

# 钻探用井架承载能力试验与安全评定

周国强<sup>1</sup> 刘金梅<sup>2</sup> 郭奕珊<sup>1</sup> 韩东颖<sup>3</sup>

(1. 大庆石油学院秦皇岛分院 应用技术学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 大庆石油学院 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 3. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**提出了基于测试应力的钻探用井架安全承载能力评定方法。以井架现场试验时杆件的工作应力为综合评定井架结构承载性能的重要指标, 以与应力有关的设计参数为有限元模型输入参数的修正对象, 将现场测试与有限元数值模型相结合, 通过修正的有限元模型, 分析了在各种载荷作用下在役井架的工作性能, 应用国际上通用的 API Spec 4F 标准进行了安全评定。对某型号钻探井架进行了逐级加载试验, 通过井架第一级载荷作用下模型的模拟与修正, 复现、预测了其它八级载荷作用下的井架工作性能, 预测结果误差不超过 5%, 验证了模型修正方法的正确性。

**关键词:**井架; 承载能力; 数学模型; 安全

**中图分类号:** TE923 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2008)04-0053-04

钻探用井架是石油装备中的重要安全设备, 其安全性能直接关系到整套钻机系统的安全生产。石油现场井架长期使用, 因拆装、运输、超载和腐蚀等各种因素的影响, 各杆件、杆件间连接及整体都会出现不同程度的损伤与缺陷<sup>[1-2]</sup>, 使井架的承载能力低于原设计标准<sup>[3]</sup>, 现场盲目使用易造成生产安全隐患。目前, 国外对钻探井架的安全评定偏重于外观查测、简易诊断和一般处置与预防等三个方面<sup>[4]</sup>。从查测的内容来看, 主要是井架杆件的变形、损伤、磨损和腐蚀等, 诊断的结论多偏重于定性分析, 处理与预防也不够具体。国内对钻探用井架承载性能评定方法的研究主要是以井架上有限的测试数据, 通过强度、刚度、可靠性和稳定性等理论建立井架评定方法<sup>[5-6]</sup>。这些仅仅从井架上有限的测点数据, 通过线性外推来评价井架整体性能的方法尚欠全面与科学。为此, 笔者将现场测试数据与有限元模型结合起来, 通过修正的有限元模型, 真实模拟在各种载荷作用下在役井架的工作性能, 以全面而科学地评价在役井架的安全性。

## 1 模型修正

精确的有限元模型对于井架承载能力预测以及井架安全评定至关重要。在建模过程中, 由于在役钻探井架存在着各种各样的缺陷等众多不确定性因素, 导致有限元模型与在役井架结构存在很大差异,

必须利用现场试验数据对有限元模型进行修正。近年来, 有限元模型修正技术得到了长足的发展<sup>[7-8]</sup>。根据修正对象的定义, 可将修正方法分为矩阵型方法和设计参数型方法, 后者以材料特性等有限元输入参数作为修正对象, 物理意义明确, 更便于工程应用。

现场试验表明, 井架上各杆件的工作应力反映的是井架结构安装、材料损伤以及载荷作用缺陷等多方面的综合因素。笔者以在役井架现场试验时杆件的工作应力作为综合评定井架结构承载性能的重要指标, 而与应力有关的设计参数作为有限元模型输入参数的修正对象, 主要以材料特性参数为基础来修正模型。井架上各杆件受力特征为压弯杆件, 轴向应力、弯曲应力及井架杆件上最大应力可分别表示为:

$$\sigma_n = f(A) \quad (1)$$

$$\sigma_w = f(I) \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_w \quad (3)$$

收稿日期: 2007-12-24; 改回日期: 2008-03-03

基金项目: 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目  
“在役钻机安全评定方法研究”(编号: 03B209000)资助

作者简介: 周国强(1952—), 男, 上海人, 1977年毕业于大庆石油学院机械系矿机专业, 1993年获东北重型机械学院(燕山大学前身)机械专业硕士学位, 部级重点实验室主任, 研究员, 长期从事石油钻探井架检测和安全评定技术研究。

联系电话: (0335) 8065822

式中,  $A$  为井架杆件理想横截面积;  $I$  为井架杆件理想抗弯惯性矩;  $\sigma_n$  为理想状态下井架杆件轴向计算应力;  $\sigma_w$  为理想状态下井架杆件弯曲计算应力;  $\sigma$  为理想状态下井架杆件最大计算应力。

以材料特性参数修正模型的关系式, 分别为:

$$A_e = f_1(\beta)A \quad (4)$$

$$I_e = f_2(\beta)I \quad (5)$$

$$\sigma_e = \beta\sigma \quad (6)$$

式中,  $A_e$  为井架杆件等效横截面积;  $I_e$  为井架杆件等效抗弯惯性矩;  $\beta$  为杆件的应力修正因数;  $f_1(\beta)$  为材料截面积修正量;  $f_2(\beta)$  为材料弯曲刚度修正量;  $\sigma_e$  为井架杆件实测应力值。

## 2 安全评定方法

根据井架上钩载、风载、立根载荷及地震载荷等作用, 利用修正的井架有限元数值模型, 按 API Spec 4F 校核公式, 计算分析在各种设计载荷作用下该井架的工作性能。

### 2.1 轴心受压杆强度校核

强度验算准则为:

$$f_a \leq F_a \quad (7)$$

式中,  $f_a$  为计算得到的轴向压应力, MPa;  $F_a$  为容许压应力,  $F_a = C_a F_y$ , MPa;  $C_a$  由文献[6]查得;  $F_y$  为材料的屈服强度, MPa。

当  $\sqrt{2\pi^2 E/F_y} < KL/r < 120$  时:

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad (8)$$

式中,  $E$  为弹性模量;  $K=1$ ;  $L$  为杆件无支撑长度;  $r$  为回转半径。

### 2.2 轴心受压杆和受弯杆强度校核

井架强度校核中承受轴心受压和受弯的杆件其评定计算应满足以下要求:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (9)$$

$$\frac{f_a}{0.60 F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (10)$$

当  $f_a/F_a \leq 0.15$  时, 式(9)、(10)可用下式代替:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (11)$$

式中, 与 b、m 和 e 结合在一起的下标 x、y 表示某应力所对应的弯曲轴;  $F_a$  为只有轴心力存在时的轴心

压应力;  $F_b$  为只有弯矩存在时的弯曲应力;  $F_e$  为除以安全系数的欧拉应力,  $F_e = \frac{12\pi^2 E}{23(KL_b/r_b)^2}$ ;  $L_b$  为弯曲平面内无支撑长度;  $r_b$  为相应的回转半径;  $K$  为弯曲平面内有效长度系数;  $C_m = 0.85$ 。

## 3 现场试验与数值模拟

### 3.1 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, 井架提升游动系统为  $6 \times 7$  轮系, 有效绳系为 12 根, 最大设计钩载为 3 150 kN, 钻井井深 5 000 m。对该井架进行外观检测发现: 井架底座基础水平满足规范要求; 井架立柱均无严重的弯曲变形; 井架材料基本没有锈蚀; 井架整体稍有前倾。

在井架现场试验时, 测试参数为杆件应力应变。根据井架承载特征, 在井架中下段和二层台处的井架立柱上共布置了 32 个测点(如图 1 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承载进行动应力测试, 测试时初始状态钩载指重表读数为 200 kN; 然后分八次逐级加载, 记录指重表读数分别为 525、1 015、1 500、2 000、2 550、2 825、3 000 和 3 200 kN。中下段司钻对侧立柱 5# 测点的测试曲线如图 2 所示。对测试曲线进行数据分析并通过相应的计算公式得到了井架上 32 个测点在各级载荷作用下的应力应变值。通过分析计算结果得出: 井架在工作载荷作用下, 井架正面前侧两个立柱的应力明显大于井架背面前侧两个立柱的应力; 井架司钻对侧立柱的应力值比司钻侧的要大。从原因分析可知: 该井架整体结构前倾, 导致井架前两立柱受力偏大; 井架游动系统钢丝绳死绳固定器位于井架司钻对侧立柱底部, 致使井架司钻对侧立柱受力大。

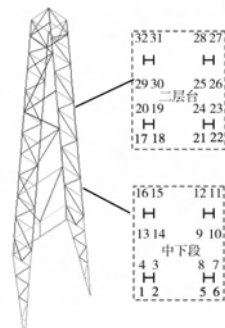


图 1 井架试验测点位置示意

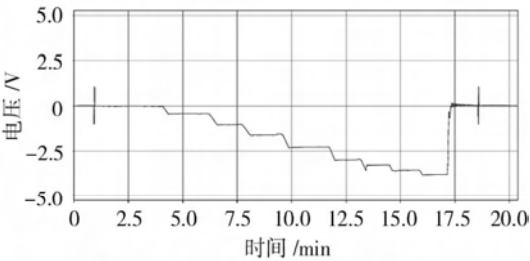


图 2 井架上 5<sup>#</sup> 测点测试曲线

3.2 试验井架有限元模型修正及数值模拟

采用 ALGOR FAES 结构分析软件建立井架有限元模型。有限元模型中含 158 个梁单元,共 79 个节点、426 个自由度。考虑在役井架与理想井架的实际差异,及井架上各杆件的工作应力反映了在役井架结构安装、材料损伤以及载荷作用缺陷等多方

面综合因素的影响,在建模过程中将测试数据与有限元模型结合,通过井架杆件的应力修正因数  $\beta$ ,以井架杆件截面积  $A$  与井架杆件弯曲刚度  $I$  作为待修正参数,修正井架有限元模型。

检验修正后模型的精度,通常只比较修正井架在一种试验载荷作用下的计算和试验结果。事实上,修正后的有限元模型应当同时具有复现和预测能力。即不但可以准确复现井架在一种试验载荷下的杆件应力,而且可以预测井架在一种试验载荷以外有限载荷作用下的杆件应力状况。为此,笔者以井架试验时的第一级载荷为准,即初始状态大钩载荷 200 kN,载荷作用时钩载 525 kN,实际钩载 325 kN 作用下进行模拟、修正,将第一级载荷以外的七级试验载荷作为检验测试应力以评估修正后有限元模型的预测能力。模型修正后的计算结果见表 1。

表 1 修正前后井架立柱应力对比

大钩载荷/kN	井架中下段处司钻对侧立柱应力				
	测试值/MPa	修正前模拟值/MPa	修正前相对误差, %	修正后模拟值/MPa	修正后相对误差, %
325	-12.54	-10.06	19.78	-12.58	0.32
815	-30.93	-25.23	18.43	-31.54	1.97
1 300	-48.99	-40.25	17.84	-50.32	2.71
1 800	-68.81	-55.73	19.00	-69.67	1.25
2 350	-90.80	-72.76	19.87	-90.96	0.18
2 625	-99.92	-81.27	18.66	-101.60	1.68
2 800	-108.79	-86.70	20.31	-108.40	0.36
3 000	-116.23	-92.89	20.08	-116.10	0.11
3 150		-97.54		-121.90	

3.3 结果分析

从表 1 可以看出,采用与应力有关的设计参数作为有限元模型输入参数的修正对象,无论在修正段(井架第一级载荷作用下)还是在修正段外(井架除第一级载荷以外的七级载荷作用下),修正后的井架相应杆件的数值模拟值与测试值误差不超过 5% (如图 3 所示)。从图 3 可看出,井架相应杆件测试应力、计算应力随载荷变化均呈良好的线性关系。当大钩载荷为 3 150 kN 时,通过井架数值模拟试验知井架中下段和二层台司钻对侧前立柱应力分别为 -121.90 MPa 和 -110.90 MPa,井架最大应力为 154.09 MPa。

对井架在最大设计钩载 3 150 kN 作用下进行了强度校核,最大受力出现在井架司钻对侧的立柱杆件上,计算最大系数值为 0.843,小于 1.0,满足设计

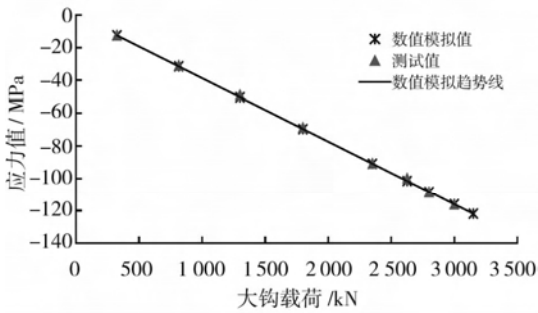


图 3 井架中下段司钻对侧前立柱测试应力及数值模拟值要求。

4 结 论

1)以在役井架现场试验时杆件的工作应力为综合评定井架结构承载性能的重要指标,以与应力有关的设计参数  $A$ 、 $I$  为有限元模型输入参数的修正

对象,将现场测试与有限元模型结合,可以真实模拟在各级载荷作用下在役井架的工作性能。

2)应用 API Spec 4F 标准对井架在各种设计工况下进行校核,从而准确评定在役井架的工作性能。该方法为在役石油钻探井架作业安全提供了更科学、更可靠的保证,同时也为其它大型复杂钢结构的承载能力试验、预测及安全性评价提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] 张传忠,艾光富. 井架基础不均匀下沉的影响及处理方法[J]. 石油钻探技术,2002,30(1):39-40.
- [2] 韩东颖,李子丰,周国强,等. 基于振动参数的钻井井架安全承载力评定[J]. 石油钻探技术,2006,34(6):48-51.

- [3] 艾万荣,徐闯. 在用井架承载能力及使用寿命测试系统的研制[J]. 石油钻探技术,1996,24(1):40-41.
- [4] API RP 4G MOD—2002. Recommended practice for use and procedures for inspections, maintenance, and repair of drilling and well servicing structures[S].
- [5] 李学彤,周国强. 在用 7000m 钻机井架可靠性评定[J]. 石油矿场机械,1992,21(6):19-23.
- [6] 裴峻峰,杨其俊. 评估石油井架工作寿命及可靠性的新方法[J]. 石油机械,1997,25(5):17-18.
- [7] 张德文,魏卓旋. 模型修正与破损诊断[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [8] 淳庆,邱洪兴. 钢桁梁桥基于模型修正方法的损伤程度识别研究[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(2):114-118.

[审稿 李子丰]

## Drilling Mast Load Capacity Test and Safety Evaluation

Zhou Guoqiang<sup>1</sup> Liu Jinmei<sup>2</sup> Guo Yishan<sup>1</sup> Han Dongying<sup>3</sup>

(1. School of Applied Technology, Qinhuangdao Division of Daqing Petroleum Institute, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China; 2. School of Mechanical Science and Engineering, Daqing Petroleum Institute, Heilongjiang, Daqing, 163318, China; 3. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China)

**Abstract:** This paper proposed that the working stress is the main parameter for evaluating drilling mast safety load capacity. Using design parameters related to stress as input parameters, the working capacity of oilfield drilling mast under different load was analyzed through the combination the oilfield test with modified finite numerical model. The safety evaluation was conducted using the API Spec 4F standard. A drilling mast was loaded step by step. Through the numerical simulation and modification under first load, the well mast working performances under other 8 load were predicted. The error between the predicted and experiment results were less than 5%, which validates this method.

**Key words:** drilling derrick; carrying capacity; mathematical model; safety

## 欢迎订阅 2008 年《石油与装备》杂志

《石油与装备》(网址:www.cippe.net)是由香港振威国际能源传媒集团有限公司主办、中国石油与化工设备工业协会及北京振威展览有限公司合办、中国图书进出口(集团)总公司负责国内发行的石油装备类专业性综合期刊,读者遍布全国各大油田、钻井、工程公司、科研院所和装备制造公司,主要以石油石化行业的高层管理者、决策者、科技人员及物资采购人员等为重点读者对象。

《石油与装备》杂志报道石油石化相关行业、领域内最新的政策信息及相关专家学者权威的行业视点;详尽、真实地记录石油装备制造工业的科技发展进程;提供勘探钻井、炼油化工、工程项目和安全环保等生产环节需要的新技术、新设备、新工艺和新经验;刊登国内外石油装备制造企业的设备和企业宣传广告。从 2007 年 8 月起,为满足读者需求,调整了主要栏目,调整后主要有“热点聚焦”、“技术应用”、“解决方案”、“工程项目”和“装备商桥”等。

《石油与装备》杂志以“中国国际石油石化技术装备展览会”(cippe 振威国际石油展)为依托,立足于“cippe 振威国际石油展”每年庞大的、不断更新的数据库,力争为石油石化产业提供详实的资讯、更多的商机和更好的推广服务。欢迎联系广告业务。

本刊为双月刊,逢双月 1 日出版;十六开彩色全铜版纸印刷,国内、外公开发行;国际连续出版物号:ISSN 1990—5947。期刊定价:港澳台 25 港元,中国大陆 20 元,其他国家和地区 5 美元。

编辑部地址:北京市朝阳区北苑路 170 号 E 座 801-803;邮编:100101;电话:010-58236535,58236542;传真:010-58236567;联系人:杨磊。