

国家自然科学基金重点项目“矿山顶板灾害预警(51234005)”资助

矿山顶板灾害研究论文集

KUANGSHAN DINGBAN ZAIHAI YANJIU LUNWENJI

何富连 马念杰 张守宝 主编

张守宝

 冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

矿山顶板灾害研究论文集

何富连 马念杰 张守宝 主编

北 京

冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书是受国家自然科学基金重点项目“矿山顶板灾害预警(编号51234005)”资助召开的第二次矿山顶板灾害全国性学术会议的论文集。主要内容涉及到与矿山顶板灾害相关的矿山岩石与岩体力学、采场支架-围岩关系及控制、巷道矿山压力及控制等理论与实践研究成果,具体包括矿山顶板灾害的发生影响因素、顶板灾害的发生机理、工程灾变条件、采场与巷道围岩控制以及顶板灾害预警方法与系统等方面的内容。

本书可供煤矿开采及相关行业生产、科研、设计人员阅读,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山顶板灾害研究论文集/何富连,马念杰,张守宝主编.
—北京:冶金工业出版社,2017.6

ISBN 978-7-5024-7511-6

I. ①矿… II. ①何… ②马… ③张… III. ①矿山—
顶板事故—文集 IV. ①TD773-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第115477号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7511-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017年6月第1版,2017年6月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;14.5印张;340千字;223页

60.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

编 委 会

主 编：何富连 马念杰

张守宝

编委会成员：张拥军 刘洪涛

谢生荣 赵志强

目 录

低频探地雷达井下隐伏构造灾害源 CT 探测	
..... 张凯, 李思远, 崔凡, 王丽冰, 耿晓航	1
矿井探地雷达技术在顶板煤厚探测中的应用	
..... 崔凡, 耿晓航, 张凯, 陈柏平, 李思远	7
不同煤柱宽度下沿空掘巷围岩应力状态与破坏特征	 丁楠, 李小裕, 蒋力帅 13
基于随机介质理论的综放开采初始放煤顶煤运移规律研究	
..... 刘鑫, 杨登峰, 张拥军, 朱帝杰	19
沿空掘巷围岩顶板变形演化规律的煤柱尺寸效应	 李小裕, 丁楠, 蒋力帅 26
隐伏断层顶板采动切落过程及支架动荷载效应试验研究	
..... 杨登峰, 胡同旭, 张拥军, 徐杨, 马杭州	32
薄基岩特厚煤层综放工作面端头顶板管理技术研究	 杨晓强 37
大跨度巷道厚煤层顶板失稳分析与控制对策	 张亮杰, 杨增强, 刘炳权 43
深井大断面巷道碎裂顶板破坏机理与控制技术研究	
..... 杜朝阳, 武精科, 郑铮, 杨增强	49
基于 MATLAB 数据分析的直接顶灾变预警系统设计	 刘峻, 李政, 施伟 55
倾斜顶板条件下沿空巷道支护技术研究与应用	 孔军峰, 郑铮, 杜朝阳 61
同忻煤矿大跨度巷道维护特点与锚网索支护技术	 张雪峰, 宋佳伟 66
麻家梁特厚煤层采动支承应力演化特征及区段煤柱宽度优化	 郭金刚, 王伟光 72
羊场湾矿综放大断面窄煤柱合理宽度研究	 董伟 79
煤泥岩复合破碎型回采巷道顶板控制技术	 翟高峰 84
综放大跨度切眼围岩变形破坏规律及其控制	 来永辉, 肖鹏, 张亮杰 90
综放工作面矿压规律分析及支护强度确定	 陈涛 96
综放沿空煤巷上覆岩层弧形三角块稳定性研究	 李安静 101
寸草塔一矿回采巷道围岩变形规律及支护技术	 吴浩波, 闫建军 106
大柳塔矿活鸡兔井回采巷道支护参数设计	 杨刚, 李仁义 111
浅埋煤层巷道围岩变形破坏特征及控制技术	 刘方, 薛琪 117
三巷式布置保留回采巷道矿压显现规律研究	 闫建军, 李仁义 122
双排平行深孔卸压防治巷道底鼓技术研究	 詹平, 薛琪 129
赵固一矿回采巷道加长锚杆支护方案	 张弘, 李正 135
保德煤矿回采巷道支护锚杆参数优化研究	 霍天宏 141

目 录

低频探地雷达井下隐伏构造灾害源 CT 探测	
..... 张凯, 李思远, 崔凡, 王丽冰, 耿晓航	1
矿井探地雷达技术在顶板煤厚探测中的应用	
..... 崔凡, 耿晓航, 张凯, 陈柏平, 李思远	7
不同煤柱宽度下沿空掘巷围岩应力状态与破坏特征	 丁楠, 李小裕, 蒋力帅 13
基于随机介质理论的综放开采初始放煤顶煤运移规律研究	
..... 刘鑫, 杨登峰, 张拥军, 朱帝杰	19
沿空掘巷围岩顶板变形演化规律的煤柱尺寸效应	 李小裕, 丁楠, 蒋力帅 26
隐伏断层顶板采动切落过程及支架动荷载效应试验研究	
..... 杨登峰, 胡同旭, 张拥军, 徐杨, 马杭州	32
薄基岩特厚煤层综放工作面端头顶板管理技术研究	 杨晓强 37
大跨度巷道厚煤层顶板失稳分析与控制对策	 张亮杰, 杨增强, 刘炳权 43
深井大断面巷道碎裂顶板破坏机理与控制技术研究	
..... 杜朝阳, 武精科, 郑铮, 杨增强	49
基于 MATLAB 数据分析的直接顶灾变预警系统设计	 刘峻, 李政, 施伟 55
倾斜顶板条件下沿空巷道支护技术研究与应用	 孔军峰, 郑铮, 杜朝阳 61
同忻煤矿大跨度巷道维护特点与锚网索支护技术	 张雪峰, 宋佳伟 66
麻家梁特厚煤层采动支承应力演化特征及区段煤柱宽度优化	 郭金刚, 王伟光 72
羊场湾矿综放大断面窄煤柱合理宽度研究	 董伟 79
煤泥岩复合破碎型回采巷道顶板控制技术	 翟高峰 84
综放大跨度切眼围岩变形破坏规律及其控制	 来永辉, 肖鹏, 张亮杰 90
综放工作面矿压规律分析及支护强度确定	 陈涛 96
综放沿空煤巷上覆岩层弧形三角块稳定性研究	 李安静 101
寸草塔一矿回采巷道围岩变形规律及支护技术	 吴浩波, 闫建军 106
大柳塔矿活鸡兔井回采巷道支护参数设计	 杨刚, 李仁义 111
浅埋煤层巷道围岩变形破坏特征及控制技术	 刘方, 薛琪 117
三巷式布置保留回采巷道矿压显现规律研究	 闫建军, 李仁义 122
双排平行深孔卸压防治巷道底鼓技术研究	 詹平, 薛琪 129
赵固一矿回采巷道加长锚杆支护方案	 张弘, 李正 135
保德煤矿回采巷道支护锚杆参数优化研究	 霍天宏 141

寸草塔二矿回采巷道支护参数优化研究	唐青豹	149
高应力破碎围岩大断面巷道支护技术研究	刘元祥	155
门克庆煤矿深部回采巷道支护设计与分析	李腾龙	161
上湾煤矿 51203 工作面辅运巷支护参数设计	史超	167
石圪台矿回采巷道顶板支护参数优化	靳俊晓	173
深部大断面切眼围岩控制技术	冯泽康, 赵力, 乔顺兴	179
高地应力大断面泵房围岩控制技术优化研究	魏树群	183
邢东矿远距离输送地面注浆技术应用	邢世坤, 吴俊	188
大采高工作面超长一体式充填液压支架撤出技术研究	杨军辉, 周艳青	192
深井沿空留巷充填体宽高比数值模拟研究	张英卓	196
超长距离高瓦斯巷道快速掘进技术优化	杨杨, 刘琦	202
综放工作面液压支架支护强度的弹性力学计算分析	袁友桃, 孙波, 朱梦楠, 解丰华	208
大断面巷道交叉点锚网索联合支护技术	鲁永祥	214
近距离下煤层顶板控制技术选择与工艺	李政, 解广瑞, 彭潇, 孟祥超	219

低频探地雷达井下隐伏构造灾害源 CT 探测

张凯^{1,2}, 李思远³, 崔凡³, 王丽冰⁴, 耿晓航³

- (1. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100011;
2. 神华集团有限责任公司科技发展部, 北京 100011;
3. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;
4. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为探测井下隐伏构造灾害源并圈定其影响范围, 保障煤矿安全生产, 通过理论分析并对比多种井下物探方法, 阐述了应用低频防爆探地雷达开展 CT 透射式井下隐伏构造灾害源探测的可行性与优势。在神东布尔台煤矿 42201 工作面跳采回撤通道至切眼区域, 应用中心频率为 12.5MHz 的雷达天线进行实际探测, 结果表明: 12.5MHz 天线有效 CT 透射探测深度可达 300m, 可识别断距在 1.2m 以上的断层。该方法弥补了常规反射式探地雷达井下探测深度和精度的不足, 对促进井下隐伏构造灾害源探测起到了一定推动作用。

关键词: 隐伏构造灾害源; 低频探地雷达; CT 透射; 井下探测

以小断层为主的矿井隐伏构造灾害源, 可导致煤矿出现透水、冒顶等事故, 影响采煤进程。提前探明其空间分布特征, 是避免此类事故发生的有效手段^[1]。与地面半空间探测相比, 井下探测属于全空间范畴, 探地雷达以其高精度、高效率、施工简便的技术优势相较于其他地球物理勘探方法在井工探测领域具有更强的适用性。但在井下探测过程中, 探地雷达激发的高频脉冲电磁波在煤层介质传播中衰减严重, 反射回波信号很弱, 导致探测深度受限, 这也是井下探地雷达技术面临的最大问题。

本次研究针对矿井介质全空间分布及矿井灾害源体积小、构造复杂的特点, 在保障探测精度的前提下, 采用 12.5MHz 分

体式天线及透射式雷达数据采集方式进行探测, 大幅度增加了探地雷达的探测深度, 对井下隐伏灾害源的判识及圈定起到了重要意义。

1 矿井探地雷达理论基础

1.1 电磁场的波动特征

探地雷达是利用电磁场的波动特征进行目标探测的, 通过地下介质间的电性差异判断异常体, 圈定异常范围。根据电磁波传播理论, 高频电磁波在介质中的传播满足麦克斯韦方程组, 即

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51234005), 国家重大仪器开发专项(2012YQ030126), 国家重点研发计划项目(2016YFC0501100), 中国工程院重点咨询研究项目(2015-XZ-23)。

作者简介: 张凯(1980—), 男, 江西新余人, 神华集团有限责任公司科技发展部, 高级工程师。电话: 010-58131796, 邮箱: zhangk@shenhua.cc。

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{4}$$

式中， ρ 为电荷密度， C/m^3 ； $\boldsymbol{J}$ 为电流密度， A/m^2 ； $\boldsymbol{E}$ 为电场强度， V/m ； $\boldsymbol{D}$ 为电位移， C/m^2 ； $\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度， T ； $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度， A/m [2]。

当随时间变化时，麦克斯韦方程组描述了互耦的电场和磁场的变化关系。根据能量损耗和能量存储的相对强度大小，波场呈现出凋落和波动特性。当探测环境具有类波场响应时，探地雷达探测是有效的。而井下探测环境具有类波场响应，这为探地雷达应用到井下探测提供了理论依据。

针对麦克斯韦方程组，当消去电场或磁场分量，将其重新改写时，电磁场的波动特性变得明显。这里运用电场表述，重新写为

$$\nabla \times \nabla \times \boldsymbol{E} + \mu \sigma \cdot \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \mu \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} = 0 \tag{5}$$

式中， $\boldsymbol{E}$ 为电场强度； μ 为介质磁导率， H/m ； σ 为介质的电导率， S/m 。由于矿井地质结构中岩土介质均为低电损耗介质（ $\sigma \ll \omega \varepsilon$ ），能量耗散（ $\mu \sigma$ ）与能量存储（ $\mu \varepsilon$ ）相比较小，这也为探地雷达的井下探测提供了理论支撑 [3]。矿井地质结构中岩土介质的电磁参数如表 1 所示。

表 1 矿井地质结构中岩土介质的电磁参数

介质名称	电导率/ $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	相对介电常数	波速/ $\text{m} \cdot \text{ns}^{-1}$
纯水	0.0001~0.03	81	0.033
土壤	0.00014~0.05	3~40	0.09~0.13
干燥	0.001~0.01	3.5	0.16
湿煤	0.001~0.1	8	0.106
灰岩	0.0016~0.1	4~8	0.09~0.15
砂岩	0.001~0.01	5~30	0.055~0.134

1.2 电磁波衰减特性

探地雷达发射的高频脉冲电磁波可以通过傅里叶变换进行分解，将电磁脉冲分解成一系列不同频率的谐波，而这些谐波的传播一般都可以近似为平面波的传播形式。此时，探地雷达的理论基础是平面谐波在介质中的传播规律。

对于一个简谐平面波，取其时谐因子为 $e^{j\omega t}$ ，令其在一个相对磁导率为 1 的导电介质中传播，则传播方向上的衰减系数为

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中， ω 为角频率， rad/s ； ε 为介质相对介电常数； μ 为磁导率； σ 为电导率。探地雷

达信号的衰减受频率影响很大。根据衰减系数公式来看，信号衰减系数与天线中心频率成正比，衰减随频率的变化关系也为应用低频探地雷达天线增加探测深度提供了理论依据 [4~6]。

与此同时，通过 CT 透射数据采集方式，接收单程走时，相较于常规反射探测接收双程走时来说，探测距离增大了一倍，有效地提升了探地雷达在井下的探测深度。

1.3 多种勘探方法对比分析

当前用于井下探测的物探方法主要分为弹性波探测和电磁类探测。以弹性波探测为代表，主要有井下地震勘探和井下 TSP

超前探测^[7~9]；电磁类勘探方法主要有直流电法、瞬变电磁和探地雷达^[10~12]。其中，地震勘探技术完备，广泛用于煤矿采区的合理布置、综采工作面开采地质条件的评价等方面，但无法对井下进行全空间探测，受地形因素影响较大且成本较高；井下 TSP 技术，适用范围较广，可以在各种地质岩性条件下使用，但其对复杂构造区域探测时，精度不够，探不出断层产状、产状和岩体波速参量等关键信息；直流电

法勘探技术较为成熟，对高、低阻地质异常有良好的反映，但若增大探测深度需通过增大电极距实现，该技术同样受地形制约且人工成本较高；瞬变电磁方法，施工效率高，可穿透高阻屏蔽层，勘探深度较大，而其会在浅部出现勘探盲区，且受井下铁磁介质影响较大；探地雷达勘探技术精度高，抗干扰性强，探测效率高，但探测深度受限。多种地球物理勘探方法对比如表 2 所示。

表 2 多种地球物理勘探方法对比

勘探方法	优 点	缺 点
地震勘探	技术完备、大面积采集信息	探测效率低、成本高
直流电法	浅层的地质异常体分辨能力强、 高低阻异常体反应明显	受浅部高阻屏蔽影响较大、 地形影响较大
井下 TSP	适用范围较广、成本低	精度低、成果解释困难
瞬变电磁	分辨率高、施工效率高、 勘探深度较大	抗干扰能力差、 有浅部勘探盲区
探地雷达	精度高、抗干扰性强、地形影响小	探测深度受限

综合以上分析，将探地雷达技术应用到井下探测是切实可行的，且有着其他物探方法不可替代的优势。在保障探测精度的基础上，通过降低天线中心频率，减小衰减系数，增大探测深度，能满足井下探测需求，使其在井工探测领域适用性更强。

2 应用实例

2.1 CT 透射探测原理

CT 透射法测量是将发射与接收天线分别放置在被探测区域两侧进行对穿探测，接收单程走时信息，相较于常规反射探测接收双程走时来说，探测距离增大了一倍，同时，因发射和接收天线所置的相对位置可控，又可获得准确的透射距离，从而精确计算出波速和介质的相对介电常数，继而反演成像。通过低频天线与透射采集方式相结合，有效地提升了探地雷达在井下的探测深度，满足井下隐伏构造灾害源探测需求。

2.2 测区概况及探测方案

探测区域选择神东布尔台煤矿 42201 工作面跳采回撤通道至切眼区域。对回撤通道的 A、B 侧帮进行对穿探测。回采工作面位于 42 煤二盘区大巷东南，为 42 煤二盘区首采工作面，以 28°51'12" 方位回采，四邻均为未开采区。42 上 201-1 工作面回采 42 上煤，煤厚范围 4.8~7.0m，平均煤厚 5.7m；42 上 201-2 工作面煤厚范围 5.1~7.3m，平均煤厚 6.24m，中等热稳定性。探测区域如图 1 所示。

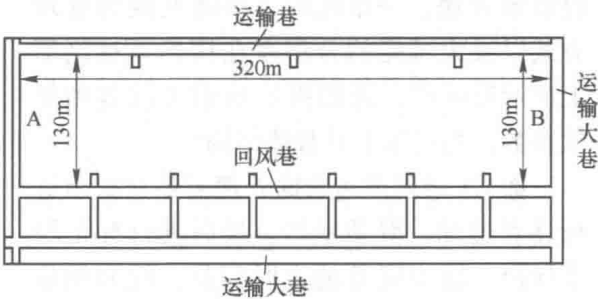


图 1 探测区域示意图

现场采用 12.5MHz 分体式天线进行 CT 透射探测,在 A、B 侧帮高度约 1.5m 位置处各布置一条测线,A 测线为发射天线所在位置,B 测线为接收天线所在位置,A、B 侧帮长度均为 130m,间距 320m。里程定位采用白色自喷漆喷涂里程编号方式,从测线起点 0m 开始喷涂,每 10m 编号递增 1,A 测线上测点编号 $A_0 \sim A_{13}$,B 测线上测点编号 $B_0 \sim B_{13}$ 。进行 CT 透射探测时,发射天线由支架固定在 A 侧帮测点上,沿预先标定的测点逐次移动。接收天线沿 B 测线匀速移动接收,在标记点上打标,方便后期对异常体进行定位。探测示意如图 2 所示。

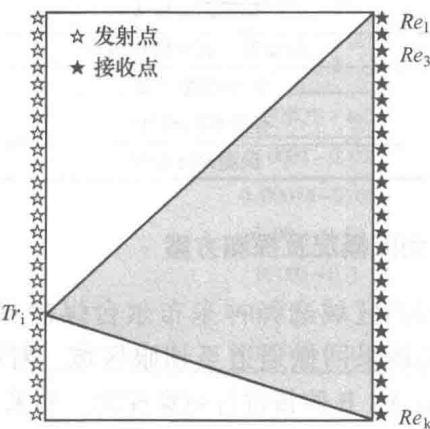


图 2 CT 透射探测观测系统示意图

2.3 CT 透射雷达数据处理

CT 透射雷达数据处理的方式和流程与常规反射探测数据处理有很大不同,常规探地雷达数据处理的目的是压制干扰,通过背景去噪、一维滤波、小波变换等处理方式以最大可能的分辨率在探地雷达剖面上显示反射波,进而提取反射波的各种属性参数,判定地下异常体结构。

而 CT 透射雷达数据处理需要对初至进行逐点追踪、滑动平均、最后进行标记厚度导出,输出完整的走时信息,继而根据走时信息进行层析反演成像。CT 数据处理

流程如图 3 所示。

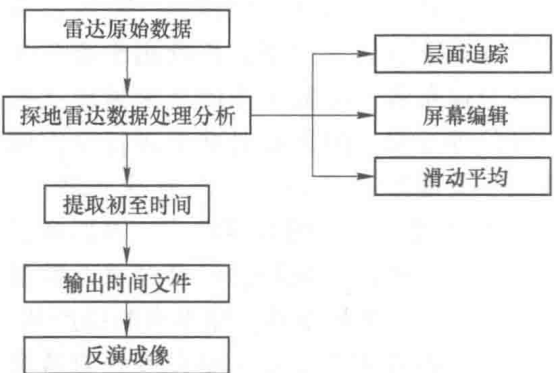


图 3 CT 数据处理流程

2.4 反演成果解释

在雷达数据处理后,引入射线追踪算法和 ART 算法进行走时层析反演成像,将输出的走时信息通过算法进行迭代修正,最终结果以速度等值线图的形式表示出来,确定异常区域,完成对反演结果的综合解释。

2.4.1 直射射线追踪算法

射线追踪方法作为一种快速有效的波场近似算法,不仅对于地震波理论研究有重要意义,而且也已直接应用于地震波反演及偏移成像过程。而高频电磁波可用一定频率的雷克子波近似模拟。在进行射线追踪之前,离散化整个观测区域,假设将每个网格内的介质视为均匀各向同性介质,可将求取整个观测区域的波速分布转化为求取各个网格的介质波速。在进行直射射线追踪的过程中,对所有射线逐条进行计算^[13~15]。

2.4.2 ART 算法原理

ART (代数重建法) 算法,是在给定慢度解向量初值的基础上,逐条计算每一个网格的射线对其慢度修正值的一类迭代算法。对于每一个网格,逐条遍历经过该网格的射线,修正该网格慢度值,并根据当前慢度反演结果计算新的走时,检验是否

达到迭代停止条件。实现 ART 算法程序时, 给定基本信息后设定算法迭代次数以及初始速度, 当给定速度越接近实际值时, 迭代所需要的时间越小。

常规迭代算法的终止条件一般可设为最大均方根误差、最大迭代次数。将迭代算法具体到 ART 算法时, 可选择相对走时残差变化值、慢度解向量中任意元素两次迭代变化值、最大迭代次数等作为迭代终止条件。本次研究以任意两次迭代变化值大小作为迭代终止条件, 即后一代的解与前一代的解变化不大时算法终止^[16,17]。

2.4.3 成果解释

将走时数据输入算法程序, 经迭代反演后输出新的走时数据, 最终绘制测区速度等值线图, 如图 4 所示。

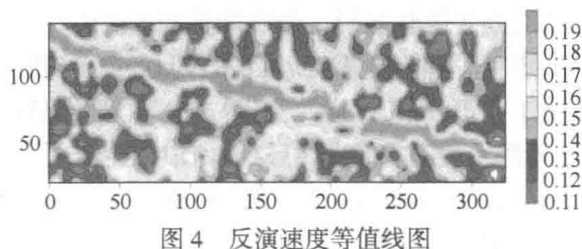


图 4 反演速度等值线图

结果显示, 在布尔台煤矿 42201 工作面跳采回撤通道至切眼区域内, A、B 侧帮之间 320m 范围内存在连续性较强的带状高速异常区, 结合现场情况推断为断层破碎区域。后经实际地质资料揭示: 探测区域内存在 DF57 断层, 断距 1.2~7.0m。探测解释结果与实际地质资料揭示情况基本吻合。同时可确定 12.5MHz 低频雷达天线 CT 透射有效信号可达 320m 的探测深度。

3 结语

综合多种地球物理勘探方法, 选定适用性最佳的矿井探地雷达技术对井下隐伏灾害源进行探测识别, 通过选择低频探地雷达天线进行 CT 透射探测, 大幅度增大

了雷达的探测深度, 且实现了跨工作面探测。

经井下实际探测, 证实了 12.5MHz 分体式透射雷达天线有效探测深度为 300m, 且探测结果与实际地质资料基本吻合, 探测精度得到保证。未来工作的重点将放在通过改造天线, 继续增大探地雷达的探测深度, 以及在原有探测深度的基础上进一步增大探测精度, 为隐伏灾害源的精准定位及风险判识提供理论和硬件支撑, 指导煤矿安全生产。

参考文献

- [1] 孙继平. 煤矿安全生产理念研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36 (2): 313~316.
- [2] 杨峰, 等. 地质雷达探测原理与方法研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] Harry M. Jol. 探地雷达理论与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [4] 刘广亮. 煤岩介质电磁波衰减特性的频率域研究 [D]. 山东: 山东科技大学, 2006.
- [5] 陈清礼, 肖希, 蒋晓斌, 等. 电磁波衰减系数特性分析 [J]. 石油天然气学报, 2014, 36 (8): 43~45.
- [6] Kang J, Kim D, Choi J B, et al. High-performance near-field electromagnetic wave attenuation in ultra-thin and transparent graphene films [J]. 2D Materials, 2017, 8 (4).
- [7] 王康, 廉洁, 张万鹏, 等. 极不稳定煤层槽波地震勘探技术 [J]. 煤矿安全, 2015, 46 (9): 86~89.
- [8] 程建远, 李浙龙, 张广忠, 等. 煤矿井下地震勘探技术应用现状与发展展望 [J]. 油气藏评价与开发, 2009, 32 (2): 96~100.
- [9] 李贵炳. TSP 技术在煤矿水害预警预报中的应用探讨 [J]. 中国矿业, 2009, 18 (6): 93~95.
- [10] 李术才, 李凯, 翟明华, 等. 矿井地面-井下电性源瞬变电磁探测响应规律分析 [J]. 煤炭学报, 2016, 41 (8): 2024~2032.
- [11] 徐爱, 刘长会, 张强, 等. 矿井综合物探技

- 术在巷道前方导水构造探测中的应用 [J]. 煤炭科技, 2016 (2): 37~38.
- [12] 梁庆华, 吴燕清, 宋劲, 等. 探地雷达在煤巷掘进中超前探测试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42 (5): 91~94.
- [13] Vidale J E. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions [J]. Geophysics, 1990, 55 (5): 521~526.
- [14] Cardarelli E, Cerreto A. Ray tracing in elliptical anisotropic media using the linear traveltime interpolation (LTI) method applied to traveltime seismic tomography [J]. Geophysical Prospecting, 2002, 50 (1): 55~72.
- [15] Sai-min Z, Zhu-sheng Z, Ling-jun C, et al. Seismic ray-tracing method of applying parabolic interpolation to traveltime [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22 (1): 43~48.
- [16] 王飞. 跨孔雷达走时层析成像反演方法的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
- [17] 杜翠. 矿井复杂构造雷达波走时层析成像反演算法研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2014.

矿井探地雷达技术在顶板煤厚探测中的应用

崔凡¹, 耿晓航¹, 张凯^{2,3}, 陈柏平¹, 李思远¹

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100011;

3. 神华集团有限责任公司科技发展部, 北京 100011)

摘 要: 根据探地雷达原理, 分析了该物探方法在煤矿井下顶板煤层厚度探测的理论可行性。利用防爆探地雷达及 150MHz 主频天线在安太堡井工矿 3 号井 90102 工作面, 沿切眼顶部设计了一条顺巷道走向方向的雷达测线, 沿测线对顶板煤层厚度实施了连续探测, 绘制出巷道顶板煤厚分布剖面图, 并通过局部钻探验证。该应用对计算顶板煤炭资源量, 指导放顶煤开采设计, 保证安全生产具有重要意义。

关键词: 探地雷达; 煤厚探测; 井下物探

为提高煤炭的产量, 保证开采安全, 达到资源高效回收的目标, 需要准确了解煤炭资源的赋存分布情况。在放顶煤开采工艺中, 若能预知顶板煤层厚度及其变化情况, 就能准确计算煤炭储量, 有效减少顶煤损失。同时, 由于煤厚变化往往伴随构造出现, 也可对顶板构造情况进行间接判断, 提升生产安全。目前, 对于顶板煤厚的探测, 主要还是采用人工煤电钻打孔的方式, 根据钻进阻力和反沫来确定钻进位置, 间接估测煤厚^[1-3]。该方法效率低、精度低, 更难以对整体煤厚的变化情况开展调查。采用矿井地球物理方法也可以探测煤层厚度。目前, 可以针对井下煤厚探测的物探方法, 大多都是基于弹性波探测原理, 其代表性仪器设备有煤厚探测仪、面波仪、矿井地震仪等。由于其工作频率一般在 0.5~4000Hz 范围, 理论探测精度并不能满足井下煤厚探测需要。

并且这些方法受限于井下施工条件, 均只适宜沿巷道底板开展, 并不适用于放顶煤开采工艺前对顶板煤厚井下探测^[4-7]。因此, 寻找一种有效的技术手段对顶板煤厚精准探测具有一定意义。

防爆探地雷达作为一种新型矿井物探技术, 操作简便, 抗干扰能力强, 适应井下工作环境。并且具有其他矿井物探方法不具备的高精度探测特点, 其分辨率最高可达分米至厘米级^[8-10]。同时还具有安全、无损、高效和可连续探测的优势, 若对其设备和探测方式加以改进, 足以满足对煤矿顶板煤厚连续变化的高精度探测。

1 基本原理

1.1 探地雷达基本原理

矿井探地雷达方法与常规探地雷达探

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51234005), 国家重大仪器开发专项(2012YQ030126), 国家重点研发计划项目(2016YFC0501100), 中国工程院重点咨询研究项目(2015-XZ-23)。

作者简介: 崔凡(1984—), 男, 安徽淮南人, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 副教授。电话: 010-62331031, 邮箱: cuifan@cumt.edu.cn。

测原理一致,都是通过天线向地下发射高频脉冲电磁波,并接收在地下不同介质界面处形成的反射回波达到对地下介质勘探的目的^[9]。不同介质的介电常数差异越大,根据反射系数原理,在界面处反射的电磁波能量越大^[10~14]。因此,当电磁波信号遇到煤层与围岩的界面时,雷达信号会发生反射响应。通过将雷达天线发射面紧贴巷道顶板开展连续数据采集,对精确记录反射回波的特征信息,并进行数据处理,可以构建煤层与围岩的剖面扫描图像,达到探测顶板煤层厚度的目的,如图1所示。

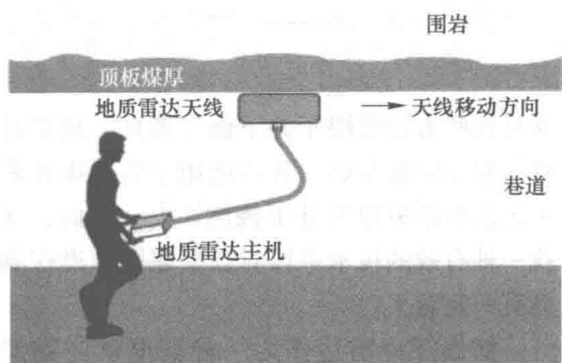


图1 探地雷达探测顶板煤厚示意图

1.2 探地雷达系统及处理

本次探测使用了中国矿业大学(北京)自主研发的ZTR-12矿用本质安全型探地雷达系统。该系统由一体化主机、高频信号连接线、150MHz主频天线和辅助设备等几部分共同组成。

ZTR-12型探地雷达主机采用显示系统与控制单元的一体化的密封防水设计,天线采用屏蔽式密封设计,全系统均达到本质安全型认证,可在井下方便、安全地开展探测工作。

探地雷达数据处理包括预处理(标记和桩号校正等)和处理分析,以压制规则和随机干扰,提高资料信噪比,以尽可能

高的分辨率在探地雷达剖面上突出反射波,突出有效异信号(包括电磁波速度、振幅和波形等),提高解释精度。针对井下顶板煤厚探测中,干扰背景强、数据质量差的特点,经过试验探测并对比分析,采用如图2所示的资料处理技术流程。

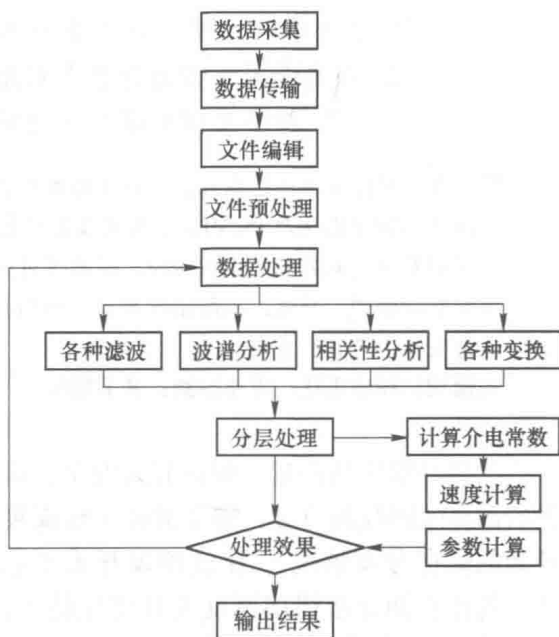


图2 雷达数据分析处理流程图

2 探地雷达煤厚探测的理论依据

2.1 煤与围岩的电性差异

由于煤的形成条件,导致煤层的顶、底板多为泥岩、砂岩、灰岩等与煤具有明显电性差异的岩层,从而形成电性差异界面^[12~15],几种常见煤系地层岩石的电性参数如表1所示。根据电磁波传播理论,在相对介电常数 ϵ_r 不同的两种介质的界面会产生反射,反射的强度由上下两层介质的介电常数和电导率相对差异而定,两者差异越大,反射信号越强,且两层介质间的分界面越易分辨。服从反射定律,如式(1)所示。而雷达波的穿透深度主要取决于地下介质的导电性和雷达天线的中心频率。电导率越高,穿透深度越小;中心频

率越高，穿透深度越小。

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \quad (1)$$

式中， ε_1 为介质1的相对介电常数； ε_2 为介质2的相对介电常数； R 为反射系数。

探地雷达探测煤厚的原则即确定煤层的顶底界面位置，因为煤层与其围岩的相对介电常数 ε_r 不同，可以引起反射波，所以根据反射回波的旅行时间计算煤层厚度是可行的。

表1 煤系地层常见岩石电性参数

介质	电导率 $\delta/\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	介电常数 ε_r (相对 值无量纲)	电磁波速度 $v/\text{m} \cdot \text{ns}^{-1}$
空气	1	1	0.3
泥岩	$10^{-1} \sim 1$	8~11	0.07
页岩	0.5~2	5~15	0.09
砂岩(干)	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	4~6	0.15
砂岩(湿)	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	6	0.06
灰岩(干)	10^{-9}	5~7	0.12
灰岩(湿)	2.5×10^{-2}	8	0.1
褐煤	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	2.7	0.19
气煤	$6 \times 10^{-2} \sim 10^{-1}$	2.8	0.16
肥煤	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	3.0	0.15
焦煤	$5 \times 10^{-2} \sim 10^{-1}$	2.3	0.17
瘦煤	$2 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$	3.1	0.15
无烟煤	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	3.6	0.18

2.2 煤厚计算

在煤层及其围岩具备可产生雷达反射波的基础上，根据雷达波在介质中的旅行时间和波速，可计算出煤层厚度。由于电磁波在均一且各向同性的理想介质中的传播速度是一定的，但实际探测中，则是各类介质综合作用条件下的波速 $\bar{v}$ 。因此可根据综合波速 $\bar{v}$ 和雷达数据中记录的煤层上层面反射波与下层面反射波的时间差 Δt ，即可根据式(2)计算出煤层厚度 H

$$H = \frac{\Delta t \cdot \bar{v}}{2} \quad (2)$$

式中， H 为煤层厚度； $\bar{v}$ 为电磁波在介质中的综合传播速度，其大小由式(3)表示

$$\bar{v} = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (3)$$

式中， C 为电磁波在真空中的传播速度，约为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ； ε 为介质综合相对介电常数，取决于各岩层构成物质的介电常数，根据现场实际情况，准确构建该参数，是煤层厚度准确探测的重要条件。

2.3 矿井雷达井下抗干扰分析

探地雷达在井下工作，属于全空间探测环境，巷道内的支架、钢筋网等金属体都会对探测形成干扰。所选取的150MHz一体式屏蔽天线，可有效屏蔽来自天线后方及周围的干扰信号。而天线探测方向的线性干扰金属体一般沿巷道方向展布，多属于巷道整体环境的一部分，分布具有规律性，比较容易识别，如金属支护、锚杆、锚网等^[7]。对于这样的干扰因素，可以通过对所采集数据进行叠加、滤波处理进行部分抑制和消除。并且，由于150MHz雷达天线体积小、重量轻，适宜矿井工作条件，故可以满足煤厚探测的需求。

3 探测实例

3.1 基本概况

安太堡井工矿位于山西省朔州市平鲁区井坪镇东北部，东南方向距朔州城区中心直距约28km，西南距井坪镇约6km，地处朔州市平鲁区向阳堡乡、榆岭乡境内。矿井位于宁武煤田朔州矿区西北部，宁武向斜的西北端。

本区为华北型石炭-二叠纪煤系，井田含煤地层为二叠系下统山西组、石炭系上统太原群和中统本溪组，全区主要采用全

厚放顶开采方式，主要可采煤层为4号、9号和11号煤层。

本次探测目标为安太堡井工矿 90102 工作面切眼顶板以上 20m 范围内的煤厚分布情况。该区域煤为 9 号煤层，煤岩类型主要以半亮型煤为主，煤层结构复杂，含夹矸 2~4 层，多为高岭质泥岩、炭质泥岩。根据以往钻探资料和矿井设计，该区平均煤厚为 12m。故根据钻探调查的巷道顶板 20m 范围内的煤厚、围岩厚度和分布比例，可估算出该区域电导率值和相对介电常数值分别为 $10^{-1} \sim 1 \text{ S/m}$ ，8~11。该电导率值条件下，150MHz 天线可以满足整体煤层厚度的探深。综合介电常数值则可以作为煤厚计算的条件，以保障煤厚的精确计算。

3.2 现场探测

3.2.1 测线布置

安太堡井工矿 3 号井 90102 工作面切眼，全长 240m，液压支架共 161 台，每一液压支架防护板宽度约为 1.49m，采用液压支架作为雷达数据采集的控制里程碑点，自主运输巷起，向回风巷方向编号为 1-161 号，如图 3 所示。由于工作面条件所限，只能在宽度和安全性均满足的顶板支护区域逐段进行雷达数据采集，因此只能逐段采集，具体测线布置分段情况如表 2 所示。

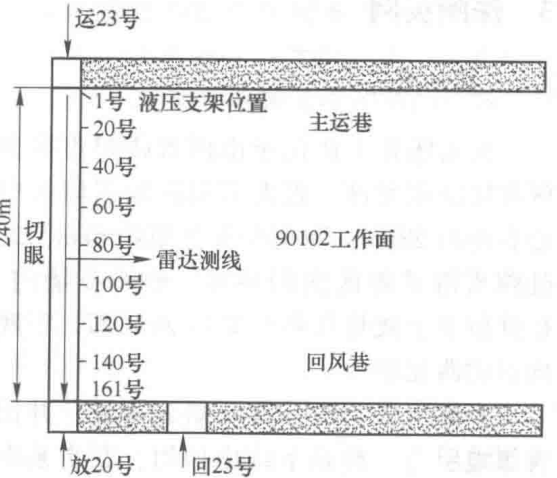


图3 测区分布图

表2 测线分布表

序号	测线位置	探测里程/m (距离第一支架)
1	22~24 号液压支架	31.3~35.8
2	30~31 号液压支架	43.2~46.2
3	67~68 号液压支架	99.8~101.3
4	77~79 号液压支架	113.2~117.7
5	94~95 号液压支架	138.6~141.6
6	114~116 号液压支架	168.4~172.8
7	126~127 号液压支架	186.2~189.2
8	135~137 号液压支架	199.7~204.1
9	141~143 号液压支架	208.6~213.0
10	159~160 号液压支架	235.4~238.4

3.2.2 设计天线支架

探测工作面顶板距离巷道底板平均为 3m，而探测工作开展时，必须将天线紧贴顶板与被测介质充分耦合。因此必须研制一种结构简单、坚固安全的天线支架，以满足探测需求。

为了增强天线贴顶探测的稳定性并尽量减轻重量，采用掏空高强度纤维板固定天线，并使用空心钢管作为手持支撑杆，支撑杆与天线连接的底座采用可前后、左右转动一定角度的钢材焊接。底座和纤维板采用尼龙安全带扣死，保障仪器不会滑落，改造后的天线支架如图 4 所示。

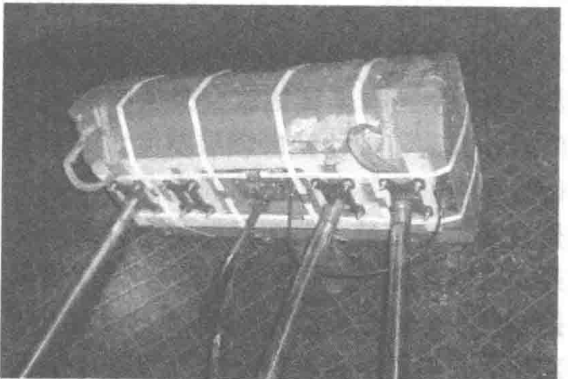


图4 天线支架