

# 微型反应堆补偿能耗的方法

郭诚湛

(深圳大学核技术研究所, 518060)

朱国盛 王德亮

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

微型反应堆 (MNSR) 严格限制冷态后备反应性为 3.5—4.0mk, 小于  $0.5\beta_{eff}$  (微堆的  $\beta_{eff} = 0.008$ ), 从根本上杜绝了瞬发临界事故和堆芯元件烧毁事故的发生。在如此小的后备反应性条件下, 为了使微堆寿期大于 10a, 采用间断地添加顶铍反射层的办法来补偿能耗。理论计算出了添加顶铍反射层厚度与反应性增长的关系, 在零功率反应堆上进行了实验校核, 并就原型微堆添加顶铍反射层的操作经验作出总结。

**关键词** 微堆 能耗 顶铍反射层

为了确保微堆的安全, 在堆物理、热工水力设计以及总体布局上采取了一系列的措施<sup>[1-3]</sup>: 堆芯采用稠密栅格, 即单位栅元里 H 原子数与  $^{235}\text{U}$  原子数之比值较小, 使中子能量处于欠慢化状态, 让堆芯的慢化剂具有较大的负温度系数, 并适当地控制堆芯流量, 使冷却剂流过堆芯获得较大的温升和较大的反应性温度效应; 装料时, 严格控制初始冷态后备反应性处在 3.5—4.0mk 范围内, 即小于  $0.5\beta_{eff}$ , 从根本上杜绝产生瞬发临界事故和堆芯燃料元件的熔化事故。如此小的后备反应性难以保证反应堆寿期大于 10a。为了补偿运行中的反应性损失, 间断地添加顶铍反射层, 通过  $\text{Be}(n, 2n)\text{Be}^8$  和  $(\gamma, n)$  反应, 产生附加的中子增殖。添加顶铍反射层起到了添加元件的效果, 使微堆的后备反应性增加。当铍反射层达到一定厚度后, 反应性增殖为零, 达到饱和, 微堆寿期将终止。本文研究添加顶铍反射层来补偿能耗的方法。

## 1 顶铍反射层效率的确定

在堆芯的底部、周围均布有铍反射层。在运行初期, 堆芯上部是水反射层。运行一定时间后, 逐步添加顶铍反射层来补偿能耗。顶铍反射层的尺寸、规格列于表 1。顶铍的效率和效率达到饱和时的添加厚度对估计反应堆寿期有重要意义。顶铍反射层总的反应性当量很大, 实验测量困难较大。本文先通过理论计算求得添加顶铍反射层厚度与反应性增量的关系, 然后在零功率反应堆上对最初几个数据点运行实验校核。

先采用 HAMMER 程序进行群常数计算, 再用 EXTERMINATOR-2 二维 X-Y, R-Z, R- $\theta$  程序作中子通量密度空间分布计算。计算中, 将堆芯分为 17 个区, 进行二维四群计算。在堆芯装载不变的条件下, 改变顶铍厚度, 从  $k_{eff}$  的变化中获得顶铍反射层的效率。计算结果示于

收稿日期: 1994-08-19 收到修改稿日期: 1994-10-19

图1。从图1可以看出:曲线开始部分变化较快,1.5mm厚的Be片的效率相当于1mk反应性;随后,曲线变化缓慢,当顶铍厚度达到约10cm时,反应性当量趋向饱和,效率几乎为零,此时,微堆寿期终止。

原型微堆顶铍反射层(109.5mm厚)的总效率为16.8mk,商用微堆为17.9mk。

表1 顶铍反射层的尺寸和规格<sup>[3]</sup>

Table 1 Sizes and kinds of top Be reflector

微堆类型	顶铍反射层直径/mm	半圆形顶铍厚度(mm)和块数	总厚度/mm	微堆类型	顶铍反射层直径/mm	半圆形顶铍厚度(mm)和块数	总厚度/mm
原型堆	265	1.5; 30 3.0; 10 6.0; 8 12.0; 8	109.5	商用堆	243	1.5; 10 3.0; 20 6.0; 8 12.0; 8	109.5

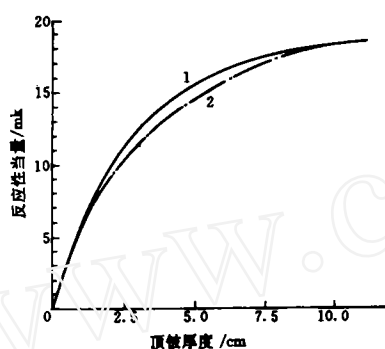


图1 顶铍反射层的效率曲线

Fig.1 Efficiency curve of top Be reflector

1——理论计算曲线;2——零功率堆实验曲线

## 2 运行方式

反应堆必须有足够的后备反应性来克服温度效应和氙毒反应性,并且随着功率的提高,温度效应、氙毒反应性亦随之增加。微堆依靠自然循环冷却。随着运行功率的提升,堆的进出口温差、入口温度随之上升(图2),温度效应亦增加(图3)。当稳定运行3h左右,堆内的温度达到动态平衡,在额定工况下,此时约70%的后备反应性消耗于温度效应,余下的反应性主要用于补偿氙毒反应性<sup>[5]</sup>。微堆的氙毒反应性一般是比较小的,在额定工况,即小辐照座中子通量密度为 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 下,稳定运行时的平衡氙毒约 $-5.6\text{mk}$ <sup>[6]</sup>。由于冷态后备反应性小,克服温度效应后剩余后备反应性就更小了,因此,微堆不可能长期连续运行,只能采用间隔式运行方式。在两次运行间隔期间让氙毒自行衰变消失,保证每天有2—2.5h以上运行时间。原型微堆在冷态(15℃)后备反应性为3.4mk时,最大可连续运行时间为6.5h,商用微堆冷态(20℃)后备反应性为3.9mk时,最大可连续运行时间为7.25h。经过长期运行之后,随着燃料、<sup>149</sup>Sm中毒和结渣不断增加,后备反应性将不断减少。实际运行经验表明,当原型微堆冷后

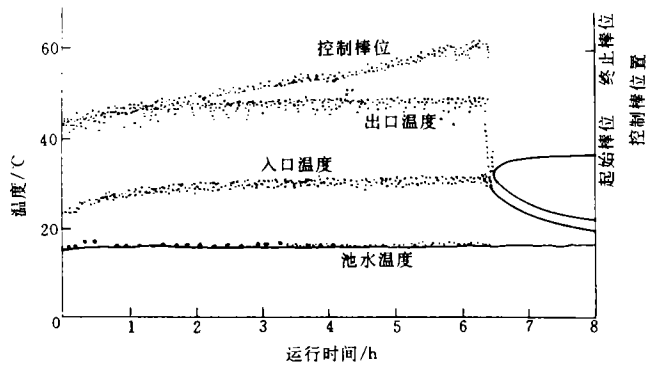


图2 额定工况下原型微堆的运行参数

Fig.2 Operation parameters under normal power level of prototype MNSR

备反应性小于2.6mk、商用微堆小于2.9mk时,在额定工况下,每天可连续运行时间将短于额定的2.5h,此时,需要添加顶铍反射层。

### 3 添加顶铍反射层补偿燃耗

微堆只有1根中心控制棒,它还兼作安全棒、调节棒、补偿棒之用。在添加顶铍反射层时,必须把控制棒及其传动机构卸下。为了防止意外临界的发生,先把中子、 $\gamma$ 监测仪投入工作,在4个小跑免管(侧铍反射层中的辐照孔道)内各放入1个Cd串(由3个Cd盒串联在一起),将中心控制棒拔出

堆芯。若中子、 $\gamma$ 读数上升,且没有稳定的计数,说明堆仍处于超临界状态,必须在第5个小跑免管免内加入1个Cd串;如果中子、 $\gamma$ 读数慢慢增加,最后有稳定计数,而且比拔出控制棒之前增加不多,说明堆处于次临界状态,此时方可添加顶铍反射层。每次添加顶铍厚度必须予以控制,使添加后的冷态后备反应性控制在3.5-4.0mk范围内。添加顶铍操作过程如下:利用长柄工具把堆芯上面的托盘吊起,把经过丙酮、酒精清洗过的Be片轻轻放到托盘上慢慢入堆,同时观察中子、 $\gamma$ 读数增长情况,如果增加不多,逐步趋于稳定,说明堆处于次临界状态,此时可把控制棒和传动机构复位;如果中子、 $\gamma$ 读数增加很快,且没有1个稳定的读数,说明Be的厚度添加量过大,引入的反应性过多,必须减小Be的厚度。整个操作必须按操作程序和严格监督下进行,以防止意外临界的发生。

原型微堆在1987、1991、1993年进行了3次添加顶铍反射层的操作。添加情况列于表3。原型微堆平均燃耗速率实测值为0.56mk/a,而1mk后备反应性产生的中子通量为 $1.68 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 。这样,微堆寿期将大于10a。在堆寿期内,平均2—3年需添加1次顶铍反射层以补偿

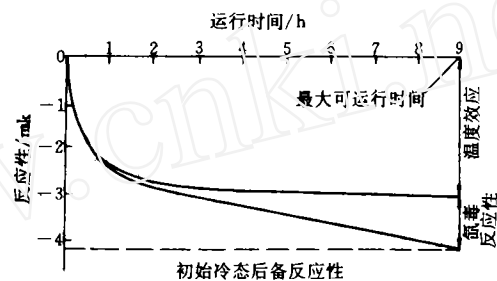


图3 反应性随运行时间的变化(功率为30kW)

Fig.3 A plot of reactivity against time under the power of 30kW

燃耗。

表3 原型微堆顶铍反射层添加厚度

Table 3 Added thickness of top Be reflector of prototype MNSR

添加日期	添加厚度 /mm	总添加量 /mm	反应性增量 $\Delta k/mk$		总的反应性 增量 $\Delta k/mk$
			理论值	实测值	
1987.05	4.80	4.80	1.80	2.10	2.10
1991.09	1.75	6.55	0.70	0.80	2.90
1993.02	1.75	8.30	0.70	0.78	3.68

#### 4 小结

添加顶铍反射层来补偿燃耗的优点是容易控制堆内的冷态后备反应性,严格限制了失控功率和辐射影响,从根本上杜绝了瞬发临界燃料元件烧毁事故的发生,这对于确保建在人口稠密地区的微堆的安全性尤其重要。添加顶铍反射层的操作比较频繁,容易出现意外临界事故,必须加强管理、规范操作步骤,在专业人员参与、堆物理人员指导下,使每次操作做到安全、迅速、准确。

#### 参 考 文 献

- 1 周永茂.原型微堆的设计和建造.核工业部鉴定文件.1984.
- 2 胡志绮.原型微堆基本物理参数计算.中国原子能科学研究院资料.1983.
- 3 石双凯.强中子源堆堆芯热工水力计算.中国原子能科学研究院资料.1983.
- 4 胡志绮,郭诚湛.微堆的物理设计和计算.中国原子能科学研究院资料.1988.
- 5 郭诚湛.微型中子源核反应堆的性能研究.中国原子能科学研究院资料.1989.
- 6 郭诚湛.氙毒反应性对微堆运行的影响.中国原子能科学研究院资料.1991.

### A METHOD OF COMPENSATING BURNUP IN MINIATURE NEUTRON SOURCE REACTOR(MNSR)

GUO CHENGZHAN

ZHU GUOSHEN WAN DELIANG

(Shenzhen University, 518060)

(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

#### ABSTARCT

Since the cold excess reactivity of MNSR is strictly limited in 3.5 - 4.0mk, that is less than  $0.5\beta_{eff}$ , the prompt critical and core melt accident could not happened. In order to expanding reactor life to more than 10 years, a method of adding top Be shims is adopted for compensating reactivity of burnup. The reactivity effect of the thickness of Be is calculated by theory and checked experimentally in the zero power reactor. The operating experience for adding top Be reflector is introduced in the paper.

**Key words** MNSR Burnup Top Be reflector