

低温环境下管道法兰连接的应力分析

刘小川¹, 许晶禹²

(1. 中国航空油料有限责任公司, 北京 100088; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 文中在考虑温度作用的前提下, 对低温管道中的法兰进行了不同螺栓强度等级和螺栓预紧力下的“拉伸+弯曲”组合工况的有限元分析。研究表明: 法兰最大应力出现在螺栓上, 螺栓的预紧力和强度等级的降低都将对法兰应力分布产生重要的影响。同时, 文中也给出了法兰外侧的位移随螺栓预紧力和强度等级的变化规律。最后, 通过现场测试验证了数值模拟的准确性。该研究结果可以为输油管线法兰连接的预紧力设定提供参考。

关键词: 输油管线; 法兰连接; ANSYS; 应力分布; 现场测试

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-9614(2017)01-0032-04

Stress Analysis of Pipeline Flange Connection under Low Temperature Environment

LIU Xiao-chuan¹, XU Jing-yu²

(1. China National Aviation Fuel Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: On the premise of temperature function in the paper, FEM analysis for pipeline flange under low temperature under combination condition of “bending and stretching” with various bolt strength grade and bolt pre-tightening load was carried out. Results show that, the maximum stress appears on the bolt, both degrade of bolt pre-tightening load and degrade of bolt strength have effect on stress distribution of flange. Moreover, the paper provides changing law for lateral displacement with bolt pre-tightening load and bolt strength grade. At last, the accuracy of the numerical simulation was validated by field test. This paper provides reference for settings of pre-tightening load in the oil pipeline flanged joint.

Keywords: oil pipeline; flange connection; ANSYS; stress distribution; field test

0 引言

长输油气管道沿线会受山体滑坡、水灾、穿越等的影响, 易造成整体移位、局部变形或应力集中, 从而导致较大的位移应力、屈曲或蠕变, 严重时甚至导致管道断裂破坏^[1]。埋地管道会被道路、建筑、堆积物等占压, 占压造成地基的不均匀沉降也会导致管道产生弯曲甚至破裂^[2-6]。

由于法兰连接具有较高的强度和密封性, 因而在输油管线中广泛应用。法兰连接一般由法兰、螺栓和垫片组成, 应力分布复杂, 是管线受力的薄弱环节。在初始预紧时, 垫片被法兰压实而密封良好, 在工作状态时, 由于受到轴向拉应力, 垫片回弹, 导致密封变差甚至失效。同时, 法兰和螺栓局部应力过大也会导致法兰连接的破坏。

张斯亮等建立了预紧、操作工况下 DN200 和

DN450 两组法兰的计算模型, 采用 ANSYS 软件得到了其应力分布^[7]。研究表明: 法兰在各种工况下应力分布相似, 垫片应力沿径向变化较大、沿周向变化较小, 垫片的最大应力出现在外边缘处。杜坤等采用 ANSYS 分析了预紧力、密封介质内压力等因素对垫片应力分布的影响^[8]。研究表明: 在预紧状态和工作状态下, 垫片应力都沿径向呈现出均匀的带状分布, 且内侧应力小于外侧应力。韩传军等建立了法兰连接有限元模型, 研究了螺栓预紧力、介质压力对法兰应力、应变和密封性能的影响^[9]。研究表明: 在法兰连接结构中, 最大 Von Mises 应力均出现在螺栓孔靠近轴线一侧以及法兰颈与法兰盘的连接处。

本文主要针对低温环境下法兰连接中的失效问题, 采用耦合场分析的方法对管道法兰连接的应力进行数值模拟研究。

1 模型建立

耦合热弹性分析的本构方程为:

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120048)

收稿日期: 2016-05-26

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\mathbf{D}]^{-1}\{\boldsymbol{\sigma}\} + \{\boldsymbol{\alpha}\} \Delta T \quad (1)$$

$$S = [\boldsymbol{\alpha}] \{\boldsymbol{\sigma}\} + \frac{\rho c_p}{T_0} \Delta T \quad (2)$$

式中: $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ 为应变向量; $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ 为应力向量; S 为熵密度; $[\mathbf{D}]$ 为弹性刚度矩阵; $\{\boldsymbol{\alpha}\}$ 为热膨胀系数向量; ΔT 为温度增量; ρ 为密度; c_p 为常压下比热容; T_0 为绝对参考温度。

对由热弹性本构方程耦合的运动应力方程和热流动连续方程应用变分原理, 得到以下有限元单元矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{M}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{U}}\} \\ \{\dot{\mathbf{T}}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}] & [0] \\ [\mathbf{C}^m] & [\mathbf{C}^l] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{U}\} \\ \{\mathbf{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}] & [\mathbf{K}^m] \\ [0] & [\mathbf{K}^l] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{U}\} \\ \{\mathbf{T}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{F}\} \\ \{\mathbf{Q}\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{M}]$ 为单元质量矩阵; $[\mathbf{C}]$ 为结构阻尼矩阵; $[\mathbf{K}]$ 为单元刚度矩阵; $\{\mathbf{U}\}$ 为位移向量; $\{\mathbf{F}\}$ 为单元节点力和单元压力之和; $[\mathbf{C}^l]$ 为单元特定热流矩阵; $[\mathbf{K}^l]$ 为单元热传导耗散矩阵; $\{\mathbf{T}\}$ 为温度向量; $\{\mathbf{Q}\}$ 为单元生热和单元表面热对流向量之和; $[\mathbf{K}^m]$ 为单元热弹性刚度矩阵; $[\mathbf{C}^m]$ 为单元热弹性阻尼。

ANSYS 实用单元中, solid5 是一种磁、热、电、压电、结构多场耦合 8 节点实体单元。solid5 可以用来模拟法兰主体、垫片和螺纹。除 solid5 单元外, 模型还需要涉及到模拟法兰和垫片、法兰和螺母之间接触的 TARGET170 和 CONTA174 单元、模拟螺纹预紧力的 prets179 单元以及用于施加管断面均布载荷的 surf154 单元。

在管道公称压力 1.6 MPa 条件下, DN350 法兰及连接构件参数如下: 外径 $A_1 = 364$ mm; 法兰外径 $D = 520$ mm; 螺栓孔中心圆直径 $K = 470$ mm; 螺栓孔直径 26 mm; 螺栓孔数量 $n = 16$; 法兰厚度 $C = 35$ mm; 法兰内径 381 mm; 螺纹规格 M24; 螺纹宽度 $s = 36$ mm; 最大厚度 $m = 22.3$ mm; 法兰两侧管长 0.5 m; 垫片厚度 3 mm; 法兰两侧管长各 0.3 m。

建立的有限元模型如图 1 所示, 整个模型共有 85 712 个单元。法兰和螺栓是钢质材料, 杨氏模量为 2.1×10^{11} kN/m, 泊松比为 0.3, 热膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 导热系数为 30 W/(m·°C)。垫片材料是纯铜, 杨氏模量为 1.1×10^{11} kN/m, 泊松比为 0.3, 热膨胀系数为 $1.77 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 导热系数为 400 W/(m·°C)。法兰与垫片间的摩擦因数为 0.2。

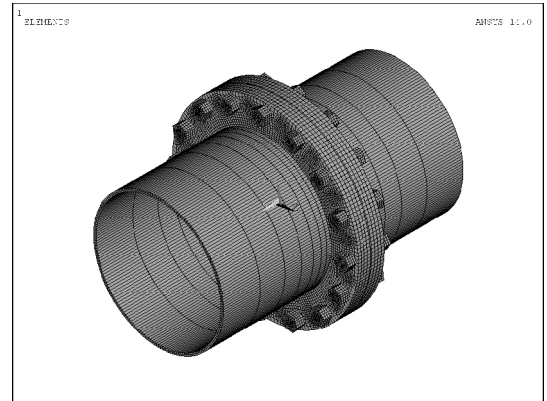


图 1 法兰连接有限元模型

2 边界条件与加载

位移边界条件: 一侧管端作为约束面, 管端的节点限制 z 向自由度, 在 xy 平面内管端最外侧节点与 x 轴的交点约束 y 方向位移, 与 y 轴交点约束 x 方向的位移。

温度边界条件: 管内侧温度为 -10°C , 管外温度为 0°C 。

螺栓预紧力设置: 螺栓等级 8.8 条件下, M24 螺纹紧固扭矩为 680 N·m, 每个预紧力单元上均施加 141.67 kN 预紧力。

载荷设置: 拉弯组合的载荷可以分为 3 种工况。轴向应力 50 MPa, 弯曲应力 20 MPa; 轴向应力 35 MPa, 弯曲应力 35 MPa; 轴向应力 20 MPa, 弯曲应力 50 MPa。在 ANSYS 中, 通过编写宏文件实现压力载荷的加载。

3 计算结果分析及现场试验验证

3.1 全部螺栓预紧时的应力分析

当 16 个螺栓全部预紧时, 分别计算 3 种工况下的温度和应力分布。图 2 为法兰面温度分布云图, -8.88889 、 -10 等的单位为 $^\circ\text{C}$ 。从图 2 可以看出, 在法兰与垫片接触端面上表现出明显的温度梯度。综合分析发现, 3 种工况下法兰面的温度分布具有相似的规律。

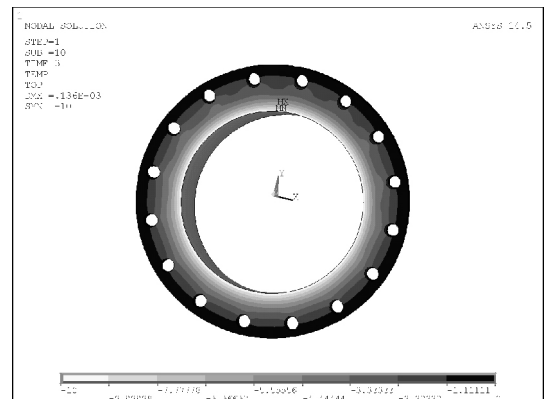
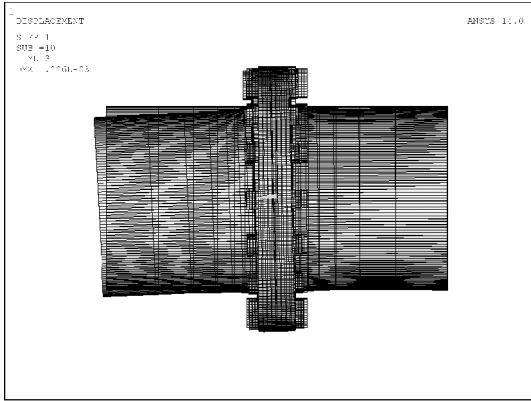
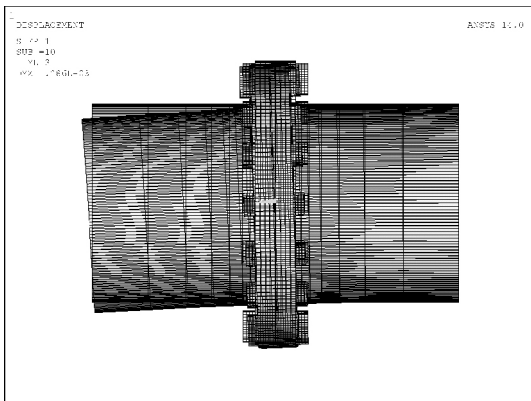


图 2 法兰温度分布

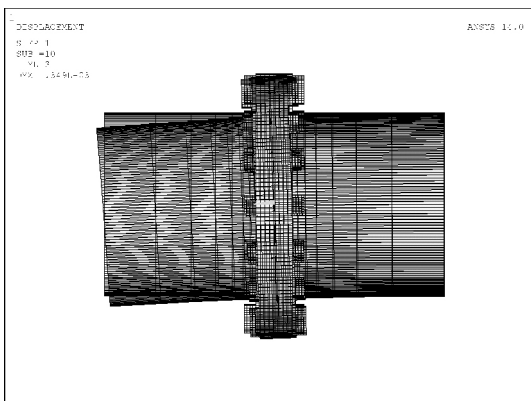
图 3 为 3 种工况下法兰连接的变形情况。从图 3 中可以看出,最大位移发生在法兰最外端以及管道自由端。3 种工况下结构的最大位移量分别为 0.226 , 0.286 , 0.349 mm。因此,总载荷一定时,随着弯曲应力比重的增加,结构最大位移逐渐增加。



(a) 工况 1 变形前后对比



(b) 工况 2 变形前后对比

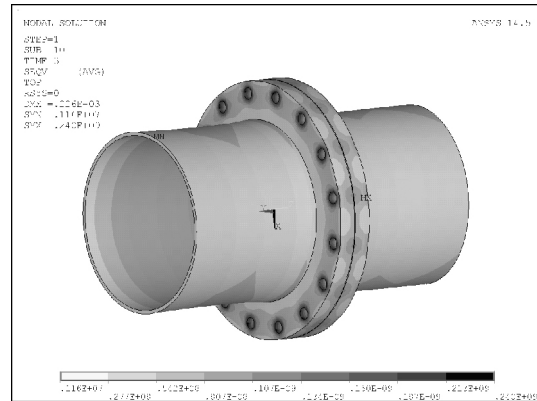


(c) 工况 3 变形前后对比

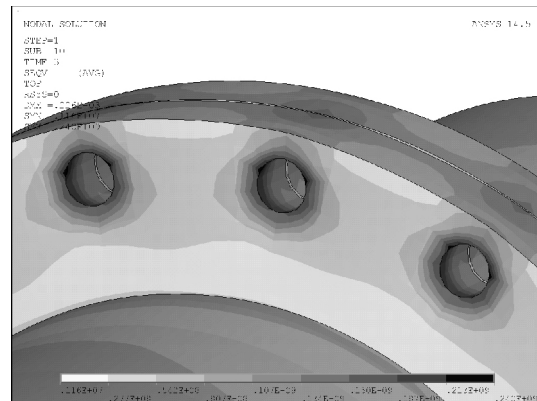
图 3 法兰连接整体变形图

图 4 为法兰的折算应力分布。由图 4 可以看出,法兰的最大应力出现在法兰面和螺栓孔交汇位置。综合分析可以发现,3 种工况下法兰的应力分布基本相似,法兰最大折算应力分别为 240 , 242 , 242 MPa。法兰连接整体的最大折算应力分别为 439 , 440 , 441 MPa ,

体现在螺栓处,如图 5 所示。3 种工况下垫片的最大折算应力最低,分别为 78.9 , 78.1 , 77.2 MPa。



(a) 法兰整体的应力分布



(b) 螺栓孔局部折算应力分布

图 4 法兰折算应力分布

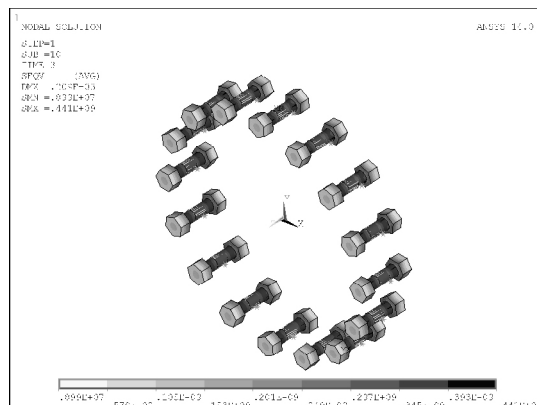


图 5 螺栓的折算应力分布

3.2 部分螺栓预紧力缺失时的应力分析

当部分螺栓预紧力缺失时,法兰连接的应力分布会发生变化。本文重点研究了最上部 3 个螺栓缺失 90%预紧力的情况。图 6 为法兰连接整体的应力分布图,可以看出缺失预紧力的 3 个螺栓处应力明显低于其他部位,但最大应力依旧分布在螺栓上。

图 7 为预紧力缺失前后,法兰连接最大应力、法兰

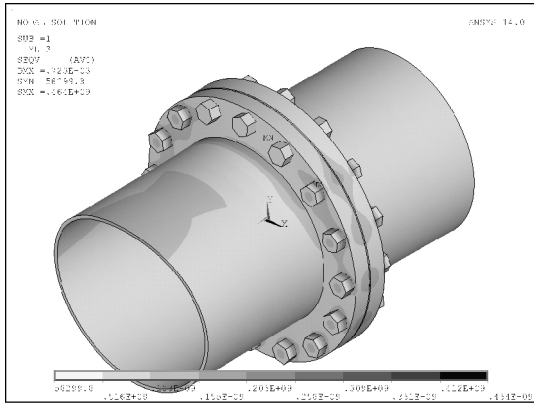


图 6 法兰连接整体的应力分布图

最大应力、法兰最外侧位移的对比。可以看出,“拉伸+弯曲”总应力一定时,弯曲应力的变化对法兰连接的应力分布影响不大。预紧力缺失之后,法兰连接的最大应力变化不大,法兰的最大应力基本不变。预紧力缺失之后,法兰最外侧位移出现了较大的提高,因此,预紧力缺失可能会导致法兰连接的泄漏。

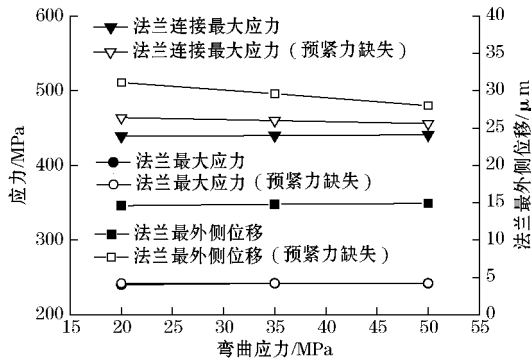


图 7 预紧力缺失前后应力分布的对比

3.3 不同螺栓强度等级时的应力分析

当装配螺纹强度等级由 8.8 降低到 6.8(屈服强度 480 MPa) 时,螺栓紧固力矩为 471 N·m,装配预紧力变为 98.125 kN,在计算时需要更改载荷设置。图 8 为改变螺纹强度等级前后法兰连接应力分布的对比。

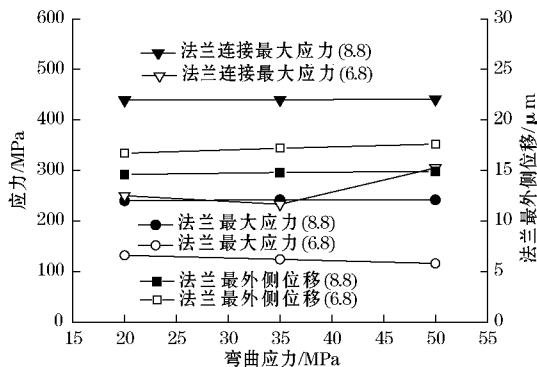


图 8 改变螺栓强度等级前后应力分布的对比

从图 8 可以看出,螺纹强度等级降低到 6.8 后,法兰连接最大应力和法兰最大应力均出现了大幅度的降低,而法兰最外侧位移却变化不大,在 3 μm 以内。

3.4 现场测试结果分析

输油管道铺设在地下约 2 m 处,管道内径为 DN350。电阻应变片粘贴在管道和阀门的法兰间,粘贴过程中,首先采用刚度较高的不锈钢板在法兰间搭接一个桥梁,然后将不锈钢片中间断开,并留有距离约为 3 mm 的缝隙,最后将单轴电阻应变片粘贴在断开的不锈钢片上,分别连接不锈钢片的两端。因此,当管道法兰间出现相对位移时,所有的位移将体现在刚度最差电阻应变片上,即可通过电阻应变片阻值的变化得到测试法兰连接处的相对位移,如图 9 所示。

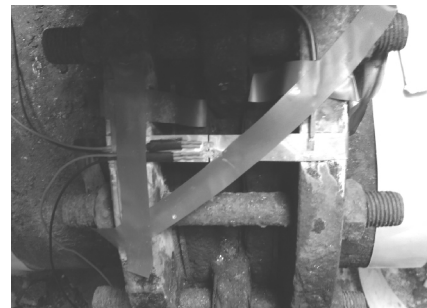


图 9 现场实验应变片粘贴情况

图 10 为法兰最外侧变形随测试时间的变化。变形最高点对应的管道内平均流速为 1.34 m/s。可以看出,当管道内流体开始通过法兰时,法兰两侧相对变形突然增加,增量在 5~12 μm 之间。在相同操作工况下,对长直管道模型进行 ANSYS 计算结果为 12 μm,两者吻合度较高。

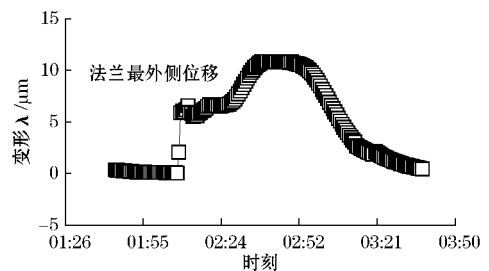


图 10 法兰最外侧变形随测试时间的变化

4 结束语

本文在温度场变化的条件下,研究了“拉伸+弯曲”作用下法兰连接的应力分布。研究发现法兰连接的最大应力出现在螺栓上,法兰上的最大应力出现在螺栓孔附近。各部分最大应力按由高到低顺序依次为:螺栓>法兰。螺栓预紧力缺失和降低螺纹强度等

(下转第 57 页)

裂纹中的氧化物是网状裂纹形成、扩展,并与表面联通之后,由燃煤在空气中燃烧并与裂纹两侧的金属发生反应生成的产物。

通过对网状裂纹区域材质的表面及截面的金相组织观察,确定裂纹位于样管母材和鳍片之间的焊缝区域。网状裂纹起裂于焊缝组织中靠近熔合线的位置,沿着柱状晶晶界向焊缝中心扩展,呈沿晶扩展特征,且 S 元素面扫描发现在裂纹的边界处有 S 元素的富集,而裂纹内部氧化区域的 S 元素含量反而较低,证明 S 元素并非来自燃煤产物与焊缝金属反应在裂纹中形成的填充物,而遗传自裂纹处原始晶界,这些均为明显的焊接热裂纹特征。热裂纹是焊缝在凝固过程中产生的内应力超过该温度下金属的断裂强度时形成的一种晶间裂纹,其形成原因可归纳为内应力和冶金偏析两个方面的因素^[4]:(1) 焊缝在凝固过程中,晶粒间残存的还未凝固的少量液体形成液态薄膜弱化了晶界强度,此时只要较小的拉应力即可使该薄膜破坏,形成热裂纹。焊缝金属凝固温度范围越宽,其热裂敏感性越大;(2) 焊缝内部存在的 S,亦即偏聚在晶界上的 S,在焊材熔敷金属和母材金属凝固过程中在晶界处形成远低于钢熔点的 Fe+FeS 类低熔共晶物液相的偏析薄膜,使热裂纹形成的倾向性增大。

由以上分析可以确定,该锅炉水冷壁管的网状裂纹位于样管与鳍片之间的焊缝区域,起裂源为焊缝中靠近熔合线的柱状晶晶界,裂纹沿柱状晶晶界扩展,裂纹界面有 S 元素富集,属于典型的焊接热裂纹。因

此,建议在焊接过程中应采取适当工艺措施降低焊接应力,防止焊接热裂纹的产生,并加强焊后质量检验。

4 结论

该电厂锅炉水冷壁管与其鳍片之间焊缝的物相构成为针状铁素体;水冷壁管壁表面网状裂纹位于水冷壁管与其鳍片之间的焊缝区,起裂源为焊缝中靠近熔合线的柱状晶晶界,裂纹沿柱状晶晶界扩展,裂纹界面有 S 元素富集,属于典型的焊接热裂纹;起裂原因主要是焊接内应力较高,应在焊接过程中采取适当工艺措施降低焊接应力,防止焊接热裂纹的产生。

参考文献:

- [1] 杨峰,崔玮,韩福全. 火电厂锅炉水冷壁管横向裂纹开裂原因分析[J]. 热加工工艺, 2011(5): 189-191.
- [2] 刘勇,唐必光. 锅炉水冷壁管横向裂纹故障机理分析[J]. 华东电力, 1999(9): 37-39.
- [3] 《火电机组焊接热处理实用技术培训教材》编委会. 火电机组焊接热处理实用技术培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 1-2.
- [4] 叶卫平. 实用钢铁材料金相检验[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 407.

作者简介: 于建明(1979—), 高级工程师, 主要从事超临界电站锅炉检验技术和缺陷研究工作。

E-mail: 27804598@qq.com

通讯作者: 刘杰(1981—), 工程师, 主要从事高温合金、耐磨合金及超临界锅炉用钢管的失效分析研究工作。

E-mail: jack_6859@163.com

(上接第 35 页)

级都会对法兰连接的应力分布产生影响。预紧力缺失之后,法兰连接的应力大小变化不大,法兰最外侧位移出现了大幅提高。降低螺纹强度等级之后,法兰连接最大应力和法兰最大应力均出现了大幅度的降低,而法兰最外侧位移却变化不大。现场实验表明,ANSYS 计算结果与实验测试结果吻合度较高。该研究结果可以为输油管线法兰连接的预紧力设定提供相应的依据。

参考文献:

- [1] 马廷霞,陈浩. 长输管道应力应变自动化监测系统研究[J]. 石油机械, 2008, 36(4): 55-57.
- [2] 帅健,王晓霖,叶远锡,等. 地面占压荷载作用下的管道应力分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(2): 99-103.
- [3] 谭超,潘国耀,刘宗祥,等. 坠落式危岩对输油管道的影

响评价[J]. 油气储运, 2011, 30(11): 805-807.

- [4] 王连捷,吴珍汉,胡道功,等. 青藏高原移动冰丘引起输油管道拱曲的数值模拟[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 675-681.
- [5] 王丽梅. 埋地长输管道泄漏事故应急关键技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [6] 张世翔,章言鼎. 青岛输油管道泄漏爆炸事故分析与整改建议[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(12): 89-91.
- [7] 张斯亮,杨宇峰,王峰,等. 法兰联接强度和密封性能的有限元分析[J]. 当代化工, 2013, 42(10): 1468-1471.
- [8] 杜坤,刘美红. 基于螺栓法兰连接系统的垫片应力分析[J]. 机械设计与制造, 2013(5): 88-90.
- [9] 韩传军,张杰,牛世伟. 基于有限元的法兰接头强度特性分析[J]. 石油机械, 2013, 41(4): 98-101.

作者简介: 刘小川(1973—), 研究方向为油气储运。

E-mail: xujingyu@imech.ac.cn