

气体水合物反射层的速度结构研究

摘要 地震反射剖面的成像特征反映了海底模拟反射层(BSRs)与海底底面平行特征,人们通常称该反射层就是甲烷水合物稳定带的基底。本文根据地震反射数据的波形反演技术,分析了用于估算BSR层的反射速度结构特点和水合物层厚度。通过大洋钻探计划(ODP)验证结果表明,BSR层下部的沉积物孔隙层中含有大约30 m厚的游离甲烷气。水合物层和其下部的气体代表着巨大的甲烷气藏,它将有重要的经济意义和影响全球气候变化。

关键词 气体水合物 反射层 速度结构 BSR 波形反演技术

海底模拟反射层(BSRs)通常出现在大洋底部和相邻大陆边缘沉积物层的上部几百米深处,最大可能出现在汇聚型大陆边缘加积堆积的棱柱体沉积物中。BSR被广泛解释为甲烷水合物稳定带存在的基底。在这样的环境下,甲烷水合物存在的稳定性主要受温度控制,例如,BSR常被用来估计地热梯度和热流产生的原因。然而,BSRs最重要的意义是由于在水合物的内部和下部沉积层中圈闭大量的甲烷气体,这具有重要的经济价值,同时水合物的形成和分解对全球气候变化也起着重要的作用。

现在很多研究者用多道地震反射数据对BSR上部的水合物饱和层与其下部气体饱和层的物理特性进行对比,以建立BSR模型。但是,近来一些研究者认为,天然气的存在与否并不需要波阻抗对比,因为波阻抗对比的产生是由BSR上部水合物沉积层和其下部的水饱和带相互作用的结果,这个观点和建议是建立在收集了加拿大温哥华岛Cascadia沉降带的1987年高质量地震反射数据并进行了详细研究的基础上(图1)。研究区的BSR反射层延伸几万米。然而,常规合成地震剖面不能区分这两种模式,而通过钻井能达到区分的目的,如1992年10月大洋钻探计划(ODP)164测线的钻探结果就证实了这点。为了识别BSR反射层进行全球性钻探是不允许的,也是不现实的。因此,用地震反射数据的波形反演能够区分这两种模式并可提供BSR下部游离气带的厚度。

研究所使用的数据(图中圆点所示)来自测线89—08,图中同时也标出了钻井位置。

波形反演是最小化样品间的现场地震数据和合成地震数据的差值。由于波形差值函数是非线性的,只有使用蒙特卡洛(随机)方法才可保证达到整体最小值(寻求一个单一的模型)。如果未知函数的数据不是太大,这一方法将是可行的。同通常的地震反演情况一样,使用蒙特卡洛方法在整个模型空间对单一函数进行最优化在经济上是相当昂贵的。然而,这个问题可以用少参数函数的蒙特卡洛技术得到解决。这一技术使地震反射数据转换亏损得到了补偿。我们首次使用随机检索方法估算速度变化的长波波长,然后用线性局部方法估算密度和速度变化的短波波长。

我们将该反演技术应用于Hyndman和Spence地区VI-5井的部分数据,该处海底和BSR平行(图2)。反演分为三步:

第一步,我们通过在120 ms反射层的最大能量来估算三个突出的反射层的速度平方

根。已确定的反射层的双程反射时间为 2.23 ms(图 3),其反射界面为 BSR 层底界。我们计算出速度平方根的上限和下限,用能量曲率和最少能量来求出单层层速度。

从图 4F 获得的最佳反演模型,时间轴上的箭头指示的第一步和第三步反演的反射层。

第二步,同时对三个速度的层速度范围间的模型空间进行研究。开始选用 50 个随机模型,而且每次迭代中有一参数是随机变化的。如果能量随着随机变化而增加,则该迭代模型即为一个新模型。经 100 次迭代后,该模型收敛于局部最小值,于是,从 50 个

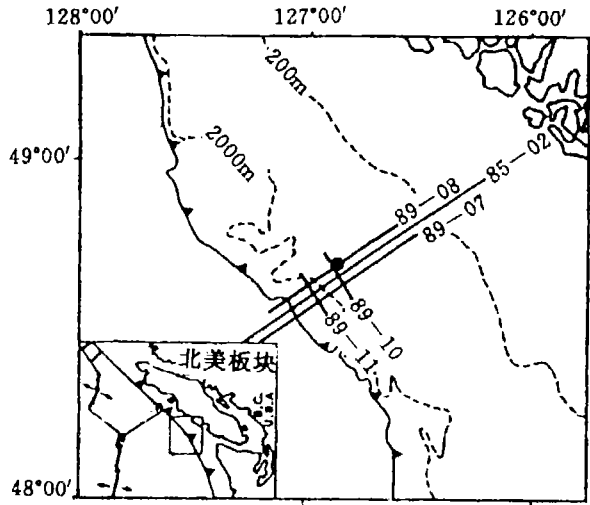


图1 加拿大温哥华岛海上 Vicinity 地区的 ODP 钻井 VI-5 多道地震测线位置

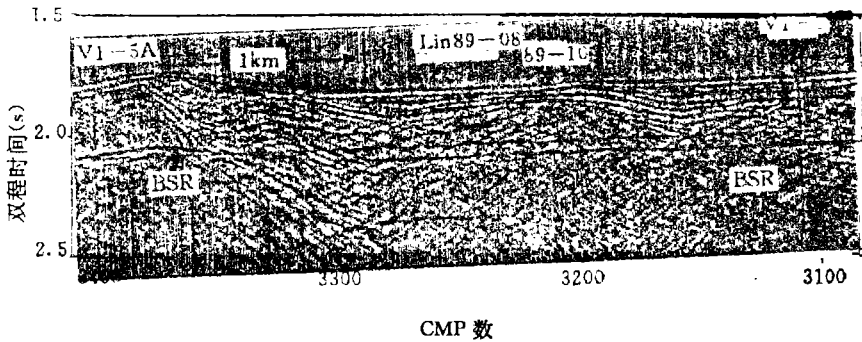


图2 89-08 测线的部分地震剖面,双程反射时间(0~2 S)强振幅的 BSR 特征,图中标出了 VI-5 井的位置和变化后的 VI-5A 井的位置

随机研究模型中进行 局部最优化以便达到整体最小值,这个模型的三个间隔层(BSR 之上或下以及水柱层)的速度迅速地收敛到 1.477、1.725 和 1.79 km/s。在 2.23 ms 内该反射层下面的速度被确定为 2.0 km/s,最终的四层模型被平滑(图 4A,直线)。最后,在深度 1 288 m 处,即海底下方的速度通过海底反射系数为 0.3 而被调整,这与第二海底反射层和第一个海底反射层的振幅比,以及 Hyndman 和 Spence 给出的值是一致的。随后,这些数据用傅立叶变换函数转换成频率域。这一阶段,校正作用会直接影响到原始数据的获得和数据处理效果,包括海表面反射层作用的影响。

第三步:反演技术。利用变化梯度法最小化差值函数,起始点开始于在上一步中得到的速度模型,同时利用归化反射变化最大值方法估算了水平层的合成地震剖面,并且估算了海底反射的子波。以 0.06~0.50 s/km 低速 45 道来看,泊松比 0.4,从初始 P 波波速中得出剪切波(S)波速。使 S 波波速在整个反演过程中保持恒定,该速度对气体饱和度有一定的敏感性。这一现象使得我们在气体出现时所引起的低的 P 波波速带中具有一个准确的、减少了

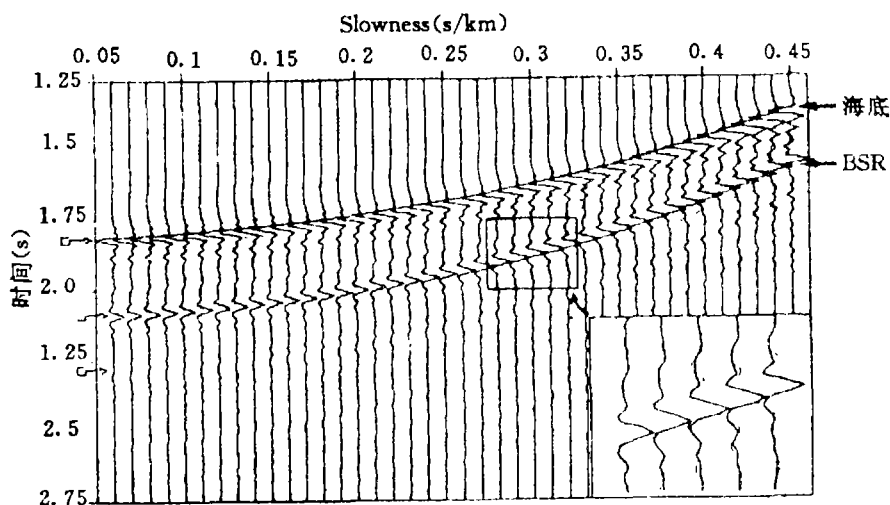


图3 地震反演和合成地震所使用的波形图

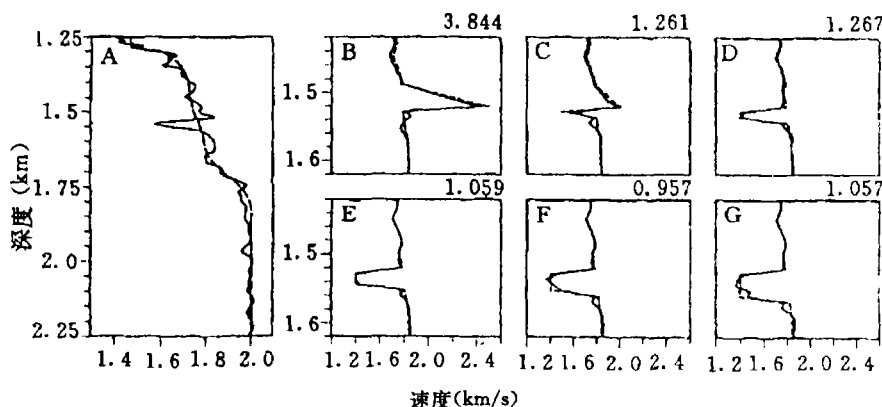


图4 速度剖面

图中:(A) 经过第二步反演的初始速度模型(虚点线表示)经过第四步后的最终速度模型(实线表示)。在最终模型中包含了短波速度震动,BSR 深度为 1.54 km,即海底 240 m,其 P 波速度为 1.58 km/s,VicinityBSR 的初始模型(虚点线)是经过 G 展示在 B 图上,另外,图上实线表示经过 5 次反演后的速度模型结果。(B)线性速度梯度,表示 32 m 厚的水合物带。(C)在线性速度梯度内的 24 米厚的水合物带和下部 8 m 厚的游离气带。(D) 速度为 1.4 km/s 的 16 m 厚的气带。(E)24 m 厚的气带。(F)32 m 的气带。(G)40 m 厚的气带。角上的数字指示立体模型与不对称模型 A 的比率。

的泊松比。我们也可利用 Hamilton's 算子从起始 P 波速度得出该层的密度,并且允许其在反演过程中变化。具体的反演过程由具有不同范围的频率和速度的 4 个步骤组成,对于第 11 和 45 道(记录线)的数据和合成地震剖面之间的最终互相关分别是 81.0%和 92.2%。反演的速度模型主要由海底和 BSR 之下的低速带组成(图 4A,实线)。这样 BSR 之下的 P 波波速为 1.58 km/s(图 4A,实线),而 S 波波速为 0.72 km/s,并且该层的密度为 1.6 km/m³。

第四步连续迭代中,使其差值改变很小,这表示了最小差值的收敛性。即使最终模型对于在反演的第二步中得到速度的长波波长变化是整体最小值,但还存在一个可能性,即对于

速度的短波波长变化还是一个局部最小值。因此,为了进一步提高模型精度并检验,对于BSR不同模型的有效性,我们利用各种不同的可能模型(其中有6种被展示在图4B至G中),在BSR附近的100 m的地带中通过代替速度进行了一系列反演。根据这些模型,进行了5种迭代。这些模型收敛于不同的局部最小值,在每种情况中都与初始模型相近。最好的波形匹配(图3,合成记录)是在第五个模型中得到(图4F)的,该模型中存在一个32 m厚的低速带,并且速度为1.4 km/s。只有该模型能够有一个比图4A中的好的匹配值。而最差的匹配是在第一个模型中(图4B)得到的,其没有低速带。对于第一和第五个模型的第45道(记录线)的数据和合成地震剖面之间的互相关分别为69.4%和93.5%。

这一差异表明在参数范围内,这样可以确信BSR层之下存在低速带,且厚度大约为30 m。数据与合成地震剖面,特别是在BSR层附近和海底吻合性更好。合成剖面和数据采用步步逼近法,使在低速范围内一致。由于适度频率取决于海底反射系数,同时所使用的速度—密度相关性在BSR之上不能够立即得到使用,所以BSR之下的P波波速的绝对值出现了不确定性。并且在BSR之上预测到水合物出现,BSR之下也同样可预测到气体。然而,在低速层带的P波波速值应该是1.3~1.5 km/s。这表明在孔隙空间至少存在~1%的气体,但不能够估计到气体饱和度的确切值。在少量气体存在时,P波波速下降很快,然而随着气体饱和度的增加,这种变化很小,因此可以得到1%~100%的气体饱和度。

用美国南部的Colombia太平洋海上地震数据进行波形反演结果显示在加积型柱状体地层中广泛分布着BSR层。该BSR层延伸范围广,长约100 km,深约1.25~300 km。BSR的振幅是变化的,但是在许多地方高于海底反射层的振幅。我们反演了三个共中心点(CMPs),在两种情况下,BSR对应于~30 m厚的地层,并且具有约1.35 km/s的P波波速(这一点与VI-5井相同)。对于BSR来说,反演技术能够提供一个精确的深度和速度结构,同时这些结果对钻探很有帮助。如果BSR层上覆于游离气之上,那么甲烷就能够高浓度富集,并且在海底压力下,其溶解度降低,这样的浓度是在有机物生物成因降解的情况下不易形成。它是下部游离气或溶解甲烷,经连续沉积的热干涉作用,甲烷溶解度发生改变形成的。这样,在水合物稳定带的下部会出现一个基底。

尽管~1%以上的饱和度气体对速度不敏感,这并不影响BSR之下的气体饱和度,但是,可估算出气体带的厚度。同时,也可以估算在BSR之上水合物出现的数量。在VI-5井位置处,水合物量较少,因为速度的增加在整个速度之上最多为~5%(图4A),这与只有~10%的水合物饱和度一致。VI-5的钻探结果验证了这一估算值。从而可得到地震波速和气体以及水合物的饱和度间的相关性。

在气体水合物中或下覆地层中储存的有机碳量超过了所有化石燃料总和。目前,在世界大陆边缘地层中至少已发现了22处BSR水合物层。而且,在这些地方也获得了多道地震反射数据。随着计算机的迅速发展和技术的不断提高,在井约束条件下,应该应用一维和二维反演技术进行多道地震数据处理,最终能够对全球BSR上下的储层中所存储的甲烷资源量进行精确估算评价。