

· 试油试采技术 ·

文章编号:1004-4388(2023)06-0013-07

油气井放喷等离子智能点火装置

熊战¹, 吴运春², 张士川¹, 贾二虎², 李伟², 汤国庆²

1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

2. 廊坊市华安电器设备有限公司 河北廊坊 065007

通讯作者:Email:ren_rich@sina.com

项目支持:中国石油集团油田技术服务有限公司钻井安全技改重要成果“油气井安全智能遥控点火装置”(2023-05)

引用:熊战, 吴运春, 张士川, 等. 油气井放喷等离子智能点火装置[J]. 油气井测试, 2023, 32(6): 13-19.

Cite: XIONG Zhan, WU Yunchun, ZHANG Shichuan, et al. Oil and gas well open flow plasma intelligent ignition device[J]. Well Testing, 2023, 32(6): 13-19.

摘要 钻井和试油测试现场所用的点火装置, 存在放喷排出气体不易直接引燃、火焰难以长期保持、点火可靠性低等技术难题。依据空气载体等离子发生器原理, 结合等离子点火技术、远程控制技术设计研制的等离子智能点火装置, 可实现远程自动点火, 并能对火把燃烧情况进行实时监测, 达到了油气井安全高效放喷点火的目的。该装置作为井控装备, 已配套 230 余套应用于钻井、试油测试施工现场, 取得了较好的应用效果, 具有广泛的推广应用价值。

关键词 油气井; 钻井; 试油测试; 放喷; 智能点火装置; 等离子火焰; 井控安全; 现场应用

中图分类号: TE27 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.06.003

Oil and gas well open flow plasma intelligent ignition device

XIONG Zhan¹, WU Yunchun², ZHANG Shichuan¹, JIA Erhu², LI Wei², TANG Guoqing²

1. Well Testing Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

2. Langfang Hua'an electrical equipment Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: Igniters used in drilling and oil testing sites are challenged by hardly direct combustion of bleed effluent, difficult retention of flame, low reliability of ignition, and other technical problems. A plasma intelligent igniter was designed and developed based on the principle of air plasma generator, together with the plasma ignition and remote control technologies. It can realize an automatic ignition remotely and also a real-time monitoring of flame, enabling a safe bleeding and ignition at wells. More than 230 plasma intelligent igniters have been configured as a well control device in drilling and oil testing sites, with ideal results obtained. This igniter is worthy of promotion.

Keywords: oil and gas well; drilling; well testing; open flow; intelligent ignition device; plasma flame; well control safety; field application

在油气井钻井和试油测试过程中, 对短期放喷排出来的天然气引燃烧掉, 这是目前现场处理天然气的普遍做法, 也是最有效的方法。若不对分离出来的天然气进行燃烧, 天然气会在井场弥漫、聚集, 它与空气混合可能发生爆炸。若天然气中含有硫化氢等有毒有害气体, 还会危及人的生命。

为保证现场要求放喷点火安全、有效、可靠, 张涛等^[1]提出了在地层测试放喷过程中采用高能自动点火装置, 装置主要对空气进行压缩产生动能, 然后对需要引燃的介质进行雾化处理, 提升物质燃烧的概率, 再使用高能电子点火器等设备, 对物质

进行引燃。对于高含硫天然气井放喷气体点火位置的确定, 钱新明等^[2]以流体力学理论为基础, 建立优化后的放喷装置数学模型, 借助 FLUENT 软件, 模拟了天然气放喷后放喷池内的流场与浓度场, 结合现场的多次试验对模拟结果进行修正, 最后确定了天然气有效点火位置的范围, 为点火设备的建设提供了理论和技术支持。郑伟亮等^[3]在实用新型专利《一种点火控制系统、点火控制箱及液气分离器点火装置》中采用电容储能, 半导体电阻发火, 火花能量大, 具有很强的自净化能力, 不受气压污染影响, 抗油、抗水、抗结焦、耐高温高压屏蔽电缆, 传



输损耗低,可屏蔽点火能量的杂散辐射,防止对其他现场电子设备的电磁干扰。马志^[4]在专利《一种钻井液气分离器点火器》中,通过高压线连接点火电极总成和附电极总成,产生高频电火花,引燃放喷管线排出的可燃气体。

目前,现场常用的两种点火方式:半导体电阻发火和高频脉冲电火花,其存在的不足是点火器产生的能量小,并且电火花难以持续保持,不易直接点燃放喷排出的可燃气体^[5-8]。一般都需要柴油或液化气等辅助燃料,先点燃辅助燃料,由辅助燃料引燃放喷排出的可燃气体。油气井试油测试等离子智能点火装置在设计上充分考虑了油气井放喷工艺的特点,采用高能等离子火焰点火技术直接引燃放喷排出的可燃气体,并经过对等离子火焰进行调制,具有火焰强度可调整控制、点火能量大、火焰长期保持,以及防风、防水、防爆、防腐蚀等功能,并能实现远程控制,解决了钻井和试油测试现场放喷排出的可燃气体不易直接引燃、点火可靠性低等技术难题。因其具有安全性、稳定性、可靠性、有效性及操作便利性,在国内的部分油气勘探开发市场,以及海外的伊拉克、委内瑞拉、印度尼西亚等市场应用,取得了较好的效果。因其适应性广,可作为井控装备,配套于钻井队、测试地面流程队、试油队;在各类油气井,特别是高压油气井、高含硫油气井等井控技术要求较高的油气井上使用^[9-11]。

1 等离子点火技术原理

从等离子发生器原理及等离子点火技术两方面对等离子智能点火装置的点火原理进行详细说明。

1.1 等离子发生器原理

油气井等离子智能点火装置采用的是空气载体等离子发生器,它由阴极、阳极以及载体风系统组成。其原理是:在阳极和阴极之间施加高频高压,形成高压电场,处在高压电场中的空气分子(或原子)中的电子从高压电场中获得能量脱离分子(或原子),形成带正、负电荷的离子以及电子,将电极之间的空气电离形成具有高温导电特性等离子体^[12]。其中带正电的离子流向电源负极形成电弧的阴极,带负电的离子及电子流向电源的正极形成电弧的阳极。等离子体由载体风系统形成的压缩空气吹出阳极,形成可以利用的高温电弧。在气体压力大于一个大气压时,等离子体的温度在 700 ℃~70 000 ℃。

1.2 等离子点火技术

220 V 交流电经过整流、滤波,形成高频脉冲,供给高频脉冲变压器输出高压脉冲;通过高压集束线加在点火头正负极上,在点火头上形成高频高压脉冲电场。高压脉冲电场将流经阳极和阴极之间的压缩空气电离成温度为 18 000 ℃ 的等离子,使得大量等离子聚集在点火头处。载体风系统在不锈钢点火枪杆内形成压缩空气流,压缩空气将等离子拉长形成长度 100 mm 以上的等离子火焰。点火枪安装在与放喷管线相连接的燃烧器出口处,从燃烧器内排出来的可燃气体在经过等离子火焰时,被点燃,从而完成整个点火过程。

2 主要组成结构及功能

等离子点火系统组成如图 1 所示。等离子点火装置系统由逆变电源、控制箱、升压装置、输出集束线、耐高温点火枪杆、等离子点火枪、火焰检测器等组成。

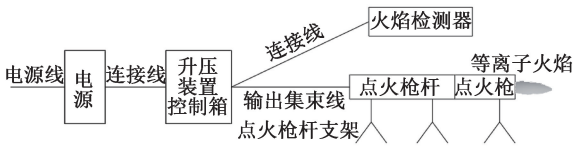


图 1 等离子点火系统组成
Fig. 1 Composition of plasma ignition system

2.1 等离子点火枪

等离子点火枪结构如图 2 所示。等离子点火枪主要由高压电缆接线端子、风机接线端子、风机电缆、风机、高压电缆、不锈钢点火枪杆、陶瓷绝缘支架、不锈钢电极引线、点火头(点火头阳极、点火头阴极)组成。点火枪的作用是将高压脉冲在点火头阴阳极之间产生高温等离子,由风机不断产生压缩空气将高温等离子拉长,在点火头处形成高温等离子火焰。

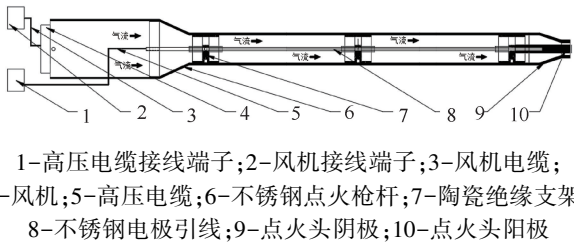


图 2 等离子点火枪结构
Fig. 2 Plasma ignition gun structure

2.1.1 点火头

点火头结构如图 3 所示。点火头主要由陶瓷

绝缘支架、点火头阴极、点火头阳极、等离子火焰所组成。点火枪进入准备点火状态,此时风机产生的压缩空气经过不锈钢点火枪管环空输送到点火头阴阳极处。当启动点火时,不锈钢电极引线将高压脉冲施加到点火头阳极上。在点火头阳极和阴极之间施加高电压脉冲,高压电场将两极间空气击穿放电,形成等离子电弧。等离子火焰温度可达到 10 000 ℃ 以上。

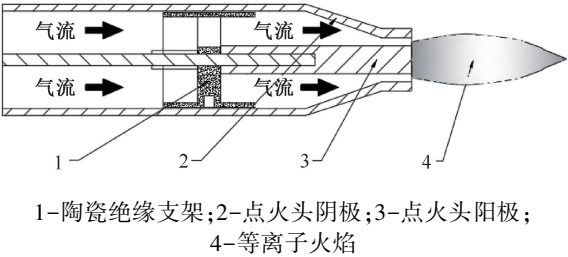


图 3 点火头结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ignition head structure

2.1.2 载体风系统

载体风系统的作用是向等离子点火枪提供压缩空气。压缩空气是等离子电弧的介质,等离子电弧形成后,需要将压缩空气以一定的流速吹出点火头阳极才能形成可利用的电弧。要求载体风系统产生的压缩空气是洁净的,而且是压力稳定的。具体实现方案如下:

- (1) 压缩空气由风机经过点火枪内部环形通道送到等离子点火头。
- (2) 压缩空气通道上设有一个压力开关,把压力信号送回控制箱。
- (3) 点火头处的压缩空气压力要求在 0.3~0.6 kPa 左右,压缩空气流量约为 1.0~1.8 Nm³/min 之间。
- (4) 通过控制压缩空气的压力或流量可以控制等离子火焰温度和强度。

2.2 逆变电源

在 220 V 交流电源供电时,将交流直接与点火装置接通,为点火装置供电能并通过充电系统为锂电池充电。在交流 220 V 电源停电时,自动将锂电池储存的电转换成 220 V 交流电源,为整套装置工作提供电能。这样可以保证点火装置无间断工作,保持点火系统高温等离子火焰持续不断。

2.3 控制箱电路

控制箱电路见图 4。控制箱内电路部分包括电源控制电路、高频调整电路、放大电路、高压输出模块、高压电路和遥控控制电路等。

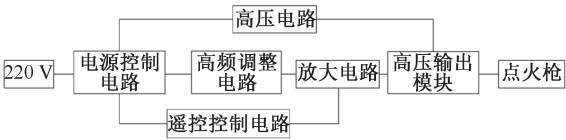


图 4 控制箱电路
Fig. 4 Control box circuit

AC220V 电源通过市电接口连接电源控制电路,电源控制电路通过遥控控制电路连接放大电路,电源控制电路通过高压电路连接高压输出模块,电源控制电路通过高频调整电路、放大电路、高压输出模块连接点火枪^[13-14]。采用大功率模块,经电路处理后,可远距离输出 15 kV 高频脉冲电压,点火能量在 3 000 J 以上,形成超高温等离子体火焰。控制电路配有遥控点火功能,可在 200 m 距离远程点火。

2.4 升压装置

升压电路如图 5 所示,升压装置主要由整流电路、滤波电路、低压脉冲电路、高频升压变压器组成。升压装置的作用是产生高压脉冲。

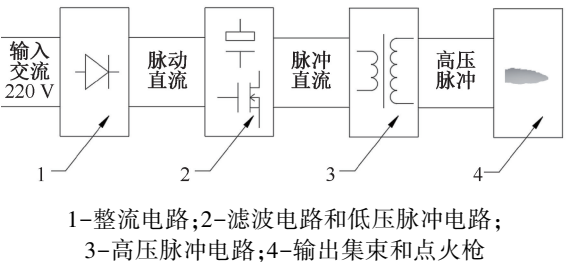


图 5 升压电路示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the booster circuit

输入的 AC220V 电源经过整流电路变成脉动直流电,脉动直流电经过滤波电路变成 310 V 直流电,再经过低压脉冲电路产生高频低压脉冲,加载到高频升压变压器的低压边,经过高频升压变压器对高频低压脉冲升压后产生高压脉冲。

2.5 控制装置

控制装置由 PLC 和继电器组成。控制装置的作用是电源、输入信号、输出信号显示和输出协调控制。

2.5.1 控制 PLC

选用 S7-200CPU224 可编程控制器,按等离子点火装置工作的特点和要求编制的控制程序保证点火过程可顺利地进行,并对点火工作过程提供了有效的监控和保护^[15-16]。等离子点火装置分为遥控、本控、自动、接入上位机四种运行方式。在本控操作时,通过对输出高频高压脉冲和压缩空气压力开关调整改变等离子火焰的大小和强度,以

适应不同工况条件下的点火参数需求。具体方案如下：

(1)使用 USS 协议通过 CPU224 上的通讯口 PORT0 与 6RA70 的通讯口 XI72 之间的进行数据交换,以完成对点火装置工作状态的读取,根据读取到的状态和接收到的控制指令和实时的状态判断等,发出相应的操作指令到执行机构,执行机构按照发来的指令完成相应工作。

(2)压缩空气压力信号直接接入 CPU224 固有的模拟量输入,CPU224 根据实时的电流值大小,控制压缩空气闸门的大小,调节等离子火焰的大小和强度。

(3)通过扩展 EM277 DP 模块与主站 S7-300 完成数据交换,实现上位机集中控制。EM277 模块配置为 16 字入/16 字出模式。

(4)通过 CPU224 内部的逻辑运算,实现点火装置的自动控制。

2.5.2 手持遥控器

系统连接完毕并接通电源后,打开控制箱的开关,按一下手持遥控器的点火按钮,即开始点火,按停止按钮即可关断点火。手持遥控器距离控制箱 200 m 内发出信号,控制箱内遥控接收机输出相应信号到控制装置。手持遥控器按键可实现控制箱的运行、停止,火焰监测启动、停止,点火启动、停止。

2.5.3 输入、输出信号

手动控制输入按钮包括启动、停止、火检、急停、应急、复位等。输入相应信号后,控制器根据程序自动控制输出显示和输出控制。遥控器接收输入,输入相应信号后控制器根据预先程序自动控制输出显示和输出控制。控制器根据输入信号和运行状态,给出当前点火装置的运行状态,由指示灯显示。

2.5.4 输出控制

如图 6 所示,电源接通后,控制器实时接收各种输入信号,根据接收到的信号,判断点火装置运行状态,控制器根据预先设定给执行机构下达相应指令,执行机构根据控制器指令完成相应操作,控制器完成点火装置的各种状态的自动运行。

2.6 火焰监测器

根据油气在燃烧时辐射较强的紫外线和大量的红外线,采用三波段红外线和紫外线型火焰监测器。火焰监测器放置在安全位置(放置点温度 50℃ 以下),当燃烧器点燃时,监测器发出信号给控制装

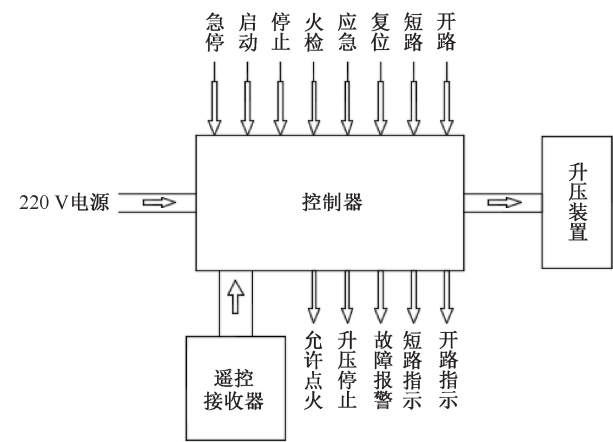


图 6 输出控制示意图
Fig. 6 Output control diagram

置,控制装置接收到监测器发来的信号,自动停止输出集束的高压脉冲,点火装置自动停止工作,进入到点火准备状态。当燃烧器熄灭时,火焰监测器处于不断检测状态,监测器发出无火焰状态,控制装置接收到信号后自动从点火准备状态进入点火状态,再次点燃燃烧器。

3 技术性能

油气井试油测试等离子点火装置技术性能优良,适用范围广泛,满足钻井、试油测试现场放喷点火的需求。

3.1 主要技术参数

- (1)引火介质:等离子;
- (2)燃烧介质:井内产出可燃气体或辅助燃料(液化气、天然气、汽油、柴油);
- (3)点火频率:≤10 次/s;
- (4)输出点火高压:6 000 V;
- (5)单次点火能量:≥3 000 J;
- (6)在保证 220 V 电源下,可 24 h 连续工作;
- (7)操作方式:遥控(遥控器在开阔地操作距离 200 m)、本控、自动、接入上位机;
- (8)火焰监测:采用三波段红外线和紫外线型火焰监测器;
- (9)工作环境:温度 -35 ~ +80℃,相对湿度 ≤90%,海拔高度 ≤3 000 m;
- (10)DC24V 锂电池充满电,可累计工作时间 30 min 以上。

3.2 技术特点

(1)点火装置采用等离子火焰点火技术,具有火焰强度可调整控制,点火能量强的优势;火焰可连续长期保持,点火能力可靠,实现了全天候点火。

(2)点火装置采用实时的 PLC 做核心控制器,它具有逆变电源智能充、放电保护,输入电源自动转换,火焰监测,遥控点火等功能。

(3)点火头具有自洁能力,不易结碳和结垢,在水、泥浆中均能正常工作,在雨雪天气以及污染较严重的场所也能正常工作。

(4)系统在运行中,当外接电源停电时系统会自动启动备用电源供电,在外接电源恢复正常时会立即为备用电池充电,解决了停电应急问题。

(5)适用于各种野外恶劣环境,具备防风、防水、防爆、防腐蚀等功能。

4 现场安装

等离子智能点火装置在钻井及试油测试现场的布置与组装连接具有一定的作业要求,确保现场井控安全,同时需满足点火装置的正常操作。

4.1 现场布置

等离子点火装置的逆变电源、控制箱、耐高温点火枪杆、等离子点火枪、火焰监测器在井场中的布置方式如图 7 所示。考虑到井场安全及设备性能要求,等离子点火枪固定在火把可燃气体出口处,逆变电源放置在距离控制箱 10 m 内,控制箱放

置距离点火杆尾端 30 m 内合适位置,火焰检测器放置在距火把 50 m 内(温度 50 ℃ 以下)的合适位置。

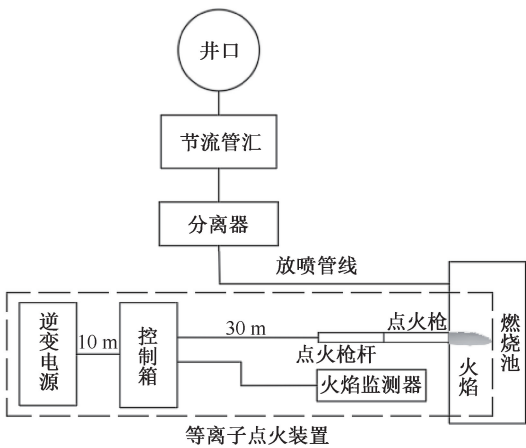


图 7 等离子点火装置现场布置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of site layout of plasma ignition device

4.2 现场连接

等离子点火装置的逆变电源、控制箱、高压集束线、耐高温点火枪杆、等离子点火枪、火焰监测器在井场连接方式如下:

(1)根据现场选用的燃烧器或火把形式,等离子点火枪可采用卧式和立式安装,见图 8、图 9。

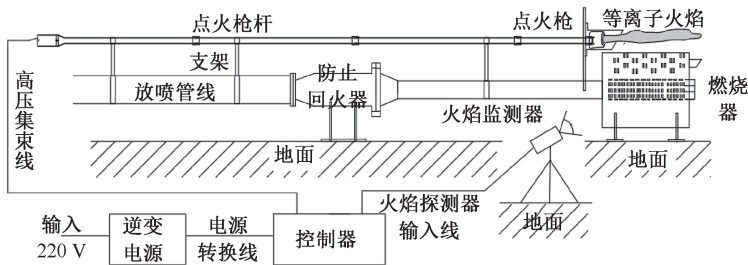


图 8 等离子点火装置现场卧式连接示意图
Fig. 8 Schematic diagram of horizontal connection of plasma ignition device

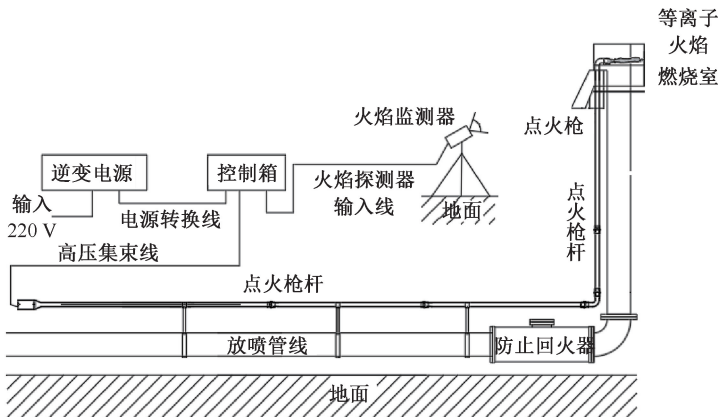


图 9 等离子点火装置现场立式连接示意图
Fig. 9 Schematic diagram of field vertical connection of plasma ignition device



(2)连接点火枪与点火枪杆。

(3)220 V 电源经过导线连接到逆变电源输入上,24 V 锂电池与逆变电源连接,逆变电源输出经过导线连接到控制箱的电源输入。

(4)将输出集束导线一端连接到控制箱的输出高压集束上,将另一端连接到点火杆末端高压集束插座上;同时连接好风机电源。

(5)将火焰监测器与控制箱相连接。

5 现场应用

苏 25-X 井是长庆油田的一口生产井,完钻井深 3 523 m,采用水基压裂投产,压裂后采用 5 mm 油嘴放喷排液 7 天,求产阶段获得日产气 $1.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,无阻流量 $7.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该井点火装置立式安装,采用耐高温不锈钢点火枪杆长度 9 m,输出集束长度 60 m,在距离火把燃烧点 35 m 处放置火焰监测器(见图 10)。放喷期间,能在燃烧器出口处形成 100 mm 以上的等离子火焰,点燃喷出的天然气(见图 11)。



图 10 苏 25-X 井点火装置连接准备

Fig. 10 Su25-X well ignition connection ready



图 11 苏 25-X 井放喷点火情况

Fig. 11 Open flow situation in the Su 25-X well

在距离控制箱 150 m 处使用遥控器对点火装置进行操作时,各种操作工况准确无误。手动操作各种操作时点火装置工作准确无误。并且在液气间歇产出期间,点火装置处于自动状态,火焰监测器监测到火把处有火焰时,点火装置自动停止工作进入到点火准备状态,当火把处火焰熄灭时,点火装置自动启动进入到点火状态。

等离子智能点火装置经过现场试验并不断改进,目前的产品型号为 HAYQDH-III 型。于 2019 年开始投入现场应用,已在渤海钻探钻井队、试油队、测试队配套约 230 多套,主要用于国内部分市场及伊拉克市场、委内瑞拉、印度尼西亚等市场。

6 结论

(1)采用高能等离子火焰点火技术直接引燃放喷气体,并经过对等离子火焰进行调制,具有火焰强度可调整控制、点火能量大、火焰长期保持等特征,解决了钻井和试油测试现场放喷气体不易直接引燃、点火可靠性低等技术难题。

(2)点火装置可实现手动、自动、遥控、远程计算机接口控制。特别适合各种人所不能及的远距离点火和空中以及有毒气体的燃烧场所点火,并能对火把燃烧情况进行实时监测。

(3)系统安装快捷、操作简便,移动运输方便,维护少和使用寿命长。并具备防风、防水、防爆、防腐蚀等功能,适应于油田野外各种恶劣环境。

(4)该装置目前仅适用于钻井及试油放喷管线出口点火,对于钻井井喷失控应急状态下井口点火,还需要进一步拓展研发配套技术及工具,以扩大其应用范围。

致谢:感谢渤海钻探油气井测试公司和廊坊市华安电器设备有限公司同意本文公开发表。感谢任源峰先生等在论文编写及修改方面给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] 张涛,郭向前.高能自动点火装置在地层测试放喷管线中的应用分析[J].石油机械,2017,24(2):96,107.
ZHANG Tao, GUO Xiangqian. Application of automatic high energy ignition device in the formation testing choke line[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(2):96,107.
- [2] 钱新明,孙文磊,黄平,等.含硫天然气井放喷气体点火位置的确定[J].化工学报,2009,60(11):2737-2742.
QIAN Xinming, SUN Wenlei, HUANG Ping, et al. Deter-



- mination in ignition position for open flow gas of gas well containing sulfur[J]. CIESC Journal, 2009, 60(11): 2737-2742.
- [3] 郑伟亮, 匡占丰, 何生岗, 等. 一种点火控制系统、点火控制箱及液气分离器点火装置[P]. 河北: CN208777959U, 2019-04-23.
ZHENG Weiliang, KUANG Zhanfeng, HE Shenggang, et al. The invention relates to an ignition control system, an ignition control box and a liquid-gas separator ignition device[P]. Hebei: CN208777959U, 2019-04-23.
- [4] 马志. 一种钻井液气分离器点火器[P]. 河北: CN200993369, 2007-12-19.
MA Zhi. The utility model discloses a drilling fluid gas separator igniter[P]. Hebei: CN200993369, 2007-12-19.
- [5] 谢奎, 王雷. 川东北罗家寨区块放喷排液地面流程设计及优化[J]. 油气井测试, 2016, 25(6): 31-33.
XIE Kui, WANG Lei. Design and optimization of the ground flow of discharge, injection and drainage of LuoJiazhai block in northeast Sichuan province[J]. Well Testing, 2016, 25(6): 31-33.
- [6] 张明友, 谢奎, 廖刚. 高温高压井地面测试计量自动化智能控制技术[J]. 油气井测试, 2023, 32(3): 12-16.
ZHANG Mingyou, XIE Kui, LIAO Gang. Automatic and intelligent control of surface testing and metering for HTHP wells[J]. Well Testing, 2023, 32(3): 12-16.
- [7] 赵益秋, 王志敏, 杨川琴. 地面测试高压远程控制技术及应用实践[J]. 钻采工艺, 2019, 42(1): 61-64.
ZHAO Yiqiu, WANG Zhimin, YANG Chuanqin. Technology and application practice of high voltage remote control in ground test[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(1): 61-64.
- [8] 何石, 向鹏. 元坝气田高压分离器自动排液系统技术改造与效果分析[J]. 西部特种设备, 2021, 4(3): 67-73.
HE Shi, XIANG Peng. Technical Transformation and effect analysis of automatic drainage system of high pressure separator in Yuanba gas field[J]. Western Special Equipment, 2021, 4(3): 67-73.
- [9] 项培军, 张明友, 贺秋云, 等. 四川高温高压含硫井测试技术[J]. 油气井测试, 2007(S1): 56-59.
XIANG Peijun, ZHANG Mingyou, HE Qiuyun, et al. Sichuan high temperature and high pressure sulfur well testing technology[J]. Well Testing, 2007(S1): 56-59.
- [10] 马群, 高文祥, 郑如森, 等. 克深气田“三超”气井安全隐患治理对策与实践[J]. 天然气与石油, 2021, 39(1): 128-133.
MA Qun, GAO Wenxiang, ZHENG Rusen, et al. Control measures for safety hazards in “three-super-high” gas well in Keshen gas field and its implementation[J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(1): 128-133.
- [11] 王玺, 夏柏如. 高压高产气井地面测试流程研究[J]. 油气井测试, 2005, 14(2): 39-41.
WANG Xi, XIA Bairu. Research on surface test flow of high pressure and high production gas well[J]. Well Testing, 2005, 14(2): 39-41.
- [12] 王学年, 施侠, 吴德才. 等离子点火技术的应用研究[J]. 华东电力, 2003(10): 24-26.
WANG Xuenian, SHI Xia, WU Decai. Application research of plasma ignition technology[J]. East China Electric Power, 2003(10): 24-26.
- [13] 黄船, 曾小军, 何锦华. 智能试油技术在川渝气田的探索与实践[J]. 钻采工艺, 2020, 43(4): 57-60.
HUANG Chuan, ZENG Xiaojun, HE Jinhua. Exploration and practice of intelligent oil testing technology in Chuan-yu gas field[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4): 57-60.
- [14] 庞东晓, 卢齐, 张斌, 等. 自动化技术在川渝地区试油工程中应用初探[J]. 钻采工艺, 2021, 44(4): 68-72.
PANG Dongxiao, LU Qi, ZHANG Bin, et al. Application of automation technology in oil testing engineering in Sichuan and Chongqing area[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(4): 68-72.
- [15] 匡立春, 刘合, 任义丽, 等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 1-11.
KUANG Lichun, LIU He, REN Yili, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1-11.
- [16] 文宏武, 杜成刚, 康凯, 等. 超高压气井地面计量热交换及控制系统[J]. 油气井测试, 2022, 31(6): 17-21.
WEN Hongwu, DU Chenggang, KANG Kai, et al. Surface metering heat exchange and control system of ultra-high pressure gas well[J]. Well Testing, 2022, 31(6): 17-21.

编辑 邵振鹏

第一作者简介:熊战,男,1970年出生,教授级高级工程师,1992年毕业于江汉石油学院钻井工程专业,现主要从事钻井及试油测试管理工作。电话:0317-2551036; Email: xiong-zhan@cnpc.com.cn。通信地址:河北省廊坊市油气井测试公司,邮政编码:065007。