

文章编号: 1001-1986(2019)05-0208-05

# 矿用电磁随钻伽马测井仪标定与试验

王小龙, 蒋必辞, 汪凯斌

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 为有效识别煤层及其顶底板, 针对煤矿定向钻孔施工需求, 开发了矿用电磁随钻伽马测井仪。通过自然伽马测井刻度获得仪器刻度系数, 采用标准井测试及煤矿井下穿层孔试验, 获得矿用电磁随钻伽马测井仪多种测量曲线。通过与标准井伽马曲线对比及穿层孔地质资料分析, 验证了矿用电磁随钻伽马测井仪测量结果的准确性。山西伯方煤矿井下应用试验表明, 矿用电磁随钻伽马测井仪在定向钻孔施工中不仅能进行钻孔轨迹测量同时可有效识别煤层顶底板界面, 对于指导煤矿井下定向钻孔施工、提高目的层钻遇率具有重要意义。

**关 键 词:** 伽马测井仪; 轨迹计算; 岩性识别; 电磁传输; 标准井测试

**中图分类号:** P631    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.05.029



## Calibration and experiment of mine electromagnetic LWD gamma logging tool

WANG Xiaolong, JIANG Bici, WANG Kaibin

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to effectively identify coal seam, roof and floor, mine electromagnetic LWD gamma logging tool was developed for directional drilling in coal mine. The calibration coefficient of the instrument can be obtained by natural gamma logging scale, and various measurement curves of mine electromagnetic LWD gamma logging tool can be obtained by standard well test and crossing borehole test in coal mine. Through comparing with the gamma curve of standard well and analyzing the geological data of the crossing borehole, the measurement result accuracy of mine electromagnetic LWD gamma logging tool is verified. The application test in underground coal mine shows that the mine electromagnetic LWD gamma logging tool can not only measure the drilling track, but also effectively identify the interface of coal seam roof and floor in directional drilling operation, which is of great significance for guiding the operation of directional drilling underground and improving the drilling encounter rate of target layer.

**Keywords:** gamma logging tool; trajectory calculation; lithology identification; electromagnetic transmission; standard well testing

煤矿井下定向钻进技术是近十年发展起来的新技术, 其已被广泛应用于煤矿井下各类钻孔施工中, 如瓦斯抽采长钻孔、探放水孔及地质勘探孔等<sup>[1-2]</sup>。随钻测斜仪为定向钻进技术提供了“眼睛”, 定向钻机依据随钻测斜仪测量的轨迹与设计轨迹的偏差, 调整钻进姿态与方向, 使得实钻轨迹尽可能顺着设计轨迹延伸。然而, 由于井下地质情况复杂多变, 煤层顶底板随煤层走势起伏变化, 设计轨迹未必完全处于目的层中, 通常实钻轨迹虽然逼近设计轨迹,

但只有部分孔段处于目的层, 导致目的层钻遇率低、钻孔施工效果不好<sup>[1-2]</sup>。目前, 为了提高目的层的钻遇率, 定向钻进需要在钻进过程中不停地人为开分支孔, 以探测煤层顶板与底板, 大大降低了钻孔施工的效率、增加了施工成本。为解决这一问题, 中煤科工集团西安研究院有限公司开发了矿用电磁随钻伽马测井仪<sup>[1-6]</sup>, 该套仪器除具有随钻测斜功能外还具有随钻自然伽马测井功能, 同时采用电磁传输测量数据, 实现孔内数据向孔口的发送。利用自然

收稿日期: 2018-12-10

基金项目: 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2018XAYZD02)

Foundation item : Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2018XAYZD02)

第一作者简介: 王小龙, 1975 年生, 男, 陕西扶风人, 副研究员, 从事物探技术与装备开发工作. E-mail : wangxiaolong@cctegxian.com

引用格式: 王小龙, 蒋必辞, 汪凯斌. 矿用电磁随钻伽马测井仪标定与试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5) : 208-212.

WANG Xiaolong, JIANG Bici, WANG Kaibin. Calibration and experiment of mine electromagnetic LWD gamma logging tool[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5) : 208-212.

伽马测井数据可以进行岩性识别, 使钻进过程中可根据钻孔内地质情况调整钻孔轨迹, 从而提高目的层钻遇率、降低施工成本。目前煤矿井下伽马测井尚未建立行业标准, 矿用电磁随钻伽马测井仪缺乏可以与之对比的仪器, 因此, 在石油系统的标准井中对矿用电磁随钻伽马测井仪进行了标定测试。本文介绍其测试过程及结果, 建立起此套仪器在标准井中的标准曲线, 总结了伽马测井的主要影响因素, 在此基础上进行了煤矿井下的应用, 并取得较好效果。

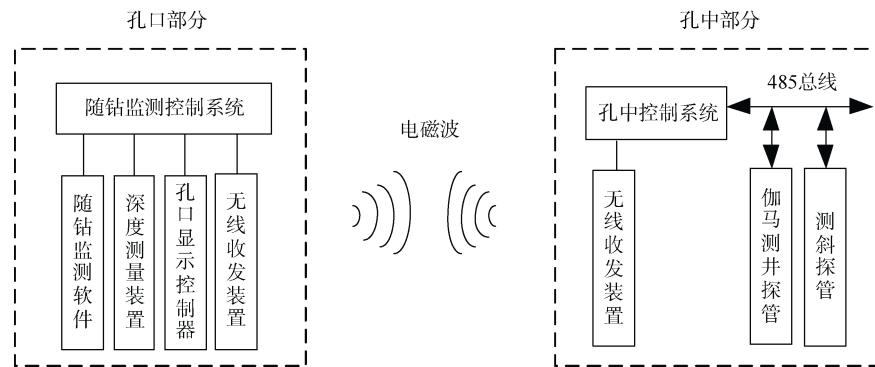


图 1 矿用电磁随钻伽马测井仪组成框图

Fig.1 Block diagram of the composition of mine electromagnetic LWD gamma logging tool

矿用电磁随钻伽马测井仪由孔口和孔中两部分组成, 孔口部分包括深度记录仪<sup>[7]</sup>、电磁无线收发装置、孔口显示控制器及配套的随钻监测软件<sup>[8]</sup>, 孔中部分包括孔中控制系统、无线收发装置、伽马测井探管及测斜探管。在实际随钻作业过程中, 孔中控制器通过 RS485 通信总线得到测井数据及测斜数据, 对数据信号进行载波调制, 再通过电磁传输方式发送到孔口, 孔口电磁无线收发装置将接收到的信号进行载波解调, 获得相应伽马测井及测斜数据, 通过 RS232 总线送入孔口显示控制器, 随钻测井监测软件将伽马测井数据与孔口深度测量装置送来的深度数据通过时间进行匹配, 然后进行数据处理与解释<sup>[9-11]</sup>。钻孔测量轨迹及伽马测井曲线实时显示在孔口显示控制器上, 司钻人员可以根据钻进情况实时调整或改变钻进状态, 从而达到随钻监测的目的。

## 2 伽马测井仪标定

### 2.1 伽马测井仪刻度

不同自然伽马仪器测量的计数率是不同的, 甚至同一仪器不同时间测量的计数率也可能不同。这是由于仪器测得的计数率不仅与地层放射性强度有关, 同时也与仪器的电子电路、仪器结构、外壳材质、伽马探测器的效率及钻孔尺寸等多种因素相关<sup>[12-13]</sup>。此外, 由于地层放射性具有随机性, 仪器计数率本

### 1 矿用电磁随钻伽马测井仪工作原理与组成

煤矿井下钻孔以近水平钻孔居多, 通常钻孔孔径较小( $\Phi 73\text{ mm}$  和  $\Phi 89\text{ mm}$  居多), 此外煤矿井下仪器必须满足防爆要求, 而在石油领域已经成熟的测斜及自然伽马测井仪器并不能直接应用于煤矿井下。考虑煤矿井下钻孔孔径、泥浆液压力、供电情况及环境噪声等多方面因素, 设计开发了矿用电磁随钻伽马测井仪, 其组成框图如图 1 所示。

身也存在统计起伏特性。为了进行放射性测井曲线的定量化解释, 需要去除测量仪器本身对放射性测井曲线的影响, 即需要对仪器进行刻度。在标准刻度井中对仪器计数率进行统计, 进而获得地层放射性工程值(单位 API)与仪器计数值(单位 CPS)之间的比例关系(也称为仪器刻度系数)。不同的伽马仪器经过标准刻度井标定之后, 对于同一钻孔放射性测量就具有一致的结果。

伽马刻度井及工程值 API 标准是由美国石油学会制定的<sup>[14-15]</sup>。美国休斯顿大学建立的自然伽马刻度井为一级标准刻度井, 自然伽马仪器在该井高放射层和低放射层读数差值的 1/200 被定义为一个自然伽马 API 单位。依据 API 标准, 中国石油集团计量中心建立了我国自然伽马刻度井, 该井高放射层为花岗岩, 低放层为白云岩, 高放射层和低放层差值为 207.45 API。

矿用电磁随钻伽马测井仪在中国石油集团计量中心刻度井中进行了刻度。刻度的具体过程:

- 伽马测井仪在地面预热 30 min, 输出计数值稳定;
- 伽马测井仪放入标准刻度井低放射层中测量 30 min, 获得低放射层仪器的平均计数率  $n_L$ ;
- 伽马测井仪放入标准刻度井高放射层中测量 30 min, 获得高放射层仪器的平均计数率  $n_H$ ;
- 计算伽马测井仪的刻度系数  $k=207.45/(n_H-n_L)$ 。

矿用电磁随钻伽马测井仪在标准井中的测量数据为低放射层平均计数 1.03, 高放射层平均计数 70.34, 刻度系数 2.98。通过刻度系数可以将伽马测井仪采集的自然伽马计数值转换为放射性工程值。

## 2.2 伽马测井仪标准井测试

为验证矿用电磁随钻伽马测井仪伽马测量的准确性与可靠性, 在中国石油集团计量中心 2 号标准井(也称后村 2 号模拟试验井)中进行了对比测试。后村 2 号井自然伽马测量标准层位为 195~300 m。在后村 2 号模拟试验井的测试过程为:

a. 伽马测井仪在地面预热 30 min, 待输出计数值稳定, 伽马仪器与测井车进行时间同步;

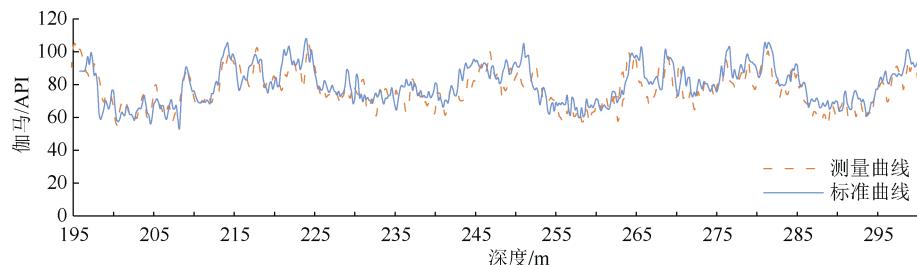


图 2 矿用电磁随钻伽马测井仪测量曲线与标准伽马曲线的对比

Fig.2 Comparison of the curve measured by mine electromagnetic LWD gamma logging tool and the standard gamma curve

## 2.3 影响伽马测井的主要因素

a. 放射性测量的统计涨落 统计涨落是放射性元素在衰变时固有的特性。统计涨落限制了伽马测量的精度, 并可能掩盖地层特性的变化。为减小统计涨落误差, 尽可能采用大尺寸、高效率的探测器, 并采用延长采样时间等方法。

b. 仪器结构 当伽马探测器选定后, 伽马仪器的结构及探测器的安装方式、安装位置对伽马测量有着直接的影响, 为了减小仪器结构的影响, 在仪器设计阶段需要做仔细的分析与仿真。

c. 钻铤 由于伽马探测器安装在钻铤内, 钻铤会对伽马探测器产生一定的屏蔽作用。钻铤的厚度和密度越大, 屏蔽作用越明显。因而, 在设计阶段需要仔细考虑钻铤材料及厚度的选择。在刻度时, 需要将伽马测井仪安装在钻铤内进行整体刻度, 以修正钻铤的影响。

d. 井径 井径不同, 伽马探测器接收到的射线粒子数量不同, 伽马计数值也不同。当井径影响不能忽略时, 应考虑对井径的影响做校正。

e. 钻井液 当孔内钻井液为清水时, 钻井液对伽马测量结果的影响可以忽略不计。如果钻井液密度很大, 则会吸收一部分伽马射线; 如果钻井液本身含有放射性成分的物质, 则又会放射出一些伽马射线, 影响仪器测量结果。当钻井液的影响较大时, 应考虑对钻井液的影响做校正。

b. 利用测井车缆线将伽马测井仪器快速下放到 300 m 处;

c. 从 300 m 处开始上提测井, 上提速度 90 m/h, 伽马仪器采样间隔 25 cm;

d. 上提到 195 m 处结束测量;

e. 导出测量数据并进行处理, 与该标准井的标准伽马曲线进行对比(图 2)。

从图 2 可以看到, 两条曲线变化趋势一致, 吻合度很高。这说明矿用电磁随钻伽马测井仪自然伽马测量结果准确可信。此测试建立起了此套仪器在标准井中的标准曲线, 为仪器测试结果可靠性建立了参考依据。

## 3 矿用随钻伽马测井仪井下钻孔试验

矿用电磁随钻伽马测井仪经过刻度及标准井测试后, 建立起标准井中的标准曲线, 后续在山西兰花集团伯方煤矿进行了井下实钻试验。试验钻孔在 3 号煤中开孔, 3 号煤层顶板是砂质泥岩层(厚约 2 m), 再往上是厚细砂岩层, 3 号煤层下面是厚细砂岩层。此次试验钻孔开孔倾角 2.7°, 开孔方位角 310°, 钻进深度 89 m, 本次随钻测量所得的钻孔轨迹投影及伽马曲线如图 3 所示。

图 3a 是伽马测量曲线, 是将测试的计数率(单位 CPS)根据刻度系数转换为地层放射性(单位 API), 图 3b 上下位移是指钻孔轨迹相对于开孔点的垂直距离, 开孔点向上为正, 向下为负。

根据图 3 中的轨迹与煤层顶板之间的关系, 钻孔在煤层中延伸一段距离(0~15 m 处)进入顶板后, 在顶板中靠近煤层顶部的地方向前延伸一段距离(15~47 m 处)再次进入煤层, 最终在煤层顶部靠近顶板的地方停止钻进。

根据图 3, 伽马曲线的变化可知为: 刚入孔进入煤层时伽马数值较低(小于 80 API), 随着轨迹靠近顶板, 数值逐渐增大(90~120 API), 穿到顶板后伽马数值达到最大(120~150 API), 随着在顶板中的延伸, 伽马数值逐渐下降(小于 80 API)。根据已知的地层资料, 顶板岩性为砂质泥岩, 从伽马数

据上看, 应该是进入顶板到达砂质泥岩后轨迹逐渐下降并再次进入煤层, 在煤层中伽马数值一直稳定在较低的数值。在钻孔末端由于轨迹再次靠

近顶板, 伽马数值有逐渐增加的趋势。伽马曲线基本反映了从煤层到顶板砂质泥岩层再回到煤层的变化趋势。

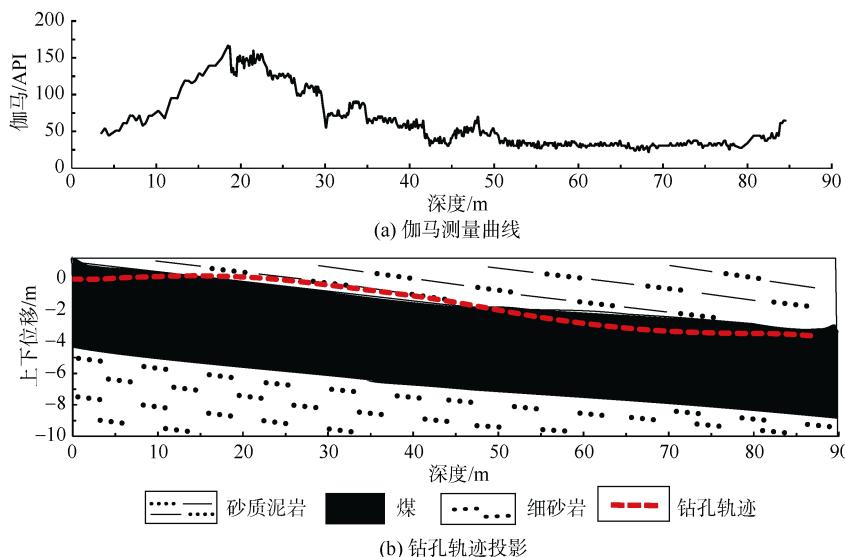


图3 伽马测量曲线与钻孔轨迹投影

Fig.3 Gamma measurement curve and borehole trajectory projection

#### 4 结论

a. 矿用电磁随钻伽马测井仪, 具有钻孔轨迹测量与伽马测井的功能, 采用电磁传输数据, 可应用于煤矿井下各类钻孔测量, 对于顺煤层钻进煤岩界面对识别及岩性划分具有重要作用。

b. 电磁随钻伽马测井仪在中国石油集团计量中心自然伽马刻度井和2号标准井进行了标定及测试。通过标定、标准井测试及与标准伽马测井曲线的对比, 验证了所研制电磁随钻伽马测井仪测量的准确性与可靠性。

c. 影响伽马测井的因素较多, 如放射性属性、仪器自身及使用环境等, 在实际使用中需根据工况条件确定主要因素, 通过分析仿真做到仪器的优化设计, 如需要考虑井眼尺寸及钻井液的影响时, 可通过相关校正方法减小影响。

d. 煤矿井下实钻试验表明, 矿用电磁随钻伽马测井仪各项性能指标均满足实际使用要求, 可应用于煤矿井下顺煤层定向钻进钻孔施工, 为提高目的层钻遇率服务。

#### 参考文献

- [1] 石智军, 董书宁, 姚宁平, 等. 煤矿井下近水平随钻测量定向钻进技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 1-6.  
SHI Zhijun, DONG Shuning, YAO Ningping, et al. Technology and equipment of horizontal measuring directional drilling in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2013,

41(3): 1-6.

- [2] 姚宁平. 我国煤矿井下近水平定向钻进技术的发展[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4): 78-80.  
YAO Ningping. Development trend of nearly horizontal directional drilling technology in coal mines of China[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(4): 78-80.
- [3] 姚宁平, 张杰, 李泉新, 等. 煤矿井下定向钻孔轨迹设计与控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 7-11.  
YAO Ningping, ZHANG Jie, LI Quanxin, et al. Tracing design and control technology of directional drilling borehole in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 7-11.
- [4] 张杰, 姚宁平, 李乔乔. 煤矿井下定向钻进技术在矿井地质勘探中的应用[J]. 煤矿安全, 2013, 44(10): 131-134.  
ZHANG Jie, YAO Ningping, LI Qiaojiao. Application of directional drilling technology in mines geological exploration[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(10): 131-134.
- [5] 王小龙. 矿用随钻方位伽马测井仪的设计与试验[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 161-167.  
WANG Xiaolong. Design and experiment of mine azimuth gamma logging instrument while drilling[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 161-167.
- [6] 汪凯斌. 矿用电磁波随钻方位伽马测井系统的研究与实现[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 145-151.  
WANG Kaibin. Research and realization of the mine electromagnetic wave azimuth gamma logging system while drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 145-151.
- [7] 王岚, 陈龙, 张鹏, 等. 随钻测井钻孔深度测量装置的设计[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(3): 144-146.  
WANG Lan, CHEN Long, ZHANG Peng, et al. Design of LWD borehole depth-measuring device[J]. Coal Geology & Explora-

- tion , 2017 , 45(3) : 144–146.
- [8] 蒋必辞 , 汪凯斌 , 潘保芝 , 等. 煤矿井下电磁波无线随钻测井软件设计与实现[J]. 煤田地质与勘探 , 2016 , 44(6) : 152–158.
- JIANG Bici , WANG Kaibin , PAN Baozhi , et al. Design and implementation of LWDEWCM software[J]. Coal Geology & Exploration , 2016 , 44(6) : 152–158.
- [9] 陈刚 , 王小龙 , 汪凯斌 , 等. 煤矿井下随钻方位伽马仪器刻度及顺煤层钻进模拟[J]. 中国矿业 , 2015 , 24(增刊 1) : 384–388.
- CHEN Gang , WANG Xiaolong , WANG Kaibin , et al. Coal mine down-hole LWD azimuth gamma instrument calibration and coal seam drilling simulation[J]. China Mining Magazine , 2015 , 24(S1) : 384–388.
- [10] 蒋必辞 , 陈刚 , 王小龙 , 等. 基于矿用随钻方位伽马的煤矿井下钻进监测[C]//2016 中国地球科学联合学术年会论文集(三十)——专题 54 : 煤炭资源与矿山地球物理 , 2016-10. 北京 : 中国和平音像电子出版社 , 2016 : 31–34.
- [11] 袁超. 随钻方位伽马测井方法基础研究[D]. 青岛 : 中国石油大学(华东) , 2012.
- [12] 骆庆锋 , 王铁永 , 梁羽佳 , 等. 方位自然伽马探测器设计研究[J]. 石油仪器 , 2012 , 26(4) : 1–3.
- LUO Qingfeng , WANG Tieyong , LIANG Yujia , et al. Design of the azimuth gamma detector[J]. Petroleum Instruments , 2012 , 26(4) : 1–3.
- [13] 杨锦舟. 基于随钻自然伽马、电阻率的地质导向系统及应用[J]. 测井技术 , 2005 , 29(4) : 285–288.
- YANG Jinzhou. Application of geosteering system based on GR and resistivity LWD[J]. Well Logging Technology , 2005 , 29(4) : 285–288.
- [14] 任晓荣 , 黄剑雄. 自然伽马测井刻度的论述[J]. 石油仪器 , 1999 , 13(4) : 25–27.
- REN Xiaorong , HUANG Jianxiong. Discussion of natural gamma logging scale[J]. Petroleum Instruments , 1999 , 13(4) : 25–27.
- [15] 杨锦舟 , 肖红兵 , 张海花. 随钻自然伽马刻度装置及量值传递研究[J]. 石油仪器 , 2004 , 18(5) : 24–26.
- YANG Jinzhou , XIAO Hongbing , ZHANG Haihua. Study on the calibration device for WMD Gamma-ray tool[J]. Petroleum Instruments , 2004 , 18(5) : 24–26.

(责任编辑 聂爱兰)