

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2010.10.007

# 气体释放速率对浅层气藏中气水运移的影响

王勇, 孔令伟, 郭爱国, 柏巍

(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)

**摘要:** 为了论证在防治浅层气地质工程灾害中预先采取的有控制性排气措施的合理性和必要性, 借助非饱和水气两相渗流原理, 研究浅层气藏在气体释放路径下的气水运移规律. 采用数值方法描述排气井不同释放速率对地下浅层气藏中气水运移的影响. 结果表明: 气体释放速率对气藏中的气水运移和分布形态有显著影响, 释放速率越快, “水锥”效应越明显; 实际工程中需结合详勘数据, 选取适宜的排气速率, 实施控制性排气措施, 避免过早发生淹井, 导致气井快速失效; 在气藏中的浅层气体释放完毕后, 砂土中会残留部分以气泡形式存在的气体. 施工过程中需引起重视.

**关键词:** 浅层气; 储气砂; 两相流; 气体释放速率; 气水运移

中图分类号: P 642.4; TU 42

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2010)10-1883-07

## Effects of gas release rate on gas-water migration in shallow gas reservoir

WANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, BAI Wei

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Laws for gas-water migration in shallow gas reservoirs were analyzed in path of gas release with the theory of two-phase seepage in unsaturated soil in order to verify the rationality and necessity of the controlling measure for pre-exhausting gas in the process of preventing shallow gas geological engineering disasters. The effects of different release rates of exhaust shafts on the gas-water migration in shallow gas reservoirs were described by using numerical methods. Results show that the gas release rate significantly affects the gas-water migration and distribution in shallow gas reservoirs. The faster the gas release rate, the more significant water-coning effects are. According to the detailed geological investigation data, the appropriate gas release rate should be selected to implement the controlling measure for gas release in practical engineering in order to avoid premature flooded shaft and rapid failure of the exhaust shaft. There are still some residual gas bubbles in sandy soil after the gas release, which should be regarded in process of construction.

**Key words:** shallow gas; gassy sand; two-phase flow; gas release rate; gas-water migration

浅层气在我国的江浙沿海、长江三角洲、柴达木盆地、松辽盆地、渤海湾盆地与南方滇黔粤桂地区的中小型盆地均有较普遍的分布<sup>[1]</sup>. 近年来, 随着工程建设领域的拓宽和地下空间的开发, 不少工程在含浅层气地质区域展开; 浅层气因埋深浅, 富含甲烷气

体, 具有较高的压力, 给这些地区的工程建设带来了一些灾害性的影响. 比较典型的如: 上海在大规模开发利用地下空间过程中, 曾因浅层气释放引起隧道、基坑与沉井施工发生恶性工程事故, 造成重大经济损失<sup>[2-3]</sup>; 现已建成通车的杭州湾跨海大桥曾在工程

收稿日期: 2010-08-10.

浙江大学学报(工学版)网址: [www.journals.zju.edu.cn/eng](http://www.journals.zju.edu.cn/eng)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40372128).

作者简介: 王勇(1977—), 男, 河南平顶山人, 助理研究员, 博士, 从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究.

E-mail: [wang831yong@163.com](mailto:wang831yong@163.com)

地质勘探过程中,出现强烈井喷致使勘探作业受阻,发生了船损人伤的事故<sup>[4]</sup>;正在营建的杭州地铁工程在前期勘察作业中,遭到含有气压较高的浅层气地层,多次发生地下气体喷发并燃烧的现象,给地铁工程建设和今后的安全运营构成了极大的威胁<sup>[5]</sup>.

经过不断的经验积累和实践,孔令伟等<sup>[6-7]</sup>提出:在工程施工前,对地下浅层气藏中的气体进行预先排放是防治浅层气灾害性影响的有效措施.一般在施工前3~6个月,距离构筑物一定区域内,打设数排气释放井,将浅层气体进行预先排放,减小后期对工程的影响.但是,这种预排气防灾措施不能以无控自由方式进行,必须采取控制措施,使地下浅层气体在适宜的排放速率下进行有控释放;否则,不仅难以取得理想的排气效果,而且可能造成较大的地基土层扰动.

本文以杭州地铁工程所遇的浅层气藏为研究对象,利用非饱和土水气两相渗流理论,探讨不同气体释放速率对浅层气藏中气水运移规律的影响,验证有控放气措施的合理性与必要性,为工程中采取有控方式的预排气措施提供理论依据.

## 1 储气砂层中的水气两相渗流原理

杭州地区普遍分布有第四纪超浅层气藏,埋深一般小于60 m,气藏原始剩余压力为0.12~0.46 MPa,90%以上的气体为甲烷,主要储集在河漫滩相为主的砂层、贝壳层或砂透镜体中<sup>[8]</sup>.这种储有浅层气的砂土称为储气砂.因其气相的特殊性,可以归为一类特殊的非饱和土,借助非饱和土理论能够揭示它的工程特性<sup>[9]</sup>.

### 1.1 储气砂土的土水特征曲线(SWCC)

在非饱和土中,因气水交界面存在收缩膜,导致土体中形成基质吸力 $s$ ,其值等于孔隙气压力 $u_a$ 与孔隙水压力 $u_w$ 之差,即 $s = u_a - u_w$ .土水特征曲线(soil-water characteristic curve)反映了土体含水率与基质吸力间的变化关系,笔者<sup>[10]</sup>在室内测定了杭州地铁典型区段浅层气藏中储气砂的土水特征曲线.为了计算方便,采用van Genuchten<sup>[11]</sup>提出的VG三参数模型来描述储气砂土的土水特征曲线:

$$\theta_e = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha s)^h} \right]^m \quad (1)$$

式中: $\theta_e$ 为有效体积含水率, $\theta_e = (\theta_w - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ,其中 $\theta_w$ 为体积含水率, $\theta_r$ 为残余体积含水率, $\theta_s$ 为饱和体积含水率, $\theta_e$ 数值上与有效饱和度 $S_e$ 相等, $S_e = (S_w - S_r) / (1 - S_r)$ ,其中, $S_w$ 为含水饱和度,

$S_r$ 为残余水饱和度; $s$ 为基质吸力; $\alpha$ 、 $h$ 、 $m$ 为试验参数.

VG模型拟合结果与试验实测对比如图1所示.其中, $\theta_r = 0.1$ , $\theta_s = 0.424$ , $\alpha = 0.168$ , $h = 3.5$ , $m = 0.46$ ,相关系数 $R^2 = 0.995$ .从图1可以看出,VG模型能够较好地描述储气砂土的土水特征曲线.

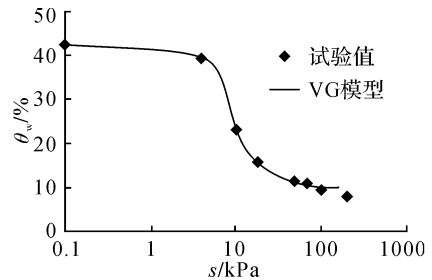


图1 VG模型拟合的储气砂土水特征曲线

Fig. 1 Fitting for SWCC of gassy sand with VG model

### 1.2 气藏中水气两相渗流规律

非饱和土中水作为湿润相流体,气体作为非湿润相流体,若不考虑水的汽化和气体的溶解,并假设土中孔隙由水和气完全充满,则孔隙中水气两相的饱和度应满足的关系如下:

$$S_a + S_w = 1. \quad (2)$$

式中: $S_a$ 为气相饱和度.

浅层气藏中的水气分布原始处于平衡状态,一旦工程排气井伸入储气层中,这种平衡态即被打破,浅层气体在压差作用下喷出地面,气藏压力不断减小,气藏周围的水分在静水压力作用下浸入气藏,逐步驱排孔隙中的气体,气藏体积随之不断缩小.一般描述土中气体的稳定流动采用Fick定律,王永胜等<sup>[12]</sup>证明在温度变化范围不大的情况下,达西定律与Fick定律是一致的,故采用达西定律来描述储集层砂土的渗气特性是合适的.当气体在多孔介质中流速不大时,气体渗透符合达西渗流规律;当流速大于一定值后,会偏离达西定律<sup>[13]</sup>.在实际工况下,气藏具有一定规模,除排气井口附近因内、外压差较大可能导致气体流速度过快,运动规律不符合达西定律外,较大面积气藏中的水气运移实际上是一个缓慢渐进的过程,可用达西流动定律来描述储气砂层中的水气运移规律.

在非饱和土中,因土中水和气只能在各自相所充填的孔隙空间中流动,饱和度变化对水和气相的渗透系数有很大的影响.在土水特征曲线VG模型基础上,采用van Genuchten在Mualem模型<sup>[14]</sup>基础上建议的非饱和土渗水系数关系式来确定储气砂土的水相渗透系数:

$$k_{rw} = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

式中:  $k_{rw}$  为相对渗水系数,  $k_{rw} = k_w / k_0$ , 其中,  $k_w$  为非饱和渗水系数,  $k_0$  为饱和渗水系数, 可以通过室内试验测定;  $m$  取自 VG 土水特征曲线模型。

采用 Parker 等<sup>[15]</sup> 建议的非饱和土渗气系数关系式来确定储气砂土中的气相渗透系数:

$$k_{ra} = (1 - S_e)^{1/2} (1 - S_e^{1/m})^{2m} \quad (4)$$

式中:  $k_{ra}$  为相对渗气系数,  $k_{ra} = k_a / k_d$ , 其中,  $k_a$  为非饱和渗气系数,  $k_d$  为干土渗气系数, 它与饱和渗水系数  $k_0$  之间满足如下关系<sup>[16]</sup>:

$$k_d = \frac{\rho_a \mu_w}{\rho_w \mu_a} \cdot k_0 \quad (5)$$

式中:  $\rho_a$ 、 $\rho_w$  分别为气相和水相的密度;  $\mu_a$ 、 $\mu_w$  分别为气相和水相的动力黏滞系数。

储气砂层中水气两相相对渗透曲线如图 2 所示。可以看出, 砂土中气水两相流体相对渗透能力的转换交点出现在  $S_e$  约为 0.72 附近, 相对渗透曲线将整个饱和度区间分成 3 个区域, 即: A 区、B 区和 C 区。A 区称为单向水流区, 分界点约在  $S_e = 0.88$  附近, 此时对应的气相饱和度称为残余气饱和度  $S_{a0}$ , 储气砂内部孔隙水占据几乎所有的主要通道, 自由气流通道被完全封闭, 失去宏观流动性, 被水相分散成气泡滞留在孔隙中。滞留的气泡会对水流产生很大的混合淤堵效应, 称之为“贾敏效应”, 从而影响水相的渗流<sup>[17]</sup>。C 区称为单向气流区, 当  $S_e < 0.4$  时,  $k_{rw}$  很小, 主要原因在于砂土属亲水介质, 气相优先占据大的流通孔道, 当含水饱和度较小时, 越来越多的水流连续通道被气流切断, 水相只能分布在砂土颗粒表面或孔隙的边角或狭窄部分, 逐步变成束缚水, 此时对应的含水饱和度称为束水饱和度  $S_{w0}$ 。B 区  $S_e$  处于 0.4 至 0.88 之间, 该区域称为水气两相同流区, 随着水相饱和度的增加,  $k_{rw}$  逐渐增加, 而  $k_{ra}$  逐渐减小, 但初期气相的渗透性仍大于水相的透

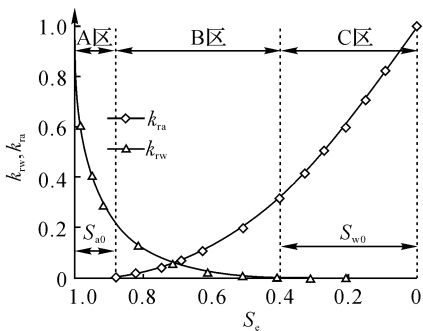


图 2 模型预测的储气砂相对渗透曲线

Fig. 2 Predicted relative permeability curve of gassy sand

透性, 主要原因是气相占据大孔道中央, 流动阻力小, 水相占据小孔道和大孔道的四壁和角域, 遇到的阻力大, 流经的路径较长所致; 当  $S_e > 0.72$  后, 渗水性快速增加, 水在孔隙中形成连通孔道, 且越来越多, 占据主要流动通道, 使渗水性迅速增加, 同时气流通道逐步被水流替代, 气相渗透性逐渐变差, 当气流通道减少到一定程度后, 不仅原来的气流通道被水占据, 而且自由气相失去了连续性变成气泡被封闭于砂土孔隙之中, 这就是浅层气藏中气水两相的相对渗流规律。

### 1.3 储气砂土中水气耦合运移控制方程

为了描述在整个饱和度区域内的水气运移过程, 假定水相和气相均保持连续。定义土中气和水的体积系数分别为  $B_a = \rho_{a0} / \rho_a$ ,  $B_w = \rho_{w0} / \rho_w$ , 其中,  $\rho_{a0}$ 、 $\rho_{w0}$  为初始状态下气和水的密度。在等温条件下, 认为水不可压缩,  $B_w = 1$ ;  $B_a$  可由理想气体状态方程确定。描述储气砂土中气水两相渗流的连续性方程为

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \frac{k_d k_{ra}}{B_a \rho_a g} (u_a - \rho_a g - D) \right\} + q_a = \frac{\partial (n \rho_a S_a)}{\partial t}, \\ & \left\{ \frac{k_0 k_{rw}}{\rho_w g} (u_w - \rho_w g - D) \right\} + q_w = \frac{\partial (n \rho_w S_w)}{\partial t}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:  $u_a$ 、 $u_w$ 、 $S_a$ 、 $S_w$  为未知数,  $n$  为孔隙率,  $D$  为标高,  $q_a$  和  $q_w$  分别为气和水的汇源强度项。储气砂土的土水特征曲线方程联立式(2)、(6)共同构成了描述浅层气藏中气水两相运移数学模型的控制方程。

## 2 气体释放井的数值模拟

假设土层各处渗流均符合达西定律, 利用水气两相流理论, 借助连续介质快速拉格朗日分析 (FLAC) 二维有限差分程序提供的两相流模块, 引入气体状态方程和体积系数公式, 实现可压缩气体流动的描述, 对杭州地铁典型含气区段工程打设的排气井进行模拟, 研究不同气体释放速率对气藏中气水运移的影响。

### 2.1 排气井模型及计算参数选取

根据杭州地铁工程的详勘报告<sup>[18]</sup> 显示, 该地区浅层气藏顶板埋深一般为 25~33 m, 气体主要储集在粉细砂层或砂透镜体中, 气层厚度不一, 最厚可达 8~10 m。储集层上部普遍存在较厚的富含有机质的淤泥质黏土层, 系浅层气的主要气源层和封盖层; 储集层下部一般是圆砾层。根据这一赋存特点, 可将模型土层大致分为 4 层, 由上至下依次为: 砂质粉土层, 层厚为 13.5 m; 淤泥质粉质黏土层, 层厚为 13.5 m; 粉细砂层 (储气层), 层厚为 10 m; 圆砾层, 层厚为 5

m. 为了便于计算分析, 将各土层均简化为水平分布, 且各向同性, 不考虑气体在水中的溶解和逸出, 地下水位线位于地表处, 排气井位于模型中部, 井宽 0.5 m, 井深 27 m, 分析模型如图 3 所示.

考虑到杭州地区地下水位较高且水量丰富, 将模型底部边界设为常水压边界, 左、右边界设为常水头边界, 井壁两侧  $a \sim a'$ 、 $b \sim b'$  定为非渗透边界;  $a' \sim b'$  设定为常流量边界, 流速为  $q_0$ ; 其余内部边界均设为渗透边界.

含气土层中储气砂土  $\rho_{w0} = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$ ,  $\mu_w = 1.01\ \text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\rho_{a0} = 2.34\ \text{kg/m}^3$ ,  $\mu_a = 0.010\ 5\ \text{mPa} \cdot \text{s}$ . 室内测定  $k_w = 6.41 \times 10^{-4}\ \text{cm/s}$ , 假设为等温条件, 忽略流体黏度的变化, 由式(5)可以得出  $k_d = 1.44 \times 10^{-4}\ \text{cm/s}$ . 储气砂层初始孔隙率  $n_0 = 42.3\%$ , 初始气藏压力为 350 kPa, 初始孔隙水压力按静水压力分布; 气藏中砂土的初始含水率按照土水特征曲线方程计算,  $S_r = 0.2$ , 其余土层初始饱和度均取 1. 土层基本参数如表 1 所示. 表中,  $k_v$ 、 $k_h$  分别为竖向和水平向饱和渗水系数.

FLAC 两相流分析中将孔隙中流体分为湿润相

和非湿润相两相流体, 假设完全充满整个孔隙空间; 流体渗流符合达西定律, 两相间渗流采用相对渗透曲线经验模型来描述; 土水特征曲线采用 VG 模型. 计算中, 水为湿润相流体, 气体为非湿润相流体, 为了简化分析, 假设水气不相混溶, 气水渗流采用储气砂相对渗透曲线, 土水特征曲线采用储气砂土 VG 模型拟合方程来描述, 两相流计算输入参数如表 2 所示.

表 2 FLAC 两相流计算输入参数

Tab. 2 Calculating parameters of two-phase flow in FLAC

输入参数	参数取值	参数说明
fmodulus	2 GPa	湿润相流体模量, 湿润相为水.
f2modulus	0.35 MPa	非湿润相流体模量, 非湿润相为气体.
porosity	0.423	土层初始孔隙率
wpermeability	0.295	湿润相渗透系数, 非湿润相渗透系数根据式(5)计算得出.
udcoe	0	不排水系数, 力学耦合时取 1, 不耦合时取 0
visrat	96.2	黏度比, 为 $\mu_w/\mu_a$
vga	0.46	土水特征曲线 VG 模型参数
vgpcw	0.5	湿润相流体渗透系数模型参数
vgpcnw	0.5	非湿润相流体渗透系数模型参数
vgp0	5.95 kPa	土水特征曲线 VG 模型参数
rsat	0.1	残余含水率与饱和含水率比

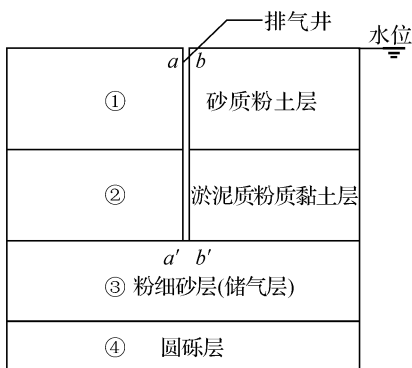


图 3 排气井数值分析模型

Fig. 3 Model of exhaust shaft for numerical analysis

表 1 土层基本参数

Tab. 1 Basic parameters of soil

土层编号	土层	基本参数
①	砂质粉土	$k_v = k_h = 4.27 \times 10^{-4}\ \text{cm/s}$ , $S_w = 1$
②	淤泥质粉质黏土	$k_v = k_h = 7.0 \times 10^{-7}\ \text{cm/s}$ , $S_w = 1$
	黏土	$k_v = k_h = 6.41 \times 10^{-4}\ \text{cm/s}$ , $S_r = 0.1$
③	粉细砂 (储气层)	$S_{w0}$ 由土水特征曲线求出
④	圆砾	$k_v = k_h = 2.4 \times 10^{-2}\ \text{cm/s}$ , $S_w = 1$

### 2.2 气体释放速率对气藏中气水运移的影响

排气井气体释放速率  $q_0$  分别取 0.005、0.01 和 0.05 m/s 3 种不同工况进行计算, 得出不同时刻各排放速率下气藏饱和度的变化如图 4~6 所示. 图中, 饱和度随颜色由浅入深逐渐增大.

从图 4~6 可以看出, 排气井在不同的排气速率下, 气藏周围的水体在压差驱动下逐步浸入气藏, 同时驱动气相流动, 使原始气藏逐渐缩小, 直至最终完全排出, 说明描述储气砂层中的气水两相耦合渗流模型能够有效模拟浅层气藏在工程气体释放路径下的变化过程. 释放速率对气藏中的气水运移与分布形态有显著影响. 当排气井出口流速较小时(如  $q_0 = 0.005\ \text{m/s}$  的工况), 气藏在底水和边水的驱动下缓慢缩小, 气藏中气体在水平向和竖向运移相对均衡, 气层底水界面呈现微弱的上凸趋势, 但对整个排放过程中的气藏形态影响较小. 当排气速率较快时(如  $q_0 = 0.01\ \text{m/s}$  的工况), 因水平向气体运移路径较长, 气藏在水平向的缩小较竖向迟缓, 气藏底部水气

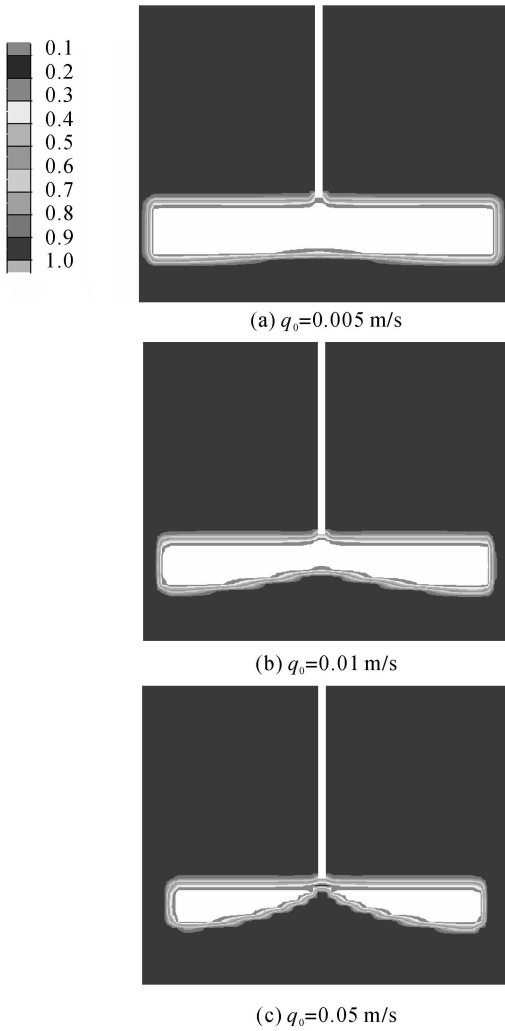


图 4  $t = 1.25 \times 10^4$  s 时各释放速率下气藏饱和度分布  
 Fig. 4 Distribution of saturation in gas reservoir under three kinds of gas release rates at  $1.25 \times 10^4$  s

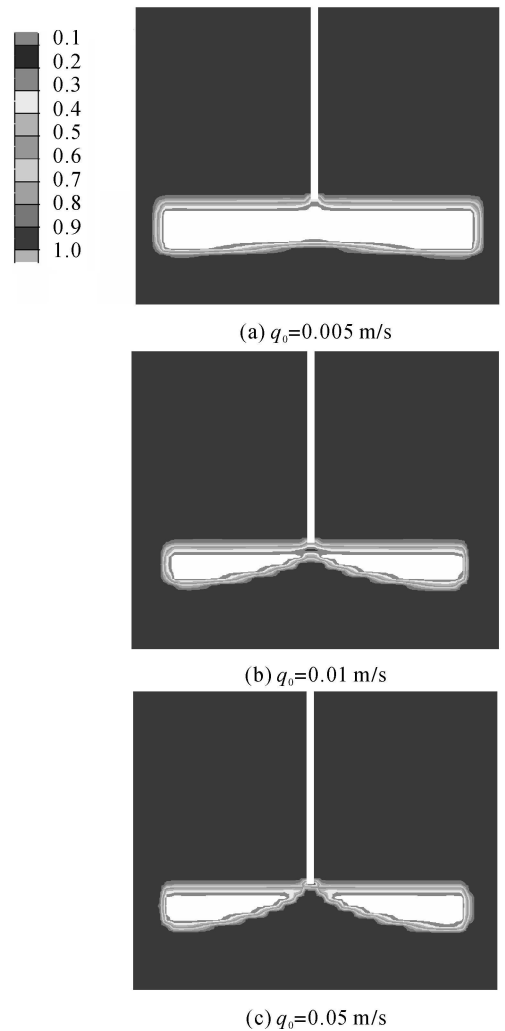


图 5  $t = 2.63 \times 10^4$  s 时各释放速率下气藏饱和度分布  
 Fig. 5 Distribution of saturation in gas reservoir under three kinds of gas release rates at  $2.63 \times 10^4$  s

界面出现明显上凸, 石油领域称为“底水锥进”现象<sup>[19]</sup>. 伴随着气藏的进一步减小, “水锥”最终冲破气藏, 将气藏分割为 2 部分, 底水进入排气井, 井口将被水淹没. 在实际条件下因储层砂体中存在“贾敏效应”, 导致气藏中的剩余气体很难排出. 当排气速率更快时 (如  $q_0 = 0.05$  m/s 的工况), “底水锥进”现象更加严重, 气体释放初期“水锥”快速“刺穿”气藏, 导致排气井过早发生淹井, 气井很快排气失效. 若要排出剩余气体, 则必须进行负压抽排, 但这会导致很大的土层扰动和土体变形.

由排气井的数值模拟过程可以看出, 原始气藏厚度、水平向及竖向渗透系数都是影响气体排放过程中气水运移的重要因素. 原始气藏越薄, 储气层竖向渗透系数越大, “水锥”影响越严重, 工程排气井的排放速率应越缓; 在气井底部打穿盖层后, 伸入储气层层顶不宜过深, 并与气层底部保持合理距离, 避免

因气体竖向运距过短而快速出现“水锥”、导致过早淹井的问题. 浅层气地质条件下的工程, 应结合详细勘察资料, 施工前实施控制性放气措施, 严禁气体失控自然释放, 避免发生过早淹井、排气井快速失效的工程事故, 减少不必要的经济损失.

另外, 由于毛细滞后效应和毛细孔隙通道的混合淤塞效应存在, 实际工程中被水浸入的气藏区域不能达到数值描述的饱和态, 其中会残余部分以气泡形式存在的气体不能完全排出, 从而形成“贾敏效应”. 储气砂体属亲水介质, 且孔隙通道大小不一, 水分沿着相对狭小的孔道会更快浸入气藏, 形成“指进”现象<sup>[19]</sup>, 气相被水分割为大小不等的气泡分布于孔道中产生液阻效应, 需要更大的压差才能驱动这些气泡运移. 因此, 在实际工程中, 这些分散的气泡是很难排出的, 多数将残存于土体当中. 因气体主要成分为甲烷, 且水中带有一定的溶解性, 尽管预排

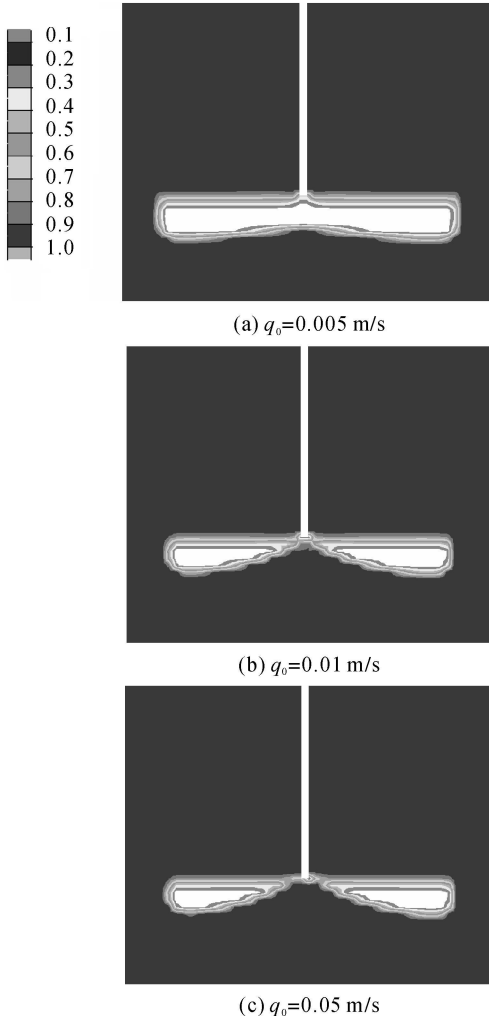


图6  $t = 3.88 \times 10^4$  s时各释放速率下气藏饱和度分布  
Fig. 6 Distribution of saturation in gas reservoir under three kinds of gas release rates at  $3.88 \times 10^4$  s

气井中气体释放完毕后,在实际施工过程中仍需采取措施对土层中的残留和溶解气体进行防治。

### 3 结语

(1) 气体释放速率对地下浅层气藏中的气水运移和分布形态影响显著,工程在施工前必须采取有控制性的预排气措施。

(2) 气藏厚度、水平向及竖向渗透系数是影响气体排放过程中气藏内部气水运移的重要因素。工程预排气井底应打穿盖层,但伸入气藏量不宜过大。考虑“水锥”的影响,选取适宜的释放速率进行排气,以避免发生过早淹井、气井快速失效的工程事故。

(3) 在实际工程中,由于水气运移过程中存在“指进”和“贾敏效应”,导致气体释放完毕后,原始气藏区域的砂土中会残留部分以气泡形式存在的浅层气体,在施工过程中需引起高度重视。

### 参考文献(References):

- [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 and Gas Geology**, 1996, 17(3): 226-231.
- [2] 黄金明,顾杨,毛海明. 混凝土顶管穿越浅层气层的施工技术[J]. 建筑施工, 2008, 30(3): 222-225.  
HUANG Jin-ming, GU Yang, MAO Hai-ming. Study on construction technology for jacking of concrete pipe through shallow gas stratum [J]. **Building Construction**, 2008, 30(3): 222-225.
- [3] 唐益群,叶为民. 上海地铁盾构施工隧道中几个问题研究[J]. 地下空间, 1993, 13(3): 171-177.  
TANG Yi-qun, YE Wei-min. Study on several problems of Shanghai subway construction tunnel [J]. **Underground Space**, 1993, 13(3): 171-177.
- [4] 冯铭章,季军. 上海地区浅层气地质灾害评估[J]. 上海地质, 2006(4): 44-47.  
FENG Ming-zhang, JI Jun. The geological hazard evaluation by shallow layered natural gas in Shanghai region [J]. **Shanghai Geology**, 2006(4): 44-47.
- [5] 王勇,孔令伟,郭爱国,等. 杭州地铁储气砂土的渗气性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 815-819.  
WANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental research on gas permeability of shallow gassy sand in Hangzhou metro project [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 815-819.
- [6] 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.
- [7] 伍军,李上寿,孟庆斌. 浅层气富集区海上长大钻孔桩快速施工技术[J]. 铁道建设, 2006(4): 13-21.  
WU Jun, LI Shang-shou, MENG Qing-bin. Fast construction technology of the marine long-large bored pile in shallow gas enrichment area [J]. **Railway Construction**, 2006(4): 13-21.
- [8] 蒋维三,叶舟,郑华平,等. 杭州湾地区第四系浅层天然气的特征及勘探方法[J]. 天然气工业, 1997, 17(3): 20-23.  
JIANG Wei-san, YE Zhou, ZHENG Hua-ping, et al. The characteristic and exploration methods of quaternary shallow gas in Hangzhou Bay area [J]. **Natural Gas Industry**, 1997, 17(3): 20-23.
- [9] KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Jian-bin, et al. On strength property of gassy fine sand and model tests of pile foundation [J]. // **Proceedings of the 16th International Con-**

## ference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Osaka Japan: Millpress 2005; 2009-2012.

- [ 10] 王勇, 田湖南, 孔令伟, 等. 杭州地铁储气砂土的抗剪强度特性试验研究与预测分析[ J]. 岩土力学, 2008, 28(增刊): 465-469.  
WANG Yong, TIAN Hu-nan, KONG Ling-wei, et al. Experimental study and predictive analysis of shear strength characteristics of gassy sand in Hangzhou metro project [ J]. **Rock and Soil Mechanics** 2008, 28(Suppl.): 465-469.
- [ 11] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [ J]. **Soil Science Society of America** 1980(44): 892-898.
- [ 12] 王永胜, 谢定义, 郭庆国. 非饱和土中气体的运动特性与渗气系数的测定[ J]. 西北水电, 1993(1): 48-51.  
WANG Yong-sheng, XIE Ding-yi, GUO Qing-guo. Laws of gas motion in unsaturated soil and determination of air permeability [ J]. **Northwest Water Power**, 1993(1): 48-51.
- [ 13] 冯光乐. 油气渗流力学基础[ M]. 北京: 科学出版社, 2007: 53-59.
- [ 14] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[ J]. **Water Resource Research**, 1976, 12(3): 513-522.
- [ 15] PARKER J C, LENHARD J C, KUPPUSAMY T. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media [ J]. **Water Resource Research** 1987, 23(4): 618-624.
- [ 16] 张丙印, 朱京义, 王昆泰. 非饱和土水气两相渗流有限元数值模型[ J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 701-705.  
ZHANG Bing-yin, ZHU Jing-yi, WANG Kun-tai. Finite element modeling of two-phase seepage in unsaturated soil [ J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering** 2002, 24(6): 701-705.
- [ 17] 杨胜来, 魏俊之. 油层物理学[ M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 209-217.
- [ 18] 杭州地铁 1 号线地下有害气体勘察报告[ R]. 杭州: 浙江省地矿院, 2008.
- [ 19] 史密斯 C R. 实用油藏工程[ M]. 岳清山, 柏松章, 刘学峰, 等. 译. 北京: 石油工业出版社, 1995: 334-346.

(上接第 1882 页)

## 参考文献(References):

- [ 1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[ M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 3-8.
- [ 2] 钟善桐. 钢管混凝土结构[ M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 6-56.
- [ 3] 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展[ J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 16-26.  
CAI Shao-huai. Recent development of steel tube confined concrete structures in China [ J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(4): 16-26.
- [ 4] JEROME F. Composite steel and concrete structural systems for seismic engineering [ J]. **Journal of Construction Steel Research** 2002, 28(5): 65-72.
- [ 5] 黄汉炎. 钢管混凝土柱 RC 梁板节点拟静力三向加载试验研究[ J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6): 3-13.  
HUANG Han-yan. Study on quasi-static 3D loading test for concrete-filled steel tubular column and RC beam-slab joints [ J]. **Journal of Building Structures** 2001, 22(6): 3-13.
- [ 6] 方小丹, 李少云, 陈爱军. 新型钢管混凝土柱节点的试验研究[ J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 2-15.  
FANG Xiao-dan, LI Shao-yun, CHEN Ai-jun. Experimental research on concrete filled steel tubular column joints [ J]. **Journal of Building Structures** 1999, 20(5): 2-15.
- [ 7] 褚云朋, 雷劲松. 新型方钢管混凝土梁柱节点力学性能分析[ J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(4): 36-39.  
CHU Yun-peng, LEI Jin-song. Mechanical property analysis on steel plate joint of concrete-filled square steel tubular column with RC beam [ J]. **Journal of Building Science Research of Sichuan**, 2009, 35(4): 36-39.
- [ 8] 王清湘, 孙健. 新型穿心钢筋暗牛腿钢管混凝土梁柱节点动力性能研究[ J]. 钢结构, 2009, 24(1): 14-20.  
WANG Qing-xiang, SUN Jian. Mechanics behavior of a new type of concrete-filled circular steel tubular column joint with piercing reinforcing bar hidden bracket [ J]. **Journal of Steel Construction** 2009, 24(1): 14-20.
- [ 9] TOSHIKI F, AKIYISHI M, NISHIYAMA K. Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns [ J]. **Journal of Structure Engineering** 2004, 34(8): 600-601.
- [ 10] RICLES J M, PENG S W, LU L W. Seismic behavior of composite concrete-filled steel tubular column-wide flange beam moment connections [ J]. **Journal of Structure Engineering** 2004, 38(8): 23-232.
- [ 11] 韩林海. 钢管混凝土结构的理论与实践[ M]. 北京: 科学出版社, 2004: 24-69.
- [ 12] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[ M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 20-32.
- [ 13] 翟渊军, 李晓芬, 马文亮, 等. SOLID65 单元在钢筋混凝土结构非线性分析中的应用[ J]. 电网与水力发电进展, 2007, 23(8): 97-101.  
ZHAI Yuan-jun, LI Xiao-fen, MA Wen-liang, et al. Application of SOLID65 element in nonlinear analysis on reinforced concrete structure [ J]. **Journal of Advances of Power System and Hydroelectric** 2007, 23(8): 97-101.
- [ 14] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 Ansys 上的实践[ M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000: 221-230.