

# 4500型电驱压裂橇的研制与应用

石 权

中石化四机石油机械有限公司 湖北荆州 434020

**摘 要:** 传统的压裂车工作效率较低, 噪音大, 维护成本较高, 污染严重, 一定程度上制约了我国页岩气开发的发展。为此, 研制了4500型电驱压裂橇, 该4500型电驱压裂橇与常规柴油压裂橇相比, 施工效率提高一倍, 综合使用费用节约20%, 具有较好的工业推广条件, 具有可观的经济效益。

**关键词:** 页岩气; 电驱; 压裂橇

**Abstract:** Traditional fracturing trucks have low work efficiency, high noise, high maintenance costs, and serious pollution, which to a certain extent restricts the development of shale gas development in China. For this reason, the 4500 electric fracturing skid has been developed. Compared with the conventional diesel fracturing skid, the 4500 electric fracturing skid has doubled the construction efficiency and reduced the comprehensive use cost by 20%. It has good conditions for industrial promotion. , Has considerable economic benefits.

**Keywords:** shale gas; electric drive; fracturing skid

## 引言:

在油气田压裂作业时, 利用多台大功率压裂装备组成压裂机组, 对储层岩石进行压裂并形成导流通道。常规压裂装备采用“柴油发动机—变速箱—压裂泵”的传动方式, 工作时, 单台发动机以额定转速高速旋转, 产生的动力通过液力传动箱和传动轴驱动压裂泵, 压裂液经压裂泵增压后形成超高压液体并排出, 为实现不同排量的输出, 液力传动箱设置有7-9个档位, 调节档位可满足施工对排量的变化需求<sup>[1]-[2]</sup>。传统的压裂车工作效率较低, 噪音大, 维护成本较高, 污染严重, 工作人员作业条件较差, 作业所需成本高, 自动化程度低, 并且需通过变速箱换挡实现调速, 输出特性不够平滑。

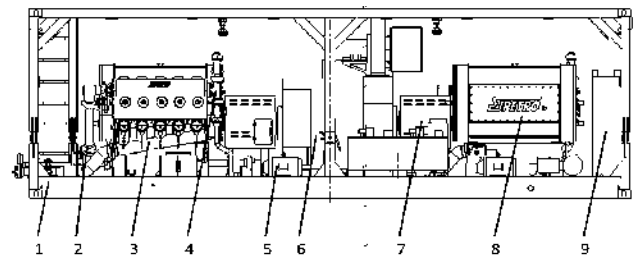
为此, 设计开发了4500型电驱压裂橇。该装置采用一拖二的模式(即一个电机驱动两个压裂泵), 最大输出功率达到4500hp, 为国内深层页岩气高效率、低成本开发提供装备保障。

## 1 总体方案

### 1.1 整体结构

4500型电驱压裂泵橇整体采用橇装结构, 是将泵送设备安装在橇架上, 用来执行高压、大排量的油井增产作业。电驱压裂橇主要由橇架、多相异步变频调速电机、液压离合器装置、卧式柱塞泵、吸入排出管汇、安全系统、压裂泵润滑系统、电控系统等组成, 其结构如

图1所示。



1—橇架; 2—高压管汇; 3—吸入管汇; 4—安全管汇; 5—润滑系统; 6—电机; 7—离合器; 8—大泵; 9—电控系统;

图1 4500型电驱压裂橇结构示意图

### 1.2 工作原理

电驱压裂泵橇是电动压裂施工核心装备, 用于高压泵送, 最大输出功率6000hp, 采用单机双泵结构。橇架(件1)用于承载上装部件。电机(件6)的最大功率为3300kW, 为2台压裂泵(件8)提供动力, 保证压裂泵的输出功率达到4500hp。电机采用双轴输出连接两台压裂泵, 与电机配套使用的离合器(件7)的功能是为了脱开电机和压裂泵, 使单台压裂泵停止工作时, 另一台压裂泵能够正常工作。离合器(件7)主要用于连接动力装置, 输入端连接电机(件6), 输出端连接压裂泵(件8)。为保证压裂橇在施工过程中的安全, 该橇设置有两套安全系统(件4)。吸入管汇(件3)固定在尾部, 施工过程中可以根据现场施工橇的布置情况灵活接入一根或者二根上水管线。排出管汇(件11)采用140MPa或

**作者简介:** 石权(1990-), 男, 湖北随州人, 工程师, 机械设计。

105MPa的高压直管和活动弯头固定在撬架上，施工作业时可以将直管与地面管汇或其它设备进行连接。压裂撬的控制系统采用网络控制方式，通过电控系统（件9）进行集中或远程控制。压裂撬润滑系统（件5）主要对柱塞泵的动力端和液力端进行润滑，动力端采用连续式压力润滑，通过电机驱动的润滑泵提供润滑油，液力端柱塞、盘根采用电动隔膜泵进行连续压力润滑。

### 1.3 主要技术参数

整体结构尺寸：8.4m×2.4m×3m；最大输出水马力：4500hp（3300kw）；最高工作压力：105MPa；最大输出流量：2.88m<sup>3</sup>/min。

### 1.4 结构特点

- (1) 采用撬装结构，降低设备成本；
- (2) 采用一台电机两端输出，驱动2个卧式柱塞泵的单机双泵结构，有效提升施工排量；
- (3) 两台卧式柱塞泵正反安装，保证整机运转的平衡性；
- (4) 高低压管汇集成一侧，方便现场管线连接。

## 2 关键技术

### 2.1 轻量化大功率电机

针对压裂装备环境条件和负载特性，联合电机厂家定制化开发出一种轻量化大功率电机作为4500型电驱压裂撬的直驱电机，确定电机电压、功率、扭矩、转速、特性曲线、外形尺寸等参数，并辅之以独特的风冷系统，工作时电机两端输出直接驱动压力泵，操控性能好，具有更高的可靠性和稳定性，使用、维护更加方便快捷。

#### (1) 电机转速、功率与主要尺寸之间的关系

电机的定子内径 $D_{il}$ 和轴向长度 $L_{ef}$ 是电机的两个主要尺寸，这两个尺寸决定了电机的基本外型<sup>[3]-[4]</sup>。对于交流电机，电机的主要尺寸由以下公式决定：

$$\frac{D_{il}^2 L_{ef} n_N}{P'} = \frac{6.1}{\alpha_p' K_{Nm} K_{dp} A B_s}$$

其中： $P'$ 指计算功率， $n_N$ 指额定转速， $\alpha_p'$ 指计算极弧系数， $K_{Nm}$ 指气隙磁场波形系数， $K_{dp}$ 指电机绕组系数， $A$ 指电负荷， $B_s$ 指气隙磁密。其中 $\alpha_p'$ 、 $K_{Nm}$ 、 $K_{dp}$ 、 $A$ 、 $B_s$ 五个量都有一定的约束范围，当电机形式以及功率等级一定时，差别不大。

因此电机的功率一定时，转速越高，电机的体积越小。从减小电机体积重量的角度考虑，希望转速越高越好。

电机的额定功率 $P_N$ 、额定转矩 $T_N$ 、额定转速 $n_N$ 的关系由以下公式决定：

$$P_N = \frac{60}{2\pi} T_N n_N$$

根据4500型电驱压裂撬内部减速比，与之匹配的电机额定功率为2400kW，额定转矩为32kNm，则电机的额定转速为701r/min。

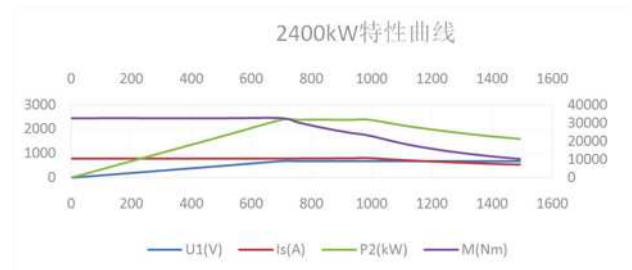


图2 2400kW工况特性曲线

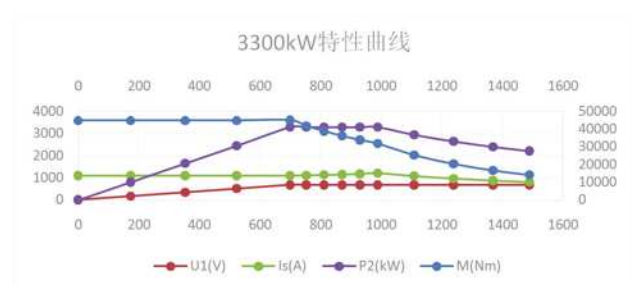


图3 3300kW工况特性曲线

由以上可以确定电机的基本参数：

- |               |               |
|---------------|---------------|
| 额定功率：2400kW   | 最大功率：3300kW   |
| 额定电压：690VAC9相 | 额定电流：788A     |
| 额定频率：35.3Hz   | 额定转速：701rpm   |
| 最高转速：1500rpm  | 额定转矩：32709N.m |
| 额定效率：95%      | 功率因数：0.894    |
| 绝缘等级：200级     | 极数：6          |

### 2.2 专用工业液压离合器

离合器主要用于电机与卧式柱塞泵之间的连接和脱离，针对电驱压裂泵工作特性及结构特点，专门选用一种特殊的重型离合器—18寸多片式常开式液压干式离合器，体积小，传递扭矩大，特殊工况下可快速脱离，两台压裂泵可独立工作和控制。

离合器技术参数：

- 额定扭矩：60000N.m@1.65MPa；
- 最高转速：1140r/min；

离合器分为三个部分：离合器、过渡盘和联轴器，联轴器和电机连接，离合器、过渡盘和泵总成连接，离合器的控制系统的采用液压控制。

### 2.3 电控系统

本装置电控系统是专门为4500型电驱压裂撬研制开发的。该电控系统主要是集高压变电、交流变频、电气

控制和配电于一体,并通过完善的保护功能实现对压裂泵主电机和辅助用电设备的集中控制和供电<sup>[5]-[6]</sup>。

电控系统技术参数:

电控系统额定输入电压为 10KV;

电控系统额定频率为 50HZ;

电控系统输出电压为 3X690V、400V;

电控系统频率: 50HZ。

4500型电驱压裂橇电控系统包括:移相变压器、二极管整流器、逆变器、矢量控制PWM计算器、磁链/速度观测器、速度控制器、电流控制器、九相变频电动机、房体。

4500型电驱压裂橇采用24脉冲移相整流方法,通过高压开关柜将10KV高压电经移相变压器降压成720V低压电,变压器的四个副边绕组通过一定绕法使得四个绕组分别移相一定的角度,形成24脉移相整流,通过24脉移相整流可消除5,7,11,13,17及19等6个主要的谐波,使得电控系统产生的谐波达到国家电网标准范围之内。变频器通过4个整流形成共直流母线方式为三个逆变器提供直流电源,这种做法保证二极管整流器其中有一个出现故障,还能确保另外三个能够继续降功率运行。

当系统出现其中某一相缺相故障时,系统将判断其余桥臂正常运行可行性,确定其余桥臂可以正常工作时,自动由其中一套磁链/速度观测器接管三台逆变器的电流电压检测,并将磁链/速度观测器检测到逆变器的输出电压电流值后计算出励磁转矩电流,励磁转矩电流作为反馈电流反馈给电流控制器与给定电流进行比较处理,将电流控制器计算产生的控制电压参数、磁链/速度观测器检测计算出的转子磁链角度参数反馈给矢量控制PWM计算器进行计算处理后,经由2相/5相脉冲分配器将相应故障桥臂脉冲信号封锁,并保持其它桥臂信号畅通,同时使得逆变器畅通桥臂输出电压电流仍然是正弦波,保证九相电动机电流幅值和相位达到新的平衡,实现九相变频电动机的不对称运行和降1/3功率运行。

故4500型电驱压裂橇的电控系统可靠性高,由于相数冗余,当九相电机驱动系统中的电机或者九项逆变器的一相甚至几相发生故障时,可以将其断开,系统仍然可降载运行而不必停车。

### 3 现场试验和应用

2017年11月28日-12月31日,4500型电驱压裂橇

在焦页193平台完成三口井中23层段施工,使用的电网电压是10kv级别,作业压力40-90MPa,输出水功率2300kw左右,压裂泵负荷率70%左右,累计时间35h,泵注液体4300m<sup>3</sup>,试验中电机长时间在额定设计工况点运行,电机与泵的合理匹配得到验证。随后,该设备又在吐哈油田进行了现场应用,截至目前共完成了2000多个小时的可靠运行,日平均作业液量2037m<sup>3</sup>,其单机工作压力高、输出功率大,安全性、可靠性及可操作性得到了用户的认可。

### 4 结论

(1)4500型电驱压裂橇使用电机作为动力源,具有功率大、体积小、重量小的优点,在体积、重量受限的条件下,能够有效提升压裂装备的功率,同时无需使用柴油燃料,在作业中噪声小、零排放。

(2)4500型电驱压裂橇采用一台电机两端输出,驱动两个压裂泵的单机双泵结构,能够有效提升施工排量,相当于两台传统压裂泵车,实现了输出排量双倍增加。

(3)4500型电驱压裂橇上的电机与大泵通过工业离合器直连,取消了液力传动箱,电机能够实现变频控制,使得排量由档位阶梯控制变更为连续控制,适应施工需求;同时采用整体橇装结构简化结构,减小故障率,便于设备维护。

(4)现场试验和应用结果表明,该4500型电驱压裂橇与常规柴油压裂橇相比,施工效率提高一倍,综合使用费用节约20%,且噪音小,安全环保,施工中的操作只需要调节电机转速进行控制,实现“一键式操作”。

### 参考文献:

- [1]董大忠,王玉满,李新景,等.中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J].天然气工业,2016,36(1):19-32.
- [2]汪洋,骆新颖,张斌.中石油国家页岩气示范区水平井钻井关键技术研究[J].钻采工艺,2017,40(45):26-28.
- [3]傅丰礼,唐孝镛.异步电动机设计手册[M].机械工业出版社,2006
- [4]陈世坤.电机设计[M].机械工业出版社,1997
- [5]戴文进.特种交流电机及其计算机控制与仿真[M].机械工业出版社,2002
- [6]陈坚.电力电子学:电力电子变换和控制技术[M].北京:高等教育出版社,2002.