

蒸汽发生器管板超差管孔胀管的非线性有限元分析

陈银强, 张蜀治, 桂春, 刘鸿运, 王先元

(中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘要: 本工作利用三维非线性有限元分析了某核蒸汽发生器管板的胀管效果, 研究了尺寸偏差和材料特性变化等对胀管效果的影响, 计算了几种典型传热管间隙和刚度下的接触压力, 并与非超差管孔胀管接触压力进行了对比研究, 最后对合适胀管压力的选择提出了建议。

关键词: 蒸汽发生器; 管板; 超差; 有限元

中图分类号: TL353.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S1-0552-04

Nonlinear Finite Element Analysis for Out-of-Tolerance Holes Expansion in Tube Sheet of Steam Generator

CHEN Yin-qiang, ZHANG Shu-zhi, GUI Chun, LIU Hong-yun, WANG Xian-yuan
(China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd, Wuhan 430223, China)

Abstract: The tube's expansion effectiveness in steam generator (SG) tube sheet was analyzed with 3-D nonlinear finite element in this paper. Tube expansion influences of actual size deviation and material characteristics were also researched. Through analysis, contact pressures of several typical tube gaps and tube stiffness were calculated and compared with the results of non out-of-tolerance holes. In the last, reasonable suggestions were provided for the selection of proper expansion pressure.

Key words: steam generator; tube sheet; out-of-tolerance; finite element

蒸汽发生器管板与传热管的胀接是蒸汽发生器设计、制造最关键的技术之一,也是蒸汽发生器故障率较多的部位。因此,传热管与管板胀接质量的好坏直接影响到蒸汽发生器的使用寿命。由于蒸汽发生器管板管孔数目很多,在进行管板钻孔加工中,部分管孔很有可能会出现超过规范限制条件的超差现象。用实验的办法只能对单一的超差管孔进行拉脱力的测量,

若对所有超差管孔用实验的方法进行超差管孔拉脱力的测量则难以实现,而且成本很高。

本工作用三维非线性有限元分析研究某核蒸汽发生器管板的胀管效果,研究尺寸超差、材料特性变化对胀管效果的影响,计算几种典型孔径、间隙、管壁厚度和管子刚度下的接触压力,并与非超差管孔胀管接触压力进行对比研究。本工作还预设各种可能的超差情况,并计

算由此产生的管板接触压力的变化情况。

1 分析模型及有关参数

1.1 分析模型

某核蒸汽发生器管板采用等边三角形孔栅布置,管板在进行钻孔时,有两个孔出现了孔径超差现象,且沿着整个厚度方向(从一次侧表面到二次侧表面)孔径是变化的。本工作利用有限元分析软件 ANSYS,对超差管孔进行非线性有限元分析。

由于沿着管板整个厚度方向孔径均在变化,因此,必须建立整个管板厚度方向的模型。胀接工艺采用的是逐管胀接,后胀接的传热管对已胀接的相邻传热管的胀接接触力和管壁中的残余应力有明显的影 响。相关研究表明,胀管的相互影响区不超过 3 排。因此,在管孔密集区模型建模过程中选取了 2 排 5 列传热管进行分析计算(利用对称性扩充到 4 排管)。在建模时还考虑了距二次侧表面 4 mm 的未胀区的影响。

模型采用三维结构分析单元及高阶接触单元。由于管孔及管子的曲率半径很小,在靠近传热管的管板区域和传热管本身采用了二次曲面高阶单元,为了节省计算时间,管板其它区域采用低阶元,最终的有限元分析模型示于图 1。分析计算中除了接触非线性之外,还需考虑传热管与管板材料的非线性因素。

1.2 模型参数

分析中除了两真实超差模型 M1 # 和 M2 # 之外,还考虑了名义尺寸模型和另外几种预设的超差模型。

分析模型的材料特性选择密塞斯动力硬化双线性材料特性,其中一组来自 ASME B&P Code II,另一组来自实测数据。ASME B&P Code II 的名义材料特性屈服强度比实测材料的屈服强度大,因此,用名义材料特性计算能获得保守的(较低的)管子胀紧度。

1.3 边界条件

分割此模型的各个分割面都看为对称面,图 1 左侧对称面($y-z$ 坐标面)通过管子为第 1 排第 1 列胀接的管子,图 1 前面的分割面为 $x-z$ 坐标面,底面即一次侧表面为 $x-y$ 坐标面。管子在未胀前与管孔有间隙存在,由于管板一次

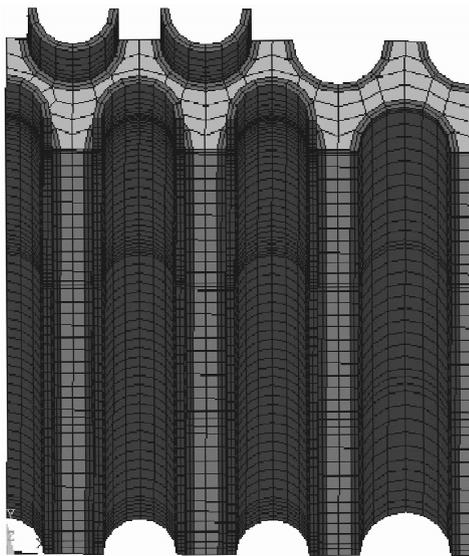


图 1 有限元分析模型

Fig. 1 Finite element model

侧表面管端采用密封焊,为此,各管在 $x-y$ 坐标面外壁面上的所有节点与管孔壁面上对应的节点建立 3 个方向自由度耦合,以模拟密封焊,同时需要约束管子的总体运动。

2 计算结果分析

在分析结构尺寸公差对胀管效果的影响时,假设模型中第 1 排第 1 列管孔为 1 # 超差管孔,第 2 排第 2 列管孔为 2 # 超差管孔。

由于胀管过程是一个与历程相关的过程,加载程序必须严格按照预计的程序进行,模型设计时,规定胀管是逐管胀接,首先胀接图 1 中最左端的第 1 排第 1 列管子,接着第 1 排第 2、第 3、第 4 列管子,然后对第 2 排管子逐列胀接。

2.1 周围管子胀接对超差管孔胀紧度的影响

图 2 为 1 # 超差管孔沿管壁纵向路径(从一次侧表面到二次侧表面方向)上当各传热管相继胀接完成后的接触压力分布曲线变化。图 2 中,1-1P 到 1-5P 分别代表模型图 1 中的第 1 排第 1 列、第 2 列、第 3 列,第 2 排的第 1 列和第 2 列管。由图 2 可见,从第 1 排第 1 列管子到第 1 排第 2 列依次开始逐管胀接。随着后序传热管的胀接,1 # 传热管的接触压力明显降低。由于超差管孔孔径沿着管板厚度方向上的变化,使得在直径变化剧烈的区域接触压力出现了波动。以该路径上中间一点为例(管板厚

度中间部位,100 mm),接触压力从 61 MPa 逐渐降到 58.36、52.90、49.81、50.45 MPa,随着第 1 排第 3 列、第 2 排第 1 列、第 2 排第 2 列传热管的胀接,1# 超差管孔上的接触压力已无明显的变化。再以距管板二次侧表面 22.5 mm 处的一点为例,接触压力从 50.07 MPa 变化到 45.95、43.79、40.91、40.91 MPa,随着第 1 排第 3 列、第 2 排第 1 列、第 2 排第 2 列传热管的胀接,1# 超差管孔上的接触压力已无明显的变化,2# 超差管孔沿管壁纵向路径上各管胀接完成后的接触压力分布曲线与 1# 管孔相似(图 3,图 3 以第 1 排第 2 列为胀管起点,其代表意义与图 2 相同)。

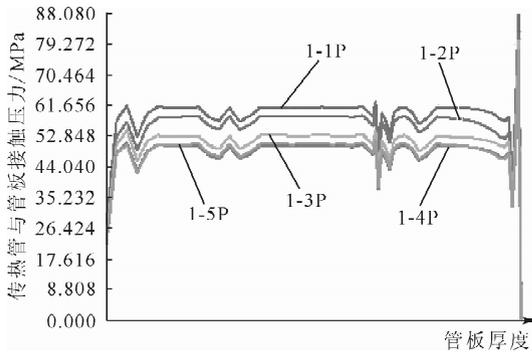


图 2 M1# 模型 1# 管孔沿管壁纵向路径上各管胀接完成后的接触压力分布曲线

Fig. 2 Contact pressure distribution along axial path of tube wall after completion of others tube expansion of tube 1# in M1# model
管板厚度指一次侧表面到二次侧表面的距离

2.2 名义材料特性下计算结果比较

将模型 M1# 和 M2# 对应的 1# 管和 2# 管沿上述路径的接触压力进行路径上的积分并除以路径总长便可获得该路径上的平均接触压力 p_c , 模型 M1# 中 2# 管的平均接触压力为 42.06 MPa。

从计算结果可看出,管壁接触压力随传热管刚度的增大而增大,如从模型 M3#、M4#、M5#、M6#、M7# 管子刚度依次增大时,接触压力从 41.95 MPa 增大到 48.94 MPa,而模型 M2# 对应的刚度 $t/d=0.0864$ (t 为管壁厚度, d 为传热管外径,单位 mm)时,1# 管壁的接触压力为 38.46 MPa。在同样的刚度下,间隙对管壁的接触压力稍有影响,但影响不大,如在

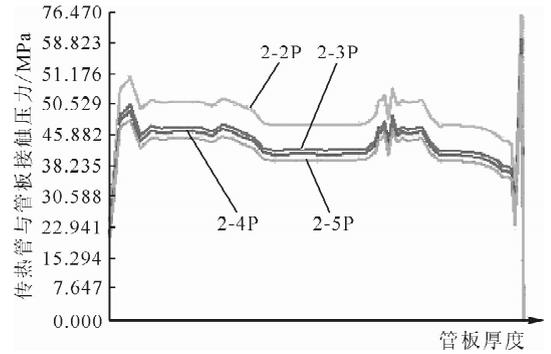


图 3 M1# 模型 2# 管孔沿管壁纵向路径上各管胀接完成后的接触压力分布

Fig. 3 Contact pressure distribution along axial path of tube wall after completion of others tube expansion for tube 2# in M1# model

$t/d=0.0847$ 时,通过模型 M3# 和 M7# 管壁接触压力可看出,0.15 的间隙差使得接触压力降低了 0.553 MPa(底面处管壁接触压力)。

从模型 M1# 和 M2# 计算结果可看出,随着管子刚度的减小、管壁与管孔间隙的增大,1# 管沿胀接深度平均的管壁胀接压力从 41.37 MPa 降低到 38.46 MPa,2# 管沿胀接深度平均的管壁胀接压力从 42.06 MPa 降低到 39.92 MPa,间隙对管壁接触压力的影响不大。

2.3 实测材料特性、名义尺寸参数下计算结果

考虑到材料特性,特别是塑性屈服强度对塑性区将会有显著的影响,因此,采用实测的材料特性研究名义尺寸参数下胀管压力对胀管效果的影响。

通过实测的材料特性和名义尺寸参数下胀管压力对胀管效果的影响比较,可以清楚地看到,在大于 280 MPa 的胀管压力下,增加胀管压力只能降低管板厚度中部的管壁胀接接触压力(胀紧度)。这说明,280 MPa 以上的胀管压力将使孔壁产生塑性屈服。

图 4 为模型 M12# 第 1 排管以胀接压力 300 MPa 和 280 MPa 胀接时孔壁上的塑性应变分布(这里的塑性应变指传热管卸载之后发生的永久不可恢复的应变,是残余变形与长度的比值)。从图 4 可看出,当胀管压力超过 280 MPa 时,孔壁上只有很小一点塑性应变区,如果进一步减小胀接压力,管板厚度中部的管壁胀接接触压力(胀紧度)将会随之降低,当胀

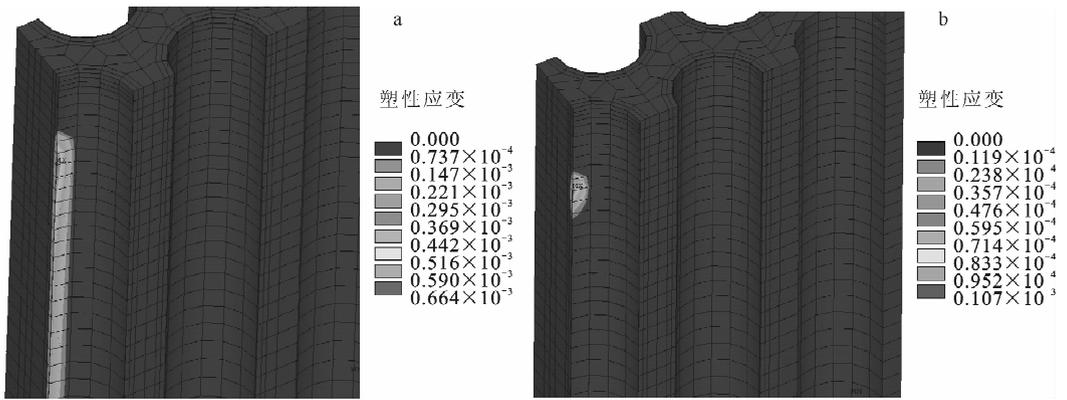


图4 模型 M12# 第1排管以胀接压力 300 MPa(a)、280 MPa(b)胀接时孔壁上的塑性应变分布

Fig.4 Plastic strain distribution of the first tube wall in model 12# with expansion pressures at 300 MPa (a), 280 MPa (b)

接压力降低到 260 MPa 时,管板厚度中部的管壁胀接接触压力由 74.35 MPa 降低到 73.00 MPa。当继续增大胀接压力时,管孔带上的塑性变形将继续增大。280 MPa 对应的模型底面处的平均接触压力最大,为 74.35 MPa,这说明,获得最大胀紧度的胀接压力为 280 MPa。

将计算模型管孔深度上的接触压力沿模型深度平均即得到平均接触压力。在 300 MPa 胀接压力下,可获得最大平均接触压力(沿深度平均接触压力),增加或减少胀接压力,均使平均接触压力降低。计算模型只选取了 90 mm 厚的管板二次侧表面以下不太深的区域进行计算,此平均接触压力受表面附近接触压力的影响较大,因此,以前述管板厚度中部的管壁胀接接触压力表述厚管板的胀紧度更为合理。

3 结论

本工作通过对名义材料特性下的超差管孔以及实测材料特性下的名义尺寸下管孔的弹塑性有限元分析,得出如下结论。

1) 由于胀接过程中传热管已屈服,管子处于流动状态,此时,超差管孔对胀管接触压力影响很小。1# 管孔沿胀接深度平均的管壁接触压力从 41.37 MPa 降低到 38.46 MPa,2# 管孔沿胀接深度平均的管壁胀接压力从 42.06 MPa 降低到 39.92 MPa,间隙对管壁接触压力的影响不大。

2) 在实测材料特性下,为获得最大的胀紧度,胀紧压力不宜超过 300 MPa,也不得低于

280 MPa。选择 300 MPa 以上的胀接压力并不能获得更高的胀紧度。当然,这个胀接压力是在实测的管板和管子材料屈服强度下获得的,如果材料屈服强度有所改变,最佳的胀管压力也可能会改变。

3) 本工作采用的三维分析模型的结果可很好地反映实际超差管孔胀管总体效果的评价。

参考文献:

- [1] 李磊,王海峰. 换热器管子-管板液压胀接的有限元模拟[J]. 南京化工大学学报, 2001, 23(6): 10-13.
LI Lei, WANG Haifeng. Research of the hydraulic expansion between tube and tube plate of heat exchanger[J]. The Transaction of Nanjing University of Chemical Technology, 2001, 23(6): 10-13(in Chinese).
- [2] 付胜利,高德利. 可膨胀管膨胀过程三维有限元数值模拟[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2006, 21(1): 54-57.
- [3] RANDY M M, RENE G, WILLIAM B. Well remediation using expandable cased-hole liners[J]. World Oil, 2002, 7: 56-65.
- [4] 周传月,李桂英,马云翔. 某舰用锅炉过热器胀接接头弹塑性有限元分析[J]. 热能动力工程, 2001, 16(1): 77-79.
ZHOU Chuanyue, LI Guiying, MA Yunxiang. Elastic-plastic finite element analysis of expansion joint in boiler superheater for naval vessels[J]. Heat Energy and Power Engineering, 2001, 16(1): 77-79(in Chinese).
- [5] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 292-301.