

水资源和环境工程中水平井研究简介

詹红兵¹, 万军伟²

(1. 美国德克萨斯 A&M 大学地质与地球物理系, TX 77843-3115; 2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 简单介绍了水平井在水资源和环境工程中的近期研究进展, 重点介绍了在不同含水层(如承压含水层、潜水含水层、越流含水层及河下含水层)中, 水平井抽水条件下降深的半解析解, 同时分析了降深随抽水时间变化的标准曲线和微分标准曲线。这些半解析解可用于分析小流量水平井在中长时段的降深特性。分析了用于排水和供水的大流量水平井的水力学特征, 并介绍了求解渗流—管流耦合并流系统的一种新方法。同时介绍了在非饱和含水层中水平井抽取气体的动力学特征, 并分析了地面覆盖和未覆盖 2 种情况下的气体清除效率, 报告了在不同饱和含水层条件下水平井的捕获区和捕获时间的计算。

关键词: 水平井; 半解析解; 捕获。

中图分类号: X143; P641. 2 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)05-0511-06

作者简介: 詹红兵(1966—), 男, 美国 Texas A&M 大学地质与地球物理系助理教授(tenure-track), 1989 年毕业于中国科技大学, 1996 年获美国内华达大学水文与水文地质专业博士学位, 现从事水文地质和环境工程方面的教学与科研工作。E-mail: zhan@geo.tamu.edu

0 引言

水平井是指井的透水(气)段—滤管呈水平放置的抽(注)流体的集水建筑物。这类井有几个重要特点:(1)地下水向水平井的流动具有较大的垂向分速度;(2)水平井透水段同含水层有较大接触面积;(3)水平井的地表出口可避开地表永久障碍物, 比如飞机跑道、河流、公路和建筑物等;(4)甚至在含水层厚度很小的情况下, 也可安装透水段很长的水平井。

在许多实际应用中, 水平井的以上特点使它在许多领域的应用较竖直井优越得多。一般来讲, 水平井大大提高了集水(流体)建筑物与地下水、非饱和带中的气体、地下油气的接触面积, 有效地提高了流体的抽取效率。Seines 等^[1]在对一薄层油储的实例研究中指出: 一个水平井相当于 4 个竖直井。Parmentier 和 Klemovich^[2]指出, 一个水平井同油层的接触面积相当于 10 个竖直井的总接触面积。在石油工程界水平井提高了油气的抽取效率^[1, 3~5]。在水文和环境工程界, 水平井可用于抽取污染的地下水以

及非混溶性液体和土壤气体^[6~12]。水平井还常用于地下水供水、排水、矿山排水和地质工程等方面^[13]。

流体向水平井流动的早期研究是由 Hantush 和 Papadopoulos^[13]完成的。他们研究的是由一系列在同一水平面上成辐射状排列并有一个共同端点的水平井组所组成的集合并(辐射井)。不过, 由于水平井的昂贵钻探费用, 在这一领域的进一步研究工作只取得了有限的进展。随着最近 15 年来水平井钻井技术的不断发展, 水平井研究引起了石油工程、水文地质和环境工程学界的极大兴趣。水平井已经越来越多地被用于油气的勘探和开采。在封闭油气田中油气向水平井的流动问题已被探讨^[3, 14~17]。近几年水平井和斜井在水文地质中的应用也得到了相应的发展。这其中包括水平井在承压含水层^[7~9, 11, 12, 18, 19]、河下含水层^[10, 12, 20]、越流含水层^[20]、非承压含水层^[21]和裂隙含水层中的水平井问题^[22], 以及同水文地质和环境工程有关的水平井研究, 如用水平井抽取土壤气体^[9, 23~25]、水平井的抽水段和注水段问题^[26]、薄含水层中污染清除的再循环水平井^[27]和污染地下水的捕获区^[11, 12]等。

本文简单介绍目前有关水平井在水资源和环境工程中的研究, 重点论述液、气向水平井的流动。由

收稿日期: 2003-05-28

基金项目: 美国国家自然科学基金项目(DMI-BES-9909964)。

于篇幅所限,着重阐述笔者对这一领域的观点.

1 地下水向水平井流动的一般特征

地下水向水平井的流动通常是一个三维流动问题.流动随时间可分为 3 个阶段,分别称为初时段、中时段和长时段.在初时段,含水层边界尚未产生影响,笔者观察到垂直于井轴的竖直截面上的径向流动(图 1b);在长时段,水平井类似于大口径的竖直井,在离井中心较远的区域是水平方向的径向流动(图 1c),在离井轴较远的地方,逐渐过渡到垂直于井轴的竖直截面上的径向流动;在中时段,流动是复杂的过渡区.水平井的流动问题通常要用数值方法计算.然而,在一定的近似条件下,可得到水平井的半解析解,并用此分析水平井的流动特性.下面介绍得到水平井半解析解的假设条件:(1)水平井井壁被视为等流量边界;(2)水平井井壁被视为线汇(源);(3)忽略水流在水平井管内流动的水头损失;(4)忽略水平井的井储效应和表面效应.井储是指抽水前储存于井管中的水;井储效应会影响含水层的初始降深.表面效应是指受井壁过滤器以及井壁周围填砾和钻井过程中泥浆等影响,所造成的井壁外侧含水层渗透系数的改变.

一般来讲,用等水头边界条件模拟水平井更接近物理实际,但用解析法求解相对较难^[28].取而代之

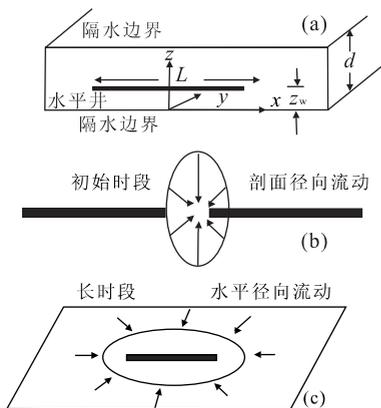


图 1 水平井流动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) a horizontal well in a confined aquifer, (b) radial flow at the early pumping stage, and (c) horizontal pseudoradial flow at the late pumping stage

a. 承压含水层水平井概念模型; b. 抽水初始时刻垂直井轴的剖面径向流动; c. 长时间抽水的水平径向流动

之的是更容易解析处理的等流量边界条件^[15,18,29].在一个假想模型中(40 m 长的水平井,20 m 厚的含水层),用 Visual Modflow 软件模拟等流量和等水头井管^[30].在数值模拟中,等水头井管是通过给每个代表水平井的单元设置一个极大的渗透系数来模拟的.模拟结果显示,当测量点到井壁的距离大于井径的 25 倍时,用等流量和等水头假设所得降深结果不大于 5%.假设水平井管径是 0.2 m,这意味当观测井离井壁的距离大于 5 m 时,用等流量和等水头假设所得降深结果相差小于 5%.这个结论同 Rosa 和 Carvalho^[28] 所做的研究一致. Rosa 和 Carvalho^[28] 研究指出,等流量和等水头假设所得几何表面效应分别是 0.907 5 和 0.871 7,差别不大于 5%.几何表面效应是在长时降深公式中同水平井和含水层几何尺度有关的一项.因此,在水平井流量不大的许多水文应用中,我们可以应用等流量假设.这项假设同以前的研究是一致的^[13,15,16,28].

Park 和 Zhan^[25] 指出:水平井有限井径的影响仅局限于初始降深.当抽水时间延长时,此效应变得可以忽略.因此,在水平井流量不大的实际应用中,用线汇(源)来处理水平井是合理的.当水平井用于环境问题时,抽水量通常较小,因此井管内水流的水头损失通常可以忽略不计.然而,对于以排水或供水为目的的水平井,抽水量通常较大,导致管内水流的水头损失也较大.如是后一种情况,我们必须考虑含水层内、含水层和井之间以及井内的水头损失;而要同时考虑这 3 个不同类型的水头损失,就必须将它们耦合在同一个运动方程中,用数值计算方法来求解.井储效应和表面效应会影响初始降深曲线,关于这方面的详细阐述,可参考 Park 和 Zhan^[25].

2 地下水向水平井流动的半解析解

这部分简单介绍地下水向水平井流动的半解析解,示意图和坐标系如图 1a 所示. x 和 y 轴沿水平方向, z 轴沿垂直方向,原点在含水层底边界.水平井轴沿 x 方向,水平井到底边界的垂直距离是 z_w .水平井中心在 $(0,0,z_w)$,假设侧边界离水平井足够远,不影响地下水流动.底边界不透水,上边界根据不同问题可分为:(1)不透水边界(承压含水层);(2)等水头边界(河下含水层);(3)潜水面自由边界(非承压含水层);(4)弱透水边界(越流含水层).水平井被处理成线汇(源).

我们通常用两步法求解此边界问题. 第一步, 求解地下水向点汇流动的解, 然后, 用所得点汇解沿水平井轴方向积分得到地下水向水平井流动的解. 详细的求解步骤和半解析解的数值计算软件可见 Zhan 和 Zlotnik^[21]、Zhan 和 Park^[31]. 通过计算, 可以求出在任何给定位置的观测孔或观测井的降深并画出降深标准曲线和微分标准曲线. 其中, 降深标准曲线和微分标准曲线的定义类似于竖直井中的定义, 即降深标准曲线定义为降深随时间在双对数值上的关系曲线($\lg s - \lg t$); 微分标准曲线定义为降深对时间自然对数的一次微分随时间在双对数值上的关系曲线($\lg(ds/d\ln t) - \lg t$).

水平井的标准曲线依赖于水平井的长度、水平井到边界的距离、含水层的各向异性及观测孔或观测井的位置. 一般来讲, 水平井标准曲线在初时段不同于竖直井的泰斯(Theis)曲线, 反映出在初时段水平井和竖直井流动的不同特性. 水平井标准曲线在长时段近似于竖直井的泰斯(Theis)曲线, 反映出在长时段水平井和竖直井流动的共同特性.

承压含水层中地下水向水平井流动的研究可见 Zhan^[32]. 在这项研究中, 含水层的上边界是弱透水层(aquitard), 考虑弱透水层的渗透和储水效应. 这项研究显示, 在通常情况下, 微分标准曲线比标准曲线更容易受弱透水层参数的影响. 因此, 在标准曲线无法分辨弱透水层参数时, 微分标准曲线可用作诊断工具. 在中时段和长时段, 标准曲线和微分标准曲线对弱透水层与含水层的厚度比以及渗透系数比的变化较为敏感, 对弱透水层与含水层的弹性给水度比的变化较不敏感. 弱透水层的储水效应在中时段对标准曲线和微分标准曲线有较大影响. 河下含水层中地下水向水平井的流动研究可见 Zhan^[32]. 在这项研究中, 含水层的上边界为一等水头的河流. 比起承压含水层和越流含水层, 等水头河流对地下水流动的影响更为显著. 随着抽水时间的延长, 等水头边界很快成为主要的供水水源. 这将导致含水层中降深趋于稳态.

在潜水含水层中, 潜水面自由边界对地下水向水平井流动的影响近似于垂直井中的情况^[21]. 不过, 水平井抽水所产生的潜水面下降漏斗形状同垂直井所产生的下降漏斗形状不一样. 首先, 水平井下降漏斗底部曲面的曲率较小, 这不同于垂直井所产生的尖锐底部. 其次, 水平井下降漏斗的范围较大, 这就是水平井可在大范围内用于控制地下水潜水面的原因.

3 大流量水平井水力学

当水平井用于供排水目的时, 通常采用大流量和长滤管. 在此情形下, 水平井管内水流的水头损失变得不可忽略. Tarshish^[33]意识到管内水动力学的重要性并将其包括于他的数值模拟中. 不过, 他的研究仅局限于无限长井管和稳定流状态, 而且, 他只考虑了管内水头损失正比于管内平均流速的平方这一种特殊情况. 这意味着他只考虑了雷诺数 Re 大于 100 000 的情形^[34,35].

Chen 等^[36]对大流量水平井水力学做了进一步的研究. 他们考虑了水平井管内可能存在的 5 种流动状态, 并将此同含水层中的渗流耦合在一起. 为了与理论计算结果进行对照比较, 他们在实验室完成了较大流量水平井的抽水试验. 这一试验用一内径为 5.42 cm 的水平井在一长 453 cm、宽 50 cm、高 100 cm 的砂槽中进行抽水试验. 砂粒直径介于 0.25~1.0 mm. 砂层上部保持 10 cm 厚的水层厚度, 形成一等水头边界. 其他各边为不透水边界. 这一试验结果指出: 在水平井管内, 层流、紊流及其介于其间的各种过渡流态可以共存. 他们的试验结果同理论计算结果基本吻合. 不过, 他们尚未考虑到发生在含水层和水平井界面上的水头损失, 以及地下水由垂直于井壁的径向流转为平行于水平井的轴向流的水头损失. 前一种水头损失虽然在 Chen 等^[36]的试验中不存在(因为水平井管是预先埋设好的, 然后填上砂层), 但在实际野外应用中, 因为钻井泥浆的使用及钻井过程对含水层渗透系数的改变, 水流通过含水层和水平井界面的水头损失往往不可避免. 后一种水头损失有必要在进一步的研究中加以完善并融于 Chen 等^[36]的耦合模型中.

为了进一步研究水平井流动的水力学特征, Zhan^[37]分析了一水平井抽水的野外试验. 试验场位于美国丹佛市东北部的洛基山兵工厂的南厂区(Rocky mountain arsenal). 含水层为以冰川沉积为主的浅层非承压含水层, 并有不规则的底边界. 抽水试验持续了 48.5 h. 首先将抽水试验所得的降深数据同基于线汇(源)假设条件下的半解析解进行比较, 结果发现初时段降深无法同理论计算结果拟合. 一种可能的解释是线汇(源)理论模型未考虑水平井储水效应和表面效应. Park 和 Zhan^[22]的研究结果发现, 当考虑到这 2 种效应时, 初始降深要明显小于线汇(源)模型结果. 野外试验同理论计算结果综合

表明在讨论水平井初始降升时,井储效应和表面效应不可忽略.不过,在讨论长时降深时,上述 2 种效应变得可以忽略.因此,线汇(源)解提供了较精确的长时降深结果.

4 水平井在环境工程中的应用

水平井被认为是抽取污染地下水或地下气态污染物的一种有效手段^[9~12,18,20,24].以抽取气体为例,Zhan 和 Park^[20]研究了非饱和含水层中水平抽气井周围的气体压力场以及气体流动速度场的分布.此项研究给出了地表覆盖(不透气)和地表未覆盖 2 种境况下的气体压力的半解析解.这项研究还指出:当地表不覆盖时,水平井抽气效率很快就会大幅下降,因为地面大气不久就成为主要的供气气源.当水平井开启后不久,它所抽取的气体大部分是从大气层穿过地表进入到水平井的空气,而只有极少部分是非饱和带里的污染气体.这表明,要有效地利用水平井,提高其清除气体的效率,表面一定要覆盖.

当用水平井来捕获污染的地下水时,捕获区的范围以及捕获时间是 2 个重要的参数.因为受水平井井端的影响,地下水向水平井的流动通常是三维流问题,而捕获区和捕获时间的研究必须通过数值计算得到.在数值计算中,水平井被赋予一极大的渗透系数,然后求解流场和流线.捕获时间是用粒子示踪来计算的.

不过,在一定的近似条件下,也可用解析解来估算捕获时间.推导解析解所用的条件是无限长水平井和稳定流假设.在使用解析解之前,有必要对这 2 个近似条件做一阐述.首先,对有限长水平井,井端会影响压力分布并造成三维流场.然而,如果水平井足够长,解析解在受井端效应影响最小的靠近井中心的区域是近似正确的.考虑到许多用于环境治理的水平井(环境水平井)都使用较长的滤管来增大同地下水的接触面积,无限长水平井假设对估计水平井附近的捕获时间是合理的. Daviau 等^[15]分析过沿水平井管的压力变化.他们以一滤管长度等于 2 倍含水层厚度的水平井为例,指出:当 $r/L < 0.25$ 时,应用无限长滤管的假定是近似可行的,其中 r 是观测孔离水平井中心的水平径向距离, L 是滤管长度.因此,我们可以近似用 $L/4$ 作为近场的尺度范围.

Murdoch^[8]指出水平井周围压力场是一非稳定过程.当进入抽水中时段时,Ozkan 等^[16]发现降深

随着时间的增加在空间上均匀分布.而地下水的流动速度依赖于水头梯度,而不是水头本身.因此,抽水进入中时段后,尽管压力场在随时间不断变化,但地下水速度场却是稳定的.

综上所述,捕获区和捕获时间的解析解在近场和中时段后可以近似使用.当给定水平井单位长度滤管的抽水量、有效孔隙度、含水层厚度、水平井离底边界的距离以及起始点的座标时,水平井的捕获时间可用 Zhan 和 Cao^[12]所提供的解析公式求解.这些公式是通过设置影射井来获得等水头曲线和流线,然后计算速度,从而得到捕获时间.捕获时间相等的点所连成的曲线(等时线),描述了对应某一捕获时间的捕获区的范围.

在有些环境工程应用中,水平井被安装在含水层的底部.比如,水平井通常用来抽取位于含水层底部的比重较大的非溶性液体(如 DNAPLs).这种位于含水层底部的水平井捕获时间的求解也见于 Zhan 和 Cao^[12].另有一种情况是含水层的上边界为一等水头的河流边界.这种情况下的捕获区和捕获时间也在 Zhan 和 Cao^[12]中讨论过.

Zhan 和 Cao^[12]的研究表明含水层的上下边界及介质为各向异性时,对捕获区的形状和捕获时间有较大影响.

5 讨论和总结

(1)本文阐述了地下水向水平井流动的一般特性,并简介了有关地下水在水资源和环境工程中的应用研究.(2)研究了地下水向线汇水平井流动的一般方法,并取得了较满意的结果.这个方法首先研究地下水向点汇流动问题,然后将点汇解沿水平井轴方向积分,得到线汇水平井的降深分布.不同含水层,比如承压含水层、越流含水层、河下含水层和非承压含水层中地下水向线汇水平井流动的半解析解都已获得.详细分析了水平井的标准曲线和微分标准曲线.此半解析解通常可用于解释小流量水平井在中间抽水时段以后的降深曲线.小流量水平井通常用于地下水污染清除.(3)对于大流量水平井,因井管内水流水头损失较大,水平井不能近似为等流量的线汇,需考虑井外渗流和井内管流的耦合流动系统.大流量水平井通常用于排供水.(4)水平井井储效应对水平井初始降深有较大影响.随着抽水时间延长,井储效应的影响逐渐消失.(5)当水平井用

在非饱和含水层中抽取气体时,如果地面无不透气层覆盖时,抽气效率会大幅下降.当水平井用在饱和含水层抽取污染地下水时,对不同含水层条件(比如承压含水层、越流含水层、河下含水层和非承压含水层)下的捕获区和捕获时间的解析解做了较详细的研究.捕获区和捕获时间可以用于快速估计水平井对污染物的清除效率.

参考文献:

- [1] Seines K, Lieu S C, Haug B T. Troll horizontal well tests demonstrate large production potential from thin oil zones [J]. SPE Reservoir Engineering, 1994, 9(2): 133—139.
- [2] Parmentier P P, Klemovich R M. A new direction in remediation [J]. Civil Engr, 1996, 66: 55—57.
- [3] Joshi S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells [J]. J of Petroleum Tech, 1988, 40(6): 729—739.
- [4] Maurer W C. Recent advances in horizontal drilling [J]. J Canadian Pet Technol, 1995, 34: 25—33.
- [5] Penmatcha V R, Arbabi S, Aziz K. Effect of pressure drop in horizontal wells and optimum well length [A]. Proceedings of the 1997 SPE production operations symposium [C]. Oklahoma: Soc Pet Eng, 1997.
- [6] Morgan J H. Horizontal drilling applications of petroleum technologies for environmental purposes [J]. Ground Water Mon Rev, 1992, 12(2): 98—102.
- [7] Environmental Protection Agency (EPA). Manual alternative methods for fluid delivery and recovery [R]. EPA/625/R—94/003, 1994.
- [8] Murdoch L C. Transient analyses of an interceptor trench [J]. Water Resour Res, 1994, 30(11): 3023—3031.
- [9] Falta R W. Analytical solutions for gas-flow due to gas injection and extraction from horizontal wells [J]. Ground Water, 1995, 33(2): 235—246.
- [10] Sawyer C S, Lieuallen-Dulam K K. Productivity comparison of horizontal and vertical ground water remediation well scenarios [J]. Ground Water, 1998, 36(1): 98—103.
- [11] Zhan H. Analytical study of capture time to a horizontal well [J]. J Hydrol, 1999, 217: 46—54.
- [12] Zhan H, Cao J. Analytical and semi-analytical solutions of horizontal well capture times under no-flow and constant-head boundaries [J]. Adv Water Resources, 2000, 23(8): 835—848.
- [13] Hantush M S, Papadopoulos I S. Flow of ground water to collector wells [A]. Proc Am Soc Civil Engrs [C]. J Hydraulics Division, 1962, HY5: 221—244.
- [14] Goode P A, Thambynayagam R K M. Pressure draw-down and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media [J]. SPE Formation Evaluation, 1987, 2(4): 683—697.
- [15] Daviau F, Mouronval G, Bourdarot G, et al. Pressure analysis for horizontal wells [J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3: 716—724.
- [16] Ozkan E, Raghavan R, Joshi S D. Horizontal-well pressure analysis [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4: 567—575.
- [17] Kuchuk F J, Goode P A, Wilkinson D J, et al. Pressure transient behavior of horizontal wells with and without gas cap or aquifer [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6: 86—94.
- [18] Cleveland T G. Recovery performance for vertical and horizontal wells using semianalytical simulation [J]. Ground Water, 1994, 32(1): 103—107.
- [19] Kawecki M W. Transient flow to a horizontal water well [J]. Ground Water, 2000, 38(6): 842—850.
- [20] Zhan H, Park E. Vapor flow to horizontal wells in unsaturated zones [J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66(3): 710—721.
- [21] Zhan H, Zlotnik V A. Groundwater flow to a horizontal or slanted well in an unconfined aquifer [J/OL]. Water Resour Res, 2002, 38(7): 10.1029/2001WR000401.
- [22] Park E, Zhan H. Hydraulics of horizontal wells in fractured shallow aquifer systems [J]. J Hydrol, 2003 (in press).
- [23] Plummer C R, Nelson J D, Zumwalt G S. Horizontal and vertical well comparison for in situ air sparging [J]. Ground Water Monitoring and Remediation, 1997, 17(1): 91—96.
- [24] Hunt B, Massmann J W. Vapor flow to trench in leaky aquifer [J]. J Envir Engr, 2000, 126: 375—380.
- [25] Park E, Zhan H. Hydraulics of a finite-diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect [J]. Adv Water Resources, 2002, 25(4): 389—400.
- [26] Steward D R, Jin W. Gaining and losing sections of horizontal wells [J]. Water Resour Res, 2001, 37(11): 2677—2685.
- [27] Korte N, Kearn P M, Siegrist R L, et al. An evaluation of horizontal recirculation using single-well tests, pumping tests, tracer tests, and the colloidal borescope [J]. Ground Water Monitoring and Remediation,

- 2000, 20(1): 78—85.
- [28] Rosa A J, Carvalho R de S. A mathematical model for pressure evaluation in an infinite-conductivity horizontal well [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(4): 559—566.
- [29] Langseth D E. Hydraulic performance of horizontal wells [A]. Proceedings of HMCRI's 11th national conference (SUPERFUND'90) [C]. Washington: Hazardous Materials Control Research Institute, 1990. 398—408.
- [30] Waterloo Hydrogeologic Inc. Visual mudflow [DB/OL]. Waterloo, Ontario, Canada, 2000. <http://www.flowpath.com>
- [31] Zhan H, Park E. Horizontal well hydraulics in leaky aquifers [J]. J Hydrol, 2003 (in press).
- [32] Zhan H. Hydraulics of horizontal wells in leaky confined aquifers [J]. J Hydrol, 2003 (in press).
- [33] Tarshish M. Combined mathematical model of flow in an aquifer-horizontal well system [J]. Ground Water, 1992, 30(6): 931—935.
- [34] Olson R M, Wright S J. Essentials of engineering fluid mechanics [M]. 5th ed. New York: Harper & Row Publishers, 1990.
- [35] Munson B R, Young D F, Okishi T H. Fundamentals of fluid mechanics [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [36] Chen C, Wan J, Zhan H. Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well [J]. J Hydrol, 2003 (in press).
- [37] Zhan H. Groundwater flow to horizontal wells in water table aquifers: Field experiments and theory [A]. Proceeding of international groundwater symposium (published in CD) [C]. Berkeley, CA: [s. n.], 2002.

Horizontal Wells in Water Resources and Environmental Engineering

ZHAN Hong-bing¹, WAN Jun-wei²

(1. Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University, College Station, TX 77843—3115, USA; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This article briefly introduces recent researches on horizontal wells in water resources and environmental engineering. This paper focuses on the location of semi-analytical solutions of groundwater flow to horizontal wells under different aquifer conditions such as confined, leaky confined, unconfined aquifers and aquifers under streams. The type curves and the derivative type curves of drawdowns are analyzed. Such semi-analytical solutions are useful for the interpretation of drawdowns characteristics after intermediate pumping time. This article also studies the hydraulics of a horizontal well at a large pumping rate, which is commonly used for dewatering and water supply. The authors have to consider the hydraulic head loss within the wellbore and to incorporate the Darcian flow and the pipe-flow into an integrated flow system. This article discusses vapor extraction in the unsaturated zone using horizontal wells and provides simplified analytical solutions to describe vapor pressure distribution and vapor flux across the ground surface (if the ground is open). It also reports the capture zone and capture time calculations under different aquifer conditions.

Key words: horizontal well; semi-analytical solution; capture.