

用落下灰 Ge(Li) γ 能谱中 ^{95}Zr - ^{95}Nb 谱峰估算核爆日期

龐巨丰 郑桂芳

(陕西省卫生防疫站)

本文报告了用核爆后放射性落下灰 Ge(Li) γ 能谱中, ^{95}Zr - ^{95}Nb γ 射线峰面积比估算核爆日期的方法。即利用 ^{95}Zr 与 ^{95}Nb 在某测量时刻的 γ 辐射比来估算核爆日期。研究了不同的峰面积计算方法对估算结果的影响。用我国 1976 年元月 23 日核试验放射性落下灰的 Ge(Li) γ 能谱进行检验, 结果表明, 用 $R_{03} = ^{95}\text{Zr}(757 \text{ keV}) / ^{95}\text{Nb}(766 \text{ keV})$ 和 $R_{01} = [^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV}) + ^{95}\text{Zr}(757 \text{ keV})] / ^{95}\text{Nb}(766 \text{ keV})$ 两种 γ 辐射比来估算核爆日期较好, 前者于核爆后 40 天之前, 后者于 40 天之后较适用。在本研究的几种峰面积计算方法中, 最好用高斯函数拟合和沃森-斯特林斯基 (Wasson-Sterlinski) 方法, 尤其在距核爆期较近又无电子计算机的情况下, 沃森-斯特林斯基法更适用。

前 言

估算核爆日期, 过去已提出了几种方法^[1~8], 归纳起来, 有四大类: (1) 衰变曲线法; (2) 铝片吸收法; (3) 放化分析法; (4) γ 能谱分析法。衰变曲线法和铝片吸收法都是利用裂变产物混合的总体特性, 比较繁琐。放化分析法, 则是利用放射性落下灰中, 各个裂片核素所占的分额及其爆后随时间的变化特性。放射性落下灰中, 各个裂片核素所占的分额与爆后所经过的时间有一定的关系, 两种裂片核素含量之比值同样与爆后时间有一定的关系, 利用该比值与时间的关系特性就可以确定核爆日期, 但是由于核爆裂片的“分凝”特性, 随核武器的当量、爆炸的方式、核爆时气象条件以及收集落下灰地点与爆心的距离等不同, 每次爆炸后, 落下灰中各裂片核素所占分额以及两种核素含量之比值是有差异的。另外, 放化分析程序复杂, 核素分析结果误差较大, 给核爆日期的估算带来较大的误差。随着高分辨率 Ge(Li) 探测器的出现及应用, 采用 γ 能谱分析的方法, 确定核爆落下灰中裂片核素的含量比, 简单方便。适当选择一对核素, 测定其放射性强度比来估算核爆日期的方法, 可以选择质量数不同的一对同位素, 如 ^{97}Zr 和 ^{95}Zr 等^[5,6]。但是, 要求两种同位素衰变链相似, 并且不发生显著的“分凝”作用。如果选用同一衰变链、质量数相同、放射 γ 射线的两种核素活性比时, 就不必考虑“分凝”作用了。1972 年带刀正提出用 ^{95}Zr 与 ^{95}Nb 的活性比估算核爆日期^[9]。由于 ^{95}Zr 的 γ 射线能量 724 keV, 757 keV 与 ^{95}Nb 的 766 keV 很接近, 只有 Ge(Li) γ 能谱才有可能使它们的全能峰分辨开, 才有可能利用 ^{95}Zr 和 ^{95}Nb 的谱峰面积来估算核爆日期。他研究了 γ 峰面积比可能选取的四种情况: $[^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV}) + ^{95}\text{Zr}(757 \text{ keV})] / ^{95}\text{Nb}(766 \text{ keV})$, $^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV}) / ^{95}\text{Nb}(766 \text{ keV})$, $^{95}\text{Zr}(757 \text{ keV}) / ^{95}\text{Nb}(766$

$$+ \left[\frac{A_{20}T_2}{T_2-T_3} + \frac{\beta_2 A_{10}T_1T_2}{(T_2-T_1)(T_2-T_3)} \right] 2^{-(t-t_0)/T_2}$$

$$+ \left[A_{30} + \frac{A_{20}T_2}{T_3-T_2} + \frac{\beta_1 A_{10}T_1}{T_3-T_1} + \frac{\beta_2 A_{10}T_1T_3}{(T_3-T_1)(T_3-T_2)} \right] 2^{-(t-t_0)/T_3}$$

故在测量时刻 t , ^{95}Zr 与 ^{95}Nb 的放射性强度比值为:

$$R = \frac{A_1}{A_3}$$

即

$$R = \left\{ \frac{T_1}{T_1-T_3} \left(\beta_1 + \frac{\beta_2 T_1}{T_1-T_2} \right) + \frac{\beta_2 T_1 T_2}{(T_2-T_1)(T_2-T_3)} 2^{-\frac{(T_1-T_2)(t-t_0)}{T_1 T_2}} \right.$$

$$+ \frac{T_1}{T_3-T_1} \left(\beta_1 + \frac{\beta_2 T_3}{T_3-T_2} \right) 2^{-\frac{(T_1-T_3)(t-t_0)}{T_1 T_3}}$$

$$+ \frac{A_{20}}{A_{10}} \cdot \frac{T_2}{(T_2-T_3)} \left[2^{-\frac{(T_1-T_2)(t-t_0)}{T_1 T_2}} - 2^{-\frac{(T_1-T_3)(t-t_0)}{T_1 T_3}} \right]$$

$$\left. + \frac{A_{30}}{A_{10}} 2^{-\frac{(T_1-T_3)(t-t_0)}{T_1 T_3}} \right\}^{-1} \quad (1)$$

根据上述裂变链所给出的独立产额百分数可见, $^{95\text{m}}\text{Nb}$ 和 ^{95}Nb 的独立产额比 ^{95}Zr 的累积产额低得多。因此, 可以认为: $t=t_0$ 即核爆时刻, $^{95\text{m}}\text{Nb}$ 和 ^{95}Nb 的活性为零, 即 $A_{20}=A_{30}=0$, 那么(1)式变为:

$$R_0 = \left[\frac{T_1}{T_1-T_3} \left(\beta_1 + \frac{\beta_2 T_1}{T_1-T_2} \right) + \frac{\beta_2 T_1 T_2}{(T_2-T_1)(T_2-T_3)} 2^{-\frac{(T_1-T_2)(t-t_0)}{T_1 T_2}} \right.$$

$$\left. + \frac{T_1}{T_3-T_1} \left(\beta_1 + \frac{\beta_2 T_3}{T_3-T_2} \right) 2^{-\frac{(T_1-T_3)(t-t_0)}{T_1 T_3}} \right]^{-1} \quad (2)$$

将 $T_1=63.98$ 天, $T_2=3.608$ 天, $T_3=35.15$ 天, $\beta_1=0.98$, $\beta_2=0.02$ 代入(2)式, 则可得 R_0 随 $(t-t_0)$, 即随测量时刻与核爆时刻的时间间隔变化的函数关系。

由于 ^{95}Zr 发射两种主要能量的 γ 射线: 724 keV, 757 keV, 其分支比分别为 γ_1, γ_2 (253 keV γ 射线分支比较小, 不予考虑)。 ^{95}Nb 只有一种能量的 γ 射线, 分支比为 γ_3 。因此, 考虑 ^{95}Zr 与 ^{95}Nb 的活性比, 则可变为求它们的 γ 射线辐射强度比。我们考虑下面四种情况:

$$R_{01} = \frac{^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV}) + ^{95}\text{Zr}(757 \text{ keV})}{^{95}\text{Nb}(766 \text{ keV})}, \quad R_{02} = \frac{^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV})}{^{95}\text{Nb}(766 \text{ keV})},$$

$$R_{03} = \frac{^{95}\text{Zr}(757 \text{ keV})}{^{95}\text{Nb}(766 \text{ keV})}, \quad R_{04} = \frac{^{95}\text{Zr}(724 \text{ keV})}{^{95}\text{Zr}(757 \text{ keV}) + ^{95}\text{Nb}(766 \text{ keV})}.$$

即

$$\begin{cases} R_{01} = \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\gamma_3} \right) R_0, & R_{02} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_3} \right) R_0, \\ R_{03} = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_3} \right) R_0, & R_{04} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2 R_0 + \gamma_3} \right) R_0. \end{cases} \quad (3)$$

将 $\gamma_1=0.43$, $\gamma_2=0.55$, $\gamma_3=0.99$ 代入(3)式得:

$$\begin{cases} R_{01} = \frac{0.98}{0.99} R_0, & R_{02} = \frac{0.43}{0.99} R_0, \\ R_{03} = \frac{0.55}{0.99} R_0, & R_{04} = \frac{0.43 R_0}{0.55 R_0 + 0.99}. \end{cases} \quad (4)$$

这样, 由公式(2)和(4)则可用电子计算机算出 $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$ 随核爆后的时间

间隔($t-t_0$)变化数据表或曲线。

如果实验上测得 ^{95}Zr (724 keV, 757 keV), ^{95}Nb (766 keV) γ 射线峰面积 S_1, S_2, S_3 ; 其对应峰面积效率分别为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 。

$$\text{则} \begin{cases} R_{01} = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3 S_1 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 S_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 S_3}, & R_{02} = \frac{\varepsilon_3 S_1}{\varepsilon_1 S_3}, \\ R_{03} = \frac{\varepsilon_3 S_2}{\varepsilon_2 S_3}, & R_{04} = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3 S_1}{\varepsilon_1 \varepsilon_3 S_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 S_3}. \end{cases} \quad (5)$$

基于三种 γ 射线能量比较接近, 可以近似令其效率相等, 即 $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \approx \varepsilon_3$, 这时 (5) 式可变为:

$$\begin{cases} R_{01} = \frac{S_1 + S_2}{S_3}, & R_{02} = \frac{S_1}{S_3}, \\ R_{03} = \frac{S_2}{S_3}, & R_{04} = \frac{S_1}{S_2 + S_3}. \end{cases} \quad (6)$$

由实验测得三个 γ 全能峰面积, 代入 (6) 或 (5) 算得 $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$ 的实验值后, 再由 (4) 式理论上计算的它们随 ($t-t_0$) 变化的数据表或曲线, 即可查出核爆与测量时刻的时间间隔 ($t-t_0$), 从而算出核爆炸日期 t_0 。

实验结果和讨论

1976 年 1 月 23 日我国核试验后, 在上海收集了放射性落下灰, 应用了 Ge(Li) 探测器(80 cc)和 4000 道脉冲振幅分析器构成的半导体 γ 谱仪进行测量。同一个样品于 1976 年 2 月 17 日、2 月 27 日和 4 月 9 日测得的 γ 能谱中, ^{95}Zr - ^{95}Nb γ 谱段分别如图 1、图 2 和图 3 所示。图中所描绘的谱是经过最小二乘法作四次数据光滑后的能谱^[12]。显而易见, 在

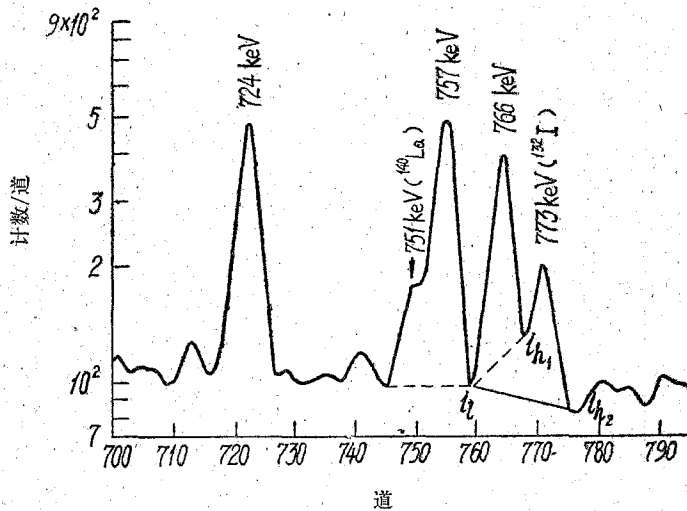


图 1 76.2.17 测得的落下灰 Ge(Li) γ 谱中 ^{95}Zr - ^{95}Nb γ 能谱段 (四次光滑)

图 1、2 的两个谱中, 除了 ^{95}Zr - ^{95}Nb 的 724 keV、757 keV 和 766 keV γ 射线峰外, 还较明显的存在 ^{132}I 的 773 keV 和 ^{140}La 的 751.5 keV 的 γ 射线峰, 它们分别是 ^{132}Te 和 ^{140}Ba 衰变的子体核素。

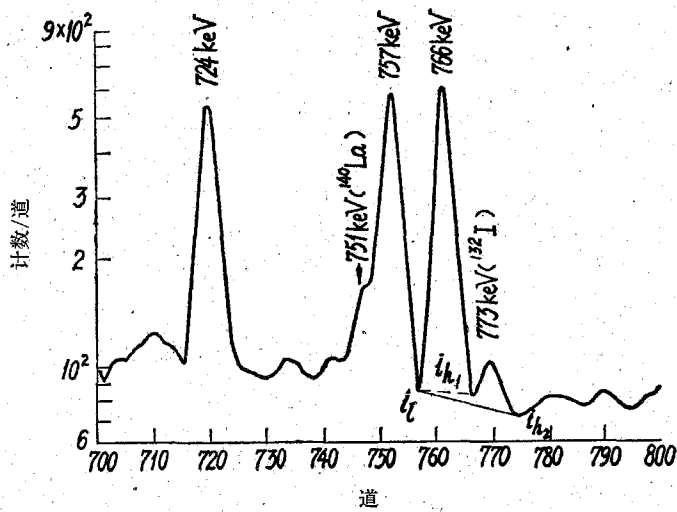


图 2 76.2.27 测得的落下灰 Ge(Li) γ 谱中 ^{95}Zr - ^{95}Nb γ 能谱段 (四次光滑)

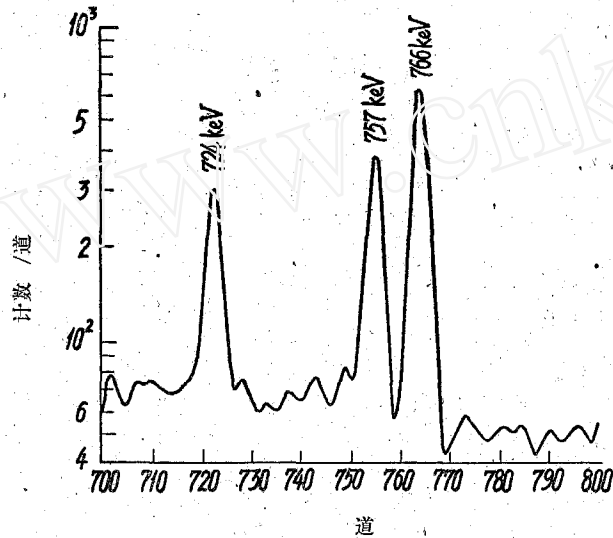


图 3 76.4.9 测得的落下灰 Ge(Li) γ 谱中 ^{95}Zr - ^{95}Nb γ 能谱段 (四次光滑)

本文研究了四种计算全能峰面积的方法：高斯函数非线性最小二乘拟合法^[12]，改型双曲正割函数非线性最小二乘拟合法^[12]，沃森(Wasson)面积法^[13](简称 W 法)，沃森-斯特林斯基(Wasson-Sterlinski)面积法^[13](简称 W-S 法)。后面两种方法属于计数累加法，是目前为止计数累加法中较好的方法。高斯函数和改型双曲正割函数拟合法，是由电子计算机自动确定边界，做指数函数基底扣除，并且与峰址为中心，道数少的一侧为参考自动作对称化后拟合求面积。像图 1 的重迭峰中，766 keV 峰的边界，基本上如虚线($i_l \sim i_{h_1}$)所示。对于 W 法和 W-S 法，像图 1 这样的重迭峰中，766 keV 峰扣基底的边界，两种选取方法，如图中的虚线($i_l \sim i_{h_1}$)和实线($i_l \sim i_{h_2}$)，都作了计算。并且峰面积计算时，峰址的两侧各取 3 道($n=3$)，共计用了 7 道。同时，分别探讨了 4 次、2 次数据光滑和不光滑对峰面积计算的影响。

表 1、表 2 分别列出了 ^{95}Zr - ^{95}Nb 724 keV、757 keV、766 keV γ 射线全能峰面积以及按公式 (5) 和 (6) 计算的 $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$ 的实验测量结果。表 1 中列出的 W 和 W-S 面积, 对于像图 1 的迭加峰, 766 keV 扣基底的边界是取 $i_{l_2} \sim i_{h_2}$ (实线) 的结果。

表 1 ^{95}Zr - ^{95}Nb Ge(Li) γ 谱峰面积计算结果

测量日期	光滑次数	峰面积号*	高斯函数	改型双反正割	W 法	W-S 法
1976年 2月17日	0	S_1	/**	/	1509.7	3831.2
		S_2			1510.3	4015.3
		S_3			1160.4	3049.8
	2	S_1	1639.3	1667.4	1596.6	4034.5
		S_2	1399.6	1391.6	1606.4	4139.0
		S_3	1086.7	1071.0	1225.8	3146.7
	4	S_1	1676.7	1668.6	1604.2	4010.2
		S_2	1384.1	1427.3	1631.9	4132.6
		S_3	1080.2	1088.8	1246.6	3151.7
1976年 2月27日	0	S_1	1625.4	1655.0	1746.0	4630.0
		S_2	1750.4	1791.3	1996.3	5219.0
		S_3	2064.7	2143.3	2321.8	5404.4
	2	S_1	1744.8	1737.1	1737.1	4542.6
		S_2	1793.1	1793.1	2019.0	5188.5
		S_3	2030.9	2030.9	2085.5	5430.4
	4	S_1	1800.6	1842.2	1771.8	4547.7
		S_2	1837.8	1784.8	2060.7	5209.9
		S_3	2038.5	2024.6	2122.4	5435.1
1976年 4月9日	0	S_1	945.2	/	892.4	2406.5
		S_2	1187.6		1190.0	3233.0
		S_3	2255.1		2284.4	6071.5
	2	S_1	1001.7	1044.4	908.7	2394.3
		S_2	1239.8	1213.0	1220.3	3233.5
		S_3	2356.6	2382.0	2327.2	6047.0
	4	S_1	1000.6	1036.5	927.5	2394.1
		S_2	1252.6	1239.3	1234.5	3213.1
		S_3	2419.4	2433.4	2365.1	6046.1

* S_1, S_2, S_3 分别为 724, 757, 766 keV 峰面积; ** 划斜道的是因为其中有一个峰迭代发散, 结果均未列出。

利用 DJS-14 型电子计算机, 由公式(2)和(4), 比值 $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$ 随核爆后的时间间隔 $(t-t_0)$ 的变化, 理论计算结果示于图 4。由表 2 所列的实验值与图 4 的理论值进行比较, 则可求出 $(t-t_0)$ 值, 如表 3 所列的结果, 从而得到核爆日期 t_0 值。

1. 峰面积效率修正对估算核爆日期的影响 按公式(6)计算 $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$ 时, 比较简便。但是 724 keV 与 766 keV γ 射线能量的差异常常是不能忽视的, 应该考虑峰面积效率的修正, 即按(5)式计算。表 3 所列的结果, 在作效率修正时, 不管计算峰面积用什么方法, 修正系数均是相同的。表 3 数字表明, 经过效率修正, 结果比较满意。也就是说, 用公式(5)计算 $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$ 的实验值较好。

表 2 γ 辐射强度比值的实验测量结果

测量日期	光滑次数	比 值	高 斯 函 数		改型双曲正割		W 法		W-S 法	
			(6)	(5)	(6)	(5)	(6)	(5)	(6)	(5)
1976年 2月17日	0	R_{01}					2.603	2.516	2.573	2.488
		R_{02}	/	/	/	/	1.301	1.235	1.256	1.192
		R_{03}	/	/	/	/	1.302	1.281	1.317	1.296
		R_{04}					0.5653	0.5412	0.5423	0.5347
	2	R_{01}	2.796	2.699	2.856	2.756	2.613	2.526	2.597	2.511
		R_{02}	1.508	1.431	1.557	1.478	1.302	1.236	1.282	1.217
		R_{03}	1.288	1.268	1.299	1.278	1.310	1.289	1.315	1.294
		R_{04}	0.6593	0.6313	0.6771	0.6483	0.5637	0.5398	0.5530	0.5302
	4	R_{01}	2.833	2.734	2.843	2.744	2.596	2.510	2.584	2.498
		R_{02}	1.552	1.473	1.532	1.454	1.287	1.221	1.272	1.207
		R_{03}	1.281	1.261	1.311	1.290	1.309	1.288	1.311	1.290
		R_{04}	0.6804	0.6507	0.6632	0.6350	0.5573	0.5336	0.5505	0.5271
1976年 2月27日	0	R_{01}	1.635	1.581	1.608	1.555	1.842	1.783	1.821	1.762
		R_{02}	0.7872	0.7471	0.7722	0.7328	0.8593	0.8155	0.8567	0.8130
		R_{03}	0.8478	0.8343	0.8358	0.8225	0.9825	0.9669	0.9640	0.9487
		R_{04}	0.4260	0.4072	0.4206	0.4020	0.4335	0.4146	0.4332	0.4172
	2	R_{01}	1.742	1.684	/	/	1.801	1.743	1.792	1.734
		R_{02}	0.8592	0.8154	/	/	0.8528	0.7904	0.8365	0.7938
		R_{03}	0.8830	0.8620	/	/	0.9681	0.9527	0.9555	0.9403
		R_{04}	0.4568	0.4362	/	/	0.4232	0.4044	0.4278	0.4091
	4	R_{01}	1.785	1.725	1.791	1.731	1.806	1.748	1.795	1.7374
		R_{02}	0.8833	0.8572	0.9099	0.8635	0.8348	0.7922	0.8367	0.7940
		R_{03}	0.9016	0.8873	0.8816	0.8676	0.9709	0.9555	0.9586	0.9434
		R_{04}	0.4645	0.4441	0.4836	0.4623	0.4236	0.4051	0.4272	0.4086
1976年 4月9日	0	R_{01}	0.9458	0.9160	/	/	0.9116	0.8834	0.9288	0.9002
		R_{02}	0.4191	0.3977	/	/	0.3906	0.3707	0.3964	0.3762
		R_{03}	0.5266	0.5182	/	/	0.5209	0.5126	0.5325	0.5240
		R_{04}	0.2746	0.2619	/	/	0.2569	0.2450	0.2586	0.2468
	2	R_{01}	0.9512	0.9211	0.9477	0.9172	0.9148	0.8866	0.9307	0.9020
		R_{02}	0.4251	0.4034	0.4385	0.4161	0.3905	0.3706	0.3959	0.3757
		R_{03}	0.5261	0.5177	0.5092	0.5011	0.5244	0.5161	0.5347	0.5262
		R_{04}	0.2785	0.2657	0.2905	0.2771	0.2562	0.2444	0.2580	0.2462
	4	R_{01}	0.9313	0.9020	0.9352	0.9054	0.9141	0.8858	0.9274	0.8988
		R_{02}	0.4136	0.3925	0.4260	0.4043	0.3922	0.3722	0.3960	0.3758
		R_{03}	0.5177	0.5095	0.5093	0.5012	0.5220	0.5137	0.5314	0.5230
		R_{04}	0.2725	0.2600	0.2822	0.2692	0.2577	0.2458	0.2586	0.2467

2. 能谱数据光滑对估算核爆日期的影响 一般来说,对于弱放射源、统计涨落比较大的 γ 能谱,在峰面积计算之前,都应该进行数据光滑。光滑次数的多少,要视统计涨落的大小而定。在本实验的条件下,数据光滑对核爆日期的估算结果,影响不太显著。但是仔细分析表3的结果,总的来说,数据光滑的结果还是比较好的,因为数据光滑消除了峰边界计数统计涨落对结果产生的影响。W-S峰面积法,本身已考虑到减少边界道计数统计

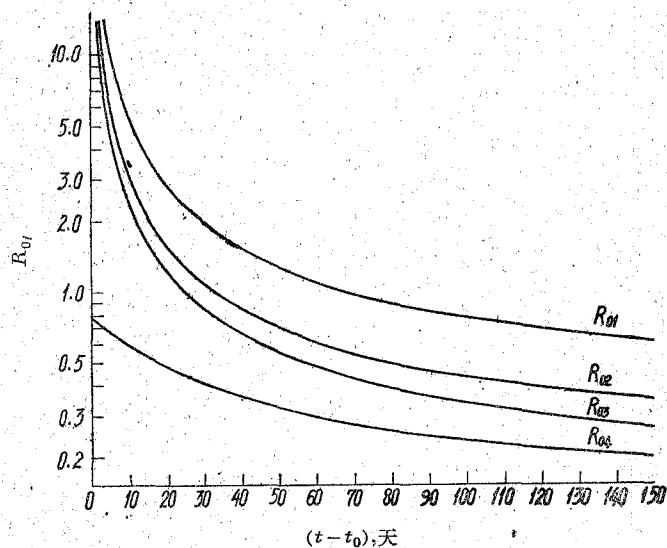


图 4 $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}-\gamma$ 辐射比 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 、 R_{04} 随 $(t-t_0)$ 变化的理论曲线

涨落对峰面积精度的影响，增加高计数道的权重。因而，用 W-S 法计算面积时，能谱数据光滑对核爆日期的估算，影响更小。

3. 用 W 和 W-S 峰面积法时，扣基底边界的选取对估算核爆日期的影响 在峰面积的计算中，扣基底边界的选取往往对结果影响较大，尤其在重迭峰的情况下，更显得重要。在距核爆日期较近的落下灰能谱中， $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ 的 γ 射线谱峰，受到 ^{132}I 773 keV 和 ^{140}La 715.5 keV γ 射线峰的干扰(如图 1, 2)。在 W 和 W-S 峰面积法中，我们采用两种边界 $i_l \sim i_{h_1}$ (图 1 虚线)和 $i_l \sim i_{h_2}$ (图 1 实线)扣基底后，计算面积以估算核爆日期，结果列于表 4，对于距核爆日期较远测得的 γ 谱， $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ 的 γ 谱峰受到干扰较小(如图 3)，没有明显的迭加峰，边界的选取就比较容易。

表 4 的结果说明，用 W 和 W-S 峰面积法估算核爆日期时，766 keV γ 峰扣基底的边界取宽一些，即 $i_l \sim i_{h_2}$ 比较好(距核爆期较近时)。

4. 用 W 和 W-S 峰面积法时，面积区宽度(即 n 值)对估算核爆日期的影响 对于 Ge(Li) γ 谱峰，用 W 和 W-S 法计算峰面积时，一般取 $n=3$ ，即面积区为 $2n+1=7$ 道。但是，在重迭峰的情况下，为了减小线性基底扣除的影响，统计涨落不太厉害时，取 $n=2$ ，即峰面积区为 $2n+1=5$ 道，也许准确度会提高。为此，我们比较了 $n=2$ 和 $n=3$ 时，核爆日期估算结果的差异，如表 5 所列。

表 5 的结果说明，2 月 17 日和 27 日的测量结果，由于 766 keV 峰受到其它 γ 峰的干扰，形成重迭峰，峰面积区宽度取得窄一点较好。而 4 月 9 日的测量结果，由于距核爆日期较远， $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ γ 峰受到的干扰较小，各峰分离较开，因而峰面积区取得宽一些较好。宽一些，某种程度上减少统计涨落带来的不确定性。

5. 峰面积计算方法以及 γ 辐射比值的选择对核爆日期估算结果的影响 表 3, 4, 5 所列的结果说明，四种峰面积计算方法中，高斯函数拟合法和 W-S 法比较好。这两种方法在没有电子计算机的情况下，均可用台式电动计算机或电子计算器进行^[14]。W-S 法比较简便，更宜于推广应用。

表 3 ($t-t_0$) 的 估 算 值

测量日期	光滑次数	面积 计算法*	测量日期与核爆日期之时间间隔, 天								真 值
			按 (6) 式 计 算				按 (5) 式 计 算				
			R_{01}	R_{02}	R_{03}	R_{04}	R_{01}	R_{02}	R_{03}	R_{04}	
1976年 2月17日	0	I	/	/	/	/	/	/	/	/	25.0
		II	21.3	18.4	24.1	11.4	22.1	19.5	24.6	13.4	
		III	21.5	19.2	23.8	13.1	22.3	20.3	24.2	13.9	
		IV									
	2	I	19.7	15.8	24.4	5.4	20.4	16.7	24.8	7.1	
		II	19.2	15.2	24.2	4.5	20.0	16.1	24.6	9.4	
		III	21.2	18.4	24.0	11.6	22.0	19.5	24.4	13.5	
		IV	21.3	18.7	23.9	12.4	22.1	19.8	24.3	14.3	
	4	I	19.4	15.3	24.6	4.3	20.1	16.1	25.0	5.9	
		II	19.3	15.5	23.9	5.2	20.1	16.4	24.4	6.8	
		III	21.3	18.7	24.0	12.1	22.1	19.7	24.4	14.0	
		IV	21.4	18.9	23.9	12.6	22.2	20.0	24.4	14.6	
1976年 2月27日	0	I	35.9	32.3	39.4	26.5	37.4	34.3	40.2	29.5	35.0
		II	36.6	33.0	40.1	27.3	38.1	35.0	40.9	30.5	
		III	31.3	29.2	33.2	25.4	32.5	31.0	35.8	28.3	
		IV	31.7	29.3	33.9	25.0	32.9	31.1	34.6	27.9	
	2	I	33.4	29.2	37.3	22.2	34.7	31.0	38.3	25.0	
		II	/	/	/	/	/	/	/	/	
		III	32.1	30.2	33.7	26.9	33.3	32.1	34.4	30.0	
		IV	32.3	30.1	34.3	26.2	33.5	31.9	34.9	29.2	
	4	I	32.4	28.3	36.7	21.2	33.7	29.3	37.4	23.9	
		II	32.3	27.3	37.7	19.0	33.6	29.0	38.4	21.5	
		III	32.0	30.1	33.6	26.9	33.2	32.0	34.3	29.9	
		IV	32.2	30.1	34.1	26.3	33.5	31.9	34.8	29.3	
1976年 4月9日	0	I	71.8	70.8	72.6	69.9	75.2	76.2	74.3	77.3	77.0
		II	/	/	/	/	/	/	/	/	
		III	75.6	78.2	73.7	80.6	79.1	84.5	75.4	89.5	
		IV	73.6	76.6	71.5	79.4	77.0	82.6	73.1	88.0	
	2	I	71.2	69.4	72.7	67.8	74.5	74.7	74.4	74.9	
		II	71.6	66.5	76.1	62.0	75.0	71.5	77.9	68.5	
		III	75.2	78.3	73.0	81.1	78.7	84.5	74.7	89.9	
		IV	73.4	76.7	71.1	79.9	76.8	82.8	72.7	88.5	
	4	I	73.4	72.1	74.4	71.0	76.8	77.7	76.1	65.9	
		II	72.9	69.2	76.1	65.9	76.4	74.5	77.9	72.9	
		III	75.3	77.8	73.5	80.1	78.8	84.0	75.2	88.8	
		IV	73.8	76.7	71.7	79.5	77.2	82.9	73.3	88.1	

* I, II, III, IV 分别代表高斯函数拟合法、改型双曲正割函数拟合法、W法、W-S法。

R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 、 R_{04} 四个比值, 对核爆日期估算结果影响非常大。虽然从理论上来说, 应该是会得到同样结果; 但实际上, 由于峰面积计算结果的不确定性, 半衰期、 γ 射线分支比等参数的不确定性, 用它们估算核爆日期, 相互差别较大。表 3, 4, 5 的结果均可以说明。

表 4 两种边界选取法对核爆日期估算结果的比较

测量日期	光滑次数	面积算法	766keV峰 扣基底边界	$t-t_0$ 值, 天				真值
				按(5)式计算				
				R_{01}	R_{02}	R_{03}	R_{04}	
1976.2.17	4	W法	$i_1 \sim i_{b1}$	19.0	17.0	20.9	11.4	25.0
			$i_1 \sim i_{b2}$	22.1	19.7	24.4	14.6	
		W-S法	$i_1 \sim i_{h1}$	19.6	17.6	21.4	12.3	
			$i_1 \sim i_{h2}$	22.2	20.0	24.4	14.6	
1976.2.27	4	W法	$i_1 \sim i_{h1}$	32.9	31.7	33.9	29.6	35.0
			$i_1 \sim i_{h2}$	33.2	32.0	34.3	29.9	
		W-S法	$i_1 \sim i_{h1}$	33.2	31.7	34.5	29.1	
			$i_1 \sim i_{h2}$	33.5	31.9	34.8	29.3	

表 5 W和W-S峰面积区宽度不同时,核爆日期估算结果

测量日期	光滑次数	面积算法	峰区宽度	$t-t_0$ 值, 天				真值
				按(5)式计算				
				R_{01}	R_{02}	R_{03}	R_{04}	
1976.2.17	2	W	$n=2$	22.1	19.3	24.3	14.3	25.0
			$n=3$	22.0	19.5	24.4	13.5	
		W-S	$n=2$	22.2	20.1	24.2	14.9	
			$n=3$	22.1	19.8	24.3	14.3	
1976.2.27	2	W	$n=2$	33.6	31.9	35.0	29.1	35.0
			$n=3$	33.3	32.1	34.4	30.0	
		W-S	$n=2$	33.7	31.8	35.2	28.8	
			$n=3$	33.5	31.9	34.9	29.2	
1976.4.9	2	W	$n=2$	76.6	83.0	72.4	89.0	77.0
			$n=3$	78.7	84.5	74.7	89.9	
		W-S	$n=2$	75.6	81.7	71.5	87.7	
			$n=3$	76.8	82.8	72.7	88.5	

但是,从表中所列结果,可以明显看到,用 R_{03} ,即 $^{95}\text{Zr}(757\text{ keV})$ 与 $^{95}\text{Nb}(766\text{ keV})$ γ 辐射强度比,来估算核爆日期比较准确,特别是在核爆后 40 天之前,存在其它核素 γ 峰干扰的情况下,估算结果较好,误差不到 1 天。而且,受峰面积计算方法的影响不显著,峰面积效率校正的影响也不明显。其次,用 R_{01} ,即 $^{95}\text{Zr}(724\text{ keV} + 757\text{ keV})$ 与 $^{95}\text{Nb}(766\text{ keV})$ γ 辐射比,来估算也较好,尤其是在核爆 40 天之后更好。

比值 R_{04} ,实际中不能采用,它受到峰面积计算方法的影响较大,在有其它核素 γ 谱峰干扰的情况下(如图 1),766 keV 峰迭加于 ^{132}I 773 keV 的康普顿端与全能峰之间的谱谷上,直线基底扣除会使峰面积的计算结果比实际值偏低;757 keV 峰又骑在 766 keV 的谱谷上,峰面积也比实际值偏低,所以 R_{04} 值偏高得多,使日期的估算偏离较大。另外,从图 4 理论上的曲线变化率也可见, R_{04} 的稍微偏差,都会导致日期有较大的偏离。

6. 用 γ 辐射比 R_{03} 和 R_{01} 估算的核爆日期 根据上面的讨论, 经过数据光滑, 应用高斯函数拟合和 W-S 法计算 ^{95}Zr - ^{95}Nb γ 射线全能峰面积, 采用经过效率校正的 γ 辐射比 R_{03} 和 R_{01} 估算核爆日期是比较理想的。现将核爆日期估算结果列于表 6。

表 6 用 R_{03} 和 R_{01} 估算的核爆日期

测量日期	光滑次数	峰面积计算法	$t-t_0$, 天		核爆炸日期 (1976年1月日)		真 值 (1月 日)
			R_{01}	R_{03}	R_{01}	R_{03}	
76.2.17	4	高斯	20.1	25.0	27.9	23.0	23
		W-S	22.2	24.4	25.8	23.6	
76.2.27	4	高斯	33.7	37.4	24.3	20.6	
		W-S	33.5	34.8	24.5	23.2	
76.4.9	4	高斯	76.8	76.1	23.2	23.9	
		W-S	77.2	73.3	22.8	26.7	
平 均					24.8	23.5	
标 准 偏 差					± 1.9	± 2.0	

表 6 的结果说明, 在距核爆日期 40 天之内测量落下灰 γ 能谱时, 用 W-S 法计算面积和比值 R_{03} 估算核爆日期比较好, 不准确性小于 1 天。在 40 天以后, 用比值 R_{01} 估算核爆日期比较好。

小 结

(1) 通过对核爆后放射性落下灰 Ge(Li) γ 能谱的分析, 利用 ^{95}Zr - ^{95}Nb 所发射的 γ 射线强度比来估算核爆日期是可取的。只要计算峰面积的方法较好, 不准确性可小于 1 天。

(2) γ 辐射比的选择对结果的影响较大。在核爆后的近期(40 天内)测量中, 用 ^{95}Zr (757 keV) 与 ^{95}Nb (766 keV) γ 辐射比 (R_{03}) 估算核爆日期比较好。在较远期(40 天以后)的测量中, 用 ^{95}Zr (724 keV + 757 keV) 与 ^{95}Nb (766 keV) γ 辐射比 (R_{01}) 估算核爆日期较好。

(3) 在本实验所研究的四种峰面积计算方法中, 高斯函数非线性最小二乘法拟合和 W-S 法比较好, 尤其 W-S 法, 比较简便, 对存在重迭峰干扰的情况下仍然适用, 值得推广。

(4) 实验表明, 用经过峰面积效率校正的公式 (5) 计算 γ 辐射比值较 (6) 式好。

(5) 通过对核爆日期估算的研究, 反过来验证 γ 能谱解析方法 (如计算峰面积方法) 的优劣。推动我们进一步研究 γ 能谱的解析方法, 以期获得准确的峰面积计算结果。

本实验 Ge(Li) γ 能谱数据由上海市卫生防疫站提供; DJS-14 型电子计算机由西安交通大学提供, 在此一併表示感谢。

(下转第 500 页)

池底水质分析结果除 Cl^- 为 0.08 ppm, 比平时回路水质偏高外, 其它项目与回路水质相差不多。是否有 Cl^- 的局部富集, 还有待于进一步的实验证实。

三、结 语

综上所述可以看出, 对系统设备进行必要的运行分析, 是今后应当坚持并加以扩展提高的一项重要任务。运行分析应当形成一个制度, 并纳入日常工作计划。

在总结了目前运行分析的现状之后, 我们认为今后的运行分析工作应当作如下改进:

1. 订好运行分析规程, 对运行分析的项目、方法、表格应正式规定下来。
2. 在每次更新设备与芯体时, 应抓好初始值的全面测定工作, 以作为运行分析对比的基点。
3. 运行分析计算是繁琐的, 应当提高运行分析的自动化程度, 采用自动测量记录的分析仪表, 如传热系数、温差、压降、阻力指标等。
4. 对运行中出现的疑难问题, 应作专项的实验研究, 作为对运行分析的补充。

参 考 文 献

- [1] 曹质彬, 游泳池式反应堆铝制热交换器设计运行中的几个问题, 待发表, 1979。
- [2] Л. Д. Берман, Электрические станции, 1963, 5 p. 28。
- [3] R. A. McAllister et al., Corrosion, 17, 12, 95 (1961)。
- [4] L. Horst Jr., Paper ASME, № 62-W/A-330 (1962)。
- [5] 电力译丛, 10, 39(1964)。
- [6] 全国化工与炼油机械行业技术情报网, 换热器——国外化工与炼油设备发展概况之一, 1971年, 兰州。
- [7] 曹质彬, 游泳池式反应堆一次净化系统前机械过滤器芯体改装设计, 内部资料, 1977。
- [8] Б. А. Алексеев, Водочистка и водоподготовка на исследовательских ядерных реакторах, 1961。
- [9] М. М. Сенявин, Атомная техника за рубежом, 6, 19 (1963)。
- [10] 第六设计院三室, 用水封作为排风过滤器密封装置的改进意见, 设计技术情报, 2, 14 (1977)。
- [11] С. А. 普列奇斯斯基, 排入大气的放射性排出物(排出物中气溶胶和气体净化装置设计)中国工业出版社, 1965。
- [12] 安徽蚌埠绝缘材料厂, GB型GS型高效空气过滤器。

(上接第 562 页)

参 考 文 献

- [1] K. Way & E. P. Wigner, Phys. Rev., 73, 11 (1949)。
- [2] H. F. Hunter et al., Nucleonics, 9 (5), C2 (1951)。
- [3] F. Yamasaki et al., J. Sci. Res. Inst., 49, 137 (1955)。
- [4] Y. Nishiwaki et al., Ann. Rept. Kinki. Univ. Atomic Energy Res. Institute, 1, 88 (1963)。
- [5] T. Sotobayashi et al., Nature, 215, 728 (1967)。
- [6] T. Sotobayashi et al., Bull. Chem. Soc. Jap., 41 (11), 2796 (1968)。
- [7] T. Mamuro & Y. Matsuda, J. Rad. Res., 10 (3-4), 126 (1969)。
- [8] I. Fujii et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 31 (7), 1907 (1969)。
- [9] 带刀正, Radioisotopes, 21 (4), 230 (1972)。
- [10] 核素图表编制组, 核素图, 原子能出版社, 1976。
- [11] L. E. Weaver et al., USNRDL-TR-633 (1963)。
- [12] 陕西省卫生防疫站, 放射医学, 1, 38 (1977)。
- [13] L. Kotta, Nucl. Instrum. Methods, 112, 245 (1973)。
- [14] 陕西省卫生防疫站, 用高斯曲线拟合 γ -射线谱峰台式计算机算法, 内部资料, 1978。