



煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书

卷八

宋岩 张新民 主编

煤层气藏高分辨率探测的 地球物理方法

彭苏萍 杜文凤 勾精为 苑春方 杨瑞召 等著



科学出版社
www.sciencep.com

煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书·卷八

宋 岩 张新民 主编

煤层气藏高分辨率探测的 地球物理方法

彭苏萍 杜文凤 勾精为 苑春方 杨瑞召 等著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要内容包括:煤及岩石的地球物理响应,煤层及其顶底板岩性的精细描述,煤层气转换波勘探方法与技术,煤层气 AVO 探测技术和瓦斯突出区地质与地球物理预测。本书通过煤层气藏高分辨率探测的地球物理响应研究,探讨了煤层厚度、煤层结构及其顶底板岩性的精确预测方法,阐述了煤层气转换波地震勘探的基础理论和方法,论述了煤层气三参数 AVO 反演方法,说明了利用地质与地球物理方法综合预测煤层气富集区块和煤与瓦斯突出区的预测方法。

本书适合煤层气研究人员和相关专业人员阅读,也可作为高等院校相关专业的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书:典藏版/宋岩,张新民主编.
—北京:科学出版社,2018.5

ISBN 978-7-03-052236-8

I. ①煤… II. ①宋… ②张… III. ①煤层-地下气化煤气-油气藏形成-研究②煤层-地下气化煤气-资源开发-研究 IV. ①P618.110.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 057274 号

责任编辑:胡晓春/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟/封面设计:高海英

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张:172 3/4 插页:2

字数:4 050 000

定价:3298.00 元(共 11 册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

国家 973 计划煤层气项目,将出版《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》(共 11 卷),内容包括煤层气基础研究现状、煤层气的生成与储集、煤层气成藏机制及富集规律、中国煤层气资源潜力、煤层气地震勘探技术、煤层气经济高效开采方法等诸多方面的基础理论及应用基础问题,涵盖面相当广泛,是一项很有意义的系统科学工程。项目首席科学家让我为该套丛书作序,欣然应命,特写以下文字,以示支持和祝贺。

煤层气是一种重要的非常规天然气资源。美国在 20 世纪 80 年代实现了对煤层气的商业性开发利用,建立起具有相当规模的煤层气产业。中国是个煤炭资源大国,煤层气资源也相当丰富。据最新预测结果,全国煤田埋深 2000m 以浅范围内,拥有的煤层气资源量为 $31 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (褐煤未包括在内),与我国陆上常规天然气资源量大致相当;若将褐煤中的煤层气也计算在内,数量则更加可观。从我国化石能源资源的禀赋条件和经济社会发展需求来看,煤层气是继煤炭、石油、天然气之后我国在新世纪最现实的接替能源;同时开发利用煤层气在解除煤矿瓦斯灾害隐患、保护大气环境方面也具有十分重要的作用。

我国从 20 世纪 80 年代开始进行现代煤层气技术研究及开发试验工作,截至 2004 年上半年,在全国境内已施工各类煤层气井近 250 口,建成柳林、潘庄、大城、淮南等 10 余个煤层气开发试验井组,其中阜新刘家、晋城潘庄、沁水柿庄 3 个井组已进行商业性煤层气生产;在煤储层特征研究、煤层气资源评价等基础研究以及无烟煤煤层气开发等方面也取得了可喜的进展。但总体上说,我国煤层气产业化进程缓慢,不能满足国民经济和社会发展的需要。

煤层气不同于常规天然气。它在地球化学特征、储集性能、成藏机制、流动机理、气井产量动态等方面与常规天然气有明显差别,必须要用不同于常规油气的理论和方法来指导煤层气的勘探与开发。同时,由于中国大陆是由几大板块经多次碰撞、拼合而成,至今仍受欧亚、印度、太平洋三大板块运动的共同作用影响;中国的聚煤期多、延续时间长,煤田遭受的后期改造次数多、作用强烈,因而铸就了中国煤层气地质条件的复杂性和多样性。因此,在北美单一大陆板块环境下产生的美国煤层气理论不完全适应中国的情况。

建立符合中国地质特征的煤层气基础理论,为形成中国煤层气产业提供科学技术支撑,是中国科技工作者面临的紧迫任务。经过各方面的共同努力,

在国家科学技术部的支持下,国家 973 计划“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目,汇集我国石油、煤炭、中国科学院和高等院校等行业和部门的专家学者及精英们协同攻关,体现了多学科交叉、产学研相结合的科学研究新理念,改变了过去部门条块分割、单一学科推进的被动局面。

项目紧紧围绕国家目标和关键科学问题,组织各方面力量,就制约我国煤层气产业化的主要科学问题,如煤层气的成因、储集性能、成藏动力学、气藏成因类型、资源富集规律及潜力、煤储层特征的地球物理响应、气体流动与产出机理等,高起点地开展了广泛、深入的基础研究,这些成果对我国煤层气产业的形成和发展具有理论指导和技术导向作用,集中代表了当前我国煤层气基础研究的整体水平。

将研究成果及时整理出版,可展示我国煤层气基础研究的实力,是加强学术交流、传播煤层气知识、加快科学研究成果向现实生产力转化的重要环节。新的科学理论和技术方法,必将加快我国煤层气产业化进程,并对世界煤层气的发展做出贡献。让我们大家共同努力,早日实现我国煤层气的跨越式发展,以满足经济社会发展对洁净能源不断增长的需求。

中国科学院院士



2004 年 8 月于北京

序 二

煤层气,俗称瓦斯,是以吸附态赋存于煤层中的一种自生自储式非常规天然气。开发和利用煤层气是一举两得的事,不仅可作常规油气的补充资源,更重要的是能够大大改善煤矿安全生产条件,减少以至杜绝煤矿事故发生。

煤层气作为一种资源量巨大的非常规天然气资源,已经从研究逐渐走向开发利用。美国是最早进行煤层气开发利用的国家,煤层气工业起步于20世纪70年代,到80年代实现了大规模的商业开发,煤层气的产量增长速度快,从1980年的年产不足 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ 到1990年年产 $100 \times 10^8 \text{m}^3$,90年代初期稳产在 $200 \times 10^8 \text{m}^3$,2002年年产 $450 \times 10^8 \text{m}^3$,约占美国天然气当年产量的7.9%,可见美国煤层气的开发是相当成功的,比较成功的盆地为科罗拉多州和新墨西哥州的圣胡安盆地和亚拉巴马州的黑勇士盆地。一般认为煤层气井低产,但也有相当高产的,例如1996年,我考察圣胡安盆地ARCO公司辖区,有110口煤层气井,日产气 $660 \times 10^4 \text{m}^3$ 多。因此研究煤层气低产中的高产规律有重要的理论与实践意义。澳大利亚借鉴美国的成功经验,也开展煤层气的勘探和试验,取得一定的成效。此外,捷克、波兰、比利时、英国、俄罗斯、加拿大等国也都开展煤层气的勘探开发试验。目前,世界上对煤层气研究日益加深,开发地域日益扩大,煤层气在能源中的地位日益提高。

我国是煤炭资源大国,拥有相当丰富的煤层气资源(据“七五”估算,埋深2000m以浅的资源量为 $31 \times 10^{12} \text{m}^3$)。我国煤层气的勘探开发明显落后于美国,从80年代开始,积极引进美国的煤层气开采技术,进行勘探开发试验,但总的来说成效不大,主要原因是我国煤层气地质条件复杂,对煤层气藏形成机理还不太清楚,煤层气的勘探和开采与常规天然气又有很大差别,缺少较为完善和成熟的理论指导。因此,在我国进行煤层气的勘探与开发基础理论研究将是推动该产业更快向前发展的前提,回顾20年前“煤成气的开发研究”国家重点科技攻关项目的进行,促进了我国目前天然气工业的大好局面就是一个实证。我曾和其他科学家一同向国家科技部呼吁过立项进行煤层气的研究,今天这一愿望终于实现,“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”正式立项实施了,这是一件可喜可贺的大事,通过该项目的研究,将会解决我国煤层气勘探与开发存在的若干重大问题,深化煤层气成藏和开采机理的认识,催生煤层气勘探大好局面早日到来。

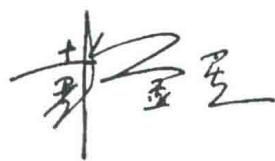
本人有幸加入该项目的跟踪专家行列,从立项到研究启动,一直在关注着

其进展和研究成果。迄今,项目前期的成果显著,不乏新发现、新认识和新观点以及创新。宋岩、张新民两位首席科学家计划在项目研究期内出版 11 卷《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》(以下简称《丛书》),《丛书》包含煤层气勘探和开发各个方面成果,主要包括前期调研论文集《煤层气成藏机制及经济开采理论基础》,和集成各个课题的和项目的研究成果。《丛书》从煤层气形成的动力学过程及资源贡献、煤储层物性非均质性及控制机理、煤层的吸附特征与储气机理、煤层气藏动力学条件研究、煤层气成藏条件和模式、我国煤层气可采资源潜力评价、煤层气藏高分辨率探测的地球物理响应、煤层气开采基础理论研究、煤层气开发技术等方面,系统全面地研究煤层气的勘探开发理论,技术、方法等诸多基础性、关键性问题,这是前人未及的一个重要举措。《丛书》总的主线是形成一套系统的、具有中国特色的煤层气勘探与开发理论,这也是我国目前所缺乏的。首席科学家所作出的努力和宗旨意在把我国煤层气研究优秀的成果充分展现给地学和煤层气领域学者,达到互相学习交流的目的。《丛书》是该领域中的知识积累、规律总结和创新结晶。这套丛书的出版将对从事煤层气工作的学者、相关专业人员和大中专院校学生大有裨益,同时,势必对煤层气产业产生重要影响和促进。

《丛书》的主编和作者主要是中青年科研骨干,项目给了他们用武之地,他们年富力强,知识广博,勤于实践,善于探索,勇于攀登,敢于创新,是一支强有力的生力军,故由他们编著的《丛书》基础扎实,知识丰富。

在此预祝《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》顺利陆续出版,并能成为煤层气理论和实践双全的文献。

中国科学院院士



2004 年 8 月 1 日

前 言

为了推进煤层气的产业化进程,2002 年科技部 973 计划设立了“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”(编号:2002CB211700)项目。“煤层气藏高分辨率探测的地球物理响应”是该项目下属的一个课题,其研究内容是中国煤层气经济资源潜力及预测研究的重要组成部分,由中国矿业大学(北京)承担。

有关地球物理在煤层气方面的应用研究,课题立项之初,国内外文献报道寥寥无几,最为典型的实例来自于美国新墨西哥州圣胡安盆地锡达山煤层气田。但由于美国煤层气田在地质背景和煤层赋存状况等方面与我国存在很大差异,因此在我国进行煤层气藏高分辨率探测的地球物理方法研究,是一项既有探索性又有挑战性的工作。

由于含煤地层各向异性强,传统地质方法很难对煤层气富集区块进行有效预测;煤层气作为吸附气体,不能借用常规天然气探测理论与技术,因此,必须根据中国煤地质特征,建立起适合我国煤层气富集区探测的地球物理识别和预测方法。

针对这一研究目标,选择淮南煤田为研究靶区,通过研究已有的地质、钻井、测井和巷道等资料,基于数学统计、物理测试和数值模拟等方法,对煤层气地球物理测井响应、岩石物性响应、煤层多波裂隙响应和煤层 AVO 响应等方面展开研究,建立煤层气地球物理响应机理,在此基础上,针对实际地球物理资料,通过基础理论和方法研究,实现实际资料的采集、处理、解释和反演,进而实现煤层气富集区预测。

通过多年研究,课题在煤层精细结构反演、煤层气转换波勘探方法与技术、煤层气 AVO 正演和反演研究方面取得了重大进展,初步建立起了利用地球物理方法预测煤层气富集区块的基础理论、方法和技术。

本书的主要内容包括:①煤及岩石的地球物理响应。研究了不同煤体结构的测井响应、含煤岩系岩石的弹性参数响应特征、煤层的多波地震响应和煤层振幅随偏移距变化(AVO)的地震响应,为深入开展煤层气地球物理研究奠定了基础。②煤层厚度及其顶底板岩性的精确描述。基于测井约束反演方法,建立了煤层结构及其顶底板岩性的精细描述方法,反演出煤层精细结构,可对煤层厚度分布及其顶底板岩性进行预测。③煤层气转换波勘探方法与技术。建立了煤层气三维三分量地震勘探的基础理论和方法,开展了转换波地震资料处理,实现了对煤层裂隙的反演。④煤层气储层 AVO 正演和反演方法。阐述了 AVO 技术探测煤层气的原理,推导出基于各向异性的薄煤层 AVO 公式,研究了煤层气富集区的 AVO 响应特征,提出利用煤层 AVO 异常研究煤层气富集区的依据,开发出直接获得介质弹性密度、体积模量和剪切模量三参数的 AVO 反演方法,并在实际中得到应用。⑤瓦斯突出区地质与地球物理预测。研究了瓦斯含量预测的数学地质模型、瓦斯涌出量预测的数学地质模型、煤与瓦斯突出区域预测的数学地质模型以及构造复杂程度定量评定与瓦斯突出预测,实现了瓦斯突出区地质与地球物理综合预测。

本书前言由彭苏萍、杜文凤编写；第一章由彭苏萍、张慎河和高云峰编写；第二章由彭苏萍、杜文凤、杨瑞召和孔炜编写；第三章由彭苏萍、勾精为、苑春方、李国发、何兵寿和杜文凤编写；第四章由彭苏萍、勾精为、苑春方、高云峰、陈信平和邓小娟编写；第五章由彭苏萍、张许良和杜文凤编写，全书最终由彭苏萍、杜文凤统稿。

目 录

序一	贾承造 (i)
序二	戴金星 (iii)
前言	(v)
第一章 煤及岩石的地球物理响应	1
第一节 煤体结构的测井响应	1
一、构造煤的测井响应	1
二、不同突出危险程度煤体的测井响应	2
第二节 岩石的弹性参数响应	3
一、岩石声波速度响应特征	3
二、岩石的弹性力学参数特征	13
第三节 煤层及含裂隙煤层的多波地震响应	18
一、煤层的多波地震响应	18
二、含裂隙煤层的多波地震响应	21
第四节 煤层振幅随偏移距变化(AVO)的地震响应	26
一、煤体结构和顶底板岩性对 AVO 响应特征的影响	27
二、煤层厚度对 AVO 响应特征的影响	28
三、瓦斯突出煤层的 AVO 响应特征	30
第二章 煤层及其顶底板岩性的精细描述	33
第一节 测井约束反演预测煤层厚度、煤层结构及其顶底板岩性	33
一、测井约束地震反演	33
二、反演实例	35
三、煤层结构、煤层厚度及其顶底板岩性预测	39
第二节 地震属性反演预测煤层厚度、顶板岩性及煤层含气性	42
一、地震多属性定量分析	42
二、煤层厚度、顶板岩性和含气性预测	49
第三节 基于地震波形分类技术预测煤层含气性	52
一、地震波形分类技术的原理	53
二、利用地震波形分类技术预测煤层含气性实例	54
第三章 煤层气转换波勘探方法与技术	57
第一节 转换波地震资料面波压制技术	57
一、方法原理	58
二、应用效果	61
第二节 转换波地震资料规则干扰压制方法	62
一、减去法去噪技术的基本原理	62

二、实现与应用	64
第三节 P-SV 转换波转换点位置的解析解	68
一、水平反射界面上 P-SV 转换波转换点坐标的精确解	68
二、用于叠前偏移水平反射界面上 P-SV 转换波转换点坐标的精确解	74
三、倾斜界面条件下 P-SV 转换波转换点位置的解析解	80
第四节 转换波地震资料静校正技术	80
一、转换波静校正问题的特殊性	80
二、转换波静校正的基本原理	82
三、转换波静校正应用效果	84
第五节 转换波速度分析	86
一、共转换点速度分析	86
二、多层介质理论的转换波速度分析、动校正与叠加	89
第六节 基于模型的速度分析	96
一、基于模型的转换波速度分析	96
二、基于模型的无畸变动校正技术	97
三、基于模型的转换波三参量速度分析	98
第七节 转换波裂隙反演技术	100
一、利用转换波探测煤层裂隙的总体思路	100
二、利用多波地震资料求取地下裂隙主方位	101
第八节 含煤地层转换波叠后横波波阻抗反演	109
一、转换波和横波反射系数之间的关系	109
二、转换波叠后横波波阻抗反演的实现方法	112
第九节 纵波和转换波联合解释	115
一、大套煤系地层的速度比解释	115
二、煤层的速度比解释	117
三、快慢波时差和各向异性分析	119
四、振幅比解释	119
五、地震地质资料综合预测	122
第四章 煤层气 AVO 探测技术	124
第一节 AVO 技术探测煤层气的原理	124
一、使用 AVO 探测煤层气的依据	124
二、与 AVO 探测天然气技术的比较	125
三、不利因素和有利因素分析	126
第二节 基于各向异性的薄煤层 AVO 正演方法	126
一、两层 EDA 介质 AVO 公式	128
二、三层介质 AVO 公式	130
三、计算实例	132
第三节 常规地震 AVO 反演	138
一、AVO 反演基本原理	138

二、实现方法和步骤	139
三、应用实例	141
第四节 三参数 AVO 反演	145
一、三参数 AVO 反演方法	145
二、煤层气富集部位 AVO 响应特征	147
三、AVO 分析方法预测安徽顾桥矿区煤层气富集区	149
第五章 瓦斯突出区地质与地球物理综合预测	154
第一节 瓦斯含量预测的数学地质模型研究	154
一、建模工具	154
二、预测原理	155
三、瓦斯含量的测试、计算与校正	155
四、影响瓦斯含量的地质条件及其变量取值	156
五、瓦斯含量预测数学地质模型的建立	157
六、潘三矿 13-1 煤层瓦斯含量预测	160
第二节 瓦斯涌出量预测的数学地质模型研究	160
一、瓦斯涌出量预测数学地质模型的建立	160
二、潘三矿 13-1 煤层瓦斯涌出量预测	162
第三节 煤与瓦斯突出区域预测的数学地质模型研究	162
一、建模工具	162
二、变量取值	164
三、煤与瓦斯突出区域预测数学地质模型的建立	164
四、潘三矿 13-1 煤层瓦斯突出区域预测	165
第四节 构造复杂程度定量评定及预测瓦斯突出研究	167
一、构造复杂程度定量评定	167
二、潘三矿东翼下山采区地质构造的三维地震探测	168
三、构造复杂程度系数的计算	168
第五节 煤与瓦斯突出综合预测	170
一、潘三矿东四下山采区煤与瓦斯突出预测	170
二、谢桥矿西一采区煤与瓦斯突出预测	178
参考文献	184

第一章 煤及岩石的地球物理响应

第一节 煤体结构的测井响应

一、构造煤的测井响应

煤田地质勘探期间要进行大量的测井工作,主要有视电阻率测井、自然电位测井、自然伽马测井、伽马伽马测井、井径测井和声波时差测井等,为未采区煤体结构的划分提供依据。为了正确划分煤体结构,本研究收集了淮南煤田潘三矿 144 个钻孔的测井资料,并根据测井原理、构造煤的物理力学性质以及实际对比结果,研究了 13-1 煤层构造煤的测井特征。

视电阻率测井: 13-1 煤的电阻率为 $27 \sim 250 \Omega \cdot \text{m}$, 煤层气的电阻率则为 $10^4 \sim 10^9 \Omega \cdot \text{m}$, 随着煤体破坏程度的增高, 煤的孔隙率增大, 透气性减小, 吸附并保存了更多的煤层气, 电阻率相应增大, 因而, 含煤层气构造煤比原生结构煤具有更高的视电阻率。然而, 当钻孔处于煤层浅部, 煤层气含量较低时, 高孔隙度的破坏煤体中就可能含有较多的水分, 电阻率相应减小, 其视电阻率也降低。构造煤的视电阻率曲线多呈锯齿状, 顶部多平缓; 原生结构煤的视电阻率曲线则多呈尖棱状、舌状。

伽马伽马测井: 伽马伽马测井又称为密度测井, 伽马伽马射线强度与岩层的密度成反比。随着煤体破坏程度的增高, 煤的密度减小, 吸收的伽马射线减少, 散射的伽马射线增多, 伽马伽马射线强度就增大。因此, 构造煤比原生结构煤具有更大的伽马伽马值。由于构造煤分布的不均匀性, 在曲线形态上则变化较大, 多呈锯齿状。伽马伽马曲线是反映构造煤最好的一种测井曲线。

自然伽马测井: 构造煤的孔隙和裂隙均较发育, 单位体积内放射性物质的含量减小, 所以在自然伽马曲线上表现为低异常。由于构造煤分布的不均匀性, 在曲线形态上多呈锯齿状变化。

自然电位测井: 随着煤体破坏程度的增大, 煤的成熟度增高, 氧化反应增强, 所带的正电荷增多, 其自然电位也显示出明显的正异常。因而, 构造煤比原生结构煤具有更高的自然电位。

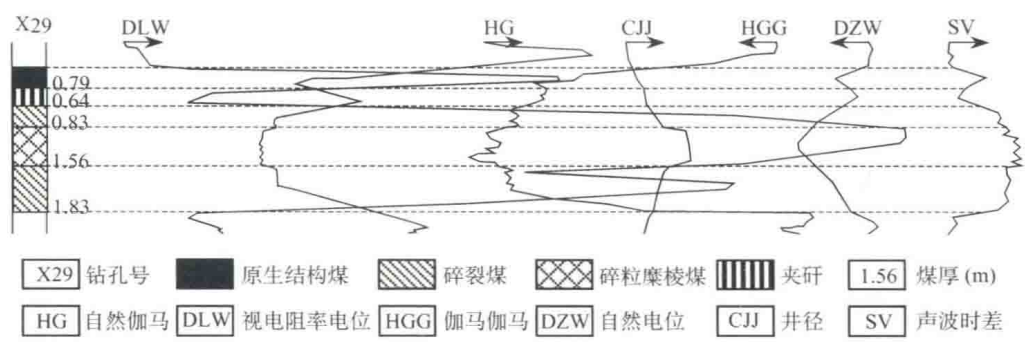
井径测井: 构造煤强度较低, 结构疏松, 容易坍塌, 其井径也会因扩孔而增大。

声波时差测井: 13-1 煤层的声波时差为 $350 \sim 560 \mu\text{s}/\text{m}$, 煤层气的声波时差则为 $2260 \mu\text{s}/\text{m}$, 随着煤体破坏程度的增加, 煤的强度降低, 煤层气含量增大, 声速降低, 其声波时差增高。

根据煤体宏观结构特征, 以构造煤的类型为基础, 以瓦斯突出的难易程度为依据, 本着实用和易于鉴别的原则, 可以把煤分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤。根据地质构造的发育特征和煤体的破坏规律, 可以从宏观上确定构造煤的分布区带; 根据煤体力

学参数的测试,可以确定煤体结构类型;根据构造煤的划分原则,可以从井下掘进巷道和回采工作面的煤壁上准确划分煤体结构,并确定各煤分层的厚度;根据地面钻孔的测井曲线特征和岩心描述,可以定量划分各钻孔的煤体结构,把地质规律、参数测试、井下观测和测井曲线等多种方法综合起来,并相互对比和验证,可以准确划分煤体结构,并确定构造煤的分布区带,这种划分煤体结构的技术可称为地质测井技术。

采用地质测井法划分 X29 钻孔的煤体结构如图 1.1 所示,X29 钻孔位于安徽淮南潘三矿叶集背斜南翼,此地带构造煤普遍发育,主要分布于煤层的中下部,在测井曲线上表现为高的视电阻率、高的伽马伽马、低的自然伽马、正异常的自然电位、大的井径和高的声波时差。



二、不同突出危险程度煤体的测井响应

对研究区常规测井曲线和 VSP 测井进行统计与综合研究,得到了不同突出危险程度煤体的测井响应特征(如表 1.1 所示)。不同突出危险程度的煤体测井响应具有明显的差异性,测井响应的差异可以作为划分突出煤体结构和预测瓦斯突出的依据。

表 1.1 不同突出危险程度煤体的测井响应参数

物性响应参数	非突出煤体	过渡煤体	突出煤体	严重突出煤体
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	>1.65	$1.55\sim1.65$	$1.45\sim1.55$	<1.45
孔隙度 $nv/\%$	<1.5	$1.5\sim3.5$	$3.5\sim5.5$	>5.5
挥发分 $V_{daf}/\%$	>36	$32\sim36$	$28\sim32$	<28
弹性模量 E_{50}/GPa	>4	$3\sim4$	$2\sim3$	<2
泊松比 μ	<0.2	$0.2\sim0.3$	$0.3\sim0.4$	>0.4
抗拉强度 R_t/MPa	>0.45	$0.35\sim0.45$	$0.25\sim0.35$	<0.25
抗压强度 R_c/MPa	>12	$8\sim12$	$4\sim8$	<4
纵波速度 $v_p/(\text{m}/\text{s})$	>2050	$1850\sim2050$	$1650\sim1850$	<1650
视电阻率 $DLW/(\Omega \cdot \text{m})$	<100	$100\sim150$	$150\sim200$	>200
伽马伽马 $HGG/(\gamma/\text{mc})$	<490	$490\sim580$	$580\sim670$	>670
自然伽马 HG/γ	>14	$10\sim14$	$6\sim10$	<6
声波时差 $SV/(\mu\text{s}/\text{m})$	<400	$400\sim450$	$450\sim500$	>500

突出煤体一般都遭到了不同程度的破坏,因此比非突出煤体具有更小的强度和密度。在物性响应参数上主要表现为小的弹性模量、抗拉强度、抗压强度、密度和大的泊松比。

随着煤体突出危险程度的增高,其孔隙度提高,在测井响应参数上,主要表现为大的孔隙度和小的挥发分。

构造煤与原生煤的密度和纵波速度也有较大差异。同一煤层中的构造煤弹性参数明显低于原生煤,构造煤的密度降低幅度为 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%。这些变化反映了构造煤和原生煤结构特征的差异,也为利用地震勘探技术预测煤体结构提供了研究基础。

第二节 岩石的弹性参数响应

近年来,煤田地震勘探工作取得了较大进展,高分辨率三维地震勘探已经得到了广泛应用,多波多分量勘探技术也取得了初步成果。在利用地震勘探技术进行精细构造解释的同时,本研究开始使用 AVO、地震反演、地震属性分析、地震波形分类等技术和方法,从地震资料中提取煤层的厚度、结构、裂隙、煤层气富集等信息,使煤田地震勘探由构造勘探向岩性勘探方向发展。为了满足 AVO 等技术和方法的需求,需要深入研究煤系地层的弹性特征,如纵波速度、横波速度、密度和各种弹性模量参数等。

岩石弹性特征的实验室测定、测井资料、VSP 测井以及常规地震勘探方法等,都是获取地层(或岩石)弹性特征的重要途径。每一种方法都有独特的作用和优点,例如,实验室测定可以提供气饱和状态下岩石样品的弹性参数,测井资料具有深度方向高密度取样和在真实地下状态测量的优点等。然而,由于测试的对象、原理、方法和环境的不同以及被测试物理信号频率的不同,各种测量结果之间存在差异,在地震勘探应用研究中,通常需要采用多种资料互相验证和标定。

一、岩石声波速度响应特征

(一) 实验条件和原理

1. 实验条件

实验采用美国生产的 AUTOLAB-1000 多功能岩石超声波参数自动测量系统,该仪器能够模拟地层温度和压力,自动测量岩石双轴向的纵、横波速度和力学应变,可以确定岩石动、静态弹性参数和压缩系数,用于研究压力和温度变化对岩石动、静态弹性参数的影响,以及岩石孔隙体积变化与渗透率变化的关系等。实验所用容器最大安全耐压 104MPa,最高温度为 125℃,可施加最大孔隙压力 70MPa,中心频率:纵波 700kHz,横波 200kHz,测试岩石试件的尺寸规格为:岩心直径 25mm 和 38mm,岩心长度 25~54mm,测量精度 3.3%。

为满足岩心超声波测试边界条件,根据国际岩石力学学会实验室和现场实验标准化委员会(ISRM 标准)规定及实验室测量仪器条件,选取具有代表性的岩心加工成 $\Phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的圆柱体,磨光两端面,使其相互平行并垂直圆柱体的轴线。

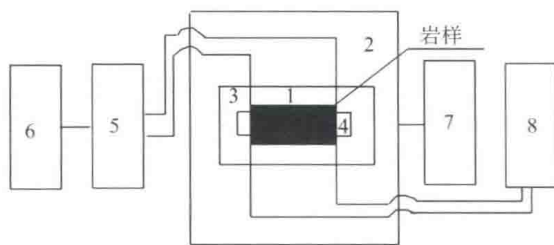


图 1.2 声波速度试验装置简图

1. 岩样; 2. 仪器外壳; 3. 压力容器; 4. 超声波换能器(控温计); 5. 超声波发射仪; 6. 计算机; 7. 压力源; 8. 温度压力控制器

2. 实验原理

声波速度实验测量系统,如图 1.2 所示。实验室测量岩石弹性波速的重要方法为脉冲透射法,其基本原理是在一定温度和压力条件下,测量超声波穿过实验样品所用时间,以实验样品长度除以时间得到超声波通过实验样品的弹性波速度。

$$v_p = \frac{L}{t_p} \quad v_s = \frac{L}{t_s} \quad (1.1)$$

式中, v_p, v_s 分别表示岩石的纵波速度、横波速度; L 为岩石样品长度; t_p, t_s 分别表示纵波、横波穿过岩样经历的时间。

(二) 岩石声波特性实验结果及分析

1. 煤、岩石声波速度特征

实验对不同深度处的同类岩样在温度 40℃、围压 20MPa 条件下进行岩石超声波测试,将不同岩性超声波速度进行统计,汇总结果见表 1.2。

表 1.2 岩石超声波测试结果表

岩性	标记	深度 /m	围压 /MPa	温度/℃	纵波速度 /(m/s)	横波速度 1 /(m/s)	横波速度 2 /(m/s)
粗砂岩	f8-1	787.4	20	40.2~40.9	3839~4541	2484~2911	2424~2820
	f5-1	809					
	w10-1	737.4					
中细砂岩	f24-4	664.1	20	39~40.9	4738~5309	2747~3272	2864~3269
	f13-2v	747.6					
	f13-1	747.6					
	f3-1	832.6					
中砂岩	w11-1v	732.5	20	40.3~40.9	4760~5129	2890~3343	2862~3323
	f4-2	831					
	f6-5h	804.3					
	w2-1	793					
粉细砂岩	f21-3v	696.8	20	40.7~40.9	3950~4330	2480~2684	2464~2636
	f21-7h	696.8					
泥质粉砂岩	f11-2h	775	20	40.4~40.9	3560~5373	2224~3263	2195~3200
	w9-2	740					
	w4v	772.5					
泥岩	f12-1v	753.6	20	40.6~40.9	4086~4790	2560~2944	2556~2966

对表中数据采用堆积柱状图分析(图 1.3),得出气饱和岩石超声波速度特征如下:

(1) 不同岩性波速差别比较大,在实验温度压力条件下,粗砂岩纵波速度 v_p 变化区间一般在 3839~4541m/s,而中砂岩纵波速度 v_p 变化区间一般在 4760~5129m/s;中细砂岩纵波速度 v_p 变化区间在 4738~5309m/s,而泥岩纵波速度 v_p 变化区间则在 4086~4790m/s,速度相差达 1000m/s。

(2) 不同岩性之间波速值存在较大范围交叉:中砂岩纵波速度 v_p 变化区间一般在 4760~5129m/s,中细砂岩纵波速度 v_p 变化区间一般在 4738~5309m/s,中砂岩纵、横波速度与中细砂岩纵、横波速度在较大范围内交叉,泥岩纵、横波速度变化区间与粗砂岩纵、横波速度相类似,这说明不同类型岩石纵、横波速度在不同条件下也可能相同。

(3) 从表 1.2 中实验数据可以看出,煤系地层不同岩性超声波速度的一般特征为:砂岩的纵、横波速度一般要高于泥岩的纵、横波速度,砂岩中中砂岩、中细砂岩的纵、横波速度相对较高,粗砂岩和粉细砂岩的纵、横波速度相对较低,泥质粉砂岩纵、横波速度变化范围比较大,介于砂岩和泥岩的纵、横波速度之间。

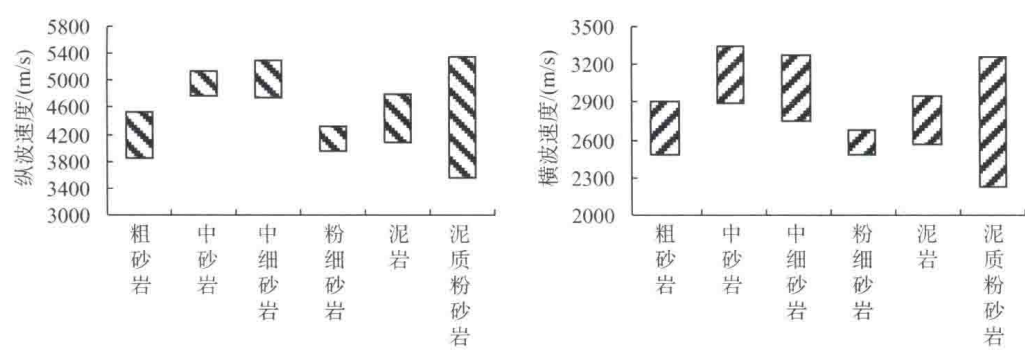


图 1.3 不同岩性超声波速度特征

2. 沉积岩石声波波形、波幅和频谱特征

波形分析一般指的是对波形在时间域和幅值域里进行分析,而频谱分析(也称频率分析)是对动态信号在频率域内进行分析,分析的结果是以频率为坐标的各种物理量的谱线和曲线,可得到各种幅值以频率为变量的频谱函数 $F(\omega)$ 。频谱分析可求得幅值谱、相位谱、功率谱和各种谱密度等。关于动态测试中数据处理分析内容广泛,涉及的问题很多,其中频谱分析和波形分析是动态数据处理中最重要和最基本的方法。

一为了研究沉积岩石波形及其频谱特征,对实验采集的超声波数据进行波形和频谱分析,截取起止时间在 20~40 μ s 范围,作出不同岩性岩石超声波波形图和功率谱图(图 1.4~图 1.9)。

从不同岩性波形图可以看出,除了粗砂岩波形呈现出不规则的正弦曲线外,中砂岩、中细砂岩等波形比较规则,首波起跳明显,呈纺锤形对称于时间轴,从不同岩性波幅(表 1.3)也可以看出,由于岩性不同,其波幅值存在差异,表现为中砂岩、细砂岩和粉砂岩波幅相对比较大;而粗砂岩、泥质粉砂岩和泥岩波幅值相对比较小。从不同岩性功率谱图(图 1.4~图 1.9)可以看出,中砂岩和中细砂岩主频比较明显,而粗砂岩、泥质粉砂岩等主频并不明显。