第七章 固井和完井

Chapter 7 Well Cementing and completion

固井：下套管+注水泥

井身结构设计;

套管柱设计;

注水泥技术;

固井质量的核心问题就是套管柱的强度和环形空间的密封及胶结质量问题。

完井

钻开生产层;

完井井底结构;

完井井口装置。

第一节 井身结构设计
Section 1 Casing program

主要包括套管层次和每层套管的下深、套管和井眼尺寸的配合以及每次水泥浆的返深。

一、套管的分类及作用

1、表层套管

- 封隔地表浅水层及浅部疏松和复杂地层;
- 安装井口、悬挂和支撑后续各层套管。

2、生产套管（油层套管）

钻达目的层后下入的最后一层套管，用以保护生产层，提供油气生产通道。

3、中间套管（技术套管）

在表层套管和生产套管之间由于技术要求下入的套管，可以是一层、两层或更多层。主要用来封隔井下复杂地层。

4、尾管（衬管）

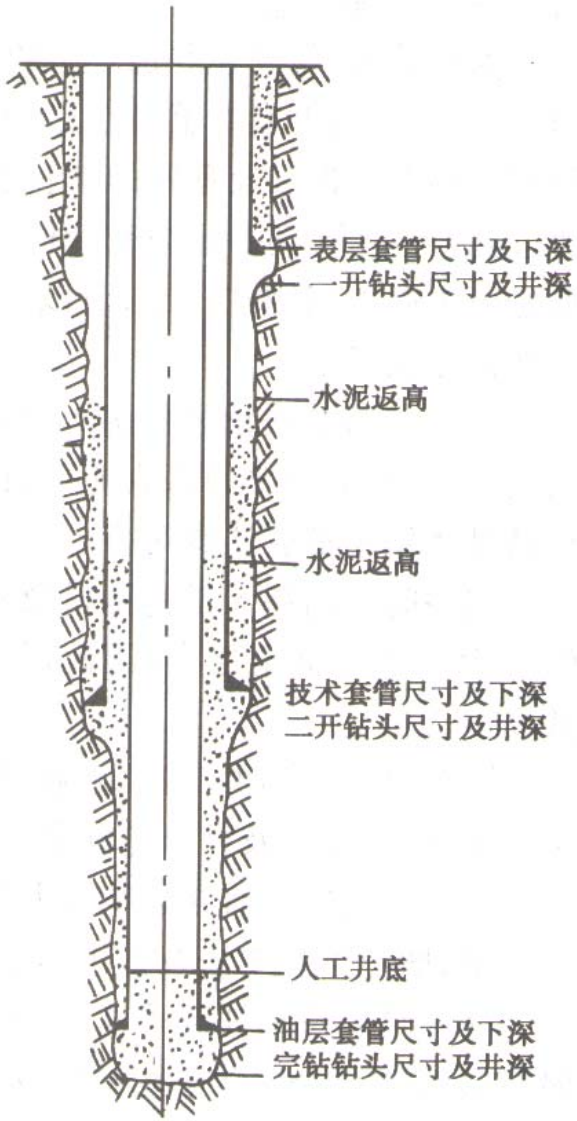
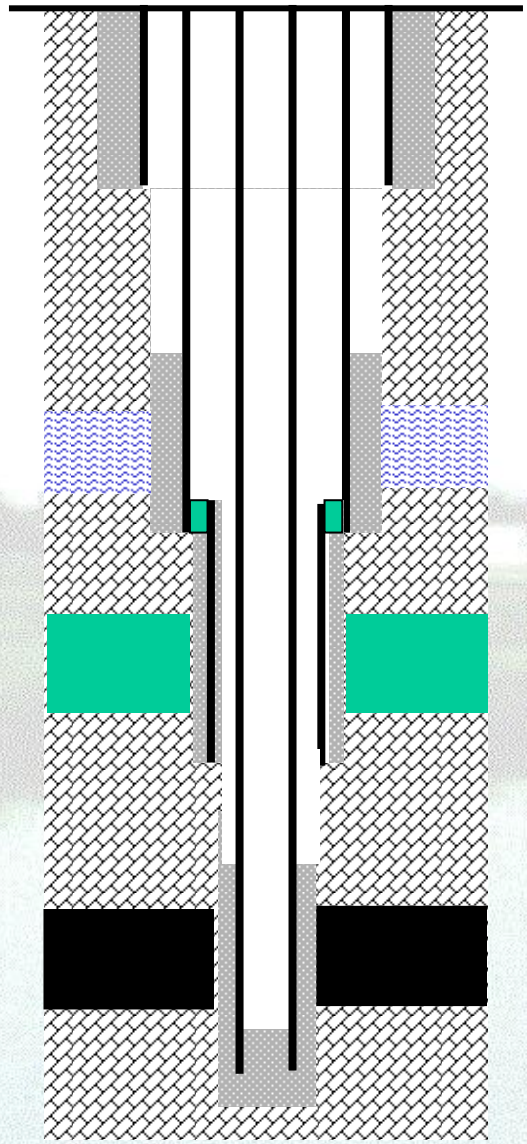

表层套管尺寸及下深
一开钻头尺寸及井深
水泥返高
水泥返高
技术套管尺寸及下深
二开钻头尺寸及井深
人工井底
油层套管尺寸及下深
完钻钻头尺寸及井深

图 7-1　套管的基本类型



二、井身结构设计的原则

1、有效地保护油气层；

2、有效避免漏、喷、塌、卡等井下复杂事故的发生，保证安全、快速钻进；

3、当实际地层压力超过预测值而发生井涌时，在一定压力范围内，具有压井处理溢流的能力。

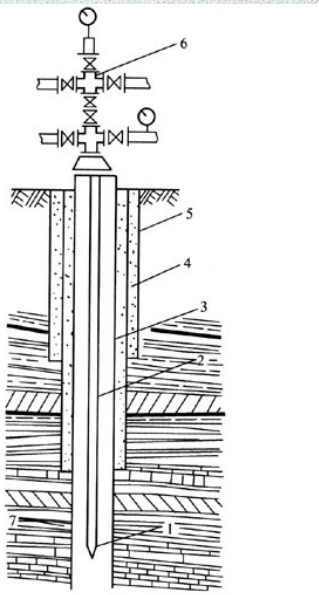


图 1-2　天然气气井井身结构图

1—油管鞋；2—油管；3—油（气）层套管；4—技术套管；5—表层套管；6—采气树；7—生产层

三、井身结构设计的基础数据

- 地层岩性剖面、地层孔隙压力剖面、地层破裂压力剖面、地层坍塌压力剖面。
- 6个设计系数：

  抽系压力系数S_b，24 ~48 kg/m^3

  激动压力系数S_g，24 ~48 kg/m^3

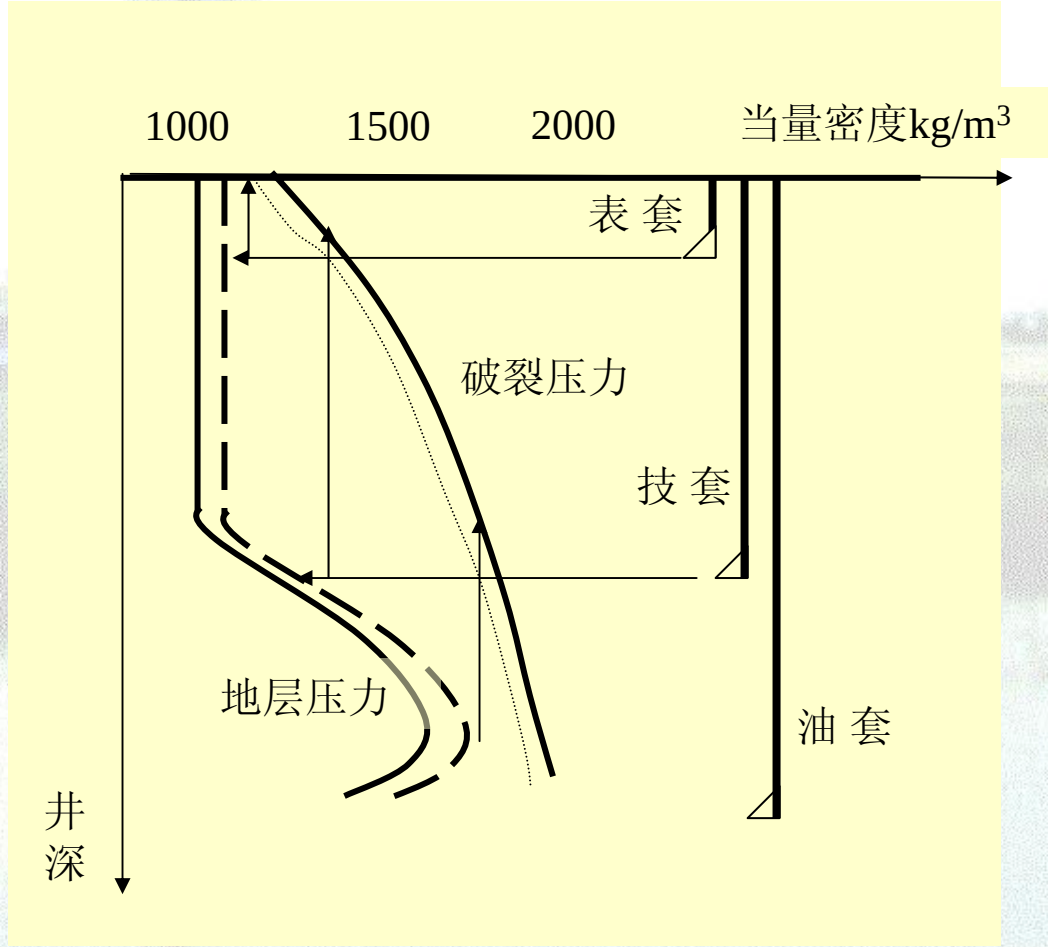
  压裂安全系数S_f，30 ~60 kg/m^3

  井涌允量S_k，50 ~80 kg/m^3

  压差允值Δp，ΔP_N=15 ~18 MPa，ΔP_A=21 ~23 MPa

四、确定套管层次和下深的基本思路

依据两个压力剖面，以保证钻进时井内最大压力不压裂最薄弱的裸露地层为原则，从全井最大地层压力梯度处开始，由下向上确定套管的层次和各层套管的下入深度。



五、裸眼井段应满足的力学平衡条件

$$\rho_d \geq \rho_{\mathrm{pmax}} + S_{\mathrm{b}}$$ 防井涌

$$(\rho_{\mathrm{dmax}} - \rho_{\mathrm{pmin}}) \times D_{\mathrm{pmin}} \times g \leq \Delta p_{\mathrm{N}}(\Delta p_{\mathrm{A}})$$ 防压差卡钻

$$\rho_{\mathrm{dmax}} + S_{\mathrm{g}} + S_{\mathrm{f}} \leq \rho_{\mathrm{f\,min}}$$ 防井漏

$$\rho_{\mathrm{dmax}} + S_{\mathrm{f}} + S_{\mathrm{k}} \times \frac{D_{\mathrm{pmax}}}{D_{\mathrm{c1}}} \leq \rho_{\mathrm{fc1}}$$ 防关井井漏

六、套管尺寸与钻头尺寸的选择

1. 原则:

（1）套管能顺利下入井眼内，并具有一定的环空间隙注水泥。

（2）钻头能够顺利从上一层套管内通过。

2. 经验配合关系

- 长期实践形成的经验配合关系（P 256，图7-3）
- 国内常用的配合关系:
  - **(17 ½) 13 3/8—(12 ¼) 9 5/8—(8 ½) 5 ½**
  - **（26）20 —（17 1/2）13 3/8—（12 1/4）9 5/8—（8 1/2）7—（5 7/8）4 1/2 或 5**

第二节 套管柱强度设计
Section 2 Casing string design

一、套管和套管柱

1. 套 管

（1）结构特点

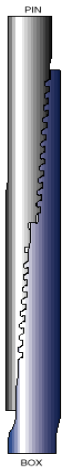
优质无缝钢管，一端为在管体上车制的公扣，一端为带母扣的套管接箍。

（2）尺寸系列（API 标准）

直径：4 1/2”，5”，5 1/2”，6 5/8”，7”，7 5/8”，8 5/8”，9 5/8”，10 3/4"，11 3/4"，13 3/8"，16"，18 5/8"，20"；共14种。

壁厚：5.21 ~ 16.13 mm。

Casing Connections

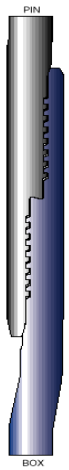


SuPreme LX

Moderate-to-high pressure oil and gas wells requiring metal seal reliability with good structural capability, particularly in clearance situations. Commonly used in gas wells greater than 12000' deep.

Production Casing
Tie-Backs
Intermediate Casing
Liners

Special applications include gas storage production strings and high alloy liners.



MAC-II

High pressure gas wells requiring metal seal reliability combined with good structural capability. Commonly used in high pressure gas wells greater than 15000' deep for the critical heavy wall casing strings.

Production Casing
Tie-Backs
Intermediate Casing

Special applications include very heavy wall casing for shifting salt intervals.

Series 500 Type 563

Moderate-to-high pressure oil and gas wells requiring metal seal reliability combined with superior structural capability. Commonly used in gas wells and higher pressure oil wells for production casing strings.

Production Casing
Tie-Backs

Special applications include geothermal and steam injection production strings and subsidence interval strings.

Series 500 Type 521

Moderate pressure oil and gas wells requiring superior structural capability, particularly for rotation-while-bending. Commonly used in horizontal and extended reach wells and large diameter surface strings.

Horizontal Liners
Surface Casing
Intermediate Casing
Drilling Liners

Special applications include liners for geothermal wells and screens for horizontal wells.

Series 500 Type 511

Low-to-moderate pressure oil and gas wells requiring good structural capability primarily in clearance situations. Commonly used in horizontal and extended reach wells and as drilling liners.

Horizontal Liners
Repair Liners
Drilling Liners
Wash Pipe

Special applications include wire-wrapped screens for horizontal wells and tubing salvage.

（3）钢级（API 标准）

H-40，J-55，K-55，C-75，L-80，N-80，C-90，C-95，P-110，Q-125。

数字×1000为套管的最小屈服强度 kpsi。

（4）螺纹类型（API标准）

短圆（STC）、长圆（LTC）、梯形（BTC）、直连型（XL）

2、套管柱

由同一外径、不同钢级、不同壁厚的套管用接箍连接组成的管柱。特殊情况下也使用无接箍套管柱，套管柱的外径也可以不同。

二、套管柱受力

- 套管柱在井内所受外载复杂。在不同时期（下套管过程中、注水泥时、后期开采等过程中）套管柱的受力也不同。
- 在分析和设计中主要考虑基本载荷：轴向拉力、外挤压力及内压力。

井下套管柱的受力

- 轴向拉力：自重、弯曲应力、注水泥附加拉力、动载、摩阻、热应力等。
- 外挤压力：管外液柱压力、岩层压力、热应力等。
- 内压力：地层流体压力、压裂及注水等压力。

1、套管轴向拉力的计算

在常规的套管柱设计中，轴向拉力一般按套管的重力计算。其它轴向载荷，如弯曲应力引起的附加拉力、动载荷、注水泥引起的附加拉力、摩阻力等，一般考虑在安全系数之内。

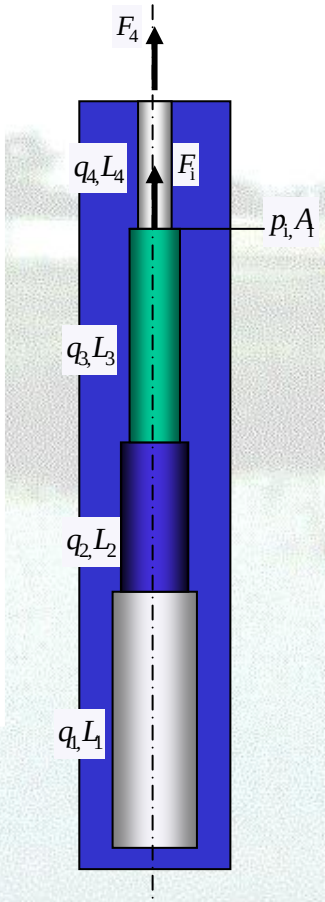
- 套管自重产生的轴向拉力，自下而上逐渐增大，在井口处达到最大。
- 国内在套管设计中，轴向拉力一般按套管在空气中的重力计算F_o。设计结果一般偏于安全。
- 如果进行真三维应力设计，则必须算出真实的轴向力大小F_m。

$$F_o = \sum_{i=1}^{n} q_i L_i$$

$$F_m = \sum_{i=1}^{n} q_i L_i \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) - p_i A_i$$

$$= \sum_{i=1}^{n} K_B q_i L_i - p_i A_i$$

$$= \sum_{i=1}^{n} q_{mi} L_i - p_i A_i$$



2、外挤压力计算

- 主要载荷：管外液柱的压力、地层中流体的压力、高塑性岩石（盐膏层、泥岩层）的侧向挤压力等。
- 常规情况下按套管全淘空时的管外钻井液液柱压力计算。
- 有大段盐膏层的特殊情况下，有时将钻井液密度替换为上覆岩层压力的当量密度进行计算。

$$P_{oc} = g\rho_d D$$

- 套管柱所受的外挤力，在井底最大，井口最小。

3、内压力计算

国内外普遍采用以下方法计算套管的内压力:

有效内压力 = 井口压力 + （管内液柱压力-管外液柱压力）

考虑到套管外的平衡压力，一般情况下，套管在井口所受的内压力最大。

计算时，考虑三种最危险的情况确定井口压力

(1) 套管内充满天然气并关井时的内压力;

$$p_{\mathrm{i}}=\frac{p_{\mathrm{gas}}}{e^{1.1155\times10^{-4}GD}}$$

(2) 以井口装置的承压能力作为套管在井口所受的内压力;

(3) 以套管鞋处的地层破裂压力值确定井口内压力:

$$p_i = D(G_{\mathrm{f}} + \Delta G_{\mathrm{f}})$$

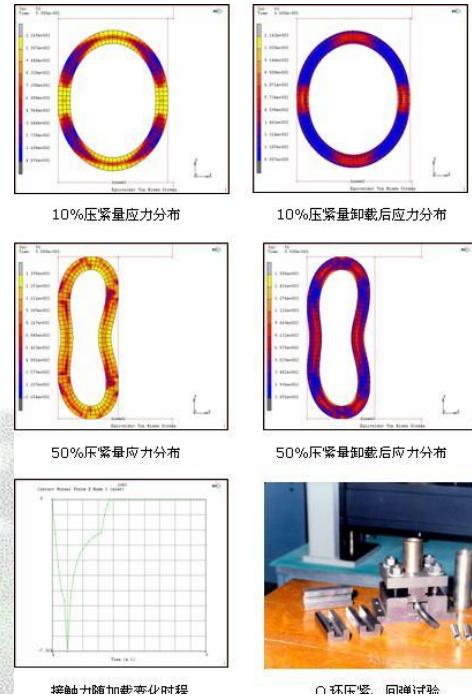
三、套管的强度

1、套管的抗拉强度

- 套管所受轴向拉力一般在井口最大。
- 由拉应力引起的破坏形式：本体被拉断、脱扣。
- 圆螺纹套管的丝扣滑脱负荷小于管体的屈服拉断负荷；以丝扣滑脱负荷作为其抗拉强度；
- 梯形螺纹套管和直联型套管的丝扣滑脱负荷大于管体的屈服拉断负荷。以管体屈服拉力作为其抗拉强度。

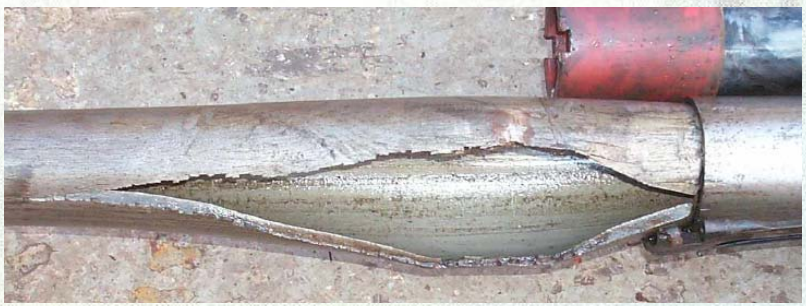
2、套管的抗外挤强度

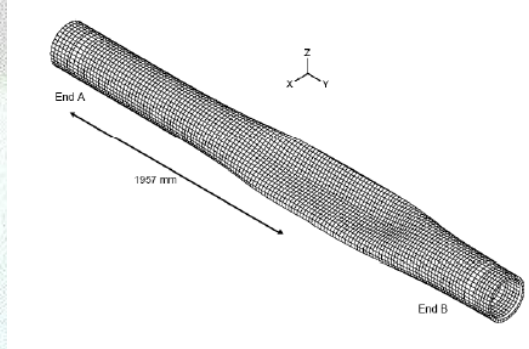
- 外挤载荷作用下的破坏形式：
  - 径厚比较大时，失稳破坏（失圆、挤扁）；
  - 径厚比较小时，强度破坏。
- 根据现有套管尺寸，绝大部分是失稳破坏。套管开始丧失稳定性时的外挤压力值称为其抗挤强度。
- 抗挤强度可以在钻井手册或套管手册中查到。



3、套管的抗内压强度

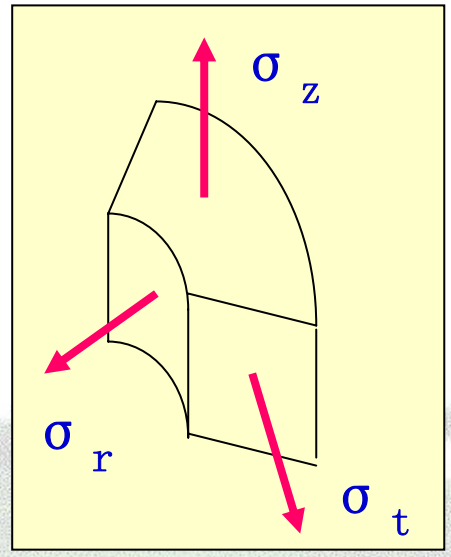
- 内压载荷下的主要破坏形式：爆裂、丝扣密封失效。
- 抗内压强度可由钻井手册或套管手册查到。





4、双向应力下的套管强度

从套管内部取一微小单元（如图），分析可知，在外载作用下产生三个方向的应力 σ_t、σ_r、σ_z，对于薄壁管，$\sigma_t >> \sigma_r$，σ_r 可以忽略。变为双向应力问题。

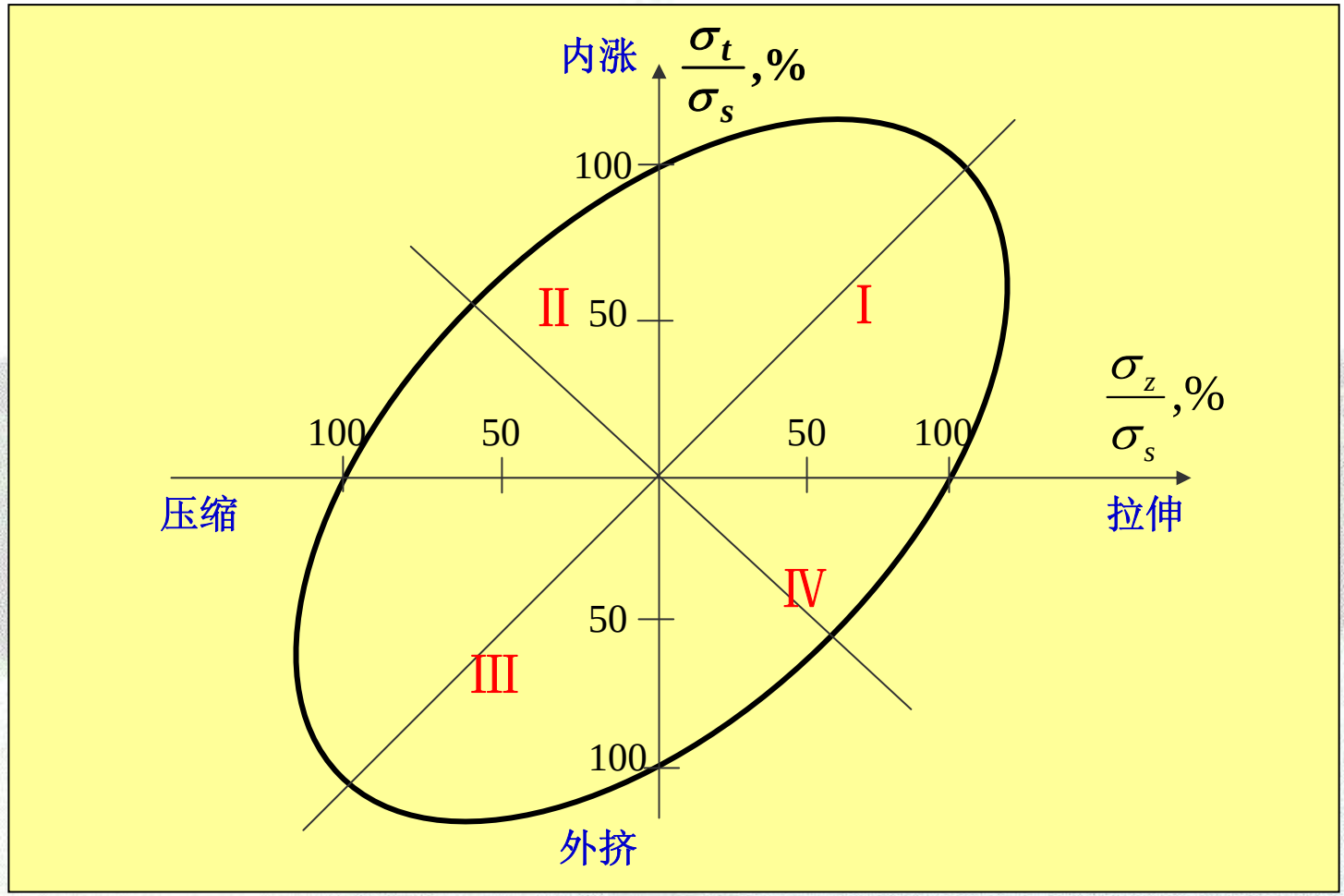


由第四强度理论，得出套管在双向应力作用下的强度破坏条件：

$$\sigma_z^2 + \sigma_t^2 - \sigma_z \sigma_t = \sigma_S^2$$

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_s}\right)^2 - \frac{\sigma_z \sigma_t}{\sigma_s^2} + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_s}\right)^2 = 1$$

按拉为正、压为负，根据强度破坏条件可画出椭圆图形：



双向应作用下套管强度的变化：

- 第一象限：拉伸与内压联合作用，轴向拉力的存在下使套管的抗内压强度增加。
- 第二象限：轴向压缩与内压联合作用。在轴向受压条件下套管抗内压强度降低。
- 第三象限：轴向压应力与外挤压力联合作用。在轴向受压条件下套管抗外挤强度增加。
- 第四象限：轴向拉应力与外挤压力联合作用。轴向拉力的存在使套管的抗挤强度降低。由于这种情况在套管柱中是经常出现的。因此在套管柱设计中应当考虑轴向拉力对抗挤强度的影响。

5、考虑轴向拉力影响时的抗外挤强度计算公式

$$p_{cc} = p_c\left(1.03 - 0.74 \times \frac{F_m}{F_s}\right)$$

其中：P_c为从手册中查到的轴向拉力为零时套管的抗外挤强度；F_m 为轴向拉力；F_s为管体屈服拉力。

是个近似计算式。

四、套管柱强度设计

目的：确定合理的套管钢级、壁厚、以及每种套管的井深区间。

1、设计原则

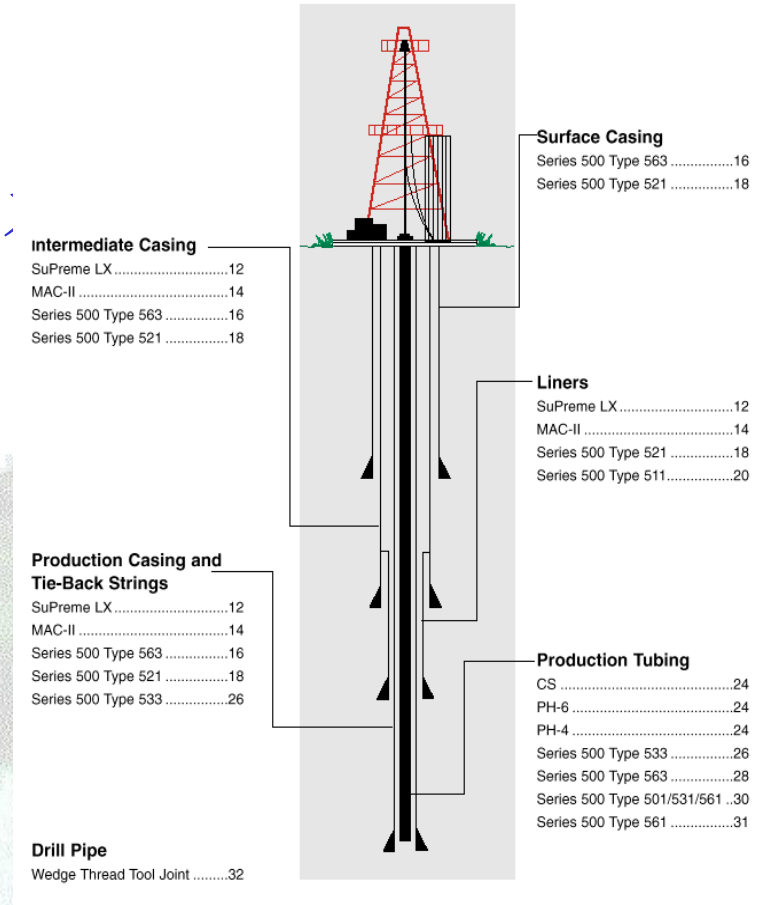
- 满足强度要求，在任何危险截面上都应满足下式：

  套管强度＞外载×安全系数

- 应能满足钻井作业、油气层开发和产层改造的需要；
- 在承受外载时应有一定的储备能力；
- 经济性要好。
- 安全系数：
  - 抗外挤安全系数 S_c=1.0；
  - 抗内压安全系数 S_i=1.1；
  - 套管抗拉力强度（抗滑扣）安全系数 S_t=1.8；
  - 按三维应力的设计安全系数？。

2、各层套管柱的设计特点

- 表层套管：主要考虑内压载荷。
- 技术套管：既要有较高的抗内压强度，
  有抗钻具冲击磨损的能力。
- 油层套管：上部抗内压，下部抗外挤。



3、套管柱设计的等安全系数法

该方法基本的设计思想是使各个危险截面上的最小安全系数等于或大于规定的安全系数。

基本设计思路

①计算本井可能出现的最大内压力，筛选符合抗内压强度的套管；

②下部套管段按抗挤设计，上部套管段按抗拉设计，各危险断面上的最小安全系数要大于或等于规定安全系数；

通式：套管强度 > 外载 × 安全系数

③水泥面以上套管强度要考虑双向应力的影响；

④轴向拉力通常按套管在空气中的重量计算；当考虑双向应力时，按实际轴向力计算。

第三节 注水泥技术
Section 3 Cementing technology

- 注水泥目的：固定套管、有效封隔井内的油气水层。
- 本节内容：油井水泥；水泥浆性能；提高注水泥质量的措施。
- 注水泥的基本要求：

（1）水泥浆返高和套管内水泥塞高度必须符合设计要求；

（2）注水泥井段环形空间内的钻井液全部被水泥浆替走，不存在残留现象；

（3）水泥石与套管及井壁岩石有足够的胶结强度，能经受住酸化压裂及下井管柱的冲击；

（4）水泥凝固后管外不冒油、气、水，环空内各种压力体系不能互窜；

（5）水泥石能经受油、气、水长期的侵蚀。

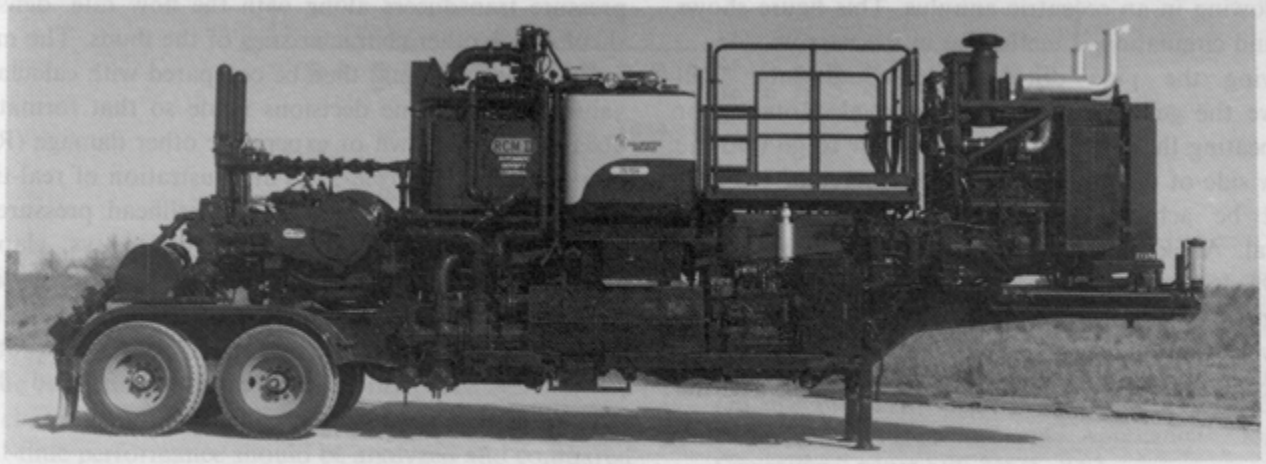


Figure 8-29 Pump

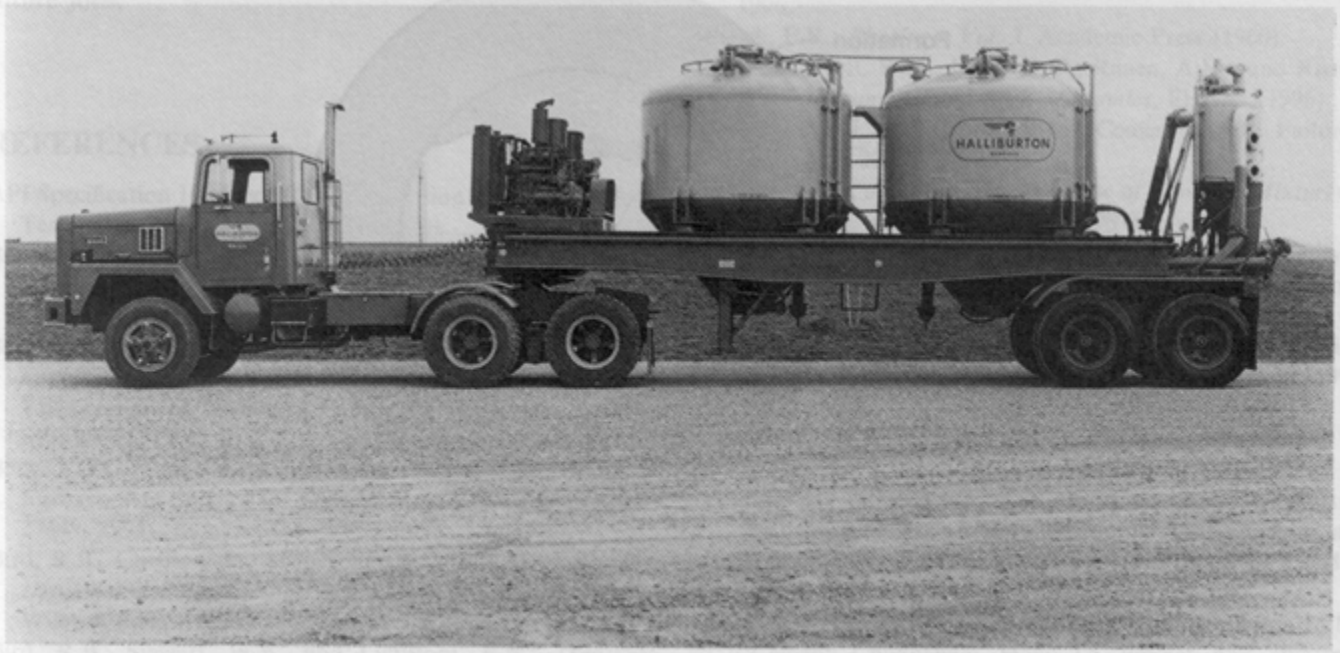
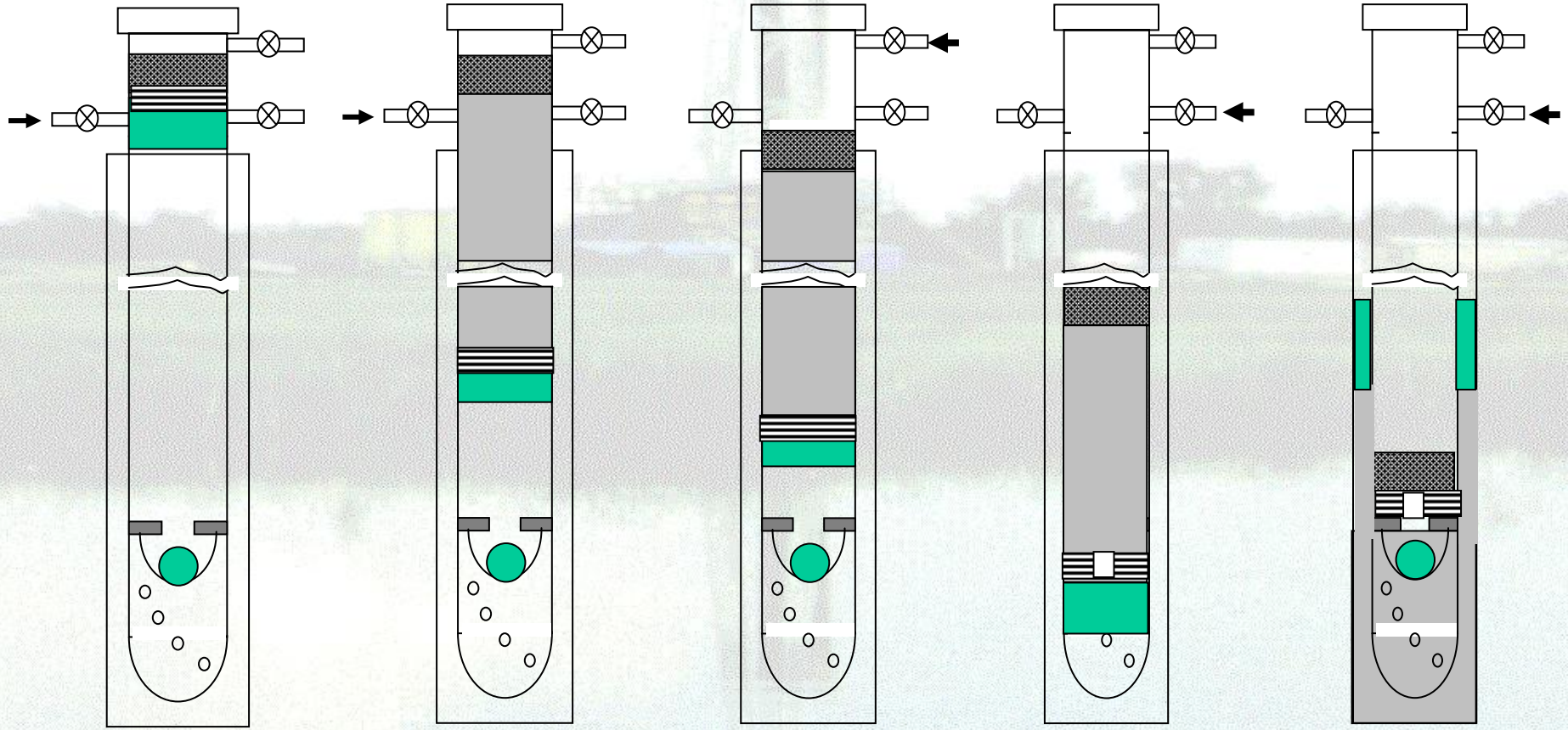


Figure 8-30 Bulk equipment

注水泥过程

冲洗液+隔离液+下胶塞+水泥浆+ 上胶塞+顶替液



打前置液　注水泥浆　顶胶塞　替钻井液　碰 压

一、油井水泥

油井水泥是一种硅酸盐水泥。

对油井水泥的基本要求：

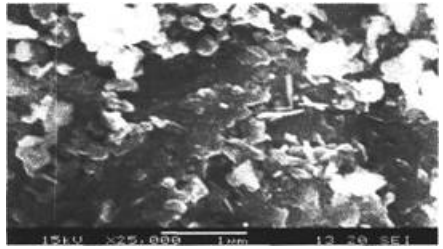
（1）水泥能配成流动性良好的水泥浆，且在规定的时间内，能始终保持这种流动性。

（2）水泥浆在井下的温度及压力条件下保持性能稳定；

（3）水泥浆应在规定的时间内凝固并达到一定的强度；

（4）水泥浆应能和外加剂相配合，可调节各种性能；

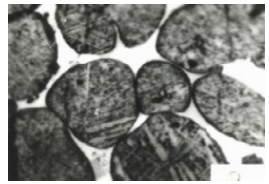
（5）形成的水泥石应有很低的渗透性能等。



1、油井水泥的主要成分

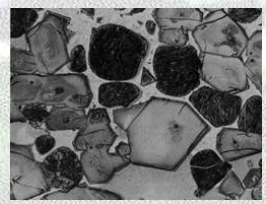
（1）硅酸三钙$3CaO\cdot SiO_2$（简称C_3S）

水泥的主要成份，一般的含量为 40%～65%。对水泥的强度，尤其是早期强度有较大的影响。



（2）硅酸二钙$2CaO\cdot SiO_2$（简称C_2S）

含量一般在24%～30%之间；水化反应缓慢，强度增长慢；对水泥的最终强度有影响。

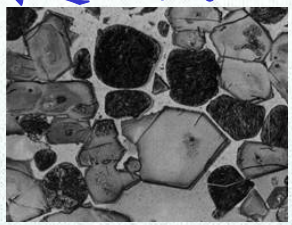


（3）铝酸三钙$3CaO\cdot Al_2O_3$（简称C_3A）

促进水泥快速水化；是决定水泥初凝和稠化时间的主要因素；对于有较高早期强度的水泥，其含量可达15%。

（4）铁铝酸四钙$4CaO_2\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3$（简称$C_4AF$）

早期强度增长较快，含量为8%～12%。



除了以上四种主要成份之外，还有石膏、碱金属的氧化物等。

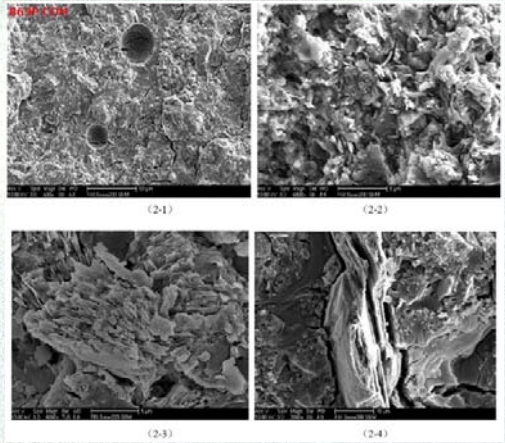
2、水泥的水化

水泥与水混合成水泥浆后，与水发生化学反应，生成各种水化产物。逐渐由液态变为固态，使水泥硬化和凝结，形成水泥石。

（1）水泥的水化反应

- $3CaO\cdot SiO_2 + 2H_2O \rightarrow 2CaO\cdot SiO_2\cdot H_2O + Ca(OH)_2$
- $2CaO\cdot SiO_2 + H_2O \rightarrow 2CaO\cdot SiO_2\cdot H_2O$
- $3CaO\cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O$
- $4CaO\cdot Al_2O_3 + Fe_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O + CaO\cdot Fe_2O_3\cdot H_2O$

除此之外还发生其他二次反应，生成物中有大量的硅酸盐水化产物及氢氧化钙等。



（2）水泥凝结与硬化

水泥的硬化分为三个阶段：

- 溶胶期：水泥与水混合成胶体液，开始发生水化反应，水化产物的浓度开始增加，达到饱和状态时部分水化物以胶态或微晶体析出，形成胶溶体系。此时水泥浆仍有流动性。
- 凝结期：水化反应由水泥颗粒表面向内部深入，溶胶粒子及微晶体大量增加，晶体开始互相连接，逐渐絮凝成凝胶体系。水泥浆变绸，直到失去流动性。
- 硬化期：水化物形成晶体状态，互相紧密连接成一个整体，强度增加，硬化成为水泥石。

3、油井水泥的分类

（1）API水泥的分类

级别	使用深度范围 m	使用温度范围，℃	类型			说明
			普通	抗硫酸盐		
				中	高	
A	0 ~ 1830	≤76.7	●			普通水泥
B				●	●	中热水泥，中、高抗硫酸盐型
C				●	●	早强水泥，普通和中、高抗硫酸盐型
D	1830 ~ 3050	76 ~ 127		●	●	用于中温中压条件，中、高硫酸盐型
E	3050 ~ 4270	76 ~ 143		●	●	基本水泥加缓凝剂，高温高压用
F	3050 ~ 4880	110 ~ 160		●	●	基本水泥加缓凝剂，超高压、高温用
G	0 ~ 2440	0 ~ 93		●	●	基本水泥，分中、高抗硫酸盐型
H				●	●	
J	3660 ~ 4880	49 ~160	●			超高温用，普通型

（2）国产以温度系列为标准的油井水泥

- 45℃水泥：用于表层或浅层，深度小于1500米；
- 75 ℃水泥：用于井深1500~3200米。超过3500米，应加入缓凝剂。超过110 ℃，应加入不少于28%的硅粉。
- 95 ℃水泥：用于井深2500~3500米。超过110 ℃，加入28%以上的硅粉。
- 120 ℃水泥：用于井深3500~5000米。当用于4500~5000米时，应加入缓凝剂及降失水剂。

二、水泥浆性能与固井工程的关系

1、水泥浆性能

①水泥浆密度

- 干水泥密度 3050～3200 kg／m^3,
- 水泥完全水化需要的水为水泥重量的20％左右;
- 使水泥浆能流动加水量应达到水泥重量的45％～50％;
- 水泥浆密度1800～ 1900 kg／m^3之间。
- 水灰比：水与干水泥重量之比。

②水泥浆的稠化时间

- 水泥浆从配制开始到其稠度达到其规定值所用的时间。

③水泥浆的失水

一般用30分钟的失水量表示。

④水泥浆的凝结时间

- 从液态转变为固态的时间。
- 对于封固表层及技术套管，希望水泥能有早期较高的强度。通常希望固完井候凝 8hr.左右，水泥浆开始凝结成水泥石，其抗压强度可达2.3MPa以上即可开始下一次开钻。

⑤水泥石强度

- 能支撑和加强套管，能承受钻柱的冲击载荷。
- 能承受酸化、压裂等增产措施作业的压力。

⑥水泥石的抗蚀性

- 主要应抗硫酸盐腐蚀。

2、水泥的外加剂

（1）加重剂：重晶石、赤铁粉等。可使水泥浆密度达到 2300 kg／m^3。

（2）减轻剂：硅藻土、粘土粉、沥青粉、玻璃微珠、火山灰等。可使水泥浆的密度降到1450 kg／m^3。

（3）缓凝剂：丹宁酸钠、酒石酸、硼酸、铁铬木质素磺酸盐、羧甲基羟乙基纤维素等。

（4）促凝剂：氯化钙、硅酸钠、氯化钾等。

（5）减阻剂：β—奈磺酸甲醛的缩合物、铁铬木质素磺酸盐、木质素磺化钠等。

（6）降失水剂：羧甲基羟乙基纤维素、丙烯酸胺、粘土等。

（7）防漏失剂：沥青粒、纤维材料等。

3、特种水泥

（1）触变性水泥：在水泥中加入粘土或硫酸盐。当水泥浆静止时，形成胶凝状态，但在流动时，胶凝状态被破坏，具有良好的流动性。

（2）膨胀水泥：在水泥中加入铝粉或煅烧的氧化镁。水泥浆凝固时，体积略有膨胀。一般用于高压气井。

（3）防冻水泥：在水泥中加入石膏粉或铝酸钙。用于地表温度较低地区的表层套管固井。

（4）抗盐水泥：在水泥中加入盐粉。用于海水配浆或盐岩层固井。

（5）抗高温水泥：在水泥中加入石英砂或铝酸盐。用于高温条件固井。

（6）轻质水泥：低压固井用。

三、前置液

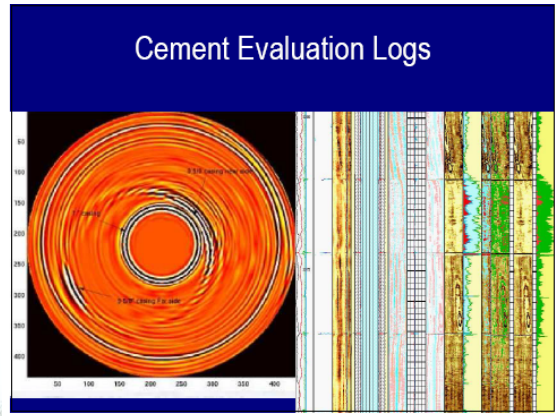
将水泥浆与钻井液隔开，起到隔离、缓冲、清洗的作用，可提高固井质量。

1. 冲洗液：低粘度、低剪切速率、低密度。用于有效冲洗井壁及套管壁，清洗残存的钻井液及泥饼。

2. 隔离液：有效隔开钻井液与水泥浆，以便形成平面推进型的顶替效果。通常为粘稠液体。

四、提高注水泥质量的措施

1、对注水泥质量的基本要求



（1）对固井质量的基本要求

- 水泥浆返高和水泥塞高度必须符合设计要求；
- 注水泥井段环空内的钻井液顶替干净；
- 水泥石与套管及井壁岩石胶结良好；
- 水泥凝固后管外不冒油、气、水，不互窜；
- 水泥石能经受油、气、水长期的侵蚀。

（2）在固井中常出现的固井质量问题

- 井口有冒油、气、水的现象。
- 不能有效地封隔各种层位，开采时各种压力互窜。
- 因固结质量不良在生产中引起套管变形，使井报废等。

2、影响注水泥质量的因素

（1）顶替效率低，产生窜槽。

窜槽：由于水泥浆不能将环空中的钻井液完全替走，而使环形空间局部出现未被水泥浆封固住的这种现象。

注水泥段：

$$\text{顶替效率}=\frac{\text{环形水泥浆体积}}{\text{环形空间体积}}\times\%$$

注水泥段任一截面：

$$\text{顶替效率}=\frac{\text{环形水泥浆面积}}{\text{环形空间截面积}}\times\%$$

形成窜槽的原因：

- 套管不居中；
- 井眼不规则；
- 水泥浆性能及顶替措施不当。接触时间、顶替速度及流态、水泥浆流变性等。

（2）水泥浆凝结过程中油气水上窜。

引起油气水上窜的原因:

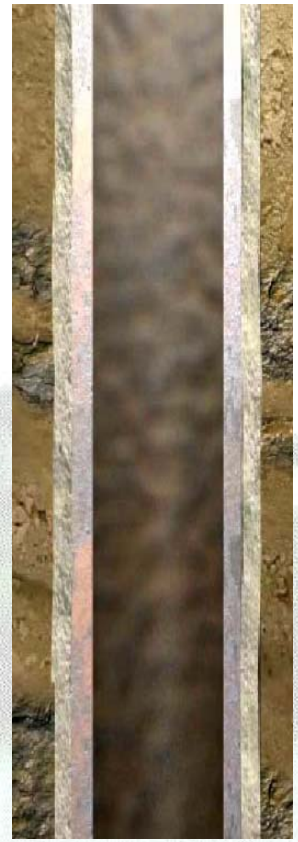
①水泥浆失重：水泥浆柱在凝结过程中对其下部或地层所作用的压力逐渐减小的现象。

②桥堵引起失重，从而引起油气水上窜;

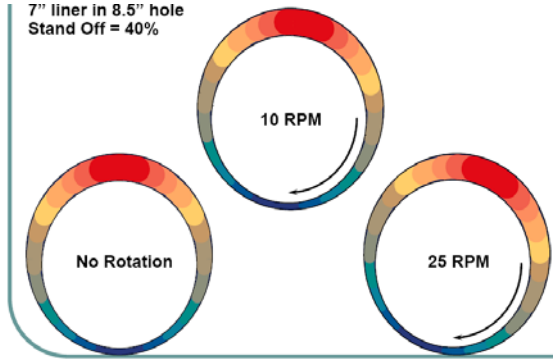
③水泥浆凝结后体积收缩；收缩率小于**0.2%**。

④套管内原来有压力，放压后使套管收缩。

⑤泥饼的存在，影响地层——水泥间（第二界面）的胶结。



3、提高注水泥质量的措施



（1）提高顶替效率，防止窜槽

①采用套管扶正器，改善套管居中条件；

②注水泥过程中活动套管；

③调节注水泥速度，使水泥浆在环空呈紊流状态；

④调整水泥浆性能。加大钻井液与水泥浆的密度差；降低钻井液粘度和切力。

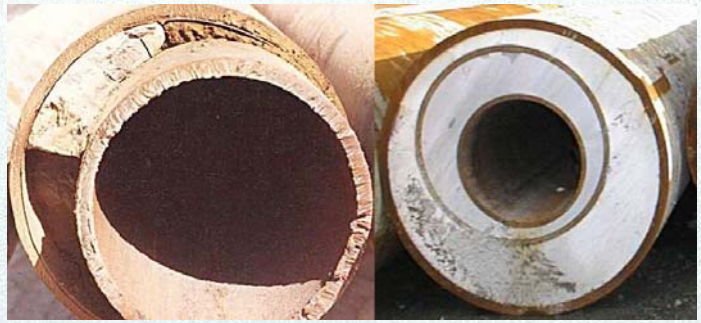
（2）防止油气水上窜

①采用多级注水泥或两种凝速（上慢下快）的水泥；

②注完水泥后及时使套管内卸压，并在环空加回压；

③使用膨胀性水泥，防止水泥收缩；

④使用刮泥器，清除井壁泥饼。



第四节 完井技术
Section 4 Well completion

完井：从钻开生产层、下油层套管、注水泥固井、射孔到试采等一系列生产过程的总称。

完井工程包括的内容：

（1）钻开生产层：钻井完井液设计、平衡压力钻井

（2）完井井底结构设计和完井方法选择

（3）安装井底：包括下套管固井或下入筛管、割缝衬管

（4）连通井眼与产层（射孔、裸眼等）

（5）防砂措施

（6）安装井口，完井测试

完井工程的原则和要求：

（1）有效地保护油气层，尽量减轻或避免对产层的污染。

（2）建立产层与井眼之间的良好通道，使油气流入井阻力最小，提高产能。

（3）有效地封隔油、气、水层和不同压力的地层，防止层间干扰。

（4）有效地控制油层出砂，防止井壁坍塌，确保油气井长期稳产。

（5）井底结构能够满足开采、注水、井下作业等工艺要求。

（6）工艺简单，成本低。

一、钻开储集层

储集层的两个突出特点：

- 储集有一定压力的油气水；
- 地层孔隙和裂缝比较发育，具有较好的原始渗透率。

对钻开储集层的技术要求：

- 保护油气层，防止钻井液污染；
- 控制油气层，防止不必要的井喷，安全钻开储集层。

1、钻井作业对储集层性质的影响

（1）压差的影响

在正压差的作用下，钻井液中的液相和固相侵入储层岩石孔隙或裂缝中，对储集层造成不同性质的伤害。

1）水侵使储集层中的粘土成分膨胀，使孔隙度减小，渗透率降低;

2）水侵破坏孔隙内油流的连续性，增加油流阻力;

3）水侵产生水锁效应，增加油流阻力;

4）泥侵堵塞储集层孔隙通道。

（2）化学物质不配伍的影响

钻井液的化学成分与地层流体的化学成分不配伍，发生化学反应，生成沉淀物堵塞孔隙；钻井液中化学物质将岩石某些成分溶蚀，破坏岩石的胶结，使岩石坍塌或膨胀，是储集层岩石渗透率降低。

（3）浓度差的影响

钻井液和地层流体中的化学物质的浓度差，引起化学物质的渗透现象。

（4）应力状态变化的影响

钻开储集层形成井眼，井壁周围岩石的应力状态发生变化，引起岩石的变形（主要是侧向变形），使岩石的孔隙度和渗透率降低。

2、钻开储集层的方法

①采用合理的钻井液体系，避免水侵和泥侵的危害；

②采用合理的钻井液密度，采用平衡或欠平衡压力钻井；

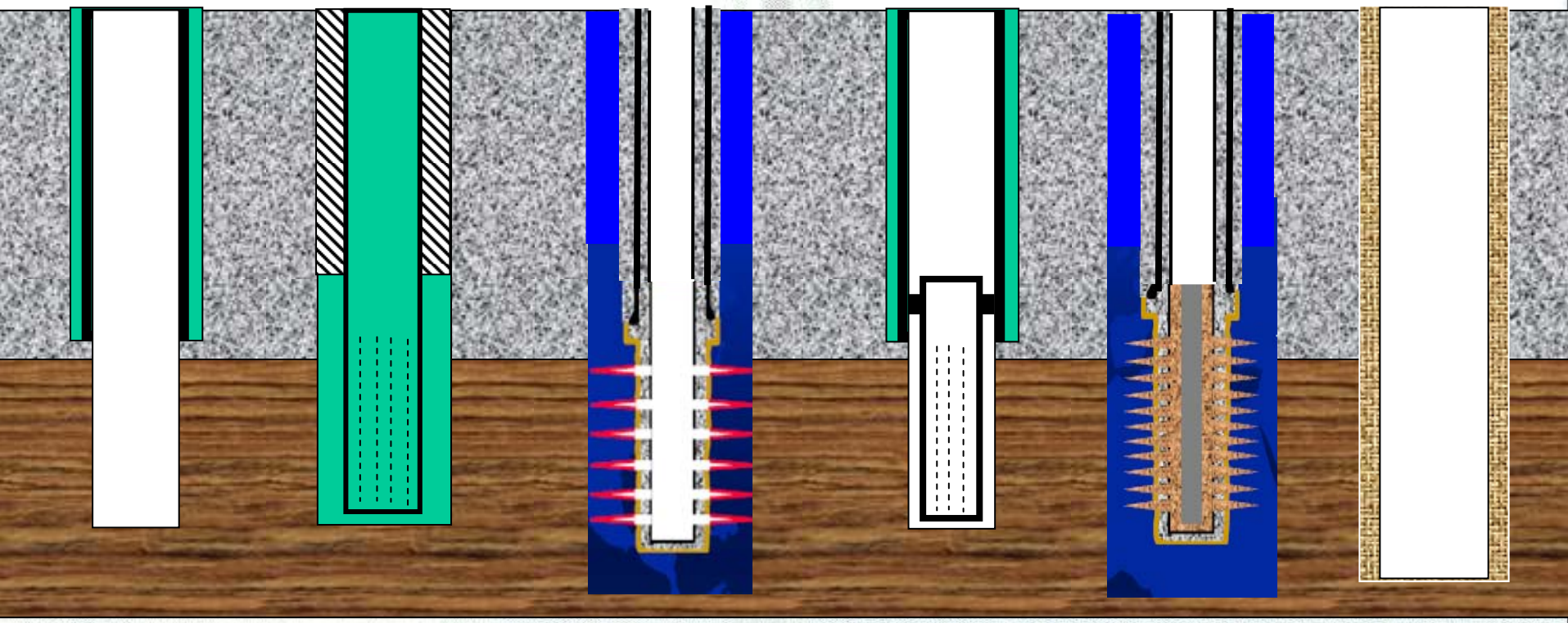
③采用良好的井身结构，减少储集层浸泡时间；

④在其他生产环节中也尽量防止污染

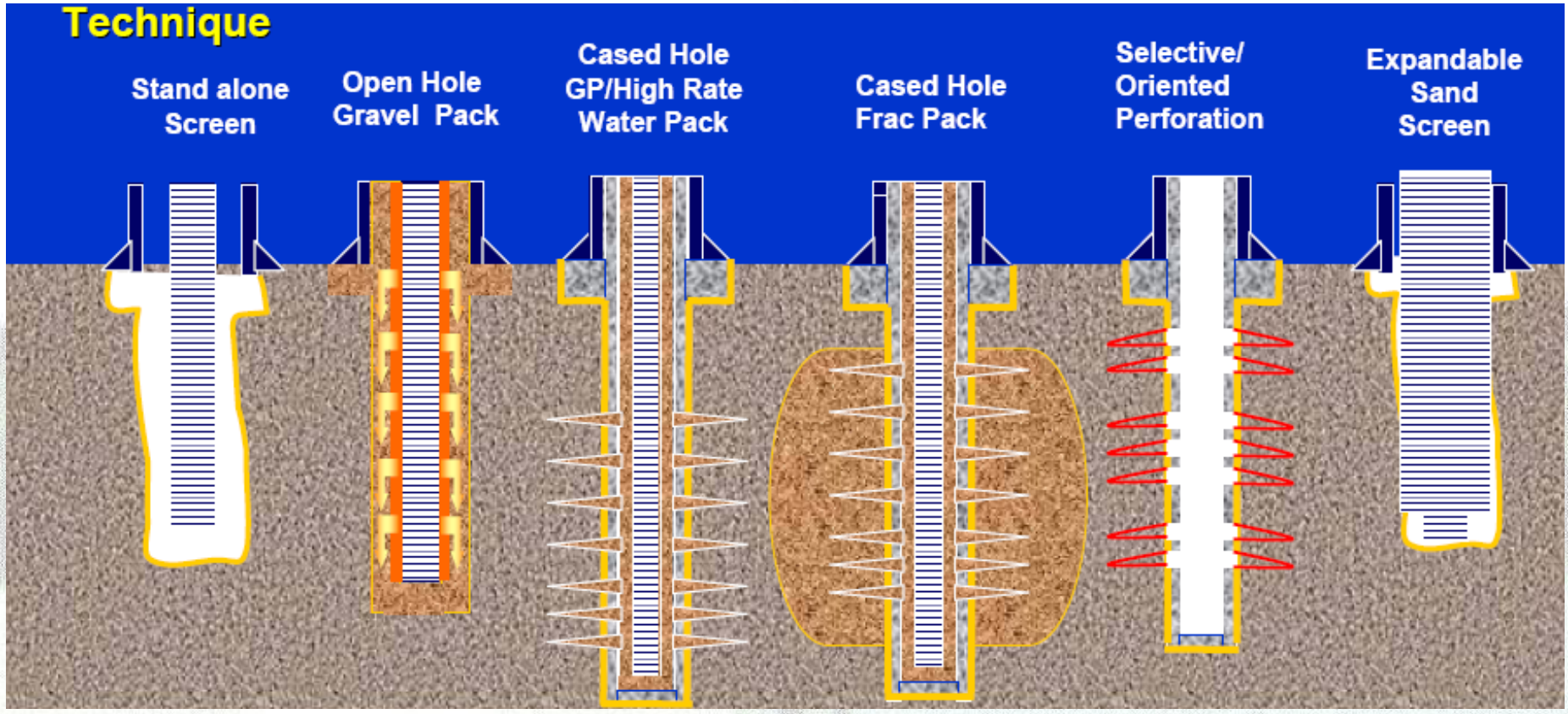
- 使用低失水、低密度水泥浆；
- 采用屏蔽暂堵等保护油气层技术；
- 减少试油或其他作业中的关井、压井次数。

二、油气井完井井底结构类型

裸眼完井　贯眼完井　射孔完井　衬管完井　防砂完井　人工井壁



防砂完井方法


Technique
Stand alone Screen
Open Hole Gravel Pack
Cased Hole GP/High Rate Water Pack
Cased Hole Frac Pack
Selective/ Oriented Perforation
Expandable Sand Screen

1、裸眼完井法

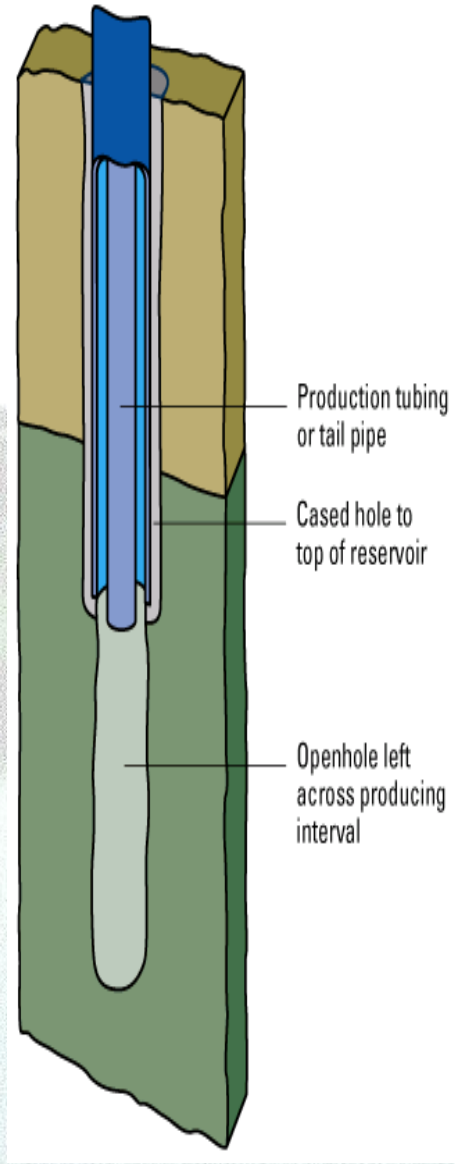
让储集层裸露，只在储集层以上用套管封固的完井方法。

先期裸眼完井：先固井，后打开储集层。

后期裸眼完井：先打开储集层，后固井。

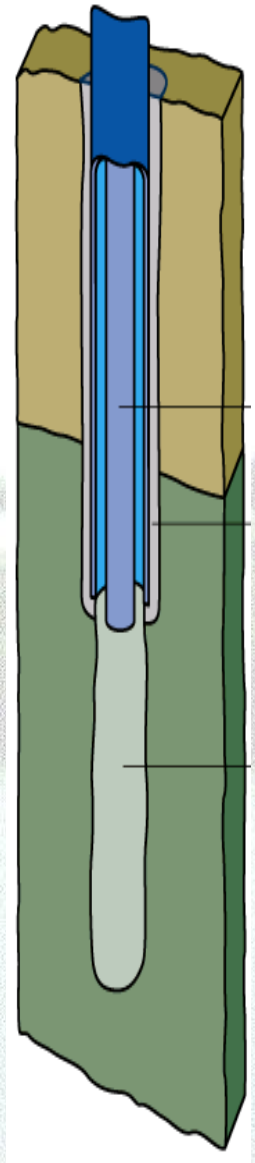
①裸眼完井的适用范围：

- 只适用于在孔隙型、裂缝型、裂缝---孔隙型或孔隙---裂缝型坚固的均质储集层中使用。
- 适合于井中只有单一的储集层，不需分层开采，无含水含气夹层的井。



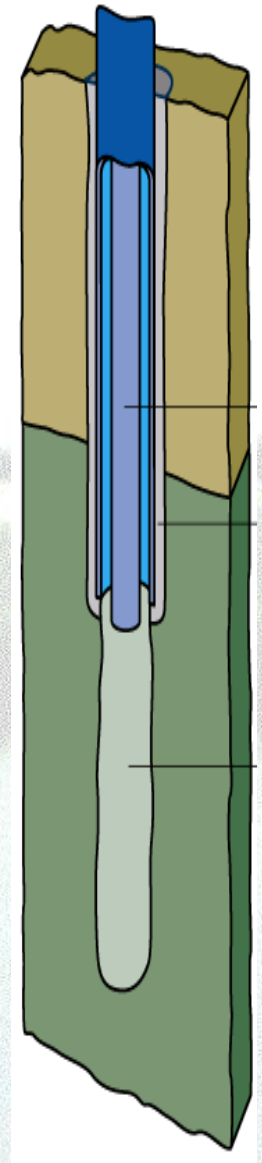
②裸眼完井法的优点：

- 排除了上部地层的干扰，可以在受污染最小的情况下打开储集层。
- 在打开储集层的阶段如遇到复杂情况，可及时提起钻具到套管内进行处理，避免事故的进一步复杂化。
- 缩短了储集层在洗井液中的浸泡时间，减少了储集层的受伤害程度。
- 由于是在产层以上固井，消除了高压油气对封固地层的影响，提高了固井质量。储集层段无固井中的污染。



③裸眼完井法的缺点

- 不能防止井壁坍塌和油层出砂。
- 不能克服不同性质地层的相互干扰。
- 无法进行选择性酸化、压裂、分层开采、分层注水等作业。
- 固井时尚未掌握产层的真实资料，容易给下一步的作业造成被动。



2、射孔完井法

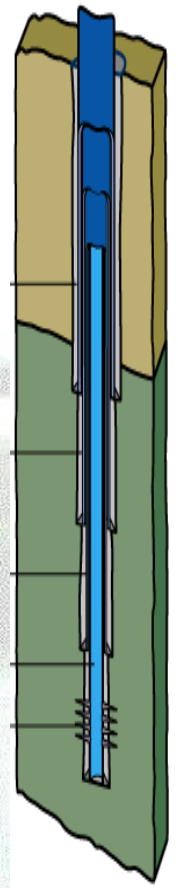
是使用最多的完井方法。

主要优点:

- 能比较有效地封隔和支持疏松易塌的生产层。
- 能够分隔不同压力和不同特点的油气层。
- 可进行无油管完井和多油管完井。

主要不足:

- 打开生产层和固井的过程中，钻井液和水泥浆对生产层的侵害较严重。
- 油气流入井内的阻力较大。



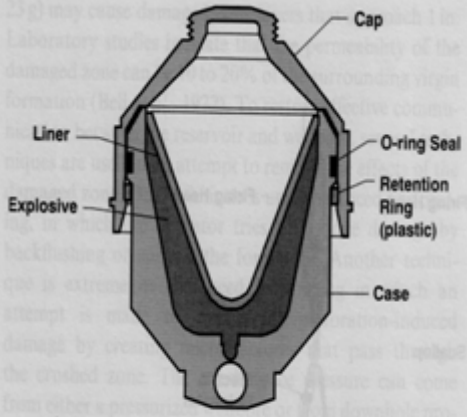


Figure 13-13 Capsule charge

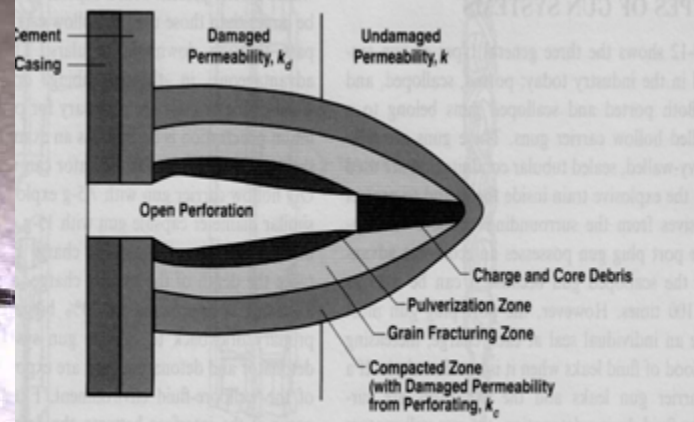


Figure 13-11 Perforation-damaged zone (from Bell *et al.*, 1995)

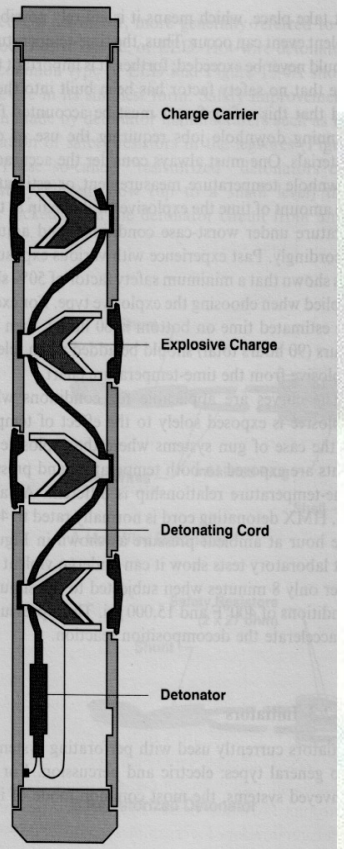
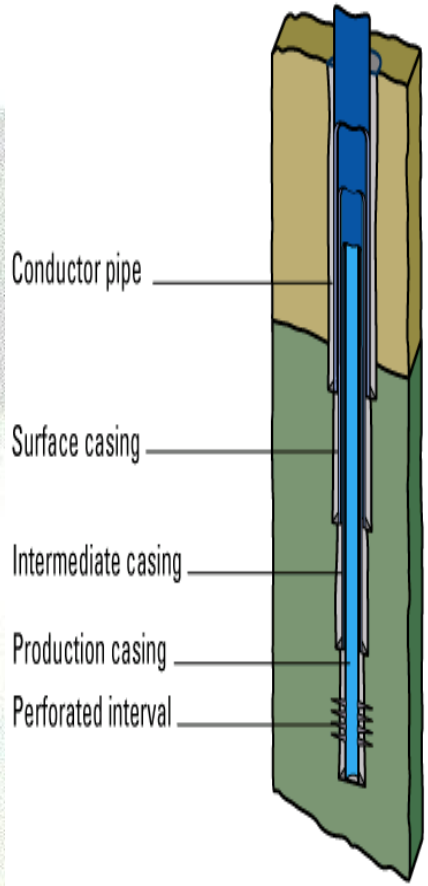


Figure 13-2 Perforating gun and explosive train



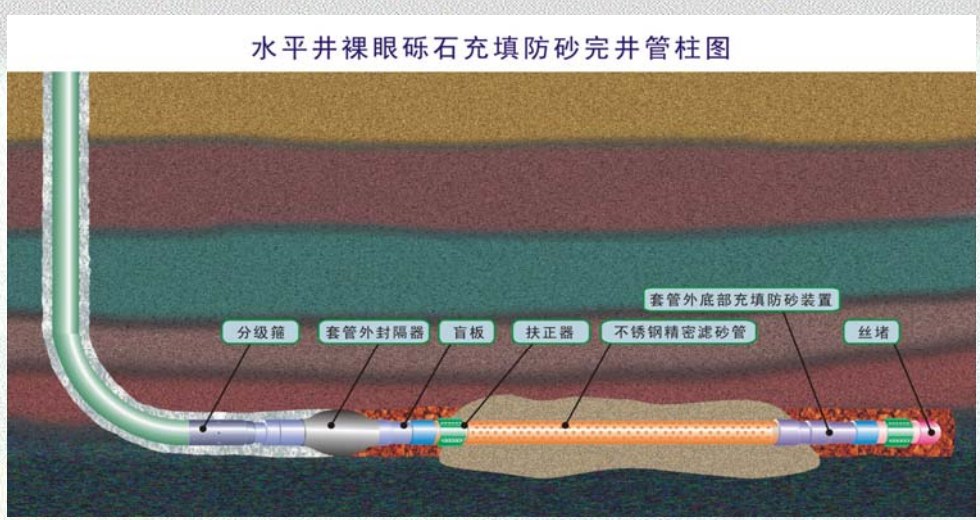
3、防砂完井

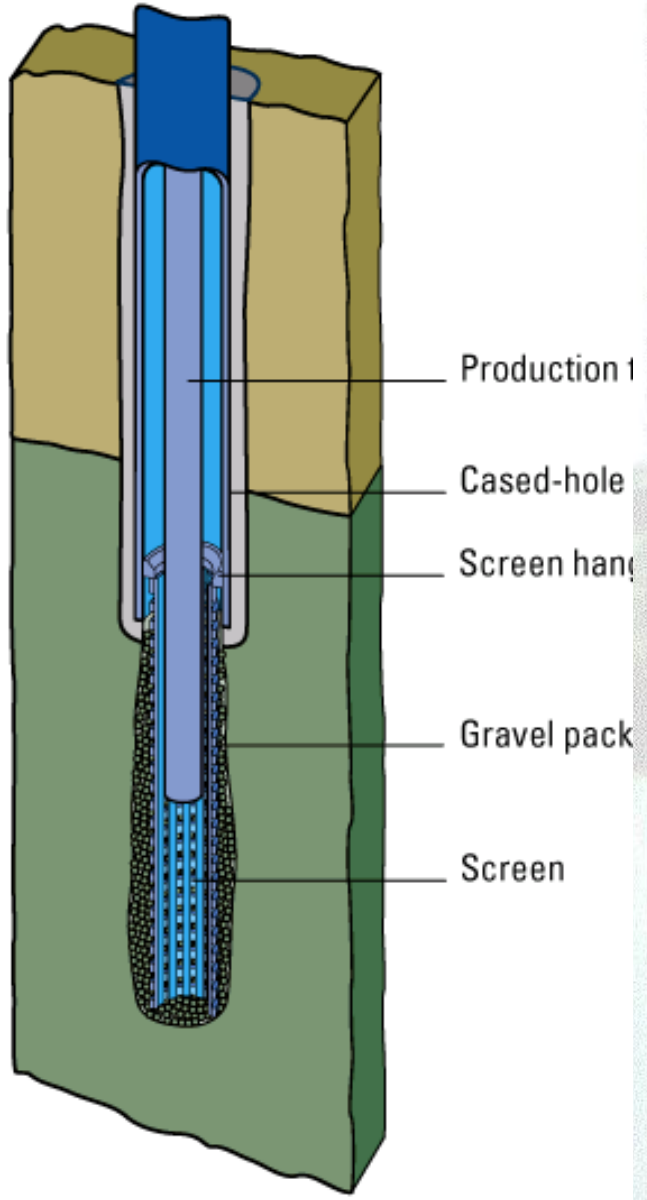
①裸眼砾石充填完井

在钻开产层之前下套管固井，然后钻开产层并在产层段扩眼，下入筛管，在井眼与筛管间的环空中充填砾石。

②管内砾石充填完井

在出砂井段下筛管，在筛管和油层套管之间的环空中充填砾石。





SAND SCREENS

COMMON DENSITIES OF SOLIDS-FREE COMPLETION FLUIDS

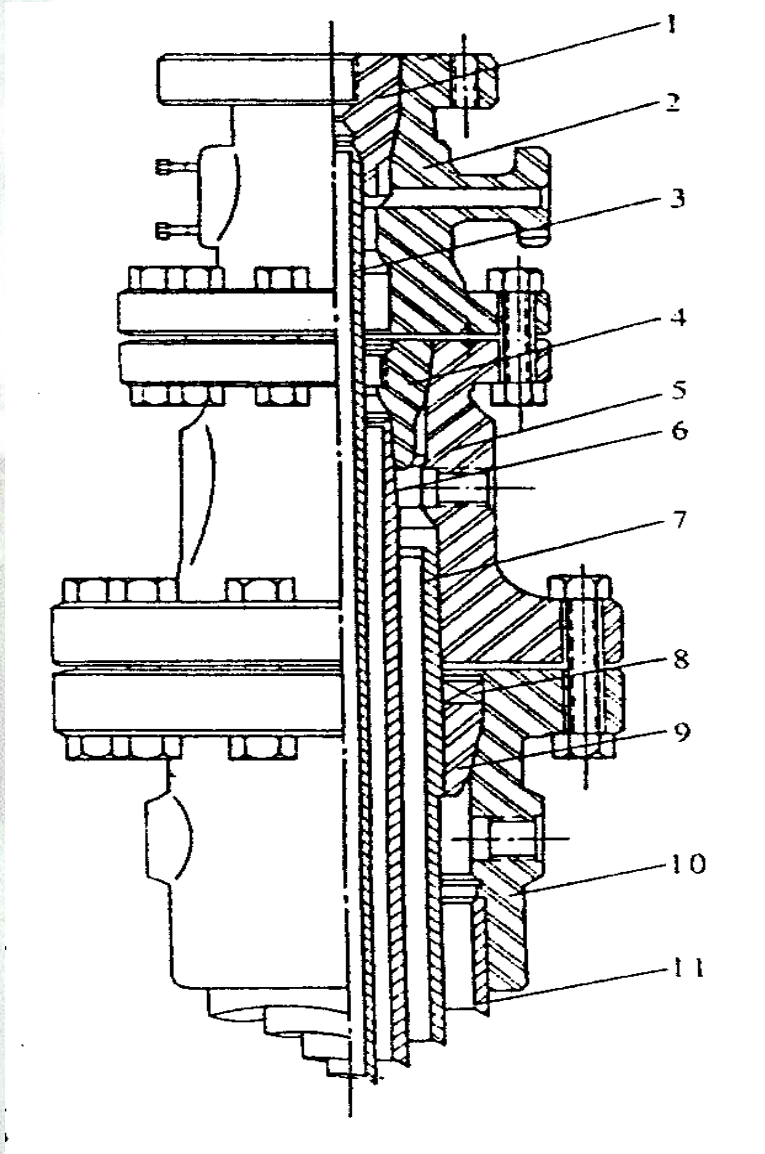
③人工井壁完井

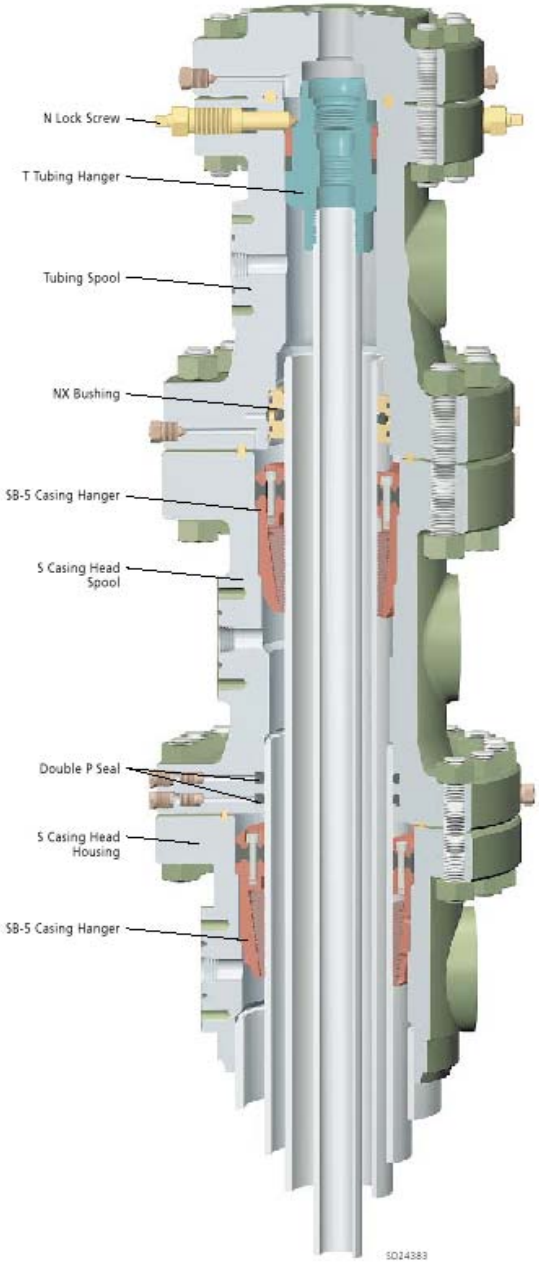
利用渗透性的可凝固材料注入到出砂层，形成人工井壁。

- 渗透性固井射孔完井法：用渗透性良好的材料注入套管和地层之间，再用小功率射孔弹射开套管但不破坏注入的渗透层；
- 渗透性衬管完井法：在衬管与裸眼之间注入渗透性材料；
- 渗透性人工井壁完井法：在裸眼井段注入渗透性材料形成人工井壁。

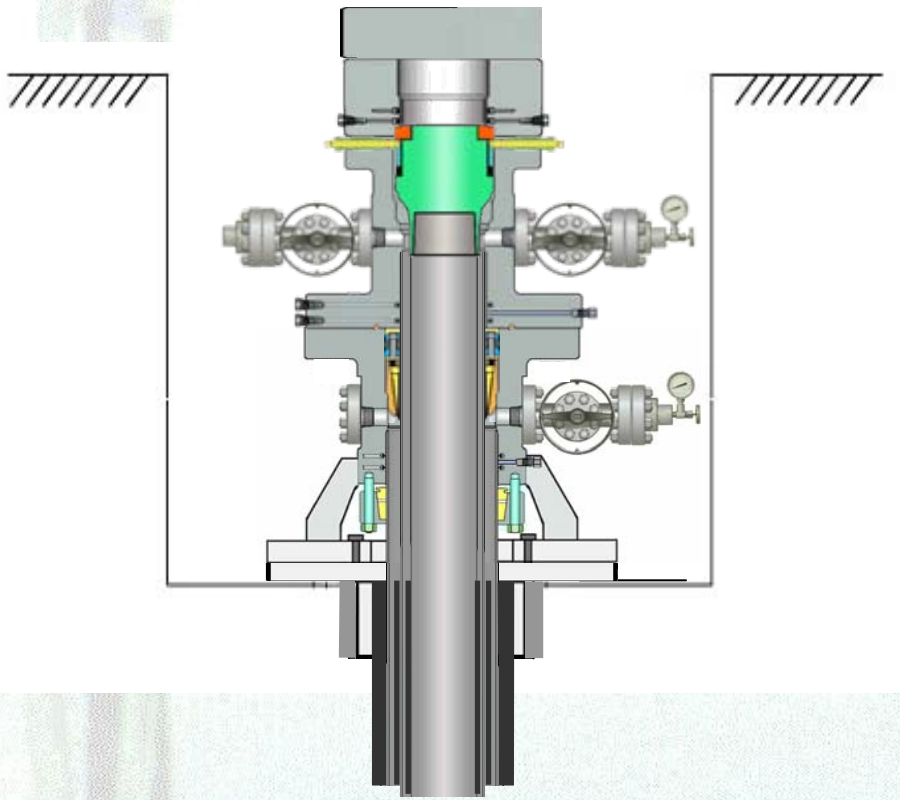
四、完井井口装置

1——油管悬挂器;
2——油管头;
3——油管;
4——套管悬挂器;
5——套管头;
6——油层套管;
7——技术套管;
8——密封圈;
9——套管悬挂器;
10——套管头;
11——表层套管。





Cameron S Wellhead System



第五节 试油
Section 5 Well Testing

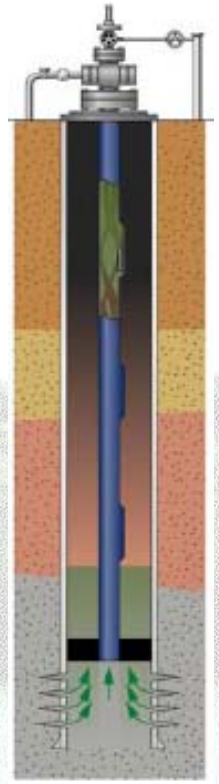
对可能出油(气)的生产层，在降低井内液柱压力的情况下诱导油气入井，然后对生产层的油、气、水产量、地层压力及油、气的理化性质等进行测定，这一整套工艺技术称为试油。试油的目的是为了认识和鉴别油气层，为油、气田的正常生产和开发提供可靠的依据。

一、 诱导油、气流

油、气井因其地层能量不同，在钻开生产层或射孔后，可遇到两种情况：一种是在一定的液柱压力下，油、气井能自喷；一种是不能自喷。对于自喷井，可进行放喷测试；对于不能自喷的井，则必须进行诱导油、气流的工作。油、气入井不畅的原因一般是：油、气层原始渗透率低；油、气层地层压力偏低；油、气流动性差或井内液柱压力过高；油、气层受污染堵塞等。对于因井筒内液柱压力大，不能自喷的井，应采取降低井筒内液柱压力的办法诱导油、气入井。这种方法的实质是降低井筒内液柱高度或洗井液密度。替喷法、抽汲、提捞及气举法属于此类诱导油、气流方法。

替喷法及气举法原理与人工举升采油方法类似，将在后继章节介绍。

如果经替喷后，油、气井仍不能自喷时，可采用抽汲法或提捞法诱喷。抽汲法是利用下入油管内的特殊工具抽子进行的，抽子在油管内高速上提下放，把井内部分液体经油管逐步抽出地面，从而降低井内液柱高度。抽汲过程中抽子高速上提时，会使抽子下面造成低压，这对于近井地带堵塞物的排出十分有利，从而也可达到诱喷的目的。提捞法是用特制的捞筒下入井内，将洗井液一筒一筒地捞出，达到降低液柱高度，诱导油、气流的目的。提捞法一般用于低压井的试油。

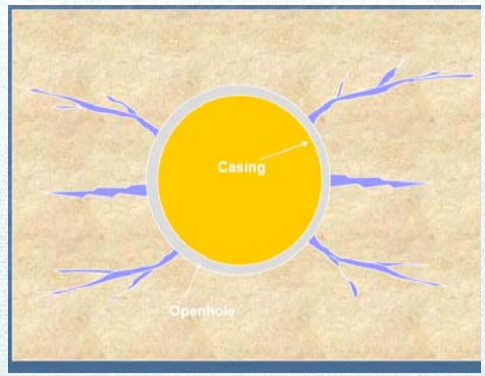


Gas Lift

二、增大油、气流通道

有些油、气井，由于生产层严重地受到钻井液和水泥浆的污染，导致孔隙或裂缝通道被严重堵塞；另有一些油、气井生产层的原始渗透率很低，采用前述的诱导油、气流方法仍然不能明显有效时，必须采取人工强化措施，增大油、气流通道，改善油、气层的渗透性，使油、气能畅流入井甚至喷出地面。

我国某些油、气田，在油、气井投产前，一般情况是要对油、气层进行一些人工强化措施，当处理后获得较大的生产能力后，再正式投产。通常采用较多的人工强化措施是水力压裂和酸化处理。经过处理，可以扩大油、气层的孔隙和原始裂缝或形成新的人工裂缝，增大油、气层渗透率，实现增大油、气通道的目的。



三、 完井测试

完井测试的主要任务是通过地下资料的收集和分析，确定油、气层的工业价值，为油、气井正常生产和制订合理的开发方案提供可靠的依据。测试时，要取全取准下述几方面的资料：

1）油、气、水产量；

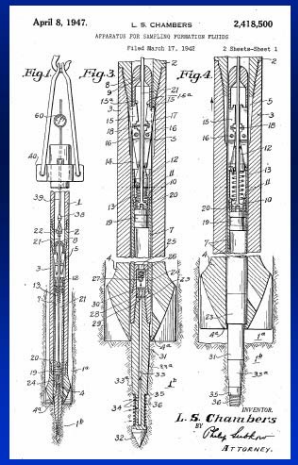
2）原始地层压力，井口油管压力和套管压力；

3）油、气层中部温度及地热增温率；

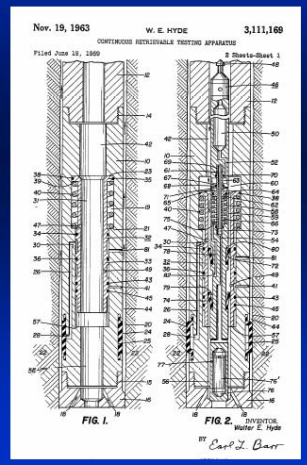
4）油、气、水样。

Early Formation Testers

Chambers 1947

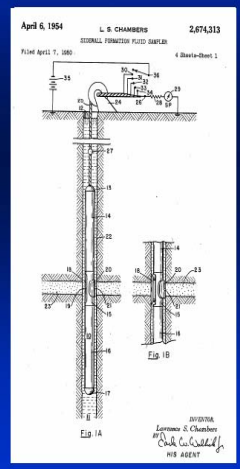


Hyde 1963

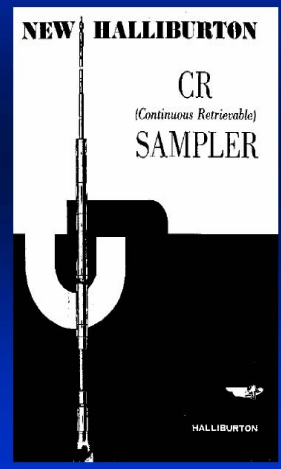


Early Formation Testers

Chambers 1954



Hyde 1963



Wireline Testers

RFT 1974 | SFTT 1986 | MDT 1989 | RDT 1998

Focused Probe | Oval Probe

四、 中途测试

每钻穿一油、气层，即停钻对油、气层进行测试。测试完后，视情况而定，或者恢复钻进，或者在获得高产油、气流的情况下，就此完井投产。这种自上而下逐层钻穿、逐层测试的方法称为中途测试。

中途测试在探井中应用较广泛。其优点是能迅速发现油、气流，并可初步确定油、气层压力和生产能力。由于这种方法在钻穿之后，立即测试，因而避免了钻井液对油、气层的长期污染，有助于取得可靠的油、气、水资料，有助于提高探井的成功率，加快油、气田的勘探和开发速度。

中途测试如同完井测试一样，测试工艺有两个主要环节：一是诱导油、气流；二是取得测试资料。由于中途测试是在钻井的中途进行，一般在取得资料后绝大多数要恢复钻井，因此，中途测试除了准确取得被测试层基本的油、气、水资料外，还必须考虑钻井工艺的一些要求。中途测试利用专门的井下工具进行，目前，我国较普通采用的中途测试方法是用带玻璃接头和裸眼筒形封隔器的测试仪器进行。这种方法的主要特点是既能较大程度地降低钻杆内的液柱压力，又能保持封隔器以上环形空间的钻井液柱压力不变，利于诱导油、气流。

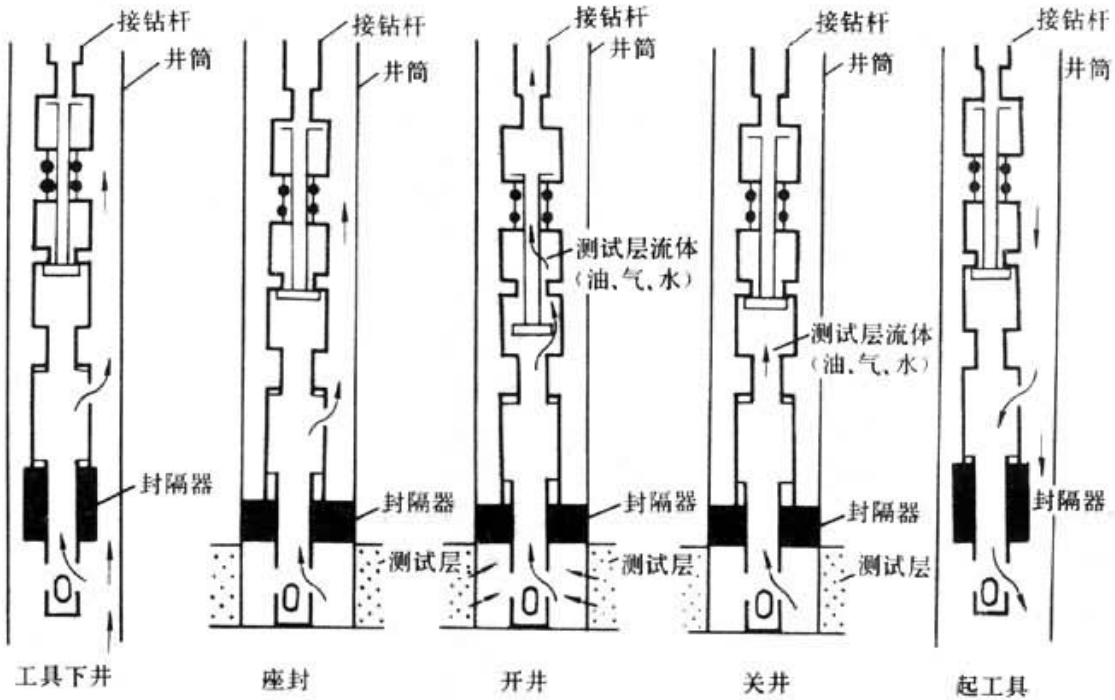


图 1　钻杆测试器工作状态示意图

DFT Pathfinder 2001	GeoTap Halliburton 2002	TestTrack Baker INTEQ 2003	StethoScope Schlumberger 2005