

## 中国南海荔湾区块喷射导管设计 入泥深度研究\*

王艳秋,郑喜耀,刘剑涛,周杨锐

(中海油服物探事业部工程勘察中心,天津 300451)

**摘 要:**导管入泥深度的合理设计是深水喷射钻井作业成功实施的关键。通过分析中国南海荔湾区块的地质条件,总结出了中国南海荔湾区块土壤强度随深度变化的关系,结合中国南海喷射导管结构的详细数据,给出了导管承载力随时间的变化以及导管最小入泥深度随时间的变化。计算方法与结论可为今后中国南海深水喷射钻井导管入泥深度设计提供参考。

**关键词:**南海;深水;喷射导管;入泥深度

**中图分类号:** P634.5

**文献标识码:** A

在海洋钻井作业中,浅水区域的导管通常采用打桩或钻孔后下入并固井的方式。而在深水区域,由于可能存在海床不稳定、破裂压力低、气体水合物堵塞、浅层水流的危害、海底低温变化等问题,常规的打桩、钻孔、下导管再固井的方式常常比较困难,作业风险高,对于日费高昂的深水钻井显然不合适。为此,人们实验应用了喷射导管钻井技术,该技术已在墨西哥湾、马来西亚、巴西以及我国南海等深水区域的油气田开发中应用<sup>[1]</sup>。

深水表层钻井作业通常采用“喷射下入”方法进行表层导管安装(图 1)。在导管内下入喷射组合钻具(简称喷射 BHA),利用导管柱和喷射 BHA 的重量和开泵冲洗下入导管(主要靠冲洗作用),岩屑沿喷射 BHA 和导管之间的环空返出。钻至预定井深后,静止管串,利用地层的黏附力和摩擦力稳固住导管,然后脱手送入工具并取出管内钻具,从而完成导管的安装。这种方法的主要特点是不进行固井作业,靠导管与土壤之间的附着力来固定导管<sup>[2]</sup>。

导管入泥深度设计是喷射钻井作业中最为关键的一环,入泥深度过大将容易造成导管喷射下入遇卡,入泥深度过浅将由于导管轴向承载能力不足而导致井口失稳下沉,合理地设计深度是确保导管能够安全定位以及后续钻井作业能够顺利进行的基础。

\* 收稿日期:2014-07-30

资助项目:十二五重大专项——荔湾 3-1 及周边气田地质灾害风险评价研究(2011ZX05056-001)

作者简介:王艳秋(1983-),男,工程地质工程师,主要从事岩土工程方面研究. E-mail:wangyanqiu625@163.com

(王佳实 编辑)

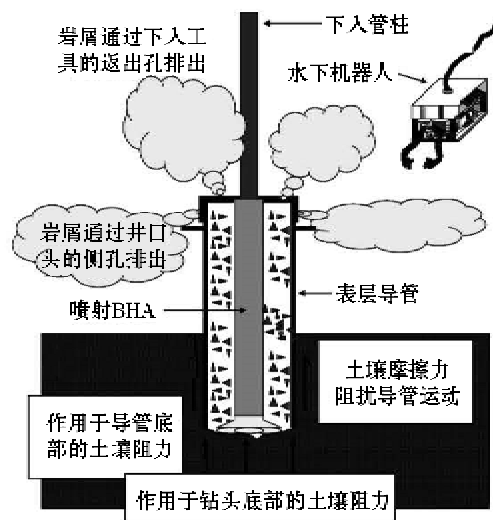


图 1 喷射下入表层导管示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the surface catheter injected into

导管入泥深度从 40~130 m 不等,与井位所处水深并没有直接联系<sup>[3]</sup>。Beck<sup>[4]</sup>最早提出导管入泥深度的设计方法,但没有考虑导管实时承载力随时间的变化。API-RP\_2A\_WSD《Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Off-shore Platforms-Working Stress Design》<sup>[5]</sup>提供了桩设计的相关指导规范,对喷射安装的导管入泥深度设计具有一定指导意义。Akers<sup>[6]</sup>借鉴 API 中桩的设计理论,对导管承载力进行了计算并给出导管设计方法,但假定扰动后的土壤抗剪强度随时间的变化没有增量。苏勘华等<sup>[7]</sup>基于土力学与桩基理论,利用迭代法提出一种导管下深设计方法,能否应用于工程实践有待进一步验证。Philippe<sup>[8]</sup>提出的方法考虑了承载力的时间效应,是目前最通用的导管入泥深度设计方法,该方法在墨西哥湾和中国南海水深为 600~1 700 m 的 20 余口井中得到了成功应用。通过对荔湾 3-1 海底土资料进行分析,统计得出适合喷射法下表层套管的海底土强度应小于 300 kPa。

Philippe<sup>[8]</sup>的方法在进行导管竖向实时承载力和导管最小下入深度计算时,应已知预定井场的 72 m 以内的地层土质参数、喷射导管装置在水下的总重量及附加在导管上的载荷。本文验证了 Philippe<sup>[8]</sup>方法在中国南海荔湾区块喷射导管设计中应用的可行性,在对该方法研究的基础上,考虑了防沉板在导管轴向最大承载力和导管最小下入深度计算中的影响,通过统计中国南海荔湾区块的已有工程地质资料,得出了中国南海荔湾区块经验性的不排水抗剪强度剖面,为今后在中国南海荔湾区块的喷射导管入泥深度设计提供参考。

## 1 导管入泥深度分析方法

本文在 Philippe<sup>[8]</sup>方法计算瞬时承载力和导管最小下入深度的公式中,考虑了防沉板的重量;在计算导管的实时承载力的公式中,考虑了防沉板的承载力。

### 1.1 导管承载能力分析

喷射导管在喷射后( $t=0.01$  d)的瞬时承载力等于喷射过程中记录的最终钻压<sup>[8]</sup>。如果设计有防沉板,喷射导管的承载力还应考虑防沉板的承载力。喷射导管总的瞬时承载力:

$$Q_0 = WOB_{\text{last}} = R \times (W_{\text{cond}} + W_{\text{WH}} + W_{\text{DC}} + W_{\text{CADA}} + W_{\text{Mud-mat}}) \quad (1)$$

式中, $Q_0$ 为喷射导管喷射后的瞬时承载力( $t=0.01$  d); $WOB_{\text{last}}$ 为安装过程中记录的最终钻压; $R$ 为钻压使用率,应在0.8到1.0之间; $W_{\text{cond}}$ 为导管在水下的重量; $W_{\text{WH}}$ 为井口装置在水下的重量; $W_{\text{DC}}$ 为钻铤在水中的重量; $W_{\text{CADA}}$ 为下入工具在水下的重量; $W_{\text{Mud-mat}}$ 为防沉板在水下的重量。

喷射导管安装完成后,土壤经喷射扰动后其不排水抗剪强度会急剧减小,需要经过一定时间才能恢复,喷射导管的承载力也将随时间增加。同时,当防沉板埋置于海底表面(入泥深度1 m)起支承作用时,可考虑防沉板的承载力对喷射导管承载力的贡献,但对于喷射导管的荷载为“使用荷载”(对应的地基承载力相当于容许承载力),防沉板的承载力可取其极限承载力除以安全系数 $K$ (对于短期结构物,建议 $K$ 取1.5)。导管喷射结束静置时间 $t$ 天后,导管实时承载能力:

$$Q_t = Q_0 + 0.055 \times [2 + \lg(t)] \times \pi \times D \times L \times Su_{\text{AVE}} + \frac{(q_n \times A_m)}{K} \quad (2)$$

式中, $Q_t$ 为导管静置 $t$ 天后的承载力; $Q_0$ 为导管初始承载力( $t=0.01$  d); $t$ 为导管静置时间( $t < 10$  d); $D$ 为导管外径; $L$ 为导管入泥深度; $q_n$ 为单位面积承载力; $A_m$ 为防尘板面积; $Su_{\text{AVE}}$ 为整个导管入泥深度范围内土的平均不排水抗剪强度, $Su_{\text{AVE}} = Su_0 + Su_1 \times L$ ,假设粘土的抗剪强度随深度变化的公式为 $Su = Su_0 + b \times L$ ,则 $Su_{\text{AVE}} = Su_0 + (\frac{b}{2} \times L)$ ,即 $Su_1 = \frac{1}{2} \times b$ , $Su_0$ 为表层粘性土的不排水抗剪强度, $b$ 和 $Su_1$ 为经验系数。

### 1.2 导管最小下入深度设计

在土剖面已知情况下,导管最小入泥深度的设计原则是确保导管在最危险工况下不发生下沉,即导管能够承受最大轴向载荷,于是满足:

$$Q_t = \text{LOAD} \quad (3)$$

$$\text{LOAD} = FS_1 \times (W_{\text{cond}} + W_{\text{WH}} + W_{\text{Mud-mat}}) + FS_2 \times W_{\text{landed}} \quad (4)$$

式中,LOAD为最大轴向载荷; $W_{\text{cond}}$ , $W_{\text{Mud-mat}}$ , $W_{\text{WH}}$ 含义同公式(1); $W_{\text{landed}}$ 为附加在导管上的荷载; $FS_1$ 为局部安全系数,建议取1.0; $FS_2$ 为局部安全系数,建议取1.3;导管和钻铤的重量跟导管入泥深度及各线重有关。通常情况下,为使导管能够承受更大的弯曲载荷,在靠近泥线24.38 m这一段壁厚采用38.10 mm,往下壁厚采用25.40 mm<sup>[9]</sup>。导管在水下的重量: $W_{\text{cond}} = w_1 \times L_2 + w_2 \times (L - L_1)$ 。式中, $w_1$ 为上部导管单位长度浮重(kN/m); $L_1$ 为上部导管长度; $w_2$ 为下部导管单位长度浮重(kN/m); $L$ 为导管入泥深度。钻铤重量: $W_{\text{DC}} = w_{\text{DC}} \times L$ ,式中, $w_{\text{DC}}$ 为钻铤单位长度浮重(kN/m)。

联合式(2)、(3)、(4)(其中对于“最危险工况”,公式(2)中不考虑防沉板的承载力),得到如下方程:

$$A \times L^2 + B \times L + C - FS_2 \times W_{\text{landed}} = 0 \quad (5)$$

式中,  $A = 0.055 \times (2 + \lg(t)) \times \pi \times D \times Su_1$ ;  $B = R \times (w_{DC} + w_2) + 0.055 \times (2 + \lg(t)) \times \pi \times D \times Su_0 - FS_1 \times w_2$ ;  $C = R \times (W_{WH} + W_{CADA} + W_{Mud-mat} + L_1 \times (w_1 - w_2)) - FS_1 \times (W_{WH} + W_{Mud-mat}) + FS_1 \times L_1 \times (w_2 - w_1)$ ; 求解公式(5),得导管最小入泥深度:

$$L = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \times A \times C + 4 \times A \times FS_2 \times W_{land}}}{2 \times A} \quad (6)$$

## 2 Philippe 方法在南海应用可行性分析

Philippe 方法计算喷射导管入泥深度在中国南海荔湾区块是否可行需要符合 2 个条件:第一,中国南海荔湾区块的土质条件和墨西哥湾是否类似?即粘土的抗剪强度随深度的变化呈线性关系,公式  $Su = Su_0 + b \times L$  如何应用?第二,中国南海应用的喷射导管技术中实际瞬时钻压和整个喷射装置重量的关系?即钻压使用率  $R$  是多少?

### 2.1 中国南海深水浅层地质

在水深大于 500 m 和 1 500 m 的深水和超深水海域,海底浅层土质基本为松软的粘性土,含水率高达 70%;在海底泥线以下 100 m 范围内,土体不排水抗剪强度小于 200 kPa;在泥线附近抗剪强度仅为 2~10 kPa<sup>[4,9]</sup>。

2011 年在中国南海水深 680~1 500 m 左右的荔湾 3-1 项目完成了 11 个孔深为 40 m 的 CPT 测试,11 个井位的位置示意图见图 2,土壤强度随深度变化的关系见图 3。从不排水抗剪强度剖面图上可以看出,在深水区域,大部分区域粘性土的不排水抗剪强度随深度呈线性增加,通过这 11 个孔位的 CPT 测试数据,总结出中国南海深水井场 40 m 内土质的不排水抗剪强度剖面,推荐的不排水抗剪强度剖面为  $Su = Su_0 + 1.2 \times L$ ,下限  $Su = Su_0 + 1.0 \times L$ ,上限  $Su = Su_0 + 1.4 \times L$ ,与墨西哥湾的土质的不排水抗剪强度剖面基本一致。

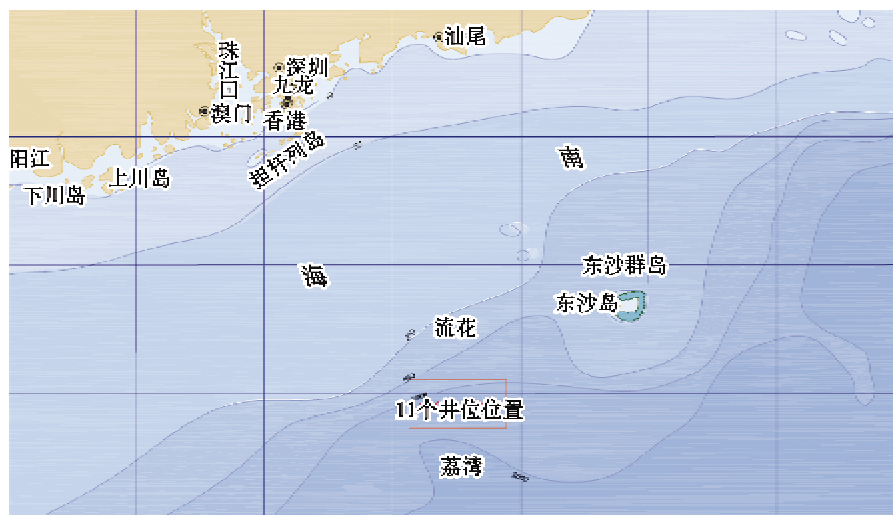


图 2 11 个井位位置示意图

Fig. 2 Locations of the 11 drilling wells

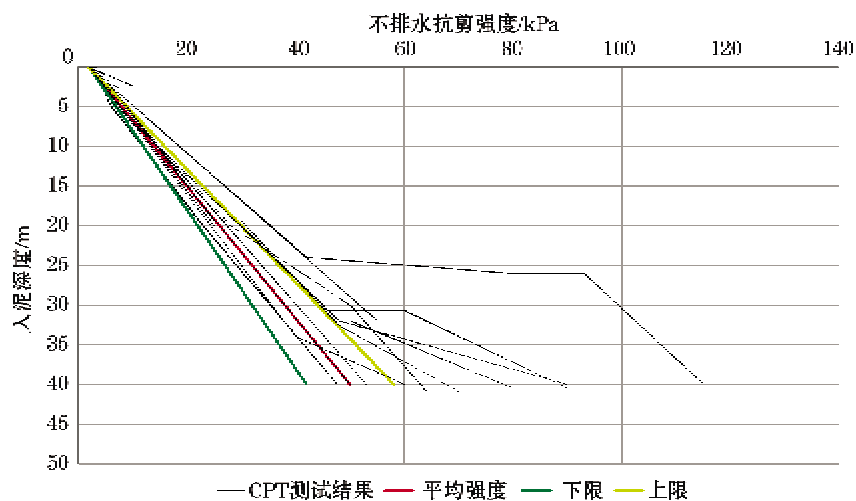


图 3 基于 CPT 测试获得的粘性土的不排水抗剪强度随深度变化曲线

Fig. 3 The variations of the undrained shear strength of cohesive soils with depth, according to the CPT measurements

## 2.2 钻压使用率

根据记录的两个深水井场的实时钻压情况(图 4),得出在中国南海应用的喷射导管技术中钻压使用率  $R$  约为 0.8。

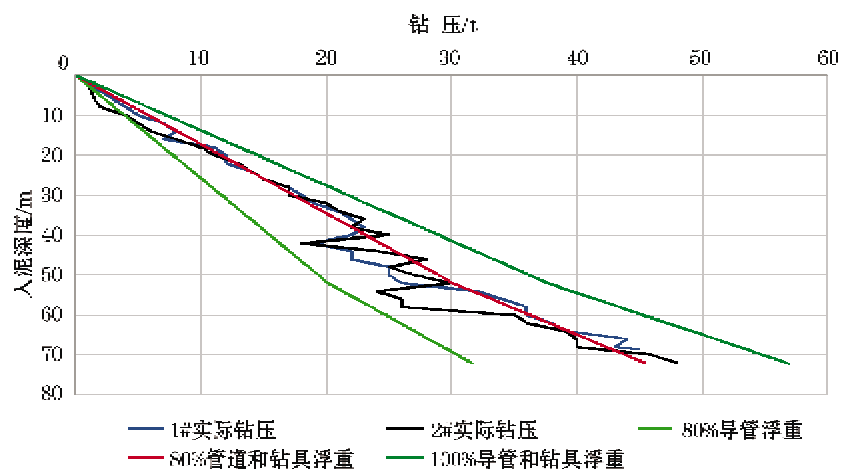


图 4 钻压随深度变化的曲线

Fig. 4 The variations of bit pressure with depth

### 3 算 例

根据近几年在南海获得的深水表层取样结果得知,深水表层土质基本上为粘性土。以南海某深水井为例,拟设计的导管直径为 914.4 mm,靠近泥线 24.38 m 段壁厚为 38.1 mm,往下为 25.4 mm。表层土质强度为 3 kPa。南海深水井场 40 m 内土质不排水抗剪强度随深度变化的剖面为  $Su_{AVE}=3+1.2\times L$ ,因 40 m 内土质不排水抗剪强度剖面是线性增加的,假设 40 m CPT 测试得到的不排水强度剖面可以外推到 72 m 的土层,由公式 (2) 得出了喷射导管设计入泥 72 m 时不同时间节点的承载力分布如图 5 所示。

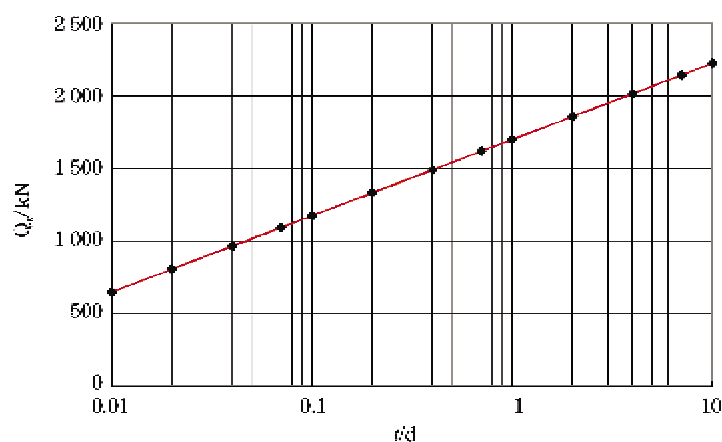


图 5 喷射导管入泥 72 m 时不同时间节点的承载力

Fig. 5 The bearing capacity of injection catheter at different time when reaching to a driving depth of 72 m

通过分析中国南海所使用的喷射导管技术及资料,得出附加在导管上的载荷一般为 700 kN。采用文中的计算方法及该井场的土质强度剖面,分析出了不同静置时间下的导管最小下入深度见表 1。

表 1 附加在导管上的载荷 700 kN 时不同时间节点的最小下入深度

Table 1 The minimal driving depth at different time when adding a load of 700 kN on the catheter

| 静置时间 $t/h$   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 10   | 24   | 48   |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 最小下入深度 $L/m$ | 78.6 | 69.4 | 65.4 | 62.9 | 61.2 | 56.7 | 52.3 | 49.5 |

### 4 实例验证

图 6 将表 1 中的导管静置时间和导管的最小下入深度关系的数据绘成散点图,通过添加趋势线拟合出回归曲线,并在图中统计了中国南海荔湾区块 9 个深水井场成功安装的喷射导管下入长度与等候时间的数据。位于推荐的回归曲线以下的数据认为是安全的。从图中可以看出,相同等候时间情况下,实际导管下入的深度与理论计算的喷射导管下入深度相差不大,实际的喷射导管数据基本在理论计算的曲线下方,属于安全数据。

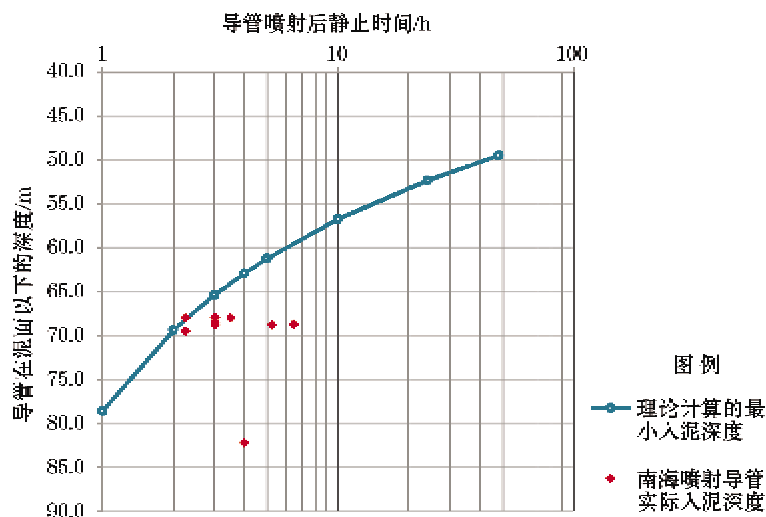


图6 理论计算和实际应用的不同时间节点的导管最小下入深度

Fig. 6 The catheter driving depth calculated theoretically and used practically at different time nodes

## 5 结 语

1)海底粒状土和抗剪强度小于 300 kPa 的粘性土采用喷射法施工方式比较适合。水深大于 500 m 和 1 500 m 的中国南海深水和超深水海域海底以下 100 m 内的土质基本为粘性土,且排水抗剪强度小于 200 kPa,所以喷射法下表层套管技术适用于中国南海的深水和超深水海域。

2)本文统计了中国南海北部深水和超深水的浅层海底土质力学性质,填补了该海域深水和超深水浅层土质资料的空白。在 Philippe<sup>[8]</sup>方法基础上补充了防沉板重量和防沉板承载力对导管竖向实时承载力和导管最小下入深度的影响。

3)本文的计算结果是由中国南海应用的喷射导管数据和中国南海荔湾区块的土质资料得出的。通过对比中国南海成功安装的喷射导管入泥深度的数据,验证了文中方法的正确性。通过不同时间节点的导管最小下入深度曲线,可以找出导管的下入深度和等候时间的一个成本平衡点,减少了设计的盲目性,增加了结构的可靠性并可以节省钻井成本。

4)现今,在中国南海深水区域(500~3 000 m 水深)仅在荔湾 3-1 项目中完成了 11 个 40 m 的 CPT 测试,对于深水浅层地质资料的掌握还比较少。随着我国深水勘探开发步伐的加快,越来越多的深水区块投入勘探开发,将会进行泥面以下 100 m 深的工程地质钻孔取样及 CPT 测试,以补充中国南海深水海底以下 100 m 地质资料缺失的空白。

### 参考文献:

- [1] 徐荣强,陈建兵,刘正礼. 喷射导管技术在深水钻井作业中的应用[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 19-22.
- [2] 付英军,姜伟,朱荣东,等. 深水表层导管安装方法及风险控制技术研究[J]. 石油天然气学报:江汉

- 石油学院学报,2011,33(6):153-157.
- [3] 唐海雄,罗俊丰,叶吉华.南海超深水喷射钻井导管入泥深度设计方法[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2011,33(3):147-151.
- [4] BECK R D. Reliable deepwater structural casing installation using controlled jetting[R]. Dallas: Society of Petroleum Engineers 22542, 1991.
- [5] API-RP\_2A\_WSD Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Off-shore Platforms-Working Stress Design[S]. Washington D C: American Petroleum Institute, 2000.
- [6] AKERS T J. Jetting of structural casing in deepwater environments; job design and operational practices[R]. San Antonio: Society of Petroleum Engineers 102378, 2008.
- [7] 苏堪华,管志川,苏义脑.深水钻井导管喷射下入深度确定方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(4):47-50.
- [8] PHILIPPE J. Innovative design method for deepwater surface casing[R]. San Antonio: Society of Petroleum Engineers 77357, 2002.
- [9] QUIROS G W, LITTLE R L. Deepwater soil properties and their impact on the geotechnical program[R]. Houston: OTC 15262, 2003.

## Research on the Design of Injection Catheter Driving Depth in the Liwan Block of the South China Sea

WANG Yan-qiu, ZHENG Xi-yao, LIU Jian-tao, ZHOU Yang-rui

(Geotech, Geophysical-China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China)

**Abstract:** The rational design of injection catheter driving depth is a key of successful implementation of jet drilling operation in deep water. By analyzing the geological conditions in the Liwan Block of the South China Sea and combining with the detailed information about the structures of the injection catheter in the South China Sea, the relationship of the changes of soil strength with time is summarized and the variations of both the bearing capacity and the least driving depth of the catheter with time are given. The methods for the calculation of the injection catheter driving depth and the conclusions thus obtained could provide useful references for the future driving depth design of the jet drilling catheter in the deep water of the South China Sea.

**Key words:** the South China Sea; deep water; injection catheter; driving depth