

地球物理技术在煤层气勘探中的应用

魏 冬,王宏语

(中国地质大学(北京)能源学院 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室 北京 100083)

摘要: 煤层气的勘探对于优化能源结构、保障煤矿安全、减少温室气体排放等具有重要意义。基于煤储层的方位各向异性和双相介质特征,方位 AVO、转换横波法和 AVO 等地震勘探技术能够对煤层气富集区做出有效预测。测井技术具有方法种类多、分辨率高等特点,在煤层气储层识别和储层参数定量解释方面取得了较好的应用效果。开展地震技术和测井技术的综合利用是今后煤层气勘探技术的发展方向。

关键词: 煤层气; 方位; 各向异性; 双相介质; 储层识别

中图分类号: TD849; P631.81

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2011)05-0052-04

煤层气是煤在煤化作用过程中经生物化学和热解作用生成,主要以吸附态储存于煤层裂隙,成分以 CH_4 为主的非常规天然气。加大煤层气的勘探开发,对于优化能源结构,保障煤矿安全生产,减少温室气体排放等具有重大意义^[1]。

中国煤层气勘探开发历程包括地质探索、技术引进、产业化发展 3 个阶段^[2]。截至 2008 年,全国共钻煤层气井 2800 余口,投产 1419 口,煤层气产量为 $7.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[3]。围绕煤储层的地质特征及地球物理响应等基础研究,加大地球物理技术在煤层气勘探中的应用,是推动中国煤层气产业发展的必由之路。

1 地震技术

煤层气主要储集在煤层裂隙中。煤层中裂隙的存在使煤储层表现为方位各向异性和双相介质特征^[4],这些特征为利用地震技术预测煤层气奠定了基础。

地震波在方位各向异性介质中传播后,横波将分裂为偏振方向近乎正交的快横波和慢横波。纵波地震属性随方位角变化而变化。因此通过对快、慢横波的偏振方向与时差以及纵波属性的分析可

以确定裂隙的走向与密度,进而预测煤层气富集区。

双相介质理论认为地下介质由固体颗粒和流体介质两部分组成^[5]。由于固体颗粒与流体介质的相互作用,地震波在双相介质中传播时将产生快纵波和慢纵波。快纵波的固相位移和流相位移同相,慢纵波的固相位移和流相位移反相。慢纵波使地震波的能量分配发生变化,地震波场特征表现为低频共振、高频衰减。

1.1 纵波方位 AVO 技术

纵波在裂缝地层表现出方位各向异性特征。当入射方位与裂隙走向平行时,纵波速度快,振幅弱;垂直时速度慢,振幅强。因此,利用纵波振幅、速度等随方位角的变化能够预测裂隙发育带。

常锁亮等^[6]对沁水盆地煤层进行方位 AVO 反演,得到煤层各向异性强度平面分布图。研究表明,褶曲转折部位及断层两侧各向异性强度强,推断这些区域裂隙系统发育,为煤层气富集区。

在实际研究中,纵波方位 AVO 技术仅适用于定向排列的角度较大的裂隙带的检测^[6]。对于不同角度、不同方向的多组裂隙,方位 AVO 技术应用效果欠佳。此外,在进行野外数据采集时,使用宽方位、高覆盖、炮检距均匀的三维地震采集技术,能够

获得高信噪比、高分辨率的地震资料,降低裂隙检测风险。

1.2 转换横波法

地震波在各向异性介质中传播后,横波依据入射方位与裂隙走向的相对关系发生不同的分裂情况^[7]。垂直入射时只产生慢波,平行入射时只产生快波,其它方位上将分裂为2个偏振方向近乎正交的横波,偏振方向与裂隙方向平行的为快横波,与裂隙方向垂直的为慢横波。2种横波的时差在入射方位与裂隙走向呈 45° 角时达到最大,在垂直与水平方向上变为零,且当入射方位经过垂直或平行方向变化时,横向分量发生极性反转。通过对快、慢横波偏振特性、时差以及振幅差等属性的分析,能够对裂隙发育带及裂隙特性做出有效判断。由快横波的偏振方向可推知裂隙走向,由快横波和慢横波的时差可推知裂隙密度,时差越大,裂隙密度越高。由快、慢横波振幅差可定性确定裂隙发育区。

王世瑞等^[8]利用多分量裂缝检测技术对安徽北部煤矿煤层气储层特征和煤层各向异性特征进行研究并取得了很好的预测效果。

在实际研究中,横波地震资料采集成本昂贵,信噪比、分辨率普遍偏低,与之配套的处理方法也不太成熟。这些因素成为转换横波法在煤层气地震勘探中推广和应用的羁绊。

1.3 数字滤波法

基于双相介质中的能量再分配及其“低频共振、高频衰减”的表现特征,数字滤波法可以从地震记录中提取所需频率范围内的能量分布特性,去掉不需要的频率成分,对煤层气富集区做出有效预测。

杨双安等^[5]采用数字滤波法对山西唐安煤矿三维地震资料进行处理,得到煤层能量平面分布图并成功预测多处煤层气富集区。

1.4 频谱分解技术

频谱分解技术主要依据含煤层气煤层的高频吸收特性和薄煤层反射的调谐原理预测煤层气富集区^[9]。高频吸收特性是指当地震波经过含煤层气煤层时,高频成分能量衰减较地震波通过不含煤层气煤层时严重。薄层反射的调谐原理是指当薄层厚度增加至 $1/4$ 波长的调谐厚度时,反射振幅达到最大值。不同频率地震波调谐厚度不同。当地震数据从时间域变换到频率域,在振幅谱中,振幅随频率增加逐渐变大,直至达到调谐频率,之后振幅随频率增加而降低。当顶、底界面相差 $1/2$ 波长

也就是 $3/2$ 个调谐频率时,顶、底反射相消,振幅随频率增加而达到最小。

常锁亮等^[10]利用频谱分解技术对山西阳泉矿区的煤层气富集区进行预测。研究表明,研究区西南部以及向斜轴部、挠曲及断层附近低频能量较高,表明这些地区煤层气含气量高。预测成果与钻孔测试资料吻合较好。

1.5 AVO 技术

AVO技术是根据叠前CDP道集中反射振幅随炮检距的变化情况,提取相关地震属性数据,进而反演与储层特性有关的物性参数以预测储层有利区。

地震波在饱和煤层气的煤层中传播后,纵波速度降低,横波速度基本不变,泊松比减小,从而使得饱和煤层气的煤层与盖层之间泊松比差增大。由于泊松比是影响AVO响应的因素,因此可用AVO技术研究煤储层的含气性。

常锁亮等^[6]利用AVO技术对沁水盆地煤矿煤层气进行预测。结果表明,通过AVO反演得到的煤层伪泊松比平面图与区域构造对应关系明显。高泊松比区多分布在向斜轴部及翘起端、背斜翼部以及逆断层下降盘等应力集中区。

在实际应用中,为满足AVO技术预测煤层气富集程度的有效性,煤层气勘探中观测系统设计应保证地震波的有效入射角为 $0^\circ\sim 30^\circ$ 或更大,偏移距均匀分布并保证资料信噪比。

地震技术广泛应用于煤层气勘探领域,在煤储层物性研究方面也取得了显著成果。但每一种地震技术都有其局限性和适用性。因此,多种地震技术相互结合,相互验证,才能精细描述煤储层的物性特征,有效预测煤层气富集区。

2 测井技术

测井是通过测井曲线反映的地层岩性的物理特征来解决地质学问题的一种技术。测井技术具有方法种类多、分辨率高等优点,在常规油气勘探开发中发挥了重要作用。煤层气测井技术主要用于煤层气储层的识别和煤层气储层参数的定量解释^[11]。

2.1 煤层气储层识别技术

基于测井曲线的基本原理,通过对大量已知煤层气储层测井曲线地质响应的分析总结,国内外学者提出了多种煤层气储层识别方法,可以归纳为直

接识别法和孔隙度分析法。

2.1.1 直接识别法

煤层气储层一般具有高电阻率、高声波时差、低自然伽马、低体积密度的测井响应特征。在没有渗透层的煤层中,当浅侧向测井曲线明显高于深侧向测井曲线时,说明此处可能含气。此时若声波时差增大而体积密度变小,则可判断该层含气。若对应的自然伽马和自然电位曲线变低,则可判断此层为煤层气储层^[12]。

2.1.2 孔隙度分析法

煤层气储层中各向异性显著,中子和密度测井不受地层各向异性的影响。因此,中子-密度孔隙度重叠法是比较理想的煤层气测井预测方法。同时,中子-声波孔隙度重叠法与中子-密度孔隙度重叠法能够相互验证,排除煤层气储层预测时的多解性。

煤层的主要成分是碳,水和灰分含量很少。因此,中子、声波和密度孔隙度响应主要取决于煤层碳含量。多数情况下,煤层中子孔隙度、密度孔隙度和声波孔隙度相互接近。煤储层中煤层气的存在会引起中子孔隙度减小,密度孔隙度和声波孔隙度增大。因此,煤层气储层的中子孔隙度小于密度孔隙度和声波孔隙度。

谭廷栋^[13]采用中子、密度、声波孔隙度重叠法对南海西部气田测井曲线进行分析,有效识别出煤层气储层。

2.2 煤层气储层参数定量解释技术

测井技术可以确定的煤层气储层参数包括:①煤层气储层的孔隙度、渗透率和饱和度;②煤岩工业分析参数;③煤层气的吸附、解吸特性参数;④煤层厚度、深度、储层压力、温度和产能等。

2.2.1 煤层气储层的孔隙度、渗透率和饱和度

煤层气储层的孔隙包括裂缝孔隙与基质孔隙。实际研究中,裂缝孔隙度常用深、浅侧向测井曲线值计算^[14]:

$$\varphi_f = \left(\frac{\frac{1}{R_{LLS}} - \frac{1}{R_{LLD}}}{\frac{1}{R_{mf}} - \frac{1}{R_w}} \right)^{\frac{1}{mf}}$$

式中 R_{LLS} 、 R_{LLD} 分别为浅、深侧向电阻率; R_{mf} 、 R_w 分别为泥浆滤液电阻率和地层水电阻率; mf 为裂缝孔隙度指数; φ_f 为裂缝孔隙度。

根据水分含量与裂缝孔隙度,求取两者之差即

为基质孔隙度。

煤层气储层裂缝渗透率取决于煤层本身的裂缝发育程度。因此,根据裂缝孔隙度可以得到裂缝渗透率。计算公式如下:

$$K_f = RF \times 8.33 \times 10^6 \varphi_f$$

式中 φ_f 为裂缝孔隙度; K_f 为裂缝渗透率; RF 为比例因子,可由实验数据得出^[15]。

煤层气主要以吸附态储存于煤层裂隙中。由 Langmuir 实验定律可知,煤对 CH_4 的吸附能力与温度和压力有关:当温度一定时,随压力升高吸附量增大,当压力达到一定值时,煤的吸附能力达到饱和,再增加压力,吸附量也不再增加。煤的吸附特征可用方程描述为:

$$Q = \frac{V_L P_p}{P_p + P_L}$$

式中 Q 为一定压力下煤吸附的气体量; P_p 表示压力; V_L 表示 Langmuir 体积; P_L 表示 Langmuir 压力^[16]。

2.2.2 煤岩工业分析参数

煤岩成分包括固定碳、灰分、挥发分以及水分。水分、挥发分和固定碳都与灰分线性相关,其中挥发分和固定碳与灰分的线性相关性较好。煤的真密度与灰分有较好的线性相关性。因此,采用统计相关分析法,通过密度测井与灰分、灰分与挥发分、灰分与固定碳之间的相关关系表达式,结合密度测井数据,能够求出煤岩成分的各项数据^[17]。

谭廷栋^[13]应用统计相关分析法对沁水盆地煤层气井进行煤岩成分分析,取得了较好的效果。

此外,测井数据还可以对煤层气吸附、解吸特性参数和煤层厚度、深度进行厘定。测井曲线通过对煤层与顶底板层界面深度的界定,进而确定煤层厚度和深度。对煤层有密切响应的测井如自然伽玛测井、密度测井和电阻率测井等都可以进行煤层厚度、深度的判定^[18]。

测井技术在煤层气储层识别和煤层气储层参数的定量解释方面取得了较好的应用效果,但在实际应用中仍存在一些问題。煤层气测井技术是基于石油测井和煤田测井技术发展起来的,现有的油气藏测井基础理论不适用于煤层气测井。煤储层的双重孔隙结构和各向异性特征,造成储层地质与测井响应之间关系复杂化,呈现更加显著的非线性特征,为测井资料解释带来多解性、模糊性和不确定性。因此,基于煤储层双重孔隙和各向异性的自

身结构特征,加强煤层气测井的基础理论研究,开展适用于煤层气储层特点的专用测井技术研究,势在必行。

3 结 语

中国含煤盆地叠加复合现象明显,构造演化历史长,控气因素复杂,煤的多阶段演化和多热源叠加变质作用明显,煤层气多期生成并发生调整与再分配,资源分布非均一性显著,致使煤层气勘探难度大,勘探目标不明确,高产富集区预测不准。因此,开展地震技术和测井技术在煤层气勘探中的综合利用,发挥各自优势,加强煤层气藏高精度地球物理勘探技术研究,为煤层气勘探提供更多有利的勘探目标是今后的重要任务。

参考文献:

- [1] 宋岩,柳少波,赵孟军,等.煤层气藏边界类型、成藏主控因素及富集区预测[J].天然气工业,2009,29(10):5-9.
- [2] 王许涛,刘文斌,张百良.煤层气开发利用的制约因素及对策[J].洁净煤技术,2006,12(4):27-30.
- [3] 赵庆波,陈刚,李贵中.中国煤层气富集高产规律、开采特点及勘探开发适用技术[J].天然气工业,2009,29(10):13-19.
- [4] 刘立州.长平井区瓦斯赋存及涌出规律分析[J].洁净煤技术,2008,14(6):104-107.
- [5] 杨双安,宁书年,张会星,等.三维地震勘探技术预测瓦斯的研究成果[J].煤炭学报,2006,31(3):334-336.
- [6] 常锁亮,杨起,刘大锰,等.煤层气储层物性预测的AVO技术对地震纵波资料品质要求的探讨[J].地球物理学进展,2008,23(4):1236-1243.
- [7] 何兵寿,彭苏萍,张会星,等.煤体中直立裂隙的多波地震响应及预测[J].地质学报,2008,82(10):1416-1421.
- [8] 王世瑞,杨德义,彭苏萍,等.多分量转换波裂缝检测技术的进展[J].特种油气藏,2004,11(3):12-15.
- [9] 李仁海,崔若飞,毛欣荣,等.利用岩性解释方法圈定岩浆岩侵入煤层范围[J].地球物理学进展,2008,23(1):242-248.
- [10] 常锁亮,刘大锰,林玉成,等.频谱分解技术在煤田精细构造解释及煤含气性预测中的应用[J].煤炭学报,2009,34(8):1015-1021.
- [11] 张松扬.煤层气地球物理测井技术现状及发展趋势[J].测井技术,2009,33(1):9-15.
- [12] 刘丽民,魏庆喜,徐仁桂.煤层气常规测井技术与应用[J].中国煤层气,2008,5(1):28-31.
- [13] 谭廷栋.天然气勘探中的测井技术[M].北京:石油工业出版社,1994.
- [14] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释[M].东营:石油大学出版社,1997.
- [15] 乌洪翠,邵才瑞,张福明.深部煤层气测井评价方法及其应用[J].煤田地质与勘探,2008,36(4):25-33.
- [16] 侯俊胜.煤层气储层测井评价方法及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2000.
- [17] 赵军龙,戴华林,王彦龙,等.煤型气储层的测井评价技术[J].煤田地质与勘探,2008,36(6):24-28.
- [18] 秦勇.国外煤层气成因与储层物性研究进展与分析[J].地学前缘,2005,12(3):289-298.

Application of geophysical technique on coal bed methane exploration

WEI Dong, WANG Hong-yu

(Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China;
School of Energy Resource, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The exploration of coal bed methane contributes greatly to optimize energy structure, guarantee coal mine safety and reduce emissions of greenhouse gases. Based on the azimuth anisotropy and two-phase medium characteristics of coal bed, azimuthal AVO, converted shear wave and AVO can detect coal bed methane enrichment area effectively. With numerous and high-resolution logging techniques, well logging technology has a good effect on reservoir recognition and reservoir parameter quantitative interpretation of coal bed methane. Comprehensive utilization of seismic technique and well logging technique is the trend of coal bed methane exploration technology.

Key words: coal bed methane; azimuth; anisotropy; two-phase medium; reservoir recognition