

潜水含水层水动力弥散试验研究

苏贺¹, 康卫东¹, 曹珍珍², 朱亮³

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中化地质矿山总局 山东地质勘查院, 山东 济南 250013; 3. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要: 水动力弥散理论主要研究地下水可溶物质在时间、空间上的变化和弥散运移规律, 预测地下水污染的发展趋势。通过在包头市某厂区现场弥散试验所得的实测数据, 利用标准曲线法进行了潜水含水层水动力弥散试验。测定结果表明, 浅层含水层的纵向弥散度(a_L)为 1.19~1.28 cm, 横向弥散度(a_T)经验推断值为 0.24~0.26 cm。研究结果可为厂区有效地下水污染防治措施的制订提供科学依据。

关键词: 弥散试验; 标准曲线法; 弥散系数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0083-03

中图分类号: P641.2

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.018

Experimental Study on Unconfined Aquifer Hydrodynamic Dispersion

SU He¹, KANG Wei-dong¹, CAO Zhen-zhen², ZHU Liang³

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. Shandong Geological Prospecting Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Ji'nan, Shandong

250013, China; 3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: Hydrodynamic dispersion theory studies the temporal and spatial changes in groundwater soluble substances and predicts the trend of groundwater pollution. This article carried out a dispersion test in the new Huamei factory site of Baotou City, and measured the longitudinal dispersion degree of the shallow aquifer. The results showed that the longitudinal dispersion degree was 1.19~1.28 cm, the transverse dispersion degree experience value was 0.24~0.26 cm. It provides a sound basis for formulating effective measures to prevent and control groundwater pollution.

Keywords: dispersion experiment; standard curve method; dispersion coefficient

近年来,随着人口的增长和工业的迅速发展,地下水的污染问题日趋严重。为了对厂区地下水中污染物的运移、扩散、降解等规律进行分析和探讨,建立其浅层地下水的溶质运移模型,需要确定含水层的弥散参数。弥散参数确定的方法有实验室模拟与野外就地测量,由于实验室模拟的方法有很大的误差,因此弥散参数宜在现场测定。现场弥散试验过程中所使用的理想的示踪剂应该毒性小、不易被含水层中的固体颗粒吸附、灵敏度高和价格便宜。现在国内外使用的主要示踪剂可分为 4 类:离子化合物,人工放射性同位素,有机染料和碳氟化物。

对本试验来说,人工放射性同位素,因其有放射性危害,在现场使用受很多因素制约。有机染料包括荧光素、甲基盐、苯盐等,具有毒性低、灵敏度高、价格便宜和测量方便等优点,但容易被含水层中固体颗粒吸附。因此采用离子化合物氯化钠(NaCl)作示踪剂进行了天然流场下的水动力弥散试验。以现场试验

资料计算水动力弥散参数。

所需要获得的弥散参数主要是各向同性多孔介质的纵向弥散度和横向弥散度。法国水文地质学家 Sauty 采用有限差分的数值法,计算得出了一组以 Peclet 数 P 为参数,以无因次浓度 C_r 和无因次时间 t_r 为纵横坐标的标准曲线,将实际资料所得的曲线与标准曲线拟合,最后确定弥散参数^[1]。

1 试验方法

1.1 弥散试验井孔布设

现场弥散的试验点选在包头市某厂区,厂区所处地貌单元为昆河冲洪积扇尾部与黄河一级阶地交汇所形成的冲洪积平原,地形比较平坦。场地内浅层地下水埋深 6~8 m,属孔隙型潜水。试验场地弥散试验井孔布设如图 1 所示。 g_5 为示踪剂投源孔, g_4 为径向示踪剂监测孔,距投源孔 3.85 m; g_6 为横向示踪剂监测孔,距投源孔 2.90 m; CH_1 为抽水孔,距投源

收稿日期:2013-04-28

修回日期:2013-06-05

资助项目:包钢华美稀土环境评价项目

作者简介:苏贺(1987—),男(汉族),山东省济南市人,硕士研究生,研究方向为地质工程。E-mail:493157222@qq.com。

孔 7.15 m。 $g_5-g_4-CH_1$ 位于一条直线上。 g_6 垂直于 $g_5-g_4-CH_1$ 方向。孔 g_1, g_2, g_3, g_7 为抽水试验观测孔。

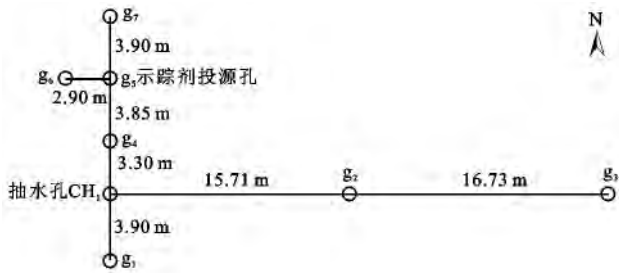


图 1 弥散试验井孔布设状况

1.2 弥散试验过程

采用氯化钠 (NaCl) 作为示踪试剂。20 °C 时 NaCl 溶解度为 36 g。抽水孔的抽水流量为 615.05 m³/d, 当观测孔的水位降深达稳定后开始进行弥散试验。示踪剂溶液投放时间作为弥散试验起始时间, 示踪剂溶液投放前, 对各井孔的稳定水位、抽水量和地下水中 Cl⁻ 的背景浓度进行测定。试验示踪剂溶液用质量为 100 kg NaCl 配制而成, 一次性瞬时注入。

试验时将示踪剂快速瞬时注入 g_5 井孔所在的潜水含水层中, 并尽可能使溶液上下均匀混合。示踪剂溶液投放后, 每隔半小时在 g_4 及 CH_1 观测孔中取样, 测定水样的 Cl⁻ 浓度。现场试验的延续时间根据 Cl⁻ 浓度随时间变化曲线具体确定, 要求水样的 Cl⁻ 浓度从背景值达到峰值并且再次逐渐降低到起始背景值, 待 Cl⁻ 浓度稳定一段时间后终止试验^[2-4]。

弥散示踪试验在小落程抽水 (615.05 m³/d) 监测孔水位降深达稳定, 即地下水流场形成稳定流场后开始进行, 示踪剂注入时间为 2012 年 7 月 20 日 11 时, 即小落程抽水 18 h 后, 弥散试验与抽水时段关系如图 2 所示。

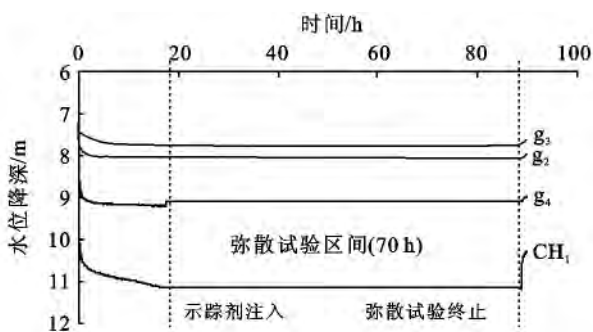


图 2 弥散试验时间分布

试验场地含水层弥散试验历时 70 h, Cl⁻ 浓度随时间的变化过程如图 3 所示。经测定, 试验场地地下水 Cl⁻ 浓度背景值为 693.17~709.58 mg/L。从图 3

可以看出, 试验数据具有统一的趋势: g_4 观测孔中 Cl⁻ 浓度, 在试验开始后的第 26 h 检测出开始升高, 在 31 h 后观测孔中 Cl⁻ 浓度达到峰值 945.42 mg/L, 之后逐渐降回到背景浓度; CH_1 监测孔 Cl⁻ 浓度, 在试验开始后的第 54 h 检测出开始升高, 在 58 h 后抽水孔中 Cl⁻ 浓度达到峰值 814.17 mg/L, 之后逐渐降回到背景浓度。背景值时段内的局部数据会围绕背景值有一定幅度的上下小波动, 主要因为示踪剂在多孔介质中的运移情况是一个非常复杂的过程, 取得的水样测试具有一定的随机性等所致。

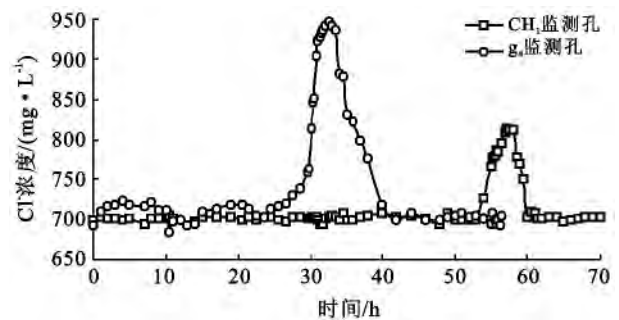


图 3 示踪剂监测孔 Cl⁻ 浓度随时间变化曲线

2 结果与分析

用管井抽水, 使井附近天然流速与抽水产生的流速相比可以忽略不计, 形成以抽水井为中心的径向流场。在抽水试验达到稳定阶段后, 一次性瞬时注入示踪剂。径向收敛流场瞬时注入法的数学模型需要有 6 个假设条件: (1) 含水层为均质各向同性, 底板水平、等厚、在平面上无限展布; (2) 抽水井及观测井的井径较小, 且为完整井; (3) 瞬时而投放井注入示踪剂后, 必须保证对含水层及其它井孔没有干扰, 或产生的干扰可以忽略不计; (4) 示踪剂一经注入, 则立即与井中水完全混合均匀; (5) 机械扩散满足 Fick 定律, 且示踪剂浓度足够小, 可忽略密度对地下水运动的影响; (6) 抽水井中示踪剂浓度不影响含水层中示踪剂浓度。

描述稳定径向渗流场中溶质运移的基本方程 (对流二维弥散方程) 为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = a_L |u| \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} - u \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{a_T |u|}{r^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \theta^2}$$

式中: c ——示踪剂浓度 (mg/L); u ——地下水流速 (径向散发流 $u > 0$ 、径向收敛流 $u < 0$, m/d); Q ——流量 (注水井—径向散发流 $Q > 0$, 抽水井—径向收敛流 $Q < 0$, m³/d); h ——含水层厚度 (m); n ——有效孔隙度 (率); a_L, a_T ——纵向弥散度 (m); 横向弥散度 (m); r, θ ——径向距离 (m), 方位角 (°)。

对流—弥散方程的最后一项是由于横向弥散产生的,对径向散发或径向收敛的渗流场,由于径向地下水流速很大,则忽略横向弥散作用不会导致较大误差,故径向渗流场中溶质运移的对流—弥散方程可以简化为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = a_L |u| \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} - u \frac{\partial c}{\partial r}$$

对于瞬时注入径向流的情况,目前尚无解析解。Sauty 采用有限差分的数值法,计算得出了一组以 Peclet 数 P 为参数,以无因次浓度 C_r 和无因次时间 t_r 为纵横坐标的标准曲线,用于确定含水层的弥散度 a_L 。

无因次浓度 C_r 和无因次时间 t_r 的确定,依据现场试验实测数据,按照下式将观测浓度 C 换算成无因此浓度 C_r 、观测时间 t 换算成无因次时间 t_r 。

$$C_r = \frac{C - C_0}{C_{\max} - C_0}$$

$$t_r = \frac{t}{t_0}$$

式中: C ——示踪剂的观测浓度(mg/L); C_0 ——示踪剂的背景浓度(mg/L); C_{\max} ——示踪剂的峰值浓度(mg/L); t ——累积观测时间(h); t_0 ——纯对流时间(h)。

纯对流时间(t_0)计算公式:

$$t_0 = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)hn}{Q}$$

式中: t_0 ——纯对流时间(h); Q ——抽水井抽水量

(m^3/h); h ——含水层平均厚度(m); n ——含水层有效孔隙度(率); r_2 ——投源孔至抽水孔的距离(m); r_1 ——溶质浓度检测孔至抽水孔的距离(m)。

对试验数据进行无因此浓度 C_r 、无因次时间 t_r 计算处理后,绘制与标准曲线同模的 C_r-t_r 实测曲线,并与标准曲线进行拟合,找到实测曲线与某一 P 值的标准曲线拟合最好的情况,确定 P 值,再由公式 $a_L = r/P$ 计算得到纵向弥散度(径向弥散度) a_L 值^[5-8]。根据上述方法将弥散试验数据的实测曲线与标准曲线进行分析,弥散度计算结果详见表 1。

本次弥散试验得到试验场地 g_5-g_4 区间的径向弥散度(a_L)为 1.28 cm, g_5-CH_1 区间的径向弥散度(a_L)为 1.19 cm。

在弥散试验期间,观测孔 g_6 的 Cl^- 浓度未发生明显变化,即没有观测到横向弥散引起的 Cl^- 浓度变化,原因是示踪剂的横向扩散速度比较的小,整个弥散试验的时间不能使得示踪剂 Cl^- 到达横向弥散的观测孔 g_6 。根据 1985 年在试验场地下游的尾矿坝场区所做的潜水弥散试验得到的纵向弥散度为 0.05 m、横向弥散度为 0.012 m 以及经验判断,场地横向弥散度大致为纵向弥散度的 1/5^[9]。

本场地试验获得纵向弥散度(a_L)为 1.19~1.28 cm,横向弥散度(a_T)经验推断值为 0.24~0.26 cm。

表 1 弥散度参数计算

弥散试验场地	孔间距/ m	含水层厚度/ m	抽水量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	孔隙度	纯对流时间/h	P 值	弥散度/ cm
g_5-g_4 区间	3.85	23.95	25.632	0.27	30.622	300	1.283 3
g_5-CH_1 区间	7.15	24.07	25.632	0.27	38.065	600	1.191 7

3 结论

(1) 通过对包头市某厂区进行水动力弥散试验,测得示踪剂在含水介质中的纵向弥散度(a_L)为 1.19~1.28 cm, 横向弥散度(a_T)为 0.24~0.26 cm。

(2) 弥散试验采用标准曲线法,求解过程表明该方法数值稳定性良好。此次模拟计算对以有限分析解建立包头市某厂区浅层地下水的溶质运移模型奠定了基础,同时为制订有效的地下水污染防治措施提供科学依据。

(3) 试验过程中采用示踪剂为 NaCl,对环境基本上无损害,并且适合于小范围的简单连通示踪试验。

[参 考 文 献]

[1] Bear J. 多孔介质流体动力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1983.

[2] 王秉忱. 地下水水质模型[M]. 辽宁 沈阳:辽宁科学技术出版社,1985.

[3] 陈崇希,李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,1996.

[4] 吴耀国,田春声. 本溪郑家潜水含水层二维水动力弥散试验及其结果分析[J]. 水文地质工程地质,1998,25(1): 32-35.

[5] 宋树林,林泉. 地下水弥散系数的测定[J]. 海岸工程,1998,17(3):61-65.

[6] 王大纯,张人权. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社,1996.

[7] 陈崇希,李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,1996.

[8] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社,1997.

[9] 屠显章. 包钢尾矿区潜水弥散试验与水质模型[J]. 工程勘察,1988(4):32.