

类型 γ 射线能谱指纹的识别机理

刘素萍 伍怀龙 古当长 龚 建 郝樊华 胡广春

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2002 年 1 月 2 日收到, 2002 年 4 月 6 日收到修改稿)

放射源的辐射指纹能起到标识和鉴别放射性物体的作用. 在涉及核弹头不可逆销毁过程的深度核裁军核查中, 核弹头的辐射指纹对标识和鉴别裁减下来的核弹头将起到关键作用. 预先研究辐射指纹的有关技术, 如识别机理的研究, 将有助于深度核裁军的核弹头核查技术发展. 以实验室放射源为研究对象, 探索了类型 γ 射线能谱指纹的同一性识别机理.

类型 γ 射线指纹识别机理的研究, 就是要找出一种合适的方法, 以较高的置信度, 描述两个正在进行比较的 γ 射线指纹是否为同一放射源的指纹. 采用了谱形比较法, 并用谱相似度概念来描述两个指纹的相似程度. 在谱形比较思想的指导下, 编制了放射源类型指纹识别软件, 并通过放射源同一性的识别实验验证了软件的有效性, 同时研究了谱相似度随统计涨落和测量条件, 如时间、源强和本底等因素的变化情况. 研究结果表明: 1) 用相似度概念来描述两个指纹的相似程度, 回答两个待比较的 γ 射线能谱是否代表同一类型放射源, 是切实可行的; 2) 该识别机理只具备识别放射源类型的能力, 而对同一类型、差异甚微的放射源个体还不能识别.

关键词: γ 射线能谱指纹, 辐射指纹, 识别机理, 核查技术

PACC: 0150M, 0650D

1. 引 言

任何放射性物体都有自己的辐射指纹. 依据辐射种类的不同, 辐射指纹可以分成中子指纹、 γ 射线指纹、 x 射线指纹等. 这些射线指纹有时能起到标识和鉴别放射性物体的作用, 例如, 在核弹头的销毁核查中, 为了证明进入弹头销毁厂的弹头容器里确实装有约定类型的弹头, 就需要利用军控界人士熟悉的术语“指纹印技术”^[1]. 在核弹头的销毁应用中, 指纹印技术是指: 东道国向核查人员提供各种型号待拆卸核弹头的样弹各一枚, 核查人员首先通过核查双方认可的一些核查方式对样弹的真假进行识别^[2], 并获取样弹的类型 γ 射线指纹 (或者类型中子指纹), 并将之安全地存放在所谓的“指纹识别器”中 (其安全可靠需由核查双方, 尤其是被核查方认可), 然后核查人员用指纹识别器对送入拆卸厂的弹头容器逐一核查, 以确保弹头的真实性^[3,4]. 指纹印技术也可以应用到核弹头的存储核查中, 以确保正在存储状态下的未部署及按条约裁减下来的核弹头没有违反条约而转为他用^[5]. 就 γ 射线指纹而言, 指纹印技术的关键是如何从前后两个指纹的比较中得出肯定或否定的结论. 换言之, 指纹印技术的关键问

题在于用什么样的识别机理去进行识别.

γ 射线指纹可以表现为 γ 射线能谱的形式. 本文将对放射源 γ 射线能谱指纹的识别机理作深入研究.

2. 类型 γ 射线指纹的识别机理

类型 γ 射线指纹识别机理的研究, 就是要找出一种合适的方法, 以较高的置信度, 描述两个正在进行比较的 γ 射线指纹是否为同一类型的放射源指纹. 指导我们探索识别机理的基本思想是谱形比较, 即比较两个指纹究竟能够重合到何种程度. 为此, 引入了“谱相似度”概念来描述两个指纹的谱形相似程度, 简称为“谱形比较法”.

2.1. 寻峰

谱形比较法共分 4 个步骤. 第一步是找出参考谱和比较谱在扣除对应采样本底后的有关能峰信息, 包括峰中心位置 (道数/能量)、峰强度、峰强度相对误差等. 我们用便携式、高分辨、高纯锗 γ 谱仪 (EG&G ORTEC 公司生产) 分别采集实验室标准放射源的 γ 射线指纹和环境辐射本底, 得到 γ 谱指纹文件和对应的本底文件 (* .chn). γ 谱由连续谱和若干

分立能峰组成.我们利用 Mariscotti 寻峰法^[6]对谱数据作了能峰搜寻,生成能峰信息报告文件(*RPT).

在扣除本底时,我们摒弃了传统的将本底谱和放射源谱对应道数计数相减的剥谱方法,因为那样做有时会导致原有的单峰因本底扣除而劈开.我们引入卡峰值 a 来寻找本底谱和指纹谱的能峰对应关系.卡峰值 a 代表一定的能谱宽度,当两个能谱对射线能量差值的绝对值小于 a 时,它们被认为是同一条射线.在确定本底谱和指纹谱的能峰对应关系后,对应能峰的强度之差便是扣除本底后的峰强度计数.

2.2. 能峰属性标定

谱形比较法的第二步是找出参考谱和比较谱(以下简称为参、比谱)的能峰对应关系,并确定各能峰的属性,包括匹配能峰与不匹配能峰,重要与不重要等.

参、比谱的能峰对应关系有匹配能峰和不匹配能峰两种.所谓匹配能峰是指在参、比谱中同时存在的相同能量的能峰.不匹配能峰则是指那些在一能谱中存在而在另一能谱中不存在的能峰.

按其重要性划分,匹配能峰和不匹配能峰均可以分成重要与非重要两种,分别由重要核素(或同位素)和非重要核素(或同位素)产生.

在标定参、比谱的能峰属性,如匹配与不匹配,重要与不重要时,我们也遵守所谓的卡峰原则.

2.3. 能谱相似度计算

谱形比较法的第三步是计算“能峰相似度”和“能谱相似度”.

2.3.1. 能峰相似度

引入能峰相似度函数来描述每对匹配能峰的相似程度.能峰相似度函数 F_i 的定义为

$$F_i = \begin{cases} e^{-\Delta_i/a} \times 100\% & \text{当 } \Delta_i > \sqrt{(I_{ri}\mu_{ri})^2 + (I_{ci}\mu_{ci})^2}, \\ 1 & \text{当 } \Delta_i \leq \sqrt{(I_{ri}\mu_{ri})^2 + (I_{ci}\mu_{ci})^2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 Δ_i 为第 i 对匹配能峰的计数强度差值; I_i 为第 i 对匹配能峰弱峰的计数强度; I_{ri} 、 I_{ci} 分别为第 i 对匹配能峰中参、比谱的计数强度; μ_{ri} 、 μ_{ci} 分别为第 i 对匹配能峰中参、比谱的能峰强度相对误差.

当匹配能峰的峰强度差异 Δ_i 大于其统计涨落 $\sqrt{(I_{ri}\mu_{ri})^2 + (I_{ci}\mu_{ci})^2}$ 时,这种差异有可能被探测到;

而当 Δ_i 小于或等于 $\sqrt{(I_{ri}\mu_{ri})^2 + (I_{ci}\mu_{ci})^2}$ 时,这种差异会被淹没在统计涨落中.以不同的方式处理这两种情况有助于提高指纹识别能力,尤其是当参、比谱存在非统计涨落引起的细微差异时.

(1)式中 I_i 定义为第 i 对匹配能峰弱峰的计数强度,而不是指定为参、比谱的此峰对应计数强度.这样做的目的是为了解决两个能谱比较时,由于参、比谱的互换而引起的能峰相似度数值变化,换言之,对任意一对匹配能峰而言,能峰相似度的值是唯一的¹⁾

能峰相似度的概念也可以外延到不匹配能峰.显然,所有不匹配能峰的峰相似度都为零.这样两个能谱的所有能峰对(匹配能峰或不匹配能峰)都可以用能峰相似度来描述.

2.3.2. 能谱相似度

每对能峰(匹配能峰或不匹配能峰)对两个能谱总相似度的贡献有差异.贡献的大小遵从下列两个原则:

- 1) 强峰的贡献比弱峰大;
- 2) 重要核素(或同位素)特征峰(匹配能峰和不匹配能峰)的贡献比其他能峰的贡献大.

依据上述原则,引入能谱相似度函数 P 来描述两个能谱的总相似度.能谱相似度函数 P 为两个能谱中重要核素(或同位素)的特征峰,包括匹配能峰和不匹配能峰的权重得到特殊加强后的所有能峰相似度函数的计数强度加权平均值.

$$P = \frac{\sum_i F_i M_i + \sum_j F'_j I'_j}{\sum_i M_i + \sum_j I'_j + \sum_k N''_k}, \quad (2)$$

式中 F_i 、 I_i 分别为第 i 对重要匹配能峰的峰相似度和强峰计数强度; M 为重要匹配能峰的重要因子; \sum_i 为对所有重要匹配能峰的求和; F'_j 、 I'_j 分别为第 j 对非重要匹配能峰或不匹配能峰的峰相似度和强峰计数强度; \sum_j 为对所有非重要能峰(包括匹配能峰和不匹配能峰)的求和; I''_k 为第 k 个重要不匹配能峰的计数强度; N 为重要不匹配能峰的重要因子; \sum_k 为对所有重要不匹配能峰的求和.

1) 当考虑两个能峰的峰相似程度时,可用能峰相似度来描述,且能峰相似度始终为正值,并具有惟一性;而当考虑两个能峰的峰差异时,可用能峰差异度来描述,且能峰差异度可能是正值,也可能是负值,正负号取决于参考谱的选取.

当两个能谱比较时,若发现重要核素(或同位素)的匹配能峰强度差异较大,或者发现重要核素(或同位素)的不匹配能峰存在时,两个能谱分别代表两个不同类型的放射源的概率将会显著增大。为此,引入重要性因子 M 和 N ,分别对重要核素(或同位素)匹配能峰和不匹配能峰对能谱相似度的贡献和影响进行有意夸大,以利于显示类型指纹差异。(2)式中 M 和 N 是人为选取的大于 1 的数,按理均可以提到求和号之外,但为了让能谱相似度的定义更清晰, M 和 N 的作用更明确,故意将 M 和 N 保留在求和号之内。

2.4. 能谱相似度优化

从能谱相似度的计算过程可以看到,能峰属性的正确标定十分重要。例如,在比较两个原本极为相似的能谱时,由于能峰对应关系的错位,原本是匹配峰的能峰对有可能被识别成双倍个数的不匹配能峰,从而造成相似度的急剧下降。又比如,当参、比谱分别与重要核素库中的重要射线作卡峰标定时,有可能发生这样的情况:原本是重要的能峰,可能在一能谱中被标定为重要,而在另一能谱中却被标定为不重要。这样,当参、比谱互换时,就会出现不同的能谱相似度值,使得相似度的惟一性遭到破坏。因此,必须对能峰属性的标定作仔细的检查,以便得到正确的相似度值。

在检查能峰属性的标定时,卡峰值的动态调整十分有用。卡峰值的大小变化不仅会影响到本底扣除,而且会影响到匹配属性和重要属性的标定。对于指定的两个能谱而言,只有当卡峰值的选取十分恰当时,才能保证正确的属性标识,才能保证相似度的惟一性。

然而,仅靠卡峰值的优化是不够的,还需要用能谱平移(固定一能谱,逐步平移另一能谱)的方法来进一步寻找参、比谱的最佳能峰对应关系。参、比谱的采集可能是由同一台谱仪完成的,也可能是由同一型号不同个体的谱仪完成的。由于能谱采集的环境、时间甚至谱仪可能不同,同一放射源的参、比谱可能出现零道位置不重合,即能谱漂移的情况。无论参、比谱之间的能谱漂移有多大,若它们有着某种程度的相似,则只有当匹配能峰的个数达到最多时,两个能谱的能峰对应关系找得最准。能谱平移的目的就是要找出这种最佳匹配。显然,此时的能谱相似度达到极大值,该值便是表征两个能谱相似程度

的最终值。

3. 放射源 γ 射线指纹识别

根据上述识别机理,我们编制了类型 γ 射线能谱指纹识别软件,并用实验室标准放射源 γ 射线能谱识别来验证识别软件的有效性。同时,研究了能谱相似度随统计涨落和测量条件,如时间、源强和本底等因素的变化情况。在以下实验中取下列参数:重要性因子 M 和 N 均为 10(取值具有一定的随意性,原则上, M 和 N 的值越大,越有利于类型指纹的区分);能谱平移范围为 $\pm 0.3\text{keV}$;卡峰值的初始值为 0.5keV ,步长为 0.05keV 。

3.1. 能谱相似度与统计涨落

在完全相同的测量条件下,我们对组合源 $\text{Eu1} + \text{COCS} + \text{Ba}$ 进行了反复测量(测量时间为 1000 s),以便考察放射性测量统计涨落对能谱相似度的影响。测量结果见表 1。

表 1 能谱相似度与统计涨落

能谱文件	能谱相似度	备注	能谱文件	能谱相似度	备注
1A8B7DA*	100		1A8B7DA*	100	以
1A8B7DB	93.16		1A8B7DB	97.76	Eu^{152} ,
1A8B7DC	94.48	以 Eu^{152}	1A8B7DC	98.60	Co^{60} ,
1A8B7DD	90.39	的特征	1A8B7DD	96.25	Cs^{137} 和
1A8B7DF	94.09	γ 射线	1A8B7DF	98.06	Ba^{133} 的
1A8B7DG	90.21	为重要	1A8B7DG	96.06	特征 γ
1A8B7DH	92.91	射线	1A8B7DH	97.47	射线为
1A8B7DI	94.09		1A8B7DI	98.06	重要射
1A8B7DAJ	90.54		1A8B7DAJ	96.44	线

注:上角*为比较谱(以下各表均与此相同)。

表 1 的数据说明,即使在完全相同的能谱采集条件下,对同一辐射源的某一固定部位作反复测量,每次所测得的能谱并不完全相同,存在着因统计涨落而引起的细微差异。此外,重要射线的选定也会影响到统计差异,当进行比较的两个能谱的主要能峰被尽可能多地标定为重要射线时,统计涨落引起的差异会大大减小。

从能谱相似度存在统计差异这一事实得到启发,在确定指纹的同一性时,不能机械地以 100% 能谱相似度作判据,而只能在一定的置信水平上,作出肯定或否定的判定。

3.2. 能谱相似度与测量时间

在 3.1 节的测量条件下,我们仅改变测量时间,考察了能谱相似度随测量时间的变化情况,测量结果见表 2.

从表 2 可以看出,在 400 至 2000s 的时间跨度内,相似度的变化主要由统计涨落引起;而在 400s 以下,相似度随测量时间的缩短而明显下降.不难理解,测量时间的长短会影响到测量精度,从而影响对能谱相似程度的判定.在本轮实验中,400s 以下的测量时间偏短,测量精度尚不够;400s 以后,测量达到一定精度.由此可以得出结论:放射源指纹的采集时间有下限,当测量时间超过下限后,相似程度的判定对测量时间的要求并不严格.由于不同类型放射源的时间下限各不相同,因此我们建议,统一所有指纹的采集时间,以便将问题简单化.

表 2 能谱相似度与测量时间

能谱文件	测量时间/s	能谱相似度	备注
Zh1t20a*	2000	100.00	
Zh1t18a	1800	97.84	
Zh1t16a	1600	98.60	
Zh1t14a	1400	97.09	
Zh1t12a	1200	96.99	以 Eu^{152} , Co^{60} ,
Zh1t10a	1000	95.99	Cs^{137} 和 Ba^{133}
Zh1t8a	800	97.44	的特征 γ 射
Zh1t6a	600	97.08	线为重要射
Zh1t4a	400	98.18	线
Zh1t2a	200	94.60	
Zh1t1a	100	94.73	
Zh1t05a	50	90.21	
Zh1t02a	20	89.14	

3.3. 能谱相似度与源强

根据放射源源强在参、比谱的采集时间间隔内的变化情况,可以将放射源分成长、短寿命两种,长寿命放射源的源强可以看作是恒定的,而短寿命放射源的源强则有明显的变化.在 3.1 节的测量条件下,更换不同强度的 Eu^{152} 源,考察了能谱相似度随长寿命放射源源强的变化情况.从表 3 可以看出, Eu^{152} 的源强大致可以分成 $13.2 \times 10^4 \text{Bq}$ 和 $2.2 \times 10^4 \text{Bq}$ 两个等级,它们之间的能谱相似度差异显著;但同一等级的源强,如 $13.397 \times 10^4 \text{Bq}$ 和 $13.142 \times 10^4 \text{Bq}$ 的能谱相似度差异几乎与统计涨落相当,亦即当同一类型的长寿命放射源的个体强度差异不很显著时,本论文所讨论的识别机理只具备识别类型

的功能,而不能识别个体.

表 3 能谱相似度与源强

能谱文件	Eu^{152} 活度 / 10^4Bq	能谱相似度	备注
1A8B7DA	13.397	84.06	
3A8B7DA	13.142	83.74	以 Eu^{152} 的特征
4A8B7DA*	2.1822	100.00	γ 射线为重要
5A8B7DA	2.1795	97.72	射线
6A8B7DA	2.2991	95.10	

我们也考察了该识别机理对短寿命放射源个体的识别能力.实验用的是 I^{131} 放射源($T_{1/2} = 8.04 \text{day}$),实验结果见表 4.从表 4 可以看出,随时间的推移,相同测量条件下所获得的能谱与同一标准能谱(此处为 11ha)的相似度差异逐渐增大.考虑到能谱相似度存在统计差异,我们可以保守地得出这样的结论:当 I^{131} 的源强衰减 16% 以后,能谱相似度的变化开始显著起来,识别机理能对此变化进行识别,作出否定的判定.

表 4 能谱相似度与源强

能谱文件	相对时间 间隔/h	相对源强 差异/%	能谱相似度	备注
11ha*	0.00	0.00	100	
11hb	1.11	0.38	99.18	
12ha	17.56	5.85	99.03	
12hb	18.70	6.22	98.80	
12hd	23.43	7.74	97.3	
13ha	47.27	15.00	95.26	以 I^{131} 的
13hb	48.16	15.26	94.75	特征 γ 射
13hc	48.88	15.47	94.46	线为重要
17ha	138.60	37.91	65.2	射线
17hb	143.30	38.90	61.31	
17hc	144.38	39.13	60.38	
18ha	160.05	42.32	53.34	
18hb	161.08	42.52	51.03	
18hc	162.26	42.76	48.66	

3.4. 能谱相似度与本底扣除

参、比谱在作相似度比较之前均应扣除相应的本底.在 3.1—3.3 节的实验中,参、比谱的采谱环境相同,在作相似度比较时,两个能谱扣除的是同一实验室天然本底.为了检验本底扣除的准确性,我们利用实验室放射源 Co^{60} , Ba^{133} , Eu^{152} 分别作铀标准丰度源 UTB900 的本底,并用识别软件对 UTB900 的同一性进行自动识别,实验结果与事实符合较好(参见表 5).

表 5 能谱相似度与本底扣除

能谱文件	本底	能谱相似度	备注
UTB900*	天然	100	以 U^{235} , U^{238}
CoUTB900	Co^{60}	97.06	的特征 γ 射
BaUTB900	Ba^{133}	96.66	线为重要射
EuUTB900	Eu^{152}	94.51	线

4. 结 论

识别软件的有效性验证实验表明,用能谱相似度概念来描述两个指纹的相似程度,回答两个待比

较的 γ 射线能谱是否代表同一类型的放射源,是切实可行的。

通过对放射源 γ 射线指纹识别机理的研究,进一步明确了 γ 射线指纹的概念内涵以及指纹采集条件。 γ 射线指纹是指在特定的测量条件下,个体放射源 γ 射线能谱的组成,包括核素的种类、特征 γ 射线的相对强度等。特定的测量条件是指用同一型号的探测器,在相同探测距离、方位对个体放射源的固定部位作不低于某一测量精度的测量。

在识别长寿命放射源的同—性时,由于能谱相似度存在统计差异,该识别机理只具备识别类型的能力,而对同一类型、差异甚微的个体还不能识别。

- [1] Liu S P 2000 *A Verification Regime for Warhead Control* Publ. by CISAC (USA: Stanford University)
- [2] Liu S P, Hu G C, Gong J, Hao F H and Xiang Y C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1405 [in Chinese] 刘素萍、胡广春、龚建、郝繁华、向永春 2001 物理学报 **50** 1405]
- [3] Fetter S 1996 *Verification Nuclear Disarmament*, Fetter is an Associate Professor in the School of Public Affairs (University of Maryland, College Park)

- [4] Sun X L and Du X W 1993 *Identifying Nuclear Warheads—An Approach of Verification on Dismantlement of Nuclear Warheads* (Beijing: Institute of Applied Physics and Computational Mathematics)
- [5] Du X W 1996 *Science and Technological Groundwork for Nuclear Arms Control* (Beijing: National Defense Industry Press) pp 114—157 [in Chinese] 杜祥琬 1996 核军备控制的科学技术基础 (北京:国防工业出版社)第 114—157 页]
- [6] Mariscotti M A 1967 *Nucl. Instru. Methods* (**50**) B09

Investigation of gamma-ray fingerprint identifying mechanism for the types of radiation sources

Liu Su-Ping Wu Huai-Long Gu Dang-Chang Gong Jian Hao Fan-Hua Hu Guang-Chun

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China*)

(Received 2 January 2002 ; revised manuscript received 6 April 2002)

Abstract

Radiation fingerprints sometimes can be used to label and identify the radiation resources. For instance , in a future nuclear reduction treaty that requires verification of irreversible dismantling of reduced nuclear warheads , the radiation fingerprints of nuclear warheads are expected to play a key role in labeling and identifying the reduced warheads. It would promote the development of nuclear warheads deep-cuts verification technologies if we start right now some investigations on the issues related to the radiation fingerprints. This paper is dedicated to the investigation of gamma-ray fingerprint identifying mechanism for the types of radiation resources.

The purpose of the identifying mechanism investigation is to find a credible way to tell whether any two gamma-ray spectral fingerprints that are under comparison are radiated from the same resource. We created the spectrum pattern comparison (SPC) to study the comparability of the two radiation fingerprints. Guided by the principle of SPC , we programmed a software dedicated to identify the types of radiation resources. The efficiency of the software was tested by a series of experiments with some laboratory gamma-ray resources. The experiments were designed to look into the relations between comparability and radioactive statistics , and the relations between comparability and some measurement conditions such as real time , resource activity and background etc. Two main results can be drawn from the investigation : 1) it is quite feasible to use the concept of spectral comparability to answer the question whether any two gamma-ray fingerprints are identity or not ; 2) the identifying mechanism can only identify the types of radiation resources , and cannot identify the individuals with the same type and small differences.

Keywords : gamma-ray spectral fingerprints , radiation fingerprints , identifying mechanism , verification technology

PACC : 0150M 0650D