

# 连续管作业机动力橇的防爆设计与应用

柳庆仁 颜家福 周忠城 曹和平 于东兵

中石油江汉机械研究所有限公司, 湖北 武汉 430024

**摘 要:**为满足连续管作业机在海上平台、页岩气井场和气化采煤基地等爆炸性气体环境中的安全使用要求,必须对连续管作业机动力橇进行防爆设计。根据国家和石油行业电气设备相关防爆标准和爆炸性环境用内燃机防爆标准,对动力橇用防爆柴油机系统的柴油机本体、进气系统、排气系统与安全保护系统等四大重要组成部分进行了防爆设计,并对这四大重要部分的组成、防爆机理、实施方法进行了总结,同时提出了改进措施,保障了设备和人员安全。防爆动力橇现场应用结果表明,该动力橇能满足油气井场爆炸性气体环境中连续管作业机的安全使用。研究结果可为类似柴油驱动动力设备防爆设计提供参考。

**关键词:**连续管作业机;动力橇;防爆设计

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.03.016

## Explosion-proof design and application of power pack skid for coiled tubing unit

LIU Qingren, YAN Jiafu, ZHOU Zhongcheng, CAO Heping, YU Dongbing

CNPC Jiangnan Machinery Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430024, China

**Abstract:** In order to meet the safety requirements of coiled tubing unit in explosive gas environment such as offshore platform, shale gas well site and gas-filled atmosphere of coal mining base, the power pack skid for coiled tubing unit shall meet explosion-proof design requirements. Based on explosion-proof design criteria, the explosion-proof design of the diesel engine system for power pack skid was implemented on the diesel engine body, air intake system, exhaust system and safety protection system. Furthermore, the explosion-proof principle and the integration of the air intake, exhaust system and safety protection system of explosion-proof diesel engine for power pack skid are analysed and summarized in this paper. The field application concludes that the power pack skid can meet the safe operation of the coiled tubing unit in the explosive gas environment at the oil and gas well site. This paper could provide useful reference for the explosion-proof design of similar diesel-engine driven equipments.

**Keywords:** Coiled tubing unit; Power pack skid; Explosion-proof design

收稿日期:2020-06-02

基金项目:中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目“煤炭地下气化关键技术研究与先导试验”子课题“地下气化井下作业装备研究与应用”(2019E-25-04)

作者简介:柳庆仁(1984-),男,湖北荆州人,工程师,硕士,主要从事石油机械设备研发工作。E-mail:liuqrdr@cnpc.com.cn

## 0 前言

连续管作业机在油气领域的应用越来越广泛,为了满足连续管作业机在海上平台、页岩气井场、气化采煤基地等爆炸性气体环境中的使用要求,开发了防爆型<sup>[1]</sup>连续管作业机组<sup>[2]</sup>,该机组包括动力橇、控制橇、连续管滚筒橇、井口装置橇等,其中动力橇主要由顶吊橇体、防爆柴油机系统、液压系统、电源与照明系统和动力软管滚筒等组成。

目前,连续管作业机动力橇所用防爆柴油机系统的柴油机本体、进气系统、排气系统、安全保护系统四大重要组成部分主要依赖原装进口,价格昂贵,存在维修时间长、保养费用高等弊端。为了降本增效,开发了在非防爆柴油机系统的基础上进行防爆设计而成的新型防爆柴油机系统,本文主要介绍采用这种新型防爆柴油机系统的动力橇防爆设计内容和现场应用效果。

## 1 动力橇防爆设计依据

根据国家标准和石油行业标准<sup>[3-6]</sup>可知,连续管作业机动力橇使用爆炸性气体环境为2区(Zone 2),气体级别为IIA,温度组别为T3,本文以此作为动力橇防爆设计依据。在实际应用中,从安全角度上,油气井场一般选用防爆等级更高的(气体级别为IIB或IIC、温度组别为T4~T6)电气设备。

动力橇所用防爆柴油机系统应满足适用于可燃性气体和蒸汽环境用II类3G级别<sup>[7]</sup>内燃机的相关防爆要求,柴油机机械部分防爆等级为IIA T3,电气部分防爆标志为Ex nA[ic] IIC T3(防爆类型为无火花本安组合型,防爆等级为IIC T3)。其它电气设备选用IIC T3或

IIC T4~T6防爆等级。

## 2 动力橇防爆柴油机系统组成与防爆设计

### 2.1 防爆柴油机系统组成

防爆柴油机系统作为动力橇的主要防爆部分,其自身的防爆性能决定了动力橇的防爆性能。

防爆柴油机系统的四大重要部分为防爆柴油机本体、防爆进气系统、防爆排气系统和防爆安全保护系统。

### 2.2 防爆柴油机系统防爆设计

#### 2.2.1 柴油机本体防爆设计

在非防爆柴油机本体的基础上进行防爆设计改造,防爆设计主要包括以下方面。

1) 进气部分设计隔爆型进气总管及进气歧管<sup>[8]</sup>、隔爆型进气压缩机、隔爆型阻火器,避免缸内和进气部分产生的火焰和火花窜到爆炸性气体环境中。

2) 排气部分设计隔爆型夹水套排气总管及排气歧管、隔爆型夹水套涡轮增压器,水套里循环的冷却液有效控制了排气部分表面温度,确保表面最高温度低于温度组别T3。

进气、排气部分隔爆外壳的隔爆结合面间隙应满足IIA气体级别最大安全间隙<sup>[9]</sup>的要求,并加装可压缩不燃材料的衬垫<sup>[10]</sup>。

3) 柴油机曲轴箱呼吸器的防爆设计,保证曲轴箱满足正压型防爆要求。

4) 电气部分采用防爆等级不低于IIC T3的无火花本安型防爆电气元件或设计有安全栅,满足IIC气体级别最小点燃电流比<sup>[11]</sup>的要求。

#### 2.2.2 进气系统和排气系统的防爆设计

防爆进气系统和排气系统结构见图1。

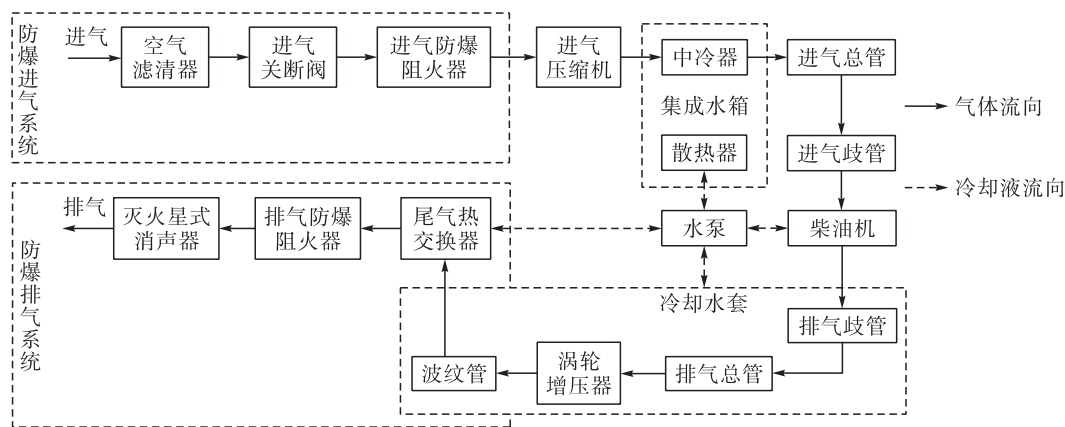


图1 防爆进气系统和排气系统结构图

Fig. 1 Flowchart of explosion-proof air intake system and exhaust system structure

#### 2.2.2.1 进气系统组成及防爆设计

防爆进气系统主要由空气滤清器、进气连接管、电

控进气关断阀、进气防爆阻火器等组成,其中电控进气关断阀防爆标志为Ex e IIC T4,进气防爆阻火器防爆标

志为 Ex d IIC T3。为了满足进气系统的防爆要求,在非防爆柴油机进气系统基础上设计了 1 套由进气关断阀和进气阻火器组成的进气防爆装置。在紧急情况下,进气关断阀能迅速切断进气通道迫使柴油机停止工作,保障设备和作业安全;进气防爆阻火器能熄灭可能从缸内发生回火或者进气系统部件处产生的火焰和火花,避免引爆潜在的爆炸性气体。

### 2.2.2.2 排气系统组成及防爆设计

柴油机尾气中存在大量未完全燃烧的火花或火星,而且柴油机尾气温度可高达 600 ℃,远远超过温度组别 T3,所以要对柴油机排气系统进行防爆设计<sup>[12]</sup>。

防爆排气系统主要由满足爆炸性环境用非电气设备防爆标准<sup>[13-14]</sup>的隔爆型夹水套波纹管、隔爆型尾气热交换器、排气防爆阻火器(Ex d IIC T3)、灭火星式消声器组成。其原理是柴油机尾气经过柴油机夹水套排气歧管及排气总管和夹水套涡轮增压器的冷却后,再通过夹水套波纹管和尾气热交换器进一步冷却,保证尾气热交换出口处尾气温度低于 195 ℃,最后通过排气防爆阻火器和灭火星式消声器消除尾气中的火花与火星。其中,水套和热交换器里循环的冷却液与柴油机本体冷却循环回路相通,冷却液通过动力橇集成散热水箱来进行散热,集成散热水箱<sup>[15]</sup>的散热能力满足柴油机系统的散热需求。该系统结构紧凑,安装方便。

### 2.2.3 安全保护系统组成及防爆设计

安全保护系统主要由近程控制箱、可燃性气体或蒸汽探测系统、远程控制箱组成,其控制原理见图 2。

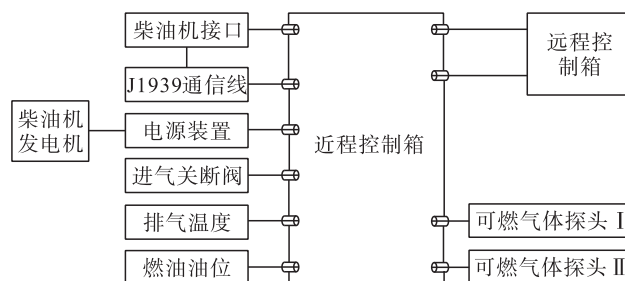


图 2 安全保护系统控制原理图

Fig. 2 Control principle diagram of safety protection system

近程控制箱和远程控制箱是基于 CAN 总线<sup>[16]</sup>通信的控制单元,由防爆显示屏、防爆控制按钮和开关、数据采集模块、继电器、安全栅、隔爆型箱体组成。采用隔爆型箱体,保证控制箱整体满足防爆要求,箱内设计有安全栅<sup>[17]</sup>对非防爆电器元件所在电路进行限能和隔离,达到防爆要求。控制箱上控制按钮与开关采用隔爆型(Ex d)或隔爆与增安组合型(Ex de),防爆等级为 IIA T3 或以上。

安全保护系统利用防爆柴油机本体上的转速、机油压力、冷却液温度传感器、集成水箱上液位传感器、尾气热交换器出口处温度传感器、气体或蒸汽探头,监测柴油机转速、机油压力、冷却液温度及液位、排气温度和环境爆炸性气体或蒸汽的浓度等参数,实时监测动力橇工作状况。当安全保护系统出现异常情况时,自动发出光信号和声信号等报警信号,提醒作业人员安全停机,保证作业和设备的安全,如果没有人工停机,异常情况进一步恶化后柴油机进而会自动停机。自动报警与停机情况见表 1。

表 1 自动报警与停机情况表

Tab. 1 Automatic alarm and stop status table

| 异常情况            | 自动报警                | 自动停机                |
|-----------------|---------------------|---------------------|
| 冷却液温度过高         | 达到最高水温限值的 96% 和 98% | 达到最高水温限值            |
| 冷却液液位低          | —                   | 柴油机启动后立即停机          |
| 机油压力过低          | 低于最低压力限值的 98%       | 达到最低压力限值            |
| 尾气热交换器出口处排气温度过高 | 190 ℃               | 195 ℃               |
| 环境中出现可燃性气体或蒸汽   | 浓度达到爆炸下限的 10% ~ 20% | 浓度达到爆炸下限的 20% ~ 25% |

动力橇作业前,打开电源,安全保护系统能自动检测空气中可燃性气体或蒸汽浓度,如果浓度达到爆炸下限的 20% 时,可燃性气体或者蒸汽报警灯会明亮,进气关断阀会关闭,柴油机无法启动,保障作业安全。

## 3 动力橇其他防爆组成与防爆设计

动力橇除了防爆柴油机系统外,还包含液压系统、散热水箱的风扇转动系统等非电气防爆部分,以及电源与照明系统、液压油电加热系统等电气防爆组成部分。

散热水箱集成了液压油散热器,工作时液压油温度远低于温度组别 T3,保证液压系统满足非电气设备国家标准 GB 25286.6—2010《爆炸性环境用非电气设备 第 6 部分:控制点燃源型“b”》<sup>[18]</sup>的要求。散热水箱的风扇由柴油机曲轴上端风扇皮带轮驱动,风扇皮带轮由柴油机曲轴前端皮带轮通过带传动驱动,采取选用抗静电皮带、给风扇设计护罩并加大风扇转动叶片与护罩之间间距等措施,有效避免出现摩擦火花,以满足上述标准的防爆要求。

动力橇电源与照明系统选用 24 V 防爆电源装置 (Ex ed IIC T4 Gc)、防爆照明灯具 (Ex d IIC T6 Gb) 和本安型或隔爆型铠装电缆等电器元件,满足动力橇防爆设计依据。液压油防爆电加热系统选用 220 V 防爆电加热器 (Ex d IIC T4),加热器所需电能来自 220 V 防爆发电机或作业现场。

#### 4 防爆动力橇应用现状

目前,防爆动力橇已在渤海和南海海上平台、四川页岩气井场、气化采煤基地<sup>[19]</sup>和山西煤层气基地使用,取得了良好的效果。在国家级页岩气示范区四川长宁区块,防爆动力橇配合连续管作业机进行通洗井、测井、射孔、打捞、泡沫冲砂、气举排液、钻磨桥塞<sup>[20]</sup>等作业,2019年,其中1套机组在5个井场进行了19井次的通井、测声幅、钻磨桥塞、首段射孔等作业,其中钻磨桥塞作业达11井次,平均井深为4 800 m,平均水平段长度为1 500 m,平均桥塞数量为26个,平均连续作业时长为72 h。

在山西煤层气基地爆炸性气体环境中,防爆动力橇配合连续管作业机进行喷射射孔拖动压裂作业<sup>[21]</sup>,实现连续管压裂与完井投产一体化作业,缩短施工与投产周期,避免压井,实现带压、安全、高效作业。

在南海可燃冰海上平台、渤海海上平台爆炸性气体环境中,防爆动力橇配合连续管作业机进行注液、冲砂、除垢、打捞、气举等作业,平均持续工作时长达40 h,安全可靠,得到了用户的肯定。

为了满足动力橇防爆认证要求,安全保护系统配置了严格的自动停机功能,但是在连续管作业机实际应用中,动力橇突然停机对作业机和作业井的危害非常大,动力橇突然停机(液压控制系统失去动力)可能会导致作业机溜管、作业机和井口装置无法关闭或损坏,甚至是井控失败,特别是在页岩气高压、高危的井场。所以,实际应用中,应尽量避免自动停机,而要优化安全保护系统的自动报警频次,可设置低位、中位和高位报警,这样可多次提醒作业人员进行操作,以保证设备、作业和人员的安全,避免事故发生。

#### 5 结论

1)在非防爆柴油机本体、进气系统、排气系统、控制系统的基础上进行防爆设计,得到的国产化防爆柴油机本体、进气系统、排气系统、安全保护系统能满足连续管作业机动力橇的防爆认证及使用要求。它的推广使用进一步降低了连续管作业机的作业成本,达到了降本增效目的。

2)连续管作业机防爆动力橇在各油气井场现场应

用的良好表现,给予了连续管作业机在油气井场爆炸性气体环境中安全作业的保障。

3)为了跟上国家对于非道路移动机械排放标准实施的步伐,中国已开始对防爆柴油机系统尾气排放控制与防爆技术开展国产化设计。

#### 参考文献:

- [1] 全国防爆电气设备标准化技术委员会. 爆炸性环境 第1部分:设备通用要求:GB 3836.1—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.  
National Technical Committee on Explosion Protected Electrical Apparatus of Standardization Administration of China. Explosive atmospheres-part 1: equipment-general requirements; GB 3836.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [2] 曹和平,周忠诚,张志海. 海陆两用模块化橇装式连续管作业机的研制[J]. 石油机械,2012,40(11):123-125.  
CAO Heping, ZHOU Zhongcheng, ZHANG Zhihai. Development of sea-land modular skid-mounted coiled tubing machine [J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40 (11): 123-125.
- [3] 全国防爆电气设备标准化技术委员会. 爆炸性环境 第14部分:场所分类爆炸性气体环境:GB 3836.14—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.  
National Technical Committee on Explosion Protected Electrical Apparatus of Standardization Administration of China. Explosive atmospheres—part 14: classification of areas—explosive gas atmosphere: GB 3836.14—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [4] 石油工业标准化技术委员会. 石油设施电气设备安装区域一级、0区、1区和2区区域划分推荐做法:SY/T 6671—2017[S]. 北京:石油工业出版社,2017.  
Technical Committee on Petroleum Industry of Standardization Administration. Recommended practice for classification of locations for electrical installations at petroleum facilities classified as class 1, zone 0, zone 1, and zone 2: SY/T 6671—2017[S]. 北京:Petroleum Industry Press, 2017.
- [5] 张斌. 防爆电气设备的一些常识[J]. 电气防爆,2010(3):43-45.  
ZHANG Bin. Brief introduction on explosion protected electrical equipments [J]. Electric Explosion Protection, 2010 (3): 43-45.
- [6] 全国防爆电气设备标准化技术委员会. 爆炸性环境 第20部分:设备保护级别(EPL)为GA级的设备:GB 3836.20—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.  
National Technical Committee on Explosion Protected Electrical Apparatus of Standardization Administration of China. Explosive atmospheres-part 20: Equipment with

- Equipment Protection Level (EPL) GA; GB 3836.20—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [7] 全国防爆电气设备标准化技术委员会. 爆炸性环境用往复内燃机防爆技术通则 第1部分:可燃性气体和蒸汽环境用II类内燃机;GB 20800.1—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- National Technical Committee on Explosion Protected Electrical Apparatus of Standardization Administration of China. General rules of explosion-protect techniques of reciprocating internal combustion engines for explosive atmospheres-part 1: group II engines for use in flammable gas and vapor atmospheres; GB 20800.1—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [8] 范江鹏. 防爆柴油机进排气歧管的优化设计[J]. 煤矿机电, 2019, 40(3): 22-25.
- FAN Jiangpeng. Optimization design of intake and exhaust manifold for explosion-proof diesel engine [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2019, 40 (3): 22-25.
- [9] 王瑞龙. 防爆柴油机阻火器最大安全间隙的研究[J]. 煤炭安全, 2017, 48(2): 69-71.
- WANG Ruilong. Study on the maximum safety gap for flame arresters of explosion-proof diesel engine [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48 (2): 69-71.
- [10] European Committee for Electrotechnical Standardization. Fire hazard testing-Part 11-10: Test flames-50 W horizontal and vertical flame test methods; IEC 60695-11-10-2013 [S]. Brussels: European Standard, 2013.
- [11] 沈立峰. 化工防爆电气设备选用与维护[J]. 石油化工安全环保技术, 2019, 25(1): 29-32.
- SHEN Lifeng. Selection and maintenance of chemical explosion-proof electrical equipment [J]. Petrochemical Safety Technology, 2019, 25 (1): 29-32.
- [12] 田威, 郭孔辉, 颜伏伍. 矿用柴油机干式排气系统防爆性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学汽车工程学院, 2014.
- TIAN Wei, GUO Konghui, YAN Fuwu. Research on the explosion-proof performance of coal mine diesel engine's dry exhaust system [D]. Wuhan: School of Automotive Engineering Wuhan University of Technology, 2014.
- [13] 全国防爆电气设备标准化技术委员会. 爆炸性环境用非电气设备 第1部分:基本方法和要求;GB 25286.1—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- National Technical Committee on Explosion Protected Electrical Apparatus of Standardization Administration of China. Non-electrical equipment for explosive atmospheres—part 1: basic method and requirements; GB 25286.3—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [14] 全国防爆电气设备标准化技术委员会. 爆炸性环境用非电气设备 第3部分:隔爆外壳型“d”;GB 25286.3—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- National Technical Committee on Explosion Protected Electrical Apparatus of Standardization Administration of China. Non-electrical equipment for explosive atmospheres—part 3: protection by flameproof enclosure “d”; GB 25286.3—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [15] 王西. 防爆柴油机排气系统新型冷却方式研究[J]. 科技风, 2015(3): 78-79.
- WANG Xi. Study on a new cooling method for exhaust system of explosion-proof diesel engine [J]. Technology Wind, 2015 (3): 78-79.
- [16] 周旭. 一种新型防爆柴油机车安全保护系统设计[J]. 工矿自动化, 2013, 39(2): 9-11.
- ZHOU Xu. Design of a new type of safety and protection system of explosion-proof diesel locomotive [J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39 (2): 9-11.
- [17] 隋明新. 总线安全栅在炼油项目中的应用[J]. 石油化工自动化, 2010, 46(2): 47-49.
- SUI Mingxin. The application of field barrier in refinery project [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2010, 46 (2): 47-49.
- [18] 全国防爆电气设备标准化技术委员会. 爆炸性环境用非电气设备 第6部分:控制点燃源型“b”;GB 25286.6—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- National Technical Committee on Explosion Protected Electrical Apparatus of Standardization Administration of China. Non-electrical equipment for explosive atmospheres—part 6: protection by control of ignition source “b”; GB 25286.6—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [19] 张富强, 刘寿军, 邵崇权, 等. 集成控制气化采煤连续管装备的研制[J]. 石油机械, 2016, 44(9): 75-79.
- ZHANG Fuqiang, LIU Shoujun, SHAO Chongquan, et al. Development of integrated control coiled tubing unit for gasification coal mining [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44 (9): 75-79.
- [20] 任勇, 郭彪, 石孝志, 等. 页岩气套变水平井连续油管钻磨复合桥塞技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 61-66.
- REN Yong, GUO Biao, SHI Xiaozhi, et al. Technology of coiled-tubing drilling composite bridge plug in the shale gas horizontal well with casing deformation [J]. Well Testing, 2018, 27 (4): 61-66.
- [21] 王创业, 方惠君, 詹顺, 等. 连续管定向喷砂射孔拖动压裂技术在煤层气水平井中的应用[J]. 天然气工业, 2018, 38(增刊1): 143-147.
- WANG Chuangye, FANG Huijun, ZHAN Shun, et al. Application of continuous tube directional sandblasting and perforating drag fracturing technology in coalbed methane horizontal well [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38 (Suppl 1): 143-147.