

炭/炭复合材料对活化片辐照的影响

周雪梅^{1,2} 孟令杰^{1,2} 赖 伟^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

摘要 根据钍基熔盐堆高温环境辐射测量需求,采用具有高温抗氧化 SiC 涂层的炭/炭复合材料作为待测活化片的载体材料,介绍了采用炭/炭复合材料作为辐照载体的优越性,对其进行了成分和热分析测试,并详细描述了带有炭/炭复合材料的一组活化片和不带有炭/炭复合材料的另一组活化片同时在铀氢锆脉冲堆的径向实验孔道中进行中子辐照的实验过程。通过比较两组活化片的单核反应率,详细分析了炭/炭复合材料对活化片辐照结果的影响。结果表明,载体采用涂层为 SiC 的炭/炭复合材料,并且壁厚为几个毫米时,对多种活化片的中子辐照结果影响很小,可以作为高温环境下辐照材料的载体。

关键词 炭/炭复合材料, 中子辐照, 单核反应率, 固态燃料熔盐堆 TMSR-SF

中图分类号 TL341

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.020601

Effects of C/C composites on the irradiation of activation foil

ZHOU Xuemei^{1,2} MENG Lingjie^{1,2} LAI Wei^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Background: C/C composites coated with SiC were introduced for the irradiation measurement at high temperature in Thorium Molten Salt Reactor-Solid Fuel (TMSR-SF) due to their excellent performance as an irradiation carrier of activation foil. **Purpose:** This study aims at the effects of C/C composites to activation foils. **Methods:** Based on the characteristics and service environment of C/C composites, component test and thermos analysis were carried out by element gravimetric density (GD) and calorimeter respectively to verify whether they would have influence on the irradiation results. Neutron irradiation experiment for activation foils with/without C/C composites was performed in a horizontal radial hole of uranium zirconium hydride reactor. And the activation rates of mononuclear were calculated respectively. **Results:** Experimental results show that SiC coating is essential for C/C composites to enhance oxidation resistance. The activation rate of mononuclear with C/C composites was reduced slightly. When the thickness of C/C was of mm-level, the decrement of activation rate for mononuclear was less than 10%. **Conclusion:** C/C composites coated with SiC could be used as carrier materials for activation foils at high temperature when the carrier wall is thin. The results of irradiation could be corrected based on the measurement of C/C composites.

Key words C/C composites, Neutron irradiation, Activation rate of mononuclear, TMSR-SF

中国科学院战略性先导研究项目(No.XDA02001003)资助

第一作者: 周雪梅, 女, 1979 年出生, 2013 年于中国科学院上海应用物理研究所获博士学位, 研究领域为反应堆物理及参数测量

Supported by "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences (No.XDA02001003)

First author: ZHOU Xuemei, female, born in 1979, graduated from Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences with a doctor's degree in 2013, focusing on reactor physics and parameter measurement

收稿日期: 2015-12-01, 修回日期: 2015-12-21

TMSR-SF (Thorium Molten Salt Reactor-Solid Fuel)是一种以液态熔盐为冷却剂的固体燃料实验堆,是中国科学院“未来先进核裂变能”战略性先导科技专项优先选择并设计的反应堆堆型。根据实验需求,需要在反射层内垂直实验孔道内进行材料辐照实验,而反射层内的温度约 600 °C,并且测量孔道直径仅几厘米,空间比较狭窄。对于用量很少的辐照材料,如测量中子能谱的活化片,需要寻找一种合适的载体才能进行辐照实验。通过大量调研,针对高温环境及不影响辐照结果等条件,选择涂层为 SiC 的炭/炭复合材料作为载体材料比较合适。本文工作的目的是通过对炭/炭复合材料进行成分和热分析测试,并通过中子辐照实验来分析载体材料对辐照结果的影响,通过辐照结果表明所选择的具有高温抗氧化涂层 SiC 的炭/炭复合材料是高温环境下的一种理想的载体材料。

1 炭/炭复合材料的选择及测试

在测量环境不高于 100 °C 时,大多选用聚乙烯作为辐照载体材料,而对于如 TMSR-SF 反射层内的实验孔道,由于其达 600 °C 的高温环境,所使用的辐照载体材料必须要满足以下条件:(1) 材料要纯,纯度达 99.9%以上,不能含有吸收截面大的杂质,材料本身中子吸收截面要小,避免对中子有较多的吸收,以免影响测量结果;(2) 高熔点;(3) 化学性能稳定,不能在高温下与活化材料发生反应;(4) 密度不能过大,在采用气动系统时,容易被气体推动;(5) 具有相对较高的机械强度,这样保证不宜变形;(6) 有一定的延展性,便于加工成型^[1]。

炭/炭复合材料是由高强度、高熔点的碳纤维和基体炭两部分组成^[2-3],利用辉光质谱对所采用材料进行元素成分分析,测得碳含量大于 99.95wt.%。对热中子而言,碳俘获截面为 (3.73 ± 0.07) mb,吸收截面约 3.5 mb,并且其具有重量轻、模量高等优异性能而能够满足以上条件。但是,炭/炭复合材料在空气气氛的高温环境中容易被氧化,图 1 为采用扫描热仪对炭/炭复合材料进行热分析的测试图。

从图 1 中可以看出,在约 400 °C 的空气气氛中开始发生氧化反应;在 600 °C 时,开始出现明显氧化,所以这种材料的很多性质只有在惰性气体中才能保持,为增强其抗氧化性,在其表面添加高温化

学气相沉积所得到的 SiC 涂层,研究表明, SiC 涂层能在 1 500 °C 下对炭/炭复合材料有效保护达上百小时。

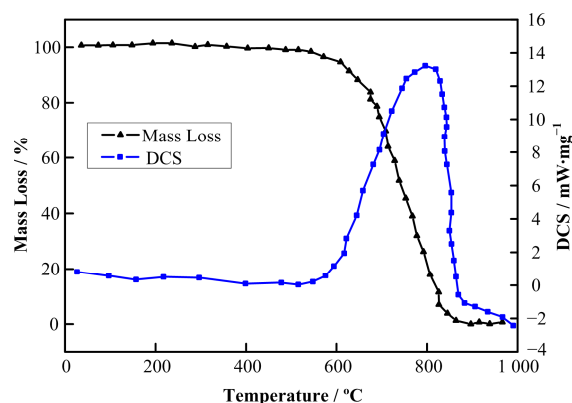


图 1 炭/炭复合材料的氧化测试曲线
Fig.1 Oxidation test curve of C/C composites.

TMSR-SF 反射层内中子能谱的测量拟采用活化法,将活化材料置于所设计的载体盒内,利用气动或其他机械手段将其传送至待测点,然后被中子辐照。辐照完毕后,将带有活化材料的载体盒送入实验室进行测量分析,以得出待测点的如中子能谱、中子注量率等参数,但是需要研究载体材料对活化材料辐照结果的影响,以便了解测量参数的准确性。

2 实验原理及实验过程

2.1 实验准备

由于载体盒每次只能载一片活化片,对于需要辐照的几十个活化片而言,实验过程非常麻烦,并且中子辐照环境的变化会影响实验结果。为此,采用带有 SiC 涂层的两块炭/炭复合材料板代替载体盒,以研究载体材料对活化片辐照结果的影响。炭/炭复合材料板的厚度为 4.62 mm,边长为 160 mm,平板的两面涂有厚度为 50 μm 的 SiC 涂层。标号为 1 的第一组活化片置于平板的一面,标号为 2 的另一组活化片置于两块压紧的平板间,如图 2 所示,辐照时的排列顺序为:第一组活化片、炭/炭复合板、第二组活化片、炭/炭复合板,将之作为一个整体进行辐照。通过研究两组单核反应率的变化来研究炭/炭复合材料对辐照结果的影响。



图 2 两组活化片在炭/炭复合材料平板上的布局
Fig.2 Layout of two groups of activation piece on the C/C composites plate.

2.2 辐照环境介绍

本次实验是在铀氢锆脉冲堆的水平径向孔道 B 内进行的。铀氢锆脉冲堆^[4]是以铀氢锆燃料、慢化剂材料作元件，石墨、水作反射层的池式研究堆，堆芯靠池水自然循环冷却。铀氢锆脉冲堆为满足各

种实验应用的需要，设置了许多辐照实验孔道，其中水平径向孔道 B 距反应堆中轴线 930 mm，是介于切向和径向之间的一个实验孔道，径向孔道 B 辐照区如图 3 所示。径向孔道 B 中 4 群中子注量率如表 1 所示。

表 1 径向孔道 B 的 4 群中子注量率
Table 1 Four groups of neutron fluence rate in radial channel B.

距堆芯中心距离 Distance from the center of the reactor core / mm	4 群中子注量率 Four groups of neutron fluence rate / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$				总中子注量率 Total neutron fluence rate / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	
500	4.758×10^{11}	1.291×10^{12}	9.511×10^{11}	5.855×10^{12}	8.573×10^{12}
1 250	1.539×10^{10}	1.885×10^{10}	1.295×10^{10}	9.371×10^{10}	1.409×10^{11}
2 000	3.612×10^9	4.178×10^9	2.612×10^9	8.174×10^9	1.858×10^{10}
3 250	1.008×10^9	1.171×10^9	7.052×10^8	2.100×10^9	4.984×10^9



图 3 水平径向孔道的辐照区
Fig.3 Radiation zone of horizontal radial channel.

图 3 中辐照孔道的直径为 15 cm，孔道各处的中子通量密度近似相等。将带有活化片的炭/炭复合板靠近辐照孔道，对准中子入射方向。由于第二组活化片位于紧密靠近的两块板之间，中子入射方向可以视为垂直板面的方向，这样可认为第二组活化片是完全被炭/炭复合材料包裹着。

2.3 实验原理及过程

当反应堆在功率为 2 MW 稳定运行功率时，将两组带有活化片的平板在径向孔道 B 处辐照 4 小时 6 分 46 秒（14 806 s），经过适当冷却后开始测量各活化片的放射性强度。由于部分活化材料所采用的量很少，且经中子辐照后所得产物的半衰期很短，所以测量时的计数率很低，经过一段时间的冷却后，有些已经测不到放射性，最终选取了 9 组活化片，各核素及其反应道的参数如表 2、3 所示。

表 2、3 中前 7 组核反应道的 γ 测量是在型号为 GEM-25185 高纯锗上进行测量，此高纯锗的探测效率标定如下：

$$\ln(\text{eff}(E)) = -0.444 - 0.836 \ln(E) + 0.008 \ln(E)^2 \quad (1)$$

式中：eff(E) 表示对应能量 E 的探测效率。

表 2、3 中后两组核反应道的 γ 测量是在型号为 GEM-40190 的高纯锗上进行测量, 此高纯锗的探测效率标定如下:

$$\ln(\text{eff}(E)) = 8.457 - 3.424 \ln(E) + 0.209(\ln(E))^2 \quad (2)$$

由测量的 γ 能量和探测效率, 式(1)、(2)即可得到各能量对应的探测效率。

表 2 核反应参数 1
Table 2 Parameters of nuclear reactions 1.

核反应 Nuclear reactions	天然元素 质量 Quality of natural element / mg	丰度 Abundance / %	直径 Diameter / mm	γ 射线能量 Energy of γ / keV	分支比 Branching ratio / %	靶核原子量 Target nucleus atomic weight	靶核原子数 Target nucleus atomic number
$^1\text{In}^{115}(\text{n}, \gamma)\text{In}^{116\text{m}}$	0.104	95.70	20	1 293.50	85.00	114.9	5.22×10^{18}
$^2\text{In}^{115}(\text{n}, \gamma)\text{In}^{116\text{m}}$	0.106	95.70	20	1 293.50	85.00	114.9	5.33×10^{18}
$^1\text{Cu}^{63}(\text{n}, \gamma)\text{Cu}^{64}$	144.110	69.17	20	511.00	38.60	62.93	9.54×10^{21}
$^2\text{Cu}^{63}(\text{n}, \gamma)\text{Cu}^{64}$	145.160	69.17	20	511.00	38.60	62.93	9.61×10^{21}
$^1\text{Dy}^{164}(\text{n}, \gamma)\text{Dy}^{165}$	9.535	28.20	20	633.40	0.562 8	163.93	9.87×10^{19}
$^2\text{Dy}^{164}(\text{n}, \gamma)\text{Dy}^{165}$	9.504	28.20	20	633.40	0.562 8	163.93	9.84×10^{19}
$^1\text{Na}^{23}(\text{n}, \gamma)\text{Na}^{24}$	2.345	100.00	20	1 368.55	100	22.99	6.14×10^{20}
$^2\text{Na}^{23}(\text{n}, \gamma)\text{Na}^{24}$	2.575	100.00	20	1 368.55	100	22.99	6.74×10^{20}
$^1\text{Zn}^{64}(\text{n}, \text{p})\text{Cu}^{64}$	243.760	48.60	20	511.00	38.60	63.93	1.12×10^{22}
$^2\text{Zn}^{64}(\text{n}, \text{p})\text{Cu}^{64}$	476.090	48.60	20	511.00	38.6	63.93	2.18×10^{22}
$^1\text{Co}^{59}(\text{n}, \gamma)\text{Co}^{60}$	147.550	100.00	20	1 173.23	99.86	58.93	1.51×10^{22}
$^2\text{Co}^{59}(\text{n}, \gamma)\text{Co}^{60}$	156.180	100.00	20	1 173.23	99.86	58.93	1.6×10^{22}
$^1\text{Mo}^{98}(\text{n}, \gamma)\text{Mo}^{99}$	23.450	24.13	8	140.51	90.9	97.905	3.48×10^{20}
$^2\text{Mo}^{98}(\text{n}, \gamma)\text{Mo}^{99}$	23.820	24.13	8	140.51	90.9	97.905	3.53×10^{20}
$^1\text{Sc}^{45}(\text{n}, \gamma)\text{Sc}^{46}$	4.485	100.00	20	1 120.52	99.99	44.96	6.01×10^{20}
$^2\text{Sc}^{45}(\text{n}, \gamma)\text{Sc}^{46}$	4.796	100.00	20	1 120.52	99.99	44.96	6.42×10^{20}
$^1\text{Mg}^{24}(\text{n}, \text{p})\text{Na}^{24}$	254.160	78.99	20	1 368.55	100	23.985	5.04×10^{22}
$^2\text{Mg}^{24}(\text{n}, \text{p})\text{Na}^{24}$	253.610	78.99	20	1 368.55	100	23.985	5.03×10^{22}

表 3 核反应参数 2
Table 3 Parameters of nuclear reactions 2.

核反应 Nuclear reactions	辐照时间 Irradiation time / s	冷却时间 Cooling time / s	测量时间 Measuring time / s	半衰期 Half-time / s	探测效率 Detection efficiency / %	净计数 Net count	单核反应率 Activation rate for mononuclear
$^1\text{In}^{115}(\text{n}, \gamma)\text{In}^{116\text{m}}$	14 806	6 484	932.3	3 249	0.244 916	10 026	$4.543\ 28 \times 10^{-19}$
$^2\text{In}^{115}(\text{n}, \gamma)\text{In}^{116\text{m}}$	14 806	7 628	1 308.8	3 249	0.244 916	10 024	$4.199\ 69 \times 10^{-19}$
$^1\text{Cu}^{63}(\text{n}, \gamma)\text{Cu}^{64}$	14 806	9 382	139.2	45 759.6	0.480 437	12 705	2.963×10^{-21}
$^2\text{Cu}^{63}(\text{n}, \gamma)\text{Cu}^{64}$	14 806	9 060	182.0	45 759.6	0.480 437	15 959	$2.813\ 2 \times 10^{-21}$
$^1\text{Dy}^{164}(\text{n}, \gamma)\text{Dy}^{165}$	14 806	10 521	384.7	8 401.98	0.410 61	11 708	$4.574\ 71 \times 10^{-18}$
$^2\text{Dy}^{164}(\text{n}, \gamma)\text{Dy}^{165}$	14 806	9 852	491.2	8 401.98	0.410 61	13 266	$3.871\ 02 \times 10^{-18}$
$^1\text{Na}^{23}(\text{n}, \gamma)\text{Na}^{24}$	14 806	11 167	5 827.1	54 111.6	0.235 205	10 006	$8.236\ 38 \times 10^{-22}$
$^2\text{Na}^{23}(\text{n}, \gamma)\text{Na}^{24}$	14 806	21 613	1 717.9	54 111.6	0.235 205	2 668	$7.555\ 38 \times 10^{-22}$
$^1\text{Zn}^{64}(\text{n}, \text{p})\text{Cu}^{64}$	14 806	19 744	1 710.4	45 759.6	0.480 437	2 519	$4.838\ 49 \times 10^{-23}$
$^2\text{Zn}^{64}(\text{n}, \text{p})\text{Cu}^{64}$	14 806	18 859	1 962.0	45 759.6	0.480 437	5 109	$4.330\ 03 \times 10^{-23}$
$^1\text{Co}^{59}(\text{n}, \gamma)\text{Co}^{60}$	14 806	65 324	1 834	1.66×10^8	0.262 709	2 545	$5.675\ 25 \times 10^{-20}$
$^2\text{Co}^{59}(\text{n}, \gamma)\text{Co}^{60}$	14 806	62 547	2 021	1.66×10^8	0.262 709	2 623	$5.014\ 61 \times 10^{-20}$
$^1\text{Mo}^{98}(\text{n}, \gamma)\text{Mo}^{99}$	14 806	67 655	3 865.3	238 320	1.255 231	2 531	$4.788\ 77 \times 10^{-22}$
$^2\text{Mo}^{98}(\text{n}, \gamma)\text{Mo}^{99}$	14 806	71 650	4 088.4	238 320	1.255 231	2 546	$4.537\ 41 \times 10^{-20}$
$^1\text{Sc}^{45}(\text{n}, \gamma)\text{Sc}^{46}$	14 806	64 726	1 364.6	7 244 986	0.513 053	3 535	$5.974\ 7 \times 10^{-20}$
$^2\text{Sc}^{45}(\text{n}, \gamma)\text{Sc}^{46}$	14 806	66 888	1 398.6	7 244 986	0.513 053	3 568	$5.503\ 47 \times 10^{-20}$
$^1\text{Mg}^{24}(\text{n}, \text{p})\text{Na}^{24}$	14 806	68 521	2 170.0	54 111.6	0.469 409	2 524	$6.939\ 04 \times 10^{-24}$
$^2\text{Mg}^{24}(\text{n}, \text{p})\text{Na}^{24}$	14 806	70 916	2 291.3	54 111.6	0.469 409	2 508	$6.753\ 3 \times 10^{-20}$

表 3 中的单核反应率根据式(3)^[5-6]可以计算得到:

$$A_i = \frac{C \lambda_i}{\gamma_d \varepsilon N_i (1 - e^{-\lambda_i t_0}) (1 - e^{-\lambda_i (t_2 - t_1)})} \quad (3)$$

$$N_i = \frac{m_i}{M_i} \theta_i \times 6.023 \times 10^{23} \quad (4)$$

式中: C 为探测器测得的净峰面积总计数; γ_d 为待测 γ 射线的分支比; ε 为对应的探测效率; m_i 为 i

箔质量; N_i 为 i 核数目; M_i 为 i 核同位素原子量; θ_i 为 i 核同位素的含量; λ_i 为 i 核衰变常数; t_0 为辐照时间; t_1-t_0 为冷却时间; t_2-t_1 为测量时间。

3 结果分析

将表 3 中的单核反应率单独提取出来, 单核反应率的差值如表 4 所示。

表 4 单核反应率的比较
Table 4 Activation rate for mononuclear.

核反应道 Nuclear reactions	第一组单核反应率 Nuclear reactions of group 1 / A1	第二组单核反应率 Nuclear reactions of group 2 / A2	100×(A1-A2)/A1 / %
In ¹¹⁵ (n, γ)In ^{116m}	4.54×10 ⁻¹⁹	4.20×10 ⁻¹⁹	7.56
Cu ⁶³ (n, γ)Cu ⁶⁴	2.96×10 ⁻²¹	2.81×10 ⁻²¹	5.06
Dy ¹⁶⁴ (n, γ)Dy ¹⁶⁵	4.57×10 ⁻¹⁸	3.87×10 ⁻¹⁸	15.40
Na ²³ (n, γ)Na ²⁴	8.24×10 ⁻²²	7.56×10 ⁻²²	8.27
Zn ⁶⁴ (n, p)Cu ⁶⁴	4.84×10 ⁻²³	4.33×10 ⁻²³	10.5
Co ⁵⁹ (n, γ)Co ⁶⁰	5.68×10 ⁻²⁰	5.01×10 ⁻²⁰	11.6
Mo ⁹⁸ (n, γ)Mo ⁹⁹	4.79×10 ⁻²²	4.54×10 ⁻²²	5.25
Sc ⁴⁵ (n, γ)Sc ⁴⁶	5.97×10 ⁻²⁰	5.50×10 ⁻²⁰	7.89
Mg ²⁴ (n, p)Na ²⁴	6.94×10 ⁻²⁴	6.75×10 ⁻²⁴	2.68

本次实验是在水平径向孔道中进行的辐照, 可以视为所有中子运动方向都垂直于炭/炭复合板, 由于第二组活化片位于压紧的两块板之间的中间位置, 可以认为第二组活化片完全被炭/炭复合材料包围。从表 4 中可以看出, 第二组活化片的单核反应率都略小于第一组, 说明炭/炭复合材料对活化材料的辐照结果有一定的影响, 但是影响不大。Dy¹⁶⁴(n, γ)Dy¹⁶⁵ 的单核反应率差值最大, 达 15.4%, 这是由于 Dy¹⁶⁵ 衰变所放出能量为 633.4 keV 的 γ 的分支比仅为 0.562 8%, 在此能量附近有能量分别为 545.8 keV、715.34 keV 的 γ 放出, 这将影响被监测 γ 的计数, 以至于此反应道的单核反应率误差较大。Co⁵⁹(n, γ)Co⁶⁰ 的单核反应率误差为 11.6%, 主要是因为 Co⁶⁰ 的半衰期太长, 为 5.27 a, 这样被探测 γ 的计数率太低, 统计误差将增加, 导致单核反应率的误差较大。Zn⁶⁴(n, p)Cu⁶⁴ 的单核反应率误差大, 是由于被辐照材料 Zn 的质量误差造成, 第一组 Zn 的质量为 243.76 mg, 第二组的质量为 476.09 mg, 由于所选用材料的量都很少, 少许的质量误差将会引起最终单核反应率的差别。炭/炭复合材料板对其它反应道单核反应率的影响都小于 10%, 如果减小平板的厚度, 其对单核反应率的影响将进一步减小。由于碳与中子的反应截面很小, 主要是慢化快中子,

由于所采用的炭/炭复合板较薄, 中子通量的变化对结果影响很小。使用薄壁的载体盒对材料辐照结果影响不大, 辐照结果的误差可以根据实验测试进行修正。

4 结语

本文介绍了一种适用于高温环境下装载活化片的材料-SiC 涂层的炭/炭复合材料。对炭/炭复合材料进行了成分和热分析测试, 并在中子场中进行辐照测试, 通过测量单核反应率来研究炭/炭复合材料对活化材料辐照结果的影响, 结果表明, 炭/炭复合材料对于活化材料的辐照结果有影响, 但影响不大。在考虑炭/炭复合材料作为载体材料时, 载体的壁尽量薄, 这样会减少辐照结果误差, 单核反应率误差的测定结果可以作为测定中子能谱、中子注量率等结果误差修正的依据, 解决了高温环境下活化材料的装载问题。

参考文献

- 1 周雪梅. 钍基熔盐堆中子能谱测量方法的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013
ZHOU Xuemei. Study of neutron energy spectrum for Thorium Molten Salt Reactor[D]. Beijing: University of

- Chinese Academy of Sciences, 2013
- 2 黄剑峰, 李贺军, 熊信柏, 等. 炭/炭复合材料高温抗氧化涂层的研究进展[J]. 新型炭材料, 2005, **20**(4): 373–379
HUANG Jianfeng, LI Hejun, XIONG Xinbo, *et al.* Progress on the oxidation protective coating of carbon-carbon composites[J]. New Carbon Materials, 2005, **20**(4): 373–379
- 3 雷宝灵. 炭/炭复合材料及其制动摩擦磨损微结构研究[D]. 湖南: 粉末冶金研究院, 2011
LEI Baoling. Microstructure, friction and wear mechanisms of C/C composites[D]. Hunan: Powder Metallurgy Research Institute, 2011
- 4 岳为民, 韩同敬, 陆绍机. 西安脉冲堆水平实验孔道[J]. 核动力工程, 2002, **23**(6): 46–48
YUE Weimin, HAN Tongjing, LU Shaoji. Xi'an pulsed reactor horizontal experimentation channels[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, **23**(6): 46–48
- 5 史永谦. 核反应堆中子学实验技术[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2011: 343–345
SHI Yongqian. Experimental technology of neutronics in nuclear reactor[M]. Beijing: Atomic Energy of China Publishing Press, 2011: 343–345
- 6 Zhou X M, Liu G M, Li D, *et al.* Using activation method to measure neutron spectrum in an irradiation chamber of a research reactor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(1): 010603. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.010603