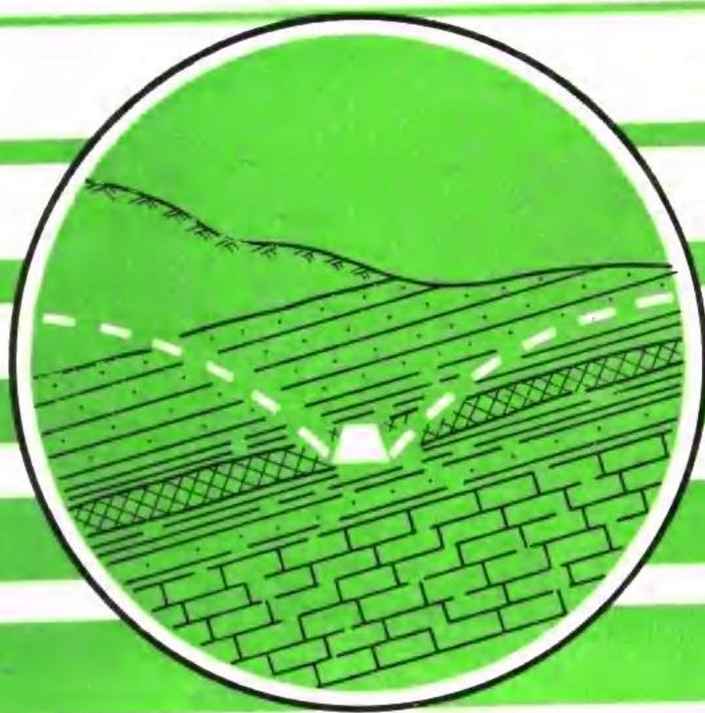


矿坑涌水量计算方法研究

陈崇希 陈明佑 陈爱光 区永和 编著



742

武汉地质学院出版社

内 容 简 介

本书系国家重点科技研究项目的一个专题研究成果。内容包括：对现有矿坑涌水量计算方法的评述；不稳定井流理论实际应用的分析；在解析法、数值法和数值-解析法方面提出了一些新的认识和新的计算方法。书中附有四个通用的计算机程序。

本书提出的绝大部分方法，同样适用于供水水文地质计算。

本书可供从事矿床水文地质、供水水文地质工作者及大专院校有关专业师生参考。

*

*

*

矿坑涌水量计算方法研究

陈崇希 陈明佑 著
陈爱光 区永和

*

武汉地质学院出版社出版
武汉地质学院印刷厂印刷

*

开本：787×1092·1/16 印张：6.6 字数：158千字

1985年11月第1版 1985年11月第1次印刷

印数：1—2000 定价：1.95元

统一书号：15414·002

前 言

《矿坑涌水量计算方法研究》^①属于“五五”计划国家重点科技项目第二十一项《岩溶充水矿床水文地质工程地质研究》中的一个专题。该研究报告是我们在1974年至1980年期间，为解决生产实际问题，探索、推广地下水不稳定井流理论在矿坑涌水量预测和地下水资源评价实践中应用的研究成果。

报告共分五个部分：

第一部分详细分析了齐姆的含有“影响半径”的模型与裘布依的岛状含水层模型之间的本质区别，指出了目前几种常用矿坑涌水量预测方法中存在的一些问题。

第二部分探讨了地下水不稳定井流解析法用于矿坑涌水量计算的可能性，并对岩溶含水层（暗河型除外）是否可采用要求含水层为均质和其地下水流服从达西线性定律的解析解问题作了初步探讨。

第三部分针对岩溶充水矿床的特点，在运用解析法方面提出了几种方法和计算公式。在涌水量预测方面还提出了层状非均质含水层不稳定承压-无压井流的近似计算公式。

第四部分提出了一个改进的数值计算方法，并对时间步长问题作了较详细的分析。

第五部分综合数值法和解析法的优点，提出了一个新的计算方法——数值-解析法。

书中大部分成果先后在我国山东、河北、江苏、江西、湖南、湖北、广西、四川以及毛里塔尼亚等十多个矿区及地下水水源地进行试用，取得了较好的效果。部分方法还有待于实践检验。

地质矿产部科学技术司和水文地质工程地质司于1983年1月在北京召开了本科研成果的评审会，并通过了研究报告。评审书指出：^②

“（一）《矿坑涌水量计算若干问题的初步研究》（以下简称《涌水量研究》）全面正确地论证了裘布依、齐姆和泰斯模型的假设及在矿坑涌水量计算方面的使用条件，为在实际工作中准确应用这两个公式起了积极作用。

（二）《涌水量研究》在确定含水层参数方面，提出了“特定条件法”（特定条件标准曲线对比法，特定条件切线法，特定条件直接法），能具体应用到比较复杂的边界条件及多井抽水条件中；该法推导原理正确，实际应用效果良好，在图解法求参方面有所发展。

（三）《涌水量研究》提出层状非均质不稳定的承压-无压井流的近似计算方法，是进一步解决新问题的良好开端。

（四）《涌水量研究》对不同的数值法进行了对比研究；在时间步长问题上作了较深入的探讨；利用观测孔资料解稳定流方程，是确定初始流场的较好方法。

（五）《涌水量研究》提出的数值-解析法便于处理勘探区外围工程控制不足及天窗补

^①1983年该研究报告送地质矿产部评审时题为《矿坑涌水量计算若干问题的初步研究》。

^②引自《地质矿产部科技成果评审书》地质矿产部技地83-02号。

给等问题，是水文地质计算中的一种好方法，值得提倡。

总之，《矿坑涌水量计算若干问题的初步研究》科研报告，内容丰富，论述精炼，计算分析数据完整准确，实例有一定的代表性，成果具有实用价值，是一份较好的科研报告，具国内先进水平。”

数年来，先后参加此项科研工作的还有孙连发、李正根、沈继方等同志；在完成这项研究课题的过程中，西安煤田地质勘探所、水文地质工程地质研究所以及山东地质一队、三队、六队和山东水文地质一队、三队、湖南冶金物探水文地质队、江苏水文地质队等单位给予了大力支持并提供了部分资料；并得到兰仲雄、孙訥正、肖树铁、李竞生等同志的热情帮助，山东地质局的侯顺宝、梁文康、吴修义、刘彦博、马振久和徐庆山同志以及应文亮、蒋健民、庞炳乾等同志也给予了大力协助或参加了部分工作，使本研究课题得以较顺利地完

成。我们在此谨表示衷心的感谢。

在这次编辑成书的过程中，孙连发同志对书稿作了认真的审读，提出了不少修改意见；有关人员

对书稿进行了细致的文字加工工作；徐晓玲同志清绘了全部图件。在此向上述同志表示感谢。

矿坑涌水量计算，尤其是岩溶充水矿床涌水量计算，是一个比较复杂的课题，许多问题还有待于深入研究。我们所做的工作还是初步的。限于水平和时间，本书所讨论的内容，难免有不妥或错误之处，恳望读者批评指正。

作者于武汉地质学院

一九八三年十月

目 录

前言

第一章 几种常用矿坑涌水量预测方法中的问题	(1)
第二章 地下水不稳定井流解析法用于矿坑涌水量预测可能性的探讨	(12)
第三章 解析法	(17)
一、特定条件法求含水层参数	(17)
(一) 特定条件法原理	(17)
(二) 特定条件法确定参数的步骤	(20)
(三) 特定条件法应用的若干实例	(21)
二、解析法求参数对井流试验的要求	(30)
三、层状非均质含水层中承压-无压井流涌水量计算	(31)
第四章 数值法	(38)
一、从一个理论模型的计算结果对几种数值解法的讨论	(38)
二、一个改进的计算方法	(52)
三、关于时间步长问题的初步探讨	(54)
四、数值法对勘探试验的要求及模型设计中的若干问题	(60)
(一) 确定参数	(60)
(二) 开采或疏干动态预测	(61)
第五章 数值-解析法	(64)
一、问题的提出	(64)
二、数值-解析法原理	(64)
三、实例	(69)
附录 I 隐式差分法及交替方向差分法计算程序	(72)
附录 II 有限元法的计算程序	(85)
附录 III 数值-解析法计算程序	(93)
参考文献	(99)

第一章 几种常用矿坑涌水量

预测方法中的问题

正确预测矿坑涌水量及其周围地下水位（水头）的动态是矿区水文地质工作的核心问题，它是设计部门制定疏干措施的主要依据。

五十年代以来，由于矿坑涌水量预测上的错误，已有了不少教训。有的矿坑放水试验的实际涌水量超过勘探报告的预测量达数百倍之多，使得已建成的开拓井巷搁置起来，不敢开采；有的本来可以开采的矿田，却由于计算的涌水量过大而错误地被放弃掉。

造成上述情况的原因很多，归纳起来不外乎两方面：一是水文地质条件未查清；一是用以预测矿坑涌水量的数学模型建立得不正确。前者是基础，若重要的水文地质条件未调查清楚，预测可能要犯大错误。但是，对于条件已基本查清的矿区，如果计算模型建立得不正确，其预测效果同样也不会好的。这部分主要就后一问题作一些讨论。

目前，我国用以预测矿坑涌水量的方法，大部分仍然是五、六十年代所使用的，例如地下水稳定井流解析法，水文地质比拟法（单位涌水量法）， $Q-s$ 曲线外推法（包括无时间变量的相关分析法），稳定流分段法（块段法），单位静储量法和水均衡法等等。不稳定井流的理论虽然在七十年代初有了初步的推广，数值法也已被采用，但就全国范围而言，用于涌水量预测的，还只限于个别矿区。

上述列举的常用预测方法，除了单位静储量法和均衡法之外，都有一个共同点，即它们都是以稳定流动为前提，而且差不多都是以裘布依稳定井流理论为基础。因此，我们首先从裘布依稳定井流的应用条件着手分析。

裘布依稳定井流方程（承压）

$$Q = \frac{2\pi KMs_w}{\ln \frac{R}{r_w}} \quad (1-1)$$

式中 Q ：抽水井流量（ m^3/d ）；
 K ：含水层渗透系数（ m/d ）；
 M ：含水层厚度（ m ）；
 s_w ：抽水井中的水头降深（ m ）；
 R ：圆柱形含水层的半径（ m ）；
 r_w ：抽水井半径（ m ）。

是地下水动力学基本方程之一，但是长期以来，对于建立该方程的水文地质条件却没有搞清楚。

五十年代，我国地下水动力学的教材是以卡明斯基^[1]著的《地下水动力学原理》等书为

蓝本的。在这些书中，将裘布依稳定井流的外边界条件叙述为无界的①（图1-1），并沿用了三十多年。因此，对裘布依公式的应用条件再作一些分析，不是没有意义的。

我们②曾证明，对于无越流的无界含水层，是不可能在一个“影响半径” R 处形成稳定井流的，这种情况的影响范围必定会波及整个含水层。裘布依稳定井流的外边界条件不是无界的，而是圆形定水头边界条件（图1-2）。因此，这个“ R ”，应称为“补给半径”，才更能说明条件。

后来了解到：裘布依建立井流方程时，是针对圆形定水头外边界条件的（1981年底从法国

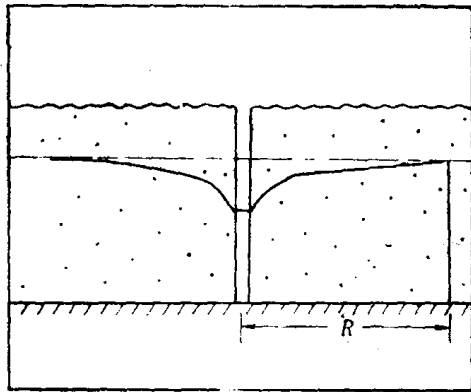


图1-1 无限含水层中的无压井流

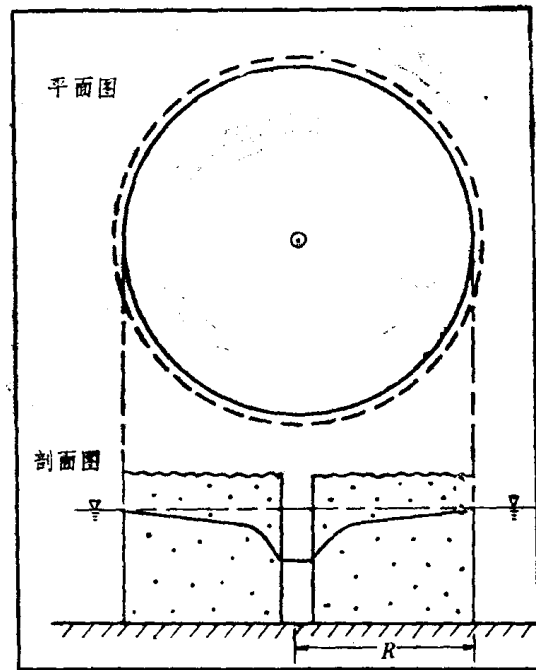


图1-2 圆形定水头含水层中的无压井流

复制到裘布依原著)。由此看来，裘布依的推导并没有错误，只是该式的实用价值并不象许多教材所述的那么广泛，那么大。但是，裘布依方程仍不失其理论上和历史上的意义，裘布依本人仍将作为地下水定量评价的先驱记录在地下水动力学的文献上。不过这种圆形定水头外边界条件在自然界很少见到，因此裘布依方程在应用上遇到困难。然而，生产要求对地下水作出定量评价，在不稳定井流理论尚未提出的情况下，德国工程师A·齐姆提出， R 值可以近似取为从抽水井中心到实际上观测不出地下水位下降处的水平距离（图1-1），这个距离之外，地下水位基本不受抽水的影响。这就引出了“影响半径”的概念。此后，一些学者为了在非裘布依外边界条件下使用裘布依稳定井流公式，按照A·齐姆对“影响半径”的定义，建立了许多确定影响半径的公式。例如

用于潜水含水层的库萨金公式^[2]

$$R = 2s_w \sqrt{h_w K} \quad (1-2)$$

式中 h_w ：井中水位（从隔水底板算起）或水厚（m）。

用于承压含水层的奚哈尔德公式^[2]

$$R = 10s_w \sqrt{K} \quad (1-3)$$

等等，不下二十多个。

①严格地讲，含水层都是有界的。所谓“无界”，通常系指边界对研究区的水头分布还没有产生明显影响的含水层系统。

②陈崇希（1966）地下水动力学（函授教材）北京地质学院内部出版；陈崇希（1974）地下水不稳定流计算山东地质局第一地质队印刷；武汉地质学院矿床水文地质教研组（陈崇希）（1975）地下水不稳定井流计算方法武汉地质学院内部出版。

这里不去一一分析这些确定影响半径公式的精确性如何, 因为用不稳定井流理论很容易证明, 对于无越流无界含水层, 影响半径方程的理论形式应是

$$R=2\sqrt{at}\sqrt{W^{-1}\left(\frac{cT}{Q}\right)} \quad (1-4)$$

式中 a : 含水层压力传导系数 (m^2/d);

t : 抽水延续时间 (d);

W^{-1} : 泰斯井函数的反函数;

T : 含水层导水系数 (m^2/d);

Q : 定流量抽水井的流量 (m^3/d);

c : 系数, 取决于测量水位仪器的精度 (或影响半径处允许水位下降值 Δh , 当 $\Delta h = 0.01\text{m}$ 时, $c = 0.04\pi$, 当 $\Delta h = 0.001\text{m}$ 时, $c = 0.004\pi$)。

鉴于目前大量的计算方法仍以齐姆提出的影响半径为基础, 因此, 在这里有必要对包含影响半径 (图1-1) 的齐姆公式与圆形定水头外边界条件 (图1-2) 的裘布依稳定井流公式作一对比讨论。

需要指出, 在泰斯 (1935年) 的不稳定井流理论问世之前, 齐姆采用这种方法定量评价自然条件下地下水井流问题是无可非议的。但是, 在不稳定井流理论已得到相当发展的今天, 还采取一百多年前齐姆提出的方法, 其理论上的正确性就值得怀疑了。

初看起来, 齐姆模型 (图1-1) 和裘布依模型 (图1-2) 很相近 (因为在 R 处, 后者的水位降深为零, 前者的降深接近于零), 似乎可以通用, 但是, 它们之间存在下列本质上的差别:

(1) 在裘布依条件下, 地下水可以形成稳定流动; 齐姆条件下则不能。

裘布依稳定井流公式是在无垂向补给、排泄条件下导出的。当每一个渗流断面处 ($r_w \leq r \leq R$) 的渗透流量均相等 (包括圆形含水层的外缘 R 处), 且等于抽水井的流量 Q 时, 就可以形成稳定流动。但是, 对于齐姆模型, 按照“影响半径”的定义, 在 R 之外水位不受抽水影响而保持天然的水平状态。这就会出现一个非常明显的矛盾: “影响半径” R 处的渗流断面的流量等于抽水井的流量, 而比 R 稍微大一点处的渗流断面的流量却等于零。这怎么能形成稳定流动呢?

(2) 对于裘布依圆形定水头外边界条件, 当井流稳定后, 抽水井流量 Q 等于外边界的补给量。由于抽水前的补给量为零, 故抽水井流量 Q 就等于补给的增加量。但是, 对于齐姆条件, 井孔抽取的水量始终是静储量^① (如果影响范围扩大到补排边界, 这已偏离齐姆条件了)。由此可见, 从水均衡的角度来看, 裘布依模型抽取的是补给的增量, 齐姆模型则是静储量, 两者在水资源评价的意义上, 有着本质的差别。

(3) 对于裘布依条件, 在 $r=R$ 处, 其水力梯度 $J = \frac{Q}{2\pi R M K}$; 对于齐姆条件, 由于在 $r \geq R$ 处的水位几乎不下降, 因而在 $r=R$ 处的 Q 和 J 均趋于零。

(4) 裘布依漏斗曲线是对数曲线, 它反映各个断面的流量相等; 而齐姆漏斗曲线则是指数积分曲线, 它表示抽取的全是静储量, 随着 r (离抽水井的距离) 的减小, 断面流量却增大。

^①我国地下水资源(储量)仍未统一, 本文暂采用普洛特尼柯夫分类法。

(5) 上述几方面的差别, 综合反映到流网上, 两者也是不同的。裘布依模型的浸润曲线是流线, 当 s_w 较小时, 等水头线接近铅垂线, 而齐姆模型的流网则截然不同 (图1-3)。

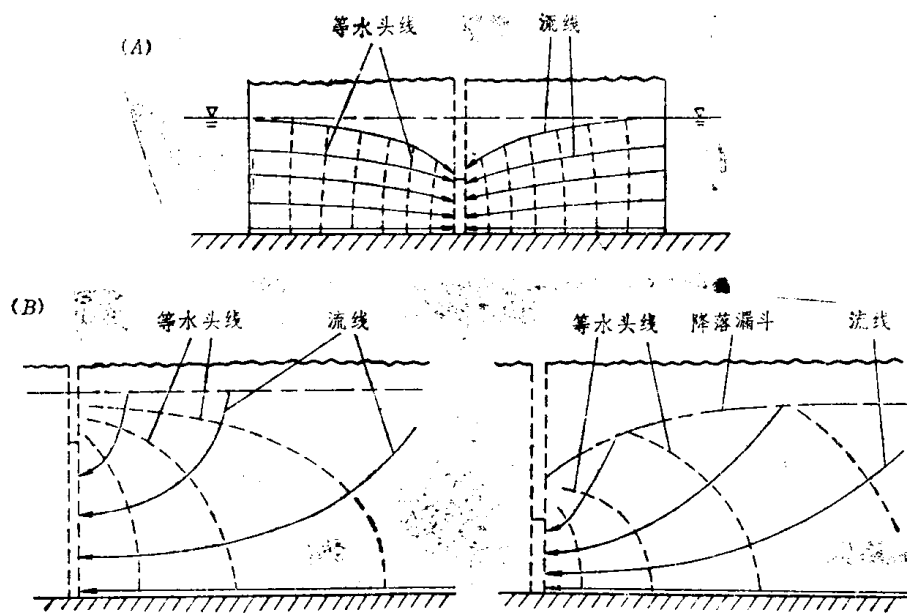


图1-3 井流流网

(A) 裘布依井流

(B) 齐姆井流

由上述分析可以作出结论, 尽管裘布依条件与齐姆条件从表面上看很相近, 但它们的本质是不同的。因此, 笼统地用齐姆的“影响半径” R 代替裘布依的圆形含水层的半径是错误的。

有的文章把裘布依圆形含水层的半径——补给半径——也称为“影响半径”, 这种提法似乎不恰当, 它容易混淆“影响半径”与“补给半径”之间的根本差别。另外, “影响半径”本来就是为齐姆条件而提出来的, 即相对于渗流场内仍然存在着未受抽水(明显)影响的区域而言的, 如果整个渗流区都已受(明显)影响, 即边界已明显起作用, 则用含水层的几何形状来描述更为确切。

以上是针对天然水头面为水平的状态来讨论的, 但是自然界地下水面往往是倾斜的, 或者说存在地下水天然动储量(迳流量), 在这种情况下能否形成稳定流动呢?

长期以来流行着一种观点, 认为抽水量小于(或大大地小于)天然动储量(补给量)时, 抽水就可以形成稳定流动, 我们①〔3〕〔6〕曾用下面的简单方法, 证明上述观点是不能成立的。

对于无垂向渗入补给和排泄的含水层, 假定抽水前存在着天然迳流量 $Q_{动}$, 并设此时地下水处于稳定状态(否则就不好讨论抽水自身能否使渗流场达到稳定), 在渗流场上任取一均衡段, 则其流入量必等于流出量。现假定对某井孔以流量 $Q_{抽}$ 进行若干天抽水(注意: 这里对 $Q_{抽}$ 的大小及抽水延续时间 t 均没有任何限制), 如此时已有一个相当大的影响范围(但未达供排边界), 地下水能否达到稳定状态呢? 我们取比该时刻的影响范围稍大一点的地段作为

①陈崇希(1966) 地下水动力学(函授教材) 北京地质学院内部出版; 陈崇希(1974) 地下水不稳定流计算 山东地质局第一地质队印刷; 武汉地质学院矿床水文地质教研组(陈崇希)(1975) 地下水不稳定井流计算方法 武汉地质学院内部出版。

均衡区来研究(图1-4)。由于均衡段边缘线在影响范围之外,因此,该边缘线上的含水层厚度和水力梯度等要素均与抽水前相同,即流进与流出水量相等。但此时均衡段内部却多了一项井孔抽水的流出项 $Q_{抽}t$,故它是负均衡,地下水流不能稳定,影响范围要继续发展。因此可得出结论:在补给量或排泄量改变之前,即使 $Q_{抽}$ 小于 $Q_{动}$,抽水也不能达到稳定状态。

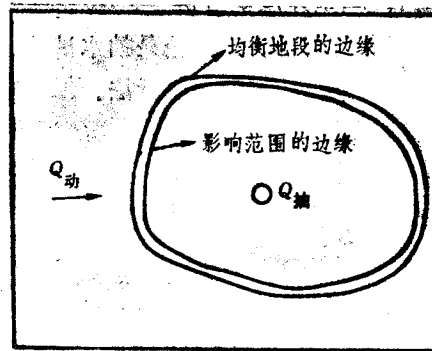


图1-4 均衡段平面图

由上述分析可知, t 时间内从井孔抽出的总水量,等于均衡段疏干漏斗内地下水的体积。

对于承压水来说,则是减压漏斗所释放的弹性储量(此结论也适用于抽水前后垂直补给量和排泄量保持不变的含水层),即

$$Q_{抽}t = -\Delta V_{静} \quad (1-5)$$

$$\text{或} \quad Q_{抽} = -\Delta V_{静}/t \quad (1-5')$$

式中 $\Delta V_{静}$: 同时期内静储量(包括弹性储量)的增量(m^3)。

由此可见,作为“单位静储量法”⁽²³⁾⁽²⁴⁾的基础方程

$$Q_{抽}t = Q_{动}t + \Delta V_{静} \quad (1-6)$$

是没有理论依据的。

当影响范围扩展到含水层的补、排边界(或抽水引起垂直补给量和(或)排泄量的变化)时,可引起补给量的增大或排泄量的减少,此时均衡方程应为

$$V_{抽} = \Delta V_{补} - \Delta V_{泄} - \Delta V_{静} \quad (1-7)$$

式中 $V_{抽}$: t 时间内抽水总量(m^3);

$\Delta V_{补}$: 同时期内补给量的增量(m^3);

$\Delta V_{泄}$: 同时期内排泄量的增量(m^3)。

当抽水尚未波及到补、排边界而抽水前后垂直补给量、排泄量又保持不变时, $\Delta V_{补}$ 和 $\Delta V_{泄}$ 均等于零,于是

$$V_{抽} = -\Delta V_{静} \quad (1-8)$$

这就是前面分析的,抽出的水总量全部来自静储量的消耗。当抽水已使地下水达到稳定流动,即 $\Delta V_{静}=0$ 时,则

$$V_{抽} = \Delta V_{补} - \Delta V_{泄} \quad (1-9)$$

此式说明,只有当补给的增加量与排泄的减少量之和等于抽水量时,才可能达到地下水的稳定状态。该式是判断能否形成稳定井流的基本条件。

(1-7)式不仅是矿坑涌水量计算中应遵守的水均衡原则,也是供水地下水资源评价中应满足的条件:不仅是定量计算的基础,也是勘探指导思想出发点。也就是说,在水文地质勘探中,不但要查明补给条件,而且要搞清排泄方式、排泄量;不仅要了解补给、排泄的现状,更应分析疏排、开采后的变化。

有了上述理论上的准备,特别是建立了方程(1-7)和(1-9)式,我们再就来分析目前几种常用的矿坑涌水量预测方法中的问题,就比较容易了。

1. 稳定井流解析法

不少地质报告, 无论是抽水试验还是矿坑涌水量预测, 特别是通过抽水试验求含水层参数, 多数采用稳定井流解析法。但一些报告在采用这种方法时, 却忽视对水文地质条件的分析, 忽视当地是否存在稳定井流的可能性, 似乎以为“稳定流法”是一种不受条件限制、可任意选用的计算方法, 这当然是一种误解。

有的还认为, 随着抽水(定流量)时间的延续, 水位降速逐渐减小, 则井流逐渐趋向稳定, 或者说, 井中水位降深 s 必定存在一极限值 $s_{\max}$ (图1-5)。其实不然, 这种现象仍然存在两种可能的结果。例如, 无界的泰斯系统, 其水头降速为

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{Q}{4\pi T} \frac{1}{t} e^{-\frac{r^2}{4at}} \quad (1-10)$$

在 $t \geq \frac{r^2}{4a}$ 时段, 水位的降速随时间的延续是不断地减慢。但是, 对于这种系统, 不存在补给的增加量和排泄的减少量, 抽取的全是静储量, 因而不具备稳定井流的条件。从其降深方程来看

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^\infty \frac{r^2}{4aT} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (1-11)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow \infty$, 不存在一个极限值, 水位持续下降, 直至最后破坏其基本条件而告终, 如承压井流转变为承压-无压井流; 定流量无压井流由于井中水位降至底板而不能维持定流量抽水等等。因此, 把水位降速逐渐减小与井流逐渐趋向稳定等价起来是错误的。重要的问题是分析水文地质条件, 按(1-9)式来判断是否存在稳定井流的可能性。

我们并不是否定在自然条件下抽水形成稳定井流的可能性。而是说, 象裘布依圆形定水头外边界条件的稳定井流在自然条件下是极为罕见的。然而过去的问题却是在利用抽水试验数据计算含水层参数和涌水量预测中大量地、普遍地引用裘布依稳定井流公式。

下面顺便讨论一下与上述问题有关的拟稳定流动问题。

“拟稳定流动”尚没有统一的定义。J. 贝尔 (Bear, 1979) 将其定义为“没有显著附加降深被观测到”的流动^[21]。接着他认为: “从抽水井到实际上观测不到降深处的距离称为井孔的影响半径”^[21]。接着贝尔又用这个影响半径 R 来建立有关的稳定井流公式。这样一来, 贝尔实际上把无界含水层中的不稳定井流与稳定井流(引入“影响半径”)挂上了钩。

我们认为: 贝尔关于拟稳定流动的定义是不确定的。因为“附加降深”的大小与抽水的“附加延续时间”有关。短的“附加延续时间”产生的“附加降深”可以是不显著的, 但长的“附加延续时间”则完全可以获得显著的“附加降深”。因此, 这样的拟稳定流动的定义是不恰当的。至于引入“影响半径”将不稳定井流与稳定井流联系起来, 其理论上的不合理性, 前文已作了分析, 不再重复。

我们建议把拟稳定流动定义为: 流场中的流速不随时间变化, 而水头随时间变化的一种

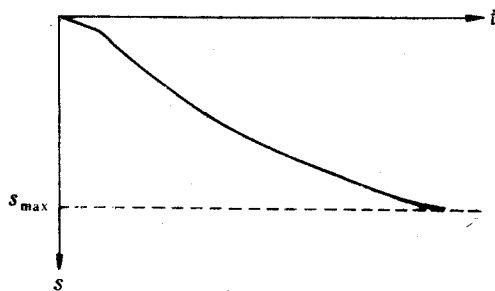


图1-5 $s-t$ 曲线图

不稳定流动。称它为拟稳定流动，只是由于这种流场在某些因素上具有稳定流动的特征，即抽水降落漏斗曲线的几何形状属于对数曲线，与裘布依稳定井流的一样。正是由于这一特点，由泰斯基本公式出发，当满足条件 $\frac{r^2}{4at} \leq 0.01$ 时，可以导出公式^[16]

$$Q = \frac{2\pi T(s_1 - s_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

显然，此公式在形式上与裘布依公式相同。但是，我们决不能由此得出结论：这时泰斯不稳定井流转变为裘布依稳定井流了。因为这时属于拟稳定流动，它在本质上属于不稳定流动，因为流场上的水头仍然随着时间的延续而下降，降落漏斗仍在发展。我们也不能因为泰斯不稳定井流与裘布依稳定井流在这方面存在相似性，便笼统地说裘布依公式可以用于无限含水层，把圆形定水头外边界条件抛弃掉。这是因为：①上述的相似性仅仅限于 $r \leq 0.2\sqrt{at}$ 的范围内^[16]，而这个“适用条件”从裘布依公式本身是得不出来的，只有依据泰斯公式才可证明此条件；②在此范围内也只能说降落漏斗曲线的形状相似，或者说对应点的水力梯度近似一致，而不能说水头线方程一样。一个是稳定漏斗曲线，另一个是不稳定漏斗曲线，两者怎么能说一致呢？

为了便于分析，我们将在自然条件下进行抽水而能够出现稳定井流的常见条件分为四类：

- ① 地表水体附近的井流；
- ② 第一类越流系统^[16]中的井流；
- ③ 大泉附近的井流；
- ④ 地下水位埋深很浅的蒸发型排泄区的井流。

2. 水文地质比拟法

水文地质比拟法主要包括富水系数法和单位涌水量法。前者不仅要求水文地质条件相似，而且要求开拓开采方法、范围、进程等方面也应大体相同。这样苛刻的条件实际上很难满足。因此，该法目前用得不多，故不予赘述。

单位涌水量法预测矿坑涌水量是较常用的方法之一，几乎各种有关教材和手册都介绍此法。归纳起来，大体有下列几个公式^{[4][5][7]}：

对于满足达西渗透定律的承压完整井流

$$q'_1 = \frac{Q_1}{F_1 s_1} \quad (1-12)$$

$$Q_2 = q'_1 F_2 s_2 = Q_1 \frac{F_2 s_2}{F_1 s_1} \quad (1-13)$$

对于满足达西渗透定律的潜水完整井流

$$Q_2 = Q_1 \frac{(2H_2 - s_2)s_2}{(2H_1 - s_1)s_1} \quad (1-14)$$

对于紊流条件的完整承压井流

$$q'_1 = \frac{Q_1}{F_1 \sqrt{s_1}} \quad (1-15)$$

$$Q_2 = q'_1 F_2 \sqrt{s_2} = Q_1 \frac{F_2}{F_1} \sqrt{\frac{s_2}{s_1}} \quad (1-16)$$

(对于“混合流”，上式中的 s 取 m 次方根)。

上述式中 q'_1 : 生产矿坑单位开采面积、单位降深的涌水量(l/d);

Q_1 和 Q_2 : 生产矿坑和设计新矿坑的涌水量(m^3/d);

F_1 和 F_2 : 生产矿坑和设计新矿坑的开采面积(m^2);

s_1 和 s_2 : 生产矿坑和设计新矿坑的水位降深(m);

H_1 和 H_2 : 生产矿坑和设计新矿坑的初始含水层厚度(m)。

然而，几乎所有的有关教材和手册对于应用这些公式的基本条件——是稳定井流还是不稳定井流——都没有提及。于是在应用中产生混乱，似乎对于稳定井流或不稳定井流均没有什么限制。

实际上，从单位涌水量法的名称来看，已清楚地表明其应用条件。因为不稳定井流是无“单位涌水量”可言的。当某井作定流量抽水，若处于不稳定状态，则随着抽水时间的延续，其流量 Q 可与一系列降深 s 相对应，因此， $q=Q/s$ 是个变量。只有当形成稳定井流时， Q 才与一个 s 对应，单位涌水量 q 也才是确定的。所以说，单位涌水量法只能用于稳定井流。

自然界出现稳定井流最常见的条件是傍河井流。然而上述公式中却没有一个考虑河流这一因素的。实际上考虑河流因素并不难，例如，对于傍河承压完整稳定井流，单位涌水量法应按下列公式预测

$$q_1 = \frac{Q_1}{s_1} \quad (1-17)$$

式中 q_1 : 生产矿坑单位降深涌水量(m^2/d)。

$$Q_2 = q_1 s_2 \frac{\lg \frac{2\lambda_1}{r_{w1}}}{\lg \frac{2\lambda_2}{r_{w2}}} \quad (1-18)$$

式中 λ_1 和 λ_2 : 生产矿坑和设计新矿坑至河流的距离(m);

r_{w1} 和 r_{w2} : 生产矿坑和设计新矿坑开采面积的引用半径(m)。

如果根据同一井田上某一水平(中段)的涌水量来预测下一开采水平(中段)的涌水量，这时大体有 $\lambda_2 \approx \lambda_1$ ，若 $r_{w2} \approx r_{w1}$ ，则(1-18)式可简化为

$$Q_2 = q_1 s_2$$

另外，对于第一类越流系统^[16]也存在类似上述的关系。

这里还需要指出的是文献中用于紊流的单位涌水量公式，实际上是以哲才-克拉斯诺波利斯基的承压完整稳定井流方程^[1]

$$Q = 2\pi K_t M \sqrt{\frac{s_w}{\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R}}} \quad (1-19)$$

为基础的。而该式又是在下列微分方程及边界条件下导出的，即

$$Q = 2\pi r M K_t \sqrt{\frac{dH}{dr}} \quad (1-20)$$

$$h|_{r=R} = H \quad (1-21)$$

$$h|_{r=r_w} = h_w \quad (1-22)$$

(其中 K_t 为紊流状态含水层的渗透系数)。由此可见，这里除了存在类似于裘布依稳定井

流所要求的圆形定水头边界之外，还要求在整个渗流场内的水流流动服从水流阻力平方定律——水流摩擦阻力与平均流速的平方成正比。根据尼古拉池对圆形导管所作的试验^[6]可知，水流服从阻力平方定律大体上发生在雷诺数Re大于10万的条件下。这么大的雷诺数，相当于表1-1所列的条件。

表1-1

圆管直径d (cm)	平均流速V (cm/s)	20°C水的粘滞运动系数 ν (cm ² /s)	雷诺系数 (万) $Re = \frac{Vd}{\nu}$
1	1000	0.01	10
5	200	0.01	10
10	100	0.01	10
50	20	0.01	10
100	10	0.01	10

为了粗略地判断抽水试验过程中出现阻力平方区的可能性，假定下列抽水试验数据

$$Q=5000\text{m}^3/\text{d}, \quad M=10\text{m},$$

$$\text{岩溶率 } n=0.01, \quad r=500\text{m},$$

则在距抽水井中心 r 断面处的平均实际流速 u_r 为

$$u_{r=500\text{m}} = \frac{Q}{2\pi r M n} = \frac{5000}{2 \times 3.14 \times 500 \times 10 \times 0.01} = 15.9\text{m/d} = 0.0184\text{cm/s}$$

同理，有 $u_{r=5\text{m}} = 1.84\text{cm/s}$, $u_{r=0.5\text{m}} = 18.4\text{cm/s}$ 。

从上表和这些简单的计算来看，可以得出这样的概念：在抽（放）水过程中，局部地段水流服从阻力平方定律是可能的；但是，在整个渗流场内要求处处满足平方定律，几乎是不可能的。也就是说，哲才-克拉斯诺波利斯基公式的实用价值是可疑的。

斯姆列盖尔公式也存在类似的问题，而且从理论上说比紊流公式更不合理。

我们并非认为水文地质比拟法从此就不能应用了，而是强调当使用此法时应当注意条件。

3. Q-s曲线外推法（包括通过相关分析得到的Q-s相关方程）

该法在本质上与单位涌水量法没有什么不同，它们之间的公式类型大部分也可以对应起来。因此，单位涌水量法存在的问题，在Q-s曲线外推法中也同样存在。

这里需要补充说明一点，在目前经常使用的Q-s曲线类型中，有一种为对数曲线型的，即

$$Q = a + b \lg s \quad (1-23)$$

当 $s=1$ 时， $Q=a$ （相当于单位涌水量）；但当 s 趋于零时，涌水量 Q 却趋于 $-\infty$ ，而不是趋于零，这在物理意义上是说不通的。

此法的另一缺点是预测涌水量时采用外推法。如没有一定的理论依据，预测值是不容许超出子样的取值范围的，这样对于勘探阶段深埋矿体坑道涌水量的预测，使用Q-s曲线外推，结果往往很不可靠。

4. 稳定流分段法（辐射流法、块段法）

一些教材、手册^[7]在矿坑系统涌水量预测中引入稳定流分段法。

分段法是将复杂形态的渗流分解成若干个简单形态的渗流段——每个分渗流段有现成的解或比较容易求解——的一种近似方法。该法对于求解某些非均质含水层中地下水的稳定流动问题和坝下渗流问题，带来许多方便。

但是,分段法要求各分渗流段的流型(流网)与总渗流(原渗流)相应部分一致或基本一致,故各分段必须沿流线(流面)或等水头线(等水头面)分割。沿流面分割得到的分渗流段的新边界为隔水边界;沿等水头面分割得到的分渗流段的新边界仍为等水头边界。所以,运用分段法必须从分析流网开始。但是在一般的水平二维流动的情况下,人们不可能在勘探阶段画出矿坑排水后的地下水流网形态,从而也无法利用分段法来预测矿坑涌水量。

5. 单位静储量法

此法是苏联K. II. 彼图什科夫^[14]所提出,并得到H. II. 普鲁特尼科夫^[15]的推荐。该法提出后,对我国的地下水资源评价工作产生相当的影响。此法的基本观点是:当抽水井的流量 $Q_{\text{抽}}$ 小于天然动储量 $Q_{\text{动}}$ 时,抽水可以形成稳定井流;当 $Q_{\text{抽}} > Q_{\text{动}}$ 时,其基本方程为

$$Q_{\text{抽}} = Q_{\text{动}} + \frac{V_{\text{漏}}}{t}$$

我们在前面已证明,这些基本观点和方程都是错误的。

6. 水均衡法

均衡原理是阐明物质收入、支出与储存量变化三者之间的关系。地下水运动都要满足水均衡方程。或者说,水均衡原理是建立一切地下水运动方程的基础之一。描写地下水运动的微分方程,就是在渗流场中处处(和时时——对于不稳定流动)满足水均衡的方程。因此,水均衡在地下水的定量计算上是非常重要的。

这里所要讨论的是在利用水均衡法预测矿坑涌水量时存在的一些问题。

(1) 收入、支出各项均衡要素的确定。这里不仅仅要测得在天然条件下各项均衡要素,而且更重要的是,当地下水被疏排之后均衡要素(例如迳流量、越流量等)在数量上往往发生变化,而预先确定其变化是十分困难的,有的甚至是不可能的。

以潜水为例。用来预测地下水的开采(或疏排)量的均衡方程为^[7]

$$\begin{aligned} Q_{\text{开}} = & (Q_{\text{迳}} + Q_{\text{越}} + Q_{\text{河}} + Q_{\text{雨}} + Q_{\text{人}}) \\ & - (Q'_{\text{迳}} + Q'_{\text{越}} + Q'_{\text{河}} + Q'_{\text{蒸}}) \\ & \mp \frac{\Delta h}{\Delta t} \mu F \end{aligned} \quad (1-24)$$

式中 $Q_{\text{开}}$: 均衡区内开采(疏排)的水量(m^3/d);

$Q_{\text{迳}}$ 和 $Q'_{\text{迳}}$: 同一含水层进入均衡区和流出均衡区的水量(m^3/d);

$Q_{\text{越}}$ 和 $Q'_{\text{越}}$: 从其它含水层流进均衡区和由均衡区含水层流往其它含水层的水量(m^3/d);

$Q_{\text{河}}$ 和 $Q'_{\text{河}}$: 河流补给和排泄均衡区含水层的水量(m^3/d);

$Q_{\text{雨}}$ 和 $Q'_{\text{蒸}}$: 大气降水补给和蒸发(蒸腾)消耗均衡区含水层的水量(m^3/d);

$Q_{\text{人}}$: 人为补给均衡区含水层的水量(m^3/d);

μ : 均衡区含水层的给水度;

F : 均衡区的面积(m^2);

Δh : 均衡计算期内地下水位变化值(m)。

显然,这些均衡要素均涉及地下水开采(疏排)条件下的数量。而要确定这些数量是困难的。以迳流量($Q_{\text{迳}}$ 或 $Q'_{\text{迳}}$)及越流量($Q_{\text{越}}$ 或 $Q'_{\text{越}}$)为例,有的建议用断面法来确定,即

$$Q_{\text{迳}}(\text{或}Q'_{\text{迳}}) = KJ\omega$$

$$Q_{\text{越}} (\text{或 } Q'_{\text{越}}) = \frac{K'}{M'} F \Delta H$$

式中 ω : 渗流断面 (m^2);

$\frac{K'}{M'}$: 越流系数 ($1/d$);

ΔH : 越流层与均衡区含水层间水头差 (m)。

这种提法显然是存在问题的。因为地下水开采(疏排)以后,均衡区进、出断面的水力梯度 J 和渗流断面 ω 是不能预先给定的;同样,均衡区含水层与越流层之间的水头差,也是无法预先知道的。如果能在越流量确定之前就计算出均衡区含水层(疏排层)的水头分布,那么就等于矿坑涌水量预测的任务已经完成了,因为只要水头分布已知,则任何点的水力梯度和断面的流量(包括矿坑涌水量或集水建筑物的流量)也就可以计算出来了。

(2) 储存量项。均衡区地下水收入总量与支出总量之差,表现在储存量(体积)的变化上。

同样大小的地下水储存量,可以有不同的水位分布曲线。如图1-6所示, AB 水位线与 $CDEF$ 水位线两图式,其地下水储存量是相等的。对于 $CDEF$ 线,矿体已呈疏干状态,可安全开采;然而对于 AB 线则不行。因此,储存量在空间上的分配——体现为水位的分布——是个关键的问题。但是,均衡法对于这个问题是无能为力的。

有些建立的均衡方程,企图写出水头分布曲线,实际上事先已将条件作了简化,然后采用某一解析式来表示水头曲线,这种做法已不是纯均衡法了,它已在相当程度上依赖于解析法。

(3) 目前还流行一种认识:地下水动力学是不考虑地下水的补给条件的,因此用该法计算矿坑涌水量时应当用水均衡法加以检验[4]等。假如这种认识是正确的,则水均衡法的价值无疑会大大地提高。但事实并非如此,地下水动力学中的每一个公式——当然是指正确的公式——都是在一定的初始条件(如果属于不稳定流动问题)和边界条件下导出的,这些

条件不仅反映了开采(疏排)之前含水层的补给、迳流和排泄条件,而且还规定了开采(疏排)之后补给量、排泄量上的变化。正如前面曾指出的,描写地下水运动的微分方程就是在渗流场中处处(和时时——对于不稳定流动)满足水均衡的方程,怎么微分方程的解却还必须受(大面积平均意义上的)水均衡方程来检验呢?

H. И. 普洛特尼科夫等[4]表示:“仅仅作为渗透系数和含水层厚度(不考虑地下水的实际补给条件)的函数的涌水量是偏高的。”这很可能是在不稳定井流条件下,给定一个“影响半径” R ,再套用圆形定水头边界条件的裘布依稳定井流公式所造成的。普洛特尼科夫等的这个从实践中得出的结论,正好证实本文前面对此问题分析的正确性。

这一部分的讨论,并非对矿坑涌水量预测方法的全面评述,而只是对其中某些方法以及使用中存在的若干问题作一些初步分析。

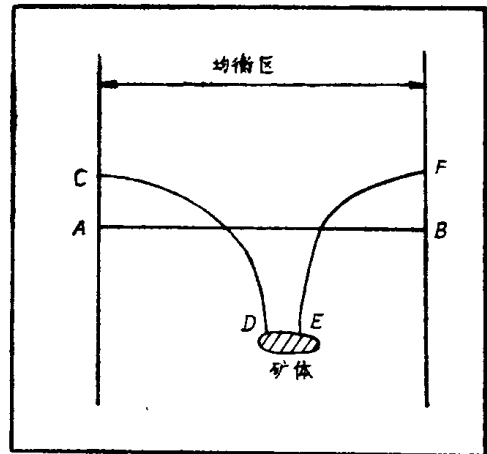


图1-6 地下水储存量相同而水位线不同示意图

第二章 地下水不稳定井流解析法 用于矿坑涌水量预测可能性的探讨

地下水不稳定井流解析法的出现, 如果从泰斯公式问世算起, 至今已将近半个世纪了。这些年来, 不稳定井流解析法的理论得到相当的发展。但就我国水文地质界来说, 该理论在七十年代才得到初步普及和推广。不过仍然缺乏实践经验, 尤其是用于矿山地下水计算方面。

地下水不稳定井流解析法应用于矿坑涌水量预测, 还存在着一些问题需要加以讨论, 对此试分析如下(以泰斯公式为例):

1. 泰斯公式要求井径趋于零, 而实际井径是有一定大小的, 这一假定对泰斯解析式的应用有什么约束呢? 关于这个问题, 我们^①曾经作过分析。

我们知道, 在井壁处的水力梯度为

$$\left. \frac{\partial s}{\partial r} \right|_{r=r_w} = -\frac{Q}{4\pi T} \cdot \frac{2}{r_w} \cdot e^{-\frac{r_w^2}{4at}}$$

而泰斯定解问题的内边界条件是

$$\lim_{r_w \rightarrow 0} -2\pi r T \left. \frac{\partial s}{\partial r} \right|_{r=r_w} = Q$$

于是有

$$\lim_{r_w \rightarrow 0} Q e^{-\frac{r_w^2}{4at}} = Q$$

由此可见, 引入 $r_w \rightarrow 0$ 的假定, 是为了使

$$\lim_{r_w \rightarrow 0} e^{-\frac{r_w^2}{4at}} = 1 \quad (2-1)$$

已知 $e^{-0.01} = 0.99 \approx 1.0$, 因此当满足条件 $r_w^2/4at \leq 0.01$, 或

$$t \geq 25 \frac{r_w^2}{a} \quad (2-2)$$

时, 其效果相当于流量误差在1%以内。这在实用上当然是允许的。因此, 我们的意见是, 泰斯定解问题理论上要求井径趋于零的要求, 在实用上可以用条件(2-2)式来约束泰斯公式的应用。

从一般实际情况来看, 条件(2-2)式在抽水的初期就能满足。例如, 若取 $r_w = 0.1\text{m}$, $a = 10^4 \text{m}^2/\text{d}$, 则按(2-2)式有

$$t \geq 25 \frac{0.1^2}{10^4} = 25 \times 10^{-6} \text{d} = 2.2 \text{s}$$

^①武汉地质学院矿床水文地质教研组(陈崇希)(1975) 地下水不稳定井流计算方法 武汉地质学院内部出版。