

螺栓法兰连接系统的热应力场

郑小涛,陈瑶,喻九阳,徐建民,王成刚

化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

摘 要:利用有限元软件 ABAQUS 建立了螺栓法兰连接系统的实体模型,采用热结构耦合分析方法,研究了法兰公称直径为 100 mm 的螺栓法兰系统的温度场及其应力场,以及在预紧力和温度梯度操作条件下螺栓等效应力、轴向应力、径向应力和切向应力的变化关系。结果表明,温度场对螺栓轴向两端的应力影响较大,当内壁温度为 100 °C 时螺栓头靠近法兰一侧的等效应力增加了 250 MPa,螺栓上靠近法兰一侧的螺纹的等效应力增加 100 MPa,而温度场对螺栓远离法兰一侧的螺纹的应力影响很小,说明设计时应重点考虑热应力对靠近法兰一侧的螺纹与螺栓头的影响。

关键词:螺栓;螺母;温度场;热应力

中图分类号:TH131.3

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.06.009

0 引言

法兰连接由一对法兰、垫片和螺栓组成,借助螺栓把两部分设备连接在一起,并压紧垫片使连接处紧密不漏。在压力容器应力分析中,法兰具有特殊性,因为法兰本身就是一个承受外载荷的结构部件,而且法兰连同螺栓和垫片一起成为一个承受初始预紧力的装配结构(也称为螺栓法兰系统),而失效主要表现为泄露,因此要解决法兰连接的问题,需要对整个系统的特性进行分析。文献[1]是比较二维轴对称力学模型和三维实体模型在螺栓法兰系统中的差别,文献[2]采用了接触有限元方法计算螺栓法兰垫片三者之间的相互作用,指出法兰接头密封时管道内压是一个不可忽略的计算因素,文献[3]通过三维建模软件与 ANSYS workbench 有限元软件实现无缝对接,直接将 Inventor 建立的三维模型导入 ANSYS workbench 中进行有限元单元网格的划分与受力分析,其中拉杆的等效应力最大达到 1 428 MPa,文献[4]的结果表明接触设置方式对应力集中系数影响最大。

1 螺栓法兰几何模型及参数

选择 $DN=100$ mm, $PN=6$ MPa 的法兰,上下法兰相同,材料为 1.25Cr1Mo;螺栓型号为 M16,4 个,材料为 25Cr2MoVA;垫片选择金属缠

绕垫,材料为 00Cr17Ni14Mo2,螺母型号为 M16,4 个,材料为 35CrMoA。对计算模型进行如下简化:

- (1) 螺纹牙型为三角型。
- (2) 忽略螺旋角的存在。
- (3) 在 100 °C 内所有材料的屈服应力不发生变化。

法兰及垫片具体尺寸如图 1 和图 2 所示。材料参数如表 1 所示。

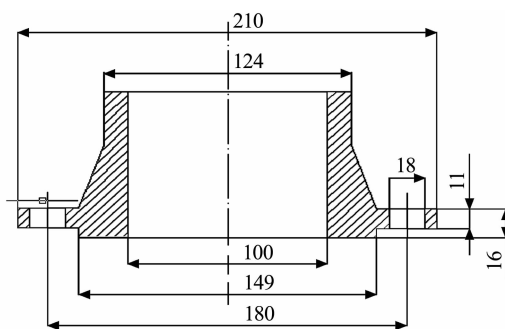


图 1 法兰几何尺寸

Fig. 1 Geometrical model of flange

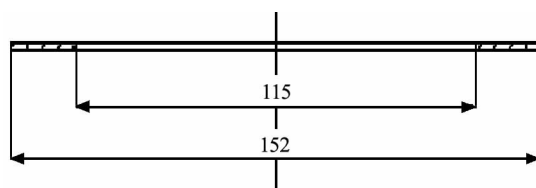


图 2 垫片几何尺寸

Fig. 2 Geometrical model of Gasket

收稿日期:2014-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305310);湖北省教育厅科学研究计划项目(Q20131506)

作者简介:郑小涛(1982-),男,湖北武汉人,讲师,博士。研究方向:结构完整性方面的教学和研究工作。

表 1 螺栓法兰系统材料参数

Table 1 Material parameters of bolted flanged system

项目	材料对应数值				
	法兰	螺栓	螺母	垫片	空气
$E \times 10^5 / \text{MPa}$	2.07	2.17	2.12	2.07	
泊松比 μ	0.291	0.3	0.3	0.3	
$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	39.8	27.2	46	15.1	0.043
许用应力	225	685	685	177	

2 螺栓法兰系统有限元模型

2.1 网格模型

有限元模型是基于软件 ABAQUS 建立的,其网格划分模型如图 3 所示。

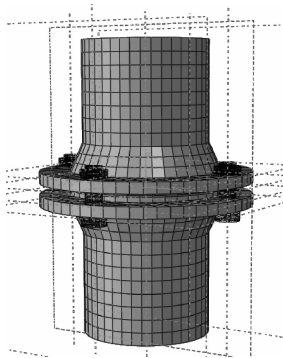


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.2 边界条件

下法兰连接管道的一端使用固支约束,管道的长度取大于 $2.5 \sqrt{Rt}$ (R 为接管内径, t 为接管厚度)^[9]可忽略边界影响,约束螺栓螺母径向方向位移。

2.3 接触条件

螺栓与螺母设置接触,螺栓及螺母与法兰设置面接触。

2.4 加载次序

(1)施加少量的预紧力 5 N。

(2)施加所有的预紧力 19 265 N,该预紧力由 $F_0 = (0.5 \sim 0.6) \sigma_s A_s$ (σ_s 是螺栓材料屈服点,MPa, A_s 是螺栓公称应力截面积, mm^2)。

(3)保持螺栓预紧时的长度不变,添加温度场。

3 分析结果

采用热力顺序耦合的方法计算螺栓法兰系统的应力场,主要进行三个分析,首先分析螺栓法兰系统的温度场,接着研究螺栓法兰系统施加预紧力与温度时的应力场。

3.1 温度场结果

分析螺栓法兰系统的温度场,螺栓法兰系统的对流换热系数参考文献[6],当工作温度为 100 °C 时,系统的温度场由图 4 有,管道以及法兰内侧温度均为 100 °C,最低温度为 81 °C 位于螺栓底侧,法兰最外侧温度为 86 °C。在没有特别散热情况下,螺栓法兰整体温度都在 80 °C 以上,说明工作温度对法兰整体温度有较大影响。

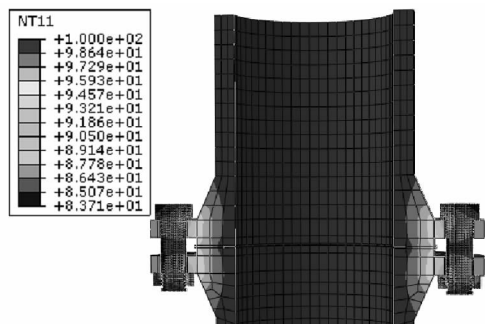


图 4 螺栓法兰系统温度场

Fig. 4 Temperature field of bolted flanged system

3.2 施加预紧力时的应力分布

分析的目的是比较在预紧力作用时温度场的存在与否对于整个应力场的影响大小,且主要研究对象为螺栓与螺母。于是根据需要定义几条研究路径,路径如图 5 所示,这几条路径都是设置在螺栓的轴向方向。重点分析路径 1 上的 mises 等效应力、切向应力、轴向应力、径向应力以及路径 2、3 上的 mises 等效应力。

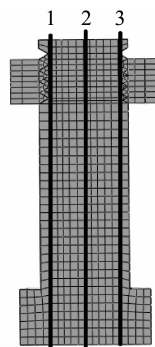


图 5 研究路径图

Fig. 5 Analysis path

图 6 至图 9 是路径 1 上的应力分析,图 6 是路径 1 上的 mises 应力,其中一条线是未施加温度场,仅施加预紧力的一个应力分布,另外一条是同时作用预紧力以及温度场的一个应力场结果。由该结果发现温度场对螺栓螺母接触部位和螺栓法兰接触部位影响大,对于螺栓中间部位影响小。图 7 是路径 1 上的切向应力,由该图可知螺栓中部切

向应力近似为 0 MPa,切应力在螺栓与法兰接触部位受温度场影响明显.图 8 是路径 1 上的轴向应力,两条线几乎重合,表明温度场不影响螺栓路径 1 处的轴向力.图 9 是路径 1 上的径向应力,其趋势与切向应力一致,螺栓中部的径向应力也是近似为 0 MPa.图 10 是路径 2 上的 Mises 应力,图 11 是路径 3 上的 Mises 应力.比较图 6、图 10、图 11,可知螺栓靠近法兰内侧的等效应力是大于螺栓法兰外侧的等效应力.

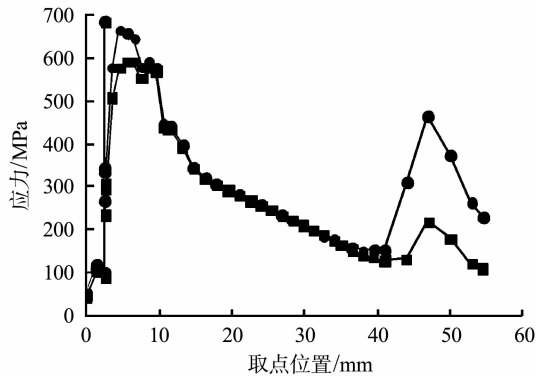


图 6 路径 1 上的 mises 应力

Fig. 6 Mises stress on path1

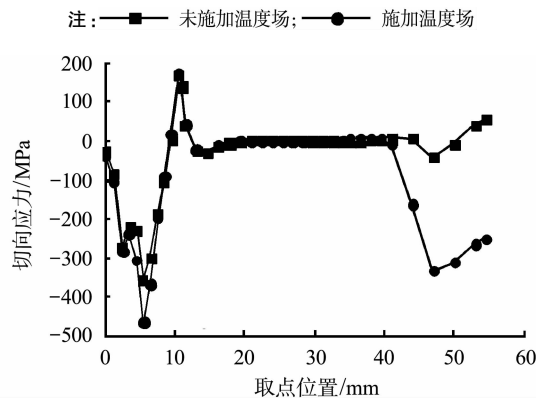


图 7 路径 1 上的切向应力

Fig. 7 Tangential stress on path1

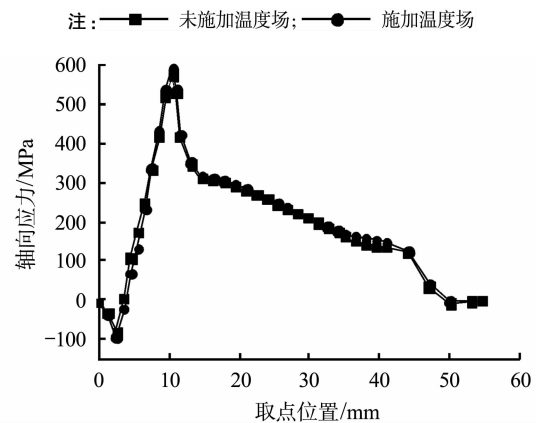


图 8 路径 1 上的轴向应力

Fig. 8 Axial stress on path1

注: —■— 未施加温度场; —●— 施加温度场

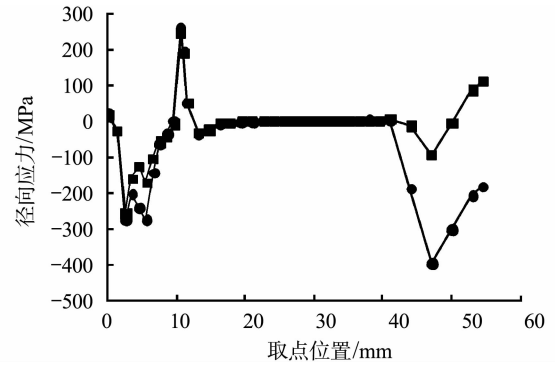


图 9 路径 1 上的径向应力

Fig. 9 Radial stress on path1

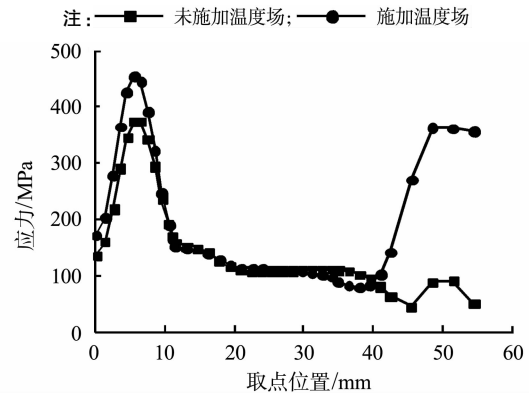


图 10 路径 2 上的 mises 应力

Fig. 10 Mises stress on path2

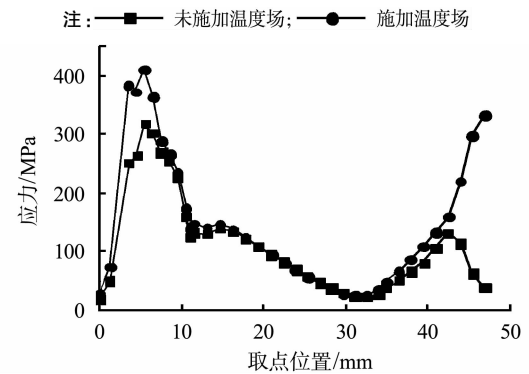


图 11 路径 3 上的 mises 应力

Fig. 11 Mises stress on path3

注: —■— 未施加温度场; —●— 施加温度场

4 结 语

(1)螺栓靠近法兰一侧的螺纹受力更大,应力增加值最大超过 100 MPa.

(2)螺栓中部只受轴向力,不受切向力与径向力,并且温度场也不影响螺栓中部的应力.

(3)温度场影响螺栓两端的应力,对螺栓头的影响更为明显,应力增加值最大为 250 MPa.

致 谢

感谢国家自然科学基金委员会和湖北省教育厅的资助!

参考文献:

- [1] 徐超,余绍荣. 机械螺栓法兰连接的有限元力学模型比较研究[J]. 机械设计与制造, 2009(6): 37-39.
XU Chao, YU Shao-rong. Finite analysis of mechanical model of bolted flange connect[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(6): 37-39. (in Chinese)
- [2] 周芝庭,冯建芬,谷春笑. 基于 ABAQUS 螺栓接头的接触有限元分析[J]. 金陵科技学院学报, 2008(12): 9-12.
ZHOU Zhi-ting, FENG Jian-fen, GU Chun-xiao. Analysis of sealing performance of flange coupling based on ABAQUS[J]. Journal of JinLing Institute of Technology, 2008(12): 9-12. (in Chinese)
- [3] 柯尊凤,邓华荣. 短应力线轧机拉杆有限元分析[J]. 冶金设备, 2010(2): 35-37.
KE Zun-feng, DENG Hua-rong. Finite element analysis of tension rod for short-stress-path mill[J]. Metallurgical Equipment, 2010(2): 35-37. (in Chinese)
- [4] 刘攀,金挺,毛庆. 反应堆压力容器法兰螺纹应力集中系数[J]. 核动力工程, 2011(2): 9-12.
LIU Pan, JIN Ting, MAO Qing. Analysis on fatigue strength reduction factor of reactor pressure vessel flange thread[J]. Nuclear Power Engineering, 2011(2): 9-12. (in Chinese)
- [5] 冯军军,刘麟,顾伯勤. 基于 ABAQUS 的承受外弯矩作用的螺栓法兰连接参数化研究[J]. 润滑与密封, 2010(10): 55-58.
FENG Jun-jun, LIU Ling, GU Bo-qin. Parametric study of the bolted flanged connections subjected to external bending moments based on ABAQUS[J]. Lubrication Engineering, 2010(10): 55-58. (in Chinese)
- [6] 卢均臣. 基于蠕变的高温法兰强度[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
LU Jun-chen. Strength and sealing analysis of flange at high temperature based on creep[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

Thermal stress of bolted flanged system

ZHENG Xiao-tao, CHEN Yao, YU Jiu-yang, XU Jian-min, WANG Cheng-gang

Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and
Intrinsic Safety(Wuhan Institute of technology), Wuhan 430205, China

Abstract: The real model of bolted flanged system was established by finite element software ABAQUS. The temperature field and stress field of bolted flanged system were analyzed using thermal-structure coupling analysis. Changes of equivalent stress, axial stress, diameter stress and tangential stress of bolt under combined preload and temperature gradient were studied. Results show that the temperature field significantly increases the stress at two ends of bolt; the maximum equivalent stress at bolt head closing to flange increases 250 MPa and equivalent stress of thread in bolt closing to flange increases 100 MPa when the inner wall temperature is 100℃; temperature field has few influences on stress at thread which is away from flange in bolt. It illustrates that the influences of thermal stress on bolt closing to flange should be stressed in engineering design.

Key words: bolt; nut; temperature field

本文编辑:陈小平