

X射线密度测井屏蔽体的蒙特卡罗模拟研究

刘 睿^{1,2} 于华伟^{1,2} 祝 倩^{1,2} 岳爱忠³ 王 虎³ 刘超卓⁴ 张倩文^{1,2}
杨 树^{1,2} 祝林苛^{1,2} 张晓蕾³

1(中国石油大学(华东)深层油气全国重点实验室 青岛 266580)

2(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 青岛 266580)

3(中国石油集团 测井有限公司测井技术研究院 西安 710077)

4(中国石油大学(华东)理学院 青岛 266580)

摘要 密度测井中使用可控X射线源替代¹³⁷Cs放射源已经成为新的趋势。X射线源强度受靶基上高压影响较大,当高压为350 kV时,密度测量不确定度可以保持在 $0.01 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。为探究适用于350 kV高压X射线密度测井仪器的屏蔽体材料及厚度等参数,利用蒙特卡罗方法研究了X射线穿过不同材料与厚度后的能谱及计数率;并且通过对0~0.15 MeV、0.15~0.35 MeV两个能窗相关响应关系的对比,分析了不同能窗中X射线衰减与探测器计数率差异的原因。另外结合四探测器X射线密度测井仪器实际结构,主要考虑了三部分粒子对探测器的影响,并通过MCNP模拟分析并设计了各部分屏蔽体的放置方式及最佳厚度。研究表明:X射线的衰减无论在高能窗还是低能窗,都随着屏蔽材料原子序数及厚度而增大。选择钨镍铁合金为四探测器X射线密度测井仪器模型的屏蔽材料;在基座与近源距探测器之间设置的屏蔽体厚度为1.75 cm,每个探测器之间放置厚度为0.2 cm的屏蔽体,探测器背部增加0.35 cm厚度的屏蔽体。本研究为X射线密度测井仪研制中的屏蔽材料和结构提供了设计理论和关键参数。

关键词 可控源, X射线, 密度测井, 蒙特卡罗模拟, 屏蔽体

中图分类号 TL99, P631.8¹⁷

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080202

Monte Carlo simulation analysis of X-ray density logging shields

LIU Rui^{1,2} YU Huawei^{1,2} ZHU Qian^{1,2} YUE Aizhong³ WANG Hu³ LIU Chaozhuo⁴ ZHANG Qianwen^{1,2}
YANG Shu^{1,2} ZHU Linke^{1,2} ZHANG Xiaolei³

1(National Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

2(School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

山东省自然科学基金(No.ZR2022MD019)、中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目(No.2021DJ3801)、中央高校基本科研业务费(No.22CX01001A-2)、中国石油大学(华东)探究性实验项目资助、中国石油集团测井有限公司十大科技项目中项目九“测井应用基础与前沿储备技术研究项目”(No.CNLC2022-9C)课题六“开放基金课题”(No.CNLC2022-9C06)资助

第一作者: 刘睿, 男, 1996年出生, 2019年毕业于山西财经大学, 现为硕士研究生, 主要研究方向为核测井方法及蒙特卡罗模拟研究

通信作者: 于华伟, E-mail: yhwlog@163.com

收稿日期: 2023-09-04, 修回日期: 2024-01-03

Supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (No.ZR2022MD019), China National Petroleum Corporation Scientific Research and Technology Development Project (No. 2021DJ3801), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 22CX01001A-2), Exploratory Experimental Project of China University of Petroleum (East China), CNPC Logging Co., the 9th Project of Top Ten Science and Technology Projects, 9 "Logging Application Foundation and Advanced Reserve Technology Research Project" (No. CNLC2022-9C) Project 6 "Opening Fund Project" (No.CNLC2022-9C06)

First author: LIU Rui, male, born in 1996, graduated from Shanxi University of Finance and Economics in 2019, master student, focusing on method for nuclear logging and Monte Carlo simulation

Corresponding author: YU Huawei, E-mail: yhwlog@163.com

Received date: 2023-09-04, revised date: 2024-01-03

Abstract [Background] The use of controlled X-ray sources instead of ^{137}Cs radioactive sources in density logging has become a new trend. The intensity of the X-ray source is substantially influenced by the high voltage on the target substrate, and the density measurement uncertainty can be maintained at $0.01\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ when the high voltage is 350 kV. [Purpose] This study aims to analyze the parameters of the shielding material and thickness suitable for the 350 kV high-voltage X-ray density logging instrument. [Methods] The Monte Carlo method was used to analyze the energy spectrum and counting rate of X-rays passing through different materials and thicknesses. By comparing the correlation between the 0~0.15 MeV and 0.15~0.35 MeV energy windows, the reasons for the difference between the X-ray attenuation and detector count rate in different energy windows were determined. In addition, combined with the actual instrument model construction of the four-detector X-ray density logging instrument, the influence of the three parts of particles on the detector was primarily considered. The placement mode and optimal thickness of each part of the shield for detectors were analyzed and designed using Monte Carlo N-particle (MCNP) simulation. [Results] The simulation results show that the attenuation of X-rays in high- and low-energy windows increases with increase of atomic number and thickness of shielding materials. When tungsten nickel iron alloy is selected as the shielding material for the four-detector X-ray density logging instrument model, the suitable thickness of the shield between the base and the near-source detector is 1.75 cm. Meanwhile, to maintain the high voltage of X-ray generator at 350 kV, a shield layer with a thickness of 0.2 cm is placed between each detector, and a shield layer with a thickness of 0.35 cm is added to the back of the detector. [Conclusions] This study provides the design theory and key parameters for shielding materials and structures in the development of X-ray density logging tool.

Key words Controllable source, X-ray, Density logging, Monte Carlo simulation, Shield

传统岩性密度测井中通常使用放射性同位素 ^{137}Cs 源,但综合考虑环境保护、人身安全等因素,选择可控源替代放射性源已经成为了必然趋势^[1]。Becker等^[2]通过使用电子加速器获得高速电子并与阳极高原子序数材料发生韧致辐射释放X射线,最早做了替代传统放射性伽马源的尝试。张锋等^[3]认为,在相同地层介质中使用X射线密度测井所得的密度响应灵敏度高于 ^{137}Cs 源,并且X射线源的密度测量不确定度小,测量精度高。因此,近年国内外石油服务公司已经开始研制X射线密度测井仪器并使其走向工业生产。Simon等^[4]设计了井下四探测器X射线测井仪器样机,与常规双探测器密度测井仪器相比,具有更好的垂向分辨率及测量精度;但其源距比传统密度测井仪源距缩短了40%,故而仪器内部构造更加紧密,屏蔽体材料选择及厚度设置需要更加高效。并且在密度测井仪器中,为了保证测量精度,X射线所需要的能量通常大于250 keV,因此,Simon等所设计仪器X射线发生器的最优工作高压为350 kV。但与单能 ^{137}Cs 源相比,X射线具有低能连续的特点,且考虑到X射线密度测井主要利用康普顿散射的因素,因此在研究过程中需要分能窗对能谱、计数及响应关系等进行分析。鉴于X射线源与 ^{137}Cs 放射源在能量上的差异,传统仪器结构并不

适用于新的可控源仪器,因此需要重新根据其工作高压,综合考虑仪器结构、材料加工、造价等因素,对屏蔽材料和厚度进行研究。

由于X射线具有很强的穿透性,因此在常规X射线屏蔽防护中,主要使用铅等重金属作为屏蔽材料。而陈旭等^[5]认为相比常用的铅防护,钨在X射线屏蔽中具有无毒、无污染、强度高、加工工艺性能好等诸多优点,并通过实验方法得出了最高能量为100 keV的X射线所需要的屏蔽厚度。Bayless等^[6]认为X射线密度测井仪器应该在探测器周围放置屏蔽,以最大限度减少直接穿过仪器的X射线,保证探测器接收的计数只来源于地层;此外还需要在探测器晶体背部做好屏蔽以防止从仪器背面进入的X射线干扰探测器计数,但是缺乏对具体厚度的详细说明,因此需要进一步研究探讨。

本文研究了不同材料及其厚度对X射线的屏蔽效果,并在此基础上针对四探测器X射线密度测井仪器模型进行屏蔽体设置,对探测器除准直孔之外不同方位的透射及散射粒子进行屏蔽实验,为今后X射线密度测井仪器的屏蔽提供依据。

1 X射线密度测井仪屏蔽材料分析

岩性密度测井主要通过射线与地层发生康普顿

散射,利用不同距离的探测器接收到散射光子,并利用其中的高、低能量信息获得地层密度和岩性等参数^[7]。目前测井仪器中使用的管电压往往为300~350 kV^[8],从而在保证探测精度的同时尽可能增大康普顿散射截面,减少光电效应的影响。而由于X射线能量是连续的,因此在设置屏蔽体时高能窗部分的屏蔽是非常重要的研究参数。

1.1 X射线屏蔽理论基础

Simon等^[4]指出,在X射线密度测井中连续分布的X射线源可以近似等效为单能X射线。并且X射线在穿过物质时遵循窄束衰减规律^[9],公式可以表示为:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

式中: I_0 表示为X射线的初始强度; I 表示为X射线衰减后的强度; μ 表示物质对射线的线性衰减系数; x 表示为X射线穿过物质的距离。X射线穿过物质时,主要通过光电效应、康普顿散射和电子对效应这三种作用来进行衰减;而测井中350 kV高压的X射线源释放X射线最大能量为0.35 MeV,不满足电子对效应的最小能量,因此只需要考虑光电效应和康普顿散射,其衰减系数为:

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可得:

$$I = I_0 \cdot e^{-(\mu_{ph} + \mu_c)x} \quad (3)$$

由式(3)可知,当X射线密度测井中能窗改变时,其衰减中两种作用的比例占比有所区别。陈翔鸿^[10]认为,350 kV高压的X射线源在能窗为0.15~0.35 MeV时康普顿衰减系数占92.6%,光电吸收系数占7.4%。因此,在能量为0~0.15 MeV的低能窗X射线衰减的主要原因为光电效应,在能量为0.15~0.35 MeV的高能窗X射线衰减主要因为康普顿散射。

1.2 屏蔽材料分析

为了研究适用于X射线密度测井仪的屏蔽材料,并得到不同能窗下屏蔽效果的比对,首先根据原子序数由小到大,分别选取常用高密度材料(如不锈钢、铜、钨镍铁合金、钨、铅等)进行分析。考虑到能量衰减,MCNP模型中选择真空作为X射线运移的环境并将源设置在距离屏蔽材料10 cm的位置处;对于出射X射线的连续能量特点,采用SI和SP卡、选用A类型的线性内插分布对其能量进行详细描述;使用F1卡记录350 kV高压X射线与0.1 cm及0.6 cm屏蔽体作用后的能谱计数,从而得到X射线经过不同屏蔽材料后的能谱图,结果如图1所示。

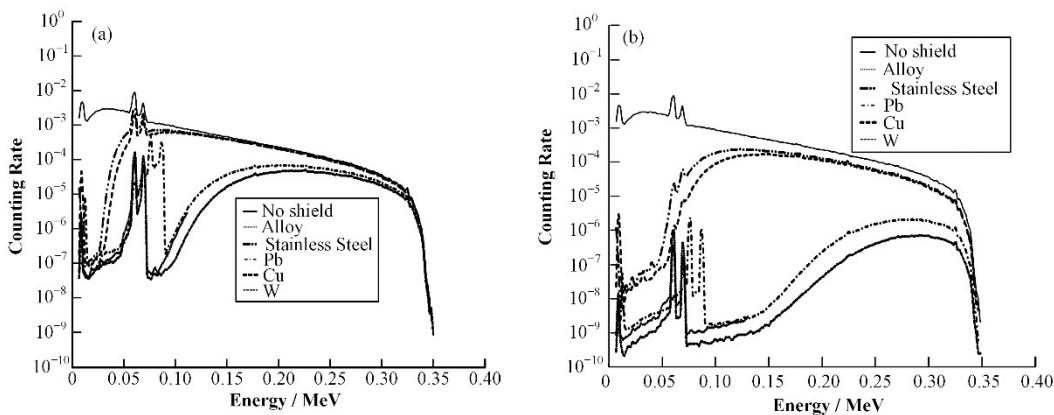


图1 X射线经过不同材料后的能谱图 (a) 0.1 cm, (b) 0.6 cm
Fig.1 Energy spectra of X-rays passing through different materials (a) 0.1 cm, (b) 0.6 cm

由图1可知,X射线在不同材料中的衰减有较大差异。铜和不锈钢对能量小于0.15 MeV的低能X射线具有一定的衰减作用且效果相似,但对高能X射线衰减效果不明显;而X射线在钨镍铁合金、钨及铅中的衰减效果无论在低能窗还是高能窗都非常显著。根据式(1),令 $K=I_0/I$, K 值越大,说明X射线衰减越多。当材料厚度为0.1 cm时,铜、不锈钢、铅、合金、钨在低能窗的 K 值分别为4.32、3.26、65.25、159.03和338.85,在能窗的 K 值分别为2.87、2.41、15.43、18.09和25.23;当材料厚度为0.6 cm时,实验

材料在低能窗的 K 值为30.31、17.58、61 408.28、61 732.10和166 099.25,在能窗的 K 值为2.18、1.88、160.06、199.04和509.88。此外,随着厚度的增加,实验材料的X射线能谱在各个能量段都有不同程度的衰减,且能峰向高能方向偏移。分析可知:对于同一种能量的X射线,实验材料的线性衰减系数 μ 由大到小分别为钨、钨镍铁合金、铅、铜、不锈钢,因此X射线在穿过钨等重金属时所衰减的能量比铜和不锈钢高。当X射线能量增加时, μ 呈现下降趋势^[11],即不同能窗的衰减系数并不相同。铜和不锈

钢的衰减系数在低能窗内远小于钨等重金属,所以在低能窗部分屏蔽效果差。此外,当屏蔽材料厚度增加时低能X射线衰减比高能X射线多,因此能峰整体向高能发生偏移。观察图1还可发现,重金属钨及合金在0.06~0.07 MeV区域内有一部分屏蔽盲区,铅的屏蔽盲区在0.07~0.09 MeV^[12]区间内,这是因为钨和铅的吸收边不同。即X射线能量等于物质的电离能时,会发生共振吸收从而使电子电离为光电子,此时X射线吸收系数发生突变,这种跃迁称之为吸收边,不同元素吸收边也有所不同。

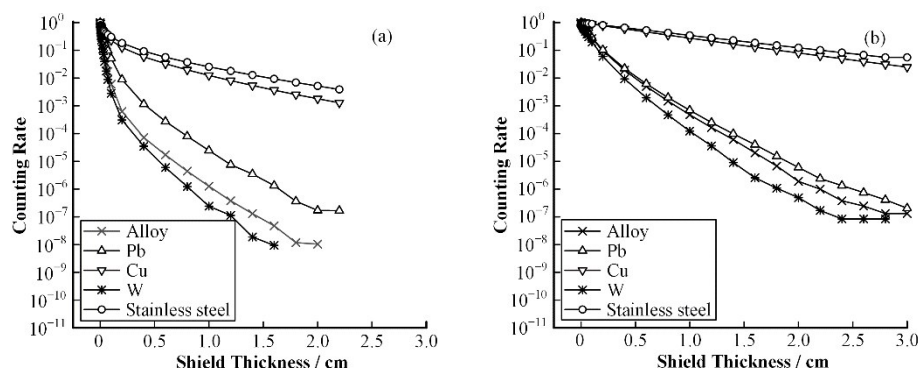


图2 X射线与实验材料厚度的响应关系 (a) 低能窗, (b) 高能窗
Fig.2 Response relationship between X-rays and thickness of experimental material
(a) Low-energy window, (b) High-energy window

由图2可知,随着屏蔽材料厚度增加F1卡所记录的低能窗及高能窗的计数率都越来越小,且穿过钨等重金属后的X射线计数率下降速度明显比铜、不锈钢快。对于低能窗而言,衰减等量的X射线所用的屏蔽材料厚度由大到小分别为钨、合金、铅、铜、不锈钢;且在屏蔽厚度小于0.5 cm的区间内计数率(对数形式)和屏蔽厚度不成严格的指数关系。相比而言,高能窗下屏蔽同等剂量X射线厚度则要求更大,但是各个材料的屏蔽能力依然和低能窗一致,且计数率与屏蔽厚度呈指数关系。分析认为:X射线在物质中传输时,随着距离 x 增大 I 呈指数规律衰减;且 μ 越大, I_0 衰减同等能量所需要的 x 越小。由于钨等重金属的质量衰减系数 μ 大于铜、不锈钢,因此当X射线衰减同等能量时衰减的距离小于铜、不锈钢,所以其所需屏蔽厚度较少。由§1.2可知, μ 与X射线的能量成反比,X射线能量越高 μ 越小,所以X射线密度测井中高于0.15 MeV的部分所需要的屏蔽厚度更大。此外,在高能窗的X射线衰减主要以康普顿散射为主,因此衰减时与厚度成较好的指数关系;而低能窗部分同时受光电效应和康普顿散射影响,因此衰减计数率与屏蔽厚度不是单一指数规律,而是成双指数关系。综上分析,根据X射线密度测井的测量特性,优选钨或钨镍铁作为仪器的内

1.3 屏蔽厚度分析

实验材料的屏蔽效果不仅与 μ 相关,还与其厚度有很强的联系。为了探究厚度对各种材料屏蔽效果的影响,使用350 kV高压X射线照射不同厚度的钨、铅、铜等材料,并得到其在0~0.15 MeV、0.15~0.35 MeV能窗下与F1卡记录的积分流量之间的响应关系,结果如图2所示。材料厚度分为0 cm、0.003 cm、0.03 cm、0.07 cm、0.1 cm、0.2 cm、0.6 cm、1.0 cm、1.2 cm、1.6 cm、2.0 cm、2.6 cm、3.0 cm等,统计误差小于1%。

部屏蔽材料。

2 X射线密度测井屏蔽原理及仿真模型

利用MCNP软件建立地层密度测井模型,模拟屏蔽体厚度与不同探测器的计数变化之间的响应关系,以研究四探测器X射线密度测井仪的屏蔽体设置方式及厚度。参考杨争春^[8]、武蕙琳^[13]等的X射线密度测井实验结果,为了满足密度测井的精度要求,设置X射线发生器高压为350 kV从而保证密度测量不确定度小于0.01 g·cm⁻³。构建的模型如图3所示,其中探测器与源的距离分别为10 cm、15 cm、20 cm、25 cm;将探测器准直孔角度设置为45°,保证

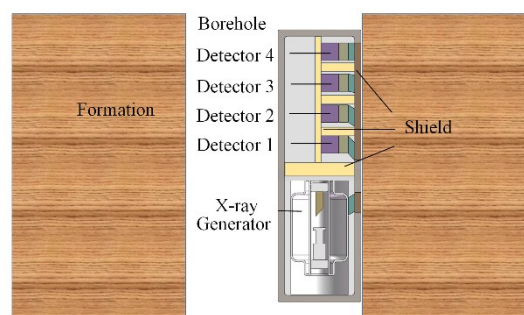


图3 四探测器X射线密度测井仪结构示意图
Fig.3 Structure diagram of four-detector X-ray density logging instrument

探测器尽可能多接收来自地层的一次散射光子;此外地层模型高度、井眼半径分别 80 cm, 10.6 cm, 井眼内部充满淡水。为了减小探测器计数统计误差,模拟时抽样 1×10^9 个粒子,并设置权重卡减小误差,用于保证统计误差 $< 2\%$ ^[14];使用 F8 卡记录点探测器发出的脉冲能量分布^[15]。

3 X射线密度测井仪屏蔽体研究

由于 X 射线能量低于 ^{137}Cs 源,因此四探测器 X 射线密度测井仪的源距相比传统仪器更加紧凑,仪器内部空间更小、屏蔽要求更高。因此其屏蔽体设计至关重要,需要在有限的空间内充分屏蔽掉仪器内部直接穿过射线的干扰,从而尽可能保证来自地层的散射 X 射线信息。单纯从减少 X 射线计数的方面考虑,钨是最理想的屏蔽材料。但是在仪器设计时还要考虑仪器重量、造价等因素,所以选择钨镍铁合金作为 X 射线密度测井仪的屏蔽材料。结合实际

仪器结构,需要考虑三部分粒子对探测器的影响(如图 3 中的 Shield 位置):1)直接穿透射线管阳极靶基座到达探测器的 X 射线;2)探测器之间穿过并相互干扰的 X 射线;3)穿过仪器背部并经过泥浆再次散射回仪器的 X 射线。

3.1 仪器内部 X 射线屏蔽的研究

模拟电子打靶过程中选用金作为阳极靶材料,并使之与水平方向呈 45° ,使用 F8 卡记录探测器的计数率。发生韧致辐射时,除了在靶材表面产生 X 射线,还会有一部分 X 射线在靶材背后产生并穿越仪器内部直接对探测器计数率造成影响。为了探究本部分不同近远(1号、4号)探测器所需要的屏蔽体厚度,在源与近源距探测器之间放置钨镍铁合金进行实验:首先记录无屏蔽体时(即图 4 横坐标为 0)探测器的计数率,之后开始逐渐改变其厚度,得到不同远近探测器计数率的对数关系,结果如图 4 所示。

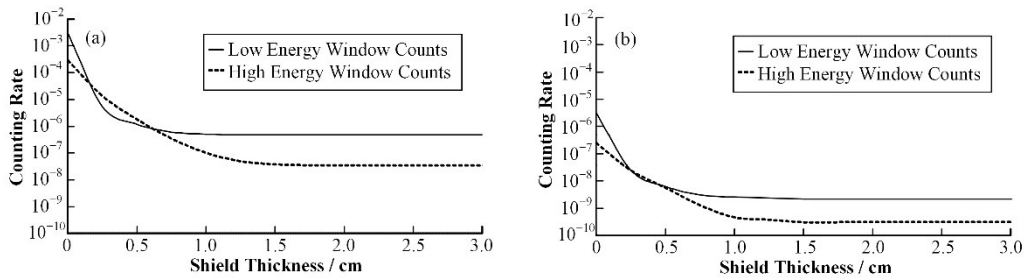


图 4 仪器内部屏蔽体对近探测器(a)和远探测器(b)计数率的影响
Fig.4 Effect of internal shield of instrument on count rate of short-spacing detector (a) and long-spacing detector (b)

由图 4 可知,随着屏蔽体厚度的增加,近源距与远源距探测器低能窗、高能窗的计数都呈现下降趋势。低能窗及高能窗的屏蔽体厚度分别增加至 1.25 cm、1.75 cm 时,近源距探测器接收的计数不再变化,所接收的粒子数全部来自于地层;低能窗及高能窗的屏蔽体厚度增加到 1 cm、1.5 cm 时,远源距探测器的计数逐渐稳定,获得的信息全部关于地层。分析认为:在四探测器 X 射线密度测井仪的射线管与近源距探测器之间需要设置钨镍铁合金进行屏蔽,以防止 X 射线穿透基座对探测器计数造成影响。此部分屏蔽厚度设置为 1.75 cm 时既可以屏蔽粒子对仪器内各探测器的影响,又兼顾到了高低能窗。

3.2 探测器之间屏蔽的研究

与 §3.1 中 X 射线到达探测器的方式不同,§3.2 中所研究的 X 射线是经地层散射后到达探测器的。以近源距 1 号探测器为例,部分散射 X 射线从 2 号探测器的准直孔进入仪器内部影响到 1 号探测器的计数,所以要在 1 号与 2 号探测器之间设置屏蔽体。源

距越大, X 射线在地层中衰减越多,到达远源距的散射粒子比近源距的少,因此只要近源距的 1 号和 2 号探测器之间的屏蔽达到要求,即可保证更远探测器的屏蔽效果。为了保证光子只从 1 号及 2 号探测器的准直孔进入,将仪器外壳的权重设置为 -1,使得光子无法从其进入。本部分进行屏蔽体厚度实验时与 §3.1 中一致,依然先从无屏蔽体(横坐标为 0 cm)开始,逐渐增加厚度。图 5 为改变 1 号与 2 号探测器之间的屏蔽体厚度后,所得到屏蔽厚度与 1 号探测器计数率的响应关系。其中横坐标为屏蔽体厚度,纵坐标为屏蔽率,屏蔽率计算如式(4)。

$$\tau = \frac{N_0 - N_i}{N_0 - N_m} \quad (4)$$

式中: τ 为屏蔽率; N_0 为 1 号与 2 号探测器之间没有屏蔽体时 1 号探测器的计数率; N_m 为 1 号与 2 号探测器之间填充理想屏蔽体情况下 1 号探测器的计数率; N_i 是不同屏蔽体厚度下 1 号探测器的计数。

图 5 中,随着屏蔽体厚度的增加,1 号探测器的屏蔽效率逐渐提高;当屏蔽体厚度增加至 0.2 cm 左

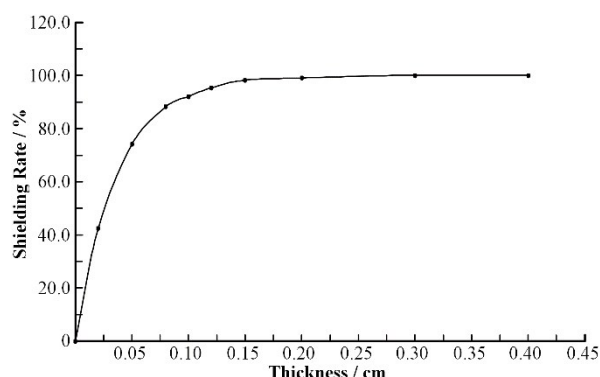


图5 探测器之间屏蔽体厚度对计数率的影响
Fig.5 Effect of shields thickness between detectors on count rate

右时计数基本保持稳定。分析可知,当探测器之间没有屏蔽体时,穿过其他探测器准直孔进入仪器内部的X射线会影响到某个特定探测器的计数率,使得其计数准确性下降,导致获得的地层信息有误。屏蔽体厚度增加至0.2 cm时,可以隔绝该部分粒子的影响,使得探测器所接收的粒子只来自于对应的准直孔,从而保证地层信息更加精确。因此在实际仪器构造中,探测器之间需要增加0.2 cm厚度的钨镍铁合金。

3.3 仪器背部X射线屏蔽的研究

为了研究X射线密度测井仪器背部屏蔽的厚度,将探测器准直孔及其一侧的外壳权重设置为-1,使得光子只能穿越远离探测器准直孔一侧的外壳,再经过泥浆散射后进入仪器内部被探测器所接收。模拟时在探测器后端统一设置半圆环形钨镍铁屏蔽体,厚度依然从无到有逐渐增加,以探究近远探测器在不同能窗下的计数率与屏蔽体厚度的归一化响应关系,从而得出探测器背部的屏蔽率。结果如图6所示,且图6横纵坐标的定义与§3.2中的图5一致。

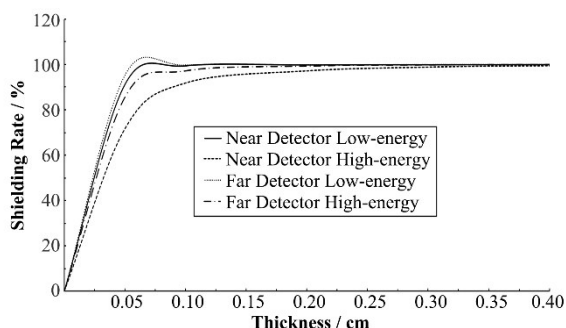


图6 探测器背部屏蔽体对计数率的影响
Fig.6 Effect of detector back shield thickness on count rate

由图6可知,近源距1号探测器、远源距4号探测器在低能窗的屏蔽体厚度为0.12 cm、0.35 cm,在 高能窗的屏蔽体厚度为0.1 cm、0.25 cm时所接收的

计数率几乎为零。相比其他部分的屏蔽体,仪器背部需要的屏蔽体没有其他部分厚。分析可知:X射线发生管工作时大量光子经准直孔进入地层,只有少部分光子从仪器背部穿出并经过泥浆重新进入仪器内部对探测器产生影响,因此本部分所需要屏蔽的X射线光子数量少;且由于前后两次穿过仪器不锈钢外壳,X射线能量有所衰减,所以探测器背部屏蔽体厚度较薄。综合远近探测器高低能窗的屏蔽效果,此处屏蔽体厚度最终选择为0.35 cm。

4 结语

为研究350 kV高压X射线密度测井仪器的屏蔽方式、屏蔽体材料及厚度等参数,本文分析了X射线穿过钨、铅、钨镍铁合金、铜及不锈钢等材料后的能谱及计数率,并针对所设计的仪器结构确定了不同位置屏蔽体的主要参数,为今后仪器研制提供了设计理论和关键参数。

1)铜和不锈钢对小于0.15 MeV的低能X射线具有一定衰减作用,但对大于0.15 MeV的高能X射线衰减效果较差;钨镍铁合金、钨及铅对X射线的衰减作用在高低能窗都非常明显。但钨及其合金、铅分别在能量为0.06~0.07 MeV、0.07~0.09 MeV的区间内有屏蔽盲区,这是因为不同金属的吸收边不同所导致。

2)X射线的衰减与屏蔽材料的原子序数、厚度呈指数关系。在 高能窗的X射线衰减主要以康普顿散射为主,因此衰减时计数率与屏蔽体厚度近似成单指数关系;而低能窗部分同时受光电效应和康普顿散射影响,因此计数率与厚度成双指数关系,而不是单一指数关系。

3)针对四探测器X射线密度测井仪,屏蔽体共设置三部分:a.近源距探测器与X射线发生器之间设置1.75 cm厚度的钨镍铁合金屏蔽体,用于屏蔽直接穿过仪器内部的X射线;b.各探测器之间设置0.2 cm厚度的屏蔽体,用于防止探测器散射X射线对其他探测器的干扰;c.探测器背部设置0.35 cm厚度的半圆环形屏蔽体,用于隔绝从仪器背部透射而出又经过泥浆滤液后再次进入仪器的散射光子。

作者贡献声明 刘睿负责文章大纲拟定,参与模型搭建,参与探究过程和问题讨论,以及论文撰写和修改;于华伟参与模型搭建及参数调整,技术指导与论文修改;祝倩参与研究问题和讨论,数据处理;岳爱忠参与数据处理,提供核测井相关技术咨询;王虎、刘超卓负责后期数据处理;张倩文、杨树参与屏蔽体设置方式研究;祝林苛参与图像处理;张晓蕾参

与X射线能谱研究。

参考文献

- 1 Yu H W, Wang Z, Xue Z B, *et al.* Corrections of fast neutron inelastic scattering effects on D-T neutron porosity logging[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2022, **190**: 110486. DOI: 10.1016/j.apradiso.2022.110486.
- 2 Becker A J, Boyce J R, Corris G W, *et al.* Detection of scattered X-rays from an electron linac in a borehole[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1987, **24 - 25**: 995 - 998. DOI: 10.1016/S0168-583X(87)80296-3.
- 3 张锋, 李亚芬, 信毅, 等. 基于X射线和伽马源的密度测井数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, **42**(1): 60 - 66. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-5005.2018.01.007.
ZHANG Feng, LI Yafen, XIN Yi, *et al.* Numerical simulation of density logging based on X-ray and gamma ray sources[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, **42**(1): 60 - 66. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2018.01.007.
- 4 Simon M, Tkabladze A, Beekman S, *et al.* A revolutionary X-ray tool for true sourceless density logging with superior performance[C]. London, UK: SPWLA 59th Annual Logging Symposium, 2018.
- 5 陈旭, 魏存峰, 孙晋川, 等. 钨合金的X射线屏蔽性能模拟分析与实验验证[J]. 中国体视学与图像分析, 2019, **24**(1): 9 - 15. DOI: 10.13505/j.1007-1482.2019.24.01.002.
CHEN Xu, WEI Cunfeng, SUN Jinchuan, *et al.* Simulation analysis and experimental verification on the X-ray protective properties of tungsten alloy[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2019, **24**(1): 9 - 15. DOI: 10.13505/j.1007-1482.2019.24.01.002.
- 6 Bayless J R, Burkhart C P, Kuthi A. Advances in X-ray and neutron source technologies for logging applications [C]. SPWLA Annual Logging Symposium. SPWLA, 1993: SPWLA-1993-Y.
- 7 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1998.
HONG Youmi. Logging principle and comprehensive interpretation[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1998.
- 8 于华伟, 杨争春, 刘超卓, 等. X射线密度测井中X射线管高压对密度测量精度的影响[J]. 核技术, 2021, **44**(11): 110401. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2021. hjs. 44. 110401.
YU Huawei, YANG Zhengchun, LIU Chaozhuo, *et al.* Effects of X-ray tube high-voltages on the density measurement accuracy in X-ray density logging[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(11): 110401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110401.
- 9 王虎, 刘睿, 岳爱忠, 等. 350 kV 高压X射线密度测井探测深度特性及影响[J]. 核技术, 2023, **46**(10): 100502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100502.
WANG Hu, LIU Rui, YUE Aizhong, *et al.* Depth-of-investigation characteristics and influence of 350-kV high-voltage X-ray density logging[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(10): 100502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100502.
- 10 陈翔鸿. X射线密度测井方法基础研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
CHEN Xianghong. Basic research on X-ray density logging method[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2020.
- 11 王建, 邹树梁. 钨和铅作为 γ 射线屏蔽材料的性能对比研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2011, **25**(4): 19 - 22. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0062.2011.04.004.
WANG Jian, ZOU Shuliang. Comparative study of tungsten and lead as gamma ray shielding material[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2011, **25**(4): 19 - 22. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0062.2011.04.004.
- 12 Li Z F, Zhou W, Zhang X L, *et al.* High-efficiency, flexibility and lead-free X-ray shielding multilayered polymer composites: layered structure design and shielding mechanism[J]. Scientific Reports, 2021, **11**: 4384. DOI: 10.1038/s41598-021-83031-4.
- 13 武蕙琳, 李雨莲, 金亚, 等. 基于数值模拟的X射线密度测井仪器源距设计[J]. 核技术, 2022, **45**(10): 100402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.100402.
WU Huilin, LI Yulian, JIN Ya, *et al.* A design of source spacing of the X-ray density logging tool based on numerical simulation[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(10): 100402. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2022. hjs. 45. 100402.
- 14 Yu H W, Zhang Y X, Chen X H, *et al.* Numerical simulation and method study of X-ray litho-density logging[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(12): 124. DOI: 10.1007/s41365-020-00826-2.
- 15 于华伟, 张倩文, 王哲, 等. 基于 γ 宽束衰减的方位密度测井间隙计算及应用[J]. 核技术, 2023, **46**(11): 110503. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110503.
YU Huawei, ZHANG Qianwen, WANG Zhe, *et al.* Standoff calculation and application of azimuthal density logging based on broad-beam γ -ray attenuation[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(11): 110503. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110503.