

图4 不同温度下B原油的屈服值

其中 τ_y 为管道应用屈服值; τ_{ys} 为黏度计测定值; ϕ 为空隙影响系数; 式(5)中 $(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ 项是由于原油比容随温降变小引起的空隙含量, ρ_1, ρ_2 为停输或启动时刻油温下的原油密度.

就B原油而言, 根据式(4), 求得 $(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ 值以及表1中的 τ_y/τ_{ys} 值, 用最小二乘法回归即可以求出 $\phi = 4.9430$. τ_y 、 τ_{ys} 之间的关系如图4所示. 式(5)表明空隙对原油屈服值的影响关系.

5. 结论

(1) 管道中原油冷却收缩产生的疏松性是降低原油启动压力的主要因素. 原油中的空隙一方面阻

止了蜡网结构的连续生长; 另一方面在加压过程中能沿管线逐次压缩破坏蜡结构.

(2) 实验证明胶凝原油在形成结构以后, 若带有空隙, 则其蜡网晶格具有一定的渗透性. 启动过程表现为先渗透而后屈服流动.

(3) RV黏度计测定值与管路应用值之间的关系可用式(5)来表征.

参考文献

- [1] Jiang Yongxing. Proceedings of China-Japan International Conference on Rheology. Beijing: Peking University Press, 1991: 241-244
- [2] Gale Wheeler et al. SPE (September) 1989, Number/page 19265/1-5
- [3] Batycky J P, Ritter R A. *Journal of Canadian Petroleum*, 1978 (July-September), 66-72
- [4] Peter B et al. EUR 1978, 35: 283-290
- [5] Bao Chong. Proceedings of China-Japan International Conference on Rheology. Beijing: Peking University Press, 1991: 221-225
- [6] 汤楷逊译. 石油科学进展 B. 北京: 石油工业出版社, 1986
- [7] Gill F, Russell R J. *Journal of Chemical Engineering*, 1974, 46(16): 1264
- [8] Perkins T K, Turner J. *Journal of Petroleum Technology*, 1971(March): 301-306

(本文于1992年12月7日收到)

连云港淤泥流变特性研究

呼和敖德 黄振华

(中国科学院力学所, 北京 100080)

张袁备 金 缪

(连云港建港指挥部)

摘要 研究了体积容重为 $C_v = 0.057 \sim 0.41$ 连云港西墅地区淤泥的流变特性和弹性模量. 在剪切率的变化范围 $2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 3.5 \times 10^2 \text{s}^{-1}$, 淤泥具有三种不同的流变特性, 在很低剪切率情况下, 淤泥剪切力基本保持常值; 在低剪切率范围, 表现为宾汉流体性质, 其屈服应力和宾汉黏性系数以 C_v 指数增长; 在高剪切率, 淤泥流动体现出宾汉伪塑性特征. 划分三个特征区的临界剪切率值是随淤泥含水量变化. 最后指出, 连云港淤泥弹性模量与高

岭土结果很相近, 对淤泥含水量的变化极其敏感.

关键词 淤泥流变特性, 淤泥, 弹性模量

1. 引言

淤泥质海滩分布于我国及世界众多大江河口及海岸. 淤泥是粒径微小的黏土, 粉沙和水的混合物, 易于悬浮和流动. 因此, 这种淤泥的物理性质的研究对于在淤泥质海床上海岸工程建设以及有关的港口回淤, 航道淤积、港口环境污染等一系列问

题的研究都具有十分重要意义。

国内外有关泥沙流变特性的研究结果^[1-3]认为,随着水流中固体颗粒浓度的增高,流动从牛顿流体转化为非牛顿流体,呈现出复杂的流变关系。最近 O'Brien^[4] 和 Julien^[5] 等,分别研究了低剪切率和高剪切率条件下高含沙水流流变特性,研究结果表明高含沙水流在低剪切率条件下具有宾汉流体特征,而在高剪切率时满足二次律应力应变关系。高含沙水流的流变特性与含沙水流中的黏性颗粒的含量密切相关,淤泥的黏土成份含量比一般高含沙水流高得多,因此也具有较高的屈服应力。日本学者^[6]测定了含水量为 $W = 145\% - 496\%$ 的高岭土的流变曲线,在低剪切率情况下,泥的流变特性从宾汉流体过渡到幂律流。但是,黏土的含量、化学成份、剪切率等因素对流变性质影响很大,关于这方面还有待深入研究。

本文采用 RMS-605 旋转式流变仪测量了连云港西墅地区天然淤泥的流变曲线和弹性模量,并进行了深入系统地研究。这项研究是在较大剪切率范围和不同含水量淤泥条件下进行的。考虑港湾沿岸波流等自然情况下淤泥运动的剪切率范围(一般低于 $50s^{-1}$),重点研究了淤泥在低剪切率情况下的流变特性。同时,还测定了淤泥的化学成份及天然淤泥的常规物理参数,最后对所研究的流变关系给予了合理的数学描述。

2. 淤泥特性的测量

2.1 常规参数的测量结果

对连云港西墅地区淤泥样品作了常规项目的测试^[8]

西墅淤泥样品取自高、中、低三个潮位线在表层所取淤泥均属粉质轻黏土,在低潮位点钻取的不同深度土样分析,在 2.5-4.5m 深处淤泥层为重黏土,天然淤泥颗粒大小分析见表 1

表 1 淤泥特性表

样品	比重	淤泥粒径分布			流限 %	塑限 %
		黏土 (%)	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)		
中高潮位淤泥	2.75	37	0.0022	0.009	0.055	
低潮位淤泥	2.76	80	0.00085 [#]	0.002 [#]	0.0055	67.5 30.5
Aspen ^[5]						
天然土	27		0.007	0.013	0.028	25 6

淤泥的天然容重在各取样点存在较大差异,表层淤泥天然容重约为 $1.51-1.56g/cm^3$ 。沿泥层深度容重变化范围为 $1.51-1.74g/cm^3$ 。

2.2 淤泥流变特性测量及流变模型

淤泥流变特性的测量采用了美国 RMS-605 流变仪,该仪器可测黏度范围 $10-10^8 Pa \cdot s$,剪切率范围 $10^{-3}-10^3 s^{-1}$,频率 $10^{-2}-10^2 rad/s$ 。精度达 $\pm 0.1\%$,温度可以控制。有两种不同旋转装置:旋转圆板及旋转圆筒式,实验中两种方法均被采用。测量过程温度保持在 $20^\circ C$ 。

在静态运动下测量了淤泥应力应变关系,给出流变曲线,当改变频率进行动态测量可获得淤泥的弹性模量。

采用旋转圆筒法测量不同含水量淤泥流变特性示于图 1。在本实验剪切率范围,流变曲线呈现出明显的三种特征,可划分为三种特征区:屈服区,宾汉区及宾汉伪塑性区。在小剪切率的屈服区,淤泥剪应力基本保持不变,对于连云港西墅淤泥流变特性可用下述流变方程描述

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_B & \tau < \tau_B \\ \tau &= \tau_B + \tau_{PB} \frac{\partial u}{\partial y} & \tau_B < \tau < \tau_P \\ \tau &= \tau_B + \eta_P \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n & \tau > \tau_P \end{aligned} \right\} (1)$$

其中 η_P 为塑性稠度系数, n 为流动指数。所得结果与文献 [7] 在低剪切率条件下得到的高岭土流变特性非常相似。这些结果说明淤泥中含水量对结果有显著的影响。

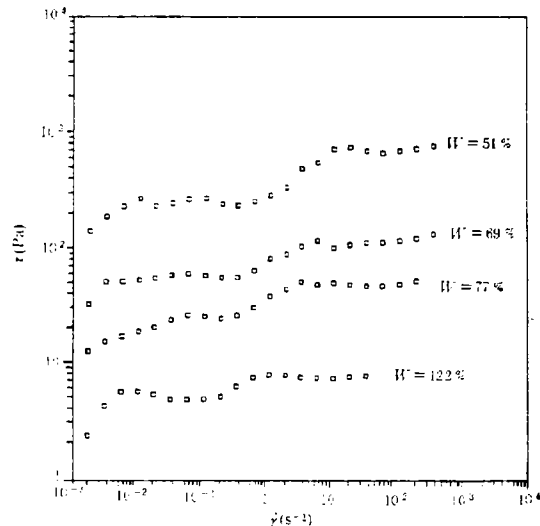


图 1 连云港淤泥流变曲线

2.3 宾汉 (Bingham) 模型

在自然界、江河流动及海浪的作用下泥沙运动主要是在低剪切率范围内进行。在低剪切率范围淤泥流动具有宾汉特性。对连云港淤泥进行多次流变特性测量得到淤泥屈服应力 τ_B 和宾汉黏性系数 η_B ，这些结果主要依赖于淤泥的体积容重 $C_v = (\rho_m - \rho_w)/(\rho_s - \rho_m)$ ，并以 C_v 指数规律变化

$$\left. \begin{aligned} \tau_B &= 0.4997e^{16.46C_v} \\ \eta_B &= 0.0167e^{20.48C_v} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

关于 τ_B 和 η_B 的实验结果分别示于图 2 和图 3。

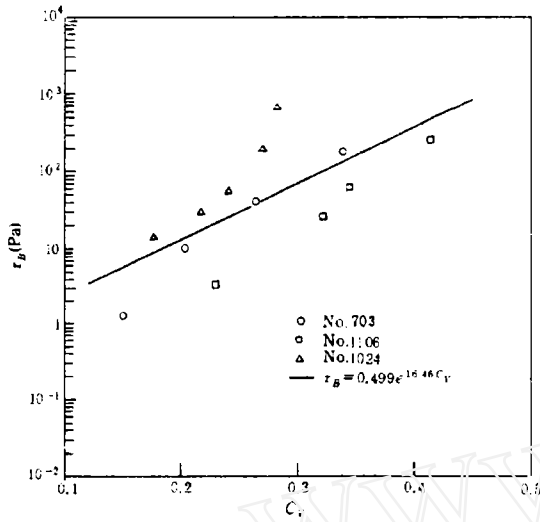


图 2 连云港淤泥屈服应力 τ_B

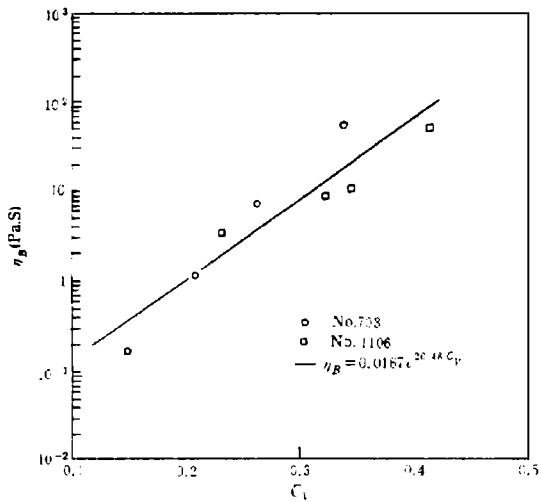


图 3 连云港淤泥宾汉黏性系数 η_B

从实验结果可以发现，含有细颗粒黏土成分的高浓度浮淤具有较高的抗剪强度，即具有较高的屈

服应力，屈服应力值与细颗粒黏土含量密切相关，这主要因为黏土颗粒之间易形成絮凝结构。然而多次实验也反映出，在同样含水量情况下的淤泥样品，由于放置时间的不同，或受到某种扰动都会影响到浮淤絮凝结构的形成，会影响实验结果，从而引起实验数据的分散。目前，国内外对淤泥流变特性的测量由于无法克服上述的种种因素，所得到的实验结果都存在很大的分散度。我们在图 4 和图 5 分别给出了关于屈服应力和宾汉黏性系数的国内外某些实验结果，其实验淤泥样品均含有较高比例的细颗粒黏土成分，这些结果均在同一量级范围之内。

至于宾汉区的应变率范围的上下临界值 $\dot{\gamma}_2$ 和 $\dot{\gamma}_1$ 值，实验表明与淤泥含水量有关，对于西墅淤泥其变化规律为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\gamma}_1 &= 252.24W^{-1.75} \\ \dot{\gamma}_2 &= 35728W^{-2.2077} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

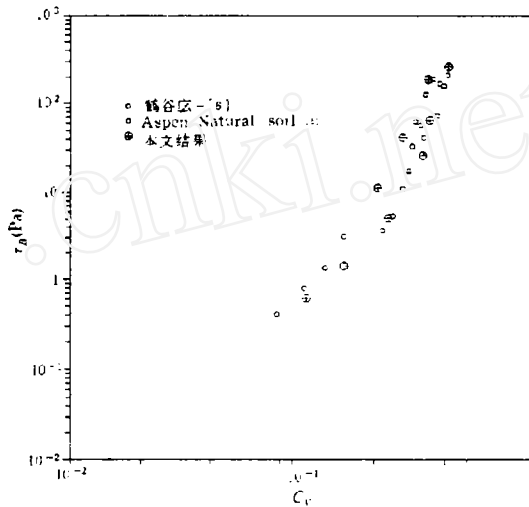


图 4 屈服应力 τ_B 与淤泥体积容重 C_v 关系

2.4 表观黏性系数

对于非牛顿流体，一般需要两个或两个以上参数来表示其黏性。表观黏性系数 η_a 是比较通用的一种，定义为

$$\eta_a = \tau_B / \frac{\partial u}{\partial y} + \eta_B \quad (4)$$

对于牛顿流体， η_a 为常值，对于非牛顿流体表观黏性系数是剪切率的函数，从本文实验结果计算得到的表观黏性系数 η_a 示于图 6。观察分析实验结果发现，表观黏性系数随应变率和含水量变化，并可表示为剪切率的幂律函数

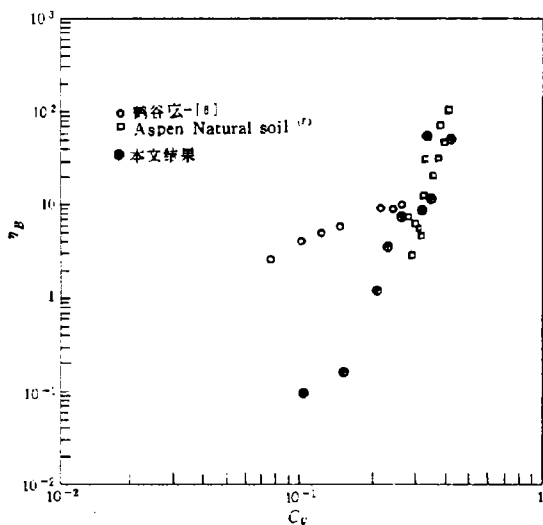


图5 宾汉黏性系数 η_B 与淤泥体积容重 C_v 关系

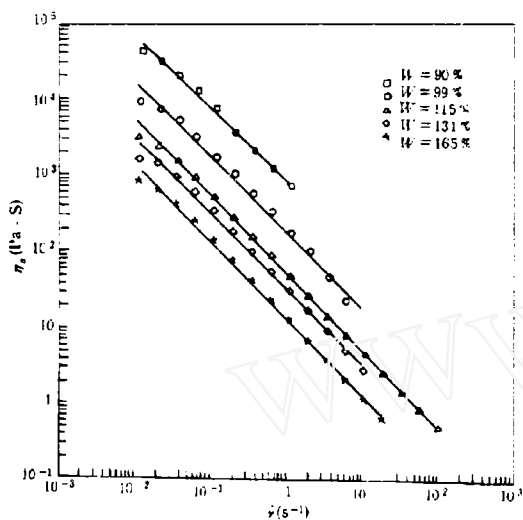


图6 连云港淤泥表现黏性系数 η_B

$$\eta_a = \alpha_a \dot{\gamma}^{\beta_a} \quad (5)$$

其系数 β_a 随含水量变化较小, 近似取为常值. 而系数 α_a 则为含水量的幂律函数, 以下述经验公式表示

$$\left. \begin{aligned} \alpha_a &= 8.499 \times 10^{10} W^{-3.6045} \\ \beta_a &= 0.8924 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2.5 淤泥的弹性模量

连云港淤泥弹性模量的实验结果示于图7, 在本实验频率范围, 频率的改变对弹性模量的影响很小. 最主要的影响参数是含水量. 因此连云港淤泥的弹性模量与含水量关系可近似表示为

$$G = 8.46 \times 10^{16} W^{-6.83} \quad (7)$$

与此同时, 本文对同一地区原状土^[8](Pt3[#] 钻井位 5.6 米深处样品土 $\rho_m = 1.66\text{g/cm}^3$) 用土力学加载方法进行测试. 在单调加载工况下, 淤泥弹性模量为 $2.8 \times 10^5\text{Pa}$, 当往复加载之后, 其值为 $3.96 \times 10^5\text{Pa}$, 而用本仪器测量得到 $6.5 \times 10^5\text{Pa}$. 后两个结果很相近. 因此本方法测量的结果是很可靠的, 而且这种方法可以测量较高含水量淤泥样品. 而用土力学方法则无法实现. 本文结果与中野晋^[7] 等人对高岭土所得到的结果非常一致, 都证明淤泥弹性模量对含水量的改变非常敏感.

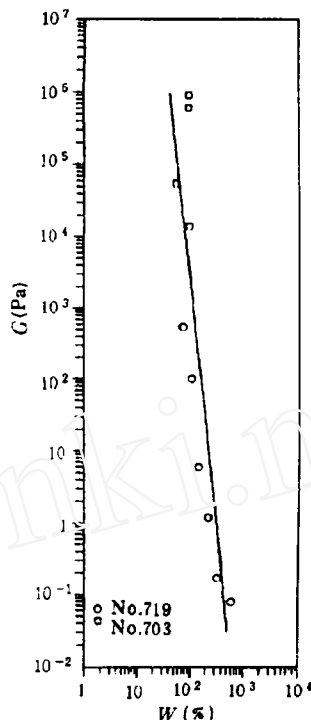


图7 连云港淤泥弹性模量 G

3. 结论

(1) 西墅淤泥平均比重为 2.75, 表层淤泥含黏土量约 37%. 天然容重约在 $1.48 \sim 1.71\text{g/cm}^2$ 范围之内.

(2) 在低剪切率范围, 淤泥流变特性随剪切率变化呈现三种性质, 在很低剪切率情况下, 淤泥剪应力基本保持不变, 随剪切率增高, 表现为宾汉流特性、剪切率再提高则呈现出宾汉伪塑性体特征. 其临界剪切率值与淤泥含水量有关, 随含水量减小而增大.

(3) 淤泥宾汉模型的屈服应力和宾汉黏性系数以体积容重 C_v 指数增长.

(4) 淤泥的弹性模量对其含水量的改变非常敏感, 连云港淤泥的弹性模量随含水量的变化关系与高岭土的结果非常一致。

参 考 文 献

[1] Thomas D G. Non-Newtonian suspensions, part 1: physical properties and laminar transport characteristics. *Ind Eng Chem*, 1963, 55(11): 18-79
 [2] Street N. Viscosity of clay suspensions. *World Oil*, 1958, 147(7): 151-156
 [3] 钱宁. 高含沙水流运动. 北京: 清华大学出版社, 1989: 206
 [4] O'Brien J S, Julien P Y. Laboratory analysis of mud-

flow properties. *J Hydr Engrg, ASCE*, 1988, 114(8): 877-887
 [5] Julien P Y, Lan Yongqing. Rheology of hyperconcentrations. *J Hydr Engrg ASCE*, 1991, 117(3): 396-353
 [6] 鹤谷広一, 中野晋, 鷹滨润. 波と底泥の動的相互作用によ波高減衰と底泥運動. 第 33 回海岸工学講演会論文集, 1986: 317-321
 [7] 中野晋, 伊东信幸. 弾性な考慮した底泥床上的波高衰計算手法と現地海域への適用. 第 37 回海岸工学論文集, 1990: 220-224
 [8] 黄振华, 张袁备, 呼和敖德. 连云港西墅地区淤泥特性. 中科院力学所科技报告, STR-92019, 1992, 15
 (1992 年 12 月 24 日收到第一稿,
 1993 年 3 月 16 日收到修改稿)

抽油杆杆体及过渡段的剩余寿命研究

王国丽 魏嘉荃 钟伯明
 (大庆石油学院, 大庆 151400)

摘要 本文通过抽油杆材料疲劳裂纹扩展速率及抽油杆工作载荷的研究, 对抽油杆杆体及过渡段存在表面缺陷时的剩余寿命进行了分析、推导, 计算, 得到了便于工程应用的剩余寿命图线, 为抽油杆缺陷评定提供了依据。

关键词 抽油杆, 表面缺陷, 剩余寿命

1. 前 言

抽油杆的疲劳断裂是抽油杆的常见失效原因之一. 抽油杆在加工和工作过程中不可避免地会出现这样或那样的缺陷, 如锻造缺陷, 热处理淬火引起的缺陷, 以及划痕和裂缝等等, 均成为裂纹源. 在交变载荷作用下, 如果裂纹尖端应力强度因子幅值 $\Delta K_I < \Delta K_{Ih}^{[1]}$ 门槛值, 裂纹不扩展, 我们称为无限寿命; $\Delta K_I > \Delta K_{Ih}$, 裂纹就会缓慢扩展, 当扩展到失稳临界尺寸 a_c 简称临界尺寸的剩余寿命, 可通过疲劳裂纹扩展规律来预测, 从而可根据预测结果安排检修计划.

描述裂纹疲劳扩展规律常用 Paris 表达式: $da/dN = m\Delta K_I^n$, m 、 n 是材料常数, 通过实验确定^[1]; $\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min}$ 是应力强度因子幅

值. 在抽油杆不同位置的不同裂纹形状, 有不同的表达式, da/dN 是交变载荷循环一次的裂纹扩展量, 单位是 mm/次. 这样, 抽油杆各部分有初始表面缺陷 a_0 时的剩余寿命

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{m\Delta K_I^n} \quad (1)$$

本文研究了抽油杆杆体和过渡段存在半椭圆表面裂纹和环形裂纹时的剩余寿命.

2. 抽油杆的工作载荷

抽油杆的工作载荷根据 Goodman 最大许用应力进行计算.

Goodman 最大许用应力公式^[2]

$$S_T = \frac{T}{4} + 0.5625S_{\min} \quad (2)$$

应力比 $R = S_{\min}/S_{\max} = 0.3$ 时

$$T = 775\text{MPa} \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 得

$$S_A = \frac{1}{4} \times 775 + 0.5625 \times 0.3S_{\min} \leq S_{\max} \quad (4)$$

由式 (4) 得

$$S_{\max} = 233\text{MPa}$$