



深水钻井水下井口 稳定性分析理论与方法

苏堪华 著

石油工业出版社

深水钻井水下井口稳定性 分析理论与方法

苏堪华 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对海洋深水钻井特点,综合考虑海洋环境载荷、钻井平台(船)漂移、隔水管扰动等因素对套管柱与地层之间相互作用的影响,建立了深水钻井水下井口稳定性分析理论与方法,揭示了各种因素对水下井口稳定性的影响规律。同时,针对深水钻井喷射下入导管的工艺特点,建立了深水钻井导管下入深度的确定方法,并针对深水 SBOP 钻井系统的水下井口稳定性进行了分析。最后,介绍了深水钻井水下井口稳定性分析软件。

本书可作为深水钻井科研和技术人员进行工程设计及现场施工的参考用书,也可作为石油高等院校相关专业本科和研究生教学的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

深水钻井水下井口稳定性分析理论与方法/苏堪华著.

北京:石油工业出版社,2015.7

ISBN 978-7-5183-0739-5

I. 深…

II. 苏…

III. 深水钻井-井壁稳定性-分析

IV. TE245

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第112932号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:<http://www.petropub.com>

编辑部:(010)64523612 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京苏冀博达科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015年7月第1版 2015年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:10.5

字数:260千字

定价:48.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

深水钻井水下井口上部连接防喷器组及隔水管,下部连接套管串,在钻井作业过程中承受复杂的作用力,一旦发生井口失稳,将会带来严重后果。但是目前并没有系统的分析理论和方法,因此有必要对导管及表层套管承载能力和水下井口稳定性开展研究,为我国深水钻井设计及施工提供一定的技术支持。

本书针对深水钻井的特点,综合考虑海洋环境载荷、钻井平台(船)漂移、隔水管扰动等因素对套管柱与地层之间的相互作用的影响,建立了泥线以下导管和表层套管承载能力的分析理论和方法,形成了基于深水钻井平台—隔水管—水下井口—套管柱—海底浅部软土这一整体系统的水下井口稳定性分析理论和方法,并应用该方法对相关影响因素进行了系统分析。针对深水钻井喷射下入导管的工艺特点,建立了深水钻井导管下入深度的确定方法,并提出了确定导管下深的必要条件;同时针对深水 SBOP 钻井系统的套管柱承载能力和水下井口稳定性进行了分析。另外还提出了深水钻井过程中水下井口稳定性的评价指标和防止水下井口失稳的具体措施。最后,介绍了深水钻井水下井口稳定性分析软件。

本书写作过程中得到了苏义脑院士、管志川教授的悉心指导和热心帮助,在此特表谢忱。此外,在试验过程、软件编程方面,得到了龙芝辉、刘继林、齐成伟、石丽、万立夫等同志的帮助,在数据处理、图文编辑方面,得到了研究生王梓航、刘洪伟、韩垚堃等同学的帮助,有些内容参考了国内外同行的文献资料,在此一并表示感谢。

由于本书涉及内容较多,加之笔者水平有限,不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2015 年 3 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 深水钻井井口系统组成	2
1.3 水下井口稳定性研究现状	3
2 深水钻井导管及表层套管承载能力分析理论与方法	5
2.1 海底浅部地层特征及工程性质指标	5
2.2 导管与表层套管竖向承载能力理论模型及计算方法	8
2.3 导管与表层套管横向承载能力理论模型及计算方法	13
2.4 本章小结	22
3 深水钻井水下井口稳定性分析理论与方法	24
3.1 水下井口系统组合及其整体受力情况	24
3.2 隔水管力学分析方法	25
3.3 套管柱力学分析方法	33
3.4 水下井口稳定性综合分析方法建立及求解	33
3.5 本章小结	35
4 深水钻井水下井口稳定性相关影响规律分析	37
4.1 算例基本参数	37
4.2 耦合分析方法与非耦合分析方法对比	38
4.3 不同因素对水下井口稳定性的影响规律	39
4.4 本章小结	51
5 导管及表层套管承载能力相关影响规律分析	52
5.1 竖向承载能力计算及相关因素影响规律	52
5.2 横向承载能力计算及相关因素影响规律	55
5.3 本章小结	82
6 动态因素对深水钻井套管柱承载能力的影响	83
6.1 土的动力本构关系	83
6.2 水下井口及其以下套管柱的动力学模型	85
6.3 模型验证及相关因素影响规律分析	92
6.4 低频动力下的套管柱与软土相互作用室内试验	102
6.5 本章小结	111

7 考虑深水钻井平台运动因素的水下井口稳定性分析	113
7.1 水下井口动态稳定性分析理论模型	113
7.2 平台运动关键参数的确定	114
7.3 整体分析模型求解	115
7.4 平台运动对水下井口稳定性的影响	115
7.5 本章小结	121
8 深水钻井导管喷射下入深度确定方法	122
8.1 深水钻井喷射下入导管的施工工艺	123
8.2 深水钻井喷射下入导管的受力分析	124
8.3 导管下入深度确定流程	127
8.4 算例及影响因素分析	127
8.5 本章小结	130
9 深水 SBOP 钻井系统水下井口稳定性分析	131
9.1 深水 SBOP 钻井系统的概念及应用情况	131
9.2 深水 SBOP 钻井系统水下井口稳定性分析方法	134
9.3 算例及相关因素影响规律分析	136
9.4 本章小结	143
10 深水钻井水下井口稳定性评价及防失稳措施	144
10.1 水下井口稳定性评价	144
10.2 水下井口防失稳的安全措施	145
10.3 采取防失稳措施后的水下井口稳定性分析	148
10.4 本章小结	151
附录 深水钻井水下井口稳定性分析软件	152
附录 1 软件简介及计算机运行流程	152
附录 2 软件模块设计	153
参考文献	156

1 绪 论

1.1 研究目的和意义

在海洋石油钻井中,目前一般定义水深超过 500m 的海域为深水,超过 1500m 称为超深水。深水钻井较浅水钻井而言,海洋环境更加恶劣,隔水管长度显著增加,防喷器组体积和重量明显增大,而且海底浅部地层更为饱和疏松,深水钻井中导管一般喷射下入而不需固井,这些因素都造成深水钻井与浅水钻井有很大差异。我国海洋深水钻完井技术水平与国外的差距还很大,已经成为制约我国深水油气资源开发的瓶颈。

深水钻井作业时,钻井平台(船)、钻井隔水管、防喷器、水下井口及其以下套管柱是一个整体。深水钻井时水下井口承受的作用力主要来自隔水管底部接头处的竖向和横向反力、防喷器组及悬挂套管串的重力、作用于防喷器组及井口的横向波流力、海底浅部土层对套管柱的竖向和横向阻力等。由于深水海域泥线以下的浅部地层(0~100m)一般是由海底淤泥、黏土、粉砂及砂泥混层等土质组成,以黏性土和砂性土为主,成岩性差且较为疏松。这些作用力的共同作用使导管及表层套管组成的套管柱承载能力不足,从而引起水下井口下陷或倾斜,在恶劣海况和工况下,将引起水下井口的失稳破坏。

目前国内外对深水钻井隔水管进行了大量的研究,主要集中在隔水管的受力变形、应力分布和疲劳寿命等方面,一般没有考虑水下井口及其以下套管柱的影响。但是水下井口和防喷器组上接隔水管,下连套管串,起着非常重要的作用,其受力和强度分析同样复杂和重要。泥线以下导管和表层套管的承载能力分析是水下井口稳定性分析的基础,但是相关文献极少,多数文献集中在浅水入泥隔水导管、固定式平台桩基受力分析方面。

从近几年国外的几个主要深水钻井作业区(美国墨西哥湾、巴西 Campos 盆地、西非海域等)的钻井情况看,由于海底浅部地层强度太低,先后出现过水下井口导向盘倾斜甚至完全沉没在泥线以下、导管倾斜或下陷导致井口不稳定、套管柱倾斜导致隔水管下部断裂等一系列严重问题。目前,这些问题主要是通过一些工程技术手段来解决,如加大导管直径和壁厚、通过拉紧导管使水下井口处于恰当的位置来保持井口稳定等。

虽然国外有关文献提出了水下井口存在的稳定性问题,但是并没有针对该问题建立系统的理论及分析方法。同时,由于海洋环境载荷对钻井平台和隔水管的动态响应直接作用到水下井口及其以下的套管柱上,需要研究动态因素对水下井口稳定性的影响。对于深水钻井导管下入深度的确定,虽然有关文献提出了针对特定地层的设计方法,但并不全面,也不具有通用性。另外,深水水上防喷器(SBOP)钻井系统作为新技术开始应用,但并没有相关文献分析该系统不同导管下入深度及隔水管尺寸等因素对其水下井口稳定性的影响规律。

因此,针对深水钻井的导管承载能力和水下井口稳定性问题,在综合考虑海洋环境载荷、钻井船或钻井平台漂移、隔水管力学性能、套管柱与地层之间的非线性响应等因素的基础上,

建立一套水下井口稳定性分析的理论和方法,揭示各种因素对水下井口稳定性的影响规律和敏感性,为我国深水钻井工程设计及施工提供一定的理论依据是必要的。

1.2 深水钻井井口系统组成

深水钻井技术与陆地和浅水钻井技术有很大差异。深水钻井常规系统一般由钻井平台、隔水管系统、防喷器系统和水下井口、套管柱等组成^[1],自泥线处从下向上分别是水下井口、防喷器组、隔水管底部组件、隔水管柱、伸缩短节、钻井平台,其中水下井口通过连接器与防喷器组连接,防喷器组通过隔水管底部组件中的球形挠性接头与隔水管连接,隔水管与伸缩短节的外管连接并通过隔水管张紧器张紧悬挂在钻井平台上,伸缩短节的内管与导流器通过上部球形/挠性接头连接,如图 1.1 所示。

水下井口的作用在很大程度上与陆上井口相似,它支撑防喷器组,注水泥时悬挂并支撑套管柱,并在钻井和采油作业中封闭套管柱之间的环空。目前深水钻井中主要有两个井口,一个是低压井口,与 914.4mm (36in) 或 762.0mm (30in) 套管连在一起,为高压井口提供支撑;另一个是高压井口,一般尺寸是 476.3mm ($18\frac{3}{4}$ in),可容多个悬挂器,适用于多层套管程序。

深水钻井所用的水下防喷器(Subsea Blow-out Preventer, Subsea BOP)系统与常规防喷器系统在功能上是一致的,但是体积和重量要大很多,并且是使用框架组装在一起的。

典型的隔水管系统包括伸缩短节、隔水管单根、底部隔水管总成、球形/挠性接头、节流压井管线、浮力设备以及备选组件等。球形/挠性接头是隔水管系统中最重要部件之一,其功能是用于使隔水管和 BOP 组之间产生角位移,从而减小隔水管上的弯矩。

水下井口是完成钻井作业的基础,其性能好坏将直接影响随后实施的各井段的钻井作业。

由于深水钻井作业受到水面风浪、洋流等影响,在井口安装 BOP 和隔水管以后,将对井口产生很大的弯矩,因此需要井口具有足够的抗弯矩能力、可靠的密封性能和简单有效的连接能力。

深水钻井水下井口的常规配置^[2]为:914.4mm (36in) 或 762.0mm (30in) 导管头、476.3mm ($18\frac{3}{4}$ in) 套管头、339.7mm ($13\frac{3}{8}$ in) 套管挂、244.5mm ($9\frac{5}{8}$ in) 套管挂、177.8mm (7in) 套管挂、可选的 406.4mm (16in) 套管挂、339.7mm ($13\frac{3}{8}$ in) 防磨补心、244.5mm ($9\frac{5}{8}$ in) 防磨补心、177.8mm (7in) 防磨补心、应急密封、BOP 试压工具和各设备的送入回收工具,而且

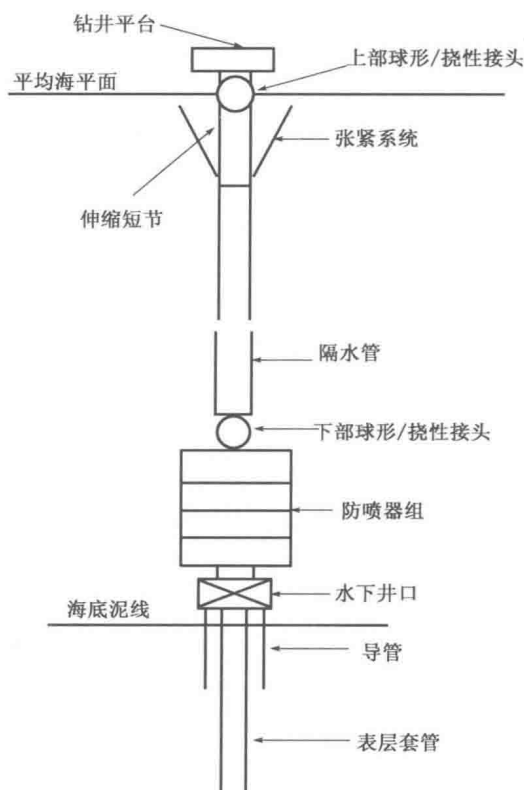


图 1.1 常规深水钻井井口系统组成

为了保证深水密封的可靠性,密封总成都采用了金属对金属密封,常规配置如图 1.2 所示。

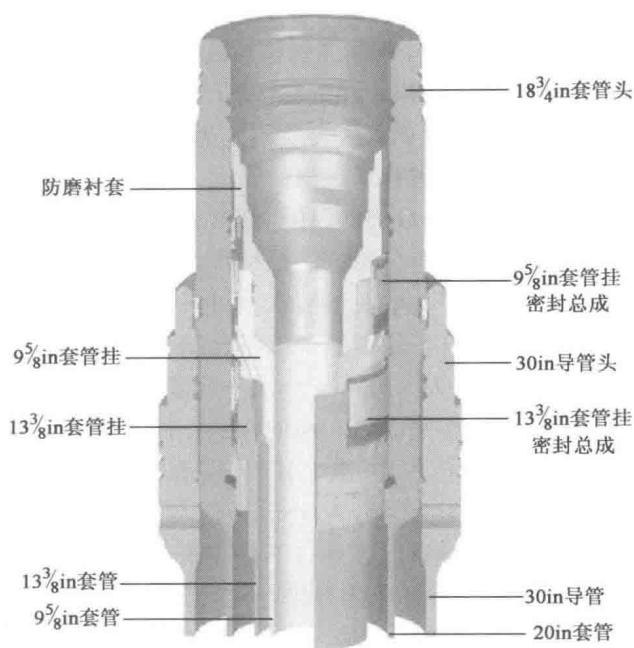


图 1.2 深水钻井水下井口的常规配置

914.4mm 或 762.0mm 导管头(低压井口)是导管留在泥线以上的部分,内接关键的 476.3mm 套管头(高压井口)。高压井口是深水井口的核心部分,它坐落在 914.4mm 或 762.0mm 导管头内,是承受重力、弯矩和井筒高压的关键设备。该套管头上部设计有连接器连接槽,以便在 508.0mm 套管固井完毕后下入 BOP 组和隔水管。476.3mm 套管头内通常可以容纳 339.7mm、244.5mm 和 177.8mm 三层套管挂和一层油管挂,以满足深水钻井的需要。为了适应深水钻井作业对套管层数的要求,通常还特设了一层 406.4mm 的套管层段,在需要时可以选择。

1.3 水下井口稳定性研究现状

由于水下井口承载隔水管在波流作用下传递的作用力和大型化 BOP 的重量等,一旦发生失稳,将会造成严重后果,因此,水下井口的稳定性问题成为深水钻井中重点关注的问题之一。

1990 年, Da Costa 等人^[3]指出,临时井口导向盘(Temporary Guide Base, TGB)可在浅水作业中使用,但是在深水中钻 914.4mm 井眼时, TGB 就会出现问题,整体倾没在海底泥线中。同年, King^[4]也指出了海洋钻井中的导管稳定性问题。2003 年, Rocha 等人^[5]指出,尽管在某些深水区域中安装了 914.4mm 或 762.0mm 导管,但是在钻 660.4mm(26in)或 444.5mm(17 1/2 in)井眼时,仍然存在井口不稳定问题,一般使用良好的操作程序拉紧导管使井口处于恰当的位置来保持井口稳定。Juiniti 等人^[6]在 2003 年回顾了自从在 Campos 盆地开展深水钻探以来的经验,在最初的深水钻井开钻钻 762.0mm 井眼时采用和浅水中一样的方法,由于

海床强度太低,出现了临时井口导向盘倾斜甚至完全沉没在泥线下的问题。当在超过 2000m 水深的地区进行钻探时,出现喷射钻 762.0mm 导管时导管旋转问题,导致井口不稳定,这个问题通过使用 914.4mm 导管得以解决,并且加强抗弯能力的 476.3mm 井口也开始在水深超过 2000m 的地区应用。2007 年,John Shaughnessy 等人^[7]指出,目前海洋钻井的最大水深已超过 3000m,在最近几年出现了大量由于机械失效或人为错误等引发的问题,文中对墨西哥湾深水钻井最近遇到的井口稳定性问题进行了讨论。

实际上,钻井平台、隔水管、水下井口、套管柱与海底浅部土层之间是耦合作用的,需要研究它们之间的相互关系。采用整体耦合分析方法是解决水下井口及套管柱稳定性问题的重要方法。虽然在海洋工程方面也开展了一些关于浅水插桩式平台的桩腿与土体之间的动力响应分析,但多数采用平台、桩腿、土体相互分离的子结构法进行研究,相互之间实际上未完全耦合。例如,1980 年 Bernfard Stahl 等人^[8]分析了浅水平台隔水导管的受力和设计方法,研究了从钻台到泥线的导管以及下部井口在竖向力和横向弯矩作用下的稳定性情况。1991 年,Barltrop 等人^[9]对浅水固定式平台的水上 BOP、水上井口、隔水导管和土壤进行了综合分析,为井口受力分析提供了一个整体思路。1992 年,Wetmore 等人^[10]对自升式平台入泥隔水导管的受力情况进行了分析,建立了相应模型,但该井口不是在水下而是在水面上。

1993 年,King 等人^[11]针对海洋钻井中的导管稳定性问题、BOP 和井口配合问题、井口长期疲劳寿命问题,提出了有限元模型分析方法,但并没有给出具体的理论模型和求解方法,同时并不适用于目前的深水或超深水作业。1998 年,Thorogood 等人^[12]在其文献中认为隔水管配置、响应和操作都与隔水管系统、防喷器、井口和导管相关联,但侧重于导管及井口的疲劳失效方面,并且没有给出具体的分析模型。2003 年,Rocha 等人^[5]针对深水钻井遇到的挑战讨论了套管和井口设计问题,也没有具体到受力分析。2003 年,Pat Watson 等人^[13]讨论了在墨西哥湾开发钻井的创新方法,提到井口的设计,发现对泥线以上高压井口进行加长厚壁设计,可以满足井口弯矩承载能力和疲劳寿命的要求。2000 年,申智春^[14]主要针对南海西部石油公司使用的非常规套管结构支撑水下井口系统的稳定性进行了研究,使用非线性有限元软件 MARC 对有限元模型进行分析,但对隔水管的力学分析过于简化,不适合深水条件。2003 年,弓大为^[15]在分析隔水管故障时,给出了水下防喷器组及井口的受力示意,并指出了井口失稳的严重后果,但没有给出详尽的理论分析。2008 年,苏堪华、管志川等人对深水钻井过程中水下井口稳定性及导管、表层套管的承载能力进行研究^[16-17],提出了深水钻井水下井口稳定性及套管柱承载能力的分析方法,并对相关因素的影响规律进行了系统分析。

2 深水钻井导管及表层套管承载能力分析理论与方法

由于深水海洋环境的海底泥线以下浅部地层强度较低,防喷器组体积和重量明显增大,导管一般喷射下入而不进行固井,这些都会造成深水钻井导管及表层套管的承载能力与浅水有很大差异,而这是水下井口稳定性分析的基础。本章根据桩基和材料力学理论建立了适用于深水钻井的导管及表层套管承载能力分析模型及相应的求解方法,为深水钻井水下井口稳定性分析奠定了理论基础。

2.1 海底浅部地层特征及工程性质指标

2.1.1 海底浅部地层的特征

海底泥线以下的浅部地层一般是海底淤泥、黏土、粉砂及砂泥混层等土质,成岩性差,以黏性土和砂性土为主。

文献[18]指出渤海湾西部海区表层沉积物主要为淤泥质粉砂、粉砂质黏土及黏土质软泥,一般厚 10~14m。埋深 10~14m 以下一般为黄褐色粉土、粉砂、粉质黏土层,黏性土一般为可塑状态,砂性土呈稍密或密实状态,中低压缩性,强度较高。其中一个典型井位的取样数据见表 2.1。

表 2.1 某井位浅部地层物理力学性质指标

地层土质类型	水下重度, kN/m ³	不排水抗剪强度, kPa	内摩擦角, (°)
淤泥、淤泥质黏土	7.9	8.0	—
粉质黏土	9.1	20.0	—
黏质粉土	9.6	—	15.0
粉土、砂质粉土	9.7	—	20.0
粉砂、砂质粉土	9.9	—	25.0
黏质粉土、粉质黏土	9.2	40.0	—
粉质黏土	9.0	60.0	—
粉质黏土	10.0	70.0	—

文献[19]根据钻孔资料将南海北部区域海床下 120m 以内地层划分为 9 个工程地质层,具体数据见表 2.2。

表 2.2 南海北部工程地质分层表

工程地质层	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
土层性质	粉质黏土	松—中密砂土	软黏土	高密含砾砂土	硬黏土	砂黏土互层	砾砂粉砂互层	含砾密实砂土	含砂黏土
厚度,m	0~18.7	2~23.1	6.6~43	0~19.6	4~12.8	12~35.2	4.8~28.2	1.8~15.2	16~25.6
水下重度 kN/m ³	7.0	7.9~8.0	7.0~8.0	8.5~9.0	8.5~10	8.5~9.1	9.2~9.5	9.0	9.3~9.5
内摩擦角,(°)	—	30	—	40~41	—	33~40	37	37~38	—
不排水抗剪强度,kPa	22~27	—	26	—	90~170	—	—	—	120~180

文献[20]指出,墨西哥湾深水区域海底浅部地层土壤以正常固结的饱和黏土为主,其不排水抗剪强度在泥线处非常小,且随深度线性增大,具体数据如图 2.1 所示。

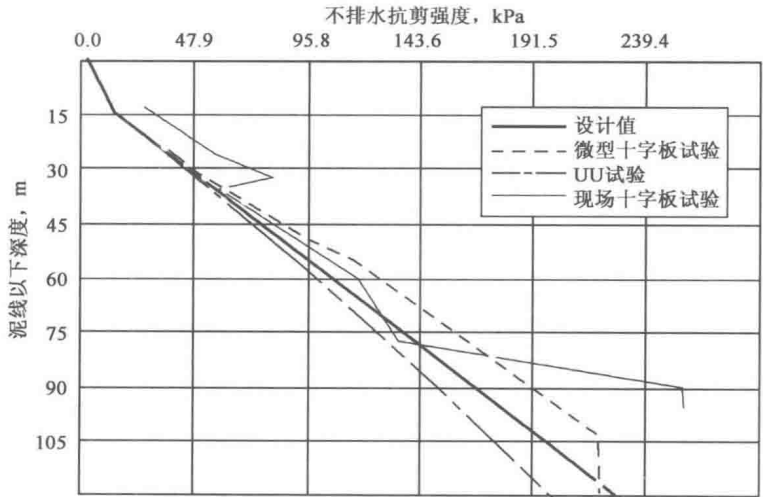


图 2.1 墨西哥湾海底浅部地层不排水抗剪强度剖面

文献[21]指出,北海深水区域的海底浅部地层一般为硬质超固结黏土,其不排水抗剪强度一般在 95~191kPa 之间,同时有存在砂性土夹层的可能性。

2.1.2 浅部地层土的工程性质指标

浅部地层土的工程性质指标主要有以下几项:土的重度、密实度、有效上覆土压力、抗剪强度等^[22]。

1. 土的重度

土的密度是指单位体积土的质量,一般土的密度为 1600~2200kg/m³。由土的质量产生的单位体积的重力称为重力密度,简称重度,其值表示为:

$$\gamma = \rho_s g \tag{2.1}$$

式中 γ ——土的重度,kN/m³;

ρ_s ——土的密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

海底浅部地层的土体浸没在水中,由于受到水的浮力作用,减轻了土的有效重力,计算时取土的有效重度(也称为水下容重、水下重度、水下浮重)代替天然重度,即有效重度等于饱和重度减去水的重度,表示为:

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w \quad (2.2)$$

式中 γ' ——土的有效重度, kN/m^3 ;

γ_w ——水的重度,纯水在 4°C 时的重度等于 $9.81\text{kN}/\text{m}^3$,在工程上化整为 $10\text{kN}/\text{m}^3$ 。

2. 砂土的密实度

砂土的密实度对其工程性质非常重要,对砂土评价的主要问题是正确划分其密实度。

当砂土处于最密实状态时,其孔隙比称为最小孔隙比 $e_{\min}$;而砂土处于最疏松状态时的孔隙比称为最大孔隙比 $e_{\max}$ 。这两种孔隙比都可以通过试验的方法得到,然后可按式(2.3)计算砂土的相对密实度:

$$D_{\text{sr}} = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.3)$$

式中 D_{sr} ——砂土的相对密实度;

e ——砂土的孔隙比,通过试验得到。

根据砂土的相对密实度,将砂土划分为密实($D_{\text{sr}}=1.0\sim0.67$)、中密($D_{\text{sr}}=0.67\sim0.33$)、松散($D_{\text{sr}}=0.33\sim0$)三种密实度。

3. 有效上覆土压力

用有效重度计算的土压力称为有效上覆土压力,表示为:

$$\sigma'_v = \sum_{i=0}^x \gamma'_i x_i \quad (2.4)$$

式中 σ'_v ——有效上覆土压力, kPa ;

γ'_i ——第 i 层土的平均有效重度, kN/m^3 ;

x ——土的任意深度, m ;

x_i ——第 i 层土的厚度, m 。

4. 土的抗剪强度

土的抗剪强度是指土体对外载荷所产生的剪应力的极限抵抗能力。由于剪切破坏是土体强度破坏的重要特点,因此土的强度问题实质上就是土的抗剪强度问题。

库仑根据试验结果提出了土的抗剪强度表达式:

$$\tau_f = C + \sigma_s \tan \phi \quad (2.5)$$

式中 τ_f ——土的抗剪强度, kPa ;

C ——土的黏聚力, kPa ;

σ_s ——剪切滑动面上的法向应力, kPa ;

ϕ ——土的内摩擦角, $(^\circ)$ 。

土的抗剪强度指标可通过试验的方法获得,目前室内最常用的是三轴剪切试验,它是测定

抗剪强度的一种较为完善的方法,通过这个试验可以得到土的内摩擦角及黏聚力。对于砂性土,一般认为其黏聚力为 0,仅测定其内摩擦角作为砂性土抗剪强度的主要指标。

对于饱和软黏土,常采用不固结不排水剪(UU 试验)的试验方法^[23],即试样在施加围压和随后施加竖向应力直至剪切破坏的过程不允许排水,这样土的孔隙水压力不会消散,得到抗剪强度指标 C_u 和 ϕ_u 。饱和黏性土的三轴 UU 试验结果表明,内摩擦角 $\phi_u=0^\circ$,所以饱和黏性土的不排水抗剪强度可表示为:

$$\tau'_f = C_u \quad (2.6)$$

因此,一般把 C_u 称为黏土的不排水抗剪强度。

由于室内测定的试验方法要求事先获得原状土样,但是试样在采取、运送、保持和制备过程中不可避免地会受到扰动,特别是对于高灵敏度的黏性土影响更为严重。因此,对于饱和软黏土,采用十字板剪切试验对现场地层进行不排水抗剪强度测定,表达式为:

$$\tau_+ = \frac{2M_+}{\pi D_+^2 \left(H_+ + \frac{D_+}{3} \right)} \quad (2.7)$$

式中 τ_+ ——十字板测定的土的不排水抗剪强度, kPa;

M_+ ——剪切破坏时的扭矩, kN·m;

D_+ ——十字板的直径, m;

H_+ ——十字板的高度, m。

需要注意的是,如果在软土层中夹有薄层粉砂,则十字板试验的结果就会偏大。

2.2 导管与表层套管竖向承载力理论模型及计算方法

导管及表层套管的竖向承载力包括两层涵义,一是管柱自身结构强度所能提供的承载力,二是支承管柱的地基土所能提供的承载力。深水钻井导管及表层套管组成的套管柱可视为一种细长杆件,但其工作条件与一般压杆不同,它处于海底泥线以下具有一定强度和刚度的浅部地层介质中,既非完全自由状态,又非完全约束状态。一般情况下管柱周围地基土的侧向约束足以阻止管柱的竖向弯曲,即处于浅部地层中的管柱一般不会由于顶部受压而发生强度破坏。本节重点分析支承管柱的地基土所能提供的承载力。

2.2.1 导管及表层套管竖向承载力分析模型

由于目前一般采用喷射方式下入导管,所以本书重点分析喷射下导管后套管柱的承载力。套管柱受到管柱顶部(井口)竖向外力及其管柱自身重力的作用,如果管柱的竖向承载力不足,将会引起整个管柱和水下井口下陷的危险。根据深水钻井的工况,导管及表层套管的竖向受力示意如图 2.2 所示。

根据深水钻井的特点,分两种最危险工况(管柱受竖向力最大的情况)进行导管及表层套管承载能力的分析。

1. 隔水管及 BOP 下入之前,表层套管悬挂在导管上等待固井

首先喷射下入导管,然后钻表层套管所需井眼后下表层套管,在表层套管没有固井之前,

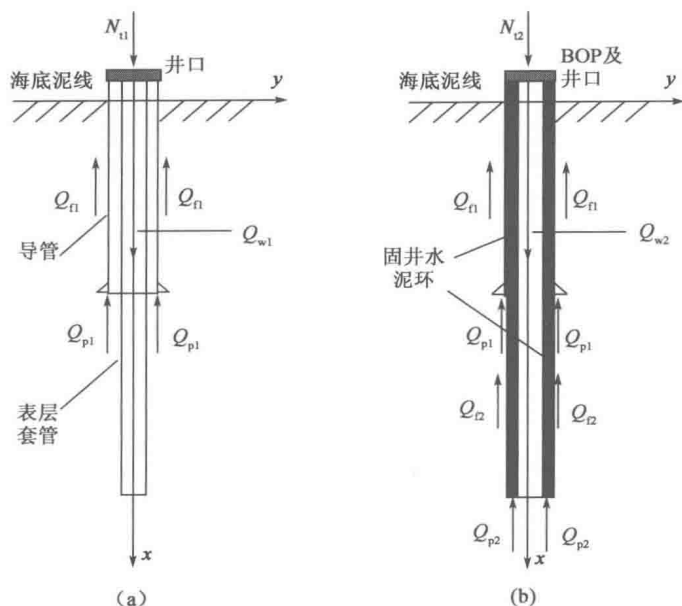


图 2.2 深水钻井导管及表层套管竖向受力示意图

下入的导管将承担自身及表层套管重量[图 2.2(a)], 这种情况下导管的竖向受力关系为:

$$Q_{w1} + N_{t1} < Q_{f1} + Q_{p1} \quad (2.8)$$

式中 Q_{w1} ——导管及表层套管在钻井液中的重量, kN;

N_{t1} ——管柱顶部受到的作用力, 在这种情况下为井口及其附属件在海水中的重量, kN;

Q_{f1} ——导管管侧总的摩擦阻力, kN;

Q_{p1} ——导管管端总的支承阻力, kN。

2. 隔水管及 BOP 下入之后, 技术套管悬挂在井口上等待固井

表层套管固井后, 隔水管及 BOP 下入并安装到水下井口上, 继续钻技术套管所需井眼, 当技术套管下入后悬挂在井口时的情况[图 2.2(b)]为该阶段的危险工况。因为, 此时 BOP 的部分或全部重量、导管和表层套管及水泥环的重量、技术套管的自身重量都要导管及表层套管共同承担。在正常钻井作业阶段, 由于隔水管顶部张紧力的存在使 BOP 受到一定的过提力, 从而减轻了 BOP 作用在套管柱上的重力, 但当遇到紧急情况需要脱离隔水管时, 水下 BOP 的重量将全部由套管柱来承担。这种情况下导管及表层套管的竖向受力关系为:

$$Q_{w2} + N_{t2} < Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{p1} + Q_{p2} \quad (2.9)$$

式中 Q_{w2} ——导管、表层套管、水泥环、技术套管在钻井液中的重量, kN;

N_{t2} ——管柱顶部受到的作用力, 在这种情况下为 BOP、井口及其附属件在海水中的重量, kN;

Q_{f2} ——导管鞋深度以下表层套管外水泥环的侧摩擦阻力, kN;

Q_{p2} ——表层套管及水泥环下端的总支承阻力, kN。

从式(2.8)和式(2.9)可知, 如果要满足套管柱不下沉的要求, 则需要套管柱提供一定的竖

向承载能力,按照土力学和桩基理论,管柱的竖向承载力主要由管柱周围的海底浅部地基对其侧面产生的摩擦阻力和管柱底端对其产生的支承阻力来控制。因此,管柱的极限竖向承载力 Q_u 由极限侧阻力(表面摩擦力) Q_f 和极限端阻力(下端支承力) Q_p 组成,若忽略二者之间的相互影响,假定沿管柱的极限侧阻力和管柱极限端阻力同时发生,则可表示为:

$$Q_u = Q_f + Q_p = \sum_{i=0}^l U_i l_i q_{sui} + A_p q_{pu} \quad (2.10)$$

式中 Q_u ——管柱的极限竖向承载力,kN;

Q_f 、 Q_p ——总的管侧阻力和管端阻力,kN;

q_{sui} ——管柱周围第 i 层土的单位面积极限管侧阻力,kPa;

q_{pu} ——单位面积极限管端阻力,kPa;

A_p ——管端底面积, m^2 ;

l_i 、 U_i ——第 i 层土的厚度及相应的管柱周长,m;

l ——管柱的入土长度,m。

由式(2.10)可知,若求 Q_u ,则 q_{sui} 和 q_{pu} 的确定是关键,所采用的分析方法一般分为4类^[24]:

- (1)依据土力学原理以静力分析方法估算管柱竖向承载能力;
- (2)按规范经验方法确定管柱竖向承载能力;
- (3)对地基土进行原位测试来确定管柱竖向承载能力;
- (4)按荷载传递函数法确定管柱竖向承载能力。

对于海洋作业,根据美国 API^[25]和中国船级社^[26]规范,推荐采用静力分析法确定泥线以下海底浅部地层中管柱的竖向承载力,可以满足初步设计的要求。

2.2.2 单位面积极限管侧阻力计算

q_{sui} 的计算方法分为总应力法和有效应力法两大类,包括 α 法、 β 法、 λ 法等。

1. α 法

α 法由 Tomlinson(1971)提出,属于总应力法,用于计算饱和黏性土的侧阻力,其表达式为:

$$q_{sui} = \alpha C_u \quad (2.11)$$

式中 α ——黏着系数,取决于地基土的不排水抗剪强度和管柱进入土层的深度比。

关于系数 α 的确定,不同学者提出了不同的方法。

API RP 2A 标准 1980 年版推荐的确定方法为:对于软黏土,当 C_u 小于 25kPa 时, α 值为 1.0;对于硬黏土,当 C_u 大于 75kPa 时, α 值为 0.5;当 C_u 介于 25~75kPa 之间时, α 值随 C_u 值呈线性减小。

API RP 2A 标准 2000 年版推荐的确定方法为:系数 α 由式(2.12)计算,限制条件是 $\alpha \leq 1.0$ 。

$$\begin{cases} \alpha = 0.5\psi^{0.5}, & \psi \leq 1.0 \\ \alpha = 0.5\psi^{-0.25}, & \psi > 1.0 \\ \psi = C_u/\sigma'_v \end{cases} \quad (2.12)$$

对于喷射下入导管到黏土地层中的管柱承载能力,文献[27]依然采用式(2.11),但系数 α 的确定却因为下入过程的扰动而要小得多,一般取值为0.25~0.33。由于这个系数的经验性太大,在初次作业区域而没有现场取样试验的情况下,为安全起见, α 系数有可能取到0.1。

2. β 法

β 法由 Chandler(1968)提出,又称为有效应力法,用于计算砂性土的侧阻力,其表达式为:

$$q_{\text{sui}} = K\sigma'_v \tan \delta \quad (2.13)$$

式中 K ——地层侧压力系数,对于轴向压缩载荷 K 为 0.5~1.0;

δ ——土和管壁界面的外摩擦角, ($^\circ$)一般取 $\delta = \phi - 5^\circ$ 。

令 $K \tan \delta = \beta$, 则:

$$q_{\text{sui}} = \beta \sigma'_v \quad (2.14)$$

根据试验统计, $\beta = 0.25 \sim 0.40$, 平均为 0.32。

3. λ 法

Vijayvergiya 和 Focht(1972)根据墨西哥湾钢管桩实测数据,综合 α 法和 β 法的特点,假设桩端阻力 $q_{\text{pu}} = C_u N_c$ (N_c 取 9),桩侧阻力由极限荷载减去桩端阻力得到,认为平均桩侧摩阻力为土的有效上覆压力及不排水抗剪强度的函数,即

$$q_{\text{sui}} = \lambda(\sigma'_v + 2C_u) \quad (2.15)$$

式中 λ ——系数,是桩长 l 的函数。

Vijayvergiya 等提出:

$$\lambda = 2k_\lambda(\omega_\lambda l - 1 + e^{-\omega_\lambda l})/(\omega_\lambda l)^2 \quad (2.16)$$

Lagon(1982)通过实测统计认为 $k_\lambda = 0.3$, $\omega_\lambda = 0.1$, 则:

$$\lambda = 60(0.1l - 1 + e^{-0.1l})/l^2 \quad (2.17)$$

式中 k_λ 、 ω_λ ——经验系数。

2.2.3 单位面积极限管端阻力计算

1. 计算端阻力的极限平衡理论公式

对于极限端阻力使用承载力理论分析,假设基础土体为刚塑体,在管柱端部以下发生一定形态的剪切破坏滑动面,便可导出不同的极限端阻力理论表达式, Terzaghi(1943)、Meyerhof(1951)、Vesic(1963)等所提出的单位面积极限管端阻力公式可以统一表示为如下形式^[23-24]:

$$q_{\text{pu}} = \xi_c C N_c + \xi_q \gamma_u N_q + \xi_\gamma D \gamma_d N_\gamma \quad (2.18)$$

式中 γ_u ——管柱端部平面以上土的有效重度, kN/m^3 ;

γ_d ——管柱端部平面以下土的有效重度, kN/m^3 ;

D ——管柱底端的直径, m ;

ξ_c 、 ξ_q 、 ξ_γ ——形状系数;

N_c 、 N_q 、 N_γ ——承载力系数。

由于 N_q 和 N_γ 比较接近,而 D 远小于 l ,在工程计算中可将式(2.18)中的最后一项略去而不会产生太大的误差,即: