

许小凯,王赞,孟召平. 2014. 六种不同煤阶煤的品质因子特征. 地球物理学报, 57(2): 644-650, doi:10. 6038/cjg20140227.

Xu X K, Wang Y, Meng Z P. 2014. Quality factor characteristics of six metamorphic kinds of coals. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(2): 644-650, doi:10. 6038/cjg20140227.

六种不同煤阶煤的品质因子特征

许小凯¹, 王赞^{2,3*}, 孟召平¹

1 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

3 中国地质大学(北京), 北京 100083

摘 要 通过 6 种不同煤阶煤的弹性测试, 分析了煤岩变质程度(以镜质组最大反射率表示)与煤岩品质因子之间的关系; 在此基础上, 进一步分析了煤岩速度与品质因子之间的关系及纵波与横波品质因子的各向异性特征. 研究发现: 煤岩镜质组最大反射率与纵波、横波品质因子均存在良好的线性相关性; 垂直层理方向的波速与品质因子存在良好的线性关系, 好于走向与倾向方向; 垂直层理方向的纵波与横波品质因子线性相关, 相关系数可达 93.5%; 煤岩的三方向品质因子存在各向异性, 且强于速度的各向异性. 通过横波品质因子与纵波品质因子间相互换算的理论公式计算结果与实验室实测结果的对比, 证明了该理论公式的可靠性, 误差小于 10%, 为多分量转换波的吸收衰减补偿提供了理论依据.

关键词 煤岩, 镜质组反射率, 品质因子, 各向异性, 衰减补偿

doi:10. 6038/cjg20140227

中图分类号 P631

收稿日期 2013-06-20, 2013-12-24 收修定稿

Quality factor characteristics of six metamorphic kinds of coals

XU Xiao-Kai¹, WANG Yun^{2,3*}, MENG Zhao-Ping¹

1 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

3 China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract Lab ultrasonic measurements to metamorphic kinds of coal reveal the relationship between maximum vitrinite reflectance and ultrasonic quality factor. And then the relations between ultrasonic velocities and quality factors, including the anisotropic characteristics of quality factors are analyzed. The results show that there are a good linear correlation between the maximum vitrinite reflectance and P- and S-wave quality factor, quality factors and velocities in vertical direction, the P-wave quality factor and S-wave's in vertical direction. Moreover, there are stronger anisotropies in seismic quality factors than velocities. Comparison of the measured S-wave Q values with estimated values based on a theoretical formula indicates an only 7.2% relative error in this method. It proves that this theoretical formula can be applied to attenuation compensation of the converted shear wave in processing of multi-component seismic data.

Keywords Coal, Vitrinite reflectance, Quality factor, Anisotropy, Attenuation compensation

基金项目 国家自然科学基金项目(41172145, 41372163)、国家重大专项“大型油气田与煤层气开发”(2011ZX05035-001-006HZ, 002-003HZ, 008-006-22, 049-01-02, 019-003)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(SKLODZ-ZY125-01)联合资助.

作者简介 许小凯, 男, 1987, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院在读博士生. E-mail: xuxiaokai110110@163.com

* **通讯作者** 王赞, 男, 1969, 博士, 研究员, 博士生导师; 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, 中国科学院“多波多分量”研究组(MWMC)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

1 引言

煤岩的品质因子是衡量煤岩对地震波能量、频率吸收衰减能力的重要指标. 对于一般致密、刚性岩石的品质因子研究, 国内外学术与生产部门已做过大量的测试工作(赵明阶和徐蓉, 2000; 何元金和马兴晟, 2003; 马占国等, 2005). 对于品质因子在井下与地面地震探测中的应用, 国内外的报道更多(韩德品等, 2009; White, 1992; Wang Y, 2002). 但由于煤岩制样困难, 关于煤岩的品质因子研究, 目前大多基于井下巷道的实际地震观测和信息解译来探索煤层吸收衰减特征与煤岩结构、物性之间的关系. 例如, 张平松等(2006)通过井下巷道的声波探测试验发现煤层突出危险性与煤层的衰减系数呈正相关, 与煤层品质因子呈负相关; 刘盛东等(2005)和赵秋芳(2008)等基于弹性波在介质中传播的衰减理论, 利用地震纵波探测技术对淮南矿区多个煤矿的高突煤层和低突煤层、郑州大平矿高突煤层及山东淄博岭子矿不含瓦斯煤层进行探测和衰减试验, 分析了不同煤层的纵、横波波速、煤体弹性模量、孔隙率特征; 重点研究了煤层突出性和非突出性与煤层固有主频值、频谱特征、地震波在不同煤层中的吸收衰减系数和反映煤体物理性质和状态的品质因子 Q 值之间的相关性, 提出了以煤层固有频率和品质因子 Q 值为预测参数对煤层进行分类的新方法; Krey (Krey, 1963, Krey et al., 1982) 和 Buchanan 等(1978; 1983; 1985)分别从煤矿井下巷道地震波探测的角度, 探索了地震波的能量、频率的吸收衰减特征及槽波能量在不同方向上的吸收衰减各向异性特征.

少量关于煤岩品质因子实验室测量研究主要以煤样(汤红伟等, 2009)或相似物理模型的超声频谱分析为主. 例如, Nie 等(2007)从改善煤储层渗透率的角度研究了声发射的频率、强度与煤岩声阻抗的关系及其在煤岩中的衰减机制, 探索利用声发射技术提高煤层气采收率的方法; 李建楼和严家平(2010)通过煤体的密闭物理模拟试验研究认为声波振动有利于改造煤体的渗透能力; 并认为声波能量与频率的损耗由热损耗、发散热等多种原因引起; 赵群和郝守玲(2005; 2006)通过对某一种煤岩多面体模型超声试验, 研究了煤岩纵波与横波能量吸收衰减随方位呈现 W 型的各向异性特征; 纵波吸收衰减的方位各向异性强于纵波传播速度的各向异性; 纵

波衰减随裂隙方位的变化明显大于横波, 纵波速度随裂隙方位的变化小于横波变化幅度.

目前煤岩品质因子的研究, 由于井下多分量地震技术尚未大规模开展应用, 对纵波品质因子研究较多, 横波较少; 涉及纵横波品质因子及其各向异性的研究更少. 理论上, 不论对于瓦斯与煤突出的灾害预防, 还是构造与岩性的探测, 研究煤岩对纵波、横波的吸收衰减特征及变化规律对于提高煤田地地震勘探的精度十分有意义(Lu and Wang, 2010). 为此, 本文在 6 种不同煤阶煤岩超声弹性测量的基础上, 重点分析煤岩纵波与横波的吸收衰减特征与煤岩变质程度的关系, 并进一步讨论它们与纵横波速度的关系; 从多分量地震探测的角度, 着重分析纵波与横波品质因子的相互换算关系及存在的规律, 为多分量转换横波的吸收衰减补偿提供试验与物性依据. 实验室的超声测量对于认识煤岩的地震波速度和品质因子特征具有参考意义.

2 原煤样品弹性测试

2.1 待测样品信息

试验所采取的样品来自 8 个不同的矿区, 代表了 6 种不同煤阶的煤岩, 如表 1 所示. 采样过程中为测试不同方向的煤岩品质因子, 分别对采样煤层标明了垂直层理方向、倾向与走向. 为满足弹性测试的需要煤岩被加工成边长 6 cm 的立方体, 共 25 块, 如图 1 所示. 煤岩样品镜质组最大反射率(R_{omax})测试结果如表 1 所示, 其中相同变质程度煤岩的参数给出的是不同岩样的平均值.

表 1 测试样品信息

Table 1 Coal samples' information

样品编号	煤样变质程度	平均镜质组最大反射率 $R_{\text{omax}}/(\%)$	视密度 $\rho_a/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	采样地点
A	褐煤	0.396	1.15	义马煤矿
B	肥煤	0.938	1.28	平顶山八矿戊组
C	焦煤	1.008	1.37	平顶山八矿己组
D	气煤	0.752	1.24	新疆
E	贫瘦煤	1.723	1.40	鹤壁六矿 2143 工作面
F	无烟煤	3.77	1.62	焦作方庄矿和九里山矿

2.2 超声测量

本次超声试验采用常温常压(室温、一个大气压)行波传播-脉冲透射的方法进行测试(何元金和马兴晟, 2003; 伍向阳, 2000). 整套仪器由脉冲信号



图 1 待测试样样品

Fig. 1 Photos of coal samples

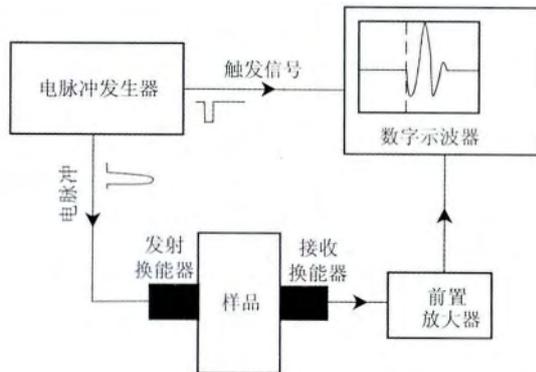


图 2 数字化脉冲法声波测试系统框图

Fig. 2 Diagram of digital pulse sonic testing system

发生器、超声换能器、放大器和示波器组成,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,主频为 100 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%.

本次超声测量从 25 块煤岩中选取 8 块(代表 6 种煤阶)相对较完整、具有平整平面的样品,分别测量了煤岩沿煤层走向、倾向和垂向 3 个方向的纵横波透射波形;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 分别代表煤层的走向、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.

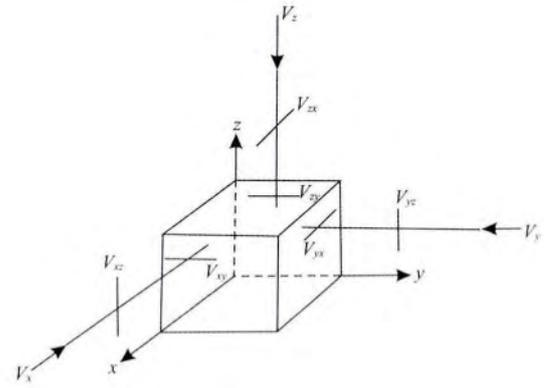


图 3 煤样测速示意图

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

2.3 品质因子 Q 计算

在采集煤岩样品三方向纵波与横波透射波的基础上,本文品质因子的计算采用谱比法(Tonn, 1991;孙进忠等,1988),其结果如表 2 所示.

表 2 煤样 Q 值计算表

煤样编号	Q_P			Q_S		
	x	y	z	x	y	z
A	8.49	7.18	6.27	3.01	2.38	3.01
B	10.55	9.54	8.02	3.26	3.26	4.85
C	7.54	5.02	7.56	3.37	3.03	3.73
D	9.99	7.71	7.33	3.13	2.95	3.18
E	17.4	10.67	5.36	5.76	3.59	—
F	22.95	20.56	15.54	7.78	6.69	6.69

注:(1) x 表示煤层走向方向, y 表示煤层倾向方向, z 表示垂直层理方向(下同);(2)样品 E 由于裂缝隙极其发育而使得接收到的波形过于杂乱,难以拾取一个完整的周期而无法利用谱比法计算品质因子.

3 实验数据分析

3.1 煤岩变质程度与品质因子的关系

通过煤岩的镜质组反射率(R_{omax})分别与 Q_P 值、 Q_S 值回归分析,可以得到煤岩镜质组最大反射率与 Q_P 值、 Q_S 值线性相关, Q_P 值、 Q_S 值随煤岩镜质组反射率的增加而增大,见图 4、5. 镜质组反射率与煤的分子结构密切相关,尤其是在煤化作用过程中形成的芳香稠环的类石墨层,对煤的反射率影响较大. 由于煤的变质程度越高,芳香族稠环缩合程度不断增加,微晶结构不断有序化,基本结构单元定向生长和优先拼叠使堆砌度增大、平面碳网中的芳环

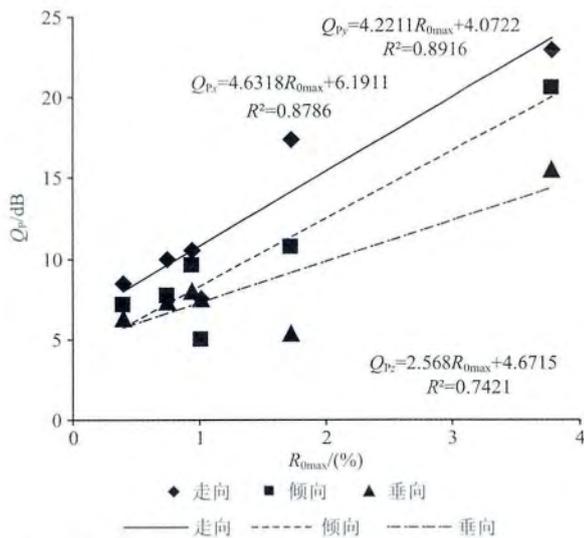


图4 镜质组最大反射率(R_{omax})与 Q_p 值的关系
Fig. 4 R_{omax} versus Q_p

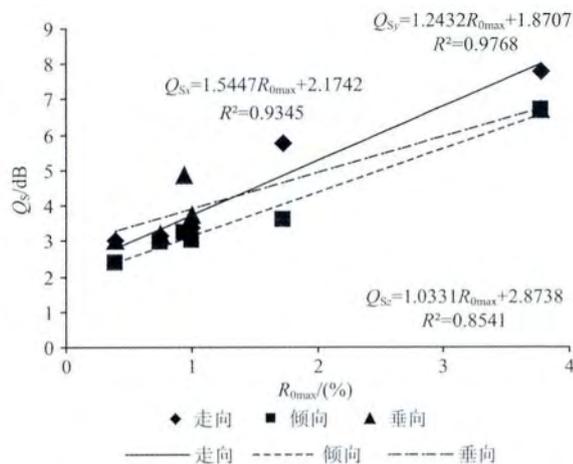


图5 镜质组最大反射率(R_{omax})与 Q_s 值
Fig. 5 R_{omax} versus Q_s

环数增多、层面间距减小,芳香稠环体系增大;结构的有序化提高了煤中波能量的传递效率。

其中,沿倾向与走向方向的纵波品质因子、横波品质因子与镜质组最大反射率的相关性均大于垂直层理方向的,平均相关系数大于 90%;横波品质因子与镜质组最大反射率的相关性要好于纵波品质因子与镜质组最大反射率的相关性,平均在 96% 以上。这与横波沿骨架传播,其品质因子主要反映煤岩固体骨架的物性特点相吻合。

3.2 纵波速度与 Q_p 的关系

在实际地震资料处理过程中, Q 值的求取一般通过扫描近似获得(Wang, 2003, 2004, 2006; Wang and Guo, 2004);而速度是经常使用的参数,若能建立速度与品质因子之间的关系,则可以认为 Q 值扫描提供初始的、相对精确的模型。本次实验通过三方向

Q_p 值与相同方向传播的纵波速度回归分析,可以看出三方向 Q_p 与 V_p 正相关, Q_p 随着 V_p 的升高呈增大趋势,即纵波速越大,纵波能量的吸收衰减越小;垂直层理方向的纵波速度与 Q_p 相关性最好,相关系数高达 98.9%;倾向与走向方向的较差,其中走向纵波速度与走向 Q_p 相关性最差,相关系数只有 56%,见图 6,这与煤岩的纵向压实沉积和广泛发育的平行层理构造是有关系的。

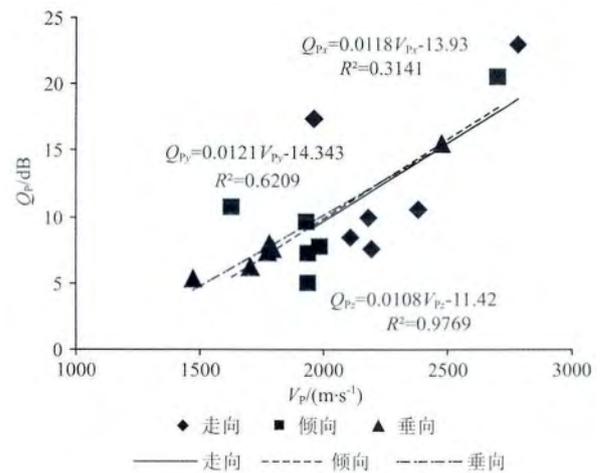


图6 纵波速度与 Q_p 关系
Fig. 6 P-wave velocity versus Q_p

3.3 横波速度与 Q_s 的关系

在多分量地震数据处理过程中,横波 Q 值的取得一般通过扫描或纵波品质因子与速度比换算获得(Wang et al., 2009; Yan and Liu, 2009),因此建立横波速度与横波品质因子之间的关系也是非常有意义的。本次实验经过三方向 Q_s 值与相同方向传播横波速度(取不同偏振方向横波的速度均值)回归分析,可以看出各方向 Q_s 与 V_s 正相关, Q_s 随着 V_s 的升高呈增大趋势,即横波速越大,横波能量的吸收衰减越小;横波速度在垂直层理方向上与相同方向的 Q_s 相关性最好,相关系数高达 96%;在其它方向上相关性较差(见图 7),这与煤岩的纵向压实沉积和广泛发育的平行层理构造是有关系的。

3.4 Q_p 与 Q_s 间的关系

为配合多分量地震数据的处理,建立垂向横波品质因子与纵波品质因子之间的关系是关键步骤之一(Wang et al., 2009)。本次实验通过沿垂直方向 Q_p 值与沿相同方向传播横波的 Q_s 值(该方向的横波速度取同方向快慢横波速度的均值)回归分析,可以看出 Q_p 与 Q_s 线性相关,见图 8。为重点说明在转换横波处理中的应用,本图没有显示另外两个方向的回归关系。

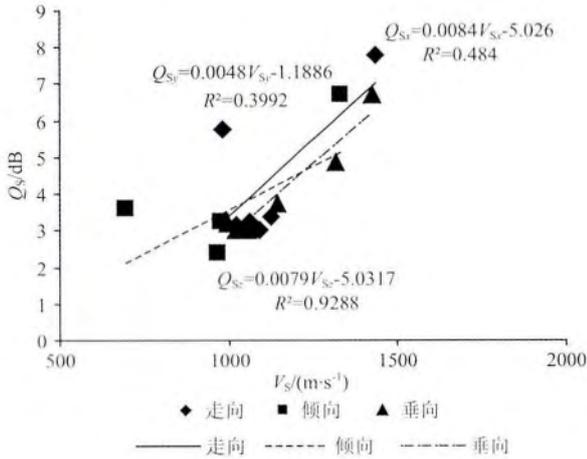


图 7 横波速度与 Q_s 关系
Fig. 7 S-wave velocity versus Q_s

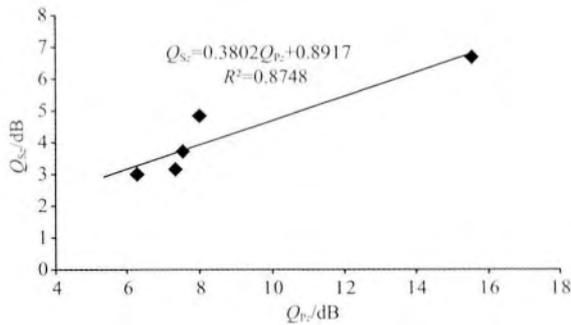


图 8 垂向 Q_p 与 Q_s 线性回归图
Fig. 8 Linear fitting between Q_p and Q_s in vertical direction

关系式 $\frac{1}{Q_s} \approx \frac{3\gamma^2}{4} \frac{1}{Q_p}$ (其中 $\gamma = \frac{V_p}{V_s}$) (Wang et al., 2009) 是多波处理中经常使用的近似公式. 通过这个公式可以利用纵波品质因子和纵横波速度比求取横波的品质因子, 从而实现转换横波的吸收衰减补偿. 在本次实验中, 我们通过这个公式的 Q_s 理论估算值 (见表 3) 与实测的 Q_s 值对比, 来评价 Wang et al. (2009) 提出公式的精度. 如表 3 所示, 平均误差小于 10%, 可见 Wang et al. (2009) 中提出的公式是可以可靠使用的.

3.5 煤岩品质因子的各向异性

在本次实验的基础上, 通过三方向纵横波的传播试验, 我们还研究了煤岩品质因子的各向异性特征. 如表 4 所示, 以 $A = 2 \times (Q_1 - Q_2) / (Q_1 + Q_2)$ (Q_1 与 Q_2 分别表示对比的两方向品质因子, 单位 dB) 表示两方向品质因子之间的各向异性大小. 可见: 纵波的品质因子各向异性强于横波的; 通过与速度各向异性 (王赞等, 2012) 的对比, 品质因子的各向异性强于速度各向异性. 这一结论认识与赵群和郝守玲

表 3 煤样 Q_s 实验测量值与理论公式计算值的对比

Table 3 Comparison between the measured Q_s in the lab and the theoretical calculated

煤样编号	理论公式计算值			实测与理论计算 Q_s 值的误差 (%)		
	x	y	z	x	y	z
A	3.01	2.37	3.01	0	0	0
B	2.80	3.23	5.87	14	1	21
C	2.62	2.26	4.09	24	25	10
D	2.91	2.94	3.12	7	0	2
E	5.86	2.6	—	2	28	—
F	8.13	6.69	6.49	4	0	3
平均误差				8.5	9	7.2

注: Wang et al. (2009) 中提出的公式只适用于垂直层理方向的品质因子换算.

表 4 煤岩的三方向品质因子各向异性

Table 4 Anisotropy of quality factors in the xyz directions

煤样编号	Q_p 各向异性因子			Q_s 各向异性因子			
	A_{Pxy}	A_{Pxz}	A_{Pyz}	A_{Sxy}	A_{Sxz}	A_{Syz}	
A	16.7	30.1	13.5	23.4	0.0	23.7	
B	10.1	27.2	17.3	0.0	39.2	39.2	
C	40.1	0.3	40.4	10.6	10.1	20.7	
D	25.8	30.7	5.2	5.9	1.6	7.5	
E	48.0	105.8	96.3	46.4	—	—	
F	11.0	38.5	27.8	15.1	15.1	0.0	
平均值		25.3	38.8	33.4	16.9	13.2	18.2

(2005), Liu et al (2007), 的结论相同, 对于各向异性地震理论和多波技术的研究, 这将会是个很好的启示.

4 结论

对于地震数据处理中的吸收衰减补偿和介质属性的重要指示参数—品质因子的研究, 本文通过 6 种不同煤阶煤岩、三方向的超声测量和数据分析, 可以获得如下结论:

(1) 煤岩的品质因子与镜质组的最大反射率之间有良好的线性相关性, 且横波品质因子与镜质组最大反射率的相关性最好. 因此, 利用多波勘探预测煤岩煤阶是可行的.

(2) 垂直层理方向的品质因子与速度之间存在良好的线性相关性, 在实际多波数据处理中, 在已知垂向速度的情况下建立品质因子的初始模型是可行与合理的.

(3)垂直层理的纵波品质因子与横波品质因子间近似存在线性相关性,与理论近似公式符合,也从物理实验上证明了理论近似公式的适用性。

(4)煤岩品质因子间存在明显的各向异性,且强于速度的各向异性;虽然品质因子的求取存在诸多问题,但这一结论对于我们如何充分利用地震波的动力学信息,拓宽各向异性的研究与指示范围是有重要意义的。

由于煤岩制样的困难,本次实验样品数偏少,不能给出规律性较强的结论,只列出探索性的测试分析结果;且由于煤岩层理、割理、裂缝发育,横波分离、波型转换现象严重,给横波初至的拾取和品质因子计算带来了一定的影响。但本文所获得的结论对于认识不同煤阶煤岩的吸收衰减特征及对煤田多波地震数据处理、反演的意义是明显的。

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岩超声测量中给予的指导和帮助,感谢申振华与成林硕士所做的制样与实验室测量工作。

参考文献(References)

- Buchanan D J. 1978. The propagation of attenuated SH-channel waves. *Geophysical Prospecting*, 26(1): 16-28.
- Buchanan D J. 1985. In-seam seismology: a method for detecting faults in coal seams// Fitch A A. *Developments in Geophysical Exploration Methods-5*. Applied Science Publishers LTD, 71-109.
- Buchanan D J, Jackson P J, Davis R. 1983. Attenuation and anisotropy of channel waves in coal seams. *Geophysics*, 48(2): 133-147.
- Han D P, Zhao P, Li D. 2009. Application status and development prospects of mine geophysical exploration technology. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 24(5): 1893-1849.
- He Y J, Ma X K. 2003. *Experiments in Modern Physics*. Beijing: Tsinghua University Press, 198-206.
- Krey T. 1963. Channel waves as a tool of applied geophysics in coal mining. *Geophysics*, 28(5): 700-714.
- Krey T, Arnetzl H, Knecht M. 1982. Theoretical and practical aspects of absorption in the application of in-seam seismic coal exploration. *Geophysics*, 47(12): 1645-1656.
- Li J L, Yan J P. 2010. Experimental study of acoustic effects on coal gas permeability. *Journal of China Coal Society*, 35(S1): 81-85.
- Liu S D, Zhao Q F, Zhang P S, et al. 2005. Test and research on relationship between seam gas features and vibration wave parameters. *Coal Science and Technology*, 33(11): 33-36.
- Liu E, Chapman M, Varela I, et al. 2007. Velocity and attenuation anisotropy: implication of fracture characterizations. *The Leading Edge*, 26: 1170-1174.
- Lu J, Wang Y. 2010. Seismic wave propagating in Kelvin-TI media. *Applied Geophysics*, 7(4): 368-375.
- Ma Z G, Mao X B, Li Y S, et al. 2005. Experimental study on influence of temperature on the mechanical properties of coal. *Ground Pressure and Strata Control*, (3): 198-206.
- Nie B S, He X Q, Li X C, et al. 2007. Research on attenuation characteristic of sound wave in coal or rock body. *Journal of Coal Science & Engineering (China)*, 13(2): 154-158.
- Sun J Z, Zhao H R, Zhang K Y. 1988. Supersonic methods for determining the Q value of material. *Oil Geophysical Prospecting*, 23(6): 699-708.
- Tang H W, Cheng J Y, Wang S D. 2009. The test results and its analysis of deep coal seam and rock sample. *China Coal*, 35(9): 75-78, 81.
- Tonn R. 1991. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods. *Geophysical Prospecting*, 39(1): 1-27.
- Wang Y. 2002. A stable and efficient approach to inverse Q filtering. *Geophysics*, 67(2): 657-663.
- Wang Y. 2003. Quantifying the effectiveness of stabilized inverse Q filtering. *Geophysics*, 68(1): 337-345.
- Wang Y. 2004. Q analysis on reflection seismic data. *Geophys Res. Lett.* 31: L17606.
- Wang Y. 2006. Inverse Q-filter for seismic resolution enhancement. *Geophysics*, 71: V51-60.
- Wang Y, Guo J. 2004. Seismic migration with inverse Q filtering. *Geophys. Res. Lett.* 31: L21608.
- Wang Y, Lu J, Shi Y, et al. 2009. PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values. *J. Geophys. Eng.*, 6(4): 386-389.
- Wang Y, Xu X K, Zhang Y G. 2012. Characteristics of P- and S-wave velocities and their relationships with density of six metamorphic kinds of coals. *Chinese J. Geophys.*, 55(11): 3754-3761.
- White R E. 1992. The accuracy of estimating Q from seismic data. *Geophysics*, 57(11): 1508-1511.
- Wu X Y. 2000. Research on Sonic velocity and its properties of hydrocarbon fluids[Ph. D. Thesis]. Beijing: Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences.
- Yan H, Liu Y. 2009. Estimation of Q and inverse Q filtering for prestack reflected PP- and converted PS-waves. *Applied Geophysics*, 6: 59-69.
- Zhang P S, Liu S D, Zhao Q F, et al. 2006. Factor analysis on seam reduced features and quality in Huainan Mining Area. *Coal Science and Technology*, 34(5): 83-85.
- Zhao M J, Xu R. 2000. The present situation and prospect of the acoustic properties research in rock. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 19(2): 79-85, 98.
- Zhao Q F, Hou Y, Liu S X. 2008. The pilot study on characteristics of the seismic wave spectrum and gas content of coal seam. *Journal of Henan Polytechnic University*, 27(6): 615-618.

- Zhao Q., Hao S L. 2005. Testing anisotropy of ultrasonic velocity and attenuation in coal samples. *Oil Geophysical Prospecting*, 40(6): 708-710.
- Zhao Q., Hao S L. 2006. Anisotropy test instance of ultrasonic velocity and attenuation of coal sample. *Progress in Geophysics*, 21(2): 531-534.

附中文参考文献

- 韩德品, 赵错, 李丹. 2009. 矿井物探技术应用现状与发展展望. *地球物理学进展*, 24(5): 1839-1849.
- 何元金, 马兴昆. 2003. 近代物理实验. 北京: 清华大学出版社.
- 李建楼, 严家平. 2010. 声波作用对煤体瓦斯渗透性影响的实验研究. *煤炭学报*, 35(S1): 81-85.
- 刘盛东, 赵秋芳, 张平松等. 2005. 煤体瓦斯特征与震波参数关系的试验研究. *煤炭科学技术*, 33(11): 33-36.
- 马占国, 茅献彪, 李玉寿等. 2005. 温度对煤力学特性影响的实验研究. *矿山压力与顶板管理*, (3): 46-48.
- 孙进忠, 赵鸿儒, 张宽一. 1988. 材料 Q 值的超声波测定方法. *石油地球物理勘探*, 23(6): 699-708.
- 汤红伟, 程建远, 王世东. 2009. 深层煤矿床的煤岩物性测试结果与分析. *煤炭科技*, 35(9): 75-78, 81.
- 伍向阳. 2000. 石油流体中声波速度及其相关性质研究[博士论文]. 北京: 中国科学院地球物理研究所.
- 张平松, 刘盛东, 赵秋芳等. 2006. 淮南矿区煤层衰减特征及品质因子分析. *煤炭科学技术*, 34(5): 83-85.
- 赵明阶, 徐蓉. 2000. 岩石声学特性研究现状及展望. *重庆交通学院学报*, 19(2): 79-85, 98.
- 赵秋芳, 侯懿, 刘顺喜. 2008. 煤层波谱特征与瓦斯含量的试验研究. *河南理工大学学报*, 27(6): 615-618.
- 赵群, 郝守玲. 2005. 煤样的超声速度和衰减各向异性测试. *石油地球物理勘探*, 40(6): 708-710.
- 赵群, 郝守玲. 2006. 煤样的超声速度和衰减各向异性测试实例. *地球物理学进展*, 21(2): 531-534.
- 王赞, 许小凯, 张玉贵. 2012. 6 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*, 55(11): 3754-3761.

(本文编辑 汪海英)