

褚宏宪, 梅赛, 史慧杰, 等. 海洋短排列高分辨率地震拖缆沉放深度测试分析[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 65-71.

# 海洋短排列高分辨率地震拖缆沉放深度测试分析

褚宏宪<sup>1,2,3</sup>, 梅赛<sup>1,2,4\*</sup>, 史慧杰<sup>1,2</sup>, 秦轲<sup>1,2</sup>, 孙军<sup>1,2</sup>, 方中华<sup>1,2</sup>

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071; 3 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东烟台 264004; 4 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100)

**摘要:**海洋短排列、小道距、高分辨率地震勘探具有分辨率、信噪比高和施工便捷的特点,是浅部高分辨率地震勘探的重要手段。由于拖缆整体拖曳长度较短,受作业环境和设备等限制,通常采用加配重物代替水鸟来调节拖缆沉放深度。施工采集状态下的实际监测发现,受潮流、船速、配重量等多种因素影响,电缆和地震震源沉放深度变化较大,有较强的规律性变化。笔者对震源、电缆沉放深度测试结果进行了分析总结,认为地震采集船速控制宜采用稳定对水速度,能在地震资料采集过程中合理地保证较稳定的震源、电缆沉放深度控制,针对高分辨率地震调查目的,地震电缆沉放深度越小越好。该认识对优化海洋短排列、小道距、高分辨率多道地震采集参数,地震精确处理提供了准确、高精度的数据和保障。

**关键词:**多道地震; 高分辨率; 短排列; 沉放深度; 陷波

中图分类号:P631; P714<sup>†</sup>.8

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.003

## 0 引言

海洋小道距、高分辨率地震探测技术具有排列短、道距小、震源能量小、炮间距小、频率高、施工方便性等优点,近年来发展迅速,应用广泛<sup>[1-7]</sup>。常规的海上地震采集采用等深度缆的工作方式,拖缆深度相对固定,但采集的地震原始数据存在受海水面对虚反射引起的陷波特性,近年来发展的变深度地震拖缆采集技术在一定程度上抑制海面虚反射,使得采集的地震数据的频带变宽<sup>[8]</sup>。针对不同调查目的及调查区地震地质条件,需要采用不同的海上地震采集的激发与接收参数组合,主要参数包括震源能量和沉放深度、地震电缆沉放深度、道数、道间距、覆盖次数、偏移距等参数。针对具体项目,采

集参数经试验确定后保持固定,有利于获得稳定可靠的地震资料。

小道距高分辨率地震勘探在浅部地层具有较高的地层分辨率<sup>[9]</sup>,针对天然气水合物高分辨率调查的目标,震源与电缆沉放深度更浅,随着震源与电缆沉放深度减小,高频能量增强且有效频带变宽,有助于提高分辨率。针对道间距为 3.125 m、采集道数 < 120 道的短排列多道地震拖缆外业采集,多采用小型船只作业,等浮电缆设计一般为零浮力, < 120 道短排列、小道间距地震拖缆整体拖带长度较短,拖缆沉放深度控制受作业环境和设备等限制,一般不采用水鸟控制,通常采用加配重物来调节拖缆沉放深度。在这种施工方式下,拖缆的实际沉放深度往往根据经验直观判断,不能获得精确的拖缆沉放深度,往往同一测线的震源和拖缆沉放深度采用固定值记录,拖缆的沉放深度变化规律尚不明确。而拖缆的沉放深度对于数据采集和数据处理尤为重要,是外业施工和资料数据处理的重要参数。通过实际监测发现,震源和拖缆的沉放深度受潮流、船速、配重物等多种因素影响,在采集施工过程中电缆和震源的沉放深度变化较大,并存在较强的规律性特点。本文对此进行了总结和应用,为优化多

收稿日期: 2020-01-07

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20191003, DD20189503); 国家自然科学基金(41276060, 41330964, 41606083)

作者简介: 褚宏宪(1973—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事海洋地球物理调查与研究。E-mail: chx-8@163.com

\* 通讯作者: 梅赛(1985—), 男, 在读博士, 助理研究员, 主要从事海洋地质调查与研究。E-mail: meisai2000@163.com

道地震采集参数,地震精确处理提供了准确和高精度的数据和保障。

## 1 地震采集系统

地震采集系统由船载设备和拖曳系统等组成,拖曳系统主要包括震源、多道接收拖缆,图1为高分辨率64道地震设备平面布置图,电火花震源或气枪震源从船尾中间释放,震源和多道接收拖缆采用拖曳方式作业。采用电火花或GI气枪做为震源,多道地震采集系统采用美国Geometrics公司生产的GeoEel Solid 64道固体海洋数字地震拖缆,拖缆组成主要有甲板缆、前导段拖缆、前弹性

段、拖缆工作段和后弹性段等;固体缆工作段(8段):拖缆直径38 mm,每段8道,25 m长,3.125 m道间距,每道6个水听器组合、1个A/D转换模块。高分率多道地震采集采用等距激发模式,等距激发信号由导航软件提供,常规hypack等导航软件也可以实现等距激发,地震采集参数和有关指标见表1。

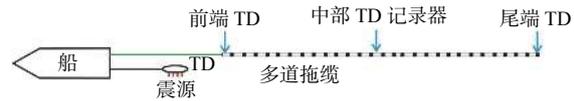


图1 地震采集设备和TD监测点位布置示意图

Fig.1 Diagram showing the seismic acquisition equipment and TD monitoring point

表1 地震数据采集系统参数表

Table 1 The main parameters of the seismic acquisition system

道间距/m	能量/J	炮间距/m	最小偏移距/m	道数	覆盖次数	采样率/ms	记录/s	震源沉深/m	震源放长/m	电缆沉深/m	电缆放长/m	船速/kn
3.125	5000	12.5	12.5	64	8	0.25	2.5	1	50, 38	1	50	5

## 2 研究方法

首先合理确定测试点位置,拖缆工作段为64道,道间距3.125 m,前导段拖缆长度100 m,拖缆工作段长度为200 m,测试点震源处布置1个,地震拖缆布置3个,布设在拖缆的前端、中部和尾端部位,分别位于1、32、64道数字包处(图1),拖缆测试点间距离为100 m。深度传感器采用DST centi-TD型温深传感器,采用SeaStar软件设置采样时间、频率及激活测量模式。拖缆入水深度通过均匀配置铅皮重物控制,在海上地震采集工作前将深度传感器固定于拖缆上,测线结束后回收拖缆、读取拖缆深度记录数据等,然后对取得的深度等数据进行分析。

## 3 测试结果分析

### 3.1 多道接收拖缆沉放深度测试

外业施工时地震电缆沉放深度与设计沉放深度差值一般要求<1 m,海上地震采集记录因海水面虚反射的影响存在陷波特性和,使得地震记录的频

带变窄,地震剖面分辨率降低<sup>[10]</sup>。地震拖缆检波器虚反射的陷波频率与海水的速度 $c$ ,拖缆深度 $d$ 等因素有关,可用公式(1)表示:

$$f_n = nc/2d \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: $f_n$ 为沉放 $d$ 深度处检波器虚反射的第 $n$ 个陷波频率;

$n$ 为陷波个数;

$c$ 为水速, m/s;

$d$ 为检波器沉放深度, m。

因此,地震拖缆沉放越深,第一陷波频率越小,高频损失越严重<sup>[11]</sup>。多道地震拖缆沉放深度较浅时低频涌浪噪音较大,降低了中深部有效反射的信噪比,电缆沉放深度越深,接收的子波主频越低,有利于低频信号接收<sup>[12]</sup>。如图2所示,拖缆不加配重物沉放0 m即漂浮于水面上时,频谱分析显示主频带为40~180 Hz,满足高分辨率地震的高分辨率要求;而拖缆沉放12 m时,主频带宽度仅为40~100 Hz,主频带宽度大大降低,与上述陷波频率计算公式相符。拖缆沉放深度太大,严重影响数据的主频带宽度,极大降低了信号的分辨率,因此,鉴于高分辨率地震的目标要求,在海况较好的情况下,拖缆沉放深度越小越好。

电缆沉放较深时,可以更好地接收到深层信号,

信噪比相对提高, 叠加效果和同相轴的连续性都要更好些<sup>[13]</sup>。测试分为加配重物和不加配重物 2 种情况, 加配重物情况, 采用在每个数字包位置固定绑扎铅皮, 共 8 个数字包, 每个数字包处配重 200 g

铅皮, 不加配重情况为去掉所有配重, 测试结果见表 2、图 3 和图 4。电缆沉放较深时, 涌浪等引起的干扰也得到了有效抑制(图 4), 经频率分析显示沉放深度较大的原始单炮记录各频段能量更强(图 3)。

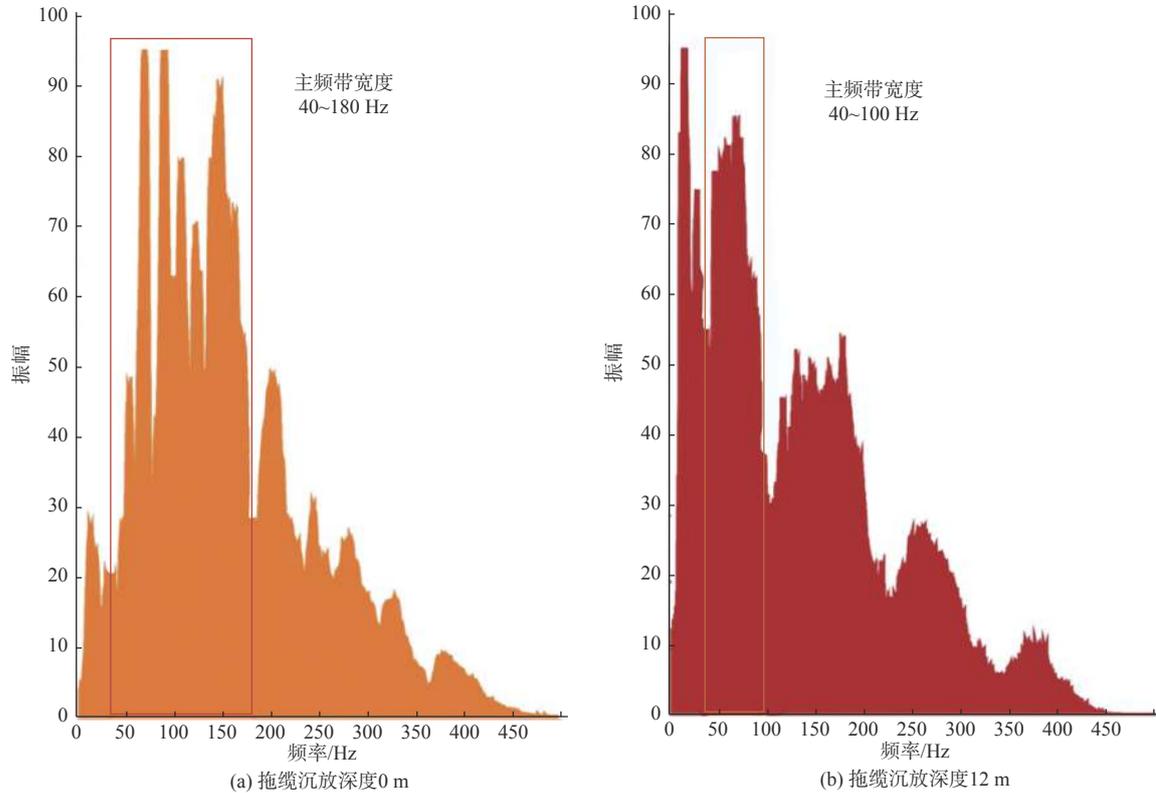


图 2 拖缆不同沉放深度频谱图

Fig.2 The frequency analysis from different sinking depths

表 2 电缆沉放深度测试结果表

Table 2 The information related to seismic cable sinking depth

是否配重	潮流	前端/m	陷波频率/Hz	中部/m	陷波频率/Hz	尾端/m	陷波频率/Hz
配重	顶流	2.8~2.9	250	7.1~7.3	107	9~10	75
	顺流	3.7~4.3	187	7.5~8.5	93	10~11	68
无配重	顶流	1.0~2.1	375	7.6~8.5	93	7.9~8.5	93
	顺流	2.0~2.9	250	8.8~9.8	83	8.6~9.5	83

### 3.1.1 拖缆不同位置沉放深度变化

(1) 在均匀配重情况下, 多道拖缆呈倾斜沉放状态, 倾斜的程度与潮流的影响密切相关。顶流作业时, 拖缆前端沉放深度 3 m, 中部沉放深度 7 m, 尾端沉放深度 9~10 m; 顺流作业时, 拖缆整体沉放

深度变大, 前端沉放深度 4 m, 中部沉放深度 8 m, 尾端沉放深度达 10~11 m。

(2) 不加配重情况下, 拖缆前端沉放深度小, 中部与尾端沉放深度相差不大, 中部沉放深度略大。顶流作业时, 拖缆前端深度沉放 2 m, 中部沉放深

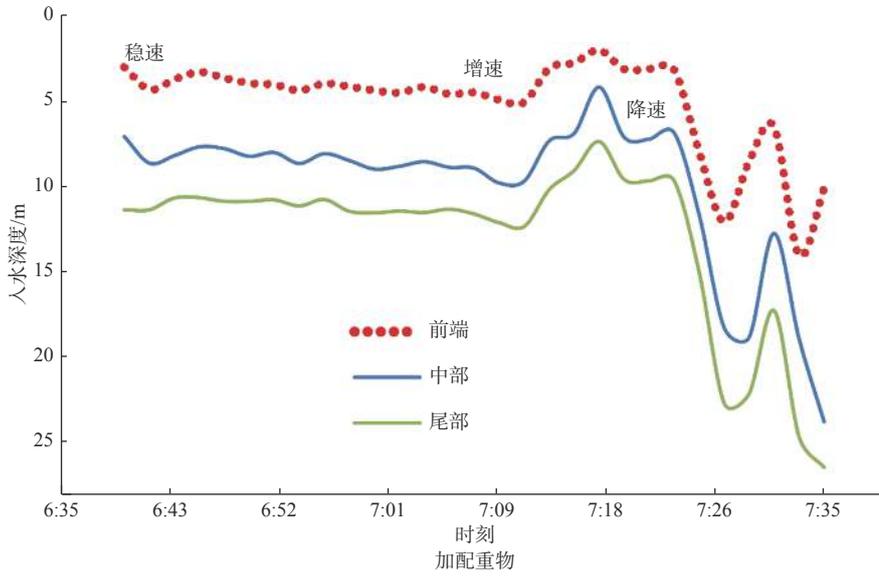


图 3 拖缆不同位置沉放深度与航速变化关系曲线图

Fig.3 The curve of relation between sinking depth and speed variation at different positions of the towing cable

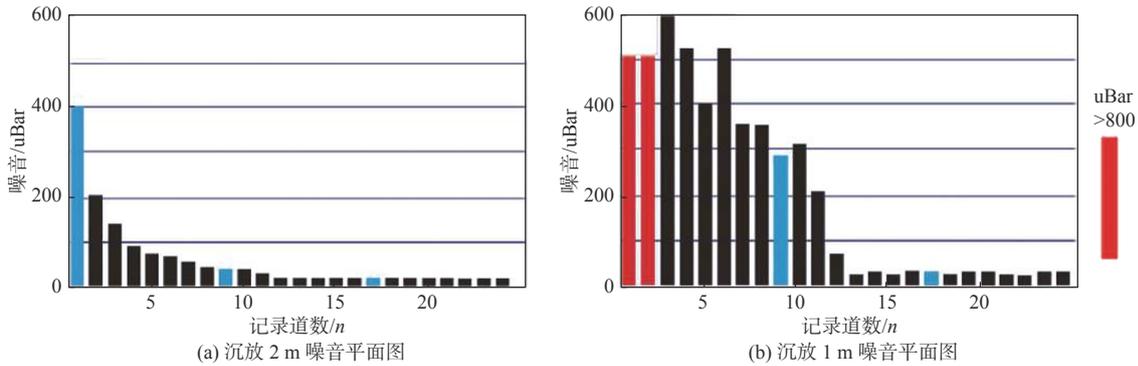


图 4 拖缆不同沉放深度噪音平面图

Fig.4 The noise of single shot records obtained from different sinking depth

度 8 m, 尾端沉放深度 8 m; 顺流作业时拖缆整体沉放深度变大, 前端沉放深度 3 m, 中部沉放深度 9 m, 尾端沉放深度达 9 m。

但随着拖缆的排列长度加大, 拖缆的后端和尾标远离船尾, 整体入水深度加大, 呈前端浅、尾端深的倾斜状态。因此拖缆的沉放深度不但与是否配重相关, 还与拖缆放长相关, 拖缆的放长要根据具体船只的尾流干扰情况、水面虚反射和拖缆姿态等综合确定。

### 3.1.2 入水深度与潮流、船速的关系

多道拖缆的沉放深度的变化还与施工作业时的潮汐相关, 其沉放深度呈类似于潮位曲线的周期循环变化特征, 图 5 为黄海某海区实测 25 h 拖缆沉放深度变化规律, 地震船保持对地 4 kn 速度

航行, 可以看出拖缆沉放深度呈周期约为 12 h 的循环变化, 沉放深度随潮流的顶流或顺流变化, 顶流时沉放深度变小, 平均入水深度约为 6 m, 顺流时沉放深度增大, 平均入水深度约为 9 m。船速加大时, 对电缆的拉力增加, 拖缆沉放深度变小; 船减速降低时, 对电缆的拉力变小, 拖缆沉放深度变大; 同时可以看到, 无论顶流还是逆流施工, 拖缆沉放深度变化幅度均达 4 m 以上, 远远超过电缆沉放深度控制误差 1 m 的规范要求。震源和电缆沉放深度误差对地震成像精度的影响较大, 电缆沉放深度偏差使海底反射波无法校平, 影响地震数据处理地震成像效果<sup>[14]</sup>。因此, 在高分辨率、短排列多道地震采集施工中, 控制拖缆入水深度尤为重要, 船速控制应由对地速度改为对水速度较为

合理, 拖缆在水体中稳定的运动速度是保持其沉放深度稳定的关键, 是提高电缆平衡性的有效保障。但船速采用对水速度控制施工较麻烦, 需要船只配备测流计等措施, 当前大部分专业地震调查船可以实现对水船速的精确控制。当船只不具备对水船速控制功能时需要根据海区潮流和试验等情况确定, 顶流时适当降低对地船速, 顺流时适当加大对地速度, 尽量保持拖缆沉放深度不要起伏太大。提高电缆平衡性的措施还应考虑前导段

拖缆释放长度不能太短或太长, 前导段拖缆释放距离应位于船尾流区之外, 一般大于 1 倍船体长度, 并根据试验情况确定适宜的释放长度。提高电缆平衡性的另一个措施是在电缆前端和尾端各配置一个定深浮筒支架, 以保持拖缆稳定的沉放深度和较好的平衡性。在船只遇渔船、渔网等障碍物转弯或回转上线时, 多道拖缆沉放深度瞬时值较大, 在浅水区应注意水深变化, 防止沉入海底, 加大回转半径。

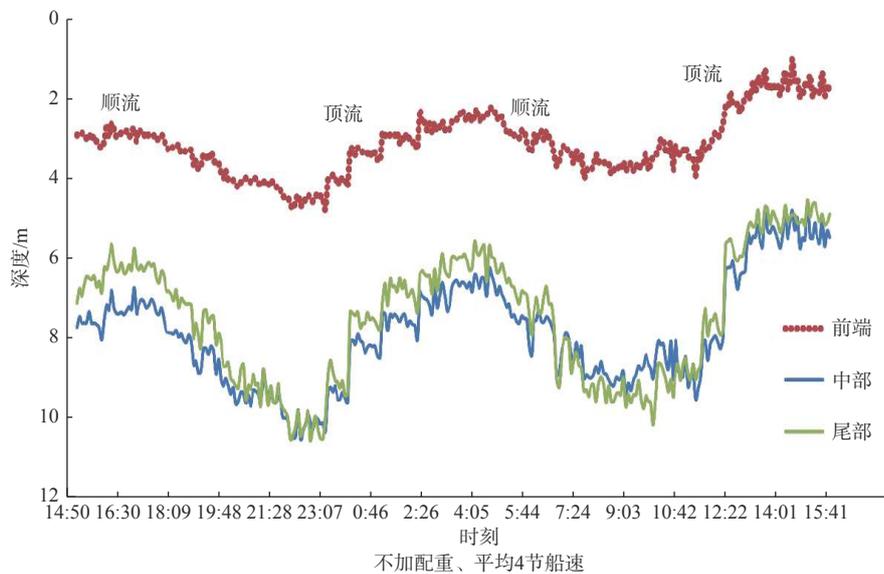


图 5 不同位置测试点多道缆入水深度变化图

Fig.5 Time-dependent chart of laying depth of multi-channel cable at different test points

### 3.2 震源沉放深度测试

水层虚反射原理的研究表明, 不同震源沉放深度的水层虚反射直接关系到采集资料的频率成分。采用大容量气枪阵列在海水中以较大的沉放深度激发地震子波, 达到了有效增强地震波能量、拓展低频信号<sup>[15-16]</sup>。当目的层深时, 震源沉放深度深一些, 有利于接收深层反射波的信息; 目的层浅时, 震源沉放深度可以浅一些, 以提高地震反射波的频率<sup>[17]</sup>。本文主要对法国 SIG 电火花震源进行了测试, 分为不加浮球(图 6)和加浮球(图 7) 2 种情况, 从测试结果看出, 在不加浮球情况下, 震源拖体沉放深度和潮流的关系与拖缆沉放深度与潮流的关系相反, 顶流时震源拖体下沉, 顺流时震源拖体上浮, 具体表现为电火花震源电极顺流

时沉放深度小, 最小值 1.5 m, 顶流时电极沉放深度大, 最大值 8.5 m, 船速对电极的沉放深度也有影响, 规律与多道拖缆相同, 船速增大时电极沉放深度变小, 船速降低时电极沉放深度变大, 在船只遇渔船渔网等障碍物转弯或回转上线时, 电极沉放深度瞬时值较大, 在浅水区应注意水深变化, 防止沉入海底, 加大回转半径。加浮球情况下, 受浮球拉力影响, 电火花震源电极入水深度变化较小, 图 5 为浮球绳长 4 m 的测试结果, 变化范围为 1~2.5 m, 平均 1.5 m, 电极沉放深度较为稳定。电极沉放深度的变化, 会直接改变脉冲信号频率等特性, 不利于震源的一致性, 因此, SIG 型电火花震源应采取加浮球等深度控制措施, 可以避免震源起伏过大, 提高震源的重复性和一致性, 获得稳定的震源信号。

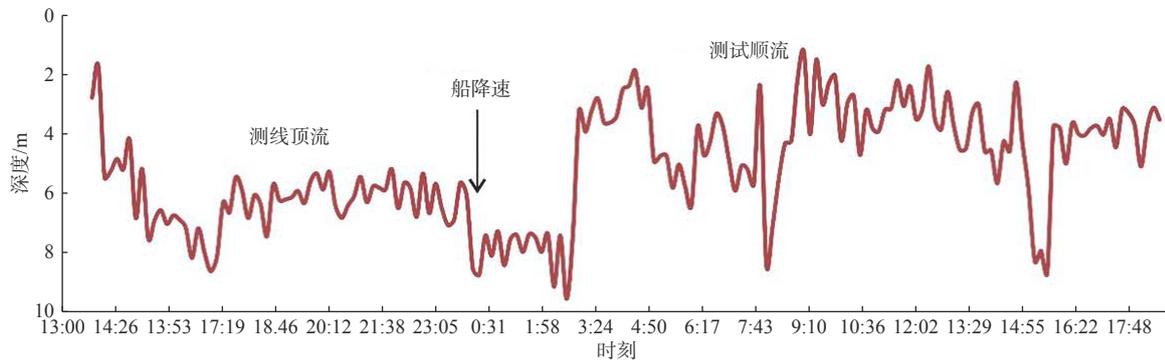


图6 无浮球时电火花震源电极测试沉放深度变化曲线

Fig.6 Variation curve of sinking depth of spark source electrode test without floating ball

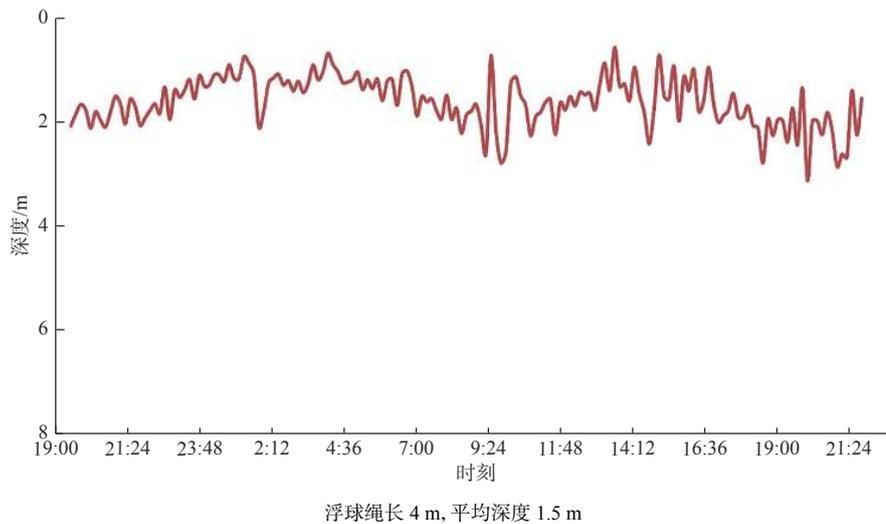


图7 悬挂浮球时电火花测试沉放深度变化曲线

Fig.7 Variation curve of sinking depth of spark source electrode test with floating ball

## 4 结论

(1) 短排列地震拖缆沉放深度受潮流、船速等多种因素影响,且变化幅度较大,随着拖缆放长的加大,拖缆远离船尾,整体沉放深度加深,呈现前端浅、尾端深的倾斜状态。在顶流和船速加速情况下地震拖缆沉放深度变小,在顺流和船减速情况下地震拖缆沉放深度变大,实测工作状态时拖缆入水深度变化 $>4\text{ m}$ ,超出规范允许偏差要求。拖缆沉放深度太大,严重影响数据的主频带宽度,极大降低了信号的分辨率,因此鉴于高分辨率地震的目标要求,在海况较好的情况下,拖缆沉放深度越小越好。

(2) 增加电缆平衡性的措施宜考虑前导段拖缆放长不能太短或太长,放长距离应保证远离尾流干扰,并根据试验情况确定适宜的后放长度,可以在

电缆的前端和尾端各布置一个定深浮筒支架,以保持拖缆的定深和较好的平衡性。

(3) 多道地震资料采集施工时船速采用对水速度的控制方式较为合理,电缆在水体中稳定的运动速度是保持其沉放深度稳定的关键,也是提高电缆平衡性的保障。当船只不具备对水船速控制功能时需要根据海区潮流和试验等情况确定,顶流时适当降低对地船速,顺流时适当加大对地速度,尽量保持拖缆沉放深度不要起伏太大。

(4) SIG型电火花震源应采用加浮球等措施控制电极沉放深度,提高震源的重复性和一致性,以获得稳定的震源信号。

### 参考文献:

- [1] 张勇,田双凤,周建平,等.小排列高分辨率多道地震系统在岱山岛大桥工程中的应用[J].海洋学研究,2008,26(4): 105-110.

- [2] NISSEN S E, COMBES J M, NEKUT A G. Acquisition, processing, and analysis of shallow, high-resolution seismic data from the outer continental shelf and upperslope, offshore Louisiana [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(2): 300-316.
- [3] BELLEFLEUR G, DUCHESNE M J, HUNTER J, et al. Comparison of single- and multichannel high-resolution seismic data for shallow stratigraphy mapping in St. Lawrence River estuary, Quebec [J]. *Current Research*, 2006: 1-10.
- [4] LEE H Y, PARK K P, KOO N H, et al. High-resolution shallow marine seismic surveys off Busan and Pohang, Korea, using a small-scale multichannel system [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, 56(1): 1-15.
- [5] MOSHER D C, SIMPKIN P G. Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: data acquisition [J]. *Geoscience Canada*, 1999, 26: 174-187.
- [6] 史慧杰, 赵铁虎, 褚宏宪, 等. 海域高分辨率24道地震采集技术在渤海海峡跨海通道项目中的应用 [J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(10): 47-56.
- [7] 吴志强, 祁江豪, 张训华, 等. 大陆架科学钻探CSDP-2 井的垂直地震剖面测量 [J]. *地球物理学报*, 2019, 62(9): 3492-3506.
- [8] 唐进, 杨凯, 顾汉明, 等. 海上变深度缆地震采集宽频机理分析 [J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(5): 2386-2391.
- [9] 褚宏宪, 孙运宝, 秦轲, 等. 小道距高分辨率多道地震对天然气水合物勘查的适用性 [J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(6): 50-54.
- [10] 陈金海, 王桂华, 徐新南. 海上地震虚反射探讨 [J]. *海洋石油*, 2000, 20(1): 22-27.
- [11] 金明霞, 宋鑫, 易淑昌, 等. 海洋地震变深度电缆采集数据的频谱分析及消除鬼波研究 [J]. *物探与化探*, 2018, 42(3): 529-530.
- [12] 李军峰, 肖都, 孔广胜, 等. 单道海上反射地震在海上物探工程中的应用 [J]. *物探与化探*, 2004, 28(4): 365-368.
- [13] 钟明睿, 朱江梅, 杨薇, 等. 震源及电缆沉放深度对海上地震资料的影响 [J]. *物探与化探*, 2012, 36(1): 78-83.
- [14] 骆迪, 蔡峰, 吴志强, 等. 海洋短排列高分辨率多道地震高精度成像关键技术 [J]. *地球物理学报*, 2019, 62(2): 730-741.
- [15] 祁江豪, 吴志强, 郭兴伟, 等. 大容量气枪震源在南黄海海相高速屏蔽层下VSP资料采集中的应用: 以大陆架科学钻探CSDP-2井为例 [J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4): 1661-1670.
- [16] 吴志强, 郝天珧, 唐松华, 等. 立体气枪阵列延迟激发震源特性及在浅海区OBS探测中的应用 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(7): 2573-2586.
- [17] 王桂华. 海上地震数据采集主要参数选取方法 [J]. *海洋石油*, 2004, 24(3): 35-39.

## DEPTH MEASUREMENT ANALYSIS FOR SHORT ARRAY HIGH RESOLUTION SEISMIC TOWING STREAMERS AT SEA

CHU Hongxian<sup>1,2,3</sup>, MEI Sai<sup>1,2,4\*</sup>, SHI Huijie<sup>1,2</sup>, QIN Ke<sup>1,2</sup>, SUN Jun<sup>1,2</sup>, FANG Zhonghua<sup>1,2</sup>

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3 Yantai center of Coastal Geology, China Geological Survey, Yantai 264004, Shandong, China; 4 College of Marine Geosciences, Ocean university of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The short array high resolution seismic survey is an important survey method commonly used at sea because of its advantages of high resolution, high signal to noise ratio and easy operation. However, since the length of the towing streamers is too short, the sinking depth of the towing streamers is always limited by the operating conditions and the equipment itself. Generally, waterbird control is not used, and the towing streamers sinking depth is usually adjusted by weight. The source depth and the depth of the towing streamers depend upon many factors such as the tidal current, the speed and weight of survey vessel and the conditions of data acquisition. As the results, the sink depths of the source and streamers change greatly and regularly. In this paper, we summarized our experiences from offshore survey and recognized that for the purpose of high resolution seismic survey, when the data acquisition of seismic data is going on, the relative water velocity should be as stable as possible and smaller seismic cable sinking depth is preferred.

**Key words:** multiple-channel seismic; high-resolution; short array; sinking depth; notch