

西石门铁矿水文地质条件和 矿坑涌水量的预测

彭定邦· 吴炳肃·

摘 要: 论述了西石门铁矿水文地质条件,并在此基础上应用三维流有限元法求得了矿区水文地质参数和预测了4个中段的矿坑涌水量,为该矿山排水设计提供了科学依据。应用三维流有限元法求解水文地质问题,目前实例不多,这是一次有意义的探索。

关键词: 水文地质条件,岩溶充水矿床,三维流,有限元法,矿坑涌水量

The Hydrogeological Conditions in Xishimen Iron Mine and the Prediction of Mine Inflow

*Peng Dingbang· Wu Bingsu**

ABSTRACT: The hydrogeological conditions in Xishimen iron mine, which is a mineral deposit filled with karst water, have been deeply expounded. On the basis of the above expounding, the finite element technique for the three-dimensional flow has been applied to solve the hydrogeological parameters of the mining region and to predict the mine inflow of four levels. These research results may be used as the scientific bases for design of the mine drainage. So far, there are few examples of solving hydrogeological problems with the finite element method for the three-dimensional flow. This research may be one of valuable explorations.

KEY WORDS: hydrogeological condition, mineral deposit filled with karst water, finite element technique, three-dimensional flow, mine inflow

1989-09-13 收稿

* 地质系 (Department of Geology)

岩溶充水矿床的水文地质条件复杂，研究这类矿床水文地质条件和其矿坑涌水量预测方法，其有重要意义。

1 矿区水文地质条件

1.1 概述⁽¹⁾

矿区主要含水层为奥陶纪马家沟灰岩（以下简称奥灰）溶隙含水层，相对隔水层为闪长岩。奥灰裸露，并以NNE向分布于矿区，其四周和底部为闪长岩包抄，形成奥灰溶隙潜水

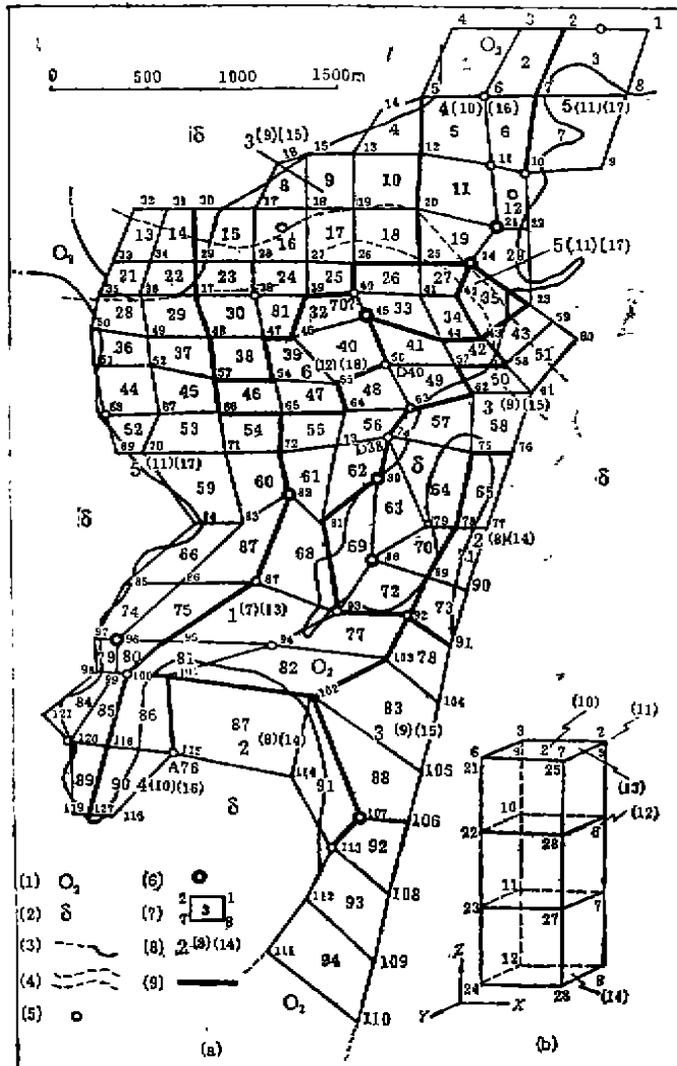


图1 (a)单元剖分和非均质分区；(b)单元柱体

- (1) 中奥陶统灰岩；(2) 闪长岩；(3) 180m水平灰岩与闪长岩界线；(4) 马河河床；(5) 观测孔；
- (6) 排水点；(7) 单元号和梭号；(8) 分区号；(9) 分区界线；(10) 单元号；(11) 梭号；(12) 结点号；
- (13) 潜水面；(14) 含水层底板

Fig.1 (a) The divided elements and divided areas of inhomogeneous media; (b) Prism element

含水层。矿区边缘有 3 个狭窄的闪长岩缺口——北口、西口和南口，使矿区内外奥灰相互连通，并成为接受区域岩溶水补给的 3 个通道。马河自西向东横穿矿区北部，流经矿区长 3 000 m，其中奥灰河段长 2 100 m，旱季干涸无水，汛期河水渗漏是矿区地下水的主要补给来源。

1.2 渗流场的非均质各向异性和三维流特性

矿区奥灰构造破坏程度是岩溶发育和渗透性强弱的重要因素。根据地质构造和水文地质勘探资料，矿区奥灰含水层渗透能力的非均质性可用 16 个字概括：内强边弱、弱中有强、强中有弱和随深减弱。即在平面上，矿区中部倒转背、向斜地段透水性最强，为矿区强劲流带，而矿区边缘（包括三水口）透水性则相应减弱。但弱中有强，南口相对强于北、西两口，西口最弱。在上述强劲流带中，有一弱透水地段，它分隔矿区北部和中部，其位置在观测孔 707 与 D40 之间（图 1）。1980 年中区 40 m 中段放水试验时，中南区水位一直下降，而北区却基本不降。当时起始水位为 135 m，因此，以该标高为界，潜水面在其之上时，北、中区间尚有一定连通性；而在其下时，则北、中区间之水力联系被此弱透水地段所截断。关于随深减弱，即在铅垂方向上奥灰渗透性随深度衰减，本文以 $K_z = K_0 \exp(-\alpha h)$ 模拟此衰减规律，式中 α 为衰减系数， K_0 和 K_z 分别为起始水位处和距起始水位 h 深处的渗透系数。

矿区主要构造线为 NNE，并常见 3 组含水裂隙（NE、NNE 和 NNW）。放水试验时，等水位线延伸方向和长圆形降落漏斗的长轴方向均与 NNE 向构造线相吻合。以 128 m 标高等水位线而言，近似南北为长圆形的长轴，东西为短轴，长宽比约为 3:1。以 x 、 y 分别表示 EW 向和 SN 向，则有 $K_y:K_x = 3:1$ 。在反求参数中求得 $\beta = K_y:K_x = 2$ ，于是 K_y 、 K_x 都可以用 K_x 表示。

因为奥灰含水层形状非常复杂，而且矿区疏干降深很大，故渗流场具明显的三维流特性。

1.3 计算前对各项补给量的定性估计

补给来源有：（1）入渗补给（马河渗漏和奥灰裸露区入渗，后者简称裸补）；（2）侧向补给（区域岩溶水通过三水口流入矿区和闪长岩周边裂隙水补给，后者简称周补）。各项补给量的定性估计：（1）以马河补给为主，三水口次之（仅南口补给稍多），而裸补和周补甚少；（2）潜水位在 135 m 以下时，马河渗漏仅威胁北区。而在 135 m 以上时，马河补给量将部分地越过弱透水地段转移至中区；（3）西石门处在太行山补给区东缘，三水口水位高峰值滞后于汛期 2~3 个月。故三水口和马河补给所造成的矿坑涌水量高峰值并非同步发生。因此，不能将两者简单相加，否则，涌水量预测值将偏大。

2 三维流有限元法

2.1 数学模型和求解方法^{〔2〕〔8〕}

选取各向异性介质三维非稳定渗流数学模型：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t}, \text{ 在 } D \text{ 上} \quad (1)$$

$$\left. H \right|_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad (2)$$

$$\left. H \right|_{B_1} = \varphi(x, y, z, t) \quad (3)$$

$$\left. K_n \frac{\partial H}{\partial n} \right|_{n_2} = q \quad (4)$$

式中： D 为所研究的渗流区； B 为渗流区边界面， B_1 为给定水头的第一类边界面， B_2 为给定法向补给量的第二类边界面； H 为水头； K_x 、 K_y 、 K_z 分别为 X 、 Y 、 Z 三个相互垂直轴向上的渗透系数； W 为单位时间、单位体积上进入含水层的水量（流入为正，流出为负），它包括两部分：排水量（为负）和入渗量（为正）； μ_s 为比弹性给水度。

对于潜水，因其顶部边界为自由面，属于需要求解的部分，故还应建立潜水面方程与上述方程联立求解。设潜水面方程为 $z = f(x, y, t)$ ，则在潜水面上应有下列关系：

$$H = z, \text{ 在 } z = f(x, y, t) \text{ 上} \quad (5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \cos \gamma = - \frac{K_z}{\mu_s} \frac{\partial H}{\partial n}, \text{ 在 } z = f(x, y, t) \text{ 上} \quad (6)$$

式中： n 和 K_n 分别为潜水面的外法线方向和外法线方向上的渗透系数； μ_s 为重力给水度； $\cos \gamma$ 为 n 与 Z 轴的方向余弦。但是，联立求解的计算工作量很大，考虑到 μ_s 与 K_z 都是影响潜水面升降的因素，本文取 K_z 代替两者的综合作用，不另建立潜水面方程，避免工作量的巨增。显然，这在理论上是不严格的。但是，实践证明，经过这样处理，计算结果符合工程要求。

求解方法和步骤：按标准有限元法编出 FORTRAN 语言，用大型计算机（日立牌 M—150）计算求解。计算步骤是：（1）解逆问题——根据 1978 年放水试验的水头和排水量等资料反求水文地质参数（包括非均质分区界线之确定）；（2）解正问题——矿坑涌水量预测。

2.2 计算范围和边界性质的确定、单元剖分和数据整理

计算要求自 180m 水平向下疏干，并预测 120m、80m、40m、0m 四个中段的矿坑涌水量，故主要根据 180m 水平闪长岩与奥灰界线圈定计算范围（图 1(a)）。三水口定为第一类边界，奥灰周边闪长岩及其下部托底闪长岩均视为第二类边界（大都为隔水边界，仅周边闪长岩表层有裂隙水补给矿区）。

如图 1 所示，平面上剖分为 94 个单元，在空间则是 94 个直立柱体，每柱体又等分为 3 层。柱体棱上 4 个结点的 x 、 y 坐标相同，而 z 坐标各不相同；上、下端点分别在潜水面和含水层底板上，下端点固定不动，而其上的 3 点都随潜水面升降。棱号 2、3 代表北口，35 代表西口，110、111 代表南口。

初步的非均质分区：平面上按上述的前 12 字规律将矿区划分为 6 个区，因垂向上分为 3 层，故空间共计 18 个区。图 1(a) 区号说明，如 $2^{(8)}(14)$ ，表示第一、二、三层分别属 2、8、14 区。

数据整理：单元、棱和结点的编号；求各棱之 x 、 y 坐标；依据计算起始等水位线图确定各结点水头初值 z ；确定各排水点的结点号；给定各种参数和各排水点之流量。

3 反求水文地质参数

根据水文地质条件分析和勘探资料选取参数初值，采用试估——校正法，不断修正输入参数和非均质分区界线，直至计算机输出的水头分布与实测水头分布二者拟合，此时所读入的参数即为所求之参数。

3.1 待求参数的个数及其简化处理

待求参数甚多，如不作适当处理，仅根据极为有限的水位和排水量观测资料是无法求解的。首先按经验并参考透水性强弱给定 μ_s 值，其值控制在 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{m}^{-1}$ 范围内。对于渗透系数，因为 $K_s = 3K_x$ ， $K_x = K_y/\beta$ ， $K_x = K_0 \exp(-\alpha h)$ ，所以待求者简化为 8 个，即 α 、 β 和平面上 6 个区的 K_x 。至于入渗补给强度 i ，需求出马河 3 个渗漏补给河段和裸补区的 4 个 i 值。此外，还需求出周补的单宽流量 q 值。总计 13 个待求参数。

3.2 计算时段划分和各排水点流量的取值

本课题模拟该矿 1978 年放水试验 73d 进行反求参数计算。根据此时气象和地下水动态，

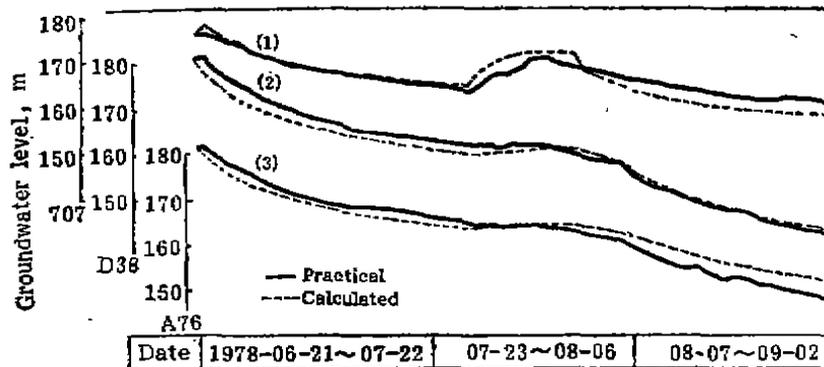


图 2 计算水位与实测水位的拟合

- (1) 观测孔 707，代表马河地段水位；(2) 观测孔 D38，代表中区水位；
(3) 观测孔 A76，代表南区水位

Fig.2 Coincidence between practical and Calculated groundwater level

划分为 3 个时段（图 2）：第一时段无入渗影响（即 $i=0$ ），其计算水位与实际水位的拟合用于初步求得 K_x 和 α 、 β 值；在第二时段内读入 i 和 q ，此时段内的拟合用于求 i 和 q 值；第三时段内的拟合用于对各参数值的检验。

将放水试验时各排水点实际排水量历时曲线简化为阶梯流量过程线，并从中得出不同时段各排水点的排水量。

3.3 反求渗数结果和其可靠性

- (1) 非均质分区如图 1 (a) 所示；

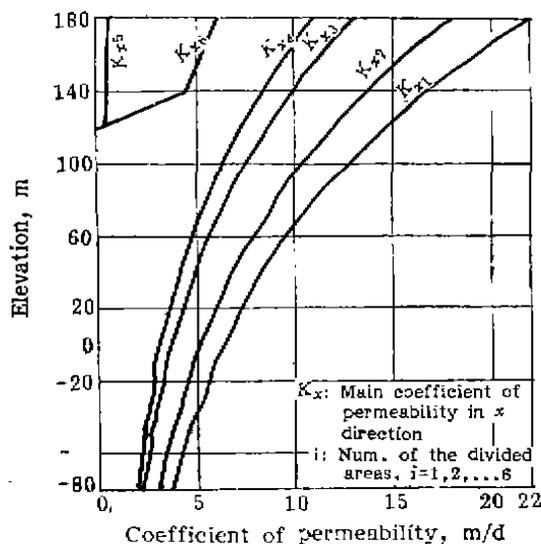


图3 K_{x_i} 随标高变化

Fig.3 The change of K_{x_i} with elevation

(2) 各区不同标高 (+180 ~ -80m) 渗透系数 K_x 如图 3 所示。 $\alpha = 0.007$, $\beta = 2$;

(3) 马河 3 种渗漏补给河段的 i 值分别为 0.040、0.014、0.0017。裸补区 i 值为 $7 \times 10^{-4} \text{ t/d} \cdot \text{m}^2$;

(4) 周补单宽流量 $q = 0.1141 \text{ t/d} \cdot \text{m}$ 。

计算结果的可靠性: (1) 参与拟合的观测孔共计 17 个, 拟合时间长达 73d, 计算区水位降深平均达 30m, 而各观测孔计算水位与放水试验实测水位一直保持稳定拟合状况 (图 2); (2) 在拟合过程中, 还随时注意了三水口进水量大小的合理性, 即南口进水量最大, 北口居中, 尽管西口水位最高, 但进水量最小。表 1 中数据正与此相符, 且实际排水量与边界进水量也相当接近^[4]。上述两点, 足以说明计算结果正确可靠。

表 1 两次放水试验中边界补给量与排水量对照, t/d

Table 1 Comparing boundary recharge with drainage in the two tests of the large discharge and drawdown, t/d

拟合日期	第一类边界计算进水量			第二类边界计算进水量	合计	实际排水量
	北口	西口	南口			
1978年9月2日	26 078	5 109	39 050	2 330	72 567	65 308
1980年8月9日	8 921	1 077	20 330	2 330	32 658	33 899

4 矿坑涌水量预测

4.1 预测的内容和两个预测阶段

从排水设计出发, 应预测丰水年矿坑最大涌水量。本课题以 10 年一遇的 1973 年代表丰水年, 因为矿区奥灰分布范围随深度缩小, 此缩小趋势尤其集中表现在 40m 中段, 致使北区矿量显著减少, 故必须分为两个预测阶段: 第一阶段——全矿区 120m、80m 两中段, 计算范围如图 1 (a) 所示; 第二阶段——中南区 40m、0m 两中段, 计算范围如图 4 所示。后者西口已不存在, 北口和南口分别以棱号 1、2 和 40、41 代之。这里的北口与图 1 中北口意义完全不同, 其水位取决于马河地段, 而不受区域岩溶水水位控制, 即北口水位峰值与马河地段同步。

4.2 马河渗漏补给和裸补、周补量预测

先求得 1978 年汛期马河补给量 $I_{78} \approx 22 630 \text{ t/d}$ 。因 1973 年资料不足, 故以 I_{78} 为基

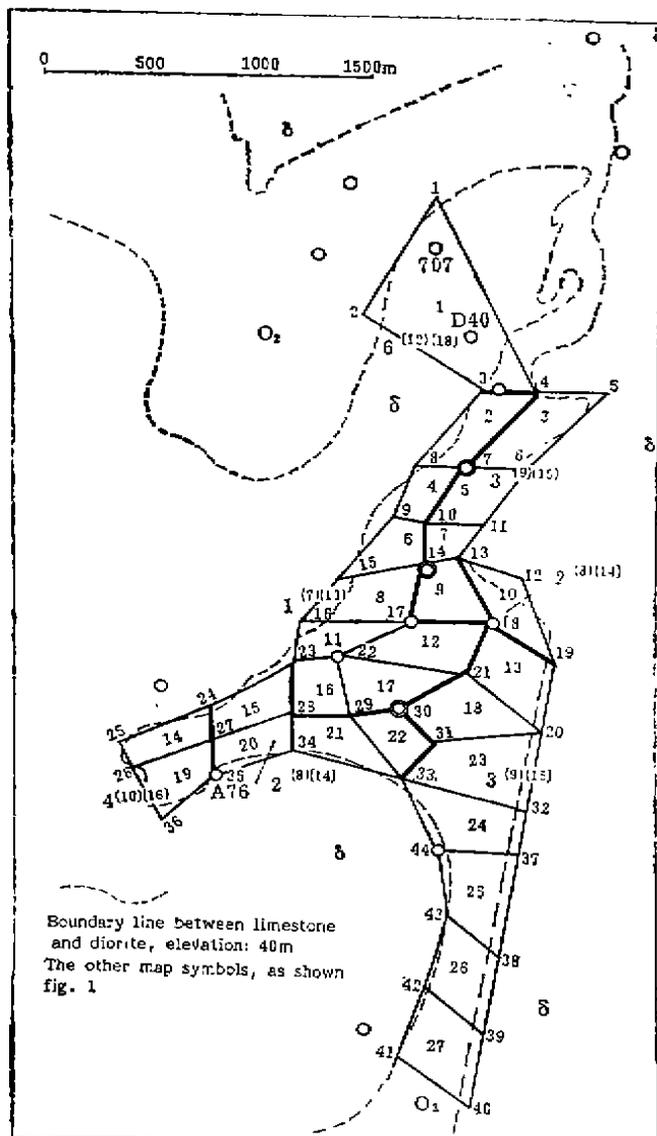


图4 预测第二阶段单元剖分和非均质分区

Fig.4 The divided elements and the inhomogeneous areas of second prediction stage

数，采用变幅系数法^[10]求得1973年汛期马河补给量 $I_{73} = \eta_{73} \cdot I_{78} = 2.056 \times 22\ 630 \approx 46\ 530\ \text{t/d}$ ，式中 η_{73} 为变幅系数。

裸补量 $e_{73} = \eta_{73} \cdot i \cdot A$ ，周补量 $P_{73} = \eta_{73} \cdot q \cdot L$ ，式中 A 和 L 分别为灰岩裸面积和闪长岩周边长度。于是求得：第一阶段 $e_{73} = 8\ 530\ \text{t/d}$ ， $P_{73} = 4\ 790\ \text{t/d}$ ；第二阶段 $e_{73} = 7\ 070\ \text{t/d}$ ， $P_{73} = 2\ 260\ \text{t/d}$ 。

4.3 矿坑涌水量预测

根据水量平衡原理，当某中段疏干后，为了保持采矿所要求的水头分布（降落漏斗），

必须及时将补给水量排除，补给多少排除多少，才能保障该疏干中段的生产安全，所以，预测了此时的总补给量就等于预测了矿坑涌水量。

当矿区入渗补给量、周补量和各种参数已求得，根据采矿要求的水头分布已确定，则只需再给定各排水点排水量和各水口水头，就可计算出该中段各水口补给量。

各水口均非定水头边界，根据水位动态资料求得水头随时间的变化规律。至于各排水点的排水量，则通过试算确定。与反求参数相仿，先估计总补给量，并以此为排水量初值，进行试算，直至矿区水头分布符合该预测中段的采矿要求为止。此时排水量即等于各项补给量之总和，亦即该中段的矿坑涌水量预测值。

矿坑涌水量预测结果(t/d)：全矿区 120m 中段为 91 450；全矿区 80m 中段为 86 860；中南区 40m 中段为 46 530；中南区 0m 中段为 47 280。

1982 年为 10 年一遇的丰水年，其汛期排水量可用来检验矿坑涌水量预测值。当时北区水位处在 120m 中段，中南区水位处在 80m 中段，而汛期最大排水量为 76 500t/d，与预测值接近。因 1982 年降水量低于 1973 年，故 1982 年汛期排水量稍低于预测值。

5 结 论

在反求参数过程中的水位拟合和流量校核能满足生产要求，涌水量预测值又与实际排水量接近。因此，实践证明，三维流有限元法是解决矿区大降深疏干三维流问题的一种有效方法。计算过程中所作的简化处理是可行的。

致谢：本工作曾得到戚国安同志热情帮助，谨致以衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 杜开荣，邬荣姣，水文地质工程地质，1984，(3)：9
- 2 任天培，彭定邦，周柔嘉等，水文地质学，北京：地质出版社，1986：138
- 3 薛禹群，谢春红，水文地质学的数值法，北京：煤炭工业出版社，1980：249
- 4 薛禹群，谢春红，戴水汉等，水文地质工程地质，1981，(3)：21
- 5 彭定邦，水文地质工程地质，1987，(5)：1