

弹性钻柱两个特殊点的意义及计算方法

高德利 韩志勇

(钻井教研室)

提要 通过分析钻柱的应力和应变状态,对钻柱的中性点和零轴向力点给出了新的定义和计算方法,并阐述了稳定力和屈曲力(通称为虚轴向力)的概念。导出了处在垂直井眼中的复合钻柱的有关计算公式。文中还与原有的研究结论进行了对比分析,并提出了不同意见。本文以钻柱为研究对象,所得的结果可以推广应用到套管柱及油管柱上。

关键词 钻井工具;中性点;计算方法

一、前言

弹性钻柱两个特殊点称之为中性点(P_N)和零轴向力点(P_Z),它们代表了两个特殊的受力和变形状态。对于中性点的问题,国内外专家认识不一,从而产生了不同的定义和论述。A. Lubinski [1]认为,中性点把钻柱分为两段,上面一段在泥浆中的重量等于吊卡或大钩所悬吊的重量;下面一段在泥浆中的重量等于钻压。A. Klinkenberg [2]认为,中性点是应力分布各向同性的点,即是三个主正应力相等的那些点所在的断面(The Neutral Zone)(本文定义的“中性点”也具有以点代面的含义)。H. B. Woods [4]根据最小势能原理和模拟装置推导断定,中性点是轴向应力等于其它两个主应力(径向应力和周向应力)的平均值的点,同时给出了判定管柱稳定性的准则。另外,还有人认为 [5,6],中性点是管柱曲直的分界点。在国内,文献 [7]发表以后引起了一场讨论,先后有龚伟安 [8]、杜春长 [9]、董法治 [10]参加了讨论,对统一认识起了积极作用。Lubinski 关于中性点的定义对我国影响最早,也最大 [1,11];文献 [7]的结论基本上未超出文献 [5]的范围;文献 [10]则对中性点问题进行了长篇综合分析。笔者研读了上述文献,认为有不少商榷余地。

本文根据弹性力学及流体力学原理 [13,14],通过分析钻柱的应力和应变状态,给出钻柱两个特殊点的新定义及其计算方法,并与原有的研究结果进行对比分析,以求统一认识。在分析中采用下列假设:

1. 钻柱处于纯弹性状态;
2. 不考虑钻柱弯曲的影响;
3. 在分析钻柱受力变形时,以拉为正,以压为负。

二、径向液压力的作用结果

在一般钻井条件下，钻柱浸没在钻井液里工作，其内外圆周侧壁势必要受到来自钻井液的径向压力。由弹性力学可知，径向受均布压力的圆环或圆筒，其体内会产生径向应力（ σ_r ）和周向应力（ σ_θ ），并可用拉密公式求出。在一般情况下，由于作用在钻柱内外侧壁的径向液压力是沿轴向变化的，故不能以整个钻柱为分析对象而使用拉密公式。因此，可从钻柱上任意位置割取一薄圆环片，其所受的内外径向液压力 p_i 和 p_o 沿轴向厚度可视为不变，如图1所示。这时可用拉密公式求得圆环片平面应力问题的解为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\alpha'} &= 0, \sigma_r \neq 0, \sigma_\theta \neq 0 \\ \epsilon_{\alpha'} &= -\left(\frac{\mu}{E}\right)(\sigma_r + \sigma_\theta) \\ (\sigma_r + \sigma_\theta) &= -\frac{2(d_o^2 p_o - d_i^2 p_i)}{(d_o^2 - d_i^2)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\alpha'}$ ——轴向应力；
 $\epsilon_{\alpha'}$ ——轴向应变；
 μ ——泊松比；
 E ——弹性模量。

显然， $\epsilon_{\alpha'}$ 在钻柱横断面上是均匀分布的。

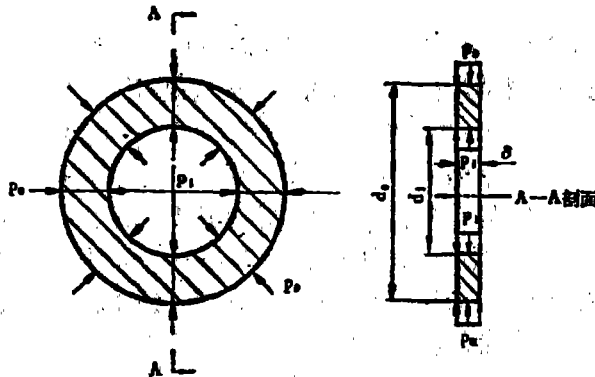


图1 受均布压力的圆环片

按虎克定律，把轴向应变 $\epsilon_{\alpha'}$ 转换为应力 $\sigma_f = \epsilon_{\alpha'} E$ 。 σ_f 相当于一个与 $\epsilon_{\alpha'}$ 相对应的轴向应力，但由于实际的轴向应力 $\sigma_{\alpha'} = 0$ ，故称 σ_f 为虚轴向应力。通过式（1）， σ_f 又可表示为：

$$\sigma_f = -\mu(\sigma_r + \sigma_\theta) = \frac{2\mu(d_o^2 p_o - d_i^2 p_i)}{(d_o^2 - d_i^2)} \quad (2)$$

可见， σ_f 在钻柱横断面上是均布应力，相应的虚轴向力表达式为：

$$F_f = 2\mu(A_o p_o - A_i p_i) \quad (3)$$

式中， $A_o = \frac{\pi}{4} d_o^2$ ， $A_i = \frac{\pi}{4} d_i^2$ 分别是钻柱（圆环片）的外圆面积和内圆面积。

由式(3)可见, F_f 是由作用在钻柱上的径向液压力 p_i 及 p_o 产生的, 无论 d_o , d_i 及 μ 取何值, 只要 $p_i = p_o = 0$, 就必然有 $F_f = 0$ 。在 d_o , d_i 及 μ 不变时, p_i 和 p_o 的大小决定了 F_f 取值大小。显然, F_f 随 p_i , p_o 及 d_o , d_i , μ 而变化, 可能出现正负值。因此定义 $F_f > 0$ 时, 则称 F_f 为稳定力 (F_a); 当 $F_f < 0$ 时, 称 F_f 为屈曲力 (F_b)。

对于整个钻柱而言, 由于径向液压力的作用, 会使钻柱产生轴向变形, 并可用式(3)计算出相应的虚轴向力 F_f 。对钻柱的任一横断面, 若 F_f 是 F_a , 则该断面的 $\varepsilon_a' > 0$, 为轴向拉应变; 若 F_f 是 F_b , 则 $\varepsilon_a' < 0$, 为轴向压应变; 若 $F_f = 0$, 则 $\varepsilon_a' = 0$, 表示径向液压力的作用不影响该断面的轴向应变状态。因此, 在分析钻柱的轴向应变状态时, 必须考虑虚轴向力的影响。

三、零轴向力点和中性点的定义及其计算方法

钻柱的轴向载荷来自液力、机械力或二者兼有。在轴向载荷作用下, 钻柱在任一点 P 处的轴向内力为 $F_a(P)$, 其沿着钻柱轴向变化。若钻柱上存在一点 P_z , 使 $F_a(P_z) = 0$, 则称 P_z 为零轴向力点。钻柱上的 P_z 点把钻柱分为两部分, 点以上部分受轴向拉力, 点以下部分受轴向压力。若 $F_a(P)$ 在钻柱上处处不为零, 则钻柱内不存在 P_z , 这时钻柱或完全处于受压力状态或完全处于受拉力状态。由于假设不考虑钻柱的弯曲影响, 所以由 $F_a(P)$ 引起的轴向应力 σ_a'' 在横断面上是均匀分布的, 相应的轴向应变 $\varepsilon_a'' = \sigma_a''/E$ 也是均匀分布的。由于作用在钻柱侧壁的径向液压力会引起轴向应变 ε_a' , 故钻柱的总轴向应变 ε_a 为:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a' + \varepsilon_a'' = \frac{1}{E} [\sigma_a - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \quad (4)$$

式中, $\sigma_a = \sigma_a' + \sigma_a'' = \sigma_a''$; ε_a 在横断面上均匀分布。

式(4)实际上就是三维应力的各向同性均匀材料的广义虎克定律。因此, 定义在钻柱上或钻柱的轴向延长线上, 若存在一点 P_N , 使 $\varepsilon_a(P_N) = 0$, 则称 P_N 为钻柱的中性点。若 P_N 处在钻柱上, 则 P_N 把钻柱分成两部分, 其中一部分处于压缩变形状态, 另一部分处于拉伸变形状态; 若 P_N 离开钻柱而处在轴向延长线上, 则整个钻柱在轴向上, 或处于完全压缩变形状态或处于完全拉伸变形状态, 依具体情况而定。

根据式(4), 由 $\varepsilon_a(P_N) = 0$ 可得:

$$\sigma_a = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (\text{在 } P_N \text{ 点上}) \quad (5)$$

当钻柱材料为体积不可压缩时, 则 $\mu = \frac{1}{2}$, 式(5)变成 Wood[4] 关于中性点的定义式。

若定义 $\sigma_{ad} = E\varepsilon_a$ 为相当轴向应力, 代入式(4)中, 并考虑到式(2), 则有:

$$\sigma_{ad} = \sigma_f + \sigma_a \quad (6)$$

显然, 与 σ_{ad} 相应的相当轴向力 F_{ad} 为:

$$F_{ad} = F_f + F_a \quad (7)$$

不难理解, 当 $F_{ad} = 0$ 时, 总轴向应变必等于零。因此, 根据上述对中性点和零轴向力点的定义, 可以得到两个重要的方程式, 即:

$$F_{ad}(P_N) = F_f(P_N) + F_a(P_N) = 0 \quad (8)$$

$$F_a(P_Z) = 0 \quad (9)$$

利用这两个方程式，可以分别计算出 P_N 和 P_Z 的位置。在 P_N 点， $F_a(P_N) = -F_f(P_N)$ ；在 P_Z 点， $F_{ad}(P_Z) = F_f(P_Z)$ 。

设坐标轴 H ，其原点在钻柱的顶端，沿钻柱轴线指向底端。钻柱处在直井里（不一定为铅直井）， P_N 和 P_Z 的 H 坐标分别为 L_N 和 L_Z ，则式（8）和式（9）变为：

$$F_{ad}(L_N) = 0 \quad (10)$$

$$F_a(L_Z) = 0 \quad (11)$$

由式（10）和（11）即可求出 L_N 和 L_Z 。当 $F_f(L_Z) > 0$ 时，则 $L_N > L_Z$ ；当 $F_f(L_Z) < 0$ 时，则 $L_N < L_Z$ 。若 $H = X$ 为 $F_a(H)$ 的间断点，且 $\lim_{H \rightarrow x^-} F_a(H) > 0$ ， $\lim_{H \rightarrow x^+} F_a(H) < 0$ ，则 P_Z 处在 $H = X$ 间断点上，应定义 $F_a(x) = 0$ ，并取 $L_Z = x$ ；若 $x = y$ 是 $F_{ad}(H)$ 的间断点，且 $\lim_{H \rightarrow y^-} F_{ad}(H) > 0$ ， $\lim_{H \rightarrow y^+} F_{ad}(H) < 0$ ，则 P_N 处在 $H = Y$ 的间断点上，应定义 $F_{ad}(Y) = 0$ ，并取 $L_N = Y$ 。

只要 F_f 存在，则 P_N 和 P_Z 就不会重合，且有：

$$\left. \begin{aligned} F_a(L_N) &= -F_f(L_N) \\ F_{ad}(L_Z) &= F_f(L_Z) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

显然， F_f 对 P_Z 的位置无影响，而对 P_N 的位置有不可忽视的影响。在 P_Z 位置不变的情况下，由于 F_f 作用的结果， P_N 有离开钻柱而存在的可能性。

四、垂直井眼中复合钻柱

P_N 和 P_Z 的计算方法

将复合钻柱下入充满钻井液的垂直井眼里，假设钻柱只受自重力、静液压力及钻压、大钩吊载的作用，其中以自重力及静液压力为主动动力。设 H 是原点在井口、且向下为正的铅垂坐标轴；复合钻柱是由 n 段不同规格的钻杆和钻铤构成，各段的名义线重度自上而下分别为 q_1, q_2, \dots, q_n ；对应于各段下端点的 H 坐标自上而下分别为 H_1, H_2, \dots, H_n ，井口处 $H = H_0 = 0$ ；将复合钻柱各段自上而下编号为 $1, 2, \dots, n$ ，其中第 j 段钻柱长度为 $\Delta H_j = H_j - H_{j-1}$ ($j = 1, 2, \dots, n$)；钻井液的重度为 γ_m ，钻柱材料的重度为 γ_s 。

(一) 复合钻柱的 F_f, F_a 及 F_{ad} 的表达式

1. 由静液压力引起的轴向内力 F_{h_j} 为：

$$F_{h_j} = -f_k \left[\sum_{i=j+1}^n (\Delta H_i q_i) + H_j q_j \right] \quad (13)$$

式中， $j = 1, 2, \dots, n$ ； $f_k = \gamma_m / \gamma_s$ 。当 $j = 1$ 时，由式（13）可得：

$$|F_{h_1}| = f_k \sum_{i=1}^n (\Delta H_i q_i) = |\vec{B}| \quad (14)$$

式中， \vec{B} 是复合钻柱在钻井液中所受到的总浮力，作用点在浮心，方向竖直向上。

2. 复合钻柱在空气中完全悬挂时的轴向内力分布为：

$$W_j(H) = \sum_{i=j+1}^n (\Delta H_i q_i) + (H_j - H)q_j \quad (15)$$

式中, $j=1, 2, \dots, n$ 。当 $j=1, H=0$ 时, 则有 $W_1(0) = W$, 为复合钻柱在空气中的总重量。

3. 在静液压力作用下, 虚轴向力 F_f 是稳定力 $F_{sj}(H)$, 即 (取 $\mu = \frac{1}{2}$):

$$F_{sj}(H) = (f_k q_j)H \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

4. 复合钻柱轴向力 $F_{sj}(H)$ 及相当轴向力 $F_{adj}(H)$ 的表达式为:

$$\begin{aligned} F_{sj}(H) &= W_j(H) + F_{hj} + (-W_{ob}) \\ &= \sum_{i=j+1}^n (\Delta H_i q_i) K_f + q_j (H_j K_f - H) - W_{ob} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} F_{adj}(H) &= F_{sj}(H) + F_{sj}(H) \\ &= K_f \left[\sum_{i=j+1}^n (\Delta H_i q_i) + (H_j - H)q_j \right] - W_{ob} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $K_f = 1 - f_k$; W_{ob} 为钻压; $j=1, 2, \dots, n$ 。

上述 $F_{hj}(H)$, $F_{sj}(H)$ 及 $F_{adj}(H)$ 均在 $H = H_j$ 处间断, 而 $W_j(H)$ 及 $F_{adj}(H)$ 均是 H 的分段线性连续函数, $j=1, 2, \dots, n$ 。

(二) 计算 P_N 和 P_Z 的 H 坐标 L_N 和 L_Z

在以上给定的条件下, P_Z 和 P_N 均在钻柱上, 即 $0 \leq L_N \leq L_0$, $0 \leq L_Z \leq L_0$, 其中 $L_0 = H_n$ 为复合钻柱的总长度 (在地面丈量)。

依据式 (17), 若 $\lim_{H \rightarrow H_j^+} F_{sj}(H) > 0$, $\lim_{H \rightarrow H_j^-} F_{sj}(H) < 0$, 则 P_Z 处在第 j 段上, $j=1, 2, \dots, n$ 。依据式 (18), 若 $F_{adj}(H_{j-1}) > 0$, $F_{adj}(H_j) < 0$, 则 P_N 处在第 j 段上, $j=1, 2, \dots, n$ 。

设 P_Z 和 P_N 均在第 j 段钻柱上 ($j=1, 2, \dots, n$), 由式 (10) 和式 (11) 得:

$$F_{sj}(L_Z) = 0, \quad F_{adj}(L_N) = 0 \quad (19)$$

分别将式 (17) 和式 (18) 代入式 (19) 中得:

$$L_Z = H_j K_f + \frac{1}{q_j} \left[\sum_{i=j+1}^n (\Delta H_i q_i) K_f - W_{ob} \right] \quad (20)$$

$$L_N = \frac{K_f \left[\sum_{i=j+1}^n (\Delta H_i q_i) + H_j q_j \right] - W_{ob}}{q_j K_f} \quad (21)$$

按式 (16) 计算 $F_{sj}(L_Z)$, 必有 $F_{sj}(L_Z) > 0$, 所以由式 (20) 和式 (21) 计算的 L_Z 和 L_N 具有 $L_N > L_Z$ 的不等关系。

根据式 (17), 若 $\lim_{H \rightarrow H_j^+} F_{sj}(H) > 0$, $\lim_{H \rightarrow H_j^-} F_{s_{j+1}}(H) < 0$, 则 P_Z 处在 $H = H_j$ 的间断点上, 这时应定义 $F_{sj}(H_j) = 0$, 取 $L_Z = H_j$ ($j=1, 2, \dots, n$)。

根据式 (18), 若 $F_{adj}(H_j) = 0$, 则 P_N 在 $H = H_j$ 的衔接处, 取 $L_N = H_j$ ($j=1, 2, \dots$,

n)。

(三) 复合钻柱的最大轴向伸长 ΔL_m

当钻柱材料的泊松比 $\mu \neq \frac{1}{2}$ 时, 式 (18) 可改写为:

$$F_{ad_j}(H) = K_f \left[\sum_{i=j+1}^n (\Delta H_i q_i) + (H_j - H) q_j \right] - [W_{ob} + (1 - 2\mu) f_k q_j H] \quad (22)$$

在不加钻压时, 复合钻柱处于最大伸长状态, 伸长量 ΔL_m 可表示为:

$$\Delta L_m = \sum_{j=1}^n \int_{H_j}^{\Delta H_j} \left(\frac{F_{ad_j}(H)}{EA_j} \right) dH \quad (23)$$

式中, A_j 为第 j 段钻柱的名义横断面积; $F_{ad_j}(H)$ 由式 (21) 令 $W_{ob} = 0$ 而得到, 代入式 (22) 并积分, 则得:

$$\Delta L_m = \left(\frac{K_f \gamma_a}{E} \right) \sum_{j=1}^n \left[\Delta H_j \sum_{i=j+1}^n \left(\Delta H_i \frac{q_i}{q_j} \right) + \left(\frac{\Delta H_j^2}{2} \right) \right] - \left(\frac{\gamma_m}{6K} \right) L^2 \quad (24)$$

式中, $K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$, 为钻柱材料的体积弹性模量。当 $\mu \rightarrow \frac{1}{2}$ 时, 则 $K \rightarrow \infty$, 表示材料体积不可压缩。

(四) 计算实例

采用本文的方法求解文献[9]中的例题如下:

已知 $q_1 = 38.13 \times 10 \text{ N/m}$, $q_2 = 163.2 \times 10 \text{ N/m}$, $H_1 = 2,880 \text{ m}$, $H_2 = 3,000 \text{ m}$, $n = 2$,

$$\gamma_m = 1.2, \gamma_a = 7.85, \mu = \frac{1}{2} \quad E = 2.1 \times 10^8 \text{ kPa}, W_{ob} = 150 \text{ kN}$$

求: L_N , L_Z 及 ΔL_m 。

$$\text{解: } K_f = 1 - \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} \right) = 0.85$$

通过式 (17) 和 (18) 进行判断, 得知 P_Z 处在钻杆上, P_N 处在钻铤上, 故在式 (20) 中令 $j = 1$, 在式 (21) 中令 $j = 2$, 分别得:

$$L_Z = H_1 K_f + \frac{(H_2 - H_1) K_f q_2 - W_{ob} \times 10^3}{q_1} \approx 2491.2 \text{ m}$$

$$L_N = H_2 - \frac{W_{ob} \times 10^3}{K_f q_2} \approx 2892 \text{ m}$$

$$\Delta L_m \approx 1.79 \text{ m}$$

在此例中, 中性点以下的钻柱在泥浆中的重量等于钻压, 即 $W_{ob} = (H_2 - L_N) q_2 K_f / 1000 \text{ kN}$ 。图 2 是表示本例钻柱轴向力的分布及 P_Z 和 P_N 的位置示意图。

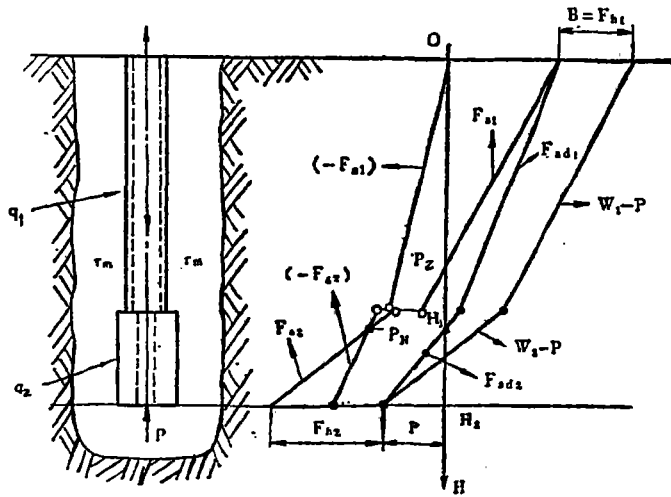


图2 题解示意图

五、静液压力与浮力的区别

关于这个问题在文献[10]中已有论述，但笔者认为还存在不正确的概念。关于静液压力和浮力的概念，在流体力学专著中[14]有明确的论述。在力的三要素方面，静液压力和浮力有严格的区别。静液压力的定义式为：

$$\vec{p}_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \vec{F}_n}{\Delta A} \right) = -\vec{n} p_n \quad (25)$$

式中， $\Delta \vec{F}_n$ 为面积 ΔA （法线方向为 \vec{n} ）上所承受的表面力； p_n 是 p_n 的大小，如图（3）所示， $p_n = \rho g h + p_0$ （ ρ 为液体的密度， g 为重力加速度）。 \vec{p}_n 的方向是垂直并指向其作用面，即 \vec{p}_n 与 \vec{n} 的方向相反。 p_n 的作用点是其作用面上的点。另外，静液压力具有各向同性的特点。

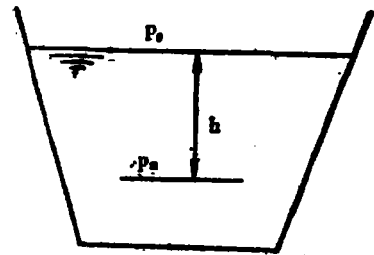


图3 静液中的压力

浮力 \vec{B} 也是一种力，是固体与液体相互接触而产生的。它的严格定义是，完全浸没在液体中、或部分浸没在液体中的物体受到液体对它的作用力，其合力称为物体的浮力。根据阿基米德定律，浸在液体中的物体所受到的浮力 \vec{B} 的大小等于物体所排开液体的重量，而方向和重力相反。物体所受浮力可以认为集中作用在一点，即浮力中心，简称浮心。浮心就是被排开液体的重心。

静液压力与浮力有明显的差别，同时二者也有内在的联系。 p_n 是产生 \vec{B} 的动力源泉，而物体与液体相互接触（即物体浸在液体中）是产生 \vec{B} 的必要条件。

文献[10]认为：“理想井眼中的等径钻柱和不等径钻柱（上小下大）的总浮力虽都作用在钻柱的底端，但区别还是有一点，即等径钻柱底端的浮力分布是均匀的，而不等径钻柱底端浮力分布外小内大，是非均匀的。只有把它当作集中力使用时，才没有区别”。文献[9]也有类似的论述，显然都是不正确的。实际上，作用在钻柱底端的力不是 \vec{B} ，而是

\vec{p}_n ; \vec{B} 是集中力, 而不是分布力; \vec{B} 的作用点在钻柱所排开钻井液的重心。

由于 \vec{p}_n 总是垂直并指向于其作用面, 故作用在钻柱端部和内外台肩上的 \vec{p}_n 会形成轴向载荷而引起钻柱的轴向内力, 这种现象称之为“活塞效应”。在分析钻柱的轴向载荷时, 必须考虑这个“活塞效应”。本文在上述分析中考虑了此效应。

六、讨论

本文所定义的中性点具有广义性, 它包含了前言中所提到的 Lubinski, Klinkenberg 及 Woods 各自定义的中性点。只有 $p_i = p_o =$ 静液柱压力时, Lubinski 中性点、Klinkenberg 中性点和 Woods 中性点与本文定义的中性点 (取 $\mu = \frac{1}{2}$) 才能完全一致, 否则, Lubinski 中性点和 Klinkenberg 中性点均不存在。Lubinski 自己也承认^[3], 他定义的中性点和 Klinkenberg 中性点是一致的。文献[8]旨在支持 Lubinski 中性点的定义, 又由该定义引出性质 2 来否认 Klinkenberg 的中性点, 是自相矛盾的; 同时引出性质 3 把 Woods 中性点的定义 归为 Lubinski 中性点的一个特性, 是不恰当的。事实上, Woods 中性点的定义式包含着 Lubinski 中性点的定义, 而不是反序。不难看出, Woods 的定义式是本文定义的中性点取 $\mu = \frac{1}{2}$ 时的特例。

文献[10]的结论认为, Woods 中性点的特点是: “除理想井眼等径钻柱外, 它随井深增加而下降, 以至于迅速消失, 井深再增加, 它就成为负值。”因此, 文献[10]的作者认为, 这是 Woods 中性点 “不应该继续存在的主要理由。”这完全是一种误解。文献[10]引用文献[9]的例题与本文上节例题是一样的, 其计算结果 ($L_w = -295.6\text{m}$, $\sigma_a = 80.3 \times 10^5 \text{Pa}$) 是错误的, 正确的结果 (按本文公式计算) 是, $L_w = H_2 - L_N = 108.1315\text{m}$ 及 $\sigma_a(L_N) = -347.04 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

Klinkenberg 在假设钻柱材料体积不可压缩的前提下, 认为三向主应力相等时不发生任何变形是正确的, 文献[10]的相反意见不能成立。至于文献[10]中论述的三种“中和点”的关系, 依据上述分析不难辩明其是非。

另外, 文献[10]认为, 以“静水压力法”计算零轴向力点时, “在理想井眼塔式钻柱中将发生谬误, 其原因是, 钻铤台肩面上的静液压力对轴向压力产生了干扰。”实际上这种“干扰”是“活塞效应”的一部分, 是不能忽略的, 使用“静水压力法”时, 由静水压力的特性要求必须考虑这种“干扰”。应该指出, 文献[8]没有考虑这种“干扰”, 所导出的公式(6)和(7)均是错误的。

关于把中性点与钻柱弯曲联系起来的论述, 有必要进一步探讨。特别是把中性点作为钻柱曲直分界点^{[5][6]}的结论, 即不能用文献[1]的屈曲理论来驳斥^[8], 也不能盲目地加以接受^[7], 而文献[12]的分析有一定参考意义。这个问题有待进一步研究, 本文不再深入讨论。

七、结论

1. 中性点是钻柱总轴向应变等于零的点。钻柱上的中性点把钻柱分为两部分, 其以上部分处于轴向拉伸变形状态, 以下部分处于轴向压缩变形状态。在一定条件下, 中性点可以离

开钻柱体而存在于其轴向延长线上,这时整个钻柱或完全处于轴向拉伸变形状态或完全处于轴向压缩变形状态。

2. 钻柱的轴向内力等于零的那点,称为零轴向力点。它把钻柱分为两部分,其以上部分受轴向拉力,其以下部分受轴向压力。零轴向力点的轴向应变一般不等于零。

3. 本文所定义的中性点具有广义性,而Lubinski中性点、Klinkenberg中性点及Woods中性点均是本文所定义的中性点的特例。本文给出了中性点及零轴向力点的一般计算方法,作为特例,就垂直井中的复合钻柱(在限定受力条件下)导出了具体的计算公式,可供有关人员参考。

4. 静液压力与浮力有严格的区别,那种认为浮力是分布力并作用在钻柱底端的概念是错误的。

5. 本文以钻柱为分析对象所得到的结果,可以直接应用到套管柱和油管柱相应的分析和计算中。

本研究工作得到沈忠厚教授的热情支持和指导,笔者表示衷心感谢!

(1986年5月收稿)

参 考 文 献

- [1] Lubinski, A.: Buckling of Rotary Drilling Strings, *World Oil*, Vol.132, No. 4—7, 1951.
- [2] Klinkenberg, A.: The Neutral Zone in Drill Pipe and Casing and Their Significance in Relation to Buckling and Collapse, *Drilling and Production Practice*, pp.64—79, 1951.
- [3] Lubinski, A.: A Discussion on "the Neutral Zone in Drill Pipe and Casing and Their Significance in Relation to Buckling and Collapse", *Drilling and Production Practice*, pp.76—77, 1951.
- [4] Woods, H.B.: A Discussion on "the Neutral Zone in Drill Pipe and Casing and Their Significance in Relation to Buckling and Collapse", *Drilling and Production Practice*, pp.77—79, 1951.
- [5] Goins, W.C.: Better Understanding Prevents Tubular Buckling Problems, *World Oil*, Vol.190, No.1—2, 1980.
- [6] Lubinski, A. et al. Helical Buckling of Tubing Sealed in Packers, *JPT*, June, 1962.
- [7] 辛俊和等: 井内管柱中和点问题探讨, 钻采工艺, 1981, No.4.
- [8] 龚伟安: 对钻柱中和点问题的一点认识, 钻采工艺, 1982, No.2.
- [9] 杜春常: 浮力对钻柱的受力影响, 钻采工艺, 1983, No.1.
- [10] 董法治: 钻柱中和点问题浅议, 钻采工艺, 1983, 6(1), 1984, 7(3), 7(4)。
- [11] 刘希圣主编: 《钻井工艺原理》(上册), 石油工业出版社, 1980年。
- [12] 吴疆: 油气管柱弯曲失稳问题的探讨, 钻采工艺, 1985, 8(1)。
- [13] 徐之纶编: 《弹性力学》(上册), 人民教育出版社, 1982年。
- [14] 潘文全主编: 《流体力学基础》(上册), 机械工业出版社, 1982年。

THE DEFINITION OF TWO SPECIAL POINTS OF DRILL STRING AND CALCULATION METHODS

Gao Deli Han Zhiyong

Abstract On the basis of stress and strain in drill string, this paper gives new definitions and calculation methods for the neutral point and the zero axial force point in drill string. The concepts of stabilized force, buckling force and fictitious axial force are described. The calculation formulas for the compound drill string in straight hole have been derived. In comparison with other research, the result of this paper is popular and can be applied to analyze casing string and tubing.

Key words Drilling tool; Neutral point; Computational method