

# 极限状态法在深孔全液压岩心钻机 桅杆结构系统设计计算中的应用

李文东, 冉恒谦, 刘凡柏

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**通过对岩心钻机稳定性因素的系统研究, 总结出了钻机工作工况, 为桅杆结构力学模型的建立打下基础。根据项目要求, 桅杆的稳定性分析和优化建议为结构设计提供理论依据, 本文是基于极限状态法对桅杆结构系统进行分析计算, 将其作为本文的主体部分。最后, 得出有实际意义的结论。

**关键词:** 极限状态法; 桅杆; 钻机

中图分类号: P634.3<sup>+</sup>4

文献标识码: A

文章编号: 1672-7428(2009)S1-0032-04

## Application of Limit State Method in Design and Calculation of Mast structure System of Deep-hole Full Hydraulic Core Drilling

LI Wen-dong, RAN Heng-qian, LIU Fan-bai

(Institute of Exploration Techniques of CGS, Langfang Hebei 065000 China)

**Abstract:** This paper has did a lot of research work to check out the stable elements and working conditions of mast framework, which are the basic work for setting up the force analysis model. Stability analysis and optimizing suggestions will be used for structure design of mast as a theory basis, which takes a great part of this paper. At the end, acquiring the valuable conclusions.

**Key words:** limit state; mast; drill machine

### 1 概况

我国人口过多, 资源相对不足。结合我国所面临的资源现状, 中国地质科学院勘探技术研究所牵头并联合中国地质大学(北京)等高校成功申请了国家 863 项目《2000m 地质岩芯钻探关键技术与装备》, 项目的顺利实施将加速我国在深部找矿的现代化进程。依托 863 项目, 2000m 全岩心钻机由勘探技术研究所进行设计。桅杆结构作为全液压力头式岩芯钻机的重要组成部分, 其本身结构特点及载荷的不规律性等, 导致桅杆结构受力情况很复杂。根据钢结构极限状态法设计桅杆即在充分满足

功能要求的基础上, 做到安全可靠, 技术先进, 确保质量和经济合理。

### 2 桅杆结构及工作工况

钻机桅杆结构系统主要由天车头、上桅杆、下桅杆、孔口装置、给进装置等部分组成。桅杆主体结构截面尺寸为 900mm × 600mm。上、下桅杆铰接且可沿轴旋转折叠, 以方便运输, 桅杆总高度为 11.6m, 该设计高度可一次提升 9m 立根。主绞车单绳提升力 18t, 给进油缸左右各一个, 能够提供 20t 提拔力, 以满足该钻机服务于深孔钻进, 在处

收稿日期: 2009-08-30

**作者简介:** 李文东(1986-)男(汉族), 新疆人, 中国地质科学院在读硕士, 地质工程专业, 河北省廊坊市金光道 77 号, lwd118@foxmail.com; 冉恒谦(1963-)男(汉族), 四川人, 中国地质科学院勘探技术研究所地调科研处处长、教授级高级工程师, 地质工程专业博士多年来一直从事探矿工程技术工作, 国家 863 项目泥浆泵子课题负责人; 刘凡柏(1971-)男(汉族), 山东人, 中国地质科学院勘探技术研究所高级工程师, 工程机械专业中国地质调查局及国家 863 项目子课题全液压岩心钻机负责人。

埋孔内事故时有足够的提拔力,减少事故损失。

该岩心钻机设计钻进能力为 2000m,在深孔钻进过程中地质情况复杂多样,按照钻机在最恶劣工况下进行稳定分析计算,设想钻机在钻进过程中会遇到以下几种情况:

工况 1:在处理孔内事故过程中,动力头和主绞车共同完成提升钻具的工作,此时主绞车提升力为 18T,动力头给进油缸提升力为 20T,动力头在完成起拔钻具的同时仍在带动井下钻具低速大扭矩转动,动力头输出最大扭矩为 6000N·m;

工况 2:正常钻进过程中,在下放钻具过程中,绞车刹车对桅杆产生冲击荷载作用,特别是深孔情况下,对桅杆稳定性影响较大,需要单独考虑。

因此,对桅杆稳定性验算,只需考虑这两种工况即可。不同工况下的力学参数总结如表 1

### 3 桅杆力学模型

桅杆结构本身特点及载荷的不规律性得,导致桅杆结构的受力情况很复杂。目前,要对桅杆结构进行准确的静力计算还是比较困难的。在力学模型的建立上,我们可以根据实际情况进行简化,在结构材料的弹性限度内,可以把桅杆看作具有相当刚度的一个连续弹性体,是靠底座的支撑、托板及撑杆的铰接固定作用使得桅杆稳定。将桅杆水平放置来看,支座位移相当于弹性支座连续梁的弹性沉降,支座反力相当于弹性支座连续梁的支座反力。因此,将弹性支座连续梁的计算理论作为桅杆计算理论是合理的。

表 1 桅杆工作工况及力学参数表

参数	工况 1	工况 2
桅杆自重	1.37 t (竖直向下)	1.37 t (竖直向下)
偏心压力	36t (竖直向下)	48 t, (竖直向下)
偏心距	0.013m	0.013m
水平分力	1.44 t (水平方向)	1.92 t (水平方向)
动力头输出最大扭矩	0.6 t·m (水平顺时针)	不考虑
单个给进油缸作用力	10 t (竖直向下,左右各一个)	不考虑
滑架支撑作用	面约束	面约束
斜支撑作用	点约束	点约束
底部固定铰支	点约束,左右各一个	点约束,左右各一个

注:该表格参数将应用于桅杆静力分析计算

### 4 桅杆静力计算

根据上述弹性支座连续梁的计算理论,将桅杆视为一个静定结构,就不难计算出杆身的最大弯矩及发生的位置以及最大剪力及发生的位置。

#### 4.1 工况 1 事故处理

考虑到桅杆实际受力情况如图 1,起塔油缸直接作用于桅杆滑架上,而该滑架直接与桅杆相连接,因而可将桅杆滑架简化为一组理想铰支,使桅杆承受水平方向剪力和对桅杆截面中心的弯矩,桅杆底部与地面接触,简化为一铰支。截面弯矩合成公式:

$$M_{左} = m_{顶} + Q_L^{\text{顶}} + M_{底} - M_{架} - F_{架} L' + M_{滑}$$

$$M_{右} = m_{顶} + Q_L^{\text{顶}} + M_{底} - M_{架} - F_{架} L' + M_{滑}$$

式中:  $L$ —桅顶部到底部依次计算长度;  $L'$ —滑板中部至底部依次计算长度。

$$M_{底} = N_{底} \times 0.265 = 37.734 \times 0.265 = 10.000t \cdot m$$

(对桅杆中轴求偏心弯矩)。

危险断面处弯矩和剪力值见表 2。

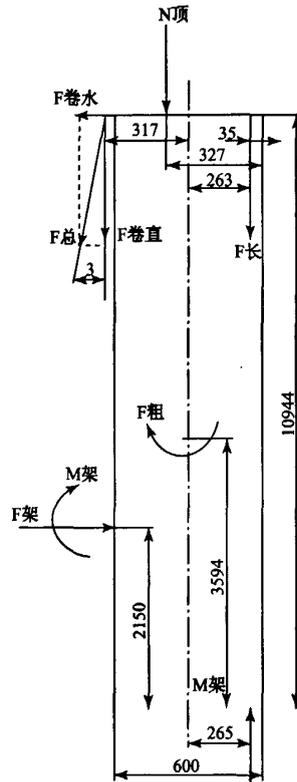


图 1 桅杆受力分析图

表 2 危险断面处弯矩和剪力值

作用点	$M_{y_{max}}/t \cdot m$	$Q_{x_{max}}/t$
上桅杆底部(上桅杆验算)	15.984	0.000
滑板与桅杆接触面中点(整体验算)	19.801	0.936

注:以上数据,将在桅杆稳定性论证过程中用到

4.2 工况 2 冲击载荷作用

设想钻孔深度接近设计深度 2000m 时,起下钻具长度接近钻孔长度,由刹车而使钻具产生惯性力最大,这种动载荷将对桅杆产生冲击破坏作用最为严重。

(1) 动载荷计算

根据冲量定理:

$$m \cdot \nabla v = F_{惯} \cdot \nabla t$$

已知:  $m = 18t$ ;  $\nabla v = 1m/s$  (主绞车最大下放钻具速度),  $\nabla t = 3s$  (刹车时间)。

$$\text{由公式: } m \cdot \nabla v = F_{惯} \cdot \nabla t \Rightarrow F_{惯} = 6t$$

$F_{动} = F_{卷动} = F_{提动} = 18 + 6 = 24t$  ( $F_{动}$  表示动载荷作用)

(2) 截面弯矩合成公式:

$$M_j = M_{j右} = M_{j左} = M_{顶动} + Q_{顶动} \cdot L + M_{底动} - M_{架动} - F_{架动} \cdot L'$$

式中:  $L$ —桅顶部到底部依次计算长度;  $L'$ —滑板中部至底部依次计算长度。

$$M_{底动} = N_{底动} \times 0.265 = 48 \times 0.265 = 12.72t \cdot m;$$

危险断面处弯矩和剪力值见表 3。

表 3 危险断面处弯矩和剪力值

作用点	$M_{y_{max}}/t \cdot m$	$Q_{x_{max}}/t$
上桅杆底部(上桅杆验算)	20.643	0.000
滑板与桅杆接触面中点(整体验算)	25.505	1.240

以上数据,将在桅杆稳定性论证过程中用到

根据表 2 与表 3 计算结果比较分析,只要演算表 2 桅杆绕  $y-y$  轴所受最大弯矩及剪力作用下是否稳定即可。

5 桅杆稳定性演算

在桅杆的设计中,仅考虑强度安全是不够的,还必须考虑到它的稳定性。一般结构物的丧失稳定,有两种类型,一种是倾覆稳定,一种是弹性稳定。倾覆稳定是把结构物作为一个刚体,在外力作用下不能保持其原来的位置而发生的倾覆或滑移现象。弹性稳定是将结构物看作一个弹性体,在外力作用下,发生这样一种较大的变形,致使外力不能有微量的增加否则将引起弹性变形的无限发展,而

使结构丧失稳定,而把这个极限状态称为临界状态,载荷称为临界载荷。

根据桅杆理论计算模型可知,研究和解决桅杆稳定性问题,就是研究解决一个具体的桅杆临界载荷与桅杆内力载荷的关系问题,正如钢结构设计过程中,必须满足的一定设计准则即为承载力极限状态设计准则。

5.1 桅杆整体稳定性校核(桅杆在工况 2 下工作)

根据《钢结构设计手册》中极限状态法进行稳定性验算,桅杆整体绕  $y-y$  稳定性验算,弯矩绕  $Y$  轴作用于桅杆截面,由于截面中空,不能再考虑截面塑性深入发展,故弯矩作用于平面内的整体稳定性验算宜采用边缘屈服准则,并考虑抗力分项系数后,按《钢结构设计准则》给定的整体稳定性公式计算:

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} m_y}{W_x \left(1 - \varphi_x \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} \leq [\sigma]$$

式中:  $\varphi_x$ —压杆稳定性系数,由  $\lambda_{y1} = 57.54$  查表得  $\varphi_x = 0.815$  (b 类截面);  $N'_{Ex}$ —考虑抗力分项系数后的欧拉临界力;  $\beta_{mx}$ —等效弯矩系数,  $\beta_{mx} = 1$  (桅杆简支);  $[\sigma] = 1550kg/cm^2$ ; 安全系数  $k = 1.5$ ;

$$N'_{Ex} = \frac{\pi^2 EA}{1.1 \lambda_{y1}^2} = \frac{3.14^2 \times 206000 \times 80.64 \times 10^2}{1.1 \times 57.74^2} = 446.6T$$

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx}}{W_x \left(1 - \varphi_x \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} = \frac{48000}{80.64 \times 0.815} + \frac{1 \times 25505000}{2421 \times \left(1 - 0.815 \frac{48}{446.6}\right)} = 1885kg/cm^2$$

根据计算结果  $1885kg/cm^2 \geq [\sigma] = 1550kg/cm^2$ ,在工况 2 下,安全系数取 1.5 的情况下,说明桅杆整体结构失稳。

5.2 分肢稳定性验算

将桅杆桁架结构视为一平行桁架,将桅杆四个肢腿看作桁架的玄杆(如图 2),则前支腿和后支腿的轴心压力分别按下式确定,

$$\text{前支腿: } N_1 = \frac{N y_2}{a} + \frac{M y_{max}}{a} = \frac{48.0 \times 26.5}{53.0} + \frac{25.505 \times 10^2}{53.0} = 72.23t$$

$$\text{后支腿: } N_2 = 48.0 - 72.23 = -24.23t$$

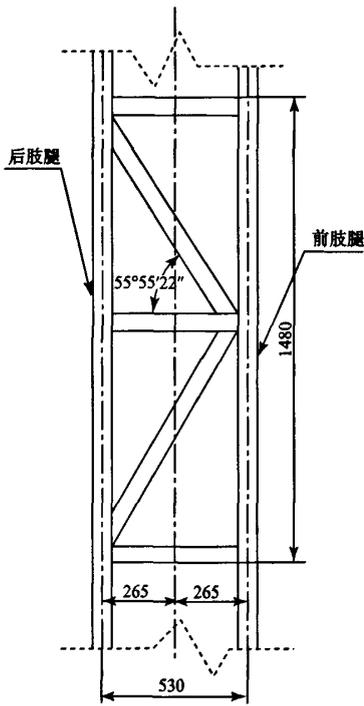


图2 桅杆支腿示意图

由以上结果发现,桅杆后腿受拉力且较小,因此不存在稳定性问题,故只需验算前支腿稳定性。

前支腿的长细比为:

$$\lambda_1 = \frac{148}{2.66} = 55.64 \leq [\lambda] = 150$$

由  $\lambda_1 = 55.64$  按 b 类截面查表得  $\varphi_{y1} = 0.830$

$$\frac{N_1}{\varphi_{y1} \cdot A_1} = \frac{72230}{0.830 \times 40.2} = 2158 \text{ kg/cm}^2 \geq [\sigma]$$

在工况 2 下,安全系数为 1.5,由计算结果说明肢腿强度不符合要求。

## 6 结论及优化建议

(1) 根据稳定性计算结果,桅杆在工况 2 下工作,无论从桅杆整体情况还是支腿都达不到稳定要求。

(2) 在桅杆顶部,由于天车头安装位置的因素,

导致  $F_{\text{顶}}$  对桅杆中心截面产生偏心  $M_{\text{顶}} = 0.97 \text{ t} \cdot \text{m}$  并不是很大。

由以上工作得出的结论,提出桅杆结构设计中的优化建议,供设计人员参考。

(1) 在天车头的安装位置应尽量靠近桅杆中心截面,以减少顶部偏心矩的大小。

(2) 经计算上桅杆结构强度不够理想,应将支腿截面尺寸由原来的  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  放大为  $80 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,为提高桅杆整体稳定的安全储备。

(3) 桅杆底部与地面接触点应尽量靠近桅杆中心截面,考虑到不影响其他零部件在桅杆上的布置问题,可考虑在桅杆底部安装铰板,这样可以去除底部较大偏心矩,可大大改善桅杆受力情况,不论是桅杆整体还是局部稳定性(上桅杆和前支腿)都有很大的改善。

(4) 为增加在桅杆结构的安全系数,可将上桅杆底部与下桅杆底部到中部位置多布置横,斜支撑。

(5) 建议加强上下桅杆连接刚度,斜撑支撑点的位置离上下桅杆连接处不宜太远,最好偏上。

## 参考文献:

- [1] 陈琦丽. 钻探技术的新进展[J]. 凿岩机械气动工具, 1999, (01).
- [2] 黄振群. 试谈我国钻探设备的发展方向, 地球科学 - 中国地质大学学报, 1992, (01).
- [3] 乐俊旺. 塔桅结构的设计控制, 特种结构, 2006, (03).
- [4] 安娜, 赵大军. 风载作用下四角钻塔的有限元分析[J]. 山西建筑, 2006, (17).
- [5] 陈亦, 陈晓明. 基于特征的塔桅结构 CAD 方法[J]. 特种结构, 2000, (02).
- [6] 舒兴平, 沈蒲生. 平面钢框架极限承载力的试验研究[J]. 湖南大学学报, 1994, (01).
- [7] 王延荣, 田爱梅. 结构振动可靠性设计方法研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18, (2).
- [8] 陈树勋, 李威龙. 一种实用的机械结构优化设计方法[J]. 机械设计, 2003, (20).