

讲座连载

《地震相分析》讲座 (一)

王 英 民

(成都地质学院)

引 言

在石油、煤炭等地下沉积矿产的勘探开发中,沉积相研究具有极为重要的意义。然而,由于目的层深埋于地下,因此所采用的研究手段和研究方法与露头区的沉积相研究相比有很大不同。

在地下相分析中只有通过岩心资料才能够观察到目的层的沉积相标志,而钻井取心一般都不是连续进行的,并且一口探井的全井取心率往往只有百分之几到百分之十几,这给沉积相研究造成很大困难。利用电测井资料进行测井相分析虽可对全井做出连续的沉积相解释,但其多解性较强,因此除了上述两种资料外,还迫切需要从其它资料中获取更多的信息以提高沉积相解释的准确性。

更重要的是,即使单井相分析的资料足够充分,解释完全正确,但毕竟只是“一孔之见”。要想进一步掌握沉积相的平面展布特征就必须有大量的足够密集的钻孔,而这在勘探阶段恰恰难以满足。因此迫切需要一种仅用少量钻孔就能较好地掌握沉积相平面变化特征的新手段、新方法。

地震相分析正是为满足上述迫切需要而产生的。地震相就是在地震反射时间剖面上所表现出来的反射波的面貌。地震相分析则是根据地震相特征进行沉积相的解释推断。在石油勘探及某些煤田勘探中,地震勘探资料是必不可少的重要基础资料。这些资料一般在勘探初期就可获得,且一般都能覆盖整个盆地,其中具有极为丰富的地层、构造和沉积相信息,因此是地下分析中极为宝贵的基础资料。地震相分析作为地震地层学的一个重要组成部分,诞生于 1977 年左右,并在世界上迅速传播。十几年来它在广泛的实践中不断发展完善,已成为地下相分析不可缺少的锐利武器。

此讲座做为入门读物力求浅显易懂,并重在提高实际动手能力。同时也注意尽量反映国内外学科发展的最新动态,以体现出新颖性和先进性。在地震相标志的分类、命名上,以及地震相分析的思路和方法上,本讲座与目前国内外较为流行的一些教材或专著不尽相同,引入了作者几年来在科研和教学实践中所提出的一些新概念和新观点。提请读者注意与国外代表性的专著和国内代表性的教材对照学习,并结合个人的科研生产实践形成自己的独立见解。同时恳请能对本讲座提出宝贵的批评建议。

第一章 地震相标志

一、地震反射资料

为便于理解,我们可用如下方式高度简化地理解地震勘探过程:在地表安置一个检波器,同时激发一个地震波,当其向下传播时遇到波阻抗界面(通常为地层界面或岩性界面)则有部分能量向上反射,部分能量继续向下传播直至遇到另一个波阻界面,如此类推。地面检波器将各波阻抗界面反射上来的反射波按先后到达顺序依次记录下来,就形成一条所谓的“单道地震记录”。它是一条由波峰和波谷交替出现的似正弦波曲线。其中任何一个波峰或波谷都称为一个相位,而曲线在任何一点上与基线间的幅值都称为该点的视振幅,它反映了反射波于那一瞬间在检波器处所引起的振动的大小。相邻波峰之间或波谷之间的时间差称之为视周期,而视周期的倒数则称之为视频率。沿着测线每隔一定间距进行一次地震波的激发和接收,将得到的各单道地震记录依次并排放在一起,就形成一张地震反射时间剖面,简称地震剖面。

在地震剖面上(图1),其纵坐标是地震波由地表传至地下反射界面再反射至地表的双程旅行时间,而横坐标则为沿测线方向上的距离。剖面中由各单道地震记录的相同相位所构成的波峰面或波谷面称为同相轴,它是地震剖面的基本组成部分,其特征包含有丰富的地质信息,是地震资料解释的主要对象。

除获取地震剖面外,地震勘探的另一任务是利用地震反演技术从原始地震记录中求取地下岩层的各种物理参数,如速度、波阻抗、反射系数和吸收系数等。据此可对地下岩层的岩性、孔隙度和流体性质等做出解释推断。

综上所述,在地震勘探过程中主要获取两类资料:一类是地震反射时间剖面;另一类是地下岩层的物理参数。后者可用以进行岩性解释从而对地下相分

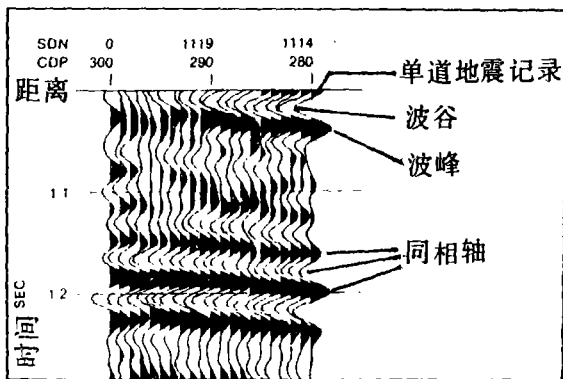


图1 地震反射时间剖面

析十分有用,但由于地震反演方法所需费用太大,通常仅在局部圈闭评价时才使用,故它只能是地震相分析的一种辅助手段。在沉积盆地的区域性地下相分析中,主要是利用地震剖面进行的。

二、地震相标志的基本类型

地震相标志是地震相分析的基础,它必须在一定的地震地层单元内部进行。最重要的地震地层单元是层序,它被定义为相对整合的,成因上有联系的,其顶部和底部以不整合面及与之可对比的整合界面为界的一套地层,主要根据地震剖面上的上超,削蚀及退覆型顶超来划分。在层序内部可进一步细分为准层序组,每个准层序组都具有独特的沉积体系

域特征,并以重大海侵面为界,这一界面在地震剖面上表现为很强的连续反射同相轴,并在界面上下伴生有下超和前积型顶超。有关层序、准层序组、准层序等层序地层单位,以及上超、下超、削蚀、退覆型顶超和前积型顶超等地层接触关系的概念见图2。由于不同准层序组之间存在着沉积体系域的显著差别,因此应以准层序组作为地震相分析的基本地震地层单元。

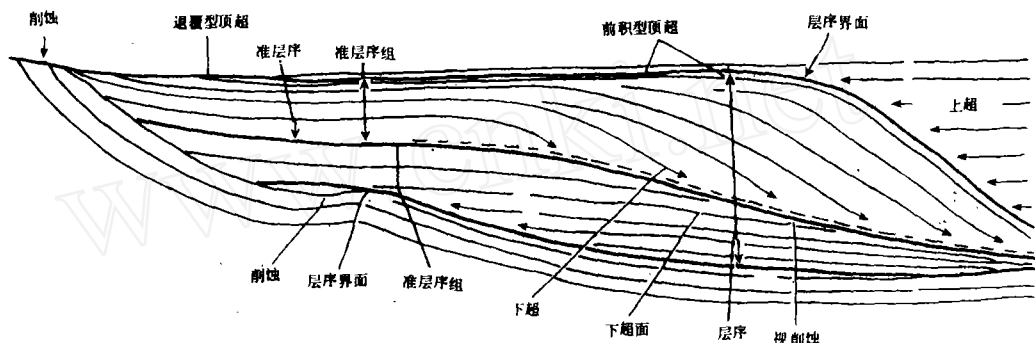


图2 层序地层单位及地层接触关系示意图

地震相标志是准层序组内部那些对地震剖面的面貌有重要影响、并且具有重要的沉积相意义的地震反射特征。它有三种基本类型,即地震反射结构、地震反射构造和地震相单元外形。

1、地震反射结构

在沉积相标志中,沉积结构是指沉积岩各个组成部分的形态特点。与之类似,地震反射结构是指地震剖面的各个组成部分(即同相轴)的物理地震学特征,包括其视振幅、视周期(视频率)、连续性三个方面。

(1) 视振幅 视振幅反映了其相应地下界面反射系数的大小。对于相同的入射波而言,界面的反射系数越大则所产生的反射波的振幅越强。反射系数的大小由界面上下岩层的波阻抗差所决定。波阻抗是岩层的密度 ρ 与速度 V 的乘积。当地震波垂直入射时,反射系数

$$R = \frac{(\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1)}{(\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)}$$

显然波阻抗差越大则反射系数就越大。波阻抗与岩性有着密切的关系,一般说来泥岩波阻抗较低,砂岩波阻抗居中,碳酸盐岩波阻抗较高。因此视振幅的大小最终可归结为界面上,下岩性差别大小的表现。

(2) 视周期 视周期(视频率)反映了相邻反射界面之间间距的大小。间距越大,则它们各自产生的反射波之间的时间差越大,即相当于视周期越大。反之间距越小则视周期越小。当界面间距小于入射地震波的 $1/4$ 主波长时,两个界面形成的反射波将相互叠加成为一个复合波,从而无法将两个界面区分开,这就是地震波的垂向分辨率。习惯上人们在地震相描述时更喜欢用视频率这一术语。由于视频率是视周期的倒数,因此其地质意义从本质上讲是相同的,只不过视周期越长则视频率越低而已。

(3) 连续性 连续性是指同相轴的视振幅以及视频率在横向上的稳定程度。根据以上讨论不难理解它所反映的是界面上、下岩性差别或界面间距在横向上的稳定程度。

在定性描述时,不论对视振幅、视频率还是连续性都可分为三个等级,如图3所示。根

据这三个方面的特点可描述地震反射结构,并可划分出不同的地震反射结构类型。

(4) 描述和命名方法 地震反射结构有两种描述和命名方法。当准层序组内部上述三个方面的特征上、下都比较均匀时,可直接按“视振幅+视频率+连续性”的顺序进行描述和命名,例如“强振幅高频高连续性反射结构”,当以上特征上、下不均匀时,则可根据其在垂向上的变化特点进行描述和命名,例如“向上增强反射结构”。

(5) 非地质影响因素 需要指出的是以上分析的仅仅是单视振幅、视频率和连续性的地质影响因素。实际上它们做为地震波的物理地震学特征还与地震波的激发条件、传播过程,接收条件,以及资料处理中的流程和参数选择均有密切联系,影响因素极为复杂。这些影响有时十分强烈,以至于将地质因素的影响掩盖掉。因此必须对这些非地质的影响因素有所了解,才不致于被假象所蒙蔽。

非地质影响因素可分为两类:一类是自然因素,如地震波在传播过程中的能量损失和频率损失,地下岩层的构造复杂情况等。前者使地震波的振幅随深度而逐渐减小,频率特性也发生显著变化,主频逐渐降低。后者使地震波的传播路径发生剧烈变化,从而使反射波性质也出现复杂的改变;另一类是人为因素,如地震波的激发效果,采集效果、处理效果等。在同一测线上采用不同的观测方法,或采用不同的处理方法,则剖面上的视振幅、视频率和连续性会有很大不同,表现为不同的地震反射结构特点。其中视振幅与地震波的激发能量,检波器的偶合情况、干扰波的压制效果、静校正的效果、水平叠加和偏移处理的效果、动平衡和相干加强的效果以及显示比例因子的选择等均有密切关系。而视频率则与激发出的地震波的频率特性、检波器的组合方式和采样间隔、滤波频率参数的选择、反褶积的效果等有密切关系。至于连续性,因它反映的是视振幅与视频率的横向稳定程度,因此与上述各种因素均有关系。做为一个高级地震解释人员必须对以上因素有充分的了解,可参考有关地震勘探的教材。一个初学者则主要应掌握两个原则:一是用于地震反射结构分析剖面应是采用相同的采集和处理方法获取的,质量应是合格的,切忌将用不同采集处理方法得到的剖面混在一起使用;二是在分析中着重考虑视振幅、视频率和连续性在同一地层单元内的横向相对变化,而不必过分重视它们的绝对值的大小。采用这两个原则实际上相当于对地震剖面进行了归一化处理,消除各种非地质因素的影响。

2. 地震反射构造

在沉积相标志中,沉积构造是指沉积岩各个组成部分的空间排列方式。与之类似,地震反射构造是指地震剖面中的各个组成部分(即同相轴)的空间排列方式,它在形态上与

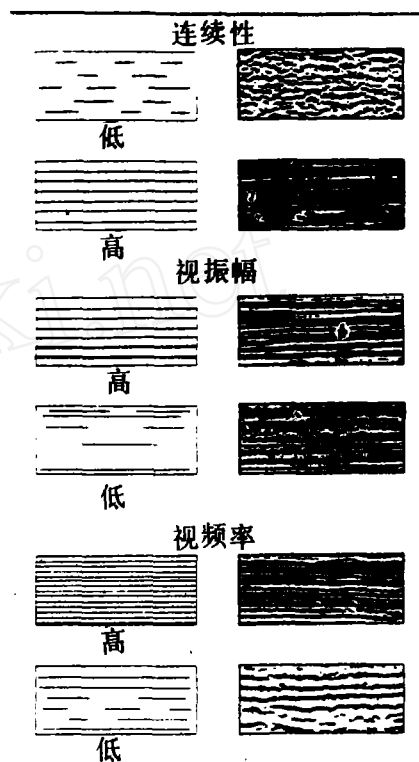


图3 视振幅、视频率、连续性的等级划分

层理构造十分相似,例如平行反射构造类似于水平层理;前积反射构造类似于交错层理等,从而在某种意义上可将其看做是“超巨型”的层理。但它们在成因机制上有着本质区别。层理构造反映的是流动体制和物质组分粒度特征的变化,而地震反射构造则是厚度大致与准层序(以海洋洪水面为界的地层单元)或成因层(以沉积环境突变面为界的地层单元)相当的岩层的叠加模式的直接表现,反映的是沉积作用的性质和沉积补偿状况等。在沉积相解释推断中具有重要意义。

地震反射构造讨论的是同相轴之间的几何关系,属于几何地震学信息。而地震反射结构讨论的是同相轴的物理特征,属于物理地震学信息。前者受地震波采集和处理过程的影响很小,因此比较可靠,但它只能反映宏观地质特征,如扇体、三角洲等。后者受采集、处理的影响很大,可靠性较差,但在资料可靠的情况下能反映更细致的地质特征,如岩性变化等。在地震相分析中应根据它们各自的特点合理应用。

3. 地震相单元外形

地震相单元外形是指在三度空间上具有相同反射结构或反射构造的地震相单元的外部轮廓。大多数地震相单元外形都是沉积体外形的良好反映,例如扇状外形是扇体的反映,丘状外形是礁体的反映等等。显然它对沉积相解释有重要意义。

地震相单元外形与地震反射构造一样都属于几何地震学信息,从而影响因素较少,比较可靠。不同之处在于地震反射构造是单一地震剖面上的特征,而地震相单元外形则是在多条剖面上或地震相平面图上所表现出来的在三度空间上的特征。

在以露头为基础的沉积相研究中,由于受观察视野的限制,一般看不出沉积体的外形,正所谓“只见树木,不见森林”。对其外形只有当相图和等厚图编完之后才能从图上认识,因此没有人把沉积体外形当作沉积相标志,这是一件十分可惜的事,因为沉积体外形特征显著,对沉积相解释极为有效。而在以地震剖面为对象的地震相分析中,由于可在三度空间上连续观测,视野开阔,从面可以很容易地掌握沉积体的外形特征,这为沉积相研究引入了一个特别有效的相标志。

综上所述,在地震相分析中有三种基本的地震相标志,它们分别具有不同的地质意义,因此应当相互配合使用。下面将分别介绍它们的具体类型及地质意义。

需要读者注意的是,在目前流行的专著与教材中,把同相轴的排列方式称之为地震反射结构,而这与人们对“结构”概念的理解是不吻合的。而且在其地震反射结构的类型中,把完全是根据同相轴的物理地震学特征所定义的一些地震相特征也称为某某反射结构,如无反射结构等,这与它所下的定义自相矛盾。因此我们根据“结构”与“构造”的一般定义,将同相轴的物理地震学特征称为地震反射结构,而将同相轴的排列方式称为地震反射构造。这种定义是否恰当,还望读者批评指正。

三、地震反射结构

在三种地震相标志中,以地震反射结构的类型为最多。按三类物理地震学特征,每类有三种状态计,可出现 27 种组合型式。若它们在垂向上分布不均匀,则类型就会更多。在此我们仅介绍几种典型的地震反射结构。

1. 杂乱反射结构(强振幅低连续性结构)

由于视频率的影响因素很多,干扰因素的影响往往比地质因素更强,因此除了其地质

意义特别重要的少数场合,一般可不考虑视频率的特点。

杂乱反射结构的基本特征就是振幅很强,但又不连续,故显得很杂乱(图 4a)。振幅强意味着界面上、下岩性差异大。不连续则意味着岩性或岩层厚度横向变化剧烈,从而反射系数横向上变化很大。这种反射结构往往发育于冲积扇,陡崖浊积扇、海底扇等扇体中,或者由于重力滑动或构造变动而强烈变形的地层里。

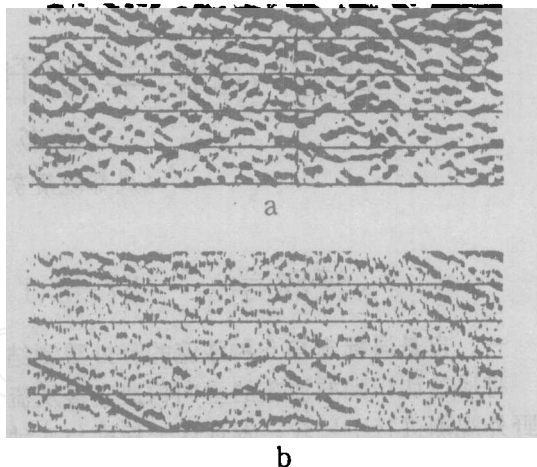


图 4 (a) 杂乱反射结构; (b) 无反射结构

2. 无反射结构(极低振幅中连续性结构)

其基本特征就是振幅极低,几乎看不出同相轴的存在。在这种情况下很难评价连续性的好坏,故笼统地称之为中连续性(图 4b)。形成无反射结构的根本原因是岩性均一、形不成反射界面。这与岩性本身并无直接关系,巨厚的深湖相泥岩,滨海相砂岩,陆棚相灰岩以及泥质沉积很贫乏的辫状河砂岩中都可发育这种反射结构。它们的岩性差别很大,但都很均一。

3. 三高反射结构(高振幅、高频、高连续性结构)

图 5a 为典型的三高反射结构。振幅高意味着界面上、下岩性差异大。频率高意味着层厚较薄且频繁交替,连续性高则意味着岩性和岩层厚度横向上很稳定,它是浊积砂发育的深海相、深湖相、或者薄煤层稳定发育的浅湖沼泽相的典型特征。

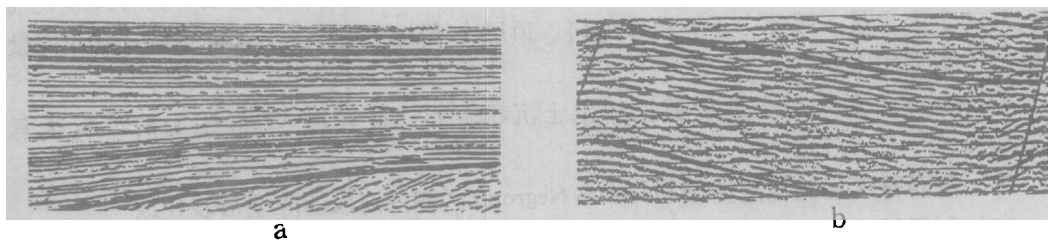


图 5 (a) 三高反射结构; (b) 向上增强反射结构

4. 向上增强反射结构

其基本特征是振幅在下部较弱,而向上显著增强(图 5b)。这表明在下部岩性较均一,而向上岩性差别增大。通常在反旋回的沉积相组合中,如三角洲、海退期陆棚沉积等容易形成这种反射结构。

综上所述,只要抓住振幅强弱与界面上、下岩性差别大小相对应;频率高低与岩层厚薄相对应;连续性好坏与岩体及岩层厚度的横向稳定性相对应这一关键,再根据对不同沉积相单元中的岩性差异特点,横向变化特点和旋回性特点的理解,就可以进行初步的沉积相解释。

然而必须记住,影响地震反射结构的非地质因素很多,它们造成假象是无法避免的,因此还必须充分利用其它两类地震相标志。通过综合分析、去伪存真。