

应用天然气密闭燃烧装置提高杨税务潜山气藏试气安全环保质量

张士川¹, 陈燕¹, 雷鹏¹, 刘述忍¹, 徐文光², 尹后凤³

- 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. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司石油工程总承包分公司 陕西西安 710016
- 3. 中国石油华北油田分公司华港燃气集团有限公司 河北任丘 062552

通讯作者:Email:liushuren@cnpc.com.cn

项目支持:中国石油集团渤海钻探工程有限公司科研项目“天然气密闭燃烧装置研究与应用”(2018Z32K)

引用:张士川, 陈燕, 雷鹏, 等. 应用天然气密闭燃烧装置提高杨税务潜山气藏试气安全环保质量[J]. 油气井测试, 2020, 29(4): 18-23.

Cite: ZHANG Shichuan, CHEN Yan, LEI Peng, et al. Applying airtight combustion device for natural gas to improve the safety of gas testing and environmental quality in Yangshuiwu buried hill gas reservoir [J]. Well Testing, 2020, 29(4): 18-23.

摘要 为保证杨税务潜山气藏在勘探过程中符合环保要求, 研制了天然气密闭燃烧装置。通过结构设计和高温耐火材料选型, 制造了燃烧装置的炉体, 实现燃烧器的点火、供气、降温、送风、监测、自动化控制等功能, 建立了完善的安全监测和保护系统; 设计了天然气放喷、回收、密闭燃烧控压系统, 并配套了相应的软件。经在华北油田杨税务潜山气藏6口天然气井试气放喷应用, 有效降低了噪音、热辐射、光污染和有害气体排放, 各项指标均符合国家标准, 具有明显的工程优势, 可为石油勘探开发提供有力的技术支撑。

关键词 潜山气藏; 试油; 密闭燃烧; 天然气; 地面计量; 自动控制系统; 安全环保

中图分类号: TE27 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.04.003

Applying airtight combustion device for natural gas to improve the safety of gas testing and environmental quality in Yangshuiwu buried hill gas reservoir

ZHANG Shichuan¹, CHEN Yan¹, LEI Peng¹, LIU Shuren¹, XU Wenguang², YIN Houfeng³

- 1. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China
- 2. Petroleum Engineering General Contracting Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China
- 3. Huagang Gas Group Co., Ltd., CNPC Huabei Oilfield Branch, Renqiu, Hebei 062552, China

Abstract: In order to ensure that the exploration of Yangshuiwu buried hill gas reservoir meets environmental protection requirements, an airtight combustion device for natural gas was developed. Through structural design and selection of high-temperature refractory materials, the furnace body of the combustion device was manufactured to realize the functions of ignition, gas supply, cooling, air supply, monitoring, and automatic control of the burner. A complete safety monitoring and protection system was established. The pressure control system for natural gas relief, recycle, and airtight combustion was designed, and corresponding software was provided. The application of gas relief testing in 6 natural gas wells in the Yangshuiwu buried hill gas reservoir of Huabei Oilfield shows that the device can significantly reduce noise, heat radiation, light pollution and harmful gas emissions, and all indicators are in line with national standards. The device has obvious engineering advantages, and can provide strong technical support for petroleum exploration and development.

Keywords: buried hill gas reservoir; oil testing; airtight combustion; natural gas; surface measurement; automatic control system; safety and environmental protection

在油田勘探期间, 因现场不具备天然气回收和管网集输条件, 往往采用传统的天然气燃烧池放喷燃烧的方法。该方法存在以下问题: ①需要足够的安全距离, 井场征地要符合安全要求; ②燃烧不充

分时产生的一氧化碳、氮氧化物、碳颗粒(黑烟)等有害物质, 对环境造成影响, 不符合环保要求; ③燃烧产生的热辐射容易引燃火炬周围的树木及农作物; ④天然气产量较大时, 火焰明显, 易造成敏感关

注^[1-5]。天然气密闭燃烧装置主要用来处理勘探井试油测试、试采过程中的天然气^[6]。但现有装置目前存在价格昂贵、天然气处理量低等问题。

国外在20世纪70年代初就开始天然气密闭燃烧装置研究,主要分为开放式地面火炬系统和封闭式地面火炬系统。前者较后者的处理量大,但环保性能较后者差,主要以封闭式地面火炬系统为主^[7-8]。如美国 John Zink、Kaldair、QTI 等公司均推出了自己的产品。加拿大 QTI 公司生产的 Q3000 型焚烧炉 2009 年 8 月在 P302-2 井试气施工并联使用,燃烧时间 240 h,最大处理气量 $53 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[9-10]。国内该方面研究较晚也较少,北京航天动力研究所生产的 SGI-10 型焚烧炉 2011 年 3 月在 D401-1 井试气施工中使用,燃烧时间 8 h,最大处理气量 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[11-12]。2014 年,四川红光机械有限公司申报了《气井放喷密闭燃烧装置》的专利,但该装置并未生产制造成样机投入现场使用^[13]。2016 年,四川嘉科能源装备工程有限公司申报了《一种测井密闭燃烧火炬》的专利,该专利虽然达到了天然气充分燃烧、减少热辐射和噪声污染的目的,但是未公开有关实时监测和安全防护的措施,存在炸膛危险,自动化程度较低^[14]。2016 年,川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院研制了天然气处理能力为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的试油测试用密闭燃烧装置,但仅进行了小型试验^[15]。

杨税务潜山位于廊坊近郊,属于人口稠密高危地区,政治敏感性强,安全环保标准高。在 2016 年 11 月 8 日,AT1X 井试油放喷求产期间,气产量达到 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用传统的燃烧池放喷燃烧方式,虽然采取了搭建防火墙等措施,但是不能有效控制天然气燃烧的火焰高度,存在一定的安全隐患^[16-18]。为确保试油施工安全、环保放喷求产,在调研国内外天然气密闭燃烧装置结构、原理和存在问题的基础上,结合研究区实际使用需求,设计研制了天然气密闭燃烧装置,包括整体结构、高耐温材料、自动化控制、安全监测及保护系统等。

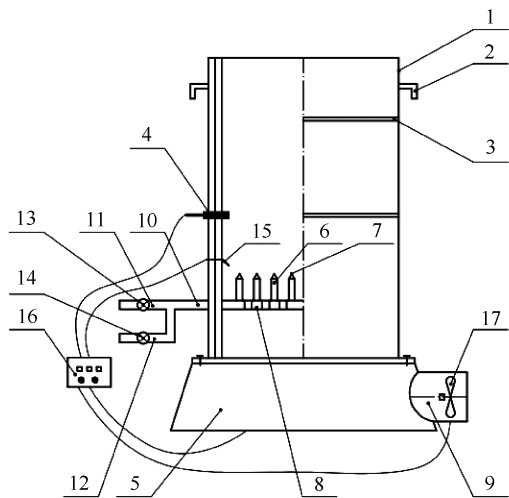
1 天然气密闭燃烧装置方案设计

为确保杨税务潜山试油施工安全,满足环保放喷求产需要,对天然气密闭燃烧装置整体结构进行设计,其主要技术指标满足生产需要。

1.1 天然气密闭燃烧装置整体结构设计

天然气密闭燃烧装置的整体结构,主要由炉

体,耐高温隔热材料,火焰探测器,热电偶,燃烧头,进风口,天然气入口,变频鼓风机,控制系统等组成(图1)。



1-炉体;2-吊耳;3-加强箍;4-热电偶;5-底座;6-燃烧头;
7-点火头;8-燃料分配盘;9-进风口;10-进气管线;11-引火气管线;
12-井口气管线;13-引火气管线控制阀门;14-井口气管线控制阀门;
15-离子探针探测器;16-控制柜;17-变频鼓风机

图1 天然气密闭燃烧装置结构示意图

Fig.1 Structure of airtight combustion device for natural gas

炉体由内向外由不锈钢板、隔热棉、涂层材料组成。点火头数量为3个,燃烧头数量为40个,在燃料分配盘上成环状均匀分布。点火头上有电火花点火器,保持燃料分配比例和增大燃料与空气的接触面积,实现充分燃烧。离子探针探测器紧靠燃烧头,材料为镍铬铝合金或铁铬铝合金,耐温 $1420 \sim 1450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。引火气管线连接外部辅助设备 LNG 气罐或者分离器出来的干气,用来点燃点火头并且维持一段时间的燃烧。热电偶紧贴在炉体的内壁,材料为铂铑合金,耐温 $1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。引火气管线连接外部辅助设备 LNG 气罐或者分离器出来的干气,用来点燃点火头并且维持一段时间的燃烧。

1.2 主要技术指标

- (1)单台装置的最大燃烧量: $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;
- (2)炉膛内温度:不大于 $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (3)装置出口烟气温度:不大于 $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (4)燃烧器调节范围: $5000 \sim 150000 \text{ Nm}^3/\text{d}$ 天然气;
- (5)尾气排放符合 GB 13271-2014(锅炉大气污染物排放标准);
- (6)整体结构满足公路运输条件和现场快速拆组的要求,炉体外径小于 2960 mm 。

2 关键技术

天然气密闭燃烧装置设计主要包括高温耐火材料选型、密闭燃烧装置燃烧器及 PLC 自动化控制系统。

2.1 高温耐火材料选型

隔热耐火材料又称作轻质耐火材料,是指体积小、气孔率高、具有隔热性能,对热流具有明显阻抗作用的材料。隔热耐火材料按照组织结构可以分为固相连续型、气相连续型和纤维结构。其中的固相大多数是非金属氧化物结晶相和玻璃相。相对来说,固相材料的导热系数很高,但都有着较高的使用温度,隔热作用有限。所以在材质选择上,一般优先选用本身热导率很低材料,比如硅藻土、钙长石、硅酸钙和耐火纤维等。气体分布在固相内的气孔中,气体本身的导热系数很低。因此,由固相与气相构成的气孔率很高的轻质耐火材料具有很好的隔热效果,而充满气体的散状材料或纤维状材料也具有良好的隔热作用^[19-20]。

天然气密闭燃烧装置筒体内衬的耐火材料组成为:不锈钢+隔热棉+耐火材料涂层。天然气充分燃烧的火焰温度约为 1 400 ℃,该密闭燃烧装置配有变频鼓风机降温,始终保持筒体温度不超过 900 ℃。因此,筒体内衬耐火材料最内层选择耐温 1 200 ℃的 S310 不锈钢板;为了进一步降低热辐射,中间层选用硅酸铝隔热纤维棉;为了保护外部筒体的耐酸不锈钢,又在中间加了一层耐火涂层材料 OCr25Ni20。

2.2 密闭燃烧装置燃烧器

天然气密闭燃烧装置的燃烧器结构如图 2 所示。燃烧器安装在装置底部,主要由燃烧头、点火头、进气管、变频鼓风机组成。燃烧器采用 3 只点火头点燃主火焰,确保点火的安全和可靠。进气管由两路进行供应,一条管路来自 LNG 气瓶或者分离器干气,依靠电火花点燃点火头,并维持点火头燃烧一段时间;另一条管路来自井口气。每台燃烧器安装 3 只点火枪,由多只液化气罐组成的气源提供能够维持一定时间的点火燃料,点火枪采用电火花放电点火,离子探针探测火焰。

燃烧头采用多层燃烧结构,以获得尽可能大的燃料调节比,以适应试油时放空燃气量的大范围变化。点火头和燃烧头组件采用耐热合金 OCr25Ni20 材料制造,可长期在高温环境中使用。

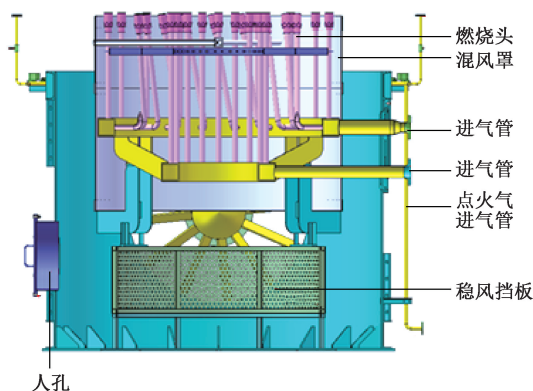


图 2 燃烧器结构示意图

Fig. 2 Burner structure

变频鼓风机为燃烧配风,通过变频器调节风量来适应燃气量的变化。其主要作用有三个:一是开车时,保证安全吹扫;二是为天然气燃烧提供足够的空气,实现高负荷正压燃烧,能够满足大流量并产气放空燃烧需要;三是经过鼓风冷却,吸收大量热源,使筒体内燃气火焰温度降温。

2.3 PLC 自动化控制系统

天然气放空燃烧装置控制系统主要由 4 部分组成,分别为 PLC 控制柜 1 套和变频控制柜 1 套、现场接线柜 3 套和现场仪表。PLC 控制柜完成主要控制流程,采集仪表、功能组件信号,输出控制信号。变频柜分为手动、自动两种操作模式。

运行流程通过 PLC 控制实现,共分为 5 个阶段实现:①t1 信号检测阶段。确保流程未启动前,无火焰信号和风压信号反馈。②t2 启动风机阶段。确保风压信号反馈。③t3 点火阶段。确保点火流程正常。④t4 稳定火焰阶段。持续监测火焰信号。⑤t5 启动主燃气阀阶段。启动主燃气切断阀,并持续监测火焰信号。

2.3.1 手动操作模式

将三档开关 SA 置于“手动”档位,通过控制面板上的启动、停止按钮来控制变频器启停,通过 ESD 急停按钮来紧急停止变频器,通过电位计旋钮来调节变频器运行频率。控制面板上还配备了对应的指示灯,显示变频器状态。

部分控制系统界面如图 3、图 4 所示。

2.3.2 自动操作模式

自动操作模式则由 PLC 控制变频器起停及频率大小。

2.4 燃烧装置安全监测及保护系统

设计了火焰探测装置,通过控制系统可及时切

断天然气供应,防止因熄火导致天然气泄漏的问题发生;设计了热电偶测温元件,根据反馈的信号控制变频器频率,来调节变频鼓风机的配风量,以此将炉膛内的温度控制在 800~900 ℃ 之间,保证耐热钢炉膛不因过热而烧塌。

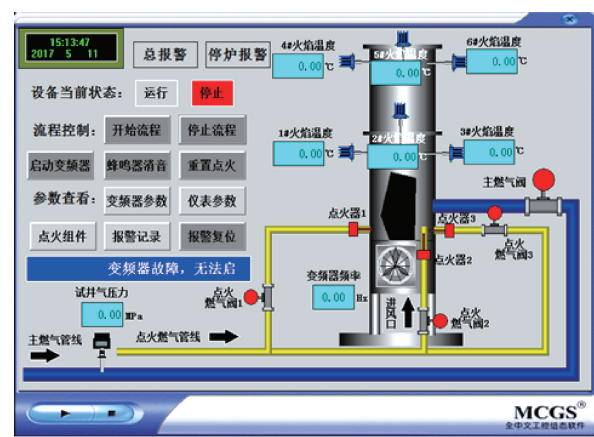


图 3 PLC 控制系统主界面

Fig. 3 Main interface of the PLC control system

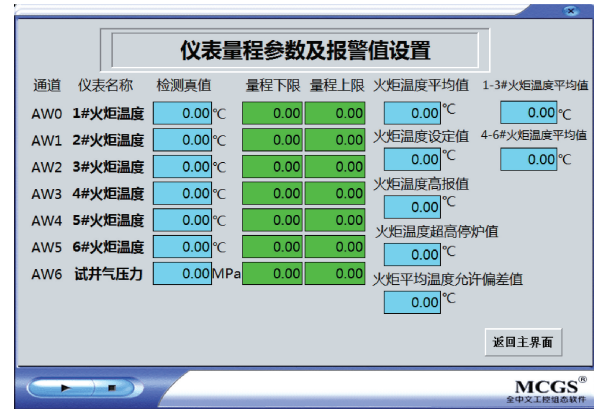


图 4 仪表参数设置图

Fig. 4 Setting of instrument parameter

2.4.1 热电偶

天然气密闭燃烧装置炉膛温度测量仪表热电偶对装置的安全运行起着非常重要的作用。若热电偶经常损坏,将严重影响燃烧炉的安全、使用寿命及装置的平稳运行。炉膛内温度通过 6 只热电偶进行实时监测,分布在炉膛中部和下部。天然气燃烧时,热电偶温度显示不高于 1 200 ℃,并将信号引入 PLC 控制系统,便于操作人员监控。温度的实时监测能够使操作人员更好地判断燃烧装置内天然气的燃烧情况,为烟气达标排放提供保障。当炉膛内温度超过 1 200 ℃ 时,热电偶反馈信号至控制系统,控制系统调节变频鼓风机,增大送风量,使空气携带热量能力增加,从而降低炉膛内温度。

2.4.2 火焰探测器

离子火焰探测器不同于普通的火焰探测器。离子火焰探测器主要用于燃气工业燃烧器、锅炉的火焰监测。检测性能可靠,可以排除积炭、布线分布电容的影响,只对火焰敏感,对高温无反应,具有强抗干扰性能。

该炉体在燃烧头上方安有 4 个火焰探测器,分别与外部控制系统连接。当燃烧器、锅炉中的控制点火装置自动点火时,打开燃料阀,如果在设定时间内没有点燃,离子火焰探测器的控制器自动关闭燃料阀并报警;如点火成功,则保持燃料正常供应。

2.4.3 气动切断阀

气动切断阀由多弹簧气动薄膜执行机构或浮动式活塞执行机构与调节阀组成,接收调节仪表的信号,控制工艺管道内流体的切断、接通或切换。气动切断阀的气源要求经过滤的压缩空气,流经阀体内的介质应该是无杂质和无颗粒的液体和气体。

当火焰探测器监测到火焰熄灭时,火焰探测器将信号传至 PLC 自动控制系统,自动控制系统发送信号至气动切断阀,快速切断天然气供应,防止天然气泄漏。

当热电偶监测到炉膛内温度急剧增加时,将调节变频鼓风机增大送风量,降低炉膛内温度。当温度继续增加时,达到不锈钢板的极限温度时,自动快速关闭供气阀门,停止燃料的供给。

2.5 天然气放喷、回收、密闭燃烧控压系统

天然气放喷、回收、密闭燃烧控压系统主要由燃烧分流减压撬、燃烧装置背压阀撬、管网减压阀撬,以及放喷坑背压阀撬组成。

燃烧分流减压撬可使井口气降压至设定压力值,经燃气量调节阀和燃烧器外环背压阀主燃烧器进气口进入燃烧装置,从而实现低压安全环保作业。

3 现场应用

天然气密闭燃烧装置 2 套样机投入使用以来,先后完成了杨税务潜山气藏 AT2X 井、AT3 井、AT4X 井和 AT5X 井,以及 Q2-10 井,共 6 口井的地面放喷计量施工。以 AT3 井为例,介绍天然气密闭燃烧装置的应用情况。

AT3 井位于河北省廊坊市广阳区,是冀中坳陷廊固凹陷杨税务潜山构造古 1 潜山圈闭的一口预探井。完钻井深 5 645.00 m,测试井段为 5 385.00~

5 458.40 m,层位为 O_1^1 。2017年11月15日至2018年4月27日开井测试期间,应用该装置获得较好效

果。井上天然气放喷、回收、密闭燃烧控压系统布局如图5所示,AT3井产气情况如图6所示。

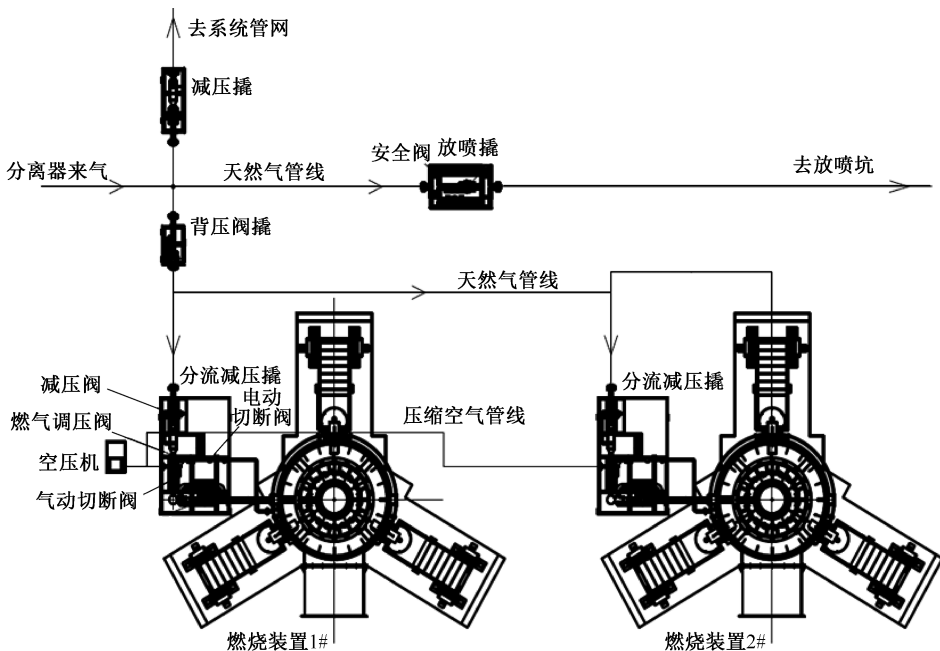


图5 天然气放喷、回收、密闭燃烧系统装置布局图

Fig. 5 Device layout of natural gas relief, recycle, and airtight combustion system

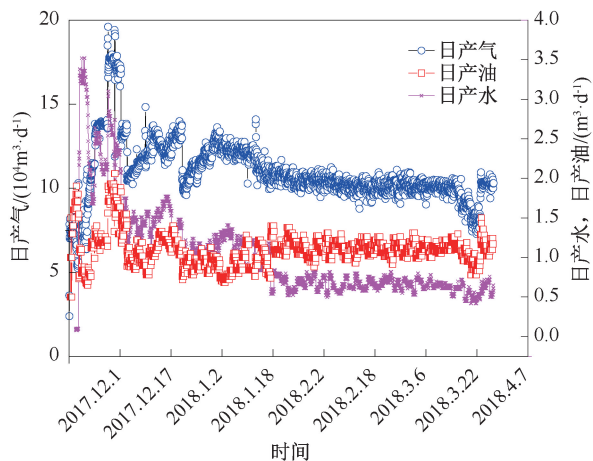


图6 AT3井地面放喷计量曲线

Fig. 6 Surface relief metering curve of Well AT3

采用红外测温仪测试天然气密闭燃烧装置炉体外壁温度为 193°C ,采用热辐射传热学公式计算无障碍区范围在半径 20 m 处的热辐射照度为 $1.58 \text{ kW}/\text{m}^2$,安全环保符合化工标准《HG/T 20570—95 火炬系统设置》。

采用无人机观测天然气密闭燃烧装置实际运行状况:燃烧时,炉体上空的颜色与天空颜色基本相同,说明天然气在炉体内完全燃烧,无冒黑烟等现象。由此说明,天然气密闭燃烧装置尾气排放符合国家标准《GB 13271—2014 锅炉大气污染物排放标准》和《大气污染物综合排放标准 GB 16297—1996》,

应用成功。

4 结论

(1)研制的天然气密闭燃烧装置,有效解决了天然气放喷计量中存在的热辐射、光污染、噪声和不完全燃烧等环境污染问题,对试油期间天然气处理有明显工程优势,具备推广应用的前景。

(2)PLC 控制系统、热电偶测温元件和火焰探测装置能够自动控制,实现天然气安全充分燃烧,保障设备运行的安全性。

(3)天然气密闭燃烧装置在华北油田杨税务潜山气藏成功应用 6 口井,最大处理气量达到 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,未来将研制最大处理量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的撬装式天然气密闭燃烧装置,以适应不同天然气产量的气井试气测试。

致谢:感谢中国石油集团渤海钻探工程有限公司“天然气密闭燃烧装置研究与应用”项目组科研人员提供的技术支持。

参考文献

- [1] 王爱洁. 工业燃烧器的研究与开发[D]. 青岛:中国石油大学,2010.
WANG Aijie. Research and development of industrial burner [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [2] 回胜. 旋流燃天然气燃烧器燃烧特性实验研究[D].

- 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- HUI Sheng. Experimental investigation on combustion charactics of swirling natural gas burner [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [3] 郝增贤,闫桂芳,王伟秋,等. 环保试油排液装置现场应用[J]. 油气井测试,2017,26(1):61-62.
- HAO Zengxian, YAN Guifang, WANG Weiqiu, et al. Field application of environmental protection typed oil test and flowing device [J]. Well Testing, 2017,26(1):61-62.
- [4] 王伟秋,甘惠娟,闫研林,等. 节能环保型试油连续排液装置的研究与应用[J]. 油气井测试,2017,26(3):63-65.
- WANG Weiqiu, GAN Huijuan, YAN Yanlin, et al. Research and application of energy conservation and environmental protection typed continuous drainage device [J]. Well Testing, 2017,26(3):63-65.
- [5] 苟彬德. 多点式地面火炬的安全环保性能初探[J]. 石油化工设计,2015,32(1):10-13.
- GOU Binde. Discussion on the safety and environment protection performance of multi-point ground flare [J]. Petrochemical Design, 2015,32(1):10-13.
- [6] 庞东晓,陆灯云,韩雄,等. 天然气密闭燃烧器的研制与应用[J]. 天然气工业,2019,39(10):127-131.
- PANG Dongxiao, LU Dengyun, HAN Xiong, et al. Development and application of natural gas closed burners [J]. Natural Gas Industry, 2019,39(10):127-131.
- [7] 李立力. 封闭式地面火炬系统安全分析与风险控制[J]. 广州化工,2014,42(1):110-112.
- LI Lili. Safety analysis and risks control for the enclosed ground flare system [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014,42(1):110-112.
- [8] 张志刚. 地面火炬安全风险的探讨与分析[J]. 炼油技术与工程,2007,37(7):52-56.
- ZHANG Zhigang. Analysis of safety risks of ground flare [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2007,37(7):52-56.
- [9] 李明志,聂仕荣,张文昌,等. 普光气田 P302-2 井焚烧炉试气技术[J]. 中国工程科学,2010,12(10):61-64.
- LI Mingzhi, NIE Shirong, ZHANG Wenchang, et al. Gas testing technology for Puguang P302-2 Well [J]. Engineering Sciences, 2010,12(10):61-64.
- [10] 聂仕荣,张文昌. 焚烧炉在普光气田高含硫气井试气中的应用[J]. 天然气工业,2009,29(6):113-116.
- NIE Shirong, ZHANG Wenchang. Applications of incinerators in well test of high sour gas wells at Puguang gas field [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(6):113-116.
- [11] 姜春河,张庆生,张文昌,等. 国产 SGI-10 型高含硫天然气焚烧炉在普光 D401-1 井试气中的应用[J]. 天然气工业,2011,31(7):87-89.
- JIANG Chunhe, ZHANG Qingsheng, ZHANG Wenchang, et al. Application of the China-made SGI-10 incinerator to the gas production test of the Well D401-1 in the Puguang Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2011,31(7):87-89.
- [12] 杨光炼,刘飞,潘登,等. 试油测试过程中的安全环保技术作业——以川渝地区为例[J]. 天然气工业,2014,34(5):158-162.
- YANG Guanglian, LIU Fei, PAN Deng, et al. HSE practices during well testing in sour gas and shale gas wells: Case studies of Sichuan and Chongqing fields [J]. Natural Gas Industry, 2014,34(5):158-162.
- [13] 张燕忠,刘信智,刘泉,等. 气井放喷密闭燃烧装置[P]. 中国专利 CN 201410613103.5, 2014.
- [14] 明勇,杨家银,张兴伦,等. 一种测井密闭燃烧火炬[P]. 中国专利 CN 201620240842.9, 2016.
- [15] 刘飞,赵益秋,王雷. 试油测试用密闭燃烧装置开发与试验[J]. 油气井测试,2016,25(6):23-26.
- LIU Fei, ZHAO Yiqiu, WANG Lei. Development and test of closed combustion device for oil testing and well test [J]. Well Testing, 2016,25(6):23-26.
- [16] 刘述忍,程晓东,赵政嘉,等. 杨税务高温潜山气藏测试射孔联作技术优化[J]. 石油钻采工艺,2018,40(2):185-189.
- LIU Shuren, CHENG Xiaodong, ZHAO Zhengjia, et al. Optimization of test and perforation combination technology in Yangshuiwu high-temperature buried hill gas reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40(2):185-189.
- [17] 于建涛,王东明,刘蜀平,等. 旋冲钻具在华北油田安探 1x 井的试验应用[J]. 西部探矿工程,2017,29(2):33-36.
- YU Jiantao, WANG Dongming, LIU Shuping, et al. Test and application of rotary drilling tool in Antan 1x Well of Huabei Oilfield [J]. West-China Exploration Engineering, 2017,29(2):33-36.
- [18] 杜金虎,何海清,赵贤正,等. 渤海湾盆地廊固凹陷杨税务超深超高温奥陶系潜山油气勘探重大突破实践与启示[J]. 中国石油勘探,2017,22(2):1-12.
- DU Jinhua, HE Haiqing, ZHAO Xianzheng, et al. Significant exploration breakthrough in Yangshuiwu ultra-deep and ultra-high temperature Ordovician buried-hill in Langgu sag, Bohai Bay basin [J]. China Petroleum Exploration, 2017,22(2):1-12.
- [19] 朱丽慧,李永刚,李绍奇. 隔热耐火制品耐压强度试验[J]. 耐火材料,1997,31(3):167-168.
- ZHU Lihui, LI Yonggang, LI Shaoqi. Testing of compression strength for insulating refractory products [J]. Refractories, 1997,31(3):167-168.
- [20] 高帅,马明锴. 定形隔热耐火制品显气孔率的检测[J]. 山东冶金,2004,26(4):51-52.
- GAO Shuai, MA Mingkai. Test method for apparent porosity of shaped insulating refractory products [J]. Shandong Metallurgy, 2004,26(4):51-52.

编辑 刘振庆

第一作者简介:张士川,男,1982 年出生,工程师,2005 年毕业于河北经贸大学计算机科学与技术专业,现从事油气井测试相关工作。电话:0317-2553898,15931606648; Email: zhang_sc@cnpc.com.cn。通信地址:河北省廊坊市广阳区万庄石油基地油气井测试公司,邮政编码:065007。