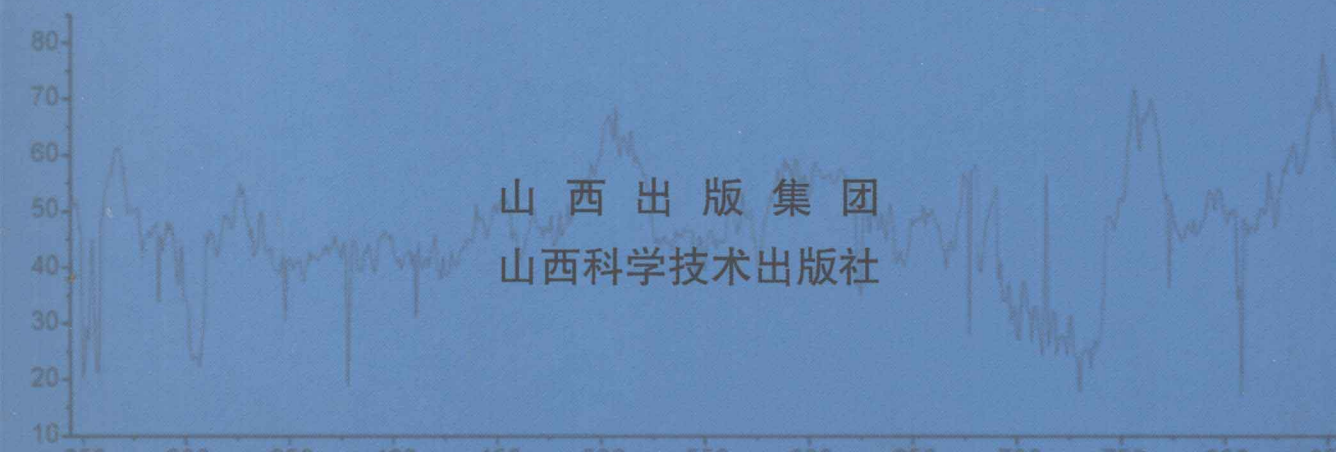
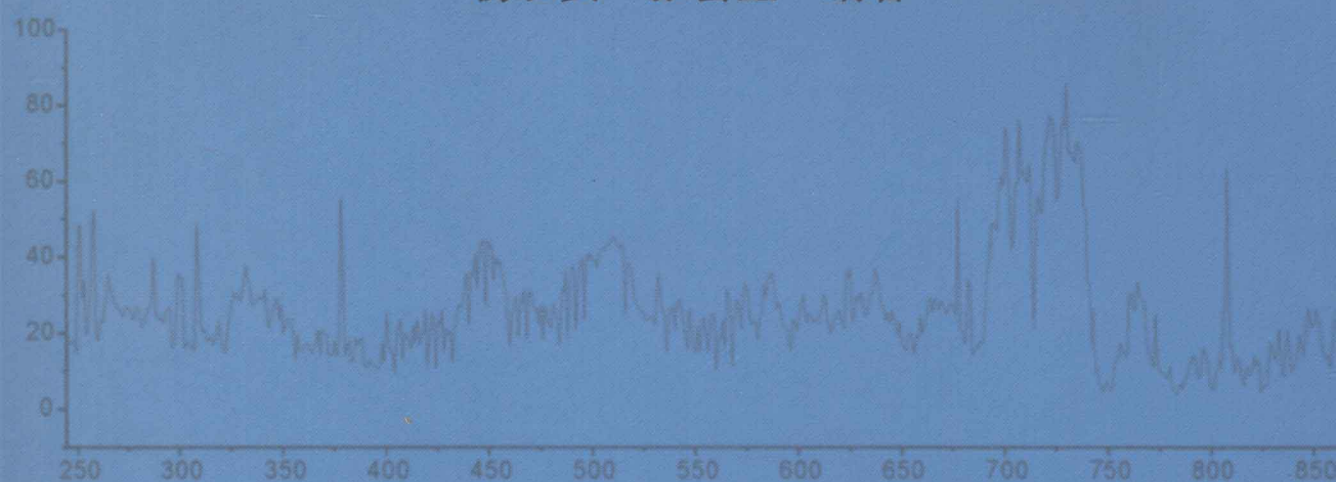


基于双相介质理论

地震预测瓦斯技术

杨双安 张会星 编著



山西出版集团
山西科学技术出版社

基于双相介质理论 地震预测瓦斯技术

杨双安 张会星 编著



山西出版集团
山西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于双相介质理论地震预测瓦斯技术 / 杨双安, 张会星编著. —太原: 山西科学技术出版社, 2011.8

ISBN 978-7-5377-3971-9

I. ①基… II. ①杨…②张… III. ①多相介质相互作用—应用—煤层—瓦斯探测—研究 IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 158949 号

基于双相介质理论地震预测瓦斯技术

编 著 杨双安 张会星

出 版 山西出版集团·山西科学技术出版社

(太原市建设南路 21 号 邮编: 030012)

发 行 山西出版集团·山西科学技术出版社(电话: 0351-4922121)

印 刷 山西省煤炭地质制图印务中心

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 9.25

字 数 200 千字

版 次 2011 年 8 月第 1 版

印 次 2011 年 8 月太原第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5377-3971-9

定 价 38.00 元

如发现印、装质量问题,影响阅读,请与发行部联系调换。

内容提要

本书介绍了双相介质理论的原理及应用,从双相介质理论出发,研究固体和流体之间的相互作用所引起的岩石力学属性变化,从而进一步引起流体波速度的频散和振幅的衰减,产生慢纵波,以此理论来预测煤层瓦斯的分布规律,是对传统地震勘探技术和理论的继承和发展。

本书可供地质、物探工程技术人员,科研人员和有关高校师生学习参考。

前 言

目前,三维地震勘探技术已经成为煤矿生产中必不可少的勘探手段,在很大程度上替代了传统的地质勘探方法。然而,在煤田地震勘探解释成果逐步得到验证后,发现部分成果不符合地震资料解释的一般规律,个别异常现象反映出的是瓦斯富集区。造成这种状况的主要原因在于:(1)地震资料的处理与解释算法存在误差,对于某些资料,这种误差会很大;(2)理论假设与实际情况偏差较大,如我们常常假设地下介质是完全弹性的,而事实上地下介质往往表现出一定的黏弹性,某些地区的这种黏弹性会很强;(3)理论基础存在问题,现在的地震勘探原理都是基于单相介质中的弹性波方程,单相介质中的波动方程假设地下岩石由质密固体组成,它不考虑流体对地震波传播规律的影响,而实际上煤储层都是典型的双相介质,双相介质中地震波的传播规律同单相介质相比又存在很大差别。对于前两点,可通过改进算法或采用特殊算法大体解决,如可采用反 Q 滤波或其他方法解决黏弹性问题,采用连续速度分析方法减小弹性参数分块均匀假设所带来的误差等。对于第三点,必须采用合适的理论来解决,根据煤层气地质理论知道煤储层是一种典型的流固耦合渗流模型,所以说预测瓦斯富集区必须以双相介质中的波动方程为理论基础,发展基于双相介质理论的地震资料处理与反演技术,才能提高资料

处理与反演结果的精度与可靠性。

本书是作者在博士(后)期间的博士学位论文基础之上编著而成的,首次把基于双相介质理论的预测油气技术引用到煤田地震勘探领域。依据本书发表的科技论文两篇被 Ei 检索,其中一篇荣获山西省第十四届优秀学术论文一等奖;本书所涉及的课题荣获 2009 年山西省科技进步三等奖。本书是作者作为一名物探工作者在充分解析全三维地震勘探资料信息的道路上迈出的小小一步,旨在能起到抛砖引玉的作用。

本书得到河南理工大学博士基金项目(B2009-77)的支持才顺利出版发行;同时,在本书的编写过程中,曾得到宁书年导师、彭苏萍院士、曹代勇教授、崔若飞教授、何学秋教授、聂百胜教授等指导并提出很多宝贵意见,特此表示感谢。本书由田峰、申有义校对,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳切希望读者批评指正。

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 本书研究的意义	1
1.1.1 煤田地震勘探理论发展的需要	1
1.1.2 煤矿实际生产的需要	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 双相介质理论研究方面	3
1.2.2 油气、天然气水合物游离气和煤层气检测方面	9
1.3 本书的技术思路及研究内容	12
第二章 双相介质中的地震波场理论	15
2.1 双相介质理论的基本方程	15
2.1.1 双相介质理论的本构方程	15
2.1.2 双相介质理论的几何方程	18
2.1.3 双相介质理论的运动微分方程	18
2.2 双相各向同性介质中的纵波方程	21
2.3 双相各向同性介质中的横波方程	24
第三章 煤层气地质研究	27
3.1 煤层气勘探的意义	27
3.2 煤层气的成因	28

3.3 煤层气储层特性	29
3.3.1 基质孔隙	29
3.3.2 裂隙特征	31
3.4 煤层气的赋存形式与含气量	33
3.4.1 煤层气的赋存状态	33
3.4.2 煤层气含量	33
3.5 煤层气储层模型	34
3.5.1 研究现状	34
3.5.2 固体—流体耦合模型	35
3.6 中国第一个大型煤层气田——沁水煤层气田	37
 第四章 利用双相介质理论预测煤层瓦斯的原理及方法	39
4.1 预测煤层瓦斯的原理	39
4.1.1 预测煤层瓦斯的必要性	40
4.1.2 预测煤层瓦斯的原理	41
4.2 双相介质中地震波能量的提取方法	44
4.2.1 三角滤波器	44
4.2.2 最大能量扫描法	46
4.2.3 数值模拟结果	48
4.3 利用三维地震数据体预测瓦斯的处理要求	51
4.3.1 原始资料评价	51
4.3.2 数据处理要求	52
 第五章 预测煤层瓦斯的三维地震勘探技术研究	54
5.1 煤田三维地震勘探的发展	54

5.2 煤田三维地震勘探的技术要求	56
5.3 资料采集中地震波激发问题的研究	56
5.3.1 组合爆炸	56
5.3.2 震源枪	60
5.4 资料处理阶段的技术分析	62
5.4.1 处理技术分析	62
5.4.2 叠前时间偏移技术的应用分析	64
5.5 地震资料上定性解释煤层夹矸层的分析	69
5.6 地震勘探对小构造的透视分析	74
5.7 煤田陷落柱的研究	78
5.7.1 浅析菲涅耳带半径的大小	78
5.7.2 煤田陷落柱导水性研究	80
5.7.3 煤田陷落柱的超声模拟	85
5.8 本章小结	89
 第六章 三维地震勘探技术预测瓦斯的应用	90
6.1 三维地震勘探技术预测煤层瓦斯在寺河煤矿的应用	90
6.1.1 采空区的特征	90
6.1.2 工区概况	92
6.1.3 实际资料的分析	94
6.2 三维地震勘探技术预测煤层瓦斯在唐安煤矿的应用	96
6.2.1 工区概况	96
6.2.2 山区地震资料采集研究	98
6.2.3 预测瓦斯分析	99
6.3 三维地震勘探技术预测煤层瓦斯在赵庄煤矿的应用	108

6.3.1 赵庄矿二、四盘区北块段地质概况	108
6.3.2 三维地震勘探及瓦斯预测成果	108
6.4 利用三维地震资料预测煤层瓦斯在高河矿井的应用	115
6.4.1 高河矿井东一盘区地质概况	115
6.4.2 三维地震资料再处理	117
6.4.3 煤层瓦斯富集区的解释分析	118
6.5 本章小结	126

第一章 绪 论

地球内部流体的存在和岩石各向异性是地下介质的两大特征。考虑地下流体和介质各向异性理论是当今地震学和地球物理学理论与应用研究的前沿和难题。本书正是考虑了地下流体的存在,从双相介质理论出发,研究固体和流体之间的相互作用会引起岩石的力学属性的变化,从而引起声波或流体波速度的频散和振幅的衰减,产生慢纵波,以此理论来预测煤层瓦斯的分布规律。

煤层气的赋存不同于常规天然气,可以吸附态、游离态、溶解态三种形式存在。

1.1 本书研究的意义

1.1.1 煤田地震勘探理论发展的需要

煤田地震勘探是在石油地震勘探的基础上发展起来的。20 世纪 80 年代以来,高分辨率地震勘探迅速发展并得到广泛应用,煤田地震勘探逐渐形成自己的特色。

煤田地震勘探是利用一定厚度煤层与其顶、底板岩石的波阻抗差异,取得能量强、连续性好的煤层反射波组,研究地下煤层构造分布规律的一种方法。现行的地震勘探主要任务是利用反射波的时间(运动学特征)来解决构造问题,查明有效控制面积内落差 $\geq 5\text{m}$ 的断层的性质、产状及延伸长度;直径 $\geq 25\text{m}$ 的陷落柱,尽可能查明 20m 左右的陷落柱;幅度 $\geq 10\text{m}$ 的褶曲;小窑采空区范围、煤层冲刷区、古河床、岩浆岩侵入体等等。

由于国家煤炭工业部的撤销,煤田地质勘探主管部门不太明确,煤田地震勘探投资少、经费短缺,科研人员流失、研究工作力度不够,研究成果没有大的突破,基本上停留在 20 世纪 90 年代的构造勘探阶段。随着科学技术的飞速发展,

石油勘探行业及科研部门在双相各向同性理论、地震各向异性理论的研究及数值模拟、油气检测方面取得了可喜的成果;地质矿产行业及科研部门在 BISQ 模型双相各向同性介质理论方面取得了一定的成果;煤田地震勘探及科研部门在三维三分量地震勘探方面做了不少工作,但收效甚微、进展缓慢;利用三维地震探测技术针对构造发育的地区,定量评价构造的复杂程度进而划分出瓦斯突出危险带,具有很大的局限性,一直没有得到推广应用。

传统地震勘探的弹性波动方程理论是建立在地下介质是纯固体的单相介质基础之上,即岩石是由质密的固体颗粒组成,在岩石孔隙很小或孔隙中含有束缚流体时是成立的;而当岩石孔隙度较大,而且孔隙中含有连续可动流体时,弹性理论简化就会有较大偏差。实际上,地下介质大多充满流体即液体(油、水)或气体(瓦斯)的介质(双相或多相介质),由于固体介质与流体介质的相互作用,使之与单向介质的物理—力学性质有巨大的差异,引起的弹性波场的差异反应在地震时间剖面上没有得到充分地研究和认知。故建立更加切合实际的双相或多相介质理论模型是利用三维地震勘探技术预测瓦斯的理论基础,是研究煤田地震勘探理论发展的需要。

1.1.2 煤矿实际生产的需要

煤与瓦斯突出是一种极其复杂的动力现象,对煤矿生产造成非常大的影响,一方面造成人员伤亡,使井下作业人员处于危险环境之中;另一方面使煤矿的掘进和回采速度降低,使煤矿采掘接替变得非常紧张,一般在非突出危险地区煤巷炮掘速度在 100 ~ 200m/ 日,而在突出危险区域一般炮掘速度为 50 ~ 70m/ 日,有的甚至只有 30 ~ 40m/ 日。在突出矿井中,煤与瓦斯突出已成为影响生产、制约煤矿发展的重要原因。

2004 年末至 2005 年初仅几个月时间,郑州矿业集团大平煤矿、铜川矿业集团陈家山煤矿和阜新矿业集团孙家湾煤矿发生的瓦斯爆炸,造成了巨大的经济损失和数百人的死亡,引起了党中央和国务院的高度重视。2004 年度煤矿事故的死亡人数为 3457 人。国务院总理温家宝 2005 年 1 月 19 日主持召开国务院常务会议,严肃处理河南郑煤集团大平煤矿相关责任人。会议提出全面加强煤矿安全生产工作的五项措施,其中第三项措施指出:依靠科技进步,提高煤矿安全生

产水平。加强煤矿安全生产的基础研究和应用研究,特别要加强防范和控制瓦斯灾害的科研攻关,推动煤层气综合开发利用,变害为利。

20 世纪 90 年代初期,在中国大型和特大型煤矿基建矿井和生产矿井中,开展了大规模的煤矿采区二维地震勘探。煤矿采区地震勘探技术是专门探查地质小构造,为煤矿布置采煤工作面、巷道、井筒及其辅助工程服务的。连续进行的上百个项目的地质成果,给矿井带来了巨大的经济效益,实践证明了采用这一新技术对提高煤田地质勘探水平和节约煤矿建设投资、加强科学管理起到了重大的推动作用。

20 世纪 90 年代末期至 21 世纪初期,煤矿采区三维地震勘探逐步地得到煤矿业主的认可并得到推广。煤矿采区三维地震勘探之所以获得显著成效,主要是它的原理更接近于实际,因为地下煤系地层(煤层)本身是一个三维实体,用三维方法观测,才能得到符合实际的整体认识。经过三维偏移,勘探区内各类地质体得到正确成像,反映出真实、清晰的地质现象。三维地震网格密,采样密度高,信息更加丰富,结合高分辨率地震勘探技术,更加精细地反映了各种地质现象,大大提高了地质体的空间分辨率。

据不完全统计,2004 年至今,煤田三维地震勘探产值平均每年达 4 亿人民币,为煤矿生产采区勘探完成 800km^2 左右,拥有大量的三维地震勘探成果。如果利用本书提出的煤系地层具有双相介质特性的煤层瓦斯预测技术的原理和现有的三维地震资料(采集内容、信息是全频的)再处理,在综合其他资料的基础上,此技术的反演结果可用于确定进一步勘探的精查范围或地质研究靶区,实际资料的预测结果也可用于指导煤层气开发阶段的井位布置。该项技术不受地层构造限制,它不仅适用于检测构造煤层气藏,而且也适用于检测非构造煤层气藏。这些充分说明以三维地震勘探成果预测瓦斯的富集区将对矿井安全生产具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 双相介质理论研究方面

国外双相介质理论的研究最早开始于 1928 年(Voigt, 1928, Reuss, 1929)。后

来,Gassmann(1951)建立了基于双相介质的 Gassmann 方程,他忽略流体与岩石之间的相对运动,推导出了关于有效体积模量的表达式。1956 年美国 Shell 开发公司的 M.A.Biot 发表了两篇论文(1956),提出了著名的 Biot 双相介质理论,奠定了双相介质理论的基础,并由其 1962 年发表的两篇论文进一步发展,建立了孔隙各向异性介质理论,这也是后来双相各向异性问题研究的基础。Biot 假设流体可以在孔隙空间内流动,得到一个“高频解”,Biot 同时定义了 Gassmann 方程所适用的低频范围: $v < 0.1(\varepsilon\phi/2\pi k\rho_f)$ (v : 频率, ε : 流体黏滞系数, k : 岩石骨架的渗透率)。在这个范围内,岩石骨架与流体耦合的较好,因此 Gassmann 方程又叫低频方程。Biot 理论充分考虑了孔隙介质的双相特性,建立了保守系中和有耗散情况下的双相介质中的弹性波动方程,发现了第二类纵波,并指出孔隙流体和固体介质之间的相对运动是弹性波在孔隙介质传播过程中发生衰减的重要机理。这一点由 White 等人(1975)的实验得到了证实。Mavko 和 Nur(1979)提出了“喷射流”(squirt flow) 机制,将 Biot 理论进一步推广,但并未见其实际应用。Plona(1980)在实验中观测到了第二类纵波(慢纵波)。Geertsma 和 Smit(1961)等人应用 Biot 理论研究水平界面的反射,计算孔隙介质的特性参数,导出了纵波速度的频率方程。S.Hassanzadeh(1988)用 Biot 理论计算各种几何条件下的合成地震记录,对孔隙度、渗透率等特性参数对地震波特性的影响进行了研究,发现流体充填的非均匀介质的孔隙度、渗透率等特性参数十分明显地影响地震波的特性。Nur(1986)等人在综合前人工作的基础上,较详细地论述了流体饱和度、裂隙密度、孔隙度、孔隙流体压力与围压、裂隙与孔隙空间之几何形态等因素对地震波衰减的影响,弹性介质以及多孔隙岩石内的波传播特点,并指出了双相介质理论在测井储油层评价、强化回采率、断层检测、圈定地下含蒸汽区域等地震勘探的应用前景。Г и б и р я к о в(1991)研究了双相介质中固体骨架与流体之间的物理力学性质,并指出微观介质的形变会引起新的物理效应,从而对纵波、横波及波散指数、储层滤波特性均会产生影响。Nur 和 Wang(1989)、Wang 和 Nur(1992)总结和论述了双相介质中地震波和声波速度的实验、理论与模型成果。Akbar 等(1993)研究了 P 波衰减与渗透率的变化关系。Dvorkin 和 Nur 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。Parra 等(1994)基波的速度和衰减的影响。Sharma(1990)研究,关于双相各向异性理论方面的研究也有一些,如双相各向异性介质中波的衰减问题 (Schmitt,1989), 地震速度问题 (Mukerji 等, 1994), 渗透率问题 (Sayers,1999) 及双相各向异性的等效介质模型问题等 (Berryman,1985,1986,1991,Rathore,1994,Thomsen,1995,Hudson,1996,Gerlin-sky,Shapiro,1997)。

总之,Biot 理论与喷射流动(squirt flow)理论是目前已被接受的两种描述含流体多孔介质弹性性质的理论。它们各有自己的优点,同时也都具有一定的局限性。相同之处都是假设介质由固体、孔隙及孔隙内流体组成,孔隙内流体与固体之间有相对运动;不同之处是“喷射流”机制假设多孔介质是由流体部分饱和的,而 Biot 理论假设多孔介质是由流体完全饱和的,且流体与固体之间的运动方式不同,喷射流动理论是基于单个孔隙中流体流动的机理建立的,当弹性波在孔隙中传播时,孔隙发生形变,致使细小孔隙中流体被挤出而流向邻近较大孔隙中,形成“喷射”流动。Mavko 和 Nur 利用喷射流动模型描述了拥有平的裂缝或孔隙的部分流体饱和岩石中波的衰减,在低频段,所得结论与 Biot 理论的结论一致,衰减因子 Q^{-1} 都是与频率 w 成正比,只是利用喷射流动模型所得波的衰减幅度更大一些;在高频段,喷射流动模型与 Biot 理论模型所得结论完全不同,Biot 理论的结论是波的衰减因子 Q^{-1} 与 $w^{-1/2}$ 成正比,而喷射流动得到的结果为 Q^{-1} 与 $w^{-3/2}$ 成正比。大量研究实验 (Born, 1941; Wyllie et al, 1962; Gardner et al, 1964; Usher, 1962)表明,喷射流动模型所得结果与实际更为接近。基于喷射流机制,Akbar 等(1993)研究了 P 波衰减与渗透率的变化关系,他计算了波的衰减和渗透率与波的传播方向之间的关系,发现 P 波传播方向垂直于孔隙排列方向时的衰减大于平行于孔隙排列方向时的衰减,而且这两个衰减之比随着孔隙半径的增大而增大,随着频率或饱和度的增大而减小;岩石渗透率越大,P 波的衰减越小。Biot 理论是双相介质理论研究的基础,Biot 方程从宏观上较好地反映了弹性波在流体饱和多孔介质中的传播规律,指出固体介质与流体介质的相对运动是弹性波发生衰减的重要机理,但是它对能量衰减的预测值比实际低;喷射流动理论对弹性波在含流体多孔介质中传播时发生的衰减的预测值与实际更为接近,

流体的喷射流动能更好地解释弹性波在多孔介质中传播时的强衰减、高频散现象。但是,由于喷射流动理论侧重的是流体的局部运动,它对孔隙内流体所占孔隙的比例以及孔隙的形状很敏感,这就要求在应用此理论时需要知道很多岩石的结构信息,而岩石结构的细节往往不容易知道,这就限制了喷射流动理论的应用。

之后,Dvorkin 和 Nur 提出了统一的 Biot-Squirt(BISQ)模型,即将 Biot 理论假设固体与流体相对运动的 Poiseuille 型和喷射流动(squirt flow)有机地结合起来。地球物理学家们已经发现:Biot 流动不能对双相介质中地震波的频散和衰减做出合理的解释,孔隙介质流体的喷射流动则是造成地震波强衰减和高频散的主要原因。当地震波在多孔双相介质中传播时,这两种机制同时存在,Biot 流体力学机制描述的是宏观现象,喷射流动机制反映的是局部特征,两种机制都会对地震波的频散和衰减产生重要的影响。因此,喷射流动和 Biot 流动构成固相一流相相互作用、相互影响的两种重要力学机制。在 BISQ 模型中,假设岩石形变只沿着波的传播方向,而流体的流动既可平行于波的传播方向(Biot 流动),也可垂直于波的传播方向(Squirt 流动),且引入了一个特征喷射流动长度参数,这个参数不依赖于频率、流体的黏滞性和可压缩性,可通过实验测定。基于这些假设,Dvorkin 和 Nur 利用 Biot 理论的弹性波动力学方程和流体力学质量守恒方程以及流体轴对称流动基本性质,导出了含可压缩黏性流体双相介质中纵波相速度和衰减品质因子的计算公式,它们是频率、流体黏滞度、流体压缩性、孔隙度、渗透率和特征喷射流动长度的函数。Best(1995)等人的实验证明了储层砂岩内存在两种衰减机制,在高渗透率砂岩中,超声衰减主要是 Biot 的总体流动机制起作用,在低渗透率砂岩中,超声衰减主要是 Mavko 和 Nur 的局部流动机制起作用。BISQ 模型反映了流体两种不同流动形式和流体特性对波速、衰减和频散的影响规律,比 Biot 理论更能真实地体现波在孔隙各向同性双相介质中的传播规律,但由于此理论太复杂,难以应用于实际。

国内对双相介质理论的研究和应用较国外晚,始于 20 世纪 90 年代初期,但进展较快,目前已取得了一些成果。1990 年王尚旭对双相介质中的地震波传播规律进行了研究,并实现了双相介质中地震波传播的有限元解法。之后,乔文孝

等(1992)对声波在两种孔隙介质界面上的反射和透射规律进行了研究。张应波(1994)对 Biot 理论在地震勘探的应用进行了探索,初步建立了一套利用地震数据计算地层弹性参数的数学模型。刘维国等(1994)对双相介质中的密度进行了反演。席道瑛等(1995)对低频条件下饱和流体砂岩的衰减进行了研究,并探讨了各向异性层速度的反演方法。牟永光(1996)用地震物理模型实验模拟了地震波在双相介质中的传播过程,观测到了第二类纵波(慢纵波)和第二类横波(慢横波),证实了这两种波的存在。刘克安、刘宏伟等(1997)应用时卷正则化方法对二维双相介质波动方程中的三个主要参数(孔隙率、固相密度和液相密度)同时进行反演。刘维国、全大勇(1998)利用遗传算法对双相介质中的孔隙率进行了反演。席道瑛等(1997,1998,1999)做了大量实验,对饱和多孔岩石的衰减与孔隙率和饱和度的关系,饱和多孔岩石应力波的衰减与频散特性及其衰减与频率的关系等问题进行了研究。席道瑛等(2000)还对饱和岩石的时温等效关系进行了研究,取得了一定的进展。刘洋(1998)对双相各向异性介质中的波动方程进行了数值模拟。

尹志军、黄述旺(1999)把分形分维技术引入到利用地震资料预测裂缝中,通过分形分维反映裂缝与断层的内在联系,对裂缝分布规律作了半定量分析。从纵波资料上提取瞬时振幅、瞬时频率及速度并作速度反演等信息,结合分形分维技术,对储集层裂缝发育情况进行预测。其观点:储集层内引起地震波速度下降的一个主要原因就是裂缝发育和孔隙流体的存在;地震波在质密岩石中传播时,波长是一定的,由于其传播速度大而频率高,频率一般在 50 ~ 60Hz。如果地层中发育裂缝,地震波速度降低,频率明显下降,裂缝越发育,尤其当裂缝中充满天然气时,频率降低得越多,一般可降低 15%左右;当岩石中发育裂缝时,由于波阻抗降低,岩石块体与裂缝体系之间波阻抗差增加,反射波振幅明显变大,能量显著增强。

张应波、张骥动(1999)利用储层物性参数预测油气的原理是根据双相介质理论,使用地震、地质数据提取储层的孔隙度、密度、层速度、视渗透率、流体密度等物性参数的一种处理方法。这些物性参数剖面比常规地震时间剖面更细致地反映了地下各种地质现象,揭示地质体的岩性变化及油气聚集规律。

杨顶辉、张中杰等(2000,2001)综合前人的研究成果,对双相各向异性理论