

煤岩界面识别的声学建模

杨文萃,邱锦波,张 阳,张福建,刘 星
(天地科技股份有限公司 上海分公司,上海 201400)

摘 要:为解决煤岩界面识别问题,采用声学探测法,依据声波在水煤、煤岩界面反射、折射时,在界面处满足声压连续和质点速度连续的物理性质,建立了声学传输路径模型。考虑到经过分界面的声波在介质中传播的同时存在介质衰减,推导出声波在水、煤、岩3种介质传输时于水煤、煤岩2个界面传播、反射的回波公式,构成路径传输煤岩识别声学模型。该模型为包含不同介质的声吸收系数、特性阻抗、厚度和声波频率、幅值比模数的非线性方程。通过搭建煤岩识别试验平台,水听器作为声波收发仪器,与信号发生器、示波器构成收发系统和分析装置,使用SIMULINK模拟声波收发及建模过程,标定介质的声吸收系数,求解发射、接收声波的幅值比模型方程获得煤层厚度、水层厚度数值解,从而验证了模型的可行性。仿真试验表明,理论煤厚识别误差为0.03 m,后续将通过现场试验进一步验证。

关键词:煤岩识别;声学建模;声学探测;煤层厚度

中图分类号:TD263.2

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2015)03-0100-04

Acoustic modeling of coal-rock interface identification

YANG Wen-cui, QIU Jin-bo, ZHANG Yang, ZHANG Fu-jian, LIU Xing

(Shanghai Branch, Tiandi Science and Technology Company Limited, Shanghai 201400, China)

Abstract: In order to solve the problem of coal-rock interface identification, based on the acoustic detection method, according to the sonic wave reflection and refraction at the water-coal interface and coal-rock interface which met the physical properties of the acoustic pressure continued and particle velocity continued at the interface, an acoustic transmission path model was established. In consideration of the medium attenuation existed in the transmission of the sonic waves at the interfaces in the medium, two transmission and reflection echo formulas of the water-coal and coal-rock interfaces were derived when the sonic waves transmitted in the water, coal and rock three mediums, and the acoustic model of the path transmission coal-rock identification was established. The model was a nonlinear equation, including different medium sound absorption coefficient, characteristic impedance, thickness and acoustic wave frequency and amplitude ratio modulus. With the establishment on the experiment platform of the coal-rock identification, the hydrophone as the sonic wave transceiver made up transmit-receive system and analysis device with the signal generator and oscillograph. The SIMULINK was applied to simulate the acoustic wave transmit-receive and modeling process, to calibrate the sound absorption coefficient of the medium and to solve the amplitude ratio model equation of the acoustic wave transmission and receiving to have the seam thickness and water thickness numerical values and thus the feasibility of the model was verified. The analogue simulation showed that the theoretical identification error of the seam thickness was 0.03 m and the further verified with the site test would be conducted.

Key words: coal-rock identification; acoustic modeling; acoustic detection; seam thickness

0 引 言

煤岩识别是国内外公认的高技术、高难度课题,

也是实现自动调高和综采自动化的关键与前提^[1]。国内外研究者分别对此尝试了射线探测法、雷达发射系数反演法、记忆截割法、测力截齿法、同位素传

收稿日期:2014-08-10;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.est.2015.03.024

基金项目:国家高技术研究计划(863计划)资助项目(2012AA06A406)

作者简介:杨文萃(1987—),女,河南周口人,助理研究员,硕士。Tel:021-67100501, E-mail: ywecumt@163.com

引用格式:杨文萃,邱锦波,张 阳,等.煤岩界面识别的声学建模[J].煤炭科学技术,2015,43(3):100-103.

YANG Wen-cui, QIU Jin-bo, ZHANG Yang, et al. Acoustic modeling of coal-rock interface identification[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3):100-103.

感、光纤探测法^[2]。射线探测法在射线含量丰厚的矿区可以探测到煤厚,但该方法只适用于我国 20% 具有放射性顶板的煤矿上。雷达探测法通过测量煤和页岩界面的综合反射系数,利用由天线移动形成的空间调制识别传递函数和散射矩阵计算介电常数和各层煤和页岩的厚度。然而天线散射和目标散射增加了时间域问题的难度,天线装置在收发电磁波时仍存在天线环时响应、天线放大器溢出等技术问题^[3]。记忆截割法依靠煤层地质变化的连续性估计煤厚,但是精度很低。由于探测方式的局限性和井下地质的复杂性均未取得理想效果。唯一成功应用在美国的射线探测法由于我国矿井煤层地质原因也无法广泛推广^[4]。综上所述,非接触式探测是解决煤岩识别问题的有效手段。鉴于声波探测在军事、医学、地震勘探、海底探测等领域应用广泛^[5-6],笔者提出采用声学探测法解决煤岩识别问题,通过建立声学路径传输模型,依据煤、岩等特性参数,对模型的可靠性加以验证,以期为后续的地面试验提供理论基础和前期保障。

1 煤岩探测试验装置

声学探测法是用声波检测被测物体的厚度、特性参数、物理性质的方法。利用发出的声波穿透被测介质和相应界面,通过接收在不同界面处的回波信号的幅值、相位来推算被测物体的信息,可以根据不同的被测对象选择发射频率,其适应性较强。在采煤机滚筒处安装的声学测量仪器,负责收发一定频率的声波,该仪器应具备较好的防水、防震和防爆性。采煤机自带的水压系统通过水路透过水孔和喷嘴射出一定水压的水流,覆盖声波传输路径直至煤层。水的特性阻抗值与煤、岩接近,故用来取代空气作为传输媒介,以此大幅降低界面间传播时的能量损失,使得有足够能量的声波被接收水听器识别。为评估下文推导的声波公式的正确性,设计试验平台进行模型验证。声波在 3 种介质中的线路传输如图 1 所示。

信号发生器发出的正弦波或脉冲波的信号,经过功率放大器放大,传入作为压电换能器的水听器,水听器是一种在水下发射和接收声波的换能器。由水听器向水煤界面发射的声波,在如图 1 所示的各介质水、煤、岩中传播,并经水煤分界面和煤岩分界面折射、反射,最终由作为接收器使用的水听器接收^[7]。仪器由发射部分和接收部分构成。发射部

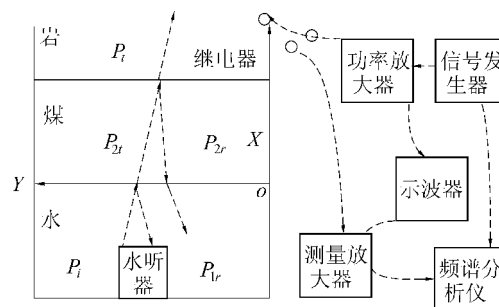


图 1 试验台仪器布置与声波传输路径

分为信号发生器和功率放大器,信号发生器调节发射声波的频率、幅值、初相位等信息,功率放大器保证发射的能量足够多,以确保经路径损耗和散射衰减后能被接收部分识别。接收部分包括一个测量放大器、示波器和频谱分析仪。发射接收电路是一个收发共用的水听器转换电路,由三极管实现收发线路的切换。

2 声波路径传输过程

2.1 传输路径中声波的声压

声源不同,声压振幅分布不同,发射声波的空间分布就不同,分别有 Gaussian 型、贝塞尔型、平面型声波,以下公式推导基于平面声波。声压是描述声波的基本物理量之一,使用声压来描述路径传输中的声波变化。涉及到的声波属于小振幅范畴,小振幅声波的波动方程为^[8]:

$$\partial^2 p / \partial x^2 = \partial^2 p / (\partial t^2 c_0^2) \quad (1)$$

式中: p 为声压; x 为图 1 坐标下的声波传输位置; c_0 为声速; t 为声波传输空间里的时间坐标。

求解式(1),得出水、煤、岩各介质中声压如下:

水中声场声波运动方程为^[8]

$$P_i + P_{1r} = P_{1a} e^{j(\omega t - k_1 x)} + P_{1ra} e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (2)$$

式中: P_i 为入射声波的声压,幅值为 P_{1a} ; P_{1r} 为入射波在水煤界面产生反射波的声压,幅值记为 P_{1ra} ; ω 为声波角频率; k_1 为声波波数, $k_1 = \frac{\omega}{c}$, c 为声波速度; $(\omega t + k_1 x)$ 为声波相位信息。

在不考虑损耗、散射、声吸收情况下,煤中透射波和反射波为

$$P_{2t} = P_{2ta} e^{j(\omega t - k_2 x)}$$

$$P_{2r} = P_{2ra} e^{j(\omega t + k_2 x)}$$

式中: P_{2t} 为透入煤层中声波的声压,幅值为 P_{2ta} ; P_{2r} 为煤岩界面反射回煤质中声波的声压,幅值记为 P_{2ra} ; k_2 为煤质中声波波数。

岩中透射波为 $P_t = P_{ta} e^{j[\omega t - k_3(x-x_c)]}$, P_t 为透射到岩层中声波的声压,幅值为 P_{ta} ; k_3 为岩中声波波数; x_c 为当前声波路径下的煤层厚度。

2.2 声波路径传输中的损耗

声波在非理想媒质传播时,会出现随着距离的增大而逐渐衰减的物理现象。介质中声波的衰减分为散射衰减和吸收衰减。散射衰减是由介质颗粒或孔隙导致,一般为瑞利散射。吸收衰减为内摩擦造成的声吸收,衰减系数为 α ,声波在固体中传播时,该系数与声波频率 f 的一次方成正比^[9]: $\alpha = \alpha_0 f$,其中: α_0 为不考虑频率变化的衰减系数。

声波在液体中传播时,热传导的声吸收系数与声波频率的二次方成正比: $\alpha = \alpha_0 f^2$ 。在液体中不含颗粒杂质的情况下,衰减中不含颗粒损耗与粘滞。散射衰减相对声吸收幅值太小,忽略不计^[10]。声波振幅在传播路径上的吸收损耗为 $e^{-\alpha_0 f x}$ 或 $e^{-\alpha_0 f^2 x}$ 。考虑声波路径上声吸收,根据水煤界面和煤岩界面声压连续,在 $x=0$ 处得出:

$$P_{ia} + P_{1ra} = P_{2ta} + P_{2ra} e^{-\alpha_c f x_c} \quad (3)$$

$$e^{-\alpha_c f x_c} P_{2ta} e^{j(\omega t - k_2 x_c)} + P_{2ra} e^{j(\omega t + k_2 x_c)} = P_{ia} e^{j\omega t} \quad (4)$$

式中, α_c 为煤的吸收系数。

考虑声波路径上声吸收后,根据法向质点速度在水煤界面和煤岩界面连续,在 $x=0$ 处得出:

$$\frac{P_{ia}}{R_1} - \frac{P_{1ra}}{R_1} = \frac{P_{2ta}}{R_2} - \frac{P_{2ra}}{R_2} e^{-\alpha_c f x_c} \quad (5)$$

$$e^{-\alpha_c f x_c} \frac{P_{2ta}}{R_2} e^{j(\omega t - k_2 x_c)} - \frac{P_{2ra}}{R_2} e^{j(\omega t + k_2 x_c)} = \frac{P_{ia}}{R_3} e^{j\omega t} \quad (6)$$

式中: P_{ia} 为水煤分界面上入射声波的声压幅值; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为水、煤、岩的特性阻抗。 $R = P e^{j(\omega t - kx)} / V$ (k 为介质中声波波数, V 为媒质中的质点速度)。

解式(3)一式(6)方程组,得出发射和接收的声波振幅之比,该比值是一复数,对此复数求模 A ,得:

$$A = \sqrt{M/N} e^{-2\alpha_{wa} f^2 x_{wa}} \quad (7)$$

$$M = (R_1 + R_2)^2 e^{-2\alpha_c f x_c} + \frac{2(R_2^2 - R_1^2)(R_3 + R_2)}{(R_3 - R_2)} \cos(2k_2 x_c) + \frac{(R_2 - R_1)^2 (R_2 + R_3)^2}{(R_3 - R_2)^2} e^{2\alpha_c f x_c} \quad (8)$$

$$N = (R_2 - R_1)^2 e^{-2\alpha_c f x_c} + \frac{2(R_2^2 - R_1^2)(R_3 + R_2)}{(R_3 - R_2)} \cos(2k_2 x_c) + \frac{(R_2 + R_1)^2 (R_2 + R_3)^2}{(R_3 - R_2)^2} e^{2\alpha_c f x_c}$$

式中: α_{wa} 为水的吸收系数; x_{wa} 为收发器距离水煤界面的垂直距离。

3 仿真模拟与标定

3.1 仿真过程与测厚反演

使用 SIMULINK 软件建立了式(7)所示的声学模型^[11],由信号发生器发出一定频率的正弦波信号,采样时间为 $1/10000$ s。模拟在试验平台下声波的传输,即声波透过了水、煤、岩3种介质,在水煤界面、煤岩界面上反射并且最终返回到接收端。

已知多频率点下模数式(7)是多参数非线性方程组^[13],方程中参数特性阻抗反映声波在介质分界面传播时反射、折射的情况,它表征了声波在界面间传播的特征,已知各个介质的特性参数包括介质密度 ρ 、声在其中的传播速度 v ^[14],由特性阻抗公式 $R = \rho v$,即可求出各介质特性阻抗。水、煤、岩的特性阻抗分别为 1.48×10^6 、 3.08×10^6 、 7.5×10^6 Ns/m³。模型中另外2个参数煤的声吸收系数为 $\alpha_c = 0.6 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$ ^[12],水的吸收系数取 $\alpha_{wa} = 10^{-5} \text{ dB/m}$ ^[10]。

3次仿真模拟发射端发出的信号的波形方程分别为 $y = 10 \sin(6280t)$, $y = 20 \sin(628t)$, $y = 10 \sin(62800t)$, y 为平面声波的声压幅值, t 为时间。

建立的 Simulink 仿真模型由各个模块构成,每个模块代表一个特定频率的信号传输,仿真模型由信号发射源、声学建模模块、接收与频谱分析3部分组成。经模型仿真后输出端信号用示波器检测。模型仿真运行后可输出与输入信号同频、不同幅值的正弦信号,并将发送、接收信号分别送入示波器和频谱分析仪,捕捉并获取两者的幅值之比,即为式(7)中的模数 A 。10、1 000、10 000 Hz 频率下,由仿真所得收发信号模数比 A 分别为 1.65、1.67、2.27。

标定 10、1 000、10 000 Hz 频率下的煤吸收系数、水吸收系数,在煤岩识别仿真试验平台下,使收发器发出和接收的脉冲信号经放大处理后送入示波器和频谱分析仪,求得收发信号幅值之比的模数 A 后,代入非线性模型方程组(7)的数值求解公式,计算出实际煤层厚度为 0.21 m,水层厚度为 0.43 m。而设定的煤厚 $x_c = 0.2 \text{ m}$ 、 $x_{wa} = 0.4 \text{ m}$,即煤厚识别误差为 0.03 m。

3.2 参数标定

为保证后续试验的准确性,煤吸收系数、水吸

收系数需要加以标定^[15,7],获取发射与接收信号的幅值之比后,对其求模,代入式(7),测量试验平台布置的煤层厚度、水层厚度,将其作为已知量,以煤吸收系数、水吸收系数为未知量,代入非线性模型方程组的数值解公式,计算出煤吸收系数、水吸收系数。

4 结 论

1) 设计了声学探测试验平台,声学探测作为一种新的煤岩识别探测手段,以声波回波的能量特征为参数,识别路径传输中的煤层厚度。

2) 声波路径中水煤界面、煤岩界面的声压连续和质点速度连续是声波建模的理论基础。

3) 建立了声波在水、煤、岩 3 种介质中传播,穿透水煤、煤岩 2 个界面的声学模型,得出了最终的回波公式,声学建模时考虑了声波在介质中的吸收过程。

4) 对探测声波收发信号的建模过程作了 SIMULINK 仿真,后续将进一步对模型用于井下解决煤岩识别的效果进行试验验证。

参考文献:

- [1] 方新秋,何 杰. 煤矿无人工作面开采技术研究[J]. 科技导报,2008,26(9):57-61.
- [2] Wencui Yang, Shibo Wang. Coal-rock interface sensing technology applied for horizon control of mining shearers[C]. 2010 international conference on Electrical and Control Engineering, 25-27 June, 2010; 587-590.
- [3] Robert L, Walter J Johnson. A radar coal thickness sensor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(5):834-840.
- [4] Bessinger Stephen L, Nelson, Michael G. Remnant roof coal thickness measurement with passive gamma ray instruments in coal mines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(3):562-565.
- [5] 马昭军,刘 洋. 地震波衰减反演研究综述[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4):1074-1082.
- [6] 凌 云. 大地吸收衰减分析[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(1):1-8.
- [7] 迟凤阳. 混浊水介质声吸收实验测量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009:32-50.
- [8] 杜功焕,许绛垣,朱哲民. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001:182-214.
- [9] J E 怀特(美). 地下声波[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 97-157.
- [10] 刘永伟. 混浊海水声吸收与声散射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011:86-97.
- [11] 郑智琴. Simulink 电子通信仿真与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002:92-177.
- [12] 苏道宁,冯世瑄. 岩石的声衰减与声频谱的变化[J]. 华东石油学院学报, 1986, 35(10):110-115.
- [13] 杰拉尔德,惠特莱(美). 应用数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:25-117.
- [14] 冯春节. 二维地震勘探在草原区煤田勘探中的实际应用[J]. 山西建筑, 2007, 33(12):116-117.
- [15] 刘海滨. 岩石吸收系数的计算和测定方法[J]. 吉林地质, 1996, 15(2):82-86.
- [1] 方新秋,何 杰. 煤矿无人工作面开采技术研究[J]. 科技导报, 2008, 26(9):57-61.
- [2] Wencui Yang, Shibo Wang. Coal-rock interface sensing technology applied for horizon control of mining shearers[C]. 2010 international conference on Electrical and Control Engineering, 25-27 June, 2010; 587-590.
- [3] SZKLARSKI L M. Problem of limitation of oscillation of winder ropes [J]. Automation for Mineral Resource Development, 1985(6):45-53.
- [4] Wilde D H, Mech E. Effects of emergency braking on multi-rope tower-mounted friction winders [J]. Colliery Guardian, 1964 (20):683-690.
- [5] 特拉乌毕 E C, 薛太恺. 摩擦轮提升设备按钢绳不滑动条件的精确计算[J]. 矿山机械, 1980, 8(5):30-36.
- [6] 李玉瑾. 摩擦提升防滑安全研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1992.
- [7] 李玉瑾. 多绳摩擦轮提升的防滑边界约束条件分析[J]. 煤炭学报, 1992, 17(3):105-111.
- [8] 李玉瑾. 竖井提升的冲击限制设计法[J]. 煤矿设计, 1994(6): 20-23.
- [9] 李玉瑾. 多绳摩擦提升系统动力学研究与工程设计[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008:38-42.
- [10] Hankus J. New version of criterion of winding rope contraction [J]. Archives of Mining Sciences, 1996, 42(4):531-542.
- [11] Zarudzki J. The optimal choice of mining hoisting process parameters [J]. Archives of Mining Sciences, 1995, 41(1):134-144.
- [12] 李玉瑾. 电梯曳引钢丝绳张力计算[J]. 中国电梯, 2003, 14(1):14-15.
- [13] 李玉瑾, 刘宏斌. 改善矿井提升机液压站制动性能的研究[J]. 矿山机械, 2000, 28(8):31-32.
- [14] 李玉瑾. 多绳摩擦轮提升系统的动力学研究与设计[J]. 煤炭工程, 2003(9):6-9.
- [15] Kou Zi-ming, He Meng-he. Problem in the hoist control system and its improvement way [J]. Kuangshan Jixie/Mining Machinery, 1998, 26(6):35-38.

(上接第 99 页)