

钻井事故 预防及处理案例分析

李作宾 施建国 编著



中国石油大学出版社

钻井事故预防及 处理案例分析

李作宾 施建国 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钻井事故预防及处理案例分析/李作宾,施建国编
著. —东营:中国石油大学出版社,2010.5
ISBN 978-7-5636-2772-1

I. ①钻… II. ①李… ②施… III. ①油气钻井—工
程事故—预防—案例—分析 ②油气钻井—工程事故—处理
—案例—分析 IV. ①TE28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 079020 号

书 名: 钻井事故预防及处理案例分析
作 者: 李作宾 施建国

责任编辑: 袁超红(电话 0532—86981532)
封面设计: 青岛心动创意工作室

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: shiyoujiaoyu@126.com
印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)
开 本: 185×260 印张: 17.5 字数: 448 千字
版 次: 2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
定 价: 58.00 元

序

钻井是一项复杂的系统工程,受地层本身的复杂性、工程的多样性、工程施工者的经验和掌握技术的差异性等众多因素的影响,钻井工程施工存在着许多模糊性、随机性和不确定性。尽管钻井工程技术在不断发展和进步,钻井设备、仪器和工具性能也在不断完善,但是,钻井事故仍然时有发生。

一旦发生钻井事故,轻者耗费大量人力、物力、财力和时间,还会影响工程质量;重者导致钻井工程报废、设备毁坏、资源浪费、污染环境、贻误油气勘探开发战机,甚至造成人员伤亡。2010年4月20日发生在某海湾的钻井平台井喷、爆炸、着火、沉没事故,造成11人失踪,17人受伤。井喷未能得到有效控制,每天喷出原油约800 m³,已造成了严重的环境污染。2010年5月11日,业主宣布这次漏油事件已给它带来3.5亿美元的损失。这个数字还没有计算价值数亿美元的钻井平台和巨额的间接损失。

由于钻井工作环境的不同,每一个钻井技术人员所经历的钻井事件也不尽相同,他经历的你不了解,你经历的他不清楚,尤其是前人的经历后人了解的也比较少。随着钻井技术和管理队伍的不断推陈出新,不希望也不可能让后人把前人经历的钻井事故再重复一遍。

为了预防和减少钻井事故,以及在发生钻井事故后,能够准确判断事故性质,及时采取针对性的技术措施,快速解除事故,减少各方面的损失,加快工程施工进度,提高钻井技术水平,《钻井事件预防及处理案例分析》一书,结合作者多年钻井技术管理工作的经验和体会,从钻井基本理论入手,进行专题论述,并给出了井涌、井喷、卡钻、钻具断脱、落物和测井、下套管、固井等作业过程中的工程事故近百例,详细记述了钻井事故的发生和处理经过,分析了发生事故的原因,提炼出了事故的教训,给出了预防和处理事故的建议。

尽管《钻井事故预防及处理案例分析》一书记述的钻井事故新旧不一,而且由于当时技术条件的制约,事故处理过程也不尽完善,但是,这些案例均具有一定的代表性,相信钻井工作者、尤其是工作在生产一线的钻井人员参阅和借鉴后会获益颇丰。

让我们谨记那些用巨额经济损失甚至人的生命换来的经验和教训,精心设计、科学施工,有效地预防和减少发生新的钻井事故,正确的处理发生的事故,不断推进钻井技术进步、管理进步,为中国石油工业的发展、为国家全球能源战略的实施保驾护航!



2010年5月16日

前言

钻井工程事故一直制约着钻井安全生产、施工进度的加快和工程质量的提高。《钻井事故预防及处理案例分析》是一本介绍如何预防和减少钻井事故,以及一旦发生钻井事故,如何准确判断事故性质,采取恰当的技术措施,快速解除事故的参考书。

全书共分六章,分别介绍了井涌和井喷、卡钻、钻具断脱、落物打捞、测井、套管和固井等事故发生的原因,以及预防和处理方法,书中列举了上述六类钻井事故案例近 200 个,供读者参阅。第一章,井涌、井喷事故预防及处理介绍了油气井压力控制,以及安全、 H_2S 防护、环保的有关要求。井喷是最严重的钻井事故,本章以事故发生的时间倒序给出了井涌、井喷、失控抢险及浅层气井控技术等典型案例,以唤起读者对钻井事故的重视。第二章,卡钻事故预防及处理,首先介绍了卡钻事故的预防及处理技术,然后以压差、井塌、键槽、落物及其他卡钻事故为序给出了卡钻事故处理案例。第三章,钻具事故预防及打捞处理,首先对浅井、深井及气体钻井等钻具失效的原因进行了探讨,随后给出了钻铤、钻杆、螺杆等钻具断脱事故案例。第四章,井下落物预防及处理,首先介绍了落物事故的预防和处理方法,随后给出了整体钻头、钻头牙轮或刀翼、测斜仪、转盘方补芯以及榔头等落井的打捞方法。第五章,测井事故预防及处理,先是介绍了测井事故的预防和处理方法,然后给出了不同类型的测井事故处理案例。书中特别提醒读者,对于测井仪器,要立足打捞,不应采取“磨”的方法。第六章,固井及套管事故预防及处理,先是介绍了固井事故诊断系统和又喷又漏井的固井技术,然后给出了尾管、分级箍、断套管等多种套管和固井事故。此外,本书每节均给出了事故原因和处理情况分析,以及相关建议,以供读者参阅。

本书由中国石化国际石油勘探开发公司俄罗斯—中亚大区李作宾和中原油田钻井二公司施建国共同编写,其中,第一、三、四章主要由李作宾负责;第二、五、六章主要由施建国负责。在编写过程中得到了有关领导和同事的大力支持和帮助,在此表示真诚的感谢!

随着钻井技术的飞速发展,以及不同地区地层的复杂性和钻井事故的独特性,加之编者水平有限,本书所编录的内容难免存在不少欠缺和不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2010.4.6

目 录

第 1 章 井涌、井喷预防与处理	1
第 1 节 概 述	1
第 2 节 油气井压力控制	6
第 3 节 井喷失控井喷流出口速度预测	8
第 4 节 高含 H_2S 天然气井井喷失控处理	12
第 5 节 油气田钻井井喷后的环境污染防治措施	18
第 6 节 某海上井喷失控事故及其影响	22
第 7 节 X926-2 井井喷事故	29
第 8 节 喷漏同存复杂情况的处理	31
第 9 节 AD4 井事故处理	34
第 10 节 井喷着火灭火方法和作业程序	35
第 11 节 ASB3 井抢险带火作业技术	39
第 12 节 WS1 井反循环压井案例	43
第 13 节 TF6 井上喷下漏情况的处理	46
第 14 节 DQ8 井溢流分段压井施工	50
第 15 节 YH23-2-14 井井喷失控事故	52
第 16 节 WQ4 井井喷事故处理	53
第 17 节 Q28-G22 井井喷事故处理	55
第 18 节 S7 井井喷事故处理	57
第 19 节 W13-120 井井喷事故处理	59
第 20 节 DT1 井溢流与井漏同存尾管固井技术	60
第 21 节 高含硫喷漏同存气井钻井与完井工艺技术	65
第 22 节 浅气层井控技术	68
第 23 节 SXZK12-1 井井喷抢险	71
第 24 节 LS1 井井喷事故处理	74
第 25 节 M-3 井井喷、失控、着火和报废	76
第 26 节 C-7 井井场井喷与环境污染	77
第 2 章 卡钻事故预防与处理	78
第 1 节 卡钻事故处理技术	78
第 2 节 深斜井防卡技术	82
第 3 节 大位移海油陆采井井下事故的预防与处理	85
第 4 节 深井特殊结构井打捞解卡作业技术	89

第 5 节	钻进参数实时监测与故障诊断技术	93
第 6 节	顺鱼侧钻解卡技术	98
第 7 节	连续油管冲洗解堵解卡技术	101
第 8 节	浴酸解卡技术	106
第 9 节	CXXC 气田浅层丛式井卡钻事故预防	107
第 10 节	TB 地区卡钻事故的预防与处理	109
第 11 节	DND 气田封隔器解卡技术	112
第 12 节	TH 油田水平井卡钻事故的分析及处理	114
第 13 节	长裸眼多压力系统卡钻事故处理	116
第 14 节	S57 井卡钻事故及处理	121
第 15 节	X5-1 井压差粘附卡钻的快速解卡技术	124
第 16 节	W13-367 井的多次井漏、卡钻和处理	127
第 17 节	气举负压解卡技术在 P2-X171 井的应用	129
第 18 节	MX 地区水平井段压差卡钻及处理	132
第 19 节	W343 井盐层卡钻及处理	136
第 20 节	BX 油田 QK17-2 井卡钻及处理	138
第 3 章	钻具事故预防及打捞处理	142
第 1 节	钻具事故预防及处理方法	142
第 2 节	浅井段钻具失效原因探讨及预防措施	146
第 3 节	深井钻具失效分析与预防	149
第 4 节	气体钻井断钻铤事故的原因分析及预防	155
第 5 节	螺杆钻具井下事故的处理与预防	158
第 6 节	动力卡瓦夹持区钻具防失效技术	161
第 7 节	套铣扶正器	165
第 8 节	ERDS 地区钻具失效的特点及预防	166
第 9 节	PG 气田气体钻井钻具失效情况及对策	169
第 10 节	TLM 油田钻具失效原因分析	171
第 11 节	SB 探区钻具失效原因分析及对策	175
第 12 节	J65-2B 井定向钻具打捞工艺技术	177
第 13 节	MJ1 井钻具断裂原因分析	180
第 14 节	井斜对 LG13 井钻具刺漏的影响	183
第 15 节	PG1 井断钻具处理	187
第 16 节	Q9 井钻具折断事故处理	189
第 17 节	W259 井钻具落井事故	190
第 18 节	W42-9 井钻具断落处理	191
第 19 节	P2-平 1 井大直径螺杆钻具断落事故处理	194
第 20 节	MC170 井螺杆钻具断落事故处理	195
第 4 章	落物事故预防及打捞处理	198
第 1 节	落物类型及打捞方法	198
第 2 节	液压多功能小件落物打捞器	200

第 3 节	P2 井钻头落井事故及处理	201
第 4 节	QC29-10 井 PDC 钻头事故处理	204
第 5 节	L28 井取心钻头冠体落井处理	205
第 6 节	处理 PDC 钻头事故的新尝试——爆炸破碎	207
第 7 节	W72-225 井掉钻头事故处理	208
第 8 节	W13-202 井掉牙轮事故处理	210
第 9 节	WQ3 井掉牙轮事故处理	211
第 10 节	Y87-侧 28 井随钻仪器落井事故处理	212
第 11 节	一把抓打捞工具的制做及其应用	213
第 12 节	W13-415 井榔头落井事故处理	215
第 5 章	测井事故预防及处理	216
第 1 节	电缆测井事故的预防及处理	216
第 2 节	测井电缆打捞技术	219
第 3 节	切穿法打捞电缆仪器在油田的应用	222
第 4 节	BN23 井测井仪器打捞	223
第 5 节	W14-侧 38 井测井事故处理	225
第 6 节	W209-66 井测井事故处理	227
第 7 节	B47 井电测仪器落井事故处理	228
第 8 节	W13-404 井测井仪器落井事故处理	229
第 6 章	固井和套管事故预防及处理	231
第 1 节	固井事故诊断与处理系统	231
第 2 节	又喷又漏井的固井技术	233
第 3 节	固井前井漏问题处理	237
第 4 节	ATNB-0002 井尾管复杂情况及处理	239
第 5 节	SLK3 井尾管复杂情况及处理	241
第 6 节	SLK3 井尾管悬挂器密封失效原因分析及处理	243
第 7 节	SLW2 井尾管固井复杂情况及处理	245
第 8 节	NAYS1 井送放工具密封失效原因分析及处理	247
第 9 节	PG1 井技套固井施工分接箍漏失事故及处理	247
第 10 节	TS1 井尾管送入钻具事故处理	250
第 11 节	Q60 井固井事故处理	253
第 12 节	WC98-1 井固井事故处理	255
第 13 节	CB304 井固井事故的处理	256
第 14 节	某井套管固井事故原因分析	258
第 15 节	T301 井复杂情况下的完井技术	263
第 16 节	W10-102 井固井复杂情况处理	265
第 17 节	XP6-65 井井漏固井处理	266
第 18 节	W13-337 井技术套管断裂处理	268
结束语		269
参考文献		270

第 1 章 井涌、井喷预防与处理

当钻遇油、气、水层时,如果井底钻井液液柱压力低于地层压力,地层流体就会进入井内。大量地层流体进入井内后,就有可能产生井涌、井喷,甚至失控、着火,酿成重大钻井事故。因此在钻井工程中,采取有效措施进行油气井压力控制是钻井安全的一个极其重要的环节。

井喷是严重的钻井事故,井喷失控是损失巨大的灾难性事故,后者常常造成设备毁坏和人员伤亡,还会造成恶劣的社会影响。井喷失控的危害主要有损坏设备、浪费油气资源、破坏油气层、污染环境、报废井、造成大量经济损失、打乱正常的生产秩序,甚至造成人员伤亡等。

第 1 节 概 述

在油气井钻探工作中,由于一些地区高压、高产、高含硫油气井钻井的特殊性,井控技术始终是最重要的油气井钻井技术之一。随着勘探开发的不断深入,井控问题越来越引起人们的重视。为此,在不断总结过去经验教训的基础上,加深了对油气井压力控制的理解,找出了失败的原因。同时,钻井科技人员开展了多项重点项目的科研攻关,取得了多方面的成果,基本解决了防止重大井喷、失控、着火的关键技术问题,获得了显著的经济效益和社会效益。

一、对井喷环节的简要分析

1. 油气井压力控制的三个阶段

井喷、失控和着火是事故发展的三个阶段。井喷、失控和着火三者中,防止井喷是最重要的环节,没有井喷也就不存在失控和着火。防止井喷的油气井压力控制又分为发现、关井、压井三个环节,有效地把握这三个阶段就能有效地控制整个过程,避免井喷、失控和着火。尤其是及时“发现”溢流是防止井喷的关键环节。

2. 从井下溢流到井喷有一个时间过程

在油气井钻井过程中,井内一般都有与地层压力相当的液柱压力,形成井喷都有一个从流体进入井筒到井口外溢,再到井喷的时间过程。哪怕时间很短,但这个过程是存在的。这个时间段对油气井压力控制来说极为宝贵。只有气体钻井因井内基本无液柱平衡地层压

力,一旦钻遇大产量气藏时,井喷会来得异常快、异常猛烈。

1978年5月发生井喷的B5井是四川李子坝构造上以阳新为目的层的探井。该井当时使用密度 2.13 g/cm^3 的钻井液钻至井深2 788 m,在乐二层发生强烈井喷,测得产量为 $295 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用密度 2.3 g/cm^3 钻井液压井后注水泥塞,下 $\Phi 177.8\text{ mm}$ 套管至气层顶部后,采用 $\Phi 73\text{ mm}$ 正规扣钻杆、清水钻开水泥塞,坐钻杆挂非正规完井。当用清水以排量 4 L/s 、泵压 12 MPa 的参数钻开水泥塞后,发生钻具放空、泵压突然大幅上升的情况。这一现象说明,该井的地层气在 32 MPa 压差下以极高的速度进入井筒,推动钻井液排出井口,出口流量增大,阻力增大,泵压增高,同时,对钻具的上顶力加大,悬重降低。

井喷显示后,当即完成了以下操作:下探井底,提出并卸掉方钻杆,钻具上加装回压阀,方钻杆从小鼠洞接带锥塞单根,在井口连接上述管串,上提钻具再下放,将锥塞坐在特殊四通内。整个操作过程大约 10 min 。完成上述操作后,上紧顶丝、换装井口完井。

在这大约 10 min 时间内,观察到:出口流量在钻塞时是 4 L/s ,钻完塞后流量突然加大到约 50 L/s 。随着进入井内气量的增加,井内液体减少,液柱压力降低,气体膨胀,出口流量变化更加明显,特别是在气体上升至井深一半以上后,出口流量增大的速度更加剧烈。当出口出现满流后,从喇叭口开始漫出,之后是液柱涌到转盘面上,此时喷势距离喷上二层台、天车台也就不足 1 min 了。

3. 溢流进入井筒的两大动因

井喷事故是由于地层气无控制的快速侵入井筒引发的。根据地质特点,在川、渝地区,能引发井喷的地层气侵入井筒的方式有两种:一是液柱压力大于地层压力条件下的置换气进入井筒,如溶洞和裂缝置换气;二是欠平衡条件下地层储集气进入井筒。后者主要有这几种情况:地层压力预测不准,钻井液密度不足;钻井液柱压力接近地层压力,停止循环后,循环阻力消失,当量液柱压力就低于地层压力;起下钻抽汲;井漏后液柱压力降低等。

(1) 过平衡条件下置换气进入井筒:1982年11月,D4井在下入 $\Phi 177.8\text{ mm}$ 油层套管后,使用密度为 2.4 g/cm^3 的钻井液钻至井深3 164.10 m(地层阳三),钻进放空 1.4 m ,钻具悬重由 401.8 kN 恢复到 441 kN ,同时发生井漏,井口钻井液断流不到 1 min 后恢复流动,当即上提钻具循环观察,当循环到溢流上升至井深约三分之一位置时,发现溢流,池面上涨,接着发生井涌,关井,立管压力为零。控制压力循环,排除溢流后恢复正常。起钻,下油管测试,初测日产量 $520 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

据邻井地层压力测算该井该地层压力为 72.8 MPa ,井内液柱压力大于地层压力约 3 MPa ,在溶洞与远端裂缝并不畅通的低压差情况下,当液柱刚刚接触溶洞气时,有限溶洞空间的气体会被压缩,若钻井泵的排量不能及时补足被压缩的空间,就会出现短暂的断流和泵压下降。当溶洞成为井眼的一部分后,原溶洞中的气体在其与钻井液密度差作用下,钻井液下沉,气体上浮进入井筒,随循环的钻井液上返,并在上返过程中减压膨胀,形成溢流,这样的溶洞气若处理不当就可能引发井喷。

实验发现,当地层裂缝达到一定宽度时,井筒中的钻井液会沿裂缝的下壁进入裂缝;裂缝中的气体会沿上壁进入井筒。这种置换在液柱压力大于地层压力的条件下也同样进行,在大倾角裂缝条件下尤甚。这样的置换也是造成川、渝地区溢流井喷多发、堵漏困难、固井窜槽的原因之一,要解决这些问题还有许多工作要做。

(2) 欠平衡条件下地层流体进入井筒:当液柱压力低于地层压力时,地层中储集的气体

在负压差作用下进入井筒,就会诱发井喷。这是至今一些地区油气井井喷的最主要原因。

据统计,一些地区油气井钻井过程中的井喷,大体上是在以下几种情况下引发的。

a. 在液柱压力远低于地层压力的条件下打开高压高产气层,前述的 B5 井是这类溢流造成井喷的典型例子。

b. 液柱压力稍低于地层压力,这种情况在正常钻井过程中可能毫无溢流显示,在进入起、下钻程序时,由于循环阻力的消失而引发溢流,再加上抽汲、掏空,溢流会加重,受过气侵的钻井液若没有经过脱气处理,在后续钻进中即使再有了循环附加压力也不能平衡地层压力,也会出现气侵、井涌,起钻中会出现灌不够或灌不进钻井液的情况,到起钻中后期或下钻中、下完钻后的第一循环周时发生井涌井喷,特别是深井、小井眼、水平井中要更为注意。

c. 液柱压力稍大于地层压力。由于近平衡作业工艺技术的不断发展,正压差已控制得很低,甚至采取负压差下的控压钻进。在液柱压力稍大于地层压力情况下的井喷,多发生在起下钻中,主要是起钻后期和下钻过程中,以及下完钻的第一循环周。

d. 井漏后的井喷。钻进中发生井漏,若没有其他层位干扰,不往井内补充钻井液,井内钻井液面会逐渐下降,直到静止平衡。在液面静止前,越接近静液面漏速越小。液面静止后,地层气会源源不断的以扩散、置换等方式进入井内,上浮、膨胀,使静液面不断上升,直至井口,外溢。一旦发生外溢,井内液量减少,开始出现负压差,加剧了溢流速度,直到井喷。据观察统计,在喷漏同层条件下,发生井漏后若停止往井内补充钻井液,也不进行起下钻作业,从井漏到井喷少则数小时,有的长达数天毫无反应。从开始外溢到井喷一般也要数小时。

二、井控技术中存在的几个问题

由于个别井控技术人员对上述问题认识程度不同或不到位,在井控技术的实施时往往存在井下溢流发现不及时等问题。

1. “发现”技术的实施和落实不到位

油气井压力二次控制的三个阶段中,早期发现是最重要的一个阶段。从井喷发生发展过程看,井喷都是从溢流开始的,都有一段过程,在 B5 井大产量、32 MPa 压差的情况下也有约 10 min,在一般情况下,这个时间过程会更长一些,只要发现及时,就为关井争得了足够的时间,若处理得当,井喷事故是可以避免的。及时发现溢流的“坐岗制”工作方法是在经历过多次井喷失控、着火教训后总结形成的。“坐岗制”工作方法的推广执行,对大幅度减少井喷失控事故起到了重要作用。

目前,钻井队实行了双岗制坐岗,在探井上还有先进的、连续监测的录井仪,为什么还不能及时发现井下溢流呢?这除了坐岗人员的责任心和技能不足外,井场技术人员没有从井内溢流的动因上分情况去把握观察的时机和现象,同时还对及时发现溢流的重要性认识不够,把关不严。如 2007 年某井发生溢流,井队报告:“在溢流 1.8 m^3 时及时发现,3 min 完成了关井,在规定的时间内有效地控制了井口,总溢流量达 13.2 m^3 。”这些报告资料恰恰说明井队没有及时发现溢流或发现溢流后没有及时关井。如果液柱压力远低于地层压力,地层流体进入井筒会速度很快,会发现循环中防溢管出口流量增加很大,必然导致环空流动阻力大大增加,且伴随着立管压力大幅上升(上述 B5 井的例子已说明)。其一,该井井底压力为 80 MPa,按 3 min 溢流 11.4 m^3 计算,把这一溢流量按理想气体换算到标准大气压下的天然

气产量达 $437 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 这是不可能的; 其二, 该井的井径是 $\Phi 215.9 \text{ mm}$, 钻进排量应该是 20 L/s 左右, 泵压约 20 MPa , 其中环形的间的循环阻力约 2 MPa , 按报告溢流量计算, 排量会达 73 L/s , 立管压力表显示的压力可能达到近 40 MPa , 这无论是钻井泵、动力系统、还是循环系统都是不能承受的。

对于可能存在液柱压力稍低于地层压力的溢流, 有经验、负责任的现场技术人员则会根据此种情况下溢流发生的过程特点严格执行起钻前的短起下钻和循环观察的操作规程, 非常注意核查起钻初期、起钻后期的累计灌钻井液量、下钻中的累计回收量, 完整观察下完钻的第一循环周出口管、池面是否有异常情况。对于液柱压力稍大于地层压力的情况, 主要是观察起钻抽汲引起的溢流, 井队工程师应在起钻中期、后期亲自核对钻井液灌入量。对于井漏的情况, 要加强出口管返出情况、灌入量和间隔时间的观察, 若开始液面不在井口, 要持续观察井筒液面上升情况, 如按一定时间间隔吊灌钻井液, 发现可以灌入的量越来越少, 可以说明地层在往井筒溢流, 不及时处理就会发生井喷。这类情况引起的井喷在 20 世纪 80 年代前较多。在观察溢流时, 尤其要注意井内没有作业, 钻具静止、又没有循环情况下井口钻井液的轻微流动。还有, 起钻初期要注意起钻时钻具水眼被堵, 钻具内的钻井液随起钻带出井又不能回收到液罐, 容易造成灌入量的不足。

2. 关井的理念应适应“快”的要求

发现溢流后, 尽可能快关井, 可减少井内溢流, 使关井后的井口压力不会太高, 有利于压井的安全。

“四七”动作关井程序是“六五”国家重点科研项目“平衡钻井与井控技术研究”所取得的十大成果中重要成果, 这种关井方法称为“半软关井”。远在该项目研究之前, 国际上通用关井方法只有“硬关井”和“软关井”两种。所谓“硬关井”是指发现溢流后, 根据当时作业情况, 采取最简单、最快的操作步骤, 不需要打开节流阀, 直接关闭闸板防喷器。对于溢流发现的早, 尚未形成喷势的情况, 一般都采用这种“硬关井”法。“软关井”是在回收钻井液管线开启的情况下, 先关球型防喷器再关闸板防喷器。这种关井方法适用于溢流已发展成井喷的情况。因为在这种情况下直接采用“硬关井”容易损坏胶芯, 也会因水击造成对井口的冲击。作为“四七”动作的“半软关井”与“软关井”的不同是关井时回收管线闸门只开了一部分。实质上“半软关井”也是“软关井”, 都适用于相同或相似的情况。在溢流的初期阶段, 应该采用“硬关井”时用“四七”动作关井, 也能完成关井, 只是多了不必要的打开节流阀的动作程序。不必要的程序多了, 不易被紧张情况下的操作工人所掌握, 既容易造成混乱, 又容易拖延关井时间。关井操作中最重要的是关防喷器, 其他动作都是为这个动作做准备的。在检查和考核中, 不能把主要动作和其他动作等同起来评价。但是, 也要防止关井方法的改变引起一些关井操作的混乱。因此需要开展关井程序的进一步研究, 推行高效合理的关井程序, 不要一套操作规程永恒不变。

3. 应更多地训练和培养井场技术人员熟练掌握压井技术

压井是油气井压力二次控制, 是在发现溢流、完成关井后, 使井内恢复平衡的过程。压井原理本来不复杂, 但由于组织实施涉及的因素较多, 技术性更强, 井场技术人员实战训练的机会不多, 压井失败、重复施工时有发生, 也就形成了现在这种井队发现溢流后急报上级部门, 等待上级技术人员来压井。究其原因可能还是对一些技术细节注意不够, 甚至还存在的一些错误做法。

(1) 发现溢流后或压井前应准确取得地层压力。由于影响关井立压读数的因素很多,往往会产生误差,特别是钻具上装了回压阀。最好是用记录的立压曲线准确分析确定地层压力,每一位压井组织者都应亲自分析立压曲线资料,不要以听说数据为依据,更不要采用“控压循环”中根据套压、溢流量、喷势推算确定的地层压力。

(2) 发现溢流后要尽快及时压井。在实际工作中,往往发现溢流关井后,井场技术人员不能组织压井,在等待上级部门技术人员到井场期间采取循环观察等候压井,称为“控压循环”。这种“控压循环”反而会增加井筒溢流量或井漏,增加风险。

(3) 根据溢流动因采取相应的压井措施。对于已经确证为井筒液柱压力大于地层压力的置换气引起的溢流,即关井立压为 0 MPa 的溢流,如前述 D4 井就是这类溢流的典型例子,该井采取的压井方法是直接控制立压循环即可排除溢流完成压井。压井时,开泵的同时缓慢地开启节流阀,使开泵正常后的泵压等于流动阻力加关井立压再加 1.0~3.0 MPa 即可。对于由裂缝置换气引起的溢流,主要是通过随钻分离除气实现压井,现有的真空除气器是可以实现有效脱气的。

对于液柱压力小于地层压力的欠平衡引起的溢流,在可能的情况下应尽快采用工程师法压井。在不具备工程师法压井条件时,最好尽快先采取司钻法压井。压井时,通过观察喷势和返出情况,调节节流阀控制套压进行循环观察,或者在“控压循环”中加重钻井液,直到平稳为止,这样的压井方法难以维持井底压力稳定,是错误的。压井时,要根据关井立压计算的地层压力操控节流阀,使井底压力始终稍大于地层压力,不要以溢流量大小和套压之间的关系变化操控节流阀。近几年,笔者所见到的压井施工记录或压井技术总结没有替高密度钻井液压井时控制立压的变化资料和根据钻具内液柱、立压之和对井底形成的压力始终略大于地层压力的情况分析。由于环空溢流气体在不同井深排出的钻井液量不同,难以根据套压值维持井底压力的平稳,如果不注意这点,会形成边压井边溢流的情况,甚至造成在压井过程中井筒内一会儿溢流一会儿井漏的情况,使压井失败,或使压井钻井液的密度越压越高,而得出错误的地层压力结论。如某公司在某构造钻井的压井液密度就从开始计算的 $2.4\sim 2.5\text{ g/cm}^3$ 在反复压井过程中提高到了 $2.8\sim 2.9\text{ g/cm}^3$,甚至要求准备密度为 $3.2\sim 3.3\text{ g/cm}^3$ 的钻井液,如此高的地层压力是很难令人相信的。用过高的钻井液密度压井又可能造成井漏,使井下情况更为复杂,难以处理。

对于井漏引起溢流的处理:钻进中遇井漏要及时堵漏,现在堵漏的方法较多,堵漏也不是一件难事,例如,一些地区 90% 的井漏是可以通过注入钻井液实现堵漏的。若井内管柱不能实施堵漏作业,必须要起钻换管柱,起钻过程中必须灌入钻井液。漏层的漏速和所受的压差正相关,不同的压差漏速不同,漏速为零的液面为静液面。若是在井口安装了井内液面监测仪(易漏地区作业的钻井队应推广使用该种仪器),在灌入过程中就可以测出压差和漏速的关系曲线,最好是根据这一关系曲线控制灌入的量,以维持漏速较小的井筒安全液面。对于液柱压力稍大就漏、稍小则喷的窄密度窗口井段,推荐应用欠平衡钻井技术或控压钻井技术。

目前的井控技术培训应针对上述问题,以实战为例加强训练,尽快培训出一批能够在溢流发现上把关、从容关井、熟练压井的井控技术人员,整体提高油气田的井控技术水平,以适应复杂“三高”气田勘探开发的需要。

第2节 油气井压力控制

一、井内压力与地层压力的关系

在钻井工程中,如果钻井液不循环,则作用在井眼内钻井液静液柱压力,称为井内静液柱压力,作用在井底的压力称为井底压力,井内静液柱压力的大小与井深和钻井液密度存在式 1-1 的关系。

$$p_h = 0.0098\rho h \quad (1-1)$$

式中: p_h 为井内静液柱压力, MPa; ρ 为钻井液密度, g/cm^3 ; h 为井深, m。

如果钻井液循环,在井内还要附加环空循环阻力。另外,钻头喷嘴射流对井底的冲击力以及钻头旋转对井底的冲击力也是井底压力的一部分。钻进过程中岩屑进入钻井液,使钻井液密度增加,也增加井底压力。当钻进速度比较慢时,岩屑引起的钻井液密度增加不明显。对于水基钻井液,随着井内温度的增加会使钻井液密度降低,而井内钻井液液柱在井眼下部产生的较高压力又使钻井液密度增加。多数情况下,二者作用使钻井液密度略有降低。但是,对于油基钻井液而言,一般情况下,二者作用的结果会使钻井液密度降低得较多。

在提升钻柱或者套管柱过程中,在井内会产生抽汲压力;而在下放钻柱或套管柱过程中,在井内会产生激动压力。抽汲压力和激动压力称为波动压力(p_s)。运动管柱在充满流体的井内产生波动压力的原因有三:其一,管柱从静止状态到运动状态需要克服井内钻井液静切力;其二,管柱运动引起井内钻井液动量变化;其三,运动钻柱外壁携带着的钻井液与管柱运动方向同向流动,同时还从与其运动管柱相反方向排出。

正常情况下,波动压力与管柱运动速度、管柱长度、井眼尺寸、井径扩大率、钻井液性能、钻头类型及其水眼直径等因素有关。当井眼不规则、井眼缩径或者钻头泥包时,将会产生更大的波动压力。钻柱运动将会产生非常大的波动压力。例如,所谓的“拔活塞”式上提钻柱,就会产生相当大的抽汲压力;而过快的下放钻柱,又会产生非常大的激动压力。实际上,波动压力在钻井中可能诱发许多事故。抽汲压力使大量地层流体侵入井内,激动压力有可能压漏地层,使井内液柱压力降低,同样使地层流体侵入井内,因此,大量井涌是在起、下钻情况下发生的。另外,起钻过程中没有及时、有效地往井内灌入钻井液,使井内钻井液液柱压力降低,也常常诱发井涌。同时,抽汲压力和激动压力也可能诱发井壁坍塌,造成井下复杂。

为了讨论问题方便,下面定义井内有效压力为 p_{he} ,并考虑影响井内压力的几个重要因素。设

$$p_{he} = p_n + \Delta p \quad (1-2)$$

并且

$$\Delta p = \Delta p_r + \Delta p_a \pm p_s \quad (1-3)$$

式中: Δp_r 为钻井液中含岩屑增加的压力值, MPa; Δp_a 为环空流动阻力增加的压力值, MPa; p_s 为起下钻波动压力值, MPa。

式(1-3)中,考虑激动压力时, p_s 前取“+”;考虑抽汲压力时, p_s 前取“-”。一般情况下,由于 Δp_r 、 Δp_a 与 p_s 等许多因素有关,因此, Δp 并不容易准确确定,因而 p_{he} 也不容易准确

定。令 p_p 代表地层压力,由式(1-1)~式(1-3)可知,当 $p_h = p_p$ 时,则 $p_{he} > p_p$;而当 $p_{he} = p_p$ 时,则 $p_h < p_p$ 。从钻井实际出发,下面定义:当 $p_{he} = p_p$ 时的钻井方式为平衡压力钻井,为了安全钻井,一般 p_{he} 比 p_p 略大一些,即所谓近平衡压力钻井。

二、地层流体的侵入

1. 地层流体的分类

地层流体包括油、气、水。其中气可为天然气、二氧化碳或硫化氢气体等,水可为淡水或者盐水。

2. 地层流体侵入的原因

造成井底有效压力降低进而导致地层流体进入井内的原因有多种,主要是钻井液密度低、环空钻井液液柱压力降低、起钻抽汲、停止循环等。

三、流体在环空中的上窜速度

1. 油和水的上窜速度

通过卡钻泡油的实例发现,低密度液体在高密度液体中存在明显的上浮现象,但是,钻井实际中往往把油和水等侵入液的上窜速度忽略不计,通常用迟到时间法进行测量。

2. 以水为液相的气体上窜速度

对于气泡状流型:

$$v_g = \frac{Q_g + Q_w}{W} + 1.53 \left[\frac{g(\rho_w - \rho_g)\sigma}{\rho_w^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1-4)$$

对于段塞状流型:

$$v_g = 1.2 \frac{Q_g + Q_w}{W} + 0.35 \left[\frac{gd(\rho_w - \rho_g)\sigma}{\rho_w} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1-5)$$

式中: v_g 为气体上窜速度, m/s; Q_g 为气体流量, m^3/s ; Q_w 为液体流量, m^3/s ; ρ_w 为液体密度, kg/m^3 ; ρ_g 为气相密度, kg/m^3 ; A 为流道截面积, m^2 ; σ 为气体表面张力, mN/m ; d 为流道直径, m 。

一般情况下,当截面含气率大于 20% 时,即认为由气泡状流型开始向段塞状流型过渡。在常温常压下,气泡相对于液相的滑脱速度其数量级为每秒几厘米到十几厘米;而在段塞流型下,气泡的上窜速度约为 0.5~0.8 m/s。研究表明,在相同的介质下,随着含气率的增加而气体上窜速度加快。

3. 以钻井液为液相的气体上窜速度

实验表明,对于相同的含气量,在以非牛顿流体的钻井液液相中气体上窜速度比以水为液相的快。有的学者研究认为,气体在钻井液中的上窜速度为 0.5 m/s 左右。实际上,当含气量很少时,在钻井液的粘滞力作用下,气体在钻井液中的上窜速度非常低,与油和水的上窜速度差不多。严格来讲,气体在钻井液中的上窜速度是随着含气量、井深、流型、温度和压力的变化而变化的。

4. 浅层气

不少地区在 100~500 m 的地层中存在浅层气。尽管浅层气压力不会太高,但是,控制

难度一点不亚于深层的高压气层。首先,气层距离井口很近,一旦钻开浅气层,气体很快到达井口,从发现溢流到井涌、井喷的时间非常短,有不少还没有采取任何措施就井喷失控的实例。另一方面,由于表层或者技术套管下得不够深,地层抗破能力非常低,就是关井成功,关井压力也不能太高,气体压破地层从钻台周围冒出,造成设备基础塌陷的情况也屡见不鲜。

四、地层流体侵入的检测

地层流体侵入的征兆主要有钻时加快、钻井液总量增加(溢流)、钻井液返出流量增大、返出钻井液温度增高、返出钻井液密度降低、返出钻井液电导率变化、返出钻井液黏度变化、循环压力下降、循环槽面罐面油气显示、大钩负荷增加等。

地层流体侵入的检测方法主要有钻井液池面检测法、返出钻井液流量检测法、声波气侵早期检测法等。

五、油气井控制

及时发现溢流是油气井控制的关键。关井越早、越快,地层流体侵入井内就越少,井控也就越容易。

1. 关井

关井就是进行油气井控制,关井分为软关井和硬关井。关井步骤分别有钻进中、起下钻杆中、起下钻铤中和空井等作业条件下的“四七”动作。

2. 压井钻井液密度计算

钻具内的钻井液是没有受到地层流体影响的,因此,立管压力加上钻井液液柱压力应当等于地层压力,则

$$p_p = p_{sp} + p_{hi} \quad (1-6)$$

式中: p_{sp} 为关井立管压力,MPa; p_{hi} 为钻柱内静液柱压力,MPa; p_p 为地层压力,MPa。

由式(1-6)计算出地层压力 p_p ,然后增加适当的附加系数计算出压井钻井液密度。

3. 压井

压井的目的是重新建立压力平衡。压井排量一般选择正常钻进排量的 1/2 到 1/3。常用的压井方法主要有司钻法、工程师法、循环加重法。另外,还有置换法、先强行下钻后压井法、体积法、顶部压井法、关井后带压下钻压井法和动力压井法等。

第 3 节 井喷失控井喷流出口速度预测

井喷失控是石油及天然气勘探开发中的灾难性事故。井喷失控井储层压力高、产量大,喷流速度达亚音速或音速。喷流及燃烧火焰柱高一般在 40~50 m,最高达 100 m。高压下喷出的天然气流卷吸空气混合燃烧,温度高达 1 000~1 800 ℃,热辐射强。即使井喷失控未着火的井,由于喷出流体中常含有毒气体(H_2S 、 CO_2 等)在大气中弥散也会造成严重的环境

污染,伤害人类生命。

失控井喷流可视为轴对称(圆形)自由紊动正浮力射流,喷流在井口上空的力学特征(性)参数是失控井处理方案设计、处理施工作业的重要依据。喷流出口速度(μ_0)是喷流形态描述及速度场、温度场、预测的基础数据。现代流动显示测量技术如粒子图像测速(PIV)、激光诱导荧光(LIF)、层析技术(CT)、激光分子测速技术等都对复杂流动显示与测量的先进方法。但运用这些技术都必须满足一个基本点,如粒子图像测速需要在流场中播入粒子,激光诱导荧光需把某些物质(如碘、钠或荧光燃料)溶解或混合于测量流体中,层析技术一般只能用于定常流,而粒子投放技术是激光测速中的关键。由于井喷失控井井口环境条件的限制,难于在井口直接安放测量仪表测量喷流参数,井喷失控后也无法在高速喷流中放入参照物。因此,一般的测量仪器也无法对喷流进行遥测。笔者采用在钻井、完井过程中获得的地层特性参数,基于气体在管内及环空流动的动力学方程探讨了井喷失控井在不同井筒流道[空井、井内有管柱(堵)、井筒内有管柱(未堵)]的喷流速度(μ_0)的预测模型。这些预测模型将在全尺寸实验井验证完善。

一、短管模型

井喷失控井筒流道及出口几何特征是十分复杂的,井筒流道会出现井筒内无管柱的空井、井筒内有管柱但管柱堵塞(如装有单流阀)、井筒内有管柱(未堵)三种情况。而喷口也可能出现如喷管或扩压管的几何形状。短管模型视喷井井筒为一喷管,即在求出喷井绝对无阻流量(q_x)后,以该流量计算喷流压耗,以喷层能量(地层压力)与压耗之差作为短管内压力,并近似认为喷流通过“短管”的流动为一元等熵流动,导出喷流的出口速度(μ_0)。

二、喷层产量方程

井喷失控前,在钻井、完井过程中,通过地质录井、测井、钻井液性能及随钻监测方法可以初步获得喷层厚度、渗透率、孔隙率、地层压力等数据。在同一区块的井还可以通过邻井试采资料取得相关数据。因此,井喷失控后可以利用这些数据,通过气井绝对无阻流量假设在当前地层压力条件下的二项式方程估算喷流的体积流量($C_0 q_x$),以此流量预测喷流在井筒流动中的能量损耗(p_{wf})。

$$q_x = \frac{[A^2 + 4B(p_p^2 - p_x^2)]^{\frac{1}{2}} - A}{2B} \quad (1-7)$$

$$\text{其中: } A = \frac{1.291 \times 10^{-3} \bar{\mu} \bar{Z} T}{Kh} \left[\ln \frac{0.472 r_e}{r_w} + S \right], B = \frac{2.282 \times 10^{-21} \beta r_g \bar{Z} T}{r_w h^2}.$$

三、喷流在井筒中流动方程

喷流出口速度、喷口内流动压力是喷层流体总能量流动至喷口时剩余能量的函数。根据井筒流道特征,作以下假设:喷流在井筒中的流动为一元绝热的稳定流;气柱温度为井筒平均温度;气体偏差因子(Z)取井筒内气体的平均偏差因子;忽略喷流与套管(裸眼)摩擦损失;略去动能项影响。在以上假设条件下,由能量守恒方程建立喷流在井筒流道中的能量方程:

$$dp + \rho q dH + dL_w = 0 \quad (1-8)$$