

文章编号：0258-0926(2015)05-0105-03；doi: 10.13832/j.jnpe.2015.05.0105

ACP1000 控制棒驱动线抗震试验研究

杜建勇, 李朋洲, 李琦, 柳琳琳, 徐昱根, 李天勇, 马建中

中国核动力研究设计院核级设备鉴定中心, 成都, 610041

摘要：为验证国产第三代压水堆 ACP1000 控制棒驱动线 (CRDL) 在三代核电要求地震条件下的结构完整性和功能完好性, 在多点激励试验装置上, 采用一组控制棒驱动线 1:1 样机作为试验对象, 进行 CRDL 的抗震试验研究。试验中采用多频波法进行 CRDL 水平和竖直 2 个方向的地震激励, 得到地震对 CRDL 落棒时间的影响; 测量了运行基准地震 (OBE) 和安全停堆地震 (SSE) 下 CRDL 的加速度响应值和应变值, 验证了 CRDL 在 OBE 下的运行功能和 SSE 下的安全功能。试验结果表明: ACP1000 的 CRDL 在地震载荷作用下能够保持其结构完整性和功能完好性。

关键词：ACP1000; 控制棒驱动线 (CRDL); 抗震试验

中图分类号：TL327 **文献标志码：**A

Research on Seismic Test of ACP1000 Control Rod Drive Line

Du Jianyong, Li Pengzhou, Li Qi, Liu Linlin, Xu Yugen, Li Tianyong, Ma Jianzhong

Qualification Center of Safety Classified Equipment of NPIC, Chengdu, 610041, China

Abstract: To verify the structural integrity and operability under the seismic condition required by the third generation of nuclear power plants, the seismic test of ACP1000 control rod drive line (CRDL) was conducted on the multi-exciter test unit. One horizontal direction and one vertical direction of the CRDL were excited with multi-frequency earthquake time history. Drop-time of CRDL under earthquake was obtained. The acceleration and strain response values of CRDL under OBE and SSE level were measured. Operation functions under OBE level and safety function under SSE level of CRDL were validated. The seismic test shows that ACP1000 CRDL can keep the structural integrity and operability under the seismic condition.

Key words: ACP1000, CRDL, Seismic test

0 引言

ACP1000 是国内自主研发的三代核电反应堆, 控制棒驱动线 (CRDL) 作为反应堆启停堆和功率调节的关键能动部件, 除用于正常运行期间的反应堆功率调节或维持外, 还是紧急停堆系统的构成部件之一, 需要执行在规定时间内释放控制棒组件进行紧急停堆的安全功能。

根据相关物项分级标准, CRDL 所含的关键设备组件属抗震 I 类设备。根据相关规范要求, 抗震 I 类设备必须保证在地震发生时或 (和) 地

震后均能履行其安全功能。根据 ACP1000 CRDL 自身的结构特点和相关规范的要求, 为了验证其在要求地震载荷 ($0.3g$, g 为重力加速度), 条件下安全功能的可靠性, 必须对其进行抗震试验研究。

1 ACP1000 控制棒驱动线

ACP1000 中 CRDL 主要包括控制棒驱动机构 (CRDM)、控制棒组件、导向筒组件 (上部和下部导向筒)、燃料组件等。其中 CRDM 棒行程壳体、导向组件和燃料组件控制棒导向管等构成

CRDL 的下落通道, 相对的运动件为驱动杆、钩爪部件和控制棒组件。CRDL 与反应堆的连接点包括反应堆压力容器 (RPV) 顶盖、上支承板、上堆芯板和下堆芯板。

2 试验方案

2.1 试验模型

CRDL 的安全功能主要是驱动控制棒落棒实现安全停堆, 其中落棒时间是其安全分析评价的重要依据参数。为了精确模拟 CRDL 在实堆中的落棒过程, 采用 ACP1000 CRDL 1:1 样机作为试验对象; 燃料组件采用模拟件, 除了封装在燃料棒内部的芯块不同外, 其他特征与燃料组件工程样件相同, 其他部件均采用工程样机。

2.2 激励方法

ACP1000 的 CRDL 与反应堆有多处关联, 当地震发生时, 地面地震运动通过反应堆传递到各个关联点, 然后通过各个关联点传递给 CRDL。由于各个关联点处于不同的楼层高度, 各个关联点的地震响应各异。为了能够精确模拟各个关联点的地震激励, 采用多点激励试验方法进行抗震试验研究, 激励点分别选择为 RPV 顶盖、上支承板、上堆芯板和下堆芯板。

2.3 激励方向

国内外的研究表明, CRDL 与反应堆的各关联处的水平相对位移是影响落棒时间的关键因素, 因此以往 CRDL 抗震试验中主要考虑水平方向激励。为了能够更加真实地模拟实际地震, 在进行水平激励的同时增加了竖向激励。因此, 本试验的激励方向包括 1 个水平方向和 1 个竖直方向, 在每个激励点均施加水平激励, 在下堆芯板位置施加竖向激励。

2.4 顶部限位

在 ACP1000 的设计中, CRDM 顶部设计了抗震支承环, 限制 CRDM 顶部的过大变形。本试验中根据 ACP1000 实际堆顶的设计, 考虑在极限工况下 CRDM 相对于抗震支承环的最大变形和地震载荷的最大位移, 对 CRDM 顶部进行限位, 避免 CRDM 由于过度变形损坏。

2.5 试验工况及方法

2.5.1 动态特性探查试验 在抗震试验前后分别探查 ACP1000 的 CRDL 在安装状态下的基阶固有频率, 试验工况见表 1。动态特性探查试验的输入为加速度幅值不超过 0.2 g 的白噪声。

2.5.2 地震试验 地震试验包括 5 次运行基准地

表1 动态特性试验工况

Table 1 Test Condition for Dynamic Characteristics

工况	介质	控制棒位置
D1	空气	完全插入堆芯
D2	室温水	提升至顶位
D3	室温水	完全插入堆芯

震 (OBE) 和 1 次安全停堆地震 (SSE) 试验。在 OBE 试验中模拟 CRDL 的正常运行工况, 包括提升、下插、保持和落棒; 在 SSE 试验中模拟 CRDL 的安全停堆工况, 对其进行落棒测试。

地震试验采用多频波法进行, 试验载荷为各个激励位置不同的绝对位移时程。

3 试验结果

3.1 动态特性

表 2 为 ACP1000 的 CRDL 各个主要部件的基阶固有频率。从表 2 中数据得出:

(1) CRDM 的基阶固有频率在抗震试验前后未发生变化, 导向筒和模拟燃料组件的基阶固有频率在抗震试验后略有下降, 其中导向筒最大降幅为 2.05%, 模拟燃料组件最大降幅为 9.52%。

(2) 控制棒的位置对于 CRDM 和模拟燃料组件的固有频率有影响, 对导向筒的固有频率无明显影响。

表2 CRDL各部件第一阶固有频率

Table 2 First Order of Natural Frequency of CRDL

试验工况	试验前			试验后		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
驱动机构频率/Hz	1.60	1.52	1.56	1.60	1.52	1.56
上部导向筒频率/Hz	34.50	26.00	26.00	34.10	25.70	25.50
下部导向筒频率/Hz	83.00	44.00	44.00	82.80	43.40	43.10
模拟燃料组件频率/Hz	3.00	2.94	2.81	2.81	2.66	2.66

3.2 地震试验

3.2.1 地震激励模拟 表 3 为各个激励点要求位移与响应位移 RMS 值的统计偏差。试验中各个激励点的响应位移与要求位移 RMS 值的相对统计偏差小于 2.5%。图 1 为试验中某激励点的响应位移与要求位移曲线比较, 结合表 3 得出各个激励点很好地模拟了地震要求载荷。

试验中激励点加速度响应谱 (TRS) 在 0.8 Hz 以上能够包络输入加速度反应谱 (RRS), 见图 2。其中 0.8 Hz 小于 CRDL 最低频率的 0.7 倍, 满足 HAF J0053 《核设备抗震试验指南》中反应谱

表 3 试验中各个激励点响应位移与要求位移 RMS 值统计偏差
Table 3 RMS Error on Response Displacement and Input Displacement of Each Exciter

激励点	OBE					SSE
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	
顶盖处水平向	0.83%	0.68%	0.67%	0.46%	0.70%	0.63%
上支承板处水平向	0.91%	0.70%	0.71%	0.49%	0.76%	0.71%
上堆芯板处水平向	0.34%	0.56%	0.45%	0.02%	0.24%	1.58%
下堆芯板处水平向	0.19%	0.71%	0.80%	0.67%	0.80%	1.61%
竖直方向	0.48%	0.58%	0.77%	0.36%	0.64%	2.28%

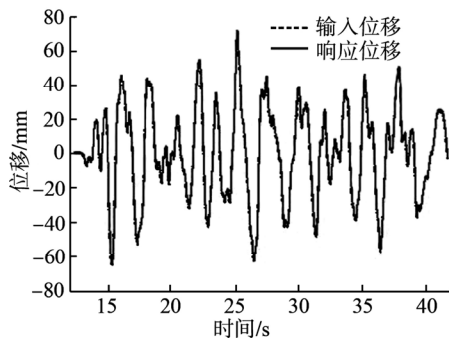


图 1 激励点位移曲线比较

Fig. 1 Comparison of Input and Response Displacement

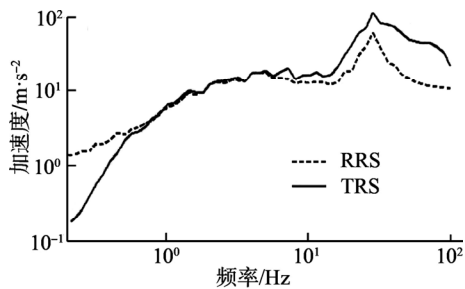


图 2 激励点加速度反应谱曲线比较

Fig. 2 Comparison of TRS and RRS

包络要求。

3.2.2 功能测试

(1) 正常运行功能：根据 HAD102/02《核电厂的抗震设计与鉴定》等核安全法规要求，在 OBE 地震工况下，抗震类设备必须能够保持其正常的运行功能。进行了 OBE 地震下 ACP1000 的 CRDL 提升、下插、保持和落棒等运行性能测试。结果为：CRDL 能按照设计的速度进行提升、下插，控制棒上下运动正常；控制棒能够在设定位置保持；控制棒能够实现落棒功能，落棒时间比静态落棒时间增长，但小于设计限值。

(2) 安全停堆功能：根据 HAD102/02《核电厂的抗震设计与鉴定》等核安全法规要求，在 SSE 地震工况下，抗震类设备必须能够实现安全停

堆功能。进行了 SSE 地震下 ACP1000 的 CRDL 的落棒功能测试，控制棒能够实现落棒功能，落棒时间比静态落棒时间增长，但小于设计限值。

3.3 地震对运行功能的影响分析

(1) OBE 地震试验过程中，CRDL 能够实现正常的提升、下插和保持功能，OBE 地震对 CRDM 的提升、下插和保持功能无明显影响。

(2) 由于各个激励点的地震输入不同，CRDL 各个激励点之间存在一定的相对位移，而且由于地震载荷导致 CRDL 的下落通道在水平向出现明显的变形，运动部件在下落过程中与下落通道周围结构发生碰撞和摩擦，从而对运动件的下落产生影响。另外，模拟燃料组件通过压缩弹簧和销钉定位，在剧烈的地震作用下模拟燃料组件与上堆芯板和下堆芯板之间会出现微小的错位，也会对落棒造成影响。CRDL 是由多个部件组成的一个细长的组合式柔性结构，具有一定的非线性特性，地震载荷作用后整个结构无法完全复原。因此，地震中的落棒时间较试验前落棒时间有明显增加，OBE 试验后和 SSE 试验后的落棒时间比 OBE 试验前的落棒时间略有延长。

4 结论

(1) 试验装置模拟了 ACP1000 CRDL 在实际反应堆中的安装方式，试验中较精确地模拟了 CRDL 各个激励的地震试验载荷，通过虚拟仿真技术设计的试验支撑是合理的。

(2) 试验验证了 ACP1000 CRDL 在设计地震条件下的结构完整性和功能完好性，为 ACP1000 的安全评审提供了试验依据。

(3) 本试验中实现了水平方向和竖直方向地震载荷的同时加载，相比较国际上普遍采用的水平单向多点激励试验，更加真实地模拟了实际地震。

(责任编辑：刘君)