

螺旋式传热管束流致振动试验研究

高李霞, 蒋自龙, 马建中, 李松, 丛滨

(中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

摘要:对某溶液堆堆芯内呈纵向螺旋状盘绕的传热管束进行了流致振动试验研究,包括结构在空气中和静水中振动特性的计算和试验以及稳态和瞬态运行工况下的流致振动试验。试验结果表明,传热管束入、出口之间的压力差随流速的增加而增加,且上部固定连接端是相对薄弱的部位。在稳态运行时不会发生动力失稳,振动位移不会造成管束各管段之间发生接触碰撞,疲劳分析表明满足规范要求。瞬态响应最大振动位移和应变均比稳态运行时高两个数量级以上。

关键词:溶液堆;螺旋式;传热管束;流致振动

中图分类号:O341

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)S1-0468-04

Experimental Study on Flow Induced Vibration of Heat Transfer Helical Tube Bundle

GAO Li-xia, JIANG Zi-long, MA Jian-zhong, LI Song, CONG Bin

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The flow induced vibration (FIV) tests of heat transfer helical tube bundle of a liquid-reactor were carried out. Two parts were included: Calculation and test on vibration characteristics in air and water of structure; FIV test in steady-state and transient condition. The results show that the larger internal flow velocity becomes, the higher pressure drop of bundle is, and the up restraint positions are weak. The dynamic buckling of bundle does not occur during steady-state operation, the tubes are not contacted, and the fatigue evaluation was done according to ASME code and the structure is founded to satisfy the ASME code requirements. The transient maximum vibration displacements and strains are larger 2 orders than steady-state values.

Key words: liquid-reactor; helical; heat transfer tube bundle; flow induced vibration

某溶液堆是以低浓铀或高浓铀为燃料的水均匀溶液反应堆,反应堆内会产生大量的热量和气泡,热量由堆芯内纵向螺旋状盘绕的传热管束(图1)带出。该传热管束的高度

从堆芯中心沿径向逐渐变小;上下端弯管的弯曲直径从堆芯中心沿径向逐渐变大,两端分别焊接在入口和出口集流管上,而无其它支承,呈竖直悬挂状,结构柔弱,刚度小,在管

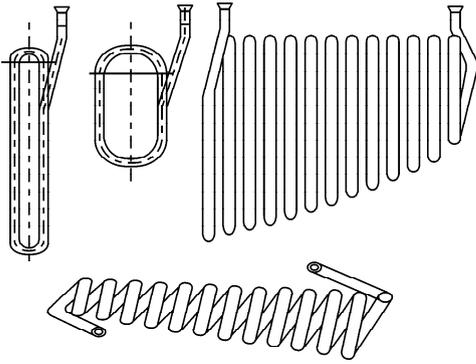


图1 螺旋状传热管束结构简图

Fig.1 Structure of heat transfer helical tube bundle

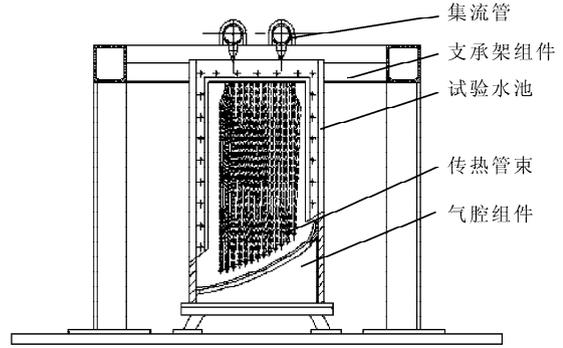


图2 试验模型结构图

Fig.2 Test model diagram

内水流和管外核反应形成的气泡及其它瞬态激励下而诱发振动。

1 试验模型

试验模型由1组传热管束、支承架组件、试验水池组件、水池支承架组件、气腔组件和集流管组件6部分组成,试验模型结构示于图2。其中,试验水池的形状和尺寸是根据计算的附加质量系数来确定的。气腔组件安装在试验水池底部,通入氮气在试验水池内产生气泡,用以模拟核燃料溶液裂变产生的气泡。

2 传热管束振动特性

文献[1-2]中分别对传热管束振动特性的分析计算和试验做了详细阐述,表1列出传热管束在空气中和静水中的振动特性计算值和试验值。从表1可知,结构在空气中和静水中的1阶频率很低,分别为3.867、3.281 Hz,说明结构柔弱,刚度很小,且水的附加质量对结构的振动特性有较大影响,结构在静水中的固有频率明显降低。

3 流致振动试验

3.1 水力回路

本次流致振动试验采用一高扬程、小流量的水力回路。该回路由水箱、主泵、稳压器、试验模型、管道和控制阀门等组成。在试验模型入口端和出口端各设置1个球阀,以便模拟泵启、停时瞬工况。

3.2 传感器布置和测量系统

本试验采用加速度计、应变片、电涡流传感器和激光测振仪测量结构的振动响应;采用压力传感器测量回路的压力变化。应变片分别布置在传热管大小头近焊缝处及大小头所在管段近上、下弯管处和直管段中部,共有8个应变片测点。

电涡流传感器、加速度计和激光均布置在传热管振动位移最大位置处。传感器测点布置示意图示于图3。数据采集及其分析处理采用比利时LMS公司开发的128通道同步采集、实时分析处理系统。

3.3 流致振动试验工况

按照传热管束浸没于水中的深度、管内水流速度、生成管外水中气泡的充气量以及稳态和瞬态运行来确定试验的各种工况(表2)。

表1 结构在空气中和静水中固有频率计算值和测量值

Table 1 Natural frequencies as measurement and calculation in air and water

阶号	方位	空气中固有频率			静水中固有频率		
		测量值/Hz	计算值/Hz	相对偏差/%	测量值/Hz	计算值/Hz	相对偏差/%
1	平面外	3.867	3.786	2.1	3.281	3.243	1.16
	平面内	3.828	3.860	-0.8	3.477	3.306	4.9
2	平面外	4.063	4.164	-2.5	3.555	3.566	-0.31
	平面内	7.266	7.216	0.7		6.181	

表 2 流致振动试验工况
Table 2 FIV test conditions

状态	系列	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	充气量/($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	环境条件
稳态工况	1	2,3,4,5	0.1	I、II
	2	2,3,4,5	0	I、II
	3	4	0,0.075,0.1,0.3	I、II
	4	0	0,0.075,0.1,0.3	II
瞬态工况	突然开启(关闭)出口		0	II
	集流管下游的阀门		0.1	II
	突然开启(关闭)入口		0	II
	集流管上游的阀门		0.1	II

注: I 表示液面在传热管半圆形弯头上表面以下 150 mm 处; II 表示液面在传热管半圆形弯头上表面以下 100 mm 处

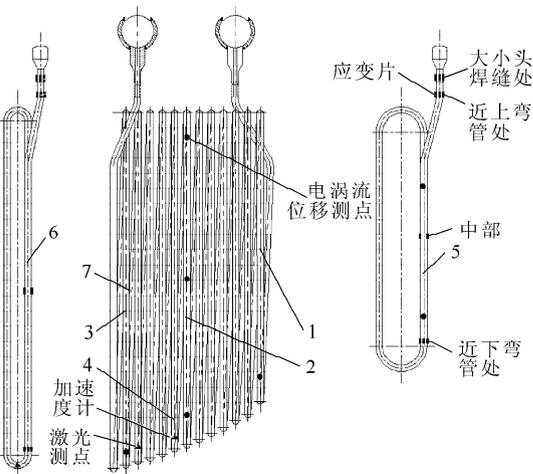


图 3 传感器布置图

Fig. 3 Arrangement of sensors

图中数字为管编号

4 试验结果及数据分析

4.1 稳态试验工况

稳态工况时,分别进行了管外有气泡激励情况下,管内流速变化(2~5 m/s)的两个系列的试验(系列 1、2),以及管内有无流速情况下管外充气量变化(0~0.3 L/s)的两个系列的试验(系列 3、4),分别对这 4 个系列的试验结果进行比较分析。图 4、5 分别示出了应变在不同系列试验下的变化趋势。

对试验结果分析可知,在额定工况(环境条件 II,管内流速 4 m/s,充气量 0.1 L/s)下,最大应变发生在 6 号管大小头焊缝平面内方位,最大应变有效值为 $0.759 \mu\epsilon$,最大振动位移发生在 2 号管下部,最大振动位移有效值为

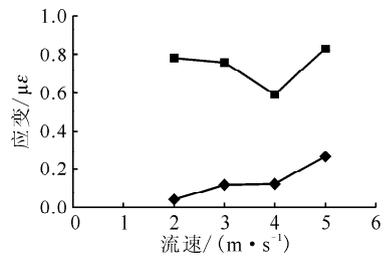


图 4 随流速增大典型应变信号变化趋势

Fig. 4 Variation of typical strain signals with increment of flow velocity

◆——环境条件 I,无充气量;
■——环境条件 II,充气量 0.1 L/s

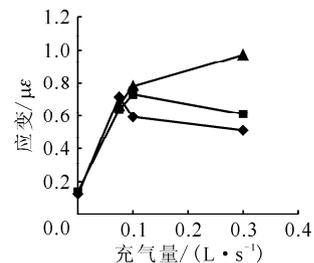


图 5 随充气量增大典型应变信号变化趋势

Fig. 5 Variation of typical strain signals with increment of nitrogen-inflation rate

◆——环境条件 I,管内流速 4 m/s;
■——环境条件 II,管内流速 4 m/s;
▲——环境条件 II,管内无流速

0.031 mm。在管内流速 4 m/s、充气量 0.1 L/s 时,环境条件 II 下的振动响应比环境条件 I 下的振动响应大。

在只有管外气泡或只有管内流体激励情况下,传热管束的振动响应随激励的增加而变大,

且管外气泡引起的振动响应约为管内流体引起的3~5倍,某些部位甚至在1个数量级以上。

在管外气泡和管内流体共同激励下,传热管束的振动响应并不是随着激励的增大而变大,说明在这两种激励共同作用下,可能产生了耦合作用,但由于本次试验流速范围有限,且流速变化和充气量变化的测量点较少,因此,管外气泡扰动与管内流体激励是否有耦合,以及如果有耦合,耦合的影响方式如何,则需进行深入的试验研究验证。

当流速从2 m/s增加至5 m/s时,传热管束的入口端与出口端的压力差(压降)变大,分别为0.16、0.375、0.697、1.051 MPa。

4.2 瞬态工况试验结果分析

通过突开(闭)阀门的方式模拟泵启、停的瞬态工况。对瞬态工况的试验结果进行分析可知,突开阀门引起的瞬态振动大于突闭阀门引起的瞬态振动,并且突开(闭)入口集流管上游的阀门引起的传热管束的振动响应也远大于突开(闭)出口集流管下游的阀门引起的传热管束的振动响应。应变峰峰值最大为 $137.69\mu\epsilon$,振动位移峰峰值最大为12.507 mm。比较瞬态和稳态工况的试验结果可知,瞬态工况时的传热管束的振动响应比稳态时约大两个数量级。

4.3 疲劳评定

在额定工况(环境条件II、流速4 m/s、充气量0.1 L/s的稳态工况)下,传热管束最大应变发生在6号管大小头焊缝平面内,有效值为 $0.759\mu\epsilon$,由于幅值的概率分布为高斯正态分布,所以,最大峰值应变小于 $4\mu\epsilon$,焊缝系数为2,则峰值应力小于1.576 MPa,该应力远小于奥氏体不锈钢材料的高周疲劳破坏许用应力94 MPa(ASME附录I表I-9.2.2)。因此,MIPR传热管束在额定工况稳定运行时流致振

动方面满足ASME规范的疲劳设计准则。

突然开(闭)阀门的瞬态工况,传热管束最大应变发生在5号管大小头焊缝平面外,最大峰值应变为 $68.845\mu\epsilon$,焊缝系数为2,峰值应力为27.12 MPa,该应力远小于奥氏体不锈钢的疲劳破坏许用应力94 MPa。

5 结论

1) 传热管束在额定工况下稳态运行时未发现动力失稳迹象,振动位移不会造成管束各管段之间发生接触碰撞,流经管束的压力降随流速的增加而增加,在额定工况下,压降为0.698 MPa。疲劳分析表明满足规范要求。

2) 稳态运行时,管外气泡运动对管的扰动作用较之管内流动更为敏感和明显,这些现象有待进一步研究。

3) 瞬态响应最大振动位移和应变均比稳态运行时高两个数量级以上,因此,类似的瞬态状况应在溶液堆运行时尽量避免。

4) 稳态和瞬态运行工况的试验结果表明,5号管和6号管大小头焊缝附近测点的应变值无论在稳态或瞬态运行工况时,都比其它测点大得多,说明传热管束的上部固定连接端是相对薄弱的部位,在溶液堆运行时要重点关注。

参考文献:

- [1] 高李霞. MIPR传热管束振动特性分析[C]//第14届全国反应堆结构力学会议论文专辑. 成都:中国核动力研究设计院,2006:182-184.
- [2] 高李霞,李松,丛滨. 传热管束振动特性研究[J]. 振动与冲击,2007,8(26):92-95.
GAO Lixia, LI Song, CONG Bin. Vibration characteristic study of heat transfer tube bundle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 8(26): 92-95(in Chinese).