

HPGe 测量连续硬 X 射线能谱的 解谱方法研究

全 林,屠 荆,陈志华,刘月恒,常永福,刘书焕

(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

摘要:结合数值模拟得到的单能光子在 HPGe 探测器上能量响应函数,用改进的剥谱法对测量得到的连续硬 X 射线能谱进行解谱。扣除测量谱中康普顿、反散射等效应产生的计数对测量能谱的影响,得到了仅反映探测器对光电效应的能量响应的能谱。最后,通过效率修正,完成了测量谱到实际能谱的还原,为连续硬 X 射线能谱解析提供了可靠方法。

关键词:X 射线;HPGe 探测器;剥谱法;解谱

中图分类号:TL501.9

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2007)05-0601-04

Method Study on Spectrum Unscrambling of Continuous Hard X-ray Measurement by HPGe Detector

QUAN Lin, TU Jing, CHEN Zhi-hua, LIU Yue-heng,
CHANG Yong-fu, LIU Shu-huan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-16, Xi'an 710024, China)

Abstract: The influence of counts caused by non-photoelectric effect in measured continuous hard X-ray spectrum was corrected. The pure photoelectric spectrum was obtained using the method of improved spectrum stripping technology accompanied by energy respond function of single-energy photon for HPGe detector which had been got in advance, and the real energy spectrum on measurement site was unfolded from the photoelectric spectrum by relative efficiency correction. The reliable method for continuous hard X-ray spectrum scrambling was obtained.

Key words: X-ray; HPGe detector; spectrum stripping; spectrum unscrambling

用 HPGe γ 谱仪对连续硬 X 射线能谱进行直接测量是一种有发展前景的能谱测量方法。在放射性 γ 源活度测量中,对单峰以及复杂多峰(全能峰)面积的解谱技术已较成熟,解谱对测量结果起到了必要的修正。然而,对于

能量在 20 keV~1.022 MeV 范围内的连续硬 X 射线能谱,目前尚无较好的解谱方法来扣除测量能谱中非光电效应对测量计数的影响,这不可避免地给连续光子能谱测量带来了一定的偏差^[1]。这种偏差随着康普顿效应的增强而变

得明显,从而使得连续谱的解谱一直是核测量技术领域的难题。

本研究工作的目的在于结合单能光子在探测器上能量响应拟合函数,探索用改进的剥谱法对测量能谱进行解谱,来扣除测量谱中康普顿、反散射峰等对测量计数的影响,经过效率修正后,实现测量位置处测量能谱到实际能谱的还原。

1 解谱基本原理

在测量得到的 X 射线能谱中,第 j 道计数 n_j 为各道近似单能光子源 E_i 在探测器中产生能量响应曲线中第 j 道的计数 $F_j(E_i, X_j)$,按照一定权重 $\eta_i(X_i)$ 在该道上相加的结果,解谱的关系式为:

$$\sum_{i=1}^k (\eta_i(X_i) F_j(E_i, X_j)) = n_j \quad (j = 1, \dots, k) \quad (1)$$

其中: n_j 为测量得到第 j 道的计数; E_i 为能量刻度中第 X_i 道对应的能量。

当式(1)表达一中心道高度为 1 的全能峰时,表明此时探测到发生光电效应的光子个数为 $N'_i(E_i)/\epsilon_i(E_i)$,它与全能峰的峰面积成正比,有:

$$N'_i(E_i)/\epsilon_i(E_i) = B(y_c - y_0)w_1 \sqrt{\frac{\pi}{2 \ln 4}} \quad (2)$$

式中: B 为待定常数,可以由最高道计数确定; $y_c = 1$; y_0 为高斯函数的底线, $y_0 = 0$; w_1 为入射能量 E_0 的全能峰半高宽 $FWHM(E_0)$; $N'_i(E_i)$ 为测量位置处能量为 E_i 光子的相对个数; $\epsilon_i(E_i)$ 为能量 E_i 的相对效率。

2 解谱

2.1 解谱条件

1) 连续谱测量

为获得便于验证解谱效果的连续硬 X 射线测量谱,测量中用管电压为 100 kV、电流为 10 mA 的稳定直流 X 光机产生的连续 X 射线作为待测射线源。为便于验证解谱的作用及效果,在 X 光机周围设置了相应的准直、屏蔽吸收(高纯铝)装置,来吸收能量在 60 keV 以下的射线,使得测量位置处只有 60~100 keV 的连

续谱。利用反应堆活化制备的 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{152}Eu 、 ^{133}Ba 、 $^{166}\text{Ho}^m$ 、 ^{141}Ce 、 ^{51}Cr 等放射性平面源,结合蒙特卡罗模拟计算方法,完成 HPGe 测量系统的能量、半宽度刻度和相对效率标定^[2]后,对该连续硬 X 射线能谱场进行测量,对测量结果进行扣本底、数据平滑处理后,得到如图 1 所示的能谱。

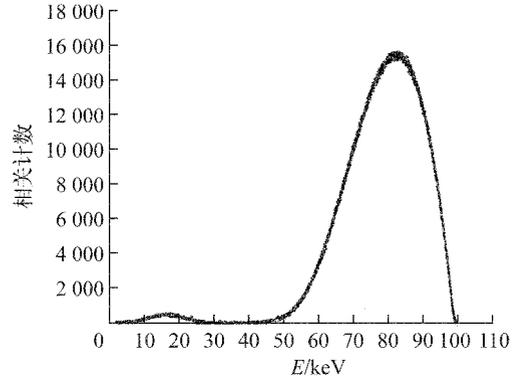


图 1 X 射线测量能谱

Fig. 1 Measured X-ray spectrum

2) HPGe 单能光子能量响应函数获得

获得探测器较准确的单能响应曲线是解谱的基础。然而,目前可用于探测系统标定的单能源太少,难以用实验值拟合的方法获得单能光子在 HPGe 探测器上的能量响应曲线表达式。本研究结合蒙特卡罗理论模拟计算、最小二乘数据拟合、效应曲线拟合的方法,获得了单能光子在该探测器上各个效应的能量响应函数表达式 $F_j(E_0, X_i)$ 。最后采用准单能 γ 源测量数据对理论表达式进行标定,确定了各效应函数的相对高度 δ_j ,得到了该响应函数随光子入射能量变化的如下实际函数表达式^[3]:

$$F(E_0, X_i) = \sum_{j=1}^4 \delta_j F_j(E_0, X_i) \quad (5)$$

3) 假设验证

在连续谱的解析中,全能峰的展宽是否可以忽略是该改进的剥谱法在本工作中能否使用的基础。为考证这一假设,解谱中仅考虑全能峰展宽对能谱的影响。为此,选取 X 射线能谱测量中的高能段作为研究对象,研究每道计数时,考察相邻 5 道对中心道的影响;在程序处理中,采用 5 阶追赶法和矩阵运算相结合的分析

技巧,对高能段进行解谱,以扣除测量谱中全能峰展宽对能谱计数的影响^[4]。解谱前后的能谱对比示于图 2。计算结果表明:解析前后能谱每道计数差别均在 0.1% 以下,在连续能谱解析中,全能峰的展宽对能谱的影响基本可以忽略,以上假设成立,可用改进的剥谱法对连续谱进行解析。

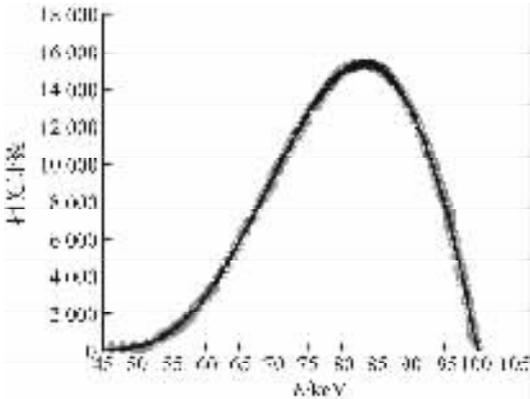


图 2 扣全能峰展宽前后能谱对比

Fig. 2 Primal and unscrambled spectra

△——原始峰能谱;●——扣全能峰展宽后能谱

2.2 解谱方法

在学习和改进现有 γ 能谱分析方法的基础上,根据测量能谱的特点,将能谱分成高低两段能区进行解析。尝试用全谱矩阵法和改进的剥谱法来解析连续硬 X 射线能谱(图 1)^[5]。其中,全谱矩阵法对测量谱以及单能响应函数要求严格,在此解谱误差太大,而改进的剥谱法较适合该问题的解谱。

根据解谱原理,在连续能谱解析中,因全能峰的展宽对能谱的影响基本可忽略不计,认为高能对低能计数有影响,而低能不影响高能计数。解谱中,对测量能谱由高能到低能逐道循环扣除各单能响应曲线的高度,从而得到以各道为能区的单能光子被 HPGe 探测到的个数。由于单能响应函数中全能峰中心高度为 1,则扣除 X 道以上的入射能量在探测器上的能量响应曲线对该道计数的贡献后,得到的计数高度可看成探测器探测到入射能量为 E_i 的单能光子响应曲线权重 η_i ,解析的函数表达式为:

$$\begin{cases} \eta_k = n_k + n_{k+1} + \dots + n_{k+5} \\ \eta_{k-1} = n_{k-1} - \eta_k F_{k-1}(E_k, X_j) \\ \eta_{k-2} = n_{k-2} - \eta_k F_{k-2}(E_k, X_j) - \\ \quad \eta_{k-1} F_{k-2}(E_{k-1}, X_j) \\ \vdots \\ \eta_1 = n_1 - \eta_k F_{k-2}(E_k, X_j) - \dots - \\ \quad \eta_3 F_1(E_3, X_j) - \eta_2 F_1(E_2, X_j) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)的边界条件为:根据 X 光机运行的管电压、入射能量与道的对应关系,确定被探测到入射光子的能量上限 E_k ,该道的计数为第 n_k 到 n_{k+5} 道的计数和,即 $\eta_k = n_k + n_{k+1} + \dots + n_{k+5}$,该计数可从测量能谱中直接读出。在该相对能谱解析中,为简化计算,将式(2)中某些常数项均值设为 1,这时,能谱解析公式变为:

$$N'_i(E_i) = \eta_i(X_j)FWHM(E_i) / (\epsilon_i(E_i)FWHM(E_k)) \quad (4)$$

用 Matlab 按上述方法进行编程计算,得到测量位置处的解谱图形如图 3 所示。

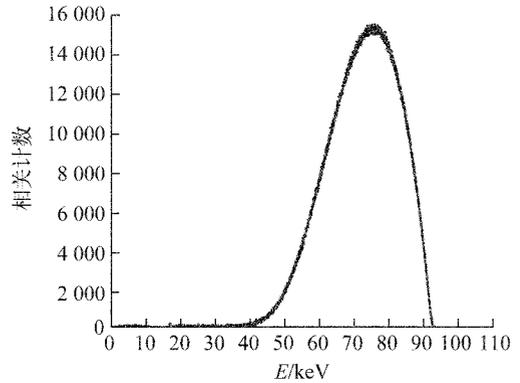


图 3 解谱后能谱

Fig. 3 Unscrambled spectrum

2.3 讨论

1) 谱型分析

从图 1 可看出:1) 测量能谱由 50~100 keV 的高能段和 8~30 keV 的低能段连续谱组成,测量和设计不相符。同时,高能段的峰值在约 80 keV 处,对应低能段的康普顿效应产生的峰值约在 20 keV 处,测量得到的低能计数是由高能光子在探测器发生康普顿效应造成的,测量位置处没有能量低于 50 keV 的透射光子,50、80、100 keV 的康普顿边能量为 8.17、19.06、28.1 keV。可见,低能和高能段计数在 HPGe

探测器上产生的康普顿效应计数相吻合;2) 高能段近似麦克斯韦峰型分布。这主要是因光机产生的韧致辐射能谱近似麦克斯韦谱,连续 X 射线在屏蔽衰减中,低能光子衰减快,同时测量中高能光子对低能计数有贡献,而低能对较高能计数基本无影响,则测量谱中峰型部分近似麦克斯韦分布。这些实验现象与理论符合较好,测量谱中低能段计数不是测量位置处的实际能谱,测量谱与真实谱之间存在差别,随入射能量增加,由于康普顿截面的变化,该差别有可能增大。

2) 解谱效果

对比解谱前后的能谱(图 1、3)可看出:解谱后低能段(30 keV 以下)的计数基本消失,高能段(50~100 keV)的计数基本不变。低能段消失的原因已在前面的理论分析中进行了阐述,这里进一步证明了解谱的效果;高能段由于是连续能谱,全能峰展宽对能谱解析的影响不大,同时 Ge 逃逸峰和光电峰前拖尾与光电峰计数高度相比,相差了约 3 个量级,由于其存在与否对能谱的影响并不大,所以,高能段(连续能谱)在解谱前后变化不大。解谱后的能谱与实验设计能谱相一致,这一解谱效果明显,说明所探索的解谱方法有一定的应用价值。

从图 3 可看出,在解谱中,该方法使得低能段会有一定的累计误差,这归因于以下两方面:其一,解谱是用剥谱法从高能到低能进行的,低能区域必然会出现累计误差效应;其二,难以找到用于探测系统刻度以及响应曲线标定的低能单能光子源而导致低能误差。从减小误差方面

考虑,该方法较适合于测量连续硬 X 射线能谱的解谱。

3 小结

结合数值模拟得到的单能光子在 HPGe 探测器上的能量响应函数,利用 5 阶追赶法和矩阵运算相结合的分析技巧,对高能段进行解谱,得出了全能峰展宽对该连续谱解谱没有影响的重要结论。用改进的剥谱法对测量得到的连续硬 X 射线能谱进行解谱,解谱中确定边界条件后,遵循对全谱采用从高能到低能逐道扣除的原则,修正了测量谱中康普顿、反散射峰等效应对测量能谱计数的影响,使得测量能谱仅反映探测器对光电效应的能量响应,并通过效率修正后,还原了测量位置处的实际能谱,从而为连续硬 X 射线能谱解谱提供了可行的方法。

参考文献:

- [1] 复旦大学,清华大学,北京大学. 原子核物理实验方法:上册[M]. 北京:原子能出版社,1982:376-396.
- [2] KLAUS D, RICHARD G H. Gamma and X-ray spectrometry with semiconductor detectors[M]. New York: Elsevier Science, 1988:71-244.
- [3] KNOLL G F. Radiation detection and measurement[M]. 3rd ed. New York: Quebecor Printing, 1999:312-326.
- [4] 尹泽明,丁春利. 精通 MATLAB6[M]. 北京:清华大学出版社,2002:80-99.
- [5] 庞巨丰. γ 能谱数据分析[M]. 西安:陕西科学出版社,1990:1-43.