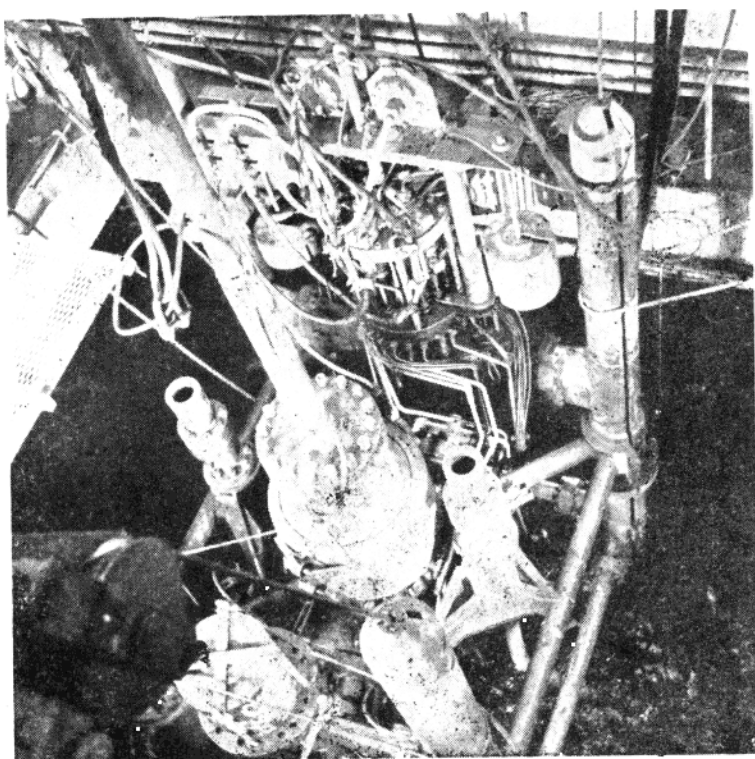


石油钻探技术

第二辑

1980

地质出版社



浮船钻井
防喷器组进入水中
王美德 摄

石油钻探技术

第二辑（总24）

中国地质学会石油地质专业委员会主办

《石油钻探技术》编辑部编辑

（限国内发行）

地质出版社出版

（北京西四）

地质印刷厂印刷

（北京安德路47号）

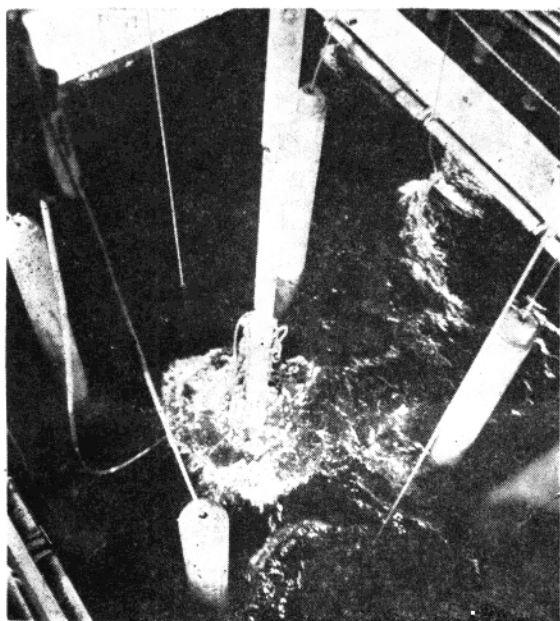
新华书店 发行所发行·各地新华书店经售

1980年12月北京第一版·1980年12月北京第一次印刷

印数2,530册·定价0.30元

统一书号：15038·新606

科技新书目：188—123



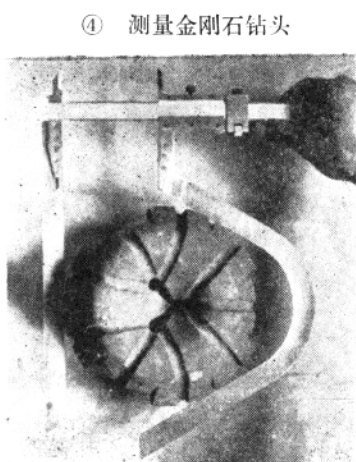
① 浮船钻井
导向架进入水中
王美德摄



③ 测量三牙轮钻头

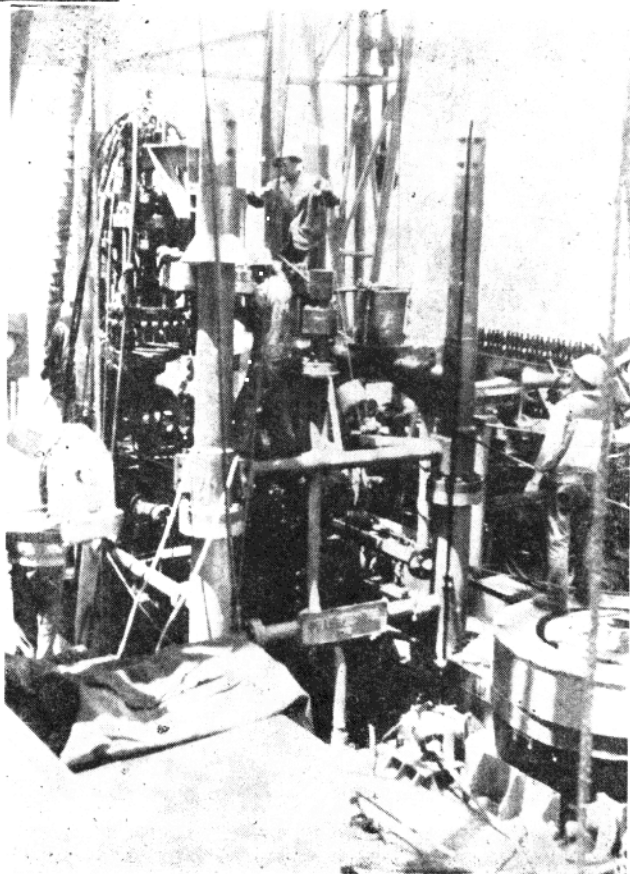
张界如供稿

③、④ 为八普改制的量
测钻头直径的量具



④ 测量金刚石钻头

张界如供稿



② 浮船钻井
防喷器组在钻台中

王美德摄

目 录

钻井工艺

- 喷射式钻井的初步实践.....地质部第三普查勘探大队 杨嘉琦 (1)
- 两种水力理论的对比.....地质部第一普查勘探大队 杨长城 (6)
- 漏失地层钻进泥浆胶凝性能的调整.....杨兴安 (8)

固井与试油

- 封·密西斯 (Von·Mises) 椭圆的探讨.....刘祖煌 (12)
- 一次表层套管的固井事故.....地质部第五普查勘探大队 王祖模 (19)
- 电缆投送装置.....江苏省石油试采大队 徐宗翹 (20)

设备与工具

- MB-820柴油机喷油定时器专用调试设备及调试方法徐宝荣 (27)
- 介绍测量外径的一种方法.....贵州省第八普查勘探大队 张界如 (30)
- 提高井底打开式测斜仪成功率的几点作法.....广东七三五地质队 探矿科 (32)

译文

- 金刚石钻头性能和寿命的模型.....西南石油学院 李天增译 (33)
- 钻井队如何节省柴油..... (41)
- 橡胶注水泥套管鞋..... (43)

海上钻井

- 海上钻井知识
- 三、浮船钻井程序.....席嘉珍 (44)

简讯

- 50,000 (15000米)英尺钻机..... (31)
- 压裂施工规模的世界纪录..... (42)

喷射式钻井的初步实践

地质部第三普查勘探大队 杨嘉琦

近几年来,我国正在大力推广喷射钻井工艺技术。当前,钻井队只要具备一些基本条件,如喷射式钻头、耐高压的地面管汇和适当功率的泥浆泵,都可试行。我队在内蒙古地区伊七井试用喷射钻井工艺完成了一口3112米的普查井,取得了比较好的效果。平均机械钻速(镶齿钻头)较全地区(大部是铣齿钻头)提高62%,较79年同深度的井提高69%。该井所用设备是F-200型钻机,另配ZPN-630型机泵组一套,罗马尼亚制造的泥浆固控设备。所用钻头为瑞德公司8 $\frac{1}{2}$ "镶齿钻头,使用4 $\frac{1}{2}$ "内平钻杆,7"和6 $\frac{1}{4}$ "钻铤。

目前,喷射式钻井的理论比较多。就泵功率分配方式来讲,就有最大钻头水马力、最大水眼冲击力和最大喷射速度三种理论;就其水力计算来讲,公式也比较繁杂,特别是泵压沿程损耗计算,涉及的参数与变量较多,计算公式也有多种。在生产实践中由于井场条件所限,如普遍没有旋转粘度计,泥浆塑性粘度与动切力无法测定,许多公式,甚至计算图表都用不上。另外没有准确的流量计,最主要的一个参变数——泥浆排量Q也无法测得准确,致使计算结果与实际出入较大。例如计算钻头水马力常用下式:

$$N_b = 0.11 \frac{\rho \cdot Q^3}{c^2 \cdot d_s^5}$$

N_b ——钻头水马力;

ρ ——泥浆密度,克/cm³;

Q ——排量,公升/秒;

c ——流量系数;

d_s ——喷嘴相当直径,厘米

设 $c=0.97$, $d_s=2$ 厘米, $\rho=1.15$, $\phi 150$ 毫米缸套,单泵。

从公式中可以看出,钻头水马力与 Q^3 成正比,而井场测量泵排量 Q 可能出现的误差有两点,一是泵容积系数不清楚,二是泵冲数不准(同时两个人数拉杆冲数所得结果经常误差一冲)按上式所给的数据,若容积系数取1、0.9和0.8,所得钻头水马力分别为126.96马力、88.62马力和65.24马力;若泵冲数取60和61次/分,所得钻头水马力分别为126.96马力和133.38马力。从以上计算的结果可以看出,由于泵容积系数不清,计算钻头水马力出现的误差最高是95%,由于泵冲数不准造成的误差为5%,取极限数值,两者累积的最大误差可达104%,当然实际工作中不可能达到这么大的误差。但由于泵容积系数不清造成的计算误差是相当可观的,不能忽视。

在井场为了能够较准确而又较简便地作出喷射式钻井水力设计,应该采取实测与计算相结合的方法,以下是本井进行水力设计的思路和程序。

一、首先必须确定的几项原则

1. 泵排量

依据泥浆最低上返速度的要求,首先确定最低排量。针对本区地层特点,参考过去岩屑录井试验的砂样迟到时间,在使用22~25秒稍具初终切力的泥浆条件下,上返速度达到0.7米/秒时,岩屑运载比超过50%,因

此确定环空泥浆最低上返速度为 0.7 米/秒, 相应的最低排量为 19 公升/秒, 从而得知最小的缸套尺寸为 $\phi 150$ 毫米单泵即可满足要求。下一步再确定最大排量。根据钻井实践经验, 泥浆上返速度不宜超过 1.2 米/秒, 其相应的排量为 31.7 升/秒, 用 $\phi 170$ 毫米活塞即可。从本地区地层特点分析, 自地表到井深 1100 米为疏松的白垩系砂岩, 机械钻速可达 30 米/时, 泵排量过低往往因出口泥浆比重高造成加单根倒喷现象。而白垩系砂岩以下的地层机械钻速一般不超过 5 米/时, 同时考虑到松软地层射流有直接破碎岩石的因素, 从而确定本井千米以上井段用 $\phi 170$ 毫米缸套, 千米以下用 $\phi 150$ 毫米缸套。

2. 钻头所需最低水马力

(1) 根据富尔顿曲线图, 当采用钻压 18 吨, 转盘转速 60 转/分时, 相应的钻头最低水马力是 200 马力。

(2) 根据水力可钻性曲线查得机械钻速 5 米/时钻头水马力 85~209 马力, 机械钻速 25 米/时时, 钻头水马力为 130~448 马力。

(3) 根据经验公式, 井底每平方英寸的水马力为进尺数 (英尺) 的平方根估算, 机械钻速 5 米/时、25 米/时相应的最大钻头水马力是 229 马力和 510 马力。

由于我们没有实践经验, 参照上述三种计算结果确定在千米以上井段钻头水马力 350~400 马力, 千米以下井段不低于 200 马力。

钻头所需水马力确定后, 可以初步估算用几台泵打钻。按照合理分配泵功率的原则, 钻头泵压降占总泵压的 50~60% 之间比较合适。井场所用 ZPN-630 型泥浆泵 $\phi 150$ 毫米缸套最高泵压是 150 kg/cm², $\phi 170$ 毫米缸套是 113 kg/cm², 按常用泥浆性能查表得, 井深 3100 米排量 20 升/秒和井深一千米排量 32 升/秒的泵压沿程损消分别是 64 kg/cm² 和 44 kg/cm², 剩余泵压均超过

50%, 因此初步确定用单泵打钻。

3. 选用几个喷嘴

本井选用两个喷嘴, 其原因有两点。第一是两个喷嘴射流压力不平衡, 有利于排除钻头中心部位的岩屑, 改善镶齿钻头牙轮壳体中心部分先期冲蚀掉齿现象; 第二是两个喷嘴直径大一些, 可减少堵塞现象。

二、水力计算程序

以上三项原则确定之后, 最主要的问题是计算喷嘴直径。

1. 计算喷嘴组合的钻头压降和水马力

把已有不同直径的喷嘴组成各种形式的组合, 按泵常用冲数的理论排量计算钻头泵压降和水马力列于表上, 供实测泵压时选择参考。使用的计算公式如下:

$$P_b = 0.82 \frac{\rho \cdot Q^2}{c^2 d_e^4} \quad N_b = \frac{P \cdot Q}{7.5}$$

在运用上述公式时 Q 、 ρ 和 d_e 是变数, 其中 d_e 只有几种尺寸, 在使用每组喷嘴时它是固定值。 ρ 在一口井如地层无特殊压力异常带其变化不大, 可视为常数。例如 ρ 值 1.1、1.10 增加到 1.20, 计算的结果对 P_b 和 N_b 值的影响是 9% 左右, 如果 ρ 取平均值则影响不到 5%, 故可略而不计。因此公式

$$P_b = 0.82 \frac{\rho Q^2}{c^2 d_e^4} \text{ 可简化为 } P_b = K Q^2$$

在一定的喷嘴组合情况下 K 是常数, P_b 与 Q^2 成简单的函数关系, 计算工作就简单多了。表 1 是本井所用 $\phi 150$ 毫米缸套各种喷嘴组合的钻头压降与水马力。

2. 实测钻头泵压降验证计算结果

把钻头接在方钻杆下部, 在不同泵冲数下记录立管压力表读数, 该读数包括立管至方钻杆下部的压力损耗, 但因排量不大该压力损耗数值很低, 立管压力表读数可当作钻头压力降, 实用中无什么影响。

表 2 为三种喷嘴组合实测值与计算值对比情况。

不同喷嘴组合钻头泵压降与水马力

表 1

(φ150毫米/缸套, 容积系数=1, C=0.97, ρ1.12)

喷嘴组合		$3 \times \frac{16}{32}$	$2 \times \frac{16}{32}$ $1 \times \frac{14}{32}$	$1 \times \frac{16}{32}$ $1 \times \frac{14}{32}$	$3 \times \frac{14}{32}$	$1 \times \frac{12}{32}$ $2 \times \frac{14}{32}$	$2 \times \frac{16}{32}$ $1 \times \frac{14}{32}$	$2 \times \frac{12}{32}$ $1 \times \frac{14}{32}$	$3 \times \frac{12}{32}$ $1 \times \frac{16}{32}$	$1 \times \frac{12}{32}$ $2 \times \frac{14}{32}$	$1 \times \frac{12}{32}$ $1 \times \frac{14}{32}$	$2 \times \frac{12}{32}$	
喷嘴相当直径cm		2.20	2.11	2.02	1.92	1.83	1.80	1.74	1.65	1.59	1.57	1.46	1.34
K值($K = 0.82 \frac{\rho}{C^2 d_s^5}$)		0.0417	0.0493	0.0587	0.0719	0.0871	0.0931	0.1065	0.1319	0.1529	0.1607	0.2152	0.3034
冲数 (次/分)	排量 (公升/秒)	钻头泵压降 (kg/cm ²)											
		钻头水马力 (马力)											
45	18.54	14.33	16.95	20.18	24.71	29.94	32.00	36.61	45.34	52.56	55.24	73.97	104.29
		35.42	41.90	49.89	61.08	74.01	79.10	90.50	112.08	129.93	136.55	182.85	257.81
50	20.60	17.70	20.92	24.91	30.51	36.96	39.51	45.19	55.97	64.89	68.20	91.32	128.75
		48.68	57.53	68.50	83.90	101.64	108.65	124.27	153.92	178.45	187.55	251.13	354.06
55	22.66	21.41	25.31	30.14	36.92	44.72	47.81	54.69	67.73	78.51	82.52	110.50	155.79
		64.66	76.44	91.02	111.50	135.05	144.39	165.16	204.55	237.10	249.21	333.71	470.49
60	24.72	25.48	30.13	35.87	43.94	53.23	56.89	65.08	80.24	93.43	98.20	131.5	
		83.98	99.31	118.23	144.83	175.45	187.51	214.50	264.47	307.95	323.67	433.42	
65	26.78	29.91	35.36	42.10	51.56	62.47	66.77	76.38	94.60	109.66	115.25		
		106.78	126.24	150.30	184.07	223.02	238.37	272.68	337.72	391.49	411.44		

钻头压力降实测与计算对比表

表 2

(φ150毫米缸套)

喷嘴组合与泵冲数		实 测 数 值		计 算 数 值		对 比 情 况 (计算值增加百分比)	
喷 嘴	冲 数	钻头泵压降 (kg/cm ²)	*钻头水马力 (马力)	钻头泵压降 (kg/cm ²)	钻头水马力 (马力)	钻头泵压降	钻头水马力
3×14/32	60	40	125.81	43.94	144.83	10%	15%
3×14/32	65	50	175.80	51.56	184.10	3%	4.7%
2×14/32	44	50	117.33	52.82	127.68	5.6%	8.8%
2×14/32	48	60	151.56	62.87	165.81	4.8%	7.3%
2×14/32	60	91	288.77	98.2	323.67	8%	12%
2×14/32	64	100	332.67	111.60	392.39	11%	18%
2×14/32	65	105	357.81	115.25	411.44	10%	15%
12/32+14/32	45	70	168.37	73.97	182.85	5.6%	8.6%
12/32+14/32	50	82	213.42	91.32	251.13	11.4%	18%
12/32+14/32	56	102	296.07	114.54	352.33	12.3%	19%
12/32+14/32	64	132	435.95	149.65	526.17	13.4%	20%

* 实测钻头水马力是按实测泵压推算而得。

伊七井喷射式钻进钻头使用综合表

表 3

地 层	井 段 (米)	钻头 类型	喷嘴 组合	排量 公升/ 秒	总泵压 P _s kg/cm ²	钻头泵 压降 P _b kg/cm ²	P _b /P _s	上返 速度 米/秒	喷射 速度 米/秒	钻头水 马力	进尺 (米)	纯钻进 (小时)	机械 钻速 米/时	钻压 (吨)	转数 转/分	泥 浆 性 能					
																比重	粘度 (秒)	失水 c.c/ 30分	泥井 m/m	pH 值	切 力 初 终
志丹群粗中砂岩 砾岩、泥岩	383.75 1051.45	FP-622 × 32	16 32	31.67 34.4	110	85.87 101.72	0.78 0.92	1.20 1.30	121 132	351 451	667.70	49:45	13.42	16 18	50 57	1.08 1.13	24 32	3.5 6	0.5 1		0 0
	1051.45 1065.53		14 32	33.85 36.04	107	75.79 85.92	0.71 0.8	1.28 1.37	113 121	328.38 396.36	14.08	4:40	3.06	12 13	60 62	1.09 1	25 30	3.5 5	0.5 0.8	10	0 0
安定组砾状粗砂 岩、细砂岩	1065.53 1116.30	FP-72	14 32	28.84	138	122.97	0.89	1.09	144.6	453.95	50.77	15:30	3.08	8 18	60 62	1.11 1.12	30 22	5			3.6 5.6
	1116.30 1116.97		14 32	26.37 28.02	125 140	103 116	0.82 0.83	1.0 1.06	132 140	346 416	662.39	87:20	7.59	14 18	56 66	1.12 1.14	22 26	4 6	1	8 10	
直罗延安组砂岩 泥岩、页岩	1779.36 1779.36	FP-532 × 32	14 32	27.19 27.6	130 140	109 113	0.84 0.81	1.03 1.04	136 139	379 399	449.72	57:50	6.63	18 16	56 49	1.10 1.15	25 35	4 5	0.8 1	9 8	0 0
	2228.08 2234.46		14 32	22.25 25.54	110 130	73 96	0.66 0.74	0.84 0.97	112 128	208 314	105.73	55:50	2.70	16 16	54 50	1.13 1.17	24 30	4 5	0.7 1	10 10	0.4 5.6
延长组块状砂岩 二马营组砂泥岩	2385.19 2385.19	FP-623 × 32	12 32	21.84 25.54	100 135	58 79	0.58 0.59	0.83 0.97	130 115	162 258	277.31	80:45	3.43	16 16	50 57	1.14 1.18	25 35	4 5	0.5 1.0	9 10	3.9 7.5
	2682.50 2670.75		12 32	25.54 23.49	135 125	79 82	0.59 0.66	0.97 0.89	115 118	258 247	277.31	80:45	3.43	16 16	57 54	1.18 1.13	35 23	5 4.4	1.0 0.8	10 10	0.4 7.5
刘家沟组合砾砂 岩、泥岩	2670.75 2749.69	FP-532 × 32	14 32	23.49 25.13	125 140	82 93	0.66 0.61	0.89 0.84	118 112	247 208	78.94	20:10	3.90	16 14	54 51	1.13 1.12	23 27	4.4 4	0.8 0.8	10 9.5	0 0.39
	2749.69 2771.43		14 32	25.13 22.25	140 120	93 73	0.61 0.64	0.84 0.94	112 124	208 285	78.94	20:10	3.90	16 16	56 66	1.14 1.14	30 35	7.8 6	1 1	2.4 9.6	
同 上	2771.43 2915.0	FP-622 × 32	14 32	22.25 24.72	120 140	73 90	0.61 0.64	0.84 0.94	112 124	208 285	143.57	84:30	1.70	14 16	51 66	1.12 1.14	27 35	4 6	0.8 1	9.5 10	0 0.81.2
	2915.0 2917.61		14 32	24.72 21.0	140 120	90 87	0.64 0.73	0.94 0.80	124 122	285 234	143.57	84:30	1.70	16 12	66 50	1.14 1.12	35 25	6 5	1 1	10 1	0.81.2
孙家沟组泥 岩砂岩	2917.61 3015.09	FP-62	14 32	21.0 24.72	120 140	87 121	0.73 0.86	0.80 0.94	122 143	234 383	97.48	94:00	1.04	12 12	50 60	1.12 1.14	25 30	5 6			
	3015.09 3065.45		12 32	24.72 21.0	140 120	121 87	0.86 0.73	0.94 0.80	143 122	383 234	97.48	94:00	1.04	12 12	60 50	1.14 1.12	30 25	6 5			
山西太原组泥岩 砂岩、寒武 系石英砂岩	3015.09 3065.45	M89F 2 × 32	14 32	24.30	135	87	0.64	0.92	122	271	43.60	48:30	0.90	14 14	50 57	1.13 1.14	29 32	5 7	1		
	3065.45 3077.41		14 32	21 22	100 130	35 39	0.35 0.30	0.80 0.86	77 81	94 99	43.60	48:30	0.90	14 13	57 57	1.14 1.15	32 28	7 4			
前寒武系石 英砂岩	3077.41 3102.64	FP-72	12 32	22	130	39	0.30	0.86	81	99	25.23	17:30	1.44	12 13	57	1.15	28	4	1		
	3102.64 3102.64		12 32	22.64	130	20	0.15	0.86	57	58	25.23	17:30	1.44	13 12	57	1.15	28	4	1		
同 上	3102.64 3112.06	FP-723 × 32	16 32	22.64	130	20	0.15	0.86	57	58	9.24	6:10	1.50	12	55	1.14					
	3112.06 3112.06		16 32	22.64	130	20	0.15	0.86	57	58	9.24	6:10	1.50	12	55	1.14					

通过实测发现计算的钻头泵压降较实测的高3~13.4%，钻头水马力高4.7~20%（由于实测泵冲数与泵压表读数误差，造成计算值增加比例在一定范围内波动）并可推算出泵的容积系数是0.98~0.94。

根据实测与计算对比，在生产中就不必每换一种喷嘴组合都要进行实测钻头泵压降，可以利用计算的钻头泵压降乘0.92，水马力乘0.89作为实际值。

3. 钻进中将总泵压减去钻头泵压降即等于沿程损耗（可作一次不同排量下的总泵压测定），根据实测结果可很快算出不同排量下的每米钻杆内外循环压耗，列表备查。在计算每米钻杆循环压耗前，先把井下钻铤长度按钻铤与钻杆循环压耗的比值折算成相当钻杆长度。

有了以上实测与计算的结果就可很容易地进行水力计算，正确选择喷嘴尺寸、推算任一井深泵功率分配情况，满足喷射式钻井的要求。

按照上述水力计算程序和方法，本井所用钻头的综合情况列于表3。

通过一口井的初步实践，对本井及今后开展喷射式钻井的几点分析认识：

1. 本井喷射式钻进取得比较明显的效果是机械钻速提高幅度大，和全区对比平均提高62%，和邻井（距本井30米的一口井）相比，同样使用的都是美国镶齿钻头，由于邻井水马力不足，机械钻速比本井低26%。

2. 为适应高泵压钻进必需解决泵活塞问题。本井用的是Y₃-3泵整体式活塞很不耐用，共消耗126个，平均每个活塞只能使用六个小时，有时造成停钻修泵，严重阻碍

了喷射式钻进的进行。

3. 最后两只钻头未达到喷射式钻井的要求，主要原因是泵活塞不耐用，井队不愿再用高泵压打钻。可明显看出这两个钻头所获得的各项指标都不好。

4. 选用两个喷嘴是可行的，未发生什么不良影响，但钻头牙轮壳体中心部位先期冲蚀现象未得到明显的改善。

5. 方钻杆下部应装过滤器防止活塞碎胶皮堵水眼。

6. 低返速钻井是可行的。本井上返速度一般保持在0.8~1米/秒，今后尚可适当降低，保持在0.6~0.7米/秒，同时进一步缩小喷嘴尺寸，维持一定的钻头水马力，以减少泵压沿程损耗，节省动力消耗。

7. 各井队应配备旋转粘度计。一方面可摸索出与实际近似的泵压沿程损耗计算方法，另一方面能够及时调正泥浆塑性粘度与动切力值，掌握泥浆流型，作到心中有数。

8. 钻头水马力多大合适不易搞准确。应当先确定钻头最低水马力，在钻进中根据进尺快慢，适当超出钻头所需最低水马力数值即可。参照现有资料，把钻头水马力按井底面积每平方厘米控制在0.6~1马力1平方厘米比较合适。当前，喷射式钻井要求充分利用泵功率的提法是否恰当应当认真研究，对于合理地使用与分配泵功率、如何防止浪费动力降低成本应引起重视，要进一步摸索。本井一直采用单泵打钻，而且一个泵的功率也未全部用完，井深2300米以前打钻时开一部柴油机，这无疑比用双泵双车节省很多燃料，同时维修费用也低。

（上接第32页）

每次灌墨水前用清水检验，达到：1) 活塞密封不漏，2) 虹吸时间30秒以上，3) 用手压住冲头骤然松开能迅速弹起，然后才灌墨

水、穿销钉、组装待用。从而有效地避免了由于活塞密封不严或因活塞杆变形、冲头弹簧弹力不足等原因而造成的测斜失败的问题，确保了每次投测的成功。

两种水力理论的对比

地质部第一普查勘探大队 杨长城

摘要: 本文试图通过简单的数学运算导出最大水马力与最大冲击力两种理论的水力参数的数学关系, 由此评价它们的优劣。

一、条 件

在进行水力设计时, 大多数情况采用降冲次法维持总压力降 P_t 等于泵的许用压力。且当井身结构、钻具尺寸、井深、泥浆性能、设备等情况一定时, 循环管路的总压力损失系数 K 也应是一个常数。因此可以假定:

$$P_t = \text{常数}, P_t = KQ^n$$

其中 K 、 n 为常数。

根据最大水马力理论有最优排量:

$$Q_{nk} = \sqrt{\frac{P_t}{3K}}$$

根据最大冲击力理论则有最优排量:

$$Q_{fk} = \sqrt{\frac{P_t}{2K}}$$

所以:

$$Q_{nk} = \sqrt{\frac{2}{3}} Q_{fk} = 0.826 Q_{fk} \quad (1)$$

又因为, 最大水马力理论的钻头压力降 $P_{nb} = \frac{2}{3} P_t$, 最大冲击力理论的钻头压力降 $P_{fb} = \frac{1}{2} P_t$ 。所以:

$$P_{nb} = \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{2} \right) P_{fb} = \frac{4}{3} P_{fb} \quad (2)$$

将 (1)、(2) 式代入钻头压力降公式:

$$P_b = 0.82 \frac{\rho Q^2}{c^2 n^2 d^4} \quad (3)$$

当钻井条件一定时 ρ 、 c 、 n 均为常数, 设

$$\alpha = 0.82 \frac{\rho}{c^2 n^2} = \text{常数}$$

根据公式 (3) 可以导出最大水马力理论的最佳水眼直径 d_n 与最大冲击力理论的最佳水眼直径 d_f 的关系如下:

$$d_n = \sqrt[4]{\alpha \cdot \frac{Q_{nk}^2}{P_{nb}}} = \sqrt[4]{\alpha \cdot \frac{(\sqrt{2/3} Q_{fk})^2}{4/3 P_{fb}}} = \sqrt[4]{1/2} d_f = 0.843 d_f \quad (4)$$

从 (1) 式和 (4) 式可以看出: 两种不同的水力理论所需的最佳排量和水眼尺寸是不同的。实际上, 在水力设计中只有排量和水眼尺寸是变量, 至于钻头压力降、喷射速度、钻头水马力和冲击力不过是参变量, 它们随排量和水眼尺寸的变化而变化。因此, 可以通过两种水力理论的最佳排量和水眼尺寸的关系推算出两种水力理论的其它水力参数的关系。

二、推 算

钻头水马力 $N_b = \frac{P_b Q}{7.5}$ 。将公式 (1)、

(2) 代入可以得出最大水马力理论的钻头水马力 N_{nb} 与最大冲击力理论的钻头水马力 N_{fb} 的关系:

$$N_{nb} = \frac{P_{nb} \cdot Q_{nk}}{7.5} = \frac{4/3 P_{fb} \cdot \sqrt{2/3} Q_{fk}}{7.5} = 1.09 N_{fb} \quad (5)$$

钻头喷射速度 $V_n = 12.74 \frac{c \cdot Q}{n \cdot d^2}$ 。将 (1)、

(4) 式代入可以得出最大水马力理论的钻头喷射速度 V_{nn} 与最大冲击力理论的喷射速

度 $V_{f\pi}$ 的关系:

$$V_{n\pi} = 12.74 \frac{c \cdot (\sqrt{2/3} Q_{f\pi})}{n \cdot (\sqrt{1/2} d_f)^2} = \sqrt{4/3} V_{f\pi} \\ = 1.16 V_{f\pi} \quad (6)$$

冲击力 $F = \frac{n\pi f_0}{g} V_{n\pi}^2$ 。式中 n 、 r 、 g 为

常数, $f_0 = \frac{\pi}{4} d^2$ 。将(4)式、(6)式代入可

以导出最大水马力理论的钻头冲击力 F_n 与最大冲击力理论的钻头冲击力 F_f 的关系:

$$F_n = \frac{n\pi}{4g} d_n^2 \cdot V_{n\pi}^2 = \frac{n\pi}{4g} (\sqrt{1/2} d_f)^2 \cdot (\sqrt{4/3} V_{f\pi})^2 \\ (\sqrt{4/3} V_{f\pi})^2 = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \frac{4}{3} F_f \\ = 0.93 F_f \quad (7)$$

三、对 比

从上面的结果看,无论是冲击力、喷射速度还是钻头水马力两种理论的数值相差不大。必须指出这一对比的条件是:即在钻井的某一瞬间,钻井条件完全相同时,采用不同的水力理论在钻头水眼处所获得的水力参数的关系。

就喷射钻井的原理而言,增加冲击力、喷射速度以及钻头水功率的目的在于清岩与破岩。因此必须计算射流对井底的水力参数,才能正确比较出两种水力理论的优劣。

许多资料表明:净化井底主要靠漫流,而漫流的流速与动量的平方根成正比。射流中心线的流速 V_l 与 $\frac{L}{d}$ 成反比,即:

$$V_l \propto \frac{1}{\frac{L}{d}} V_0$$

式中: V_l ——射流对井底的喷射速度;

L ——喷嘴高度;

d ——喷嘴直径;

V_0 ——喷嘴出口处射流速度。

当喷嘴至井底的距离 L 一定时,增加喷嘴直

径 d 可以使井底获得较高的喷射速度 V_l 。根据本文公式(4)和公式(6)两种水力理论所获得的 V_l 则不同,其值为:

$$V_{nl} = \frac{\beta d_n}{L} V_{n\pi} = \frac{\beta \sqrt{1/2} d_f}{L} \sqrt{\frac{4}{3}} V_{f\pi} \\ = \sqrt{1/2} \cdot \sqrt{\frac{4}{3}} V_{fl} = 0.978 V_{fl} \quad (8)$$

β ——比例系数

公式(8)表明:最大水马力理论在井底所获得的喷射速度 V_{fl} 比最大冲击力理论在井底获得的喷射速度 V_{nl} 反而小。加之 $Q_{n\pi} = \sqrt{2/3} Q_{f\pi}$,最大水马力理论在井底所获得的动量比最大冲击力理论就要小很多了,其值为:

$$Q_{n\pi} \cdot V_{nl} = \sqrt{2/3} \cdot \sqrt{1/2} \cdot \sqrt{4/3} Q_{f\pi} V_{fl} \\ = 0.81 Q_{f\pi} V_{fl}$$

因此最大水马力理论的清岩作用不如最大冲击力理论好。

国外资料表明:井底所获得的冲击压力(死点处的压力) $P_m = 0.00806 \rho V^2 M^2$

式中: ρ ——射流密度;

V ——喷嘴处射流流速;

$M = \frac{d + 2L_0 \tan(\theta/2)}{d + 2L \tan(\theta/2)}$ 为无因次数,其

中:

d ——喷嘴直径;

L_0 ——等速核长度;

L ——喷嘴至井底的高度;

θ ——射流扩散角。

当 L_0 、 L 、 θ 为常数,且 $L > L_0$ 时, $M < 1$ 。增加喷嘴直径 d 时, M 值也将增加,同时 P_m ——井底获得的冲击压力也增加并有如下关系:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} M = 1$$

即 d 趋于无穷大时 M 的极限为1。这一关系说明由于最大冲击力理论的喷嘴直径 d_f 大于最大水马力理论的喷嘴直径,其冲击压力也将得到改善。

漏失地层钻进泥浆胶凝性能的调整

杨 兴 安

钻井过程中,井内泥浆柱的压力一般都略大于地层流体压力。当地层裂隙发育、孔洞尺寸比较大时,井壁表面便不能形成泥饼,即发生井漏。泥浆漏失的快慢和多少是同泥浆柱与地层流体间的压力差值、地层孔洞、裂隙的发育程度,尺寸大小和泥浆性能等因素有关。在遇到漏失时,降低泥浆比重以减少对漏失地层的压力,或采用架桥堵漏材料堵塞地层孔洞和裂缝,使其尺寸变小以减少漏失。这些措施已被公认是正确的并经常被采用。但是对泥浆流动性能的调整,特别是与泥浆流动性能密切有关的胶凝性能——屈服值和静切力的调整尚有不同的认识。本文仅就漏失地层泥浆胶凝性能的调整进行一些讨论。

屈服值和静切力都是反映泥浆胶凝性能的参数。屈服值是泥浆流动状态下胶凝强度的量测。静切力是泥浆充分静止后胶凝强度的量测。一般说来泥浆胶凝强度增加,屈服值和静切力也相应增大。

长期以来有不少钻井和泥浆工作者主张在漏失地层提高泥浆静切力,增加其胶凝强度。认为提高泥浆静切力有助于减少和防止漏失。而对由于提高泥浆切力引起环空压降增加,从而增大对漏失地层的压力,加剧漏失这一点却很少考虑。因此,必须看到提高泥浆切力对处理漏失有利和不利两个方面。

(一) 对提高泥浆静切力处理漏失机理的探讨

1. 提高泥浆静切力后,漏入地层泥浆将形成很强的胶凝结构,推动其流动的压力也将增加,这有助于减少和防止漏失。

苏联学者 P. И 希辛柯在所著的泥浆水力学一书中,讨论了U形管中泥浆液面平衡问题。在推导直径为 d 的U形管内泥浆液面可能保持的最大高度差时,认为高度差为 H 的泥浆柱重量应与长度为 l 之泥浆柱侧表面上产生的剪切应力相平衡,并提出下面的平衡方程式:

从能量的观点分析,井底所获得的功率: $N_{\Sigma} = F \times V_l$, 其中:

式中: F ——射流对井底的作用力;

V_l ——射流对井底的喷射速度。

最大冲击力理论也将大于最大水马力理论,不过、冲击力与功率的定量分析尚需做进一步研究,它们将涉及到井底压力分布。

上的推导表明最大冲击力理论的动量是最大水马力理论的动量的 1.22 倍,其清岩作用要好。因此可以提高钻速,这一结论表明在钻井过程中,不应一味减小排量和喷嘴尺寸,否则将影响射流的清岩作用,从而影响钻速。

参 考 资 料

1. 射流原理。
2. 喷射式钻头水眼射流的漫流和冲击。

四、结 论

目前的喷射式钻井提高钻速的主要原因在于射流的清岩作用、其次是破岩作用。以

$$\frac{\pi d^2}{4} H r = \pi d l \tau_0$$

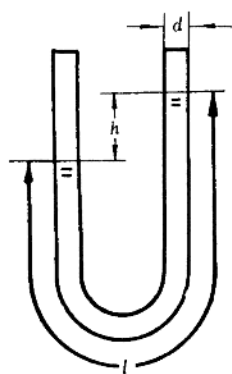


图 1

式中: r —— 泥浆比重;

τ_0 —— 泥浆静切力;

$\frac{\pi d^2}{4}$ —— 是泥浆柱的断面积, S_d ;

$\pi d l$ —— 是泥浆柱的侧表面积 S_l ;

$H \cdot r$ —— 是保持泥浆静止所能承受的最大压力。

上式可写成:

$$P = \frac{S_l}{S_d} \tau_0$$

对漏入地层的泥浆来说, 地层孔洞、裂隙的断面积比其侧表面积要小得多。 $\frac{S_l}{S_d}$ 是一个很大的数值。在这种情况下, τ_0 增加将引起 P 很大增加。不少人和一些书刊采用这个公式来说明提高泥浆静切力对处理漏失的重要作用, 这也成为他们主张在漏失地层大幅度提高泥浆静切力的理论依据。

事实上这个公式对漏失到地层延伸较远的细长泥浆束来说是不完善的。它是针对 U 管内很短一段泥浆柱推导出来的。在推导过程中, 并假定泥浆柱侧表面各处剪切应力的数值完全一样。把泥浆看作不可压缩的液体, 完全忽略了泥浆弹性的存在。对于很短一段泥浆来说, 其压缩变形可以忽略, 用上述公式计算尚不会有大的误差。对于深井的

泥浆柱来说, 其受压后变形很大, 泥浆柱侧表面各处的剪切应力不可能是均匀分布的。泥浆受压变形最大地方的剪切应力最大, 泥浆变形的地方小, 产生的剪切应力也小。

考虑泥浆弹性的存在, 对长管内泥浆柱受压后侧表面剪切应力分布进行研究所得到的公式表明: 它类似于指数曲线, 但比指数曲线递降的更快 (公式推算附后)。

漏入地层延伸相当远的泥浆受到井内泥浆柱压力时, 其侧表面上产生的剪切应力分布亦服从上述分析。从井壁到漏失层远端, 剪切应力由大到小迅速递减。其胶凝结构的破坏也是首先从井壁附近开始逐渐向远处发展, 最后导致泥浆的整体流动——即发生漏失。

忽略泥浆压缩变形存在, 认为泥浆侧表面上各处剪切应力完全相同, 其胶凝结构的破坏是整体同时破坏。持这样观点必然得出提高静切力对处理漏失非常重要的结论并对提高静切力堵漏作出过高的估计。

2. 提高泥浆的静切力, 其胶凝强度将增加。由于泥浆在环空中流速较低, 胶凝结构拆散不多, 在这种情况下, 提高胶凝强度必然增加环空流动阻力, 即增加环空压降。从而增大对漏失地层的压力, 加剧泥浆漏失。对这一点尚有相当一部份人认识不足, 常不问具体情况, 对在漏失地层采用低粘度、低切力的泥浆一律持反对态度。

泥浆作用于漏层的压力与漏层流体压力之差值 ΔP , 对泥浆漏失影响极大。 ΔP 与泥浆漏失速率 Q 关系如下:

$$\Delta P = K Q^2$$

K —— 阻力系数。

钻井过程中, 泥浆作用于井壁的压力 P 由泥浆液柱压力 $P_{\text{柱}}$ 和环空流动压力降 $P_{\text{环}}$ 两部分组成。

$$P = P_{\text{柱}} + P_{\text{环}}$$

设漏失地层流体压力为 $P_{\text{地}}$, 作用在漏失地层上的压力差 ΔP 为:

$$\Delta P = P - P_{\text{地}} \\ = P_{\text{柱}} + P_{\text{环}} - P_{\text{地}}$$

正确的泥浆设计中,要求采用尽可能低的比重,使泥浆静液柱压力 $P_{\text{柱}}$ 稍大于或等于地层流体压力 $P_{\text{地}}$ 。二者在数值上几乎相等:

$$P_{\text{柱}} - P_{\text{地}} \approx 0$$

$$\Delta P = P_{\text{环}} + P_{\text{柱}} - P_{\text{地}}$$

$$\Delta P \approx P_{\text{环}}$$

这时作用于漏失层的压力差,主要由环空压降的大小来决定。环空压降减少一半,泥浆漏失量将为原来的四分之一。

环空压降与泥浆性能、井径、钻具直径、泥浆上返速度的关系如下:

$$P_{\text{环}} = \frac{H \cdot YP}{300(d_H - d_p)} + \frac{\mu P \cdot H \cdot V}{1500(d_H - d_p)^2}$$

H ——井深;

$d_H - d_p$ ——井径与钻具外径之差;

YP ——泥浆屈服值;

μ_p ——泥浆塑性粘度;

V ——泥浆上返速度。

从上式可以看出:

1. 提高泥浆静切力,其胶凝强度屈服值也相应增加,环空压降将增大;提高塑性粘度也增加环空压降。但屈服值对环空压降的影响比塑性粘度要大的多。

2. 在其它参数不变的情况下,环空压降与井深成正比关系。

浅井段、即使静切力、屈服值增大很多,环空压降还是一个不大的数值。也就是说作用在地层上的压力差 ΔP 增大不多。但是流入地层孔洞和裂隙的泥浆的胶凝强度却增得很大,在这种情况下提高泥浆的静切力和屈服值对处理漏失是有利的。

深井段、即使静切力、屈服值增加不多,由于 H 很大,环空压降是很大的,作用在地层上的压力差 ΔP 也就很大,但处于地层孔洞、裂隙内的泥浆胶凝强度却无大的增加。所以在深井段提高泥浆的静切力、屈服值和粘度对处理漏失是有害的。

3. 降低泥浆上返速度;在漏失井段不采用满眼钻具结构,即增大环空间隙,可以降低环空压降,有助于克服漏失。

很多地区都有采用高粘度、高切力泥浆无法处理的漏失问题和改用低粘度、低切力泥浆处理漏失获得成功的例子。

我队施工的伊11井,钻遇古风化壳裂隙发育地带,发生严重漏失。采用降低泥浆比重、在泥浆中添加锯沫和云母片,提高泥浆粘度切力等措施。虽然泥浆粘度、切力提高,接近流不动状态,但漏失仍很严重,无法钻进。后来,试验用低粘度、低切力加锯沫的泥浆,同时采用降低排量等办法来降低环空压降,取得明显效果,漏失大大减少,保证了正常钻进。试验前后情况对比见表1。

表 1

井段	859~905米	905~942米
地层	基岩风化壳	基岩风化壳
排量	31公升/秒	24公升/秒
泵压	55~70大气压	40~55大气压
泥浆性能	比重:1.09 粘度:70~159秒 切力:>200毫克/cm ² 加锯沫	比重:1.08 粘度:29~35秒 切力0~10毫克/cm ² 加锯沫
漏失情况	漏失:287方 每小时漏失:4方	漏失110方 每小时漏失1.2方
钻井情况	泥浆消耗大,多次被迫提前提钻,搅泥浆,停停打打。	钻进中补充少量泥浆可维持正常钻进。

我国东部某地区处理井漏由采用稠泥浆加锯沫转变到稀泥浆加贝壳渣使漏失处理取得很大成功。该区处理井漏两种方法效果对比见表2。

三、漏失地层钻进泥浆胶凝性能调整原则

1. 提高钻进泥浆的胶凝性能,将增加对漏失地层的压力。井愈深,这种作用愈明显。故深井段预防和处理漏失时应尽可能降

锯沫稠泥浆贝壳渣稀泥浆堵漏效果对比

表 2

井 号	井 段 (米)	漏 失 性 质	漏失量 (方)	堵漏方法	泥 浆 性 能		堵漏 次数	堵漏消 耗时间	堵 漏 效 果
					比 重	粘度秒			
滨184	1948~1978	裂 缝	852	原浆强行钻进 锯沫稠泥浆	1.19 1.20	27 滴流	1 2	共147天	泥浆漏光、井塌 卡钻侧钻 大量漏失后钻穿
滨331	1646.57~1653	断 层	300	锯沫稠泥浆 贝壳渣泥浆	1.28 1.16~1.18	滴 流 25~37	1 1	4天 2:04	无 效 成 功
滨12~4	1471.60~1486.75	风化壳	800	锯沫稠泥浆 贝壳渣泥浆	1.26~1.34 1.21~1.23	滴 流 35~23	3 1	70天 5:25	无 效 成 功
滨239	2048~2069	裂 缝	350	锯沫稠泥浆 贝壳渣泥浆	1.22~1.26 1.22	滴 流 54~39	3 1	165天 3:41	无 效 成 功

(此表摘自“石油勘探与开发”1977年第四期)

低泥浆的胶凝性能。

2. 使用高胶凝强度的泥浆, 有助于克服漏失。在堵漏成功后采用低胶凝强度泥浆钻进的措施是正确的。

3. 单纯采用高胶凝强度泥浆堵漏弊病很多: 难以堵住大的裂隙、孔洞; 堵塞不牢, 不能承受固井作业的高压而会再次发生漏失; 不易解堵会影响裂隙、孔洞内油气的试采。因此在石油钻井中尽量少使用高胶凝强度泥浆堵漏, 最好在低粘度、低切力泥浆中添加可酸化的架桥材料。

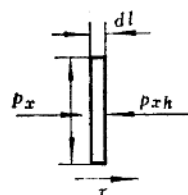
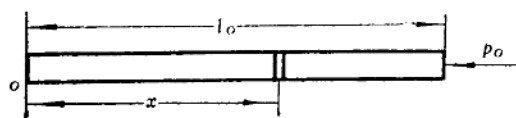


图 2

分别为 p_x , p_{x+1} x 处泥浆侧表面的剪切应力为 τ 。

在平衡状态则有:

$$\frac{\pi D^2}{4} (p_{x+1} - p_x) = \pi D dx \tau$$

$$p_{x+1} - p_x = dp$$

$$dp = \frac{4\tau}{D} dx$$

$$\tau = kxp$$

$$dp = \frac{4}{D} kxp \cdot dx$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{4k}{D} x \cdot dx$$

$$\text{两端积分} \quad \int \frac{dp}{p} = \frac{4k}{D} x \cdot dx$$

$$\ln p = \frac{2k}{D} x^2 + c$$

$$\text{根据边界条件} \quad x = l_0 \quad p = p_0$$

附 录

考虑泥浆弹性存在, 细管内长泥浆柱受压力后其侧面剪切应力公式推导如下:

细长管内泥浆柱长度为 l_0 , 直径为 D , 左端受到压力 p_0 作用。

泥浆受压后, 长度变短, 直径变粗。对细长泥浆柱来说, 其直径变化可以忽略。

泥浆柱受压变形其侧面产生与分压力方向相反的剪切应力, 变形大小与剪切应力成正比, 与泥浆柱长度, 作用在泥浆柱上压力成正比。故可得:

$$\tau = kxp$$

τ ——泥浆柱侧面剪切应力

x ——泥浆柱长度

p ——作用在泥浆柱上压力

k ——与泥浆受力变形产生剪切应力有关的常数。

在距 O 点 x 处截取一长度为 dx 泥浆膜, 其两侧的压力

封·密息斯(Von·Mises) 椭圆的探讨

刘 祖 煌

一、封·密息斯(Von·Mises)椭圆

石油管材在井内往往是处于复杂应力状态之下工作的。

若从井内工作的石油管材体中取出一“单元体”，其三对主面上的主应力为（见图1）

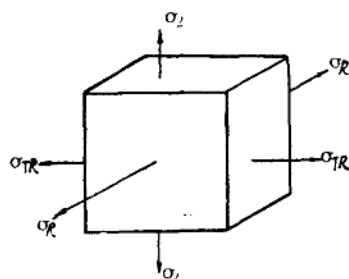


图 1

σ_L : 纵向（轴向）应力；

σ_{TR} : 横向（周向）应力；

σ_R : 径向应力。

在三向应力状态之下，由广义虎克定律推导出来的本“单元体”比能式为（在比例极限之内）：

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_L^2 + \sigma_{TR}^2 + \sigma_R^2 - 2\mu(\sigma_L\sigma_{TR} + \sigma_L\sigma_R + \sigma_{TR}\sigma_R)] \quad (1)$$

这个变形比能 u 包括改变本“单元体”体积的比能 u_p 及改变本单元体形状的比能 $u_g^{[1]}$ 。

等截面杆受轴向力后，其弹性比能公式为：

$$u = \frac{1}{2E} \sigma^2 \quad (2)$$

仿照上式，可把(1)式写成：

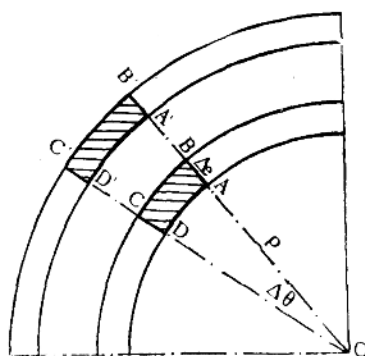


图 2

$$\ln p_0 = \frac{2k}{D} l_0^2 + c$$

$$c = \ln p_0 - \frac{2k}{D} l_0^2$$

将 c 代入则得：

$$\ln p = \frac{2k}{D} x^2 + \ln p_0 - \frac{2k}{D} l_0^2$$

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{2k}{D} (x^2 - l_0^2)$$

$$p = p_0 e^{\frac{2k}{D} (x^2 - l_0^2)}$$

$$\tau = kxp$$

$$\tau = kxp_0 e^{\frac{2k}{D} (x^2 - l_0^2)}$$

由公式可以看出： x 值愈大， τ 愈大，即愈接近受压力端，泥浆柱侧表面剪切应力愈大。远离受压端剪切应力迅速递减。

$$u = \frac{\sigma_n^2}{2E}$$

上式中的 σ_n^2 为引进的一个换算应力, 其值为:

$$\sigma_n^2 = (\sigma_L^2 + \sigma_{TR}^2 + \sigma_R^2 - 2\mu(\sigma_L\sigma_{TR} + \sigma_L\sigma_R + \sigma_R\sigma_{TR})) \quad (2)$$

为了确保石油管串在井内工作安全, 应使:

$$\sigma_n^2 \leq [\sigma_s]^2$$

$[\sigma_s]$ 为石油管材的屈服应力。

图2为石油管材横截面上所取一 $\Delta ABCD$, 管材受内压(外挤方向相反)后, 发生膨胀, $\Delta ABCD$ 变为 $\Delta A'B'C'D'$ 。其周向(横向)应变为:

$$\Sigma_{LR} = (\rho + d\rho)\Delta\theta - \rho\Delta\theta = d\rho\Delta\theta$$

$$\text{周向(横向)应力 } \sigma_{TR} = Kd\rho\Delta\theta$$

即周向应力 σ_{TR} 决定于 $\Delta\theta$ 。

径向的应变:

$$\begin{aligned} \because \quad OA &= \rho \\ OB &= \rho + \Delta e \\ DA' &= \rho + d\rho \\ DB' &= \rho + d\rho + \Delta e + de \end{aligned}$$

$$\text{又} \quad \frac{de}{\Delta e} = \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\text{即} \quad de = \frac{d\rho}{\rho} \Delta e$$

$$\therefore \Sigma_R = OB' - DA' - \Delta e = de = \frac{\Delta e}{\rho} d\rho$$

$$\text{径向应力 } \sigma_R = K \frac{\Delta e}{\rho} d\rho$$

可见径向应力 σ_R 决定于 $\frac{\Delta e}{\rho}$ (厚径比),

半径 ρ 越大, $\frac{\Delta e}{\rho}$ 就越小, 石油管材在井内工作, 一般径向应力很小, 考虑强度时, 可以忽略^[3], (2)式中的 σ_R 项可以省去:

$$\sigma_n^2 = \sigma_L^2 + \sigma_{TR}^2 - 2\mu\sigma_L\sigma_{TR} \leq [\sigma_s]^2$$

对一柱同钢级同壁厚的石油管材, 上式可变为:

$$F_n^2 = F_L^2 + F_{TR}^2 - 2\mu F_L F_{TR} \leq [F_s]^2$$

式中: F_L 为纵向力;

F_{TR} 为横向力;

$[F_s]$ 为管材的屈服强度。

$$\text{设} \quad \frac{F_L}{[F_s]} = y$$

$$\frac{F_{TR}}{[F_s]} = x \text{ 代入上式, 得:}$$

$$x^2 + y^2 - 2\mu xy \leq 1$$

$$\text{取} \quad x^2 + y^2 - 2\mu xy = 1 \quad (3)$$

用坐标转轴变换公式 $x = x'\cos\theta - y'\sin\theta$ 及 $y = x'\sin\theta + y'\cos\theta$ 代入(3)式, 并取 $\theta = 45^\circ$, (3)式变换化简:

$$\left(\frac{x'}{\sqrt{\frac{1}{1-\mu}}} \right)^2 + \left(\frac{y'}{\sqrt{\frac{1}{1+\mu}}} \right)^2 = 1$$

由上式作出的椭圆曲线就是封·密息斯(Von·Mises)椭圆, 简称V·M椭圆。

$$\left. \begin{aligned} \text{长轴半径 } a &= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1-\mu}}} \\ \text{短轴半径 } b &= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1+\mu}}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上式中的 μ 是材料的泊松比。对各向同性材料 $\mu = 0.25$, 金属材料 $\mu = 0.25-0.35$, 石蜡、橡胶之类拉伸时体积无变化的材料, μ 值接近于0.5。软木之类 μ 值几乎等于零^[4]。钢材的 $\mu = 0.25-0.35$ ^[5]。

石油管材, 在非腐蚀介质中实验 $\mu = 0.26$; 在有点腐蚀介质中或冷轧钢, μ 值取0.3^[6]。

几个 μ 值的V·M椭圆长、轴半径如下:

$$\mu = 0.26 \quad a = 1.162 \quad b = 0.892$$

$$\mu = 0.30 \quad a = 1.192 \quad b = 0.870$$

$$\mu = 0.50 \quad a = 1.410 \quad b = 0.819$$

[现场实用时V·M椭圆的作法]:

已知长、短轴后, 作图方法有多种, 但都是近似画法, 较简便的是“四圆心”法。

取一方格纸, 定好直角坐标原点及坐标轴, 并把直角坐标轴反转(逆时针) $\theta = 45^\circ$,