

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222656

基于渗流—管流耦合模型的陇东地区水平井取水数值模拟及影响因素分析

方亚宏, 曾发荣, 刘 斌, 潘俊义, 骆建文

(长庆工程设计有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:为缓解油气资源开发中的缺水问题,常利用水平井开采地下水资源,但目前极少分析水平井取水影响因素问题。因此,利用数值模型模拟水平井开采方式,探究水平井布设方向、埋藏深度、管长及井管渗透性能对取水效果的影响。结果表明,在考虑取水效率和施工难度的情况下,最优水平井布设方向应沿来水方向,位置尽可能布设于洛河组上层,管长和井管渗透性能分别推荐为800~1000 m和0.15,对应开采量为1 368~2 389 m³/d。研究结果对缓解陇东地区油气资源开发中水资源短缺问题和制定合理的水资源开发策略具有重要的指导意义。

关键词:水资源短缺; 油气资源开发; 水平井; 渗流—管流耦合; 取水效率

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0119-05

1 概况

陇东地区属于典型的盆地型黄土高原,丘陵沟壑、高原沟壑和土石山地是其主要的地貌类型^[1]。陇东地区地层由前长城系组成,绝大多数年代地层埋藏于第四系风积黄土层之下,白垩系砂岩与新近系泥岩在河谷谷底两侧或河谷与沟谷底部呈树枝状出露^[2]。研究区内白垩系地层厚度大、产状较为平缓,岩性以砂质泥岩为主。研究区内主要河流有马莲河、洪河,均为常年性河流且属于黄河水系一级支流泾河流域^[3]。其地下水系统大体可分为黄土潜水、河谷潜水和白垩系承压水三个大的地下水系统,主要含水介质分别为离石黄土、砂砾卵石层和砂岩。洛河组含水岩组主要接受大气降水入渗补给和上层地下水越流补给,区内排泄方式有向地表水排泄和人工开采。区内地下水径流方式有水平径流和垂向径流两种,其中垂向径流是主要的径流方式。在陇东地区页岩油开采过程中,随着体积压裂技术的大规模推广,施工作业用水量大幅增加,水资源短缺问题日益突出^[4]。而该地区气候干旱,水资源总量少,地下水为主要的水资源来源。在实际开采过程中,相比于管井,水平井出水量大,更适用

于油气资源开采过程中的水资源开采^[5-6]。鉴于此,本文利用数值模型对水平井开采过程进行模拟,得到水平井布设方向、埋藏深度、管长等参数对取水效果的影响。并在综合考虑抽水效率及开采难度的条件下,优选出最优水平井开采参数,旨在为水平井取水效率的提高及油气资源开采过程中水资源短缺问题提供技术保障和支撑。

2 研究方法

水平井一般由竖井和水平巷两部分组成,是以水平或近似水平的方式将过滤器安装在含水层中。在抽水试验的基础上,考虑水平井取水时井管内多种流态并存,以“渗流—管流耦合模型”为前提,结合辐射孔—含水层间水量交换的计算方法,建立相应的水平井取水三维渗流数值模型。利用水位常年观测资料对该模型进行识别和检验,验证水平井取水模型的可靠性。

2.1 水文地质模型及数学模型

研究区西部以马莲河为边界,故将马莲河概化成河流边界。研究区其余边界均以分水岭为边界,统一概化为零流量边界;研究区顶面第四系黄土层可概化成潜水面边界;底面洛河组地层可概化为隔水底板。水平井抽水稳定时,竖井处水位

收稿日期: 2022-12-23, 修回日期: 2023-02-06

基金项目: 长庆油田黄土边坡治理设计关键技术研究(2023DJ0701)

作者简介: 方亚宏(1997-),男,硕士、助理工程师,研究方向为水文地质, E-mail: 1270365257@qq.com

保持不变,故可将其概化为定水头边界。水平井
 布设位置见图 1。

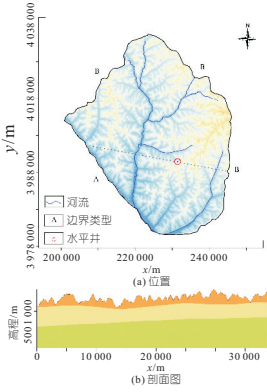


图 1 水平井布设位置

Fig. 1 Horizontal well layout

利用水平井进行取水时,地下水三维流特征
 显著,可将水流概化为三维流,且服从达西定律,
 数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0$$

$$(x, y, z) \in D \quad (1)$$

式中, H 为地下水标高, m ; K 为渗透系数, m/d ;
 x, y, z 为坐标变量; D 为计算区范围。

其中零流量边界为:

$$\frac{\partial H}{\partial n_1} \Big|_B = 0 \quad (2)$$

式中, n_1 为二类边界外法线方向; B 为零流量边界。

排水沟边界为:

$$Q_A = C_A (H - H_A) \quad (3)$$

式中, Q_A 为水平管与含水层之间的水量交换量;
 H_A 为排水沟内水位; A 为排水沟边界; C 为渗流
 管透水性能, m^2/d 。

井管与含水层之间的水量交换量 Q_e 为:

$$Q_e = C(H_p - H) \quad (4)$$

式中, H_p 为辐射管内水位。

渗流管内出流量 Q_p 又分为层流、光滑紊流、
 紊流,计算公式为:

$$Q_p = \begin{cases} \frac{\pi d^2}{4} \frac{d^2 g}{32\nu} \frac{\Delta H}{l} & \text{层流} \\ \frac{\pi d^2}{4} \frac{2gd}{0.316} \left(\frac{d}{\nu}\right)^{0.25} \left(\frac{1}{\nu}\right)^{1.75} \frac{\Delta H}{l} & \text{光滑紊流} \\ \frac{\pi d^2}{4} 8gd \left(\log_{10} 3.71 \frac{d}{e}\right)^2 \frac{1}{\nu} \frac{\Delta H}{l} & \text{紊流} \end{cases} \quad (5)$$

式中, ΔH 为水头损失, m ; ν 为水的运动粘滞系
 数, m^2/s ; d 为辐射管的直径, m ; g 为水的重力加

速度, m/s^2 ; l 为水平管道长度。

$t \geq 0$ 时潜水面边界为:

$$H \Big|_{A_6} = z$$

$$-(K + W) \frac{\partial H}{\partial n_p} + W \Big|_{A_6} = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

式中, n_p 为潜水面内法线方向; A_6 为潜水面边
 界; W 为降雨入渗补给强度, m^2/d ; μ 为给水度; t
 为时间。

竖井边界为:

$$H(x, y, z) = H_s \quad (7)$$

式中, H_s 为取水建筑物内抽水动水位, m 。

2.2 模型验证

在对边界条件进行概化的基础上,采用离散
 化网格对模型区进行精细剖分。为刻画水平井结
 构,先在 xOy 面上对外部进行 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 等
 间距网格化剖分,再对水平井所在区域进行 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$
 细剖。在 xOz 、 yOz 面上,考虑到采用常规的
 以实际含水层地层作为模型层剖分时不方便刻画
 辐射管,为了更好地刻画辐射孔,垂直方向采用水
 平切片的方式剖分,将模型剖分成 8 层(其中第四
 系黄土层对应模型第 1 层,环河组地层对应模型
 第 2、3 层,洛河组地层对应模型的 4~8 层)。
 河流布设于模型第一层,而将水平井布设于洛河
 组含水层。

在剖分网格的基础上,采用“渗流—管流耦合
 模型”建立计算域水平井取水数值模型。根据当
 地水文地质资料,将模型降雨入渗补给系数设定
 为 0.07,第四系黄土水平渗透系数设定为 0.02
 m/d ,垂向渗透系数设定为 0.2 m/d ,得到的潜
 水面初始流场见图 2。之后进行模型的拟合验证,
 利用 2021 年 1~12 月的长观孔资料对模型进行
 验证,观测井位置见图 2。

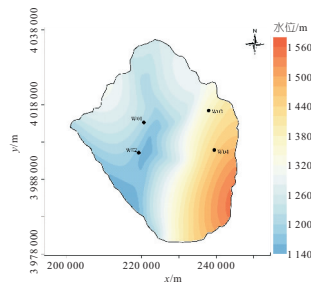


图 2 初始流场图

Fig. 2 Initial flow field diagram

通过模拟水位与实测值对比(图 3),可以看
 出拟合效果较好,满足模型精度要求,故所建模型
 合理可靠。拟合后的参数分区见图 4,具体参数
 分区见表 1。

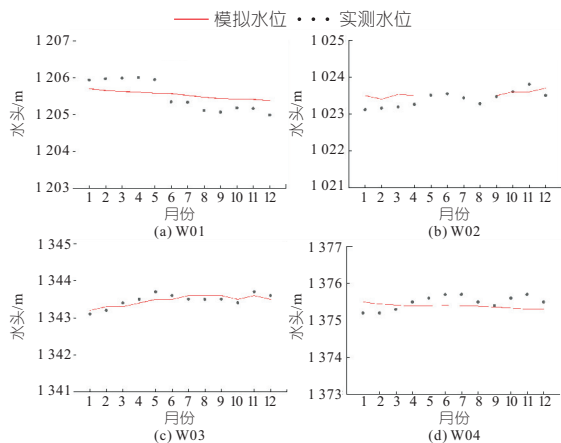


图 3 模拟水位与实际观测水位拟合图

Fig. 3 Fitting diagram of simulated water level and actual observed water level

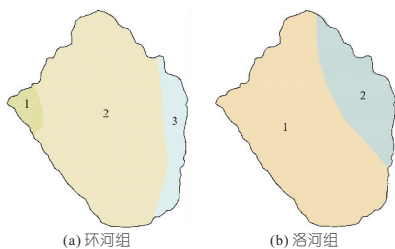


图 4 模型参数分区图

Fig. 4 Model parameter partitioning diagram

表 1 识别后的水文地质参数

Tab. 1 Hydrogeological parameters after identification

地层	分区	渗透系数 K_h /($m \cdot d^{-1}$)	渗透系数 K_v /($m \cdot d^{-1}$)	给水度	弹性释水率 / m^{-1}
环河组	1	0.6	0.06	0.15	1×10^{-5}
	2	0.3	0.03	0.15	1×10^{-5}
	3	0.4	0.04	0.15	1×10^{-5}
洛河组	1	1.5	0.15	0.25	1×10^{-5}
	2	1.2	0.12	0.15	1×10^{-5}

3 水平井不同结构参数下的开采方案设计

3.1 不同方向水平井结构优化设计

建立水平井取水模型,水平管直径为 0.124 m,弯曲度为 1,粗糙度为 0.000 1,雷诺数为 2 300,模型的边界条件、参数及水平井管流参数保持不变,在保证各方向水平井长度均为 1 200 m、竖井降深为 20 m 不变的前提条件下,分别设计 8 种不同方向的水平井,各水平井之间夹角为 45° ,各方案布设见图 5(方案一~八)。为了进一步确定最优布设方向,对布设方向进行加密,加密后各水平井夹角设置为 10° ,共设 8 种方案的加密计算,布设方向见图 5(方案 1~8)。这样在研究区内共设计水平井不同方向条件的 16 种地下水开采方案,各方案布设方向见图 5。

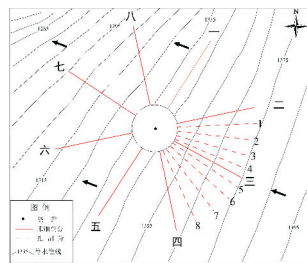


图 5 水平井布设方向示意图

Fig. 5 Horizontal well layout direction

3.2 不同埋深水平井结构优化设计

在已确定水平井最优布设方位的基础上,设置竖井抽水降深为 20 m、管长为 1 200 m,分别设计 5 种不同水平井埋深方案,将水平井依次布设于模型的第 4~8 层。共设计了 5 种不同埋深条件的开采方案,分析水平井不同埋深对水平井出水量的影响。

3.3 不同长度水平井结构优化设计

在已选最优布设方向和布设埋深的基础上,通过改变水平井长度,计算得到不同长度水平井的出水量。设计水平井长度范围为 200~1 200 m,设计不同长度的水平井方案共计 10 种,并在所有方案的基础上设计 20~100 m 降深方案,相互进行组合,共 90 种不同水平井长度条件的开采方案,以此分析水平井不同长度对水平井出水量的影响。

3.4 不同透水性能的井管优化设计

在已选最优布设方向、布设埋深及不同管长的基础上,通过改变井管透水性能,计算得到不同透水性能条件下的出水量。设计一系列不同的井管透水性能值(0.05~0.15),并与不同水平管长度进行组合,共计 50 组方案,分析井管不同透水性能对水平井出水量的影响。

4 结果与分析

4.1 水平井不同布设方向对出水量的影响

针对不同方向的水平井开采方案的模拟结果见图 6,对比不同方案的出水量,水平井布设方向对出水量影响较为明显。

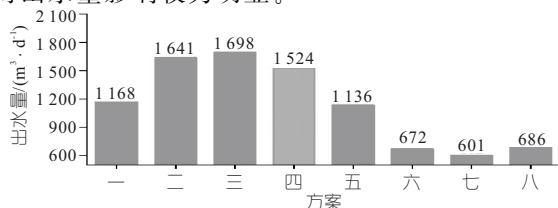


图 6 水平井不同方案布设出水量图

Fig. 6 Water production diagram of horizontal well in different directions

由图 6 可看出,随着水平井布设方向的变化,水平井出水量呈现出规律性的变化,且当水平井布设于水流上游时其出水量普遍大于布设于下游位置,可见布设位置对出水量影响较大。为了进一步确定水平井最优布设方向,对布设方向进行加密,加密后出水量图见图 7。由图 7 可知,方案 3 所在方向近似平行于流线方向且指向流场上游,出水量达到最大值,即 1 717 m³/d。如方案 3 所示当水平井沿水流方向布设时,此时水平管管内外水头差最大,根据水量交换量计算原理对应的出水量也最大。因此,为了提高水平井的开采效率,宜将水平井沿来水方向布设,此时水平管两端点处水头差最大,取水效果也最好。

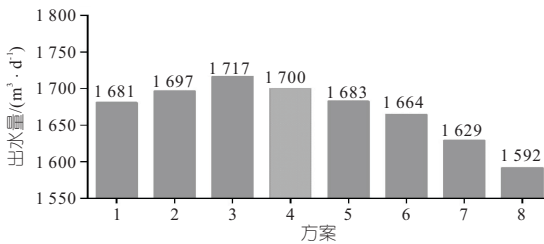


图 7 水平井加密剖分后不同方案布设出水量图

Fig. 7 Water production map of horizontal wells

distributed in different directions after encrypted subdivision

4.2 水平井不同埋深条件对出水量的影响

不同埋深条件下的水平井开采方案的模拟结果为层位 4~8 的出水量分别为 1 717、1 683、1 678、1 626、1 492 m³/d。对比不同方案的出水量,水平井埋藏深度对出水量影响较大。

由模拟结果可知,当水平井布设于洛河组最上层时,水平井出水量最大,而布设位置越靠近模型隔水底板,其水平井出水量越小,相比布设于洛河组最上层时出水量减少了 13.1%,可见水平井布设位置对其出水量影响较为明显。由于利用水平井开采水资源时,水平井会截取部分河流的排泄量,且其埋藏深度越靠近地表,越容易截取河流向下的排泄量,对应的水平井水量也达到最大。故布设水平井位置时,考虑将水平井布设于模型第四层即洛河组靠上层位置,此时水平井易截取河流排泄量,对应的出水量最大。

4.3 水平井不同长度对出水量的影响

在已选最优方向及埋深的基础上,针对不同长度条件下水平井开采方案的出水量及出水效率模拟结果见图 8。由图 8 可知,水平井出水量与水平井管长呈明显正相关关系,即随着管长的增加,出水量呈现明显的增加。当竖井水位降深为 20 m,水平井长度从 200 m 增加到 1 000 m 时,对应的出水量也从 517.8 m³/d 增加到 1 716.6 m³/d,

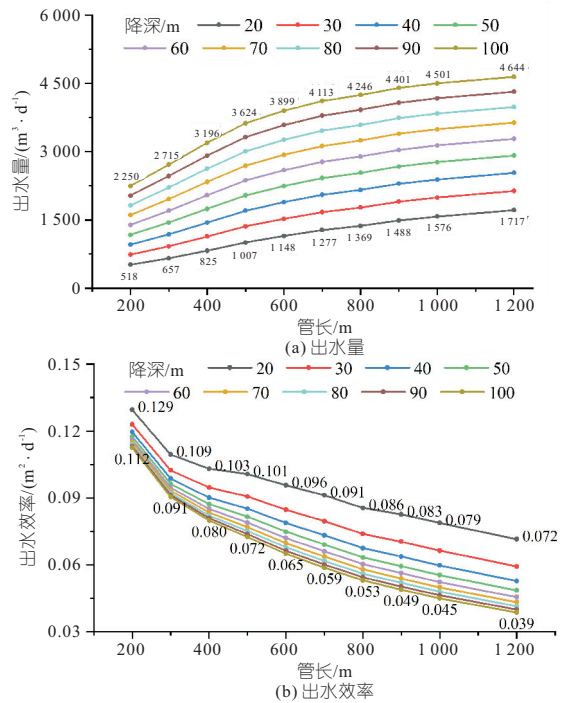


图 8 不同长度条件下水平井出水量及出水效率

Fig. 8 Water yield and water yield efficiency of horizontal wells with different lengths

水平井单位长度的出水效率明显降低,由最初的 12.9 m²/d 减少到 8.2 m²/d。

随着水平井长度的增加,井管不仅在水平方向上与含水层接触面积增大,且井管是整个井管系统的唯一进水段,井管长度增大,有效进水段的长度增大,井管出水量亦会增大。与此同时,水流受到的摩擦阻力也越大,从而导致水平井出水效率降低。

故综合考虑施工难度和出水效率,水平井管不宜布设过长,本文推荐水平井管长为 800~1 000 m,此时其出水效率较高。

4.4 不同透水性能的选择

在已选最优方向、埋深及井管长度的基础上,针对不同透水性能条件下的水平井开采方案的出水量及出水效率模拟结果见图 9。由图 9 可看出,随着水平井井管透水性能的变化,水平井出水量与井管透水性能呈明显正相关关系,但随着井

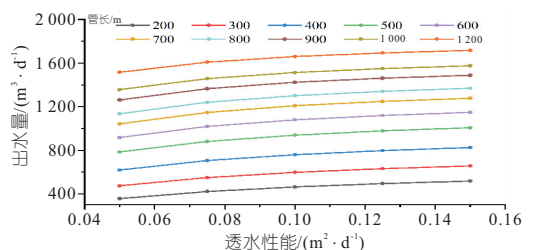


图 9 不同透水性能条件下水平井出水量

Fig. 9 Water yield of horizontal wells with different permeability performance

管透水性的增加,水平井管出水量增加的趋势逐渐变缓,两者并非完全线性关系。

在实际施工中,若井管不添加任何过滤性材料,含水层泥沙易进入井管,导致井管堵塞,不仅会降低出水效率和出水量,还会缩短工程的使用寿命。综合考虑井管出水量及取水设施的使用年限,建议井管透水性能与含水层渗透系数保持一致,此时水平井出水效率和出水量都较高,建议水平井管透水性能为 $0.15 \text{ m}^2/\text{d}$,不仅可以保证井管出水量,而且可以延长整个水平井取水系统的使用期限。此时,对应的总出水量范围为 $1\ 368 \sim 2\ 389 \text{ m}^3/\text{d}$,

5 结论

a. 在充分了解研究区地层岩性及地貌类型的基础上,以“渗流-管流耦合模型”为理论依据,结合水文地质资料,建立了研究区三维数值模型,并利用观测资料验证了模型的合理性,可用于模拟实际水平井工程。

b. 在模型合理的基础上,优选出适合陇东地区的水平井结构。结合模拟结果及实际取水需要,建议水平井尽可能布设于洛河组最上层靠近

地表处,方向则沿流线方向布设且指向上游,水平井管长推荐为 $800 \sim 1\ 000 \text{ m}$,竖井降深推荐为 $20 \sim 40 \text{ m}$,井管透水性能参数推荐为 0.15 ,对应的开采量范围为 $1\ 368 \sim 2\ 389 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

c. 采用数值模型方法计算得到不同结构参数下水平井出水量,对缓解陇东地区油气资源开发中水资源短缺问题和制定合理的水资源开发策略具有重要的指导意义,

参考文献:

- [1] 凌新颖. 陇东黄土高原地下水补给与演化规律研究[D]. 兰州:兰州大学,2019.
- [2] 贾冰. 陇东黄土高原马莲河流域水环境演化特征及石油开发影响研究[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [3] 潘峰,陈丽华,付素静,等. 石油类污染物在陇东黄土塬区土壤中迁移的模拟试验研究[J]. 环境科学学报,2012,32(2):410-418.
- [4] 蒋廷学,卞晓冰,王海涛,等. 深层页岩气水平井体积压裂技术[J]. 天然气工业,2017,37(1):90-96.
- [5] 郭倩,牟海斌,徐嘉璐,等. 水平井开采地下水方案优选的实例研究[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(4):105-108,113.
- [6] 陈崇希. 关于地下水开采引发地面沉降灾害的思考[J]. 水文地质工程地质,2000(1):45-48,60.

Numerical Simulation and Influencing Factors Analysis of Water Intake in Horizontal Wells in Eastern Gansu Province Based on Coupled Percolation-pipe Flow Model

FANG Ya-hong, ZENG Fa-rong, LIU Bin, PAN Jun-yi, LUO Jian-wen

(Changqing Engineering Design Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to alleviate the water shortage in the development of oil and gas resources, horizontal wells are often used to exploit groundwater resources, but there is little analysis on the factors affecting the water intake of horizontal wells. Therefore, the numerical model is used to simulate the horizontal well mining mode and explore the influence of horizontal well layout direction, burial depth, pipe length and well pipe permeability on the water intake effect. The results show that considering the water intake efficiency and construction difficulty, the optimal horizontal well layout direction should be laid along the incoming water direction, and the location should be located in the upper layer of Luohe Formation as far as possible. The recommended pipe length and well pipe permeability are $800 \text{ m} \sim 1\ 000 \text{ m}$ and 0.15 , respectively, and the corresponding production volume is $1\ 368 \text{ m}^3/\text{d} \sim 2\ 389 \text{ m}^3/\text{d}$. The research results have important guiding significance for alleviating the shortage of water resources in the development of oil and gas resources in the eastern region of Longdong and formulating reasonable development strategies of water resources.

Key words: water resources shortages; oil and gas resources development; horizontal well; seepage-pipe flow coupling model; water intake efficiency