

# Mechanism & Method of Detecting Gas Concentrated Zone Based on ISS Velocity Field

—Examples from Coalfaces of Coal and Gas Outburst Mines in Xin'an Coalfield

Jiwen Teng<sup>1,2,3</sup>, Songying Li<sup>4\*</sup>, Mingkui Jia<sup>5</sup>, Jie Lian<sup>4</sup>, Guodong Liu<sup>6</sup>, Lei Feng<sup>7</sup>, Xiaoshuai Yao<sup>4</sup>, Yafeng Yan<sup>1</sup>, Minfang Jing<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>2</sup>Jilin University, Changchun Jilin

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>4</sup>Geological Institute, Yima Coal Industry Group Co., Ltd., Yima Henan

<sup>5</sup>Research Institute, Henan Energy & Chemical Industry Group Co., Ltd., Zhengzhou Henan

<sup>6</sup>Geological Institute, China Earthquake Administration, Beijing

<sup>7</sup>School of Resource & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan

Email: [jwteng@mail.iggcas.ac.cn](mailto:jwteng@mail.iggcas.ac.cn), [lea161@163.com](mailto:lea161@163.com)

Received: Jan. 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: Feb. 13<sup>th</sup>, 2019; published: Feb. 21<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

Gas is the first killer of coalmines, and the gas accidents easily cause heavy casualties and property losses. Gas accumulation area (zone) is the high incidence area of gas accidents. In order to determine the relationship between the rules of gas accumulation area (zone) and geological anomalies such as thickness change, structure and stress concentration of coal seam, the paper takes Xin'an coalfield as an example. The ISS (in-seam Seismic Survey) transmission method was adopted for exploration, the shot holes were arranged in the inside coal wall of one way of the coal mining face to form the seismic source of the seismic wave field; in another way, the detectors were arranged to receive the seismic channel wave information and collect the data, and the excitation in sequence and reception were synchronized. The velocity field distribution of the channel wave in the mining face was drawn by the velocity tomography, and then the gas accumulation areas (zones) were predicted, and last the effects were tested by comparative analysis between the predictions and the drill-measured gas content. The experimental results preliminarily prove that the velocity field of seismic channel wave can be used to predict the gas accumulation areas (zones) of coal face, and scientifically guide the prevention and control of mine gas disasters.

## Keywords

Channel Wave, Velocity Field, Mining Face, Gas Accumulation Zone, Tomography

---

\*通讯作者。

# 基于地震槽波速度场探测瓦斯富集区的机理与方法探讨

——以新安煤田煤与瓦斯突出矿井采煤工作面为例

滕吉文<sup>1,2,3</sup>, 李松营<sup>4\*</sup>, 贾明魁<sup>5</sup>, 廉 洁<sup>4</sup>, 刘国栋<sup>6</sup>, 冯 磊<sup>7</sup>, 姚小帅<sup>4</sup>, 闫亚芬<sup>1</sup>, 金明方<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院地质与地球物理研究所, 北京

<sup>2</sup>吉林大学, 吉林 长春

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京

<sup>4</sup>义马煤业集团股份有限公司地质研究所, 河南 义马

<sup>5</sup>河南能源化工集团有限公司研究总院, 河南 郑州

<sup>6</sup>中国地震局地质研究所, 北京

<sup>7</sup>河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作

Email: jwten@mail.iggcas.ac.cn, \*lea161@163.com

收稿日期: 2019年1月29日; 录用日期: 2019年2月13日; 发布日期: 2019年2月21日

## 摘 要

瓦斯是煤矿第一杀手, 瓦斯事故极易造成重大人员伤亡和财产损失, 而瓦斯富集区(带)则是瓦斯事故的高发区域。为了厘定瓦斯富集区(带)的地球物理标志、规律与煤层厚度变化、构造、地应力集中等地质异常事件之间的关系, 本文以河南省新安煤田为例, 采用地震槽波透射法进行探查, 在采煤工作面一条煤巷内侧煤壁布置炮孔形成激发地震槽波波场的震源, 在另一条煤巷内侧煤壁布置检波器接收地震槽波信息和采集数据, 依次激发, 同步接收。通过地震槽波速度层析成像求得采煤工作面槽波速度场分布图, 然后预测瓦斯富集区(带), 再通过与钻孔实测瓦斯含量进行对比分析做效果检验。实验结果初步证明: 利用地震槽波速度场可以有效预测采煤工作面瓦斯富集区(带), 能够科学指导矿井瓦斯灾害防治。

## 关键词

地震槽波, 速度场, 采煤工作面, 瓦斯富集区(带), 层析成像

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

瓦斯属煤矿五大自然灾害之一, 也是煤矿第一大杀手, 煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸及其诱发的煤尘爆炸等事件极易造成群死群伤[1] [2] [3]。1942年4月26日, 世界采矿史上最大矿难事故发生在当时伪满州国辽宁本溪湖煤矿, 共造成1549人死亡, 就是由瓦斯爆炸引起[4]。据统计, 建国以来煤矿发生的一次死亡100人以上的特别重大事故有25起, 其中属于瓦斯煤尘爆炸或煤与瓦斯突出并引起瓦斯煤尘爆炸的

22 起, 占比 91.7% [5]。瓦斯富集区是发生瓦斯事故的高风险区域, 是煤矿治理瓦斯、预防瓦斯事故的关键部位[6]。如果能够利用物探手段查明煤层中的瓦斯富集区, 就可以科学地引导瓦斯治理工作, 提高瓦斯抽采效率, 减少瓦斯事故发生[7]。

利用物探技术探查瓦斯富集区, 前人曾做过不少研究和探索。利用三维地震勘探以煤层割理裂隙为探测目标的煤层瓦斯富集 AVO 预测技术在淮南煤田初步表明了其可行性, 在其他地区也曾有过相关研究或实践[8] [9] [10]; 利用地震波能量信息预测瓦斯富集区, 也取得了比较明显的效果[11] [12] [13] [14]。基于电磁波在穿过瓦斯富集区造成电磁波能量损耗, 则可利用无线电波坑透成果并结合地质资料分析, 来预测采煤工作面瓦斯富集区[15]; 还可利用地质雷达高频电磁波在传播距离范围内的回波异常来超前预测瓦斯富集区[16]。地震槽波探测构造煤的研究是可以的[17] [18]。

槽波是一种只在煤层中传播的特殊地震波, 1955 年, 由 Evison 在新西兰发现[19]; 1963 年, 德国人 Krey 首次详细地从理论上分析了槽波的特性[20]。上世纪 80 年代, 地震槽波勘探技术首先在国外煤矿开始投入使用, 主要用于井下探测煤层的不连续性, 如煤层厚度变化、断层、陷落柱、矸石层分布, 剥蚀带等[21] [22] [23]; 之后引入我国, 但却在起步发展不久, 由于理论、方法和技术等方面的问题, 使之较长时期陷于停滞状态。2011 年, 在自然科学基金重点项目(煤矿灾害事件与地震槽波波场特征示范研究——煤层厚度变异与断层和采空区探测, 编号 41130419)的支持下, 带动地震槽波勘探技术在国内开始重新兴起并趋于活跃, 且在设备研发、数学-物理模拟、场地实验等方面均取得了不少新成果和新认识[24]-[31], 实现了煤层厚度定量化解译、断层和采空区精细探测等, 很好地指导了煤矿安全生产[32] [33] [34] [35]; 但尚未见有利用地震槽波探测煤层瓦斯富集区的有效研究或文献记载。为此, 本文将对这一难题进行攻关与探讨。

## 2. 地震槽波波场与瓦斯富集机理

### 2.1. 煤层瓦斯富集主要特点

煤层瓦斯赋存状况与整个成煤过程及其赋存过程等密切相关。其主要影响因素包括煤的沉积环境、煤岩组分、煤在湿度和压力条件下的变质程度、煤层厚度及其变化、煤层埋藏情况、地质构造、地应力、顶底板岩性及其水文地质特征、以及岩浆岩侵入等[36] [37] [38] [39] [40]。本文的研究区为新安煤田, 其煤层瓦斯赋存状况主要和煤层厚度及其变化、地质构造与地应力分布密切相关[41] [42] [43] [44]。结合与该煤矿相关的地质资料, 对历年来瓦斯数据进行分析并指出, 新安煤田采煤工作面的瓦斯富集主要有以下特点:

1) 煤层厚度剧烈变化带多为瓦斯富集区。煤层厚度剧烈变化, 包括煤层厚度突然由厚变薄或由薄变厚, 乃是地应力异常或高应力区, 易形成瓦斯富集。历史上, 新安煤田曾发生过 14 次煤与瓦斯突出或瓦斯异常涌出事件, 其中 9 次都发生在煤层厚度突然增大或减小的地域[45]。

2) “煤窝子”多为瓦斯富集区。受沉积基底和后期构造运动及改造的双重作用, 新安煤田煤层底板起伏不平, 煤层厚度变化大, 大部分区域属于不稳定煤层或极不稳定煤层, 甚至为“鸡窝煤”。在“煤窝子”的区域, 即中间煤层厚、周围煤层薄的区域, 瓦斯富集。

3) 断层带或隐伏构造变异带多为瓦斯富集区。新安煤田处于新安向斜北翼, 整体属于单斜构造, 褶曲并不明显, 但中、小型断层与底板隐伏构造发育。新安煤田开采二<sub>1</sub>煤, 其直接底板为泥岩, 顶板为泥岩、砂岩互层, 不易形成开放型构造, 故不利于瓦斯逸散。断层带或隐伏构造带, 既造成煤层厚度异常变化, 也常为地应力集中区段, 易形成“瓦斯包”, 多为瓦斯富集区。

### 2.2. 煤厚剧烈变化与构造以及高地应力区(段)的地震槽波速度场响应

基于 Rayleigh 型槽波和 Love 型槽波中 Rayleigh 型槽波形成的地质条件苛刻, 处理难度亦较大; 而

Love 型槽波对煤层厚度变化十分敏感, 具有更强的反射和绕射能量[46] [47], 故在地震槽波勘探时, 通常均选用 Love 型槽波。

Love 型槽波具有显著的频散特征(图 1), 且煤层厚度不同, 槽波频散曲线各异。随着煤层厚度的减小, Love 型槽波主频段向高频方向移动; 同一频率下的波速也增加, 即槽波速度与煤层厚度呈负相关, 煤层厚的地方波速低, 煤层薄的地方波速高[48]。这样, 便可以将地震槽波勘探繁衍求得的采煤工作面波速等值线图转化为煤层厚度等值线图。

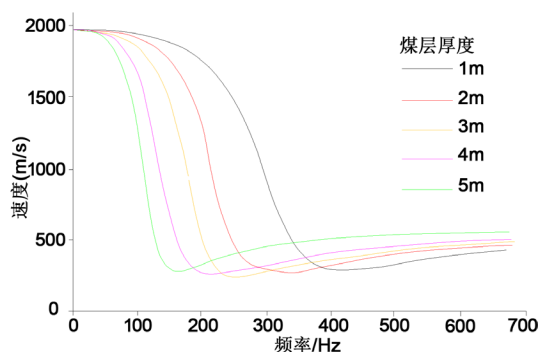


Figure 1. Dispersion curves of Love mode channel wave  
图 1. Love 型槽波频散曲线

根据槽波速度等值线图与煤层厚度等值线图的相关性发现: 煤层厚度剧烈变化带, 在槽波速度等值线图上反映为等值线密集区段, 即高梯度变化带; “煤窝子”, 则反映为中间速度低、周边速度高的封闭或近封闭区域; 断层带或隐伏构造带或煤层厚度异常变化, 故在槽波速度等值线图上为高梯度变化带或为高速区。

利用地震纵波探测采煤工作面内部地应力分布是一项成熟技术, 纵波速度场变化反映地应力大小变化, 高地应力区一般显示为纵波速度等值线图上高速区。在相同地质岩性条件下, 地震槽波速度与纵波速度呈正相关, 故高地应力区在槽波速度等值线图上亦呈现高速区。由于煤层厚度剧烈变化也会造成地应力集中, 故高地应力区在槽波速度等值线图上亦可显示为高梯度带或高低速相间分布区域。

### 2.3. 瓦斯富集区地震槽波速度场响应规律

新安煤田瓦斯富集区主要分布在煤层厚度剧烈变化带、“煤窝子”、断层带或隐伏构造带以及高地应力区段等, 即这些异常区域在地震槽波等值线图上分别显示为等值线密集分布、或封闭、近封闭的低速区、高速区及高低速相间分布区等。采煤工作面瓦斯富集区在地震槽波速度场上的响应特征为:

- 1) 槽波速度等值线图上高梯度带多为瓦斯富集区。
- 2) 槽波速度等值线图上中间速度低、周边速度高的封闭或近封闭区块变为瓦斯富集区。
- 3) 槽波速度等值线图上高低速相间分布地带多为瓦斯富集区。

## 3. 探测与解译方法

### 3.1. 探测仪器与方法

采煤工作面瓦斯富集区探测实验所使用仪器为德国 DMT 公司生产的 SUMMIT-II EX 防爆地震槽波探测仪。

采煤工作面瓦斯富集区探测实验采用透射法, 利用采煤工作面的一条巷道布置一系列炮点, 使用 0 延迟雷管或延迟时间相同的一段雷管, 依次放炮作为震源, 激发地震波; 在另外一条巷道安装一系列检

波器,同时接收地震波信号。如果切眼(联结采煤工作面两条进、回风巷,用于布置采煤设备的巷道)已贯通,也可以在切眼中布置一定数量的炮点或检波器点。为了产生并接收到高分辨率的槽波信息,应尽可能将炸药和检波器放在垂直于煤层的中间位置,用炮泥或水把炮孔封死,通过充气使检波器囊与煤层孔壁紧密耦合。

### 3.2. 数据处理与解译

使用美国 Parallel Geoscience Corporation 的专用解译软件 SPW。对井下场地所采集数据进行格式转化、加载观测系统、雷管延迟时间校正等预处理,然后进行滤波、自动增益控制、早晚弱音、频散分析等以形成频散曲线,再选定适宜频率,拾取旅行时,最后反演完成 CT 层析成像,给出地震槽波速度等值线图。

根据采煤工作面瓦斯富集区的地震槽波速度场与其主要响应特征,则可以预测并识别所探查采煤工作面的瓦斯富集区(高瓦斯风险区)。

## 4. 探测与研究实例

新安煤田瓦斯富集区地震槽波探测与数据采集。新安煤田地处豫西,跨新安、孟津两县,面积超过 700 km<sup>2</sup>,煤炭资源量 30 亿 t 以上,是河南省的主要煤田之一。主采二叠系山西组二<sub>1</sub>煤,煤层厚度 0 m~29.99 m,平均 4.0 m。直接顶板多为大占砂岩,直接底板为泥岩。煤田内中小型断层较多,底板隐伏构造发育,且全煤田发育构造煤。现该煤田有 5 对生产矿井,均为煤与瓦斯突出矿井,合计生产能力约 600 万 t/a。

首先利用透射法对采煤工作面进行地震槽波勘探,利用求得的槽波速度等值线图进行预测并识别瓦斯富集区;再使用钻探手段,布置一定数量深浅不一的钻孔测试瓦斯含量,勾画工作面瓦斯含量等值线图,确定实际的瓦斯富集区;最后,通过采煤工作面瓦斯富集区的槽波波场特征与实际测试结果进行对比分析,以厘定地震槽波探测采煤工作面瓦斯富集区的可靠性。本项研究已开展采煤工作面瓦斯富集区探测实验 6 例,这里选择其中 2 例给予阐明。

### 4.1. 实例 1

#### 4.1.1. 研究区概况

新义矿 11021 工作面为俯采工作面,倾向长度 693 m,走向长度 124 m,可采储量 53 万 t,平均开采深度 660 m。测区位于工作面里段 410 m(图 2)。测区煤厚 1.8 m~8.8 m,平均 4.7 m,煤层倾角约 7°,部分区段含有夹矸石。煤层直接顶板为砂质泥岩;直接底板为粉砂岩。

#### 4.1.2. 地震槽波勘探

在 11021 工作面轨道巷布置 25 个炮孔作为激发震源,间距 15 m,乳化炸药 200 g/炮,矿用 1 段延迟毫秒雷管引爆;在皮带巷布置 23 个检波器孔,间距 15 m,且以平行于煤层的 X 向和 Y 向双分量检波器接收槽波信息(图 2)。对 575 道槽波记录辨识分析后,筛选出槽波震相清晰、频散曲线连续的地震道 328 道。选取 125 Hz 频率计算槽波群速度,并进行层析成像构制槽波速度场分布(图 3)。

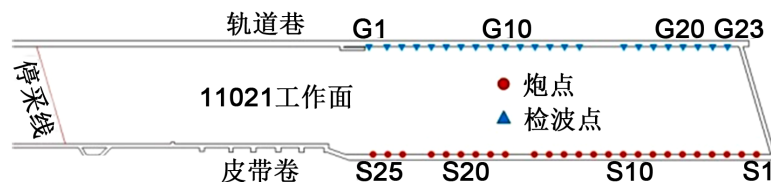


Figure 2. ISS observation system in 11021 coalface (inside part)

图 2. 11021 工作面(里段)槽波观测系统布置图

根据巷道已揭露的地质信息与瓦斯富集区的地震槽波速度场响应特征，综合分析槽波速度场，预测11021采煤工作面里段存在3处疑似瓦斯富集区，其编号分别为1#、2#、3#(图3)。分析如下：

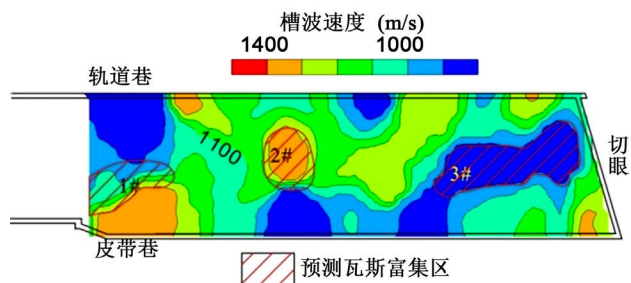


Figure 3. Wave velocity contour in 11021 working face (inside part)  
图 3. 11021 工作面(里段)槽波速度成像图

- 1) 1#疑似瓦斯富集区：位于高速区与低速区相间区段，宽度 20 m~30 m，表明煤厚剧烈变化，预测为瓦斯富集区。
- 2) 2#疑似瓦斯富集区：明显的高速区，可能是薄煤区或高应力区。新义煤矿的薄煤区主要由古河流冲刷或构造剥蚀导致，且多呈条带状分布。为此基本上可以排除由薄煤区即高速区引起，更可能为高地应力区，故将其预测为可能性较大的瓦斯富集区。
- 3) 3#疑似瓦斯富集区：为四周高速区包围的低速区块，也是厚煤条带，预测为瓦斯富集区。考虑到巷道对煤层瓦斯自然释放等作用，预测 3#疑似瓦斯富集区面积向工作面内部有所收缩。

#### 4.1.3. 瓦斯含量实测结果

通过打钻，采用解析法直接测定煤层瓦斯含量。工作面构成后，在测区共施工钻孔测试点 42 个(图 4)。利用井下和实验室的实测数据计算，求得该测区瓦斯含量为 3.0 m<sup>3</sup>/t~6.9 m<sup>3</sup>/t。统计瓦斯含量测点并绘制出瓦斯含量等值线图，由此识别出 3 处瓦斯富集区(图 5)。

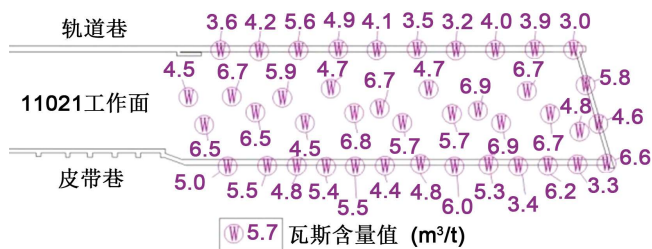


Figure 4. Distribution of gas content measure points in 11021 working face (inside part)  
图 4. 11021 工作面(里段)瓦斯含量测点分布

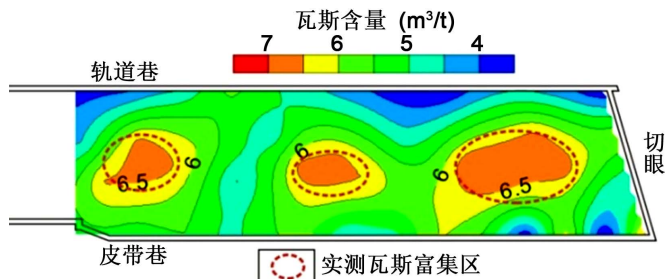


Figure 5. Gas content contour in 11021 working face (inside part)  
图 5. 11021 工作面(里段)瓦斯含量成像图

图中 3 处瓦斯富集区与预测的 3 处瓦斯富集区在位置、范围大体一致，仅有少许差异。

## 4.2. 实例 2

### 4.2.1. 测区概况

义安矿 11061 工作面走向长度 1090 m、倾向宽度 135 m，可采储量 107 万 t，平均开采深度 616 m。测区位于工作面外段 420 m，煤层厚度 0.4 m~8 m，平均 4.5 m；煤层倾角约 5°，结构简单。煤层直接顶板为砂质泥岩和中粒石英砂岩。直接底板为粉砂岩或细砂岩。

### 4.2.2 地震槽波勘探

在 11061 工作面轨道巷布置 34 个炮孔作为激发震源，间距 10 m，乳化炸药 200 g/炮，矿用 1 段延迟毫秒雷管引爆；在皮带巷布置 22 个检波器孔，间距 20 m，且以平行于煤层的 X 向和 Y 向双分量检波器接收槽波信息。对 748 道槽波记录辨识分析后，筛选出槽波震相清晰、频散曲线连续的地震道 546 道。选取 125 Hz 频率做为槽波群速度依据，并进行层析成像确定槽波速度场分布(图 6)。

根据巷道已揭露的地质信息与瓦斯富集区的地震槽波速度场响应特征，综合分析槽波速度场后，预测有 2 处小范围疑似瓦斯富集区(图 6)。测区槽波速度场在整体上显示为：两侧为低速区、中间区段为高速区，与巷道揭露的两侧厚、中间薄的煤层厚度变化情况相一致。2 处疑似瓦斯富集区均为波速从高速向低速急剧变化的区段，也是煤厚剧烈变化的地带。考虑到巷道对煤层瓦斯自然释放作用等，预测的瓦斯富集条带向工作面内部有所收缩。

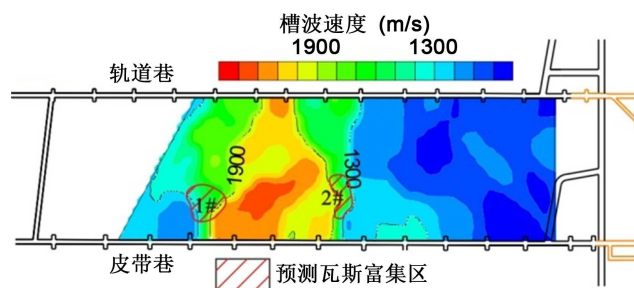


Figure 6. Velocity contour of channel wave in 11061 working face (outside part)

图 6. 11061 工作面(外段)槽波速度成像图

### 4.2.3 瓦斯含量实测结果

工作面确定后，分别沿工作面两条巷道每间隔 50 m 布置 1 个瓦斯含量测试点，两侧钻孔交错分布，孔深 40 m~60 m，共施工测量点 19 个。利用井下和实验室的实测数据计算结果：测区瓦斯含量为 3.0 m<sup>3</sup>/t~7.7 m<sup>3</sup>/t。利用 19 个测点的瓦斯含量绘制出测区瓦斯含量分布图(图 7)。

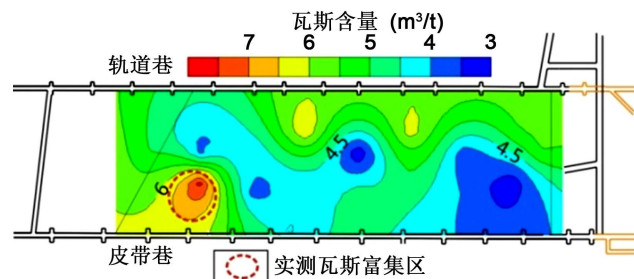


Figure 7. Gas content contour in 11061 working face (outside part)

图 7. 11061 工作面(外段)瓦斯含量等值线图

实测的 1 处瓦斯富集区, 与预测的 1#疑似瓦斯富集区的位置、大小基本一致; 另 1 处预测的瓦斯富集区, 可能由于实测钻孔密度不足, 在瓦斯含量分布图上没有显示瓦斯含量异常。

## 5 结论

1) 利用地震槽波勘探技术可以预测采煤工作面内部瓦斯富集区。在采煤工作面槽波速度成像图上, 速度变化梯度大的区段、高低速相间分布的条带、高速包围的低速区块以及非薄煤层区导致的高速区域通常可预测为瓦斯富集区。

2) 采煤工作面瓦斯富集区地震槽波速度场分布特征是基于地震槽波速度场对地质异常体的响应及与地质异常和瓦斯富集区之间密切相关。经过现场实验证实, 但例证尚少, 尚不足以定论, 故仍需要更多的现场实验和数学-物理模拟做进一步研究。

3) 本组实验钻孔距离较大密度偏小, 钻孔测量瓦斯含量与地震槽波勘探有一定的时间间隔。为了取得更好的实验效果, 今后在开展现场实验时, 应增加钻孔密度, 且钻孔测量瓦斯含量尽可能与地震槽波勘探同步进行。

## 基金项目

国家自然科学基金重点资助项目(41130419)。

## 参考文献

- [1] 陈建民. 煤矿生产过程风险源辨识与评价研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
- [2] 孙庆刚. 中国煤矿瓦斯灾害现状与防治对策研究[J]. 中国煤炭, 2014, 40(3): 116-119.
- [3] 王德明. 煤矿热动力灾害及特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 137-142.
- [4] 薛毅. 日本侵占中国煤矿述论(1895~1945 年) [J]. 河南理工大学学报(社会科学版), 2015, 16(3): 335-346.
- [5] 高岩. 中美煤矿瓦斯爆炸事故不安全动作原因对比分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- [6] 李润求, 蒋敏. 近 10 年我国煤矿瓦斯灾害事故规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(9): 143.
- [7] 焦先军, 杨冬生, 修中标. 顾桥矿岩巷掘进瓦斯异常区探测与防治[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 76-80.
- [8] 彭苏萍, 高云峰, 杨瑞召, 等. AVO 探测煤层瓦斯富集的理论探讨和初步实践——以淮南煤田为例[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1475-1486.
- [9] 彭苏萍, 杜文凤, 殷裁云, 等. 基于 AVO 反演技术的煤层含气量预测[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1792-1796.
- [10] 崔大尉, 王远, 于景邨. 利用 AVO 属性研究构造煤的分布规律[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1842-1849.
- [11] 杨双安, 宁书年, 张会星, 等. 三维地震勘探技术预测瓦斯的研究成果[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 334-336.
- [12] 杨双安, 宁书年, 张会星, 等. 三维地震勘探技术预测瓦斯的可行性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(3): 72-74.
- [13] 杨双安, 张会星. 三维地震资料预测瓦斯富集区的应用[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(8): 108-110.
- [14] 李文利, 申有义, 杨晓东, 等. 利用地震波能量属性预测矿井瓦斯富集区[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(11): 60-64.
- [15] 梁庆华, 吴燕清, 李云波, 等. 无线电波探测瓦斯富集区理论与方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 148-153.
- [16] 梁庆华, 宋劲, 孙兴平, 等. 地质雷达井下探测瓦斯富集区特征研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1570-1574.
- [17] 王斌. 槽波地震探测构造煤技术研究[J]. 煤, 2015, 24(7): 13-16.
- [18] 冯磊, 张玉贵, 张豪, 等. 构造煤槽波地震探测可行性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5): 1027-1034.
- [19] Evison, F.F. (1955) A Coal Seam as Guide for Seismic Energy. *Nature*, **176**, 1224-1225.
- [20] Krey, T.C. (1963) Channel Waves as a Tool of Applied Geophysics in Coal Mining. *Geophysics*, **28**, 701-714.  
<https://doi.org/10.1190/1.1439258>



- [21] Luo, D.H., Sun, S.X., Zhang, D.H., *et al.* (2011) Application of Improved EAHP on Stability Evaluation of Coal Seam Roof. *Earth and Planetary Science*, **3**, 384-393. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.110>
- [22] Qin, K. and Cui, R.F. (2011) Locating the Distribution of Gas Enriched Area Using Seismic P-Wave Azimuth Attributes. *Earth and Planetary Science*, **3**, 189-194. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.082>
- [23] Tang, H.G. (2011) Seismic Prospecting Technique for Coalbed Methane Accumulating Area. *Earth and Planetary Science*, **3**, 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.087>
- [24] 王伟, 高星, 李松营, 等. 槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用——以河南义马矿区为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 1054-1062.
- [25] 胡国泽, 滕吉文, 皮娇龙, 等. 井下槽波地震勘探——预防煤矿灾害的一种地球物理方法[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 439-451.
- [26] 皮娇龙, 滕吉文, 杨辉, 等. 地震槽波动力学特征物理-数学模拟及应用进展[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 958-974.
- [27] 皮娇龙, 滕吉文, 刘有山. 地震槽波的数学-物理模拟初探[J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2481-2493.
- [28] 吴海. 防爆无缆遥测地震仪在煤矿槽波勘探中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(4): 86-89.
- [29] 廉洁, 李松营, 王伟, 等. 槽波地震勘探技术在义马矿区的应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 162-165.
- [30] 廉洁, 李松营, 滕吉文, 等. 槽波探测技术的多领域应用与试验[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 35-40.
- [31] 杨雪, 宋俊磊, 王典洪, 等. 槽波地震勘探仪器的发展现状[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 114-120.
- [32] Yancey, D.J., Imhof, M.G., Feddock, J.E., *et al.* (2007) Analysis and Application of Coal-Seam Seismic Waves for Detecting Abandoned Mines. *Geophysics*, **72**, M7-M15.
- [33] 姚小帅, 冯磊, 廉洁, 等. 槽波地震反射法在断裂构造探测中的应用[J]. 能源与环保, 2015, 237(9): 101-104.
- [34] 李松营, 廉洁, 滕吉文, 等. 基于槽波透射法的采煤工作面煤厚解释技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 719-725.
- [35] 冯磊, 杜艳艳, 李松营, 等. 煤层厚度地震槽波层析成像分辨率分析[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 197-203.
- [36] 程远平, 张晓磊, 王亮. 地应力对瓦斯压力及突出灾害的控制作用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 408-414.
- [37] 张志荣, 赵晶, 张浪. 双鸭山煤田地质构造特征与瓦斯赋存规律分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(s2): 346-349.
- [38] 彭信山, 刘明举, 陈阳, 等. 含水性及水动力条件对煤层瓦斯逸散与赋存的控制作用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(a01): 93-99.
- [39] 赵斌, 郭英海, 苏驰, 等. 阳泉新景矿太原组沉积环境及其对 15~#煤层瓦斯赋存控因分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(11): 120-122.
- [40] 朱有彬, 方家虎, 吴小军, 等. 朱仙庄井田岩浆岩侵蚀区瓦斯赋存影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 147-151.
- [41] 黄建平, 许彦鹏, 冯利民, 等. 矿井瓦斯赋存规律研究[J]. 煤炭工程, 2009(9): 83-85.
- [42] 潘少杰. 新安煤田瓦斯赋存规律与突出区域预测指标研究[J]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- [43] 王晓彬, 张子敏, 张玉贵, 等. 新安煤矿瓦斯赋存影响因素分析[J]. 煤炭工程, 2010(2): 78-81.
- [44] 贾明魁, 徐德宇, 李书文. 新安煤田瓦斯地质规律研究[J]. 中国煤炭, 2015, 41(12): 31-35.
- [45] 翟华, 张建甫, 王恩营. 豫西三软不稳定厚煤层煤与瓦斯突出快速判识技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [46] Greenhalgh, S.A., Zhou, B., Pant, D.R., *et al.* (2007) Numerical Study of Seismic Scattering and Waveguide Excitation in Faulted Coal Seams. *Geophysical Prospecting*, **55**, 185-1978. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00604.x>
- [47] 李松营, 廉洁, 姚小帅, 等. 槽波地震勘探应用技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [48] Li, X.P. (1997) Elimination of Higher Modes in Dispersive In-Seam Multimode Love Waves. *Geophysical Prospecting*, **45**, 945-961.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)