

中文引用格式:朱双江,鲁义,李贺,等. 煤氧化自燃的弹性波响应特征及机制[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 145–152.

英文引用格式:ZHU Shuangjiang, LU Yi, LI He, et al. Elastic wave response characteristics and mechanism of coal oxidation spontaneous combustion [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 145–152.

煤氧化自燃的弹性波响应特征及机制^{*}

朱双江^{1,2,3}副教授, 鲁义^{**1,2,3}教授, 李贺^{1,2,3}教授, 李敏^{1,2,3}副教授,
郭鑫^{1,2,3}副教授, 赵新¹

(1 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2 地下空间
防火防爆材料与装备湖南省工程研究中心, 湖南 湘潭 411201; 3 火灾爆炸
防控与应急技术湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1689

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174180); 国家自然科学基金青年基金资助(52404205); 湖南省自然科学基金青年基金资助(2023JJ40294); 湖南教育厅优秀青年项目(22B0499)。

【摘要】 为利用弹性波探测准确定位破碎煤柱内部的隐蔽自燃区域, 试验煤的弹性波速度对温度的响应特征及内在机制。首先, 利用程序升温炉预处理煤样, 得到不同氧化程度煤样; 然后, 通过弹性波和低场核磁共振测试, 分析不同氧化程度煤的弹性波及孔裂隙特征; 最后, 结合热重(TG)测试和型煤单一变量试验, 揭示煤氧化自燃的弹性波响应特征及内在机制。结果表明: 原煤纵、横波速度随温度升高逐渐下降, 其中, 纵波速度在热失重最大质量温度后的下降速率约为横波速度下降速率的2.4倍; 纵波速度下降趋势呈明显的分段特征, 第Ⅰ阶段从初始温度到TG最大质量温度, 纵波速度下降速率约为 $1.27\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})/\text{℃}$, 第Ⅱ阶段从TG最大质量温度到终止温度, 纵波速度下降速率增大至 $4.51\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})/\text{℃}$; 煤体孔隙度从30℃时的1.57%上升至360℃时的9.6%, 特别是温度超过最大质量温度后, 裂隙数量和开度显著增加, 不仅导致弹性波的传播路径变长, 还使弹性波传播速度下降; 煤基质作为弹性波的传播介质, 在最大质量温度前未明显分解, 对应的型煤纵波速度稳定在900 m/s左右; 煤基质在超过最大质量温度后开始迅速分解, 对应的型煤纵波速度下降至360℃时的798 m/s, 且煤基质由“高波速”介质逐渐转变为“低波速”介质。

【关键词】 煤氧化自燃; 弹性波; 响应特征; 孔裂隙; 纵波速度; 煤基质

Elastic wave response characteristics and mechanism of coal oxidation spontaneous combustion

ZHU Shuangjiang^{1,2,3}, LU Yi^{1,2,3}, LI He^{1,2,3}, LI Min^{1,2,3}, GUO Xin^{1,2,3}, ZHAO Xin¹

(1 School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 Hunan Engineering Research Center for Fire and Explosion Prevention Materials and Equipment in Underground Spaces, Xiangtan Hunan 411201, China; 3 Key Laboratory of Fire and Explosion Prevention and Emergency Technology in Hunan Province, Xiangtan Hunan 411201, China)

* 文章编号: 1003-3033(2025)05-0145-08; 收稿日期: 2024-12-16; 修稿日期: 2025-02-21

** 通信作者: 鲁义(1986—), 男, 江西新干人, 博士, 教授, 主要从事火灾科学与技术、煤自燃与瓦斯复合灾害防治等方面的研究。E-mail: luyijx@163.com。

Abstract: In order to accurately locate the hidden spontaneous combustion area inside the broken coal pillar using elastic wave detection, the response characteristics and mechanism of the elastic wave velocity of coal to temperature were experimentally studied. Firstly, coal samples were pretreated by temperature programmed furnace to obtain coal samples with different oxidation degrees. Then, elastic wave and low-field NMR tests were conducted to analyze the characteristics of elastic wave and pore cracks of coal with different oxidation degrees. Finally, combined with thermogravimetric (TG) analysis and single variable briquette experiments, the elastic wave response characteristics and mechanism of coal oxidation spontaneous combustion were revealed. The results show that the P-wave and S-wave velocities of raw coal gradually decrease with increasing temperature, and the P-wave velocity decreases 2.4 times that of the S-wave velocity after the maximum mass loss temperature of TG curve. The decreasing trend of P-wave velocity shows an obvious segmental characteristic. Before the maximum mass loss temperature of the TG curve in stage I, the P-wave velocity decreases at a rate of approximately $1.27 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/^{\circ}\text{C}$. from the maximum mass loss temperature to the final temperature, the decline rate of P-wave velocity increases to $4.51 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/^{\circ}\text{C}$. The porosity of coal increases from 1.57% at 30 $^{\circ}\text{C}$ to 9.6% at 360 $^{\circ}\text{C}$. In particular, after the temperature exceeds the maximum mass loss temperature, the number and aperture of cracks increase significantly, which not only lengthens the propagation path of elastic waves, but also decreases the propagation speed of elastic waves. As the propagation medium of elastic waves, the coal matrix does not decompose obviously before the maximum mass loss temperature, and the corresponding P-wave velocity of briquette remains stable at about 900 m/s. After exceeding the maximum mass loss temperature, the coal matrix decomposes rapidly, and the corresponding P-wave velocity of briquette drops to 798 m/s at 360 $^{\circ}\text{C}$, which proves that the coal matrix gradually transitions from a "high wave velocity" medium to a "low wave velocity" medium.

Keywords: coal oxidation spontaneous combustion; elastic wave; response characteristics; pore and fracture; longitudinal wave velocity; coal matrix

0 引言

我国 90%以上的煤层为自燃或易自燃煤层,煤自燃引起的火灾占矿井火灾总数的 85%~90%^[1],其中,破碎煤柱自燃是井下煤自燃的主要形式之一^[2]。随着浅部煤炭资源的逐渐枯竭,深部煤炭资源开采将成为常态,随之而来的高地应力、高地温环境将使煤柱更容易破碎自燃。煤柱自燃一旦发现即处于自燃期,且自燃区域在风流压力作用下会迅速扩大,对工作面的安全生产造成极大威胁^[3]。此外,煤自燃会引起自身力学性能的弱化,不仅进一步迫使煤柱破碎,还增大了顶板坍塌及采空区煤自燃的风险。因此,及时、准确定位煤柱隐蔽自燃区域对井下安全生产具有重要意义。

国内外学者针对煤层隐蔽火源开展了非接触式地球物理探测研究。一部分学者利用煤岩体在高温状态下磁性变化的特点,通过磁法勘探圈定了煤田火区范围^[4-5]。另一部分学者研究了煤岩燃烧及受热过程中的电磁辐射效应,并通过电磁辐射探测定

位了煤层的高温异常区域。孔彪^[6]、牛会永^[7]等测量了不同温度条件下煤样的电阻率,发现电阻率的变化对煤的自燃有较好的响应。以上研究主要针对于露天煤矿火区隐蔽火源位置的探测,而井下煤柱隐蔽火源的探测受到巷道内的锚杆、管路和锚网等金属设施的干扰,导致电、磁探测结果的精度有所下降。尽管有学者基于煤柱内部漏风流场和温度场开展了易自燃区域的数值模拟研究^[4],但直接利用地球物理方法探测煤柱隐蔽火源位置的研究鲜有涉及。弹性波探测是地球物理勘探中的重要技术手段之一,其常用的弹性波速度、波阻抗等参数能够准确反映地层岩性,且数据准确性不受井下金属设施影响。弹性波探测已成功应用于断层、陷落柱、采空区、瓦斯富集区和应力集中区等多种煤层物性参数异常区域的探测^[8-9],但鲜有学者针对氧化自燃煤体的弹性波响应特征进行深入研究。郭军等^[10]认为煤自燃过程中气体组分介质变化会影响声波的传播速度,进而可建立声速与煤温之间映射关系。闫治国等^[11]开展了砂岩等岩石高温后的弹性波特性

试验研究,认为高温导致的岩石裂隙发育是造成纵波速度下降的原因。李祥春等^[12]分析了煤样波速和波阻抗随温度的变化特性,认为热膨胀会使煤体弹性模量降低,而热应力会导致裂隙发育,从而使波速和波阻抗减小。潘荣锟等^[13]测量了不同氧化程度煤的纵波速度,发现当温度达到 265 ℃ 时,煤的纵波速度较常温下降了 62.94%,并得出煤体内部孔隙结构发育是造成纵波速度下降的原因。

关于高温煤岩体弹性波速度的研究表明,波速下降归因于煤岩体内部孔裂隙的发育。然而,在煤氧化自燃过程中,煤基质在高温条件下会发生分解,不仅使煤体内部孔隙结构进一步发育,还会改变煤基质自身的物性。二者都可能对弹性波的传播产生影响,但其对弹性波传播的影响特性及作用机制尚未明确。鉴于此,笔者拟以煤的弹性波响应为研究对象,基于弹性波传播的基本原理,结合煤氧化自燃过程中孔裂隙和基质的演变特性,分析煤氧化自燃不同阶段弹性波的响应特征,通过揭示煤自燃的弹性波响应机制,以期为煤柱隐蔽火源位置及发展态势探测提供参考。

1 试验方法及流程

1.1 煤样制备

试验所用煤样采自内蒙古察哈素煤矿 31213 工作面新剥落的煤块,煤质为低阶烟煤,煤的工业分析结果见表 1。为分析煤自燃的弹性波响应特征及机制,需综合利用原煤、型煤及煤粉试样进行试验。在煤块上沿层理方向钻取直径为 50 mm 的煤柱,切割加工成长为 100 mm 的标准原煤试样,并将其置于真空干燥箱中干燥 24 h 后取出,放入真空釜中备用。将钻取原煤试样后的剩余煤块粉碎研磨,筛选出粒径为 57~74 μm 的煤粉,将其真空干燥后置于真空釜中备用。型煤的制备需将煤粉进行特殊的预处理,详见下文试验流程部分。

表 1 煤样工业分析

Table 1 Industrial analysis of coal samples %			
水分	灰	挥发分	固定碳
7.86	11.95	33.12	47.07

1.2 弹性波测试

根据弹性波频率的不同,可分为地震波、次声波、声波和超声波,实验室尺度下的弹性波测试通常使用超声波进行。文中所用弹性波测试设备为智能超声纵、横波综合测试仪,如图 1 所示。由于超声波

耦合剂会影响煤氧复合反应的进程,为保证耦合效果,使用超声波测试架施加 0.2 MPa 的轴向压力,不仅增加超声探头与煤样端面的耦合效果,还能保证多次测量时探头和端面的耦合一致性。测试所用超声波探头的主频为 0.5 MHz,采样频率为 10 MHz。



图 1 超声纵、横波测试仪
Fig.1 Ultrasonic P and S-wave tester

1.3 孔隙度测试

孔隙度测试所用设备是低场核磁共振岩心分析仪,其主磁感应强度为(0.5±0.03) T,射频脉冲的功率为 300 W。将煤样饱水后放入核磁共振分析仪进行测试,测试完成后,将其放入氮气干燥箱内自然风干。

1.4 热重(TG)测试

采用热重(Thermogravimetric, TG)分析仪进行 TG 测试。取真空釜中的干燥煤样 10 mg 放入坩埚内,然后将坩埚放入分析仪中,设定测试温度区间为 30~800 ℃,试验气氛为空气,流量为 50 mL/min。

1.5 试验流程

- 1) 取 6 个制备好的原煤试样,平均分为 A、B 组,其中, A 组试样编号为 CHS-A1、CHS-A2、CHS-A3; B 组试样编号为 CHS-B1、CHS-B2、CHS-B3。将 A、B 组试样放入升温炉中进行程序升温,升温速率设置为 10 ℃/min,目标温度为 30 ℃,达到目标温度后继续保持该温度 240 min,以保证煤样内外氧化程度接近一致,然后取出煤样进行冷却处理。
- 2) 取冷却处理后的 A 组煤样进行弹性波测试,并对冷却处理后的 B 组煤样进行核磁共振测试。
- 3) 弹性波和核磁共振测试完成后,将 A、B 组煤样重新放入程序升温炉,设定新的目标温度自 30 ℃ 开始,以 30 ℃ 的步长递增,重复步骤 1) 和步骤 2),直至煤样破碎至无法进行超声测试或核磁共振测试。
- 4) 取制备的煤粉 10 mg 进行 TG 特性分析,其升温速率同样设置为 10 ℃/min。
- 5) 另取制备的煤粉若干,平均分为 5 组,分别

将5组煤粉加热至不同温度(120、180、240、300和360℃),当达到目标温度后,保持该温度240 min,冷却后取出。

6) 将经过步骤5)处理后的煤粉用孔径57~74 μm的筛网再次筛选,得到粒径基本一致但氧化程度不同的5组煤粉。

7) 将等体积的步骤6)得到的5组煤粉依次放

入φ50 mm×100 mm型煤压制模具中,使用相同的成型压力压制。最终得到5组煤体内部结构相近,而氧化程度不同的标准型煤试样,按照温度由低到高分别编号为CHS-X1、CHS-X2、CHS-X3、CHS-X4和CHS-X5。

8) 依次测量5组型煤试样的纵波速度。具体试验流程如图2所示。



图2 试验流程

Fig. 2 Flow chart of the experiment

2 煤氧化自燃的弹性波响应特征

2.1 氧化自燃煤体的弹性波特征参数

弹性波探测涉及到的参数主要包括弹性波的波速、振幅、泊松比和波阻抗等,其中最常用且最容易获得的参数。弹性波速度主要包括纵波速度和横波速度,二者对异常的响应敏感程度不同。CHS-A1、CHS-A2和CHS-A3这3种原煤试样在不同温度时的纵波速度和横波速度变化情况如图3所示。由图3可知:随着温度升高,二者均呈下降趋势,但纵波速度的下降速率明显高于横波速度,特别是在温度为240℃之后,纵波速度下降了约34.3%,而横波速度下降了约14.3%,表明纵波速度的下降速率约为横波速度的2.4倍。因此,纵波速度对煤氧化自燃的响应比横波速度更灵敏,更适合用作反映煤氧化自燃进程的弹性波特征参数。

2.2 煤氧化自燃过程纵波速度变化特性

CHS-A1、CHS-A2和CHS-A3这3种原煤试样的纵波速度均值随温度的变化特性如图4所示。由图4可知:纵波速度整体呈下降趋势,整个过程可以

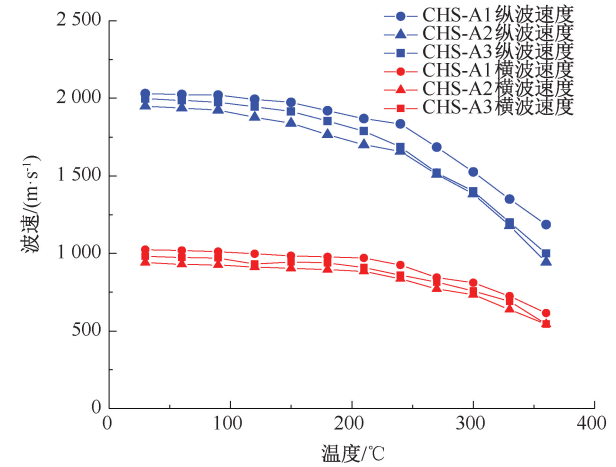


图3 煤自燃过程纵、横波速度变化

Fig. 3 Changes of P-wave and S-wave velocity during coal spontaneous combustion

分为2个阶段,第I阶段从温度为30℃到240℃,纵波速度从1992 m/s下降至1726 (m·s⁻¹)/℃,下降约13.3%,下降速率约为1.27 m/(s·℃⁻¹),表明其下降速度相对缓慢;第II阶段从温度为240℃到360℃,该阶段的纵波速度下降速率明显大于第I阶段,纵波速度从1726 m/s下降至1185 m/s,下

降约 27.1%,下降速率约为 $4.51\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})/\text{℃}$,约是第 I 阶段下降速率的 3.6 倍。当温度高于 360 ℃ 后,煤样因难以维持其外观形态逐渐发生坍塌,难以准确测量纵波速度。试验结果表明:原煤在氧化自燃过程中的纵波速度存在明显的分段演化特征,不同阶段的纵波速度下降速率有显著差异。

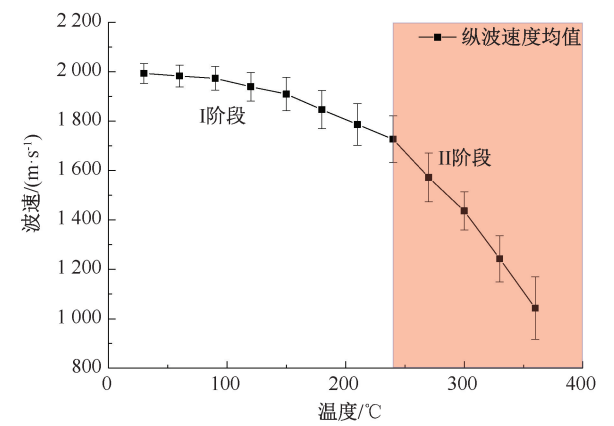


图 4 原煤纵波速度随温度变化特性
Fig. 4 Variation characteristics of P-wave velocity of raw coal with temperature

3 煤氧化自燃的弹性波响应机制

煤基质是弹性波传播的主要介质,而煤体内孔隙裂隙的开度、形状等会影响弹性波的传播路径^[14]。因此,在煤氧化自燃过程中,二者的演化特性直接决定了弹性波的传播特性。

3.1 煤的 TG 特性

煤的 TG 曲线反映了煤基质的氧化分解情况,将 TG 曲线对温度求导后,得到 TG-微商热重 (Differential Thermalgravity, DTG) 曲线,如图 5 所示。由图 5 可知: TG-DTG 曲线上主要有 6 个比较明显的特征温度点^[15],其中, t_1 为临界温度点,对应 DTG 曲线的第 1 个峰谷温度点,在该温度后,煤基质表面及内部的水分开始流失,同时,氧气与煤基质中的少量活性基团开始发生反应; t_2 为干裂温度点,对应 TG 曲线的第 1 个最小值点,在该温度后,煤的质量因吸附氧气而轻微增加; t_3 为最大质量温度点,在该温度后,煤基质快速氧化分解导致质量迅速下降; t_4 为燃点温度,此温度后达到煤的燃点,煤粉开始燃烧; t_5 为最大失重速率温度,对应 DTG 曲线上的最小峰谷温度点;当温度超过 570 ℃ 后,煤样质量趋于稳定,此时,大部分煤基质已经氧化分解; t_6 为燃尽温度点,该温度后煤的质量基本不再发生变化。特

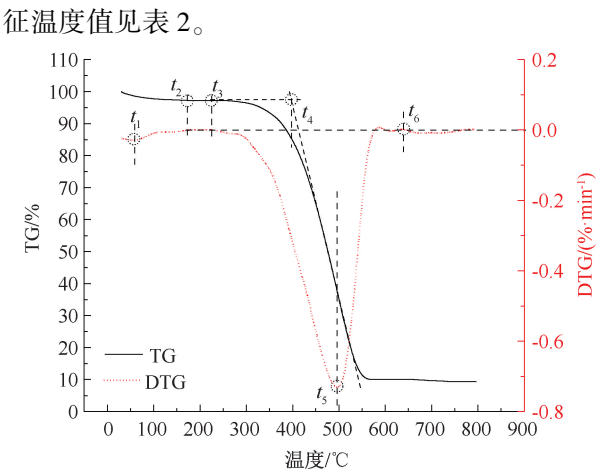


图 5 煤的 TG-DTG 曲线
Fig. 5 TG-DTG curve of coal

表 2 煤 TG-DTG 曲线的特征温度值
Table 2 Characteristic temperature values of the TG-DTG curve of coal

特征温度	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
	59.4	173.4	226.8	394.8	497.5	641

基于以上特征温度,将煤的氧化自燃分为 4 个阶段^[15]:失水失重阶段 (t_1-t_2),该阶段煤的质量下降幅度较小,并且有逐渐放缓的趋势,煤基质未发生明显的氧化分解,主要发生煤的脱水;吸氧氧化阶段 (t_2-t_3),该阶段煤基质表面的部分物质发生煤氧复合作用,并产生 CO 和 CO_2 等气体,但由于煤基质氧化分解量很小,导致其与吸氧引起的增重量基本持平;热解阶段 (t_3-t_4),该阶段煤基质的氧化分解逐渐加快,并产生 C_2H_4 和 C_2H_6 等气体;燃烧阶段 (t_4-t_6),该阶段煤基质氧化分解速率先是剧烈增加,并产生大量热和气体,后逐渐放缓,直至煤氧复合反应停止。

3.2 孔隙发育特性

利用低场核磁共振方法测得 CHS-B1、CHS-B2 和 CHS-B3 这 3 种煤样在不同温度点的累计孔隙度,煤样平均孔隙度随温度的变化曲线如图 6 所示。同时,利用高清相机记录升温过程中煤样端面裂隙发育情况如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知:随着温度升高,煤样孔隙度逐渐增加,结合 TG 分析中的特征温度点,可将孔隙度曲线分为 2 个阶段:第 I 阶段在 t_3 之前为最大质量温度,该阶段孔隙度上升趋势相对平缓,孔隙度从 1.57% 上升至 3.34%,煤样端面有少量新生裂隙发育,已有裂隙的开度并没有明显增加;第 II 阶段从温度 t_3 开始,此阶段煤基质迅速氧化分解,煤样端面裂隙迅速发育,新生裂隙数量

和裂隙开度均有明显增加。从而使煤氧复合反应区域面积迅速增大,导致孔隙度上升速率明显增加,孔隙度从240℃时的3.34%上升至360℃时的9.6%;当温度超过 t_4 后,煤进入燃烧阶段,煤基质有明显分解现象,从而导致煤体结构松散,裂隙进一步扩展,形成大量不规则小煤块。此时浸水后的煤样有坍塌迹象,难以准确测量孔隙度。

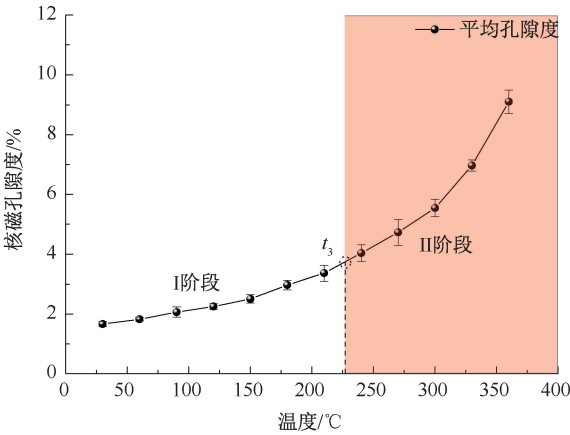


图6 煤自燃过程孔隙度演变

Fig. 6 Porosity evolution during coal spontaneous combustion process

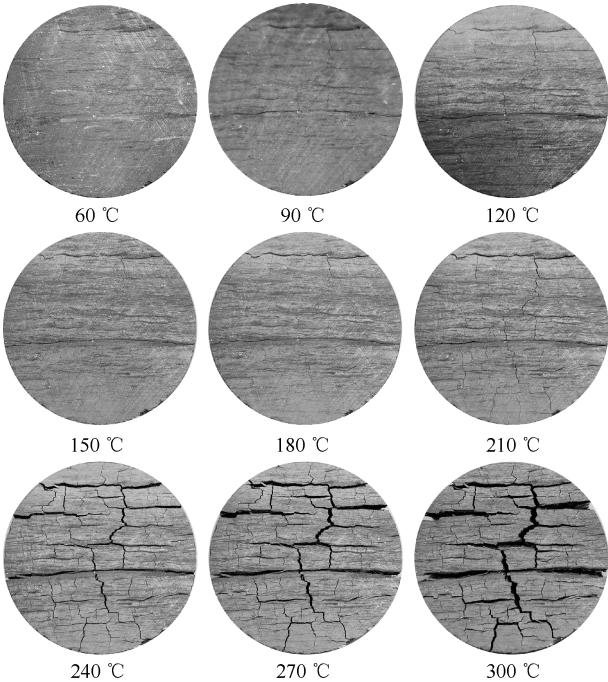


图7 不同氧化程度煤表面裂隙发育

Fig. 7 Development of surface fractures of coal with different oxidation degree

3.3 煤基质纵波速度变化特性

煤氧化自燃过程中基质分解与孔裂隙发育是同

步进行的。尽管已有学者研究了孔裂隙发育对弹性波传播的影响^[11-13],但关于煤基质作为弹性波传播的固体介质,其自身物性改变对弹性波传播的影响特性少有涉及。因此,通过设计单一变量试验,分别研究不同氧化程度煤基质的纵波速度变化。根据步骤5)—步骤7)的型煤制备方法,不同氧化程度型煤试样由相同粒径、相同体积的煤粉经相同的成型压力和成型时间压制而成。由此可知:各型煤试样的孔隙度基本一致,主要变量为煤基质的氧化程度。

CHS-X1—CHS-X5型煤的纵波速度如图8所示。由图8可知:在温度为240℃之前,型煤纵波速度几乎没有变化,稳定在900 m/s左右;当温度超过240℃后,型煤纵波速度开始明显下降,从温度为240℃到300℃,纵波速度下降2.8%,平均下降速率约为 $0.43 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) / ^\circ\text{C}$;从温度为300℃到360℃,纵波速度下降了8.4%,下降速率约为 $1.27 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) / ^\circ\text{C}$ 。可以看出,纵波速度下降速率逐渐增加,整体的变化趋势与TG曲线的变化较为相似,说明煤基质的物性变化对纵波速度产生了显著影响,导致其从一种“高波速”介质逐渐转变为“低波速”介质。

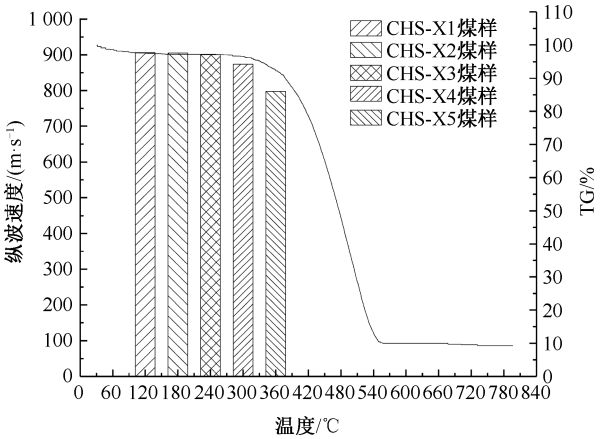


图8 不同氧化程度型煤的纵波速度

Fig. 8 P-wave velocity of briquettes with different oxidation degree

3.4 弹性波的内在响应机制

不同氧化程度原煤的平均纵波速度、平均孔隙度及TG的同步变化特性如图9所示,由图9可知:在温度达到 t_3 之前,TG曲线仅有轻微下降,说明煤基质尚未发生明显的氧化分解,而煤的孔隙度已经开始逐渐增加。结合断面裂隙发育情况,可以确定该阶段的纵波速度下降主要是由于煤裂隙扩展所致;当温度超过 t_3 后,TG曲线下降速率和孔隙度上升速率明显增加,说明煤基质氧化分解逐渐加快,并

导致孔裂隙大量发育。结合图 8 不同氧化程度型煤的纵波速度变化特性分析可知:该阶段纵波速度下降受煤基质自身物性变化和孔裂隙发育共同影响。

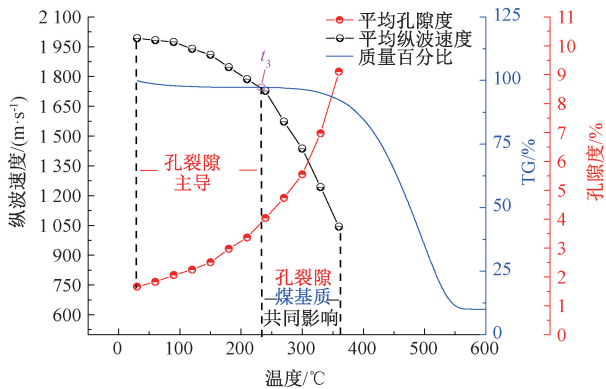


图 9 波速、孔隙度及 TG 的同步变化特性
Fig. 9 Synchronous variation characteristics of wave velocity, porosity and TG

弹性波对煤氧化自燃的响应机制如图 10 所示,由图 10a 可知:煤作为一种多孔介质,主要由煤基质及内部的孔裂隙组成,其中,煤基质是弹性波传播的介质。费马时间最短原理如图 11 所示,由图 11 可知:弹性波在各种介质中的传播路径总是满足所用传播时间为最短的条件^[16]。在升温至 t_3 前,煤氧复合作用仅在煤基质表面缓慢进行,绝大部分煤基质尚未开始氧化分解,仍属于“高波速”介质,未对弹性波的传播造成影响,而已经开始发育的孔裂隙改变了原有的传播路径,如图 10b 所示,新路径的传播距离的变长,表现为波在煤样中的传播速度降低;当温度超过 t_3 后,煤氧复合作用由煤基质表面向内部发展,煤基质逐渐由“高波速”介质转变为“低波速”介质,煤中的孔裂隙进一步发育,使波的时间最短路径进一步变长如图 10c 所示,纵波速度在二者的共同影响下以更快的速度下降。

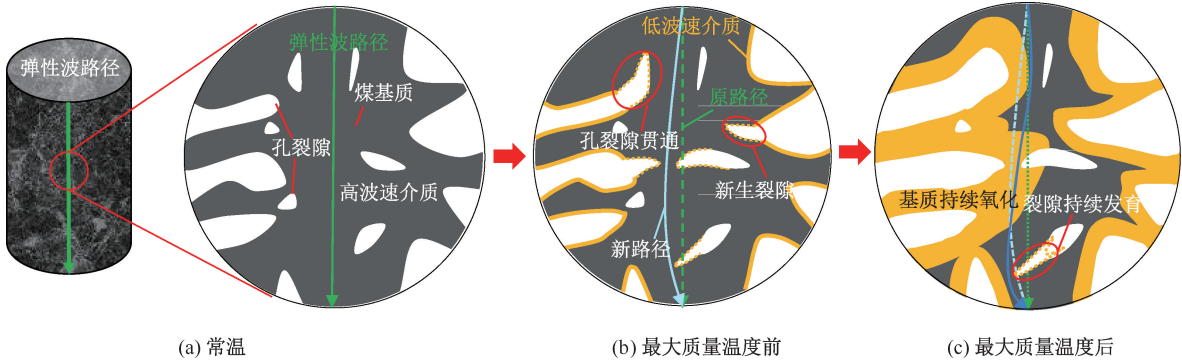


图 10 弹性波对煤氧化自燃的响应机制

Fig. 10 Response mechanism of elastic wave to coal oxidation and spontaneous combustion

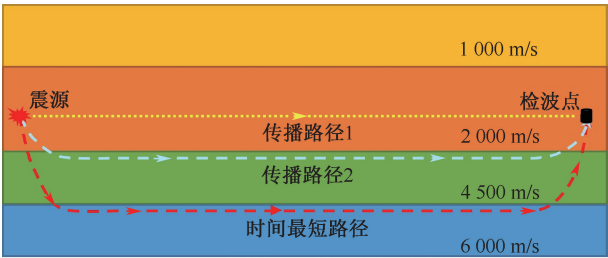


图 11 费马时间最短原理
Fig. 11 Schematic diagram of Fermat's principle of least time

4 结 论

1) 原煤氧化自燃过程中,纵波速度的下降速率高于横波速度,特别是温度高于 TG 曲线的最大质量温度后,纵波速度下降速率约为横波速度下降速率的 2.4 倍,表明纵波速度更适合作为反映煤氧化自燃的弹性波特征参数。

2) 煤基质的氧化分解一方面使煤体内部孔裂隙发育,煤体孔隙度从温度为 30℃ 时的 1.57% 上升至温度为 360℃ 时的 9.6%;同时,裂隙数量和开度也在温度超过 TG 曲线最大质量温度后显著增加,不仅导致弹性波的传播路径变长,还使弹性波的传播速度下降。另一方面,煤基质作为弹性波的传播介质,在温度达到 TG 曲线最大质量温度前未明显分解,对应的型煤纵波速度稳定在 900 m/s 左右;超过热失重最大质量温度后,煤基质开始迅速分解,对应的型煤纵波速度下降至温度为 360℃ 时的 798 m/s,且煤基质由“高波速”介质逐渐转变为“低波速”介质。

3) 原煤纵波速度曲线呈分段下降趋势,其分界点为 TG 曲线的最大质量温度。在最大质量温度前,煤纵波速度下降速率约为 $1.27 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})/\text{℃}$,该阶段纵波速度下降主要受孔裂隙发育影响;而在最大质量温度后,煤纵波速度下降速率约为

4.51 (m · s⁻¹)/℃,该阶段纵波速度同时受孔裂隙发育和煤基质物性改变影响。

参考文献

- [1] 秦波涛,仲晓星,王德明,等.煤自燃过程特性及防治技术研究进展[J].煤炭科学技术,2021,49(1):66-99.
QIN Botao, ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, et al. Research progress of coal spontaneous combustion process characteristics and prevention technology[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1):66-99.
- [2] 鲁义,殷召元,马东,等.沿空掘巷工作面停采期煤自燃防治技术[J].煤炭科学技术,2015,43(3):48-51.
LU Yi, YIN Zhaoyuan, MA Dong, et al. Coal spontaneous combustion prevention technology in mining face of gateway driving along goaf during mining stop period[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3):48-51.
- [3] 吴芳华,施式亮,鲁义,等.磷石膏基自产气膨胀浆体防火性能研究[J].中国安全科学学报,2024,34(3):148-154.
WU Fanghua, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Fire prevention and extinguishing performance of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3):148-154.
- [4] SHAO Zhenlu, WANG Deming, WANG Yanming, et al. Theory and application of magnetic and self-potential methods in the detection of the Heshituoluogai coal fire, China [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 104:64-74.
- [5] IDE T S, CROOK N, ORR F M, et al. Magneto meter measurements to characterize a subsurface coal fire [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87(3):190-196.
- [6] 孔彪. 煤炭燃烧及受热过程的电磁辐射效应研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
KONG Biao. Study on the electromagnetic radiation effects of coal and rock heating and combustion process[D]. Xuzhou: China University of Mining Science and Technology, 2018.
- [7] 牛会永,刘铁康,聂琦苗,等.浸水加温条件下煤电性参数特征试验研究[J].中国安全科学学报,2020,30(9):37-42.
NIU Huiyong, LIU Yikang, NIE Qimiao, et al. Experimental study on characteristics of coal electrical parameters under water immersion and heating[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(9):37-42.
- [8] 彭苏萍,杜文凤,殷裁云,等.高丰度煤层气富集区地球物理识别[J].煤炭学报,2014,39(8):1398-1403.
PENG Suping, DU Wenfeng, YIN Caiyun, et al. Geophysical identification of high abundance coalbed methane rich region[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1398-1403.
- [9] 邓军,王津睿,任帅京,等.声波探测技术在矿井领域中的应用及展望[J].煤田地质与勘探,2023,51(6):149-162.
DENG Jun, WANG Jinrui, REN Shuaijing, et al. Application and prospect of acoustic detection in the mining sector[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6):149-162.
- [10] 郭军,陈昌明,金永飞,等.松散煤体准多孔介质声速-煤温映射关系模型研究[J].煤炭学报,2024,49(8):3510-3521.
GUO Jun, CHEN Changming, JIN Yongfei, et al. Mapping model of sound velocity and coal temperature for quasi-porous media in loose coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8):3510-3521.
- [11] 闫治国,朱合华,邓涛,等.三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(11):2010-2014.
YAN Zhiguo, ZHU Hehua, DENG Tao, et al. Experimental study on longitudinal wave characteristics of tuff, granite and breccia after high temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11):2010-2014.
- [12] 李祥春,聂百胜,杨春丽,等.煤炭体声波波速随温度变化规律试验研究[J].煤炭科学技术,2016,44(5):140-144.
LI Xiangchun, NIE Baisheng, YANG Chunli, et al. Experiment study on acoustic wave velocity law with temperature variation in coal and rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5):140-144.
- [13] 潘荣锟,马智会,余明高,等.易自燃煤氧化的力学特性研究[J].煤炭学报,2021,46(9):2949-2964.
PAN Rongkun, MA Zhihui, YU Minggao, et al. Mechanical properties of spontaneous combustion coal oxidation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9):2949-2964.
- [14] ZHU Shuangjiang, KANG Jianhong, WANG Youpai, et al. Effect of CO₂ on coal P-wave velocity under triaxial stress [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022,32(1):17-26.
- [15] 李亚清,欧霖峰,李星,等.煤自燃热失重特征规律及关键官能团研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(2):118-124.
LI Yaqing, OU Linfeng, LI Xing, et al. Study on thermogravimetric characteristics and key functional groups of coal spontaneous combustion[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(2):118-124.
- [16] 陆基孟,王永刚.地震勘探原理[M].青岛:中国石油大学出版社,2009:12-15.



作者简介: 朱双江 (1990—),男,山东日照人,博士,副教授,主要从事煤自燃与瓦斯灾害防治、矿井地球物理勘探等方面的研究。E-mail:zsj@hnust.edu.cn。