

# 钻机井架安全承载能力评定方法研究<sup>\*</sup>

韩东颖<sup>1</sup> 周国强<sup>2</sup> 李子丰<sup>1</sup>

(1.燕山大学机械工程学院 2.大庆石油学院秦皇岛分院石油井架检测国家计量认证重点实验室)

韩东颖等. 钻机井架安全承载能力评定方法研究. 天然气工业, 2007, 27(1): 81-84.

**摘要** 钻井是石油天然气勘探与开发的一个重要环节, 钻机井架作为钻井设备的关键部分, 其承载性能直接关系到整套钻机系统的安全运行。为了准确评定出钻机井架的安全承载能力, 提出了以测试应力为基准定量评定含损伤缺陷钻机井架安全承载能力的新方法。首先建立了以测试应力为基准的参考应力修正数学模型, 其次推导出以截面锈蚀、杆件初弯曲、载荷偏心等主要损伤缺陷指标所确定的修正函数, 得到真实反映含损伤缺陷钻机井架力学行为的数值修正模型, 实现对安全承载能力的预测。对现场某型号钻机井架进行逐级加载试验, 得到了载荷与应力的关系曲线; 结合现场钻机井架实际的损伤缺陷状况修正数值模型, 并进行了数值仿真模拟加载试验, 实测值与仿真值误差在5%以内, 验证了该数值模型的准确性。最后根据仿真预测结果对该井架安全承载性能进行了评定, 为提高油气勘探开发过程中钻机系统的安全运行提供了参考。

**关键词** 钻井 钻机井架 测试应力 损伤缺陷 修正模型 评定方法

勘查油气藏, 开采石油、天然气, 广泛应用钻机打勘探井、深井取心井、生产井和注水井, 钻井过程中钻机系统的安全运行十分重要。井架作为钻机系统中的关键部分, 其安全性能<sup>[1]</sup>直接关系到整套钻机系统的安全生产, 现已被纳入评价钻机体系安全运行的项目之中。在长期生产使用过程中, 由于拆装、运输、超载和腐蚀等各种因素的影响, 井架各杆件、杆件间连接及整体都会出现不同程度的损伤缺陷, 这些损伤缺陷使井架的承载能力低于原设计, 导致安全载荷的未知, 造成生产安全隐患。为确保钻机钻井过程的安全运行, 准确评定钻机井架承载能力意义重大。

目前, 国外对钻机井架的安全评定偏重于外观检测、简易诊断和一般处置与预防等3个方面<sup>[2]</sup>。从检测的内容来看, 主要是井架杆件的变形、损伤、磨损、腐蚀等, 诊断结论多偏重于定性分析, 处理与预防也不够具体。国内对钻机井架承载性能的研究大致可分为以强度、刚度<sup>[3]</sup>、可靠性<sup>[4]</sup>、稳定性<sup>[5]</sup>为主的评定方法。由于井架结构本身是复杂的空间刚架或桁架结构, 其缺陷特征又复杂多样, 目前这些评定理论均无法给出精确评定结果。本文提出的方法是通过井架现场静、动载试验, 测量井架的应力、位移及损伤缺

陷程度, 以测试应力为参考等效井架的损伤缺陷并结合计算机仿真实验来定量评定井架的承载能力。

## 一、井架评定修正模型的建立

井架杆件应力作为综合评定参量是反映井架杆件乃至整体损伤缺陷的重要指标。测试井架杆件的应力, 通过对井架杆件的应力修正能够反映井架的各种损伤缺陷, 经过数值计算分析和长期的现场测试评定工作经验可得出井架立柱的参数对于井架承载性能有较大的影响。本文以测试井架立柱的应力为参考来修正井架数值模型, 评价井架承载性能。

### 1. 参考应力数学模型

对于压弯杆件, 轴向应力可通过横截面积体现, 弯曲应力可通过弯曲刚度<sup>[6]</sup>体现。对以应力为参考的修正式可等效为对杆件横截面积和弯曲刚度的修正关系式, 表示如下:

$$A_e = f_1(\alpha, \beta, \gamma, \dots) A_t \quad (1)$$

$$I_e = f_2(\alpha, \beta, \gamma, \dots) I_t \quad (2)$$

式中:  $A_e$  为钻机井架杆件等效横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $A_t$  为理想横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $I_e$  为杆件的等效抗弯惯性矩,  $\text{m}^4$ ;  $I_t$  为理想抗弯惯性矩,  $\text{m}^4$ ;  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  为损伤缺陷影响指标;  $f_1(\alpha, \beta, \gamma, \dots), f_2(\alpha, \beta, \gamma, \dots)$  为由损伤缺

<sup>\*</sup> 本文系中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(编号:03B209000)。

**作者简介:** 韩东颖, 女, 1978年生, 博士研究生; 从事石油井架安全承载能力评定与结构损伤识别技术研究。地址: (066004) 河北省秦皇岛市河北大街西段550号井架室。电话: (0335) 8065822。E-mail: dongying.han@163.com

陷影响指标所确定的对横截面积与抗弯惯性矩的修正函数。

以杆件应力为参考,钻机井架损伤缺陷的修正关系可用下式表示:

$$\alpha = f_i(\alpha, \beta, \gamma, \dots) \sigma_m \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

式中:  $\sigma_m$  为钻机井架杆件实测参考应力, MPa;  $\alpha$  为无损缺陷钻机井架相应杆件数值模拟计算应力, MPa;  $\alpha, \beta, \gamma, \dots \in [0, 1]$  且当  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  均为零时,  $f_i(\alpha, \beta, \gamma, \dots) = 1$ , 表示杆件无损缺陷。

### 2. 损伤修正函数

钻机井架的损伤缺陷类型很多, 本文主要讨论3种最常见的损伤缺陷形式, 包括材料表面锈蚀、杆件初弯曲和载荷偏心。

假定  $\alpha$  为截面锈蚀损伤指标, 当  $\alpha \neq 0$ , 其余影响指标均为零时, 表示只有截面锈蚀, 不包含其他损伤缺陷, 以此类推。

#### (1) 截面锈蚀损伤指标修正函数

假设杆件的横截面形式如图1所示。截面锈蚀后的截面积为:

$$A_e = 2b't' + (H' - 2t')d' \quad (4)$$

原横截面积为:

$$A_i = 2bt + (H - 2t)d \quad (5)$$

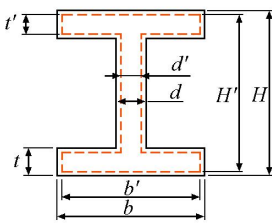


图1 钻机井架立柱截面示意图

由截面锈蚀指标确定的修正函数为:

$$f(\alpha, 0, 0, \dots) = \frac{2b't' + (H' - 2t')d'}{2bt + (H - 2t)d} \quad (6)$$

其他截面形式推导与此相似。

#### (2) 杆件初始弯曲损伤指标修正函数

钻机井架杆件不同程度地存在着附加弯曲应力, 从而使杆件的纵向刚度大为减少, 使钢结构承载能力降低。设杆件初弯曲如图2所示, 假设初弯曲形式为:

$$y_0 = f_0 \sin \frac{\pi x}{l} = Cl \sin \frac{\pi x}{l} \quad (7)$$

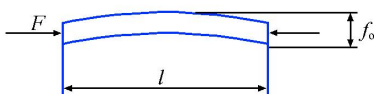


图2 杆件初弯曲示意图

式中:  $y_0$  为杆件初弯曲挠度, m;  $f_0$  为现场测得的初弯曲矢高, m;  $l$  为杆长, m。  $C = f_0 / l$  为初弯曲矢高与杆长  $l$  之比。

当钻机井架杆件受到轴力  $F$  作用后, 其弯曲形式变为:

$$y = \frac{Cl}{1-a} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (8)$$

式中:  $a = \frac{F}{\left(\frac{\pi^2 EI}{l^2}\right)} = \frac{\alpha \lambda^2}{\pi^2 E}$ ,  $F$  为轴向力, N;  $E$  为弹性

模量, N/m<sup>2</sup>;  $I$  为截面惯性矩, m<sup>4</sup>;  $\lambda$  为杆件长细比。

$$\begin{aligned} \delta_w &= \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dy_0}{dx}\right)^2 dx \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \left[\frac{C\pi}{1-a}\right]^2 \cos^2 \frac{\pi x}{l} dx - \frac{1}{2} \int_0^l (C\pi)^2 \cos^2 \frac{\pi x}{l} dx \\ &= \frac{C\pi^2 la(2-a)}{4(1-a)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\delta_w$  为杆件受力后变形增大而产生的杆件轴向缩短, m。

$$\delta_v = \frac{FL}{EA} \quad (10)$$

式中:  $\delta_v$  为由轴力引起的杆件轴向缩短, m。

$$\delta = \delta_w + \delta_v = \frac{C\pi^2 la(2-a)}{4(1-a)^2} + \frac{FL}{EA} \quad (11)$$

式中:  $\delta$  为受到轴力  $F$  作用后, 杆件实际的轴向缩短, m。

由杆件初弯曲指标确定的修正函数为:

$$\begin{aligned} f(0, \beta, 0, \dots) &= \frac{FL}{EA(\delta_w + \delta_v)} \\ &= \frac{d}{E \left[ \frac{FL}{EA} + \frac{C^2 \pi^2 la(2-a)}{4(1-a)^2} \right]} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{C^2 \lambda^2 (2-a)}{4(1-a)^2}} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\lambda = \sqrt{\frac{L}{r}}$ ,  $r$  为截面回转半径, m。

#### (3) 载荷偏心修正函数

现场作业的井架, 由于天车台安装不对中及死快绳等因素的影响, 井架立柱本身就承受不平均的承载; 另外钻机井架在钻进、起下钻过程中, 所承受的都是时变的动载荷, 通过大钩作用在井架上的载荷就不恒是平均分配的载荷, 井架杆件应力重新进行分布, 井架的承载性能也随之发生相应变化。能够正确地反映出井架杆件的应力随载荷偏心的变化的关系对于评价井架的承载能力十分必要。

定义  $\gamma_m$  为测试偏载系数,  $\gamma_m = F_m / F_m$ ;  $\gamma_i$  为初

始理论计算偏载系数,  $\gamma = F_t / F_{ta}$ ;  $\gamma_e$  为实际偏载系数, 当无其他损伤缺陷时,  $F_{ma} = F_{ta}$ , 则:

$$\gamma_e = \gamma_m / \gamma = F_m / F_t \quad (13)$$

式中:  $F_m$  为测试轴向力, N;  $F_{ma}$  为测试轴向平均力, N;  $F_t$  为理论计算轴向力, N;  $F_{ta}$  为理论计算平均轴向力, N。

实测应力可表示为:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_m} = \frac{\gamma_e F_t}{A_m} = \frac{F_t}{A_m / \gamma_e} = \frac{F_t}{A_e} \quad (14)$$

式中:  $A_m$  为实测横截面积,  $m^2$ ;  $A_e$  为由载荷偏心确定的等效横截面积,  $A_e = A_m / \gamma_e$ ,  $m^2$ 。

计算理想应力为:

$$\sigma = F_t / A_t \quad (15)$$

实际载荷偏心系数与横截面积的关系为:

$$\gamma_e = \sigma_m / \sigma = A_t / A_e \quad (16)$$

所以由载荷偏心指标确定的修正函数为:

$$f(0, 0, \gamma, \dots) = \sigma / \sigma_m \quad (17)$$

根据现场钻机井架杆件的实际情况确定哪项指标起主要作用, 进而确定损伤修正函数。

## 二、现场试验及结果分析

### 1. 现场试验

对 ZJ50D 型钻机配套使用的 JJ315/45-K 型井架进行了现场测试。该井架高度为 45.0 m, 井架提升滑动系统为 6×7 轮系, 有效绳系为 12 根, 最大设计钩载为 3150 kN。对此井架进行外观查测得出: 井架底座基础水平满足规范要求, 没有发生不规则沉降; 立柱均无严重的弯曲变形, 基本没有锈蚀; 井架整体稍有前倾。

进行应力应变测试时在井架中下段和二层台的立柱上共布置了 32 个测点(如图 3 所示), 采用 40 通道的高精度数据采集系统及分析软件对井架进行静、动态测试, 相对于静态测试实验要求, 静动态测试对井场的试验条件要求并不是很高, 而且可以全程实时监测应力应变的变化情况, 提高测试过程中的可控性和测试的精度。测试时: 初始状态钩载指重表读数为 200 kN; 分 8 次逐级加载, 记录指重表读数分别为 525、1015、1500、2000、2550、2825、3000 kN 和 3200 kN。其中 1~8 号测点的测试数据曲线如图 4 所示, 中下段司钻对侧 5 号测点和二层台司钻对侧 21 号测点的测试数据曲线如图 5、图 6 所示。对测试曲线进行数据提取并通过相应的计算公式得到 32 个测点的应力应变。通过数据分析可得出井架前面立柱的应力明显大于后面立柱的应力, 司钻

对侧立柱的应力比司钻侧的要大些。因而本文只列举司钻对侧立柱应力及其仿真结果。

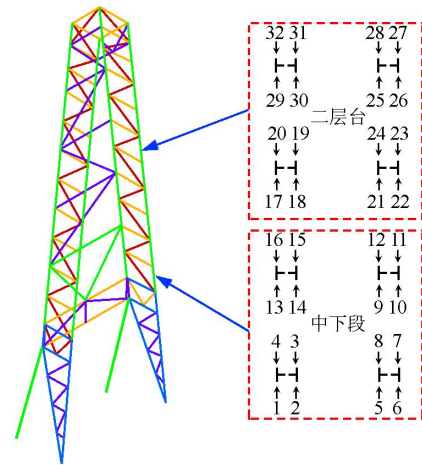


图 3 测点布置示意图

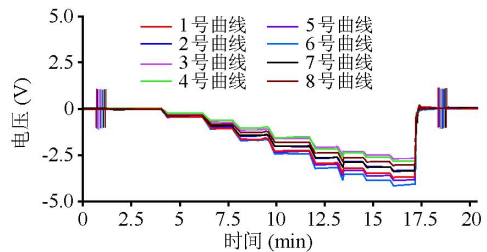


图 4 1~8 号测点测试数据曲线图

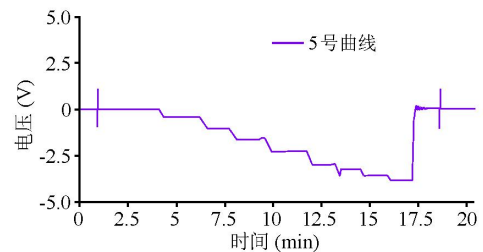


图 5 5 号测点测试数据曲线图

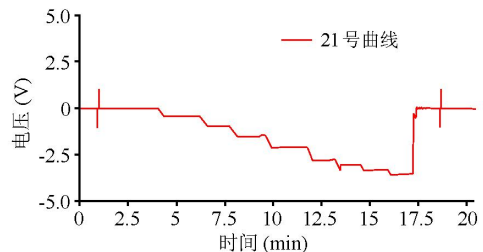


图 6 21 号测点测试数据曲线图

### 2. 数值仿真实验及结果分析

结合此井架的制造、安装和现场实际运行情况, 确定载荷偏心为此井架的主要损伤缺陷形式, 以测试应力为参考修正井架的数值模型, 对此井架进行了仿真实验。在预测计算中采用与实验过程中同样的阶梯性加载方式, 对各载荷下的应力值与相应位

置实时数据采集的测试应力值进行了比较。表1为实测立柱应力及仿真结果的比较,图7、图8分别为井架中下段司钻对侧前面立柱和井架二层台司钻对侧前面立柱测试应力及数值模拟值。

表1 实测立柱应力及仿真结果比较表

大钩载荷 (kN)	中下段司钻对侧前面立柱			二层台司钻对侧前面立柱		
	测试值 (MPa)	模拟值 (MPa)	误差 (%)	测试值 (MPa)	模拟值 (MPa)	误差 (%)
325	-12.54	-12.58	0.32	-11.43	-11.44	0.09
815	-30.93	-31.54	1.97	-27.46	-28.70	4.51
1300	-48.99	-50.32	2.71	-43.67	-45.78	4.84
1800	-68.81	-69.67	1.25	-60.63	-63.38	4.53
2350	-90.80	-90.95	0.17	-79.60	-82.74	3.94
2625	-99.92	-101.60	1.68	-88.28	-92.43	4.47
2800	-108.79	-108.40	0.36	-95.21	-98.60	3.56
3000	-116.23	-116.10	0.11	-101.86	-105.60	3.67
3150	—	-121.90	—	—	-110.90	—

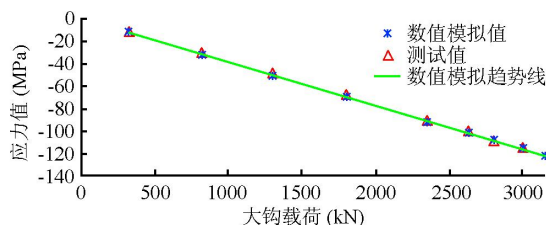


图7 井架中下段司钻对侧前面立柱测试应力及数值模拟值

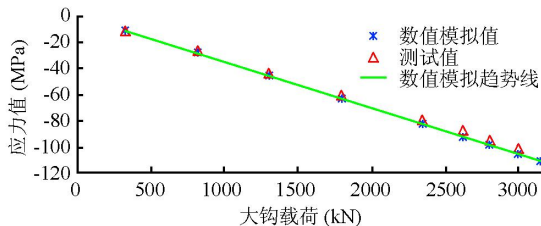


图8 井架二层台司钻对侧前面立柱测试应力及数值模拟值

从表1和图7、图8可看出,测试应力、模拟应力随载荷变化均成良好的线性关系,与文献[7]分析一致;以测试应力为参考等效井架的损伤缺陷,实现了对多点测试数据的较精确拟合,模拟值与测试值误差不超过5%;当大钩载荷为3150 kN时,数值仿真

实验模拟中下段和二层台司钻对侧立柱应力分别为-120.90 MPa和-110.90 MPa,经校核满足API 4F和钢结构设计规范要求。

### 三、结论

对现场钻机井架逐级载荷试验和数值仿真模拟分析得出,在设计承载范围内,测试立柱的应力随载荷的增大呈良好的线性关系,首次在试验中全程验证了载荷与应力的关系,为以线性外推方法进行井架安全承载能力提供了现实依据;构建了以测试应力为参考的井架安全承载力预测数学模型,通过对数值模型几何参数的修正得到了含损伤缺陷钻机井架合理可靠的数值仿真模型,实现了对测试数据的多点拟合,拟合值与测试值误差在5%以内,验证了以测试部分立柱的应力为参考等效井架的损伤缺陷从而预测井架安全承载力方法的正确可行性;为分析含损伤缺陷钻机井架的动态行为、极限承载力和保证油气勘探开发过程中钻机系统的安全运行提供了参考。

### 参考文献

- [1] 朱清澄,郑勇,周娜.在用井架安全性测评技术及方法[J].天然气工业,1993,13(5):47-49.
- [2] RECOMMENDED. Practice for use and procedures for inspections, maintenance and repair of drilling and well servicing structures[M]. API RP 4G, 2002.
- [3] 周国强,郭奕珊.在用井架剩余承载能力极限状态评定方法.石油机械[J],1998,26(11):15-17.
- [4] 万夫,段成明,郑勇.现役井架可靠性测评分析系统[J].天然气工业,1999,19(5):57-60.
- [5] 田晓光.井架弯曲变形后的稳定校核及承载能力算法[J].天然气工业,1996,16(4):40-42.
- [6] 王元清,袁英战,周国强.含损伤缺陷采油井架钢结构双重非线性承载性能分析[J].建筑结构学报,2000,21(4):62-67.
- [7] 韩东颖,周国强.基于ANSYS6.0钻机井架几何非线性分析[J].石油矿场机械,2004,33(1):12-14.

(收稿日期 2006-06-11 编辑 钟水清)