

渗流井合理竖井降深确定

王 玮, 刘 基, 陈 立, 宁丽娜, 薛 璐

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过采用单位面积河流在单位水头差作用下的渗漏量来表征河流渗漏能力, 建立渗流井取水理想模型, 分别计算了在不同河流渗漏能力和含水层渗透性能条件下, 竖井降深对渗流井出水量的影响。建立渗流井取水非稳定流模型, 计算了在前期稳定竖井降深不同条件下, 河流断流后渗流井出水量衰减过程及竖井降深发展过程。提出渗流井合理竖井降深应根据河流与地下水是否脱节以及含水层渗透性能, 在岸边渗流井中部及一侧各布设一个观测孔, 根据观测孔水位进行确定。对于含水层渗透性能较强地区, 渗流井竖井降深应使得渗流井范围内地下水位与河流脱节, 但高于辐射孔顶面; 对于含水层渗透性能较差地区, 渗流井竖井降深应使得侧部观测孔水位接近河床底面或刚出现脱节。

关键词: 渗流井; 合理降深; 渗漏能力; 脱节; 数值模拟

中图分类号: P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)03-0281-04

Determination on the Reasonable Drawdown of Vertical Well of a Seepage Well

WANG Wei, LIU Ji, CHEN Li, NING Li-na, XUE Lu

(School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract By using an ideal model for seepage well and the leakage with specific head difference in specific area to represent the leakage capability of the river, the effects of different drawdown on the yield of seepage well are calculated under different leakage capability of river and different permeability of aquifer. The process of the flow rate reduction of the seepage well and the process of the drawdown development of vertical well while the river dried up are illustrated by the transient model of seepage well under different previous steady drawdown of vertical well. The results show that the reasonable drawdown of vertical well of seepage well should be determined by the water level of observation wells located in both central part and side part of the seepage well based on whether the river disconnects groundwater, and the permeability of aquifer. As for the high permeability aquifer, drawdown of vertical well should make the groundwater level disconnect the river, but higher than the top of the radiate bore; as for the poor permeability aquifer, the drawdown should make the water level of the side observation well close to the bottom of riverbed or just disconnect with river.

Key words: seepage well; reasonable drawdown; leakage ability; disconnection; numerical modeling

0 引言

渗流井取水工程是一种集取河流渗漏补给量的技术^[1], 是利用天然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的工程。渗流井是一种结构较为复杂的地下水取水建筑物^[1], 由

竖井、平巷、硐室和辐射孔(渗流孔)4部分组成。每个渗流井视具体情况一般包含若干个硐室, 在各硐室的顶部及侧面一般向上或侧上方向上施工若干幅射孔, 辐射孔伸入到河谷区的主要含水段内; 硐室间距约 50 m, 之间通过平巷连接; 整个平巷—硐室—辐射孔结构体系位于河床之下的地层之中, 而

收稿日期: 2009-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40502025); 长安大学科学基金项目(05Q12)

作者简介: 王 玮(1970-)男, 江西乐平人, 副教授, 工学博士, 从事水资源、环境教学与研究。E-mail: wangwei1@chd.edu.cn

© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

竖井则位于河岸边,通过平巷与该结构体系相连,竖井即为渗流井的取水点。

渗流井目前已被多处水源工程采用,不乏成功的实例,以其高产、低耗、好管理、供水总体成本相对较低等众多优势,凸现在人们面前。尤其是在干旱半干旱地区的第四系冲积含水层厚度较小的河谷区,其单井出水量远大于传统的管井。

李晓等从不同方面对渗流井取水进行了研究^[2-4],但均未涉及合理竖井降深确定方面的内容。在开采过程中增大竖井降深,一方面将增加渗流井的出水量,另一方面可能因降深过大导致取水成本增高,且在枯水季节使得渗流井正常取水的可靠性降低。为此,在不同的含水层和河流特征条件下,确定渗流井开采时的合理降深,是渗流井设计中急需解决的一个关键问题。

1 渗流井计算模型

通过对渗流井取水时的井流特征分析,渗流井取水时,地下水由渗流井周围向渗流井径流,水流具有显著的三维流特征。在渗流井—含水层系统内,多种流态并存,由于在“辐射孔—硐室—平巷—竖井”系统有水的流动,存在水头损失,则这些部位不是等水头边界条件,同时,由于渗流井的出口在竖井处,在这里水头最低,且在辐射孔、平巷、硐室内也不是等强度分布,其水力条件复杂,很难严格地确定。Wang 等^[1]在陈崇希等^[7]提出的“渗流—管流耦合模型”、等效渗透系数等理论基础上,建立了渗流井取水稳定流数学模型,并采用数值方法求解该模型^[1]。

根据该数学模型,针对不同河流渗漏能力、不同地层条件,可通过建立数值模型,计算各种条件的不同竖井降深对渗流井取水的影响,在此基础上,得出确定合理竖井降深的方法。

根据渗流井工程较多的陕北地区的河谷区条件,所选用的理想算例为一长方形河谷区,东西向长 10 km(顺河流方向),南北向宽 700 m(垂直河流方向),含水介质为第四系冲积层及中生界砂泥岩风化带,总体厚度较小,为非均质轴对称各向异性介质,呈双层结构形式分布。中生界砂泥岩风化带以下岩石结构致密,裂隙不发育,构成区域隔水底板。渗流井位于模型区中部,为计算渗流井周围的三维流场,厚度按 40 m 计,其中第四系厚度为 10 m。理想模型中东西两边界距离渗流井较远,可概化为第一类边界,水头为 40 m,河流水位也为

40 m,南北两侧为河谷区边界,可概化为隔水边界。计算区的顶面为潜水面,不考虑面状源汇项。在模型中通过设定不同的含水层参数、河流渗漏能力,可计算出不同条件下不同竖井降深对渗流井取水量的影响。

根据陕北地区常见的渗流井工程确定理想算例中的渗流井结构(图 1),竖井建于河流岸边,深度 30 m,井壁采用混凝土支护,内径 3 m。在竖井内向河床方向开挖平巷,平巷顶面埋深为基岩以下 5 m,净截面尺寸为 1.8 m×1.6 m(高×宽)。设计硐室 5 个,间距为 70 m,硐室顶面高出平巷顶面 1.2 m,每个硐室的尺寸为 3 m×3 m×4 m(高×宽×长)。硐室内布设辐射孔 5 个,孔径 108 mm,单孔长度进入第四系孔隙含水层 3 m 为宜。

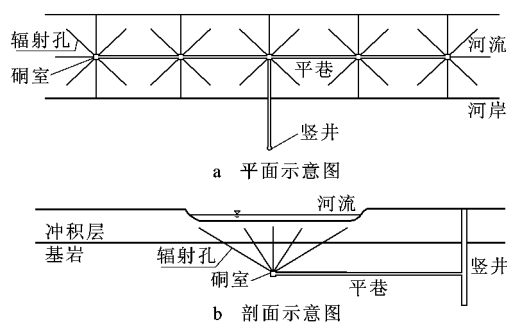


图 1 典型渗流井取水工程结构

Fig. 1 Sketch of a Typical Seepage Well Structure

为准确刻画渗流复杂的结构,首先采用长方体单元对计算域进行精细剖分,垂直河流方向剖分为 78 行,顺河流方向剖分为 269 列,垂向上剖分为 14 层。剖分网格中水平最大间距 200 m(远离渗流井位置),最小间距 0.25 m(渗流井及其附近)。垂向上将第四系孔隙含水层与基岩风化带剖分为 3 层,将基岩裂隙含水层剖分为 11 层,共 14 层,其中第 9、10 层为硐室所在层,层厚分别为 1.2、1.8 m,第 10 层同时也是平巷所在层。

由于在模型中等效渗透系数是渗流速度的函数,因此必须采取迭代的方法进行计算^[1,8]。

2 不同河流渗漏能力下的合理降深

自然界在河流作用下,河谷区含水层与河流水体间一般存在一层渗透性相对较差的河床介质,该介质的存在对河流与地下水间的水量交换起着一定的阻碍作用,使得在计算中河流一般不能简单地处理为一类边界。根据美国地调局开发的 Modflow 软件中关于河流的处理方法,可采用单位面积

河流在单位水头差作用下的渗漏量来表征河流渗漏能力。根据达西定律

$$Q=K\frac{\Delta H}{M}A=\frac{K}{M}\Delta HA=C\Delta HA$$
$$C=\frac{K}{M}$$

式中: Q 为河流渗漏补给量(m^3/d); K 为河床介质渗透系数(m/d); M 为河床介质厚度(m); ΔH 为河流发生渗漏的水头差(m); A 为河流发生渗漏的面积(m^2); C 为河流渗漏能力(d^{-1})。

根据计算结果, 不同河流渗漏能力条件下渗流井稳定出水量与竖井降深间的关系见图 2。

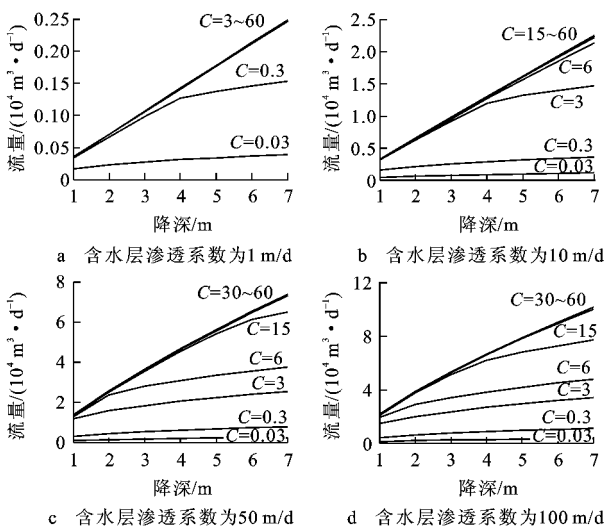


图 2 不同渗漏能力河流条件下渗流井稳定出水量与竖井降深关系

Fig. 2 Yield of Seepage Well Versus Drawdown of Vertical Well Under Different Conditions with Variable River Leakage Ability

由图 2 可见, 当河流渗漏能力较差时, 在竖井降深较小的条件下, 就已经出现河流与地下水位脱节(指随着地下水位下降, 河床下非饱和区随抽水进行不断扩展, 使得地下水与河水失去饱和和水力联系, 产生脱节^[8])。此时随着竖井降深的增加, 无论含水层渗透性能大小, 渗流井出水量增加幅度很小, 渗流井取水效率降低。随着河流渗漏能力的增强, 竖井降深较大时, 才出现河流与地下水位脱节。此时, 增加竖井降深, 能显著增加渗流井出水量。

由此表明, 在考虑不同河流渗漏能力的条件下, 应根据渗流井分布范围内河流与地下水位是否脱节, 来确定竖井合理降深, 当渗流井分布范围内河流与地下水位出现较大面积脱节时, 就不宜再进一步增加竖井降深。

3 不同地层条件下的合理降深

含水层的渗透性能大小, 决定着地下水位降落漏斗的扩展范围, 进而也决定着渗流井开采对河流渗漏补给的激发程度。

根据计算结果(图 3), 当第四系松散层含水层渗透性能较强时, 地下水位降落漏斗可向外围进一步扩展, 从而激发渗流井分布范围之外河流的渗漏补给, 渗流井出水量有比较显著的增加, 但增加幅度却逐渐减小, 含水层内大降深分布面积较大, 近渗流井地带地下水位可能下降到辐射孔顶面之下, 使得渗流井取水效果下降; 当含水层渗透性能较差时, 降落漏斗向外围扩展有限, 渗流井出水量增加幅度很小。

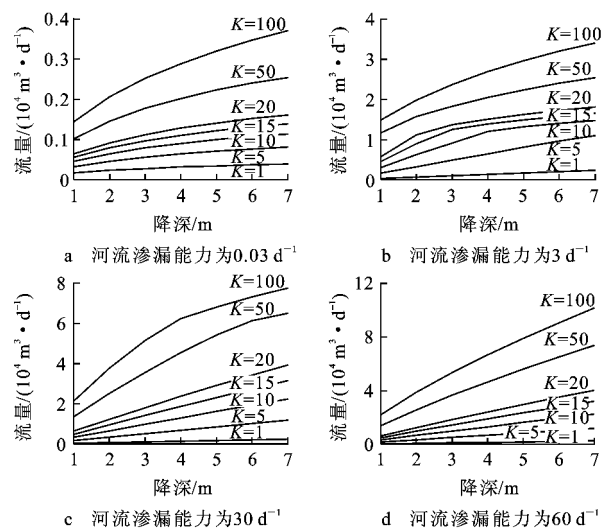


图 3 不同渗透性能含水层条件下渗流井稳定出水量与竖井降深关系

Fig. 3 Yield of Seepage Well Versus Drawdown of Vertical Well Under Different Conditions with Variable Aquifer Permeability

由于河谷区基岩弱风化带的渗透性能一般均较差, 其渗透系数的变化对渗流井出水量影响程度较小, 不同基岩渗透系数条件下的计算结果也说明了这一点。由此表明, 在考虑不同含水层渗透系数的条件下, 应根据渗流井分布范围内地下水位下降程度, 来确定竖井降深, 为保证辐射孔的集水能力, 地下水位不应下降到辐射孔顶面之下。

4 河流断流条件下的渗流井取水

在干旱半干旱地区, 受气候条件及河谷区水资源开发利用等影响, 河流流量季节波动较大, 在部分时段河流流量锐减甚至出现断流现象。此时, 将

对依赖河流渗漏补给的渗流井出水量产生较大的影响。在此期间势必要消耗部分储存量,才能维持渗流井的正常运行。此时,断流前竖井降深及地下水流动形态,对渗流井持续取水的可靠性有着重要的影响。

为此,在前述的渗流井稳定流计算模型基础上,引入时间变量,可建立渗流井取水非稳定流计算模型,用以计算断流期间渗流井出水量衰减情况(定降深抽水)或竖井降深发展情况(定流量抽水)。在第四系含水层给水度为 0.15、侏罗系含水层给水度为 0.02 的条件下,断流后竖井降深发展情况见图 4(定流量抽水,图中 D_0 表示断流前竖井稳定降深,单位为 m),渗流井出水量衰减情况见图 5(定降深抽水,图中各曲线由上至下依次为先期稳定竖井降深为 7、6、5、4、3、2、1 m)。

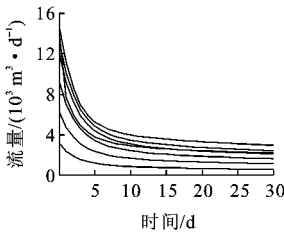
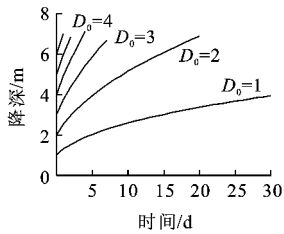


图 4 河流断流条件下竖井降深发展

图 5 河流断流条件下渗流井出水量衰减

Fig. 4 Process of Drawdown Development of Vertical Well While the River Dried Up

Fig. 5 Process of Yield Reduction of Seepage Well While the River Dried Up

由计算结果可知,其他条件相同情况下,当河流断流时按正常河流条件出水量继续抽水,前期稳定流竖井降深较小的渗流井中,竖井降深发展速度较慢,仍能维持相当一段时期的正常开采。而在前期稳定流竖井降深较大的渗流井中,竖井降深发展速度较快,如本算例中先期降深分别为 2、3、4、5、6 m 的渗流井中,在抽水分别进行 20、7、4、2、1 d 时,竖井降深均达到或超过 7 m,使得因计算出现干单元而无法计算。

当河流断流时按先期竖井降深继续进行定降深抽水,先期稳定流竖井降深较大的渗流井出水量衰减速度,比前期竖井降深较小渗流井的要快。因此,河流正常流量条件下,应在保证一定取水量时,竖井降深尽可能小,这样,在含水层中就储存有较多的地下水,枯水季节来临时,可保证渗流井出水量不致快速衰减(或保证竖井降深不致快速发展)。

综上所述,渗流井竖井降深应根据河流与地下水是否脱节以及含水层渗透性能综合确定。为此,应在岸边渗流井中部及一侧各布设一个观测孔,以观测开采后的地下水位变化状况。对于含水层渗透性能较强的地区,渗流井竖井降深应使得渗流井范围内地下水位与河流脱节,但高于辐射孔顶面;对于含水层渗透性能较差的地区,渗流井竖井降深应使得侧部观测孔水位接近河床底面或刚出现脱节。

5 结语

(1)当河流渗漏能力较差时,渗流井开采易使河流与地下水位脱节,此时随着竖井降深的增加,渗流井出水量增加幅度很小。随着河流渗漏能力的增强,竖井降深较大时,才出现河流与地下水位脱节,此时,增加竖井降深,能显著增加渗流井出水量。

(2)含水层渗透性能较强时,渗流井开采可激发渗流井分布范围之外河流的渗漏补给,增加竖井降深渗流井出水量有比较显著的增加;含水层渗透性能较差时,降落漏斗向外围扩展有限,增加竖井降深渗流井出水量增加幅度很小。

(3)前期稳定流竖井降深较小的渗流井,当河流断流时出水量衰减速度(或竖井降深发展速度),比前期稳定流竖井降深较大渗流井的要小。

(4)渗流井竖井降深应根据河流与地下水是否脱节以及含水层渗透性能综合确定。

参考文献:

[1] Wang W, Zhang G. Numerical Simulation of Groundwater Flowing to Horizontal Seepage Wells Under a River[J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15(6): 1211-1220.

[2] 李 晓, 邓 高. 渗流井滤膜的初步试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(3): 54-58.

[3] 李 晓, 杨立中, 于苏俊. 重庆白沙渗流井渗透水水质特征研究[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(6): 610-614.

[4] 李 晓, 杨立中. 利用天然河床渗滤取水的新技术[J]. 中国给水排水, 2003, 19(6): 74-76.

[5] 李 晓. 天然河床渗滤取水技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.

[6] 伏 苓, 方 晔, 张莉平, 等. 某县城渗流井取水工程设计[J]. 给水排水, 2004, 30(7): 27-30.

[7] 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, 31(1): 1-8.

[8] 刘国东. 傍河地下水与河水脱节机理研究[J]. 长春科技大学学报, 1998, 28(1): 64-69.