

# SAGD 高温潜油电泵技术在曙光油田的实践与应用

刘冬雷

辽河油田科技部

DOI: 10.12238/jpm.v5i1.6504

**[摘要]** 针对现有有杆泵举升技术无法满足辽河油田稠油区块 SAGD 采油效果的问题, 联合沈阳工业大学通益科技有限公司研制高温电机、高温多级离心泵、高温电机保护器、高温动力电缆等, 形成 SAGD 高温潜油电泵人工举升技术, 有效解决高温、大排量 SAGD 采油问题, 同时提高 SAGD 油井产量。

**[关键词]** 稠油; SAGD; 高温; 大排量; 潜油电泵

## Practice and application of SAGD in Shuguang Oilfield

Liu Donglei

Liaohu Science and Technology of Oilfield

**[Abstract]** in view of the existing rod pump lift technology cannot meet the liaohu oil heavy oil block SAGD oil production effect problem, joint Shenyang university of technology benefit technology co., LTD. Developed high temperature motor, high temperature multistage centrifugal pump, high temperature motor protector, high temperature power cable, etc., form SAGD high temperature submersible electric pump artificial lift technology, effectively solve the problem of high temperature, large displacement SAGD production, and at the same time improve SAGD well production.

**[Key words]** heavy oil, SAGD, high temperature and large displacement, submersible oil and electric pump

### 引言

目前辽河油田 SAGD 井有三种布井方式, 即在靠近油藏的底部钻一对上下平行的水平井, 上面水平井注汽, 下面水平井采油; 第二种是直井与水平井组合方式, 即在油藏底部钻一口水平井, 在其上方钻一口或几口垂直井, 垂直井注汽, 水平井采油; 第三种是单管水平井 SAGD, 即在同一水平井井口下入注汽管柱, 通过注汽管柱向水平井最顶端注汽, 使蒸汽腔沿水平井逆向扩展。所以 SAGD 井有温度高、水平段较长的特点。随着 SAGD 技术的不断发展, 水平井段逐渐加长、油层埋藏的加深, 油藏产能的进一步提升, 现有的有杆泵举升方式更加难以满足 SAGD 采油技术的需求。因此, 开展一种能够安置于水平段、耐高温、超大排量、运行可靠的高温电潜泵举升设备的研究, 满足 SAGD 技术的采油需求, 实现 SAGD 油井的多元化开采, 仍然是摆在我们面前的重要课题。

### 1 高温电泵技术研究

#### 1.1 高温电机的研制

##### 1.1.1 高温电机结构设计

从零部件来分潜油电机主要由定子、转子、止推轴承、上下连接头、电机油、金属盒引线连接等部件组成。从功能来分潜油电机主要由扭矩系统、电气系统、径向支撑系统、轴向支撑系统、电气绝缘系统、散热系统、密封系统、机械连接系统等系统组成。

(1) 定子: 电机定子是由优质碳素结构钢制成的壳体; 耐高温的高导磁性的优质硅钢制成定子铁芯; 复合绝缘材料绕包铜线制成的三相绕组线, 其耐温达 280℃ 以上; 高强度、高绝缘性的聚酰亚胺槽绝缘等组成。

(2) 转子: 潜油电机转子是采用多级独立的转子通过电机轴串接的方式组成的, 且在两级转子之间配有扶正轴承。每节独立转子是由转子叠片、导条、端环组成。它们经过叠压、铆压、焊接、加工等工序制作。其是产生电磁转矩的重要部件。因此根据电机功率的大小来决定转子串接的数量。除上下导向轴承外, 各级转子之间都装有扶正轴承, 由硬质合金内套和不锈钢制成的轴承(瓦)构成滑动轴承, 以保证转子有一个稳定且良好的旋转中心, 扶正轴承为防转型, 消除了不必要的震动

和磨损,更有利于高温电机长期的高速运转。

(3) 止推轴承:因为受到使用环境的限制,电机外形呈细长形状,而转子则采用悬挂式结构,由电机上部的止推轴承来承受电机转子的自重。止推轴承的磨擦副是由一个滑板和一个特殊结构的带有扇型块的止推盘组成,采用耐温的硬度合适的合金制成,以保证转子在高转速下良好的运转。

(4) 上下接头:上下接头是以优质不锈钢加工制成,其内孔安装特殊材质轴瓦,使其和电机轴形成一对摩擦付。已构成电机的径向支撑。接头上另有许多通孔和盲孔,其中一部分为电气连接的通道,或者是油路连接的通道。另一部分,则是潜油电机与其它潜油泵设备机械联接的螺栓孔和螺钉孔。

(5) 电机油:电机腔内充满特制的高温电机油,耐温达300℃,这种电机油具有非常良好的绝缘性能和润滑性能,电机内的油路循环系统使电机在工作时各轴承得到充分润滑,并将电机工作时产生的热能传到电机外壳。

### 1.1.2 高温电机的电磁及温度场计算

#### 1.1.2.1 高温电机电磁场计算

高温潜油电机作为一种特殊的三相异步电动机,同样也受到齿谐波磁场的影响,潜油电机也要考虑这方面的影响,也必须采用斜槽来加以削弱。但是因为潜油电机的细长结构,若是采用直接斜槽的话会使铁心叠压工艺十分复杂。因而采用变通的方法:在设计转子圆形槽时,让转子圆形槽与键槽的中心线成一定的角度,即转子圆形槽的中心线与键槽的中心线不在一条直线上。这样在潜油电机在制造装配时,转子分段,中间有扶正轴承,对每段转子做不同处理,让同一个扶正轴承连接不同的两段转子,其中一段转子槽中心线与键槽的中心线的夹角在转子槽中心线的右边;另一段转子槽中心线与键槽中心线的夹角在其左边,如图1所示。这样两种转子节交替连接,从整个潜油电机来看就起到了斜槽的作用了。

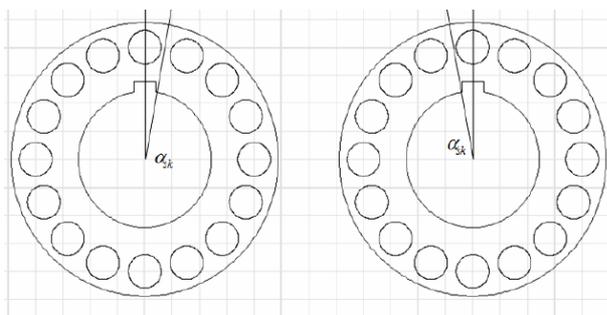


图1 新型交错转子

通过对新型转子结构的电机进行有限元计算后,得到了电机的磁通分布、转速-效率曲线、转矩-转速曲线,能够很好的满足井下工作的需求。

#### 1.1.2.2 高温电机温度场计算

温升特性是高温电机一个非常重要的技术指标,由于高温电机依靠流过电机表面的冷却液带走电机产生的热能,所以有必要进行电机的温升计算,其中,转子在电机的中心部位,温度最高,本电机主要校核计算了环境温度为250℃下的转子温

升,转子各部分温升如图3所示。从转子各部分的温度分布图中可以看出,整个转子温度基本均匀,无过热点,电机中的几个发热部件在额定运行时温升在绝缘结构的规定极限温度下,可以保证电机安全稳定运行。

### 1.2 高温电机保护器

高温电机是高温电潜泵的关键部件之一。工作在井下,必须禁止井液进入高温电机。高温潜油泵保护器的功能主要是使电机腔内外压力平衡,隔离井液与电机油,避免井液进入电机内部。另外,还承担泵轴的重量和泵轮工作时产生的轴向力,这些力是通过轴端接触传递到保护器中平面轴承上的。低温电潜泵保护器通常使用沉淀式保护器和胶囊式保护器。

SAGD高温井多为水平井或大斜度斜井,井温高达200℃以上,而传统沉淀式保护器不适用于水平放置或倾斜放置,胶囊式保护器的弹性囊没有足够的抗拉强度和耐温性,因此这两种保护器都不适用于高温井。针对以上两种保护器的缺陷和局限性,提出耐高温多级模块化金属囊高温电机保护器,研制了高温绝缘、润滑电机油。保护器的基本工作原理:①保护器腔与电机腔体互相连通,并用机械密封封闭起来,腔体上端设有一个安全阀3,当腔体内压力超过设定值时,安全阀开启,泄放出部分电机油,使腔内压力保持在安全值以下。②当电机油膨胀,波纹管组件6被压缩时,夹层空间的井液从呼吸孔排出;收缩时波纹管被拉长,井液从呼吸孔进入夹层空间,从而使机组内外压力平衡。③护轴管组件8可使保护器的工作寿命延长。在波纹管放松到自由长度状态以后,护轴管组件可使从机械密封摩擦副渗入的井液沉落到保护器腔底部。随着时间的推延,井液液面逐渐升高,直到升至护轴管上端的通油孔,保护器寿命结束。④甩沙器组件1通过甩沙轮的离心力作用,净化井液,使机械密封和波纹管组件不受泥沙损害。具体结构见下图。⑤根据电机的功率等级、工作温度和运行寿命,电机可以安装单级保护安器和两级保护器,当安装两级保护器时,保护器分别安装于电机头部和尾部。

### 1.3 高温多级离心泵

潜油泵是一种多级离心泵,是由上下泵头、泵轴、泵壳、叶轮、导壳、轴承支架及连接系统组成,每一级都由一个旋转的叶轮和一个固定的导壳组成,叶轮串装在泵轴上由方键径向定位,每级叶轮上下都装有减磨垫,每节泵的两端各有一个轴承支架。叶轮为全浮式。传统导壳和叶轮之间减磨垫材料已不能满足高温要求,本电泵采用改性聚醚醚酮材料制作而成,有极好的耐磨、耐温和摩擦系数小的特点。

### 1.4 控制系统

电潜泵机组下井结束后,其启泵和停机,以及运行过程中的一系列控制,都需要由电潜泵控制柜(以下简称控制柜)来完成。该控制系统使用于控制电潜泵交流异步电动机的运行,可实现对机组的平稳启动、停止,根据负载情况手动调节输出频率,进而调节电机的转速,使设备的生产能力达到自由可调、节能及延长机组使用寿命的目的。

系统采用低压变频然后升压的方式来满足高压电机的使用要求。变压器能够有效地滤掉高频部分,使其输出的电流波形达到较好的正弦度,满足电机供电要求,提高了电机的使用寿命。交流传动系统采用交流变频器装置以及配套的降压变压器、升压变压器、电机、电机信号采集箱、电缆等组成。

### 1.5 电缆接头连接技术

传统“三孔橡胶垫环套挤压塑性变形密封”的电缆密封方法,在高、低温转变过程中,在塑料护层表面形成沟痕,从而在塑料护层与橡胶垫之间产生缝隙,密封性能减弱甚至失效。采用“差压自补偿密封技术及配套结构”实现高温密封的方法,弥补温度变化在动力电缆上引起的残留环形沟痕。

### 1.6 地面模拟试验装置

在高温潜油电机研制及出厂过程中,需要对其型式或出厂试验(如效率、温升、振动、密封、绝缘等方面的测试),通过高温模拟井测试和性能试验,不仅杜绝出厂前的质量隐患,而且对高温潜油电机的改进及重新设计有很大的帮助。

同步研制了一套高温 ESP 试验装置,该装置既能完成成套机组的试验,也能实现高温潜油电机的单机试验。该装置介质为高温导热油,系统耐温达到 280℃,HTESP 出口压力最高为 18MPa,被测试的 ESP 系统最长可达 22m。在进行高温潜油电机单机试验时,打开盲板,换装测功机,电动机与测功机之间通过高强度细长轴及花键套相连接(根据需要还可以安装转矩传感器),打开换流阀,启动辅助循环泵,实现电动机的空载试验、负载试验和堵转试验。

基于电潜泵的技术参数,结合现场套管内径为 $\Phi 224\text{mm}$ (外径 $\Phi 245\text{mm}$ ),搭建了 250℃高温电潜泵试验台,其主要功能:通过控制泵出口的闸阀来模拟电潜泵的举升压差(扬程),同时记录瞬时流量;当变频控制电机转速时,可以通过传感器记录电机的电流、电压、功率及功率因素等参数。使用该实验台能够研究高温电潜泵的额定负载特性、空载特性及超速性能。

### 1.7 高温热采电泵井口

配合管柱同步捆绑多缆的正常穿出,需要配套设计多点穿越结构的高温热采电泵井口。通过这种井口在实现传统电泵井口提供井液通道与对井液和动力电缆密封的基础上,额外增加提供温度、压力两条测试电缆的通道,实现电泵生产时的温压正常测试。

井口装置主要井口四通、油管悬挂器、主体、穿越器、测试通道等部件组成。油管悬挂器安装在套管四通内部台肩上,内部有提升悬挂内螺纹,悬挂器和套管四通之间采用两道 O 型圈密封和利用油管重力实现的金属密封。与主体之间采用 O 密封圈密封,能可靠地密封油管悬挂器、主体、套管四通及管柱环空之间的压力。油管悬挂器采用了偏心的结构,在预留井液通道的旁边设计有动力电缆穿越通道和测试电缆通道。

### 1.8 高温电泵防喷技术

潜油电泵在起下管柱过程中,油管外壁捆绑了动力电缆,在油管外壁同步捆绑动力、测温、测压电缆,一旦发现有井涌迹象,需要临时封井时,常规的封井器需要将电缆剪断后再封井,有可能会延误关井最佳时间,另一方面,电缆被剪断造成很大的损失。针对以上情况,研究电泵井防喷技术,解决高温电泵井作业施工防井喷的难题。

## 2 现场应用效果

高温潜油电泵自研究成功以来,在辽河油田 SAGD 开发区块已累计实施 11 井次,采用电泵生产后,油井平均日产液 397.3 方,日产油 99.2 吨,油井累计产液 158 万方,累计生产原油 41.7 万吨,累计增油 18.2 万吨。对比之前有杆泵采油,高温潜油电泵在改善开发效果、降低运行成本、提高劳动效率等多方面取得显著效果:

(1) 从生产效果方面分析,由于高温潜油电泵可大幅提高 SAGD 油井产出液量,并可根据油井实际产能,调整频率控制电泵排量,达到与油藏产能的精确匹配。同时电泵生产平稳,配套合理注采调控,有助于促使蒸汽腔更合理扩散和泄油,改善 SAGD 开发效果。目前已经实施电泵的油井对比之前有杆泵采油累计增产已经达到 18.2 万吨,增产创效显著。

(2) 从油井管理方面分析,电泵地面没有大型举升设备,系统自动化程度高,井口防喷风险小,员工管理工作量大幅度减少,劳动效率得到提高。SAGD 检泵作业风险相对较高,作业时周边注汽井需停注,作业过程中需持续压井,采用电泵后检泵频次下降,风险也随之降低。

(3) 从生产运行方面分析,潜油电泵无地面维护工作量。有杆泵系统中地面抽油机需要维护保养,需要消耗盘根等材料费用。有杆泵采油由于使用的抽油泵泵径大,交变载荷高,地面抽油机设备庞大,能耗相比电泵高,因此电泵的运行成本相比抽油机有杆泵系统低。

## 3 结论

(1) 试验表明,高温潜油电泵技术突破了耐高温关键性难题,实现了在辽河油田 SAGD 水平油井中的正常生产,填补了国内技术空白。

(2) 高温电潜采油技术对比现有的有杆泵举升技术,可突破泵挂下深和排量限制的技术瓶颈,可有效提高 SAGD 井原油产量,改善 SAGD 采油效果。

(3) 该技术自动化程度高,管理简单,应用前景广阔。

## [参考文献]

- [1]张珊,朱赫,常云飞.浅析潜油电泵采油技术在长庆油田的应用[J].中国石油和化工标准与质量.2016,(3).012.
- [2]孟大伟,徐永明,温嘉斌,等.潜油电机设计方法改进研究[J].石油学报.2007,(3).027.
- [3]罗英俊.采油技术手册[M].石油工业出版社,2004.