

493187

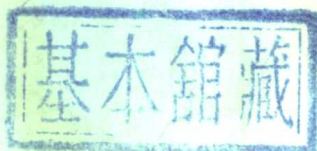
5111
7511

单
社

3
11

单井水力学

陈雨孙 编著



中国建筑工程出版社

单
社

5111
7511

5111
7511

单井水力学

陈雨孙 编著

• 限国内发行 •

中国建筑工业出版社

本书对单井开采地下水产生的水力学问题，作了比较系统的分析，提出了井周含水层中地下水三维流和紊流的理论。概述了单井抽水试验和开采地下水时经常遇到的各种实际问题，如滤水管内、外水头和流量的分布；水跃值的有无；围填层的存在，泥浆和滤水管的堵塞，抽水管口的位置和滤水管的长度等因素对水量和降深的影响；一井开采两层和多层含水层；井径对涌水量的影响；紊流对降深的影响等。为了正确认识裘布衣公式中的“影响半径”书中提出了“引用补给半径”的新概念和测定方法，以及用单井的稳定和非稳定抽水试验测定各种参数等问题。全书共十八章，大部分章节附有验证理论的实例。

书中还对从苏联引进的一些错误的概念、理论和公式进行了分析，并作了一定的修改和补充。

本书可供从事水文地质、凿井施工、给水排水、农田水利科学技术人员，大专院校教员、学员参考，也可供工程地质等有关人员参考。

井 水 力 学

陈雨孙* 编著

·限国内发行·

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：12 字数：322 千字

1977年12月第一版 1977年12月第一次印刷

印数：1—5,430 册 定价：1.05 元

统一书号：15040·3362

目 录

引言	1
第一章 滤水管的水力学问题	6
(一) 井和滤水管	6
(二) 地下水流经滤水管时的水头损失	7
(三) 水泵的作用	20
第二章 含水层水头的微分方程, 定解条件及其解	21
(一) 立方程	21
(二) 定解条件的确定	23
(三) 解方程	24
第三章 滤水管内、外的水头分布	34
(一) 滤水管外壁的水头分布	34
(二) 滤水管内的水头分布	35
第四章 含水层中的水头分布	45
第五章 承压井的水跃值问题	55
(一) 测水位管放置不同深度的影响	57
(二) 滤水管包网和缠丝间隙堵塞的影响	58
第六章 滤水管内的流量分布	62
第七章 抽水管口的位置对于井水面降深、 涌水量和功率消耗的影响	70
(一) 抽水管口位于滤水管顶端的上方	70
(二) 抽水管口位于滤水管的中部	72
(三) 抽水管口的位置对于井水面降深、 涌水量和功率消耗的影响	84
第八章 人工围填对涌水量和泥浆堵塞对降深的影响	95
(一) 人工围填	95
(二) 泥浆堵塞	106

第九章 非完整井	108
(一) 井壁边界条件	109
(二) 非完整井的一般公式	112
(三) 滤水管和井壁管的降深分布	115
(四) 非完整井的井水面降深和涌水量的关系	122
(五) 抽水管口伸入滤水管中时的井水面降深	126
(六) 井的完整程度对涌水量的影响	127
(七) 所谓厚含水层的有效带问题	131
第十章 大涌水量抽水时的降深和完整井滤水管的有效长度	133
(一) 大涌水量抽水时完整井滤水管内水头降深公式	133
(二) 大涌水量抽水时非完整井滤水管内水头降深公式	140
(三) 大涌水量抽水时含水层内降深的分布	142
(四) 完整井的滤水管的有效长度	148
第十一章 井周紊流的影响	151
(一) 紊流基本定律的理论推导	151
(二) 紊流基本定律的实验证明	155
(三) 单井抽水发生紊流的微分方程及求解	166
(四) 完整井和非完整井井壁紊流降深(抽水管口置于 滤水管顶端)计算公式	173
第十二章 潜水井的水力学问题	181
(一) 裘布衣公式的由来	181
(二) “裘布衣假定”的分析	184
(三) 裘布衣公式的误差	185
(四) 裘布衣公式作为涌水量计算公式的正确性	188
(五) 潜水井的最大涌水量	193
(六) 潜水层的势场	195
(七) 井内竖向流速对潜水井流量的影响	207
第十三章 单井开采双层含水层	217
(一) 公式的推导	218
(二) 流量计算的例题	224
(三) 抽水管口伸入滤水管内的情况	228

(四) 非完整井的井组串联	243
(五) 抽水管口伸入双层含水层非完整井滤水管中	249
(六) 两个含水层水头不等的情况	254
(七) 用混合抽水试验测定双层含水层的参数及 每层提供的流量	258
第十四章 单井开采多层含水层	259
(一) 抽水管口位于第一含水层顶板以上	259
(二) 抽水管口伸入完整和非完整井滤水管内的情况	267
(三) 用混合抽水试验测定多层的渗透系数和所提供的流量	277
第十五章 影响半径——引用补给半径	278
(一) 影响半径——实用影响范围——引用补给半径	278
(二) 引用补给半径的测定	302
第十六章 用抽水试验测定参数	313
第十七章 涌水量和井径、井水面降深的关系	325
(一) 涌水量和井径的关系	325
(二) 涌水量和井水面降深的关系	331
第十八章 单井非稳定流抽水试验	346
(一) 滤水管内竖向流速的影响	346
(二) 井的非完整性的影响	359
(三) 井周紊流的影响	364
(四) 用单井非稳定流抽水试验测定渗透系数	366
后记	375

引 言

井是地下水开发和回灌最基本的手段。为了开发城市及工业用的地下水资源，我国每年要开凿大量的水井。水文地质勘察工作也要通过井的抽水试验，测定含水层的富水程度，计算水文地质参数。

用抽水试验正确测定水文地质参数是计算地下水资源的基础工作。多年来的生产实践表明，这项工作目前还存在着很多问题：如抽水时间的长短，观察孔需不需要，怎么合理布置，抽水井的口径对涌水量的影响，水跃值的处理，含水层“有效带”的存在与否，滤水管长些好还是短些好，抽水管口放浅些好还是深些好，抽水量大些好还是小些好，抽水井钻探时可不可用泥浆护壁？怎样正确认识和测定裘布衣公式的影响半径，一个井同时开采几个含水层经济，还是几个井各开采一个含水层经济等等。然而，迄今国内外有关地下水动力学的文献和书籍中对上述具体问题尚少涉及。这一系列问题中，最根本的还是参数计算问题。同一个含水层用不同直径和不同深度的井以不同的抽水量做试验，算得的参数有大有小，甚至可差好几倍。没有准确的参数不仅给地下水资源的评价带来很大困难，一切有关单井的水力学计算也就没有基础。而参数计算不准也正反映了地下水动力学理论落后于实践。

在地下水开发工作中也存在着类似问题，其中主要的也是井的出水量和井水面降深算不准。即使在已经打过井的地方，只要井的口径、深浅一变，就没法正确地预见它的水量。至于对什么样的含水层，应该设计什么样的井能够最经济有效地开采地下水的问题，在目前来说研究的更不够。

多年来，我国水文地质工作者对这些问题都很重视，不断地

进行总结和研究，但是还远远不能满足生产实践的需要。其中单井的理论问题仍然是一个薄弱环节。特别是联系到滤水管的水力作用的研究我们从国内外的有关资料中只能找到有限的成果。

1954年彼得森 (Petersen J.S.)^① 等人，就滤水管的阻力问题进行了研究，他们将一定长度的一段滤水管放在水位保持不变的水池中进行抽水，观测水进入滤水管时产生的水头损失。并应用动量守恒原理，得到管内、外水头差

$$\Delta h = \frac{16Q^2}{g\pi^2 D^4} \frac{\cosh \frac{CL}{D} + 1}{\cosh \frac{CL}{D} - 1}$$

式中 g ——重力加速度；

D ——管直径；

L ——管长；

$C = 11.3 / (C_s A_p)$ ；

其中

A_p ——滤水管壁圆孔的面积与管壁侧面积之比；

C_s ——水流通过圆孔的收缩系数。

稍后我国的力伯法^②运用最小功原理，也获得了水槽中滤水管内任一点的水头损失。

$$\Delta h = \Delta H \frac{\cosh 2kl + 1}{\cosh 2kL + 1}$$

式中 $k = 5.657 \frac{C_s A_p}{D}$

C_s 、 A_p 、 D 、 L 的意义同上， l 为自滤水管底部算起的任一

① J.S. Petersen, Erohwer & M. L. Albertsen "Effect of well Screens on flow into well and aquifer" 《Proceeding A.S.C.E》 vol 80, Sep. No 578, 1954.

② 力伯法：“用最小功法求井的滤水管中流量分布”《土木工程学报》1956年第一卷五期。

点的高度, Δh 即为该高度的管内、外水头差, ΔH 是总的水头损失。从而也算得滤水管内的流量分布; 设总流量是 Q , 把滤水管平均分为上、中、下三段则

$$\text{当 } L = \frac{3}{k} \quad \begin{array}{l} \text{下段的流量为 } 0.117 Q; \\ \text{中段的流量为 } 0.362 Q; \\ \text{上段的流量为 } 0.638 Q. \end{array}$$

$$\text{当 } L = \frac{6}{k} \quad \begin{array}{l} \text{下段的流量为 } 0.018 Q; \\ \text{中段的流量为 } 0.117 Q; \\ \text{上段的流量为 } 0.865 Q. \end{array}$$

也就是说滤水管中的流量基本上集中在出水端的 $1/3$ 长度的那一段。因此得出结论: 1) 如含水层厚, 则当井径小、长度大时 ($L > \frac{3}{k}$) 滤水管的一部分即不起作用; 唯有扩大口径增加进入面积, 才能解放滤水管对岩层进水量的限制。2) 如含水层薄, $L < \frac{3}{k}$, 则由管径 D 的增大能使总的水头损失 ΔH 减少, 但 D 大到一定程度后, 如不相应增长 L , 则得不到减少水头损失的效果。

1954年厉文洵 (Wen Hsuing Li) ^① 首次将井内水头损失和含水层内水头损失联系起来, 建立了以滤管壁为边界的边界条件, 从拉普拉斯方程找得了地下水三维流的严格解:

$$H = H_{od} + \frac{Q_d}{2\pi k M} \ln\left(\frac{2r}{D_o}\right) + \frac{4}{3} \frac{Q_d^2}{2gA^2} - \frac{8}{\pi^2} \frac{Q_d^2}{2gA^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2(1+N_n)} \frac{K_o\left(\frac{n\pi r}{L}\right)}{K_o\left(\frac{n\pi D_o}{2L}\right)} \cos \frac{n\pi z}{L}$$

式中 H_{od} —— 滤水管外壁的水头;

① Wen Hsuing Li, "Interaction between well and aquifer" «Proceeding A.S.C.E» Vol 80 sept No 578, 1954.

Q_d ——滤水管出口端的流量；

D_0 ——滤水管外壁的直径；

A ——滤水管的断面积；

g ——重力加速度；

L ——承压含水层的厚度；

N_n 为一表达式其内容如下：

$$N_n = \left(\frac{\pi}{4} \right)^2 \cdot \frac{Q_d k D_0}{g A^2} \left(\frac{D}{C_s L} \right)^2 \\ \times n K_1 \left(\frac{n \pi D_0}{2 L} \right) / K_0 \left(\frac{n \pi D_0}{2 L} \right)$$

其中

D ——滤水管的内直径；

$K_0(x)$, $K_1(x)$ ——虚变元零阶及一阶贝塞尔函数。

稍感不足的是在建立边界条件时厉文洵没有考虑管壁的摩擦损失。

稍后我国常士骝^①补充了这个问题：他在生产实践中发现滤水管底的水头和管顶水头不一样；后者比前者为高，于是根据计算克服管路摩阻的水头损失的原理，用积分方法求得滤水管内的水头降深变化

$$s = s_0 + \frac{1}{3} C_1^2 C_2 s_0^2 y^3,$$

式中 y ——滤水管内任一点的高度；

$$s_0 = \frac{Q}{2\pi k M} \ln \frac{R}{r_w},$$

$$C_1 = \frac{Q}{M s},$$

$$C_2 = \frac{\lambda}{2g d A^2}.$$

① 常士骝：“抽水试验工作中几个问题的研究”《水文地质工程地质》1957年第5期。

其中 λ ——管壁摩阻系数;
 d ——滤水管内径;
 A ——滤水管横断面积。

在地下水动力学的科学试验方面,冶金工业部前勘察总公司研究室曾在北京南苑建立了试验场,于1963至1966年间进行了室内模型和野外的多孔抽水试验。取得了大量有价值的实验数据,证实了滤水管内流速引起的水头损失,对井周含水层的地下水流起着控制作用。也证实了粗颗粒含水层中福希汉默(Ph. Forchheimer)提出的紊流规律,并对如何正确运用裘布衣公式提出了自己的理论见解。

这本“单井水力学”就是在学习和分析了国内、外已有的研究成果的基础上写出的。本书探讨的对象仅限于从裘布衣公式的适用半径 r_D 起(见本书式(15-19)、(15-20)、(15-21)及(15-22))到水泵抽水管口止的地下水和井管内水流的运动规律。从裘布衣公式适用半径以外的地下水运动问题我们认为是属于一般地下水动力学的研究对象,不在本书探讨范围内。这样的划分,是为了便于将本书的探讨内容应用于任何形状和任何补给类型的含水层的单井抽水中去。

从现有的文献资料来看,在周文德(Ven Te Chow)编的《水科学的进展》(Advances in Hydro Science)1卷(1964年)中载有汉多士(M.S. Hantush)著的《井的水力学》(Hydraulics of Wells)一篇。考其内容主要仍是各种含水层中由抽水井造成的降深场。对于由井内水力作用形成的水力学规律,则很少提到。其他以单井水力学为内容的书籍还比较少见。因此本书的写作仅仅是一种尝试。试图在解释上面提出的那些生产实践中存在问题上有所前进。因为是尝试,书中错误、缺点和片面之处一定不少,希望读者指正。

第一章 滤水管的水力学问题

(一) 井 和 滤 水 管

“井”在水文地质学上叫做人工地下水露头，意思是说：井是用人为了力量，从地表向下挖凿，并保持一个圆柱形空间，直到含水层内，从而可以从这空间中揭露并提取地下水。机井是指安设了机械抽水设备，可以连续不断地提取地下水的井。从水力学的原理来看，连续地抽水与断续地抽水，地下水的运动规律是完全不同的，在此只讨论单井连续抽水的水力学规律。

机井的深度和直径之比，往往达到几十或几百倍以上，其形状很象一根管子，又为了使机井能保持自身圆柱形空间，在内部往往下入钢铁、水泥、木材或其他材料做成的管子，所以又把机井叫做管井。目前机井的深度已有超过 500 米以上的，但常见的深度一般在数十米至一、二百米之间，直径在 150 毫米到 500 毫米之间，有时也有大达一米的。

组成机井的最重要的一个部分是滤水管。滤水管的作用有两个方面：既要让地下水畅通地流入井内，又不让含水层的颗粒进入井内。以保证井水的含砂量不超过一定的标准，并使井周围的含水层保持稳定。所以滤水管也是矛盾的统一。在一定的水文地质条件和同样的施工质量下，一口机井开采地下水的的能力，往往取决于滤水管的设计和制作的好坏。所以研究单井水力学，也首先要从滤水管着手。抓住了滤水管这个主要矛盾，有关单井的许多长期争论的问题，诸如井径与涌水量的关系；涌水量与井面降深的关系；涌水量与滤水管长度的关系；厚含水层分段开采如何准确测定含水层的渗透系数等，都可迎刃而解。

在水文地质学上，根据滤水管所在含水层的地下水类型的不同

同（承压水、潜水、自流水）又可把井分为承压水井、潜水井和自流水井。根据滤水管的长度和含水层厚度之比，又可分为完整井和非完整井：前者滤水管的长度等于含水层的厚度，后者则滤水管的长度小于含水层的厚度。

目前，常用的滤水管，根据制作材料的不同又可分为钢滤水管、铸铁滤水管、石棉水泥滤水管、木滤水管和砾石水泥滤水管等。它们的结构，除了砾石水泥滤水管外，基本相似，都是在管壁上均匀钻以小圆孔，然后在管外壁的纵向按一定的间隔，垫以钢筋，再在钢筋的横向缠以镀锌铁丝（图 1-1）。一般常用的规格见表 1-1^①，表中所说的圆孔率系指圆孔的总面积和滤水管外壁面积之比。砾石水泥管的结构比较简单，它是以砾石作材料，用水泥将其疏松胶结成管形，使管壁有一定的孔隙率，从而具有一定的透水能力。

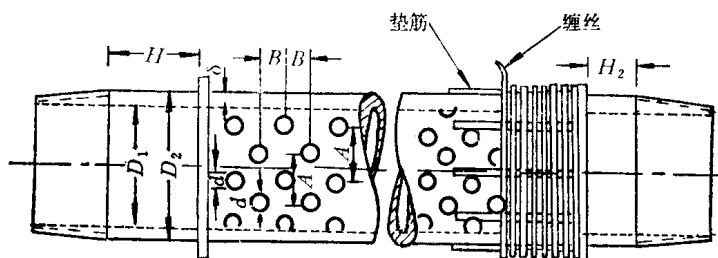


图 1-1

（二）地下水流经滤水管时的水头损失

为了弄清楚滤水管的水头损失，最好是把滤水管从含水层分离出来，单纯地研究从地下水脱离含水层进入滤水管开始，直到离开滤水管进入抽水管为止的这段流程内产生的全部水头损失。从图 1-1 所示的滤水管的结构可知，当地下水离开含水层时，首先须通过缠丝的间隙，再通过管壁小圆孔，然后才能进入管内。

① 图 1-1 及表 1-1 引自郭连科、张育芝、刘瑞祺编著的《供水管井的设计与施工》中国建筑工业出版社 1974 年版第 96 页。

表 1-1

公称规格(吋)	内径 D_1	外径 D_2	厚度 δ	死头长度		孔径 d	孔心横距 A	孔心纵距 B	每周孔数	每米行数	垫筋尺度 (直径)	垫筋根数	挡箍尺度 (宽×厚)	缠铅丝号数	孔隙率 (%)	每米重量 (公斤)
				H_1	H_2											
6	153	168	7.5	210	100	21	47.9	22.2	11	45	6	11	16×6	14	32.5	39
8	203	219	8	210	100	21	49.1	22.2	14	45	6	14	20×7.5	14	31.7	49
10	255	273	9	210	150	21	50.4	22.2	17	45	6	17	20×7.5	12	30.9	67
12	305	325	10	260	150	21	51.0	22.2	20	45	6	20	20×7.5	12	30.5	87
14	355	377	11	260	150	21	49.3	22.2	24	45	6	24	20×7.5	12	31.6	110
16	404	426	11	260	150	21	49.5	22.2	27	45	6	27	20×7.5	12	31.2	126

注：表中未经注明的长度单位均以毫米计。

当水流一进入管内，其运动方向即由水平改变为垂直。但向上还是向下，则视抽水管口所在位置而定。水流在这一系列的连续运动中，都要消耗能量（水头）。现即按上述运动顺序分别研究水流的流量（流速）和水头损失的关系。对于缠丝外面包有滤网的滤水管（亦称包网过滤器）的水头损失，我们将把它当作一个特殊问题在第五章中作专门的讨论。

1. 水流通过缠丝间隙的水头损失

从表1-1可知，常用的镀锌铁丝是12号，其直径为2.6毫米，而缠丝的间隙一般在0.5（在粉砂层中）到5毫米（在砾、卵石层中）之间，水流通过缠丝间隙所遇的阻力应远比含水层为小。考虑到缠丝是紧贴着含水层的表面（见图1-1），可把它当作是含水层的一部分，而地下水通过它所经过的流程又仅等于缠丝的直径——即2.6毫米，它与地下水从补给区通过含水层流入滤水管的整个流程的长度来比是微乎其微的。所以地下水通过缠丝时的水头损失与含水层中的水头损失相比极其微小。因此可以略而不计。但如果因填砾规格不当，在水流的带动下，砾石紧密地堵塞在缠丝间隙内，使有效过水面积急剧减少的情况下，水流通过缠丝间隙时将产生很大的水头损失。这种特殊情况和包网过滤器的情况相似因此放在第五章中单独论述。

2. 水流通过管壁圆孔的水头损失

水流通过圆孔时造成的水头损失，在水力学中早有详细研究，在此可略作必要的复述。实验表明，水流通过圆孔射向大气中的流速（图1-2）可写为

$$V = C_v \sqrt{2gh} \quad (1-1)$$

式中 V ——水流流速；

g ——重力加速度；

h ——圆孔上游的水头；

C_v ——流速系数。

C_v 的值须按圆孔的类型和条件，由实验来确定，一般为0.98。在流速是稳定的情况下，通过圆孔的流量

$$Q = A_c v$$

式中 Q ——流量；

A_c ——水流的截面积；

v ——水流的平均流速。

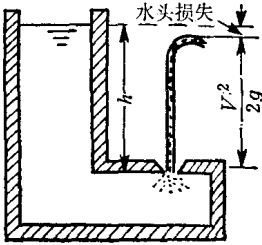


图 1-2

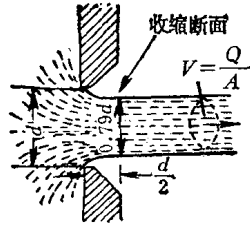


图 1-3

如果圆孔的刃缘是直角，则当水流自圆孔射出时，产生一种缩径作用（图1-3），因而使水流的截面积比圆孔的面积为小，在图1-3中水流的直径只及圆孔的直径的79%。所以水流总不能获得如式（1-1）所示的流速。从图1-3可以看出通过圆孔的水流仅与圆孔上游的边缘相接触，在接触处的截面上流线并非互相平行，而是向孔的下游方向收敛，流线在收敛也就是水流截面在变小，此时其上游的水头压力尚未全部转化为流速，当水流越过圆孔内缘直至距内缘 $d/2$ 处（ d 是圆孔直径，见图1-3），其截面才固定不变。在这里，压头才全部转换为速头，因此也只有在这里，公式（1-1）才能应用。由此，又出现一个缩径系数 C_A ，即圆孔水流的截面积 A_c 和圆孔的面积 A 之比，或

$$C_A = \frac{A_c}{A}$$

所以通过圆孔的流量

$$Q = A_c v = (C_A A) (C_v \sqrt{2gh}) \quad (1-2)$$

乘积 $C_A C_v = C$ ，称作流量系数。对于方缘圆孔来说缩径后的水流面积比图1-3中的刃缘圆孔还稍小，只及刃缘圆孔面积的62%，

亦即 $C_A=0.62$,

因此

$$Q=0.62A \times 0.98\sqrt{2gh}$$

$$Q=0.61A\sqrt{2gh} \quad (1-3)$$

这里比值0.62是缩径系数；0.61是流量系数。一般情况，对于方缘圆孔（滤水管上的圆孔都是方缘圆孔）流量系数采用0.6是足够精确的了。对于直径小于1吋的圆孔，随着孔径的变小，流量系数有某些增长，如图1-4所示。

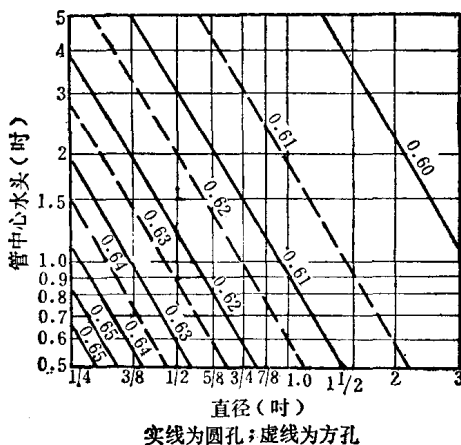


图 1-4

如果圆孔的水流不是射入空气，而是射入水中，即圆孔的下游浸没于水中，则只要圆孔有一定的厚度，即便只及孔径的1/4，水流的缩径就有所减弱，而流量即相应增加。在计算水中射流（如滤水管就是这种情况）时，式（1-3）中的 h 当以圆孔上下游的水头差来代替。

至此，我们便可把上述原理应用到滤水管中来，取出长度为 z 的任意一段滤水管来考虑：它的外壁面积为 $2\pi r_w z$ ；进水面积为 $2\pi r_w z A_p$ （ A_p 是圆孔率）；通孔圆孔的水流面积为 $2\pi r_w z A_p C_A$ 。设管内和管外的水头各为 h_i 和 h_o ，于是根据式（1-2），通过该