

深水钻井中救援井关键技术

田 峥¹, 周建良¹, 唐海雄², 蒋世全¹, 郝希宁¹

[1. 中海油研究总院, 北京 100027; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518067]

摘要 深水救援井具有高风险、高技术、高投入和高社会敏感性等特点。在深水作业井失控、常规救援措施难以有效实施时,深水救援井是公认的终极救援手段。目前我国救援井数量较少,深水救援井经验几乎为空白。在调研国内外救援井的基础上,对深水救援井一系列关键技术进行了梳理和分析。对救援井的井位选择、轨迹连通、压井和弃井等几项关键技术,进行了技术分析,可为后续的救援井研究提供一定参考。

关键词 深水钻井; 救援井; 轨迹; 连通技术; 压井; 弃井

中图分类号 TE58 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2014)02-0106-05

Key Technologies of Relief Wells in Deepwater Drilling

TIAN Zheng¹, ZHOU Jian-liang¹, TANG Hai-xiong², JIANG Shi-quan¹, HAO Xi-ning¹

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China; 2. CNOOC Ltd.-Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518067, China)

Abstract Deepwater relief wells exhibit characteristics of high risk, high technology, high investment and high social sensitivity. When the well is out of control and the routine rescue measures fail, relief well is regarded as the ultimate rescue means. However, in China, the quantity of relief wells is relatively small, and the deepwater relief well experience is almost blank at present. Based on the research of relief wells at home and abroad, a series of key technologies of deepwater relief well are sorted and analyzed. Several key technologies such as location selection, the trajectory of relief well connected, well control and well abandonment are analyzed. The results provide certain reference for subsequent relief well study.

Key words deepwater drilling; relief well; trajectory; connecting technology; well control; well abandonment

0 引言

随着石油开发逐步从浅水走向深水,我们对深水作业存在的各种风险的认识不断加深。2010年4月20日墨西哥湾“深水地平线”平台井喷失控事故的恶劣后果给石油行业敲响了警钟。深水作业风险高,各种复杂情况都有可能发生。一旦作业失控,常规应急救援措施难以奏效,就需要考虑终极手段——救援井。

救援井最初通过在井喷层附近钻直井来缓解膨胀地层的压力并用高速率开采来降低事故地层孔隙压力。其基本原理是:井眼轨迹与事故井的轨迹在地层的某个层位连通或汇合,将高密度的钻井液

或水泥通过救援井输入事故井,以达到油(气)井灭火或控制井喷的目的。

救援井与一般的油气井不同。特殊的使用目的与苛刻的作业环境决定了救援井特殊的技术要求。救援井的井位选择、井身结构与轨迹设计、连通技术、压井技术及弃井方法等关键技术都不同于常规油气井。本文就海上救援井研究的几个关键技术要点进行逐一分析。

1 救援井井位优选

在制定救援井方案的过程中,井位优选十分重要。需要充分考虑多种因素:区域海洋环境(风、浪、流、温度等)、海底地形地貌、交通运输等。此外,救

收稿日期:2014-02-21

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05026-001-04)

作者简介:田峥(1984—),男,硕士,工程师,主要从事岩石力学在深水钻完井中的应用方面的研究。

援井自身的作业安全、钻井速度和效率等因素亦需考虑。鉴于深水救援井作业的复杂环境,一般救援井设计需考虑备用一个救援井井位。

(1) 风向因素。救援井井位确定时,需考虑当地的季节性气候和风向。一般来说,救援井的井位要位于事故井的上风处,避免事故井喷出的流体影响救援井作业安全。事故井着火时尤其如此,在大火伴随喷出高压流体的情况下,一旦风向不利,势必对救援井作业造成威胁。

(2) 井位间距选择。救援井与事故井井口间距的计算可以从井斜角反推。定向钻井施工中最佳井斜角为 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ^[1]。在该井斜角范围内,定向井造斜、摩阻扭矩、水力携岩性能较好。根据地层岩性、储层埋深及连通位置进行造斜点优选。在最佳造斜点和造斜率确定后,可反推确定两井之间的距离。

(3) 地层情况。对于深水救援井,海底障碍物、边坡稳定性、浅层地质灾害预测等对井位优选非常重要。井位选择中需要避开那些复杂情况较多的区域,以便达到快速高效钻井的要求。

从整体工程的理想角度考虑,允许救援井的钻井位置在井喷井1000英尺(约305 m)内,偏移角度在 15° 内^[2]。最好的方向是充分利用地层漂移和地层方位变化趋势。

2 井眼轨迹设计及井身结构设计

利用定向钻井技术,选择有利的井位,合理设计井身剖面及井身结构,以尽可能少的钻井进尺,定向钻至事故井的压井点。

井眼轨迹常用的有五段式和三段式两种^[3]。前者通常用在连通位置较深、难以连通的情况,后者适合于连通层位较浅的情况。地下深层钻井中,井眼轨迹及方向难以精确控制,为了进行井眼连通,在寻求连通点的过程中通常需要反复调整方位及方向,实际救援井的轨迹显得不规则^[4],轨迹示意图见图1。

通过国内外的实践经验,井眼轨迹设计及井身结构设计主要技术原则如下:

(1) 对于定向井轨迹设计,应在尽可能缩短救援井轨迹长度的条件下,使其与失控井井口有足够距离,以保证作业安全,同时快速钻井。

(2) 对于深水井,由于水深较大、泥线到靶点垂深浅,因此造斜点选择以降低整体狗腿度为宜。

(3) 为降低侧钻风险、增加一次命中连通率,以事故井内套管为磁探测参考物,以事故井最后一层套管鞋处作为连通点;因为靶前距短,因此造斜点的

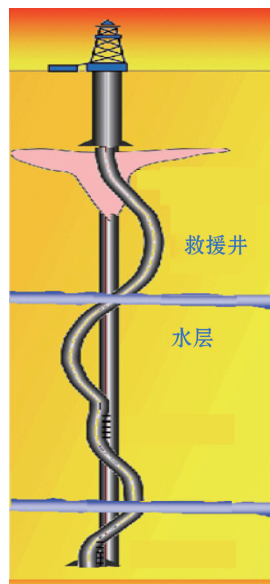


图1 救援井井眼轨迹示意图

Fig. 1 Borehole trajectory of relief well

选择建议在36英寸(1英寸=2.54 cm)鞋以下满足不受磁干扰的深度时立即进行造斜,以连续造斜方式到达靶点。

(4) 尽量利用地层自然增、减方位(井斜)趋势,造斜率大小考虑中靶及井下工具和套管能顺利下入;造斜率要满足中靶要求,并且考虑井下工具和套管的入能力^[5]。因此,两个备用井位均需要作为救援井的设计井位。

3 救援井连通技术

传统的磁性测斜仪、陀螺测斜仪或随钻测量(MWD)工具无法有效精准地使救援井与事故井在靶点成功连通。为了精确探测救援井与事故井的相对位置,保证一次连通成功,应采用特殊的邻井距离探测工具。

目前,Wellspot 是国际上比较先进且广泛使用的能够精确探测救援井与事故井间距的电磁测距工具^[6]。该工具主要包括地面供电设备、电极、探管和计算软件。

套管等金属相比地层具有更高的电导率,当电极附近存在套管或钻杆等金属材质时,电极注入的电流大部分在套管或钻杆处聚集,套管内产生向上和向下传输的电流,套管周围将产生变化的磁场,这个变化的磁场可由电极下的探管测得。Wellspot 工具的主要技术参数如表1所示;工作原理如图2所示。

表 1 Wellspot 工具主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of Wellspot tool

测距范围	测距精度	测量方位	工具外径	耐温	耐压
/m	/%	精度/(°)	/英寸	/°C	/MPa
60	±20	±3	2	200	172.375

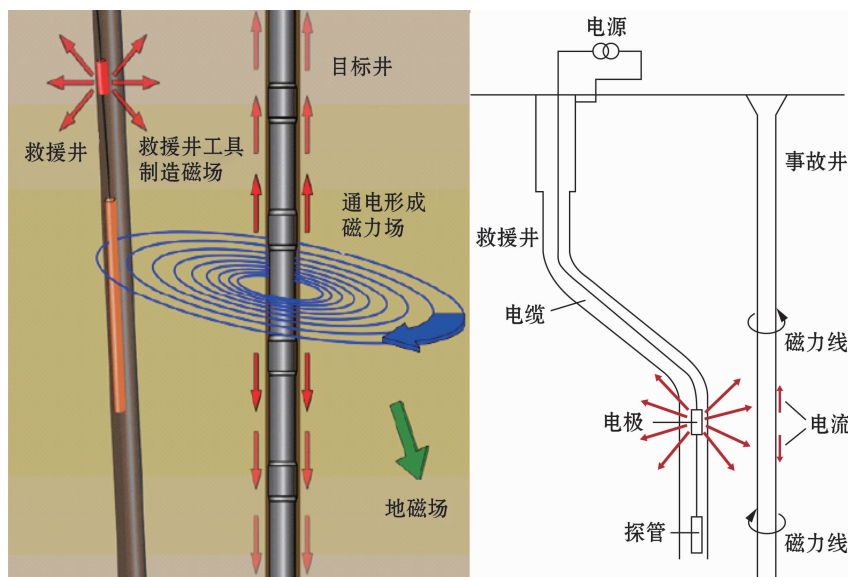


图 2 Wellspot 工具工作原理示意图

Fig. 2 Working principle of Wellspot tool

图 3 给出了救援井到事故井相对位置计算模型。如图 3 所示, H 为事故井套管内电流 I 在探管处产生的磁场强度; H_p 为 H 在两交变磁场传感器所在平面上的投影。显然, H_p 可由位于 x 和 y 方向的两交变磁场传感器测得。由图 3 可知:

$$H = H_p - H_d \cdot n_2, \quad (1)$$

$$H_d = (H_p \cdot n_1) / (n_1 \cdot n_2), \quad (2)$$

$$r / (r \cdot r) = 2\pi(H \times n_1) / I. \quad (3)$$

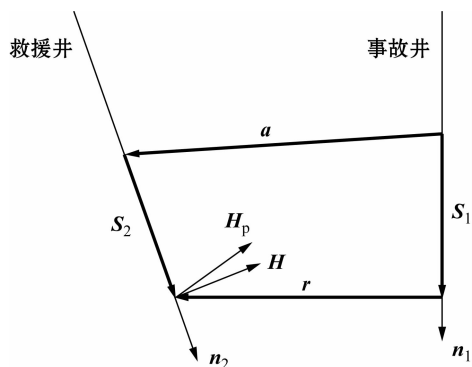


图 3 救援井到事故井相对位置计算模型

Fig. 3 Calculation model for the relative position between relief well and accident well

由式(1)~式(3)可知,当 H_p 由两正交的交变磁场传感器测得后,就可以唯一地确定 H 、 r 和 a ,从而也就确定了救援井到事故井的距离。

Wellspot 工具的局限性在于无法进行随钻测量,每次测量都需要提出钻具,然后下入 Wellspot 工具,大大增加了钻井时间。因此该工具主要用于救援井这种特殊工况,不利于在其他工况(如丛式井防碰等)中推广应用。

4 救援井压井

压井的目的是恢复井眼内压力平衡,即井底压力等于或稍大于地层压力,并且还必须把地层进入井眼中的流体安全地排出井眼或安全地再压回地层。压井的原则是保持井底常压,也就是在压井过程中,井底压力略大于地层压力并且使井内压力保持不变^[7]。

救援井钻达目的层位、连通救援井与事故井眼之后,由定向救援井向高压油气层循环重泥浆压井,最终达到制止井喷、恢复井内压力平衡的目的。

海上常用压井方法包括海洋司钻法、海洋工程师法和动力压井法。

海洋司钻法压井又叫做二次循环法压井,第一循环周用原钻井液循环排出井内受污染钻井液,待压井钻井液配制好后,第二循环周将压井液泵入井内,压住地层。海洋工程师法压井又称做一次循环法压井,是在一个循环周内完成的。

动力压井法是通过增加压井循环排量增加流动阻力,从而增加井底压力,达到压井目的。其适用条件为:高压地层在井底,地层破裂压力小的薄弱地层

不一定在井底。在钻井过程中动力压井的环空流动压降均匀分布在井身长度上,常规压井的回压作用在整个井身的每一点上,也就是说动力压井法将产生较小的井壁压力。套管下得越浅,使用动力压井时套管鞋处的压力就越比使用常规压井方法时小,从而越安全。

表 2 比较了上述几种压井方法的特点。

表 2 动力压井法和常规压井方法的比较

Table 2 Comparison between dynamic well control method and conventional well control method		
比较内容	动力压井法	常规压井法
临时压力来源	环空流动压降	井口回压
建立临时压力方法	增大流体循环速度	调节节流器
井口状态	不关井	关井调节节流器
环空流动压降	主要因素	忽略
优点	薄弱地层受力小,操作方便,及时迅速	所需压井液量少
缺点	对机泵要求高	薄弱地层受力大,操作麻烦

5 弃井技术

救援井弃井方案需要根据压井后能否重入待救援井井口情况分类而定。

若被救援井压井后具备重入的条件,则重新安装被救援井井口,从被救援井介入进行弃井。根据被救援井的套管完整性情况,还应建立井筒与地层的有效封隔。若被救援井压井后不具备重入的条件,根据情况可考虑通过救援井注入水泥浆进行弃井。

救援井的弃井宜采取临时弃井措施,直至被救援井完成弃井后再对救援井按照《海洋石油弃井规范》的要求进行永久弃井。

对于能重新入老井眼的情况,以连通点为被救援井 20 英寸套管鞋为例分别针对救援井和被救援井的情况进行弃井分析。

(1) 被救援井的弃井。下入固井管柱到裸眼段油气层位置,注水泥塞封隔油气层,自所封堵油、气、水层底部 30 m 以下向上覆盖至所封堵层顶以上不少于 50 m;裸眼段最后一个水泥塞需返进 20 英寸套管鞋至少 50 m,候凝、探水泥塞顶面并试压合格;20 英寸套管鞋内坐封一只桥塞,进行负压测试,用抑制性海水顶替井筒内的泥浆;在桥塞上注长度不小于 100 m 的水泥塞;注入弃井最后一个水泥塞,长度不小于 50 m,且水泥塞顶面位于海底泥面下

4~30 m 之间。

(2) 救援井的弃井。下入固井管柱到裸眼段油气层位置,注水泥塞封隔油气层,自所封堵油、气、水层底部 30 m 以下向上覆盖至所封堵层顶以上不少于 50 m;裸眼段最后一个水泥塞需返进 9-5/8 英寸套管鞋至少 50 m,候凝、探水泥塞顶面并试压合格;9-5/8 英寸套管鞋内坐封一只桥塞,进行负压测试,用抑制性海水顶替井筒内的泥浆;在桥塞上注长度不小于 100 m 的水泥塞;在 20 英寸表层套管鞋深度附近的内层套管内向上注一个长度不小于 50 m 的水泥塞;注入弃井最后一个水泥塞,长度不小于 50 m,且水泥塞顶面位于海底泥面下 4~30 m 之间。

6 结束语

(1) 救援井技术中的井位选择、轨迹、井身结构设计、连通工具与技术、压井及弃井技术,相比于一一般的油气井钻井都有较大的区别。

(2) 救援井井位选择中考虑了风向、距离及地层情况,主要是从救援的安全作业角度进行考虑。救援作业现场情况复杂,还需考虑作业失败、移位钻井等情况,因此,需要准备备用井位。

(3) 救援井轨迹不同于一般井眼轨迹,取决于井眼的连通情况。地下深层处,井眼方位调整难度大,难以准确控制。因此,救援井轨迹实钻过程中会反复调整进行连通,轨迹会比较不规则。

(4) 救援井连通作业,需要工具对井眼轨迹进行精度的测量和定位。介绍了能够精确探测救援井与事故井间距的电磁测距工具 Wellspot,并对其工具技术参数和使用条件进行了介绍。

(5) 简要介绍了救援井的几种压井方法,并进行了比较和分析。弃井中对救援井压井后是否具备重入井眼条件的两种情况进行了分析。

参 考 文 献

- [1] Wolff C J M, de Wardt J P. Borehole position uncertainty-analysis of measuring methods and derivation of systematic error model [J]. J Petroleum Technology, 1981, 33 (12): 2339.
- [2] Wilson H, Brooks A G. Wellbore position errors caused by drilling fluid contamination[C]. SPE, 2001: 71400.
- [3] 董本京, 高德利, 柳贡慧. 井眼轨迹不确定性分析方法的探讨 [J]. 天然气工业, 1999, 19(4): 59.
- [4] Aadnøy B S. Modern well design [M]. Huston: Gulf Publishing Company, 1996. 109.
- [5] 李克向. 钻井手册(甲方)(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. 130—131, 135—140, 147.
- [6] Prange M D, Tilke P G, Kaufman P S. Assessing borehole-position uncertainty from real-time measurements in an earth model[C]. SPE, 2004: 89781.
- [7] 海洋钻井手册编写组. 海洋钻井手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. 86.

• 书 讯 •

《船舶结构设计》简介

谢永和, 吴剑国, 李俊来 编著
上海交通大学出版社出版
定价: 28.00 元

内 容 提 要:

本书紧跟现代船舶设计技术的最新发展,在作者多年教学、科研和设计经验的基础上,特别增加了船体屈曲强度、船舶舫剖面结构优化设计、应力集中、有限元在船体结构设计中的应用以及疲劳强度等专题分析研究,更加全面、深入和系统地展现了船舶强度与结构设计的理论与方法。本书理论浅显易懂,分析细致透彻,实例资料详实,图文并茂,是近年来难得一见、适合不同读者需求、内容非常全面的船舶与海洋工程类专业教材。该书必将成为有志于从事船舶与海洋工程的广大科技人员和管理人员的良师益友。

本书共分 9 章,内容包括船体外载荷、船体总纵强度、船体局部强度、船体纵向扭转强度、船体结构规范法设计、船舶舫剖面结构优化设计、应力集中、有限元法在船体结构设计中的应用以及疲劳强度。

本书可供船舶与海洋工程及其相关专业、流体力学专业、航海技术专业等高年级本科生、研究生教学使用,也可作为有关专业的教师、工程师、科研人员和技术管理人员的参考书。



国家“十二五”重点图书
船舶与海洋工程专业规划教材
浙江省高等教育重点建设教材

船舶结构设计

谢永和 吴剑国 李俊来 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS