

影响 CSEM 勘探效果因素分析

胡小群, 李 斌, 黄 涛

(中国石化集团上海海洋石油局第一海洋地质调查大队, 上海 201208)

摘 要:海洋可控源电磁勘探技术(Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods, mCSEM)通过探测地层电阻率的分布情况,并与地震资料结合来确定构造中是否含有油气,可以大大降低勘探风险。深水油气勘探开发的成本非常高,采用 CSEM 进行油气勘探已被世界各大石油公司认可。虽然 CSEM 勘探在深水油气勘探中取得了较好的效果,但其最终的勘探效果受水深及海底地形、目标层埋深、目标层与围岩电阻率差异、目标层厚度与侧向规模、浅部高阻层以及目标层附近非油气高阻异常体等因素的影响。通过对 CSEM 勘探影响因素的分析认为,在进行 CSEM 勘探前须对各种因素进行分析,并结合地质资料进行模拟。只有在各种条件满足 CSEM 勘探的前提下,才能取得令人满意的效果。

关键词:CSEM; 影响因素; 水深; 埋藏深度; 电阻率差异

中图分类号: P631.4⁺2 **文献标识码:** A

1 CSEM 工作方法

国外的深水油气勘探开发始于 20 世纪 90 年代,目前国外深水油气勘探开发技术已较成熟,世界上的深水油气田主要位于墨西哥湾、巴西海域、西非几内亚湾、北海等海域。国外在深水油气勘探中,除了传统的地震方法外,普遍应用了一种名为“可控源电磁法”(Controlled-Source Electromagnetic Methods, CSEM)的物探新技术。此项技术在 2000 年 11 月进行首次野外试验,最近几年大规模的商业化,已是一项非常成熟的物探技术。CSEM 技术在国外的深水油气勘探中发挥了巨大作用,有效地提高了勘探成功率,降低了干井风险。

在所有地球物理属性中,电阻率是烃的最敏感的指示标志,油气最明显的物性就是其高电阻

率,所以,在传统油气勘探开发中,在钻井的同时进行电阻率测井,以此来确定油气层。

CSEM 想要达到的目的就是在钻井之前,直接在海底布设接收器,以确定地下有无高电阻率异常体的存在^[1]。CSEM 能在钻井前确定地下构造中的目标层位到底有无高电阻率异常,以此对地震得到的构造进行筛选和评级,从储层电性角度进一步优选,这样就能极大提高井位的可靠程度,降低干井风险。海上油气勘探开发中钻井的成本远高于陆地,而深水(千米以上)钻井的成本又远高于大陆架浅水区域(数十米到百米),所以,在深水区域钻井之前,要尽可能地提高井位的可靠性,因此,在深水油气勘探中 CSEM 的意义非常重大。

CSEM 的工作方法是在海底放置多个接收电磁场的接收器,然后在近海底沿设计测线拖动一个电偶极的发射源。电偶极源发射低频的电磁波(一般为 0.1~10 Hz)^[2],电磁波在上覆的水体和下伏的海底岩层中扩散传播。沿着地下地层传播的电磁波,如果遇到高阻层时,就会形成一种沿着

收稿日期:2012-07-15

作者简介:胡小群(1967—),女,工程师,主要从事海洋地球物理工作。E-mail:huxiaoqun@sopgc.com

高阻界面传播的导波(可以类比地震中的折射波),这时电磁信号比在通常的低阻海底地层中传播衰减更少。沿着高阻层传播的信号不断扩散,被接收器接收(图 1),所以,当地下存在含油气高阻时,接收器就会接收到加强的信号。CSEM 探测的就是地下高阻层中导波引起的上覆地层电场分布的异常变化。

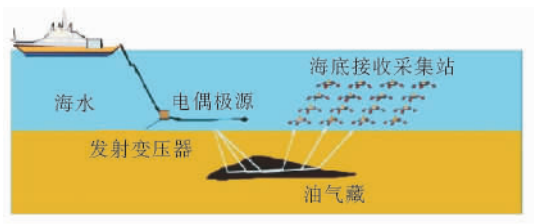


图 1 CSEM 勘探原理(据文献[3])

Fig. 1 Principle of CSEM (from reference [3])

2 影响因素

每种地球物理勘探方法都要满足其特定的条件,才能取得预期的效果。与地震勘探相比,CSEM 对外界条件的要求较苛刻。影响 CSEM 勘探效果的主要因素有:①工区水深;②目标层埋藏深度;③目标层异常大小(包括目标层电阻率与围岩电阻率差异,目标层侧向延伸规模及厚度,目标层的水平规模等因素);④海底地形起伏及浅部高阻层,如天然气水合物。⑤目标层附近非油气高阻异常体,如盐丘、火山岩、高阻碳酸盐岩、致密高阻砂岩等。

2.1 水深

发射源发射的电磁信号主要沿 3 条路径传播到接收器(图 2):①由发射源经过海水直接到达海底接收器的“直达波”;②向上透过海水后,沿

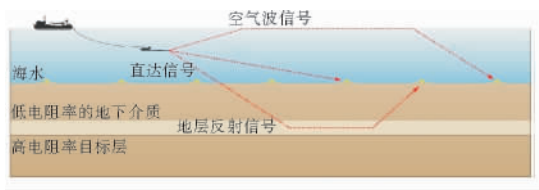


图 2 CSEM 信号传播的路径(据文献[4])

Fig. 2 Three paths of electromagnetic signals in CSEM(from reference [4])

空气—海水界面传播,其中部分电磁波再向水下传播,被海底接收器接收,这种电磁波称之为“空气波”;③向下透过海水后在地层中传播,再反射回海底,被海底接收器接收,这种电磁波称之为地层反射波,这是 CSEM 勘探的有效信号。

在不同偏移距范围内,通过 3 种路径传播的信号被接收器接收时,其接受的信号比例不同。在近偏移距范围内,信号绝大部分是透过海水由发射源直接传播到接收器的直达波。由于海水导电性良好电阻率低,接收器接收到的电磁信号在海水中衰减迅速,随着偏移距的逐渐增大,直达波会急剧衰减。当偏移距达到一定范围时,来自地下的地层信号就占主导地位了。而沿着海水—空气界面传播的空气波,由于空气是极高阻体,沿着这一路径的信号基本上不衰减,在偏移距很大(接收器离发射源很远)时,这一信号仍存在,在所有偏移距范围内,都存在空气波。当偏移距不太大时,空气波因量级小于其他信号显现不明显。在偏移距较大时,由于其他信号微弱,空气波就突显出来了。当偏移距达到足够大时,空气波量级趋于相对衰减。

CSEM 通过设计使得处于一定偏移距范围内(一般为 2~5 倍目标层埋藏深度)的接收器能够接收到来自目标层位的有效信号。此时,接收器在接收有效信号的同时,还接收空气波信号。但目标层的有效信号强度在量级上要大于空气波,经处理后的可清晰显现。

MacGregor^[5]通过一维模拟研究了水深对 CSEM 勘探的影响,模拟使用的模型见图 3。当目标层埋藏深度在 1.5 km,水深只有 100 m 时,通过模拟计算出的含有油气层和没有油气层时的 MVO 曲线是基本重合的,不能被区分。此时,由于水深太浅,原本设计的用来接收地下地层信号的偏移距范围内的接收器接收的空气波信号与来自地下地层的有效信号大小相差不大。当水深达到 2 km 时,有、无油气储层的 MVO 曲线在合适的偏移距上明显分开(图 3)。

CSEM 勘探要求的最低水深与想要勘探的目标层位的深度是相关的。若目标层埋藏深度非常浅(数百米),此时对水深要求可以低些。考虑到油气储层的一般埋藏深度在 1 km 以上,目前 CSEM 勘探比较适合的水深应在千米左右。

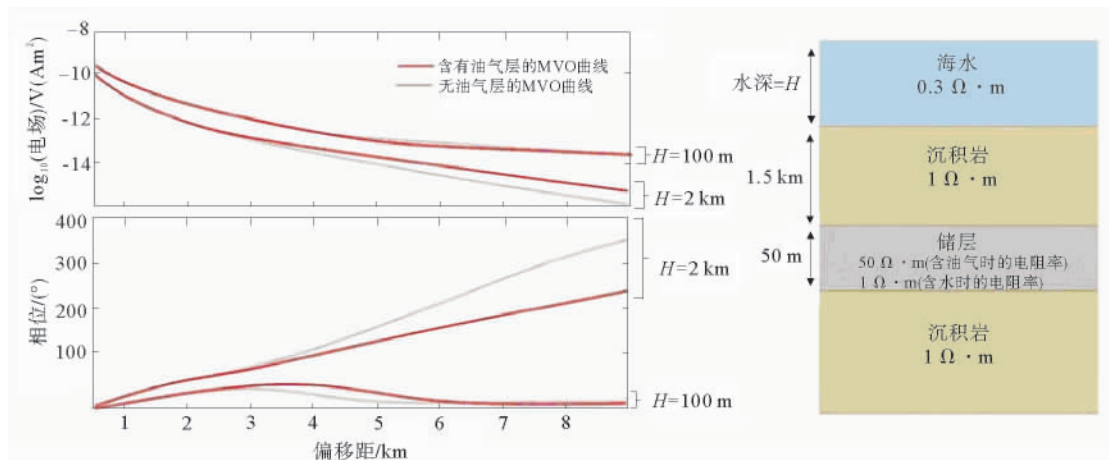


图3 数值模拟水深对 CSEM 的影响(据文献[3])

Fig. 3 Affects of water depth on CSEM by mathematic modeling(from reference [3])

2.2 目标层埋藏深度

地震勘探所采用的弹性波在固体介质中传播,衰减相对慢,所以地震波能达到较深的地层。CSEM 发射源发射的电磁信号在传播上与弹性波有着很大不同。油气沉积盆地中的地层主要是沉积岩,其电阻率不高,电磁波随着传播距离呈指数衰减。电磁波在地层中的穿透深度远不及弹性波。

根据麦克斯韦方程,低频电磁波在导电介质中传播,其衰减快慢与电磁波的频率和介质的电阻率相关。为了达到油气勘探的深度,CSEM 一般采用低频电磁波,以保证电磁信号穿透足够的深度。

从地球物理角度讲,CSEM 对目标层埋藏深度的要求,就是要保证主动源发射的电磁信号能够穿透地层到达异常体,再透过地层传播到接收器后,信号仍具有一定的强度。

在影响 CSEM 是否可行的所有因素中,占绝对主导作用的是目标层的埋藏深度。Steven Constable^[6]经过分析认为,目标层的埋藏深度是影响 CSEM 异常的最重要的因素,当目标层的埋藏深度增加时,CSEM 异常呈指数级下降。

由于地下地层总体上电阻率较低,电磁波在地层中衰减较快,这使得 CSEM 勘探深度不是非常大。目前,CSEM 的极限勘探深度为 3 500 m。

2.3 目标层异常大小

目标层产生的异常大小是一个综合效果,其影响因素有:①目标层电阻率与背景电阻率差异;②目标层厚度;③目标层水平规模。

目标层电阻率与围岩电阻率的差异是 CSEM 地球物理勘探的基础。有 2 种情况可能使地下的目标油气储层不满足 CSEM 的地球物理勘探前提:①油气储层是由多个极薄层叠加起来的,其总电阻率较低,与周围含水沉积岩的电阻率差异不够大;②碳酸盐岩类(灰岩、白云岩等)沉积岩中含有油气储层。由于围岩是碳酸盐岩,其电阻率变化范围较大,有可能使目标层与围岩的电阻率差异不够大。

目标层产生的异常是其电阻率与厚度的总体效果。目标层厚度对 CSEM 的影响,要结合目标层埋藏深度考虑。当目标层深度不大,较薄的油气储层也能被 CSEM 发现;随着目标层埋藏深度增加,目标层的厚度要更厚才能被 CSEM 发现。

此外,目标层在水平上要达到一定规模才能被 CSEM 探测出来。在目标层水平规模对 CSEM 勘探的影响方面,Steven Constable^[7]通过三维模拟分析得出,高阻体侧向规模一般要达到埋深的 2 倍以上才能被分辨。图 4 是在假设高阻体为 100 m 厚的圆饼状,埋藏深度为 1 000 m 的情况下,高阻层水平侧向规模对 CSEM 勘探影响的三维模拟,结果表明,当埋藏深度为 1 000 m

时,电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 的高阻目标体在电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 的半空间内,只有当其直径至少为 $2\,000 \text{ m}$ 以上时,才能被 CSEM 探测出。

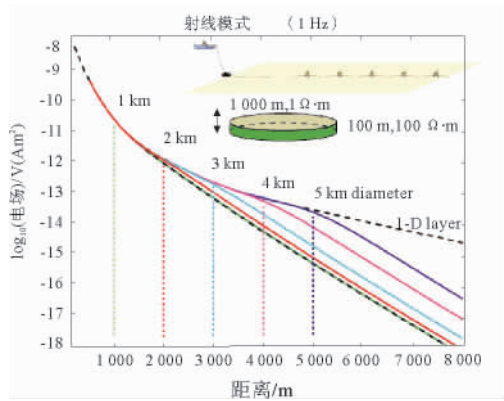


图 4 三维模拟分析目标层侧向规模对 CSEM 勘探的影响

Fig. 4 Affects of the lateral scale of a target on CSEM

2.4 海底地形和浅层高阻层

海底地形起伏较大时,电磁波的传播路径变得不规律,使 CSEM 接收到的信号变得复杂。浅层高阻层会在 CSEM 接收的信号中产生异常信号,影响对深部油气储层的分辨。

工区内海底地形起伏剧烈,或是有浅部高阻层(如天然气水合物、浅层气)时,CSEM 数据处理解释时会变得非常复杂,需要对各个因素(地形、浅层高阻、目标层高阻)分别进行大量的正反演运算,才能从异常信号中分离出深部油气目标层的异常。

2.5 目标层附近非油气高阻异常体

除了以上从地球物理角度论述影响 CSEM 对地下高阻层探测的因素外,还有由地球物理向地质转化的问题。CSEM 探测的是地下的高阻体,而不是油气藏本身。油气藏都是高阻体,但高阻体不一定是油气藏。除了油气储层外,地下还有其他的高阻异常体,如火山岩、盐丘、

高阻碳酸盐岩、蒸发岩等。因此,CSEM 解释需要结合工区地质情况以及其他物探方法,以排除这些“虚假正异常”。

3 结论

CSEM 勘探的最终效果受工区水深及海底地形、目标层埋深、目标层与围岩电阻率差异、目标层厚度与侧向规模、目标层附近高阻异常体以及浅部高阻层等因素的影响。CSEM 是一种适用于深水(千米以上)、勘探深度较浅(海底以下 $3\,500 \text{ m}$ 以内)的电磁勘探技术。一般来说,考察工区的水深和目标层埋深,就可以初步推断某一特定工区是否满足 CSEM 勘探的基本条件。但针对这一特定工区,若要精确、定量评估以上各因素对 CSEM 勘探的影响以得出此工区目标层对 CSEM 勘探的敏感程度,则需要进行数值模拟后才能确定。

参考文献:

- [1] Eidesmo T, Ellingsrud S, MacGregor L M, et al. Remote detection of hydrocarbon filled layers using marine controlled source electromagnetic sounding [C] // 64th EAGE Conference & Exhibition, Florence, Italy, 27 May 2002.
- [2] Eidesmo T, Ellingsrud S, MacGregor L M, et al. Sea Bed Logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas [J]. First Break, 2000, 20(3): 144-152.
- [3] 何展翔, 余刚. 海洋电磁勘探技术及其新进展 [J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(1): 2-10.
- [4] 斯伦贝谢. 电磁法油气勘探 [J]. 油田新技术, 2009, 21(1): 4-19.
- [5] MacGregor L, Andreis D, Tomlinson J, et al. Controlled-source electromagnetic imaging on the Nuggets-1 reservoir [J]. The Leading Edge, 2006, 25(8): 984-992.
- [6] Constable S C, Srnka L J. An Introduction to marine controlled source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration [J]. Geophysics, 2007, 72(2): 3-12.
- [7] Constable S C, Weiss C J. Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: insights from 1D modeling [J]. Geophysics, 2006, 71(2): 43-51.

FACTORS AFFECTING CSEM PERFORMANCE

HU Xiaoqun, LI Bin, HUANG Tao

(Marine Geological Investigation Party, Shanghai Offshore Petroleum Bureau, SINOPEC, Shanghai 201208, China)

Abstract: Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods (mCSEM) are used to measure sub-surface resistivity from seabed. The resistivity information can be integrated with seismic data to define whether a structure contains hydrocarbon or not. Deepwater drilling is very expensive, so CSEM is widely used by large oil companies in deepwater petroleum exploration. The performance of CSEM on a specific block is affected by many factors, including water depth, seabed topography, burial depth of the target, resistivity contrast between the target and surrounding rocks, thickness of the target, target's lateral scale, and other non-hydrocarbon high-resistivity anomalies near the target or in shallow burial depth. This paper analyzed all these factors and their affects to CSEM. Before CSEM data acquisition, it is crucial to evaluate all these factors with mathematic modeling. Once all these factors are fit for CSEM, the results shall be maximized.

Key words: CSEM; factors of affect; water depth; burial depth; resistivity contrast

本刊加入“中国知网(CNKI)”系列数据库的声明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊现被《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库独家收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付(不收版面费者不付稿酬)。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。