# 水平井的水力特征及其解析解的适用条件

# 万军伟,沈仲智,潘欢迎

(中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074)

摘要:利用自制的水平井砂槽模型,进行了一系列不同流量条件下的水平井抽水试验,结果 表明:(1)在不同出流条件下,水平井井管中可以同时出现层流一粗糙紊流多种不同流态;(2) 水平井出流条件下,井管中的水头损失既不能忽略,也不服从线性变化规律.它与井管中的水 流流态有关.用"等水头井壁"或"等强度线汇"来刻画水平井井壁边界条件是不全面的.根据 "等强度线汇"理论得到的解析解与试验结果对比发现,本试验条件下解析解的近似适用条件 是:水平井管中的水流全部为层流(*Re*<2 320)或者层流和层流一光滑紊流过渡区(*Re*<4 000)同时并存的情况.当水平井管中出现光滑紊流区(*Re*>4 000),即同时有层流、层流一光 滑紊流过渡态和光滑紊流或更多种流态时,解析解已不再适用,此时必须用新的层流一管流 耦合模型来求解.

关键词:水平井;砂槽模型;流态;水流阻力;解析解. 中图分类号:X143;P641.2 文献标识码:A 文章编号:1000-2383(2003)05-0537-08 作者简介:万军伟(1964-),男,副教授,1985年毕业于武汉地质学院,2002年获博士学位, 现从事水文地质和岩溶地质方面的教学与科研工作,E-mail,waniw64@21cn.com

# 0 引言

水平井是指进水段(滤管)沿水平方向放置的 井.20世纪30年代,前苏联和美国就开始将水平井 用于油藏和天然气的开采[1~3],当时由于受技术手 段的限制,水平井的施工主要是在地下坑道、隧道或 大口径的垂直井中进行,因此施工难度和成本都很 高,水平井的长度和数量也十分有限.到 20 世纪 70 年代,随着水平井钻井工艺及其配套技术的日趋完 善,水平井的施工难度、施工成本逐渐降低,准确性 不断提高,在世界各地油藏和天然气的开采中水平 井的数量急剧上升[4~10].近年来,随着超短曲率半 径水平井钻井工艺的日趋成熟,美国和其他一些发 达国家已陆续开始将水平井技术应用到地下水资源 开采、地下水污染治理及斜坡排水治理工程等方 面[11~17],尤其在地下水污染治理工程中(地下水污 染物的原位抽吸系统),水平井技术应用十分广泛. 实践表明,在低渗透性、薄含水层的地下水采排工程 中,水平井的采排效率要比垂直井高得多[13].

#### 基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 49872081).

## 1 水平井的研究现状及存在的问题

#### 1.1 研究现状

水平井水力特征的研究始于 20 世纪 50 年代, 1958 年 Merkulov 报道了计算水平井流量的第一个 解析解;1962 年 Hantush 和 Papadopulos<sup>[18]</sup>对水平 井渗流理论进行了较全面的研究,得到了无限潜水 含水层和承压含水层中辐射井(collector wells,相 当于多个水平井)的解析公式,并应用影射原理推导 了半无限含水层以及其他边界条件和不同辐射井数 (水平井的个数分别为 2,3,4,6,8)的降深公式,但 前提是将水平井视为等强度的线汇,利用空间无限 点源的渗流基本方程,通过积分得到有限长度水平 井和辐射井的解析公式,未考虑水平井井管中的流 动对地下水渗流场的反作用.

1986年以后,许多水文地质和环境地质学家对 水平井进行了研究<sup>[19~24]</sup>,研究内容主要涉及水平井 流的水动力特征、不同介质和边界条件下水平井流系 统降深、流量、流速的解析解、利用水平井抽水试验反 求水文地质参数以及水平井在土地修复中的应用等.

1992 年 Tarshish<sup>[25]</sup>对 Hantush 的模型进行了

收稿日期: 2003-05-28

改进,考虑了水平井井管中的水流运动,他将水平井 井管中的水流运动假定为稳定流,水流流态为粗糙 紊流(阳力平方区),水头损失与平均流速的二次方 成正比. 这是最早考虑水平井管道内水头损失的论 文,说明作者已经意识到了含水层和井管中水流运 动的区别,但是它假定水平井为无限长、整个水平井 井管中水流为稳定流、水流流态都为"阻力平方区". 这一假定实际上并不具有普遍意义,因为"井管中水 流的水头损失与平均流速呈平方关系"必须当水平 井管道中水流的流态都为粗糙紊流区(即雷诺数大 于105)时才成立<sup>[26]</sup>.事实上,当管道中出现粗糙紊 流时,该水平井的上游必定同时存在光滑紊流,层流 以及它们三者之间的两种过渡区,这几种流态条件 下水流的水头损失与平均流速就不再服从平方关 系,另外,Tarshish 在公式推导时首先由谢才公式  $(\wedge H = CQ^2)$ 计算水平井井管中的管道流,得到井壁 处的水头分布,然后再由地下水渗流理论建立含水 层中的渗流公式,这种处理方法有严重缺陷,因为这 种处理方法必须事先已知水平井管各断面的流量 (Q)及谢才系数(C),事实上我们只知道水平井出口 处的流量 Q<sub>#0</sub>,而水平井中间各断面的流量事先我 们是不知道的;谢才系数(C)也是随着水平井中流 量的变化而变化.因此 Tarshish 的模型并不是耦合 模型,而是按谢才公式预先给定沿水平井的水头分 布.

#### 1.2 存在的问题

从目前国内外研究进展来看,绝大多数都是基 于"等强度线汇"或"等水头井壁"假定导出的解析公 式,仅仅对含水层性质、含水层边界条件、水平井的 结构等侧面进行了较多的讨论和分析.对水平井井 管中水流流态、阻力及其对含水层的影响几乎都未 涉及. 一般不考虑水平井井管中的管道流或仅考虑 一种流态(阻力平方区)<sup>[25]</sup>,更没做到含水层渗流与 水平井管道流的耦合求解.

"等水头井壁"假定的实质是忽略水流在水平井 管道中流动时存在的水流阻力,从流体运动的基本 概念来看(图1),水平井一侧出流,其出口处的水头 最低,沿水平井向里水头逐渐升高.而"等水头线汇" 假定沿水平井管道水头处处相等,意味着水平井管 道中的水是不流动的,这与实际不符."等强度线汇" 假定处处单位长度井管入流量相等,其结果是水平 井管的中点降深最大,这就意味着水平井管道中的 水是由两端向中间汇流,也与实际不符.由此可见



图 1 水平井井轴方向降深和流向示意图



"等水头线汇"、"等强度线汇"假定下的流场特征都 与实际的水平井流水力特征不符.也就是说"等强度 线汇"和"等水头井壁"假定实际上是一种近似的假 定,但前人都未对这两种假定的适用条件及其可能 引起的误差进行分析.基于上述原因笔者专门设计 制作了水平井巨型砂槽模型,通过模型实验来研究 水平井流的水力特征.

### 2 水平井砂槽模型的设计和模型试验

#### 2.1 模型设计

为了便于砂槽物理模型的制作、试验和计算,并 尽可能多地再现水平井管水流的多流态特点,设计 了一个类似河下矩形含水层的砂槽模型(图 2),在 距砂槽底部 20 cm 处设置一口水平井,并可进行渐 变流量或阶梯流量等多种抽水的砂槽物理模型试 验.砂槽模型的组成和结构如下:



#### 图 2 水平井砂槽模型

Fig. 2 Sand tank model of horizontal well 1. 溢水装置;2. 渗流槽;3 水平井;4. 阀门;5. 电磁流量计;6. 点式测 压计;7. 压力传感器;8. AD转换器;9. 电脑

(2)边界条件.为便于计算,并突出水平井的影 响, 矩形砂槽的 4 个侧面和底面均设计为平面隔水 边界.顶面边界条件有隔水边界、潜水面边界和已知 水头边界 3 种方案可供选择. 若选取隔水边界,则水 平井的抽水量仅依靠弹性储存量的释放来提供,将 导致"含水层"中水头过快地下降,而"含水层"的初 始水头在实验室里难以提得过高,因此,在边界条件 下会使得试验时间过短,不利于试验数据的获取和 数值模拟的检验.另外,砂槽的侧向变形不仅难以避 免,而且很可能侧向变形(水压降低,侧向壁面收缩) 释放的水量超过"含水层"弹性储存量的释放量,从 而使研究的问题复杂化. 若选择潜水面边界,则会涉 及饱和一非饱和问题的非饱和参数的测定,也会使 问题没有必要的复杂化.于是选择上边界为已知水 位的"河流"边界,在水平井抽水过程中,河流作为补 给水源.

另外,分别在砂槽的两侧安装了溢水装置(图 2),通过溢水设备尽可能使"河水位"保持稳定,并控 制顶部具有约 10 cm 的水层厚度,避免"河流"干枯 以及空气进入"含水层"而破坏基本条件.

(3)选择透水介质的原则有二:一是为保证渗流 遵循达西定律,不能采用过粗的介质;二是为使水平 井井管中水流的流态除层流外能出现更多的流态, 这就要求水平井的出水量足够大,因此介质不宜过 细,考虑到上面 2 个矛盾因素,笔者选择粒径为 0.25~1.0 mm的中粗砂作为砂槽的充填材料.为此, 首先对河砂进行水洗、筛分,在装砂的过程中采用分 层夯实、控制容重的方法,使砂层尽可能均匀,以达到 均质、各向同性的要求.砂层装填的总厚度为 1.0 m.

(4)为了使水平井管中能出现更多的流态,在模型设计时除了考虑模型尺寸尽可能大、透水介质比较粗以外,还注意到了水平井井管的安装位置要比较低,使水平井的出水口位置与"河水位"有相当的高差.本模型水平井位于距底板(xoy)之上20.0 cm的位置;为了使水平井滤水管的过水能力尽可能大,选择内径为5.42 cm,外径为6.0 cm的滤水管,滤水管的长度与模型长度相等(453 cm),这种条件下, 笔者粗略地用等水头水平井条件估算,井管中的水

Table	e 1 Position of	Position of observation points			
观测孔	$x/\mathrm{cm}$	y/cm	$z/\mathrm{cm}$		
1	41.5	20	80		
2	41.5	20	10		
3	156.5	30	60		
4	226.5	20	40		

20

30

20

20

226.5

296.5

401.5

401.5

5 6

7

8

流除层流外可以形成紊流.滤水管采用氯乙烯塑料 管制成,滤水孔采用梅花型布局,孔径和孔间距均为 5.0 mm,空隙率为 39.3%,滤水管的外壁缠一层极 薄的尼龙丝网,以防止砂粒进入到水平井中影响水 平井的正常工作.

(5)为了能更多地获得水平井三维流动的信息, 水平井的位置并没有设计在砂槽的对称面上,即 y=25.0 cm 处,而是略为偏向一侧,即放置在 y=20.0 cm 处.

(6)传感器设置.水压(水头)传感器共设置 10 个,其中 8 个均匀地布置在砂槽中,具体位置如表 1 所示.另外 2 个传感器,一个位于砂层之上的"河水" 中,以记录"河水位"的变化,还有一个位于水平井的 出口管中,距砂槽内壁 31.0 cm,以记录水平井出口处 的水压(水头);在水平井出口管水压探头下游的水平 井管中设置流量传感器,记录水平井的出水量;在流 量传感器的下游设置阀门,以控制水平井的流量.

(7)数据采集系统.包括 AD 转换器(将压力和 流量传感器输出的电流信号转换成数字信号)和微 型计算机,进行数据储存和图形输出.压力和流量传 感器都是1s记录一个数值.

2.2 试验步骤

整个水平井砂槽模型试验分为以下 3 个步骤. (1)砂槽"含水层"饱水过程:该过程是通过打开砂槽 底部的进水阀门缓慢地自下而上充水,目的是为了 充分排除砂槽"含水层"中的气泡,该过程一般约需 24 h.(2)模型检查:主要检查连接压力传感器的乳 胶管内是否有气泡和漏水等情况,以及传感器、数据 采集程序的运行情况等.(3)关闭砂槽底部进水阀 门,改由砂槽上部供水,等待片刻,使"含水层"中的 "地下水"处于稳定状态;溢水口保持有水流溢出,控 制"河水位"为基本稳定.(4)慢慢打开水平井出口阀 门,控制水平井出水量增至340 mL/s,稳定30 s后流

10

60

80

10





量再次增大至 720 mL/s,如此逐级增大至 1 200, 1 400,1 690 mL/s,最后关闭,共计 220 s. 水平井出 口流量和典型观测点的水位动态如图 3,4 所示.当 Q=1 690 mL/s 时,其雷诺数为 39 327,说明此时水 平井管道内已同时存在层流、层流一光滑紊流过渡 区、光滑紊流区以及光滑紊流与粗糙紊流过渡区 4 种流态.

由图 4 可见,虽然 8 # 和 1 # 观测点距水平井井 轴都为 10 cm,但两者的水头明显不等,位于水平井 出口附近的 8 # 观测点的水头要明显低于位于水平 井末端附近的 1 # 观测点,而且随着水平井流量的 加大,两者的差别也越来越大.我们还可以设想,随 着模型尺寸的增大、水头的提高及水平井长度的加 大,这种差别也会随之加大.这些现象表明:水平井 管道既非等水头井壁,也非等强度线汇.

# 3 "等强度线汇"模型解析解与试验结 果的对比分析

3.1 "等强度线汇"模型解析解

"等强度线汇"模型是基于均质各向同性无限介 质中一瞬时空间点源作用下,温度分布规律的基本 解,将该解应用到地下水井流计算中,则可以得到强 度为 q 的空间瞬时点汇(井径趋于零的球状抽水井) 作用下,均质各向同性无限空间中水头降深分布的 基本解<sup>[27,28]</sup>:

$$s = \frac{q}{8\mu_s(\pi a \ t)^{3/2}} e^{-\frac{t^2}{4at}} .$$
(1)

对于水平井渗流问题,如果假定:①含水层满足 均质各向同性;②渗流服从达西定律;③井径无限 小,且定流量抽水;④井壁出水量沿井轴均匀分布, 则含水层中水平井抽水问题可视为无限空间连续有





限线汇问题——"等强度线汇",该问题可以通过上述空间瞬时点汇的基本解对时间和空间的积分求解得到<sup>[27,28]</sup>,其解为

$$s = \frac{Q}{4\pi K(L-d)} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-y^{2}}}{y} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{L-z}{r}\sqrt{y}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{d-z}{r}\sqrt{y}\right) \right] dy.$$
(2)

其中: $u = \rho^2/4at$ .本次实验的砂槽模型为一有限边 界(矩形)的水平井流问题,其中4个侧面和底面为 隔水边界,顶部为定水头边界,该井流问题可以在上 述无限空间连续有限线汇基本解(2)的基础上,利用 影射原理,经无数次影射,近似为无限空间多条水平 井(抽、注)降深的叠加,其中每一条水平井对观测点 的降深均可用式(2)来描述,当虚拟井为抽水井时, Q 取正值:当虚拟井为注水井时,Q 取负值. 求解过 程中先进行了试算,分别对影射  $1 次_2 x$ 、……、5次不同情况(图 5)的降深进行了计算,发现当影射 次数达到 3 次以后,本模型中降深最大的点(水平井 中点)处的降深值随影射次数的增加已趋于稳定(小 于 mm 级),因此将本模型经3次反应后得到的无限 空间 49 条长度不等的水平井(28 条注水井,21 条抽 水井)模型来近似刻画实际的有限空间水平井连续 抽水问题,由于本次试验为阶梯流量抽水过程,因此 在计算时需进行阶梯流量叠加处理,最后的计算结 果见表 2.

上述计算结果表明:当水平井中流量较小(雷诺 数较小)时,即当水平井管中的水流全部呈层流 (*Re*<2 320)或部分出现层流一光滑紊流(*Re*<4 000)时,基于"等强度线汇"导出的水平井流解析 公式与实际情况吻合较好,相对误差一般小于 5%; 但是随着水平井流量的增大,当井中雷诺数达到 28 390时(水平井管中有部分水流开始呈光滑紊 流),井管附近解析解结果与实测值误差明显增大,

$Q/(\mathrm{mL} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	Re	点号	<b>实测水头值</b> /cm	解析水头值/cm	绝对误差/mm	相对误差/%
		2	1 061	1 051	-10	-0.9
200	4 206	5	1 040	1 025	-15	-1.4
		8	1 038	1 053	15	1.4
532 11		2	893	876	-17	-1.9
	$11\ 186$	5	849	818	-31	-3.7
		8	841	891	50	5.9
1 350		2	502	461	-41	-8.2
	28 390	5	491	307	-184	-37.5
		8	437	493	56	12.8
2 050		2	153	86	-67	-43.8
	$43\ 111$	5	91	-130	-221	-242.8
		8	37	132	95	256.8



Table 2 Errors between analytical solutions and observed values on different conditions



图 5 水平井砂槽模型经 4 次影射后的"等效"模型(垂直水平 井的横截面)

Fig. 5 "Equivalent" model of sand tank of horizontal well 实线为隔水边界;虚线为定水头边界;实心点为抽水井;空心点为注 水井

相对误差达 10%左右;随着水平井流量的进一步增 大,当井中雷诺数大于 33 000,达到 43 111 时(水平 井管同时出现层流、层流一光滑紊流过渡区、光滑紊 流区和光滑紊流与粗糙紊流过渡区),井壁附近解析 解的结果已经完全失真,其相对误差已大于 40%,且 在水平井的中上游表现为负误差(实测值大于计算 值),而水平井的下游则表现为正误差(实测值小于计 算值),在水平井出口处相对误差可达 256.8%.

为什么井壁附近解析解计算结果会出现随着流 量的增大,与实测值偏差越来越大的现象呢?其根 本原因是在解析解的建立过程中曾假定④井壁出水 量沿井轴均匀分布,只有基于该假定才能将水平井 视为等强度的线汇,并利用点汇叠加原理导出解析 公式(2).这一假定所导致的计算结果必然是水平井 中点处的水头降深最大,向两侧降深逐渐减小,形成 由水平井两端向中点汇流的格局(图1),空间上其 等降深面为一以井轴为对称轴的椭球面,这显然与 实际水平井的单向流动大相径庭.因此其计算结果 与实测值的误差会呈现:水平井的末端误差最小,且 呈负误差;沿水平井井轴向下游,负误差逐渐增大, 至水平井中点负误差达到最大值,而后负误差逐渐 减小,并逐渐转变为正误差(实测值小于计算值),至 水平井出口正误差达到最大值(图1).

此外,还有部分学者将水平井假定为"等水头井 壁",这种假定同样也是不成立的,因为若沿水平井 井轴不同部位的水头相等,则意味着水平井管内为 "一潭死水",显然与实际不符,若水平井无限长,则 基于这种假定计算得到的降深结果(图1)是:不管 观测点在井轴方向的哪个部位,只要它们离水平井 井轴的距离相等,则含水层的水头(或降深)必然相 等.也就是说其含水层中的等势面是以井轴为中心 的圆柱面,这与实际显然不符.基于该假定的计算结 果也会出现与"等强度线汇"假定相类似的偏差.

3.2 "等强度线汇"模型解析解的适用条件

根据上述水平井试验和计算结果的分析对比, "等强度线汇"和"等水头井壁"模型对水平井流的概 化从水平井水流运动的概念上来说是失真的.但是 当水平井管中的水流呈层流或者是层流以及层流一 光滑紊流过渡态共存时,即雷诺数较小时,基于"等 强度线汇"和"等水头井壁"理论得到的解析结果失 真不明显,对精度要求不高的水流计算可以适用.根 据本次实验结果其相对误差一般小于 5%.这是由 于在雷诺数条件下,水头损失与断面平均流速呈一 次方(或接近一次方)的关系<sup>[20]</sup>,又由于此时水流的 速度也很小,所以沿水平井井轴的水头线是十分缓 慢的下降曲线.但是随着流量的增大,水平井井管中 除了存在层流以及层流一光滑紊流过渡态以外,还 会逐渐出现光滑紊流、光滑紊流一粗糙紊流过渡态 以及粗糙紊流等多种流态,此时井管中的水头损失 与断面平均流速不仅有一次方的关系,还有 1.75-2 次方的关系,再加上断面平均流速的增大,沿井轴 方向水头损失会急剧增大,此时,基于"等强度线汇" 和"等水头井壁"理论得到的解析结果与实际情况偏 差较大,尤其对水平井附近的描述就会出现严重偏 差."等强度线汇"和"等水头井壁"假定已不成立.

综上所述,就本次实验条件而言,基于"等强度 线汇"和"等水头井壁"假定导出的水平井流解析公 式的近似适用条件是:水平井管中的水流全部为层 流(*Re*<2320)或者是层流和层流一光滑紊流过渡区 (*Re*<4000)同时并存的情况.当水平井管中出现光 滑紊流区(*Re*>4000),即同时有层流、层流一光滑紊 流过渡态和光滑紊流或更多种流态时,该解析解已不 适用,起码对井壁附近的渗流刻画已经面目全非.

### 4 结论

水平井砂槽模型试验表明:水平井管道中可以 出现层流、层流一光滑紊流过渡态、光滑紊流和粗糙 紊流等多种流态.不同流态条件下水平井管道中的 水流阻力遵循不同的规律.在本次试验条件下,基于 "等强度线汇"和"等水头井壁"假定导出的水平井流 解析公式的近似适用条件是:水平井管中的水流全 部为层流(*Re*<2 320)或者是层流和层流一光滑紊 流过渡区(*Re*<4 000)同时并存的情况.当水平井管 中出现光滑紊流区(*Re*>4 000),即同时有层流、层 流一光滑紊流过渡态和光滑紊流或更多种流态时, 该解析解已不再适用,起码对井壁附近的渗流刻画 已经面目全非,此时必须利用渗流一管流耦合模 型<sup>[29~31]</sup>,用数值方法<sup>[32]</sup>进行求解.

致谢:本研究得到了陈崇希教授的悉心指导和 国家自然科学基金委的经费资助,在此深表感谢!

#### 参考文献:

- [1] Ranney L. Drilling wells horizontally [N]. The Oil Weekly, 1941-01-20.
- [2] Borisov J P. Oil production using horizontal and multi-

ple deviation wells [M]. Moscow: Nedra, 1964.

- [3] Ciger F M, Reiss L H, Jourdan A P. The reservoir engineering aspect of horizontal drilling [A]. Paper SPE 13 024 presented at the SPE 59th annual technical conference and exhibition [C]. Houston, Texas: [s. n.], 1984. 16-19.
- [4] Joshi S D. A review of horizontal well and drainhole technology [A]. SPE annual technical conference and exhibition [C]. Dallas, TX: Soc Pet Eng, 1987. 27-30.
- [5] Joshi S D. Augmentation of well productivity using slant and horizontal wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(6): 729-739.
- [6] Renard G L, Duping J M. Influence of formation damage on the flow efficiency of horizontal wells [A]. Formation damage control symposium [C]. Louisiana: Lafayette, 1990.
- [7] Wilson D K, Kaback D S. Industry survey of horizontal wells [R]. Technical report WSRC-TR-93-511, Aiken, South Carolina, Westinghouse Savannah River Co. Savannah River Technology Center, 1993.
- [8] Karlsson H. Horizontal systems technology for shallowsite remediation [J]. J Pet Technol, 1993, 45: 160-165.
- [9] Seines K, Lieu S C, Haug B T. Troll horizontal well tests demonstrate large production potential from thin oil zones [J]. SPE Reservoir Eng, 1994, 9: 133-139.
- [10] Maurer W C. Recent advances in horizontal drilling[J]. J Canadian Pet Technol, 1995, 34: 25-33.
- [11] Conger R M. A groundwater pumping application for remediation of a chlorinated hydrocarbon plume with horizontal well technology [J]. Ground Water Management, 1993, 15: 47-60.
- [12] Anggle D G. A horizontal well recovery system to capture LNAPL and affected groundwater [J]. Ground Water, 1994, 32(5): 847-848.
- [13] Sawyer C S, Lieuallen-Dulam K K. Productivity comparison of horizontal and vertical ground water remediation well scenarios [J]. Ground Water, 1994, 36(1): 98-103.
- [14] Zhan H. Using horizontal wells to recover dissolved contaminants and non-aqueous-phase-liquid: Capture size and capture time delineation [A]. Proceedings of the 1999 petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water: Prevention, detection, and remediation [C]. Houston, Texas: [s. n.], 1999. 100-106.
- [15] Zhan H. A new technology for site characterization:

Interpretation of horizontal well pumping tests in aquifers and aquitards [A]. Proceedings of the 1999 petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water: Prevention, detection, and remediation [C]. Houston, Texas: [s. n.], 1999. 94-99.

- [16] Zhan H. Analytical study of capture time to a horizontal well [J]. Journal of Hydrology, 1999, 217(1-2): 46-54.
- [17] Zhan H, Chung J. Theoretical and experimental study of using horizontal wells to recover DNAPL [A]. 2001 International containment & remediation technology conference and exhibition [C]. Orlando: [s. n.], 2001. 94.
- [18] Hantush M S, Papadopulos I S. Flow of groundwater to collector wells [J]. Journal of Hydraulics Division, 1962, HY-5: 221-247.
- [19] Das Gupta A, Gaikwad V P. Interface upconing due to a horizontal well in unconfined aquifer [J]. Ground Water, 1987, 25(4): 466-474.
- [20] Goode P A, Thambynayagam R K M. Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media [J]. SPE Formation Evaluation, 1987, 2 (4): 683-697.
- [21] Langseth D E. Hydraulic performance of horizontal wells [A]. Proceedings of the HMCRI's 11th national conference (SUPERFUND'90) [C]. Washington: Hazardous Materials Control Research Institute, 1990. 398-408.
- [22] Edwards K B. Estimating aquifer parameters from a horizontal well pumping test in an unconfined aquifer
   [J]. Water Resources Bulletin, 1991, 27(5); 831-839.
- [23] Cleveland T G. Recovery performance for vertical and horizontal wells using semianalytical simulation [J]. Ground Water, 1994, 32: 103-107.
- [24] Falta R W. Analytical solutions for gas-flow due to gas injection and extraction from horizontal wells [J]. Ground Water, 1995, 33: 235-246.
- [25] Tarshish M. Combined mathematical model of flow in an aquifer-horizontal well system [J]. Ground Water,

1992, 30(6): 931-935.

- [26] 吕文舫,郭雪宝,柯葵.水力学[M].上海:同济大学出版社,1990.
  LÜ W F, GUO X B, KE K. Hydraulics [M]. Shanghai, Tongji University Press, 1990.
- [27] 陈崇希,林敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学 出版社,1999.
  CHEN C X, LIN M. Groundwater hydrodynamics
  [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.
- [28] 陈崇希,李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 武 汉:中国地质大学出版社,1996.
  CHEN C X, LI G M. Groundwater hydrodynamics dispersion theory and mass transport application [M].
  Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [29] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水 流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学——中国地质大 学学报,1995, 20(4): 361-366.
  CHEN C X. Groundwater flow model and simulation method in triple media of karstic tube-fissure-pore [J].
  Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(4): 361-366.
- [30] 陈崇希,林敏,叶善士,等. 地下水混合井流的理论及应 用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1998. CHEN C X, LIN M, YE S S, et al. Groundwater flow model of mixed well and its application [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.
- [31] 陈崇希,裴顺平.地下水开采一地面沉降数值模拟及防 治对策研究[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2001. CHEN C X, PEI S P. Numerical simulation of landsubsidence due to groundwater withdrawal and its prevention countermeasure [M]. Wuhan; China University of Geosciences Press, 2001.
- [32] 陈崇希,万军伟. 地下水水平井流的模型及数值模拟方法——考虑井管内不同流态[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2002,27(2):135—140.
  CHEN C X, WAN J W. A new model of groundwater flowing to horizontal well and the numerical simulation approach [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2):135—140.

# Hydraulic Performance of Horizontal Well and Applicability of Its Analytical Solutions

WAN Jun-wei, SHEN Zhong-zhi, PAN Huan-ying

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the hydraulic performance of horizontal well, the authors produced a grant sand tank model, by which they took horizontal well pumping tests on the different flux, measured the value of the head and flux obtained from time to time, and studied its hydraulic performance. The hydraulic test of the sand tank model showed that (1) several kinds of flow regimes are presented in the horizontal well pumping, such as transient region of laminar flow, hydraulic smooth region, transient region of turbulent flow and hydraulic roughness region. (2) The head loss of horizontal well pipe, which is neither neglected nor linear, is closely related to the flow regime, so that it is not perfect to describe a horizontal wellbore with the linear or square sink. The reflectance theory is used to establish the analytical model. On the linear sink basis, when only flow of laminar (Re < 2 320) or flow of laminar and transient regions of laminar flow (Re < 4 000) are presented in the horizontal well pipe, the analytical solution is approaching the test data. However, when flow of laminar, flow of laminar and transient regions of laminar flow, hydraulic smooth region, and transient region of turbulent flow or hydraulic roughness region (Re < 4 000) occur, the analytical solution is not applicable. Then a new combined mathematical model of flow should be used in an aquifer-horizontal well system to obtain a solution.

Key words: horizontal well; sand tank model; flow regime; flow resistance; analytical solution.

¥ ¥ ¥ \* × × ¥ × × ¥ ¥ × × ¥ \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* ¥ ¥

(上接 526 页)

### Three-Dimensional Discrete Fracture Network Model and Its Inverse Method

YU Qing-chun<sup>1</sup>, Yuzo Ohnishi<sup>2</sup>

(1. Tsukuba Software Engineering Co., Ltd, Japan; 2. Department of Civil Engineering, Kyoto University, Japan)

Abstract: This paper presents and investigates an inverse method to simulate three-dimensional discrete fracture network of rock masses. The guiding principle of this method is to optimize the model to produce the same results as those from the filed observations, including the number and size of fractures, which is actualized through fitting the simulated fractures to the mapped fractures on outcrops and bore-holes. An illustrated example is presented to demonstrate the method.

Key words: fracture network; inverse method; model.