

高含硫气田职工培训教材

高含硫气田注水泵工

吴红旗 编著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高含硫气田职工培训教材

高含硫气田注水泵工

吴红旗 编著

中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高含硫气田注水泵工/吴红旗编著.

—北京: 中国石化出版社, 2013. 10

高含硫气田职工培训教材

ISBN 978 - 7 - 5114 - 2391 - 7

I. ①高… II. ①吴… III. ①含硫气体 - 注水 (油气田)

IV. ①TE357. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 233514 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 7.5 印张 181 千字

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

定价: 30.00 元

序

2003年，中国石化在四川东北地区发现了迄今为止我国规模最大、丰度最高的特大型整装海相高含硫气田——普光气田。中原油田根据中国石化党组安排，毅然承担起了普光气田开发建设重任，抽调优秀技术管理人员，组织展开了进入新世纪后我国陆上油气田开发建设最大规模的一次“集团军会战”，建成了国内首座百亿立方米级的高含硫气田，并实现了安全平稳运行和科学高效开发。

普光气田主要包括普光主体、大湾区块（大湾气藏、毛坝气藏）、清溪场区块和双庙区块等，位于四川省宣汉县境内，具有高含硫化氢、高压、高产、埋藏深等特点。国内没有同类气田成功开发的经验可供借鉴，开发普光气田面临的是世界级难题，主要表现在三个方面：一是超深高含硫气田储层特征及渗流规律复杂，必须攻克少井高产高效开发的技术难题；二是高含硫化氢天然气腐蚀性极强，普通钢材几小时就会发生应力腐蚀开裂，必须攻克腐蚀防护技术难题；三是硫化氢浓度达1000ppm（ $1\text{ppm} = 1 \times 10^{-6}$ ）就会致人瞬间死亡，普光气田高达150000ppm，必须攻克高含硫气田安全控制难题。

经过近七年艰苦卓绝的探索实践，普光气田开发建设取得了重大突破，攻克了新中国成立以来历代石油人努力探索的高含硫气田安全高效开发技术，实现了普光气田的安全高效开发，创新形成了“特大型超深高含硫气田安全高效开发技术”成果，并在普光气田实现了工业化应用，成为我国天然气工业的一大创举，使我国成为世界上少数几个掌握开发特大型超深高含硫气田核心技术的国家，对国家天然气发展战略产生了重要影响。形成的理论、技术、标准对推动我国乃至世界天然气工业的发展作出了重要贡献。作为普光气田开发建设的实践者，感到由衷的自豪和骄傲。

在普光气田开发实践中，中原油田普光分公司在高含硫气田开发、生产、集输以及HSE管理等方面取得了宝贵的经验，也建立了一系列的生产、技术、操作标准及规范。为了提高开发建设人员技术素质，2007年组织开发系统技术人员编制了高含硫气田职工培训实用教材。根据不断取得的新认识、新经验，先后于2009年、2010年组织进行了修订，在职工培训中发挥了重要作用；2012年组织进行了全面修订完善，形成了系列《高含硫气田职工培训教材》。这套教材是几年来普光气田开发、建设、攻关、探索、实践的总结，是广大技术工作者集体智慧的结晶，具有很强的实践性、实用性和一定的理论性、思想性。该教材的编著和出版，填补了国内高含硫气田职工培训教材的空白，对提高员工理论素养、知识水平和业务能力，进而保障、指导高含硫气田安全高效开发具有重要的意义。

随着气田开发的不断推进、深入，新的技术问题还会不断出现，高含硫气田开发和安全生产运行技术还需要不断完善、丰富，广大技术人员要紧密结合高含硫气田开发的新变化、新进展、新情况，不断探索新规律，不断解决新问题，不断积累新经验，进一步完善教材，丰富内涵，为提升职工整体素质奠定基础，为实现普光气田“安、稳、长、满、优”开发，中原油田持续有效和谐发展，中国石化打造上游“长板”作出新的、更大的贡献。

陈维国

2013年3月30日

前 言

普光气田是我国已发现的最大规模海相整装高含硫气田，在国内没有成功开发同类气田的先例，在世界范围也属于难题。普光气田开发建设以来，中原油田普光分公司作为直接管理者和操作者，逐步积累了一套较为成熟的高含硫气田天然气开发、生产、集输和 HSE 管理等方面的经验。为全面总结高含硫气田开发管理经验，固化、传承、推广好做法，夯实自身培训管理基础，同时也为同类气田开发提供借鉴，根据气田开发生产工作实际，组织开发系统技术人员，以建立中石化高含硫气田职工培训示范教材为目标，在已有自编教材的基础上，编著、修订了系列《高含硫气田职工培训教材》。本套教材涵盖了井控技术、采气工、输气工、化验工、综合计量工、仪表维修工、污水处理工和注水泵工 8 个重点专业，每个专业单独成册，总编杨发平。

《高含硫气田注水泵工》为专业技术培训类教材，侧重于实际操作技能培训，内容与国标、行标、企标要求相一致，符合现行开发政策和现场操作规范，具有较强的适用性、先进性和规范性，可以作为高含硫气田职工培训使用，也可作为高含硫气田开发研究和教学、科研提供参考。本册教材主编吴红旗，副主编张广晶、韦小科；内容共分 9 章，涵盖了高含硫气田注水泵工需要在现场掌握的专业基础知识和操作规程，其中概述由刘二喜编写，第一、二、三、五章由林雷编写，第四、八、九章由华飞编写，第六章和第七章由蒋斌巍编写；参加编审的人员有吴红旗、程虎、黄华东、赵斌、韦小科、杨德等。

在本套教材编著过程中，各级领导给予了高度重视和大力支持，陈惟国同志对做好教材编著工作多次作出指导，刘地渊、熊良淦、张庆生、姜贻伟、陶祖强对教材进行了审定，多位管理专家、技术骨干、技能操作能手为教材的编审贡献了智慧、付出了辛勤劳动，编审工作还得到了中原油田培训中心普光项目部的大力支持，中国石化出版社对教材的编审和出版工作给予了热情帮助，在此一并表示感谢！

高含硫气田开发生产尚处于起步阶段，在管理经验方面还需要不断积累完善，恳请同志们在使用过程中多提宝贵意见，为进一步完善、修订提供借鉴。

目 录

第1章 高含硫污水回注基础知识	(1)
1.1 流体力学知识	(1)
1.2 注水地层选择原则	(9)
1.3 注水工艺流程	(9)
1.4 岩石的渗透率	(9)
1.5 吸水指数录取方法	(11)
1.6 回注压力	(12)
思考题	(12)
第2章 高含硫气田注水工艺流程	(14)
2.1 概述	(14)
2.2 注水井站工艺流程	(14)
2.3 注水工艺流程	(14)
思考题	(17)
第3章 回注水源与水质	(19)
3.1 概述	(19)
3.2 高含硫污水来源	(19)
3.3 高含硫污水水质及标准	(19)
3.4 注入水各项指标超标的危害	(20)
思考题	(21)
第4章 高含硫气田注水设备	(22)
4.1 概述	(22)
4.2 柱塞泵的结构	(22)
4.3 注水泵的工作原理	(23)
4.4 注水泵的主要性能参数	(24)
4.5 注水泵润滑系统	(24)
4.6 注水泵操作要点	(25)
4.7 常见故障判断及排除	(27)
第5章 注水泵撬块仪器仪表	(28)
5.1 概述	(28)
5.2 流量测量仪表	(28)
5.3 高压注水表的结构及工作原理	(30)
5.4 温度测量仪表	(31)

5.5	压力测量仪表	(32)
5.6	弹簧管式压力表的结构及原理	(33)
5.7	压力表的校验、安装及使用要求	(33)
5.8	电气测量仪表	(35)
	思考题	(38)
第 6 章	绘制工艺图基本知识	(39)
6.1	机械制图基本知识	(39)
6.2	平面图的画法	(43)
6.3	三视图的画法	(46)
6.4	注水站的图纸识读	(47)
	思考题	(49)
第 7 章	污水回注站安全生产知识	(50)
7.1	安全	(50)
7.2	消防	(62)
7.3	回注站注水安全技术	(69)
7.4	应急预案与应急演练	(82)
	思考题	(88)
第 8 章	注水站常用阀门基础知识	(89)
8.1	阀门的分类	(89)
8.2	常用阀门的类型及用途	(90)
8.3	阀门型号及表示方法	(91)
8.4	安全阀	(92)
第 9 章	注水泵配套设施	(96)
9.1	低压配电室	(96)
9.2	仪表值班室	(106)
9.3	高架注水罐	(108)



1.1 流体力学知识

流体包括液体和气体。它同固体相比较,分子间引力较小分子运动较强烈,分子排列松散,这就决定了液体和气体具有相同的特性,即不能保持一定的形状,而具有流动性。

从力学性质来看,固体具有抵抗压力、拉力和切力三种能力,因而在外力作用下,通常只发生较小的变形,而且到一定程度后变形就停止。流体由于不能保持一定的形状,所以它只能抵抗压力而不能抵抗拉力和切力,当它受到切力作用时,就要发生连续不断的变形即流动,以上就是流体和固体的显著区别。

液体和气体除具有前述的共性外,还有以下不同的特性。

液体的分子距和分子有效直径差不多是相等的,当液体加压时,由于分子距稍有缩小,而出现强大的分子斥力来抵抗外力,这就是说,液体分子距很难缩小,而可以认为液体具有一定的体积,因此通常称为不可压缩流体。又由于分子引力作用,液体有力求自身表面面积收缩到最小的特性,所以在容器里只能占据一定的体积,而在上部形成自由分界面。

一般地说,气体分子距很大,分子引力很小。例如常温、常压下,空气分子距为 $3 \times 10^{-7} \text{ cm}$,其分子有效直径的数量级为 10^{-8} cm 。可见分子距比分子有效直径大很多,因此当分子距离缩小很多时,才会出现分子斥力。通常称气体为可压缩流体。又因为分子距很大,分子引力很小,这就使气体既没有一定形状,也没有一定体积。因而,一定量气体进入较大容器内,由于分子不断地运动,结果使气体均匀充满容器,而不能形成自由表面。

1.1.1 流体主要物理性质

1.1.1.1 密度

流体单位体积内所具有的质量称为密度,以 ρ 表示。对于均质流体,其体积为 V 、质量为 m ,则 $\rho = m/V$ 。

1.1.1.2 重度

物体之间相互有吸引力的特性,这个吸引力称为万有引力,作用是企图改变物体原有物理状态而使其相互接近。在流体运动中,仅考虑地球对流体的引力,表征地球引力大小的物理量就是重力,流体在重力作用下便显示出重量。

流体单位体积内所具有的重量为重度(重力密度),过去也称为容重,以 γ 表示:

$$\gamma = G/V \quad (1-1)$$

式中 γ ——重度, N/m^3 ;

G ——重量, N ;

V ——体积, m^3 。

在气体中,常用比容(比体积)这一物理量,比容是单位质量流体的体积,比容和质

量密度成倒数关系，即：

$$v = 1/\rho \tag{1-2}$$

式中 v ——比容， m^3/kg ；
 ρ ——密度， kg/m^3 。

根据牛顿第二定律可知，质量和重量的关系为 $G = mg$ 。式（1-2）两边同时除以 V 后，则得： $\gamma = \rho g$ 。

式中，重力加速度 g 在国际单位和工程单位制中其数值均为 $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

再说明一下相对密度这个概念。液体的相对密度是指液体的密度与同体积的（温度 4°C ）蒸馏水密度之比。相对密度是一个比值，是量纲为 1 的量。

相对密度一般用 d 表示，而气体的相对密度是指在标准状态下，气体密度与空气的密度之比。

一些常见液体的相对密度见表 1-1。

表 1-1 常见液体的相对密度

液体	相对密度	温度/ $^\circ\text{C}$	液体	相对密度	温度/ $^\circ\text{C}$
蒸馏水	1.00	4	航空汽油	0.65	15
海水	1.02 ~ 1.03	4	轻柴油	0.83	15
重原油	0.92 ~ 0.93	4	润滑油	0.89 ~ 0.92	15
中原油	0.88 ~ 0.90	15	重油	0.89 ~ 0.94	15
轻原油	0.86 ~ 0.88	15	沥青	0.93	15
煤油	0.79	15	甘油	1.26	0
航空煤油	0.78	15	水银	13.6	0
普通汽油	0.70 ~ 0.75	15	乙醇	0.79 ~ 0.80	15

1.1.1.3 压缩性和膨胀性

1. 压缩性

在温度不变的情况下，流体在压力作用下体积缩小的性质，压缩性大小，用体积压缩系数 δp 表示，它代表压力增加一个大气压时所发生的体积相对变化量。

$$\delta p = -\frac{dV}{V} \cdot 1/dp \tag{1-3}$$

式中 V ——原有体积， m^3 ；
 dV ——体积改变量， m^3 ；
 dp ——压力改变量， Pa （工程制用工程大气压）；
 δp ——体积压缩系数， Pa^{-1} （工程制用 $1/\text{大气压}$ ）。

因为 dp 与 dV 的变化方向相反，即压力增加体积减少，故式（1-3）中加一负号，以便系数 δp 永为正值。水的 δp 值见表 1-2。

表 1-2 水的体积压缩系数

压力/ atm	5	10	20	40	80
$\delta p \times 10^4 / \text{atm}^{-1}$	0.529	0.527	0.521	0.513	0.505

从表 1-2 可以看出, 压力为 5atm 情况下, 每增加 1atm 时, 水的体积只改变万分之 0.529, 可见水的压缩性是很小的。其他液体压缩性也是很小的, 在一般情况下, 可以略去这种微小的变化, 当作不可压缩流体来处理, 对于不可压缩流体, 体积保持不变。

气体易于压缩, 它的体积变化由状态方程来决定, 所以气体密度的变化可以表示为: $P = \rho RT$ 。其中 P 为压力, T 为绝对温度, R 为气体常数, 对于空气 $R = 287.06 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。气体在高速流动时, 它的体积变化不能忽略不计, 可作为压缩流体来处理。对于可压缩流体, 体积的变化由温度和压力决定, 因而它的密度表示为 $\rho = f(P, T)$, 即密度可表示为压力和温度的函数。当密度仅为压力的函数, 而与温度无关时, 密度表示为 $\rho = f(p)$ 。

研究一个具体流体问题时, 是否考虑压缩性的影响不取决于流体是气体还是液体, 而是由具体条件来决定。例如在标准大气压条件下, 当空气的流速等于 68 m/s 时, 不考虑压缩性所引起的相对误差约等于 1%, 这在工程计算中一般可忽略不计, 所以低速流动的气体可以认为是不可压缩流体。而在研究管中的水击现象时, 需把水作为可压缩流体处理, 因为水的压缩性虽然小, 但在这类问题中却不能忽视。

2. 膨胀性

流体的膨胀性是指在压力不变的条件下, 流体温度升高时, 其体积增大的性质。膨胀性大小用体积膨胀系数 δt 表示, 它表示温度每升高 1°C 时, 所发生的体积变化量, 即:

$$\delta t = \frac{dV}{V} \cdot 1/dt \quad (1-4)$$

式中 dt ——温度改变量;

δt ——体积膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$ 。

实验指出, 在 1 大气压下, 温度较低时 ($10 \sim 20^\circ\text{C}$), 温度每升高 1°C , 水的体积相对的变量仅为万分之 1.5, 温度较高时 ($90 \sim 100^\circ\text{C}$), 也只改变万分之 7, 所以在实际计算中, 一般不考虑液体的膨胀性, 表 1-3 为水的膨胀系数随压强和温度而变化的数值。

表 1-3 水的体积膨胀系数

压强/atm	温度/ $^\circ\text{C}$				
	0 ~ 10	10 ~ 20	40 ~ 50	60 ~ 70	90 ~ 100
1	0.000014	0.000150	0.000422	0.000556	0.000719
100	0.000043	0.000165	0.000422	0.000548	0.000704
500	0.000149	0.000236	0.000429	0.000523	0.000661

1.1.1.4 黏性

黏性是流体的一个重要性质, 黏性是指当流体微团发生相对运动时产生切向阻力的性质。流体是由分子组成的物质, 当它以某一速度流动时, 其内部分子间存在着引力。此外, 流体分子和固体壁之间有附着力作用。分子间的吸引力和流体分子与壁面附着力都属于抵抗流体的阻力, 而以摩擦形式表现出来, 其作用是抵抗液体内部的相对运动, 从而影响着流体的运动状况。由于黏性存在, 流体在运动中因克服摩擦力必须要做功, 所以黏性也是流体中发生机械能量损失的根源。

1.1.1.5 表面压力

由于液体的分子引力极小, 一般来说, 它只能承受压力, 不能承受张力, 但是在液体与

大气相接触的自由面上,由于气体分子的内聚力和液体的内聚力有显著差别,使自由表面上的液体分子有向液体内部收缩的倾向,这时沿自由表面上必定有拉紧作用力,使自由表面处于拉伸状态,单位长度上这种拉力便定义为表面张力,以表面张力系数 δ 来表示。

表面张力除产生在液体和气体相接触的自由表面外,在液体与固体相接触的表面上,也会产生附着力,因表面张力系数 δ 值不大,在工程上一般可以忽略不计。但是在毛细管中,这种张力可引起显著的液面上升和下降,即所谓毛细管现象。因此在用某些玻璃制成的水仪表中,必须注意到表面张力的影响。

1.1.2 流体静力学及基本方程

流体静力学是研究流体在静止状态下的平衡规律及其应用。

所谓静止是一个相对的概念,如果流体对地球没有相对运动,我们称它们是处于静止状态,这是因为把参考坐标系固定在地球上。而实际上地球本身亦处于运动中,如果把参考坐标系放在其他星球上,则静止流体是随地球一起运动的。与这种情况相类似,如果容器中的流体随容器在运动,而流体对容器没有相对运动,则对于固定在容器上的参考坐标系来说,容器中的流体也是静止的,我们就称此种情况下的流体是处于相对静止或相对平衡。因此,流体静力学是研究流体质点相对于参考坐标系有没有运动的情况。

既然处于静止或相对静止状态的流体对参考坐标系没有运动,则流层间没有相对运动,这时不呈现切应力。所以本章讨论的流体平衡规律对理想流体和实际流体都是适用的。

由于流体处于静止状态时,流体质点之间以及质点和壁面之间的作用,是通过压力形式来表现的,所以本章中心问题是根据平衡条件来研究静止状态下压力分布规律,进而确定静止流体作用在各种表面上的总压力大小、方向、作用点。因此流体静力学对工程实践有重要意义,也为流体动力学打下必要基础。

在静止流体中有一作用面积为 ΔA ,其上压力为 Δp ,则当面积缩为一点时,平均压力 $\Delta p/\Delta A$ 的极限值就是该点静压力,用符号 p 表示。因此静压力的数学表示方法是:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta p}{\Delta A} \right) \quad (1-5)$$

静压力表示作用在单位面积上的力,亦称为压强,其单位常用 Pa 或 kgf/cm² 表示。

作用在某一面积上的总静压力称为总压力,以 P 表示,其单位常用 N 或 kgf 表示。

流体静压力有两个重要特性,一是静压力方向永远沿着作用面内法线方向;二是静止流体中任何一点上各个方向的静压力大小相等,与作用面方位无关。

流束或总流上垂直于流线的断面,称之为有效断面,因为所有流线都垂直地通过它,所以沿有效断面方向没有流体流动,有效断面可能是平面,也可能是曲面。如在等直径管路中,流体都是沿着管轴方向,流线是一簇互相平行的直线,有效断面是平面,在喇叭形管路中,液流的有效断面是曲面。

单位时间内流经有效断面的流体量,称为流量,有两种表示方法:一种以单位时间通过的流体体积表示,称为体积流量,或习惯称为流量,记为 Q ,其单位为 m³/s,也常用 L/s 或 m³/h 等辅助单位;另一种以单位时间通过的流体重量表示,称为重量流量,记为 G ,其单位为 N/s。这两种流量之间的换算关系为:

$$G = \gamma Q \quad (1-6)$$

式中 γ ——流体重度, N/m³。

现在多应用质量流量,即质量通过一个断面的速率,单位为 kg/s 。

对微小流束而言,体积流量 dQ 应等于速度 μ 与微小断面面积 dA 之乘积,即:

$$dQ = \mu dA \quad (1-7)$$

对总流而言,体积流量 Q 则是微小流束之流量对总流有效断面面积 A 的积分,即:

$$Q = \int A \mu dA \quad (1-8)$$

由于流体的黏性,任一有效断面上各点速度大小不等。因而需要找出断面上速度分布的函数式才能对式(1-8)进行积分。为了计算方便,通常引入了一个断面平均流速的概念,用 V 表示,它的物理意义是假想有效断面上各点流速相等,而按这个各点相等的流速 V 所通过的流体体积与按实际不同分布的流速 μ 所通过的流体体积相等。则有:

$$V \cdot A = \int A \mu dA = Q \quad (1-9)$$

$$V = (\int A \mu dA) / A = Q / A \quad (1-10)$$

根据式(1-10)所确定的流速 V 就称为断面平均流速。由式(1-9)可知体积流量等于断面平均流速与有效断面面积的乘积,反之,根据断面面积与体积流量可求得断面平均流速,工程上所说的管道中流体的流速,便是指断面平均流速而言。

1.1.3 流体动力学及基本方程

本节主要研究流体流动的一些基本方法,讨论流体流动的某些基本概念,再应用物理学中的质量守恒定律、牛顿第二定律、动量定律和动量矩定理等推导出理想流体流动的几个重要方程,这些方程是流体流动所共同遵循的普遍规律,是分析流体流动的重要依据。

1.1.3.1 流体流动的基本概念

流体是由连续分布的质点所组成的。在运动情况下,一个质点在某一瞬间占据在一定的空间点 (x, y, z) 上,具有一定的速度 μ 、压力 p 、密度 ρ 及温度 T 等标志其运动状态的运动要素。一般来说,这些运动要素是空间坐标和时间的连续函数。

1.1.3.2 稳定流动与不稳定流动

根据流体运动要素是否随时间变化,可以把流体运动分为稳定流和不稳定流两类。

一个盛水容器如果控制进入及排出容器的水量,使容器内水面高度 H 不变时,流体中的每一空间点处质点的运动要素将不随时间而变化,只是不同位置处的运动要素才有所不同。因此,在流场中流体质点通过空间点时所有的运动要素都不随时间改变,这种流动称为稳定流动,其数学表达式为:

$$p = p(x, y, z) \quad u = M(x, y, z)$$

如果关闭进水阀则容器内水面将不断下降,这时,通过空间点处流体质点运动要素的全部或部分要随时间改变,这种流动叫不稳定流。这时的运动要素是时间和坐标的函数,即:

$$p = p(x, y, z, t) \quad u = M(x, y, z, t)$$

在实际工程中,绝大部分遇到的问题都是不稳定流动。但是,由于不稳定流动问题的复杂性给研究带来了很大的困难,同时在实际工程问题中,有许多的问题虽然是属于不稳定流动范畴,可是运动要素的变化并不显著,而接近于稳定流动。为了更好地研究流体运动情况,需要了解一些相关的概念。

1. 迹线与流线

拉格朗日法描述流体运动主要是研究个别质点在不同时刻的运动情况。把某一质点在连

续的时间内所占据的空间位置连成的线称为迹线。迹线就是流体质点在一段时间内运动的轨迹线。

欧拉法描述流体运动主要是考察同一时刻各流体质点在不同空间位置上的运动情况，流线的概念是由欧拉提出的。流线是某一瞬间在流场中绘出的曲线，在这条曲线上所有质点的速度矢量都和该曲线相切，所以，流线表示瞬时流动方向。流线具有以下特性：

- (1) 稳定流动时，流线的形状不随时间变化；不稳定流动时，流线的形状随时间改变。
- (2) 稳定流动时，流线和迹线重合；不稳定流动时，流线与迹线不重合。
- (3) 流线是连续光滑的曲线。

2. 流管、流束、管流

在流场中画一封闭曲线 C ，经过曲线 C 的每一点做流线，由许多流线所围成的管称为流管。

不稳定流时流管形状随时间而改变，稳定流时流管的形状不随时间改变，由于流管是由流线所围成，流线是不能相交的，所以流管内外不存在流体质点的交换。

充满在流管内部的流体称为流束。断面无穷小的流束为微小流束。无数微小流束的总和称为总流，如水管及气管中的水流及气流的总体。

在分析点流束的速度、流量、压力等运动要素变化时，可以认为在微小断面 dA 上的各点运动要素相等，这样能利用数学积分方法求出相应总流断面上的运动要素。

3. 连续性方程

因为流体被视为连续介质，所以在流体流动时是连续地充满它所占据的空间，不出现空隙。这样根据质量守恒定律对于空间固定的封闭曲面来说，不稳定流时流入的流体质量与流出的流体质量之差应等于封闭曲面内流体质量的变化；稳定流时则流入的流体质量必然等于流出的流体质量。这些结论以数学形式表达，就是连续性方程。力学上常用的连续性方程有：一元连续性方程、空间连续性方程和理想流体运动方程（欧拉方程）及伯努利方程，这里我们只作为了解即可，不做详细介绍。

1.1.4 流体的流动状态及水头损失

1.1.4.1 层流和紊流

早在 1883 年，雷诺总结了大量的测验结果，发现在管流中存在两种截然不同的流态，即层流状态和紊流状态，并找出了划分两种流态的标准。

层流状态主要表现为液体质点的摩擦和变形。紊流状态主要表现为液体质点的相互撞击和混掺。从层流到紊流的过渡称为临界状态。

层流时，沿程水头损失与平均流速成正比；紊流时，沿程水头损失与平均流速的 1.75~2 次方成正比。

紊流状态下，惯性力占主要地位，雷诺数较大；层流状态下，惯性力较弱，黏性力居主导地位，雷诺数较小。故用雷诺数来判别流态，它同时反映出流速、管径和流体物理性质三方面对流态的影响。

对于任何一种管内液流或气流，任何流态，都可以确定出一个雷诺数 Re 值，处于临界状态下的雷诺数称为临界雷诺数，用 Re_c 表示，管路中临界雷诺数约为：

$$Re_c = \frac{vcd}{r} = 2000 \sim 3000 \quad (1-11)$$

习惯上用 $Re_c = 2000$ 做标准。一般输液管路, 如 $Re \leq 2000$ 即认为是层流, 而 $Re \geq 2000$ 时则认为是紊流, 这就是流体平衡微分方程式, 是 1755 年欧拉提出的, 又称为欧拉平衡方程式。根据这个方程可以解决流体静力学中许多基本问题, 它在流体静力学中具有重要地位。因为推导公式时考虑质量力总是空间的任一方向, 因而它既适用于绝对静止状态也适用于相对静止状态。同时, 推导中也没有考虑整个空间密度是否变化及如何变化, 所以它不但适用于不可压缩流体, 而且也适用于可压缩流体。

该方程的物理意义: 当流体平衡时, 作用在单位质量流体上的质量力与压力的合力相平衡, 它们沿三个坐标轴, 质量力分量和表面力分量是对应相等的。

1.1.4.2 静力学基本方程式

假设在重力作用下的静止流体, 将直角坐标系的原点选在自由面上, y 轴垂直向上, 液面上的压力为 P 。

通过流体平衡微分方程可以导出重力作用下的平衡方程, 也就是水的静力学基本方程式:

$$P = P_0 + \gamma h \quad (1-12)$$

它说明:

(1) 静止流体中任一点压力 P 等于表面压力 P_0 与从该点到流体自由表面的单位面积上的液柱重量 (γh) 之和。于是, 应用 $P = P_0 + \gamma h$ 便可求出静止流体中任一点静水压力。

若自由表面上的压力 $P_0 = P_a$ 时, 则式 $P = P_0 + \gamma h$ 可写成:

$$P = P_a + \gamma h \quad (1-13)$$

又如在同一个连通的静止流体中, 已知某点压力, 则应用式 $P = P_0 + \gamma h$ 可推广到求任一点的压力值, 即:

$$P = P_i + \gamma \Delta h \quad (1-14)$$

上式中 Δh 为两点间深度差。

(2) 在静止流体中, 压力随深度按线性规律变化, 式 $P = P_0 + \gamma h$ 中变量仅为 P 和 h , 而 $P = f(h)$ 为一次函数。

(3) 在静止流体中, 相同沉没度 ($h = \text{常数}$) 各点处压力相等, 也就是在同一个连续重力作用下的静止流体的水面都是等压面。但必须注意这个结论只是对相互连通而又是同一种流体才适用。

绝对压力, 是指以绝对真空为零点计量的压力:

$$P_{\text{绝}} = P_0 + \gamma h \quad (1-15)$$

如自由表面压力 $P_0 = P_a$, 则:

$$P_{\text{绝}} = P_a + \gamma h \quad (1-16)$$

在气体状态方程中, 其压力是绝对压力。

相对压力, 以大气压为零点而计量的压力:

$$P_{\text{表}} = P_{\text{绝}} - P_a \quad (1-17)$$

$$P_{\text{表}} = (P_a + \gamma h) - P_a = \gamma h \quad (1-18)$$

因而, 表压 $P_{\text{表}}$ 实质是指某点绝对压力超过大气压的数值, 即表压为绝对压力与大气压之差。

在许多工程设备中所受的大气压部分都是互相抵消而不起作用, 在大多数压力仪表中都是以大气压力为起点而计量。因而, 在开口容器中及不可压缩流体的静压力计算问题, 一般都用表压表示。

真空压力（真空度）：工程上不仅会遇到绝对压力大于大气压的情况，也会遇到小于大气压的情况。例如水泵吸水管，喷嘴吸水现象等都是低于大气压的，这些部分的相对压力 $P_{\text{绝}} - P_a$ 是负值，称为负压，或者说该部位存在着真空。真空压力是指流体的绝对压力小于大气压产生真空的程度，用绝对压力比当地大气压 P_a 小多少来表示，即：

$$P_{\text{真}} = P_a - P_{\text{绝}} = \gamma h_{\text{真}} = P_{\text{表}} \quad (1-19)$$

1.1.4.3 压力的度量

压力的度量有 3 种单位：

(1) 力单位，用单位面积承受的力表示，其单位为 P_a 或 kgf/cm^2 。

(2) 气压单位，用工程大气压表示。由物理学我们已经了解了标准大气压值，我们可记为 $h = 760\text{mmHg}$ ，或记为 $P = 13.6 \times 9800 \times 0.76\text{N}/\text{m}^2 = 1.0366\text{kgf}/\text{cm}^2$ 。在工程计算上为了方便起见常取 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 作为 1 个工程大气压，相当于 $9.8 \times 10^4\text{Pa}$ 。

(3) 液柱高单位，即以水柱或汞柱的高度表示压力大小。由 $P_{\text{表}} = (P_a + \gamma h) - P_a = \gamma h$ ，得 $h = \frac{P_{\text{表}}}{\gamma}$ ，说明一定的压力（ $P_{\text{表}}$ ）就相当于一定的液柱高。如果 γ 取不同的液体，则 h 值就不同，即一定的压力可以用不同的液柱高来表示。工程大气压相应的液柱高，对于汞， $h_{\text{汞}} = \frac{9.8 \times 10^4}{13.6 \times 9800} = 0.735\text{mHg}$ ；对于水， $h_{\text{水}} = \frac{9.8 \times 10^4}{9800} = 10\text{mH}_2\text{O}$ 。

1.1.4.4 静力学基本工程式的意义

方程 $Z + \frac{P}{\gamma} = c$ 的几何意义：在一个容器壁上打一小孔，接上与大气压相通的玻璃管，这样就形成一根测压管。如果容器中装的是静止流体，液面为大气压，则测压管内液面与容器内液面是平齐的。如果我们假设一个基准面 0-0，则测压管液面到基准面高度由 Z 和 P/γ 两部分组成， Z 表示该点位置到基准面高度， P/γ 表示该点压力的液柱高度。在流体力学中常用水头表示液柱高度，所以 Z 称为位置水头， P/γ 称为压力水头，而 $(Z + \frac{P}{\gamma})$ 称为测压管水头。则：

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \quad (1-20)$$

也就是静止流体中各点测压管水头是一常数，如果容器内液面压力大于或小于大气压力，则测压管液面会高于或低于容器液面，但不同点的测压管水头仍是常数。

物理意义：位置水头 Z 表示的是单位重量流体从基准面算起所具有的位置势能，简称比位能，我们把重量 G 的物体从基准面移到高度 Z 后，该物体所具有的位能是 $G \cdot Z$ 。对于单位重量来说，比位能就是 $\frac{GZ}{G} = Z$ ，它具有长度单位，基准面不同， Z 值也不同。压力水头

$\frac{P}{\gamma}$ 表示的是单位重量流体从压力为大气压算起所具有的压力势能，简称比压能，比压能是一种潜在势能，如果流体中某点的压力为 P ，在该处接一测压管后，在压力作用下，液面会上升高度 $\frac{P}{\gamma}$ ，也就是把压力势能变为位置势能。对于重量 G 、压力为 P 的流体，在测压管内上升 $\frac{P}{\gamma}$ 后位置势能的增量 $G \frac{P}{\gamma}$ 就是原来的流体具有的压力势能，所以对单位重量来说，比压

能就是 $G \frac{P}{\gamma} / G = \frac{P}{\gamma}$, 对于单位重量的流体来说, 位置水头 Z 代表位置势能, 压力水头 $\frac{P}{\gamma}$ 代表了压力势能; 而测压管水头 $(Z + \frac{P}{\gamma})$ 就代表了总势能。

所以在静止液体中, 单位重量流体的总势能是恒定的, 这也就是静止流体中能量分布规律。

1.2 注水地层选择原则

污水回注层的选择遵循以下基本原则:

- (1) 回注层埋藏深度不宜过浅, 避免污染上部地表水破坏环境。
- (2) 回注层不能是该区产气层或潜力产层。
- (3) 回注层不应是当地重要的经济矿床开发层。
- (4) 回注层必须具备良好的封存条件。
- (5) 尽量选择埋藏较浅、储层物性好、厚度大的地层。
- (6) 首选钻井中出现严重井漏或放空, 且孔隙发育的地层。
- (7) 地层压力为正常压力系统或低压系统。

1.3 注水工艺流程

高含硫污水经污水处理站处理后, 由压力缓冲罐和事故压力缓冲罐经污水外输泵增压后进入计量阀组, 再经外输高压玻璃钢管道至分线阀组后, 分别输送到回注站, 由高压注水泵将污水注入地层。如遇外输管线出现异常, 可由密闭吸污罐车通过污水站装车鹤管拉水至回注井场后, 由污水卸车泵打入井场高架注水罐, 再由高压注水泵回注至地层, 如图 1-1 所示。



图 1-1 注水工艺流程图

1.4 岩石的渗透率

1.4.1 孔隙度

岩石的孔隙度是指岩石中未被固体物质充填的空间体积 V_p 与岩石总体积 V_0 的比值。用希腊字母 ϕ 表示。其表达式为: