

煤层瓦斯富集区核磁共振探测技术研究

童雪瑞¹⁾, 姜志海¹⁾, 刘树才¹⁾, 李毛飞¹⁾, 王文闯²⁾

1) 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州, 221000;

2) 中国地质大学, 武汉, 430074

关键词: 核磁共振; 煤层瓦斯; 矿井地球物理

煤炭是我国的主体能源和重要工业原料, 当前和今后较长时期内, 煤炭在我国经济发展中的战略地位不可动摇(张建强等, 2023)。然而我国的煤层赋存条件复杂、煤矿事故多发, 其中瓦斯事故是重大煤矿灾害之一。近些年来, 用于瓦斯富集区探测的地球物理方法主要包括槽波、微震、声发射、电磁辐射、地质雷达等手段(王恩元等, 2022)。但是大部分方法在实际应用中仍停留在定性解释和近似定量计算阶段, 难以满足工程需求, 因此亟需发展定量瓦斯富集区探测技术。同时, 中国煤系气资源丰富, 贡献率高且勘探开发潜力大, 煤系气高效勘探开发是当前中国煤地质与非常规油气地质研究关注焦点, 定量探测瓦斯富集区可以推进煤系气高效勘探开发, 对保障我国能源安全和社会意义重大(桑树勋等, 2022)。

基于核磁共振技术定量、无损、探测信息量丰富等优点, 提出煤层瓦斯富集区核磁共振探测技术。

1 核磁共振基本理论

核磁共振技术可以通过对岩石中含氢流体(瓦斯)的弛豫时间测量来定量分析其孔隙结构及流体充填特征, 该方法具有定量、无损、可连续探测、探测信息量丰富等优点。

核磁共振探测方法是一种以核磁共振理论为基础, 通过观测识别煤层瓦斯富集区中氢核弛豫信号实现煤层瓦斯富集区探测的地球物理方法, 探测过程需要预极化、激发、弛豫等过程。首先, 将地面铺设的线圈通入当地拉莫尔频率的交变电流, 激发地下水中的氢原子发生能级跃迁。激发停止后,

由于氢原子恢复到热平衡状态的过程中会释放能量, 接收线圈将检测到核磁共振弛豫信号。在计算机的控制下, 通过有规律地改变脉冲矩的大小, 激发煤层不同位置的氢原子, 最终能够实现不同位置瓦斯富集区的直接定量探测(图 1)。

2 瓦斯富集区核磁共振响应研究

2.1 三维正演原理

核磁共振探测方法的正演过程, 包括激发场计算、核函数计算、核磁共振信号计算。瓦斯富集区的核磁共振三维正演首先需要计算地下激发磁场的空间分布, 本文使用有限元法计算磁场分布, 并使用开源软件 TetGen 进行四面体网格划分。

核(Kernel)函数代表地下各点单位数量质子所产生的核磁共振信号, 反映了该点存在氢核的情况下产生信号大小的能力, 因此也被称为灵敏度函数。核函数的计算公式可写为(Behroozmand, 2015):

$$K(q, r) = \omega_L M_0 \sin \left[-\gamma \frac{q}{I_0} |B_T^+(r)| \right] \times \frac{2}{I_0} |B_R^-(r)| \cdot e^{i[\zeta_T(r, \omega_L) + \zeta_R(r, \omega_L)]} \times [\hat{b}_R^+(r, \omega_L) \cdot \hat{b}_T^+(r, \omega_L) + i \hat{b}_0 \cdot \hat{b}_R^+(r, \omega_L) \times \hat{b}_T^+(r, \omega_L)] \quad (1)$$

其中, B_T 表示发射线圈产生的磁场, 其方向与地磁场 B_0 方向垂直; B_R 表示接收线圈产生的虚拟磁场, 这个虚拟磁场是假设接收线圈中通入单位电流所产生的。由于电磁波在导电介质中传播会发生椭圆极化, 而任意椭圆极化波均可分解为两个振幅不等、旋向相反的圆极化波叠加。 B_T^+ 表示 B_T 在垂直于

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 42230811、41974141)、国家重点研发计划资助项目(编号: 2023YFC3008901)、中国矿业大学研究生创新计划资助项目(编号: 2022WLKXJ001)、江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(编号: KYCX22_2599)的成果。

收稿日期: 2023-12-10; 改回日期: 2023-12-29; 责任编辑: 章雨旭。DOI: 10.16509/j.georeview.2024.s1.071

作者简介: 童雪瑞, 女, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事应用地球物理研究; Email: tongxuerui218@163.com。

地磁场 B_0 的平面的正旋分量, B_R^- 表示 B_R 在垂直于地磁场 B_0 的平面的逆旋分量。 $\hat{b}_0$ 表示地磁场 B_0 的单位方向向量, $\hat{b}_T^+$ 、 $\hat{b}_R^+$ 分别表示 B_T 、 B_R 垂直于地磁场 B_0 的分量 B_T^+ 、 B_R^+ 的单位方向向量。 ζ_T 、 ζ_R 分别表示发射和接收线圈磁场椭圆极化的相位偏移。

核磁共振信号可由地下各微元处核函数值与含水量乘积累加得到, 即为式(2)。

$$E(d, t) = e^{-\frac{t}{T_2}} \cdot \int G(d, \vec{r}) f(\vec{r}) d^3 r \quad (2)$$

式中 d 为任一特定的观测方案, $G(d, \vec{r})$ 为采用 d 观测方案时, $\vec{r}$ 位置处时的核函数值, t 为有效横向弛豫时间。

2.2 煤层瓦斯核磁共振响应研究

为了研究不同尺寸瓦斯富集区的核磁信号响应特征, 本节定义了一个正方体瓦斯富集区, 通过改变其边长, 计算核磁共振响应。观测系统如图1,

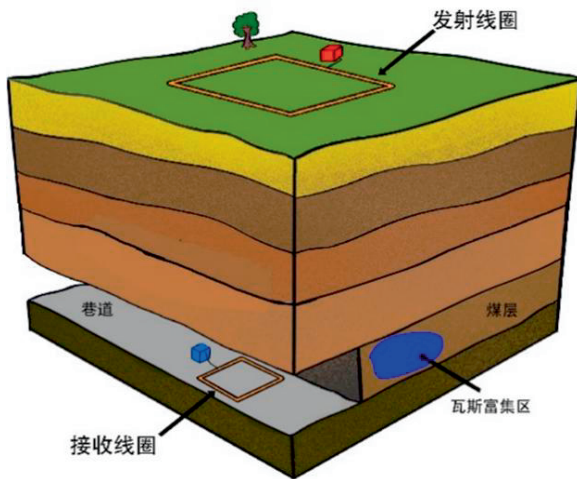


图1 核磁共振观测系统示意图

地磁场强度 59820 nT, 磁倾角 70°, 磁偏角 0°, 拉莫尔频率 2547 Hz。发射线圈是边长 150 m 的正方形单匝线圈, 电流 1A。接收线圈为边长 4 m 的正方形线圈, 匝数 50 匝, 位于地下 150 m。

通过建立瓦斯富集区地质模型, 利用数值模拟研究其核磁信号响应规律。核磁共振信号响应特征如图2所示。瓦斯富集区的边长分别设置为 10 m, 20 m, 30 m, 随着瓦斯富集区的体积增大, 核磁信号强度显著增强。

3 结论

首先提出了煤层瓦斯富集区核磁共振探测技术, 并通过三维数值模拟分析了煤层瓦斯富集区核磁共振响应特征, 总结瓦斯的核磁共振响应特征规律, 为实现煤层瓦斯富集区的精准辨识、高效施工提供理论支撑和技术保障。

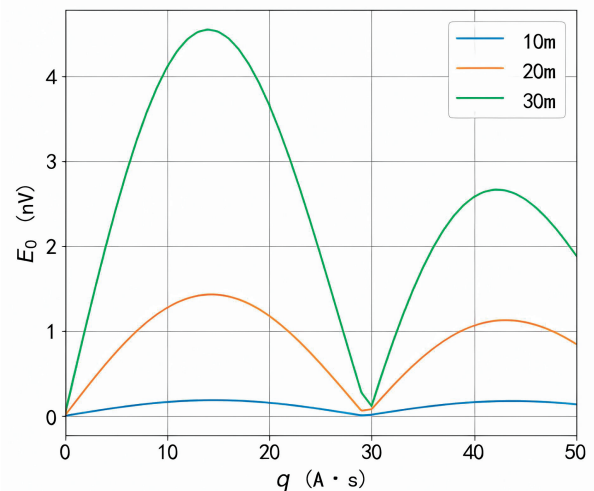


图2 核磁共振信号响应特征曲线

参 考 文 献 / References

- 桑树勋, 周效志, 刘世奇, 黄华州, 王冉, 韩思杰, 王建国, 潘冬明, 张志镇, 汪吉林, 陈同俊, 赵立明, 郑司建. 2022. 岩石力学地层理论方法及其煤系气高效勘探开发应用基础述评. 地质学报, 96(1): 304~316.
- 王恩元, 张国锐, 张超林, 李忠辉. 2022. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望. 煤炭学报, 47(1): 297~322.
- 张建强, 宁树正, 张莉, 徐小涛. 2023. 我国煤炭行业绿色发展现状及实现途径探讨. 地质论评, 69(S1): 233~235.
- Behroozmand A A, Keating K, Auken E. 2015. A review of the principles

and applications of the NMR technique for near-surface characterization. Surveys in Geophysics, 36(1): 27~85.

TONG Xuerui, JIANG Zhihai, LIU Shucui, LI Maofei, WANG Wenchuang : Research on nuclear magnetic resonance detection technology in coal seam gas enrichment areas

Keywords : nuclear magnetic resonance; coal seam gas; mine geophysics