

文章编号: 1673-9469(2014)03-0078-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-9469.2014.03.020

## 单孔稳定流抽水试验渗透系数分析

汪星晨, 关英斌, 张立, 李金龙, 马亚波  
(河北工程大学 资源学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 由于水文地质本身的复杂性和计算的多样性, 致使渗透系数计算值往往存在着较大的差异。以台格庙勘查区 XJ-7 钻孔煤系地层含水层完整井稳定流抽水试验为例, 分别利用水位下降资料和水位恢复资料分析计算, 通过对比验证, 后者计算结果  $K=0.0589 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  更加精确与合理。表明单孔稳定流抽水试验中, 利用裘布依公式求得的渗透系数精确度不高, 水位恢复期人为和机械因素干扰较小, 结果更具可靠性。

**关键词:** 稳定流抽水试验; 渗透系数; 水位恢复

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

### A tentative study of permeability coefficient on single-hole steady flow pumping tests

WANG Xing-chen, GUAN Ying-bin, ZHANG Li, MA Ya-bo  
(College of Resources, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** There is a huge discrepancy between the calculated permeability coefficient and the actual situation of the aquifer being due to some factors such as the complexity of the hydrogeology and the diversity and relative difficulty of counting accurately. With specific illustration, this paper will take the experiment with the steady flow pumping test of the fully penetrating well in the coal-bearing strata aquifer in XJ-7, an exploration area, as an example. In this experiment, we took different methods of analyzing the statistics of groundwater level decrease and water-level recovery respectively. Through the comparison between these two methods, we find out that the result of the latter counting method that  $K=0.0589 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  is much accurate and reasonable. This experiment thus demonstrates the permeability coefficient is of low accuracy when applying the Dupuit Formula into the practice of single-hole steady flow pumping test. By contrast, the counting result in the water-level recovery period is much more reliable because of the smaller and insignificant influence of both human and mechanical factors.

**Key words:** steady flow pumping test; permeability coefficient; water-level recovery

水文地质参数是进行地下水资源评价及地下水流数值模拟的基础。随着水文地质勘探的发展, 近年来国内外学者研究了更为复杂含水层、边界条件、水井等条件下的地下水渗流问题, 使得含水层求参取得了长足的进步。Viver 和 Tonder<sup>[1]</sup> 采用 Cooper-Jacob 公式对裂隙含水层抽水试验进行分析, 提出了求解裂隙含水层水文地质参数的 FTA 方法, 该方法将断层与周围基岩视为两个相互联系的系统; Ajayi 和 Obilade<sup>[2]</sup> 提出了利用抽

水试验资料对无限均质各向同性含水层水文地质参数进行估计的数值方法; 随着多学科的交叉与融合还有一些其它方法被用于水文地质参数求解中, 如基于水化学动力学的方法<sup>[3]</sup>、利用长观资料反演水文地质参数的方法<sup>[4-5]</sup>等。单孔抽水试验中由于无专门的水位观测孔, 使得根据抽水试验资料所求得的水文地质参数准确度和正确度较差, 但由于其方法较简单, 钻探工程量较少, 故在水文地质勘探工程中仍占据主导地位, 是目前煤

收稿日期: 2014-03-12

作者简介: 汪星晨(1990-), 男, 安徽人, 硕士, 从事水文地质、地质灾害、环境地质的研究。

炭地质勘探获取含水层水文地质参数的主要方法之一<sup>[6]</sup>。从地下水运动规律来看,采用非稳定流抽水试验获取的参数比较符合客观实际情况,但是由于其抽水试验时间长,参数计算过程复杂,在水文地质勘探中的运用受到限制。稳定流抽水试验,一般时间短,参数计算简单直接,而被广泛应用。生产实践中单孔抽水试验绝大多数按稳定流理论为基础的规程规定进行观测,抽水时的 $Q$ 、 $S$ 值均能达到相对的稳定,且抽水停止后均进行了恢复水位观测,这就使得在求取渗透系数时既可以利用抽水阶段数据,也可以使用水位恢复阶段的数据进行计算。本文以台格庙勘查区XJ-7钻孔为例,运用上述方法进行渗透系数计算并对结果进行比较,认为水位恢复阶段,由于没有机械因素和人为因素的干扰,其数据利用价值更高,更适合求取渗透系数。

## 1 概况

台格庙勘查区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市境内,区内地表大部分为风积沙。区内地层由老至新发育有:侏罗系中统延安组,侏罗系中统直罗组、安定组,白垩系下统志丹群,第三系上新统和第四系。主要含水层有:第四系松散层潜水含水层,白垩系下统志丹群孔隙裂隙含水层,侏罗系直罗组孔隙裂隙含水层,延安组顶部孔隙裂隙含水层<sup>[7]</sup>。本文分析的XJ-7钻孔煤系地层含水层主要位于侏罗系中统延安组,属于延安组顶部孔隙裂隙含水层。抽水层位起止深度为453.33~571.92 m。根据以往勘探工作,该含水层水位标高+1 276.107 m,单位涌水量 $q=0.05089 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$ ,渗透系数 $K=0.06767 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

## 2 抽水试验设计及结果

在正式抽水之前尽水泵最大能力做一次最大的水位降深,初步了解水位降低值与涌水量的关系,以便正式抽水时合理选择水位降深。XJ-7钻孔试抽结果最大水位降深为27.84 m。正式抽水应进行三次水位降深,根据试抽结果初步设计3次降

深分别为27.84 m、18.56 m和9.28 m。试验实际降深为29.18 m、20.00 m和10.03 m(见表1)。

## 3 渗透系数计算

### 3.1 利用水位下降资料计算

根据台格庙勘查区煤系地层含水层边界性质,选择“承压-无压稳定流”计算式来计算水文地质参数,即

$$K = \frac{0.366Q_1 g}{MS} \frac{R}{r} \quad (1)$$

$$R = 10S \sqrt{K} \quad (2)$$

式中 $Q$ -涌水量,  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $S$ -抽水井的降深,  $\text{m}$ ;  $M$ -含水层厚度,  $\text{m}$ ;  $r$ -抽水井半径,  $\text{m}$ ;  $R$ -抽水井影响半径,  $\text{m}$ ;  $K$ -渗透系数,  $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

由表1数据,利用excel进行反复试算得出渗透系数为 $0.0855 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.0818 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.0750 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ (见表2)。

### 3.2 水位恢复法计算

应用Theis公式和非稳定流阶段时间-降深数据求解水文地质参数有多种方法,本文应用泰斯恢复法进行计算。

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3)$$

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} - \frac{u^4}{4 \times 4!} + \dots \quad (4)$$

$$u = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt} \quad (5)$$

式中 $S$ -降深;  $Q$ -流量;  $r$ -距井中心距离;  $W(u)$ -Theis井函数;  $\mu^*$ -贮水系数;  $T$ -导水系数;  $t$ -时间。

对于式(3)中 $u$ 的较小值( $u < 0.1$ ),降深可由渐近线表示,式(3)可简化为

$$S = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u)$$

表1 三次降深抽水试验结果

Tab. 1 The results of three drawdown pumping tests

抽水层位	含水层厚度/m	抽水井半径/m	降深/m	涌水量 / $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	单位涌水量 / $\text{L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$
煤系地层	77.25	0.133	29.18	2.172	0.074
			20.00	1.519	0.076
			10.03	0.794	0.079

表2 利用 Excel 对渗透系数的试算

Tab.2 The theoretical trial of counting permeability coefficient by using Excel

降深	$Q/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	$M/\text{m}$	$S/\text{m}$	$R/\text{m}$	$r/\text{m}$	$K/\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
第一降深	187.66	77.25	29.18	1	0.133	0.026 696
	187.66	77.25	29.18	47.676 97	0.133	0.077 834
	187.66	77.25	29.18	81.408 38	0.133	0.084 914
	187.66	77.25	29.18	85.030 37	0.133	0.085 49
	187.66	77.25	29.18	85.318 29	0.133	0.085 534
	187.66	77.25	29.18	85.340 61	0.133	0.085 538
	187.66	77.25	29.18	85.342 34	0.133	0.085 538
第二降深	131.24	77.25	20	1	0.133	0.027 239
	131.24	77.25	20	33.008 69	0.133	0.074 453
	131.24	77.25	20	54.572 26	0.133	0.081 242
	131.24	77.25	20	57.005 81	0.133	0.081 831
	131.24	77.25	20	57.212 1	0.133	0.081 879
	131.24	77.25	20	57.229 15	0.133	0.081 883
	131.24	77.25	20	57.230 56	0.133	0.081 884
第三降深	68.6	77.25	10.03	1	0.133	0.028 3 91
	68.6	77.25	10.03	16.900 23	0.133	0.068 18
	68.6	77.25	10.03	26.189 72	0.133	0.074 345
	68.6	77.25	10.03	27.348 09	0.133	0.074 954
	68.6	77.25	10.03	27.459 88	0.133	0.075 012
	68.6	77.25	10.03	27.470 4	0.133	0.075 017
	68.6	77.25	10.03	27.471 39	0.133	0.075 017

转化为以 10 为底的对数,重写简化为

$$S = \frac{2.30Q}{4\pi T} \lg \frac{2.25Tt}{r^2\mu^*} \quad (6)$$

稳定流抽水的水位恢复过程,即抽水停止后水位停止下降,代替的是水位再上升到原水位的过程(图1)。现假设以流量  $Q$  持续抽水到时间  $t_1$  后停泵进行水位恢复,在时刻  $t$  的剩余降深  $S'$  (初始水位与  $t$  时刻水位之差) 可看做以流量  $Q$  继续抽水一直延续到  $t$  时刻的降深和从停抽时刻起以流量  $Q$  注水阶段  $t'$  水位恢复两者的叠加<sup>[8]</sup>。两者均可用 Theis 公式计算。

$$S' = \frac{Q}{4\pi T} (W(u) - W(u')) \quad (7)$$

式中  $S'$  剩余降深。

将式(6)代入式(7)中得

$$S' = \frac{2.30Q}{4\pi T} \lg \frac{t}{t'} \quad (8)$$

在半对数纸上标绘  $S'$  与  $\frac{t}{t'}$  ( $\frac{t}{t'}$  在对数尺上),

通过标绘点适合成一条直线,此直线的斜率即为:  $2.30Q \cdot (4\pi T)^{-1}$ , 因此  $\Delta S'$  值可从曲线图上直接读出<sup>[9-10]</sup>, 代入下式即可求得渗透系数。

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta S'} \quad (9)$$

根据 XJ-7 钻孔抽水试验水位恢复数据(见

表3) 在半对数纸上绘制  $S'$  与相应的  $\frac{t}{t'}$  数值(见图

2) 通过图像  $\frac{t}{t'}$  的对数周期的剩余降深差值等于

2.763 m。把此值代入到式(9), 可得

$$K = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta S' M} = \frac{2.30 \times 68.602}{4\pi \times 2.763 \times 77.25} = 0.058 9 \quad (10)$$

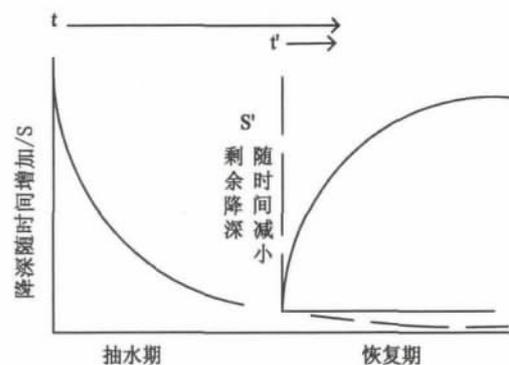


图1 时间-降深/剩余降深曲线图

Fig.1 Time-drawdown/the curve chart of the remaining drawdown

表 3 XJ-7 钻孔抽水试验水位恢复数据

Tab. 3 The water recovery data of XJ-7 drilling pumping tests

$t'/\text{min}$	$\frac{t'}{t'}$	$S'/\text{m}$
	$\infty$	10.03
0.5	1 321	9.05
1	661	8.10
2	331	7.27
3	221	6.40
5	133	5.62
10	67	4.61
20	34	3.93
30	23	3.59
60	12	3.05
90	8.3	3.03
120	6.5	2.42
150	5.4	2.35
180	4.7	2.19
240	3.8	1.55
300	3.2	1.28
450	2.5	0.80
600	2.1	0.61

表 4 实测降深与计算降深对比

Tab. 4 The comparison results between theoretical counting and practical measuring

资料来源	渗透系数 $/\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	降深实测值 $/\text{m}$	降深计算值 $/\text{m}$	误差
水位下降资料	0.075 0	9.84	7.29	26%
		8.72	5.40	38%
		9.05	5.05	44%
		10.07	10.03	0.4%
水位恢复资料	0.058 9	5.30	5.65	7%
		4.17	4.56	9%
		3.05	2.98	2%
		2.19	1.85	15%

### 5 结束语

对于单孔完整井稳定流抽水试验,在测算承压含水层水文地质参数时,由于抽水时人为和机械因素干扰较大,利用裘布依公式求得的渗透系数精确度不高。水位恢复期人为和机械因素干扰较小,数据精确度较高,求得的渗透系数更具可靠性。

### 参考文献:

[1] VIVER J J P, TONDER G J V. An analytical method for the analysis of pumping tests in fractured aquifers [J]. Water SA, 1997, 23(4): 365-372.

[2] AJAYI O, OBILADE T O. Numerical estimation of aquifer parameters using two observational wells [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(7): 982-988.

[3] 黄勇, 周志芳, 高正夏. 基于水化学动力学方法的水文地质参数确定 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(Z1): 2988-2991.

[4] 王华军, 李娟. 利用地下水长观资料求解含水层参数 [J]. 地下水, 2007, 29(6): 78-81.

[5] 牛永强, 李世峰. 核桃峪井田华池—洛河组水文地质条件评价 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(1): 62-65.

[6] 邵军战. 单井稳定流抽水试验中水位恢复曲线的作用分析 [J]. 中国煤炭地质, 2013(10): 31-34.

[7] 中国煤炭地质总局华盛水文地质勘察工程公司第三公司. 新街矿区 TBM 工法试验斜井地质勘探报告 [R]. 2012.

[8] 王在岭, 杨建明. 用水位恢复数据计算承压含水层水文地质参数 [J]. 铁道勘察, 2006(2): 38-40.

[9] CREWESIMAN G P, DELIDE N A. 抽水试验资料的分析 and 评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1970.

[10] 尚衍峰, 狄艳丽, 曹思文. 煤层底板岩层的渗透特性 [J]. 黑龙江科技学院学报, 2013, 23(4): 394-397.

(责任编辑 刘存英)

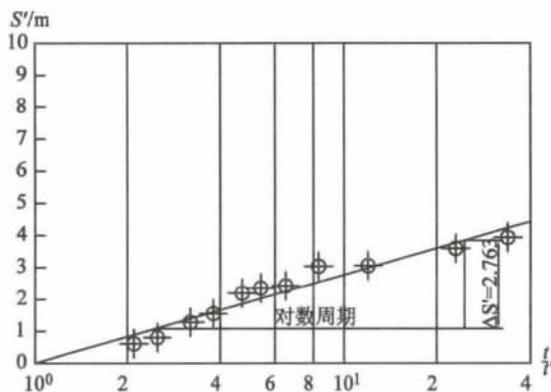


图 2 用泰斯恢复法对 XJ-7 钻孔抽水试验综合恢复资料的分析

Fig. 2 Comprehensive analysis of the recovery data in XJ-7 drilling pumping tests with Theis Recovery Act

### 4 精确度对比

分别利用水位下降资料计算的参数代入式(1)与式(2),水位恢复资料计算的参数代入式(8),取四组实测降深对比计算降深,确定两种算法的精确度及其可靠性和代表性(见表4)。根据以往勘探资料,第三降深计算的渗透系数更接近,所以水位下降资料计算的渗透系数采用第三降深计算结果。由表4可看出,水位下降资料计算结果误差基本在20%以上,水位恢复法计算结果误差基本在10%以下,水位恢复法的渗透系数更精确。