

# 渗流井取水数值模拟及应用

徐嘉璐<sup>a,b</sup>, 陈泉萌<sup>a,b</sup>, 郭倩<sup>a,b</sup>, 王玮<sup>a,b</sup>

(长安大学 a. 环境科学与工程学院; b. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

**摘要:**天然滤床渗流井取水工程是近年来发展起来的一种集取河流渗漏补给量的新技术,利用河床砂砾石层的净化作用,将河水转化为地下水以获得水资源。渗流井取水时,“渗流井一含水层”多种流态并存,水力条件复杂,边界条件很难确定。现以等效渗透系数为纽带将“井管”内外不同介质不同流态耦合起来,建立起渗流井取水的“渗流—管流”耦合模型。将所建模型应用于陕西省绥德县枣林坪水源地渗流井取水工程,计算了当地渗流井取水平水期、枯水期的出水量,最终确定允许开采量为 47 600 m<sup>3</sup>/d。计算结果表明建立的模型能够较好地反映渗流井取水时的井流特征,对于指导渗流井取水工程的勘探、设计、施工有着积极的理论指导意义。

**关键词:** 渗流井; 等效渗透系数; “渗流—管流”耦合模型; 允许开采量

**中图分类号:** P641.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0097-04

## Numerical Simulation and Application of Water-taking by Seepage Well

XU Jialu<sup>a,b</sup>, CHEN Xianmeng<sup>a,b</sup>, GUO Qian<sup>a,b</sup>, WANG Wei<sup>a,b</sup>

(Chang'an University, a. School of Environmental Science and Engineering; b. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In regions where rivers are not perennial or have low flow conditions, the seepage wells are placed in the riverbed to obtain the uninterrupted supply of naturally filtered groundwater through highly permeable saturated riverbed aquifers. However, various flow patterns of “seepage well aquifer” exist when water is taken by seepage wells. Due to the complexity of flow conditions, there is no analytical solution to characterize the boundary conditions accurately. To overcome this difficulty, a coupled “seepage pipe flow” numerical model was developed for simulating water taking by seepage wells using the equivalent hydraulic conductivity to couple different mediums and flow patterns inside and outside the pipe. The numerical model was applied for groundwater exploitation by seepage wells in the Zaoliping water source area in Suide County of Shanxi Province. The model was used to calculate the water yields in the normal and dry seasons and the allowable water yield was determined to be 47 600 m<sup>3</sup>/d. The results showed that the proposed coupled seepage pipe flow model can reflect the flow conditions for water taking by seepage wells, which has theoretical significances for guiding the exploration, design, and construction of seepage wells.

**Key words:** seepage well; equivalent hydraulic conductivity; coupled seepage pipe flow model; allowable water yield

随着我国国民经济建设的快速发展,城市的工业和生活需水量日益增加,但由于供水的不足,使一些城市和厂矿的发展受到了严重的制约<sup>[1]</sup>。即使是近邻江河水域,由于不同程度的污染和季节性断流等原因,致使对地表水资源的利用受到了很大的影响,此时就需要考虑开采地下水资源。在对地下水进行开采时,选择何种开采方式是一个值得探讨的问题,其中天然滤床渗流井取水技术作为近年来新兴的地下水取水建筑物,受到了越来越广泛的关注。

渗流井是一种具有较复杂结构的地下水取水建筑物,由渗流孔、硐室、输水平巷和集水竖井 4 个主要部分组成<sup>[2]</sup>(图 1),每个渗流井含有若干个硐室,在硐室的顶部及侧面连接若干个渗流孔深入河谷区集水,硐室之间通过平巷连接。输水平巷、硐室和渗流孔这三部分位于河床之下的基岩中,集水竖井则通过输水平巷与之相连,作为取水点位于岸边。集水竖井、输水平巷、硐室和渗流孔的规格和数量随着需求量的要求相应增减,同时也受到研究区天然滤床条件的影响。

收稿日期: 2013-03-11    修回日期: 2013-07-10    网络出版时间: 2013-07-28  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.016.html>  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972154)  
作者简介: 徐嘉璐(1988-),女,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源的学习和研究。E-mail: xujialu0407@163.com.  
通讯作者: 王玮(1970-),男,江西乐平人,副教授,硕士生导师,主要从事水资源与环境的教学与科研工作。E-mail: wangwei@chd.edu.cn

与传统的管井相比,渗流井具有以下优点<sup>[25]</sup>:出水量大且水位降深相对较小;地下水流入井内的流速较低,减少了水流对取水建筑物的冲击;具有良好的自净作用,不需要频繁地对井进行清洗;供水总体成本相对较低的同时易于管理。基于这些优点,渗流井目前已经被多处水源工程采用,不乏成功的实例。但由于渗流井结构复杂,尚没有与之相对应的取水机理研究成果,使得相应的地下水资源评价方法十分缺乏。

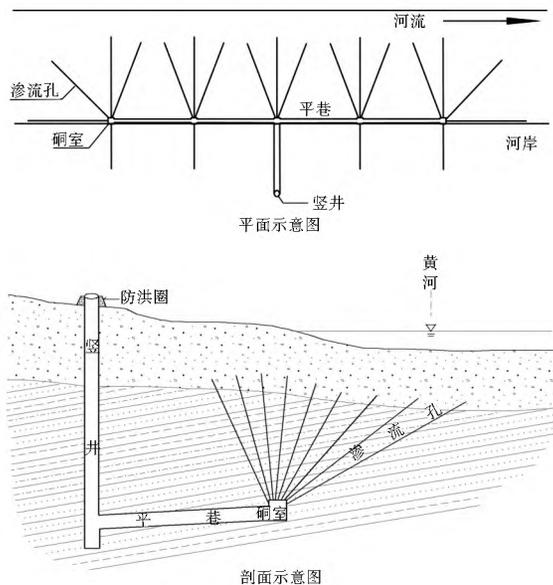


图 1 渗流井取水结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of seepage well

### 1 渗流井井流特征

渗流井工作时,在“井—含水层”系统中存在着多种流态,在含水层介质中地下水一般为低雷诺数 ( $Re < 1 \sim 10$ ) 的层流,渗流速度与渗流的水头损失呈线性关系,遵从达西定律。而在“井管”中,因其具有较大的水力半径,水流的雷诺数一般也较大,通常为紊流<sup>[2]</sup>。

渗流井刚开始工作时,出水量主要来自渗流井和其所在含水层,河流渗漏补给水量较少。随着工作时间的加长,渗流井及其所在含水层出水量逐渐减少,河流渗漏补给量逐渐增加。当抽水强度较小时,渗流井取水能在较短的时间内达到稳定状态,此时的取水量几乎全部来自河流渗漏补给。整个渗流井取水过程中井内及其周围水流具有显著的三维流特征。

### 2 渗流井数值模拟

由渗流井中地下水的流态可知,渗流井系统的边界条件不易确定。如果把“井—含水层”系统看作一个非均质介质,其中“井管”系统可视作为具有高渗透性能的透镜体,若将系统的边界移到竖井的位置,那么此处的边界条件则很容易给出。当采用定降深抽水时,为第一类边界条件,当采用定流量抽水时,则为第二类边界条件,这样就可以将整个渗流井取水过程概化为一个非均质介质定降深抽水或定流量抽水的问题。由于在渗流井中层流与紊流共存,为了将“井管”内

外不同介质不同流态耦合起来,考虑利用陈崇希等提出的等效渗透系数的概念<sup>[6,7]</sup>。

当水流为层流时,“井管”中的渗透系数  $K_l$  可表示为:

$$K_l = \frac{d^2 \gamma}{32 \mu} \quad (1)$$

式中: $d$  为“井管”的直径 (m);  $\gamma$  为水的重率 ( $N/m^3$ );  $\mu$  为水的动力黏滞系数 ( $Pa \cdot s$ )

当水流为紊流时,“井管”中的等效渗透系数  $K_n$  可表示为:

$$K_n = \frac{2gd}{fv} \quad (2)$$

式中: $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ );  $f$  为“井管”的摩擦系数;  $v$  为“井管”中的渗流速度 ( $m/s$ )。

在引入紊流状态等效渗透系数的概念后,便可将整个渗流井取水系统的流动规律统一用达西定律的形式来表示,在此基础上,描述地下水向渗流井流动的稳态流数学模型就可以建立<sup>[2]</sup>:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (K_{he} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{he} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial H}{\partial z}) = 0 \quad (x, y, z) \in D \\ & H(x, y, z) |_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z) \quad \text{上下游两侧定水头边界} \\ & \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = 0 \quad \text{河谷两侧及含水层底板隔水边界} \\ & \frac{K_r}{M_r} (H_r - H) = q_r \quad \text{河流边界} \\ & \left. \begin{aligned} & H = z \\ & \frac{\partial H}{\partial n_p} = 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{潜水面边界} \\ & \left. \begin{aligned} & H(x, y, z) = H_s \\ & \lim_{x \rightarrow x_w} \int_0^{2\pi} \int_0^M \int_0^M r K \frac{\partial H}{\partial r} dz d\theta = Q_s \end{aligned} \right\} \quad \text{竖井边界} \left\{ \begin{aligned} & \text{定降深抽水} \\ & \text{定流量抽水} \end{aligned} \right. \\ & K_e = \begin{cases} K & \text{含水层中的渗透系数,层流} \\ K_l & \text{“井管”中等效渗透系数,层流} \\ K_n & \text{“井管”中等效渗透系数,紊流} \end{cases} \end{aligned} \right.$$

式中: $K$  为渗透系数 ( $m/d$ );  $K_h$ 、 $K_v$  分别为水平渗透系数和垂向渗透系数 ( $m/d$ );  $K_r$  为河床淤积层的垂向渗透系数 ( $m/d$ );  $H$  为地下水位高度 (m);  $H_1$  为第一类边界水位标高 (m);  $n$  为二类边界外法线方向单位向量;  $\Gamma_1$  为一类边界;  $Q_s$  为渗流井的开采量 ( $m^3/d$ );  $H_s$  为渗流井抽水动水位 (m);  $M_r$  为河床淤积层的厚度 (m);  $H_r$  为河流水位 (m);  $q_r$  为河流单位面积的渗漏补给量 ( $m/d$ );  $n_p$  为潜水面内法线方向单位向量;  $\Gamma_2$  为二类边界;  $D$  为计算区范围。

### 3 应用实例

#### 3.1 水文地质概况

绥德县位于榆林市东南部,东邻吴堡,西连子洲,南接清涧,北和米脂,东北与佳县接壤,东南与山西柳林县隔黄河相望。绥德县盐岩资源丰富,是陕北盐矿的中心地,也是国家级陕北能源化工基地的重要区域,随着盐化工业的建设,水资源需求量大幅增加,水资源短缺已成为制约当地经济社会发展和能源化工基地建设的主要因素。

枣林坪水源地地属绥德县行政区范围,位于绥德县东南边境的黄河河谷区,地处西北内陆,属于温带大陆性半干旱气候。黄河为该研究区内的主要河流,其余支流多属季节性

河流,常年基本断流,仅雨季有短暂洪流,且河流多为高泥沙河流,直接开发利用难度大,造成当地地表水资源十分匮乏。为了满足当地城市工业和生活的用水需求,根据在条件类似地区的取水经验,在黄河岸边采用渗流井方式开采地下水资源。研究区内含水介质主要为第四系全新统冲击砂砾卵石层和三迭系碎屑基岩风化带。整体上黄河河谷从漫滩后缘至漫滩前缘,地下水赋存条件逐渐转好,沿漫滩前缘顺河流方向受含水层岩性变化的控制赋水性差异显著。

### 3.2 模型定义

枣林坪水源地的中东部为黄河,天然条件下,地下水在接受大气降水入渗补给后向黄河排泄,未来人工开采条件下,黄河河水受到激发将大量渗漏补给地下水,此时可将黄河概化为第三类河流边界。西部和东部边界位于低山丘陵区,下部为三叠系完整基岩,基岩结构致密,裂隙不发育,共同构成区域隔水底板。由于黄河水面横、纵的延伸比较广,渗流井取水时不会影响到黄河上、下游边界(即枣林坪水源地的北部、南部边界),故可将其概化为第一类定水头边界。发生着降水入渗、潜水蒸发等垂向水交换作用的潜水面,可概化为潜水面边界<sup>[10-11]</sup>。

在对边界条件进行概化的基础上,采用离散化网格对模

表 1 渗流井平水期出水量组成计算结果

Table 1 Results of water yield components by seepage Wells in the normal season

编号	出水量组成							总出水量	建议开采量
	硇室 1	硇室 2	硇室 3	硇室 4	硇室 5	平巷	竖井		
ZLPSLJ1	2 399.8	1 867.3	1 874.4	1 831.8	2 338.8	25.2	14.6	10 352	10 300
ZLPSLJ2	2 247.7	1 565.9	1 602.8	1 765.5	2 304.1	25.8	13.5	9 527.1	9 500
ZLPSLJ3	2 676	2 105.6	2 109.8	2 101.6	3 419.7	37.4	16.4	12 466.6	12 400
ZLPSLJ4	2 677.7	2 111.6	2 084.5	2 086.3	2 670.4	37	16.4	11 683.9	11 600
ZLPSLJ5	687.3	559.2	1 646.3	2 022	2 509.2	32.2	9.3	7 465.6	7 400
ZLPSLJ6	1 434.1	734.5	558.9	549.1	634.2	34.9	9.7	3 955.4	3 900
ZLPSLJ7	1 377.5	1 115.8	1 134	1 145.5	1 402.9	42.5	12.9	6 232.2	6 200
	合计							61 682.7	61 300

由于黄河流经研究区的河段在每年 6 月-7 月会出现枯水期,届时黄河水位下降、水边线后退,对渗流井开采造成一定影响,为此在模型中将河流水边线改为枯水期水边线,同时把河流水位降低 1 m,此时计算出枯水期渗流井的出水量,枯水期出水总量 48 066.6 m<sup>3</sup>/d,建议开采量 47 600 m<sup>3</sup>/d。

将平水期与枯水期渗流井出水量的计算结果进行对比可知,由于枯水期黄河水边线后退时伴随着水位的下降,导致河流渗漏补给时的水力坡度变小,进而减小了各渗流井出水量,使之衰减了 22.07%。如果在此基础上,建造相应的蓄水工程,将渗流井在平水期获取的多余河流渗漏补给量储存起来供枯水期使用,就可以使研究区的水资源能够得到更充分、合理的利用。

### 3.5 开采保证程度论证

由结果可知,在设计开采方案作用下,枯水季节黄河水边线后退时地下水开采量为 47 600 m<sup>3</sup>/d,均由黄河渗漏补给量组成。根据区内吴堡水文站黄河流量观测资料,黄河流经区内多年平均流量为 540.74 m<sup>3</sup>/s,最枯流量 16.7 m<sup>3</sup>/s,

拟区进行剖分,利用前述数学模型建立研究区渗流井取水的数值模型。为了能将渗流井的结构准确刻画,对计算区域采用长方体单元进行精细的剖分。研究区沿东西方向剖分为 300 列,沿南北方向剖分为 602 行,剖分网间距 5 m,实际代表平面面积 1.888 km<sup>2</sup>。垂向上设定为 40 m,剖分为 11 层,其中第四系含水层剖分为 3 层,下部基岩剖分为 8 层,总活动单元个数为 75 502 个。

### 3.3 开采方案设计

根据研究区的水文地质概况和陕北条件类似地区渗流井取水经验,本次设计布设 7 眼 5 硇室渗流井,相邻竖井间的距离为 400 m,沿黄河枯水期水边线布设硇室,硇室间的距离按实际情况调整,分别为 60 m 或 70 m。渗流孔由各硇室向斜上方进行施工,单根渗流孔进入第四系含水层长度为 1~3 m<sup>[89,12]</sup>。在河流长期有水的条件下,渗流井取水可达到稳定状态,此时的地下水流动运动可用前述数学模型来描述。该问题可采用三维有限差分数值方法进行求解。

### 3.4 计算结果及分析

经计算,枣林坪水源地平水期渗流井出水量组成见表 1,总出水量 61 682.7 m<sup>3</sup>/d,建议开采量 61 300 m<sup>3</sup>/d。此时渗流井开采形成的平面降深场见图 2。

由此计算出枣林坪水源地地下水容积储存量为 277.74×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,单位储存量为 35.61×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,即地下水水位下降 1 m 所释放出的水量就可维持该地段 47 600 m<sup>3</sup>/d 的渗流井枯水季节开采量 7 d 左右。且黄河与地下水水力联系较为密切,计算过程中也考虑了枯水季节黄河水边线后退对渗流井取水量的影响,因此枯水季节黄河水边线后退条件下开采量 47 600 m<sup>3</sup>/d 是有补给保证的。

## 4 结论

(1) 渗流井作为近年来发展起来的地下水开采新技术具有取水范围广、水量大、水质好、开采集中、易于管理和供水总体成本相对较低等优点,对邻近具有天然滤床的江河的缺水地区是较为理想的地下水开采方式。

(2) 渗流井取水时,“渗流井-含水层”系统中多种流态并存,在含水层介质中,地下水渗流过程中雷诺数一般小于 10,水流为层流,在渗流井“井管”中,雷诺数变化范围大,可以出现层流、光滑紊流、粗糙紊流及两个过渡流态。渗流井井管内壁既不是等水头边界也不是等强度边界,其水动力条

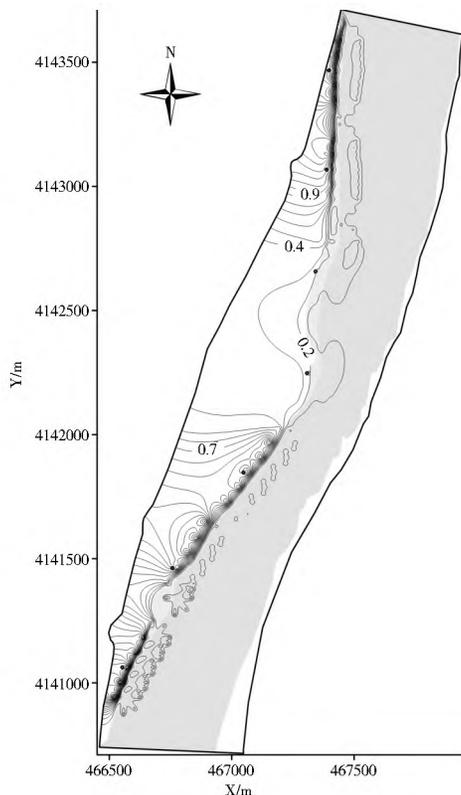


图 2 渗流井平水期降深等值线图

Fig. 2 Draw down contour map of seepage wells in the normal season

件复杂, 很难严格的确定。

(3) 在分析渗流井结构和井流特征的基础上, 以等效渗透系数为纽带建立起渗流井取水的“渗流-管流”耦合模型<sup>[6,7]</sup>。将所建模型用于陕西绥德县枣林坪水源地的地下水资源评价中, 计算了研究区渗流井取水平水期、枯水期的出水量, 最后确定枣林坪水源地的允许开采量为 47 600 m<sup>3</sup>/d。证明所建模型能够较好的反应渗流井取水时地下水的井流特征。

参考文献(References):

[1] 陈台智, 周志彰. 开拓供水新领域施工天然滤床渗流井取水工程[J]. 探矿工程, 1995, (1): 11-13. (CHEN Tai zhi, ZHOU Zhi zhang. Open Up New Water Supply Field, Construction of Nature Filter Bed Seepage Flow Well. [J]. Exploration Engineering, 1995, (1): 11-13. (in Chinese))

[2] 王玮. 渗流井取水计算模型及其应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010. (WANG Wei. Calculation Model and Its Application of Horizontal Seepage Well[M]. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi, 2010. (in Chinese))

[3] Eunhee Lee, Yunjung Hyun, Kang Kun Lee. Numerical Modeling of Groundwater Flow into A Radial Collector Well with Horizontal Arms[J]. Geosciences Journal, 2010, 14(4): 403-414.

[4] Bakker, M., Kelson, V. A. Luther, K. H. Multilayer Analytic Element Modeling of Radial Collector Wells[J]. Ground Water, 2005, 43: 926-934.

[5] Bischoff, H. An integral Equation Method to Solve Three-dimensional Flow to Drainage Systems[J]. Applied Mathematical Modeling, 1981, (5): 399-404.

[6] 陈崇希, 万军伟, 詹红兵, 等. “渗流-管流耦合模型”的物理模拟及其数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2004, (1): 1-8. (CHEN Chong xi, WAN Jun wei, ZHAN Hong bin. Physical and Numerical Simulation of Seepage pipe Coupling Model. [J] Geology and Geophysics, 2004, (1): 1-8. (in Chinese))

[7] 陈崇希, 胡立堂. 渗流-管流耦合模型及其应用综述[J]. 水文地质工程地质, 2008, (3): 70-75. (CHEN Chong xi, HU Li tang. A Review of the Seepage pipe Coupling Model and Its Application[J]. Geology and Geophysics, 2008, (3): 70-75. (in Chinese))

[8] 王玮, 畅俊斌, 王俊杰. 渗流井取水方式地下水允许开采量计算[J]. 水文地质工程地质, 2009, (1): 35-43. (WANG Wei, CHANG Jun bin, WANG Jun jie. Calculation of the Reasonable Yield of Groundwater of Seepage Wells[J]. Geology and Geophysics, 2009, (1): 35-43. (in Chinese))

[9] WANG Wei, ZHANG Ge, Numerical Simulation of Groundwater Flowing to Horizontal Seepage Wells under A River[J]. Hydrogeology, 2007, (15), 1211-1220.

[10] 郑新崑, 王玮, 刘基, 等. 陕北佳县南河底水源地渗流井取水效果分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, (4): 39-43. (ZHENG Xin yu, WANG Wei, LIU Ji, WANG Jun jie. Analysis of Water Intaking Effect of Seepage Well in Jia County Yulin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, (4): 39-43. (in Chinese))

[11] 王玮, 畅俊斌, 王俊杰. 黄河河谷岸边渗流井取水方式合理开采量计算[J]. 人民黄河, 2010, (9) 44-45. (WANG Wei, CHANG Jun bin, WANG Jun jie. Groundwater Calculation of Groundwater Yield of Seepage Wells in the Yellow River Valley[J]. Yellow River, 2010, (9) 44-45. (in Chinese))

[12] Wang Wei, Chen Peng, Liu Ji. Calculation of Groundwater Yield of Multiple Seepage Wells[A]. 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection[C]. Shaanxi, 2011.