



·蒙特卡罗方法及其应用·

基于 JMCT 软件的中子活化数值模拟 程序的开发和检验*

黄 孟¹, 朱剑钰¹, 伍 钧¹, 张松柏², 李 瑞³, 李 刚³

(1. 中国工程物理研究院 战略研究中心, 北京 100088; 2. 四川轻化工大学 自动化与信息工程学院, 四川 宜宾 644005;
3. 中国工程物理研究院 高性能数值模拟软件中心, 北京 100088)

摘 要: 中子活化产物和辐射特征的数值模拟程序是研究材料活化效应的重要工具。在 JMCT 软件的基础上开发了具备材料中子活化效应模拟能力的数值模拟程序, 并将其命名为“中子活化数值模拟程序”, 旨在将其应用于军控核查、核安全等领域的研究中。对该程序在核弹头内部中子输运和活化计算的准确性进行了验证, 发现该程序对核弹头内部中子输运和活化的计算精度优良。利用该程序研究了混凝土地面核素在裂变核材料的裂变中子辐照下的活化效应, 计算结果进一步验证了中子活化数值模拟程序的功能。

关键词: 中子活化; 数值模拟软件; 核弹头核查; 核材料; 混凝土活化

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210356

Development and test of neutron activation simulation program based on JMCT software

Huang Meng¹, Zhu Jianyu¹, Wu Jun¹, Zhang Songbai², Li Rui³, Li Gang³

(1. Center for Strategic Studies, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;
2. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644005, China;
3. Software Center for High Performance Numerical Simulation, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: The numerical simulation program of neutron activation products and their radiation characteristics is an important tool to study the activation effect of materials. A numerical simulation program capable of simulating the neutron activation effect of materials was developed through the secondary development of the JMCT software, and it was named “neutron activation simulation program”, which is expected to be applied to the research of arms control verification and nuclear security. The correctness of the neutron activation simulation program in calculating the neutron transport and activation inside nuclear warheads was tested, and the calculation results are accurate. The activation effect of concrete floors under the irradiation of the fission neutrons from fissile materials was studied based on the neutron activation simulation program, and the calculation results furthermore prove the functions of the neutron activation simulation program.

Key words: neutron activation; numerical simulation software; warhead verification; nuclear materials; concrete activation

在军控核查、无损检测、核考古学等领域中, 利用被检材料的中子活化效应可以反演出被检材料的元素组分、活化时间、来源等重要信息。例如, 在核裁军核查中, 由于核弹头中的非核材料长期处于裂变中子的辐照环境中, 非核材料中的核素会与裂变中子发生核反应, 并产生大量新核素。在核弹头拆卸后, 通过探测和分析非核材料中的这部分活化核素, 将有望认证非核材料的来源, 从而佐证核弹头确实被拆卸^[1-9]。又如, 在打击恐怖分子核袭击的行动中, 需要对恐怖分子获取的裂变核材料进行搜查和追踪, 并在其实施核袭击之前发现和缴获这些材料, 从而

* 收稿日期: 2021-08-17; 修订日期: 2021-11-10
基金项目: 四川省科技厅项目 (2021YFSF0058)
联系方式: 黄 孟, hm.max@126.com。
通信作者: 朱剑钰, zhujyu@126.com。

阻止核袭击的发生。考虑到裂变核材料从存储场所中移走后,存储场所中的混凝土地面的中子活化核素将在一段时间内继续存在,并通过衰变产生 α 、 β 、 γ 等射线。因此,通过探测和分析存储场所中非核材料的中子活化效应所产生的 α 、 β 、 γ 等射线,能够为判断该存储场所是否曾经存放过裂变核材料提供重要判据。

中子活化产物和辐射特征的含时数值模拟程序是研究材料活化效应的重要工具。本文在JMCT软件的基础上开发了具备材料中子活化效应模拟能力的数值模拟程序,验证了该程序在核弹头内部中子输运和活化计算的准确性,利用该程序计算了混凝土材料的中子活化效应,进一步验证了该程序的功能。

1 中子活化数值模拟程序介绍

本文在JMCT软件的基础上开发了具备材料中子活化效应模拟能力的数值模拟软件,将其命名为“中子活化数值模拟程序”。JMCT软件是一款由北京应用物理与计算数学研究所和中国工程物理研究院高性能数值模拟软件中心共同研发的蒙特卡洛粒子输运模拟软件,该软件能够对中子、光子的输运进行高精度模拟,并具备三维可视化建模和并行计算的能力。中子活化数值模拟程序能够实现以下功能:(1)计算中子辐照下材料中活化核素的产额和空间分布;(2)计算经过中子辐照后材料中活化核素的数目;(3)计算经过中子辐照后从材料中出射并进入探测器的 γ 射线的能谱。

中子活化数值模拟程序的基本框架如图1所示。首先,中子活化数值模拟程序构建了放射性核素数据库,该数据库包含了原子数从1~109的3224种放射性核素的半衰期和特征 γ 射线等数据,能够为后续计算提供必要的参数。其次,中子活化数值模拟程序调用JMCT软件模拟辐照中子在材料中的输运过程,并记录中子反应的类型和位置,进而由此推算出中子活化反应的产物及其产额(A)。然后,根据输入的中子辐照时长(T_R)、材料闲置时长(T_D)(停止中子辐照后材料闲置等待探测的时长)和探测器测量时长(T_M),中子活化数值模拟程序能够计算出中子活化反应产生的放射性核素(即活化核素)在开始探测时的数目

$$N_p = \left(-\frac{A}{\lambda} \cdot e^{-\lambda T_k} + \frac{A}{\lambda} \right) \cdot e^{-\lambda T_0} \quad (1)$$

式中: λ 为活化核素的半衰期。同时,中子活化数值模拟程序还能计算出活化核素在探测器测量时长内发生衰变的数目

$$N_d = N_p \cdot (1 - e^{-\lambda T_m}) = \left(-\frac{A}{\lambda} \cdot e^{-\lambda T_k} + \frac{A}{\lambda} \right) \cdot e^{-\lambda T_0} \cdot (1 - e^{-\lambda T_m}) \quad (2)$$

最后,根据材料内活化核素在探测器测量时长内发生衰变的数目,中子活化数值模拟程序构建材料内活化核

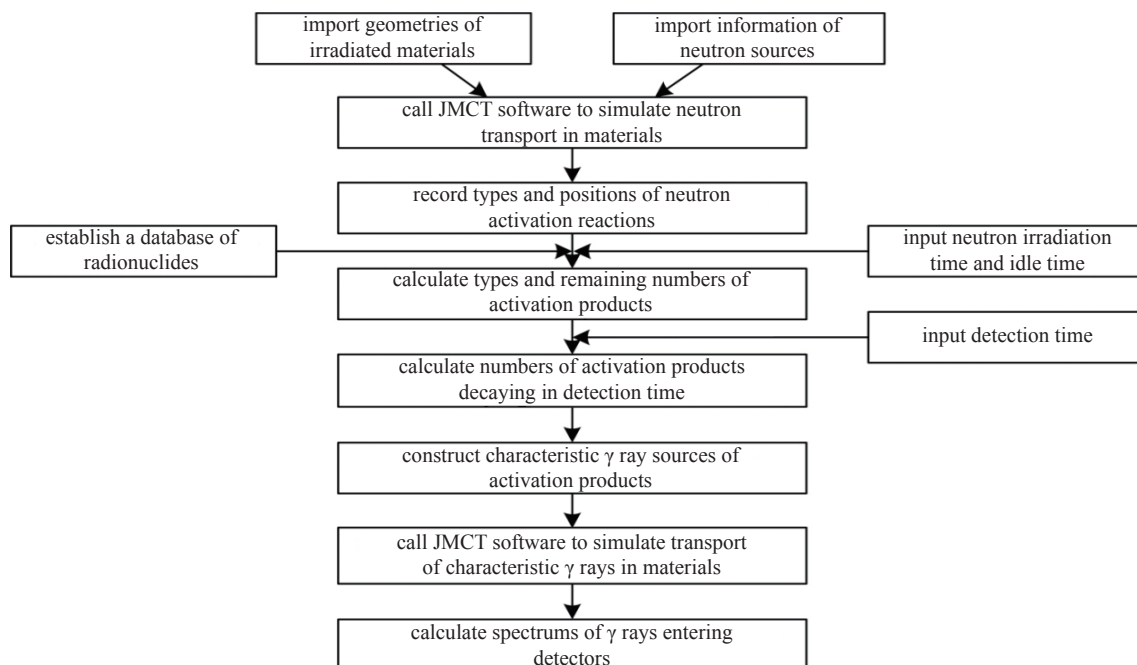


Fig. 1 Framework of neutron activation simulation program

图1 中子活化数值模拟程序的基本框架

素的特征 γ 射线源,并调用 JMCT 软件模拟特征 γ 射线在材料中的输运过程,进而计算出从材料中出射并进入探测器的 γ 射线的能谱。

图 2 展示了中子活化数值模拟程序中的放射性核素半衰期数据库和放射性核素 γ 衰变数据库。放射性核素半衰期数据库的存储格式是“质量数-质子数-能级-半衰期(s)”,放射性核素 γ 衰变数据库的存储格式是“质量数-质子数-能级-特征 γ 射线能量-分支比”。图 3 展示了中子活化数值模拟程序的核素数目计算的结果文件。

DataBse_HalfLife.txt				DataBse_GammaDecay.txt			
1	1	1	0.83008e+030	1	8	2	0.9807 84.
2	3	1	0.38839e+008	2	8	2	0.4776 5.
3	4	1	0.3e-006	3	11	3	0.3368 33.
4	5	1	0.1.9e-006	4	11	3	0.320 7.8
5	6	1	0.1.6e-006	5	11	3	0.2.590 6.
6	5	2	0.6e-007	6	11	3	0.2.811 2.8
7	6	2	0.807	7	11	3	0.0.219 0.78
8	7	2	0.1.5e-007	8	7	4	0.0.4776 10.4
9	8	2	0.119	9	11	4	0.2.125 35.5
10	9	2	0.1e-007	10	14	4	0.3.5346 0.9
11	10	2	0.3e-007	11	14	4	0.3.6845 7.
12	4	3	0.6e-006	12	8	5	0.-0.511 200
13	5	3	0.1.2e-006	13	12	5	0.4.438 1.3
14	8	3	0.0.84	14	12	5	0.3.215 0.00065
15	9	3	0.0.178	15	13	5	0.3.68 7.6
16	10	3	0.1.1e-007	16	14	5	0.6.094 90.
17	11	3	0.0.0088	17	9	6	0.-0.511 200
18	12	3	0.1e-008	18	10	6	0.-0.511 200
19	6	4	0.9.2e-008	19	10	6	0.0.71829 100.
20	7	4	0.4.60339e+006	20	11	6	0.-0.511 198
21	8	4	0.6.8e-006	21	15	6	0.5.298 68.
22	10	4	0.4.79347e+013	22	17	6	0.1.375 100
23	11	4	0.13.8	23	17	6	0.1.849 100
24	12	4	0.0.022	24	17	6	0.1.906 100
25	13	4	0.1e-006	25	12	7	0.-0.511 190
26	14	4	0.0.0046	26	12	7	0.4.438 2.
27	7	5	0.1.4e-006	27	16	7	0.6.129 68.8
28	8	5	0.0.77	28	16	7	0.7.115 4.7
29	9	5	0.5e-007	29	17	7	0.0.871 3.
30	12	5	0.0.0202	30	17	7	0.2.1842 0.3

Fig. 2 Databases of half-lives and γ -decay of radionuclides

图 2 放射性核素半衰期数据库和放射性核素 γ 衰变数据库

result midde.txt									
PARAMETERS									
1	Type =	background							
2	Irradiation time =	1.5769e+09 s							
3	Decay time =	0 s							
4	Detection time =	900 s							
5	Irradiation intensity =	1e+06 s ⁻¹							
ACTIVATION									
9	Mass--Num--State--Number produced								
10	6	2	0	1.3502e+06					
11	8	4	0	3.7845e+06					
12	10	4	0	15500					
13	14	6	0	5.64288e+07					
14	16	7	0	600					
15	24	11	0	1800					
16	27	12	0	6900					
17	28	13	0	290100					
18	233	92	0	100					
19	234	92	0	100000					
20	235	92	0	78600					
21	236	92	0	6.9747e+06					
22	237	92	0	376200					
23	239	92	0	2.74719e+07					
RESIDUES									
26	Mass--Num--State--After decay--Detected--After detection								
27	6	2	0	1.5718e+06	1.5718e+06	0			
28	8	4	0	37.1126	37.1126	0			
29	10	4	0	2.44401e+13	318.07	2.44401e+13			
30	14	6	0	8.82396e+16	3.05428e+08	8.82396e+16			
31	16	7	0	6171.85	6171.85	6.19783e-38			
32	24	11	0	1.39856e+08	1.61065e+06	1.38245e+08			
33	27	12	0	5.64425e+06	3.76888e+06	1.87837e+06			
34	28	13	0	5.6499e+07	5.59429e+07	556128			
35	233	92	0	1.57663e+11	19.5906	1.57663e+11			
36	234	92	0	1.57667e+14	12704.3	1.57667e+14			
37	235	92	0	1.19206e+14	3.34833	1.19206e+14			
38	236	92	0	1.09994e+16	9290.76	1.09994e+16			
39	237	92	0	3.16535e+11	3.38408e+08	3.16197e+11			
40	239	92	0	5.60611e+10	2.00435e+10	3.60176e+10			

Fig. 3 Output file of radionuclide numbers of neutron activation simulation program

图 3 中子活化数值模拟程序的核素数目计算的结果文件

2 核弹头输运和活化计算

本节使用的蒙特卡洛模拟软件包括 MCNP5、GEANT4 和中子活化数值模拟程序。其中, MCNP5 软件是由美国 Los Alamos 国家实验室研发的,能够实现中子、光子和电子的联合输运模拟,与其它程序相比, MCNP5 软件中的减方差技巧是比较多而全的; GEANT4 软件是一款由欧洲核子研究中心(CERN)研发的蒙特卡洛模拟软件,具备复杂物理模型的设计能力,能够精细地模拟各种粒子(包括中子、光子、电子和阳离子)与介质的相互作用。

2.1 核弹头模型

文章中模拟计算选用的核弹头模型如图 4 所示,该模型是核弹头的经典简化模型,通常被用于军控核查领域中的核弹头数值模拟研究^[10-11]。该模型是由一系列同心球壳组成,由内向外分别是裂变芯、反射层、惰层、炸药层和外壳,各个部分的尺寸、质量和成分参数如表 1 所示。按照惰层材料的不同,核弹头模型又可以分为模型 1 和模型 2,其中模型 1 的惰层材料为贫化铀,模型 2 的惰层材料为天然钨。

核弹头内部的中子有两个来源:一是铀材料(包括武器级铀和贫化铀)自发裂变产生的裂变中子;二是铀材料自发裂变释放的 α 粒子与轻元素原子核发生 (α ,n) 反应,进而产生中子。能量分布 $f(E)$ 近似为 Watt 谱

$$f(E) = C \cdot e^{-E/a} \cdot \sinh \sqrt{bE}$$

$$C = 2 \cdot e^{ab/4} / (a \sqrt{ab\pi}) \quad (3)$$

式中: a 、 b 为 Watt 谱的形状参数, E 是中子能量, C 是系数。在模拟计算中,这两种来源的中子产额参数如表 2 所示。

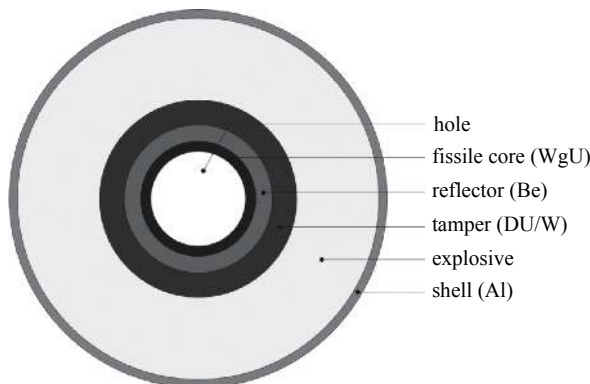


Fig. 4 Nuclear warhead model

图 4 核弹头模型

表 1 核弹头模型中各结构的尺寸、质量和成分参数

Table 1 Size, mass and ingredient parameters of structures in nuclear warhead model

structure	outer radius/cm	mass/kg	ingredient parameters
hole	5.77	0.0	vacuum
fissile core	7.0	12.0	weapons-grade uranium (^{234}U (1%), ^{235}U (93.3%), ^{238}U (5.5%), O(0.2%))
reflector	9.0	3.0	natural beryllium
tamper	12.0	79.0	Model 1: depleted uranium (^{235}U (0.3%), ^{238}U (99.7%)); Model 2: Natural tungsten
explosive	22.0	71.0	explosive (atom number ratio is H:C:N:O=2:1:2:2)
shell	23.0	17.0	natural aluminium

表 2 裂变材料的中子产额

Table 2 Neutron fields of fissile materials

material	nuclide	portion	neutron yield/neutrons·s ⁻¹	
			(α , n) reaction	spontaneous fission
weapon-grade uranium	^{234}U	1%	50	5.546
	^{235}U	93.3%	0.012	0.299
	^{238}U	5.5%	0.001	13.57
	O	0.2%	0	0
depleted uranium	^{235}U	0.3%	0	0.299
	^{238}U	99.7%	0	13.57

2.2 模拟计算结果

2.2.1 从核弹头中出射的中子数目和中子能谱

通过中子活化数值模拟程序的模拟计算,可以得到从核弹头中出射的中子的数目和能谱,如表3和图5所示。表3和图5还显示了MCNP5软件^[12]模拟计算的结果,通过对比发现,中子活化数值模拟程序与MCNP5软件的计算结果吻合得很好,这表明中子活化数值模拟程序对核弹头内部中子输运的计算精度优良。

表 3 从核弹头模型中出射的中子的数目

Table 3 Numbers of neutrons emitted from nuclear warhead model

simulation software	contribution of fission core to neutron	contribution of tamper to neutron	total neutron leakage	
	leakage from shell (neutrons/s)	leakage from shell (neutrons/s)	(neutrons/s)	
Model 1	neutron activation simulation program	18	718	736
	MCNP5	18	720	738
Model 2	neutron activation simulation program	13	0	13
	MCNP5	13	0	13

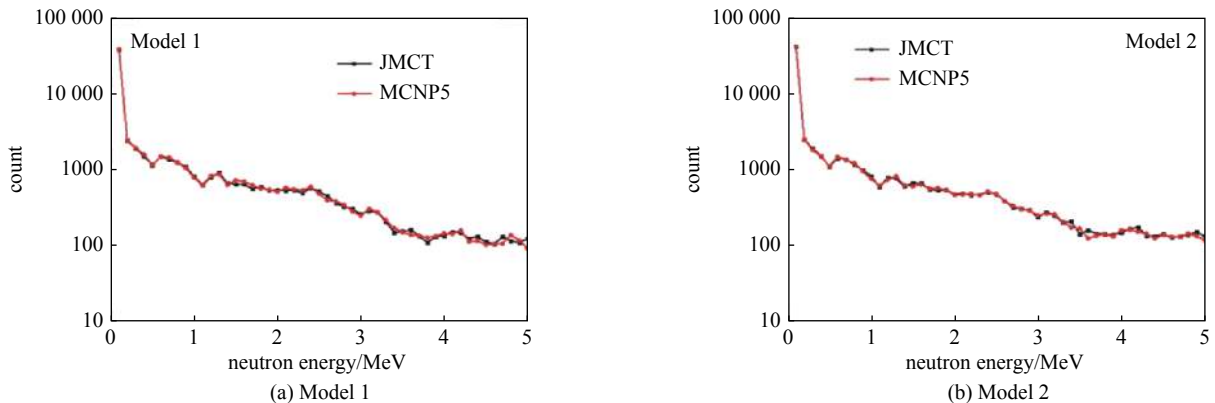


Fig. 5 Spectra of neutrons emitted from nuclear warhead models

图 5 从核弹头模型中出射的中子的能谱

2.2.2 核弹头内部炸药中放射性核素的产额

在核弹头中,中子可能会与材料发生中子活化反应,产生放射性核素。研究这部分放射性核素的种类和产额,有助于了解材料周围物体的特殊属性,这在军控核查和反恐领域有着重要的意义。在本文的模拟研究中,着重分析了核弹头内部炸药的中子活化反应的情况。

通过理论分析可知,中子与核弹头内部炸药发生活化反应,会产生以下几种放射性核素,分别是 ^{16}N 、 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{11}C 和 ^{14}C ,它们的半衰期和衰变类型如表4所示^[13]。通过模拟计算,得到了炸药中这几种放射性核素的产生情况,如表5所示。可以看到,与 ^{14}C 核素相比, ^{16}N 、 ^{15}O 、 ^{13}N 和 ^{11}C 等核素的产额很小,这是因为 ^{16}N 、 ^{15}O 、 ^{13}N 和 ^{11}C 等核素的产生反应存在能量阈值(^{14}C 核素的产生反应则没有),且能量阈值较高(均超过10 MeV),而核弹头内绝大部分中子的能量都小于10 MeV,因此这几种核素的产额要明显小于 ^{14}C 核素。由此可知,中子活化数值模拟程序对核弹头内部炸药的中子活化反应的模拟计算结果与理论相符。此外,表5还展示了GEANT4软件的计算结果,通过对比中子活化数值模拟程序和GEANT4软件的计算结果发现,两者吻合得很好,进一步验证了中子活化数值模拟程序计算结果的准确性。

表4 核弹头模型中的放射性核素

Table 4 Radionuclides in nuclear warhead model

radionuclide	nuclear reaction	half-life	decay type
^{16}N	$^{16}\text{O}(\text{n,p})^{16}\text{N}$	7.130 s	β^- , γ
^{15}O	$^{16}\text{O}(\text{n,2n})^{15}\text{O}$	122.240 s	β^+
^{13}N	$^{14}\text{N}(\text{n,2n})^{13}\text{N}$	9.970 min	β^+ , β^- , γ
^{11}C	$^{12}\text{C}(\text{n,2n})^{11}\text{C}$	20.48 min	β^+ , β^- , γ
^{14}C	$^{14}\text{N}(\text{n,p})^{14}\text{C}$	5730 a	β^-

表5 炸药中放射性核素的产生情况

Table 5 Production of radionuclides in explosive

	simulation software	neutrons simulated	equivalent measuring time	number of radionuclide				
				^{16}N	^{15}O	^{13}N	^{11}C	^{14}C
Model 1	neutron activation simulation program	10^7	9.19×10^3 s	47	0	4	0	5.56×10^6
	GEANT4	10^7	9.19×10^3 s	61	0	5	0	5.72×10^6
Model 2	neutron activation simulation program	10^7	5.23×10^5 s	35	0	2	0	5.93×10^6
	GEANT4	10^7	5.23×10^5 s	36	0	9	0	6.07×10^6

3 混凝土材料活化计算

3.1 混凝土地面核素活化产生的放射性核素

在数值模拟计算中,构建了裂变核材料存储场所中的混凝土地面模型。该模型呈圆饼状,直径为500 cm,厚度为10 cm(一般建筑混凝土地面的厚度为8~16 cm),密度为 2.0 g/cm^3 ,其元素组分如表6所示。同时,将裂变核材料近似为点中子源,放置于混凝土地面模型的上表面中心位置处,其强度为 10^5 s^{-1} (与1.8 kg武器级钚的中子产额大致相当),中子出射方向各向同性,中子能谱服从Watt分布。需要说明的是,本文的模拟计算忽略了距离裂变核材料2.5 m以外的混凝土地面的中子活化效应以及存储场所的墙体和天花板的中子活化效应,也忽略了裂变核材料的屏蔽体对混凝土地面的中子活化效应的影响。

通过模拟计算,得到了混凝土地面核素活化产生的放射性核素的种类和产额,如表7所示^[14]。在表7所列的诸多核素中,具有 γ 衰变的核素有 ^{16}N 、 ^{20}F 、 ^{23}Ne 、 ^{24}Na 、 ^{27}Mg 、 ^{28}Al 、

表6 混凝土地面模型的元素组分

Table 6 Element composition of concrete floor model

element	atom proportion/%	nuclide
H	13.3	$^1\text{H}/^1\text{H}$
O	73.7	$^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$
Na	1.8	^{23}Na
Mg	0.3	$^{24}\text{Mg}/^{25}\text{Mg}/^{26}\text{Mg}$
Al	4.2	^{27}Al
Si	0.3	$^{28}\text{Si}/^{29}\text{Si}/^{30}\text{Si}$
K	1.2	$^{39}\text{K}/^{40}\text{K}/^{41}\text{K}$
Ca	4.8	$^{40}\text{Ca}/^{42}\text{Ca}/^{43}\text{Ca}/^{44}\text{Ca}/^{46}\text{Ca}/^{48}\text{Ca}$
Fe	0.4	$^{54}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}/^{58}\text{Fe}$

表 7 混凝土地面模型中核素活化产生的放射性核素的信息

Table 7 Information of activation products of concrete floor model

radionuclide	half-life	decay type	yield/s ⁻¹	activation reaction
¹⁴ C	5715 a	β ⁻	1.59	¹⁷ O(n,α)
¹⁶ N	7.13 s	β ⁻ ,γ	0.613	¹⁶ O(n,p)
²⁰ F	11.0 s	β ⁻ ,γ	0.432	²³ Na(n,α)
²³ Ne	37.2 s	β ⁻ ,γ	1.05	²³ Na(n,p)
²⁴ Na	14.96 h	β ⁻ ,γ	14.8	²³ Na(n,γ), ²⁴ Mg(n,p), ²⁷ Al(n,α)
²⁷ Mg	9.45 min	β ⁻ ,γ	7.05	²⁷ Al(n,p)
²⁸ Al	2.25 min	β ⁻ ,γ	15.6	²⁷ Al(n,γ), ²⁸ Si(n,p)
³⁶ Cl	3.01×10 ⁵ a	β ⁺ ,β ⁻ ,EC	20.1	³⁹ K(n,α)
³⁷ Ar	35.0 d	EC	82.7	⁴⁰ Ca(n,α)
³⁹ Ar	268 a	β ⁻	61.6	³⁹ K(n,p), ⁴² Ca(n,α)
⁴¹ Ar	1.82 h	β ⁻ ,γ	0.0700	⁴¹ K(n,p)
⁴⁰ K	1.26×10 ⁹ a	β ⁺ ,β ⁻ ,EC,γ	261	³⁹ K(n,γ), ⁴⁰ Ca(n,p)
⁴² K	12.36 h	β ⁻ ,γ	2.04	⁴¹ K(n,γ), ⁴² Ca(n,p)
⁴¹ Ca	1.02×10 ⁵ a	EC	29.4	⁴⁰ Ca(n,γ)
⁴⁵ Ca	162.7 d	β ⁻	1.18	⁴⁴ Ca(n,γ)
⁴⁹ Ca	8.72 min	β ⁻	0.134	⁴⁸ Ca(n,γ)
⁵⁴ Mn	312 d	EC,γ	0.835	⁵⁴ Fe(n,p)
⁵⁶ Mn	2.579 h	β ⁻ ,γ	0.141	⁵⁶ Fe(n,p)
⁵⁵ Fe	2.73 a	EC	0.798	⁵⁴ Fe(n,γ)

⁴¹Ar、⁴⁰K、⁴²K、⁵⁴Mn 和 ⁵⁶Mn 等 11 种; 其中, ⁴⁰K 核素是天然存在的放射性核素(其丰度为 0.012%), 它在混凝土材料中大量存在, 因此难以用于有效判断地面混凝土是否被裂变核材料释放的裂变中子辐照过; ¹⁶N、²⁰F、²³Ne 等 3 种核素的半衰期小于 1 min, 当裂变核材料撤离后, 地面混凝土中的这 3 种核素在几分钟的时间内衰变殆尽, 因此很难对其进行有效测量。综合以上分析, 本文发现, 在混凝土地面核素活化产生的放射性核素中, ²⁴Na、²⁷Mg、²⁸Al、⁴¹Ar、⁴²K、⁵⁴Mn 和 ⁵⁶Mn 等 3 种核素的特征 γ 射线有望被探测到, 并用于判断裂变核材料的存储历史, 下文将着重研究这七种活化核素的数目和探测效果。需要说明的是, 尽管表 7 中的 ³⁶Cl 核素能够发生 β⁺衰变, 并产生 2 个能量为 511 keV 的 γ 光子, 但是, 由于 ⁴⁰K 核素同样具有 β⁺衰变, 并且在混凝土材料中大量存在, 因此难以通过探测 511 keV γ 光子来判断 ³⁶Cl 核素是否存在, 所以本文也不对 ³⁶Cl 核素的探测进行讨论。

3.2 活化核素的数目与探测效果

由公式(1)可知, 当中子辐照时长和材料闲置时长发生变化时, 混凝土地面中的活化核素的数目也会随之变化。由于 ²⁴Na、²⁷Mg、²⁸Al、⁴¹Ar、⁴²K、⁵⁴Mn 和 ⁵⁶Mn 等 7 种活化核素的半衰期和产额各不相同, 因此对于一定的中子辐照时长和材料闲置时长, 混凝土地面中这七种活化核素的数目也有较大差异。利用中子活化数值模拟程序计算了当中子辐照时长为 1 a 和 1 d 时 7 种活化核素的数目与材料闲置时长的关系曲线, 如图 6 所示。从图中可以发现, 随着材料闲置时长的增加, 活化核素的数目也随之减少; 当中子辐照时长为 1 a 时, ⁵⁴Mn 核素的初始数目是七种核素中最多的; 当中子辐照时长为 1 d 时, ²⁴Na 核素的初始数目是 7 种核素中最多的, 但是由于其半衰期远小于 ⁵⁴Mn 核素, 因此随着材料闲置时长的增加, ²⁴Na 核素的数目逐渐被 ⁵⁴Mn 核素超越。

若使用 ORTEC 公司生产的尺寸为 φ65 mm×60 mm 的高纯锗探测器对混凝土地面模型中的活化核素衰变产生的特征 γ 射线进行探测, 探测器入射窗中心与混凝土地面模型的上表面中心重合, 则探测器测量到的某个活化核素的某条特征 γ 射线的数目

$$N_m = N_d \cdot f \cdot \varepsilon = \left(-\frac{A}{\lambda} \cdot e^{-\lambda T_k} + \frac{A}{\lambda} \right) \cdot e^{-\lambda T_d} \cdot (1 - e^{-\lambda T_m}) \cdot f \cdot \varepsilon \quad (4)$$

式中: f 为该条特征 γ 射线的分支比, ε 为高纯锗探测器对该条特征 γ 射线的平均探测效率。

利用中子活化数值模拟程序分别计算了在中子辐照时长为 1 a 和 1 d、材料闲置时长为 1 h 和 1 a 情况下进入

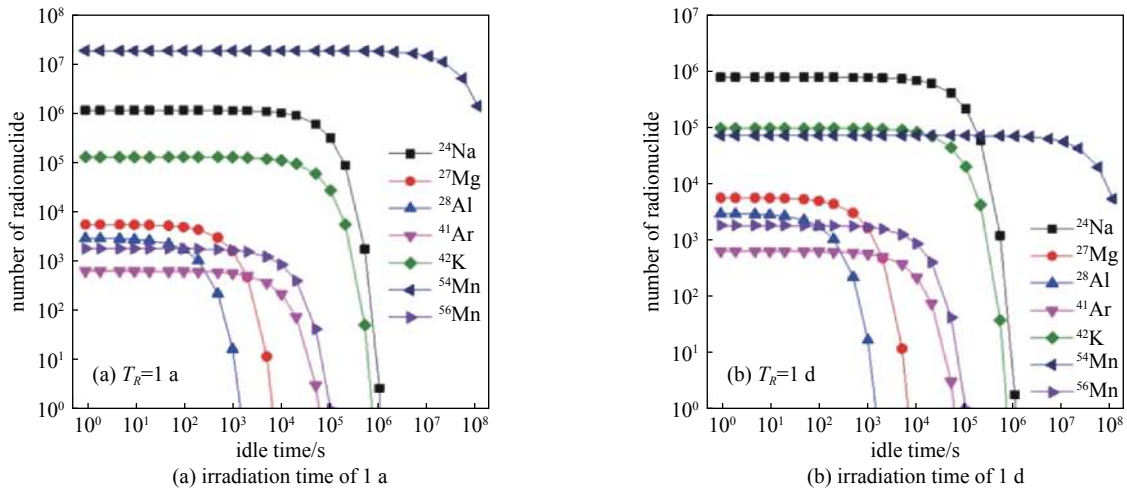


Fig. 6 Relationship curves between numbers of 7 radionuclides and idle time

图 6 七种活化核素的数目与材料闲置时长的关系曲线

高纯锗探测器的 γ 射线的能谱(探测器测量时长为 10^3 s),如图 7 所示。在图 7(a)和图 7(c)中, ^{24}Na 核素的 1.369 MeV 和 2.754 MeV 特征 γ 射线峰最为显著,其计数均超过了 10^2 ;在图 7(b)中, ^{54}Mn 核素的 0.834 MeV 特征 γ 射线峰最为显著,其计数超过了 10;在图 7(d)中,同样也是 ^{54}Mn 核素的 0.834 MeV 特征 γ 射线峰最为显著,但是其数目太少,在

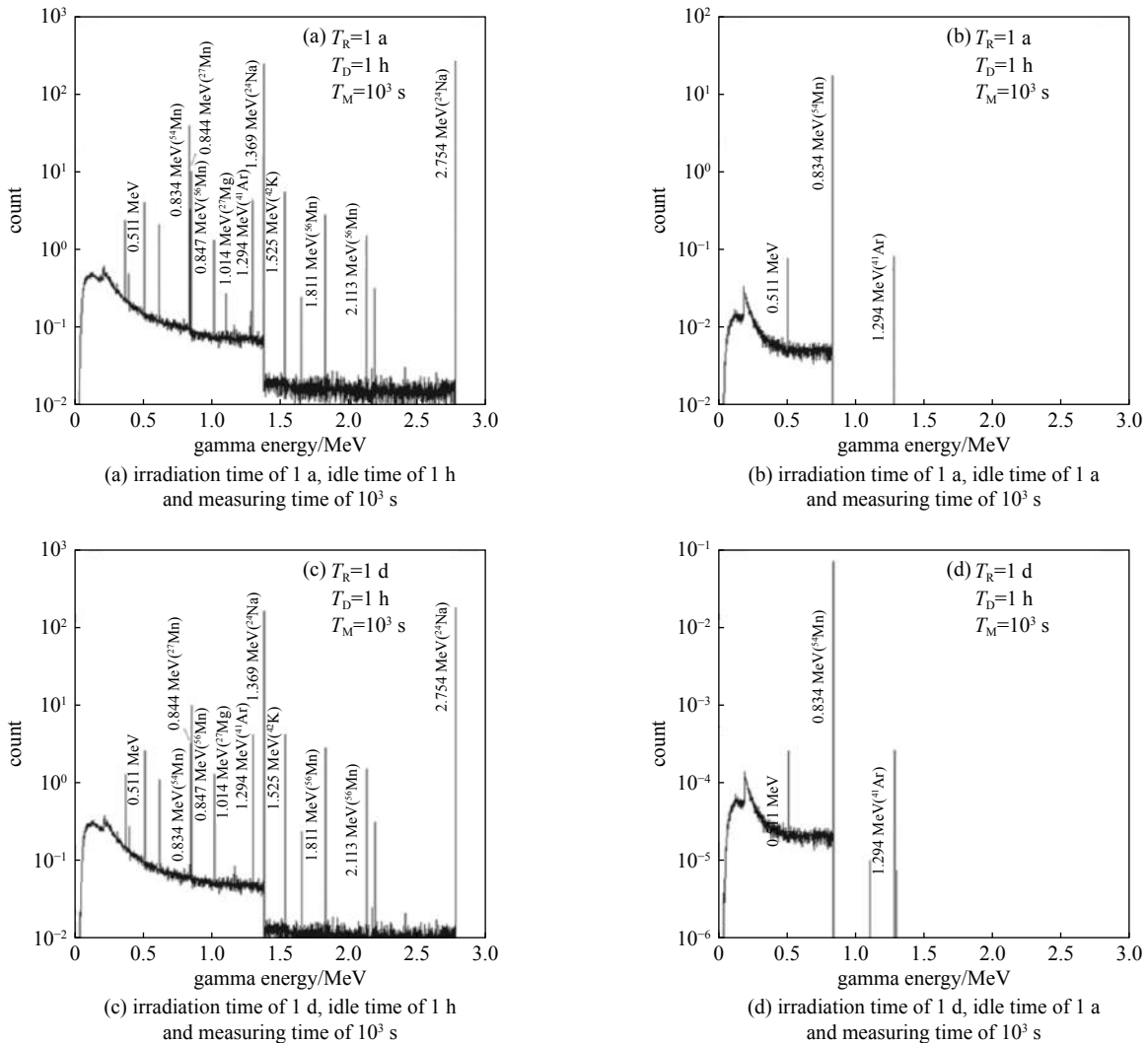


Fig. 7 Spectra of γ rays entering HPGe detector under different neutron irradiation time and idle time

图 7 不同中子辐照时长和材料闲置时长下进入高纯锗探测器的 γ 射线的能谱

实际测量时难以对其进行有效探测。

4 结 论

本文在 JMCT 软件的基础上开发了具备材料中子活化效应模拟能力的数值模拟程序,旨在为炸药来源认证方法的研究提供重要的计算工具。本文介绍了中子活化数值模拟程序,并验证了对该程序在核弹头运输和活化计算的准确性。计算结果表明,该程序对核弹头内部中子运输和活化的计算精度优良。最后,本文利用该程序研究了混凝土地面核素在裂变核材料的裂变中子辐照下的活化效应,并发现混凝土地面中的 ^{24}Na 、 ^{27}Mg 、 ^{28}Al 、 ^{41}Ar 、 ^{42}K 、 ^{54}Mn 和 ^{56}Mn 等 7 种活化核素可以用于判断裂变核材料的存储历史,计算结果进一步验证了中子活化数值模拟程序的功能。

参考文献:

- [1] Glaser A, Barak B, Goldston R J. A zero-knowledge protocol for nuclear warhead verification[J]. *Nature*, 2014, 510(7506): 497-502.
- [2] Hecla J J, Danagoulian A. Nuclear disarmament verification via resonant phenomena[J]. *Nat Commun*, 2018, 9: 1259.
- [3] Kemp R S, Danagoulian A, Macdonald R R, et al. Physical cryptographic verification of nuclear warheads[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113(31): 8618-8623.
- [4] Olinger C T, Stanbro W D, Johnston R G, et al. Technical challenges for dismantlement verification[R]. LA-UR-97-2812, 1997.
- [5] MacArthur D W, Hauck D K, Smith M. Confirmation of nuclear treaty limited items: pre-dismantlement vs. post-dismantlement[R]. LA-UR-13-23004, 2013.
- [6] Olinger C T, Frankle C M, Johnson M W, et al. Measurement approaches to support future warhead arms control transparency[R]. LA-UR-98-3115, 1998.
- [7] Hauck D K, MacArthur D W. Benefits of a “presence of fissile material” attribute for warhead confirmation in treaty verification[R]. LA-UR-13-25330, 2013.
- [8] Kütt M, Philippe S, Barak B, et al. Authenticating nuclear warheads with high confidence[C]//Proceedings of the 55th Annual INMM Meeting, 2014.
- [9] Voznyuk R, Charles M, Renlund A, et al. High explosive detection and destruction technology applications for warhead dismantlement transparency[R]. SAND2000-1533C, 2000.
- [10] 伍钧. 核弹头探测技术数值模拟研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院北京研究生部, 2003. (Wu Jun. Numerical simulation study of nuclear warhead detection techniques[D]. Beijing: Graduate School of China Academy of Engineering Physics, 2003)
- [11] Fetter S, Frolov V A, Miller M, et al. Detecting nuclear warheads[J]. *Sci Glob Secur*, 1990, 1(3/4): 225-253.
- [12] X-5 Monte Carlo Team. MCNP—A general Monte Carlo n-particle transport code, Version 5[R]. LA-UR-03-1987, 2003.
- [13] 刘运祚. 常用放射性核素衰变纲图[M]. 北京: 原子能出版社, 1982. (Liu Yunzuo. Common radionuclide decay scheme[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982)
- [14] Holden N E. Table of the isotopes[R]. BNL-71000-2003-BC, 2003.