

MB 形容器体积对 BGO 晶体探测效率的蒙特卡罗优化设计

王建华¹, 凌 球², 郭兰英², 邱小平², 许浚江¹

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

2. 南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001)

摘要: 本研究采用蒙特卡罗方法 MCNP 对 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 晶体探测器 Marinelli Breaker(简称 MB) 容器的优化设计; 气体放射源 MB 容器内的气体发生 β^+ 衰变后, 接着正电子与负电子湮没后发射 γ 射线。设计中, 首先通过计算 γ 射线的数量来确定 BGO 晶体探测器金属包壳厚度与峰值效率关系; 计算结果显示当 BGO 金属包壳厚度为 0.7mm~1.0mm 时, 峰值效率达到最大。根据这一金属尺寸, 我们进一步设计了 MB 容器的最佳尺寸, 这种尺寸使探测器的探测效率较高而费用较少。从而达到满足生产这种探测器的要求。

关键词: 蒙特卡罗方法; 探测效率; β^+ 衰变; Marinelli Breaker

中图分类号: TL812 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2008)03-0533-05

随着我国核电事业的发展, 核安全问题引起重视, 在压水堆核电站运行过程中, 反应堆本体即控制棒驱动机构和反应堆一回路管道等压力边界可能发生破裂, 将产生一回路水泄漏。如果不及时采取措施, 将会给反应堆的安全运行带来严重后果, 为此对压力堆边界的检测成为重要的课题^[1-2]。近年来人们设想了多种方法试图解决这个问题, 其中氦-13 监测系统就是其中的一种, 氦-13 来源于反应堆堆芯一回路水中, 通过两次核反应产生。氦-13 是一种 β^+ 发射体, 能量为 1.199MeV 的正电子; 半衰期 9.96min; 在反应堆安全检测时, 通过测量能量为 0.511MeV 光子数量, 就可以导出一回路水是否泄漏; 因此确定探测器对 β^+ 粒子湮灭产生的 γ 探测效率十分重要。在设计这样的一种探测器时, 从经济角度上考虑需要设计的探测器几何尺寸尽可能小, 而在实践上, 探测响应则

要求有尽可能大的体积, 本文就是为解决这个问题进行研究, 所设计的 MB 容器几何尺寸使探测器模型在经济上是合理的, 而在实践中又是可行的。

1 物理思想与计算过程

1.1 MB 容器设计模型

MB 容器设计模型如图 1 所示, 外形为正圆柱体, BGO 晶体底部与氦-13 气体底部持平, BGO 晶体高度为 50mm, 晶体半径为 25mm, BGO 金属包壳(金属壁)厚度对设计结果影响较大, 对它在模拟中做变量处理, 其变化范围 0.05cm~1.0cm; 晶体中心到容器外层内壁的距离 R 和金属壁厚度一样都是变量, 当正圆柱体底部半径 R 变化时, 晶体顶部到容器内壁的距离也跟着变化。在蒙特卡罗考虑方面, 整个空气部分都是放射气体源, 氦-13 包含在气体内, 由于空气部分的几何形状不是规则的, 因此在设计处理的时候把它分成两个独立放射源进行处理, 如图 1 所示, 图中标示的分割线把整个气体源分成上下两个部分; 在 MC 模拟时, 由

收稿日期: 2007-06-20

作者简介: 王建华(1981-), 男, 汉族, 福建福安人, 实习研究员。辐射防护专业。

于氮-13 源的强度(活度)与体积成正比,体积越大,包含的氮-13 的数量也就是越多,模拟时考虑氮-13 气体均匀地分布在马林杯形状的 MB 容器内,这样抽样概率大小就按照体积大小来确定。

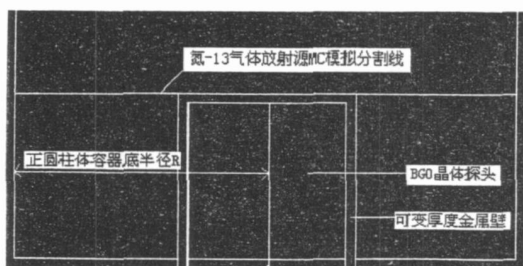


图 1 MB 容器的设计模型,容器为正圆柱体,中间圆柱体为 BGO 晶体,BGO 晶体外部为金属包壳厚度,为了得到更好的探测效率,在设计中其厚度是变化的,金属包壳外部是包含氮-13 的 MB 形容器,其体积在设计中也是变化的。

1.2 蒙特卡罗方法数据处理考虑

氮-13 产生 β^+ 衰变,放出正电子,正电子能量为 1.199MeV,正负电子质量为 0.511MeV,为了平衡核素的电荷守恒必须放出一个 0.511MeV 负电子;在一次 β^+ 衰变中实际总共产生 2.221MeV 的能量。蒙特卡罗软件 MCNPX 以下的版本没有办法对正电子进行处理;本研究采用截面数据库 e103 和 mcplib04 对正电子处理,在材料选择方面,金属包壳(金属壁)为不锈钢材料,按照各元素组成形式为 $1Cr18Ni9Ti$;其组成成分按质量分比为: $\omega_C = 0.12\%$, $\omega_{Si} = 0.75\%$, $\omega_{Mn} = 0.85\%$, $\omega_{Cr} = 19.1\%$, $\omega_{Ni} = 9.5\%$, $\omega_S = 0.2\%$, $\omega_P = 0.3\%$ 和 $\omega_{Fe} = 68.8\%$;其密度为 $7.9g/cm^3$ 。 γ 光子探头为 BGO 晶体,晶体化学形式为 $Bi_4Ge_3O_{12}$;密度取为 $7.137g/cm^3$ 。空气材料质量分比为: $\omega_C = 0.01\%$, $\omega_N = 75.53\%$, $\omega_O = 23.18\%$ 和 $\omega_{Ar} = 1.28\%$,密度为 $0.001205g/cm^3$ 。

2 计算结果与讨论

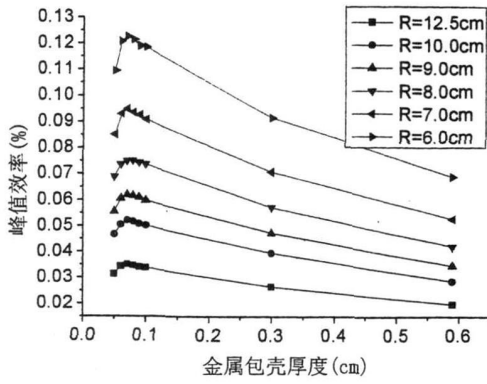
2.1 金属壁厚度与 BGO 晶体探测效率的关系

用蒙特卡罗方法模拟了金属厚度初步取为: 0.05cm、0.06cm、0.07cm、0.08cm、0.09cm、0.1cm、0.3cm、0.59cm 和 0.79cm 的情况;模拟发现 0.79cm 金属厚度过大,总效率和

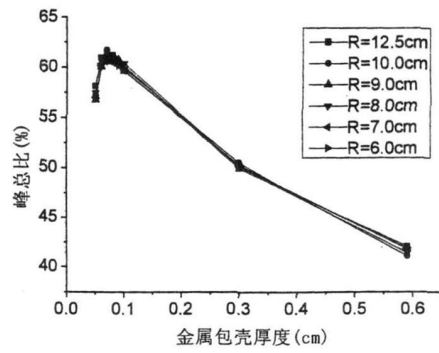
峰值效率都很低,考虑不对它进行详细处理。计算中发现在金属包壳里会产生 3 个峰值,在能量 0.511 处产生一个峰;由于 β^+ 粒子能量为 1.199MeV,电子能量为 0.511MeV,在 1.71MeV ($1.199 + 0.511 = 1.71MeV$) 和 1.199MeV 分别有一个较强的峰。而晶体 BGO 里面只有一个很强的 0.511MeV 峰值,而没有其他两个能量的峰值。所有计数都已经归一化为一个正电子的情况;因此空气源强度在此研究过程中不考虑。MC 计算主要考虑研究 BGO 晶体中的峰值效率、峰总比和总效率与金属厚度关系;而 BGO 晶体能量沉积也做出计算,将能量沉积与金属厚度的关系与上面进行比较。所有记录误差小于 1.5%,大部分都在 1% 以下进行的。

金属厚度与探测效率计算结果如图 2 所示,它们分别表示金属包壳厚度与峰值效率(2a)、峰总比(2b)、总效率(2c)和 BGO 晶体能量沉积(2d)的影响关系。从这些图可以看出,金属包壳厚度对探测效率的影响是很大,当金属厚度在 0.07-0.1cm 内时,各自分别达到最大,当金属厚度进一步增大或者减小时,各自分别都减小。另一方面,我们从图中还可以看出,峰总比和容器的体积没有关系, $R = 6.0cm$ 和 $R = 12.5cm$ 的变化曲线几乎是重合的。从物理机制上是比较容易理解的,体积的大小改变的是活度和增加电子进入 BGO 晶体中的概率,增强活度影响的是探测器的响应;而具体单个正电子在 BGO 中的作用显然和活度没有关系;增加电子进入 BGO 晶体中的概率结果将增加总计数,总计数增加的同时;峰值计数也跟着相应地增加,结果使得体积对峰总比没有影响。

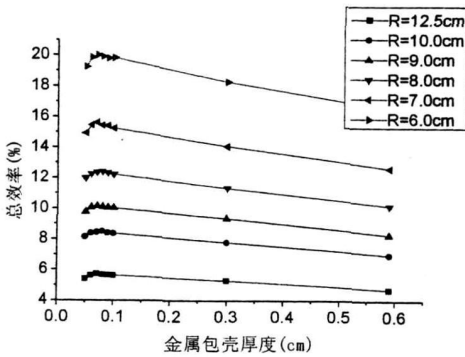
不同 MB 形容器尺寸下,金属包壳厚度与总效率的变化图中可以看出;当金属厚度在 0.07-0.1cm 内时,总效率也达到最大。另一方面,容器的体积越小,BGO 晶体的相对作用面积就越大,单个电子进入 BGO 晶体中的概率就越大,但是金属包壳厚度的增加,发出的正电子在 BGO 晶体中产生沉积的能量也就越少,如图 2 所示。综合上面分析可以知,要得到更好的效率建议金属厚度取在 0.07-0.1cm 内。



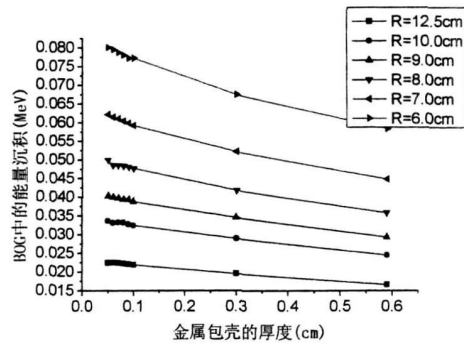
(2a)



(2b)



(2c)



(2d)

图2 峰值效率(2a)、总效率(2b)、峰总比(2c)和BGO晶体的能量沉积(2d)与金属包壳厚度以及MB容器体积变化的关系。

2.2 MB容器体积与探测效率的关系

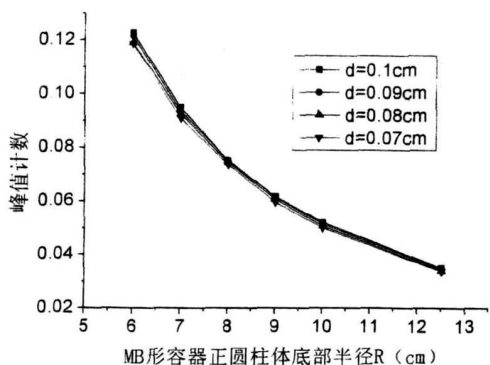
以上分析可知当金属厚度在0.07-0.1cm内时为最好;所以对MB容器体积进行模拟分析时,我们取金属厚度 $d = 0.07, 0.08, 0.09$ 和0.1cm四种金属壁厚度,分别计算MB容器体积与探测效率的关系,MB容器对不同体积下的峰值效率和总效率。根据设计要求MB容器的外形为正圆柱体;因此只要研究MB容器的半径R即可,圆柱体的高等于圆柱体底部半径R,因此R改变时高也随着一起改变。MC计算结果如图3所示。图中0.511峰值计数(图3a)是指能量在0.511MeV时BGO晶体中的计数。BGO总计数是所有能量段在BGO晶体中的总计数,峰总比为峰值计数与总计数的比值。峰总比与MB容器体积无关,而总探测效率随着MB容器体积增加而减小,灵敏度(响应因子)与活度或体积大小成正比,体积增加了也就是等于放射性粒子数增加了,那么活度也就增加,这样进入BGO晶体中的正电子也增加,

灵敏度也就增大了;另一方面灵敏度也和总效率成正比,但是总效率与体积成反比(见图3b);这样灵敏度似乎与体积成正比又成反比。将两者的作用考虑进去,即总的作用结果(见图3c)。图中可以看出总的作用结果是成正比了。考虑响应因子后的峰总比是考虑总效率和体积因素后的峰总比。图3d看出考虑响应因子后的峰总比与体积成正比,金属壁厚度在0.07cm~0.1cm内对整个计算没有影响,图3中的4个图曲线几乎是重合的,即 $d = 0.07, 0.08, 0.09, 0.1$ cm对探测效率或者响应没有变化,所以在探测设计中可以使用金属厚度在区域内的任何一个值。

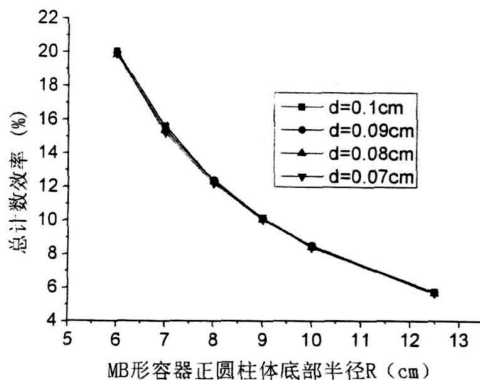
从蒙特卡洛方法计算中我们结果得到:BGO晶体的峰值效率,总效率与金属厚度密切相关,对能量为1.199MeV的正电子(氮-13衰变产物)而言,在0.7cm~1.0cm处达到最大,大于或者小于该尺寸时探测效率都减小,而能量沉积随着金属厚度的增加而减小。峰总比与

MB 容器体积无关, 而总探测效率随着 MB 容器体积增加而减小, 但是体积减小, 活度必然降低, 结果灵敏度必然降低, 同样达不到设计效

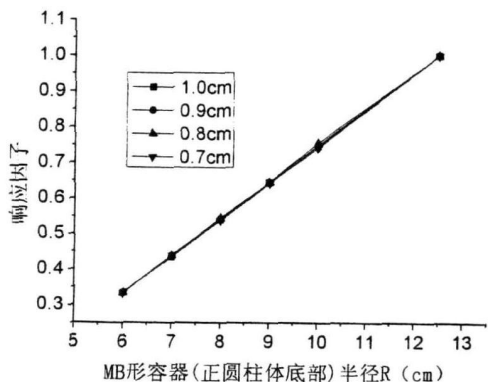
果, 实际生产需要的探测器可根据经济要求和效率要求, 从图表 3 中取相应的体积作为设计。



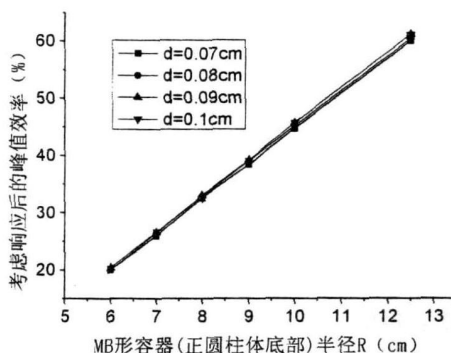
(3a)



(3b)



(3c)



(3d)

图 3 峰值计数(3a)、总计数效率(3b)、响应因子(3c)和峰值效率(3d) 随 MB 容器体积(或圆柱体半径)变化关系。

参考文献:

[1] 曹雷, 凌球, 郭兰英, 等; 对 MB 形气态 β^+ 衰变源的效率刻度[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(6): 541-543.
 [2] Verheijke. M L. Calculated Efficiencies of NaI(Tl) Scintillation Crystals for Marinelli Beakers

with Aqueous Sources [J]. Int. J Appl Rad Isot, 1970, 21: 119-127.
 [3] CCG-700 MCNP4C Monte Carlo N-Particle Transport Code System[R], Los Alamos National Laboratory Los Alamos, New Mexico, 2000.
 [4] 瞿盛庭, 毛正宥. 蒙特卡罗法计算 γ 谱仪的源 γ 总效率 [J], 核动力工程, 1994, 15(3): 259-265.

The optimal volume of MB shape for BGO crystal detection efficiency designed by using Monte Carlo

WANG Jian-hua¹, LING Qiu², GUO Lan-ying², QIU Xiao-ping², XU Xun-jiang¹

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai, 201800, China.

2. School of the Nuclear Science and Technology, Nanhua University, Hengyang, 421001, China.)

Abstract: In this study, we use MCNP Monte Carlo method to optimize the design of Marinelli Beaker (MB) of BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) crystal detector which occurs β^+ decay from the gas source and further produce positron and then positron-electron annihilation to produce γ ray. We first calculate the number of γ ray to determine the relation between the thickness of metal layer of BGO crystals detector and the peak value efficiencies. Our results show that the peak value efficiency arrive the maximum value point when the metal layer with thickness of 0.7mm to 1.0mm. Then we use this dimension to further design the optimal volume of MB who has high efficiency and low cost. And this will meet the need of production for this detector.

Key words: Monte Carlo method; detection efficiency; β^+ decay; Marinelli Breaker

(上接第 532 页, Continued from page 532)

[2] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999 年 6 月第 4 版.

[3] 李超. SG1525A 在高压电源中的应用[J]. 火控雷达技术, 2001 年 9 月.

[4] 苏开才, 毛宗潭. PWM SG1525 模块在直流调速系统中的应用[J]. 船电技术, 1989 年第 5 期.

[5] 马世俊. 卫星电源技术[M]. 北京: 宇航出版社,

2001 年 12 月.

[6] 董运红, 赵忠民. 一种大功率充电电源的设计[J]. 航空计算技术, 2001 年 3 月.

[7] 杨松, 陈济, 王继. 应用 SG1525 设计高压稳定电源[C]. 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十八次学术会议, 2005 年.

Design of High Voltage Unit in Particle Detector in Space

YU Xiang-qian, CHEN Hong-fei, ZOU Ji-qing, SHI Wei-hong

(Institute of Space Physics and Applied Technology, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract: A kind of High Voltage Unit (HVU) is designed by using SG1525, which is used to provide the bias voltage to the solid detectors in particle measurement in space. The parameters of the transformer are obtained base on experiments and the best working point of HVU is calculated by the theoretical analysis and numerical simulation, such as the best pulse-width, working frequency and the primary loops of the transformer. In the design of HVU of this paper, the specifications are: output voltage - 90V, pulse-space rate 6.2%, 0~18 μ A load regulation 5.5%, voltage regulation 1.3, ripple coefficient less than 5, and power dissipation 426 mW. The theoretical analysis and numerical simulation are agreed to the experiments, so that this method can be a useful reference for such HVU design.

Key words: High Voltage Unit; DC / DC transform; SG1525; Particle Radiation Detector