

低浓化微堆拓展应用可行性研究

吕征, 孙志勇, 王思广

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

摘要:对现有微型中子源反应堆(微堆)采用低浓铀燃料并对引出热中子束装置进行了物理可行性研究, 给出堆芯核特性参数, 并对不同中子束装置的结构方案进行了分析, 为微堆燃料元件低浓化并拓宽应用提供了有益的结果。

关键词:微堆; k_{eff} ; 中子注量率

中图分类号: TL411.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2003)02-0106-05

The Feasible Research on Developing Application of Miniature Neutron Source Reactor Loaded Low enrichment Fuel

LU Zheng, SUN Zhi-yong, WANG Si-guang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-33, Beijing 102413, China)

Abstract: The feasible researches on reducing fuel enrichment and deriving of thermal neutron beam are carried out for current miniature neutron source reactor(MNSR). The nuclear parameters of reactor and formation of thermal neutron beam are analyzed and calculated. The research provides profitable suggestion for enhancing application and reducing fuel enrichment on MNSR.

Key words: miniature neutron source reactor; effective multiplication factor; neutron flux density

中国原子能科学研究院研制开发的微型中子源反应堆(微堆)的结构简单, 安全性好, 建造和运行费低, 运行操作简便, 环境核污染少, 有较好的国际市场和 application 前景。但因受燃料低浓化和应用多样化等研究堆发展趋势的影响, 微堆面临着新的挑战。

本工作就现有微堆采用低浓铀燃料元件和在满功率 20 kW 运行时从侧反射层外引出热中子注量率大于 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的中子束装置以供治疗脑肿瘤用的设想进行物理可行性分

析, 为微堆低浓化下拓展用途提供理论依据。

1 微堆结构简介

微堆本体结构示于图 1。反应堆浸没在轻水中。堆芯外径 238 mm, 高度 250.5 mm; 侧铍内径 240 mm, 厚度 100 mm; 底铍直径 350 mm, 厚 100 mm; 顶铍直径 264 mm, 最大厚度可调节; 顶铍托盘底厚度为 2.5 mm, 侧厚 2 mm; 入口流道(侧铍与底铍间的距离)为 4 mm; 出口流道(侧铍与顶铍间的距离)为

收稿日期: 2002-05-27; 修回日期: 2002-08-08

作者简介: 吕征(1977—), 男(满族), 河北承德人, 助理工程师, 反应堆工程专业

5 mm;中央导管材料为 Zr-4,内径 9 mm,壁厚 1.5 mm。

燃料元件的总长为 257 mm,包壳壁厚 0.4 mm,芯体与包壳的间隙为 0.05 mm。燃料芯体直径 4.2 mm,长度 240 mm,上、下端塞长度各为 7 mm,上端塞下部气隙为 3 mm。包壳材料和上下端塞材料为 Zr-4 合金。在反应堆中,用上下栅板将元件固定。上下栅板厚度分别为 3、4 mm。下栅板置于底铍上。

实际应用时,在靠近侧铍外加一弧度为 140 的反射瓦,瓦材为铍或石墨(根据核特征参数选定),内径 400 mm,厚 80 mm。瓦外为一 10 mm 厚的铝桶,铝桶外靠铍(或石墨)瓦侧有与瓦等弧等高的石墨块,其厚度为 800 mm。堆芯中间为控制棒导管。

2 计算方法和程序

计算中主要使用了 3 个程序:WIMS/D4, CITATION 及 CITA-TOOL。其中:WIMS/D4 程序为带燃耗栅元的计算程序,用来计算 CITATION 所需的少群参数;CITATION 程序为基于有限差分方法求解中子扩散方程的堆芯稳态物理分析程序;在数据格式转换和计算结果处理上采用中国先进研究堆物理研究中开发的 CITA-TOOL 接口程序。

3 低浓化方案的选定

为了选定低浓化方案,在富集度为 13%、14%、15% 和 $H^{235}U$ 原子数比分别为 180、190、200,且在侧铍厚度固定为 100 mm 的情况下,对有无顶铍和两种底铍厚度等多种方案进行临界计算。计算结果列于表 1。

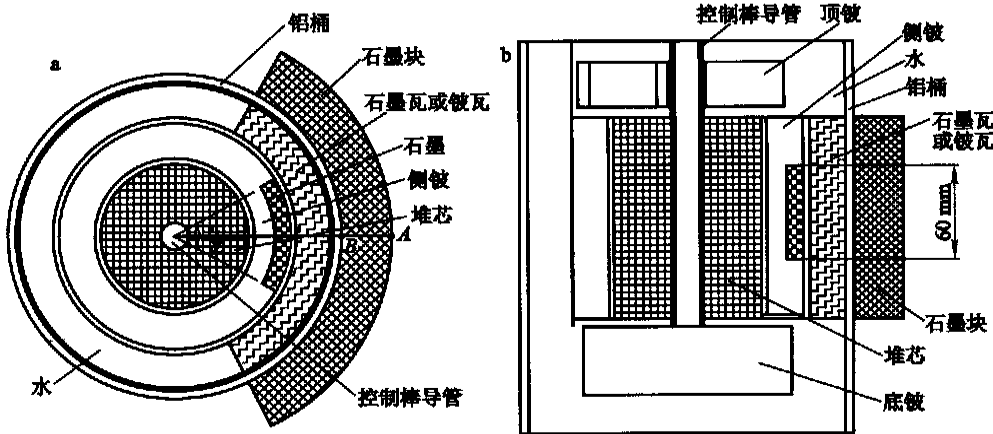


图 1 微堆本体结构示意图

Fig. 1 The sketch of MNSR's structure

a——横剖图;b——纵剖图

表 1 低浓化方案选择计算结果

Table 1 Calculation results of reduced enrichment case

^{235}U 富集度	$H^{235}U$ 原子数比	满装载 元件数	^{235}U 总 装载量/g	k_{eff}			后备反应性/mk		
				顶铍 110 mm		无顶铍	顶铍 110 mm		无顶铍
				底铍 50 mm	底铍 100 mm	底铍 100 mm	底铍 50 mm	底铍 100 mm	底铍 100 mm
13 %	180	324	1 308.00	1.082 543	1.091 542	1.071 206	76.25	83.86	66.47
	190	310	1 251.49	1.076 762	1.085 678	1.065 526	71.29	78.92	61.50
	200	296	1 194.97	1.070 002	1.078 822	1.058 891	65.42	73.06	55.62
14 %	180	304	1 321.65	1.085 804	1.094 784	1.074 499	79.02	86.58	69.33
	190	291	1 265.13	1.079 590	1.088 481	1.068 399	73.72	81.29	64.02
	200	278	1 208.62	1.072 355	1.081 148	1.061 289	67.47	75.06	57.75
15 %	180	287	1 336.85	1.088 185	1.097 140	1.076 923	81.04	88.54	71.43
	190	274	1 276.29	1.081 107	1.089 966	1.069 968	75.02	82.54	65.39
	200	262	1 220.40	1.073 879	1.082 643	1.062 860	68.80	76.33	59.14

根据应用要求,堆芯的剩余反应性应大于 20 mk;热工设计要求燃料元件根数不少于 300 根;考虑到计算误差,需留有适当的剩余反应性裕量。基于以上考虑,选择 ^{235}U 富集度为 13.2%、堆芯装载为 310 根元件的堆芯方案。

4 选定方案的核特征

为了更灵活地改变堆芯装载,栅板上开有 324 个栅孔,根据剩余反应性的不同要求,堆芯装载元件数可在 310~324 根间变化。

4.1 临界计算

临界计算在底铍厚度 100 mm 和无顶铍情况下进行。对于 310 根装载,计算了下列 5 种堆芯方案:1) 无反射瓦,无石墨块;2) 铍瓦,无石墨块;3) 铍瓦,有石墨块;4) 石墨瓦,无石墨块;5) 石墨瓦,有石墨块。其中: ^{235}U 装量为 1.28 kg; H^{235}U 原子数比为 185。对于 324 根装载,计算了下述 3 种堆芯方案:1) 无反射瓦,无石墨块;2) 铍瓦,有石墨块;3) 石墨瓦,有石墨块。其中: ^{235}U 装量为 1.34 kg; H^{235}U 原子数比 176。

计算结果列于表 2。图 2 为 310 根装载 1)、3)、5) 方案堆芯布置时的径向中子注量率分布曲线。图 2 中,曲线 1、2、3、4 为能群号(下同)。其中,各能群的范围分别为:第 1 群,0.821~10 MeV;第 2 群,10 keV~0.821 MeV;第 3 群,0.5 eV~10 keV;第 4 群,0.0~0.5 eV。石墨块外侧(图 1 中 A 点)轴向中子注量率分布示于图 3。

4.2 顶铍效率计算

随着反应堆的运行,堆芯反应性将逐渐下降。单靠提升控制棒不能维持反应堆运行时,可增加顶铍厚度,以延长反应堆运行时间。为此,计算了侧铍外有铍瓦或石墨瓦、铝桶外有石墨块情况下的顶铍效率。计算结果列于表 3。

4.3 石墨块内开空腔的方案计算

在石墨块内径向不同位置开空腔,研究其对石墨块外表面 A 点处中子注量率的影响。空腔尺寸为:与堆芯张角 30° ,径向厚度 5 cm,高度 20 cm。表 4 列出了不同空腔位置的计算结果。这里的空腔位置系指与铝桶外侧的径向距离。

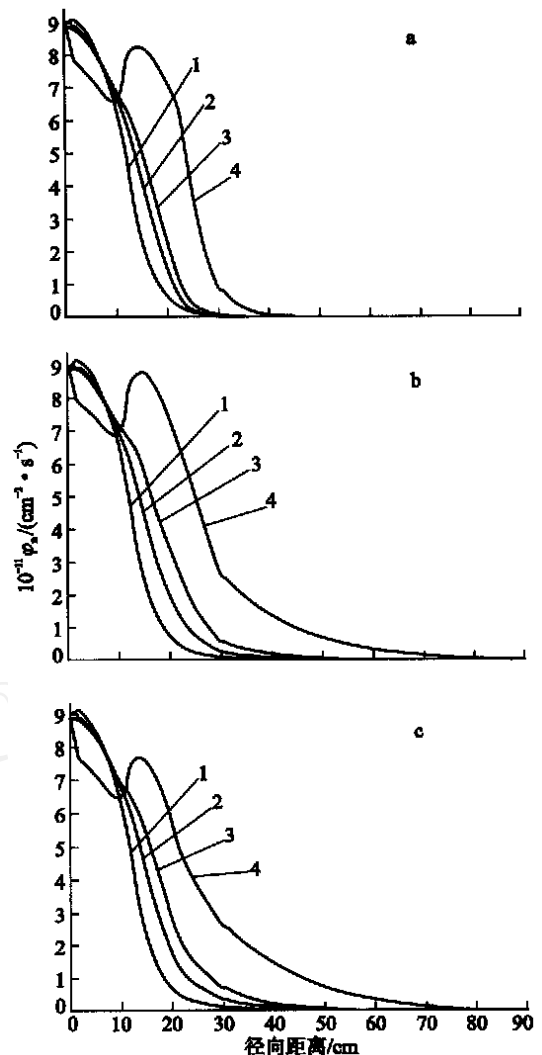


图 2 310 根装载堆芯中心平面 4 群中子注量率径向分布

Fig.2 Radial neutron flux density of 310 rods loaded (4 groups)

a——无反射瓦,无石墨块;b——有石墨块和铍瓦;

c——有石墨块和石墨瓦

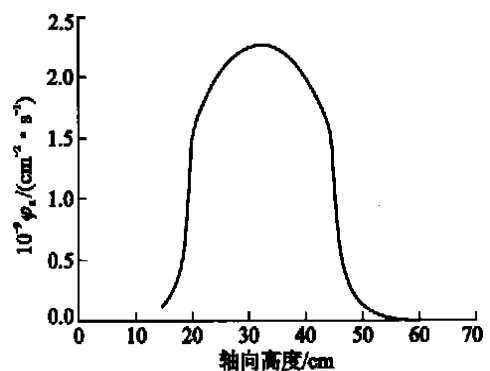


图 3 有石墨块和石墨瓦 A 点第 4 群中子注量率轴向分布

Fig.3 Axial neutron flux density of the 4th group at point A with graphite mass and graphite reflector

表 2 ²³⁵U 富集度 13.2 % 时的计算结果

Table 2 Calculation results for 13.2 % of ²³⁵U enrichment

燃料装 载根数	堆本体结构		k_{eff}	铝桶外中子注量率 ¹⁾ / (cm ⁻² s ⁻¹)			
	瓦材料	石墨块		第 1 群	第 2 群	第 3 群	第 4 群
310	无	无	1.058 741	4.99 ×10 ⁹	4.56 ×10 ⁹	7.37 ×10 ⁹	8.10 ×10 ¹⁰
	Be	无	1.063 480	5.14 ×10 ⁹	1.53 ×10 ¹⁰	3.58 ×10 ¹⁰	2.79 ×10 ¹¹
		有	1.063 593	6.59 ×10 ⁹	2.36 ×10 ¹⁰	5.29 ×10 ¹⁰	2.50 ×10 ¹¹
	石墨	无	1.058 745	9.30 ×10 ⁹	2.41 ×10 ¹⁰	4.75 ×10 ¹⁰	2.90 ×10 ¹¹
		有	1.059 071	1.20 ×10 ¹⁰	3.69 ×10 ¹⁰	6.94 ×10 ¹⁰	2.56 ×10 ¹¹
324	Be	有	1.069 295	6.58 ×10 ⁹	2.36 ×10 ¹⁰	5.29 ×10 ¹⁰	2.48 ×10 ¹¹
	石墨	有	1.064 713	1.20 ×10 ¹⁰	3.68 ×10 ¹⁰	6.92 ×10 ¹⁰	2.55 ×10 ¹¹

燃料装 载根数	堆本体结构		/ mk	石墨块外中子注量率 ²⁾ / (cm ⁻² s ⁻¹)			
	瓦材料	石墨块		第 1 群	第 2 群	第 3 群	第 4 群
310	无	无	55.5	1.11 ×10 ⁵	5.51 ×10 ⁴	5.80 ×10 ⁴	3.18 ×10 ⁵
	Be	无	59.7	1.13 ×10 ⁵	5.63 ×10 ⁴	5.93 ×10 ⁴	3.28 ×10 ⁵
		有	59.8	4.17 ×10 ⁶	1.37 ×10 ⁷	5.11 ×10 ⁷	1.97 ×10 ⁹
	石墨	无	55.5	1.91 ×10 ⁵	9.49 ×10 ⁴	1.00 ×10 ⁵	5.53 ×10 ⁵
		有	55.8	7.19 ×10 ⁶	2.30 ×10 ⁷	7.86 ×10 ⁷	2.26 ×10 ⁹
324	Be	有	64.8	4.16 ×10 ⁶	1.37 ×10 ⁷	5.10 ×10 ⁷	1.96 ×10 ⁹
	石墨	有	60.8	7.17 ×10 ⁶	2.29 ×10 ⁷	7.84 ×10 ⁷	2.25 ×10 ⁹

注:1) 图 1 中 B 点处
2) 图 1 中 A 点处

表 3 310 根带石墨块情况下加铍瓦和石墨瓦两种方案下顶铍的贡献

Table 3 The contribution of top Be reflector for installing Be and graphite reflector

顶铍厚度/ mm	铍瓦		石墨瓦	
	k_{eff}	反应性/ mk	k_{eff}	反应性/ mk
0	1.063 593		1.059 071	
2	1.065 198	1.42	1.060 664	1.42
5	1.066 697	2.74	1.062 113	2.70
10	1.068 921	4.69	1.064 306	4.64
20	1.072 634	7.92	1.068 083	7.97
30	1.075 454	10.37	1.070 852	10.38
70	1.081 541	15.60	1.076 915	15.65
110	1.083 524	17.29	1.078 873	17.33

表 4 石墨块内开空腔方案计算结果

Table 4 Calculation results of different cavity position in graphite reflector

空腔位置/ cm	石墨块外侧中子注量率 / (cm ⁻² s ⁻¹)			
	第 1 群	第 2 群	第 3 群	第 4 群
4~9	7.65 ×10 ⁷	1.65 ×10 ⁸	2.80 ×10 ⁸	1.93 ×10 ⁹
20~25	4.99 ×10 ⁸	7.91 ×10 ⁸	9.44 ×10 ⁸	2.41 ×10 ⁹
40~45	5.38 ×10 ⁹	4.47 ×10 ⁹	4.00 ×10 ⁹	3.92 ×10 ⁹
无空腔	4.17 ×10 ⁶	1.37 ×10 ⁷	5.11 ×10 ⁷	1.97 ×10 ⁹

4.4 侧铍加石墨层的方案计算

在侧铍外侧 1/2 和 1/4 厚度、对堆芯张角 60°、高为 60 mm 中心对称范围内,将铍更换为石墨,研究其对反应性和 A 点处的注量率的

影响。

计算在底铍 100 mm、加石墨瓦、无顶铍条件下进行。计算结果列于表 5。

表5 侧铍加石墨层方案计算结果

Table 5 Calculation results for graphite layer with different thickness

石墨层厚度/mm	k_{eff}	$n' / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$			
		第1群	第2群	第3群	第4群
0	1.059 070	7.19×10^6	2.30×10^7	7.86×10^7	2.26×10^9
25	1.058 440	7.63×10^6	2.44×10^7	8.83×10^7	2.31×10^9
50	1.056 904	8.00×10^6	2.55×10^7	8.48×10^7	2.32×10^9

5 微堆零功率临界质量校核计算

为了验证计算方法的正确性和计算结果的可信度,对微堆零功率装置进行临界计算,并与实验结果进行比较。该实验装置是 ^{235}U 富集度为90.1%的U-Al合金堆芯。实验结果为:外推临界质量321根,内插临界质量321.8根。在321和321.8根装载下的 k_{eff} 计算值分别为1.009 263和1.010 093,堆芯周边单根组件反应性为1.038 mk,实验值为1.09 mk;所有 k_{eff} 计算结果与实验结果均在1%以内相互吻合。计算方法合理,结果可信。

6 分析与讨论

1) 为满足传热要求,燃料元件的根数应大于300根。后备反应性要求不小于20 mk。310根装载时,加石墨瓦和石墨块下的后备反应性为55.8 mk(表2),扣除试验孔道反应性当量10 mk和计算误差20 mk外,剩余25.8 mk。后备反应性有5.8 mk余量。石墨瓦外热中子注量率为 $2.26 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。栅板上开有324个栅位,可方便增加装载。因此,选定的方

案满足最初设想的剩余反应性大于20 mk和侧瓦外中子注量率大于 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 要求。

2) 计算结果表明:在铝桶内加Be瓦可使反应性增加4~5 mk,而加石墨瓦的反应性增益很少。从中子注量率考虑,石墨瓦与Be瓦相比,石墨块外侧的热中子注量率约高15%。初选方案的后备反应性具有足够的裕量,且石墨价格比Be低廉,因此,采用石墨瓦较为适宜。

3) 在水池石墨块内开空腔可提高石墨块外侧的热中子注量率。空腔位置越靠近外侧,其效果越好(表4)。由此,在辐照点处快中子辐射剂量允许条件下,堆芯位置可适当向水池边靠近,辐照点与堆芯的相对距离则保持不变。

4) 在侧铍上加石墨层后反应性减少 $6 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ k}$,石墨块外侧热中子注量率增加2%~2.5%。侧铍加石墨给加工和安装均带来一定困难,而注量率增益则不大,因此,该方案无实用价值。

5) 对微堆零功率实验装置的校核计算与实验结果吻合很好。采用的计算方法合理,计算结果可信。