

安全科学与工程



移动扫码阅读

李东会,梁雁侠,张 凯,等.含水煤体纵波波速变化规律试验研究——以古汉山烟煤与赵固无烟煤为例[J].煤炭科学技术,2022,50(5):143-149.

LI Donghui, LIANG Yanxia, ZHANG Kai, *et al.* Experimental study on longitudinal wave velocity of water-bearing coal: taking Guhanshan bituminous coal and Zhaogu anthracite as examples[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 143-149.

含水煤体纵波波速变化规律试验研究 ——以古汉山烟煤与赵固无烟煤为例

李东会^{1,2}, 梁雁侠¹, 张 凯¹, 王晨曦¹

(1.河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454000;2.中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心,河南 焦作 454000)

摘 要:煤层由于地下水、水力增透技术等因素导致煤体内部含水程度不同,不同含水程度对煤层力学特性和瓦斯在煤层中流动有着较大的影响,从而会造成瓦斯抽采的困难。为解决含水瓦斯抽采困难的难题,在实验室内采用古汉山烟煤与赵固无烟煤进行不同含水饱和度煤样声波测试,结合 Wood 理论假设的 Gassmann 方程与 Kuster-Toksoz 理论方程作规律分析研究。结果表明:无论是古汉山烟煤还是赵固无烟煤含水饱和度以 60% 为分界线。平行层理含水饱和度在 60% 之前与 Wood 理论假设的 Gassmann 方程符合,60% 之后符合 Kuster-Toksoz 理论方程。而垂直层理孔、裂隙较发育,含水饱和度 60% 之前与 Wood 理论假设的 Gassmann 方程不符合,因此,自建的修正公式计算不同含水饱和度波速,与实际波速基本吻合。而含水饱和度 60% 之后符合 Kuster-Toksoz 理论方程。为明确不同含水饱和度下煤体波速变化规律提供室内试验依据,从而也可作为声波资料应用于煤层含水饱和度评估与预测提供理论基础。

关键词:含水煤样;含水饱和度;瓦斯抽采;煤体声波;纵波

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2022)05-0143-07

Experimental study on longitudinal wave velocity of water-bearing coal: taking Guhanshan bituminous coal and Zhaogu anthracite as examples

LI Donghui^{1,2}, LIANG Yanxia¹, ZHANG Kai¹, WANG Chenxi¹

(1.College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2.Collaborative Innovation Center of Central Plains Economic Region for Coalbed /Shale Gas, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Due to factors such as groundwater and hydraulic permeability improvement technology, coal seams have different water content in the coal body. Coal seams with different water content have a great influence on their mechanical properties and gas flow in the coal seam, thus causing difficulties in gas extraction. In order to solve the difficult problem of water-bearing gas extraction, this paper adopted the Guhanshan bituminous coal and Zhaogu anthracite to conduct the acoustic wave test of coal samples with different water-bearing saturation in the experiment, and analyzed and studied the law by combining the Gassmann equation assumed by Wood theory and the kuster-toksoz theoretical equation. It is found that the water saturation of both ancient hanshan bituminous coal and zhaogu anthracite is 60%. The parallel bedding water saturation before 60% conforms to Gassmann equation assumed by Wood theory, and after 60% conforms to kuster-toksoz theoretical equation. However, vertical stratification pores and fractures are relatively developed, and the water saturation before 60% is inconsistent with Gassmann equation assumed by Wood theory. Therefore, the author established a modified formula to calculate wave velocities of different water saturation, which is basically consistent with the actual wave velocities. After 60%, it conforms to the kuster-toksoz theoretical equation. It provides a theoretical basis for defining the wave velocity variation rule of coal body under different water saturation.

收稿日期:2021-11-01 责任编辑:黄小雨 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2019-1311

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(182300410138);河南省博士后经费资助项目(19030070);河南联合国家自然科学基金资助项目(U1704129)

作者简介:李东会(1981—),男,河南辉县人,讲师,博士。Email:lidonghui@hpu.edu.cn

通讯作者:梁雁侠(1991—),男,山西省朔州人,硕士研究生。E-mail:806658492@qq.com

tion.

Key words:water-bearing coal; water saturation;gas extraction;coal acoustic wave;longitudinal wave

0 引 言

声波测试煤岩介质物理力学特性及结构特征是通过记录超声波穿透煤岩信号参数(如波速、振幅、衰减因子等)变化,间接地了解煤岩的物理力学特性及结构特征,在煤矿安全开采中得到广泛应用^[1-2]。煤是一种多孔介质,而井下煤层由于地下水、水力增透技术等因素导致煤体内部含水程度不同,不同含水程度的煤层对其力学特性和瓦斯在煤层中流动有着较大的影响,从而会造成瓦斯抽采的困难。为解决含水煤层条件下瓦斯不易解吸、煤层渗透率低而造成的瓦斯抽采困难的难题,利用声波测试技术来预测煤层含水饱和度的方法是可行的。因此,本文在实验基础上,研究了纵波波速随含水饱和度的变化规律,并解释了该变化规律的内在机理。为声波资料应用于煤层含水饱和度评估与预测提供了理论基础,对不同饱和度煤层评价都具有重要意义。

近年来学者针对岩石声波在不同含水饱和度传播变化规律进行了大量研究。WYLLIE、BIOT、GREGORY 等^[3-5]最早研究岩石纵波波速与不同含水饱和度的变化规律,得出岩石孔隙均匀分布时,随饱和度增加纵波波速增大。AMOS^[6]对岩石进行干燥与饱水状态下的声波测试,得出岩石含水对纵波影响较大,对横波影响较小。LOUIS^[7]首次提出岩石水力学这一岩石含水特性的力学名称。之后国内外学者对岩石含水进行了大量的研究。国内学者从 20 世纪 80 年代开始研究,孙成栋^[8]最先进行了岩石试件的 S 波测试技术。赵明阶等^[9]给出岩石变

形参数的测试方法,把波速与工程岩体分类联系起来。周治国等^[10]、史譔等^[11]、陈旭等^[12]对不同岩样进行了不同含水率声波测试,得出岩石弹性波速度和含水饱和的关系。段天柱等^[13]研究受载条件下不同含水率砂岩力学特性及波速规律。

研究煤体不同含水率的少之又少。李楠、王云刚、赵宇等^[14-16]研究煤样吸水率对声波速度的影响,他们分析了干燥和饱水状态煤样声波的变化规律,得出相应的结论。但不同含水率煤样声波变化规律试验分析的很少。因此在研究岩石不同含水饱和度和声波变化规律的基础上,研究煤样不同含水饱和度和声波变化规律,为煤层物理勘探提供室内试验依据。

1 试验方案

1.1 煤样制作

采用古汉山烟煤与赵固无烟煤为研究对象。首先,将新鲜大块煤体从井下采出并立即用胶带将其捆扎严密,保证煤体得到密封;其次,将煤体尽快运至井上,并立即采取浸蜡固封的方法再次进行密封。根据测量的结果,合理规划如何钻取岩芯,用粉笔划分界线,并记录清晰,然后在切割机上面切割煤块;操作切割机,要确保安全,切煤的时候下刀要连续,稳定。为了保证加工的时候样品稳定,试样尽量有平整断面。煤样的制取是以平行层理及垂直层理方向。煤体式样加工成直径 50 mm,高 100 mm 的圆柱体样品,钻取古汉山与赵固煤样各 2 组。参数见表 1。

表 1 煤样参数
Table 1 Basic parameters coal samples

煤样编号	煤样种类	干燥煤样密度/ (g·m ⁻³)	煤样方位	通过含水饱和度和 计算孔隙率/%	最大镜质组反射率/%
古汉山 1x	烟煤	1.34	平行层理	3.82	1.925
古汉山 1y		1.29	垂直层理	4.08	
古汉山 2x		1.35	平行层理	3.84	
古汉山 2y		1.30	垂直层理	4.07	
赵固 1x	无烟煤	1.47	平行层理	6.57	2.257
赵固 1y		1.42	垂直层理	6.82	
赵固 2x		1.46	平行层理	6.64	
赵固 2y		1.42	垂直层理	6.93	

煤样自然吸水处理过程:① 将煤样放入 105~110 ℃ 的干燥箱 24 h,取出放入干燥器中冷却室温

称重 m_{dry} ;② 将煤样浸泡在水中使其自由吸水,期间不定时测量不同含水饱和度下试样下的质量 m ;

③当试样含水基本保持不变,每隔 24 h 称量 1 次,直到连续 3 次测量质量差不超过 0.01 g 为止,最后一次为自然吸水饱水质量 m_{sat} 。

1.2 试验含水饱和度 S_r 和煤样孔隙率 ρ 计算方法

$$S_r = \frac{m - m_{\text{dry}}}{m_{\text{sat}} - m_{\text{dry}}} \times 100\%$$

(1)

$$\varphi = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{dry}}}{\rho_L V} \times 100\%$$

(2)

式中: ρ_L 为水的密度,取 $1\text{g}/\text{m}^3$; V 为试样体积; φ 为孔隙率。

1.3 不同含水饱和度波速计算方法

选用换能器发射频率为 50 kHz,采用适量凡士林耦合煤样与换能器端面。不同含水饱和度波速 $v = L/T$, L 为试样长度, m ; T 为超声波传播时间, s 。

2 试验结果与分析

2.1 波速与含水饱和度变化规律

为研究不同煤质含水煤体波速变化情况,选取古汉山烟煤、赵固无烟煤进行试验,分别进行试验 4 组,分别测试 8 个煤样不同含水饱和度声波波速(表 2、表 3)。

表 2 赵固煤样不同含水饱和度波速								
Table 2 Wave velocities of Zhaogu coal samples with different water saturation								
试验 序号	赵固 1x		赵固 1y		赵固 2x		赵固 2y	
	含水饱 和度/%	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	含水饱 和度/%	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	含水饱 和度/%	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	含水饱 和度/%	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0	2 200	0	1 898	0	2 153	0	1 886
2	12.3	2 160	15.7	1 901	14.6	2 117	14.9	1 909
3	21.8	2 077	21.4	1 909	24.6	2 127	23.4	1 986
4	32.7	2 123	29.9	1 952	33.3	2 123	38.8	2 026
5	39.6	2 054	39.9	2 007	42.2	2 098	48.9	2 098
6	51.2	2 108	48.4	1 997	50.1	2 172	57.4	2 119
7	63.5	2 134	58.4	2 040	66.2	2 207	65.9	2 134
8	70.6	2 193	65.5	2 087	73.3	2 247	74.4	2 171
9	81.4	2 278	74.2	2 203	87.2	2 269	89.2	2 236
10	92.6	2 322	84.1	2 250	95.5	2 283	95.5	2 288
11	100	2 369	92.5	2 299	100	2 323	100	2 364

表 3 古汉山煤样不同含水饱和度波速								
Table 3 Wave velocities of Guhanshan coal samples with different water saturation								
试验 序号	古汉山 1x		古汉山 1y		古汉山 2x		古汉山 2y	
	含水饱 和度/%	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	含水饱 和度/%	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	含水饱 和度/%	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	含水饱 和度/%	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0	2 067	0	1 968	0	2 035.66	0	1 948
2	12.1	2 043	10	1 997	11.9	2 012.14	20.7	2 000
3	24.3	2 075	23.3	2 016	22.6	2 013.50	32	2 033
4	36.4	2 037	39.9	1 999	35.9	2 006.26	45.2	2 054
5	42.5	2 085	45.9	2 057	43.5	2 053.30	52.7	2 042
6	51.4	2 067	52.5	2 043	52.4	2 035.66	65.9	2 112
7	63.5	2 091	59.2	2 105	64.1	2 059.18	71.5	2 181
8	75.6	2 165	69.3	2 133	75.8	2 131.70	78	2 214
9	81.5	2 191	79.2	2 172	82.3	2 157.18	85.4	2 222
10	87.9	2 272	85.8	2 232	89.7	2 236.56	94.6	2 270
11	94.1	2 330	93.2	2 269	92.3	2 293.40	100	2 301
12	100	2 360	100	2 299	100	2 322.80		

通过对以上数据分析,赵固、古汉山 2 组煤不同含水饱和度具有相同的变化规律,因此,以赵固 1x、

1y,古汉山 1x、1y 一组为例进行分析,得出结论如图 1 所示。

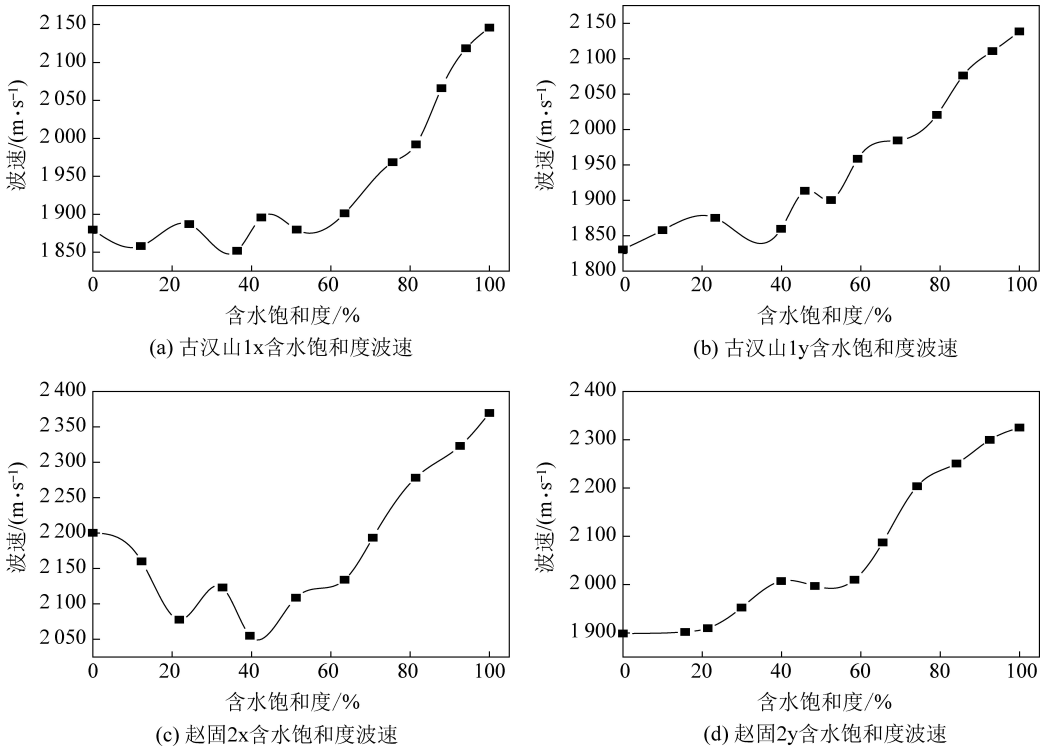


图 1 古汉山、赵固煤样含水饱和度变化规律

Fig.1 Variation law of water saturation of Guhanshan and Zhaogu coal samples

由图 1 可得:无论是古汉山烟煤还是赵固无烟煤,在含水饱和度 60%之前平行层理波速随着含水饱和度增大而减小,期间有波动。含水饱和度在 60%以后波速随含水饱和度增加而快速增大。而垂直层理整体随煤体含水饱和度增大而增大,在含水饱和度在 60%之前增加缓慢,到 60%以后波速随含水饱和度增加而快速增大。且无烟煤平行层理垂直层理波速大于烟煤平行层理垂直层理波速。是由于无烟煤变质程度高于烟煤,声波在煤体传播衰减、散射低,导致波速传播快。

2.2 波速与含水饱和度关系研究

为了描述了波速与不同含水饱和度二者之间的关系。采用基于 Wood 理论的 Gassmann^[17] 方程,如下所示:

$$v_p = \sqrt{\frac{K_G + \frac{4}{3}\mu_m}{\rho}} \quad (3)$$

其中, $K_G = K_m + \alpha^2 M$ (4)

$$K_m = \rho_d \left[(v_p^d)^2 - \frac{4}{3}(v_s^d)^2 \right] \quad (5)$$

$$\alpha = 1 - \frac{K_m}{K_s} \quad (6)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\alpha - \varphi}{K_s} + \frac{\varphi}{K_r} \quad (7)$$

$$\mu_m = \rho_d (v_s^d)^2 \quad (8)$$

$$r = \rho_d + \varphi [S_r \rho_L + (1 - S_r) \rho_a] \quad (9)$$

式中: K_G 为 Gassmann 方程的体积模量; K_m 为煤样干燥时的体积模量; μ_m 为煤样干燥时的剪切模量; r 为煤样密度; ρ_d 为干燥煤样密度; ρ_a 、 ρ_L 分别为空气和水的密度; v_p^d 、 v_s^d 分别为干燥时的纵横和横波波速; S_r 为含水饱和度; K_s 、 K_r 分别为煤样骨架和流体的体积模量, K_s 可根据以下经验公式计算:

$$K_s = K_m (1 + 50\varphi) \quad (10)$$

根据 Wood 理论假设,则

$$\frac{1}{K_r} = \frac{S_r}{K_w} + \frac{1 - S_r}{K_a} \quad (11)$$

式中: K_a 、 K_w 分别为空气和水的体积模量,在常温常压时分别为 1.013×10^5 和 2.18×10^9 Pa。参数 S_r 、 φ 可由式(1)、式(2)获得,干燥时纵波波速 v_p^d 和横波波速 v_s^d 可由超声波检测装置测得,干燥的煤样密度 ρ_d 由质量与煤样体积可得到。

如图 2 所示,红色线条为基于 Wood 理论假设的 Gassmann 方程。无论是古汉山烟煤还是赵固无烟煤在平行层理在含水饱和度 60%之前,实际波速

与 Wood 理论假设的 Gassmann 方程基本吻合,上下偏差不大。是因为在进水最初阶段,样品的进水率大。平行层理煤体孔隙率小,当样品从完全干燥状态到较小的饱和度时,干燥的煤体与水之间会发生物理和化学作用,使煤体发生化学软化,导致煤体弹性模量下降,使弹性波衰减增大,波速减小。当含水饱和度在 10%~60%时,波速变化较小,且无规则,此时弹性波按 Wood 理论的 Gassmann 方程发生变化。

而垂直层理煤样孔隙发育高,孔隙率较大。当煤样浸水时,水快速进入煤样,使原来煤样中空气减少,而波在水中传播速度远大于空气,使得波速在煤样中传播缩短了传播路径,同时反射、散射等现象降低,从而导致波速上升。同样水的进入也会使煤体软化,阻碍波速的传播。在含水饱和度 60%之前,水导致波速加快速度大于水使煤体软化波速降低的速度,导致波速增大,且成缓慢增加。不符合 Wood 理论假设的 Gassmann 方程。

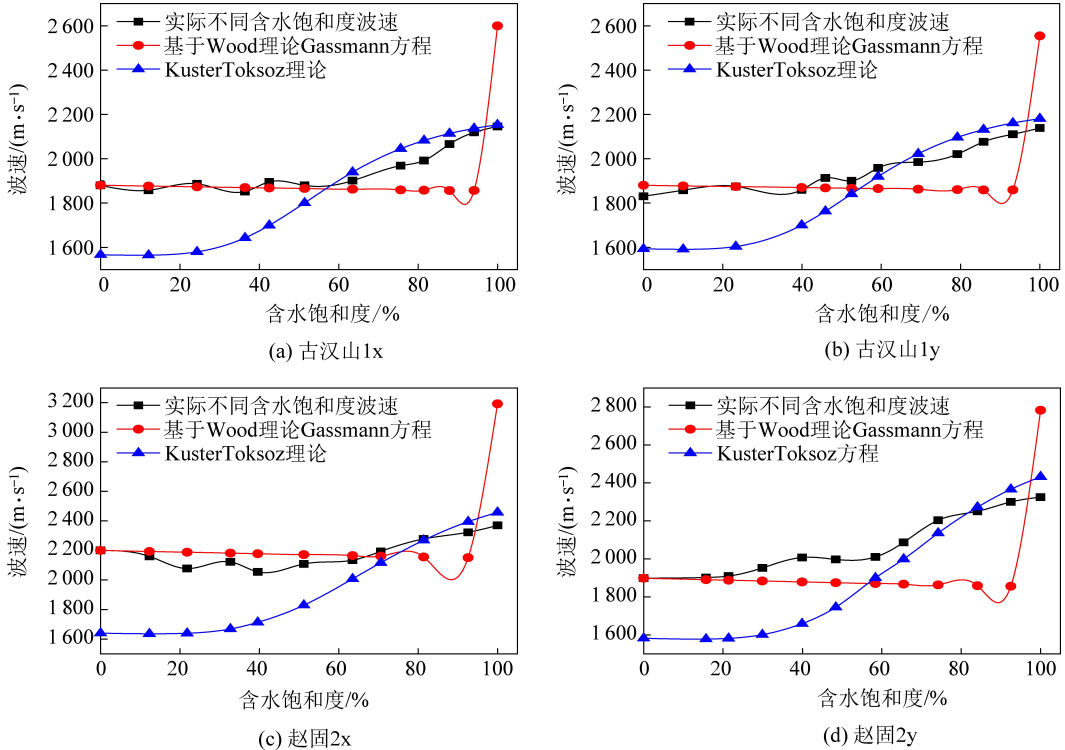


图2 不同煤样实际含水饱和度与不同模型含水饱和度对比

Fig.2 Comparison between actual water saturation of different coal samples and water saturation of different models

当样品的含水饱和度在 60%~100%时,无论烟煤还是无烟煤平行层理还是垂直层理波速明显上升。查阅相关文献,此阶段符合 Kuster-Toksoz^[18]理论。该理论利用弹性波散射理论,将双相介质等效为一种连续介质,使得入射波通过等效介质产生的

位移场和由入射波经每个孔隙散射引起的位移场相同,用长波一阶散射理论推导了对多种包含物形状的等效模量的 Kuster-Toksoz 表达式,其推广后的形式可以写成如下所示:

$$K^* - K = \frac{c}{3}(K' - K) T_{ijj} \frac{3K^* + 4\mu}{3K + 4\mu} \quad (12)$$

$$\mu^* - \mu = \frac{c}{5}(\mu' - \mu) \left(T_{ijj} - \frac{T_{ijj}}{3} \right) \frac{6\mu^* (K + 2\mu) + \mu(9K + 8\mu)}{5\mu(3K + 4\mu)} \quad (13)$$

其中:

$$T_{ijj} = \frac{3F_1}{F_2} \quad (14)$$

$$T_{ijj} - \frac{1}{3}T_{ijj} = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4F_5 + F_6F_7 - F_8F_9}{F_2F_4} \quad (15)$$

$$F_1 = 1 + A \left[\frac{3}{2}(g + \varphi) - R \left(\frac{3}{2}g + \frac{5}{2}\varphi - \frac{4}{3} \right) \right] \quad (16)$$

$$F_2 = 1 + A \left[1 + \frac{3}{2}(g + \varphi) - \frac{R}{2}(3g + 5\varphi) \right] + B(3 - 4R) + \frac{A}{2}(A + 3B)(3 - 4R)[g + \varphi - R(g - \varphi + 2\varphi^2)] \tag{17}$$

$$F_3 = 1 + \frac{A}{2} \left[R(2 - \varphi) + \frac{(1 + \alpha^2)}{\alpha^2}g(R - 1) \right] \tag{18}$$

$$F_4 = 1 + \frac{A}{4}[3\varphi + g - R(g - \varphi)] \tag{19}$$

$$F_5 = A \left[R \left(g + \varphi - \frac{4}{3} \right) - g \right] + B\varphi(3 - 4R) \tag{20}$$

$$F_6 = 1 + A[1 + g - R(g + \varphi)] + B(1 - \varphi)(3 - 4R) \tag{21}$$

$$F_7 = 2 + \frac{A}{4}[9\varphi + 3g - R(5\varphi + 3g)] + B\varphi(3 - 4R) \tag{22}$$

$$F_8 = A \left[1 - 2R + \frac{g}{2}(R - 1) + \frac{\varphi}{2}(5R - 3) \right] + B(1 - \varphi)(3 - 4R) \tag{23}$$

$$F_9 = A[g(R - 1) - R\varphi] + B\varphi(3 - 4R) \tag{24}$$

$$A = \frac{\mu'}{\mu} - 1 \tag{25}$$

$$B = \frac{1}{3} \left(\frac{K'}{K} - \frac{\mu'}{\mu} \right) \tag{26}$$

$$R = \frac{3\mu}{3K + 4\mu} \tag{27}$$

$$g = \frac{a^2}{1 - a^2}(3\phi - 2) \tag{28}$$

$$\phi = \frac{\alpha}{(1 - \alpha^2)^{3/2}} [\cos^{-1} \alpha - \alpha(1 - \alpha^2)^{1/2}] \tag{29}$$

式中： T_{ijj} 和 T_{ijj} 为对称能四阶张量，取决于包含物形状； K^* 为推导后的等效体积模量； μ^* 为推导后的等效剪切模量； K 为体积模量； μ 为切变模量； K' 为孔隙的体积模量； μ' 为孔隙的切变模量； α 为孔隙纵横比； c 为孔隙体积； g 与 ϕ 均为中间变量。

通过 Kuster-Toksoz 理论计算，如图 2 中蓝色线所示，不管垂直层理还是平行层理含水饱和度在 60%~100%时，Kuster-Toksoz 模型计算的波速是增加的，与实际波速（黑色线）走势大小基本吻合。所

以此阶段符合 Kauster-Toksoz 理论。

60%~100%阶段波速明显上升，是由于波速在水中传播速度大于空气，水分逐步充满煤样孔隙，水代替空气而成为孔隙中连通的液相，裂隙状的小孔开始被饱和。导致裂隙状孔刚度增加，使得波速在煤样中传播缩短了传播路径，同时反射、散射等现象降低，从而导致波速上升。

垂直层理煤样含饱和度在 60%之前，由于孔、裂隙较发育，水的进入作用大于水使煤样软化的作用，导致纵波波速缓慢上升。结合分析与试验现象，把垂直层理含水饱和度在 60%之前，进行波速与不同含水饱和度变化规律定量分析，经过计算分析得出垂直层理含水饱和度在 60%之前符合以下修正公式：

$$v_p = \frac{S_{n1} - S_r}{1 - S_{n1}}v_0 + \left(1 - \frac{S_{n1} - S_r}{1 - S_{n1}} \right)v_{n1} \tag{30}$$

其中： S_{n1} 为煤样第 1 次转折是（第 2 阶段快速增加的起点）的含水饱和度； S_r 为 S_{n1} 之前煤样不同含水饱和度； v_0 为煤样干燥时的波速； v_{n1} 为煤样在 S_{n1} 饱和度下的波速。通过计算与实际波速相比较，得出结论如图 3 所示。

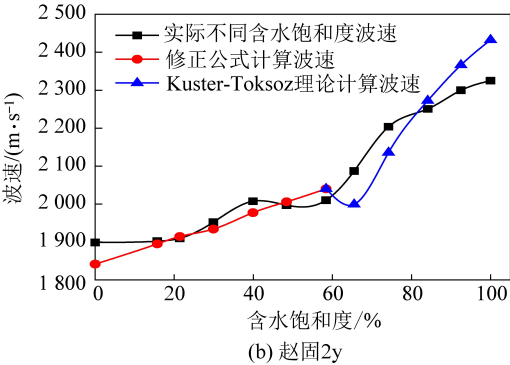
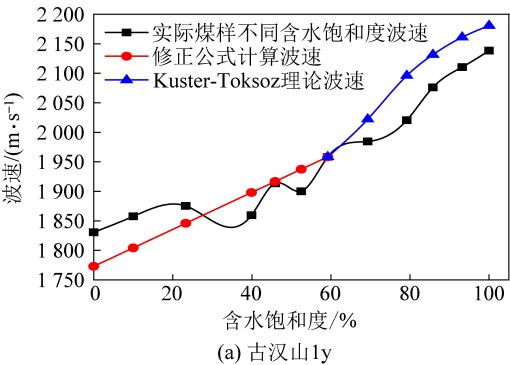


图 3 不同煤样实际含水饱和度与修正公式、模型含水饱和度对比

Fig.3 Comparison between actual water saturation of different coal samples and water saturation of modified formula and model

分析得出:无论烟煤还是无烟煤煤样含水饱和度在 60%之前,修正公式计算的波速(红色线)与实际波速走势基本吻合,波速大小相差不大。含水饱和度 60%之后,Kauster-Toksoz 理论计算波速与实际波速走势、大小基本吻合,符合 Kauster-Toksoz 理论。

3 结 论

1)赵固无烟煤平行层理与垂直层理波速大于古汉山烟煤平行层理与垂直层理波速,且无论赵固无烟煤还是古汉山烟煤,干燥时平行层理波速大于垂直层理波速。

2)无论是烟煤还是无烟煤平行层理煤样在含水饱和度 60%之前,波速随不同含水饱和度增加而下降,在含水饱和度 60%之后波速快速上升。而垂直层理煤样在含水饱和度 60%之前,波速随不同含水饱和度增加而缓慢增加,在含水饱和度 60%之后波速快速上升。

3)平行层理煤样在含水饱和度 60%波速与 Wood 理论假设的 Gassmann 方程计算波速基本吻合,在含水饱和度 60%之后波速与 Kauster-Toksoz 理论计算波速基本吻合。垂直层理煤样在含水饱和度 60%波速与修正公式计算波速基本吻合,在含水饱和度 60%之后波速与 Kauster-Toksoz 理论计算波速基本吻合。

参考文献(References):

- [1] 高鑫浩,王明玉.水力压裂-深孔预裂爆破复合增透技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(7):318-324.
GAO Xinhao,WANG Mingyu. Study on hydraulic fracturing-deep hole pre-splitting blasting composite permeability enhancement technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 318-324.
- [2] 张凯,李东会,梁雁侠.三轴加载煤样声波速度与孔隙率关系试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(5):63-68.
ZHANG Kai, LI Donghui, LIANG Yanxia. Experimental study on relationship between acoustic velocity and porosity of coal samples under tri-axial loading[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 63-68.
- [3] WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media[J]. Geophysics, 1956, 21(1): 50-60.
- [4] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, I. low frequency range[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1956, 28(2): 168-172.
- [5] GREGORY A R. Fluid saturation on dynamic elastic properties of sedimentary rocks[J]. Geophysics, 1974, 41(5): 896-910.
- [6] AMOS Nur, GENE Simmons. The effect of saturation on velocity in low porosity rocks[J]. Letters. 1969, 7(2): 184-190.
- [7] Louis C. Rock Hydraulics Rock Mechanics. Edition by L. Muller Udine.[J] Springer-Verlag, 1974, 300-386.
- [8] 孙成栋.岩石试件的 S 波测试技术[J].长春地质学院学报.

- 1980(9):38-40.
SUN Chengdong. S-wave testing technique for rock specimens[J]. Changchun University of Earth Sciences. 1980(9):38-40.
- [9] 赵明阶,吴德伦.工程岩体的超声波分类及强度预测[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1):89-92.
ZHAO Mingjie, WU Delun. The ultrasonic identification of rock mass classification and rock mass strength prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 89-92.
- [10] 周治国,朱合华,陈伟.饱水岩样声波传播规律的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(5):911-917.
ZHOU Zhiguo, ZHU Hehua, CHEN Wei. Experimental study on acoustic wave propagation character character of water saturated rock samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 911-917.
- [11] 史譔,沈文略,杨东全.岩石弹性波速度和饱和度、孔隙流体分布的关系[J].地球物理学报,2003,46(1):139-142.
SHI Ge, SHEN Wenlue, YANG Dongquan. The relationship of wave velocities with saturation and fluid distribution in pore space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(1): 139-142.
- [12] 陈旭,俞缙,李宏等.不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J].岩石力学,2013,34(9):2528-2530.
CHEN Xu, YU Jin, LI Hong et al. Experimental study of propagation characteristics of acoustic wave in rock with different lithologies and water contents[J]. Rock Mechanics. 2013, 34(9): 2528-2530.
- [13] 段天柱,任亚平.不同含水率砂岩单轴压缩力学特性及波速法损伤[J].煤田地质与勘探,2019,47(4):154-158.
DUAN Tianzhu, REN Yaping. Study on uniaxial compression mechanical properties of sandstone with different moisture content and wave velocity method[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 154-158.
- [14] 李楠,张新,王达轩等.煤样吸水全过程纵波波速变化规律及波形特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(8):1922-1925.
LI Nan, ZHANG Yin, WANG Daxuan et al. Experimental study on the variation of P-wave velocity and waveform characteristics during the whole process of water absorption of coal samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1922-1925.
- [15] 王云刚,李满贵,陈兵兵等.干燥及饱含水煤样超声波特征的试验研究[J].煤炭学报,2015,40(10):2446-2450.
WANG Yungang, LI Nanguai, CHEN Bingbing et al. Experimental study on ultrasonic wave characteristics of coal samples under dry and water saturated conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2446-2450.
- [16] 赵宇,张玉贵,于弘奕.煤岩吸水率对声波速度各向异性影响的试验研究[J].石油地球物理勘探,2017,52(5):1000-1004.
ZHAO Yu, ZHANG Yugui, YU Hongyi. Experimental research on effects of water absorption on acoustic velocity anisotropy in coal rock[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(5): 1000-1004.
- [17] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. Geophysics, 1951, 16(4): 673-684.
- [18] KAUSTER G T, TOKSOZ M N. Velocity and attenuation of seismic wave in two-phase media[J]. Geophysics, 1974, 39(5): 608-618.