

石油勘探实用水动力学

E. C. 戴尔勃格



石油工业出版社

067443

石油勘探实用水动力学

E.C.戴尔勃格

王学礼 译 王秉忱 校



5749/24



200434164

石油工业出版社



(京)新登字082号

内 容 提 要

本书把地下流体地质应用于油气勘探,不仅有获得资料的方法,还介绍了各种原理,从而把地下地层测试资料和实际的地质和地球物理资料结合起来,为寻找水动力圈闭油气藏指明了方向。

本书可供从事实际勘探工作的地质技术人员及有关大专院校师生参考。



石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京海淀吴海印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 5¹/₂印张 118千字 印1—2000

1992年1月北京第1版 1992年1月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0754-1/TE·712

定价: 3.30元

序 言

一段时期以来，笔者认为有必要着手为积极从事油气勘探的地质工作者与地球物理工作者，用他们的习惯用语写一本完整的、自成体系的水动力学书籍。本书就是为此目的所做。

按照惯例油气勘探工作者总是关心与油气有关的四个基本要素，因为这四个要素是增强地下油气聚集可能性的必要条件。它们是：圈闭、储集层、油源以及流体本身。过去，对圈闭与储集层给予了高度重视，有关于构造、地层学以及岩性学方面的大量文献可资利用。关于油源的问题，有日益增多的地球化学及矿物学方面的论文、书籍及研究报告可供借鉴。对第四个要素——流体，则大都忽视了，而这正是本书所要阐明的。

为系统阐述这个内容，笔者从多方面搜集材料：大学物理教程（“水动力学是物理学中最困难的研究主题之一”）；对M.K.Hubbert讲授的两周严密教程的个人笔记（他确实是这门学科的奠基人）；期刊上的论文（一些论文对此问题的研究强些；而另一些论文则差些）；与有经验的地质勘探工作者的讨论（其中有些人成功地利用了这些方法，而对于其他人则还不能这么说）；以及我个人在从事油气勘探活动中所获得的经验与教训。

在编写本书时，笔者力求把有规律的理论方法的清楚

与实用，理论的应用与步骤同在石油勘探中应用水动力学的远景目标、潜在的可预期的成果，有效地溶合在一起。这本著作旨在以最简单的方式向地质工作者、地球物理工作者以及工程师们介绍在他们自己的勘探计划中可以亲自运用的概念与技术。我想解释“何时”与“在哪些”方面应用水动力学这个勘探工具，以及“如何”应用它。

试图把任何学科的复杂内容一般化或者简化，那我们就容易陷入困境，而水动力学作为一门科学与技术也并不例外。另一方面，在类似这种应用技术领域内，如要过分注意细节问题，就会使信息很快丧失其有效性。因此，作为最佳结果，人们设法获得在操作上是直观的，但在概念上是精确的中间根据。人们期望，当在较大勘探区内评价油气存在的可能性或者估计较小的局部地区内地下油气勘探的潜力时，为了建立起尽可能完整的地下形象，这本著作的内容将使读者有效地理解怎样和在哪儿能够把地下地层测试资料同地质勘探及地球物理基本资料综合在一起。

M.K.Hubbert的卓越成就是：奠定了地下流体运动的基础理论，制定了有用的模拟和绘图方法，通过实验与现场观测验证了理论及其应用，本节试图对他的这一成就做点微小补充。当笔者获得一些工作经验之后，就更加坚信Hubbert的著作对油气勘探工作者的价值。然而，与此同时，尽管有分散在各处的论文，有关教科书中的章节以及类似的参考资料，但在整个石油勘探专业中却广泛地忽视了这些有价值的概念与方法，对此笔者十分关注。笔者开始着手矫正这种状况，把理论、方法、应用及与石油勘探有关的研究工作实例搜集在一本书中，以“使水动力学一起发挥作用”。在

做这件事时，笔者力图在天天寻找油气和实际设计油井钻探的石油勘探工作者中间，而不是在虽已意识到它的重要性，但却很少能够使用它的研究人员中间去解释和简化Hubbert的革新观念，以便增强对他的成就的评价和运用。笔者的目的是说明水动力学在勘探中的历史。

笔者要向各位受本人委托的人士表示感谢与赞赏，因为在过去几年内，在他们的帮助下，才使包括在书中的某些观念得以建立起来，某些方法得到完善。

如果没有我的妻子与合作者Janice Dahberg的熟练地编辑，反复和重新打字，以及对笔者零乱的字迹、模糊的笔记的整理，本书是不可能出版的。对她所做的贡献是无法用数字计量的，正象我对她为我所做的不懈努力的感激程度无法衡量一样。

谨以此书敬献给我研究生时代的导师 John C. Griffiths 博士，是他使我确信了应用科学的价值，尽管他从未确切地告诉过我应用科学到底是什么！

E.C. 戴尔勃格

加拿大阿尔伯达省卡尔加里市，1982年3月

目 录

序 言

第一章 地下环境中的流体	1
流体的性质.....	1
流体环境.....	4
势(能)的概念.....	6
流体的势能.....	8
力场、流线与梯度.....	9
圈闭的概念.....	12
地层压力资料的来源.....	15
第二章 水文地质条件	19
水静力环境.....	19
水动力环境.....	23
向量模型与泾水界面.....	26
作为水动力强度函数的泾水界面方向与聚集.....	28
水流强度对油气藏位置的影响.....	31
第三章 水动力学勘探分析	40
评价方法.....	40
第四章 测势面	44
测势面.....	44
地下流动型态的推断.....	45
第五章 压力—深度梯度	58
压力—深度梯度曲线.....	58
p - D 曲线图的地质解释.....	60

地下水文相关性	62
区域系统与水界面	68
油气生产层厚度估算问题	70
p - D 曲线图与测势面	71
测势图的绘制	78
在不连续系统中用水文资料绘图	81
第六章 油气圈闭势能结构 (U、V、Z)	84
油测势面与水测势面的关系	84
绘制相对于水的油气势能图	87
用 U 、 V 、 Z 法制图预测油气运移与聚集	91
第七章 圈闭的势能剖面	94
具有水静力环境的构造圈闭	94
具有水动力环境的构造圈闭	97
地层圈闭水动力模型	103
区域范围的水动力圈闭势能剖面	108
用 U 、 V 、 Z 法预测石油问题	113
倾斜的油、气藏——文献资料中的某些实例	114
第八章 绘制水动力图	127
绘制构造性圈闭的水动力图	127
油气藏的位移	131
非构造性水动力圈闭	136
绘制 U 、 V 、 Z 等值线图的一项应用	140
绘制水动力圈闭的区域图(练习)	148
附录A: 文中用到的符号与缩写词目录	149
附录B: Hubbert的证明与练习答案	152
● 考文献	167

第一章 地下环境中的流体

流体的性质

在后面的讨论中，必然要经常涉及到流体的基本属性以及在不同物理环境中它们所表现出来的作用与反作用的行为方式。其中最重要的水动力学属性是流体的密度。

某种物质的密度是该物质给定体积的相对重量，例如每立方厘米 X 克或者每立方英尺 Y 磅（一立方英尺重 Y 磅！）。为了消去不同的单位，把物质的重量（ $W=mg$ ）与相同体积纯水的重量相比被描述为比重，而纯水的比重为1.0000。

这要假定是在标准的温度与压力下，因为体积与温度成正比，而与压力则成反比。

在石油工业中规定用API重量来表示流体的密度。由于API重量与比重相反，“高API重量的原油”实质上是轻质油，反之亦然。另一方面，“重油”为稠油，它的API值低。其换算关系式为

$$\text{API重量(以度表示)} = \frac{141.5}{\text{比重(在60°F时)}} - 131.5$$

（注意：纯水的API重量是10°）。

当容器充满流体时，其中任一点的压力随深度增加而增大，这是由于其上覆流体重量增加的缘故。压力梯度

($\text{grad } p$) 即压力随深度的变化率 dp/dZ , 在数值上等于 Dg , 此处 D 是密度, 为单位体积内的质量, 而 g 是重力加速度, Dg 表示单位体积的重量, 也代表水柱高度呈线性增加时压力的增值, 它只是该流体的密度 (与重量) 的函数。显然, 不同流体压力梯度的斜率将随它们的密度和比重而改变。

图1-1表示了在“静止”条件下 (即没有流体的内部运动), 石油工业中常见的6种流体的上述这些关系。图中表示出假定高为1000ft的储罐, 每罐顶部活塞上的压力升高到1000lb_f/in² (psi)。其底部的压力反映出高度—重量—密度的差别, 对纯水是1433psi, 盐水是1493psi; 重油是1404psi; 轻油是1359psi; 天然气是1050psi, 在15lb钻井液情况下是1780psi。许多石油和盐水的流体特征包括在

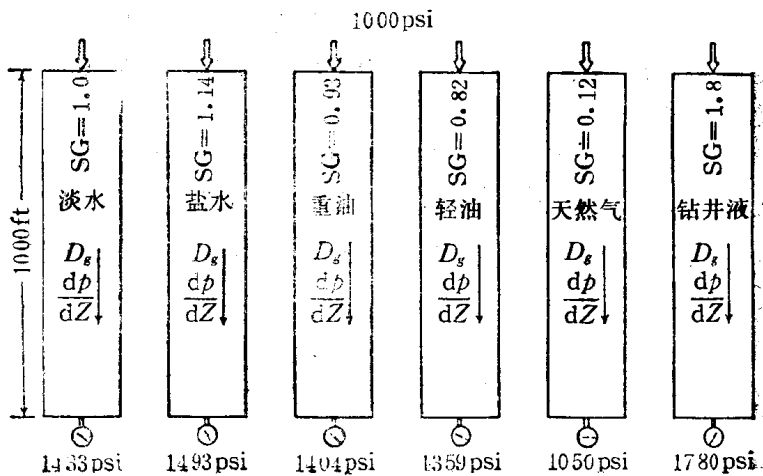


图1-1 说明由静密度梯度造成的垂向压力变化的
常见地下流体千英尺液柱

表1-1内。从顶部到底部的压差反映出每种流体的比梯度。在绘制和解释压力—深度梯度曲线，预测油气、油水界面，绘

表1-1 地下流体的比重及与密度有关的压力梯度

比 重	API重量	grad p 静液压梯度	总矿化度(ppm)
2.5		1.083	
2.0		0.866	
1.5		0.650	
1.25		0.541	
1.20		0.520	
1.14 (盐水和重油)	-7.5°	0.494	210,000
1.12 (盐水和重油)	-5.2°	0.485	175,800
1.10	-2.7°	0.476	143,500
1.05	3°	0.455	69,500
1.00 (淡水)	10°	0.433	0
0.95	17°	0.411	
0.90	25°	0.390	
0.85 (轻油)	35°	0.368	
0.80	45°	0.346	
0.70	60°	0.303	
0.65		0.238	
0.60		0.216	
0.40 (天然气)		0.130	
0.20		0.086	
0.15		0.065	
0.10		0.043	

某些典型的Alberta-B.C地层水的密度梯度（援引的数据业经Lynes联合服务公司同意）

续表

Belly 河	0.437	Leduc D-3	0.478
Cardium	0.437	Beaverhill Lake-Swan Hills	0.474
Milk 河	0.440	Slave Point	0.474
Dunvegan	0.450	Gilwood, Granite, Wash.	0.474
Blairmore	0.461		

注: $\frac{SG \times 62.4}{144} = \text{grad } p$

制水动力圈闭图, 解释等势面与钻井补偿地层压力时, 都要用到这些数据资料。

在表1-1中列出了一些地下流体的数据, 表明了怎样对常用标度进行相互比较, 可以用这张表确定流体的性质。例如, 有一盐水样品, 含有百万分之145000的溶质, 其相对于淡水的比重为1.1。同时, Belly河层位的地层水, 表中列出其静液压梯度为0.437, 应归类于淡水, 因为相应的溶质浓度大约应为10000。

流 体 环 境

图1-2表明不同环境中流体内部与密度有关的压力梯度的方向。图上所画的是一个充满水的大槽, 在左、右侧分别装有进、出口阀门。在左右两侧距槽底相同高度处联接两只垂直测压管(A与B)。槽内的压力与作用于顶部的力有关, 该压力用标有字母 p 的箭头来表示。这三种情况与在具有不同地质特征的储集层中所遇到的条件类型相似。

第一种情况说明静水环境的特征。由于进、出口阀门都关闭了, 流体不流动。两只测压管中的水柱高度相同, 据此事实观察者可以推论这一点。因而, 在整个水体内部, 水

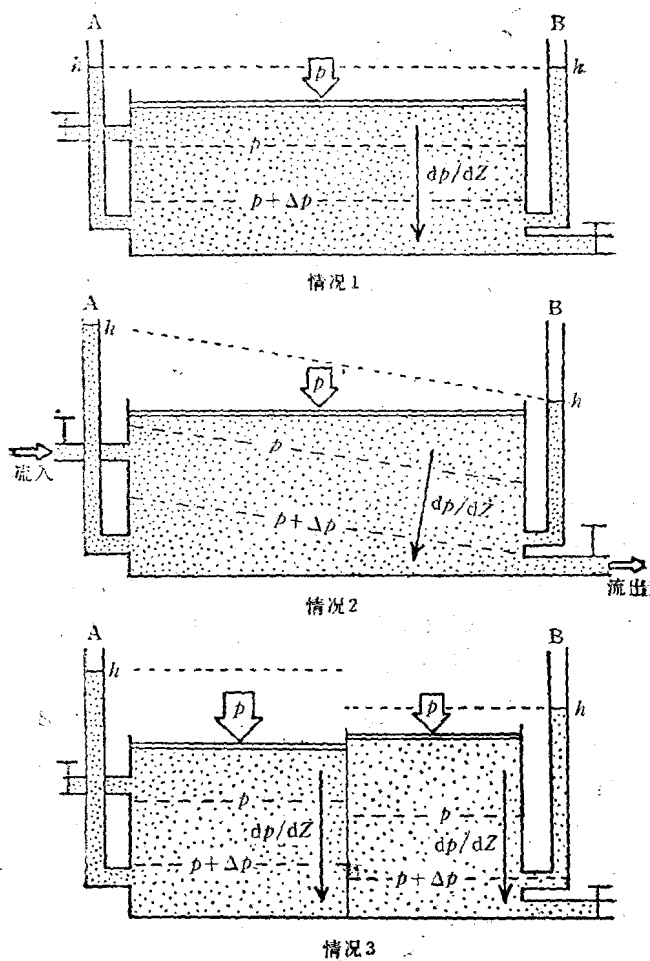


图1-2 静水与水动力环境的密闭容器模型

“头”或者势能是相同的。因为这是个静水系统，压力梯度是垂直的，因而水平面代表等压面，从顶部至底部压力增高（ p 、 $p+\Delta p$ 等）。

情况2代表非静态的水动力环境，两个阀门全都打开，以使流体从左向右通过水槽流动。如测压管中水柱高度所表明的那样，槽左端流体的水头或势能比右端大。槽内是水动力环境，压力梯度倾斜，因为它是重力及流动分力的向量。在情况3中，水柱高度显然不同。这可能被认为在槽内存在着水动力梯度，但实际上它反映出如下事实：水槽确实分成两个互相隔绝的室，每个室以不同的压力为特征。人们仅根据测压管可能推断出水处在流动的水动力环境下，而事实并非如此。

我们可以把密闭槽比拟为地下储集层，在探井中不是用测压管而是用压力计来监测各地层的流体压力。地质工作者就是根据这些数据推断出地下流体环境，地层水是否在流动，以及在何处通过最后的勘探钻井更可能碰到聚集的油气。

势（能）的概念

考虑到在地面上50层楼的窗台上与距地面7ft高的台阶上各有一个球，以地面为基准，举升第一个球所贮存的机械能要比第二个大得多；为举升球到50层楼的高度所做的功要比把第二个球放在低位置所做的功大许多倍。之后如果两个球又落下来，势能将变成动能，而地面上的一个人不幸被两个球击中头部，他根据撞击的强弱很容易分辨出哪一个球是由高处落下来的；换言之，他能分辨出哪一个球最初具有更

大的势能。因此,在研究地下油气储集层时,反映流体内各点势能大小的单位就是高度或海拔高程的单位,用英尺或米表示,以方便的基准面(通常取海平面)算起。与举升到楼顶的球一样,加压的液体也具有做功的势能。

水动力学理论及其在勘探地质学中的应用,是根据所研究流体的水力位势状态表现出的流体特征为基础的。水力位势可以想象成为单位质量在给定点上所持有的能量,在地下环境中,它基本上由重力与压力引起。高势能点与低势能点之间力的不平衡促使流体发生流动或运动,利用如图1-3中所示的简单模型便可说明。

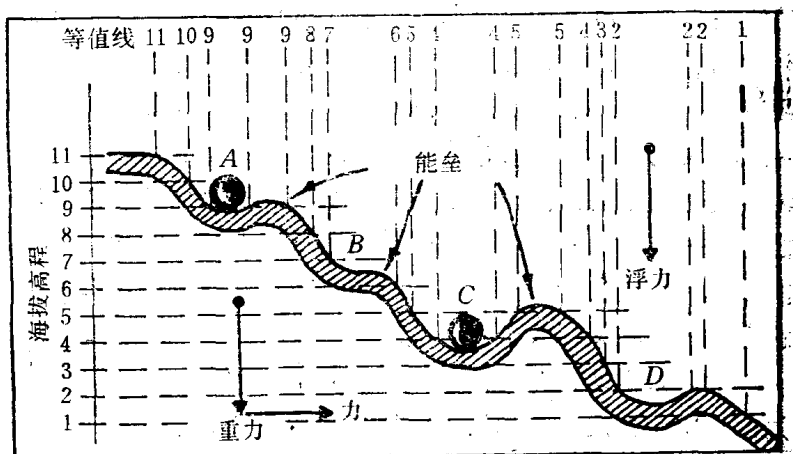


图1-3 阐明势能最小值与阻挡概念的物理模型

用倾斜的波状起伏的地面代表相对势能,有一个石球在地面上滚动,这就构成了使这些概念直观化的模型。如果在斜面顶端对石球施加一水平力,则随着这个力及重力的向下吸引,石球将沿斜面滚下,它是否会停留在凹坑A、B、C与

D中的一处，这要看初始“推动力”的大小。石球一旦停留在某一凹坑处，它的动能（取决于运动的）将为零，尽管它的势能（是高度的函数）将是仅被障垒局限的最小值。在这种情况下，石球暂时被“圈闭”在相对于整个系统的局部低势区之内。对石球再施加一个新的力，或者使势面倾斜以改变系统，它就可以越过“峰脊”（势面上的局部高点）继续向下运动，直到停留在另一凹坑处（势面上局部低点）。图中等值线的高低代表势能的大小。因此，这张图实质上为“能量面”图。

如果我们把图1-3倒置过来，把石球视为盐水溶液中的油滴或天然气泡（其密度小于水），而且我们现在把代表负效应的重力向量视为由重力产生的浮力，方向向上，则我们便有了一个关于油气圈闭的模型。就油滴或气泡而言，区域A、B、C与D仍然是水介质中局部的水力势能低的区域，油、气达到稳定停留在原来的“低处”，就象重力驱动石球的方式一样。地下油气圈闭同样是地下关于油气的局部低势能区域，直到它们贮存足够的能量克服局部能量障垒之前，它们将一直聚集在其中。

水动力学理论在石油勘探中的应用包括在一个区域或在局部地层范围内，绘制地下流体势能变化图。

流体的势能

流体势能与流体压力虽然有关，但不能将其混为一谈，因为它们并不是一回事。在M.K.Hubbert之前的许多年内，这两个术语可以交换使用，他令人信服地证明了事情并非如此，这使许多工程师与地质工作者感到困惑。Hubbert

的证明被引在附录B中。

流体的势能反映出集中作用在其内部任一点的总力，标记为 Φ 。如石球模型所表明的那样，它是重力、基准面以上点的高度、由物理因素影响产生的局部压力及所研究流体密度的函数。

势能的计算式如下：

$$\Phi = gZ + \frac{p}{D}$$

式中 g ——重力加速度；

p ——压力；

D ——密度；

Z ——相对于基准面的海拔高程。

这一方程以及由它导出的其它方程在本书中自始至终都要一再用到，特别是在静水环境以及水动力环境的各节中。

所研究流体内的流动（仅考虑向前平稳流动或移动）或运动是由点和点间的势差造成的。如果流体内B点处的势能大于A点处的势能，则流动方向是自B向A。因此，水流与电流类似，电流是由导线中两连通点间的电位差（电压差）造成的。

力场、流线与梯度

显然，如果地下各点处流体势能可以被测试出来并能绘出区域势能分布图，就可能确定水的以及在地下含水介质内伴生的油气运动情况，从而能预测出它们相对稳定的最可能的聚集地点。这就是勘探水动力学的总的目的。

图1-4为一幅模型图，其中的等值线是由所研究区域内