

用能量法研究深直井管柱最大转速与 正弦屈曲时临界轴向力间的关系

陈 敏, 吕建国, 刘宝林, 肖天鹏

(中国地质大学 北京 工程技术学院 北京 100083)

摘 要 通过考虑离心力对钻柱屈曲的影响,运用能量法研究了钻柱最大转速与正弦屈曲时临界轴向力间的关系,进而得到了转速—轴向临界力的数学模型。综合考虑钻柱惯性离心力和自重的影响,我们发现,在工作状态下,钻柱的临界压力会明显地小于静态时的临界力,这对实际的钻探工程来说具有十分重要的指导意义。

关键词 能量法;深直井管柱;最大转速;正弦屈曲;临界轴向力

中图分类号: P634.5 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2005)12-0040-03

Analysis on the Relationship between the Axis Critical Force and the Maximum Speed of the Drill String in Deep Straight Well with Energy Method/CHEN Min, Lü Jian-guo, LIU Bao-lin, XIAO Tian-peng (China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract This paper investigates the relationship between the axis critical force under sinusoid bending and the maximum speed of drill string by considering the eccentric force effects of the drill string, and then obtains a mathematics model for the speed—axis critical force. Considering the inertial eccentric force and the weight of the drill string, we find that the axis critical force will be obviously less than that under the static state, which will be very important in drill engineering applications.

Key words: energy method; drill string in deep straight well; maximum revolution; sinusoid bending; axis critical force

1 概述

钻柱在孔中工作时,以一定的转速作回转运动。由于钻柱自身的某些偏心 and 因自重失稳而产生的某些弯曲,使钻柱有一定的质量偏离回转中心。而这些偏心质量在回转运动中产生的离心力将促使钻柱发生进一步的弯曲。与此同时,钻柱上还有由于自重而产生的纵向压力。在离心力和纵向力的作用下,整个钻柱在孔内呈波形弯曲,其波峰压向孔壁,在回转运动中和向下给进中就有可能产生摩擦阻力,影响钻进工作。

虽然许多学者用能量法研究了钻柱在孔内的弯曲状态^[1~3],但是,他们大多集中在半波长的分析上,着重研究了整个钻柱完全发生正弦屈曲时的半波长问题,并没有针对钻柱钻进时刚好发生一次正弦屈曲时的临界轴向力与转速进行分析。Lubinsk 最先研究了垂直井眼中钻柱在自重作用下发生屈曲

的情况。他得出了钻柱弯曲的微分方程,然后利用边界条件解出了钻柱在自重作用下发生屈曲的临界力。Lubinsk 假设中和点以下钻柱在泥浆中的重力等于钻压^[3]。但 Lubinsk 并没有考虑钻柱偏心质量导致的惯性离心力的影响。因此,本文运用能量法综合考虑钻柱自重和离心力的影响,建立了深直井管柱最大转速与正弦屈曲时临界轴向力间的解析表达式。

2 深直井管柱最大转速与正弦屈曲时临界轴向力间关系的能量法建模

为了研究钻柱在孔内的弯曲状态,根据能量法原理,我们可以设定钻柱受外力(离心力和纵向力)所作的功等于钻柱变形所储存的位能。即:

$$U = W_e + W_w \quad (1)$$

式中: U ——钻柱变形位能; W_e ——纵向力所作的

收稿日期 2005-06-06

基金项目 国家自然科学基金重点项目“复杂条件下钻井技术基础研究”(编号为 50234030)

作者简介 陈敏(1976-),女(汉族),湖北人,中国地质大学(北京)硕士在读,地质工程专业,研究方向为力学在地质工程中的应用,北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学 500302 班(010)62773336,chenm03@163.com;吕建国(1964-),男(汉族),内蒙古人,中国地质大学(北京)工程技术学院副院长、教授,机械专业,硕士,从事力学教学与力学在地质工程中的应用研究工作(010)82321883,lijg@cugb.edu.cn;刘宝林(1959-),男(汉族),吉林榆树人,中国地质大学(北京)教授、科学钻探国家专业实验室主任,探矿工程专业,硕士,从事微机自控钻进、优化钻进、钻机无级调速和湖泊钻探取心等方面的研究工作(010)82323273,lbaoLin@cugb.edu.cn。

功； W_{ω} ——离心力所作的功。

假设以钻柱的中和点 O 为坐标原点，以井眼中心线为 x 轴，建立如图 1 所示的右手坐标系。

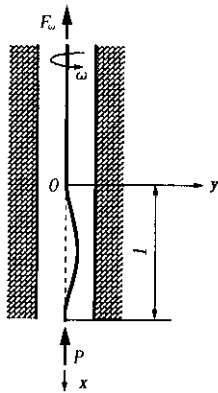


图 1 钻柱以 ω 的角速度钻进过程中垂直井管柱屈曲的临界轴向力模型

现在，我们考虑钻柱在以 ω 的角速度钻进过程中垂直井管柱屈曲的临界轴向力问题。为分析方便，我们将中和点以下发生屈曲的钻柱部分连同坐标系放大成图 2。由于钻柱以 ω 的角速度钻进，因而，发生屈曲的部分除受到泥浆中的等效自重 W_e 的作用外将会受到惯性离心力 F_{ω} 的作用。

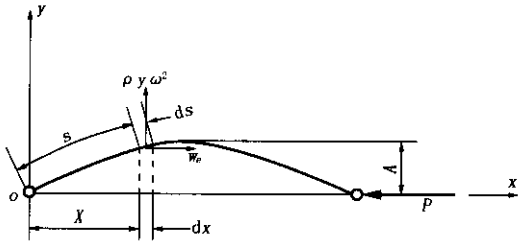


图 2 发生屈曲变形的部分的钻柱模型

2.1 钻柱变形能 U

由材料力学知，发生屈曲的半波长内钻柱中储存的变形能为：

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^l y''^2 dx \tag{2}$$

设钻柱屈曲部分为正弦屈曲：

$$y(x) = A \sin(\pi x / l) \tag{3}$$

式中 A ——如图 2 所示的最大挠度。

将 (3) 式代入 (2) 式得：

$$\begin{aligned} U &= \frac{EI}{2} \int_0^l A^2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^4 \sin^2 \frac{\pi x}{l} dx \\ &= \frac{EIA^2 \pi^4}{2l^4} \int_0^l \frac{1 - \cos \frac{2\pi x}{l}}{2} dx \\ &= \frac{EIA^2 \pi^4}{4l^3} \end{aligned} \tag{4}$$

2.2 重力所做功

由图 2 可知：

$$\begin{aligned} ds &= \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \\ &= dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \\ &= dx \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{dy}{dx} \right)^4 + \dots \right] \end{aligned} \tag{5}$$

忽略 $(dy/dx)^2$ 的高阶无穷小项后 (5) 式可以近似记为：

$$ds \approx dx \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] \tag{6}$$

因而，屈曲后微段的变形量为：

$$ds - dx = \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \tag{7}$$

所以 x 段在泥浆中的等效自重微段位移上所做的功为：

$$q \alpha (ds - dx) = \left(\frac{1}{2} \right) q \alpha \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \tag{8}$$

式中 q ——钻柱在泥浆中考虑浮力后的重力线密度。

因此，发生屈曲部分的钻柱自重所做的功为：

$$W_e = \int_0^l \frac{1}{2} q \alpha \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \tag{9}$$

将 (3) 式代入 (9) 式得：

$$\begin{aligned} W_e &= \int_0^l \frac{1}{2} q \alpha \left(\frac{\pi A \cos \frac{\pi x}{l}}{l} \right)^2 dx \\ &= \frac{1}{8} q A^2 \pi^2 \end{aligned} \tag{10}$$

2.3 离心力做的功

离心力对正弦屈曲部分微质量 dm 做的功为：

$$\int_0^y (dm) \xi \omega^2 d\xi = \int_0^y (\rho ds) \xi \omega^2 d\xi = \frac{1}{2} \rho ds \omega^2 y^2 \tag{11}$$

式中： ρ ——钻柱的质量线密度。

离心力对整个正弦屈曲部分做的功为：

$$W_{\omega} = \int_s \frac{1}{2} \rho \omega^2 y^2 ds \tag{12}$$

根据 (6) 式 (12) 式可以化为：

$$W_{\omega} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \int_0^l y^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx \tag{13}$$

根据 (3) 式 (13) 式可以化为：

$$W_{\omega} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \int_0^l \left(A^2 \sin^2 \frac{\pi x}{l} + \frac{\pi^2 A^4}{2l^2} \sin^2 \frac{\pi x}{l} \cos^2 \frac{\pi x}{l} \right) dx \tag{14}$$

即

$$W_{\omega} = \frac{\rho}{4} \omega^2 A^2 l + \frac{\rho}{32l} \omega^2 \pi^2 A^4 \tag{15}$$

根据能量法原理，将式 (4) (10) (15) 代入式

(1)得：

$$\frac{1}{8}qA^2\pi^2 + \frac{1}{4}\rho\omega^2A^2l + \frac{1}{32l}\rho\omega^2\pi^2A^4 = \frac{EIA^2\pi^4}{4l^3} \tag{16}$$

考虑到 $l \gg A$ (16)式可以进一步近似简化为：

$$\frac{1}{8}q\pi^2 + \frac{1}{4}\rho\omega^2l = \frac{EI\pi^4}{4l^3} \tag{17}$$

由于 O 点为中和点 ,因此有：

$$P = ql \tag{18}$$

式中 P ——如图 1 所示的井底作用于钻头的轴向力。

因此，

$$l = P/q \tag{19}$$

将 (19)式代入 (17)式就可以得到临界轴向力与钻进角速度之间的关系方程：

$$q^2\pi^2P^3 + 2\rho P^4\omega^2 = 2EI\pi^4q^4 \tag{20}$$

根据 (20)式 ,可以发现 ,转速 ω 越大 ,有效轴向力 P 就越小 ,进而可以求出在给定钻进压力 P 下的临界转速为：

$$\omega_{cr} = \frac{q\pi}{2\rho P^2} \sqrt{4\rho EI\pi^2q^2 - 2\rho P^3} \tag{21}$$

如果忽略泥浆的浮力作用 ,则有：

$$q = \rho g \tag{22}$$

式中： g ——重力加速度。

式 (21)可化进一步简化为：

$$\omega_{cr} = \frac{g\pi}{2P^2} \sqrt{4\rho^3g^2EI\pi^2 - 2\rho P^3} \tag{23}$$

显然 ,在钻柱静平衡状态 ,即 $\omega = 0$ 时 ,由 (20)式可得：

$$P_{cr} = \sqrt[3]{2EI\pi^2q^2} \tag{24}$$

因此 (24)式就是在中和点假设条件下钻柱在静态的临界压力。从 (20)式和 (24)式可以看出 ,钻柱的临界载荷 P_{cr} 明显地受到了钻速 ω 的影响 ,在 $\omega = 0$ 时 P_{cr} 最大 ,随着 ω 的增大 , P_{cr} 将不断减小。式 (24)可以作为钻柱钻进过程中轴向压力的上限。在工作压力 $P < P_{cr}$ 的情况下 ,可以由 (21)式或 (23)式求出任意钻进压力 P 下的临界转速。

3 结语

本文运用能量法建立了钻柱最大转速与正弦屈曲时临界轴向力关系数学模型。通过综合考虑离心力和自重对钻柱屈曲的影响 ,得到了转速 - 轴向临界力的解析表达式。研究发现 ,在工作状态下 ,钻柱的临界压力会明显地小于静态时的临界力 ,这对实际钻探工程来说具有非常重要的理论指导意义。

参考文献：

[1] 李世忠. 钻探工艺学 [M]. 北京 :地质出版社 ,1992.
[2] 武汉地质学院 ,等. 岩心钻探设备及设计原理 [M]. 北京 :地质出版社 ,1980.
[3] 赵国珍 ,龚伟安. 钻井力学基础 [M]. 北京 :石油工业出版社 ,1988.

国家 863 计划“ 天然气水合物探测技术 ”课题通过验收

2005 年 12 月 15 日 ,以广州海洋地质调查局为依托单位
的国家 863 计划“ 天然气水合物探测技术 ”课题 ,在北京通过
了资源与环境技术领域海洋资源开发技术主题专家组的验收。

该课题在天然气水合物的地震识别、地震物理模拟技
术、船载地球化学探测系统研制和深水浅孔保真取样器研制
方面实现了自主创新 ,在天然气水合物地震采集参数分析系
统、地震数值模拟技术、天然气水合物饱和度估计和稳定带
顶底面识别技术、底水地球化学探测系统研制、室内高精度
地球化学测试分析技术和天然气水合物资源综合评价技术
方面有突破性的进展 ,在天然气水合物地震采集试验技术、

地震识别处理技术和深水深孔天然气水合物保真取心钻具
等方面取得了显著进展 ,形成了适合我国海域特点的天然气
水合物探测技术系列 ,共获得国家发明专利 7 项 ,国家实用
新型专利 7 项 ,国家计算机软件著作权登记证书 8 项。

课题的研究成果在实际生产中得到推广应用 ,提升了
“ 我国海域天然气水合物资源调查与评价 ”国家专项依托工
程的技术水平 ,提高了地震资料的质量和地球化学数据的精
度 ,提供了新的调查技术手段 ,扩大了天然气水合物资源远
景区 ,发现了天然气水合物异常 ,缩小了勘探靶区 ,为依托工
程的顺利实施提供了技术支撑。

(据 中国地质调查局网站)