

高温高压井测试管柱变形增量计算模型^{*}

高宝奎^{**} 高德利

(石油大学 北京)

高宝奎等. 高温高压井测试管柱变形增量计算模型. 天然气工业, 2002; 22(6): 52~54

摘 要 在油气井测试过程中, 为了保证测试安全, 必须准确掌握油管的轴向力与变形情况。测试油管下部因受压会发生螺旋屈曲, 并与套管接触产生摩擦力。屈曲后油管进一步变形时, 油管轴向力与变形的关系非常复杂。常规计算方法没有考虑摩擦力对变形的影响, 其结果不适用于高温高压井测试管柱安全分析。文章经过把塑性力学应力—应变关系与油管轴向力—变形关系进行对比, 提出了用塑性力学增量理论的思想, 来计算油管轴向力与变形的增量计算模型。通过现场应用, 证明了这种计算方法的科学性和实用性。

主题词 增量理论 测试 油管 变形 摩擦力

本文根据高温高压井测试特点, 建立了基于测试操作过程的测试管柱变形增量计算模型, 并编制了相应计算软件。经多口高温高压井成功应用, 证明本文模型是合理的, 能够满足工程安全需要。

基于操作工况的管柱变形增量计算模型

1. 油管弯曲与摩阻基本计算公式

在测试过程中, 油管在自重、温度、内外流体压力及其它因素影响下, 受压段可能发生螺旋屈曲。屈曲后油管与井壁接触, 引起摩擦力。轴向压力越大, 屈曲越严重, 摩擦力也就越大。取井口处为坐标原点, 向下为正, 轴向力以压力为正, 如图1。

设油管横截面真实轴向力为 F_a , 定义有效轴向力为^[1]

$$F_f(x) = F_a(x) + p_i(x) A_i - p_o(x) A_o \quad (1)$$

式中: p_i 为油管内液体压力, MPa; p_o 为油管内液体压力, MPa; A_i 为油管内圆截面积, m^2 ; A_o 为油管外圆截面积, m^2 。

式(1)为油管发生屈曲变形的判别依据。当 $F_f(x) > 0$ 时, 油管发生屈曲, 否则不发生屈曲。螺旋屈曲使长度为 x 的油管段轴向缩短量为

$$d(x)_{hel} = \frac{F_f r^2}{4EI} x \quad (2)$$

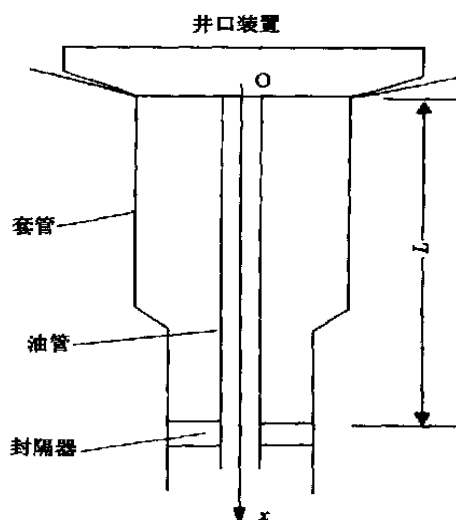


图1 测试管柱示意图

式中: r 为油管与套管之间的间隙(套管内半径 - 油管外半径), m; EI 为油管抗弯刚度, $kN \cdot m^2$; x 为油管微段长度, m。

螺旋屈曲引起单位长度油管与套管接触力^[1]

$$N = \frac{r F_f^2}{4EI} \quad (3)$$

接触力 N 乘以摩擦系数 μ , 得单位长度油管与套管间摩擦力

^{*} 本文属国家“863 攻关课题”“高温超压测试技术”(课题编号: 863/820-07-03)研究成果。

^{**} 高宝奎, 1965年生, 高级工程师; 1987年于兰州大学获学士学位, 1992年于清华大学获硕士学位。现从事油气井钻井完井工程方面研究工作。地址: (102200) 北京市昌平区石油大学石油天然气工程学院。电话: (010) 89733702。E-mail: cgdli@www.bjpeu.edu.cn

$$h = \mu N \quad (4)$$

2. 管柱变形特点

测试过程包括管柱下入、射孔、开井流动、关井恢复压力等多个操作步骤,每次对测试工具进行操作,都不同程度地改变管柱的受力与变形状态。后续操作的轴向力变化及轴向变形,是在前面操作的力与变形基础上发生的。如果前面的操作使管柱发生了螺旋变形,那么相应的摩擦力就会制约后续的变化。所以管柱变形具有如下特点:

1) 随着施工步骤的进行,管柱轴向力有时增加,有时减小,摩擦力的大小和方向也会发生变化。假如在某一时刻管柱具有初始温度、压力及受力变形状态,温度、压力经过一番变化后又回到初始值,由于摩擦力的作用,油管受力与变形并不一定能同时回到初始状态。

2) 从井口到封隔器的距离不变,因此新发生的螺旋屈曲效应、膨胀效应、活塞效应、轴向力变化、温度效应等引起的轴向伸缩变形,必须满足轴向总长度的协调性。

以上两点说明,油管在测试过程中的变形,不仅与初始状态有关,还与不同操作工况中温度、压力、流量等参数变化细节有关,因而变形与轴向力不总是——对应。

3. 基于操作过程的增量计算模型

测试油管轴向力—变形关系与塑性力学应力—应变关系具有很大相似性。本文把塑性力学中计算变形的增量理论^[2]引入到高温高压井测试油管变形的计算,用于计算操作工况变化时油管变形,并称之为基于操作过程的管柱变形增量计算方法。该方法的实质是,在前一个操作已有的管柱受力与变形基础上,把后续的实际载荷用增量的形式进行描述,求出每一载荷增量引起的变形,并最终得到下一个操作结束时管柱的受力与变形。

模型应用方法分析

1. 工程问题处理步骤

以增温为例。对测试管柱来说,增温是一种加载方式。如果变形自由,那么温度引起的轴向应变为 $\epsilon_T = T$, 其中 α 为材料热膨胀系数, T 为温度变化量。对于有初始弯曲的油管,各点变形和受力不一致,变温后无法用解析式表达轴向力,为此采用增量加载方法。假设 $x = 0$ 、 $x = L$ 两点管柱不上下移动,则可按如下步骤分析:

1) 增温加载增量处理。把总增温 $\Delta T = T(x)$ 分

为 n 个连续的微增温 $dT = T/n$, 计算出每一个微增温的变形状态,再计算下一个微增温。

2) 油管局部平衡计算。在油管上 $x = x_0$ 点取一长度微元 dx , 设微元上下端固定。微增温 dT 使微元伸长 $d(\epsilon_T) = \alpha dx = dT \alpha dx$ 。设微元产生附加轴向压力 F_T , F_T 使微元轴向缩短 $d(\epsilon_T) = \frac{F_T}{EA_c} dx$, 式中 E 为弹性模量, A_c 为管柱横截面净面积。 F_T 同时引起屈曲加剧 ($F_f(x) > 0$ 时), 使轴向缩短 $d(\epsilon_T)_b = \frac{F_T r^2}{4EI} dx$ 。由两端固定假设得 $d(\epsilon_T) - d(\epsilon_T)_b - d(\epsilon_T)_b = 0$

$$\text{整理得 } F_T = dT / \left(\frac{1}{EA_c} + \frac{r^2}{4EI} \right) \quad (5)$$

式(5)结果是在微元端点在变温时不上下移动假设下得到的,对各点都适用。各点变温后,原摩擦力大小方向不变,轴向力变为

$$F(x, dT) = F(x) + F_T \quad (6)$$

3) 轴向力间断增量处理。由式(5)、式(6)发现,如果沿管柱的轴向各点变温相同,则附加轴向压力相等,微元不会上下移动。否则,相邻微元轴向力会出现间断,微元不上下移动的假设不成立,计算时需要对轴向力间断进行增量处理,直到满足力学平衡。

4) 油管变形协调处理。对轴向力间断进行处理是与油管的变形协调性同时进行的。变形的协调性必须同时考虑如下问题: 轴向力变化引起的变形; 温度应变; 原有屈曲段油管的进一步变形; 新出现的油管屈曲段长度及其轴向变形; 摩擦力大小与方向的变化。

5) 变径点轴向力增量处理。一般井眼套管上段井径大,即 $d_u > d_L$, 由式(5)可知,增温引起的轴向力 $F_{Tu} < F_{TL}$, 因此在变径点附近管柱轴向力有较大变化。计算时需要将轴向力突变 ($F_{TL} - F_{Tu}$) 分解为若干微增量,进行增量计算,直到达到力学平衡,此时会出现轴向力曲线不光滑。

2. 计算模型实用性举例

假设某井封隔器坐封深度 4 000 m, 距封隔器 400 m 以上井径扩大,环隙从 5 cm 增加到 7.5 cm, 油管外径 88.9 mm, 内径 70.2 mm, 摩擦系数 $\mu = 0.2$, 热胀系数 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 变温前油管底部弯曲段长 1 000 m。经计算得温度变化后轴向力曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,温度升高产生三方面影响: 油管弯曲段增长,温度升高 50 后,屈曲长度由起初 1 000 m 增加到 2 500 m 以上; 管柱轴向力增大;

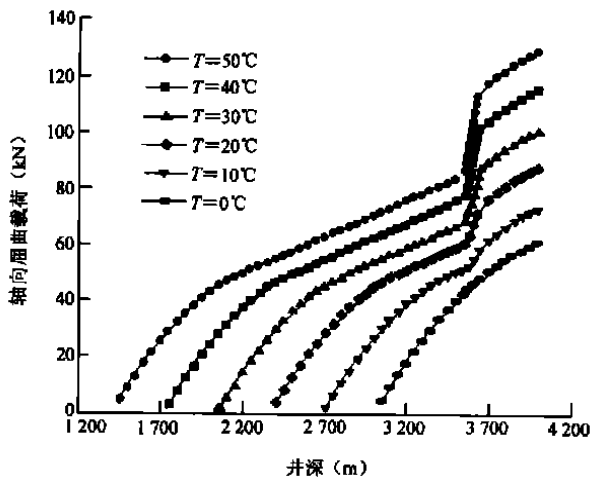


图 2 升温对油管轴向力的影响

在井径变化点,增温引起轴向力出现间断。由于摩擦力作用,重新分布的轴向力变化不平滑。温度变化越大,这种现象越明显。如果不考虑摩擦力影响,图 2 中的每条曲线都会变成直线,并且不存在距封隔器 400 m 处的轴向力不平滑现象。

模型验证与现场应用结果

1. 模型验证

为了检验本计算方法的准确性,首先选择了 5 口常温常压井进行验证。验证的方法是,在测试管柱的下端和上端分别安装一个测力短节,测量管柱

轴向力。把上端测得的轴向力作为已知量,推算下端轴向力,然后与实测的下端轴向力进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 计算方法现场验证数据表

井号	实测井口 轴向力(kN)	实测井底 轴向力(kN)	推算井底 轴向力(kN)	相对误差 (%)
1	64	- 147	- 145.26	- 1.18
2	102	- 127	- 123.78	- 2.52
3	136	- 128	- 125.67	1.82
4	188	- 168	- 170.77	1.65
5	190	- 132	- 130.30	- 1.30

2. 现场应用结果

应用本模型对新疆和南海 4 口高温高压井的测试管柱进行了安全设计,在测试过程中,测试管柱没有发生任何问题,证明了本文计算模型的科学性与实用性。

参 考 文 献

1 Mitchell R F. Comprehensive analysis of buckling with friction. SPE DE, Sep. 1996:178 ~ 184
2 徐秉业. 塑性力学. 北京:高等教育出版社,1988

(收稿日期 2002 - 03 - 28 编辑 钟水清)

泥浆液位监控报警系统通过试验验收鉴定

泥浆液位监控报警系统,俗称泥浆液位“黑匣子”,采用计算机控制,能自动监测和定时记录钻井全过程的泥浆液位,尤其能在井筒泥浆液位出现异常时,及时进行井涌或井漏异常显示报警,有利于石油天然气、地质矿产、盐业行业等钻井安全生产。该项技术由四川省资中恒生机械有限责任公司开发,并于 2001 年申请中国发明专利。

四川省资中恒生机械有限责任公司研制的 N YJ 2000 型泥浆液位监控报警系统样机于 2002 年 6 月 20 日至 7 月 31 日在川中营山一号预探井进行了全井工业试验,并于 8 月 1 日通过了四川石油管理局川中石油天然气勘探开发公司的验收鉴定。在营山一井工业试验中,7 月 23 日钻达井深 2 078.27 m 时发生井涌,N YJ 2000 系统及时有效地显示预报油气井涌一次;次日井深 2 093.57 m 起钻过程中,使用 N YJ 2000 系统自动灌注泥浆,有效地保持了井筒压力平衡;尤其是在下钻到底循环泥浆排除后效过程中出现井漏时,及时有效的井漏报警,比同井场使用的综合录井仪井漏信息提前 25 分钟,井筒漏失量数据实时跟踪观察,为井筒漏失处理提供了可靠依据。该装置具有操作简便,资料记录准确及时,显示报警形象直观等特点,在井涌、井漏等复杂情况下能及时、准确报警,起下钻、下套管能自动定时定量灌浆,井筒压力平衡能达到理想效果。

根据石油钻井井口控制的需要,该新型钻井安全生产用的 N YJ 2000 系统产品已完善定型,准备小批量试生产,投放钻井现场使用。

(邓福泉 供稿)

Feng Guoqing, Chen Jun and Zhang Liehui (Southwest Petroleum Institute) and Feng Yi 'yong (South Sichuan Gas Field, Southwest Oil and Gas Field Branch, PCL). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 6, pp. 48 ~ 51, 11/25/2002. (ISSN1000-0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: Genetic algorithm is a novel optimizing method with the character of global optimization and it is suitable for solving the problems of non-linear optimization. In recent years, it has been successfully applied to many fields, such as optimal solution of complex function, structure optimal design, adaptive control, system control and pattern recognition, etc. The genetic algorithm was introduced into optimal log interpretation by the authors, in other words, the optimal log interpretation was realized by use of the genetic algorithm. The questions about multi-parameter and nonlinear optimum log data processing were studied by fully applying the character of global optimization of the genetic algorithm. On the basis of fully discussing conventional genetic algorithm theory, it is pointed out in the paper that the conventional genetic algorithm was improved from two aspects: introducing non-time-homogeneous genetic algorithm in light of the severe non-convergence of the conventional time-homogeneous genetic algorithm; and in combination with integral simulation annealing algorithm, introducing dynamic record window technique in order to solve the problem of pre-mature convergence. Through forward model simulation operation and practical log data interpretation, it is shown that the genetic algorithm improved is much easier to be converged, by which the multi-parameter and nonlinear optimum log data interpretation may be well studied.

SUBJECT HEADINGS: Log interpretation, Optimization, Mathematical model, Simulation, Example

Feng Guoqing (*Doctor*), born in 1974, is mainly engaged in the teaching and research on oil and gas field development engineering. Add: Nanchong, Sichuan (637001), China Tel: (0817) 2642052

INCREMENTAL CALCULATION MODEL OF TESTING STRING DEFORMATION IN A HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRESSURE WELL

Gao Baokui and Gao Deli (University of Petroleum Beijing). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 6, pp. 52 ~ 54, 11/25/2002. (ISSN1000-0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: In the process of oil and gas well testing it is

imperative to know well the tubing deformation related to its axial force in order to ensure the safety in testing. Spiral buckle can be formed at the lower part of the tubing because of forcing, then the frictional force will be produced when the spiral buckle is in contact with the casing. While the tubing buckled is further deformed, the relation between the tubing axial force and its deformation is very complicated. The influence of the frictional force on the deformation wasn't considered in conventional calculation method, therefore its result calculated wasn't suitable for safety analysis of the testing string in a high-temperature and high-pressure well. In the paper, through contrasting plasticity stress-strain relation with tubing axial force-deformation relation, it is put forward that an incremental calculation model of computing tubing axial force and deformation may be set up on the basis of plasticity increment theory. The scientific property and practicality of such a calculation method were proved out by means of on-site application.

SUBJECT HEADINGS: Increment theory, Testing, Tubing, Deformation, Frictional force

Gao Baokui (*senior engineer*), born in 1965, received his Bachelor's degree from Lanzhou University in 1987 and his Master's degree from Qinghua University in 1992. Now he is engaged in the research on oil and gas drilling and completion engineering. Add: Changping District, Beijing (102200), China Tel: (010) 89733702

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CASING DAMAGE IN PLASTIC FLOW FORMATION

Lian Zhanghua, Liu Gan and Tang Bo (Southwest Petroleum Institute) and Dong Fan and Li Yuan (No. 5 Oil Production Plant of North China Oil Field). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 6, pp. 55 ~ 57, 11/25/2002. (ISSN1000-0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: Through setting up an elastic-plastic finite element mechanical model expressing the interaction among casing, cement mantle and formation, a series of simulating research were carried out for the complicated mechanical system mentioned in the paper by use of the MSC. Marc software with high nonlinear function, thus providing a simple, convenient and feasible method for studying the casing damage mechanism in complex formations. Moreover the overlying formation load inversion may be done by use of this method, thus providing theoretical basis for taking preventive measures against the casing damage in complex formations.

SUBJECT HEADINGS: Casing, Mechanical model, Finite element, Rock, Analysis