

文章编号: 0258-0926(2015)S2-0090-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.S2.0090

不同流量下控制棒落棒数值模拟研究

马 超, 陈 平, 肖 忠, 茹 俊, 蒲曾坪, 李 云

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计重点实验室, 成都, 610041

摘要: 应用控制棒落棒计算程序 CRAC 对中国先进燃料组件在不同回路流量条件下的落棒敏感性进行计算模拟, 并将计算结果同落棒试验中获得结果对比, 两者符合较好。控制棒落棒总时间均随着流量的减小而减小; 最大及最小落棒时间计算值与试验值非常接近; 名义落棒计算值与试验值较为接近。

关键词: 回路流量; 中国先进燃料组件; 控制棒落棒; CRAC 程序; 数值模拟;

中图分类号: TL325 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Control Rod Drop Sensibility under Different Flow Rates

Ma Chao, Chen Ping, Xiao Zhong, Ru Jun, Pu Zengping, Li Yun

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: The CRAC program was adopted to simulate the control rod drop process in the Chinese advanced fuel assembly under different flow rates. The comparison of the calculation results with the test results showed good agreement. The total rod drop time decreases with the decreasing of the flow rate; the calculation values for the largest and smallest drop time are very close to the test values; and the nominal calculation curve is close to the experiment curve.

Key words: Flow rate per loop, Chinese advanced fuel assembly, Control rod drop, CRAC program, Numerical simulation

0 前 言

控制棒落棒时间计算是核反应堆控制棒驱动机构、燃料组件以及热工水力设计的一个重要计算部分, 是进行反应堆安全分析的一个重要依据^[1-2]。针对反应堆控制棒的落棒时间试验与计算, 国内外的研究人员进行过许多研究^[3-8]。这些研究虽然能够模拟导向管内部流体流动, 但不太符合真实工程情况^[6-8]。

CRAC 程序是中国核动力院自主开发的商用控制棒落棒计算程序, 该程序利用流体力学压强平衡方法以及试验经验关系式, 可以对包括驱动机构、导向筒、控制棒、燃料组件在内的相关部件建立分析模型, 获得反应堆在典型运行工况下的落棒时间以及落棒过程速度-位移曲线, 计算结果准确性已经通过试验验证。

中国先进燃料组件在导向管设计上采用管中管结构形式。通过开展中国先进燃料组件控制棒落棒试验, 获得了在不同回路流量条件下, 试验用燃料组件中控制棒下落速度和位移与时间的关系、控制棒落棒时间等试验数据。本文利用 CRAC 程序对此次落棒试验各工况进行相应计算模拟, 获得不同流量条件下落棒时间以及落棒曲线。经过对比分析, 程序计算落棒结果同试验数据符合良好, 也验证了 CRAC 程序对于中国先进燃料组件在不同流量条件下落棒过程计算的适用性。

1 CRAC 程序介绍

本文运用 CRAC 程序计算试验用燃料组件控制棒下落时间。首先分析驱动线组件(包括驱动杆和控制棒组件)在下落过程中, 受到重力、浮

力、机械摩擦力、水力作用力；然后分别计算其所受的各种作用力，针对驱动线组件，采用牛顿第二定律，建立相应的动力学方程；最终可求得驱动线组件的加速度、速度、位移等下落特性参数。驱动线组件下落过程中的运动方程如下：

$$dV/dt=g-(F_{\text{ARCH}}+F_{\text{FT}}+F_{\text{GG}}+F_{\text{ASCO}}+F_{\text{MEC}}+F_{\text{RES}}+F_{\text{PRCH}}) \quad (1)$$

$$F_{\text{ARCH}}=\rho g V_{\text{OEM}} \quad (2)$$

$$F_{\text{GG}}=C_{\text{GG}}\rho_{\text{out}}Q_{\text{GG}}^2 \quad (3)$$

$$F_{\text{RES}}=F_{\text{PRCH}}+C_{\text{K}}\Delta l \quad (4)$$

式中， V 为驱动杆速度； F_{ARCH} 为浮力； g 为重力加速度； ρ 为驱动线所排开流体的平均密度； V_{OEM} 为驱动线体积； F_{FT} 为机械摩擦力，机械摩擦力 F_{FT} 由落棒试验的测量结果获得； F_{GG} 为水力机械摩擦力，由导向筒下部流体流向出口引起； F_{ASCO} 为控制棒组件的水作用力； F_{MEC} 为驱动杆水作用力，可以应用流体力学压强公式求解； F_{RES} 为缓冲弹簧压缩力； C_{GG} 为比例系数，与导向筒和反应堆运行工况有关，由试验获得； ρ_{out} 为堆芯出口冷却剂密度； Q_{GG} 为流经一盒燃料组件及其导向筒的流量； F_{PRCH} 为缓冲弹簧开始被压缩时星形架弹簧的预紧力； C_{K} 为弹簧的刚度； Δl 为弹簧的被压缩位移量。

F_{ASCO} 由两部分组成：作用于控制棒底部的过压力以及作用控制棒上的水力摩擦力。过压力同摩擦力都与控制棒速度以及导向管内流体雷诺数密切相关，可以应用流体压强平衡公式求解。

驱动杆在驱动机构内各通道（隔热套、管座）位置处所受到的水作用力，同驱动杆速度以及各通道内流体雷诺数有关。

对该模型的求解采用时间离散化的方法，利用初始条件：驱动杆速度以及初始位移为零，按设定的时间步长逐次迭代。首先，确定出某时刻的各项力；接着，假定在该时刻力为恒定，加速度恒定，求出下一时刻的速度和行程；然后用求出的速度和行程计算出这一时刻的各项力的新值；从而便可求得驱动线组件下落速度、位置和落棒时间。

该程序应用C++语言写成。计算所需输入包括：驱动机构（包括隔热套与管座）结构参数、控制棒导向筒组件结构参数、燃料组件和控制棒组件的结构参数、控制棒驱动线实验参数、热工

水力学参数等。

2 落棒试验简介

为验证燃料组件落棒时间的安全性，开展中国先进燃料组件控制棒落棒试验。落棒试验中，冷却剂从试验本体底部流入，先后经过下支撑板、燃料组件，在试验本体左侧的管口流出。控制棒组件的初始位置为：控制棒组件全插入后，被驱动机构向上提起225步，每步提升高度为15.875 mm。试验回路参数为：压力 15.5 ± 0.5 MPa；温度 315 ± 5 °C；额定流量 510 ± 10 m³/h。在控制棒落棒试验中考察流量变动对于落棒时间的影响，分别在30%、50%、75%、90%、100%额定流量下进行落棒试验。在各种流量变化工况下，进行多次落棒试验，测量得到落棒时间取平均，得出结果：控制棒组件下落至燃料组件导向管缓冲段入口处时间 T_5 ；控制棒到达全插入位置的落棒总时间 T_6 ；控制棒下落速度、位移与落棒时间的关系。

3 试验工况模拟计算过程

运用CRAC程序模拟计算试验用燃料组件的落棒时间，针对每一特定工况的流量变化，根据控制棒驱动线、燃料组件的结构参数以及热工水力参数的不确定度划分为3种情况：即最长落棒时间（MAX）和最短落棒时间（MIN），以及名义落棒时间（NOM）。驱动线、燃料组件结构以及热工水力参数的不确定度主要包括：驱动线总重量设计上下限值、试验温度上下限值、驱动结构各流体通道压力损失系数上下偏差、格架上管座压力损失系数上下偏差、燃料棒沿程摩擦压力损失系数上下偏差等。根据上述参数极限值计算最长和最短落棒时间，各参数名义值计算名义落棒时间。

根据试验工况条件，分别计算在不同回路流量条件下（100%、90%、75%、50%、30%），控制棒组件被提起225步然后落下的落棒时间以及位移-速度随时间变化值。表1为 T_5 、 T_6 计算与试验结果。试验与计算结果（落棒时间）去除单位并以落棒总时间的计算最大值为基准1进行了归一化处理。EXPRIMENT为落棒试验结果，相对误差 $E=(\text{NOM}-\text{EXPRIMENT})/\text{EXPRIMENT}$ 。

对于 T_5 、MAX、MIN、NOM与EXPRIMENT变化趋势一致，随着回路流量的增大， T_5 都逐渐

表1 不同流量下 T_5 、 T_6 计算与试验结果
Table 1 Calculation and Experiment Results of T_5 and T_6 in Different Flux

时间	流量/%	MIN	NOM	MAX	EXPRIMENT	E
T_5	100	0.546357	0.606087	0.719399	0.575432	0.05327
	90	0.536255	0.58281	0.662743	0.556546	0.04719
	75	0.523519	0.556019	0.60433	0.53586	0.03762
	50	0.509025	0.527252	0.549431	0.508279	0.03733
	30	0.502438	0.514515	0.527032	0.496245	0.03682
T_6	100	0.65128	0.765602	1	0.774474	-0.01146
	90	0.637358	0.715381	0.896306	0.742501	-0.03653
	75	0.622513	0.688502	0.818877	0.714919	-0.03695
	50	0.603935	0.633669	0.735386	0.675743	-0.06226
	30	0.595766	0.626246	0.690983	0.660811	-0.05231

增大。对于 T_6 ，EXPRIMENT 介于 MAX 与 MIN 之间，这是因为 CRAC 理论模型中经验参数范围选取都较为保守。NOM 略低于 EXPRIMENT，最大相对误差为 6.23%。

落棒高度 225 步、不同流量（100%、90%、75%、50%、30% 额定流量）下落棒速度以及位移随时间变化试验与计算结果（时间、位移、速度）。CRAC 对位移、速度的计算结果同试验结果符合良好，均为随着回路冷却剂流量的减小，落棒总时间逐渐减小，落棒最大速度逐渐增大。在 100%、90%、75%、50% 额定流量下，落棒开始阶段，试验值略低于计算值，而后试验速度上升较快，试验曲线开始高于计算曲线，进入缓冲后试验曲线迅速降低并在落棒末期略低于计算曲线。在 30% 流量下，在进入导向管缓冲段前，试验速度一直高于计算速度，进入缓冲段后，试验速度才开始迅速下降并低于计算速度。产生该现象的原因是：CRAC 中的冷却剂流动的局部压力损失系数是通过额定流量条件下试验测量获取的。在较低流量下应用 CRAC 需要修正计算结果。

试验与 CRAC 计算值的偏差表现为：控制棒子弹头靠近缓冲段入口处时，试验观测到落棒速度曲线有突然升高再下降的现象，而在 CRAC 的计算值却没有这一现象；控制棒子弹头进入缓冲段之后速度会迅速下降，缓冲段初始阶段 CRAC 计算得到的速度下降趋势明显，而接近行程末端时，CRAC 计算得到的速度下降趋势变缓。文献 [9] 也记载了落棒试验也出现缓冲段入口处落棒速度突然增大现象，认为此现象可能是由于测量扰动造成的。

4 结论

在变回路流量条件下开展了中国先进燃料组

件落棒试验，在此基础上利用 CRAC 落棒分析程序，计算不同流量条件下中国先进燃料组件内的落棒过程相关参数。计算结果与试验结果符合较好，落棒时间变化趋势都是随着回路流量的降低而减小。该结果对于反应堆安全分析是保守的，当反应堆一回路发生流量丧失事故时，事故工况的落棒时间小于额定流量运动工况下的落棒时间。落棒时间的实验值与计算值较接近；名义落棒速度与位移计算值与试验值最接近，相对误差均在 6.3% 以下，满足工程计算精度要求。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国能源行业标准. 压水堆核电厂反应堆系统设计-堆芯-第 4 部分: 燃料相关组件[S]. NB/T 20057. 4-2012.
- [2] RCC-C2005. Design and construction rules for fuel assemblies of PWR nuclear power plants[S]. 2005.
- [3] 张应超, 高永光, 张明葵等. CARR 控制棒驱动机构堆外调试试验[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(8): 1380-1382.
- [4] 胡俊, 刘少华, 蒋贤国等. 秦山核电二期工程控制棒驱动线冷态对中试验研究[J]. 核动力工程, 2003, 24(S1): 155-164.
- [5] 张伟, 薄涵亮, 孙常龙等. 研究堆控制棒冷却剂流动阻力特性实验研究[J]. 核科学与工程, 2006, 26(1): 46-50.
- [6] 孙磊. 控制棒组件落棒时间与历程计算[J]. 核动力工程, 2003, 24(1): 59-62.
- [7] K H Yoon, J Y Kim, K H Lee, et al. Control rod drop analysis by finite element method using fluid-structure interaction for a pressurized water reactor power plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 239(2009): 1857-1861.
- [8] 谢晴瑜. 考虑流固耦合效应的核电厂关键设备非线性动力学计算软件的研发[D]. 华北电力大学核科学与工程学院, 硕士学位论文, 2014, 3.
- [9] Structural behavior of fuel assemblies for water cooled reactors. IAEA-TECDOC-1454[S]. 2005.

(责任编辑: 王中强)