

ICS 75.180.10

E 92

备案号: 8143—2001

SY

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 5322—2000

套管柱强度设计方法

Design method of casing string strength

2000-12-12 发布

2001-06-01 实施

国家石油和化学工业局 发 布

目 次

前 言 IV

1 范围 1

2 引用标准 1

3 定义 1

4 符号及代号 1

5 套管强度计算 6

6 有效外载计算 7

7 套管柱强度设计..... 10

附录 A（标准的附录） 三轴强度设计推导..... 12

附录 B（提示的附录） 套管设计实例..... 14

附录 C（提示的附录） 井口装定载荷计算..... 30

前 言

本标准是对 SY/T 5322—88《套管柱强度设计推荐方法》的修订。修订后增加了套管强度计算和定向井轴向拉力计算；按井型和套管类型计算有效外载；采用三轴应力强度设计并列出了设计步骤。

本标准从生效之日起，同时代替 SY/T 5322—88。

本标准的附录 A 是标准的附录。

本标准的附录 B、附录 C 是提示的附录。

本标准由中国石油天然气集团公司提出。

本标准由石油钻井工程专业标准化委员会归口。

本标准起草单位：西南石油学院。

本标准主要起草人 杜春常 郭小阳 刘崇建

本标准于 1988 年 4 月首次发布，本次是第一次修订。

套管柱强度设计方法

Design method of casing string strength

代替 SY/T 5322—88

1 范围

本标准规定了套管强度计算、套管柱有效外载计算及强度设计方法。

本标准适用于油气井套管柱强度设计。

2 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。本标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

SY/T 5313—93 钻井工程术语

3 定义

本标准采用下列定义。

3.1 屈服挤毁强度 yield collapse strength

在套管内壁上产生最小屈服应力的外压力值。

3.2 塑性挤毁强度 plastic collapse strength

套管在塑性挤毁范围内的最小挤毁压力值。

3.3 过渡挤毁强度 transition collapse strength

套管从塑性到弹性过渡区的最小挤毁压力值。

3.4 弹性挤毁强度 elastic collapse strength

套管在弹性挤毁范围内的最小挤毁压力值。

3.5 管体屈服强度 pipe body yield strength

使管体产生屈服所需要的轴向载荷值。

3.6 套管连接强度 joint strength of casing

使套管接箍螺纹滑脱或断裂的最小轴向载荷。

3.7 三轴应力强度 triaxial stress strength

套管在内外压力及轴向载荷联合作用时的套管强度。

3.8 套管弯曲力 casing bending force

套管在弯曲井眼中发生弯曲时所产生的轴向力。

3.9 井口装定载荷 installation load of well head

固井作业完成后，安装井口时需要对套管柱上提或下压的轴向力。

3.10 井口载荷 well head load

井口载荷是包括井口装定载荷在内的各种载荷的总称。

4 符号及代号

符号及代号见表 1。

表1 符号及代号

序号	代号	含 义	单位
1	D_c	套管外径	mm
2	D_{ci}	套管内径	mm
3	D_{qj}	接箍外径	mm
4	d_{qj}	接箍内径	mm
5	r_o	套管外半径	mm
6	r_i	套管内半径	mm
7	r_{in}	设计段套管内半径	mm
8	r_{on}	设计段套管外半径	mm
9	δ	套管壁厚	mm
10	L_j	螺纹配合长度	mm
11	R	造斜段曲率半径	m
12	L_i	第 i 段套管下入长度	m
13	L_{an}	按抗拉强度套管可下入长度	m
14	L_{sn}	按三轴抗拉强度套管可下入长度	m
15	L_n	设计段套管下入长度	m
16	L_{in}	注水泥后管外液面下降值	m
17	L_{im}	注水泥后管内液面下降值	m
18	L_g	水泥封固段套管长度	m
19	L_t	非水泥封固段套管长度	m
20	ΔL	安装井口时上提或下放套管的长度	m
21	H_s	套管下深或套管鞋深度	m
22	H_i	第 i 段套管下深	m
23	h	计算点井深	m
24	H_{md}	计算点测量深度	m
25	H_{md2}, H_{md3}	分别为造斜段、稳斜段底部的测量井深	m
26	H_{v1}, H_{v2}, H_{v3}	分别为垂直段、造斜段、斜直段的垂深	m
27	A_p	管端截面积	mm ²
28	A_c	接箍截面积	mm ²
29	A_{jp}	最末一扣管壁截面积	mm ²
30	A_i	第 i 段套管截面积	mm ²
31	ρ_m	固井时钻井液密度	g/cm ³
32	ρ_{max}	下次钻井最大钻井液密度	g/cm ³
33	ρ_{min}	下次钻井最小钻井液密度	g/cm ³
34	ρ_c	地层水密度 (1.03~1.06)	g/cm ³
35	ρ_w	完井液密度	g/cm ³

表 1 (续)

序号	代号	含 义	单位
36	$\Delta\rho_e$	注水泥后管外液体密度变化	g/cm^3
37	ρ_{in}	注水泥时管内液体密度	g/cm^3
38	$\Delta\rho_i$	注水泥后管内液体密度变化	g/cm^3
39	ρ_{an}	水泥浆密度	g/cm^3
40	ρ_s	套管钢材密度	g/cm^3
41	ρ_g	天然气相对密度 (0.5~0.55)	
42	Y_p	管材屈服强度	MPa
43	U_p	管材最小极限强度	MPa
44	U_c	接箍最小极限强度	MPa
45	p_{∞}	抗挤强度	MPa
46	p_{bo}	抗内压强度	MPa
47	p_{ca}	三轴抗挤强度	MPa
48	p_{ba}	三轴抗内压强度	MPa
49	σ_a	轴向应力	MPa
50	p_{bs}	套管鞋处最大内压力	MPa
51	p_{bh}	计算点最大内压力	MPa
52	p_{be}	有效内压力	MPa
53	p_{oe}	有效外压力	MPa
54	p_i	管内液柱压力	MPa
55	p_o	管外液柱压力	MPa
56	p_p	地层或油层压力	MPa
57	$p_{\text{c}i}$	第 i 段套管抗挤强度	MPa
58	$p_{\text{ce}i}$	第 i 段套管有效外挤压力	MPa
59	$p_{\text{ca}i}$	第 i 段套管三轴抗挤强度	MPa
60	σ_{ai}	第 i 段套管轴向应力	MPa
61	Y_{pi}	第 i 段套管材料屈服强度	MPa
62	p_{oi}	第 i 段套管外液柱压力	MPa
63	p_{ii}	第 i 段套管内液柱压力	MPa
64	$p_{\text{b}i}$	第 i 段套管抗内压强度	MPa
65	$p_{\text{be}i}$	第 i 段套管有效内压力	MPa
66	$p_{\text{ba}i}$	第 i 段套管三轴抗内压强度	MPa
67	p_{in}	设计段管内最小液柱压力	MPa
68	p_{on}	设计段管外最大液柱压力	MPa
69	p_e	注水泥时井口环空压力	MPa
70	Δp_e	注水泥后井口环空压力变化	MPa

表 1 (续)

序号	代号	含 义	单位
71	p_{ih}	注水泥时井口内压力	MPa
72	Δp_i	注水泥后井口内压力变化	MPa
73	G_p	油层或地层压力梯度	MPa/m
74	G_v	上覆岩层压力梯度	MPa/m
75	G_{oi}	第 i 段套管有效外压力梯度	MPa/m
76	G_f	破裂压力梯度	MPa/m
77	T_o	抗拉强度	kN
78	T_a	三轴抗拉强度	kN
79	T_y	管体屈服强度	kN
80	T_e	有效轴向力	kN
81	T_i	计算段以下第 i 段套管的重量	kN
82	T_h	大钩载荷	kN
83	T_{kt}	造斜段顶点拉力	kN
84	T_{vn}	垂直段任意井深的拉力	kN
85	T_{ks}	造斜段任意测量深度的拉力	kN
86	T_{st}	稳斜段顶点的拉力	kN
87	T_{sa}	稳斜段任意测量深度的拉力	kN
88	F_b	套管弯曲力	kN
89	T_b	弯曲段套管拉力	kN
90	T_{yi}	第 i 段套管屈服强度	kN
91	T_{ai}	第 i 段套管三轴抗拉强度	kN
92	T_{ei}	第 i 段套管有效拉力	kN
93	T_{on}	设计段套管抗拉强度	kN
94	T_s	套管初拉力	kN
95	B_1	温度引起的轴向力	kN
96	B_2	水泥封固段套管重量	kN
97	B_3	封固段水泥浆重量	kN
98	B_4	管内液体重量	kN
99	B_5	管外液体重量变化	kN
100	B_6	管内液体重量变化	kN
101	B_7	井口环压变化引起的轴向力	kN
102	B_8	井口内压变化引起的轴向力	kN
103	B_9	管外液面下降引起的轴向力	kN
104	B_{10}	管内液面下降引起的轴向力	kN
105	Q_h	井口载荷	kN

表 1 (完)

序号	代号	含 义	单位
106	Y_1	选定的井口装定载荷	kN
107	Y_2	温度变化引起的轴向力	kN
108	Y_3	全部管串在空气中的重量	kN
109	Y_4	水泥浆的重量	kN
110	Y_5	管外液体重量	kN
111	Y_6	管内液体重量	kN
112	Y_7	管外液体重量变化	kN
113	Y_8	管内液体重量变化	kN
114	Y_9	井口环空压力引起的轴向力	kN
115	Y_{10}	井口内压力引起的轴向力	kN
116	Y_{11}	管外液面下降引起的轴向力	kN
117	Y_{12}	管内液面下降引起的轴向力	kN
118	q	单位长度套管质量	kg/m
119	q_i	设计段以下第 i 段套管单位长度质量	kg/m
120	q_j	设计段套管单位长度质量	kg/m
121	q_t	未封固段套管单位长度质量	kg/m
122	q_c	套管平均单位长度质量	kg/m
123	q_g	封固段套管单位长度质量	kg/m
124	q_v	垂直段套管单位长度质量	kg/m
125	q_k	造斜段套管单位长度质量	kg/m
126	q_s	稳斜段套管单位长度质量	kg/m
127	Δt	固井后温度变化平均值	℃
128	α	井斜角	(°)
129	θ	造斜段增斜率	(°)/100m
130	k_m	掏空系数 ($k_m=0\sim 1$), 1 表示全掏空	
131	μ	地层岩石泊松系数 $\mu=0.3\sim 0.5$	
132	S_i	规定的抗内压系数	
133	S_t	规定的抗拉系数	
134	S_c	规定的抗挤系数	
135	S_{ti}	第 i 段套管抗内压系数	
136	S_{ti}	第 i 段套管抗拉系数	
137	S_{ci}	第 i 段套管抗挤系数	
138	n	设计套管段号	
139	k_f	浮力系数	
140	$(D_c/\delta)_{yp}$	屈服挤毁与塑性挤毁交点的径厚比	
141	$(D_c/\delta)_{pt}$	塑性挤毁与过渡挤毁交点的径厚比	
142	$(D_c/\delta)_{ec}$	过渡挤毁与弹性挤毁交点的径厚比	

5 套管强度计算

5.1 抗挤强度

5.1.1 屈服挤毁强度

当 $D_c/\delta \leq (D_c/\delta)_{yp}$ 时,

$$p_{\infty} = 2Y_p \left[\frac{(D_c/\delta) - 1}{(D_c/\delta)^2} \right] \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{其中} \quad (D_c/\delta)_{yp} = \frac{\sqrt{(A-2)^2 + 8(B + 0.0068947C/Y_p) + (A-2)}}{2(B + 0.0068947C/Y_p)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$A = 2.8762 + 1.5485 \times 10^{-4} Y_p + 4.47 \times 10^{-7} Y_p^2 - 1.62 \times 10^{-10} Y_p^3 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$B = 0.026233 + 7.34 \times 10^{-5} Y_p \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$C = -465.93 + 4.475715 Y_p - 2.2 \times 10^{-4} Y_p^2 + 1.12 \times 10^{-7} Y_p^3 \quad \dots\dots\dots(5)$$

5.1.2 塑性挤毁强度

当 $(D_c/\delta)_{yp} \leq D_c/\delta \leq (D_c/\delta)_{pt}$ 时,

$$p_{\infty} = Y_p \left[\frac{A}{D_c/\delta} - B \right] - 0.0068947C \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{其中} \quad (D_c/\delta)_{pt} = \frac{Y_p(A-F)}{0.0068947C + Y_p(B-G)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$F = \frac{3.238 \times 10^5 \left(\frac{3B/A}{2 + B/A} \right)^3}{Y_p \left(\frac{3B/A}{2 + B/A} - (B/A) \right) \left(1 - \frac{3B/A}{2 + B/A} \right)^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$G = FB/A \quad \dots\dots\dots(9)$$

5.1.3 过渡挤毁强度

当 $(D_c/\delta)_{pt} \leq D_c/\delta \leq (D_c/\delta)_{te}$ 时,

$$p_{\infty} = Y_p \left[\frac{F}{D_c/\delta} - G \right] \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{其中} \quad (D_c/\delta)_{te} = \frac{2 + B/A}{3B/A} \quad \dots\dots\dots(11)$$

5.1.4 弹性挤毁强度

当 $D/\delta \geq (D_c/\delta)_{te}$ 时,

$$p_{\infty} = \frac{3.238 \times 10^5}{(D_c/\delta)(D_c/\delta - 1)^2} \quad \dots\dots\dots(12)$$

5.2 管体屈服强度

$$T_y = 7.85 \times 10^{-4} (D_c^2 - D_a^2) Y_p \quad \dots\dots\dots(13)$$

5.3 抗内压强度

$$p_{\infty} = 0.875 \left[\frac{2Y_p\delta}{D_c} \right] \quad \dots\dots\dots(14)$$

5.4 抗拉强度

5.4.1 圆螺纹连接

螺纹断裂强度:

$$T_o = 9.5 \times 10^{-4} A_{jp} U_p \quad \dots\dots\dots(15)$$

螺纹滑脱强度:

$$T_o = 9.5 \times 10^{-4} A_{jp} L_j \left[\frac{4.99 D_c^{-0.59} U_p}{0.5 L_j + 0.14 D_c} + \frac{Y_p}{L_j + 0.14 D_c} \right] \quad \dots\dots\dots(16)$$

其中

$$A_{jp} = 0.785 [(D_c - 3.6195)^2 - D_a^2] \quad \dots\dots\dots(17)$$

5.4.2 梯形螺纹连接

管体螺纹强度:

$$T_o = 9.5 \times 10^{-4} A_p U_p [25.623 - 1.007(1.083 - Y_p/U_p) D_c] \quad \dots\dots\dots(18)$$

接箍螺纹强度:

$$T_o = 9.5 \times 10^{-4} A_c U_c \quad \dots\dots\dots(19)$$

其中

$$A_p = 0.785 (D_c^2 - D_a^2) \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$A_c = 0.785 (D_g^2 - d_g^2) \quad \dots\dots\dots(21)$$

5.5 三轴应力强度

三轴抗挤强度:

$$p_{ca} = p_{co} \left[\sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\sigma_a + p_i}{Y_p} \right)^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a + p_i}{Y_p} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(22)$$

三轴抗内压强度:

$$p_{ba} = p_{bo} \left[\frac{r_i^2}{\sqrt{3r_o^4 + r_i^4}} \left(\frac{\sigma_a + p_o}{Y_p} \right) + \sqrt{1 - \frac{3r_o^4}{3r_o^4 + r_i^4} \left(\frac{\sigma_a + p_o}{Y_p} \right)^2} \right] \quad \dots\dots\dots(23)$$

三轴抗拉强度:

$$T_a = 10^{-3} \pi (p_i r_i^2 - p_o r_o^2) + \sqrt{T_o^2 + 3 \times 10^{-6} \pi^2 (p_i^2 - p_o^2) r_o^4} \quad \dots\dots\dots(24)$$

5.6 管材屈服强度

用式 (25) 计算管材屈服强度。

$$Y_p = \frac{10^3 T_y}{\pi (r_o^2 - r_i^2)} \quad \dots\dots\dots(25)$$

或用钢级代号 (如 N-80 代号为 80) 乘以 1000 除以 145 得管材屈服强度 (MPa)。

6 有效外载计算

6.1 有效内压力

6.1.1 直井

6.1.1.1 表层套管和技术套管

a) 气井

按下一次使用的最大钻井液密度计算套管鞋处的最大内压力, 即

$$p_{bs} = 0.00981 \rho_{\max} H_s \quad \dots\dots\dots(26)$$

任意井深处套管最大内压力用式 (27) 计算。

$$p_{bh} = \frac{p_{bs}}{e^{1.1155 \times 10^{-4} (H_s - h) \rho_s}} \quad \dots\dots\dots(27)$$

有效内压力用式 (28) 计算。

$$p_{be} = p_{bh} - 0.00981 \rho_c h \quad \dots\dots\dots(28)$$

b) 油井

任一井深的套管最大内压力:

$$p_{bh} = 0.00981 \rho_{\max} h \quad \dots\dots\dots (29)$$

有效内压力用式 (30) 计算。

$$p_{be} = p_{bh} - 0.00981 \rho_c h \quad \dots\dots\dots (30)$$

6.1.1.2 生产套管和生产尾管

a) 油井

对不用油管生产的用式 (31) 计算最大内压力。

$$p_{bs} = G_p H_s \quad \dots\dots\dots (31)$$

任一井深处的最大内压力:

$$p_{bh} = \frac{p_{bs}}{e^{1.1155 \times 10^{-4} (H_s - h) \rho_s}} \quad \dots\dots\dots (32)$$

对用油管生产的用式 (33) 计算最大内压力。

$$p_{bh} = G_p H_s + 0.00981 \rho_w h \quad \dots\dots\dots (33)$$

有效内压力:

$$p_{be} = p_{bh} - 0.00981 \rho_c h \quad \dots\dots\dots (34)$$

b) 气井

按管内全充满天然气考虑, 即任一井深的最大内压力为:

$$p_{bh} = p_p \quad \dots\dots\dots (35)$$

有效内压力为:

$$p_{be} = p_{bh} - 0.00981 \rho_c h \quad \dots\dots\dots (36)$$

6.1.2 定向井

定向井有效内压应将斜直段和弯曲段的测量深度换算为垂直井深计算。

6.2 有效外压力

6.2.1 直井

6.2.1.1 表层套管和技术套管

对非塑性蠕变地层:

$$p_{ce} = 0.00981 [\rho_m - (1 - k_m) \rho_{\min}] h \quad \dots\dots\dots (37)$$

对塑性蠕变地层:

$$p_{ce} = \left[\frac{\mu}{1 - \mu} G_v - 0.00981 (1 - k_m) \rho_{\min} \right] h \quad \dots\dots\dots (38)$$

6.2.1.2 生产套管和生产尾管

对非塑性蠕变地层:

$$p_{ce} = 0.00981 [\rho_m - (1 - k_m) \rho_w] h \quad \dots\dots\dots (39)$$

对塑性蠕变地层:

$$p_{ce} = \left[\frac{\mu}{1 - \mu} G_v - 0.00981 (1 - k_m) \rho_w \right] h \quad \dots\dots\dots (40)$$

6.2.2 定向井

定向井有效外压力应将弯曲段和斜直段的测量井深换算为垂直井深计算。

6.3 有效轴向力计算

6.3.1 直井

直井有效轴向力用式 (41) 计算。

$$T_v = \left[\left(\sum_{i=1}^{n-1} T_i \right) + 0.00981 (H_s - h) q_i \right] k_f \quad \dots\dots\dots (41)$$

其中

$$k_f = \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right) \quad \dots\dots\dots(42)$$

6.3.2 定向井有效拉力

6.3.2.1 套管自重拉力

如图 1 所示为定向井井身剖面。垂直段井深 H_{v1} ，增斜段曲率半径为：

$$R = \frac{5730}{\theta} \quad \dots\dots\dots(43)$$

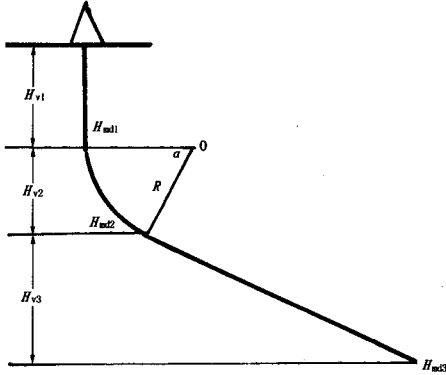


图 1

斜垂直长度：

$$H_{v2} = R \sin \alpha \quad \dots\dots\dots(44)$$

稳斜段垂直长度：

$$H_{v3} = (H_{md3} - H_{md2}) \cos \alpha \quad \dots\dots\dots(45)$$

井口拉力：

$$T_h = 0.00981(q_v H_{v1} + q_k H_{v2} + q_s H_{v3}) k_f \quad \dots\dots\dots(46)$$

垂直段任一测量深度的拉力：

$$T_{va} = T_h - 0.00981 H_{md} q_v k_f \quad \dots\dots\dots(47)$$

造斜段顶部的拉力：

$$T_{kt} = T_h - 0.00981 H_{v1} q_v k_f \quad \dots\dots\dots(48)$$

造斜段任一测量深度的拉力：

$$T_{ka} = T_h - 0.00981 \left[H_{v1} q_v + q_k R \sin \left[\frac{(H_{md} - H_{v1}) \theta}{100} \right] \right] k_f \quad \dots\dots\dots(49)$$

稳斜段顶点的拉力：

$$T_{st} = T_h - 0.00981 (H_{v1} q_v + H_{v2} q_k) k_f \quad \dots\dots\dots(50)$$

稳斜段任一测量深度的拉力：

$$T_{sa} = T_h - 0.00981 \left[H_{v1} q_v + H_{v2} q_k + q_s \left(H_{md} - H_{v1} - 100 \frac{\alpha}{\theta} \right) \sin \alpha \right] k_f \quad \dots\dots\dots(51)$$

6.3.2.2 套管弯曲力

$$F_b = 2.32 \times 10^{-3} D_c q_2 \theta \quad \dots\dots\dots(52)$$

弯曲段套管任一点的拉力为：

$$T_b = F_b + T_{ka} \quad \dots\dots\dots(53)$$

7 套管柱强度设计

套管强度设计方法很多，其实质并无多大差别，都是使套管强度大于所受的有效外载一定的余量。本标准采用三轴强度设计。

7.1 安全系数

抗挤系数 $S_c = 1.00 \sim 1.125$ ，抗内压系数 $S_i = 1.05 \sim 1.15$ ，抗拉系数 $S_t = 1.60 \sim 2.00$ 。

7.2 设计原始数据

设计原始数据见表 2。

表 2 设计原始数据

项目名称	单 位	项目名称	单 位	项目名称	单 位
井别		下次最小钻井液密度	g/cm ³	套管下入总长	m
井号		地层水密度	g/cm ³	掏空系数	
套管类型		天然气相对密度		抗挤系数	
套管下深	m	地层压力梯度	MPa/m	抗内压系数	
水泥返深	m	上覆岩层压力梯度	MPa/m	抗拉系数	
固井时钻井液密度	g/cm ³	地层破裂压力梯度	MPa/m	是否塑变地层	
下次最大钻井液密度	g/cm ³	岩石的泊松系数			

7.3 套管性能参数

套管性能参数见表 3。

表 3 套管性能参数

项目名称	单 位	项目名称	单 位
直径	mm	单位长度质量	kg/m
钢级		抗挤强度	MPa
牙型		抗内压强度	MPa
壁厚	mm	抗拉强度	kN
管体屈服强度	kN		

7.4 设计方法及步骤

先按抗挤强度自下而上进行设计，同时进行抗拉强度和抗内压强度校核。当设计到抗拉强度或抗内压强度不满足要求时，选择比上一段高一级的套管，改为抗拉强度或抗内压强度设计，并进行抗挤强度校核，一直到满足设计要求为止。

7.4.1 确定第一段套管的钢级和壁厚：

计算套管鞋处的有效外挤压力 p_{cel} ，并根据 $p_{cal} \geq S_c \cdot p_{cel}$ 的原则，选择第一段套管的钢级和壁厚，用前述套管强度公式计算或查出套管强度，列出套管性能参数表。

7.4.2 确定第一套管的下入长度 L_1 ：

第一段套管下入的长度 L_1 取决于第二段套管的下入深度 H_2 ，因此，第二段套管应选比第一段套管强度低一级的。第二段套管的下入深度 H_2 用式 (54) 确定。

$$H_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \dots\dots\dots(54)$$

式中, a 、 b 、 c 见附录 A (标准的附录)。

第一段套管的下入长度 L_1 为:

$$L_1 = H_1 - H_2 \quad \dots\dots\dots(55)$$

7.4.3 对第一段套管顶部进行抗内压强度校核:

按前述三轴抗内压公式计算出第一段套管顶部的三轴抗内压强度 p_{bel} 及有效内压力 p_{bet} , 则第一段套管的抗内压安全系数为:

$$S_{il} = p_{bel}/p_{bet} \quad \dots\dots\dots(56)$$

如果 $S_{il} \geq S_i$, 则满足要求, 否则选择高一级的套管改为抗拉设计。

7.4.4 对第一段套管顶部进行抗拉强度校核:

按前述三轴抗拉强度公式计算出第一段套管顶部的三轴抗拉强度 T_{al} 及有效拉力 T_{el} , 则第一段套管抗拉安全系数为:

$$S_{tl} = T_{al}/T_{el} \quad \dots\dots\dots(57)$$

如果 $S_{tl} \geq S_t$, 则满足要求。按上述步骤继续设计第二段、第三段等, 直到设计井深为止。

按上述抗挤设计到第 n 段套管时, 如果抗拉强度或抗内压强度不满足, 则应选用高一级的套管, 改为抗拉强度设计该段套管。

7.4.5 按套管抗拉强度计算该段套管的下入长度 L_{on} 。

7.4.6 计算三轴应力下该段套管的下入长度 L_{an} 。

计算出 L_{on} 及 L_{an} 后, 如果 $\left| \frac{L_{an} - L_{on}}{L_{an}} \right| \leq 0.01$, 则 $L_n = L_{an}$, 否则重复上述计算, 直到 $\left| \frac{L_{an} - L_{on}}{L_{an}} \right| \leq 0.01$ 为止。然后进行该段套管抗内压和抗挤强度校核, 直到满足设计井深为止。

公式推导见附录 A (标准的附录)。

7.5 套管设计

套管设计实例见附录 B (提示的附录)。

7.6 井口装定载荷计算

井口装定载荷计算见附录 C (提示的附录)。

附 录 A
(标准的附录)
三轴强度设计推导

A1 按三轴抗挤设计应使 $p_{\text{ca2}} \geq S_c \cdot p_{\text{ca2}}$, 于是由三轴抗挤强度公式有:

$$p_{\text{ca2}} = p_{\text{ca2}} \left[\sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\sigma_{a2} + p_i}{Y_{p2}} \right)^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{a2} + p_i}{Y_{p2}} \right) \right] = p_{\text{ca2}} \cdot S_c \quad \dots\dots\dots (\text{A1})$$

由于 p_{ca2} 在不同情况下的计算公式不一样, 为了方便, 用有效外挤压力梯度来表示, 即:

$$G_{\text{ca2}} = \frac{p_{\text{ca2}}}{H_2} \quad \dots\dots\dots (\text{A2})$$

于是式 (A1) 变为:

$$p_{\text{ca2}} = G_{\text{ca2}} \cdot H_2 \cdot S_c \quad \dots\dots\dots (\text{A3})$$

而

$$\sigma_{a2} = \frac{9.81 q_2 (H_1 - H_2)}{A_2} \quad \dots\dots\dots (\text{A4})$$

$$Y_{p2} = 10^3 \frac{T_{y2}}{A_2} \quad \dots\dots\dots (\text{A5})$$

$$p_i = 0.00981(1 - k_m) \rho_{\text{min}} H_2 \quad \dots\dots\dots (\text{A6})$$

将上述各式代入式 (A1) 得:

$$G_{\text{ca2}} H_2 S_c = p_{\text{ca2}} \left[\sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{9.81 q_1 (H_1 - H_2) k_f + 0.00981(1 - k_m) \rho_{\text{min}} H_2 A_2}{A_2 Y_{p2}} \right)^2} - \frac{9.81 q_1 (H_1 - H_2) k_f + 0.00981(1 - k_m) \rho_{\text{min}} H_2 A_2}{2 A_2 Y_{p2}} \right] \quad \dots\dots\dots (\text{A7})$$

令上式中:

$$C_1 = \frac{G_{\text{ca2}} S_c}{p_{\text{ca2}}} \quad \dots\dots\dots (\text{A8})$$

$$C_2 = \frac{0.00981 q_1 H_1 K_f}{T_{y2}} \quad \dots\dots\dots (\text{A9})$$

$$C_3 = \frac{9.81 \times 10^{-6} (1 - k_m) \rho_{\text{min}} A_2 - 0.00981 q_1 K_f}{T_{y2}} \quad \dots\dots\dots (\text{A10})$$

如果设计第 n ($n > 3$) 段套管时, 则:

$$C_1 = \frac{G_{\text{ca2}} S_c}{p_{\text{con}}} \quad \dots\dots\dots (\text{A11})$$

$$C_2 = \frac{0.00981 \left(\sum_{i=1}^{n-1} q_i H_i - \sum_{i=2}^{n-1} q_i H_{i-1} \right) k_f}{T_{yn}} \quad \dots\dots\dots (\text{A12})$$

$$C_3 = \frac{9.81 \times 10^{-6} (1 - k_m) \rho_{\text{min}} A_n - 0.00981 q_n K_f}{T_{yn}} \quad \dots\dots\dots (\text{A13})$$

又令

$$C_1^2 + C_1 C_3 + C_3^2 = a \quad \dots\dots\dots (\text{A14})$$

$$C_1 C_2 + 2 C_2 C_3 = b \quad \dots\dots\dots (\text{A15})$$

$$C_2^2 - 1 = c \quad \dots\dots\dots (\text{A16})$$

$$\text{则} \quad aH_2^2 + bH_2 + c = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{A17})$$

$$\text{所以} \quad H_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \dots\dots\dots(\text{A18})$$

A2 按抗拉强度计算该段套管的下入长度用式 (A19)。

$$L_{\text{on}} = \frac{\frac{T_{\text{on}}}{S_t} - 0.00981 \sum_{i=1}^{n-1} q_i L_i k_i}{0.00981 q_n k_i} \quad \dots\dots\dots(\text{A19})$$

A3 计算三轴应力下该段套管的下入长度 L_{an} 。按三轴抗拉强度公式有：

$$T_{\text{an}} = 10^{-3} \pi (p_{\text{in}} r_{\text{in}}^2 - p_{\text{on}} r_{\text{on}}^2) + \sqrt{T_{\text{on}}^2 + 3 \times 10^{-6} \pi^2 (p_{\text{in}} - p_{\text{on}})^2 r_{\text{on}}^4} \quad \dots\dots\dots(\text{A20})$$

$$\text{式中:} \quad p_{\text{in}} = 0.00981 (H_n - L_{\text{on}}) (1 - k_m) \rho_{\text{min}} \quad \dots\dots\dots(\text{A21})$$

$$p_{\text{on}} = 0.00981 (H_n - L_{\text{on}}) \rho_m \quad \dots\dots\dots(\text{A22})$$

将 p_{in} 、 p_{on} 的值代入上式即可求出 T_{an} 。于是有：

$$L_{\text{an}} = \frac{\frac{T_{\text{an}}}{S_t} - 0.00981 \sum_{i=1}^{n-1} q_i L_i k_i}{0.00981 q_n k_i} \quad \dots\dots\dots(\text{A23})$$

比较 L_{on} 与 L_{an} 的差值是否满足精度要求，如果满足要求，则 $L_n = L_{\text{an}}$ ，否则重新试算。

附 录 B
(提示的附录)
套管设计实例

B1 直井**B1.1 表层套管**

设计原始数据见表 B1。

表 B1

井型	探井(气井)	下次最大钻井液密度	1.45g/cm ³	岩石泊松系数	0.35
井号	T001	下次最小钻井液密度	1.20g/cm ³	套管下入总长	1500m
类型	表层	地层水密度	1.05g/cm ³	掏空系数	0.85
尺寸	339.7mm	天然气相对密度	0.55	抗挤系数	1.00
下深	1500m	地层压力梯度	0.0115MPa/m	抗内压系数	1.10
水泥返高	1500m	上覆岩层压力梯度	0.023MPa/m	抗拉系数	1.85
固井时钻井液密度	1.25g/cm ³	破裂压力梯度	0.018MPa/m	是否塑变地层	是

a) 抗挤设计表层套管

$$p_{ce} = \left[\frac{0.35}{1 - 0.35} \times 0.023 - 0.00981 \times (1 - 0.85) \times 1.2 \right] \times 1500 = 15.93(\text{MPa})$$

选 C-95 壁厚 12.19mm 的套管, 其套管参数见表 B2。

表 B2

直径	339.71mm	单位长度质量	101.2kg/m
钢级	C-95	抗挤强度	16.065MPa
牙型	短圆扣	抗内压强度	31.37MPa
壁厚	12.19mm	抗拉强度	4955.3kN
管体屈服强度	8215.9kN		

 $S_c = p_{co}/p_{ce} = 16.065/15.93 = 1.008 > 1$, 满足要求。

 $\sigma_a = -0.00981 \times 1.25 \times 1500 = -18.4(\text{MPa})$, $p_i = -0.00981 \times 1.2 \times 1500 = -17.66(\text{MPa})$,

 $Y_p = 95 \times 1000/145 = 655.17(\text{MPa})$, 代入三轴抗挤强度公式得 $p_{ca} = 16.48(\text{MPa})$ 。
所以, $S_{ca} = 16.48/15.93 = 1.035$, 满足要求。

b) 校核抗内压强度

井底最大内压力为 $p_{bo} = 0.00981 \times 1.45 \times 1500 = 21.33(\text{MPa})$,井口内压力为 $p_{bh} = \frac{21.33}{e^{1.1155 \times 10^{-4} \times (1500-0) \times 0.55}} = 19.43(\text{MPa})$,
 $S_i = p_{bo}/p_{be} = 31.37/19.4 = 1.62$, 满足要求。

 $\sigma_a = 31.7\text{MPa}$, $r_i = 157.66\text{mm}$, $r_o = 169.85\text{mm}$, $T_e = 0.00981 \times 101.2(1 - 1.25/7.85) \times 1500 = 1252(\text{kN})$,

 $\sigma_a = 99.872\text{MPa}$, $p_o = 0$, $Y_p = 95 \times 1000/145 = 655.17(\text{MPa})$, 代入三轴抗内压强度公式得:

$p_{ba} = 31.71 \times 1.0583 = 33.56$ (MPa)。所以, $S_{ia} = 33.56/19.4 = 1.73$, 满足要求。

c) 抗拉强度校核

井口有效拉力 $T_e = 1252$ kN, 抗拉强度 $T_o = 4955$ kN, 三轴抗拉强度 $T_a = T_o = 4955$ kN

所以, $S_{io} = S_{ia} = 4955/1252 = 3.96$, 满足要求。

表层套管设计结果见表 B3。

表 B3

段号	1	累重	151.8t	三轴抗挤强度	16.4MPa	有效拉力	1252kN
直径	339.7mm	钢级	C-95	抗挤系数	1.035	抗拉强度	4955kN
井段	0~1500m	壁厚	12.19mm	有效内压力	19.4MPa	三轴抗拉强度	4955kN
段长	1500m	牙型	短圆扣	抗内压强度	31.37MPa	抗拉系数	3.96
每米重量	101.2kg/m	有效外压力	15.93MPa	三轴抗内压强度	33.56MPa		
段重	151.8t	抗挤强度	16.06MPa	抗内压系数	1.73		

表层套管强度设计曲线如图 B1。

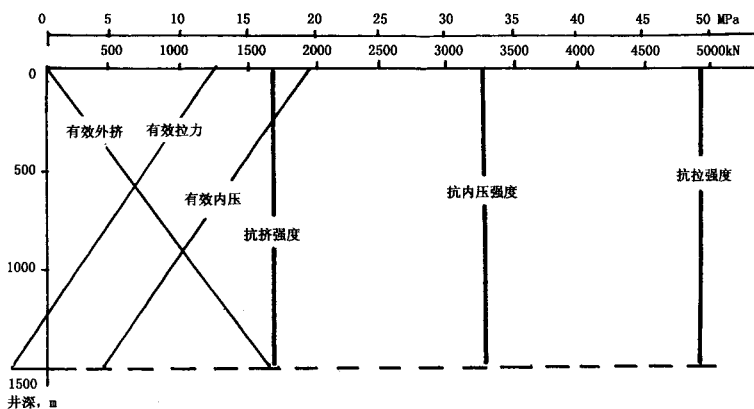


图 B1

B1.2 技术套管

设计原始数据见表 B4。

表 B4

井型	探井(非气井)	下次最大钻井液密度	1.55g/cm ³	岩石泊松系数	0.30
井号	T001	下次最小钻井液密度	1.30g/cm ³	下入总长	3500m
类型	技术套管	地层水密度	1.05g/cm ³	掏空系数	0.65
尺寸	244.5mm	天然气相对密度	0.55	抗挤系数	1.00
下深	3500m	地层压力梯度	0.0145MPa/m	抗内压系数	1.10
水泥返高	3500m	上覆岩层压力梯度	0.023MPa/m	抗拉系数	1.65
固井时钻井液密度	1.45g/cm ³	破裂压力梯度	0.021MPa/m	是否塑变地层	否

a) 抗挤设计第一段套管

$$p_{csl} = 0.00981[1.45 - (1 - 0.65)1.30]3500 = 34.16(\text{MPa})。$$

选择第一段套管性能参数见表 B5。

表 B5

直径	244.5mm	单位长度质量	69.94kg/m
钢级	P-110	抗挤强度	36.54MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	65.08MPa
壁厚	11.99mm	抗拉强度	5395.7kN
管体屈服强度	6641.2kN		

$$S_{cl} = 36.54/34.16 = 1.07, \text{ 满足要求。}$$

由三轴抗挤强度公式得第一段套管底部三轴抗挤强度为 $p_{cal} = 39.24(\text{MPa})$,

所以, $S_{cal} = 39.24/34.16 = 1.15$, 满足要求。

选第二段套管的性能参数见表 B6。

表 B6

直径	244.5mm	单位长度质量	64.74kg/m
钢级	N-80	抗挤强度	26.27MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	43.64MPa
壁厚	11.05mm	抗拉强度	3669.8kN
管体屈服强度	4470.5kN		

计算得: $C_1 = 0.000541$, $C_2 = 0.4379$, $C_3 = -0.000117$, $a = 2.42 \times 10^{-7}$, $b = 1.344 \times 10^{-4}$,

$$c = -0.808。 \text{ 所以, } H_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = 1570(\text{m})。$$

第一段套管的下入长度 $L_1 = 3500 - 1570 = 1930(\text{m})$ 。

b) 校核第一段套管抗拉强度

第一段套管顶部有效拉力 $T_{el} = 0.00981 \times 0.8153 \times 69.94 \times 1930 = 1079.6(\text{kN})$,

$S_{tl} = 5395.7/1079.6 = 4.99$, 满足要求。

将 $p_i = 0.00981 \times (1 - 0.65) \times 1.3 \times 1570 = 5.4(\text{MPa}) = 5400(\text{kPa})$,

$p_o = 0.00981 \times 1.45 \times 1570 = 22.3(\text{MPa}) = 22300(\text{kPa})$, $T_o = 5395.7\text{kN}$, $r_i = 110.26\text{mm}$, r_o

$= 122.25\text{mm}$, 代入三轴抗拉强度公式得: $T_{al} = 5171\text{kN}$ 。 $S_{tal} = 5171/1079.6 = 4.79$, 满足要求。

c) 校核第一段套管抗内压强度

顶部有效内压力 $p_{be} = 0.00981(1.55 - 1.05)1570 = 7.7(\text{MPa})$,

底部有效内压力 $p_{be} = 0.00981(1.55 - 1.05)3500 = 17.17(\text{MPa})$,

$S_{iel} = 65.08/17.17 = 3.79$, 满足要求。

将 $p_{bo} = 65.08\text{MPa}$, $r_o = 122.25\text{mm}$, $r_i = 110.26\text{mm}$, $Y_p = 110 \times 1000/145 = 758.6(\text{MPa})$,

$\sigma_a = -0.00981 \times 1.45 \times 3500 = -49.78\text{MPa}$, $p_o = 0.00981 \times 1.45 \times 3500 = 49.78(\text{MPa})$,

代入三轴抗内压强度公式得 $p_{bal} = p_{bo} = 65.08\text{MPa}$ 。所以, $S_{ial} = S_{iel} = 65.08/17.17 = 3.79$, 满足要求。

d) 校核第二段套管抗拉强度

$T_{e2} = 0.8153 \times (69.94 \times 0.00981 \times 1930 + 64.74 \times 0.00981 \times 1570) = 1892(\text{kN})$ 。

由于第二段套管顶部内外压力都为零, 所以, $S_{te2} = S_{ie2} = 3669.8/1892 = 1.94$, 满足要求。

e) 校核第二段套管的抗内压强度

由于是非气井, 第二段套管顶部(井口)的内压为零。所以, 满足要求。

f) 第二段套管抗挤强度校核

有效外挤压力 $p_{\text{oe2}} = 0.00981 [1.45 (1 - 0.65) 1.30] 1570 = 15.32 \text{ (MPa)}$ 。

$S_{\text{oe2}} = 26.27 / 15.32 = 1.71$ 。

$S_{\text{oe2}} = 15.32 / 15.32 = 1$ (按设计系数为 1 的三轴设计)。

技术套管设计结果见表 B7。

表 B7

第 1 段设计结果							
段号	1	累重	134.98t	三轴抗挤强度	39.24MPa	有效拉力	1079kN
直径	244.5mm	钢级	P-110	抗挤系数	1.15	抗拉强度	5396kN
井段	1570~3500m	壁厚	11.99mm	有效内压力	17.17MPa	三轴抗拉强度	5171kN
段长	1930m	牙型	长圆扣	抗内压强度	65.08MPa	抗拉系数	4.79
每米重	69.94kg/m	有效外压力	34.16MPa	三轴抗内压强度	65.08MPa		
段重	134.98t	抗挤强度	36.54MPa	抗内压系数	3.79		
第 2 段设计结果							
段号	2	累重	241.33t	三轴抗挤强度	15.32MPa	有效拉力	1892kN
直径	244.5mm	钢级	N-80	抗挤系数	1.00	抗拉强度	3669kN
井段	0~1570m	壁厚	11.05mm	有效内压力	0MPa	三轴抗拉强度	3669kN
段长	1570m	牙型	长圆扣	抗内压强度	43.6MPa	抗拉系数	1.94
每米重	67.74kg/m	有效外压力	15.32MPa	三轴抗内压强度	43.6MPa		
段重	106.35t	抗挤强度	26.27MPa	抗内压系数	>1.10		

技术套管强度设计曲线如图 B2。

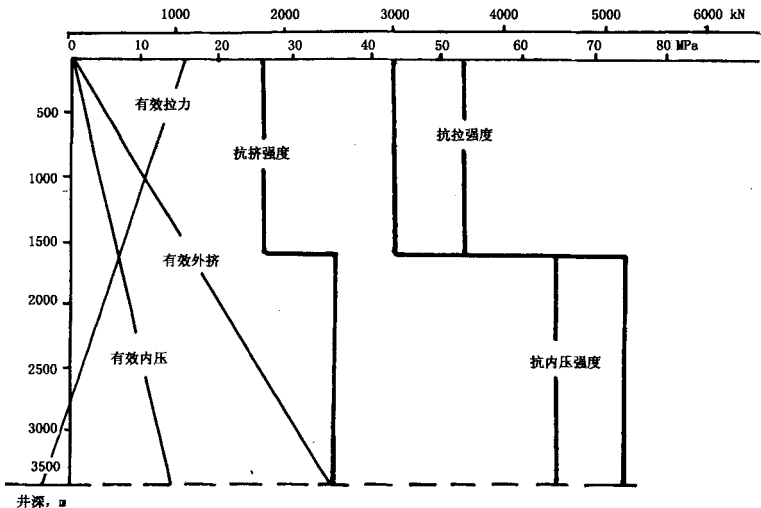


图 B2

B1.3 生产套管

设计原始数据见表 B8。

表 B8

井型	探井(气井)	下次最大钻井液密度	1.55g/cm ³	岩石泊松系数	0.35
井号	T001	完井泥浆密度	1.25g/cm ³	套管下入总长	4500m
类型	油层套管	地层水密度	1.05g/cm ³	掏空系数	1.00
尺寸	177.8mm	天然气相对密度	0.55	抗挤系数	1.00
下深	4500m	地层压力梯度	0.015MPa/m	抗内压系数	1.00
水泥返高	4500m	上覆岩层压力梯度	0.023MPa/m	抗拉系数	1.80
固井时钻井密度	1.50g/cm ³	破裂压力梯度	0.021MPa/m	是否塑变地层	是

a) 抗挤设计第一段套管

$$p_{\text{cal}} = [0.35 / (1 - 0.35) \times 0.023 - 0.00981 (1 - 1) \times 1.25] \times 4500 = 55.73 \text{ (MPa)}.$$

根据有效外挤压力选择 C-75 壁厚 11.51mm 套管, 其强度参数如表 B9。

表 B9

直径	177.8mm	单位长度质量	47.62kg/m
钢级	C-75	抗挤强度	56.54MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	58.54MPa
壁厚	11.51mm	抗拉强度	2815.7kN
管体屈服强度	3109.3kN		

将 $p_{\infty} = 56.54 \text{ MPa}$, $Y_p = 75 \times 1000 / 145 = 517.24$, $p_i = -0.00981 \times (1 - 1) \times 1.25 \times 4500 = 0$, $\sigma_a = -0.00981 \times 1.50 \times 4500 = -66.22 \text{ (MPa)}$ 代入三轴抗挤强度公式得 $p_{\text{cal}} = 60.5 \text{ (MPa)}$ 。

第一段套管三轴抗挤系数为 $S_{\text{cal}} = 60.5 / 55.73 = 1.086$, 满足要求。

第二套管选择 C-75 壁厚 10.36mm, 其性能参数见表 B10。

表 B10

直径	177.8mm	单位长度质量	43.16kg/m
钢级	C-75	抗挤强度	46.4MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	52.74MPa
壁厚	10.36mm	抗拉强度	2499.9kN
管体屈服强度	2820.2kN		

将 $C_1 = 0.000317$, $C_2 = 0.603$, $C_3 = -0.000134$ 代入 $a = C_1^2 + C_1 C_3 + C_3^2 = 7.5 \times 10^{-8}$

$$b = C_1 C_2 + 2 C_2 C_3 = 2.94 \times 10^{-5}, \quad c = C_2^2 - 1 = -0.6364$$

$$H_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = 2700 \text{ (m)}$$

第一段套管的下入长度 $L_1 = 4500 - 2700 = 1800 \text{ (m)}$ 。

b) 校核第一段套管抗拉强度

有效拉力 $T_{el} = 0.8089 \times 47.62 \times 0.00981 \times 1800 = 680.3$ (kN)。

将 $p_i = 0$ (全掏空), $p_o = 0.00981 \times 1.5 \times 2700 = 39.7$ (MPa), $T_o = 2815.7$ kN, $r_o = 88.9$ mm, $r_i = 77.39$ mm 代入三轴抗拉强度公式得 $T_{al} = 1255$ kN。

三轴抗拉系数 $S_{al} = 1255/680.2 = 1.84$, 满足要求。

c) 校核第一段套管抗内压强度 (按关井全充满天然气)

井底有效内压力 $p_{bel} = (0.015 - 0.00981 \times 1.05) 4500 = 21.15$ (MPa)。

顶部有效内压力 $p_{bet} = 0.015 \times 4500 - 0.00981 \times 1.05 \times 2700 = 39.69$ (MPa)。

将 $p_{bel} = 58.54$ MPa, $r_o = 88.9$ mm, $r_i = 77.37$ mm, $Y_p = 75 \times 1000/145 = 517.24$ (MPa),

$\sigma = 9.81 (q_1 L_1 k_f) / A_1 = 113$ MPa, $p_o = 0.00981 \times 1.5 \times 2700 = 39.7$ (MPa) 代入三轴抗内压强度公式得:

$p_{bel} = 63.12$ MPa, 所以, $S_{il} = 63.12/39.69 = 1.59$, 满足要求。

由于第一段套管的三轴抗拉系数 1.84 已接近规定的值 1.80, 所以, 第二段套管应选比第一段高一级的改为按抗拉设计。重选第二套管强度参数见表 B11。

表 B11

直径	177.8mm	单位长度质量	52.09kg/m
钢级	C-75	抗挤强度	66.67MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	59.71MPa
壁厚	12.65mm	抗拉强度	3127kN
管体屈服强度	3394kN		

按抗拉强度确定第二段套管下长度。

$L_{a2} = [(3127/1.8) - 0.00981 \times 47.62 \times 1800 \times 0.8089] / (0.00981 \times 0.8089 \times 52.1) = 2560$ (m)。

此时, 第二段套管顶部井深为 $4500 - 1800 - 2560 = 140$ (m)。

按三轴抗拉强度计算第二段套管下深, 由三轴抗拉强度公式计算得: $T_{a2} = 3075$ kN。

所以, $L_{a2} = [(3075/1.80) - 0.00981 \times 47.62 \times 1800 \times 0.8089] / (0.00981 \times 52.1 \times 0.8089) = 2490$ (m)。

相对误差: $(2560 - 2490) / 2560 = 0.0273 > 0.01$, 不满足要求。

又令 $L_{a2} = L_{a2} = 2490$ mm, 此时, 第二段顶部井深为 $4500 - 1800 - 2490 = 210$ (m)。计算得: $T_{a2} = 3047$ kN,

$L_{a2} = [(3047/1.80) - 0.00981 \times 47.62 \times 1800 \times 0.8089] / (0.00981 \times 52.1 \times 0.8089) = 2450$ (m),

相对误差: $(2490 - 2450) / 2490 = 0.0161 > 0.01$, 不满足要求。

再令 $L_{a2} = L_{a2} = 2450$ mm, 此时, 第二段顶部井深为 $4500 - 1800 - 2450 = 250$ (m)。计算得: $T_{a2} = 3032$ kN。

$L_{a2} = [(3032/1.80) - 0.00981 \times 47.62 \times 1800 \times 0.8089] / (0.00981 \times 52.1 \times 0.8089) = 2430$ (m)。

相对误差: $(2450 - 2430) / 2450 = 0.008 < 0.01$, 满足要求。

所以, 第二段套管下入长度为 $L_2 = 2400$ m (取整数)。

d) 校核第二段套管的抗内压强度 (按关井充满天然气)

有效内压力为 $p_{b02} = 0.015 \times 4500 - 0.00981 \times 1.05 \times 300 = 64.4$ (MPa)。

将 $p_{b02} = 59.71$ MPa, $r_o = 88.9$ mm, $r_i = 76.25$ mm, $Y_p = 75 \times 1000/145 = 517.24$ (MPa), $\sigma_a = 9.81 (q_1 L_1 + q_2 L_2) k_t / A_2 = 254.88$ (MPa), $p_o = 0.00981 \times 1.5 \times 300 = 4.1$ (MPa) 代入三轴抗内压强度公式得: $p_{b01} = 67.86$ (MPa)。所以 $S_{12} = 67.68/64.4 = 1.05$, 满足要求。

e) 校核第二段套管抗挤强度

有效外挤压力 $p_{c02} = 0.35 / (1 - 0.035) \times 0.023 \times 2700 = 33.44$ (MPa)。

将 $p_i = 0$, $\sigma_a = 9.81 q_1 L_1 k_t / A_2 = 104$ (MPa), $Y_p = 75 \times 1000/145 = 517.24$ (MPa), $p_{c02} = 66.67$ MPa 代入三轴抗挤强度公式得 $p_{c02} = 59$ (MPa)。所以, $S_{12} = 59/33.44 = 1.76$, 满足要求。

第三段套管下入长度为 $L_3 = 4500 - 1800 - 2400 = 300$ (m)。

选第三段套管性能参数见表 B12。

表 B12

直径	177.8mm	单位长度质量	56.55kg/m
钢级	C-95	抗挤强度	92.7MPa
牙型	梯形扣	抗内压强度	69.3MPa
壁厚	13.72mm	抗拉强度	4141kN
管体屈服强度	4630kN		

f) 抗拉强度校核

有效拉力 $T_{03} = 0.00981 (L_1 q_1 + L_2 q_2 + L_3 q_3) k_t = 1807$ (kN)。

将 $T_o = 4141$ kN, $r_o = 88.9$ mm, $r_i = 75.18$ mm, $p_i = 0$, $p_o = 0$ 代入三轴抗拉强度公式得:

$T_{03} = T_o = 4141$ kN。所以 $S_{13} = 4141/1807 = 2.29$, 满足要求。

g) 抗内压强度校核

有效内压 $p_{b03} = 0.015 \times 4500 = 67.5$ (MPa), 将 $p_{c03} = 0$, $p_{b0} = 69.3$ (MPa), $r_o = 88.9$ mm, $r_i = 75.18$ mm, $Y_p = 655$ MPa, $\sigma_a = 255.6$ MPa 代入三轴抗内压强度公式得: $p_{b03} = 1.082 \times 69.3 = 75$ (MPa)。

所以, $S_{13} = 75/67.5 = 1.11$, 满足要求。

h) 抗挤强度校核

有效外挤压力 $p_{c03} = 0.35 / (1 - 0.35) \times 0.023 \times 300 = 3.72$ (MPa)。

将 $p_i = 0$, $Y_p = 655$ (MPa), $\sigma_a = 255.6$ MPa, $p_{c03} = 92.7$ 代入三轴抗挤强度公式得: $p_{c03} = 69$ MPa。

所以, $S_{13} = 69/3.72 = 18.55$, 满足要求。

生产套管设计结果见表 B13。

表 B13

第1段设计结果							
段号	1	累重	85.72t	三轴抗挤强度	60.5MPa	有效拉力	680.3kN
直径	177.8mm	钢级	C-75	抗挤系数	1.086	抗拉强度	2815.7kN
井段	2700~4500m	壁厚	11.51mm	有效内压力	39.69MPa	三轴抗拉强度	1255kN
段长	1800m	牙型	长圆扣	抗内压强度	58.54MPa	抗拉系数	1.84
每米重	47.62kg/m	有效外压力	55.73MPa	三轴抗内压强度	63.12MPa		
段重	85.72t	抗挤强度	56.54MPa	抗内压系数	1.59		

表 B13 (完)

第 2 段设计结果							
段号	2	累重	210.74t	三轴抗挤强度	59MPa	有效拉力	1672kN
直径	177.8mm	钢级	C-75	抗挤系数	1.76	抗拉强度	3127kN
井段	300~2700m	壁厚	12.65mm	有效内压力	64.4MPa	三轴抗拉强度	3010kN
段长	2400m	牙型	长圆扣	抗内压强度	59.71MPa	抗拉系数	1.80
每米重	52.09kg/m	有效外压力	33.44MPa	三轴抗内压强度	67.68MPa		
段重	125.02t	抗挤强度	66.67MPa	抗内压系数	1.05		
第 3 段设计结果							
段号	3	累重	227.71t	三轴抗挤强度	69MPa	有效拉力	1807kN
直径	177.8mm	钢级	C-95	抗挤系数	18.55	抗拉强度	4141kN
井段	0~300m	壁厚	13.72mm	有效内压力	67.5MPa	三轴抗拉强度	4141kN
段长	300m	牙型	梯形扣	抗内压强度	69.3MPa	抗拉系数	2.29
每米重	56.55kg/m	有效外压力	3.72MPa	三轴抗内压强度	75MPa		
段重	16.97t	抗挤强度	92.7MPa	抗内压系数	1.11		

生产套管强度曲线如图 B3。

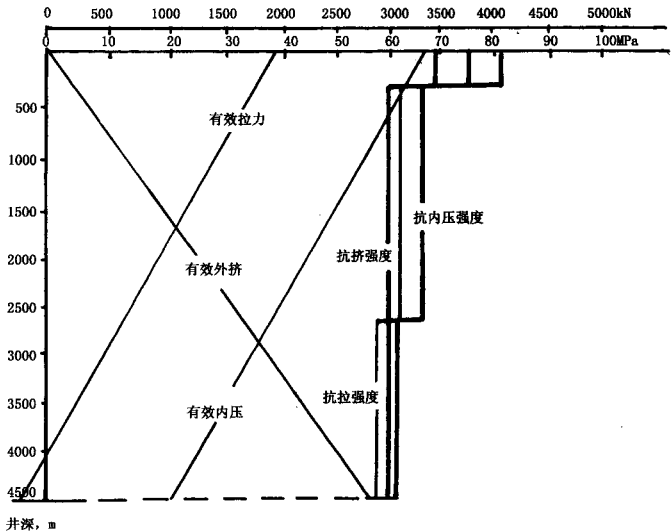


图 B3

B2 定向井

定向井剖面如图 B4，图中 $\alpha = 45^\circ$ ，增斜率 $\theta = 45^\circ/100\text{m}$ ， $R = 5730/4.5 = 1273$ (m)， $H_{\text{md}2} = 2000\text{m}$ ， $H_{\text{md}3} = 3500\text{m}$ ， $H_{\text{v}2} = R \sin \alpha = 1273 \times \sin 45^\circ = 900$ (m)， $H_{\text{v}3} = 1500 \times \sin 45^\circ = 1060$ (m)。

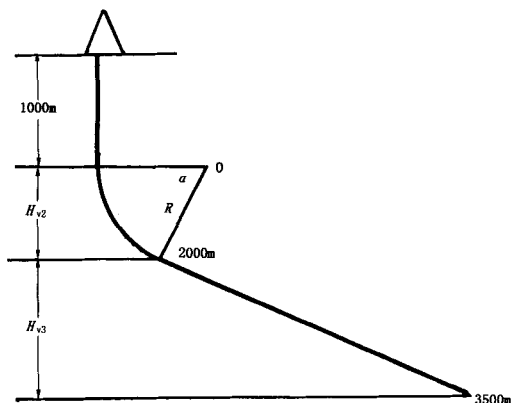


图 B4

B2.1 表层套管

设计原始数据见表 B14。

表 B14

井型	定向井(无气)	下次最大钻井液密度	1.40g/cm ³	岩石的泊松系数	0.4
井号	D001	下次最小钻井液密度	1.20g/cm ³	下入总长	1000m
套管类型	表层套管	地层水密度	1.05g/cm ³	掏空系数	0.65
尺寸	339.7mm	天然气相对密度	0.55	抗挤系数	1.00
下深	1000m	地层压力梯度	0.0125MPa/m	抗内压系数	1.10
水泥返高	1000m	上覆岩层压力梯度	0.023MPa/m	抗拉系数	2.0
固井时钻井液密度	1.25g/cm ³	破裂压力梯度	0.016MPa/m	是否塑变地层	否

a) 抗挤设计表层套管

$$p_{ce} = 0.00981 \times [1.25 - (1 - 0.65) \times 1.2] \times 1000 = 8.14 \text{ (MPa)}。$$

根据有效外挤压力选 K-55 壁厚 10.92mm 的套管，其性能参数如表 B15。

表 B15

直径	339.7mm	单位长度质量	90.8kg/m
钢级	K-55	抗挤强度	10.62MPa
牙型	短圆扣	抗内压强度	21.3MPa
壁厚	10.92mm	抗拉强度	2815.7kN
管体屈服强度	4279kN		

将 $p_1 = -0.00981 \times (1 - 0.65) \times 1.2 \times 1000 = 4.12$ (MPa), $\sigma_a = -0.00981 \times 1.25 \times 1000 = -12.26$ (MPa),

$Y_p = 55 \times 1000 / 145 = 379.3$ MPa, $p_{co} = 10.62$ MPa 代入三轴抗挤强度公式得: $p_{ca} = 10.8$ MPa。

所以, $S_{ca} = 10.8 / 8.14 = 1.33$, 满足要求。

b) 抗拉强度校核

有效拉力 $T_e = 0.00981 \times 90.8 \times (1 - 1.25 / 7.85) \times 1000 = 748.91$ (kN)。

将 $T_o = 2815.7$ kN, $p_1 = 0$, $p_o = 0$ 代入三轴抗拉强度公式得 $T_a = 2815.7$ kN。

所以, $S_{Ta} = S_{To} = 2815.7 / 748.91 = 3.76$, 满足要求。

c) 抗内压强度校核

井底有效内压 $p_{be} = 0.00981 \times (1.4 - 1.05) \times 1000 = 3.43$ (MPa)。

将 $p_o = 0.00981 \times 1.25 \times 1000 = 12.26$ (MPa), $p_{bo} = 21.3$ MPa, $\sigma_a = -0.00981 \times 1.25 \times 1000 = -12.26$ (MPa)

代入三轴抗内压强度公式得 $p_{ba} = p_{bo} = 21.3$ (MPa)。

所以, $S_{Ia} = 21.3 / 3.43 = 6.21$, 满足要求。

表层套管设计结果见表 B16。

表 B16

段号	1	累重	90.8t	三轴抗挤强度	10.8MPa	有效拉力	748.91kN
直径	339.7mm	钢级	K-55	抗挤系数	1.33	抗拉强度	2815.7kN
井段	0~1000m	壁厚	10.92mm	有效内压力	3.43MPa	三轴抗拉强度	2815.7kN
段长	1000m	牙型	短圆扣	抗内压强度	21.3MPa	抗拉系数	3.76
每米重	90.8kg/m	有效外压力	8.14MPa	三轴抗内压强度	21.3MPa		
段重	90.8t	抗挤强度	10.62MPa	抗内压系数	6.21		

表层套管强度曲线如图 B5。

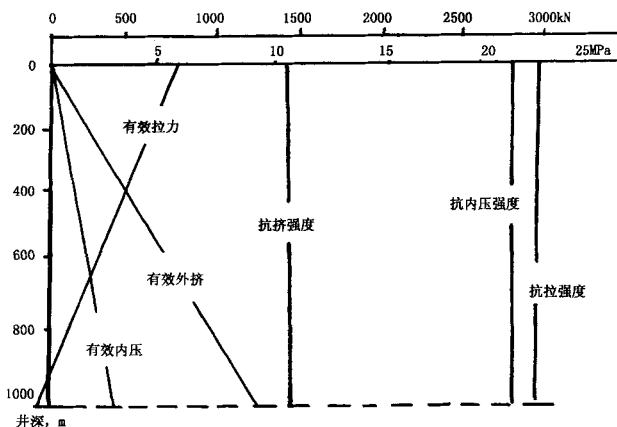


图 B5

B2.2 技术套管

设计原始数据见表 B17。

表 B17

井型	定向井(无气)	下次最大钻井液密度	1.50g/cm ³	岩石的泊松系数	0.35
井号	D001	下次最小钻井液密度	1.25g/cm ³	下入总长	2000m
类型	技术套管	地层水密度	1.05g/cm ³	掏空系数	0.5
尺寸	244.5mm	天然气相对密度	0.55	抗挤系数	1.00
下深	2000m	地层压力梯度	0.0135MPa/m	抗内压系数	1.10
水泥返高	2000m	上覆岩层压力梯度	0.023MPa/m	抗拉系数	2.00
固井时钻井液密度	1.35g/cm ³	破裂压力梯度	0.019MPa/m	是否塑变地层	否

a) 抗挤设计技术套管

$$p_{ce} = 0.00981 \times (1.35 - (1 - 0.5) \times 1.25) \times (1000 + 900) = 13.5 \text{ (MPa)}。$$

根据有效外挤压力选择 J-55 壁厚 10.03mm 套管，其性能参数见表 B18。

表 B18

直径	244.5mm	单位长度质量	59.53kg/m
钢级	J-55	抗挤强度	17.72MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	27.23MPa
壁厚	10.03mm	抗拉强度	2313kN
管体屈服强度	2820kN		

将 $p_1 = -0.00981 \times (1 - 0.5) \times 1.25 \times 1900 = -11.65 \text{ (MPa)}$, $\sigma_a = -0.00981 \times 1.35 \times 1900 = 25 \text{ (MPa)}$,

$$p_{co} = 17.72 \text{ MPa}, Y_p = 55 \times 1000 / 145 = 379.3 \text{ (MPa)}, \text{代入三轴抗挤强度公式得 } p_{ca} = 19.5 \text{ MPa}。$$

所以, $S_c = 19.5 / 13.5 = 1.44$, 满足要求。

b) 抗拉强度校核

$$\text{自重拉力 } T_{kt} = 0.00981 \times 1900 (1 - 1.35 / 7.85) \times 59.53 = 918.7 \text{ (kN)},$$

$$\text{套管弯曲力 } F_b = 2.32 \times 10^{-3} \times 244.5 \times 59.53 \times 4.5 = 152 \text{ (kN)},$$

$$\text{所以, } T_c = 918.7 + 152 = 1070 \text{ (kN)}。$$

由于井口处 $p_o = 0$, $p_1 = 0$, 所以 $T_a = T_o = 2313 \text{ kN}$ 。

故 $S_t = 2313 / 1070 = 2.16$, 满足要求。

c) 抗内压强度校核

$$\text{有效内压力 } p_{be} = 0.00981 \times (1.5 - 1.05) \times 1900 = 8.4 \text{ (MPa)}。$$

$$\text{将 } p_o = 0.00981 \times 1.35 \times 1900 = 25.2 \text{ (MPa)}, \sigma_a = -0.00981 \times 1.35 \times 1900 = -25.2 \text{ (MPa)}。$$

代入三轴抗内压强度公式得 $p_{be} = p_{bo} = 27.23 \text{ MPa}$ 。所以, $S_i = 27.23 / 8.4 = 3.24$, 满足要求。

设计结果见表 B19。

表 B19

段号	1	累重	119.06t	三轴抗挤强度	19.5MPa	有效拉力	1070kN
直径	244.5mm	钢级	J-55	抗挤系数	1.44	抗拉强度	2313kN
井段	0~2000m	壁厚	10.03mm	有效内压力	8.4MPa	三轴抗拉强度	2313kN
段长	2000m	牙型	长圆扣	抗内压强度	27.23MPa	抗拉系数	2.16
每米重	59.53kg/m	有效外压力	13.5MPa	三轴抗内压强度	27.23MPa		
段重	119.06t	抗挤强度	17.72MPa	抗内压系数	3.24		

技术套管强度曲线如图 B6。

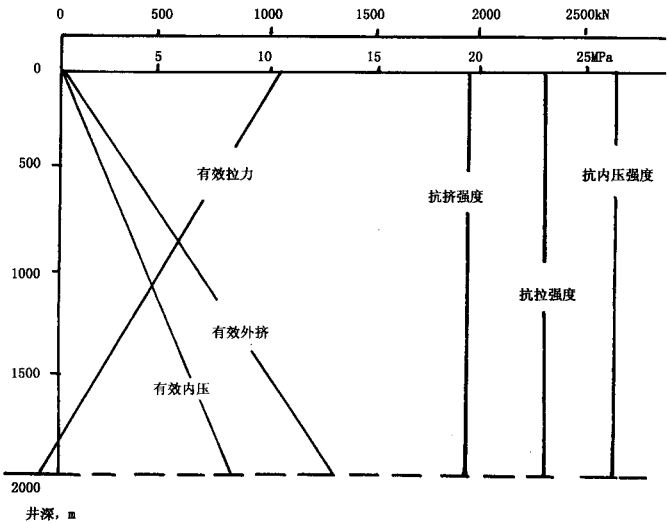


图 B6

B2.3 生产套管

设计原始数据见表 B20。

表 B20

井型	定向井(油井)	下次最大钻井液密度	1.55g/cm ³	岩石的泊松系数	0.35
井号	D001	下次最小钻井液密度	1.30g/cm ³	下入总长	3500m
类型	生产套管	地层水密度	1.05g/cm ³	掏空系数	0.5
尺寸	177.8mm	天然气相对密度	0.55	抗挤系数	1.00
下深	3500m	地层压力梯度	0.0145MPa/m	抗内设计系数	1.10
水泥返高	3500m	上覆岩层压力梯度	0.023MPa/m	抗拉系数	2.00
固井时钻井液密度	1.45g/cm ³	破裂压力梯度	0.021MPa/m	是否塑变地层	否

a) 抗挤设计第一段(斜直段)

$$p_{\text{el}} = 0.00981 \times [1.45 - (1 - 0.5) \times 1.3] \times (1000 + 900 + 1060) = 23.23 \text{ (MPa)}。$$

根据有效外挤压力选择 K-55 壁厚 8.05mm 套管, 其性能参数见表 B21。

表 B21

直径	177.8mm	单位长度质量	34.23kg/m
钢级	K-55	抗挤强度	22.55MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	30MPa
壁厚	8.05mm	抗拉强度	1517kN
管体屈服强度	1628kN		

将 $p_i = 0.00981 \times (1 - 0.5) \times 1.3 \times 2960 = -18.87 \text{ (MPa)}$, $\sigma_a = -0.00981 \times 1.45 \times 2960 = -42.1 \text{ (MPa)}$,

$$Y_p = 55 \times 1000 / 145 = 379.3 \text{ (MPa)}, p_{\text{co}} = 22.55 \text{ MPa 代入三轴抗挤强度公式得 } p_{\text{cal}} = 24 \text{ MPa}。$$

所以, $S_{\text{cl}} = 24 / 23.23 = 1.03$, 满足要求。

因为斜直段长为 1500m, 所以, 第一段套管下入长度为 1500m, 垂直长度为 1060m, 其顶部垂深为 1900m。

b) 校核抗拉强度

$$\text{有效拉力 } T_{\text{el}} = 0.00981 \times (1 - 1.45 / 7.85) \times 34.23 \times 1060 = 290 \text{ (kN)}。$$

将 $T_o = 1517 \text{ kN}$, $p_i = 0.00981 \times (1 - 0.5) \times 1.3 \times 1900 = 12.1 \text{ (MPa)}$, $p_o = 0.00981 \times 1.45 \times 1900 = 27 \text{ (MPa)}$,

$$r_o = 88.9 \text{ mm}, r_i = 80.5 \text{ mm}, \text{ 代入三轴抗拉强度公式得 } T_{\text{al}} = 1100 \text{ kN}。$$

所以, $S_{\text{tl}} = 1100 / 290 = 3.8$, 满足要求。

c) 校核抗内压强度(不用油管生产)

$$\text{井底有效内压力 } p_{\text{bel}} = (0.0145 - 1.05 \times 0.00981) \times 2960 = 12.43 \text{ (MPa)},$$

顶部有效内压力 $p_{\text{bel}} = (0.0145 \times 2960) / e^{0.00011155 \times (2960 - 1900) \times 0.55} - 0.00981 \times 1.05 \times 1900 = 20.63 \text{ (MPa)}$,

将 $p_{\text{bo}} = 30 \text{ MPa}$, $r_o = 88.9 \text{ mm}$, $r_i = 80.85 \text{ mm}$, $Y_p = 379.3 \text{ MPa}$, $p_o = 0.00981 \times 1.45 \times 1900 = 27 \text{ (MPa)}$,

$$\sigma_a = 64.9 \text{ MPa 代入三轴抗内压强度公式得: } p_{\text{bal}} = 32.6 \text{ MPa}。$$

所以, $S_{\text{il}} = 32.6 / 20.63 = 1.58$, 满足要求。

d) 抗拉设计第二段套管(弯曲段)

选择 N-80 壁厚 8.05mm 套管, 其性能参数见表 B22。

表 B22

直径	177.8mm	单位长度质量	34.23kg/m
钢级	N-80	抗挤强度	26.41MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	43.7MPa
壁厚	8.05mm	抗拉强度	1966kN
管体屈服强度	2366kN		

弯曲段套管下入长度为 1000m, 垂直长度为 900m, 垂深为 1900m。

e) 抗拉强度校核

有效拉力 $T_{e2} = 0.00981 \times 34.23 \times (1060 + 900) \times 0.815 + 0.00232 \times 177.8 \times 34.23 \times 4.5 = 600$ (kN)。

将 $T_o = 1966$ kN, $r_o = 88.9$ mm, $r_i = 80.85$ mm, $p_o = 0.00981 \times 1.45 \times 1000 = 14.2$ (MPa), $p_i = 0.00981 \times (1 - 0.5) \times 1.3 \times 1000 = 4.9$ (MPa), 代入三轴抗拉强度公式得: $T_{a2} = 1706$ kN。

所以, $S_{e2} = 1706/600 = 2.84$, 满足要求。

f) 抗内压强度校核

有效内压力 $p_{b2} = (0.0145 \times 2960) / e^{0.00011155 \times (2960 - 1000) \times 0.55} - 0.00981 \times 1.05 \times 1000 = 42.92 / 1.13 - 10.3 = 27.68$ (MPa)。

将 $p_{b0} = 43.7$ MPa, $r_o = 88.9$ mm, $r_i = 80.85$ mm, $Y_p = 551.7$ MPa, $p_o = 0.00981 \times 1.45 \times 1000 = 14.2$ (MPa),

$\sigma_a = 139.9$ MPa, 代入三轴抗内压强度公式得: $p_{b2} = 47.55$ MPa。

所以, $S_{i2} = 47.55/27.68 = 1.72$, 满足要求。

g) 抗挤强度校核

有效外挤压力 $p_{e2} = 0.00981 \times [1.45 - (1 - 0.5) \times 1.3] \times 1900 = 14.9$ (MPa)。

将 $p_i = -0.00981 \times (1 - 0.5) \times 1.3 \times 1900 = -12.12$ (MPa), $\sigma_a = 67.59$ MPa,

$p_{e0} = 26.4$ MPa, $Y_p = 551.7$ MPa, 代入三轴抗挤强度公式得: $p_{e2} = 24.98$ MPa

所以, $S_{e2} = 24.98/14.9 = 1.68$, 满足要求。

h) 抗拉设计第三段 (垂直段)

该段套管选 C-90 壁厚 8.05mm, 其性能参数见表 B23。

表 B23

直径	177.8mm	单位长度质量	34.23kg/m
钢级	C-90	抗挤强度	27.8MPa
牙型	长圆扣	抗内压强度	49.2MPa
壁厚	8.05mm	抗拉强度	1988kN
管体屈服强度	2665kN		

套管下入长度 1000m, 垂深 1000m。

i) 抗拉强度校核

有效拉力 $T_{e3} = T_{e2} + 0.9981 \times 34.23 \times 0.815 \times 1000 = 600 + 273.7 = 873.7$ kN。

在井口 $p_i = 0$, $p_o = 0$, 所以, $T_{a3} = T_{e3} = 1988$ kN。

故 $S_{i3} = 1988/873.7 = 2.27$, 满足要求。

j) 抗内压强度校核

有效内压力 $p_{b2} = (0.0145 \times 2960) / e^{0.00011155 \times (2960 - 0) \times 0.55} = 42.92/1.2 = 35.77$ MPa。

将 $Y_p = 551.7$ MPa, $p_o = 0$, $\sigma_a = 873.7/A_3 = 203.6$ MPa, $r_o = 88.9$ mm, $r_i = 80.85$ mm,

$p_{b0} = 49.2$ MPa 代入三轴抗内压强度公式得: $p_{b2} = 54$ MPa

所以, $S_{i3} = 54/35.77 = 1.51$, 满足要求。

k) 抗挤强度校核

有效外挤压力 $p_{\text{es}} = 0.00981 \times [1.45 - (1 - 0.5) \times 1.3] \times 1000 = 7.85 \text{ (MPa)}$ 。

将 $Y_p = 551.7 \text{ MPa}$, $p_i = -0.00981 \times (1 - 0.5) \times 1.3 \times 1000 = 6.38 \text{ (MPa)}$, $\sigma_a = 600/A_3 = 139.9 \text{ MPa}$,

$p_{\text{co}} = 27.8 \text{ MPa}$ 代入三轴抗挤强度公式得: $p_{\text{cs}} = 23.8 \text{ MPa}$ 。

$S_{\text{cs}} = 23.8/7.85 = 3.03$, 满足要求。

生产套管设计结果见表 B24。

表 B24

斜直段设计结果							
段号	1 (斜直段)	累重	51.345t	三轴抗挤强度	24MPa	有效拉力	290kN
直径	177.8mm	钢级	K-55	抗挤系数	1.033	抗拉强度	1517kN
井段	2000~3500m	壁厚	8.05mm	有效内压力	20.63MPa	三轴抗拉强度	1100kN
段长	1500m	牙型	长圆扣	抗内压强度	30MPa	抗拉系数	3.8
每米重	34.23kg/m	有效外压力	23.23MPa	三轴抗内压强度	32.6MPa		
段重	51.345t	抗挤强度	22.55MPa	抗内压系数	1.58		
弯曲段设计结果							
段号	2 (弯曲段)	累重	85.575t	三轴抗挤强度	24.98MPa	有效拉力	600kN
直径	177.8mm	钢级	N-80	抗挤系数	1.68	抗拉强度	1966kN
井段	1000~2000m	壁厚	8.05mm	有效内压力	27.68MPa	三轴抗拉强度	1706kN
段长	1000m	牙型	长圆扣	抗内压强度	43.7MPa	抗拉设计系数	2.84
每米重	34.23kg/m	有效外压力	14.9MPa	三轴抗内压强度	47.55MPa		
段重	34.23t	抗挤强度	26.4MPa	抗内压系数	1.72		
垂直段设计结果							
段号	3 (垂直段)	累重	119.805t	三轴抗挤强度	23.8MPa	有效拉力	873.7kN
直径	177.8mm	钢级	C-90	抗挤系数	3.03	抗拉强度	1988kN
井段	0~1000m	壁厚	8.05mm	有效内压力	35.55MPa	三轴抗拉强度	1988kN
段长	1000m	套管牙型	长圆扣	抗内压强度	49.2MPa	抗拉系数	2.27
每米重	34.23kg/m	有效外压力	7.85MPa	三轴抗内压强度	54MPa		
段重	34.23t	抗挤强度	27.8MPa	抗内压系数	1.51		

生产套管强度设计曲线如图 B7。

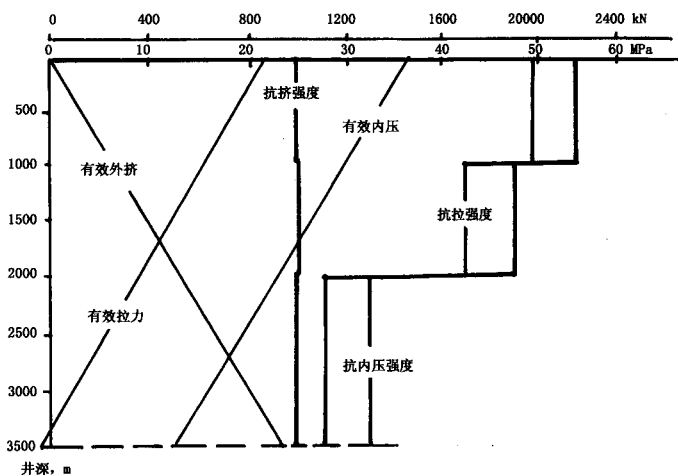


图 B7

附录 C

(提示的附录)

井口装定载荷计算

C1 套管井口载荷的交付

固井作业完成后,悬挂在转盘上的套管负荷要移交给井口,使套管悬重挂在井口上,这项作业叫井口装定。由于该层套管在今后钻井、试油及开采过程中受力条件要发生变化,井口载荷应当合理,以保证条件变化时套管不会发生破坏。

C2 套管装定载荷计算

套管装定载荷用式 (C1) ~ 式 (C11) 计算。

$$T_s = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 + B_{10} \quad \text{.....(C1)}$$

$$B_1 = 0.00981(32.8\Delta tq_f + 584q_g) \quad \text{.....(C2)}$$

$$B_2 = -0.00981q_g L_g \quad \text{.....(C3)}$$

$$B_3 = 7.85 \times 10^{-6} D_c^2 L_g \rho_{sm} \quad \text{.....(C4)}$$

$$B_4 = -7.85 \times 10^{-6} D_{ci}^2 L_g \rho_{im} \quad \text{.....(C5)}$$

$$B_5 = -5.5 \times 10^{-6} D_c^2 L_f \Delta \rho_e \quad \text{.....(C6)}$$

$$B_6 = 5.5 \times 10^{-6} D_{ci}^2 L_f \Delta \rho_i \quad \text{.....(C7)}$$

$$B_7 = -3.2 \times 10^{-4} D_c^2 \Delta p_e \quad \text{.....(C8)}$$

$$B_8 = 3.2 \times 10^{-4} D_{ci}^2 \Delta p_i \quad \text{.....(C9)}$$

$$B_9 = 3.14 \times 10^{-6} D_c^2 (\rho_m + \Delta \rho_m) (L_m + 0.75 L_m^2 / L_f) \quad \text{.....(C10)}$$

$$B_{10} = -3.14 \times 10^{-6} D_{ci}^2 (\rho_i + \Delta \rho_i) (L_{im} + 0.75 L_{im}^2 / L_f) \quad (L_{im} \leq L_f) \quad \text{.....(C11)}$$

如果计算结果 T_s 为负值,则安装井口时需要下放此值的力;反之需要上提此值的力。

C3 套管伸长计算

安装井口上提和下放时,套管伸长或缩短长度用式 (C12) 计算。

$$\Delta L = \frac{T_s L_f}{161.7(D_c^2 - D_{ci}^2)} \quad \text{.....(C12)}$$

C4 井口载荷计算

井口载荷用式 (C13) ~ 式 (C25) 计算。

$$Q_h = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8 + Y_9 + Y_{10} + Y_{11} + Y_{12} \quad \text{.....(C13)}$$

$$Y_1 = + T_s \quad \text{.....(C14)}$$

$$Y_2 = -0.00981(32.8\Delta tq_f - 584q_g) \quad \text{.....(C15)}$$

$$Y_3 = 0.00981q_g (L_g + L_f) \quad \text{.....(C16)}$$

$$Y_4 = -7.85 \times 10^{-6} D_c^2 L_g \rho_{sm} \quad \text{.....(C17)}$$

$$Y_5 = -7.85 \times 10^{-6} D_{ci}^2 L_g \rho_{im} \quad \text{.....(C18)}$$

$$Y_6 = 7.85 \times 10^{-6} D_{\text{ci}}^2 (L_g + L_f) \rho_{\text{im}} \dots\dots\dots (\text{C19})$$

$$Y_7 = -2.35 \times 10^{-6} D_{\text{c}}^2 L_{\text{f}} \Delta \rho_{\text{e}} \dots\dots\dots (\text{C20})$$

$$Y_8 = 2.35 \times 10^{-6} D_{\text{ci}}^2 L_{\text{f}} \Delta \rho_{\text{i}} \dots\dots\dots (\text{C21})$$

$$Y_9 = -4.807 \times 10^{-4} D_{\text{c}}^2 (\Delta p_{\text{e}} + 1.67 p_{\text{e}}) \dots\dots\dots (\text{C22})$$

$$Y_{10} = 4.807 \times 10^{-4} D_{\text{ci}}^2 (\Delta p_{\text{i}} + 1.67 p_{\text{ih}}) \dots\dots\dots (\text{C23})$$

$$Y_{11} = 4.87 \times 10^{-4} D_{\text{c}}^2 (\rho_{\text{m}} + \Delta \rho_{\text{e}}) (L_{\text{m}} - 0.5 L_{\text{m}}^2 / L_{\text{f}}) \dots\dots\dots (\text{C24})$$

$$Y_{12} = -4.87 \times 10^{-4} D_{\text{ci}}^2 (\rho_{\text{im}} + \Delta \rho_{\text{i}}) (L_{\text{im}} - 0.5 L_{\text{im}}^2 / L_{\text{f}}) \dots\dots\dots (\text{C25})$$