

文章编号 : 0258-0926(2016)S2-0056-02 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0056

套管型燃料组件动态特性研究

张晓玲, 赵 晖, 喻丹萍, 刘理涛, 孙 磊, 马建中

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 采用试验结合数值分析的方法对套管型燃料组件在不同安装边界条件下的动态特性进行研究。首先采用有限元分析方法对燃料组件的固有频率进行理论预估, 计算结果可为动态特性试验参数的设置及模态参数的辨识提供参考; 试验以敲击法为主, 单点激励, 多点拾振, 通过对试验数据的多方法拟合, 获得燃料组件的固有频率、振型等参数。试验结果与数值分析结果吻合较好。

关键词: 燃料组件; 动态特性试验; 数值分析

中图分类号: TL375 文献标志码: A

Study on Dynamic Characteristics of Extension-Type Fuel Assembly

Zhang Xiaoling, Zhao Hui, Yu Danping, Liu Litao, Sun Lei, Ma Jianzhong

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Numerical analysis combined with test which adopting impacting method is used to achieve the dynamic characteristics of fuel assembly under different boundaries. Firstly, finite-element analysis method is used to predict the natural frequency of fuel assembly, and the results supply a reference for test parameter setting and identification. Then the test adopts the impacting method, single-point excitation and multiple-point vibration pickup, to obtain the natural frequencies and modes. The results from the test and the numeric analysis are uniform.

Key words: Fuel assembly, Dynamic characteristics test, Numeric analysis

0 引言

中国工程试验堆的燃料组件为套管型燃料组件, 为满足功能, 燃料组件的外形采用六边形。燃料组件结构的特殊性及其插入式安装边界的特点决定了其动态特性参数识别的复杂性, 而固有频率是流致振动响应分析评价的关键因素。组件的频率、振型可为流致振动响应计算和试验结果分析提供参照, 并为今后磨蚀计算提供参数, 同时对燃料组件的动态特性有一个全面了解。

1 燃料组件结构概述

燃料组件为套管型结构, 每 2 层燃料管之间沿周向均匀分布有肋, 并提供刚度。燃料组件的外形为六边形, 上下两端分别设有圆形接头部件, 其中下接头作为燃料组件的支撑边界插入下部结构, 组件整体为对称结构。燃料组件在顶部与相邻组件相切接触或自由。组件结构如图 1 所示。

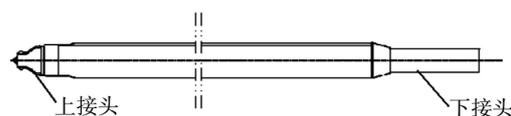


图 1 燃料组件结构示意图

Fig. 1 Structure of Fuel Assembly

2 数值分析

试验前对燃料组件的固有频率进行了理论预估, 计算结果可为动态特性试验参数的设置及试验结果提供参考。燃料组件的数值分析采用有限元分析方法, 用带中间节点的体单元模拟组件结构。综合考虑计算精度和计算机耗费比, 建模中对燃料组件细部结构作了部分简化: 将燃料管视作均质材料; 燃料管由包壳和芯块构成, 属夹层薄壁细长杆结构, 其径向和轴向尺寸相差很大, 故对燃料管整体弹性模量和密度等材料参数采用刚度等效的方法处理; 燃料管与肋的连接采用

2 种方法进行处理：一是各层燃料管和肋之间采用一体式连接，认为燃料管与肋完全粘合，忽略各层之间的滑移和摩擦；二是放开肋与燃料管之间的位移协调，认为燃料管之间可以自由变形。分析得到 2 种连接方式下组件的刚度相差约 10%，由于第 2 种处理方法的分析结果显示外层燃料管与肋之间会产生局部结构渗透，因此采用一体式连接方式处理燃料管与肋之间的连接不会对模态分析造成较大的误差。

分析的边界条件考虑了燃料组件顶部自由和顶部接触 2 种情况，分析结果见表 1。

表 1 燃料组件固有频率分析结果
Table 1 Natural Frequencies of Fuel Assembly

边界条件	振型阶数	计算频率/Hz
顶部自由	1	25.7
	2	161.3
顶部接触	1	113.5
	2	340.2

3 试验原理与方法

采用模态试验方法进行燃料组件的动态特性试验，试验分析程序为 LMS。首先对燃料组件进行建模，根据结构特点，燃料组件的一阶振型应为典型的梁式一阶振型，因此建立的试验模型为梁模型，燃料组件沿高度方向共布置 5 个测点。建模时考虑底部的约束，对应于顶部自由和顶部接触 2 种边界条件建立 2 个试验模型，分别为 6 节点模型 A 和 7 节点模型 B，见图 2。

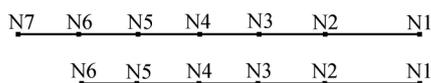


图 2 燃料组件试验模型

Fig. 2 Test Model of Fuel Assembly

试验采用敲击法进行，下接头作为燃料组件的底部支撑插入下部结构，约束燃料组件的垂向自由度，径向允许微小位移，周向可旋转。由于燃料组件的边界条件的不确定性，试验对燃料组件的模态参数识别难度较大。试验考虑了因加工及安装误差引起的燃料组件的不对称性，对燃料组件相邻的 3 个面（以下用 A 面、B 面和 C 面代替）分别进行敲击试验，测量组件不同面的加速

度或位移响应，采用多种拟合方法，对响应信号进行模态分析，以获得燃料组件的固有频率和振型。

4 试验结果

试验得到燃料组件的固有频率，并与分析结果进行比较，比较结果见表 2。

表 2 燃料组件固有频率试验结果与分析结果对比
Table 2 Comparison of Measured and Calculated Natural Frequencies

边界条件	振型阶数	试验结果/Hz	计算结果/Hz
顶部自由	1	A: 13.5~20.1	25.7
		B: 17.5~20.6	
		C: 13.2~19.3	
顶部自由	2	A: 142.2~146.0	161.3
		B: 144.1~147.9	
		C: 140.3~144.1	
顶部接触	1	A: 116.8~120.3	113.5
		B: 112.5~118.2	
		C: 115.5~116.8	
顶部接触	2	—	340.2

比较表 2 中试验和分析的结果，燃料组件在顶部自由的状态下，有限元分析的结果高于试验结果，原因在于燃料组件顶部自由时其刚度可变的范围较大，数值分析无法精确模拟该边界条件，有限元模拟的底部约束强于试验的底部约束。燃料组件顶部接触的状态下，数值分析结果与试验结果吻合较好：燃料组件顶部被约束后，发生一阶梁式振动时其底部的支撑被动约束，刚度不会出现顶部自由时的较大波动，频率变化范围缩小，边界条件能较准确地模拟。

5 结论

套管型燃料组件动态特性研究采用试验与数值分析相结合的方法，获得了较为一致的结果。

(1) 套管型燃料组件的数值分析可按刚度等效原则将包壳燃料管做均质简化；燃料管之间的肋可视为与燃料管完全粘合，该方法对计算结果不造成较大误差。

(2) 套管型燃料组件因结构特征及边界条件的不确定性，其固有频率在一定范围内变化，且以顶部自由状态的低阶频率变化范围较大。

(责任编辑：杨洁蕾)