

井下管柱状态测试短节的机械结构设计

邓 旭¹ 刘明尧¹ 马宏伟² 杨伯阳²

(1. 长江大学 机械工程学院, 湖北 荆州 434023; 2. 河南油田分公司 石油工程技术研究院, 河南 南阳 473123)

摘要: 为深入了解高压分层挤注过程中, 井下液体温度、压力以及管柱承受的轴向力和伸缩蠕动等状态参数, 研制了井下管柱状态检测系统。介绍了该系统的基本功能, 着重分析了井下测试短节的机械结构及布局, 总结了井下管柱的内外筒强度设计及校核方法; 简要介绍了应变片贴片处弹性体的设计原则, 并指出了高温高压条件下如何分析评价弹性体的结构强度和应力水平, 以及热应力、流体压力对拉压力测量的影响; 提出了摆动式机械接触滚轮测量管柱蠕动位移的方法, 论述了位移测试组件的基本原理及结构。

关键词: 管柱; 测试; 短节; 结构设计; 位移

中图分类号: TE921⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2007) 01-0049-04

为检测井下作业时某一温度、压力状态下管柱的受力情况及蠕动变化规律, 笔者研制了井下管柱状态检测系统^[1]。由于井下环境、成本以及传送距离等因素的制约, 传感器采集的数据直接传送到地面设备后不理想, 因而该系统设计采用了存储回放模式。该系统井下测试短节完成数据的采集, 并将数据存储到存储器中, 待系统完成一个作业时间段后, 将井下测试短节起出并与上位机相连, 借助相应的软件完成数据的传输和处理^[1-4]。

井下测试短节是井下管柱状态检测系统的核心部分, 安装在管柱的被测端, 随管柱一起下入井中。工作过程中, 短节的测试模块根据参数设置, 智能化检测和记录管柱的轴向拉压力、蠕动及周围液体的压力、温度等参数。技术参数要求为: 耐压 60 MPa; 耐温 120 °C; 拉压力检测范围 ± 400 kN; 蠕动检测精度 ± 0.05 m; 测量采样间隔 1~60 s, 可选; 结构尺寸要求外径 ≤ 116 mm, 内通径 ≥ 36 mm, 总长度 ≤ 1500 mm; 每秒钟记录一次测量数据时, 其连续存储时间不小于 8 h。

1 井下测试短节的总体结构

井下测试短节的机械部分是井下管柱状态检测系统的壳体构架, 为传感器及电路提供包容空间。因此, 其结构及强度设计得是否合理, 关系到检测系统的安全和测量稳定性。井下测试短节作为整个管柱的组成部分, 必须在高温高压环境中保持足够的强度和抗腐蚀性。由于井下测试短节在井下工作的时间较

长, 所以还必须考虑仪器仓的密封问题^[5]。

从径向结构上来讲, 可将井下测试短节的机械结构分为两部分, 即内筒和外筒。二者之间的环形空间安放电子仪器。短节的径向空间有限, 除去内外筒壁厚, 留给仪器的环形空间比较小。若采用内筒偏心式结构, 即内筒及其内通径偏离整体结构中心轴, 则可以产生一个较大的半圆形空间, 便于安装电子仪器。但是, 这样使得内筒的内通径加工制造变得相当困难, 也不利于内外筒的装配。因而, 经过比较分析采用正心结构, 并适当加长仪器仓的轴向长度较为合理。

从轴向结构来讲, 可以将井下测试短节分为 3 部分: 轴向拉压力测试段、位移测试段和仪器仓段。由于液体压力在内外筒截面变化处产生附加的拉压力, 因此测量拉压力的应变片贴片区域应远离内外筒的相互作用区域, 以减小附加拉压力的影响, 同时也有利于消除内外筒装配应力对应变片的影响。所以, 轴向拉压力测试筒设计在短节端部比较合理。

井下管柱的蠕动位移采用摆动式机械接触滚轮测量, 由于其结构占据较大的径向空间, 需要在管壁上开槽、钻孔, 因此该处的管柱要求有较大的壁厚。将

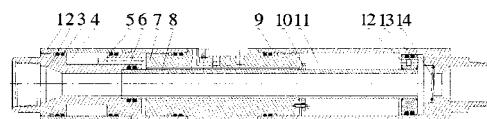
收稿日期: 2006-07-04; 改回日期: 2006-08-10

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技开发项目 (编号: P04054) 部分研究成果

作者简介: 邓旭 (1976—), 男, 1999 年毕业于哈尔滨理工大学机械工程学院, 在读硕士研究生。

联系电话: (0716) 8488284

位移测试组件设计在特殊的管筒上, 考虑到管柱连接及下井扶正导向等因素, 位移测试筒位于井下测试短节中间部位较为合理。温度传感器安装在位移测试筒上, 且与位移测试组件的位置相对布置。压力传感器采用带有螺纹连接结构的高转换精度型, 安装在内筒的大端密封一侧。各段管柱的长度通过图解法确定, 利用 AutoCAD 软件按比例绘制机械结构总体布局。经过分析, 井下测试短节的机械结构部分设计总长为 1 250 mm, 外径 116 mm, 内通径 36 mm, 适用于直径为 124 mm 的井眼进行井下高压注水管柱状态测试(如图 1 所示)。井下测试短节的两端为标准管螺纹结构, 实现与连接接口公称直径为 73.0 mm 的普通油管连接。



1. 保护筒; 2. 拉压力测试筒; 3, 6, 13. 密封圈; 4. 应变片仓;
5. 接口电路及开关仓; 7. 蠕动位移及温度检测筒; 8. 内筒; 9.
仪器仓外筒; 10. 连接固定组件; 11. 电子仪器仓; 12. 压力传感
器安装孔; 14. 调整弹簧

图 1 井下测试短节机械结构

2 内外筒强度设计

以 API 标准为基础, 结合最大载荷法进行内外筒的基本强度设计。最大载荷法的本质是根据实际工作条件下管柱所受的有效载荷结合一定的安全系数来设计管柱^[6-7]。由于蠕动位移及温度检测筒安装有磁柱、霍尔传感器, 为避免钢材磁化影响信号检测, 选用不磁化的奥氏体钢材 1Cr18Ni9Ti, 其屈服强度为 205 MPa, 抗拉强度为 520 MPa。两端外筒及内筒均选用 40Cr 合金结构钢, 其屈服强度是 785 MPa, 抗拉强度是 980 MPa。由短节的总体机械结构可知, 外筒壁承受 60 MPa 的液压力, 同时承受轴向 400 kN 的拉压力, 因此需要进行外筒壁的抗外压强度、抗拉压强度及螺纹连接强度的设计。

首先按照外筒壁抗拉强度初步计算出 40Cr 材料外筒的标称最小壁厚为 3.9 mm。由 API 标准的管柱半径与管筒壁厚的对应关系可知, 外筒在液体外压最大时发生弹塑性破坏, 故需按照中厚壁管柱的相应公式进行校核^[8], 校核公式为:

$$\rho_c = 2Y_m \left[\frac{D/\delta - 1}{(D/\delta)^2} \right] \quad (1)$$

式中, ρ_c 为临界外挤压力, MPa; Y_m 为平均屈服极限, MPa; D 为管筒外径, mm; δ 为管筒壁厚,

mm。

考虑到有效外压力及轴向拉压力的双轴应力作用, 采用最小屈服极限代替平均屈服极限进行修正计算, 解得 $D/\delta = 25.2$, 取 $D = 116$ mm, 则 $\delta = 4.6$ mm。安全系数取 1.8, 圆整后壁厚为 7 mm, 最大应力为 436 MPa。为了防止粘扣, 采用 40Cr 材料加工成螺纹连接套, 固定在不锈钢位移测试筒的两端。因此, 螺纹连接强度只需考虑截面较小的外筒壁情况, 其计算公式为:

$$P_j = 0.95 A_p L_1 \left[\frac{4.98 U_p}{D^{0.59} (0.5 L_1 + 0.14 D)} + \frac{Y_p}{L_1 + 0.14 D} \right] \quad (2)$$

式中, P_j 为丝扣连接强度, N; L_1 为丝扣有效啮合长度, mm, $L_1 = L - M$; L 为丝扣连接长度, mm; M 为连接接口端面至丝扣啮合起始点的长度, mm; A_p 为完整扣终点扣根处的截面积, mm^2 , $A_p = 0.7854 [(D - 3.62)^2 - d^2]$; D 为管筒圆扣螺纹根部直径, mm; d 为管筒内径, mm; Y_p 为管筒最小屈服极限强度, MPa; U_p 为管筒最小极限强度, MPa。

取 $L = 50$ mm, $M = 5$ mm, $U_p = 980$ MPa, $Y_p = 780$ MPa, $D = 116$ mm, 代入式 (2), 解得 $P_j = 1212$ kN, 安全系数可达 3.0, 圆扣螺纹连接强度可满足要求。

同理, 1Cr18Ni9Ti 材料的位移测试筒壁厚设计为 18 mm, 安全系数 1.6。

考虑到管柱壁厚的不均匀、材料及加工缺陷, 内筒的抗内压设计采用修正公式计算:

$$P_j = 1.75 \frac{Y_p \delta}{D} \quad (3)$$

式中, P_j 为临界内压力, N; Y_p 为管筒最小屈服极限强度, MPa, D 为管筒外径, mm; δ 为管筒壁厚, mm。

取 $D = 36 + 2\delta$, 代入式 (3), 解得 $\delta = 4.4$ mm, 即安全系数为 1.4 时, 内管壁厚取 6 mm。

3 应变片弹性体设计

由于测试短节工作在井下油管的端部, 理论上只承受拉压力, 不受弯曲、扭转载荷作用。因此, 该系统中轴向拉压力传感器采用带有温度补偿功能的电阻应变测量桥路, 应变片贴到测力筒的特定对称受力区域, 以消除可能的弯矩等附加因素影响。弹性体贴片部位截面如图 2 所示。

图 2 中 d 、 D 分别为内孔直径及当量圆筒外径。

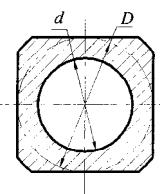


图 2 弹性体贴片部位截面

根据公式计算 D :

$$D \geq \sqrt{d^2 + \frac{\pi F}{4\sigma_q}}, \quad (4)$$

式中, F 为轴向拉压力, N; σ_q 为许用应力, MPa。

安全系数为 1.5, d 取 36 mm, F 取 400 kN, 则 $D \geq 45$ mm。

由拉应力计算公式可知, 若想提高灵敏度, 必须减小弹性体横截面积 A 。但 A 的减小受到允许应力和线性要求的限制, 并且 A 越小, 应变片对内部液体压力引起的径向和周向应变干扰越敏感。故 D 取 60 mm, 此时弹性体的额定最大轴向应力为 346 MPa, 理论上内部液体压力引起的径向和周向应变的附加效果不大于轴向应变的 0.7%, 可在软件上适当补偿。

应变片贴在四个对称平面上, 具体贴片及组桥方式见图 3。纵向应变片 R_1 和 R_3 串联, R_2 和 R_4 串联, 且处于对臂位置, 以减小弯矩的影响; 横向应变片具有温度补偿作用。A-C 为供电电源端, B-D 为信号输出端。桥路输出值为 ϵ_{BD} , $\epsilon_{BD} = 4(1 + \mu)\epsilon_z$, 其中 ϵ_z 为轴向总应变值, μ 为材料泊松比。 $\epsilon_z = \epsilon_F = \epsilon_\phi$, ϵ_F 为测试短节所受轴向外力引起的轴向应变, ϵ_ϕ 为弹性体内通径流体产生的轴向作用力引起的轴向应变。

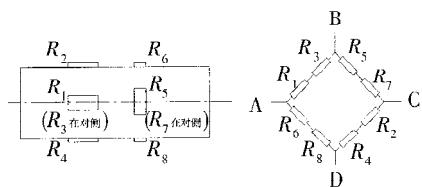


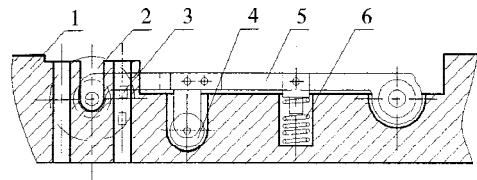
图 3 弹性体贴片及组桥示意

在应变片弹性体结构基本确定以后, 借助于 ANSYS 等有限元分析软件, 分析高温高压条件下弹性体的结构强度和应力水平, 并对管内流体压力及热应力等对轴向拉压力测量的影响, 尤其是内压力产生的周向应变评估分析, 进一步优化弹性体贴片部位的结构设计, 并根据评估结果在软件上修正^[7,9]。

4 位移测量组件

管柱的蠕动位移采用摆动式机械接触滚轮方法测

量, 将两物体的相对直线运动转变为滚动轮的转动, 利用霍尔元件检测滚动轮的转动角度和方向来计算位移。位移测量组件结构如图 4 所示, 测量位移的滚动轮安装在摆杆上, 依靠弹簧推动摆杆的压力使滚动轮紧贴在管壁上。滚动轮在摩擦力作用下转动, 轮子周长滚过的距离就是井下管柱的蠕动位移量。为了测量出轮子的转动量, 在靠近轮子的侧面安装两个开关型霍尔元件。当轮子转动时, 小磁柱每经过霍尔传感器一次, 就会发出一个脉冲信号, 通过比较两个霍尔传感器的电平, 判断位移的方向。记录两个方向的脉冲数量, 并根据磁柱个数、分布角度以及滚动轮周长就可以计算出井下管柱蠕动位移量。



1. 蠕动位移及温度检测筒; 2. 滚动轮; 3. 霍尔传感器组件; 4. 控制塞; 5. 摆杆; 6. 弹簧

图 4 位移测量组件结构

该位移测量结构的理论量程为无穷大, 实际的量程受到单片机处理整数的最大值、存储器的容量和滚动轮直径的限制。样机的位移检测轮周长为 8.3 cm, 每转动一周发出 4 个脉冲, 理论分辨精度为 2.075 cm。在存储容量足够大的情况下, 采用 8 位单片机时, 总量程可达 5 m; 若采用 16 位单片机, 则可达 1 300 m。根据经验, 高压注水时 3 000 m 深的井, 管柱蠕动位移一般在 3 m 以内, 采用 8 位单片机即可满足量程要求。

5 结 论

1) 基于存储回放模式的井下管柱状态检测系统, 有助于了解高压分层挤注过程中井下管柱的轴向受力及蠕动位移状态。井下测试短节机械部分的结构及强度的合理设计是检测系统安全和测量稳定性的重要保证。

2) 通过使用 ANSYS 等有限元分析软件, 可以有效地分析高温高压条件下弹性体的结构强度和应力水平, 优化弹性体贴片部位的结构设计。

3) 提出了一种以摆动式机械接触滚轮为基本原理, 基于霍尔元件进行信号检测的直线大位移测量方法, 并将其应用到井下管柱的蠕动位移检测。该位移测量方法具有结构简单、测量装置体积小、量程大、适应环境广等优点, 有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 邓旭, 刘明尧, 马宏伟, 等. 井下管柱状态检测系统的研制 [J]. 石油钻探技术, 2006, 34 (5): 52-53.
- [2] Faisal M, Al-Thawad, Issaka M B. A simple approach to numerical analysis of complex well tests [R]. SPE81514, 2003.
- [3] 李志刚. 基于虚拟仪器的随钻井下管柱多参数测量系统 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33 (3): 39-41.
- [4] 岳宗杰, 郭庆明, 舒振家. QDT-MWD 在大位移井导向钻井中的应用 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (4): 52-54.
- [5] 王以法, 管志川, 李志刚, 等. 井下测量接头自动测量系统的

- 研制 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2000, 24 (5): 11-13.
- [6] 石崇东, 张绍槐. 智能钻柱设计方案及其应用 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (6): 7-10.
- [7] 刘延强. 井下温度压力测试仪的力学设计原理 [J]. 石油矿场机械, 1997, 26 (5): 35-37.
- [8] 《钻井手册 (甲方)》编写组. 钻井手册 (甲方) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [9] 陈镭. 螺杆泵采油井光杆转矩和轴向拉力双参数测试技术 [J]. 石油钻探技术, 2000, 28 (5): 49-51.

〔审稿 韩志勇〕

The Mechanical Structure Design of Downhole String State Measurement System

Deng Xu¹ Liu Mingyao¹ Ma Hongwei² Yang Baiyang²

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 2. Petroleum Engineering Technique Institute, He'nan Oilfield Branch Company, Nanyang, He'nan, 473123, China)

Abstract: The downhole string state measurement system has been developed in order to understand the parameters such as, downhole fluid temperature, pressure, axial force and deformation, etc in the process of injecting high-pressure water into wells. This paper introduces the basis function of this system; focuses on its mechanical structure and layout of measurement system; and summarizes the design and verification method for inner and outer sleeve of downhole string. This paper briefly introduces design principles of elastomer in the location where strain gauge is attached and presents how to analyze the impacts of structure strength, stress, thermal stress and fluid pressure on measurement of axial force at high temperature & high pressure. A method to measure the string creep using swing mechanical roller was proposed. The basic principle and structure of displacement measurement mechanism is discussed in this paper.

Key words: pipe string; testing; nipple; structural design; displacement

套管欠平衡一体化钻井技术在老油田的应用

套管欠平衡一体化钻井技术在老油田的钻进试验表明, 该技术不但可以成功钻进不同压力层, 还可达到如下效果: 1) 使钻进引起的地层伤害减到最小并取得最大注入能力; 2) 使诱导性漏失减到最小, 从而减少了压差卡钻; 3) 减少了油井准备、起下钻柱和下套管等非生产作业时间, 提高了钻进效率。若使用地面闭环加压分离系统来控制流体和压力, 再应用该钻井技术钻井, 和常规钻井技术相比, 还具有以下优点: 1) 下套管柱不必压井; 2) 排除了钻井液漏失进入地层的可能性; 3) 改进了注入能力、井眼清洁效果、油井存在的注水泥作业和水泥胶结测井问题。

套管欠平衡一体化是一项先进的钻井技术, 不仅节约时间和成本, 还可以有效地保护储层, 有望成为将来用于老油田开发的主要钻井技术。

〔闫循彪摘译自 World Oil, June, 2006〕

亚洲第一深井——塔深 1 井完钻

由中国石化华北石油局承钻的目前亚洲第一深直井——塔深 1 井, 近日顺利钻达设计井深 8 408 m 后完钻。

塔深 1 井是中国石化集团为尽快实施西部石油资源接替战略和建设千万吨级塔河大油田而部署的第一口超深探井, 位于塔里木盆地阿克库勒凸起东南部, 初始设计井深 8 000 m, 后加深钻至井深 8 408 m。在该井施工过程中, 技术人员解决了奥陶系碳酸盐岩地层漏失严重和深部寒武系地层温度压力高等一系列世界性技术难题, 创造了多项国内外超深井钻探工程的新纪录。