

井下作业井控技术

主 编 王 林
副主编 唐少峰 陈显进 李 娜



JINGXIA ZUOYE JINGKONG JISHU



井下作业井控技术

主 编 王 林
副主编 唐少峰 陈显进 李 娜

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为井下作业井控技术培训教学用书,书中系统地介绍了井下作业井控基本知识、井涌井喷机理及分析、井控设计、井控技术措施、井控装置、防喷演习及井喷失控应急预案、井喷案例和井下作业 HSE 基本知识等。

本书通俗易懂,注重实用,可作为井下作业人员取得井下作业井控操作合格证的培训教材,也可供石油院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

井下作业井控技术/王林主编.
北京:石油工业出版社,2007.7
ISBN 978-7-5021-5867-5
I. 井…
II. 王…
III. 井下作业(油气田)-井控技术
IV. TE 358

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 151256 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址: www.petropub.com.cn
发行部:(010) 64210392
经 销:全国新华书店
印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:20
字数:508 千字 印数:1—7200 册

定价:45.00 元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

《井下作业井控技术》编委会

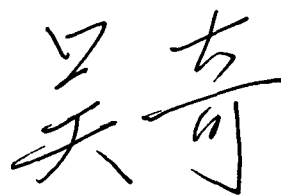
主 编：王 林

副 主 编：唐少峰 陈显进 李 娜

编写人员：张兴福 于 平 侯维涛 唐庆春 曹云森
牛彦山 倪明泉 马展朝 郑国忠 高宏海
陆明龙 马久芹 张加平 刘莉娇

序

井下作业在油气勘探开发中发挥着重要作用。近年来，井下作业工作量逐年增加，井下作业过程中发生井喷事故的风险加大，使得井下作业井控工作显得尤为重要。特别是勘探目标的复杂化、油田开发规模的不断扩大和井下作业技术逐步走向国际市场，这些都对井下作业井控工作提出新的更高的要求。为了适应不断发展的井下作业井控工作的需求，各油田根据《中国石油天然气集团公司石油与天然气井下作业井控规定》的要求，陆续开展了井下作业井控培训，以提高广大员工井控技术素质。2003 年大庆油田在调研了井下作业井控技术发展状况和总结过去井控工作经验的基础上，参考钻井井控培训教材，编写了《井下作业井控技术》培训教材。该教材在大庆油田井下作业培训中发挥了重要作用，三年来共培训 3600 多人，提高了井下作业操作人员、技术和管理人员的井控技术水平，井控操作持证率明显提高。随着井控技术的不断发展，结合井下作业的生产实际，以及中国石油天然气集团公司对井控工作的新要求，近期大庆油田又对原教材进行了增编和修改，使内容更丰富，更符合生产实际。本教材是一本系统阐述井下作业井控技术的教材，必将为井下作业人员提高井控技术水平发挥积极作用。

A handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '吴' (Wu) on the left and '戈' (Ge) on the right, written in a stylized, cursive manner.

2006 年 10 月

目 录

第一章 井控的基本知识	(1)
第一节 井控的概念	(1)
第二节 井下各种压力及相互关系	(2)
复习题	(6)
第二章 井涌井喷机理及分析	(9)
第一节 井侵的特点	(9)
第二节 溢流产生的原因	(11)
第三节 溢流的显示	(13)
第四节 井喷失控的原因和危害	(18)
复习题	(19)
第三章 井下作业井控设计	(21)
第一节 地质和工程设计井控内容	(21)
第二节 施工设计井控内容	(22)
复习题	(25)
第四章 井下作业井控技术措施	(26)
第一节 压井工艺	(26)
第二节 注水井放喷降压	(31)
第三节 不压井作业工艺技术	(33)
第四节 作业过程井控	(39)
第五节 井下作业井喷处理	(45)
复习题	(47)
第五章 井控装置	(49)
第一节 井口装置	(49)
第二节 防喷器	(55)
第三节 防喷器控制装置	(73)
第四节 封井器	(81)
第五节 内防喷装置	(86)
第六节 井口加压控制装置	(94)
第七节 节流压井管汇	(98)
复习题	(102)
第六章 防喷演习及井喷失控应急预案	(107)
第一节 防喷演习	(107)
第二节 井喷失控应急预案	(109)
复习题	(122)
第七章 井喷案例	(123)

第八章 井下作业 HSE 基本知识	(130)
第一节 安全用电基本知识	(130)
第二节 防火与防爆	(135)
第三节 压裂酸化作业安全要求	(139)
第四节 井下作业“八防”措施	(141)
第五节 硫化氢防护措施	(143)
第六节 常用现场急救技术	(152)
第七节 常见急症的急救	(154)
复习题	(162)
附录一 中国石油天然气集团公司石油与天然气井下作业井控规定	(166)
附录二 大庆油田井下作业井控技术管理实施细则	(179)
附录三 石油与天然气井下作业井控检查表	(190)
附录四 防喷器及控制装置 防喷器 (SY/T 5053.1—2000)	(198)
附录五 防喷器判废技术条件 (Q/CNPC 41—2001)	(215)
附录六 油井井下作业防喷技术规程 (SY/T 6120—1995)	(217)
附录七 石油与天然气钻井、开发、储运防火防爆安全生产技术规程 (SY/T 5225—2005)	(220)
附录八 含硫化氢的油气生产和天然气处理装置作业的推荐方法 (SY/T 6137—2005)	(248)
附录部分复习题	(291)
复习题参考答案	(294)
参考文献	(309)

第一章 井控的基本知识

第一节 井控的概念

一、井控的概念

井控，有的人叫做井涌控制（Kick Control），还有的人叫做压力控制，各种叫法虽说有些不同，但是本质上是一样的，就是指采取一定的方法控制井内压力，基本保持井内压力平衡，以保证井下作业的顺利进行。总而言之，井控就是实施油气井压力的控制，就是用井眼系统的压力控制地层压力。

井下作业井控内容主要包括井控设计、井控装备、作业过程的井控、防火防爆防污染防硫化氢措施和井喷失控的处理，井控技术培训和井控管理制度等。

井下作业井控技术是保证井下作业安全的关键技术。主要工作是执行设计，利用井控装备、工具，采取相应的措施，快速安全地控制井口，防止发生井涌、井喷、井喷失控和着火事故。

二、井控的分级

根据井涌的规模和采取的控制方法不同，把井下作业井控分为三级，即初级井控（一级井控）、二级井控、三级井控。

初级井控：依靠井内液柱压力来平衡地层压力，使得没有地层流体侵入井筒内，无溢流产生。

二级井控：依靠井内正在使用的压井液不足以控制地层压力，井内压力失衡，地层流体侵入井筒内，出现溢流和井涌，需要及时关闭井口防喷设备，并用合理的压井液恢复井内压力平衡，使之重新达到初级井控状态。

三级井控：发生井喷，失去控制，使用一定的技术和设备恢复对井喷的控制，也就是平常所说的井喷抢险，可能需要灭火、邻近注水井停注等各种技术措施。

一般地说，在井下作业时要力求使一口井经常处于初级井控状态，同时做好一切应急准备，一旦发生溢流、井涌、井喷，能迅速地做出反应加以解决，恢复正常修井作业。

三、与井控有关的概念

1. 井侵

当地层压力大于井底压力时，地层中的流体（油、气、水）侵入井筒液体内，这种现象通常称之为井侵，最常见的井侵为气侵。

2. 溢流

当井侵发生后，地层流体过多地侵入井筒内，使井内流体自行从井筒内溢出，这种现象称之为溢流。

3. 井涌

严重的溢流使井内液体过多地溢出井口，出现的涌出现象称之为井涌。

4. 井喷

地层流体（油、气、水）无控制地涌入井筒，喷出地面的现象称之为井喷。

5. 井喷失控

井喷发生后, 无法用常规方法控制井口而出现敞喷的现象称之为井喷失控, 这是井下作业中的严重事故。

综上所述, 井侵、溢流、井涌、井喷、井喷失控反映了地层压力与井底压力失去平衡后井下和井口所出现的各种现象及事故发展变化的不同严重程度。

第二节 井下各种压力及相互关系

井控问题实际上就是井内压力控制问题, 了解压力的概念及各种压力之间的关系对于掌握井控技术和防止井喷是非常重要的。

一、井下各种压力的概念

1. 压力

压力是指物体单位面积上所受的垂直力。压力的单位是帕, 符号是 Pa。1Pa 是 1m^2 面积上受到 1N (牛顿) 的力时形成的压力, 即 $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。

根据需要, 压力的单位通常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa)。

$1\text{kPa} = 1 \times 10^3 \text{Pa}$, $1\text{MPa} = 1 \times 10^6 \text{Pa}$ 。

2. 静液压力

静液压力是由静止液体重力产生的压力, 其大小取决于液柱密度和垂直高度。

静液压力的计算公式为:

$$p = \rho g H \quad (1-1)$$

式中 p ——静液压力, Pa;

ρ ——液体密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, $g = 9.81\text{m}/\text{s}^2$;

H ——液柱垂直高度, m。

3. 压力梯度

压力梯度指的是单位深度或高度液体所形成的压力, 即每米 (或每百米) 井深压力的变化值。

压力梯度的计算公式为:

$$G = \frac{p}{H} = \rho g \quad (1-2)$$

式中 G ——压力梯度, kPa/m ;

p ——压力, kPa 或 MPa;

H ——深度, m 或 100m;

g ——重力加速度, $g = 9.81\text{m}/\text{s}^2$;

ρ ——液体密度, g/cm^3 。

4. 压力系数

压力系数是指某深度的地层压力与该深度的静水柱压力之比。地层压力系数无单位, 其数值等于平衡该地层压力所需修井液密度的数值。

5. 地层压力

地层压力是地下岩石孔隙内流体的压力, 也称孔隙压力。

地层压力又分为正常地层压力和异常地层压力。

正常地层压力是指地下某一深度的地层压力等于地层流体作用于该处的静液压力，正常地层压力梯度为 $9.8 \sim 10.496 \text{ kPa/m}$ 或压力系数为 $1.0 \sim 1.07$ 。

异常地层压力不同于正常地层压力，它分为异常高压和异常低压。一般情况下，地层压力梯度小于 9.8 kPa/m 或地层压力系数小于 1 的地层即为异常低压；地层压力梯度高于 10.496 kPa/m 或地层压力系数大于 1.07 的地层即为异常高压。

6. 地层压力的表示方法

目前在井下作业现场有四种压力表示方法：

(1) 用压力的具体数值表示地层压力，如： 10 MPa ， 20 MPa 等。

(2) 用地层压力梯度表示地层压力。说到某点的压力时，可直接说该点的压力梯度。

对于某地区来说，由于地层水密度是一定的，所以此地区的正常地层压力梯度是一个固定不变值。正常地层压力梯度能够较直观地表示某地区的正常地层压力。

例 1 某地区 3500 m 以上为正常地层压力，测得地层深度为 2500 m 的地层压力为 26.215 MPa ，求该地区的正常地层压力梯度。

$$\text{解：} G = \frac{p}{H} = \frac{26.215}{2.5} = 10.486 \text{ kPa/m}。$$

例 2 某地区地层水密度为 1.05 g/cm^3 ，求该地区的正常地层压力梯度。

$$\text{解：} G = \rho g = 1.05 \times 9.81 = 10.3 \text{ kPa/m}。$$

在井下作业施工前，如果已经了解本地区的正常地层压力梯度，那么在井下作业过程中，要想知道某地层深度地层压力的具体数值，只要将正常地层压力梯度乘以地层深度即可。

例 3 某地区正常地层压力梯度为 11.8 kPa/m ，当井深为 2 km 时，地层压力为多少？

$$\text{解：} p = GH = 11.8 \times 2 = 23.6 \text{ MPa}。$$

(3) 用流体当量密度表示地层压力。地层压力梯度消除了地层深度的影响，如果同时消除地层深度和重力加速度的影响，那么地层压力便可直接用流体当量密度来表示。这个密度通常称为压井液的当量密度。

因为

$$\rho_0 = \frac{p}{gH}$$

又因为

$$p = \rho g H$$

所以

$$\rho_0 = \frac{\rho g H}{g H} = \rho \quad (1-3)$$

式中 ρ_0 ——压井液的当量密度， g/cm^3 。

由式 (1-3) 可知，正常压井液的当量密度的数值等于形成地层压力的地层水密度。由此，只要知道某地区的地层水密度，就能直接得到正常压井液的当量密度，井下作业人员便可以采用相应的压井液密度实现平衡作业，或者采用比地层流体当量密度略高的压井液密度，实施近平衡修井。由于流体当量密度易与井下作业中所用的压井液密度形成对比，因此用流体当量密度表示地层压力的大小较之地层压力梯度更为直观。

例 4 地层深度为 2 km 时，地层压力为 20.972 MPa ，问地层流体当量密度为多少？

$$\text{解: } \rho_0 = \frac{p}{gH} = \frac{20.972}{9.8 \times 2} = 1.07 \text{ g/cm}^3。$$

由于各地区的地层水矿化度各不相同,有的是淡水,有的是含有不同量各种盐分的盐水,因此,各地区的地层水密度也不相同。所以,各地区的正常地层流体当量密度也各不相同。例如,胜利油田为 1.02 g/cm^3 , 东南亚为 1.03 g/cm^3 , 墨西哥为 1.07 g/cm^3 。

(4) 用地层压力系数表示地层压力。当用地层流体当量密度表示地层压力时,人们在叙述时要说某地区正常地层压力为 1.07 g/cm^3 , 为了叙述方便起见,人们往往把单位去掉,而说某地层压力为 1.07, 这就是地层压力系数。

地层压力系数是指某地层深度的地层压力与该深度处的静水柱压力之比。地层压力系数无单位,其数值等于平衡该地层压力所需压井液密度的数值。

如 2km 深度的地层压力为 20.972 MPa , 相同深度的淡水静液柱压力为 $1 \times 9.8 \times 2 = 19.6 \text{ MPa}$, 则

$$\text{地层压力系数} = \frac{20.972}{19.6} = 1.07 \quad (1-4)$$

在井下作业中谈到地层压力的大小时,上述四种表示方法都可能用到,虽然表示某一点的压力有不同的方法,但意思说的是同一个压力。如 2km 深度的地层压力为 20.972 MPa , 也可以说压力梯度是 10.49 kPa/m , 也可以说当量密度是 1.07 g/cm^3 , 或说压力系数是 1.07。

7. 上覆岩层压力

上覆岩层压力是某深度以上的岩石和其中流体对该深度所形成的压力。地下某一深处的上覆岩层压力就是指该点以上至地面岩石的重力和岩石孔隙内所含流体的重力之总和施加于该点的压力。

上覆岩层压力与地层孔隙压力的关系是:

$$p_o = M + p_p \quad (1-5)$$

式中 p_o ——上覆岩层压力, MPa ;

M ——基体岩石重力, MPa ;

p_p ——地层孔隙压力, MPa 。

上式也可写成:

$$G_o = G_M + G_p \quad (1-6)$$

式中 G_o ——上覆岩层压力梯度, kPa/m ;

G_M ——基体岩石压力梯度, kPa/m ;

G_p ——孔隙压力梯度, kPa/m 。

G_o 一般在 $17.3 \sim 30.1 \text{ kPa/m}$ 之间, 多为 23.1 kPa/m 。

8. 地层破裂压力

地层破裂压力是指使地层岩石发生变形、破碎或裂缝时的压力。破裂压力通常以梯度或密度来表示, 常用单位是 kPa/m 或 g/cm^3 。

破裂梯度一般随井深的增加而增大, 较深部的岩石受着较大的上覆岩层压力, 可压得很致密。

在进行井下作业时, 压井液压力的下限要能够保持与地层压力平衡, 既不污染油气层, 又能实现安全生产, 实现压力控制。而其上限则不应超过地层的破裂压力以避免压裂地层造

成井漏。

9. 井底压力

井底压力是指地面和井内各种压力作用在井底的总压力。

井底压力以井筒液柱静液压力（静液柱压力）为主，还有压井液的环空流动阻力（环空压力损失）、侵入井内的地层流体的压力、激动压力、抽汲压力、地面压力等，这个压力随作业工序不同而变化。

10. 压差

压差是指井底压力和地层压力之间的差值：

$$\Delta p = p_L - p_R \quad (1-7)$$

式中 p_L ——井底压力；

p_R ——地层压力。

当井底压力大于地层压力，即 $\Delta p > 0$ ，称为正压差；当井底压力小于地层压力，即 $\Delta p < 0$ ，称为负压差。正压差通常可称为超平衡，负压差可称为欠平衡。

在作业过程中控制井底压差是十分重要的，井下作业就是在井底压力稍大于地层压力，保持最小井底压差的条件下进行的，既可提高起下管柱速度，又可达到保护油气层的目的。

11. 抽汲压力

上提管柱时，管柱下端因管柱上升而空出一部分环形空间，井内液体应该向下流动而迅速充满这个空间，但由于管柱内外壁与井内液体之间存在有摩擦力，并且井内液体具有一定的粘度，从而对井内液体向下流动产生一定的阻力，不能迅速地充满空出的空间，从而使井底压力降低。

抽汲压力就是由于上提管柱而使井底压力减小的压力。抽汲压力值就是阻挠井内液体向下流动的阻力值。由于抽汲压力的存在，使得井内液体不能及时充满上提管柱时空出来的井眼空间，这样在管柱下端就会对地层中的流体产生抽汲作用，而使地层流体进入井内造成油气水侵。

影响抽汲压力的主要因素：

- (1) 起管柱速度越快，随同管柱一同上行的液体就越多，抽汲压力就越大；
- (2) 井内液体粘度、切力越大，向下流动的阻力就越大，抽汲压力越大；
- (3) 井越深，管柱越长，随管柱一同上行的液体就越多，越不能及时充填空出的井筒空间，因此抽汲压力就越大。

12. 激动压力

下放管柱时，挤压管柱下端的液体向上流动，同样由于井内液体具有一定的粘度与切力，管柱内外部与井内液体之间存在摩擦力，从而对井内液体向上流动产生一定的流动阻力，使井内液体难于向上流动，从而使井底压力增加，形成激动压力。

激动压力就是由于下放管柱而使井底压力增加的压力，激动压力值就是阻挠井内液体向上流动的阻力值。

影响激动压力的主要因素：

- (1) 下放管柱速度越快，下入井内的管柱体积就越多，被挤出的液体就越多，向上流动的速度就越大，引起的流动阻力也越大，激动压力也越大；
- (2) 粘度、切力越大，对井内液体产生的流动阻力也越大，激动压力也越大。

二、井下压力系统的平衡关系

在一口井的各种作业中，始终有压力作用于井底，该压力主要来自于井内流体的静液柱

压力。同时，将井内流体沿环形空间反循环泵送时，所消耗的泵压也作用于井底，这个压力即循环修井液（压井液）时的环形空间压力损失，通常很小。其他还有侵入井内的地层流体的压力、激动压力、抽汲压力、地面回压等。在不同的作业情况下，井底压力是不相同的，简要介绍如下。

(1) 静止状态：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力}$$

(2) 正常循环：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} + \text{环形空间压力损失}$$

如果是反循环，则有：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} + \text{管柱内压力损失}$$

(3) 起管柱时：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} - \text{抽汲压力}$$

如果不及时关修井（压井）液，则有：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} - \text{抽汲压力} - \text{因液面降低减小的压力}$$

(4) 下管柱时：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} + \text{激动压力}$$

(5) 冲砂、钻塞作业时：

$$\text{井底压力} = \text{环形空间阻力} + \text{岩屑或砂粒在修井液中产生的附加压力} + \text{向下送管的激动压力}$$

(6) 发生气涌循环时：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} + \text{环形空间压力损失} + \text{节流阀压力}$$

(7) 溢流关井时：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} + \text{井口回压}$$

或者

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} + \text{套管压力}$$

当井内有气侵时：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力} + \text{井口回压} + \text{气侵附加压力}$$

(8) 用旋转防喷器循环修井（压井）液时：

正循环：

$$\text{井底压力} = \text{油管液柱压力} + \text{井口回压}$$

反循环：

$$\text{井底压力} = \text{环形空间液柱压力} + \text{环形空间阻力} + \text{旋转防喷器回压}$$

(9) 空井时：

$$\text{井底压力} = \text{静液柱压力}$$

从上述几种情况来看，起管柱时，在其他情况相同时的井底压力最小，发生井喷的可能性较大；尤其是起管柱且不及时向井内灌注修井（压井）液的情况最为危险。

复 习 题

一、名词解释

1. 井控

2. 井侵
3. 溢流
4. 井涌
5. 井喷
6. 井喷失控
7. 初级井控
8. 静液压力
9. 地层压力
10. 井底压力

二、填空题

1. 人们根据井涌的规模和采取的控制方法不同，把井控作业分为三级，即（ ）、（ ）和（ ）。
2. 三级井控是指发生井喷，失去控制，使用一定的技术和设备恢复对井喷的控制，也就是平常所说的（ ）。
3. 在井下作业时要力求使一口井经常处于（ ）状态，同时做好一切（ ）准备，一旦发生溢流、井涌、井喷，能迅速的做出反应，加以解决，恢复正常修井作业。
4. 压力系数是指某深度的（ ）与该深度的（ ）之比。
5. 异常地层压力不同于正常地层压力，它分为（ ）和（ ）。
6. 在进行井下作业时，压井液压力的下限要能够保持与（ ）平衡，而其上限则不应超过地层的（ ）以避免压裂地层造成井漏。
7. 井底压力以（ ）为主，其他还有环空流动阻力、抽汲压力、激动压力、地面压力等。
8. 压差是指（ ）和（ ）之间的差值。
9. 抽汲压力就是由于（ ）管柱而使井底压力（ ）的压力。
10. 激动压力就是由于（ ）管柱而使井底压力（ ）的压力。

三、判断题（对的画√，错的画×）

- （ ） 1. 井控工作就是为了防喷，只要井不喷，井控工作就做好了。
- （ ） 2. 正常地层压力是指地下某一深度的地层压力等于地层流体作用于该处的静液压力。
- （ ） 3. 井底压力随作业不同而变化。
- （ ） 4. 井底正压差大则不易发生井喷，因此应保持较大的井底正压差。

四、选择题（每题 4 个选项，只有 1 个是正确的，将正确的选项填入括号内）

1. （ ）反映了地层压力与井底压力失去平衡后井下和井口所依次出现的各种现象及事故发展变化的不同严重程度。
 - (A) 井侵 溢流 井涌 井喷 井喷失控
 - (B) 溢流 井侵 井涌 井喷 井喷失控
 - (C) 井涌 井侵 溢流 井喷 井喷失控
 - (D) 井喷 井侵 溢流 井涌 井喷失控
2. 压力的单位名称是帕，符号是（ ）。

- (A) Pa (B) Pb (C) T (D) Ta

3. 1MPa 等于 () Pa。

(A) 10^2

(B) 10^4

(C) 10^6

(D) 10^8

4. 静液压力的大小取决于 ()。

(A) 液柱粘度和高度

(B) 液柱密度和粘度

(C) 液柱密度和高度

(D) 液柱密度和垂直高度

5. () 井底压力等于井筒液柱静液压力。

(A) 循环时

(B) 起管柱时

(C) 下管柱时

(D) 空井时

6. 在井底压力 () 地层压力条件下的修井过程为近平衡修井。

(A) 小于

(B) 等于

(C) 稍大于

(D) 大于

五、简答题

1. 地层压力的表示方法有哪几种?

第二章 井涌井喷机理及分析

井下作业井喷失控是施工过程中的一种严重工程事故。在井下作业施工过程中,由于预防措施不当,补救工作不及时,往往会造成严重井喷或无控制井喷。严重井喷或无控制井喷之后,轻者可造成油气资源浪费,环境污染,地层压力下降,生产能力降低;重者可导致全井报废或对整个油气田的严重破坏,给国家财产和人民的生命安全带来重大损失。因此,为防止井喷失控现象的发生,有必要了解和掌握井涌井喷机理,以便采取相应的技术措施。

第一节 井侵的特点

在井下作业过程中,如果措施不当,会使井底压力小于地层压力,造成油、气、水侵入井筒内液体中的现象,即造成井侵。井侵主要有油侵、水侵和气侵,油侵和水侵没有气侵那样危险。由于气体密度比压井液的密度低得多,因此,压井液中的气体总有一个向上运移的趋势,不管是关井或开井,气体运移总是可以发生的;另外气体是可以压缩的,体积随压力的变化而变化,因此这更增加了井控工作的复杂性。为了更好地控制气侵,防止井喷,本节重点讲述气侵的特点。

一、井侵的方式

(1) 在井下作业过程中,地层孔隙中的石油、天然气、盐水或淡水会不断地释放出来而侵入井内的液体中。侵入井内液体中的油、气、水量与岩石的孔隙度和时间长短有关。如果油、气、水层薄,岩石孔隙度小,时间短,就不会有多少油、气、水侵入井筒内液体中,反之就会有较多的油、气、水侵入井筒内液体中。少量的天然气以小气泡的形式混在井筒内液体中,少量的石油、盐水或淡水以小油滴、小水滴的形式混在井筒内液体中。

(2) 在井下作业过程中,气层中的天然气会向井筒内的液体中扩散。侵入井内的天然气量与裸露气层的表面积有关。射开气层较小,只会有一些小气泡侵入井中;当射开气层较多,层位较厚时,就会有一些大气泡侵入井中。如果起下管柱等作业导致井内压井液停止时间较长,就会有許多天然气扩散到井内,在井底积聚成气柱。

(3) 在井下作业过程中,如果压井液静液压力接近地层压力时,在起管柱的过程中,就会造成井底压力低于地层压力的现象,这时,天然气会大量侵入井内,形成气柱,油水也会大量侵入井内与井内上返压井液不断混合,形成较多的油迹。较多的盐水侵会使压井液起泡,粘度、切力增加,导致流动困难。

二、天然气泡侵

1. 天然气泡侵入井内的特点

(1) 天然气泡向上运移。天然气以微小气泡形式侵入井底后,会因其密度小于压井液密度而与压井液发生重力置换,而在压井液中逐渐滑脱上升运移,就像潜水员呼出的气泡向上运动一样。

(2) 天然气泡向上运移时体积膨胀。天然气泡在井底时,受到整个井筒的压井液液柱的

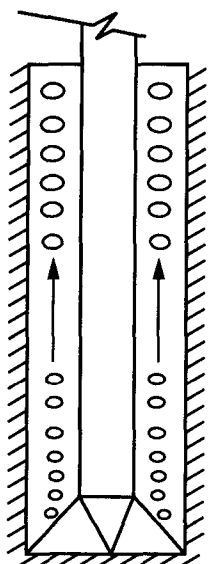


图 2—1 天然气泡在井内上升的特点

压力，气泡的体积是很小的，对压井液密度的影响也较小。在气泡滑脱上升的过程中，气泡上面的压井液液柱高度越来越小。这样气泡所受到的压井液液柱的压力就越来越小，由于天然气泡的体积与其所承受的压力成反比，这样就引起了气泡的体积逐渐膨胀。如图 2—1 所示，这就像我们刚打开汽水瓶那样，气泡在瓶底体积很小，而越向上升，气泡体积就越大。当气泡向上至接近地面时，气泡体积膨胀到最大。

2. 天然气泡侵入井内后的注意事项

(1) 天然气以气泡形式侵入压井液后，压井液的密度随井深自下而上逐渐变小。因此，我们从返至地面池中的压井液测得的压井液密度不是整个井眼的压井液密度，不能用其计算环空的压井液液柱的压力或井底压力。

(2) 压井液气侵后，短时间一般不会使井底压力小于地层压力，但必须及时除气，保证泵入井内的压井液密度始终为原浆密度。如果不及及时除气，气侵的压井液就会被重新泵入井内，使井底压力进一步减小，导致井底压力小于地层压力，使地层中的天然气大量侵入井内，引起井喷。

(3) 在浅气井作业时，气侵使井底压力的减小程度比深井大。其原因是井浅时，侵入井内的气体所受到的压井液液柱压力小。气泡体积大，随着气泡向上运移，气泡会越来越大，这种增大趋势比深井快，这就使浅井气侵后的平均压井液密度比深井小，因而容易降低井底压力，使井底压力小于地层压力，较快地造成溢流与外溢。因此，在浅气井作业时，应密切注视压井液地面的气泡现象，必要时及时停止施工，观察溢流情况或关井观察套管压力，根据井口压力情况进行压井或除气等工作。

三、天然气柱侵

1. 天然气柱侵的特点

由于各种原因而较长时间停泵时，侵入井底的气体往往不是均匀分布，而是产生积聚现象，形成气柱。天然气柱侵与天然气泡侵一样具有向上运移和体积膨胀两个特点。天然气柱上升到井深的一半，气柱所受到的压井液液柱压力就减小一半，气柱体积就增加一倍，当气柱再向上运移一半，气柱体积又增加一倍。每上升到余下路程的一半，气柱体积就增加一倍，当气柱接近地面时，气柱体积增加到最大。如图 2—2 所示。

气柱的上升膨胀，会使接近井口处的压井液排出地面，排出的压井液体积等于气柱膨胀的体积。气柱在井底时，气柱体积小，被排出的压井液体积小，可能使人们检测不出来。随着气柱的逐渐上升膨胀，被排出的压井液体积就越来越大，溢流流速会越来越快，当气柱快升至地面时，被排出的压井液体积会迅速增加，溢流流速会大大增加。

2. 天然气柱侵入井内后的注意事项

(1) 气柱在井底或者在井的深部时，对井底压力影响甚微，可以忽略。但是，随着气柱的上升膨胀，井底压力会逐渐减小；当气柱上升到一定高度时，井底压力就会小于地层压力，使井底又发生更大的气侵；当气柱快升到井口时，气柱的膨胀力就会大于气柱上面的压井液液柱压力。这时，膨胀的气柱就会推动其上面的压井液自动外溢。发生压井液自动外溢后，气柱上面的压井液将会很快地全部溢完，造成井喷。