

论文

# 常温压条件下五种变质程度构造煤的超声弹性特征

王赞<sup>①\*</sup>, 许小凯<sup>②</sup>, 杨德义<sup>③</sup>

① 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002;

② 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

③ 太原理工大学矿物工程学院, 太原 030024

\* E-mail: yunwang@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2014-01-08; 接受日期: 2014-06-23; 网络版发表日期: 2014-10-21

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2014CB440905)、国家自然科学基金项目(批准号: 41172145, 41372163)、矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目(编号: SKLODG-ZY125-01)和国家科技重大专项(编号: 2011ZX05: 035-001-006HZ, 002-003HZ)资助

**摘要** 鉴于构造煤对煤矿安全生产和煤层气抽采的重要影响, 为了实现构造煤的地震预测, 针对淮南、平顶山、鹤壁和焦作 4 个矿区采集的 5 种不同变质程度的碎粒与糜棱构造煤样进行了走向方向的实验室超声测量. 在常温常压条件下, 构造煤样纵、横波超声测试显示: 相比于原生结构煤, 构造煤的纵横波速度、品质因子、弹性模量大幅度降低. 具体表现为: 构造煤的纵横波速度之间存在一定的相关性, 但速度与密度、速度与品质因子、纵波品质因子与横波品质因子之间的线性相关性已不存在; 纵横波速度比与泊松比总体呈现降低的规律, 纵波品质因子小于横波品质因子. 孔隙结构与弹性模量的关系分析显示: 纵横波速度与孔隙体积、有效孔隙率和比表面积存在较好的正相关性; 杨氏模量、剪切模量也存在类似的关系, 但其他模量不存在这种相关性. 不同构造煤样的弹性模量、孔隙结构与变质程度、密度之间未发现存在相关性, 这与构造煤主要表现为结构的破坏是吻合的. 上述实验结果显示, 从地震弹性反演的角度预测构造煤是可能的.

**关键词**  
构造煤  
变质程度  
超声测量  
弹性特征

我国的绝大多数煤田经历多期次构造作用的叠加, 构造煤(据宜文和姜波, 2005)发育较为普遍(姜波等, 2009; Wang 等, 2007). 由于构造煤是煤矿安全生产(张子敏, 2009; 郝吉生等, 2000; 张玉贵等, 2007)与煤层气抽采的重要影响因素(Pan 和 Connell, 2011), 构造煤的预测成为煤田地震勘探面临的重大挑战. 尤其随着深层煤炭资源开采的逐渐增多和大规模煤层气压裂开采的需要(孟召平和侯泉林, 2013; 王怀

勳等, 2011; 孙晓明和何满潮, 2005), 精确探测构造煤的空间分布成为当务之急. 尽管近些年来构造煤的地质预测法和地球物理预测法获得了长足的发展(张子敏和张玉贵, 2005), 但由于地质法主要依赖钻孔和巷道开拓信息定性预测构造煤, 还不能满足采煤规划设计、煤炭安全生产和煤层气开采水平井设计的需要(王恩营等, 2008); 而地球物理预测法刚处于发展的起步阶段, 离生产实践的需求仍有较大差距,

中文引用格式: 王赞, 许小凯, 杨德义. 2014. 常温压条件下五种变质程度构造煤的超声弹性特征. 中国科学: 地球科学, 44: 2431-2439

英文引用格式: Wang Y, Xu X K, Yang D Y. 2014. Ultrasonic elastic characteristics of five kinds of metamorphic deformed coals under room temperature and pressure conditions. Science China: Earth Sciences, 57: 2208-2216, doi: 10.1007/s11430-014-4922-4

其中, 由于三维地震技术在煤田勘探中的大规模成熟应用, 采前实现构造煤的定量或定性预测成为地震勘探面临的新问题。

由于构造煤的纵横波速度等特征的认识是实现构造煤地震探测的基础条件之一, 因此, 近些年构造煤弹性特征的研究逐渐得到重视(吕绍林, 1995; 郭德勇等, 1998; 何继善和吕绍林, 1999; 彭苏萍等, 2004, 2005; 张慎河等, 2006; 姚军朋等, 2011), 利用巷道或地面地震技术实现构造煤的探测也得以尝试, 并取得了一些进展(汤友谊等, 2002; 彭苏萍等, 2005; 孙学凯等, 2011; 芦俊等, 2011)。但是, 由于构造煤结构疏松, 采集、制样十分困难, 针对构造煤的弹性测试很少, 因此, 目前关于构造煤的弹性特征的认识是零星的或经验性的, 只针对个别矿区和煤类型; 也使得利用地震资料与测井数据的联合反演预测构造煤的空间展布缺乏必要的、严谨的物理实验基础(陈同俊等, 2009, 2010)。例如, 何继善等(1999)利用超声波进行了不同煤体结构的测量发现, 不同煤体结构类型的超声波速具有很大差别, 构造煤的纵横波速度明显低于原生结构煤, 且随着煤体结构破坏程度的升高而降低。但他们的测量样品主要来自于河南平顶山煤矿, 煤的变质程度相对单一, 且只测量了纵波速度, 缺少对构造煤弹性性质的系统认识。郭德勇等(1998)对不同粒度构造煤粉末重新压铸(6 MPa 压力)成型的构造煤模型样品在高压条件下对垂直与平行层理两个方向的纵波速度进行了测试, 结果表明: 随着围压增加构造煤的波速增加, 而随着煤结构破坏程度提高, 构造煤的波速降低; 且不同方向的 P 波速度存在各向异性, 各向异性系数一般在 5%~10%。由于构造煤粉末重新压铸成型后破坏了构造煤的原始结构状态, 与原始地层条件下的构造煤相似性、可比性难以评价, 因此, 这一实验结果也只具有一定的参考价值。彭苏萍等(2004)利用测井曲线对淮南煤田构造煤与原生结构煤的密度和纵波速度差异进行了统计分析发现, 与原生结构煤相比, 构造煤的密度降低约为 5%, 而纵波速度降低明显, 平均为 13%。由于煤层相对于其他沉积岩的软分层特点, 钻孔扩径和井眼垮塌会对测井数据的测量与解译造成不可预测的影响, 因此, 单纯从测井曲线研究构造煤的弹性特征也存在诸多不确定性, 且这一认识也只局限于淮南构造煤。

综上所述, 由于现有的构造煤弹性特征研究多

局限于某一煤矿或煤田有限的样品和钻孔, 对不同变质程度煤、不同破坏程度的构造煤弹性特征缺乏统一的认识, 因此, 通过超声测量获得不同变质程度与结构破坏的构造煤的弹性模量显得十分紧迫与必要, 也是实现地震探测构造煤的必由之路。

## 1 测试样品与方法

由于煤层是一种松软的沉积岩体, 而且岩体内具有很多层理、割理和缝隙等结构分界面, 因此构造煤的超声测量主要存在两个方面的难题:

(1) 受到构造应力破坏的构造煤结构疏松, 特别容易破碎, 在井下很难采集到成块的样品。目前对构造煤的弹性测试, 一般是利用模具把破碎的构造煤挤压成型后再进行测量, 样品弹性模量受到很大的影响, 失去了与地层条件下构造煤的可比性。

(2) 进行构造煤横波超声测量时, 由于透射横波与其他波型叠加混杂, 横波初至难以识别, 也无法提取准确的横波波形, 通过经验估算初至的原始做法(伍向阳, 2000)使得横波速度  $V_s$  与品质因子  $Q_s$  的计算存在较大的误差。

### 1.1 构造煤制样

针对第一个问题, 本次样品的制作方法是: 首先使用加工的圆柱形模具直接打进构造煤发育煤层, 取出煤样, 尽量保证了构造煤的原始状态; 其次, 在圆柱形模具的两个横截面上加入适量黏合剂, 使两个断面尽量牢固; 最后, 使用砂纸打磨两个截面, 使之具有较好的平面特性, 便于后续测量中的换能器耦合。如图 1 所示为本次实验制作的部分构造煤样品。显然, 由于端面处黏合剂的加入会改变构造煤原始的结构, 使得实测的超声信号透射旅行时减小; 但由于构造煤尺度较大(表 1), 为超声测量的信号检测可靠, 这一短距离内的结构变化对于整体的超声波速度影响应该可以忽略。即所测的超声波时差基本可以客观地反映构造煤的原始结构状态。

### 1.2 构造煤的超声测量与数据采集

针对第二个问题, 本文尝试采用两种方法配合解决。首先重复观测两个正交方向的横波信号, 根据不同类型体波的偏振差异, 利用张建利等(2013)介绍的拾取横波初至的方法, 提高淹没在纵波和转换波



图1 构造煤测试样品

信号中横波信号的拾取精度;其次考虑到纵波与横波的频率差异,设计了适当的滤波器提高横波速度和品质因子的计算精度。

本次构造煤超声实验所使用的装备与技术同王赟等(2012, 2013)所介绍的相同,纵横波使用的频率均为 100 kHz,整个测量系统误差小于 1%;但考虑到构造煤样品制备及测量的复杂性和高难度,系统测试误差控制在 3%以内。具体测试实验条件如下:

(1) 低频探头的选用。由于测试煤柱尺寸为直径 6 cm,高 6 cm,且为了避免高频波的衰减性,故样品适宜超声波的低频段测试,选择 100 kHz 的低频超声波探头。

(2) 水分条件控制。从煤的井下采集到加工成样,煤层原始的水分(含游离水、化合水和结晶水)赋存状态必然受到破坏。由于水分对煤岩的弹性影响较大。为了保证样品测试时水分条件一致,本次实验暂不考虑储层水分状态以及不同的水分含量对煤岩弹性的影响。统一将加工好的煤样暴露在自然空气

条件下一段时间(本次实验选择 7 天),之后将样品浸泡水中 24 h,再将其取出晾干 5 h。

(3) 加载方案。测试时,为了保持不同样品测试条件的一致性,专门采用夹持器以相同的压力将探头和煤样两端夹持固定,使得探头与煤样端面耦合良好。考虑到煤样硬度低的特点,夹持器施加压力定为 10 kPa。

### 1.3 待测样品信息

本次试验的构造煤样品来自 4 个不同矿区、具有 5 种不同的变质程度;且采样时沿煤层走向垂直工作面方向打入钢模具,即采集的构造煤样按王赟等(2012)的三方向标记法属于 X 方向,在样品采集过程中对构造煤的赋存状态进行了标记(表 1)。

## 2 测试结果与分析

### 2.1 测量与换算结果

采用王赟等(2013)介绍的速度与弹性模量和成林(2012)介绍的品质因子计算方法可以根据超声测量的透射波形得到所有构造煤样的纵横波速度、弹性模量与品质因子,如表 2 和 3 所示。

### 2.2 构造煤的弹性特征

由表 2 数据分析可知,构造煤样的纵波平均波速为  $737 \text{ m s}^{-1}$ ,横波平均波速为  $433 \text{ m s}^{-1}$ ,均远小于原生结构煤的纵波与横波速度(王赟等, 2012),且纵、横波速度比平均约为 1.702,也小于原生结构煤的平均纵横波速度比 2.02;纵横波速度与密度之间相关关系很差,这与构造煤与对应原生结构煤(王赟等, 2012)密度几乎无变化,而受力后结构发生较大变化影响

表 1 测试样品信息<sup>a)</sup>

煤样 编号	变质程度	采样矿点	煤层	具体采样点	样品加 工规格	样品数量 (块)	构造煤工业分析		
							$M_{ad}(\%)$	$A_d(\%)$	$V_{daf}(\%)$
1	气煤	淮南潘一	石盒子组 13-1 煤	2331(3)工作面 30 m	直径 6 cm, 高 6 cm 柱状	4	1.82	12.21	37.01
2	肥煤	平顶山八矿	下石盒子组戊 <sub>9-10</sub> 煤	12160 工作面 177 m	同上	5	1.67	30.54	33.34
3	焦煤	平顶山八矿	山西组己 <sub>15</sub> 煤	14120 工作面 22.5 m	同上	5	1.58	7.03	22.56
4	贫瘦煤	鹤壁六矿	山西组二 <sub>1</sub> 煤	2143 工作面 50 m	同上	6	1.48	8.30	13.48
5	无烟煤	焦作古汉山	山西组二 <sub>1</sub> 煤	14181 工作面 75 m	同上	5	2.85	10.99	7.71

a)  $M_{ad}$ , 试验煤样水分的质量分数(%);  $A_d$ , 空气干燥基灰分的质量分数(%);  $V_{daf}$ , 干燥无灰基挥发分的质量分数(%). 工业分析按 GB/T212-2001 执行

表 2 构造煤  $V_p$ ,  $Q_p$ ,  $V_s$  及横波  $Q_x$ ,  $Q_y$  <sup>a)</sup>

煤样编号	块编号	$V_p$ (m s <sup>-1</sup> )	$Q_p$	$V_s$ (m s <sup>-1</sup> )	$Q_x$	$Q_y$	视密度 $\rho$ (g cm <sup>-3</sup> )
1	1-1	857	1.03	545	1.50	1.26	1.28
	1-2	667	0.94	400	1.78	1.82	1.27
	1-3	857	1.02	545	1.37	1.65	1.22
	1-4	938	0.74	566	1.77	1.49	1.17
2	2-1	706	0.59	368	1.07	1.52	1.28
	2-2	522	0.92	324	0.83	0.89	1.25
	2-3	833	0.28	455	0.65	1.09	1.27
	2-4	759	0.69	508	0.86	0.71	1.29
	2-5	789	0.40	522	1.10	1.08	1.28
3	3-1	583	0.60	400	0.46	0.62	1.31
	3-2	750	0.37	400	0.23	0.36	1.33
	3-3	698	0.40	357	1.40	1.02	1.35
	3-4	732	0.38	423	1.31	0.98	1.38
	3-5	632	0.54	324	0.75	1.52	1.35
4	4-1	759	0.48	429	0.46	0.31	1.40
	4-2	706	0.47	429	0.46	1.26	1.41
	4-3	706	0.55	375	0.4	0.47	1.39
	4-4	674	0.49	400	0.50	0.43	1.43
	4-5	600	0.57	400	0.48	0.91	1.37
	4-6	714	0.41	286	0.15	0.78	1.41
5	5-1	741	0.39	462	1.17	2.40	1.51
	5-2	870	0.88	400	0.37	0.54	1.53
	5-3	698	0.28	451	0.32	0.89	1.47
	5-4	638	0.58	420	1.16	1.14	1.52
	5-5	870	0.30	500	0.82	0.57	1.51

a)  $V_p$ , 纵波速度;  $Q_p$ , 纵波品质因子;  $V_s$ , 横波速度;  $Q_x$ ,  $Q_y$ , 横波品质因子,  $x$ ,  $y$  表示横波两个不同的偏振方向且正交; 视密度数据由河南理工大学瓦斯地质研究所测量, 按 GB/T6949-1998 执行

表 3 构造煤走向上五种力学弹性参数计算结果

煤样编号	块编号	拉梅常数 $\lambda$ (GPa)	剪切模量 $\mu$ (GPa)	泊松比 $\nu$	体积模量 $K$ (GPa)	杨氏模量 $E$ (GPa)
1	1-1	0.18	0.38	0.16	0.43	0.88
	1-2	0.16	0.20	0.22	0.29	0.50
	1-3	0.17	0.36	0.16	0.41	0.84
	1-4	0.28	0.37	0.21	0.53	0.91
2	2-1	0.29	0.17	0.31	0.41	0.46
	2-2	0.08	0.13	0.19	0.17	0.31
	2-3	0.36	0.26	0.29	0.53	0.68
	2-4	0.08	0.33	0.09	0.30	0.73
	2-5	0.10	0.35	0.11	0.33	0.77
3	3-1	0.03	0.21	0.06	0.17	0.44
	3-2	0.32	0.21	0.30	0.46	0.55
	3-3	0.31	0.17	0.32	0.43	0.46
	3-4	0.25	0.25	0.25	0.41	0.62
	3-5	0.26	0.14	0.32	0.35	0.37
4	4-1	0.29	0.26	0.27	0.46	0.65
	4-2	0.18	0.26	0.21	0.36	0.63
	4-3	0.30	0.20	0.30	0.43	0.51
	4-4	0.19	0.23	0.23	0.34	0.56
	4-5	0.05	0.22	0.10	0.20	0.48
	4-6	0.49	0.12	0.40	0.57	0.32
5	5-1	0.18	0.32	0.18	0.40	0.76
	5-2	0.67	0.24	0.37	0.83	0.67
	5-3	0.12	0.30	0.14	0.32	0.68
	5-4	0.08	0.27	0.12	0.26	0.60
	5-5	0.39	0.38	0.25	0.64	0.95

了速度有关. 同文献(王赟等, 2012)相比, 构造煤的纵横波速度差异也是明显的, 可以截然分开, 且所测样品中纵波与横波速度均无超过  $1000 \text{ m s}^{-1}$ . 通过对纵、横波波速进行线性回归分析, 如图2与3所示, 可以发现不同变质程度的构造煤  $V_p$  与  $V_s$  的均值具有良好的线性相关性, 但不同变质程度煤的纵横波速度相关性差异较大. 通过表4中的镜质组最大反射率与表2的密度和速度相互关系分析可以发现, 密度与变质程度存在一定的相关性, 但不同变质程度的构造煤纵横波速度与变质程度未呈现相关性.

为综合说明构造煤纵波与横波品质因子的特征, 取横波两个正交方向的品质因子均值作为波传播方向的品质因子, 如图4所示. 从图4和表2可见: 构造煤的品质因子极低, 一般都小于2; 且大多数样品纵波的品质因子比相同煤样的横波品质因子还小, 接近  $Q_s$  的一半; 品质因子与速度之间不存在相关性, 使得基于构造煤的速度估算品质因子缺少了物理依据. 根据图5所显示的纵、横波  $Q$  值关系可见: 纵波

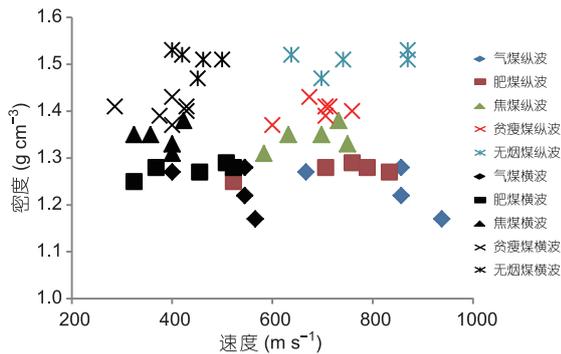


图2 构造煤速度与密度的关系

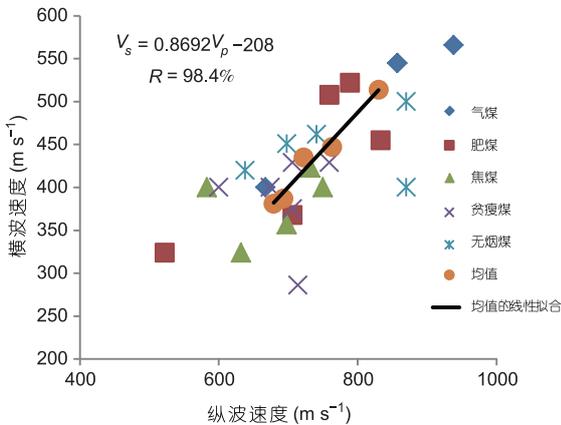


图3 构造煤纵波与横波的速度关系

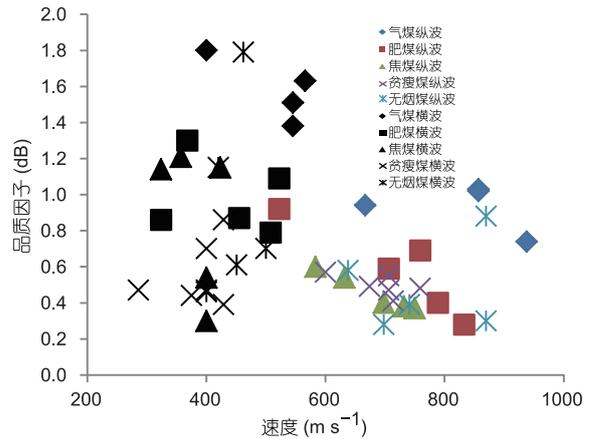


图4 速度与  $Q$  关系

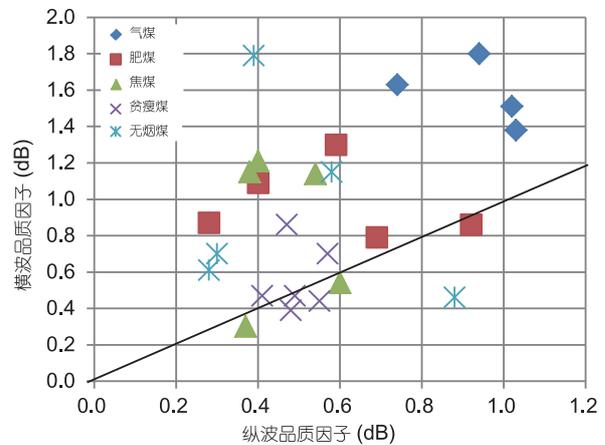


图5 纵横波品质因子之间的关系

品质因子与横波品质因子之间也不存在线性相关性, 尽管总体上也显示随  $Q_p$  的增加,  $Q_s$  也存在增加的趋势; 且品质因子与变质程度之间也不存在相关性, 这与一般沉积岩和原生结构煤的规律存在差异(王赟等, 2013; Wang 等, 2009). 根据图中的等分线可知, 大部分构造煤样品的横波品质因子均大于纵波品质因子, 说明构造煤对纵波的吸收衰减作用更强, 对于多波地震探测识别构造煤, 这是有意义的.

从表2横波两个正交方向测得的品质因子数据对比可以发现, 横波品质因子的方向各向异性差异(以  $2|(Q_x - Q_y)/(Q_x + Q_y)|$  表示)变化较为剧烈, 从1.7%~135%均有分布, 但总体分布在30%~40%, 均值为38.5%. 这说明由于构造应力的破坏作用使得原始沉积的层理状的煤在不同方向上对地震横波的吸收衰减差异较大, 即存在各向异性, 但也不存在随变

质程度变化的规律性。

从表 3 弹性模量数值可以看出, 除泊松比外, 构造煤的弹性模量明显的小(王赞等, 2013), 均小于 1 GPa, 说明构造煤抗压缩与剪切的能力很弱, 之所以在煤层中赋存, 是因为围岩的作用形成局部的应力平衡, 而一旦这种平衡被破坏, 构造煤自身是难以承受高地应力作用的, 这也是构造煤的探测对于深层煤开采和瓦斯抽采具有重要意义的原因。

### 2.3 构造煤的孔隙结构与弹性模量的关系

对于构造煤而言, 由于在煤炭开采过程中它主要是形成动力灾害的必要条件之一; 在煤层气开发中是水平压裂井一般要避开的层段, 因此, 构造煤的孔隙结构对于构造煤的评价是有意义的(成林, 2012; 据宜文等, 2004)。尤其对于构造煤可能超量的吸附瓦斯, 构造煤的孔隙体积与比表面积是衡量煤吸附能力的重要指标之一(侯泉林等, 2012; 据宜文等, 2005); 对于煤层气开发, 煤的孔隙结构, 主要是孔隙体积和有效孔隙率是瓦斯解吸扩散速度的衡量指标(陈富勇等, 2010)。为此, 在本实验中, 同时测量了构造煤样的比表面积和孔隙结构, 如表 4 所示。其中孔隙结构测定实验采用  $N_2$  吸附和压汞实验,  $N_2$  吸附主要测定煤中小孔(<50 nm)的孔径分布, 压汞实验主要测定煤中中孔、大孔(>50 nm)的孔径分布。样品煤岩镜质组反射率分析按 GB/T6948-2008 执行; 比表面积测定按 GB/T7702.20-2008 执行, 实验采用  $N_2$  吸附。

需要说明的是: 在本实验中, 超声测量使用的是淮南的气煤, 孔隙结构测量使用的河南的气煤, 由于地区的差异性, 以下孔隙结构与弹性模量的关系分析不考虑气煤。

由于构造煤在产生过程中密度基本不变, 而孔隙结构会发生较大的变化, 因此, 从表 4 与 2 的对比中难以看到构造煤的总孔隙体积、平均孔径、有效孔隙率与密度存在相关关系。而纵横波速度与总孔体

积和有效孔隙率、比表面积存在较好的相关性, 如图 6 所示; 但与平均孔径无相关关系。由于煤体结构破坏类型分类的非定量的特点, 从表 4 中难以看到构造煤结构破坏程度与孔隙结构的关系; 而实际上按照据宜文和姜波(2005)的分类方法和微观结构分析, 构造煤的破坏程度越大, 孔隙体积与比表面积应相应增加。因此, 从这个角度看, 采用简单的三类构造煤分类对于构造煤的微观结构反映精度有限。

综合分析表 3 和 4, 也可以得到弹性模量与孔隙结构的关系(图 7)。从图 7 中可见, 显然杨氏模量、剪切模量与比表面积和有效孔隙率存在较好的正相关关系, 而其他模量这种相关性较弱。由于速度与弹性模量间的换算关系, 这一规律与纵横波速度与孔隙结构关系的规律性一致。

由表 4 样品孔隙结构数据可知, 随着焦煤、贫瘦煤至无烟煤变质程度的升高煤样总孔体积、有效孔隙率及 BET 比表面积相应增大, 与变质程度随密度的变化关系一致。且波速、模量与孔隙结构的发育程度正相关。说明孔隙结构对波速、模量的影响集中体现在宏观密度对波速、弹性模量的影响。然而当考虑变质程度较低, 密度小的肥煤时, 其总孔体积、有效孔隙率及 BET 比表面积数值却明显高于焦煤、贫瘦煤, 仅略小于无烟煤, 又使得上述规律存在局限性。由于肥煤的平均孔径最大且样品为碎粒煤(其他三类均为糜棱煤), 孔隙-裂隙结构的根本不同使得肥煤孔隙结构对波速、模量的影响明显不同于其他三类煤。

## 3 认识与讨论

由于构造煤是目前煤层气开发的禁区与煤矿瓦斯灾害的诱因之一, 因此通过弹性测试为构造煤地震探测提供基础物理支撑显得十分紧迫与必要。本文采自 4 个不同矿区、代表了 5 种不同变质程度(中高阶)、二种结构破坏程度的构造煤样, 其纵、横波超

表 4 样品孔隙结构测定实验结果

编号	煤种	总孔体积( $cm^3 g^{-1}$ )	平均孔径(nm)	有效孔隙率(%)	$R_{o,max}$ (%)	BET 比表面积( $m^2 g^{-1}$ )	构造煤类型
2	肥煤	0.01996	8.118	2.54	1.346	9.836	碎粒煤
3	焦煤	0.003213	4.588	0.43	1.494	2.801	糜棱煤
4	贫瘦煤	0.004559	7.343	0.64	1.672	3.462	糜棱煤
5	无烟煤	0.02508	6.660	3.78	2.548	15.06	糜棱煤

a)  $R_{o,max}$ , 煤岩油浸最大镜质组反射率; 有效孔隙率由总孔隙体积和视密度计算而得, 据张子敏(2009); 孔隙结构数据由河南理工大学瓦斯地质研究所测试

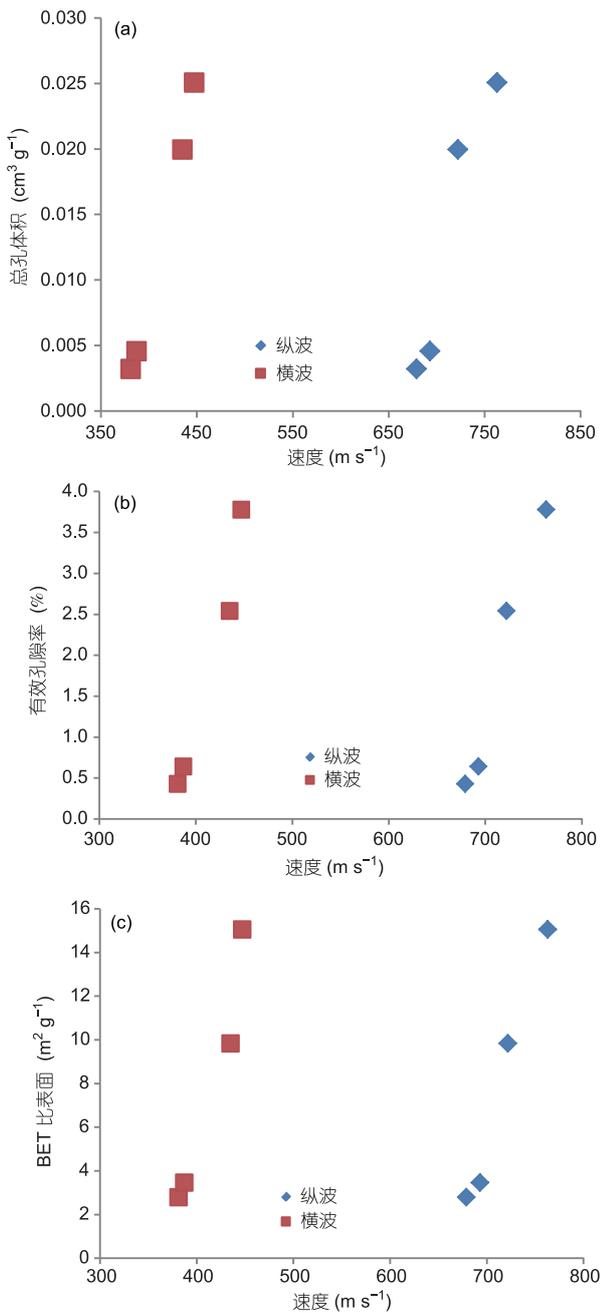


图6 构造煤速度与孔隙结构的关系图

(a), (b), (c)分别表示纵横波速度与总孔隙体积、有效孔隙率和比表面积的关系

声测试结果表明以下几点。

(1) 由于煤的物性组成及结构、构造极其复杂, 所测超声波波速值必然是煤的各物质组分、孔隙结构、层理构造等地质参数的综合反映值, 所以对每种煤的测试结果取均值, 所分析的结果便能在一定程

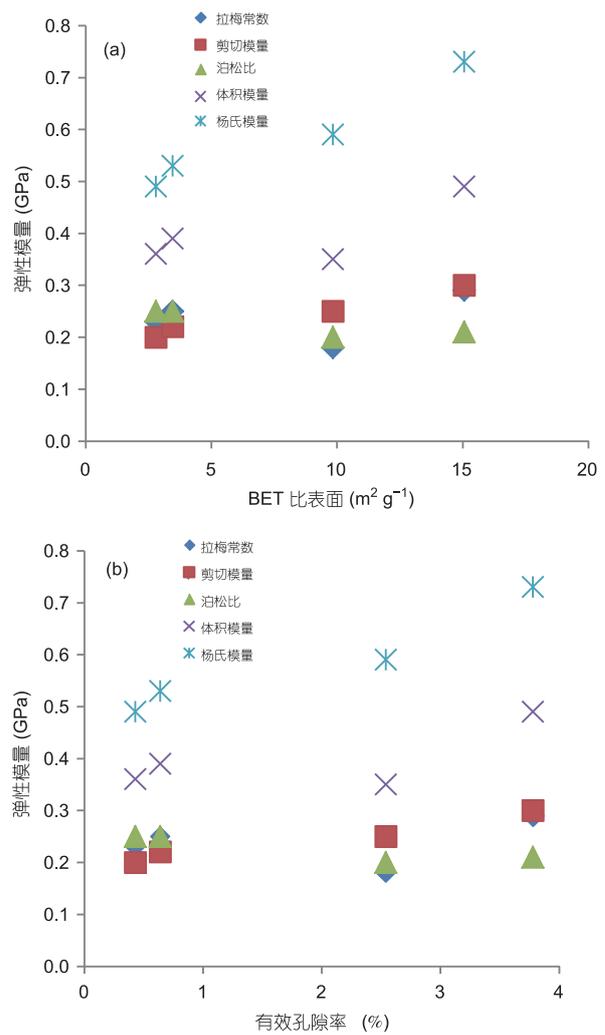


图7 构造煤的弹性模量与孔隙结构的关系图

(a) 弹性模量与构造煤孔隙比表面积的关系; (b) 弹性模量与有效孔隙率的关系

度上反映该煤种的一般性特征。为便于分析将表2中各个煤种对应值取算术平均值, 见表5所示。构造煤的纵、横波速明显降低, 但相互间具有较好的相关性,  $V_p$ ,  $V_s$  与视密度线性相关性差。将平均后的各煤种视密度  $\rho$  与  $V_p$  及  $V_s$  进行回归分析, 结果如图8所示。  $\rho$  与  $V_p$  及  $V_s$  之间存在较强的二次相关性。  $V_p$  与  $V_s$  随着密度的增加总体上呈先减小后增大的趋势。用同样的方法将各煤种密度均值与其工业分析指标也进行了相关性分析。经分析, 密度与  $M_{ad}$ (水分)、 $V_{daf}$  均呈强的二次相关, 与灰分相关性不大。由于测试前对样品水分条件进行了统一处理, 暂不分析水分的影响条件下, 可知样品密度主要受变质程度的影响, 进而

表 5 构造煤各煤种  $\rho$ ,  $V_p$  及  $V_s$  均值表

煤样编号	$\rho$ (g cm <sup>-3</sup> )	$V_p$ (m s <sup>-1</sup> )	$V_s$ (m s <sup>-1</sup> )
1	1.24	830	514
2	1.27	722	435
3	1.34	679	381
4	1.40	693	387
5	1.51	763	447

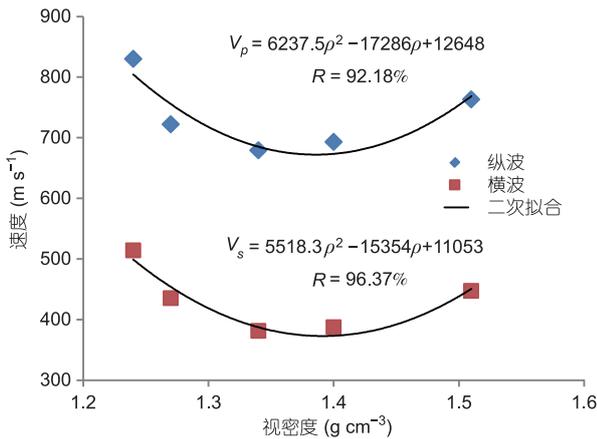


图 8 构造煤各煤种  $\rho$  与  $V_p$  及  $V_s$  均值之间相关性

影响其弹性响应特征。而前述孔隙结构对弹性参数的影响, 应该是样品宏观结构破坏程度对其弹性响应的具体体现。构造煤的纵、横波速比为 1.7:1, 低于原生结构煤的纵横波速度比。

(2) 纵、横波的  $Q$  值均很小, 表示构造煤对弹性波的强吸收衰减作用, 与构造煤岩强度低、易破碎的特性相符; 品质因子与波速、品质因子之间相关性较差, 两个偏振方向的横波品质因子平均各向异性系数可达 38%。

由表 6 关于原生结构煤和对应构造煤的孔隙结构实验数据可知, 两种类型煤孔隙结构最突出的特点表现为: 构造煤平均孔径一般比其对应的原生结构煤大。这可能是造成构造煤比对应原生结构煤衰

减严重的主要原因。

(3) 与之前的原生结构煤超声测试结果相比(王赞等, 2012, 2013; 成林, 2012), 构造煤样的纵、横波波速和  $Q$  值、速度比、弹性模量比原生结构煤都有明显所降低, 这是煤体结构由基质-裂隙结构向碎粒、糜棱结构转变的结果。这为进一步利用弹性反演预测构造煤提供了有效的岩石物理依据。

由于目前对于构造煤破坏类型的划分在地质界尚无统一的标准(据宜文等, 2005; 张子敏, 2009), 且结构破坏程度的划分还是基于煤样的定性分析, 因此, 虽然本文在野外采样和实验室观测时也进行了不同结构破坏程度的二种结构简单分类, 但由于这种定性分析与结构破坏定名缺乏定量的描述参数, 因此本文没有探讨不同破坏程度构造煤的弹性特征差异; 而若要求地震探测能进一步预测构造煤的破坏程度, 能够形成对构造煤结构破坏程度精确、定量地微观描述是前提。为了将超声波基础实验的研究成果应用到实际地震勘探中, 必须考虑从超声波到低频地震勘探的过渡, 以便将煤超声波响应特征映射到实际地震勘探中, 实现构造煤的地震探测。由于煤样实验室的超声测量是在常温压和高频条件下实现的, 对于实际地层条件和地震频带的差异, 本文的结果只具有相对的指导意义。

根据 Zhou 等(2012)对割理发育与不发育煤样的变温、变压超声实验结果: 针对我国目前煤炭和煤层气赋存的地层温度条件, 温度对割理发育不同程度煤的速度影响较小; 相比于常压条件, 割理发育煤样的纵横波速度随着压力的升高会有近 10% 增加, 而割理不发育煤样的纵横波速度只有近 5% 的增大。虽然本文的煤样测试结果是在常温压条件下进行的, 所揭示的纵横波速度、弹性模量特征及其与密度的关系对于地层条件下的煤岩弹性具有可比性, 因此对于构造煤的探测具有参考意义。

表 6 原生结构煤和对应构造煤样品孔隙结构测定实验结果对比<sup>a)</sup>

编号	煤种	总孔体积(cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )		平均孔径(nm)		有效孔隙率(%)	
		原生结构煤	构造煤	原生结构煤	构造煤	原生结构煤	构造煤
2	肥煤	0.00972	0.01996	5.474	8.118	1.39	2.54
3	焦煤	0.005716	0.003213	4.037	4.588	0.83	0.43
4	贫瘦煤	0.008957	0.004559	5.195	7.343	1.25	0.64
5	无烟煤	0.005208	0.02508	3.953	6.660	0.85	3.78

a) 有效孔隙率由总孔体积和视密度计算而得。据张子敏(2009)

**致谢** 中国石油大学(北京)的魏建新研究员在煤样超声测量中给予指导和帮助, 河南理工大学瓦斯地质研究所的张玉贵教授指导煤工业分析及孔隙结构测定工作, 申振华和成林硕士在样品制备和实验室测量工作中提供帮助, 在此一并致谢。

## 参考文献

- 陈富勇, 琚宜文, 李小诗, 等. 2010. 构造煤中煤层气扩散-渗流特征及其机理. 地学前缘, 17: 195-201
- 陈同俊, 崔若飞, 刘恩儒. 2009. VTI型构造煤 AVO 正演模拟. 煤炭学报, 34: 438-442
- 陈同俊, 王新, 崔若飞. 2010. 基于方位 AVO 正演的 HTI 构造煤裂隙可探测性分析. 煤炭学报, 35: 640-644
- 成林. 2012. 构造煤地球物理响应研究. 硕士学位论文. 焦作: 河南理工大学
- 郭德勇, 韩德馨, 冯志亮. 1998. 围压下构造煤的波速特征实验研究. 煤炭科学技术, 26: 21-24
- 郝吉生, 袁崇孚, 张子戊. 2000. 构造煤及其对煤与瓦斯突出的控制作用. 焦作工学院学报, 19: 403-406
- 何继善, 吕绍林. 1999. 瓦斯突出地球物理研究. 北京: 煤炭工业出版社
- 侯泉林, 李会军, 范俊佳, 等. 2012. 构造煤结构与煤层气赋存研究进展. 中国科学: 地球科学, 42: 1487-1495
- 姜波, 秦勇, 琚宜文, 等. 2009. 构造煤化学结构演化与瓦斯特性耦合机理. 地学前缘, 16: 262-271
- 琚宜文, 姜波. 2005. 构造煤结构及储层物性. 徐州: 中国矿业大学出版社
- 琚宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 2004. 构造煤结构-成因新分类及其地质意义. 煤炭学报, 29: 513-517
- 琚宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 2005. 煤岩结构纳米级变形与变质变形环境的关系. 科学通报, 50: 1884-1892
- 芦俊, 王赞, 石瑛. 2011. 利用多波地震与测井数据联合反演预测煤岩的坚固性. 地球物理学报, 54: 2967-2972
- 吕绍林. 1995. 孔隙超声波仪预测煤体结构的理论基础. 焦作矿业学院学报, 14: 54-58
- 孟召平, 侯泉林. 2013. 高煤级煤储层渗透性与应力耦合模型及控制机理. 地球物理学报, 56: 667-675
- 彭苏萍, 杜文凤, 苑春方, 等. 2008. 不同结构类型煤体地球物理特征差异分析和纵横波联合识别与预测方法研究. 地质学报, 82: 1311-1322
- 彭苏萍, 高云峰, 彭晓波, 等. 2004. 淮南煤田含煤地层岩石物性参数研究. 煤炭学报, 29: 177-181
- 彭苏萍, 高云峰, 杨瑞召, 等. 2005. AVO 探测煤层瓦斯富集的理论探讨与初步实践. 地球物理学报, 48: 1475-1486
- 孙晓明, 何满潮. 2005. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究. 中国矿业大学学报, 34: 166-169
- 孙学凯, 崔若飞, 毛欣荣, 等. 2011. 联合弹性波阻抗反演与同步反演确定构造煤的分布. 煤炭学报, 36: 778-783
- 汤友谊, 陈江峰, 彭立世. 2002. 无线电波坑道透视构造煤的研究. 煤炭学报, 27: 254-258
- 王恩营, 殷秋朝, 李丰良. 2008. 构造煤的研究现状与发展趋势. 河南理工大学学报(自然科学版), 127: 278-281
- 王怀勳, 朱炎铭, 李伍, 等. 2011. 煤层气赋存的两大地质控制因素. 煤炭学报, 36: 1129-1134
- 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: 3754-3761
- 王赞, 张玉贵, 许小凯. 2013. 6种不同变质程度煤的最大镜质组反射率与弹性参数的关系. 地球物理学报, 56: 2116-2122
- 伍向阳. 2000. 石油流体中声波速度及其相关性质研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地球物理研究所
- 姚军朋, 司马立强, 张玉贵. 2011. 构造煤地球物理测井定量判识研究. 煤炭学报, 36: 94-98
- 张建利, 王赞, 张玉贵. 2013. 横波偏振方法在煤样超声测量实验中的应用. 煤炭学报, 38: 1220-1226
- 张慎河, 彭苏萍, 刘玉香. 2006. 含煤地层裂隙岩石声速特征试验研究. 山东科技大学学报(自然科学版), 25: 28-31
- 张玉贵, 张子敏, 曹运兴. 2007. 构造煤结构与瓦斯突出. 煤炭学报, 32: 281-284
- 张子敏. 2009. 瓦斯地质学. 徐州: 中国矿业大学出版社
- 张子敏, 张玉贵. 2005. 瓦斯地质规律与瓦斯预测. 北京: 煤炭工业出版社
- Pan Z J, Connell L D. 2011. Modelling of anisotropic coal swelling and its impact on permeability behaviour for primary and enhanced coalbed methane recovery. Int J Coal Geol, 85: 257-267
- Wang Y, Lu J, Shi Y, et al. 2009. PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values. J Geophys Eng, 6: 386-389
- Wang Z R, Chen L X, Cheng C R, et al. 2007. Forecast of geological gas hazards for "Three-Soft" coal seams in gliding structural areas. J China Univ Min Tech, 17: 484-488
- Zhou F, Xu M J, Ma Z G, et al. 2012. An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin. J Geophys Eng, 9: 691-696