The wellhead velocity is the most significant factor affecting the shape and height of the water-coning, and it is negatively correlated with the water coning sweep area and positively correlated with the water-coning height. The larger the wellhead velocity, the sharper the shape of water coning. The smaller the wellhead velocity, the gentler the water coning shape. During the same exhaust time, the larger the water-coning sweep area, the better the exhaust effects. The higher the water-coning height, the faster the exhaust well flooded. In practice, a low wellhead flow-rate should be controlled to avoid premature well flooding so as to achieve the purpose of effective exhaust.

Key words: shallow gas; gas well; water-gas migration; water coning; two-phase flow

0 引 言

浅层气在我国江浙平原、长江三角洲、渤海湾以及滇黔桂平原多有分布, 浅层气地质会对工程建设产生危害^[1]。现阶段, 针对浅层气地质的工程灾害防治

措施多为施工前布设超前排气井进行有控排气^[2]。自

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979269, 52127815)

收稿日期: 2022-09-23

*通信作者(E-mail: wang831yong@163.com)

21 世纪初修建杭州湾跨海大桥和杭州地铁过程中遭遇浅层地质灾害至今,由浅层气诱发的工程灾害防治问题一直是众多学者关注的焦点。

了解浅层气的赋存特征和气藏类型对研究浅层气地质的工程灾害防治有重要意义。气藏依据能量驱动类型不同可分为气驱气藏和水驱气藏;水驱气藏按能量补给方式不同又可分为弹性水驱和刚性水驱。杭州湾地区浅层气地质的勘察报告显示:在进行的浅层气藏排气过程中,常出现水气同产,且带出地层泥沙的现象;依据气藏分类标准,可判定杭州湾地区的浅层气藏属于常压底水浅层气藏。当气藏处于原始状态,气藏内部气水平衡且有明显的水平分界面,按重力关系,气体位于上方,地层水位于下方。气藏一旦被气井打开后,原始平衡被破坏,受压差影响使得原本水平的气水界面向井口方向形成“舌形”隆起,油气行业称之为“水锥”^[3]。随着排气时间的增加,水锥不断上升直至突破到井口,形成气水同产。这种气水界面随排气过程呈锥形向上推进的演化过程被称为“底水锥进”^[4]。水锥对浅层气有控排放是不利的,随着排气时间增长,水锥抵达井口,储层介质会产生液阻效应,致使气藏中剩余气体无法继续排出,从而造成排气井“淹井”而失效^[5]。

底水浅层气藏在排气过程中会不可避免地出“水锥”现象,底水侵入气藏后,气相在储层中的渗流速度会急剧下降,进而降低排气效率^[6]。因此,对底水浅层气藏采取有控排气措施时,水锥的形成与气井的排气效果密切相关。Sobocinski 等^[7]针对不同储层的物理特性,提出了底水气藏的水锥过程与锥进时间的联系。徐耀东等^[8]对气井见水时间进行了研究,得到底水气藏无因次锥高与无因次时间的关系,并对 Sobocinski-Cornelius 方法进行了修正。谢林峰等^[9]对底水气藏水锥高度及形态的计算方法进行了改进,认为当产气量较大时,需要考虑非达西渗流对气藏内水锥高度与分布形态的影响。陈军等^[10]对气藏水锥的动态过程进行了数值模拟研究,给出了气井投产后不同时刻的水锥模型。但迄今,处治类似于我国杭州湾地区工程建设中常常遭遇的超浅层气藏时,对有控排气措施中出现的水锥问题的研究尚少,该问题直接关系到工程超前排气井的合理布设和排气效果,也是浅层气地质灾害防治中亟待解决的问题。

本文以杭州湾地区的超浅层气藏为研究对象,基于气井打开理论和数值模拟,分析排气速率对气藏内部水锥生成、形态和高度的演化规律,论证有控排气措施的合理性,为超前排气井的布井设计提供理论支撑。

1 杭州湾浅层气藏的赋存特征

杭州湾位于我国浙江省东北部,是我国最大、最典型的喇叭状河口湾,在地质演化历史中经历了第四纪时期的几次海侵、海退过程,形成了有利于浅层气生成和赋存的地质条件^[11]。淤泥质沉积物中富含有机质,在生物厌氧菌作用下,经低温、还原条件生成浅层气。气体不断聚集,驱替粉细砂层中的孔隙水,逐渐占满孔隙,形成具有一定原始压力的浅层气藏^[12]。

Wang 等^[13]证实了杭州湾地区的超浅层气藏属于弹性水驱气藏,并把储层中的原始气水分布划分为三部分,自上而下依次为:①气相饱和区、②过渡带、③水相饱和区。图 1 即为杭州湾典型底水浅层气藏的气水赋存示意图。

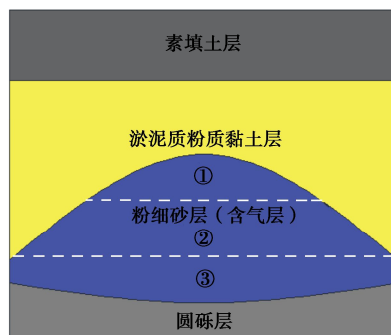


图 1 杭州湾底水浅层气藏的赋存示意图

Fig. 1 Schematic of shallow gas reservoirs in bottom water of Hangzhou Bay

2 气井打开理论

浅层气超前有控排气过程与天然气藏开采过程极为相似,但传统意义上的天然气藏多储存于地下岩层孔隙中,埋深数百米至上千米,开采过程中几乎不造成地面沉降。而杭州湾超浅层气埋深浅,且储集层多为未胶结的粉细砂层,无控排气常带出大量地层泥沙,造成地面塌陷。因此,在对浅层气实施有控排气时常以“不破坏储层、不带出泥沙”为控制标准^[14]。

2.1 气井打开模型

弹性水驱气藏开采过程中,气井打开时,靠近射孔段附近气体渗流符合非达西平面径向渗流,射孔段底部符合非达西球面向心渗流,远井地带符合达西平面径向渗流^[15]。杭州湾地区浅层气的储层厚度不等,最厚可达 8~10 m,薄弱处仅有 0.5~1 m。因此,气藏顶部的钻开厚度多控制在 0.5 m 以内^[16]。针对杭州湾地区的超浅层气藏有控排气时的气水运移特点,建立如图 2 所示的气井打开模型。

由图 2 可知:气藏处于原始状态下,有明显的气

水界面。假设气藏厚度为 H 、打开厚度为 L 、供气半径为 R_e 。在气水界面上孔隙气压力与孔隙水压力相等, 模型中气相渗流简化为平面径向流。

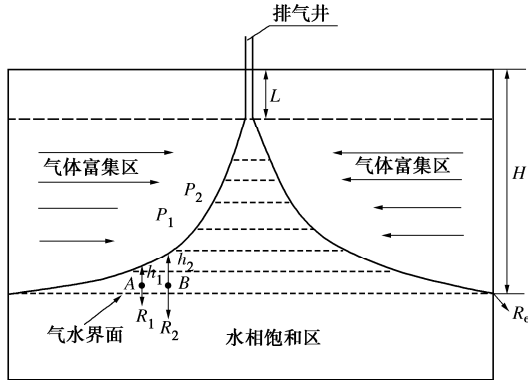


图 2 气井打开理论模型(改编自谢林峰等^[9])

Fig. 2 Theoretical model for gas well opening (Adapted from Xie et al^[9])

2.2 气水界面描述

由图 2 所示, 依据静力学原理可知 $P_A = P_B$, 则

$$P_1 - P_c + \rho_w g h_1 + \rho_g g (h_2 - h_1) = P_2 - P_c + \rho_w g h_2, \quad (1)$$

左右除以 $(R_1 - R_2)$ 得

$$\frac{P_1 - P_2}{R_1 - R_2} = -\Delta\rho_{wg} \frac{h_1 - h_2}{R_1 - R_2}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\rho_{wg} = \rho_w - \rho_g$, 为水气密度差; g 为重力加速度; ρ_g 为气相密度; ρ_w 为水相密度; P_1, P_2 分别为不同位置的气藏压力; h_1, h_2 分别为 A, B 两点的气水界面高度; R_1, R_2 分别为 A, B 两点的供气半径。

当 R_2 趋近于 R_1 时, 令 $h=f(R)$ 则有

$$\frac{\partial P}{\partial R} = -\Delta\rho_{wg} \frac{\partial f(R)}{\partial R}. \quad (3)$$

假设井底渗流为平面径向流, $V = \frac{Q_g B_g}{2\pi R h'}$ 。 h' 为

气体距离井筒距离为 R 时的过流高度, 根据气相流动规律可得出:

$$\frac{\partial f(R)}{\partial R} = \frac{Q_g \mu_g B_g}{2\pi K h' \Delta\rho_{wg}} \frac{1}{R} + \beta_g \frac{\rho_g}{\Delta\rho_{wg}} \left(\frac{Q_g B_g}{2\pi h'} \right)^2 \frac{1}{R^2}. \quad (4)$$

式中 $f(R), h', \mu_g$ 都是关于 R 的函数; Q_g 为气井产量; K 为气层渗透率; B_g 为气体体积系数; μ_g 为地层条件下气体黏度; π 取 3.14; R 为变量 (不同供气半径); β_g 为影响紊流的孔隙结构特征参数。

从图 2 中可知, $h' = H - f(R)$ 。式 (4) 为描述位于底水气藏中心排气井以定体积流量排气时的气水界面方程。

2.3 气水界面模型求解

若忽略气体的非达西渗流状态, 则式 (4) 可改写为

$$\frac{\partial f(R)}{\partial R} = \frac{Q_g \mu_g B_g}{2\pi K g \Delta\rho_{wg}} \frac{1}{R[H - f(R)]}, \quad (5)$$

式中, H 为气藏厚度。

考虑 $f(R_e) = 0, R = R_w$ 的边界条件, 可得出不考虑气体非达西渗流状态下描述气藏气水界面形态的解析解:

$$f(R_w) = H - \sqrt{H^2 + \frac{Q_g \mu_g B_g}{2.66 K \Delta\rho_{wg}} \times \ln \frac{R_w}{R_e}}. \quad (6)$$

式 (6) 为排气井不考虑气体非达西渗流状态以定体积流量 Q_g 排气的气水界面变化曲线。

若考虑气体非达西渗流状态对气藏排气时气水界面的影响, 则式 (4) 改写为

$$\frac{\partial f(R)}{\partial R} = \frac{Q_g \mu_g B_g}{5.32 K \Delta\rho_{wg}} \frac{3.462 \times 10^{-13} \beta_g \frac{\rho_g}{\Delta\rho_{wg}} (Q_g B_g)^2}{R^2 [H - f(R)]^2}. \quad (7)$$

式 (7) 即为考虑气体非达西渗流时排气井以定体积流量排气的气水界面方程。

图 3 是以定体积流量 Q_g 排气时, 考虑非达西渗流与不考虑非达西渗流的气水界面形态曲线。由图 3 可知, 考虑非达西渗流与不考虑非达西渗流的气水界面形态相近, 均呈现出以井轴为中心向井口的锥型隆起, 即为水锥, 曲线形态与高斯分布曲线形态相似。图中 h' 和 h'' 分别为考虑非达西流和不考虑非达西流状态时的气水界面隆起高度, 称为水锥高度; r' 和 r'' 为考虑非达西流状态和不考虑非达西流状态时的水锥波及面宽度。由图 3 可知, 考虑非达西流的水锥高度小于不考虑非达西流情况下的水锥高度, 但水锥波及范围则相反。同时, 井口定体积流量对水锥形态和高度影响显著。井口气体体积流量越小, 即流速越小, 水锥形态越平缓, 与之对应的水锥高度越低, 水锥波及范围越大; 井口流速越大, 水锥形态越尖锐, 与之对应的水锥高度越高, 水锥波及范围越小。

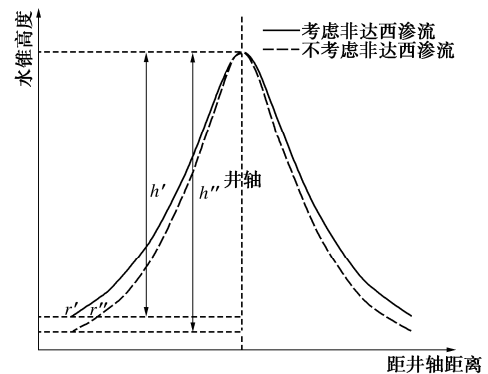


图 3 气水界面理论形态

Fig. 3 Theoretical form of gas-water interface

值得注意的是, 前述理论公式是假设气藏渗流规

律为平面径向流推导的,与实际气藏排气过程的渗流规律有一定差异。此外,理论公式得出的曲线形态是定体积流量排气过程中气水界面的最终形态,并不能反映排气过程水锥的生成、形态与高度的演化过程。因此,本文建立杭州湾浅层气藏的典型概化模型,对有控排气过程开展数值模拟,进一步分析排气过程的水锥形态与高度的演化规律。

3 超前排气井数值模拟

假设地层水平均匀分布且各向同性,排气过程中不发生土体变形。基于杭州湾浅层气藏的典型赋存特征,采用 FLAC^{2D} 有限差分程序对有控排气过程气藏内部气水运移进行数值模拟,研究分析浅层气藏有控排气过程中气藏内部的气水界面运移规律,以及不同排气速率时的水锥形态与高度演化过程。

3.1 数值计算模型与初始条件

数值计算前对杭州湾地区典型浅层气藏赋存地层进行概化处理。概化后的地层自上而下共分为4层,依次如下:①素填土层,层厚13.5 m;②淤泥质粉质黏土层,层厚13.5 m;③粉细砂层(含气层),层厚10 m;④圆砾层,层厚5 m。淤泥质粉质黏土层为生气层和盖层,孔渗性较差;粉细砂层孔渗性较好,有利于气体赋存,为主要储集层;含气层下部为圆砾层。

假定气相以游离态赋存,排气过程中不考虑气体的吸附和溶解,且气藏连续、初始气压力分布均匀。计算模型如图4所示,图中W为排气井, $a-b$ 为排气井井底, $a-a'$ 、 $b-b'$ 为排气井井壁。在井底附近设置监测点A,监测井底含水饱和度变化。

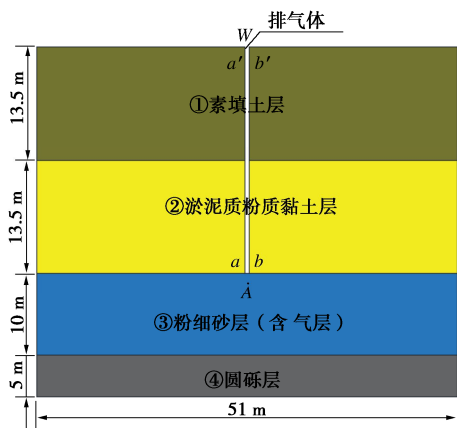


图4 排气井数值模型

Fig. 4 Model of an exhaust shaft for numerical analysis

网格划分:计算区域面积为 $51\text{ m}\times 42\text{ m}$,在 X 和 Y 方向上各设置100个网格。排气井深度为27 m,直径为100 mm。

位移边界:模型左右外边界约束 X 方向位移,下边界约束 X 和 Y 方向位移,排气井壁约束 X 方向位移,

上边界为自由边界。

渗透边界:模型内部均为渗透边界,井壁为不透水边界,井底设置常流量边界。左右外边界和下边界为常水压边界,上部边界为自由透水边界。

初始条件:初始孔隙水压力按静水压分布,原始气藏压力设为0.35 MPa,初始饱和度 S_a 为42.4%,残余饱和度 S_r 取15%。

储层砂土的孔隙水密度 $\rho_{w0}=1000\text{ kg/m}^3$,气体密度 $\rho_g=2.34\text{ kg/m}^3$,水黏度 $\mu_w=1.01\text{ mPa}\cdot\text{s}$,气体黏度 $\mu_g=0.0105\text{ mPa}\cdot\text{s}$,储气砂饱和渗水系数 $k_w=3.94\times 10^{-6}\text{ cm/s}$ 。除含气层外,其余地层均为饱和土层。

实际工程中,若排气井以无控制措施进行浅层气排放,排气速率会随气藏压力减小而发生变化,产生非稳态渗流,进而破坏储层土骨架,问题的研究将趋于复杂。为研究浅层气藏有控排气过程中气藏内部的气水界面演化规律,排气井分别以 $q=0.01, 0.03, 0.05\text{ cm/s}$ 的排气速率进行气体排放。探讨排气速率及排气时间对气藏内部气水界面的影响规律。

3.2 计算结果分析

图5(a)为排气井以恒定速率排气($q=0.01\text{ cm/s}$),不同时刻气藏内部水锥的形态与高度演化过程。初始时刻,在气藏打开瞬间,气藏内部的气水界面尚未发生改变,水锥尚未形成;随着排气时间的增加,气藏内的气水界面开始变化,底水锥进逐渐明显,并向井底方向推进。在底水驱动作用下,气体逐渐向外排出,气藏范围逐渐缩小。

不同时刻气藏内水锥的形态有所不同,排气时间较短,气水界面距离井底较远,形成的水锥形态相对平缓;随着排气时间的增加,底水界面逐渐隆起并上升至井底附近,形态趋于尖锐。不同时刻排气过程形成的水锥波及面有所不同,排气时间较短时,水锥波及面较小;随着排气时间的增加,水锥波及面逐渐增大。图中 h_1, h_2, h_3 分别为不同时刻的水锥高度变化。由图5(a)可知,水锥高度是随排气时间推移而逐渐增大的,当水锥高度逐渐增加至水锥抵达井底时,排气井出现淹井,水锥形态和高度不再变化,此时排气井失效。

图5(b)为排气井以不同速率排气时,相同时刻($t=1.5\times 10^4\text{ s}$),水锥的形态与高度演化过程。由图5(b)可知,相同排气时间内,不同排气速率工况的水锥形态与高度呈现出相似的变化规律,水锥均以井轴为对称轴,隆起后向井底推进。图中 b_1, b_2, b_3 分别为不同排气速率时,相同时刻气藏内的水锥高度变化。由图5(b)可知,相同时刻,不同排气速率所形成的水锥高度随排气速率的增大逐渐增加。相同时间内,排气速率大的工况,水锥则更快地锥进至井底,造成排气井失效;排气速率越小的工况,水锥到达井底所需的时间越长。

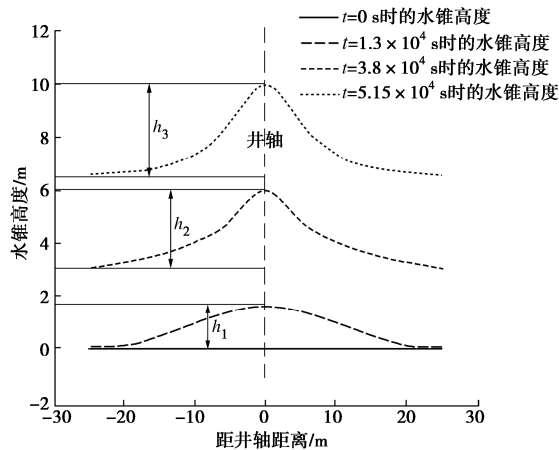
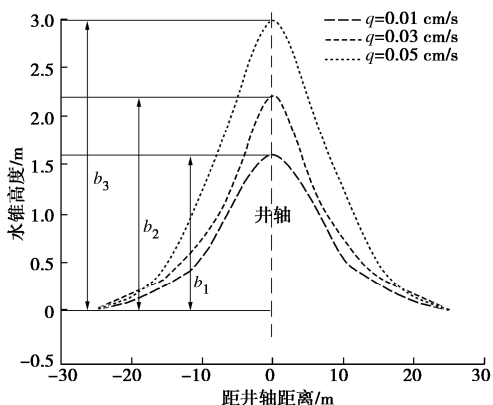
(a) $q=0.01$ cm/s 时水锥形态与高度变化(b) $t=1.5 \times 10^4$ s 时不同井口流速下的水锥形态与高度

图 5 气体排放过程中水锥形态及高度的变化曲线

Fig. 5 Distribution of water-coning shape and height during gas emission

图 6 为井口流速与水锥高度的关系曲线。由图 6 可看出, 水锥高度与排气速率成正相关, 且随着排气速率的增加, 水锥高度呈非线性加速增大。水锥高度直接影响水锥形态, 平缓的水锥形态对应较小的水锥高度; 尖锐的水锥形态则对应较高的水锥高度和较快的淹井过程。因此, 在气藏面积恒定条件下, 排气速率过大会使水锥效应显著放大, 边水驱动效果减弱加剧了底水锥进现象, 导致更多的气体难以有效排出。当井口流速较小时, 水锥效应减弱, 底水驱动波及范围增大, 排气井的排气效果得以改善。

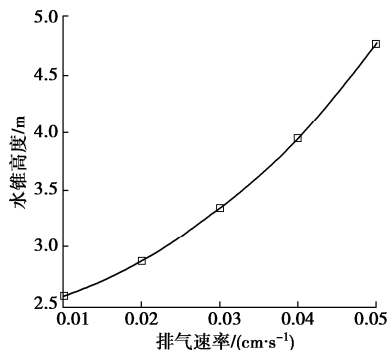


图 6 井口流速与水锥高度关系

Fig. 6 Relationship between wellhead velocity and water-coning height

3.3 水锥形态

图 7 (a) 为井口流速 $q=0.01$ cm/s 时得出的水锥曲线与同产量状况下水锥形态理论解的对比。从图 7 (a) 可看出, 数值模拟得出的气藏水锥曲线与理论公式得出的解析水锥曲线基本吻合, 说明前述的理论公式能够有效地描述杭州湾底水浅层气藏在排气过程中的水气界面运移规律。

图 7 (b) 为不同排气速率工况淹井时的水锥形态曲线。由图 7 (b) 可知, 不同排气速率工况下, 淹井时水锥形态、高度以及波及范围均有较大差异。影响水锥形态和高度的主要因素为排气速率, $q=0.01$ cm/s 时, 水锥形态最平缓, 水锥高度也最低; 随着排气速率的增加, 水锥形态更加尖锐, 高度也随之增加, 当 $q=0.05$ cm/s 时, 水锥形态最尖锐, 水锥高度最大。排气过程中水锥曲线越平缓, 说明排气波及的范围越大, 即水驱作用影响的面积更广, 排气效果越好; 水锥形态越尖锐, 水锥高度越大, 排气过程水驱的波及面积越小, 排气影响范围就越小, 越不利于井底周围气体的排出。

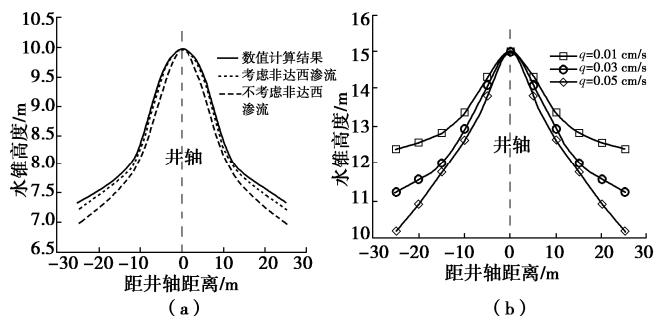


图 7 淹井时的水锥形态曲线

Fig. 7 Distribution of water-coning curve at flooding time

4 结 论

基于杭州湾地区典型超浅层气藏的赋存特征, 引入气井打开理论与弹性水驱气藏渗流规律, 探讨排气过程气藏内部的气水界面演化规律; 采用 FLAC^{2D} 两相流模拟分析了浅层气藏单井有控排气时气藏内部水锥形态与高度的演化过程, 得出以下结论:

(1) 水锥的形态与高度是影响排气效果的显著因素。浅层气藏进行有控排气时的水锥形态以井轴为中心呈钟形分布; 数值计算结果与理论模型吻合, 表明水锥理论模型适用于分析杭州湾地区典型超浅层气藏的排气效果。

(2) 影响水锥形态和高度的主要因素是井口流速。井口流速越大, 水锥形态越尖锐, 水锥高度越大, 锥进作用波及的气藏范围越小, 越不利于气体排放。井口流速越小, 水锥形态越平缓, 水锥高度越小, 锥进作用波及的气藏范围越大, 越有利于气体排放。

(3) 在工程建设前期布设超前排气井, 实施有控排气措施是合理且必要的。在工期允许的条件下, 尽可能以较小的井口流速进行排气, 避免“淹井”过早发生, 方能达到浅层气有效排放的目的。

参考文献:

- [1] 丁国生, 田信义. 中国浅层天然气资源及开发前景[J]. 石油与天然气地质, 1996, **17**(3): 226 - 231. (DING Guo-sheng, TIAN Xin-yi. China's shallow gas resources and exploration prospects[J]. Oil & Gas Geology, 1996, **17**(3): 226 - 231. (in Chinese))
- [2] 郭爱国, 孔令伟, 沈林冲, 等. 地铁建设中浅层气危害防治对策研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(3): 769 - 775. (GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, SHEN Lin-chong, et al. Study of disaster countermeasures of shallow gas in metro construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(3): 769 - 775. (in Chinese))
- [3] 王晓冬. 渗流力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006. (WANG Xiao-dong. Foundation of Seepage Mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. (GE Jia-li. The Modern Mechanics of Fluids Flow in Oil Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. (in Chinese))
- [5] 王 勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 气体释放速率对浅层气藏中气水运移的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, **44**(10): 1883 - 1889. (WANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo et al. Effects of gas release rate on gas-water migration in shallow gas reservoir[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, **44**(10): 1883 - 1889. (in Chinese))
- [6] 王会强, 李晓平, 杨 琪, 等. 底水气藏见水时间预测方法[J]. 新疆石油地质, 2007, **28**(1): 92 - 93. (WANG Hui-qiang, LI Xiao-ping, YANG Qi et al. A prediction of water breakthrough time in gas reservoirs with bottom water[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, **28**(1): 92 - 93. (in Chinese))
- [7] SOBOCINSKI D P, CORNELIUS A J. A correlation for predicting water coning time[J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, **17**(5): 594 - 600.
- [8] 徐耀东. 底水气藏气井见水时间预测方法[J]. 内蒙古石油化工, 2012, **38**(2): 149 - 151. (XU Yao-dong. Prediction of water coning time for gas well in bottom-water gas reservoir[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012, **38**(2): 149 - 151. (in Chinese))
- [9] 谢林峰, 李相方. 底水气藏水锥高度与形状计算新方法[J]. 天然气工业, 2004, **24**(4): 54 - 56, 8. (XIE Lin-feng, LI Xiang-fang. New calculating method of highness and shape of water cone for gas pool driven by bottom water[J]. Natural Gas Industry, 2004, **24**(4): 54 - 56, 8. (in Chinese))
- [10] 陈 军, 刘太雷. 底水气藏气井水锥动态模拟及见水时间预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, **38**(1): 84 - 88. (CHEN Jun, LIU Tai-lei. Modeling of the water coning dynamics and the prediction of the water breakthrough time for the gas well in bottom-water gas reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, **38**(1): 84 - 88. (in Chinese))
- [11] 朱瑶宏, 黄燕庆, 曾洪贤, 等. 杭州湾大桥南岸工程地质特征与浅层气分布[J]. 岩土力学, 2002, **23**(增刊 1): 215 - 219. (ZHU Yao-hong, HUANG Yan-qing, ZENG Hong-xian et al. Engineering geological features and shallow gas distribution in south bank of Hangzhou bay bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(S1): 215 - 219. (in Chinese))
- [12] 勇振明, 金柏范, 王旭东, 等. 杭州湾地区第四系超浅层气的开发及营销[J]. 天然气工业, 1997, **17**(3): 36 - 38. (YONG Zhen-ming, JIN Bai-fan, WANG Xu-dong et al. The development and management of quaternary extrashallow gas reservoirs in Hangzhou bay[J]. Natural Gas Industry, 1997, **17**(3): 36 - 38. (in Chinese))
- [13] WANG Y, KONG L W, WANG Y L, et al. Deformation analysis of shallow gas-bearing ground from controlled gas release in Hangzhou Bay of China[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(1): 04017122-1-13.
- [14] 孔令伟, 郭爱国, 陈守义, 等. 浅层天然气井喷对地层的损伤影响与桩基工程危害分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, **24**(4): 375 - 381. (KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Shou-yi et al. Influence of shallow natural gas blowout on stratum damage and hazard analysis of pile foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, **24**(4): 375 - 381. (in Chinese))
- [15] 杨筱璧, 李祖友, 鲁敏衡, 等. 高速非达西流气井产能方程的新形式[J]. 特种油气藏, 2008, **15**(5): 74 - 75, 83, 109. (YANG Xiao-bi, LI Zu-you, LU Min-heng et al. New deliverability equation for gas wells with high velocity Non-Darcy flow[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, **15**(5): 74 - 75, 83, 109. (in Chinese))
- [16] 郭爱国, 沈林冲, 张金荣, 等. 浅层气对杭州地铁施工的影响模式分析[J]. 铁道工程学报, 2010, **27**(9): 78 - 81. (GUO Ai-guo, SHEN Lin-chong, ZHANG Jin-rong, et al. Analysis of influence mode of shallow gas on construction of Hangzhou metro[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, **27**(9): 78 - 81. (in Chinese))

(编校: 明经平)