第52卷第12期 原 子 能 科 学 技 术 Vol. 52, No. 12
2018年12月 Atomic Energy Science and Technology Dec. 2018

可逆比热容法测量反应堆中子注量率的可行性及应用前景

杨铜锁[1],朱庆福[2],史永谦[2],辛督强[1],张建祥[1],王 璠[2],王永仓[1],鲁 谨[2,*]
(1. 西京学院 陕西省可控中子源工程技术研究中心,陕西 西安 710123;
2. 中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部,北京 102413)

摘要:热分析仪器和测量技术的迅速发展为通过测量受辐照材料热性质的变化测量中子注量提供了可能。本文提出采用调制差示扫描量热(MDSC)法测量反应堆辐照的含硼材料可逆比热容的变化,进而得到反应堆的中子注量率。从理论和实验两方面讨论了利用该方法测量反应堆中子注量率的可行性。介绍了可逆比热容法测量反应堆中子注量率的原理和实验方法。展望了这种测量方法在测量高注量反应堆中子注量率的应用前景。

关键词:固体核径迹探测器;热分析;中子注量率;调制差示扫描量热法;可逆比热容
中图分类号:O571.53 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2018)12-2289-07
doi:10.7538/yzk.2018.youxian.0152

Feasibility and Application Prospect of Reversible Specific Heat Capacity Method for Measuring Neutron Fluence Rate of Reactor

YANG Tongsuo[1], ZHU Qingfu[2], SHI Yongqian[2], XIN Duqiang[1], ZHANG Jianxiang[1], WANG Fan[2], WANG Yongcang[1], LU Jin[2,*]
(1. *Shaanxi Engineering Research Center of Controllable Neutron Source*, *Xijing University*, *Xi'an* 710123, *China*;
2. *China Institute of Atomic Energy*, *P. O. Box* 275-45, *Beijing* 102413, *China*)

Abstract: With the rapid development of thermal analysis instrument and measurement technology, it is possible to measure neutron fluence by measuring the change of thermal properties of irradiated materials. In this paper, the modulated differential scanning calorimetry (MDSC) method was adopted to measure the neutron fluence rate of the reactor with the change of the reversible specific heat capacity of the boron containing materials irradiated in the reactor. The feasibility of this method to measure neutron fluence rate in the reactor was discussed in both theory and experiment. The principle and experimental method for measuring neutron fluence rate in the reactor by reversible

收稿日期:2018-03-12;**修回日期:**2018-07-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11175267,11775310)
作者简介:杨铜锁(1946—),男,陕西西安人,副教授,从事固体核径迹和原子结构研究
* **通信作者:**鲁 谨,E-mail: palujin@sina.com
网络出版时间:2018-11-01;**网络出版地址:**http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20181030.1116.014.html

specific heat capacity method were introduced in detail. The application of this method in measuring the neutron fluence rate of high fluence reactor is prospected in the future.

Key words: solid nuclear track detector; thermal analysis; neutron fluence rate; modulated differential scanning calorimetry method; reversible specific heat capacity

一定注量的中子辐照固体材料能改变材料的热性质,其中包括固体材料比热容增大[1]。固体样品比热容的改变本质上是辐照损伤引起物质结构发生变化引起的。当在固体样品中掺入硼元素,在反应堆中辐照会发生如下核反应过程:热中子辐照^{10}B靶,^{10}B俘获中子后形成^{11}B,^{11}B迅速分裂为^{4}He离子和^{7}Li离子。此核反应放出的总能量为 2.79 MeV,其中^{4}He离子动能占 1.47 MeV,^{7}Li离子动能占 0.84 MeV,另外 0.48 MeV 的能量以 γ 光子形式放出。这些产物与样品相互作用主要是两种方式,一是电子过程,二是原子过程[2-4]。电子过程是指入射粒子的能量损失于原子的电离和激发,其结果是在晶体内产生瞬态扰乱和半永久的效应,不能长久保持(在 10^3 s 以内);原子过程是指通过粒子碰撞在靶样品中产生位移原子,给晶体造成永久性损伤。α 粒子和^{7}Li离子与靶原子碰撞产生位移原子,形成核径迹,核径迹在含硼靶样品中产生永久性辐射损伤,属于原子过程。在相同能量情况下原子过程产生的位移原子形成的损伤比 γ 射线的大 5 个数量级,因此在讨论损伤时忽略 γ 射线和电子过程产生的永久性损伤。在对样品的中子辐照剂量不是特别高的情况下,根据上述研究可知比热容的变化量与中子辐照注量呈正比关系。

1 cm^3 的靶样品中含有的硼原子数约为10^{22}个数量级,中子注量率为 10^{11} $cm^{-2}\cdot s^{-1}$的反应堆辐照 100 h,中子注量约为 $10^{16}\sim10^{17}$ cm^{-2}数量级,考虑反应截面后在 1 cm^3 的靶样品中发生核反应的原子核数应小于 $10^{16}\sim10^{17}$,由此可推出反应堆辐照样品 100 h 发生反应的原子核数占样品总原子核数的比例为几十万或数百万分之一,发生核径迹重叠的概率很小,基本能保持比热容的变化量与注量呈正比关系。

利用比热容的变化量与注量呈正比关系这一现象来测量反应堆的中子注量率,与测量比热容使用的热分析仪器性能有关。采用的测量软件、测量方法也至关重要。本文就美国 TA 公司生产的 Q2000 差示扫描量热仪器,研究可逆比热容法测量反应堆中子注量率的可行性及应用前景。

1 常规 DSC 和 MDSC 测量比热容的比较

调制差示扫描量热(MDSC)法是在传统量热(DSC)法基础上叠加了 1 个正弦震荡温度程序,将总热量分解为 1 个可逆热流(比热容成分)和不可逆热流(动力学成分),具有较高的灵敏度和分辨率[5-9]。对同一样品的测量和分析结果对比表明,MDSC 法不用消除热历史而直接测量比热容,防止了由于消除热历史的方法不恰当而引起的实验误差,且实验数据直接测试得出,不需要转换计算。更为重要的是将 DSC 法的 1 条曲线分解为两条曲线便于对实验结果进行分析研究:可逆热流曲线反映的是样品内部热焓变化、玻璃化转变、熔融等信息;不可逆热流曲线反映的是热焓松弛、结晶、热固化、挥发、分解、蛋白质变性等动力学信息[5,10]。因此,MDSC 法测量效果要明显优于 DSC 法[7,11]。

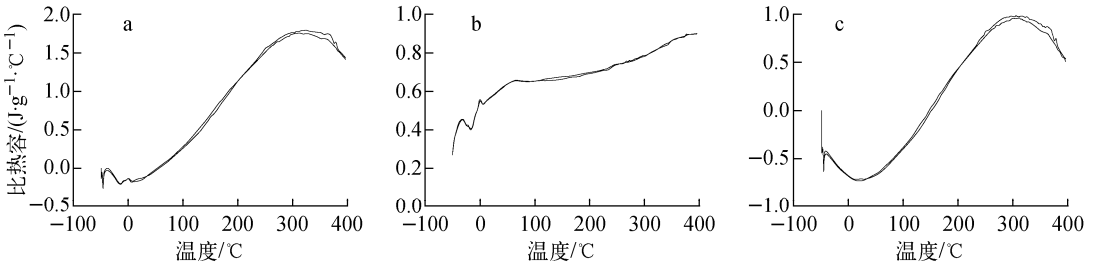
2 实验

实验在中国原子能科学研究院微型中子源反应堆上进行,反应堆的中子注量率为 8.5×10^{11} $cm^{-2}\cdot s^{-1}$。晶体硼颗粒辐照 16 h,MDSC 法测得的比热容曲线如图 1 所示。图 1中每个分图有两条曲线是因为重复测量1 次所致,用于观察实验的重复性,可见实验的重复性良好。

总比热容 c_{pZ}、可逆比热容 c_{pK}、不可逆比热容 c_{pB}之间的关系为:

$$c_{pZ}=c_{pK}+c_{pB} \tag{1}$$

c_{pZ}相当于 DSC 法测出的比热容,包含可逆比热容(与纯比热容相关成分)与不可逆比热容(与动力学相关的非比热容成分)。显然,研究纯比热容问题采用可逆比热容测量更合理。晶体硼颗粒分别辐照 16 h(样品质量 $m=5.04$ mg)、32 h($m=5.08$ mg)、48 h($m=5.18$ mg)、64 h



a——总比热容;b——可逆比热容;c——不可逆比热容

图 1　MDSC 法测得的比热容曲线

Fig. 1　Specific heat capacity curve obtained by MDSC method

(m=5.57 mg),MDSC 法测出的可逆比热容曲线如图 2 所示。由图 2 可见,总体上辐照注量增大,可逆比热容升高。

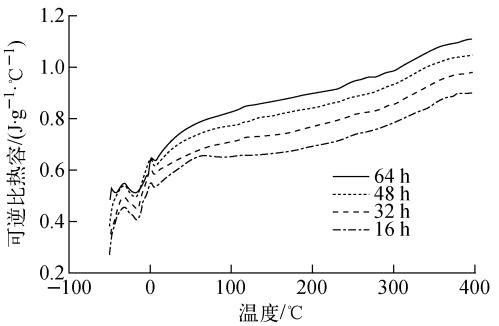


图 2　MDSC 法测得的可逆比热容曲线

Fig. 2　Reversible specific heat capacity curve obtained by MDSC method

实验测得的可逆比热容结果列于表 1。表 1 中,32 h—16 h、48 h—16 h、64 h—16 h 分别表示受辐照 32 h、48 h、64 h 样品的可逆比热容减去受辐照 16 h 样品的可逆比热容的差,相当于样品受辐照 16 h 后再辐照 16 h、16 h×2、16 h×3的可逆比热容增量。由表 1 各温度点可见,可逆比热容增量与再辐照时间大致呈正比关系。

3　测量中子注量率的可行性

从表 1 数据可看出,在实验误差范围内样品受辐照的注量与可逆比热容增量的总和呈正比关系,可得到如下关系:

$$8.5\times10^{11}\ \mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}\times16\times1\times3\ 600\ \mathrm{s}=k\times1.881\ 87\times1\ \mathrm{J/(g\cdot ℃)}\approx k\times1.881\ 87\ \mathrm{J/(g\cdot ℃)}\tag{2}$$

$$8.5\times10^{11}\ \mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}\times16\times2\times3\ 600\ \mathrm{s}=k\times1.881\ 87\times2\ \mathrm{J/(g\cdot ℃)}\approx k\times3.706\ 5\ \mathrm{J/(g\cdot ℃)}\tag{3}$$

$$8.5\times10^{11}\ \mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}\times16\times3\times3\ 600\ \mathrm{s}=k\times1.881\ 87\times3\ \mathrm{J/(g\cdot ℃)}\approx k\times5.334\ 82\ \mathrm{J/(g\cdot ℃)}\tag{4}$$

写成一般关系式为:

$$\varphi\times t=k\times\Delta c\tag{5}$$

式中:φ 为中子注量率;t 为辐照时间;k 为比例系数,它的意义是要使可逆比热容增大 1 个单位样品所需要的反应堆中子辐照注量;Δc 为可逆比热容增量的总和。

将式(2)与(5)两边相除并整理得:

$$\varphi=\frac{2.601\ 79\times10^{16}\times\Delta c}{t}\tag{6}$$

利用式(3)和(4)同理可推出:

$$\varphi=\frac{2.664\ 292\times10^{16}\times\Delta c}{t}\tag{7}$$

$$\varphi=\frac{2.753\ 23\times10^{16}\times\Delta c}{t}\tag{8}$$

根据式(6)～(8)取 k 的平均值,可得:

$$\varphi=\frac{2.665\ 89\times10^{16}\times\Delta c}{t}\tag{9}$$

式(6)～(9)反映了晶体硼颗粒样品可逆比热容增量总和与反应堆辐照注量之间的关系。根据式(6)～(9)的任意一式,将晶体硼颗粒样品放入未知中子注量率的反应堆中辐照一定时间 t,测出辐照后可逆比热容增量 Δc,就可计算出中子注量率。式(6)～(9)中采用式(9)更合理,但工作量相对较大。

根据以上实验结果提出可逆比热容法测量反应堆中子注量率的方法,测量原理、技术路线如下。

表 1 可逆比热容和可逆比热容增量

Table 1 Reversible specific heat capacity and it's increasement

温度/℃	可逆比热容/(J·g^{-1}·℃$^{-1}$)				可逆比热容增量/(J·g^{-1}·℃$^{-1}$)		
	16 h	32 h	48 h	64 h	32 h—16 h	48 h—16 h	64 h—16 h
120	0.655 75	0.726 64	0.789 17	0.848 83	0.070 89	0.133 42	0.193 08
130	0.656 35	0.731 66	0.8	0.856 01	0.075 31	0.143 65	0.199 67
140	0.659 72	0.733 4	0.803 74	0.861 58	0.073 68	0.144 02	0.201 86
150	0.664 68	0.736 49	0.809 84	0.864 81	0.071 8	0.145 16	0.200 13
160	0.670 04	0.739 96	0.815 35	0.871 27	0.069 92	0.145 31	0.201 24
170	0.674 4	0.746 72	0.821 06	0.879 17	0.072 31	0.146 66	0.204 77
180	0.678 97	0.753 28	0.829 92	0.884 74	0.074 31	0.150 95	0.205 77
190	0.687 7	0.761 2	0.836 02	0.894 61	0.073 5	0.148 33	0.206 92
200	0.692 26	0.767 18	0.840 55	0.896 95	0.074 92	0.148 29	0.204 69
210	0.698 02	0.774 32	0.846 46	0.903 05	0.076 31	0.148 44	0.205 04
220	0.705 95	0.781 47	0.854 72	0.906 82	0.075 51	0.148 77	0.200 87
230	0.711 71	0.791 7	0.860 83	0.914 72	0.079 99	0.149 12	0.203 02
240	0.725 4	0.801 16	0.871 46	0.930 34	0.075 76	0.146 06	0.204 94
250	0.737 5	0.813 71	0.885 04	0.943 45	0.076 21	0.147 54	0.205 95
260	0.744 64	0.818 92	0.889 96	0.950 81	0.074 28	0.145 32	0.206 17
270	0.753 77	0.827 41	0.897 83	0.960 5	0.073 64	0.144 06	0.206 73
280	0.759 33	0.833 4	0.908 86	0.963 02	0.074 07	0.149 53	0.203 69
290	0.772 02	0.845 56	0.925 39	0.978 1	0.073 54	0.153 37	0.206 07
300	0.782 34	0.854 83	0.932 28	1.030 05	0.072 48	0.149 94	0.247 71
310	0.799 4	0.872 97	0.950 2	1.042 66	0.073 57	0.150 79	0.243 26
320	0.813 69	0.893 44	0.968 5	1.055 28	0.079 75	0.154 81	0.241 59
330	0.828 57	0.905 6	0.984 06	1.067 89	0.077 03	0.155 48	0.239 32
340	0.840 28	0.923 75	0.998 23	1.080 5	0.083 47	0.157 95	0.240 23
350	0.860 71	0.940 93	1.012 2	1.093 12	0.080 21	0.151 49	0.232 4
360	0.875 99	0.955 41	1.024 02	1.105 73	0.079 41	0.148 02	0.229 74
总和					1.881 87	3.706 5	5.334 82

1）将含硼晶体材料分为两部分，一部分作为刻度探测器的样品，其余作为探测器样品。反应堆辐照能改变样品热性质的原因在于样品中沉积了离子核径迹[12-15]，含硼材料受反应堆辐照后均能产生核径迹，故将受辐照材料由晶体硼材料扩大为含硼晶体材料。

2）将刻度探测器样品分为 n 份，$n\geqslant 4$，每份约 100 mg，分别用铝薄膜包裹，得到 n 个刻度探测器的样品包。

3）将 n 个刻度探测器样品包放入中子注量率恒定的热中子反应堆中，分别辐照 t_n 小时，且使相邻两个时间段长短成等差数列，得到 n 个受不同辐照注量的样品包。

4）分别对 n 个刻度探测器样品包用 MDSC 法测量其可逆比热容。

5）根据表 1 方法，由各刻度探测器样品包的可逆比热容得到可逆比热容增量的总和 N_1，N_2，…，N_n。

6) 列出刻度探测器各样品包的中子辐照注量增量与相应可逆比热容增量总和的关系式。

样品包 2－1：

$$\phi \times \Delta t \times 3\ 600 = kN_1 \tag{10}$$

样品包 3－1：

$$\phi \times 2 \times \Delta t \times 3\ 600 = kN_2 \tag{11}$$

样品包 4－1：

$$\phi \times 3 \times \Delta t \times 3\ 600 = kN_3 \tag{12}$$

$$\cdots$$

样品包 n－1：

$$\phi \times (n-1) \times \Delta t \times 3\ 600 = kN_{n-1} \tag{13}$$

样品包 2－1,样品包 3－1,…,样品包n－1的可逆比热容增量总和是指受辐照 t_2,…,t_n 时间段后样品的可逆比热容减去受辐照 t_1 样品的可逆比热容的差值总和,相当于样品在原受辐照 t_1 时间段的基础上再辐照 Δt,$\Delta t \times 2$,…,$\Delta t \times (n-1)$时间段后可逆比热容增量的总和。

应注意式(10)～(13)中 ϕ 与式(5)中 φ 的意义不同,前者代表刻度探测器时反应堆有确定值的中子注量率,后者代表未知堆的中子注量率。

式(10)与(5)两边相除得：

$$\frac{\phi \times \Delta t \times 3\ 600}{\varphi \times t \times 3\ 600} = \frac{N_1}{\Delta c} \tag{14}$$

式(14)变形后得：

$$\varphi = \frac{\phi \times \Delta t \times \Delta c}{t \times N_1} \tag{15}$$

将式(11)与(5)两边相除,同理可得：

$$\varphi = \frac{\phi \times 2 \times \Delta t \times \Delta c}{t \times N_2} \tag{16}$$

将式(12)与(5)两边相除,同理可得：

$$\varphi = \frac{\phi \times 3 \times \Delta t \times \Delta c}{t \times N_3} \tag{17}$$

$$\cdots$$

$$\varphi = \frac{\phi \times (n-1) \times \Delta t \times \Delta c}{t \times N_{n-1}} \tag{18}$$

式(15)～(18)就是含硼晶体材料受中子辐照注量与可逆比热容增量总和的关系,即完成了探测器的刻度。根据测量精度的不同需求可选用以下 3 种方法测量未知反应堆的中子注量率。

(1) 从式(15)～(18)中任选一式计算未知反应堆的中子注量率。

(2) 用式(15)～(18)中的每一式求出未知反应堆的中子注量率,再求其平均值作为未知反应堆的中子注量率。

(3) 式(15)～(18)的每一式对应 1 个样品包,对每个样品包重复几次实验,求出可逆比热容增量总和的平均值后建立相应的式(15)～(18),最后再按照第 2 种方法求其平均值作为未知反应堆的中子注量率。

7) 将样品在未知中子注量率的反应堆上辐照时间 t 后,用 MDSC 法测量出比热容增量求和得出 Δc,利用步骤 6 得到反应堆的中子注量率。

利用步骤 6 计算未知堆中子注量率,应注意以下几点。

1) 以上所建探测器中子注量与比热容增量总和的关系是针对特定样品,受特定反应堆辐照后可逆比热容增量的总和,在特定的温度范围,选取特定的温度间隔点取可逆比热容增量求和后建立的关系式。其中某一条件改变,各式中对应关系的系数可能改变。

2) 用探测器测量未知反应堆中子注量率,未知反应堆的中子能谱应与已知反应堆的中子能谱相近,温度范围选取、温度间隔点选取应与在已知反应堆辐照实验时相同,取各点可逆比热容增量求和得出 Δc。

3) 建立探测器中子注量与可逆比热容增量总和的关系的过程,是对选定样品刻度的过程,该样品是受刻度样品,已知堆是刻度堆。当受刻度样品和刻度堆发生改变时,可按照建立式(15)～(18)的技术路线重新进行实验,建立中子辐照注量和样品可逆比热容增量总和之间的关系式,所选温度范围、温度间隔、温度点多少均可根据研究需要另选。建立起的关系式与上述关系式具有类似的用途,使用条件相似。也即当受刻度样品和刻度堆发生变化时,应重新对探测器进行刻度实验。

4) 本文给出的实验结果是由微型中子源反应堆辐照几十小时得到的,在相同辐照注量率情况下,若将辐照时间控制到以 min 为单位,可将测量反应堆中子注量率的范围提高 3 个数量级左右,这能基本满足今后计划测量

中国先进研究堆(CARR)中子注量率的要求。至于将辐照时间延长至1 000 h、10 000 h,或更长时间是否还能保持可逆比热容增量与辐照注量呈正比关系,如有需求还可继续进行实验,把辐照注量控制到可逆比热容增量与辐照注量呈正比关系的范围内。

4 应用前景

精确测量高注量反应堆的中子注量率一直是反应堆物理界面临的世界性难题。从测量原理看,可逆比热容法更适合测量高中子注量率场的中子。因为热分析仪器测量可逆比热容增量没有上限限制,用这种仪器测量高注量中子注量率不存在超出探测器量程的问题。样品受辐照注量越多,可逆比热容变化越大,测量相对误差越小,这正是测量高注量率反应堆所需要的。今后研究拟在CARR(目前亚洲最高中子注量率)实验孔道内进行辐照实验,通过测量样品中辐照损伤对可逆比热容的影响来对CARR进行中子注量率测量和刻度。由于测量的不是中子与核发生反应后的次级带电粒子,因此本文方法具有以下优点。

1) 本文方法属于积分测量法,不受半衰期的限制,因此能直接精确测量高注量状态下反应堆堆芯内部的中子注量率。

2) 受辐照样品体积小、质量轻、适用范围宽。

3) 本方法操作简便(直接测量中子与靶样品作用后的可逆比热容,不需化学蚀刻和计数径迹数目)、速度快,可在3 h内完成测量。

4) 本方法可在强γ场和β射线存在的环境下测量中子。

5) 本方法能在探测器受辐照后与反应堆完全分离的情况下测量与读取中子注量率的数据。

本方法可开展核电站压力壳钢的中子辐照性能研究,将受辐照样品制作成任意形状,粘贴在压力壳钢上,进行长期中子辐照;可对反应堆孔道、堆芯部件等高注量、强辐照、空间狭小的部位的中子注量率直接测量,提高了测量精度,简化了实验步骤;可用于大型反应堆结构部件的积分注量监测,对于大型反应堆结构材料中子辐照损伤、构件的老化管理、研究堆辐照生产、功率刻度等诸多方面均有重要意义[16]。

参考文献:

[1] 马鹏飞,阮永丰,洪晓丰,等. 中子辐照对6H-SiC晶体比热容的影响[J]. 硅酸盐学报,2009,37(4):605-608.
MA Pengfei, RUAN Yongfeng, HONG Xiaofeng, et al. The effect of neutron-irradiation on specific heat capacity of 6H-SiC[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(4): 605-608(in Chinese).

[2] 于效忠,吕国刚,张觐,等. 核辐射物理学[M]. 北京:原子能出版社,1986.

[3] 王广厚. 粒子和固体相互作用物理学[M]. 北京:科学出版社,1991.

[4] 曹建中. 半导体材料的辐射效应[M]. 北京:科学出版社,1993.

[5] 王艳色,魏志勇,申凯华,等. 调制差示扫描量热法在高分子材料中的应用[J]. 高分子通报,2016(3):16-21.
WANG Yanse, WEI Zhiyong, SHEN Kaihua, et al. Application of modulated differential scanning calorimetry in polymer research[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2016(3): 16-21(in Chinese).

[6] RIBEIRO M, GROLIER J P E. Temperature modulated DSC for the investigation of polymer materials: A brief account of recent studies[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1999, 57: 253-263.

[7] 解云川,范晓东. 调制式DSC在高聚物研究中的应用[J]. 高分子通报,2002(2):67-74.
XIE Yunchuan, FAN Xiaodong. Applications of modulated differential scanning calorimetry in polymer research[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2002(2): 67-74(in Chinese).

[8] READING M. Method and apparatus for parsed dynamic differential analysis: US, 5474385[P]. 1995.

[9] READING M, HAHN B K, CROWE B S. Method and apparatus for modulated differential analysis: US, 5346306[P]. 1994.

[10] READING M, LUGET W R. Modulated differential scanning calorimetry[J]. Thermochimica Acta, 1994, 238(15): 295-307.

[11] 鲁红,冯大春,杨继佑,等. DSC、MDSC测定物质比热容的比较[J]. 分析仪器,2011(3):70-74.

[12] 杨铜锁,史永谦,朱庆福,等. 利用测热技术测量

核反应堆中子通量密度[J]. 原子能科学技术,2016,50(9):1 629-1 633.

YANG Tongsuo, SHI Yongqian, ZHU Qingfu, et al. Measurement of neutron flux density in reactor with thermal analysis method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(9): 1 629-1 633(in Chinese).

[13] 杨铜锁,何少蓉,李天祥,等. 热分析法测量磷灰石中固体核径迹[J]. 科学通报,2009,54(17): 2 495-2 499.

YANG Tongsuo, HE Shaorong, LI Tianxiang, et al. Measurement of nuclear tracks in apatite by thermal analysis method[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(17): 2 495-2 499(in Chinese).

[14] 陈洛娜,包伯荣,李燕飞,等. 用钴活化法测定反应堆中热中子积分通量[J]. 核技术,1988,11(12):33-35.

CHEN Luona, BAO Borong, LI Yanfei, et al. Measurement of integral thermal neutron flux in a high flux reactor by the Co activation method[J]. Nuclear Techniques, 1988, 11(12): 33-35 (in Chinese).

[15] 张志军,雷家荣,袁示刚,等. 固体核径迹法测量中子注量的研究[J]. 中国辐射卫生,2006,15(2):6-9.

ZHANG Zhijun, LEI Jiarong, YUAN Shigang, et al. Nuclear track method to measure neutron flux[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2006, 15(2): 6-9(in Chinese).

[16] 曾庆长. 核压力容器辐照脆性破裂问题[J]. 海工科技,1981(3):76-80.

ZENG Qingchang. Radiation brittle fracture of nuclear pressure vessel[J]. Journal of Naval University of Engineering, 1981(3): 76-80(in Chinese).