

微型中子源反应堆的运行性能

郭诚湛

(深圳大学核技术应用联合研究所, 518060)

文章概要总结了我国自行设计、建造的原型中子源反应堆及相继建成并投入运行的 7 座商用堆的主要性能和运行特点。

关键词 微型中子源反应堆 运行性能 结构特点

微型中子源反应堆(Miniature Neutron Source Reactor, 以下简称微堆)是由中国原子能科学研究院于 1984 年 4 月研制成功的 1 种结构简单、安全可靠、建造和运行费用低、对环境无核污染的核装置。它可以建造在位于人口稠密的城市中的科研、医院、培训中心等单位,用以进行中子活化分析、少量的中、短寿命同位素制备以及培训核应用技术人员。本文将对微堆的主要性能和运行特点予以总结。

1 良好的自限功率能力^[1]

微堆采用“池罐”结构,以浓缩度为 90.2% 的²³⁵U 作燃料元件,金属铍作反射层,水为慢化剂和冷却剂。在物理设计中,堆芯采用稠密栅格、中子能量欠慢化方案,使堆芯慢化剂具有较大的负温度系数。在热工水力设计上采用自然循环,自动把堆芯裂变能量带出并传递到水池和周围环境中。在总体布置上,堆芯入口冷却剂通过虹吸作用自动与出口冷却剂相耦合,加速堆芯的温度反馈作用。这些设计特点使微堆的安全性能优良,抑制功率骤变能力强。在初始装料时,严格限制冷态后备反应性为 3.5—4.0 mk,以杜绝瞬发临界事故和堆芯燃料元件熔化事故的发生。

在原型和商用微堆上已做过大量动态反馈实验,研究微堆对引入的各种正反应性扰动的响应特性,并利用核电站瞬态分析程序 Relap-5 进行了理论计算^[2,4]。从表 1 和 2 可以看出:当引入最大冷态后备反应性 3.6 mk 时,功率开始快速增长,倍增周期只有 5.2 s。约 6 min 后,功率增长的势头被慢化剂的温度效应抑制,出现了 75.8 kW 的功率峰值 P_{\max} 。然后,随着堆芯温度效应的增加、氙毒的积累,反应堆功率自动下降。以上过程仅仅依靠堆芯的内在自然规律、不施加任何外界作用使反应堆功率得以自动抑制,呈现出非能动特性。过程中,芯体元件最高温度为 91.5℃,元件壁面最高温度为 91.2℃,远低于饱和温度(约 113℃)。由此可见,原型微堆在正反应性全部释放时,堆的安全被裕度很大。

收稿日期:1994-12-24 收到修改稿日期:1995-03-28

表1 原型微堆动态反馈实验和计算结果

Table 1 Experimental and calculated values of the kinetic feedback of prototype miniature neutron source reactor (MNSR)

引入反应性 ρ/mk	P_{\max}/kW		到达 P_{\max} 的时间 t/s		相应入口温度 $T_1/^\circ\text{C}$		相应出口温度 $T_2/^\circ\text{C}$	
	实验值	计算值	实验值	计算值	实验值	计算值	实验值	计算值
线性 2.0	33.8	34.4	570	640	23.4	24.6	49.7	48.4
阶跃 2.1	36.1	36.7	556		20.5	20.0	47.0	48.4
线性 2.9	58.2	58.7	361	370	25.3	24.6	49.8	56.4
阶跃 3.0	60.9	62.2	432	370	21.2	20.2	58.4	57.6
线性 3.6	75.8	75.5	358	240	22.8	21.5	62.8	61.5

表2 动态反馈计算结果

Table 2 Calculated results of kinetic parameters of prototype MNSR

引入反应性 ρ/mk	平均温度系数 $\text{mk}/^\circ\text{C}$	元件中心最高 温度/ $^\circ\text{C}$	元件壁面最高 温度/ $^\circ\text{C}$	最大出口温度 $/^\circ\text{C}$	最大流量 $/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	流速 $/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
线性 2.0	0.118	68.3	68.0	51.9	0.348	1.03
阶跃 2.1	0.121	66.0	65.0	48.5	0.355	1.05
线性 2.9	0.120	85.3	84.3	59.6	0.442	1.31
阶跃 3.0	0.130	83.0	82.5	57.7	0.448	1.32
线性 3.6	0.137	91.5	91.2	62.1	0.492	1.46

考虑到商用微堆可能建造在城市稠密人口地区,这对微堆的安全提出了更高的要求。在商用微堆的设计中采取了一系列相应措施^[3]。主要措施是提高欠慢化程度,增加安全裕度。大量实验业已证实,采取以上措施来提高商用微堆安全性是以牺牲部分经济性为代价的,即可连续运行时间缩短。此外,在商用微堆设计中,参考美国 ANSI/ANS-15.15-1987“研究性堆安全系统准则的规定对于危险性可以忽略的反应堆,仍需设置不遵守单一故障准则的安全系统”,设置了保护系统。当堆功率、温差超过额定值的120%时,该系统确保反应堆自动下棒停堆

2 间隔式运行方式

微堆属低中子通量密度反应堆,氙毒反应性通常很小。由于将冷态后备反应性严格控制为3.5-4.0 mk,它不足以补偿平衡氙毒反应性(原型微堆的平衡氙毒反应性为-5.7 mk,商用微堆为-5.6 mk),因此,它不可能长期连续运行,只能采取间隔式运行方式。在额定功率下,每天通常运行2 h。停堆之后待氙毒衰变后,第2天再次启动运行。原型微堆冷态后备反应性为3.4 mk时,在额定功率下最大可连续运行时间为6.5 h。商用微堆冷态后备反应性为3.9 mk时,最大可连续运行时间为9 h。

从表3和4可看出,微堆在运行过程中,温度效应占冷态后备反应性的很大份额。在额定

工况下,当控制棒到顶,即后备反应性全部释放时,温度效应占冷态后备反应性的75%以上,它比氙毒反应性(包括停堆后产生的最大碘坑)大得多,这就决定了不存在碘坑下微堆无法再启动的问题(停堆后堆芯温度下降所释放的反应性(温度效应)比氙毒反应性大)。如果控制棒到顶,可采取降低功率的运行方式,以温度效应来克服氙毒反应性来延长运行时间。可见,微堆的运行方便、灵活,这给活化分析工作提供了较佳条件。

表3 额定工况下反应性的分配

Table 3 Reactivity distribution under rated power level

堆型	稳定运行时间/h	反应性 ρ / -mk	
		温度效应	氙毒反应性
原型堆	2	2.10	0.11
	6	2.60	0.78
商用堆	2	2.60	0.09
	6	2.90	0.62

注:额定工况下 $n_{v0} = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

表4 额定工况下运行不同时间停堆后产生的最大碘坑

Table 4 Maximum xenon reactivity variation after shutdown for different operation time under rated power level

稳定运行时间/h	最大碘坑 / -mk	
	原型堆	商用堆
2.0	0.11	0.09
2.5	0.17	0.13
6.0	0.79	0.63

注:额定工况下 $n_{v0} = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

3 堆寿期长

微堆冷态后备反应性很小,一般控制为3.5--4.0 mk。利用 $\text{Be}^9(n,2n)\text{Be}^8$ 和 (γ,n) 反应,可以产生附加中子增殖,以陆续添加 Be 反射层来获得添加元件的效果,使后备反应性增加,不断补偿燃耗、 ^{149}Sm 毒物和结渣效应。每运行约 2a,需添加 1 次顶铍反射层。

根据理论计算,原型和商用微堆添加顶铍反射层厚度为 109.5 mm,总效率分别为 16.8 和 17.9 mk^[6]。

原型微堆在 1984 年 4 月至 1992 年 9 月期间共计消耗掉 4.41 mk 的反应性。先后添加过 3 次铍反射层。上顶铍累计厚度为 8.3 mm,引入的反应性为 3.44 mk。平均每年消耗的反应性约为 0.52 mk,实测燃耗以每 mk 相应的中子通量计为 1.68×10^{18} 。若在额定工况下每天运行 2.5 h、每年按 52 周、每周工作 6 d 计,1 a 中释放出的能量相应为 2.8×10^{18} nvt,则每年约消耗 1.6 mk。由此可见,微堆寿期稍大于 10 a。

微堆寿期在很大程度上取决于堆芯元件和铍的电化学腐蚀。如果堆水、池水的水质长期保持优良(即电阻率 0.5-1.0 M Ω ·cm, pH=5.5-6.5),不发生或发生轻微腐蚀,从实际运行经验看,寿期可能达到 20-30 a。

4 测量、控制仪器少,操作简单

微堆使用的仪器仪表很少,只有中子通量密度仪、控制棒棒位指示器、进出口温度计、堆顶 γ 剂量仪。操纵台不设备份,不用应急电源。堆的运行状态根据中子通量密度、热功率、堆顶 γ 剂量三者的关系来判断。控制棒及其传动机构亦非常简单。1 根中心控制棒既作安全棒又作补偿、调节棒,它既能恒速提升、下降进行微调以稳定功率,又能快速落棒满足特殊工况需要,还可利用跑兔系统作为停堆的辅助措施。一旦发生卡棒现象,可将 Cd 盒(把 Cd 片包在跑兔

盒内)用压缩空气打入堆内停堆。目前,微堆已实现计算机闭环控制^[7],做到了无人管理、自动采集运行参数、记录运行日志。运行人员经过短期训练就可上岗进行操作运行。加之造价低廉,因此微堆易于商品化。

5 跑兔管的品质

1) 中子通量密度稳定性好

跑兔管内中子通量密度的稳定性与中子探测器的选择、调节系统的性能以及堆运行工况有关。

初期的原型微堆的堆芯周围布置了5种探测器,对它们进行了线性、稳定性、重复性动态响应特性等项实验测定。其中,以北京核仪器厂生产的LB 1120 ϕ 5 微型裂变电离室的性能最佳,它的灵敏度、线性、稳定性和使用寿命等指标均满足微堆的要求。在原型微堆运行10 a中,仪器的各种性能都经受了考验。在商用堆中,微型裂变电离室的位置从原型堆的外跑兔管的位置处移到侧铍反射层内,与小跑兔管处于同一圆周上。这一变动可更有效地监测控制小跑兔管内的中子通量密度的变化。为了准确给出小跑兔管内的绝对中子通量密度,在比较宽的量程范围内($10^9 - 10^{12} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)测试小跑兔管内的中子通量密度与裂变电离室电流间的关系,用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合仪对辐照过的金箔进行标定、符合、外推,保证小跑兔管内的中子通量密度处在 $10^9 - 10^{12} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,测定误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。堆功率越高,通量密度的稳定性越好。这是由于微堆具有良好的自限功率能力的缘故。

2) 控制系统抗干扰能力强

调节系统采用带宽控制自动调节法^[6]。当中子通量密度与设定值的偏离小于 $\pm 0.5\%$ 时,系统将不作任何调节;偏离设定值大于 $\pm 0.5\%$ 而小于 $\pm 1.0\%$ 时,控制棒仅作微量调节;偏离设定值大于 $\pm 1.0\%$ 时,控制棒进行强调节。控制棒的位移大小由可控硅导通的时间长短来决定。这样,既保证了控制系统快速响应,又可保证控制精度。

控制调节系统抗干扰能力强,而且随着功率的提升、温度系数负反馈的加强,使得堆的自稳性能变得更好。实验结果表明,如果从小跑兔管引入 -1mk 的Cd盒,在额定工况下,控制调节系统可以在5 s内恢复到原来的中子通量密度水平。一般样品的反应性当量很小,所以,各跑兔管内样品的进出对堆的扰动很小,这就保证了活化分析的精度。这一点,对于短寿命核素的分析显得尤其重要。

3) 跑兔管内轴向周向中子通量密度一致性好,各跑兔管之间中子通量密度偏差小

在原型微堆的小跑兔盒内,沿着轴向、半高度的周向均布着探测片。大量测量表明,小跑兔管内轴向、周向通量密度的不均匀性分别不超过2.7%和2.8%,各小跑兔管内的通量密度偏差小于1%。中子通量密度分析的均匀性给活化分析工作带来很大方便。

4) 小跑兔管内的中子温度和超热指标

采用“双探测片法”和“辐比法”测量了小跑兔管内的中子温度 $T_n(\text{C})$ 和超热指标 γ 。结果列于表5。由表5可看出,跑兔管内超热中子成分相当高,中子谱偏硬。

5) 跑兔管内的温度

在原型微堆小跑兔管和大跑兔管内各安装着热电偶。在额定工况下测得的管内温度列于表6。

表5 微堆的超热参数

Table 5 Epithermal parameters of MNSR

超热参数	原型堆	商用堆
金镉比	3.0	2.7
镉镉比	21.0	17.2
中子温度/℃	45.5	55.4
超热指标 γ	0.031	0.034
介质温度/℃	21	26

表6 原型微堆在额定工况下跑兔管内的温度

Table 6 Temperature in irradiation sites under rated power level of MNSR

稳定运行时间/h	温度/℃	
	小跑兔管	大跑兔管
1	23.57	22.58
2	29.30	25.00
3	38.52	32.30
4	40.05	34.07

注:初始水温为 20 ℃

初始水温为 20 ℃ 时,运行 3 h 后,依靠自然循环,堆内温度基本达到平衡。从测量数据看,小跑兔管内的温度基本上是堆芯的平均温度,大跑兔管内的温度比小跑兔管约低 5 ℃。这样的温度非常适宜生物样品的活化分析。

6) 跑兔管内的 γ 发热

在原型微堆的小跑兔管内安装 1 个钴自给能探测器和 1 个 Pt 探测器,大跑兔管内安装着 1 个直径 $\phi 5$ 裂变室和 1 个 $\phi 5$ γ 电离室。在额定工况下获得的中子通量密度与 γ 吸收剂量的比值为 $3.6 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \cdot \text{Gy}^{-1}$,小跑兔管内 γ 吸收剂量率约为 10^4Gy/h 。跑兔管内 γ 发热较小,适合于生物样品的辐照分析。

6 厂房内外辐射水平低^[9,10]

微堆采用“罐-池”结构,燃料元件采用高压小电流钨弧焊,表面铀污染很小。2 次抽样检测表面铀污染分别小于 $3.5 \times 10^{-9} \text{g/cm}^2$ 和 $1.7 \times 10^{-9} \text{g/cm}^2$,从而可有效控制堆水中的长半衰期裂变产物的产生。1984 年至 1992 年期间,对原型微堆的堆水、池水中的¹³⁷Cs 的比活度进行了测量。结果列于表 7。

测量结果表明:原型微堆的堆水、池水水样中的裂变核素的比活度为本底水平,堆水比池水的比活度略高一些,但仍为正常值。后者是由燃料元件包壳表面微量的铀污染造成的。

表 8 列出原型微堆,深圳、山东、巴基斯坦微堆厂房内外辐射水平的测量结果。厂房外的辐射剂量与环境本底水平相同。大厅和控制台处的辐射剂量在规规定值以下。1984 年至 1991 年期间,原型微堆的实测表明:人年均剂量当量为 $1.0 \times 10^{-3} - 4.9 \times 10^{-4} \text{Sv}$,个人最大年剂量为 $2.6 \times 10^{-3} \text{Sv}$,均低于国家标准规定值。

表7 原型微堆堆水、池水中¹³⁷Cs 的比活度 a (¹³⁷Cs)Table 7 Specific activities of ¹³⁷Cs in the pool and reactor waters of MNSR

测量日期	a (¹³⁷ Cs)/Bq·l ⁻¹	
	堆水	池水
1984-08	0.11	5.7×10^{-3}
1987-10	0.33	2.7×10^{-2}
1988-03	0.23	4.2×10^{-2}
1991-01	0.30	7.4×10^{-3}
1992-04	<0.40	<0.40

表8 几座微堆的辐射水平测量结果
Table 8 Measured radiation dose rate for MNSRs

微堆名称	辐射水平/mSv·h ⁻¹											
	微堆大厅内									微堆厂房外		
	顶部			大厅			控制台			H _γ	H _n	H _{n+γ}
H _γ	H _n	H _{n+γ}	H _γ	H _n	H _{n+γ}	H _γ	H _n	H _{n+γ}				
原型微堆	4.8×10 ⁻²	1.5×10 ⁻³	5.0×10 ⁻²	3.5×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴	5.3×10 ⁻⁴	3.4×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻⁴	4.6×10 ⁻⁴	9.2×10 ⁻⁵	5.0×10 ⁻⁶	9.7×10 ⁻⁵
深圳微堆	7.3×10 ⁻²	8.4×10 ⁻⁴	7.3×10 ⁻²	2.7×10 ⁻³	1.4×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻³	4.2×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻⁶	4.2×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴	4.3×10 ⁻⁶	1.8×10 ⁻⁴
山东微堆	6.3×10 ⁻²	4.0×10 ⁻⁴	6.3×10 ⁻²	1.6×10 ⁻³	5.3×10 ⁻⁵	1.7×10 ⁻³	6.7×10 ⁻⁴	2.7×10 ⁻⁵	6.8×10 ⁻⁴	8.5×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻⁶	8.7×10 ⁻⁵
巴基斯坦微堆	5.1×10 ⁻²	1.2×10 ⁻⁴	5.1×10 ⁻²	2.0×10 ⁻⁴	3.4×10 ⁻⁵	2.3×10 ⁻⁴	1.4×10 ⁻⁴	2.2×10 ⁻⁵	1.6×10 ⁻⁴	8.4×10 ⁻⁵	8.0×10 ⁻⁶	9.2×10 ⁻⁵

表9 在堆水、池水中的放射性核素及其比活度 a
Table 9 Radioactive nuclides and their specific activities a in the pool and reactor waters

放射性核素	a/Bq·m ⁻³		总铀量/mg·l ⁻¹	
	堆水	池水	堆水	池水
总 α	1×10 ⁵	4.7×10 ²		
总 β	1.4×10 ⁵	8.0×10 ²		
总 Sr	5.8×10 ³	4.4×10 ¹		
³ H	1.0×10 ⁷	1.1×10 ⁵		
²⁴ Na	4.8×10 ⁶	1.4×10 ⁵		
⁴¹ Ar	5.2×10 ⁴	2.2×10 ⁴		
⁴⁶ Sc	9×10 ²			
⁵¹ Cr	7.0×10 ³			
⁵⁴ Mn	1.4×10 ³			
⁵⁶ Mn	1.0×10 ⁷	3.7×10 ³	2.1×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷
⁵⁸ Co	5×10 ⁷			
⁶⁰ Co	4×10 ³			
⁶⁵ Zn	2.6×10 ³			
¹³⁷ Cs	3.3×10 ²	2.7×10 ¹		
¹⁴⁰ La	7×10 ²			
¹⁴⁰ Ba	7×10 ²			
²³⁵ U	3.6×10 ¹	8×10 ⁻¹		

表9 列出原型堆在8a运行期间堆水、池水中放射性核素及其比活度的实测数据。这些数据是数次测量中的最大值。从表8、9中所列数据可知,微堆的辐射场是非常弱的,堆水、池水中的放射性核素的比活度很低。堆水、池水净化系统是闭路循环,不向外排放,对环境将不会产生污染。

参 考 文 献

- 1 Zhou Yongmao. The MNSR Reactor: IAEA-TECDOC-384. 1987.
- 2 郭诚湛. 微型中子源核反应堆的固有安全性. 核科学与工程, 1994, 14(2): 104 - 109.
- 3 郭诚湛, 胡志绮, 夏 普. 商用微堆现行堆芯的物理计算. 中国原子能科学研究院资料, 1987.
- 4 郭诚湛, 许汉铭, 胡志绮, 等. 原型微堆动态反馈实验和计算. 中国原子能科学研究院资料, 1985.
- 5 郭诚湛. 微型反应堆补偿燃耗的方法. 原子能科学技术, 1995, 29(6): 514.
- 6 王里玉, 彭春元. 微堆自动控制仪器. 中国原子能科学研究院资料, 1991.
- 7 王里玉. 微机闭环控制系统. 中国原子能科学研究院资料, 1991.
- 8 陈绍能. 反应堆的中子通量和能谱参数. 原子能科学技术, 1990, 24(6): 78 - 83.
- 9 张先发. 微型核反应堆辐射防护教材. 中国原子能科学研究院资料, 1991.
- 10 张先发. 原型微堆堆水、池水水样分析. 中国原子能科学研究院资料, 1992.

OPERATION PERFORMANCE OF MINIATURE NEUTRON SOURCE REACTOR

Gou Chengzhan

(Shenzhen University, 518060)

ABSTRACT

Miniature neutron source reactor (MNSR) was first built in China Institute of Atomic Energy, Beijing, China, in April 1984. Four years later, four commercial MNSRs were built by China Institute of Atomic Energy both at home and abroad and three more commercial MNSRs are under way. The experiences in the design, operation and experiments are reviewed briefly in the paper.

Key words Miniature neutron source reactor Operation property Structure characteristic