

分类号 P313.1

密级 公开

U D C 55

编号

中国科学院地球化学研究所

博士后研究工作报告

砂岩、页岩、无烟煤、烟煤的超声测量实验

许小凯

工作完成日期 2016年8月—2018年5月

报告提交日期 2018年5月

中国科学院地球化学研究所（贵州）

2018年5月

声 明

本人声明所呈交的博士后出站报告是我个人和合作导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国科学院地球化学研究所或其他教育机构和科研单位的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确说明并表示了谢意。

签名： 许小凯 日期： 2018 年 5 月 25 日

关于博士后出站报告使用授权说明

本人完全了解中国科学院地球化学研究所有关保留、使用博士后出站报告的规定，即中国科学院地球化学研究所有权保留送交博士后出站报告的复印件，允许博士后研究报告被查阅和借阅；中国科学院地球化学研究所可以公布博士后研究报告的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究报告。

公开 保密（ 年）（保密的论文在解密后应遵守此规定）

博士后签名： 许小凯

合作导师签名： 王赞

日期： 2018 年 5 月 25 日

砂岩、页岩、无烟煤、烟煤的超声测量实验

ULTRASONIC MEASUREMENT EXPERIMENTS ON SANDSTONE, SHALE, ANTHRACITE AND BITUMINOUS COAL

博 士 后 姓 名 许小凯

流动站（一级学科）名称 中国科学院地球化学研究所地质学

专 业（二级学科）名称 岩石物理

研究工作起始时间 2016年8月01日

研究工作期满时间 2018年6月30日

中国科学院地球化学研究所人事部（贵州）

2018年5月

内 容 摘 要

为了探索非常规页岩气、煤层气储层的弹性特征及其与常规砂岩储层的差异性，本研究主要以砂岩、页岩、煤三类储层岩石为研究对象，对采集的三类岩石样品进行了超声测量研究。首先，沿岩石样品的层理及主要的裂隙方向切割、加工磨制了实验测试所需的标准方块样品 30 个。其次对制备好的各类成品岩样分别在常压、单轴加载（屈服破坏之前）条件下进行纵波与横波的超声测量，测量在块状样品的三个正交方向上依次展开。最后，对所测岩样的超声波形等数据进行了分析和处理，获得所测实验条件下各类岩石的弹性参数，包括纵横波速度（ V_p 、 V_s ）、五种动态弹性力学参数（拉梅常数（ λ ）、剪切模量（ μ ）、泊松比（ ν ）、体积模量（ K ）和杨氏模量（ E ））及纵横波品质因子（ Q_p 、 Q_s ）。在此基础上，对比分析了各类岩石的纵横波速度、动弹性力学性质、纵横波衰减等纵横波响应特征；并对比总结了三类岩石弹性参数的各向异性及压力敏感性规律。实验结果将为利用弹性波勘探方法准确评价页岩气、煤层气储层物性及有效指示所受应力状态提供有力的实验与模型参数支撑。

关键词：超声，页岩，煤，波速，动弹性力学参数，衰减，各向异性，压力敏感性

Abstract

This research aims to study the elastic characteristics for the unconventional shale gas, coal-bed methane reservoirs, which differs with the conventional sandstone reservoir. These three kinds of reservoir rocks were taken as research objects, on which ultrasonic measurement experiments were carried out. First, 30 standard square samples in all for measurement are obtained by cutting and processing along the stratifications or the main fractures. Then, the prepared block rock samples were measured in three orthogonal directions with ultrasonic longitudinal and transverse waves under normal pressure and uniaxial loading (before yielding failure) conditions, respectively. Finally, the measured ultrasonic waveform data were analyzed and processed, and various elastic parameters for kinds of rocks were obtained including longitudinal and transverse wave's velocities and quality factors, and five kinds of dynamic elastic parameters (lame constant, shear modulus, Poisson's ratio, bulk modulus and Young's modulus). On this basis, elastic wave response characteristics of various kinds of rocks were contrastively analyzed, such as *P*- and *S*- velocity, attenuation and dynamic elastic mechanical properties. Furthermore, the laws of anisotropy and pressure sensitivity for the elastic parameters of these three types of rocks are summarized and compared. Experimental results will provide strong experimental and theoretical supports for accurately evaluating physical properties of shale gas and coal-bed methane reservoirs and effectively indicating the stress state with elastic wave exploration methods.

Keywords: ultrasonic, shale, coal, wave velocity, dynamic elastic mechanics parameters, attenuation, anisotropy, pressure sensitivity.

目 次

1 引言.....	1
1.1 研究目的及意义.....	1
1.2 页岩、煤超声波测试实验研究现状.....	1
1.2.1 页岩超声波实验研究现状概述.....	2
1.2.2 煤超声波实验研究现状概述.....	3
1.3 本文工作简介.....	4
2 岩样信息与超声波测量实验.....	7
2.1 岩石样品信息.....	7
2.2 超声波测量实验方法与步骤.....	10
2.3 弹性波参数计算方法与原理.....	14
3 常压条件下岩石的超声波响应特征.....	19
3.1 纵横波速度特征.....	19
3.2 动弹性力学参数特征.....	22
3.3 波的衰减特征.....	27
3.4 小结.....	30
4 单轴受载岩石的波速及其各向异性特征.....	31
4.1 加载压力对波速大小的影响特征.....	31
4.1.1 砂岩.....	31
4.1.2 页岩.....	33
4.1.3 无烟煤.....	36
4.2 加载压力对波速各向异性的影响特征.....	39
4.2.1 砂岩.....	39
4.2.2 页岩.....	42
4.2.3 无烟煤.....	46
4.3 小结.....	51
5 单轴受载岩石的动弹性力学参数及其各向异性特征.....	53
5.1 加载压力对动弹性力学参数大小的影响特征.....	53
5.1.1 砂岩.....	53
5.1.2 页岩.....	56
5.1.3 无烟煤.....	59
5.2 加载压力对动弹性力学参数各向异性的影响特征.....	62
5.2.1 砂岩.....	62
5.2.2 页岩.....	65
5.2.3 无烟煤.....	68
5.3 小结.....	71
6 单轴受载岩石的波衰减及其各向异性特征.....	73
6.1 加载压力对衰减大小的影响特征.....	73
6.1.1 砂岩.....	73
6.1.2 页岩.....	75
6.1.3 无烟煤.....	77
6.2 加载压力对衰减各向异性的影响特征.....	80
6.2.1 砂岩.....	80

6.2.2 页岩.....	82
6.2.3 无烟煤.....	86
6.3 小结.....	89
7 结论.....	91
参 考 文 献.....	93
致 谢.....	95
作者简介.....	97

1 引言

1.1 研究目的及意义

随着环保压力增加和技术进步，全球能源消费的低碳化趋势日益明显，天然气将成为全球能源由高碳向低碳转变的重要桥梁，在一次能源消费结构中的地位持续增长。我国长期面临着常规天然气资源匮乏及枯竭的危机。随着国外页岩气、煤层气等非常规天然气的成功开发，近年来我国对页岩气、煤层气等的勘探开发力度也逐渐加强。然而我国的页岩气、煤层气赋存及开发地质条件复杂。目前我国页岩气的勘探开发工作整体上仍处于起步阶段。页岩、煤层作为页岩气、煤层气的气源层和储集层，是两者勘探开发的主要研究对象。加强我国非常规天然气储层物性的研究对于推动我国非常规天然气的勘探开发具有重要的理论和实际意义。

声学性质是岩石的一项重要物理性质，是利用地震和声波测井等弹性波勘探技术间接获得岩石物性的理论研究基础。其室内实验研究方法主要基于超声波测试技术。通过测定岩石的超声透射波信号可获得波速、衰减系数、波形、频率、频谱、振幅等弹性参数信息，进而间接地了解岩石或岩体的物理力学特性及结构特征[1]，为利用地震和声波测井更有效的勘探目标储层物性（包括力学性质、岩性、孔裂隙结构等）提供理论和实验研究基础。

和常规天然气的砂岩储层相比，页岩、煤具有明显的各向异性和非均质性，主要归因于发育的层理、裂隙等界面结构，且这些结构空间（尤其是裂隙）是储层流体的赋存、运移空间，其不同应力场下的发育、分布情况直接控制着流体的开采难易程度及开发方式。比如储层内构造裂隙的优势取向信息可为井网、井距的优化部署提供依据。另外，裂隙等结构面的发育、分布情况主要受其应力场的控制，不同的应力状态下裂隙等结构面会发生产生、压缩、扩展、闭合等变化，对储层物性产生极大的影响。比如，应力集中区裂隙通常处于压缩闭合状态，气体开采难度大。

综上，为了探索非常规页岩气、煤层气储层的弹性特征及其与常规砂岩储层的差异，非常有必要在实验室对这三类储层岩石开展不同方向上的、不同加载压力条件下的超声波测量实验，了解三者弹性的各向异性特征及其受加载压力的影响规律，这将为实现利用弹性波勘探方法准确评价非常规页岩气、煤层气储层物性及有效指示所受应力状态提供有力的实验与理论支撑，具有重要的基础研究和现实意义。

1.2 页岩、煤超声波测试实验研究现状

由于裂隙的散射作用会形成各向异性，特别是平行、定向排列的裂隙表现为

方位各向异性[2], Crampin[3]通过横波分裂现象的研究提出了裂隙诱导的各向异性可能是地震各向异性的主要原因。页岩、煤介质中存在大量的层理、节理和裂隙,对弹性波的传播速度和能量衰减有很大影响[4]。在加载压力对页岩、煤的超声波响应的影响特征及超声波响应的各向异性两方面,国内外众多学者已经开展了很多研究工作,简介如下。

1.2.1 页岩超声波实验研究现状概述

在页岩超声波传播特性的各向异性方面,前人主要围绕不同加载条件下页岩层理倾角开展了研究工作。邓继新等[5]在实验室超声波频率下对层理发育的页岩和泥岩的各向异性进行了研究,发现随着压力的增高,页岩各个方向的速度均增加,但纵、横波各向异性呈减小趋势;指出平行于层理定向排列的黏土矿物和微裂隙是使样品显示出强弹性各向异性的内在原因,随着压力的增高微裂隙逐渐闭合,样品的各向异性程度减弱。史调等[6]在实验室对页岩进行了超声波测量实验研究,结果表明,页岩衰减具有明显的压力和方向性;平行层理传播的纵波(PH)衰减系数小于垂直层理传播的纵波(PV)衰减系数,传播和震动方向平行层理的横波(SH)和垂直层理传播的横波(SV1)衰减系数小于传播方向平行层理震动方向垂直层理的横波(SV)衰减系数。程礼军等[7]针对页岩层理发育和各向异性强的特点,对页岩进行了一系列三轴压缩条件下的超声波速度测试,获得了不同层理倾角、轴向载荷条件下的纵横波速度变化特性。陈乔[8]等对具有不同层理方向的页岩柱样进行轴向多频率超声波透射实验,结果表明:随层理倾角的增加,波速减小趋势明显,衰减系数增加。熊健等[9]对页岩钻取不同层理角度的岩心(10个层理角度),超声实验结果显示:声波速度随层理角度的增加或频率减小而减小,与频率呈良好的正对数关系;声波衰减系数随层理角度的增加或频率的增加而增大,与频率呈弱线性关系。袁和义等[10]测定了页岩在不同围压条件下的纵波速度以及快慢横波速度,结果表明,页岩的纵波波速以及快慢横波波速均表现出各向异性,并且随围压升高,波速升高速率变缓。

Josh [11]等研究大范围页岩区块的资料,认为页岩在微观结构、地层速度和力学参数上均表现出各向异性。Kuila [12]等研究了致密页岩的加载应力与波速的关系。Sierra [13]等人在实验室中检测了页岩的弹性波速各向异性,发现页岩的定向排列的黏土矿物成分与各向异性具有较好的相关性。Domnesteanu[14]等分析了不同压力条件以及超压条件下页岩的速度、衰减各向异性。Sondergeld [15]等研究了不同围压和水平层理角度条件下的纵横波速度特性,并分析了围压对波速各向异性的影响。Hu[16]等对不同轴压加载下的页岩进行了超声波测量,结果显示页岩在所有方向上的固有衰减随着轴向应力的增加而增加;横波衰减比纵波的更大且对应力的变化更敏感;页岩超声波衰减的应力敏感性不同的方向上会有很大的差异。Wang[17]等对页岩进行了单轴加载条件下的超声波测试,结果显

示页岩波速随着层里面倾角的增加而减小,层里面控制着页岩固有的波速各向异性。Li[18]等实验研究了各向同性应力场、各向异性应力场对页岩纵波速度各向异性的影响。

1.2.2 煤超声波实验研究现状概述

在煤超声波传播特性的各向异性方面,前人主要从不同加载条件下煤层理、微裂隙角度开展了研究工作。孟召平[19]等通过实验室超声波测试研究发现:煤系岩石的横波速度与纵波速度之间呈现出线性相关性;沉积岩石的声波速度受沉积岩石密度、围压等因素控制,且与它们呈正相关关系。郭德勇[20]等在高压下对原生结构煤不同方向进行了超声波测试。结果表明:煤的波速随着围压的增加而增加;煤层中波速存在各向异性,平行层理的波速高于垂直层理的波速。Zhou[21]等为了研究微裂隙对弹性波速度的影响,对煤岩进行了多方位弹性波速度的测试实验。其中围压模拟煤层的实际埋藏压力。结果表明,微裂隙使得弹性波速度降低;速度随着围压的升高而增大,但当围压增加到某一程度(10 MPa)时,围压的影响迅速变小,速度趋于稳定,因为煤样中大部分微裂隙已经关闭,速度决定于煤的矿物组分。速度对微裂隙的方向是敏感的,沿着微裂隙的方向弹性波传播快,而垂直裂隙方向上传播慢。这项研究为预测煤的微裂隙提供基本的数据。Morcote[22]等通过对不同种类的煤进行实验室超声波速度测量,发现烟煤和烛煤的速度和模量比高煤级的半无烟煤和无烟煤的低。围压小于 5MPa 时煤的弹性特征具有压力敏感性,与存在的微裂隙有关。围压在 5MPa (大部分微裂隙的关闭压力)以上时,煤显示出内在的各向异性。这种高压下的内在各向异性可归因于较好的层理和煤组分的优势方向。Shea[23]等实验研究了单轴和三轴测试条件下煤样品的弹性 P 和 S 波(1MHz)速度和衰减行为。对于轴向加载变化和样品结构破坏前内部微裂隙的初步发展,S 波的衰减和速度比 P 波的更敏感。Lwin[24]等研究了依次饱和 He, N₂, CH₄ 及 CO₂ 的烟煤样的超声响应,结果显示 V_p 随着围压和孔压压差的增大而增大。Yu[25, 26]等对煤样开展了围压条件下的超声 P (1MHz)、S (0.5MHz) 波速度、衰减、各向异性及动弹性模量的实验室测量。V_p、V_s 随着围压的增大而增大,归因于微裂隙的关闭,平行层理方向速度要高于垂直层理方向的;随着围压的升高,P、S 衰减下降,Q 升高;煤样 V_p 显示弱弹性各向异性,速度各向异性对围压不敏感。动弹性特征对煤层内应力和饱和状态具有潜在的指示作用。赵群,郝守玲[27]研究表明:典型的平行、定向排列的裂隙,表现为对介质超声波速度、衰减的方位各向异性;速度的变化与裂缝的分布具有很好的对应关系;沿着裂隙方向,弹性波传播速度最大,垂直方向最小。P 波衰减随裂隙方位的变化明显大于 S 波。闫立宏[28]对煤样的纵波速度进行了系统地测试。结果表明:平行层理方向的纵波速与垂直层理方向的纵波速不同,平行层理两个方向的波速也存在一定差异。王赞[29, 30]等对 6 种不同变

质程度煤样进行了超声测量，发现沿煤层走向、倾向和垂直煤层层理方向的纵横波速度逐渐降低；三个方向间的速度各向异性一般都大于 10%。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。

综上，众多学者已经对页岩、煤的超声波响应特征就压力敏感性、各向异性两方面开展了大量的研究工作。针对于压力因素前人主要开展了围压、孔压、轴压及三轴加载对两类介质超声波速度、衰减等的影响规律的研究；针对于各向异性，前人也已经就定向裂隙、层理对两类介质超声波响应的方位变化特征进行了探究。值得注意的是，页岩、煤超声波响应的压力敏感性、各向异性均受控于层理、裂隙等结构面的发育分布情况，但总体上，针对于变压条件下的两类岩石超声波响应特征各向异性问题的综合性研究相对较少，主要体现在加载压力条件多为围压加载、单一的测试体波类型（P、S 波）及部分弹性参数（速度、动弹性力学性质、衰减）等。为了能够全面掌握地应力条件下两类储层岩石弹性的各向异性特征，加强变压条件下的页岩、煤超声波响应特征各向异性问题的实验研究是非常有必要的。

1.3 本文工作简介

（1）研究目标的确定

鉴于目前页岩气、煤层气是目前我国大力支持发展的两种非常规天然气，且具有重要的勘探开发意义，推进完善针对于地下的含气页岩、煤层物性的地球物理勘探技术的研究也势在必行。相比于常规气储层砂岩，具有发育微裂隙等界面结构的页岩、煤两类储层岩石普遍具有较强的各向异性及非均质性，所以开展针对于三类岩石的超声波实验对比研究，探索弹性的各向异性及其压力敏感性特征是发展页岩气、煤层气储层物性的弹性波（地震、声波测井）勘探技术与方法的理论基础。

另一方面，这项实验研究工作也是合作导师基金项目“地震各向异性理论与多分量地震技术”所需开展的基础岩石物理实验研究的内容。

（2）研究思路与方法

针对于砂岩、页岩、煤三类储层岩样，在常压条件及单向加载条件下分别开展三个正交方向上的超声波测量实验，基于实验结果对三者的弹性特征各向异性及压力敏感性进行分析与讨论，总结三类储层的弹性的规律及控制机理。

（3）具体的研究工作

首先，样品采集制备。调研煤层气、页岩气勘探开发程度较高的区域，确定储层岩石样品的采集点，并实施采样工作；对采集的样品沿层理及主要的裂隙方向进行切割并加工成可用于超声测试的标准方块成品岩样。每类岩性制备若干个成品样。

其次，常压下的超声测试实验。对不同岩性的各个样品每个方向上分别进行

超声波透射测量实验，获得透射纵、横波波形数据，进一步基于波形处理方法对波形数据进行计算获得弹性参数的具体数值结果，主要包括有纵、横波速度、动弹性力学参数、衰减等。

再者，加载条件下的超声测试实验。对每类岩性开展变压超声测量实验之前先做一项单轴加载试验，获得对应岩性岩石的应力-应变特征及抗压强度。进而对不同岩性的各个样品每个方向上分别进行单轴加载过程中的实时超声波透射测量实验。整个压力加载过程应确保在岩石屈服破坏之前，最高加载压力的确定应参考抗压强度及加载过程中的位移曲线变化特征。获得每个测压点处的透射纵、横波波形数据，进一步基于波形处理方法对波形数据进行计算获得整个压力加载过程中的弹性参数的具体数值结果。

最后，弹性特征分析。基于实验所测弹性参数的结果，分别对常压、变压下的各类岩性岩石的波速、动弹性力学参数及衰减特征进行对比分析，在总结了各类岩性岩石的弹性特征的基础上，进一步总结其各向异性特征及其随加载压力的变化规律。

2 岩样信息与超声波测量实验

本章内容主要对本次超声波测量实验所用的岩样信息和实验设备、方法、条件、步骤等进行了详细介绍。

2.1 岩石样品信息

鉴于本次实验的目的是对比分析常规天然气储层（砂岩储层）与页岩气、煤层气这两类非常规天然气储层的弹性特征，此次分别采集了砂岩、页岩、高变质程度的无烟煤及中变质程度的烟煤四类岩性的岩石样品。

(1) 砂岩

课题组在黔西的赫章地区采集了若干种二叠系砂岩的露头样品。原岩是厚层的砂岩，所采块样未见层理。因为采集的块样尺寸大小不均以及样品的裂隙分布情况差异，所以根据每块样品的尺寸形状及主裂隙发育方向，确定所能切割标准方块样品的尺寸及三个正交方向。其中切割方向尽可能的沿着主裂隙面的走向与垂向以确保要测试的三个主轴方向上的结构差异最大，与主裂隙面平行的两个正交方向记为 X、Y 方向，与主裂隙面垂直的方向记为 Z 方向。并将六个端面打磨光滑以便于后续测量中与超声波换能器耦合良好。共加工了 6 个砂岩方块成品样，如图 2.1 所示，具体样品信息见表 2.1。其中 10P、11P 在加载过程中发生破裂，未获得其相关超声波的测试实验结果。



图 2.1 加工的方块砂岩样品

表 2.1 具体的砂岩样品信息

编号	边长/mm			质量 (m) /g	密度 (ρ) /g/cm ³	描述
	X	Y	Z			
B4	49.67	49.42	49.61	309.1	2.54	
10P	60.57	60.69	60.97	530.6	2.37	碎裂岩化砂岩，方解岩成网脉状充填裂隙，加载过程中破坏
1P	60.30	60.64	60.42	541.4	2.45	碎裂化砂岩
B2	49.81	50.88	50.60	326	2.54	
KS-5	45.75	46.95	45.86	234.5	2.38	含侵染状 Py/Chal 的灰绿色砂岩
11P	60.98	59.78	61.10	558	2.51	碎裂岩化砂岩，加载过程中破坏

(2) 页岩

课题组曾对黔东南地区的页岩进行了集中采集,主要来自前寒武纪新元古界乌叶组和震旦系陡山沱组,多为黑色页岩(或泥岩)。此次测试的页岩样品也选自其中,将大块状页岩沿着平行和垂直层理方向切割加工成边长约为 5cm 的立方块,平行层理的两个方向分别标记为 X、Y 方向,垂直层理的方向标记为 Z 方向,共加工了 7 块成品样,如图 2.2 所示,具体样品信息见表 2.2。其中 JJ-1-1 样在加载过程中发生破裂,未获得其相关超声波的测试实验结果。



图 2.2 加工的方块页岩样品

表 2.2 具体的页岩样品信息

编号(简记)	边长/mm			质量(<i>m</i>) /g	密度(ρ) /g/cm ³	地层 系组	描述
	X	Y	Z				
JJ-1-1	52.46	51.39	50.81	347.5	2.54	乌叶 组	黑色页岩(或泥岩), 加载过程中破坏
JJ-2-1-1(J1)	50.82	50.47	51.35	318.5	2.42	乌叶 组	黑色薄层
JJ-2-1-2(J2)	51.91	51.17	53.57	344.9	2.42	乌叶 组	黑色薄层
WH-1-1-1(W1)	49.73	51.69	51.20	305.4	2.32	陡山 沱组	黑色薄层含粉砂质 泥岩,水平层理清楚
WH-1-1-2(W2)	49.71	50.58	48.00	287.3	2.38	陡山 沱组	黑色薄层含粉砂质 泥岩,水平层理清楚
XZ-1-1(X1)	48.09	52.48	49.53	330.5	2.64	乌叶 组	灰黑、黄灰色砂质页 岩(或泥岩)
GH-2-1(G1)	53.35	53.04	51.43	341.9	2.35	陡山 沱组	黑色薄层泥岩,层次 清楚

(3) 无烟煤

煤样采自我国煤层气开发程度较高的沁水盆地南部的晋城矿区(寺河矿,SH)二叠系山西组 3#煤层及临近的焦作矿区(古汉山矿,JZ)二叠系山西组二 1 煤

层，均为高变质程度的无烟煤。煤样层理清晰可见，同样将大块状煤沿着平行和垂直层理方向切割加工成边长为 6cm 的立方块，平行层理的两个方向分别标记为 X、Y 方向，垂直层理的方向标记为 Z 方向，共加工了 8 块成品样，如图 2.3 所示，具体样品信息见表 2.3。其中，CJ3、CS5 样在加载过程中发生破坏，未获得其相关超声波的测试实验结果。



图 2.3 加工的方块煤样品

表 2.3 具体的煤样品信息

编号	边长/mm			质量 (m) /g	密度 (ρ) /g/cm ³	描述
	X	Y	Z			
CJ1	59.71	59.53	60.82	321	1.48	
CJ2	60.84	60.15	60.29	343	1.55	
CS1	59.72	59.62	59.80	319	1.50	
CS2	59.21	60.11	59.82	300	1.41	
CS3	61.04	59.80	57.07	320	1.54	Y 方向多组裂隙
CS4	59.50	59.60	60.16	320	1.50	
CS5	58.52	60.14	59.54	320	1.53	
CJ3	—	—	58.75	—	1.54	

(4) 烟煤

烟煤样采自山西西山煤田的二叠系山西组（屯兰矿、杜儿坪矿），为中变质肥、瘦煤。同样将大块状煤沿着平行和垂直层理方向切割加工成边长为约 5cm 的立方块，平行层理的两个方向分别标记为 X、Y 方向，垂直层理的方向标记为 Z 方向，共加工了 9 块成品样，如图 2.4 所示，具体样品信息见表 2.4。其中，D2-1、D2-2 及 D3-2 样在测试过程中发生破坏，未获得其相关超声波的测试实验结果。



图 2.4 加工的方块烟煤样品

表 2.4 具体的烟煤样品信息

编号	边长/mm			质量 (m) /g	密度 (ρ) /g/cm ³	描述
	X	Y	Z			
D ₂ -1	52.41	51.65	51.78	179.54	1.28	测试过程中破坏
D ₂ -2	50.73	49.88	51.85	168.62	1.29	
D ₃ -2	49.9	51.9	49.8	168.68	1.31	
t ₁ -2	50.35	48.39	48.18	153.65	1.31	
t ₁ -1	46.48	46.72	48.24	143	1.37	
t ₂ -1	48.9	43.61	48.2	141.46	1.38	
t ₃	44.45	42.81	41.45	115.43	1.46	
D ₂ -3	47.07	49.2	49.21	163.61	1.44	
D ₃ -1	51.37	52.29	50.41	173.43	1.28	

2.2 超声波测量实验方法与步骤

此次岩石的超声波测量实验主要分为两大类，即常压条件下的超声测量实验和单轴加载（屈服前）条件下的超声测量实验。

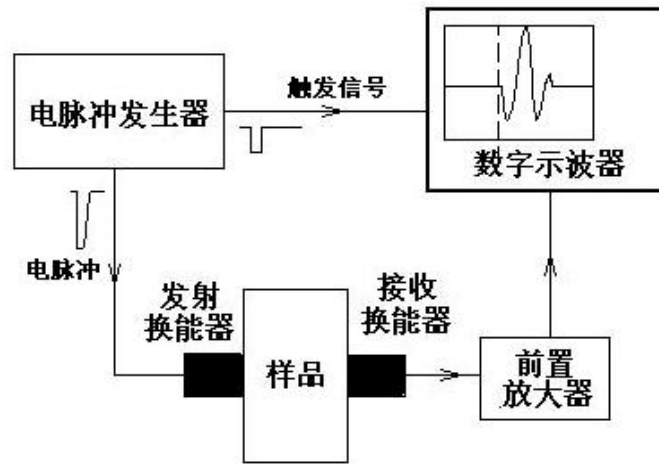
实验样品前处理：

因为每类样品均取自同一个采样点的同一位置，默认其物性一致。湿度等实验条件控制方法如下：从野外露头采集的砂/页岩样品以及从地下煤层采集的煤样品在采集、加工过程中原位湿度等条件必然发生变化。鉴于此，为了保证各类样品测试时水分条件一致，本次实验前统一将加工好的岩样暴露在自然空气条件下一段时间（本次实验选择 7 天），之后将样品放在烘干箱内烘干 48 小时，再在室内环境下自然放置 7 天，确保其湿度条件与室内条件一致。

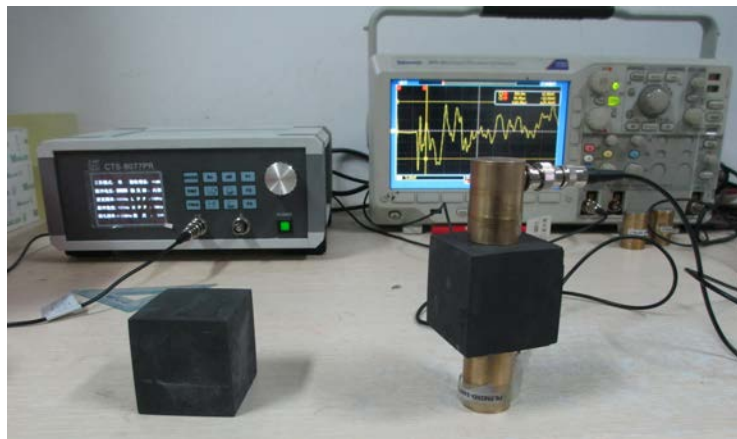
(1) 常压条件下超声测量实验设备与性能介绍

常温（25℃）、常压（1 个大气压）条件下岩石的超声脉冲测量实验在中国

石油大学（北京）完成。测量方法采用行波传播—脉冲透射法[31]，此方法主要依据国际岩石力学学会在 1978 年推荐的、用脉冲传输法原理测量波速度的仪器工作原理。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 2.5 所示。其中，P 波、S 波超声探头（换能器）各一对，主频均为 1MHz。另外，为保证样品与换能器耦合良好，测试时采用蜂蜜为耦合剂。整个测量系统误差小于 1%；但考虑到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。



(a) 系统示意框图



(b) 实物图

图 2.5 脉冲法超声波测试仪器系统

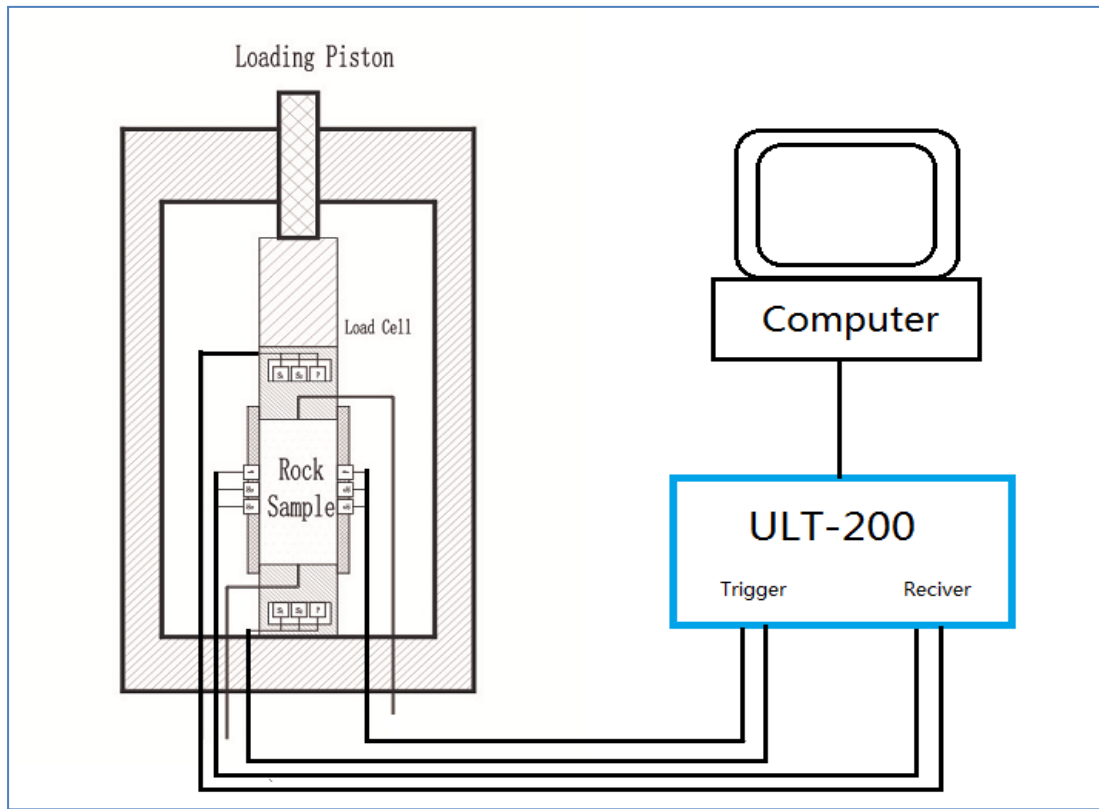
(2) 单轴加载-超声实验设备与性能介绍

此次单轴加载条件下的岩石弹性波的实验室测量实验仪器选用美国 GCTS (Geotechnical Consulting & Testing Systems) 的 RTR-2000 高温高压动静岩石三轴测试系统（中科院声学所），如图 2.6(a)所示。该系统能够对地层温压条件下的岩石进行三轴动静力学、渗流等物性的模拟实验研究。三轴压力室内能够模拟的最高温度、围压及轴压承受力分别可达 200 °C、140MPa 及 2000kN。其中的 ULT-200 超声波测试系统模块也是一套完备的岩石超声脉冲测量实验系统，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 2.6(b)所示。值得注意的是，该超声测试系统与力学试验主机系统的关键耦合问题在于超声探头与压头的耦合。系统内的一套超声 P 波、S 波的压电晶体（换能器）均集成在耐高温高压的一组压头内，如图 2.6(c)所示，较好的实现了超声波探头与压头的统一结合，可以实现压力加载过程中的超声纵、横波的同步测试，同时获得岩样某一状态下的 P、S 波波形。此次实验所用超声纵、横波探头的主频均为 1MHz，采样率为 20MHz。测试时同样采用蜂蜜为耦合剂。整个测量系统误差小于 1%；但考虑到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。



(a) GCTS 三轴测试系统实物图



(b) ULT-200 超声波测试系统示意图



(c) 集成纵、横波双探头的耐高温压的压头

图 2.6 RTR-2000 高温高压动静岩石三轴测试系统

(3) 实验方法与步骤

超声波测量方法均采用行波传播—脉冲透射法[31]。常压条件下的岩样超声波测量的目的与操作步骤相对简单，不再赘述。每个样品在 X/Y/Z 单个方向上均分别进行一组超声纵、横波的测试。

单轴加载-超声实验测试目的、条件要求较高，操作相对复杂，具体实验步骤叙述如下：

- 1) 首先，每类岩样各选一/两个样品，对其只做单轴压缩实验，逐渐缓慢增加轴向压力直至样品破坏，获得每类岩样的单轴加载条件下的应力-应变曲线特征及抗压强度水平；直接将探头对接，测量探头的发射子波波形及波在探头内的走时，以便后续样品透射波 Q 值计算及初至时间的系统校正。
- 2) 针对每一块岩样，选取其 X 方向为第一个测试方向，从第一个加载压力点 0.5MPa 开始以 0.5MPa 的递增压力对样品实施单向轴向压力加载，每一个压力点处稳压 2min 后再对其进行超声波测试，获得该压力状态下的超声纵、横透射波的波形等数据；接着增压至下一个压力点并重复超声波的测试过程；
- 3) 参考前面获得的岩样的抗压强度水平并实时观测压头位移曲线的变化特征，将位移曲线变化速率开始减缓的转折点（即破坏前的屈服点）确定为岩样在该方向上的最高轴向加载压力点（记为 P_{max} ）； P_{max} 处的超声测试完成之后该方向上的加载-超声实验即完成；
- 4) 重复上述步骤，相继实施对 Y、Z 方向的加载-超声实验测试；至此一块样品的实验测试完成；
- 5) 重复上述步骤，完成每一块岩样在三个正交方向上的单轴加载-超声波测量实验。

其中，加载-超声实验中烟煤的测试效果不佳，其波形信号普遍较差，纵横波初至、首波波形很难判识，所以本报告中烟煤的加载-超声实验结果先不做讨论。

所测岩样具体 P_{max} 的测试信息见表 2.5。

表 2.5 岩样具体的 P_{max} 测试信息

样品编号	砂岩			样品编号	页岩			样品编号	无烟煤		
	P_{max}/MPa				P_{max}/MPa				P_{max}/MPa		
	X	Y	Z	号	X	Y	Z	号	X	Y	Z
B2	50	38	50	J1	35	35	35	CJ1	10	10	10
B4	45	45	45	J2	20	50	50	CJ2	12	12	12
1P	20	20	20	W1	20	20	20	CS1	15	15	15
KS-5	20	20	20	W2	30	30	30	CS2	15	15	15
				X1	30	30	30	CS3	8	8	8
				G1	30	14	30	CS4	15	15	15

2.3 弹性波参数计算方法与原理

弹性波参数主要包括纵、横波的速度(V_p 、 V_s)、衰减（以品质因子 Q 表征）及五种动态弹性力学参数，即拉梅常数 (λ)、剪切模量 (μ)、泊松比 (ν)、体积模量 (K) 和杨氏模量 (E)。

(1) 波速计算方法

波速即为样品长度与超声波穿过样品的旅行时间（初至时间）之比。

纵、横波速度计算可按公式(2.1)来进行。

$$V_p=L/t_p-t_0 \quad V_s=L/t_s-t_0 \quad (2.1)$$

式中： V_p 一纵波速度(m/s)； V_s 一横波速度(m/s)；

L 一发射接收换能器中心间的距离(m)；

t_p 一纵波在样品中走的时间(s)；

t_s 一横波在样品中走的时间(s)；

t_0 一仪器系统的零延时(s)。

三类岩石纵波初至时间可以在所测波形图上直接读取，砂/页岩的横波初至也较易判别，而对于煤岩，其横波初至一般较难准确读取。因为煤内（微）裂隙发育，不仅会使透射横波发生横波分裂，也会使地震波发生波型转换和多次反射。因此，接收端接收到的信号不是单一的透射横波，而是分裂为快、慢子波的透射横波、转换纵波以及多次反射或转换波的混叠波形；如果考虑到横波转换器也会激发纵向振动，实际的波形还有透射纵波参杂。而且，由于纵波波速高于横波，因此初至波形是纵波，续至波形才是透射横波，多次波最后到达。因此，不能直接拾取煤岩整个波形的第 1 个起跳点作为横波初至。根据纵波与透射横波的偏振特性差异，张建利[32]等提出了一种偏振滤波法，该方法提高了淹没在纵波和转换波信号中横波信号的拾取精度，计算出的横波速度较为准确，在横波初至的拾取及较纯净首波波形的提取方面获得了较好的应用效果。本次实验采用“偏振滤波法”对煤进行横波初至的拾取，并进一步通过宽带滤波滤除高频纵波和低频多次波干扰，得到消除干扰的、较纯净的透射横波波形，从而提高了横波波速及品质因子 Q 值的计算精度。

(2) 品质因子 Q 值具体计算方法

岩石一般是非弹性体，这使得波在岩石中传播时，会有一部分机械能转换成热能，反映了岩石本身对波的吸收特性[33]。衰减主要由岩石的微观性质—诸如岩石内部裂纹的密度、分布、构造以及所含流体的相互作用决定的。研究地震波的衰减可以了解岩石的微构造及变化，以及岩石所处的地应力环境。所以测量地震波的衰减对于了解岩石的物理状态非常重要[34]。煤层是一种松软的沉积岩体，而且岩体内具有无数的缝隙和界面，因此煤对声波能量的吸收是很强的[35]。

波在岩石中的这种衰减性质通常用岩石的品质因子 Q 来表征。常常用下面的式子定义：当波传播一个波长 λ 的距离后，原来储存的能量 E 与消耗能量 ΔE 之比的 2π 倍[31]，即： $Q = 2\pi E / \Delta E$ 。

目前已经提出多种计算 Q 值的方法，频率域方法有谱比法、匹配技术和谱模拟；时间域方法有振幅衰减法、子波模拟法、上升时间法和解析信号法。本次实验采用振幅衰减法[34]来计算 Q 值。下面给出本实验所用振幅衰减法的公式推

导过程。由

$$A(x) = A_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.2)$$

式中： A_0 —未通过介质的子波振幅； $A(x)$ —通过介质的透射波振幅； α —衰减系数； x —介质长度。又

$$\alpha = \pi f / (QV) \quad (2.3)$$

式中： α —衰减系数； Q —品质因子； f —主频； V —波速。得

$$A(x) = A_0 \exp(-\pi fx / (QV)) \quad (2.4)$$

因为透射波初至时间 $t=x/V$ ，所以

$$A(x) = A_0 \exp(-\pi ft / Q) \quad (2.5)$$

两边取对数后求得：

$$Q = -\frac{\pi ft}{\ln \frac{A(x)}{A_0}} \quad (2.6)$$

以本次实验 P 波数据为例说明 Q 值具体计算过程。

(一) 首先将实验中示波器记录的 P 波子波波形 (如图 2.7) 和样品透射 P 波波形 (如图 2.8) 经数据采集软件采样后将数据导入 Excel 表格中，一列记录采样时间，一列记录振幅值。

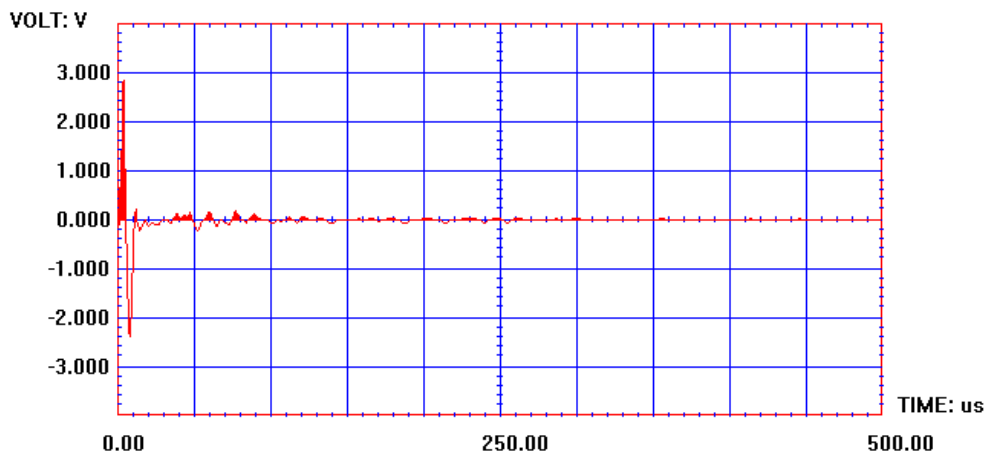


图 2.7 P 波子波波形

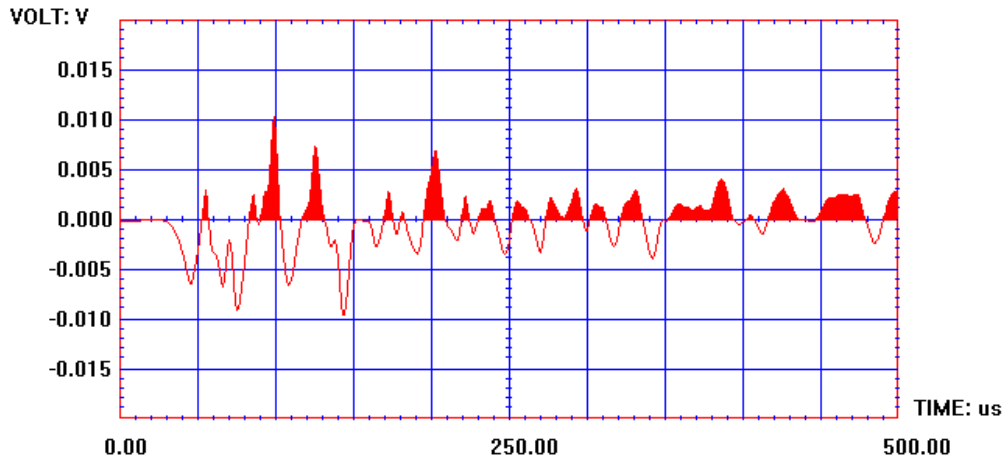


图 2.8 透射 P 波波形

(二) 根据振幅衰减法计算 Q 值的算法编写 matlab 程序，形成 matlab 程序文件。计算 Q 值算法叙述如下：①首先通过拾取初至，截取一个完整的透射波波形。②对透射波波形进行宽带滤波，滤除其他波形干扰。③将有效透射信号转换到频域，拾取最大振幅对应的频率点作为主频；分别计算发射子波和有效透射信号的均方根振幅，将主频、初至等参数代入公式 (2.6)，就可以计算出 Q 值。

(3) 常用动弹性力学参数计算

描述岩石常用的五种力学弹性参数[31]定义如下：

λ —拉梅常数，如果一个立方体介质受向上拉伸应力的作用，产生一个向上的应变 ε ，而 G 是阻止介质横向压缩所需的一个横向拉应力，则 $G=\lambda\varepsilon$ 。其物理意义为阻止横向变形所需拉应力的一个度量。

μ —剪切模量， μ 是在剪切应力作用下介质发生切应变的比例常数， $F=\mu\phi$ ，它的物理意义是阻止切应变，液体没有切应变， $\mu=0$ 。

ν —泊松比，在拉应力(或压应力)作用下，伴有膨胀(或压缩)的同时，在垂直应力方向产生压缩(或膨胀)，定义横向压缩(或膨胀)与纵向伸长(或压缩)之比，称为泊松比。

K —体积模量，物体在静水压力中，应力与应变的比例常数。是物体的整个体积受力，当静水力为 P 时，物体发生相对体积变化 θ ，则 $P=-K\theta$ ，负号表示压力增大，体积变小，所以体积模量表示了物体的抗压缩性质。

E —杨氏模量，在一维情况下，应力和应变之比的比例常数，表示物体对受力作用的阻力(或形变)的度量。

岩石动态弹性力学参数可由所测的纵横波速度及密度导出[31]，弹性参数之间具体的换算关系[31]见表 2.6。

表 2.6 弹性参数间的关系

	K	E	λ	ν	ρV_p^2	$\rho V_s^2 = \mu$
λ, μ	$\lambda + 2\mu/3$	$\mu(3\lambda + 2\mu/\lambda + \mu)$	—	$\lambda/2(\lambda + \mu)$	$\lambda + 2\mu$	—
K, λ	—	$9K(K - \lambda/3)$ $K - \lambda)$	—	$\lambda/3 K - \lambda$	—	$3(K - \lambda)/2$
K, μ	—	$9K\mu/3 K + \mu$	$K - 2\mu/3$	$3K - 2\mu/2(3K + \mu)$	$K + 4\mu/3$	—
E, μ	$E\mu/3(3\mu - E)$	—	$\mu(E - 2\mu)/(3\mu - E)$	$E/2\mu - 1$	$\mu(4\mu - E/3\mu - E)$	—
K, E	—	—	$3K(3K - E)/(9K - E)$	$(3K - E)/6K$	$3K(3K + E)/(9K - E)$	$3KE/(9K - E)$
λ, ν	$\lambda(1 + \nu/3\nu)$	$\lambda[(1 + \nu)(1 - 2\nu)]/\nu$	—	—	$\lambda(1 - \nu)/\nu$	$\lambda(1 - 2\nu)/2\nu$
μ, ν	$\mu(2 + 2\nu/3 - 6\nu)$	$2\mu(1 + \nu)$	$2\mu\nu/(1 - 2\nu)$	—	$\mu(2 - 2\nu)/(1 - 2\nu)$	—
K, ν	—	$3K(1 - 2\nu)$	$3K(\nu/1 + \nu)$	—	$3K(1 - \nu)/(1 + \nu)$	$3K(1 - 2\nu)/(2 + 2\nu)$
E, ν	$E/3(1 - 2\nu)$	—	$E\nu/(1 + \nu)(1 - 2\nu)$	—	$E(1 - \nu)/(1 + \nu)(1 - 2\nu)$	$E/(2 + 2\nu)$
V_p^2, V_s^2	$\rho(V_p^2 - 4V_s^2/3)$	—	$\rho(V_p^2 - 2V_s^2)$	—	—	—

表中： K —体积模量； E —杨氏模量； μ —剪切模量； λ —拉梅常数； ν —泊松比； ρ —密度

3 常压条件下岩石的超声波响应特征

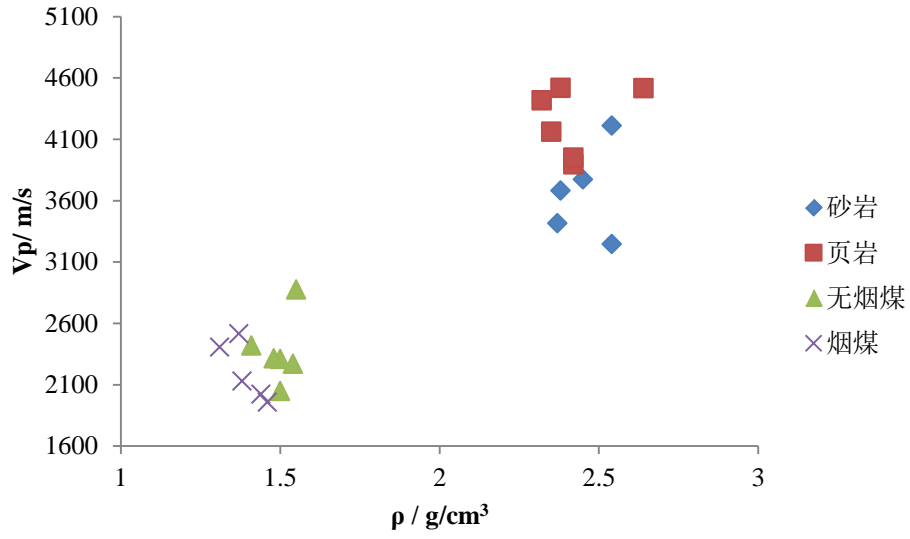
本章基于常压条件下测试的四类岩样的超声透射纵、横波形的结果, 对各岩样三个正交方向上的纵、横波速度 (V_p 、 V_s)、五种动态弹性力学参数 (拉梅常数 (λ)、剪切模量 (μ)、泊松比 (ν)、体积模量 (K) 和杨氏模量 (E)) 及品质因子 (Q_p 、 Q_s) 进行了计算, 并对四类岩样在常压条件下的弹性特征进行了讨论与对比分析。

3.1 纵横波速度特征

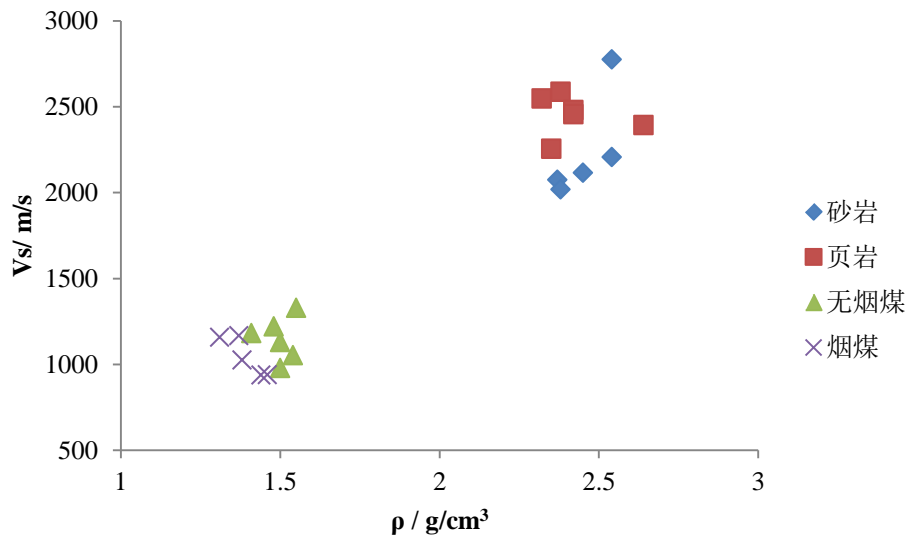
常压条件下四类岩样的纵横波速度 (V_p 、 V_s) 测试结果如表 3.1 所示, 且为便于不同岩性之间的波速特征的直观观测与对比, 进一步将各岩样三个方向上的 V_p 、 V_s 均值及视密度 ρ 之间的关系成图, 见图 3.1 所示。

表 3.1 V_p 、 V_s 值

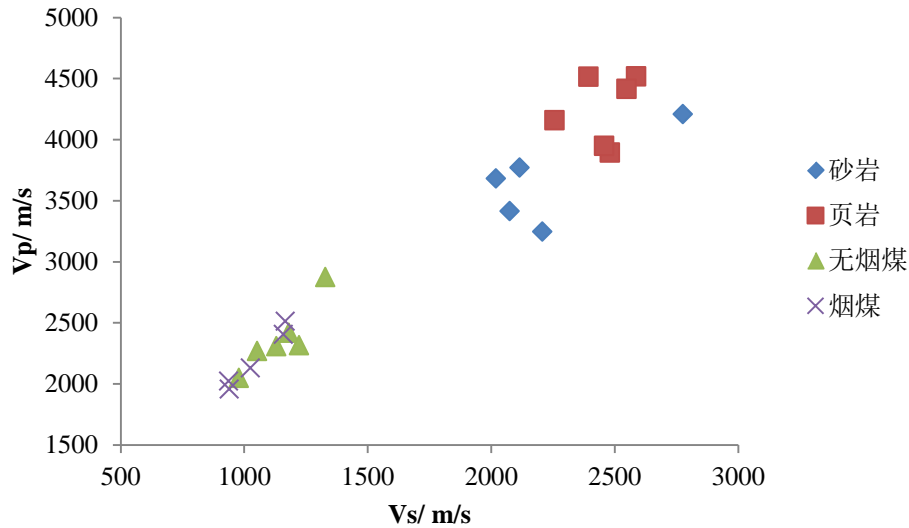
岩性	样品 编号	V_p / m/s				V_s / m/s				ρ / g/cm ³
		X	Y	Z	均值	X	Y	Z	均值	
砂岩	B4	4357	4335	3937	4210	2822	2808	2696	2775	2.54
	10P	3933	3350	2960	3415	2179	2178	1867	2075	2.37
	1P	3838	3816	3662	3772	2181	2113	2051	2115	2.45
	B2	3461	3223	3056	3247	2261	2239	2120	2207	2.54
	KS-5	4013	3528	3504	3682	2080	2006	1968	2018	2.38
页岩	X1	5592	4859	3096	4516	2837	2796	1548	2393	2.64
	W2	4911	4571	4075	4519	2637	2634	2486	2586	2.38
	G1	4322	4201	3958	4160	2392	2257	2116	2255	2.35
	W1	4786	4401	4063	4417	2617	2611	2415	2548	2.32
	J2	4391	4029	3265	3895	2747	2437	2257	2480	2.42
	J1	4497	4075	3277	3950	2606	2568	2194	2456	2.42
无烟 煤	CS1	2710	2556	1659	2308	1313	1196	878	1129	1.5
	CS2	2574	2484	2199	2419	1260	1179	1104	1181	1.41
	CS3	2654	2283	1869	2268	1246	984	927	1052	1.54
	CS4	2587	2332	1226	2048	1183	1135	614	977	1.5
	CJ1	2566	2467	1913	2315	1298	1280	1086	1221	1.48
	CJ2	3104	3069	2451	2875	1531	1242	1213	1328	1.55
烟煤	D2-3	2092	2009	1968	2023	959	928	923	937	1.44
	t1-1	2636	2459	2446	2514	1206	1153	1140	1166	1.37
	t1-2	2468	2373	2372	2405	1176	1149	1147	1158	1.31
	t2-1	2329	2096	1964	2130	1071	1038	966	1025	1.38
	t3	1993	1976	1903	1957	1066	1022	731	939	1.46



(a) V_p - ρ



(b) V_s - ρ



(c) V_p - V_s

图 3.1 四类岩样的均值纵横波速度特征

(1) 波速大小特征

砂岩 V_p 介于 2900-4400 m/s, V_s 介于 1800-2900 m/s; 页岩 V_p 介于 3000-5600 m/s, V_s 介于 1500-2900 m/s; 无烟煤 V_p 介于 1200-3200 m/s, V_s 介于 600-1600 m/s; 烟煤 V_p 介于 1900-2700 m/s, V_s 介于 700-1300 m/s。

两类低密度的煤岩 V_p 、 V_s 明显低于对应砂/页岩的, 显示出了典型的低波速和低波阻抗特征。总体上, 页岩 V_p 、 V_s 比对应砂岩的稍偏高; 无烟煤密度及 V_p 、 V_s 均比对应烟煤的稍偏高。可见具有显著密度差异的岩性之间, 波速差异是很大的。

密度相差较小的不同岩性的岩石之间, 比如砂岩和页岩、无烟煤和烟煤, 以及具有相同岩性的不同岩样个体之间, 波速与密度之间就不一定具有良好的正相关关系了。例如, 砂岩、页岩、无烟煤的某些方向上的 V_p 、 V_s 与 ρ 之间的正相关关系非常弱, 甚至出现负相关; 而烟煤 V_p 、 V_s 与 ρ 之间均呈现出了良好的负相关关系。这是因为在密度相近的岩样之间, 内部的裂隙等界面结构就成为了影响波速大小的主要因素, 不同岩样之间以及不同方向之间的微结构差异控制着波速的差异性特征。

值得注意的是, 每类岩性岩样的 V_p 与 V_s 之间均呈良好的正相关关系 (如图 3.1(c)), 且两类煤岩的 V_p 与 V_s 之间具有高度的正线性相关性。

(2) 波速各向异性特征

显然, 各岩样三个正交方向上的纵波速度 (V_p) 之间或横波速度 (V_s) 之间均存在一定的差异性, 且部分岩样 (尤其是页岩 X1) 差异显著。垂直层理面的方向 (Z 向) V_p 和 V_s 均最小。各岩样三个方向上的平均速度一般与其中间速度相近。

整体上三个方向上 V_s 的差异性较 V_p 的小, 即所测岩样 V_s 的各向异性程度

大都较 V_p 的弱。其中，页岩 V_p 、 V_s 的各向异性程度最高，无烟煤次之，烟煤、砂岩的最低，归因于页岩、无烟煤内发育的层理、裂隙等界面结构。

3.2 动弹性力学参数特征

常压条件下四类岩样的五种动态弹性力学参数(拉梅常数(λ)、剪切模量(μ)、泊松比(ν)、体积模量(K)和杨氏模量(E))计算结果分别如表 3.2 至表 3.5 所示,表 3.6 总结了所测各类岩性的动弹性力学参数的变化范围。为便于不同岩性之间的动弹性力学参数的直观观测与对比,进一步将各岩样三个方向上的动弹性力学参数均值与视密度 ρ 之间的关系成图,见图 3.2 所示。

(1) 动弹性力学参数大小特征

总体上,两类低密度煤岩的拉梅常数(λ)、剪切模量(μ)、体积模量(K)和杨氏模量(E)均明显低于对应砂/页岩的,而泊松比(ν)则相反,符合煤岩低强度、高泊松比的典型特征。且煤岩的各动弹性力学参数值均相对集中,变化范围小。可见具有显著密度差异的岩性之间,动弹性力学参数值差异还是很大的。

页岩 λ 、 μ 、 K 及 E 均比对应砂岩的偏高,尤其是 λ 和 K ,而两者 ν 相近;无烟煤 λ 、 μ 、 K 及 E 均比对应烟煤的稍偏高,而两者 ν 相近。

密度相差较小的不同岩性的岩石之间,比如砂岩和页岩、无烟煤和烟煤,以及具有相同岩性的不同岩样个体之间, λ 、 μ 、 K 及 E 与密度之间就不一定具有良好的正相关关系了。例如,砂岩、页岩、无烟煤的某些方向上的 λ 、 μ 、 K 及 E 与 ρ 之间的正相关关系明显减弱,不乏负相关的情形;而烟煤 λ 、 μ 、 K 及 E 与 ρ 之间均呈现出了良好的负相关关系。而对应泊松比(ν)与密度之间也不一定具有良好的负相关关系了。同样因为密度相近的岩样之间的裂隙等界面结构差异性已经转变为影响它们弹性力学性质的主控因素。

值得注意的是,每类岩性岩样的 μ 、 K 及 E 之间均呈良好的正相关关系,尤其是两类煤岩的,且每类岩性的 μ 、 E 之间具有高度的正线性相关性。

(2) 动弹性力学参数各向异性特征

显然,各岩样三个正交方向上的每个动弹性力学参数(λ 、 μ 、 ν 、 K 及 E)之间均存在一定的差异性,且部分岩样(尤其是页岩 X1)差异显著。垂直层理面的方向(Z向)动弹性力学参数均最小。各岩样三个方向上的动弹性力学参数平均值一般与其中间值相近。

整体上,页岩动弹性力学参数的各向异性程度最高,无烟煤次之,烟煤、砂岩的相对较低,同样归因于页岩、无烟煤内发育的层理、裂隙等界面结构。

表 3.2 砂岩动弹性力学参数结果

样品编号	方向	λ / Gpa	μ / Gpa	ν	K / Gpa	E / Gpa
B4	X	7.76	20.23	0.14	21.25	46.07
	Y	7.68	20.03	0.14	21.03	45.60
	Z	2.45	18.46	0.06	14.75	39.08
10P	X	14.15	11.25	0.28	21.66	28.77
	Y	4.24	8.26	0.17	9.75	19.33
	Z	4.11	11.24	0.13	11.61	25.50
1P	X	15.06	10.31	0.30	21.93	26.73
	Y	12.78	11.65	0.26	20.55	29.40
	Z	10.98	10.94	0.25	18.27	27.36
B2	X	0.89	11.42	0.04	8.50	23.66
	Y	4.46	12.98	0.13	13.11	29.29
	Z	0.92	12.73	0.03	9.41	26.32
KS-5	X	17.73	10.30	0.32	24.60	27.11
	Y	10.07	9.58	0.26	16.45	24.06
	Z	11.19	9.22	0.27	17.33	23.49

表 3.3 页岩动弹性力学参数结果

样品编号	方向	λ / Gpa	μ / Gpa	ν	K / Gpa	E / Gpa
X1	X	41.28	20.64	0.33	55.04	55.04
	Y	19.83	21.25	0.24	34.00	52.75
	Z	12.65	6.33	0.33	16.87	16.87
W2	X	10.10	14.71	0.20	19.91	35.41
	Y	24.38	16.51	0.30	35.38	42.87
	Z	16.63	16.55	0.25	27.66	41.39
G1	X	14.58	13.45	0.26	23.55	33.89
	Y	12.87	11.97	0.26	20.85	30.14
	Z	22.85	10.52	0.34	29.87	28.25
W1	X	13.16	15.89	0.23	23.75	38.98
	Y	21.51	15.82	0.29	32.05	40.75
	Z	11.24	13.53	0.23	20.26	33.20
J2	X	1.14	12.33	0.04	9.36	25.70
	Y	10.54	14.37	0.21	20.12	34.82
	Z	10.14	18.26	0.18	22.31	43.04
J1	X	16.07	16.43	0.25	27.03	40.99
	Y	2.69	11.65	0.09	10.46	25.48
	Z	8.27	15.96	0.17	18.91	37.36

表 3.4 无烟煤动弹性力学参数结果

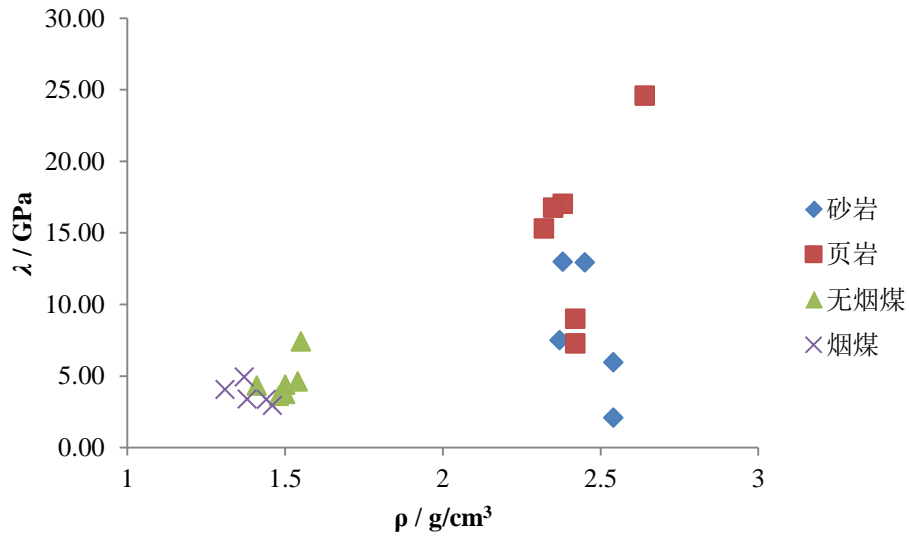
样品编号	方向	λ / Gpa	μ / Gpa	ν	K / Gpa	E / Gpa
CS1	X	1.82	1.16	0.31	2.59	3.02
	Y	5.84	2.59	0.35	7.57	6.96
	Z	5.51	2.15	0.36	6.94	5.84
CS2	X	4.86	2.24	0.34	6.36	6.01
	Y	4.78	1.96	0.35	6.09	5.31
	Z	3.38	1.72	0.33	4.53	4.58
CS3	X	6.07	2.39	0.36	7.66	6.50
	Y	2.73	1.32	0.34	3.61	3.54
	Z	5.04	1.49	0.39	6.04	4.13
CS4	X	5.84	2.10	0.37	7.24	5.74
	Y	1.12	0.57	0.33	1.50	1.51
	Z	4.29	1.93	0.34	5.58	5.20
CJ1	X	4.02	2.49	0.31	5.68	6.53
	Y	4.90	2.42	0.33	6.51	6.47
	Z	1.93	1.75	0.26	3.09	4.41
CJ2	X	10.15	2.39	0.40	11.75	6.72
	Y	7.33	3.63	0.33	9.75	9.70
	Z	4.75	2.28	0.34	6.27	6.10

表 3.5 烟煤动弹性力学参数结果

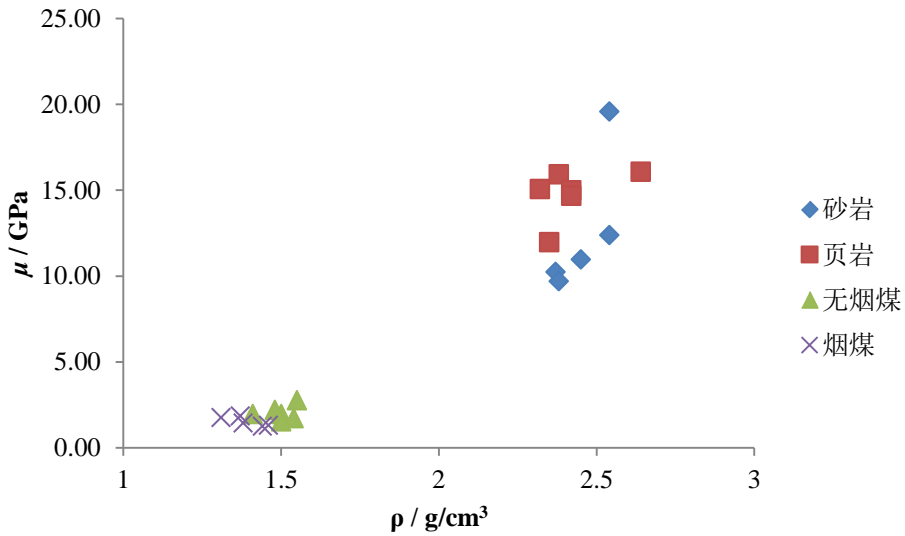
样品编号	方向	λ / Gpa	μ / Gpa	ν	K / Gpa	E / Gpa
D2-3	X	3.85	1.23	0.38	4.67	3.38
	Y	3.10	1.24	0.36	3.92	3.37
	Z	3.16	1.33	0.35	4.04	3.58
t1-1	X	4.55	1.82	0.36	5.77	4.95
	Y	4.73	1.78	0.36	5.91	4.85
	Z	5.53	1.99	0.37	6.86	5.45
t1-2	X	4.35	1.81	0.35	5.56	4.91
	Y	3.91	1.73	0.35	5.06	4.66
	Z	3.93	1.72	0.35	5.08	4.65
t2-1	X	4.91	1.29	0.40	5.76	3.60
	Y	2.35	1.49	0.31	3.34	3.89
	Z	2.89	1.58	0.32	3.95	4.19
t3	X	2.65	1.52	0.32	3.67	4.02
	Y	3.73	0.78	0.41	4.25	2.20
	Z	2.48	1.66	0.30	3.59	4.31

表 3.6 所测各类岩性的动弹性力学参数的变化范围

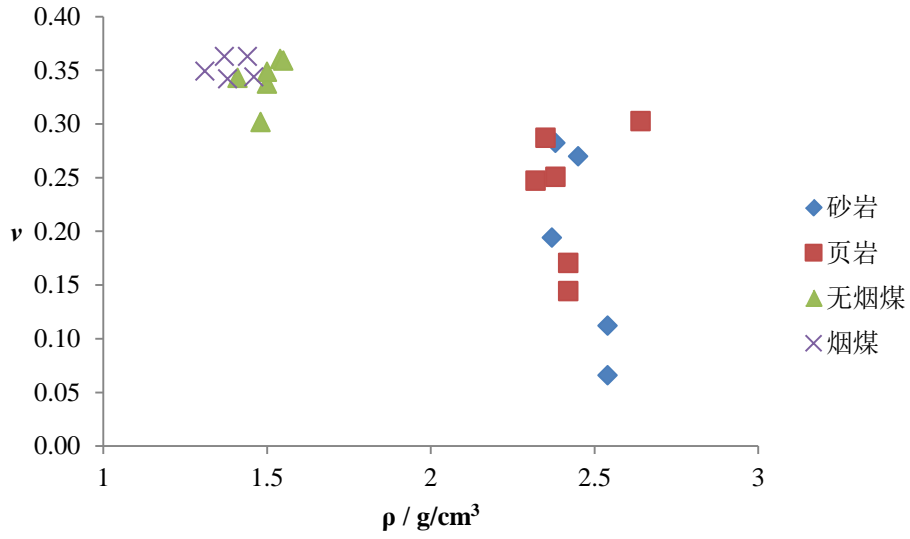
岩性	λ / Gpa	μ / Gpa	ν	K / Gpa	E / Gpa
砂岩	0.89-17.73	8.26-20.23	0.03-0.32	8.5-24.6	19.33-46.07
页岩	1.14-41.28	6.33-21.25	0.04-0.34	9.36-55.04	16.87-55.04
无烟煤	1.12-10.15	0.57-3.63	0.26-0.4	1.5-11.75	1.51-9.7
烟煤	2.35-5.53	0.78-1.99	0.3-0.41	3.34-6.86	2.2-5.45



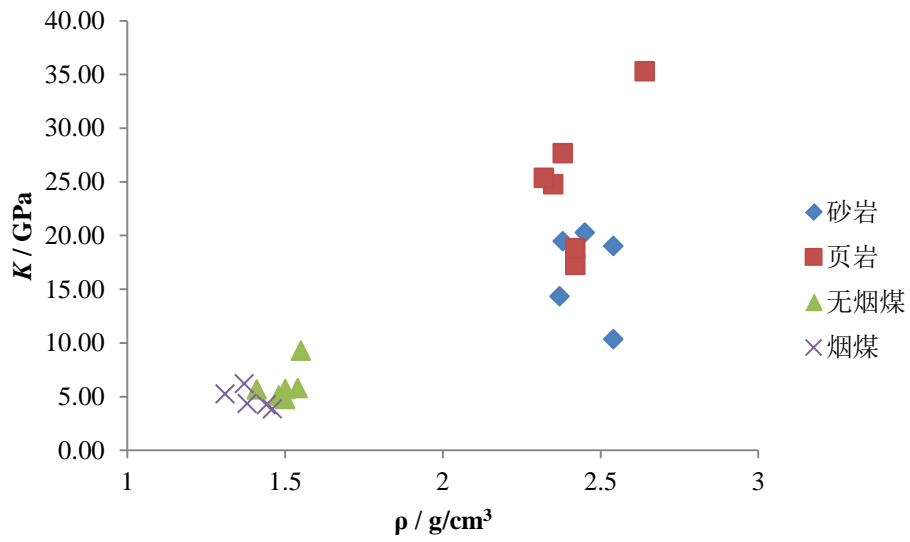
(a) 拉梅常数 (λ)



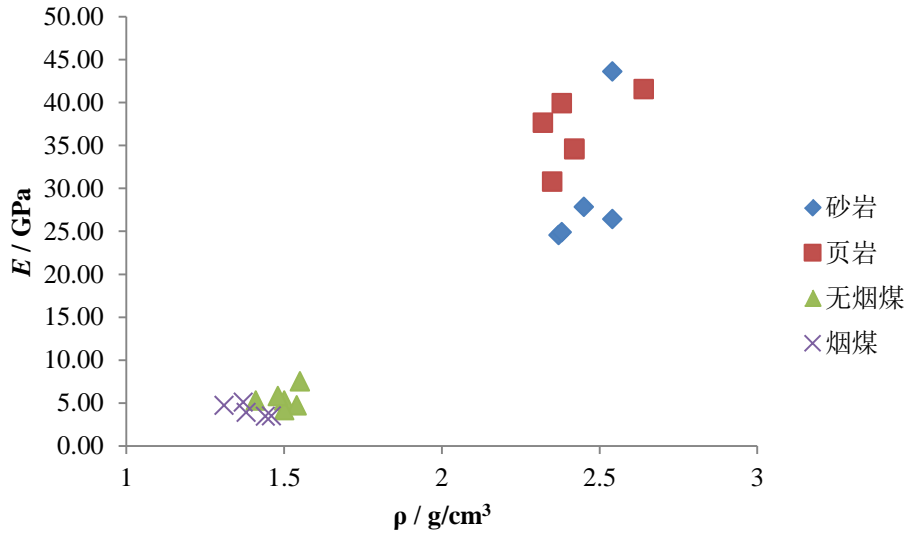
(b) 剪切模量 (μ)



(c) 泊松比 (ν)



(d) 体积模量 (K)



(e) 杨氏模量 (E)

图 3.2 四类岩样的动弹性力学参数特征

3.3 波的衰减特征

常压条件下四类岩样的纵横波衰减 (Q_p 、 Q_s) 测试结果如表 3.7 所示, 且为便于不同岩性之间的衰减特征的直观观测与对比, 进一步将各岩样三个方向上的 Q_p 、 Q_s 均值及视密度 ρ 之间的关系成图, 见图 3.3 所示。

(1) 衰减大小特征

砂岩 Q_p 介于 0.37-8.43, Q_s 介于 1.62-9.46; 页岩 Q_p 介于 0.5-10.64, Q_s 介于 1.09-29.14; 无烟煤 Q_p 介于 0.28-1.12, Q_s 介于 0.64-5.3; 烟煤 Q_p 介于 0.9-8.86, Q_s 介于 2.33-18.29。

四类岩石中, 无烟煤的 Q_p 、 Q_s 及其变化范围均相对最小; 页岩 Q_p 、 Q_s 整体均值相对最高, 且其变化范围也最广; 烟煤、砂岩对应的 Q_p 、 Q_s 数值及其变化范围均比较相近。可见, 无烟煤内纵横波衰减特征最强; 页岩、烟煤、砂岩内纵横波衰减特征均相对较弱, 但同种岩性不同的岩样之间纵横波衰减特征差异显著。

烟煤密度明显比砂岩的低, 但砂岩与烟煤的衰减特征相近; 稍低密度的烟煤的衰减明显比无烟煤的弱。且同种岩性的页岩、无烟煤、烟煤的不同岩样之间的 Q 值与密度均呈负相关关系, 而砂岩的不同岩样之间的 Q 值与密度呈较好的正相关关系。综上可知, 总体上岩石波的衰减特征受密度的影响作用减弱, 裂隙等界面结构特征已经成为波衰减的主要控制因素。因为砂岩内的界面结构相对不发育, 所以其不同岩样之间的衰减还是主要受密度的影响。四类岩石之间以及同类岩性的不同岩样之间的衰减特征差异主要归因于界面结构的差异性。总之, 岩石内超声波衰减对界面结构的敏感性要强于对密度的敏感性, 这与前述四类岩石的波速特征恰好相反。

值得注意的是，每类岩性岩样的 Q_p 与 Q_s 之间均呈良好的正相关关系（如图 3.3(c)），且页岩、砂岩、烟煤的 Q_p 与 Q_s 之间具有高度的正线性相关性。另外，各岩样每个方向上 Q_s 值普遍比对应 Q_p 值的高，表明四类岩石内纵波的衰减特征比横波的更强。

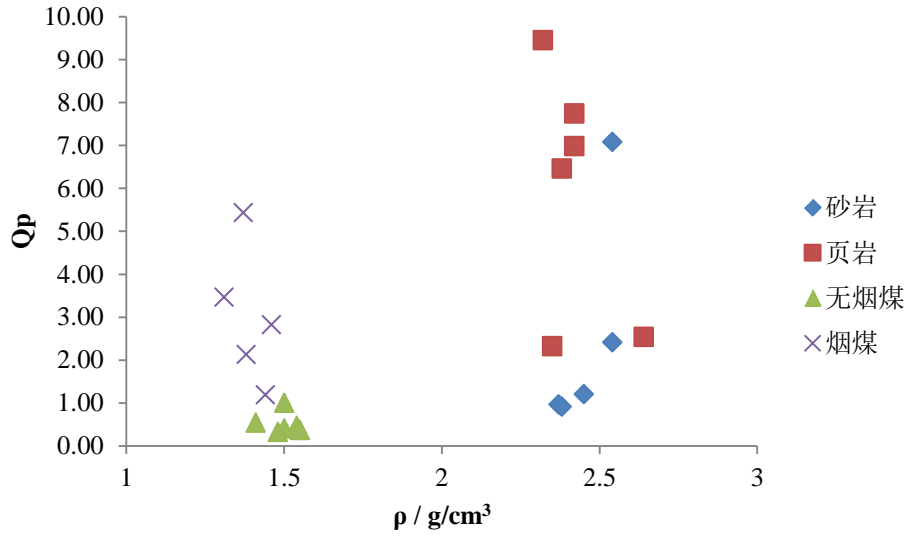
(2) 波衰减各向异性特征

显然，各岩样三个正交方向上的 Q_p 之间或 Q_s 之间均存在一定的差异性，垂直层理面的方向（Z 向） Q_p 和 Q_s 均最小，各岩样三个方向上的平均 Q 值一般与其中间值相近。所以四类岩石波的衰减普遍具有一定的各向异性特征，垂直层理面方向上的衰减最大。

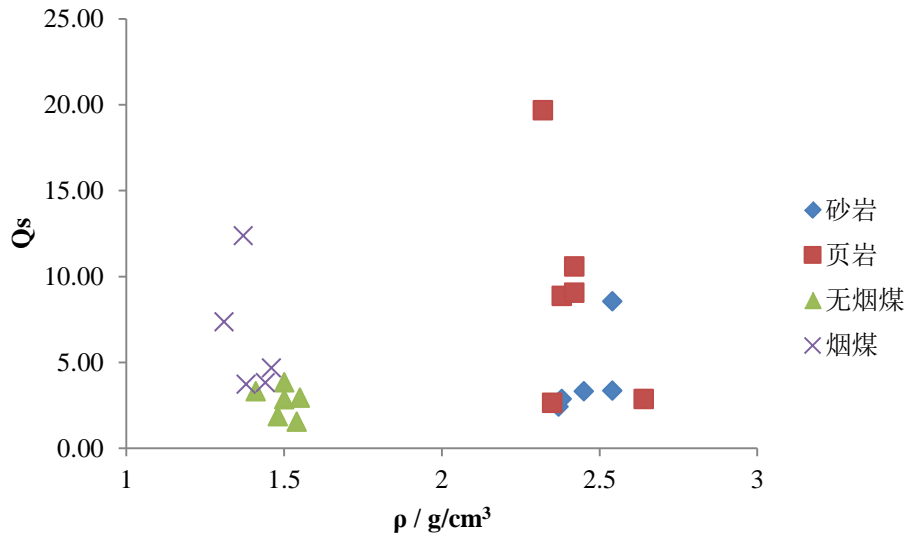
四类岩石中纵、横波之间以及不同岩性之间的衰减各向异性程度并没有呈现出明确的相对大小关系，归因于岩石内复杂的界面结构。

表 3.7 Q_p 、 Q_s 值

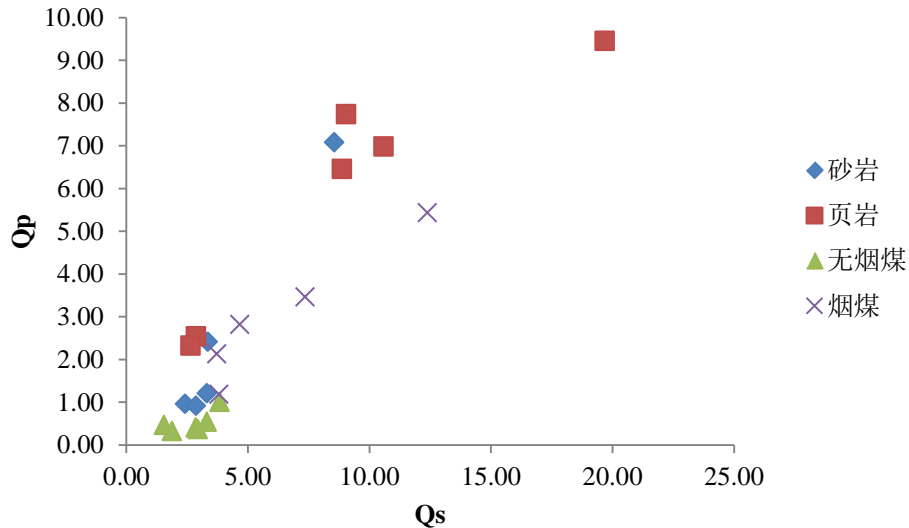
岩性	样品 编号	Q_p				Q_s				$\rho / \text{g/cm}^3$
		X	Y	Z	均值	X	Y	Z	均值	
砂岩	B4	8.43	6.94	5.87	7.08	9.46	8.19	8.01	8.55	2.54
	10P	1.23	0.99	0.67	0.96	3.06	2.56	1.62	2.41	2.37
	1P	2.00	0.96	0.66	1.21	5.27	2.37	2.28	3.31	2.45
	B2	3.91	1.78	1.55	2.42	5.19	2.49	2.34	3.34	2.54
	KS-5	1.65	0.74	0.37	0.92	4.09	2.26	2.22	2.86	2.38
页岩	X1	3.56	3.56	0.50	2.54	4.17	3.34	1.09	2.87	2.64
	W2	6.92	6.86	5.60	6.46	14.18	9.43	2.99	8.87	2.38
	G1	3.84	2.41	0.73	2.33	3.38	2.38	2.17	2.64	2.35
	W1	10.64	9.31	8.41	9.45	29.14	17.92	11.97	19.67	2.32
	J2	8.74	8.05	4.16	6.98	11.35	10.70	9.67	10.57	2.42
	J1	9.70	8.89	4.63	7.74	10.18	8.81	8.13	9.04	2.42
无烟 煤	CS1	1.12	1.02	0.88	1.00	5.30	4.70	1.51	3.84	1.5
	CS2	0.62	0.57	0.43	0.54	4.15	3.30	2.46	3.30	1.41
	CS3	0.67	0.40	0.32	0.47	3.19	0.82	0.64	1.55	1.54
	CS4	0.44	0.42	0.36	0.41	3.34	3.19	2.02	2.85	1.5
	CJ1	0.38	0.32	0.28	0.32	2.43	2.11	1.06	1.87	1.48
	CJ2	0.40	0.40	0.30	0.37	3.70	3.07	2.04	2.94	1.55
烟煤	D2-3	1.58	1.08	0.90	1.19	6.61	2.47	2.33	3.81	1.44
	t1-1	8.86	6.02	1.40	5.43	18.29	16.15	2.69	12.38	1.37
	t1-2	4.43	3.55	2.41	3.46	8.84	6.77	6.44	7.35	1.31
	t2-1	3.48	1.70	1.22	2.13	4.23	3.64	3.28	3.72	1.38
	t3	4.67	1.99	1.80	2.82	6.25	3.89	3.85	4.66	1.46



(a) Q_p - ρ



(b) Q_s - ρ



(c) Qp-Qs

图 3.3 四类岩样的纵横波 Q 值特征

3.4 小结

基于常压条件下砂岩、页岩、无烟煤、烟煤四类岩石的弹性特征的对比分析，可以获得如下主要结论：

(1) 相比于砂/页岩，煤波速、波阻抗、拉梅常数 (λ)、剪切模量 (μ)、体积模量 (K) 和杨氏模量 (E) 明显偏低，而泊松比 (ν) 稍偏高。推测密度差异显著的岩石之间，波速、各动弹性力学参数差异也很大。密度相差较小的岩石之间波速、 λ 、 μ 、 K 及 E 的差异受控于内部不同的裂隙等界面结构。每类岩石的 V_p (Q_p) 与 V_s (Q_s) 均正相关。

(2) 四类岩石的 V_p 、 V_s 、各动弹性力学参数、衰减均呈现各向异性，垂直层理面的方向上 V_p 、 V_s 、动弹性力学参数均最小，而衰减最大。 V_s 的各向异性程度大都较 V_p 的弱。其中，页岩 V_p 、 V_s 、动弹性力学参数的各向异性程度最高，无烟煤次之，归因于页岩、无烟煤内发育的层理、裂隙等界面结构。

(3) 无烟煤内纵横波衰减特征最强；岩石波的衰减特征受密度的影响作用减弱，裂隙等界面结构特征已经成为波衰减的主要控制因素。所测四类岩石内纵波的衰减特征比横波的更强。

4 单轴受载岩石的波速及其各向异性特征

本章基于所测岩样透射纵横波的走时,对单轴加载条件下的各岩样三个正交方向上的对应压力点的纵、横波速度 (V_p 、 V_s) 进行了计算,并对单轴受载的三类岩石的弹性波速度及其各向异性特征进行了讨论。

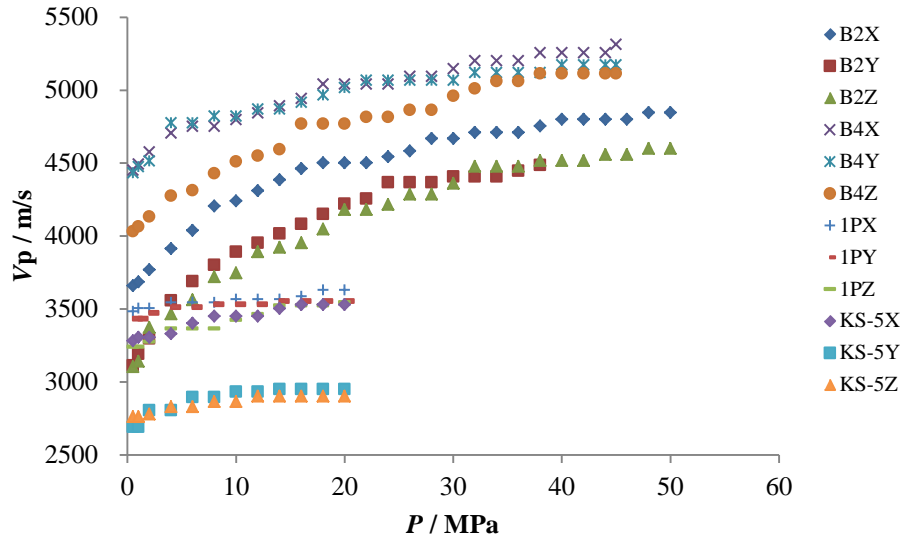
4.1 加载压力对波速大小的影响特征

4.1.1 砂岩

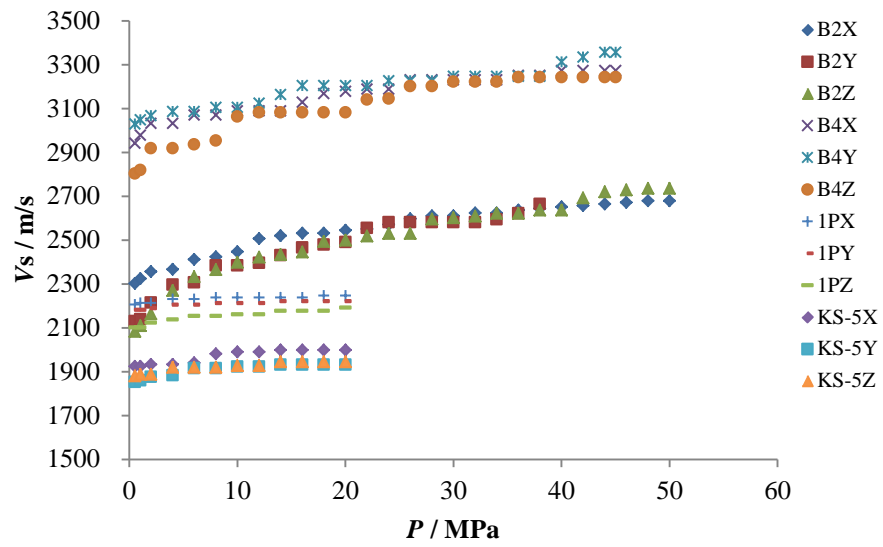
由单轴加载条件下的超声波测量实验获得的 B2、B4、1P 及 KS-5 (海绿石英砂岩) 四块砂岩样品三个方向上纵横波速度 (V_p 、 V_s) 及波速比 (V_p/V_s , 记为 r) 随加载压力 (P) 变化的结果如图 4.1 及表 4.1 所示。总体上,加载压力 P 在 0.5MPa-50MPa 范围内所测砂岩 V_p 介于 2500-5500m/s, V_s 介于 1800-3500m/s, r 介于 1.44~1.81。固结胶结程度好的、较致密坚硬的 B2、B4 波速明显高于含有充填物或其它杂岩的碎裂化砂岩 1P 及 KS-5。

砂岩各方向上 V_p 、 V_s 均随 P 的升高呈现明显的阶段性增加的特征,且同一方向上 V_p 、 V_s 具有相似的变化规律。在压力升高初期波速增加速率较快,随后增加速率逐渐变缓,波速呈近线性缓慢增加并趋于一个稳定的最大值。这与单轴加载条件下岩石的应力-应变过程相一致。基于单轴加压下岩石典型的应力-应变关系(破坏前区域)可知,加载初期(OA段)是岩石的压密阶段,内部许多微裂隙发生闭合,所以波速增加速率较快;随着压力的持续增加,岩石可压缩性减弱并进入弹性变形阶段,波速的增加幅度逐渐减小,并趋于理论上的岩石骨架波速。所测砂岩各方向上 V_p 、 V_s 与 P 之间整体上呈较好的二次相关性(相关系数均在 90%以上)或分段线性,但各样之间波速阶段性变化的拐点不尽相同,B2、B4 样拐点压力多位于 15~20MPa, 1P 及 KS-5 多位于 5~10MPa。

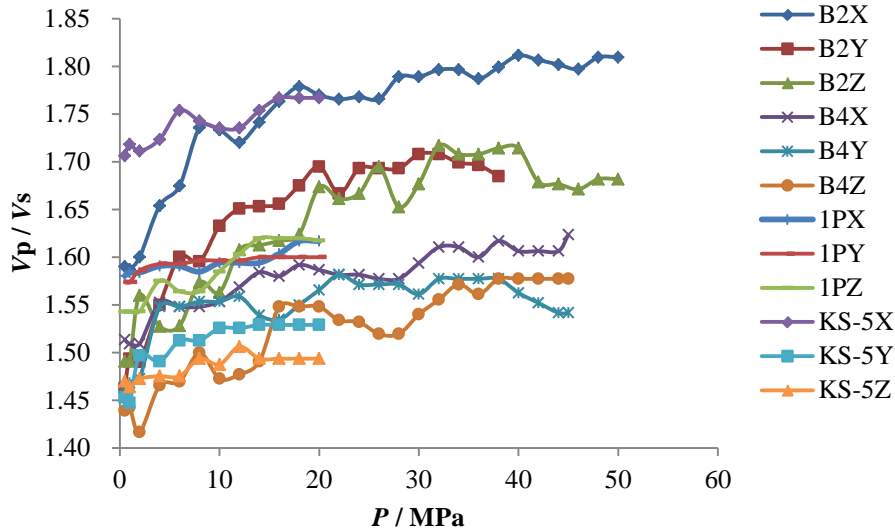
图 4.1 (c)显示所测砂岩各方向上 r 随加载压力的升高整体上也呈现出与波速相类似的阶段性上升的趋势,但 r 与 P 之间的关系曲线并非严格的单调递增,具有明显的局部波动性。另外,从提取的砂岩波速随压力变化的特征信息(如表 4.1)可知,在破坏前的承载压力范围内 V_p 随压力上升的平均变化速率($\Delta V_p/\Delta P$)明显高于 V_s 的 ($\Delta V_s/\Delta P$)。上述结果均表明加载压力对砂岩 V_p 的影响作用比对 V_s 的更显著,即砂岩 V_p 对加载压力具有更强的敏感性。



(a) V_p - P



(b) V_s - P



(c) V_p/V_s - P

图 4.1 单轴加载条件下砂岩波速测试结果

表 4.1 砂岩波速随压力变化的特征信息

样品	承压范围 (MPa)	V_p 范围 (m/s)	V_s 范围 (m/s)	最高 AV_p (m/s)	最高 AV_s (m/s)	$\frac{AV_p}{AP}$ (m/s/MPa)	$\frac{AV_s}{AP}$ (m/s/MPa)
B2	0.5~50	3104~4846	2082~2735	$\frac{1185\sim1495}{1352}$	$\frac{376\sim653}{521}$	$\frac{23.9\sim36.6}{30.3}$	$\frac{7.6\sim14.3}{11.7}$
B4	0.5~45	4033~5314	2803~3356	$\frac{739\sim1081}{894}$	$\frac{327\sim440}{366}$	$\frac{16.6\sim24.3}{20.1}$	$\frac{7.4\sim9.9}{8.2}$
1P	0.5~20	3242~3631	2101~2246	$\frac{121\sim305}{191}$	$\frac{40\sim92}{58}$	$\frac{6.2\sim15.6}{9.8}$	$\frac{2.1\sim4.7}{3.0}$
KS-5	0.5~20	2691~3530	1852~1998	$\frac{140\sim260}{216}$	$\frac{64\sim78}{72}$	$\frac{7.2\sim13.4}{11.1}$	$\frac{3.3\sim4.0}{3.7}$

注：表中第一行为最小值~最大值，第二行为平均值。

整体上砂岩的波速与密度之间满足较好的正相关关系。相比于密度较低的 1P 及 KS-5, B2、B4 的纵横波速普遍较大；抗压强度高；破坏前的承载压力范围广(高达 50MPa)；压力影响下的波速增幅大，尤其是 B2 的 V_p 、 V_s 最高增长率可达 48.2%、31.4%；波速随压力的平均变化速率也要高出至少一倍；随着 P 的升高， r 也呈现出大增幅和高平均变化速率的特征。可见具有不同结构、物质组分的砂岩之间在加载压力对波速大小的影响特征方面表现出显著的差异性。B2、B4 波速的应力敏感性要高于 1P 及 KS-5。

4.1.2 页岩

由单轴加载条件下的超声波测量实验获得的六块页岩样品三个方向上纵横波速度 (V_p 、 V_s) 及波速比 (r) 随加载压力 (P) 变化的结果如图 4.2 及表 4.2 所示。总体上，加载压力 P 在 0.5MPa-50MPa 范围内所测页岩 V_p 介于 3200-5700m/s, V_s 介于 2200-3100m/s, 与所测砂岩纵横波速中、高值区范围相当；

r 介于 1.42~1.91.

在破坏前的压力加载范围内页岩各方向上 V_p 、 V_s 均随 P 的升高呈现**缓慢的阶段性增加**的特征且同一方向上 V_p 、 V_s 也表现出相似的变化规律。压力影响下的纵、横波速度最高增幅分别不超过 376m/s、121 m/s，最高增长率分别低于 10%、6%，随压力的平均变化速率最高不过 17.2 m/s/MPa、3.9 m/s/MPa。与砂岩相比，页岩纵、横波速的平均值均稍偏高，但加载压力对波速的影响作用明显减弱，波速对加载压力普遍显示出较弱的敏感性特征，且与具有较低密度的砂岩（1P 及 KS-5）的相类似。

虽然随着加载压力的升高页岩同一方向上 V_p 、 V_s 表现出相似的变化规律，但 r 整体上呈现出与波速相类似的缓慢上升的趋势，且 V_p 随压力上升的平均变化速率（ $\Delta V_p/\Delta P$ ）均高于 V_s 的（ $\Delta V_s/\Delta P$ ），所以加载压力对页岩 V_p 的影响作用比对 V_s 的更显著，即页岩 V_p 对加载压力具有更强的敏感性。

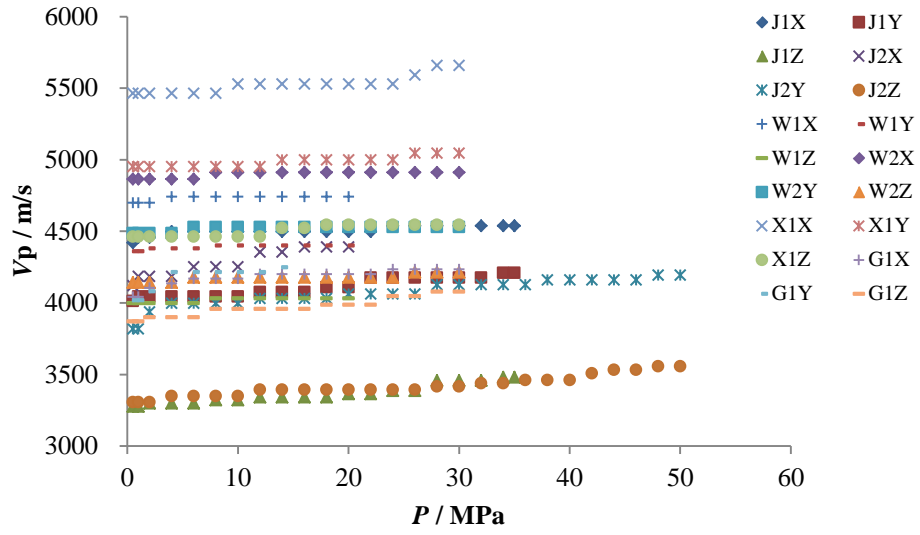
由表 4.2 可见，整体上页岩的波速与密度之间**并没有**呈现出较好的正相关关系。虽然砂质页岩 X1 密度最大，波速也相对最高，但具有较低密度的 W1、W2 及 G1 波速均不低于具有较高密度的 J1、J2。值得注意的是，在所测页岩中砂质页岩 X1 及含粉砂质泥页岩的 W1、W2 波速均普遍较高，但波速对压力的敏感性相对最差，甚至比具有较低密度的砂岩（1P 及 KS-5）还稍弱。

对比研究**页岩和砂岩**的波速测量结果，可以总结如下规律：

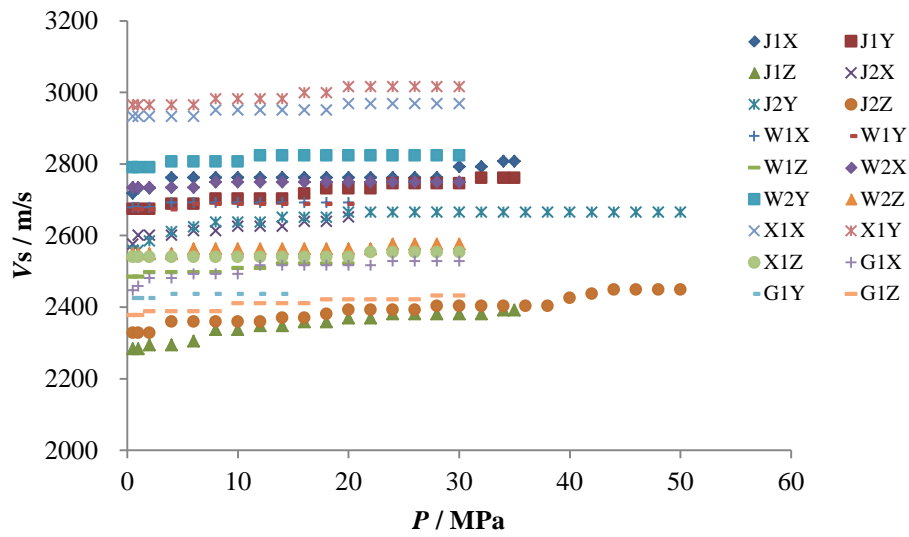
1) 具有单一岩性的纯砂/页岩（比如 B2、B4 和 J1、J2）的波速随加载压力升高的平均变化速率均比杂砂/页岩的要高，即纯砂/页岩波速对加载压力的敏感性比其相应的杂砂/页岩的强。

2) 加载压力对纯/杂砂岩波速的影响作用普遍比对纯/杂页岩的强，即纯/杂砂岩波速对加载压力的敏感性均比相应纯/杂页岩的强。

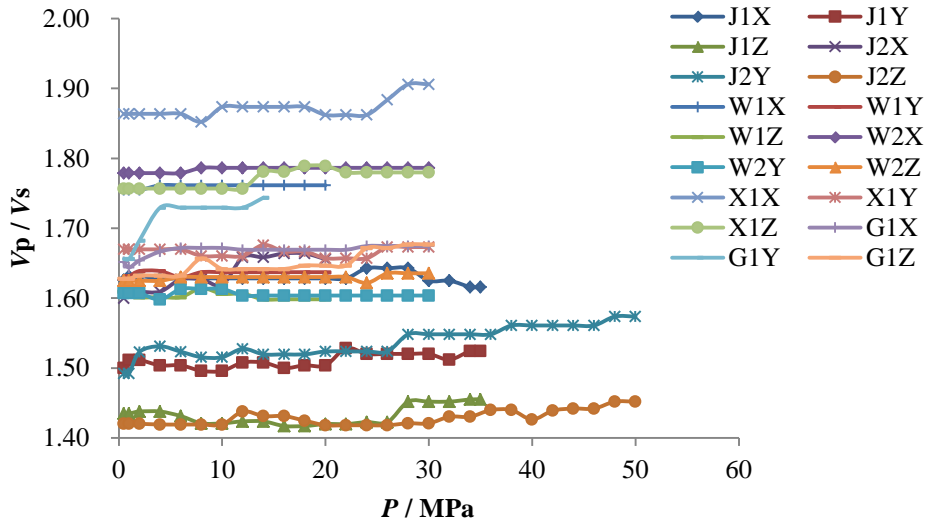
综上，页岩与砂岩在加载压力对波速大小的影响特征方面表现出显著的差异性，归因于岩性组合及结构的不同。有待对岩石物性做进一步检测以揭示其控制机理。



(a) V_p - P



(b) V_s - P



(c) V_p/V_s - P

图 4.2 单轴加载条件下页岩波速测试结果

表 4.2 页岩波速随压力变化的特征信息

样品	承压范围 (MPa)	V_p 范围 (m/s)	V_s 范围 (m/s)	最高 AV_p (m/s)	最高 AV_s (m/s)	$\frac{AV_p}{AP}$ (m/s/MPa)	$\frac{AV_s}{AP}$ (m/s/MPa)
J1	0.5~35	3277~4538	2284~2808	$\frac{118\sim203}{173}$	$\frac{86\sim108}{95}$	$\frac{3.4\sim5.9}{5.0}$	$\frac{2.5\sim3.1}{2.7}$
J2	0.5~50	3306~4391	2328~2665	$\frac{249\sim376}{298}$	$\frac{76\sim121}{101}$	$\frac{5.0\sim13.9}{8.8}$	$\frac{2.2\sim3.9}{2.8}$
W1	0.5~20	4000~4742	2485~2692	$\frac{31\sim43}{38}$	$\frac{14\sim37}{22}$	$\frac{1.6\sim2.2}{1.9}$	$\frac{0.7\sim1.9}{1.1}$
W2	0.5~30	4143~4911	2549~2824	$\frac{42\sim70}{53}$	$\frac{15\sim33}{25}$	$\frac{1.4\sim2.4}{1.8}$	$\frac{0.5\sim1.1}{0.8}$
X1	0.5~30	4462~5658	2540~3016	$\frac{82\sim193}{123}$	$\frac{13\sim51}{33}$	$\frac{2.8\sim6.5}{4.2}$	$\frac{0.4\sim1.7}{1.1}$
G1	0.5~30	3872~4250	2378~2528	$\frac{192\sim232}{211}$	$\frac{11\sim81}{49}$	$\frac{6.5\sim17.2}{10.3}$	$\frac{0.9\sim2.8}{1.8}$

注：表中第一行为最小值~最大值，第二行为平均值。

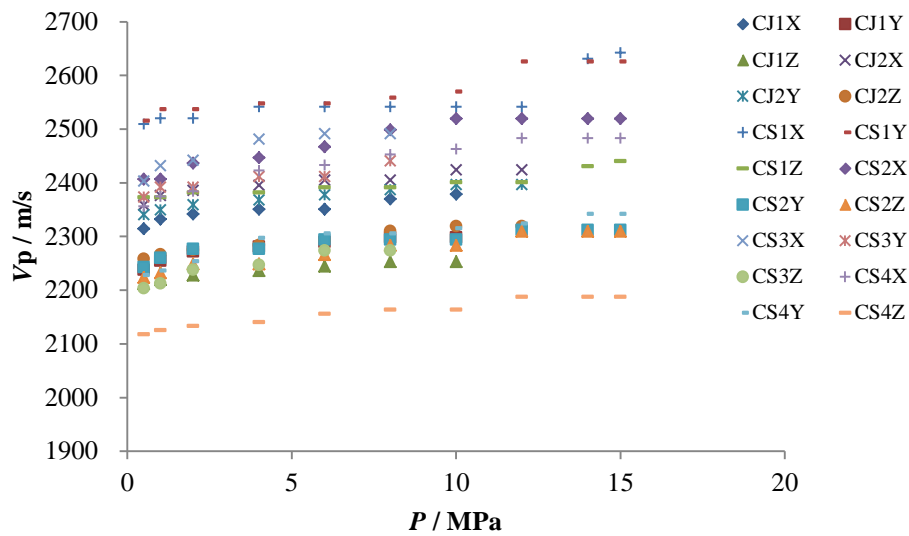
4.1.3 无烟煤

由单轴加载条件下的超声波测量实验获得的六块无烟煤样品三个方向上纵横波速度 (V_p 、 V_s) 及波速比 (r) 随加载压力 (P) 变化的结果如图 4.3 及表 4.3 所示。总体上，加载压力 P 在 0.5MPa-15MPa 范围内所测无烟煤 V_p 介于 2100-2700m/s, V_s 介于 900-1400m/s; r 介于 1.75~2.20. 可见，无烟煤纵、横波速度明显比砂、页岩的小，而 r 明显偏高。

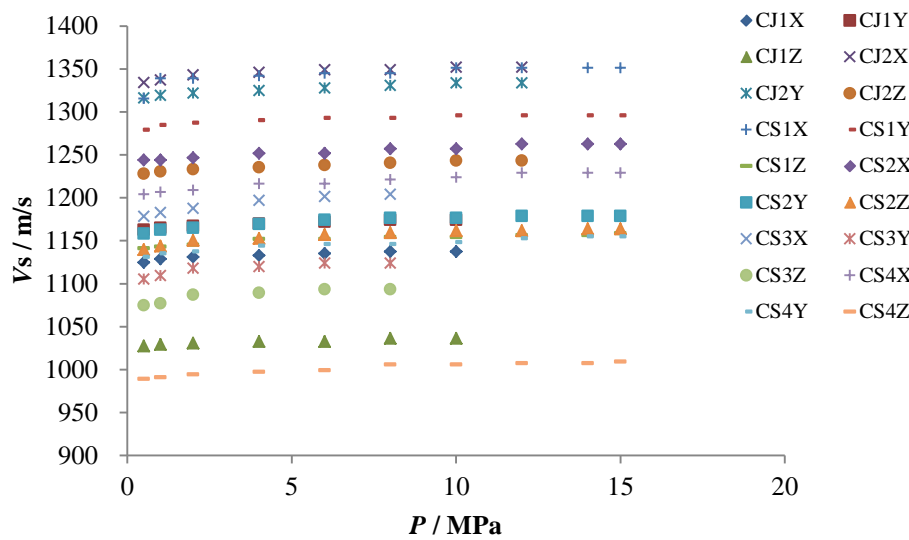
在破坏前的压力加载范围内无烟煤各方向上 V_p 、 V_s 均随 P 的升高呈现缓慢的阶段性增加的特征并逐渐趋于一个稳定值。压力影响下的纵、横波速度最高增

幅分别不超过 133m/s、36 m/s，最高增长率分别低于 5.4%、2.7%，随压力的平均变化速率最高不过 11.8 m/s/MPa、3.4 m/s/MPa。对比可见，无烟煤破坏前的承载压力范围最小，加载压力对无烟煤纵、横波速大小的影响作用也相对较弱；其波速对加载压力的敏感性明显低于砂岩，而与页岩的相当。

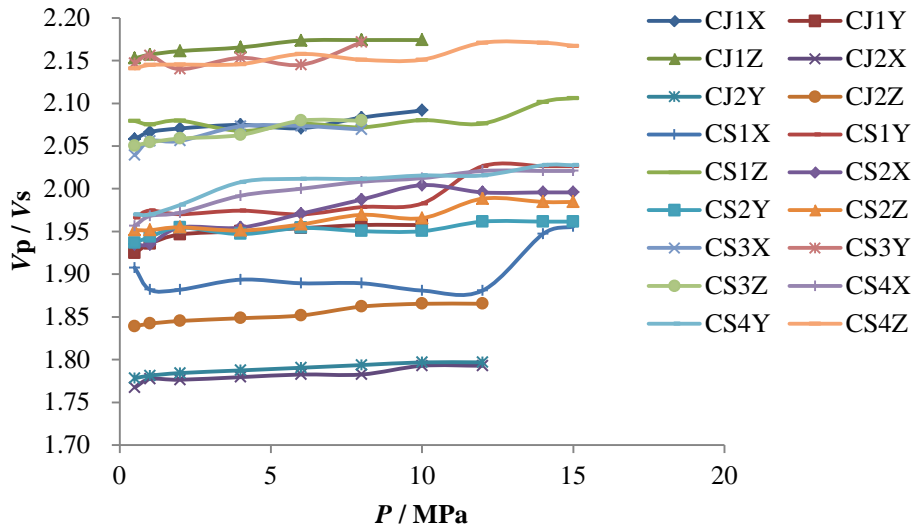
随着加载压力的升高，无烟煤 v_p 整体上也呈现出缓慢升高的趋势，且 V_p 随压力上升的平均变化速率 ($\Delta V_p/\Delta P$) 均明显高于 V_s 的，所以加载压力对无烟煤 V_p 的影响作用比对 V_s 的更显著，即无烟煤 V_p 对加载压力具有更强的敏感性。



(a) V_p - P



(b) V_s - P



(c) V_p/V_s -P

图 4.3 单轴加载条件下无烟煤波速测试结果

表 4.3 无烟煤波速随压力变化的特征信息

样品	承压范围 (MPa)	V_p 范围 (m/s)	V_s 范围 (m/s)	最高 AV_p (m/s)	最高 AV_s (m/s)	$\frac{AV_p}{AP}$ (m/s/MPa)	$\frac{AV_s}{AP}$ (m/s/MPa)
CJ1	0.5~10	2212~2379	1027~1174	$\frac{41\sim65}{55}$	$\frac{9\sim13}{11}$	$\frac{4.3\sim6.8}{5.8}$	$\frac{0.9\sim1.4}{1.2}$
CJ2	0.5~12	2258~2424	1228~1352	$\frac{56\sim66}{61}$	$\frac{15\sim18}{17}$	$\frac{4.9\sim5.7}{5.3}$	$\frac{1.3\sim1.5}{1.5}$
CS1	0.5~15	2373~2642	1141~1351	$\frac{68\sim133}{104}$	$\frac{17\sim36}{23}$	$\frac{4.7\sim9.2}{7.2}$	$\frac{1.2\sim2.5}{1.6}$
CS2	0.5~15	2224~2520	1139~1262	$\frac{69\sim113}{89}$	$\frac{19\sim24}{21}$	$\frac{4.8\sim7.8}{6.2}$	$\frac{1.3\sim1.7}{1.5}$
CS3	0.5~8	2203~2491	1075~1204	$\frac{68\sim88}{75}$	$\frac{19\sim26}{21}$	$\frac{9.0\sim11.8}{10.1}$	$\frac{2.5\sim3.4}{2.8}$
CS4	0.5~15	2118~2483	989~1229	$\frac{69\sim128}{104}$	$\frac{20\sim25}{23}$	$\frac{4.8\sim8.8}{7.1}$	$\frac{1.4\sim1.7}{1.6}$

注：表中第一行为最小值~最大值，第二行为平均值。

由表 4.3 可见，整体上无烟煤的波速与密度之间**并没有**呈现出较好的正相关关系。值得注意的是，在所测两类无烟煤中 CJ 系列无烟煤的波速对压力的敏感性比 CS 系列的稍弱。

综合对比砂岩、页岩、无烟煤的波速测量结果，可以总结如下规律：

- 1) 具有低密度的无烟煤承压能力及纵、横波速均相对最小；
- 2) 页岩、无烟煤波速对加载压力的敏感性强度相近，但均明显较砂岩的弱。
- 3) 三类储层岩石中 V_p 对加载压力的敏感性均比 V_s 的强。

上述总结的岩石物理性质均可为利用弹性波技术对三类岩层岩性的判识提

供理论依据和新方法的构建思路。

4.2 加载压力对波速各向异性的影响特征

为了进一步探讨各岩样三个方向上纵横波速(V_p 、 V_s)及波速比(r)的各向异性特征,定义如下一对各向异性因子 (A 和 a , 见式 4.1)。其中 Max 、 Min 及 Med 分别代表 V_p (或 V_s 或 r)三个方向上的最大值、最小值及中间值。可见 $A \geq a$, 且 A 、 a 值越大则表示相应两个方向上的目标值差别越大,即各向异性特征越明显。

$$\begin{cases} A = \frac{Max-Min}{Max} \\ a = \frac{Max-Med}{Max} \end{cases} \quad (4.1)$$

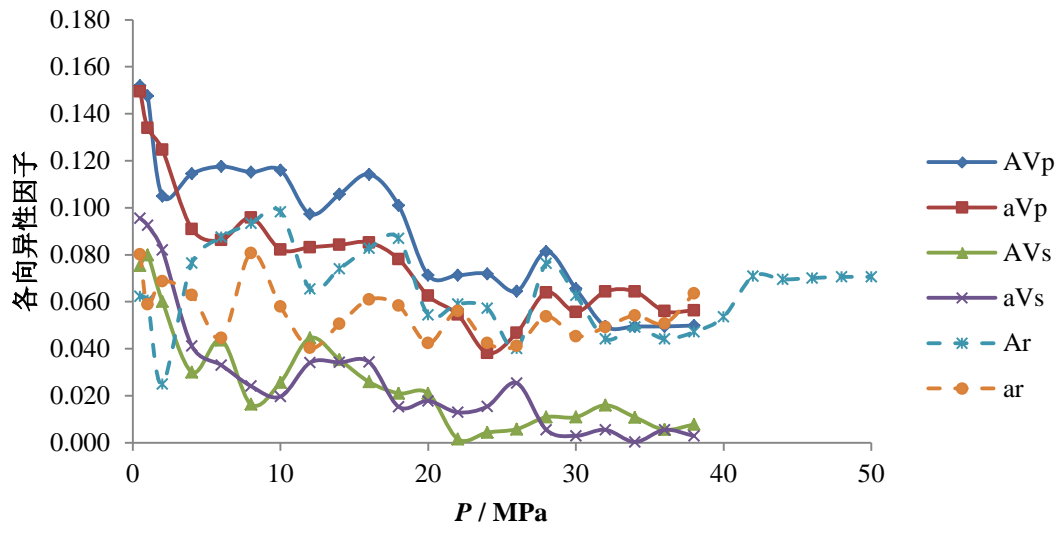
4.2.1 砂岩

由单轴加载条件下砂岩波速的测量值可分别计算出纵横波速度 (V_p 、 V_s) 及波速比 (r) 的各向异性因子,结果如图 4.4 及表 4.4 所示。总体上,加载压力 P 在 0.5MPa-45MPa 范围内砂岩 $A(V_p)$ 介于 0.011-0.178, $a(V_p)$ 介于 0.004-0.186, $A(V_s)$ 介于 0.001-0.08, $a(V_s)$ 介于 0-0.096, $A(r)$ 介于 0.004-0.159, $a(r)$ 介于 0-0.158。可见,所测砂岩的波速及波速比均显示出一定的各向异性特征,其各向异性的指标普遍小于 0.2 且随加载压力的变化而变化。

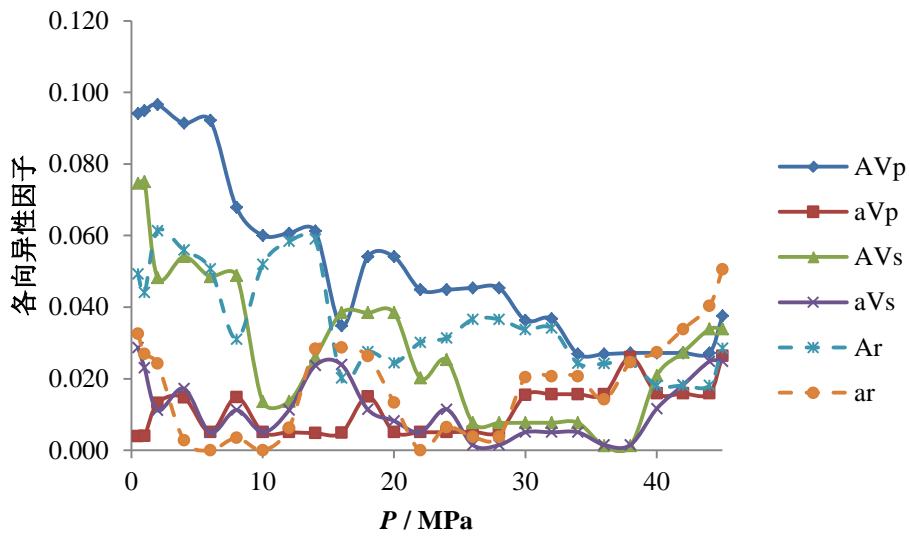
随压力的变化规律: 纯砂岩 B2、B4 (尤其是 B2) 的波速及波速比各向异性特征规律性明显。在破坏前的压力加载过程中,纯砂岩 $A(V_p)$, $a(V_p)$, $A(V_s)$, $a(V_s)$, $A(r)$, $a(r)$ (尤其是 A) 整体上均呈减小的趋势并趋于稳定。这是因为岩石物性的各向异性除了矿物组分差异之外很大程度上均是由岩石内部孔裂隙结构的差异分布所引起的,随着加载压力的逐渐升高,三个方向上的孔裂隙空间均趋于压缩或闭合,结构差异减小,所以在三个方向上由孔裂隙结构差异引起的波速(或波速比)的差异性也逐渐减小,并且三个方向上波速(或波速比)最终将趋于一个稳定的各向异性状态,即只由矿物组分差异引起的固有各向异性状态。然而,图 4.4 结果显示波速及波速比各向异性因子随着压力的升高并非呈现理想的单调递减趋势,变化过程普遍具有一定的波动性,尤其是波速比各向异性因子。

另外,对于岩性及结构复杂的砂岩(尤其是杂砂岩 1P、KS-5),随压力的升高其波速及波速比各向异性因子的变化量普遍较小,甚至几乎没有发生变化,整体上显示出对加载压力较弱的敏感性特征。上节分析可知,杂砂岩波速大小对加载压力的敏感性明显偏弱,所以其波速及波速比各向异性特征受加载压力的影响也较弱。

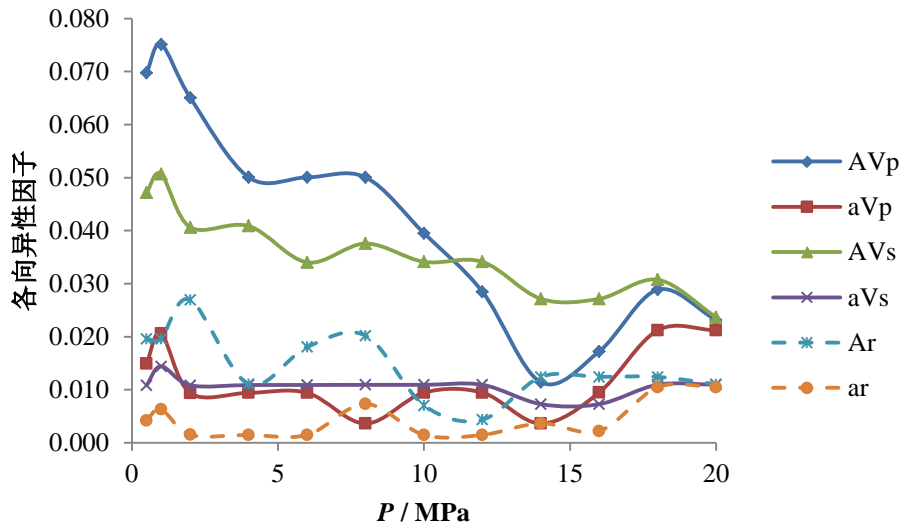
在加载压力范围内砂岩的 V_p 各向异性因子(尤其是 A) 普遍较相应 V_s 的大,说明纵波速度的各向异性特征要强于横波速度的,所以纵波速度 (V_p) 是一个可以用于检测砂岩物性各向异性特征的敏感性参数。



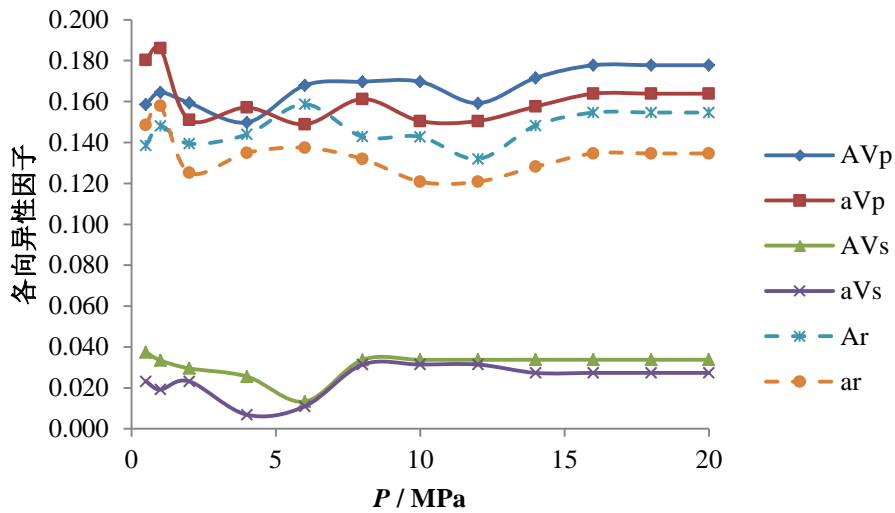
(a) B2



(b) B4



(c) 1P



(d) KS-5

图 4.4 单轴加载条件下砂岩波速及波速比各向异性特征

表 4.4 砂岩波速及波速比各向异性随压力变化的特征信息

样品	承压范围(MPa)	A(Vp)	a(Vp)	A(Vs)	a(Vs)	A(r)	a(r)
B2	0.5~38	$\frac{0.050\sim 0.152}{0.091}$	$\frac{0.038\sim 0.150}{0.079}$	$\frac{0.002\sim 0.080}{0.026}$	$\frac{0\sim 0.096}{0.029}$	$\frac{0.025\sim 0.098}{0.065}$	$\frac{0.040\sim 0.081}{0.055}$
B4	0.5~45	$\frac{0.027\sim 0.097}{0.053}$	$\frac{0.004\sim 0.026}{0.011}$	$\frac{0.001\sim 0.075}{0.029}$	$\frac{0.001\sim 0.029}{0.012}$	$\frac{0.018\sim 0.061}{0.036}$	$\frac{0\sim 0.050}{0.018}$
1P	0.5~20	$\frac{0.011\sim 0.075}{0.042}$	$\frac{0.004\sim 0.021}{0.012}$	$\frac{0.024\sim 0.051}{0.036}$	$\frac{0.007\sim 0.014}{0.011}$	$\frac{0.004\sim 0.027}{0.015}$	$\frac{0.001\sim 0.010}{0.004}$
KS-5	0.5~20	$\frac{0.150\sim 0.178}{0.167}$	$\frac{0.149\sim 0.186}{0.161}$	$\frac{0.013\sim 0.037}{0.031}$	$\frac{0.007\sim 0.031}{0.024}$	$\frac{0.132\sim 0.159}{0.147}$	$\frac{0.121\sim 0.158}{0.134}$

注：表中第一行为最小值~最大值，第二行为平均值。

4.2.2 页岩

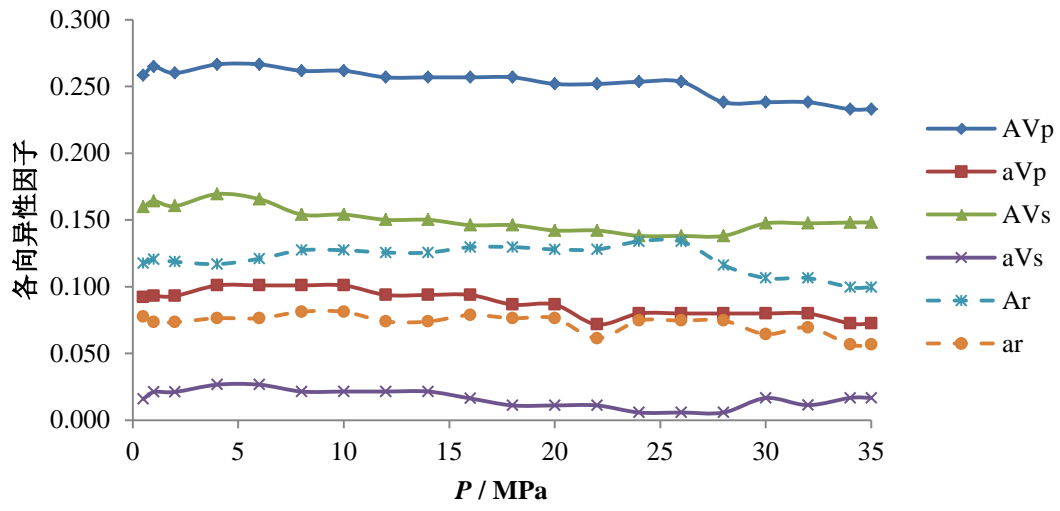
由单轴加载条件下页岩波速的测量值可分别计算出纵横波速度 (V_p 、 V_s) 及波速比 (r) 的各向异性因子, 结果如图 4.5 及表 4.5 所示。总体上, 加载压力 P 在 0.5MPa-50MPa 范围内页岩 $A(V_p)$ 介于 0.036-0.267, $a(V_p)$ 介于 0.004-0.108, $A(V_s)$ 介于 0.028-0.169, $a(V_s)$ 介于 0.002-0.031, $A(r)$ 介于 0.017-0.144, $a(r)$ 介于 0.003-0.092。可见, 所测页岩的波速及波速比各向异性特征均比较明显, 普遍较砂岩的强。

和砂岩相比, 页岩波速及波速比各向异性因子值总体上明显偏高(尤其是 A), 表明其波速及波速比各向异性强度要比砂岩的大。且其纵、横波速度的 A 值一般远大于相应 a 值(最高达 30 倍), 表明页岩三个方向中有一个方向上的纵、横波速值均比其它两个方向上的要小很多。这正是因为页岩具有典型的层理结构, 垂直层理面方向上的波速值明显低于平行层理面两个正交方向上的波速值。因此, **波速 A 值 \gg a 值的特征**可以用来作为利用弹性波勘探判识像页岩等这种具有明显层理结构岩石岩性的理论依据。

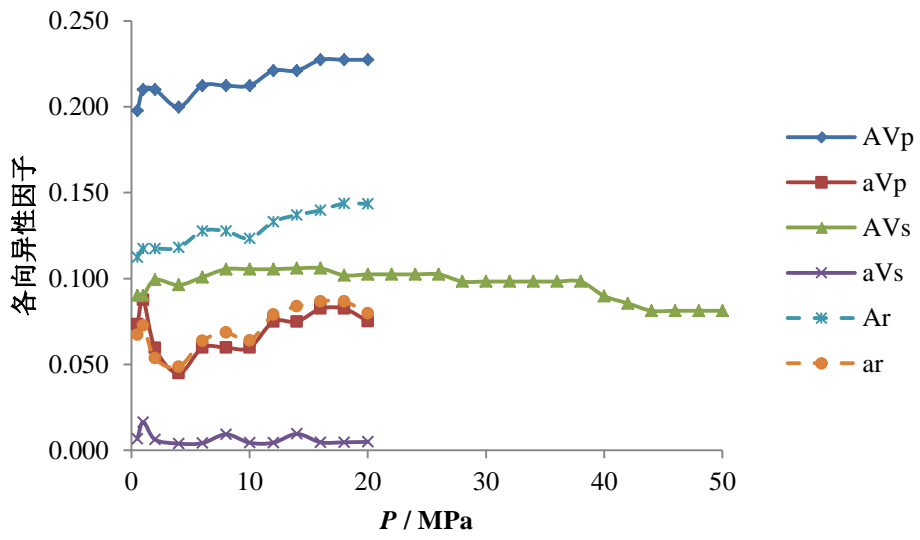
随压力的变化规律: 页岩波速及波速比各向异性特征也表现出一定的规律性。在破坏前的压力加载过程中, 页岩 $A(V_p)$, $a(V_p)$, $A(V_s)$, $a(V_s)$, $A(r)$, $a(r)$ 整体上变化不显著, 大都表现出微小的波动; 仅纯页岩 J1 波速及波速比各向异性因子呈明显的缓慢减小的趋势。相比于砂岩, 页岩波速及波速比各向异性因子的变化量普遍较小, 各向异性特征受加载压力的影响明显偏弱。由上节波速分析可知, 加载压力对页岩波速大小的影响作用普遍比对砂岩的弱, 所以页岩波速及波速比各向异性因子受加载压力的影响作用也相对不强, 页岩波速及波速比各向异性特征对加载压力普遍表现出较弱的敏感性。

另外, 对于岩性及结构复杂的杂页岩 (W_1 、 W_2 及 X_1), 随压力的升高其波速及波速比各向异性因子的变化量非常小, 甚至几乎没有发生变化。相比于 J1 等纯页岩, 其波速及波速比各向异性整体上显示出对加载压力更弱的敏感性特征, 同样归因于杂页岩波速大小对加载压力的敏感性相对偏弱。

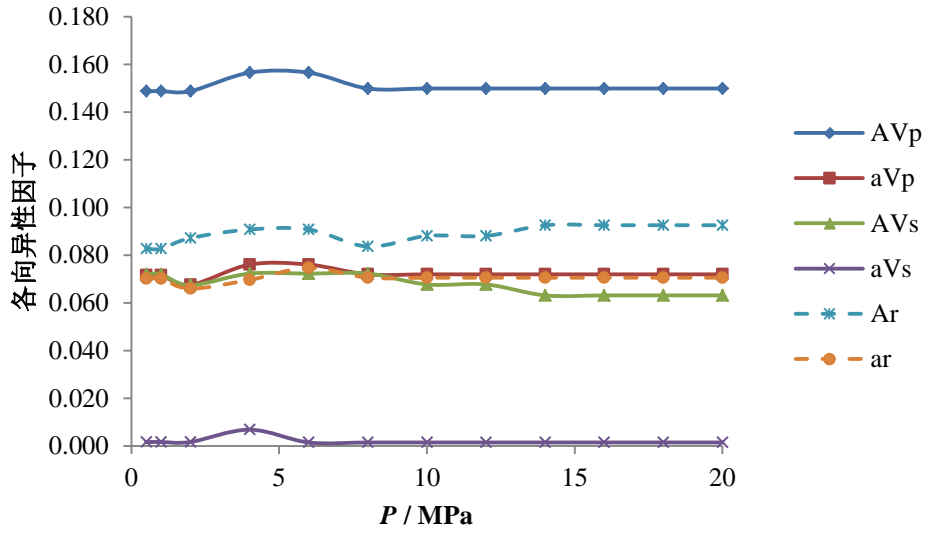
在加载压力范围内页岩的 V_p 各向异性因子 (A 、 a) 普遍较相应 V_s 的大, 说明纵波速度的各向异性特征要强于横波速度的, 可见纵波速度 (V_p) 是一个可以用于检测页岩物性各向异性特征的敏感性参数。



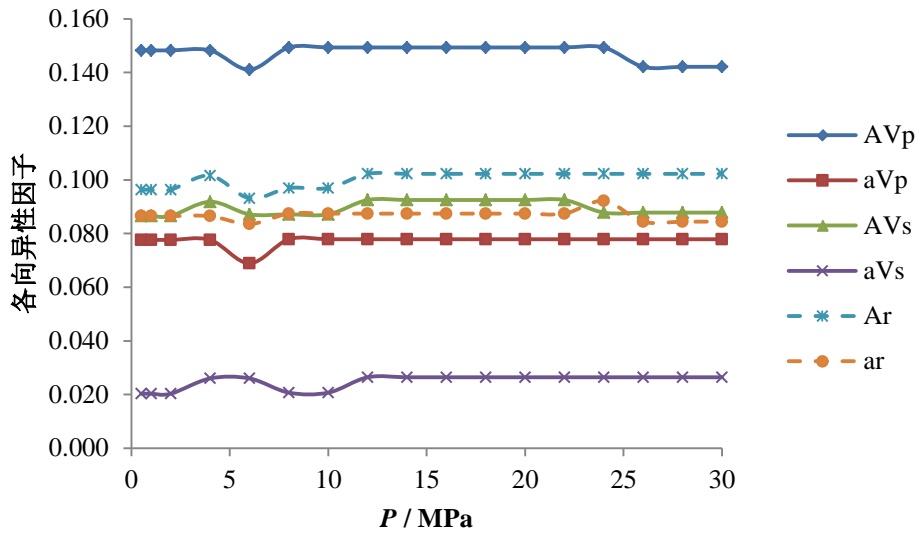
(a) J1



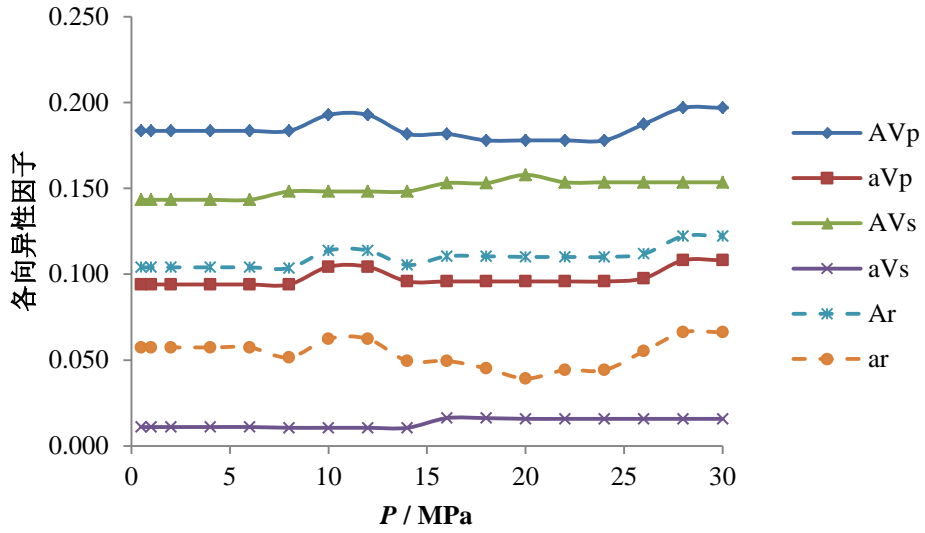
(b) J2



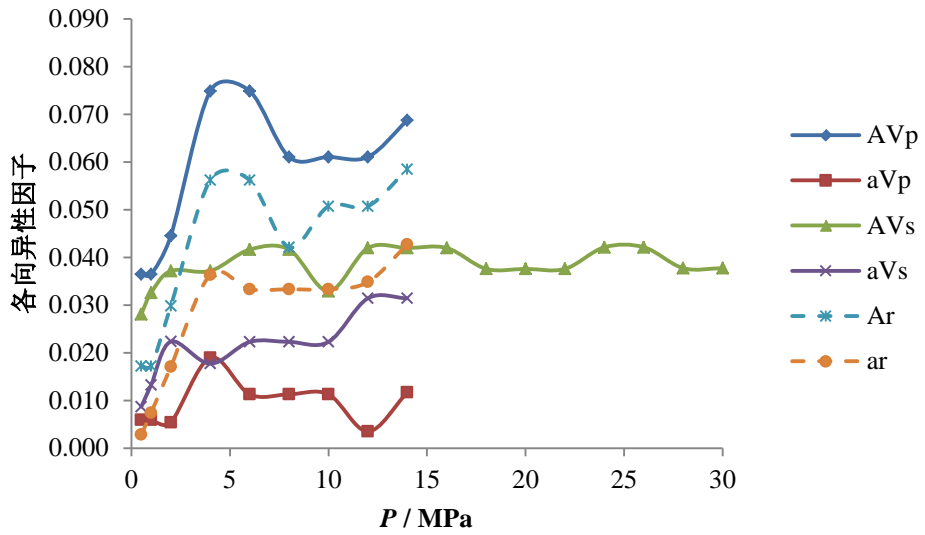
(c) W1



(d) W2



(e) X1



(f) G1

图 4.5 单轴加载条件下页岩波速及波速比各向异性特征

表 4.5 页岩波速及波速比各向异性随压力变化的特征信息

样品	承压范围 (MPa)	A(Vp)	a(Vp)	A(Vs)	a(Vs)	A(r)	a(r)
J1	0.5~35	$\frac{0.233\sim0.267}{0.253}$	$\frac{0.072\sim0.101}{0.088}$	$\frac{0.138\sim0.169}{0.150}$	$\frac{0.006\sim0.027}{0.016}$	$\frac{0.1\sim0.134}{0.121}$	$\frac{0.057\sim0.081}{0.073}$
J2	0.5~50	$\frac{0.198\sim0.227}{0.215}$	$\frac{0.045\sim0.088}{0.07}$	$\frac{0.081\sim0.106}{0.097}$	$\frac{0.004\sim0.016}{0.007}$	$\frac{0.112\sim0.144}{0.128}$	$\frac{0.049\sim0.087}{0.071}$
W1	0.5~20	$\frac{0.149\sim0.157}{0.151}$	$\frac{0.068\sim0.076}{0.072}$	$\frac{0.063\sim0.072}{0.068}$	$\frac{0.002\sim0.007}{0.002}$	$\frac{0.083\sim0.093}{0.089}$	$\frac{0.066\sim0.075}{0.07}$
W2	0.5~30	$\frac{0.141\sim0.149}{0.147}$	$\frac{0.069\sim0.078}{0.077}$	$\frac{0.087\sim0.092}{0.089}$	$\frac{0.02\sim0.026}{0.025}$	$\frac{0.093\sim0.102}{0.1}$	$\frac{0.084\sim0.092}{0.087}$
X1	0.5~30	$\frac{0.178\sim0.197}{0.185}$	$\frac{0.094\sim0.108}{0.098}$	$\frac{0.143\sim0.158}{0.149}$	$\frac{0.011\sim0.016}{0.013}$	$\frac{0.104\sim0.122}{0.11}$	$\frac{0.039\sim0.066}{0.054}$
G1	0.5~30	$\frac{0.036\sim0.075}{0.058}$	$\frac{0.004\sim0.019}{0.009}$	$\frac{0.028\sim0.042}{0.038}$	$\frac{0.009\sim0.031}{0.021}$	$\frac{0.017\sim0.058}{0.042}$	$\frac{0.003\sim0.043}{0.027}$

注：表中第一行为最小值~最大值，第二行为平均值。

4.2.3 无烟煤

由单轴加载条件下无烟煤波速的测量值可分别计算出纵横波速度(Vp、Vs)及波速比(r)的各向异性因子,结果如图4.6及表4.6所示。总体上,加载压力P在0.5MPa-15MPa范围内无烟煤A(Vp)介于0.039-0.121,a(Vp)介于0.002-0.089,A(Vs)介于0.076-0.18,a(Vs)介于0.014-0.069,A(r)介于0-0.106,a(r)介于0-0.082。可见,所测无烟煤的波速及波速比均呈现出一定的各向异性特征,且与砂岩、页岩的相比存在一定的差异性。

总体上,无烟煤纵波速度(Vp)及波速比(r)的各向异性因子(A、a)值明显小于对应页岩的,而与砂岩的相近。其横波速度(Vs)的各向异性因子A值明显大于砂岩的,而与页岩的相近;其Vs的a值明显大于对应页/砂岩的。可见,无烟煤纵波速度(Vp)及波速比(r)的各向异性强度明显比页岩的弱,而与砂岩相当;其横波速度(Vs)的各向异性强度明显比砂岩的大,且也不低于页岩的。总之,无烟煤波速各向异性特征的**最大突出特点**在于其具有非常高的横波速度(Vs)各向异性强度。综上,砂岩、页岩及无烟煤在波速及波速比各向异性特征方面存在显著的差异。

另外,多数无烟煤纵、横波速度的A值一般远大于相应a值(最高达8倍),表明无烟煤三个方向中有一个方向上的纵、横波速值均比其它两个方向上的要小很多。同样可归因于无烟煤发育的层理结构,垂直层理面方向上的波速值明显低于平行层理面两个正交方向上的波速值。但整体上无烟煤的这个特征较页岩的稍弱,表明页岩层理结构对其波速各向异性特征的影响更大。这是因为除了层理之外,煤中普遍发育有一定数量的正交或近似正交的(端、面)割理(裂隙)及大

量的微裂隙，在一定程度上削弱了层理对波速各向异性特征影响的强度。可见，**波速 A 值 >> a 值的特征**均可用于具有典型层理结构的无烟煤、页岩等岩性的弹性波判识；并且，对比分析波速 A 值与 a 值的相对大小也可为煤储层割理（裂隙）发育程度提供一种新的间接评价思路，即波速 A 与 a 值相差越大表明层理对煤波速各向异性的影响力越大，间接反映出垂直层理面上的割理越不发育。

随压力的变化规律：无烟煤波速及波速比各向异性特征也表现出一定的规律性。在破坏前的压力加载过程中，无烟煤 $A(V_p)$, $a(V_p)$, $A(V_s)$, $a(V_s)$, $A(r)$, $a(r)$ 整体上变化不明显，大都表现出微小的波动，不乏缓慢升高的趋势；仅部分样品（CJ1、CS1、CS3 及 CS4）的 $A(r)$, $a(r)$ 呈明显的缓慢减小的趋势。无烟煤波速及波速比各向异性因子的变化量普遍较砂岩的小，与页岩的相近或稍小。可见，其各向异性特征受加载压力的影响作用微弱。由上节波速分析可知，加载压力对无烟煤波速大小的影响作用普遍比对砂岩的弱，且与页岩的相近，所以无烟煤波速及波速比各向异性因子受加载压力的影响作用也相对小，无烟煤波速及波速比各向异性特征对加载压力普遍表现出较弱的敏感性，明显弱于砂岩，而与页岩的相当。

另外，CJ 系列无烟煤波速及波速比各向异性因子普遍比 CS 系列的稍小，且随压力的升高其变化量也明显小于 CS 系列的，甚至几乎没有发生变化。相比于 CS 系列，CJ 系列无烟煤波速及波速比各向异性整体上显示出对加载压力更弱的敏感性特征，归因于 CJ 系列无烟煤的波速大小对加载压力的敏感性比 CS 系列的相对偏弱。

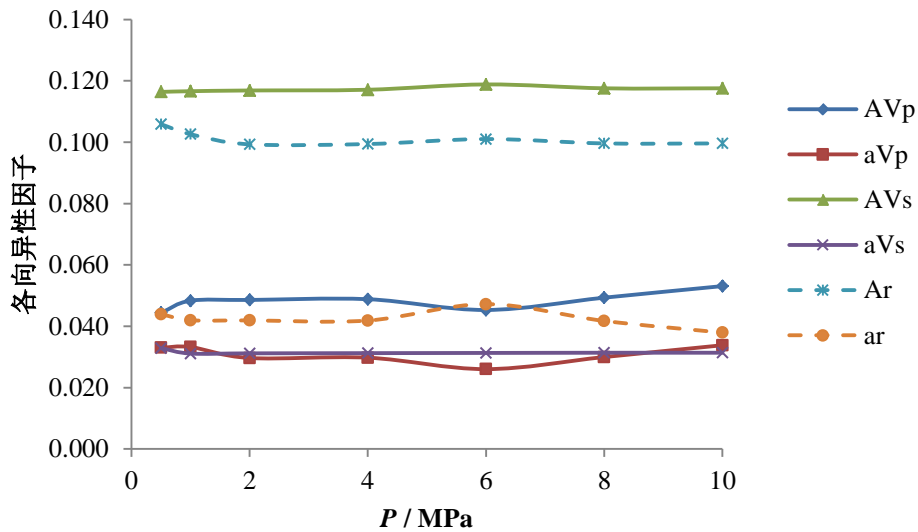
在加载压力范围内无烟煤的 V_s 各向异性因子 (A 、 a) 普遍较相应 V_p 的大，说明横波速度的各向异性特征要强于纵波速度的，可见横波速度 (V_s) 是一个可以用于检测无烟煤物性各向异性特征的敏感性参数，有别于砂/页岩的敏感性参数-纵波速度 (V_p)。

综上，相比于砂/页岩，无烟煤横波速度 (V_s) 各向异性特征显著，分析原因如下：

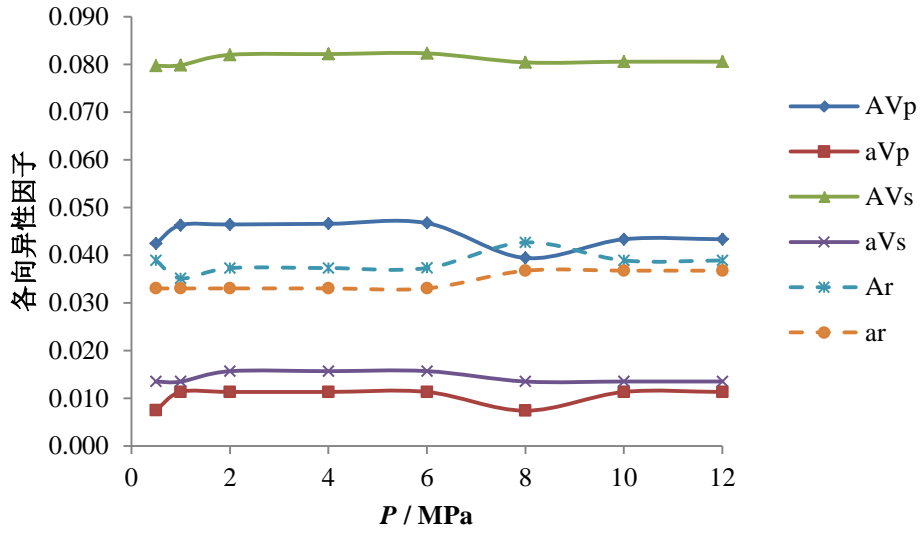
普遍认为薄层组合（层理）及裂缝/隙定向分布是引起岩石各向异性的主要因素[36, 37]。相比于纵波，横波在各向异性介质中的传播过程相对复杂，因为横波可在相同的传播路径上以不同的偏振方向传播。裂隙对横波的传播特性有较大的影响，横波速度对裂隙的空间分布变化是相当敏感的[38, 39]。裂隙的分布情况不同，横波的传播速度、偏振方向也会发生变化，主要体现在横波分裂现象，甚至会出现再分裂现象，使波的传播过程更加复杂[40]，它是岩石速度各向异性的重要特征。鉴于横波较之纵波对裂隙各向异性介质更为敏感[41]，且横波速度各向异性（尤其横波分裂现象）可以携带很多的裂缝相关信息[42]，比如在一定范围内，裂缝介质的横波速度各向异性程度随裂缝密度及裂缝宽度的增加而变大[43]，所以利用地震横波各向异性可以获得储层各向异性特征及裂缝发育、分布

的相关信息，对裂缝性油气藏勘探研究有着重要意义[40, 41, 44]。

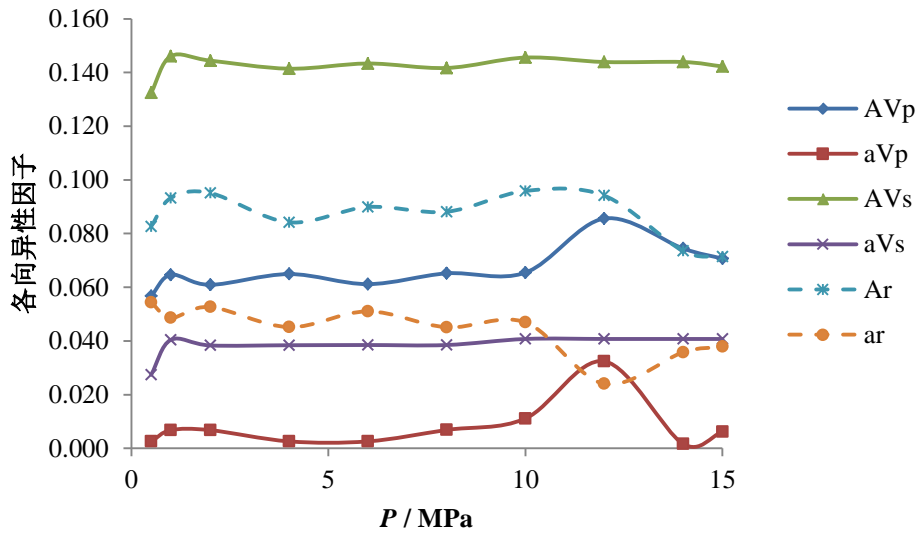
页岩层理发育，常被认为是横向各向同性介质[38]。而煤是一种松软的有机沉积岩，对应力具有很强的敏感性。除了成岩过程中形成的典型层理、割理结构外，伴随着后期多期次的构造运动煤岩中普遍发育有不同尺度的构造裂隙，包括一套或数套定向排列的裂隙/缝、节理以及煤基质内大量的微裂隙[32]。可见层理结构是导致砂/页岩各向异性的主要诱因，而煤除了层理结构之外普遍发育的大量（微）裂隙结构是其各向异性的另一个主控因素，所以煤层可以视为一种裂缝性储层。因为横波对裂缝各向异性介质具有很强的敏感性，所以具有大量（微）裂隙结构发育的无烟煤的横波速度（ V_s ）各向异性特征比其纵波速度（ V_p ）的要显著得多。虽然横波较之纵波对各向异性介质更为敏感，但前述实验结果已经表明不具复杂裂隙结构的砂/页岩纵波速度（ V_p ）各向异性程度比横波速度（ V_s ）的高。也已有实验发现由岩石层理结构引起的各向异性与岩石内部微裂隙定向分布引起的各向异性是有区别的[38]。综上所述，纵波速度（ V_p ）是检测砂/页岩各向异性特征的敏感性参数，而横波速度（ V_s ）是检测无烟煤各向异性特征的敏感性参数，这也为进一步研究利用地震横波各向异性特征对煤层气储层裂隙发育情况进行勘探提供了实验与理论依据。



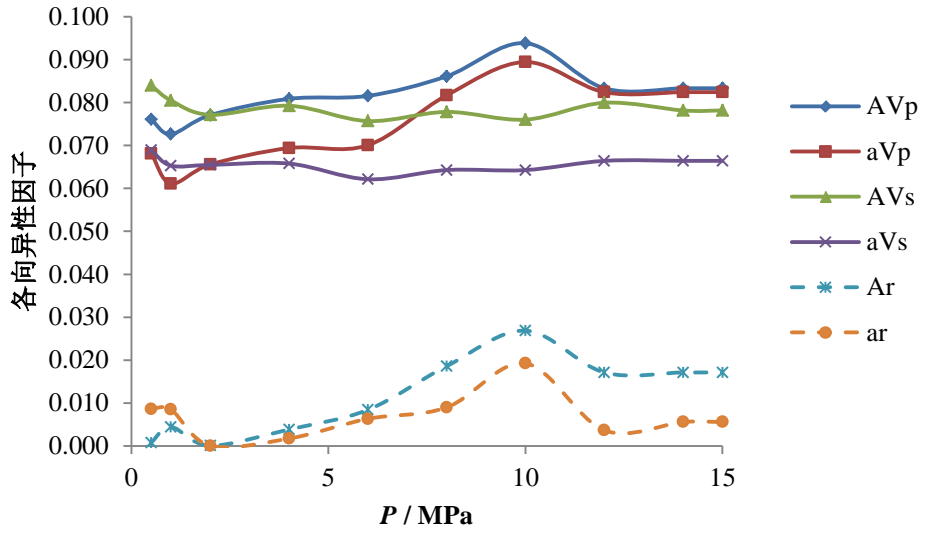
(a) CJ1



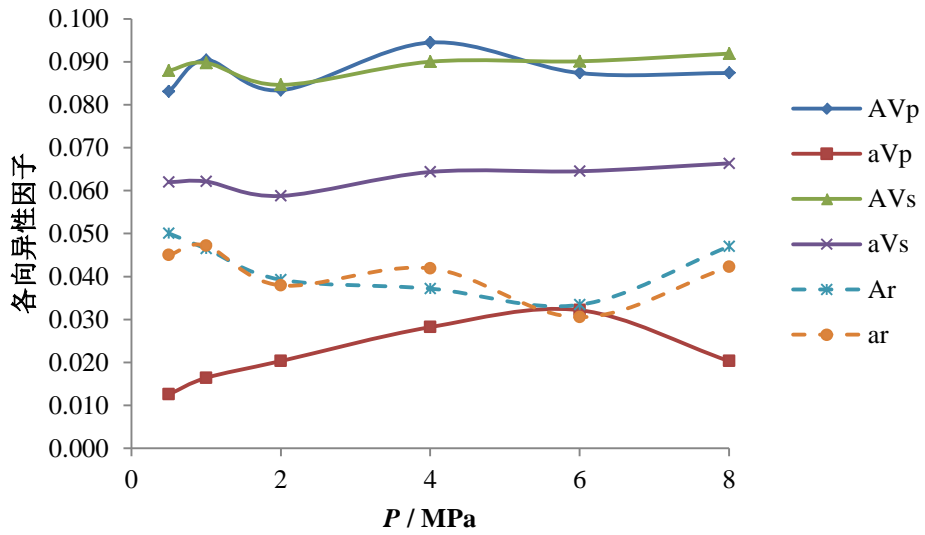
(b) CJ2



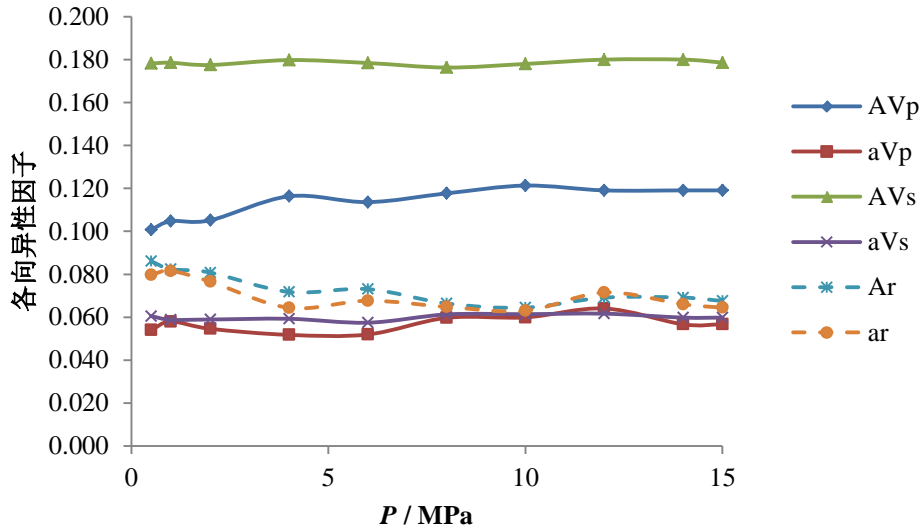
(c) CS1



(d) CS2



(e) CS3



(f) CS4

图 4.6 单轴加载条件下无烟煤波速及波速比各向异性特征

表 4.6 无烟煤波速及波速比各向异性随压力变化的特征信息

样品	承压范围 (MPa)	A(Vp)	a(Vp)	A(Vs)	a(Vs)	A(r)	a(r)
CJ1	0.5~10	$\frac{0.044\sim0.053}{0.048}$	$\frac{0.026\sim0.034}{0.031}$	$\frac{0.116\sim0.119}{0.117}$	$\frac{0.031\sim0.033}{0.031}$	$\frac{0.099\sim0.106}{0.101}$	$\frac{0.038\sim0.047}{0.042}$
CJ2	0.5~12	$\frac{0.039\sim0.047}{0.044}$	$\frac{0.007\sim0.011}{0.01}$	$\frac{0.08\sim0.082}{0.081}$	$\frac{0.014\sim0.016}{0.014}$	$\frac{0.035\sim0.043}{0.038}$	$\frac{0.033\sim0.037}{0.034}$
CS1	0.5~15	$\frac{0.057\sim0.086}{0.067}$	$\frac{0.002\sim0.032}{0.008}$	$\frac{0.132\sim0.146}{0.143}$	$\frac{0.027\sim0.041}{0.038}$	$\frac{0.071\sim0.096}{0.087}$	$\frac{0.024\sim0.054}{0.044}$
CS2	0.5~15	$\frac{0.073\sim0.094}{0.082}$	$\frac{0.061\sim0.089}{0.075}$	$\frac{0.076\sim0.084}{0.079}$	$\frac{0.062\sim0.069}{0.066}$	$\frac{0\sim0.027}{0.011}$	$\frac{0\sim0.019}{0.007}$
CS3	0.5~8	$\frac{0.083\sim0.094}{0.088}$	$\frac{0.013\sim0.032}{0.022}$	$\frac{0.085\sim0.092}{0.089}$	$\frac{0.059\sim0.066}{0.063}$	$\frac{0.033\sim0.05}{0.042}$	$\frac{0.031\sim0.047}{0.041}$
CS4	0.5~15	$\frac{0.101\sim0.121}{0.114}$	$\frac{0.052\sim0.064}{0.057}$	$\frac{0.176\sim0.18}{0.179}$	$\frac{0.057\sim0.062}{0.06}$	$\frac{0.064\sim0.086}{0.073}$	$\frac{0.063\sim0.082}{0.07}$

注：表中第一行为最小值~最大值，第二行为平均值。

4.3 小结

在获得单轴加载条件下各岩样三个正交方向上纵、横波速度测试结果的基础上，对三类岩石的弹性波速度大小、各向异性及压力敏感性特征进行了对比分析与讨论。可以获得如下主要结论：

(1) 砂岩、页岩、无烟煤各方向上 V_p 、 V_s 及波速比均随 P 的升高呈现明显的阶段性增加的特征。在压力升高初期波速增加速率较快，随后增加速率逐渐变缓并趋于一个稳定的最大值（理论上的岩石骨架波速）。这与单轴加载条件下

岩石屈服破坏前的应力-应变过程相一致。无烟煤波速相对最小。与砂岩相比，页岩、无烟煤波速对加载压力的敏感性减弱。三类储层岩石中 V_p 对加载压力的敏感性均比 V_s 的强， V_p 可以用来作为预测地应力状态的一个较好的弹性波指标。

(2) 在破坏前的压力加载过程中，所测砂岩、页岩、无烟煤的波速及波速比均显示出一定的各向异性，且各向异性强度整体上均呈减弱并趋于稳定的变化趋势。所测页岩的波速及波速比各向异性特征均比较明显，普遍较砂岩的强，无烟煤纵波速度(V_p)及波速比的各向异性强度明显比页岩的弱，而横波速度(V_s)各向异性强度非常高。但页岩、无烟煤波速及波速比各向异性对加载压力的敏感性偏弱。

(3) 砂岩、页岩纵波速度的各向异性特征要强于横波速度的，而无烟煤横波速度的各向异性特征要强于纵波速度的。因为横波较之纵波对裂隙各向异性介质更为敏感。层理结构是导致砂/页岩各向异性的主要诱因，而煤除了层理结构之外普遍发育的大量（微）裂隙结构是其各向异性的另一个主控因素。

5 单轴受载岩石的动弹性力学参数及其各向异性特征

根据岩石弹性理论, 由岩石密度 ρ 及纵横波速度 (V_p 和 V_s) 可分别求出岩样各方向上对应每个加载压力下的其它五种动态弹性力学参数的值, 即拉梅常数 (λ)、剪切模量 (μ)、泊松比 (ν)、体积模量 (K) 和杨氏模量 (E)。本章主要对三类储层岩石的这五种动弹性力学参数及其随单向加载压力的变化特征进行分析与讨论。

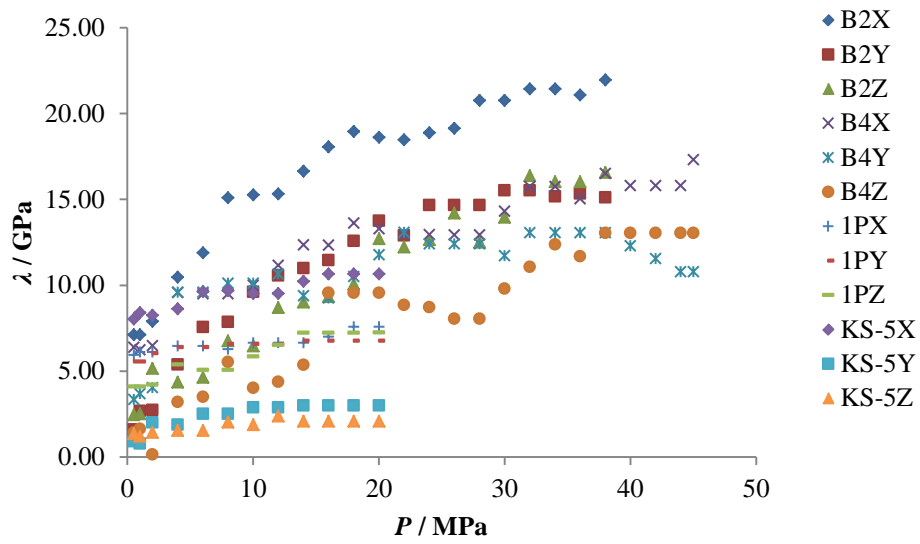
5.1 加载压力对动弹性力学参数大小的影响特征

5.1.1 砂岩

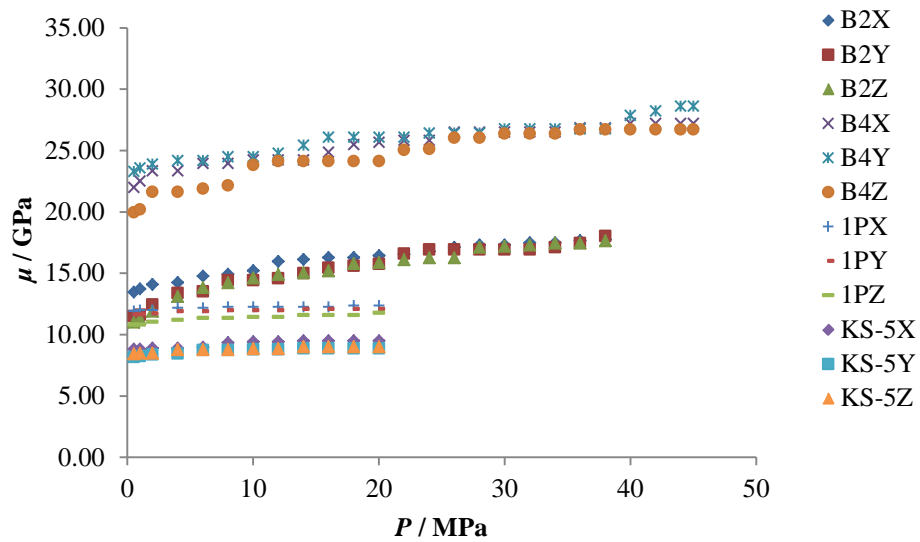
基于前述所测纵横波速度 (V_p 、 V_s) 计算获得单轴加载条件下砂岩样品各方向上的五种动态弹性力学参数随加载压力 (P) 变化的结果, 如图 5.1 所示。初始加载压力 (0.5MPa) 下所测砂岩拉梅常数 (λ) 介于 0-10GPa, 剪切模量 (μ) 介于 5-25GPa, 泊松比 (ν) 介于 0-0.25, 体积模量 (K) 介于 5-25GPa, 杨氏模量 (E) 介于 15-50GPa。在破坏前的承载压力范围内 (0.5MPa--45MPa), 总体上它们均随着加载压力的升高呈增大的趋势, λ 介于 0-22GPa, 剪切模量 (μ) 介于 5-30GPa, 泊松比 (ν) 介于 0-0.28, 体积模量 (K) 介于 5-36GPa, 杨氏模量 (E) 介于 15-66GPa。

随着加载压力的升高, 砂岩各方向上 λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E 均呈现阶段性增加的特征, 前期升高速度较快, 后期减缓并逐渐趋于稳定, 与波速的变化特征较一致。同样归因于加载压力作用下岩石孔裂隙逐渐被压缩并趋于闭合, 其动弹性力学参数均逐渐升高并趋于岩石骨架的固有弹性力学性质。

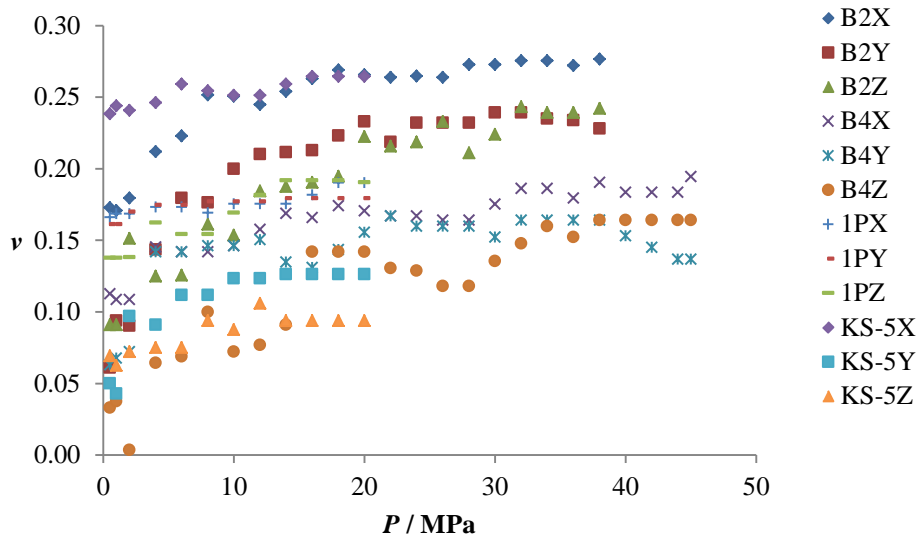
总体上, 随加载压力的升高 λ 、 K 、 E 增加速率普遍较大, μ 、 ν 的相对较小, 尤其是 ν (除去低压的失真异常数据) 呈波动性缓慢增加的趋势。可见砂岩的 λ 、 K 、 E 对加载压力具有较强的敏感性, μ 、 ν 敏感性稍弱。另外, 相比于较致密坚硬的 B2、B4, 杂砂岩 1P 及 KS-5 的弹性力学强度 (λ 、 μ 、 K 和 E) 普遍较低, 且表现出较弱的应力敏感性。



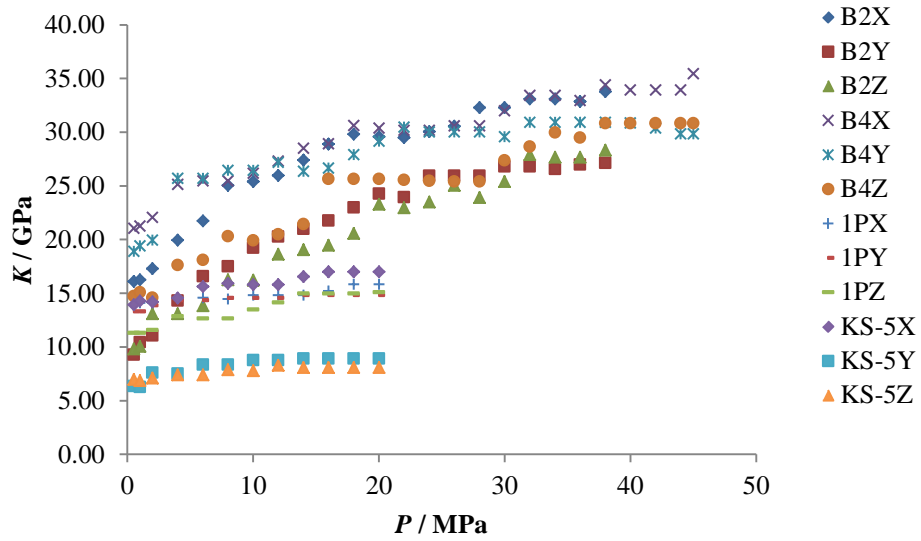
(a) λ - P



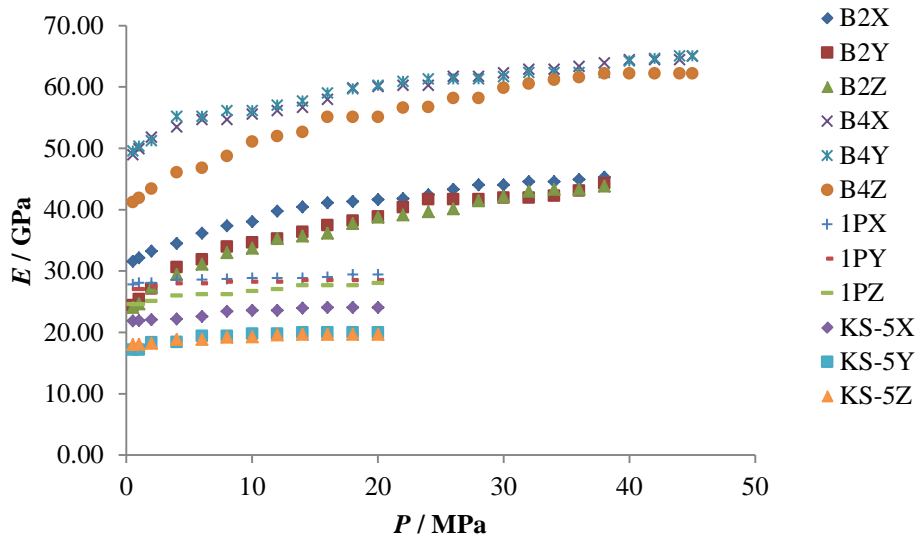
(b) μ - P



(c) ν - P



(d) K - P



(e) E - P

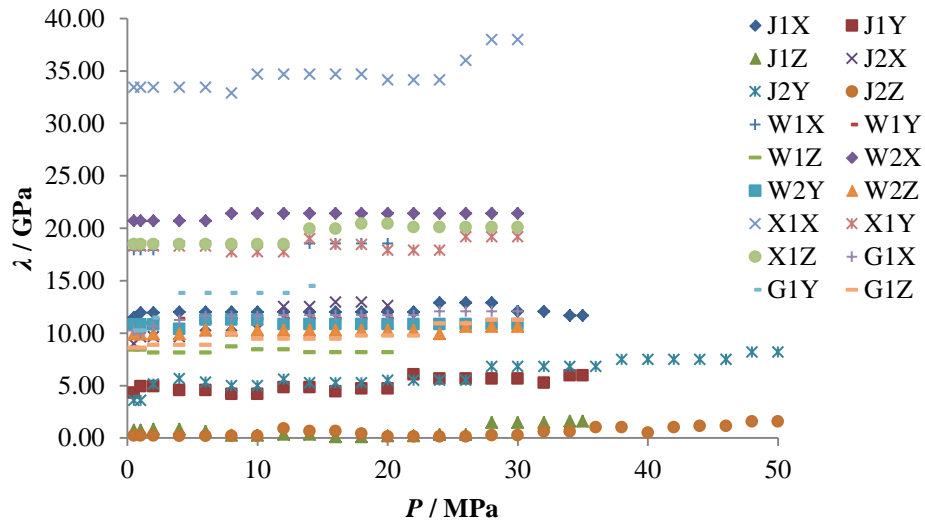
图 5.1 单轴加载条件下砂岩动弹性力学参数结果

5.1.2 页岩

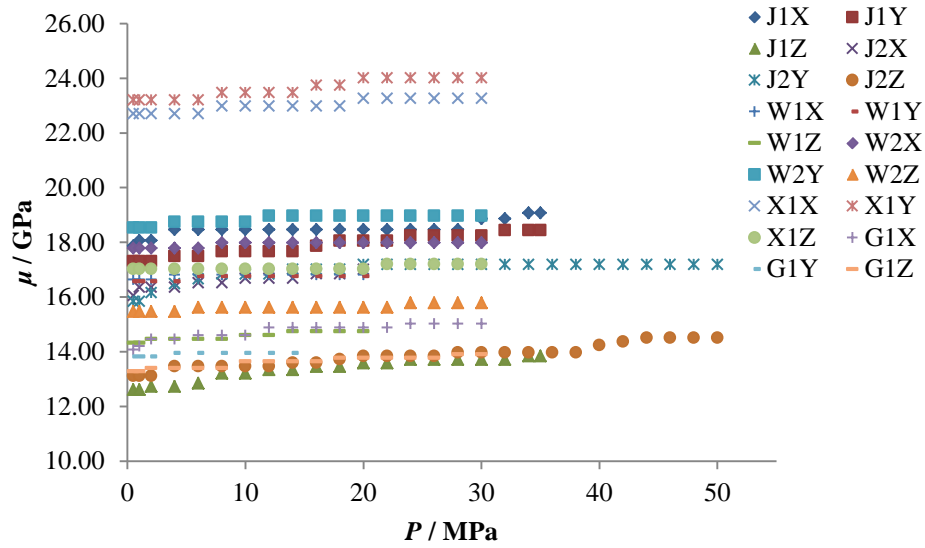
基于前述所测纵横波速度 (V_p 、 V_s) 计算获得单轴加载条件下页岩样品各方向上的五种动态弹性力学参数随加载压力 (P) 变化的结果, 如图 5.2 所示。初始加载压力 (0.5MPa) 下所测页岩拉梅常数 (λ) 介于 0-35GPa, 剪切模量 (μ) 介于 12-24GPa, 泊松比 (ν) 介于 0-0.3, 体积模量 (K) 介于 8-50GPa, 杨氏模量 (E) 介于 25-60GPa。在破坏前的承载压力范围内 (0.5MPa--50MPa), 总体上它们均随着加载压力的升高呈增大的趋势, λ 介于 0-40GPa, 剪切模量 (μ) 介于 12-25GPa, 泊松比 (ν) 介于 0-0.31, 体积模量 (K) 介于 8-54GPa, 杨氏模量 (E) 介于 25-61GPa。

随着加载压力的升高, 页岩各方向上 λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E 均呈缓慢增加并逐渐趋于稳定的特征, 与波速的变化特征较一致。同样可归因于加载压力对页岩的压实作用。与砂岩相比, 页岩 λ 、 K 均值明显偏高, ν 、 E 稍偏高, μ 相近; 但在承载压力范围内 (0.5MPa--50MPa) 页岩各方向上 λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E 随加载压力的变化速率普遍较小, 加载压力对动弹性力学参数的影响作用明显减弱, 页岩动弹性力学参数对加载压力普遍显示出较弱的敏感性特征, 且与具有较低密度的砂岩 (1P 及 KS-5) 的相类似。整体上, 砂岩动弹性力学参数对加载压力的敏感性比相应页岩的强, 与两者波速的对比特征相一致。

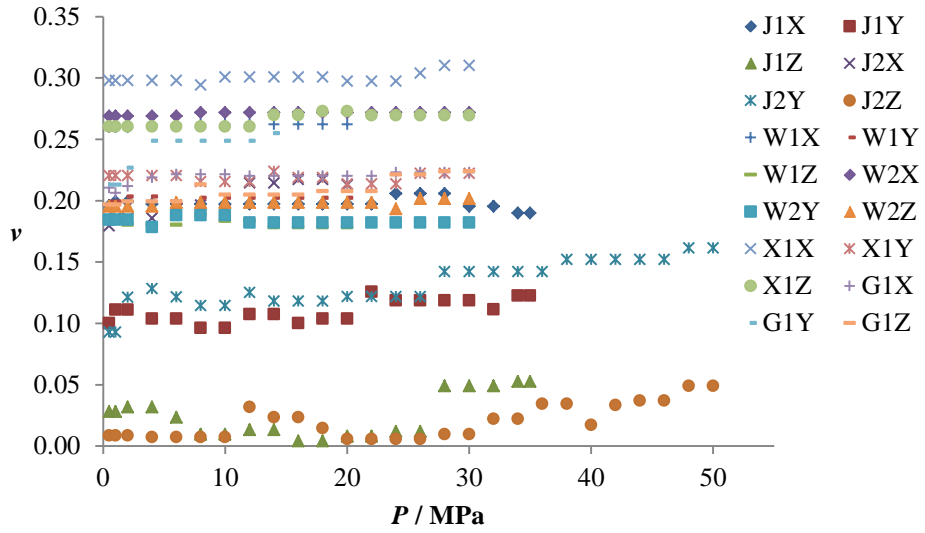
总体上, 随加载压力的升高页岩 λ 、 K 、 E 的增加速率普遍较大, μ 、 ν 的相对较小, 尤其是 ν (除去低压的失真异常数据) 呈波动性缓慢增加的趋势。可见页岩的 λ 、 K 、 E 对加载压力具有较强的敏感性, μ 、 ν 敏感性稍弱。



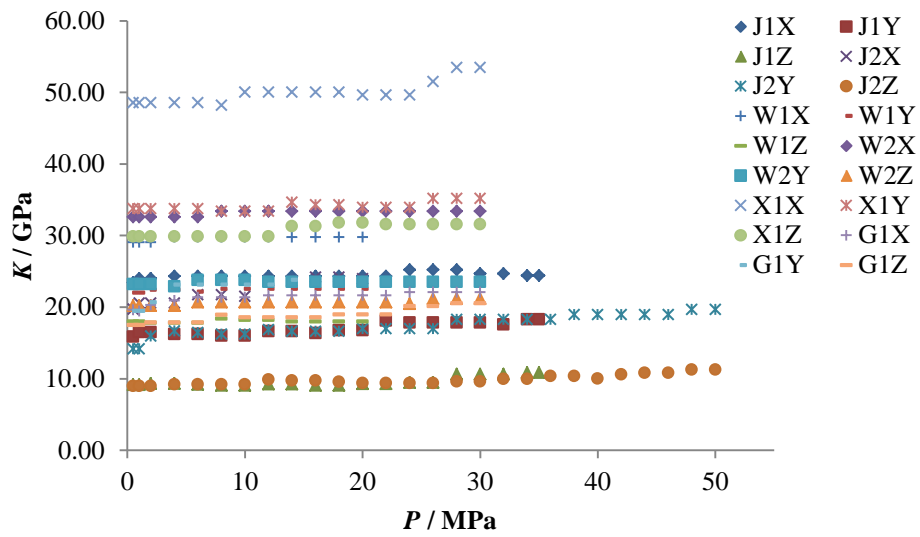
(a) λ - P



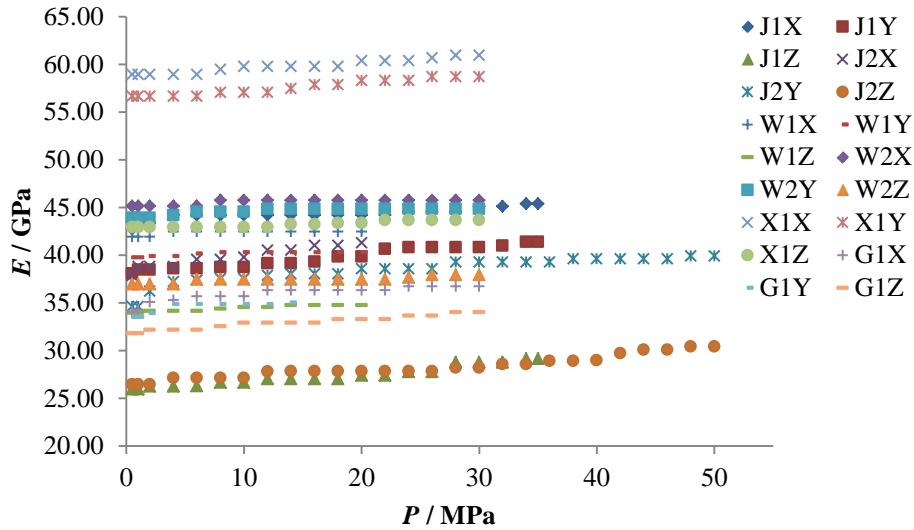
(b) μ - P



(c) ν - P



(d) K - P



(e) $E-P$

图 5.2 单轴加载条件下页岩动弹性力学参数结果

5.1.3 无烟煤

基于前述所测纵横波速度 (V_p 、 V_s) 计算获得单轴加载条件下无烟煤样品各方向上的五种动态弹性力学参数随加载压力 (P) 变化的结果, 如图 5.3 所示。初始加载压力 (0.5MPa) 下所测无烟煤拉梅常数 (λ) 介于 3-5GPa, 剪切模量 (μ) 介于 1.4-2.8GPa, 泊松比 (ν) 介于 0.25-0.37, 体积模量 (K) 介于 4.5-6.3GPa, 杨氏模量 (E) 介于 4-7GPa。在破坏前的承载压力范围内 (0.5MPa--15MPa), 总体上它们均随着加载压力的升高呈增大的趋势, λ 介于 3-5.4GPa, 剪切模量 (μ) 介于 1.4-2.9GPa, 泊松比 (ν) 介于 0.25-0.37, 体积模量 (K) 介于 4.5-7GPa, 杨氏模量 (E) 介于 4-7.3GPa。

随着加载压力的升高, 无烟煤各方向上 λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E 均呈缓慢增加并逐渐趋于稳定的特征, 与波速的变化特征较一致。同样可归因于加载压力对无烟煤样的压实作用。与砂/页岩相比, 无烟煤 λ 、 μ 、 K 和 E 值均急剧下降, 而 ν 普遍偏高。但在承载压力范围内 (0.5MPa--15MPa) 无烟煤各方向上 λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E 随加载压力的变化速率又进一步降低, 远小于砂/页岩的。加载压力对无烟煤动弹性力学参数的影响作用相对最小, 无烟煤动弹性力学参数对加载压力普遍显示出微弱的敏感性特征。

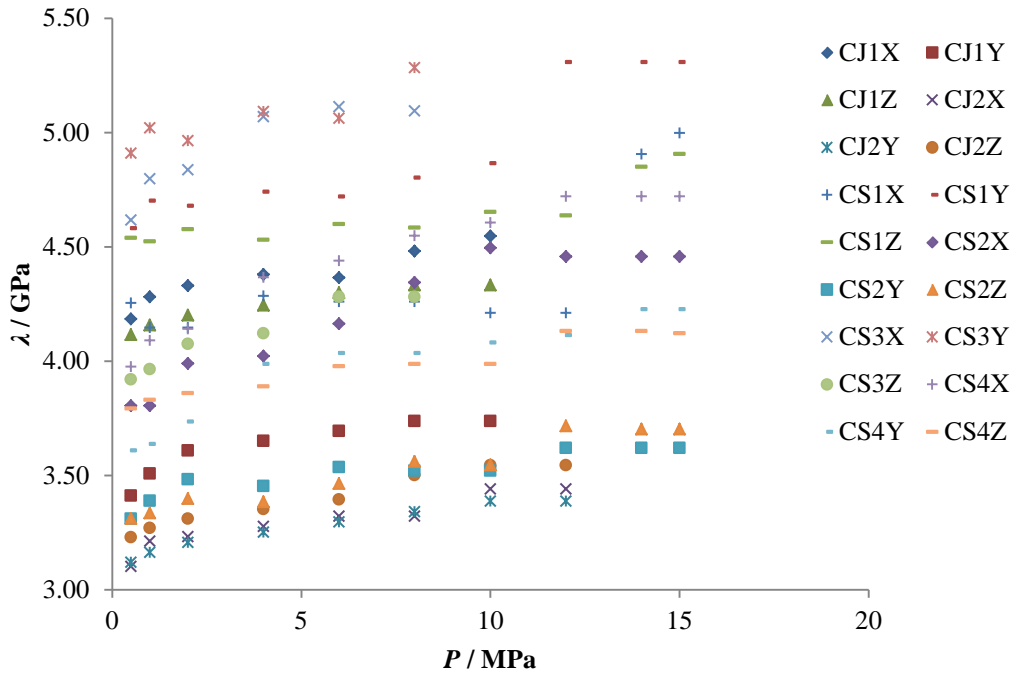
同样, 随加载压力的升高无烟煤 λ 、 K 、 E 的增加速率相对 μ 、 ν 的大, 尤其是 ν (除去低压的失真异常数据) 呈波动性的极缓慢增加的趋势。可见无烟煤的 λ 、 K 、 E 对加载压力具有较强的敏感性, μ 、 ν 敏感性稍弱。

综合对比砂岩、页岩、无烟煤的动弹性力学参数结果, 可以总结如下规律:

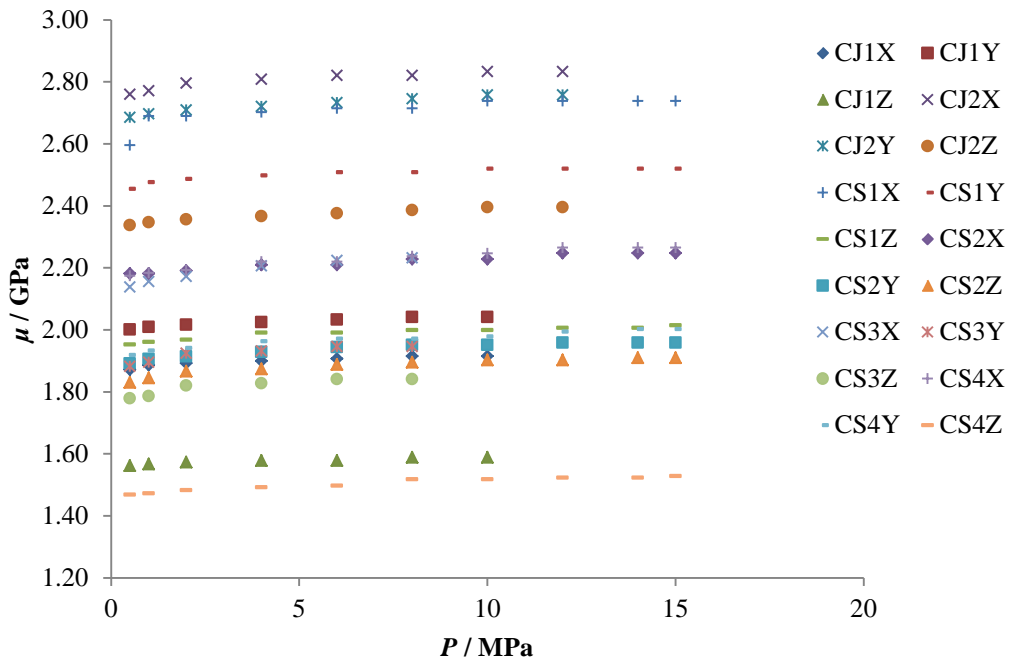
1) 整体上, 页岩动弹性力学参数普遍较砂岩的高; 无烟煤的 λ 、 μ 、 K 和 E 均是相对最小的, 但 ν 是相对最大的;

2) 砂岩、页岩、无烟煤的动弹性力学参数对加载压力的敏感性依次减弱;

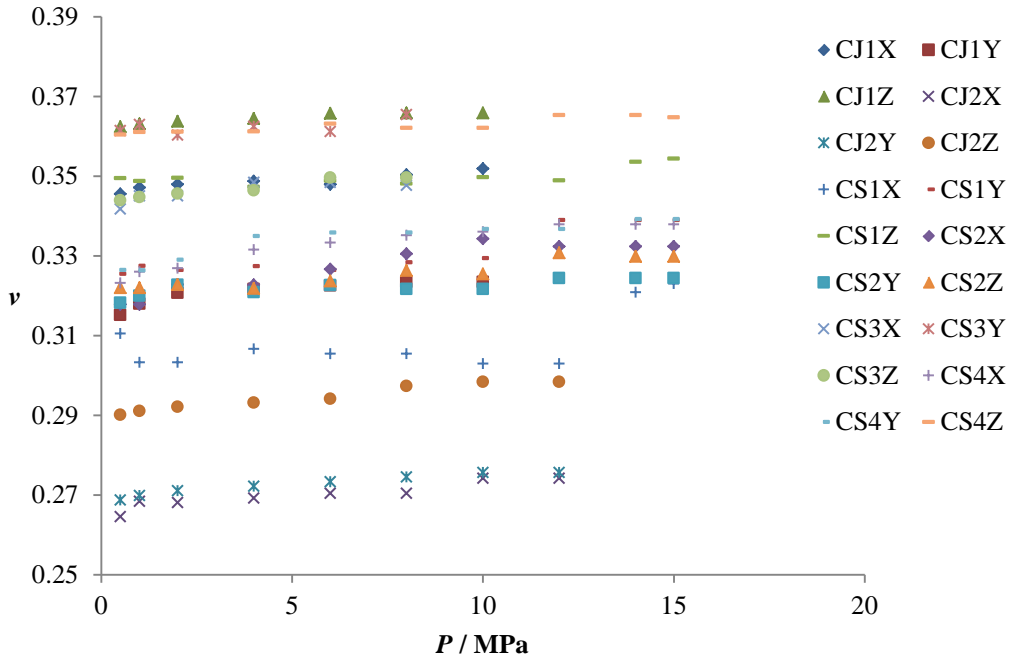
3) 三类储层岩石的 λ 、 K 、 E 对加载压力的敏感性均比 μ 、 ν 的相对强。



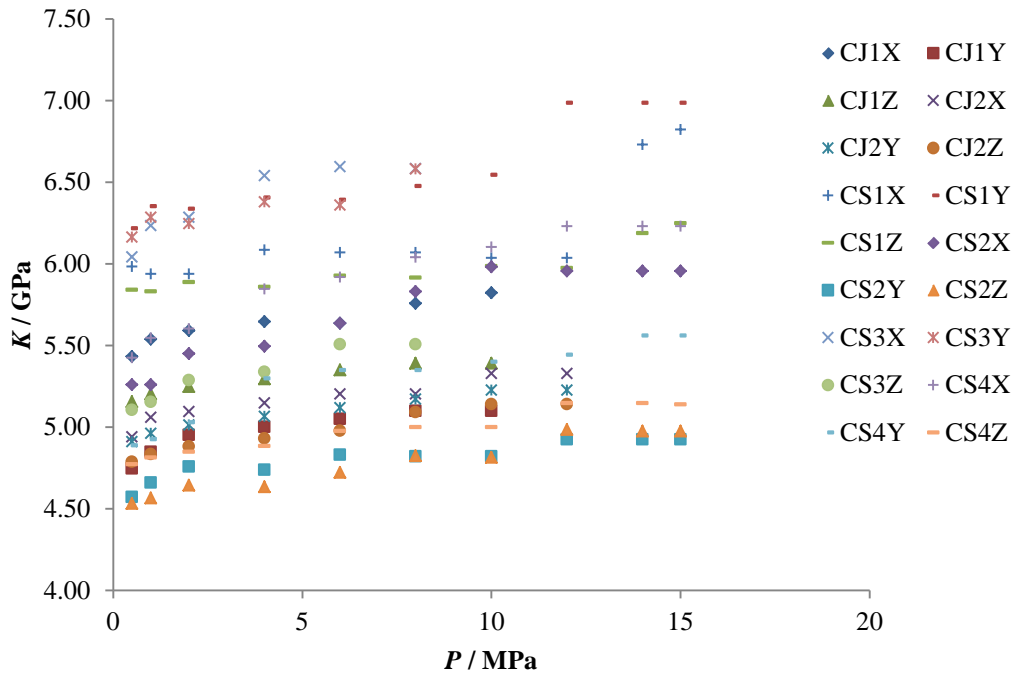
(a) λ - P



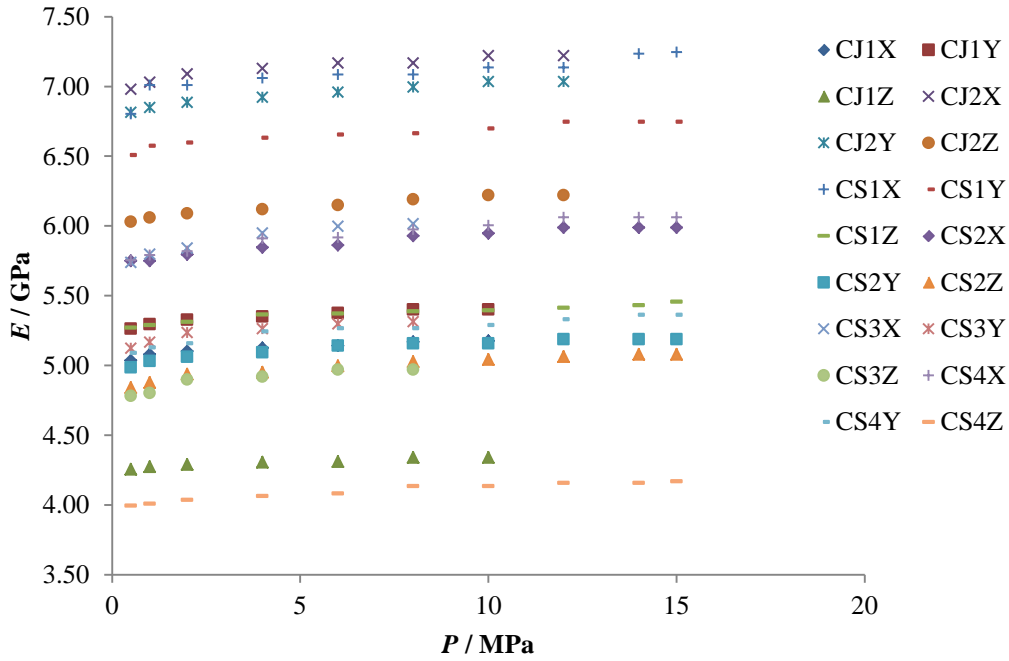
(b) μ - P



(c) ν - P



(d) K - P



(e) $E-P$

图 5.3 单轴加载条件下无烟煤动弹性力学参数结果

5.2 加载压力对动弹性力学参数各向异性的影响特征

本节依然采用前述已经定义的一对各向异性因子 (A 和 a , 见式 4.1) 对三类岩样动弹性力学参数 (λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E) 各向异性特征进行讨论。

5.2.1 砂岩

由前述获得的单轴加载条件下砂岩动弹性力学参数结果可分别计算出其各向异性因子, 结果如图 5.4 所示。总体上, 加载压力 P 在 0.5MPa-45MPa 范围内砂岩 $A(\lambda)$ 介于 0-0.98, $a(\lambda)$ 介于 0-0.91, $A(\mu)$ 介于 0-0.16, $a(\mu)$ 介于 0-0.19, $A(\nu)$ 介于 0-0.97, $a(\nu)$ 介于 0-0.83, $A(K)$ 介于 0-0.52, $a(K)$ 介于 0-0.57, $A(E)$ 介于 0-0.24, $a(E)$ 介于 0-0.23。可见, 所测砂岩的动弹性力学参数 (λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E) 均显示出一定的各向异性特征, 各向异性因子 A 与对应 a 值相差不大, 均普遍小于 1, 且随加载压力的变化而变化。

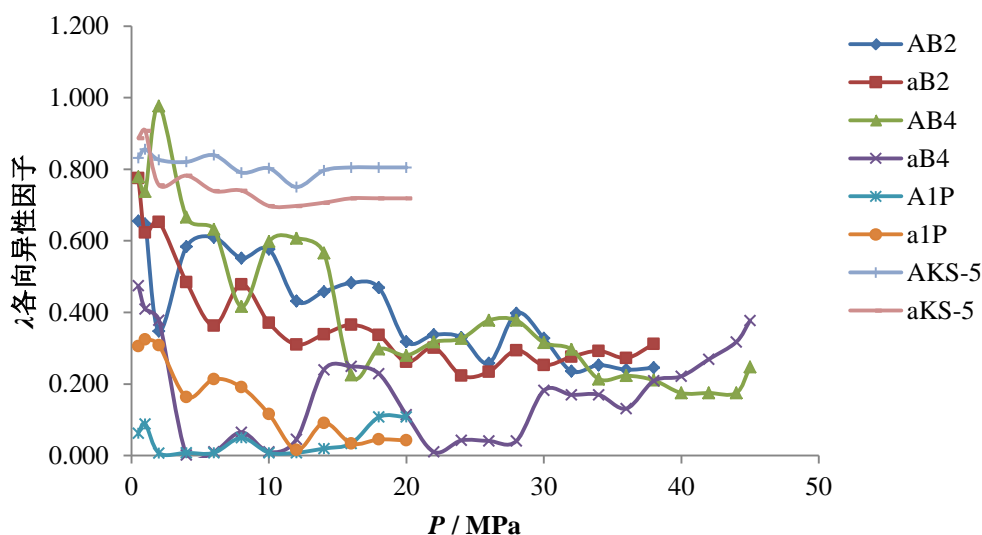
随压力的变化规律: 砂岩的动弹性力学参数各向异性特征规律性明显。在破坏前的压力加载过程中, 砂岩 (尤其是纯砂岩 B2、B4) 动弹性力学参数的 A 、 a 值整体上均呈逐渐减小并趋于稳定的特征。同样归因于随着加载压力的逐渐升高, 三个方向上的孔裂隙空间均趋于压缩或闭合, 结构差异减小, 这样在三个方向上由孔裂隙结构差异引起的动弹性力学参数的差异性也逐渐减小, 并且最终将趋于一个稳定的砂岩骨架固有的各向异性状态。然而, 图 5.4 结果显示砂岩动弹性力学参数各向异性因子随着压力的升高并非呈现理想的单调递减趋势, 变化过程普遍具有一定的波动性。

另外, 对于岩性及结构复杂的砂岩 (尤其是杂砂岩 1P、KS-5), 随压力的升

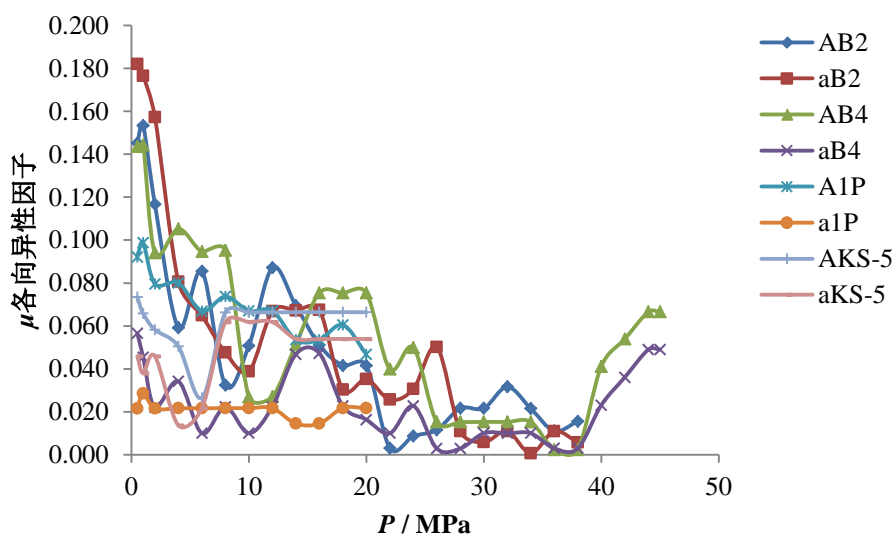
高其动弹性力学参数各向异性因子的变化量普遍较小，甚至几乎没有发生变化，整体上显示出对加载压力较弱的敏感性特征。同样归因于杂砂岩波速对加载压力偏弱的敏感性。

在加载压力范围内砂岩 λ 、 ν 各向异性程度普遍较高， K 、 E 、 μ 的相对较小并依次减弱，且它们的各向异性因子对加载压力的敏感性强度也具有相同的规律。

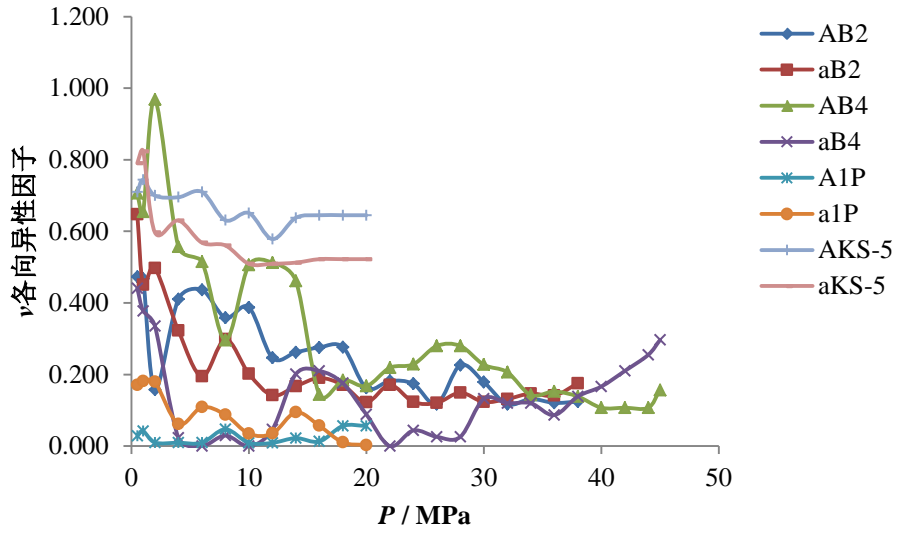
总体上，砂岩动弹性力学参数各向异性随加载压力的变化规律与其波速的相似，且砂岩波速各向异性程度与 E 、 μ 的相近。



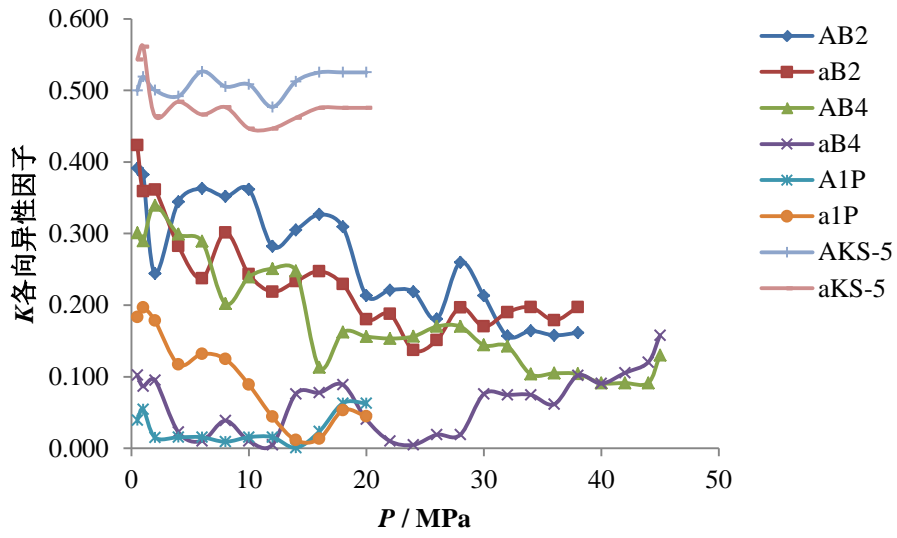
(a) λ



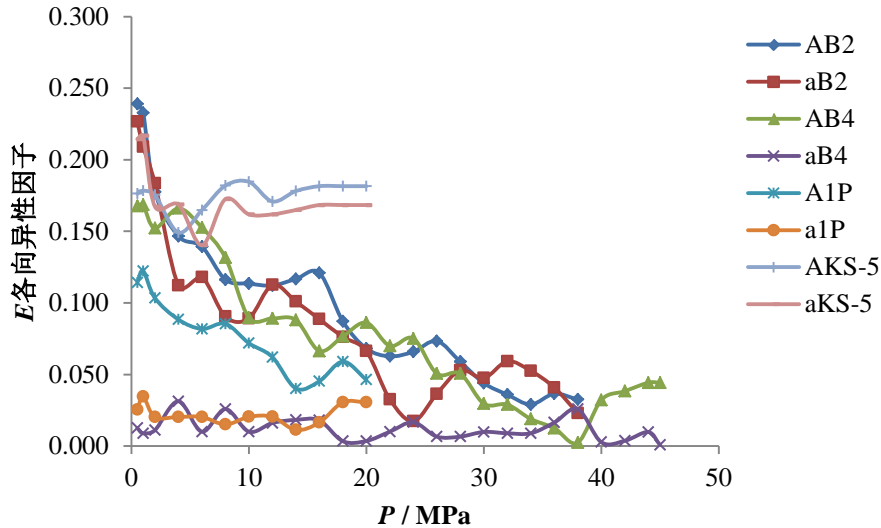
(b) μ



(c) ν



(d) κ



(e) E

图 5.4 单轴加载条件下砂岩动弹性力学参数各向异性特征

5.2.2 页岩

由前述获得的单轴加载条件下页岩动弹性力学参数结果可分别计算出其各向异性因子，结果如图 5.5 所示。总体上，加载压力 P 在 0.5MPa-50MPa 范围内页岩 $A(\lambda)$ 介于 0.16-1, $a(\lambda)$ 介于 0-0.65, $A(\mu)$ 介于 0.05-0.31, $a(\mu)$ 介于 0-0.06, $A(\nu)$ 介于 0.07-0.98, $a(\nu)$ 介于 0.01-0.52, $A(K)$ 介于 0.1-0.63, $a(K)$ 介于 0-0.35, $A(E)$ 介于 0.06-0.41, $a(E)$ 介于 0.01-0.13。可见，所测页岩的动弹性力学参数 (λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E) 均显示出一定的各向异性特征，各向异性因子值普遍小于 1，且随加载压力的变化而变化。

和砂岩相比，页岩各动弹性力学参数的 A 值均稍偏高， a 值均稍偏低，即： $A(\text{页}) \geq A(\text{砂}) \approx a(\text{砂}) > a(\text{页})$ 。表明砂岩与页岩的对应动弹性力学参数整体上处于一个相近的各向异性强度水平，且砂岩各动弹性力学参数在三个方向上存在两个相近的低值（即最小值 \approx 中间值），而页岩各动弹性力学参数在三个方向上存在一个较明显的最小值，归因于页岩典型的层理结构特征。

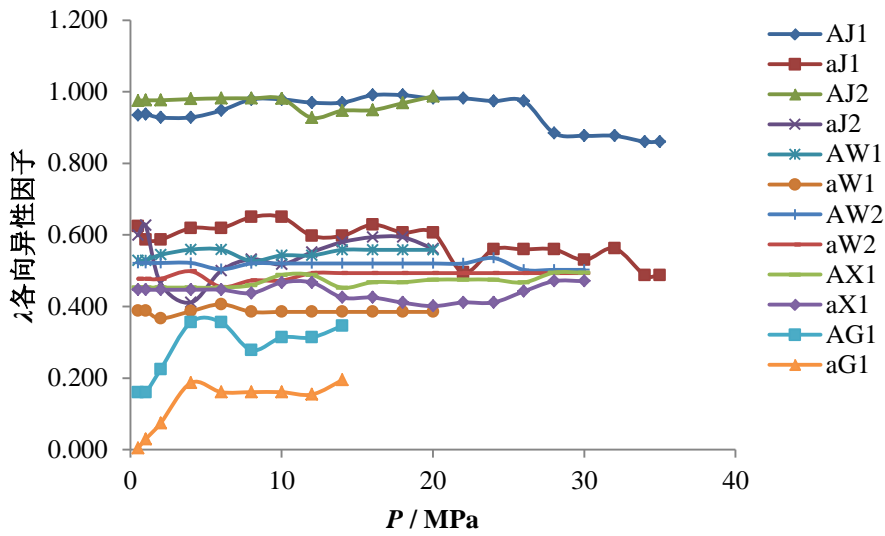
随压力的变化规律：页岩动弹性力学参数各向异性特征也表现出一定的规律性。在破坏前的压力加载过程中，页岩动弹性力学参数的 A 、 a 值整体上变化不显著，大都表现出微小的波动；仅纯页岩 J1 动弹性力学参数的各向异性因子呈较明显的缓慢减小的趋势。相比于砂岩，页岩动弹性力学参数的 A 、 a 值随加载压力的变化率普遍较小，各向异性特征受加载压力的影响明显偏小，即页岩动弹性力学参数各向异性特征对加载压力普遍表现出较弱的敏感性。同样归因于页岩波速对加载压力的弱敏感性。

另外，对于岩性及结构复杂的杂页岩（W1、W2 及 X1），随压力的升高其动弹性力学参数各向异性因子的变化量非常小，甚至几乎没有发生变化。相比于 J1 等纯页岩，其动弹性力学参数各向异性整体上显示出对加载压力更弱的敏感

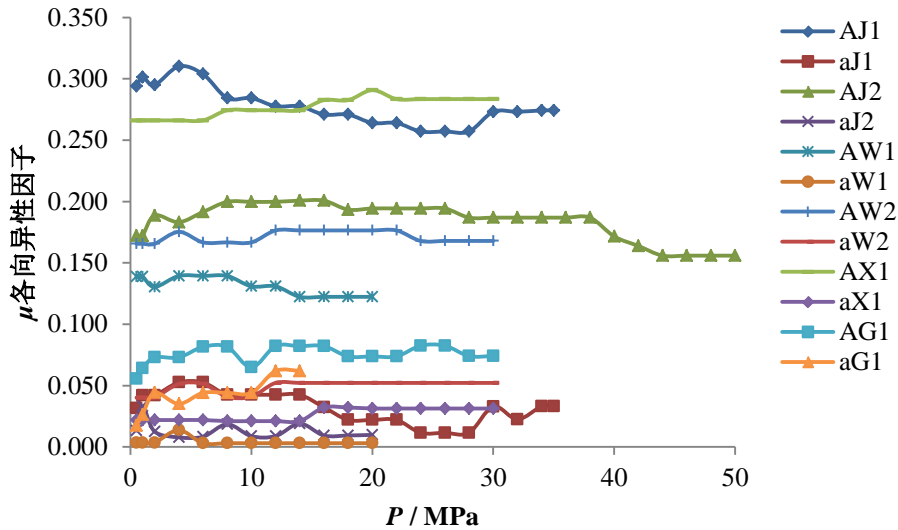
性特征，同样归因于杂页岩波速对加载压力的敏感性相对偏弱。

在加载压力范围内页岩 λ 、 ν 各向异性程度普遍较高， K 、 E 、 μ 的相对较小并依次减弱；且其 λ 、 ν 的各向异性因子对加载压力的敏感性相对较强， K 的次之， E 、 μ 的相对最小。

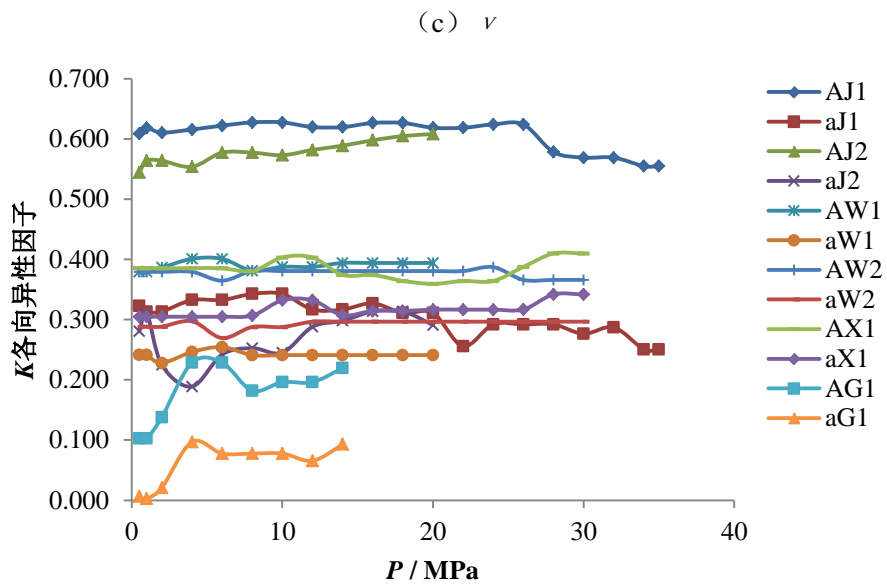
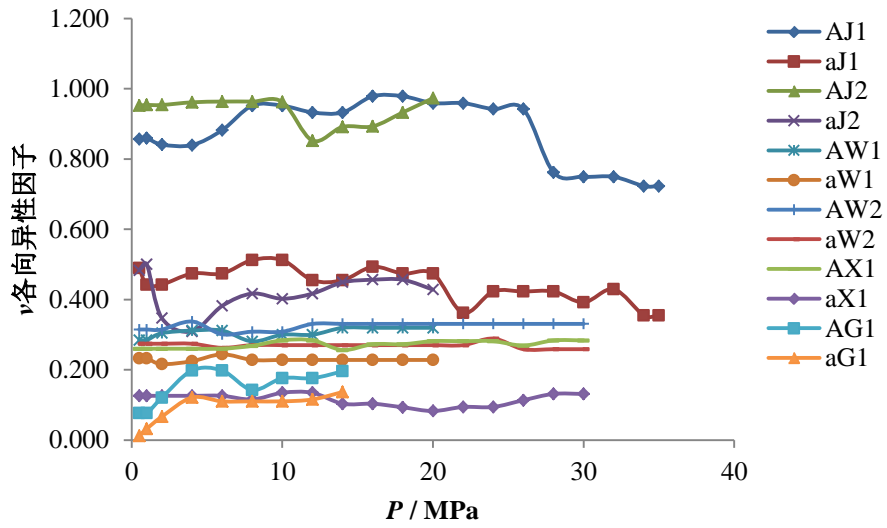
总体上，页岩动弹性力学参数各向异性随加载压力的变化规律与其波速的相似，但不具有“ A 值 \gg a 值”的特征，可见利用弹性波速度各向异性特征来判识页岩层理结构具有更好的优越性。页岩波速各向异性程度与 E 、 μ 的相近。

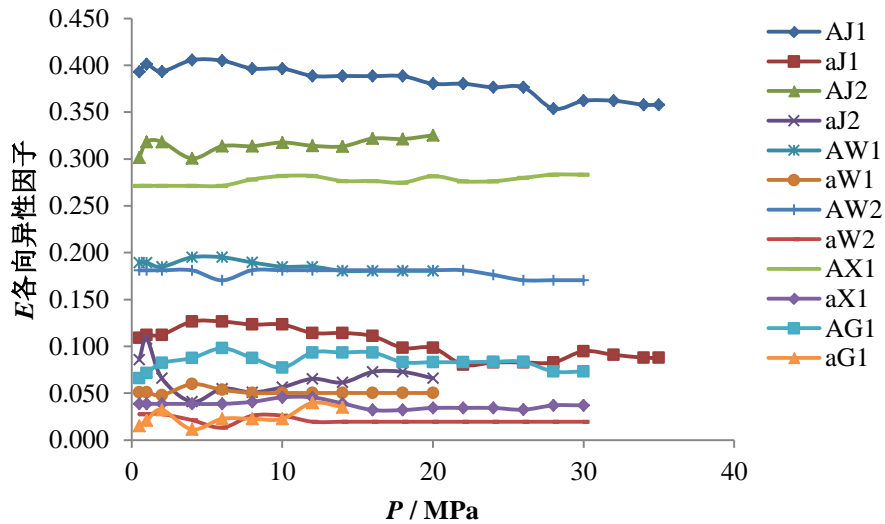


(a) λ



(b) μ





(e) E

图 5.5 单轴加载条件下页岩动弹性力学参数各向异性特征

5.2.3 无烟煤

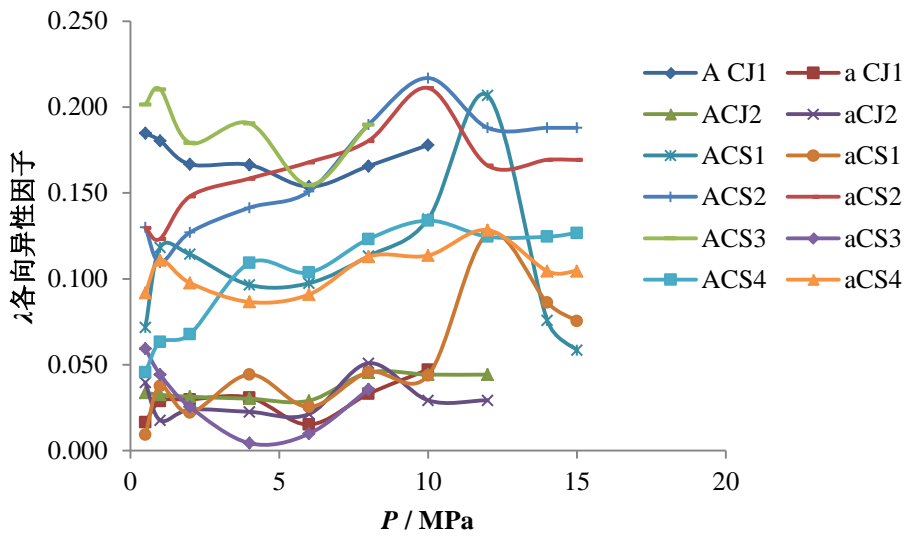
由前述获得的单轴加载条件下无烟煤动弹性力学参数结果可分别计算出其各向异性因子，结果如图 5.6 所示。总体上，加载压力 P 在 0.5MPa-15MPa 范围内无烟煤 $A(\lambda)$ 介于 0.02-0.22， $a(\lambda)$ 介于 0-0.22， $A(\mu)$ 介于 0.14-0.33， $a(\mu)$ 介于 0.02-0.14， $A(v)$ 介于 0-0.14， $a(v)$ 介于 0-0.1， $A(K)$ 介于 0.02-0.2， $a(K)$ 介于 0-0.2， $A(E)$ 介于 0.13-0.32， $a(E)$ 介于 0.02-0.14。可见，所测无烟煤的动弹性力学参数 (λ 、 μ 、 v 、 K 和 E) 均显示出一定的各向异性特征，各向异性因子值普遍小于 0.35，且随加载压力的变化而变化。总的来看，无烟煤动弹性力学参数各向异性程度比其波速各向异性的稍强。

总体上，无烟煤 λ 、 v 、 K 的各向异性因子 (A 、 a) 值明显小于对应砂/页岩的，而其 E 、 μ 的与对应砂/页岩的相近。可见，相比于砂/页岩，无烟煤 λ 、 v 、 K 的各向异性强度均大幅减弱，且三类岩石 E 、 μ 的各向异性强度相差不大。整体上，在三类储层岩石中无烟煤的各动弹性力学参数所呈现的各向异性程度普遍最弱，且也不具有“ A 值 \gg a 值”的特征，这是因为无烟煤中普遍发育的层理、割理、节理及大量的微裂隙等复杂的界面结构的综合作用使其动弹性力学参数的宏观各向异性特征变得不明显，自然弱于含简单层理、定向裂隙结构的砂/页岩。综上，砂岩、页岩及无烟煤在动弹性力学参数各向异性特征方面存在显著的差异。

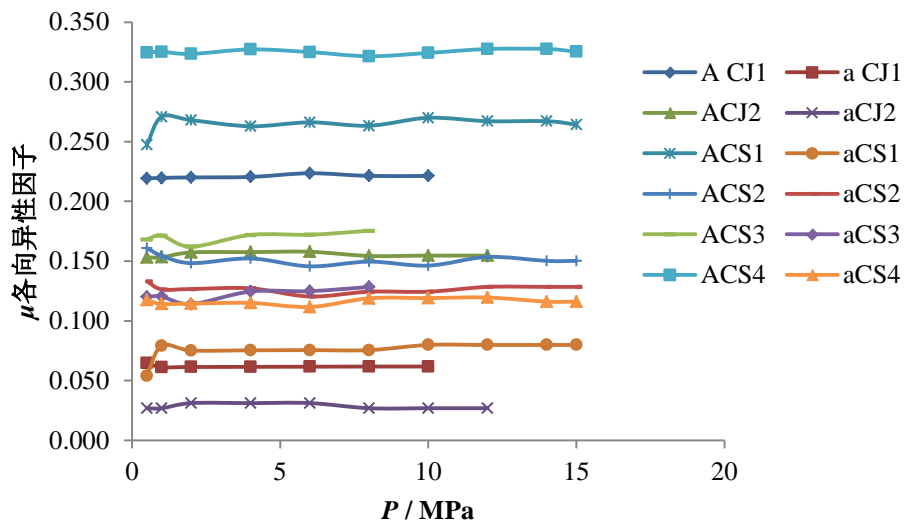
随压力的变化规律：无烟煤动弹性力学参数各向异性特征也表现出一定的规律性。在破坏前的压力加载过程中，无烟煤动弹性力学参数的 A 、 a 值整体上变化非常小，大都表现出微小的波动； E 、 μ 的 A 、 a 值变化率极小，甚至几乎没有发生变化，表明无烟煤 E 、 μ 各向异性受加载压力的影响微弱，几乎不具有敏感性。无烟煤 λ 、 v 及 K 的 A 、 a 值均呈现出在一定范围内的微小波动性变化特征，不乏总体升高的趋势；其中，仅 v 各向异性程度随压力的升高呈较明显的缓慢减

小的趋势。无烟煤 λ 、 K 及 ν 的各向异性对加载压力的敏感性比 E 、 μ 的稍强。另外，相比于 CS 系列，虽然 CJ 系列无烟煤动弹性力学参数的各向异性整体上显示出对加载压力更弱的敏感性，但其各向异性程度随加载压力的升高呈较明显的缓慢减小的趋势。

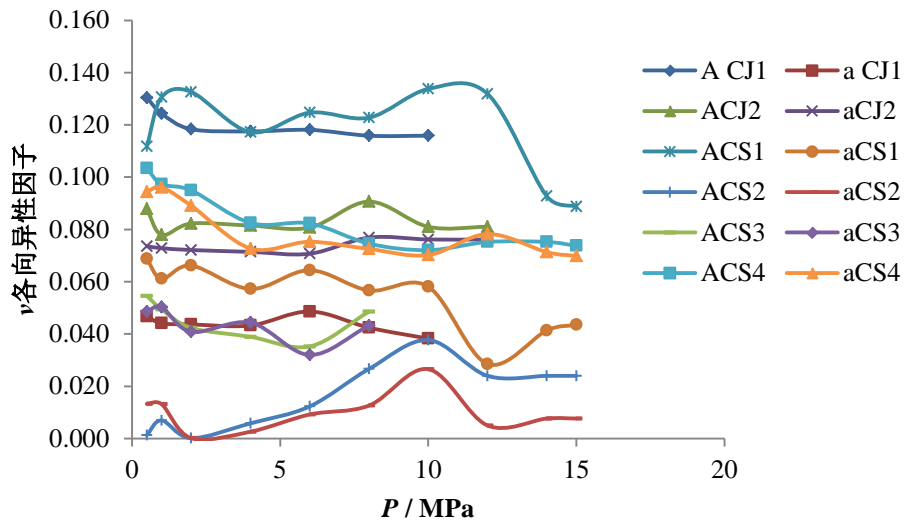
相比于砂/页岩，无烟煤动弹性力学参数的 A 、 a 值随加载压力的变化率更小，各向异性特征受加载压力的影响也最小，即无烟煤动弹性力学参数各向异性特征对加载压力普遍表现出微弱的敏感性。总体上，砂岩、页岩、无烟煤对应动弹性力学参数的各向异性特征对加载压力的敏感性依次减弱，与三者波速各向异性特征对加载压力敏感性的相对强弱规律相似，归因于三者复杂的结构及其对应力响应特征差异。



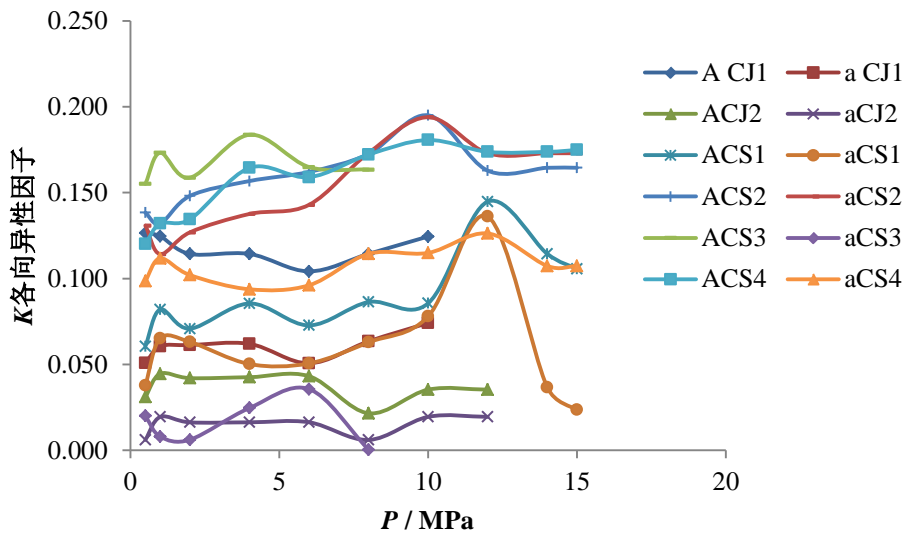
(a) λ



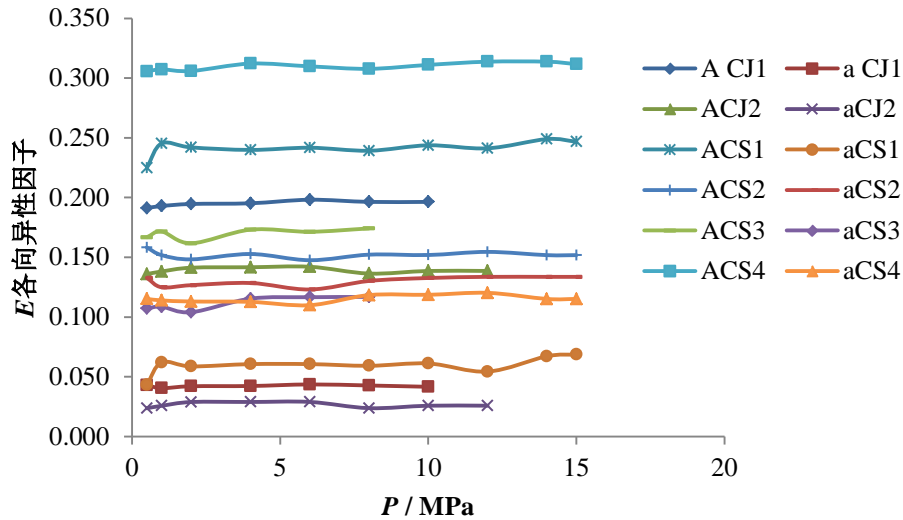
(b) μ



(c) ν



(d) K



(e) E

图 5.6 单轴加载条件下无烟煤动弹性力学参数各向异性特征

5.3 小结

在获得单轴加载条件下各岩样三个正交方向上五种动态弹性力学参数测试结果的基础上，对三类岩石的五种动态弹性力学参数大小、各向异性及压力敏感性特征进行了对比分析与讨论。可以获得如下主要结论：

(1) 随着加载压力的升高，砂岩、页岩、无烟煤各方向上 λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E 均呈现阶段性增加的特征，前期升高速度较快，后期减缓并逐渐趋于稳定，与波速的变化特征较一致。整体上，页岩动弹性力学参数普遍较砂岩的高；无烟煤的 λ 、 μ 、 K 和 E 均是相对最小的，但 ν 是相对最大的；砂岩、页岩、无烟煤的动弹性力学参数对加载压力的敏感性依次减弱。三类储层岩石的 λ 、 K 、 E 对加载压力的敏感性均比 μ 、 ν 的相对强。

(2) 所测砂岩、页岩、无烟煤的动弹性力学参数 (λ 、 μ 、 ν 、 K 和 E) 均显示出一定的各向异性特征，砂岩、页岩动弹性力学参数的各向异性程度随着加载压力的升高整体上均呈逐渐减小并趋于稳定的特征。砂岩与页岩的对应动弹性力学参数整体上处于一个相近的各向异性强度水平，而无烟煤的最弱且随压力的升高呈微小的波动性变化。

在加载压力范围内砂岩、页岩 λ 、 ν 各向异性程度普遍较高， K 、 E 、 μ 的相对较小并依次减弱，且它们的各向异性强度对加载压力的敏感性强度也具有相同的规律。而无烟煤 λ 、 K 及 ν 的各向异性对加载压力的敏感性比 E 、 μ 的稍强。总体上，砂岩、页岩、无烟煤对应动弹性力学参数的各向异性特征对加载压力的敏感性依次减弱。

6 单轴受载岩石的波衰减及其各向异性特征

本章基于所测岩样纵横波的透射波形,采用振幅衰减法对单轴加载条件下的各岩样三个方向上的对应压力点的纵横波品质因子(Q值, Q_p 、 Q_s)进行了计算,并对单轴受载的三类岩石的弹性波衰减及其各向异性特征进行了讨论。

6.1 加载压力对衰减大小的影响特征

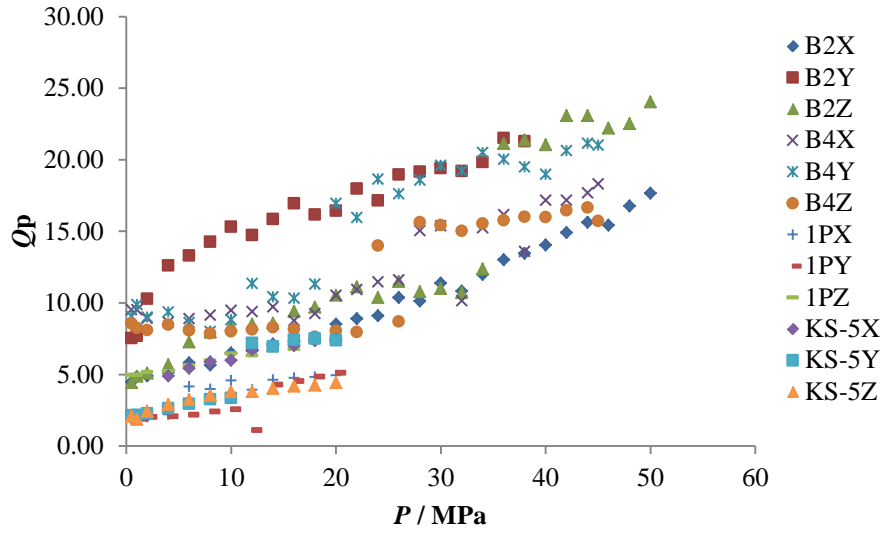
6.1.1 砂岩

由单轴加载条件下的超声波测量实验获得的砂岩样品三个方向上纵横波 Q 值(Q_p 、 Q_s)及其比(Q_p/Q_s , 记为 η)随加载压力(P)变化的结果如图 6.1 所示。总体上,加载压力 P 在 0.5MPa-50MPa 范围内所测砂岩 Q_p 介于 1-25, Q_s 介于 1.9-28, η 介于 0.2~1.9。

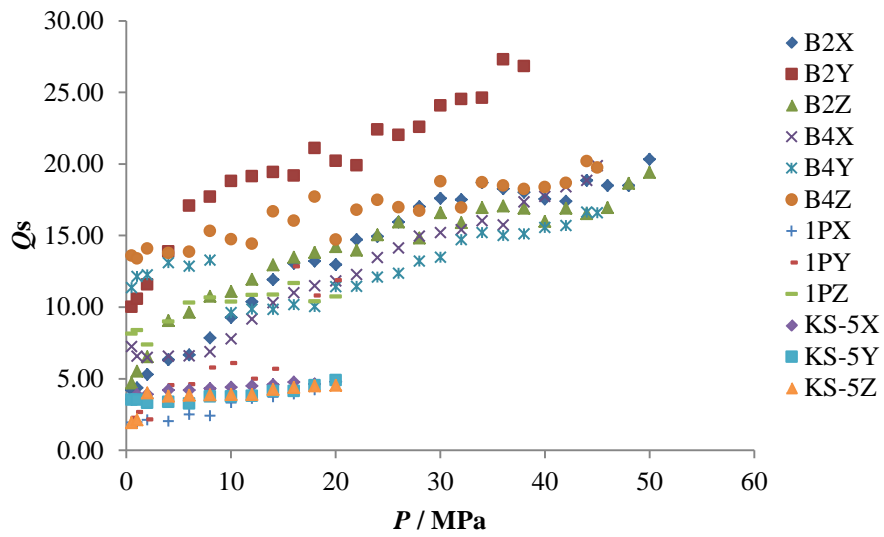
砂岩各方向上 Q_p 、 Q_s 均随 P 的升高呈现阶段性增加的特征,且同一方向上 Q_p 、 Q_s 具有相似的变化规律。在压力升高初期 Q 增加速率较快,随后缓慢增加并趋于稳定。Q 随压力的总体变化趋势与波速的一致,但呈现出一定的波动性。所测砂岩 Q 与 P 之间整体上呈较好的线性相关性。同样归因于单轴加载条件下岩石破坏前的应力-应变机制。岩石内的孔裂隙空间及层理等结构面是弹性波传播及吸收衰减的主要影响因素。压力作用下,岩石内部孔裂隙空间体积减小、结构面压缩闭合且岩石骨架也进一步被压实,因此由孔裂隙结构引起的波的衰减作用减弱,且岩石波的衰减将逐渐趋于受载岩石骨架固有的衰减特征。

图 6.1 (c)显示所测砂岩各方向上 η 大都小于 1,可见受载砂岩 Q_s 一般较 Q_p 的高,表明受载砂岩内纵波的衰减作用相对横波的更大些。 η 随加载压力的升高具有明显的波动性变化,但整体上变化趋势规律性不明显。

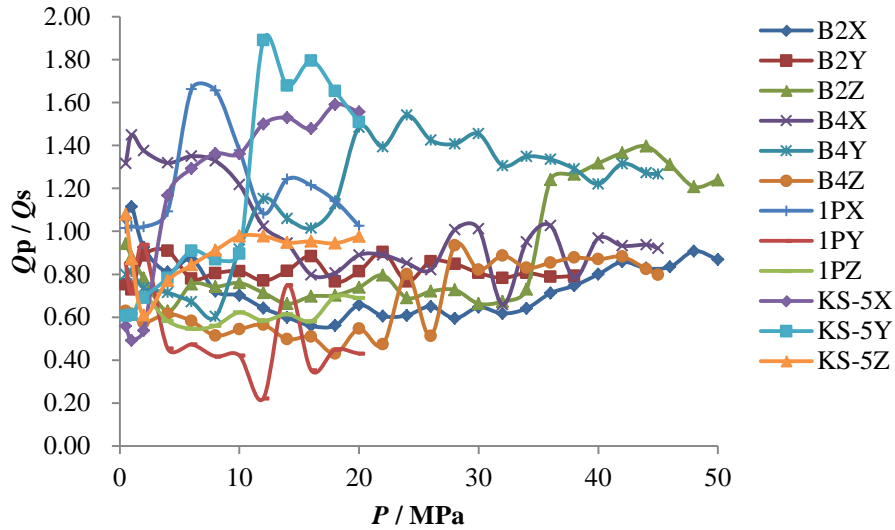
较致密坚硬的高密度的 B2、B4 砂岩的纵横波 Q 值一般比碎裂化较低密度砂岩 1P 及 KS-5 的高,且其 Q 值随压力的平均变化速率也较高。表明 B2、B4 砂岩具有相对较弱的弹性波吸收衰减特征,衰减对加载压力的敏感性稍大。可见具有不同结构、物质组分的砂岩之间在波的衰减及加载压力对波衰减的影响特征方面表现出显著的差异性。



(a) Q_p - P



(b) Q_s - P



(c) Q_p/Q_s - P

图 6.1 单轴加载条件下砂岩 Q 值测试结果

6.1.2 页岩

由单轴加载条件下的超声波测量实验获得的页岩样品三个方向上纵横波 Q 值 (Q_p 、 Q_s) 及其比 (η) 随加载压力 (P) 变化的结果如图 6.2 所示。总体上, 加载压力 P 在 0.5MPa-50MPa 范围内所测页岩 Q_p 介于 1.3-26, Q_s 介于 1.8-26, η 介于 0.2~1.8.

在破坏前的压力加载范围内页岩各方向上 Q_p 、 Q_s 均随 P 的升高呈现缓慢的阶段性增加并趋于稳定的特征, 且同一方向上 Q_p 、 Q_s 也表现出大致相似的变化规律。 Q 随压力的总体变化趋势与波速的一致, 但呈现出一定的波动性。同样归因于单轴加载条件下岩石的压实使得波的衰减作用减弱。与砂岩相比, 页岩 Q_p 、 Q_s 的平均值整体上均稍偏高; 但加载压力对纯页岩 (J1 及 J2) 衰减的影响作用明显减弱, 纯页岩衰减对加载压力普遍显示出较弱的敏感性特征, 而杂页岩 (尤其是 W1、W2) 衰减对加载压力的敏感性强度与砂岩的相当。

图 6.2 (c)显示所测页岩各方向上 η 小于 1 的情况占多数, 可见受载页岩 Q_s 大多比对应 Q_p 的高, 表明受载页岩内纵波的衰减作用相对横波的更大些。 η 随加载压力的升高具有明显的波动性变化, 但总体上多呈下降趋势; 再者页岩 Q_s 随加载压力的变化速率一般高于对应 Q_p 的, 所以加载压力对页岩 Q_s 的影响作用比对 Q_p 的更显著, 即页岩横波衰减对加载压力具有更强的敏感性, 不同于页岩波速对加载压力的敏感性特征。

整体上页岩的 Q 值与密度之间并没有呈现出较好的相关关系。有较低密度的 W1、W2 的 Q 值均比具有较高密度的 J1、J2 及 X1 的大, 且纯页岩 J1、J2 的 Q 值随加载压力的变化率最小。所以纯页岩 J1、J2 本身具有很强的波的衰减特征, 但其衰减对加载压力的敏感性相对最弱。

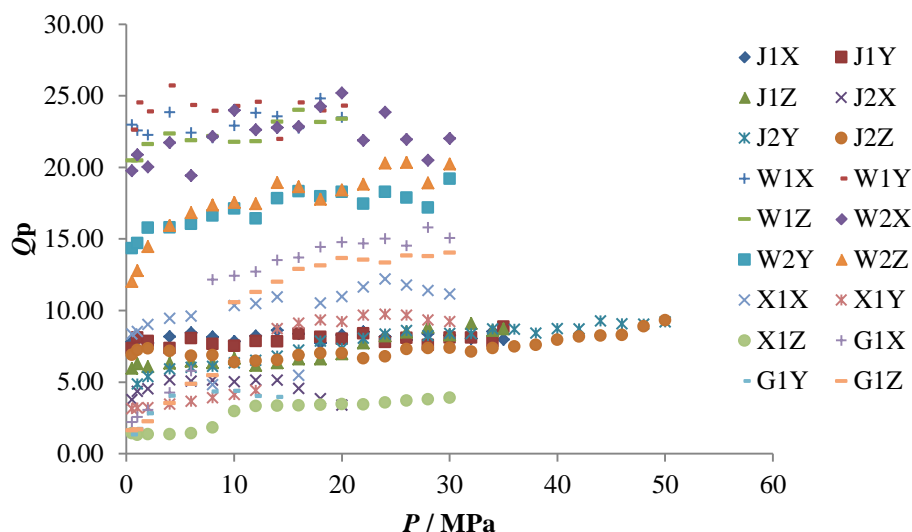
对比研究页岩和砂岩的 Q 值测量结果, 可以总结如下规律:

1) 相比于杂砂岩, 纯砂岩具有较弱的纵横波衰减特征, 但其衰减对加载压力具有较强的敏感性; 相比于杂页岩, 纯页岩具有很强的波的衰减特征, 但其衰减对加载压力具有较弱的敏感性。

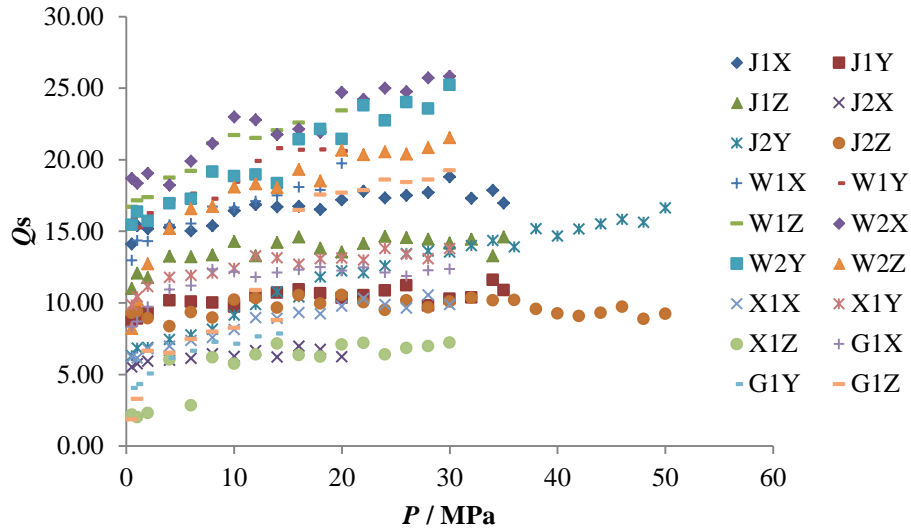
2) 杂砂岩、纯页岩、纯砂岩、杂页岩的 Q 均值呈现出依次增大的规律, 所以其对波的衰减特征依次减弱。纯页岩波的衰减对加载压力的敏感性最弱, 杂页岩波的衰减对加载压力的敏感性强度与砂岩的相当。

3) 受载砂/页岩内纵波的衰减作用相对横波的更大些。相比于 V_s , 砂/页岩 V_p 对加载压力具有更强的敏感性; 相比于 Q_p , 页岩 Q_s 对加载压力具有更强的敏感性, 即页岩横波衰减对加载压力的敏感性更强, 然而砂岩内纵、横波衰减对加载压力的敏感性并没有表现出明确的相对强弱关系。

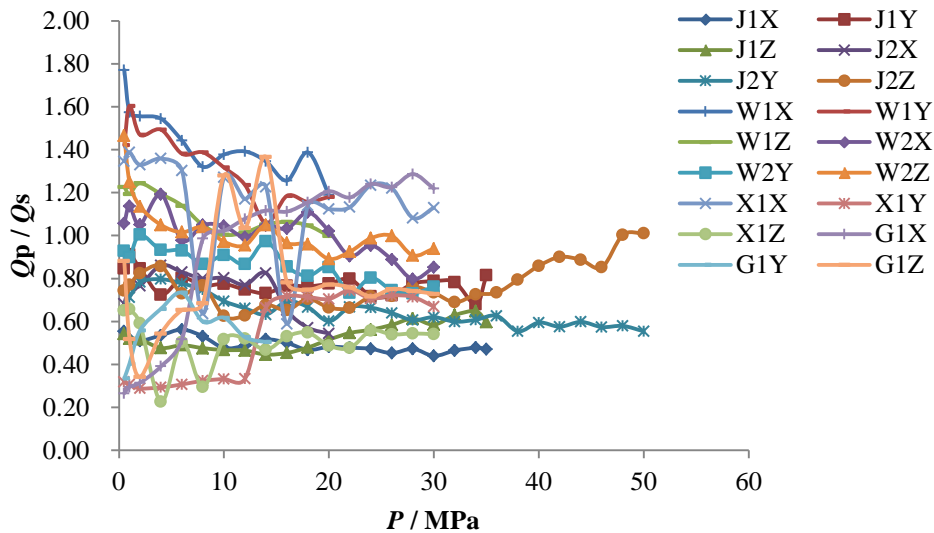
综上, 不同类型的页岩与砂岩在波的衰减及加载压力对波衰减的影响特征方面表现出显著的差异性, 归因于岩性组合及结构的不同。有待对岩石物性做进一步检测以揭示其控制机理。



(a) Q_p - P



(b) Q_s - P



(c) Q_p/Q_s - P

图 6.2 单轴加载条件下页岩 Q 值测试结果

6.1.3 无烟煤

由单轴加载条件下的超声波测量实验获得的无烟煤样品三个方向上纵横波 Q 值 (Q_p 、 Q_s) 及其比 (η) 随加载压力 (P) 变化的结果如图 6.3 所示。总体上, 加载压力 P 在 0.5MPa-15MPa 范围内所测无烟煤 Q_p 介于 0.4-10.6, Q_s 介于 1.3-21, η 介于 0.2~1.3。

在破坏前的压力加载范围内无烟煤各方向上 Q_p 、 Q_s 均随 P 的升高呈现**阶段性增加**并最终趋于稳定的特征, 且 Q 值变化趋势几乎没有呈现波动性。同样归因于单轴加载条件下岩石的压实使得波的衰减作用减弱。

相比于砂/页岩, 无烟煤 Q_p 、 Q_s 均值整体上均明显偏小, 表明其对弹性波具有很强的吸收衰减性, 归因于煤岩内极发育的孔裂隙结构。整体上无烟煤的 Q

值与密度之间**并没有**呈现出较好的相关关系。虽然无烟煤破坏前的整个加载压力范围小($\leq 15\text{MPa}$),但加载压力作用下无烟煤 Q 值增长幅度范围还是比较大的,加载压力作用下无烟煤纵横波 Q 值的变化速率**不低于**对应砂/页岩的,整体上无烟煤 Q 值大都具有较强的应力敏感性特征,表明无烟煤波的衰减受加载压力的影响作用大,对加载压力普遍显示出较强的敏感性特征。这是因为相比于砂/页岩,煤是有机沉积软岩,具有低的弹性模量及高泊松比,应力作用下煤体极易发生变形,煤体内发达的裂隙等结构面具有很强的应力敏感性,其受载压缩闭合对衰减的影响作用显著。

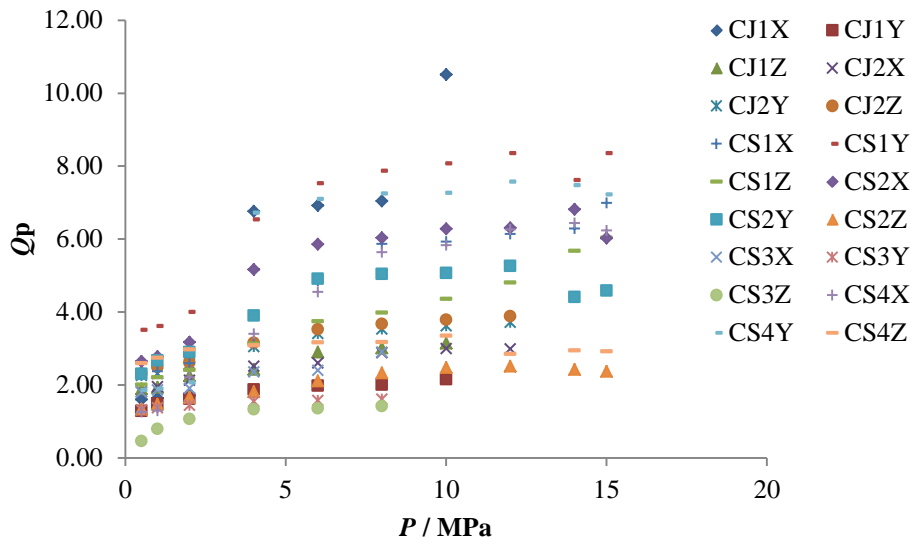
图 6.3 (c)显示所测无烟煤各方向上 η 大都小于 1,可见受载无烟煤 Q_s 一般较 Q_p 的高,表明**受载无烟煤内纵波的衰减作用相对横波的更大些**。 η 随加载压力的升高具有明显的波动性变化,但整体上变化趋势规律性不明显。但对比图 6.3(a)、(b)发现,无烟煤 Q_s 随加载压力的变化速率普遍高于对应 Q_p 的,所以加载压力对无烟煤 Q_s 的影响作用比对 Q_p 的更显著,即无烟煤**横波衰减**对加载压力具有更强的敏感性,不同于无烟煤波速对加载压力的敏感性特征,即无烟煤**纵波速度**对加载压力具有更强的敏感性。

综合对比**砂岩、页岩、无烟煤**的 Q 值测量结果,可以总结如下规律:

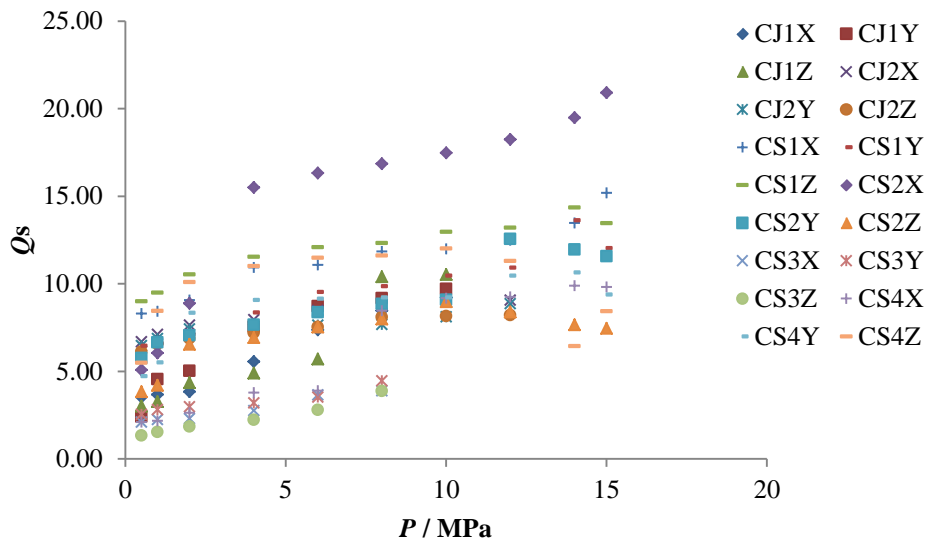
1) 在破坏前的压力加载范围内,随着加载压力的升高,三类储层岩石的 Q 值均相应增大并逐渐趋于稳定,表明三类岩石波的衰减均随受载压力的增大而减弱;

2) 相比于砂/页岩,无烟煤 Q 值整体上均明显偏小,表明无烟煤对弹性波的吸收衰减特征最强;但无烟煤波的衰减对加载压力的敏感性特征不弱于砂/页岩的;然而无烟煤波速对加载压力的敏感性明显低于砂岩,而与页岩的相当。

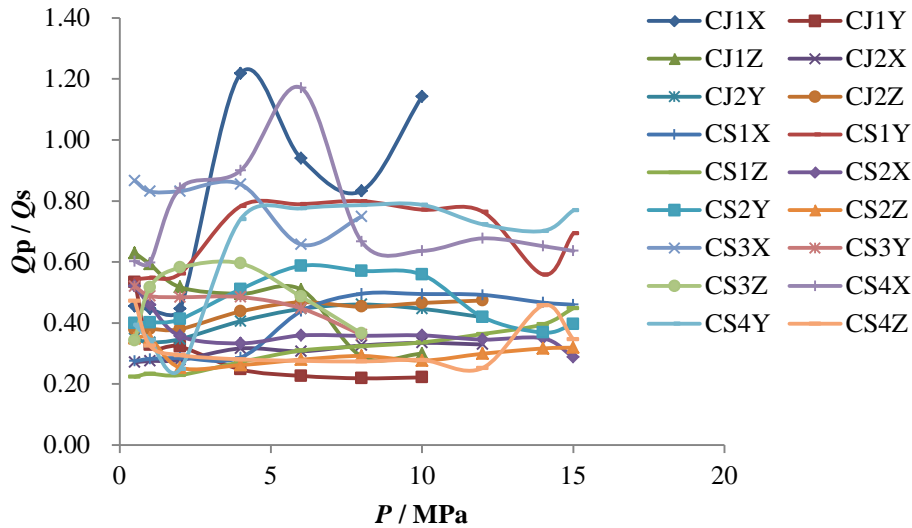
3) 三类受载岩石中 Q_s 值普遍比对应 Q_p 值的高,表明三类储层内纵波的衰减作用比横波的更强。砂岩内纵、横波衰减对加载压力的敏感性并没有表现出明确的相对强弱关系,页岩和无烟煤的横波衰减对加载压力的敏感性特征均比纵波衰减的强。然而三类储层岩石中 V_p 对加载压力的敏感性均比 V_s 的强。



(a) Q_p - P



(b) Q_s - P



(c) Q_p/Q_s - P

图 6.3 单轴加载条件下无烟煤 Q 值测试结果

6.2 加载压力对衰减各向异性的影响特征

本节依然采用前述已经定义的一对各向异性因子 (A 和 a , 见式 4.1) 对三类岩样 Q 值 (Q_p 、 Q_s 及其比 η) 各向异性特征进行讨论。

6.2.1 砂岩

由单轴加载条件下砂岩 Q 值可分别计算出纵横波 Q (Q_p 、 Q_s) 及其比 (η) 的各向异性因子, 结果如图 6.4 所示。总体上, 加载压力 P 在 0.5MPa-50MPa 范围内砂岩 $A(Q_p)$ 介于 0.01-0.86, $a(Q_p)$ 介于 0.01-0.6, $A(Q_s)$ 介于 0.02-0.78, $a(Q_s)$ 介于 0.01-0.73, $A(\eta)$ 介于 0.02-0.94, $a(\eta)$ 介于 0.03-0.87。可见, 所测砂岩的 Q_p 、 Q_s 及 η 均显示出一定的各向异性特征, 其各向异性因子变化范围广 (0.01-0.94), 且随加载压力的变化而变化。

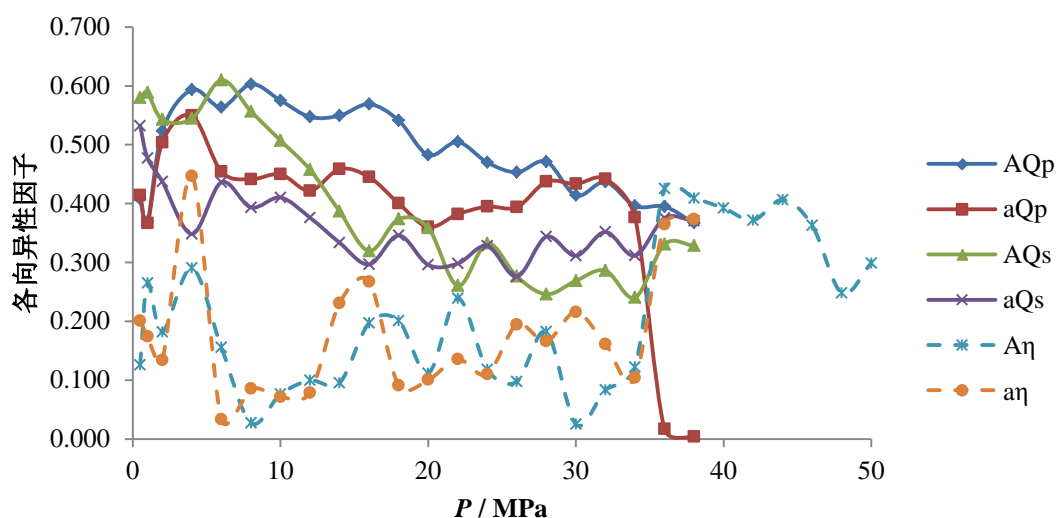
随压力的变化规律: 砂岩纵横波 Q 值及其比 η 的各向异性特征 (除去低压及高压端的失真异常数据点) 规律性还是比较明显的。在破坏前的压力加载过程中, 砂岩 $A(Q_p)$, $a(Q_p)$, $A(Q_s)$, $a(Q_s)$, $A(\eta)$, $a(\eta)$ 整体上均呈减小的趋势并趋于稳定, 但普遍具有一定的波动性。这是因为岩石内的孔裂隙空间及层理等结构面是弹性波传播及吸收衰减的主要影响因素。随着加载压力的逐渐升高, 三个方向上的孔裂隙空间均趋于压缩或闭合, 结构面差异减小, 因此在三个方向上由孔裂隙结构差异引起的波衰减作用的差异性也逐渐减小, 并且三个方向上波的衰减最终将趋于一个稳定的各向异性状态, 即受载岩石骨架固有的衰减特征。

另外, 对于岩性及结构复杂的砂岩 (尤其是杂砂岩 1P、KS-5), 随压力的升高其 Q 值及 η 值各向异性因子的变化速率普遍较高, 整体上显示出对加载压力较强的敏感性特征, 表明具有较强波衰减的杂砂岩衰减各向异性特征受加载压力的影响作用也较强。总之, 杂砂岩波速值相对低、波速及其各向异性的应力敏感

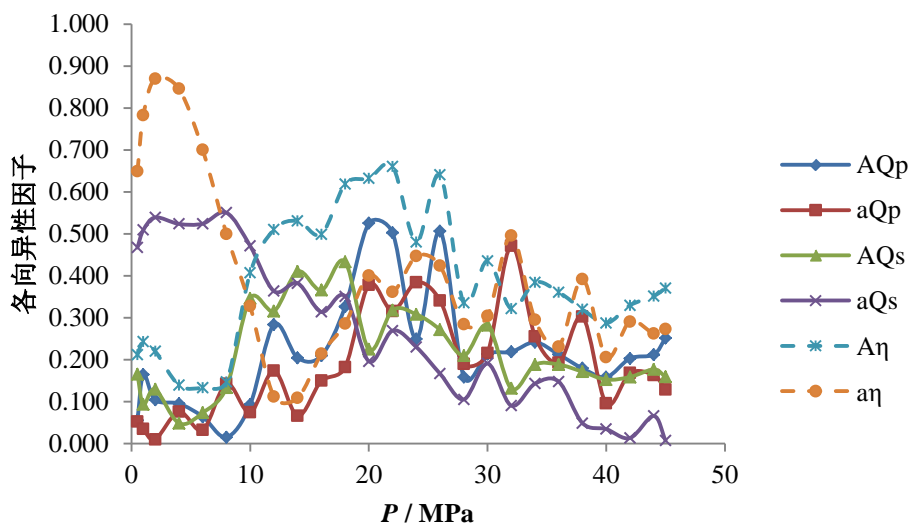
性均相对弱；同时杂砂岩波的衰减较大、衰减的应力敏感性相对弱、衰减各向异性的应力敏感性相对强。

在加载压力范围内砂岩（尤其是 B2,B4）的 Q_p 各向异性因子普遍较相应 Q_s 的大，说明其纵波衰减的各向异性特征要强于横波衰减的。前述表明砂岩纵波速度的各向异性特征要强于横波速度的，可见纵波在检测砂岩物性各向异性方面比横波更有优越性。

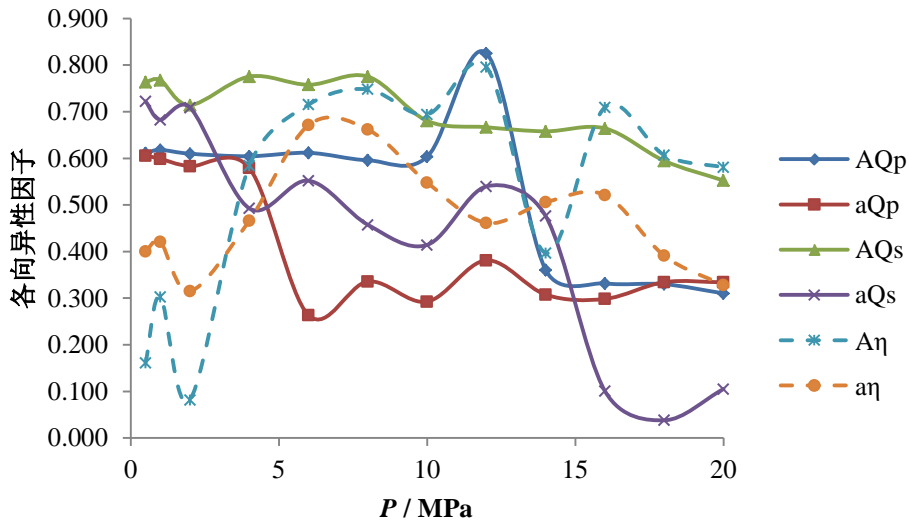
对比砂岩波速与衰减的各向异性特征，可见砂岩衰减各向异性程度明显比其波速的高。



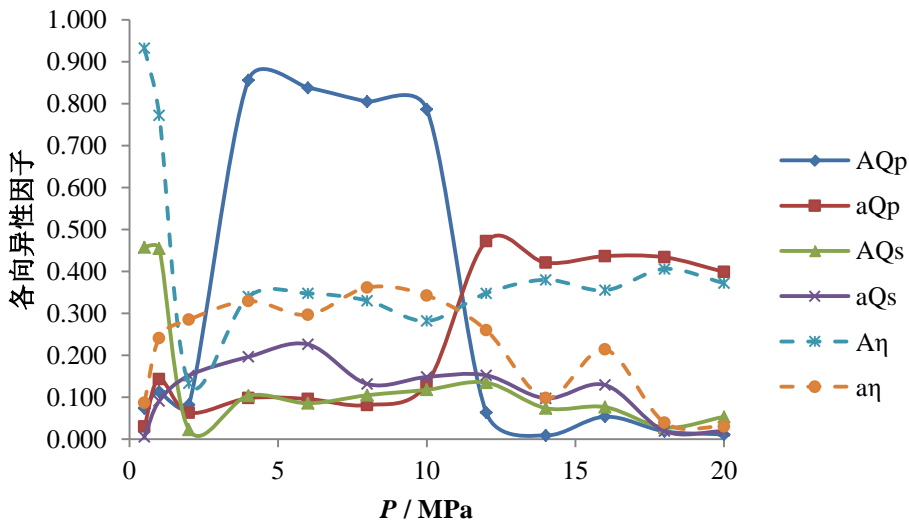
(a) B2



(b) B4



(c) 1P



(d) KS-5

图 6.4 单轴加载条件下砂岩 Q 值各向异性特征

6.2.2 页岩

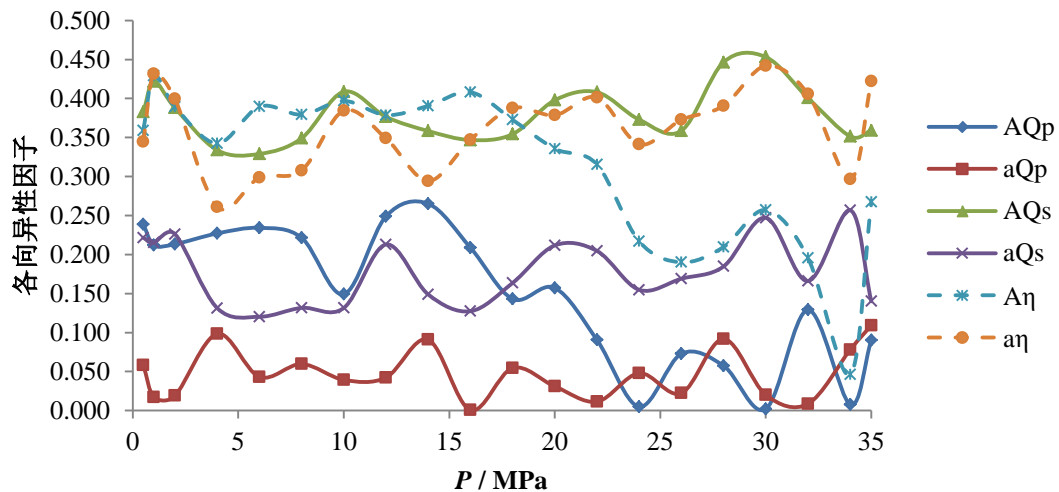
由单轴加载条件下页岩 Q 值可分别计算出纵横波 Q (Q_p 、 Q_s) 及其比 (η) 的各向异性因子, 结果如图 6.5 所示。总体上, 加载压力 P 在 0.5MPa-50MPa 范围内页岩 $A(Q_p)$ 介于 0-0.86, $a(Q_p)$ 介于 0-0.67, $A(Q_s)$ 介于 0.12-0.81, $a(Q_s)$ 介于 0.01-0.78, $A(\eta)$ 介于 0-0.84, $a(\eta)$ 介于 0-0.79。可见, 所测页岩的 Q_p 、 Q_s 及 η 均显示出一定的各向异性特征, 其各向异性因子变化范围广 (0-0.86), 且随加载压力的变化而变化。

随压力的变化规律: 页岩纵横波 Q 值及其比 η 的各向异性特征规律性还是比较明显的。在破坏前的压力加载过程中, 除极个别异常情况外, 页岩 $A(Q_p)$, $a(Q_p)$, $A(Q_s)$, $a(Q_s)$, $A(\eta)$, $a(\eta)$ 整体上大都呈减小的趋势并趋于稳定, 但普遍

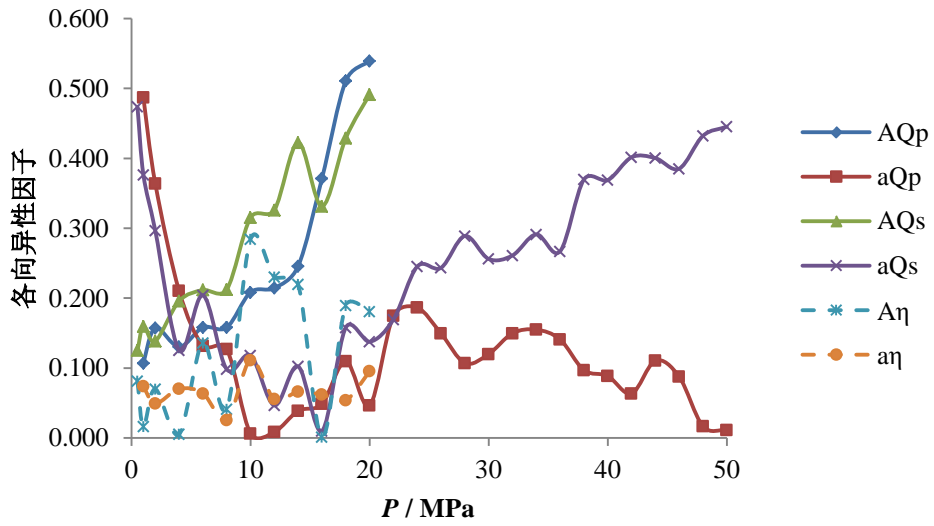
具有一定的波动性。同样归因于受载岩石裂隙等结构面的压缩、闭合，波衰减各向异性特征随着结构面的各向异性的减弱而减弱并最终趋于稳定。各类页岩样品之间以及页岩与砂岩之间在波衰减各向异性及其对加载压力的敏感性方面均未表现出明显的相对强弱关系，且页岩纵、横波衰减并没有呈现出明显的“ A 值 $\gg a$ 值”的特征。

在加载压力范围内页岩 Q_p 、 Q_s 各向异性因子之间并不具有统一的相对大小关系，比如 J1、W1 的 Q_s 各向异性因子大于其 Q_p 的，而 W2 的则相反，表明页岩纵、横波衰减的各向异性特征并没有表现出统一的相对强弱关系。这一点不同于页岩纵、横波速度的各向异性特征的对比情况，即页岩纵波速度的各向异性特征要强于横波速度的。

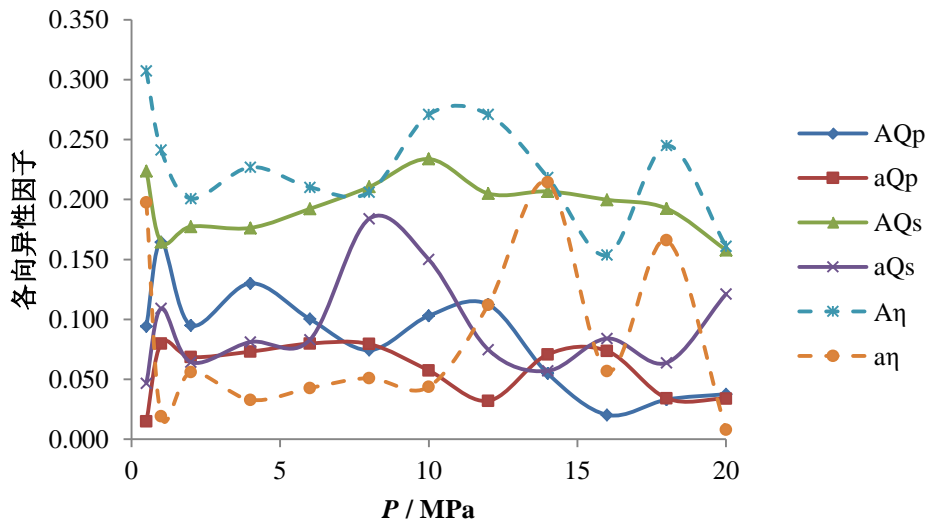
对比页岩波速与衰减的各向异性特征发现，前述加载压力范围内页岩波速各向异性因子值均在 0.3 以内，整体上明显小于页岩衰减各向异性因子值，可见页岩衰减各向异性程度明显比其波速的高。



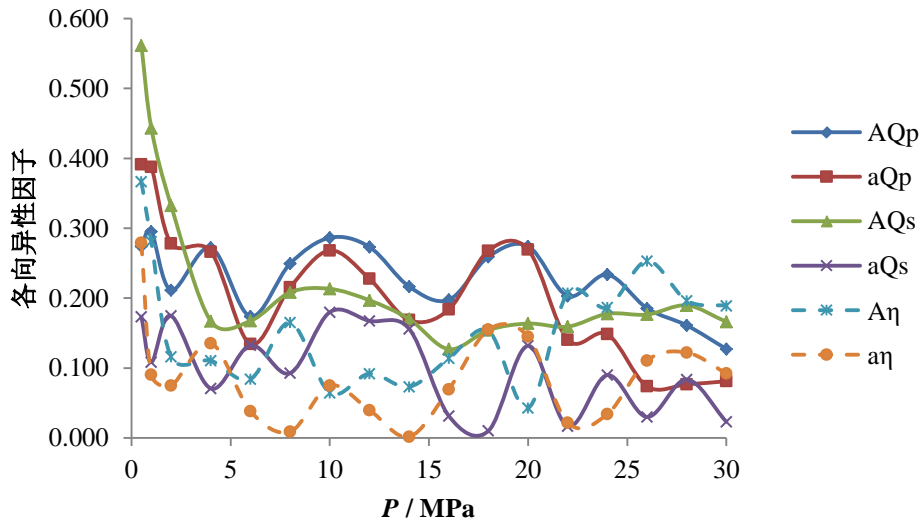
(a) J1



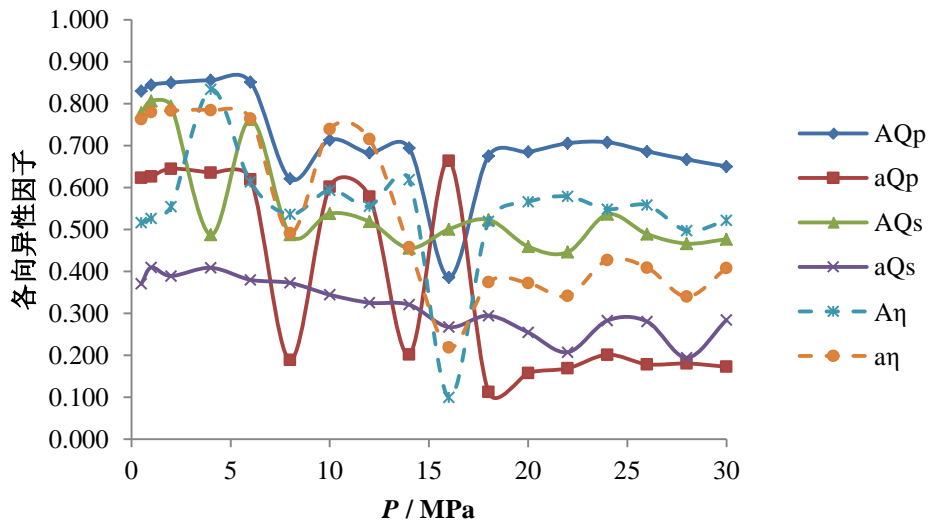
(b) J2



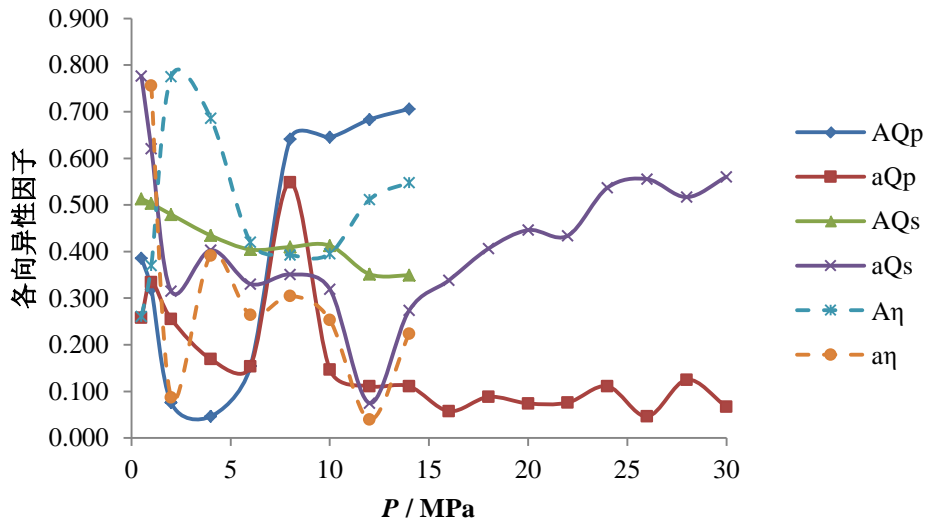
(c) W1



(d) W2



(e) X1



(f) G1

图 6.5 单轴加载条件下页岩 Q 值各向异性特征

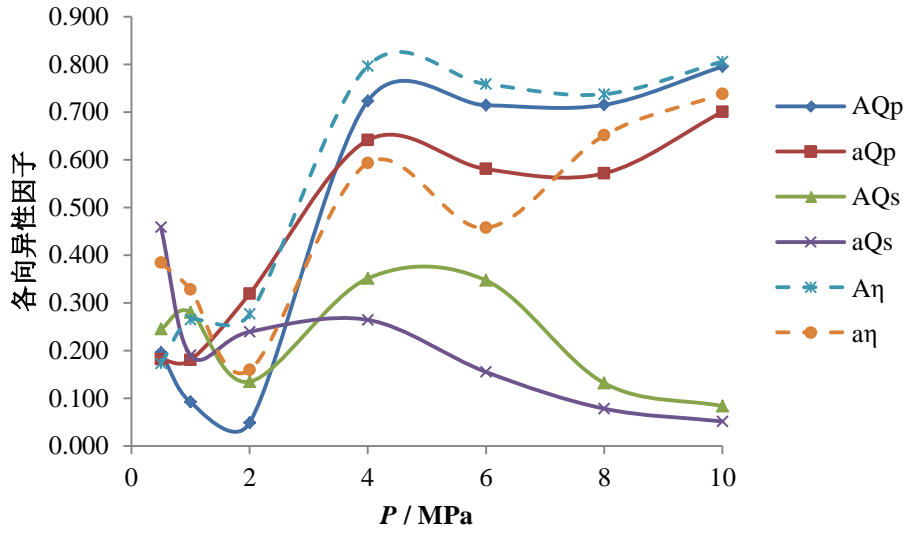
6.2.3 无烟煤

由单轴加载条件下无烟煤 Q 值可分别计算出纵横波 Q (Q_p 、 Q_s) 及其比 (η) 的各向异性因子, 结果如图 6.6 所示。总体上, 加载压力 P 在 0.5MPa-15MPa 范围内无烟煤 $A(Q_p)$ 介于 0.04-0.8, $a(Q_p)$ 介于 0.01-0.7, $A(Q_s)$ 介于 0.05-0.75, $a(Q_s)$ 介于 0.02-0.66, $A(\eta)$ 介于 0.05-0.81, $a(\eta)$ 介于 0.01-0.74。可见, 所测无烟煤的 Q_p 、 Q_s 及 η 均显示出一定的各向异性特征, 其各向异性因子变化范围广(0-0.81), 且随加载压力的变化而变化。

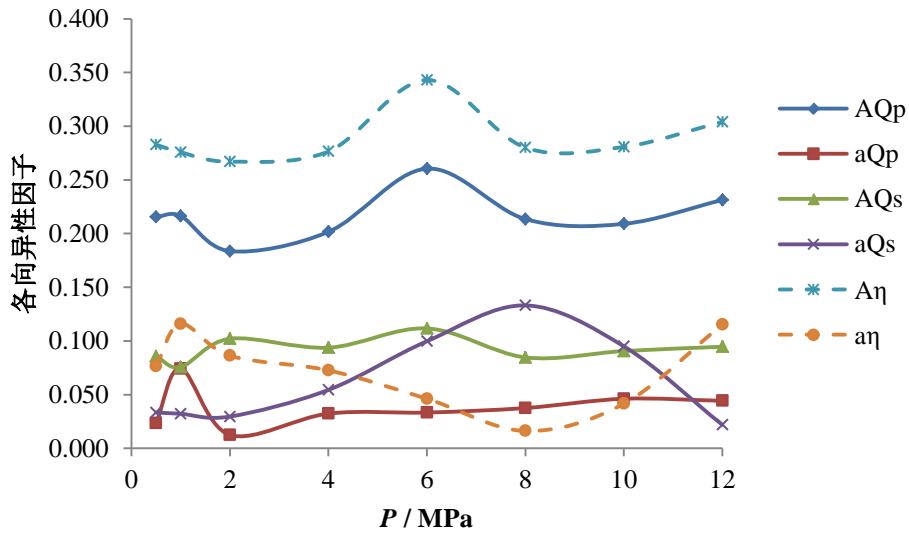
随压力的变化规律: 无烟煤纵横波 Q 值及其比 η 的各向异性特征规律性还是比较明显的。在破坏前的压力加载过程中, 除去低压及高压端个别的失真异常数据点外, 无烟煤 $A(Q_p)$, $a(Q_p)$, $A(Q_s)$, $a(Q_s)$, $A(\eta)$, $a(\eta)$ 整体上大都呈减小的趋势并趋于稳定 (以 CS1 效果最好), 但普遍具有一定的波动性。同样归因于受载岩石裂隙等结构面的压缩、闭合, 波衰减各向异性特征随着结构面的各向异性的减弱而减弱并最终趋于稳定。各类无烟煤样品之间以及无烟煤与页岩、砂岩之间在波衰减各向异性及其对加载压力的敏感性方面均未表现出明显的相对强弱关系, 且无烟煤纵、横波衰减的“**A 值**>>**a 值**”的特征也不明显。

在加载压力范围内无烟煤 Q_p 的各向异性因子 (A 、 a) 大都比对应 Q_s 的高, 仅 CJ2、CS2 样 a 的情况相反, 表明总体上无烟煤纵波衰减的各向异性特征比横波衰减的强。这一点不同于无烟煤纵、横波速度的各向异性特征的对比情况, 即无烟煤横波速度的各向异性特征要强于纵波速度的。

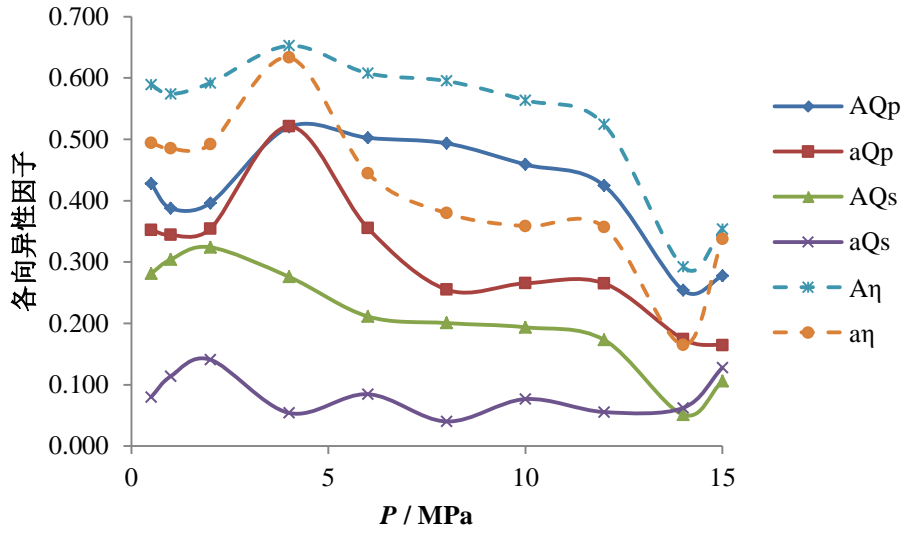
对比无烟煤波速与衰减的各向异性特征发现, 前述加载压力范围内无烟煤波速各向异性因子值均在 0.2 以内, 整体上明显小于无烟煤衰减各向异性因子值, 可见无烟煤衰减各向异性程度明显比其波速的高。



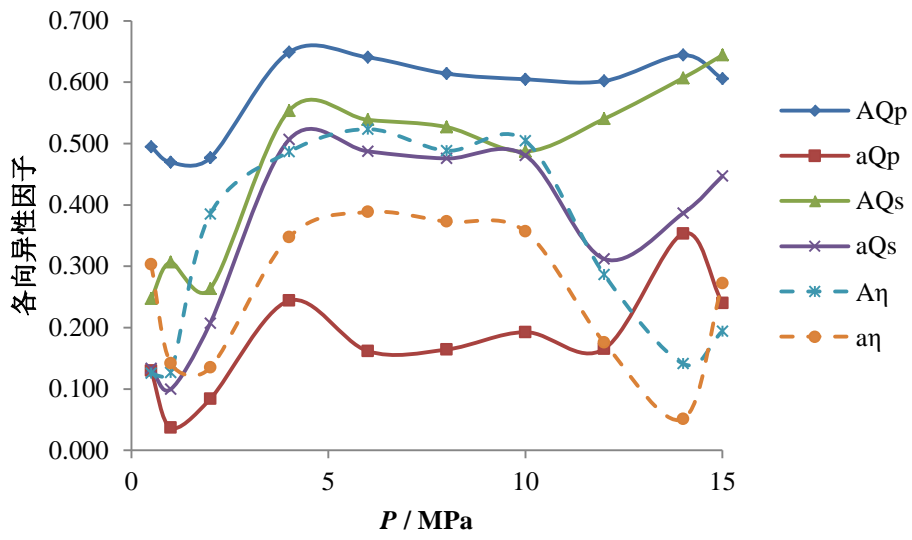
(a) CJ1



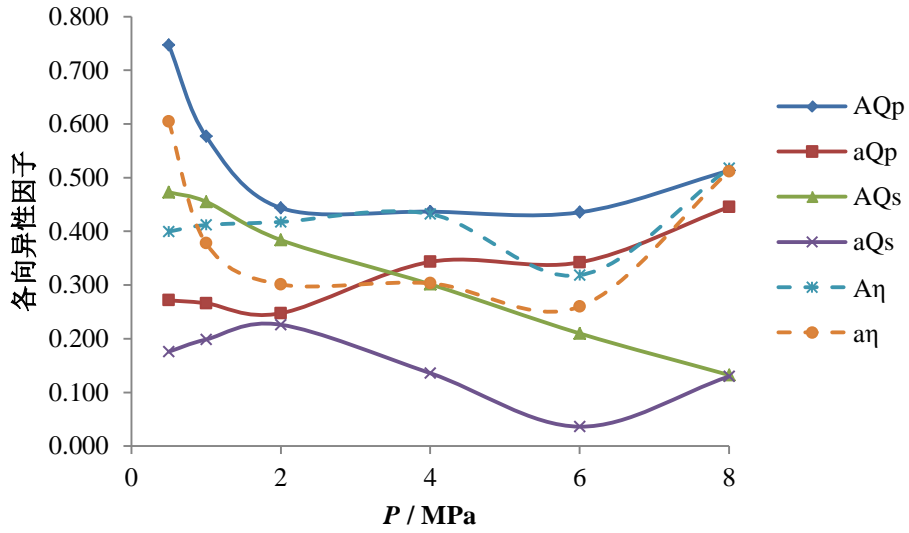
(b) CJ2



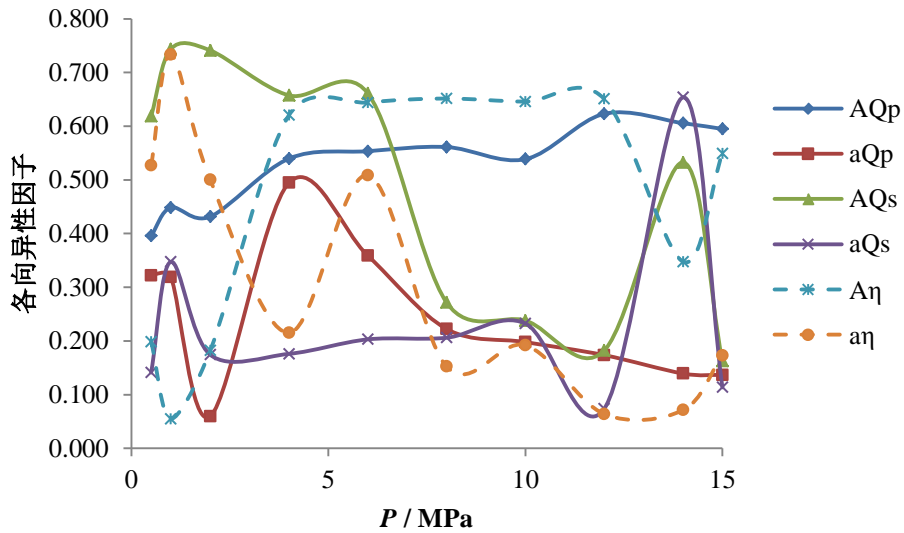
(c) CS1



(d) CS2



(e) CS3



(f) CS4

图 6.6 单轴加载条件下无烟煤 Q 值各向异性特征

6.3 小结

在获得单轴加载条件下各岩样三个正交方向上纵、横波品质因子测试结果的基础上，对三类岩石的弹性波衰减大小、各向异性及压力敏感性特征进行了对比分析与讨论。可以获得如下主要结论：

(1) 砂岩、页岩、无烟煤各方向上 Q_p 、 Q_s 均随 P 的升高呈现阶段性增加并趋于稳定的特征，表明三类岩石波的衰减均随加载压力的增大而减弱。与砂岩相比，页岩纵、横波衰减及对加载压力的敏感性整体上均稍偏弱。而无烟煤对弹性波的吸收衰减特征最强，但无烟煤波的衰减对加载压力的敏感性特征不弱于砂/页岩的。加载砂岩、页岩、无烟煤内纵波的衰减作用相对横波的更大些。页岩和无烟煤的横波衰减对加载压力的敏感性特征均比纵波衰减的强。

(2) 所测砂岩、页岩、无烟煤的纵、横波衰减均显示出一定的各向异性特征。在破坏前的压力加载过程中，砂岩、页岩、无烟煤纵横波衰减各向异性程度整体上均呈减小的趋势并趋于稳定。归因于受载岩石裂隙等结构面的压缩、闭合，波衰减各向异性特征随着结构面的各向异性的减弱而减弱并最终趋于稳定。

在加载压力范围内砂岩、无烟煤纵波衰减的各向异性特征要强于横波衰减的，而页岩纵、横波衰减的各向异性特征并没有表现出统一的相对强弱关系。各类无烟煤样品之间以及无烟煤与页岩、砂岩之间在波衰减各向异性及其对加载压力的敏感性方面均未表现出明显的相对强弱关系。砂岩、页岩、无烟煤衰减各向异性程度明显比其相应的波速的高。

7 结论

博士后工作期间主要开展了针对于砂岩、页岩、煤三类储层岩石的超声波测试实验,进而基于实验结果对比分析了三者弹性参数的各向异性及其压力敏感性特征,以期为发展页岩气、煤层气储层物性的弹性波(地震、声波测井)勘探技术与方法提供实验与理论支撑。

对采集的三类岩石样品共制备了实验测试所需的标准方块样品 30 个。依次对各样品在三个正交方向上开展常压、单轴加载条件下的两大类超声波测试实验。对所测超声波形等数据进行分析和处理,获得实验所测各类岩石的弹性参数。在此基础上,对比分析各类岩石的波速、动弹性力学性质、衰减等弹性特征,进一步对比总结三类岩石弹性的各向异性及压力敏感性规律。获得的初步分析结论如下:

基于常压条件下砂岩、页岩、无烟煤、烟煤四类岩石的弹性特征的对比分析,可以获得如下主要结论:

(1) 相比于砂/页岩,煤波速、波阻抗、拉梅常数(λ)、剪切模量(μ)、体积模量(K)和杨氏模量(E)明显偏低,而泊松比(ν)稍偏高,无烟煤内纵横波衰减特征最强。

(2) 三类储层岩石的 V_p 、 V_s 、动弹性力学参数、衰减均呈现各向异性,垂直层理面的方向上 V_p 、 V_s 、动弹性力学参数均最小,而衰减最大。

基于单轴加压砂岩、页岩、无烟煤三类岩石的超声测量对比与分析,可以获得如下的主要结论:

(1) 砂岩、页岩、无烟煤各方向上 V_p 、 V_s 、波速比、动弹性力学参数、 Q_p 、 Q_s 均随 P 的升高呈现明显的阶段性增加并趋于稳定的特征。与砂岩相比,页岩、无烟煤波速对加载压力的敏感性减弱。砂岩、页岩、无烟煤的动弹性力学参数对加载压力的敏感性依次减弱。三类储层岩石中 V_p 对加载压力的敏感性均比 V_s 的强。

(2) 受载砂岩、页岩、无烟煤内纵波的衰减作用相对横波的更大些。与砂岩相比,页岩纵、横波衰减及对加载压力的敏感性整体上均稍偏弱。无烟煤超声波的衰减对加载压力的敏感性特征不弱于砂/页岩的。

(5) 在破坏前的压力加载过程中,所测砂岩、页岩、无烟煤的波速、波速比、动弹性力学参数、衰减均显示出一定的各向异性,且各向异性强度整体上均呈减弱并趋于稳定的变化趋势。所测页岩的波速及波速比各向异性特征普遍较砂岩的强。页岩、无烟煤波速及波速比各向异性对加载压力的敏感性偏弱。砂岩与页岩的对应动弹性力学参数整体上处于一个相近的各向异性强度水平,而无烟煤的最弱,且随压力的升高呈微小的波动性变化。页岩和无烟煤的横波衰减对加载压力的敏感性特征均比纵波衰减的强。

(6) 砂岩、页岩纵波速度的各向异性特征要强于横波速度的，而无烟煤横波速度的各向异性特征要强于纵波速度的。砂岩、页岩、无烟煤对应动弹性力学参数的各向异性特征对加载压力的敏感性依次减弱。砂岩、无烟煤纵波衰减的各向异性特征要强于横波衰减的。砂岩、页岩、无烟煤衰减各向异性程度明显比其相应的波速的高。

存在问题与展望：

- (1) 一些重要的弹性波响应特征还没有来得及分析，比如频谱特征分析；
- (2) 岩样的其它物性（比如矿物成分分析、孔裂隙结构探测）的实验研究相当欠缺，以待今后进一步补充；
- (3) 所测超声波数据还有待深入挖掘分析，与其他物性信息的综合分析更有利于储层物性的弹性规律的解释以及机理的揭示。

参 考 文 献

1. 翟小洁, 岩石在单轴受荷条件下的超声波特性研究. 2008, 成都理工大学.
2. 桂志先, 贺振华, 张小庆, 基于 Hudson 理论的裂隙参数对纵波的影响. 江汉石油学院学报, 2004(01): p. 45-47+143.
3. Crampin, S., Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, 1985(No.1): p. 142.
4. Yin, H., Stress-induced ultrasonic velocity and attenuation anisotropy of rocks. *Seg Technical Program Expanded Abstracts*, 1992. **11**(1).
5. 邓继新,等, 泥岩、页岩声速各向异性及其影响因素分析. 地球物理学报, 2004(05): p. 863-869.
6. 史谓, 邓继新, 地层条件下泥、页岩衰减各向异性研究. 中国科学(D 辑:地球科学), 2005(03): p. 268-275.
7. 程礼军,等, 页岩三轴压缩条件下的纵横波速特征. 断块油气田, 2016(04): p. 465-469.
8. 陈乔,等, 层理性页岩地层超声波透射实验. 天然气工业, 2013(08): p. 140-144.
9. 熊健,等, 川南地区龙马溪组页岩岩石声波透射实验研究. 地下空间与工程学报, 2014(05): p. 1071-1077.
10. 袁和义, 陈平, 基于波速测量的龙马溪组页岩的各向异性研究. 地下空间与工程学报, 2017(05): p. 1200-1205.
11. Josh, M., et al., Laboratory characterisation of shale properties. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2012. **88-89**(2): p. 107-124.
12. Kuila, U., et al., Stress anisotropy and velocity anisotropy in low porosity shale. *Tectonophysics*, 2011. **503**(1-2): p. 34-44.
13. Sierra, R., et al. Woodford shale mechanical properties and the impacts of lithofacies. in *US Rock Mechanics Symposium & Us-canada Rock Mechanics Symposium*. 2010.
14. Domnesteau, P., C. Mccann, and J. Sothcott, Velocity anisotropy and attenuation of shale in under- and overpressured conditions. *Geophysical Prospecting*, 2002. **50**(5): p. 487-503.
15. Sondergeld, C.H. and C.S. Rai, Elastic anisotropy of shales. *Leading Edge*, 2011. **30**(3): p. 324-331.
16. Hu, J., et al. Stress-Associated Intrinsic and Scattering Attenuation from Laboratory Ultrasonic Measurements on Shales. in *International Geophysical Conference, Qingdao, China, 17-20 April. 2017*.
17. Wang, Y. and C.H. Li, Investigation of the P- and S-wave velocity anisotropy of a Longmaxi formation shale by real-time ultrasonic and mechanical experiments under uniaxial deformation. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2017.
18. Li, X., X. Lei, and Q. Li, Response of Velocity Anisotropy of Shale Under Isotropic and Anisotropic Stress Fields. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2017(11): p. 1-17.
19. 孟召平, 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(04): p. 389-393.
20. 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(04): p. 22-24.
21. Feng, Z., et al., An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin. *Journal of Geophysics & Engineering*, 2012. **9**(6): p. 691.

22. Morcote, A., G. Mavko, and M. Prasad, Dynamic elastic properties of coal. *Geophysics*, 2010. **75**(6): p. E227-E234.
23. Shea, V.R. and D.R. Hanson, Elastic wave velocity and attenuation as used to define phases of loading and failure in coal. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1988. **25**(6): p. 431-437.
24. Lwin, M.J., The effect of different gases on the ultrasonic response of coal. *Geophysics*, 2011. **76**(5): p. 155.
25. Yu, G., K. Vozoff, and D.W. Durney, The influence of confining pressure and water saturation on dynamic elastic properties of some Permian coals. *Geophysics*, 1993. **58**(1): p. 30-38.
26. Yu, G., K. Vozoff, and D.W. Durney, Effects of confining pressure and water saturation on ultrasonic compressional wave velocities in coals. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991. **28**(6): p. 515-522.
27. 赵群, 郝守玲, 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*, 2006(02): p. 531-534.
28. 闫立宏, 杨庄煤矿煤岩波速特征及其与其强度的关系研究. *煤炭科学技术*, 2006(06): p. 57-60.
29. 王赟, 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(11): p. 3754-3761.
30. 许小凯, 王赟, 孟召平, 六种不同煤阶煤的品质因子特征. *地球物理学报*, 2014(02): p. 644-650.
31. 陈颀, 黄庭芳, 岩石物理学. 2001, 北京: 北京大学出版社.
32. 张建利, 王赟, 张玉贵, 横波偏振方法在煤样超声测量实验中的应用. *煤炭学报*, 2013(07): p. 1220-1226.
33. 滕吉文, 张中杰, 白武明, 岩石圈物理学. *地球物理学进展*, 2002. **17**(2): p. 281-293.
34. 郝召兵, 秦静欣, 伍向阳, 地震波品质因子 Q 研究进展综述. *地球物理学进展*, 2009(02): p. 375-381.
35. Rai, C.S. and K.E. Hanson, Shear-wave velocity anisotropy in sedimentary rocks: A laboratory study. *Geophysics*, 1988. **53**(6): p. 800.
36. 何樵登, 张中杰, 对各向异性介质中横波分裂现象的研究. *世界地质*, 1990(02): p. 11-18.
37. 张中杰, 地震各向异性研究进展. *地球物理学进展*, 2002. **02**: p. 281-293.
38. 魏建新, 岩石横波分裂和各向异性的实验室观测. *石油物探*, 1993(01): p. 60-67.
39. 雷军, 介质各向异性和非均匀性对横波分裂参数测量的影响. *科学通报*, 2017. **62**(23): p. 2619-2629.
40. 周寅, 基于横波分裂的裂缝属性识别研究. 2015, 吉林大学.
41. 解建建, 基于横波分裂分析的裂缝检测方法研究及应用. 2011, 成都理工大学.
42. 全红娟, 朱光明, 李桂花. 裂隙介质中横波分裂现象的影响因素分析. in 2014年中国地球科学联合学术年会——专题 22: 煤炭资源与矿山安全勘查技术. 2014. 中国北京.
43. 楚泽涵, 张颖, 横波在各向异性复合介质中的传播. *石油大学学报(自然科学版)*, 1998(01): p. 24-27+112-113.
44. 魏周拓,等, 横波各向异性分析方法及其在复杂储层中的应用. *石油物探*, 2011(03): p. 275-280+6.

致 谢

转眼之间，来到贵阳已近两年，博士后出站报告匆匆忙忙完成，感慨良多，在这里我要对两年来给予我帮助的家人、师长、朋友表示衷心的感谢！

首先感谢合作导师王赞研究员两年来的培养与指导。王老师学识渊博、治学严谨、平易近人。感谢老师在生活上对学生的鼓励和支持。感谢王老师对学生论文的悉心指导，在此向王老师表示学生深深的敬意和衷心的感谢！

感谢课题组的同门师兄弟妹在生活和学习上提供的帮助，和你们在一起短暂美好的日子一去不返了！

感谢参加博士后出站答辩的各位评委，谢谢你们提出的宝贵建议！

感谢胡晓燕老师在博后管理方面给予的帮助和指导！

感谢中国科学院地球化学研究所为我提供良好的生活、学习环境！

再次向所有帮助和关心我的师友、家人表示诚挚的谢意！

许小凯

2018年5月22日于中科院地化所

作者简介

许小凯，男（1987—），2010年毕业于河南理工大学，获学士学位；2013年毕业于河南理工大学，获硕士学位。2013年9月-2016年7月在中国矿业大学（北京）攻读博士学位，专业为地质工程。2016年8月-2018年6月在中科院地化所从事非常规煤层气、页岩气储层岩石物理实验研究工作。

博士生期间发表的学术论文

1. 许小凯, 王赟, 孟召平. 六种不同煤阶煤的品质因子特征. 地球物理学报. 2014, 57(2): 644-650. (SCI 收录)
2. Wang Yun, **Xu Xiaokai**, Yang Deyi. 2014. Ultrasonic elastic characteristics of five kinds of metamorphic deformed coals under room temperature and pressure conditions. Science China: Earth Sciences, 57: 2208-2216. (SCI 收录)
3. 王赟, 许小凯, 张玉贵. 2016. 常温压条件下六种变质程度煤的超声弹性特征. 地球物理学报, 59(7): 2726-2738. (SCI 收录)
4. 王赟, 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. (SCI 收录)
5. 陈亮, 吴兵, 许小凯, 等. 泥、砂岩交互地层综放开采覆岩破坏高度的确定. 采矿与安全工程学报, 2017.(06). (EI 收录)
6. Chen liang, Wu bing, **Xu Xiaokai**. Precise prediction of the area existing coal and gas outburst risk in working face scale. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2016,8(6). 2845-2851. (EI 收录)
7. 许小凯, 孟召平, 张玉贵, 等. 关于表面能在煤吸附性评价方面应用的探讨. 煤矿安全, 2015, 46(5): 172-175. (中文核心)
8. 许小凯, 陈亮, 张玉贵, 等. 广义有效应力在煤岩多相耦合渗流评价中的应用. 煤炭科学技术, 2015, 43(7):30-34. (中文核心)
9. 许小凯, 陈亮, 孟召平. 构造煤原煤制样及渗流实验方法设计. 煤炭技术, 2015, 34(8): 276-278. (中文核心)
10. 许小凯, 陈亮, 张玉贵. 煤岩渗透率稳态法测试实验中两个问题的探讨. 煤炭科学技术, 2016, 44(8):104-108.. (中文核心)

博士后期间发表的学术论文

1. Liang Chen, Shaowu Fan, Jianhang Guo, **Xiaokai Xu**, et al. Study on the critical value of gas content in regional prediction of coal and gas outburst based on gas adsorption and desorption experiment[J] Journal of Mines, Metals & Fuels, 2017.9 (EI)
2. 柳苏, 张玉贵, 许小凯, 赵晨光. 频率信号激励下煤电性试验及其特征研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(11):65-67. (中文核心)

在审稿件:

1. Xu Xiaokai, Wang Yun. Experimental investigation on permeability sensitivity of coal reservoir to pore pressure and its effective stress control mechanism. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, under review.
2. Xu Xiaokai, Wang Yun. A Preliminary Investigation of The Main Control Seepage Pore-fracture Structure Characteristics of High-rank Coal. *Fuel*, under review.
3. Xu Xiaokai, Wang Yun. Comparative study on pore structure and adsorption characteristics between coal and coal based activated carbon. *Journal of Physics D*, under review.

博士后期间参加科研项目

主要参与了国家杰出青年科学基金项目“地震各向异性理论与多分量地震技术”（编号：41425017）的研究，2015年1月-2019年12月。做煤、页岩等非常规气储层声学及电学各向异性特征方面的研究。