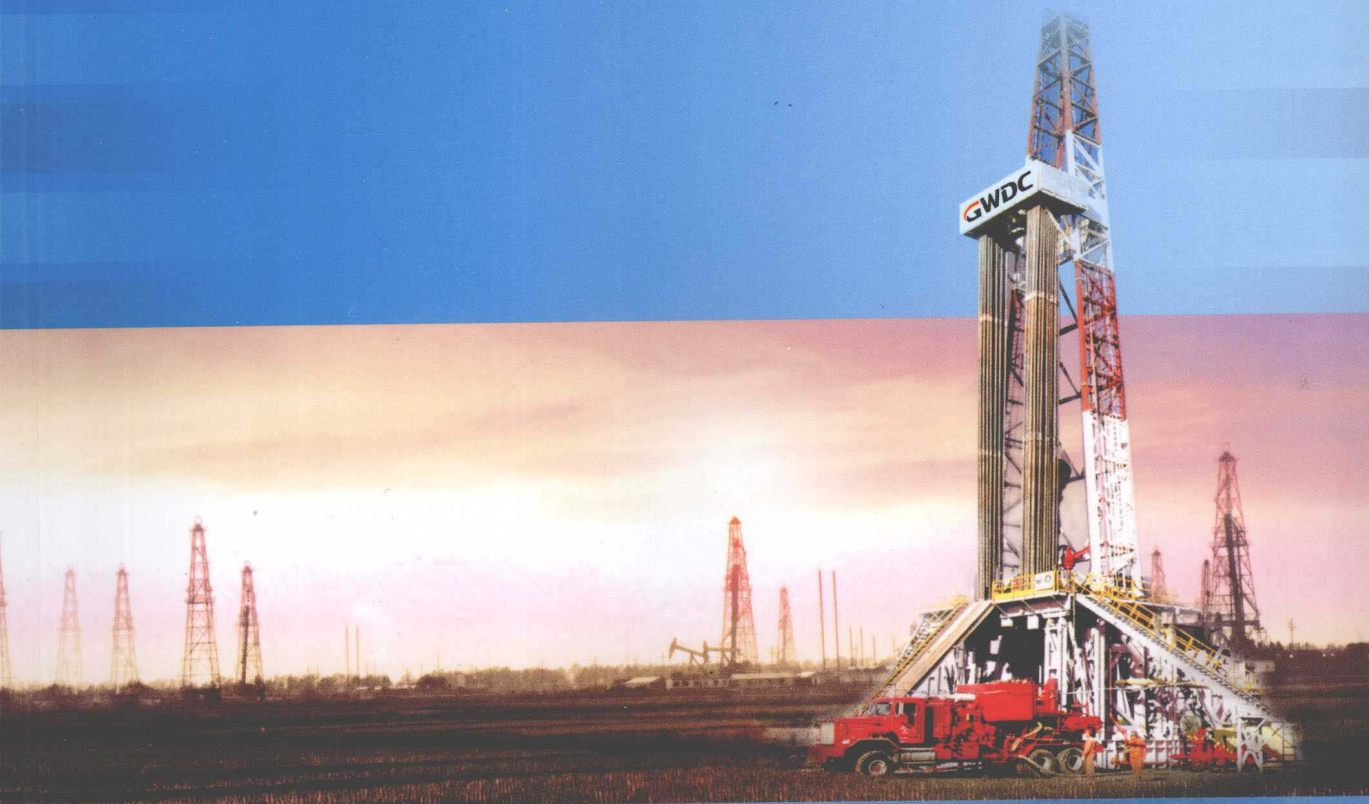


钻井井控技术与设备

长城钻探井控培训中心 编
辽河油田井控培训中心



石油工业出版社

钻井井控技术与设备

长城钻探井控培训中心
辽河油田井控培训中心 编

石油工业出版社

内 容 提 要

井控工作是石油天然气勘探开发过程中的重要环节,是油气安全生产工作的重中之重。本书参照国际标准,结合国际井控培训规范和长城钻探多年来境外井控管理经验,介绍了井控基本理论、井控技术、井控设备、硫化氢防护等知识,附录中还介绍了井控常用英语词汇、公式换算等内容。

本书适合从事井控工作的操作人员、技术人员和管理人员培训或自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

钻井井控技术与设备/长城钻探井控培训中心,辽河油田
井控培训中心编. —北京:石油工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-5021-9163-4

I. 钻…

II. ①长… ②辽…

III. 油气钻井-井控设备

IV. TE921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 158179 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

编辑部: (010) 64523585 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 22

字数: 562 千字

定价: 55.00 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

《钻井井控技术与设备》

编 委 会

主 任：张柏松 胡欣峰 胡成礼
副 主 任：翟智勇 苏庆新 唐国斌 罗远儒
委 员：王正东 高丽丽 史英俊 索长生 田玉宇
 李四永 徐振松

主 编：罗远儒 田玉宇
副 主 编：侯 静 徐连阁 张忠辉
编写人员：罗远儒 侯 静 林亚南 黄 蓉 许广奎
 金 浩 刘鹏展 李桂珍 宫 丽 张晓何
 李 烨 杜小毛 张兴国 邓利新 孙立伟
 杨盛余 朱建旭

前 言

井喷失控是油气勘探开发生产过程中不可接受的灾难性事故，不仅使油气资源受到破坏，还可能会造成机毁人亡、环境污染、重大火灾等严重后果，带来巨大的经济损失，同时产生恶劣的社会影响。

近年来，全球各大石油公司和石油工程技术服务公司把井控工作提高到了一个前所未有的高度。井控技术不仅成为石油行业 HSE 工作的标志性技术之一，更是钻修井和测录试等行业安全生产的重要保证。随着井控设备的更新、井控管理制度的日益完善，井控技术也不断发展，为进一步实现安全、优质、快速钻井提供了有力的保障。按照中国石油天然气集团公司工程技术分公司关于“各油田企业井控培训中心必须编写针对各油田井控特点的井控培训教材”的要求，长城钻探井控培训中心与辽河油田井控培训中心一起，历时约 2 年时间，组织编写了《钻井井控技术与设备》培训教材。旨在丰富境内外员工的井控知识，培养员工的井控素质，提高员工的井控操作技能。

本书注重实用性，在编写中，参照国际标准，结合了 IADC 国际井控培训规范、长城钻探多年来境外井控管理经验以及辽河油田特殊地质情况和井控工作特点。内容涉及井控技术、井控设备、硫化氢防护等基本知识，适合钻修井和测录试等专业从事生产与安全工作的管理人员和现场操作人员参加 IADC 国际井控培训和国内井控培训使用。

由于井控工作涉及面广，井控技术不断发展，同时编者的水平有限，该教材错误和不妥之处在所难免，恳请专家、读者提出宝贵意见，以便今后修订完善。

编 者

2011 年 12 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 井控及其相关概念.....	1
第二节 井喷失控的原因及危害.....	2
第二章 压力	6
第一节 井下各种压力的概念.....	6
第二节 井底压力分析	16
第三章 地层压力检测	17
第一节 地层压力和异常地层压力形成的机理	17
第二节 地层压力的预测和检测方法	22
第三节 地层强度试验	32
第四章 井控设计	39
第一节 井控设计相关行业标准与规定	39
第二节 地质设计	41
第三节 工程设计	44
第四节 压力剖面	47
第五节 套管程序的确定	48
第六节 钻井液设计	50
第七节 井控设备选择	51
第八节 应急计划	52
第九节 满足井控安全的钻前工程及合理的井场布局	53
第十节 辽河油区井控风险分析及井喷失控的应急处理	55
第五章 溢流的原因、检测与预防	63
第一节 溢流原因	63
第二节 溢流显示	68
第三节 溢流的预防	70
第四节 溢流的及早发现与处理	72
第六章 关井程序	74
第一节 关井方法	74
第二节 常规关井程序	76

第三节	关井立压的确定	79
第四节	关井套压的控制	80
第五节	特殊情况下的关井程序	81
第七章	井内气体的特点、膨胀及运移	91
第一节	天然气的来源、特点及危险	91
第二节	天然气侵入井内的方式	93
第三节	气体溢流对井内压力的影响	94
第四节	在开井和关井状态下气体的运移	101
第五节	井口放压的方法	104
第八章	井底恒压的井控方法	107
第一节	井控的目的和井底恒压法的原理	107
第二节	保持井底压力恒定的步骤及方法	110
第三节	井控操作注意事项	124
第九章	特殊井井控技术	128
第一节	小井眼井控技术	128
第二节	水平井井控技术	130
第三节	欠平衡井控技术	133
第四节	浅气层的处理	138
第五节	井漏的处理	145
第六节	强行起下钻作业	147
第七节	控压钻井井控技术	155
第十章	井控设备概述	168
第一节	井控设备的功用与组成	168
第二节	钻井工艺对防喷器的要求	171
第三节	液压防喷器的主要参数	172
第四节	井口防喷器的组合	173
第十一章	环形防喷器	178
第一节	环形防喷器的功用和类型	178
第二节	环形防喷器技术规范及使用	183
第十二章	闸板防喷器	185
第一节	闸板防喷器的功用和结构	185
第二节	闸板防喷器的工作原理	188
第三节	闸板防喷器的侧门	190

第四节	闸板防喷器的锁紧装置·····	191
第五节	活塞杆的二次密封装置·····	193
第六节	剪切闸板·····	194
第七节	闸板防喷器的关井和合理使用·····	195
第十三章	液压防喷器控制系统·····	198
第一节	液压防喷器控制系统的功用、组成及类型·····	198
第二节	气控液型控制装置工作原理·····	200
第三节	FKQ640-7 控制装置 ·····	204
第四节	控制装置主要部件·····	207
第五节	控制装置在井场安装后的调试·····	228
第六节	防喷器控制装置的使用与维护·····	230
第七节	井控装置常见故障与排除·····	232
第十四章	节流与压井管汇·····	235
第一节	节流与压井管汇的作用和组成·····	235
第二节	节流与压井管汇主要部件·····	237
第三节	节流与压井管汇的安装与使用·····	242
第四节	防喷管汇和放喷管线·····	243
第十五章	井控辅助设备·····	244
第一节	套管头·····	244
第二节	钻具内防喷工具·····	246
第三节	液气分离器·····	254
第四节	钻井液罐液面监测装置·····	257
第五节	钻井液灌注装置·····	258
第六节	不压井起下钻装置·····	259
第七节	监测仪器和其他设备·····	261
第十六章	井控装置现场安装、试压与维护·····	264
第一节	井控装置的布置与安装·····	264
第二节	井控装置的试压·····	267
第三节	井控装置的日常维护与检查·····	269
第十七章	硫化氢防护及有毒有害气体危害·····	271
第一节	概述·····	271
第二节	硫化氢的来源和特性·····	273
第三节	硫化氢对人体的危害、急救与护理·····	274

钻井井控技术与设备

第四节 硫化氢的检测与防护·····	276
第五节 含硫油（气）田设备的腐蚀与防腐·····	281
第六节 含硫油气田井场和生活区的安全要求·····	283
第七节 防硫化氢应急计划·····	285
第八节 其他有毒有害气体对人体的危害·····	286
附录 ·····	288
附录 1 集团公司井控管理规定 ·····	288
附录 2 公式换算 ·····	322
附录 3 单位换算 ·····	326
附录 4 中英文压井施工单 ·····	328
附录 5 井控常用英语词汇表 ·····	330
附录 6 长城钻探公司井控十大禁令 ·····	341
参考文献 ·····	342

第一章 绪 论

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, 必须把井控技术作为研究和发展的重要内容。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 井控及其相关概念

一、井控基本概念

1. 井控 (Well control)

井控是实施油气井压力控制的简称。在国外, 有的称井涌控制, 还有的称压力控制, 各种称谓本质是一样的。在钻井过程中, 只有采取一定的方法控制住地层孔隙压力 (地层压力), 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, 这种现象称为井侵。

3. 溢流 (Overflow)

当井底压力小于地层孔隙压力时, 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的现象称为溢流。

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, 无法用常规方法和装备控制而出现地层流体敞喷的现象称为井喷失控。

二、井控的分级

根据所采取控制方法的不同,把井控作业分为一次井控、二次井控和三次井控。

1. 一次井控

井内采用适当的钻井液密度来控制地层孔隙压力,使得没有地层流体进入井内,溢流量为零。

2. 二次井控

井内使用的钻井液密度不能平衡地层压力,地层流体进入井内,地面出现溢流,这时要依靠地面设备和适当的井控技术来处理和排除地层流体的侵入,使井重新恢复压力平衡。

3. 三次井控

二次井控失败,溢流量持续增大,发生了地面或地下井喷且失去了控制。这时要使用适当的技术和设备重新恢复对井内压力的控制,达到一次井控状态。

三、井控工作中的“三早”

井控工作中的“三早”是指早发现、早关井和早处理。

(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 井喷失控的原因及危害

据不完全统计,1949—1988年,我国累计发生井喷失控井230口,其中井喷失控后又着火的井78口,占井喷失控井的34%,因井喷失控着火和井喷后地层坍塌损坏钻机59台;其中1978—1988年的11年间发生井喷失控井133口,因井喷失控导致死亡5人,伤41人。1994—2007年发生18次严重井喷失控事故,尤其是罗家16H井,因喷出大量硫化氢气体夺去了243条人命,造成了巨大的经济损失与负面社会影响。

一、井喷失控的原因

综观各油气田发生井喷失控事故的事例,分析井喷失控的直接原因,大致可归纳为以下五个方面。

1. 地质设计与工程设计缺陷

1) 地质设计缺陷

(1) 未能提供准确的地层三个压力值,特别是准确的地层压力资料。

(2) 未能提供施工井周边注水井的压力、注水量等资料。

(3) 未能提供施工井所在区块浅气层和过去所钻井发生井喷事故的资料。

(4) 未能提供施工井周边的情况，如居民、道路、河流等。

2) 工程设计缺陷

(1) 井身结构设计不合理。表层套管下入深度不够，当钻遇异常压力地层关井时，在表层套管鞋处憋漏，钻井液窜至地表，无法实施有效关井；有的井设计不下技术套管，长裸眼钻进，同一裸眼段同时存在漏、喷层，给井控工作增加了风险与难度。

(2) 钻井液密度设计不合适。

(3) 防喷装置设计不合适。防喷装置的压力等级与地层压力不匹配；在深井、高压井、高含硫等复杂井未配备环形防喷器以及剪切闸板防喷器；储能器的控制能力与井口防喷器不匹配；内防喷工具、井控管汇、辅助井控装置的选择不符合要求。

(4) 加重料储备及加重能力不能满足井控要求。

(5) 井控技术措施针对性、可操作性差。

2. 井控装置安装、使用及维护不符合要求

(1) 井口不安装防喷器。

(2) 井控设备的安装及试压不符合井控实施细则的要求。

(3) 井口套管接箍上面的双公短节螺纹不符合要求，不试压，包括套管头。

(4) 钻具内防喷工具未安装或失效。

3. 井控技术措施不完善、未落实

(1) 对浅气层的危害性缺乏足够的认识，无针对性的技术措施或未落实。

(2) 未采取措施预防抽汲压力。

(3) 起钻不灌钻井液或没有及时灌满。

(4) 空井时间长，又无人观察井口。

(5) 相邻注水井不停注或未减压。

(6) 钻井液中混油过量或混油不均匀，造成井内液柱压力低于地层压力。

(7) 钻遇漏失层段发生井漏未能及时处理或处理措施不当。

4. 未及时关井，关井后复杂情况处置失误

(1) 未能及时准确地发现溢流。

(2) 未能及时关井。

(3) 未及时组织压井，井口压力过高导致井口失控或地下井喷，或因硫化氢腐蚀引起钻具断裂导致井口失控。

(4) 压井方法选择不当，排除溢流措施不当。

5. 思想麻痹，存在侥幸心理，作业过程中违章操作

由于思想上不重视井控工作，未严格执行设计，或在一些大型施工前未制订详细的井控措施或者措施不当，针对性不强，从而导致的井喷失控也占有一定的比例。因此，要从严格管理、技术培训和规范岗位操作等方面入手，做好基础工作。

二、井喷、井喷失控的危害

大量的实例告诉我们，井喷失控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六个方面。

1. 打乱全面的正常工作秩序，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，则会发生憋破地表、造成地面下陷、环境污染等重大事故。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。例如，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，使含硫化氢的天然气通过煤层裂隙窜入附近煤矿的矿井里，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。例如，长垣坝长 1 井发生井喷，日喷天然气 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，损失天然气 $4.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，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。例如，孤东试 7 井起钻时发生强烈井喷，20min 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。又如，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 177.8mm，而防喷器闸板芯子内径 139.7mm），发生严重井喷，大量气流、泥沙喷出，把井口的岩心筒及直径 158.75mm 钻铤、转盘一起顶出 12m 高，并将转盘挂在井架大腿拉筋上，3min 后二层平台起火。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 50~70m。该井经 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

罗家 16H 井发生的特大井喷失控事故，震惊中外。该井是高含硫水平井，由于含硫化

氢天然气的大量逸出，未及时点火，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。

多年来，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。要全面提高钻井人员的素质，培养高素质的井控技术队伍。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。

第二章 压 力

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。

第一节 井下各种压力的概念

一、压力

1. 压力的定义

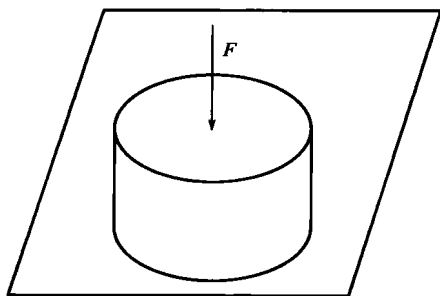


图 2-1 圆柱体对桌面的压力

压力是指物体单位面积上所受的垂直方向的力，物理学上也叫压强。由此可以看出，压力与力和面积有关。

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，压力值就是其重量除以底面积所得的商。

2. 压力的表达式

压力的表达式如下：

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

式中 p ——压力， N/m^2 ；

F ——垂直力， N ；

S ——面积， m^2 。

3. 压力的单位

压力的国际标准单位是帕（斯卡），符号是 Pa ，即 $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ 。

4. 单位换算

根据现场工作需要，常用千帕（ kPa ）或兆帕（ MPa ）表示压力。

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

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

(1) 与过去常用的工程大气压的换算关系是：

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

$$1\text{kgf/cm}^2=98.067\text{kPa}\approx 0.098\text{MPa}$$

粗略计算时，可近似认为 $1\text{kgf/cm}^2=100\text{kPa}=0.1\text{MPa}$ ，其误差约为 2%。

(2) 英制中，压力的单位是每平方英寸面积上受到多少磅的力，符号是 psi。换算关系是：

$$1\text{psi}=6894.76\text{Pa}，可近似认为 1\text{psi}=6.895\text{kPa}=6.895\times 10^{-3}\text{MPa}$$

(3) 压力的国际工程单位是巴，符号是 bar。换算关系是：

$$1\text{bar}=14.5\text{psi}，可近似认为 1\text{bar}=1\text{kgf/cm}^2，1\text{bar}=0.1\text{MPa}。$$

二、静液柱压力

1. 静液柱压力的定义

静液柱压力是由静止液体的重量产生的压力，其大小只取决于液体密度和液体的垂直高度，与液柱横向尺寸及形状无关。

2. 静液柱压力的计算公式

静液柱压力的计算公式如下：

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

式中 p_m ——静液柱压力，MPa；

g ——重力加速度， m/s^2 ，取值 9.81m/s^2 ；

ρ ——钻井液密度， g/cm^3 ；

H ——液柱垂直高度，m。

例 2-1 如图 2-2 所示，井内钻井液密度为 1.20g/cm^3 ，地层水密度为 1.07g/cm^3 ，计算 3000m 处静液柱压力及地层压力。

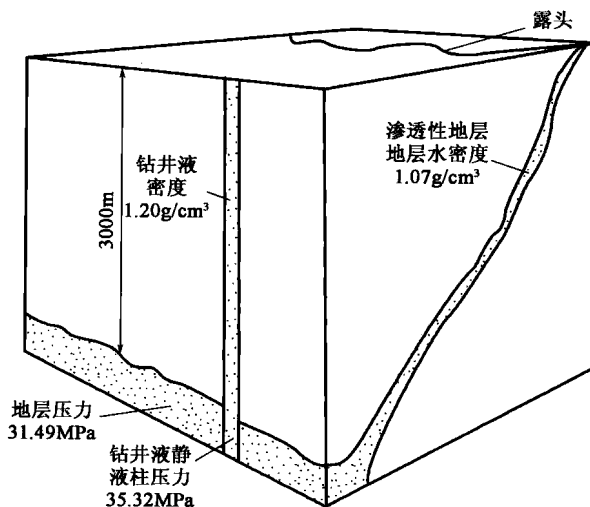


图 2-2 钻井液静液柱压力和地层压力

解：(1) 3000m 处钻井液静液柱压力：

由计算公式： $p_m = 10^{-3} g \rho H$

$$\begin{aligned} \text{得：} p_m &= 10^{-3} \times 9.81 \times 1.20 \times 3000 \\ &= 35.32 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

(2) 地层压力：

由计算公式： $p_p = 10^{-3} g \rho H$

$$\begin{aligned} \text{得：} p_p &= 10^{-3} \times 9.81 \times 1.07 \times 3000 \\ &= 31.49 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

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）。图 2-3 给出了几种情况下的井底静液柱压力。

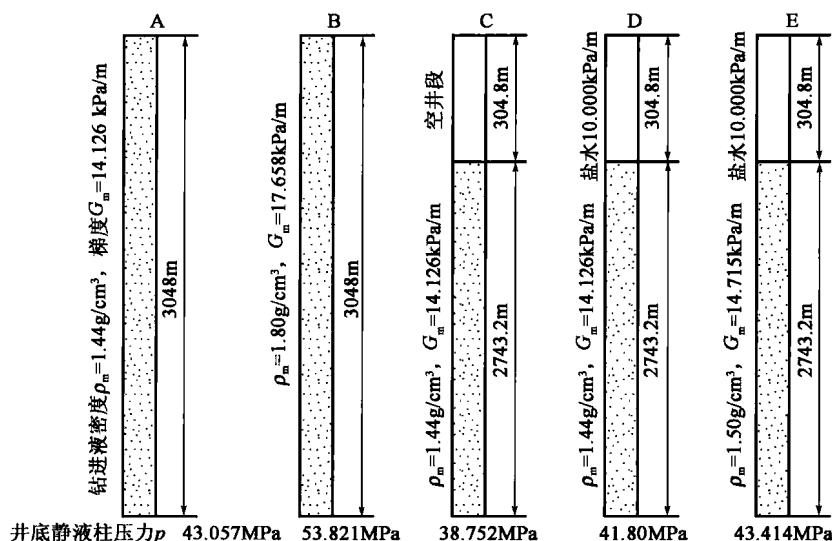


图 2-3 井底静液柱压力

三、压力梯度

1. 压力梯度的定义

压力梯度是每增加单位垂直深度压力的变化值，即每米垂直井深压力的变化值。

2. 压力梯度的计算公式

压力梯度的计算公式如下：

$$G = p/H = g\rho \quad (2-3)$$

式中 G ——压力梯度，kPa/m；

p ——压力，kPa 或 MPa；

H ——深度，m 或 km。

由压力梯度的定义，静液柱压力公式也可以写成：

$$\text{静液柱压力} = \text{压力梯度} \times \text{垂深}$$