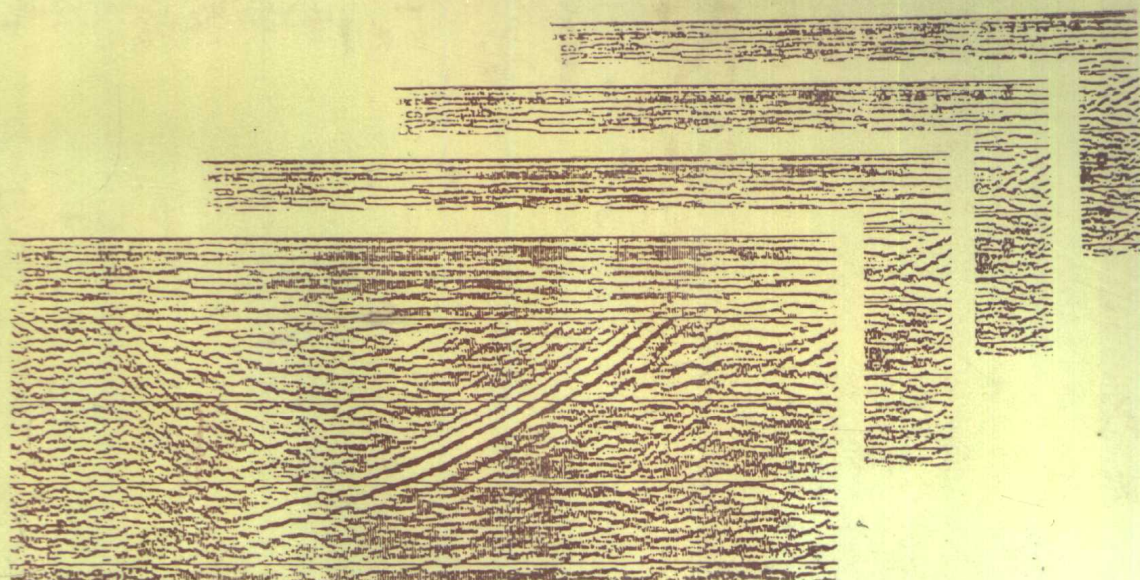


地震资料矿井构造 解释方法及其应用

崔若飞 编著



煤炭工业出版社

TD163

C-677

地震资料矿井构造解释方法及其应用

崔若飞 编著

煤炭工业出版社

854531

内 容 简 介

本书较系统地论述了利用地震资料进行矿井构造解释的理论和方法。主要包括:矿井构造解释的地质及地球物理基础,地震特征参数的定义、提取、处理和抽选,模式识别方法的基本原理,典型矿井构造的数学模拟,地震资料构造异常识别系统,以及有关小断层、陷落柱、煤层结构、煤层厚度变化等典型矿井构造的应用实例。

本书可供地震勘探、矿井地质、采矿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。

高等学校教学参考书 地震资料矿井构造解释方法及其应用

崔若飞 编著

责任编辑:宋德淑

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

北京地质印刷厂 印刷

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^1/16$ 印张 $7^{1/8}$

字数 166 千字 印数 1—500

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-5020-1512-4/TD163

书号 4281 定价:12.00 元

前 言

煤炭是我国的第一能源,大约占 75%,而且这种趋势到下世纪初不会改变。当前我国煤炭开采向两个方向发展,一个是新矿区要建成“高产高效”的现代化大型矿井,另一个是老矿区要上综合机械化采煤和高档普采工作面。因此在矿井的建设和生产过程中,工作面的合理布置、综采机组高产高效的发挥,以及矿工和整个矿井的安全等都依赖于矿井地质构造的查明程度。这样就要求在矿井开采以前,准确地查明采区内的地质构造。

从 80 年代起,高分辨率地震勘探技术已逐步发展完善,成为主要的煤田地质勘探手段并得以广泛使用。在地震地质条件较好的地区,可以查明落差 10m 左右的断层。即便如此,仍距煤矿综采对地质上的要求相差甚远。

长期以来,煤田地震勘探的方法和处理、解释技术一直仿效油气勘探,而没有考虑煤田的特点。如在“八五”期间,将岩性地震勘探作为重点,而忽视查明采区内地质构造这个采矿工程中的首要任务。实际上煤田地震资料有其鲜明的特点:由于勘探深度浅,则信号频率高、频带范围宽;由于煤层与其顶、底板岩层的物性差异大,则煤层反射波非常突出。但是,煤田地震资料解释的现状却不能令人满意,基本上依赖解释人员的经验来确定构造异常的位置。

从 1989 年起,中国矿业大学的部分教师将“利用地震资料进行矿井构造解释”课题作为科研的主攻方向。其目标是将现行的人工解释变成人机联作解释,将单凭人类经验的主观解释变成利用多个地震特征参数的客观解释,将解释手段从定性提高到半定量。该项研究具有较强的理论性和广泛的实用性,为煤田地震资料构造解释过程提供了一种全新的思路:将油气勘探中储层预测技术的基本原理与煤田地震资料的特点相结合,把计算机技术、模糊数学理论、模式识别技术、分形技术及人工神经网络技术进行综合并应用到地震资料的构造解释过程中。使用这种新的解释技术,可在地震地质条件理想的地区,查明采区内落差 5m 左右的小断层及其它小构造的分布情况,大幅度提高了现有的地震解释精度与可靠性,为矿井开拓准备工作(巷道布置、采区布置)提供准确的地质资料,给煤矿生产带来巨大的经济效益。

本书在内容上反映了作者多年来的研究成果,全书共分六章:第一章,阐述了矿井构造解释的理论基础;第二章,讨论了地震特征参数的定义、提取、处理和抽选;第三章,对典型的矿井构造进行了数学模拟研究;第四章,模式识别方法的基本原理;第五章,简述了地震资料构造异常识别系统;第六章,利用不同矿区、不同地震地质条件下的实际地震资料,对小断层、陷落柱、煤层结构、煤层厚度变化等典型矿井构造进行了解释。

在本书撰写过程中,中国矿业大学何锡麟教授、李志聃教授、刘天放教授、曹德欣副教授、杨文强博士均给予大力的支持和帮助,并提供了参考资料,张扬、王辉、罗明、赵爱华、于庆坤、许东、王磊、曹新领等同志为该项研究做了大量的基础性工作,在此表示衷心的感谢。

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。

编著者

1996 年 12 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 矿井构造解释的理论基础	(7)
第一节 典型的矿井构造	(7)
第二节 矿井构造解释的地球物理基础	(9)
第二章 地震特征参数的定义和提取	(15)
第一节 地震特征参数的定义	(15)
第二节 地震波的分形参数	(17)
第三节 地震波的最大熵谱	(25)
第四节 地震特征参数的提取和处理	(31)
第五节 地震特征参数的抽选	(33)
第三章 典型矿井构造的数学模拟	(37)
第一节 断层模型的数学模拟	(37)
第二节 陷落柱的数学模拟	(42)
第三节 煤层结构的数学模拟	(45)
第四节 煤厚变化的数学模拟	(49)
第四章 模式识别方法	(51)
第一节 模糊数学基础	(51)
第二节 模糊综合评判法	(55)
第三节 模糊聚类分析法	(60)
第四节 模糊模式识别法	(62)
第五节 分段线性模式识别法	(64)
第六节 灰色关联分析法	(68)
第七节 人工神经网络模式识别法	(69)
第五章 地震资料构造异常识别系统	(75)
第一节 系统简介	(75)
第二节 构造异常的解释原则	(77)
第六章 实际地震资料的矿井构造解释	(79)
第一节 涡北井田地震资料的断层解释	(79)
第二节 谢桥煤矿地震资料的断层解释	(88)
第三节 葛泉煤矿地震资料的陷落柱解释	(97)
第四节 梁宝寺勘探区地震资料的煤层结构解释	(99)
第五节 潘三煤矿地震资料的煤层厚度解释	(101)
参考文献	(107)

绪 论

一、煤田地震资料矿井构造解释的重要性

随着我国采煤技术的进步,煤矿生产也由“产量”型向“效益”型过渡。新矿区要建成“高产高效”型自动化矿井,老矿区要上综合机械化采煤和高档普采工作面。在现代化大型矿井的建设和生产过程中,综采工作面的合理布置、综采机组高产高效的发挥、矿工以至整个矿井的安全,依赖于矿井构造(指煤田被划分为井田后所遇见的中、小型地质构造)的查明程度。因此对煤田地质工作提出了更高的要求,要求准确地搞清采区内的细微地质构造,即建立高产高效地质保障系统,包括:查明落差 5m 左右的断层;查清陷落柱、老窑及采空区的空间分布形态;解决煤层分叉与合并、煤层厚度变化、岩浆岩侵入,以及煤层顶底板水文地质条件及力学性质等地质问题。

在我国不同地区、不同矿井所遇到的小构造问题各不相同,但它们对煤矿生产带来的影响却相同。概括起来有以下几点:

- (1)综采工作面的布置带有很大的盲目性,以至缩短工作面长度或改为普采。
- (2)造成大量无效进尺,使工作面的接替紧张。
- (3)采用钻爆法通过小断层和陷落柱时,造成大量人力、物力、财力的消耗。
- (4)频繁的设备搬迁,造成长时间的停产和设备损坏。

在综采工作面上,如果碰到落差与煤层厚度相近的断层,可使采煤成本提高 10%~20%;如果碰到落差更大的断层,则有可能使工作面报废。1995 年 12 月,峰峰矿务局梧桐庄矿由于断层构成导水通道,淹掉整个在建矿井,造成巨大的经济损失和人员伤亡。陷落柱给山西、河北、安徽的众多矿井的均衡生产带来影响,同时破坏了水文地质环境,一旦沟通含水层与井巷的联系,则使矿井突水淹井。1984 年 6 月,开滦矿务局范各庄矿发生了充水陷落柱特大透水事故,21h 就淹掉整个矿井。煤层分叉与合并、煤层厚度的变薄均会影响煤矿的生产,如果实际煤厚比设计煤厚变薄 10%~20%时,煤炭产量可下降 35%~40%。

80 年代以前,基本的勘探手段是传统地质学方法、地质统计方法、钻探和巷探,只能查找落差 30~50m 的断层。从 80 年代起,高分辨率地震勘探技术已经逐步发展完善,成为主要的煤田地质勘探手段,并得以广泛使用。目前,地震勘探广泛用于合理布置采区、主巷道的开拓、综采工作面开采地质条件的评价,为矿区开发设计提供可靠、正确的决策依据。在地震地质条件较好的地区,在几百米深度范围内可以查明落差 10~15m 的断层;在特别理想的条件下,甚至可以查明落差 5~10m 级的小断层。即便如此,仍距煤矿综采对地质上的要求相差甚远。

小断层是矿井生产中特别是综合机械化采煤过程中极为关注的构造问题,它是一个随地质勘探技术发展而变化的模糊概念。在目前技术条件下,一般指落差小于 10m 的断层。小断层(包括陷落柱、煤层结构及煤层厚度变化等其它矿井构造)是煤矿设计、建设及生产中最为关心的构造信息,查明这类规模的构造是当前中国乃至全球煤田地震勘探必须攻克的一大难题。

虽然小断层落差甚小,但仍能造成岩性或物性的横向变化,于是既会引起反射波运动学特征的变化,也会引起反射波动力学特征的变化。如果将反射波的运动学特征与动力学特征加以综合解释,就有可能提高小断层的解释精度与可信度。

从70年代起,油气地震勘探向岩性勘探、“直接找油”的方向发展,其中的“储层预测”技术受到地球物理学家的高度重视。它是以地球物理学、地质学、现代数学和计算机科学的新理论、新方法为基础,多学科相互交叉、相互渗透的产物。随着油气勘探的不断深入,特别是在常规地震资料含有微弱油气信息而人工难以分辨的情况下,在地震资料解释工作站上通过人机联作方式在常规地震资料中提取不同的地震波动力学参数(也称地震特征参数),并将各种模式识别方法(包括人工神经网络技术)对地震特征参数进行系统研究,从而确定主要岩性带的分布,预测含油气有利部位。

我国煤田地震资料采集和处理技术发展迅速,现已全部实现数字化和自动化。相比之下,地震资料解释方法和技术的发展却远远落后于资料的采集和处理。现行的地震资料解释方法主要是利用反射波至时间(运动学特征)来解决构造问题,而没有充分利用与地下构造及岩性等有关的动力学信息;另一方面是完全依赖解释人员的经验,从地震剖面上观察反射波时差的变化,并参考振幅、相位等因素来确定构造异常的位置。然而,如果一个断层的时差、振幅和相位有明显的变化,那么这个断层就不是一个小断层了。由于人的分辨能力有限,对于小断层的时差、振幅和相位等方面所造成的微小变化难以察觉,因此依靠传统的方法解释小断层和其它矿井构造具有很大的局限性。

由上述可知,我国煤田地震资料解释的现状是不能令人满意的。能否将“储层预测”这一先进解释技术用于煤田地震资料解释中呢?能否使煤田地震资料解释方法和技术与国内外先进水平保持同步呢?从1989年起,我们把油气勘探中储层预测技术的基本原理与煤田地震资料的特点相结合,研究利用地震特征参数及模式识别方法综合解释矿井构造的技术,建立了地震资料构造异常识别系统,为利用煤田地震资料进行矿井构造解释提供了一种全新的方法。

二、地震资料解释技术的研究现状

60年代以前,国外煤田勘探较少采用地面物探方法。如前苏联在1966~1970年间,物探工作仅占地质勘探工作量的8.1%。进入70年代以后,英、美、德、前苏联等国纷纷应用以地震勘探为主的地面物探方法,并将其作为一种主要的勘探手段,同时应用地震勘探技术研究小断层也有所发展。总的来说,国外在这方面的研究主要有以下特点:

(1)勘探深度浅,且覆盖层薄,故相对深层而言,用地震勘探技术查找断层难度小些。

(2)利用高分辨率二维和三维地震勘探技术,可以准确查明落差10m左右的断层,但主要还是利用反射波运动学特征来进行构造解释,丰富的动力学信息未加以利用。

(3)70年代“石油危机”时,各国在煤田地震勘探领域投入巨资进行深入研究。80年代“石油危机”过后,煤田地震勘探技术水平没有明显进展。

我国煤田地震勘探起步较晚,80年代前,从资料采集到处理、解释技术,基本上是油气地震勘探的翻板。在80年代以后,发展了具有煤田特点的高分辨率二维地震勘探技术。进入90年代,三维地震勘探技术才得到应用。

地震资料解释技术的发展同计算机技术与勘探地球物理计算技术密切相关。被称为“90年代技术”的模式识别技术、分形技术和人工神经网络技术已经在地震资料解释中得到广泛

应用,而地震特征参数则是应用模式识别技术及神经网络技术的基础。所有这些计算技术均离不开计算机系统,均采用人机联作解释方式。

1. 人机联作解释技术

人机联作地震解释系统本质上是一个计算机系统,它利用地震资料解释工作站并配有各种处理、解释、绘图软件,具有强大的计算和显示功能。由于人机联作地震解释系统速度快、信息丰富、解释手段多样灵活,故可以快速而准确地提供解释成果,较人工解释的效率、质量及信息利用率等方面大幅度地提高。

80年代后,地震资料解释工作站在油气勘探中得到广泛应用,并逐渐加以完善。由于它能综合解释地质、测井、地震资料,并兼有处理、解释、绘图能力,所以在煤田地震勘探中,即适用于资源勘探阶段,也适用于矿区开发阶段。1994年,中国煤田地质总局物探研究院引进2台地震资料解释工作站,主机是SUN1000,配备了GEOQUEST公司的地震/地质解释软件包,主要用于采区的三维地震资料解释,这套系统运行后使煤田地震勘探的解释水平有所提高。

2. 地震特征参数解释技术

在高分辨率的前提下,如何进一步解释落差更小的断层及其它小构造?一些地球物理工作者提出利用地震特征参数来解决这个问题:高如曾(1988)在石油地震资料中应用多个动力学参数解释小断层;于立微(1991)利用地震波振幅特性做了定量解释煤层中小断层的研究工作;朱华荣等(1992)将地震波运动学特征与动力学特征相结合解释煤层结构(煤层的分叉与合并);张立昌(1988)、姚建阳(1991)、程增庆(1991)等分别研究了利用不同的动力学参数计算薄储层或煤层的厚度。上述这些工作仅定性地利用了地震特征参数,尚未把它们综合起来进行小构造的定量解释。

3. 模式识别技术

70年代初期,模式识别方法被Gelfand等人引入地震学研究领域,在强震危险地点判定、地震预测、强震发生的动力因子、大地震和其它地学现象的相关性等方面得到广泛应用。1983年,联合国教科文组织在意大利举办了“模式识别方法与地震活动性分析”学习班,将推广这种方法。我国地震工作者从1982年起也开展了这方面的研究,并取得了有意义的结果(王碧泉,1982;马季芳,1985)。

美国控制论专家Zadeh于1965年首先提出模糊集合的概念,创建了模糊集理论方法(也称模糊数学)。从80年代初期起,美国、日本、新西兰及我国地震学者分别把模糊数学中的基本思想与模式识别理论相结合,形成了地震学的一个新的研究领域——模糊地震学。

由于模糊领域的信息统计量更适应描述地震信息量的特征,模糊数学方法在地球物理勘探领域也逐渐成为一个引人注目和深入研究的课题。在我国,高如曾(1984)首先将模糊数学方法引入石油物探当中,以构造部位、曲率、气底振幅比、瞬时相位、瞬时频率、视极性与气顶振幅比等6种参数为基础,利用综合评判方法预测油气富集带;张运陶等(1986)对高如曾的方法进行了改进,使整个计算过程比较简单;高哲民等(1987)将直接模糊模式识别法用于地震相模式识别中,推动了地震地层学的发展;张运陶等(1988)又把模糊模式识别及模糊综合评判方法应用于测井多参数评价油气层,取得了较好的评价效果;张银凤等(1989)指出了模糊聚类方法在地震层位自动对比中的应用,详细分析了地震剖面所具有的模糊性质;1990年,杨再朝、肖辞源等分别将不同的模糊数学方法用于预测油气圈闭和油气富集带。随后,又

有不少文章介绍利用不同模糊数学方法解决油气勘探中的不同问题,如廖明光等(1991)的间接模糊模式识别方法识别沉积相;陈永仁等(1992)的多级模糊综合评判方法评价不同勘探阶段的圈闭构造及间接模糊模式识别方法进行的多元模糊聚类方法划分微地震相;刘力辉等(1994)采用灰色理论进行油气藏预测。

概括起来,模糊地震学在油气地震勘探中得到广泛的应用,主要是利用模糊模式识别、模糊聚类分析、模糊综合评判、灰色关联分析等各种不同方法来研究地震相、层位对比、油气圈闭、储层横向预测等问题。在煤田地震勘探中,尚未见有这方面的报导。

4. 分形技术

1977年,法国数学家 Mandelbrot 首次提出分形几何学的设想,并在 10 多年中使其得到了较快的发展,分形理论已被广泛用于众多领域,包括自然科学和社会科学。分形学作为数学的一个新的分支,在 80 年代已成为热门学科之一,它为非均匀性、突变性、差异性和间断性的研究提供了一种行之有效的工具。

长期以来,人们习惯于在欧氏空间中研究问题,而自然界中有很多问题是无法用传统科学解决的。分形几何学更准确地揭示了自然界的本来面貌,用简单方法描述复杂现象,用规则的方法处理不规则的问题。在越混乱、越无规则、越复杂的领域,它就越有成效。

分形理论的基本观点是维数的变化为连续的,处理的对象具有非规则性和自相似性。自然界中的自相似性是普遍存在的,这也是分形几何学得到广泛应用的原因。自相似性是指几何体(或图像)在它的不同方向上放大或缩小同样的倍数,所得几何体(或图像)与之完全相似,即局部是整体比例缩小的映象。

Hirata(1988)及 Yielding(1992)的研究结果表明:岩石破裂过程具有自相似性,断层与裂缝具有自相似结构。由此,人们有可能利用地震资料对落差小于地震分辨率的小断层及裂缝做分形预测。

在地球物理学中,分形学较早地被应用于天然地震研究中(洪时中,1990;冯德益,1991)。分形学在地球物理勘探领域中的应用研究尚处于起步阶段,主要集中在油气预测(Goupillaud,1990;何光明,1992;汪富泉,1992;钱绍新,1993;曾锦光,1994;胡运来,1995;蒋加钰,1995;肖创柏,1996)、地震数据压缩与恢复(陈志文,1992)、小断层及裂缝发育带预测(King,1983;Mandelbrot,1982;Hirata,1988;Yielding,1992;何光明,1992;吴大奎,1995)等三个方面。

迄今为止,煤田物探界尚未有应用分形理论解决实际问题的先例。

5. 人工神经网络技术

人工神经网络是一门新兴的信息处理技术。它是根据目前人们对生物神经系统的理解和认识,将人的大脑功能加以模型化的一种计算机信息处理系统。1987年,国际神经网络学会成立,标志着这门新学科的诞生。作为多学科的交叉科学与研究前沿,人工神经网络的并行处理能力、自组织能力,以及高度的分类、计算和容错能力引起各学科研究人员的极大兴趣,现已成为当代高科技领域中方兴未艾的竞争热点。几年来,它成功地应用于信号分析、设备故障诊断、生产系统及质量控制、图像语言处理等许多领域。

从 1988 年起,神经网络也引起国内外地球物理界的重视,勘探地球物理学家很快将人工神经网络技术引入自己的领域。目前在地震、电法、重力、磁法及测井等诸方面都取得了一些成果,特别是在地震勘探和测井方面的研究更加深入,某些方面已达到实用水平。

神经网络具有许多优点和用途,目前在地球物理中的应用主要是模式识别能力,传统的模式识别是将样本按线性分类法将其分类,而神经网络是将具有 n 个分量的输入向量转换成具有 p 个分量的输出向量的非线性系统,原则上可以完成任何复杂的非线性分类工作。由于神经网络具有很强的优于常规模式识别的能力,它能够通过样本进行学习,具有在强干扰下的适应性。因此,它首先被美国地球物理学家 McCormack 和 Murat(1991)用来做地震道自动编辑和初至自动拾取。Li-XinWang 等人(1992)将 Hopfield 神经网络用于地震信号反褶积和震源子波估计。Osborne(1992)利用神经网络为油田开采提供更加精细和可靠的储层渗透率。此外,勘探地球物理学家将神经网络的应用研究重点放在地震资料的自动解释方面。因为这一环节长期以来完全依赖于人的知识和经验,而神经网络的并行算法和高度模式识别能力恰好弥补了这方面的不足。主要的研究内容包括:反射层自动追踪、亮点和异常振幅检测、速度和深度反演、地震剖面模式识别和油气预测专家系统。例如,张学工(1992)利用人工神经网络,实现地震记录中的废道自动切除;蔡煜东(1993)研究应用人工神经网络系统中的反向传播模型,对碳酸盐岩储层进行油气预测;姚姚和周熙襄(1994)利用人工神经网络实现同相轴自动拾取和地震道自动编辑;庄东海(1994)利用人工神经网络自动拾取地震记录初至;董林平等(1996)用人工神经网络自动解释速度谱;庄东海等(1996)用人工神经网络计算薄层厚度。

三、地震资料矿井构造解释方法

针对煤田地震勘探现阶段的主要任务,为了查明采区内的小型地质构造,就必须对现行的人工解释方法进行改革,充分利用已经具备的软、硬件条件,寻找一种新的具有煤田地震资料特点的矿井构造解释方法。完成这种方法需要做以下几个方面的工作:

1. 矿井构造规律的研究

从地质学研究的角度出发,深入了解矿井构造(特别是小断层)的形成机制和规律性,充分了解煤田地质、构造地质和矿井构造的预测和评价理论及方法。

2. 分辨率的理论研究

利用波动方程方法,对于不同落差的断层模型、不同尺度的陷落柱模型、煤层分叉与合并模型、煤层厚度变化模型选择不同频率进行数学模拟,并且提取有关层位的地震特征参数,应用模式识别技术进行定量分析,对各种构造异常体的纵向分辨率和横向分辨率进行理论研究。

3. 地震特征参数提取及特征度量理论的研究

地震资料人工解释中,只能利用 1~2 个地震参数,如借助模式识别技术,可以同时研究大量的地震参数。因此如何提取更多适合于小构造解释的地震特征参数,这是保证取得良好地质效果的前提。在矿井构造解释中,并非地震特征参数越多越好,要考虑各参数与构造异常体的相关性(即对构造解释的贡献率),这就要求制定一种标准,对所提取的地震特征参数进行客观衡量,因地制宜地选择最有效的地震特征参数参加构造解释。

4. 模式识别理论和方法的研究

在利用地震资料进行矿井构造解释过程中,要求根据不同的地质条件选择不同的模式识别方法、不同的地震特征参数,并使地震特征参数的提取与处理、标准模式的选取、构造异常识别整个解释过程自动化和系统化,形成地震资料构造异常识别系统,能够在微机及地震资料解释工作站上使用。

5. 实际地震资料的矿井构造解释

应用地震资料构造异常识别系统,对不同类型矿区的实际地震资料进行矿井构造解释。首先选择地震地质条件较好,且构造条件较简单,以及地震资料的信噪比和分辨率均较高的矿区;然后选择地震地质条件较差,且构造条件比较复杂,地震资料的信噪比和分辨率均较低的矿区。要求这些矿井均是生产矿井,地质(巷道)资料可以立即对地震解释成果进行验证。地震资料矿井构造解释方法的最终目的是:在地震地质条件较好的地区,配合人工解释,能够查清落差为 5m 左右的小断层,大大提高地震资料解释的精度和可靠性。

第一章 矿井构造解释的理论基础

第一节 典型的矿井构造

一、断层

断层构造是在一定的地质条件下产生的,尽管不同矿区的地质背景不同,构造特征也不同,但它们在许多方面又具有共同的规律性。

含煤岩系是指一套含有煤层的沉积岩系,主要由砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、石灰岩和煤层组成,其中,碎屑岩和泥质岩类是煤系地层的基本类型。

断裂构造是岩石发生脆性变形的产物,断层是岩石沿某个面的破裂和沿该面的位移。受煤系沉积物岩性、变形环境及构造应力的共同控制,断层有多种表现形式。按断层面力学性质,可分为:压性断层、剪性断层和张性断层;按两盘相对运动性质,可分为:正断层、逆断层和平移断层;按几何关系,可分为:走向断层、倾向断层、斜向断层和顺层断层。

煤岩层的组合形式,对构造变形具有明显的控制作用。在煤系地层中,如果主要是厚层坚硬岩层时,构造变形以脆性为主,形成断裂构造。对于煤层来说,如果顶、底板与坚硬岩层呈规则接触,则其内应力相对不易集中,断层较少,且以小断层为主;如果顶、底板岩性相反,或与煤层呈不规则面接触,则煤层变形复杂,断层增多。

矿区中的断层具有一系列典型特征:首先以脆性破裂为标志,走向上延伸呈波状,具有明显的破裂面;其次,断层规模有大有小,断层带由破裂岩组成,充填物一般不发生动力变质或重结晶作用。受多种因素的影响,不同矿区构造形迹的展布具有不同的表现特征。一定构造环境下发生的各种构造并不是杂乱无章,而是具有某些共同的基本规律,同时各种不同构造类型之间又有密切的联系。因此认识并善于运用这些地质规律,对于利用地震资料进行小断层解释十分有益。

在矿区内,构造展布的基本规律如下:

1. 方向性和成带性

方向性是指在相当大的范围内,同期构造作用产生的构造,无论是构造形迹本身,还是相互之间,都具有构造的方向性。它产生的原因是形成构造的应力,为一种具有方向性的矢量。

成带性是指中小型断裂构造在某一构造部位沿某一特定方向密集成带延伸的性质。它是地壳中应力不均匀分布和应力呈带集中的结果,与构造发生时的边界条件和应力作用方式密切相关。

2. 对称性和递变性

对称性是指同级构造复杂程度大致呈镜像反映的性质。如褶皱轴部构造复杂带两侧对称出现构造简单带,褶皱翼部构造简单带两侧又同时出现复杂带。

递变性是指构造复杂程度由简单到复杂或小断层由疏到密、构造规模由小到大逐渐过渡的性质。它是构造应力场中应力大小和方向逐渐递变的结果。

3. 等距性和分区性

等距性是指在相同构造变形环境中,相邻同级构造带或构造形迹之间表现出的等间距分布的性质。它是一种普遍存在的构造规律。分区性是指矿区内部不同地带由构造复杂程度、展布方式、组合形式共同体现出一定差异的性质,这种性质一方面表明矿区构造具有不均一性,另一方面这种不均一性又具有一定的随机性。

4. 组合规律

在不同矿区或不同时代的地层中,由许多构造以某种固定形式反复出现,形成具有共性的构造集合体,即“构造形式”。矿区内常见的有棋盘格构造、多字型构造、人字型构造、弧型构造等。

二、陷落柱

陷落柱是煤系地层底板厚层灰岩中古溶洞裂隙的塌陷物,以及上覆地层塌陷物形成的塌陷体,统称为陷落柱和塌陷柱。根据目前掌握的资料,我国华北各煤田岩溶陷落柱比较发育,主要是指石炭二叠系煤系地层下部的奥陶系灰岩中古溶洞(裂隙)的塌陷形成的柱体。

1. 陷落柱的构造特征

在平面上,陷落柱多呈椭圆形,其次为圆形和不规则形。其直径大小不一,一般为几十米至几百米,最大可达千米。

在垂直剖面上,陷落柱有四种形态,即:上小下大的圆锥型(图 1-1a)、上下大小相近的筒型(图 1-1b)、斜塔型(图 1-1c)和不规则型(图 1-1d)。

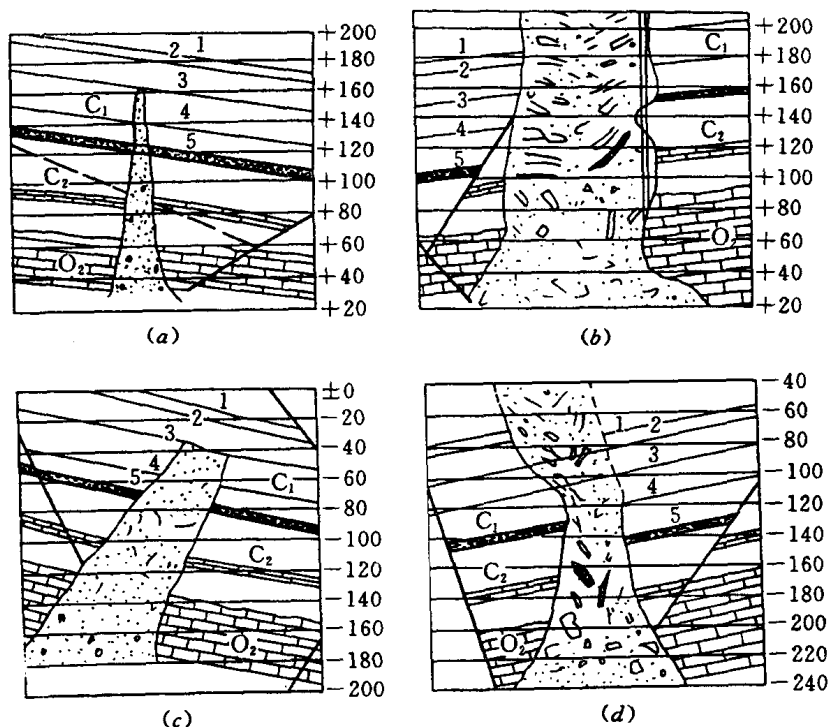


图 1-1 陷落柱的形态特征

陷落柱的塌陷高度是指奥陶系灰岩顶面到柱体顶端的距离,一般为几十米至百余米,大多数在煤系或其上部终止塌陷,少数可塌陷至地表。

2. 陷落柱的内部结构

陷落柱内混杂堆积着破碎岩块,层序无法确定,岩块间由泥质物质充填,且被压缩的非常紧密坚硬。陷落柱内岩块的岩性,主要取决于上部岩层,岩块棱角分明、排列紊乱、胶结程度不一。

三、煤层结构及厚度变化

我国某些煤田中,经常遇到煤层的分叉、合并、缺失现象,统称为煤层结构的变化。煤层结构的变化是由于煤层沉积缺失和受古河道冲刷引起的(图 1-2)。如图中,分为分叉、合并、 3_F 煤缺失等三类。北部合并区的 3 煤厚度为 $7.45 \sim 10.05\text{m}$;南部合并区的 3 煤厚度为 $8.80 \sim 10.47\text{m}$;分叉及 3_F 煤缺失区的 3_U 、 3_F 煤的厚度变化很快,分别为 $2.44 \sim 6.59\text{m}$ 和 $0 \sim 3.60\text{m}$,两分煤层的层间距沿分叉方向逐渐加大。煤层结构及厚度的变化是煤矿井中常见的地质现象,它对生产影响极大,是采区地震勘探中急需解决的地质构造问题。

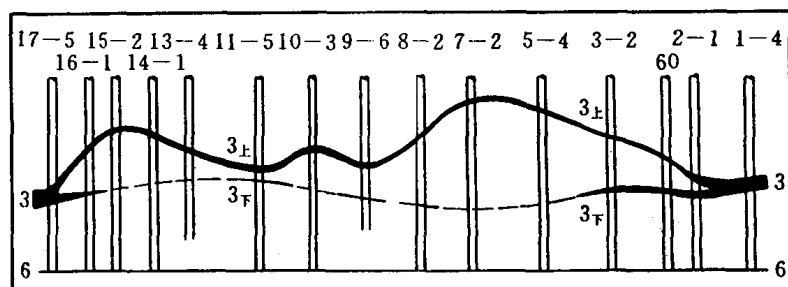


图 1-2 山东唐口煤田 3 煤层结构变化示意图

(据朱华荣等,1992)

第二节 矿井构造解释的地球物理基础

一、煤层反射波

由于煤田具有独特的沉积环境与地质条件,所以煤层反射波也具有其特殊性。与围岩相比,煤层具有明显的低速、低密度特点,即煤层的顶、底板与围岩之间有较强的波阻抗差异。界面上的反射系数为

$$R = \frac{\rho_{\text{围}} \cdot v_{\text{围}} - \rho_{\text{煤}} \cdot v_{\text{煤}}}{\rho_{\text{围}} \cdot v_{\text{围}} + \rho_{\text{煤}} \cdot v_{\text{煤}}} \quad (1-1)$$

式中 $\rho_{\text{围}}$ 、 $\rho_{\text{煤}}$ ——围岩与煤层的密度, g/cm^3 ;

$v_{\text{围}}$ 、 $v_{\text{煤}}$ ——围岩与煤层的速度, m/s 。

围岩一般以砂岩、泥岩和灰岩为主, $\rho_{\text{围}} = 2.4 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$, $v_{\text{围}} = 4000 \sim 5000 \text{ m/s}$;煤层中, $\rho_{\text{煤}} = 1.3 \text{ g/cm}^3$, $v_{\text{煤}} = 1800 \sim 2000 \text{ m/s}$ 。经计算,煤层顶、底界面的反射系数约为 0.5,所以它们是很好的反射界面,均能形成较强的煤层反射波。

由式(1-1)可知,地震波从致密介质入射到疏松介质, R 为负;反之, R 为正。因此煤层顶界面的 R 为负,底界面的 R 为正。如果上、下围岩的速度、密度相同,则 $R_1 = -R_2$,煤层顶、底界面是两个极性相反的反射界面。

煤层的厚度通常在 $0 \sim 20\text{m}$ 之间变化,相对于地震波在煤层中传播的主波长 λ (一般为

20~50m)是比较小的。所以在地震勘探中,煤层属于薄层。对薄层的定量划分,长期以来没有统一的标准,不同的学者给薄层下过不同的定义。习惯上认为,层厚小于 $\lambda/4$ 的地层为薄层。严格地说,薄层的范围是动态的,它不仅与地层的实际厚度有关,还与勘探深度及入射波主频有关。

由于煤层的厚度小,偶极性反射界面及高反射系数决定了煤层反射波有以下特点:

(1)煤层反射波在煤层顶、底界面的双程旅行时间 $\tau(\tau=2H/v)$ 远小于地震波周期 T ,即 $\tau \ll T$ 。因此煤层反射波是顶、底界面反射波相互叠加形成的复合波,在剖面上以近似于单波的复波出现。

(2)由于煤层顶、底界面是良好的反射界面,除了考虑顶、底界面的反射纵波外,也应考虑多次反射波、转换波及多次转换波。

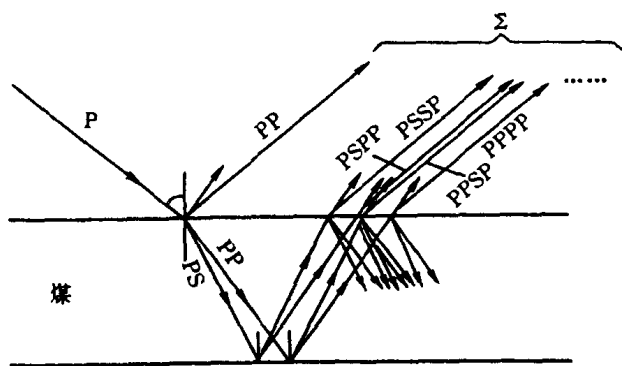


图 1-3 煤层反射波的形成
(据刘天放,1990)

如图 1-3 所示,一个单频谐和平面纵波 P 入射到煤层,在顶界面上将产生 2 个反射波 PP、PS,2 个折射波 PP、PS。前者在煤层中向下传播,在底界面上将产生 4 个反射波返回,在顶界面上又将产生 8 个反射波返回煤层,而下行形成多次反射波及多次转换波。同时,有 8 个折射波透过顶界面,与多次波一道进入上层介质。由于同类波具有相同速度与传播方向,按一定的相移关系叠加在一起而形成了煤层反射波。这种叠加作用使煤层反射波增强,但对煤层顶、底界面的

分辨带来困难。实际上当煤层厚度 $H < \lambda/2$ 时,顶、底界面的反射波就无法分辨。

二、地震分辨率

利用模式识别技术能否对现有地震资料进行定量分析,以及对各种构造异常(如小断层或煤厚变化)进行判断和识别,就有必要对地震分辨率问题加以讨论。

分辨率是指将两个非常靠近的异常区分开的能力。地震分辨率分为纵向分辨率和横向分辨率。

1. 纵向分辨率

纵向分辨率是指沿地层垂直方向所能分辨的最薄地层的厚度。以煤层为例,纵向分辨率就是能分开煤层顶、底界面反射波的极限厚度或双程旅行时间。Rayleigh, Ricker, Widess 根据自己的研究,提出了不同的准则。

1) Rayleigh 准则 该准则最初是定义于光学系统中,并且仅适用于可见光。之后,它被引用到地震勘探领域中。

在光学系统中,点光源类似于地震波点震源,光学仪器类似于介质,绕射波相当于频谱有限的地震子波。光学系统的分辨率定义为它区分两个相邻物体影像的能力。

Rayleigh 准则定义一个绕射波的中央峰点到相邻谷点间的时差 $b/2$ 为光学系统的纵向分辨率。图 1-4 表明,当两个物体的影像时差大于或等于 $b/2$ 时,它们能够被分辨;当两个物体的影像时差小于 $b/2$ 时,它们不可分辨。

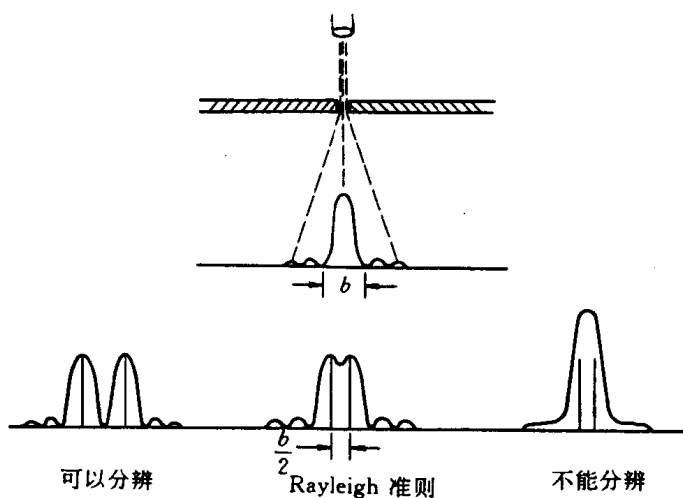


图 1-4 纵向分辨率的 Rayleigh 准则

由此可知,如果想得到较高的纵向分辨率,必须使 $b/2$ 尽可能小。按照 Rayleigh 准则,使地震子波的一阶导数等于零,可以求出两个极值点(峰点和谷点),从而确定时差 $b/2$ 。

下面给出 Rayleigh 准则的定量关系,对于 Ricker 子波

$$W(t) = (1 - 2(\pi f_p t)^2) \exp(-(\pi f_p t)^2) \quad (1-2)$$

式中 f_p ——子波的峰值频率,Hz。

对 $W(t)$ 求一次导数,并令其等于零,即 $W'(t)=0$,得到纵向分辨率 $b/2$

$$\frac{b}{2} = \frac{1}{2.6 f_p} \quad (1-3)$$

式(1-3)中的 $b/2$ 是用双程旅行时间定义的,故称为时间分辨率。将时间换算成厚度,称为地层分辨率 ΔH_R ,它与地震波主波长 λ 的关系为

$$\Delta H_R = \frac{\lambda}{4.0} \quad (1-4)$$

2) Ricker 准则 该准则定义子波主峰上两个拐点间的时差 T_R 作为纵向分辨率(图 1-5)。

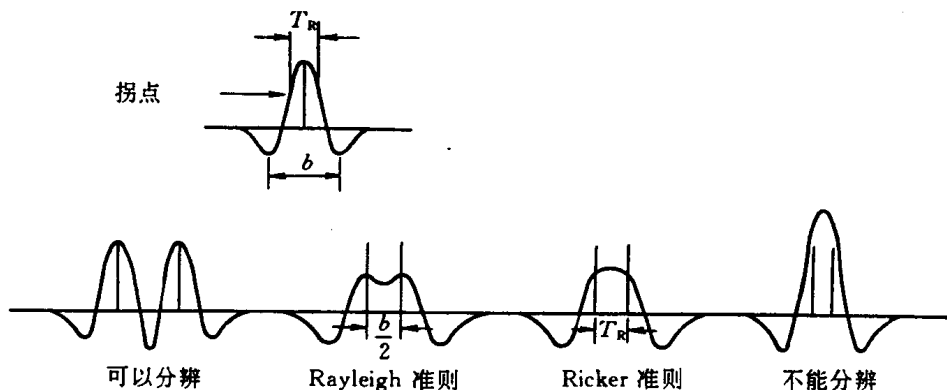


图 1-5 纵向分辨率的 Ricker 准则

按 Ricker 准则,令子波的一阶导数等于零便可求出 T_R 。仍以 Ricker 子波为例,对 $W(t)$ 求两次导数,并令 $W''(t)=0$,得到

$$T_R = \frac{1}{3.0f_p} \quad (1-5)$$

和

$$\Delta H_R = \frac{\lambda}{4.62} \quad (1-6)$$

3) Widess 准则 1973 年, Widess 从薄层的概念出发研究分辨率,将厚度小于 $\lambda/8$ 的地层定义为“薄层”,将地层分辨率 ΔH_R 定义为

$$\Delta H_R = \frac{\lambda}{8} \quad (1-7)$$

通过上述讨论可以看出,这三种纵向分辨率准则并不存在根本差异。Rayleigh 准则和 Widess 准则分别用 $\lambda/4$ 和 $\lambda/8$ 作为纵向分辨率,而 Ricker 准则介于二者之间。它们的共同特点是仅用单一(时差)参数作为衡量纵向分辨率标准。

在地震剖面上,用肉眼辨别厚度为 $\lambda/4$ 的地层比较容易;辨别厚度为 $\lambda/4 \sim \lambda/8$ 的地层已成可能;辨别厚度小于 $\lambda/8$ 的地层则比较困难,必须利用地震波的其它特征才能加以识别。特别强调,任何一种纵向分辨率准则都不是绝对不可逾越,它仅是在某种给定条件下的参考标准。许多地震勘探成果已超过了 Widess 分辨率的限度。

2. 横向分辨率

横向分辨率是指沿地层横向所能分辨的最小地质体的宽度。按照波动的观点,反射波是地下界面上众多点源发出的绕射波叠加的结果。因此地面某点所接收的反射波能量主要来自界面上某个范围,这个范围称第一菲涅尔带。图 1-6 表明,不同地质体的反射响应单位是第一菲涅尔带。当地质体的宽度小于第一菲涅尔带时,反射波类似于绕射波,不能表明地质体的形状。当地质体的宽度等于第一菲涅尔带时,反射波开始显示地质体形态特征。

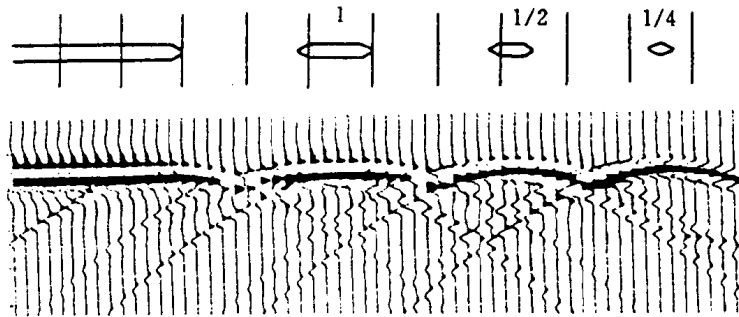


图 1-6 不同地质体的反射响应

若把地震波视为球面波,间隔为 $\lambda/4$ 的两个球面波前到达界面时,其水平宽度就是所谓的第一菲涅尔带(图 1-7)。

从图 1-7 的简单几何关系,可求得第一菲涅尔带半径 R_1 。即

$$R_1 = \sqrt{\frac{\lambda h_0}{2}} = \sqrt{\frac{v h_0}{2f}} \quad (1-8)$$

式中 h_0 —— 反射界面深度, m;

v —— 平均速度, m/s;