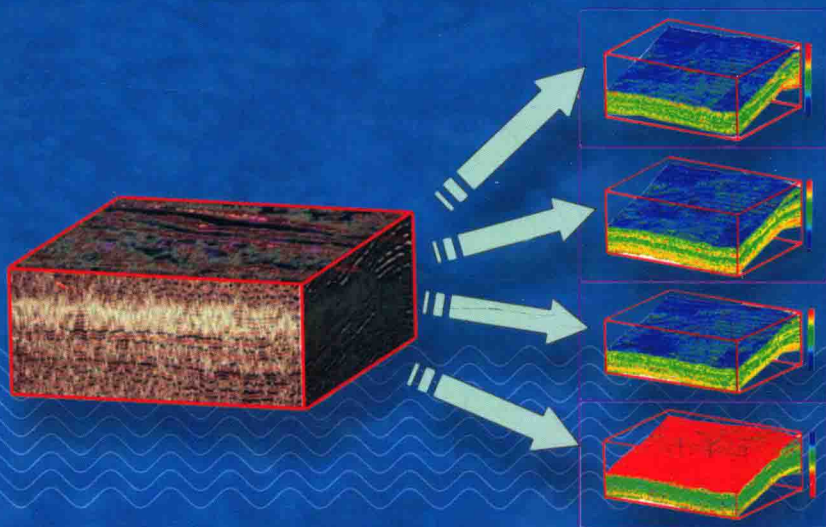


Seismic Nonlinear Prediction Method and Application
of Coalbed Methane Reservoir

煤层气地震非线性 预测方法与应用研究



李 琼 何建军 等 / 著

 科学出版社

煤层气地震非线性预测方法 与应用研究

Seismic Nonlinear Prediction Method and Application
of Coalbed Methane Reservoir

李 琼 何建军 等著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

煤层气是一种重要的非常规油气资源,资源量大;煤层气气藏属于典型的“自生自储”型气藏,其独特而复杂的储层性质和成藏机理导致勘探开发困难,因而煤层气的勘探与开发仍是世界性难题。从地球物理角度看,这些难题是目前对煤层气储层复杂的地震波传播规律认识不清造成的。本书以岩石物理学和地震波传播理论为指导,通过对试验区煤层气有利区带储层岩石物理参数测试,分析煤层气储层岩石物理参数之间的关系,总结出煤层气储层条件下的岩石物理特征,为岩石物理模型、波场特征分析及地震反演和煤层气预测提供基础实验数据和依据。煤岩显微结构和岩石物理研究表明,煤岩具有强的各向异性和非线性特征,针对复杂多变的煤层气储层预测问题,将动力学非线性科学理论引入和应用于储层预测与评价之中,创建了新型的煤层气储层预测理论和方法技术。

本书可供从事岩石物理和煤层气勘探开发领域人员参考,也可供相关专业的高校研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气地震非线性预测方法与应用研究 / 李琼等著. —北京: 科学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-03-050877-5

I. ①煤… II. ①李… III. ①煤层-地下气化煤气-地震勘探-研究 IV. ①P618.110.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 290833 号

责任编辑: 杨 岭 黄 桥 / 责任校对: 韩雨舟

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化



*

2016 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 8 3/4

字数: 220 千字

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

《煤层气地震非线性预测方法与应用研究》(*Seismic Nonlinear Prediction Method and Application of Coalbed Methane Reservoir*)一书是在国家自然科学基金(编号:41274129)、国家科技重大专项专题(2008ZX05035-001-006HZ, 2011ZX05035-005-003HZ)联合资助下完成的,书中的主要内容、研究进展是作者及其研究团队近年来在基础理论研究和实践过程中获得的成果和新认识。

煤层气地震非线性预测方法针对煤层气储层具有双重孔隙结构、高吸附性等特点,以岩石物理学和地震波传播理论为指导,联合应用动力学非线性科学理论和方法,通过对试验区煤层气有利区带储层岩石物理参数测试,分析煤层气储层岩石物理参数之间的关系,总结出煤层气储层条件下的岩石物理特征,为岩石物理模型、实际模型的数值模拟和波场特征分析提供基础实验数据和依据。在此基础上优选地震预测方法对煤层气富集区开展地震预测方法与应用研究。

本书以现有实验技术为基础,分别于2010年和2014年对沁水盆地和顺地区的煤矿进行了实际野外踏勘,获取了相关地质资料,并在井下采集煤岩样和顶、底板样进行岩石物理参数测试及分析研究。获得了典型煤岩样和顶、底板样超声波实验测试数据以及显微组分、镜质组平均最大反射率及孔隙显微结构特征;分析地层条件下煤岩岩石物理参数的变化规律和相关关系。从煤岩样采集、煤岩样制备到测试技术与数据处理,形成了一套针对煤储层在地层条件下的煤岩测试分析技术。

岩石物理测试与分析是地球探测、地球物理研究必需的重要基础数据资料,是联系地质、地球物理和油藏工程的纽带与桥梁,可以有效地消除地震解释与反演结果的多解性,是促进地震解释和反演结果由定性到半定量并发展到定量的基础。煤层气储层预测方法与技术的发展必将是储层预测非线性化、深入储层内部结构分析的微观化及储层预测与评价的量化等。非线性科学理论的应用与发展开创了有广阔前景的煤层气储层预测的新途径。

研究工作主要由作者及其所指导的研究生完成。煤岩岩石物理测试是在成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室的地层条件岩石物理实验室完成测试工作的,实验室单钰铭教授参与了岩石物理测试工作,在此表示衷心的感谢;同时感谢曹均教授在岩石物理测试与分析中的工作贡献。研究生张刘、黄涵、杨超杰等参与了野外试样采集及测试样品加工、部分实验室测试工作及数据分析处理,研究生陈杰在数据分析及文献调研方面作了大量工作,他们的工作对本书的出版具有积极作用。同时本书作者向所有参考文献的作者表示感谢。

全书共分8章,内容由浅入深,在讲授基本理论和方法的同时,着重体现学科前沿的最新发展动态,力求全面系统涵盖该领域的基本内容,本书较为系统地阐述了煤岩地

震岩石物理实验研究成果和非线性科学的基本理论、基本方法和相关应用。采用实例分析方法，使专业应用在内容、方法上更加具体化。通过该方法技术研究，实现煤层气富集区的预测。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，希望读者批评指正。

作者
2016 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 煤层气储层地震岩石物理及地震预测技术研究现状	2
1.2.1 煤层气储层地震岩石物理发展现状	2
1.2.2 煤层气富集区地震预测技术研究现状	6
1.3 煤层气地震非线性预测方法与特色	7
1.3.1 煤层气储层地震岩石物理学方法	8
1.3.2 基于地震岩石物理的地震非线性预测方法	9
1.3.3 煤层气富集区地震非线性预测方法与技术	9
第 2 章 采煤矿区地质特征	10
2.1 煤岩样采集点地质概况	11
2.1.1 TC 煤矿	11
2.1.2 CG 煤矿	12
2.1.3 ZB 煤矿	13
2.2 样品的采集	14
第 3 章 煤岩显微结构测试与分析	15
3.1 显微煤岩特征	15
3.1.1 煤岩显微定量测试与分析	16
3.1.2 煤质特征	19
3.1.3 煤变质作用及其煤种	20
3.1.4 岩石薄片的常规鉴定	20
3.2 煤岩样扫描电镜分析	24
3.2.1 煤储层孔隙、裂隙(割理)发育特征	25
3.2.2 煤中裂隙	28
3.3 煤岩显微结构测试与分析成果	31
第 4 章 煤层气储层岩石物理的实验测试与分析	32
4.1 煤岩样品的制样	32
4.2 岩石物理参数的测试方法和仪器	32
4.2.1 测试方法	32
4.2.2 实验测试仪器设备	34
4.2.3 煤岩样超声波测试系统	34
4.3 煤岩样储层物性参数的测量	38

4.4	煤岩样声学和力学参数的测试	38
4.4.1	煤岩样声学参数的测试	38
4.4.2	地层环境的实验室模拟	38
4.5	煤岩样的岩石物理测试结果与分析	39
4.5.1	煤岩样纵横波速度与储层物性的关系分析	39
4.5.2	煤岩样纵横波速度与地层压力的关系分析	43
4.5.3	煤岩样弹性参数变化规律分析	52
4.5.4	煤岩样品质因子(衰减)测试分析	64
4.5.5	煤岩样纵横波速度各向异性的测试分析	71
4.6	HS 地区煤层气储层物性参数变化规律综合分析	73
第 5 章	动力学非线性系统特征及非线性参数计算	76
5.1	动力学非线性系统特征	76
5.2	动力学非线性系统的混沌特征	77
5.2.1	混沌的产生	77
5.2.2	混沌的特征	78
5.2.3	动力学非线性系统的分形特征	79
5.2.4	煤层气储层地震信号非线性特征	79
5.3	相空间的重建	80
5.4	地震信号关联维数计算	81
5.5	地震信号 Lyapunov 指数的计算	83
5.6	地震信号突变参数的计算	85
5.7	煤层夹矸地质模型与地震响应非线性特征分析	86
5.8	基于非线性参数处理与分析的煤层气储层高渗区估计	89
5.8.1	M10 非线性参数处理与分析	89
5.8.2	非线性参数综合评价技术	91
5.8.3	M10 煤层气储层地震非线性参数综合预测	93
第 6 章	高分辨率非线性反演及煤层特征分析	96
6.1	高分辨率非线性反演基本原理	96
6.1.1	混合智能学习算法中的遗传算法	96
6.1.2	混合智能学习算法中的 MIMO-ANFIS 学习算法	98
6.1.3	混合智能学习算法中的禁忌搜索算法	98
6.2	高分辨率非线性反演方法实现技术	98
6.2.1	反演的目标函数	98
6.2.2	储层三维整体反演的实现技术	99
6.3	高分辨率非线性反演及效果分析	99
6.3.1	高分辨率非线性三维反演过程	99
6.3.2	YCN 煤层气储层高分辨率非线性三维反演分析	105
6.3.3	工区 2、3 煤储层高分辨率非线性反演分析	111

第7章 煤层气富集程度检测 115

7.1 煤层气储层非均质性预测 115

7.1.1 储层非均质性概述 115

7.1.2 YCN 煤层非均质性检测 115

7.2 YCN 煤层气相对富集区低频异常检测 117

第8章 结论与展望 120

8.1 结论与认识 120

8.1.1 主要理论进展 120

8.1.2 主要技术进展 120

8.2 展望 121

参考文献 122

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

近年来我国面临更为严峻的石油及常规天然气紧缺的现状,必须寻找非常规天然气来补充和代替常规天然气。中国煤层气资源量大,煤层气资源丰富,埋深 2000m 以浅的煤层气资源量达到 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是世界第三大煤层气储藏国(李景明等,2008),煤层气将作为新的能源展现于世界。但是煤层气储层等非常规油气藏的勘探与开发是世界性难题,这些难题归根结底就是对复杂介质中的地震波传播规律认识不清,二是基于理论认识的针对煤层气藏特征的储层地球物理方法研究。

同时,煤层气储层也是今后重要的勘探领域之一,煤层气是 21 世纪众多新能源中炙手可热的焦点,目前已在美国、加拿大、澳大利亚实现了大规模商业性开发。与国外的研究水平相比,我国煤层气储层的研究起步比较晚。我国对煤层气的早期研究主要集中在煤层气的勘探,以及钻井、完井、排采等方面,但是对煤储层特征的研究相对落后,很难满足国家大型煤层气资源开发的需求(汤达祯等,2014)。总的说来,我国煤层气储层的勘探近年来已有重大突破,相关的地震、地质理论与方法也正在形成中。比较而言,煤层气储层的地质研究开始比较早,相关的理论方法比较成熟。地球物理方法的研究起步较地质研究晚,且早期针对二维地震资料开展的研究效果不明显。近几年随着三维地震技术的提高和普及,我们已能从三维地震资料中进行比较可靠的煤层气储层地震研究,但相关的研究还有待进一步深入,特别是地震岩石物理方面的研究更是刚刚开始,离定量解释的要求还有很大差距。

在石油天然气的勘探开发中,地震勘探获取的资料以地震波传播信号的旅行时间、反射波振幅及相位变化等特征形式带来了地下岩石和流体的信息,这些地震响应特征受到岩石性质、地层压力、温度、孔隙度、流体类型及其饱和度等诸多因素的复杂影响。充分理解地下岩石对地震波场的响应特征,准确识别这些响应特征中所包含的不同信息,进而根据地震属性参数预测地层岩性等地质性质,为油气检测、储量计算和油藏监测提供参考数据,已经成为石油地球物理勘探的热点问题和发展方向。所以,作为地震岩性分析理论基础的地震岩石物理学(seismic rock physics),多年来在弄清岩石及其所含流体的性质与地震属性参数之间关系方面开展了全面深入的研究,并形成了一整套基于岩石弹性、黏弹性和各向异性等物理特性的系统理论、介质模型和经验准则。地震岩石物理学是地球物理技术研究的理论基础之一,是连接储层特性(孔隙度、渗透率、饱和度)与地球物理勘探技术的桥梁,长期以来岩石物理学的发展成功地推动了地球物理勘探技术的进步,并为油气藏地球物理特征、地震岩性识别、储层预测、油气检测、异常压力预

测以及非常规能源的勘探开发提供了重要的理论基础和实验数据,指明了技术发展方向。针对煤层气高吸附、双重孔隙结构等特点,加强煤层气岩石物理和煤层气地震响应特征的研究,可以提高对煤层气藏规律和基本地球物理特征的认识,为煤层气探勘开发方面的技术进步奠定理论基础,具有现实意义。

目前主要技术难点和问题是:

(1)煤层气以吸附气为主的存储状态,给现有岩石物理测试技术带来了难度。获得第一手实验数据就尤为重要,需要形成针对煤岩样的样品采集、加工、测试和数据处理的整套技术。岩石物理学基础研究是地震处理和解释技术中的关键一环,它是连接测井、地质和地震之间的桥梁,如何将岩石物理—测井—地质—地震相互结合是一个难点,有了它才能把各种地震数据准确地转换成为岩性、物性、含气性等有用的地质信息。

(2)目前针对煤层中煤裂隙预测的研究还不全面,缺乏将其宏观、微观特征相结合的综合研究,煤层气储层裂缝地震响应模式描述的难题尚未解决。因此,在将来的工作中,拟对这些问题进行进一步的研究。

(3)如何用地震方法反演获得煤层气储层地震渗透性特征,进而预测煤层气富集区也是一个难点。

总之,通过实验测试手段,着力发现和认识煤层气与地震信息之间的关系,运用岩石物理方法技术,研究岩石物理特征和地震响应特征,量化地震与测井解释、限定不确定性、减少解释的风险,提供岩石物理基础支撑。促进煤层气储层地震解释、反演计算等向定量化发展,加快煤层气储层勘探开发的前进步伐。

1.2 煤层气储层地震岩石物理及地震预测技术研究现状

1.2.1 煤层气储层地震岩石物理发展现状

岩石物理学是研究岩石物理性质及相互关系和应用的学科。岩石物理学是地球物理学的一个重要分支及其组成部分。重点研究与地质学、地球物理学、地球化学、油储地球物理学、地热学和环境科学密切相关的基本岩石属性和响应特征,为上述各地学学科分支研究中可能遇到的不确定性或多解性提供定量或半定量解释、标定的物质基础。在过去的几十年里,岩石物理学对现代地球科学的发展和应用做出了不可磨灭的贡献。例如,通过研究地震波在岩石中的传播特性,人们发现岩石圈内存在部分熔融和低速带现象;而对孔隙性岩石的导电机理和弹性波速度的研究导致了油储地球物理的诞生。

但是,由于煤层气勘探起步晚,基础理论和技术方法研究工作较为薄弱,国内对煤层气储层岩石物理的研究经历了一个不断深化和发展的过程。煤层气储层等非常规油气藏与常规储层相比更加复杂,现代油气勘探工作正面临着勘探目标越来越复杂及对勘探精度的要求越来越高等难题,基于地震岩石物理研究可以帮助我们充分了解复杂介质中地震波传播规律,解决现代非常规油气勘探和开发工作中所面临的各种棘手问题。但是,煤层气高吸附、双重孔隙结构等特点不同于常规油气储层,地震岩石物理的研究才刚刚

起步,存在许多待解科学问题,需要进行深入的技术方法的研究和理论的探讨。

岩石在地球上存在时间久远,因而它的复杂性和多样性是地球上的其他介质所不能相比的,要想彻底探究岩石的内在性质,必须将反映岩石性质各方面的参数,如弹性参数(杨氏模量、剪切模量、体积模量、泊松比等)、物性参数(密度、孔隙度、渗透率)、储集空间类型参数(裂隙、孔隙等)及流体类型(油、气、水)相结合进行系统分析,找出它们之间的内在规律,岩石物理学这一学科就是为了寻找这一规律而诞生的。通过在实验室进行岩石物理模拟实验,将所要研究储层的岩石的地球物理参数(速度、振幅、频率等)与它的岩石物性参数(密度、孔隙度、渗透率等)进行相关分析(陈颀和黄庭芳,2001),斯坦福大学著名岩石物理学家 Mavko 对地震岩石物理学的定义是:运用岩石物理的方法将地震信号中的属性(如速度、波阻抗、衰减等)与岩石的特征性质参数(如密度、孔隙度、压力、孔隙流体、饱和度等)进行相关分析研究,使地震资料能与地质资料相辅相成,提高解释的准确性和一致性,降低地震资料解释潜在的风险。这在常规与非常规油气储层预测过程中是极其重要的,基于岩石物理的研究可以极大地降低地震资料在油气藏储层预测中的不确定性和风险性。

煤是由埋藏在地下的植物遗体等经过几百万年的成岩作用形成的一种炭质岩石,随着地层温压条件的变化,煤的化学性质和物理结构也发生相应的变化(彭苏萍等,2014a)。煤阶是由煤化的程度决定的,一般来说,褐煤、亚烟煤属于低阶煤,烟煤属于中阶煤,半无烟煤、无烟煤属于高阶煤。煤层气大部分是由于煤层中的有机质被微生物分解而产生的,煤相对其他岩石而言,其质地较软,因而从煤中取芯和制样是一个很困难的过程,但是随着煤层气逐渐成为新能源的宠儿,通过运用地震岩石物理的方法获取煤层的相关地震属性参数来研究煤层气的富集区,已经成为国内外研究的热点之一。在利用地球物理方法对煤层气储层进行评价时,岩石物理是不可或缺的基础,它在储层特性(孔隙度、密度、饱和度、流体类型、压力、温度等)和地震属性(速度、阻抗、振幅、AVO 响应等)相互转换之间起着桥梁的作用。

在过去的 30 年中,许多地球物理学者和石油工程师对煤岩的岩石物理性质进行了研究。Greenhalgh 和 Emerson(1986)在大气压条件下对 143 个平行和垂直于煤层层面的岩石进行了纵横波速度的测量。Yu 等(1993)分析了干燥和饱和水煤岩样品声波速度随围压的变化。Lwin(2011)研究了煤层中不同气体填充对声波速度的影响。Chen 等(2013)总结了煤层气含量与弹性性质之间的负相关关系,为煤层气 AVO 技术提供了岩石物理基础。Wu 等(2015)对煤岩动态弹性参数及其各向异性特征进行了实验测试研究。Wang 等(2015)提出了不同煤岩的裂缝密度、纵波速度、孔隙度和渗透率之间的定量关系。Yao 和 Han(2008)对煤岩样进行超声波测量,并从压力、温度、含水饱和度、各向异性等几个方面来讨论分析其对煤岩样速度的影响。Morcote 等(2010)研究发现煤岩样的煤阶越高,其体积模量和剪切模量也随之增大,纵横波速度比却与煤阶成反比关系。Dirgantara 等(2011)对不同煤阶的煤岩样进行测量,发现煤岩样的煤阶越高,其纵波和横波速度都会随之增大。

在国内,孟召平等(2006)对煤系岩石的纵横波速度进行了测量,并以此计算了煤系岩石的动弹性模量,在煤系岩石的声波速度与岩石物理力学参数之间建立了定量关系。

董守华(2008)测量沿煤层三个方向的纵横波速度来计算煤的各向异性系数,从孔隙率入手进行研究探讨,认为煤各向异性由裂隙引起。2010年李琼、曹均、单钰铭等在国内首次对煤岩进行地层条件下系统岩石物理测试,建立了一套完整的煤岩岩石物理实验技术。陈信平等(2013)通过大量实验数据研究发现煤层气储层含气量与其弹性参数之间存在负相关关系。李琼等(2013)通过应用MTS岩石物理参数测试系统对沁水盆地和顺地区煤岩样和顶板样进行了地层温压条件下的纵横波速度等参数测试研究,研究发现煤岩样与顶板样的弹性特征存在较大差异,并具有明显的各向异性和非线性特征,获得了一系列岩石物理关系模型,为煤层气地震反演技术提供了基础。

上述国内外学者在煤层岩石物理这一研究领域做出了较多贡献,研究成果颇丰,但是在煤层气储层非线性地震特征研究、煤层裂隙预测、高渗区和煤层气富集区预测上仍然还存在相当大的困难,这也是地震岩石物理在煤层气领域研究的一个难点。

1. 模拟地层温压条件的测试技术

模拟原位环境进行岩石样本测试为煤层气地球物理勘探技术研究提供了必要的基础研究手段。岩石物理测试是岩石物理研究基础性资料的来源,岩石样本在进行岩石物理测试时,可分为常温常压和高温高压(模拟地层的实际条件)两种测试方式,只有在高温高压条件下得到的岩石物理基本数据,才是接近于原位环境的,对地球物理基础理论研究更为重要。

模拟地层条件下的实验测试方法技术主要有3种:通过测量超声波脉冲从样品一端到另外一端的旅行时和样品长度的方法确定超声波速度的脉冲传输法(Birch, 1960),也就是常说的脉冲透射法;也有通过测量第一个波和第二个波的反射时间的方法确定超声波速度的脉冲反射法。20世纪80年代中国科学院声学研究所的应崇福领导的课题小组,用动态光弹法进行了固体中超声波传播和散射声场的研究工作,动态光弹物理模拟法是用光学成像方法直接显示弹性波在介质中的波场分布,与常用的声波传感器电信号测试方法相比较,它能够更直观地观测波的传播过程,同时,动态光弹物理模拟法可以测试超声波速度,但该方法要求样品透明,在实际应用中受到限制。因此目前,地震岩石物理测试技术多采用脉冲传输法。

2. 地震波传播理论

岩石物理学家面对复杂多变的岩性地层,一直开展新的岩石物理模型研究和理论探索。煤层气在煤层中赋存的状态和流动机理与常规储层不同,煤层气的开采过程是一个流体渗流与多孔介质弹塑性变形动态耦合作用极强的过程。Gassmann(1951)建立了反映速度和孔隙度以及孔隙流体模量体系的著名Gassmann方程;White(1965)将Gassmann公式作适当的变换,获得具有液体、气体影响的纵、横波速度表达式;Berryman和Milton(1991)提出了等效介质模型,推导了岩石骨架由两个成分所组成的复合孔隙介质的广义Gassmann方程的精确解,描述了双相孔隙介质的波传播过程。Biot(1956)根据潮湿土壤的电位特性和声学中声波的吸收特性,发展了Gassmann的流体饱和多孔双相介质理论,奠定了双相介质波动理论的基础。从这以后,流固耦合理论的发展主要围绕着假

设不同的孔隙材料的模式得到不同的物理方程而展开：假设固体骨架为弹性的(各向同性与各向异性)、塑性的、黏弹性的(线性与非线性的以及它们之间的各种组合)，孔隙流体假设为不可压缩的与可压缩的等等。Mavko 等(1998)提出高频的 Biot 理论在渗透率非常高的介质中适用。Biot 流动描述的是宏观现象，喷射流机制反映的是局部特征，两种机制通过流体的质量守恒而统一，对地震波的衰减和频散均产生重要影响。Dvorkin 和 Nur (1993)、Dvorkin 等(1994)基于孔隙各向同性一维问题将这两种流体-固体相互作用的力学机制有机地结合起来，提出了统一的 Biot-Squirt(BISQ)模型。从理论上极大地丰富了饱和岩石介质的弹性波传播理论。Parra(1997)将 Dvorkin 等基于一维各向同性的 BISQ 模型推广到横向各向同性的双相介质情况，获得了同时包含 Biot 流动作用和喷射流作用的波传播方程。杨顶辉等在其 1997~2002 年的系列文章中，对双相各向异性介质进行了深入研究，考虑双相各向异性介质中固一流相对运动速度的各向异性，将含流体多孔介质的 BISQ 模型用于预测波的衰减和频散，同时利用有限元方法对双相 PTL 介质和双相各向同性介质中的弹性波传播进行了数值模拟。

3. 孔隙、裂缝系统研究

作为煤层气储集层的煤层是一种双孔隙岩石，由基质孔隙和裂隙组成。所谓裂隙是指煤中自然形成的裂缝，由这些裂缝围限的基质块内的微孔隙称基质孔隙。裂隙对煤层气的运移和产出起决定作用，基质孔隙主要影响煤层气的赋存(苏现波，1998)。

假设连续介质中均匀地随机分布着沿不同方向排布的圆球形孔隙或者椭球形裂隙，推出等效介质的弹性模量表达式，即 Kuster-Toksöz 理论模型(1974)。Eshelby(1957)给出了含有单个椭圆包裹体的基质的弹性模量表达式，Wu(1966)利用自洽理论给出了两相介质的有效弹性模量的计算方法。其他还有自洽模型(O'connell and Budiansky, 1974; Budiansky and O'connell, 1976; Berryman, 1980, 1995)，和常微分自洽模型(Berryman, 1992)。

Aguilera(1976)提出了一种能够处理基岩孔隙和裂缝孔隙的双孔隙度模型，在 2003 年，提出了适用于基岩孔隙、裂缝和不连通孔洞构成的三孔隙度模型(Aguilera, 2003)。

煤储层是由基质孔隙和割理组成的，可以简化为双重介质模型。有学者也提出了由宏观裂隙、显微裂隙、孔隙组成的三元裂隙-孔隙介质模型(傅雪海，2001)。

Schmoker(1988)在研究碳酸盐岩孔隙度区域预测时提出碳酸盐岩孔隙度与 R_0 间为乘方关系，赵阳(2003)提出了 R_0 与砂岩孔隙度间幂函数关系模型来预测沾化凹陷沙河街组四段烃源层的孔隙度。

4. 各向异性研究

地震学家对地震波在各向异性介质中的传播现象进行观测，研究和总结了地震波传播规律和机理。特别是 Crampin 等(1980)首次从三分量记录中识别出横波分裂现象，并在 1981 年、1985 年证实了裂隙诱导各向异性和横波分裂的存在，提出了广泛扩容各向异性(简称 EDA)模型。Thomsen(1986)的论文定义了弱各向异性，引入一套 Thomsen 各向异性参数；Tsvankin(1997)定义了 2 个垂直速度和 7 个各向异性参数。Wang(2002)描述了测量单个圆柱岩样横向各向异性(TI)介质必须的 5 种弹性常数的技术。Liu 等

(2000)讨论了确定平行裂缝和排列整齐的裂隙对地震波传播的影响程度的各种方法。Hudson 等(2001)计算整齐排列裂缝、流体饱和介质的 V_P 、 V_S 的各种等效介质理论。Maultzsch 等(2003)提出了一种新的等效介质理论来模拟频变各向异性流体饱和岩石模型,并与裂缝长度密切相关,该模型考虑了两种不同尺度下的基于喷射流机制的速度频散和衰减:基质颗粒尺度(微裂隙和等效基质孔隙度)和地层尺度裂缝。用该模型研究致密砂岩油藏的多分量 VSP 的横波分裂。

煤层不同于常规储层,煤层的天然裂缝(割理)发育,煤层的裂缝扩张呈现出大量的不规则裂缝;煤岩在垂直层理方向上和平行层理方向上的物理力学性质差异较大,煤岩样中定向排列的裂隙产生明显的速度各向异性、横波分裂和衰减各向异性;同时还发现 P 波的动力学特征变化比运动学特征更明显, P 波衰减随裂隙方位的变化明显大于 S 波。这为利用 P 波属性的变化进行裂隙检测和预测提供可靠实验依据(赵群和郝守玲, 2005)。我们前期研究形成了从定比观测理论、定向裂缝模型、孔洞模型到多种缝洞模型的研究系列,深入研究了系列物理模型的地震响应特征。分析了多种环境下缝洞特征参数与地震波速度、振幅、衰减和主频等属性参数之间的复杂关系和变化规律。得出了不同地震波属性参数对缝洞特征检测的敏感度,进一步加深了地震波的动力学参数比运动学参数对于储层缝洞的检测更为有效的认识。

1.2.2 煤层气富集区地震预测技术研究现状

高丰度煤层气富集区(甜点区)是指煤层埋藏深度适中、厚度较大、热演化程度合适、含气量相对较高、孔渗性相对较好、单井产量高且稳产的煤层气富集区带。寻找和优选煤层气富集的“甜点”区带,对于煤层气开发井位的部署和优化、提高煤层气井产量、促进煤层气藏的有效开发都具有现实的经济价值。在实际的煤层气勘探中,不同地质因素对煤层气富集的影响程度不同,由单一地质因素预测的煤层气富集区,具有一定的局限性,需要综合多种地球物理方法对煤层气藏进行综合评价,提高预测精度:多种属性联合进行精细构造解释、AVO 反演预测裂缝发育特征、多种反演方法相结合预测煤层厚度特征、叠前反演预测煤层含气性和脆性特征,综合优选各种预测结果确定煤层气“甜点区”(霍丽娜等, 2014; 彭苏萍等, 2014b; 陈贵武等, 2014)。

地球物理技术的应用能提高煤层气预测的精度,特别是地震勘探技术在精细构造解释、煤层厚度、顶底板岩性及分布、夹矸、小断层、裂缝发育带等预测方面有着重要作用;在煤层渗透性和含气性研究方面,一些物探手段和方法已经显示出明显的效果。Ramos 和 Davis(1997)首次将 AVO 技术应用于煤层气勘探中,对煤层气储层裂隙进行了 AVO 分析和模拟,描述了裂隙性煤层气储层的特征。Peng 等(2006)分析了煤层气 AVO 技术的三种限制因素和四种有利因素。Chen 等(2013)讨论了煤层气储层弹性参数与含气量之间的负相关关系,建立了煤层气 AVO 技术的岩石物理基础。Chen 等(2014)研究了煤层气 AVO 理论,模拟得到了煤层气的 AVO 响应特征,结果表明煤层气 AVO 异常有且仅有“第四类” AVO 异常,叠前反演得到的 ρ 和 μ 可以作为圈定“甜点”的敏感参数。方位 AVO 技术是研究煤层裂隙发育的一种有效手段,也是煤层气探测的一项重要

技术(林庆西, 2015)。但由于目前煤层气田地震资料的局限性, 对煤储层的割理系统和含气以后的地球物理特征尚没有全面的认识; 针对煤层气储层的非均质性, 地球物理预测技术体系尚未建立; 在煤储层含气性预测方面, 现有地球物理技术难以直接识别, 多解性强, 综合评价技术正处于起步阶段。

地震反演技术是伴随着地震技术在油气田勘探与开发中的不断深入应用, 于 20 世纪 80 年代发展起来的一门新学科, 并逐渐成为储层预测的核心技术。近几年, 随着岩性油气藏勘探的广泛开展, 地震反演技术得到了长足的发展, 新技术、新方法层出不穷, 在生产实践中发挥着越来越重要的作用。20 世纪 80 年代发展了基于递推的反演, 上世纪 90 年代出现了基于模型的反演, 近年来又发展了基于属性的反演。反演方法也由线性反演发展到了非线性反演, 极大地提高了反演的精度和分辨率。为了提高波阻抗反演的分辨率和准确性, 很多地球物理工作者为此做了大量的研究工作, 如 D. W. Oldenburg 和 Colin Walker 的最大熵(MED)及自回归(AR)方法; B. Ursin 和 O. Holberg 的最大似然反褶积(MLD)方法; Marc Lavielh 的贝叶斯估计反褶积(BED)方法; D. A. Cooke 和 W. A. Schneider 的广义线性反演(GLI)方法等, 都取得了很好的效果。这方面有代表性的工业化软件是美国 Landmark 公司的 G-log。从 20 世纪 80 年代中后期, 相继出现了有井约束的宽带约束反演(BCI)技术和各种优化算法。这方面具有代表性的论文如: 周竹生的宽带约束反演; S. Gluck 的地层反演方法; D. Carron 和 E. P. Schlumberger 的井中和地面的井控地层反演; T. Brae 的利用地层模型解释先验信息进行反演; R. D. Martinez 的多参数约束反演方法。以上方法都从不同的角度和计算方法上提高了波阻抗反演的分辨率, 降低了多解性, 具有代表性的软件有 Seislog、Parm、Strata、CCFY、I-SIS、Jason 等, 并且正在世界各地油气田的勘探开发生产过程中发挥着重要作用。

在非线性反演方面, 1999 年 British Columbia 大学的 Ulrych 教授、杨文采(1993)及张向君等(1999)讨论了地震道的混沌特性和混沌控制反演方法。李正文和李琼(1999)以及安鸿伟博士(2002)通过改变网络参数, 选择更加合适的奇怪吸引子构成混沌神经网络反演方法。用混沌神经网络法进行反演, 获得了全局最优。在非线性处理方法技术方面发展了非线性信号分析理论和处理技术。基于混沌理论和突变理论及分形理论, 应用非线性时间序列相空间重构方法, 从地震道中提取了 Lyapunov 指数、分维数和突变参数等多种参数, 联合其他属性参数进行储层岩性反演和储层评价。

因此, 只有继续深入开展煤层气地球物理技术的应用研究, 从煤储层实验室岩石物理测试、测井资料、地震、地质资料入手, 认真分析煤储层含气性、内部结构特征、渗透性等关键参数在测井、地震资料上的综合响应特征, 寻找一套适合煤层气勘探开发的低成本、高效率的地球物理勘探技术。

1.3 煤层气地震非线性预测方法与特色

基于岩石物理的“煤层气地震非线性预测与应用”对非常规油气检测具有重要意义和理论价值, 其理论与方法技术使储层预测非线性、储层内部结构分析微观化与储层评价量化。

煤层气地震非线性预测方法是将岩石物理学方法与地震非线性参数法和地震非线性反演方法以及富气聚集检测方法有机地相结合形成了煤层气综合预测的新方法和新技术，这是对煤层气勘探开发的一种新发展。

1.3.1 煤层气储层地震岩石物理学方法

与国外煤层气的勘探开发相比，我国煤层气的勘探开发具有自身的规律，主要储集在中高阶煤种，变质程度高，煤层构造复杂，渗透性低、压力低、含气饱和度低和地应力高“三低一高”现象突出。研究思路和技术路线流程图如图 1-1 所示。在研究过程中，主要从实验和理论入手，研究煤层气、煤岩与地球物理参数直接和间接的联系，由煤岩样典型样品的选择、采集与加工、储层条件下样品测试系统的建立、实验测试到实验测试结果的分析，最后归纳出储层条件下的煤层气储层的岩石物理参数之间的关系和特征。并充分考虑微观物理结构的改变对岩石物理参数的影响，研究煤层气储层显微结构、非均质性、渗透性等对地震波场响应特征的影响，分析煤层气储层各向异性对地震波的响应机理。通过选择有代表性的样品，设计合理的加工与实验程序，进行有代表性煤层气样本实验测量和内部结构特征分析，寻找内在的岩石物理变化规律，为建立针对煤层气储层特点的岩石物理模型提供实验基础和依据。

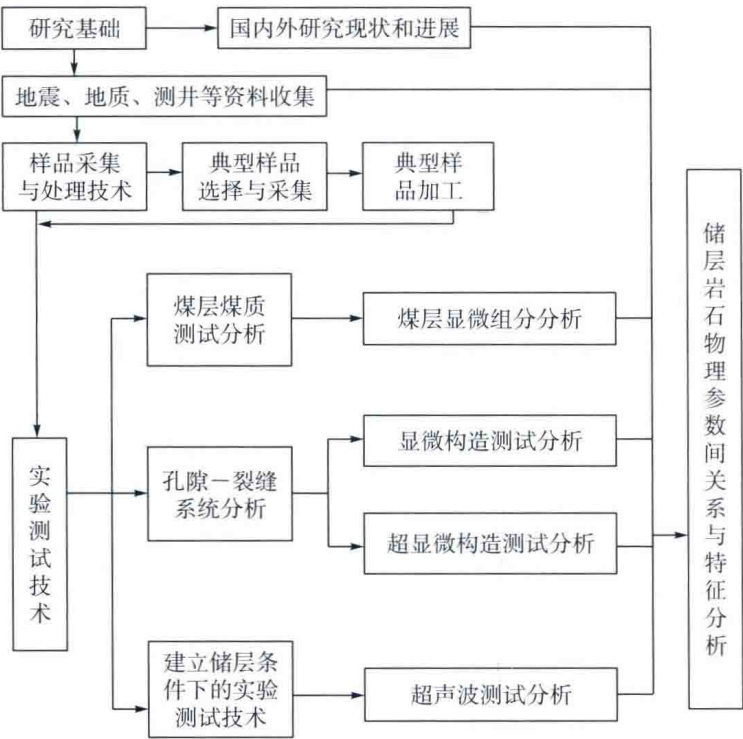


图 1-1 研究思路和技术路线流程图

1.3.2 基于地震岩石物理的地震非线性预测方法

基于煤层具有低速度、低密度、非均质、各向异性和非线性特征,针对这种非线性系统,将岩石物理学与非线性动力学相结合形成煤层气预测的岩石物理地震非线性预测理论和方法。基于这种理论,建立与发展了煤储层预测的方法技术,提高了煤层气勘探开发的效果。

1.3.3 煤层气富集区地震非线性预测方法与技术

以“岩石物理、钻井、测井等地质资料分析为控制—地震反演为基础—进行储层检测和渗透性分析”为研究主线。首先分析钻井、测井资料,获得目标层位煤层气储层的“四性”特征:岩性特征、电性特征、物性特征和含气特征,并通过测井曲线组合计算出反演所需要的基础属性曲线(如孔隙度、渗透率、纵横波速度、波阻抗等),完成“单点”研究工作。以过井连井地震剖面进行参数提取与反演实验,获取合理反演流程与反演参数,以及波场参数与钻井成果对比分析工作,完成“线上”研究工作。最后对地震数据体进行波场参数提取、裂缝检测及高分辨率非线性反演,获取煤层气储层、顶底板的评价参数与渗透性特征,综合钻井、测井、测试成果对研究区煤层进行储层评价和有利区评价,从而完成“面上”研究工作。研究工作中采用“点—线—面相结合、钻井—测井—地震相结合”的研究思路,以确保研究成果的准确性和适用性。