

# 自动举升试井防喷装置的研制及力学分析

郑天文

中国石油大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司 黑龙江大庆 163453

通讯作者:Email:dlts\_liuxf@petrochina.com.cn

引用:郑天文. 自动举升试井防喷装置的研制及力学分析[J]. 油气井测试,2021,30(1):26-30.

Cite: ZHENG Tianwen. Development and mechanical analysis of automatic lift well test blowout preventer [J]. Well Testing, 2021,30(1):26-30.

**摘要** 传统试井施工作业需要人工举升测试仪器,攀爬到防喷管顶部,将仪器送入高 3.5 m 的防喷管内,存在工人劳动强度大、效率低、安全系数低等问题。研制的自动举升试井防喷装置,以便携无线液压泵站为动力源,驱动液压油缸,在地面完成将仪器装入防喷装置的所有安装工作;举升过程中,液压油缸将防喷管顶起,防喷管自动对接完成安装;施工结束后,按反安装顺序拆卸防喷装置。为了施工安全,对防喷管强度、立柱尺寸进行了适应性验证,对采油树受力情况进行了分析。该装置在大庆油田完成生产试井 12 万多层,应用效果显著。

**关键词** 试井;防喷装置;防喷管;液压举升;力学分析;采油树

**中图分类号:**TE353 **文献标识码:**B **DOI:**10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.01.005

## Development and mechanical analysis of automatic lift well test blowout preventer

ZHENG Tianwen

Well Testing Technology Service Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163513, China

**Abstract:** The traditional well test operation requires workers to climb to the top of the blowout preventer and send the instrument into the blowout preventer with a height of 3.5 m, which has the problems of high labor intensity, low efficiency and low safety factor. The developed automatic lifting well test blowout preventer takes the portable wireless hydraulic pump station as the power source driving the hydraulic cylinder and completing all the installation work of installing the instrument into the blowout preventer on the ground. During the lifting process, the hydraulic cylinder jacks up the blowout preventer, and the blowout preventer is automatically butted to complete the installation; when the construction is completed, the blowout preventer is disassembled according to the reverse installation sequence. In order to ensure the safety of construction, the adaptability verification of lubricator strength and column size was conducted, and the mechanical force of Christmas tree was analyzed. The device has been used in 120 000 wells in Daqing Oilfield, and the application effect is remarkable

**Keywords:** well test; blowout preventer; lubricator; hydraulic lift; mechanical analysis; Christmas tree

油田测试技术在油田开发动态监测中发挥着重要作用,为油田有效开发提供有力支撑<sup>[1-3]</sup>。国内各油田配备的防喷管主要为普通防喷管,应用于水井调试、分层测压、投捞等项目。因为材质较重、测调联动的仪器串较长,不适用于测调联动项目。近年来,油田企业对安全环保施工提出了更高要求<sup>[4-5]</sup>,传统的油田试井作业使用的防喷装置立起后离地面超过 3.5 m,试井施工时,首先需将带有施工平台的防喷装置通过油管卡箍连接到井口上,然后爬上防喷管将滑轮固定到防喷管顶端,再将长达 2 m 的试井仪器送入防喷管内。测试过程中,更换仪器,以及测试施工完毕,则需要工人爬上爬下重

复多次,劳动强度大、效率低,存在高空坠落风险。尤其在东北冬季施工作业时,更容易因结冰打滑出现安全事故<sup>[6-7]</sup>。

针对现有试井测试防喷装置存在的问题,研制了自动举升试井防喷装置,避免了测试工人因爬架登高而导致的安全问题。该装置采用强度高、防磁、耐腐蚀和低密度的钛合金材料研制,强度、防磁、耐腐蚀方面优于不锈钢,重量仅是不锈钢材料的 58%;在地面上使用遥控器远程控制电动液压泵就可以进行操作,完全排除高空跌落或高空落物伤人的安全隐患,同时施工班组可以由 3 人减少为 2 人,对施工人员身体条件的要求也进一步放宽,完

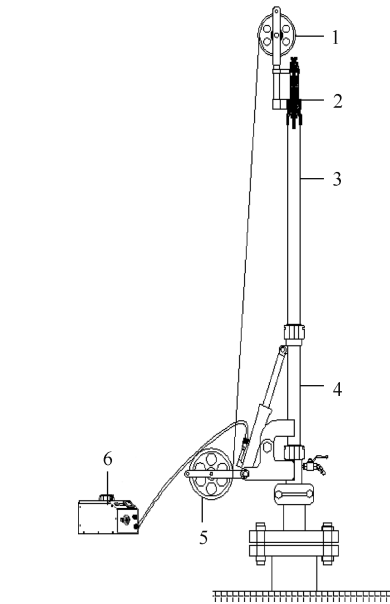
全达到安全环保施工要求<sup>[8]</sup>。到目前为止大庆油田已经配备 350 多套,测试超 12 万井层次,预计在未来 3 年内将全面取代传统的人工立管施工方式,并在全国各油田推广应用。

1 结构及工作原理

自动举升试井防喷装置从结构、用料方面进行优选,采用科学结构、轻便强度高的材料进行设计。

1.1 结构组成

该装置由防喷头,天滑轮,溢流管,防喷加压控制管,防喷管,折叠主体,地滑轮,液压缸,蹦链支架和液压泵站组成(图 1)。



1-天滑轮;2-防喷头;3-防喷管;4-折叠主体;  
5-地滑轮;6-液压泵站

图 1 自动举升试井防喷装置结构示意图  
Fig.1 Structural diagram of automatic lift well test blowout preventer

1.2 工作原理

自动举升试井防喷装置采用便携遥控液压泵站为动力源,用液压缸做驱动,在水平状态装好仪器、防喷头、滑轮等部件,然后举升至垂直测试状态。施工时,将液压折叠底座通过油管卡箍连接到井口上,折叠主体部分呈水平状态,将上端防喷管插入,由快速梯形螺纹组成的快速链接连在一起,接着仪器从防喷管顶端插入,安装防喷头,固定天滑轮,链接溢流管、防喷加压控制管。用便携遥控液压泵站给液压油缸供液,液压油缸将防喷管顶起,防喷管将自动对接完成安装。打开测试阀门,再打开先导阀门,井液慢慢充满防喷管,达到井内

和防喷管内压力平衡,在重力作用下,仪器慢慢进入井筒内,开始正常测调施工。试井施工结束时,仪器串返回防喷管内,关闭先导阀,关闭测试阀门,打开放空阀门,防喷管内液体排除压力下降到安全压力,拧开快速接头螺帽,然后缓慢打便携遥控液压泵站泄压阀,防喷管会慢慢向一侧倾斜直到水平状态,然后按反安装循序拆卸防喷装置<sup>[9-10]</sup>。

2 力学计算

防喷管强度、立柱尺寸的大小,采油树受力情况等因素,对野外班组施工安全影响极大。

2.1 防喷管强度计算

图 2 为防喷管水平位置时的力学简图。

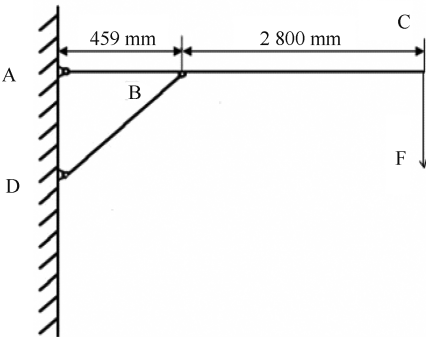


图 2 防喷管水平位置时的力学简图  
Fig.2 Mechanical diagram of lubricator in horizontal position

基本参数:防喷管接箍截面尺寸  $D=89\text{ mm}$ ,  $d=62\text{ mm}$ ;材料 J55 的防喷管的极限应力 ( $552\sim379$ ) MPa,材料 TC4 防喷管的极限应力 860 MPa;防喷管所受载荷为 106 kg。

防喷管水平位置时,防喷管的强度计算:

(1)防喷管与液压缸接触的位置为危险截面,其弯矩

$$M_B = 106 \times 9.8 \times 2.8 = 2.9(\text{kN} \cdot \text{m})$$

式中: $M_B$  为支点 B 处的力矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

(2)防喷管截面 B 的抗弯截面系数

$$\begin{aligned} W_z &= \frac{\pi D^3}{32} (1 - \alpha^4) \\ &= \frac{3.14 \times 89^3 \times 10^{-9}}{32} \left[ 1 - \left( \frac{62}{89} \right)^4 \right] \\ &= 52.566 \times 10^{-6} (\text{m}^3) \end{aligned}$$

式中: $W_z$  为防喷管截面 B 的抗弯截面系数,  $\text{m}^3$ ;  $\alpha$  为内外直径的比值。

## (3) 防喷管截面 B 上最大工作应力

$$\begin{aligned}\sigma_B &= M_B / W_Z \\ &= \frac{2\,900}{52.566 \times 10^{-6}} \\ &= 55.2 \text{ (MPa)}\end{aligned}$$

式中:  $\sigma_B$  为防喷管截面 B 上最大工作应力, MPa。

因为防喷管的最大工作应力小于极限应力, 所以, 防喷管在水平位置时满足强度要求<sup>[11]</sup>。

## 2.2 立柱尺寸选择

防喷管水平位置时, 需要选择立柱尺寸。图 3 为防喷管水平位置时立柱受力的力学简图。

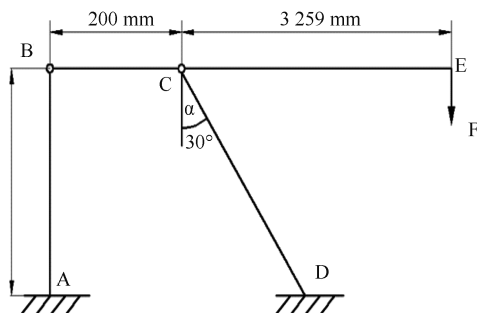


图 3 防喷管水平位置时立柱受力的力学简图

Fig. 3 Mechanical diagram of column under stress of lubricator in horizontal position

## (1) 防喷管水平位置时油管 AB 受力

$$\begin{aligned}F_{AB} &= \frac{F \cdot CE}{BC} \\ &= \frac{106 \times 9.8 \times 3.259}{0.2} \\ &= 16.927 \text{ (kN)}\end{aligned}$$

式中:  $F_{AB}$  为采油树测试阀门上端承受向上的拉力, kN;  $F$  为防喷管水平位置时所承受的最大载荷, N;  $CE$  为防喷管及仪器串的重心到支点 C 处的长度, m;  $BC$  为测试阀门上端到支点 C 处的长度, m。

## (2) 立柱 CD 尺寸选择

支杆 CD 受力为

$$\begin{aligned}F_{CD} &= \frac{F \cdot BE}{BC \cdot \cos 30^\circ} \\ &= \frac{106 \times 9.8 \times (3.259 + 0.2)}{0.2 \times 0.732} \\ &= 24.54 \text{ (kN)}\end{aligned}$$

式中:  $F_{CD}$  为立柱承受的压力, kN;  $BE$  为装置总长度, m。

如果选用普通碳钢 (普通碳钢的极限应力 235 MPa), 则因为  $\sigma_{CD} \leq [\sigma]$ , 所以  $F_{CD}/A \leq [\sigma]$ 。

计算出立柱 CD 面积  $A \geq 0.1 \text{ mm}^2$ 。若选用实心圆杆, 立柱直径大于 15 mm 即可。

## 2.3 采油树拉力分析

图 4 为工作时采油树受力的结构简图, 图 5 为工作时采油树受力的力学简图。基本参数: 标准套管截面尺寸  $D=139.7 \text{ mm}$ ,  $d=125 \text{ mm}$ ; 钢级 P110 的极限应力 758~965 MPa, 绞车装 2.4 mm 的 IPS 级钢丝, 破断拉力为 7.24 kN, 即  $T=7.24 \text{ kN}$ 。

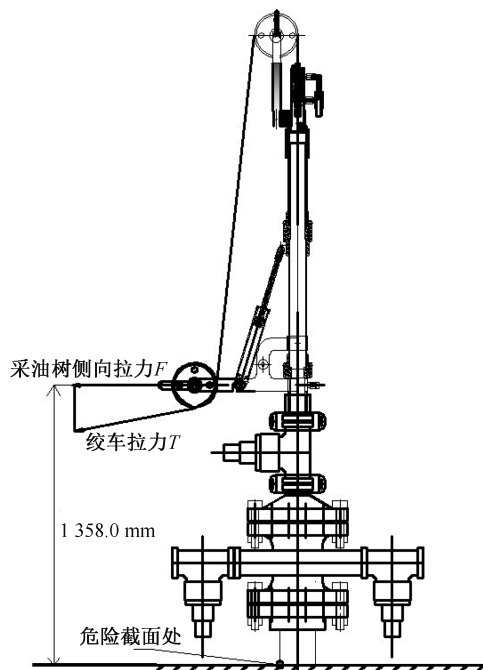


图 4 采油树受力结构简图

Fig. 4 Structural diagram of christmas tree under stress

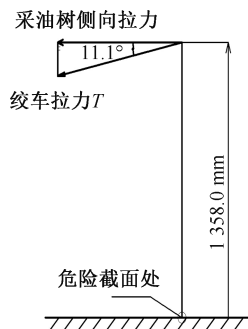


图 5 采油树受力的力学简图

Fig. 5 Mechanical diagram of christmas tree under stress

最大拉力:

$$F = T \cos 11.1 = 7.24 \times 0.981 = 7.1 \text{ (kN)}$$

采油树底端标准套管跟地平面的位置为危险截面, 其弯矩为<sup>[12]</sup>

$$M_B = 7.1 \times 1.358 = 9.6 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

套管截面的抗弯截面系数为

$$\begin{aligned}
 W_z &= \frac{\pi D^3}{32} (1 - \alpha^4) \\
 &= \frac{3.14 \times 139.7^3 \times 10^{-9}}{32} \left[ 1 - \left( \frac{125}{139.7} \right)^4 \right] \\
 &= 3.4425 \times 10^{-5} (\text{m}^3)
 \end{aligned}$$

套管截面上最大工作应力为

$$\begin{aligned}
 \sigma_B &= M_B / W_z \\
 &= \frac{9\,600}{34.425 \times 10^{-6}} \\
 &= 278.86 (\text{MPa})
 \end{aligned}$$

因为套管在地平面之处的最大工作应力 278.86 MPa,远小于套管的极限应力 758~965 MPa。所以,套管受到绞车 2.4 mm 钢丝拉力时,满足强度要求<sup>[13-14]</sup>。

为保障采油树安全,钢丝的最大拉力应小于 19.58 kN。试验情况为 5 kN 时,钢丝从打捞头处抽杆,7 kN 时,钢丝拉断<sup>[15]</sup>。

### 3 现场应用

2010 年 11 月 15 日,首次对 XXX 注水井进行流量调配施工。该井口为高井口,测试阀门离地面达到 2 m。第一次采用普通攀爬型防喷装置,施工人员 3 人,其中 2 人绑缚安全带在高处井口和防喷管上作业,1 人在地面配合。由于该井比较高,加上 2.5 m 的防喷装置,安装井口每次大约需要 0.5 h,每次更换仪器、调换水嘴都要反复开关测试阀门,反复爬上爬下。起下 6 次仪器用时 8 h,合计工时 24 h。使用自动举升试井防喷装置,作业施工仅需 2 人配合,无需登高,6 次起下仪器仅需要开关一次测试阀门,起下 6 次仪器用时 6 h,节约 1 人 2 h,合计工时 12 h。节约工时 50%,施工更安全。

自动举升试井防喷装置自 2009 年开始研制,到目前为止,已经完成生产试井任务 12 万多层。现场应用结果表明,该装置有效规避了登高作业或在防喷管下作业的风险,同时可配回注装置实现零溢流<sup>[16-17]</sup>。

另外,大庆油田近年来采用了测调联动新技术。该技术使用直径 3.5 mm 的铠装电缆,采用边调边测技术,提高了测调效率和精度。但是,由于采用的仪器较常规存储式测调仪增加了长度和重量,更凸显出自动举升试井防喷装置优势。测调联动新技术在大庆已经组建 300 班组以上,防喷装置也正在逐步更换成自动举升试井防喷装置<sup>[18]</sup>。

### 4 结论

(1)自动举升试井防喷装置消除了工人登高作业跌落和高空落物伤人的安全因素,降低了工作强度。

(2)该装置有效提高劳动效率,施工班组可以由 3 人减少为 2 人,为减员增效提供了技术和装备保障。

(3)该装置井口设置导向滑轮,保证了机械强度,确保了安全生产,有效提升了生产管理水平,能够创造显著的经济效益和社会效益。

(4)该项试井新工艺已经在大庆油田开展应用,也可以在国内陆上其他油田,如胜利、长庆等油田推广应用,具有较好的应用前景。

致谢:感谢大庆油田测试技术服务分公司技术发展部负责论文外审的领导审核把关;感谢分公司第四大队相关技术人员对本文的贡献。

### 参考文献

- [1] 周治岳,刘俊丰,温中林,等. 涩北气田多层合采井分压测试技术[J]. 油气井测试,2019,28(2):20-26.  
ZHOU Zhiyue, LIU Junfeng, WEN Zhonglin, et al. Separate pressure testing technique for commingling production wells in Sebei gas field [J]. Well Testing, 2019,28(2):20-26.
- [2] 徐兴安,张凤辉,杨万有,等. 渤海油田分层注水测试新技术[J]. 油气井测试,2019,28(4):51-56.  
XU Xing'an, ZHANG Fenghui, YANG Wanyou, et al. New testing technology of layered water injection in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2019,28(4):51-56.
- [3] 崔龙兵,刘练,周生福,等. 顺北油田“三高”油气井试井工艺技术[J]. 油气井测试,2020,29(3):57-63.  
CUI Longbing, LIU Lian, ZHOU Shengfu, et al. Well test processes of oil and gas wells with “three highs” in Shunbei Oilfield [J]. Well Testing, 2020,29(3):57-63.
- [4] 李海涛,赵凯,温丽娟. 光杆断脱自动防喷装置的研制[J]. 油气田环境保护,2020,30(1):15-16.  
LI Haitao, ZHAO Kai, WEN Lijuan. The development of automatic blow-out prevention device for rod breaking in pumping well [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2020,30(1):15-16.
- [5] 陈勇. 井口电缆防喷装置的引进和应用[J]. 江汉石油职工大学学报,2010,23(5):49-51.  
CHEN Yong. The introduction and application of wellhead cable blowout preventer [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2010,23(5):49-51.

- [6] 姚洪田. 水井测调地面配套装置[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(6): 97-98.  
YAO Hongtian. Ground supporting device for water well testing and adjusting [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2011, 30(6): 97-98.
- [7] 王鸿勋, 张琪. 采油工艺原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 84.
- [8] 周萌. 双级密封式测井电缆井口防喷装置[J]. 内蒙古石油化工, 2006, 16(2): 127-130.  
ZHOU Meng. Double-stage sealed logging cable wellhead blowout preventer [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2006, 16(2): 127-130.
- [9] 柳宇. 免攀爬防喷装置[J]. 机械工程师, 2016(9): 212-213.  
LIU Yu. No-climbing blowup preventer [J]. Mechanical Engineer, 2016(9): 212-213.
- [10] 张海兰, 林志波, 樊喜兵, 等. 液压防喷管在测试过程中的应用[J]. 化工管理, 2018(5): 233.  
ZHANG Hailan, LIN Zhibo, FAN Xibing, et al. Application of hydraulic blowout preventer in testing process [J]. Chemical Enterprise Management, 2018(5): 233.
- [11] 林秀娟, 肖文生, 王鸿雁. 深水采油树下放过程钻柱力学分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 125-129.  
LIN Xiujuan, XIAO Wensheng, WANG Hongyan. Drill string mechanical analysis of running deepwater oil tree [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2011, 35(5): 125-129.
- [12] 苏堪华, 管志川, 苏义脑. 深水钻井水下井口力学稳定性分析[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(6): 1-4.  
SU Kanhua, GUAN Zhichuan, SU Yinao. Mechanical Stability analysis of subsea wellhead for deepwater drilling [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(6): 1-4.
- [13] 李宁, 左凯, 陈胜宏, 等. 新型应急防喷装置研制[J]. 石化技术, 2019, 26(6): 55, 7.  
LI Ning, ZUO Kai, CHEN Shenghong, et al. Development of a new emergency blowout preventer [J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(6): 55, 7.
- [14] 王进旗, 田树祥, 肖培琛. 助力式过环空测井防喷装置的研制[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26(1): 5-7.  
WANG Jinqi, TIAN Shuxiang, XIAO Peichen. Development of force-aided blowout preventer in annular space logging [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(1): 5-7.
- [15] 高振涛, 侯庆春, 肖兵, 等. 注水井偏心电动调配测试技术[J]. 油气井测试, 2002, 11(3): 53-54.  
GAO Zhentao, HOU Qingchun, XIAO Bing, et al. Eccentric motorized dispensing technology in injection well [J]. Well Testing, 2002, 11(3): 53-54.
- [16] 唐高峰, 崔玉海, 刘海涛, 等. GZF 高压注水井口测试防喷器的研究与应用[J]. 石油机械, 2003, 31(11): 35-36, 54.  
TANG Gaofeng, CUI Yuhai, LIU Haitao, et al. Development and application of new high-pressure water-flooding wellhead testing BOP [J]. China Petroleum Machinery, 2003, 31(11): 35-36, 54.
- [17] 陈军. 钢丝作业技术在不同井况的应用[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(2): 243, 249.  
CHEN Jun. Application of wire operation technology in different well conditions [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(2): 243, 249.
- [18] 孙金峰. 井口防喷管起升装置的研制与应用[J]. 投资与创业, 2012(12): 152-153.  
SUN Jinfeng. Development and application of wellhead blowout preventer lifting device [J]. Undertaking & Investment, 2012(12): 152-153.

编辑 刘振庆

**第一作者简介:**郑天文,男,1990年出生,助理工程师,2013年6月毕业于哈尔滨理工大学信息管理与信息系统专业,现从事工程技术施工环保及HSE管理工作。电话:0459-5820927,15004583060;Email:dlts\_zhengtw@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市萨尔图区丰收村测试技术服务分公司,邮政编码:163453。