

# 油气井用安全避爆点火装置可靠性研究

王峰, 马涛, 李静岑, 陈政, 王喜, 霍达, 刘超瑾, 柳茜茜, 赵振洋

(物华能源科技有限公司, 西安 710061)

**摘要:** **目的** 解决石油开采电缆射孔工艺中雷管存在的早爆风险给井场带来的安全隐患。**方法** 设计油气井用安全避爆点火装置, 选用高安全性大电流雷管, 采用电路隔离、传爆序列隔离设计方案, 对装置内的压缩弹簧进行选型设计与分析, 并完成该装置的保险解除及复位模拟试验。**结果** 所设计的安全避爆点火装置, 使用截径 5 mm 规格的弹簧能满足压力导通要求, 以及泄压后弹簧克服蠕变性能损失使装置切换为安全状态的要求, 确保了施工状态与未施工状态下的管柱安全性。**结论** 该装置应用于电缆射孔作业中, 提高了施工可靠性, 同时可确保现场作业人员的安全。

**关键词:** 早爆; 电缆射孔; 弹簧设计; 有限元; 可靠性

中图分类号: TQ560.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)12-0033-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.12.006

## Reliability of Safe Explosion Avoidance Ignition Device for Oil and Gas Wells

WANG Feng, MA Tao, LI Jing-cen, CHEN Zheng, WANG Xi, HUO Da,  
LIU Chao-jin, LIU Qian-qian, ZHAO Zhen-yang

(Wuhua Energy Technology Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the potential safety hazard in the well field caused by the premature explosion risk of detonators in the cable perforation process of petroleum exploitation. A safe explosion avoidance ignition device for oil and gas wells was designed. High safety and high current detonators were used in the device. The design scheme of circuit isolation and explosion transmission sequence isolation was adopted. The type selection design and analysis were carried out to the compression spring in the device, and the simulation experiment of device arming and resetting was completed. The designed safe explosion avoidance ignition device met the requirements of pressure conduction by the spring with a cross-sectional diameter of 5 mm and the spring switched the device to a safe state by overcoming the creep property loss after pressure relief, ensuring the safety of the pipe string under construction and not under construction. The device is used in cable perforation operation to improve the reliability and safety of construction and ensure the safety of on-site operators.

**KEY WORDS:** premature explosion; cable perforation; spring design; finite element; reliability

在常规电缆射孔工艺中, 下井前雷管与导爆索已处于连接状态 (如图 1 所示), 井场周边常伴有各类

杂散信号, 如电磁波信号、声波信号等<sup>[1-3]</sup>, 同时井筒内也存在压力波动<sup>[4]</sup>, 2 种环境下雷管均存在早爆

收稿日期: 2022-10-28; 修订日期: 2022-12-05

Received: 2022-10-28; Revised: 2022-12-05

作者简介: 王峰 (1974—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火工品研发与设计、油气井用爆破器材设计。

**Biography:** Wang Feng (1974-), Male, Senior engineer, Research focus: design of initiating explosive devices and the design of explosive materials for oil and gas wells.

引文格式: 王峰, 马涛, 李静岑, 等. 油气井用安全避爆点火装置可靠性研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 033-039.

WANG Feng, MA Tao, LI Jing-cen, et al. Reliability of Safe Explosion Avoidance Ignition Device for Oil and Gas Wells[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 033-039.

风险,存在较大安全隐患<sup>[5]</sup>。为解决射孔作业雷管早爆问题,提高电缆射孔的安全性,油田专家也做过许多针对性的研究,来提高石油射孔的安全性。在雷管安全性方面,早期设计使用新型雷管如磁电雷管<sup>[6-7]</sup>、爆炸桥丝雷管<sup>[8-9]</sup>、无起爆药雷管<sup>[10-13]</sup>和冲击片雷管<sup>[14-15]</sup>等,张波等<sup>[16]</sup>设计出了分离式无起爆药安全点火系统。起爆系统方面,王耀忠<sup>[17]</sup>提出了一种油管输送射孔撞击式安全电起爆系统。斯伦贝谢公司研制了压力脉冲起爆系统<sup>[18]</sup>,通过地面控制系统将起爆所需的压力脉冲冲击发命令作为程序写入井下控制系统的芯片中,只有当压力脉冲满足事先编制好的程序,井下控制系统才会给出击发指令,引爆雷管,实现安全起爆。张维山等<sup>[19]</sup>研制出了液压延时射孔起爆装置,当压力值超过设计值时,剪断销钉,启动延时系统,延时系统利用井筒压力和液压油的流动阻力控制延时时间,延时结束后,解锁点火系统,井筒压力推动击针撞击并引爆起爆器,实现射孔枪安全起爆。借鉴以上研究成果,结合现场电缆射孔具体要求,开发了一种油气井用安全避爆点火装置。该装置可实现下井前雷管与导爆索隔离,确保施工前安全。下井后,依靠静液柱压力使雷管与导爆索接通传爆序列。如果井下出现未爆现象,枪串提出地面,依靠弹簧复位功能,实现雷管导爆索分离,确保地面安全。

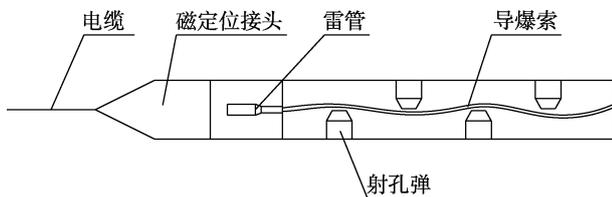


图1 雷管与导爆索位置  
Fig.1 Locations of detonator and detonating cable

## 1 安全避爆点火装置结构与工作原理

安全避爆点火装置主要由大电流安全雷管、压缩弹簧、避爆器等零件组成,装置结构三维剖视图见图2。该装置采用快速插线连接,输出端连接射孔枪,连枪前须先制作好传爆组件,传爆组件的一端抵入避爆器中心孔,并与避爆器隔板接触,另一端传爆管经转换接头的扶正胶塞穿入并与转换接头端面平齐,装配完成后,连接射孔枪。安全避爆点火装置材料采用40Cr,该材料广泛应用于井下仪器、工具中,耐压性能稳定,可确保装置在井下不被破坏。

该装置特点在于采用2道安全措施设计,一处为选用大电流雷管,该雷管具有受压导通的结构设计,可实现常态电路隔离,安全性高。在井场及井口施工过程中,装置中大电流雷管的插针在弹簧的作用下,始终保持断路状态。同时,雷管中的接地帽与短路帽始终相接触,使雷管保持短路状态,确保了其地面操



图2 油气井用安全避爆装置结构  
Fig.2 Structure of safe explosion avoidance device for oil and gas wells

作的安全性。当大电流雷管起爆系统被送至井下,井液压力大于安全压力(5 MPa)时,雷管中的插针下行,使其与接地帽脱离。这时,断路与短路状态同时解除,雷管两极形成电流通路。到达目的层时,在起爆电流作用下,雷管可安全起爆。另一处为避爆器隔板阻断点火通道设计,较常规直列式点火序列不同,产品在未下入井内,或者井液压力未达到安全压力前,雷管与传爆组件间在避爆器隔板作用下被阻断分隔开,产品处于一个相对安全状态;当井液压力升至安全压力,大电流雷管端面受井液压力作用,沿避爆器腔体发生移动,顶开避爆器隔板,实现大电流雷管与传爆组件爆炸序列对齐,保险解除,接通传爆网络。针对以上功能,该装置的可靠性依靠弹簧元件的压缩与回弹实现,因此,弹簧的设计与分析变得尤为重要。

## 2 可靠性设计

安全避爆点火装置工作状态由活塞受压力运动压缩弹簧、打开避爆器隔板来控制,因此需要弹簧的压缩行程足够。弹簧材料选用油淬火-回火弹簧钢丝60Si<sub>2</sub>Mn,确保弹簧材料性能良好,其弹性模量 $E=213\text{ GPa}$ ,抗拉极限强度 $\sigma_b=1\ 570\text{ MPa}$ ,许用应力 $[\sigma]=863.5\text{ MPa}$ ,温度使用范围为 $-40\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[20]</sup>。

当安全避爆点火装置随管串下入油井后,受井筒内静液柱压力作用,弹簧开始受力。随着深度的增加,弹簧受力逐渐增大。根据油田实际井况,假设管柱最大下放深度为5 000 m,由实际工况可知,压缩弹簧最小工作载荷 $P_1=55\text{ N}$ ,最大工作载荷 $P_n=590\text{ N}$ ,工作行程 $h=(30\pm 1)\text{ mm}$ ,弹簧外径 $D_2\leq 45\text{ mm}$ 。弹簧载荷为静载荷,循环载荷 $N<10^4$ 。端部结构并紧,磨平,两端各有1圈支撑圈。

初算弹簧刚度 $P'$ :

$$P' = \frac{P_n - P_1}{h} = 18\text{ N/mm} \quad (1)$$

工作极限载荷 $P_j$ , III类载荷规定 $P_j \geq P_n$ ,所以取 $P_j = P_n = 590\text{ N}$ 。查GB/T 1239.6<sup>[21]</sup>可得弹簧的相关参数,见表1。

表 1 弹簧相关参数  
Tab.1 Related parameters of spring

材料直径 $d/mm$	弹簧中径 $D/mm$	工作极限载荷 $P_j/N$	工作极限载荷下的单圈变形量 $f_j/mm$	单圈刚度 $P_d'/N$
5	40	761.8	7.9	96.4

有效圈数  $n$ :

$$n = \frac{P_d'}{P'} = 5.36 \quad (2)$$

按照压缩弹簧有效圈数标准, 选取标准值  $n=5.5$ 。

总圈数:  $n_1=n+2=7.5$ ;

弹簧刚度  $P'$ :

$$P' = \frac{P_d'}{n} = 17.5 \text{ N/mm} \quad (3)$$

工作极限载荷下的变形量  $F_j$ :

$$F_j = n f_j \approx 43 \text{ mm} \quad (4)$$

节距  $t$ :

$$t = \frac{F_j}{n} + d = 12.81 \text{ mm} \quad (5)$$

自由高度  $H_0$ :

$$H_0 = nt + 1.5d = 77.95 \text{ mm} \quad (6)$$

取标准值  $H_0=80 \text{ mm}$ 。

由安全避爆点火装置的工作原理可知, 当装置的静液载荷解除后, 弹簧会克服密封圈与本体之间的摩擦力, 推动大电流雷管复位, 使避爆器隔板关闭, 传爆序列隔离, 故对弹簧进行载荷验算。密封圈与本体之间的接触面上存在相对滑动情况, 符合库伦摩擦条件假设<sup>[22]</sup>。该假设认为, 接触面上的剪切应力与正应力成正比关系, 即:

$$\tau = \mu \sigma \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为摩擦系数;  $\sigma$  为接触面上的正应力。依据工程应用<sup>[23]</sup>, 取摩擦系数  $\mu=0.2$ , 正应力为弹簧的静液压力。考虑井下 5 000 m 极限载荷情况为 50 MPa, 代入式 (7) 计算可得, 剪切应力  $\tau=10 \text{ MPa}$ 。

弹簧复位过程中, 由胡克定律可知, 弹簧自身产生的弹力为:

$$F = -k \times \Delta x = -0.525 \text{ N} \quad (8)$$

式中, 负号表示力的方向与位移的方向相反。弹簧回弹时, 自身产生应力为:

$$\sigma_{\text{复位}} = \frac{F}{S} = 320 \text{ MPa} \quad (9)$$

由计算可知  $\sigma_{\text{复位}} > \tau$ , 即弹簧回弹自身应力远大于密封圈与本体之间的剪切应力。因此, 当载荷解除后, 所设计的弹簧能够可靠回弹, 推动大电流雷管复位, 使避爆器隔板关闭, 传爆序列重新隔离。

根据上述设计计算, 弹簧的工作图如图 3 所示。按照该结构安全避爆点火装置的相关设计, 弹簧行程为  $(30 \pm 1) \text{ mm}$ , 符合设计要求。在装置内设计相应的弹簧行程限位卡槽, 确保弹簧可靠工作。

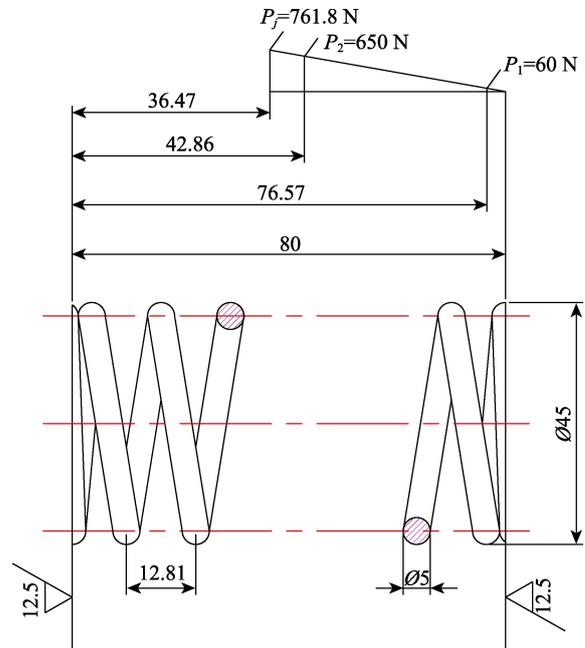


图 3 弹簧工作图 (单位: mm)  
Fig.3 Working diagram of spring (unit: mm)

### 3 可靠性分析

为验证所设计弹簧是否符合实际使用要求, 建立弹簧模型, 对弹簧进行有限元分析, 观察弹簧压缩过程的变形及位移情况。建立有限元模型时, 材料性能各向同性<sup>[24]</sup>, 弹性模量  $E=2.05 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu=0.32$ 。考虑到计算精度以及尽量减小模型的规模, 网格类型采用 8 节点 6 面体单元 (C3D8), 模型网格数 12 865。

#### 3.1 保险解除阶段结果与分析

管串下放过程中, 弹簧端面载荷与静液柱深度呈正比关系, 故分别计算当压强为 10、20、40、60、80、100 MPa 时, 弹簧的压缩量与应力分布情况, 计算结果及分析如图 4 所示。图 4 中, 浅灰色透明部分表示弹簧自由状态下的长度, 实体部分表示弹簧承载后的实际长度, 其中颜色由浅至深表示位移逐渐增大。由图 4 可知, 弹簧自由端的位移最大, 与实际使用情况相符。当弹簧所受压强为 10 MPa 时, 最大位移为 2.9 mm, 压强依次按设计条件增加时, 最大位移分别对应 6、9.3、13、18、24 mm, 都小于弹簧设计时的极限载荷位移, 符合使用要求。

#### 3.2 保险复位阶段结果与分析

安全避爆装置所用弹簧为钢丝 60Si<sub>2</sub>Mn, 该材料

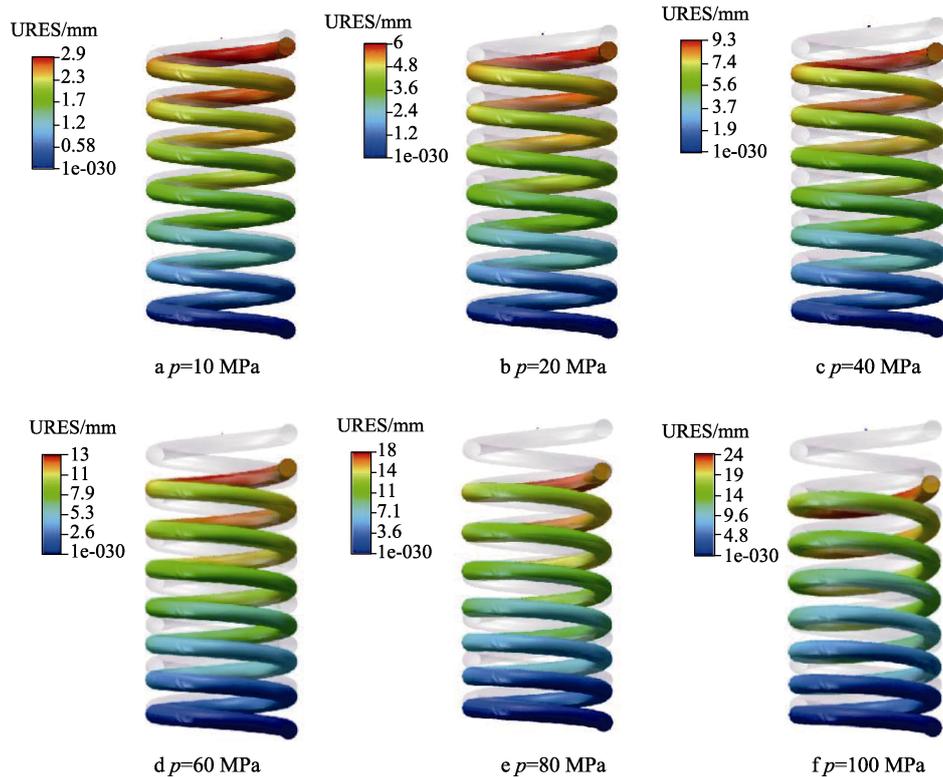


图4 不同载荷下弹簧压缩量对比

Fig.4 Comparison of spring compression under different loads

同时具有弹性和塑性性质,因此又常被称为弹塑性材料。弹塑性指的是物体在外力作用下会发生变形,而外力卸载之后变形不一定能完全恢复的性质,其中变形中可恢复部分称为弹性变形,不可恢复部分称为塑性变形。因此,为确保弹簧在回弹过程中能够重新使装置恢复到保险复位状态,针对3种规格直径的弹簧试验结果,建立相应的有限元模型,进行弹簧回弹阶段的位移分析。弹簧材料为定义为弹塑性材料,应力应变关系如式(10)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon_e = \sigma/E & (\text{弹性阶段}) \\ \varepsilon_p = (\sigma/K)^{1/n} & (\text{塑性阶段}) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\sigma$  为应力;  $E$  为弹性模量;  $K$  为强度系数;  $n$  为应变硬化指数。

对不同直径的弹簧施加均为5 MPa的载荷,保压相同长度时间后,卸掉载荷,结果如图5—7所示。

图5—7表明,相同载荷下,不同材料直径的弹簧,压缩量不同。加载后,由于材料变形中存在的部分塑性变形在卸载后无法恢复,因此卸载后,弹簧的自由长度也不同。

$$P' = \frac{Gd^4}{8D^3n} \quad (11)$$

由式(11)可知,弹簧的材料直径越大,其刚度越大,相同载荷下弹簧的变形量越小,计算结果符合实际情况。由计算结果可知,当  $p=5$  MPa时,采用弹塑性材料,不同直径弹簧的最大压缩量及卸载后的自由长度见表2。

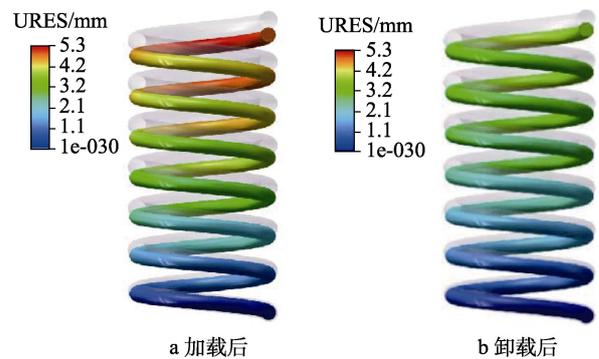


图5 5 MPa下直径  $d_1=4$  mm 弹簧应力对比

Fig.5 Stress comparison of spring with a diameter  $d_1=4$  mm under 5 MPa: a) after loading; b) after unloading

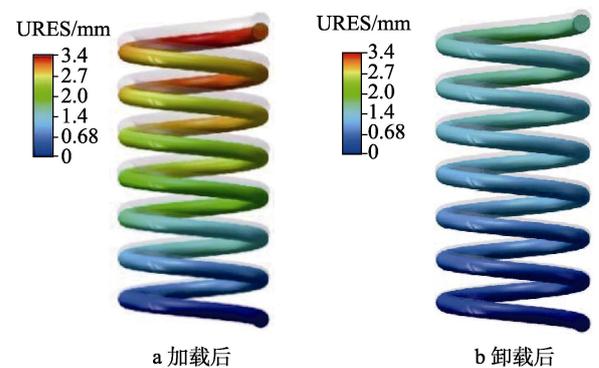


图6 5 MPa下直径  $d_2=4.5$  mm 弹簧应力对比

Fig.6 Stress comparison of spring with a diameter  $d_2=4.5$  mm under 5 MPa: a) after loading; b) after unloading

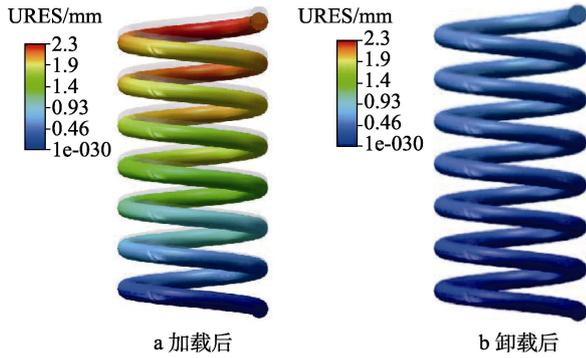


图 7 5 MPa 下直径  $d_3=5$  mm 弹簧应力对比  
Fig.7 Stress comparison of spring with a diameter  $d_3=5$  mm under 5 MPa: a) after loading; b) after unloading

表 2 弹簧的最大压缩量及卸载后的自由长度  
Tab.2 Maximum compression of spring and free length after unloading

序号	弹簧直径 $d/\text{mm}$	载荷 $p/\text{MPa}$	最大压缩量 $\Delta L/\text{mm}$	卸载后自由长度 $H'/\text{mm}$
1	4		3.9	76.1
2	4.5	5	1.7	78.3
3	5		0.57	79.43

当材料直径分别为 4、4.5、5 mm 时, 弹簧的长度变形率分别为 4.9%、2.1%、0.94%。根据安全避爆点火装置的使用要求, 只有材料直径  $d=5\text{mm}$  的弹簧符合使用要求。



图 8 试验结果

Fig.8 Test result: a) measuring bar marking line; b) device connection; c) before pressurization; d) after pressurization

试验结果表明, 只有匹配  $d_3=5$  mm 规格弹簧的安全避爆点火装置能同时满足 5 MPa 压力导通要求及泄压后弹簧克服密封圈摩擦阻力使装置切换为安全状态的要求。针对该弹簧进行蠕变测试, 测试结果显示, 24 h 后弹簧的自由长度为 79.43 mm, 与初始自由长度 (80 mm) 无明显变化, 48 h 后弹簧自由长度较初始长度减小约 2 mm, 微小的弹簧强度损失对装置的功能并无影响。

#### 4.2 安全避爆点火装置可靠性试验

模拟电缆射孔实际施工情况, 测试安全避爆装置

### 4 可靠性验证

#### 4.1 保险解除及复位模拟验证实验

设计截径分别为 4、4.5、5 mm 等 3 种规格弹簧 (其他参数基本一致) 进行测试, 测试项目包括导通压力测试及弹簧蠕变测试 2 项。首先完成导通压力测试, 再将满足导通压力测试的弹簧进行疲劳测试。具体测试方法如下。

1) 导通压力测试。本体连接打压接头, 打压接头另一端通过高压软管与手摇泵连接, 避爆器端插入位移测量棒, 加压测试, 观察位移测量棒的移动距离, 当测试棒标记线露出接头端面, 表明传爆通道正常开启。

2) 弹簧蠕变测试。采用简易测试方法进行弹簧蠕变测试, 用台钳将弹簧夹紧, 并使弹簧压缩行程与实际产品状态下弹簧压缩行程保持一致, 分别测试 24、48 h 后弹簧自由长度的变化情况。

经反复测试, 手摇泵压力值约 5 MPa 时, 将活塞连同大电流安全雷管推至到位, 且位移测量棒标记线完全露出, 待泄压后, 活塞在弹簧作用下能迅速归位, 试验结果如图 8 所示。其中, 图 8a 中下面的标记线为加压前测量棒与转换接头端面平齐起始位置, 上面的标记线为加压后避爆器通道正常开启时, 测量棒与接头端面平齐终止位置。

可靠隔爆与起爆功能。试验装置由打压装置、避爆装置、导爆索、固定钢条等组成, 如图 9 所示。改装大电流安全雷管使其处于导通状态, 可依次模拟: 1) 关闭加压装置, 安全避爆点火装置不受压力作用, 点火后观察导爆索是否爆轰, 验证装置是否能够可靠隔爆; 2) 启动加压装置, 向安全避爆点火装置施加预设安全压力, 推开避爆器隔爆板, 点火后观察导爆索是否爆轰, 导爆索若爆轰, 通过测定导爆索的爆速, 验证装置是否可正常传爆; 3) 关闭加压装置, 去除装置的外加载荷, 使弹簧回弹复位, 关闭避爆器隔爆板, 验证装置是否可靠隔爆。

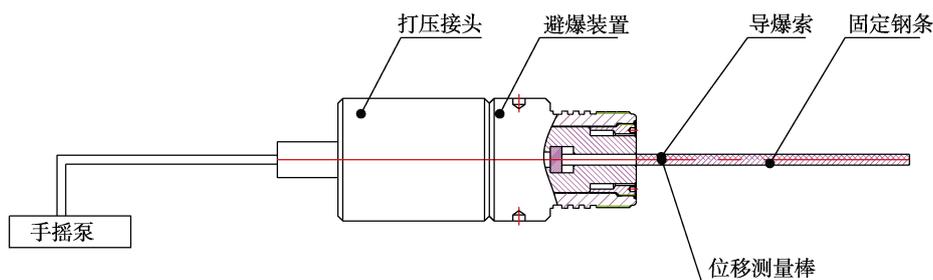


图9 安全避爆装置可靠性测试

Fig.9 Reliability test of safe explosion avoidance device

由多次试验结果可知,关闭加压装置时,安全避爆点火装置不受压力作用,点火后传爆序列未做功,装置实现可靠隔爆。启动加压装置,向安全避爆点火装置施加预设安全压力,推开避爆器隔爆板,点火后导爆索正常爆轰,测得相应爆速见表3,试验结果见图10,导爆索可靠作用,表明装置实现可靠传爆。关闭加压装置,去除装置的外加载荷,使弹簧回弹复位,装置实现可靠隔爆。

表3 爆速测试结果

Tab.3 Detonation velocity test results

序号	测试距离/mm	时间/ $\mu\text{s}$	爆速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	100	13.28	7530
2	100	13.44	7440
3	100	13.35	7490
4	100	13.33	7502
5	100	13.39	7468
6	100	13.42	7451
7	100	13.40	7462
8	100	13.31	7513
9	100	13.30	7518
10	100	13.50	7407



图10 爆速测试试验

Fig.10 Detonation velocity test

## 5 结论

1) 针对常规电缆射孔工艺中,下井前雷管与导爆索处于连接状态的安全缺陷,本文设计开发出一种安全避爆装置。该装置可实现下井前雷管与导爆索隔

离,确保施工前安全;下井后,依靠静液柱压力使雷管与导爆索对正,接通传爆序列。

2) 针对安全避爆点火装置工程使用要求,进行安全避爆点火装置保险解除及复位的可靠性设计,并对所设计的结构进行有限元分析、多次可靠性试验。试验结果表明,所设计的安全避爆点火装置满足电缆射孔作业的可靠性与安全性要求。

## 参考文献:

- [1] 俞海, 马涛, 李哲雨, 等. 油气井水下超声通讯起爆系统设计与验证[J]. 火工品, 2022(2): 74-76.  
YU Hai, MA Tao, LI Zhe-yu, et al. Design and Verification of Underwater Ultrasonic Communication Initiation System for Oil and Gas Wells[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(2): 74-76.
- [2] 于秋来, 张伟民, 蔡山, 等. 油管输送射孔多级可控声波起爆技术探讨[J]. 测井技术, 2021, 45(2): 218-221.  
YU Qiu-lai, ZHANG Wei-min, CAI Shan, et al. Discussion on Multistage Controlled Acoustic Detonation Technology of Tubing Conveyed Perforation[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(2): 218-221.
- [3] 刘浩生. 声波沿钻柱的传播特性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.  
LIU Hao-sheng. Study on Propagation Characteristics of Acoustic Waves along Drill String[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [4] 张银兵. 水下声遥控安全起爆系统的研究及实现[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.  
ZHANG Yin-bing. Research and Realization of Underwater Secure Detonation System Based on Acoustic Remote Control Technology[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [5] 邓桥. 射孔工况下井筒安全性分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.  
DENG Qiao. Safety Analysis for Downhole Wellbore during Perforating[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [6] 欧俊德. 桥丝电雷管静电安全问题工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
OU Jun-de. Technology Research of the Electrostatic Safety Problem of the Detonator[D]. Nanjing: Nanjing

- University of Science and Technology, 2006.
- [7] 李志鹏, 文雯, 吕子剑, 等. 静电放电对爆炸桥丝火工品作用性能影响研究[J]. 火工品, 2014(3): 6-9.  
LI Zhi-peng, WEN Wen, LYU Zi-jian, et al. Research on the Effect of ESD on the Performance of EBW[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014(3): 6-9.
- [8] 尹强, 耿春余. 冲击片雷管研究与发展[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(4): 8-11.  
YIN Qiang, GENG Chun-yu. Research and Development of Slapper Detonator[J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(4): 8-11.
- [9] 赵艳美. 冲击飞片式无起爆药电雷管试产质量分析[J]. 煤矿爆破, 2003(2): 17-18.  
ZHAO Yan-mei. Analysis on the Quality of Production Test of Flying Plate Detonator[J]. Coal Mine Blasting, 2003(2): 17-18.
- [10] 张一博. 新型磁电雷管起爆器的开发及研制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.  
ZHANG Yi-bo. Development and Research of a New Type Magnetolectric Detonator[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.
- [11] 王海东, 孙新波, 梁纯, 等. 磁电雷管输出特性测试技术研究[J]. 测井技术, 2006, 30(3): 285-287.  
WANG Hai-dong, SUN Xin-bo, LIANG Chun, et al. On Magnetolectric Detonators Output Characteristic Test Technology[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(3): 285-287.
- [12] 马宏昊, 沈兆武, 姚保学, 等. 无铅雷管系统研究[J]. 爆破器材, 2009, 38(3): 18-21.  
MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, YAO Bao-xue, et al. Research on Detonator Production System without Lead[J]. Explosive Materials, 2009, 38(3): 18-21.
- [13] 沈兆武, 马宏昊. 高精度高安全无起爆药延期雷管的关键技术[C]//第九届全国工程爆破学术会议论文集. 青岛: 中国力学学会, 2008.  
SHEN Zhao-wu, MA Hong-hao. The Key Technology of High-precision and High-Safety Non-Primary Delay Detonator[C]//Proceedings of the 9th National Engineering Blasting Academic Conference. Qingdao: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2008.
- [14] 马宏昊. 高安全雷管机理与应用的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.  
MA Hong-hao. Study on Mechanism and Application of High Safety Detonator[D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2008.
- [15] 刘迎彬, 胡晓艳, 朱建新, 等. 分离式起爆装置: CN105157483B[P]. 2017-03-22.  
LIU Ying-bin, HU Xiao-yan, ZHU Jian-xin, et al. Separated-Type Detonating Device: CN105157483B[P]. 2017-03-22.
- [16] 张波, 朱建新. 分离式无起爆药安全点火系统在石油射孔中的应用[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 100-104.  
ZHANG Bo, ZHU Jian-xin. Application of Separated Type Non-Primary Explosive Safe Ignition System in Oil Perforation[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 100-104.
- [17] 王耀忠. 油管输送射孔撞击式安全电起爆系统的研制[J]. 测井技术, 2007, 31(1): 89-90.  
WANG Yao-zhong. A Safety Impact Electrical Detonating System of Tubing Conveyed Perforator[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(1): 89-90.
- [18] 赵海文, 林成财, 王峰, 等. 油气井射孔安全起爆技术的研究[J]. 成都电子机械高等专科学校学报, 2012, 15(1): 10-13.  
ZHAO Hai-wen, LIN Cheng-cai, WANG Feng, et al. Research on Safety Perforation Initiating Technique for Oil-Gas Well[J]. Journal of Chengdu Electromechanical College, 2012, 15(1): 10-13.
- [19] 张维山, 欧阳飞, 隋朝明, 等. 液压延时射孔起爆装置的研制与应用[J]. 测井技术, 2016, 40(6): 765-768.  
ZHANG Wei-shan, OUYANG Fei, SUI Chao-ming, et al. Development and Application of Hydraulic Delay Firing Head[J]. Well Logging Technology, 2016, 40(6): 765-768.
- [20] GB/T 2089—2009, 普通圆柱螺旋压缩弹簧尺寸及参数[S].  
GB/T 2089—2009, Cylindrical Coiled Compression Spring Dimensions and Parameters[S].
- [21] GB/T 23935—2009, 圆柱螺旋弹簧设计计算[S].  
GB/T 23935—2009, Design of Cylindrical Helical Springs[S].
- [22] 吴长贵, 索双富, 李雪梨. 基于 ABAQUS 的往复密封仿真分析[C]//第11届中国CAE工程分析技术年会会议论文集. 桂林: 中国机械工程学会工业工程分会, 2015.  
WU Chang-gui, SUO Shuang-fu, LI Xue-li. Simulation Analysis of Reciprocating Seals Based on ABAQUS[C]//The 11th China CAE Annual Conference. Guilin: Chinese Industrial Engineering Institute of CMES, 2015.
- [23] 韩传军, 张杰, 黄岗, 等. 往复密封中星型密封圈的密封性能分析[J]. 润滑与密封, 2012, 37(9): 28-32.  
HAN Chuan-jun, ZHANG Jie, HUANG Gang, et al. Seal Performance Analysis of a Star Sealing Ring in Reciprocating Seal[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(9): 28-32.
- [24] 徐旭辉, 李勇, 陈建军, 等. 热轧卷筒圆柱弹簧有限元分析[J]. 有色设备, 2022, 36(3): 66-70.  
XU Xu-hui, LI Yong, CHEN Jian-jun, et al. Finite Element Analysis of Hot Rolled Coil Springs[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2022, 36(3): 66-70.

责任编辑: 刘世忠