

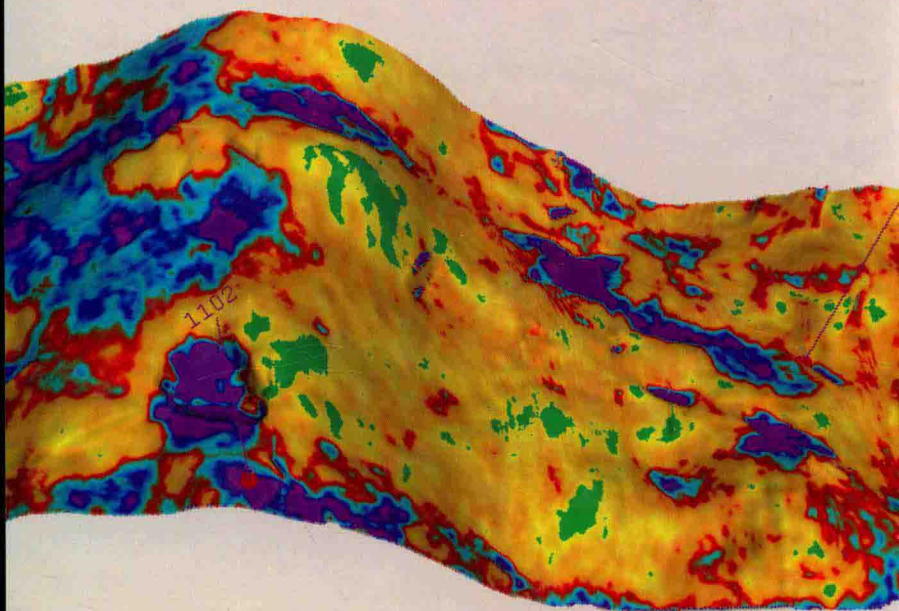


中国地质调查成果
CGS 2014-007

The Prediction Technology for Coal-gas
Disaster Factors in Jincheng Coalmine
Based on Seismic Data

晋城矿区瓦斯灾害隐患 地震资料预测技术

邹冠贵 贺天才 彭苏萍 著



科学出版社

中国地质调查局 重要煤矿区煤层气资源潜力调查与瓦斯灾害隐患预测(1212011220798)”项目资助

晋城矿区瓦斯灾害隐患 地震资料预测技术

邹冠贵 贺天才 彭苏萍 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕影响晋城矿区瓦斯灾害的重要地质因素：小构造、煤层厚度、构造煤和煤层含气量，结合地震探测技术进行研究。作者根据晋城矿区寺河煤矿和赵庄煤矿应用地震技术的资料为基本素材，并参阅国内外有关文献资料，全面细致地介绍了瓦斯隐患的地震探测技术基本特点，重点分析了晋城矿区的地震资料处理和地震解释方法的关键性步骤；总结了起伏地表三维地震处理效果改进的技术流程和方法，结合断层解释理论分析提高小构造解释精度的方法和经验；通过应用数值模拟和实际数据分析煤层厚度与地震振幅之间的属性关系并对煤厚进行预测；分析了构造煤反演的关键技术和方法；构建了煤层含气量预测的技术方法。本书资料翔实、内容丰富，具有很强的科学性、创新性、资料性和实用性。

本书可供煤田地球物理勘探专业、地质工程专业的师生和从事现场工作的物探、地质及其他工程技术人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

晋城矿区瓦斯灾害隐患地震资料预测技术 / 邹冠贵, 贺天才, 彭苏萍著. —北京: 科学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-03-041145-7

I. ①晋… II. ①邹… ②贺… ③彭… III. ①煤矿-瓦斯爆炸-地震勘探-预测技术-晋城市 IV. ①TD712②P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 128254 号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张: 11

字数: 260 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

煤炭资源在我国能源组成部分中占主体，同时在我国能源供给中具有重要的战略地位。由于我国地域分布广，不同煤田的含煤地层形成条件不同，经受了多期构造作用，从而造成不同煤田的地质条件存有较大的差异。多个矿区的实践资料表明，由于煤层沉积、埋深、构造等地质因素的影响，煤层瓦斯、煤体结构、煤层顶底板等重要地质条件在横向上变化大，表现出强烈的不均一特征。复杂的地质条件带来了许多煤矿安全生产问题，这些问题一直以来受到我国煤炭工业的重视。尤其是瓦斯灾害，由于瓦斯爆炸会造成巨大的人员伤亡和财产损失，一直是煤矿企业和社会重点关注的安全生产内容。随着我国社会经济的不断发展，国家对煤炭资源的需求不断提高，煤炭资源的开采从浅部向深部发展，从简单条件向复杂条件发展，煤矿面临更为严重的瓦斯灾害隐患。

多年的研究表明，瓦斯突出受到复杂地质因素的控制。瓦斯灾害的防治，需要以详细可靠的地质资料为基础。从 1991 年我国开始推广三维地震勘探以来，目前大部分矿区都已经开展，或者即将开展三维地震勘探工作。三维地震具有横向上高密度的特征，对复杂地质条件的探测具有控制能力强、可靠程度高的优势。本书针对瓦斯灾害防治需要详细、准确的地质资料的要求，通过三维地震探测技术与瓦斯地质结合，研究先进的地震资料处理、解释技术，为瓦斯灾害防治提供详细可靠的地震地质成果。本书以晋城矿区为例，结合瓦斯灾害地质认识，分析了小构造、煤层厚度、煤体结构、煤层含气量的地震资料预测方法。针对晋城矿区表浅层地震地质条件较差，小构造解释偏差大的情况，本书分析了以静校正、叠前偏移为核心的处理技术，构建多属性解释方法提高了小构造解释精度，同时分析了煤体结构划分常规方法存在的问题，提出了针对性的措施，通过煤层含气量表征瓦斯富集区，结合 AVO 技术构建了煤田反演预测方法，并分析了其中存在的关键问题，具有重要的学术价值。

本书共八章，由邹冠贵、贺天才、彭苏萍共同完成，贺天才、彭苏萍负责全书的统筹，邹冠贵主要负责全书的撰写。需要指出的是，本书是我们研究集体的共同成果，参与这方面研究的成员有杜文凤副教授、何登科讲师、师素珍讲师、卢勇旭博士，以及博士研究生李巧灵，硕士研究生殷裁云、程凤英、徐延勇、曹文彦、郝小霞、张健。张高阳、曾葫等很多同学为本书的插图进行了计算机的清绘和部分资料的收集整理，在此特表感谢。

本书的研究工作得到了中国矿业大学（北京）的孟召平教授、朱国维教授、方家虎副教授，中国矿业大学的董守华教授，中国煤田地质总局的勾精为教授级高工，晋城无烟煤矿业有限责任公司的付俊青副总工程师，寺河煤矿的霍振龙总工程师、吴光

亮副总工程师，山西晋城集团赵庄煤业有限责任公司宋斌总工程师、李劲松副总工程师的帮助和支持；本书还得到了晋煤集团有限责任公司的领导及工程技术人员在地质、地震资料方面的支持和帮助，在此表示真诚的感谢。同时，还要感谢书中引用文献作者的支持和帮助。

本书的出版得到了中国地质调查局项目：《重要煤矿区煤层气资源潜力调查与瓦斯灾害隐患调查》（编号：1212011220798）的资助，同时，也得到了国家十二五科技支撑课题：《晋陕蒙接壤区生态恢复关键技术及示范》（编号：2012BAC10B03-2）、《复杂条件大型煤炭基地高精度地震探测技术》（编号：2012BAB13B01）以及多项部门科研课题的资助，在此表示衷心的感谢。

瓦斯灾害隐患的地震探测技术研究，有许多的理论和方法内容需要进一步探讨完善，书中不妥之处，请多多批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 瓦斯灾害隐患预测技术研究现状	2
1.3 煤田地震解释的国内外研究现状	5
1.4 已有研究的不足	11
1.5 本书主要研究内容	12
第2章 晋城矿区地质概况及影响瓦斯突出的地质因素	14
2.1 晋城矿区含煤地层	14
2.2 地质构造发育规律	18
2.3 影响瓦斯突出的地质因素	21
第3章 晋城矿区煤田地震资料处理技术	24
3.1 煤田地震资料的处理流程	24
3.2 主要技术措施	27
3.3 寺河煤矿地震资料处理效果	32
3.4 赵庄煤矿地震资料处理效果	38
第4章 晋城矿区构造的地震属性解释技术	61
4.1 断层解释基本理论	61
4.2 采区构造地震属性解释	64
4.3 构造可靠程度评价	69
4.4 晋城矿区断层的地震解释	69
4.5 陷落柱的地震解释	78
4.6 采空区的地震解释	83
第5章 晋城矿区煤层厚度预测技术	88
5.1 基于楔形模型的煤层厚度地震属性分析	88
5.2 寺河煤矿煤层厚度预测	96
5.3 赵庄煤矿煤层厚度预测	97
第6章 晋城矿区煤层结构反演技术	99
6.1 波阻抗反演	99
6.2 波阻抗反演预测煤体结构	123
第7章 煤层含气量的地球物理预测方法	139
7.1 引言	139

7.2	AVO 属性的计算原理	140
7.3	含气量预测的 AVO 反演流程及关键性步骤	141
7.4	寺河煤矿煤层含气量预测成果	153
7.5	赵庄煤矿煤层含气量预测成果	156
第 8 章	结论	158
8.1	针对起伏地表的高分辨地震数据处理方法	158
8.2	晋城矿区采区构造地震属性解释技术	159
8.3	地震属性的煤层厚度预测技术	161
8.4	基于波阻抗反演的煤体结构划分	162
8.5	基于 AVO 反演的煤层含气量预测方法	163
参考文献		165

第 1 章 绪 论

1.1 研究意义

煤层中普遍含有瓦斯，当地下掘进到煤层时，由于煤层的应力条件发生变化，煤层瓦斯发生泄压、涌出。在一定的压力作用下，破碎煤与瓦斯由煤体突然向采掘空间大量喷出，这是一种瓦斯特殊涌出的现象，这种现象被称为煤与瓦斯突出。这种突出在煤矿中常产生破坏性作用，比如爆炸、窒息，从而形成瓦斯灾害。

瓦斯灾害的根源在于煤与瓦斯突出现象。这种现象涉及煤层的先天性条件，比如，煤体结构、煤层吨煤含气量、煤层瓦斯压力等，同时也与后天性条件有关，比如煤矿的开采、生产方法。后天性条件需要根据先天性的煤层条件来确定，并根据实际情况的变化进行及时的调整。由于我国含煤地层的复杂性，煤与瓦斯突出现象时有发生，给煤矿的安全高效生产带来极大的难度。根据煤炭行业统计数据，我国国有重点煤矿 48% 以上是高瓦斯突出矿井，新中国成立以来发生了 22 起死亡百人以上煤矿事故，其中 20 起是由于瓦斯灾害（付建华、程远平，2007）。

目前进行瓦斯灾害的防治，主要是通过两种措施的结合，一是根据矿区已有的瓦斯突出规律，确定瓦斯突出的主控地质因素，比如煤层的赋存条件、煤的结构类型及工业分析等。通过一定技术手段掌握地质因素的展布规律，在具有突出危险的区域或部位，进行针对性瓦斯突出的防治。二是根据煤与瓦斯的突出规律，在井下进行动态的监测，根据监测参数的变化规律，预测瓦斯突出，提前采取区域、或局部综合防突措施。

从上述的瓦斯防治措施可以看出，这两大类措施的采取，都需要详细可靠的瓦斯参数，用于确定突出危险区或突出危险性。瓦斯防治需要的基础性地质资料，比如实测煤层含气量、煤体结构等瓦斯参数，主要是通过钻孔或地下取心测试完成，或者进行瓦斯参数监控。它们的特点是：控制点分布较为松散，分布不均匀。在煤层赋存条件简单，横向变化小的区域，该方法能满足煤矿的安全高效生产。在煤矿地质条件复杂区域，该方法对远离控制点的瓦斯参数控制能力差，不利于煤矿的安全高效生产。

根据 1991 年原国家能源投资公司下发的能投计（1991）612 号文《关于基本建设矿井补做地震工作的通知》，其要求“凡列入计划建设的基本建设矿井项目，有条件的补做地震工作……在地震工作没有完成之前，不准进入采区施工……”。这一文件的下发，推动了高分辨地震勘探技术在煤矿建设和生产领域中的应用，揭开了大规模矿井采区地震勘探工作的帷幕。目前我国的大部分采区都已经开展或是即将开展三维地震勘探工作。虽然每个地区由于受地表条件、地下构造、煤层埋深等地质因素影响，采集

到的地震数据优劣也各有差别,但是,由于地震数据具有横向上密度高的特征,地震解释成果的准确性高;对同一个物理点具有多次覆盖的特征,可提高地震资料的信噪比。这些特点使得地震勘探技术具有勘探面积大、密度高、精度高、效果好的优势。

目前地震勘探技术广泛应用于煤田地质精细探查,可以分析地质构造、煤层厚度、煤体结构、煤层气富集区等地质条件。该技术的优势就是横向上网格小,与钻孔勘探相比,钻孔网格为 $200\text{m}\times 200\text{m}$,而地震的网格一般为 $10\text{m}\times 5\text{m}$,因此,采用地震勘探技术构建瓦斯灾害源探测的技术方法,有利于获得更为精细的成果,进而更有针对性地指导瓦斯突出的预防,提高经济效益。可见,利用地震技术进行瓦斯灾害预测,具有重要和明显的社会效益。

1.2 瓦斯灾害隐患预测技术研究现状

瓦斯灾害属于流体灾害类型,这种现象涉及三个因素:涌出源、涌出通道、涌出量,部分因素在一定条件下表现出静态、动态特征(周心权和陈国新,2008)。做好瓦斯灾害的防治工作,主要从上述的三个因素展开。同时,随着我国提出煤层气资源的开发利用,从煤层气资源开发的角度在这些方面也开展了大量的工作,两者相互促进。

瓦斯在我国的含煤地层中普遍存在。通过瓦斯抽采数据发现,瓦斯主要存在于煤层中,在煤层围岩及不可采煤层中的气体中也含有一定的量(王素玲等,1999)。总体上,煤层是最为重要的涌出源。

煤层中所有瓦斯含量的多少,可以用煤层含气量来表征。由于煤层含气量数据是评价煤与瓦斯突出、煤层气资源潜力的一个重要参数,如果能获取煤层含气量与地质因素之间的关系,则能利用地质因素预测煤层含气量的大小。进一步研究认为煤的物质组成、变质程度、煤体变形(煤体结构)、顶底板岩性、埋深与上覆有效地层厚度、构造发育情况、岩浆活动和水文地质条件是影响煤层含气量的主要因素(Yee *et al.*, 1993; 张晓宝等,2002; 王凯雄和姚铭,2004; 张同周等,2005; 苏现波等,2005; 苏现波、林晓英,2007)。通过对沁水盆地南部目标煤层含气量影响因素的分析,建立了煤变质程度、储层压力、温度及煤质特征支持向量机模型来预测煤层含气量(刘爱华等,2010);基于煤层有效埋藏深度、水分+灰分和镜质组最大反射率三个参数与煤层含气量关系密切,建立BP神经网络模型来预测煤层含气量(孟召平等,2008)。利用电阻率、密度、自然伽马、声波时差四种测井曲线,通过聚类分析计算煤层含气量和煤体结构划分,表明利用测井参数评价煤层的甲烷含量(张妮等,2010)和分析煤层破坏类型是可行的(陆国桢等,1997; Fu *et al.*, 2009)。由于地质资料主要是散点式获取,这些结果也仍然是散点式的,不同点之间的距离较大。

煤层含气量在横向上表现出变化,体现了瓦斯在一定范围内呈现富集到减弱的特征,这种变化与含煤地层在横向上的变化有关。由于边界限制,瓦斯流动系统具有独立性,则容易形成局部的瓦斯富集。在煤层气研究中,这种富集被称为煤层气藏;在瓦斯灾害中,则称为瓦斯富集区。根据含煤地层横向上的物性变化,将其边界区分为四种类

型：水动力边界、风氧化带边界、物性边界和断层边界。苏现波认为水动力边界和风氧化带边界具有普遍性；将油气领域断层的四种封闭机理（胶结作用、泥岩涂抹、对接关系和碎裂作用）引入到瓦斯富集区封闭性断层边界研究；首次将物性边界的封闭机理区分为排驱压力封闭和烃浓度封闭。不同地质背景下含煤地层具有不同的边界组合类型，进而构成了瓦斯富集区的多样性（苏现波等，2005）。同时，瓦斯富集区还存在一个岩性边界，该边界是指位于煤层尖灭带的边界，有两种情形：①位于煤层尖灭带的岩性具有较大的渗透率，排驱压力低，瓦斯容易逸散，难以在煤层内聚集，不利于瓦斯的保存；②位于煤层尖灭带的岩性具有较低的渗透率，边界具有较高的排驱压力，有利于瓦斯的保存。后一种情形常见，如在我国铁法盆地，在深部盆缘断裂附近存在煤层分叉尖灭带、岩性相变带等不渗透边界，致使瓦斯在深部聚集，构成了典型的铁法盆地瓦斯富集区（宋岩等，2009）。构造应力场也是控制瓦斯富集区极为重要的因素，挤压应力场作用下，在强变形带的中心及其附近，可以形成糜棱煤类构造煤，但糜棱煤分布较为局限；在较大范围内形成脆性变形系列的构造煤，这类煤层是瓦斯开发的有利区带；拉张构造应力场中，大部分区域有利于煤层裂隙的形成和渗透率的提高，同时，易造成瓦斯的散失，含气量降低，应重视有利储气构造的研究；剪切构造应力场中，以平移断层为界，煤层的赋存状态、煤体结构和煤储层物性都会存在一定的差异，应对不同的构造单元分别研究其煤储层特征（姜波等，2005）。

通过进行瓦斯富集区与常规天然气成藏机理的差异性研究，发现它们之间的差异性体现在以下方面：一是瓦斯以甲烷为主且成分简单，常规天然气成分相对复杂。二是瓦斯主要以吸附态储集于煤岩微孔和过渡孔的表面，常规天然气以游离态存在于储层孔隙或裂缝中。三是瓦斯赋存均经历了晚期抬升过程，后期保存条件好坏是能否形成富集区的关键；常规天然气经历了生烃、运聚和保存与破坏演化过程，天然气形成的静态地质要素和天然气成藏过程的动态地质作用的最佳时空匹配是成藏的关键。四是瓦斯的聚集受水势、压力的控制，往往具有向斜富集的特征；而常规天然气聚集受气势的控制，往往具有背斜或高部位富集的特征（宋岩等，2011）。

上述对煤层中瓦斯的研究表明，煤层中的瓦斯受到煤阶、煤储层邻近围岩的岩性及厚度、构造条件及水文地质条件等地质因素的控制。在我国众多的煤田里，瓦斯形成条件并不完全相同，从而造成不同区域的瓦斯赋存有较大的差异。比如，在我国的山西地区，主采3#煤层，在晋城寺河矿区，3#煤层平均含气量达到 $15\text{m}^3/\text{t}$ ，易于开采。然而在长治大峪矿区，3#煤层由于埋藏较浅，含气量平均在 $5\text{m}^3/\text{t}$ 。而且在同一采区内，由于煤层厚度、煤阶、埋深等地质因素的影响，煤层含气量在横向上变化大，比如寺河煤矿西采区的煤层含气量在横向上变化范围为 $2\sim 21\text{m}^3/\text{t}$ ，背斜与向斜位置的煤层含气量差异大（王平虎，2010）。

煤层中瓦斯涌出是一种正常的现象，然而在局部位置，由于含气量、煤体结构及围岩应力等条件突变，容易产生突然的煤与瓦斯突出，因此，这些部位构成了煤与瓦斯的涌出通道。针对瓦斯容易突出的部位，国内外开展了大量的研究，主要与煤层及围岩条件的突变有关，比如，构造煤（邵强等，2010）、小断层（刘咸卫等，2000）、小褶曲（何俊等，2001）、煤层厚度突变位置（李中州，2010）和煤层围岩变化（姚艳芳等，

1999; 黄凯, 2008) 等。煤与瓦斯突出的危险性随着煤层开采深度的增加而增加, 比如, 根据平顶山十矿相关统计资料, 煤层采深 500m 以上发生突出 21 次, 500m 以下发生突出 60 余次。随着矿井开采深度的增加, 煤与瓦斯突出已越来越频繁 (许伟功等, 2006)。

不同地区, 瓦斯突出部位的地质决定因素也不同, 为了预测瓦斯突出部位, 许多学者对致灾因素进行了深入研究。比如, 潞安矿区主采煤层普遍遭受地质构造破坏, 煤体结构在平面上和垂向上均有明显的分带特征, 井田北部和南部地区煤体原生结构较发育, 煤储层渗透性较好; 东部和西部的构造煤发育, 易于瓦斯突出 (郭德勇和韩德馨, 1998; 白鸽等, 2012)。对河南平顶山、安阳和四川南桐、天府矿区地质构造和煤与瓦斯突出的关系研究表明, 不同构造具有不同的突出倾向性。将地质构造分为突出构造和非突出构造及突出构造的突出段和非突出段, 利用地质构造指标预测突出 (郭德勇、韩德馨, 1998)。众多影响瓦斯突出的因素中, 构造煤的低强度、高吸附、快速解吸和低渗透性是造成瓦斯突出的根本原因, 是瓦斯涌出量预测不准、瓦斯聚集致灾的重要原因, 也是构造煤发育区瓦斯难抽采的直接原因 (张玉贵, 2006)。汤友谊等 (2004) 分析了淮南煤田不同煤体结构煤的 f 值 (坚固性系数) 分布特征和统计规律, 认为煤体结构和 f 值关系密切, 提出将 f 值作为硬煤和构造软煤的分类指标。以焦作煤田为例, 对 I ~ V 类结构煤进行了渗透率测试, 结果表明: 渗透率与不同煤体结构的关系曲线近似呈正态分布, 先是呈级数增大, 随后呈级数减小, II 类煤体渗透率最大, V 类煤体渗透率最小 (吕闰生等, 2012)。基于应用力化学理论, 水平挤压应力是形成构造煤的重要原因, 构造煤是力化学作用的产物 (张玉贵等, 2005)。构造煤尤其是糜棱煤的瓦斯易突性, 不仅受地质构造的控制, 还可能与韧性变形条件下的应力降解作用有关 (侯泉林等, 2012)。由于煤体结构的划分方法多, 杨陆武和郭德勇 (1996) 评价了煤体结构类型的不同划分方法, 认为把煤体结构划分为: 原生煤、破碎煤、构造煤是一种较为合适的方法; 傅雪海通过测井曲线划分煤体结构, 利用聚类分析将两淮煤田各矿井煤体结构划分为原生结构、碎裂煤 (I 类)、碎斑煤 (II 类) 和糜棱煤 (III 类) 4 种类型。根据煤层气试井资料, 建立煤层渗透率与 II、III 类构造煤厚度百分比之间的数学模型 (傅雪海等, 2003)。由于构造煤在煤层中不一定连续分布, 杨陆武和彭立世 (1997) 根据以煤体结构为基础的煤与瓦斯突出简化力学模型, 给出了其构造煤临界厚度判据。以河南平顶山矿区为例, 郭德勇等 (1998) 提出突出煤层煤体结构有效厚度的概念和计算方法, 探讨了突出煤层煤体结构指标临界值的计算方法。实验室大量的煤样测试结果表明, 瓦斯突出煤体和非突出煤体的导电性和介电性质存在着十分明显的差异。当电磁波穿透原生结构受到严重破坏的瓦斯突出煤体时, 电磁波能量就会明显减弱或屏蔽而形成阴影, 阴影区出现的位置是瓦斯突出煤体富集的部位或瓦斯突出煤体与地质构造共生的位置, 此时可以通过地质雷达等电磁波进行超前探测 (吕绍林等, 2000; 杨峰和彭苏萍, 2006)。当煤层中存在强烈破坏的构造煤时, 会出现低速区, 槽波由于被吸收很多而不能继续向前传播, 出现弱反射区或者衰减区域, 指示瓦斯可能突出位置 (胡国泽等, 2013)。在一定地应力和瓦斯压力作用下, 煤体弹性能量集中, 当煤体力学强度较弱如存在软分层等缺陷时, 煤体局部破坏从而释放应力波, 这种现象可以通过声发射设

备进行监控,利用煤体声发射特征规律预测煤与瓦斯突出(邹银辉等,2005)。煤与瓦斯突出前,煤岩发生变形破裂,该过程中,电磁辐射信号基本呈逐渐增强的趋势(聂百胜等,2002)。

煤层中压力变化后,煤层中的吸附态瓦斯解析,与游离态的瓦斯一起涌出到采掘空间,涌出瓦斯量以瓦斯相对涌出量和瓦斯绝对涌出量进行评价。瓦斯相对涌出量为每生产一吨煤的瓦斯涌出量,瓦斯绝对涌出量为每分钟涌出的瓦斯量,瓦斯绝对涌出量除以平均每分钟的煤产量,就是瓦斯相对涌出量。很明显,涌出量与煤层含气量、煤的开采等因素有关。目前,矿井瓦斯涌出量的主要预测方法是分源预测法,比如,在城山矿运用瓦斯地质统计法建立分源瓦斯涌出量预测关系式,对3B#、25#层采煤工作面瓦斯涌出量进行预测。对3B#、25#层进行煤与瓦斯突出危险性预测,瓦斯含量大于 $8\text{m}^3/\text{t}$ 的区域为突出危险区(石兴龙,2012)。基于回采工作面瓦斯分源涌出,利用人工神经网络分别预测开采煤层、邻近煤层、采空区三种来源的瓦斯涌出量(朱红青等,2007)。

考虑到瓦斯突出因素的主控性和多因素性,采用层次分析法和模糊综合评判法综合预测煤与瓦斯突出。运用层次分析法确定煤与瓦斯突出各影响因素的权重系数,采用隶属函数构造单因素判别矩阵,并运用模糊综合评判法建立煤与瓦斯突出预测模型。郭德勇等(2007)对平顶山研究区典型工作面进行了瓦斯突出危险性的定量预测和突出等级划分。黄为勇(2009)构建了基于支持向量机的瓦斯数据融合方法及其矿井瓦斯预警,通过多源的矿井瓦斯数据在数据级、特征级和决策级等三个层次上进行了以矿井瓦斯预警为目的的数据融合。

总体上,对瓦斯灾害隐患的预测技术繁多,这主要是由于瓦斯灾害受到多种地质条件和开采方法的综合影响。瓦斯灾害隐患预测可以归类为两种方法,一种是上游致因定量分析法,即定量分析井下环境的各主要致灾因素对矿井灾变发生发展的贡献,并据此建立分析灾变发生规律的数学模型,经数值分析求解,得到在已知环境条件下的灾变发生规律和相关参数的动态变化;一种是下游表征测定分析法,即分析致灾因素作用于井下环境后环境出现的灾前表现特征,这些特征往往具有可量测性。应用仪器测定其中可量测的参数(主要是特征)的变化,比如,声发射监测、电磁辐射监测等,并通过大量的统计资料和综合分析技术,分析这些灾前表现特征变化与灾害发生的关系,总结出灾害预测规律(周心权等,2002)。

无论是哪种方法,成功的前提是获得各个致灾因素的分布情况,并结合已有研究或生产中总结出的灾害主控因素及其演变规律,指导瓦斯灾害防治工作。从上述的研究可以看出,目前的瓦斯资料主要是通过钻孔、井下测试或井下物探等方法获取,对于瓦斯灾害预测意义重大。针对瓦斯灾害复杂的特征,如果能进一步结合先进的勘探技术,提供更翔实、丰富的地质资料,则有利于进一步促进井下生产安全高效开展。

1.3 煤田地震解释的国内外研究现状

三维地震资料的解释,是建立地震属性与各种地质异常的关系,利用地震属性来预

测地质异常的过程。地震属性是指地震数据经过一定的数学变换后得到的与地震波有关的几何学、运动学、动力学或统计学特征。从属性的定义来看,属性是一个包含内容非常广泛的概念,可以说所有的地震资料都可以归到地震属性的范围。因此,很多学者对地震属性进行了归纳和分类。比如,Tanner 于 1994 年提出的几何属性和物理属性;Brown 于 1996 年提出的叠前属性和叠后属性;Quincy Chen 于 1997 年提出了三种地震属性分类方法:第一种是按属性提取的方法分为单道与多道分时窗属性、层位属性、体积属性和剖面属性;第二种是按地震波的运动学与动力学特征进行分类;第三种则是按储层特征进行分类。

在地震资料的解释过程中,双程时、三瞬属性、相干体、波阻抗属性、AVO(振幅随偏移距变化)属性应用广泛(武喜尊,2004;杨双安等,2004;赵锴,2007;杨德义等,2011)。双程时属性是地层反射波的到达时间。经过叠加偏移处理后的地震数据,是自激自收剖面,断层、陷落柱等构造破碎带两侧的反射波产生的时差,提供了构造的识别标志。三瞬属性是利用 Hilbert 变换的信号处理方法得到瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位三种地震属性。瞬时振幅是地震反射波强度的体现,该属性能反映地震波能量上的变化,可以突出岩层波阻抗的变化界面。瞬时相位是描述地震反射波同相轴的相位,该属性与地震波的能量强弱没有关系,常作为地震同相轴连续性的一个衡量标准。瞬时频率是相位的时间变化率,它能够反映组成地层的岩性变化,有助于识别地层(戴世鑫,2012)。地震相干体属性是利用地震波形的相干性,根据相干原理,计算中心地震道与相邻道之间的相干系数。当地质体稳定时,地震道之间的相干性高;当地质体出现异常时,相干性低。因此通过对比能很好地体现出地震资料中的异常现象,指导断层的剖面解释及平面组合(杜文凤,1998)。波阻抗属性是 20 世纪 70 年代早期由加拿大 TRD 有限公司的 RoyLindseth 博士开发的,该属性根据反褶积的原理,将常规的地震反射振幅与地下介质的波阻抗建立关系,从而把时间域的地震剖面转换成反映地下岩层的深度域波阻抗剖面,如果建立速度与密度之间的关系,由此还可以得到反映地下岩层的速度剖面或密度剖面。AVO 属性体现的是振幅随着偏移距的变化,利用该属性可以确定反射界面上覆、下伏介质的岩性特征及物性参数。借助 AVO 分析,地球物理学家可以更好地评估油气藏岩石属性,包括孔隙度、密度、岩性与流体含量。

煤田构造解释以时间域运动学信息为主,主要是根据各种地质构造在地震时间剖面上的双程时时差来判别,在确定了断层位置后,通过数据网格化方法、等值线编辑方法以及时深转换中的速度场建立技术,获得构造、煤层起伏等地质成果(杜文凤,1996;崔若飞等,2002;陈辉,2009)。该方法适用于地质条件简单和中等复杂的情况。在浅层地震地质条件差,深部地质条件复杂的情况下,会因为信息量小降低解释的精度和可靠性,比如,晋城赵庄矿区,由于静校正问题,漏解释一条落差为 5m、延展长度近 1000m 的断层,对煤矿的安全生产造成极大的影响。随着实践的不断摸索,逐渐增加了振幅变弱、方差异常、相干属性等地震属性进行综合判断(杜文凤,1996;彭苏萍,1997;崔若飞,1998;张爱敏,1998;彭苏萍等,1999)。以淮南煤田为例,利用全三维可视化技术探测出煤层内的旋扭构造和新构造运动,利用地震属性的运动学和动力学特征探测出煤系地层中的陷落柱,通过基于空变速度场的时深转换技术实现煤系地层及

煤层结构的空问预测。这些复杂地质构造的发现以及煤层的空问预测结果,对于重新评价煤田开采条件和储量具有重要意义,能够有效地降低复杂地质条件下的勘探成本(彭苏萍等,2008)。

随着煤炭资源机械化开采的不断实践,现已逐步认识到不仅断层影响了煤炭资源的安全高效开采,而且岩性也能影响煤炭资源的安全开采,比如煤体结构变化容易引起应力释放,引发瓦斯突出灾害等。因此针对岩性方面的安全开采问题,煤田工作者根据煤田资料特点,通过改进反演技术,获得波阻抗属性和 AVO 属性,结合瓦斯突出、突水等地质灾害进行分析预警,获得了较好的效果,逐步形成了煤田地震反演技术。

地震反演是利用地表观测到的地震资料,以已知地质规律和钻井、测井资料为约束,对地下岩层空问结构和物理性质进行成像(求解)的过程。岩性资料是进行地震反演的重要基础资料。由于油田与煤田的生产需要不同,二者形成了不同的基础资料特征,比如,在油田领域,岩性资料往往包括:声波、密度、电阻率、人工伽玛、自然伽玛、中子、孔隙度测井、井径、岩心等资料;而煤田主要是常规的测井资料:电阻率、人工伽玛、自然伽玛、自然电位、井径。声波和密度是进行地震反演的基础,而煤田大部分的采区都缺少这些资料,或者是这方面的资料很少,因此,需要根据已有的测井资料拟合形成伪密度测井和伪声波测井。根据密度测井与自然伽玛和人工伽玛的关系,可以利用后面两种测井曲线求得密度测井,然后根据 Gardener 公式,或者是声波曲线与密度曲线的线性关系,进而求得声波曲线(刘家谨,1981;彭苏萍等,2003)。利用这种技术获得的伪测井曲线,在合成记录标定方面,具有较高的相关系数,表明该方法在没有声波、密度测井曲线的情况下,是一种可行的方法。

地震反演技术,根据地震资料的不同,可以划分为叠后反演和叠前反演。叠前反演利用叠前道集,而叠后反演利用经过偏移的叠加数据体。叠后反演求得的结果是波阻抗属性,该属性是岩石密度和声波速度的乘积。根据求取波阻抗方法的不同,地震反演可划分为直接反演和间接反演(祁少云等,1992)。直接反演方法包括道积分和递推反演法等,间接反演包括测井约束反演和地震多属性分析等。它们具有如下的特征:

道积分:一般说来,道积分就是利用叠后地震资料计算地层相对波阻抗的直接反演方法。因为它是在地层波阻抗随深度连续可微的条件下推导出来的,又称为连续反演。该方法无需钻孔控制,忠实于地震数据的岩石特征,主要优点是计算简单,递推累计误差小,其结果直接反映岩层的速度变化。但是这种方法受地震频带的限制,分辨率低,无法适应薄层解释的需要;其次无法求得绝对波阻抗和相对速度,结果比较粗略(孙家振和李兰斌,2002)。

递推反演法:它是基于反射系数递推计算地层波阻抗的地震反演方法。递推反演关键在于根据地震记录估算反射系数,得到能与已知钻孔最吻合的波阻抗信息,测井资料在其中起标定和质量控制作用。递推反演具有较宽的应用领域,可以用于煤田的波阻抗反演;在缺少钻孔测井资料、目的层较厚的情况下,利用其反演资料进行岩性分析,可以确定岩性、含水性等,比如利用递推反演可以分析深部灰岩的富水性,对其进行横向预测(邹冠贵等,2009)。由于受地震频带宽度的限制,递推反演资料的分辨率相对较低,不能满足薄层的研究需要。

间接方法都是从地质模型出发,采用模型优选迭代算法,通过不断修改更新模型,使模型正演合成的地震资料 and 实际地震资料之间的误差小于某一给定值为止(姚姚, 2000)。间接方法主要是测井约束反演和地震多属性分析。利用测井资料建立地质模型,模型频带宽度没有限制,分辨率较高,该反演方法一般称为测井约束反演,结果依赖于初始模型和所提供的子波,具有多解性和全局最优的问题(彭苏萍等, 2008)。在煤田领域,利用测井约束反演,可以对煤层顶底板中砂岩的富水性进行评价(蔡利文, 2010; 张辉, 2010),可以对深部灰岩孔隙度进行预测(邹冠贵等, 2009),对岩浆岩侵入煤层的范围进行圈定(钱进等, 2010)。地震多属性分析通过神经网络算法,建立地质与地震属性之间的关系,获得拟测井数据体,结合地质需要进行分析(Brian *et al.*, 2003; 孔炜等, 2003)。

叠后反演主要是基于褶积模型,并且求取的岩性参数是单个参数,在复杂的地质情况下,解决问题的能力有限。在 20 世纪 60 年代,地球物理学家发现在含油气的位置,地震振幅可能表现为一个亮点、平点或暗点。这主要是一种经验性的认识。在 80 年代,随着叠加技术的成熟,叠前道集的信噪比得到了极大的提高,地球物理学家观察到叠前道集上地震振幅随着偏移距的增大而增大,这是与常规认识相反的现象。进一步的研究表明,这种现象可以通过 Zoeppritz 方程(Zoeppritz, 1919)来描述。基于该方程求得的反射系数公式表明,振幅是与入射角、反射界面两侧的密度、声波速度、横波速度有关的量。该方程具有重要的意义,一是从理论上指明了振幅变化规律;二是使振幅变化具有了明确的物理意义。因此,该方程为后来利用振幅信息反演岩性及流体性质奠定了数学和物理基础。

尽管描述平面波反射和透射的 Zoeppritz 方程在 1919 年就已经建立,但由于其在数学上的复杂性和物理上的非直观性,一直没有得到直接的应用。该方程提出以后虽然曾经有人从数值计算的角度对其进行过研究(Muskat、Merest, 1940),但仍然没有实质性的进展。直到 1955 年, Koefoed 通过研究不同模型岩性参数(主要讨论泊松比的影响)的平面波反射系数变化规律,提出泊松比是影响振幅随偏移距变化的主要因素,指出了 AVO 作为岩性指示因子的可能性(Tooley *et al.*, 1965)。

80 年代初, Ostrander (1982) 首先提出利用反射系数随入射角变化的特点识别“亮点”型含气砂岩,指出含气砂岩反射振幅随偏移距的增加而增大,含水砂岩反射振幅随偏移距的增加而减小(Ostrander, 1982)。这一现象的发现丰富了烃类检测的技术,引起了人们的重视。进一步的研究发现, Zoeppritz 方程比较复杂,其代数表达式也复杂,不便求解,而且其物理含义也不明确。经过国内外学者多年来的努力,得到了一系列适用的近似公式。Bortfeld (1961)、Hilterman (1975)、Aki 和 Richards (1980)、Shuey (1985)、Smith 和 Gidlow (1987)、Ursin (1993)、Fatti 等 (1994)、Morris 和 Tatham (2003) 等分别给出了自己的近似公式。这些近似公式除了表达形式不同外,精度和假设条件也不尽相同,推动了 Zoeppritz 方程的应用和发展,其中, Shuey 近似公式由于物理意义简单明确,被广泛运用。Rutherford 等 (1989) 根据地震波垂直入射时反射系数的差别将砂岩分为三类; Castagna 在 1997 年按振幅和截距两个属性把砂岩分为四类,其中只有第三类砂岩的振幅才是随着炮检距的增大而增加的(Rutherford *et al.*,

1989)。Ruger 给出了 HTI 各向异性的 Zoeppritz 方程近似公式,它包含了穿过一个界面时各向异性参数差异的影响 (Ruger, 2005)。

在利用 AVO 研究瓦斯富集区方面,彭苏萍分析了 AVO 技术探测含气砂岩与煤层瓦斯富集区的相似点与不同点,认为两者都是基于大泊松比引起的 AVO 梯度异常;不同点在于夹矸和裂隙增加了煤层的泊松比,而砂岩含气量增大,降低了泊松比。含气砂岩的顶界面 AVO 响应表现为负梯度,根据界面两侧的波阻抗差异其可能属于第一类、第二类或第三类 AVO 异常。然而,煤层的顶界面 AVO 响应表现为正梯度,属于第四类 AVO 异常。Peng 等 (2006) 分析了 AVO 技术探测煤层瓦斯的不利点和有利点,不利点为煤层与围岩的泊松比差异小时,煤层顶底板岩性变化大,吸附态瓦斯富集;有利点为煤层反射波信噪比高,AVO 异常相对简单。基于 Zoeppritz 方程,杜文凤等 (2010) 分析了振幅与偏移距的关系 (AVO 现象),将瓦斯突出煤与非突出煤的物性参数,代入到振幅与偏移距的关系式中,并对其进行数值正演模拟,得到了反映煤层 AVO 响应的特征曲线。对该项工作的对比分析表明,瓦斯突出煤和非突出煤的顶界面 AVO 响应,表现为地震振幅随偏移距增加而减小的特点,其中,瓦斯突出煤的截距绝对值要大于非突出煤的截距绝对值,瓦斯突出煤的斜率要大于非突出煤的斜率。该项工作还分析了煤层厚度变化对 AVO 响应产生的影响,指出当瓦斯突出煤和非突出煤的厚度相同时,瓦斯突出煤的截距绝对值大于非突出煤;当厚度不同时,瓦斯突出煤的斜率大于非突出煤的斜率 (杜文凤等, 2010)。高云峰 (2006) 基于瓦斯地质理论分析了瓦斯富集的赋存机理,并和常规天然气赋存机理进行了对比,认为以构造煤为探测目标是比较可行的瓦斯突出危险预测方法;根据岩心实验室测试、钻孔测井以及 VSP (Vertical Seismic Profiling) 资料,对含煤地层的岩石密度、纵波速度、横波速度等弹性参数进行了系统研究,建立了各弹性参数之间的相关关系;对淮南煤田两个三维地震勘探区的实际资料进行 AVO 分析,探讨了部分 AVO 属性所反映的煤层 AVO 异常的物理和地质意义,结果表明 AVO 梯度和伪泊松比反射系数对煤体结构最为敏感 (高云峰, 2006)。针对煤层厚度薄、煤层顶底界面波阻抗差较大的特点,从一般各向异性介质的弹性动力学方程出发,邓小娟等 (2010) 推导出了两层 EDA 介质水平界面情况下平面波的反射和透射系数公式,并进一步推导了三层介质 (即 EDA 介质薄层位于两个各向同性介质之间) 的平面波反射和透射系数。对煤系地层进行了纵波 AVO 正演模拟,结果发现:薄层的厚度和 EDA 介质的各向同性背景参数对薄层纵波反射系数有较大影响,裂隙开度对薄层反射系数几乎没有影响。基于 Hudson 等效介质理论和 Schoenberg 等效介质理论,构建了 6 类 HTI 构造煤模型,利用数值正演模拟煤层顶板的方位 AVO 记录,最终获得了 6 类模型的多方位 AVO 记录。研究分析表明:①当裂隙密度增大时,截距值减小,梯度值增大;②相对于泥岩顶板来说,砂岩顶板的 P 值较小, G 值较大。通过对 HTI 构造煤 GVAz 曲线的分析可知:①GVAz 曲线的周期为 180° ,并在裂隙法向方位取最小值;②随着裂隙密度的增大, GVAz 曲线的波幅相应增大;③当裂隙水填充时, GVAz 曲线的波幅大于裂隙气填充时的波幅。因此,方位 AVO 的 P 值可以用来识别煤层的顶板岩性, GVAz 曲线的极值和波幅可分别用来获得裂隙发育法向和裂隙密度信息。就实际地震数据来说,较高的信噪比 (>5) 是进行方位 AVO 分析的前提 (陈同俊和王新,

2010)。

上述的地震解释主要利用纵波进行地震资料的解释,随着采区地震勘探的发展,出现了利用多波资料进行煤田地质资料的分析,主要有:彭苏萍等以淮南矿区主采煤层13-1煤为例,研究了不同结构煤层的测井曲线特征及其与瓦斯富集之间的关系;分析了多波多分量地震勘探技术在瓦斯勘探中的应用基础和主要技术方法,并建立了瓦斯富集区预测的测井参数门限和多波地震勘探的技术指标,明确指出瓦斯富集区和煤层瓦斯突出灾害区有本质不同,并在地球物理标志中有明显的分辨特征(彭苏萍等,2008)。同时,彭苏萍等指出瓦斯突出煤体在变形性质上与非突出煤体有很大差异,它的弹性模量基本上为非突出煤体的 $1/3$,而其泊松比约为非突出煤体的两倍(彭苏萍和高云峰,2004;彭苏萍等,2005)。为了利用转换波剖面得到横波波阻抗信息,杜文凤等(2010)通过建立转换波反射系数和横波反射系数之间的关系,直接从转换波地震数据中获取横波反射系数,把转换波叠后波阻抗反演问题转化为横波波阻抗反演问题。

国外专门针对煤、瓦斯勘探与开发问题所进行的地震勘探研究为数较少。在基础研究方面主要有美国 Cedar Hill 煤田 Fruitland 煤层岩心的速度测量、新南威尔士州二叠系地层的变速测量和国内河南、江西、安徽的几个矿区煤样的速度测量与弹性参数计算,以及根据煤层裂隙密度计算慢横波速度的模拟方法选择等。这些测定和计算的结果表明:①煤体中的裂隙影响煤岩的纵横波速度。对于有干裂缝或含气裂缝的煤层,其纵波和径向横波的速度,在平行裂缝方向上最大,垂直裂缝方向上最小,可借此检测裂缝方位。②在较低的围压下,煤的泊松比随裂缝密度的增加而增大,且对于水饱和岩心及气饱和岩心其增大程度不同,前者的增大程度比后者高。因此,煤的泊松比可作为判断裂缝密度和识别裂缝流体性质的一个标志。③由砂岩-煤层界面 P 波 AVO 响应的模拟计算表明 AVO 梯度是炮检方位与裂隙密度的函数。在中等入射角的情况下,炮检方位与裂缝走向平行时 AVO 梯度最小,垂直时最大;在炮检方位与裂隙方位垂直的情况下,AVO 梯度随裂缝密度的增加而变大,当裂缝密度为零时,AVO 梯度等同于各向同性情况(Antonio *et al.*, 1994; Chen *et al.*, 2001; Brian *et al.*, 2003; Michael and Stan, 2003)。上述规律可作为 P 波检测裂缝方位与密度的依据。④Hudson 模型不适用于模拟裂缝密度很高的煤层(用这种模拟计算的横波速度偏小),而 Cheng 和 Thomsen 的模型具有较高的计算精度。⑤单层煤往往很薄。由于薄层造成的振幅调谐作用,不利于使用快慢波时差分析法监测煤层的各向异性,而对夹在沉积碎屑岩中的各向异性薄层煤系列进行各向异性分析却是可行的。⑥横波四分量的交叉分量或转换横波的横向分量,其波的振幅和极性随炮检方位的相对变化是检测裂缝方位的敏感参数。⑦不同方位的纵、横波速度对围压大小很敏感,在围压较小时(裂缝开启)速度变化大;当围压增加到一定程度时,不同方位的纵、横波速度变化较小。可见速度随方向的变化不仅与裂缝状态有关,还与围压大小有关(Edward *et al.*, 1993; Davis *et al.*, 1993; Chaimou *et al.*, 1995; Thomsen *et al.*, 1995; Shuck *et al.*, 1996)。

国外有关的应用史例寥寥无几。其中美国科罗拉多矿业学院储层特征项目组于1991年10~11月在新墨西哥州圣胡安盆地的 Cedar Hill 煤田所进行的三维九分量地震勘探实验是一个典型的代表(Edward *et al.*, 1993)。这次实验的主要目的是探讨用多波