

# 我国海洋钻探技术

赵尔信, 蔡家品, 贾美玲, 张建元, 阮海龙, 沈立娜

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:**介绍了中国海洋钻探的主要技术方法,其内容包括:中国大洋钻探、南海天然气水合物钻探、深海矿产钻探、深水工程钻探。对每种钻探技术进行了描述,为海洋钻探提供部分技术支持。

**关键词:**海洋钻探;取样技术;钻探船

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)09-0043-06

**Marine Drilling Technique in China/ZHAO Er-xin, CAI Jia-pin, JIA Mei-ling, ZHANG Jian-yuan, RUAN Hai-long, SHEN Li-na** (Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The paper introduces the main technical methods of marine drilling in China, including Chinese ocean drilling, the gas hydrate drilling in South China Sea, deep-sea mineral drilling and deepwater engineering drilling. Each drilling technique is described to provide some technical support for marine drilling.

**Key words:** marine drilling; sampling technique; drillship

中国正在从海洋大国向海洋强国迈进,为此,国家“十二五”规划纲要提出“坚持陆海统筹,制定和实施海洋发展战略,提高海洋开发、控制、综合管理能力”实现了一次重大的战略思维转变。中国已经到了向海洋发展,征服深海空间的时刻。

我国海洋钻探目前主要开展了下列几个方面的工作:

- (1) 南海大洋科学钻探;
- (2) 南海深水工程钻探;
- (3) 南海天然气水合物钻探;
- (4) 大洋固体矿产的勘探;
- (5) 南海深水石油钻探。

以上工作说明中国海洋梦已经启动,并已付诸实施,宣示了对南海的主权。

## 1 南海大洋科学钻探

我国于 1998 年正式加入大洋钻探计划,随后开展了 2 个航次的南海大洋科学钻探。

### 1.1 ODP 计划

1999 年 2 月 18 日~4 月 12 日,国际大洋钻探船“决心号”在南海实施 ODP (Ocean Drilling program) 第 184 航次。时年 63 岁的汪品先教授为共同首席科学家之一,这是中国南海的首次大洋钻探航次,也是第一次由中国人设计和主持的大洋钻探航次。184 航次在南海南北 6 个深水区钻孔 17 个,从

水深 2000~3300 m 的海底钻入地层,最深一口井深入海底以下 850 m,取得了高质量的连续取心共计 5500 m。

在 184 航次,获得的重大科研成果:

- (1) 建立了西太平洋区最佳深海地层剖面;
- (2) 揭示了热带过程在碳循环及气候周期演变中的作用;
- (3) 取得了东亚季风演变的深海记录。

### 1.2 IODP 计划

2014 年 1 月 29 日~3 月 30 日进行了国际大洋发现计划,IODP (Integrated Ocean Drilling program) 第 349 航次。该航次是 IODP 计划的首个航次。

共同首席科学家是同济大学李春峰教授,此轮南海大洋钻探,一共完成 5 个钻位的取心,如同在海底打下了 5 颗“金钉子”获取了具有极高价值的岩心。钻探水深 4000 m 最深处是黄岩岛附近 4200 m,向下钻探 1000 m。据决心号船上另一位首席科学家(美籍华人)说该孔深是大洋钻探第三个深孔纪录。所用钻探船“决心号”见图 1,锥形漏斗见图 2,取样器见图 3,取出的多孔岩心见图 4,取出的第一根岩心见图 5。

#### 1.2.1 取得的科学成就

- (1) 精确地确定南海海盆扩张时代与岩浆活动过程;
- (2) 说明了南海扩张形成的晚期有多起强烈的

收稿日期:2014-06-30

作者简介:赵尔信(1941-),男(汉族),江苏扬州人,北京探矿工程研究所教授级高级工程师,地质工程专业,从事地质钻探、科学钻探、海洋钻探研究工作,北京市海淀区学院路 29 号,tuwen1725@163.com。



图1 “决心号”钻探船



图2 锥形漏斗



图3 取样器



图4 取出多孔岩心



图5 取出的第一筒岩心(9 m长)

(4)首次在南海取得说明海底扩张形成的硬岩——玄武岩。

### 1.2.3 深水钻探中出现的技术问题

(1)钻探至海底之下 600 多米时,因岩性突然变硬,曾使钻头损坏,被迫离开原井位 20 多米,重新钻孔。

研究其原因是船的升沉补偿精度仍不能精细控制,当船随波浪下降时,向上的补偿量不够,给井底钻头一个冲击力,致使将钻头压坏。

(2)有几个回次未能取上岩心,经研究改进后方再取出岩心。研究其原因是,底层特别松散,易被冲洗液冲蚀,难以形成岩心。后来所取岩心是半固结的地层比较容易取上岩心。

(3)曾因海浪较大,浪高达 4 m,钻探船被迫离开钻探井位,待浪小以后再回到原井位,继续钻探。

研究其原因是:钻探船升沉补偿能力为浪高 3 m,所以海浪达 4 m 即超过了钻探船的补偿能力。

南海大洋钻探所取得的成果不仅是为我国地球科学注入新鲜活力,而且提升了中国深海钻探领域的地位。

但这次科学钻探所用的关键大型设备是美国 1978 年制造的“JOIDES 决心号”钻探船及取样设备,钻探人员也是美国人。这些技术还受制于国外,所以我国海洋科学家汪品先院士提出:我国应尽快制造一艘中国主导的大洋钻探船及相应取样设备,为人类探索更多的海底世界的奥秘,已是下一个航次的目标。

## 2 海洋深水工程钻探

深水工程钻探(水深 > 300 m)在我国仍是空白。特别是南海蕴藏有丰富的石油天然气和天然气水合物,我们对南海进行海洋工程钻探、天然气水合物的调查工作基础薄弱,主要是缺乏深海动力定位钻探船、深水取样器、深水工程钻机等。

火山活动;

(3)南海形成的年龄约在 1600 万年前;

### 1.2.2 取得技术上的成就

(1)首次在南海 4000 m 水深进行科学钻探;

(2)首次在南海深水钻探海底以下 1000 m;

(3)所钻最深井深 5000 多米,是 ODP 深海钻探中的第三个深井;

现在国家已经立项和已完成的国家重大专项“大型油气田及煤层气开发”正在向深海发展,以寻找油气、各种矿产资源及调查海底地貌及构造环境等,研制了具有自主知识产权的深水工程钻探船、深水工程钻机、深水取样器及深水自动探测器,可进行地质钻探、工程勘察、矿产勘探、天然气水合物等调查研究。

深海钻探不再是梦想,不再是少数国家的专利,我国开始步入深水海洋国家的行列,从陆地走向海洋从浅蓝走向深绿,逐渐发展壮大,终将成为海洋强国。

### 2.1 深海钻探用深水工程钻机

我国设计制造了拥有自主知识产权的深水工程钻机,改变了我国深海钻机受制于人的现状,提高了我国重大装备的研发能力、制造能力和集成能力,加快了深海油气田的勘察,具有重要的意义。

我国现研制的深水工程钻机(以中国708号为例)性能为:钻探名义深度4000 m,最大静钩载2250 kN,最大作业水深3000 m,钻探海底以下600 m,额定功率400 HP,输出扭矩30.5 kN·m,存放钻杆数量3200 m,升沉补偿能力 $\pm 2.25$  m,井架高度34.5 m。

我国深水工程钻机的特点:

- (1)先进的电动顶驱;
- (2)钩载负荷大。最大钻杆负荷115 t,顶驱和补偿器负荷为37 t,动载系数为1.3,最大钩载为225 t;
- (3)研制了国内正在起步研究的管子处理系统、折臂抓管机和鹰爪机;
- (4)研制了海底遥控基盘,在船上控制基盘液缸夹紧和松开钻杆;
- (5)研制了水下钻杆导向装置。

由上述参数和特点描述可知,我国深水工程钻机已有国际先进水平,功能齐全,人性化的设计,完全能适应南海深水钻探,仅是钻机能力偏小,进入3000 m以深的海域较为困难。

### 2.2 深水工程钻探船

目前南海深水油气开发前期地质调查水深为300 m以浅,大于300 m水深工程钻探需租用国外钻探船,取心工作量大,代价高。国内现制造了3000 m水深钻探船见图6。

该钻探船的功能如下。

- (1)工程勘探调查:包括水深测量、地貌浅地层剖面、磁力调查及二维高分辨率数字地震调查。



图6 深水钻探船708号

- (2)工程地质勘察:包括工程地质钻探、随钻取样、海底表层取样、海底水合物取样、CPT(Cone Penetration Testing)原位测试。

- (3)工程服务:包括采油树安装、海底基盘安装、电缆铺设和海底软管铺设等。

- (4)科学考察:船上装备有多个实验室。

我国研制的深水工程钻探船(以中国708号为例)性能为:船长105 m,船宽23.4 m,吃水深度7.4 m,最大航速15节,自持力75天,额定载员90人,甲板载货面积1100 m<sup>2</sup>,主动功率14000 kW,工作水深50~3000 m,海底以下钻孔深度600 m,钻机钩载能力225 t,升沉补偿距离4.5 m(主动),钻探方法使用非隔水管法,随钻取心采用绳索取心方式,海况条件浪高3 m、蒲福7级风,使用DP-2动力定位。

深水工程钻探船的特点:(1)采用DP-2动力定位,定位精度高;(2)升沉补偿设计为主动式,补偿能力大;(3)船的功能齐全,可进行钻探、工程物探、科学考察;(4)船舱设计更加人性化。

### 2.3 深水随钻取样技术

深水随钻取样技术在国内尚是空白,国外对我是技术严密封锁,产品是只租不卖,还要外国技术人员现场服务,代价昂贵。更重要的是南海资源应由我国自主勘探和开发,以行使我国领海主权。深海钻探将为全国海洋科学家提供记录处于海表以下海底沉积物和岩中的地质和环境信息的巨大知识库。通过这些信息会使我们对地球的去、现在和将来有更好的认识。

#### 2.3.1 主要特点

- (1)在松软土层采用先进的压入式取样技术;
- (2)在软硬地层中采用超前伸缩式取样技术;
- (3)在破碎地层中采用射流式揽簧取样技术;
- (4)模块式组合取样技术,实现钻头、钻杆不提出钻孔,即可更换取样模块。

#### 2.3.2 技术要求

在3000 m水深,蒲福7级风,在效波高3 m和

海流为2.5节的条件下能够实施取样作业。取样长度1.5 m,取样直径 $\geq 60$  mm,采取率90%。

### 2.3.3 钻具性能

耐压22 MPa,运动速度1.5 m/s,外筒抗拉强度 $\geq 1080$  MPa,屈服强度 $\geq 930$  MPa,可承受最大扭矩802 kN·m,外筒螺纹连接处最大应力为348 MPa<外筒材质的屈服强度930 MPa。翻板式采取沙土样品可靠,射流式钻具取破碎样品,保真性好。

### 2.4 TK型取样钻具海上试验效果

在海上进行了3次取样试验,其试验情况分叙如下(参见图7、图8)。



图7 取样器放入海中



图8 取上2 m的样品

#### 2.4.1 试验设备

海上取样试验依托于多种设备,包括工程钻探船、深海钻机、钻塔、高压泥浆泵、排管机、鹰爪机、相应的动力定位、升沉补偿装置及TK系列取样器等。

#### 2.4.2 试验效果

关于TK型的取样效果见表1。

从表1可见,所设计的TK型取样器的取样效果完全满足合同的要求并超过了合同指标的30%~40%。

表1 海试TK型取样器取样效果与合同要求对比

海底地层	合同要求 求样品 长度/m	试样取 样长度 /m	日期	回次
软的粘性土层及 松散砂土层	1.10	1.34	2014-4-9	2、3回次及第6回次平均值
			2012-4-10	1~6回次平均值
			2012-4-23	第2回次*
稍硬的粘性土层 及中密实砂土层	0.75	1.05	2012-4-9	第1回次平均值
			2012-4-12	第3回
硬的粘土层、密 实砂层、粗砂层 及贝壳	0.45	0.74	2012-4-7	2~4回次平均值
			2012-4-8	第1回次
			2012-4-9	第4回次

\*:4月12日第1回次取样长度未参加计算,原因是泥浆管线出现问题,没有憋上压力。

## 3 南海天然气水合物钻探

中国地质调查局在南海北部成功钻获“可燃冰”,从而使我国成为继美国、日本、印度之后的第四个采到水合物实物样品的国家。钻探采样的成功,标志着我国天然气水合物调查研究水平步入世界先进行列,即达到了国际先进水平,但其发展的“瓶颈”是钻探技术和设备,特别是关键技术——保温保压取样器,被世界各国都十分重视和保密技术,也是天然气水合物取样的核心技术。

### 3.1 我国南海北部2次钻探天然气水合物的概况

(1)第一次于2007年5月在南海北部神狐海域,首获天然气水合物实物样品,预计达上百亿吨油当量。海水深度1230~1245 m,海底以下183~225 m,水合物沉积层厚度达34 m。

(2)第二次于2013年6月~9月在广东沿海珠江口盆地东,钻获高纯度天然气水合物样品,并通过钻探获得可观的控制储量。天然气水合物赋存于海水深度为600~1100 m的海底以下220 m以内的2个矿层中,上层厚度15 m,下层厚度30 m,自然产状呈层状、块状、结核状、脉状等多种类型,肉眼可辨。通过实施23口钻探井,控制天然气水合物55 km<sup>2</sup>,将天然气水合物折合成天然气,控制储量1000~1500亿m<sup>3</sup>,相当于特大型常规天然气田。

### 3.2 天然气水合物的钻探设备和技术

全部采用荷兰惠固公司的钻探船和俄罗斯的取样技术。

下面分别介绍荷兰的钻探船和俄罗斯的取样器,见图9、图10、图11、图12。

### 3.3 天然气水合物取样的关键技术——保温、保压取样器

天然气水合物是在低温(0~10℃)、高压(>10



图 9 惠固公司的钻探船  
(船长 85.5 m、船宽 16.8 m、船的作业水深 13 ~ 3000 m)



图 10 俄罗斯的取样器



图 11 取出的块状天然气水合物实物

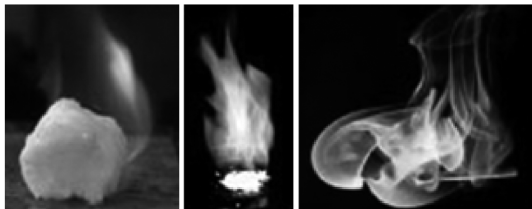


图 12 天然气水合物点燃的火焰

MPa)并有充足烃类气体连续补给和水参与下形成的一种矿物。所以在常温常压条件下极易挥发,要保持天然气水合物的原状样品,必须设计制造保温保压的取样钻具。

该类型取样器设计的关键技术是取样管的密封机构。大致有 2 种:(1)球阀密封机构;(2)翻板式密封机构。

### 3.3.1 球阀密封机构(见图 13)

该类型密封机构,有以深海钻探计划(DSDP)

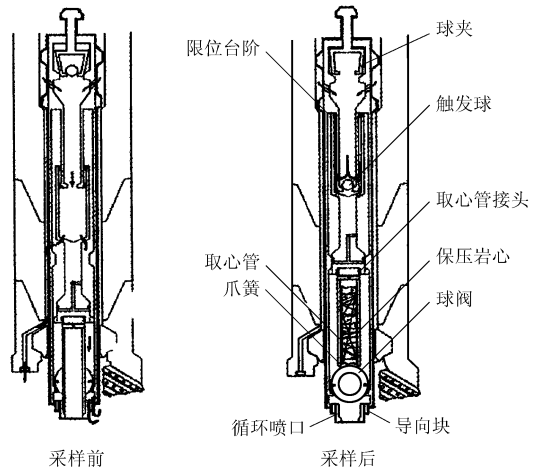


图 13 球阀式保压取样器

为代表的 PCB 保压取样器和大洋钻探计划 (ODP) 的 OCS 保压取样器。两种取样器在大洋深处多次取出了天然气水合物,但也暴露出不少问题,如球阀关闭不严,难以保证样品腔中的压力等。球阀关闭动作失败,样品无法保压甲烷气体大量流失,无法获取保真样品;球阀机构占据内筒中较大的空间,取出的样品直径较小(42 mm),影响样品的代表性。

### 3.3.2 翻板式密封机构(见图 14)

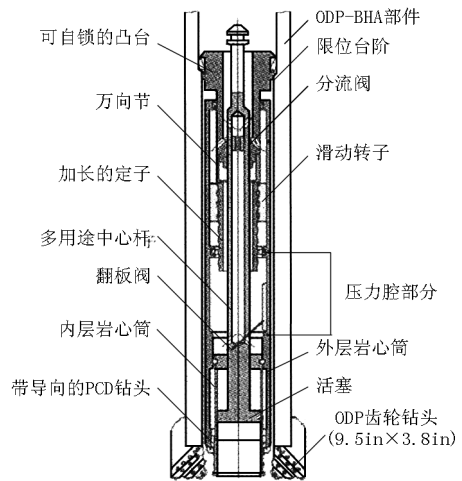


图 14 翻板式保压取样器

该类型密封机构,以惠固公司开发的 FPC 取样器和德国柏林科技大学与克劳斯塔技术大学联合研制的保压取样器为代表,取样直径较大,分别为 58 和 50 mm;保压能力达 25 MPa;翻板的打开和关闭比较灵活、可靠。

通过两种密封机构的对比可发现,用翻板式原理设计和研制的保压取样器性能较好,取出的样品直径大、压力保持可靠,机构开关灵活,翻板占据内筒的空间较小。下一步设计保压取样器以采用翻板结构为

好,再辅之以冲击器、螺杆钻等孔底动力效果更好。

#### 4 大洋固体矿产勘探

##### 4.1 海底固体矿产的勘探方法

占地球面积 70% 的海洋就是一个海底金属矿产资源的大宝库,除了油气等能源资源外,最具开发价值的应属大洋多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物 3 种潜在的海底多金属矿产资源。

目前多金属结核取样技术是箱式取样;  
结壳取样技术是深海钻探取样技术;  
硫化物取样常规手段是电视抓斗。

其中硫化物矿床的调查工作难度最大,一是硫化物矿床是三维分布的矿床,基本分布在海底两三千米以下,靠一般手段难以了解,最大技术“瓶颈”是钻探。

##### 4.2 研制适合 4000 m 深水钻探技术依据

- (1) 南海大洋科学钻探最大海水深度 4200 多米;
- (2) 南海天然气水合物赋存的海水深度 1200 多米;
- (3) 多金属硫化物矿床分布在海底水深 3000 m 以下;
- (4) 中海油工程勘察船 708 号设计水深 3000 m。

##### 4.3 设计海底以下钻探 1000 m 钻探技术依据

- (1) 南海大洋钻探最大海底以下钻探 1000 m 左右;
- (2) 南海天然气水合物赋存于海底以下 225 m 左右;
- (3) 多金属硫化物矿床赋存于海底以下 300 m 左右;
- (4) 中海油工程勘察船 708 号可钻海底以下 600 m。

因此,设计适用于深海水深 4000 m,海底以下 1000 m 的钻探船,钻机及取样工具可满足南海浅部及深部的多种领域的需要。

#### 5 南海石油钻探

“南海是世界油气资源富集地区之一,是第二个波斯湾”美国能源信息局网站这样评价南海蕴藏的丰富资源。

在南海几乎所有西方大石油公司均涉足其中,建的油气井超过千口(有资料称约 2000 口)。而中国在 2012 年 3 月前在资源最密集的南沙海域没有

一口井。

2012 年 5 月 9 日中国首座代表当今世界最先进水平的第六代半浅式深水钻进平台“海洋石油 981”,在南海荔湾区域 1500 m 深的水下钻入地层,标志着我国“深水战略”由此迈出了实质性的一步,实现了零的突破,是中国成为第一个在南海自营勘探开发深水油气资源的国家,表明中国深水作业能力领先于亚洲其他国家。

“海洋石油 981”为旗舰的“深水舰队”见图 15~18,代表了当今世界海洋石油钻井平台技术的最高水平,创造了多项世界第一。

“海洋石油 981”深水钻井平台长 114 m,宽 98 m,高 137 m,最大钻井深度 10000 m,最大作业水深



图 15 海洋钻探中的旗舰——981 号



图 16 海洋石油 981 的护卫舰铺管船 HYSY202 号



图 17 海洋石油 981 的护卫舰物探测量船

(下转第 70 页)

试验开始后通过操作台的升降开关控制冰样托盘向上移动,待冰块将要接触压头时,将升降速率调节至缓慢上升,同时观察软件界面压力曲线图,当压力出现数值时,证明压头已接触并开始挤压冰样,此时对软件中显示的位移进行修正,设定测试位移值为零。接通升降台电源,使冰样继续上升,当软件显示压力达到 50 N 时,关闭升降台电源,静置 30 s 后读取软件显示的压力和位移值即为压头挤压冰层的压力和压入深度。

利用以上方法采用 5 mm 布氏硬度压头,在  $-40 \sim -10$  °C 温度条件下对 2 mm 层理冰垂直层理方向硬度进行了测试。相同测试条件下,在冰样表面选取 5 个点进行重复测试,取 5 组测试数据平均值作为该条件下的测试结果,测试数据如表 1 所示。

表 1 2 mm 层理冰样垂直层理方向硬度测试数据

测试温度点 /°C	压入深度 $h$ /mm	压力 $F$ /N	压痕直径 $d$ /mm	HB
-10	0.14	33.5	1.67	1.50
-20	0.14	39.2	1.69	1.71
-30	0.13	42.6	1.64	1.97
-40	0.11	43.0	1.49	2.43

从表 1 中可以看出,2 mm 层理冰样在垂直层理方向的布氏硬度值随着温度的降低而增大;当冰样温度为  $-40$  °C 时,垂直层理方向布氏硬度为 2.43,比  $-10$  °C 硬度大 62%。总体来看,布氏硬度值在 1.50~2.43 之间。将此测试结果与国外测试结果对比发现,该测试结果偏小,分析原因认为主要是在

冰样压入深度检测上存在一定误差,下一步考虑在软件编程中设置一旦压头与冰样接触,即压力传感器检测压力开始上升时,位移自动清零,从而实现压头压力和位移的联动检测,提高测量精度。

#### 4 结语

(1)设计的硬度试验平台很好地解决了低温环境下冰硬度检测问题,在更换其他标准硬度压头后可以测试材料不同种类硬度值,如布氏硬度、压入硬度等。

(2)根据试验结果得出不同温度冰层的硬度值,结合冰孔温度分布,可以对反扭装置在不同孔段的使用和调节提供指导,降低反扭装置在孔内失效概率,提高钻进效率。

(3)设计的硬度试验台测量结果偏小,下一步考虑进一步完善检测软件,使压头压力和位移实现联动检测,提高测量精度。

#### 参考文献:

- [1] 李世忠. 钻探工艺学[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [2] 范晓鹏, Pavel Talalay, 郑治川, 等. 电动机械取心钻具反扭装置实验台设计及实验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 18-20, 24.
- [3] T. R. Butkovich. Hardness of Single Ice Crystals [J]. THE AMERICAN MINERALOGIST, 1958, 43: 48-57.
- [4] GB 231-84, 金属布氏硬度试验方法[S].
- [5] 崔祥斌, 孙波, 张向培, 等. 极地冰盖冰雷达探测技术的发展综述[J]. 极地研究, 2009, 21(4): 322-325.

(上接第 48 页)



图 18 海洋石油 981 的护卫舰海洋深水工程钻探船 708 号

3000 m,海底以下可钻 7000 m。

#### 6 结语

中国是一个具有 300 万  $\text{km}^2$  的海洋大国,我们要走进海洋,托起中国崛起的梦想,快速地向海洋强国迈进。因此,我们要做好以下几件事:

(1)应尽快研究中国主导的大洋钻探船、钻机和取样技术。

(2)应尽快研究具自主知识产权的天然气水合物深水钻探的保温保压取样工具。

(3)应尽快研究深水多金属硫化物钻探技术。

(4)应尽快研究海洋深水钻探工艺。

#### 参考文献:

- [1] 左汝强,李常茂,赵尔信,等. 国际海洋科学钻探进展[M]. 北京:地质出版社,2005.
- [2] 赵尔信,蔡家品,贾美玲,等. 海洋深水随钻天然气水合物取样钻探设备关键技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(S1): 40-44.
- [3] 段宝生,何繁,蒋卫焱,等. 海底沉积地层保真取样钻具的设计及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(2): 12-14.
- [4] 郭友钊. 走向海洋[M]. 北京:民族出版社,2002.
- [5] 姜泓冰. 打下“金钉子”探获南海“芯”[N]. 人民日报, 2014-4-3(22).
- [6] 陈仁泽. 珠江口钻获高纯度“可燃冰”[N]. 人民日报(海外版), 2013-12-18(01).