

中国矿业大学图书馆藏书



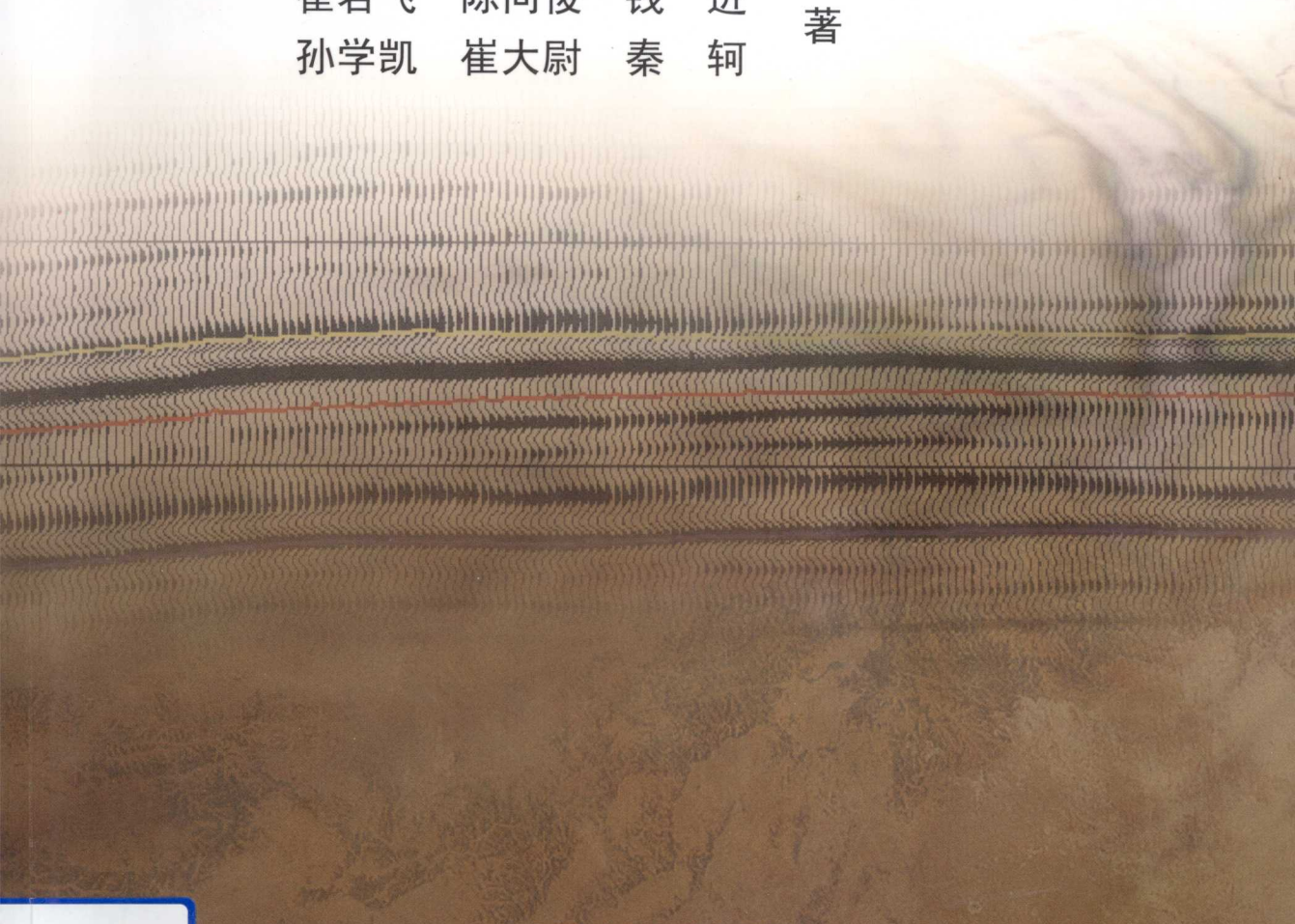
C01740760

国家自然科学基金项目（40874054）资助

# 煤层气(瓦斯)

## 地震勘探方法

崔若飞 陈同俊 钱进 著  
孙学凯 崔大尉 秦轲



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

3.110.8  
-677

P618.110.8  
C-677

基金项目(40874054)资助

# 煤层气(瓦斯)地震勘探方法

崔若飞 陈同俊 钱进 著  
孙学凯 崔大尉 秦轲



中国矿业大学图书馆藏书



C01740760

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书阐明了煤层气(瓦斯)地震勘探的目标、任务和特点,提出了利用“两个理论、四项技术”来指导煤层气(瓦斯)地震勘探工作,系统地讨论了煤层气(瓦斯)地震勘探的基本原理和应用技术。本书主要内容包括:双相介质中弹性波传播理论、各向异性介质中弹性波传播理论、地震属性技术、AVO技术、叠前反演技术和方位各向异性技术。

本书可供应用地球物理、煤田地质、采矿、安全等专业技术人员参考,也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

煤层气(瓦斯)地震勘探方法 / 崔若飞等著. — 徐州:  
中国矿业大学出版社, 2012. 5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1369 - 3

I. ①煤… II. ①崔… III. ①煤层—地下气化煤气—  
地震勘探②瓦斯煤层—地震勘探 IV. ①P618.110.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 273906 号

书 名 煤层气(瓦斯)地震勘探方法  
著 者 崔若飞 陈同俊 钱 进 孙学凯 崔大尉 秦 轲  
责任编辑 孟 茜 耿东锋  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: [cumtpvip@cumtp.com](mailto:cumtpvip@cumtp.com)  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 9 字数 222千字  
版次印次 2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷  
定 价 24.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

全书共分七章,系统地论述了指导煤层气(瓦斯)地震勘探工作的两个基本理论,详尽地讨论了指导煤层气(瓦斯)地震勘探工作的四项应用技术,包括基本原理、应用条件和应用范围。第一章为绪论;第二章为各向异性介质中弹性波传播理论;第三章为双相介质中弹性波传播理论;第四章简述了地震属性技术;第五章讨论了煤层 AVO 技术;第六章简述了叠前反演技术;第七章介绍了方位各向异性技术。

全书由崔若飞、陈同俊、钱进、孙学凯、崔大尉和秦轲合作完成,其中第一章、第四章第一节到第四节、第七章第一节到第四节由崔若飞编写,第五章由陈同俊编写,第二章、第三章由钱进编写,第六章由孙学凯编写,第四章第五节和第六节由崔大尉编写,第七章第五节由秦轲编写。全书由崔若飞统稿。

本书中的主要内容为国家自然科学基金项目“煤层气地震勘探理论与方法研究”(项目编号 40874054)的研究成果。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏与不足之处,恳请读者批评指正。

著 者

2011 年 10 月

## 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 煤层气(瓦斯)地震勘探的意义 .....	1
1.2 煤层气(瓦斯)地震勘探的手段 .....	2
1.3 煤层气(瓦斯)地震勘探技术的特点 .....	3
1.4 煤层气(瓦斯)地震勘探的目标 .....	5
<b>2 各向异性介质中弹性波传播理论</b> .....	6
2.1 各向异性介质 .....	6
2.2 各向异性介质的类型 .....	7
2.3 各向异性介质弹性基本方程 .....	9
2.4 各向异性介质的弹性波波动方程 .....	11
2.5 各向异性介质弹性波方程数值模拟 .....	13
<b>3 双相介质中弹性波传播理论</b> .....	16
3.1 煤储层双相介质 .....	16
3.2 双相介质弹性基本方程 .....	17
3.3 双相介质的弹性波波动方程 .....	21
3.4 双相各向异性介质弹性波方程数值模拟 .....	22
<b>4 地震属性技术</b> .....	25
4.1 地震属性的概念与分类 .....	25
4.2 同相轴属性 .....	26
4.3 数据体属性 .....	32
4.4 地震相分析 .....	37
4.5 瓦斯富集带的地震响应 .....	39
4.6 应用实例 .....	43
<b>5 煤层 P 波 AVO 技术</b> .....	57
5.1 P 波在均匀半空间分界面上的反射和透射 .....	57
5.2 P 波反射系数的近似方程 .....	59
5.3 反射系数近似方程在煤层中的精度 .....	60
5.4 煤层反射 P 波 AVO 近似方程 .....	64

5.5	薄煤层的调协效应及反射 P 波 AVO .....	66
5.6	煤层反射 P 波交会图分析 .....	69
5.7	煤层 P 波反射系数与 $\sin^2\theta$ 间的关系 .....	71
<b>6</b>	<b>叠前反演技术</b> .....	<b>75</b>
6.1	弹性波阻抗理论 .....	75
6.2	基于模型法反演 .....	77
6.3	同步反演 .....	82
6.4	弹性波阻抗应用实例 .....	86
6.5	同步反演应用实例 .....	96
<b>7</b>	<b>方位各向异性技术</b> .....	<b>105</b>
7.1	方位各向异性的地震模拟 .....	105
7.2	方位各向异性技术 .....	108
7.3	数值计算方法 .....	110
7.4	裂隙发育带预测 .....	115
7.5	应用实例 .....	117
	<b>参考文献</b> .....	<b>132</b>

# 1 绪 论

## 1.1 煤层气(瓦斯)地震勘探的意义

煤层气(瓦斯)是由煤化作用形成的赋存在煤层中的以甲烷为主的混合气体。我国是一个能源消费大国,加速煤层气的勘探与开发具有重要意义。

首先,煤层气作为一种新型洁净能源,其开发利用可弥补我国常规能源的不足。我国是煤层气资源大国,居世界第二位。近年来,对煤层气的成因、储层特性、赋存状态、成藏理论进行系统研究,取得了一大批成果。但是,相应的勘探与开发技术相对滞后。如今,地质学家和地球物理学家已经把研究重点放在勘探与开发技术领域。

其次,瓦斯突出问题是长期以来困扰煤矿安全生产的一个灾害性问题。瓦斯突出是指随着煤矿开采深度的增加、瓦斯含量的增加,在煤层中形成了在地应力作用下,瓦斯释放的引力作用下,使软弱煤层突破抵抗线,瞬间释放大量瓦斯和煤而造成的一种地质灾害。瓦斯突出与煤层结构受强构造挤压、剪切形成构造煤的发育程度密切相关。构造煤是指煤层中分布的软弱分层,是煤层在构造应力作用下发生破碎或强烈变形的产物。国内外大量观测研究表明,所有发生煤与瓦斯突出的煤层都发育有一定厚度的构造煤。因此,构造煤是典型的瓦斯地质体。

据国家安全生产监督管理总局统计,在一次死亡 10 人以上的特大煤矿事故中,瓦斯事故起数占 69%。事实上瓦斯已成为我国煤矿安全生产的“第一杀手”。造成这种局面的原因是多方面的,既有管理上的原因,也有技术上的原因,但是更多的应该是技术上的原因造成的。其关键在于,在对煤矿进行开采前和开采过程中,对地下构造煤、瓦斯富集带的分布情况一无所知。这样就使煤矿在生产和开采过程中,无法根据瓦斯分布情况制定有针对性的措施。

因此,只有依靠科技进步,采用新技术、新方法,才能为煤矿查明构造煤的分布、煤层瓦斯富集区域,这是当前煤矿生产中亟待解决的重要课题。

最后,利用煤层气可以有效保护生态环境。甲烷对红外线的吸收能力是二氧化碳的 25~30 倍,是造成温室效应的元凶之一。大气中甲烷浓度每增加  $10^{-6}$ ,地球表面温度增加  $1^{\circ}\text{C}$ 。煤矿开采过程中的甲烷排放量占全球甲烷总排放量的一半,可见,煤层气的开发利用可以有效降低温室效应。

总之,煤层气(瓦斯)的勘探、开发与利用可以改善我国能源结构,促进煤矿安全生产,有效保护生态环境,是一举多得利国利民的大事。

## 1.2 煤层气(瓦斯)地震勘探的手段

如今,三维地震勘探技术已经成为煤矿生产中必不可少的手段,在很大程度上替代了传统的地质勘探方法。

地震勘探的对象是具有各种立体形态的复杂地质体,了解这些地质体的构造形态应当进行三维的探测工作。

三维地震方法的主要优点是:

(1) 野外数据采集方法能适应各种地表条件,大大增加了地下界面的采样点密度,使地震波具有更高的纵横分辨率;

(2) 三维偏移是在空间中进行的,各点按照真倾角方向归位到界面反射点位置上,三维偏移剖面正确地反映了地下的构造形态,有利于研究复杂构造;

(3) 所取资料完整齐全,包含了地震波的各种信息,这样就能利用地震波动力学特征来研究复杂构造、细微构造和岩性;

(4) 利用人机交互解释系统对三维地震资料进行自动解释,同时具有灵活的方位显示,可以显示地下的立体图像,有利于研究空间的构造形态。

现行的煤田地震勘探技术主要是利用反射波的运动学特征来解决构造问题,而煤层气(瓦斯)地震勘探属于岩性地震勘探的范畴。在影响瓦斯突出的五个主要地质因素中,利用地震资料和其他地质资料可以查明落差大于 5 m 的断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾角和露头位置。但是,不能对构造煤的分布(煤层和围岩的透气性)和煤层厚度做出评价,即无法确定构造煤的分布与厚度的性质。

瓦斯作为气体,如果要在煤层中储存和运移,那么煤层及其顶底板中就必须要有相互连通的裂隙裂缝。裂隙裂缝的存在是瓦斯存在的必要条件,也是搞清构造煤发育区、煤层瓦斯富集带的关键。因此,对于煤矿开采而言,研究煤层及其顶底板裂隙裂缝的分布和连通情况极其重要。瓦斯突出及爆炸的罪魁祸首就是煤层及其顶底板中的裂隙裂缝。由于裂隙裂缝是瓦斯富集、存储、运移的场所,因此查明采区内断层的分布、裂隙裂缝的分布、煤层厚度的变化,便能够对构造煤的分布(煤层和围岩的透气性)和厚度做出正确评价。于是,煤层气(瓦斯)地震勘探的核心是查明采区内的地质构造(特别是断层的分布)、煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(构造煤的分布)、煤层厚度的变化。

早在 20 世纪 90 年代,利用地震资料研究裂隙裂缝发育的方向和密度便受到地球物理学家的高度重视。主要原因是碳酸盐岩是一个有利的高产油气层,世界上约有 60% 的油气来自碳酸盐岩储层,而碳酸盐岩储层与裂隙裂缝的关系极为密切。大量的研究工作和观测数据表明,含裂隙裂缝介质的性质可以用双相介质理论和各向异性介质理论进行解释。因此,国内外学者把重点放在利用地震资料研究双相介质的各向异性和检测裂隙裂缝方面,其主要方法有如下三类。

### 1.2.1 多波多分量裂隙裂缝检测技术

理论上,含有裂缝的介质是各向异性介质,地震多波多分量是研究各向异性介质中波传播规律的理想方法。但是,由于多波多分量地震采集的高成本和转换波处理、解释的复杂



化,使得这种技术的推广应用受到极大限制。

### 1.2.2 S波裂隙裂缝检测技术

S波分裂是地下各向异性存在的最好证据,利用S波分裂检测裂隙裂缝已经成为研究裂缝性储层的一种可靠技术手段。但是,S波地震采集的成本高,而且难以得到高质量的S波数据,这就限制了S波方法的应用。

### 1.2.3 P波裂隙裂缝检测技术

由于P波地震勘探成本低,从20世纪90年代起,地球物理学家把目光转向P波勘探,用P波代替S波/转换波检测裂隙裂缝已成为一个重要研究课题。

煤田地震勘探的情况也是如此,1993年P波三维地震勘探技术开始得到应用,1998年三维三分量地震勘探技术引入煤田,并陆续在10余个煤矿进行试验工作,希望综合利用P波和转换波解决煤矿生产中的开采技术条件问题。但是,事与愿违,时至今日没有取得突破性成果。现在,回过头来分析煤田转换波地震勘探的得失时,不能忽略煤层埋藏浅、P波的信噪比高和分辨率高这一鲜明特点,而转换波的信噪比较P波相差1~2个数量级。因此,煤层气(瓦斯)地震勘探应该以三维P波地震技术为主,同时配合其他地质手段。

## 1.3 煤层气(瓦斯)地震勘探技术的特点

利用国内外油气勘探的成功经验并结合煤层气(瓦斯)地震勘探的特点,提出利用“两个理论、四项技术”来指导煤层气(瓦斯)地震勘探。两个理论是双相介质理论和各向异性介质理论,四项技术是地震属性技术、煤层AVO技术、弹性波阻抗反演技术和方位各向异性技术。

### 1.3.1 双相介质理论

双相介质理论认为地下介质是由固体骨架和充填在骨架空隙中的流体(气体和液体)组成的。煤层与煤层瓦斯是一种典型的固相+流相双相介质。

煤田地震勘探的基本理论和方法是建立在单相(固相)介质基础上的,已经不能完全解决煤层气(瓦斯)地震勘探中的弹性波传播问题。与单相介质理论相比,双相介质理论更接近于实际。因此,研究双相介质中弹性波的传播规律,对于指导煤层气地震勘探有着重要的意义。

煤储层是典型的双相介质,与单相介质相比,地震波在双相介质中传播后,各个频率成分的能量分布发生了变化,主要表现为地震波能量向低频方向移动。产生这一现象的主要原因是:双相介质中固体颗粒与空隙中流体(气体)的相互作用产生了慢纵波,慢纵波的存在使得双相介质中波的能量分配发生了变化,即地震波场的动力学特征发生了变化。这种地震波场动力学特征的变化为预测瓦斯富集带提供了理论基础。

### 1.3.2 各向异性介质理论

各向异性现象在地球介质中是普遍存在的。广义上讲,当介质的物理性质在同一点随

方向发生变化时,则认为介质是各向异性介质。弹性波在各向异性介质中的传播与在各向同性介质中的传播具有不同的规律,它们满足不同的传播方程,具有不同的波形、相速度、群速度、极化方向特征。在地震勘探中,各向异性是指在地震波长的尺度下介质弹性特征随方向发生变化。

在各向异性介质中,P波速度随入射角与地层裂隙方位角变化而变化,界面上的反射系数与入射角、地层裂隙方位及各向异性有关,即地震属性(如速度、振幅)随波传播方向的变化而变化。而在各向同性介质中,则不具有这一特点。因此,通过研究P波方位地震属性特征,可以研究地层的各向异性系数及裂隙发育密度。

煤与瓦斯突出与地质因素密切相关,大多数瓦斯突出都发生在地质构造破坏带。裂隙裂缝的存在是瓦斯存在的必要条件,也是搞清构造煤发育区和煤层瓦斯富集带的关键。裂隙裂缝介质的性质可以用各向异性介质理论进行解释,而传统的煤田地震勘探理论与方法只研究各向同性介质。

大量的研究工作和观测数据表明,含裂隙裂缝介质的性质可以用双相介质理论和各向异性介质理论进行解释。

### 1.3.3 地震属性技术

地震属性指的是由叠前或叠后的地震数据,经过数学变换而导出的有关地震波的几何形态、运动学特征、动力学特征和统计学特征。地震属性技术是指提取、显示、分析和评价地震属性的技术,在煤层气地震勘探中包括地震属性的提取、地震属性的分析,以及利用地震属性区分构造、岩性并进行目的层预测。

### 1.3.4 煤层 AVO 技术

AVO(Amplitude Versus Offset)技术是利用反射系数随入射角变化而变化的原理,在叠前道集上分析振幅随炮检距变化的规律,估求岩石的弹性参数、研究岩性、检测油气的重要技术。该技术自20世纪80年代提出以来,在油气勘探中不断发展,并得到迅速推广和广泛应用。尤其是在天然气勘探中指导寻找天然气藏发挥了重要作用,在提高天然气勘探成功率方面收到了很好的效果。

煤层的顶底板是变化的,煤层层序的组合远比储层/盖层的组合要复杂。因此,要研究AVO技术在煤层气(瓦斯)地震勘探中的应用条件,包括利用数值模拟技术和实际资料验证。

### 1.3.5 弹性波阻抗反演技术

弹性波阻抗(EI)反演技术是一门新兴的反演技术,它使用部分角度叠加地震数据进行反演,并且比较全面地考虑了横波速度、入射角度等因素。通过弹性波阻抗反演可以求得不同入射角的弹性波阻抗值,相对于声波波阻抗,弹性波阻抗更有利于岩性分析。

### 1.3.6 方位各向异性技术

含裂隙裂缝介质的性质可以用各向异性介质理论进行解释,而传统的地震理论仅研究各向同性介质。方位各向异性技术研究不同方位角P波地震振幅、速度、波阻抗随入射角

变化关系(AVA、VAV、IPAV),利用AVA、VAV、IPAV方法定量计算裂缝属性。把上述观点进行延伸,研究多个地震属性随入射角变化的规律,利用地震属性参数随方位角变化的特征提取裂隙属性,从而确定裂隙带的空间分布,这种技术称为方位各向异性技术。

## 1.4 煤层气(瓦斯)地震勘探的目标

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。



图 1-15 震源子波和震源子波包络  
a) 震源子波 b) 震源子波包络

煤层气(瓦斯)地震勘探的目标是利用地震波运动学和动力学特征来研究煤岩层岩性,特别是查明煤层及顶板中裂隙裂缝发育的方向和密度(煤体结构破坏程度)、构造煤的分布和厚度。然后,对煤层和围岩的裂隙属性、断层及其他构造分布、煤层埋藏深度、煤层的倾向与露头位置等多源信息进行综合分析,最终查明与瓦斯突出相关的构造煤发育区和煤层瓦斯富集带,为煤层气开发和瓦斯治理提供地质依据。

## 2 各向异性介质中弹性波传播理论

### 2.1 各向异性介质

地震各向异性是岩性地震勘探的主要技术之一,利用地震各向异性预测煤层气富集区域也是当前的热点课题。本章着重介绍各向异性介质的弹性波传播理论,其中包括各向异性的基本概念、各向异性介质的类型、本构方程和波动方程等。

#### 2.1.1 各向异性介质概述

各向异性的现象在地球介质中是普遍存在的。介质的各向异性是指介质沿各个方向上的物理性质存在差异。例如,在介质中的同一点上,地震波速度沿各个方向的传播速度可以不同。

#### 2.1.2 地震各向异性

地球介质相当复杂,存在着各种不连续的间断面。当介质性质及行为在空间同一点处随方向的变化而变化,则认为是各向异性,客观表示为随观测方向的变化而变化。在地震勘探中,弹性各向异性是指在地震波长的尺度下介质弹性特征随方向发生变化。图 2-1 给出了各向同性介质与各向异性介质的地震波速度变化。

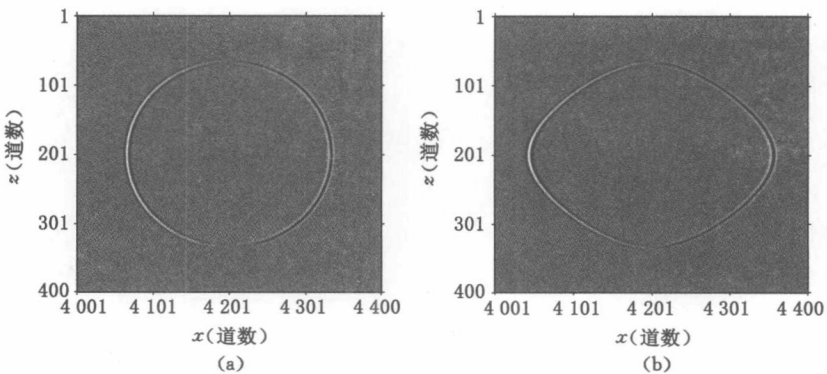


图 2-1 各向同性介质与各向异性介质的地震波速度变化  
(a) 各向同性介质; (b) 各向异性介质

一般地,引起地震各向异性的因素有:① 结构各向异性(如薄的层状结构);② 地层中方向应力导致的各向异性;③ 岩性各向异性(如颗粒的定向排列);④ 地层中岩石晶体定向

排列导致的各向异性；⑤ 岩石定向裂隙裂缝导致的各向异性。

## 2.2 各向异性介质的类型

不同的各向异性介质是通过其物性矩阵来描述的,根据各向异性介质的对称特征,可以将其分为八类(Crampin,1981)。

### 2.2.1 三斜对称各向异性介质

这是目前所能刻画的最复杂的一种介质模型。其物性矩阵中有 21 个独立的弹性参数,矩阵具体形式为

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

### 2.2.2 单斜对称各向异性介质

这种介质的物性矩阵中有 13 个独立的弹性参数,其矩阵具体形式为

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & c_{15} & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & c_{25} & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & c_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{46} & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

### 2.2.3 正交对称各向异性介质

这种介质的物性矩阵中有 12 个独立的弹性参数,其矩阵具体形式为

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & c_{15} & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & c_{25} & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & c_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

### 2.2.4 四方对称各向异性介质

这种介质有两种情况。第一种物性矩阵中有 7 个独立的弹性参数,其矩阵具体形式为

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & c_{16} \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & -c_{16} \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ c_{16} & -c_{16} & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

第二种物性矩阵中有 6 个独立的弹性参数,其矩阵具体形式为

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

### 2.2.5 三角对称各向异性介质

这种介质有两种情况。第一种物性矩阵中有 7 个独立的弹性参数,其矩阵具体形式为

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & -c_{25} & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & c_{25} & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & c_{25} \\ -c_{25} & c_{25} & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & 0.5(c_{11} - c_{12}) \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

第二种物性矩阵中有 6 个独立的弹性参数,其矩阵具体形式为

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & 0.5(c_{11} - c_{12}) \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

### 2.2.6 六方对称各向异性介质

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5(c_{11} - c_{12}) \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

### 2.2.7 立方对称各向异性介质

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

### 2.2.8 各向同性介质

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

其中,  $c_{12} = c_{11} - 2c_{44}$ 。

## 2.3 各向异性介质弹性基本方程

各向异性介质弹性基本方程主要包括介质的位移、应力和应变,三者之间关系体现为柯西方程、奈维尔方程和本构方程等。

### 2.3.1 位移、应力和应变

#### 2.3.1.1 位移矩阵

位移矢量的矩阵形式可以写成

$$\mathbf{u}_{3 \times 1} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T \quad \text{或} \quad \mathbf{u}_{3 \times 1} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T \quad (2-11)$$

其中,  $u_x, u_y, u_z$  分别是直角坐标下三个方向的位移分量,它们都是  $(x, y, z, t)$  的函数。在小应变线性位移情况下,  $\mathbf{u}_{3 \times 1}$  的增量变化可以用矢量全微分表示为

$$\begin{aligned} d\mathbf{u} &= du_x \mathbf{i} + du_y \mathbf{j} + du_z \mathbf{k} \\ &= (l_x u_x dx + l_y u_x dy + l_z u_x dz) \mathbf{i} + \\ &\quad (l_x u_y dx + l_y u_y dy + l_z u_y dz) \mathbf{j} + \\ &\quad (l_x u_z dx + l_y u_z dy + l_z u_z dz) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (2-12)$$

式中,  $l_x = \frac{\partial}{\partial x}, l_y = \frac{\partial}{\partial y}, l_z = \frac{\partial}{\partial z}$ 。其矩阵形式为

$$d\mathbf{u}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} du_x \\ du_y \\ du_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x u_x & l_y u_x & l_z u_x \\ l_x u_y & l_y u_y & l_z u_y \\ l_x u_z & l_y u_z & l_z u_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

式(2-13)称为位移增量方程,简称位移方程。

$$S_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_x u_x & l_y u_x & l_z u_x \\ l_x u_y & l_y u_y & l_z u_y \\ l_x u_z & l_y u_z & l_z u_z \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

称为位移梯度矩阵或位移偏导数矩阵,它是关于介质动态应变,即形态介质中单元体积产生微分位移的一种描述;换句话说讲,位移梯度矩阵  $S_{3 \times 3}$  涵盖了形变介质应变的类型和性质。

### 2.3.1.2 应变矩阵

在小应变线性位移情况下,采用处理均匀弹性各向同性介质位移梯度矩阵对称与反对称矩阵分解的方法对位移梯度矩阵进行分解。考虑到弹性力学中一般介质存在应变的对称性,这里只涉及对称应变矩阵  $E_{3 \times 3}$ ,可以用符号记为

$$E_{3 \times 3} = e_{ij} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

其中,  $e_{ij} = e_{ji}$  ( $i, j = 1, 2, 3$  且  $i \neq j$ )。

由于矩阵  $E_{3 \times 3}$  的对称性,可以把双角标元素转换成单角标元素,两者关系为

$$\begin{cases} \text{I} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \text{II} & xx & yy & zz & yz, zy & zx, xz & xy, yx \end{cases}$$

即

$$e_{6 \times 1} = [e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4 \quad e_5 \quad e_6] \quad (2-16)$$

### 2.3.1.3 应力矩阵

作用在单位体积元的应力可以参照均匀弹性各向同性介质,即弹性介质模型来处理,作用于体积元上的应力为

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

其中,  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  ( $i, j = 1, 2, 3$  且  $i \neq j$ )。它也是二阶对称张量,其双角标关系为

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{31} \quad \sigma_{12}]^T \\ &= [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \sigma_4 \quad \sigma_5 \quad \sigma_6]^T \end{aligned} \quad (2-18)$$

即

$$\sigma_{6 \times 1} = [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \sigma_4 \quad \sigma_5 \quad \sigma_6]^T \quad (2-19)$$

## 2.3.2 本构方程和物性矩阵

各向异性介质本构方程与均匀弹性各向同性介质形式上一样,即为

$$\sigma_{6 \times 1} = C_{6 \times 6} e_{6 \times 1} \quad (2-20)$$

取单双角标关系

$$\begin{cases} \text{I} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \text{II} & xx & yy & zz & yz, zy & zx, xz & xy, yx \end{cases}$$

式中,  $\sigma_{6 \times 1}$  和  $e_{6 \times 1}$  分别是应力和应变矩阵,物性矩阵  $C_{6 \times 6}$  的一般表达形式如式(2-1)所示。



### 2.3.3 位移与应变方程

位移与应变方程又称为科西方程,它是建立波动方程的基础方程之一。在直角坐标系下,位移与应变方程形式为

$$\mathbf{e}_{6 \times 1} = \mathbf{L}_{6 \times 3} \mathbf{u}_{3 \times 1} \quad (2-21)$$

式(2-21)的展开形式为

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ e_{33} \\ e_{23} \\ e_{31} \\ e_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 \\ 0 & l_y & 0 \\ 0 & 0 & l_z \\ 0 & l_z & l_y \\ l_z & 0 & l_x \\ l_y & l_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

式中,  $l_x = \frac{\partial}{\partial x}$ ,  $l_y = \frac{\partial}{\partial y}$ ,  $l_z = \frac{\partial}{\partial z}$ ,  $\mathbf{e}_{6 \times 1}$  是应变矩阵, 即

$$\mathbf{e}_{6 \times 1} = [e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4 \quad e_5 \quad e_6]^T \quad (2-23)$$

$\mathbf{u}_{3 \times 1}$  是位移矩阵, 即

$$\mathbf{u}_{3 \times 1} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T \quad (2-24)$$

### 2.3.4 位移与应力方程

位移与应力方程即奈维尔方程,它是建立各向异性介质波动方程的基础方程之一。该方程也称为弹性动力学中的平动运动方程。该方程的一般表达形式是

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}_{3 \times 1} = \mathbf{L}_{3 \times 6} \boldsymbol{\sigma}_{6 \times 1} \quad (2-25)$$

式中,位移矩阵是

$$\ddot{\mathbf{u}}_{3 \times 1} = l_i^2 [u_x \quad u_y \quad u_z]^T \quad (2-26)$$

$\mathbf{L}_{3 \times 6}$  是科西方程中  $\mathbf{L}_{6 \times 3}$  的转置矩阵,具体形式为

$$\mathbf{L}_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 & 0 & l_z & l_x \\ 0 & l_y & 0 & l_z & 0 & l_x \\ 0 & 0 & l_z & l_y & l_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

## 2.4 各向异性介质的弹性波波动方程

本节将介绍各向异性介质的弹性波波动方程等,其中主要是横向各向同性介质方面的内容。

### 2.4.1 各向异性介质的弹性波波动方程

各向异性介质的弹性波波动方程是在前述介质的本构、科西和奈维尔三个方程的基础之上建立的,这三个方程分别是