

熔岩玻璃体核素衰变热功率的计算

包敏, 王群书, 师全林, 解峰, 王武尚

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 温度是影响熔岩玻璃体溶解速度的关键因素, 为此, 本文计算了核试验后 10~300 000 d 内熔岩玻璃体中核素衰变热功率, 评估了核素衰变热功率对熔岩玻璃体的温度和溶解速度的影响程度。采用了国际原子能机构给出的 100 kt TNT 当量地下核试验产生的、半衰期大于 1 a 的放射性核素含量, 利用其中裂变产物核素¹³⁷Cs 的含量推算累积裂变产额大于 0.1%、半衰期为 1 d~1 a 的短寿命裂变产物核素的含量。分析了各核素的放射性衰变特点, 采用 ENDF/B VII 库中核素衰变辐射的平均 α 能量、平均电子能量和平均电磁辐射能量计算各核素在熔岩玻璃体内因衰变而沉积的能量。计算结果表明: 核素衰变热功率呈分段幂函数衰减; 在 10~2 000 d、2 000~60 000 d 和 60 000 d 之后的时段内, 衰变热功率分别主要源于短寿命裂变产物核素、长寿命裂变产物核素和锕系元素。核素衰变热功率对熔岩玻璃体的温度和溶解速度的影响不大, 1 000 d 后影响非常小。

关键词: 熔岩玻璃体; 核素; 衰变热功率; 温度

中图分类号: TL76

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2014)04-0577-06

doi: 10.7538/yzk.2014.48.04.0577

Calculation of Radionuclide Decay Heat Power for Melt Glass

BAO Min, WANG Qun-shu, SHI Quan-lin, XIE Feng, WANG Wu-shang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: As the temperature is a key factor affecting melt glass dissolution rate, the decay heat power generated by radionuclides within melt glass from 10 d to 300 000 d after an underground nuclear test was calculated to assess its influence on temperature and dissolution rate. Radioactive inventories with half-life longer than 1 a, produced by 100 kt TNT nuclear explosion published by IAEA report were used. The inventories of short-lived fission products with half-life of 1 d-1 a and accumulate yield greater than 0.1% were estimated from the inventory of ¹³⁷Cs. The decay characteristics of each nuclide were analyzed. The decay energy deposited in melt glass was calculated by the mean alpha, beta and gamma energy released by radioactive decay from ENDF/B VII database. From the calculation, it can be concluded that the decay heat power decays by power function, short-lived fission products, long-lived fission products and actinides are the main contributions to the power at 10-2 000 d, 2 000-60 000 d and after 60 000 d, respectively. The influence on melt glass temperature and dissolution rate is indistinctive, especially after 1 000 d.

Key words: melt glass; radionuclide; decay heat power; temperature

地下核试验所释放的能量最终转化为热能,提高了爆心温度。核试验瞬间汽化了核装置及部分围岩介质,汽化物质向外膨胀形成爆炸空腔,在空腔冷却过程中,汽化物中难熔性物质首先发生液化,汇集在空腔底部形成熔岩玻璃体,核试验产生的难熔性放射性核素大部分包裹在熔岩玻璃体中。在空腔低于地下水线的情况下,熔岩玻璃体受地下水长期侵蚀作用发生溶解反应,逐渐释放出放射性核素。温度是影响熔岩玻璃体溶解速度的关键因素之一^[1]。为评价熔岩玻璃体内核素衰变热功率对温度的影响,需计算核素衰变释热量。地下水在爆后几小时至几天的时间内回流空腔^[2],本文计算核爆 10 d 后熔岩玻璃体的核素衰变释热量。

1 源项分析

一次地下核试验产生的放射性核素上千种,大部分核素的半衰期极短,很快衰变为半衰期较长的子核或稳态核素。放射性核素活度衰减服从指数规律^[3],10 个半衰期后,核素活度衰减为初始值的 0.1%,可忽略其放射性衰变释热量。因此计算核爆 10 d 后的核素衰变热功率需考虑半衰期大于 1 d 的核素。

为评估 FANGATAUFA 核试验场的核环境状况,1998 年 IAEA 估算了 100 kt TNT 当量地下核试验产生的半衰期大于 1 a 的放射性核素的总活度^[4],给出了这些核素在熔岩玻璃体中的分布比例,根据这些信息可计算出熔岩玻璃体内核素的初始活度(表 1)。

表 1 IAEA 估算的地下核试验熔岩玻璃体核素活度^[4]

Table 1 Estimated underground radioactive inventory from nuclear explosion by IAEA^[4]

核素分类	核素	半衰期/a	总活度/Bq	熔岩比例/%	熔岩初始活度/Bq	
锕系核素	²³⁶ U	2.342×10^6	2.50×10^9	90	2.25×10^9	
	²³⁷ Np	2.144×10^6	4.20×10^9	95	3.99×10^9	
	²³⁸ Pu	87.7	1.60×10^{12}	98	1.57×10^{12}	
	²³⁹ Pu	2.411×10^4	7.50×10^{12}	98	7.35×10^{12}	
	²⁴⁰ Pu	6.561×10^3	2.00×10^{12}	98	1.96×10^{12}	
	²⁴¹ Pu	14.29	6.40×10^{13}	98	6.27×10^{13}	
	²⁴² Pu	3.735×10^5	8.40×10^7	98	8.23×10^7	
	²⁴¹ Am	432.6	2.90×10^{12}	98	2.84×10^{12}	
	活化核素	³⁶ Cl	3.01×10^5	4.80×10^{10}	50	2.40×10^{10}
		⁴¹ Ca	1.02×10^5	4.20×10^{10}	70	2.94×10^{10}
⁵⁵ Fe		2.744	1.50×10^{15}	95	1.43×10^{15}	
⁶⁰ Co		5.271 1	2.50×10^{14}	90	2.25×10^{14}	
⁵⁹ Ni		7.6×10^4	1.20×10^{11}	95	1.14×10^{11}	
⁶³ Ni		101.2	1.50×10^{13}	95	1.43×10^{13}	
¹⁵² Eu		13.537	1.70×10^{13}	95	1.62×10^{13}	
¹⁵⁴ Eu		8.601	3.30×10^{12}	95	3.14×10^{12}	
长寿命裂变产物核素		⁷⁹ Se	2.95×10^5	4.00×10^8	70	2.80×10^8
		⁹⁰ Sr	28.79	5.20×10^{14}	40	2.08×10^{14}
	⁹³ Zr	1.53×10^5	1.10×10^{10}	95	1.05×10^{10}	
	⁹⁹ Tc	2.111×10^4	8.30×10^{10}	80	6.64×10^{10}	
	¹⁰⁶ Ru	1.017 9	2.70×10^{15}	70	1.89×10^{15}	
	¹⁰⁷ Pd	6.5×10^6	3.50×10^9	70	2.45×10^9	
	¹¹³ Cd ^m	14.1	9.90×10^{10}	70	6.93×10^{10}	
	¹²¹ Sn ^m	43.9	3.80×10^9	60	2.28×10^9	
	¹²⁵ Sb	2.758 56	1.20×10^{14}	70	8.40×10^{13}	
	¹²⁶ Sn	2.3×10^5	4.40×10^9	70	3.08×10^9	
	¹²⁹ I	1.57×10^7	1.70×10^8	50	8.50×10^7	
	¹³⁴ Cs	2.065 2	1.00×10^{11}	20	2.00×10^{10}	
	¹³⁵ Cs	2.3×10^6	8.50×10^9	20	1.70×10^9	
	¹³⁷ Cs	30.08	6.00×10^{14}	40	2.40×10^{14}	
	¹⁴⁷ Pm	2.623 4	2.40×10^{15}	95	2.28×10^{15}	
¹⁵¹ Sm	90	1.50×10^{13}	95	1.43×10^{13}		
¹⁵⁵ Eu	4.753	3.60×10^{13}	95	3.42×10^{13}		

半衰期 1 d~1 a 的放射性核素主要是裂变产物核素,称之为短寿命裂变产物核素。表 2 列出了累积产额大于 0.001 的短寿命裂变产物核素,这些裂变产物核素的前驱核的半衰期均很短,远小于 1 d,因此核爆 10 d 后 99.9% 以上的前驱核衰变为这些裂变产物核素,可采用累积产额估算短寿命裂变产物核素的初始活度。短寿命裂变产物核素的初始总量根据表 1 中长寿裂变产物核素的初始总量推算。核试验后裂变产物核素的生成总量与累积产额呈正比,有:

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{Y_A}{Y_B} \quad (1)$$

式中: N_A 和 N_B 分别为裂变产物核素 A 和 B 初始生成的总核数,无量纲; Y_A 和 Y_B 分别为核素 A 和 B 的累积产额,无量纲。核素的总核数与放射性活度之间满足关系式:

$$A = \lambda N \quad (2)$$

式中: A 为核素的放射性活度, Bq; λ 为核素的衰变常量, s^{-1} ; N 为核素的总核数,无量纲。将式(2)代入式(1),得到:

$$\frac{A_A}{A_B} = \frac{\lambda_A Y_A}{\lambda_B Y_B} \quad (3)$$

已知裂变产物核素 A 的总活度,由 A、B 两裂变产物核素的累积产额和衰变常量可推算裂变产物 B 的总活度。以表 1 中长寿裂变产物核素 ^{137}Cs 作为裂变产物核素 A,计算表 2 中各短寿命裂变产物核素的总活度。裂变产物核素的累积产额选用 ENDF/B VII 库中的 ^{235}U 在平均能量 500 keV 中子作用下的累积产额^[5],核素 ^{137}Cs 的累积产额为 0.062 2。同一元素各同位素具有相同的物理化学性质,参照表 1,表 2 列出了核素在熔岩玻璃体中的分布比例。

表 2 熔岩玻璃体短寿命裂变产物核素含量

Table 2 Inventory of short-lived fission products in melt glass

核素	半衰期/d	累积产额	总活度/Bq	熔岩比例/%	熔岩活度/Bq
^{89}Sr	50.53	0.043 7	9.17×10^{16}	40	3.67×10^{16}
^{91}Y	58.51	0.057 3	1.04×10^{17}	40	4.15×10^{16}
^{95}Zr	64.032	0.064 3	1.06×10^{17}	95	1.01×10^{17}
^{99}Mo	2.749	0.059 4	2.29×10^{18}	80	1.83×10^{18}
^{103}Ru	39.247	0.032 4	8.75×10^{16}	70	6.12×10^{16}
^{105}Rh	1.473 3	0.012 0	8.63×10^{17}	70	6.04×10^{17}
^{127}Sb	3.85	0.003 06	8.42×10^{16}	70	5.90×10^{16}
^{132}Te	3.204	0.046 6	1.54×10^{18}	50	7.71×10^{17}
^{140}Ba	12.752 7	0.059 8	4.97×10^{17}	95	4.72×10^{17}
^{141}Ce	32.508	0.059 5	1.94×10^{17}	95	1.84×10^{17}
^{143}Ce	1.377	0.057 3	4.41×10^{18}	95	4.19×10^{18}
^{144}Ce	284.893	0.052 7	1.96×10^{16}	95	1.86×10^{16}
^{147}Nd	11.04	0.021 4	2.05×10^{17}	95	1.95×10^{17}
^{149}Pm	2.21	0.010 4	4.99×10^{17}	95	4.74×10^{17}
^{151}Pm	1.18	0.004 12	3.70×10^{17}	95	3.52×10^{17}
^{153}Sm	1.94	0.001 67	9.12×10^{16}	95	8.67×10^{16}

2 衰变热功率的计算方法

放射性核素通过向外辐射粒子释放能量,辐射粒子的类型包括 α 粒子、正负电子、电磁辐射和中微子。熔岩玻璃体的质量和体积均很大。平均 1 kt TNT 当量地下核试验约产生 700 t 熔岩玻璃体^[1-2],100 kt TNT 当量地下核试验约产生 7×10^7 kg 熔岩玻璃体。熔岩玻璃体的质量密度约为 2.5 g/cm^3 ,对应熔岩玻璃体的体积为 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。设放射性核素在熔岩玻璃体内均匀分布,除中微子携带的能量发

生逃逸外,其余粒子携带的能量全部沉积在熔岩玻璃体内部,转化为热能。核素衰变热功率采用下式计算:

$$H_i(t) = 1.6 \times 10^{-16} A_i(t) E_i \quad (4)$$

式中: $H_i(t)$ 为 t 时刻核素 i 的衰变热功率, J/s; $A_i(t)$ 为 t 时刻核素 i 的放射性活度, Bq; E_i 为核素 i 发生一次放射性衰变所释放的除去中微子之外的能量, keV。

2.1 单次衰变

若核素 i 一次衰变到稳态核,只需考虑核

素 i 的衰变热功率。核素 i 的放射性活度服从指数衰减规律^[3]：

$$A_i(t) = A_i(0)e^{-\lambda_i t} \quad (5)$$

式中： $A_i(0)$ 为核素 i 的初始活度， Bq ； λ_i 为核素 i 的衰变常量， d^{-1} ； t 为距初始时刻的时间， d 。这类核素及其对应的 E_i 列于表 3， E_i 取自 ENDF/B VII 库。

表 3 单次衰变核素的衰变热^[5]

Table 3 Decay heat information of radionuclide with single disintegration^[5]

核素	E_i/keV	核素	E_i/keV	核素	E_i/keV
³⁶ Cl	297.55	¹⁵⁴ Eu	1 515.49	¹²⁹ I	74.33
⁴¹ Ca	3.11	⁷⁹ Se	55.80	¹³⁴ Cs	1 718.50
⁵⁵ Fe	5.84	⁸⁹ Sr	585.30	¹³⁵ Cs	75.70
⁶⁰ Co	2 600.77	⁹¹ Y	606.14	¹⁴¹ Ce	246.80
⁵⁹ Ni	6.92	¹⁰⁵ Rh	231.50	¹⁴⁹ Pm	375.93
⁶³ Ni	17.42	¹⁰⁷ Pd	9.87	¹⁵³ Sm	328.93
¹⁵² Eu	1 298.18	¹¹³ Cd ^m	185.72	¹⁵⁵ Eu	124.04

2.2 级联衰变

有些放射性核素经历若干次级联衰变后最终

衰变为稳态核，需计算母核产生的衰变热功率以及各级子核产生的衰变热功率。设母核的初始活度为 $A_1(0)$ ，各级子核的初始活度为 0， t 时刻母核的活度为 $A_1(t)$ ，1 级子核的活度为 $A_2(t)$ ， $k-1$ 级子核的活度为 $A_k(t)$ ， $A_1(t)$ 采用式(5)计算， $A_2(t)$ 采用式(6)计算， $A_k(t)$ 采用式(7)计算^[8]。

$$A_2(t) = A_1(0) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (6)$$

$$A_k(t) = A_1(0) (h_1 e^{-\lambda_1 t} + h_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + h_k e^{-\lambda_k t}) \quad (7)$$

其中：

$$h_1 = \frac{\lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_k}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_k - \lambda_1)}$$

$$h_2 = \frac{\lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_k}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_k - \lambda_2)}$$

$$h_k = \frac{\lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_k}{(\lambda_1 - \lambda_k)(\lambda_2 - \lambda_k) \dots (\lambda_{k-1} - \lambda_k)}$$

式中， $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ 分别为母核、一级子核、 $k-1$ 级子核的衰变常量， d^{-1} 。表 1、2 中经历级联衰变的裂变产物核素的母核 E_i ，子核 E_i 、衰变方式列于表 4。

表 4 级联衰变裂变产物核素的衰变信息

Table 4 Decay heat information of fission products with cascade disintegration

母核 A		子核 B			稳态核 C	衰变方式 ^[6]
核素	E_i/keV	核素	半衰期	E_i/keV		
⁹⁰ Sr	195.8	⁹⁰ Y	64 h	933.0	⁹⁰ Zr	A-B:100%; B-C:100%
⁹³ Zr	19.1	⁹³ Nb ^m	16.13 a	29.3	⁹³ Nb	A-B:95%; A-C:5%; B-C:100%
⁹⁵ Zr	850.4	⁹⁵ Nb ^m (B ₁)	3.61 d	249.33	⁹⁵ Mo	A-B ₁ :1.2%; A-B ₂ :98.8%; B ₁ -B ₂ :100%; B ₂ -C:100%
⁹⁹ Mo	540.9	⁹⁹ Tc ^m (B ₁)	6.01 h	142.22	⁹⁹ Ru	A-B ₁ :87.5%; A-B ₂ :12.5%; B ₁ -B ₂ :100%; B ₂ -C:100%
¹⁰³ Ru	562.2	¹⁰³ Rh ^m	56.114 min	38.9	¹⁰³ Rh	A-B:99.75%; A-C:0.25%; B-C:100%
¹⁰⁶ Ru	10.03	¹⁰⁶ Rh	30.07 s	1 620.0	¹⁰⁶ Pd	A-B:100%; B-C:100%
¹²¹ Sn ^m	40.63	¹²¹ Sn	27.03 h	115.80	¹²¹ Sb	A-B:97.76%; A-C:2.24%; B-C:100%
¹²⁵ Sb	533.6	¹²⁵ Te ^m	57.4 d	145.42	¹²⁵ Te	A-B:23%; B-C:100%
¹²⁶ Sn	165.8	¹²⁶ Sb ^m (B ₁)	11.0 s	22.7	¹²⁶ Te	A-B ₁ :66.5%; A-B ₂ :33.5%; B ₁ -B ₂ :100%; B ₂ -B ₃ :14%; B ₂ -C:86%; B ₃ -C:100%
		¹²⁶ Sb ^m (B ₂)	19.15 min	2 164.7		
		¹²⁶ Sb(B ₃)	12.35 d	3 027.4		
¹²⁷ Sb	972.5	¹²⁷ Te ^m (B ₁)	109 d	93.7	¹²⁷ I	A-B ₁ :17.4%; A-B ₂ :82.6%; B ₁ -B ₂ :97.6%; B ₁ -C:2.4%; B ₂ -C:100%
		¹²⁷ Te(B ₂)	9.35 h	229.4		
¹³² Te	344.9	¹³² I	2.295 h	2 744.5	¹³² Xe	A-B:100%; B-C:100%
¹³⁷ Cs	179.4	¹³⁷ Ba ^m	2.55 min	661.7	¹³⁷ Ba	A-B:94.6%; A-C:5.4%; B-C:100%
¹⁴⁰ Ba	500.7	¹⁴⁰ La	1.68 d	2 852.7	¹⁴⁰ Ce	A-B:100%; B-C:100%
¹⁴³ Ce	724	¹⁴³ Pr	13.57 d	315.10	¹⁴³ Nd	A-B:100%; B-C:100%
¹⁴⁴ Ce	110.6	¹⁴⁴ Pr ^m (B ₁)	7.2 min	58.5	¹⁴⁴ Nd	A-B ₁ :1.5%; A-B ₂ :98.5%; B ₁ -B ₂ :99.96%; B ₁ -C:0.04%; B ₂ -C:100%
		¹⁴⁴ Pr(B ₂)	17.28 min	1 237		
¹⁴⁷ Nd	412.25	¹⁴⁷ Pm	2.62 a	61.79	¹⁴⁷ Sm	A-B:100%; B-C:100%
¹⁵¹ Pm	626.5	¹⁵¹ Sm	90 a	19.82	¹⁵¹ Eu	A-B:100%; B-C:100%

铀系核素经历多次 α 衰变和 β 衰变最终衰变为稳态核素,子核有十几种,按式(7)逐一计算各子核活度非常繁琐。由于在计算时间范围内衰变链尾部子核的活度远小于母核的活度,尾部子核放射性衰变产生的衰变热功率很小,高正明等^[7]在计算 WgPu 材料衰变热功率时只计算每

种核素的前 1~3 次级联衰变热功率。本文采取以下近似措施:在计算时间段内,若某级子核的活度均小于前驱核最高活度的 0.1%,则忽略该子核及后续子核的放射性衰变热功率。表 5 列出铀系核素及其需考虑的各级子核。母核与子核的活度分别采用式(5)、(6)、(7)计算。

表 5 铀系核素的衰变信息
Table 5 Decay heat information of actinides

母核		子核 1			子核 2		
核素	E_i/keV	核素	半衰期	E_i/keV	核素	半衰期	E_i/keV
^{236}U	4 562	—	—	—	—	—	—
^{237}Np	4 958	^{233}Pa	26.975 d	414.6	^{233}U	$1.592 \times 10^5 \text{ a}$	4 895
^{238}Pu	5 589.9	^{234}U	$2.455 \times 10^5 \text{ a}$	4 855	^{230}Th	$7.538 \times 10^4 \text{ a}$	4 760
^{239}Pu	5 243.23	—	—	—	—	—	—
^{240}Pu	5 252.2	—	—	—	—	—	—
^{241}Pu	5.36	^{241}Am	432.6 a	5 628	—	—	—
^{241}Am	5 628	—	—	—	—	—	—
^{242}Pu	4 982.34	—	—	—	—	—	—

3 计算结果

采用以上方法计算核试验后 10~300 000 d 时间段内熔岩玻璃体核素衰变产生的热功率,结果示于图 1。从图 1 可见,核素衰变热功率分 3 个时间段:10~2 000 d、2 000~60 000 d 和 60 000 d 之后。3 个时间段内衰变热功率分别近似为直线,说明热功率随时间呈幂函数衰减;各时间段内直线斜率的绝对值依次减小,说明热功率下降速度逐渐变慢。在 10~2 000 d 阶段,短寿命裂变产物核素的热功率占主要部分,短寿命裂变产物核素的半衰期短,放射性活度衰减快,因此,热功率衰减速度最快。在

2 000~60 000 d 阶段,长寿命裂变产物核素的热功率占主要部分;60 000 d 后铀系元素的热功率占主要部分,铀系元素的半衰期非常长,核素衰变热功率衰减速度很慢。

设熔岩玻璃体的体积比热容为 $2 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$,在不考虑热量扩散的情况下,核素每天衰变释放的热量对熔岩玻璃温度的增长量示于图 2。

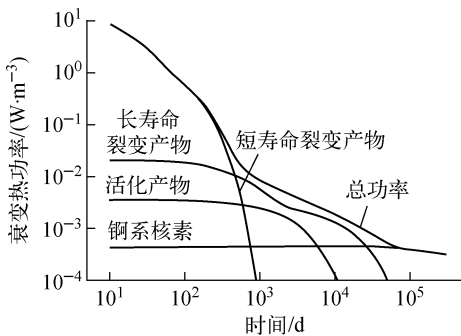


图 1 核素衰变热功率计算结果

Fig. 1 Decay heat power calculation results

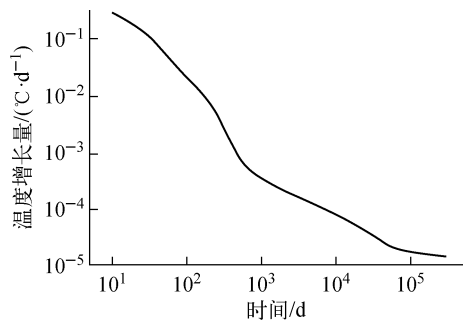


图 2 每天熔岩玻璃体温度增长量
Fig. 2 Temperature increase per day in melt glass

根据化学反应动力学公式,温度与熔岩玻璃体溶解速度之间存在以下关系^[1,8]:

$$\ln \frac{L_2}{L_1} = \frac{E_a}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \quad (8)$$

式中: T_1 、 T_2 为熔岩的温度, K; L_1 、 L_2 分别为 T_1 、 T_2 对应的熔岩玻璃体溶解速度, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; E_a 为熔岩玻璃体溶解反应的活化能, cal/mol ; R 为理想气体常数, $1.985\ 877\ 5\ \text{cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。熔岩玻璃体的温度为 T_1 , 加上核素衰变热功率对熔岩温度的增长量后为 T_2 , 通过上式计算核素衰变热功率对熔岩玻璃体溶解速度的相对增长量 $(L_2 - L_1)/L_1$ (E_a 取 $20\ \text{kcal}/\text{mol}$ ^[1], 熔岩玻璃体的温度采用地下核试验场 CHESHIRE 的熔岩温度的模拟结果^[7]), 结果列于表 6。从表 6 可知, 核素衰变热功率对熔岩温度和玻璃溶解速度的影响不大, 且随时间逐渐减弱, 1 000 d 后影响已非常小。

表 6 核素衰变热功率对熔岩玻璃体溶解速度的影响
Table 6 Influence of decay heat power for radionuclides on melt glass dissolution rate

时间/d	熔岩玻璃体温度 ^[9] /°C	熔岩玻璃体温度增长量/ (°C · d ⁻¹)	$(L_2 - L_1)/L_1$
10 ¹	236	3.76×10^{-1}	1.5×10^{-2}
10 ²	161	2.54×10^{-2}	1.4×10^{-3}
10 ³	84	3.71×10^{-4}	2.9×10^{-5}
10 ⁴	41	8.19×10^{-5}	8.4×10^{-6}
10 ⁵	38	1.70×10^{-5}	1.8×10^{-6}

4 结论

综上所述, 熔岩玻璃体内核素衰变热功率呈幂函数衰减, 且衰减速度逐渐减慢。10 ~ 2 000 d, 短寿命裂变产物核素衰变热功率占主要部分; 2 000 ~ 60 000 d, 长寿命裂变产物核素热功率占主要部分; 60 000 d 之后, 锕系元素热功率占主要部分。核素衰变热功率对熔岩玻璃体温度和溶解速度的影响不大, 且随时间逐渐减弱, 1 000 d 后影响已非常小。

参考文献:

[1] PAWLOSKI G A, TOMPSON A F B, CARLE S F, et al. Evaluation of the hydrologic source

term from underground nuclear tests on Pahute Mesa at the Nevada Test Site; The CHESHIRE test[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2001.

- [2] TOMPSON A F B, BRUTON C J, PAWLOSKI G A. On the evaluation of groundwater contamination from underground nuclear tests[J]. Environmental Geology, 2002, 42: 235-247.
- [3] 卢希庭, 江栋兴, 叶沿林. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 23-25.
- [4] IAEA. The radiological situation at the atolls of mururoa and fangataufa technical report, volume 3: Inventory of radionuclides underground at the atolls[R]. Vienna: IAEA, 1998.
- [5] HERMAN M, PRITYCHENKO B, SONZOGNI A A. Evaluated nuclear data file (ENDF) retrieval & plotting ENDF/B-VII. 1 library [DB/OL]. 2011 [2012-09-01]. <http://www.nndc.bnl.gov/sigma>.
- [6] NICHOLS A L. Nuclear data requirements for decay heat calculations[R/OL]. Vienna: IAEA, 2002 [2012-03-11]. http://www.ictp.it/~pub_off/lectures/lms020/Nichols/Nichols.pdf.
- [7] 高正明, 何彬, 赵娟, 等. 武器级钚材料衰变热功率数值计算与分析[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(2): 240-242.
GAO Zhengming, HE Bin, ZHAO Juan, et al. Numeric calculation and analysis of decay heating power of WgPu[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(2): 240-242(in Chinese).
- [8] 包敏, 王群书. 熔岩玻璃体核素²³⁹Pu 和⁹⁰Sr 释放量的计算[J]. 辐射防护, 2013, 33(3): 151-157.
BAO Min, WANG Qunshu. Calculation of radionuclides ⁹⁰Sr and ²³⁹Pu releasing amount from melt glass[J]. Radiation Protection, 2013, 33(3): 151-157(in Chinese).
- [9] 包敏, 王群书. 地下核试验近场水-热运移数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(8): 1 445-1 449.
BAO Min, WANG Qunshu. Water and heat flow simulation after underground nuclear test[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(8): 1 445-1 449(in Chinese).