

# Numerical Simulation on Integral Hoisting for Flare Stack with Flange Connection Structure

Bing Ge<sup>1</sup>, Xuanyu Sheng<sup>2</sup>, Hongzhi Zhang<sup>1</sup>, Chuan Liu<sup>1</sup>, Yachen Xu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Installation Company of Daqing Oilfield Engineering Construction Co., Ltd., Daqing Heilongjiang

<sup>2</sup>Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing

<sup>3</sup>Research Center of Advanced Energy Equipment Technology, Tianjin Research Institute for Advanced Equipment, Tsinghua University, Tianjin

Email: xuanyu@tsinghua.edu.cn, shengxy@tsinghua-tj.org

Received: Dec. 1<sup>st</sup>, 2016; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2016; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2016

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Segmentation hoisting is generally used for flare stack with flange connection structure. This paper presents a technical innovation of integral hoisting of flare stack with flange connection structure. In the paper, CATIA finite-element-analysis is used to build 100% model of flare stack and to simulate working condition in both horizontal and vertical limit states. During the integral hoisting of flare stack, strength and stability of flare stack during hoisting are checked and calculated. Dangerous points are found. Measures of strengthening weak structure are proposed and reference is provided for hoisting procedure design and formulation of hoisting plan.

## Keywords

Flange Connection, Flare Stack, Integral Hoisting, CATIA Finite-Element-Analysis, Strengthen

---

# 法兰连接火炬塔架整体吊装有限元校核

葛兵<sup>1</sup>, 盛选禹<sup>2</sup>, 张宏志<sup>1</sup>, 刘传<sup>1</sup>, 徐雅晨<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大庆油田工程建设有限公司安装公司, 黑龙江 大庆

<sup>2</sup>清华大学核能与新能源技术研究院, 北京

<sup>3</sup>清华大学天津高端装备研究院先进能源装备技术研究所, 天津

Email: xuanyu@tsinghua.edu.cn, shengxy@tsinghua-tj.org

收稿日期: 2016年12月1日; 录用日期: 2016年12月20日; 发布日期: 2016年12月23日

## 摘要

法兰连接结构火炬塔架一般采用分节吊装, 本文提出一种法兰连接结构火炬塔架整体吊装技术方法的创新。利用CATIA对火炬塔架整体进行100%实体建模, 使用CATIA有限元分析模拟火炬塔架整体吊装时的水平和竖直两个极限状态工况, 对吊装时塔架的强度和稳定性进行校核计算, 查找出危险点及提出薄弱结构的加固处理措施, 为吊装工艺设计和方案制定提供依据。

## 关键词

法兰连接, 火炬塔架, 整体吊装, CATIA有限元分析, 加固

## 1. 引言

针对法兰连接结构火炬塔架一般采用分节吊装, 而中七浅冷站安全隐患治理工程火炬塔吊装项目为冬季施工项目, 施工期间气候严寒多风雪, 吊装施工环境条件极为不利, 作业难度大。若采用分段吊装则必然导致高空作业安全风险大, 劳动强度高[1]。对此, 我们大胆进行尝试提出一种整体吊装的工艺方法。经现场多方结合, 确定对塔架进行合理的加固然后采用整体吊装, 本文对火炬塔架整体吊装工艺进行校核分析计算。

## 2. 火炬塔架结构参数

中七浅冷站安全隐患治理工程放空系统需安装三柱式火炬 1 座。根据生产厂家给出的图纸, 火炬塔架高 32 m, 火炬头高 3 m, 总高 35 m, 总重量 16.3 T。塔身及筒体全部为钢管, 塔身主材及筒体连接为法兰盘, 内部之间采用连接板连接。塔架柱子之间、柱子和横梁之间、柱子和斜撑之间, 采用高强螺栓连接。放空筒底部 6 m 范围内为  $\Phi 610 \times 12$  mm 钢管, 以上的筒体为  $\Phi 406.4 \times 10$  mm, 所有结构材质均为 20#钢, 火炬塔架整体结构图如图 1 所示。

## 3. 火炬塔架加固设计

法兰连接结构火炬塔架一般采用分节吊装, 但施工期间已进入大庆地区的冬季, 气温低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有风雪。加上登高作业施工安全风险大, 作业人员劳动强度大。综合各方面因素, 经现场多方结合, 确定采用整体吊装。但对塔架结构进行分析来看, 主立柱规格  $\Phi 180 \times 10$  和  $\Phi 159 \times 8$ , 立柱和横梁以及斜撑之间均采用 6 mm 厚节点板连接, 火炬和火炬筒体之间采用 L63  $\times$  5 角钢连接, 考虑到该火炬塔架整体结构较为轻薄, 为避免在吊装作业过程中出现变形破坏, 必须对塔架整体结构合理设置加固。

### 3.1. 塔架整体加固

为增强塔架的整体刚性, 对塔架整体结构设置加固(如图 2 所示), 采用 20b 槽钢、临时管箍、支撑管将塔架和火炬筒体连成一个刚性整体。槽钢之间采用 12 mm 厚钢板进行连接, 使之成为一个整体, 加强板间距为 300 mm, 加强板和槽钢之间角焊缝满焊。临时管箍共设置 3 道, 第一道位于距顶部平台 3.5 m 处, 第二道位于距顶部平台 15.5 m 处, 第三道位于距顶部平台 27.5 m 处。

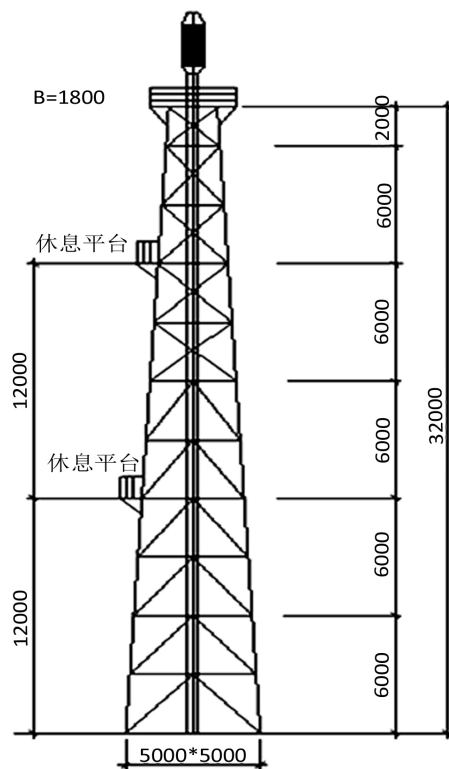


Figure 1. Integral structure of the flare stack  
图 1. 火炬塔架整体结构

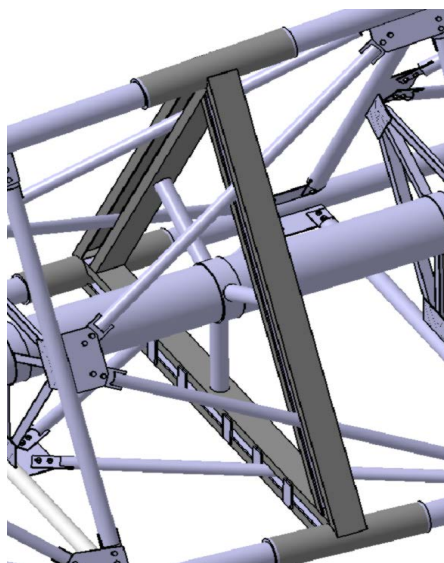


Figure 2. Integral consolidation of the flare stack  
图 2. 塔架整体加固

### 3.2. 主吊耳加固

该火炬塔架整体吊装，顶部平台尺寸 3000 mm，主吊耳形式选取轴式吊耳，长度 800 mm。为避免轴式吊耳弯矩过大，对轴式吊耳和塔架连接处进行加固设计如图 3 所示。

### 3.3. 溜尾吊耳加固

塔架整体起吊时，溜尾吊耳承受最大载荷，如下图 4 所示，采用 24 mm 厚钢板制作溜尾吊耳，并在两侧设置加强圈和加强筋板，以提高吊耳承载能力。

## 4. 火炬塔架有限元法校核分析计算

### 4.1. 火炬塔架 CATIA 有限元分析计算模型建立

在 CATIA 三维设计和辅助分析一体化计算平台中建立火炬塔架一比一三维模型(如图 5) [2]，采用 CATIA 自带的四面体自适应非线性网格划分技术对整体模型进行网格划分，并针对塔架受力变形较大位置进行局部网格细化以提高计算精度，网格划分后的模型如图 6 所示。

### 4.2. 火炬重量、重心位置和惯性矩校核结果

计算模型建立之后，在 CATIA 软件中查看火炬塔架三维模型的机械属性，对其进行评估分析得到计算总重量和重心位置坐标和体积质量等参数数据如图 7 所示。

### 4.3. 有限元法进行强度和挠度校核分析

分析火炬塔架的起吊过程中两个极限位置受力状况，一是火炬塔架完全水平状态时，汽车吊和履带

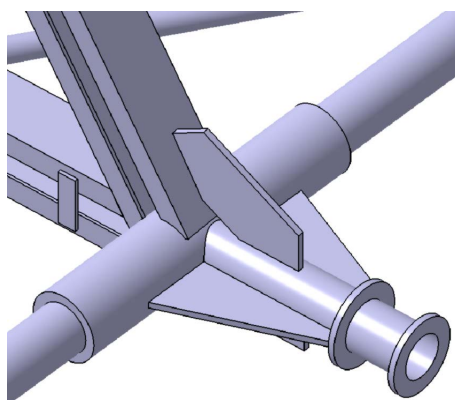


Figure 3. Consolidation of main lifting lug  
图 3. 主吊耳加固

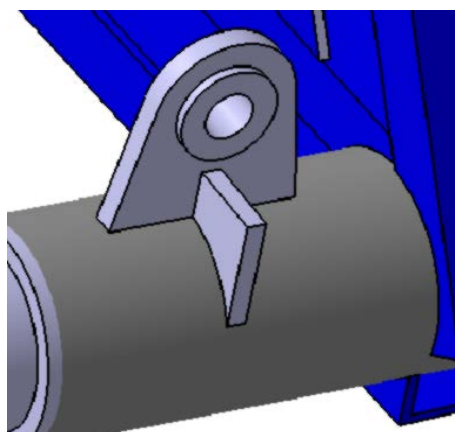


Figure 4. Consolidation of tail lifting lug  
图 4. 溜尾吊耳加固

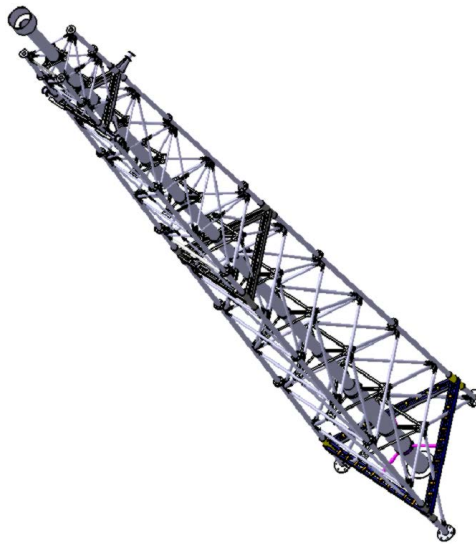


Figure 5. Three-dimensional model of the flare stack

图 5. 塔架三维实体模型

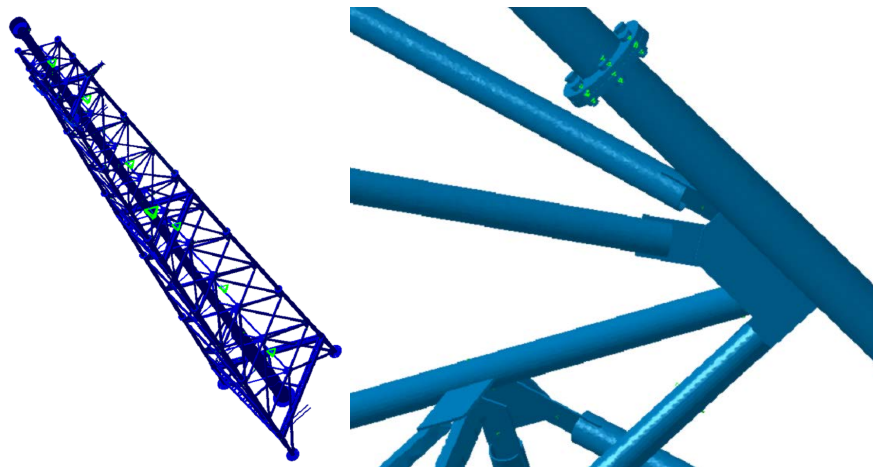


Figure 6. Mesh generation of the flare stack

图 6. 塔架整体网格划分

图形	产品	工程制图	机械		
特性		惯性中心			
体积:	2.036101m <sup>3</sup>	x:	-0.273098mm		
质量:	16003.754187kg	y:	-5.604275mm		
曲面:	470.056745m <sup>2</sup>	z:	14396.511021mm		
惯性矩阵					
lxx:	1635048.100305kgxm <sup>2</sup>	lxy:	-1.985309kgxm <sup>2</sup>	lxz:	20.779605kgxm <sup>2</sup>
lyx:	-1.985309kgxm <sup>2</sup>	lyy:	1636039.206562kgxm <sup>2</sup>	lyz:	-710.053396kgxm <sup>2</sup>
lzx:	20.779605kgxm <sup>2</sup>	lzy:	-710.053396kgxm <sup>2</sup>	lzz:	37703.790076kgxm <sup>2</sup>

Figure 7. Mechanical properties of the flare stack

图 7. 火炬塔架整体机械属性



吊的钢丝绳按照与火炬塔架重心距离的反比承受火炬塔架的部分重量,此时吊耳、钢丝绳上的载荷不大,但是火炬塔架本身由于水平放置,要承受重力产生的弯矩,火炬塔架塔中部弯矩大,需要对火炬塔架的强度和稳定性进行校核;二是,火炬塔架竖直状态时,火炬塔架的全部重量作用在上部的吊耳位置,承受火炬塔架的全部重量,此时吊耳以及吊耳附近的火炬塔身所受应力较大,需要重点对此位置进行校核,具体强度和挠度校核分析如下:

#### 4.3.1. 火炬水平状态分析计算

##### (1) 应力计算

水平位置时,两端的钢丝绳竖直向上,钢丝绳上端设定固定约束。计算的 Von Mises 应力如图 8 所示。结构整体应力水平很低,在 10~40 MPa 的量级,远低于材料的屈服强度值 240 MPa,因此结构整体处于水平位置时受力不大,满足安全要求。

##### (2) 危险点检查及处理措施

对主立柱法兰螺栓进行应力监测表明(如下图 9 所示),水平位置时上部主立柱第 2、3、4 级法兰螺栓

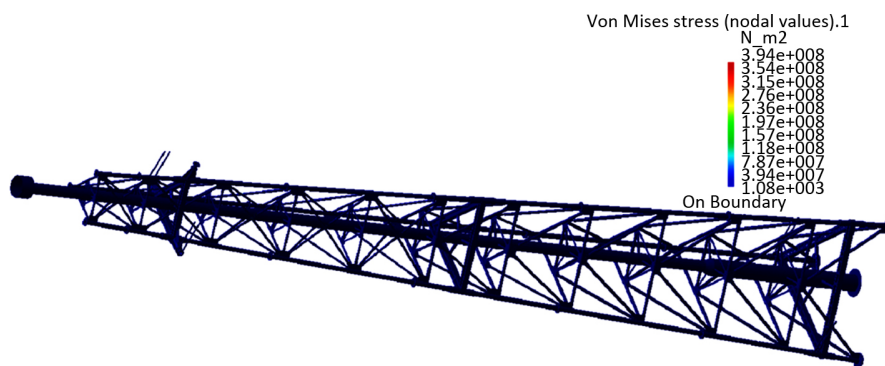


Figure 8. Stress calculation result of the flare stack

图 8. 整体应力计算结果

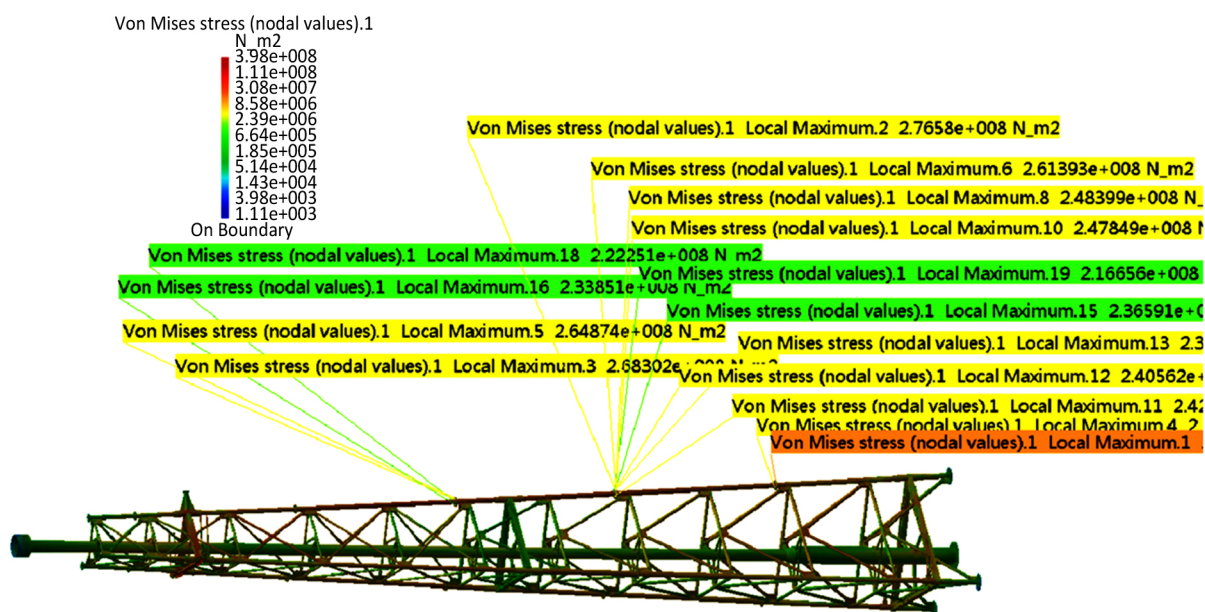


Figure 9. Inspection result of the dangerous points

图 9. 危险点检查结果显示

受力稍大在 180~260 MPa 之间, 因此建议现场对这几处位置法兰进行加强(如图 10 所示)。测得主吊耳处最大应力在 100 MPa 左右(如图 11 所示), 也小于材料的屈服强度值, 因此设计的吊耳在水平吊装位置时安全, 能够满足安全要求。

### (3) 稳定性分析

火炬塔架结构处于水平状态时, 塔架结构整体在重力作用下, 会有向下的位移, 若位移过大, 结构在吊装过程中可能会产生失稳破坏, 通过水平位移情况可以校核水平起吊吊点设置合理情况。图 12 为火炬塔架在水平状态时的位移, 中间部位位移最大, 为 11.1 mm。两吊点距离 24 m, 则最大挠度( $f$ ) ( $m$ ) =  $L/300 = 0.08 m > 0.0111 m$ , 可见结构稳定性符合安全要求。

## 4.3.2. 竖直位置时计算结果

### (1) 应力计算

竖直位置时, 设定火炬塔架顶端吊耳钢丝绳垂直向上, 结构只承受火炬塔架的重力载荷。计算火炬塔架整体的 Von Mises 应力云图如图 13 所示。结构整体应力较小, 仍然在 10~40 MPa 的量级, 远低于材料的屈服强度值 240 MPa, 满足强度安全范围, 因为结构本身只承受重力载荷作用, 没有其它的外载荷。

### (2) 危险点检查及处理措施

对火炬塔架整体结构进行危险点检测, 结构所承受的局部最大等效应力在火炬塔架上部的吊耳上(如图 14 所示), 塔架整体最大应力为主吊耳加强板处局部点应力(值为 160 MPa), 小于材料的屈服强度

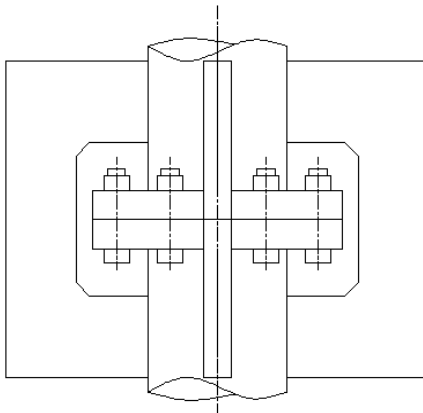


Figure 10. Reinforcement structure in flange junction

图 10. 法兰连接处加强结构

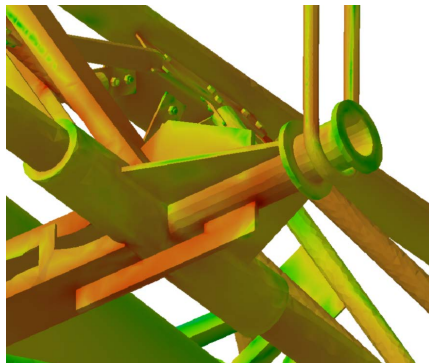


Figure 11. Stress distribution of the lifting lug

图 11. 主吊耳处应力分布

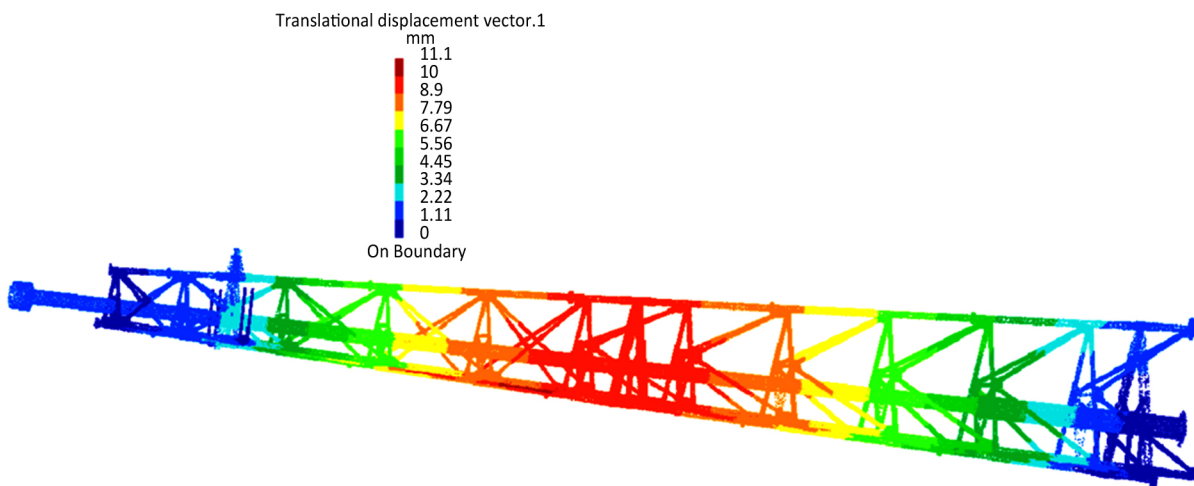


Figure 12. Result of horizontal displacement  
图 12. 水平位置整体位移计算结果

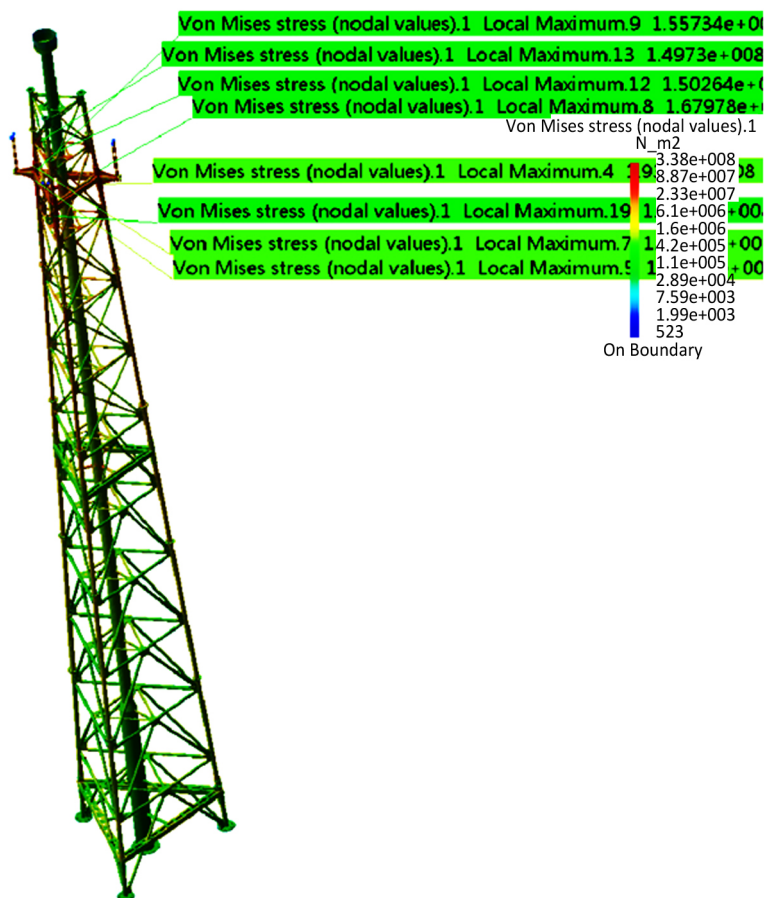


Figure 13. Stress cloud chart of the flare stack  
图 13. 竖直位置整体应力云图

值。因此结构整体在竖直位置吊装时是安全的。

### (3) 稳定性分析

火炬塔架整体位移计算显示(如图 15 所示), 在竖直位置时, 火炬塔架结构不承受外压, 只有重力载



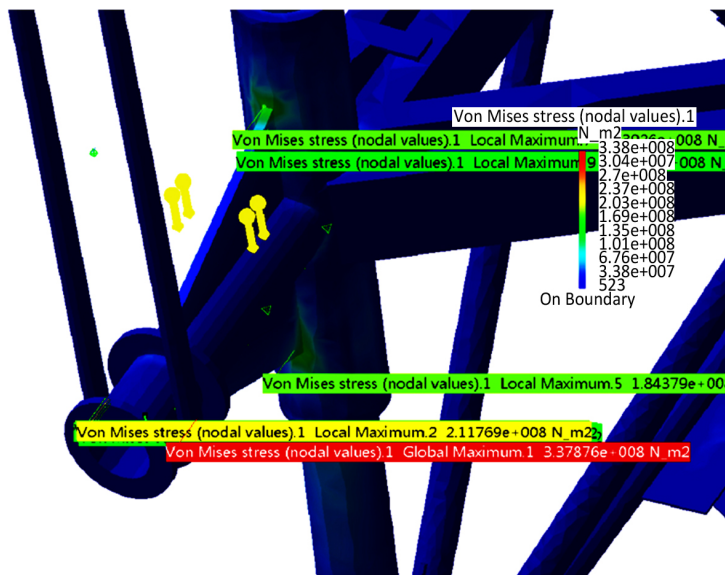


Figure 14. Maximal stress in the local position  
图 14. 局部最大应力显示图

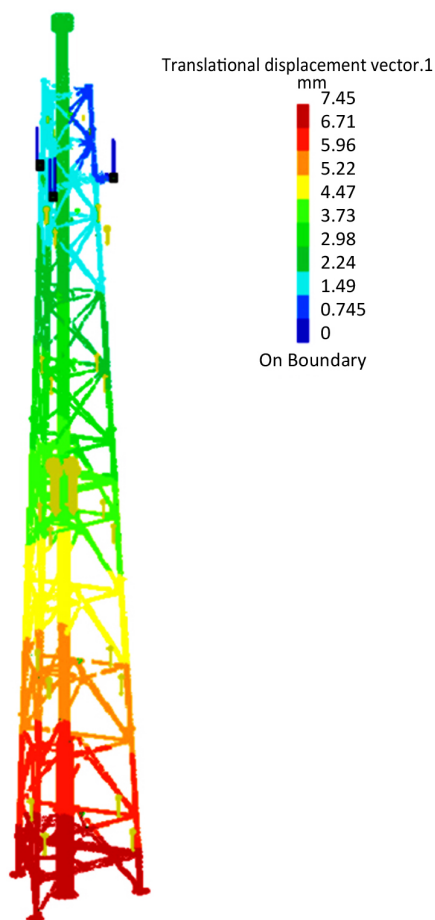
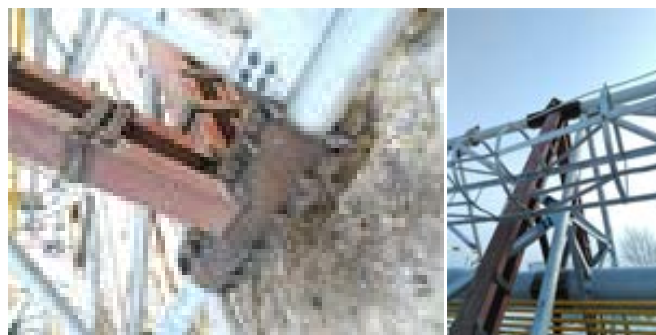


Figure 15. Displacement cloud chart of the flare stack  
图 15. 整体位移云图



**Figure 16.** Reinforcement of whole structure, lifting lug, and flange  
**图 16.** 整体加固、吊耳加固、立柱法兰加固



**Figure 17.** Result of the integral hoisting  
**图 17.** 整体吊装完成

荷，计算结构的位移大小，结构的最大位移值为 7.45 mm，位于火炬塔架的最底部，符合最大变形量要求，满足安全条件。

## 5. 现场吊装实施

参考 CATIA 有限元校核分析计算结果，依据加固指导方案，工程现场完成对该火炬塔架的整体加固、吊耳加固、立柱法兰加固工作(如图 16 所示)，于 2015 年 12 月 20 日在中七浅冷站安全隐患治理工程火炬区，经过 1 个小时的吊装作业，该火炬塔架整体吊装作业取得圆满成功(如图 17 所示)。

## 6. 结论

(1) 针对该火炬塔架整体较为轻薄而设置的整体加固、吊耳加固、立柱法兰加固等加固工装进行了大胆新颖的方法创新，保证了该火炬塔架整体吊装的强度和稳定性更加满足安全要求，确保火炬塔架整体吊装作业圆满完成。

(2) 探索了一种法兰连接结构火炬塔架的整体吊装工艺，节省工时，规避安全风险，解决了冬季施工散件高空组装和分段吊装作业的诸多困难，为这种吊装方法推广打下坚实基础。

(3) 通过整体吊装有限元校核计算，巩固成熟了一种运用计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助分析(CAE)对此类法兰连接结构火炬吊装工艺的有限元校核计算方法，进一步推动了我公司吊装技术的进步，

现场实际吊装工作验证了有限元强度校核计算结果精确、快捷，安全可靠。

### 参考文献 (References)

- [1] SH/T 3029-2014 石油化工排气筒和火炬塔架设计规范[M]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2014.
- [2] 盛选禹, 唐守琴, 编. CATIA 有限元分析命令详解与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [mos@hanspub.org](mailto:mos@hanspub.org)