

基于固有频率分析的 中间热交换器管束支撑设计

张添翼, 刘佳, 张振兴

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要: 在进行示范快堆电站的中间热交换器(IHX)设计时,需考虑流致振动对管束的影响。在计算 IHX 换热管的固有频率时,空间弯管结构形式是一个技术难点。通过有限元方法,对中国实验快堆(CEFR)的 IHX 换热管固有频率进行了计算。通过对比分析,得到了合理的计算模型及其适用范围。通过敏感性分析,提出管束支撑方案的设计原则。

关键词: 中国实验快堆; 中间热交换器; 流致振动; 固有频率; 有限元方法

中图分类号: TL364.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2017)12-2149-05

doi: 10. 7538/yzk. 2017. 51. 12. 2149

Intermediate Heat Exchanger Tubes Support Design on Inherent Frequency Analysis

ZHANG Tian-yi, LIU Jia, ZHANG Zhen-xing

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-108, Beijing 102413, China)

Abstract: In the design of intermediate heat exchanger (IHX) for demonstration fast reactor plant, the influence of flow induced vibration should be considered. The structure of the space elbow tube is a technical difficulty for inherent frequency calculation of IHX heat exchange tube. Inherent frequency of China Experimental Fast Reactor (CEFR) IHX heat exchange tube was calculated by using finite element method. Through the comparison and analysis, the reasonable calculation model and its applicable range are obtained. The design principle of tubes support is propounded by sensitive analysis.

Key words: CEFR; intermediate heat exchanger; flow induced vibration; inherent frequency; finite element method

在换热器设计工作中,越来越多的学者意识到流致振动是引起热交换器失效的主要因素之一,换热管的各个部位均有可能因振动而破坏,挠性大的管子和处于高流速区的管子更易

发生振动破坏。振动破坏形式主要有以下5种:碰撞损伤、折流板切割、管与管板连接处洩漏、疲劳破坏和声振动。

流致振动分析主要包括3部分内容:管束

固有频率计算、流体在 4 种机理作用下的激发频率以及振动判据与振幅计算。固有频率计算是流致振动分析的重要环节,关系到流致振动判据分析工作。

快堆中间热交换器(IHX)的换热管束为空间弯管结构,现有规范和计算公式通常是针对直管或 U 型管的,对于 IHX 的特殊结构形式管束不适用。同时,IHX 的管束支撑结构形式和管束布置方式也较为特殊,在有关规范和标准中对于这类结构形式也缺乏必要的技术支持。

本文采用有限元方法对中国实验快堆(CEFR)的 IHX 换热管的固有频率进行计算。

1 计算模型

1.1 中间热交换器管束结构

CEFR 的 IHX 管束结构如图 1 所示,为直管和螺旋弯管的组合,成同心圆布置,每层管束有 3 根实心拉杆,由波纹钢带和定位拉杆组合成管束支撑,约束管束位移。IHX 各层管束展平空间弯管段后结构相同,但各层管束之间的布置半径 R 不同,所以空间结构也有所区别,如图 2 所示。

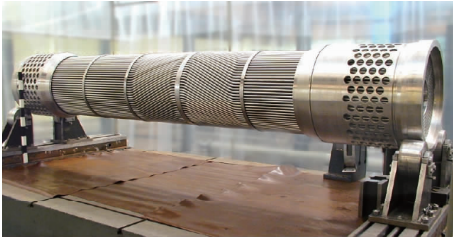


图 1 IHX 管束系统示意图

Fig. 1 Scheme of IHX tube system

1.2 计算模型

利用商用软件 ABAQUS^[1-2] 建立有限元分析模型,进行换热管固有频率计算。首先建立换热管展平模型,对不同支撑情况计算管束的固有频率;其次对第 1、5、9 层(从内向外分别为第 1~9 层)管束建立三维模型,约束条件不变,计算并考察简化为平面内管束的处理带来的误差^[3],建模时采用如下基本假设。

1) IHX 管束两端与管板简化为固支处理。IHX 管板的厚度在 200 mm 左右,远大于换热管的外径 $\phi 16$ mm,换热管两端与管板焊接在一起,将这种连接方式以固定约束处理^[4]。这种简化方式对计算结果的影响基本上可忽略。

2) 换热管支撑约束方式,即 IHX 拉杆-波纹钢带的简化方式。在考虑单根管束的固有频率计算时,对于这种类似格栅的结构形式,其约束自由度处理通常有两种方法:一是将换热管支撑结构处理为简支方式;二是通过建立具有一定刚度的弹簧单元,通过调节弹簧单元刚度来模拟波纹钢带对换热管的约束作用。

将支撑结构处理为简支,等价于忽略波纹钢带和换热管之间存在 0.5 mm 的间隙,忽略液体的作用以及将波纹钢带简化成刚体,这种处理方式提高了换热管束的刚度,使得计算结果偏大,给计算结果带来一定的不保守。弹簧单元的简化方式是将换热管模型的某个节点和地面(即固定点)之间建立弹簧单元,这种处理方式的难点在于如何选择弹簧单元的刚度来进行计算,同时缺乏有效的技术支持,但这种方法可用来考察简支处理方式的计算误差范围。

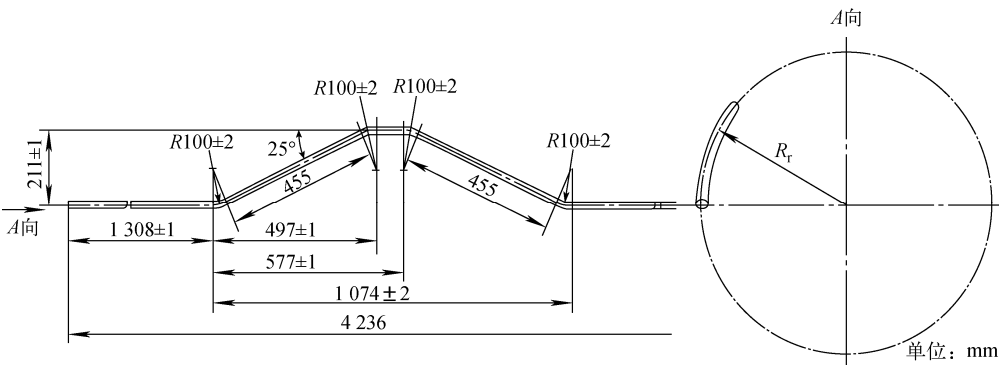


图 2 IHX 换热管展平图

Fig. 2 IHX tube expanded view

3) 忽略压力和流体附加质量分布不均匀性对固有频率的影响。IHX 一、二次侧流体流动阻力降使沿空间螺旋弯管长度方向的压力分布不均匀,温差、重力和流动在一、二次侧产生的流体附加质量分布也会存在一定的不均匀性,但变化范围不大。压水堆蒸汽发生器 U 型管固有频率^[4-5]的计算结果表明,压力分布非均匀性对固有频率的影响最大不超过 2%。流体附加质量分布不均匀性对固有频率的影响不超过 1%。与压水堆蒸汽发生器相比,IHX 换热管尺寸更小、工作压力更低、管束数量更少,因此压力和流体附加质量分布不均匀性对固有频率的影响要更小一些。

4) 由于 IHX 的支撑与管束之间存在间隙,以及长期运行中可能存在某些支撑的失效,IHX 管束固有频率的计算应考虑某一跨支撑失效的情况。考虑到热膨胀和安装需要,支撑与管束间应存在一定的间隙。尤其是由于安装和加工的随机因素,实际管束中各管子支撑是否有效是不确定的,因而各管子出现非有效支撑流体弹性不稳定性也是不确定的。但事实上管束在发生大幅振动时,一定同时受到有效支

撑和非有效支撑的影响。

2 计算结果与分析

2.1 俄罗斯计算结果

俄罗斯对于 CEFR 的 IHX 管束的计算模型是将每 1 根换热管简化为 1 个多间隔(支撑)的梁,该模型将空间螺旋管束部分简化为平面结构,认为各层管束均可采用该模型进行计算。模型的两端为刚性固定,支撑结构考虑为简支,限制管束的面内平动。俄罗斯的计算模型如图 3 所示,被支撑带分隔各段的距离为 530~630 mm,考虑部分支撑不起作用,支撑从左向右依次编号为 1#~6#。

计算模型的输入数据为:管子的惯性矩 $J=1\ 725\ \text{mm}^4$;管子的横截面积 $F=64.2\ \text{m}^2$;管子单位长度质量 $m=0.5\ \text{kg/m}$;管材的弹性模量 $E=1.65\times 10^5\ \text{MPa}$ 。计算结果表明,在部分支撑失效组合情况下,单根管束第 1 阶固有频率在 25 Hz 左右。

2.2 计算结果与误差分析

计算结果与误差分析列于表 1。展平模型与俄罗斯计算结果的相对误差基本在 10% 左

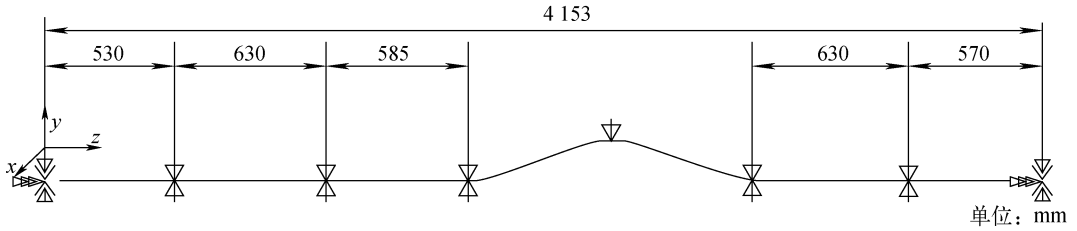


图 3 俄罗斯的计算模型
Fig. 3 Calculation model of Russia

表 1 计算结果与误差分析

Table 1 Calculation result and error analysis

支撑情况	固有频率/Hz				与展平模型的相对误差/%		
	展平模型	第 1 层 3D 模型	第 5 层 3D 模型	第 9 层 3D 模型	第 1 层	第 5 层	第 9 层
全部支撑	98.755	64.305	89.497	96.584	-34.88	-9.37	-2.20
1# 支撑失效	52.093	48.784	52.056	52.082	-6.35	-0.07	-0.02
2# 支撑失效	39.228	38.361	39.088	39.192	-2.21	-0.36	-0.09
3# 支撑失效	23.702	21.66	22.922	23.44	-8.62	-3.29	-1.11
4# 支撑失效	21.472	22.892	22.2	21.999	6.61	3.39	2.45
5# 支撑失效	22.743	19.776	22.018	22.493	-13.05	-3.19	-1.10
6# 支撑失效	46.051	46.084	45.805	45.979	0.07	-0.53	-0.16
1#,2# 支撑失效	22.8	21.696	22.764	22.792	-4.84	-0.16	-0.04

右,且误差较为稳定,可认为两者的计算模型假设基本吻合。从表1可得,如果认为工程允许误差范围为10%,展平模型的可接受模拟范围为第5层管束以外,对应的弯曲圆心角为 55° 。对于内层管束而言,展平模型的简化方式误差较大,且从计算结果的变化趋势角度看,展平的简化处理方式的计算结果是偏不保守的结果。

换热管的三维模型计算误差表明由内向外误差逐渐降低,越靠近外层的管束,计算结果越接近展平模型的结果。这是由于展平模型对弯管段的约束方式更接近靠近外层的管束,而最内层管束的弯曲圆心角约为 90° ,它实际受约束的方向和展平模型对弯管段的约束方向垂直。

3 支撑结构影响因素敏感性分析

支撑结构对 IHX 换热管固有频率的影响主要体现在支撑厚度、支撑跨距、支撑与管束的间隙等因素。在进行示范快堆的管束支撑结构设计时,应考察上述影响因素的敏感性,为设计提供必要的条件约束作为设计依据。本文选用展平模型计算支撑结构对管束固有频率的影响。

3.1 支撑厚度

管束支撑跨距选择 CEFR 中的结构,支撑简化方式为简支处理,改变支撑厚度进行计算可得到支撑厚度为 $0\sim 40$ mm 时固有频率的变化,计算结果如图4所示,随着支撑厚度的增加,空间螺旋弯管固有频率提高。管束支撑结构对换热管固有频率计算是较为敏感的影响因素,进行建模计算时必须要考虑管束支撑厚度

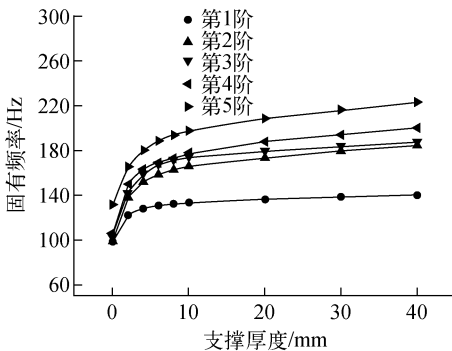


图4 支撑厚度对固有频率的影响
Fig. 4 Effect of support thickness on inherent frequency

的影响。当管束支撑厚度在10 mm以上时,支撑厚度对管束动态特性的影响已变得较小。

3.2 支撑跨距

保守考虑减少支撑厚度对跨距敏感性的影响,将支撑厚度选择为30 mm,支撑简化方式为简支处理,改变支撑个数进行计算,得到支撑跨距对管束固有频率的影响,计算结果如图5所示。当支撑跨距小于600 mm时,前4阶固有频率不变,此时前4阶固有频率对应的是弯管段的振型;当跨距增加并超过弯管段跨距时,前4阶固有频率降低,此时前4阶固有频率对应的是直管段的振型,前5阶固有频率中,不再出现弯管段对应的振型。管束的第1阶固有频率对应管束最长支撑跨距管段的振型,在进行管束支撑跨距设计时,考虑了弯管段的支撑跨距是由管束结构决定的,支撑方案无论如何改变也不能降低弯管段的支撑间距,所以设计直管段的支撑跨距稍大于弯管段的距离是较为合理的支撑方案。

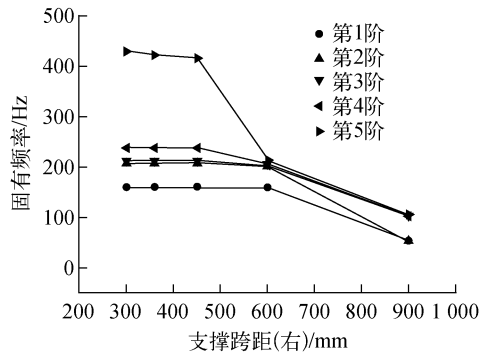


图5 支撑跨距对固有频率的影响
Fig. 5 Effect of support span on inherent frequency

3.3 支撑间隙

支撑与管束之间的间隙会影响到支撑条件,也影响管子的振动特性。间隙加大会降低管子的固有频率,加剧管子在支撑板内的锤击和磨损作用,在保证装配需要的情况下,间隙应尽可能地小。计算模型的支撑简化方式选择1.2节中的弹簧单元简化处理,改变弹簧单元刚度,考察弹簧单元刚度变化对换热管固有频率的影响,结果如图6所示。由图6可见,当弹簧刚度在400 N/mm以下时,将模型处理为简

支会带来较大的计算误差;当弹簧刚度在 600 N/mm 时,对第 1 阶固有频率的影响在 2.0% 左右,误差基本可满足工程需求。在设计和试验验证中,应从间隙的尺寸和支撑结构刚度的角度出发,将支撑间隙控制在合理范围内,可用简支处理进行建模分析。

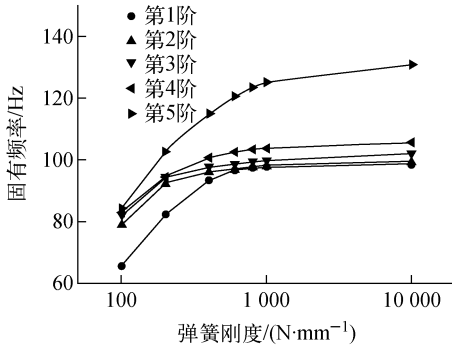


图 6 弹簧刚度对固有频率的影响

Fig. 6 Effect of spring stiffness on inherent frequency

4 结论

通过合理的简化和论证,建立了 IHX 管束固有频率计算的展平模型和三维模型,通过与俄罗斯计算结果的比较验证了计算模型的合理性,并对两种计算模型进行了误差分析,确定了计算模型的适用范围。利用建立的展平模型开展了支撑厚度、支撑跨距和支撑间隙对管束固有频率的敏感性分析。分析表明:当管束支撑厚度在 10 mm 以上时,支撑厚度对管束动态特性的影响已不敏感;管束前几阶固有频率取决于换热管最小跨距的管段,所以设计直管段的支撑跨距稍大于弯管段的距离是较为合理的支撑方案。

本文所讨论的计算对象均为空气中的管束,当考虑实际工作环境介质液钠时,应对计算结果考虑液体附加质量的修正,该系数一般需要通过试验测定。在计算 IHX 运行状态下的固有频率时,对于换热管轴向力和压力作用,可参考现有规范进行修正。

参考文献:

- [1] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 庄茁,等. ABAQUS 非线性与有限元分析与实例 [M]. 北京:科学出版社,2005.
- [3] 刘瑞兰. 在横向气流作用下螺旋管阵流弹不稳定性的分析 [J]. 华北水利水电学院学报, 1997, 18(4): 9-13.
LIU Ruilan. Fluidelastic instability for helical tube arrays in cross-flow [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1997, 18(4): 9-13 (in Chinese).
- [4] 韩良弼,施国麟,姚伟达,等. 蒸汽发生器传热管固有振动试验和分析研究 [J]. 核科学与工程, 1985, 5(1): 23-33.
HAN Liangbi, SHI Guolin, YAO Weida, et al. Experimental and analytical investigation of natural vibration of steam generation heat transfer tubes [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1985, 5(1): 23-33 (in Chinese).
- [5] 刘敏珊,刘彤,董其伍. 蒸汽发生器 U 形传热管动态特性影响因素分析 [J]. 核动力工程, 2008, 29(2): 43-47.
LIU Minshan, LIU Tong, DONG Qiwu. Analysis of factors influencing dynamic characteristics of steam generator U-tubes [J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(2): 43-47 (in Chinese).