

利用单孔稳定流混合抽水试验求取分层渗透系数的方法研究

陈艺迪¹, 陈萍²

(1. 贵州省地矿局 111 地质大队, 贵州 贵阳 550081; 2. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550004)

[摘要]为了解决具有多个充水含水层的矿区中水文地质孔施工和分层抽水试验难度大的问题,以裘布依稳定流渗流理论为依据,建立了利用钻孔单孔混合抽水试验求取分层渗透系数的“概念模型”和“数学模型”,并以两个有代表性的勘查矿区为实验场,通过实验场中水文地质钻孔的施工、抽水试验、数据采集和资料综合分析,开展了单孔混合抽水试验求取含水层分层渗透系数的方法研究。实验结果证明,两个实验场水文地质孔混合抽水试验解算出的含水层渗透系数与单层实际抽水试验计算的结果的相对误差仅分别为 3.73% 和 4.4%,反映出研究提出的方法可行,可为相同类型矿床水文地质结构矿区勘查提供借鉴。

[关键词]单孔;混合抽水试验;渗透系数;研究

[中图分类号]P641.2 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2024)01-051-05

1 问题提出

在具有多个充水含水层的矿区水文地质勘探中,为满足为矿床水文地质条件评价和矿井涌水量预测的需求,勘探工作必须查明矿床充水含水层的水文地质参数(陈萍等,2015;王明章,2011)。常用的方法是在水文地质勘探钻孔中分别对不同充水含水层进行分层止水和抽水试验(王诗扬等,2018)。但对于矿体埋深大的矿区,水文地质钻孔在施工中分层止水工艺复杂、止水难度大,施工成本较高,虽然采用多层混合抽水试验可以避免上述施工中存在困难,但试验资料却不能较好的反映出各分层的含水性和透水性数参数。多年来,较多的水文地质工作者和学者都进行了探索和研究,代表性成果为原苏联地质部水文地质学家编著的《含水层参数确定方法》,提出了基于非稳定流理论,利用双层含水

层混合抽水试验资料求取分层水文地质参数的计算方法,该方法要求抽水试验必须为具有多个观测孔的非稳定流多孔抽水试验,试验场建设及试验的成本也无疑极高,在矿体深埋的矿区勘探中难以实施。因此,探求一种工艺相对简单、施工和试验投资成本相对低廉、可有效获取分层水文地质参数的试验和参数求取方法,成为多年来水文地质工作者力图探索的问题(高卫东等,1998;兰太权等,2004;涂洋等,2008)。

研究工作以裘布依稳定流理论为支撑,从理论上探讨了混合抽水试验求取分层水文地质参数的方法,并以实际的矿区作为实验场,通过对水文地质钻孔的分层、混合抽水试验对初步建立的方法进行验证。实验结果表明,利用单孔混合抽水试验解算出的含水层渗透系数与分层实际抽水试验计算的结果颇为相近,相对误差仅分别为 3.73% 和 4.4%,证明方法可行,研究成果为相同类型矿床水文地质结构矿区勘查提供了借鉴。

[收稿日期]2023-11-34 [修回日期]2023-12-22

[作者简介]陈艺迪(1993—)男,遵义市人,水工环地质工程师,从事水工环地质工作。

[通讯作者]陈萍(1966—)女,重庆市人,水工环地质研究员,长期从事矿区水文地质工作。

2 研究方法

2.1 实验场特征

实验场一。瓮安县大湾磷矿勘探区。场区从地表向地下深部, 钻孔依次揭露寒武系牛蹄塘组至第二统金顶山组($\epsilon_{1-2}n-\epsilon_j$)碎屑岩隔水层、震旦系上统至寒武系纽芬兰统灯影组($Pt_3^{3b}\epsilon_1dy$)白云岩孔洞裂隙含水层、含矿层陡山沱组($Pt_3^{3a}d$)相对隔水层。受中部厚约10~20 m含水及透水性均差的硅质岩层控制, 将灯影组分隔为上、下两个独立的、含水性及透水性完全不同的“含水段”, 各段中地下水水力性质均为承压。抽水试验孔 ZK909 实测上部含水段地下水静止水位埋深129.8 m, 下部含水段地下水埋深130.8 m, 水位差1.0 m, 代表上、下含水段(层)静止水位接近的情景(图1)。

地层代号	换层井深 (m)	分层厚度 (m)	抽水试验段	钻孔结构及地质柱状图	水文地质特征描述
Q	7.44	7.44			第四系土层。
ϵ_{2m}	381.9	379.4			泥质粉砂岩夹泥岩, 下部为炭质泥岩, 为隔水层。
ϵ_{1-2n}	410.1	20.7			
$Pt_3^{3a}d$	520.4	110.3	第 I 试验段		白云岩, 含溶孔溶隙水, 富水性强。为上部含水段, 静止水位埋深61.4m。
$Pt_3^{3b}\epsilon_1dy$	566.6	46.2	第 III 试验段		硅质白云岩、硅质岩。相对隔水层。
$Pt_3^{3c}\epsilon_1dy$	626.3	59.7	第 II 试验段		白云岩, 含溶孔溶隙水, 富水性较强。为下部含水段, 静止水位埋深134.4m。
Pt_3^{3d}	674.4	48.1			磷块岩、硅质白云岩, 为勘查区矿系, 富水性弱, 隔水层。

图1 大湾磷矿 ZK909 孔水文地质柱状图

Fig. 1 Hydrological histogram of ZK909 drilling hole in Dawan phosphorite ore

实验场二。瓮安县上角旁磷矿。场区从地表向地下深部, 钻孔依次揭露寒武系金顶山组(ϵ_j)碎屑岩隔水层、明心寺组第二段(ϵ_{2m^2})石灰岩岩溶含水层、明心寺组第一段至牛蹄塘组($\epsilon_{1-2}n-\epsilon_{2m^1}$)碎屑岩隔水层、震旦系上统至寒武系纽芬兰统灯影组($Pt_3^{3b}\epsilon_1dy$)白云岩孔洞裂隙含水层、含矿层陡山沱组($Pt_3^{3a}d$)相对隔水层。各含水层中地下水水力性质均为承压。抽水试验孔 ZK402 揭露上部明心寺组第二段(ϵ_{2m^2})含水层地下水静止水位埋深240.0 m, 下部灯影组($Pt_3^{3b}\epsilon_1dy$)含水层地下水埋深337.5 m, 二者相差97.5 m, 代表上、下含水层静止水位差距较大的情景。(图2)。

地层代号	换层井深 (m)	分层厚度 (m)	抽水试验段	钻孔结构及地质柱状图	水文地质特征描述
ϵ_j	300.4	191.9			泥质粉砂岩, 为隔水层。
ϵ_{2m^2}	384.1	83.6	第 I 试验段		石灰岩, 含岩溶水, 富水性强, 为含水层。静止水位埋深245.2m。
ϵ_{2m^1}	667.1	283.9	第 III 试验段		泥质粉砂岩夹泥岩, 为隔水层。
ϵ_{1-2n}	682.5	15.4			炭质泥岩, 隔水层。
$Pt_3^{3b}\epsilon_1dy$	905.2	222.6	第 II 试验段		白云岩, 含溶孔溶隙水, 富水性强, 为含水层, 静止水位埋深337.5m。
Pt_3^{3d}	951.4	46.2			磷块岩、硅质白云岩, 为勘查区矿系, 富水性弱, 隔水层。

图2 上角旁磷矿 ZK402 孔水文地质柱状图

Fig. 2 Hydrological histogram of ZK402 drilling hole in Shangjiaopang phosphorite ore

各实验场所在勘探区含水层在平面上展布面积较宽, 抽水条件下地下水向抽水孔的运动可视为“无限含水层中地下水向集水构筑物的承压运动”。

2.2 研究方法

2.2.1 条件假定

为便于研究,对矿床水文地质条件、抽水试验钻孔的结构、实验场的地下水水流场、试验时序、试验方法作如下假定:

a) 实验场中分存在上部及下部两个“含水层(段)”,含水层为无限边界,并满足裘布依关于“均质”、“等厚”、“各向同性”的假设;

b) 抽水试验孔上、下含水层井径一致;

c) 上、下含水层通过钻孔发生水力联系,并在以钻孔为中心一定半径范围内形成稳定的混合水位,视该范围内上、下含水层的静止水位完全一致;

d) 对上部含水层完成单孔稳定流抽水试验后,继续钻进揭露下部含水层,终孔后对全孔作混合抽水试验。

2.2.2 水文地质概念模型建立

根据对实验场研究条件假定,以承压含水系统为例,建立天然和混合抽水试验条件下实验场的水文地质概念模型见图3。

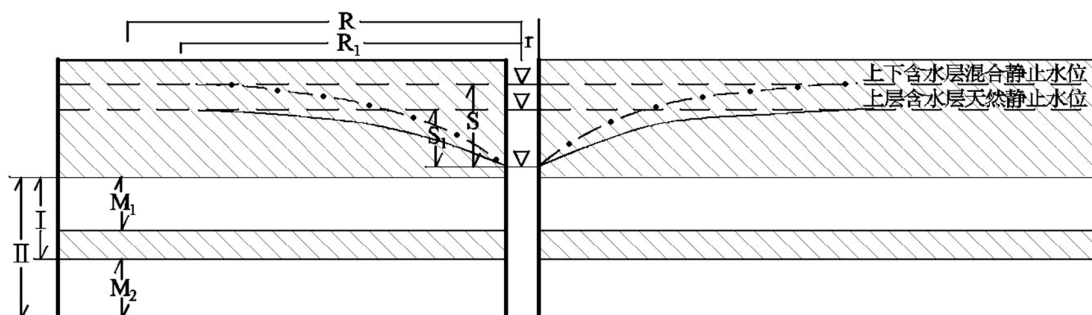


图3 双层含水层抽水试验概念模型图

Fig. 3 Concept model of pumping test in double aquifer

图中: I - 上部含水层, II - 下部含水层; M_1 、 S_1 、 R_1 - 分别为上部含水层厚度、单孔抽水试验水位稳定降深、抽水影响半径; M_2 、 S 、 R - 下部承压含水层厚度、上下含水层混合抽水试验水位稳定降深、混合抽水试验影响半径, r - 钻孔半径。

2.2.3 混合抽水试验含水层水文地质参数求取的方法

上部含水层渗透系数求取

利用上部含水层单孔稳定流抽水试验资料,根据公式(1)、(2)求得求取含水层渗透系数(薛禹群等,1997;陈雨孙等,1985)。

$$K_1 = \frac{0.366Q_1}{M_1 S_1} \lg(R_1/r) \quad (1)$$

$$R_1 = 10S_1 \sqrt{k_1} \quad (2)$$

(2) 下部含水层渗透系数求取

在满足上述假定条件下,根据裘布依理论,无限含水层中地下水向混合抽水井运动满足:

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{2.732k_1 M_1 S}{\lg(R/r)} + \frac{2.732k_2 M_2 S}{\lg(R/r)} \quad (3)$$

$$\text{或: } Q_2 = Q - Q_1 = Q - \frac{2.732k_1 M_1 S}{\lg(R/r)} \quad (4)$$

式中: Q - 混合抽水井口的涌水量

Q_1 、 Q_2 - 分别为混合抽水上层含水层和下层含水层的贡献水量

k_1 、 k_2 - 分别为上层和下层含水层的渗透系数

R - 混合抽水试验影响半径

r - 抽水试验孔半径

M_1 、 M_2 - 分别为上层和下层含水层的厚度

利用上部含水层的渗透系数 k_1 、含水层厚度 M_1 、混合抽水试验的实测水位降深 S 和影响半径 R , 根据公式(4)求出混合抽水试验期间下层含水层的水量贡献 Q_2 。

根据混合抽水试验下层含水层的水量贡献量 Q_2 、混合抽水试验的稳定水位降深 S , 利用公式(5)求出下层含水层的渗透系数 k_2' 。

$$k_2' = \frac{0.366Q_2}{M_2 S} \lg(R/r) \quad (5)$$

3 数据采集与分析

3.1 数据采集

对各实验场中水文地质孔分别依次开展上部含水层(段)、下部含水层(段)以及上下两层含水层进行单孔稳定流抽水试验。各试实验场抽水试验采集数据见表1、表2。

表1 大湾磷矿实验场 ZK909 孔抽水试验数据表

Table 1 Pumping test data of ZK909 drilling hole in Dawan phosphorite calibration field

试段	含水层厚 M(m)	静水位埋深(m)	水位降深 S(m)	涌水量 Q(m ³ /d)	井筒半径 r(m)
$Pt_3^{3b} \epsilon_1 dy^3$ (I)	110.29	129.80	32.70	385.26	0.06
$Pt_3^{3b} \epsilon_1 dy^1$ (II)	216.7	130.80	28.60	220.49	0.06
$Pt_3^{3b} \epsilon_1 dy$ (III)	326.99	131.30	24.92	496.54	0.06

表2 上角旁磷矿实验场 ZK004 孔抽水试验数据表

Table 2 Pumping test data of ZK004 drilling hole in Shangjiaopang phosphorite calibration field

试段	含水层厚 M(m)	静水位埋深(m)	水位降深 S(m)	涌水量 Q(m ³ /d)	井筒半径 r(m)
$\epsilon_2 m^2$ (I)	83.59	240.00	24.40	41.73	0.06
$Pt_3^{3b} \epsilon_1 dy$ (II)	219.78	337.48	6.00	22.46	0.06
$Pt_3^{3b} \epsilon_1 dy + \epsilon_2 m^2$ (III)	306.22	327.00	13.80	68.60	0.06

3.2 数据分析

布依单孔完整井稳定井流公式(参见式1、式2),分别计算出各实验场中试验层的含水层渗透系数 K_i 和影响半径 R(表3)。

3.2.1 分层抽水试验参数计算

以水文地质孔抽水试验数据为依据,采用裘

表3 各含水层(段)分层抽水试验渗透系数 K 计算成果统计表

Table 3 Statistics of stratified pumping test hydraulic conductivity K calculated results of each aquifer(section)

实验场	上层(I)		下层(II)		上、下层混合(III)	
	k_1 (m/d)	R_1 (m)	k_2 (m/d)	R_2 (m)	渗 k(m/d)	径 R(m)
大湾磷矿 ZK909	0.124 0	117.31	0.038 6	59.91	0.067	64.84
上角旁磷矿 ZK004	0.021 6	35.86	0.013 4	69.46	0.015 1	19.96

3.2.2 利用混合抽水试验资料求取下层(段)渗透系数(k_2')

1. 大湾磷矿 ZK909 孔

下段涌水量计算:

$$Q_2 = Q - Q_1 = Q - \frac{2.732k_1M_1S}{1g(R/r)}$$

$$= 496.54 - \frac{2.73 \times 0.1287 \times 110.29 \times 24.92}{1g(64.84/0.06)}$$

$$= 178.23(m^3/d)$$

下段渗透系数(k_2')计算:

$$k_2' = \frac{0.366Q_2}{M_2S} 1g(R/r)$$

$$= \frac{0.366 \times 178.23}{216.7 \times 24.92} 1g(64.84/0.06)$$

$$= 0.0369(m/d)$$

2. 上角旁磷矿 ZK004 孔

下段涌水量计算:

$$Q_2 = Q - Q_1 = Q - \frac{2.732k_1M_1S}{1g(R/r)}$$

$$= 68.60 - \frac{2.73 \times 0.0216 \times 83.59 \times 13.8}{1g(16.96/0.048)}$$

$$= 41.95(m^3/d)$$

下段渗透系数(k_2')计算:

$$k_2' = \frac{0.366Q_2}{M_2S} 1g(R/r)$$

$$= \frac{0.366 \times 41.95}{219.78 \times 13.8} 1g(16.96/0.048)$$

$$= 0.0129(m/d)$$

3.2.3 计算结果分析

对各实验场下部含水(段)实际抽水试验和上、下层混合抽水试验计算的渗透系数统计分析见表4。

表4 分层与混合抽水渗透系数计算成果分析表

Table 4 Analytical statement of hydraulic conductivity calculated results in stratified pumping and mixed pumping

实验场	渗透系数 K_2 (m/d)		$\frac{ K_2 - K_2' }{K_2} \%$
	分层试验 K_2	混合试验 K_2'	
大湾磷矿 ZK909	0.038 6	0.036 9	3.73
上角旁磷矿 ZK004	0.013 4	0.012 9	4.4

分析表明,两个实验场钻孔混合抽水试验解算出的下部含水层渗透系数与单层实际抽水试验

计算结果的相对误差仅分别为3.73%和4.4%,二者颇为相近。

4 结果与讨论

4.1 结果

采用本文推荐的方法,利用单孔稳定流混合抽水试验资料求取的充水含水层分层水文地质参数与实际的分层抽水试验取得的参数在数值上颇为相近,相对误差小于5%。研究成果表明,本研究提出的单孔稳定流混合抽水试验求取分层水文地质参数的方法在理论上和实际应用上都是可行的。研究成果可为相同类型矿床水文地质结构矿区勘查提供借鉴。

4.2 讨论

(1)两个实验场相邻含水层(段)水位差分别为1.0 m和97.5 m,利用混合抽水试验求取的下部含水层渗透系数相对误差分别为3.73%和4.4%,相对误差具有随含水层静止水位差值加大而增加之的趋势。在实际的应用中,建议根据实际的水位差对计算结果予以适当的修正。

(2)本研究的实验场上、下部含水层中地下水均为“承压水”,对于上部为“潜水”而下部为“承压水”的矿床,只需将式(1)、式(2)和式(3)中 Q_1 的计算改为“潜水”公式即可。

[参考文献]

- 陈萍,陈艺迪. 2015. 矿井涌水量预测的比拟法计算公式待定系数讨论[J]. 贵州地质, 32第2期, 147-153.
- 陈雨孙,颜明志. 1985. 抽水试验原理与参数测定[M]. 北京:中国水利电力出版社:12-14.
- 高卫东,尤志仁. 1998. 利用混合抽水试验计算水文地质参数及井筒分层涌水量[J]. 江苏煤炭, 1998年第1期, 8-9.
- 兰太权,赵安仁,刘秋朝. 2004. 单位涌水量与渗透系数关系的探讨试验和应用[J]. 地下水, 26(1):6-10.
- 涂洋,杜成波,李洋. 2008. 裘布依公式在实际应用中的缺陷分析[J]. 地下水, 30(5):6-8.
- 薛禹群,朱学禹,吴吉春. 1997. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社:68-70.
- 王明章. 2011. 裘布依地下水井流计算公式有关问题讨论[J]. 贵州地质, 28卷第2期, 118-121.
- 王诗扬,卢天丕. 2018. 岩溶区地下室抗浮水位问题讨论——以贵州省安顺市西秀区城区某建筑物地下室为例[J]. 贵州地质, 35(01):44-48.

Research on the Method of Calculating the Layered Permeability Coefficients by Using Single-hole Stable Flow Mixed Pumping Test

CHEN Yi-di¹, CHEN Ping²

(1. No. 111 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources Development, Guiyang 550081, Guizhou;

2. Guizhou Institute of Geo-environment Monitoring, Guiyang 550004, Guizhou, China)

[Abstract] In order to solve the problem of difficult hydrogeological hole construction and layered pumping test in mining areas with multiple water-filled aquifers, two representative exploration and mining areas were selected as experimental sites, and based on the seepage theory of Qiubuyi stable flow, a method of calculating the layered permeability coefficient by using borehole single-hole mixed pumping test was established. Conceptual Models and Mathematical Models. Based on the construction, pumping test, data collection and comprehensive analysis of the hydrogeological borehole in the experimental field, the method of obtaining the permeability coefficient of aquifer stratification from the single-hole mixed pumping test was studied. The experimental results show that the relative errors of the permeability coefficients of the aquifer calculated by the mixed pumping test of the hydrogeological holes of the two experimental sites and the results calculated by the actual pumping test of the single layer are only 3.73% and 4.4%, respectively, which reflects the feasibility of the method proposed in this study and can provide a reference for the exploration of mining areas with hydrogeological structures of the same type of deposits.

[Key Words] Single hole; Mixed pumping test; Permeability coefficient; Study