

沁水盆地高瓦斯矿井三维地震 技术应用实践

陈 强 常锁亮 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书提出了高瓦斯矿井三维地震技术应用新思路,并介绍了在沁水盆地多个矿区的实践情况。首先,对特定矿井内影响和控制瓦斯富集和突出危险区分布的主控因素进行了分析,明确了相应的勘探重点和技术思路。然后分3部分进行了讨论,第一部分基于三维正演模拟方法计算了三维观测系统的评价参数,讨论了高瓦斯矿井三维勘探采集技术的关键内容;第二部分分析了高瓦斯矿井三维地震资料处理的重点环节和处理方法,阐述了叠前偏移处理对于提高矿井精细构造和岩性解释精度的必要性;第三部分介绍了应用叠前弹性阻抗、方位 AVO 反演术、时频联合分析等地震技术预测煤层瓦斯富集和突出危险区分布范围的实践工作。

本书可作为煤田地质勘探相关专业师生教学用书,也可作为相关专业技术人员的参考书。

前 言

沁水盆地是我国重要的煤炭基地和煤层气勘探开发的试验场,随着我国煤炭资源的进一步整合、开采机械化水平的提高以及开采强度的不断增加,高瓦斯矿井迅速增加,瓦斯防治日益成为制约提高生产效率的首要因素。而目前瓦斯分布资料的严重缺乏和预测手段、成果的滞后性,使得瓦斯治理处于非常被动的局面,严重影响到煤矿安全生产。

多年来高瓦斯矿井进行了大量的采区三维地震勘探,但从目前的应用水平和探采对比情况看,构造勘探精度和可靠性远没有达到开采要求,且极少涉及瓦斯富集程度的预测。究其原因,一是没有将采区勘探与高瓦斯矿井的特定条件相联系,在地震设计、采集及处理过程中对影响小构造解释及瓦斯预测的地震波动力学信息研究与保护不够,难以准确识别小构造,更难开展对瓦斯富集程度的预测;二是在勘探过程中采用的技术落后,资料的信噪比与分辨率、保真度低,导致构造解释能力及精度降低;三是瓦斯预测属于岩性地震勘探的范畴,需要综合地震叠前多参数反演技术及瓦斯地质学理论进行系统研究与综合应用方可实现。

本书内容为近年来在高瓦斯矿井采区三维地震勘探实践中形成的初步认识。希望通过在典型矿井的三维地震技术应用,尝试提出并讨论高瓦斯矿井三维地震勘探的新模式,初步形成一套基于三维地震采集、处理、解释一体化思想的关键技术体系,同时建立高瓦斯矿井地震数据采集质量、不同瓦斯富集主控因素下实施三维地震勘探的可行性以及技术合理性的分析和评价方法。

书中主要对面向瓦斯探测目标的三维数据观测方法、叠前时间偏移处理、多属性精细构造解释以及瓦斯富集性的叠前弹性反演方法等地震新技术的系统应用进行了讨论。高瓦斯矿井三维地震技术是兼具高精度采区构造勘探和岩性预测的一项新兴技术,在煤田地震勘探中尚处于不断总结归纳研究方法的阶段。受作者水平所限,书中难免存在疏漏甚至错误,敬请读者批评指正。

本书2.2节、5.3节和5.4节以及7.4节由常锁亮博士撰写。同时,在编写过程中,得到了刘鸿福教授、刘洋教授、于光明博士后、李世红博士、姜卫东高工、桂文华高工、田伟和曾维望工程师等的大力支持与帮助,在此表示真诚的感谢!

目 次

1 绪言	1
1.1 高瓦斯矿井三维地震勘探技术的提出及其意义	1
1.2 瓦斯地震勘探技术的发展回顾	2
1.3 高瓦斯矿井三维地震勘探的研究目标及主要内容	7
2 沁水盆地煤层和瓦斯特征	9
2.1 沁水盆地概况	9
2.2 煤储层和含气性特征	15
2.3 研究区煤层及瓦斯富集特征	18
2.4 研究区瓦斯富集类型及研究方法	28
3 高瓦斯矿井三维地震数据采集方法	31
3.1 沁水盆地地震地质条件	31
3.2 浅表层结构调查方法	33
3.3 采集数据质量	34
3.4 面向目标层的观测系统设计	40
3.5 研究区观测实例	65
4 高瓦斯矿井三维地震数据处理方法	69
4.1 沁水盆地典型数据特征	69
4.2 处理思路、技术及方法流程	73
4.3 关键处理技术	78
4.4 HZ2 矿区处理成像精度分析	89
4.5 YS1 矿区叠前与叠后处理效果对比	92
5 煤田测井数据分析及煤瓦斯富集响应	102
5.1 煤田测井资料处理方法	102
5.2 煤与围岩的测井响应	108
5.3 瓦斯富集煤层的地球物理响应特征	109
5.4 不同煤体结构煤的弹性特征	111
5.5 瓦斯含量与测井数据的交会分析	111
5.6 构造煤的测井响应特征	113

6	煤层厚度和煤体结构预测地震技术研究	115
6.1	煤厚预测的叠后反演技术原理	115
6.2	YS1 矿区挠曲带的曲率预测方法	124
6.3	YS1 矿区煤体结构及构造煤发育区预测	127
7	煤层瓦斯富集区预测技术研究	134
7.1	叠前弹性阻抗反演的基本原理	134
7.2	方位 AVO 反演的基本原理	138
7.3	YS1 矿区瓦斯富集区叠前弹性反演方法及效果	143
7.4	方位 AVO 技术预测 JZ3 矿区瓦斯富集特征	153
7.5	利用衰减属性预测 HZ2 矿区瓦斯富集区	161
8	瓦斯突出危险区和地质异常体预测技术研究	169
8.1	频谱分解技术原理	169
8.2	YS1 矿区煤与瓦斯突出危险区预测	171
8.3	HZ2 矿区岩性异常体的预测	178
	结论	182
	参考文献	183

1 绪 言

1.1 高瓦斯矿井三维地震勘探技术的提出及其意义

煤炭一直是我国的支柱能源,但是,高碳、高能耗发展模式带来的瓦斯灾害、能源浪费和环境污染等一系列问题日益突出。而近年来随着煤矿井工开采方式、综合机械采煤技术的推广应用,矿井采深、开采规模和强度的显著提升,使上述问题进一步恶化。以山西省为例,近年来,煤矿最大采深由400 m增加到800 m,地应力、瓦斯压力随之增大,高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井的比率逐渐提高,煤与瓦斯突出事故越来越频繁。其中,阳泉、晋城矿区普遍进入高瓦斯和突出区,潞安矿区出现高瓦斯矿井,霍西煤田、宁武煤田局部和吕梁矿区部分进入高瓦斯区,瓦斯及相关的一系列问题非常严峻。对于上述矛盾和问题的主要焦点——高瓦斯矿井(目前约占我国煤矿总数的50%,且比例有明显增长的趋势)来说,瓦斯抽采不仅是防治瓦斯灾害,保证煤炭安全、高效生产的必要方式,更需要将瓦斯和煤炭资源一样切实加以综合利用,才是长期发展的必由之路。

我国瓦斯能源的储量虽然丰富,但是其储集层普遍具有强烈的非均质性和吸附性、低储层压力、低渗透性和显著的构造多期叠加特征。瓦斯赋存条件复杂,地域区隔性强,瓦斯富集性和突出危险区的区域性预测难度大,精度低,业已成为导致地面煤层气勘探开发进展缓慢,井下抽采率低,资源浪费严重,与瓦斯相关的煤矿安全事故频发等一系列问题的主因。因而,预先查明影响煤储层物性特征和瓦斯富集性的局部区域性控制因素,为高瓦斯矿井建设,煤炭的高效、安全生产和瓦斯的地面开采、井下抽放等技术的有效实施提供指导,具有重要的现实意义。

国内瓦斯地质规律研究表明,地质历史演化控制瓦斯生成,地质构造作用控制瓦斯地质条件,构造逐级控制瓦斯分布范围。因而,对于高瓦斯矿井来说,必须查明瓦斯生成、保存的区域性地质条件和富集性,井田构造变形强度,断裂、褶皱发育复杂程度,局部煤层结构破坏及构造煤的发育程度等。传统的非接触性、区域性煤层瓦斯富集和突出危险区的地勘预测技术,不论是单一指标,还是综合指标预测法,受地质勘探钻孔工程量限制,区域性横向预测结果精度基本不能满足矿井(或采区)的开拓、采区设计,如巷道布设、采煤方法的选取以及通风系统设计等实际生产要求,更不能直接指导采掘作业。

地震勘探技术具有横纵向分辨率高、成本低、周期短等突出特点,已经成为煤田区域构造以及采空构造勘探必不可少的手段。20世纪90年代中期以来,以多道数字地震仪在煤田系统的引进和折射波静校正技术的应用为基础,煤田三维地震勘探技术在全国范围内得到了迅速推广与应用。勘探成果为优化矿井设计、合理布置采区与工作面、保障安全生产等提供了重要的地质保障。但是当前以构造勘探为主要目的的粗放式常规煤田地震勘探方法,往往只能查明落差较大的(10 m以上)断层,控制煤层的赋存形态和煤层厚度变化趋势,不能满足高瓦斯矿井高效安全生产和瓦斯综合利用的基本要求,更不能对影响瓦

斯富集和突出的众多主控因素作出有效预测。近 20 年来，煤田三维地震的构造勘探精度一直徘徊不前，甚至在个别矿区有下降的趋势。造成这一现状的因素是多方面的，除施工队伍技术管理水平良莠不齐、市场恶性竞争造成的勘探投入不断减少和施工周期越来越短等非技术因素之外，从根源上来说更应该归结为技术应用层面研究不够深入、实际应用缺乏针对性。

高瓦斯矿井往往具有浅表层地震地质条件复杂，煤层构造发育，瓦斯含量高，分区、分带富集等显著特征，因而，面向高瓦斯矿井的地震技术应该具有构造和岩性勘探的双重性质。国内外大量的地面煤层气地震勘探研究和实践表明：现有的地震技术对地下信息的利用不仅仅局限于构造的精细描述，而且在高精度数据采集，叠前时间，深度偏移和叠前、叠后反演等一系列技术的推动下，已逐步向煤储层岩性特征识别、瓦斯富集性、构造煤分布范围的预测以及煤层的裂隙等引起的各向异性解释等方面发展。

虽然，高瓦斯矿井的煤储层普遍具有低渗透性、裂隙闭合度大、储层应力强等特征，利用地震技术预测煤层瓦斯富集性的理论和方法尚待进一步探索。但是基于地震技术，突出高瓦斯矿井这一特定服务对象，实施精细构造、岩性解释以及瓦斯富集和煤瓦斯突出危险区预测的地震方法实践势在必行，也具有较强的现实性和探索意义。

1.2 瓦斯地震勘探技术的发展回顾

有关研究表明：瓦斯富集常常伴随着煤厚、煤体结构、煤体积密度、弹性模量、泊松比、纵横波速度、频谱特征、衰减系数、品质因子等弹性力学参数及弹性波特征的明显变化，因而利用含有丰富弹性波信息（时间、速度、振幅、频率、相位、波阻抗、吸收、波形以及其衍生的其他复合属性）的地震资料，研究煤层瓦斯富集性和突出危险性具有一定的地球物理基础。近年来，相关研究人员在精细地质构造、煤层及其物性特征、顶底板岩性、煤层气高渗富集区预测和复杂地震资料处理方法开展了积极的探索。这些应用研究表明，将地震技术用于瓦斯富集分布预测是可行的，并集中体现在以下几个方面：

(1) 煤瓦斯富集的基础地球物理特征研究。

(2) 反射波方法：纵波技术，横波技术，多波技术。

(3) AVO 技术：基于横向各向同性介质理论的方位 AVO 技术，基于各向同性和异性介质理论的 AVO 技术。

(4) 叠前、叠后属性反演及分析，综合利用振幅、衰减、频率等信息的多属性联合反演技术研究，地震叠后反演技术，弹性阻抗属性反演技术。

(5) 煤层反射波的高保真采集、处理方法研究。

1.2.1 瓦斯富集煤体的地球物理特征研究

在煤的弹性力学性质以及瓦斯富集引起的煤的弹性力学性质变化规律研究方面，国内近年来做了大量的基础性物理、数值模拟试验和理论研究工作，并在煤岩石弹性，强度参数，纵横波速度、密度以及煤体结构等方面取得了研究成果。

何继善（1999）开创性地对瓦斯突出煤体（构造煤）与非突出煤体（原生结构煤）的大量弹性参数进行了实验室测试后认为，煤的声波速度随煤的破坏程度增大而降低，原生煤与构造煤相比可相差 2~3 倍；它们的弹性模量、泊松比、体积模量、剪切模量、拉梅常数等弹性参数的差异分布范围约在 21.6%~71.7% 之间，单轴抗拉和抗压等强度参

数差异甚至达到 2 倍以上。同时，随着煤的破坏程度增高，煤的电阻率值也有显著的降低，人工伽马值略有增大，地球物理测井响应突出。彭苏萍院士（2008）总结上述统计成果后认为：同样是瓦斯富集体，既存在煤体破碎严重、强度低、渗透性很差的构造煤，又有煤体原生结构完好、强度高、裂隙发育的原生煤，两者物性和弹性波特征存在较大的差异。

刘盛东等（2005）的实验室测试结果证明：瓦斯富集对原生煤的弹性力学参数及弹性波特征和运动学参数也会产生明显的影响。一般会导致煤的体积密度微有减小，幅度为 1.4% ~ 8.6%，平均约 5%；纵波速度降低幅度为 4.8% ~ 25.7%，平均约 13%；同时，弹性模量大幅降低，泊松比明显变大，衰减系数增大，品质因子减小等。刘雯林（2009）的数值计算结果也表明，甲烷吸附量变化会使地震纵波速度降低约 10% ~ 16%，同时认为反射振幅对煤岩的速度变化有放大作用，可以利用叠前反演得到纵、横波波阻抗计算煤储层的弹性参数，提高煤瓦斯的检测精度。以上研究工作说明了原生结构煤瓦斯富集体的地震波响应特征，而且还发现了瓦斯富集煤的纵波动力学响应比运动学特征更明显的特点。

另外，姚宇平（1988）、王晓曼等（1991）对煤的多项力学性质进行了物理测试；梁冰等（1995）研究了瓦斯对煤的力学性质及震波响应的影响；赵群等（2006）对煤样完成了超声波衰减的三方向测试等。杨双安、杨永波（2006）等基于 Biot 双相介质理论，认定含游离态瓦斯的煤层与含天然气地层在介质的相态特征上不存在本质区别，并进行了数值模拟。当地下煤层中含有瓦斯时，最显著的标志就是“低频共振、高频衰减”现象。

以上瓦斯富集煤体的地震波响应特征，是利用地震技术开展煤瓦斯储层含气性和物性研究的地球物理基础，同时也表明，虽然煤瓦斯储层具有厚度薄，反射系数较大，波阻抗较低，吸附性赋存方式，裂隙密度高，各向异性较强等一系列复杂特征，但是瓦斯富集性的变化仍然能够引起可识别的煤层反射波动力学和运动学的异常响应，而且相对来说，前者在很多情况下要强于后者。鉴于此，当前煤瓦斯储层物性地震技术研究的焦点除基于煤层裂隙探测的叠前 AVO、方位 AVO 分析之外，另外一个就是地震波属性与煤储层物性之间的物理响应关系研究，可以利用合理、有效的属性参数和分析手段，从煤层的强反射信号中准确提取出能够切实反映煤瓦斯富集性和其他物性特征的信息。

1.2.2 地震技术预测煤储层裂隙裂缝

受煤瓦斯现今赋存地质条件的复杂性和地面煤层气勘探开发技术影响，煤储层渗透率业已成为制约我国地面煤层气开发成功与否的关键地质因素，因而通过研究煤储层裂隙发育程度及其导致的煤岩弹性参数的变化和弹性波各向异性传播特征，寻找煤层气高渗富集区一直是我国煤层气地震勘探研究的核心内容和焦点。

从理论基础来说，利用横波分裂现象，采用横波或地震多波多分量技术是研究各向异性介质中波传播规律的理想方法。大量实践证明：横波、多分量地震、PS 转换波技术有不错的裂隙方位和密度预测效果。最具代表的是在美国西达山（Cedar Hill）矿区瓦斯地面抽放工程中，利用多分量三维地震勘探等技术在预测并确定了瓦斯富集部位的基础上，进行了地面抽放，使煤层中瓦斯含量大大减少。但由于地震勘探观测过程中没有很好地考虑炮检距和方位角的均匀分布，限制了方位 AVO 技术预测裂隙的应用效果。国内彭苏萍、高云峰等（2005）利用淮南煤田多分量地震资料，也成功地间接预测了瓦斯富集带的分

布范围。但是，由于横波/多波多分量地震采集的高成本，横波信噪比低、勘探深度浅以及转换波处理、解释的复杂化等一些制约因素影响，上述技术很难得到推广应用。

Mallick S 等 (1998) 认为在弱各向异性假设下，随炮检距和方位角变化的纵波反射系数可以简单表示为裂隙参数的解析函数，从而引发了基于 P 波资料检测裂缝和各向异性的热潮。Antonic 和 Ramos (1997) 首次进行了煤层甲烷储集层裂隙探测的三维 AVO 分析和模拟。David Gray (2000) 利用方位 AVO 技术，用 Hiterman 近似式计算了泊松比，研究了加拿大 Alberta 地区煤层的裂隙、裂缝的方向与密度的相对大小。此外，Kelly M (1991)、Skidmore C (2001) 也对 AVO 分析方法进行了有益的研究。

国内彭苏萍、彭晓波等 (2005) 利用淮南煤田地震纵波资料，初步建立了方位 AVO 反演用于预测煤层裂缝发育区系统方法，同时开创了国内利用纵波叠前 AVO 技术为主要手段，反演与含气性有关的煤岩石弹性参数，而且瓦斯富集性的区域性预测成果与已知资料情况吻合较好。崔若飞 (2007) 等利用了地震纵波对裂隙型煤层所表现出的方位各向异性特征，通过 6 个方位地震数据体和从中提取的多种与煤层和围岩裂隙相关的地震属性，计算出了裂隙的发育方向和密度，并作了瓦斯富集区分布范围的预测。

杨瑞召 (2005) 等通过波阻抗、纵横波速和振幅、反射强度、瞬时相位等地震参数与煤储层物性之间关系的理论推导，建立了预测煤储层裂隙发育程度的地震纵波响应数学模型。

这些研究表明，利用纵波 AVO、方位 AVO 技术进行煤瓦斯储层裂隙探测、物性参数预测具有很大的发展潜力。但是，AVO 技术是建立在游离型流体和骨架双相介质假设基础之上的一门相对成熟的地震技术，主要研究的对象是流体富集与储层岩石弹性力学性质变化和弹性波响应关系之间的规律。而强吸附性煤瓦斯与常规孔隙型游离气在赋存介质和方式上存在巨大差异，其产生的 AVO 响应的弹性波基础理论尚待进一步深入研究。另外一个问题是，真实煤瓦斯储层渗透性的时变性、裂隙的开合度和矿物充填特性，也会直接影响煤层渗透率评价的可靠性。

1.2.3 煤储层物性预测的地震属性分析技术

地震属性分析研究始于 20 世纪 60 年代，其目的就是借助于数学方法，从地震数据中提取尽可能多的信息，然后研究其与岩性、物性、流体性质以及地质体空间展布特征等性质的相关性。目前可用于计算的地震属性达 300 多种，广泛用于油气地震资料解释的也有 50 多种。分类方式很多，有几何和物理属性分类法，运动学和动力学属性分类法，计算维数分类法，定性、定量属性分类法和叠前叠后属性分类法等。

经过几十年的研究和实践，属性分析方法虽然取得了明显的应用效果，但仍未形成完全明确和可靠的研究结论。Bruce S. Hart (2002) 认为，其主要原因是“属性技术（开发提取属性的方法和产品）的发展比属性科学（建立属性和物理性质之间联系的物理基础的系统方法）的发展快得多”。

与油、气领域的研究深入程度相比，煤炭和煤层气地震资料的属性分析现今仍处于摸索和试验阶段，多应用于构造、煤厚解释等方面，研究的方向也逐步涉及裂隙、煤体结构和煤储层含气性预测等领域。

目前普遍应用的煤厚和顶底板岩性预测方法为叠后阻抗属性。通常，煤矿采区分布有数量较多的钻孔资料，它可以作为已知的边界和约束条件，从而有效减少属性分析的多解

性。但是煤田测井资料往往缺乏纵速度资料，因此，如何将纵向高分辨率的钻孔及测井资料与横向稳定的三维地震资料结合，在避免反演多解性问题的前提下，达到准确预测薄煤储层的厚度、结构的空变化及其顶底板岩性的分布，仍是叠后属性需要重点解决的问题。此外，孔炜（2004）、杨瑞召（2005）、孟召平等（2006）分别基于多地震属性分析、采用多元多项式回归以及 BP 人工神经网络等算法，张爱敏（1997）等利用 AVO 方法对煤厚预测作了有益的尝试。

其他属性方面，彭苏萍等（2005）分析并计算了构造煤的 AVO 特征，取得了良好的预测精度；Bruce S. Hart（2002）综合三维地震曲率 - 时间属性和井钻资料，研究了 the Fruitland Formation, San Juan basin, New Mexico 煤层气储层，得出了微裂隙群发育带、高曲率值、高裂隙渗透性的正相关结论。国内杜文凤（2006）等也从煤层的曲率属性分析角度，预测了煤层裂隙发育带。

谱分解技术作为近年来在油气勘探领域新开展的一项叠后时频域属性分析技术，其主要是利用小时窗时频变化，在频率域和时间域进行联合解释，对垂向上具有薄层特征、横向上又具有一定展布规律的地质异常体识别率和精度较高。Partyka（1999）等利用短时傅里叶变换算法进行了频谱分解，通过不同频率的振幅和相位响应，进行了河道的厚度和流向预测；Castagna（2003）以及 Satish 等（2005）则分别利用小波变换谱分解方法完成了富烃检测的尝试；国内张进铎等（2006）通过对三维地震数据进行全频段扫描、成像，在地震资料品质较差、分辨率较低的情况下，运用谱分解技术，较好地预测了塔里木盆地的河道沉积体。刘春园等（2008）利用模型正演模拟分析了溶洞尺度、裂缝密度频率域响应变化趋势。张延庆等（2006）的研究工作则表明可以利用相位调谐体进行小断层的识别。何又雄等（2007）以小波变换为基础进行了时频分析，通过地震波吸收衰减属性区分了气、水区。从发展前景上看，由于煤层是一个典型的薄储层，因而谱分解技术具有很强的针对性，实践也证明，该方法对于精细刻画煤层中发育的异常体厚度变化及描述异常体横向不连续性方面，例如判断陷落柱等地质异常体、识别不同尺度的断裂构造系统、煤层厚度变化、分叉、含气性等薄储层特征具有独特的技术优势，是一种非常可行的分析手段。

1.2.4 煤瓦斯富集性预测的叠前反演技术

叠前弹性波阻抗反演技术是油气勘探领域正在兴起的一项新技术，研究工作主要集中在油气藏预测上，针对煤储层的很少。叠前弹性阻抗反演重点是利用不同炮检距道集数据及横波、纵波、密度等测井资料，联合反演出与岩性、含油气性相关的多种弹性参数，综合判别储层物性及含油气性。较叠后声阻抗反演在可信用度方面有很大提高，并能对含油气性进行半定量 - 定量描述。其关键技术主要体现在角道集提取、地震子波提取、反演参数和算法选择等几个方面。

彭真明（2008）等针对碳酸盐岩储层的 AVO 响应比碎屑岩储层弱，常规弹性阻抗（EI）效果不明显的极端情况，通过建立相应的含流体模式，寻找碳酸盐岩储层流体检测中的有效气、水判据，应用扩展弹性阻抗（MEEI）反演完成了碳酸盐岩储层流体识别，主要是通过不同入射角下 EEI 随入射角变化的不同趋势，来识别含气或含水储层。

苑书金（2006）等应用 Fatti - AVO 方程，对多个叠前道集数据体实施联合约束稀疏尖脉冲反演，并提取了岩石弹性组合属性参数，最终结合 AVO 属性参数对鄂尔多斯地区

的油储层进行了精细描述，从而提高了识别岩性和流体的精度。

王保丽（2005）等针对利用 Connolly 弹性阻抗（ EI ）公式反演仅能直接得到纵、横波速度和密度的信息，而其他弹性参数必须通过计算得到，且不同角度弹性阻抗量纲不统一的问题，提出了以 Gray 的 AVO 近似方程为基础推导的一个弹性阻抗反演公式，应用 Gray 近似将佐普里兹方程表示的反射系数表示为剪切模量 μ 、拉梅系数 λ 和密度 ρ 的函数，并实现了不同角度阻抗间量纲的统一。

常锁亮（2008）等基于国内外煤层瓦斯富集的岩石物理及地球物理响应的研究成果，研究了二维弹性阻抗反演技术预测煤层瓦斯富集性的理论依据及实现方法，并在沁水盆地进行了预测尝试，探井实测的瓦斯富集情况初步证明了弹性阻抗方法在开展煤层瓦斯富集区研究方面的可行性和有效性。

尽管传统的叠后反演方法在精细储层描述中发挥了相当的作用，具有较好的稳定性和分辨率，但是叠后反演不能解释横波信息和弹性模量信息，对地震波动力学特性的模糊以及反演结果的多解性降低了叠后反演的精度。叠前 AVO 反演技术利用了地震资料的叠前信息，能够反演横波和弹性模量信息，但是不能很好地利用测井信息，稳定性和分辨率较低。

与角度有关的弹性阻抗反演方法的深入研究和实践说明，叠前弹性阻抗反演技术很好地融合了叠后反演和 AVO 反演的优点，其反演结果蕴含有更多的岩性和物性信息，而且这些信息不是声波阻抗派生的信息，而是通过叠前反演得到的独立信息，所以，可进一步减少反演结果的多解性，增强反演和预测结果的可靠性。

1.2.5 面向特定目标的采集和处理技术

由于地震属性分析主要利用的是地震波的振幅、波形、频率、衰减、相关性、速度、AVO 及各种比率等，其前提是必须保证地震反射特征的变化真正代表地下煤层物性和岩性的变化，才能减少非地质因素导致的“陷阱”。因此，在地震数据采集过程中尽可能消除观测方法参数、地表条件、环境噪声等非地质因素的影响，并通过精细处理获得高保真、高分辨率和高信噪比的地震数据是实现可靠属性分析的基础和关键。

在煤田地震采集技术方面，受限于勘探经费、装备水平低等因素，虽然一些新技术，如多波多分量、单点单道高密度地震勘探数据采集方法等也有所应用，但这些新设备和与之配套的新方法大规模应用于煤田地震数据采集中很不现实，将重心放在面向目标的观测系统等采集思路更现实可行。传统常规勘探中的观测系统设计都是基于共中心点（CMP）反射理论的，这一理论的成立是建立在地面和地下界面均为水平层状假设前提之上的，多数情况下与现实的复杂地质结构并不符合。所以，基于地下照明度分析，面向目标成像的观测系统设计方法越来越受到重视。

照明度分析主要是依据地震波传播能量（照明度）的不同，可以确定目标层精确成像所需要的炮点或检波点位置。许多学者和研究人员就其基础算法理论和模拟实现方法作了研究。常见的照明度计算方法有射线追踪和波动方程两种。从理论上讲，后者更适应横向强速度变化介质，且包含波场能量的直接信息，尤其是在目标区地质结构复杂程度较高的情况下，分析结果更趋合理、准确，但是目前算法还不成熟，且三维模拟的难度和成本也非常高。而前者虽然存在高频近似和射线理论本身的缺陷（如射线盲区等），但由于其具有能准确提供地下各界面上面元的射线覆盖次数，运算速度较快，成本低，算法也较成

熟, 对非规则观测系统采集以及横向速度缓慢变化的速度模型适应能力强等突出优点而被大量采用。当煤层沉积特征稳定, 地下横向速度结构变化较弱时, 完全可以从照明分析出发, 基于实际地质模型, 针对具体构造发育情况进行高精度三维地震采集方法参数的充分论证与研究, 并结合高保真数据处理措施, 从而有效提高成果数据的质量和可靠性。

另外, 常锁亮等(2008)还主要针对煤层气富集性预测的重点从采集技术方面进行了有益的讨论, 并通过对 AVO 与方位 AVO 反演理论的近似条件及模型试算结果, 研究了地震纵波数据 AVO 分析对信噪比、入射角、偏移距分布及方位角分布等参数的具体要求。

在资料处理方面, 叠前偏移处理技术作为高精度构造勘探的关键性技术, 从 2000 年以来, 在油气勘探领域, 已逐渐取代了水平叠加方法和叠后偏移技术, 成为常规处理和提高勘探开发效益的重要手段。该技术基本推翻了输入数据为零炮检距的假设, 采用共反射点偏移叠加技术, 可有效消除复杂山区水平中心点叠加所导致的地质体异常平均效应和波形畸变, 从而大大提高地震资料的成像精度和分辨率。随着叠前偏移技术的推广应用, 针对煤田数据的速度分析、静校正方法和高分辨率、相对保幅的叠前偏移等技术, 近年来也取得了一定进展。高现俊等(2008)从叠前系列保真去噪、振幅处理、偏移速度场建立方面进行了叠前时间偏移特色配套处理; 冷广升(2008)根据煤田地震资料的特点, 研究了叠前时间偏移的处理流程, 有效地提高了构造复杂地区煤层的成像效果; 李子顺(2007)发展了针对薄储层的反褶积方法, 提高数据的主频和带宽的同时降低了地层衰减影响; 钟伟(2006)利用小波变换算法, 应用噪声多项式拟合去除技术, 减少了振幅的畸变。

从总体上看, 煤田地震资料的叠前时间和深度偏移技术开展较晚, 虽然积累了一定的成果与经验, 但研究力度和深度仍需进一步加强。

1.3 高瓦斯矿井三维地震勘探的研究目标及主要内容

瓦斯地质研究主要依据煤阶、煤级、组分、埋深、分布范围、构造发育情况、水文地质等因素, 预测瓦斯富集部位, 对于区域性预测煤层的瓦斯富集性能够提供指导方向, 但是对于小尺度范围预测以及瓦斯防治工作很难提供准确的依据。钻探、测井资料可靠性很高, 但是, 成本大且数量少。加之煤瓦斯空间分布的非均一性, 其成果外推效果也不佳。

采区地震资料一般可以提供煤层的空间分布形态、断裂体系、厚度等成果, 是高瓦斯矿井安全、高效生产的重要依据。但是, 它的针对性不强, 其作用目前多局限于构造解释, 基本不能直接或间接指示瓦斯的局部富集性特征。

1.3.1 研究目标

研究利用三维地震勘探技术查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区、断裂和褶曲等小规模构造以及煤层瓦斯富集带的勘探模式和方法。通过将油气勘探中的“成功”预测理论和方法与煤田地震资料的特点相结合, 把地震模拟采集技术、地震属性技术、AVO 技术、地震反演技术等作为主要手段。建立服务于高瓦斯矿井生产的预测途径, 为煤矿突发性应变对策和瓦斯防治利用方案的制定提供科学依据。

1.3.2 主要内容

本书以沁水盆地东缘、西缘和南部的 3 个高瓦斯矿井 YS1、HZ2、JZ3 的三维地震数据为例, 重点结合高瓦斯现代化矿井生产的实际需求, 开展了面向煤层沉积特征、瓦斯富

集及煤与瓦斯突出危险区预测的地震技术研究与应用。主要包括：

(1) 模拟研究水平和起伏地表、复杂地下介质条件下，不同观测系统的 CDP 和 CRP 面元属性特征，确定面向瓦斯目标的新的三维地震观测系统设计方案和高瓦斯矿井采集数据质量评价原则。

(2) 研究精确构造成像和反射信号的动力学特征保持的叠前时间偏移技术，从而获得振幅保真和高分辨率的可用于叠前、叠后反演以及精细构造解释的高质量数据；叠前、叠后偏移处理成果对比和叠前偏移处理的必要性讨论。

(3) 研究基于多属性联合分析的精细构造解释方法和煤厚及煤体结构反演技术及其在不同瓦斯富集条件下的适用性和优选方法。

(4) 利用三维叠前弹性波阻抗反演等叠前技术预测瓦斯富集区。

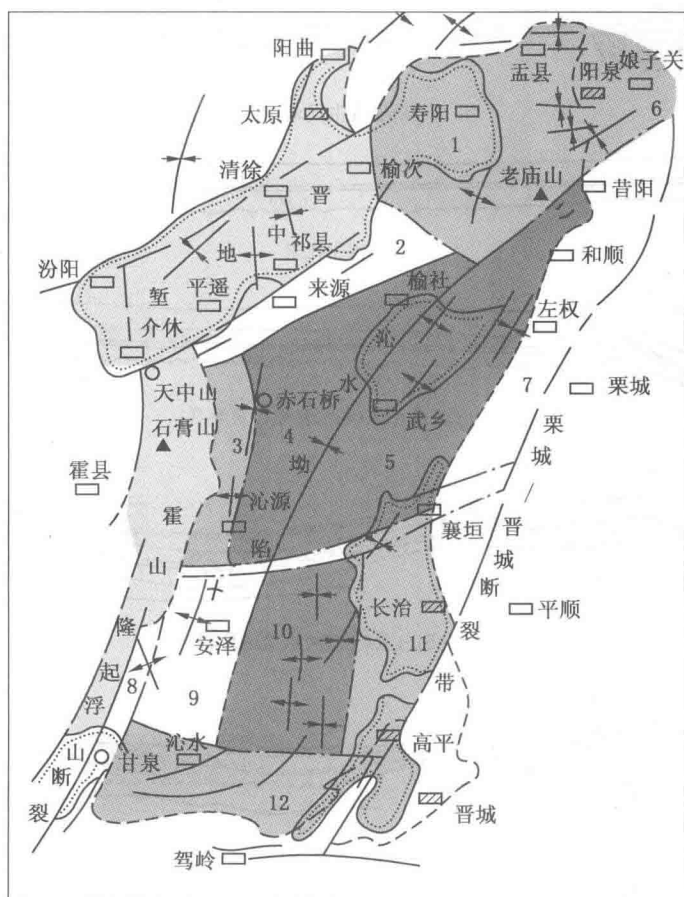
(5) 研究煤层反射波的衰减特性，探索预测煤与瓦斯突出危险区的方法。

2 沁水盆地煤层和瓦斯特征

2.1 沁水盆地概况

2.1.1 地质构造

沁水盆地位于山西省东南部，北纬 $35^{\circ} \sim 38^{\circ}$ ，东经 $111^{\circ}00' \sim 113^{\circ}50'$ ，盆地东西宽约 120 km，南北长约 330 km，总面积逾 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。整体为北北东向哑铃状大型复式向斜盆地（图 2-1）。古构造上它属于华北地台中带，是中生代剪切挤压不断增强、隆升不断扩



- 1—寿阳—阳泉单斜带；2—天中山—仪城断裂构造带；3—聪子峪—古阳单斜带；4—漳源—沁源带状构造带；
5—榆社—武乡构造带；6—娘子关—坪头单斜带；7—双头—襄垣断裂构造带；8—古县—浇底断裂构造带；
9—安泽—西坪背斜隆起带；10—丰宜—晋宜带状构造带；11—屯流—长治单斜带；12—固县—晋城单斜带

图 2-1 沁水盆地构造纲要图（据李月，2011）

大的背景下在燕山期形成的残余构造盆地。它是中国北方石炭-二叠纪煤炭资源最重要的赋存地，同时也是一个煤层气资源丰富、目前煤层气勘探程度最高的含煤盆地（苏伏羲，1998）。总体而言，沁水盆地构造简单，煤系地层分布稳定，以内部次级褶皱发育的复式向斜构造为特点（图2-1、表2-1）。

沁水盆地古生界石炭-二叠系煤层主要经历了4个时期的构造演化过程（图2-2）：

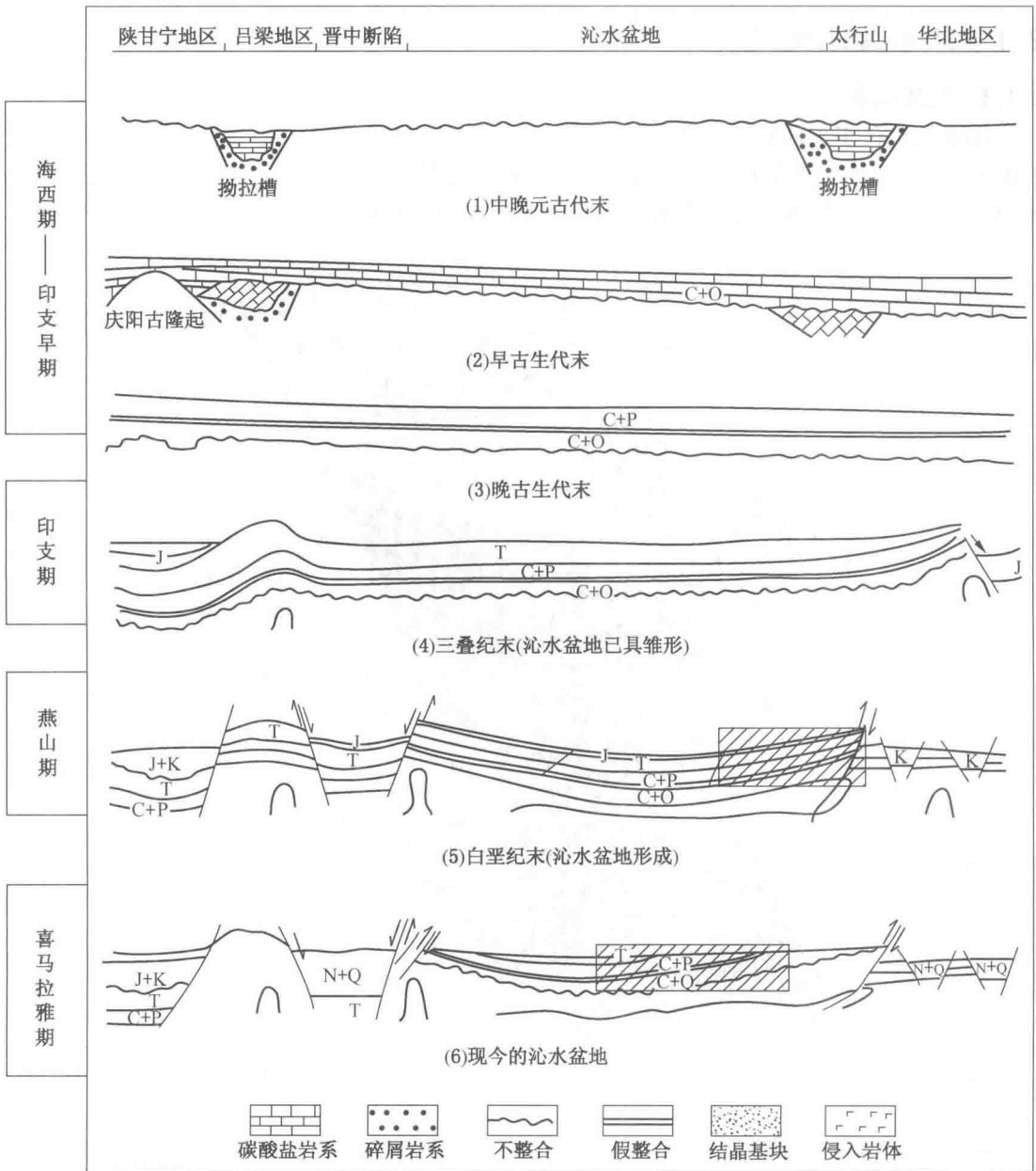


图2-2 沁水盆地构造演化模式图（据李月，2011）

(1) 海西期持续沉降沉积。地壳呈整体缓慢沉降运动，连续沉积了石炭—二叠系煤层。

(2) 印支期：受侯马—沁水—济源为中心东西走向的凹陷控制，以持续沉降为主，沉积了厚达数千米的三叠纪河湖相碎屑岩。但三叠纪末的印支运动，使华北地台逐渐解体，沁水盆地开始整体抬升，遭受风化剥蚀。

(3) 燕山中晚期显著抬升，区内构造运动最为强烈的时期：在自西向东挤压应力作用下，石炭系、二叠系及三叠系等随山西隆起而抬升、褶皱，形成了轴向近南北的复式向斜，并伴生一系列 NE、NEE 及 NW 向的短轴背、向斜及规模不等的断裂构造。在沁水复向斜两翼进一步翘起时，向斜轴部地区相对沉陷，沁水盆地的形态基本定型。同时，该区内莫霍面上拱，局部有岩浆侵入，形成不均衡的高地热场，使煤的变质程度进一步加深。

(4) 喜马拉雅期的埋深持续减小与构造分异时期：喜马拉雅期区内受鄂尔多斯盆地东缘走滑拉张应力场作用，在山西隆起区产生北西—南东向拉张应力，区内形成了沉积有上千米的新近系、第四系陆相碎屑岩的晋中断陷，其他地区石灰岩、二叠系和三叠系等地层继续遭受剥蚀，使沁水盆地成为国内少有的煤层埋深适中、分布面积大、连续性好、煤阶等级高、含气量丰富的含煤区，并使沁水盆地定型于现今状态。

2.1.2 区域地层

本区地层属华北型沉积，从总体上讲，地层沉积性、岩性、岩相、古生物等特征都较稳定，沉积旋回和韵律明显，沉积地层有长城系下部、寒武系下统、奥陶系中统、石炭系中上统、二叠系、三叠系、上第三系和第四系地层。沉积缺失长城系上部、薛县系、青白口系、震旦系、奥陶系上统、志留系、泥盆系、石炭系下统、侏罗系、白垩系、老第三系。地层可与山西及华北其他地区对比（表 2-1）。

表 2-1 地层简述

地层系统		代号	厚度/m	主要岩性		
新生代	第四系 上第三系	全新统	Q ₄	0~10	上部含亚砂土及黏土互层，中部亚黏土夹小砂浆，黏土与粉细砂互层，古壤层	
		上更新统	Q ₃	0~30	杂色黏土、亚黏土	
		中更新统	Q ₂	0~40	黏土、亚黏土、砂层，含铁质结核	
		下更新统	Q ₁	0~80	黏土、粉砂、砾石	
		上新统	N ₂	0~25	黏土、砾石	
中生界	三叠系	上统	延长群	T _{3y}	0~283	上部为鲜红色粉砂岩，砂质泥岩。下部色深，粉砂岩，细砂岩，细砂岩含同生砾岩
		中下统	二马营群	T _{2er}	0~533	砂岩及泥岩
			刘家沟组	T _{1l}	0~450	粉红色砂岩，夹薄层泥岩

表 2-1 (续)

地 层 系 统			代号	厚度/m	主 要 岩 性	
古 生 界	二 叠 系	上统	石千峰组	P ₂ sh	0 ~ 1002	灰白色厚层状中粗粒石英岩, 夹砂质泥岩薄层
			上石盒子组	P ₂ ^s	252 ~ 374	杂色, 泥岩夹多层中粒砂岩, 中上部含化石
		下统	下石盒子组	P ₁ ^x	108 ~ 175	砂岩、粉砂岩、泥岩夹煤线
			山西组	P ₁ ^s	70 ~ 110	泥岩、砂质泥岩、砂岩及煤层
	石 炭 系	上统	太原组	C ₁ t	110 ~ 142	灰岩、砂质泥岩、泥岩与煤层
		中统	本溪组	C ₂ b	15 ~ 55	铝质黏土岩、灰岩与泥岩互层, 夹煤线
	奥 陶 系	中统	峰峰组	O ₂ f	155 ~ 194	泥灰质白云岩、白云质灰岩、泥质灰岩、泥灰岩, 角砾状泥灰岩中夹青灰色或白色块状或条带状石膏层
			上马家沟组	O ₂ s	320 ±	土黄色薄层泥晶白云岩、灰质白云岩组成, 夹较多石膏层, 灰色及黑灰色中厚层泥晶灰岩, 花斑状灰岩、生物碎屑灰岩及薄层白云质灰岩组成
			下马家沟组	O ₂ x	194 ±	上段白云质灰岩与泥岩互层。下段由灰色及黑灰色中厚层状泥晶灰岩云质灰岩组成, 底为角砾状灰岩
		寒 武 系	下统		O ₁	85 ±
	c			> 600	含灰质白云岩与含泥质白云岩互层, 含泥岩白云质灰岩, 大涡卷灰岩	

2.1.3 含煤地层和煤层

1. 煤层赋存特征

沁水盆地石炭-二叠系自下而上包括本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组, 其中太原组和山西组是主要含煤岩系。太原组以石灰岩、铝土质泥岩、粉砂岩、粉砂质泥岩及砂岩为主, 厚 44.90 ~ 193.48 m, 含多层可采煤层, 总厚 0 ~ 16.89 m, 平均 7.19 m。山西组以砂岩、粉砂岩和泥岩为主, 石灰岩仅在局部地区见到, 厚 18.60 ~ 213.25 m, 含可采煤层 1 ~ 2 层, 总厚 0 ~ 10.0 m, 平均 4.20 m。太原组的 15 号煤层 (局部编为 9 号或 9+10 号) 和山西组的 3 号煤层 (局部编号为 2 号) 在全区广泛分布, 横向分布稳定, 厚度较大, 是该区的主采煤层和主要含瓦斯层。

1) 煤层总厚度分布特征

沁水盆地煤层总厚度变化在 3.65 ~ 23.8 m。平面上展布规律明显, 总体上由北向南煤层增厚, 由西向东煤层变厚。就地区而言, 在寿阳-阳泉地区和晋城地区最厚, 西部和西南部地沁源、霍东地区煤层发育较差 (图 2-3)。煤层总厚度分布见表 2-2。

2) 3 号煤层厚度分布特征

3 号煤层厚度变化在 0 ~ 8 m 之间, 其总体变化趋势为: 由北向南煤层厚度逐渐变厚, 并且在盆地南部, 由西向东煤层变厚的趋势比较明显。富煤中心位于南部晋城地区, 平均