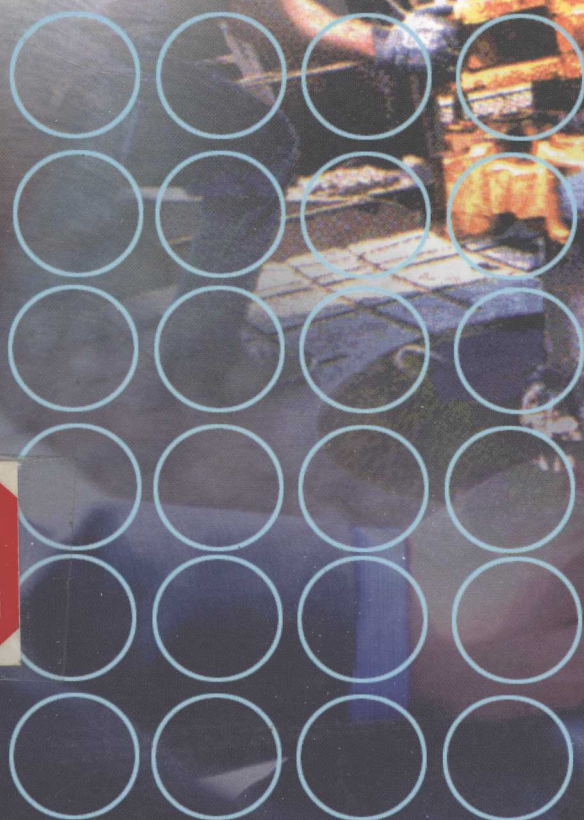


李天太 孙正义 李 琪 编著

实用钻井水力学 计算与应用



石油工业出版社

实用钻井水力学计算与应用

李天太 孙正义 李 琪 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统、全面地描述了油气井井筒内静止工况和动态工况条件下钻井水力学计算的基本内容、基本理论和基本物理定律及基础计算模型。系统地描述了环空水力学基本计算的内容和规律。对循环系统压力损耗的计算进行了详细的总结和公式推导,给出了较为系统的、单位统一(公制)的计算模型。本书对喷射钻井水力学计算的有关内容进行了介绍,提供了较为先进的算法和模型。本书描述了井内波动压力计算的方法和算法,根据钻柱工矿不同(开口、堵口、上起或下放),分别推导出了模型和算法。本书进行了小井眼钻井过程中的循环系统压力损耗和携岩分析,小井眼水力参数和钻井液流变参数优化设计计算,小井眼下钻过程中波动压力分析和许用起下钻速度的计算,并收集了一些室内现场数据对模型进行验证。本书介绍了地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力剖面建立的方法和模型,在此基础上系统地介绍了平衡压力钻井的水力学计算模型,并对低压钻井技术、理论和方法进行了介绍。书中还介绍了上述有关理论与技术的现场应用效果和情况。

本书适用于油田从事钻井工作的研究和管理人员,及石油院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用钻井水力学计算与应用/李天太等编著.

北京:石油工业出版社,2002.9

ISBN 7-5021-3958-3

I. 实…

II. 李…

III. 油气钻井-水力计算

IV. TE22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 075256 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京乘设伟业科技排版中心排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 12 印张 307 千字 印 1—1000

2002 年 9 月北京第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3958-3/TE·2853

定价:30.00 元

前 言

油气井井筒内的水力学问题是进行钻井设计和钻井作业过程中遇到的关键问题之一。环空水力学计算,环空系统压力损耗计算,波动压力计算,喷射钻井和优化钻井水力参数计算、小井眼环空水力参数计算和平衡压力钻井水力参数等方面的内容,到目前为止,在理论分析上已很完善,但现场实际应用中,有关计算模型的不确定性影响因素很多,变化很大。同时,对水平井和小井眼的工况情况和水力参数计算模型还有待于进一步完善和系统化。国内外各石油公司和石油研究院所的专家学者根据多年的研究和经验提出了一系列较为实用的理论和经验模型,也开发了很多较为实用的分析计算软件。但目前存在的问题是:针对井筒内的水力学计算问题,各类计算方法较多,计算模型各异,开发的计算软件也很多,计算单位(公制或英制)还不完全统一。诸如此类的问题给现场工程技术人员进行各类水力学计算带来了很大不便,为此本书系统地总结了前人的有关研究成果,并结合作者多年来的科研和教学成果,总结、完成了以下几个方面的内容:

(1)较为系统、全面地描述了油气井井筒内静止工况和动态工况条件下钻井水力学计算的基本内容、基本理论和基本物理定律及基础计算模型等。

(2)系统描述了环空水力学基本计算的内容和规律,对循环系统压力损耗的计算进行了详细的总结和公式推导,给出了较为系统的、单位统一(公制)的计算模型。

(3)对喷射钻井水力学计算的有关内容进行了系统的介绍,描述了目前较先进的算法和模型。

(4)系统描述了井内波动压力计算的方法和算法,根据钻柱工况不同(开口、堵口、上起或下放),分别推导出了各种工况下的数学模型和算法,介绍了计算软件的编制和应用事例的分析。

(5)进行了小井眼钻井过程中的循环系统压力损耗计算和携岩分析、水力参数和泥浆流变参数优化设计计算、起下钻过程中波动压力分析和许用起下钻速度的计算,并收集了一些室内现场数据对模型进行验证。

(6)介绍了地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力剖面建立的方法和模型,由此系统地给出了平衡压力钻井的水力学计算模型,并对低压钻井技术、理论和方法进行了介绍。

(7)本书针对上述各项内容,跟踪了其理论和技术的最新发展趋势和水平,介绍了有关理论与技术的现场应用情况。

本书由李天太、孙正义和李琪三人合作编著。李天太负责全书的统稿和第三、四、五章的编写及第六章部分内容的编写,全书的校审;孙正义负责第二、六章部分内容的编写;李琪负责第一章的编写和第二章部分内容的编写,全书的校审。在本书的编著出版过程中得到了张绍槐教授、张宁生教授和黄伟老师的大力协助和指导,得到了作者家人们的鼎力相助和支持,在此谨表示衷心的感谢和诚挚的敬意。本书的部分内容引用了作者多年来与有关油田科研合作项目的部分成果和书中所例参考文献的部分成果,恕不能一一注明,在此谨对他们表示衷心的感谢。在本书的文字编排过程中得到了王晓荣同学、韩凤蕊同学、申丽娜同学、张益同学和罗进元同学的大力帮助,在此谨对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中不妥甚至错误之处难以避免,敬请各位读者和同仁提出批评和建议,作者深表感激。

编 者

2002年2月于西安

目 录

| | |
|----------------------|-------|
| 第一章 静止井况钻井水力学计算 | (1) |
| 第一节 液体中的静液压力 | (1) |
| 第二节 气柱中的静液压力 | (2) |
| 第三节 复合流体柱中的静液压力 | (3) |
| 第四节 井控作业期间的环空压力 | (7) |
| 第五节 浮力 | (11) |
| 第二章 钻井动态水力学计算 | (18) |
| 第一节 应用于流体运动的基本物理定律 | (18) |
| 第二节 流变模型 | (28) |
| 第三节 流变测量与流变参数确定 | (34) |
| 第四节 管内和环空中的层流 | (43) |
| 第五节 管内和环空中的紊流 | (62) |
| 第六节 钻头射流流动 | (74) |
| 第三章 喷射钻井水力学计算与应用 | (77) |
| 第一节 喷射钻井的基本概念 | (77) |
| 第二节 循环系统压力损耗的计算 | (79) |
| 第三节 喷射钻井基本水力参数 | (87) |
| 第四节 携岩与井眼净化 | (92) |
| 第五节 井壁稳定性与流态判断 | (100) |
| 第六节 水力破岩机理及在钻井中的应用 | (104) |
| 第七节 喷射钻井最优工作方式设计 | (105) |
| 第四章 平衡压力钻井的水力学计算与应用 | (119) |
| 第一节 地应力与地层力学特性参数求解 | (119) |
| 第二节 地层压力剖面模型建立 | (126) |
| 第三节 合理钻井液密度设计 | (130) |
| 第四节 井控技术 | (137) |
| 第五节 低压钻井设计 | (147) |
| 第五章 小井眼环空水力学计算与应用 | (154) |
| 第一节 基本模型 | (155) |
| 第二节 模型验证与实例计算 | (163) |
| 第六章 垂直管运动引起的波动压力 | (170) |
| 第一节 层流 | (170) |
| 第二节 非牛顿流型 | (174) |
| 第三节 紊流 | (175) |
| 第四节 惯性效应 | (178) |
| 第五节 钻柱许用起下钻速度分析设计系统 | (179) |
| 附录 我国法定计量单位及与其他单位的换算 | (182) |
| 参考文献 | (185) |

第一章 静止井况钻井水力学计算

钻井水力学这门科学对于钻井工程师是非常重要的。由于钻井液和水泥浆的作用,在细长的井筒和管柱中造成了极高的流体压力,这种压力的存在,无疑是所遇到的每一个井下复杂问题都必须加以考虑的。

静止井况是钻井作业中常见的也是最简单的一种作业状态,这时井中流体和中心管柱二者都是静止的。

第一节 液体中的静液压力

地下井内压力最容易按静止井况来确定。如在截面积为 S 的井眼中与深度 H 处取一流体单元,对作用在流体单元上的各种垂直力作出自由体图(图 1.1),就可以得到该流体柱内随深度变化的压力由下式:

$$pS - \left(p + \frac{dp}{dH} \Delta H \right) S + \gamma S \Delta H = 0$$

将第二项展开并除以单元体积 $S \cdot \Delta H$ 给出:

$$dp = \gamma dH \quad (1.1)$$

如果我们研究的是像钻井液或盐水这样的液体,可以忽略该流体的可压缩性,因此,可以认为单位体积流体的重力是不随深度变化的常量。将方程(1.1)按不可压缩液体积分,给出:

$$p = \gamma H + p_0 \quad (1.2)$$

式中积分常数 p_0 等于地面压力($H=0$)。除了井内有流体溢出而井的防喷器关闭时以外,正常情况下静止的地面压力 p_0 为零。用常用法制单位表示的单位体积流体的重力可由下式给出:

$$\gamma = \rho g = 9.81 \rho \quad (1.3)$$

式中 ρ 是以 g/cm^3 表示的流体密度(单位体积的液体质量),这样方程(1.2)以常用法制单位表示,则为:

$$p = 9.81 \rho H + p_0$$

式中 p ——静液压力, kPa;

H ——液柱垂直高度, m。

静液压力方程的一项重要应用是确定钻井液的合理密度。井中流体柱必须具有足够的密度以使井内液柱压力能平衡渗透性地层中流体的孔隙压力。

[例题 1.1] 如果地层流体在 3500m 处的孔隙压力为 48000kPa, 试计算为了防止由 3500m 处一渗透性地层流体流入井内所需的静止钻井液密度。

解:利用方程(1.2)的转换形式,有:

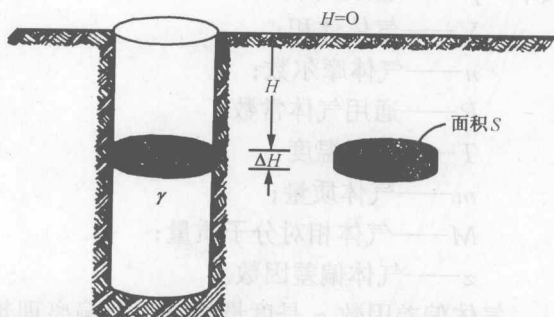


图 1.1 作用在流体单元上的各种力

$$\rho = \frac{p}{9.81H} = \frac{48000}{9.81 \times 3500} = 1.40(\text{g/cm}^3)$$

因此,当井口敞开于大气($p_0=0$),并且钻井液不循环时,为了防止地层流体流入井,钻井液密度至少应为 1.40g/cm^3 。

第二节 气柱中的静液压力

在许多钻井和完井作业中,气体至少存在于井的一部分井段中。在一些情况下,气体是由地面注入井中的;而在其他一些情况下,气体可以由地下地层进入井中。在一静止的气柱中压力随井深的变化要比在一静止的液柱中更为复杂,因为气体密度随压力的变化而变化。

气体状态可以用由下式定义的真实气体方程来描述:

$$pV = znRT = z \frac{m}{M} RT \quad (1.4)$$

式中 p ——绝对压力;
 V ——气体体积;
 n ——气体摩尔数;
 R ——通用气体常数;
 T ——绝对温度;
 m ——气体质量;
 M ——气体相对分子质量;
 z ——气体偏差因数。

气体偏差因数 z 是度量气体状态偏离理想气体状态多少的量。理想气体是这样一种气体,在其分子之间没有吸引力。天然气的气体偏差因数已经由实验确定,是温度和压力的函数,并且在石油文献中很容易查到。在本书中将一般地作出理想气体状态的简化假设,以便于在内容展开时更容易集中注意于钻井水力学概念。

通过重新安排方程(1.4),可以将气体密度表示为压力的函数。解这个气体密度 ρ 的方程得:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{zRT} \quad (1.5a)$$

将单位由一致单位改为常用法制单位,给出:

$$\rho = 0.0997 \frac{pM}{zT} \quad (1.5b)$$

式中 ρ 的单位为 g/cm^3 , p 的单位为 MPa(绝对),而 T 的单位为 K。

当气柱长度不大,而且气体压力在 7MPa 以上时,由方程(1.2b)给出的不可压缩液体的静液方程可以和方程(1.5b)一起使用,而并不降低精度。然而,当气柱很长或高压时,则气柱中气体密度随深度变化的变化应该予以考虑,利用方程(1.1),方程(1.3)和方程(1.5a)并统一单位,我们得到:

$$dp = 1.18 \times 10^{-3} \frac{pM}{zT} dH$$

如果气柱中 z 的变化不太大,我们可以把 z 看做一常数 \bar{z} 。将以上方程分离变量,有:

$$\int_{p_0}^p \frac{1}{p} dp = 1.18 \times 10^{-3} \frac{M}{\bar{z}T} \int_{H_0}^H dH$$

积分得:

$$p = p_0 e^{\frac{1.18 \times 10^{-3} M(H-H_0)}{zT}} \quad (1.6)$$

【例题 1.2】一井油管中充满甲烷气(相对分子质量 = 16)至垂直深度为 3000m。环空中则充满 1.08g/cm^3 的盐水。假设为理想气体状态,如地面油管压力为 7MPa(绝对),而且平均气体温度是 60°C ,试计算 3000m 处油管外压力超过油管内压力的值。如油管的抗挤强度为 57MPa,问由于高的外压力是否将挤毁油管?

解:由方程(1.2)的转换式可知,深度 3000m 处环空中的压力为:

$$p_2 = 9.81 \times 1.08 \times 3000 + 101.325 = 31.886(\text{MPa})$$

由方程(1.6)可知 3000m 处油管内的压力为

$$p_1 = 7e^{\frac{1.18 \times 10^{-3} \times 16 \times 3000}{1 \times 333}} = 8.298(\text{MPa})$$

因此,压力差为:

$$p_2 - p_1 = 23.588(\text{MPa})$$

这比油管的抗挤强度要低得多。

地面处油管内气体密度可以利用方程(1.5b)近似计算如下:

$$\rho = 0.0997 \times \frac{7 \times 16}{1 \times 333} = 0.034(\text{g/cm}^3)$$

值得注意的是,在方程(1.2)的转换式中利用这个密度给出:

$$\rho_1 = 9.81 \times 0.034 \times 3000 + 7000 = 8.00062(\text{MPa})$$

它比利用更复杂的方程(1.6)得到的答案相差为 0.1103MPa。

第三节 复合流体柱中的静液压力

在许多钻井作业中,井中流体柱有着几段不同的流体密度。在这类复合流体柱中压力随深度变化的变化必须通过分别计算各个流体部分的影响来确定。例如,考虑图 1.2 中所示的复合液柱。如第 1 段顶端的压力已知为 p_0 ,那么第 1 段底端的压力可以由方程(1.2)的转换式计算:

$$p_1 = 9.81\rho_1(H_1 - H_0) + p_0$$

第 1 段底端的压力实质上等于第 2 段顶端的压力。即使有界面存在,对于任何适当的井眼尺寸可以忽略毛细压力。这样,第 2 段底端的压力可以用第 2 段顶端的压力来表示:

$$p_2 = 9.81\rho_2(H_2 - H_1) + 9.81\rho_1(H_1 - H_0) + p_0$$

一般,在任何垂直深度 H 处的压力可表示为:

$$p = p_0 + 9.81 \sum_{i=1}^n \rho_i(H_i - H_{i-1}) \quad (1.7)$$

在求解井中一定深度处的压力时,往往需要把图 1.3 中所示的井的流体系统看做一压力计。钻柱内通常是压力计的左边,而环空通常是压力计的右边。然后利用方程(1.7)可以将静液压力平衡关系用已知压力和未知压力来写出。

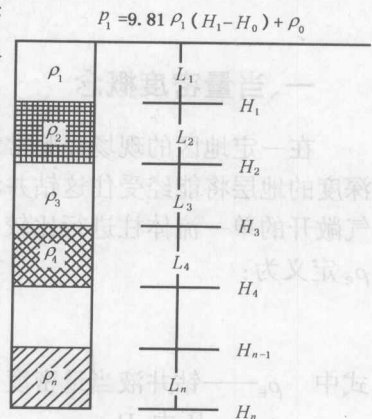


图 1.2

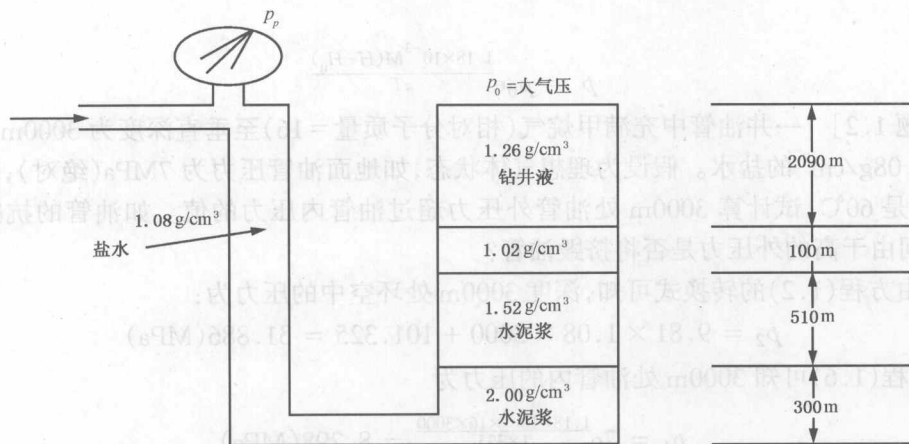


图 1.3 注水泥作业

[例题 1.3] 一技术套管下至井深 3000m 处注水泥。当套管柱下至井底时井内为 1.26g/cm^3 的钻井液。注水泥作业是这样设计：(1) 100m 的 1.02g/cm^3 钻井液前置液；(2) 510m 的 1.52g/cm^3 充气水泥浆；(3) 300m 的 2.00g/cm^3 的高强度水泥浆；最后用 1.08g/cm^3 的盐水顶替水泥浆，试计算自套管内完成顶替水泥浆所需的泵压。

解：如把井看做一压力计(图 1.3)，则复合的井的流体系统是很容易弄清楚的。静液压力平衡关系的写出是从已知压力开始，移动通过不同的流体段，到达未知压力处。当向下移动通过一流体段时， $(H_{i+1} - H_i)$ 是正的，而静液压力的变化是加到已知压力上；反之，当向上移动通过一流体段时， $(H_{i+1} - H_i)$ 是负的，而静液压力的变化是从已知压力减去：

$$p_a = p_0 + 9.81(1.26 \times 2090 + 1.02 \times 100 + 1.52 \times 510 + 2.00 \times 300 - 1.08 \times 3000)$$

因为已知压力 p_0 是 0(表压)，则：

$$p_a = 8540.59(\text{kPa})(\text{表压})$$

一、当量密度概念

在一定地区的现场经验常常使得能为最大钻井液密度作出规定，在正常钻井作业时，一定深度的地层将能经受住这钻井液密度而不会破裂。将一复合的井的流体柱与一当量的向大气敞开的单一流体柱进行比较，有时是有用的。这是通过计算当量钻井液密度 ρ_e 来达到的， ρ_e 定义为：

$$\rho_e = \frac{p}{9.81D}$$

式中 ρ_e ——钻井液当量密度， kg/m^3 ；

p ——压力，Pa；

D ——特定深度，m。

当量钻井液密度应该总是和特定深度有关的。

二、钻井液携带的固体和气体的影响

钻井工程师很少和纯的液体或气体打交道。例如，钻井液和水泥浆二者都主要是水和分散固体的混合物。环空中的钻井液还含有被钻头破碎的岩石碎屑和岩石中含有的地层流

体。只要外来材料悬浮在流体中或穿过流体以其极限速度沉降,外来材料对静液压力的影响可以通过用混合物的密度取代方程(1.2)转换式中流体的密度来计算。然而,已从流体沉淀出的颗粒和为颗粒间接触所支持的颗粒并不影响静液压力。

几种成分的混合物的平均密度可由下式给出:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \sum_{i=1}^n \rho_i f_i$$

式中 m_i, V_i, ρ_i, f_i 相应地是第 i 种成分的质量、体积、密度和体积百分比。只要各种成分是液体和固体,在流体柱的整个长度内成分密度实际上是常数。因此,混合物的平均密度实际上也是常数。

如果一种成分是细分散的气体,气体成分的密度并不保持不变,而是随着压力降低而减小。钻井液由于气泡存在而量得的密度低称之为受气侵。

气侵钻井液中一定深度处静液压力的确定可以采用真实气体方程来进行。如果 N_v 摩尔气体分散在(或吸附于) 1m^3 钻井液中,则流体柱中一定深度处气体的体积百分比由下式给出:

$$f_g = \frac{\frac{zN_v R t}{p}}{1 + \frac{zN_v R T}{p}} \quad (1.10)$$

另外,该处的气体密度 ρ_g 是由方程(1.5a)定义的。因此,混合物的有效密度是由下式给出:

$$\bar{\rho} = \rho_f(1 - f_g) + \rho_g f_g = \frac{(\rho_f + MN_v)p}{p + zN_v R T} \quad (1.11)$$

式中 M ——气体的平均相对分子质量。

对于一般的现场常用单位,将这个平均密度的表达式代入方程(1.3)中并与方程(1.1)联立可得:

$$\int_{H_1}^{H_2} dH = \int_{p_1}^{p_2} \frac{p + zN_v R T}{9.81(\rho_f + MN_v)} \cdot \frac{dp}{p} \quad (1.12)$$

如果所讨论的流体柱从头到底 z 和 T 的变化不太大,那么可以把它们看做平均值 \bar{z} 和 \bar{T} 的常数。将方程(1.12)积分可得:

$$H_2 - H_1 = \frac{p_2 - p_1}{a} + \frac{b}{a} \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (1.13)$$

式中

$$a = 9.81(\rho_f + MN_v) \quad (1.14)$$

$$b = \bar{z}N_v R \bar{T} \quad (1.15)$$

遗憾的是在方程(1.13)中压力 p_2 出现在对数项内。这意味着,对于一个气侵的流体柱,为了要确定压力随高度的变化,必须采用反复计算方法。然而,如果气液混合流体柱受到高压而且不很长,气体密度随压力的变化可以忽略。这种情况下,由方程(1.11)给定的混合物密度 $\bar{\rho}$ 可以假设为常数,而静液压力的变化可以用方程(1.2b)来计算。

[例题 1.4] 一只 250.8mm 的钻头在井深 3500m 处正以 15m/h 的速度钻进大段的低渗透砂岩,砂岩的孔隙度为 0.20,含水饱和度 0.3,含甲烷气饱和度 0.7。钻进时以 22L/s 的排

量循环 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的钻井液。试计算由于所钻地层材料进入钻井液引起的静液压力变化。假设钻井液的平均温度为 70°C ，地层水的密度为 $1.08\text{g}/\text{cm}^3$ ；还假设气体状态是理想的，气体和岩屑二者都以和钻井液相同的环空返速运移，钻屑固相的密度为 $26\text{g}/\text{cm}^3$ 。

解：由 3500m 的 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的钻井液施加的静液压力头应为：

$$p = 9.81 \times 1.5 \times 3500 = 51502.5 (\text{kPa})$$

钻碎地层的速度为：

$$15\text{m}/\text{h} \times \left(\frac{\pi \times 250.8^2}{4} \times 10^{-6} \right) = 0.741 (\text{m}^3/\text{h})$$

钻屑固相加入钻井液的速度为：

$$0.741 \times (1 - 0.2) = 0.591 (\text{m}^3/\text{h})$$

地层水加入钻井液的速度为：

$$0.741 \times 0.2 \times 0.3 = 0.045 (\text{m}^3/\text{h})$$

钻井液排量为：

$$Q = 22\text{L}/\text{S} = 22 \times \frac{3600}{1000} = 79.2 (\text{m}^3/\text{h})$$

地层水和钻屑固相加入后钻井液的密度应为：

$$\bar{\rho} = \frac{1.5 \times 79.2 + 26 \times 0.591 + 1.08 \times 0.045}{79.2 + 0.591 + 0.045} = 1.68 (\text{g}/\text{cm}^3)$$

甲烷气加入钻井液的速度是：

$$0.741 \times 0.2 \times 0.7 = 0.104 (\text{m}^3/\text{h})$$

假设气体是理想的，而且地层压力约为 60.34MPa ，可由方程(1.5b)求出气体密度为：

$$\rho_g = \frac{60.34 \times 16}{1.00 \times 70} = 137.92 (\text{g}/\text{cm}^3)$$

这样，气体进入井内的质量速度可求得为：

$$\frac{0.28 \times 10^3 \times 0.104}{16} = 1.82 (\text{mol}/\text{h})$$

因为钻井液循环的排量为 $79.2\text{m}^3/\text{h}$ ，每立方米钻井液的气体摩尔数可求得为：

$$N_v = \frac{1.82}{79.2} = 0.023 (\text{mol}/\text{m}^3)$$

利用方程(1.14)和方程(1.15)可得：

$$a = 9.81 \times (1.68 \times 10^3 + 16 \times 0.023 \times 10^{-3}) = 1.648 \times 10^4$$

$$b = 8.314 \times 1 \times 0.023 \times 343.15 = 64.83$$

因为井口是敞开于大气的，地面压力 p_1 为 101.38kPa (绝对)。井底压力 p_2 必须由方程(1.13)用反复方法来估算。如下表 1.1 中所表明的，为 p_2 假设了不同的值，直至计算的 $(H_2 - H_1)$ 等于 3500m 井深。

表 1.1

| p_2, kPa | $\frac{p_1 - p_2}{1.648 \times 10^4}$ | $\frac{64.83}{1.648 \times 10^4} \ln \frac{p_2}{p_1}$ | $H_2 - H_1, \text{m}$ |
|-------------------|---------------------------------------|---|-----------------------|
| 60 | 3634.63 | 0.0251 | 3635 |
| 55 | 3331.23 | 0.0248 | 3331 |
| 57.78 | 3499.94 | 0.0250 | 3500 |

这样,由于所钻地层材料进入钻井液造成的静液压力头变化为:

$$\nabla p = -60.35 + 57.78 = -2.57(\text{MPa})$$

上例表明,由于钻井液的正常受侵造成的静液压力头损失一般是微不足道的。而在过去钻井人员并不明白这个。主要由于钻井液从井中返出地面时密度的严重降低造成了混淆。密度的这种降低,是由于钻井液接近地面时,因上面静液压力的减少引起所夹带的气体迅速膨胀的结果。

第四节 井控作业期间的环空压力

静液压力关系的最重要应用之一是确定井控作业期间的环空压力。井控作业是指地层流体开始流入井内时随即应采取的紧急措施和顶替钻井液。地层流体流入井内称为溢流。已经流入井筒的地层流体一般必须予以除掉,这是通过地面的可调式节流器使井循环来做到的。全部时间内井底压力都必须保持在地层孔隙压力之上以防止地层流体的再次流入。然而,一个复杂因素是:有把裸露于液体压力的较弱地层压开的危险。压开一裸露地层常常导致一次地下井喷,地层流体无控制地从高压层流入压开的地层内。因此,恰当的井控策略是调节地面的节流器使井底压力正好保持稍微大于地层压力。

虽然对于现在大多数操作员所用的井控方法来说并不需要计算环空压力,然而事先了解溢流状态有助于准备应付偶然事故的计划。因为在井控作业所用的排量下环空摩阻压力损耗一般是小的,利用静液压力方程就可以进行计算

一、溢流识别

在井控作业期间将要观察到的环空压力剖面在很大程度上取决于溢流流体的成分。一般情况下,气体溢流比液体溢流产生较高的环空压力。之所以如此是因为气体溢流:(1)比液体溢流有较小的密度;(2)当其被泵送升向地面时必须允许其膨胀。这两个因素都在环空中产生较低的静液压力。因此,为了保持不变的井底压力,必须利用可调式节流器保持较高的地面环空压力。

必须对溢流流体成分进行说明,以便在油气井设计中进行环空压力计算。在实际的井控作业期间,溢流流体成分一般是不知道的。然而,溢流流体密度可以从观察到的钻杆压力、环空套管压力以及泥浆池泥浆增量来计算。密度的计算常常用来确定溢流流体主要是气体还是液体。

通过假设进入环空的溢流流体成段塞状,可以更容易地计算溢流流体的密度。一次发生溢流关闭防喷器后的初始井况的简图如图 1.4 所示。必须从关闭防喷器以前由环空被赶入钻井液池的钻井液体积来确定存在的溢流流体体积。钻井液池钻井液增量 G 通常是由钻井液池钻井液量监控装置来记录的。如溢流流体体积小于钻铤长度的环空总容积,那么溢流流体所占的长度 L_k 可以用溢流流体体积 V_k 和环空容积 C_3 来表达。假设井径大约为常数,我们得到:

$$L_k = V_k C_3 \quad (1.16)$$

式中 L_k ——溢流流体所占的长度;

V_k ——溢流流体的体积;

C_3 ——用长度每单位体积表达的钻铤井段的环空容积。

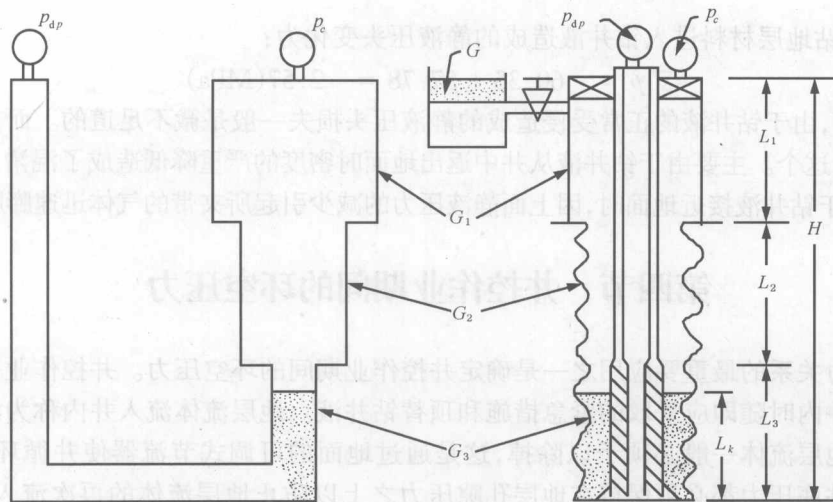


图 1.4 井控作业期间初始井况简图

如溢流流体的体积大于钻铤长度的环空总容积,那么溢流流体所占的长度 L_k 由下式给出:

$$L_k = L_3 + (V_k - \frac{L_3}{C_3})C_2 \quad (1.17)$$

式中 L_3 是钻铤总长度, C_2 是用长度每单位体积表达的钻杆井段的环空容积。对于均一的钻井液密度 ρ_m 的初始的井系统,压力平衡关系为:

$$p_c + 9.81[\rho_m(H - L_k) + \rho_k L_k - \rho_m H] = p_{dp}$$

解出这个表达式中溢流流体密度 ρ_k , 得:

$$\rho_k = \rho_m - \frac{p_c - p_{dp}}{9.81 L_k} \quad (1.18)$$

溢流流体密度小于约 0.48g/cm^3 时,应表明溢流流体主要是气体。而溢流流体密度大于约 0.96g/cm^3 时,应表明溢流流体主要是液体。

当溢流流体体积小,在计算溢流流体密度中有几个因素可以造成大的误差。井眼冲蚀可以使得难于确定溢流流体所占的长度。此外,压力表往往不能精确地读出低压。还有,实际的环空钻井液密度因为携带有钻屑固相也许略大于钻杆内的钻井液密度。而且,溢流流体是与大量泥浆相混合的,往往不能精确地用一段塞来表示。这样,利用方程(1.18)计算的溢流流体密度只应看做是粗略的估算。

如果与地层流体相混合的钻井液体积是已知的,那么溢流流体密度计算的精度能够得到一些提高。与溢流流体相混合的最小钻井液体积可以用以下表达式计算:

$$V_m = Q t_d \quad (1.19)$$

式中 Q 是泵的排量,而 t_d 是在停泵和关闭防喷器以前溢流的发现时间。溢流流体侵入部分的体积可以计算为:

$$V_k = G + Q t_d \quad (1.20)$$

这样使得可以用方程(1.18)来计算溢流流体侵入部分的平均密度。然后利用混合物的方程组可以使混合部分的平均密度 $\bar{\rho}_k$ 与溢流流体的密度相联系。因为发生大量的天然混合(即当地层气体进入井内时泵并未工作),方程(1.20)趋向于预报的混合物体积太小。

[例题 1.5] 一口井钻至垂直深度为 3000m 处并 22.5L/s 的排量循环 1.15g/cm³ 的钻井液时开始出现溢流。在停泵和关闭防喷器以前的 3min 期间泥浆池钻井液增量为 3.18g/cm³。在压力稳定后,记录得初始钻杆压力 3.59MPa 和初始套管压力 4.96MPa。钻杆井段环空容积为 24.7m³,275m 钻铤井段的环空容积为 54.8m³。试计算溢流流体的密度。总的钻柱容积为 20m³。

解:说明这个例题的几何关系的一个简图如图 1.5 所示,275m 钻铤井段的环空总容积为:

$$\frac{275}{54.8} = 5.02(\text{m}^3)$$

如假设溢流流体以段塞状进入井内,那么溢流流体体积小于钻铤井段的总的环空容积。因此:

$$L_k = 3.18 \times 54.8 = 174.26(\text{m})$$

利用方程(1.8),溢流流体的密度为:

$$\begin{aligned} \rho_k &= 1.15 - \frac{(4.96 - 3.59) \times 10^3}{9.81 \times 174.26} \\ &= 0.35(\text{g}/\text{cm}^3) \end{aligned}$$

结果应解释为低密度溢流流体的象征,也就是气体。

如果假设出现溢流时井下溢流流体是与泵入的钻井液相混合的:

$$Q = 22.5\text{l}/\text{s} = 22.5 \times \frac{60}{1000} = 1.35\text{m}^3/\text{min}$$

$$V_k = 3.18\text{m}^3 + 1.35\text{m}^3/\text{min} \times 3\text{min} = 7.23\text{m}^3$$

混合部分的长度由方程(1.17)确定为:

$$L_k = 275 + (7.23 - 5.02) \times 24.7 = 329.59(\text{m}) \approx 330(\text{m})$$

利用方程(1.18),混合部分的平均密度为:

$$\bar{\rho}_k = 1.15 - \frac{(4.96 - 3.59) \times 10^3}{9.81 \times 329.59} = 0.73(\text{g}/\text{cm}^3)$$

因为混合部分流体柱只有 329.59m 长而且又在高压下,利用不可压缩混合物的有效密度的方程可以使平均密度与溢流流体密度相联系:

$$0.73 = \frac{3.18\rho_k + (7.23 - 3.18) \times 1.15}{7.23}$$

解方程求出溢流流体密度得:

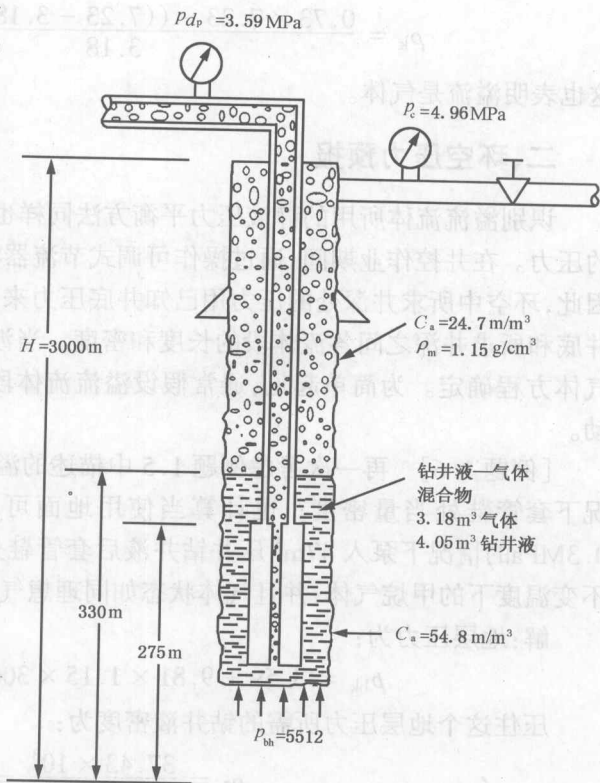


图 1.5 井筒几何示意图

$$\rho_k = \frac{0.73 \times 7.23 - ((7.23 - 3.18) \times 1.15)}{3.18} = 0.20(\text{g/cm}^3)$$

这也表明溢流是气体。

二、环空压力预报

识别溢流流体所用的静液压力平衡方法同样也能用于计算不同井况下环空中任何井深处的压力。在井控作业期间,通过操作可调式节流器将保持井底压力不变而稍微大于地层压力。因此,环空中所求井深处的压力用已知井底压力来表达通常是方便的。这样需要了解的仅是井底和所求井深之间各流体段的长度和密度。当涉及气体溢流时,气体段的长度必须用真实气体方程确定。为简单起见,通常假设溢流流体段保持为连续的段塞,相对于钻井液并不滑动。

[例题 1.6] 再一次考虑例题 1.5 中描述的溢流。试计算压井所需钻井液密度和关井并况下套管鞋处当量密度。也计算当使用地面可调式节流器保持井底压力比地层压力大 0.3MPa 的情况下泵入 47m³ 压井钻井液后套管鞋处的当量密度。假设溢流流体是处于 60°C 不变温度下的甲烷气体,并且气体状态如同理想气体。

解:地层压力为:

$$p_{bk} = 3.59 + 9.81 \times 1.15 \times 3000 \times 10^{-3} = 37.43(\text{MPa})$$

压住这个地层压力所需的钻井液密度为:

$$\rho_2 = \frac{37.43 \times 10^3}{9.81 \times 3000} = 1.27(\text{g/cm}^3)$$

类似地 1000m 深套管鞋处的当量密度为:

$$\rho_c = \frac{4.96 \times 10^3}{9.81 \times 1000} + 1.15 = 1.66(\text{g/cm}^3)$$

在泵入 47m³ 的 1.27g/cm³ 的加重钻井液后,环空中井底处 1.27g/cm³ 钻井液的体积为

$$47\text{m}^3 - 20\text{m}^3 = 27\text{m}^3$$

这是因为总的钻柱容积是 20m³。环空中这一段的长度为:

$$L_1 = 275 + (27 - 5.02) \times 24.7 = 818(\text{m})$$

环空中在这个新泥浆之上的一段是 20m³ 密度为 1.15g/cm³ 的钻井液,这是从钻杆内替出的。这一段的长度为:

$$L_2 = 20 \times 24.7 = 494(\text{m})$$

在这 1.15g/cm³ 钻井液之上的一段是甲烷气体。气体的大约压力是计算气体体积所需要的。气体段底端处的压力可以由已知的井底压力来计算,而井底压力比地层压力高 0.3MPa:

$$p_g = 37.43 + 0.3 - 9.81 \times 1.27 \times 818 \times 10^{-3} - 9.81$$

$$\times 1.15 \times 494 \times 10^{-3} = 22.37(\text{MPa})(\text{表压})$$

这个压力的井深为:

$$3000 - 818 - 494 = 1688(\text{m})$$

对于理想气体状态,气体的体积为:

$$V_g = \frac{37.43 + 0.1014}{22.37 + 0.1014} \times 3.18 = 5.31(\text{m}^3)$$

而气体段的长度为:

$$L_g = 5.31 \times 24.7 = 131.2(\text{m})$$

气体的密度由方程(1.5b)得出:

$$\rho_g = 0.0997 \frac{pM}{ZT} = 0.0997 \times \frac{(22.37 + 0.1014) \times 16}{1 \times (60 + 273)} = 0.108(\text{g/cm}^3)$$

在气体之上的是 1.15g/cm^3 的钻井液。这样,我们可以从已知 1688m 处的压力为 22.3MPa(表压)来计算 1000m 处的压力:

$$\begin{aligned} p &= 22.37 - 9.81 \times 0.108 \times 131.2 \times 10^{-3} - 9.81 \times 1.15 \\ &\quad \times (1688 - 131.2 - 1000) \times 10^{-3} \\ &= 16.35(\text{MPa})(\text{表压}) \end{aligned}$$

相应于这个压力的当量密度为:

$$\rho_e = \frac{16.35 \times 10^3}{9.81 \times 1000} = 1.67(\text{g/cm}^3)$$

第五节 浮力

前几节,我们计算了井内一定深度处的静液压力,本节我们将介绍由于静液压力而作用在井下设备和管柱上的各种力。在一些情况下需要的只是由静液压力造成的合力或弯矩,而在其它情况下所求的则是浸没的设备中一定深度处的轴向拉力或压力。我们将首先考虑确定作用在浸没的物体上的合力。

作用在浸没于井内流体中的外来物体上的液压的净效应被称为浮力。对于如图 1.6 所示的垂直四棱柱体,浮力是很容易弄清楚的。在一定深度处作用在四棱柱体一个侧面上的液压为作用在四棱柱体相对侧面上的相等的液压所平衡。因此,由流体施加在四棱柱体上的净力,是作用在四棱柱体顶端的力 F_1 和作用在四棱柱体底端的力 F_2 的合力。向下的力 F_1 可由深度 H 处的液压乘以截面积 A 来求得:

$$F_1 = p_1 A = \gamma_{wv} H A$$

类似地,作用在四棱柱体上的向上的力可由深度 $(H+h)$ 处的压力乘以截面积 A 来求得:

$$F_2 = p_2 A = \gamma_{wv} (H+h) A$$

这样,由流体施加在四棱柱体上的结果而产生的浮力 F_{bo} 为:

$$F_{bo} = F_2 - F_1 = \gamma_{wv} A (H+h) - \gamma_{wv} A H = \gamma_{wv} A h$$

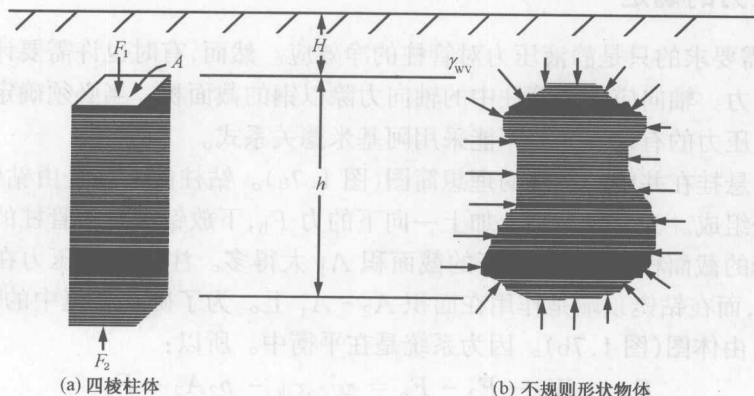


图 1.6 作用在外来物体上的液力

这表明向上的浮力 F_{bo} 等于所排代的流体的重力。这个关系式首先是由大约公元前 250 年的阿基米德采用的, 所以又称为阿基米德律。

阿基米德的关系式对浸没于流体中的外来物体是有效的而与物体的形状无关。为了对浸没于流体中的不规则形状物体更一般的情况有所理解, 我们考虑假如这个物体并不存在, 而且这个表面被认为是画在液体中的虚构的表面, 那么在这个物体表面上的流体压力将不改变。由于虚构表面所包含的流体单元是处于静止的, 各垂直力的和必定为零, 而所包含流体的重力必定等于浮力。周围的流体以同一个力系作用在外来物体上, 而这个物体也受到一个净的向上力, 这个向上力等于物体所占据范围的流体的重力, 也就是说等于所排代流体的重力。应注意的是, 即使外来物体只是部分地浸没于流体中, 也能应用这个相同的论点。

浸没于流体中的井内设备的有效重力 W_e 定义为:

$$W_e = W - F_{bo} \quad (1.21)$$

式中 W 是井内设备在空气中的重力, 而 F_{bo} 是浮力。

利用阿基米德关系式, 浮力为:

$$F_{bo} = \rho_f V = \rho_f \frac{W}{\rho_s} \quad (1.22)$$

式中 ρ_f 流体的密度, ρ_s 是钢的密度, 而 V 是所排代的流体体积, 将方程(1.22)代入方程(1.21)可得:

$$W_e = W \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s} \right) \quad (1.23)$$

钢的密度约为 7.86g/cm^3 。

[例题 1.7] 3000m 的 29kg/m 的钻杆和 180m 的 219kg/m 的钻铤悬挂在密度为 1.80g/cm^3 的钻井液中, 试计算必须由井架支撑的有效大钩负荷。

解: 钻柱在空气中的重力为:

$$W = 29 \times 3000 + 219 \times 180 = 126420(\text{kgf})$$

钻柱在钻井液中的有效重力可由方程(1.23)计算

$$W_e = W \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s} \right) = 126420 \left(1 - \frac{1.80}{7.86} \right) = 97468.85(\text{kgf})$$

W_e 即为有效大钩负荷。

一、轴向应力的确定

在上例中, 需要求的只是静液压力对管柱的净效应。然而, 有时也许需要计算管柱中一定深度处的轴向应力。轴向应力是管柱中的轴向力除以钢的截面积。当必须确定轴向应力时应该考虑应用静液压力的有效方面而不能采用阿基米德关系式。

我们考虑一悬挂在井中的钻柱的理想简图(图 1.7a)。钻柱的下部是由钻铤组成, 而钻柱的上部是由钻杆组成。为了在钻头上加上一向下的力 F_b , 下放钻柱直至管柱的部分重力是由井底支撑。钻铤的截面积 A_2 要比钻杆的截面积 A_1 大得多。注意静液压力在钻铤底端是作用在面积 A_2 上, 而在钻铤顶端是作用在面积 $A_2 - A_1$ 上。为了确定钻铤中的轴向力, 我们考虑钻柱下部的自由体图(图 1.7b)。因为系统是在平衡中。所以:

$$F_T = W_2 - F_2 - F_b = w_{dc} x_{dc} - p_2 A_2 - F_b \quad (1.24a)$$

式中 w_{dc} ——单位长度钻铤在空气中的重力;