◀专题论文▶

水平井安全高效下套管装置的研制及应用*

李显义 赵贺谦 米凯夫 张 勇 陈省身 郭博文 胡志燕
（北京石油机械有限公司）

李显义，赵贺谦，米凯夫，等. 水平井安全高效下套管装置的研制及应用［J］. 石油机械，2025，53（10）：17-24.

Li Xianyi，Zhao Heqian，Mi Kaifu，et al. Development and application of safe and efficient casing running device for horizontal wells［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：17-24.

摘要：为满足长水平段安全高效下套管施工需求，有效解决复杂井套管下入难题，研制了高性能、长寿命XTG 140H型顶驱下套管装置及配套系统。采用理论计算、整机试制的方式对旋转下套管装置结构进行优化，通过整机室内测试验证其综合性能。计算结果表明，该装置的最大理论轴向抗拉载荷超过4 000 kN。在室内测试条件下，该装置的扭矩、温度与转速呈线性关系，转速越快，扭矩、温度越高。基于旋转、提升、循环的一体化作业模式，旋转下套管装置在川渝深层页岩气区块开展了现场试验及推广应用，实现单井套管最大下深超7 100 m，施工最长水平段长3 100 m。研究测试与现场应用结果表明，XTG 140H型顶驱下套管装置及其配套系统大幅增强了套管穿越复杂井段的能力，可有效保障套管安全高效地下放至预定井深。该高性能、长寿命旋转下套管装置的研制可为非常规油气资源勘探开发及复杂井况安全高效下套管提供技术支撑和装备保障。

关键词：水平井；旋转下套管；结构设计；性能测试；深层页岩气；长水平段

中图分类号：TE242 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202504007

Development and Application of Safe and Efficient Casing Running Device for Horizontal Wells

Li Xianyi Zhao Heqian Mi Kaifu Zhang Yong Chen Xingshen Guo Bowen Hu Zhiyan
（*Beijing Petroleum Machinery Co.，Ltd.*）

Abstract: To meet the operation requirements of safe and efficient running of casing in long horizontal sections and effectively solve the problem of casing running in complex wells，a high-performance and long-life XTG 140H top drive system casing running device and its supporting system were developed. The theoretical calculation and prototype manufacturing methods were used to optimize the structure of the rotary casing running device，and the indoor full-scale testing was conducted to validate its overall performance. The calculation results show that the maximum theoretical axial tensile load of the device exceeds 4 000 kN. Under indoor testing conditions，the torque and temperature of the device are linearly related to the rotational speed：the faster the rotational speed，the higher the torque and temperature are. Based on the integrated operation mode of rotation，lifting and circulation，the rotary casing running device was field tested and widely applied in deep shale gas blocks of the Sichuan-Chongqing region，achieving a maximum single-well casing running depth exceeding 7 100 m and a record horizontal section length of 3 100 m. Research tests and field applications show that the top drive system casing running device and

* 基金项目：新型油气勘探开发国家科技重大专项“万米深井智能钻机与超高压井口装备”之子课题“万米深层钻井智能顶驱和不间断循环等关键装备”（2024ZD1401802）；北京石油机械有限公司揭榜挂帅项目“顶驱下套管装置结构优化与性能提升”（24新13）。

its supporting system greatly improves the ability of casing to cross complex well sections, and effectively ensures to safely and efficiently lower the casing to the target depth. The development of the high-performance and long-life rotary casing running device provides technical support and equipment guarantee for the exploration and development of unconventional oil and gas resources and the safe and efficient casing running in complex well conditions.

Keywords: horizontal well; rotary casing running; structural design; performance testing; deep shale gas; long horizontal section

0　引　言

鉴于油气资源劣质化态势，我国油气开发正向非常规资源迈进[1-3]。长水平段水平井+水力压裂技术的应用可有效增加储层泄流面积，成为非常规油气高效开发的主要手段之一[4]。非常规油气井水平段长度的增加使套管下入难题尤为突出，仅依靠上部套管的自重难以将套管下放至目的层位；同时底部套管受复杂交变载荷的作用，引起套管变形风险加剧，将严重影响水平井压裂施工效果，给井筒完整性带来隐患[5-7]。通过顶驱下套管装置驱动套管旋转，实现“旋转+循环”的下套管作业模式，可将套管与井壁之间的滑动摩擦转变为滚动摩擦，并在套管的旋转作用下及时清理井筒中堆积的岩屑，有效降低套管的卡阻风险[8-12]。旋转下套管作业过程中，顶驱下套管装置通过螺纹与顶驱主轴连接，液压系统驱动活塞移动，带动卡瓦运动并沿楔形槽收缩或扩张，实现套管夹持与内部密封，确保下套管作业实现边旋转边循环钻井液，可有效降低套管下入难度。这一过程中，顶驱下套管装置是实现套管夹持与密封、驱动套管旋转的关键设备。

目前，顶驱下套管装置仍以北美 Narbos（Tesco）、Weatherford 等公司产品为代表，并在国内外油气田现场广泛应用，应用表明下套管作业效率提升显著[13-14]。随着技术发展和应用，我国顶驱下套管装置性能不断优化提升，开始在国内市场推广，并逐步进军海外市场。

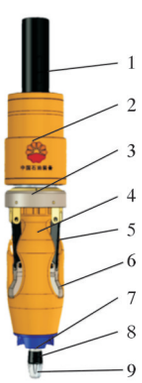
顶驱下套管装置的国产化一方面降低了旋转下套管作业成本，推动了该技术的进步；另一方面也对我国非常规油气安全高效开发起到促进作用[15-19]。前人在下套管装置的能力提升、密封性能以及下套管工艺等方面开展了相关研究[20-23]，推动了技术进步。但目前国内顶驱下套管装置仍然面临使用寿命短、液压系统稳定性差、与顶驱适配性不佳等问题。为此，笔者从适应长水平段水平井作业需求出发，研发了高性能 XTG 140H 型顶驱下套管装置并设计配套液压控制系统，以提高装置整体运行的稳定性。

1　结构与系统优化

1.1　顶驱下套管装置本体

1.1.1　工作原理

顶驱下套管装置本体是实现套管夹持、驱动套管旋转、密封套管内孔的重要设备。所设计的 XTG 140H 型液压驱动式顶驱下套管装置，通过液压油推动活塞并带动卡瓦运动，实现套管的夹持与释放。图 1 为顶驱下套管装置本体示意图。



1—心轴；2—驱动缸；3—推拉卡环；4—卡瓦筒体；5—连杆；6—卡瓦组件；7—中心管；8—密封皮碗；9—导向头。

图 1　XTG 140H 型顶驱下套管装置本体示意图

Fig. 1　Assembly of XTG 140H top drive system casing running device

由图 1 可见，XTG 140H 型顶驱下套管装置包含心轴、驱动缸、推拉卡环、卡瓦筒体、连杆、卡瓦、密封皮碗与导向机构等。心轴通过螺纹与中心管连接，心轴上部通过螺纹与顶驱主轴连接，其主要承载套管串的轴向载荷；驱动缸内部为活塞结构，在作业过程中，高压液压油推动驱动缸内的活塞上下移动；推拉卡环与驱动缸及活塞之间通过止推轴承实现动静分离，活塞通过推拉卡环带动连杆机构，使卡瓦在筒体内沿楔形槽移动并产生轴向与径向位移，实现套管的夹持与释放。此外，下套管时，当套管插入中心管并完成夹持时，卡瓦会将密封皮碗轴向压缩，从而实现套管内孔密封。当顶驱带动心轴旋转时，中心管与卡

瓦将驱动套管同步旋转，将扭矩传递至井底，实现下套管过程中的减摩降阻。

1.1.2　承载能力计算

顶驱下套管装置通过卡瓦将套管夹持并承受整个套管串的全部重力。套管串重力通过楔形槽作用在卡瓦筒体处，并传递给心轴。因此，顶驱下套管装置的最大承载能力一方面受到套管夹持能力的限制，另一方面也受到心轴与卡瓦筒体强度的限制。为了提高该装置的承载能力，心轴和筒体采用42CrMo作为基础材料锻造而成。该材料抗拉强度为1 080 MPa，下屈服强度为930 MPa[24]。

由此可计算顶驱下套管装置的最大承载力：

$$\boldsymbol{F}_{\max}=0.001\frac{R_{\mathrm{eL}}\cdot S}{n_{\mathrm{s}}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{F}_{\max}$为最大承载力，kN；R_{eL}为下屈服强度，MPa；S为横截面积，mm^2；n_{s}为安全系数，无量纲，静载情况下对塑性材料其可取1.2~2.5，在该次计算中取安全系数为2.5[25]。

根据设计情况，对顶驱下套管装置的筒体结构进行分析，其最小横截面处面积为24 680 mm^2，通过式（1）计算得到筒体的最大承载力约为9 180 kN。同理，根据心轴的最小横截面积计算得到心轴的最大承载力为4 021 kN，即该顶驱下套管装置的最大承载力为4 021 kN。

1.1.3　夹持机构力学分析

顶驱下套管装置主要通过卡瓦筒体的楔形槽将驱动缸活塞的推力转化为径向力，进而实现套管夹持。图2为卡瓦与筒体的受力分析示意图。在受力分析时，将卡瓦与卡瓦托视为一个整体。根据力平衡关系得到：

$$\begin{cases}\boldsymbol{N}_2-\boldsymbol{N}_1\cos\alpha+\boldsymbol{F}_1\sin\alpha=0\\ \boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}+\boldsymbol{F}_2-\boldsymbol{F}_1\cos\alpha-\boldsymbol{N}_1\sin\alpha=0\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}$为卡瓦托受到的连杆推力，kN；$\boldsymbol{F}_1$为卡瓦托与卡瓦筒体之间的摩擦力，kN；$\boldsymbol{F}_2$为卡瓦与套管表面之间的摩擦力，kN；$\boldsymbol{N}_1$为卡瓦托与卡瓦筒体之间的正压力（筒体对卡瓦托的支撑力），kN；$\boldsymbol{N}_2$为卡瓦与套管之间的正压力（套管对卡瓦的支撑力），kN；α为卡瓦筒体、卡瓦接触面与套管轴线的夹角，(°)。

假设平衡状态下$\boldsymbol{F}_1$为最大静摩擦力，则$\boldsymbol{F}_1=\mu\boldsymbol{N}_1$（$\mu$为摩擦因数，无量纲，此处取0.15）。对套管串进行受力分析，可得$\boldsymbol{F}_2$为⅓倍的套管轴向拉力（为确保作业过程装备的安全，$\boldsymbol{F}_2$取3 600 kN）。此外，对活塞受力分析可知，卡瓦托所受的连杆推力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}$亦为⅓倍的活塞推力。

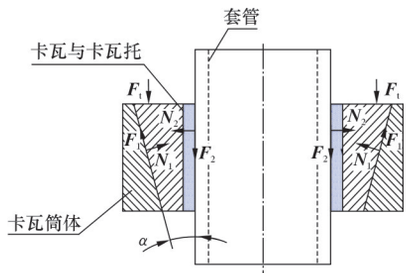


图2　卡瓦与筒体受力分析示意图

Fig. 2　Slip and cylinder force analysis

通过计算得到卡瓦托及卡瓦受到的筒体与套管的支撑力：

$$\begin{cases}\boldsymbol{N}_1=\dfrac{\boldsymbol{F}_{\mathrm{ht}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}}{3(\mu\cos\alpha+\sin\alpha)}\\ \boldsymbol{N}_2=\boldsymbol{N}_1(\cos\alpha-\mu\sin\alpha)\end{cases} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{F}_{\mathrm{ht}}$为活塞推力，kN；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}$为套管轴向拉力，kN。

为了探究卡瓦筒体楔形槽的角度对卡瓦支撑力的影响，通过计算得到$\boldsymbol{N}_1$与$\boldsymbol{N}_2$随角度变化的关系曲线，如图3所示。从图3可以发现：随着楔形槽与套管轴线夹角α增加，$\boldsymbol{N}_1$与$\boldsymbol{N}_2$均减小，导致套管夹持能力变弱；随着夹角α减小，套管夹持能力增强，但活塞作用行程将因此变长，导致装置整体长度增加，不利于装置轻便化发展。综合考虑活塞行程与卡瓦对套管的夹持力，优选卡瓦筒体楔形槽夹角设计范围为13°~16°，此时通过$\boldsymbol{N}_1$与$\boldsymbol{N}_2$计算得到的卡瓦表面应力均小于材料的屈服强度，符合强度要求。

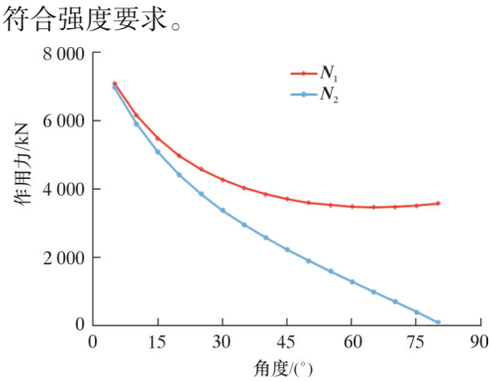


图3　卡瓦所受支撑力与角度的关系曲线

Fig. 3　Relationship between support force and angle of slip

为了提高卡瓦与套管之间的摩擦，实现较小夹持力作用下较大的套管提升能力，将卡瓦与套管的接触面设计成凹凸不平的微牙齿，使其在夹持作用下可咬入套管外壁，进一步增加摩擦力。同时，为了减轻套管夹持过程中对套管的损伤，牙齿设计为微牙痕结构，如图4所示。从图4可以发现，该结构可使得套管夹持过程中，微牙痕卡瓦在提供足够的提升力与扭矩的同时，尽可能地

减轻夹持作用对套管的损伤。此外，在套管夹持过程中，套管载荷通过卡瓦牙使卡瓦出现轴向下移的趋势，下移时在卡瓦筒体楔形面的作用下，进一步压紧套管，实现卡瓦自锁功能，防止套管坠落。

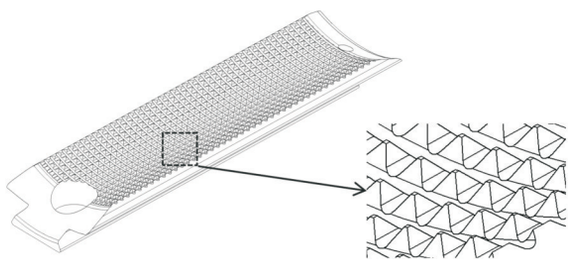


图 4　微牙痕卡瓦示意图

Fig. 4　Micro-notch slip

通过对顶驱下套管装置的承载能力与夹持机构的分析，设计并验证 XTG 140H 型顶驱下套管装置性能参数，具体工作性能参数如表 1 所示。

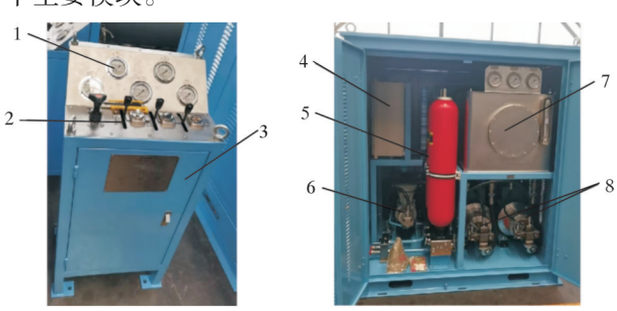
表 1　顶驱下套管装置性能参数

Table 1　Performance parameters of top drive casing running tool

参数名称	数值
套管直径/mm	114.3~139.7
额定扭矩/(kN·m)	50
提升载荷/kN	3 600
密封耐压/MPa	35~70

1.2　液压控制系统

对于研制的顶驱下套管装置液压控制系统的可靠性、稳定性会严重影响下套管装置的工作性能的问题，设计了一套独立的液压控制系统。图 5 为 XTG 140H 型顶驱下套管装置液压控制系统的 2 个主要模块。



a. 液压控制台　　b. 高能液压源

1—耐震压力表；2—操作手柄；3—液压控制箱；4—电控箱；5—蓄能器；6—散热器；7—液压油箱；8—高压泵组。

图 5　液压控制系统主要模块

Fig. 5　Schematic diagram of hydraulic control system

由图 5a 可见，液压控制台由耐震压力表、操作手柄、液压控制箱，以及安装在箱体内部的手动换向阀、减压阀、溢流阀、卸荷阀等元件组成。减压阀可将高压降低为工作压力，为顶驱下套管装置正常夹持套管提供稳定压力；溢流阀可根据不同工况调整溢流阈值，防止系统超压发生危险。作业过程中，操作人员通过手动换向阀切换液压油流动方向，驱动缸内活塞上下移动，实现套管释放与夹持作业。同时，将控制台设计为开放式，便于异常条件下的维修、调整和元器件更换。

由图 5b 可见，高能液压源采用恒压变量柱塞油泵为系统提供稳定压力，保证液压系统工作稳定。该系统采用双泵冗余设计，并通过控制系统实现单泵故障时的快速切换。油泵采用卧式布局，同时于箱体连接处增设减震垫，可有效减轻电机–泵组振动的影响。液压控制系统配有风冷系统，使液压油即使在炎热的夏天也可将温度控制在正常范围内，以保证各种元器件安全可靠工作。

2　工作特性室内测试

为了掌握 XTG 140H 型顶驱下套管装置工作特性，基于顶驱试验台与室内拉拔试验系统，对该顶驱下套管装置本体的扭矩、温升以及抗拉性能进行测试。

2.1　转速和扭矩测试

图 6 展示了基于顶驱试验台的下套管装置本体转速、扭矩室内试验系统。试验过程中将试验套管与顶驱试验台的主轴连接，顶驱下套管装置本体悬挂并固定于试验台横梁处。下套管装置的反扭机构与试验台横梁连接，确保试验过程中下套管装置驱动缸不随主轴转动。通过液压站驱动下套管装置活塞移动并夹持试验套管。由于现场作业中，顶驱下套管装置的工作转速普遍低于 30 r/min，所以该次试验主要测试 30 r/min 以下该装置转速、扭矩及温度变化的情况，同时对高转速下该装置性能进行验证，以获得不同转速下该顶驱下套管装置运行状态。

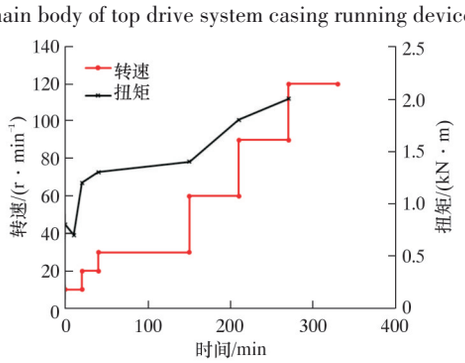
在该次试验中，首先采用 10 与 20 r/min 的较低转速驱动顶驱下套管装置心轴旋转，带动轴承转动，实现均匀润滑。随后模拟现场工况下转速，在 30 r/min 条件下旋转 90 min，并记录扭矩与轴承的温度变化。之后，将转速调整至 60、90 和 120 r/min 分别旋转 60 min，测试下套管装置在高转速情况下的扭矩与温度变化。图 7 为转速、扭矩与温度随时间变化的曲线图。从图 7 可以看出，随着转速的上升和时间的延长，下套管装置的扭矩有所增大、温度有所上升。

为了获得扭矩、温度与转速的关系，记录了试验过程中不同转速下、平稳状态时扭矩、温度

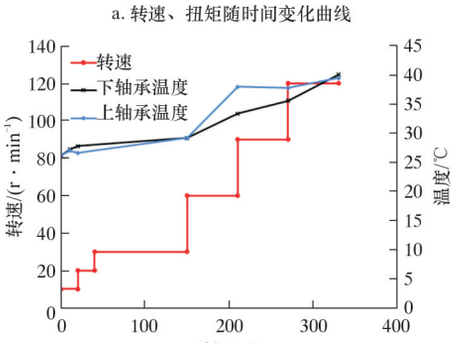


图 6　顶驱下套管装置本体转速和扭矩试验系统

Fig. 6　Laboratory test on rotational speed and torque of the main body of top drive system casing running device



a. 转速、扭矩随时间变化曲线

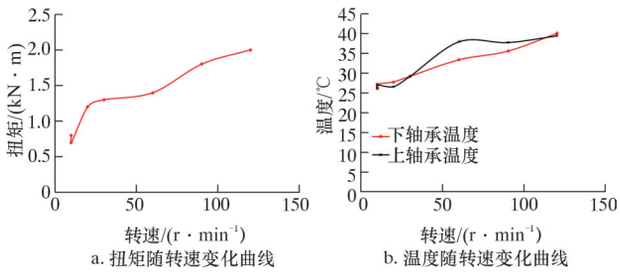


b. 转速、温度随时间变化曲线

图 7　转速、扭矩、温度随时间变化曲线

Fig. 7　Variation of rotational speed, torque and temperature over time

与转速的情况，根据记录形成的曲线如图 8 所示。由图 8a 可见，试验过程中，当顶驱下套管装置刚开始旋转时，扭矩约为 0. 8 kN·m，随着运转后轴承润滑情况得到改善，扭矩下降至约 0. 7 kN·m。当转速提高到 120 r/min 时，装置的扭矩约为 2. 0 kN·m。从图 8a 还可以发现，当转速超 30 r/min 时，扭矩与转速呈近似线性关系。如图 8b 所示，在夹持状态下，顶驱下套管装置轴承温度随转速增加呈近似线性增加，上轴承温度随转速增加波动上升。在室内条件下，当转速提高到 120 r/min 时，上、下轴承稳定时的温度分别为 39. 5 和 40. 1 ℃。



a. 扭矩随转速变化曲线　　b. 温度随转速变化曲线

图 8　扭矩、温度与转速的关系曲线

Fig. 8　Relation curves of torque, temperature and rotational speed

2. 2　抗拉性能测试

为获得下套管装置各关键部件的应力状态，采用电阻应变片法对 XTG 140H 型顶驱下套管装置本体的关键部件进行应力测试。采用 UCAM-10A 数据采集器对应力测试数据进行采集，该采集器可以在加载应力的同时，分段采集应变数值并进行存储。采用 2×3 三向应变花对测试零件的应变进行采集。根据电测法原理，由应变花所测得的 3 个方向的应变 ε_0、ε_{45}、ε_{90} 可计算所测位置的主应力，计算式如下：

$$\sigma_1 = \frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1-\nu} + \frac{\sqrt{2\varepsilon_0^2 + 2\varepsilon_{90}^2 + 4\varepsilon_{45}^2 - 4(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}) \times \varepsilon_{45}}}{1+\nu}\right] \tag{4}$$

$$\sigma_3 = \frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1-\nu} - \frac{\sqrt{2\varepsilon_0^2 + 2\varepsilon_{90}^2 + 4\varepsilon_{45}^2 - 4(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}) \times \varepsilon_{45}}}{1+\nu}\right] \tag{5}$$

式中：σ_1、σ_3 分别为第一主应力与第三主应力，MPa；ε_0、ε_{45}、ε_{90} 分别为 3 个方向的应变，无量纲；ν 为泊松比，无量纲；E 为材料的弹性模量，MPa。

通过测得的主应力，可以得到 Mises 等效应力，计算式如下：

$$\sigma_{r4} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3} \tag{6}$$

式中：σ_{r4} 为 Mises 等效应力，MPa。

测试时，对该顶驱下套管装置本体加载，每次加载增量为 100 kN。当载荷稳定后通过试验仪器采集对应的应变数据，当最大载荷超过 3 600 kN 时停止加载，从而得到顶驱下套管装置在不同载荷下的应力状态。

顶驱下套管装置的连杆、（筒体外）加强环、筒体为受力损伤的风险部件，因此对上述3类部件进行应力–应变测试，测试得到风险部件载荷与等效应力的关系曲线如图9所示。通过图9发现，在加载过程中得到的等效应力未发现异常波动，说明加载过程平稳，满足设备的抗拉要求。从图9还可以看出，在相同的载荷情况下，靠近连杆处的加强环Mises等效应力最大，其次为远离连杆处加强环与筒体的Mises等效应力，连杆处Mises等效应力最小。通过测试发现，当载荷达到3 600 kN时，连杆与筒体的最大Mises等效应力分别为11.35与62.00 MPa，远小于其材料的屈服强度。远离连杆处与靠近连杆处的加强环的Mises等效应力分别为70和438 MPa，其中靠近连杆处加强环的等效应力最大，但其安全系数仍达到2.13。

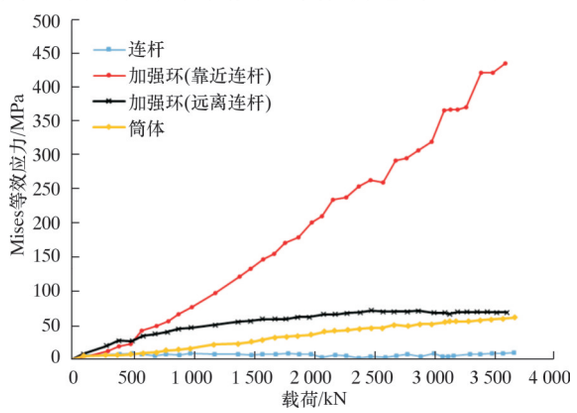


图9　各风险部件载荷–等效应力测试结果

Fig. 9　Load-equivalent stress test results of key components

综上测试分析，XTG 140H型顶驱下套管装置在受到套管串的轴向载荷时，其靠近连杆处的加强环所受应力最大，因此在施工中需要着重关注其工作状态，及时更换配件，以确保施工安全高效进行。

3　现场应用

2024年5月，在四川自XX井采用XTG 140H型顶驱下套管装置开展页岩气水平井下套管作业，图10为顶驱下套管作业照片。该井实际井深6 485 m，垂深4 162~4 165 m，水平段上倾0.6°~1.0°，水平段长1 500 m。作业过程中，套管进入水平段约500 m后，常规下套管施工遇阻。此时，启动顶驱带动下套管装置与套管旋转，转速约为20 r/min。在循环过程中，钻井液入口温度64 ℃，出口温度69 ℃，顶驱下套管装置累计旋转20 h时采集各部件的表面温度，如图11所示。由图11可知，下轴承处温度最高，超过钻井液入口温度22 ℃；驱动缸处温度最低，为45 ℃。顶驱下套管装置各关键部件的温度均低于密封元件及轴承等关键零部件的最高工作温度，满足工作需求。



图10　顶驱下套管作业照片

Fig. 10　Top drive system casing running operation site

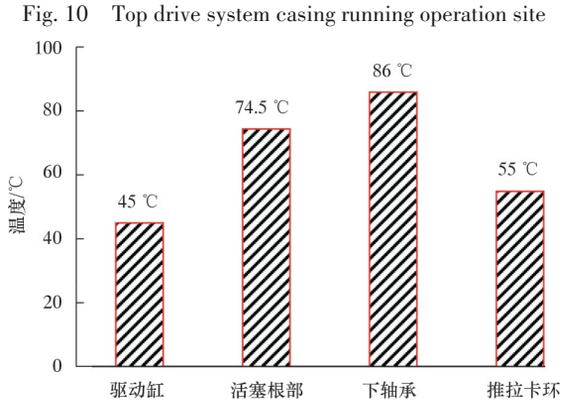


图11　自XX井顶驱下套管装置累计旋转20 h时各部件温度

Fig. 11　Component temperature of top drive system casing running device after 20 h cumulative operation in Well Zi-XX

XTG 140H型顶驱下套管装置在川渝地区的顺利施工，还不断刷新着最长水平段与最大下套管井深的纪录。

2024年7月，川渝地区大安XX井，井深7 111 m，最大井斜92.6°，最大狗腿度6.43°，最大垂深4 270.79 m，水平段长2 461 m。采用常规下套管作业方式套管下放至5 692 m时遇阻，开始旋转下套管作业。采用XTG 140H型顶驱下套管装置旋转下套管，累计作业184 h，设备运行正常，套管顺利下入。该井套管的顺利下入也刷新了该套设备最大工作深度纪录。

4　结　论

系统性设计优化了XTG 140H型顶驱下套管装置及其配套系统，形成了满足深层页岩气开发的

水平井高效旋转下套管技术设备，通过室内转速扭矩试验与装置本体拉拔试验验证与测试，并在现场应用取得了良好的效果，得到以下结论：

（1）通过转速扭矩室内试验与现场应用试验，XTG 140H 型顶驱下套管装置本体的下轴承位置温升最高，在现场作业中应持续关注该处工作状态，并做好润滑工作。

（2）XTG 140H 型顶驱下套管装置靠近连杆处加强环的 Mises 等效应力最大，需要在使用一段时间后观测加强环状态，及时更换相关配件。

（3）XTG 140H 型顶驱下套管装置配套高效液压控制系统，有效提高了下套管装置运行稳定性，保障下套管作业安全高效进行。

参　考　文　献

[1] 李国欣，雷征东，董伟宏，等. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望 [J]. 中国石油勘探，2022，27（1）：1-11.
LI G X，LEI Z D，DONG W H，et al. Progress，challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC [J]. China Petroleum Exploration，2022，27（1）：1-11.

[2] 万有余，林海，郭得龙，等. 层次分析法制定大型压裂管理制度提升非常规储层压裂效果[J]. 石油钻采工艺，2024，46（4）：479-491.
WAN Y Y，LIN H，GUO D L，et al. Developing a large-scale fracturing management system using AHP method to improve the fracturing effect of unconventional reservoirs [J]. Oil Drilling & Production Technology，2024，46（4）：479-491.

[3] 李道伦，查文舒，刘旭亮，等. 深度学习网络在非常规油气开发中的应用研究[J]. 非常规油气，2024，11（6）：1-7.
L I D L，ZHA W S，LIU X L，et al. Research on application of deeplearning network inunconventional oil and gas development[J]. UnconventionalOil&Gas，2024，11（6）：1-7.

[4] 郑新权，何春明，杨能宇，等. 非常规油气藏体积压裂 2.0 工艺及发展建议 [J]. 石油科技论坛，2022，41（3）：1-9.
ZHENG X Q，HE C M，YANG N Y，et al. Volumetric fracturing 2.0 process for unconventional oil and gas reservoirs and R&D suggestions [J]. Petroleum Science and Technology Forum，2022，41（3）：1-9.

[5] 孙映. 旋转下套管技术在复兴区块的应用与分析 [J]. 山东石油化工学院学报，2023，37（4）：59-63.
SUN Y. Application and analysis of rotary casing-running technology in Fuxing block [J]. Journal of Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology，2023，37（4）：59-63.

[6] 刘明，许鹏，陈述，等. 四川盆地致密气水平井钻井关键技术[J]. 非常规油气，2024，11（4）：152-159.
LIU M，XU P，CHEN S，et al. Key drilling technologies for tight gas horizontal wells in Sichuan Basin[J]. Unconventionaloil& Gas，2024，11（4）：152-159.

[7] 王峰. 泥岩进水诱发地层滑移条件下的套变影响因素分析[J]. 非常规油气，2024，11（1）：9-102.
WANG F. Analysis on influence factors of casing deformationunder for mation slip caused by mudstone water-entering[J]. Unconventionaloil & Gas，2024，11（1）：94-102.

[8] 高明帅，王春蕾，臧臣坤，等. 油气井套管下放方法与工具的研究进展及展望 [J]. 地质装备，2023，24（5）：1-7.
GAO M S，WANG C L，ZANG C K，et al. Research progress and prospect of casing lowering methods and tools for oil and gas wells [J]. Equipment for Geotechnical Engineering，2023，24（5）：1-7.

[9] 孙磊磊，陈远军，程旭，等. 长庆油田 HQ 区块长段水平井下套管降摩减阻技术[J]. 钻采工艺，2023，46（4）：167-172.
SUN L L，CHEN Y J，CHENG X，et al. Friction & drag reduction technology for casing running in long horizontal wellbore in block HQ，Changqing Oilfield[J]. Drilling and Production Technology，2023，46（4）：167-172.

[10] 赵传伟，孙家祥，兰恭涛，等. 循环推送下套管系统的研制[J]. 石油钻采工艺，2023，45（5）：562-567.
ZHAO C W，SUN J X，LAN G T，et al. Development of a circulating pushing casing running system[J]. Oil Drilling & Production Technology，2023，45（5）：562-567.

[11] 仇常凯，蒋凯，王兵. 克拉苏构造带超深盐下大斜度井钻井关键技术[J]. 石油钻采工艺，2024，46（1）：45-52.
QIU C K，JIANG K，WANG B. Key techniques for drilling ultra - deep pre - salt highly - deviated wells in Kelasu tectonic belt[J]. Oil Drilling & Production Technology，2024，46（1）：45-52.

[12] 张新亮，金磊，张瑞，等. 中深层水平井双漂浮下套管关键技术[J]. 石油钻探技术，2023，51（6）：57-63.
ZHANG X L，JIN L，ZHANG R，et al. Key technologies for casing running with double floating collars in middle and deep horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques，2023，51（6）：57-63.

[13] 陈清正. 顶驱下套管技术及在渤海油田的应用 [J]. 化学工程与装备，2023（12）：101-103.
CHEN Q Z. Top drive casing running technology and its application in Bohai oilfield [J]. Chemical Engineering

& Equipment，2023（12）：101-103.

[14] 张浩，沈吉阳，李洪奎. 漂浮+顶驱下套管技术在大港油田赵东 CP3-D18-XX 井中的应用［J］. 石油工程建设，2024，50（S1）：1-7.
ZHANG H，SHEN J Y，LI H K. Floating and top drive casing running for CP3-D18-XX in Dagang Zhaodong oilfield［J］. Petroleum Engineering Construction，2024，50（S1）：1-7.

[15] 李骥然，赵博，米凯夫，等. 旋转下套管技术在川渝页岩气开发中的应用［J］. 石化技术，2020，27（7）：90-92，145.
LI J R，ZHAO B，MI K F，et al. Application of top drive casing running technology in Sichuan and Chongqing shale gas exploration and development［J］. Petrochemical Industry Technology，2020，27（7）：90-92，145.

[16] 巩小娟，谢书豪，郭强，等. 旋转下套管技术在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷漏失井中的应用［J］. 中国石油和化工标准与质量，2022，42（21）：165-167.
GONG X J，XIE S H，GUO Q，et al. Application of rotary casing-running technology in lost-circulation wells in Jimusaer sag，Junggar basin［J］. China Petroleum and Chemical Standard and Quality，2022，42（21）：165-167.

[17] 徐新乐，涂增文，吴乐平，等. 顶驱旋转下套管技术及在长宁 H8 平台的应用［J］. 化工管理，2020（33）：197-198.
XU X L，TU Z W，WU L P，et al. Top-drive rotary casing-running technology and its application in Changning H8 platform［J］. Chemical Enterprise Management，2020（33）：197-198.

[18] 王志伟，张伟国，金颢，等. 南海番禺油田大位移井全程漂浮旋转下套管技术［J］. 钻采工艺，2021，44（1）：147-151.
WANG Z W，ZHANG W G，JIN H，et al. Rotating casing running technology with full-floatation for Panyu oilfield ERWs in South China sea［J］. Drilling & Production Technology，2021，44（1）：147-151.

[19] 张国田，邹连阳，黄衍福，等. 顶驱下套管装置的研制［J］. 石油机械，2008，36（9）：82-84.
ZHANG G T，ZOU L Y，HUANG Y F，et al. Development of top-drive casing-running device［J］. China Petroleum Machinery，2008，36（9）：82-84.

[20] 谢帅，罗乙凯，朱祥龙，等. 旋转下套管装置卡瓦牙结构优化［J］. 重庆科技大学学报（自然科学版），2024，26（4）：105-112.
XIE S，LUO Y K，ZHU X L，et al. Optimization of the slip tooth structure of the rotating casing device［J］. Journal of Chongqing University of Science and Technology：Natural Sciences Edition，2024，26（4）：105-112.

[21] 张庆斌，豆乔，梁海青，等. 基于有限元的顶驱下套管装置密封胶筒设计［J］. 石油矿场机械，2024，53（6）：49-55.
ZHANG Q B，DOU Q，LIANG H Q，et al. Design of casing running device packer cups based on finite element analysis［J］. Oil Field Equipment，2024，53（6）：49-55.

[22] 张楠，徐国民，宋立舟，等. 不同下套管工艺套管受力及摩阻扭矩预测模型［J］. 石油管材与仪器，2024，10（4）：36-41.
ZHANG N，XU G M，SONG L Z，et al. Prediction models for stress and torque of casing under different running processes［J］. Petroleum Tubular Goods & Instruments，2024，10（4）：36-41.

[23] 张宏英，李东阳，黄衍福，等. 顶驱下套管作业装备配套及工艺初探［J］. 石油矿场机械，2011，40（3）：20-23.
ZHANG H Y，LI D Y，HUANG Y F，et al. Equipment selection and technique discussion of top drive in casing running operation［J］. Oil Field Equipment，2011，40（3）：20-23.

[24] 全国钢标准化技术委员会. 合金结构钢：GB/T 3077—2015［S］. 北京：中国标准出版社，2015.
National Steel Standardization Technical Committee. Alloy structural steel：GB/T 3077—2015［S］. Beijing：Standards Press of China，2015.

[25] 刘鸿文. 材料力学Ⅰ［M］. 北京：高等教育出版社，2017：34.
LIU H W. Mechanics of materials Ⅰ［M］. Beijing：Higher Education Press，2017：34.

第一作者简介：李显义，教授级高级工程师，出生于 1973 年，2017 年毕业于东北石油大学，获博士学位，现从事钻完井装备及工具的设计与制造工作。地址：（102206）北京市昌平区。电话：（010）80165858。email：lixydri@cnpc.com.cn

通信作者：赵贺谦，高级工程师。email：zhqian_1993@cnpc.com.cn。

收稿日期：2025-04-06　　**修改稿收到日期：**2025-06-12

（本文编辑　宋治国）