

钻杆管体体积型缺陷的有限元分析*

韩晓毅** 张平生 刘玉标 申仲翰

(中国石油天然气集团公司管材研究所) (中国科学院力学研究所)

摘要 利用有限元软件,采用三维线性静态方法,对常用的 $\phi 127\text{mm IEU}$ 钻杆在常见的 11 种蚀坑类型下的应力分布进行了计算。计算结果显示钻杆管壁常见蚀坑的应力集中系数在 1.5 ~ 2.5 之间,拉伸和弯曲载荷作用下蚀坑应力分布基本一致,弯曲载荷的分析完全可以采用拉伸载荷结果来替代。对一系列的计算结果通过最小二乘法拟合出蚀坑应力集中系数随蚀坑深度和宽度的数学关系表明,拟合曲线与计算结果有非常好的一致性。

关键词 钻杆缺陷 有限元分析 应力集中系数

钻杆在使用或存放过程中,常在表面产生蚀坑,从而导致局部应力集中,诱发腐蚀疲劳裂纹并降低极限承载能力。进行钻杆适用性评价需要研究钻杆管体体积型缺陷部位的应力分布、应力集中系数及极限承载能力等,主要应解决以下问题:

(1) 含表面体积型缺陷的钻杆管体应力集中及轴向极限载荷分析;

(2) 在弯曲载荷下,钻杆内加厚过渡带及管体内、外表面在体积型缺陷处的应力集中分析。

笔者对常用的 $\phi 127\text{mm IEU}$ 钻杆^[1]存在常见蚀坑类型下的应力分布进行分析计算,并通过最小二乘法拟合出蚀坑应力集中系数与蚀坑深度和宽度的数学关系。对以往因腐蚀疲劳开裂而失效钻杆大量案例的统计分析表明,钻杆表面蚀坑尺寸主要为:宽度 $d = 1 \sim 7\text{mm}$,深度 $h = 1 \sim 3\text{mm}$, $d/h = 2 \sim 5$ 。根据上述数据,计算了 11 种蚀坑的应力集中状态和极限承载能力。

计算模型和方法

1. 有限元模型

由于蚀坑尺寸相对钻杆内径来说非常小,所以

只取钻杆包含蚀坑的一部分作为有限元模型,这样可以减少计算量并提高计算精度。其中切开后的边界条件采用轴对称边界条件,即沿周向位移固定、径向位移自由并约束外经处的径向位移,这一模型对于拉伸和弯曲的模拟有足够的精度,模型尺寸如图 1 所示。蚀坑处于过渡带的消失处,采用半球模型模拟蚀坑。

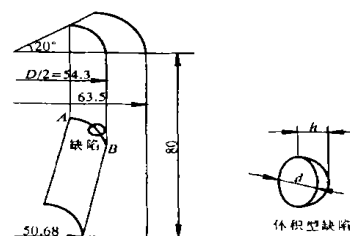


图 1 钻杆过渡带体积型缺陷计算模型尺寸
蚀坑局部采用三角形锥体单元,采用 MSC/ARIES 的自动网格划分,根据蚀坑大小调整单元尺寸,外部区域采用四变形立体单元,计算采用线性解法,典型蚀坑有限元网格如图 2 所示。

2. 外载和边界条件的模拟

拉伸:小端施加均匀分部应力 $\sigma = 100\text{MPa}$,过渡带一端固定。

弯曲:小端施加沿厚度线性分布的应力,为了

* 本项目为中国石油天然气集团公司“九五”科技攻关课题。

** 韩晓毅,高级工程师,生于 1968 年,1989 年毕业于陕西工学院金属材料专业,1995 年毕业于西北工业大学腐蚀与防护专业,获硕士学位,现从事石油管材及装备的安全评价和研究工作。地址:(710065)陕西省西安市。电话:(029) 8214211 - 3405。

(收稿日期:2001 - 09 - 24;修改稿收到日期:2002 - 01 - 04)

和拉伸对比，在中径处的应力 $B = 100\text{MPa}$ ，过渡带一端固定。

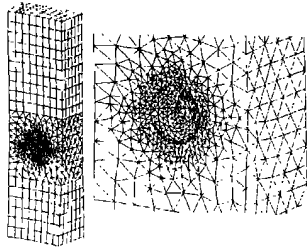


图2 典型的钻杆过渡带体积型缺陷有限元网格模型

计算结果

笔者计算的 11 种蚀坑尺寸在拉伸载荷作用下应力集中系数和极限承载力系数见表 1。

表1 $\phi 127\text{mm}$ 钻杆体积型缺陷应力集中系数计算值

缺陷序号	d/mm	h/mm	d/h	应力集中系数 S_t	极限承载力系数 P_t
1	2.0	1.0	2	2.1075	0.5639
2	3.0	1.0	3	1.9075	0.5938
3	4.0	1.0	4	1.8252	0.6657
4	5.0	1.0	5	1.7513	0.6707
5	6.0	1.0	6	1.8128	0.6603
6	4.0	2.0	2	2.1671	0.5383
7	5.0	2.0	2.5	2.0000	0.5927
8	6.0	2.0	3	1.9625	0.5938
9	7.0	2.0	3.5	1.9969	0.6071
10	6.0	3.0	2	2.2017	0.5299
11	7.0	3.0	2.3	2.0901	0.5604

其中应力集中系数定义为

$$S_t = \sigma_{1\max} / \sigma_s \quad (1)$$

极限承载力定义为蚀坑局部发生屈服时外加拉伸应力的数值。极限承载力系数定义为

$$P_t = P_t / \sigma_s \quad (2)$$

$$\text{极限承载力} = P_t \sigma_s \quad (3)$$

式中 σ_s ——材料拉伸屈服极限；

$\sigma_{1\max}$ ——蚀坑局部主应力最大值；

σ ——外加拉伸应力；

$\sigma_{\text{Von-Mises}}$ ——工程中判定材料屈服的一种等效应力^[2]，其定义为

$$\sigma_{\text{Von-Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

其中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——三向应力。

根据计算结果，设定应力集中系数和蚀坑尺寸按如下的数学关系可以较好地描述计算数据。

$$S_t = \frac{a}{(d/D)^2} + b + c \left(\frac{h}{t} \right) \quad (4)$$

式中 d ——蚀坑宽度；

h ——蚀坑深度；

D ——钻杆内径；

t ——钻杆壁厚；

a, b, c ——待定系数。

对于 $\phi 127\text{mm IEU}$ 钻杆， $D = 108.6\text{mm}$ ， $t = 9.2\text{mm}$ ；通过最小二乘法拟合获得系数 a, b, c 分别为 0.001, 1.497, 1.884。

其中拟合曲线和计算值如图 3 所示。

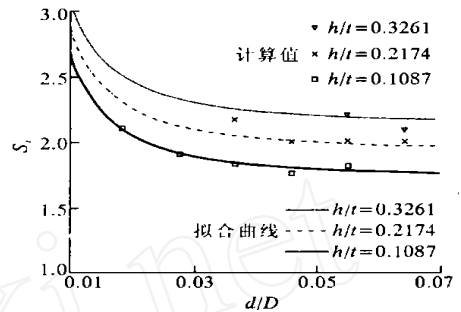


图3 钻杆过渡带体积型缺陷应力集中系数和缺陷尺寸的关系

由图 3 可以看出公式 (4) 与计算结果有非常好的一致性。在同一深度条件下，随着蚀坑宽度的增加，坑底应力集中系数减小；在同一宽度条件下，随着蚀坑深度的增加，坑底的应力集中系数增大。

还进行了含蚀坑的钻杆拉伸和弯曲的对比分析计算，结果表明这两种载荷对蚀坑应力分布的影响基本一致，因此弯曲载荷的分析完全可以采用拉伸载荷来替代。

结 论

- (1) 钻杆管壁常见蚀坑的应力集中系数在 1.5 ~ 2.5 之间；
- (2) 钻杆管壁蚀坑应力集中系数和蚀坑几何尺寸的关系可用式 $S_t = \frac{a}{(d/D)^2} + b + c \left(\frac{h}{t} \right)$ 表示。
- (3) 拉伸和弯曲载荷作用下蚀坑的应力分布基本一致，因此弯曲载荷的应力分析完全可以采用拉伸载荷来替代。

参 考 文 献

- 1 美国石油学会标准 . API Spec 5D (第 3 版) . 1992
- 2 陈昌麒 . 材料科学中的固体力学 . 北京 : 北京航空航天大学出版社 , 1994 : 188 ~ 194

(本文编辑 李学富)

similar advanced Products in the world. It is comprised of two parts, the electronics circuit and the sonde. The structure of the SHDT sonde is described, and the operating principle of its hydraulic system is expounded. The SHDT was used in several oil fields in China, and satisfactory effect has been achieved.

Subject Concept Terms SHDT sonde structural analysis hydraulic system
operation principle

Peng Yong (*Mechanical Engineering School of Xi 'an Petroleum Institute, Xi 'an*). Analysis of plunger overstroke of wire rope oil pumping system. *CPM* 2002, 30(4) : 13 ~ 16

By using the technique of predicting the performance of sucker rod string, the overstroke of the plunger of both the steel rod pumping system and the wire rope continuous rod pumping system. The influence of the main oil well working parameters on the plunger overstroke is analyzed. It is pointed out that the overstroke of the pump plunger in the continuous rod pumping system is easier to be realized compared with that of the steel rod system when the operating parameters of the well are appropriate. To increase the output of the continuous rod pumped wells, long stroke and reasonable pumping speed and minor pump diameter should be selected, and the rod and the wire rope should be matched well.

Subject Concept Terms wire rope continuous sucker rod rod pumping system
subsurface pump overstroke

Lu Yi (*Mechanical Engineering Institute of Yanshan University Qinhuangdao City Hebei Province*), Tatu Leinonen. **Analysis of stroke - increasing and force - reducing mechanism of pumping unit with Watt linkage.** *CPM*. 2002, 30(4) : 17 ~ 19, 44

Based on the crank linkage of conventional beam pumping unit, 3 kinds of Watt linkages are constructed, which have the functions of stroke - increasing, mechanical reverse and driving force balancing. Force analysis on the linkages is conducted, and formulas for calculating the stroke, mass of counterbalance and vertical driving force of the pitman are derived. Analysis and comparison shows that the stroke of the pumping unit with Watt linkage is larger than that of the conventional beam pumping unit, while the vertical driving force of the pitman is minor. Finally the 3 kinds of Watt linkages are compared.

Subject Concept Terms pumping unit linkage stroke - increasing balance

Han Xiaoyi (*Tubular Goods Research Center CNPC Xi 'an*), Zhang Pingsheng, Liu Yubiao, et al. **Finite element analysis of defects in drill pipe body.** *CPM*, 2002, 30(4) : 20 ~ 21

By using finite element analysis software and 3 - D linear static method, the stress distribution on the 127mm IEU drill pipe with various corrosion pits is investigated. The calculation results show that the stress concentration coefficient of the pits in the pipe wall is 1.5 ~ 2.5, and the stress distribution under the action of tensile load is appropriately identical to that under the action of bending load. Therefore analysis on the bending load can be replaced by the tensile load analysis. By using the least square method, the mathematical relation between the stress concentration coefficient and the depth and width of the pits is worked out.

Subject Concept Terms drill pipe defect finite element analysis
stress concentration coefficient

Li Liang (*College of Civil Engineering and Architecture North China University of Technology Beijing*), Li Zengliang, Yan Tingjun. **Mechanical analysis of A - shaped derrick with ANSYS5.4.** *CPM*, 2002, 30(4) : 22 ~ 24

Based on the design features of A - shaped derrick (taking Model JJ300/43 - A derrick as an example) and by using ANSYS5.4, the actual derrick structure is idealized as an assembly of space plate element and space beam element, thereby the natural vibration characteristics, dynamic response and stability of the derrick are analyzed.