

王贇, 许小凯, 张玉贵. 六种不同变质程度煤的纵横波速度特征及其与密度的关系. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3754-3761, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.022.

Wang Y, Xu X K, Zhang Y G. Characteristics of P-wave and S-wave velocities and their relationships with density of six metamorphic kinds of coals. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(11): 3754-3761, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.022.

六种不同变质程度煤的纵横波速度特征 及其与密度的关系

王 贇¹, 许小凯², 张玉贵²

1 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

2 河南理工大学瓦斯地质研究所, 焦作 454003

摘 要 对采自不同地区和煤矿的六种不同变质程度煤样进行常温常压条件下的超声测量. 测量发现: 煤的纵波与横波速度均与密度存在良好的线性正相关关系, 且沿煤层走向、倾向和垂直煤层层理方向的纵横波速度逐渐降低; 走向、倾向和垂向上的纵波速度与同一方向的横波速度也存在良好的线性正相关性; 六种煤样三个方向间的速度各向异性一般都大于 10%. 通过与经典经验公式—Gardner 与 Castagna 公式理论换算值的对比发现: 由于煤层的软岩特征, 理论换算煤的纵波速度、横波速度与实验室实测值之间存在较大误差. 因此, 在煤田地震勘探中应使用根据煤的岩石物理测试而形成的关系式.

关键词 纵波, 横波, 速度, 密度, 各向异性

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.022

中图分类号 P631

收稿日期 2011-12-06, 2012-03-28 收修定稿

Characteristics of P-wave and S-wave velocities and their relationships with density of six metamorphic kinds of coals

WANG Yun¹, XU Xiao-Kai², ZHANG Yu-Gui²

1 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China

2 Institute of Coalbed Gas Geology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454003, China

Abstract A lab ultrasonic measurement of six metamorphic kinds of coals was conducted under 25°C and 0.1 MPa condition. And then some phenomena were concluded as follows: There are better linear correlations between pressure wave (P-wave) velocity and density, shear wave (S-wave) velocity and density; and the correlation coefficients of strike, dip and vertical directions are different and decreasing. Also there are positive linear correlation between P- and S-wave velocity in the same direction. However, there are great difference between velocities of different directions, especially in the strike and the vertical direction. The average anisotropy is about 0.1 and even more. Through comparing and analyzing the measured values with the estimated values, according to Gardner and Castagna formula, a non-tolerated error was found, which means that

基金项目 该研究得到国家重大专项“大型油气田与煤层气开发”(编号:2011ZX05035-001-006HZ, 2011ZX05035-002-003HZ, 2011ZX05008-006-22, 2011ZX05049-01-02, 2011ZX05019-003)和中国科学院矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群(SKLOGD-ZY125-01)的联合资助。

作者简介 王贇, 男, 1969 年生, 博士, 研究员, 1998 年毕业于中国科学院地球物理研究所, 现在中国科学院地球化学研究所从事地震各向异性理论与多分量地震技术的研究. E-mail: yunwang@mail.iggcas.ac.cn

these two experience formulas cannot be applied to coal, and a suitable coal formula should be used in coal seam seismic exploration.

Keywords Pressure wave, Shear wave, Velocity, Density, Anisotropy

1 引言

随着煤炭资源开采深度的加大,深部高温热害和深层煤与瓦斯突出等动力学灾害的危险程度逐渐增加,对煤田地震勘探精度的要求也逐渐提高。目前,煤田勘探不仅要求地震勘探预测小断层,还要求对深层煤层顶底板岩性、构造煤分布、瓦斯富集程度等情况进行定性或定量的预测。随着煤层气资源勘探开发力度的加大,水平井技术得以广泛的应用,煤层气开发方案的确定,需要提前精确预测煤层厚度和煤层裂缝的发育程度与发育方向。因此,煤田地震与测井约束反演方法逐渐在煤田勘探中得到应用与推广^[1]。正如油气田地地震反演技术应用一样,煤田地震的反演也需要煤的密度、速度及其相互换算的定量关系支持,以降低地震反演中的不确定性与多解性。

由于煤层是典型的软岩,因此取芯和制样难度较大。而且由于以前煤田地震勘探主要以构造勘探为主,对于煤的声学弹性模量并无要求,使得国内外对于煤的声学特征的研究相对较少。在煤的弹性参数测量的两种方法中,以静态法研究较多^[2-7],主要是利用三轴应力—应变测试技术进行煤岩变形测量与弹性模量计算,目的是通过煤岩的力学参数的测量服务于井下巷道开采工程。由于动态法可以方便地模拟地层条件,从而使得动态法测量的弹性参数对实际地球物理勘探的指导意义更为明显,朱国维等^[8]通过改变温度与压力来模拟地层条件,测试了淮南某矿区 13-1 煤的声波速度与煤层埋深的关系;孟召平等^[9]在大量测井与钻孔数据统计分析的基础上,研究煤岩纵、横波速度与砂岩和灰岩的纵、横波速度的差异;郭德勇等^[10]对原生结构煤在高压条件下不同方位波速变化进行了测试,研究了煤的纵波速度的各向异性特征;赵群、郝守玲^[11]和董守华^[12]在此基础上进一步测量研究了煤岩衰减系数、横波速度等的各向异性特征;汤红伟、程建远^[13]等人对采自深层的煤样进行了超声测量,主要研究温度、压力和含水饱和度的变化对纵波与横波速度的影响。由于煤层制样难,李建楼^[14]、张平松^[15]等采用井下巷道现场声波探测方法对煤体的速度特征进行了

研究。

由于煤炭并非国外的主要能源,加之国外的煤田构造简单,国际上对煤岩的弹性测量研究较少。Yao 和 Han^[16]从烃源岩的角度对煤及其相似的页岩和碳质泥岩进行了实验室的超声测量,讨论了压力、温度与含水饱和度对煤岩样速度和各向异性的影响;并通过与测井数据的对比和合成地震记录重点说明煤系地层的地震反射特征及其对油气储层反射特征的影响。

对于国内煤田勘探而言,随着阻抗反演的推广应用,对于煤弹性模量特征的研究需求越来越多。但目前已有的煤弹性参数的测量结果都比较零散,只涉及一种变质程度煤或某几个煤矿的具体矿区的试验,对于不同变质程度煤的弹性特征缺少系统性的认识。因此本文针对采自国内不同地区的、不同变质程度煤的弹性速度进行了实验室测量,探索煤速度—密度、纵波速度—横波速度之间的关系,并通过与经典 Gardner 公式^[17]、Lindseth 公式^[18]和 Castagna 公式^[19]的对比,尝试总结具有普遍适用性的煤速度—密度、纵波速度—横波速度的经验公式,以方便煤田地震勘探的应用;并着重说明煤弹性参数的特殊性及其应用于煤田地震反演需要注意的问题。

2 原煤样品弹性测试

2.1 待测样品信息

为了探索我国主要变质类型煤的弹性参数特征,我们采集了国内不同地区、不同煤矿、具有不同变质程度的六种原生结构煤。为了使实验室测量的煤弹性性质能给煤田地震与测井的联合反演提供直接的物理参数,我们在井下采取煤层定向煤样,即煤样采集时标注煤层的层理方向和走向、倾向,在实验室中经过磨制加工成 6 cm×6 cm×6 cm 的立方体,共 25 块;选择其中相对完整的 8 块进行常温(25 ℃)、常压(1 个大气压)条件下的超声测量和密度测量;样品信息见表 1、图 1 所示。实验中只研究垂直层理方向、倾向、走向三个主要方向,而不涉及平行层理方向平面内的方位声学各向异性。

本文所指的密度为视密度,又称视相对密度,即地勘行业所使用的密度。密度测量按照国家行业规



图 1 待测煤样

Fig. 1 Photos of testing samples

表 1 测试样品信息

Table 1 Coal samples under testing

样品编号	采样地点	煤样变质程度	加工规格
A	义马煤矿	褐煤	6 cm 见方
B	平顶山八矿戊组	肥煤	6 cm 见方
C1	平顶山八矿己组	焦煤	6 cm 见方
C2	平顶山八矿己组	焦煤	6 cm 见方
D	新疆	气煤	6 cm 见方
E	鹤壁六矿 2143 工作面	贫瘦煤	6 cm 见方
F1	焦作方庄矿	无烟煤	6 cm 见方
F2	焦作九里山矿	无烟煤	6 cm 见方

范^[20]由河南理工大学测量。

2.2 超声测量

本次超声试验采用常温常压行波传播一脉冲透射的方法进行测试¹⁾。整套仪器由脉冲信号发生器、超声换能器、放大器、计数器和示波器组成,如图 2 所示。实验使用的是压电陶瓷柱状纵横波换能器。为保证样品与换能器耦合良好,测试纵波时采用凡士林进行耦合;测试横波时采用蜂蜜耦合。由于测试煤样为边长 6 cm 的立方体,选用超声的低频段,纵波

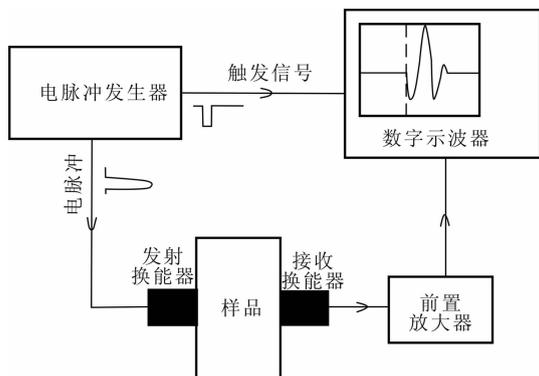


图 2 数字化脉冲法声波测试系统框图

Fig. 2 Diagram of digital pulse sonic testing system

主频为 100 kHz,横波主频为 250 kHz,整个测量系统误差小于 1%;考虑到煤岩的特殊性,最大误差不超过 3%。

本次超声测量选取相对较完整、具有平整平面的样品,分别测量了煤样沿煤层走向、倾向和垂向(垂直层理)3 个方向的纵横波速度;同时还测量了一个与煤样尺寸相同的标准铝块,如图 3 所示。

为与煤田人工地震的观测方式相统一,分别以 x 、 y 、 z 代表煤层的走向、倾向和垂直层理的方向,如图 3 所示, V_x 、 V_y 、 V_z 分别表示沿煤层走向、倾向和垂直层理的纵波速度。横波振动方向与波前方向垂直,由于煤样中裂隙的存在,横波通过煤样传播会分裂成两个相互垂直的横波,所以横波沿煤样某个方向传播时会有两个速度值。以沿 x 方向传播为例,沿 x 方向传播的横波有 V_{xy} 与 V_{xz} ,下标的第一个字母 x 代表横波传播的方向,第二个字母代表与传播方向垂直的方向(即横波振动方向)。即 V_{xy} 表示横波沿 x 传播,振动方向与 y 平行; V_{xz} 表示沿 x 传播,振动方向与 z 平行。

纵横波速度计算采用¹⁾

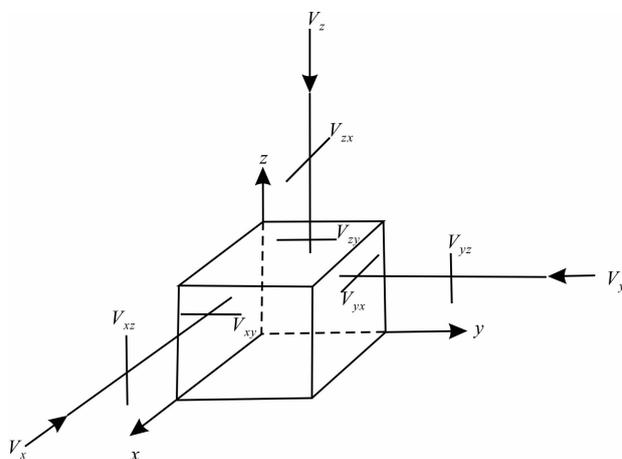


图 3 煤样测速示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ultra-sonic measurement of coal sample

1) 伍向阳. 石油流体中声波速度及其相关性研究. 北京: 中国科学院地球物理研究所, 2000, 3. 1.

$$V_p = \frac{L}{t_p - t_0}, V_s = \frac{L}{t_s - t_0}, \quad (1)$$

其中: V_p 为纵波速度, 单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; V_s 为横波速度, 单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; L 为发射、接收换能器中心间的距离, 单位 m ; t_p 为纵波在样品中的走时, 单位 s ; t_s 为横波在样品中的走时, 单位 s ; t_0 为仪器系统的零延时, 单位 s .

2.3 测量结果与弹性参数换算

原煤样品纵横波测试计算结果见表 2、表 3。表 3 中 E 和 F1 样品由于裂缝的复杂性导致横波初至难以识别而无法计算横波速度, 在本试验中空缺 z 方向的两个速度。

表 2 原煤样品纵波速度测试结果

Table 2 P-wave velocity of coals tested in lab

煤样编号	样品纵波速度 $V_p (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			视密度 ARD ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	V_x	V_y	V_z	
A	2108	1937	1704	1.15
B	2383	1935	1781	1.28
C2	2153	1989	1959	1.35
C1	2235	1889	1629	1.38
D	2183	1986	1770	1.24
E	1959	1634	1479	1.4
F1	2522	2437	2190	1.51
F2	3047	2969	2757	1.73

表 3 原煤样品横波速度测试结果

Table 3 S-wave velocity of coals tested in lab

煤样编号	横波速度 $V_s (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$									
	V_{xy}	V_{xz}	V_x 均值	V_{yz}	V_{yz}	V_y 均值	V_{zx}	V_{zy}	V_z 均值	
A	1097	1081	1089	971	959	965	910	870	890	
B	1079	1046	1063	1018	938	978	800	780	790	
C2	1127	977	1052	1108	1080	1094	969	950	960	
C1	1264	1139	1202	1066	1012	1039	1001	986	994	
D	1060	980	1020	1088	1038	1063	1024	974	999	
E	991	977	984	704	694	699				
F1	1266	1249	1258	1210	1113	1162				
F2	1612	1605	1609	1516	1492	1504	1352	1308	1330	

3 测试数据分析

为分析不同变质程度煤的速度与密度的关系, 我们在实验中还专项测试了每个煤样的最大镜质组反射率等煤质参数。但由于文章篇幅和论述重点的

要求, 关于煤的镜质组最大反射率与煤的声波速度之间的关系, 我们将在另一篇文章中讨论。以下内容将重点讨论不同变质程度煤的纵波速度-密度、横波速度-纵波速度之间的关系及其特征。

3.1 原煤样品纵横波速度与密度关系

在地震数据处理、解释和反演中, 速度-密度的关系, 尤其纵波速度-密度关系是经常要用到的公式。为此, 我们针对煤样分析它的纵横波速度与密度的关系, 以认识煤的特殊性。如图 4 和图 5 所示为三方向纵波速度、横波速度与密度之间的试验散点图和线性回归方程。由图 4、图 5 可以看出各个方向上的纵波速度与横波速度都随着密度增大而增大; 即纵波速度、横波速度与密度均存在正线性相关性, 平均相关系数 0.8。但三方向纵波速度-密度相关性与横波速度-密度相关性规律不同: 纵波速度与密度的相关性按走向、垂向、倾向三方向划分依次降低, 且 3 方向相关性差异不大, 均在 80% 附近; 而横波速度-密度的相关性按垂向、走向、倾向依次降低, 且倾向方向的横波速度-密度的相关性比其它 2 个方向要差得较大。

而且从图 4 和图 5 还可以看出, 三方向纵波速度与横波速度存在以下的统一性规律: 走向速度大于倾向速度, 垂向速度最小; 走向速度与垂向速度差异较大, 倾向速度接近平均速度。

3.2 原煤样品纵横波速度间的关系

此外, 在多波地震的联合反演中, 由于横波测井数据较少, 一般需要利用纵波速度换算横波速度; 而在目前的油气地震反演应用中, 一般采用 Castagna 公式进行弹性阻抗的反演。但对于煤田地地震该公式是否合适尚缺乏有效的实验证据。为分析煤纵横波速度间的关系, 下面以相同方向的纵波速度 V_p 为变量, 横波速度 V_s 为因变量做回归分析, 见图 6。从回归图可以看出 V_p 与 V_s 间存在着线性关系, 随着纵波速度的增大, 横波速度也不断增大, 且平均线性相关性大于 0.9; 其中以倾向和走向方向的纵波速度-横波速度线性相关性最好, 大于 93%, 而垂向的稍差, 相关系数为 86%。

从三方向纵波速度-横波速度回归公式可以看到: 三条直线方程基本可以用平均速度的回归公式代替, 说明三方向的纵波速度-横波速度关系总体上是一致的。

3.3 三方向纵横波速度的各向异性

为了说明煤层三方向速度的差异性, 定义两个方向间的速度各向异性以

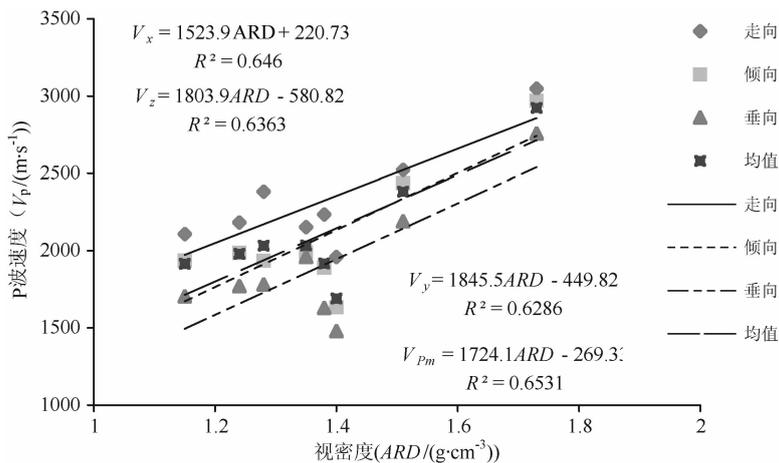


图 4 纵波速度与密度关系

Fig. 4 P-wave velocity versus density

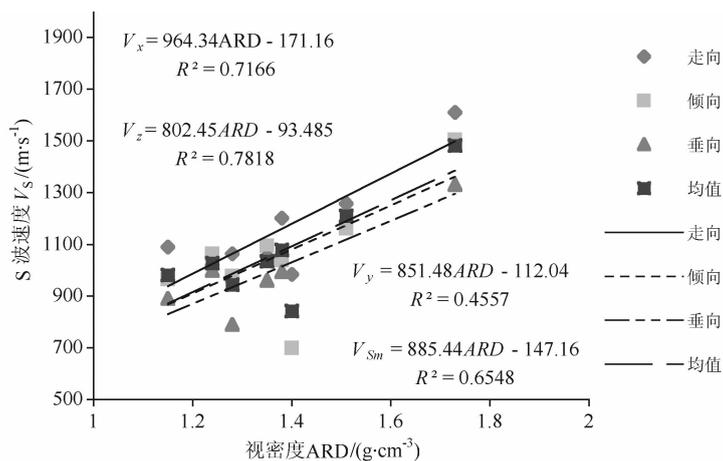


图 5 横波速度与密度关系

Fig. 5 S-wave velocity versus density

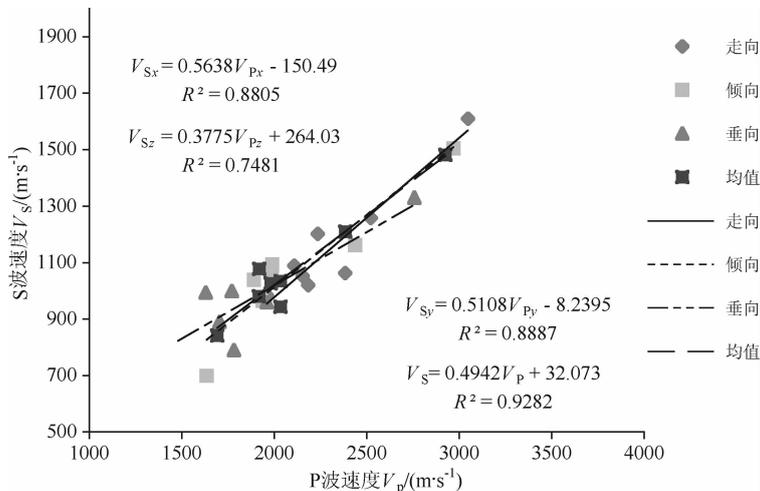


图 6 纵横波速度间的关系

Fig. 6 P- versus S-wave velocity

$$A = 2 * (v_1 - v_2) / (v_1 + v_2)$$

表示^[22],如表 4 所示为速度各向异性的计算结果.从表中数据统计可以得出以下规律:走向与垂向之间的速度差异最大,纵波速度各向异性为 9.4%—31.4%,平均 20.5%;横波为 2.1%—29.5%,平均 16.5%.走向与倾向、倾向与垂向之间的速度各向异性基本都在 10%左右.

表 4 纵横波速度的各向异性

Table 4 Anisotropy of P- and S-wave velocity

煤样编号	纵波速度各向异性(%)			横波速度各向异性(%)		
	$P_{A_{xy}}$	$P_{A_{xz}}$	$P_{A_{yz}}$	$S_{A_{xy}}$	$S_{A_{xz}}$	$S_{A_{yz}}$
A	8.5	21.2	12.8	12.1	20.1	8.1
B	20.8	28.9	8.3	8.3	29.5	21.3
C2	7.9	9.4	1.5	3.9	9.1	13
C1	16.8	31.4	14.7	14.5	18.9	9.2
D	9.5	20.9	11.5	4.1	2.1	6.2
E	18.1	27.9	10	33.9		
F1	3.4	14.1	10.7	7.9		
F2	2.6	10	7.4	8.7	19	12.3
均值	11	20.5	9.6	11.7	16.5	11.7

注:表中某一方向横波速度是采用了这一方向快慢波速度的平均值.

表 5 纵波速度实验室测量值与经验公式换算值对比

Table 5 Comparison between P-wave velocities tested in lab and estimated with empirical formulas

煤样编号	垂向纵波速度 ($V_p/(m \cdot s^{-1})$)	视密度 ($\rho/(g \cdot cm^{-3})$)	Gardner 公式 ($V_p/(m \cdot s^{-1})$)	相对误差 (%)	Lindseth 公式 ($V_p/(m \cdot s^{-1})$)	相对误差 (%)	本文公式 ($V_p/(m \cdot s^{-1})$)	相对误差 (%)
A	1704	1.15	189	89	1632	4	1494	12
B	1781	1.28	291	84	1739	2	1728	3
C2	1959	1.35	360	82	1804	8	1854	5
C1	1629	1.38	393	76	1834	13	1909	17
D	1770	1.24	256	86	1705	4	1656	6
E	1479	1.4	416	72	1853	25	1945	32
F1	2190	1.51	563	74	1970	10	2143	2
F2	2757	1.73	970	65	2256	18	2540	8
	未知量	已知量	平均误差	78.5	平均误差	10.5	平均误差	10.6

从表中误差对比可以看到,Lindseth 公式和本文回归公式的精度远高于 Gardner 公式,平均误差 10%,基本可以满足地震勘探的精度需要.因此,在缺失声波测井数据,利用密度曲线换算声波速度进行煤田地震与测井的联合反演时,针对我国煤田的纵波速度(垂向)与密度关系,建议采用本文回归的公式:

$$V_p = 1724.1\rho - 269.33, \quad (2)$$

式中 V_p 为纵波速度,单位 $m \cdot s^{-1}$; ρ 为密度,单位 $g \cdot cm^{-3}$,相关系数为 81%.

3.4 与经典经验关系式的对比

3.4.1 纵波速度-密度换算经验公式

在煤田地震数据处理及与测井数据的联合反演中,经常需要用到密度-速度的关系式,以减少反演参数的数量.此外,由于很多煤田测井缺少声波曲线,还经常需要根据密度曲线进行纵波速度的换算.但到目前为止,按照油气领域井震联合反演的方法和商业软件,工程技术人员还习惯于使用 Gardner 公式^[17]进行两者的换算.

Gardner 公式在油气勘探领域的应用得到了广泛的认可,但对于煤会产生巨大的误差,为此,Lindseth^[18]提出了一个改进的经验公式,在沉积岩地区应用效果较为理想.为了对比说明煤纵波速度与密度关系的特殊性,在本次实验的基础上,分别应用 Gardner 公式、Lindseth 公式和本文回归的公式(图 4 中的垂向回归公式)进行了煤的纵波速度的计算.以实验室测量垂向纵波速度为基准,对比了各公式的相对误差,如表 5 所示.为与煤田地震勘探相匹配,表中数据计算只考虑了垂直层理方向的纵波速度.

3.4.2 纵波速度—横波速度换算经验公式

在弹性阻抗反演过程中,由于横波偶极子测井或三分量 VSP 测井的缺失,还经常用到 Castagna 公式^[19,22]进行横波速度的求取^[23-25].但该公式是否适用于煤有待于检验.为此,在本次实验的基础上,应用 Castagna 公式和本文回归的公式(图 6 中的垂向回归公式)进行了煤横波速度的计算.以实验室测量横波速度为基准,对比了各公式的相对误差,如表 6 所示.为与煤田地震勘探相匹配,表中数据计算只考虑了垂直层理方向的横波速度,实验室测量横波

速度取快、慢波的均值。

通过表 6 中数据对比可以发现,简单套用 Castagna 公式会产生巨大的误差,而本文所提出的公式平均误差可以控制在 10% 以内。因此,建议在煤的弹性阻抗反演中,在缺失横波速度的情况下,采用本文回归的平均速度公式

$$V_s = 0.49V_p + 32.07, \quad (3)$$

约束横波速度的计算,效果会好于采用 Castagna 公式,相关系数可达 0.96。式中 V_p 为纵波速度, V_s 为横波速度,单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

因此,对于不同地区、不同变质程度煤的井震联合反演,应根据实际岩心的弹性测量结果使用煤自身的密度—速度、纵波速度—横波速度的回归公式;在缺失实验室测量结果的情况下,应用煤田测井数据回归的公式或本文给出的公式可相对减小反演误差。

表 6 实测横波速度与经验公式求取值对比

Table 6 Comparison between S-wave velocities measured in lab and estimated with empirical formula

煤样 编号	实测垂向 横波速度 均值($V_s /$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Castagna 公式求取的 垂向横波 速度($V_s /$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Castagna 公式相对 误差	本文回归公式 计算的垂向 横波速度($V_s /$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	本文 公式 相对 误差
A	890	297	67	912	2
B	790	363	54	941	19
C2	960	516	46	1008	5
C1	994	241	76	883	11
D	999	353	65	937	6
E		103		826	
F1		715		1096	
F2	1330	1204	9	1312	1
均值	994	474	53	999	7

4 结论与认识

通过六种不同变质程度煤层走向、倾向、垂直层理方向(垂向)的超声测量结果分析,可以获得如下的结论:

(1)不同变质程度煤的纵波速度、横波速度均与密度存在较好的相关性,平均线性正相关的系数在 80% 以上。其中走向与垂直层理方向的纵波速度—密度、横波速度—密度的相关性好于倾向方向的速度—密度相关性,这与沉积的物源方向是相吻合的;除倾向方向的速度—密度关系外,横波速度—密度的相关

性要好于纵波速度—密度的相关性,这与横波沿骨架传播,不受流体影响也是吻合的。

(2)三方向的纵波速度、横波速度与密度的关系均表现为相同的变化规律,即走向方向速度最大,垂向速度最小,倾向方向速度接近于三方向速度的均值。

(3)相同方向的纵波速度与横波速度存在良好的线性正相关性,其中走向与倾向的相关性好于垂向;三方向的平均纵波速度与平均横波速度的线性相关性高达 96%。

(4)煤层三方向纵波速度与横波速度均存在差异,总体表现为纵波的速度各向异性大于横波的速度各向异性;其中以走向与垂向速度之间的差异最大,纵波平均各向异性可达 20%;横波平均可达 15%;另外两个方向速度的各向异性在 10% 左右。

(5)通过与地震勘探领域的经典纵波速度—密度经验公式和纵波速度—横波速度公式对比发现, Gardner 公式描述煤纵波速度—密度的关系存在巨大误差;对中国不同变质程度煤,在缺少足够钻孔和测井数据的情况下,建议使用本文回归公式或 Lindseth 公式,可将误差控制在 10% 左右; Castagna 公式也不适合于描述煤的纵波速度—横波速度关系,建议使用本文回归的公式,可将误差控制在 10% 以内。这些在井震联合反演中需要特别注意。

随着井震联合反演应用于煤田勘探的精度要求越来越高,对煤纵波速度—密度、纵波速度—横波速度的规律性认识是十分重要的。尽管本文超声测试的煤样偏少,但在不同地区、不同变质程度煤的速度—密度等一般性规律认识缺少,甚至套用油气领域公式存在巨大误差的前提下,本文提出的公式对于煤的精细勘探具有较好参照价值。

致 谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所的伍向阳研究员和中国石油大学(北京)的魏建新研究员在煤的超声测量中给予的指导和帮助。

参考文献(References)

- [1] 石琰,王赞,芦俊. 煤田地震多属性分析技术的应用. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1397-1402.
Shi Y, Wang Y, Lu J. Application of seismic multi-attribute analysis technique in coal field. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2008, 33(12): 1397-1402.
- [2] 孟召平,彭苏萍,凌标灿. 不同侧压下沉积岩石变形与强度特征. 煤炭学报, 2000, 25(1): 15-18.
Meng Z P, Peng S P, Ling B C. Characters of the deformation and strength under different confining pressures on sedimentary rock. *Journal of China Coal Society* (in

- Chinese), 2000, 25(1): 15-18.
- [3] 孟召平, 彭苏萍, 傅继彤. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨. 岩石力学与工程, 2002, 21(1): 102-106.
Meng Z P, Peng S P, Fu J T. Study on control factors of rock mechanics properties of coal-bearing formation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2002, 21(1): 102-106.
- [4] 闫立宏, 杨庄煤矿煤岩波速特征及其与强度的关系研究. 煤炭科学技术, 2006, 4(6): 57-60.
Yan L H. Relationship study between characteristics and strength of coal and rock wave velocity in Yangzhuang Mine. *Coal Science and Technology* (in Chinese), 2006, 4(6): 57-60.
- [5] 彭担任, 王占国, 周新青等. 煤层岩体中声波速度与导热系数的关系. 矿业安全与环保, 1999, (1): 11-14.
Peng D R, Wang Z G, Zhou X Q, et al. Relationship between sonic wave velocity and Hest-conductivity coefficient in coal and rock. *Mining Safety & Environmental Protection* (in Chinese), 1999, (1): 11-14.
- [6] 孟召平, 张吉昌, Tiedemann J. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1505-1510.
Meng Z P, Zhang J C, Tiedemann J. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2006, 49(5): 1505-1510.
- [7] 吴基文, 姜振泉, 樊成等. 煤层抗拉强度的波速测定研究. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 999-1003.
Wu J W, Jiang Z Q, Fan C, et al. Study on tensile strength of coal seam by wave velocity. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (in Chinese), 2005, 27(9): 999-1003.
- [8] 朱国维, 王怀秀, 韩堂惠等. 地层条件下煤层顶、底板声波速度与反射特征. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1391-1396.
Zhu G W, Wang H X, Han T H, et al. Reflection characteristics and acoustic velocity of coal roof and floor under formation conditions. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2008, 33(12): 1391-1396.
- [9] 孟召平, 刘常青, 贺小黑等. 煤系岩石声波速度及其影响因素实验分析. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 389-393.
Meng Z P, Liu C Q, He X H, et al. Experimental research on Acoustic wave velocity of coal measures rocks and its influencing factors. *Journal of Mining & Safety Engineering* (in Chinese), 2008, 25(4): 390-394.
- [10] 郭德勇, 韩德馨, 冯志亮. 围压下构造煤的波速特征实验研究. 煤炭科学技术, 1998, 26(4): 21-24.
Guo D Y, Han D X, Feng Z L. Experimental research on acoustic wave velocity of tectonic coal under confined pressure. *Coal Science and Technology* (in Chinese), 1998, 26(4): 21-24.
- [11] 赵群, 郝守玲. 煤样的超声速度和衰减各向异性测试实例. 石油地球物理勘探, 2005, 40(6): 708-712.
Zhao Q, Hao S L. Testing anisotropy of ultrasonic velocity and attenuation in coal samples. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2005, 40(6): 708-712.
- [12] 董守华. 气煤弹性各向异性系数实验测试. 地球物理学报, 2008, 51(3): 947-952.
Dong S H. Test on elastic anisotropic coefficients of gas coal. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2008, 51(3): 947-952.
- [13] 汤红伟, 程建远, 王世东. 深层煤矿床的煤岩样物性测试结果与分析. 中国煤炭, 2009, 35(9): 75-79.
Tang H W, Cheng J Y, Wang S D. The test results and its analysis of deep coal seam and rock sample. *China Coal* (in Chinese), 2009, 35(9): 75-79.
- [14] 李建楼, 严家平. 频谱分析技术在煤体结构探测中的应用. 煤炭科学技术, 2009, 37(8): 120-123.
Li J L, Yan J P. Application of spectrum analysis technology to coal structure exploration. *Coal Science and Technology* (in Chinese), 2009, 37(8): 120-123.
- [15] 张平松, 刘盛东. 煤岩体结构构造特征的频谱分析与应用. 工程地球物理学报, 2006, 3(4): 274-277.
Zhang P S, Liu S D. The structure character of coal and rock by seismic wave spectrum analyzing technology and its application. *Chinese Journal of Engineering Geophysics* (in Chinese), 2006, 3(4): 274-277.
- [16] Yao Q L, Han D H. Acoustic properties of coal from lab measurement. SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting, 1815-1819.
- [17] Gardner G L F, Gardner L W, Gregory A R. Formation velocity and density- the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 1974, 39(6): 770-780.
- [18] Lindseth R O. Synthetic Sonic Logs—a process for stratigraphic interpretation. *Geophysics*, 1979, 44(1): 3-26.
- [19] Castagna J P, Smith S W. Comparison of AVO indicators; A modeling study. *Geophysics*, 1994, 59(12): 1849-1855.
- [20] GB/T6949-1998, 《煤的视相对密度测定方法》. 国家质量技术监督局, 1998, 1-4.
GB/T6949-1998, Determination of apparent relative density of coal (in Chinese). General Administration of Quality Supervision of the People's Republic of China, 1998, 1-4.
- [21] 刘斌, 席道瑛, 葛宁洁等. 不同围压下岩石中泊松比的各向异性. 地球物理学报, 2002, 45(6): 880-890.
Liu B, Xi D Y, Ge N J, et al. Anisotropy of Poisson's ratio in rock samples under confining pressures. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2002, 45(6): 880-890.
- [22] Greenberg M L, Castagna J P. Shear-wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification and applications. *Geophysical Prospecting*, 1992, 40(2): 195-210.
- [23] 张关泉, 屠浩敏. 层状弹性介质的波阻抗反演. 地球物理学报, 1995, 38(S): 81-93.
Zhang G Q, Tu H M. Impedance inversion for elastic layered media. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 1995, 38(S): 81-93.
- [24] 马劲风. 地震勘探中广义弹性阻抗的正反演. 地球物理学报, 2003, 46(1): 118-124.
Ma J F. Forward modeling and inversion method of generalized elastic impedance in seismic exploration. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2003, 46(1): 118-124.
- [25] 彭真明, 李亚林, 巫盛洪等. 碳酸盐岩储层多角度弹性阻抗流体识别方法. 地球物理学报, 2008, 51(3): 881-885.
Peng Z M, Li Y L, Wu S H, et al. Discriminating gas and water using multi-angle extended elastic impedance inversion in carbonate reservoirs. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2008, 51(3): 881-885.