

文章编号:1674-2869(2014)010-0031-06

高温法兰连接系统温度场的有限元分析

喻九阳,王明伍,郑小涛,程 诗

武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:利用有限元软件 ANSYS 创建法兰连接系统的三维温度场模型,建立螺栓、法兰、垫片间的接触对.设置边界条件及对流传热系数,研究了 500 ℃ 高温条件下炼化装置中法兰连接系统的温度场及热流,并分析了法兰、螺栓、螺栓、螺母、垫片、空气柱的温度分布规律及具体温度值.结果表明:法兰温度从内壁面到外壁面逐渐降低,靠近螺母端外侧温度最低为 334.952 ℃;螺栓温度从两端到中间呈现为先增大后减小的规律,螺栓内外侧温差最大值在螺栓的两端;垫片温度沿周向变化很小,垫片温度沿径向由内到外呈线性减小;上、下两段空气柱的温度关于垫片中面对称分布,靠近垫片端内侧温度最高.

关键词:温度场;有限元;法兰连接系统

中图分类号: TB24

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2014.010.007

0 引言

随着经济发展与能源供应的矛盾日益突出,炼化技术迅速发展,法兰连接系统广泛应用于各种炼化装置等高温高压工况.高温法兰泄漏是石油化工等企业发生重大事故的主要原因之一^[1].炼化装置长周期安全生产的要求被不断提高,对高温法兰连接系统等薄弱环节也提出了更高的密封要求.高温法兰连接系统相对普通法兰接头而言最大的区别是高温载荷,施加温度载荷后法兰连接系统中各组件的温度分布及热流是研究高温螺栓法兰连接系统的基础.喻健良、闫兴清等^[2]由实验探索了法兰连接系统各部件高温工况下的温度分布和螺栓力的变化规律.陆晓峰、沈轶^[3-4]对高温法兰连接系统中各部件的失效实例进行一些分析.由于试验方法往往成本高,实施测量的难度较大,本文采用有限元分析方法,对 500 ℃ 下螺栓法兰连接系统的温度分布进行模拟分析,给出了法兰、螺栓、垫片等部件的温度分布规律及具体的数值.此研究为高温螺栓法兰连接系统紧密性和高温结构完整性研究奠定了基础,具有重要的工程价值.

1 法兰连接系统基本参数

法兰连接系统中法兰、垫片和螺栓的零件图

如图 1~3 所示.文中上、下法兰公称压力和公称直径分别为 CLASS600 和 DN300.垫片为金属缠绕垫片,其公称压力和公称直径分别为 CLASS600 和 DN300.该系统共有 20 个 M33 的等长双头螺柱,及 40 个与其配套的螺母.

螺栓法兰连接系统工作在 500 ℃ 的高温环境下,各材料的性能各不相同.文中法兰连接系统中法兰的材料为 15CrMo,螺栓材料为 25Cr2MoVA,螺母材料为 35CrMo.其具体的热物理性能如表 1 所示.

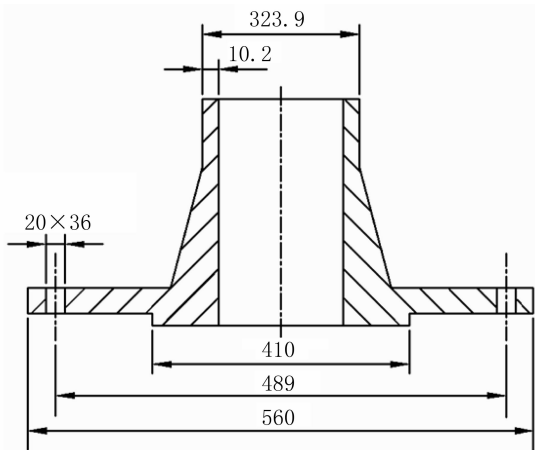


图 1 法兰尺寸

Fig. 1 Flange dimensions

收稿日期:2014-07-15

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(20131506);武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2013073)

作者简介:喻九阳(1962-)男,湖北武汉人,教授,硕士.研究方向:强化传热技术与设备、机电一体化技术和设备等.

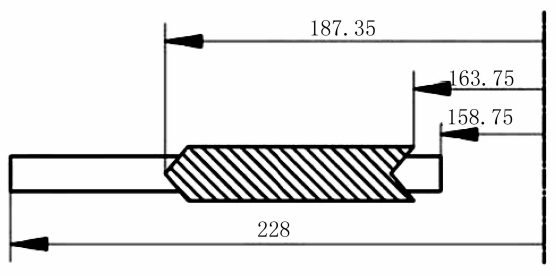


图 2 垫片尺寸
Fig. 2 Gasket dimensions

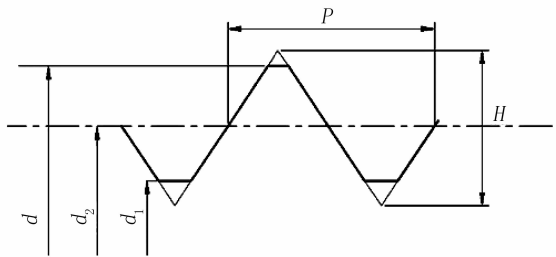


图 3 螺纹尺寸
Fig. 3 Thread dimensions

表 1 法兰材料的性能

Table1 The performance of the flange material

	热物理参数					
	$\alpha \times 10^{-6} / \text{K}$			$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$		
温度 / $^{\circ}\text{C}$	20	100	500	20	100	500
法兰	11.9	11.9	14.0	—	—	38.1
螺栓	11.5	11.5	13.9	—	41.9	—
螺母	12.3	12.3	14.3	—	40.6	—
垫片	—	16.0	—	—	15.1	20.9
空气柱	—	—	—	0.043	0.067	—

2 FEM 模型

2.1 确立模型

法兰连接自身结构具有周期对称性,载荷也具有周期对称性,其完整几何模型如图 4 所示,取其 1/20 构建有限元分析模型.由圣维南原理^[5],锥颈前端的接管长度在 $2.5\sqrt{RT}$ 以上时,边缘效应可忽略,其中 R 是接管半径, T 是管厚,经计算圆整取 120 mm. 综上,建立几何模型如图 5 所示.

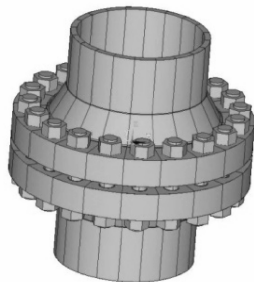


图 4 法兰连接整体模型
Fig. 4 The integral model of flange

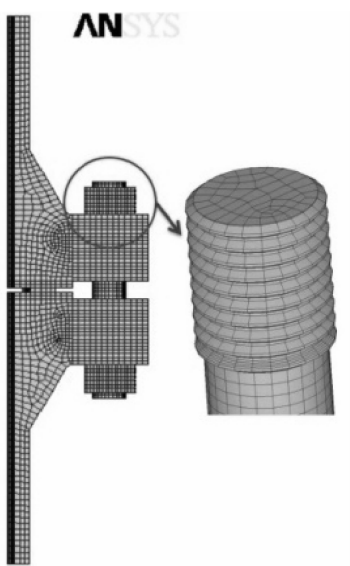


图 5 法兰连接系统 $\frac{1}{20}$ 模型及网格

Fig. 5 1/20 model and mesh of Flange

温度场分析采用 8 节点三维热单元 SOLID70,该单元可模拟 3 维传热,8 个节点中每个节点分别仅有一个方向的自由度,故可用于本法兰连接系统的稳态热分析.在对法兰连接实体模型进行网格划分时,在研究的重点区域需对网格进行合理的细化,以便于真实的模拟较大的温度梯度,非重点研究区域可以采用较为稀疏网格进行划分,在不影响最终结果的前提下简化计算.同一分析对象,六面体较四面体而言,所需单元个数少、计算量小、计算结果准确度相当,故这里选择六面体单元 SOLID70.

该法兰连接系统实体模型中,螺母与螺栓接触的第二个螺纹处进行网格细化,整体均采用扫掠网格划分方法,划分较稀疏的网格.得到的网格模型如图 5 所示,本模型共有 30 574 个单元, 33 277 个节点.为模拟螺栓螺母与法兰之间的接触作用,必须建立接触对来模拟接触非线性影响.与 SOLID70 对应的接触单元为 CONTA174,目标单元为 TARGE170.设置接触对时,将法兰端面作为接触面、螺母下端面作为目标面,如图 6 所示,同时考虑螺栓、螺母的螺纹面之间也存在接触作用,并输入接触对之间的传热系数.

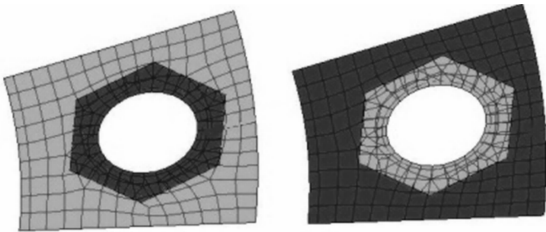


图 6 接触对
Fig. 6 contact pair

3 热载荷及热分析边界条件

根据实际操作时的工况,该温度场分析为稳态传热,介质的温度为 500 ℃,据分析,内壁面的温度略小于或等于管道法兰中介质的温度,故取内壁温度为 497 ℃.在法兰外壁、螺栓、螺母等裸露在空气中的表面上施加对流传热系数,取周围空气温度为 20 ℃.由于风速、风向等因素对对流换热系数的影响很大,所以取垫片的外侧及法兰不与垫片接触的表面的对流传热系数为 10 W/m² · ℃,螺栓中部裸露在空气中的表面的对流传热系数为 20 W/m² · ℃,法兰、螺母、螺栓端部裸露在空气中的表面的对流传热系数为 30 W/m² · ℃^[6].由于螺栓载荷较大,接触应力也较大,故设螺母与上下法兰面之间的接触传热良好,因此认为它们之间的热阻较小,取 $R_i=1\times10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{℃/W}$,其余表面视为满足绝热边界条件^[7],温度边界条件如图 7 所示.

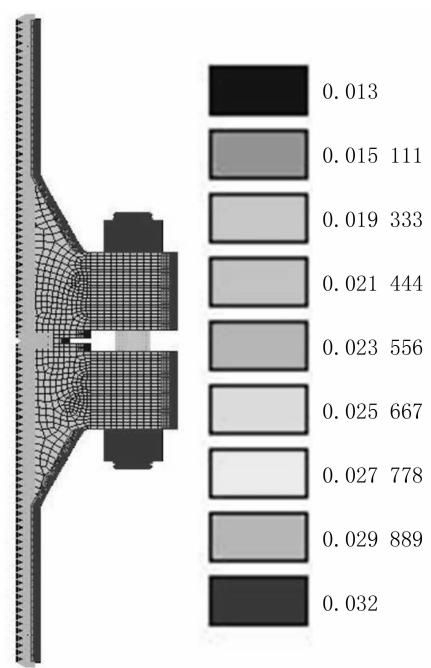
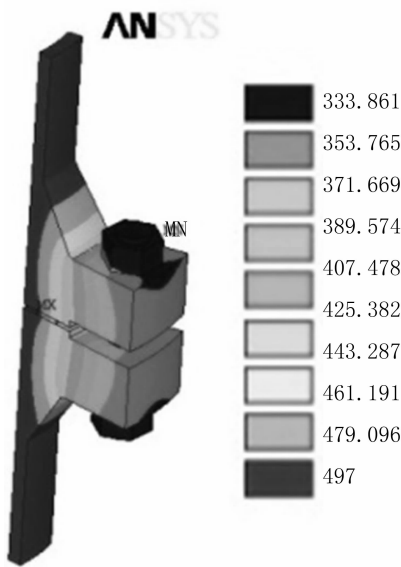


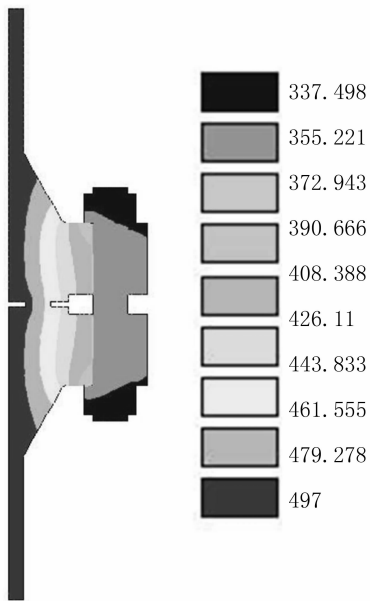
图 7 温度边界条件
Fig. 7 Temperature boundaries

4 螺栓法兰结构的温度场分析

经分析法兰连接系统的温度分布如图 8 所示,温度从法兰内壁面经螺栓、垫片到外壁面逐渐减低,热量由内向外传递.最大温度位于法兰内壁面处,为 497 ℃;最低温度位于螺栓端部外侧,为 334.952 ℃,整体温度基本呈对称分布.



(a)整体温度分布

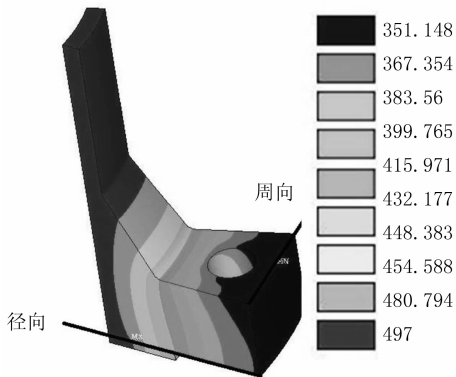


(b)剖面温度分布

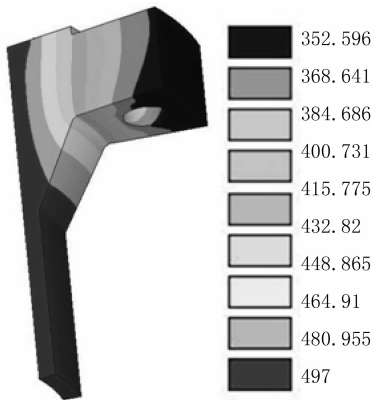
图 8 法兰整体温度分布

Fig. 8 The temperature of integral flange

从法兰的温度分布的角度来看,基本成对称分布,如图 9 所示,温度由内壁面到外壁面逐渐降低,与锥颈相连的管段外表面温度约为 491.143 ℃,法兰最低温度约为 352 ℃,均在法兰的最外侧靠近螺栓孔处.为了解法兰体径向和周向的温度变化,沿径向和周向各取一条路径进行分析,如图 9(a)所示.其中径向温度分布如图 10(a)所示,温度由内表面至外表面近似呈线性变小,一直减小至 365.361 ℃.周向温度分布如图 10(b)所示,温度分布关于螺栓孔中心处法兰直径对称,呈现出中间低两边高的特征,这是螺栓孔内的空气层热阻远大于法兰金属材料的热阻造成的.



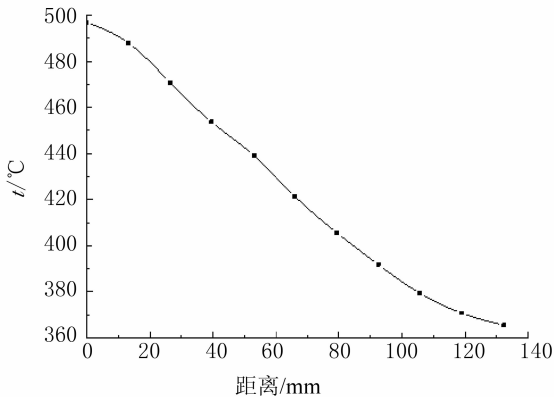
(a) 法兰 1 温度云图



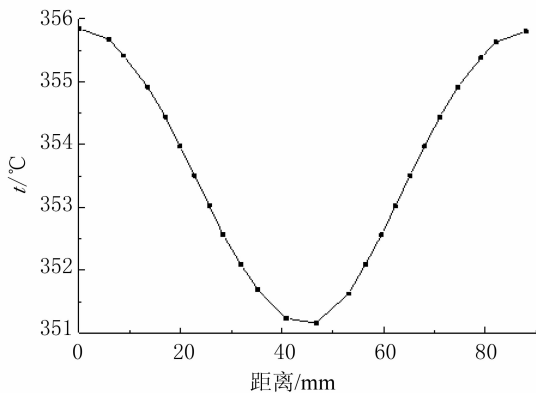
(b) 法兰 2 温度云图

图 9 法兰温度

Fig. 9 The temperature of flanges



(a) 径向温度变化



(b) 周向温度变化

图 10 不同路径温度分布

Fig. 10 Temperature of different paths

螺栓螺母的温度分布如图 11 所示,从图 11 中可以看出,最低温度位于螺栓的上端外侧,为 335.453 °C 左右.取图 11 中 A—A 为螺栓内部纵向,B—B 为螺栓外部纵向,两路径温度分布结果如图 12 所示,螺栓的温度从两端到中间呈现为先增大后减小的规律,这是因为螺栓中部裸露在空气中,而空气对流传热系数较小.含螺纹段第 1 个螺纹内侧因接触良好温度最高,如图 13 所示,上下两端基本呈对称分布,螺栓内测温度要高于螺栓外侧温度,温差最值在路径的两端.

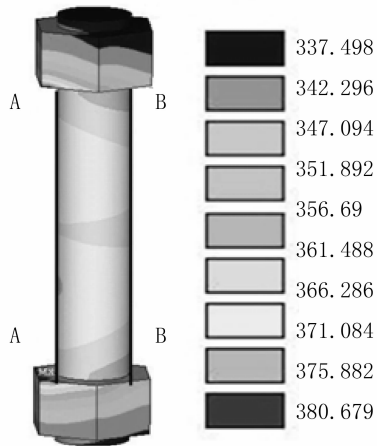


图 11 螺栓温度

Fig. 11 The temperature of bolt

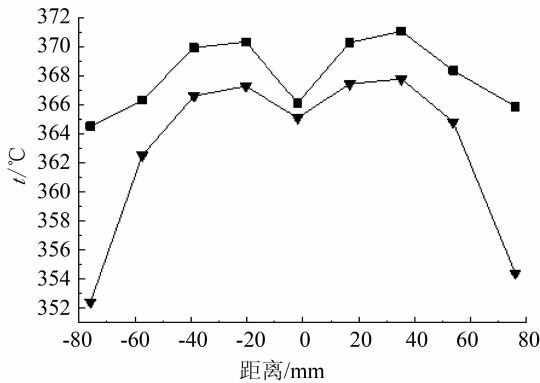


图 12 螺栓内外侧的温度

Fig. 12 The temperature of inside and outside on bolt

注: —■— A—A
—▼— B—B

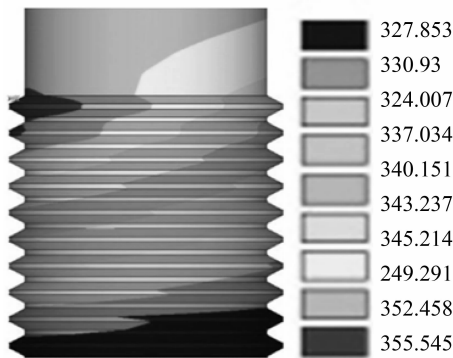


图 13 螺纹局部温度分布

Fig. 13 The temperature distribution of thread

垫片的温度场分布如图 14 所示,垫片温度基本是从内侧到外侧依次降低,且沿垫片径向路径的温度分布如图 15 所示,内部温度为设定温度 497 ℃,由内至外近似呈线性减小,减小至 454.524 ℃. 垫片温度沿周向波动甚微,基本为定值.

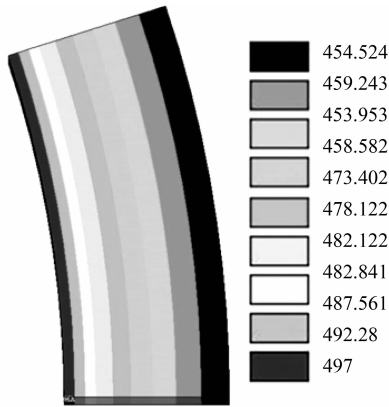


图 14 垫片温度分布

Fig. 14 The temperature distribution of gasket

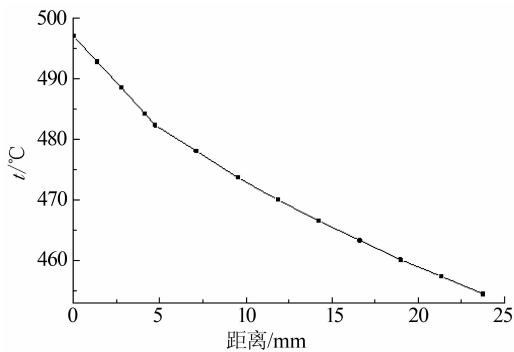


图 15 垫片径向温度分布

Fig. 15 Temperature radial distribution of gasket

空气层作为双头螺柱和法兰体之间的一种真实的存在,为真实的模拟法兰与螺栓间的热传递,建立空气环层并设置其传热系数. 空气环层的温度分布如图 16 所示,上空气柱和下空气柱关于螺栓中面近似对称分布,且内外温差较大,为 63.813 ℃.

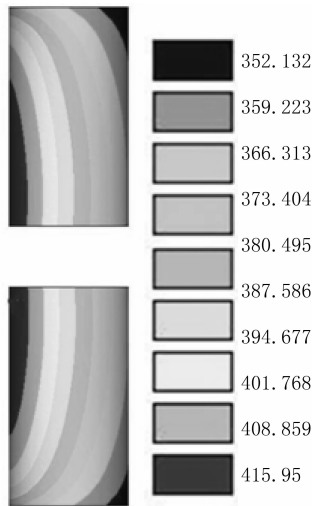


图 16 空气柱的温度分布

Fig. 16 The temperature distribution of air column

5 结 论

对高温螺栓法兰连接系统的稳态温度场分布的研究为高温螺栓法兰连接系统紧密性和高温结构完整性研究奠定了基础. 从计算结果来看:

- a. 法兰径向温度由内表面至外表面近似呈线性减小至 365.361 ℃;周向温度关于螺栓孔中心处法兰直径对称,呈现出中间低两边高的特征.
- b. 螺栓不含螺纹段温度沿轴向从两端到中间呈现为先增大后减小的规律,螺栓内侧温度要高于外侧,温差最大值在路径的两端;含螺纹段第 1 个螺栓内侧温度最高.
- c. 垫片径向温度近似呈线性减小,由内至外减小至 454.524 ℃;温度沿周向波动甚微,基本为定值.
- d. 上、下两段空气层的温度以垫片中面对称分布,靠近垫片端内侧温度最高,最高温度为 415.95 ℃,最低温度为 352.137 ℃.

致 谢

感谢国家自然科学基金委员会、湖北省教育厅科学研究计划项目和武汉工程大学研究生教育创新基金项目的资助!

参考文献:

[1] 顾伯勤,陈永林,陆晓峰. 垫片密封技术研究现状与展望[J]. 石油化工设备, 2001, 30(5): 41-43.
GU Bo-qin, CHEN Yong-lin, LU Xiao-feng. Actuality and prospect of the research in gasket sealing technology[J]. Prtro-chemical Equipment, 2001, 30 (5): 41-43. (in Chinese)

[2] 喻健良,闫兴清,罗从仁. 高温下法兰系统温度分布及螺栓载荷变化[J]. 压力容器, 2013, 30(11): 1-7.
YU Jian-liang, YAN Xing-qing, LUO Cong-ren. Temperature distribution and bolt load changes of flange system in high temperature [J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(11): 1-7. (in Chinese)

[3] 沈轶,陆晓峰. 高温法兰连接系统的失效分析[J]. 润滑与密封, 2006, 4(4): 164-167.
SHEN Yi, LU Xiao-feng. Failure analysis on flanged joints at elevated temperature[J]. Lubrication Engineering, 2006, 4(4): 164-167. (in Chinese)

[4] 陆晓峰,顾伯勤. 高温法兰连接系统的安全评定方法[J]. 润滑与密封, 2005, 11(6): 144-148.
LU Xiao-feng, GU Bo-qin, et al. Safety assessment method of flanged joints at elevated temperature[J]. Lubrication Engineering, 2005, 11(6): 144-148. (in Chinese)

[5] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社,

- 2004.
- LIU Hong-wen. Mechanics of materials[M]. Beijing: Advanced Education Press of China, 2004. (in Chinese)
- [6] 王俊和, 蔡仁良, 钟伟明. 在稳态温度场中法兰接头的三维有限元分析[J]. 压力容器. 2005, 22 (10): 18-22.
- WANG Jun-he, CAI Ren-liang, ZHONG Wei-ming. The 3-D finite element analysis of flanged joint under stable temperature field [J]. Pressure Vessel Technology, 2005, 22 (10): 18-22. (in Chinese)
- [7] 卢均臣. 基于蠕变的高温法兰强度与密封分析[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)

Temperature field analysis of flanged joints at high temperature based on finite element method

YU Jiu-yang, WANG Ming-wu, ZHENG Xiao-tao, CHENG Shi

School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: a three dimensional temperature field model of flanged connection system was built by the finite element software ANSYS, establishing the contact effect of bolt, flange and gasket. Setting the boundary conditions and the convective heat transfer coefficients, the temperature field and heat flux of flanged joint system in refining device at 500 °C were researched. The temperature distribution and the temperature values of flange, bolts, thread, nut, gasket and the air column were investigated. The results show that flange temperature reduces from the inner surface to the outer surface gradually, the lowest temperature is 334.952 °C at the outside of the nut end; the bolt temperature increases first, then decreases regularity from the two ends to the middle, and the maximum temperature difference between the inside bolt and outside appears at the two ends of bolt; the gasket temperature along the circumferential direction changes a little, however the gasket temperature along radial direction decreases linearly; the temperatures of the two air column distribute symmetrically along the middle of gasket, and the highest temperature appears at inside surface of air column near to gasket.

Key words: temperature field; finite element method; flanged connection system

本文编辑:陈小平