

深海海底超深孔钻机支撑稳定性分析

周怀瑾, 金永平*, 万步炎, 刘德顺

(湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 深海海底超深孔钻机在使用过程中, 钻机的稳定性极为重要. 针对深海海底超深孔钻机支撑稳定性展开分析, 提出了深海海底超深孔钻机稳定性系数, 分析了钻机稳定性系数与钻机质心位置、钻机及其支撑系统自身尺寸以及钻机设定的海底底面倾角等参数之间的关系. 深海海底超深孔钻机支撑稳定性分析表明: 在未打开支撑系统的情况下, 钻机的稳定性系数为 1.47, 虽然钻机的稳定性具有一定的安全余量, 但建议在钻机着底时就打开支撑系统, 以保证钻机使用时更加稳定可靠; 在支撑系统打开的情况下, 钻机稳定性系数为 2.41, 但在极端条件下深海海底超深孔钻机的稳定性仍然具有风险, 建议适当增加钻机底座和支撑宽度.

关键词: 深海海底超深孔钻机; 支撑系统; 稳定性

中图分类号: TE951 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2019)04-0073-06

Support Stability Analysis of Super-Long-Hole Seafloor Drill

Zhou Huaijin, Jin Yongping, Wan Buyan, Liu Deshun

(National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In the course of using a super-long-hole seafloor drill, the stability of the super-long-hole seafloor drill is extremely important. The support stability analysis of the super-long-hole seafloor drill, the stability factor of the super-long-hole seafloor drill are presented, and the relationship between the stability coefficient of the super-long-hole seafloor drill and location of the super-long-hole seafloor drill quality center, the size of the super-long-hole seafloor drill and its supporting system, and the inclination angle of seabed level by the super-long-hole seafloor drill is analyzed. The support stability analysis of the super-long-hole seafloor drill shows that without opening the support system, the stability coefficient of the super-long-hole seafloor drill is 1.47. Although the stability of the super-long-hole seafloor drill has a certain safety margin, it is recommended to open the support system when the super-long-hole seafloor drill is bottomed to ensure more stable and reliable use of the super-long-hole seafloor drill. With the support system open, the stability coefficient of the super-long-hole seafloor drill is 2.41. The stability of the super-long-hole seafloor drill is still at risk under extreme conditions, and it is recommended to increase the super-long-hole seafloor drill base area and support width as appropriate.

Keywords: super-long-hole seafloor drill; support system; stability

深海海底超深孔钻机是海底深层地质取样和探测技术与装备的主要发展方向,也是国家海洋资源勘探开采不可或缺的装备. 目前深海海底超深孔钻机已经在国内外被广泛应用于海洋地质、环境科学研究以

收稿日期: 2019-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705145; 51779092); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50182); 湖南省教育厅科学研究资助项目(18B205)

* 通信作者, E-mail: jinyongping@hnust.edu.cn

及海洋矿产资源勘探和海底工程地质勘探等诸多的领域^[1-5]。

深海海底超深孔钻机一般装备于母船上,利用船上的收放装置将其吊放至海底.在着底前,通常会通过钻机上带的摄像头与定位仪器进行测量并选定着陆点.然后,船上人员通过遥测遥控方式进行操作,使钻机着底,继而从海底岩体中钻取岩芯,最后再利用收放装置将深海海底超深孔钻机和岩芯回收到母船上.因为海底表面并不平稳、且有着不可预测性,为了保持钻机稳定,深海海底超深孔钻机一般都设计有支撑系统以此实现钻机底盘调平和稳定支撑的功能^[6-10].钻机调平是为了保证钻机获取到预定地层的岩芯,钻机支撑是为了避免发生倾覆而导致钻机的钻进取芯作业失败.所以,开展深海海底超深孔钻机支撑稳定性分析对深海海底超深孔钻机设计和使用都具有重要意义.

本文以深海海底超深孔钻机为例,分析了钻机基本结构和运动受力特征,提出了钻机稳定性系数模型,探讨了海底钻机本体和支撑稳定性,以期为深海海底超深孔钻机设计和使用提供理论依据.

1 深海海底超深孔钻机本体稳定性分析

1.1 深海海底超深孔钻机特征分析

深海海底超深孔钻机设计作业海洋水深可达3 000 m,钻孔深度大于200 m,能适应海底底面 20° 以下的倾角,钻机自身重量大于10 t.钻机本体采用八角形框架结构,以承载和保护钻机零部件,也便于钻机在陆地上运输和海上收放;钻机支撑系统采用目前国内外海底钻机常用的三支腿机构,操作简便可靠.非工作状态下,支撑系统不打开,钻机本体依靠自身重力保持稳定.

深海海底超深孔钻机从母船下放至海底后,立于海底底质之上,将受到收放用的脐带缆绳作用,由于缆绳在浮力材料的牵拉作用下形成S形悬链状空间形态,基本消除了缆绳对钻机可能产生的拖曳力.所以,钻机主要受到自身重力和底质的支撑力,钻机工作时还受到钻杆反作用力,这相对于底质支撑力,如图1所示.另外,钻机还受到洋流等外力,因为钻机自身重量较大,所以,这些外力带来的影响可不予考虑.

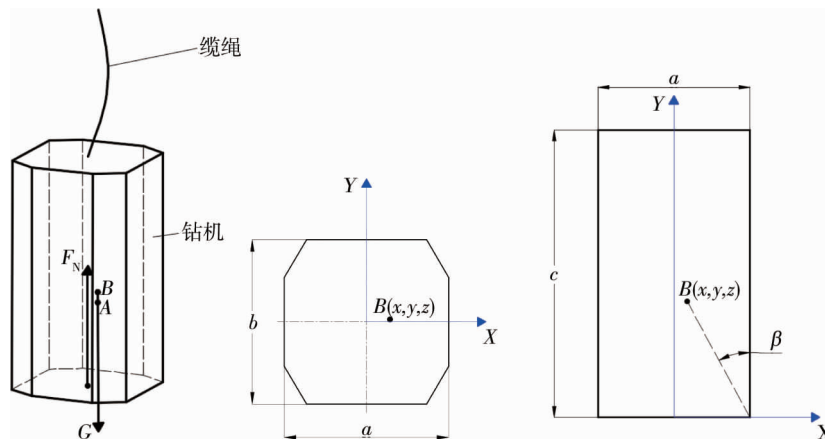


图1 深海海底超深孔钻机本体

在整个深海海底超深孔钻机工作过程中,钻机动力头向上移动以便装配钻杆,向下移动推进钻杆与钻具钻进岩层,与此同时装卸岩芯.动力头上下移动,而导致钻机总体质心发生变化.由于在钻机钻进过程中有了钻入岩层的钻杆,钻机稳定性有了保证,所以,稳定性风险主要存在于开始阶段,故钻机质心变化只需考虑动力头上下移动引起的.动力头自重较大,上下移动时钻机质心将从A点移动到B点,如图1所示.显然,钻机质心提高,其稳定性降低.所以,深海海底超深孔钻机稳定性分析都是以质点在B点处极端条件下展开.

1.2 深海海底超深孔钻机本体稳定性分析

在非工作状态下,深海海底超深孔钻机依靠本体重力保持稳定;有时为了操作简便,深海海底超深孔

钻机着底时,也没有打开支撑系统,深海海底超深孔钻机依靠本体保持稳定.所以,有必要对钻机本体进行稳定性分析.此时,钻机稳定性依赖于质心和钻机机架边框、钻机底框相对位置.为简便起见,选取钻机质心与边框最近的边框作直线,将三维问题变为平面问题.设钻机长、宽、高分别为 a, b, c (其中 $a = b$), 钻机质心 B 坐标为 $B(x, y, z)$, 适应海底底面倾角为 α , 如图 2 所示.

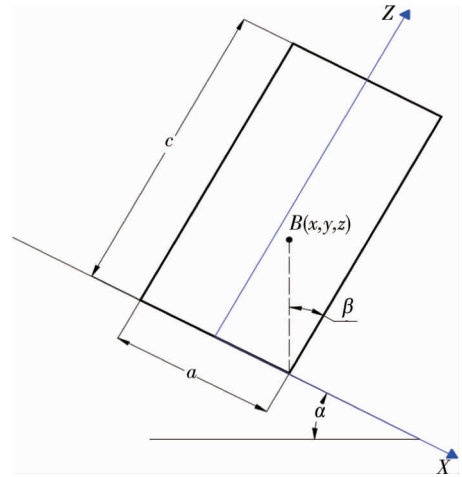


图 2 钻机着底稳定性分析

在 xoz 平面上, 设钻机质心 B 与钻机机架边框的夹角为 β , 钻机机架着底在海底底面倾角为 α 的海底斜坡上, 随着海底底面倾角为 α 的逐渐增大, 钻机质心 B 在海底底面倾角为 α 的海底斜坡上的投影将逐渐向钻机底座外部移动, 为了保证深海海底超深孔钻机稳定性, 必须使钻机质心 B 在海底底面倾角为 α 的海底斜坡上的投影落在钻机底座之内, 即

$$\alpha < \beta. \tag{1}$$

根据几何关系可得

$$\beta = \arctan\left(\frac{\frac{a}{2-x}}{z}\right). \tag{2}$$

这里定义深海海底超深孔钻机稳定性安全系数为

$$S = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\arctan\left(\frac{\frac{a}{2-x}}{z}\right)}{\alpha}. \tag{3}$$

稳定性系数是分析钻机相对于适用范围的稳定性定量方法, 实质上就是稳定性分析的安全系数法. 其中 β 为钻机适用的海底底面最大倾角, 相当于许用应力; 而 α 为钻机能够在海底倾斜底面保持稳定的最大倾角, 相当于极限应力. 深海海底超深孔钻机 S 越大, 说明钻机稳定性越好, 在海底倾斜底面作业时越安全. 当 S 小于 1 时, 则说明钻机没有达到设计要求或者钻机方案不能满足设计要求; 当 S 大于 1 时, 则说明钻机达到设计要求或者钻机方案满足设计要求. 这里特别要指出, 当 S 小于 1 时, 说明钻机存在稳定性风险, 即钻机在较大倾角时会出现倾倒现象. 而钻机是否发生倾倒, 由钻机所处的具体海底倾角来决定. 所以, 稳定性系数是稳定性或者安全性风险程度的评价方法, 而不是具体是否稳定或者稳定状态的判别方法.

深海海底超深孔钻机稳定性系数与钻机质心位置、钻机底座宽度有关, 变化规律如图 3 所示. 由图 3 可见, 随着钻机质心越低、偏心越小、宽度越宽, 钻机稳定性越高; 反之, 钻机质心越高、偏心越大、宽度越小, 钻机稳定性越低. 所以, 提高钻机本体稳定性, 可以从两方面入手: 一方面合理布置钻机部件位置时, 降低钻机质心高度、减少质心偏心距离; 另一方面科学设计钻机外形框架时, 减小其高度, 或加大钻机底座宽度, 但这会受到钻机运输、收放装备能力的限制.

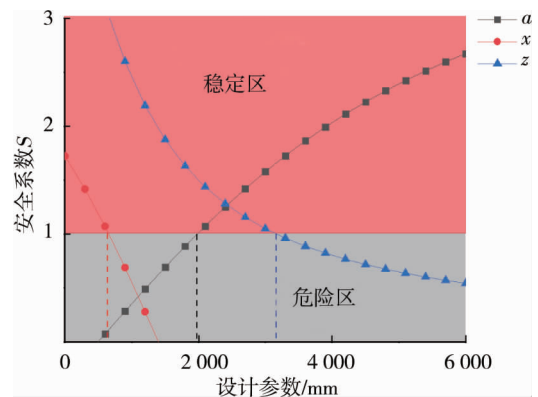


图 3 深海海底超深孔钻机本体稳定性系数

深海海底超深孔钻机要求满足海底面倾角为 20° , 在

确保钻机本体稳定的前提下,各参数设计域为($\alpha \geq 1\ 978.02\ \text{mm}$, $x \leq 658.34\ \text{mm}$, $z \leq 3\ 166.87\ \text{mm}$),如图3所示.据预算,深海海底超深孔钻机质心高度为2 037.7 mm,偏心距离为247.35 mm,底座宽度为2 800 mm,各参数均在设计域内.由式(3)计算可得钻机稳定性系数为1.47,29°是该钻机稳定的倾角临界值.因为钻机本体放置条件可控,这说明设计具有较为宽裕的安全余量.

2 深海海底超深孔钻机支撑稳定性分析

2.1 钻机3腿支撑稳定性分析

深海海底超深孔钻机着底后,必须打开支撑系统实现调平与支撑稳定之功用.深海海底超深孔钻机3腿支撑系统中液压缸、支撑杆和钻机机架构成四杆机构,利用其中的液压缸伸缩、锁定实现支撑系统收放和钻机支撑的.利用遥控系统操作,3个支腿液压缸既可以分别动作,也可以同时伸缩.这时,深海海底超深孔钻机稳定性分析就要求从钻机本体扩展到支腿支撑点构成的三角形,如图4所示.

考虑3个支腿同时伸出情况,这时钻机支撑稳定性就要求钻机质心处于3个支腿形成的等腰三角形内,简化后如图5所示.显然,钻机支撑稳定安全系数不但与钻机质心位置、钻机底座宽度有关,而且与支腿尺寸有关.支腿伸出使支撑的宽度增加,设支腿扩展的宽度为 p ;同时也使钻机质心高度增加,设支腿增加的高度为 q .

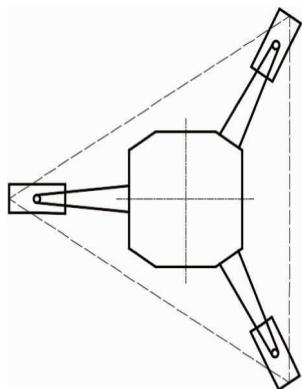


图4 深海海底超深孔钻机支撑系统

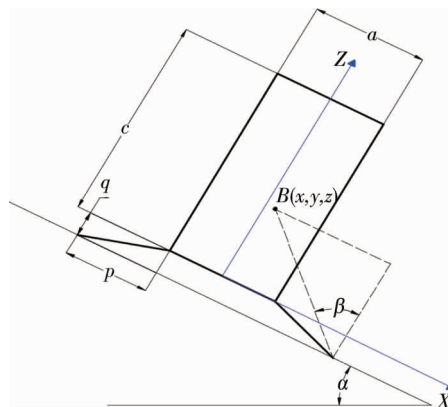


图5 钻机支撑稳定性分析

显然,此时支腿长度 l 为

$$l = \sqrt{p^2 + q^2}. \quad (4)$$

根据几何关系,可以求得

$$\beta = \arctan\left(\frac{\frac{a}{2 + p - x}}{z + q}\right). \quad (5)$$

钻机支撑稳定性系数为

$$S = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\arctan\left(\frac{\frac{a}{2 + p - x}}{z + q}\right)}{\alpha}. \quad (6)$$

钻机支撑稳定性系数与钻机及其支撑系统参数、钻机质心坐标的关系如图6所示.从图6可见,稳定性随着支撑宽度增加而增加,而随着支撑高度增加而减少,所以,在设计支撑系统时,应该使支撑系统支腿支撑宽度尽可能大、而其支撑高度尽可能小.

由于各项稳定性参数均大于0,所以深海海底超深孔钻机稳定性参数设计域为($\alpha > 0\ \text{mm}$, $q \leq 6\ 833.00\ \text{mm}$, $p > 0\ \text{mm}$, $x \leq 2\ 452.41\ \text{mm}$, $z \leq 8\ 196.10\ \text{mm}$),以便满足在倾角为20°海底面作业的要求.深海海底超深孔钻

机支撑系统支腿全部伸出时,其支撑宽度 $p=2\ 112.43\ \text{mm}$,支撑高度 $q=774.68\ \text{mm}$,由计算可得此时钻机支撑稳定性系数为 2.41,这说明设计具有较为宽裕的安全余量.考虑到钻机本体稳定性系数为 1.42,那么,随着支撑系统打开、支腿伸缩,钻机支撑稳定性系数在 1.47~2.41 之间变化.

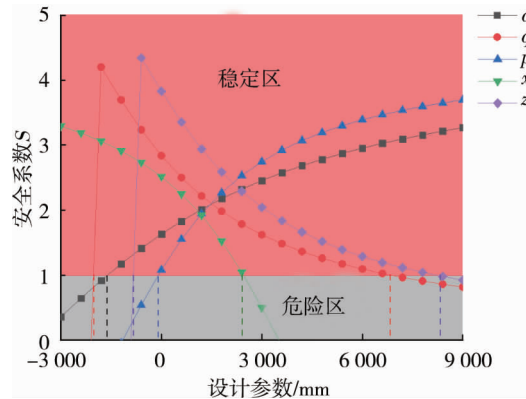


图 6 深海海底超深孔钻机支撑稳定安全系数

2.2 钻机单腿支撑稳定性分析

深海海底超深孔钻机支撑系统通过遥控实现支腿伸缩、锁定,以便保证深海海底超深孔钻机调平和稳定支撑.在调平过程中,3 个支腿伸缩有长有短,也可能一样长.但是,由于海底复杂工况和支撑控制系统故障或者误操作,导致出现极端危险的单腿支撑情况,钻机稳定性会受到严重影响.此时,深海海底超深孔钻机处于斜坡高处的支腿完全打开,而处于斜坡低处两个支腿没有打开,与海底底面接触不是支腿而是钻机底座,如图 7 所示.

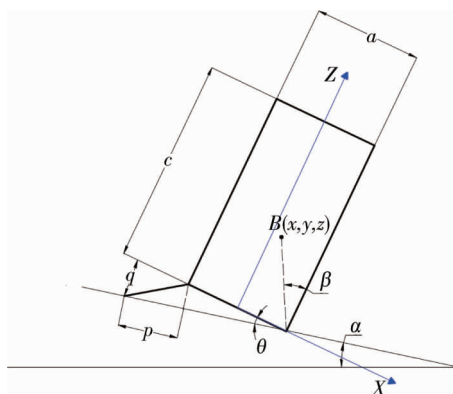


图 7 深海海底超深孔钻机单腿支撑稳定性分析

这种情况下,就相当于钻机本身的稳定性问题,并且增加了一个初始倾斜角度 θ ,根据几何关系,可得

$$\theta = \arcsin \left(\frac{l \sin \left(180^\circ - \arctan \frac{q}{p} \right)}{\sqrt{l^2 + a^2 - 2la \cos \left(180^\circ - \arctan \frac{q}{p} \right)}} \right) \quad (7)$$

结合式(2),就容易求得单腿支撑情况下的深海海底超深孔钻机稳定性系数:

$$S = \frac{\beta - \theta}{\alpha} = \frac{\arctan \left(\frac{a}{2-x} \right) - \arcsin \left(\frac{l \sin \left(180^\circ - \arctan \frac{q}{p} \right)}{\sqrt{l^2 + a^2 - 2la \cos \left(180^\circ - \arctan \frac{q}{p} \right)}} \right)}{\alpha} \quad (8)$$

钻机单腿支撑稳定性系数与各项相关参数关系如图 8 所示.从图 8 可见,在最危险的情况下,若要使

钻机能够具有稳定性,需要钻机质心高度、偏心与支撑高度足够小,且钻机底本体宽度、支腿支撑宽度与支腿长度需要足够大,而这些在设计阶段不容易实现。

深海海底超深孔钻机稳定性参数安全域为($\alpha \geq 2757.35$ mm, $q \leq 819.04$ mm, $p \geq 818.40$ mm, $x \leq 272.27$ mm, $z \leq 2082.72$ mm, $l \geq 1967.25$ mm),以探究钻机在最危险的情况下的稳定性。

由式(4)可得支腿长度 $l=2250.00$ mm,即可得出当高处支腿全部伸出时,钻机支撑稳定性系数为 $S=1.02$ 。由此可知,深海海底超深孔钻机在海底地面倾角为 20° 作业时在最危险的时候仍然具有安全稳定性,但是其稳定系数十分接近于1,说明存在稳定性风险,应该尽量避免。为了深海海底超深孔钻机支撑稳定性,可以通过调整有关参数,如增加钻机框架底座宽度或者支腿支撑宽度、降低钻机质心高度或支撑腿支撑高度,确保深海海底超深孔钻机在复杂深海海况和作业条件下万无一失。

4 结论

1) 深海海底超深孔钻机在未打开支撑系统的情况下,钻机的稳定性系数为1.47,具有一定的安全余量。

2) 深海海底超深孔钻机在支撑系统打开的情况下,钻机稳定性系数为2.41,具有较为宽裕的安全余量。

参考文献:

- [1] 刘德顺,金永平,万步炎,等.深海矿产资源岩芯探测取样技术与装备发展历程与趋势[J].中国机械工程,2014,25(23):3255-3265.
- [2] 张汉泉,陈奇,万步炎,等.海底钻机的国内外研究现状与发展趋势[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(1):1-7.
- [3] Budnik V, Chernyi S. Future Development of the World Ocean Mining for the Industry [J]. Procedia Engineering, 2016 (150) : 2150-2156.
- [4] Jin Y P, Wan B Y, Liu D S, et al. Dynamic analysis of launch & recovery system of seafloor drill under irregular waves[J]. Ocean engineering, 2016,117: 321-331.
- [5] Jaeckel A, Gjerde K M, Ardron J A. Conserving the common heritage of humankind-Options for the deep-seabed mining regime[J]. Marine Policy, 2017, 78:150-157.
- [6] 彭芸,夏建新,任华堂.国外深海底岩芯取样钻机设计参数及其应用效果[J].金属矿山,2015,45(3):156-160.
- [7] 王利恒,李昌禧.海底钻机平台调平控制算法研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(11):13-17.
- [8] 刘伟.海底钻机自动调平系统研究[D].武汉:中国地质大学,2012.
- [9] 陈奇,徐行,张志刚,等. Downhole CPT 海底基座液压自动调平系统研究[J].海洋技术,2010,29(1):120-124.
- [10] 万步炎,金永平,黄筱军.海底20m岩芯取样钻机的研制[J].海洋工程装备与技术,2015,2(1):1-5.

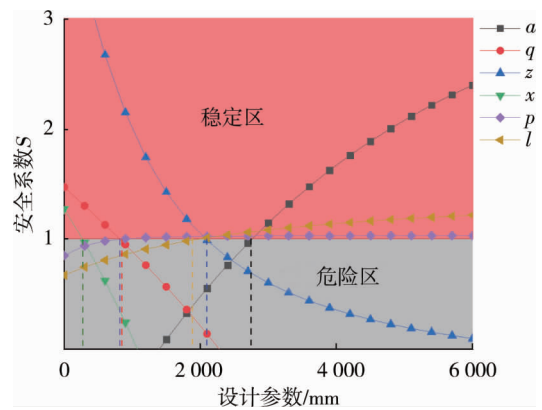


图8 钻机单腿支撑稳定安全系数