

高等学校教学用书

油 井 工 程

下 册

石油院校教材编写组编



中国工业出版社

目 录

第 四 篇 完 井

第十四章 固井	1
第1节 套管	1
第2节 套管柱設計	6
第3节 套管柱的附加裝置	16
第4节 下套管时的准备工作和下套管	22
第5节 油井水泥	24
第6节 注水泥方法及設備	32
第7节 注水泥計算	40
第8节 注水泥質量的检查及不合格的补救	46
第9节 影响注水泥質量的因素及提高注水泥質量的途径	49
第十五章 油井完成	53
第1节 井底完成方法及井底、井口裝置	54
第2节 射孔	59
第3节 誘导油流	73
第4节 地层測驗器的使用	82

第 五 篇 井場設備的搬运与安裝

第十六章 井場設備的搬运	88
第1节 两种搬家方法	88
第2节 井架立体拖运的方法	89
第十七章 钻前工程	92
第1节 开鑽前的准备工作与井場布置	92
第2节 鑽井設備的基础	94
第3节 主要鑽井設備的安裝	100
第4节 井口准备工作	106
第5节 冬季鑽井对保温的要求	108

第 六 篇 钻井生产的組織与管理

第十八章 钻井过程的生产組織	111
第1节 鑽井工作的特点及其生产結構	111
第2节 鑽井工作一条龙大协作的組織形式及先进經驗	112
第十九章 钻井队的工作	114
第1节 思想政治工作	114
第2节 技术管理工作	116
第3节 組織管理工作	117
第二十章 钻井工作的技术經濟指标	117
第1节 鑽井速度指标	118
第2节 鑽井时效分析	118
第3节 鑽井成本	120

第四篇 完 井

第十四章 固 井

为了保证地下的原油无损失地流至地面，必须自井底至井口造成一条中途不会流失的通路；为了防止压力不等的不同油层互相干扰和其它流体浸入井内，必须将各种油、气水层进行有效地隔离。此外，在钻井过程中，为了顺利地钻穿各种不同性质的地层，防止井塌、井漏和井喷等复杂现象的发生，有时也需要隔离复杂地层。上述各项任务，通常都通过固井工作来实现。因此，油、气井固井的目的在于：

1. 封隔油、气水层，并在井内形成一条中途不会流失原油的通道；
2. 安装井口设备，控制高压油、气、水的活动，并将喷出井口的流体引向预定容器；
3. 巩固井壁，防止坍塌。

现代钻井工艺中，通常是用一定直径、一定长度的钢质圆管（定名为套管），用接箍连接起来，逐根下入井内，并在套管柱和井壁之间灌注水泥，以达到巩固井壁、隔离各种地层的目的。因此固井工作一般包括下套管和注水泥两个主要组成部分。

第 1 节 套 管

油气井内目前用于固井的套管主要为无缝钢管。

表 14-1 各种钢级套管的机械性能

钢 级	抗张强度不小于 公斤/毫米 ²	延 伸 率 不 小 于 %		屈服极限不小于 公斤/毫米 ²
		δ_{10}	δ_5	
A	42	19	25	25
C	55	14	18	32
D	65	12	16	38
E _M	70	10	12	50
E	75	10	12	55
J1	95	10	12	65
M	100	10	12	70
20	40	17	20	—
35	52	14	17	—
45	60	12	14	—
30 公斤/厘米 ²	70	11	—	—

表 14-2

钢 管 尺 寸	外 径 精 确 度	壁 厚 (毫米)	精 确 度
外径 >219 毫米	+1.5% -1 %	3.5~20 >20	±12.5% ±10 %
外径 ≤219 毫米	±1 %		

表 14-3 套管强度特性表 (1956 年訂)

套管通称尺寸	套管外径 D	壁厚 δ	套管内径 d	套管理论重量	接箍外径 D _接	接箍重量	每米管柱重量	拉力强度 (吨)		当发生在管身上的应力达到屈服强度时的负荷 (吨)		抗挤毁力 (公斤/厘米 ²)		当发生在管身上的应力达到屈服强度时的内应力 (公斤/厘米 ²)																																									
								C		C		C		C																																									
								D _M	E	D _M	E	D _M	E	D _M	E																																								
								鋼								度 (公斤/毫米 ²)																																							
屈								服								强								度																															
C								D								E								E																															
32								38								50								55								60								65								70							
时	毫米	毫米	毫米	公斤/米	毫米	公斤	公斤	32	38	50	55	60	65	70	80	95	140	155	190	285	330	410	435	370	440	635	725	910																											
1 3/4	121	7	107	19.7	136	5.0	20.2	50	60	85					80	95	140			285	330	410	435	370	440	635																													
	125	8	105	22.3		22.8		60	70	105					90	110	155			345	395	510	550	425	505	725																													
	101	10	101	27.4		27.9		80	95	135					110	135	190			455	535	690	755	530	630	910																													
3 3/8	141	7	127	23.1	166	8.7	24.0	55	65	95					95	110	160			225	255	300	315	320	375	545																													
	125	8	125	26.2		27.1		70	80	115					105	135	185			280	320	395	420	360	430	625																													
	101	10	121	32.3		33.2		99	110	155					130	155	225			375	440	565	615	455	540	780																													
	117	12	117	38.4		39.3		115	135	195					155	185	270			465	550	715	780	545	645	935																													
5 3/4	146	6	134	—	166	8.7	—	45	55						85	100	170			160	175			260	310																														
	132	7	132	23.9		24.8		60	70	105					100	115	170			215	240	280	290	300	310	315	525																												
	101	8	130	27.2		28.1		70	85	125					110	130	190			265	305	370	390	410	425	440	600																												
	101	10	126	33.5		34.4		95	115	165					135	160	235			360	430	535	580	625	660	700	755																												
	122	12	122	39.3		40.2		120	140	205					160	190	280			450	530	685	750	815	875	930	905																												
7 5/8	168	6	156	—	188	9.3	—	50	60						95	115				115	125			225	270																														
	154	7	154	27.8		28.7		65	80	105	115	125	135	145	115	135	180	195	215	210	165	180	200	205	210	215	220	500	540	585																									
	132	8	152	31.6		32.5		80	95	125	140	150	165	175	130	155	220	240	260	280	210	240	275	285	300	305	310	620	665																										
	150	9	150	35.3		36.2		95	110	145	160	175	190	205	145	170	225	245	270	290	315	255	295	355	375	390	405	420	695	750																									
	148	10	148	39.0		39.9		110	130	170	185	205	220	235	160	190	250	275	300	325	350	300	350	430	460	490	515	535	715	775	835																								
	146	11	146	42.6		43.5		120	145	190	210	230	250	265	175	205	270	300	325	350	380	340	400	505	545	580	615	645	850	915																									
	144	12	144	46.2		47.1		135	160	210	230	255	275	300	190	225	295	325	350	380	410	380	445	570	620	670	710	755	950	1000																									
	140	14	140	53.2		54.1		165	195	255	280	305	330	355	215	255	340	370	405	440	475	460	540	700	765	830	890	950	1085	1170																									
9 5/8	194	8	178	36.7	216	12.5	37.9	90	110	160					150	180	260			160	175	195	200	265	315			455																											
	174	10	174	45.4		46.3		125	145	215					185	220	315			240	275	330	345	330	390			565																											
	12	12	170	53.9		55.1		155	185	270					220	260	375			315	365	460	495	395	470			680																											
	14	14	166	62.2		63.4		185	220	320					255	300	435			385	450	580	630	460	545			790																											
11 3/8	219	7	205	—	243	15.0	—	80	100						150	175				90	95			205	240																														
	203	8	203	41.6		43.1		100	120	175					170	200	290			125	130	140	145	235	280			400																											
	9.5	200	49.1		50.6			125	150	220					200	235	345			180	195	220	230	280	330			475																											
	11.0	197	56.4		57.9			155	180	260					230	275	395			230	265	310	325	320	380			550																											
	12.5	194	63.7		65.2			180	210	305					260	310	445			280	325	400	425	365	435			625																											

(續)

3

套管通称尺寸	套管外径 D	壁厚 δ	套管内径 d	套管理论重量	接箍外径 D _接	接箍重量	每米管柱重量	拉力强度 (吨)		当发生在管身上的应力达到屈服强度时的负荷 (吨)		抗挤毁力 (公斤/厘米)		当发生在管身上的应力达到屈服强度时的内应力 (公斤/厘米)								
								鋼		料		号		数								
								С	Д	С	Д	С	Д	С	Д							
吋	毫米	毫米	毫米	公斤/米	毫米	公斤	公斤	32	38	50	55	60	65	70	32	38	50	55	60	65	70	
9 ⁵ / ₈	245	8	229	46.8	269	17.3	46.8	110	130	190	325	95	100	105	105	210	250	360				
		9.5	226	55.2			56.9	140	165	240	385	140	160	165	170	250	295	425				
		11.0	223	63.5			65.2	165	200	285	445	190	210	240	250	285	340	490				
		12.5	220	71.7			73.4	195	230	335	500	240	270	320	340	325	385	555				
10 ³ / ₄	273	8	257	—	298	21.5	—	110	125	210	250	70	75			185	220	360				
		9	255	58.6			60.8	130	150	220	285	95	100	105	110	210	255	360				
		10.5	252	68.0			70.2	160	190	270	330	140	160	165	170	245	290	425				
		12	249	77.2			79.4	190	225	325	540	185	205	230	235	280	335	485				
11 ³ / ₄	299	9	281	—	325	24.3	73.7	140	160	275	310	260	310			195	230	365				
		10	279	71.3			80.5	160	190	275	345	290	345	100	105	110	115	215	255			
		11	277	78.5			87.3	180	215	310	545	320	380	125	135	145	150	235	280			
		12	275	84.6				205	240	350	595	345	410	150	165	180	185	255	305	440		
12 ³ / ₄	325	9	307	—	351	28.0	—	150	175	295	340	285	340	60	65	175	210	340				
		10	305	77.7			81.0	175	205	295	375	315	375	80	85	90	90	195	235			
		11	303	85.2			88.7	195	235	340	595	345	410	105	110	115	120	215	255			
		12	301	92.6			96.0	220	265	380	650	375	450	125	135	145	150	235	280	405		
13 ³ / ₄	351	9	333	—	376	29.0	—	160	190	315	365	310	365	50	50	165	195	310				
		10	331	84.1			87.7	185	220	315	405	345	405	65	70	70	70	180	215			
		11	329	92.2			95.8	210	250	360	645	375	445	85	85	95	95	200	240			
		12	327	100.3			103.9	235	280	405	705	410	485	105	110	120	120	220	260	375		
14 ³ / ₄	377	9	357	—	402	31.0	—	165	195	375	395	330	395	40	45	150	180	320				
		11	355	99.3			103.1	220	260	375	480	405	480	70	75	185	220	350				
		12	353	108.0			111.8	245	295	425	755	440	525	90	90	205	240	350				
16 ³ / ₄	426	10	406	—	415	35.0	—	210	250	410	495	415	495	40	40	150	175	285				
		11	404	112.6			117	240	285	410	545	460	545	50	50	165	195	310				
		12	402	122.5			126.9	270	320	460	860	500	595	65	65	180	215	310				

註: 本表取自石油工业通讯 1956 年 10 月第 10 期。

苏联生产的无缝钢管主要由 A、C、Д 级碳钢和 E_M、E、Л 与 M 级合金钢制成，我国则由 20、35、45 号碳钢和 30 分_Г 钢制成。各种钢级的机械性能如表 14-1 所示。

套管的长度一般为 $10 \pm 2 \sim 3$ 米，其厚度有 7、8、9、10、11、12、14 毫米等不同。

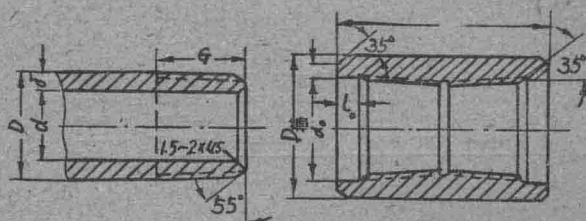


图 14-1 套管和接箍 (按苏联国定标准 632-57)

斑点、爐渣、气泡、裂縫、折皺和材料結层等缺陷。

套管之間一般是用接箍以絲扣相联接的 (见图 14-1)，亦有用焊接法联接的。

套管的主要尺寸、重量、及强度見表 14-3 所列。

套管与接箍联接处均系圓錐絲扣，其絲扣剖面如图 14-2 所示，絲扣的技术规范分別示于图 14-3，及表 14-4，表 14-5 中。

无缝钢管因受热軋工艺的影响，

壁厚和直径都不可能完全一致，总有一定的橢圓度和壁厚不均現象，这是无缝管的主要缺点，它将降低套管的抗张及抗外压强度。国产无缝钢管的公差見表 14-2。

套管的內、外側部不能有砂眼、

表 14-4 套管和接箍的絲扣性能

名 称	每 吋 扣 数	
	8	6
絲距 S , 毫米	3.175	4.233
絲扣深度 t_1 , 毫米	2.109	2.787
剖面工作厚度 t_0 , 毫米	2.033	2.711
倒圓半径, 毫米		
r	0.436	0.581
r_1	0.371	0.516
間隙 z , 毫米	0.076	0.076
傾斜角 φ :		
套管直径 114—168	0°53'42"	
套管直径 194—426	1°47'24"	
錐度 $2 \tan \varphi$:		
套管直径 114—168	1:32	
套管直径 194—426	1:16	

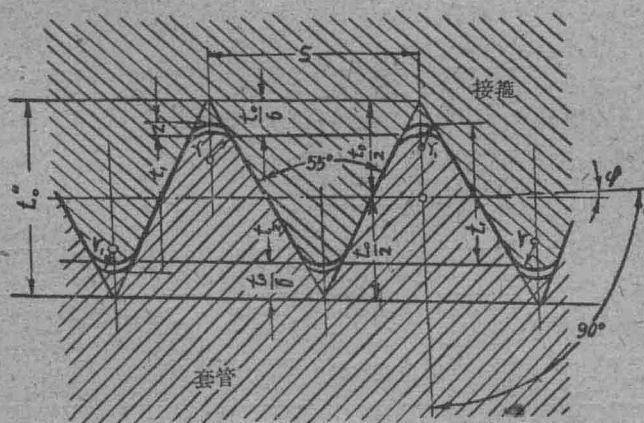


图 14-2 套管和接箍的絲扣剖面

表 14-5 套管和接箍絲扣联接的技术规范

套 管 外 径	錐 度 $2 \operatorname{tg} \varphi$	每 吋 扣 數 n	基 直 面 上 絲 扣 的 平 均 直 徑 d_1	套管端部处絲扣的直径		絲扣长度			絲扣消失 f	接箍末梢的直径 d_0	接箍末梢基面处的 直径 d_4	接箍末梢长度 l_0	套管与接箍旋接长度	
				外 径 d_2	內 径 d_3	全 消 失 端 面 至 基 面 長 (至絲扣) G	端 面 至 基 面 長 l	基 面 至 絲 扣 消 失 端 面 長 g					端 消 失 處 的 距 離 至 套 管 絲 扣 旋 接 處 的 距 離 A	端 消 失 處 的 距 離 至 套 管 絲 扣 旋 接 處 的 距 離 A
114	1:32	8	111.967	112.016	107.798	79.5	63.5	16	9.44	116	110.028	12	13	16
127			124.967	125.016	120.798	79.5	63.5			129	123.028			
141			138.967	139.016	134.798	79.5	63.5			143	137.028			
146			143.967	144.016	139.798	79.5	63.5			148	142.028			
159			156.967	157.016	152.798	79.5	63.5			161	155.028			
168			165.967	166.016	161.798	79.5	63.5			170	164.028			
194	1:16		191.967	189.844	185.626	82.5	66.5		8.87	196	190.246		11	19
219			216.967	214.844	210.626	82.5	66.5			221	215.246			
245			242.967	240.844	236.626	82.5	66.5			247	241.246			
273	1:16	6	270.289	268.562	262.988	92.0	71.0	21	11.75	275	267.953	16	15	16
299			296.289	294.562	288.988	92.0	71.0			301	293.953			
325			322.289	320.156	314.582	98.5	77.5			327	319.953			
351			348.289	346.156	340.582	98.5	77.5			353	345.953			
377			374.289	372.156	366.582	98.5	77.5			379	371.953			
426			423.289	421.156	415.582	98.5	77.5			428	420.953			

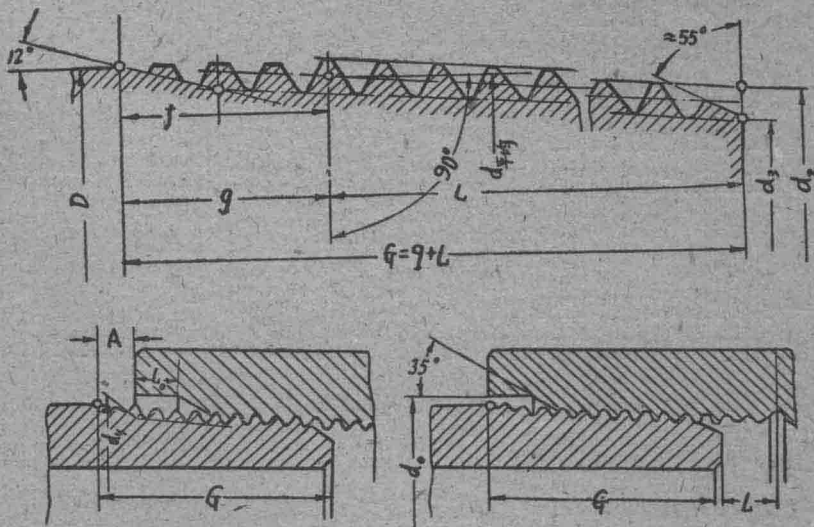


图 14-3 絲扣的尺寸

第 2 节 套管柱設計

固井中套管柱設計是一项重要工作，其中最重要的是有根据地选择套管，要求既能保証油气井的正常开采和足够的工作寿命，又要尽量节约鋼材，降低成本，必須符合既經濟又安全的原则。

套管柱的設計必須以下列三方面的工作为基础：

1. 根据套管柱各个阶段的工作条件，比較精确地定計算載荷，作为設計的主要依据；
2. 根据套管的技术规范掌握套管的强度特性；
3. 通过合理的設計方法，确定工作載荷和套管强度之間的平衡条件。

以下就这三个方面逐步闡明套管柱設計方法。

确定計算載荷

下入井內的套管承受着多种外力的作用，主要有：

- 1) 套管本身重量和其他拉伸載荷引起的拉应力；
- 2) 套管內外液柱压力不等而产生較大的剩余外压力和地层坍塌所引起的挤压力；
- 3) 注水泥及井噴时可能产生較大的內压力；
- 4) 管柱通过弯曲井段可能在套管中产生弯曲应力，若有部分套管座于井底則又承受压应力。

其中以拉伸載荷和內外压力的数值較大，也是引起套管破坏的主要因素，因此管柱設計中通常应以这三种載荷在套管內产生的应力为根据，弯曲应力及压应力由于影响不大往往忽略不計。

1. 拉伸載荷的确定

悬挂在井內的管柱，由于自重所产生的拉伸載荷最大，而且沿着井深方向递减，管柱在井口的最大重量可由下式决定：

$$Q = H \cdot q \text{ 公斤}$$

式中 H ——套管柱长度，米；

q ——单位长度的套管重量（包括接箍）公斤/米；

考虑到井內液体所产生的浮力，則管柱在泥浆中的重量为：

$$Q_1 = H \cdot q \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_{\text{泥}}} \right) \quad (14-1)$$

式中 $\gamma, \gamma_{\text{泥}}$ ——为泥浆和鋼的比重。

注水泥时，上下木塞相碰，泵压突然增加，可引起附加张力，其数值可依下式确定：

$$Q_2 = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot P_{\text{附}} \text{ 公斤} \quad (14-2)$$

式中 $d_{\text{內}}$ ——套管內径，毫米；

$P_{\text{附}}$ ——木塞相碰时的附加泵压，公斤/厘米²。

此外下套管时的动載荷以及与井壁的摩擦力都会产生相应的附加张力，其数值很难用算式确定。

苏联阿塞拜疆石油研究所曾用時間比例增加 36 倍的自动記錄仪（記錄图紙每 40 分钟

轉一圈), 实测下套管过程中拉伸负荷的变化情况, 测定結果见图 14-4。多次的实验結果証明: 在井深 1500 米以下, 綜合动載荷等于引起的管柱最大实际負荷, 总是小于套管柱在空气中的重量, 而且, 随着井深的增加, 其差值也逐渐加大。

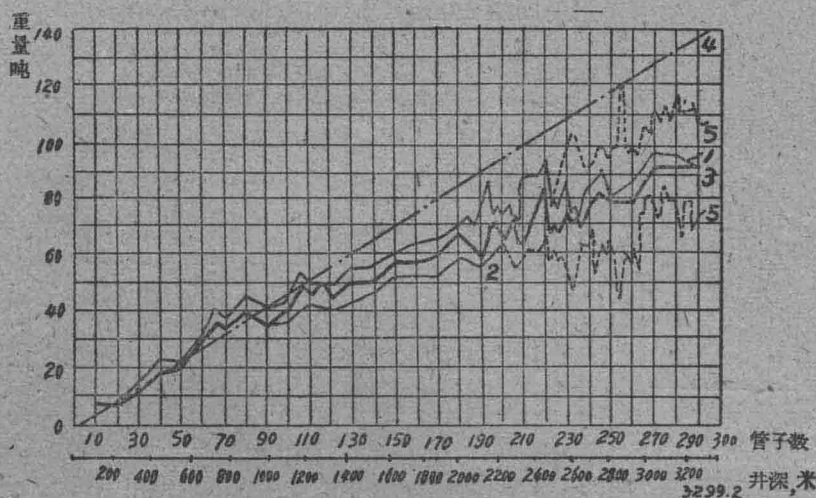


图 14-4 下套管过程中拉伸负荷的变化曲线

1—下放前最大载荷; 2—下放前最小载荷; 3—下放时平均载荷;
4—理論計算重量; 5—尖点载荷

因此, 在苏联和我国通常以套管在空气中的重量和木塞相碰时的附加张力作为套管柱設計中的拉伸計算載荷, 而由泥浆对管柱浮力来抵消动載荷等引起的附加张力。

套管柱内的最大张应力为

$$\sigma_{\text{張}} = \frac{Q + Q_{\text{附}}}{F} \quad \text{公斤/厘米}^2 \quad (14-3)$$

式中 F ——管柱断面面积, 厘米²。

由图 14-4 不难看出: 泥浆比重为 1.25 时, 管柱重量可以減輕 16%, 如果木塞相碰时的附加泵压不超过 50 公斤/厘米², 則由此引起的附加张力仅为管柱重量的 10% 左右, 在实际工作中, 木塞相碰时套管一般已固定不动, 动載荷等的作用已不再存在, 两者不会同时作用于套管柱上, 管柱在泥浆中的失重可以用来抵消由于木塞相碰而产生的拉伸載荷。因此在設計中可以仅用套管柱在空气中的重量作为纵向計算載荷, 即:

$$Q = H \cdot q \quad (14-4)$$

2. 外挤压力的計算

設計套管时, 一般取内外压力差作为計算压力。内压力根据測試和开采过程中可能的管内液面降低值来决定, 关于外压值的确定曾多次进行研究, 但并未取得重大成果。

管外液柱压力的分布如图 14-5 所示, 考虑到岩层中含有液体, 液压通常相当于靜水压力, 图中 OA 相当于沿套管全长水柱的靜水压力, OB 則相当于泥浆柱压力, OCD 相当于泥浆和水泥柱的合成压力。

在实际工作中, 注水泥井段以上的部分 (MN 以上), 通常被泥浆所充滿, 这一段管柱承受的外压力可以由泥浆柱压力計算。注水泥井段的外压值, 目前尚未有精確計算方法。

有人认为,水泥凝固以前,下部套管承受着泥浆和水泥浆柱的合成力(即 OCD),而在水泥凝固后,没有显著的体积变化,则压力分布不变。因此,提出应该以合成液柱压力计算管柱外压。

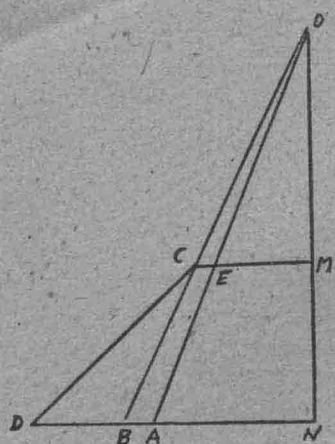


图 14-5 管外液柱压力的分布

式中 $\Delta P_{\text{内}}$ ——套管内压力减少值;

$\Delta P_{\text{外}}$ ——套管外压力减少值。

$$K = \frac{2}{[(1-m_1)-W(1+m_2)] + [(1-m_1)-W(1+m_2)]\lambda^2}$$

式中 m_1, m_2 ——套管与水泥环的波桑比,

$$m_1 = 0.33,$$

$$m_2 = 0.4;$$

$$W = \frac{E_1}{E_2} \text{——套管与水泥环的弹性系数之比,}$$

$$E_1 = 2.1 \times 10^6 \text{ 公斤/厘米}^2;$$

$$E_2 = 1.7 \times 10^5 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

$$\lambda = \frac{r_1}{r_0} \text{——套管内外半径之比。}$$

对于壁厚为 11 毫米的 $6\frac{5}{8}$ " 套管, K 值达 0.26。

由此可见,外压相应减少之值很大,不容忽略,因此萨尔基索夫提出注水区的计算压力应按下式确定:

$$P_{\text{算}} = (P_1 - K P_{\text{减}}) - (P_2 - P_{\text{减}}) = (P_1 - P_2) + (1 - K) P_{\text{减}} \quad (14-6)$$

式中 P_1, P_2 ——注水泥结束时的外压与内压;

$P_{\text{减}}$ ——内压的减少值。

必须指出:岩层中的液体,对水泥环作用有静水压力,而水泥环卸载只能降低到等于静水压力为止,继续降低内压,对套管外压不再发生影响,因此实际压力线将处于 AE 及 DC 之间(图 14-5)。

由于上述计算纯属理论推导,与实际情况是否完全一致尚难肯定,目前国内通常沿套管全长按泥浆柱压力确定近似的外压值,即:

$$P_1 = \frac{Hr}{10} \quad (14-7)$$

$$P_{\text{算}} = P_1 - (P_2 - P_{\text{減}}) \quad (14-8)$$

假如生产量为不稳定岩层，随着开采过程中带出大量砂子，生产层逐渐破坏而发生坍塌，結果在油层部份的套管上造成較大的側压力，大量的实际資料証明，套管挤毁和錯断現象主要发生在容易坍塌的生产层附近。因此，在生产层极不稳定的油区，設計油层套管时必须充分估計到开采期間，由于岩层坍塌所造成的側压，以免发生套管挤毁事故。但是到目前为止还没有找出能够比較精确地决定这部分压力的計算公式。目前主要是根据該油田生产层的特征和过去的实际經驗，适当地調整安全系数的大小，来代替并不精确的理論計算。

3. 管内压力的确定

套管内部的压力主要为液柱压力和注挤水泥时的最大泵压，这些都不难由公式或操作規程确定。由于套管的抗崩强度通常为抗挤强度的2~3倍，而在一般情况下，管外压力不会消失，内外压差不会很大，因此在套管柱設計中，对于套管的抗压能力一般不作强度核算，仅根据拉伸和外挤压力，选择套管的品种和壁厚。如果需要补挤水泥或压裂地层时，通常根据已下套管柱的抗崩强度来控制操作中的最大允許泵压，一般地說，这种情况在套管柱設計时常不加考虑。

套管强度計算

1. 套管柱是由很多套管用絲扣連接起来的，經驗証明，絲扣連接部份正是套管抗拉强度的薄弱环节，該部份的强度通常只为套管本身强度的65%左右。因此在套管柱設計中总是以絲扣部份的强度极限或屈服极限作为設計根据。

确定絲扣連接部份最大的允許拉伸載荷的計算公式。一般多采用Ф. И. 雅柯夫列夫公式：

$$P_{\text{抗拉}} = \frac{\pi D \delta_2 b \sigma_{\text{屈}}}{1 + \frac{D}{2l} \text{ctg}(\alpha + \beta)} \text{公斤} \quad (14-9)$$

式中 D ——套管第一扣处的平均直径，毫米；

δ_2 ——第一扣处的管壁厚度，厘米；

$\sigma_{\text{屈}}$ ——套管材料的屈服强度，公斤/厘米²；

l ——絲扣部份的总长度，厘米；

α ——絲扣承压面与套管軸綫的角，($\alpha=62.5^\circ$)；

β ——摩擦角($\beta=18^\circ$)。

拉伸載荷达到 $P_{\text{抗拉}}$ 时，絲扣連接的第一扣处即发生塑性变形，但是并不意味着連接的破坏，根据此式确定的載荷一般称为絲扣滑脫負荷。

根据阿塞拜疆石油研究所的試驗表明：依公式(14-9)計算的数值比实际的滑脫負荷較低，由此指出 b 值应改用第五扣处的管壁厚度，根据不同的絲扣錐度， b 值可由下式求出。

錐度为 $\frac{1}{16}$ 的套管壁厚度, $b = a - h - 0.5$ 毫米,

錐度为 $\frac{1}{32}$ 的套管壁厚度, $b = a - h - 0.3$ 毫米。

式中 a ——表示无扣部分管壁厚度;

h ——为絲扣断面高度。

2. 抗外压强度計算

套管外压力的破坏是一种不稳定破坏, 而不是强度破坏, 套管受外压破坏的原因, 是由于套管所承受的外压力达到某一临界值时, 套管将和压杆的受压情况一样开始进入不稳定状态; 而不是由于达到套管材料的强度极限, 产生强度破坏的结果。圆管承受外压能力的问题, 是个相当复杂的问题, 半世纪以来不少学者在这里进行了大量的研究, 但到目前为止, 并没有在实际问题的所有方面给出满意的結果。

对于实际圆管 (如套管), 由于制造工艺上的原因, 往往存在着偏心椭圆度 (焊接管和无縫管), 壁厚不均 (无縫管) 等缺陷, 这些因素对管的承压性能有着严重的影响, 計算中不能不加以考虑, 但是至今还没有完善的計算实际圆管抗挤强度的理論公式。

Г. М. 薩尔基索夫根据上述无縫管制造工艺上缺陷, 以壁厚及重量的最大負公差的不利組合为条件, 結合椭圆度的不利組合, 提出了适用于具有壁厚不均度的椭圆管抗挤强度的計算公式, 該公式并为实际現場工作中广泛采用。

$$P_{\text{抗压}} = 1.1 K_{\text{最小}} \left\{ \sigma_{\text{屈服}} + EK_0^2 \rho \left(1 + \frac{3l}{4\rho^3_{\text{最小}}} \right) - \sqrt{\left[\sigma_{\text{屈服}} + EK_0^2 \rho \left(1 + \frac{3l}{4\rho^3_{\text{最小}}} \right) \right]^2 - 4EK_0^2 \rho \sigma_{\text{屈服}}} \right\} \quad (14-10)$$

式中 $K_{\text{最小}} = \frac{\sigma_{\text{最小}}}{D}$; $K_0 = \frac{\delta_0}{D}$;

$$\rho = \frac{\delta_0}{\delta_{\text{最小}}};$$

D ——套管平均直径, 毫米;

$\delta_{\text{最小}}$ ——管壁最小厚度 (它决定于管壁名义厚度 δ 与負公差 ω 間的差值, ω 按照苏联国定标准 632-57, $\omega = 12.5\%$) 厘米;

故 $\delta_{\text{最小}} = 0.875 \delta_0$

δ_0 取 0.925δ ;

E ——弹性系数, $E = 2.1 \times 10^6$ 公斤/厘米²;

$\sigma_{\text{屈服}}$ ——套管材料的屈服强度, 公斤/厘米²;

l ——套管的椭圆度, $l = 2 \frac{b-c}{b+c}$, b 和 c 椭圆的长短軸。

按照苏联国定标准 632-57 規定, 对直径为 114 到 146 毫米的套管, $l = 0.025$, 对大直径的套管, 則 $l = 0.02$ 。

3. 抗内压强度計算

圆管在内压力作用下, 只有当塑性变形沿管壁全厚传播开时, 管材丧失稳定平衡。

因此由于内压力的作用使管材屈服时,带有逐渐的局部不稳定性,或断裂破坏。

圆管抗内压强度的计算公式最初由马里欧特根据薄壁管的受压情况,并假定应力在管内均匀分布,求出周向应力为:

$$\sigma = \frac{Pd}{2\delta} \quad (14-11)$$

式中 P ——内压力;
 d ——圆管内径;
 δ ——壁厚。

梁迈考虑到周向应力沿管壁厚度的分布是不均匀的,最大应力发生在管壁内表面上,最小应力发生在外表面上,内压便提出了更精确的最大周向应力计算公式。

$$\sigma_{\text{最大}} = P \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} \quad (14-12)$$

式中 R 和 r 分别为套管的外径和内径。

此后又考虑到套管属中壁和薄壁管,因而将梁迈公式展开简化后,便得出目前通用的巴尔洛公式。

$$\sigma_{\text{最大}} = P \frac{D}{2\delta} \quad (14-13)$$

实践证明一井内套管所承受的内压力不会很大,它并不是促使套管破坏的主要因素。一般都根据第一强度理论,设 $\sigma_{\text{最大}} = \sigma_{\text{屈服}}$ 时求出套管的抗内压强度,即:

$$P_{\text{内}} = \frac{2\delta}{D} \cdot \sigma_{\text{屈服}} \quad (14-14)$$

4. 安全系数

在实际工作中,使用各种公式都有它本身的特征,而且这些理论公式推导的依据在不同程度上与套管在井内实际工作条件有某些出入,因而为了工程上的安全,皆须考虑一定的安全系数值。

当按照套管的名义尺寸来确定滑脱负荷时,其相应于比例极限的应力比值,应取为 1.3。

如考虑管壁的负公差来确定滑脱负荷时,其安全系数应取 1.15。

最小的安全系数可推荐于后^①

1) 对抗挤。

(1) 位于射孔区以上的套管, 1.15。

(2) 位于射孔区内且岩石无变形井段的套管, 1.3。

(3) 位于射孔区内且岩石可能变形井段的套管, 1.5。

2) 位于深井中间井段的套管, 其所受拉伸负荷超过 70 吨者, 1.25。

3) 当计算气井中的内压力时, 1.5~2。

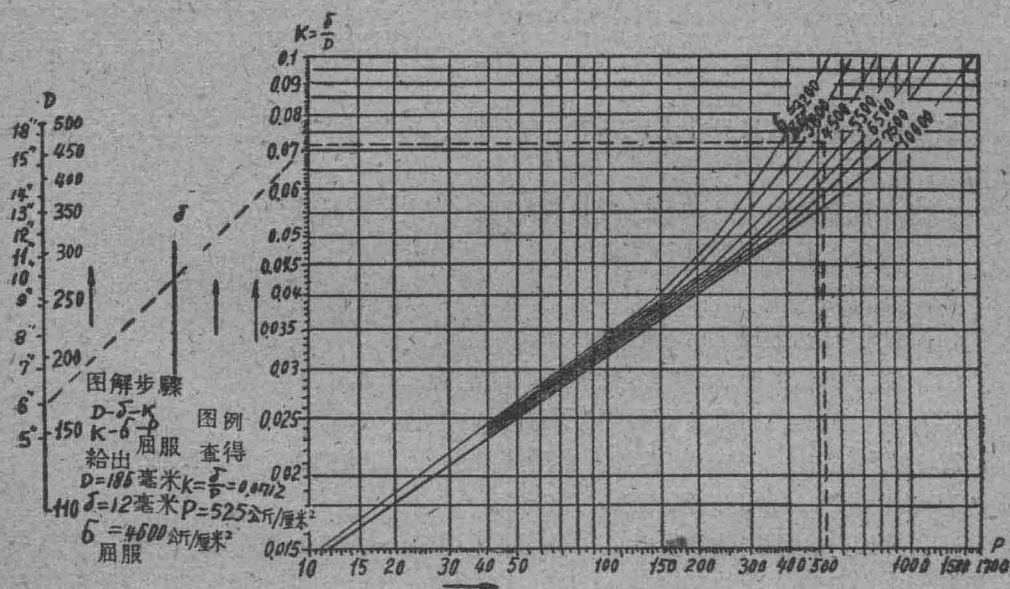
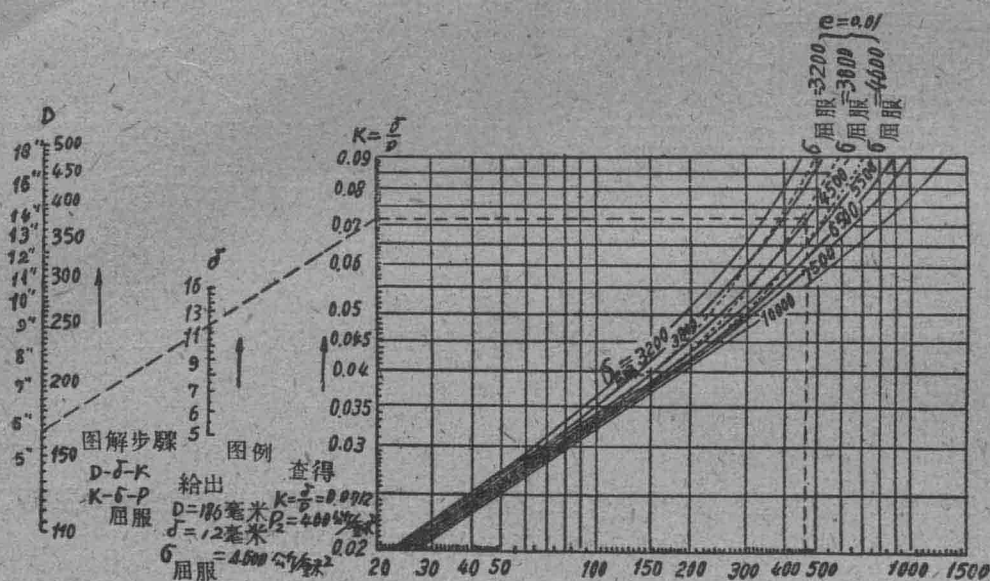
应当指出,关于安全系数数值的合理选择和进一步减小的问题,还是目前国内研究的问题,在实际工作中,应密切结合现场实际情况及生产实践中的经验,予以周密考虑。

① Н. И. Шацов 等著, “Бурение нефтяных и газовых скважин” 第 433 页, 1960 年版。

以达到既能保证工程的安全，也能有合理经济的原则。

在实际工作中，为了简化上列公式的计算工作，可使用特制成的图表。

图 14-6, 7 中给了依 Г. М. 萨尔基索夫公式确定套管外压力的图表。图 14-8 为依 Ф. И. 雅柯夫列夫公式确定套管拉伸负荷的图表。



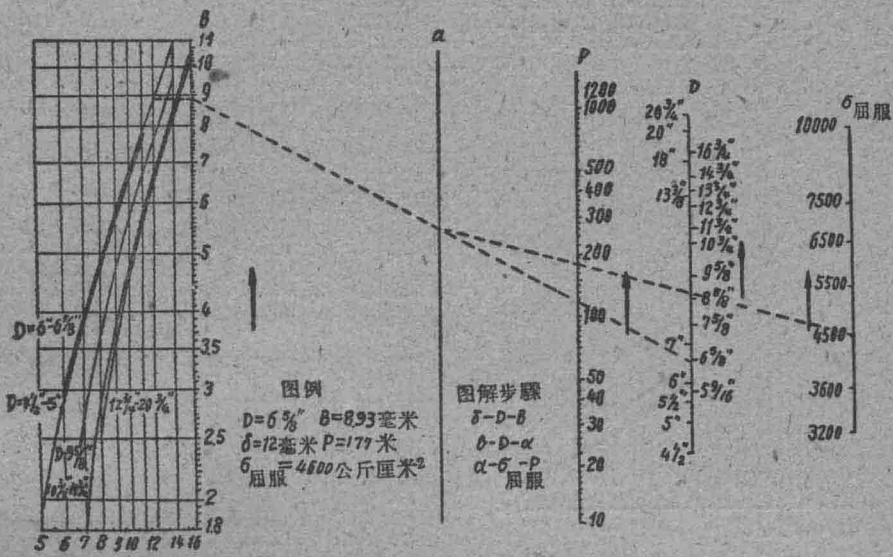


图 14-8 根据 Ф. Н. 雅柯夫列夫公式确定套管拉伸负荷的图表

套管柱设计方法

上述强度计算都是以一种外力为前提，以单向应力达到屈服极限为条件，下入井内的套管在拉伸载荷和内外压力的作用下，管壁内相应地产生各种应力，这些应力可以归为三个方向的主应力，即纵向应力 ($\sigma_{纵}$)，周向应力 ($\sigma_{周}$) 和径向应力 ($\sigma_{径}$)。设计套管时必须根据强度理论，确立工作应力与套管材料的屈服极限之间的平衡条件。

$$\sigma_{纵} = \frac{Q_1}{F}$$

根据梁迈公式，套管在内外压力作用下，周向和径向应力可以下式求得：

$$\sigma_{周} = \frac{P}{a^2 - 1} \left(1 + \frac{a^2}{\rho^2} \right)$$

$$\sigma_{径} = \frac{P}{a^2 - 1} \left(1 - \frac{a^2}{\rho^2} \right)$$

设套管内外径和平均直径分别为 $r_{内}$ ， $r_{外}$ 和 r

$$\alpha_{外} = \frac{r_{内}}{r_{外}}; \quad \rho_{外} = \frac{r}{r_{外}}$$

$$\alpha_{内} = \frac{r_{外}}{r_{内}}; \quad \rho_{内} = \frac{r}{r_{内}}$$

管受外压力以 $r_{外}$ 、 $\rho_{外}$ 代入，管受内压时以 $r_{内}$ 、 $\rho_{内}$ 代入。

由于套管属中壁管类，可设 $r \approx r_{内}$ ，则

$$\frac{a^2}{\rho^2} \approx 1, \quad \sigma_{周} = \frac{2P}{a^2 - 1}$$

所以 $\sigma_{径} \approx 0$ ，即在设计中可以忽略 $\sigma_{径}$ ，仅求出 $\sigma_{纵}$ 和 $\sigma_{周}$ 的合成应力，并不影响所得结果的精确性。

实验証明：在弹性区，纵向应力对于套管的抗外压强度会产生严重的影响（图 14-9），在弹性区域，纵向应力的存在并不影响临界压力，只是使弹性区域受到压缩，即相当于缩小了套管材料的比例极限。

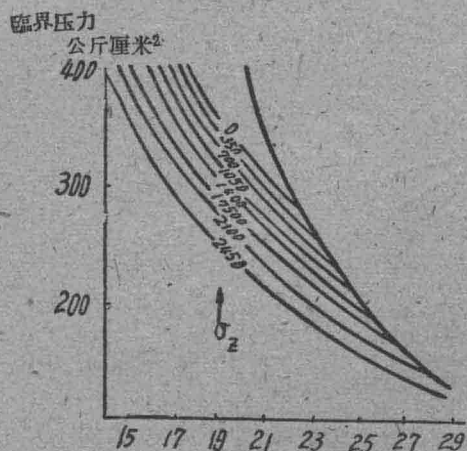


图 14-9 纵向拉伸应力对临界外压的影响

不符合经济原则。实际工作中，一般都以管柱各断面上实际应力的组合，选择不同壁厚的套管，构造安全系数基本一致的套管柱。

在我国和苏联的钻井实际中，主要根据第一强度理论，进行套管柱设计。也就是以管柱内某一断面上的最大应力 $\sigma_{\text{最大}} < \sigma_{\text{屈}}$ 为原则来设计管柱结构。根据这个原则，考虑到管柱下部受内外压差影响最大。其上部则主要受拉伸负荷的作用，因此对于下部管柱只根据各个断面上最大的外压力 $P < P_{\text{抗压}}$ （由公式 14-10 求出的临界压力）的原则选择套管。对于上部的各个断面则根据下部套管柱的总重量 $Q_{\text{柱}} < P_{\text{抗拉}}$ （按公式 14-9 求出的滑脱负荷）的原则，确定应有的壁厚，而不考虑两种外力同时作用下对于套管强度的影响。

不难看出，这种设计方法是不够合理的。从理论上讲，纵向应力的出现将削弱套管的承压性能，设计中不考虑两者的影响显然是不够安全的。但是如果分析一下上述方法中所运用的实际条件，可以认为这种近似计算是允许的。因为设计中所用套管强度计算的公式本身就不够完善，它们都以管材的弹性范围为基础。假定超过比例极限套管就发生不稳定破坏，这与实际情况并不完全一致，因而由此求出临界载荷，总是比实际的破坏载荷要小。例如根据 30~60%。因此公式本身包含着多余的安全系数。同时实验证明：在弹性范围内纵向应力对套管承压性能的影响不大，既然 T. M. 萨尔基索夫公式是应力不超过比例极限为前提，纵向载荷的影响显然可以忽略不计，多年来的实践也充分证明：在生产层比较稳定的区域，忽略纵向载荷的作用，还足以保证下部套管柱的安全，因此在没有使用更精确的套管强度计算公式以前，我们还是推荐只考虑单向最大应力为原则的简单设计方法。

对于长度不大的表层套管，因所受负荷不大，一般不必作强度设计，只需根据所用套管的丝扣滑脱负荷和管柱重量验算井口断面的安全系数就可以了。

在技术套管中，由于内外压力不会相差很大，主要是承受拉伸载荷，进行套管柱设计时，可以不考虑受横向压力的稳定问题，只根据拉伸载荷和丝扣滑脱负荷之间的平衡条件，确定套管柱结构方案，但是考虑到在继续钻进过程中，管柱下部将遭受难以计算的钻

我们知道，悬挂在井内的套管柱，其纵向载荷主要是套管自重，因而各个断面所受的拉力是不均匀的，一般在井口最大，并沿着井深方向相应递减，同时内外压力又主要由液柱压力产生，通常在套管柱下端最大，而顺次向上递减，因此在套管柱内最大纵向应力总是发生在井口部分，最大周向应力必然存在于下部断面，中间部分的合成应力决不会超过上下两端的最大应力。如果整个套管柱是由同种钢材和相同壁厚的套管组成，那么只需根据上下的最大计算应力来选择套管，可是这样便在套管柱中部造成多余的安全系数，浪费钢材，不

柱撞击载荷, 因此下部套管必须加强, 可以采用较厚管壁的套管, 并将下部 5~10 个接箍的接合处加以电焊。管壁较厚, 套管的长度视实际需要而定, 一般不超过 100 米, 最后一段套管的壁厚和长度确定后, 然后由下而上地逐步确定以上各段套管的壁厚和钢级。

设最下一部分管壁厚度为 δ_1 的套管柱, 长度为 L_1 、重量为 Q_1 , 则根据前述计算拉伸载荷以套管在空气中的重量为标准的原則, 第二部分壁厚为 δ_2 的套管柱长度 L_2 可以由下式确定: $m(Q_1 + L_2 q_2) = P_{\text{抗拉}}$

$$\text{即} \quad L_2 = \frac{P_{\text{抗拉}} - mQ_1}{mq_2}$$

式中 $P_{\text{抗拉}}$ ——壁厚 δ_2 套管的丝扣滑脱负荷 (按公式 14-9 求出);

m ——接箍滑脱负荷的安全系数;

q_2 ——壁厚 δ_2 套管的每米平均重量 (带接箍)。

相类似地可以由下式决定第三, 第四部分的套管长度

$$L_3 = \frac{P_{\text{抗拉3}} - mQ_1 - mQ_2}{mq_3}$$

$$L_4 = \frac{P_{\text{抗拉4}} - m(Q_1 + Q_2 + Q_3)}{mq_4}$$

依此类推。

最上一部分套管长度可由整个套管柱下入深度 L_1 减去以下各段的套管长度求出:

$$L_n = L - L_1 - L_2 \cdots L_{n-1}$$

井口处套管接箍的安全数为:

$$m' = \frac{P_{\text{抗拉}}^n}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n}$$

下入井内的油层套管, 在试油和开采期间, 套管内的泥浆将被比重更轻的清水或油气代替, 管内液柱压力必然显著下降。对于压力较小的油层, 有时需要把井内液体部分全部淘空, 内外压差可能很大, 套管下部抵抗外压的稳定性能便显得特别重要。设计中必须给予足够的重视, 同时因拉伸载荷主要由套管重量来确定, 所以设计油层套管时首先根据横向压力与套管抗外压强度的平衡条件自上而下地确定每种套管的许下深度, 选择适于每一井段的壁厚, 然后自下而上地核算每段套管的抗拉强度, 对于安全系数不合要求的部分改用壁厚更大的套管, 其设计步骤如下:

假定油层套管的下入深度为 H 米, 泥浆比重 γ , 抗挤安全系数为 K , 并设壁厚为 δ_1 、 δ_2 、 $\delta_3 \cdots$ 等套管的抗挤临界压力相应为 $P_{\text{抗压1}}$ 、 $P_{\text{抗压2}}$ 、 $P_{\text{抗压3}}$ (按萨耳基索夫公式决定), 根据以前提出的原則, 计算压力以泥浆柱压力为标准, 假定试油期间套管内的泥浆需要全部淘空, 即最大内外压差等于管外泥浆柱压力, 则各种套管的许下深度为:

$$H_1 = \frac{P_{\text{抗压1}} 10}{K\gamma}$$

$$H_2 = \frac{P_{\text{抗压2}} 10}{K\gamma}$$

$$H_3 = \frac{P_{\text{抗压3}} 10}{K\gamma}$$

依次类推。