

分簇射孔安全释放技术

于秋来

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email:yuqiulai@petrochina.com.cn

项目支持:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“大庆油气持续有效发展关键技术研究与应用”课题10“难采储量有效动用技术研究与试验”(2016E-10)

引用:于秋来. 分簇射孔安全释放技术[J]. 油气井测试,2020,29(6):22-26.

Cite: YU Qiulai. Safety release technology of cluster perforation [J]. Well Testing, 2020,29(6):22-26.

摘要 分簇射孔与桥塞联作施工中,常因井筒内砂卡、套变、桥塞未脱手等原因导致射孔枪串卡井,采取上提解卡措施,易发生拉断电缆事故。分簇射孔安全释放技术利用电控热熔原理,实现电缆与枪串的可靠、可控脱手。当射孔枪串遇卡,以一定上提力反复解卡无效时,通过地面电源给安全释放装置供电,60 s后保护器熔断,锁紧钩从上壳体中抽出,电缆带动鱼雷筒、鱼雷、连接杆及锁紧钩从打捞头中整体抽出。后续只需用油管下入 $\Phi 73$ mm捞筒一次打捞出射孔枪串。该技术可减少事故处理周期和费用,降低井控风险。

关键词 分簇射孔;桥塞;遇卡;电控熔断;释放装置;井控;电缆**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.06.004

Safety release technology of cluster perforation

YU Qiulai

Testing Branch of PetroChina Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: In the combined operation of cluster perforation and bridge plug, the perforation gun string is often stuck due to sand jam, casing damage and bridge plug not being released. Taking the unstucking measures with lifting the cable, it is easy to break the cable. The safe release technology of cluster perforation uses the principle of electric control and hot melting to realize the reliable and controllable release of cable and gun string. When the perforating gun string is stuck, and it is invalid to release the stuck repeatedly with a certain lifting force, the ground power supply is used to supply power to the safety release device. After 60 s, the protector is blown, the locking hook is pulled out from the upper shell, and the cable drives the torpedo barrel, torpedo, connecting rod and locking hook out of the fishing head. Later, only the tubing is needed to run into the fishing barrel with a diameter of 73 mm, and the perforating gun string can be fished out at one time. This technology can reduce accident treatment cycle and cost as well as well control risk.

Keywords: Cluster perforation; bridge plug; stuck; electrically controlled fusing; release device; well control; cable

分簇射孔与桥塞联作技术是实现非常规油气储层大规模压裂的一项关键技术^[1-3]。该技术利用电缆将射孔器和复合桥塞一次下井输送至目的层位,依次完成桥塞坐封和多级射孔作业^[4-7]。由于套管变形、井筒内沉砂、桥塞坐封未丢手或射孔枪炸枪等原因,经常导致分段射孔枪串在起下过程中发生遇卡事故^[8-9]。俞海^[10]、张平^[11]提出可通过缓慢、反复上提电缆,增大电缆上提力,以解卡射孔枪或其他工具串。张骏等^[12]、许得禄等^[13]、刘祖林等^[14]、陆应辉等^[15]认为,受水平井特殊井身结构影响,一般情况下电缆不易从电缆弱点处拉断,而是

在造斜段处拉断电缆,导致射孔枪串和一段电缆遗留在井内。由于电缆属于柔性介质,且贴于套管内壁,反而增加了后续处理的难度。只能利用连续油管携带捞钩工具先打捞井内电缆,然后在下入捞筒工具对卡井的射孔枪串进行硬打捞。唐凯^[16]在以往上提解卡措施的基础上,提出通过火工品炸断装置内弱点的方式实现卡井枪串的脱手方法,井内鱼顶较为规整,后续可直接下入捞筒进行硬打捞,提高卡井事故处理效率。

针对这一问题,本文介绍了分簇射孔安全释放技术,主要利用一种可自主控制式电子熔断装置^[17]

实现枪串遇卡情况下的可控丢手,为后续打捞处理提供良好的鱼顶条件。

1 分簇射孔安全释放技术

针对分簇射孔与桥塞联作枪串解卡时拉断电缆的问题,开发了分簇射孔安全释放技术,利用电控热熔控原理,实现电缆与枪串的可靠、可控脱手,为处理枪串卡井事故创造便利条件。

1.1 工艺原理

分簇射孔安全释放技术工具串如图1所示。从上至下主要包括:电缆,安全释放装置,磁性定位仪,射孔枪串,桥塞工具和桥塞。一旦射孔枪串发生遇卡事故,且以一定上提力反复解卡无效时,可以通过地面电源给安全释放装置供电,电控热熔断装置中的保护器将会在1 min后被熔断,从而电控热熔断安全释放装置中的锁紧钩可以从上壳体中抽出,此时电缆将带动鱼雷筒、鱼雷、连接杆及锁紧钩从打捞头中整体抽出。此时,井内落物鱼顶为释放装置的外壳,后续只需用油管下入 $\phi 73$ mm 捞筒就可以一次打捞出射孔枪串。

1.2 主要结构

分簇射孔安全释放装置为常规电缆马笼头和

电控释放装置结构一体化设计。该装置主要由上接头壳体、鱼雷、压环、鱼雷压帽、锁紧钩、熔断结构、下接头壳体、插头组件等组成。其内部结构如图2所示。

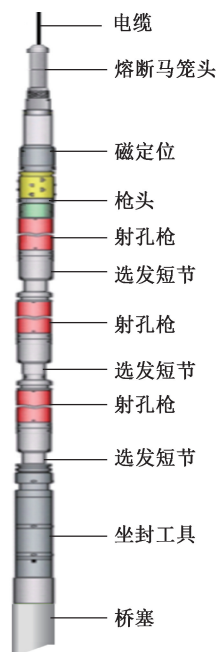
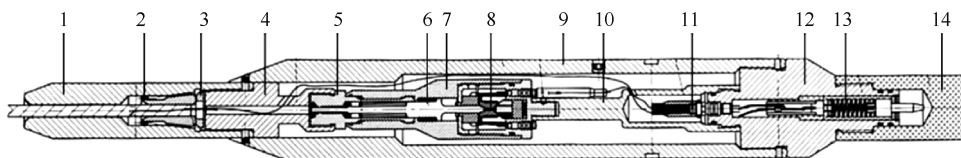


图1 下井枪串示意图

Fig. 1 Schematic diagram of downhole gun string



1-上接头壳体;2-鱼雷;3-压环;4-鱼雷压帽;5-锁紧钩;6-制动杆;7-熔断结构壳体;8-熔断结构;9-装置壳体;10-连接轴;11-三芯密封插件;12-下接头壳体;13-插头组件;14-下接头护帽

图2 安全释放装置结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of safety release device

1.3 技术参数

分簇射孔安全释放装置电控热熔断马笼头技术参数:

- 主体材料:TC11;
- 电缆:8 mm 单芯;
- 最高工作温度:175 ℃;
- 最大工作压力:140 MPa;
- 电气弱点拉脱力:30 kgf;
- 仪器最大外径:73 mm;
- 抗拉强度:不小于 60 kN;
- 抗冲击性能:大于 1 000 g·10 ms;
- 熔断时供电时间:1~2 min;
- 熔断时供电电压:50~60 V;
- 熔断后拉脱力:200~300 N。

2 关键技术

分簇射孔安全释放装置的关键技术主要包含电控释放装置结构设计和电子电路设计两部分,其中分簇射孔安全释放装置的抗拉性能和熔断性能是其核心参数。

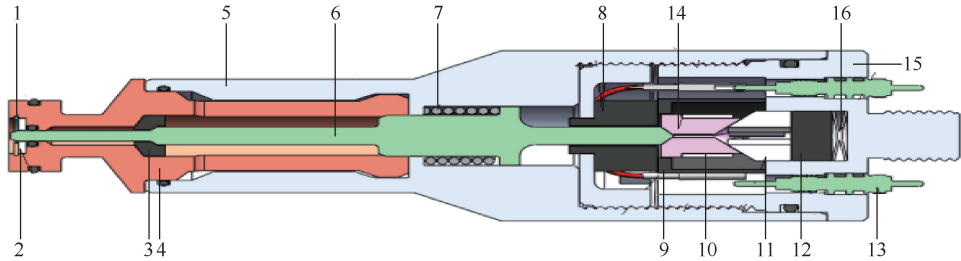
2.1 电控释放装置结构设计

电控释放装置主要由以下几部分组成:锁紧钩,制动杆,上壳体,弹簧,下壳体,绝缘四分筒,绝缘块,高压密封针,缓冲垫等组成(图3)。当现场确定需要可靠丢手时,给安全释放装置内的加热器持续通电 1~2 min,加热器温度升高,绝缘四分筒解除束缚。在弹簧推力即制动杆所受的压力作用下,制动杆向右移动,推开四分绝缘筒并进入绝缘四分筒

内。此时,锁紧钩在电缆拉力作用下脱开上壳体,从而完成安全释放过程。

为确保电控释放装置承受射孔器发射时所产生的爆轰压力和强烈的震动冲击,在电控释放装置

内部设置 4 种高效缓冲的防震垫及缓冲碟簧(图 4 中 3,8,9,12,16),保证电控释放装置在承受来自横向、纵向等不同方向的剧烈冲击和震动后仍能正常工作。



1-挡圈;2-垫片;3-缓冲垫 1;4-锁紧钩;5-上壳体;6-制动杆;7-弹簧;8-缓冲垫 2;9-缓冲垫 3;10-加热器;11-绝缘块;12-缓冲垫 4;13-高压针;14-绝缘四分筒;15-下壳体;16-缓冲碟簧

图 3 电控释放装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of electronic control release device

2.2 电子电路设计

安全释放装置的电路包含射孔枪串起爆控制的长通电路和电控熔断电路两部分,主要利用二极管实现两电路的隔离控制。正常射孔作业时,经过电缆和安全释放装置向射孔枪串供负电压进行常规的射孔点火操作。在电控熔断电路中增加二极管(图 4),可防止负电压进入电控释放装置,导致误释放。在需要释放时,给电控释放装置提供正电压,并保持 1~2 min,实现电控熔断操作。

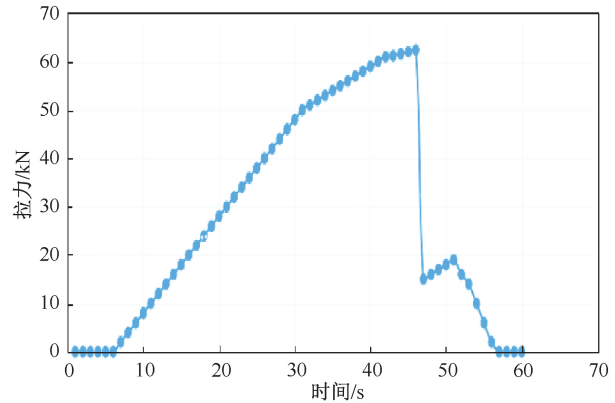


图 5 电控释放装置抗拉试验拉力-时间曲线

Fig. 5 Tension-time curve for tensile test of electric control release device

3.2 电控释放装置熔断试验

当电流为定值 0.25 A 时,3 次试验的温度分别为 10、100 和 175 ℃,对应的熔断时间分别为 54 s、53 s、53 s(表 1),说明环境温度对熔断时间的影响很小,熔断时间误差可能为关键零件加工上存在加工误差或人为秒表计时的误差。

表 1 电控释放装置熔断试验数据统计表

Table 1 Statistics of fusing test data of electronic control release device

序号	温度/℃	电阻/Ω	电压/V	电流/A	熔断时间/s
第一组	10	1 098	230	0.25	54
第二组	100(烤箱)	1 098	230	0.25	53
第三组	175(烤箱)	1 098	230	0.25	53
第四组	10	1 098	230	0.15	63
第五组	10	1 098	230	0.20	60
第六组	10	1 098	230	0.30	50

当温度为定值 10 ℃时,4 次试验的电流分别为 0.15 A、0.20 A、0.25 A 和 0.15 A,对应的熔断时间分别为 63 s、60 s、54 s 和 50 s(表 1),说明电流值对

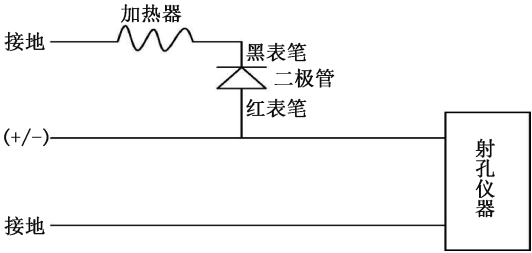


图 4 电控熔断电路设计示意图

Fig. 4 Schematic diagram of electric control fuse circuit design

3 室内试验

为检验安全释放装置的关键性能,通过电控释放装置抗拉试验和电控释放装置熔断试验分别对安全释放装置的抗拉性能和熔断性能进行检验,以确保后续现场试验施工安全。

3.1 电控释放装置抗拉试验

将电控释放装置固定在拉力检测装置上,以检验安全释放装置的电控熔断释放结构在正常射孔施工状态下的抗拉安全性能。试验结果如图 5 所示,持续增大拉力,当拉力增大到 62.3 kN 时,电控释放装置的锁紧机构拉脱。

熔断时间的影响较大。随着电流在一定范围内增大,熔断时间是呈现缩短的趋势。

4 现场试验

分簇射孔安全释放技术及配套装置经室内实验检测后,先后在直井和水平井进行了 6 井次和 3 井次下井试验,射孔器正常起爆,射孔枪串起下顺利,后续地面熔断试验可靠脱手。

4.1 实例 1

2019 年 3 月 8 日,在 X-60-X731 井进行了第一次试验。该井采用电缆输送动态负压射孔。基础数据:多级复合射孔,射孔弹型 SDP45RDX39-1,枪型 YD102-16-90-70,孔密 16 孔/m,射孔井段 1 175.7~1 138.9 m(表 2)。下井试验工具串连接如图 6 所示。

表 2 X-60-X731 井射孔施工层序数据表

Table 2 Perforation sequence data of Well X-60-X731

射孔井段/m		厚度/m		孔数	段数	弹数
油底	油顶	夹层	射开			
1 175.7	1 175.1	/	0.6	10	第一枪	20
1 174.1	1 173.5	1.0	0.6	10		
1 172.7	1 171.3	0.8	1.4	22	第二枪	35
1 170.0	1 169.2	1.3	0.8	13		
1 168.5	1 168.0	0.7	0.5	8	第三枪	8
1 159.5	1 158.4	8.5	1.1	18	第四枪	18
1 144.8	1 144.2	13.6	0.6	10	第五枪	10
1 141.6	1 140.6	2.6	1.0	16	第六枪	27
1 139.6	1 138.9	1.0	0.7	11		

表 3 Y5-X4 井射孔施工层序数据表

Table 3 Perforation sequence data of Well Y5-X4

射孔井段/m		厚度/m		孔数	有效渗透率/ μm ²	地层系数/ (μm ² ·m)	压裂段	桥塞位置/ m
油底	油顶	夹层	射开					
2 078.45	2 078.00	16.55	0.45	9	0.60	0.27	第 13 段	2 087.00
2 063.40	2 063.00	14.60	0.40	8	0.47	0.19		
2 048.35	2 048.00	14.65	0.35	7	0.56	0.20		
2 032.45	2 032.00	15.55	0.45	9	0.68	0.31	第 14 段	2 040.00
2 015.40	2 015.00	16.60	0.40	8	0.69	0.28		
2 000.35	2 000.00	14.65	0.35	7	0.59	0.21		
1 983.45	1 983.00	16.55	0.45	9	0.51	0.23	第 15 段	1 991.00
1 968.40	1 968.00	14.60	0.40	8	0.71	0.28		
1 953.35	1 953.00	14.65	0.35	7	0.71	0.25		

第 13、14、15 段均为三簇,射开厚度一致,每段 24 发弹共 72 发弹,射孔工具串长度均为 7.30 m。下井三次,点火 12 次,均成功起爆射孔枪和坐封桥塞,安全释放装置工作正常。

5 结论

(1)分簇射孔安全释放技术以“负电点火、正电熔断”电气设计,既保证了正常情况下桥射联作,又

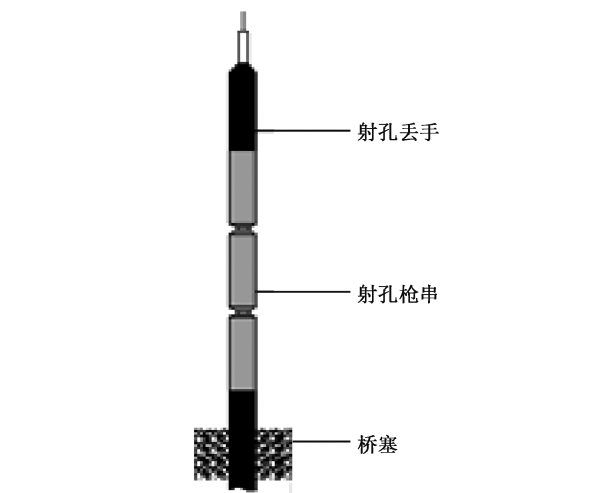


图 6 分簇射孔安全释放工艺管柱结构示意图
Fig. 6 Schematic diagram of safe release process of cluster perforation

本井共计试验 6 次,均一次起爆成功,安全释放装置工作正常,承受住了强烈的射孔震动和冲击。射孔施工后,该装置进行地面熔断试验,60 s 后顺利熔断脱手。

4.2 实例 2

2019 年 5 月 6 日,在 Y5-X4 井进行了水平井现场试验。基础数据:共 20 段,孔密 20 孔/m,射孔井段 1 728.00~2 640.45 m,射孔弹型 EH39RDX30-1,枪型 YD89-20-120-70。造斜点 975 m,最大井斜 89°,1 760.00 m 进入水平段。在该井的第 13、14、15 段进行了安全释放装置试验应用,射孔层位数据见表 3。

能在枪串遇卡时释放电缆,从根本上解决了射孔器卡井造成电缆拉断的问题,降低了射孔卡井事故处理难度和成本,提高了作业效果。

(2)分簇射孔安全释放技术为分簇射孔和桥塞联作施工提供了安全保障,对非常规储层勘探开发发挥较好的支撑作用。

(3)分簇射孔安全释放技术可应用于水平井分簇射孔和桥塞联作施工中,也可拓展到常规电缆输

送式射孔领域。

(4)分簇射孔安全释放装置的下井使用注意事项和维护保养周期还需通过现场试验进一步总结分析,制订相应的操作规程,以提高现场应用水平。
致谢:感谢西安石竹能源科技有限公司协助完成安全释放装置的室内性能测试。

参考文献

- [1] 毕巍. 分簇射孔技术在水平井中的应用[J]. 中国化工贸易, 2017, 9(3): 105.
BI Wei. Application of cluster perforation technology in horizontal well [J]. China Chemical Trade, 2017, 9(3): 105.
- [2] 陈华彬, 唐凯, 陈锋, 等. 水平井定向分簇射孔技术及其应用[J]. 天然气工业, 2016, 36(7): 33-39.
CHEN Huabin, TANG Kai, CHEN Feng, et al. Oriented cluster perforating technology and its application in horizontal wells [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(7): 33-39.
- [3] 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.
- [4] 陈建波. 连续油管分簇射孔技术发展现状[J]. 石油管材与仪器, 2017, 3(3): 7-10.
CHEN Jianbo. Current situation of coiled-tubing-conveyed cluster perforating technology [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2017, 3(3): 7-10.
- [5] 马友龙. 电缆传输分级选发安全射孔系统[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 21-26, 48.
MA Youlong. Wireline conveyed safety perforation system for staged and selective perforation [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 21-26, 48.
- [6] 王鸿飞. 水平井分簇射孔泵送远程可视化技术探讨[J]. 国外测井技术, 2020, 41(1): 57-60.
WANG Hongfei. Discussion on remote visualization technology of shower hole pumping in horizontal wells [J]. World Well Logging Technology, 2020, 41(1): 57-60.
- [7] 王海东, 陈锋, 欧跃强, 等. 页岩气水平井分簇射孔配套技术分析及应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2016, 13(8): 40-45.
WANG Haidong, CHEN Feng, OU Yueqiang, et al. analysis and application of matching technology for clustering perforation in shale-gas horizontal wells [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(8): 40-45.
- [8] 尚振华. 射孔作业存在的安全风险及预防措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016, 36(24): 73-75.
SHANG Zhenhua. Safety risk and preventive measures in perforating operation [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2016, 36(24): 73-75.
- [9] 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.

- GUO Zhenjie, ZHANG Xiao, ZHAO Yuguang. Cause analysis and treatment for failure perforation of perforating gun [J]. Well Testing, 2020, 29(1): 18-22.
- [10] 俞海. 水平井分段电缆泵送射孔遇卡问题及处理方法[J]. 国外测井技术, 2020, 41(1): 70-74.
YU Hai. Stuck problem and treatment method of segmented cable pumping perforation in horizontal well [J]. World Well Logging Technology, 2020, 41(1): 70-74.
- [11] 张平. 页岩气水平井带压打捞作业设计与实践[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 30-33.
ZHANG Ping. Design and practice of fishing operation with snubbing in horizontal wells of shale gas [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 30-33.
- [12] 张骏, 宋杰. 多级分簇射孔桥塞联作技术在新疆油田应用与异常处理方法[J]. 钻采工艺, 2016, 39(4): 57-59, 69.
ZHANG Jun, SONG Jie. Application of multi-stage clustered perforation segmented bridge plug and its abnormal treatment methods in Xinjiang Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(4): 57-59, 69.
- [13] 许得禄, 魏拓, 张辞, 等. MaHW6004 井泵送桥塞射孔联作复杂情况处理[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(3): 306-310.
XU Delu, WEI Tuo, ZHANG Ci, et al. Complex case processing of pumping bridge plug and clustering perforation for the well MaHW6004 [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(3): 306-310.
- [14] 刘祖林, 杨保军, 曾雨辰. 页岩气水平井泵送桥塞射孔联作常见问题及对策[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(3): 75-78.
LIU Zulin, YANG Baojun, ZENG Yuchen. Common problems of pumping bridge plug and clustering perforation for horizontal shale gas well and countermeasures [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3): 75-78.
- [15] 陆应辉, 唐凯, 任国辉, 等. 水平井泵送分簇射孔落鱼打捞工艺及应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(5): 23-28.
LU Yinghui, TANG Kai, REN Guohui, et al. Fishing technology of pump-down multistage perforation in horizontal well sand its application [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(5): 23-28.
- [16] 唐凯, 陈华彬, 陈锋, 等. 电缆输送分簇射孔作业爆炸解卡丢手方法: 201510596421. X[P]. 2018-07-24.
- [17] 刘九州. 可自主控制式电子熔断装置: ZL201420422328. 8[P]. 2014-07-02.

编辑 王 军

第一作者简介: 于秋来, 男, 1985 年出生, 高级工程师, 2008 年毕业于大庆石油学院石油工程专业, 主要从事射孔完井技术方面的科研攻关和方案设计等工作。电话: 0459-5684872, 13836957569; Email: yuqiulai@petrochina.com.cn。通信地址: 黑龙江省大庆市让胡路区乘南十八街试油试采分公司, 邮政编码: 163412。