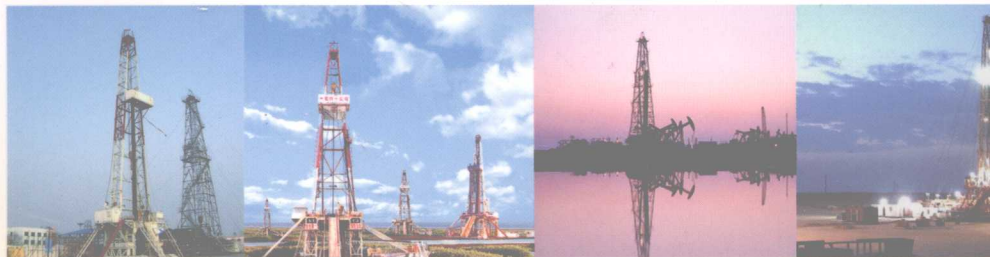


中国石油化工集团公司井控培训教材



# 钻井井控工艺技术

集团公司井控培训教材编写组 编

中国石油大学出版社

中国石油化工集团公司井控培训教材

# 钻井井控工艺技术

集团公司井控培训教材编写组 编

Z U A N J I N G J I N G K O N G G O N G Y I J I S H U

中国石油大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

钻井井控工艺技术/集团公司井控培训教材编写组编.  
东营:中国石油大学出版社,2008.7

中国石油化工集团公司井控培训教材

ISBN 978-7-5636-2605-2

I. 钻… II. 集… III. 井控技术—技术培训—教材  
IV. TE28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 099631 号

**丛 书 名:** 中国石油化工集团公司井控培训教材

**书 名:** 钻井井控工艺技术

**作 者:** 集团公司井控培训教材编写组

---

**责任编辑:** 何 峰(电话 0546—8395779,7816911)

**封面设计:** 九天设计(电话 0546—8773275)

---

**出 版 者:** 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

**网 址:** <http://www.uppbook.com.cn>

**电子信箱:** sanbianshao@126.com

**印 刷 者:** 山东新华印刷厂德州厂

**发 行 者:** 中国石油大学出版社(电话 0546—8392565,8399580)

**开 本:** 185×260 印张:18.5 字数:438 千字

**版 次:** 2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

**定 价:** 36.00 元

# 集团公司井控培训教材编写组

|       |           |     |     |     |     |
|-------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 组 长   | 雍自强       |     |     |     |     |
| 副 组 长 | 赵金洲       | 孙清德 | 唐大鹏 | 戴 靖 | 何开平 |
|       | 徐 进       | 王程忠 | 陈网根 | 刘 刚 |     |
| 成 员   | (按姓氏笔画排序) |     |     |     |     |
|       | 王齐华       | 王学良 | 牛建新 | 牛新民 | 卢 永 |
|       | 叶金龙       | 朱澄清 | 刘宝书 | 刘宪春 | 许银龙 |
|       | 孙启忠       | 李文生 | 李占英 | 李国卿 | 李孟杰 |
|       | 肖春鸿       | 何惟国 | 汪金卢 | 汪海松 | 张之悦 |
|       | 张礼峰       | 张志良 | 张桂林 | 陈 旭 | 陈薇芬 |
|       | 苗锡庆       | 范喜群 | 林雍森 | 明柱平 | 罗开林 |
|       | 罗裕强       | 胡群爱 | 徐德安 | 黄廷胜 | 颜廷杰 |
|       | 薛建国       | 魏文忠 |     |     |     |

## PREFACE 序

井控是石油天然气勘探开发业务中安全工作的重点。一旦发生井喷,轻者会使井下情况复杂化,对油气资源造成损害;重者会导致井喷失控,使油气资源受到严重的破坏,易酿成火灾,造成人员伤亡、设备毁坏、油气井报废,使自然环境受到污染,直接危及企业和国家的形象。做好井控工作,防止井喷,尤其是防止井喷失控事故的发生,事关人民群众和现场施工人员的生命安全,事关构建和谐社会的大局。井控工作搞好了,既能够避免发生重特大井喷事故,又能够确保取得预期的油气成果,提高经济效益。

为了提高井控培训效果,集团公司油田经营管理部牵头组织有关部门、院校、油田企业井控专家,在现有井控培训教材的基础上,结合当前井控新标准、新装备、新技术、新理论和施工中遇到的高压、高含硫化氢、易喷、易漏等难题,编写了这套集团公司井控培训专用教材,本教材可满足钻井、作业、测录井等不同专业以及设计、管理、技术、操作、维修等不同岗位人员对井控培训的需要,也可作为从事井筒工作人员的自学用书。

希望广大干部职工认真学习,在井控工作中坚持“以人为本”的科学发展观,认真贯彻“安全第一,预防为主,综合治理”的方针,不断提高井控意识和技能,全面做好井控安全工作。

中国石油化工集团公司党组成员、副总经理

張 斌

2008年7月8日



# 前言

井控技术是石油与天然气勘探开发技术的一个重要组成部分,已经有越来越多的人认识到,为了安全优质地实施快速钻井,必须把井控技术作为研究和发展的主要内容,特别是近几年,随着国家对安全生产工作的日益重视,石油行业各部门也把井控工作放在了一个前所未有的高度。井控工作已深入到石油勘探开发生产的各个领域,特别是钻井和井下作业,更是把井控工作放在首要位置。在这种背景下,为了进一步搞好井控培训工作,中国石油化工集团公司油田经营管理部组织编写了《钻井井控工艺技术》、《钻井井控设备》和《井下作业井控技术》这套集团公司井控培训专用教材。

《钻井井控工艺技术》由中国石油大学周广陈、集团公司油田经营管理部李占英、胜利石油管理局张桂林、张之悦负责统编和审核。其中第一章、第二章由李占英、张雪艳编写,第三章由张之悦编写,第四章由张桂林编写,第五章、第七章由田利英编写,第六章由胡晓芬编写,第八章由刘德禧编写,第九章由张礼峰编写,第十章由王瑞娥编写,第十一章由卢永编写,第十二章由张桂林、罗裕强编写,第十三章由刘刚编写,第十四章由冯化君编写,附录由陈旭编写。

在本书的编写过程中,得到了集团公司、胜利、中原、江汉、河南、江苏、华东、西南、西北、华北等油气田的领导、专家和工程技术人员的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!

由于时间仓促,水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2008年7月

# Contents

## 钻井井控工艺技术

### 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第一章 概 论 .....              | 1   |
| 第一节 井控及其相关的概念 .....        | 1   |
| 第二节 井喷的危害 .....            | 2   |
| 第二章 井下各种压力的概念 .....        | 5   |
| 第三章 地层压力预测和检测 .....        | 14  |
| 第一节 地层压力和异常地层压力形成的机理 ..... | 14  |
| 第二节 地层压力的预测与检测 .....       | 19  |
| 第三节 地层破裂压力 .....           | 33  |
| 第四章 井控设计 .....             | 43  |
| 第一节 井控设计的依据 .....          | 43  |
| 第二节 井控设计应考虑的因素 .....       | 46  |
| 第三节 设计内容 .....             | 50  |
| 第五章 溢流的原因、检测与预防 .....      | 61  |
| 第一节 溢流的原因 .....            | 61  |
| 第二节 溢流的现象与检测 .....         | 63  |
| 第三节 溢流的预防 .....            | 65  |
| 第六章 关井程序 .....             | 70  |
| 第一节 关井方法 .....             | 70  |
| 第二节 常规关井程序 .....           | 72  |
| 第三节 特殊情况下的关井程序 .....       | 75  |
| 第七章 气侵对井内压力的影响 .....       | 83  |
| 第一节 气体的来源及特性 .....         | 83  |
| 第二节 气体溢流对井内压力的影响 .....     | 84  |
| 第八章 溢流控制原理 .....           | 92  |
| 第一节 U形管原理 .....            | 92  |
| 第二节 井底常压原理 .....           | 95  |
| 第三节 关井允许的最大套管压力 .....      | 96  |
| 第四节 关井立管压力 .....           | 100 |
| 第五节 钻井液密度的确定 .....         | 102 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 第九章 常规压井法 .....                             | 107 |
| 第一节 常规压井法的优点和基本原则 .....                     | 107 |
| 第二节 常规压井法的工作程序 .....                        | 108 |
| 第三节 压井作业中应注意的问题 .....                       | 120 |
| 第四节 井控作业中容易出现的错误做法 .....                    | 123 |
| 第十章 非常规井控技术 .....                           | 127 |
| 第一节 立管压力法 .....                             | 127 |
| 第二节 体积控制法 .....                             | 128 |
| 第三节 硬顶法(平推法)压井 .....                        | 131 |
| 第四节 钻柱离开井底压井 .....                          | 135 |
| 第五节 低节流压井法 .....                            | 136 |
| 第十一章 特殊控制与操作 .....                          | 139 |
| 第一节 浅层气的处理 .....                            | 139 |
| 第二节 井漏或地下井喷 .....                           | 142 |
| 第三节 强行起下钻操作 .....                           | 146 |
| 第四节 欠平衡钻井井控技术 .....                         | 152 |
| 第五节 小井眼钻井井控技术 .....                         | 155 |
| 第十二章 完井(中测)期间井控技术 .....                     | 162 |
| 第一节 测井作业井控工作 .....                          | 162 |
| 第二节 固井施工中的井控工作 .....                        | 168 |
| 第三节 测试施工中的井控工作 .....                        | 169 |
| 第十三章 海洋钻井井控技术 .....                         | 171 |
| 第一节 钻表层井眼 .....                             | 171 |
| 第二节 深水井控 .....                              | 179 |
| 第三节 海洋钻井井控特点及程序 .....                       | 182 |
| 第十四章 井喷失控后的处理 .....                         | 189 |
| 第一节 井喷失控处理的基本做法 .....                       | 189 |
| 第二节 定向救援井技术 .....                           | 194 |
| 第三节 井喷失控井的处理实例 .....                        | 200 |
| 附录一 钻井井控技术规程(SY/T 6426—2005) .....          | 204 |
| 附录二 钻井井控装置组合配套安装调试与维护(SY/T 5964—2006) ..... | 233 |
| 附录三 含硫化氢油气井安全钻井推荐做法(SY/T 5087—2005) .....   | 256 |
| 附录四 石油与天然气井井控管理规定 .....                     | 273 |
| 附录五 常用单位换算 .....                            | 281 |
| 参考文献 .....                                  | 286 |

# 第 1 章

## 概 论

Chapter One

随着油气勘探开发领域的不断延伸和扩大,钻井难度越来越大,对井控技术和钻井相关人员的要求也越来越高。在钻井新技术得到广泛应用和钻井总体技术水平日益提高的今天,人们已充分认识到:对付复杂地层、安全优质钻井,必须要把井控技术作为研究和发展的主要内容。只有油气井的控制技术发展了,人们的井控意识、管理水平和技术素质提高了,才能有效地实施近平衡压力、欠平衡压力钻井,才能最大限度地发现油气层,保护和解放油气层。也就是说,井控技术是实施近平衡钻井和欠平衡钻井作业的关键和保障。

### 第一节 井控及其相关的概念

#### 1. 井控(well control)

井控是实施油气井压力控制的简称。在国外,有的叫井涌控制,还有的叫压力控制,各种叫法本质上是一样的。在钻井过程中,只有采取一定的方法控制住地层孔隙压力,保持井内压力平衡,才能保证钻井顺利进行。

#### 2. 井侵(influx)

当地层孔隙压力大于井底压力时,地层孔隙中的流体(油、气、水)将侵入井内,这种现象通常称为井侵。

#### 3. 溢流(overflow)

井侵发生后,井口返出的钻井液量大于泵入液量,停泵后井口钻井液自动外溢,这种现象称为溢流。

#### 4. 井涌(well kick)

溢流进一步发展,钻井液涌出井口的现象称为井涌。

#### 5. 井喷(well blowout)

地层流体(油、气、水)无控制地流入井内并喷出地面的现象称为井喷。根据井喷流体喷出位置的不同,井喷分为地面井喷和地下井喷。

(1) 地面井喷:井喷流体经井筒喷出地面的现象,称为地面井喷。

(2) 地下井喷:井喷流体经井筒流入其他低压地层的现象,称为地下井喷。

#### 6. 井喷失控(out of control for blowout)

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为井喷失控。井喷失控是钻井过程中最恶性的事故之一。从井侵到井喷失控,反映了地层压力与井底压力平衡的不同程度,是二者不同平衡关系在井口出现的现象。

### 7. 井控的三个阶段

根据井控内容和控制地层压力程度的不同,井控作业通常分为三个阶段或三级,即一级井控、二级井控和三级井控。

(1) 一级井控(也称初级井控):是指正常钻进和钻进高压油气层时,利用井内钻井液柱压力控制地层压力的方法,即无溢流产生的井控技术。一级井控工作是钻井过程中井控工作的基础。

(2) 二级井控:是指溢流或井喷发生后,通过实施关井与压井,重新建立井内压力平衡的工艺技术。这是钻井井控工作的关键,也是目前培训钻井人员掌握井控技术的重点。

(3) 三级井控:井喷失控后,重新恢复对井口控制的井控技术。

钻井过程中要力求使一口井处于一级井控状态;同时,应做好一切应急准备,一旦发生井涌或井喷能迅速地进行控制、处理,并恢复正常钻井作业。在钻井过程中,如果地层压力与井眼系统压力失去平衡,一般可通过一级井控(即调整钻井液密度)和二级井控(即使用井控设备),就能够有效地减少井下复杂情况和故障(井喷、井漏、卡钻等)的发生,实现安全快速钻井。因此,科学地把握和运用井控技术,对于安全快速钻井、提高钻井工程质量和经济效益,具有十分重要的意义。

### 8. 井控工作中的“三早”

井控工作中的“三早”就是早发现,早关井,早处理。

(1) 早发现:溢流被发现得越早,就越便于关井控制,因此也越安全。国内现场一般将溢流量控制在  $1\sim 2\text{ m}^3$  之内。早发现是安全、顺利关井的前提。

(2) 早关井:在发现溢流或怀疑有溢流(预兆不明显)时,应停止钻井作业,并立即按关井程序关井。

(3) 早处理:在准确录取关井数据和填写压井施工单后,应尽快节流循环,排出溢流,进行压井作业。

## 第二节 井喷的危害

在石油天然气勘探开发过程中,地层流体(油、气、水)一旦失去控制地进入井内,就会导致井喷或井喷失控,使井下情况复杂化,无法进行正常作业。天然气井,尤其是在含硫化氢的天然气井井喷过程中,如果处理方法和措施不当,极易引起井喷失控着火、井场爆炸、井场下陷等灾难性事故,甚至会危及周围群众生命财产安全,给国家、企业造成重大经济损失和不良社会影响。

“一五”到“八五”期间,全国共钻各类油气井 160 398 口。据不完全统计,累计发生井喷失控的井有 271 口,占完成井的 0.16%,其中井喷失控后又着火的井 81 口,占井喷失控井的 30%,因井喷失控着火烧毁钻机和井喷后地层塌陷埋掉钻机的井共 61 口。

另据统计,1994—2003 年,我国陆上共有 15 口井发生严重钻井井喷失控(着火)事故。通过对这 15 口井的数据分析可以看出:① 有 7 口井是在排除溢流压井过程中失控着火,占 47%。② 有 2 口井以喷油主,其余均是气井或以气为主的井,占 86%。③ 有 2 口高含  $\text{H}_2\text{S}$

井,占13%。④井喷失控后着火的井有7口,占47%。⑤有6口井是在起下钻中发现溢流,占40%。⑥钻井过程中严重井喷失控的井,大多数集中在以天然气勘探为主的油田。如1998年辽河油田的前28-更22井,1996年新疆的G2071井,2001年新疆的迪那2井,2003年重庆开县的罗家16H井等,这些井都是高压气井。井喷事故的发生会直接影响钻井施工期间作业人员、钻井设备和油气资源的安全,不仅会带来重大的经济损失,还会造成严重的环境污染和不良的社会影响。

大量的井喷事实告诉我们,井喷是钻井工程中性质严重、损失巨大的灾难性事故。其危害可概括为以下几个方面:

(1) 打乱正常工作秩序,影响全局生产。

一旦井喷失控,应立即启动井控应急预案,成立相应的指挥组、技术组、保障组等应急机构全面组织、指挥抢险工作。油气田的主要领导需进行组织、指挥工作。必要时还需兄弟油田、地方政府的支援,以及动用消防车辆,组织抢险队伍等。

(2) 使钻井事故复杂化、恶性化。

井喷发生后,井下压力平衡关系被彻底打破,井眼压力状况发生了显著变化,井壁被冲刷失去稳定,井眼扩大,易造成卡钻。井喷流体既会喷出地面,又会漏入低压地层,造成既喷又漏又卡钻的复杂局面等。

(3) 井喷失控极易引起火灾和地层塌陷,造成环境污染。

钻井过程中,若技术套管下入深度没有封隔住破碎易漏地层,则会发生井喷流体憋破地表、造成地面下陷、环境污染等重大问题。同时,流体喷出地面,将严重污染地表环境与浅层水资源等。若存在 $H_2S$ ,则易发生人员中毒等重大伤亡事故。

根据已有资料分析,井喷失控时未着火,特别是天然气井未着火的情况比较少见。井喷失控着火后,要使井得到控制非常困难。比如在天然气井钻井过程中,发生溢流关井后,整个井筒实际上是一个密闭的容器,井筒内的天然气体积不能发生变化。当地层天然气到达井口时,会造成井口压力过高,接近井底地层孔隙压力。有时,这个井口压力会接近或超过井口的控制能力。过高的井口压力再加上井内液柱压力,是关井过程中造成井漏和地下井喷的直接原因,也是排除溢流压井过程中造成井口刺漏、井口套管憋爆等失控着火的直接原因。1998年2月22日,四川石油管理局温泉4井钻到1869m时发生溢流,因没有考虑封隔煤层,关井后在准备压井和用钻井液堵漏过程中,造成地下井喷,使含 $H_2S$ 的天然气通过煤层裂隙窜入四川开江县翰田坝煤矿和乡镇煤矿的矿井里,导致两个煤窑及一个煤窑风洞着火,致使在煤矿内作业的采煤工人死亡11人,中毒13人,烧伤1人。

(4) 损害油气层,破坏油气资源。

井喷将造成油气储量的损失,严重的能导致储量枯竭或产层生产能力破坏,使油气层不再具有工业开采价值。

苏门答腊的一口失控井,用了3个月才得到控制,储量损失超过 $4.5 \times 10^9 \text{ ft}^3/\text{d}$ 。1958年,我国四川长桓坝气田嘉陵江组气藏井喷,气量超过 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,损失天然气达4.61亿立方米,占该气田总储量的62%,致使该气田几乎失去了开采价值。

(5) 造成钻机设备毁坏、陷落。

钻井设备可能毁于大火,也可能为陷坑吞没。

1986年5月5日,胜利油田孤东试7井起钻时发生强烈井喷,20 min后井架底座开始下沉,使大部分设备陷入方圆30多米的大坑内。1989年1月青海油田台南2井取心起钻途中发生溢流,由于操作不当,防喷器未能关住井(岩心筒直径 $\phi 177.8$  mm,而防喷器闸板芯子内径 $\phi 139.7$  mm),发生严重井喷,大量气流、泥沙喷出,把井口的岩心筒及 $\phi 158.75$  mm钻铤、转盘一起顶出12 m高,并将转盘挂在井架大腿拉筋上。3 min后二层台起火。虽然抢关防喷器将火扑灭,但由于压力过大,将防喷器内阀门芯子憋断,造成1人当场死亡,9人受伤。两天后防喷器被刺坏,喷出大量气流和泥沙,喷柱高达50~70 m。该井经过40多天的抢险工作,利用间歇停喷时机抢注水泥封堵成功,但经济损失严重,井架底座、游动滑车、大钩、水龙头、转盘、全套液压防喷器及节流管汇、两台振动筛、岩心筒、钻铤等报废,造成机毁人亡、全井报废。

(6) 涉及面广,影响周围安全,造成不良的社会影响等。

2003年12月23日,位于重庆开县高桥镇的罗家16H井发生的特大井喷失控事故,震惊中外。该井是富含硫水平井,由于含 $H_2S$ 天然气的大量溢出,未能及时点火,造成井场周围居民和井队职工共243人死亡,赔偿金额共计3300万元,遇难家庭190户,10175人入院观察治疗,约6万人星夜紧急疏散,直接经济损失2.6亿元。

几十年来,在不断积累经验、吸取教训的过程中,井控工作有了很大进步。但是,随着勘探开发风险的增加,井控工作又面临着越来越严峻的考验。比如,随着深井、天然气井、含硫天然气井的开发比重的增加,又给井控工作提出了新的要求。在气井勘探开发中,由于天然气密度小、可压缩、易膨胀、易爆炸燃烧,气井比油井就更易造成井喷或井喷失控,甚至着火。

总之,“井喷失控是钻井工程中性质严重、损失巨大的灾难性事故”,这一结论是用鲜血、生命和财产损失换来的。为此,必须牢固树立全员井控意识,深刻认识井喷失控的危害,把杜绝井喷失控作为安全的头等大事来抓。要全面提高钻井作业人员的素质,培养高素质井控技术队伍。只有了解和掌握正确、合理的压井处理方法和步骤,坚持平衡钻井和平衡压井,才能安全、成功地控制井喷,从而恢复正常钻井或完井作业。

## 复习思考题

1. 基本概念:井控、溢流、井喷、地下井喷。
2. 怎样划分井控级别?什么是一级井控、二级井控、三级井控?
3. 简述井喷失控的危害。
4. 联系实际分析怎样才能做好井控工作。
5. 作为钻井工人,你应重点掌握哪些井控知识与技能?

## 第 2 章

Chapter Two

# 井下各种压力的概念

压力是井控最主要的基本概念之一。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十分必要的。油气井压力控制的主要任务表现在两个方面:一是通过控制钻井液密度使钻井在合适的井底压力与地层压力之差下进行;二是在地层流体侵入井筒后,通过调整合理的钻井液密度及控制井口压力,将侵入井眼与钻具间环空内的地层流体排出,并建立新的井底压力与地层压力平衡。

### 压力

石油工业中,常用压力表示物体单位面积上所受的垂直力,即物理学上的压强。因此,压力与力、面积有关。

例如,一段圆柱体放在桌面上,其作用在桌面上的力等于它的重量,这个力作用到桌面上,方向向下。因为没有运动,桌子在反方向给其以相等的力,如图 2-1 所示。此种情况下,压力的大小取决于该圆柱体的底面积和其重量的大小,压力值就是底面积去除其重量所得的商。

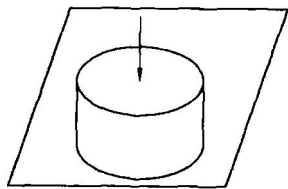


图 2-1 圆柱作用下的压力

$$p = F/S \quad (2-1)$$

式中  $p$ ——压力,Pa;  
 $F$ ——垂直力,N;  
 $S$ ——面积,m<sup>2</sup>。

压力的单位是帕,符号是 Pa。1 Pa 就是 1 m<sup>2</sup> 面积上受到 1 N 的力时所形成的压力。  
即  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$

根据需要,工作中也常用千帕(kPa)或兆帕(MPa)表示压力。

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

它们与工程大气压的换算关系是:

$$1 \text{ MPa} = 10.194 \text{ kgf/cm}^2$$

或  $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$

粗略计算时,可认为:

$$1 \text{ kgf/cm}^2 \approx 100 \text{ kPa} = 0.1 \text{ MPa}$$

其误差约为 2%。

在英制中,压力是以每平方英寸面积上受多少磅的力来衡量的,单位符号是 psi,换算关系是:

$$1 \text{ psi} \approx 6.895 \text{ kPa} = 0.006895 \text{ MPa}$$

通常换算方法是:

$$1\,000\text{ psi} \approx 7\text{ MPa}$$

井控中的压力是由液体、气体或液体与气体共同产生的,但压力的概念是一样的。

## 静液压力

静液压力是由静止液体的重力产生的压力。我们常见到的油、水通常情况下为液体,而天然气则是气体(或蒸气)。为了简单起见,我们仅讨论液体的静液压力,如图 2-2 所示。

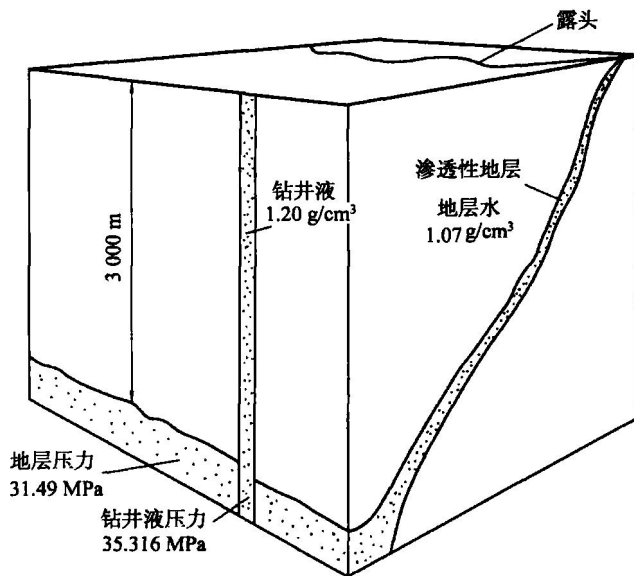


图 2-2 钻井液静液压力和地层压力

静液压力是液体密度和液柱垂直高度的函数,其大小取决于液体密度和液柱的垂直高度。若液柱为圆柱体,其高度为  $H$ ,底面积为  $A$ ,密度为  $\rho$ ,则重量应为  $\rho g A H$ ,按压力的定义:

$$p = \rho g A H / A = \rho g H$$

可以看出,静液压力只与液体密度和液柱垂直高度有关。

静液压力的计算同样可以用计算圆柱体的压力的方法计算:

$$p_H = 10^{-3} \rho g H \quad (2-2)$$

式中  $p_H$ ——静液压力,MPa;

$g$ ——重力加速度,9.81 m/s<sup>2</sup>;

$\rho$ ——液体密度, g/cm<sup>3</sup>;

$H$ ——液柱高度,m。

例 2-1 已知清水的密度为 1.00 g/cm<sup>3</sup>,求作用于游泳池内 3 m 深处的静液压力。

解:  $p_H = 10^{-3} \rho g H = 10^{-3} \times 1.00 \times 9.81 \times 3 = 0.029\,43\text{ (MPa)}$

这个概念同样适用于井内钻井液。其公式为:

$$p_m = 10^{-3} \rho g H \quad (2-3)$$

式中  $p_m$ ——钻井液静液压力,MPa;

$\rho_m$ ——钻井液密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$H$ ——钻井液柱高度,  $\text{m}$ 。

**例 2-2** 如图 2-2 所示, 井内钻井液的密度为  $1.20 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 地层水的密度为  $1.07 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 求  $3\,000 \text{ m}$  处的静液压力及地层孔隙内流体的压力。

**解:** 钻井液静液压力:

$$p_m = 10^{-3} \rho_m g H = 10^{-3} \times 1.20 \times 9.81 \times 3\,000 = 35.316 (\text{MPa})$$

地层孔隙内流体的压力:

$$p_p = 10^{-3} \rho_p g H = 10^{-3} \times 1.07 \times 9.81 \times 3\,000 = 31.49 (\text{MPa})$$

若是定向井, 井深必须用垂直井深, 而不是测量井深(或钻柱的长度)。另外, 静液压力仅取决于流体的密度和液柱的垂直高度, 与井眼尺寸无关。

图 2-3 给出了几种情况下的井底静液压力。

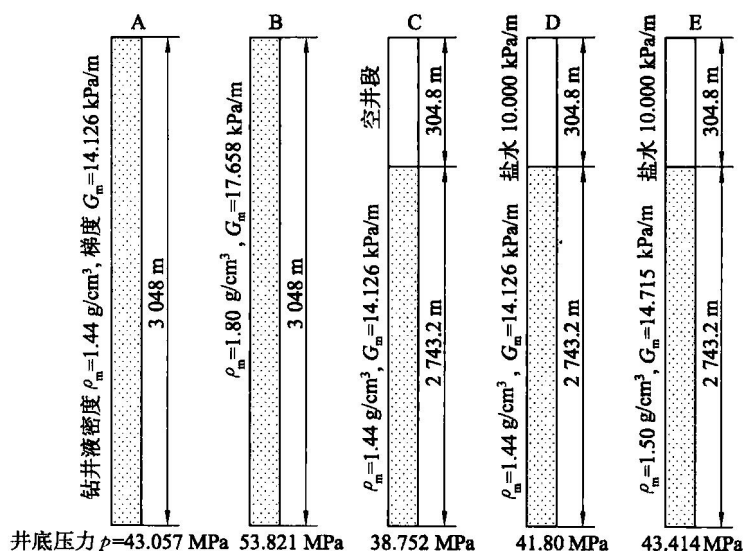


图 2-3 井底静液压力

## 地层压力

地层压力是指地层孔隙中流体所具有的压力, 也称地层孔隙压力。正常情况下, 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, 这个压力就是由某深度以上地层流体静液压力所形成的。即正常地层压力表达式为:

$$p_p = p_H = 10^{-3} \rho_n g H \quad (2-4)$$

式中  $p_p$ ——正常地层压力,  $\text{MPa}$ ;

$p_H$ ——地层流体静液压力,  $\text{MPa}$ ;

$H$ ——地层垂直高度,  $\text{m}$ ;

$\rho_n$ ——地层流体密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$  (取决于地层水的矿化度, 其正常变化范围为  $1.00 \sim 1.07 \text{ g}/\text{cm}^3$ )。

若地层水为淡水, 其密度为  $1.00 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。若地层水为盐水, 其密度则随地层水含盐量的变化而变化, 一般约为  $1.07 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。石油钻井中遇到的地层水多数为盐水。

### 1. 正常地层压力

盐水是常见的地层流体,密度大约为  $1.07 \text{ g/cm}^3$ ,换算成地层压力梯度大约是  $10.496 \text{ kPa/m}$ 。在正常压力梯度范围内,将深度乘以  $10.496 \text{ kPa/m}$  即可求得含盐水地层中的压力。在我国正常地层压力的范围是  $9.8 \sim 10.496 \text{ kPa/m}$  或  $1.0 \sim 1.07 \text{ g/cm}^3$ 。地层中某点的正常地层压力等于该点地层水的静液压力,其表达式见公式(2-4)。所有静液压力计算用的深度都是垂直深度,所以对斜井必须用其垂直井深。

### 2. 异常高压和异常低压

地层压力正常或者接近正常静液压力,则地层内的流体应一直与地面连通。但这种流体通常被封闭层或断层截断。在这种情况下,隔层下部的流体必须支撑上部岩层。岩层重于地层水,所以地层压力超过静液压力。我们称这种地层为异常高压地层或超压地层。即地层压力大于正常压力梯度时,称为异常高压,如图 2-4 所示。我国大部分油田,世界大部分沉积盆地都有异常高压存在。反之,地层压力小于正常地层压力梯度时,称为异常低压。这种情况通常发生于衰竭的产层和大孔隙的老地层。

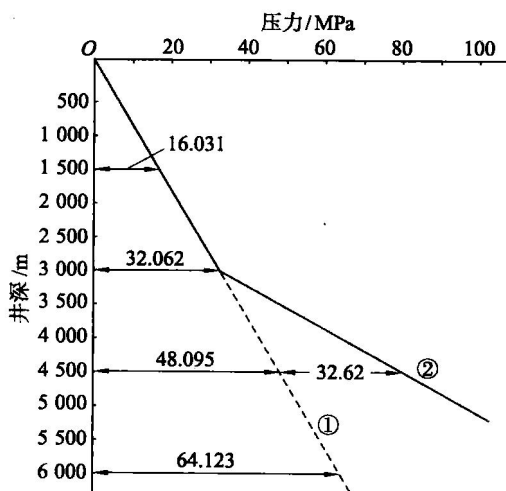


图 2-4 砂岩层的正常和异常压力

①—正常压力;②—异常高压

## 四 上覆岩层压力

地层某处的上覆岩层压力是指该处以上地层岩石和孔隙内所含流体的重力所产生的压力,即

$$\text{上覆岩层压力} = (\text{基岩重力} + \text{流体重力}) / \text{面积}$$

其表达式为:

$$p_o = [\phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_{ma}] g H \quad (2-5)$$

式中  $p_o$ ——上覆岩层压力, MPa;

$\phi$ ——岩石的孔隙度, %;

$\rho_f$ ——岩石孔隙中流体的密度,  $\text{kg/cm}^3$ ;

$\rho_{ma}$ ——岩石基质的平均密度,  $\text{kg/cm}^3$ ;

$H$ ——地层垂直深度, m。

上覆岩层所受到的重力是由岩石骨架和岩石孔隙内的流体共同支撑的。仅由岩石骨架所支撑的那部分上覆岩层压力称为基岩应力,或称为岩石结构应力。地下岩石的平均密度为  $2.16 \sim 2.50 \text{ g/cm}^3$ , 于是平均上覆岩层压力梯度大约为  $22.62 \text{ kPa/m}$ 。在实际钻井过程中,以钻台作为上覆岩层压力的基准面。因此在海上钻井时,从钻台面到海平面,海水深度和海底未固结沉积物对上覆岩层压力梯度都有实际影响,实际上覆岩层压力梯度值小于  $22.62 \text{ kPa/m}$ 。

上覆岩层压力与基岩应力、地层孔隙压力的关系是:

$$p_o = \sigma + p_p \quad (2-6)$$

式中  $p_o$ ——上覆岩层压力,MPa;

$\sigma$ ——基体岩石应力,MPa;

$p_p$ ——地层孔隙压力,MPa。

同样,可以写成:

$$G_o = G_m + G_p \quad (2-7)$$

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;

$G_p$ ——地层孔隙压力梯度,kPa/m。

若盐水密度为  $1.07 \text{ g/cm}^3$ ,则地层孔隙压力梯度  $G_p$  为  $10.497 \text{ kPa/m}$ ,基体岩石压力梯度  $G_m$  为  $12.123 \text{ kPa/m}$ 。

## 五 基岩应力

基岩应力是指由岩石颗粒之间相互接触来支撑的那部分上覆岩层压力,亦称有效上覆岩层压力或颗粒间压力,这部分压力是不被空隙水所承担的。基岩应力用  $\sigma$  来表示。

上覆岩层压力、地层孔隙压力和基岩应力的关系如图 2-5 所示。

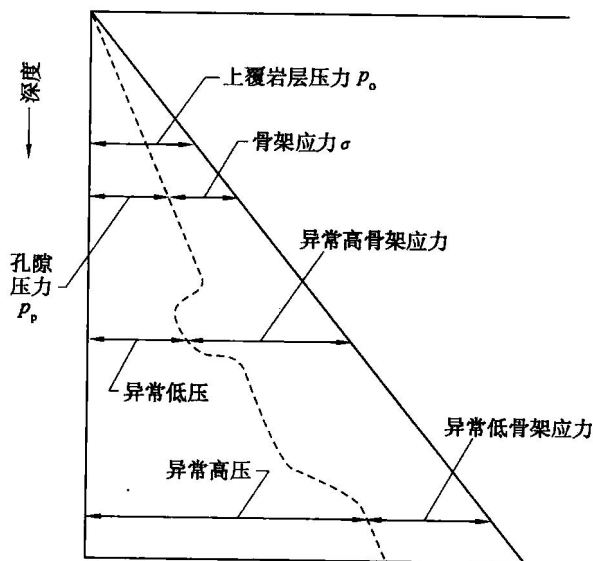


图 2-5 上覆岩层压力、地层孔隙压力和基岩应力的关系