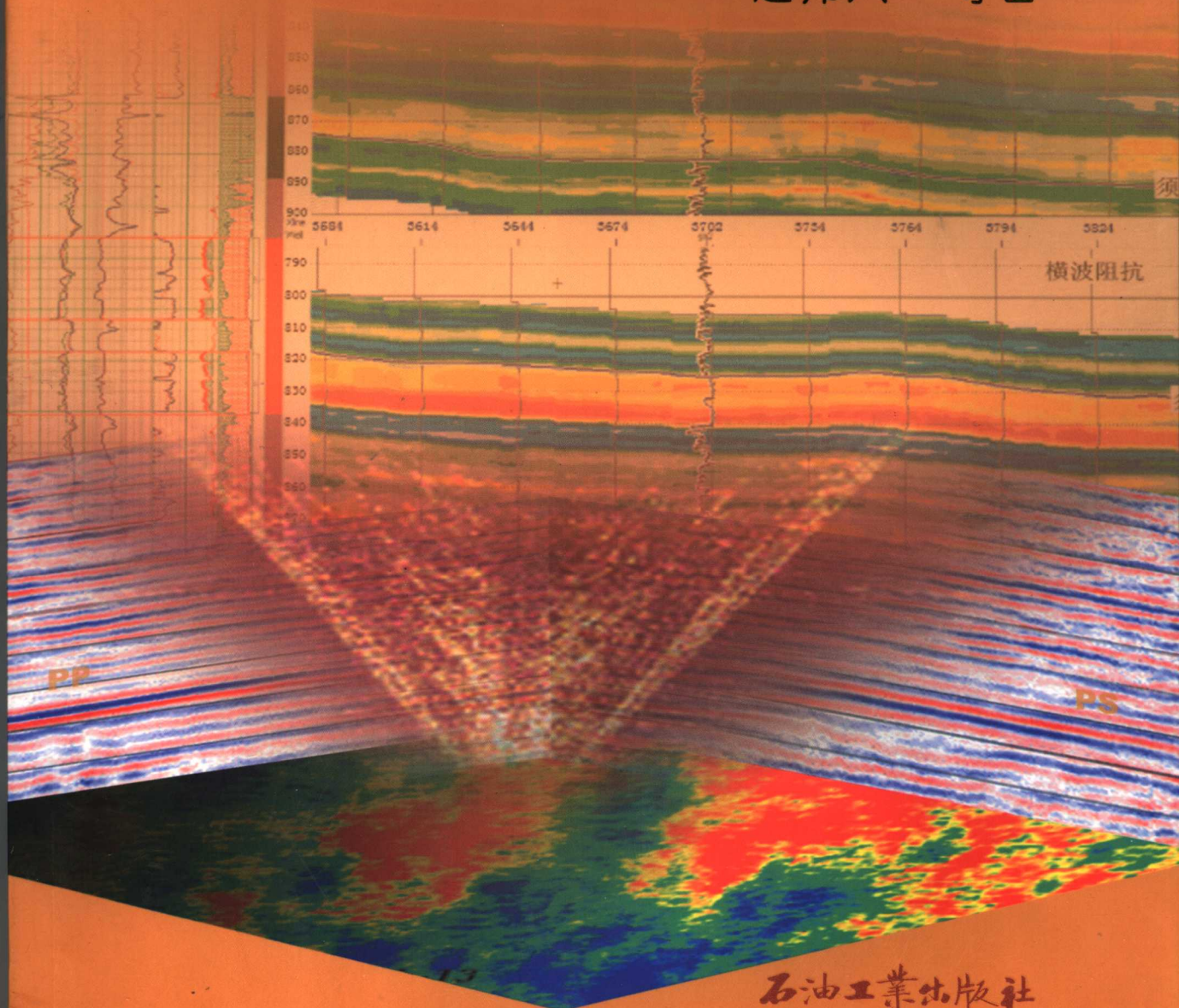


多分量地震勘探技术 理论与实践

赵邦六 等著



石油工业出版社

多分量地震勘探技术理论与实践

赵邦六 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从理论上对多分量地震勘探技术的原理、方法进行了详尽阐述,明确了多分量地震勘探的概念,并从实践上展示了多分量地震勘探技术在不同类型油气藏勘探、开发中的应用效果。本书是国内首次记载多分量地震勘探技术成功用于油气勘探、开发工业化规模生产的书籍,相信它将对中国石油物探技术的进一步发展起到重要的推动作用。

阅读本书,勘探、开发管理者可以对物探技术的最新进展和解决生产问题的能力有比较清晰的了解,从而在认识和观念上有所转变;物探工作者可以更加信心百倍地去深入研究和发 展多分量地震勘探技术,努力使之成为油气勘探开发常规技术;地质研究者可以更加自由地应用丰富的地震信息来实现他们对于地下地质事件的认知和更详尽的描述。总之,本书是研读物探新技术的最佳读本之一,对实际工作将有很好的参考价值,相信对多分量地震勘探技术的进一步完善也会起到抛砖引玉的作用。

图书在版编目(CIP)数据

多分量地震勘探技术理论与实践/赵邦六等著

北京:石油工业出版社,2007.7

ISBN 978-7-5021-6129-3

I. 多…

II. 赵…

III. 地震反射波法-地震勘探

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 088781 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petro pub. com. cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:18.5

字数:470 千字 印数:1—2000 册

定价:128.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序 言

中国经济多年来的快速发展，对能源的需求逐年加大，而作为能源最重要的组成部分——油气资源的需求量更是突飞猛进。中国石油天然气股份有限公司——中国油气资源的主要采掘者，承担着确保国内油气资源安全稳定供应的政治责任和社会责任，如何确保这一重要任务的完成是我们每一个石油人必须认真思考和不断追求的奋斗目标。

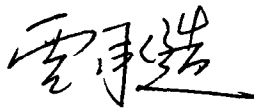
随着优质构造型油气藏勘探、开发目标的不断减少，陆上油气勘探、开发对象发生了很大变化。随之而来的是大深度、低丰度、低孔隙度、低渗透率地层岩性油气藏，碳酸盐岩裂缝性油气藏，复杂火成岩油气藏等多类型叠合的复杂油气藏的勘探、开发。因此，目前油气勘探、开发工作遇到了前所未有的难题和挑战。

针对新形势下油气勘探、开发工作出现的一系列难题，中国石油的物探工作者不畏艰难，积极探索，勇于承担起历史责任。经过多年的摸索，终于在中国陆上成功实践了多分量地震勘探这一世界前沿应用技术，为复杂油气藏的直接检测和勘探、开发效益的提高奠定了良好的基础。这不仅为复杂勘探、开发目标的实现提供了强有力的技术保障，更重要的是开辟了油气勘探的新领域和油气开发的新局面，使中国复杂油气藏的勘探、开发取得了新的历史性突破，可喜可贺。

针对复杂山前高陡（逆掩推覆）构造油气藏、碳酸盐岩油气藏、地层岩性油气藏、复杂裂缝油气藏、深层火山岩油气藏的勘探、开发，走技术发展之路是中国石油的必然选择。依靠物探技术解决面临的实际难题是我们不可他选的手段，因此，作为油气勘探开发核心技术之一的物探技术的发展迫在眉睫。地球物理工作者把多分量地震勘探理论付诸实践，并把发展多分量地震勘探技术作为油气勘探、开发的有效手段和主要发展方向，实践证明，他们的选择是正确的。

确保国内石油天然气的稳定供应是我们每个石油人义不容辞的责任，也是地球物理工作者不断追求新境界的动力。希望地球物理工作者倍加努力，不断发展和完善物探技术，保证油气勘探、开发对物探技术的需求。愿物探技术为中国石油的油气勘探、开发事业再立新功！

中国科学院院士
中国石油天然气股份有限公司副总裁



2007年4月22日

前言

地震勘探技术自 20 世纪初进入石油工业以来,先后经历了光点、模拟、数字三大飞跃,其中数字地震勘探中的多次覆盖技术、三维地震技术极大地提高了地震勘探的能力,已成为石油天然气勘探不可或缺的重要技术手段,为石油工业的发展作出了重要贡献。

人们很早就认识到地震波是一种弹性波,这种弹性波一般包含纵波和横波信息。但长期以来,由于技术和成本的限制,地震勘探实际上只使用了纵波信息,对横波信息的应用一直处于方法研究、试验阶段。近年来,随着油气勘探开发难度的加大,以及物探技术装备水平的提高,多分量地震勘探日益受到工业界的重视,并已逐渐进入工业化生产。多分量地震勘探技术在非均质性储层的含油气预测、油气藏的精细描述和动态监测中已显示出独特的优势和巨大的应用潜力,必将成为 21 世纪物探技术发展的重要方向。

多分量地震勘探技术的发展大约经历了三个阶段。20 世纪 70 年代,人们企图利用横波速度低的特点来获得比纵波相对高的地震分辨率,从而兴起了横波研究的热潮,但由于横波的频率较低、能量衰减快,因此未能取得预期的效果;70 年代后期至 80 年代中期,人们利用纵、横波联合勘探提取岩性信息获得成功,特别是利用横波分裂研究介质的各向异性获得了较大进展,再一次掀起了多分量地震勘探的热潮;80 年代中后期,海上多分量地震采集设备的出现和纵波激发、转换波接收技术的应用,使多分量勘探进入了第三次发展高潮,并从方法研究开始转入工业化生产阶段。

多分量地震勘探技术的应用范围主要包括:(1)利用横波速度较低的特点获得更高分辨率的地震资料,精细地识别小断层、小构造、薄层及地层尖灭等地质现象;(2)在受高速碳酸盐岩、火成岩、硬石膏、硬海底及气云等因素影响而造成纵波能量弱、信噪比低的地区,应用横波信息可获得较好的成像效果;(3)利用多波资料信息量大的特征,通过提取更多的物性参数(如纵、横波振幅差异,纵、横波速度比等)精细预测储层岩性,甚至直接识别油气藏;(4)利用多波资料研究地下介质的方位各向异性,探测裂缝等储层非均质性的发育特征。

多分量地震勘探之所以多次被工业界所推起,关键在于理论上纵、横波对地下介质的响应不同:横波对介质的各向异性响应比纵波敏感,而纵波受流体的影响却比横波严重(流体对横波的传播不产生任何响应)。利用纵、横波在介质中传播的这种差异性,来识别地层岩性、岩石裂缝和岩石中所含流体是可行的,而且试验和实践证明,也是十分有效的。因此,多分量地震勘探比常规纯纵波地震勘探有较大的优势。

但是,多分量地震勘探技术在目前实际应用中仍然面临许多挑战。其中,横波震源一直是制约多分量地震勘探的关键环节。由于海上无法进行横波激发,陆上横波激发的施工难度也极大,因此,横波激发、横波接收的勘探方式(简称横波勘探)逐渐被纵波激发、转换波接收的勘探方式(简称转换波勘探)所替代,成为当前多分量勘探的重要研究应用领域。目前,转换波地震处理、解释方法已有很大进步,已形成了可以工业化应用的软件产品,但共转换点的确定、CCP 道集的抽取、横波静校正、转换波速度分析、转换波 DMO、叠前偏移,以及横波资料的层位标定等方法仍需要进一步完善。特别是由于横波对各向异性较为敏

感,而针对各向异性的各项技术还处在应用研究阶段,因此,多分量地震技术在油气勘探中的应用还有一个不断发展的过程。

然而,生产需求是新技术发展的重要推动力。当前经济的迅速发展,使国际社会对石油天然气能源的需求不断增加,但按照传统技术可供发现的大型构造油气田的数量和规模正在不断地减少,而相对规模小、类型多且较为复杂的岩性油藏却在不断增加。近 10 年以来,岩性油气藏的勘探及老区剩余油的开采成为石油工业持续发展的重要推动力,地层岩性油气藏勘探已成为目前油气勘探最现实、最有潜力、最有普遍性的新领域。2003 年以来,中国石油地层岩性油藏累计新增石油地质储量占全部新增储量的 50% 以上,新增天然气地质储量占全部新增储量的 40%,剩余可采资源量占剩余石油资源量的比例近 50%。东部油区现已将地层岩性油气藏作为勘探的主要对象,中西部地区也正在积极开辟地层岩性油气藏勘探新战场。与此同时,提高老油田采收率也是目前油田增储上产的重要手段。据统计,目前全世界平均采收率大约在 30%~35% 之间。由于新技术的应用,再过 10~15 年,采收率目标可望达到 50% 左右,这相当于使现有地下储量增加 15%,也几乎使全球的可采储量翻了一番。由此可见,针对岩性油气藏的精细研究和针对老油田的精细描述是当前物探技术面临的重要课题。

国际大油公司针对裂缝性油气藏、地层岩性油气藏勘探和老油田提高采收率开发的需要,进行过多次二维、三维多分量地震勘探试验,近几年已在地面转换波及井中多分量地震勘探中取得了突破性进展,并在海上油气勘探中取得了明显的经济效益。由于多分量地震可以利用纵、横波对地下地质条件响应特征的不同,进行岩性油气藏的预测及描述,有效地减少了传统纵波地震反演的多解性问题,较大幅度地提高了油气藏勘探的预测精度,因此,多分量地震勘探目前在海洋石油天然气勘探开发领域中应用十分广泛。

我国多分量地震勘探工作起步较晚,尚处于试验研究时期,主要工作始于“六五”期间。四川石油管理局原地质调查处从 1980 年开始在川中遂宁地区开展了横波试验工作,采用三排井对称激发的方式获取 SH 波,继而研究了一套处理程序,并进行了纵、横波资料的联合解释。1985 年,原石油部物探局第二地质调查处用引进的横波可控震源在河南、内蒙等地区进行了 SH 波资料采集的野外试验。同期,作为国家“七五”科技攻关项目,石油大学、成都地质学院、长春地质学院、中国科学院地球物理研究所等单位开展了大量基础性研究,并在物理模型、岩样、岩心的多分量数据观测和实际资料的采集、处理、解释实践中取得了大量的经验和成果。“九五”期间,大庆、塔里木、辽河等油田均开展了二维三分量地震勘探的野外采集试验;煤田地质局、中国科学院地质与地球物理研究所等单位联合中国矿业大学(北京校区)及国内外公司在河北、淮南及河南的几个煤矿区进行了三维三分量的地震勘探研究。近几年,随着对岩性油气藏认识的不断深入和生产需求的不断增加,特别是多分量数字检波器的出现,多分量地震勘探技术在石油行业引起了广泛重视。长庆油田在鄂尔多斯盆地苏里格气田,西南油气田在四川盆地川中、川西北矿区,大庆油田在松辽盆地徐家气田,青海油田在柴达木盆地涩北气田,以及胜利油田等先后开展了二维三分量或三维三分量的工业化试生产。以三维三分量 VSP 技术为代表的井中多分量勘探也得到了初步开展,并在实际生产中取得了理想的应用效果。

笔者编著本书,试图对多分量勘探的理论基础和技术优势进行详尽阐述,从实践上对多分量地震勘探关键环节和作业工艺进行仔细描述,并从实际应用效果上展示多分量地震勘探技术的应用前景,以期指导今后的多分量地震勘探工作,推动多分量地震勘探技术应用的健

康顺利发展。我们有理由相信，通过物探人员的不懈努力，多分量地震技术作为解决复杂地质问题的重要手段，必将在油气勘探生产中得到更广泛的应用和不断发展，也一定能为石油工业的发展作出更大的贡献。

本书由赵邦六提出编写思路并组织编写。具体分工如下：前言由赵邦六、曾忠完成；第一章由甘利灯、姚逢昌、张明完成；第二章和第三章由刘洋、魏修成完成；第四章由詹世凡、赵邦六、邓志文、崔士天、邹雪峰完成；第五章由刘洋、郭向宇、李彦鹏完成；第六章由欧阳永林、甘利灯、赵邦六完成；第七章由严又生、魏修成、赵邦六、詹世凡完成；第八章由赵邦六、史松群、程思俭、张盟勃等完成；第九章由赵邦六、李亚林、李忠、谢芳、王鸿燕等完成；第十章由赵邦六、陈树民、孙显义、裴江云等完成；第十一章由何永清、唐忠磊、胡杰、赵邦六、丁晓勇等完成；第十二章由严又生、詹世凡、赵邦六等完成；后记由赵邦六完成；文章审稿由刘雯林、姚逢昌、詹世凡、刘洋、赵邦六完成；文章定稿由赵邦六、甘利灯完成。本书的编写得到了贾承造、胡文瑞、赵政璋、赵化昆、阎存章、杨华、侯启军、冯志强、徐春春、徐凤银、闵琪、王玉华、陈更生、王兆年、张研、何江川、谭健、杨炳秀等领导和专家的大力支持与帮助，笔者对上述领导和专家的指导与帮助表示衷心的感谢！

由于笔者水平所限，书中可能存在许多不足之处，欢迎读者批评指正。

目 录

1 地震岩石物理学基础	(1)
1.1 基本概念	(1)
1.2 理论模型	(6)
1.3 经验关系	(14)
1.4 主要应用	(23)
2 地震波波场传播理论	(24)
2.1 概述	(24)
2.2 各向同性介质弹性波理论	(25)
2.3 各向异性介质弹性波理论	(27)
2.4 双相介质弹性波理论	(34)
2.5 非均匀介质弹性波理论	(43)
2.6 黏弹性介质弹性波理论	(44)
3 多分量地震波场数值模拟	(49)
3.1 模拟方法	(49)
3.2 各向同性介质波场模拟	(62)
3.3 各向异性介质波场模拟	(67)
3.4 双相介质波场模拟	(72)
4 多分量地震资料采集	(76)
4.1 概述	(76)
4.2 多分量地震激发与接收系统	(77)
4.3 多分量地震观测系统设计	(78)
4.4 多分量地震采集方法	(86)
4.5 采集质量监控	(94)
5 多分量地震资料处理	(95)
5.1 静校正	(95)
5.2 方位旋转与波场分离	(99)
5.3 噪声压制	(100)
5.4 速度分析与动校正	(101)
5.5 DMO 处理	(107)
5.6 偏移成像	(108)
5.7 处理流程与质量控制	(114)
6 多分量地震资料解释	(117)
6.1 层位标定与纵、横波对比分析	(117)
6.2 v_p/v_s 预测岩性和检测油气	(122)
6.3 多分量 AVO 分析	(125)

6.4	弹性波反演	(137)
6.5	多分量资料的联合解释	(144)
7	井中多分量地震	(152)
7.1	资料采集方法	(152)
7.2	资料处理方法	(157)
7.3	资料解释方法	(163)
8	多分量地震勘探技术在苏里格气田砂岩气藏预测中的应用	(165)
8.1	工区概况	(165)
8.2	多分量地震应用基础研究	(167)
8.3	资料采集	(172)
8.4	资料处理	(178)
8.5	资料解释及应用	(189)
9	多分量地震勘探技术在四川盆地川中致密砂岩气藏识别中的应用	(203)
9.1	工区概况	(203)
9.2	主要地质问题	(203)
9.3	资料采集与处理	(205)
9.4	资料解释与效果	(219)
9.5	小结	(228)
10	多分量地震勘探技术在松辽盆地徐深气田火山岩气藏勘探中的应用	(229)
10.1	工区概况	(229)
10.2	资料采集	(229)
10.3	资料处理	(232)
10.4	多分量资料的应用	(238)
11	多分量地震勘探技术在柴达木盆地三湖地区天然气藏勘探中的应用试验	(250)
11.1	工区概况	(250)
11.2	主要地质问题	(251)
11.3	资料采集与处理	(253)
11.4	多分量剖面效果与认识	(262)
12	井中多分量地震勘探技术应用实例	(265)
12.1	零井源距 VSP 技术应用	(265)
12.2	非零井源距 VSP	(268)
12.3	3D-3C VSP 技术应用	(271)
参考文献		(282)
后记		(285)

1 地震岩石物理学基础

在勘探地震学中，地震波以旅行时间、反射波振幅及相位变化的形式带来了地下岩石和流体的信息。在早期的勘探地震学中，地震数据主要用于构造解释，通过构造与其他地质信息的综合间接地推断是否含有油气。随着计算能力的提高和地震资料处理、解释技术的进步，现在对地震数据的分析一般是为了预测岩性、孔隙度、孔隙流体和饱和度。地震岩石物理学为地震数据与油藏特性和参数之间架起了桥梁，近年来，它在诸如 4D 地震油藏监测，地震岩性识别，以及“亮点”和反射系数随入射角变化的分析等油气直接检测等有关新技术的开发中发挥着重要作用。目前有关地震岩石物理学的研究论文呈不断上升的趋势，为方便讨论和交流，本章试图对该学科相关的基本概念、理论模型、经验公式和应用领域进行初步分类、归纳和总结。

1.1 基本概念

1.1.1 什么是地震岩石物理学

1.1.1.1 岩石物理学与地震岩石物理学

物理学研究的是物质的基本性质和物质运动最基本最普遍的形式。岩石物理学 (Petrophysics) 是物理学的一个分支，它研究的是岩石这种特殊的物质，在地下高温高压特殊环境下所表现的基本性质和运动的普遍形式。岩石物理学的研究方法主要是通过实验的方法，即将岩石放进人工制造的高温高压模拟环境中进行实验。实验得到的结果经过模型外推，用于对自然界岩石中发生的各类现象进行解释和预测。可见它研究的是岩石在地球环境下的物理性质。从油气勘探、开发的角度来看，岩石物理学是研究地下岩石的物理性质以及这些物理性质与孔隙中流体（油、气、水）的相互作用。

那么，什么是地震岩石物理学（其英文为 Rock Physics，这很容易与 Petrophysics 的中文含义混淆，但其英文含义有明显的不同）呢？地震岩石物理学是岩石物理学的一个分支。虽然它目前还没有严格的定义，但其内涵是非常明确的，即地震岩石物理学是研究与地震波特性和有关的岩石物理性质以及这些物理性质与地震响应之间关系的一门学科。它与岩石物理学的异同如表 1.1 所示。

表 1.1 地震岩石物理学与岩石物理学的异同

地震岩石物理学 (Rock Physics)	岩石物理学 (Petrophysics)
主要使用声波、偶极声波和密度等与弹性相关的测井曲线	岩石物理学家使用各种测井资料、岩心资料和生产资料，并将相关的信息综合起来
目的是建立纵、横波速度和密度与弹性模量、岩性、孔隙度、孔隙形态、孔隙流体、温度、压力的关系	目的是获得与生产参数相关的物理性质，如孔隙度、饱和度和渗透率等
主要涉及速度和弹性参数，因为这些参数与地震响应相关	岩石物理学家通常不太关心地震，而更关心为储层描述服务的井孔测量数据

地震岩石物理学 (Rock Physics)	岩石物理学 (Petrophysics)
地震岩石物理学可以使用岩石物理学家提供的信息, 如泥岩含量、饱和度和孔隙度等	岩石物理学可以提供诸如孔隙度、饱和度、渗透率、泥质含量、油气层分布、油气层厚的和流体界面的等信息
对地震岩石物理学感兴趣的是地球物理学家 (可能还有物理学家)	油藏工程师、测井分析家、岩心分析家、地质家和地球物理学家都对岩石物理感兴趣

1.1.1.2 地震岩石物理学的研究目标、内容与方法

地震岩石物理的研究目标包含两个方面内容: (1) 建立与岩石弹性性质有关的物理性质, 如弹性参数、密度、孔隙度、饱和度等与地震响应之间的关系; (2) 提出利用地震响应预测这些物理性质的理论与方法。其研究内容包括: (1) 岩石骨架和孔隙流体的弹性性质研究; (2) 岩石与流体相互作用的模型研究及其对弹性性质的影响。研究方法可以概括为三种: (1) 模型理论法, 即在一定的假设条件下, 通过内在的物理学原理建立通用的关系, 其缺点是当假设条件不满足时会导致失败; (2) 经验关系法, 即利用实际样品的实验室测量与数据分析, 拟合出数学关系, 其缺点是推广难、物理成因解释难; (3) 综合法, 即将理论模型与经验关系有机结合, 是一种比较理想的方法。地震岩石物理研究的数据基础是岩心分析数据、测井资料和地震资料。

1.1.1.3 地震岩石物理研究的意义

随着地球物理技术的进展, 人们已经不满足于利用地震资料解决构造问题, 提出了利用地震振幅, 尤其是叠前地震振幅解决地下岩性与流体的问题, 如 AVO 分析、叠前地震属性与叠前地震反演技术、纵、横波联合技术等。为了利用所得的地球物理数据精确反演地下岩层与流体的性质, 过去那种仅将地震响应与速度相联系的做法显然是不够的, 而将速度与岩石最基本的参数相联系, 即必须真正理解各种岩石物性参数, 诸如岩石矿物组分、孔隙度、渗透率、密度、孔隙类型、孔隙几何形态、岩石颗粒的胶结程度、颗粒的接触状况和饱和度以及外界的物理参数, 如压力、温度以及所列诸参数间的相互作用对岩石中弹性波的影响。而这正是地震岩石物理学研究范畴, 可以说地震岩石物理学为地震响应与储层岩石参数之间建立起了一座桥梁, 它打开了地震定量解释的大门, 为充分、有效地使用采集的地震资料解决储层岩性与流体问题奠定了基础。在油气勘探开发中, 地震岩石物理学的具体作用如下: (1) 评估新区价值; (2) 确定勘探策略; (3) 使风险最小化; (4) 节省探井开支; (5) 圈定剩余油气; (6) 优化加密井位等。

1.1.1.4 地震岩石物理面临的挑战

尽管在日常的地球物理工作中涉及地震岩石物理的内容, 但地震岩石物理的研究与推广也面临着很大的挑战。这主要包括以下几个方面的问题: 第一是尺度问题, 因为岩心分析、测井、地震使用的信号频率是不相同的, 所以分辨率不同。岩心分析使用 100kHz 到 1MHz 的频率, 其分辨率为厘米级; 测井使用 10kHz 左右的频率, 其分辨率为几十厘米级的; 地震使用 10Hz 到 100Hz 的频率, 其分辨率为几十米级的。这样高频测量的结果如何外推到低频领域, 那些成果可以外推, 那些不行, 应该如何改进, 都有待进一步研究。第二是资料问题, 即可利用的横波资料太少, 有时还存在质量问题, 譬如, 利用纵、横波速度计算的泊松比会出现小于零的情况, 这显然是物理不可实现的。第三是经济因素, 人们受商品经济的冲击, 只对研究成果感兴趣, 而对机理研究缺乏耐心, 对岩石物理的基本理论了解严重不足。

第四是成功的实例少，目前缺乏可以仿照的成功史例，无法充分展示它的价值。要推动地震岩石物理基础研究，必须超越这几个挑战。首先，在更多的井上应用现代化的声测井方法，如偶极声波测井，解释人员必须注意不同层段上数据的质量，以避免出现使人误解的结果；有关岩石物理的文章应以更通俗易懂的方式表达出来；应该大量发表有关地震岩石物理学应用的史例供别人模仿，这些问题实质上是要求开展技术转化工作，而不是学科本身的基本理论有所发展。当地震岩石物理成为一种常用技术时，专业和非专业人员都一样能应用其结果。

1.1.2 岩石的性质

1.1.2.1 矿物

地球及其以外的物质可以分为固体圈、水圈和大气圈三个圈层结构。固体圈是由地核、地幔和地壳组成的。地球固体圈的物质组分包括了大多数已发现的元素，如 O, Si, Al, Fe, Ca, K, Na, Mg, Ti, P, S 等，它们大多数以化合物的形式存在，这些天然产出的，由无机过程形成的，具有一定化学成分和特定的原子排列（结构）的均匀固体，称为矿物。地球上的已知矿物有 3000 多种。岩石中的常见矿物只有 20 几种，其中又以长石、石英、辉石、闪石、云母、橄榄石、方解石、磁铁矿和黏土矿物为最多。

1.1.2.2 岩石

所谓的岩石就是由一种或几种造岩矿物按一定方式结合而成的矿物的天然集合体。岩石是在地球发展到一定阶段时，经过各种地质作用形成的坚硬的产物，它是构成地壳和地幔的主要物质。

1.1.2.3 成岩过程与岩石的分类

岩石可以按照包含的矿物种类、各种矿物的比例、矿物的空间分布进行分类，考虑到各种分类的任意性，最通用的分类仍然是按照的岩石的形成过程，即按照不同成岩过程对岩石进行地质学上的分类。

就岩石的形成而言，地球中的过程主要有以下三种：

(1) 火成过程 (igneous process)。地壳深部融化的物质、熔融的岩浆在地下或喷出地表，发生结晶和固结的过程。

(2) 沉积过程 (sedimentary process)。地表岩石风化的产物，经过风、流水的搬运，在某些低洼地方沉积下来的过程。

(3) 变质过程 (metamorphic process)。在地球内部高温高压环境下，先已存在的岩石发生各种物理、化学变化，使其中的矿物重结晶和发生交互作用，进而新的矿物的过程。

对应地，人们把由以上三种地球上不同成岩过程所生成的岩石，分别称为火成岩、沉积岩和变质岩。

1.1.2.4 成岩旋回

由火成岩、沉积岩和变质岩的形成过程可以看出它们之间有着密切的联系，它们都是活动着的地球过程的产物，同时，随着地球上主要地质过程的演变，这三类岩石之间可以互相转变。对这种转变过程的研究不但可以加深对岩石生成过程的认识，还可以了解在某类岩石变到另一类岩石的转变过程中包含的地质现象。图 1.1 中的实线给出了一个完整的岩石循环过程：地下熔化的岩浆冷却、固化、结晶，或者通过火山喷发的方式在地面以上结晶，从而形成了火成岩。暴露在地球表面的火成岩遭受着长期的风化，剥落的物质在风、雨、流水、冰川和重力等的作用下，搬运到低洼地方沉积，经过胶结和压实（岩石化的过程）后形

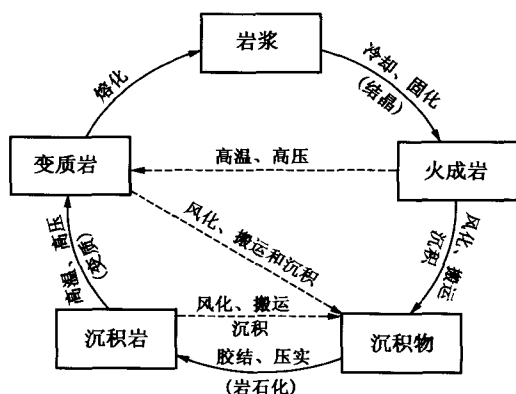


图 1.1 成岩过程

成了沉积岩。在造山运动等地球动力学作用下，沉积岩又被埋入地下，或附近有炽热的岩浆侵入等等，总之，这些沉积岩在周围巨大压力和很高的温度作用下，最终发生变质形成了变质岩。其后，变质岩或进入更深的地球内部，或遭受到更高的温度再次熔融后，变成了岩浆，经固结或喷发冷凝，又生成了新的火成岩。图 1.1 中的虚线表示的是岩石循环中的另外一些可能途径。例如火成岩，不必经过地面暴露、风化等过程，而是直接在变化了的温度和压力作用下发生变质作用，形成了变质岩。又如变质岩如果不向地球内部运

动，而是出露地表，这也可以成为沉积岩的原始材料。对于一个运动的地球，上述过程是在不停地进行的，这就构成了成岩回旋。

1.1.2.5 非均质性与各向异性

岩石均匀与非均匀的判别准则是看物理性质是否与位置有关，如果物理性质与位置有关则是非均匀的，否则是均匀的。判别各向同性与各向异性主要依据其物理性质是否与方向有关，如果物理性质与方向有关则是各向异性的，否则是各向同性的。

1.1.2.6 岩石的物理特性与地球物理方法

岩石存在不同物理特性，对于所研究的岩石的不同物理特性，必然要用到相应的地球物理方法与手段，表 1.2 左边列出了研究地球内部组成、结构和运动依赖的物理方法，而右边则列出了相应的岩石物理性质。迄今为止，地震波是研究地球内部最有效的工具之一。图 1.2 给出了研究地球内部问题时所使用各种方法的大致比例。由图可见，基于岩石中波传播性质的地震方法是目前地球物理勘探中最主要的方法。

表 1.2 研究地球的各种物理方法和相应的岩石物理性质

物理方法	岩石的物理特性
磁法	磁化率、磁导率
重力	密度
电法	电导率和介电特性
地震法	弹性，如速度、密度和衰减等
地热	热导率、比热和热扩散系数
核变	放射性

1.1.3 岩石的弹性

1.1.3.1 应力与应变

应力的定义包含两个重要的含义：应力是单位面积上的作用力；应力不仅与物体内部的受力情况有关，而且与切面的方向有关。在三位正交坐标系中，将有九个应力。应力的基本单位是 Pascal，简称 Pa，即牛顿/平方米，常用 GPa 或 MPa。由于应力的作用而产生的大

小和形状的变化,称为应变。应变是一个无量纲的物理量,应变可分为线应变、角应变和体积应变。注意旋转和平移没有应变。

1.1.3.2 弹性

当施加于物体上的应力撤除后,可能会发生两种情形。一种是物体的变形恢复到加应力以前的情况,这种物体的变形可以恢复的性质叫做弹性。第二种情形是材料的变形不能完全恢复,这是由于材料发生了破裂或塑性变形,产生了永久形变。

在一定条件下,岩石可以近似地看成是弹性体,这种弹性体的应力与应变之间呈一一对应的函数关系,并且通常是线性关系。

1.1.3.3 虎克定律

在弹性介质中,应力与应变满足广义虎克定律,即

$$\sigma = Ce \quad (1.1)$$

式中, C 为弹性参数矩阵,且 $C = [c_{ij}]_{6 \times 6}$; $\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{xy})^T$ 为应力张量; $e = (e_{xx}, e_{yy}, e_{zz}, e_{yz}, e_{zx}, e_{xy})^T$ 为应变张量。

应变与位移关系为:

$$\begin{aligned} e_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad e_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad e_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ e_{yz} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \quad e_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}, \quad e_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中, u_x 、 u_y 和 u_z 分别表示位移在 x 、 y 和 z 三个方向的分量。

应力与位移之间满足牛顿运动定律,即

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (1.3a)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + f_y = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (1.3b)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (1.3c)$$

式中, ρ 为介质的密度; t 为时间; f_x 、 f_y 和 f_z 为外力在 x 、 y 和 z 三个方向的分量。

1.1.3.4 纵波和横波

均匀岩石中可能产生两类弹性波,一类是纵波,也称为 P 波,其质点运动方向与波的传播方向平行 (如图 1.3a)。纵波在岩石中传播的速度为

$$v_p = \sqrt{\frac{K + 4\mu/3}{\rho}} \quad (1.4)$$

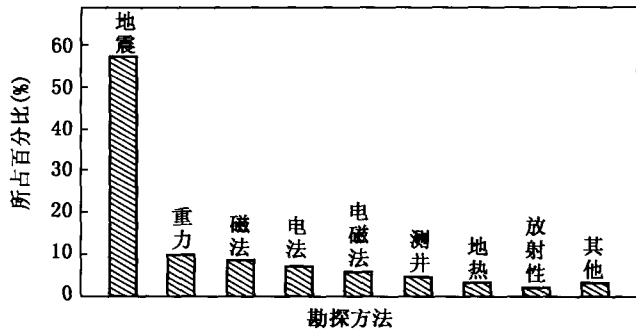


图 1.2 地球物理勘探中的各类方法比例

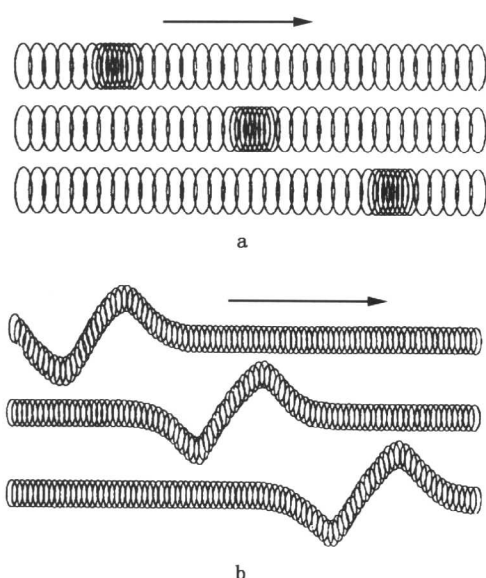


图 1.3 纵波与横波示意图

减成为一种有价值的研究课题。

由于岩石往往不是完全弹性的。这样，当波在岩石中传播时，就会有一部分机械能转变为热能。在这种转变过程中的各种机制统称为内摩擦。除了通过岩石的变形确定内摩擦外，还有两种方法也是常用的：一种方法是观测岩石样品的强迫振动，由岩石材料的强迫振动可以得到表征内摩擦大小的 Q 值， Q 值是描述岩石非弹性特性的重要参数。对于完全弹性体， $Q = \infty$ 。 Q 值越小，非弹性特性就越突出。另一种方法是观测波在岩石中的衰减，可以得到表征内摩擦的另一个参数——衰减系数 a ，对于完全弹性体， $a = 0$ ； a 值越大，非弹性性质越明显。 Q 和 a 都是描述岩石非弹性性质的，它们之间可以互换。在均匀介质中，不同位置得的振幅可以表示为

$$A(x) = A(x_0) \times \left(\frac{x_0}{x}\right)^n \times \exp[-a(x - x_0)] \quad (1.6)$$

式中， $A(x)$ 为 x 处振幅； $A(x_0)$ 为 x_0 处振幅； $\left(\frac{x_0}{x}\right)^n$ 为几何扩散造成的振幅降低，平面波 $n=0$ ； $\exp[-a(x - x_0)]$ 为衰减造成的振幅降低， a 为衰减系数。

Q 和 a 的关系可以表示为

$$\frac{1}{Q} = a \frac{v}{\pi f} \quad (1.7)$$

1.2 理论模型

我们知道，岩石是矿物的集合体，它是由多种矿物、孔隙等组成的多相物体。严格来说，岩石是一类不均匀的物体，因为岩石内部存在着不同的矿物、孔隙等。而波在物体内部传播的理论是建立在均匀物体的假定之上的。但是，当波长比岩石中存在的均匀尺度大许多

式中， ρ 为密度； K 和 μ 分别为体积模量与剪切模量。

另一类为横波，也称为 S 波，它的质点运动方向与波的传播方向垂直（如图 1.3b）。横波在岩石中传播的速度为

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.5)$$

1.1.4 岩石的衰减

岩石的性质，除了弹性性质外，还有非弹性性质——即衰减的性质。研究衰减性质的意义在于它主要不取决于岩石的宏观——整体性质，而主要是由岩石的微观性质——诸如岩石内部裂纹的密度、分布、结构和孔隙流体的相互作用等所确定。特别值得注意的是，对于岩石物理状态的变化，测量衰减性质比波速测量要灵敏得多，这一性质使得衰

时, 可以将岩石看做是一个统计意义上的均匀物体, 这时表征岩石特性的参量, 就可以看成是描述这样一个“等效体”的参量。前面介绍的波速、衰减等都是这种意义上的参量。

我们在解释岩石中波速和衰减等实验结果时, 遇到两个方面的问题。一方面, 如果知道了岩石各种矿物的性质, 各种矿物在岩石中所占的比例以及矿物的几何情况等, 能否由矿物的具体情况推导作为多相体的岩石的等效性质? 另一方面, 能否通过测量岩石的等效性质和利用其他可能的资料, 了解组成岩石的矿物情况? 显然, 这第二方面的问题在实际应用中有着重要的意义, 例如在解释地震勘探所得到的资料时, 岩石物理的知识就具有极其基础的意义。

为了解释实验结果, 必须建立岩石的物理模型。研究岩石结构模型的工作已经开展了很久, 所提出的模型大体上可以分成三类: (1) 由矿物性质进行体积平均, 推测岩石性质的模型 (简称空间平均模型); (2) 集中讨论岩石内部球形孔隙对岩石性质影响的球形孔隙模型; (3) 讨论椭球形裂纹及对岩性质影响的包裹体模型。以此为基础, 提出了许多地震波在多相岩体中传播的模型, 最典型的是空间平均模型和多孔介质模型。

1.2.1 空间平均模型

1910 年, Voight 提出一个模型, 假定组成岩石的各种矿物沿着受力方向平行排列, 并假定岩石中有 n 种矿物, 第 i 种矿物的体积模量为 K_i , 剪切模量为 μ_i , 所占岩石体积的百分比为 v_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。这时, 通过空间体积平均方法, 可以求出多相等效体的体积模量 K_V 和剪切模量 μ_V 分别为:

$$K_V = \sum_{i=1}^n v_i K_i; \mu_V = \sum_{i=1}^n v_i \mu_i \quad (1.8)$$

后来, Reuss (1929) 也提出类似的模型。在他的模型中, 矿物也是成层排列的, 不过成层的方向与应力方向垂直。这时计算出来的体积模量、剪切模量分别用 K_R 和 μ_R 表示, 具体为

$$\frac{1}{K_R} = \sum_{i=1}^n v_i / K_i; \frac{1}{\mu_R} = \sum_{i=1}^n v_i / \mu_i \quad (1.9)$$

不难证明, 通过 Voight 模型得到的结果是等效弹性参数估计的上限, 而通过 Reuss 模型得到的则是参数估计的下限, 实际岩石测量得到的参数必定落在这两个估计值之间。

Hill (1952) 提出了将这两种模型的结果取算术平均值的办法, 这样得到的值称为 VRH 值 (即用他们三人名字的第一字母缩写而成), 即

$$K_{VRH} = \frac{1}{2}(K_R + K_V); \mu_{VRH} = \frac{1}{2}(\mu_R + \mu_V) \quad (1.10)$$

Kumazawa (1969) 仿照 Hill 的做法, 对两种模型的结果取几何平均值, 即

$$K_{VRK} = (K_R \times K_V)^{\frac{1}{2}}; \mu_{VRK} = (\mu_R \times \mu_V)^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

大量实验结果表明, 通过矿物的弹性参数和矿物体积百分比计算出的速度, 在高压状态下, 与实际情况符合得很好。

1.2.2 多孔介质模型

地下介质是由充满流体的多孔骨架组成, 通常人们将岩石固体部分称基质 (有时也称为格架)。岩石的地震特性实际上是由格架、孔隙以及孔隙中的流体决定的。基质是由形成岩

石的各种矿物组成的，而孔隙流体可能是气体、油、水，或三者的混合物。如果地下介质的组分（如粒度、孔隙、裂隙和成层性）与有意义的地震波长相比很小，那么，地下介质就可以有效等价为均匀介质或均匀各向同性介质。1951 年，Gassmann 在流体和固体之间的任何相对运动与饱和岩层自身的运动相比可以忽略不计的假设条件下，推导了孔隙岩层充满流体时的弹性模量公式，奠定了近代沉积岩的弹性理论与物性之间研究的基础。其公式为

$$K_s = K_m \frac{K_d + Q}{K_m + Q} \quad (1.12a)$$

$$Q = K_f \frac{K_m - K_d}{\phi(K_m - K_f)} \quad (1.12b)$$

$$\mu_s = \mu_d \quad (1.12c)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{M}{\rho_s}} = \sqrt{\frac{K_s + \frac{4}{3}\mu_s}{\rho_s}} \quad (1.12d)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho_s}} \quad (1.12e)$$

式中， K_s 、 μ_s 分别为饱和岩石的体积模量和剪切模量； K_d 、 μ_d 分别为干岩石（空孔隙）体积模量和剪切模量（也称为格架体积模量和格架剪切模量）； K_m 为岩石基质体积模量； K_f 为岩石孔隙内流体的体积模量； ϕ 为孔隙度， v_p 、 v_s 、 ρ_s 分别为饱和岩石的纵、横波速度和密度。

1965 年 White 又将其改写为如下形式，即

$$K_s = K_d + \frac{\left(1 - \frac{K_d}{K_m}\right)^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}} \quad (1.13)$$

1998 年，Mavko 对上面公式进行了重排，得到如下形式，即

$$\frac{K_s}{K_m - K_s} = \frac{K_d}{K_m - K_d} + \frac{K_f}{\phi(K_m - K_f)} \quad (1.14)$$

值得指出的是这里的格架模量不同于干燥模量。对 Gassmann 方程的正确应用，应在束缚可湿流体（通常为水）的条件下测量骨架模量。束缚流体是岩石格架的一部分，不是孔隙空间。Wang 指出实验室岩样的过分干燥将导致错误的 Gassmann 结果。

Gassmann 方程的基本的假定条件是：（1）岩石（基质或骨架）宏观上是均质的；（2）所有孔隙都是连通或相通的；（3）所有孔隙都是充满流体（液体、气体或混合物）；（4）研究中的岩石—流体系统是封闭的（不排液）；（5）孔隙流体不对固体骨架产生软化或硬化的相互作用。

假设条件（1）是多孔介质中波传播理论的普遍假设，它确保了波长大于颗粒和孔隙尺寸。对于大多数岩石，频率范围从地震频率到实验室频率的波一般都能符合这个假设。

假设条件（2）意味着岩石具有高孔隙度和高渗透率，岩石中不存在孤立或连通性差的孔隙。这个假设的目的在于确保在半个周期的时间内波传播引发的孔隙流体流动的充分均衡。因此孔隙连通性与波长或频率有关。对于 Gassmann 方程，在假设无限波长（零频率