

国外地质勘探 技术专辑

第 5 辑

空气钻进手册

书

P62-53

5

地质部勘察技术研究院

一九八一年六月

目 录

一、引言	(1)
二、空气钻进的分类及优点	(1)
三、细目	(2)
1. “粉尘”钻进	(2)
2. 雾化钻进	(4)
3. 粘性泡沫钻进	(6)
4. 充气泥浆钻进	(7)
5. 空气钻进用化学药剂	(8)
6. 干孔测井	(9)
7. 空气钻进用空压机设备	(9)
8. 压缩热力学	(10)
9. 空气钻进用空压机的设计	(12)
10. 自由空气	(14)
11. 用空气或天然气钻进时安全施工预检项目	(15)
12. 专门用语	(16)

一、引言

标准回转钻机使用空气做循环液的钻进方法即称为“空气钻进”。

空气最终是由高密度钻井液逐步变为低密度钻井液。

适当使用空气钻进，可得到较快的进尺速度，在较少的回次中获得较长的钻头寿命，较好的控制漏失循环，较干净的岩心，较好的和更准确的探查低压带并使地层比较干净。

毫无疑问，空气钻进的首要好处是提高进尺速度，主要是由于空气的密度低。因为空气轻，能有助于最大限度地释放位于钻头下面的岩层中垂直和径向的残余应力。这种形成的“反压力”效应可提高岩石的可钻性。事实上，当用空气钻进时，岩屑明显地呈“爆炸”的形式而离开一些地层。

当今，空气钻进已被广泛认为是降低大量钻井成本的一种方法。

这本手册的目的是说明空气钻进的各种基本知识和如何应用于钻探工业。

二、空气钻进的分类和优点

1. 粉尘钻进

- ①进尺速度较快
- ②钻头寿命较长
- ③对生产层无损害
- ④无循环漏失问题
- ⑤能连续通过钻杆进行测试取样

2. 雾化钻进

- ①当孔内遇水时，则用雾化钻进
- ②可获得接近于空气钻进的各项直接效果
- ③岩屑较大
- ④能连续测试、取样

3. 粘性泡沫钻进

- ①进尺速度较快
- ②所需空气少
- ③静液压力头低
- ④对地层无损害
- ⑤能连续测试、取样

4. 充气泥浆

- ①降低堵漏材料成本

- ②保持一定的钻进速度
- ③减少卡钻的危险
- ④减少对地层的损害

三、细 目

1. “粉尘”钻进

假若地层完全干燥无水或气流能吸收侵入孔内的少量水流时,用空气钻下的岩屑返回地面尤如一股粉尘,这种情况说明为最优钻进速度和经济效果最佳。

当井内呈粉尘状时,井底压力稍有超过空气柱压头与钻屑总重之和。低压是理想的,井底岩石应力可得到最大的释放,故钻头齿可以获得最大切屑效益。

空气气举能力与空气密度成正比,与环状空间的流速的平方成正比。这样,随着井深的增加,空气密度和钻下的岩屑的重量也要增加,为了维持环状空间的流速,在地表提供的空气压力和排量也相应地应予增加。

当空气钻进失效时,最经常的原因是在高速进尺的情况下没有足够的空气清洗孔底。随着钻孔的不断加深,需要更多的空气将岩屑带出地面。空气量的增加首先是用于抵消钻杆首先形成的磨阻。然而磨阻又来源于较高的井内空气密度和经常随着孔深的增加使孔底流速降低。

若不能马上增加空压机的空气量,则需降低井的环状空间。较小的环状空间在一定的喷射速度下可提供较高的流速。可用降低孔径或用增加所用钻杆直径的办法来减少环状空间。

环状空间流速 3000 英尺/分在大多数情况下是正常适用的。若进尺速度超过 60 英尺/时,想把岩屑以足够速度排出时,则需更高的环状空间流速。

粉尘钻进存在问题但也容易解决:

①要有指示器指示是否有足够的空气。当停止钻进后,将钻孔清洗干净的时间,每1000英尺不得超过一分钟,若需较多的时间则说明空气量不足或钻孔已超径。

②偶尔井内地层出水而成为水孔从而停止排粉,但水又没在排放管出现时,则仍可钻进,但要严密注意表压,看是否有泥包或泥环现象产生,要即时上下串动钻杆以防卡钻。

③若钻孔不能排干而一直存在困难,在加接钻杆时可直接向钻杆内加入未加稀释的液体洗涤剂,这样即可减少泥包和泥环的形成。一开始加一加仑的洗涤剂即可产生效果,连加数根后可根据井内情况增减洗涤剂量。

④有些地层不能产生粉尘,例如油页岩和硬沥青,它们都在油沫中含有一定的水份从而不能变成粉尘,岩屑于排放管处呈胶块状,加些石墨即可使此问题得以解决。

⑤卡钻在此法中却非主要事故。如发生卡钻,其原因一般为键槽、坍塌、或形成泥环。键槽问题与泥浆钻进时相同。但在空气钻进时,下钻要特别注意,不要突然下降,因孔内无液体减缓下降速度或作井底缓冲垫而减小井底撞击。

⑥坍塌造成卡住钻头或钻铤,如处理得当,可不必采取专门的打捞工作。像往常以空气在管柱周围循环之,且钻杆不难拉动时,整个钻柱短时即可解卡。当钻屑下沉而埋住钻杆时则很难将钻杆拉上来。一旦出现沉砂卡钻迹象时,喷射用水稀释的泡沫剂则有助于清洗钻孔。在空气钻进中因孔壁无泥饼,故较易解除卡钻事故。

表1 空气需要量
(估计每小时60英尺的进尺速度)
“粉尘钻进”

钻 孔 尺 寸	钻 杆 尺 寸	井深和空气需要量 标准立方英尺/分					
		2000	4000	6000	8000	10,000	12,000
4— $\frac{3}{4}$	2— $\frac{3}{8}$	360	430	520	600	670	730
	2— $\frac{7}{8}$	380	480	540	625	680	750
6— $\frac{1}{4}$	2— $\frac{7}{8}$	620	735	840	940	1040	1135
	3— $\frac{1}{2}$	560	680	800	920	1020	1120
6— $\frac{3}{4}$	3— $\frac{1}{2}$	700	800	850	1050	1150	1300
7— $\frac{3}{8}$	3— $\frac{1}{2}$	840	950	1100	1240	1360	1460
7— $\frac{7}{8}$	3— $\frac{1}{2}$	950	1100	1230	1370	1500	1630
	4— $\frac{1}{2}$	830	1000	1160	1330	1450	1580
8— $\frac{3}{4}$	3— $\frac{1}{2}$	1200	1360	1530	1640	1790	1930
	4— $\frac{1}{2}$	1075	1280	1435	1590	1730	1870
	5	1040	1200	1380	1540	1700	1835
9	3— $\frac{1}{2}$	1240	1400	1570	1735	1880	2030
	4— $\frac{1}{2}$	1180	1335	1500	1670	1820	1980
	5	1100	1275	1475	1635	1800	1945
9— $\frac{7}{8}$	4— $\frac{1}{2}$	1435	1635	1800	1975	2165	2330
	5	1360	1580	1765	1955	2135	2265
	5— $\frac{1}{2}$	1270	1500	1700	1900	2080	2235
11	4— $\frac{1}{2}$	1800	2000	2200	2400	2600	2800
	5— $\frac{1}{2}$	1680	1800	2100	2300	2500	2700
	6— $\frac{5}{8}$	1490	1710	1990	2200	2400	2600
12— $\frac{1}{4}$	4— $\frac{1}{2}$	2300	2500	2700	2920	3150	3350
	5— $\frac{1}{2}$	2150	2390	2600	2800	3080	3300
	6— $\frac{5}{8}$	1950	2200	2480	2700	2950	3200
15	4— $\frac{1}{2}$	3550	3820	4100	4350	4600	4880
	5— $\frac{1}{2}$	3400	3700	3990	4250	4500	4800
	6— $\frac{5}{8}$	3200	3500	3820	4100	4400	4700
17— $\frac{1}{2}$	4— $\frac{1}{2}$	4850	5200	5575	5900	6200	6550
	5— $\frac{1}{2}$	4750	5100	5480	5800	6100	6400
	6— $\frac{5}{8}$	4570	4900	5280	5600	5980	6280

⑦在湿孔中钻屑往往在孔壁和钻杆周围形成泥环，此泥环甚至可增大到足以限制空气流过钻杆接头。泥环的形成首先表现在立管的压力逐渐稳定上升。此刻在空气流中加些液体洗涤剂，可将泥环破坏或散开。在接钻杆时若用洗涤剂做些“残渣”处理措施，经常是可以防止泥环的发生。

好的技术监督和长期密切注意排放管线处的情况是可以避免严重事故的。

2. 雾化钻进

当孔内水多而不能吹干时，采用水与泡沫剂混合，以雾状喷入空气流之中即可进行钻进，这种用泡沫剂与水成雾状喷入空气流的钻进方法即叫雾化钻进。

此法要比正常“粉尘”钻进多用30-40%的空气，其基本理由有三：

- (1) 环形空间的空气柱较重，因其中有一定重量的水份必须提举上来。
- (2) 将岩屑排出孔外。
- (3) 一些岩屑由于有水份存在而互相粘附，故需增大环形空间的空气流速，以克服较大钻屑的滑动速度。

尽管在“粉尘”钻进时一般喷射压力为200磅/平方英寸即够，但雾化钻进即需350磅/平方英寸才可。泡沫剂较吹干未处理的水所需空气量要少得多，但要随着水份的增加而增加空气流量和压力。

空压机的压力需要200-1000磅/平方英寸或更大些，尤其当有大量水需要处理时更是如此。若要排干井内起一次钻后的积水，如不分阶段进行处理则需大于1000磅/平方英寸。

在空气钻进遇水时，钻杆腐蚀一直是存在的问题。

遇到含钙质饱和水可适当防止氧化，遇有硫化氢和二氧化碳时，则很难做到防腐。为此，在含钙水中使用薄膜胺型(filming amino-type)抑止剂。

有些地区，很长一段钻孔是在完全干燥的情况下钻成的，也需要了解和准备用水和雾化钻进，以便处理所遇到的问题：

- (1) 75%以上的雾化钻进问题是出于空气量太少。粗略的计算空气量应较“粉尘”钻进多30%，但实际往往要超过计算值。
- (2) 在湿孔中卡钻，经常是由于接钻杆前未把钻屑排干净，钻屑未排出，返回落下而卡住钻具。在粉尘钻进孔中，排净钻屑直至回程空气不含岩屑为止，这是一好经验，在雾化钻进中更是绝对必要的。
- (3) 孔内坍塌、掉块是使雾化钻进失败的原因。若经常注视雾化和钻屑情况，在发生事故前可得到预兆的。当气雾已成泥糊状，或开始出现坍塌，应考虑井眼已被扩大。当井眼超径时，环流速度下降，空气泡沫则停止有效地携带岩屑。

雾化钻进时，配一台好的注射泵是很重要的。很难设想，什么样的泡沫剂与多少水混合，恰好以任一喷射速度注入就“合适”。正常情况开始是：8桶/小时或每桶水混合一夸脱的泡沫剂。

当钻孔内出现水时，要记住以下几点：

- (1) 尽量使钻孔保持干燥。
- (2) 增加泡沫剂的浓度使泡沫更稠些，提高它的携带岩屑能力。一桶水中加1加仑的

表2 空气需要量
(估计进尺速度每小时50英尺)

“雾化钻进”

钻 孔 尺 寸	钻 杆 尺 寸	井深和空气需要量 标准立方英尺/分						
		1000	2000	4000	6000	8000	10000	12000
4— $\frac{3}{4}$	2— $\frac{7}{8}$	430	500	650	790	930	1070	1200
6— $\frac{1}{4}$	2— $\frac{7}{8}$	790	850	970	1150	1420	1700	1800
	3— $\frac{1}{2}$	710	790	930	1030	1280	1420	1650
6— $\frac{3}{4}$	3— $\frac{1}{2}$	850	1000	1200	1420	1650	1850	2100
7— $\frac{3}{8}$	3— $\frac{1}{2}$	1070	1150	1300	1550	1800	1950	2150
7— $\frac{7}{8}$	3— $\frac{1}{2}$	1300	1400	1650	1900	2120	2400	2700
	4— $\frac{1}{2}$	1100	1200	1500	1800	2100	2350	2650
8— $\frac{3}{4}$	3— $\frac{1}{2}$	1600	1750	2000	2280	2600	2800	3000
	4— $\frac{1}{2}$	1450	1650	1850	2140	2400	2600	2850
	5	1350	1500	1700	2000	2200	2400	2700
9	3— $\frac{1}{2}$	1700	1850	2200	2600	2700	3000	3300
	4— $\frac{1}{2}$	1500	1700	2000	2300	2500	2700	3000
	5	1450	1550	1850	2150	2350	2550	2850
9— $\frac{7}{8}$	4— $\frac{1}{2}$	1950	2100	2400	2700	3200	3500	4000
	5	1900	2000	2300	2600	3000	3300	3600
	5— $\frac{1}{2}$	1700	1950	2150	2400	2600	2850	3100
11	4— $\frac{1}{2}$	2500	2600	2900	3200	3400	3800	4100
	5— $\frac{1}{2}$	2300	2400	2700	3000	3300	3700	4000
	6— $\frac{5}{8}$	2000	2150	2350	2650	3200	3550	3900
12— $\frac{1}{4}$	4— $\frac{1}{2}$	3100	3350	3700	4200	4500	4900	5400
	5— $\frac{1}{2}$	3000	3100	3350	3900	4300	4700	5000
	6— $\frac{5}{8}$	2600	2800	3000	3400	3700	4150	4500
17— $\frac{1}{2}$	4— $\frac{1}{2}$	6600	6850	7550	8100	8700	9250	9800
	5— $\frac{1}{2}$	6450	6700	7400	8000	8550	9100	9650
	6— $\frac{5}{8}$	6150	6600	7150	7700	8450	8950	9500

泡沫剂可制成很浓很稠的混合物。

- (3) 增加喷射速度以提高泡沫剂的携带岩屑能力。
- (4) 若加入 4 桶或更多的泡沫剂时，钻孔即可造成缓慢的段塞流，它回流至井口便可清洗钻孔。它不能做为正规作业，但可清理坍塌物和泥环。
- (5) 只要有足够的空气量，就可增强孔内抗水能力，这是雾化钻进中仅有的限制因素。多达每小时 150 桶的水也曾成功地被排出。
- (6) 钻进中出现水时，必须注入防腐剂。
- (7) 每次接钻杆之前，都要用泡沫剂把钻屑吹除干净。

在湿孔中所需空气的压力和风量

正常空气钻进时虽然 200 磅/平方英寸的压力已够，但常常采取稍高的压力是有益的。当进尺速度高，用雾化钻进或空气-泡沫钻进时，立管压力可达 350 磅/平方英寸或更高些。当排除井内的水时用泡沫剂较用空气能大大降低所需的空气量，但风量和压力要随处理的水量的增大而增加。表 2 所列说明于雾化钻进和泡沫钻进时所需空气量。

雾化钻进和泡沫钻进的设备本质上与粉尘钻进相同，主要区别是需要较高的压力和风量。空气量较粉尘钻进约多 30%—40%，依井深和侵入水量而异，在特殊情况下，压力可达 800—1000 磅/平方英寸。

用“空气泥浆”或“充气泥浆”钻进时所需压力亦较单用空气时为高。由于摩擦损耗较大故所需压力往往超过雾化钻进，但喷射效率往往较低。在中等孔深，一般清理钻孔和启动充气系统约需 800—1000 磅/平方英寸即够，但在较深的孔，同样作业则需要 1200—1500 磅/平方英寸的压力。

3. 粘性泡沫钻进

粘性泡沫是一种很稳定的“泥浆包气”的乳化液，用稳定型泥浆添加剂和泡沫剂配制而成。

由于经济的、机械的或其它原因，不论是空气钻进、雾化钻进或充气钻进满足不了要求时，此法有着特殊的用途。

简言之，以足够的空气喷射少量的稀泥浆，在近地表处可得每分钟 200 英尺的环状空间流速，空气与泥浆之比由 100:1 至 300:1。

为了抑止在环状空间时空气从泥浆中分出，泡沫应是很粘稠的，像是具有悬浮微粒的刮胡膏的稠度。为此，它不能再次循环使用，而是经排放管排到地表污水坑或存储池内。

为了取得稳定的泡沫，必须正确的配制泥浆，已试验和证实以下两种配方是好的：

不太贵的混合物包含 12 磅/桶的膨润土，1 磅/桶的纯碱面，0.5 磅/桶高粘度的羧甲基纤维素，1/2 到 1% 体积的“起泡剂 66”。但此混合物有些缺点，即有盐水或油存在的情况下将失效。

第二个配方是用同样量的起泡剂，用 0.5 磅/桶的钠羧甲基纤维素 (Driscose) 和 1 磅/桶聚丙烯酸钠 (Cypan)。这种混合物制成的泡沫，甚至在钻井中有少量的盐水或油时亦仍然稳定。

应用范围:

1. 当钻进大直径钻孔, 使用大量空气进行空气钻进不经济时, 应改用泡沫钻进为好。
2. 钻进非固结地层, 如砂层、页岩、卵石、砾石和砾岩时, 使用以适当的泥浆混合物制成的稳定泡沫对这类地层有着特殊的稳定能力。
3. 防止在用空气钻进油层时, 有时发生井内失火现象。
4. 钻低压或非固结的生产层。泡沫仅重 2—4 磅/立方英尺, 当压入井底时, 静液压力甚小, 这样则漏失很少, 甚至无循环漏失。
5. 对受砂堵的生产油层进行“泡沫捞砂”。用此法较普遍的捞砂方法需时较少, 而且效果明显还表现在泡沫捞砂的并能保持较长时间无砂堵现象。
6. 用此法可钻那些用雾化钻进时, 严重坍塌的水敏性页岩层。
7. 钻进严重循环漏失地层, 特别是伴随湿的或渗水地层。
8. 适用于因经济、距离远或地理位置等因素而造成的气量供应不足等情况的地区。

4 充气泥浆钻进

充气时, 空气和泥浆同时进入立管, 主要目的是降低返回泥浆柱的密度。往往是在孔内大量涌水时必须由空气钻进改用充气泥浆钻进。还有, 当井内出现循环漏失而用泥浆钻进成本太贵时可用此法。

充气泥浆可克服一些空气钻进的缺点, 即水侵入井内和未经处理的水对井壁所起的坏作用。同时, 充气泥浆钻进较单纯用泥浆能增加钻进速度和钻头进尺。

理想的充气泥浆是泥浆与空气组成一种稳定而均匀的泡沫, 直至返回地面的泥浆池亦不破坏和分离。但在进入泥浆泵之前要把气和泥浆分离。

虽然充气泥浆在环状空间返回时呈极度紊流状态, 但空气总会有分离而走在前头的趋势, 有时形成一段大的空气头, 紧跟着一股大的泥浆岩屑流。事实上每一段空气头都在向前推进一定体积的泥浆, 其速度可达 1500—2000 英尺/分, 这种空气头和高流速能刮损井壁。

为了保持空气和泥浆的理想混合状态, 泥浆必须有足够高的初静切力, 以防在环形空间气从泥浆中逸出。但在返回地面后, 泥浆又必须具有足够低的静切力, 以便使泵不发生气塞。很明显, 对泥浆的静切力进行完全的控制是十分必要的。

在地面可用长而浅的泥浆槽以资排去泥浆中的空气。经此, 泥浆比重将恢复到和在泥浆池时差不多。否则在泥浆罐与泥浆池之间加入去气剂亦可达此目的。

除以上各注意事项外, 有些地层严重坍塌, 在起下钻时可能被卡住或埋住, 若是如此, 可在起下钻之前增加泥浆粘度, 起下钻之后再恢复原来粘度。若需如此时, 采用石灰乳泥浆是一种既迅速而又经济的变换泥浆粘度的办法。石灰含量在井底时可能超过峰值, 若固相含量控制适当, 在起下钻之前加些水即可使泥浆变稀, 起下钻之后, 加些石灰即可变稠。

由于石灰乳泥浆的 pH 值高, 故需注意防腐。在用非离子型表面乳化剂的乳化泥浆时加入 2 磅/桶的薄膜胺式防腐剂。表面乳化剂需要细心选择, 在一定情况下, 它有增加泥浆中泡沫的趋势。所有这些建议必须遵照执行, 以防钻杆被严重腐蚀。

有时使用充气泥浆系统时, 起钻则井内液面降低, 浅含水层的水则流入井内。这是很自然的, 当起钻时, 循环停止, 空气在地表从泥浆中逸出, 井内液面下降。若液面下降严重足

以导致上部含水层涌入井内时,唯一的办法是防止空气从泥浆中分离和全孔循环泥浆。若在设计时有漏失现象,侵水现象不能制止,一定要将侵入的水以化学方法加以处理并立即排出孔外。若不处理,则水与充气泥浆混合后可能具有特殊的腐蚀性。

充气泥浆循环漏失问题

条件: 6000 英尺孔深

9 磅/加仑泥浆

井底漏失

液面位于 1000 英尺处

H = 井内充满泥浆时静液压力头

$$H = 9.0 \text{ 磅/加仑} \times 6000 \text{ 英尺} \times 0.52 = 2800 \text{ 磅/平方英尺}$$

$$2800 \div 12 = 233 \text{ 大气压}$$

h = 1000 英尺处的静液压力头

$$h = 9 \text{ 磅/加仑} \times 5000 \text{ 英尺} \times 0.52 = 2340 \text{ 磅/平方英尺}$$

$$2340 \div 12 = 195 \text{ 大气压}$$

N = 空气/泥浆

$$N = \frac{H - h \text{ (用大气压表示之)}}{2.3 \log (H - 1)}$$

$$N = \frac{233 - 195}{2.3 \times 2.37} = 7$$

5. 空气钻进用化学药剂

目前,空气钻进一般使用的化学药剂有四种:泡沫剂、防腐剂、干燥剂和润滑剂。另外还有几种用于堵水、保护页岩井段的材料,尚处在试验阶段。

(1) 泡沫剂——当井下遇到潮气时,需要使用某种分散剂以清洁钻头与钻孔,如果不及采取这种措施,潮气与岩屑往往会形成粘性泥浆,最后形成“泥包”,并最终附在钻杆或井壁上,造成通常所说的“泥环”。将导致卡钻和打捞工作。

为了避免此类事故的发生,可将纯洗涤剂或水与泡沫的混合剂注入气流中。在潮气明显出现的区段,在接钻杆时,可直接向钻杆内倒入纯洗涤剂或者泡沫剂。泡沫剂或洗涤剂都能形成一种均匀的混合物,这种混合剂的粘度足以把地下水和岩屑带至地表,以起到清理钻孔与钻头,以便继续钻进的重要作用(这就是泡沫钻进)。水和泡沫剂或者洗涤剂的注入量要根据孔径大小、地层性质以及可得到的空气和水量而定。一般,无论每小时注入 8—10 桶水,每桶含 1 夸脱泡沫剂,或者每当接钻杆时倒入 1—2 加仑的洗涤剂,亦同样有效。

(2) 防腐剂——泡沫钻进或充气泥浆钻进时,要用高 pH 值涂料和/或化学防护涂层。不然氧或二氧化碳将腐蚀钻杆。在含硫原油地区的硫化氢,如不采取防护措施,也将腐蚀钻杆。一种普通的防护混合剂应加入泡沫剂或充气泥浆内。其中每桶含有 1—2 夸脱的防腐剂、2—4 磅石灰。遇有含盐的硫化氢时,需配制较高浓度的。

(3) 干燥剂——当用空气钻进时,可用循环空气将钻孔吹干,如加些干燥剂则既经济

又容易。现在唯一通用的干燥剂是吸水的硅酸盐粉。注入干燥剂需要一个干燥化学药物喷射器。目前，遇到潮湿层时，最好的方法似乎是加入 20—40 磅的干燥石渣。如地层轻微渗水，加入少量的通用处理剂，一般认为，间断注入处理剂比连续注入更为有效。

(4) 润滑剂——在干孔中可能需要用些干燥润滑剂的这种想法被普遍接受之前，必须研制出一种更有效的材料和工艺。石墨通常被选用作润滑剂，用于解决此问题有明显的效能。

除上述四种被普遍采用的化学药剂外，有几种无须挤注的保护页岩和堵水的材料已经试验，均尚未完全取得成功。

6. 干 孔 测 井

有冲洗液的井眼不同于有空气或天然气的井眼，后者只能采用无需液体作为地层接触介质的仪器进行测井。

在这些井中，感应测井是测量地层电阻率的唯一工具。伽马射线测井能区别页岩与非页岩地层。而伽马-伽马密度测井则能测知孔隙度，甚至在含气层用中子测井能指示出低表面孔隙度。若伽马射线测井与伽马-伽马密度测井同时并用，能计算出干净地层中天然气饱和度的百分比。

在有天然气流入的井，温度测井可利用流入井内的地方温度略低的道理测知产气层。在多生产层地带，温度测井还可以测知每层产气的相对量。

7. 空气钻进用空压机设备

空压机至少应该位于距井口 150 英尺以外的地方，在排放管的上风处。

由空压机到立管的空气管线应当：

- (1) 直径要大，以减少摩擦损失。
- (2) 装一压力释放阀，预防空压机和其它设备的压力过高。
- (3) 装一止逆阀，防止泵送中的任何液体返回空压机。
- (4) 装有性能可靠的压力表。
- (5) 装一备用接头，以便在必要时向布兰登式套管头接一管线，备反循环使用。
- (6) 立管上装一个阀门以便在改用泥浆时用。

(7) 与排放管连接一放泄管以便在不用空气时，不用把空压机从管线上卸下。钻井人员可以利用一个三通阀门和二标准阀门在钻台上随时控制气流。

根据《美国油井钻井承包商协会》分会对空气或天然气钻进的排放管规定是：

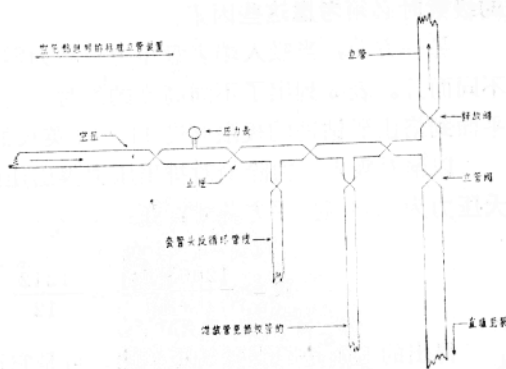


图 1

(1) 口径要大, 以确保岩屑的排出。

(2) 固定牢靠。

(3) 管长至少距井口 300 英尺。

(4) 尽可能成直角位于顺风的一边。

(5) 装一盏指示灯。在钻进时点亮, 直到移开钻进设备为止。

使用多种类型的捕尘器表明，在空气钻进时捕尘器越简单越好。捕尘器的结构应当尽可能大些，以不妨碍气流的流通为好。

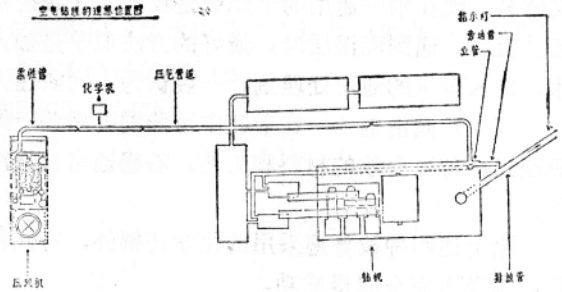


图 2

8. 压缩热力学

空气钻进用的是往复式正作用空压机。有些是在一个往复运动中把空气由吸入压力压缩到输出压力的单级空压机。在二级空压机中，第一级压缩中部分压力增高，经气卸外部热交换器的冷却。在第二个气卸中被进一步压至最终压力。

是否需要经过多级压缩, 取决于最终压力与起始压力比。而压缩级数的增多又直接涉及到成本和往复式机械的服务能力。

那么怎样决定几级压缩才是理想的呢？首先是压缩比——绝对排出压力与绝对吸入压力的比值。单级压缩的压缩比不得超过4，如果大于4，排出空气的温度增高，排气阀很快损坏，而且机器还需要使用一种合成润滑油。很明显，在4级压缩之后，必须逐次加以冷却，因为每级压缩后压力均进一步增高。

在空气钻进的井眼中，在各个不同的时间所要求的压力亦广泛的不同。吸入压力为零磅/平方英寸时，排出压力可达到 1200 磅/平方英寸（表压）。在决定选择压缩比和空压机的级数时必须考虑这些因素。

另一方面,当吸入端表盘压力总是为零磅/平方英寸时,绝对吸入压力就随海拔高度的不同而异。表3列出了不同高度的绝对空气压力。为了讨论,现以5500英尺为例。这是海平面到洛山矶钻进的极限高度11,000英尺的中间高度。

以绝对吸入压力除绝对排出压力得出压缩比 R 。在海拔 5500 英尺的高度时, 需用 的最大压力为 1200 磅/平方英寸, 则:

$$R = \frac{1200 + 12}{0 + 12} = \frac{1212}{12} = 101$$

得出的 101 是所需要的压缩比,可是它远远超过了单级压缩比为 4 的规定。显然,需要多级压缩。

假设使用两级压缩, 则压缩比为上述值的平方根:

$$R = \sqrt{\frac{1212}{12}} = 10.05$$

但比值仍大于 4；超过了两级压缩所限定的压缩比。那么使用三级压缩将如何呢？则压缩比为原值的立方根：

$$R = \sqrt[3]{\frac{1212}{12}} = 4.66$$

三级压缩中每一级的压缩比仍大于 4，这说明还需要一个第四级的压缩，求出四级压缩中每级的压缩比，其值可由原压缩比的四次方根求出：

$$R = \sqrt[4]{\frac{1212}{12}} = 3.17$$

很明显，只有四级压缩才能提供所需最大空气钻进压力，而且每一级的平均压缩比均在限定值 4 以下。

如果上述的这种空压机工作于较低的海拔时，绝对吸入压力就会稍有增加，压缩比就会减少。反之，工作于较高的海拔，吸入压力下降，压缩比将增大。

温度的影响

因为热限制了压缩比，更有必要预计由于压缩产生的温度，温度的增高与压缩比直接有关：

$$T_2 = T_1 R^{\frac{(n-1)}{n}}$$

式中： T_1 ——（绝对吸入温度，以华氏温度加 460 表示）兰金计；

T_2 ——（绝对排出温度）兰金计；

R ——压缩比；

n ——比热，空气的比热为 1.4。

在应用该公式时，最大的吸入温度取 100°F ，这是很多地区夏季常见的温度。这时的压缩比都是 101 的情况下，排出温度即可依下列公式确定：

单级压缩时的温度：

$$T_2 = (100 + 460) \times (101)^{\frac{(1.4-1)}{1.4}} = 560 \times (101)^{0.286} \\ = 2096^\circ \text{ 或 } 1636^\circ \text{ F}$$

两级压缩时的温度：

$$T_2 = (100 + 460) \times (10.05)^{\frac{(1.4-1)}{1.4}} = 560 \times (10.05)^{0.286} \\ = 1083^\circ \text{ R 或 } 623^\circ \text{ F}$$

三级压缩时的温度：

$$T_2 = (100 + 460) \times (4.66)^{\frac{(1.4-1)}{1.4}} = 560 \times (4.66)^{0.286} \\ = 869^\circ \text{ 或 } 409^\circ \text{ F}$$

四级压缩的温度：

$$T_2 = (100 + 460) \times (3.17)^{\frac{(1.4-1)}{1.4}} = (560 \times 3.17)^{0.286} \\ = 778^\circ \text{R 或 } 318^\circ \text{F}$$

现在再考虑一下海拔高度对温度的影响，海拔低，压缩比减少，排出温度也会减低，而海拔高时，压缩比增加，排出温度也随之增高。

机 械 限 度

其他所有条件相同时，带冷却器的空压机在野外工作效率就高。此外，在操作时还须考虑空压机的实际机械限度，不应盲目操作。在操作温度达到或超过 375°F — 400°F 时，会出现阀簧金属疲劳和阀片弯翘的现象。这些重要部件出现这类故障，不仅要减小空压机的风量，而且会降低机器本身的可靠性。

气缸温度达到 300°F — 400°F 时润滑也会出现问题，碳氢化合物型空压机润滑油即使其闪点为 440°F ，最低燃点是 480°F ，亦会造成事故。有鉴于此，使用一种不自燃的合成空压机润滑油较为理想。

为使空气保持尽可能低的温度，需要使用压风量大、高效率的散热式冷却器。在四级空压机中，这种中间冷却器和后冷却器能够在吸入压力为 12 磅/平方英寸、温度为 100°F 时将空气从 320°F 左右降低到低于 130°F ，而且每级的压力降不超过 3 磅/平方英寸。

三级空压机或者与相当两级压风和一个增压器也可以达到前面谈到的情况。但长时间运转，效率上的损失和经常维修是否经济也是值得怀疑的。

使用不能胜任的设备是会带来危害的。例如，空压机的中间冷却器和后冷却器，要求能在最恶劣的现场条件下有效地工作。

除此之外，空压机在多种情况下，甚至在半沙漠国家亦能吸收雾化空气。由于潮气会加速钢磨擦部件的磨损，缩短其寿命。所以必须每级压缩后都要用潮气收集器或潮气漆湿器，往复式空压机不能压缩液体，若冷凝的潮气进入汽缸前未被抽走，机器就会遭到破坏。

空压机压缩空气中未抽走的湿气，在钻杆中冷凝成水，同空气一样可以冷却钻头。天气寒冷时，管线起后冷却器的作用，尤其冷凝空压机中未被抽掉的湿气成水。这样，地层和岩屑可能变潮并在干钻进时形成“泥包”。空压机的后冷却器可以避免出现这样的问题。

当今，钻探工业界拥有了自己的多用空压机，这种空压机能适应空气、空气泡沫和充气泥浆钻进。其设计特性已证明具有中压缩比、有效地中间冷却和后冷却及低操作温度。因此，这种多用空压机的性能可保持长期可靠。

9. 空气钻进用空压机的设计

在 Magcobar 公司未进入空气钻进领域之前，空气钻进操作一直受现用的空压机的机械性能的限制。最近，Magcobar 公司和 Clark Bros 公司共同设计出了不受空气钻进所要求限制的空压机。

Magcobar 空压机是整体结构、相对平衡装置。商名为 CFB-4。底座结构是美国最常见的类型。空压机的汽缸安装在曲柄箱的对面，成 180° 与曲轴连接。

所有的往复动作零件的重量如活塞、十字头和连杆，用与之均衡重量的部件加以平衡，

以抵消了反作用，无需装重型平衡装置，机器可长期运转，而不出故障。

设计上的其他特征：

(1) 余隙——任何空气钻进空压机都需要一定的控制，以使发动机的载荷稳定。否则，吸入压力和排除压力的变动将导致超载。减小或增大空压机气缸的余隙可保持 Magcobar 空压机的发动机的额定载荷。或者，打开一个吸入阀可使各别气缸完全卸载。

在空压机中，余隙是指小于活塞一个冲程的那部分绝对体积。一般，余隙是以移动容积的百分比表示，理想状态是余隙为零，那时能得到 100% 的效率。实际上每一个气缸在端点和阀的周围必须有一定的余隙。为了调节发动机的载荷甚至需要更大的余隙。

增大余隙的一个方法是使用气缸上的隙囊。当这些隙囊打开时，空压机运转速度稳定，但排气量降低。这时，空气可以在不超载的情况下被压至较高的压力。

隙囊可以是固定的或者可变的，当隙囊打开时，固定隙囊给气缸加一定的不变的容积。隙囊必须是可完全打开或完全关闭的。另一方面，可变隙囊在隙囊的限制内加大余隙容积，这样就可以完全控制空压机的能力和发动机的载荷。

(2) 卸载器——调节空压机能力，使之达到有效马力的另一种方法是打开吸入阀片，从而使气缸卸载。吸入阀起阀器能使阀完全打开或完全关闭。

吸入阀卸载器和固定隙囊可以人工操作或自动控制。Magcobar CFE-4 空压机，可以自动调节范围较大的空气量。

(3) 冷却器——在现代空压机中，压缩基本上是绝热的。也就是说压缩热保留在空气中。因而必须把热扩散，避免造成空压机内温度过高。每一压缩级之间装中间冷却器，以冷却空气可避免因碳沉积和热损伤阀和活塞所引起的效率损失。使用有效的中间冷却器，减小了压缩一定量空气的马力，使机器运转更加可靠。

后冷却器用以保护各阀门、水龙头、回转软管和钻头产生高温，否则会使部件过早损坏。

在多级空压机内涤气器或脱水器起了很大的作用，因为空压机内余隙甚小，而且水不能压缩，聚集在气缸中的水就会把气缸盖顶开。后涤气器可避免水进入防尘孔。

所有的空气都含有一定的湿度，空气越热含潮气越多。此外，压力增加（用减少体积的办法）空气则含潮气少。当潮气离开一特殊缸体时，它不会引起特别的问题。而当它通过一中间冷却器后，问题即出现了，以后潮气接近最初吸入湿度，但被压成一较小的体积。当冷却时，空气由于特殊的压力和一些潮气的冷凝而降至露点以下。因此，必须使用涤气器去潮。

要除去的水量可能是很大的。特别是在潮湿的天气。假使吸入的空气湿度为 100%，温度为 100° F，图 4 即表明每 1000 立方英尺的空气含有 2.85 磅的水。如果同样的空气被压缩至 350 磅/平方英寸的压力，温度为 100° F，其中只含 0.1 磅的水。所以，如果在这样的情况下，空压机能提供 1550 立方英尺/分钟的压气量，涤气器每小时就将倾出 31 加仑的水。

鉴于以上这些原因，对 Magcobar CFB-4 的中间冷却器，后冷却器和涤气器已给予了特别的注意，以确保进行可靠的冷却，确保无潮气的空气进入钻杆。如下的各项亦保证了无故障服务：

(1) 每一级之后，均安有卸压阀。

(2) 空压机-震动停车开关。

(3) 空压机与发动机均装停车开关，以便当水套温度高或油压低时，关闭空压机和发动机。

10. 自由空气

钻进时所需空气量可用三种方法表示：

(1) 空压机的排量——这是在额定速度及假设 100% 的效率情况下空压机的理论排量。这个排量一般用立方英尺/分 (cfm) 表示。对多级空压机来说仅表示第一级或低压级的排量。因为它与实际空气排量关系不大，不是一个很合适的评议性数据。

(2) 标准空气——这是在标准条件下计算的排量 (68° F, 14.7 磅/英寸², 36% 相对湿度, 密度为 0.0750 磅/英尺³)

(3) 自由空气——这是未曾用海拔高度或温度进行校正过的实际空气排量。

在确定空气钻进一个孔的空气需要量时，最重要的一个因素是可获得的空气量。其所以重要是因为此空气量反映吸入端的实际状况，即这个排量表明在一定的吸入温度、压力和组份时的体积 (英尺³/分)。用这种方式表示的空气量被称之为自由空气量。这是空压机在现场作业时，以吸入压力为一个大气压时最简单的表示空气量的方法。

然而为了补偿包括钻机各种安装部位的高度和周围各种空气温度等多种不同状况，在确定空气钻进所需空气量时，应把自由空气换算成不同标准空气容积。

表 3 绝对空气压力与海拔高度相应关系

海拔高度 英尺	压 力 磅/英寸 ²	海拔高度 英尺	压 力 磅/英寸 ²
0	14.96	6,000	11.77
500	14.42	6,500	11.55
1,000	14.16	7,000	11.33
2,000	13.66	8,000	10.91
2,500	13.41	8,500	10.70
3,000	13.16	9,000	10.50
3,500	12.92	9,500	10.30
4,000	12.68	10,000	10.10
4,500	12.45	10,500	9.90
5,000	12.22	11,000	9.71
5,500	11.99		

空 压 机 效 能 的 比 较
自由空气 (CFM) 表

海拔高度	绝对压力	马科巴 CFB-4 空压机	加登纳 — 丹 佛 WEK	焦 爱 Wn-102
		350 磅/英寸 ² (表压)	350 磅/英寸 ²	250 磅/英寸 ²
0	14.96	1580	430	748
			765	

马科巴 CFM-4 空压机：排量 2000 英尺³/分，1000 转/分

加登纳-丹佛 WEK 空压机：排量 655 英尺³/分，1000 转/分

加登纳-丹佛 WEN 空压机：排量 1146 英尺³/分，1000 转/分

焦爱 Wn-102 空压机：排量 923 英尺³/分，800 转/分

11. 用空气或天然气钻进时安全施工预检项目

制定一个类似于普通回转，泥浆钻进所用的，但用于空气钻进的标准合理的安全条例，将会减少潜在的事故。在空气和天然气钻进作业中，孔中无泥浆柱以及经常形成空气和天然气的可燃性混合物等若干项目都应强调予以特别注意。

有关空气和天然气钻进一些主要安全预检项目列明如下。它们的具体应用依各个井的情况和操作者的需要而定，这些项目可随着区域的不同而增加或加以更改。

(1) 所有发动机都应装有防爆点火装置或防爆系统以及排气管用的注水系统。所有发动机的排气管都应焊牢，以确保成为一个闭路系统。

(2) 钻机所有照明装置都应是防蒸气和防爆的。井口，防喷器和井口圆井都应采用泛光探照灯，在能给予合适照明条件下，灯源尽可能设置远一些。

(3) 任何时候水泵与立管和井口装置接通，泥浆池或泥浆罐应配足泥浆或水，以备急需时向井内灌注。

(4) 所有链罩应用整体结构，并采取油浴。

(5) 当使用或遇到天然气时，仅准使用不打火花的工具和猫头绳。各个钻杆接头和方钻杆补心需经常保持良好润滑。把所有离合器调整好，以防冒火花。

(6) 井架底座不应密封，应充分通风，以防止天然气积聚。

(7) 手边应备有足够防火设备。

(8) 离钻机 200 英尺的每一路口处，应树立正进行空气或天然气钻进的报警标志，谢绝参观，教育全体工作人员通晓防火规则。

(9) 井场不允许生明火，信号灯应熄灭，除确认的安全炉外，其它炉子均不准用。

(10) 钻棚要装于与钻机有一定的安全距离以外，以备工作人员存放火柴、香烟等物。每次工作开始前应按规定检查上班人员。劝告参观人员遵守有关安全防火的规定。

(11) 汽车装备应停放在与钻机有一定距离的指定地点。

(12) 收音机，汽车电话与钻机距离 200 英尺。

(13) 每隔适当时期，对防喷器的情况、操作要进行试验，以检验其额定压力、高度和内孔等。不许使用生锈的、有砂眼的、有凹痕或弯曲的垫圈。

(14) 节流管汇上的所有阀门都必须是全开放式的，钢法兰连接式的阀门。安装前对各阀门的工作状态进行检查，对作业情况也要定时进行检查。

(15) 节流管汇必须具有不用关闭液流，就能更换各种节流嘴子的结构。

(16) 液压防喷器应备有二个控制地点，一个靠近司钻，另一个离井口有一定安全距离，全部管道与接头要用高压钢管或经确认的管线建成。

(17) Hydril 公司生产的主阀门主要在紧急时才使用，以确保作业安全。在钻进中，除紧急状态外，不应关闭主阀门。

(18) 所有防喷器和阀门都须装有加长操纵杆，以使工人在井架底座以外即用人力关闭之。

(19) 防喷器的蓄能器应设于远离井口的安全位置。

(20) Hydril 主阀门内垂直衬套，必须备有为空气和天然气钻进用的沟槽。