第六篇

井 筒 设 计

第一章　立井井筒平面设计与装备布置

第一节　井筒平面布置

一、井筒平面布置设计依据和要求

(一)设计依据

(1)提升容器的种类、数量、最大的外形尺寸；

(2)井筒装备的类型和规格；

(3)梯子间的平面尺寸、管路及电缆的规格、数量和布置；

(4)提升容器与井筒装备、井壁之间的安全间隙；

(5)井筒通过的风量。

(二)布置要求

(1)箕斗提升的井筒一般不宜兼作风井。如兼作回风井时，井上下装、卸载装置和井塔都必须有完善的封闭措施，其漏风率不得超过 15%，并应有可靠的降尘措施，保证粉尘浓度符合工业卫生标准。

(2)作为安全出口的立井井筒，当井深超过 300m 时，宜每隔 200m 左右设置一休息点。休息点可在井壁上开凿一硐室与梯子平台相连通。

(3)井筒平面内布置提升容器时所允许的间隙，必须符合表 6－1－1 规定。

表 6－1－1　立井内提升容器间及提升容器最突出部分与井壁、罐道梁、井梁间的最小间隙值　（mm）

罐道和井梁布置 \ 间隙类别		容器与容器之间	容器与井壁之间	容器与罐道梁之间	容器与井梁之间	备注
罐道布置在容器一侧		200	150	40	150	罐耳和罐道卡子之间为 20
罐道布置在容器两侧	木罐道	—	200	50	200	有卸载滑轮的容器滑轮和罐道梁间隙增加 25
	钢罐道	—	150	40	150	
罐道布置在容器正面	木罐道	200	200	50	200	
	钢罐道	200	150	40	150	
钢丝绳罐道		500	350		350	设防撞绳时，容器之间最小间隙为 200

表 6－1－2　井筒容许最大风速

井筒名称	容许最大风速（m/s）
无提升设备的风井	15
专为升降物料的井筒	12
升降人员和物料的井筒	8
设非封闭梯子间的井筒	8
修理井筒时	8

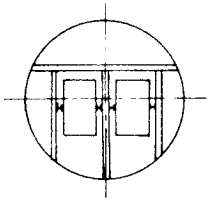
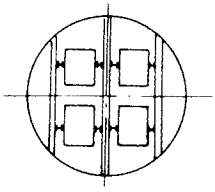
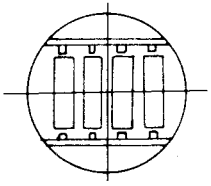
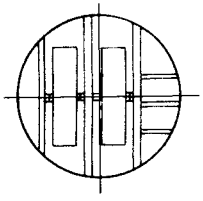
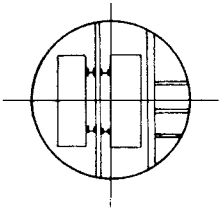
(4)井筒容许最大风速不得超过表 6－1－2 所列的最高风速。

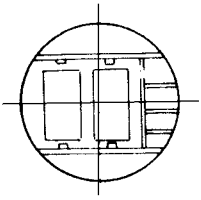
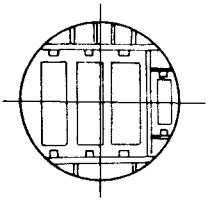
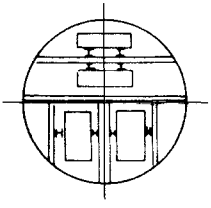
(5)合理利用井筒断面，力求做到布置紧凑、投资少、施工方便、生产安全可靠。

二、井筒平面布置形式

根据提升容器和井筒装备的不同，井筒平面布置有多种不同形式。我国煤矿中圆形井筒断面常用的几种布置形式见表 6－1－3。

表 6－1－3　井筒平面布置形式

序号	井筒净直径（m）	图示	提升容器	井筒装备
1	4.5 5.0 5.5		一对 4、6、8t 箕斗	金属罐道梁、钢轨罐道，双侧布置；除小型矿井外，一般均不设梯子间
2	6.0 6.5		两对 4、6、8t 箕斗	金属罐道梁、钢轨罐道，双侧布置
3	6.5		两对 12t 长箕斗	金属罐道梁、方钢罐道、型钢组合罐道，端面布置
4	5.0 6.5		一对 1、3t 矿车单、双层单车普通罐笼	金属罐道梁、金属或木罐道，双侧布置；设梯子间、管子间
5	5.0 6.5		一对 1、3t 矿车单、双层单车普通罐笼； 一对 1t 矿车单层双车普通罐笼	金属罐道梁、单侧布置钢轨罐道；设梯子间、管子间

序号	井筒净直径(m)	图示	提升容器	井筒装备
6	5.0 6.0 6.5		一对 1、3t 矿车单、双层单车普通罐笼	金属罐道梁、金属或木罐道,端面布置 ;设梯子间,管子间
7	7.5 8.0		一对 1.5t 矿车双层四车多绳罐笼(窄型)、一个带平衡锤的 1.5t 矿车双层 4 车多绳罐笼(宽型)	金属罐道梁、型钢组合罐道,方钢罐道,端面布置 ;设梯子间、管子间
8	7.5 8.0		一对 4、6、8t 箕斗和一对 1t 矿车单、双层单车普通罐笼	箕斗提升为双侧布置钢轨罐道 ;罐笼提升为单侧布置钢轨罐道,金属罐道梁

三、立井提升容器布置形式

(一)罐笼

1. 立井单绳罐笼主要技术特征

立井单绳罐笼主要技术特征见表 6 – 1 – 4。

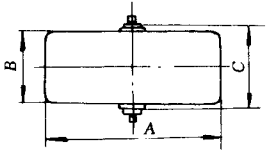
2. 立井多绳罐笼主要技术特征

(1)1t 矿车立井多绳罐笼见表 6 – 1 – 5。

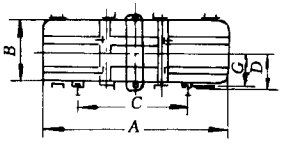
表 6-1-4 立井单绳罐笼主要技术特征

名称	装载矿车数（辆）	进出车方式	罐道					主要尺寸（mm）				罐笼自重（t）	允许乘载人数（个）	最大终端载荷（t）	型号	图号	编制单位
			布置方式	规格	间距（mm）			A	B	D	G						
					C	E	F										
1t 矿车单层单车普通罐笼	1	双侧	双侧木罐道	180×160mm	1100			2550	1010			2.140（包括捕绳器）	12	～4.5	GM1－1	TS0301（1）－301－00	原华东院
1t 矿车双层单车普通罐笼	2	双侧	双侧木罐道	180×160mm	1100			2550	1010			3.654（包括捕绳器）	（两层）24	6.844	GM1－2	TS0301（2）－301－00	原华东院
1t 矿车单层单车普通罐笼	1	双侧	单侧钢罐道	38kg/m 钢轨	1550			2550	1010	625	565	3.630（包括捕绳器）	12		GG1－1	标 66－301（3）－00	原华东院
1t 矿车双层单车普通罐笼	2	双侧	单侧钢罐道	38kg/m 钢轨	1550			2550	1010	625	565	4.352（包括捕绳器）	（两层）24		GG1－2	标 66－301（4）－00	原华东院
1t 矿车单层单车普通罐笼	1	双侧	四角绳罐道	直径 32mm		2040	1106	2550	1010	601	561	3.160（包括捕绳器）	12		GS1－1	标 66－301（3）A－00	规划院
1t 矿车双层单车普通罐笼	2	双侧	四角绳罐道	直径 32mm		2040	1106	2550	1010	601	561	4.438（包括捕绳器）	（两层）24		GS1－2	标 66－301（4）A－00	规划院
1t 双层二车单绳罐笼	2			38kg/m 钢轨								3.428（包括捕绳器）	（两层）22	8.5	GLG－1×2/2	B77－302·2	武汉院

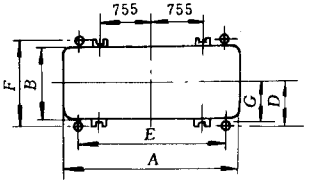
名称	装载矿车数（辆）	进出车方式	罐道					主要尺寸（mm）				罐笼自重（t）	允许乘载人数（个）	最大终端载荷（t）	型号	图号	编制单位
			布置方式	规格	间距（mm）			A	B	D	G						
					C	E	F										
1.5t 矿车双层二车单层罐笼	2	同侧	端面钢罐道		3070			2800	1200			5.471（包括捕绳器）	（两层）34	12.311	GLG－1.5×2/2	B77－302·5－00	武汉院
3t 矿车单层单车普通罐笼	1	双侧	单侧钢罐道	38kg/m 钢轨	2400			4000	1460	860	795	4.127	28	～12.475	GG3－1	T74－301·1－00	规划院
3t 矿车双层单车普通罐笼	1	双侧	单侧钢罐道	38kg/m 钢轨	2400			4000	1460	860	795	5.808	（两层）56	15.2	GG3－3	T74－301·3－00	规划院
3t 矿车单层单车普通罐笼	1	双侧	双侧钢罐道	38kg/m 钢轨	1590			4000	1460			4.123	28	～12.475	GG3－2	T74－301·2－00	规划院
3t 矿车双层单车普通罐笼	1	双侧	双侧钢罐道	38kg/m 钢轨	1590			4000	1460			5.808	（两层）56	15.2	GG3－4	T74－301·4－00	规划院



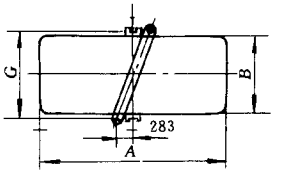
双侧木罐道普通罐笼



单侧钢罐道普通罐笼



绳罐道普通罐笼

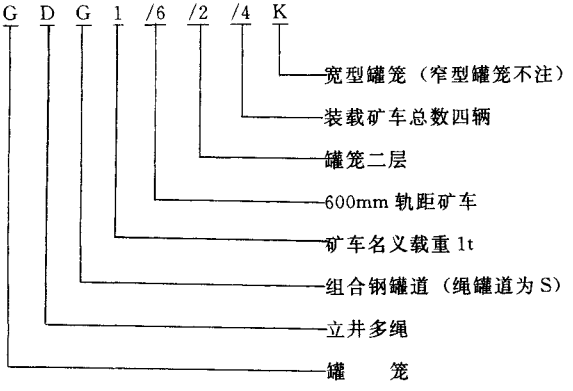


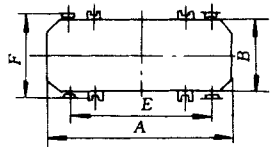
双侧钢罐道普通罐笼

表 6－1－5　1t 矿车立井多绳罐笼

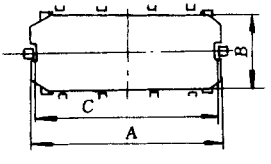
罐笼型号	矿车型号	乘人面积		乘人数	乘车辆	罐笼总载重	罐体自重	最大终端载荷	罐笼长和宽 $A \times B$	钢罐道	绳罐道		组合钢罐道宽度	绳罐道直径	编制单位
		一层面积	总面积							C	E	F			
		m^2		人	辆	t		kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
GDG1/6/1/2	MG1.1－6B	4.14		23	2	4.37	4.656	157	4750×1024	4500			180		武汉院
								279							
GDG1/6/1/2K		6.84		38			5.803	275	4750×1704						
GDS1/6/1/2		4.41		23			4.656	157	4750×1024		3460	1124		32～50	
								279							
GDS1/6/1/2K		6.84		38			5.803	275	4750×1024			1804			
GDG1/6/2/2		1.8	3.6	20			4.281	158	2550×1704	2300			180		
								267							
GDG1/6/2/2K		2.52	5.04	28			4.911	275	2550×1504						
GDS1/6/2/2		1.3	3.6	20			4.281	158	2550×1024		1530	1124		32～50	
								267							
GDS1/6/2/2K		2.52	5.04	28			4.911	275	2550×1504			1604			
GDG1/6/2/4	MG1.1－6A	4.14	8.28	46	4	8.74	7.959 (8.05)	282	4750×1024	4500			180		
								381							
								559							
GDG1/6/2/4K		6.84	13.68	76			9.281 (9.34)	276	4750×1704						
								378							
								547							
GDG1/6/2/4K		4.14	8.28	46			8.067 (8.09)	282	4750×1024		3460	1124		32～50	
								381							
								559							
GDS1/6/2/4K		6.84	13.68	76			9.28 (9.36)	276	4750×1704			1804			
								378							
								547							

型号编制示例：





绳罐道多绳罐笼

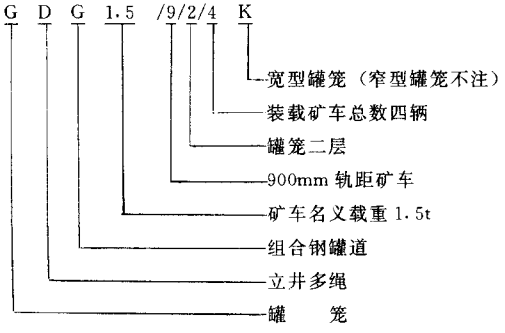


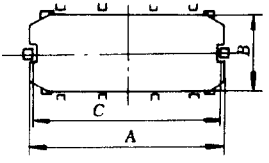
刚性罐道多绳罐笼

表 6－1－6　1.5t 矿车立井多绳罐笼

罐笼型号	矿车型号	乘人面积		乘人数	乘车辆	罐笼总载重	罐体自重	最大终端载荷	罐笼长和宽 $A\times B$	钢罐道 C	组合钢罐道宽度	编制单位
		一层面积	总面积									
		m^2		人	辆	t		kN	mm	mm	mm	
GDG1.5/6/2/2	MGC1.7－6	2.9	5.8	32	2	6.84	6.56	280	3010×1204	2900	180	南京院
GDG1.5/6/2/2K		4	8	44			7.58	290	3010×1674			
GDG1.5/6/2/4		5.5	11	60	4	13.68	10.78	550	5290×1204	5100		
GDG1.5/9/2/4	MGC1.7－9	5.8	11.6	64		14.68	10.93	570	5290×1274			
GDG1.5/6/2/4K	MGC1.7－6	7.6	15.2	84		13.68	11.91	560	5290×1674			
GDG1.5/9/2/4K	MGC1.7－9	7.6	15.2	84		14.68	11.88	580				
								570				
GDG1.5/6/3/4	MGC1.7－6	5.5	16.5	90		13.68	12.57	580	5290×1204			
								570				
GDG1.5/9/3/4	MGC1.7－9	5.8	17.4	96		14.68	12.77	610	5290×1274			
GDG1.5/6/3/4K	MGC1.7－6	7.6	22.8	126		13.68	13.93		5290×1674			
GDG1.5/9/3/4K	MGC1.7－9	7.6	22.8	126		14.68	13.98	620				

型号编制示例：





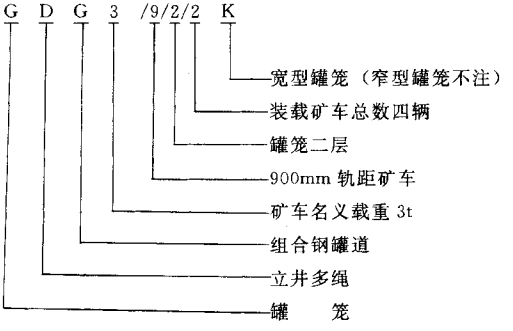
刚性罐道多绳罐笼

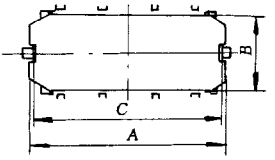
(3)3t 矿车立井多绳罐笼见表 6－1－7。

表 6－1－7　3t 矿车立井多绳罐笼

罐笼型号	矿车型号	乘人面积		乘人数	乘车辆	罐笼总载重	罐体自重	最大终端载荷	罐笼长和宽 $A\times B$	钢罐道 C	组合钢罐道宽度	编制单位
		一层面积	总面积									
		m^2		人	辆	t		kN	mm	mm	mm	
GDG3/9/1/1	MGC3.8—9	5.95	5.95	33	1	6.62	8.35	354.4	4750×1474	4500	180	邯郸院
							8.41	386.9				
GDG3/9/2/2			11.90	66	2	13.23	11.35	554.3				
							11.37	567.8				
GDG3/9/3/2			17.85	99	2	13.23	13.45	574.9				
							13.47	588.4				
GDG3/9/1/1K		6.89	6.89	38	1	11.00	8.70	460.0	4750×1704			
							8.75	481.0				
GDG3/9/2/2K			13.78	76	2	13.23	12.14	590.9				
							12.16	594.4				
GDG3/9/3/2K			20.67	114	2	13.23	14.35	583.7				
							14.37	597.2				

型号编制示例：





刚性罐道多绳罐笼

(二)箕斗

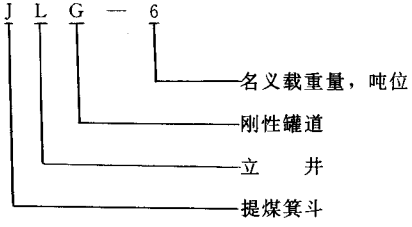
1. 立井单绳箕斗主要技术特征

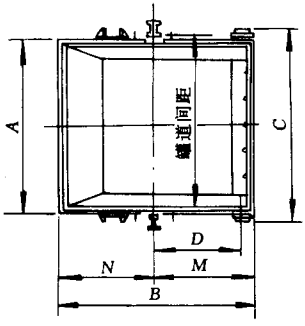
(1)JLG 系列立井单绳提煤箕斗主要技术特征,见表 6－1－8。

表 6－1－8　JLG 系列立井单绳提煤箕斗

箕斗型号		JLG－3	JLG－4	JLG－6	JLG－8
名义载重量(t)		3	4	6	8
有效容积(m^3)		3.6	4.7	7.1	9.4
斗箱断面外形尺寸 A×B(mm)		1350×1700	1590×1846		
罐道距离(mm)		1430	1680		
提升钢丝绳楔形绳环处容许最大负荷(×10N)		8000	11000	14000	17000
箕斗架底梁处容许最大负荷(×10N)		1550	2500	2750	3000
最大提升高度(带尾绳时)(m)		450	500	500	450
提升钢丝绳直径(mm)		25～35	27.5～37	31～45	31～45
罐道型式		38kg/m 或 43kg/m 钢轨			
滚动罐耳直径(mm)		250			
箕斗自重(×10N)		3515	4489	5401	6013
主要尺寸(mm)	斗箱卸煤口断面	1130×650	1300×870		
	A	1350	1590		
	B	1700	1846		
	C	1540	1780		
	D	750	860		
	M	900	958		
	N	800	888		

型号编制示例：

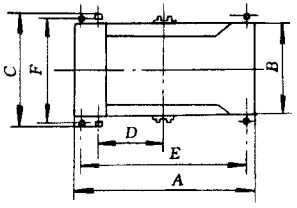




(2)绳罐道立井单绳提煤箕斗主要技术特征,见表 6－1－9。

表 6－1－9　绳罐道立井单绳提煤箕斗主要技术特征

箕斗型号	箕斗名义载重(t)	箕斗有效容积(m^3)	主要尺寸(mm)				钢丝绳罐道			稳罐罐道(钢轨)	提升绳最大终端载荷(t)	尾绳最大终端载荷(t)	最大提升高度(m)	箕斗自重(t)	图号	编制单位
			A	B	C	D	直径(mm)	数量(根)	间距 E×F(mm)							
JL－3	3	4	2000	1100	1300		32	4	1800×1200	38kg/m	8	2		3.795	71・316・3T_1	规划院
JL－4	4	5									10			4.352	71・316・4T_1	
JL－6	6	6.6	2200	1100	1350	800	32～50		2000×1250		11		700	5.01	T77－316・6T	



JL 型单绳提煤箕斗

2. 立井多绳箕斗主要技术特征

(1)刚性罐道立井多绳箕斗,见表 6－1－10。

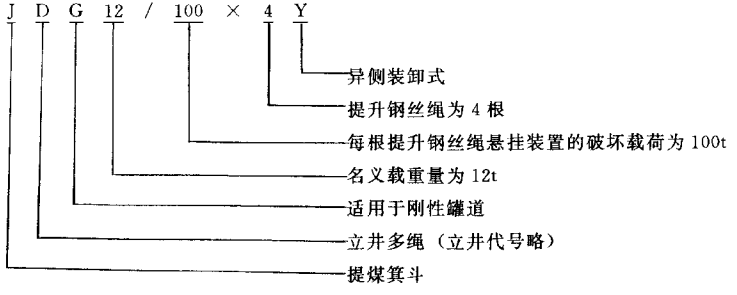
(2)绳罐道立井多绳箕斗,见表 6－1－11。

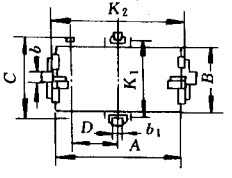
表 6-1-10 刚性罐道立井多绳箕斗

刚性罐道多绳箕斗			名义载煤量 (t)	有效容积 (m^3)	最大终端载荷 (kN)	尾绳悬挂装置最大允许载荷 (kN)	最大提升高度 (m)	箕斗自重 (t)	主要尺寸 (mm)				刚性罐道				编制单位
项目	同侧装卸式	异侧装卸式							A	B	C	D	断面宽度 (mm)		间距 (mm)		
													b	b_1	K_1	K_2	
型号 图号	JDG4/55×4 B74－316.21	JDG4/55×4Y B74－316.31	4	4.4	220	120	1300	7.0	2200	1100	1400	800	180	160	1220	2300	沈阳院
型号 图号	JDG6/75×4 B74－316.22	JDG4/55×4Y B74－316.32	6	6.6			1000	7.3									
型号 图号	JDG6/75×4 B74－316.23	JDG6/75×4Y B74－316.33			300	160	1200	7.9									
型号 图号	JDG9/110×4 B74－316.24	JDG9/110×4Y B74－316.34	9	10	440	220	1300	11.6	2300	1300	1600	830	180	180	1430	2400	
型号 图号	JDG12/110×4 B74－316.25	JDG12/110×4Y B74－316.35	12	13.2			1100	12.4									
型号 图号	JDG12/90×6 B74－316.26	JDG12/90×6Y B74－316.36			540	330	1400	13.3									
型号 图号	JDG16/150×4 B74－316.27	JDG16/150×4Y B74－316.37	16	17.6	600	300	1000	17.8	2400	1550	1850	850	180	200	1690	2500	

注：K_1 为井上下稳罐用；K_2 为井筒中导向用。

型号编制示例：





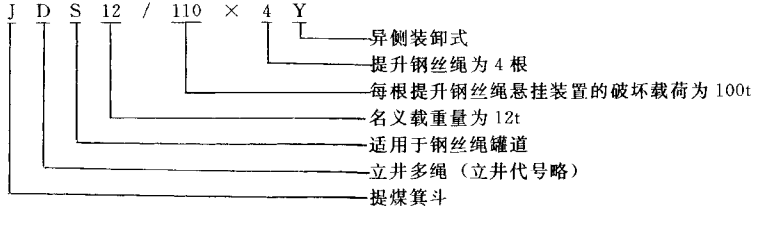
JDG 型多绳箕斗

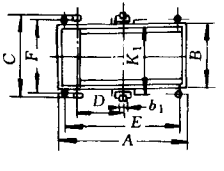
表 6-1-11 绳罐道立井多绳箕斗

绳罐道多绳箕斗			名义载煤量 (t)	有效容积 (m^3)	最大终端载荷 (kN)	尾绳悬挂装置最大允许载荷 (kN)	最大提升高度 (m)	箕斗自重 (t)	主要尺寸 (mm)				钢丝绳罐道			刚性罐道		编制单位
项目	同侧装卸式	异侧装卸式							A	B	C	D	直径 (mm)	数量 (根)	间距 $E\times F$ (mm)	断面宽度 b_1 (mm)	间距 K_1 (mm)	
型号 图号	JDS4/55×4 B74－316.1	JDS4/55×4Y B74－316.11	4	4.4	220	120	1300	6.5	2200	1100	1400	800	32～35	4	2000×1250	160	1220	沈阳院
型号 图号	JDS6/55×4 B74－316.2	JDS6/55×4Y B74－316.12	6	6.6			1000	6.9					32～50					
型号 图号	JDS6/75×4 B74－316.3	JDS6/75×4Y B74－316.13			300	160	1200	7.5										
型号 图号	JDS9/110×4 B74－316.4	JDS9/110×4Y B74－316.14	9	10	440	220	1300	10.7	2300	1300	1600	830			2100×1450	180	1430	
型号 图号	JDS12/110×4 B74－316.5	JDS12/110×4Y B74－316.15	12	13.2			1200	11.5										
型号 图号	JDS12/90×6 B74－316.6	JDS12/90×6Y B74－316.16						12.5										
型号 图号	JDS16/150×4 B74－316.7	JDS16/150×4Y B74－316.17	16	17.6	600	300	1000	16.9	2400	1550	1850	850			2200×1700	200	1690	

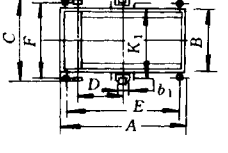
注：K_1 为井上下稳罐用。

型号编制示例：





JDS 型多绳提煤箕斗



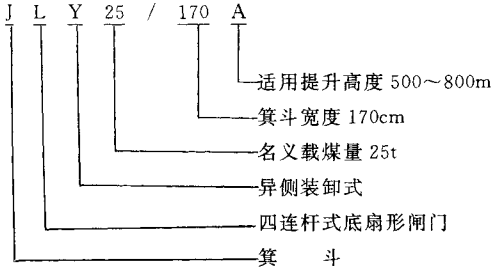
JDSY 型多绳提煤箕斗

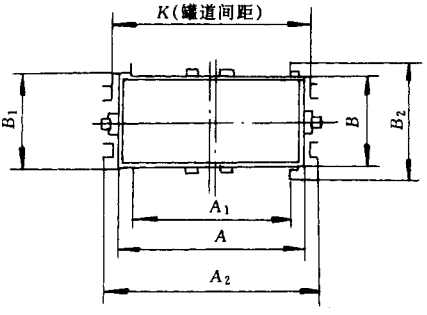
(3)JL 系列立井大型多绳箕斗，见表 6－1－12。

表 6－1－12　JL 系列立井大型多绳箕斗

箕斗型号		名义载煤量(t)	有效容积(m^3)	最大终端载荷(kN)	尾绳悬挂装置最大允许载荷(kN)	最大提升高度(m)	主要尺寸(mm)							编制单位
同侧装卸式	异侧装卸式						A	B	A_1	A_2	B_1	B_2	K	
JL20/126A	JLY20/126A	20	21.0	700	250	800	3080	1260	2660	3460	1320	1420	3200	合肥院
JL25/126A	JLY25/126A	25	26.3	860	300									
JL20/140A	JLY20/140A	20	21.0	700	250		3200	1400	2780	3580	1460	1560	3320	
JL25/140A	JLY25/140A	25	26.3	860	300									
JL20/170A	JLY20/170A	20	21.0	700	250		3200	1700	2780	3580	1760	1860	3320	
JL25/170A	JLY25/170A	25	26.3	860	300									
JL32/190A	JLY32/190A	32	33.6	1100	380		3400	1900	2980	3800	1960	2060	3530	
JL40/190A	JLY40/190A	40	42.0	1400	500									
JL50/200A	JLY50/200A	50	52.5	1730	600		3950	2000	3530	4350	2060	2160	4080	
JL20/126B	JLY20/126B	20	21.0	900	420	1100	3080	1260	2660	3460	1320	1420	3200	
JL25/126B	JLY25/126B	25	26.3	1000	450									
JL20/140B	JLY20/140B	20	21.0	900	420		3200	1400	2780	3580	1460	1560	3320	
JL25/140B	JLY25/140B	25	26.3	1000	450									
JL20/170B	JLY20/170B	20	21.0	900	420		3200	1700	2780	3580	1760	1860	3320	
JL25/170B	JLY25/170B	25	26.3	1000	450									
JL32/190B	JLY32/190B	32	33.6	1360	620		3400	1900	2980	3800	1960	2060	3530	
JL40/190B	JLY40/190B	40	42.0	1650	750									
JL50/200B	JLY50/200B	50	52.5				3950	2000	3530	4350	2060	2160	4080	

型号编制示例：



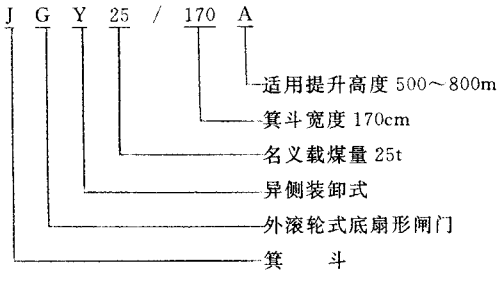


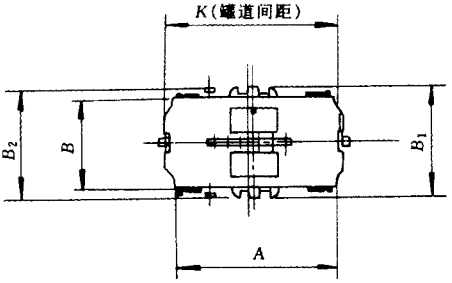
(4)JG 系列立井大型多绳箕斗，见表 6－1－13。

表 6－1－13　JG 系列立井大型多绳箕斗

箕斗型号		名义载煤量(t)	有效容积(m^3)	最大终端载荷(kN)	尾绳悬挂装置最大允许载荷(kN)	最大提升高度(m)	主要尺寸(mm)					编制单位
同侧装卸式	异侧装卸式						A	B	B_1	B_2	K	
JG20/150A	JGY20/150A	20	21.0	665	215	800	2870	1500	1860	1800	3000	南京院
JG25/150A	JGY25/150A	25	26.3	820	265							
JG25/170A	JGY25/170A	25	26.3	820	265		3170	1700	2060	2000	3300	
JG32/170A	JGY32/170A	32	33.6	1030	325							
JG32/190A	JGY32/190A	32	33.6	1030	325		3370	1900	2260	2200	3500	
JG40/190A	JGY40/190A	40	42.0	1285	410							
JG50/190A	JGY50/190A	50	52.5	1590	505							
JG40/210A	JGY40/210A	40	42.0	1285	410		3670	2100	2460	2400	3800	
JG50/210A	JGY50/210A	50	52.5	1590	505							
JG20/150B	JGY20/150B	20	21.0	780	335	1100	2870	1500	1860	1800	3000	
JG25/150B	JGY25/150B	25	26.3	980	430							
JG25/170B	JGY25/170B	25	26.3	980	430		3170	1700	2060	2000	3300	
JG32/170B	JGY32/170B	32	33.6	1260	560							
JG32/190B	JGY32/190B	32	33.6	1260	560		3370	1900	2260	2200	3500	
JG40/190B	JGY40/190B	40	42.0	1540	670							
JG50/190B	JGY50/190B	50	52.5	1900	820							
JG40/210B	JGY40/210B	40	42.0	1540	670		3670	2100	2460	2400	3800	
JG50/210B	JGY50/210B	50	52.5	1900	820							

型号编制示例：



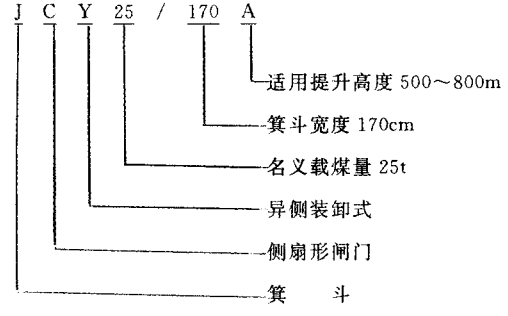


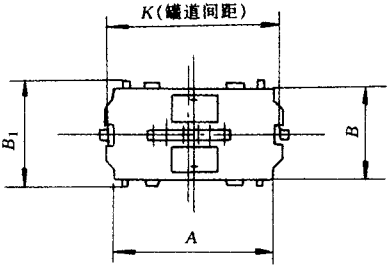
(5)JC 系列立井大型多绳箕斗，见表 6－1－14。

表 6－1－14　JC 系列立井大型多绳箕斗

箕斗型号		名义载煤量(t)	有效容积(m^3)	最大终端载荷(kN)	尾绳悬挂装置最大允许载荷(kN)	最大提升高度(m)	主要尺寸(mm)				编制单位
同侧装卸式	异侧装卸式						*A*	*B*	B_1	K	
*JC*20/126*A*	*JCY*20/126*A*	20	21.0	665	215	800	3080	1260	1400	3200	南京院
*JC*25/126*A*	*JCY*25/126*A*	25	26.3	820	265						
*JC*20/150*A*	*JCY*20/150*A*	20	21.0	665	215		2870	1500	1640	3000	
*JC*25/150*A*	*JCY*25/150*A*	25	26.3	820	265						
*JC*25/170*A*	*JCY*25/170*A*	25	26.3	820	265		3170	1700	1840	3300	
*JC*32/170*A*	*JCY*32/170*A*	32	33.6	1030	325						
*JC*32/190*A*	*JCY*32/190*A*	32	33.6	1030	325		3370	1900	2040	3500	
*JC*40/190*A*	*JCY*40/190*A*	40	42.0	1285	410						
*JC*20/126*B*	*JCY*20/126*B*	2*o*	21.0	780	335	1100	3080	1260	1400	3200	
*JC*25/126*B*	*JCY*25/126*B*	25	26.3	980	430						
*JCZ*0/150*B*	*JCY*20/150*B*	20	21.0	780	335		2870	1500	1640	3000	
*JC*25/150*B*	*JCY*25/150*B*	25	26.3	980	430						
*JC*25/170*B*	*JCY*25/170*B*	25	26.3	980	430		3170	1700	1840	3300	
*JC*32/170*B*	*JCY*32/170*B*	32	33.6	1260	560						
*JC*32/190*B*	*JCY*32/190*B*	32	33.6	1260	560		3370	1900	2040	3500	
*JC*40/190*B*	*JCY*40/190*B*	40	42.0	1540	670						

型号编制示例：





第二节　钢丝绳罐道

一、钢丝绳罐道布置原则及形式

(一)钢丝绳罐道布置原则

1. 布置钢丝绳罐道时应考虑的条件

(1)应尽可能使罐道绳远离提升容器的回转中心,以增大罐道绳的抗扭力矩,减少提升容器在运行中摆动和扭转;

(2)应尽可能增加容器之间及容器与井壁之间的间隙尺寸;

(3)应便于在井口、井底设置稳罐的刚性罐道和罐道梁,并保证罐耳通过时有足够的间隙;

(4)应便于布置和安装罐道绳的固定及拉紧装置;

(5)尽可能对称于提升容器布置,使各罐道绳受力均匀。

2. 采用钢丝绳罐道时应符合的要求

(1)单绳提升人员的罐笼必须装备可靠的断绳保险器。

(2)罐笼绳宜采用密封或半密封式钢丝绳,对提升终端荷载不大,服务年限较短矿井,也可采用 6 股 7 丝普通钢丝绳。

(3)每个提升容器的罐道宜采用四角布置,因受条件限制也可用于四绳单侧布置。对提升终端荷载不大的浅井,可采用两绳或三绳对角或三角布置。

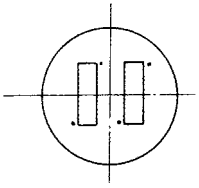
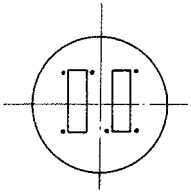
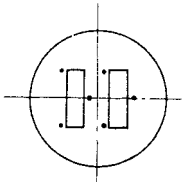
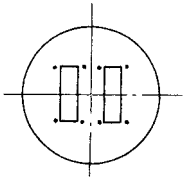
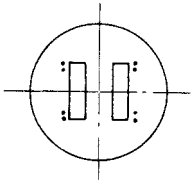
(4)罐道绳张紧装置宜采用井架液压拉紧或螺杆拉紧方式,也可采用井底重锤拉紧方式。每根罐道绳的百米拉紧力为 $8 \sim 12kN$。

(5)同一提升容器的各罐道绳的张力可考虑相差 5% ~ 10%。

(二)钢丝绳罐道布置形式

钢丝绳罐道的布置形式一般有对角(二根)、三角(三根)、四角(四根)等几种,如表 6 - 1 - 15 所示。在深井中,国外还有设六根罐道绳的。

表 6－1－15　钢丝绳罐道布置形式

布置方式	图示	罐道绳数目（根）	适用条件与优缺点
对角		2	适用于浅井和提升终端荷载不大的小型矿井
三角		3	适用于提升终端荷载不大的中、小型矿井
三角		3	适用于提升终端荷载不大的中、小型矿井
四角		4	适用于提升终端荷载较大的深井和大中型矿井。提升容器运行较平稳，是我国煤矿常用的布置形式
单侧		4	适用于提升终端荷载较大的深井和大中型矿井，与四角布置比较，提升容器运行平稳，有利于增大容器之间的间隙，便于布置防撞绳及大型设备升降

二、钢丝绳罐道安全间隙的确定

钢丝绳罐道井筒中提升容器之间，容器与井壁之间的安全间隙，直接影响井筒断面的大小，确定合理的安全间隙，即可保证安全生产，又能使井筒断面布置紧凑。

钢丝绳罐道井筒中容器安全间隙必须符合表 6－1－16 规定。

钢丝绳罐道井筒安全间隙计算公式如表 6－1－16 所列的几种，仅供参考。

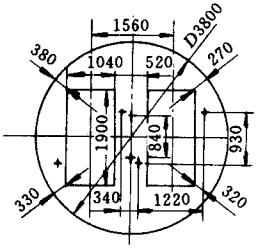
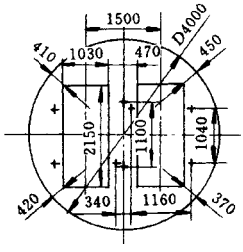
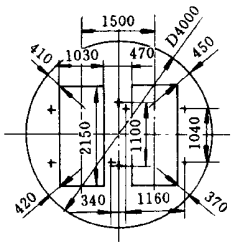
表 6－1－16　钢丝绳罐道安全间隙计算公式

公式来源	计算公式				符号注释
	单绳提升		多绳提升		
	一套提升设备	二套提升设备	一套提升设备	两套提升设备	
原《煤矿安全生产试行规程》规定	$\Delta_1 = 250 + Q \times \sqrt{H}$ $\Delta_2 = 0.8\Delta_1$	$\Delta_1 = 250 + \frac{Q_1 + Q_2}{2}\sqrt{H}$ $\Delta_2 = 0.8\Delta_1$			Q、Q_1、Q_2—提升最大终端载荷，t； H—提升高度，m； v、v_1、v_2—提升最大速度，m/s； Δ_1—容器之间的间隙；mm； Δ_2—容器与井壁之间的间隙，mm； n—罐道绳根数； K—罐道绳最小刚性系数
苏联“别雷依”公式	$\Delta_1 = 250 + 1.2Q_v$ $\Delta_2 = 0.8\Delta_1$	$\Delta_1 = 250 + 0.6 \times (Q1v_1 + Q2v_2)$ $\Delta_2 = 0.8\Delta_1$	$\Delta_1 = 150 + Qv$ $\Delta_2 = 0.8\Delta_1$	$\Delta_1 = 150 + 0.5 \times (Q_1v_1 + Q_2v_2)$ $\Delta_2 = 0.8\Delta_1$	
沈阳煤矿设计院推荐的公式	$\Delta_1 = (100 \sim 200) + \frac{1000}{nK}Qv$ $\Delta_2 = 0.8\Delta_1$		$\Delta_1 = (100 \sim 200 +) \frac{110}{nK}Qv$ $\Delta_2 = 0.8\Delta_1$		

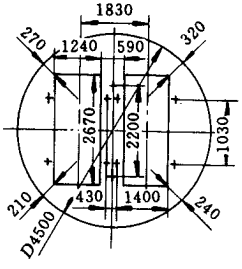
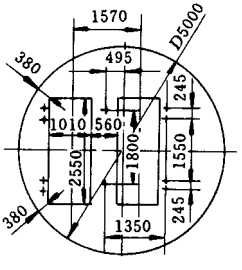
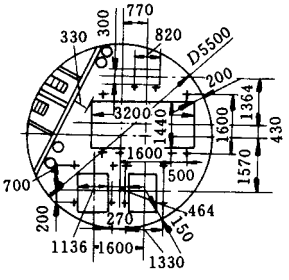
三、钢丝绳罐道使用实例

国内部分矿井使用钢丝绳罐道情况，见表 6－1－17。

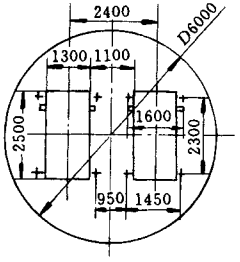
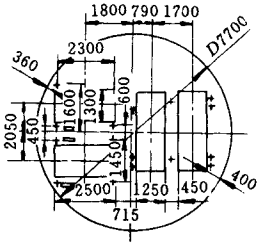
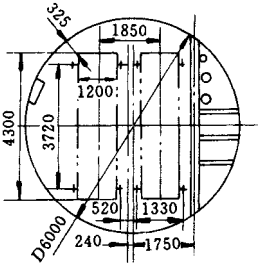
表 6－1－17　国内部分矿井使用钢丝绳罐道情况

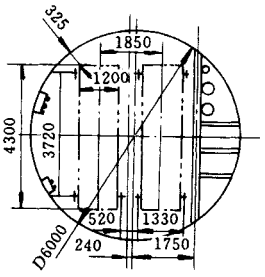
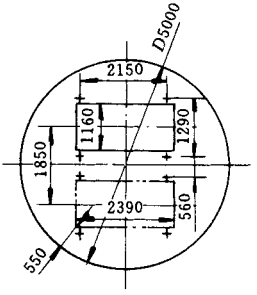
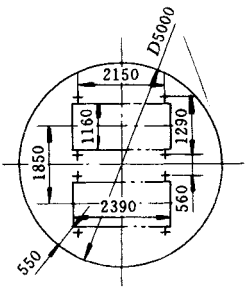
矿井 / 技术特征	长广白龙江矿	长广广兴矿	淄博龙泉二号井
图示			

技术特征 \ 矿井		长广白龙江矿	长广广兴矿	淄博龙泉二号井
井型(Mt/a)		0.03	0.03	0.30
井筒直径(m)		3.8	4.0	4.0
井深(m)		130	316	80
提升绞车型号		$2JT1600\times800$	$2JT1600\times800$	单筒 1.6
提升速度(m/s)		2.5	2.5	3.0
提升容器		0.7t 矿车单层单车罐笼	0.75t 矿车单层单车罐笼	1t 矿车单层单车罐笼
终端荷载(kN)		32	48	39
间隙(mm)	容器之间	520(270)	470(200)	350(200)
	容器与井壁之间	270(240)	450(370)	250(200)
罐道钢丝绳	规格	6×7—ϕ22.5	6×19—ϕ24.5	密封绳 ϕ28
	布置方式	对角布置(两根)	三角布置(三根)	三角布置(三根)
	拉紧力(t)			
	拉紧方式	井架螺杆(甲型)、井底绳卡	井架螺杆(甲型)、井底正反螺杆	井架螺杆(甲型)、井底绳卡
防撞绳使用情况		6×7—ϕ22.4(两根)	6×19—ϕ26.5(两根)	无

技术特征 \ 矿井	萍乡青山矿暗井	南票大窑沟矿	辽宁红透山铜矿
图示			
井型(Mt/a)	0.50	0.30	
井筒直径(m)	4.5	5.0	5.5
井深(m)	116	312/670	216
提升绞车型号	$KJ2\times3\times1.5$	$KJ2\times3\times1.5$	$KJM2.25\times4$
提升速度(m/s)	5.6	5.6	7.85
提升容器	1.5t 矿车单层单车罐笼	1t 矿车双层单车罐笼	一对 2.1m^3 翻转箕斗；一个 0.55m^3 单层双车罐笼
终端荷载(kN)	76	70	箕：128 罐：93

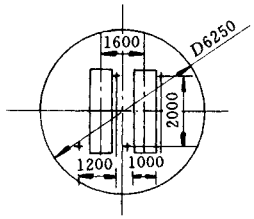
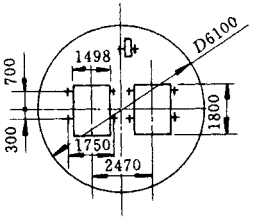
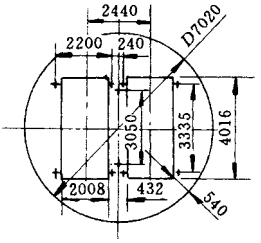
技术特征 \ 矿井		萍乡青山矿暗井	南票大窑沟矿	辽宁红透山铜矿
间隙（mm）	容器之间	590(280)	560(460)	箕：464 罐：490
	容器与井壁之间	320(210)	380(120)	箕：150 罐：200
罐道钢丝绳	规格	6×19—φ40	6× 7—φ32	6×7—φ32
	布置方式	四角布置(四根)	单侧布置(四根)	四角布置箕：(四根) 罐：(六根)
	拉紧力(t)	1.5	4.5	5.0
	拉紧方式	井架绳卡、井底重锤	井架弹簧螺杆(甲型)井底绳卡	井架楔铁座，井底重锤
防撞绳		6×19—φ40(两根)	6×7—φ32 (两根) 6×19—φ31	无
使用情况			1963 年起使用情况良好	1966 年起使用情况良好

技术特征 \ 矿井		北票立新主井	开滦唐家庄新井	大屯姚桥矿副井
图示				
井型(Mt/a)		0.60		1.20
井筒直径(m)		6.0	7.7	6.0
井深(m)		775/925	600	465
提升绞车型号		JKM2.8×4	JKM2.8×4	JKM1.85×4
提升速度(m/s)		10.4	9.35	7.8
提升容器		一对 9t 底卸式箕斗	一对 9t 底卸式箕斗；一对 1.7t 矿车三层单车罐笼	一对 1t 矿车单层双车罐笼
终端荷载(kN)		161	箕：161	104
间隙（mm）	容器之间	1100(800)	箕：330 罐：400	520(420)
	容器与井壁之间		箕：360 罐：400	325
罐道钢丝绳	规格	密封绳 φ38.5	密封绳 φ40.5	6×19—φ40.5
	布置方式	四角布置(四根)	箕：四角布置(四根) 罐：单侧布置(四根)	四角布置(四根)
	拉紧力(t)	10.5	重锤	重锤
	拉紧方式	重锤		
防撞绳		无	密封绳 φ40.5(两根)	无
使用情况		1972 年起使用情况良好		1976 年 12 月起使用情况良好

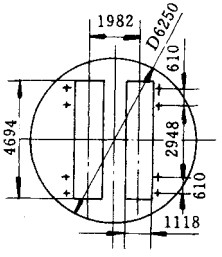
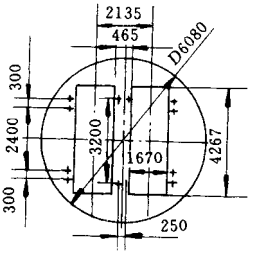
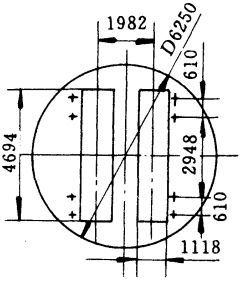
矿井 / 技术特征		大屯孔庄矿副井	大屯姚桥矿主井	大屯孔庄矿主井
图示				
井型(Mt/a)		0.60	1.20	0.60
井筒直径(m)		6.0	5.0	5.0
井深(m)		476	440	500
提升绞车型号		$JKM1.85\times4$	$JKM2.8\times4$	$JKM1.85\times4$
提升速度(m/s)		7.8	9.7	6.5
提升容器		一对 1t 矿车单层双车罐笼	一对 9t 箕斗	一对 6t 箕斗
终端荷载(kN)		104	240	160
间隙(mm)	容器之间	520(420)	560	400
	容器与井壁之间		550	
罐道钢丝绳	规格	6×19—ϕ40.5	密封绳 ϕ40.5	密封绳 ϕ40.5
	布置方式	四角布置(四根)	四角布置(四根)	四角布置(四根)
	拉紧力			
	拉紧方式	重锤	重锤	重锤
防撞绳		无	无	无
使用情况		1976 年 2 月起使用情况良好	1976 年 12 月起使用情况良好	1977 年 7 月起使用情况良好

国外部分矿井使用钢丝绳罐道情况，见表 6－1－18。

表 6－1－18　国外使用钢丝绳罐道情况

矿井 / 技术特征	弗尔敏矿(法)	库别谢夫矿 11 号井(原苏联)	弗利克列哥 1 号井(英)
图示			

矿井 / 技术特征		弗尔敏矿(法)	库别谢夫矿 11 号井(原苏联)	弗利克列哥 1 号井(英)
井筒直径(m)		6.25	6.1	7.02
井深(m)			707	606
提升速度(m/s)				19
提升容器			一对 7t 底卸式箕斗配一个紧急罐笼	
终端荷载(kt)				63.2
间隙(mm)	容器之间			432
	容器与井壁之间			540
罐道钢丝绳	规格	半封闭 ϕ37	密封绳 ϕ45	
	布置方式	对角布置(两根)	四角布置(四根)	四角布置(四根)
	拉紧力(kN)		38	91.3
	拉紧方式		井下重锤	井下重锤
防撞绳		无	无	(两根)

矿井 / 技术特征		布劳德苏欧尔特矿(英)	克拉文 15 号井(南非)	纽—马德捷尔凡钦矿 1 号井(南非)
图示				
井筒直径(m)		6.25	6.08	5.485
井深(m)		544	1061	685
提升速度(m/s)		20	15/17.5	15.2/20.3
提升容器			一对双层罐笼(每罐可载 100 人)	一对双层普通罐笼
终端荷载(kN)			150	150
间隙(mm)	容器之间	864	458	455
	容器与井壁之间	340	345	440
罐道钢丝绳	规格		半封闭 ϕ44.5	半封闭 ϕ44.5
	布置方式	单侧布置(四根)	单侧布置(四根)	四角布置(四根)
	拉紧力(kN)	61	罐:109 防:116	罐:72.6 防:54.4
	拉紧方式		井下杠杆重锤	井下重锤
防撞绳		无	半封闭 ϕ50.8(四根)	半封闭 ϕ44.5～ϕ50.8(两根)
使用情况				

第三节　刚性罐道的计算

一、荷载分析

罐道与罐道梁组成的空间结构，其作用是消除提升容器上下运行时的横向摆动，保证提升容器快速、安全运行。

作用在罐道、罐道梁上的荷载有固定荷载和临时荷载两种。固定荷载主要是罐道、罐道梁的自重(即静荷载)；临时荷载包括提升容器传来的荷载、围岩变形或位移产生的荷载以及安装和温度变化所引起的荷载。提升容器作用于罐道、罐道梁的荷载(即动荷载)又可分为断绳制动荷载和运行荷载两种，是计算罐道、罐道梁的主要荷载，其他荷载均属次要，计算时可省略或在主要荷载计算结果上乘以 1.1 超载系数。

作用于罐道、罐道梁上的荷载，按其作用方向有垂直荷载 P_Y 和水平荷载 P_H；水平荷载按作用于罐道面的方向不同又有正面水平荷载 P_v 和侧面水平荷载 P_X，如图 6－1－1 所示。

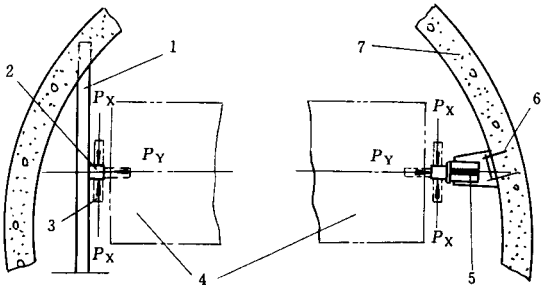


图 6－1－1　水平荷载作用图

1—罐道梁；2—罐道；3—胶轮滚动罐耳；4—罐笼；
5—罐道托架；6—树脂锚杆；7—混凝土井壁

断绳荷载是在装有断绳保险器罐笼的提升钢丝绳断裂时，防坠器刹住罐道所产生的制动阻力，其大小与防坠器的结构和罐道类型有关，其方向为垂直。在装有木罐道防坠器的罐笼中，罐道、罐道梁一般按断绳垂直荷载进行计算。

(1)运行荷载是提升容器在运行过程中与罐道、罐道梁相互作用而产生的水平力，容

器运行时发生的动力过程十分复杂，影响水平运行荷载的因素主要有下列几点：

1)提升容器在井筒内运行的速度；

2)提升容器终端荷载的大小；

3)罐道梁层间距大小；

4)罐道和罐道梁在井筒内的安装质量和精确程度；

5)罐道的规格、布置、接头平滑程度和磨损情况；

6)罐耳的类型、罐耳与罐道的间隙大小；

7)提升容器的类型、提升方式以及容器在运行中摆动量的大小，提升钢丝绳的松捻力等。

(2)采用单绳提升时，提升容器的速度和绳端荷载都比较小，罐道变形值一般不显著，提升容器对罐道产生的水平力主要依据罐耳与罐道接触面间隙大小、罐道安装的垂直程度，以及罐道接头处的误差等确定，其值甚小，设计中多采用钢轨罐道和工字钢罐道梁。随着提升容器的速度和终端荷载的增大，容器横向摆动相当激烈，甚至发生运行失稳现象，在这种情况下，水平运行荷载便成为选择计算罐道、罐道梁截面的主要根据。按以上分析，确定井筒装备计算荷载的结论如下：

1)在提升容器装有断绳防坠器的情况下，提升钢丝绳断裂，防坠器刹住罐道时，罐道、罐道梁上的计算荷载，主要根据制动产生的垂直力(即断绳荷载)计算，正常运行时的水平作用力可作校核计算。

2)在提升容器不设防坠器或采用钢丝绳断绳防坠器，以及在采用多绳提升的情况下，罐道、罐道梁上的计算荷载，主要根据容器在运行过程中与罐道相互作用而产生的水平力的计算。

二、罐道、罐道梁上的荷载计算

当井筒中提升容器装有断绳防坠器的情况下，在提升钢丝绳断绳时，防坠器刹住罐道，绳端荷重由断绳防坠器传至罐道、罐道梁，其荷载一般按动力法计算。

罐道、罐道梁所受的断绳荷载按提升容器以正常速度下放时，提升绳突然断裂，绳端荷载冲击力靠断绳防坠器制动爪插入木罐道滑动所产生的制动力来抵消。其过程为：从断绳到防坠器起作用，中间有一段时间 t(其值取决于制动爪与罐道之间的间隙、防坠器工作状况等)在这段时间内提升容器自由降落。设提升绳断绳时，容器以速度 v_0 下放，自由降落 t 秒后最大速度为 $v = v_0 + gt$。从防坠器开始起作用到提升容器完全制动，这段滑动距离叫制动距离 S，其速度由 v 变到零，根据能量守恒原理，容器坠落的动能 $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$ 消

失和位能(QS)的减少,应等于防坠器刹住罐道所产生制动阻力(W)所作的功,即:

$$\frac{Qv^2}{2g} + QS = WS$$

制动力 W,即断绳制动时容器作用于罐道的力,由上式可得:

$$W = \frac{Qv^2}{2gS} + Q \tag{1-1}$$

制动距离 S,可从初速度为 V,末速度等于零的匀减速运动公式知:

$$S = \frac{v^2}{2j}$$

将 S 式代入(1-1)得:

$$W = \frac{Qv^2 \cdot 2j}{2g \cdot v^2} + Q = Q\left(\frac{j}{g} + 1\right) \tag{1-2}$$

式中　W——作用于罐道的制动力,N;

Q——提升绳端荷重,N;

g——自由落体重力加速度,$g = 9.81\,m/s^2$;

j——制动时的加速度,m/s^2,为保证罐笼内人员的安全和有足够的制动力,一般取 $j \leqslant 3g$;当绳端荷载最小时,即罐笼乘人最少(1 人)近似空罐,为保证人员安全,制动减速度 j 不应超过 $5g$;当绳端荷载最大时,即罐笼装载最重,为保证有足够的制动力,其速度 j 应不小于重力加速度 g。

因此设计井筒装备时,罐道、罐道梁所受的断绳制动荷载可按下式计算:

当绳端荷载最小时:　$W = 6Q_{空}$

当绳端荷载最大时:　$W = 2Q_{重}$

当罐笼完全载人时:　$W = 4Q$

式中　$Q_{空}$——空罐重加一人重量,N;

$Q_{重}$——罐笼自重、矿车重、矿物或矸石重量之和,N;

Q——罐笼重加满载人员的重量,N。

在井筒中提升容器不设防坠器或采用钢丝绳防坠器(提升绳断绳,防坠器的制动不作用于罐道)以及采用多绳提升的情况下,由于多种原因引起容器的横向摆动,产生作用于罐道和罐道梁的水平力和垂直力,经过实际测定,以水平力为主这已有公论。计算井筒装备时,罐道、罐道梁上的计算荷载主要按容器运行过程中与罐道相互作用而产生的水平力计算。

近年来,刚性井筒装备在提升容器高速、重载运行情况下出现罐道变形、罐道梁开裂、梁窝松旷和运行失稳等损坏现象,如淮北芦岭矿主井,在提升终端荷载 $148\,kN$,提升

速度 13.5 m/s 运行数年后，罐道变形 532 处，罐道梁开裂 30 处，梁窝松旷 54 处。井筒装备的这些损坏现象，在国内外都有发生，也并非偶然，其主要原因是在井筒装备的设计中水平力确定有误，结果装备选型不当。实践表明，过去用于浅井的刚性井筒装备的计算依据和方法，已不能满足深井高速、重载情况的需要。

多年来，在多绳提升立井刚性井筒装备结构的设计计算中，设计的主要荷载一般采用原联邦德国水平力经验公式确定。近 20 年来，国内对近 20 个井筒的井筒装备水平力进行了现场测试，取得了大量数据，并研究得出了水平力的计算方法，这对刚性井筒装备的设计研究，起到了重要作用。现将国内外有关水平力的计算方法介绍如下：

1. 经验公式计算法

(1)原联邦德国《采矿规程》(1957 年多特蒙德市出版)规定的有关水平作用力计算公式

$$P_H = \frac{1}{n} Q K \tag{1-3}$$

式中　P_H——提升容器运行时的水平作用力，N；

Q——提升终端荷重，N；

K——罐道梁层间距换算系数，

$$K = 1 + 0.5 \frac{H - 1500}{1500} \tag{1-4}$$

H——设计采用的罐道梁层间距，mm；

1500——标准罐道梁层间距，mm；

n——与提升速度有关的系数，可按表 6-1-19 确定。

表 6-1-19　n 值

提升速度(m/s)	< 6	6 ~ 8	8 ~ 10	10 ~ 12	12 ~ 14	14 ~ 16	> 16
n	22	19	17	15	13	12	11

提升容器对罐道、罐道梁所产生的垂直荷载为其水平力的 1/4，即：

$$P_v = 0.5 \cdot P \tag{1-5}$$

(2)前苏联“矿井建设”1962 年第三期介绍的有关水平力的计算公式

$$P_H = C \cdot Q \tag{1-6}$$

式中　C——与提升速度有关的系数，

$$C = 0.004V + 0.026 \tag{1-7}$$

V——提升速度，适用在 6～16 m/s 的范围内，当 $V > 16\,m/s$ 时，取 $C = 0.09$。

当罐道梁层间距大于 1500 mm 时，每增加 500 mm，系数 C 相应地增加 10%。

(3)原联邦德国《竖井与斜井装备的技术规程》(1977 年多特蒙德市出版)规定的有关水平力的简化计算公式

对罐道与罐道梁正面的水平力 P_Y 为：

$$P_Y = \frac{Q}{12} \tag{1-8}$$

对罐道与罐道梁侧面水平力 P_X 为：

$$P_X = 0.8 \cdot P_Y \tag{1-9}$$

对罐道与罐道梁的垂直力 P_v 为：

$$P_v = 0.25 \cdot P_Y \tag{1-10}$$

经验公式计算法考虑了产生水平荷载的主要因素，参数少、公式简便易记，多年来在我国和国外的工程设计中被广泛采用。

由于目前井筒运行情况与德国公式产生的历史背景和适用条件已不相同，对中国煤矿井筒实测证明，用德国公式求得的水平力值比现场实测值及工程设计值大 1～2.5 倍。

部分矿井水平荷载按经验公式计算结果见表 6－1－20。

表 6－1－20　国内外部分矿井水平荷载计算

井筒名称	绳端荷重 Q(kg)	提升速度 v (m/s)	罐道梁层间距 L (m)	罐耳与罐道间隙 δ (mm)	水平荷载(P_H) 计算值 (kg)	水平荷载(P_H) 占 Q 的百分比(%)	计算公式
开滦吕家坨矿主井	23000		3.0	20	2880	12.5	$P_H = \frac{1}{12}Qf$
开滦吕家坨矿副井	23090		3.0		2886	12.5	$P_H = \frac{1}{12}Qf$(按提物计算)
开滦吕家坨矿副井	18360		3.0		2295	12.5	$P_H = \frac{1}{12}Qf$(按提人计算)
开滦范各庄新主井	41000	12～14	3.5		5258	12.8	$P_H = \frac{1}{12}Qf$
开滦范各庄新副井	28100	12～14	3.5		3604	12.5	$P_H = \frac{1}{12}Qf$
兖州兴隆庄主井	20000	10～12	4.168		2520	12.5	$P_H = \frac{1}{15}Qf$

井筒名称	绳端荷重 Q(kg)	提升速度 v (m/s)	罐道梁层间距 L (m)	罐耳与罐道间隙 δ (mm)	水平荷载(P_H) 计算值 (kg)	水平荷载(P_H) 占 Q 的百分比(%)	计算公式
兖州兴隆庄副井	21850	7.85	4.168		1850	8.5	$P_H=\frac{Q}{g}\ \frac{v^2}{R}$
台吉副井	17700	8.75	4.0		2000	11.3	$P_H=\sqrt{\frac{Q}{g}(va)^2\ \frac{1}{c}}$
铁法晓南副井	39000	8.15	4.168		4336	11.1	$P_H=\frac{1}{n}Qf$(Q 包括绳重)
平顶山十三矿副井	29084	11	4.0		3554	12.2	$P_H=\frac{1}{15}Qf\left(Q\text{包括}\frac{1}{2}\text{绳重}\right)$
开滦钱家营主井	711225 (N)	15	4.0		59269 (N)	8.3	$P_H=\frac{Q}{12}$
开滦钱家营副井	252110 (N)	10	5.0		21009 (N)	8.3	$P_H=\frac{Q}{12}$
联邦德国《立井与斜井装备技术规程》计算	360000 (N)	10～12	5.0		30000 (N)	8.4	$P_H=\frac{1}{12}Q$(正面水平力)
示例					24000	6.72	$P_H=0.8\times\frac{Q}{12}$(侧面水平力)
前苏联克里沃巴斯(巨型深井)	90000	8.8	4.0	10	13100	14.6	$P_H=\frac{2mv^2\pi^2\delta}{h^2}$

2. **分析确定法**

煤炭工业部沈阳设计院和兖州设计院根据现场实测数据，通过回归分析提出的水平力计算公式，见表 6－1－21(1990 年煤炭工业部鉴定通过)。

罐道水平力最大值为：

$$F=(6600\sim9400)+3F_d \tag{1-11}$$

动态罐道水平力为：

$$F_d=125v-0.00037vmF_j-\frac{2990}{m}+\frac{135400v}{mF_j}-87 \tag{1-12}$$

式中　F_d——动态罐道水平力，N；

v——提升速度，m/s；

m——终端荷载，t；

F_j——滚轮静压力，$F_j=1500\sim2500\,N$。

罐道水平力设计推荐值使用条件：

(1)提升速度不大于 12m/s；

(2)滚轮预压力小于 6.6kN；

表 6－1－21　罐道水平力设计推荐值

提升速度(m/s)	≤6	8	10	12
水平力推荐值(kN)	8.0	10.0	13.0	16.0

(3)终端质量(不包括尾绳质量)不大于 350kN；

(4)罐道安装质量符合煤炭工业部部颁验收标准。

该研究成果适用于罐笼井和 16t 以下的箕斗井井筒装备。

3. 工程计算法

工程计算法是中国矿业大学在运用相对运动原理所建立的刚性井筒装备水平力模拟实验台上,从工程使用的角度考虑,对影响水平力的三个主要因素(提升终端荷载、提升速度、罐道梁层间距)按正交设计进行了大量实验,取得了在各种情况下提升容器(胶轮滚动罐耳)沿矩形截面罐道运行所产生的水平力数据,在对实验数据进行回归分析的基础上,提出了水平力工程计算公式,即:

$$P_H = 0.132Q^{0.425}V^{0.9596}H^{-0.0345} \tag{1-13}$$

式中　P_H——水平作用力,kN；

Q——提升终端荷载(提升容器重量与提升物料重量之和),kN；

V——提升速度,s/m；

H——罐道梁(或托架)层间距,m。

工程计算公式(1－13)求得的水平力值,大于现场实测最大值 5.53%(东滩煤矿主、副井筒)。

三、悬臂式罐道梁计算

悬臂罐道梁是固定罐道的支承结构,通常一端固定在井壁上,另一端与罐道相连接,罐道梁悬出井壁的长度,一般介于 350～500mm 之间。悬臂罐道梁的梁端荷载,一般按等强度换算法求之,即根据井筒直径和提升容器的型号,按经验选用的边梁型号,求出该边梁所允许承受的集中荷载,再移此荷载于悬臂梁的自由端,然后作悬臂梁的选型计算,其步骤如下:

设某矿根据经验选用某型号工字钢边梁(按简支梁考虑),根据该边梁的最大跨度及集中荷载(图 6－1－2),作钢悬臂梁的选型计算。

计算边梁的容许弯矩：

$$M_u = f_u W_x \tag{1-14}$$

式中　M_u——某型号工字钢边梁的容许弯矩，$N \cdot mm$；

f_u——工字钢的抗弯强度设计值，对于 $Q235$ 钢，$f_u = 215 N/mm^2$；

W_x——某型号工字钢的截面抵抗矩，mm^3。

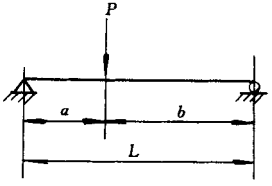


图 6-1-2　边梁受力计算

由图 6-1-2 可求出该边梁的最大弯矩：

$$M_{max} = \frac{P \times a \times b}{L} \tag{1-15}$$

式中　P——边梁承受的集中荷载，N；

a、b——分别为集中荷载作用点到两端的距离，mm；

L——边梁的跨度，mm。

根据该边梁所受的最大弯矩应小于或等于容许弯矩，即 $M_{max} \leqslant M_u$，可求出该边梁所受的集中荷载，即

$$P \leqslant \frac{L f_u W_x}{2b} \tag{1-16}$$

把等同的集中荷载 P，看为作用在悬臂梁自由端的荷载，设悬臂梁的长度如图 6-1-3 所示。按悬臂梁承受的最大弯矩求其截面抵抗矩。

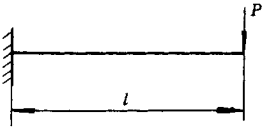


图 6-1-3　悬臂梁受力计算

$$M'_{max} = P \cdot L$$

$$W'_x = \frac{M'_{max}}{f_u} = \frac{P \cdot L}{f_u} \tag{1-17}$$

根据求出的截面抵抗矩 W'_x 查型钢表，选出相应的悬臂梁的型号。

四、罐道梁层间距的确定

在采用木罐道时，每根罐道长 $6m$，布置三层罐道梁，层间距为 $2m$；采用钢轨罐道时，每根罐道长 $12.5m$，布置三层罐道梁，考虑到钢轨的膨胀，层间距 H 为：

$$H = \frac{L_0(1+\Delta ta)}{n}$$

$$= \frac{12500(1+30\times 0.000012)}{3} = 4168\,mm$$

式中　H——罐道梁层间距，mm；

L_0——钢轨罐道长度，mm；

Δt——井筒内温度变化，一般按 30℃ 考虑；

a——钢轨的膨胀系数，一般 $a = 0.000012$；

n——支承每根罐道的罐道数，$n = 3$。

根据罐道、罐道梁受力分析，罐道梁层间距除考虑罐道类型和长度外，还必须考虑提升容器终端荷载和提升速度的大小，即必须考虑罐道、罐道梁上承受水平荷载的大小以及罐道梁截面形状。

根据国内一些矿井生产实践，如开滦矿区，采用 $0.45\sim 0.75t$ 矿车双层或三层多车罐笼，提升终端荷载约 $20t$，提升速度 $7\sim 16m/s$，采用 $38kg/m$ 钢轨罐道，罐道梁层间距加大到 4.5 或 $5.0m$；抚顺矿区木罐道罐笼井筒，采用 $1.5t$ 矿车双层双车，罐道梁层间距由 $2.0m$ 提高到 $3.0m$，已使用多年，并承受过断绳荷载的考验，证明适当加大罐道梁层间距是可行的。

近年来采用组合钢罐道，罐道梁层间距一般采用 $4.0m$。根据国外对槽钢组合罐道的提升运行试验和我国对部分井筒装备的现场测试认为：影响罐道水平力的主要因素是井筒装备的安装质量和容器偏载运行，其次是提升速度、导向装置的刚度和终端荷载；在保证安装质量，终端载荷小于 $300kN$、提升速度不大于 $12m/s$ 的正常提升情况下，罐道所受的水平力一般小于 $10.0kN$；在井筒原装备的条件下，罐道梁（或托架）层间距 $4.0m$ 可加大到 $6.0m$。为降低井筒装备的钢材消耗，减少安装工程量和费用，加快建井速度，根据井筒装备所承受水平力的大小，改善罐道梁截面形状，合理地确定罐道梁层间距，仍需进一步研究。

第四节　罐道与罐道、罐道与罐道梁的连接

一、罐道接头

罐道接头处要求有足够的强度和刚度，接头处还应平滑，使容器畅通无阻，减少振动。根据煤矿安装工程质量检验评定标准要求："同一提升容器的两罐道接头位置，严禁位于同层梁上"。另外，罐道接头之间应留 2～4 mm 伸缩缝。

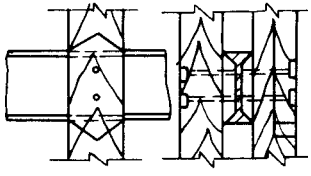
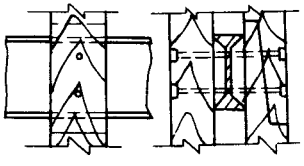
（一）木罐道接头

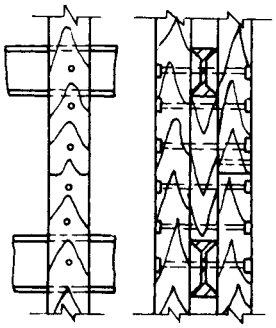
罐道接头应保证罐笼断绳制动时，工作正常。接头处常将罐道木三面削成长 100～150 mm，厚 3 mm 的梢头，以减少罐笼经过时的振动，连接螺栓埋入木罐道的净深不小于 15 mm。

1. 木罐道接头形式

按罐道接头位置不同有两种方式，即木罐道的接头布置在罐道梁上，或布置在两层罐道梁之间；按罐道接头方式不同，可分为简易接头、斜榫和公母榫接头等几种，见表 6－1－22。

表 6－1－22　木罐道接头布置形式

接头布置形式		图示	说明
接头布置在罐道梁上	简易接头		搭接接头形式之一。构造简单，安装方便，接头设在罐道梁上，牢固，可靠
	斜榫接头		搭接接头形式之一。构造简单，安装方便；接头设在罐道梁上，牢固、可靠

接头布置形式		图示	说明
接头布置在两层罐道梁之间	公母榫接头		对接接头形式。构造较复杂，安装较麻烦，接头部分需用罐道接头木，消耗木材多；接头处强度较大，井筒淋水不易积聚在接头缝隙之间；减少接头处腐朽，延长使用期限

2. **木罐道接头计算**

(1)搭接计算：

其搭接方法如图 6－1－4a **所示。**

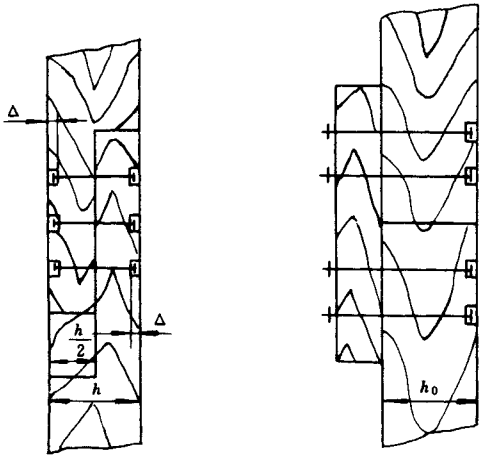


图 6－1－4　**木罐道接头计算示意图**

a**—搭接接头；**b**—对接接头**

按挤压条件，每根罐道上的螺栓数为：

$$n \geqslant \frac{W}{[\sigma_C]\left(\frac{h}{2}-\Delta\right)d} \tag{1-18}$$

式中　n**——每根罐道的螺栓数，个；**

W**——计算荷载，**N**；**

$[\sigma_C]$——罐道木顺纹抗压容许应力，N/mm^2；

h——木罐道厚度，mm；

△——螺帽陷入罐道的深度，mm；

d——螺栓直径，一般取 16～22 mm。

按剪切条件，每根罐道上的螺栓数为：

$$n \geqslant \frac{W}{\frac{\pi d_0^2}{4} f_v m_c} \tag{1-19}$$

式中　W——计算荷载，荷载设计值为荷载乘以荷载系数 γ，$\gamma = 1.4$，N；

f_v——螺栓抗剪强度设计值，$Q235$ 钢普通 C 级螺栓 $f_v = 135 N/mm^2$；

d_0——螺栓螺纹处内径，mm；

m_c——工作条件系数，一般取 $m_c = 0.8$。

根据以上两种条件计算结果，取其最大值。

(2)对接计算：

其对接方法如图 6－1－5 所示。按挤压条件，每根罐道上的螺栓数为：

$$n \geqslant \frac{W}{[\sigma_C] h_0 d} \times 2 \tag{1-20}$$

式中　h_0——托木厚度或罐道厚度减去螺帽陷入罐道内的深度，mm；

2——对接时螺栓数加倍。

按剪切条件，每根罐道上所需的螺栓数为：

$$n \geqslant \frac{W}{\frac{\pi d_0^2}{4} f_v m_c} \times 2 \tag{1-21}$$

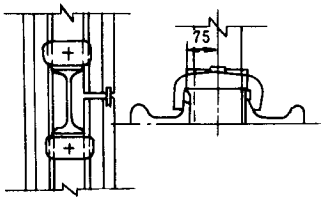
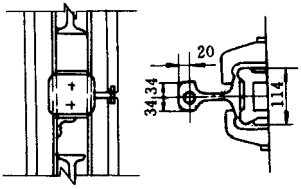
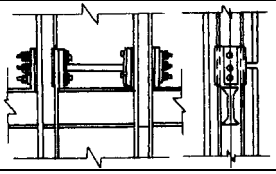
根据以上两种条件计算结果，取其最大值。螺栓垫片厚度，一般设计中不计算，螺栓垫片的直径或边长不小于 3.3d，厚度不小于 0.25d。

(二)钢轨罐道接头

钢轨罐道接头形式一般有 接头设在一根罐道梁中间，即在罐道与罐道梁连接处 ;接头设在两层罐道梁之间以及接头设在罐道梁上面等几种，见表 6－1－23。

为增加钢轨罐道在单侧布置时的刚性，减少提升速度较大时的振动，有些矿采用在两层罐道梁中间增加一副罐道卡，罐道间安设铁卡芯，如图 6－1－5 所示。每副罐道卡有螺栓两个，其中一个长螺栓外套铁管，连接和支承同一侧的两根罐道，以保证罐道不发生位移。有的矿井未加拉杆螺栓，仅将缺口板由厚 10 mm 增加到 16 mm，运转也较正常，罐道未见有位移现象。

表 6－1－23　钢轨罐道接头布置形式

接头布置形式	图示	说明
接头设在一根罐道梁中间(即设在罐道与罐道梁连接的地方)		结构较复杂,需在罐道梁上、下设两副罐道卡,钢材消耗大,因固定长度较大,罐道刚性较好
接头设在两层罐道梁之间		
接头设在罐道梁上面		结构简单,减少一副罐道卡,省钢材,罐道刚性较差

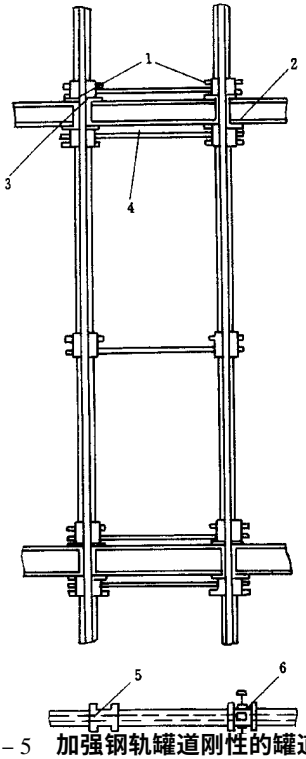


图 6－1－5　加强钢轨罐道刚性的罐道卡布置

1—罐道卡;2—罐道梁;3—钢轨罐道;4—支管及螺栓;5—缺口板;6—铁芯

罐道接头在一根罐道梁中间或两层罐道梁中间，两罐道的连接方法，采用普通接头方法和铁夹子接头，如图 6－1－6 所示。铁夹子接头具有足够的强度，检修时更换调整方便，使用效果很好。

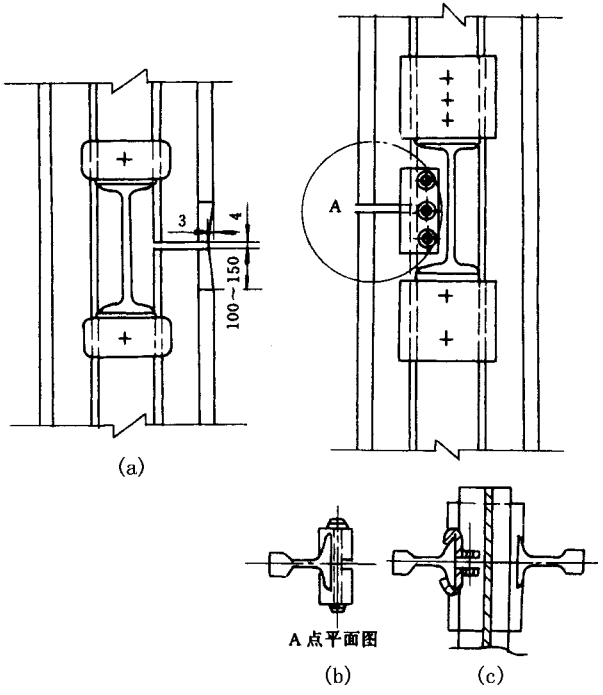


图 6－1－6　钢轨罐道接头

a—普通接头；b—锻制的铁夹子接头；c—厚 10 mm 钢板制作的铁夹子接头

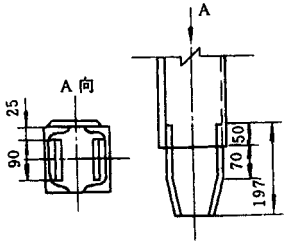
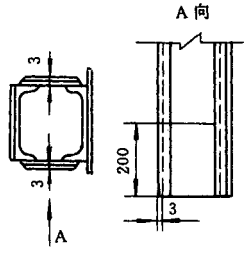
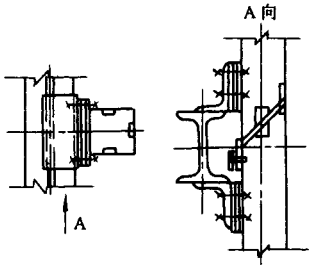
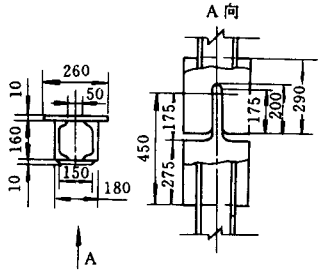
(三)钢罐道及钢一玻璃钢复合罐道接头

型钢组合罐道和钢一玻璃钢复合罐道的接头，一般设在罐道与罐道梁联接的位置上，即设在罐道梁中间。接头方式主要有扁钢销子、磨小罐道头、斜面接头及导向板等几种，见表 6－1－24。

二、钢罐道梁接头

井筒中钢罐道梁应力求没有接头，当罐道梁必须由两节组成时，其接头位置应设在弯矩较小的地方，且上下层罐道梁接头处应错开布置。短节罐道梁长度按下式求得：

表 6－1－24　型钢组合罐道接头方式

接头方式	图示	说明
扁钢销子		两根罐道的接头牢固可靠 罐道更换困难
磨小罐道头		罐道更换容易，加工安装方便 ;接头处牢固程度较差
斜面接头		罐道更换容易，安装方便，罐道与罐道梁间连接采用胶垫，容器运行平稳，冲击小，罐道梁安装允许一定的结构公差； 罐道接头加工量大，螺栓锈蚀后拆卸可否方便，有待实践考验
导向板		接头处牢固可靠，罐道更换容易，安装简便； 导向板加工要求高

$$L_0 = a + \frac{L}{2} + (200 \sim 300) \qquad (1-22)$$

式中　L_0——**短节罐道梁长度，**mm；

a——罐道梁插入井壁的深度，mm；

L——连接夹板长度，mm；200～300——安装用的附加长度，mm。

两节工字钢罐道梁接头之间一般采用夹板焊接或螺栓连接，连接夹板一般为型号较小的槽钢或用厚 10 mm 钢板压制成槽形板，如图 6－1－7 所示；连接夹板尺寸及螺栓直径和数量以保证与罐道梁等强度即可，一般按经验选取，工字钢罐道梁接头常用尺寸和连接件数量，见表 6－1－25。

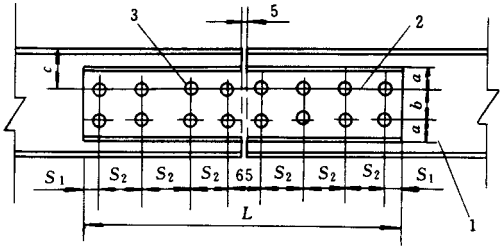


图 6－1－7　工字钢罐道梁接头

1—工字钢罐道梁；2—槽钢夹板；3—螺栓

表 6－1－25　工字钢罐道梁接头常用尺寸和连接件数量

罐道梁型号	槽钢		螺栓			型钢各孔关系尺寸（mm）				
	型号	长度（mm）	直径（mm）	数量（个）	长度（mm）	S_1	S_2	a	b	c
20_b^a	14_b^a	605	20	16	50	30	80	40	60	70
22_b^a	16a	605	20	16	50	30	80	45	70	75
25_b^a	18_b^a	605	20	16	55	30	80	50	80	85
28_b^a	20_b^a	605	20	16	55	30	80	50	100	90
32_b^a	25_b^a	605	20	20	55	30	80	60	130	95
36_b^a	28_b^a	765	20	20	55	30	80	70	140	110

注：上表所列：一般 $S_1 = 2 \sim 4d$；$S_2 = 3.5d$；$a = 1.5 \sim 2d$；$b = 3.5 \sim 8d$；d 为螺栓孔径。

三、罐道与罐道梁的连接

罐道与罐道梁的连接，其接头是否稳定牢固，直接影响提升工作能否正常进行，故在选择连接方式时，除保证有足够的强度和刚度外，还必须要求构造简单，安装和维修方

便。

(一)木罐道与钢罐道梁的连接

木罐道与钢罐道梁的连接,如图 6－1－8 所示。联接螺栓头应埋入木罐道面净深 15 mm,为防止罐道沿垂直方向移动,罐道梁应卡入木罐道 4 mm 以上。当罐道梁采用工字钢梁时,罐道梁与罐道之间应垫入垫木。

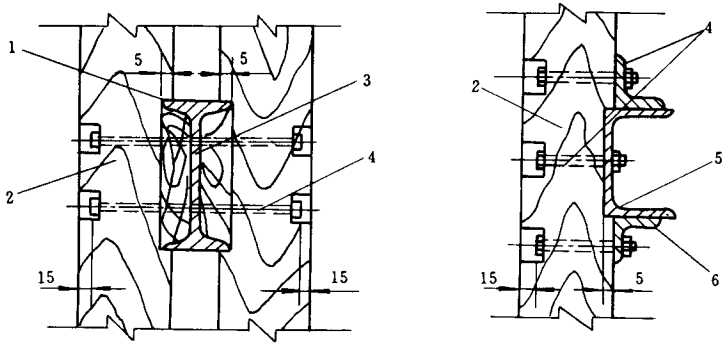


图 6－1－8　木罐道与钢罐道梁的连接

a—木罐道与工字钢罐道梁连接;b—木罐道与槽钢罐道梁连接

1—工字钢罐道梁;2—木罐道;3—垫木;4—螺栓;5—槽钢罐道梁;6—角钢

(二)钢轨罐道与钢罐道梁的连接

钢轨罐道一般用特制的罐道卡和螺栓固定在罐道梁上,如图 6－1－9 所示。为防止罐道在罐道梁上移动,一般用钢板作成凹槽垫板(即缺口板)焊在罐道梁上,罐道轨底卡在垫板的凹槽内。垫板在凹槽处的宽度 S 一般不超过罐道梁梁面宽度的 6～10 mm,垫板厚度 $d \geqslant 10\,mm$,凹槽深度为 $h = 6 \sim 12\,mm$,罐道轨底与垫板凹槽两侧边的间隙不应大于 2 mm。

单面钢轨罐道与罐道梁的连接方法,一般是在联接处的另一面需设一段伪罐道,用罐道卡固定,如图 6－1－10a、b 所示。伪罐道长度 $L = h + 2h_1 + 2d_0 + 80 \times 2$,一般为 540～600 mm。为防止伪罐道松动和安装方便,在伪罐道上下各焊一短节角钢或用螺栓与罐道梁连接住。伪罐道不宜割去轨头,以整轨为好。

为把单面钢轨罐道固定在罐道梁上,国外采用一种带钩的单面罐道卡,如图 6－1－10 所示。这样即可取消伪罐道,减少井筒装备的钢材消耗,又可省去安装伪罐道的麻烦。

(三)钢轨罐道与工字钢悬臂梁的连接

在梁的悬臂端上下各焊一个角钢,在角钢外侧加伪罐道(靠近井壁一侧),梁的上、下

各有一根，分别用罐道卡将伪罐道与罐道卡住，再以螺栓连接，其连接结构如图 6－1－11 所示。

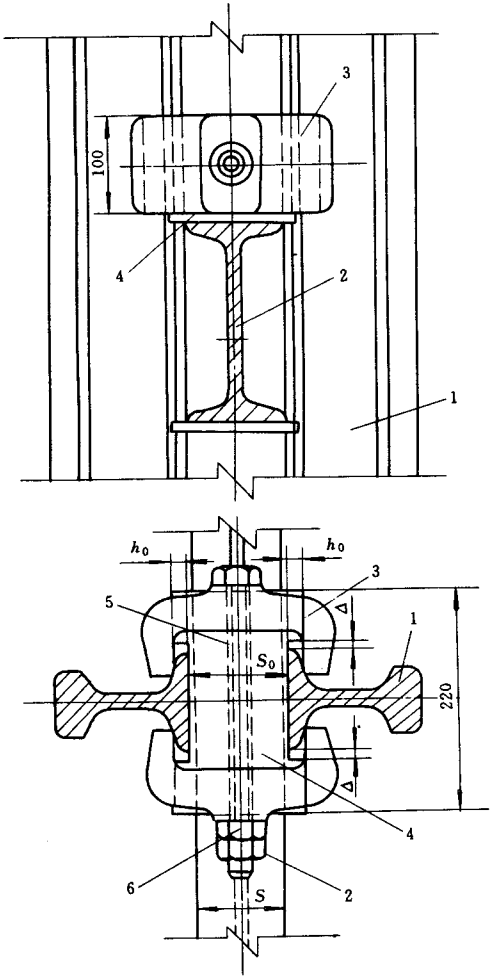


图 6－1－9　钢轨罐道与工字钢罐道梁连接

1—钢轨罐道；2—工钢罐道梁；3—罐道卡子；

4—凹槽垫板；5—螺栓；6—螺母

（四）钢轨罐道与钢筋混凝土悬臂梁的连接

在梁的悬臂端预埋入四根钢筋，在钢筋靠井壁一侧放挡板，在钢筋外侧放缺口板，用钩头螺栓将罐道和挡板扭紧，在钩头螺栓外加侧板，其结构如图 6－1－12 所示。

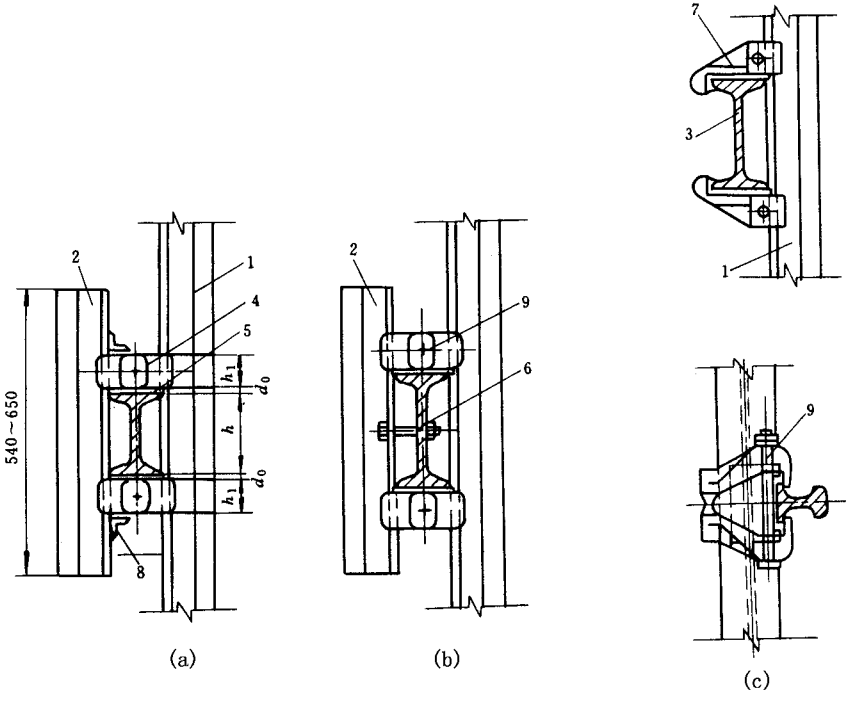


图 6－1－10　单面钢轨罐道与工字钢罐道梁连接

a—普通的；b—带螺栓的；c—用单面罐道卡；

1—钢轨罐道；2—伪罐道；3—工字钢罐道梁；4—罐道卡子；

5—凹槽垫板；6—螺栓；7—单面罐道卡；8—角钢；9—螺栓

(五)矩形钢罐道与钢罐道梁连接

矩形钢罐道(包括型钢组合罐道及球扁钢罐道)和钢一玻璃钢复合罐道与钢罐道梁连接方式,主要有螺栓连接和压板连接两种。

1. 螺栓连接方式

如图 6－1－13a 所示,在组合罐道靠近罐道梁的一侧焊有连接钢板或角钢,用螺栓直接将罐道与罐道梁连接起来。这种连接方式的优点是连接牢固可靠,罐道不会下滑;其缺点是罐道和罐道梁的加工与安装要求精度较高,罐道梁层间距必须严格保证。

2. 压板连接方式

如图 6－1－13b 所示,在罐道梁或连接角钢上钻孔并预留垫板,通过压板及压板螺栓,将罐道连接钢板压紧,依靠压板与罐道连接钢板的摩擦力,把罐道与罐道梁连接起来。这种连接方式,允许罐道与罐道梁上下左右有一定范围的调整余地,安装比较方便;但每根罐道的上半截,紧靠罐道梁面上,再焊接防滑角钢,使罐道与罐道梁连接更加牢固。

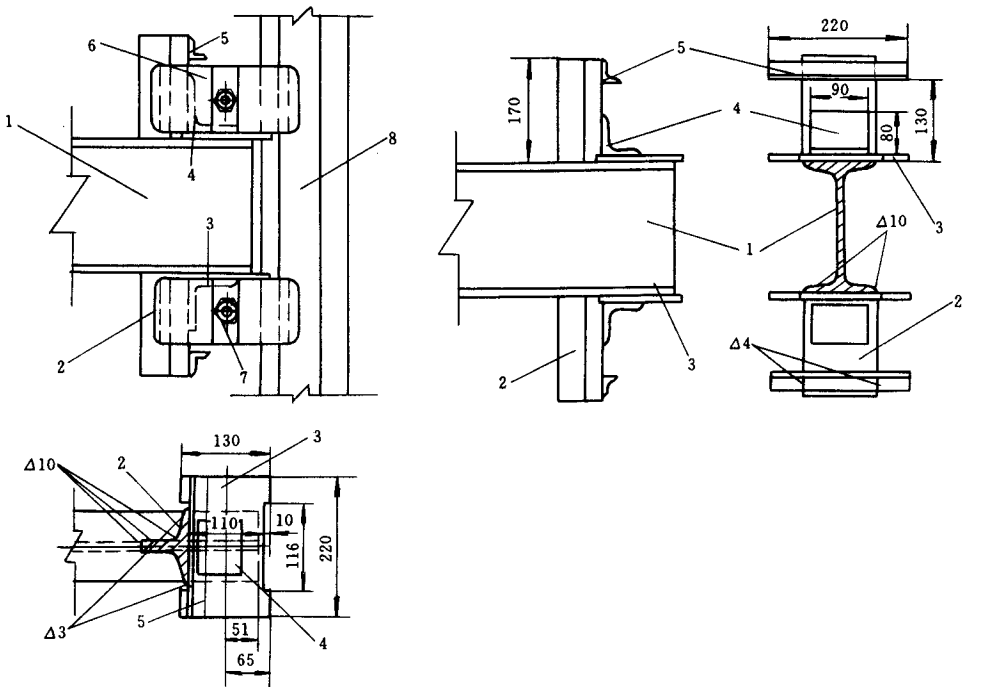


图 6－1－11　钢轨罐道与工字钢悬臂梁连接

1—悬臂梁（I 20*b*）；2—伪罐道；3—垫板（220×130×10）；
4—角钢（∟80×10）；5—角钢（∟25×4）；
6—罐道卡子；7—螺栓（*M*24×500）；8—钢轨罐道（38*kg*/*m*）

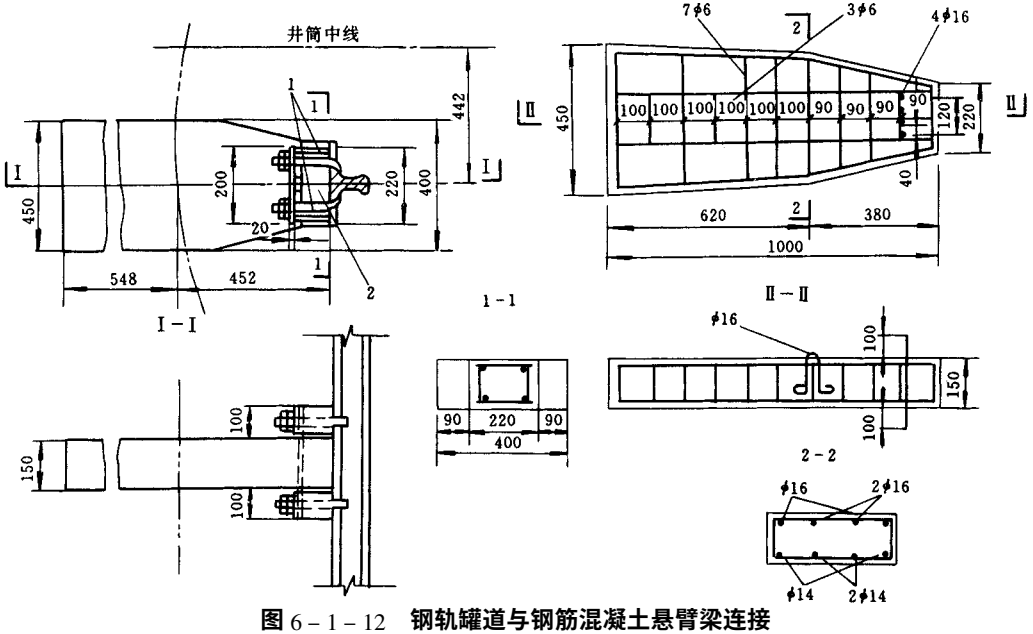


图 6－1－12　钢轨罐道与钢筋混凝土悬臂梁连接

1—挡板（120×100×10）；2—缺口板（200×100×7）

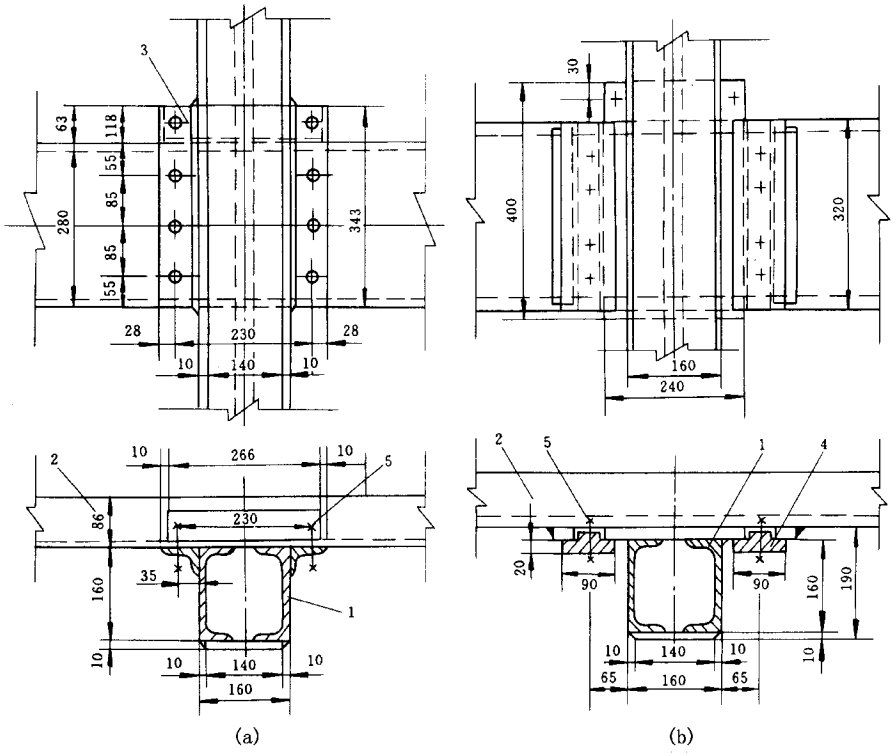


图 6－1－13　型钢组合罐道与钢罐道梁连接
a—螺栓连接方式；*b*—压板连接方式
1—槽钢组合罐道；2—槽钢罐道梁；3—角钢连接板；4—凸形压板；5—螺栓

天津林南仓副井组合罐道设计中采用防滑块来防止罐道下滑位移，如图 6－1－14 所示。

防滑块的两个楔形块中间有孔，一块的孔径为 21.5 *mm*，另一块的孔径长轴 42 *mm*，利用两孔的差距容许罐道和罐道梁在安装时有一定的调整余地，避免在井筒中进行焊接麻烦。

3. 球扁钢组合罐道与槽钢组合罐道梁采用压板连接方式

如图 6－1－15 所示，依靠压板与球扁钢的摩擦力，将罐道与罐道梁连接起来。

4. 整体轧制罐道与闭合形罐道梁的连接

主要有普通螺栓连接、*T* 形螺栓连接和压板连接等几种。用普通螺栓连接盆形罐道与矩形钢罐道梁的结构，如图 6－1－16 所示。*T* 形螺栓连接整体轧制罐道与闭合形钢罐道梁结构，如图 6－1－17 所示。压板式连接盆形罐道与矩形钢罐道梁结构，如图 6－1－18 所示。

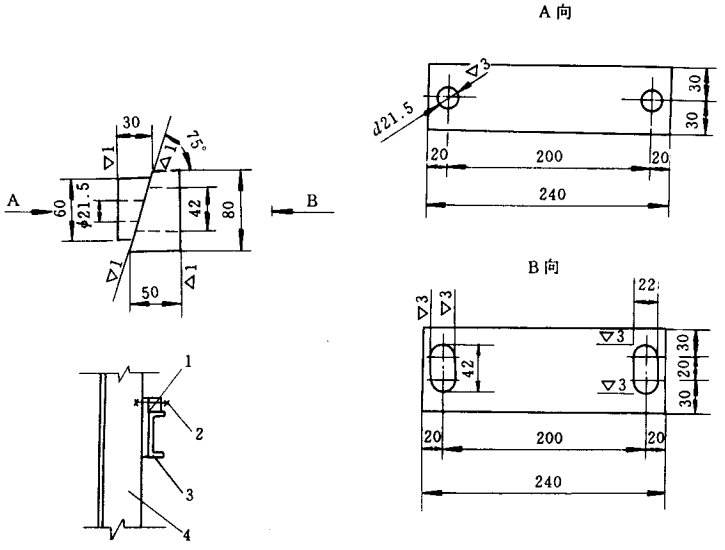


图 6－1－14　防滑块结构
1—防滑块；2—螺栓；3—罐道梁；4—组合罐道

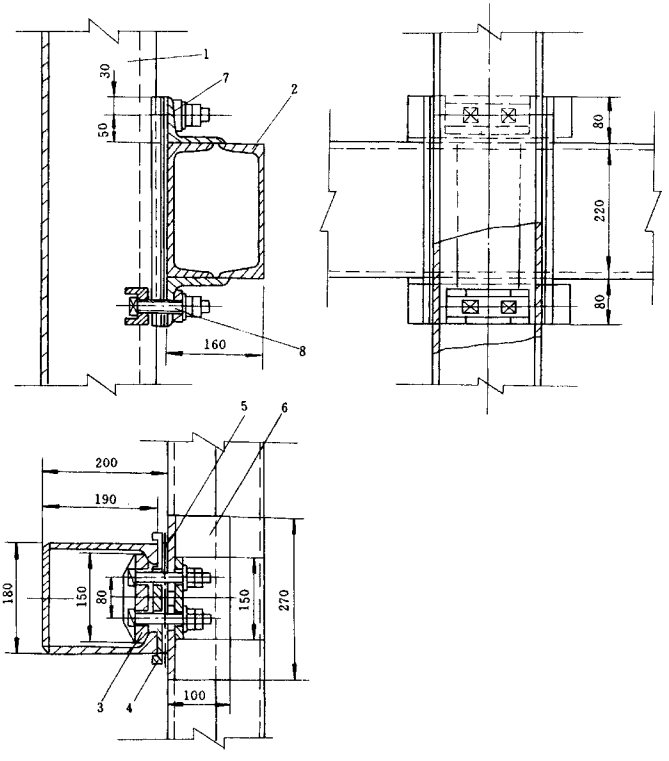


图 6－1－15　球扁钢组合罐道与槽钢组合罐道梁连接
1—球扁钢组合罐道；2—槽钢组合罐道梁；3—压板；
4—固定底板；5—调整垫片；6—连接角钢；7—垫片；8—压板螺栓、螺母

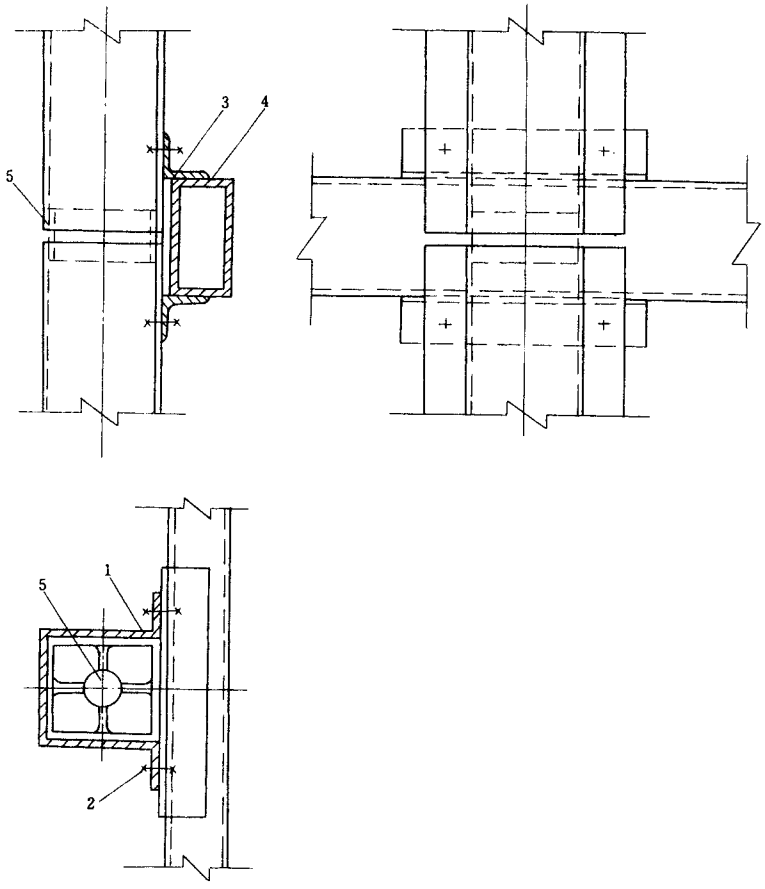


图 6－1－16　普通螺栓连接盆形罐道与矩形钢罐道梁

1—盆形罐道；2—普通螺栓；3—连接角钢；4—矩形钢罐道梁；5—垫圈片

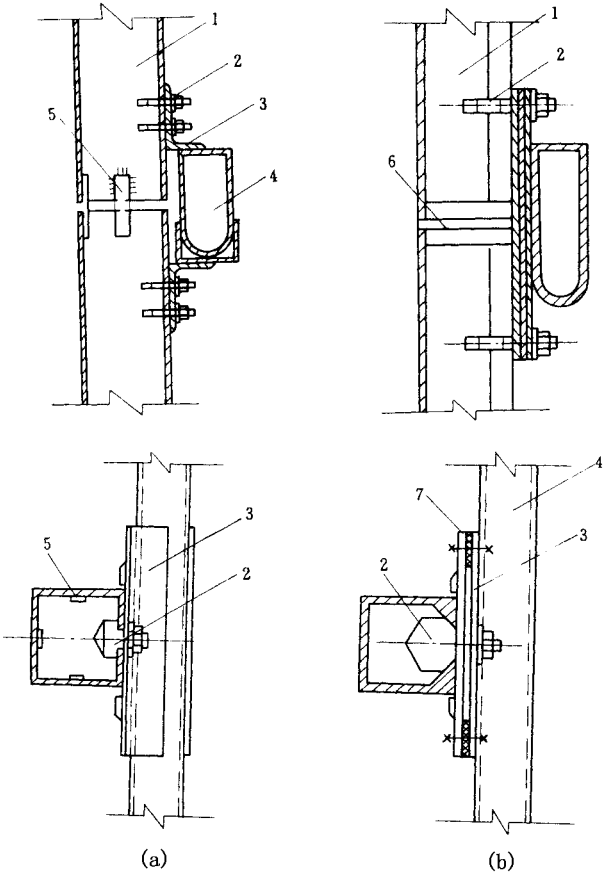


图 6－1－17　*T* 形螺栓连接整体轧制罐道与闭合形钢罐道梁

***a*—内弯形罐道与罐道梁连接；*b*—□形罐道与罐道梁连接**

1—罐道；2—*T* 形螺栓；3—连接角钢或连接钢板；4—闭合形钢罐道梁；

5—扁钢销子；6—垫圈片；7—橡胶垫

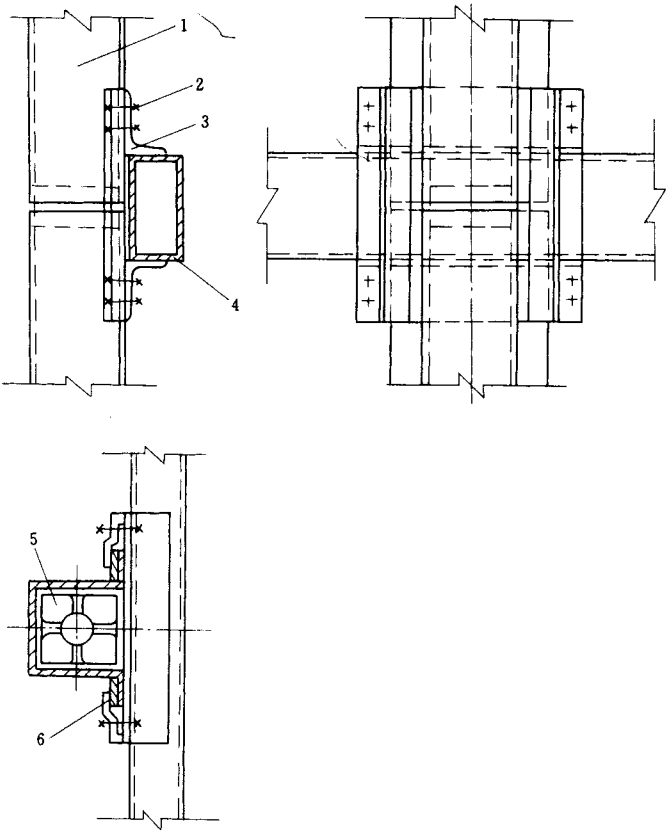


图 6－1－18　压板式连接盆形罐道与矩形钢罐道梁

1—盆形罐道；2—压板螺栓；3—连接角钢；

4—矩形钢罐道梁；5—垫圈片；6—压板

第二章　立井井筒结构设计

第一节　沉井法结构设计

一、沉井井壁结构设计

(一)设计依据及所需资料

见相关内容。

(二)井筒主要参数确定及井壁设计

1. 沉井深度

一般要求沉井穿过不稳定含水冲积层进入风化基岩达到封水的目的(一般进入风化基岩 1 米以上)。

2. 沉井允许偏斜率及沉井直径

根据《矿山井巷工程施工及验收规范》(*GBJ*213 – 79)规定,沉井的允许偏斜率,有提升设备时,不得大于 0.5%　无提升设备时,不得大于 0.8%。

对有提升设备的井筒,除严格按允许偏斜率施工外,为了保证下沉后井筒的有效直径 d_1,沉井的直径考虑偏斜率后可按下式确定。

$$d = d_1 + H \cdot \angle \tag{2-1}$$

$$D = d + 2h \tag{2-2}$$

式中　d——沉井内直径,米;

d_1——沉井有效内直径,米;

H——沉井深度，米；

$\triangle$——允许偏斜率，%，100 米以内按 0.5 ~ 0.8%，大于 100 米按 0.3 ~ 0.5%；

D——沉井外直径，米；

h——沉井井壁厚度，米。

无提升设备的井筒严格按允许偏斜率施工，设计时可以将有效直径作为沉井井筒直径，不另加 $H\triangle$ 部分。

3. 沉井井壁的厚度确定

(1)地压

井壁外侧为泥浆，其比重一般为 $1.2\gamma_0$（γ_0 为水的容重），因此，一般采用重液公式 $P=1.3\gamma_0 H$ 计算沉井地压较为合适。

(2)按强度计算井壁厚度

$$h=r\left(\sqrt{\frac{[R_a]}{[R_a]-\sqrt{3}P}}-1\right)\qquad [R_a]=\frac{R_a}{K}$$

钢筋混凝土井壁

$$h=r\left(\sqrt{\frac{[R_z]}{[R_z]-\sqrt{3}P}}-1\right)$$

$$[R_z]=\frac{R_a+\mu_{min}R_g}{K}$$

式中　r——沉井内半径，厘米；

P——井筒地压，公斤/厘米^2；

R_a——混凝土设计强度，公斤/厘米^2；

μ_{min}——最小含钢率，%，按冻结法取 0.2%；

$[R_z]$——钢筋、混凝土的允许综合强度，公斤/厘米^2；

R_g——钢筋强度，公斤/厘米^2；

K——安全系数，查表。

(3)按重率计算井壁厚度

沉井自重 G 与沉井外侧面积 S 的比值称为沉井的“重率”。

$$W=\frac{G}{S}\qquad (2-3)$$

式中　G——沉井实际自重（不扣除浮力），吨；

S——沉井外侧面积，米^2；

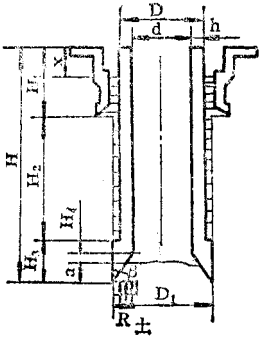
W——重率，吨/米^2。

要使沉井顺利下沉，沉井重率要超过一定值，据经验，采用触变泥浆的淹水沉井，所需重率 $W = 2 \sim 2.6$ 吨/米^2，一般 $W = 2.3$ 吨/米^2 左右。

(4)按下沉条件验算井壁厚度

沉井下沉要克服摩擦阻力，而沉井自重又由井壁自重决定，因此还需要按下沉条件验算井壁厚度。计算公式及方法见表 6－2－1。

表 6－2－1　下沉条件验算井壁厚度

图　示	计算公式	符号注释	说明
	$G > KT$ $G = G_1 + G_2 + G_3$ $G_1 = \frac{\pi}{8}(D_1^2 - d^2) \times (H_3 + H_4)\gamma_1$ $G_2 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \times (H - H_3)\gamma_1$ 变内径井筒应分别计算各段井筒重量然后相加 $G_3 = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D^2) \times (H_2 + H_1 - x)\gamma_2$ $T = T_1 + T_2 + N$ $T_1 = \pi D_1 + H_3 F$ $T_2 = \pi D(H_2 + H_1 - x)F'$ $N = \pi a t g\beta (D_1 - a t g\beta) R_{\pm}$	G—沉井总重，吨(扣除浮力)； K—下沉系数，$K = 1.15$； G_1—刃脚自重，吨； G_2—沉井井筒自重，吨； G_3—触变泥浆重量，吨； γ_1—钢筋混凝土浮容重，1.5 吨/米^3； H—沉井总深度，米； H_1—套井总深度，米； H_2—套井刃脚尖以下至沉井刃脚台阶高度，米； H_3—刃脚高，米； H_4—刃脚根部至台阶高，米； γ_2—触变泥浆容重，$\gamma_2 = 1.1$ 吨/米^3； x—触变泥浆液面至套井井口高度，米； D—井筒外直径，米； h—井壁厚度，米； D_1—刃脚外直径，米； T—总阻力，吨； N—沉井正面阻力，吨； T_1—刃脚外侧与土层间的侧面阻力，吨； T_2—井壁外侧面与触变泥浆的摩阻力，吨； F—井壁与土壤直接接触面之间的单位摩阻力，见表 6－2－2； F'—井壁与泥浆间单位摩阻力，沉井深步 < 50 米时，取 0.30 ~ 0.5 吨/米^2，深度 50 ~ 100 米时，取 0.8 吨/米^2，大于 100 米时，取 1 吨/米^2； a—刃脚插入土层深度，一般取 1 ~ 2 米； β—刃脚尖夹角，$\beta = 25 \sim 30^\circ$； $R_{\pm}$—土壤极限抗压强度，粘土层一般取 25 ~ 50 吨/米^2	1. 沉井较深时，上下部分井壁不等厚，井壁外直径不变，只改变内直径，使上下部分井壁的内壁面出现台阶，应在施工后期用混凝土将台阶填抹平整，以减小通风阻力及除掉积存碴物。 2. 计算结果若 $G > KT$ 时，需加大壁厚使 $G > KT$ 得到满足

注 本表中的沉井重量 G 扣除浮力(即混凝土按浮容重 1.5 吨/米^3 计算)而公式(2－3)的 G 指的是沉井实际重量。

表 6－2－2　土壤的单位摩阻力

土壤名称	侧面摩擦阻力 F(吨/米^2)
粘土及粘壤土	1.25～2.0
胶性粘土、砂质粘土,含砾粘土	2.5～5.0
砂壤土及淤泥	1.2～2.5
砂及细砂	1.5～2.5
砾石及粗砂	2.0～3.0
流　　砂	1.2～2.5
卵　　石	1.5～3.0

(三)井壁的环向配筋计算

1. 不均匀侧压力及圆环内力计算

当　$\alpha = 10^\circ$时

$$N_A = P_A \cdot r_0(1 + 0.785\beta)$$

$$M_A = -0.149 P_A \cdot r_0{}^2 \beta$$

当　$\alpha = 90^\circ$时

$$N_B = P_A r_0(1 + 0.5\beta)$$

$$M_B = 0.137 P_A r_0{}^2 \beta$$

式中　N_A、M_B——作用在 A 截面上的轴向力和弯矩；

N_B、M_A——作用在 B 截面上的轴向力和弯矩；

$P_A = 1.3H$；

H——沉井深度；

r_0——井壁中心半径；

β——不均匀侧压力系数,见表,

$$\beta = \frac{\mathrm{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi - \varphi_1}{2}\right)}{\mathrm{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi + \varphi_1}{2}\right)} - 1;$$

φ_1——一般为 $2.5 \sim 5^\circ$,计算时可取 3°。

对沉井法的不均匀压力系数 β,可认为是水压和土压两部分都可能产生不均匀压力,计算时,可取 $\beta = 0.2 \sim 0.3$。

2. 配筋计算

(1)当 $\dfrac{KN}{b \cdot R_w} > 0.55h_0$ 时,为小偏心受压。

$$A_g = A_g{}' = \frac{KNe - 0.5bh_0{}^2 R_a}{R_g{}'(h_0 - a')}$$

(2)当$\frac{KN}{b\cdot R_w}\leqslant 0.55h_0$时,为大偏心受压。

$$A_g = A_g' = \frac{K\cdot N}{R_g}\cdot\frac{e - h_0\left(1 - 0.5\frac{K\cdot N}{bh_0R_w}\right)}{(h_0 - a')}$$

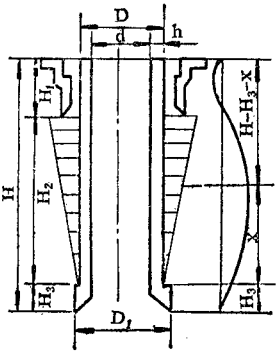
当$\frac{KN}{bR_w}\leqslant 2a'$时计算对称配筋。

$$A_g = A_g' = \frac{KNe'}{R_g(h_0 - a')^2},\ e' = e - h_0 + a'$$

式中符号物理意义同钢筋混凝土偏心受压构件,当计算出钢筋量比最小含钢率的钢筋量小时,应按构造配筋。由于沉井井壁厚度较大,井壁的环向稳定性能保证,不需进行验算。

(四)井壁竖向钢筋的计算(表 6-2-3)

表 6-2-3　井壁竖向拉力及钢筋计算

图　示	计算公式	符号注释	说　明
	$x = \frac{H_2^2}{2H}$ $N_{max} = G\left(\frac{H_3}{H} + \frac{H_2^2}{4H^2}\right)$ $H_2 = H - H_1 - H_3$ $A_g = \frac{K_L N_{max}}{R_g}$	x—最大拉力部位到刃脚台阶距离,米; H—沉井全深,米; H_1—套井深度,米; H_2—刃脚高度,米; N_{max}—最大拉力,吨; G—沉井总重(应扣除浮力,可采用表 6-2-1 的 G 值),吨; A_g—竖向钢筋总面积,厘米^2; K_L—钢筋混凝土构件抗拉安全系数,按吊挂受拉 K_L 取 1.5; R_g—钢筋强度,公斤/厘米^2	1. 假设沉井下沉到最后阶段,上部土层可能有较多的塌陷把井筒围包住,刃脚处遇流砂层,刃脚被掏空,出现竖向拉力,全部由竖向钢筋承担。 2. 最大拉力 N_{max} 是按井筒悬吊时其总重量和摩擦阻力平衡推导出来的。 3. 井筒竖向拉力除用本表公式计算外在较浅沉井(50 米左右)设计中下列数值可供参考: 竖向拉力为井壁全部重量 / 建议采用单位与个人 $\frac{1}{2}$ / 水电部给排水设计院东北分院 $\frac{1}{3}$ / 北京市政设计院 $\frac{1}{4}$ / 交通部大桥局 65% / 苏联却特维尔宁 4. 最大拉力部位配置的竖向钢筋是按扣除浮力计算的,即不允许出现排水强迫下沉为前提

二、沉井刃脚设计

(一)刃脚的作用及形状

1. 刃脚的作用

刃脚位于沉井最下端,是沉井结构重要的组成部分,其作用有以下几点:

(1)刃脚可为沉井起定向作用;

(2)切入土层破坏原状土的结构,利于克服沉井的正面阻力;

(3)封闭、阻止壁后流砂或泥浆涌入井筒内;

(4)沉井刃角的外径可略大于沉井井筒,下沉后在井筒外形成环形空间,便于放置减阻介质,以期减少侧面阻力。

表 6-2-4　刃脚断面形状

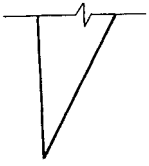
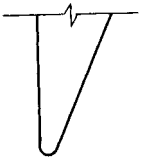
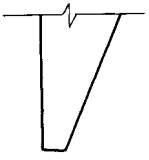
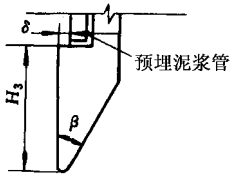
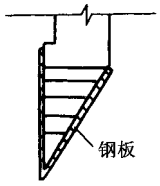
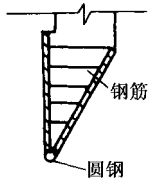
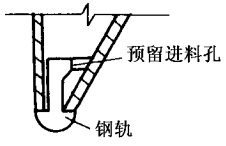
刃脚形状	 锐角	 钝尖	 踏面
适用条件	易切入土层,阻力小,刃脚锋利但不宜在有河卵石和砂姜砾石地层使用	刃脚强度较大,适用于各种地层,一般均采用此种形式	刃脚阻力较大,稳定性好,适用于松散而无阻碍物的地层

表 6-2-5　钝尖刃脚的规格及钢靴结构

名称	图　示	规格尺寸	说　明
基本尺寸		β一般为 25°~30°;H_3 为 3 m 左右,δ为台阶宽度,当壁后为泥浆淹护时,δ取 0.2~0.3 m	1. 刃脚较高时,沉井较稳定,有利于防偏,但侧面阻力大; 2. 台阶宽度应根据土层性质决定,如有膨胀性土层及深沉井时,应取较大值

名称	图　　示	规格尺寸	说　　明
钢板钢靴		钢板厚：8～20 mm； 钢板高：0.5～3 m； 圆钢：φ18～φ28 mm； 钢轨：15～24 kg/m	1. 刃脚内用加强钢筋和联系钢筋或型钢加固； 2. 钢刃脚和圆钢焊接的刃尖一般用于浅沉井； 3. 刃脚内侧钢板需预留若干出水孔
圆钢钢靴			
钢轨钢靴			

2. 刃脚的形状及适用条件

刃脚的形状及适用条件见表 6－2－4。

煤矿沉井刃脚一般采用钝尖形钢筋混凝土结构，并穿钢靴，混凝土强度等级一般为 $C25 \sim C30$。钝尖刃脚的规格及钢靴结构见表 6－2－5。

(二)刃脚受力计算

1. 刃脚的受力状态

如图 6－2－1 所示，刃脚插入土层 a 时，受总重 G，侧压力 P 与摩阻力 T，以及土壤对刃脚斜面产生的全反力作用。

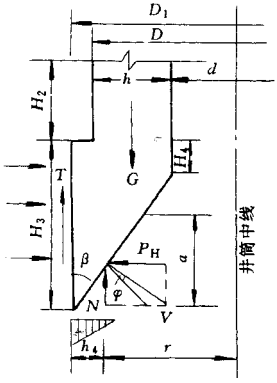


图 6－2－1　刃脚受力示意图

刃脚的全反力可分解为竖向反力 N 和水平推力 P_H。

竖向反力取单位弧长进行计算，则

$$N = \frac{G - T}{\pi(D_1 - a\tan\beta)} \tag{2-4}$$

侧面摩阻力为：

$$T = \pi D_1 H_3 F + \pi D H_2 F' \tag{2-5}$$

水平推力为：

$$P_H = N\tan(\alpha - \varphi) \tag{2-6}$$

式中　F——刃脚与土层接触的摩阻力，kN/m^2，可查表；

F′——泥浆减阻时井壁外侧的摩阻力，见相关表；

α——刃脚斜面与水平面的夹角；

φ—混凝土与土层之间的摩擦角，一般约为 25°～30°。

2. 刃脚的内力计算(图 6－2－2)

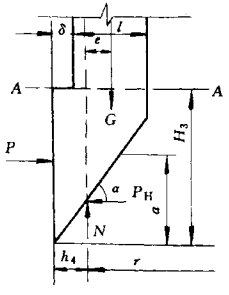


图 6－2－2　刃脚计算图示

(1)由水平推力 P_H 作用产生的拉应力及拉力

当 $h < \frac{r}{10}$ 时,按薄壁筒公式计算:

拉应力
$$\sigma_L = \frac{r}{h} P_H \tag{2-7}$$

拉力
$$N_L = \sigma_L h = r P_H \tag{2-8}$$

当 $h \geqslant \frac{r}{10}$ 时,按厚壁筒公式计算:

拉应力
$$\sigma_L = \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} P_H \tag{2-9}$$

拉力
$$N_L = \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} P_H h_4 \tag{2-10}$$

式中　P_H——刃脚的斜面下土壤的水平推力,kN/延米;

R——刃脚的外半径,m;

r——刃脚计算受力点的内缘圆环半径,m,

$$r = \frac{1}{2} D_1 - \frac{1}{3} a \tan\beta$$

h——结构的厚度,m;

h_4——合力作用点结构的计算厚度,

$$h_4 = a\tan\beta/3$$

由水平推力 P_H 作用产生的弯矩:

$$M_1 = \left(H_3 - \frac{1}{3} a \right) P_H \tag{2-11}$$

式中　H_3——刃脚高度,m;

a——刃脚插入土层高度,m。

(2)由水平外力 P 作用产生的压应力及压力

压应力
$$\sigma_t = \frac{2R^2}{R^2 - r^2} P \tag{2-12}$$

压力
$$N_t = \frac{2R^2}{R^2 - r^2} Ph \tag{2-13}$$

式中　P——井筒某一计算深度处的侧压力,淹水沉井时,$P = 3H$,kN/m^2;不淹水沉井 $P = 13H$,kN/m^2;

H——从计算深度起到地下水位的高度,m;

其他符号同上。

由水土压力 P 作用产生的弯矩：

$$M_2 = -1.5H \cdot H_3^2 \quad \text{（适用于淹水沉井）} \tag{2-14}$$

$$M_2 = -6.5H \cdot H_3^2 \quad \text{（适用不于淹水沉井）} \tag{2-15}$$

(3)由竖向反力 N 作用产生的弯矩

$$M_3 = Ne \tag{2-16}$$

式中　e——偏心距，m。

等内径井筒：　$e = \frac{h}{2} + \delta - \frac{1}{3}a\tan\beta$

变内径井筒：　$e = \frac{Q_1 h_1/2 + Q_2 h_2/2}{Q_1 + Q_2} + \delta - \frac{1}{3}a\tan\beta$

式中　h——井壁厚度，m；

h_1、h_2——变径井筒上下井壁厚度，m；

δ——刃脚台阶宽度，m；

Q_1、Q_2——变内径井筒各段井壁重力；

其他符号同上。

(三)刃脚的配筋计算

1. 环向配筋

根据式(2-8)或式(2-10)计算的 N_L 值确定配筋量：

$$A_g = \frac{r_k N_L}{f_y} \tag{2-17}$$

式中　A_g——刃脚处受拉延米高环向配筋量；

r_k——安全系数，$r_k = 1.4$；

f_y——钢筋的抗拉设计强度。

根据式(2-12)或式(2-13)计算的 σ_t、N_t 值确定配筋量：

$$\mu = \frac{r_k \sigma_t - f_c}{f_y'}, A_g' = \mu \cdot A \tag{2-18}$$

$$A_g' = \frac{r_k N_t}{f_y'} \tag{2-19}$$

式中　A_g'——刃脚处受压延米高环向配筋量，mm^2；

A——1 m 高刃脚的纵向截面积，因刃脚是变截面积，故可近似取 $A = b.h/2 = 1000 \cdot h/2$；

b——刃脚截宽度，mm；

h——刃脚根部的厚度，mm；

r_k——安全系数，$r_k = 1.4$；

f_y'——钢筋的抗压强度，N/mm^2；

σ_t——刃脚受到的压应力，N/mm^2；

N_t——刃脚受到的压力，N。

2. 竖向配筋

竖向受力计算考虑不利的情况，应将 $M = M_1 + M_3$ 联合作用和 M_2 单独作用分别算出结果，取其较大值进行配筋量的计算。

计算方法如下：

$$A_0 = \frac{r_k M_{max}}{b h_0^2 f_{cm}} \tag{2-20}$$

式中　A_0——计算系数；

M_{max}——刃脚承受的最大弯矩，$N \cdot mm$；

h_0——截面有效厚度，mm，$h_0 = h - a$；

a——钢筋的保护层厚度，mm；

f_{cm}——混凝土的抗弯强度，N/mm^2。

求得 A_0 值后，由表 6-2-6 查得相应的 α 值，将 α 值代入下式：

$$\mu_g = \alpha \frac{f_{cm}}{f_y} \text{ 得 } \mu_g \text{ 值}$$

表 6-2-6　A_0 与 α 值计算表

A_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.000	0.000	0.0010	0.0020	0.0030	0.0040	0.0050	0.0060	0.0071	0.0081	0.0091
0.010	0.0101	0.0111	0.0121	0.0131	0.0141	0.0151	0.0161	0.0171	0.0182	0.0192
0.020	0.0202	0.0212	0.0222	0.0233	0.0243	0.0253	0.263	0.0274	0.0284	0.0294
0.030	0.0305	0.0315	0.0325	0.0336	0.0346	0.0356	0.0367	0.0377	0.0388	0.0398
0.040	0.0408	0.0419	0.0429	0.0440	0.0450	0.0461	0.0471	0.0482	0.0492	0.0503
0.050	0.0513	0.0524	0.0534	0.0545	0.0555	0.0566	0.0577	0.0587	0.0597	0.0609
0.060	0.0619	0.0630	0.0641	0.0651	0.0662	0.0673	0.0683	0.0694	0.0705	0.0715

A_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.070	0.0726	0.0737	0.0748	0.0759	0.0770	0.0780	0.0791	0.0802	0.0813	0.0824
0.080	0.0835	0.0846	0.0857	0.0868	0.0879	0.0890	0.0901	0.0912	0.0923	0.0934
0.090	0.0945	0.0956	0.0967	0.0978	0.0989	0.100	0.101	0.102	0.103	0.104
0.100	0.106	0.107	0.108	0.109	0.110	0.111	0.112	0.113	0.115	0.116
0.110	0.117	0.118	0.119	0.120	0.121	0.123	0.124	0.125	0.126	0.127
0.120	0.128	0.129	0.131	0.132	0.133	0.134	0.135	0.136	0.137	0.138
0.130	0.140	0.141	0.142	0.143	0.144	0.146	0.147	0.148	0.149	0.150
0.140	0.152	0.153	0.154	0.155	0.156	0.157	0.159	0.160	0.161	0.162
0.150	0.163	0.165	0.166	0.167	0.168	0.169	0.171	0.172	0.173	0.174
0.160	0.175	0.177	0.178	0.179	0.180	0.181	0.183	0.184	0.185	0.186
0.170	0.188	0.189	0.190	0.191	0.193	0.194	0.195	0.196	0.198	0.199
0.180	0.200	0.201	0.203	0.204	0.205	0.206	0.208	0.209	0.210	0.211
0.190	0.213	0.214	0.215	0.216	0.218	0.219	0.220	0.222	0.223	0.224
0.200	0.225	0.227	0.228	0.229	0.231	0.232	0.233	0.234	0.236	0.237
0.210	0.238	0.240	0.241	0.242	0.244	0.245	0.246	0.248	0.249	0.250
0.220	0.252	0.253	0.254	0.256	0.257	0.258	0.260	0.261	0.262	0.264
0.230	0.265	0.267	0.268	0.269	0.271	0.272	0.273	0.275	0.276	0.278
0.240	0.279	0.280	0.282	0.283	0.284	0.286	0.287	0.289	0.290	0.291
0.250	0.293	0.294	0.296	0.297	0.299	0.300	0.301	0.303	0.304	0.306
0.260	0.307	0.309	0.310	0.312	0.313	0.314	0.316	0.317	0.319	0.320
0.270	0.322	0.323	0.325	0.326	0.328	0.329	0.331	0.332	0.334	0.335
0.280	0.337	0.338	0.340	0.341	0.343	0.344	0.346	0.347	0.349	0.350
0.290	0.352	0.354	0.355	0.357	0.358	0.360	0.361	0.363	0.364	0.366

A_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.300	0.368	0.369	0.371	0.372	0.374	0.375	0.377	0.379	0.380	0.382
0.310	0.384	0.385	0.387	0.388	0.390	0.392	0.393	0.395	0.397	0.398
0.320	0.400	0.402	0.403	0.405	0.407	0.408	0.410	0.412	0.413	0.415
0.330	0.417	0.419	0.420	0.422	0.424	0.426	0.427	0.429	0.431	0.433
0.340	0.434	0.436	0.438	0.440	0.441	0.443	0.445	0.447	0.449	0.450

将 μ_g 值代入 $A_g' = \mu_g bh$ 即得所需的钢筋面积。竖向钢筋插入刃脚上井壁内一般不小于 $1.5m$。

(四)刃脚钢靴钢板厚度的计算

竖向钢板厚度：

$$\Delta = \frac{r_k(G - T)}{\pi D_1 f_y} \tag{2-21}$$

式中　Δ——竖向钢板厚度，mm 斜面钢板可与竖向钢板同厚；

G——沉井结构全部自重力，kN；

T——沉井侧面阻力，kN；

D_1——刃脚外直径，m；

f_y——钢板的抗压计算强度，N/mm^2；

r_k——安全系数，$r_k = 1.4$。

(五)刃脚基座的设置

该项工作是在沉井下沉到底后进行的一项工作。

沉井施工至设计深度后，即采用混凝土进行封底。然后清理井底、排出积水，在止水垫中心和四周钻凿若干检查孔，检查下部的水文和工程地质情况，并按工作面预注浆的要求进行注浆。经钻孔检查止水垫附近胶结密实后，方可破封底掘进。首先掘砌沉井刃脚基座，以便补平刃脚，增大承托井筒的能力，完成固井工序。

刃脚基座有两种形式，单锥和双锥(图 6-2-3)。其实质是按井筒设计直径补平加固刃脚，使沉井与下段井壁联结成为整体井筒结构，以增强井筒稳固性。一般情况下，按

构造设置。较浅的沉井可采用单锥，否则，选用双锥。必要时可按本篇第三章第六节有关壁座计算公式进行验算。

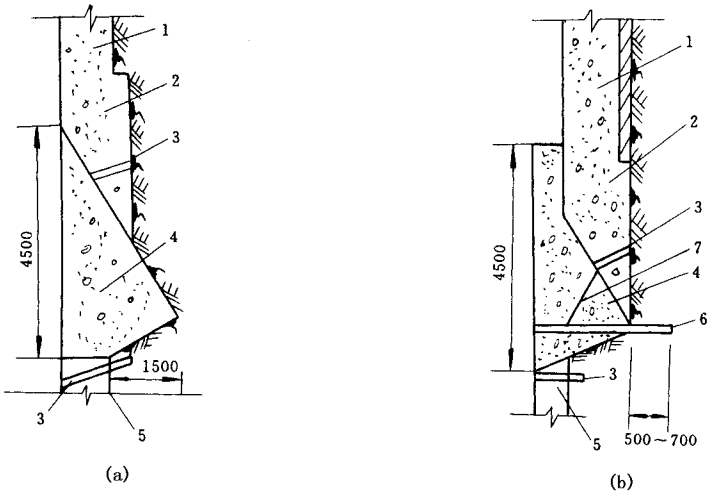


图 6－2－3　沉井刃脚基座

a—双锥；b—单锥

1—沉井井壁；2—刃脚；3—预埋注浆管；4—沉井刃脚基座；5—下段井筒井壁；6—钢轨；7—挂钩

第二节　立井钻井法井壁结构设计

一、预制钢筋混凝土井壁计算

(一)钻井法施工井筒直径的确定

井筒有效净断面即根据采矿设计，满足提升容器，通风及井筒装备布置要求的最小净断面。

井筒设计净断面即根据钻井法施工可能产生的允许偏斜，为了保证井筒使用而放大了的断面。钻井井筒质量标准，见表 6－2－7。

表 6－2－7　井筒质量标准

项　目	钻孔及井壁制作	成　井
钻孔深度	达到设计要求，深入不透水层或较完整的硬岩层 5～10 米	井筒深度小于 300 米，成井允许偏斜率不得超过 0.08%；井筒深度 300～400 米，偏斜值不得超过 240 毫米，井筒深度 401～500 米偏斜值不得超过 300 毫米，井筒深度 501～600 米偏斜值不得超过 360 毫米。有提升设备井筒有效断面应符合设计要求
钻孔偏斜率	300 米以内不得超过 0.1%。深度 300～400 米，偏斜值＜320 毫米；深度 401～500 米，偏斜值＜400 毫米；深度 501～600 米，偏斜值＜480 毫米	
井　壁	1. 上下法兰盘的不平行度不超过 ±3 毫米，井壁铅直度不得大于 3 毫米； 2. 井壁内径偏差不得小于设计规定； 3. 壁厚误差不得小于设计，也不得大于设计 20 毫米	

井筒设计净断面直径按下式计算

$$D_{设} = D_{有效} + H \cdot \eta \tag{2-22}$$

当井筒中心的座标不允许按成井实测位置调整时

$$D_{设} = D_{有效} + 2H \cdot \eta$$

式中　η——设计采用的成井偏斜率，%；

H——钻井井壁下沉的深度，米；

$D_{有效}$——井筒净断面的有效直径，米。

（二）钻井法井筒设计的结构安全系数

结构设计的安全系数除了考虑 $TJ-74$《钢筋混凝土结构设计规范》要求之外，还应根据钻井法施工特定工艺确定。由于井壁下沉过程中所引起的工艺荷载属于临时性荷载，一旦井壁下沉过程完成之后，其荷载不复存在。另一种类型的荷载即为井筒支承地压，井壁下沉过程完成之后，其内应力不能完全释放，如井壁竖向内应力。此外，井筒各部分结构，由于其重要性的不同，以及目前对实际应力状态与近似计算方法获得的结果之间存在着一定的误差，如井壁底的计算，必须采用较高的安全因素。钻井法施工井壁设计的强度设计安全系数 K，见表 6－2－8 及表 6－2－9，供参考采用。

表 6－2－8　钻井法施工井壁设计的强度设计安全系数 K

荷载种类	水压＋土压	不均匀地压	环向稳定	井壁竖向失稳	纵向受弯	复合强度校核	提吊校核		
							动力系数	裂缝校核	吊装强度折减
取用安全系数	1.7～1.85①	1.3	2.5	2.5	1.55	1.7	1.5	1.3	0.9

①井壁设计安全系数一般取用小值，新矿区未进行过地层压力观测的厚表土中井筒，钢筋混凝土结构，标号在500号以上，施工质量无确切保证时，宜取大值。

表 6－2－9　钻井法施工井壁底的强度设计安全系数① K

荷载种类	基本荷载	复合壳充填混凝土	
		压应力控制	拉应力控制
取用安全系数	2.2～2.6	2.36	3.80

①安全系数中已考虑了地下工程的影响，增大了 10～20%。在井壁底下沉过程中由于下沉导向，井壁底接触泥浆清洗过的岩面，厚壳按薄壳计算的计算误差，壳体外形制作不符合设计要求，井孔清理不够完善等原因，又增大了 30～50%。设计时可以权衡以上诸因素偏于安全方面取用。

（三）荷载

1. 永久地压

均匀受压的地压数值可以和冻结法凿井取用的数值相同。由于用冻结法凿井的井筒，孔偏不一，同时，土壤的物理机械性质也有差异，因此解冻的速度不一。而钻井法施工的井筒并无这些因素，不均匀侧压系数，取偏小值。

(1)均匀地压

(2)不均匀地压

1)按正弦函数分布

不均匀侧压系数 β 一般取 0.1～0.15，处于基岩中的井筒常取 $\beta \leqslant 0.1$。

2)按倍角余弦函数分布(图 6－2－4)

当采取这种外压力分布形状时，假定井筒处于一个不均匀的应力场中，见图 6－2－4。

作用于井壁表面径向压力：

$$P = \frac{P_1 + P_0}{2} + \frac{P_1 - P_0}{2} cos2\varphi \tag{2-23}$$

作用于井壁表面的切向应力：

$$\tau = \frac{P_1 - P_0}{2} sin2\varphi \tag{2-24}$$

式中　P——井筒外表面作用的径向压力；

P_1、P_0——不均匀地应力场中二个互相垂直方向的地压；

τ——作用于井壁表面的切向应力。

因此井筒外表面受力分布图形如图 6－2－4 之 c 所示。

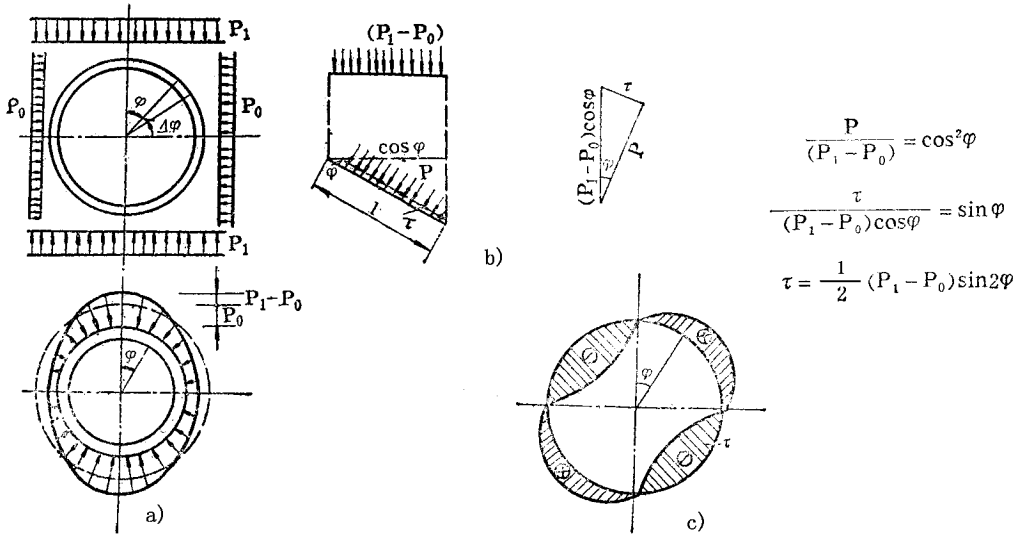


图 6－2－4　非均匀应力场中井筒表面压力按倍角余弦函数分布

事实上，非均匀压力 $P_1 - P_0$ 单向作用于井筒，使圆环变形。同时，剪力的作用，将使圆环内的弯矩和剪力增加约 50%。但是，侧向岩石限制了圆环的变形，这种限制毒现为被动的岩石压力，即弹性抗力。这时，井壁外缘所受的均匀压力的数值，将大于 P。而小于 P_1，改善了圆环的内力状态。考虑到井壁是当作自由圆环来计算，井壁表面分布的剪力引起的圆环内力，计算表达式过于复杂，不均匀外力 P_1 也具有相当的近似性，因此均匀压力直接以 P_0 计算，变化量的最大值取为上式中的$\frac{P_1 - P_0}{2}$，不均匀压力系数

$$\beta = \frac{P_1 - P_0}{2P_0}$$

不均匀压力分布形式可以表示为

$$P = P_0 + P_0 \beta cos2\varphi$$

令 $P_0 \cdot \beta = P_2$

$$N = R\left(P_0 - \frac{1}{3}P_2 cos2\varphi\right) \tag{2-25}$$

$$M = \frac{I}{F}P_0 - \frac{1}{3}P_2 \cdot R^2 cos2\varphi \tag{2-26}$$

式中　N——单位高度井壁环截面的轴向力，吨；

M——单位高度井壁环截面的弯矩，吨·米；

P——φ 角位置井筒外表面作用的径向压力，吨/米^2；

R——井筒外半径，米；

P_0——取作用于井筒外表面的径向均匀地压，吨/米^2。

2. 施工工艺荷载

(1)井壁分节施工时，各节井壁在移动及安装过程中的悬吊自重，通常按钢筋混凝土容重 $\gamma = 2.5$ 吨/米^3 计算。

(2)井壁在井内充水情况下，井筒下部所受到的悬浮自重压力。

(3)井壁在下放以后，由于孔偏而引起的变形荷载。

(4)泥浆对井壁的压力。

一般在井深比较浅，如 200 米之内，孔偏不大的情况下，自重压力以及孔偏引起的变形应力，可以不予考虑。在采用钢井壁，如果安装井壁的方式，不采用悬浮下沉时，井壁必频校验在泥浆中井口夹固段以下的悬浮自重。

(四)井壁强度及稳定性计算

钢筋混凝土井壁的强度及稳定性计算包括：

(1)均匀分布压力作用下的内力及强度计算；

(2)不均匀分布压力作用下的强度计算；

(3)稳定性验算——环向、竖向及局部稳定性验算；

(4)竖向强度验算；

(5)局部强度验算，井筒弯曲强度验算，组合应力计算，管节起吊强度计算；

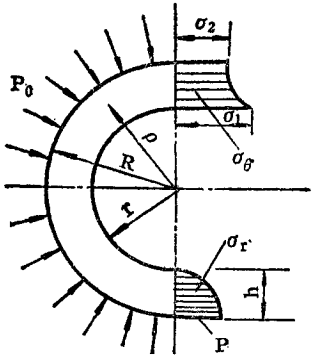
(6)法兰盘连接强度计算。

1. 均匀分布压力作用下的内力及强度计算

列表计算沿井筒检查孔柱状分布的不同土层的地压，根据最大地压数值 P_{max} 以及选择的混凝土设计强度，由公式(2－27)初选井壁厚度，然后在分段进行强度及稳定性验算的基础上，调整混凝土标号、配筋数量、配筋长度与预制钢筋混凝土井壁的分节位置。分段进行井筒在均匀分布压力作用下的内力计算公式，见图 6－2－5。

初选的井壁厚度按下式进行计算取整数值

$$h \geqslant r\left(\sqrt{\frac{[R_a]}{[R_a]-2P_{max}}}-1\right) \qquad (2-27)$$



$$\sigma_2 = \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} P_0$$

$$\sigma_\theta = \frac{R^2 P_0}{R^2 - r^2}\left(1 + \frac{r^2}{\rho^2}\right)$$

$$\sigma_r = \frac{R^2 P_0}{R^2 - r^2}\left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right)$$

$$\sigma_1 = \frac{2R^2 P_0}{R^2 - r^2}$$

若 $h < \frac{r}{10}$，近似按薄壁环计算

$$\sigma_\theta = \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P_0 R}{h}$$

图 6－2－5　均匀分布压力作用下的内应力

式中　h——井壁厚度，厘米；

r——井筒内半径，厘米；

$[R_a]$——混凝土容许强度，$(R_a) = \frac{R_a}{K}$ 公斤/厘米^2；

R_a——混凝土设计强度，公斤/厘米^2；

K——强度安全系数；

P_{max}——最大地压，公斤/厘米^2。

强度校核计算是在以下两种校核计算中取一种进行计算：

(1)按最大正应力理论进行强度校核

$$\sigma_1 \leqslant [R_z] = \frac{R_a + \mu R_g}{K} \tag{2-28}$$

式中　σ_1——井筒内缘切向正应力，公斤/厘米^2；

$[R_z]$——混凝土与钢筋的容许综合强度，公斤/厘米^2；

μ——钢筋百分率，%；

R_g——钢筋设计强度，公斤/厘米^2。

(2)按形状改变比能理论进行强度校核

1)假设条件

①材料处于理想塑性状态，泊松比 $\mu = 0.5$。

②井筒竖向应变 ε_z 等于零，即

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_h} - \mu\left(\frac{\sigma_r}{E_h} + \frac{\sigma_\theta}{E_h}\right) = 0$$

式中　σ_z——井壁单元体竖向应力(即沿井筒纵轴线方向的压力)，公斤/厘米^2；

σ_θ——井壁单元体沿圆周切线方向的应力，公斤/厘米^2；

E_h——钢筋混凝土弹性模量，公斤/厘米^2；

σ_r——井壁单元体径向应力，公斤/厘米^2。

③材料的弹性变形位能中，形状改变比能，即

$$\sigma_{xd}=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-\sigma_1\sigma_2-\sigma_2\sigma_3-\sigma_3\sigma_1}<\sigma_0 \tag{2-29}$$

式中　σ_0——材料单向压缩破坏应力，公斤/厘米^2；

σ_{xd}——材料相当应力，公斤/厘米^2；

σ_1、σ_2、σ_3——强度验算时所取立方形单元体的三个方向的主应力，公斤/厘米^2。

2）强度校核

井壁内缘三向主应力换算的相当应力为：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{xd}&=\sqrt{3}\left(\frac{R^2r^2P_0}{R^2-r^2}\right)\\ \sigma_{xd}&\leqslant[R_a]=\frac{R_a}{K}\ \text{或}\ \sigma_{xd}\leqslant[R_z]=\frac{R_a+\mu R_g}{K}\end{aligned}\right\} \tag{2-30}$$

$$h\geqslant r\left(\sqrt{\frac{[R_a]}{[R_a]-\sqrt{3}P_0}}-1\right)$$

厚表土层中的井壁强度校核常取形状改变比能理论进行校核。

2. 不均匀分布压力作用下的强度校核

见相关内容

3. 稳定性验算

（1）环向稳定性验算

环向稳定性验算按壁后泥浆置换不充分的情况考虑，不考虑不均匀压力及围岩弹性抗力的影响。均匀受压作用下自由圆环能承受的临界压力为：

$$P_{kp}=\frac{3EI}{r_0^3}\geqslant P_0K\quad\text{且}\quad P_{kp}\geqslant\frac{1}{10}\gamma_{泥}H_{泥}\cdot K \tag{2-31}$$

如圆环无纵向应变则

$$P_{kp}=\frac{1}{4}\cdot\frac{E}{1-\mu^2}\left(\frac{h}{r_0}\right)^3\geqslant P_0K\quad\text{且}\quad P_{kp}\geqslant\frac{1}{10}\gamma_{泥}H_{泥}\cdot K$$

式中　P_{kp}——圆环能承受的临界压力，公斤/厘米^2；

E——材料弹性模量，公斤/厘米^2；

I——井壁横截面惯性矩（取 1 厘米高度井壁计算），厘米^4；

r_0——井壁截面重心位置的半径，厘米；

$H_{泥}$——井壁沉入泥浆深度，米；

$\gamma_{泥}$——泥浆容重，一般取 $\gamma_{泥}=1.2$ 吨/米^3；

h——井壁厚度，厘米；

μ——泊松系数；

K——环向稳定安全系数，查表 6－2－8。

(2)竖向稳定性计算

按井筒上下两端铰接，承受自重作用，取以下两种公式的一种进行：

1)不考虑液体对井筒的浮力

$$P_k=\frac{18.76}{l^2}EI\geqslant Q_{井壁}\cdot K \tag{2-32}$$

式中　P_k——井壁临界自重，吨；

l——自地表起的井筒深度，米；

$Q_{井壁}$——设计井壁重量，吨。

2)考虑液体对井筒的浮力作用

我国煤炭科学院建井研究所提出：

$$l_{CT}=\sqrt[3]{\frac{\pi^2 EI}{4(0.13137-0.00766K_{CT}+0.00231K_{CT})q}}=\sqrt[3]{\frac{AEI}{q}}\geqslant l \tag{2-33}$$

$$K_{CT}=\frac{F_{S1}\gamma_{泥}}{q};\quad q=q_s+q_w$$

式中　l_{CT}——井壁临界深度，米；

F_{S1}——井壁外径包含的圆面积，米^2；

q_s——每延米井壁重量，吨；

q_w——每延米井壁内水的重量，吨；

A——系数值，由表 6－2－10 查出。

(3)局部曲屈验算

当井孔泥皮不能阻止充填水泥浆随井壁滑移时，下部井壁将承受最大荷载

$$\sigma_{cr}=\frac{N_{cr}}{h}=\frac{Eh}{r_0\sqrt{3(1-\mu^2)}}\geqslant\frac{QK}{2\pi r_0} \tag{2-34}$$

式中　N_{cr}——每延米井壁截面重心圆周长井壁的临界荷载，吨；

h——井壁厚度，米；

r_0——井壁截面重心位置的半径，米；

μ——泊松系数；

Q——井壁及充填水泥浆重量，吨；

σ_{cr}——局部压屈临界应力，吨/米^2。

表 6－2－10　系数 A 值

K_{CT}	A	K_{CT}	A
0	18.76	0.76	19.38
0.1	18.85	0.78	19.40
0.2	18.94	0.80	19.41
0.3	19.01	0.82	19.43
0.4	19.09	0.84	19.45
0.5	19.17	0.86	19.46
0.6	19.26	0.88	19.48
0.70	19.33	0.90	19.50
0.72	19.35	1.00	19.58
0.74	19.37		

在考虑材料非线性影响时，可以大约取上述线性计算公式得到数值的$\frac{1}{3}$计算。

井壁稳定性计算是一种较为粗糙的估算。井壁受压以后环向与竖向稳定性，不单取决于材料的性质，井壁的断面，还与受压的均匀程度，以及井壁安装的误差有关。而且后者更值得引起注意。

局部曲屈的现象，只有在井壁很薄的情况下才有可能发生，所以当井深时，井壁强度比较高的情况下才进行验算。通常从安全出发，应当考虑材料由于长时间受压而引起的非线性影响。其计算位置主要是在表土段下部。

井壁竖向失稳在设计时不允许出现，所以不必验算失稳以后的弯曲强度。

4．井壁竖向强度验算

(1)井壁竖向弯曲应力计算

当基岩段的井筒被嵌固，井筒在近地面的 S 长度范围内受弹性约束，如图 6－2－6 所示。

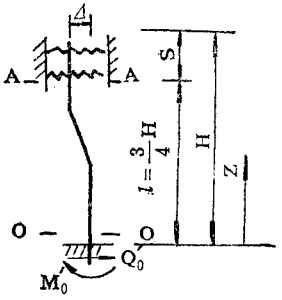


图 6－2－6　井筒上部弹性嵌固

图 6－2－6 中 $\triangle$ 为井壁随钻孔偏斜的相对位移，可以直接按成井允许偏斜率计算。

“S”弹性约束段长度，$S \geqslant 2\eta R$ 时，按弹性约束，否则，按铰约束计算。$\eta = 5 \sim 7$，土壤越密实，系数越小，井筒抗挠刚度 EI 越大，系效越大。计算步骤如下：

1）计算单位外载时 $A-A$ 位置位移（图 6－2－7）

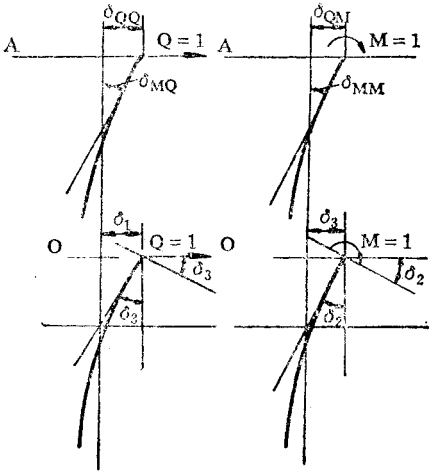


图 6－2－7　井筒底部作用单位荷载引起的变位

$$\text{弹性特征}\ \beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} \tag{2-35}$$

$$\delta_{QQ} = \frac{1}{2\beta^3 EI} \tag{2-36}$$

$$\delta_{QM} = \delta_{MQ} = \frac{1}{2\beta^2 EI} \tag{2-37}$$

$$\delta_{MM} = \frac{1}{\beta EI} \tag{2-38}$$

式中　K——地基弹性系数，参见井塔基础计算表；

δ_{QQ}——$A-A$ 截面作用单位横向力时的横向位移；

δ_{QM}——$A-A$ 截面作用单位横向力时的横向转角；

δ_{MM}——$A-A$ 截面作用单位力矩的截面转角。

2）计算 $O-O$ 位置截面在单位荷载作用下的位置变形

$$\delta_1 = \frac{l^2}{3EI} + \delta_{QQ} + 2\delta_{QM} l + \delta_{MM} l^2 \tag{2-39}$$

$$\delta_2 = \frac{1}{EI} + \delta_{MM} \tag{2-40}$$

$$\delta_3 = \frac{l^2}{2EI} + \delta_{QM} + \delta_{MM} l \tag{2-41}$$

式中　δ_1——当 $O-O$ 截面作用单位横向力时，底面出现的横向位移；

δ_2——当 $O-O$ 截面作用单位弯矩时，底面出现的转角；

δ_3——当 $O-O$ 截面作用单位横向力时，底面出现的转角。

3）计算 $O-O$ 截面的内力，剪力 Q'_0，弯矩 M'_θ

$O-O$ 截面的横向位移和转角方程为：

$$\left.\begin{aligned} \triangle_o &= Q'_0\delta_1 + M'_0\delta_3 \\ \varphi_o &= Q'_\theta\delta_3 + M'_0\delta_2 \end{aligned}\right\} \tag{2-42}$$

式中　$\triangle_o$——$O-O$ 截面的横向位移；

φ_o——$O-O$ 截面的转角。

因此，$O-O$ 截面的内力为：

$$\left.\begin{aligned} \text{剪力} \quad Q'_0 &= \frac{\triangle_o\delta_2 - \varphi_o\delta_3}{\delta_1\delta_2 - \delta_3^2} \\ \text{弯矩} \quad M'_0 &= \frac{\varphi_o\delta_1 - \triangle_o\delta_3}{\delta_1\delta_2 - \delta_3^2} \end{aligned}\right\} \tag{2-43}$$

由于 $O-O$ 计算时假设为嵌固，所以 $\varphi_o = 0$，$\triangle_o = \triangle$，显然 $A-A$ 为非弹性支承时：$M'_0 = \frac{6EI\triangle}{l^2}$ 也可以作为内力矩的估计值。

井筒各截面内力矩

$$\left.\begin{aligned} M_x &= M'_0 - Q'_0 Z \\ \sigma_z &= \frac{M'_0 R}{I} + \frac{W}{F} \end{aligned}\right\} \tag{2-44}$$

式中　R——井筒外半径，厘米；

W——井壁及壁后充填层重量，公斤；

F——井壁横截面支承面积，厘米^2；

M_x——以 $O-O$ 截面井筒中心为坐标轴圆心，沿 Z 轴坐标 Z 位置计算截面上的弯矩，公斤·厘米；

σ_z——井壁横截面上的竖向压应力，公斤/厘米^2；

Z——坐标轴计算位置。

(2)井壁竖向受力的组合应力验算

井筒结构的最不利位置是在表土与基岩接触交界面处，不利位置的荷载组合包括：井壁自重(包括壁后充填层)，井壁相对位移 $\triangle$ 引起的变形荷载，径向土压力引起的环向压力(按拉麦公式计算的弹性应力，否则不能利用叠加原理进行组合应力计算，以及运用能量强度理论进行强度验算)。最大应力位置是在井壁内缘。

组合应力的强度验算

1)按能量强度理论

$$\sigma_{xd}=\sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_x-\sigma_t)^2+(\sigma_t-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_z)^2\right]} \tag{2-45}$$

$$\sigma_{xd}\leqslant\frac{R_a+\mu\cdot R_g}{K} \tag{2-46}$$

式中 σ_{xd}——相当应力，公斤/厘米^2；

σ_r——井壁径向应力，公斤/厘米^2；

σ_t——井壁环向应力，以内缘为最大，公斤/厘米^2；

σ_z——井壁竖向应力，以及由于相对位移 $\triangle$ 引起的弯曲应力之和，公斤/厘米^2。

2)按八面体应力表达的强度验算公式计算

以主应力表达的两向受压时：

$$0.75\times\frac{\sigma_1}{R_a}-\frac{\sigma_2}{R_a}\leqslant 1；\quad \sigma_1>\sigma_2 \tag{2-47}$$

此处 σ_1 及 σ_2 代表二向受力的主应力。选择 σ_r 及 σ_t 较大者为 σ_1，其余为 σ_2。通常验算时以能量强度理论为主，八面体应力表达的强度验算式中 R_a 仍应考虑安全系数。R_a 为混凝土设计强度，按表查用。

(3)竖向配筋

井壁任何位置，纵向配筋率不小于 0.4%，同时，还应当满足以下要求。

1)按竖向不均匀地压计算竖向配筋

表土与基岩交界处，井壁在土层中受侧向地压，达到最大值，但井筒进入基岩、围岩压力突然减小，并趋于 0。由于这种围岩压力在竖向分布的突然变化，而引起内应力的变化，出现竖向弯矩，如图 6－2－8 所示。

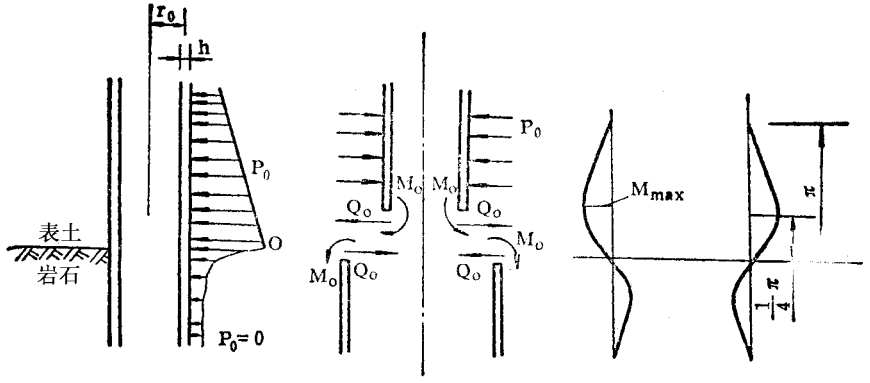


图 6－2－8　基岩与表土交界处井壁内竖向弯矩

假设井筒在 $O-O$ 截面处断开，表土段井筒在 $P_0 = P_{max}$ 作用下，产生的井筒径向自由变形：

$$\sigma_1 = \frac{P_0 r_0^2}{Eh} \tag{2-48}$$

井壁在端面剪力 Q_o 荷载作用下产生的径向变形：

$$\delta_2 = \frac{Q_o}{2\beta^3 D} \tag{2-49}$$

由于井壁厚度不变，剪力 Q_o 使 $O-O$ 截面上下二段井壁产生相同方向的绕转，$M_o = 0$，且 $\delta_1 = 2\delta_2$，剪力 Q_o 即可化简为

$$Q_o = \frac{P_0 r_0^2 \beta^2 D}{Eh} \tag{2-50}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r_0^2 h^2}}$$

因此

$$\left.\begin{aligned} Q_o &= \frac{P_0}{4\beta} \\ M_x &= \frac{Q_o}{\beta} e^{-\beta x} \sin\beta_X = \frac{P_0}{4\beta^2} e^{\beta x} \sin\beta_X \end{aligned}\right\} \tag{2-51}$$

当 $\beta_X = \frac{1}{4}\pi$ 时，$e^{-\beta x}sin\beta_X$ 达到最大值 0.3224，

$$M_{max} = \frac{0.3224}{4} \cdot \frac{P_0}{\beta^2} = 0.0806 \frac{P_0}{\beta^2} \tag{2-52}$$

式中　M_x —— x 截面的弯矩，公斤·厘米/厘米；

Q_o —— $O-O$ 截面产生的剪力，公斤/厘米；

D ——壳体抗弯刚度；

β——壳体常数，1/厘米；

μ——混凝土泊松比。

验算配筋时不考虑竖向荷载作用，按纯弯计算配筋，配筋长度取界面上下各一个波长，内外缘配筋相同。

$l\beta = 2\pi$　l 为配筋长度

2）按起吊安装验算

（1）段高确定 每节段高重量不得超过龙门吊起重能力。

$$Q_{节} = \frac{\pi}{4}(D^{21} - D_2^2) H_{节}\ \gamma_{混} \leqslant T \tag{2-53}$$

式中　$Q_{节}$ ——每节井壁重量，吨；

$H_{节}$ ——每节井壁高度，常取 4、6、8 以及 4.168 米与井筒装备罐道梁层间距配合，米；

T ——龙门吊起吊能力，吨；

$\gamma_{混}$ ——钢筋混凝土容重，常取 2.5～2.6 吨/米^3；

D_1、D_2 ——井筒内外直径，米。

（2）起吊抗裂验算 井壁起吊过程中不允许出现裂缝。

$$KK_fQ_{节} \leqslant (A_h + 2nA_g) R_f \tag{2-54}$$

式中　K ——动力系数，常取 1.5；

K_f ——抗裂安全系数，常取 1.3；

A_h、A_g ——混凝土及钢筋截面积，厘米^2；

$Q_{节}$ ——起吊井壁重量，吨；

n ——钢筋和混凝土弹性模量的比值，$n = \frac{E_g}{E_h}$；

E_g ——钢筋弹性模量；

E_h ——混凝土弹性模量；

R_f——混凝土抗裂设计强度。

5. 井壁下沉工艺应力验算

井壁下沉到底以后，井壁最下部锅底段的井壁内应力为最大。井壁中的应力，又以井壁中内缘应力为最大，见图 6－2－9。

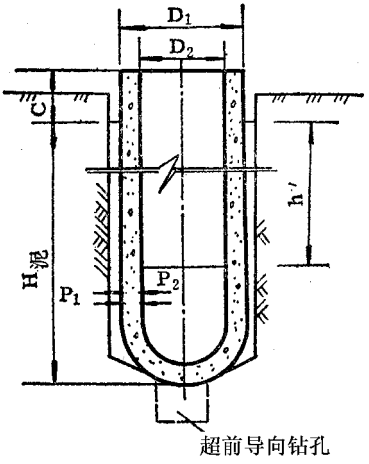


图 6－2－9　井筒漂浮下沉

(1)井筒内水面与井筒外泥浆液面差

$$h' = \frac{Q_{井壁} + Q_{底} - H_{泥}(A_{1泥}\gamma_{泥} - A_{2水}\gamma_{水})}{A_{2水}\gamma_{水}} \tag{2-55}$$

式中　h'——井筒内水面与井筒外泥浆液面差，米；

$Q_{井壁}$——井壁重量，吨；

$Q_{底}$——井壁底重量，吨；

$\gamma_{水}$——水的容重，吨/米^3；

$\gamma_{泥}$——泥浆的容重，吨/米^3；

$A_{1泥}$——井筒外缘包含的横截面面积，米^2；

$A_{2水}$——井筒内缘包含的横截面面积，米^2。

(2)单元体应力，取自井壁内缘(图 6－2－10)

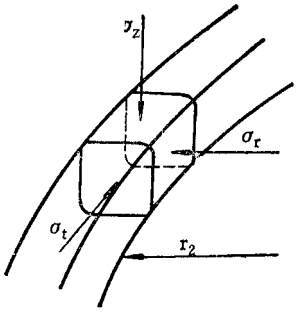


图 6－2－10　单元体应力

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r &= -P_2\\ \sigma_t &= \frac{P_2(n^2+1)-2P_1n^2}{n^2-1}\\ \sigma_z &= -(H_{泥}+C)\gamma_{混}\\ n_d &= \frac{D_1}{D_2}\end{aligned}\right\} \qquad (2-56)$$

式中　P_1——井壁外表面作用的泥浆压力，公斤/厘米^2；

P_2——井壁内表面作用的压舱水压力，公斤/厘米^2；

n_d——井壁外直径与井壁内直径的比值；

$\gamma_{混}$——混凝土容重，公斤/厘米^3；

D_1、D_2——井壁外直径与井壁内直径，厘米；

C——悬浮下沉的井壁顶面至井孔内泥浆液面差，厘米；

$H_{泥}$——井孔中泥浆液面高度，厘米。

采用能量强度理论校核

$$\sigma_{xd}=\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_r-\sigma_t)^2+(\sigma_t-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_r)^2]} \qquad (2-57)$$

$$\sigma_{xd}\leqq\frac{R_a+\mu R_g}{K}$$

6．吊环计算

吊环应采用 I 级钢筋制作，吊环埋入井壁深度不小于 $30d$，且不小于 I 米。吊点不少于 8 个。同时工作系数 $K_{同}$ 取 0.8 计算，每个吊环可以按二个截面计算。

$$2A_g=\frac{K_{吊}}{K_{同}}\cdot\frac{Q_{节}}{R_g} \qquad (2-58)$$

式中　A_g——钢筋截面面积，厘米^2；

$K_{吊}$——吊装安全系数（包括构件自重动力系数）$K_{吊} \geqslant 4$（有些部门取 $K_{吊} = 3$，但以取 4 为宜）；

R_g——钢筋强度常取 2400 公斤/厘米^2（热弯）；

$Q_{节}$——每节井壁重量，公斤。

7. 法兰盘计算

圆筒形井壁通常都依靠法兰盘连接。每节井壁上端的法兰盘称上法兰盘，每节井壁下端的法兰盘称下法兰盘。在不采用吊环提吊井壁的情况下，可以用井壁吊帽与上法兰盘对接，国内使用的法兰有槽钢形法兰，单板形法兰以及组合型钢法兰，常用的法兰盘形式有单板法兰及型钢法兰二种，如图 6－2－11 所示。

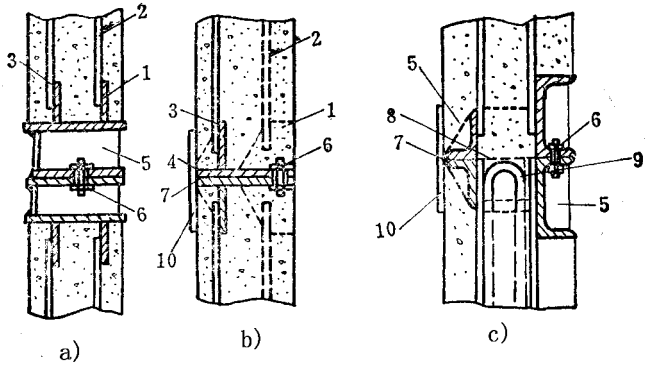


图 6－2－11　井壁法兰盘联接

a—槽钢形法兰；*b*—单板形法兰；*c*—组合型钢法兰

1—连接板；2—钢筋；3—连接圈板；4—钢板；5—加肋板；6—螺栓；7—焊缝；

8—砂浆；9—吊钩；10—环氧沥青防水层

在最早的钻井法施工中，也曾采用过焊接钢板组合而成的槽形法兰。实践证明，这种形式不单是钢材用量大，竖向强度也难以保证。目前已很少采用。

用法兰螺栓联接吊帽起吊井壁的这种方式，在井径比较大的情况下，法兰容易变形，螺栓数量很多，这对今后接头防水及加工都会带来许多困难。井壁增厚之后，法兰的用钢量随之大大增加。所以，通常井筒直径大于 5 米时，大都采用单板法兰的连接方式。上法兰钢板要按施工要求预留孔口，以便浇灌混凝土。法兰盘上环形圈板兼作防水圈钢板使用。

在设计法兰连接时，要满足二个方面的要求，即井壁制作和悬浮下沉过程中的运输、

移位以及沿井筒竖向不均匀分布的地压引起的弯曲应力。井壁的这两种工作状态，都表现为竖向受力。

(1)井壁运移提吊力验算

1)连接螺栓的计算

法兰盘沿圆周用竖向加筋板分割成与吊帽螺栓数相同的方格(假如不利用施工部门已有的吊帽，也可以自行确定)，每个方格恰好为一个起吊螺栓。

全部螺栓净截面积

$$\sum A_0 = \frac{0.9 K_d \cdot K \cdot Q_{节}}{[\sigma_l^j]} \tag{2-59}$$

每个螺栓净截面积

$$A_0 = \frac{\sum A_0}{n}$$

式中　K_d——提吊井壁的动力系数，$K_d = 1.5$；

K——螺栓受力不均匀系数，$K = 1.2$；

$Q_{节}$——每节井壁重量，公斤；

0.9——临时吊装运输验算折减系数；

n——螺栓个数；

$[\sigma_l^j]$——螺栓抗拉容许应力，公斤/厘米^2。

2)法兰板厚度计算(图 6-2-12)

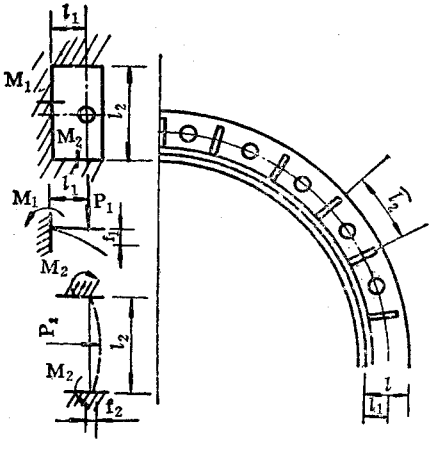


图 6-2-12　螺栓连接的法兰板厚度计算

计算时取加筋肋板围成的法兰板为三边固定一边自由的支承板。

假设每个螺栓的作用力 P，分解为图示悬臂跨梁的作用力 P_1 及固定跨梁的作用力 P_2。

根据静力条件　　$P = P_1 + P_2$

位移相等的条件，悬臂板 P_1 作用点的位移　　$f_1 = \dfrac{P_1 l_1^3}{3EI_1}$

二端固定板 P_2 作用点的位移　　$f_2 = \dfrac{P_2 l_2^3}{192EI_2}$

$$f_1 = f_2$$

联立求解　$P = P_1 + P_2$；$f_1 = f_2$　即得

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \alpha P \text{；} P_2 = \beta P \\ \alpha &= \frac{l_2^3 I_1}{64 l_1^3 I_2 + l_2^3 I_1} \\ \beta &= \frac{64 l_1^3 I_2}{64 l_1^3 I_2 + l_2^3 I_1} \end{aligned}\right\} \qquad (2-60)$$

式中　α——悬臂板荷载分配系数；

β——二端固定板荷载分配系数；

l_1——悬臂跨的计算跨径，即螺栓中心至圆圈板边距离，厘米；

l_2——固定跨计算跨径，即肋的中心间距，以弧长计，厘米；

I_1——悬臂跨板的惯性距，厘米^4；

$$I_1 = \frac{1}{12} l_2 \delta^3 \text{；}$$

δ——法兰板厚度，厘米；

I_2——固定跨板的惯性距，厘米^4，

$$I_2 = \frac{1}{12} l_1 \delta^3 \text{。}$$

由上述 P_1 和 P_2 值分别求出法兰板与圆圈板、加筋板固定截面处的弯矩，即：

$$M_2 = \frac{1}{8} P_2 l_2 \text{；} M_1 = P_1 l_1 \qquad (2-61)$$

选用较大值计算法兰板厚度，即：

$$\delta \geqslant \sqrt{\frac{6M_1}{[\sigma] l_2}} \text{；}\quad \delta \geqslant \sqrt{\frac{6M_2}{[\sigma] l_1}} \qquad (2-62)$$

肋板常取 > 8 毫米、法兰板常取 > 14 毫米

3)焊缝长度

法兰盘联接件均为贴角焊缝

焊缝长度

$$l_f = \frac{P_i}{0.7 h_f [\tau_\tau^h]} \tag{2-63}$$

$$P_i = \frac{0.9 K_d \cdot K \cdot Q_{节}}{n}$$

式中　h_f——焊缝高度,厘米;

$[\tau_\tau^h]$——焊缝允许剪应力,公斤/厘米^2;

P_i——作用在焊缝上的外力,其数值视计算部位确定;

n——纵向钢筋根数。

需要验算的位置:

①加劲肋焊缝,$P_i = P_2$;$P_i = P_1$;

②钢板与钢筋连接焊缝长度(指钢筋连接板与平板法兰之向或者钢筋与钢筋连接板之间的焊缝长度)。

直接由预埋吊钩起吊的井壁法兰焊缝,可以不考虑 K_d。

(2)井壁竖向受力时法兰盘板厚度验算

在井壁下沉过程中,常常需要用井架大钩提吊已经沉入泥浆中的井壁,以便校正垂直度。同时,提吊力不应当超过最上一节井壁的混凝土裂缝控制应力。

对于特殊部位的井壁,井壁法兰盘的设计,应当满足等强的原则。

1)法兰盘外周连接焊缝焊满之后,通常已经满足上述要求,内缘螺栓仅为构造设置。

2)表土与基岩岩性变化处,地压突变地段,为了减少井壁内缘变形,尽可能满焊,焊缝强度不足部分,方考虑螺栓连接,螺栓强度计算时,由于焊缝和螺栓连接刚度不同,强度折减 0.8 倍计算。一般情况下,内缘按构造设置已能满足。在计算不需要螺栓时,沿井筒内周边每米长布置螺栓 2 ~ 3 个,直径 ϕ18 ~ ϕ25。

3)法兰盘厚度常取 14 ~ 25 毫米,当 $\frac{l_2}{h_1} \geqslant 3$ 忽略肋板对法兰板的影响,这时以 $C-C$ 断面验算:

$$\left.\begin{aligned} M_{C-C} &= T \cdot h_1 \\ T &= \frac{M_0}{h} \leqslant [\tau_\tau^h] h_f \\ \delta_{C-C} &= \sqrt{\frac{6 M_{C-C}}{[\sigma]}} \end{aligned}\right\} \tag{2-64}$$

式中　δ_{C-C}——法兰板计算厚度，见图 6－2－13；

M_0——井壁内力矩，公斤·厘米；

h——井壁厚度，厘米；

h_1——圆圈板至井壁壁面长度，厘米；

M_{C-C}——法兰盘板 $C-C$ 截面作用的内力矩，公斤·厘米/厘米。

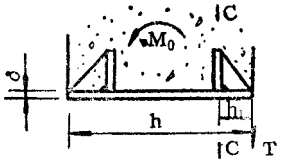


图 6－2－13　法兰盘板竖向弯矩作用简图

当 $\frac{l_2}{h_1}<3$ 时，法兰板厚度根据工地加工、焊接、安装等因素选取。混凝土与法兰板之间的粘结力，由于混凝土浇灌之后的收缩，通常在计算中不予考虑。

二、井壁底计算

井壁底是作为施工工艺要求的临时结构物。但是，钻井法施工井筒，使用于风井时，井筒不再延深，假若风化带的厚度又比较薄，壁后充填不能确切保证质量的情况下，井壁底依然要作为全部井壁的支承端，设计时仍应给予适当的富裕安全储备。

我国常用的井壁底的结构形式，有浅碟式、截锥式，半球或削球式，以及半椭圆回转扁壳井壁底等形式(图 6－2－14)。

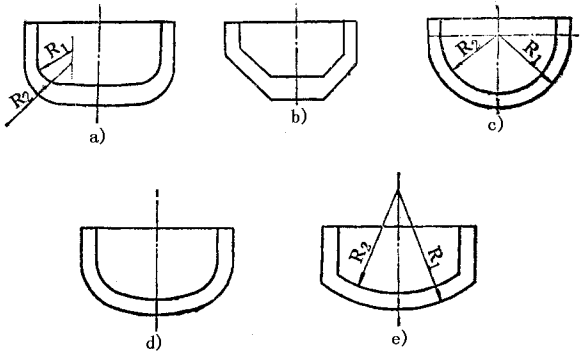


图 6－2－14　井壁底结构形式

a—浅碟式；b—截锥式；c—半球式；d—半椭圆回转扁壳；e—削球式

(一)浅碟式井壁底

1. 结构形式

它是由圆形平板和周边的环形弧壁组成。圆形平板的直径一般定为内径的一半,高度是根据井壁直径大小,以及是否要求端头能独自浮起来确定。通常在井筒直径较小时,例如 $D4.5$ 米以下,井壁底常常与最下一节井壁用法兰联接,然后由龙门吊一次提起下放。井壁底在泥浆中浮起,井壁浮出泥浆面的高度,应当大于 1 米,以便用法兰焊接。井筒直径比较大的情况下,如大于 $D5.0$ 米以上,井壁底与最下一节井壁合起来的重量势必超过龙门吊提吊能力,所以常常是单独制作。单独制作可以避免焊接造成的应力集中,以及连接处的刚度变化。

这种井壁底的最大优点是放置平稳、施工简单。

2. 荷载

假设外压力沿井壁底表面法向均匀相等地分布。外压力的大小等于泥浆对井壁的浮力与井内清水重量之差,其平衡条件为:

$$Q' - Q_0 = Q_1 + Q_2 = Q$$

式中　Q'——泥浆对井壁底的浮力,吨;

Q_0——井内清水重量,吨;

Q_1——井壁全长自重,吨;

Q_2——井壁底自重,吨。

取井壁底壳面单元面积进行分析可知,壳面单元体凹面受压舱水水柱,$\gamma_{水}(H_{泥} - h')$ 压力作用,单元体外表面承受泥浆压力,壳面压力近似按二者压力差计算。泥浆容重应事先向钻井施工单位收集,通常泥为 1.2 吨/米^3。

$$P = H_{泥}\gamma_{泥} - (H_{泥} - h')\gamma_{水} \tag{2-65}$$

式中符号参见图 6-2-9。

有些设计中直接采用 $P = \frac{Q}{A}$ 作为井壁底单位面积压力,井深时,计算压力偏大。

以上的荷载假设,在用以进行井壁内力分析时,显然忽略了一对大小相等互相平衡的清水压力对井壁底内力的影响。这在井不太深的情况下是允许的。

3. 井壁底厚度

按井壁底内缘承受剪切控制

$$t \geqslant \frac{K_j dP}{4R_j};\ d = 2r \tag{2-66}$$

式中　r——内半径,厘米;

t——按计算需要的井壁底最小厚度，不小于井壁厚度，厘米；

K_j——混凝土构件剪切安全系数，K_j 取 2.85；

R_j——混凝土剪切设计强度，$R_j = \sqrt{R_a R_l} \times 0.75$ 公斤/厘米^2。

4. 内力计算

井壁底厚度一般都大于圆筒形井壁厚度。而且，井壁底弧环以上高度一般都取 1 米左右。

假设井壁底中心弯矩计算按圆形板四周铰接约束。井壁底边缘弯矩计算按圆形板四周固定约束（图 6－2－15）。

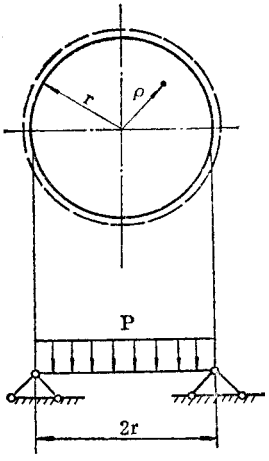


图 6－2－15　浅碟式井壁底计算简图

均布荷载 P 作用下产生的径向弯矩 M_r 和环向弯矩 M_θ，按下式计算。

周边简支：

$$\left.\begin{aligned} M_r &= \frac{P}{16}(3+\mu)(r^2-\rho^2) \\ M_\theta &= \frac{P}{16}[r^2(3+\mu)-\rho^2(1+3\mu)] \end{aligned}\right\} \tag{2-67}$$

式中　r——井壁内半径，厘米；

ρ——从圆心起计算位置的径向半径，厘米；

μ——混凝土泊松比，$\mu = 0.15$。

分别计算

$$\left.\begin{aligned}&\rho = 0, M_r = \frac{19}{96}Pr^2;\quad M_\theta = \frac{19}{96}Pr^2\\&\rho = \frac{r}{2};M_r = \frac{57}{384}Pr^2;\quad M_\theta = \frac{67}{384}Pr^2\\&\rho = r;\quad M_r = 0;M_\theta = \frac{5}{48}Pr^2\end{aligned}\right\} \tag{2-68}$$

周边固定：

$$\left.\begin{aligned}&\rho = r, M_r = -\frac{1}{8}Pr^2\\&M_\theta = -\frac{\mu}{8}Pr^2\end{aligned}\right\} \tag{2-69}$$

配筋计算时，取单位长板宽，且：

$$A_0 = \frac{KM}{bt_0^2 R_w}，查表得\ \gamma_0$$

$$A_g = \frac{KM}{R_g \gamma_0 t_0} \tag{2-70}$$

式中　t_0——钢筋混凝土井壁底截面有效高度，厘米；

M——分别代入计算弯矩 M_r、M_θ

井壁底中心 1/3 半径范围内，钢筋布置过分密集，可用圆形钢板代替。

$$Z \times [\sigma] \times \delta \times 1 = \frac{19}{96}Pr^2$$

$$\delta = \frac{19Pr^2}{96[\sigma]Z} \tag{2-71}$$

式中　Z——为上下二块钢板中心间距，厘米；

$[\sigma]$——钢板允许应力，公斤/厘米^2；

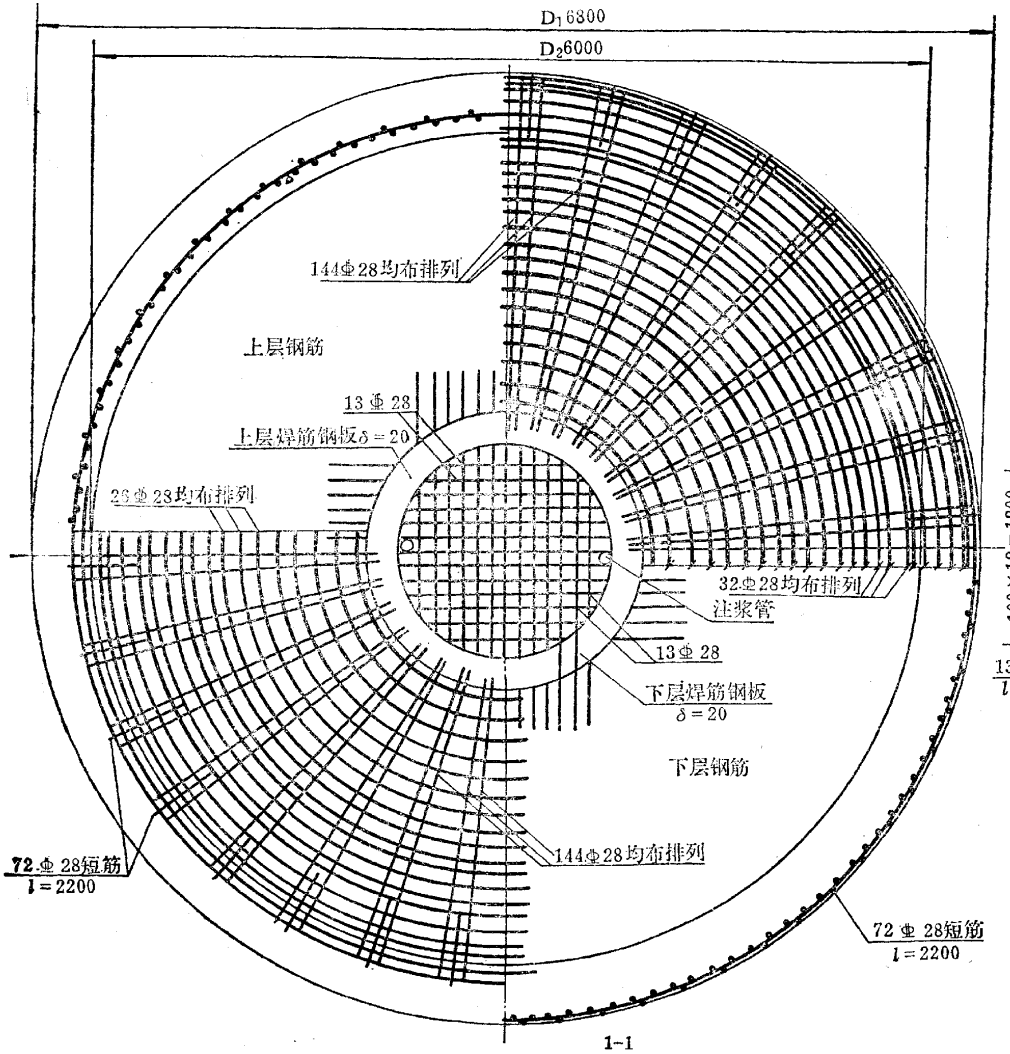
r——井筒内半径，厘米。

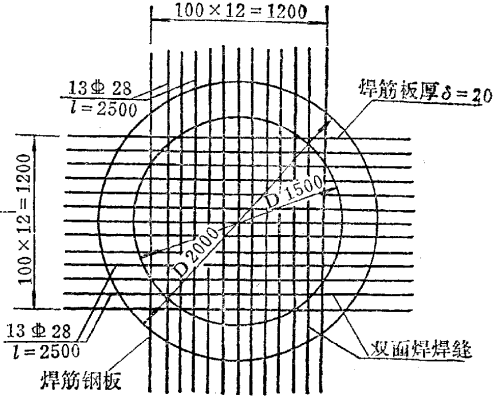
浅碟式井壁底结构实例，见图 6-2-16。

（二）截锥式井壁底

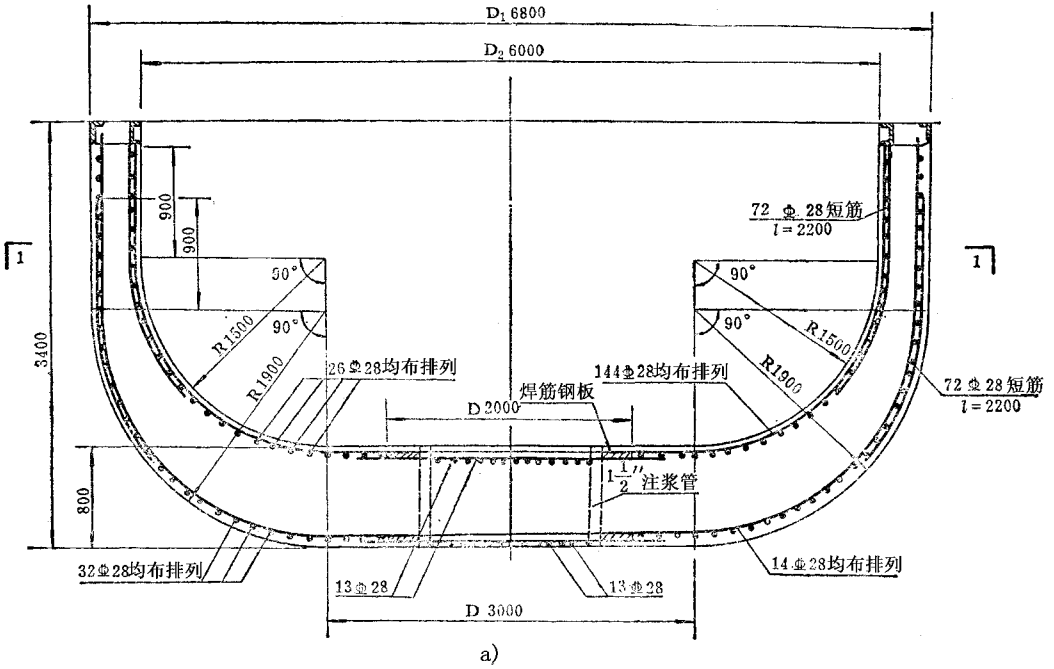
将浅碟式井壁底的弧形连接环，改成截圆锥面，就形成截锥式井壁底，见图 6-2-17。

这种形式的井壁底施工方便，放置平稳。但是，截锥和立壁以及平板连接处，应力情况相当复杂，边缘弯矩和应力集中数值，目前还没有比较详细地进行分析。一般可以按组合壳变形协调方程，以及组合壳弯矩分配法进行分析。如果井筒不很深，也可以按以下近似计算方法估算，但连接处的构造筋应适量增加。


D1 6800
D2 6000
144⌀28均布排列
上层钢筋
13⌀28
上层焊筋钢板δ=20
26⌀28均布排列
32⌀28均布排列
注浆管
13⌀28
下层焊筋钢板
δ=20
下层钢筋
144⌀28均布排列
72⌀28短筋
l=2200
72⌀28短筋
l=2200
1-1


100×12=1200
13⌀28
l=2500
焊筋板厚δ=20
100×12=1200
D1500
D2000
13⌀28
l=2500
双面焊焊缝
焊筋钢板

b)



a)

图 6－2－16　浅碟式井壁底结构实例

说明：1. 钢筋混凝土井壁底按井筒下沉达 200 米设计，承受最大外压力为 18 公斤/厘米^2。

2. 混凝土标号为 500 号钢筋采用 16 锰钢，钢筋绑扎时，搭接长度 35d 钢筋与焊筋钢板搭接焊，长度 150 双面焊缝，厚 6 毫米。

3. 上法兰仍采用井壁法兰，起运吊装采用 12 个吊钩，注浆孔埋置 2 个。

4. 底盘总高 $H=3400$，总重 $W=100$ 吨，排水量 $Q=118$ 吨。

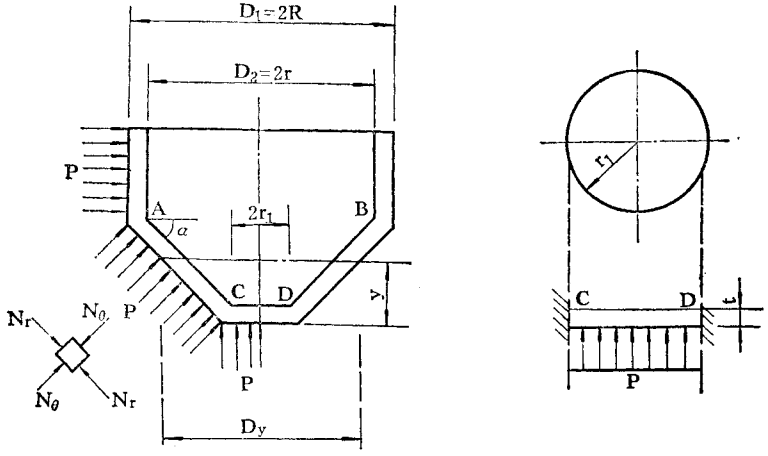


图 6－2－17　截锥式井壁底计算简图

1. 井壁底圆形平板部分计算

圆形平板以周边固定考虑。单位周长上的径向弯矩和环向弯矩 M_r 及 M_θ 按下列公式计算

$$\left.\begin{aligned} M_r &= \frac{P}{16}[(1+\mu)r_1^2 - (3+\mu)\rho^2] \\ M_\theta &= \frac{P}{16}[(1+\mu)r_1^2 - (1+3\mu)\rho^2] \\ &\text{当 } \rho = 0 \quad M_r = M_\theta = \frac{7}{96}Pr_1^2 \\ &\rho = r_1 \text{ 时 } M_r = -\frac{1}{8}Pr_1^2 \text{；} \\ &\qquad M_\theta = -\frac{1}{48}Pr_1^2 \end{aligned}\right\} \tag{2-72}$$

钢筋计算仍可利用：

$$A_0 = \frac{KM}{bt_0^2 R_w}\text{，查表得 } \gamma_0$$

则

$$A_g = \frac{KM}{R_g \gamma_0 t_0} \tag{2-73}$$

2. 截锥部分计算

当壁外受泥浆压力 P 作用，在斜壁中产生径向和环向压力。

(1)单位长度水平环向压力

$$N_\theta = \frac{D_y P}{2\sin\alpha} \tag{2-74}$$

式中　D_y ——验算截面处，斜壁中心的直径，厘米；

α——斜壁与水平面的夹角。

(2)环形截面单位长度上的径向压力 N_r

在验算截面处，泥浆压力 N 为：

$$N = \frac{1}{4}D_y^2 \pi P$$

径向压力，

$$N_r = \frac{N}{\pi D_y \sin\alpha} = \frac{\frac{\pi}{4}D_y^2 P}{\pi D_y \sin\alpha}$$

$$= \frac{D_y P}{4 \cdot \sin\alpha} \tag{2-75}$$

最大压力发生在立壁和斜壁交界处，挤压力为：

$$N_{max}=\pi R^2 P,\text{且 } KN_{max}\leqq\pi(R^2-r^2)R_a \tag{2-76}$$

截锥式井壁底配筋结构实例见图 6-2-18。

对于高强薄壁壳体，则 $2r_1$ 周边剪切强度也应列入计算。

截面配筋仍可引用钢筋混凝土结构计算公式计算，但组合壳的连接位置，含筋率不宜小于 0.8%，配筋范围可在 $2\sim3h$ 范围之内，其余不低于 0.4%，内外层等量配置。当井深超过 150 米以上，或壁厚小于 $r/10$，建议详细分析组合位置的不连续应力。

(三)半球和削球式井壁底

半球式和削球式井壁底的球面半径和井筒内径相同。半球形面承受均匀的泥浆压力，受力性能比较好。这种形式的井壁底未能获得普遍采用的原因是，井壁底高度大，球面施工困难，对于掌握了地模施工的单位，是可以选用的一种较好的形式，如图 6-2-19 所示。

在需要降低井壁底高度的情况下，削球式井壁底也普遍采用，这种形式在壳的组合位置干扰弯矩所引起的应力集中，随着削球壳的矢高比而变，受力不好，未经详细计算不宜于立即用于深井。矢高比的值，以中心轴线起算，一般控制在中心角 60°左右。井壁底厚度与井壁厚度相同，最小含筋率不小于 0.4%。

按无矩理论计算，壳体内应力沿厚度均匀分布，不考虑壳体组合位置由于变形协调而引起的干扰影响。径向局部的不连续应力，由经验估计，应力增大约 30%，含筋率不小于 0.8%，二侧均匀配筋，加强配筋范围为 $\frac{1}{5}\sim\frac{1}{4}R_0$，或者接近 3 倍壳体厚度。

图 6-2-19 中球壳面沿径向的内力 N_r 和沿纬向的内力 N_θ 分别表示为：

$$\left.\begin{aligned}N_r&=\frac{1}{2}PR_0\\N_\theta&=\frac{1}{2}PR_0\\U&=\frac{1}{4}PR_0^2\sin2\varphi_0\end{aligned}\right\} \tag{2-77}$$

式中　R_0——球壳厚度的平均半径，厘米；

φ_0——削球壳所对圆心角的一半；

N_r——削球壳面径向内力，公斤/厘米；

N_θ——削球壳面纬向内力，公斤/厘米；

U——支承环内力，公斤。

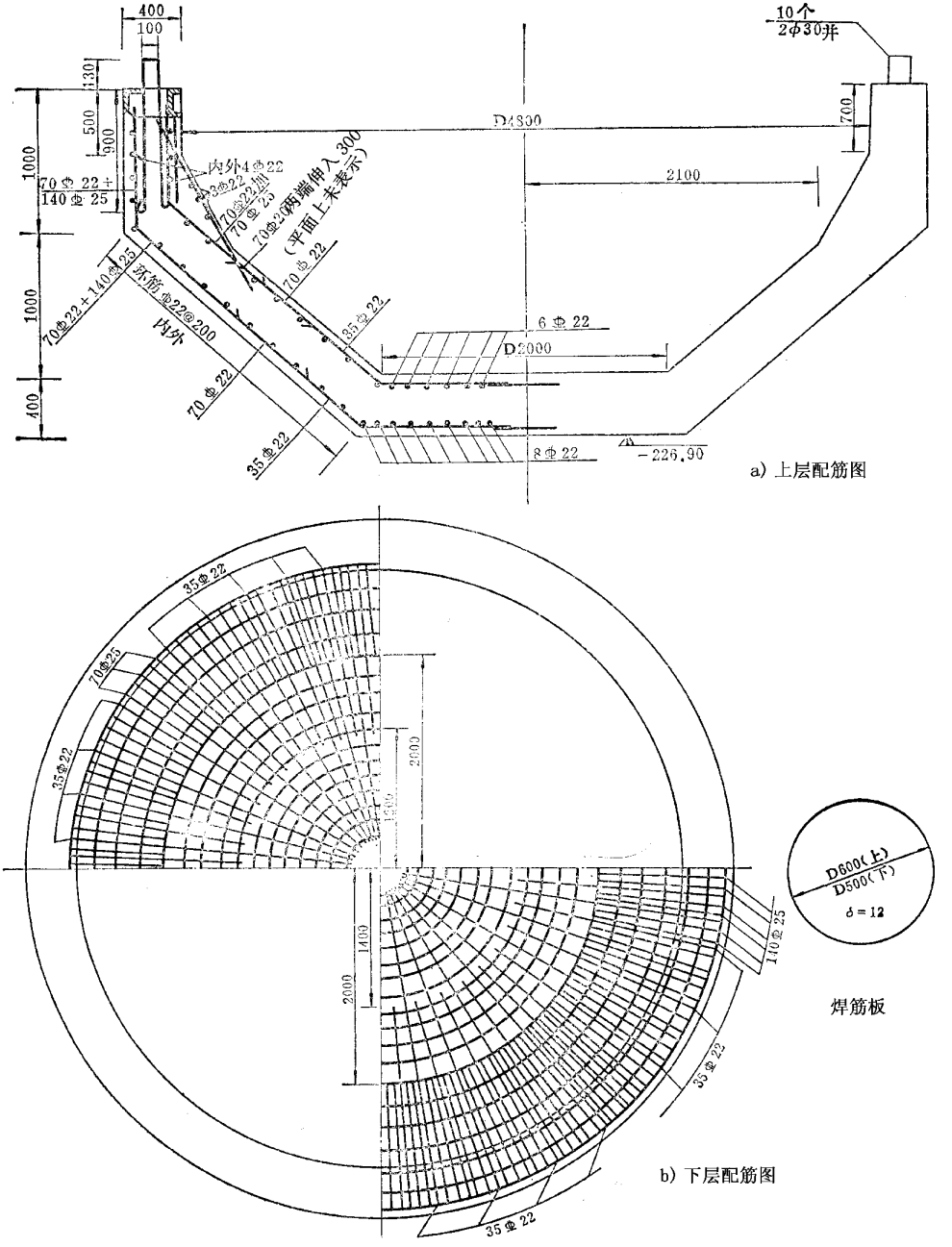


图 6－2－18　截锥式井壁底结构实例

说明：

1. 混凝土 400 号钢筋与焊筋板双面焊 110 厚度 15。

2. 法兰锚固筋内外 52 很⏀ 20□= 800。

3. 吊钩用 A_2 热弯加工成。

4. 锚筋与竖筋搭接段如相遇凡能加焊者应单面焊接。

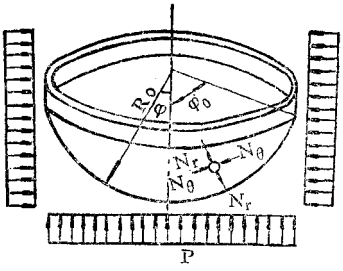


图 6－2－19　半球式和削球式井壁底计算简图

钢筋用量：

$$A_g = \frac{KN - R_a t}{R'_g} \tag{2-78}$$

式中　N——为 N_r 或 N_θ；

K——安全系数；

t——球壳厚度，厘米。

井壁底支承环，应与球壳一起浇作。在均匀压力 P 作用下，支承环承受拉力，按轴心受拉构件计算需要的抗拉钢筋。

$$A_g = \frac{K_l U}{R_g}$$

式中　K_l——受拉安全系数。

在采用半球式井壁底，$\varphi_0 = 90°$，支承环的内力 $U = 0$，此时，按构造配筋。

(四)半椭圆回转扁球壳井壁底

前面几种壳体近似计算中，都不考虑井壁底径向变形与井壁筒体部分变形不协调的影响。回转扁球壳的计算中，考虑了这一边缘效应，使壳内应力比较符合实际。

1. 半椭圆回转扁球壳的几何关系和薄膜内力(无矩内力)

半椭圆回转壳包括一个柱形筒和半椭球面，球壳部分的外形比较矮，受力较合理。

如果把椭圆曲线作母线称经线，经线离基准位置旋转角 θ，并且选择壳体曲面法线与壳体旋转轴之间夹角为 ϕ，见图 6－2－20。

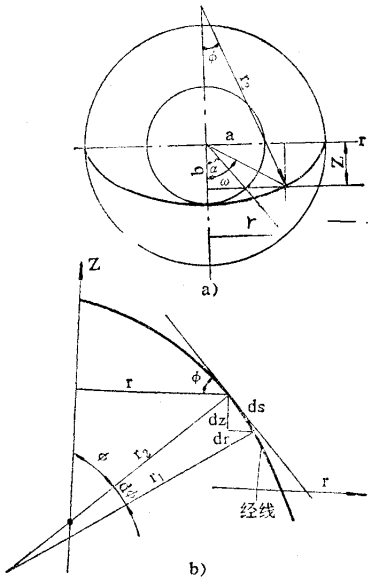


图 6－2－20　半椭圆回转扁球壳几何关系

基本几何关系

$$\left.\begin{aligned} &r = r_2\sin\phi \quad dS = r_1 d\phi \text{ 即} \\ &dr = dS\cdot\cos\phi \quad dZ = ds\cdot\sin\phi \\ &\frac{dr}{d\phi} = r_1\cos\phi \quad \frac{dZ}{d\phi} = r_1\sin\phi \\ &\frac{1}{r}\quad\frac{dr}{d\phi} = \frac{r_1}{r_2}\mathrm{ctg}\phi \end{aligned}\right\} \qquad (2-79)$$

式中　r ——为经线上一点到旋转轴距离；

r_1 ——为经线的曲率半径；

r_2 ——经线的法线与旋转轴的交点，到壳体曲面之间的长度，又称第二曲率半径或称纬线切面主曲率半径。

代入标准椭圆方程求解：

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= \frac{a^2 b^2}{(a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi)^{3/2}} \\ &= \frac{(a^4 Z^2 + b^4 r^2)^{3/2}}{a^4 b^4} \\ r_2 &= \frac{a^2}{(a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi)^{1/2}} \\ &= \frac{(a^4 Z^2 + b^4 r^2)^{1/2}}{b^2} \end{aligned}\right\} \tag{2-80}$$

经向内力　$N_\phi = N_1 = \dfrac{Pa^2}{2} \times \dfrac{1}{(a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi)^{1/2}}$

环向内力　$N_\phi = N_2 = \dfrac{Pa^2}{2b^2} \times \dfrac{b^2 - (a^2 - b^2)\sin^2 \phi}{(a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi)^{1/2}}$ $\Bigg\}$ (2-81)

当 $\phi = 0$ 时，$N_\phi = N_\theta = \dfrac{P_{1T}}{2}$

椭圆长短轴比值变化时，壳体内的应力也产生变化，如图 6-2-21 所示为壳体内力分布情况。环向力在壳面中有一次符号改变。在 $\sin\phi = \dfrac{b}{\sqrt{a^2 - b^2}}$ 处，N_θ 变为 0，分析这一应力变化可知，只有当 $\dfrac{a}{b} \geqq \sqrt{2}$ 时，$\sin\phi$ 出现实角，N_θ 变号位置分别是在：

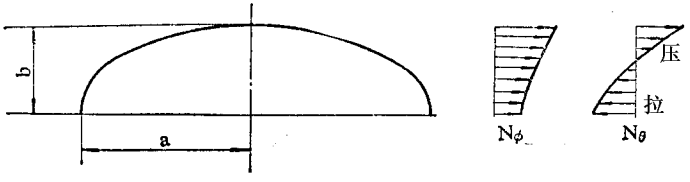


图 6-2-21　扁球壳 N_θ 及 N_θ 分布

$$r = \frac{a^2}{\sqrt{2(a^2 - b^2)}}\text{；}\quad Z = \sqrt{\frac{a^2 b^2 - b^2 r^2}{a^2}} \tag{2-82}$$

筒体 $A-A$ 截面处应力（薄膜应力），见图 6-2-22 及图 6-2-23。

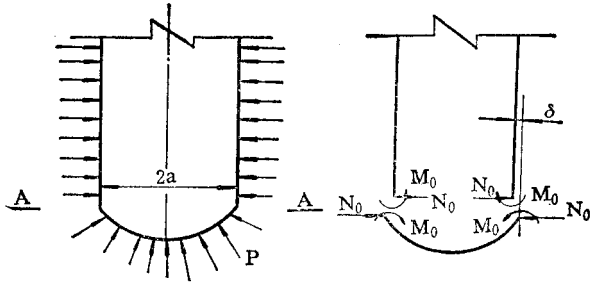


图 6-2-22　扁球壳径向位移

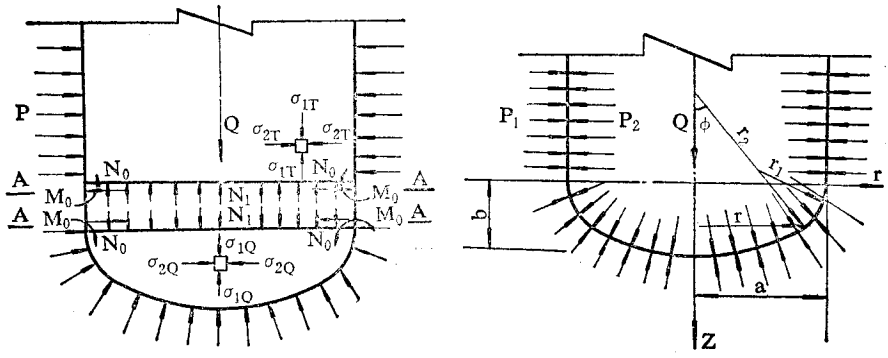


图 6－2－23　筒体受力简图

经线方向　$\sigma_{1T} = \dfrac{Pa}{2h}$

纬线方向(即环向)　$\sigma_{2T} = \dfrac{Pa}{h}$

球壳 $A-A$ **截面处应力：**

经线方向　$\sigma_{1Q} = \dfrac{Pa}{2h}$

纬线方向(即环向)　$\sigma_{2Q} = \dfrac{Pa}{h}\left(1 - \dfrac{a^2}{2b^2}\right)$　　(2－83)

式中　h**——壁厚，厘米。**

2. **组合壳体中的应力**

(1)**组合壳界面的内力** N_0

球壳与井筒连接之后，由于连接处变形不协调，势必产生保持变形协调的内力。分别讨论筒体和壳体沿 $A-A$ **截面，各自在受外载** P **作用下的径向位移时，得到：**

筒体径向自由位移：

$$\triangle_T = \frac{a}{E}\left(\frac{Pa}{h} - \mu\frac{Pa}{2h}\right) \tag{2-84}$$

壳体径向自由位移：

$$\triangle_Q = \frac{a}{E}\left[\frac{Pa}{h}\left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right) - \mu\frac{Pa}{2h}\right]$$

筒体和壳体在 $A-A$ **截面处的自由变位差。**

$$\delta = \triangle_T - \triangle_Q$$

$$= \frac{Pa^2}{2hE} \times \frac{a^2}{b^2} \tag{2-85}$$

要消除这一自由变位差，使变形协调，则将在 $A-A$ 截面产生沿圆周均匀分布的剪切力 N_0，与弯矩 M_0（即经向弯矩），这些力所产生的应力有时称不连续应力。它使筒与壳在邻近 $A-A$ 截面两侧沿径向，在经线的部分长度内产生弯曲，在以材料力学的平面假设引入壳体应力分析的公式中时，计算的误差将随着 h/a 的变化而增大。如果筒与壳厚度相等，N_0 使筒与壳两部分边缘产生相等的旋转，这时 M_0 等于零。N_0 在筒体产生 $\delta/2$ 的挠度。$A-A$ 截面两侧变形协调。取筒体圆周单位长度一小条，座标取如图 6－2－24 所示，在 N_0 作用下，挠度曲线方程为：

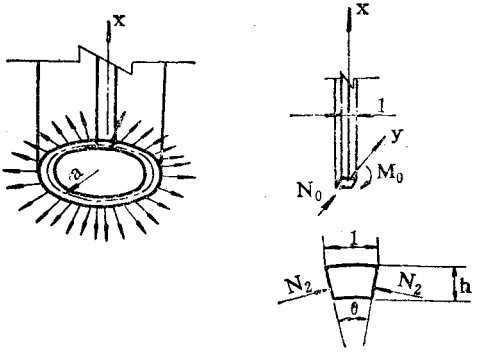


图 6－2－24　筒体单位周长条带

$$y=\frac{e^{-\lambda x}}{2\lambda^3 D}\left[N_\theta\cos\lambda x-\lambda M_0(\cos\lambda x-\sin\lambda x)\right] \tag{2-86}$$

$$\lambda=\sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{a^2h^2}}$$

$$D=\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

在 $A-A$ 截面处，$x=0$，$M_0=0$

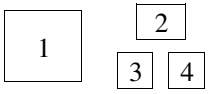
$$\left.\begin{aligned} y&=\frac{\delta}{2}=\frac{N_0}{2\lambda^3 D}\\ N_0&=\delta\lambda^3 D=\frac{Pa^2}{8\lambda b^2}\end{aligned}\right\} \tag{2-87}$$

(2)在 N_0 作用下，筒体中的弯矩

N_0 引起的沿经作用的弯矩，可借用弹性地基梁方程求得：

$$\left.\begin{aligned} &M_{1T}^{N_0} = \frac{1}{\lambda} N_0 e^{\lambda x} sin\lambda_X \\ &\text{当 } x = \frac{\pi}{4\lambda} \text{时 } M_{1T}^{N_0} \text{为最大} \\ &\text{由于 } N_0 \text{ 引起的筒中环向力} \\ &N_{2T}^{N_0} = -2N_0\lambda_a \cdot e^{-\lambda x} cos\lambda_X \end{aligned}\right\} \quad (2-88)$$

壳体和球壳中内力,应力符号表达形式为：



[1]—应力或内力的种类,N(轴向力)、M(弯矩)、σ(正应力)。

[2]—引起内力或应力的作用力,

N_0——由于 $A-A$ 截面筒体和壳体保持变形协调而产生的截面剪力；

Q——井壁自重；

P——泥浆压力。

[3]—内力或应力作用的方向,

1 表示沿经线方向(对内力 M 来说即沿经线方向,包含在筒体或壳体的 z 和 r 轴平面之内。当取单位宽度的筒体条带当作弹性地基梁来分析时则作用于 y 和 x 轴所包含的平面内。如果 M 用矢量方向来表达时,M 的矢量方向变为环向)。

2 表示沿环向。

[4]—内力或应力所在的结构,

T——筒体；

Q——球壳。

例如：$M_{1T}^{N_0}$——筒体中由于 N_0 的作用引起的沿经向的弯矩,公斤,厘米/厘米；

$N_{2T}^{N_0}$——筒体中由于 N_0 的作用引起的沿环向的轴向力,公斤/厘米(其余符号表达的形式相同)。

(3)在 N_0 作用下,球壳体中的弯矩

$$\left.\begin{aligned} &M_{1Q}^{N_0} = \frac{Pah}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\ e^{-\beta}sin\beta \\ &\text{当 } \beta \text{ 为 } \frac{1}{4}\pi \text{ 时，} M_{1Q}^{N_0} \text{ 为最大} \\ &\text{由 } N_0 \text{ 引起的环向拉力} \\ &N_{2Q}^{N_0} = Pa \cdot e^{-\beta}cos\beta \end{aligned}\right\} \quad (2-89)$$

令：　$D_Q = \dfrac{Pah}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}$ 便于列表计算

以 $\beta = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)} \cdot \sum \dfrac{\Delta S}{\sqrt{r_2 h}}$ 代替积分式

$$\beta = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)} \cdot \int_0^3 \frac{ds}{\sqrt{r_2 h}}$$

S 是根据要求计算位置确定的沿壳体曲面经线长的积分限，由椭圆积分可知（北京矿业学院《数学手册》）。

$$S = \int_0^{\alpha} \sqrt{a^2\cos^2\alpha + b^2\sin^2\alpha}\,d\alpha$$

$$= \int_0^{\alpha} \sqrt{a^2 - (a^2 - b^2)\sin^2\alpha}\,d\alpha$$

令　$K = \sqrt{\dfrac{a^2 - b^2}{a^2}}$

例如当 $\dfrac{a}{b} = 2$ 时　$K = 0.866$；$sin^{-1}K = 60^{\circ}$

则　$E(\alpha K) = \int_0^{\alpha} \sqrt{1 - K^2\sin^2\alpha}\,d\alpha$

查　$\sin^{-1}K = 60^{\circ}$ 时不同 α 的 $E(\alpha \cdot K)$ 值得

$S = \alpha \cdot E(\alpha \cdot K)$

(4)筒体和壳体中应力的组合

筒体和壳体受力的最终应力，应包括二个部分，即薄膜应力和由 No 引起的边缘应力，如 6－2－25 所示。

$$\sigma = \sigma^* + \tilde{\sigma} = \sigma^P + \sigma^{N_0} \quad (2-90)$$

σ^* ——薄膜应力；

$\tilde{\sigma}$ ——边缘应力。

对筒体来说，沿经线切线方向：

$$\left.\begin{aligned} N_{1T}^{Q} &= \frac{Q}{2\pi a} \\ M_{1T}^{N_0} &= \frac{1}{\lambda} N_0 e^{-\lambda x} \sin\lambda_X \end{aligned}\right\} \tag{2-91}$$

构成偏心受压状态，按钢筋混凝土结构配筋。

最大 $M_{1T}^{N_0}$ **在** $\lambda_X = \frac{\pi}{4}$ **；**$e^{-\lambda x}\sin\lambda = 0.3223$

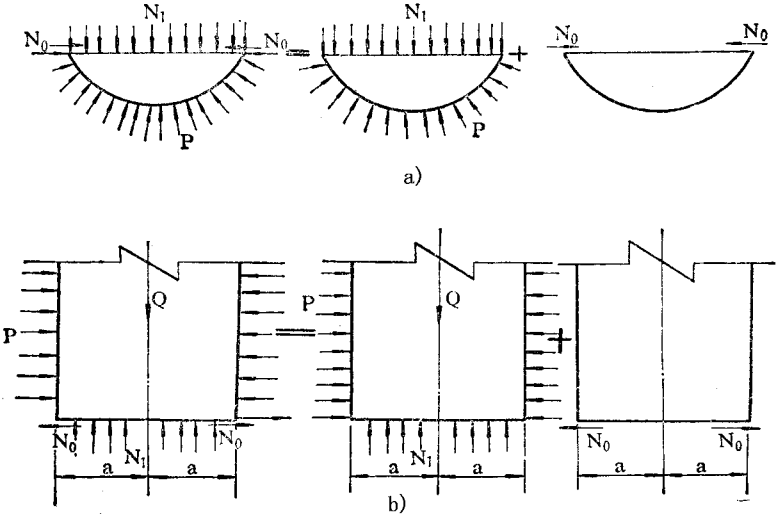


图 6－2－25　**应力组合**

应力数值也可按下式计算：

$$\sigma = \frac{N_{1T}^{Q}}{h} \pm \frac{6M_{1T}^{N_0}}{h^2} \tag{2-92}$$

沿环向：

$$\left.\begin{aligned} N_{2T}^{P} &= Pa \\ N_{2T}^{N_0} &= -2N_0\lambda a \cdot e^{-\lambda x}\cos\lambda_X \end{aligned}\right\} \tag{2-93}$$

构成轴心受压力

最大值位置是在 $\lambda_X = \frac{3}{4}\pi$**，**$e^{-\lambda x}\cos\lambda_X = -0.0669$

应力数值也可以按下式计算：

$$\sigma = (N_{2T}^{P} + N_{2T}^{N_0})\frac{1}{h} \tag{2-94}$$

对壳体来说，沿经线切线方向：

$$\left.\begin{aligned} N_{1Q}^{P} &= \frac{Pr_0}{2\sin\phi} = \frac{Pr_2}{2} \\ M_{1Q}^{N_0} &= \frac{Pah}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\ e^{-\beta}\sin\beta \end{aligned}\right\} \tag{2-95}$$

构成偏心受压状态，用应力表达式来表达时：

$$\sigma = \frac{N_{1Q}^{P}}{h} \pm \frac{6M_{1Q}^{N_0}}{h^2} \tag{2-96}$$

沿环向：

$$\left.\begin{aligned} N_{2Q}^{P} &= P\left(r_2 - \frac{r_2^2}{2r_1}\right) \\ N_{2Q}^{N_0} &= Pae^{\beta}\cdot\cos\beta \end{aligned}\right\} \tag{2-97}$$

或者用应力表达为

$$\sigma = (N_{2Q}^{P} + N_{2Q}^{N_0})\frac{1}{h} \tag{2-98}$$

通常在设计井壁端部时，尽量使筒与壳连接处环向内力处于受压或者拉应力很小的状态，以便充分利用混凝土的受压性能。即必须使椭球壳中存在过渡应力区，在过渡点附近，环向内力 N 反向，内力符号变号。连接处的环向应力则由于变形协调而减小，其壳的强度将受 N_1、M_1 来控制，设计中常取 $\frac{a}{b}=2$。半椭圆回转扁球壳结构配筋，见图 6-2-26。

安徽省煤矿设计院曾对各种不同 $\frac{D_1}{D_2}$ 比率的几何相似壳体，用有限单元法进行了应力分析，当 $\frac{D_1}{D_2}\geqslant 1.2$ 时，厚壳中拉应力已不再出现。

(5)球壳顶部的应力(浅碟效应)

壳顶 $\phi = 9.96^{\circ}$ 区域之内，按上述分析方法所获的应力数值不能采用，这不但是由于壳的外形几何形状变化引起的内力变化非常敏感，而且厚壳中的弯矩大致地与平板应力分布相同。设计可以按 $\phi = 10^{\circ}$ 沿中部圆周铰接进行计算。

$$R_2 = \frac{a^2}{(a^2\sin^2\phi + b^2\cos^2\phi)^{1/2}}\ ;\ b = R_2\cdot\sin\phi$$

板的径向弯矩：

板的切向弯矩：

$$\left.\begin{aligned} M_1 &= \frac{P}{16}(3+\mu)(b^2 - r^2) \\ M_2 &= \frac{P}{16}[(3+\mu)b^2 - (1+3\mu)r^2] \end{aligned}\right\} \tag{2-99}$$

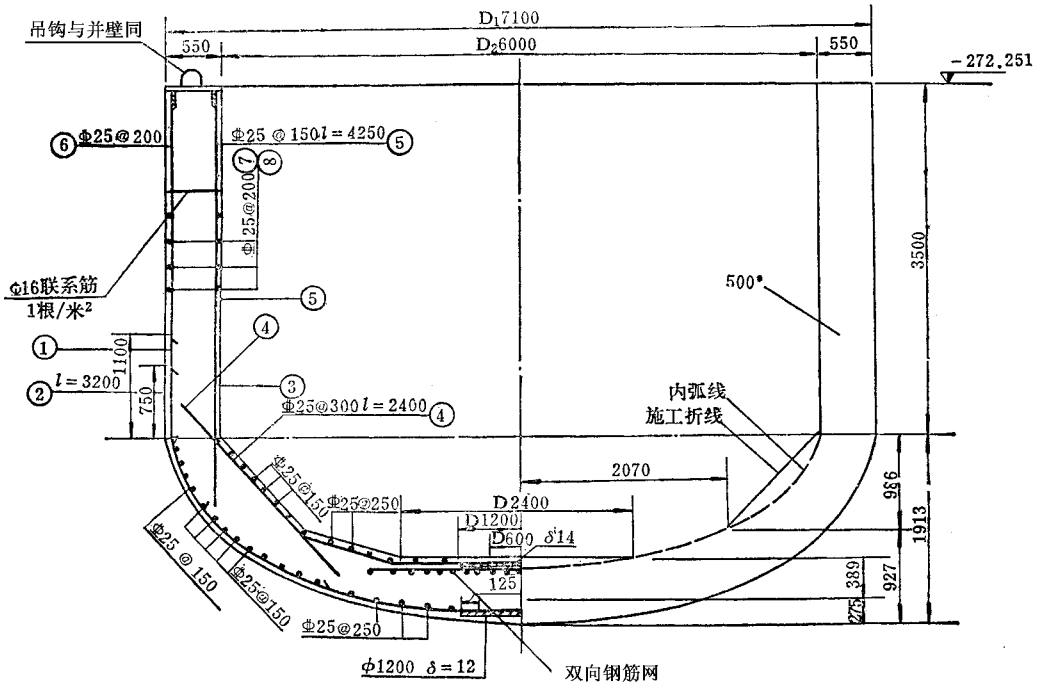


图 6－2－26　半椭圆回转扁球壳结构实例

说明：

1. 锅底结构按旋转偏角椭球壳计算承受外压 161 吨/米，壳体全重 170.6 吨，容重按 2.5 吨/米^3 计算。
2. 当泥浆比重为 $\gamma = 1.1$ 锅底顶面露出浆面约 1.07 米为了保证安全施工泥浆比重应保证调整达 $\gamma = 1.2$ 方可下放。
3. 由于锅底承压力大，壳壁较薄，为了使其受力状态与计算分析尽量一致，椭球外形应严格按图施工。
4. 钢筋除图已示明者外，请由实放大样确定长度，混凝土标号为 500 号钢筋 25 锰硅。

当 $r = 0$ 时，M 最大

$$M_1 = M_2 = \frac{P}{16}(3 + \mu)\, b^2 \qquad (2-100)$$

由于中心部分弯矩比较大，按配筋计算，钢筋布置过分稠密，通常以钢板来代替，见图 6－2－27。

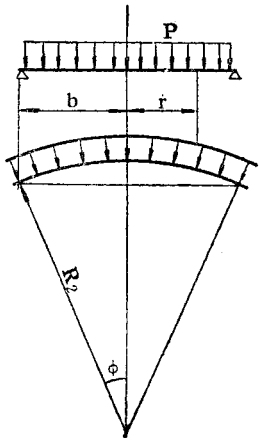


图 6－2－27　**壳顶浅碟效应计算简图**

第三章　立井井筒支护设计

第一节　支护类型及支护材料

一、支护类型(6－3－1)

表 6－3－1　支护类型(按井壁结构分)

类型名称		采用材料	使用情况	优　缺　点
砌筑式(砂浆砌体)		砂浆,料石、混凝土预制块	取材方便的普通法凿井井筒使用,近年来冻结法井筒在膨胀粘土层作临时支护用(同时为永久支护的组成部分)	1.砌筑后能立即承受压力; 2.砌体强度较低; 3.整体受力及防水性差
整体式	整体灌注式	混凝土	井筒各种施工方法包括基岩井壁广泛采用	1.整体性好,强度较高; 2. 防水性能较好; 3.便于机械化,施工方便,劳动强度低
	锚喷混凝土	混凝土(锚杆,金属网等)	在岩层较稳定,淋水小且井筒装备少或钢丝绳罐道的井筒中采用	1.掘进工程量较小,施工进度较快,效率较高; 2.喷射过程中回弹率高,粉尘多; 3.井筒采用时受多种条件限制

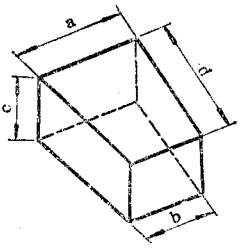
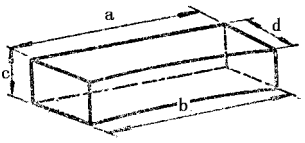
类型名称	采用材料	使用情况	优　缺　点
整体预制式、预制装配式	大型配筋砌块、丘宾筒及地面整体浇注，预制钢筋混凝土井筒	使用于钻井法、沉井法施工时，需地面预制的井筒，在地压大的深井井筒中，常采用丘宾筒、组合钢板等支护结构	1.丘宾筒、地面预制混凝土构件强度高； 2.丘宾筒、混凝土砌块在深流砂层中，必须与防水材料配套使用

二、支护材料(表 6－3－2)

表 6－3－2　支护材料分类

材料名称		材料基本规格	基本要求
料石	料石	细加工，六面平，接触面凹凸深度不超过 0.2 厘米。高度和宽度不少于 20 厘米，且不少于长度的 $\frac{1}{3}$，常用规格：300×250×150(毫米)；350×250×150(毫米)特殊规格见表 6－3－3	取材于石灰岩(酸性不宜用)、花岗岩成硬岩，抗压强度不低于 300 公斤/厘米^2，一般为 500～1000 公斤/厘米^2
	荒料石	规格同细料石，接触面凹凸深度不大于 2 厘米	
混凝土预制块	小型预制　块	见表 6－3－3	强度≥300 公斤/厘米^2，一般 400～500 公斤/厘米^2
	大型配筋预制块	见表 6－3－3	强度≥400 公斤/厘米^2
混凝土及钢筋混凝土		配料为水泥、粗骨料(碎石)、细骨料(砂)、水，喷射混凝土需掺入速凝剂，标号不得低于 200 号	材料要求及规格见表 6－3－4 至表 6－3－6 钢筋规格及等级见本章第四节
混凝土外加剂		早强剂、防冻剂、减水剂等，见第四章第六节	
锚杆金属网		见相关内容	
铸铁、丘宾筒、钢板、聚乙烯防水层、可压缩垫板、沥青等，见相关内容			

表 6－3－3　砌块规格

类别		图示	规格尺寸（毫米）				重量（公斤）
			a	*b*	*c*	*d*	
小型砌块	料石		325	300	150 200	400 (300)	50 ±
	混凝土块		270	250	160 180	400 (300)	50 ±
	联邦德国 *AV* 型标准井壁的外层井壁砌块		213 ± 3	200 ± 3	200 ± 3	300 ± 3 400 ± 3	40 ~ 50 ±
大型配筋砌块			1500 ~ 2000	按曲率半径推算	400	250 ~ 450	600 ~ 1000 ±

三、混凝土配料

(一)水泥

1. 水泥的种类及标号

水泥的种类有普通硅酸盐水泥、矿渣水泥、火山灰水泥等。配制 600 号以上的高标号混凝土时，可采用明矾石高强水泥和膨胀性明矾石水泥。

常用水泥标号有 300、400、500 及 600 号。

2. 常用水泥(表 6－3－4)

表 6－3－4　常用水泥

混凝土工程特点或所处环境条件		优先选用	可以使用	备注
普通混凝土(包括钢筋和预应力混凝土)	在普通气候环境中的混凝土	普通水泥	矿渣水泥，火山灰质水泥	
	在干燥环境中的混凝土	普通水泥	矿渣水泥	不宜使用火山灰质水泥
	在高湿度或永远处于水下的混凝土	矿渣水泥 火山灰水泥	普通水泥	
	厚大体积的混凝土	矿渣水泥 火山灰水泥	普通水泥	

混凝土工程特点或所处环境条件		优先选用	可以使用	备　注
喷射混凝土	在岩体稳定的无水工作面喷射混凝土	普通水泥，标号≥400号	矿渣水泥，标号≥400号	采用碱性速凝剂时不得用矾土水泥
	在特殊地质条件下喷射混凝土	普通水泥，标号≥500号	快硬水泥 高级水泥	
有特殊要求的混凝土	要求快硬高强≥300号混凝土	普通水泥 快硬水泥	高级水泥	
	500号或500号以上的混凝土	高级水泥	普通水泥 快硬水泥	
	严寒地区露天混凝土或水位升降范围的混凝土	普通水泥≥400号	矿渣水泥≥400号	不得使用火山灰水泥
	严寒地区水位升降区的混凝土	普通水泥≥500号		不得使用矿渣水泥，火山灰水泥
	有抗渗要求的混凝土	普通水泥，火山灰质水泥		不宜用矿渣水泥
	有耐磨要求的混凝土	普通水泥＞400号		不得使用火山灰质水泥

3．侵蚀性水作用下的混凝土，还应根据环境水对混凝土侵蚀性的判定方法及标准来选用水泥种类

环境水对混凝土的侵蚀性应分别按下列规定进行判定：

(1)结晶性侵蚀

1)当不具有下列环境地质条件中的①、②、③、⑤、⑥项时，一般判定为无结晶性侵蚀。

①地层中含有石膏(如纤维状、透镜状、碎屑状、层状及结核状石膏)；

②盐湖、盐田、盐渍化土和其他含盐(如岩盐，芒硝、光卤石、水氯美石等)地区以及海水和海水渗入的地区；

③硫化矿及煤矿矿水渗入的地区；

④强透水土层(细砂及颗粒大于细砂的土层)中有泥炭、淤泥及含有大量有机质土层内的水渗入；

⑤工业废水(酸性，含有大量硫酸盐，镁盐及铵盐)渗入的地区；

⑥使水矿化富集的地形、地貌条件。

2)在弱透水土层(粉砂及颗粒小于粉砂的土层)中，当水的 $pH>6.5$，并不具有下列任一物理风化条件时，应按表 6－3－5 进行判定。

①冻融交替，年冻融循环大于50次，最冷月月平均温度低于 $-8℃$；

②干湿交替、气候干旱、温差大；

表 6－3－5　结晶性侵蚀判定标准(1)

结晶性侵蚀指标 SO_4^{2-}(毫克/升)	结晶性侵蚀判定	宜采用的水泥品种
< 1500	无侵蚀	
1500 ~ 2500	弱侵蚀	普通硅酸盐水泥(水泥标号不低于 500 号,水灰比不大于 0.60,C_3A 小于 8%)
2500 ~ 5000	中等侵蚀	普通抗硫酸盐水泥
5000 ~ 20000	强侵蚀	高抗硫酸盐水泥

③混凝土一个侧面受有静水压力,最大作用水头与混凝土壁厚之比大于 5,另一个侧两暴露于大气之中;

④受水力冲刷、冰流机械磨蚀。

(3)当水的 $pH \leqslant 6.5$ 或具有上述任一物理风化条件时,应按表 6－3－6 进行判定。

表 6－3－6　结晶性侵蚀判定标准(2)

结晶性侵蚀指标 SO_4^{2-}(毫克/升)	结晶性侵蚀判定	宜采用的水泥品种
< 500	无侵蚀	
500 ~ 1500	弱侵蚀	普通硅酸盐水泥(水泥标号不低于 500 号,水灰比不大于 0.55,C_3A 小于 8%)
1500 ~ 2500	中等侵蚀	普通抗硫酸盐水泥
2500 ~ 10000	强侵蚀	高抗硫酸盐水泥

(2)分解性侵蚀

1)凡符合下列条件之一时的环境水,应判定为无分解性侵蚀。

①在强透水土层中,水的补给来源不具有上述"结晶性侵蚀"(1)中的③、④、⑤项;

②水的补给来源系含有碳酸盐类岩石、贝壳或钙质结核的土层中的水体;

③城镇及居民区(包括拟兴建的)无酸性的工业废水渗入。

2)在强透水土层中,分解性侵蚀应按表 6－3－7 进行判定。

表 6－3－7　分解性侵蚀判定标准

HCO_3^-（毫克当量/升）	分解性侵蚀指标 pH 值及侵蚀性 CO_2（毫克/升）	分解性侵蚀判定
<1.0	$pH \leqslant 6.5$ 或侵蚀性 $CO_2 > 15$	有侵蚀
1.0～3.0	$pH \leqslant 6.0$	有侵蚀
>3.0	$pH \leqslant 5.5$	有侵蚀

3）在弱透水土层中，当不具有上述“结晶性侵蚀”（1）中的③、⑤项时，应判定为无分解性侵蚀；当水的 $pH \leqslant 4.0$ 时，应判定为有分解性侵蚀。具有分解性侵蚀的水质，且具有上述物理风化条件之一时，宜采用不低于 500 号的水泥，当 $pH \leqslant 4.0$ 时，宜在混凝土表面涂敷沥青或采用其他防护措施。

（3）结晶分解复合性侵蚀

1）当不具有上述“结晶性侵蚀”（1）中的①、②、⑤、⑥项时，应判定为无结晶分解复合性侵蚀。

2）当水质具有结晶分解复合性侵蚀时，通常具有强结晶性侵蚀，当水中含有大量的镁盐和铵盐不属硫酸盐类时，其侵蚀性应进行专门试验和判定。

（二）细骨料与粗骨料

1. 细骨料（砂）（表 6－3－8）

表 6－3－8　混凝土用砂分类表

种　　类	按细度模量分类（M_k）	按平均粒径分类 C_d（毫米）
粗　砂	3.7～3.1	不小于 0.5
中　砂	3.0～2.3	0.35～0.5
细　砂	2.2～1.6	0.25～0.35
特细砂	1.5～0.7	<0.3

2. 粗骨料（卵石，碎石）

（三）混凝土用水

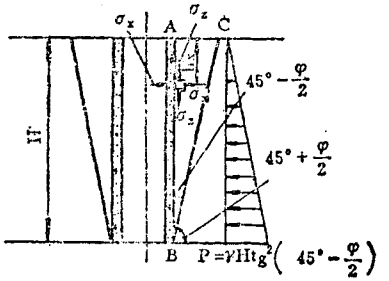
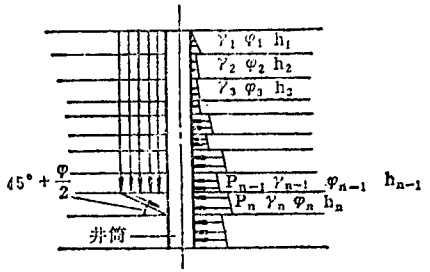
水质要求见表 6－3－9。

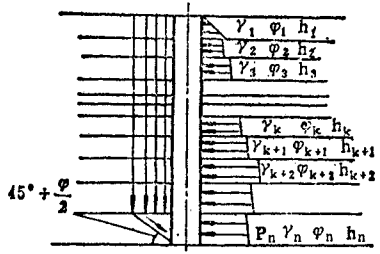
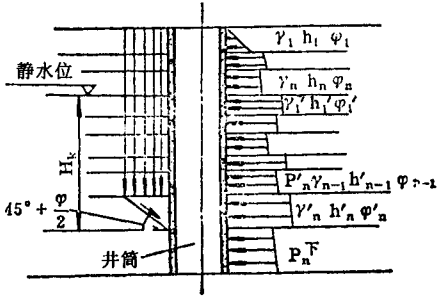
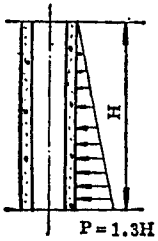
表 6－3－9　拌制混凝土用水标准

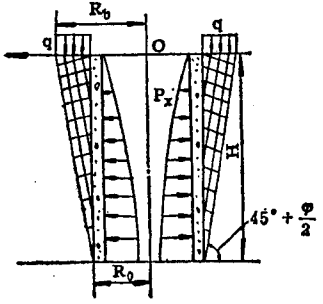
可用水	不可用水
一般饮用水均适用拌制混凝土，如用其他水则需符合下列规定： 1. $pH > 4$； 2. 硫酸盐含量按 SO_4 计算，不得超过水重 1%	1. 含盐量大于 3.5% 的海水； 2. 皮革厂、化工厂的废水； 3. 含糖水； 4. 含有油、酸及有机物的水

第二节 立井地压计算

表 6-3-10 立井地压计算

公式类型	公式名称	图示	公式	符号注释	基本假定	公式使用说明
平面挡土墙地压公式	普氏公式		$P=\gamma Htg^2(45°-\frac{\varphi}{2})$	P—作用于井壁上侧压力，吨/米^2； γ—土层的容重，吨/米^3； H—计算处深度，米； φ—土层内摩擦角度，φ 可查表 6-3-12	计算结果地压与深度成正比呈三角形分布规律，本式没有考虑地下水压力，只适用不含水或弱含水的单一岩层，由于地层分布不可能单一而使用不普遍	假设井壁为平面挡土墙，围岩为松散体。 粘结力 C=0
	秦氏公式		$P_n^{上}=(\gamma_1h_1+\gamma_2h_2+\cdots+\gamma_{n-1}h_{n-1})A_n$ $P_n^{下}=(\gamma_1h_1+\gamma_2h_2+\cdots+\gamma_{n-1}h_{n-1}+\gamma_nh_n)\times A_n$	$P_n^{上}$、$P_n^{下}$—第 n 层顶底板作用于井壁上的侧压力，吨/米^2； γ_1、γ_2、$\gamma_3\cdots\gamma_n$—各岩层容重，吨/米^3； h_1、$h_2\ldots h_n$—各岩层厚度，米； A_n—n 岩层的侧压力系数， $A_n=tg^2(45°-\frac{\varphi}{2})$，查表 6-3-13	本式未考虑地层中水压力，但给定了相应加大的侧压力系数，无形中等于考虑了地下水的影响。采用本式时，必须采用秦氏给定的侧压力系数，见表 6-3-11。 不含水或弱含水的砂层及粘土层普遍采用此式	在普氏公式基础上提出分层计算，假设井筒周围每岩层受破坏成滑动棱柱体而将其覆盖层视为均布荷载作用其上，此滑动棱柱体施于井壁的主动土压力即为井筒侧压力

公式类型	公式名称	图　示	公　式	符号注释	基本假定	公式使用说明
平面挡土墙地压公式	修正的秦氏公式		$P_n^{上}=(\gamma_{k+1}h_{k+1}+\gamma_{k+2}+h_{k+2}+\cdots\gamma_{n-1}h_{n-1})A_n$ $P_n^{下}=(\gamma_{k+1}h_{k+1}+\gamma_{k+2}+h_{k+2}+\cdots+\gamma_{n-1}\ h_{n-1}+\gamma_n h_n)A_n$	γ_{k+1}，$\gamma_{k+2}\cdots\gamma_n$—岩层容重，吨/米^3； h_{k+1}、$h_{k+2}\cdots h_n$—岩层厚度，米； $P_n^{上}$、$P_n^{下}$、A_n 同秦氏公式	适用于厚度较大且坚硬稳定的岩层覆盖下的弱岩层的地压计算	认为井筒中间有较厚的坚硬稳定岩层时，其坚硬岩层上部的岩层压力对深部岩层压力的影响可忽略不计
	悬浮理论（索柯洛夫）公式		$P_n^{上}=(\sum\gamma_n h_n+\sum\gamma'_{n-1}h'_{n-1})A_n+\gamma_0 H_{n-1}$ $P_n^{下}=(\sum\gamma_n h_n+\gamma_n'h'_n)A_n+\gamma_0 H_n$ $\gamma_n'=\frac{\Delta+\gamma_0}{1+\epsilon}$	$\sum\gamma_n h_n$—地下水位以上各土层容重与层厚乘积之总和，吨/米^2； $\sum\gamma_n' h_n'$—地下水位以下计算深度以上各土层悬浮容重与厚度乘积之总和，吨/米^2； γ_n'—土层悬浮容重，吨/米^3； Δ—土层干容重，吨/米^3； ϵ—土层孔隙比； γ_0—水容重，1 吨/米^3； H_{n-1}，H_n—第 n 层顶底部至地下水位高度（水头高度）米	本式理论上较严密，但参数多且欠准确（难以获得原状土的土工试验资料）使得计算结果与实际有一定误差，计算方法见第四章第九节	含水丰富的表土层，地压包括悬浮土体的土压力和静水压力两部分。其土压力仍按秦氏公式计算，但地下水饮以下的土层容重应采用悬浮容重 γ_0'，另外再加上静水压力。此式是根据秦氏公式演变过来的
	重液公式		$P=1.3\gamma_0 H$	γ_0—水容重，1 吨/米^3； $1.3\gamma_0$—水、土混合容重，吨/米^3； H—计算处深度，米； P—计算处地压，吨/米^2	当地下水位与地表接近，同时把土层的混合容重近似取 $1.3\gamma_0$，悬浮理论公式就可演变成重液公式，此式首先由德国人摩尔提出	此式安全可靠，在流砂层多的井筒普遍采用，近年来实测的数字表明，重液公式中地压与深度成正比增加呈三角形分布的规律与实测数字有差别，又提出了混合容重随深度增加而折减的公式： 当 H≤100 米时，$P=1.3\gamma_0 H$； 100 米<H≤200 米时，$P=1.2\gamma_0 H$； 200 米<H≤300 米时，$P=1.1\gamma_0 H$； H>300 米时，$P=1.0\gamma_0 H$ 由于实测不充分，且缺乏实践，没有普遍使用

公式类型	公式名称	图 示	公 式	符号注释	基本假定	公式使用说明
平面挡土墙地压公式	哈·林克公式		$P=P_w+P_g$ $P_w=\gamma_w\frac{h}{10}$ $P_g=\lambda_g(\gamma_{gw}\frac{h}{10}+\gamma_g\times\frac{H-h}{10}$ $\lambda_g=\frac{2(1-\sin\varphi)}{1+tg^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2})}$ $\gamma_{gw}=\gamma_g-(1-n_D)\gamma_w$	P_w—水压力，吨/米^2； P_g—土压力，吨/米^2； γ_{gw}—悬浮容重，吨/米^3； γ_w—水容重，吨/米^3； γ_g—土层干容重，吨/米^3； H—计算处高度，米； h—水头高度，米； n_p—土层孔隙比(与悬浮理论公式中的 ε 相同)； λ_g—林克侧压力系数； φ—土层内摩擦角，度	哈·林克公式与悬浮理论公式相似，他利用挡墙理论同时把水、土压力分算，但哈·林克推荐的侧压力系数 λ_g 比一般计算的 A_n 值小10%～30%	此式在西德表土层中广泛应用，因 λ_g 小于 A_n 值，所以计算结果比重液公式和悬浮理论公式要小；当 $\gamma_g=1.85$，$\gamma_w=1.0$，$n_p=0.3$ 则 $\lambda_g=0.26$(称为标准值相当 $\varphi=30^\circ$)φ 不为标准值时，φ 与 λ_g 关系如下： φ 20° 25° 30° 35° 40° 45° λ_g 0.43 0.33 0.25 0.18 0.13 0.09
圆筒形挡土墙地压公式	别列赞采夫公式		$P=\gamma R_0\frac{tg(45^\circ-\frac{\varphi}{2})}{\lambda-1}\times[1-(\frac{R_0}{R_b})^{\lambda-1}]$① $P_{max}=\gamma_0 R_0\frac{tg(45^\circ-\frac{\varphi}{2})}{\lambda-1}$ ② $P=\gamma R_0 tg(45^\circ-\frac{\varphi}{2})\times\ln\frac{R_b}{R_0}$ ③ $R_b=R_0+Htg(45^\circ+\frac{\varphi}{2})$ $\lambda=2tg\varphi tg(45^\circ+\frac{\varphi}{2}$	R_0—井筒掘进半径，米； R_b—土体滑动线与地面交点的横座标，米； λ—简化系数； γ—土容重，吨/米^3； ln—自然对数符号	别氏假定围土移动时形成空心滑动圆堆体，且土层的位移是向心的，故成楔形而相互挤压出现圆环效应，增加了土体自身的稳定性，并减少对井壁的压力，圆筒形挡土墙的理论比平面挡土墙进了一步，揭示了地压随深度不是直线增长的规律，见图 6－3－1	1. 当地面无荷载，土层不合水时用式①，取各土层的内摩擦角加权平均求出 φ 值，此式不适用 $\varphi=19^\circ30'$，即 $\lambda=1$； 2. 当 $\varphi=19^\circ30'$时，用③式求地压 P； 3. 当 $\varphi\neq19^\circ30'$且 H>300 米时，可用式②求 P，此时 P 为极限值； 4. 对于含水岩层，式①、②、③均应加静水压力； 5. 在 φ 为 19°～20°范围内加静水压力后地压很大，此式不适用

平面挡土墙公式计算的地压值与井筒深度成正比，而圆筒形挡土墙的地压值在浅部变化明显，随深度增加，地压增长率越来越小，在极限深度后（300 米左右）土压力达到最大值而几乎不再增加，如图 6－3－1 所示。

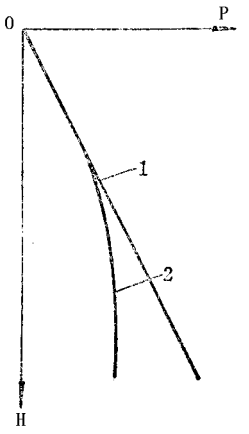


图 6－3－1　地压曲线

1—平面挡土墙地压曲线；2—圆筒形挡土墙地压曲线

由于地层性质千变万化，因此立井地压很难用某一公式计算得出。同一井筒必须根据不同水文地质情况、围岩性质及特征，采用符合各种岩层性质的公式计算。各类岩石的普氏系数 f 及其相应的 φ 值见有关内容。

表 6－3－11　秦氏水平侧压力系数 A_n 值

秦氏岩石分类	物理机械特性					水平侧压力系数	
	抗压强度 公斤/厘米^2	内摩擦角 φ		内阻力 φ①		最大～最小	平　均
		最小～最大	平　均	最小～最大	平　均		
流　砂		0～18°	9°			1.0～0.64	0.757
松散岩石		18°～26°34′	22°15′			0.64～0.5	0.526
软地层		26°34′～50°	38°15′			0.5～0.3	0.387
弱岩层	20～100			50°～70°	60°	0.3～0.031	0.164
中　硬	100～400			70°～80°	75°	0.031～0.008	0.017

① 围岩的内阻力角也可称内摩擦角。

表 6－3－12　松散土及结构土单位重量及内摩擦角数值

土的名称			干　土		润　土		湿　土	
			γ(吨/米³)	φ	γ(吨/米³)	φ	γ(吨/米³)	φ
松散土	砂壤土	松	1.4～1.6	22°	1.6～1.7	20°	1.8～1.85	15°
		中等密实	1.6～1.8	25°	1.7～1.9	22°	1.85～2.05	17°
		密实	1.8～1.95	27°	1.9～2.05	25°	2.05～2.15	18°
	粉砂,砂壤土	松	1.5～1.6	27°	1.7～1.8	22°	1.85～1.9	18°
		中等密实	1.6～1.8	30°	1.8～1.9	25°	1.9～2.0	20°
		密实	1.8～2.0	33°	1.9～2.05	25°	2.0～2.15	22°
	细　砂	松	1.5～1.6	27°	1.68～1.75	25°	1.85～1.9	22°
		中等密实	1.6～1.75	30°	1.75～1.9	27°	1.9～2.0	25°
		密实	1.75～1.9	33°	1.9～2.0	30°	2.0～2.1	28°
	中粒砂	松	1.6～1.7	30°	1.7～1.85	27°	1.9～2.0	25°
		中等密实	1.7～1.8	32°	1.85～1.95	30°	2.0～2.05	28°
		密实	1.8～1.95	33°	1.95～2.05	30°	2.05～2.15	28°
	粗砂、砾岩砂	松	1.85～1.9	33°	1.95～2.0	30°	2.05～2.10	30°
		中等密实	1.9～2.0	35°	2.0～2.1	33°	2.1～2.2	33°
		密实	2.0～2.1	37°	2.1～2.15	35°	2.2～2.25	35°
松散土	砾石卵石	中等密实	2.0～2.05	40°	2.05～2.1	40°	2.15～2.3	40°
		密实	2.05～2.1	40°	2.1～2.2	40°	2.2～2.25	40°
结构类土	粉状土	淤泥	1.5	30°	1.6	18°	1.8	10°
		淤泥土	1.5	30°	1.6	20°	1.8	12°
		黄土	1.5	—	1.6	30°	1.8	25°
		黄土状粘壤土	1.5	—	1.6	30°	1.8	25°
	有机土	泥炭土	1.0	30°	1.3	20°	1.6	15
		松种植土(泥土层)	1.5	40°	1.5	33°	—	—
		密实凝结种植土	1.7	40°	1.8	33°	—	—

表 6－3－13　计算地压时所用的侧压力系数 $A_n = tg^2(45° - \frac{\varphi}{2})$ 值

φ(度)	A_n	φ(度)	A_n	φ(度)	A_n	φ(度)	A_n	φ(度)	A_n	φ(度)	A_n
1	0.96	16	0.56	31	0.32	46	0.16	61	0.068	76	0.014
2	0.93	17	0.55	32	0.30	47	0.15	62	0.063	77	0.012
3	0.90	18	0.53	33	0.29	48	0.14	63	0.058	78	0.012
4	0.87	19	0.50	34	0.28	49	0.14	64	0.053	79	0.92×10^{-2}
5	0.84	20	0.49	35	0.27	50	0.13	65	0.048	80	0.77×10^{-2}
6	0.81	21	0.48	36	0.26	51	0.12	66	0.044	81	0.62×10^{-2}
7	0.78	22	0.45	37	0.25	52	0.12	67	0.040	82	0.49×10^{-2}
8	0.76	23	0.44	38	0.24	53	0.11	68	0.036	83	0.37×10^{-2}
9	0.73	24	0.42	39	0.23	54	0.10	69	0.034	84	0.27×10^{-2}
10	0.70	25	0.41	40	0.22	55	0.10	70	0.031	85	0.19×10^{-2}
11	0.68	26	0.40	41	0.21	56	0.096	71	0.029	86	0.12×10^{-2}
12	0.66	27	0.37	42	0.20	57	0.090	72	0.026	87	0.68×10^{-3}
13	0.63	28	0.36	43	0.18	58	0.084	73	0.023	88	0.23×10^{-3}
14	0.61	29	0.35	44	0.18	59	0.078	74	0.020	89	0.76×10^{-4}
15	0.59	30	0.34	45	0.17	60	0.073	75	0.017	90	0

永久地压实测数据，见表 6－3－14～17。

表 6－3－14　红阳一号副井永久地压值

岩　岩	土层性质	深　度（米）	实测地压（公斤/厘米^2）	为 $P=1.3\gamma_0 H$ 的百分率(%)
表土层	粗　砂	61	5.3	67
	亚砂土	67	7.2	83
	粘　土	74	7.1	74
	砂	80	7.7	74
	砂　砾	88	8.1	71
	粘　土	90	7.9	68
风化基岩	砂砾层	94	7.2	59
	砂砾层	100	6.8	52

表 6－3－15　兖州兴隆庄主井永久地压值

土层性质	垂　深（米）	实测地压（公斤/厘米^2）	为 $P=1.3\gamma_0 H$ 的百分率(%)
粘　土	88.5	10.6	95
砂　砾	118	10.4	68
细　砂	142.5	14.0	76
粘　土	151	14.0	71
砂质粘土	168.5	12.3	56

表 6－3－16　蔡园主井永久地压值

序　号	测点深度（米）	实测地压值（公斤/厘米^2）	为 $P=1.3\gamma_0 H$ 的百分率(%)
1	26	2.4	71
2	32	3.8	91
3	38	3.5	71
4	48	5.3	85
5	49.4	5.4	84
6	54	5.2	74
7	56	5.5	76
8	59	6.3	82
9	63.5	6.8	82
10	66	6.8	79
11	73.5	7.5	78
12	83	8.5	79
13	86	8.9	80
14	87	8.9	79

表 6－3－17　国内外部分矿井永久地压值

井筒名称	施工方法	最大实测深度（米）	实测地压（公斤/厘米^2）	为 $P=1.3\gamma_0 H$ 的百分率(%)
红阳一号副井	冻　结	90	7.9	68
兴隆庄主井	冻　结	168.5	12.3	56
蔡园主井	沉　井	87	8.9	79
九江大桥墩基沉井	沉　井	40	1.4～5.2	92～100
日本三池新开立井	沉　井	85	8.5	77
日本三池新港立井	沉　井	101	10.1	77
日本三池有明立井	沉　井	148	16.28～17.76	85～92
加拿大赤伯一号立井	冻　结	380	34.2	70
德国雅科巴立井	钻　井	412	45.32	85
红阳一号西风井	钻　井	93	11.16	92
各国钻井实践	钻　井		泥浆比重 1.1～1.2	85～92

第三节　井筒锚喷支护设计

竖井锚喷支护，目前还没有一套完善的定量的计算原理和方法，在实际设计中以煤炭工业部《煤矿井巷工程锚杆、喷浆、喷射混凝土支护设计试行规范、施工试行规程和质量标准》（以下简称‘试行规范’）为依据，参考一些计算及工程类比法进行设计。

一、使用条件及注意事项

国内煤炭及冶金系统的工程实践认为：

（1）遇有下列地质条件，锚喷支护应采取相应的有效措施和其他支护形式结合使用。

1）膨胀性岩体，如泥岩、泥质页岩等。

2）黄土、粘性土等第四系松散地层，不应在永久支护中应用。

3）地质构造复杂，地应力的区段及断层破碎带地层。

4）煤层。

（2）遇下列情况采用锚喷支护时，应慎重对待或者暂不使用。

1)能引起严重腐蚀的地质区段,特别是地下水对混凝土具有浸蚀性的含水岩层。

2)大面积淋水的井筒。

3)泥岩或泥质页岩,在施工中遇水膨胀松软的岩层。

4)采用冻结施工,在基岩冻结状态下施工的锚喷支护不能作为永久性支护。

5)大型矿井的锁口、马头门上下(不小于 5 米)、以及需要放置井内管路托座处。

6)矿井服务年限较长的大型矿井,井筒内装备设备较多,特别是罐笼井筒。

(3)锚喷支护,必须与光面爆破结合进行,且在爆破时应尽量减少炸药用量,在立井支护的设计中,一般应以锚为主的原则进行设计,辅以喷射混凝土、钢丝网混凝土及钢圈混凝土,直至在井筒围岩变形稳定之后,内套薄层混凝土井壁等辅助措施。

二、锚喷支护参数的选择

1. 围岩分类

参见有关章节。

2. 立井井筒锚喷支护参数(表 6 – 3 – 18)

3. 主要锚杆种类及适用范围

参见相关内容

4. 国内锚喷支护实例(表 6 – 3 – 19)

表 6 – 3 – 18　立井井筒锚喷支护参数　　(单位:毫米)

围岩分类		锚喷支护参数											
		净直径 > 4.5 米						净直径 < 4.5 米					
		岩层倾角 < 30°			岩层倾角 > 30°			岩层倾角 < 30°			岩层倾角 > 30°		
类别	名称	喷混凝土厚度	锚杆		喷混凝土厚度	锚杆		喷混凝土厚度	锚杆		喷混凝土厚度	锚杆	
			锚深	间距		锚深	间距		锚深	间距		锚深	间距
Ⅰ	稳定岩层	50 ~ 100			50 ~ 100			50			50		
Ⅱ	稳定性较好岩层	100 ~ 150			100 ~ 150	1460 ~ 1600	800 ~ 1000	100			100	1400	800 ~ 1000
Ⅲ	中等稳定岩层	100 ~ 150	1400 ~ 1600	800 ~ 1000	100 ~ 150	1600 ~ 800	600 ~ 800	100 ~ 150			100 ~ 150	1600	800 ~ 1000

围岩分类		锚喷支护参数											
		净直径 > 4.5 米						净直径 < 4.5 米					
		岩层倾角 < 30°			岩层倾角 > 30°			岩层倾角 < 30°			岩层倾角 > 30°		
Ⅳ	稳定性较差岩层	150 ~ 200	1600 ~ 1800	600 ~ 800	150 ~ 200	1600 ~ 1800	600 ~ 800	150 ~ 200	1400 ~ 1600	800 ~ 1000	150 ~ 200	1600 ~ 1800	600 ~ 800
					加金属网								
Ⅴ	不稳定岩层	150 ~ 200	1600 ~ 1800	600 ~ 800	200	1600 ~ 1800	600	150 ~ 200	1600 ~ 1800	600 ~ 800	150 ~ 200	1600 ~ 1800	600 ~ 800
		加金属网			加金属网			加金属网				加金属网	

表 6 – 3 – 19　锚喷支护井壁实例

施工矿井	矿井生产能力（万吨/年）	井筒有效直径（米）	井筒深度（米）	地质条件	衬砌结构	施工时间	备注
湖南青山立井	15	5.2	323	长兴灰岩和大冶灰岩，倾角 47° ~ 48° 岩石较稳定，但节理褶曲发育，f = 6 ~ 8，深 200 米处遇不整合破碎带 20 多米，涌水 < 1 吨/时	金属倒楔式锚杆，排间距 0.9 × 1.1 米，喷混凝土厚 100 ~ 150 毫米，每 10 米设壁圈一道	1969	
湖南恩口三号立井	15	5.5	321.5	同青山立井	金属倒楔式锚杆，排间距 0.9 × 1.1 米，喷混凝土厚 100 ~ 150 毫米，每 10 米设壁圈一道	1970	
湖南斗笠山黄港立井	21	5.5	268.63	同青山立井	90 米以下不设壁圈	1970	
湖南桥头二号井	20	5.5	293	全部为大冶灰岩，岩性倾角同青山立井	喷混凝土 100 ~ 150 毫米	1973	
湖南邓子山矿扩建主井	21	5.5	366	同青山立井	喷混凝土 100 ~ 150 毫米，每 10 米筑壁圈一道	1976	已施工 180 米
湖南洪山矿红旗主井		5.5	390	长兴灰岩和煤系岩层同青山立井	喷混凝土 150 毫米	1976	已施工 305 米

施工矿井	矿井生产能力（万吨/年）	井筒有效直径（米）	井筒深度（米）	地质条件	衬砌结构	施工时间	备注
广东梅田主井		4.2	180	花斑泥岩，中间夹二断层，厚 14 米破碎遇水膨胀，砂岩粉砂岩，中间夹 2、6 煤层，泥岩，炭质泥岩薄层构造复杂，不稳定，倾角 7 ~ 81°。涌水不大	1. 在中硬稳定岩层，喷混凝土 150 毫米 2. 松散稳定较差岩层，金属锚杆喷混凝土厚 150 毫米； 3. 断层破碎带，煤层中锚、喷、网 200 毫米	1975	该矿副井也用锚喷支护
浙江长广七号立井		5.6	926	井深 700 米以上，青龙灰岩坚硬稳定，以下为煤系粘土页岩，砂岩涌水 < 1 米^3/时	井筒喷混凝土厚 100 ~ 150 毫米（100 米以下）	1975	
平顶山大庄矿孙岭风井	60	3.5	282	岩石中等硬度，施工中见断层，有风化粘泥和片帮，80 米以下岩石结构松散，气孔多，易风化，涌水 1 米^3/时	井深 117 ~ 161 米，锚喷 100 毫米厚，243 ~ 282 米喷混凝土厚 150 毫米	1969	
邯邢陶庄二矿风井		4.2	276	砂岩砂页岩互层，f4 ~ 6 赋存稳定，层理节理发育，涌水 12.5 ~ 118 米^3/时	井深 72 米以下采用喷混凝土厚 150 毫米，共喷 188 米	1975	
邯邢陶庄二矿主井		5.5	418	同陶庄二矿风井	井深 56 米以下采用喷混凝土厚 200 毫米	1975	
邯邢陶庄二矿副井		6.5	438	同陶庄二矿风井	井深 70 米以下采用喷混凝土厚 150 毫米	1975	
焦作西风井	45	4.0	187	井筒涌水 250 米^3/时	井深 94 米以下采用喷混凝土厚 150 毫米	1975	

施工矿井	矿井生产能力（万吨/年）	井筒有效直径（米）	井筒深度（米）	地质条件	衬砌结构	施工时间	备注
内蒙乌达五虎山主风井		4.3	108	砂岩，砂页岩，煤七层，岩层倾角 6～10°，井筒涌水量 1.6～4.28 米³/时	金属倒楔式锚杆，排间距 0.8～1.0 锚孔注砂浆。锚杆加金属网，水泥砂浆 1∶3 厚 20～30 毫米	1966	井筒服务年限 107 年
南京梅山铁矿立井		5.5		石英安山岩，岩石坚硬，致密，裂隙一般 $f>8$	喷混凝土 100～150 毫米，局部地段用钢筋砂浆锚杆加固，共支护 80 米	1967	
南京梅山铁矿措施井		3.2	125	高岭土化安山岩，上部岩层强烈风化，裂隙发育，裂隙充填泥质物，下部裂隙中等发育，易风化，遇水膨胀 f3～4	喷混凝土平均厚 50 毫米	1965	
铜陵凤凰山铜矿混合井		5.5		大理岩和角砾岩，部分裂隙发育，局部地段破碎，f5～8	喷射混凝土加金属锚杆，喷厚 50～100 毫米每 10 米设壁圈	1966	
钢陵铜山新大井		5.5		井筒穿过风化闪长岩，大理岩 233 米，花岗闪长岩，稳定性差，揭露后易风化涌水极小	采用锚杆 1.2×1.0 米排间距，喷混凝土厚 150 毫米加金属网	1975	
辽宁红透山铜矿混合井		5.5	220	黑云母片麻岩，岩石较致密稳定，抗水性能较好，无涌水	喷混凝土厚 100～150 毫米	1969	掘进采用光爆

施工矿井	矿井生产能力（万吨/年）	井筒有效直径（米）	井筒深度（米）	地质条件	衬砌结构	施工时间	备注
烟台香夼铅锌矿方井		2.36×3.3	154	岩石为花岗岩，节理中等 $f=10$	喷混凝土厚 30～50 毫米，局部地段加楔缝式锚杆金属网	1970	
山西东风矿罐笼井筒		4.0		岩层稳固 $f>6$	喷射混凝土厚 100～150 毫米		支护 200 米
山东招远矿方井		2.5×3.3		石英岩花岗岩，岩层比较稳定	喷混凝土厚 30～120 毫米		支护 50 米
焦作王封矿排水井	130	4.3	170	井筒通过采煤塌陷区，煤层采空 7 米厚粉砂岩，石英砂岩、泥岩 $f=3\sim4$	井深 40 米以下采用喷混凝土厚 200 毫米	1977	已施工 83 米
淮南潘集一号主井		净 7.5 毛 8.5	637	一般涌水 30 米^3/时	370 米起～598 米，喷混凝土厚 50～100 毫米，段高 156 米	1976	喷混凝土临时支护
淮南潘集一号风井		净 ϕ6.5 毛 ϕ7.5	407	一般涌水 30 米^3/时	最大段高 196 米，喷混凝土厚 50～100 毫米		喷混凝土临时支护
焦作大陆		6.0	315	表土冻结施工，红土夹砾石层	段高 19 米，喷混凝土厚 50～100 毫米	1977	喷混凝土临时支护

三、立井锚喷支护计算

1.地压

含泥质胶结的岩层，按塑性岩层静水压力作用考虑

$$P = \gamma_{岩} \cdot H \tag{3-1}$$

稳定或中等稳定的坚硬岩层按弹性应力状态考虑

$$P = \gamma_{岩}\ H \cdot K_0$$

式中　$\gamma_{岩}$——岩石容重，吨/米^3；

H——计算深度，米；

K_0——静止侧压力系数，取 0.24～0.4，一般约为 0.3。

2. 岩体容许强度及经锚杆加固后的岩体强度

(1)岩体容许抗压强度

$$〔R_C〕= \overline{R}_C \cdot K_e \tag{3-2}$$

式中　〔R_C〕——岩体容许抗压强度，公斤/厘米^2；

$\overline{R}_C$——岩石单向极限平均抗压强度，公斤/厘米^2；

K_e——自然条件影响系数，

$$K_e = K_c \cdot K_p \cdot \xi;$$

K_e——岩体结构削弱系数，见表 6－3－20。

ξ——长时强度影响系数；

K_p——岩石含水软化系数。

表 6－3－20　K_e 值(全苏矿山测量科学研究院提出近似值)

岩石削弱程度	层厚(米)	节理组数量	节理组间距	系数 K_e
未削弱的岩石	1	1	$>R_1$①	1
中等削弱	0.5～1	≤2	≥0.5R_1	0.7
严重削弱	0.5	3	≥0.5R_1	0.3
极度削弱	～	≥3	≥0.5R_1	无法检查其稳定性

① R_1 井筒半径。

在缺乏资料情况下可取 $K_e = 0.5 \sim 0.6$。

对脆性破坏的岩石，如花岗岩、石英岩、砂岩等 ξ 可取 1～0.7，塑性岩石，如砂质的和含炭质的页岩以及中等坚固的石灰岩，ξ 可取 0.7～0.5。

岩石含水软化系数 K_P 可取下列近似数值：

石英砂质一类岩石 KP 取 0.94～0.96；

石灰岩类 K_P 取 0.15～0.5；

泥质页岩 K_P 取 0.45～0.6。

(2)锚杆加固后的岩体强度估算

$$〔\sigma_{kn}〕=1.48〔R_c〕V_T^{0.27} \tag{3-3}$$

$$V_T=\frac{T}{abh} \tag{3-4}$$

式中　$〔\sigma_{kn}〕$——岩石与锚杆支护体系的容许应力，公斤/厘米^2；

V_T——强度容积系数；

T——锚杆初始拉力，公斤；

h——锚杆有效长度，厘米；

a——锚杆水平间距，厘米；

b——锚杆垂直间距，厘米。

(3)根据岩体试验的包洛线确定岩体的强度

在具备岩体包洛线(图 6－3－2)的情况下，可用公式 3－6 确定锚杆加固提高以后的岩体强度。

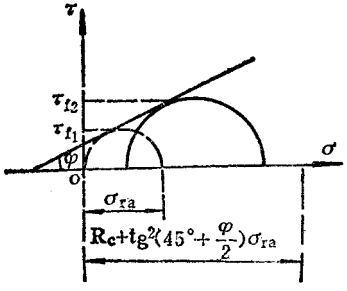


图 6－3－2　莫尔包洛线

假设采用锚杆支护之后，井筒周围形成一个由锚杆加固之后的承载环(图 6－3－3)。加固环内锚杆产生的径向应力

$$\sigma_{ra}=\frac{T}{ab} \tag{3-5}$$

式中　σ_{ra}——加固环内锚杆产生的径向应力，公斤/厘米^2；

T——锚杆拉力，公斤。

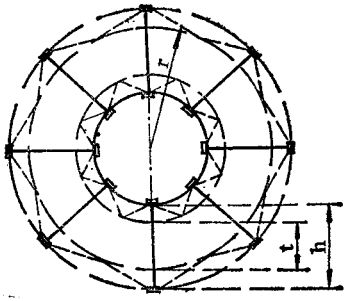


图 6－3－3　锚杆加固带承载环

从莫尔包络线(图 6－3－2)中可以看出,承载环中的岩石强度得到提高。

$$\sigma_\theta = R_c + tg^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)\cdot\frac{T}{ba} \tag{3-6}$$

式中　σ_θ——加固后的岩石强度,公斤/厘米^2;

R_c——岩石单轴试验抗压强度,公斤/厘米^2;

φ——岩石的内摩擦角,度。

加固后的围岩容许抗压强度

$$[\sigma_\theta] = \frac{\sigma_\theta}{K} \tag{3-7}$$

式中　$[\sigma_\theta]$——加固后的围岩容许抗压强度,公斤/厘米^2;

K——安全系数,$K = 1.5 \sim 2.0$。

锚杆加固之后的环形均匀压缩带厚度 t 值,可根据锚杆长度与锚间距比 t 值的关系从表 6－3－21 查得,或者根据作图确定。内侧锚杆加固岩石的压力锥面倾角近似按 45°。

表 6－3－21　均匀压缩带 t 与锚杆长度的比值

锚杆长度/锚杆间距	3	2	1.33
均匀压缩带厚度 t(最小值)/(锚杆长度)	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{10}$

3. 锚喷支护计算方法

(1)巷道周围岩体进入塑性状态的计算方法

岩体进入塑性状态,锚喷支护的计算先应确定塑性变形区的宽度,选择锚喷支护的参数,建立岩石锚杆体系的支承能力与外荷载之间的平衡关系。塑性变形区的宽度可以按公式(3－8)计算,式中卡氏系数(非弹性变形范围系数,计算公式从略)直接从表 6－3

– 22 中查用。

表 6 – 3 – 22　卡察乌洛夫系数

从地表起计算深度（米）	不同$\frac{R_c}{R_t}$时，卡氏系数 b_L^0							
	粘土质页岩						砂　岩	
	$\frac{200}{40}$	$\frac{300}{50}$	$\frac{400}{80}$	$\frac{470}{80}$	$\frac{500}{70}$	$\frac{600}{80}$	$\frac{800}{100}$	$\frac{1000}{200}$
400	0.3							
500	0.38	0.23						
600	0.46	0.23	0.20					
700	0.54	0.32	0.24	0.20				
800	0.60	0.36	0.28	0.23	0.20			
1000	0.70	0.44	0.36	0.30	0.25	0.22		
1200	0.78	0.50	0.44	0.35	0.29	0.26	0.20	
1500	0.90	0.57	0.54	0.44	0.35	0.31	0.24	0.19

注 当 $b_L^0 \leqslant 0.2$ 时，取 $b_L^0 = 0.20$。

$$b_L = R_1 b_L^0 \tag{3-8}$$

式中　b_L ——塑性变形带宽度，厘米；

R_1 ——巷道掘进半径，厘米；

b_L^0 ——卡氏系数，查表 6 – 3 – 22。

作用在塑性变形区的荷载

$$P_{max} = \frac{\gamma_{岩}\ b_L}{2\,tg\varphi K_e} \tag{3-9}$$

式中　P_{max} ——作用于塑性区荷载，公斤/厘米^2；

$\gamma_{岩}$ ——岩石容重，吨/米^3；

K_e ——自然条件影响系数；

φ ——岩石的内摩擦角，度，

$$tg\varphi = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_c}{R_t} - 3}\ ;$$

R_c ——岩石单向抗压强度，公斤/厘米^2；

R_t——岩石抗拉强度，公斤/厘米^2。

由岩石锚杆支护体系容许承受的应力$[\sigma_{kn}]$得出的岩石锚杆支护体系的支承能力 P'

$$P' = 0.25[\sigma_{kn}]\left[1 - \left(\frac{R_B}{R_B + h_0}\right)^2\right] \tag{3-10}$$

式中　h_0——岩石锚杆体系的工作厚度，厘米，

$$h_0 = h - 2r'$$

h——锚杆有效长度，厘米；

r'——锚杆之间岩石拱高度，一般取 0.2～0.5 米；

$R_B = R_1 + r'$。

支护体系的支承能力必须大于外荷载，即满足下式：

$$P_{max} \leqslant P' \tag{3-11}$$

计算时，可先假定锚杆长度及锚杆间距，确定强度容积系数 V，算出(σ_{kn})，核算公式(3－11)直到满足为止。

(2)把加固后的岩体当作均匀受压的支承环进行计算

设支承环的外半径为 R，支承厚度为 t，地压为 P(图 6－3－3)，加固带内的切向力为 N

$$N = PR \tag{3-12}$$

式中　R——支承环外半径，厘米，

$$R = \frac{a}{2} + t + R_1;$$

R_1——掘进半径，厘米；

a——锚杆间的垂直间距，厘米。

加固带内的切向应力

$$\sigma'_\theta = \frac{N}{t} \tag{3-13}$$

再选定锚杆长度，布置间距 a、b，由表 6－3－21 查出均匀压缩带宽度 t 的比值，根据提供的岩体力学参数 R_c 及 φ，计算出$[\sigma_\theta]$，根据安全条件校核并满足下式要求

$$\sigma'_\theta \leqslant [\sigma_\theta] \tag{3-14}$$

4. 锚喷支护计算算例

(1)围岩计算参数的选择

井筒周围塑性变形区的岩体是经过开拓巷道之后，受重新分布的应力破坏了的岩体。它的强度与单轴试验获得的岩块强度以及原岩体强度都有区别，岩体强度除按前述

全苏矿山测量科学研究院提出的自然影响系数 K_e 调整的方法之外，还有许多经验估计的方式。在国内水工及建工系统施工的地下工程中，根据硐室岩体试验积累的资料，对于坚硬岩石、整体性良好的岩体，用岩石的许可抗压强度来表示：

无裂隙的坚硬围岩取〔R_c〕$=0.6R_c$

有裂隙的坚硬围岩取〔R_c〕$=0.5R_c$

在具备弹性波速测试资料时，因为岩体中裂隙愈多，弹性波传播速度相应减低，因此，可以用弹性波速在岩石试件和岩体中的平方比来表示：

$$K_1=\left(\frac{V}{\mathrm{v}}\right)^2$$

式中　$\mathrm{K_1}$——龟裂系数，一般来说，完整性岩体　$K_1>0.75$，

块状岩体　$K_1=0.45\sim0.75$，

碎裂状岩体　$K_1<0.45$；

V——岩体中弹性波传播速度，米/秒；

v——岩石试件中弹性波传播速度，米/秒。

标准岩体抗压强度表示为：

$$R_{MC}=K_1R_c$$

〔R_c〕以及 R_{MC} 可以作为估计围岩是否处于稳定状态的依据，埋藏不很深的坚硬岩层，整体性良好，围岩稳定的条件是：

$$\sigma_\theta=\sigma_{max}=\frac{2\mu}{1-\mu}\gamma_{岩}\quad H<〔R_c〕$$

式中　σ_θ——井筒掘进半径位置围岩中的切向应力，公斤/厘米^2；

μ——泊松系数，一般取 $0.2\sim0.3$，软弱岩层取 0.5。

稳定状态的岩体，考虑安全系数之后，锚杆支护参数可以按构造要求设计。

塑性区中的松动围岩，岩体的凝聚力 C 和内摩擦系数 φ 降低很多，可按经验选用。

1）内摩擦角：

岩体裂隙无充填时

$$\varphi_0=0.9\varphi$$

岩体裂隙有泥质充填物时

$$\varphi_0=0.7\varphi$$

2）内聚力

$$C_0=(0.2\sim0.25)C，\quad（C\text{ 为岩体试验的凝聚力}）$$

含水岩层或井筒支护回填不密实时，应不考虑凝聚力的作用，$C_0 = 0$，这时支护方式应当重新选择，或按注浆之后的围岩考虑。

采用岩石锚杆支护体系的容许应力〔σ_{kn}〕进行支承环的计算，对中等以下强度的岩层（例如泥质岩层）计算比较方便，但这时〔R_c〕应当取用塑性带中松动以后的岩体容许强度代入公式（3－13）中，强度数值可参照表 6－3－23 选用，表中数值与毛石砂浆砌体强度相近。

（2）计算例题

表 6－3－23　塑性带中松动围岩容许强度

岩石强度（公斤/厘米²）	岩体凝聚力（公斤/厘米²）						
	100	75	50	25	10	4	2
300	33	30	28	25	22	18	17
200	27	25	22	18	16	14	13
150	22	20	18	15	13	12	10

〔例 3－1〕井筒净直径 7 米，泥质页岩的抗压强度 $R_c = 200$ 公斤/厘米²、抗拉强度 $R_t = 40$ 公斤/厘米²、最小凝聚力 $C = 2$ 公斤/厘米²、松动范围内的岩石内摩擦角 $\varphi = 30°$、岩石容重 $\gamma_{岩} = 2.5$ 吨/米³、最小岩块尺寸 0.6 米、岩层倾角 $< 30°$、井深 700 米。

塑性变形带宽度

$$b_L = R_1 \cdot b_L^0 = (3.5 + 0.15) \times 0.54 = 1.971 \text{ 米}$$

作用于塑性变形带上的荷载

$$P_{max} = \frac{\gamma_{岩} \cdot b_L}{2 \cdot tg\varphi \cdot K_e} = \frac{2.5 \times 1.971}{2 \times 0.58 \times 0.5} = 8.496 \text{ 吨/米}^2$$

由表 6－3－19 参考选定喷混凝土层厚度 150 毫米，锚杆长度应大于 0.8 倍的塑性带宽度，且锚杆间距不大于 1.5～2.0 倍最小岩块尺寸，并小于锚杆长度的一半。

选择锚杆长度 $h = 1.6$ 米，间距 $a = 0.8$ 米单根锚杆锚固力大于 4 吨，锚杆加固后的岩体强度

$$〔\sigma_{kn}〕 = 1.4〔R_c〕 = 1.48〔R_c〕 V_T^{0.27}$$

$$V_T^{0.27} = \left(\frac{T}{a \cdot b \cdot h}\right)^{0.27} = \left(\frac{4}{0.8 \times 0.8 \times 1.6}\right)^{0.27}$$

$$= 1.44$$

查 6－3－23 表，$C=2$ 公斤/厘米^2，$R_c=200$ 公斤/厘米^2，$[R_c]=13$ 公斤/厘米^2

$$[\sigma_{kn}]=1.48\times13\times1.44=27.79 \text{ 公斤/厘米}^2$$

r'取 0.3 米　$h_0=h-2r'=1.6-2\times0.3=1.0$ 米

$$P'=0.25[\sigma_{kn}]\cdot\left[1-\left(\frac{R_B}{R_B+h_0}\right)^2\right]$$

$$P'=0.25\times27.79\left[1-\left(\frac{3.65+0.3}{3.65+0.3+1.6-2\times0.3}\right)^2\right]$$

〔例 3－2〕井筒净直径 7 米，岩石强度 $R_c=600$ 公斤/厘米^3，内摩擦角 $\varphi=40^\circ$，岩层倾角 $<30^\circ$，岩石容重 $\gamma_{岩}=2.5$ 吨/米^2，井深 600 米。

选择锚杆长度 $h=1.6$ 米锚杆布置 0.8 米 × 0.8 米，锚杆直径 ϕ25。

压缩带宽度　$t=\frac{1}{3}\times1.6=0.533$ 米

支承环外半径　$R=\frac{a}{2}+t+R_1$

$$=\frac{0.8}{2}+0.533+3.5+0.15$$

$$=4.583 \text{ 米}$$

加固带内的切向力　$N=PR=\gamma_{岩}\ H\cdot R\cdot K$。

$$N=2.5\times600\times4.583\times0.25=1718.6 \text{ 吨}$$

加固带内的切向应力

$$\sigma'_\theta=\frac{N}{t}=\frac{1718.6}{0.533}=3224.4 \text{ 吨/米}^2$$

支承环加固后岩体的强度

$$\sigma_\theta=R_C+tg^2\left(45^\circ+\frac{\varphi}{2}\right)\frac{T}{b\cdot a}$$

$$=6000+tg^2\left(45^\circ+\frac{40^\circ}{2}\right)\cdot\frac{4.9\times2.4}{0.8\times0.8}=6084 \text{ 吨/米}^2$$

上式中锚杆拉力 $T=ag\cdot R_g$，锚杆直径 25 毫米截面积 $ag=4.9$ 厘米^2，锚杆屈服极限强度 $Rg=2.4$ 吨/厘米^2

安全系数取用 1.5～2

$$\frac{\sigma_\theta}{1.5\sim2}>\sigma' \text{（稳定）}$$

若用 φ_0 及 $[R_c]$ 进行计算，锚杆容许应力 $[T]$ 取安全系数 2～3，$[T]=4$ 吨/根则

$$\sigma_{\theta 0} = 〔R_C〕 + tg^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \frac{〔T〕}{0.8 \times 0.8}$$

$$= 6000 \times 0.6 + tg^2\left(45° + \frac{40 \times 0.9}{2}\right) \cdot \frac{4}{0.8 \times 0.8}$$

$$= 3624 \text{ 吨/米}^2 > 3224.4 \text{（稳定）}$$

第四章　斜井井筒设计

第一节　设计的主要原则

1. 井筒位置选择时，井口应避开汇水口滑坡和危崖；井筒穿过的地层应尽量避开流砂层、强含水层、岩溶和采空区等工程地质不良地段。

2. 根据井筒所处的地质条件、围岩性质、井筒用途及服务年限选择断面形状、支护材料和支护方式。

3. 井筒断面布置应考虑以下原则：

(1)符合《煤矿安全规程》、《煤炭工业矿井设计规范》、《煤矿矿井斜井井筒及硐室设计规范》中开采、运输、通风、斜巷管线布置和人行安全规定的要求，满足施工需要；

(2)当提升容器发生掉道或跑车事故时，对井筒中各种管线或其它设备的破坏应减少到最低程度；斜井用串车提升时井巷内的安全装置应符合《煤矿安全规程》第 345 条规定；

(3)有利于井筒检修、维护、清扫和人员通行安全；

(4)合理使用断面空间，减少井筒工程量。

4. 上下人员的井筒，垂深超过 50 m 时，必须用机械运送人员的设备。

5. 设计应从国情及地质条件出发，因地制宜地采用新技术、新工艺、新设备、新材料、做到安全适用、技术先进、经济合理。

6. 各种提升方式的斜井，其倾角一般规定为：串车提升不大于 25°；箕斗提升为 25° ~ 35°；胶带输送机提升应根据矿井开拓和设备性能确定；采用其它辅助运输设备提升的斜

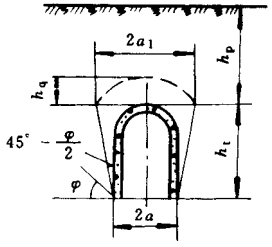
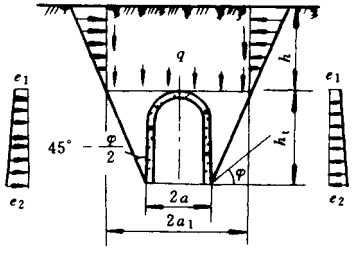
井井筒装备如单轨吊车、齿轨车、卡轨车、胶套轮车和无轨胶轮车应参照相关的布置要求同井下大巷和采区运输设备配套，形成连续运输系统，井筒倾角应根据矿井开拓布置及所选提升运输设备性能确定。

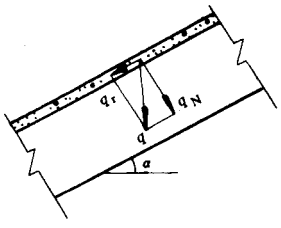
7. 箕斗提升井或装有胶带输送机的井筒不应兼作风井，如果兼作风井使用风速应符合《煤矿安全规程》、《煤炭工业矿井设计规范》中的通风规定。

8. 需延深的井筒，应预留 20～30 m 的延深长度。

第二节　斜井井筒浅部地压估算

表 6－4－1　斜井井筒浅部地压估算

计算内容	图　示	公　式	符号注释	说　明
确定巷道浅埋和深埋分界深度		$h_p \leqslant (2.0 \sim 2.5)h_q$ $h_q = \frac{a}{f} = \frac{a_1}{tan\varphi}$ 或 $h_q = \frac{a + h_1 tan\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right)}{tan\varphi}$	h_p—浅埋和深埋巷道分界深度，m； h_q—深埋巷道垂直荷载计算高度（压力拱高），m； a—巷道掘进宽度之半，m； a_1—压力拱跨度之半，m； f—普氏系数， h_t—巷道掘进高度，m φ—围岩内摩擦角度； h—巷道埋深（巷道顶板至地面距离）m； q—沿巷道轴线每米顶压值，kN/m^2； γ—围岩容重，kN/m^3；e、e_1、e_2—沿巷道轴线每米侧压值，N/m；	1. 左式成立时巷道为浅埋，否则巷道为深埋； 2. 对软岩石取 $h_p \leqslant 2.5h_q$ 对硬岩石取 $h_p \leqslant 2.0h_q$； 3. 巷道为浅埋时，不能形成压力拱
浅部巷道地压估算		顶压 ①$q = \gamma h\left[1 - \frac{h}{2a_1} \times tan^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) tan\varphi\right]$ ②$q = \gamma h$ 侧压 ①$e_1 = \gamma h \times tan^2\left(45° \times \frac{\varphi}{2}\right)$ ②$e_2 = \gamma(h_t + h) \times tan^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right)$ ③$e = \gamma\left(h + \frac{h_t}{2}\right) \times tan^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right)$		1. 顶压公式①考虑了滑面的阻力； 2. 为了偏于安全顶压公式②忽略滑面阻力； 3. 由于侧压与顶压相比其值很小一般忽略不计，只有当围岩很软才计算，为简化计算可用侧压公式③求其平均值

计算内容	图　示	公　式	符号注释	说　明
斜井巷道浅部地压估算		$q_N = q\cos\alpha$ $q_r = q\sin\alpha$	q_N—垂直于斜井井筒纵轴的压力，kN/m^2； q_r—平行于斜井井筒纵轴的压力，N/m； α—斜井井筒倾角	1. 当 $\alpha > 80°$ 时按立井计算地压，$\alpha < 60°$ 时按平硐计算地压，其倾角按实际倾角计算，$\alpha = 60° \sim 80°$ 时按倾角等于 $60°$ 的情况计算； 2. 斜井井筒侧压力按平巷侧压力计算

第三节　斜井井筒浅部支护计算

一、支护要求

1. 斜井井口至坚硬岩层之间，必须采用砌碹支护，且碹体进入坚硬岩层内的垂深不得小于 5 m。

2. 在地震区，当设计烈度为 8、9 度时处于表土段的新建斜井井筒，在地表以下垂深 20 m 以内（当表土段厚度小于 15 m，还应包括筑进基岩 5 m 一段），必须采用钢筋混凝土结构；当表土段在地表以下 20 m 内夹有饱和砂土层时，对设计烈度为 7 度及以上的斜井井筒，在地表以下垂深 30 m 以内（当表土段厚度小于 25 m，还应包括筑进基岩 5 m 的一段），必须采用配双层钢筋的钢筋混凝土结构。

3. 新建的斜井井筒浅部支护一般不设伸缩缝，需要留伸缩缝时，伸缩缝最大间距应符合“混凝土结构设计规范”的要求；软硬岩层分界地段及软岩层内巷道跨度变大处，应设置沉降缝。

4. 井筒支护应结合具体围岩条件优先考虑锚喷支护。按《锚杆喷射混凝土支护技术规范》的规定，当井筒在 Ⅰ、Ⅱ 类围岩中，宜采用喷射混凝土支护；在 Ⅲ、Ⅳ 类围岩中，宜采用锚杆加喷射混凝土支护；在 Ⅴ 类围岩中，宜采用锚杆加钢筋网喷射混凝土支护。

采用喷射混凝土支护时，应设墙脚，其深度不得小于 100 mm。

5. 对不宜锚喷支护，但服务年限长，且不受动压影响的井筒，宜采用砌碹支护。

6. 选用梯形断面的井筒，应采用金属或钢筋混凝土梯形支架支护。但井筒为串车或箕斗提升的主井时，不宜采用这种支护形式。

7. 穿过软岩或断层带的井筒，宜采用锚喷（或挂网锚喷）和混凝土（或钢筋混凝）砌碹联合支护。

8. 底板松软、破碎或底鼓的井筒，宜采用锚杆、底梁、注浆或底拱等支护形式进行底板支护。

9. 支护背后的空隙必须回填密实。

10. 支护材料应符合强度、耐久性等要求，同时必须重视其抗冻、抗渗和抗腐蚀性。支护材料的强度等级不应低于表 6－4－2 中的数值。

表 6－4－2　支护材料强度等级

材料种类	水泥砂浆		混凝土					料石
支护方法	喷射	砌筑	喷射	混凝土		钢筋混凝土		砌筑
				现浇	预制砌块	现浇	装配	
拱圈及边墙	*M*15	*M*7.5—*M*15	*C*15～*C*20	*C*20	*MU*20	*C*20	*C*25	*MU*30

二、支护厚度的确定

1. 锚喷支护

锚喷支护参数，应根据围岩的稳定性、井筒断面跨度、服务年限等因素，采用工程类比法和锚喷支护类型确定。

2. 型钢支护

型钢支护类型与参数应根据井筒断面跨度、围岩类别、顶底板和两帮移近量、支护强度、服务年限等因素确定。

3. 砌碹支护

砌碹支护类型与参数应根据围岩坚固性分类、支护材料的具体要求、井筒断面尺寸围岩破碎程度、地压大小、涌水量大小等因素确定。

各种支护类型的支护参数，应符合《煤矿矿井巷道断面及交岔点设计规范》的规定。

第五章　斜井井筒装备布置

第一节　轨　　道

一、轨型选择

斜井井筒内轨道应根据提升方式、提升容器的类型和提升速度等因素而选择不同的轨型。设计时可参考表 6－5－1 中的经验数据选定。

表 6－5－1　轨型选择

提升容器类型及提升速度		钢轨型号(公斤/米)
箕　斗	载重 6 吨及 6 吨以上	38、43
	载重 4 吨及 4 吨以下	24
矿　车	载重 3 吨,车速大于 3.5 米/秒	24
	载重 3 吨,车速小于 3.5 米/秒	18、24
	载重 1 吨,车速大于 3.5 米/秒	18、24
	载重 1 吨,车速小于 3.5 米/秒	15、18

二、道床

斜井井筒道床可分为道碴道床和固定道床两种。

1. 道碴道床

道碴道床施工简单、投资少,但线路质量较差,维修量大,适用于提升量不大,提升速度在 3.5 米/秒以下、坡度不大于 10°的斜井井筒。

一吨标准矿车串车斜井井筒通用设计中，轨道铺设形式如图 6－5－1 所示，没有垫板时为图中括号中的尺寸数字。

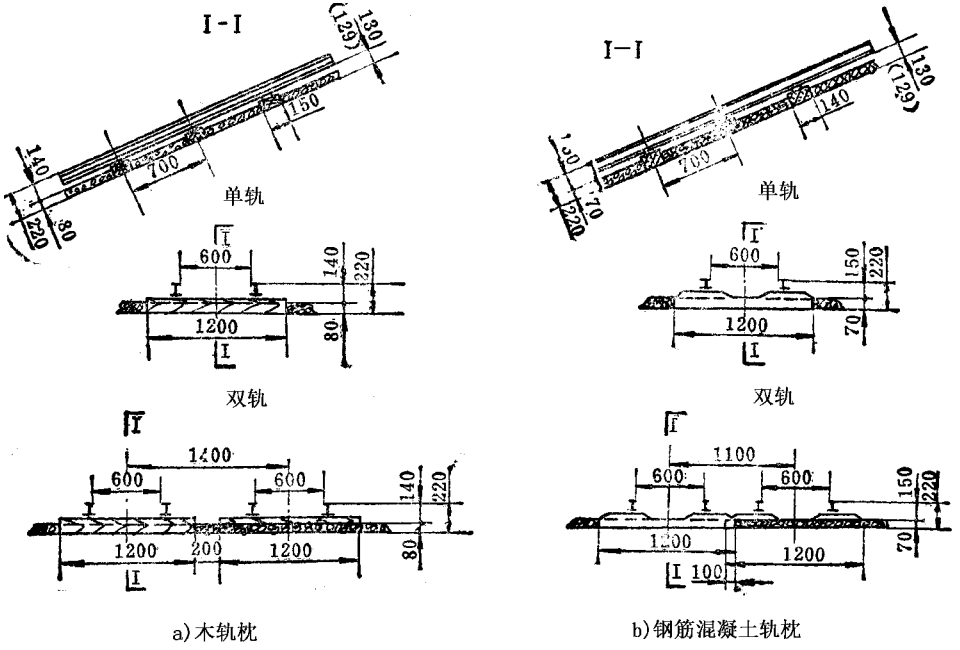


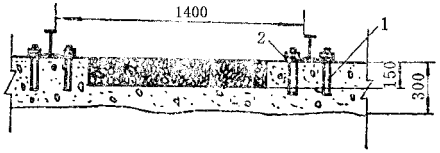
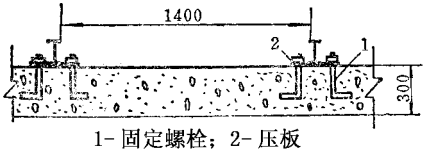
图 6－5－1　轨道铺设(600 毫米轨距)

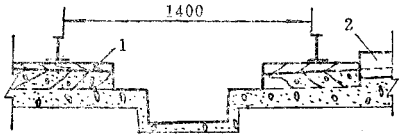
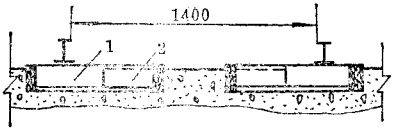
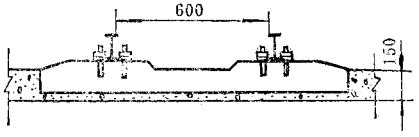
2. 固定道床

固定道床初期工程量大、施工复杂，但线路稳定、车辆运行平稳安全、维护工作量较小，故障少，能适用于大运量、高速度和坡度较大的斜井中。

固定道床的类型、结构见表 6－5－2 及图 6－5－2～图 6－5－5。

表 6－5－2　固定道床类型(单位 毫米)

类　型	图　示	优缺点	使用矿井
预埋螺栓式	 1－固定螺栓；2－压板  1－固定螺栓；2－压板	1. 消耗钢材少； 2. 施工较复杂； 3. 维修更换困难	宁夏石炭井一号井

	类　型	图　示	优缺点	使用矿井
预埋轨枕式	短木枕	 1- 木轨枕；2- 人行台阶	1. 施工较简单； 2. 维修量大	内蒙古平庄古山三井
	预制钢筋混凝土短枕	 1- 预制钢筋混凝土轨枕； 2- 预制混凝土填块	1. 施工简单； 2. 维修量小； 3. 消耗钢材较多	河南安阳龙山斜井
	预制钢筋混凝土长枕			山西古交镇城底矿井

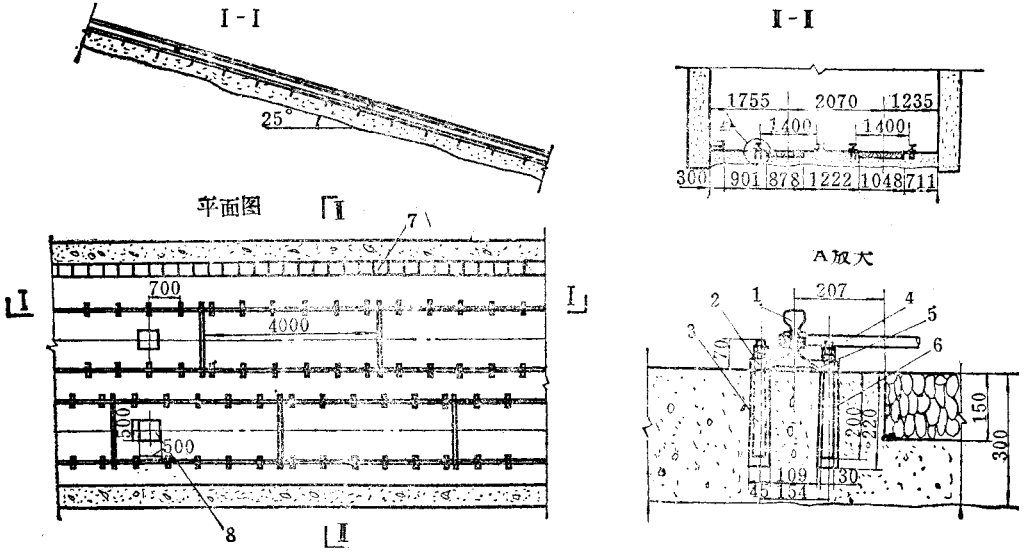


图 6－5－2　宁夏石炭井一号井固定道床

1—钢轨(38 公斤/米)；2—压板；3—固定螺栓；4—拉杆；5—胶皮垫；

6—硫磺砂浆；7—人行台阶；8—地滚预留孔

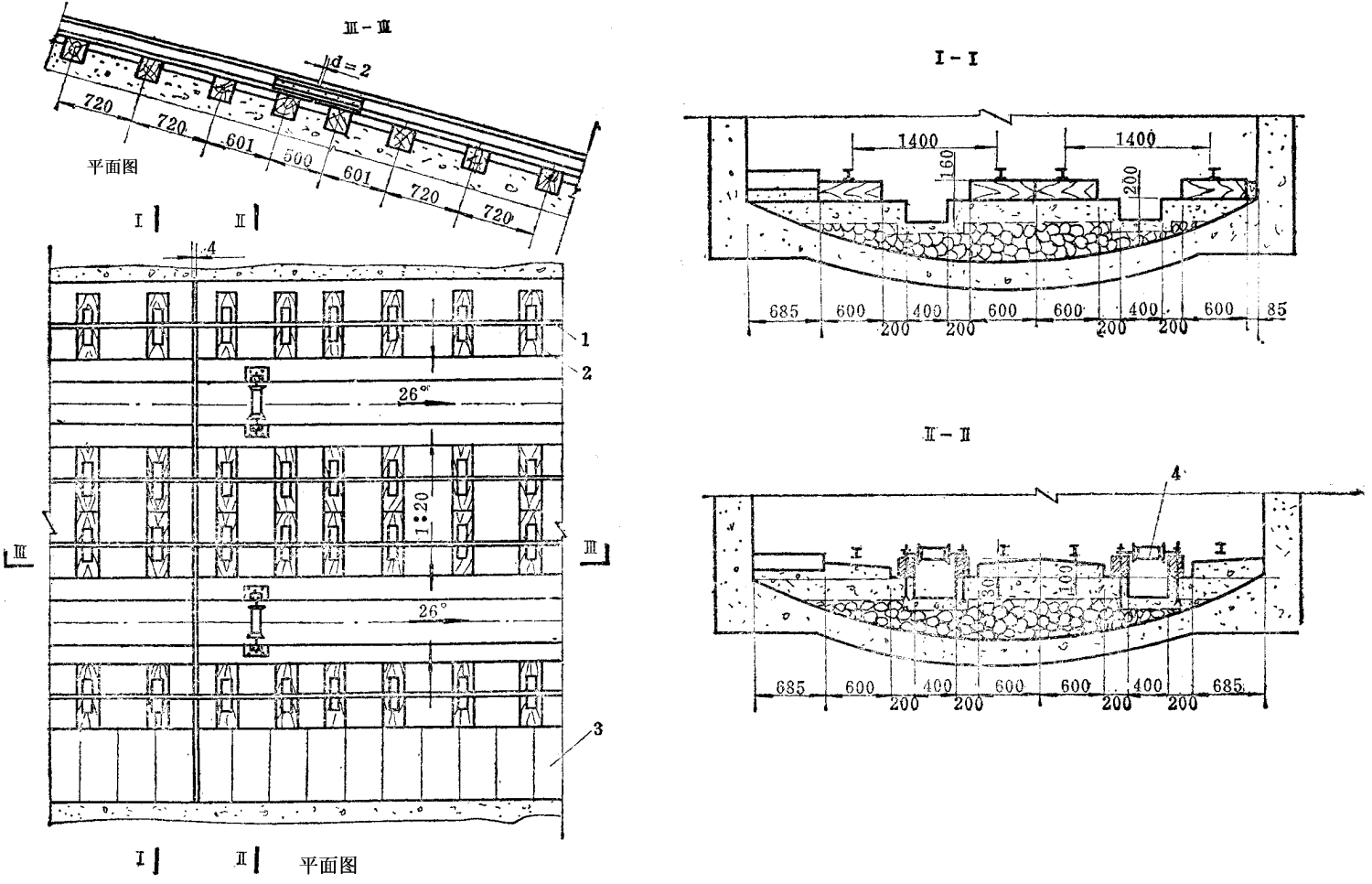


图 6-5-3　内蒙古平庄古山三井固定道床

1—钢轨（38公斤/米）；2—木轨枕（220×160毫米）；3—人行台阶；4—地滚（间距6.25米）

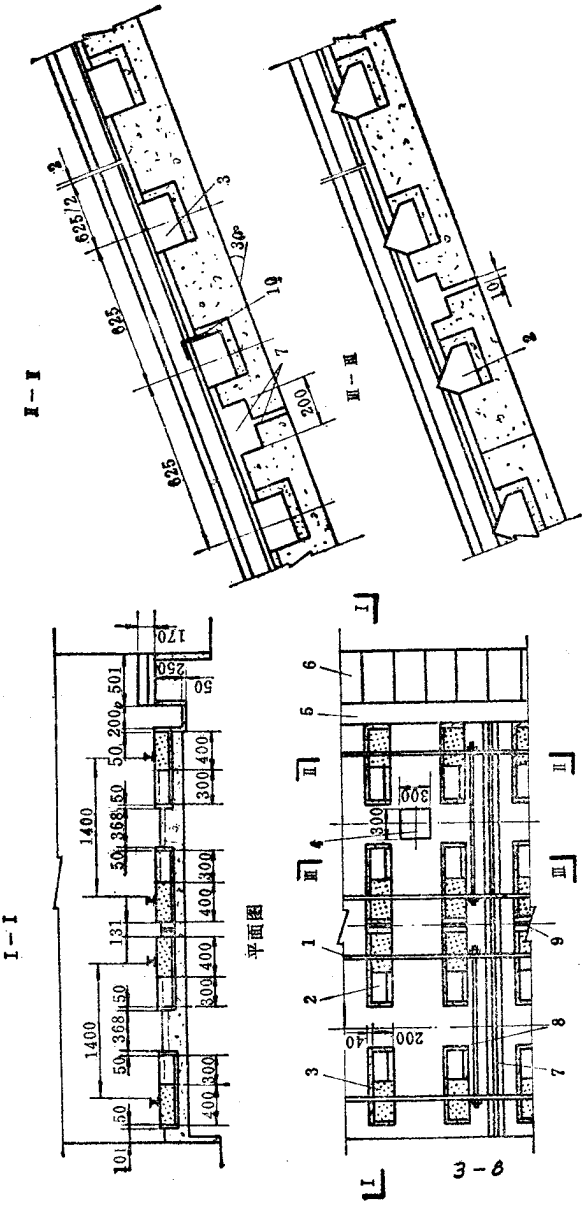


图 6-5-4　河南安阳龙山斜固定道床

1－钢轨（38 公斤／米）；2－混凝土填块；3－预制钢筋混凝土短枕；4－地滚坑；5－水沟；6－人行台阶；7－横水沟及伸缩缝（隔 12。5 米一条）；8－拉杆；9－预制混凝土隔板；10－防爬器（每节轨 2 个）

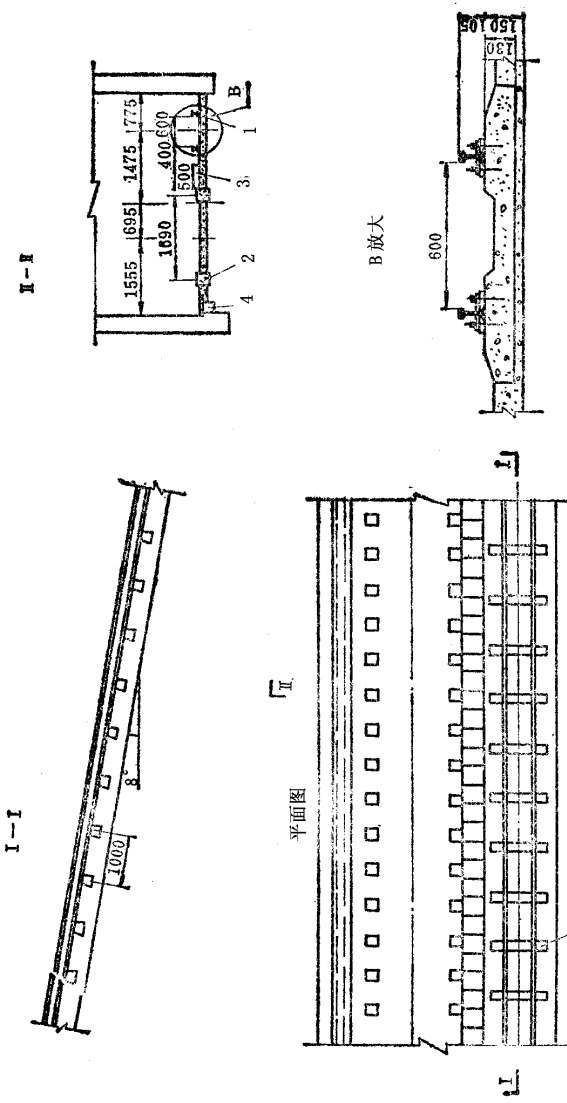


图 6-5-5　山西古交镇城底矿井固定道床

1－钢轨（18 公斤 / 米）；2－胶带架基础（250×250×250 毫米）；3－人行台阶；4－水沟；5－预制钢筋混凝土轨枕

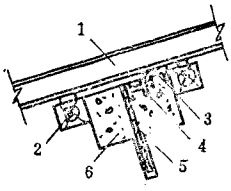
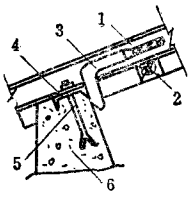
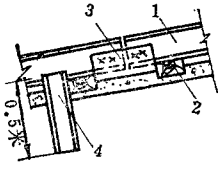
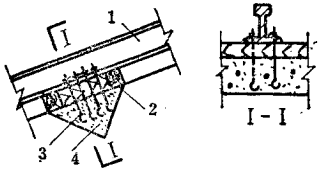
三、轨道防滑

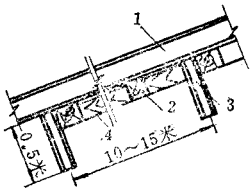
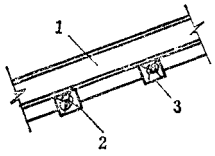
当井筒倾角大于 15°时，铺设轨道应考虑防滑措施。

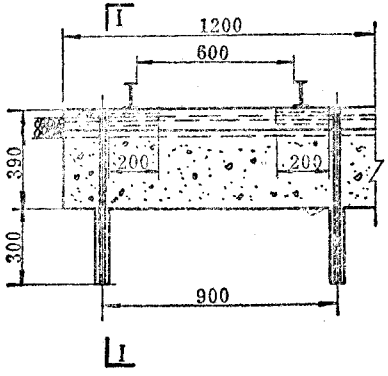
斜井轨道防滑装置可分为固定钢轨法和固定轨枕法两类。实践证明，前者效果较好，为多数矿井所采用。后者虽起一定作用，但因车辆在运行中产生震功，使道钉松动，钢轨仍可下滑，效果不好，故较少采用。

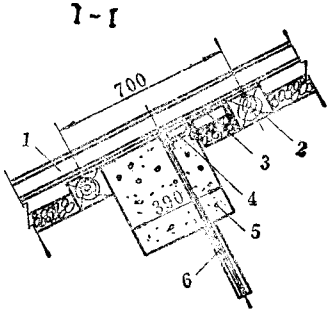
轨道防滑装置结构及材料消耗见表 6－5－3、图 6－5－6、图 6－5－7。

表 6－5－3　斜井井筒轨道防滑装置

固定方式		图　示	特征与要求	使用矿井名称	使用情况
固定钢轨	型钢固定	 1－钢轨； 2－轨枕； 2－槽钢[16； 4－工字钢 I12； 5－圆钢ϕ30； 6－混凝土底梁	用型钢固定钢轨，每隔 30 米设一组	一吨标准矿车串车斜井通用设计	
	钩形板固定	 1－钢轨； 2－轨枕； 3－钩形板； 4－槽钢[14； 5－螺栓 M32 × 500； 6－混凝土底梁	用钩形板固定钢轨，每隔 15 ~ 20 米设一组	淮南李郢孜矿	维修、更换方便，防滑效果良好
	特制鱼尾板固定	 1－钢轨； 2－轨枕； 3－特制鱼尾板； 4－钢轨桩 （15 公斤／米）	用特制鱼尾板固定钢轨，每隔 20 米设一组	抚顺西露天人车斜坡	防滑效果好，但枕木易腐烂而被挤坏，须经常维修、更换
	预埋螺栓固定	 1－钢轨；　2－轨枕；3－预埋螺栓； 4－混凝土底梁	用预埋螺栓固定钢轨，每隔 30 米设一组	抚顺老虎台矿人车斜井	防滑效果好，且钢轨与底梁间垫以枕木增加了弹性，但螺栓易锈蚀，维修更换困难

固定方式		图　示	特征与要求	使用矿井名称	使用情况
固定轨枕	轨枕桩	 1-钢轨；2-轨枕；3-防滑桩；4-撑木	每隔10～15米在井筒底板、轨枕两端各打一防滑桩(型钢或圆钢)以阻止轨道下滑	四川松藻石碌矿井副井	有一定防滑作用，但车辆在运行中产生震动，使道钉松动，钢轨仍可下滑，故效果不好
	轨枕槽	 1-钢轨；2-轨枕；3-轨枕槽	轨枕放入底板槽内使之固定，槽深80～100毫米，槽底垫道碴厚50毫米	湖南涟邵托山矿	



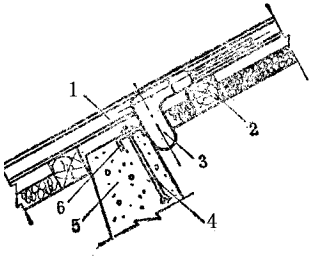


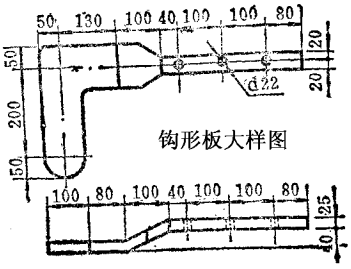
工程量及材料消耗量

名　称	材料消耗量							掘进工程量(米³)
	槽钢([16#)		工字钢(I 12#)		圆钢(φ30)		混凝土(米³)	
	长度(米)	重量(公斤)	长度(米)	重量(公斤)	长度(米)	重量(公斤)		
单轨	0.4	7.90	1.2	17.64	1.38	7.66	0.18	0.13
双轨	0.8	15.79	2.6	36.92	2.76	15.32	0.40	0.27

图 6-3-6　型钢固定防滑装置

1—钢轨；2—轨枕；3—槽钢(与钢轨焊接)；4—工字钢；5—混凝土底梁；6—圆钢





材料消耗量

名　称	规　格	单　位	数　数	
			单　轨	双　轨
钩形板	厚 25 毫米	块/公斤	2/30.8	4/61.6
槽　钢	*YB*164－63［14	公尺/公斤	1.2/14.8	2.4/29.5
螺栓及螺母	*GB*5－76 螺栓 *M*36×500，*GB*41－76 螺母 *M*36	套	3	6
六角螺栓	*GB*5－76 螺栓 *M*20×55	个	6	12
六角螺母	*GB*41－76 螺母 *M*20	个	6	12
垫　圈	*GB*96－76 *d*20	个	12	24
混凝土	根据井筒底板岩石软硬程度、决定防滑底梁的规格及混凝土消耗			

图 6－5－7　钩形板固定防滑装置

1—钢轨；2—轨枕；3—钩形板；4—螺栓及螺母；5—混凝土底梁；6—槽钢

四、铺轨部件材料消耗

1.600 毫米轨距道碴道床铺轨材料消耗见表 6－5－4。

表 6－5－4　每百米铺轨材料消耗量(600 毫米轨距)

名称		型号、规格	单位	材料消耗					
				15(公斤/米)		18(公斤/米)		24(公斤/米)	
				单轨	双轨	单轨	双轨	单轨	双轨
钢轨		按 10 米长一根计算	根 公斤	20.0 2944.0	40.0 5888.0	20.0 3612.0	40.0 7224.0	20.0 4892.0	40.0 9784.0
鱼尾板		*YB*226－63，*YB*225－63 *YB*14－63	块 公斤	40 111.20	80 222.40	40 93.2	80 186.4	40 189.2	80 378.4
螺栓		*GB*5－76，*M*16×75， *M*18×70，*GB*41－76， *M*16，*M*18	套 公斤	80 14.34	160 28.68	80 14.34	160 28.68	80 18.08	160 36.16
木轨枕(枕距700毫米)	垫板	*YB*223－63，132×100×9	块 公斤	286 258.83	572 517.66	286 580.58	572 1161.16	286 580.58	572 1161.16
	弹簧垫圈	*GB*93－76，*M*16，*M*18	个 公斤	80 0.62	160 1.24	80 0.62	160 1.24	80 0.88	160 1.76
	道钉	12×12 长 110 14×14 长 130	个 公斤	572 74.36	1144 148.72	572 74.36	1144 148.72	572 120.12	1144 240.24
	木轨枕	150×120×1200	根 米^3	143 3.09	286 6.18	143 3.09	286 6.18	143 3.09	286 6.18
	道碴		米^3	9.94	19.08	9.94	19.08	9.94	19.08
钢筋混凝土轨枕	弹性垫板	橡胶或塑料制成，规格与铁垫板相同	块	286	572	286	572	286	572
	钢筋混凝土轨枕	*Y*608－69*A*(包括扣件)	根	143	286	143	286	143	286
	道碴		米^3	8.82	14.84	8.82	14.84	8.82	14.84

2. 固定道床材料消耗见表 6－5－5。

表 6－5－5　每百米固定道床材料消耗量

	材料名称	单　位	宁夏石炭井一号主斜井（单道）	山西古交镇城底矿井胶带
上部结构材料消耗	轨　型	公斤/米	38	18
	钢　轨	根/公斤	76/7739.8	20.1/3630.1
	鱼尾板	块/公斤	32/498.2	40.2/121.9
	鱼尾螺栓	套/公斤	96/60.5	81.6/14.9
	垫　圈	个/公斤	96/4.8	/
下部结构材料消耗	钢筋混凝土轨枕	根	/	100
	固定螺栓	个/公斤	571.6/381.3	400/117.6
	固定螺母	个/公斤	1143.2/69.7	800/25.6
	拉　杆	根/公斤	25/136.8	/
	螺　母	个/公斤	100/10.5	/
	胶皮垫	块	285.8	/
	压　板	块/公斤	571.6/472.1	400/140
	木垫板(甲)	块	/	400
	木垫饭(乙)	块	/	200
	混凝土	米^3	122.9	11.4
	道　碴	米^3	28.9	/

第二节　水　　沟

一、设置原则

1. 斜井井筒中一般设有纵向主水沟并砌筑。只有当底板岩石坚硬，涌水量在 5 米^3/

时以下时，水沟可以不砌筑。

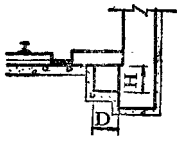
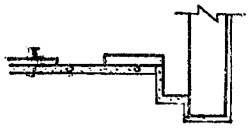
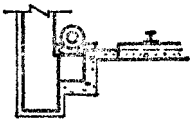
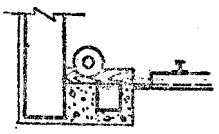
2. 井筒内每隔 30～50 米设一横向斜水沟，其坡度不小于 3‰，以便将井筒中的流水截至主水沟内。而且还需根据井筒的流水情况，在含水层泄水点下方、胶带输送机斜井接头硐室上方（当该硐室向外泄水时，则在硐室下方）、斜井交岔点上方等处设置横向水沟。

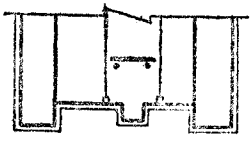
3. 在胶带输送机斜井和箕斗斜井中，井底车场水平以上的井筒流水尽量截至车场水沟内，以减少井底排水量和水窝的清理工作量。

二、布置形式

水沟形式及特征见表 6－5－6。

表 6－5－6　水沟形式及特征

布置形式		图　示	技术特征及材料消耗		
设在人行侧	与人行台阶重迭		断面规格	宽 D（毫米）	200
				深 H（毫米）	200
	与人行台阶平行		断面积（米²）	净	0.04
				掘进	0.14
设在非人行侧	与管子重迭		流量（米³/时）	坡度 5°	0～266
				坡度 10°	0～382
	与管子平行			坡度 15°	0～468
				坡度 20°	0～551

布置形式	图　　示	技术特征及材料消耗	
设在胶带输送机底下		混凝土消耗(米^3/米)	0.08

当底板软岩或衬砌较差时,常出现冲刷沟底或底鼓使水沟阻断问题,故水沟衬砌必须保证质量。若底板易鼓不宜采用与人行道、管子或胶带输送机重迭布置形式。若水沟流量达到表 6－5－6 所列流量的 1/3～1/4,则水沟需加盖,以防外流。

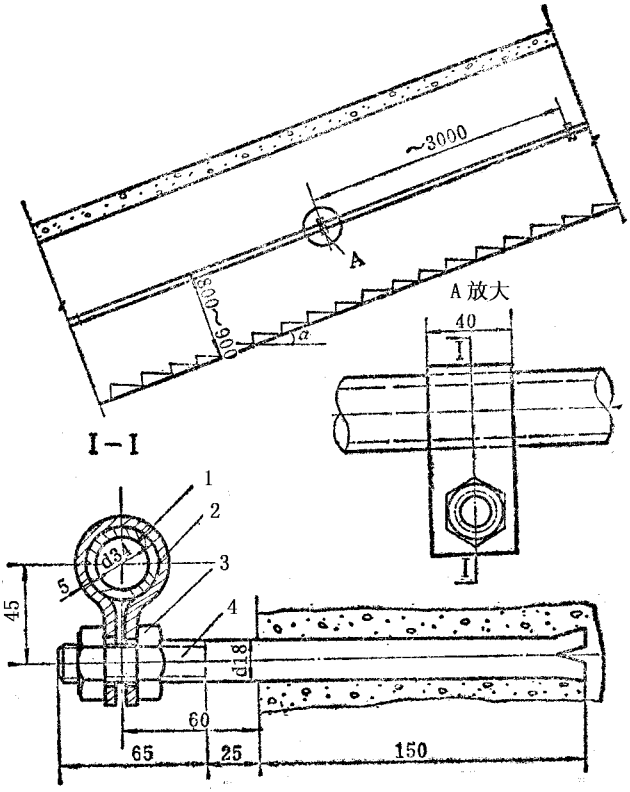
第三节　管线敷设

一、敷设要求

1. 管路一般设置在辅助提升的井筒内。视井筒内的设施情况、其位置可布置在人行道侧或非人行道侧。

2. 有机械提升的进风斜井不应敷设动力电缆。但如对电缆有可靠的保护措施时,不在此限。

3. 斜井井筒中须同时敷设电缆和管路时,应分设在井筒两侧 如果必须设在同侧时,电缆应设在管路的上方,并保持 300 毫米以上的距离。同时,电缆的悬挂高度尽量高于提升容器的高度。



序　号	名　　称	规　　格	单　　位	数量
1	焊接钢管	*d*25	米	100.0
2	扁　　钢	40×5　*L*220	公斤	11.55
3	六角螺母	*M*18　*GB*41－76	公斤	2.92
4	圆　　钢	*d*18　*L*240	公斤	15.84

图 6－5－8　焊接钢管扶手布置及百米材料消耗

4. **动力电缆和信号电缆不宜设在同一侧，如必须设在同一侧时，信号电缆要高于动力电缆 100 毫米以上。**

二、管路敷设形式

江西省煤矿设计院 1978 年编制的“一吨标准矿车串车斜井井筒施工设计”（通用设计），在井筒非人行侧设排水管两趟，压风管一趟，洒水管一趟，其敷设形式及材料消耗见

图 *6－5－9* 及表 *6－5－7*～表 *6－5－9*。

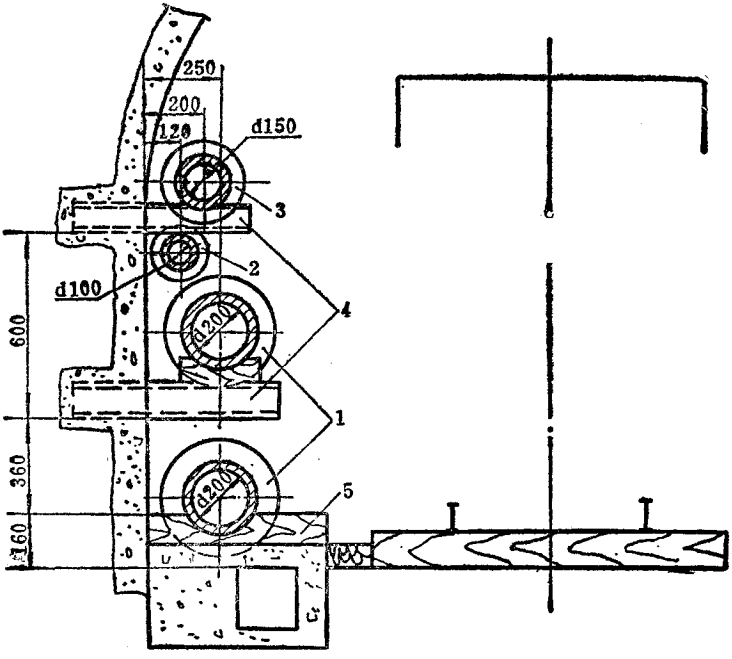
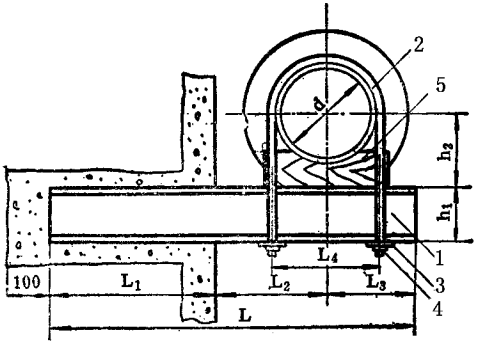


图 6－5－9　管路布置

1—排水管；2—洒水管；3—压风管；4—托梁；5—支墩

排水管托梁布置尺寸及材料消耗量



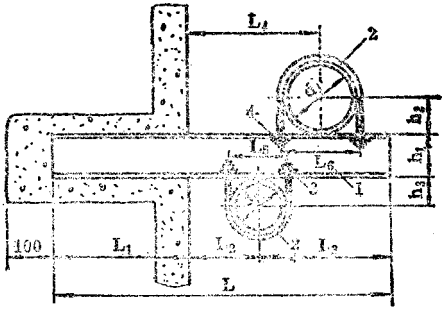
注 托梁间距：$d200\times7$ 为 8 米；$d100\times4$、$d150\times4.5$ 为 10 米

表 6－5－7　托梁布置尺寸

排水管	单位	h_1	h_2	L_1	L_2	L_3	L_4	L
$d100\times4$	毫米	100	95	250	200	120	120	570
$d150\times4.5$	毫米	100	120	300	250	150	171	700
$d200\times7$	毫米	120	160	300	250	180	231	730

序号	名　称	材料消耗											
		$d100\times4$				$d150\times4.5$				$d200\times7$			
		规格型号	数　量	重量(公斤)		规格型号	数　量	重量(公斤)		规格型号	数　量	重量(公斤)	
				单重	总重			单重	总重			单重	总重
1	托管梁 *GB*707－65	[10	0.57 米	10.0	5.7	[10	0.70 米	10.0	7.0	[10	0.73 米	10.0	7.3
2	圆钢 *U* 形螺栓 *GB*707－72	*M*12×650	2 个	0.192	0.384	*M*12×790	2 个	0.227	0.454	*M*12×960	2 个	0.993	1.986
3	扁钢垫铁 *GB*704－65	□50×5 *L*＝100	2 个	0.196	0.392	□50×5 *L*＝110	2 个	0.216	0.432	□60×5 *L*＝110	2 个	0.26	0.52
4	六角螺母 *GB*52－76	*M*12	4 个	0.016	0.064	*M*12	4 个	0.016	0.064	*M*12	4 个	0.016	0.064
5	硬木	180×45×60	0.0006 米³			220×45×60	0.0005 米³			260×50×80	0.001 米³		
	合　计		0.0005 米³		6.54		0.0006 米³		7.95		0.001 米³		9.87

压风管洒水管托梁布置尺寸及材料消耗量



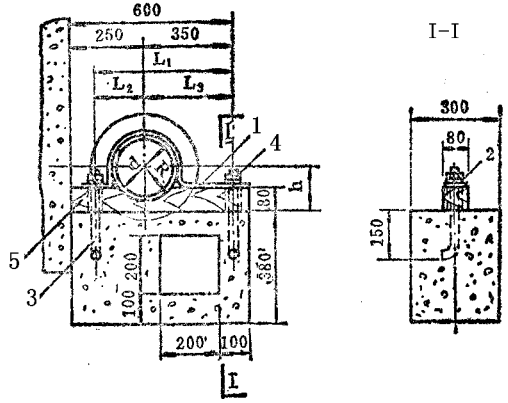
注 托梁间距 10 米

表 6－5－8　托梁布置尺寸

压风管	洒水管	单位	h_1	h_2	h_3	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L
$d100\times4$	$d50\times4$	毫米	80	54	29	150	100	160	170	68	120	410
$d150\times4.5$	$d80\times5$	毫米	80	80	45	200	120	190	200	100	171	510
$d150\times4.5$	$d100\times5$	毫米	80	80	55	200	120	190	200	120	171	510

每套托梁材料消耗量

序号	名　称	材料消耗											
		$d100\times4$，$d50\times4$				$d150\times4.5$，$d80\times5$				$d150\times4.5$，$d100\times5$			
		规格型号	数　量	重量(公斤)		规格型号	数　量	重量(公斤)		规格型号	数　量	重量(公斤)	
				单重	总重			单重	总重			单重	总重
1	托管梁 *GB*707－65	[8	0.41 米	8.04	3.296	[8	0.51 米	8.04	4.10	[8	0.51 米	8.04	4.10
2	圆钢 *U* 形螺栓 *GB*702－72	*M*12×370 *M*10×220	1 个 1 个	0.273 0.180	0.272 0.180	*M*12×505 *M*10×305	1 个 1 个	0.373 0.251	0.373 0.251	*M*12×505 *M*12×360	1 个 1 个	0.373 0.265	0.373 0.265
3	方斜垫圈 *GB*853－76	*d*12 *d*10	2 个 2 个	0.017 0.009	0.034 0.018	*d*12 *d*10	2 个 2 个	0.017 0.009	0.034 0.018	*d*12	4 个	0.017	0.088
4	六角螺母 *GB*52－76	*M*12 *M*10	2 个 2 个	0.016 0.011	0.032 0.022	*M*12 *M*10	2 个 2 个	0.016 0.011	0.032 0.022	*M*12	4 个	0.016	0.064
	合　计				3.85				4.83				4.87



注：1. 支墩间距 10 米，每百米井筒混凝土消耗量为 0.3 米^3。

2. 预埋螺栓外露 115 毫米。

表 6－5－9　支墩布置尺寸

排水管	单　位	L_1	L_2	L_3	h	R
$d100\times4$	毫　米	400	100	300	100	55
$d150\times4.5$	毫　米	420	120	300	120	80
$d200\times7$	毫　米	470	170	300	150	110

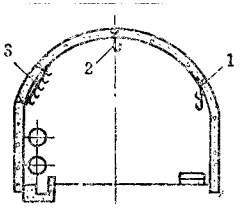
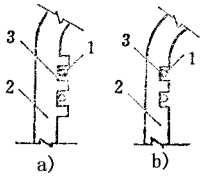
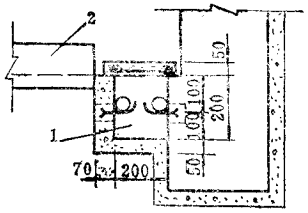
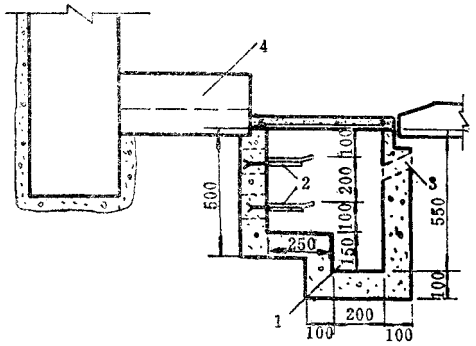
每套支墩材料消耗量

序号	名　称	材料消耗											
		$d100\times4$				$d150\times4.5$				$d200\times7$			
		规格型号	数　量	重量(公斤)		规格型号	数　量	重量(公斤)		规格型号	数　量	重量(公斤)	
				单重	总重			单重	总重			单重	总重
1	扁钢管箍 GB704－65	□50×6 L＝600	1个	1.416	1.416	□50×6 L＝690	1个	1.628	1.628	□60×6 L＝835	1个	2.363	2.363
2	垫圈 GB93－76	$d16$	2个	0.008	0.016	$d16$	2个	0.008	0.016	$d20$	2个	0.015	0.030
3	预埋螺栓	$M16\times325$	2个	0.615	1.03	$M16\times325$	2个	0.615	1.03	$M20\times325$	2个	0.802	1.603
4	六角螺母 GB52－76	$M16$	2个	0.034	0.068	$M16$	2个	0.034	0.068	$M20$	2个	0.062	0.124
5	硬木	600×80×80	0.004米³			600×80 80	0.004米³			600×80×80	0.004米³		
	合　计		0.004米³		2.53		0.004米³		2.74		0.004米³		4.12

三、电缆敷设形式

斜井井筒中敷设的电缆有：动力电缆、通讯电缆、信号电缆和照明电缆等，其敷设形式见表 6－5－10。

表 6－5－10　电缆敷设形式

形　式	图　示	优　缺　点
电缆钩	 1－通讯信号电缆挂钩； 2－照明灯钩； 3－动力电缆挂钩	1．安装简单； 2．材料消耗少； 3．仅用于无提升设备的井筒多数矿山采用
电缆槽	 1－电缆； 2－井壁； 3－槽钢或预制槽形混凝土块	1．对保护电缆有一定效果； 2．用槽钢时，则消耗钢材多，用预制槽形混凝土块时，则施工较复杂，对于（b）图形式则降低井壁强度 对（a）图形式需增加井筒断面
电缆沟	 1－电缆沟； 2－人行台阶	1．能有效地保护电缆； 2．需加大井筒断面，增加工程费用四川打通一井采用
电缆沟 水　沟	 1－水沟；2－电缆托架（隔 2 米设一组）； 3－泄水孔；4－人行台阶	1．能有效地保护电缆 2．较电缆沟和水沟分开布置时，井筒断面要小些；3．施工较复杂 山西古交镇城底矿采用