

油气探查的地震地质力学预测法

韩瑞民

(江汉石油管理局地球物理勘探处)

摘 要 文中提出利用地震资料能确定油田和油藏的周围介质中应力和应变所形成的波形稳定的地质产物,将其作为流体成因的矿藏聚集和保存过程稳定性的必要条件。通过地质介质的基本地球物理性质的研究分析,提出可应用地震地质力学的方法预测油气藏。

主题词 油气勘探 地震解释 地质力学 断裂带 地球物理模型

在传统的地球物理方法中,研究地质介质的解释模型主要由基于某种方法抽象的数学模型构成,并用地质属性(岩性学、地层学或其它属性)把这些模型充填起来,组成介质的地质地球物理模型。而作为油气勘探、开发领域内重要勘查手段的地震方法,目前正面临着勘查任务的复杂化、探测深度的增大、探查目标类型的增多,以及在生态环境脆弱的高危地带进行钻探的必须性,这些都要求对介质模型进一步完善,使其具有更多方面的性能:能够建立研究方法的基本原理,无论是对单独的地质体,还是对其在成因、岩石物理学、地质力学等相互关联方面的研究建立明确的处理与解释标准。模型还应在应用的方法之间、相关参数之间与地质学紧密相关的学科知识相匹配。这对既是定量的方法,也是定性的方法的地震技术而言是最现实的。对地质介质的动态特性和在一些情况下,对包括物质成份在内的波场参数及其特征间的相互关系,它能够很明显地表现出来。

在介质的地球物理模型的研发中,不少俄罗斯学者做出了很大的科学贡献。目前,地壳是作为一个由于内部和外部在时间和空间上随之变化的复杂的、非线性的自激系统来研究的。它对抗动的反应能在任何频率上显现出来。介质状态的变化可以是和谐的、非和谐的和趋势的变化。地壳是一个分位一分层结构,能与周围介质进行物质和能量交流的开放系统。非线性表现为对微弱作用的强烈反应,这意味着序列与混沌的相互替换。序列表现为时间—空间韵律结构的确立,混沌则表现为韵律的消失和过程的随机性。序列与混沌的交替相应地造成时间—空间结构不稳定的原因。时间韵律值在一

定的分层框架内,可在零分钟到几亿年间变化。“随时间的易变性、非线性、活动性——这是真实介质的三个基本要素,它与通常所应用的理想化模型:不变的、线性的、无源的不同之处就在于此”(A. B 尼科拉也夫)。非线性表现为速度的各向异性、波的散射、地震辐射。而活动性是在应力状态的变异、非线性弹性、蠕动流、流体位移中显现出来。

矿产普查理论中研究的是两个紧密相互关联的联合体:油气田的形成与保存的制约条件。油气田的形成始终与地质空间的动力活化作用区域相关联。构造过程的动力活化性在断裂破碎带中被聚集起来,构成了自行扩散的地质体。无论是结晶地盾上或者在沉积盆地中,它们会以某种型式呈现出来。在断裂破碎的通用分类中,构造形态参数和构造运动参数占优势。这样,并非任何时候都能考虑到,断裂破坏是一个按其结构、组成成份、弹性应变状态和流变性质来看最为复杂的地质体。对断裂破碎难以深入研究的客观原因属于其结构和物质的不均匀性以及其弹性应变状态的变化。矿体的几何尺寸、内部结构、地质动力活化性的确定正是研究矿藏中的最重要任务。

众所周知,世界上大约 80% 的油气储量正好处于地壳的断裂带中。B. И. 加夫里洛夫根据前苏联各含油气区资料,在 1975 年完成的烃类矿藏的空间分布分析表明,烃类矿藏距断裂破碎带缝合线约 3 ~ 20km。这个距离一方面可视为由地质介质的位移势能所确定的能量充填带;另一方面,也可视为使

作者简介 韩瑞民,男,1961年毕业于长春地质学院,高级工程师,1989—1991年赴苏联进修。

油气藏的地质动态形势趋于稳定的最佳距离。由自然系统的发育、油气藏形成和保存的规律性论证出发,必须研究地质介质的流动性(活化)要素和稳定性(无源的)要素的相互作用过程。假如在地壳中活动性要素的鉴别与断裂破碎相关,那么几乎在任何情况下其稳定、恒定的要素都仅由构造因素来确定。

在能量活化带中或者在其边界上,应当存在有在弹性应变状态和温度范围方面相对稳定的状态,这对于有用矿物的工业性聚集的形成是有利的。根据在独联体国家的不同区域内各油气田上的裂隙—孔隙型储集层的渗滤特性进行的研究,证实了流体的渗透基本上与裂缝性有关。在此情况下大开度的裂缝方位近似垂直。由此得出在油气田上应力随深度以正态分布为主的结论,这是地壳上具有构造稳定状态的许多地区的特点。然而,绝大部分巨型油气田恰好位于构造活化地区及断裂破碎带中。在法国的拉克天然气田区内进行诱导地震活动性研究中,曾获得在这个关系方面的有趣的结果。地震震源作用半径范围为 $R=0.32V_s/f_{cp}$ (式中 f_{cp} 为纵波的角频率)。实际上,气藏上方的 R 平均值大约为80m,而在气藏中则明显地减少到40m以下。综合研究油气藏的岩石力学性质,就能获得有关主要的非地震应变特征的结论。

从实用的观点出发,对具有长期地质发育史客体的保存条件的研究,要比那些仅根据非常有限的,有充分、严格依据的因素就进行判断的流体聚集过程研究及其预测更为合理。此外,对油气藏形成有影响的因素的数量要比油气保存的控制条件因素的数量大得多。油气田规模越大,对保存条件的要求就越高。保存因素的直接影响是在油气田形成条件中已经具有的。这些因素反映了储集体的弹性应变特性、构造特性及其参数与其屏蔽岩层的相互依赖性。储集体和周围的介质形成能够屏蔽脉动的地质动力(水动力)状态系统。这种对地震资料分析的见解导致了对于液体成因的有用矿藏普查的地震资料(也可能是对所有的地球物理资料)解释方法的重新认识。由此引入与根据弹性应变状态与真实地质介质相近似的活化介质地震模型有关的概念和定义。活化介质就是指各种不同频率、不同振幅和速度的应变与应力波在其中始终存在的分位塑性介质。以往的地震界面定义为“按其本身的弹性或密度性质各不相同的岩石接触面,在其具备足够延伸

性的情况下可作为地震界面来认识。这些界面是用地震勘探法,按其在由震源所建立的波场中的变化来研究”。该定义包括的远非现有地震界面的全部领域(如散射界面)。对于真实介质而言,地震界面应是波场的参数和特性变化的空间组成所反映的界面。

地震界面序列可以对应变和应力波形成屏蔽,这种屏蔽可称为地震地质力学屏蔽。在这种情况下,它作为地质体的特性,在活化(真实)介质状态中所保存的准稳定、稳定的弹性应变状态。它是由弹性应变参数和波效应来确定的,并经由地质构造要素的岩石物理结构的相互关系显示出来。按其本性,它应在地震参数和波场特征中反映出来。

通过对非均匀介质中的地震波传播物理学的研究,认识了在离散的介质模型情况下,具有均匀链状分布、由相同弹性关系的点状物体的模型,并证明,在地震波的频率确定的条件下,会产生波的停滞,出现完全吸收现象,中止波能量的传导。在高温高压条件下,由压缩—拉伸应力和加热—冷却状态引起应变,热动力平衡被破坏,会发生不平衡的热动力作用。由描述水动力过程的方程解中得到,在一定的由基本张弛效应所描述的粘滞性(频率相关的粘度、切力粘度和体粘度)关系的情况下,波的扰动和不能透射层位的存在是可能的。在地下很深处高温高压条件下,流体产生凝聚作用和浓缩集聚作用是可能的。这类屏蔽效应可称为波效应。

可以把由岩石物理特性和地质物质流变所形成的屏蔽称为其它的屏蔽类型。它是由岩石中刚性接触的存在和岩层构造所决定的,它在纵波和横波的传播速度差异中显示出来。对纵波速度而言,孔隙度和裂隙性为其临界参数。而对横波速度而言,则是指岩石基质(骨架)的胶结性或刚性。在塑性应变的情况下,岩石的刚性能够增加,这时 v_p 减小, v_s 增大,泊松系数由于岩石薄弱的物理结构关系的破坏也会相应地减小。 v_s 和 v_p 速度的异常特性不仅可由塑性应变引起,也会由于岩石的脱水作用和相变过程引起。例如,在蛇纹石化作用的橄榄岩脱水作用下,曾发现 v_p 速度降低和 v_s 增高。根据位于德克萨斯沿海中部平原区内的油气田资料,蛇纹石化的岩石(辉长岩、无橄玄武岩)作为储集岩的情况下,油藏内地层水缺失,且在其17号区内的类似岩层中含有工业油气。在俄罗斯季曼—伯朝拉含油气盆地的雅列格油田上,也显示了野外观测与实验研

究一致的成果。

在孔隙—裂缝型介质中, v_s 和 v_p 的各向异性也是屏蔽实现的一种可能机理。可以观测到在一定的扇形区附近, 随着地震波的人射角增大, 泊松系数值减小, 并在一定方向上介质刚性的有效增大, 故沿一定方向的屏蔽是能观测到的。

按其结构、组分、流体饱和度和动力饱和度看, 真实的地质介质可能是多相的。应力和应变波的存在始终控制着岩石圈内流体的重新分配。断裂破碎带是地壳内表现最强烈的动力活化地区, 流体流的扩散是通过它们实现的。按照地震的观点, 这些带是波速度变化呈现梯度特征的物体的弥散带。

断裂破碎在地震波场中显示出的特性为: 在纵波波场中, 可穿透的断面由反射界面和折射波速度的异常低值表现出来。

根据反射横波划分的长期活动的断裂具有在岩块中刚性关系被破坏的特征, 其结果是强烈的疏松化、涂抹粘土的存在、含水性和断裂的缝隙带。根据折射横波的异常低的速度值可确定断层分布状态。

对反射波和折射—折射波波场特征的综合分析就可以得出结论: 油气藏的存在与折射波速度的梯度带相关, 并且断裂破碎带反射波的镜像分量缺失。

在地震资料的解释中, 保存条件研究的问题在于对直接覆盖油藏的岩石的渗透特性和弹性应变特性的评价。“衬垫层的存在, 必要的圈闭要素, 这不是任何时候都被认识到的。……任何时候都应认识到天然的储集体是有时开放的或难以与表面传递的(自流的)水动力系统的不可分离部分。这些能量系统的存在没有衬垫层是不可能的”。在油藏周围介质中, 致密坚硬的刚性衬垫岩层的存在早已被证实。在萨马拉和奥伦堡地区, 地震波场为强反射的层位被规定为相对应油藏底部的封闭层, 且在区内广泛分布, 将此作为区内普查的准则。在西西伯利亚地台东南部的巨型含油气构造范围内, 显示出纵波速度的规律性增强。根据地震观测资料, 坚硬而致密的岩层与地震波的高速异常相关。这些异常相对于油藏的位置深度各不相同, 是由其地质动力状态、结构构造特征和岩石组份所决定的。有不少高速异常层分布在基底的固结岩石中。

众所周知, 在深部地震测深中, 对于 v_p/v_s 的相对低值区和 ρT 参数负值区的解释存在两种见解。一是偏重于沉积岩石学研究, 认为 v_p/v_s 值与石英含量相关。二是偏重于对弹性应变状态的研究。考

虑到地震初至波法和深部地震测深方法中折射—折射波是按同一物理学原理传播的, 则利用地震初至波法和地震对比折射波法的折射—折射波解释成果能够对 v_p/v_s 相对低值区和作为坚硬、致密的地质体相对应的 v_p 相对高值区进行研究。在一系列情况下, 油气藏位置有着同地壳的高纵波速度的地块边界相关的特征。

在具有各种不同的地质结构区域内的 v_p/v_s 关系剖面上, 可以见到巨型油气田赋存于地壳硬质地块顶部的现象。如奥伦堡凝析天然气田, 其下伏坚硬地块中的 $v_p/v_s = 1.6 \sim 1.65$ 。而于扎纳若勒油田、金基亚克油田、阿利别克—莫拉油田的 $v_p/v_s = 1.7$ 。不同地质区域内 v_p/v_s 值的变化范围也极不相同。因为每一种具体的地质状态下, 流体成因的有用矿藏的聚集和保存的必要条件也差别很大。如果将岩石和流体流的移动作为介质中的弹性能量的张弛过程来研究, 那么对于该区域及该流体成因的有用矿藏来说, 地震地质力学屏蔽可以作为主要的力能壁垒来解释。

在地震普查—勘探范围内, 可以找到大量地震地质力学屏蔽的实例。在地震区测与详查研究中, 对流体成因的矿体相对于周围介质的空间位置分析中, 常可见到矿体被断裂破碎带限制的现象。与含油气地块相对应的断裂破碎带的位置可以作为地块沿断裂带缝隙面滑动过程的产物, 借助于应力和应变波对其研究。利用断裂破碎带的分类法, 还可以按其相似性从中划分出一种以断裂破碎带的相互位置作为先决条件的地震地质力学屏蔽类型。因而, 断裂破碎带除了作为来自矿藏的有用分量的位移和侵蚀作用功能外, 还有地震地质力学的屏蔽功能。

地球的地震噪声调制效应的发现及随后的研究证明, 地震波发射和应变调制过程的能量可以4个级别的差别超越最初的相互作用。在矿藏上方, 地震噪声水平与周围介质相比有所降低。这样就能确定, 矿体和它周围的介质在应变和应力波的作用下屏蔽了破碎过程的产物。

本文中对于矿体的屏蔽仅是从底部来研究的。然而, 覆盖储集体的岩石组合的屏蔽性质的分析也是要当重要的。在应变条件下覆于矿体上方的岩层附近可以观测到强化效应。

地震地质力学预测的解释方法学是基于保存原则和在于对地壳的那些能够维持和保存地质介质的

(下转第32页)

残渣堵塞孔道;另一方面破胶后的流体表面张力过大将会造成水锁而污染地层。加大破胶剂用量,延长破胶时间可减少渗透率的降低,添加低分子量醇及表面活性剂可有效地降低表面张力,减少水锁的污染。

2.3.3 压裂后的冷却效应的影响

冷的压裂液进入地层后,导致油层温度下降,使原油中的蜡及沥青质析出,造成对油层的污染。这种污染与原油性质有关,如果原油中的蜡质和沥青含量较高,那么污染会随着降温幅度的增加而增大。

2.3.4 压裂液的滤失和粘度影响

对于压裂来说,滤失的污染往往是最严重的。因为压裂液是最先接触油层新裂缝,而这些裂缝往往都较长,所以污染深度也会随之加深。另外,由于压裂液粘度都比较高,对油流也会产生较大的流动阻力,加入降滤失剂可以降低压裂液的滤失,采用粘土防膨剂可以保证液体进入油层后对粘土不产生影响,从而减少油层的污染。

2.3.5 原油乳化造成的污染

压裂液进入油层后与原油反应生成乳化液,大大增加了液体的粘度,同时会造成水锁,增加油流阻力。为防止乳化液的形成,一般可采用非离子型和阳离子型表面活性剂。

3 井下作业中保护油层的原则

井下作业的任务就是解除事故,提高最终采收率。所以井下作业只能改善油层,而不应对油层造成污染。

井下作业必须遵循以下几项基本原则:

(上接第10页)

亚稳定状态的能量充填区、活动区和不活动区的渗透性的划分和评价原则。

地震地质力学预测的工艺技术包括如下:

(1)在断裂破碎带的分类中,划分为开放的(渗透的)和受限制的断裂带。开放的断裂破碎带是根据所形成它们的反射波和折射—折射波的界面速度的异常低值划分;受限制的断裂破碎带是根据速度的异常低值和速度高值之间的速度梯度值带划分且绘制成图。

(2)以高纵波速度值(以及通常的密度值)或较高的 $\lambda = v_p/v_s$ 的比值为特征的刚性地质力学产物

(1)不适合进入油层的工作液和固相颗粒,禁止或减少其进入油层。

(2)必须进入地层的工作液一定要与地层流体相配伍。

(3)已进入地层的固相必须用物理或化学的方法解堵,保持油层孔隙的畅通。

(4)必须遵守各项井下作业的操作规程,防止人为因素对地层造成污染。

保护油层的工作是一项全员、全过程的工作,只要任何一道工序中任何一个环节没有做好,都有可能对地层造成无法解除的污染,使以前所做的工作前功尽弃。保护油层必须针对各种不同的地层,对各种可能导致地层污染的原因进行分析,找出主要原因,根据试验制定出合理的现场施工方案,才能取得预期的效果。由于作业过程中各项工序复杂及井况等原因,导致井下作业中对地层的污染也千变万化,要想有效地解决问题,需要工程、地质等与油井有关的全部人员共同努力,在每一次施工每一道工序中都采取有效的保护措施,才能把油层的污染降到最低限度。

参考文献

- 1 张绍槐,罗平亚等编著. 保护储集层技术. 北京:石油工业出版社
- 2 王鸿勋,张琪等编. 采油工艺原理. 北京:石油工业出版社
- 3 Robert S. Schechter 著. 油井增产技术. 北京:石油工业出版社,2003

(编辑 云帆)

的划分。

此外,地震地质力学预测具有规模的不变性,这可保证具有各种不同的地质构造和组成它们的岩石组份的区域研究的总的工艺规程。对于已发生复杂错断的介质而言,在尚没有先验的地质—地球物理信息的初始研究阶段,按远景程度进行区域划分可能是最佳的研究思路。

最后还必须指出,本文建议的用于解决地震观测资料解释的办法,应当仅作为地震资料解释的组成部分来研究。这种方法可成功地用于区域地震综合研究中。

(编辑 康新荣)