

基于双源复合声波的煤温感知技术展望

郭军^{1,2,3}, 咎若怡^{1,2*}, 文虎^{1,2,3}, 王凯旋^{1,2}, 金永飞^{1,2,3}

1. 西安科技大学安全科学与工程学院, 西安 710054
2. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 西安 710054
3. 国家矿山应急救援(西安)研究中心, 西安 710054

摘要 煤矿采空区复杂环境受限空间煤温的快速精准量化识别是世界性难题。针对现有煤火探测技术存在的局限, 归纳了煤火探测技术的研究现状, 并指出目前较为主流的采空区松散媒体隐蔽高温点测量方式可分为接触式测温与非接触式测温2类; 梳理了声学测温技术的研究现状, 分析了声波的温敏特性及声波的传播特性, 总结了燃烧音的研究现状, 分析了燃烧音是如何产生的、不同条件下的燃烧音频率, 以及基于燃烧音识别的火灾探测技术; 通过研究不同频率外加声波在升温松散媒体中的传播特性, 掌握不同实验条件对外加声波与燃烧音“双源”复合声波传播规律的影响, 提出了构建一个新型的煤温感知技术的构想。

关键词 隐蔽火源; 探测技术; 燃烧音; 声学测温; 复合声波

煤层自燃火灾是矿井5大灾害的主要形式之一, 也是诱发矿井瓦斯、煤尘爆炸等次生灾害的主要原因^[1-2]。由于采空区受限空间内火源具有隐蔽、贫氧化、易复燃和高温点移动等特点^[3-4], 精确探测及防控难度极大。尽管现有的火源探测方法在很大程度上解决了火区范围圈定的问题, 但受限于采空区的复杂环境和空间火源探测技术瓶颈等因素, 仍难以实现采空区煤温的快速量化识别。因此, 隐蔽火源的精准探测作为煤火灾害防治的关

键一环, 依然是煤炭行业亟待解决的世界性难题。

近年来, 由于声学法测温技术具有非接触性、测温范围广、测量精度高和测量空间大等显著优点, 已经被广泛研究和应用在农业^[5]、工业^[6]以及大气空间等领域, 也为井下采空区隐蔽火源位置精准探测提供了新的思路。然而, 在实际运用中, 环境中存在大量的噪声信号, 且媒体自燃过程中会产生燃烧音^[7], 井下受限复杂环境中大范围遗煤自燃产生的燃烧音以及环境噪声在很大程度上制约了声

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-12-20

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52004209); 国家自然科学基金项目(52174198, 51974240)

作者简介: 郭军, 副教授, 研究方向为煤火灾害防控、应急救援等, 电子信箱: guojun@xust.edu.cn; 咎若怡(通信作者), 硕士研究生, 研究方向为煤火灾害防治、声波测煤温等, 电子信箱: 853778170@qq.com

引用格式: 郭军, 咎若怡, 文虎, 等. 基于双源复合声波的煤温感知技术展望[J]. 科技导报, 2023, 41(22): 83-90; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.22.011

波测温技术发展,其根本原因是:松散煤体自燃历程中燃烧音的演变规律、燃烧音与声发射复合声波的传播机制及感温机理等基础科学问题尚未解决。

围绕上述基础性关键科学问题,归纳了煤火探测技术、声学测温技术以及燃烧音的研究现状;梳理了各类测温技术的原理和优缺点,分析了声波的温敏特性和传播特性;得出声学法测温技术是一种相对成熟有效的温度检测技术;探明了燃烧音产生的原因及不同条件下的燃烧音频率;通过研究不同频率外加声波在升温松散煤体中的传播特性,掌握不同实验条件对外加声波与燃烧音“双源”复合声波传播规律的影响,并提出煤温“双源”复合声波感知新技术的构想。

1 煤火探测技术研究现状

采空区松散煤体隐蔽高温点常用的测量方式一般为接触式与非接触式2种。接触式可以满足绝大部分工业领域的测温需求,如热电偶温度计、液体膨胀式温度计等;非接触式测温通过检测物体红外辐射的强度来实现测温,如辐射测温技术、指标气体测温技术、同位素测氦法等^[8]。由于在实际的煤矿中测温时,难以在采空区布点,接触式测温具有一定的局限性,而非接触测温具有响应速度快、量程高,尤其是在长距离高密度温度监测应用领域等优点,因此煤矿中常采用非接触式测温技术来测量煤温。

1.1 接触式测温

接触式测温即通过检测元件与被测目标直接接触来实现温度测量。它的优点有:结构简单、使用方便等。下面是几种常用的接触式测温技术。

1) 膨胀式测温方法的主要原理是热胀冷缩,徐静等^[9]总结了膨胀式温度计的分类并对其误差来源进行了简单分析,膨胀式温度计的优点有结构简单、制造方便等。崔晓荣等^[10]指出膨胀式测温方法在测煤温时能够准确定位所测的孔内位置,但操作不方便,传送距离近,且一个端头只能测量一点的温度。该方法通常应用于环境监测、医用等领域。

2) 热电偶测温是基于热电效应来测量温度

的。许建朝^[11]介绍了热电偶温度计的测温原理及定标方法。束学来等^[8]指出热电偶测温具有易腐蚀、抗噪性差、容易损坏等缺点,该方法普遍应用于航空航天和工业生产测试的各个环节。

然而,在实际测温时,由于煤矿环境复杂,接触式测温方式因被测介质所含杂质和其不均匀性,以及热电偶的不稳定性问题将导致测温结果存在较大误差。

1.2 非接触式测温

非接触式测温即检测元件与被测目标不接触,而通过某个与温度相关的特征量实现温度测量的方法。由于煤层地质结构复杂、采空区的不可进入特征,以及火源高温点出现在采空区一定深度范围(多在氧化升温带)等,导致煤火精准探测及防控难度极大。目前多采用非接触式测量方式来测量采空区松散煤体隐蔽高温点。Guo等^[12]和Zhang等^[13]将煤自燃进程精细划分为7个阶段(图1),在不同阶段选取预测煤自燃的指标气体,通过监测气体组分及浓度来判断煤温。Liang等^[14]总结了国内外利用指标气体对煤层温度判定的研究进展。Zhou等^[15]等和文虎等^[16]通过研究松散煤体发火过程中氦析出及运移规律,实现对松散煤体发火程度判定和煤体高温点的圈定。郭军等^[17]总结和分析了煤层测温技术的原理和实现方式,以声学测温技术为主,结合分层建模和插值建模的优点,探讨声学测温技术在采空区松散煤体煤温反演探测应用中的可行性。随着对非接触测温技术的深入研究,其已经在煤矿领域得到广泛的应用,表1是几种常用的

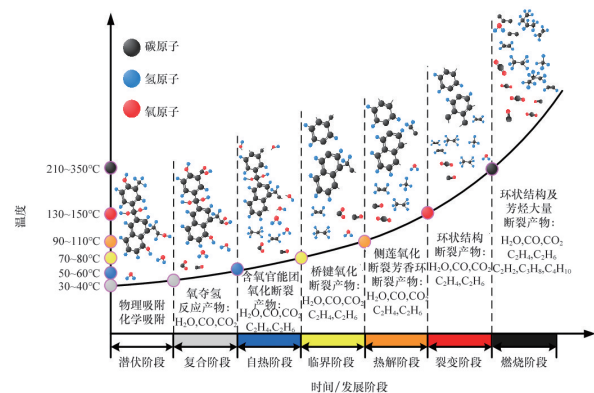


图1 煤自燃进程精细划分

非接触式测温技术的原理及优缺点对比。相比其他非接触测温技术,声学测温法具有测温区域广、量程大、精度高等优点,从测温原理上,其在采空区自燃高温点探测领域应用具有更强的可行性。

表1 非接触测温技术的原理及优缺点对比

探测方法	原理	优点	缺点
辐射测温技术	黑体辐射定律	灵敏度高、精度高	影响因素较多、测量有误差
指标气体测温技术	对气体进行一定的组合运算,分析出该地点的气体来预测某区域的煤所处的温度范围	方法简便且技术相对成熟	抽气装置的气体传输距离长、管路易漏气
同位素测氦法	利用煤岩介质中天然放射性氦随温度升高析出率增强的特性对矿井火灾进行探测	灵敏度高、探测效率高	抗震效果较差、工作量大、成本高
声学法测温技术	综合运用声学及热力学原理,建立声速与被测介质的温度关系	测温区域广、量程大、精度高	测量有误差

2 声学测温技术研究现状

近年来,声学法测温技术被广泛应用于各领域,例如:大气空间、湖海水下和锅炉炉膛等^[18-20],声学法测温的优点有测温区域广、量程大和精度高等^[21-22]。采空区松散煤体的物理结构、力学性质和多孔介质等特征与目前声学测温应用领域的特征有较多共性,具有很好的发展前景。

2.1 声波的温敏特性

波速是声波的重要特征之一,伴随固体可燃物燃烧辐射特性、温度和传播介质等的变化,对波速的传播稳定性有一定的影响。

许多国内外学者研究温度对于煤岩体波速的影响。白利平等^[23]从室温条件下加载温度到1100℃,分别采用了声波透射-反射法以及阻抗谱法测量了辉长石的纵波波速和电导率,结果表明:680℃以下,纵波波速随着温度的升高呈现小幅度降低趋势,在温度高于680℃条件下,波速开始急剧变化,可能与岩体内含水矿物脱水诱发的部分熔融相关。周莉等^[24]通过脉冲透射的方法对鹤岗南山矿的深部砂岩在18~130℃时进行波速测试,结果表明:纵波波速在30~55℃,横波波速在30~80℃时波速随温度的升高略有下降,并且纵波下降幅度较小,纵横波速比随温度的升高而逐渐上升。Yuki

等^[25]和房春慧等^[26]测量了致密砂岩纵波波速随压力和温度的变化,得出了不同样品的纵波速度与压力和温度的关系。汤红伟等^[27]利用超声波测试技术对深层煤矿床进行的纵、横波速度测试,得到了随温度的升高煤岩体弹性模量和波速随之降低的结论。李盟^[28]以不同变质程度的煤样作为研究对象,根据现有的波速模型中波速与孔隙度的关系,推导出温度与应力共同影响下的纵波速度模型。从这些研究可看出,针对于自燃煤体的现有研究相对较少,但以上研究成果可以作为研究基础。

2.2 声波的传播特性

按照声源的产生方式,声波的传播特性需要从外加声发射装置和待测区域内部发出待测声波这2个方面研究。

1) 在声发射装置的声波传播特性方面,主要是利用外加声发射装置试验研究声信号传播特性参数及影响因素,揭示声波在多孔介质内只能在颗粒间隙中曲折前行等^[29-30]。例如:Yan等^[31]、郭森等^[31]和Guo等^[32]等以木质颗粒、颗粒粮食等为研究对象,研究了多孔介质内声波信号畸变特征和传播路径弯曲效应;朱军等^[33]发现声信号在有孤立子内波影响的三维声场环境下进行传播时,能明显地观察到随着孤立子内波在时间特性上的移动。

2) 在待测区域内部发出待测声波的传播特性

方面,受热物体内部分子碰撞激发周围空气媒质的低频振动,形成火灾次声波,也称燃烧音^[34-35]。范恒^[36]介绍了火灾中的声发射信号表征参数,分析了声发射监测技术在消防领域的应用范围;荣建忠等^[37]在正庚烷火与汽油火的实验中引入了声学测量仪对燃烧音进行测量。

上述相关研究,尤其是通过外加声源在多孔介质中的传播特性和利用燃烧音探火的研究成果,对矿井火灾隐患的初期进行及时探测具有一定的意义,可以作为实现火源位置精准探测的研究基础。

3 燃烧音研究现状

井下采空区发生煤体自燃隐患时会加热周围环境内的空气、煤岩体,受热物体内部分子碰撞所产生的声压激发周围空气媒质位于次声频段的振动——“燃烧音”,另外膨胀的空气在煤岩体空隙内的流动也会产生一定的环境噪音^[38-40]。王瑞芳等^[41]进行了燃烧音测定实验,分析各个设定条件下燃烧音的频率。

燃烧音中的音频可以分为可听域、超声波域和次声波域3个频带。可听域中含有许多的日常噪声,以至于很难将其与燃烧音区分开来;超声波域中所含日常噪声较少,但所含高音成分不同且差异大;次声波域和超声波域的特征类似。

1) 设定条件下燃烧音频率分析。不同燃烧试样的燃烧音波形不同。Guan等^[42]建立了一个基于次声波传感器的实验系统来认识燃烧音,并测试了不同的燃烧材料,如纸、棉、油和木材,以证明燃烧音的存在,这些燃烧音信号的频谱也表明不同的材料有不同的频谱特征;王瑞芳等^[41]的燃烧音测试实验中得出:“衣类”和“纸类”燃烧音的水平高于其他试样的水平,“油”的燃烧音频率成分与其他试样完全不同。

通过分析燃烧音的产生机制以及燃烧音的物理特性,蒋静学等^[38-39]认定物质燃烧时产生的燃烧音可以近似为低频冲击信号,通过实验得出:不同形态,不同种类的物质在燃烧时,次声频率范围内(20 Hz以下)均存在燃烧音;不同物质燃烧时的燃

烧音声强不同;距离和障碍物对燃烧音的采集无影响;燃烧音声强随着燃烧过程的加剧而增大,随着火势变弱而减小;随着火灾的蔓延,燃烧音声强明显高于背景噪声。

2) 燃烧音测温。基于火灾产生机制及燃烧音的形成原理,可以通过检测燃烧音,来对火灾隐患的初期进行及时探测。蒋静学等^[38-39]在燃烧音识别的基础上,提出了火灾探测技术,首先对收集到的燃烧音信号进行处理,由于采集到的信号含有大量的噪声且幅度较小,因此需要对其进行处理并转换为数字信号,发送到计算机,由终端软件处理和分析收到的数据,并完成燃烧音信号的处理、波形显示和特征分析,最后实现燃烧现象的判定。即通过受热物体内部分子碰撞所产生的声压激发周围空气媒质的位于次声频段的振动,来对火灾隐患的初期进行及时探测。

煤自燃作为一种燃烧现象,在自燃过程中伴随着燃烧音的产生,一方面其本身可作为自燃火灾的一种探测方法,另一方面也会对外加声波测温产生影响。然而,松散煤体自燃的燃烧音受煤体属性和环境条件的影响,其声信号特征参数变化规律不明确,且目前煤低温氧化自燃至燃烧发展阶段,燃烧音的时频域演化规律鲜有研究报道。

4 复合声波煤温探测技术展望

采空区隐蔽火源精准探测一直是煤自燃防控领域的重点和难点问题,随着声学理论研究的不断发展以及声学法测温技术在农业、工业及大气空间等领域的广泛成功应用,声学法测温技术取得了实质性的技术突破,实现了高精度、大空间、非接触、实时连续温度场探测。农业储粮仓测温与松散煤体测温具有相似性,因此,声波测温技术对于松散煤体温度探测,从技术原理和研究思路上是可行的,通过对松散煤体的声波温敏特性及感温机制进行研究,将对有效防治煤矿现场煤自燃灾害提供巨大帮助。但要使这一技术实际应用于采空区火源探测,仍有许多问题尚待解决。

1) 复合声波的叠加传播特征和互扰机制有待

研究。采用外加声波进行自燃升温松散煤体温度感知时,自燃煤体产生的燃烧音信号与外加声波在松散煤体中产生叠加,形成复合声波信号在松散煤体中传播,二者的叠加互扰特征目前尚不明晰,复合声波在松散煤体中传播时波谱信号的畸变特性和声波衰减规律尚不清楚。

2)“双源”复合声传播特性与煤温的内在关联机制尚不明确。由于煤自燃进程的动态变化性,温度场、气体浓度场等场量对声波传播的影响具有动态特征,“双源”复合声信号的畸变特征和声线轨迹偏移特征不明确,现有的声波温度信息辨识方法与声波—温度场关联方法不适用于松散煤体非均

介质。因此,“双源”复合声波特征参数与煤温的映射关系和松散煤体声波感温机制有待研究。

针对以上问题,研究不同频率外加声波在升温松散煤体中的传播特性,掌握不同实验条件对外加声波与燃烧音“双源”复合声波传播规律的影响,提出一个新型的煤温感知技术构想。图2为在煤自燃实验装置上加装声学测试系统,通过该大型煤自燃发火实验台上所安装的声波换能器和温度以及气样采集探头,分解滤除燃烧音、环境噪声及外加声波,来探究复合声波在松散煤体中的叠加传播及互扰机制,揭示“双源”复合声波传播衰减规律。

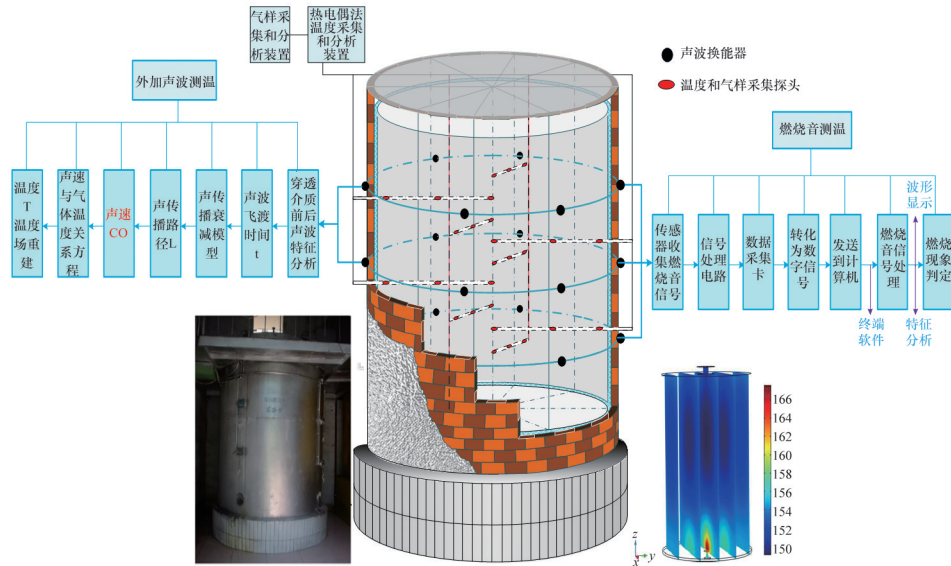


图2 煤温感知技术构想

为探究和论证复合声波煤温探测技术构想,进一步明晰“双源”复合声波特征参数与煤温的映射关系和松散煤体声波感温机制,综合分析燃烧音特征—煤温、声速—煤温映射关系,构建“双源”复合声波信号与煤温的响应关系模型,如图3所示。开展基于煤自燃历程燃烧音的演化规律试验研究,分析燃烧音波谱特征随煤温的演化特征,通过粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO)、极限学习机 (extreme learning machine, ELM) 等深度学习方法,对燃烧音信号的频率、类型、相位、声强等

特征参数的演变特征及规律进行研究,提取温敏特征明显的参数变化信息,实现松散煤体温度场燃烧音信号的准确识别,构建特征参数演化与煤温的函数映射关系。并基于外加声波测温的基本原理,即介质中声波的传播速度是介质温度的函数,在升温松散煤体中,声速不仅与温度有关,也与固气介质的特征有关。通过松散煤体外加声波测试实验,对声波在升温松散煤体中传播时声信号畸变特征与声线轨迹移动规律进行分析,采用深度学习及关联分析等研究方法结合 MATLAB 数值仿真软件,对松

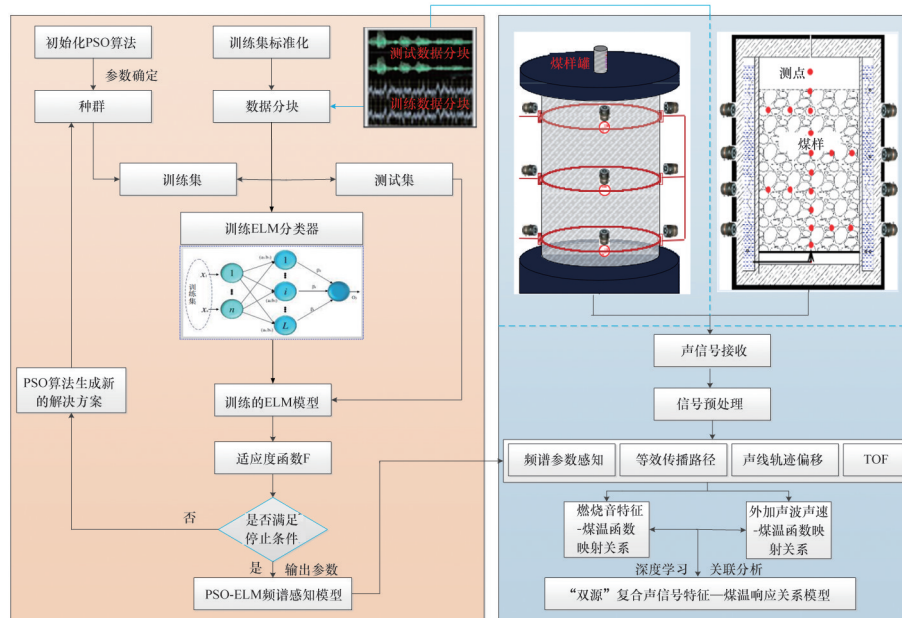


图3 “双源”复合声波信号与煤温的响应关系模型构建过程

散煤体中等声传播效路径及声波飞渡时间估算 (time of flight, TOF) 方法进行研究, 计算在升温松散煤体中声速的变化, 并建立煤温与声速的函数映射关系。

通过借鉴相关领域的研究思路和方法, 以松散煤体为研究对象, 针对松散煤体自燃过程中燃烧音的产生机制, 燃烧音和外加声波“双源”复合声波在松散煤体中的传播机制, 以及复合声波的松散煤体感温机制等关键问题展开研究。技术路线的设计上符合煤自燃和声学学科交叉研究的基本特点, 对采空区隐蔽火源的精准探测具有重要的理论价值。

5 结论

近年来, 我国矿井隐蔽火源精准探测技术不断进步和发展, 在煤自燃和声学理论研究方面也取得了重大成就, 且声学法测温技术已经在工业、农业等领域广泛成功应用, 并有望成为火源位置精准探测最具前景的一种方法, 可有效地预防和控制煤矿现场煤自燃灾害, 对矿井安全、高效开采具有重大意义。但该技术的部分难点问题, 如井下噪声信号繁杂, 且煤体自燃过程伴随着燃烧音的产生,

煤自燃过程中产生的燃烧音与煤温的映射响应关系, 以及在松散煤体中人为外加声波与煤温的映射响应关系、感温机制等尚未精准掌握和建立, 利用“双源”复合声波实现非均温度场的识别与重构存在较大困难。随着煤炭开采的深入, 出现了一些新的特点和难点, 因此, 利用声学法测温技术来预测预报以及防控煤自燃灾害的科学研究是具有潜力的研究手段。

参考文献 (References)

- [1] 王德明. 煤矿热动力灾害及特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 137-142.
- [2] 秦波涛, 张雷林, 王德明, 等. 采空区煤自燃引爆瓦斯的机理及控制技术[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1655-1659.
- [3] 李林, 陈军朝, 姜德义, 等. 煤自燃全过程高温区域及指标气体时空变化实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 444-450.
- [4] 金永飞, 郭军, 文虎, 等. 煤自燃高温贫氧氧化燃烧特性参数的实验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 596-602.
- [5] Yan H, Chen G N, Zhou Y G, et al. Primary study of temperature distribution measurement in stored grain based on acoustic tomography[J]. Experimental Thermal and Flu-

- id Science, 2012, 42: 55–63.
- [6] 安连锁, 冯强, 沈国清, 等. 电站锅炉管阵列内声传播特性及时延值测量[J]. 动力工程学报, 2017, 37(1): 13–20.
- [7] 程晓航, 王瑞芳, 张维农, 等. 火灾探测的原理和方法(上)[J]. 中国安全科学学报, 1999(1): 27–32.
- [8] 束学来, 郑炳旭, 郭子如, 等. 测温方法的比较及其在煤矿火区爆破中的运用[C]//中国矿业科技文汇—2014, 2014: 449–451.
- [9] 徐静, 贺红平, 王栋. 膨胀式温度计(玻璃棒)分类及误差来源浅析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017, doi: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.201711236.
- [10] 崔晓荣, 林谋金, 束学来. 露天煤矿火区爆破高温孔温度测量与分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(11): 303–305.
- [11] 许建朝. 谈谈热电偶温度计[J]. 益阳师专学报, 1996(6): 113–115.
- [12] Guo J, Wen H, Zheng X Z, et al. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 126: 223–231.
- [13] Zhang Y T, Shix Q, Li Y Q, et al. Characteristics of carbon monoxide production and oxidation kinetics during the decaying process of coal spontaneous combustion[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2018, 96(8): 17524761.
- [14] Liang Y, Zhang J, Wang L, et al. Forecasting spontaneous combustion of coal in underground coal mines by index gases: A review[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 57: 208–222.
- [15] Zhou B, Wu J, Wang J. Surface-based radon detection to identify spontaneous combustion areas in small abandoned coal mine gobs: Case study of a small coal mine in China[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119: 223–232.
- [16] 文虎, 程小蛟, 许延辉, 等. 松散煤体自然发火过程氨析出及运移规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2816–2823.
- [17] 郭军, 李帅, 蔡国斌, 等. 采空区隐蔽火源探测及声学法煤温感知新技术探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(6): 5–11.
- [18] Chen C, Yang K, Duan R, et al. Acoustic propagation analysis with a sound speed feature model in the front area of Kuroshio Extension[J]. Applied Ocean Research, 2017, 68: 1–10.
- [19] Katherine F W, Shane L, Karim G S, et al. Monitoring deep-ocean temperatures using acoustic ambient noise [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2878–2884.
- [20] Zhang S P, Shen G Q, An L S. Online monitoring of furnace exit gas temperature in power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 917–926.
- [21] 东桥, 郭敏. 基于萤火虫算法的温度场重建[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(1): 159–164.
- [22] Liu X, Cai X, Guo Q, et al. Study of acoustic wave propagation in micro- and nanochannels[J]. Wave Motion, 2018, 76: 51–60.
- [23] 白利平, 杜建国, 刘巍, 等. 高温高压下辉长岩纵波速度和电导率实验研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2002(11): 959–968.
- [24] 周莉, 李德建, 王春光. 温度对深部砂岩波速的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2007, 17(3): 178–180.
- [25] Yuki M, Masahiro I, Masaru T, et al. Simultaneous measurements of compressional wave and shear wave velocities, Poisson's ratio, and V_p/V_s under deep crustal pressure and temperature conditions: Example of silicified pelitic schist from Ryoke Belt, Southwest Japan[J]. Island Arc, 2010, 19(1): 30–39.
- [26] 房春慧, 李继龙, 姜纪沂, 等. 压力和温度对致密砂岩纵波速度影响的实验研究[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1770–1776.
- [27] 汤红伟, 程建远, 王世东. 深层煤矿床的煤岩样物性测试结果与分析[J]. 中国煤炭, 2009, 35(9): 75–78+81.
- [28] 李盟. 媒体超声波速度影响因素的实验研究[D]. 郑州: 河南理工大学, 2014.
- [29] Komijani M, Gracie R, Sarvaramini E. Simulation of induced acoustic emission in fractured porous media[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 210: 113–131.
- [30] Cassiede M, Shaw J M. Non-intrusive, high-resolution, real-time, two-dimensional imaging of multiphase materials using acoustic array sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(4): 0449021–04490213.
- [31] 郭森, 胡永辉, 闫勇, 等. 基于互相关的堆积物料中声波传播时间测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 1–9.
- [32] Guo M, Yan Y, Hu Y H. Temperature measurement of stored biomass using low-frequency acoustic waves and correlation signal processing techniques[J]. Fuel, 2018, 227: 89–98.
- [33] 朱军, 祝捍皓, 屈科, 等. 声速分布对浅海低频声场空间相关的影响研究[J]. 声学技术, 2019, 38(4): 376–381.
- [34] Liszka L. Long-distance propagation of infrasound from artificial sources, Journ[J]. Acoustical Society of America,

- 1974, 56(5): 23-29.
- [35] Liszka L. Cognitive information processing in space physics and astrophysics[M]. Tucson: Pachart Publishing House, 2003.
- [36] 范恒. 声发射监测技术运用于火灾探测初探[J]. 中国公共安全(学术版), 2009(Z1): 108-111.
- [37] 荣建忠, 姚卫, 高伟, 等. 基于多特征融合技术的火焰视频探测方法[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(3): 227-233.
- [38] 蒋静学. 基于燃烧音识别的火灾探测系统的研究与设计[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [39] 蒋静学, 官洪运, 范泳文, 等. 时频分析方法在燃烧音频信号分析中的应用研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(23): 67-69.
- [40] 林运通, 谢献强, 黄平, 等. 输电线路沿线林火监测技术综述[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(5): 122-126.
- [41] 王瑞芳, 程晓舫. 燃烧音火灾探测器[J]. 国际消防, 1997(8): 34-37.
- [42] Guan H Y, Fang S, Jiang J X. The detection and analysis of the combustion audio[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Science and Social Research (ICSSR 2013), Beijing: Atlantis Press, 2013.

Perspectives on a new technology for coal temperature sensing based on dual-source composite acoustic waves

GUO Jun^{1,2,3}, ZAN Ruoyi^{1,2*}, WEN Hu^{1,2,3}, WANG Kaixuan^{1,2}, JIN Yongfei^{1,2,3}

1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
2. Key Laboratory of Western Mine Mining and Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, Xi'an 710054, China
3. National Mine Emergency Rescue (Xi'an) Research Center, Xi'an 710054, China

Abstract The rapid and accurate quantification of coal temperature in restricted spaces in complex coal mining areas has always been a worldwide problem. In view of the limitations of the existing coal fire detection technology, the current research status of coal fire detection technology is summarized, and it is pointed out that the current mainstream measurement methods of hidden high temperature points in loose coal bodies in mining areas can be divided into two categories: contact temperature measurement and non-contact temperature measurement; the current research status of acoustic temperature measurement technology is reviewed, the temperature-sensitive characteristics of acoustic waves and the propagation characteristics of acoustic waves are analyzed, the current research status of combustion sound is summarized, and combustion sound generation mechanism, combustion sound frequency under different conditions and the fire detection technology based on combustion sound identification are analyzed. The concept of a new coal temperature sensing technology is put forward by studying the propagation characteristics of applied sound waves with different frequencies in heating loose coal, grasping the influence of different experimental conditions on the propagation law of "dual source" composite sound waves of external acoustic wave and combustion sound.

Keywords concealed fire source; detection technology; combustion sound; acoustic temperature measurement; composite acoustic wave ●



(责任编辑 卫夏雯)