

射孔枪未起爆原因分析及处理措施

郭振杰^{1,2}, 张晓^{1,2}, 赵宇光^{1,2}

1. 中国石油集团长城钻探工程有限责任公司测试公司 北京 100101

2. 中油测井技术服务有限责任公司 北京 100101

通讯作者: Email: zhangxiao@cnlc.cn

项目支持: 中国石油集团长城钻探工程有限责任公司科技研究项目“海外复杂油气井测试工艺技术研究及应用”(GWDC201802-05)

引用: 郭振杰, 张晓, 赵宇光. 射孔枪未起爆原因分析及处理措施[J]. 油气井测试, 2020, 29(1): 18-22.

Cite: GUO Zhenjie, ZHANG Xiao, ZHAO Yuguang. Cause analysis and treatment for failure perforation of perforating gun [J]. Well Testing, 2020, 29(1): 18-22.

摘要 X井是某油田的一口生产井, 采用APR射孔-测试联作工艺进行试油时, 应用了OWEN低压机械安全点火头, 一开井进行投棒射孔操作, 在地面没有感到射孔产生的震动, 显示头也无气泡显示, 一关井3h后二开抽汲, 地层无流体产出, 判断射孔枪未起爆。根据机械安全点火头工作原理及所进行的操作, 判断已投棒解锁, 但撞针未能下行撞击起爆器。采取向油管内增压的措施后成功射孔, 发射率100%, 但未能实现负压测试。通过点火头外观观察及压力历史数据分析, 判断射孔枪未能起爆的主要原因是压井泥浆性能较差, 泥砂和重晶石粉沉积在点火头处, 撞针无法在设计的油管内静液柱压力下完成下行动作。该分析结果可对类似井筒环境的射孔作业提供借鉴。

关键词 射孔-测试联作; APR+TCP; 机械安全点火头; 静液柱压力; 压井液; 抽汲

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.01.004

Cause analysis and treatment for failure perforation of perforating gun

GUO Zhenjie^{1,2}, ZHANG Xiao^{1,2}, ZHAO Yuguang^{1,2}

1. Test company of CNPC Great Wall Drilling Engineering Co., Ltd., Beijing 100101, China

2. China National Logging Corporation, Beijing 100101, China

Abstract: Well x is a production well in an oil field. In oil production test with the combination of APR test and perforation, Owen low-pressure mechanical safety ignition head is used. After the first open-well for rod casting and perforating operation, there is no vibration caused by perforating on the ground, and there is no bubble display on the display head. After the first shut-in for 3 hours and the second open-well for swabbing, there is no fluid production in the formation, so it is judged that the perforating gun does not detonate. According to the working principle and operation of the mechanical safety ignition head, it is judged that the rod has been thrown and unlocked, but the striker fails to impact the initiator downward. After the pressurizing in the tubing, the perforating was successful, the emissivity was 100%, but the negative pressure test could not be realized. According to the appearance observation of the ignition head and the analysis of the pressure history data, the main reason why the perforating gun failed to detonate is that the killing mud performance is poor, the mud sand and barite powder are deposited at the ignition head, and the striker cannot complete the downward movement under the hydrostatic column pressure in the designed tubing. The result of this analysis can shed light on perforating operation in similar wellbore environment.

Keywords: perforation and test combination; APR+TCP; mechanical safety ignition head; hydrostatic column pressure; killing fluid; swabbing

射孔-测试联作是油管输送式射孔和地层测试联合作业技术, 可以实现负压射孔, 是保护油气层的一种重要方式, 在国内外油田得到了广泛的应用^[1-4]。根据所选点火头的类型, 可采用投棒或加压的方式起爆射孔枪^[5-7], 使用射孔监测仪感受井

口振动判断射孔情况, 如地层无法自喷, 再根据井口泡沫头观察情况和抽汲结果进一步确认是否射孔成功。采用投棒起爆方式时, 当判断射孔枪未成功起爆, 应先打捞投棒, 再解封起出射孔-测试联作工具。樊宏伟等^[8]总结射孔-测试联作出现的问

题,从封隔器工作压差、射孔负压值、起爆点显示等方面提出了管柱及工艺优化方案。李四江^[9]探讨了复合射孔-测试联作由于工艺的限制,不能实现诸如井下开关井操作的原因,提出了相应的解决措施。王树申^[10]通过对射孔-测试联作施工中起爆器销钉剪切值,以及施工中液面高度变化对射孔器的影响分析,理顺了射孔关键质量控制环节。陈俊革^[11]结合中原油区文、卫、马油田属复杂断块油气藏储层性质,研究了射孔参数对射孔效率的影响,通过引进超正压射孔、1 m 弹射孔、袖套式射孔等新型射孔技术,使射孔完善程度得到提高,取得了显著的经济效益。米红学等^[12]提出由于射孔枪点火瞬间产生的压力波动,有时足以破坏井下工具和套管,造成严重的井下事故。经对引起井筒压力场变化因素的讨论,对现场实测数据的分析,结合地层参数,论述了射孔-测试联作管柱安全性。周建国^[13]提出射孔酸化联作,实现了一趟管柱完成射孔和酸化两项施工作业。庾洪伟等^[14]针对吉林英坨油田储层物性普遍较差,优选采用下挂式复合射孔工艺技术进行完井射孔,起到了增产、增效的作用,与水力压裂效果进行比较,证实了复合射孔更适用于英坨油田的新井投产。代景新^[15]探讨了连续油管传输射孔技术在大庆油田成功应用,连续油管携带小直径射孔枪过滑套射孔,携带大直径射孔枪套管内射孔,小直径连续油管携带小直径射孔枪过滑套射孔打通压裂通道。张文斌等^[16]针对射孔弹起爆时产生的瞬时压力场进行了研究,建立了射孔冲击载荷的计算模型,通过分析得出射孔弹数目、引爆间隔时间、装炸药量、人工井底物理条件及“口袋”深度对射孔冲击载荷的影响规律。薛世峰等^[17]建立“套管-水泥环-地层”的三维分层有限元数值模型,结合地应力及射孔数据,运用单一变量理论,分析了螺旋射孔各参数对地层破裂压力的影响。于开勋^[18]研发了地层二次爆炸射孔技术,最大限度地提高及恢复低孔低渗储层的生产能力,提高射孔完井的效率,并经过了现场试验验证。

可见,射孔技术已成为十分成熟的试油技术,在解决生产问题的同时,不断得到完善发展^[19-20]。但在某油田一口生产井采用 APR 射孔-测试联作工艺进行试油时,由于受现场条件限制,应用了 OWEN 低压机械安全点火头。在下入射孔测试管柱后,一开井进行了投棒射孔操作,但在地面没有感到射孔产生的震动,显示头也无气泡显示。一关井 3 h 后

二开抽汲,地层无流体产出,判断射孔枪未起爆。因此,对射孔枪未起爆原因进行了分析,并提出了相应的处理措施。

1 射孔测试工艺概述

某油田一口生产井,采用 APR 射孔-测试联作工艺,测试工作制度为一开一关,二开抽汲。

1.1 射孔测试工艺

该井射孔测试井段为 1 461.0~1 465.0 m,人工井底为桥塞,深度 1 481.0 m,优化联作工具组合(自上向下)为:安全循环阀+LPR-N 测试阀+压力计托筒+液压旁通阀+液压震击器+安全接头+RTTS 封隔器+筛管+机械安全点火头+127 射孔枪。

由于现场条件限制,采用机械安全点火头,用投棒的方式起爆射孔枪。井筒内压井液为密度 1.07 g/m^3 泥浆,性能较差,泥浆主要成分为重晶石粉和增黏剂。油管内测试阀上部液垫为清水,高度 619.0 m,产生的静液柱压力为 4.7 MPa。

1.2 机械安全点火头结构及工作原理

低压机械安全点火头主要由点火头上盖、固定销钉及撞针组成(图 1)。

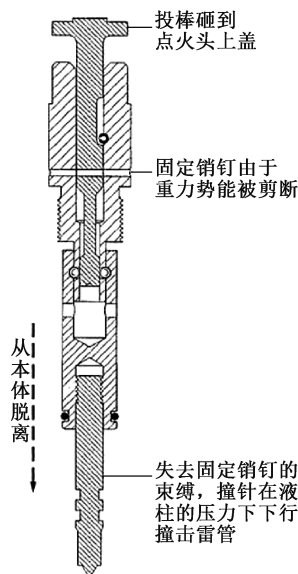


图 1 低压机械安全点火头结构及原理示意图

Fig.1 Structural and principle diagram of low-pressure mechanical safety ignition head

低压机械安全点火头是一种带保险机构的棒击点火头。当井内无液体,或压力小于产品安全压力时,系统处于安全状态,其工作原理为投棒解锁、液柱压力起爆,即起爆射孔枪需经过两个步骤:①解锁。投放棒通过自由落体砸到点火头撞针上部后,剪断点火头撞针上的限位销钉,失去限位销

钉的束缚后,在外力作用下,点火头撞针可以在点火头外筒内进行有限距离的移动。②液柱起爆。当点火头撞针上部的静液柱压力超过最小设计起爆压力时,在液柱压力作用下撞针可在点火头外筒中下行到底,触碰起爆器,起爆射孔枪。

2 射孔故障及处理措施

根据地面判断及压力历史分析射孔故障出现过程,并提出相应的处理措施。

2.1 射孔故障出现过程

射孔-测试联作工具下到设计位置后,校深、坐封、环空加压打开测试阀。测试阀打开 3 min 后投棒,投棒 2 min 后在钻台上没有感到明显振动。在抽汲树泡头处观察 10 min,未发现气泡,即按施工方案卸掉环空压力开始关井恢复。关井 3 h 后,环空加压打开测试阀开始二开井,仍没有观察到气泡。

为确定地层是否有液体流出,连接抽汲工具开始进行连续抽汲,每次抽汲前先探油管内液面高度。根据现场数据,每次抽汲液量约等于油管内液面下降体积,表明地层内没有出液。对抽汲液体取样进行氯离子浓度和 pH 值化验分析,氯离子浓度为 60 mg/L,pH 值为 7,与液垫清水的氯离子浓度和 pH 值结果相近。连续抽汲 10 次后,二开井已进行 2 h,油管内液面下降至 1 350.0 m,10 min 后再次下抽汲工具,探得油管内液面仍在 1 350.0 m。

根据以上现象,初步判断井筒内射孔枪未起爆。根据压力历史曲线进行分析(图 2),也说明了射孔枪未起爆。从投棒时刻压力曲线局部放大图可看出(图 3),投棒时刻压力曲线有明显波动,说明此时投棒已落到点火头顶部。但是,一关井恢复、二开井抽汲时,油管内压力没有变化,说明投棒后并未起爆射孔枪,地层流体没有进入封隔器以下的井筒和油管内部。

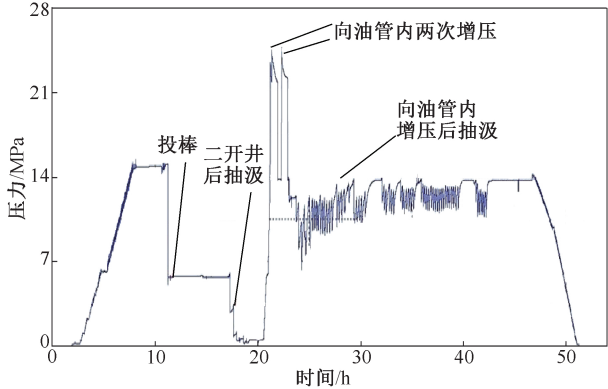


图 2 压力历史曲线图
Fig.2 History pressure curve

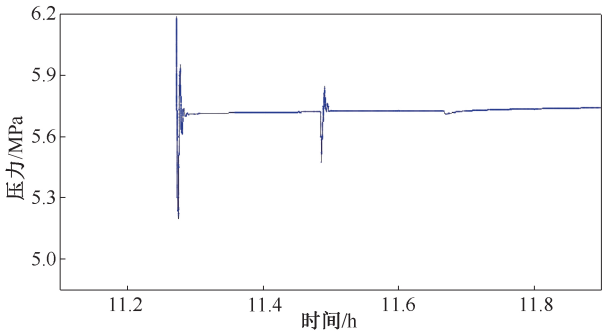


图 3 投棒时压力曲线放大图
Fig.3 Enlarged view of the pressure curve when throwing a rod

2.2 处理措施

根据所用机械安全点火头结构、工作原理和抽汲结果分析,认为投放棒已落到点火头上部,剪断了点火头撞针的销钉,但撞针因阻力未能下行到底撞击起爆器。因此,提出了在打捞起钻前,采取向油管内进行增压起爆的处理措施。

向油管内灌水使液面升至井口,用撬装泵向油管内持续增压,当油管内压力上升到 10.3 MPa 时,钻台上人员感到明显振动。停泵并关闭撬装泵与抽汲树之间的阀门保持油管内压力,此时监测到油管内压力开始持续下降,30 min 后油管内压力降至 7.9 MPa。将油管内压力释放至 0 后,再次向油管内增压至 10.3 MPa 并保压,油管内压力再次持续下降,30 min 后油管内压力再次降至 7.9 MPa。第二次释放油管内压力至 0,开始抽汲。根据每次抽汲前探得液面和抽汲进罐液体体积估算,地层内已开始出液;水分析氯离子浓度为 400 mg/L,pH 值为 9。在抽汲期间,还发现有少量油花,并在井口监测到可燃性气体。

根据以上现象和抽汲结果判断,向油管内增压后,射孔枪已起爆并射开地层(图 4)。

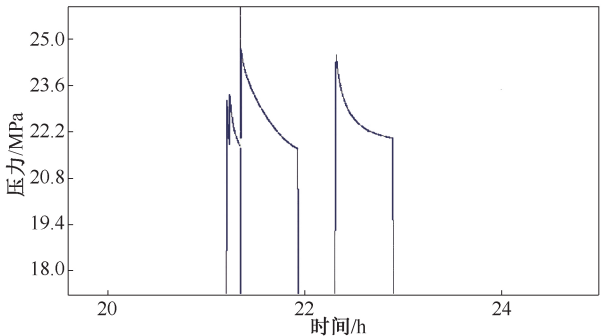


图 4 向油管内两次增压时压力计曲线放大图
Fig.4 Enlarged view of the curve of the pressure gauge for the twice tubing pressurizing

分析两次向油管内增压时段的油管内压力曲线,也说明增压后射孔成功。如图4所示,压力在持续上升到最高点时突然持续下降,即停泵后油管内无法保压,说明地层已被射开,油管内压力被挤进地层。在随后进行的抽汲时段内,每次起抽汲工具时,油管内压力也缓慢增长,如图3后段抽汲曲线,说明地层流体已进入油管内。

3 射孔枪未起爆原因分析

分析射孔枪未起爆原因,并提出相应的措施和建议。

3.1 射孔枪未起爆原因

该层测试结束后,起出射孔-测试联作工具,射孔枪发射率100%。同时发现,投放棒落到点火头上部,点火头及筛管处有大量重晶石粉和地层泥砂沉积(图5)。



图5 点火头上沉积的重晶石粉和泥砂实物图
Fig.5 Barite powder and silt deposits deposited on the ignition head

该层使用的低压机械安全点火头最小设计起爆压力为2.1 MPa,在投棒前,油管内点火头上部静液柱压力约4.8 MPa,但由于井筒内泥浆性能差,重晶石粉和泥砂堆积在点火头顶部,撞针在剪断限位销钉解锁后未能继续下行撞击起爆器。继续向油管内持续增压,使点火头撞针上部的液柱压力为设计最小起爆压力的数倍后,才能使撞针克服阻力动作。

3.2 措施及建议

在射孔测试联作管柱中采用低压机械安全点

火头进行射孔时,为保证射孔枪成功起爆,可采取如下措施建议:

(1)保证压井液具有良好的性能,防止固相颗粒沉积在点火头上。

(2)射孔工具下井前检查点火头,确保外筒无明显变形、密封件完好。

(3)设计负压射孔的液垫压力要高于点火头设计最小起爆压力,且留有安全余量。

(4)射孔工具上部可使用防砂筛管取代普通筛管。

(5)采用玻璃盘接头与点火头上部连接,在玻璃盘打碎之前,玻璃盘以上的油管空间和套管不能连通,投棒打碎玻璃盘后,油管方能和套管连通,可以有效防止泥砂在点火头上部堆积。

(6)射孔枪下部要留足“口袋”,用于沉积井筒内固体物质。

(7)射孔管柱采用冗余设计,射孔枪底部增加一个压力起爆点火头。

4 结论

(1)在采用投棒起爆方式的油管传输射孔(TCP)作业中,投棒解锁和静液柱压力是点火头撞针下行起爆的两个必要条件。投放棒未能成功砸到点火头上、油管内的静液柱压力低于点火头起爆最小压力、泥浆性能差导致点火头上部沉积固体都可能无法成功起爆。

(2)在确认已投棒剪销的前提下,可采用向油管内持续增压,提高静液柱压力的方法,推动受阻的点火头撞针下行撞击起爆器。但采用这种方式,会将工艺改为正压射孔。正压射孔在起爆瞬间使地层流体挤入地层,无法达到负压射孔减少泥浆对地层污染、清洁射孔孔道的效果。

(3)在类似的井筒环境中,尽量避免采用机械安全点火头。

致谢:感谢中国石油集团长城钻探工程有限公司测试公司同意本文公开发表。

参考文献

- [1] 高婷,刁林涛,夏国宏,等.射孔测试联作技术的改进及应用[J].石油仪器,2004,18(2):57-58.
GAO Ping, DIAO Lintao, XIA Guohong, et al. Improvement on the perforation joint formation testing installation and its application [J]. Petroleum Instruments, 2004, 18 (2):57-58.
- [2] 钟伟明,裘磊.负压射孔技术在月东油田高黏度油藏中

- 的应用[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(2): 81-83.
- ZHONG Weiming, QIU Lei. Application of negative pressure perforating technology in high viscosity oil reservoir in Yue-dong Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 9(2): 81-83.
- [3] 李俊杰. 地层测试(试油)技术的发展及展望[J]. 油气井测试, 2016, 25(5): 71-74.
- LI Junjie. Development and prospect for well test (oil test) technology [J]. Well Testing, 2016, 25(5): 71-74.
- [4] 李军贤. 泵送桥塞射孔联作技术在水平井的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(6): 56-57, 61.
- LI Junxian. Application of combined operation tech of bridge plug delivered by pump and perforation in horizontal well [J]. Well Testing, 2017, 26(6): 56-57, 61.
- [5] 丁希杰, 朱建新, 杨华. 投棒点火头安全设计及应用[J]. 石油仪器, 2009, 23(2): 15-16.
- DING Xijie, ZHU Jianxin, YANG Hua. Safety design of drop bar firing head and its application [J]. Petroleum Instruments, 2009, 23(2): 15-16.
- [6] 陆大卫. 油气井射孔技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 121.
- [7] 逯启高. 测试-射孔联作管柱优化[J]. 油气井测试, 2007, 16(1): 49, 51.
- LU Qigao. Optimization of combined operation string of perforation and testing [J]. Well Testing, 2007, 16(1): 49, 51.
- [8] 樊宏伟, 李坤全. 射孔-测试联作管柱及工艺优化[J]. 油气井测试, 2013, 22(2): 54-56.
- FAN Hongwei, LI Kunquan. Perforation-test combined string and its process [J]. Well Testing, 2013, 22(2): 54-56.
- [9] 李四江. 复合射孔-测试联作中值得探讨的几个问题[J]. 油气井测试, 2009, 18(1): 54-55.
- LI Sijiang. Some problems being worth notice about combining operation of compound perforation and well test [J]. Well Testing, 2009, 18(1): 54-55.
- [10] 王树申. 射孔-测试联作施工射孔关键质量控制节点分析[J]. 油气井测试, 2016, 25(5): 52-54.
- WANG Shushen. Key perforating quality control node analysis in TCP- DST operation [J]. Well Testing, 2016, 25(5): 52-54.
- [11] 陈俊革. 复杂断块油气藏射孔技术适应性研究及应用[J]. 油气井测试, 2003, 12(2): 57-60.
- CHEN Junge. A study on adaptability of the perforating technology and its application to complicated blocked oil/gas reservoirs [J]. Well Testing, 2003, 12(2): 57-60.
- [12] 米红学, 苏存元, 刘海峰, 等. 高压低渗深井射孔-测试联作工艺浅析[J]. 油气井测试, 2005, 14(6): 40-41.
- MI Hongxue, SU Cunyuan, LIU Haifeng, et al. A brief analysis for perforation and test combination operation tech in high pressure and low percolaiton deep well [J]. Well Testing, 2005, 14(6): 40-41.
- [13] 周建国. 射孔酸化联作技术在试油工艺中的应用[J]. 油气井测试, 2011, 20(6): 71-72.
- ZHOU Jianguo. Application of combination technology of perforation and acidification in oil test operation [J]. Well Testing, 2011, 20(6): 71-72.
- [14] 庾洪伟, 王树申, 邢学勇. 优化射孔工艺在吉林油田的应用[J]. 油气井测试, 2007, 16(2): 39-41.
- YU Hongwei, WANG Shushen, XING Xueyong. Application of optimized perforation design in Jilin Oilfield [J]. Well Testing, 2007, 16(2): 39-41.
- [15] 代景新. 连续油管传输射孔技术在大庆地区的应用[J]. 油气井测试, 2016, 25(4): 58-60.
- DAI Jingxin. Application of coiled tubing conveyed perforating in Daqing Oilfield [J]. Well Testing, 2016, 25(4): 58-60.
- [16] 张文斌, 谢胜, 卢齐. 射孔冲击载荷对射孔-酸化-测试联作管柱的影响分析[J]. 油气井测试, 2016, 25(6): 8-11.
- ZHANG Wenbin, XIE Sheng, LU Qi. Influencing analysis of perforation impact load on combined string of perforation-acidification-test [J]. Well Testing, 2016, 25(6): 8-11.
- [17] 薛世峰, 孙春海, 于海彬, 等. 螺旋射孔参数对地层破裂压力的影响[J]. 油气井测试, 2015, 24(6): 11-13.
- XUE Shifeng, SUN Chunhai, YU Haibin, et al. Effect of spiral perforation parameters on formation fracture pressure [J]. Well Testing, 2015, 24(6): 11-13.
- [18] 于开勋. 孔道内子弹增效射孔技术研究[J]. 油气井测试, 2016, 25(1): 52-53.
- YU Kaixun. Research on increase-effect perforating technology by bullet within the tunnel [J]. Well Testing, 2016, 25(1): 52-53.
- [19] 侯明明, 黄刚, 张晓东. 高温高压井射孔工艺技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(3): 14-20.
- HOU Mingming, HUANG Gang, ZHANG Xiaodong. Perforation technology for high-temperature and high-pressure wells [J]. Well Testing, 2019, 28(3): 14-20.
- [20] 陆应辉, 程启文, 徐培刚, 等. 连续油管隔板延时分簇射孔技术的现场应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 60-63.
- LU Yinghui, CHENG Qiwen, XU Peigang, et al. Field application of separating and delaying clustering perforation conveyed by coiled tubing [J]. Well Testing, 2017, 26(2): 60-63.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 郭振杰, 男, 1982 年出生, 硕士研究生, 工程师, 2008 年 6 月毕业于中国石油大学(北京)从事油气井测试工作。电话: 010-59286531, 13466769481; Email: guozj.gwdc@cnpc.com.cn。通信地址: 北京市朝阳区安立路 101 号 1811 室, 邮政编码: 100101。