

# 某舰用锅炉过热器胀接接头弹塑性有限元分析

周传月<sup>1</sup>, 李桂英<sup>2</sup>, 马云翔<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天工程与力学系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘 要:** 针对某舰用锅炉过热器实际胀接结构, 采用大型有限元通用程序 ANSYS 建立了胀接接触分析模型, 进行了三维弹塑性有限元分析。研究了材料特性和工作温度等对胀接接头残余接触压力的影响, 并提出一些对工程设计和排除故障具有指导作用的建议。

**关 键 词:** 胀接接头; 有限元法; 弹塑性分析; 残余应力; ANSYS 程序

中图分类号: U261.13; O241.82 文献标识码: A

## 1 前言

目前, 胀接的理论研究和试验研究主要集中在换热器上<sup>[1~3]</sup>, 对锅炉, 尤其是舰用锅炉过热器管子的胀接研究较少。舰用锅炉的特点是工作温度高, 负荷变化频繁。因此, 这类过热器管子胀接接头承受高温负荷后是否可靠是值得研究的课题。衡量一个管子—管板接头是否符合要求的两个准则是接头要有足够抗拉脱能力和足够的密封能力。对胀接接头来说, 这两个准则能否满足主要取决于在胀接后和在操作条件下管子和管板之间的残余接触压力的大小和分布情况。因此, 本文的研究主要集中于管子和管板在胀接后, 以及高温工作状态和回复至室温条件下, 管子和管板之间残余接触压力的大小和分布情况, 以及各种因素对它们的影响。

随着计算机技术和有限元分析技术的高速发展, 采用有限元技术作为工程研究的一种新手段, 与传统的解析法和试验法相比, 存在着许多优越性。文献[4~5]是国内较早使用有限元技术建立三维模型, 对胀接接头进行弹塑性计算分析的。文中定量地研究了材料弹性模量和热膨胀系数对胀接的影响; 管板厚薄、管子外伸对胀接的影响; 还研究了升温 and 降温对于已经水压试验合格的接头的影响。该文中只考虑了 50℃ 的温升, 与实际工作环境相差甚远。本文采用大型有限元通用程序 ANSYS 对某舰用过热器实际胀接结构进行三维非线性有限元分

析, 研究胀接接头的性能。

## 2 胀接接头的三维有限元模型

### 2.1 有限元网格

取如图 1 所示顺序排列的管子和管板为研究对象, 并做如下假设:

(1) 材料是均匀的, 没有任何缺陷; (2) 材料符合弹塑性规律, 不考虑蠕变特性; (3) 管子和管板的尺寸理想的, 不考虑公差。

利用结构的对称性, 建立如图 2 所示的三维有限元分析模型。这个模型包括一部分管子和一部分管板。管子的外径为 25 mm, 内径为 21 mm, 管壁厚 2 mm, 管板厚度为 40 mm。管子下端伸出管板 6 mm, 而管子的另一伸出端取为 20 mm, 以消除管子端部对接头的影响。管子和管板采用 8 节点三维实体单元模拟, 管子和管板的接触采用点对点接触单元模型。整个模型共计 2 835 个三维实体单元, 143 个接触单元, 4 533 个节点。

### 2.2 边界条件和载荷

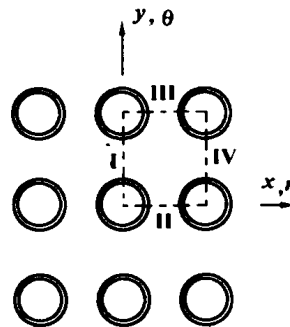


图 1 某锅炉过热器管子的排列方式

如图 1 所示, 缺省的直角坐标系和柱坐标系的原点都在管子的中心。结构关于截面 I 和截面 II 是对称的, 即这两个截面上的节点  $\theta$  方向的位移为零。管子的内表面为自由边界。截面 III 和 IV 远离胀管接触区, 因此近似处理为自由边界。另外, 为了防止模型发生刚体位移, 在  $Z$  方向, 管子和管板上各有一个节点被约束。

胀管过程通过在柱坐标系中施加径向位移来实

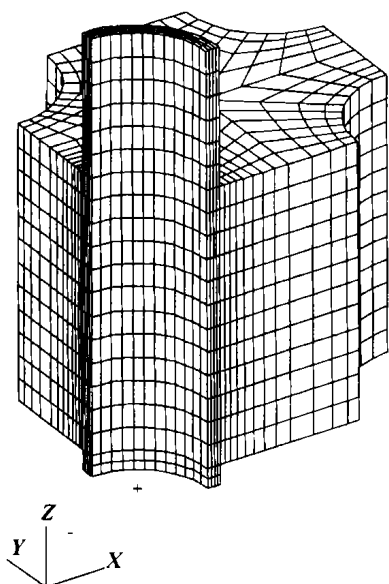


图2 胀管接头三维有限元模型

现,温度通过在节点上施加均匀的节点温度来实现。管子内壁施加径向位移为 0.2 ~ 0.5 mm,最大工作温度取为 480 ℃,工作压力为 6 MPa。计算中分四个载荷步来完成加载和卸载过程:(a)施加胀管位移载荷步,胀管径向位移由零升至预定值;(b)卸除胀管位移载荷;(c)施加温度及压力载荷步,升至预定值;(d)卸除温度及温度载荷,温度降至常温,压力载荷降低至零。

### 2.3 材料特性

管子考虑两种材料 12Cr1MoV 和 1Cr19Ni11Nb。

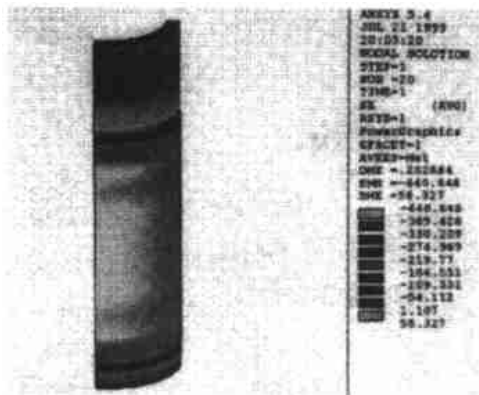


图3 胀管后管子上的接触应力

胀管过程是一个弹塑性过程,因此需要知道和定义管子和管板弹性和塑性性能。在计算中,我们采用双线性动态硬化规律来描述材料特性,它可通过弹性模量  $E$ 、初始屈服极限  $\sigma_s$  和塑性表格数据来定义硬化特性。

### 3 计算结果及分析

我们着重考察管子与管板之间的残余接触压

力,由于管板孔内表面各点上的接触压力是不相同的,因此,计算平均接触压力。管子胀接后,管子和管板上的典型接触应力分布见图3和图4。温度和压力载荷卸掉后管子和管板上的典型当量应力分布见图5。

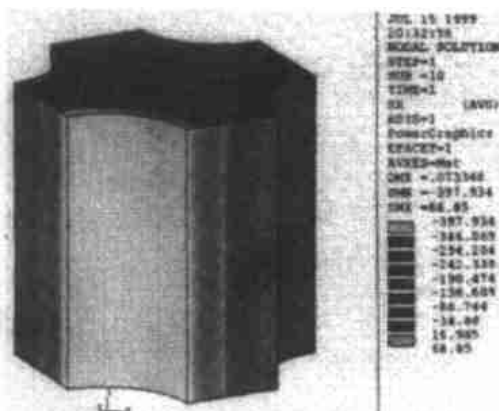


图4 胀管后管板上的接触应力

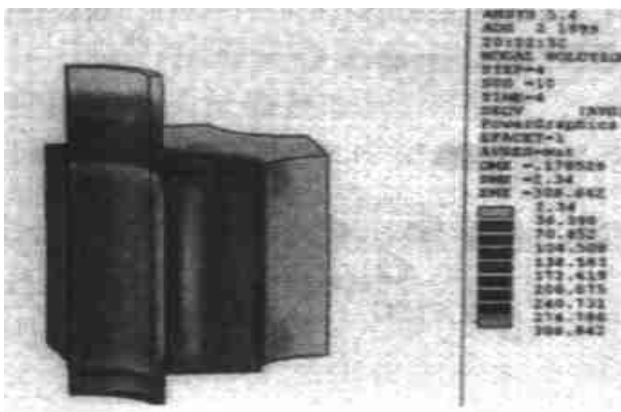


图5 温度和压力载荷卸掉后管子和管板上的当量应力

计算表明:(1)管子和管板间的平均残余接触压力随着胀管量(或胀管率)的增加而增加,当胀管量达到一定值后增加缓慢。为保证胀管的有效性,应选择合适的胀管量。(2)管子与管板之间的径向接触应力沿周向分布不均匀,工作压力(6 MPa)对残余接触压力的影响很小;(3)管子与管板材料相同,即热膨胀系数相同时工作温度下降到室温后,管子外表面和管板孔表面上的残余接触压力变化很小;(4)管子与管板材料热膨胀系数不同( $\alpha$ 分别为  $1.2 \times 10^{-5}$ 和  $1.8 \times 10^{-5}$ ,相差为  $0.6 \times 10^{-5}$ ),而且管子热膨胀系数大于管板的热膨胀系数时(方案2),工作温度下降到室温后,管子外表面上的径向应力变为“+值”,也就是管子与管板已分离。管子的热膨胀系数大于管板的热膨胀系数,在高温时能保持一定

的残余应力,而且降到常温时有可能发生泄漏;(5)在加载中,第一次加温加压及减温卸压与重复加温加压及减温卸压的计算结果基本相同。

### 3.1 热膨胀系数 $\alpha$ 对残余应力的影响

为了考察热膨胀系数对计算结果的影响,进行了几种方案的计算。首先,取管子和管板的材料热膨胀系数都相同。其次,管子的热膨胀系数分别取为  $1.4 \times 10^{-5}$ 、 $1.5 \times 10^{-5}$ 、 $1.6 \times 10^{-5}$ ,而管板的热膨胀系数取为  $1.2 \times 10^{-5}$ 。

计算表明:(1)只要管子和管板热膨胀系数相同,管子和管板接触面上有一定的残余接触应力,而与热膨胀系数的具体值无关;(2)在工作温度为  $480^\circ\text{C}$  的情况下,管子与管板热膨胀系数差值小于  $0.3 \times 10^{-5}$  时,管子和管板之间就有一定的残余接触压力。

### 3.2 工作温度对残余应力的影响

前面的计算结果表明:过热器的的工作温度对残余接触应力有很大的影响。为此,我们在这两种方案的基础上,取不同的工作温度。

计算结果表明:(1)经过一个载荷循环后,管子与管板之间的间隙与工作温度有关,温度增高间隙增大;(2)在管子与管板的热膨胀系数差值为  $0.6 \times 10^{-5}$  的情况下,工作温度  $400^\circ\text{C}$  时,经过一个温度和压力载荷循环后,管子与管板分离。工作温度  $300^\circ\text{C}$  时,经过一个温度和压力载荷循环后,管子与管板之间大部分接触。因此,工作温度超过  $300^\circ\text{C}$ ,胀接头将有泄漏现象。

## 4 残余应力释放试验

为验证计算结果,进行了残余应力释放试验。试验采用 7 块厚度为 40 mm 的管板,每个管板上胀接两种管子。其中 6 个胀接后的管板与管子分成三组放到加热炉中加热。每一组保持常温,第二组加热到  $400^\circ\text{C}$ ,第三组加热到  $500^\circ\text{C}$ ,并保温 10 个小时后冷却到常温。每个管子上贴 3 个应变片,然后在机床上铣掉管板,测量管子上的残余应变和残余应力。测量结果表明:保持常温的管子有较大的残余应力,加热到  $500^\circ\text{C}$  的管子,基本上没有残余应力,加热到  $400^\circ\text{C}$  的管子残余应力已很小。此试验得到的结果与弹塑性有限元分析结果有相同的趋势。

## 5 结论

通过弹塑性有限元分析和残余应力释放试验,得到以下结论:

(1) 试验和工程实践表明用三维非线性有限元方法来模拟管子与管板胀接接头,可以考虑各种参数对胀接的影响,是一种可行、高效的方法,对胀接接头的设计和排故具有现实指导作用。ANSYS 程序的非线性分析功能和弹塑性分析功能,基本上满足胀接接头的弹塑性计算分析。

(2) 管子和管板间的平均残余接触压力随着胀管量(或胀管率)的增加而增加,当胀管量达到一定值后增加缓慢。为保证胀管的有效性,应选择合适的胀管量。

(3) 管子与管板的热膨胀系数差值对胀接接头的的影响非常大,而与热膨胀系数的具体值无关。只要管子和管板热膨胀系数相同或接近,管子和管板接触面上有一定的残余接触应力。如果,管子与管板热膨胀系数差值较大,胀接后水压试验合格,经过一个升温、升压和降温、降压循环,管子和管板之间的残余接触压力非常小,或出现缝隙,有泄漏的可能。因此,在选择管子和管板材料时一定要注意材料的热膨胀系数的匹配。

(4) 在不考虑材料蠕变的条件下,第二次加温、加压后,残余接触压力又恢复到第一次加温加压的程度,即工作状态不出现泄漏现象。第二次减温卸压后,残余接触压力又消失,即常温出现泄漏现象。

### 参考文献:

- [1] 徐 鸿. 包括热载荷在内的胀接接头加载的弹塑性分析[J]. 压力容器, 1985, 2(1): 29-35.
- [2] 徐 鸿. 胀接接头弹塑性和在换热器上的应用[J]. 压力容器, 1986, 3(5): 39-45.
- [3] 颜惠庚, 张炳生, 葛乐通, 李培宁. 换热器的液压胀管研究(一)—胀接压力的确定[J]. 压力容器, 1996, 13(2): 21-25.
- [4] 汪建华, 陆浩. 胀管接头的弹塑性有限元分析及其应用[J]. 压力容器, 1997, 14(5): 30-33.
- [5] 段成红. 液压胀接接头的弹塑性三维有限元分析[D]. 北京: 北京化工大学, 1999.

(复 编辑)

Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 70 ~ 72

A mathematical model was set up for an asymmetrical rotor-bearing system. With the help of this model the authors have analyzed the influence of a variety of factors on the stability of the asymmetrical rotor-bearing system. Among such factors one can enumerate external damping, rotor rigidity anisotropic factor, support rigidity anisotropic factor and the relative flexibility factor of the support. As a result of the analysis and numerical simulations it has been found that the rotor rigidity anisotropy and the system damping are the major factors contributing to the loss of stability of the system. To solve the issue of instability of the asymmetrical rotor-bearing system in engineering practice the authors have proposed a method aimed at enhancing the support rigidity symmetry of a rotor-bearing system, which has been proved effective in practice.

**Key words:** asymmetrical rotor-bearing system, stability analysis, rigidity, anisotropy

湍流焓传递方程及其应用 = Exergy Transfer Equation for Turbulent Flows and Its Applications [刊, 汉] / Wang Song-ping (Qingdao University, Qingdao, China, Post Code: 266071), Chen Qing-lin, Hua Ben (South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510641) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 73 ~ 76

The authors have derived an exergy transfer equation for turbulent flows. On this basis a study was conducted of the exergy transfer for a convection heat exchange tube with a wall surface constant heat flux. The distribution of exergy loss rate caused by viscosity dissipation, radial and axial heat conduction was calculated. The calculation results of the total exergy loss rate for a unit volume indicate that the total exergy loss per unit volume is a multi-value function of heat exchange tube geometric parameters and boundary conditions. For a given geometric parameter there exists a boundary condition, which gives a minimum value of the total exergy loss rate for a unit volume, and vice versa. The above conclusion can to a certain extent serve as a guide for the optimized design of heat exchangers and the optimal selection of heat exchangers under given boundary conditions. **Key words:** turbulent flow, exergy transfer equation, distribution of exergy loss rate

某舰用锅炉过热器胀接头弹塑性有限元分析 = Finite Element Analysis of the Elastic Plasticity of a Naval Boiler Superheater Expanded-joint [刊, 汉] / Zhou Chuan-yue (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), Li Gui-ying, Ma Yun-xiang (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 77 ~ 79

Through the use of a large-sized finite element general program ANSYS the contact analysis model of an expanded joint has been set up for the expanded joint structure of a naval boiler superheater and a finite element analysis of three-dimensional plasticity conducted. A study was performed of the effect of material properties and operating temperatures, etc on the residual contact pressure of the expanded joint. Also given in this paper are some proposals, which can serve as a guide for engineering design as well as for the prevention of failures and malfunctions. **Key words:** expanded joint, finite element method (FEM), analysis of elastic plasticity, residual stress, program ANSYS

三维紊流燃烧室流场的数值计算 = Numerical Calculation of the Three-dimensional Turbulent Flow Field of a Gas Turbine Combustor [刊, 汉] / Xun Bai-qiu, Qu Zhe, Zhang Yanqiu, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 80 ~ 82

By the use of a cylindrical coordinate system a numerical simulation was conducted of a single-tube return-flow combustor flow-field. A turbulent flow viscosity model was employed to evaluate the turbulent flow viscosity with the help of a  $k-\epsilon$  dual equation turbulent flow model. A combustion model was utilized to assess chemical reaction speed with the help of a EBU (eddy-break-up) vortex breakage combustion model. Thermal radiation magnitude was calculated by using a thermal radiation model with the help of a relatively simple DTR (discrete transfer radiation) model. The results of the calculation have been found to reflect quite accurately the flow condition of the combustor flow field. Moreover, these results have al-