

固井乃钻井工程的临门一脚

第7章:现代固井理论和方法

水泥浆化学与优质固井原理

钻井是勘探开发的必经之路

中国石油大学（北京）

高德利 顾军

2006年12月21日

提 纲

- 一、固井的功用和方法
- 二、水泥浆化学原理
- 三、优质固井原理
- 四、固井质量检测原理

一、固井的功用和方法

固井就是将水泥注入井壁与套管之间环空的过程。固井工程是指通井处理钻井液、下套管、再循环处理钻井液、注水泥、候凝、测三样到装井口交井的全过程，是涉及多学科多专业的一个系统工程，核心是经济合理地设计套管柱和**安全优质地注入水泥浆**。

固井的目的是保护地表水、封隔地层和支撑套管柱。

固井方法

— 常规固井作业

包括：注前置液、注水泥浆、压胶塞、替钻井液、碰压、套管试压等

— 特种固井作业

内管注水泥：大尺寸套管固井

双级固井：封固相距较远的层系、低压易漏地层、高压层防止大段水泥浆“失重”、深井长封固段等

尾管注水泥：降低成本、降低固井施工压力、可回接

成功固井“五步骤”

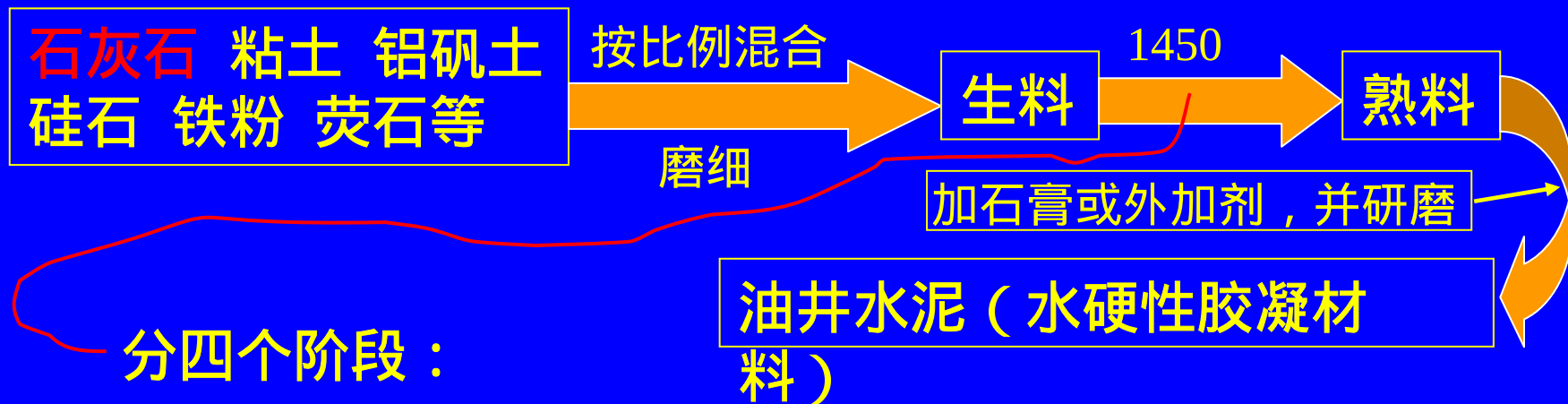
- 1.了解相关地质资料，核实勘探开发要求。
- 2.弄清井况，分析参数，设计固井方法和水泥浆性能。
- 3.匹配水泥浆组成，完成水泥浆室内试验，确保能够满足施工要求。
- 4.计算需注入的水泥量，均匀混拌并进行水泥浆室内复核试验。
- 5.实时监控施工过程，必要时对设计要求和井下实际进行修改。

二、水泥浆化学原理

- 1.油井水泥的制造方法与化学成分
- 2.油井水泥的水化机理与水化现象
- 3.油井水泥的性能参数与影响因素
- 4.油井水泥外加剂（料）与特种水泥

1.油井水泥的制造方法与化学成分

*油井水泥的制造方法（干法和湿法）



分四个阶段：

- (1) 预热干燥 - 300 ~ 600 ，烧掉有机物质
- (2) 石灰石分解 - 900 ： CaCO_3 分解出 CaO 和 CO_2
- (3) 高温化学反应 - 1450 ，生成 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 、 C_3S
- (4) 冷却、出窑

*油井水泥的化学成分

类型	C_3A (%)	SO_3 (%)	MgO (%)	不溶物 (%)	烧失量 (%)
O	≤ 15	≤ 3.5	≤ 6	≤ 0.75	≤ 3
MSR	≤ 8	≤ 3.0			
HSR	≤ 3	≤ 3.0			

*限制 C_3A 和 SO_3 含量旨在减少水化硫铝酸钙的生成量。

$Ca(OH)_2$ +硫酸盐生成二水石膏 (SO_3) + C_3A 生成水化硫铝酸钙 (水泥杆菌)，体积增大而胀裂水泥环。

*限制 MgO 含量旨在减少体积膨胀。

*限制“不溶物”含量旨在保证油井水泥的烧结质量。

*限制“烧失量”含量旨在减小水泥存放后的“风化”程度。

*油井水泥分级：

A **B** **C** **D** **E** **F** **G** **H** (**J**)

0 ~ 1830m {
A级 - 普通水泥 (0.46)
B级 - 中热水泥 (0.46)
C级 - 早强水泥 (0.56)

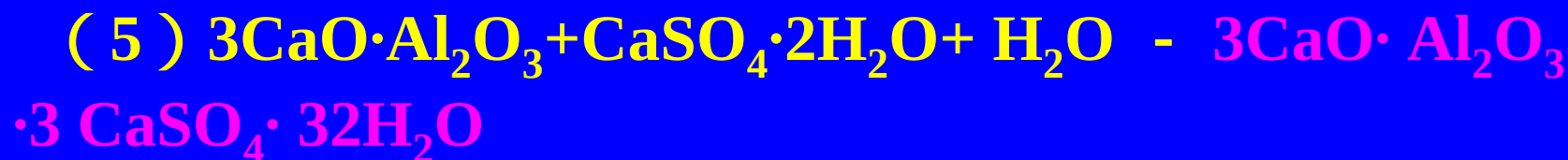
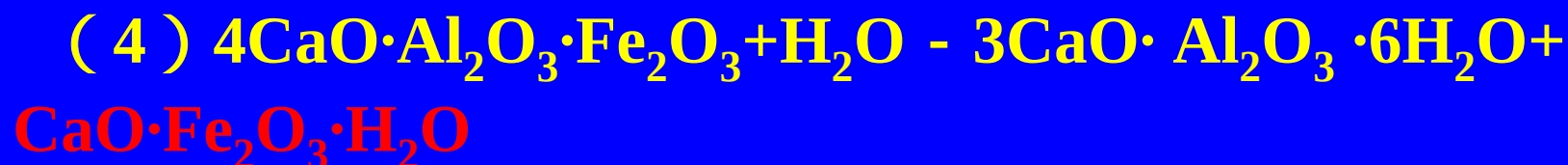
1830 ~ 4880m {
D级 - 缓凝水泥 (3050m)
E级 - 缓凝水泥 (4270m)
F级 - 缓凝水泥 (4880m)

0 ~ 2440m {
G级 - 基础水泥 (0.44)
H级 - 基础水泥 (0.38)

2.油井水泥的水化机理与水化现象

*油井水泥的水化机理

A.水化反应

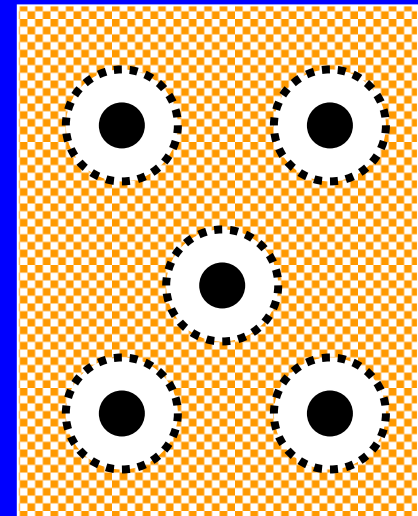
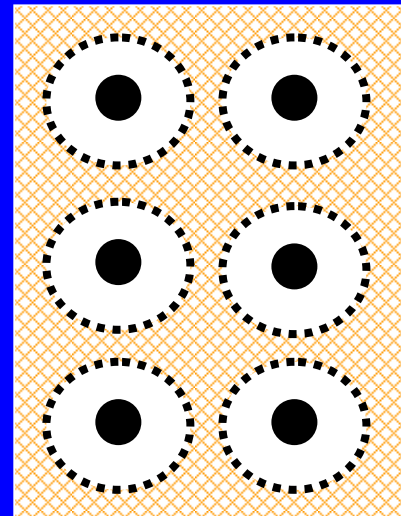
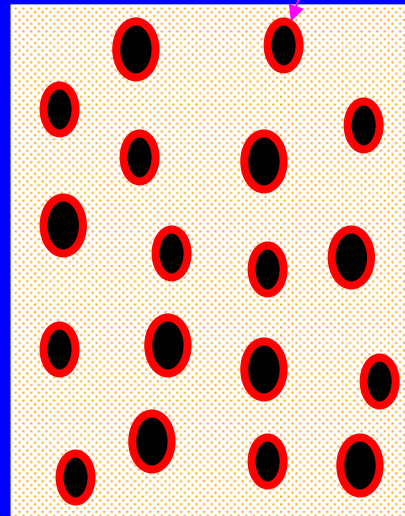
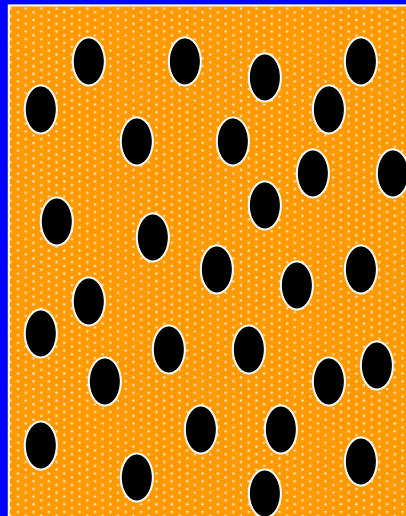


水泥水化主要生成水化硅酸二钙、氢氧化钙、水化铝酸三钙、水化铁酸钙、水化硫铝酸钙（钙矾石）等。

B.水化过程

起始期——迟缓期——凝结期——硬化期

(几分钟) (几十分钟~几个小时) (几十分钟) (几天~数年)



大量放热
液态特征

水化速度变慢
流动性能稳定

水化加速
不再流动

晶体析出
强度增加

*油井水泥水化伴随现象

放出水化热、胶凝失重、失水与析水、体积减缩等。

A.放出水化热 - 井温测井、“微环隙”

起始期——迟缓期——凝结期——硬化期

(几分钟) (几十分钟~几个小时) (几十分钟) (几天~数年)

水化速度较快
放出热量较大
持续时间较短

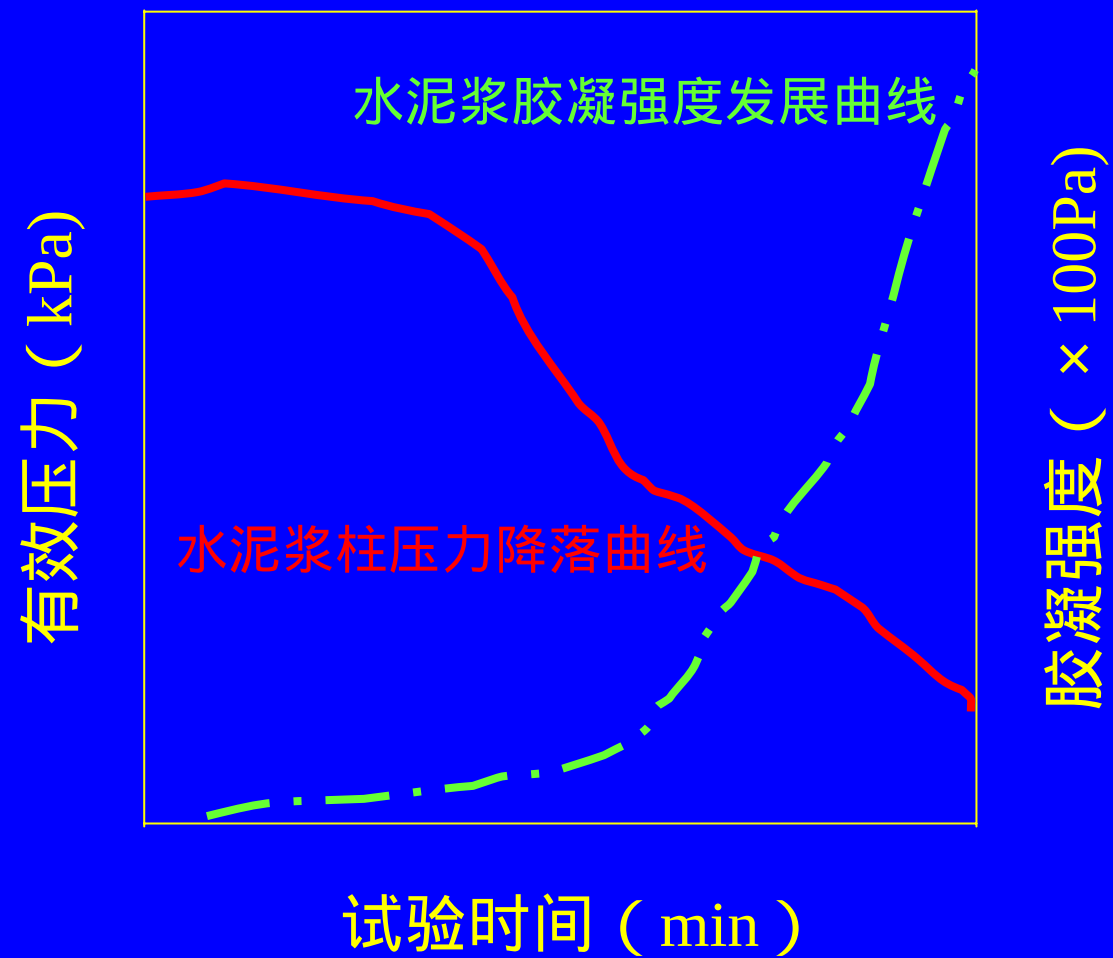
水化速度变慢
放出热量很少

水化速度加快
放出热量最大

水化速度很慢
放出热量变少
持续时间极长

放热量由大到小： C_3A 、 C_3S 、 C_4AF 、 C_2S

B. 胶凝失重



C.失水与析水

失水的危害：

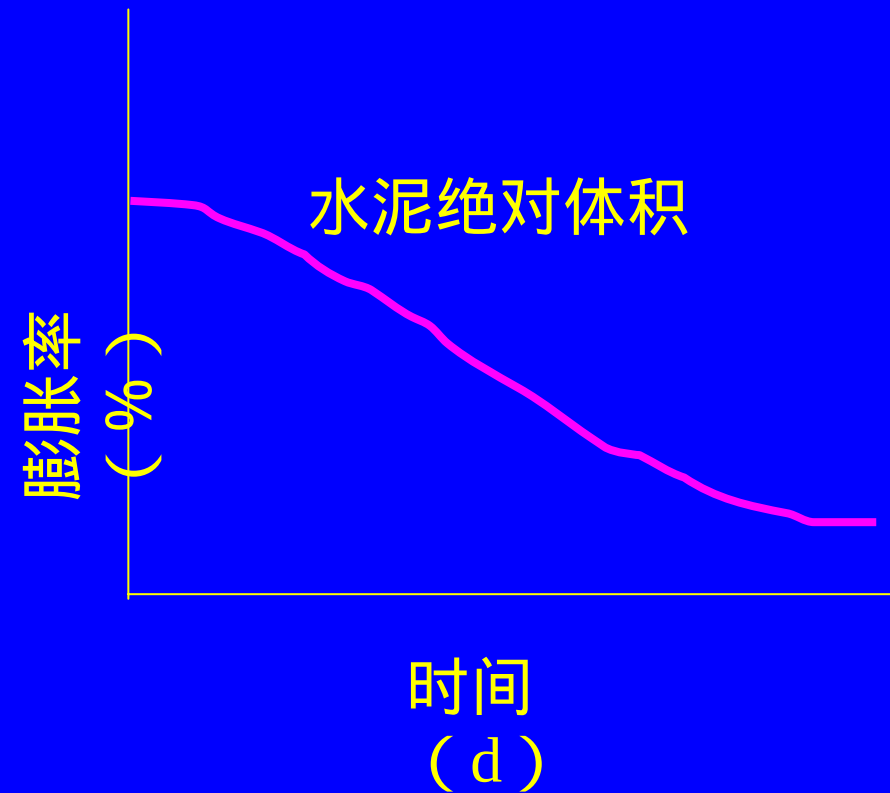
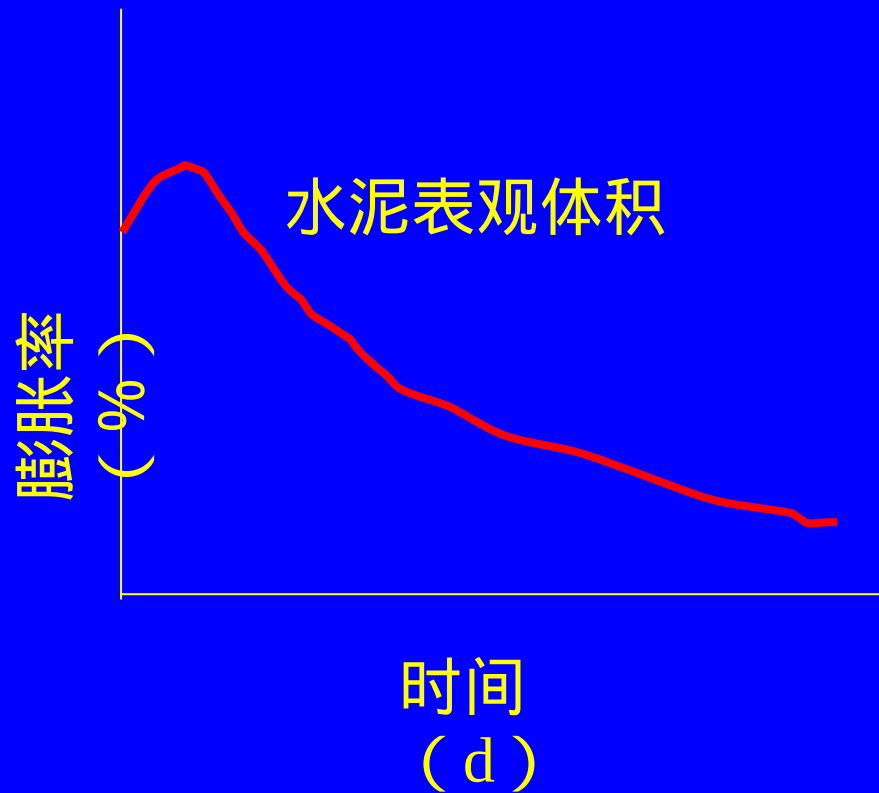
- (1) 水泥浆“瞬凝”，导致固井失败。
- (2) 水泥水化不充分，造成固井质量差。
- (3) 水泥浆体积减少，诱发油气水窜。
- (4) 水泥浆向产层失水，污染油气层。

析水的危害：

- (1) 对于水平井，形成连续性水带窜槽。
- (2) 对于垂直井，形成横向水带和纵向水槽。

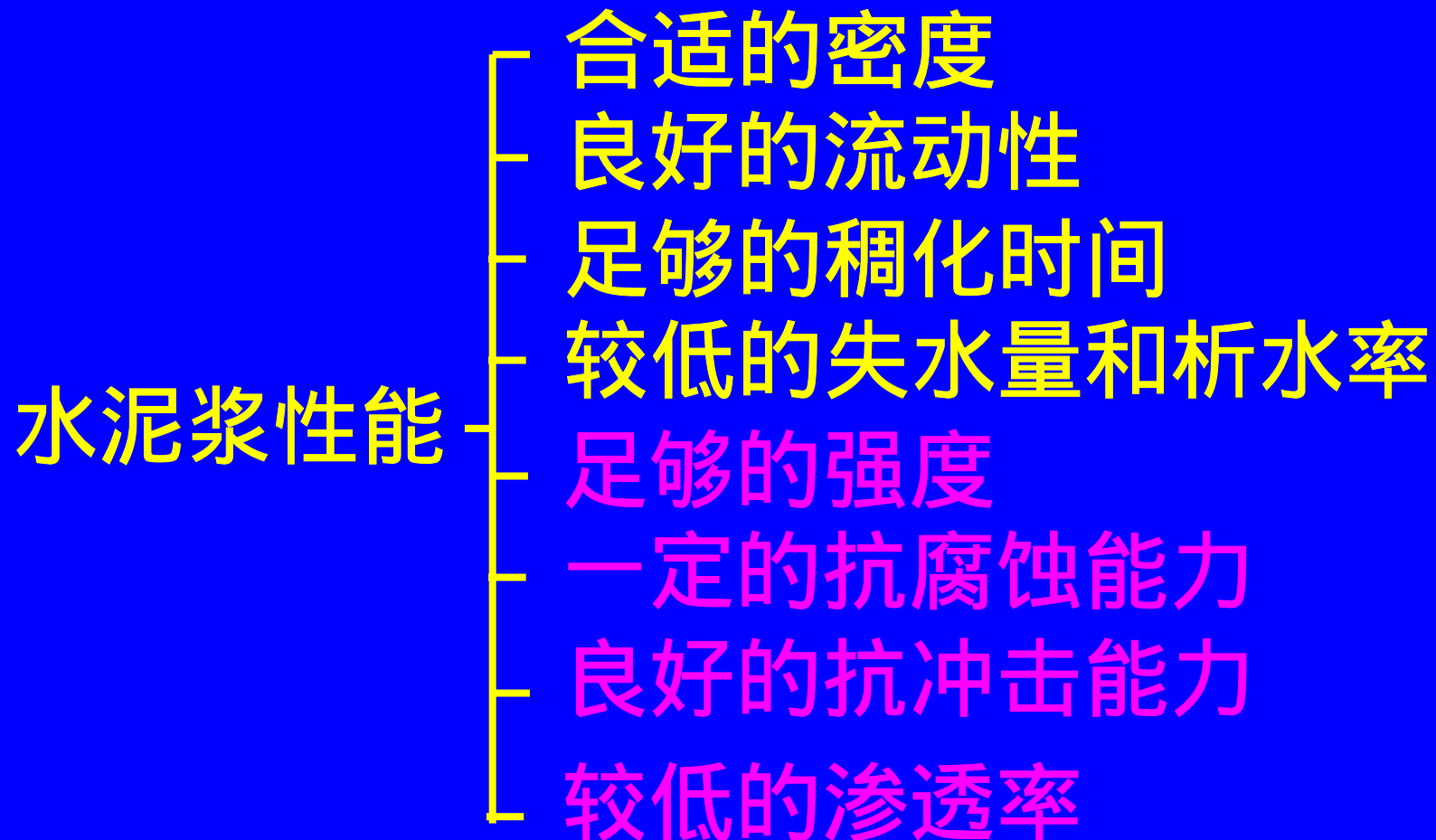
D. 体积减缩

水泥内部体积减少：以真空微孔隙的形式分布于水泥石中，造成其孔隙压力下降。
水泥表观体积收缩：

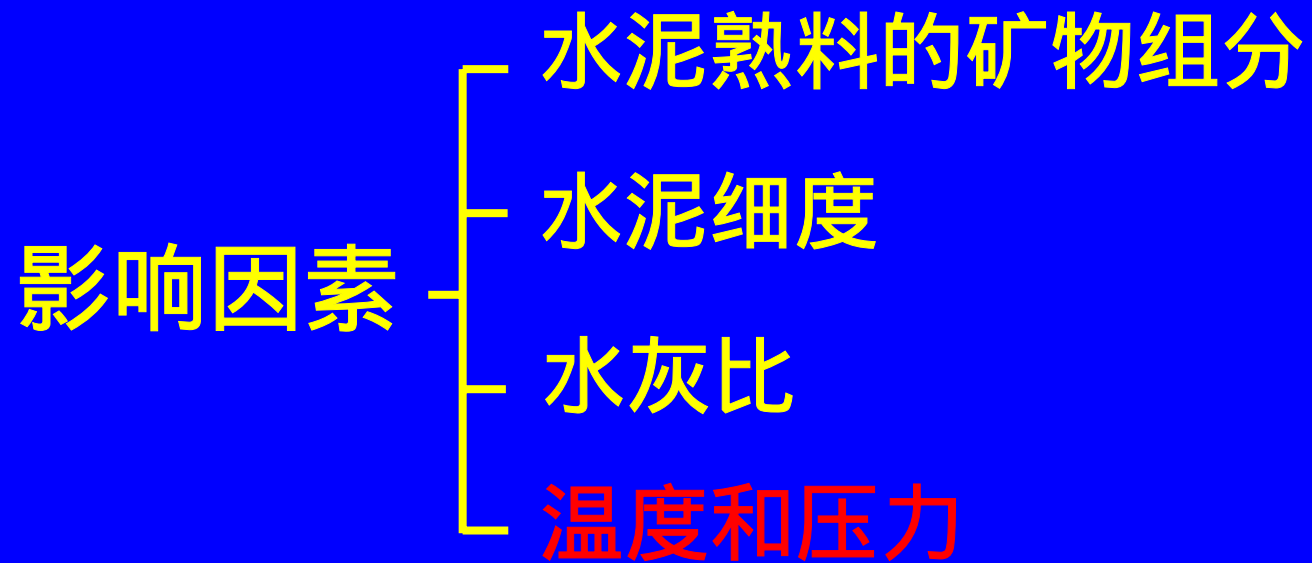


3.油井水泥的性能参数与影响因素

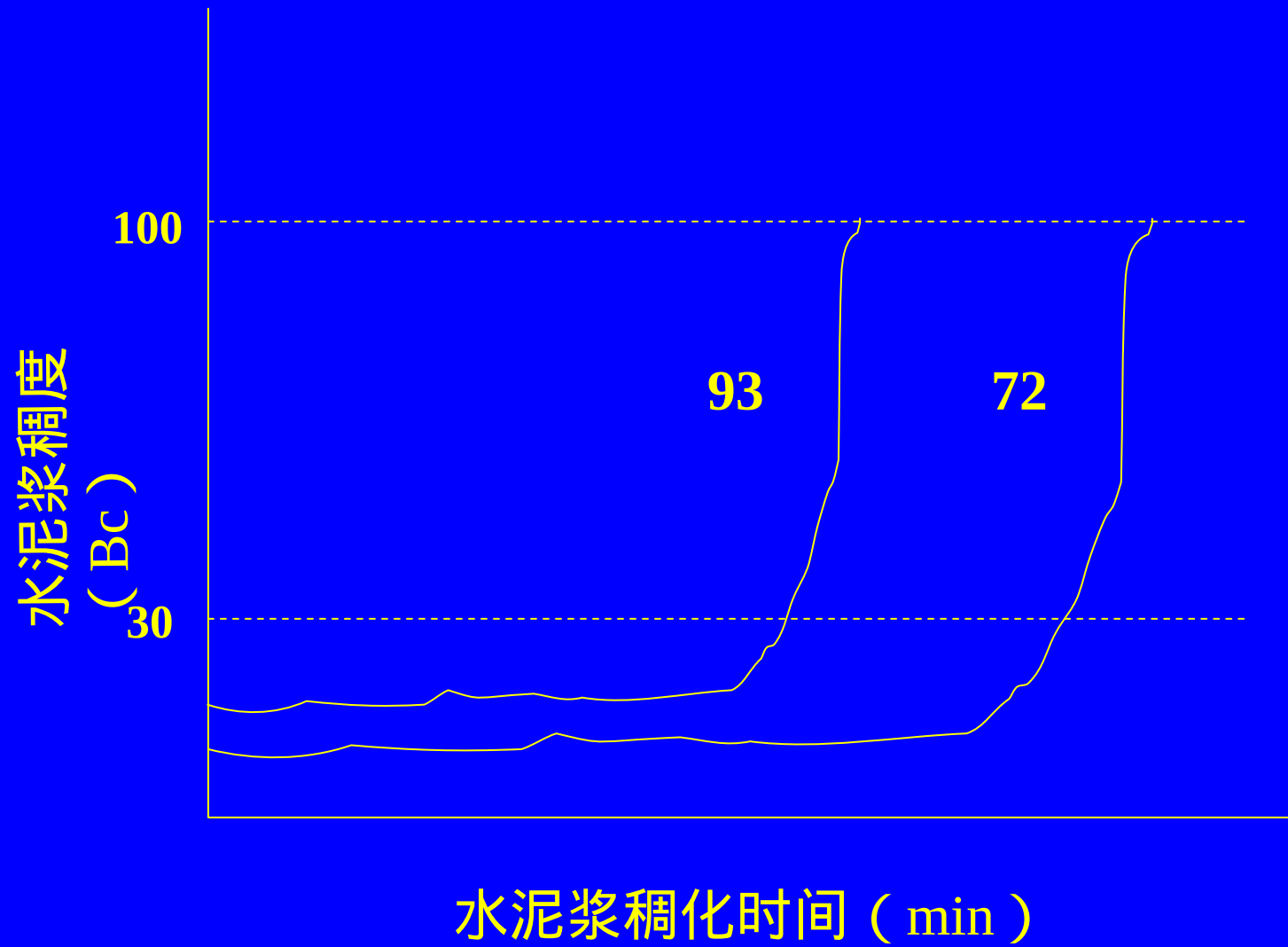
*水泥浆性能：考虑施工安全和油井寿命



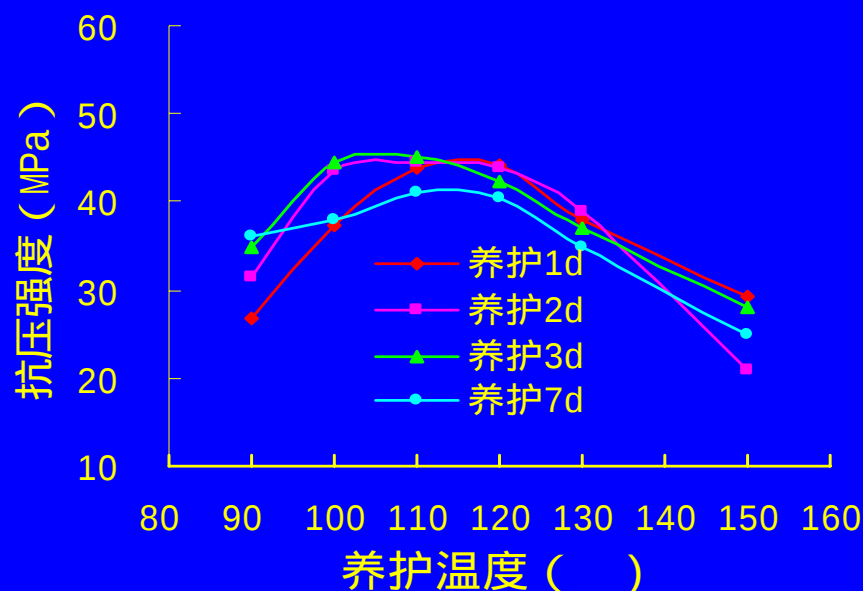
*影响水泥浆性能的因素



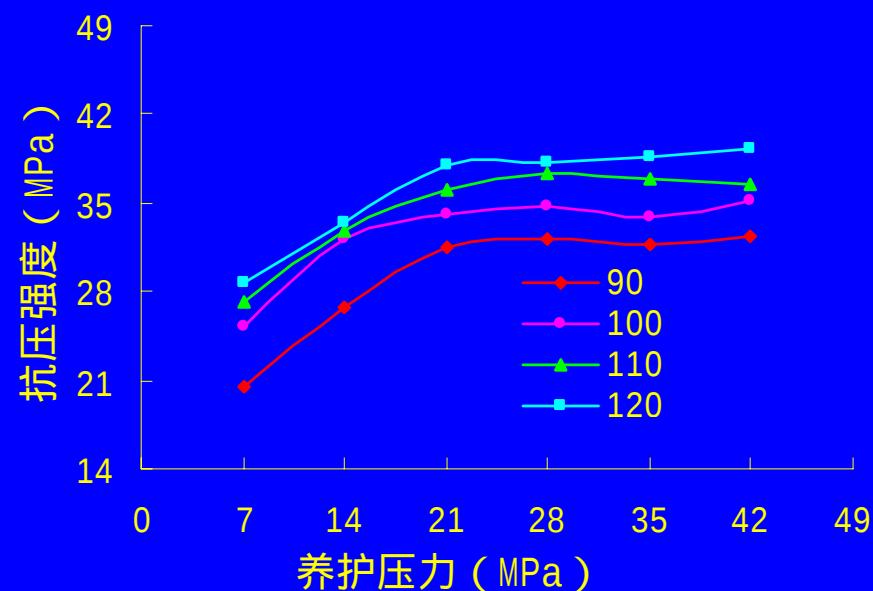
*温度对水泥浆稠化时间的影响



*温度和压力对水泥石强度的影响规律



强度随养护温度的变化关系图



强度随养护压力的变化关系图

常温下油井水泥加水后形成的C-S-H凝胶对水泥石的强度和外观稳定性起决定性作用，但高温下C-S-H凝胶会变质成 α -C₂SH晶体而破坏了水泥石内部结构，从而导致水泥石强度下降。

*压力对水泥浆失水量的影响

序号	浆柱压力 (MPa)	地层压力 (MPa)	压差 (MPa)	失水量 (ml)	24h声幅值 (%)
1	3.5	2	1.5	560	0
2	6.0		4.0	1580	0
3	9.0		7.0	3060	0
4	10.5		8.5	5050	3
5	11.5		9.5	6500	13
6	13.0		11.0	7800	29

注：试验水泥浆浆总量为38235ml。

4.油井水泥外加剂（料）与特种水泥

水泥外加剂：

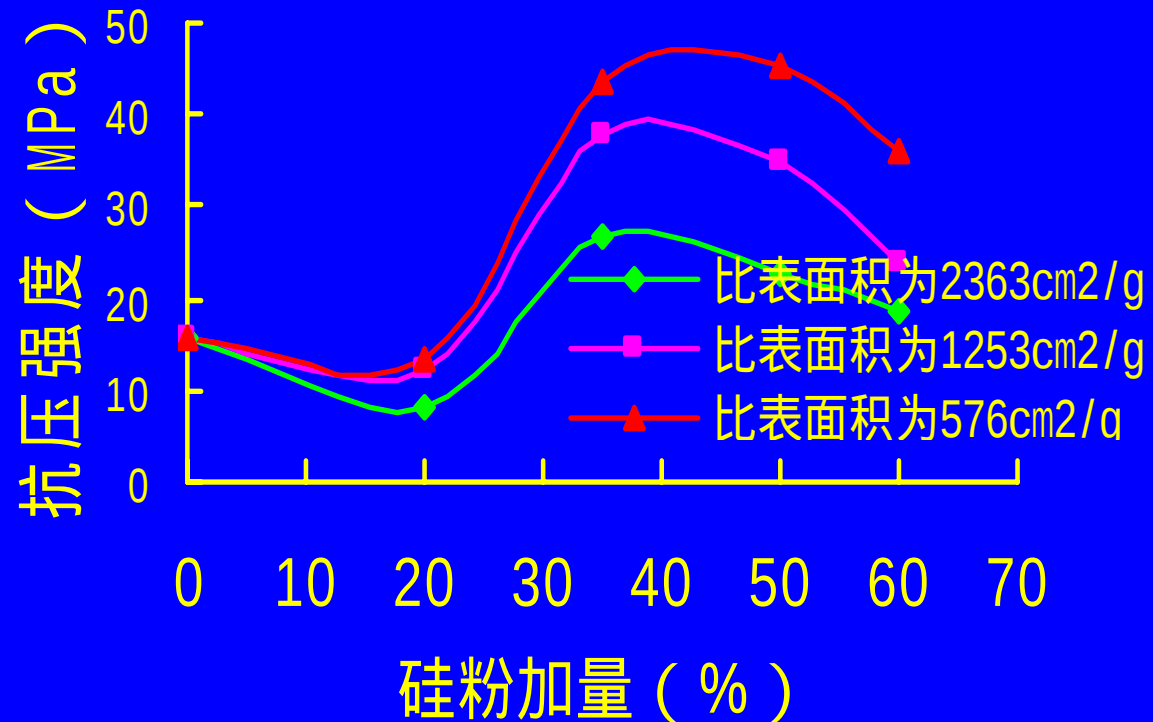
促凝剂 缓凝剂 分散剂 降失水剂
防气窜剂 减轻剂 加重剂 稳定剂

特种水泥：

低密度水泥 高密度水泥 防窜水泥
超细水泥 矿渣水泥

*硅粉加量对水泥石强度的影响

掺入一定量的硅粉把散装比降到 1.0 左右,抑制向 α - C_2SH 晶体的转化而形成一种 $C_5S_6H_5$ 高强晶体,从而使水泥石保持较高的强度。



硅粉加量与抗压强度的关系图

可以看出：硅粉加量宜选为35%左右，且宜选用中等比表面积的硅粉。

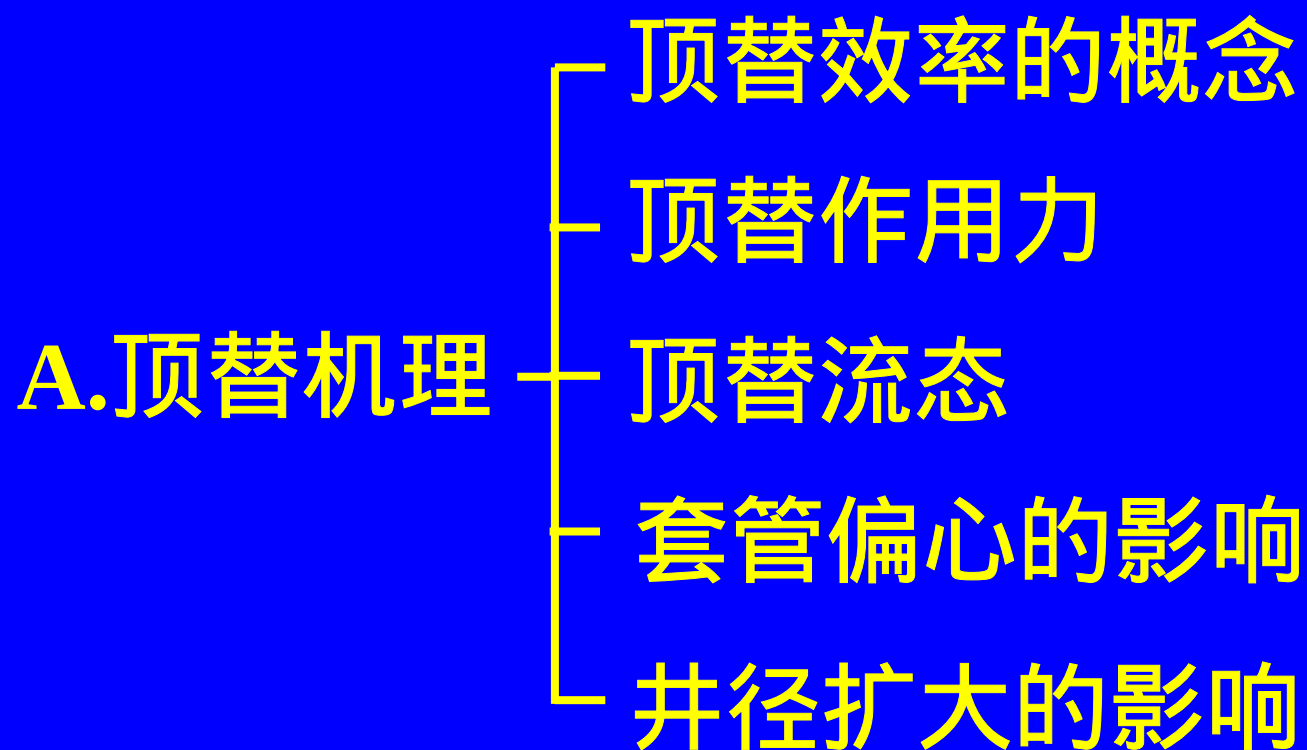
三、优质固井原理

1. 顶替机理与对策

2. 油气水窜机理与对策

3. 水泥环界面胶结质量影响因素与对策

1.顶替机理与对策



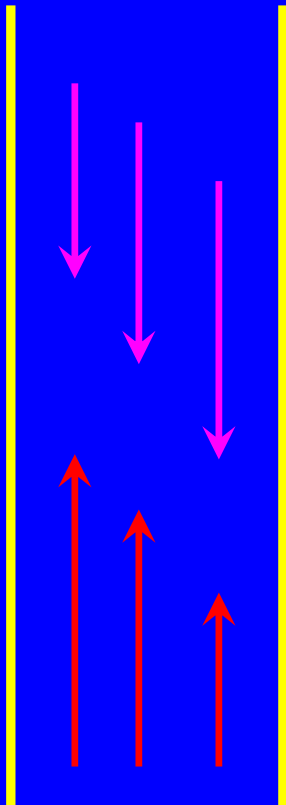
a.顶替效率的概念

$$\eta = \frac{V_c}{V} \times 100\%$$

b.顶替作用力：

反作用力

作用力



钻井液本身的粘度、切力

套管和井壁对钻井液的粘附力

钻井液本身的重力

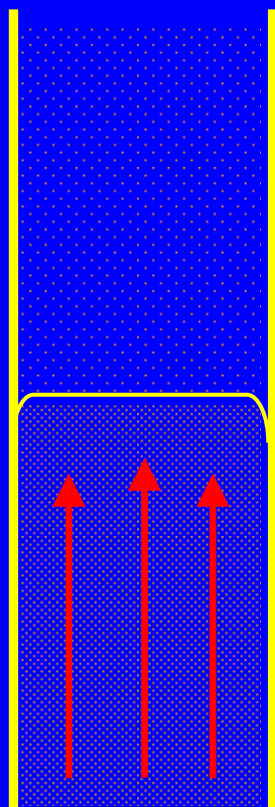
泵的压力

水泥浆对钻井液的浮力

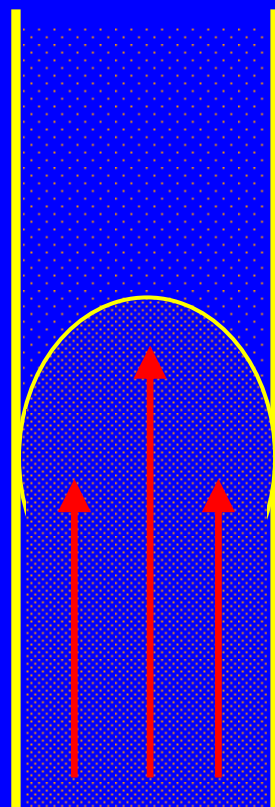
流动的水泥浆对钻井液的粘滞力

c.顶替流态

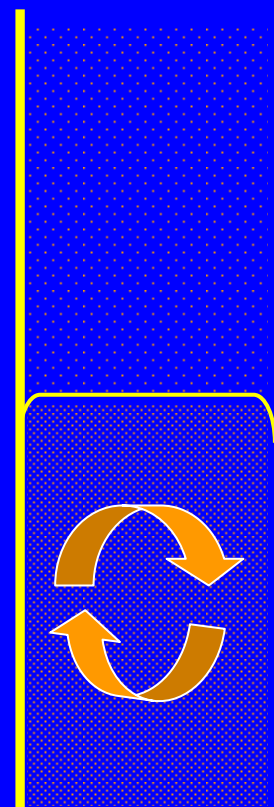
塞流



层流



紊流

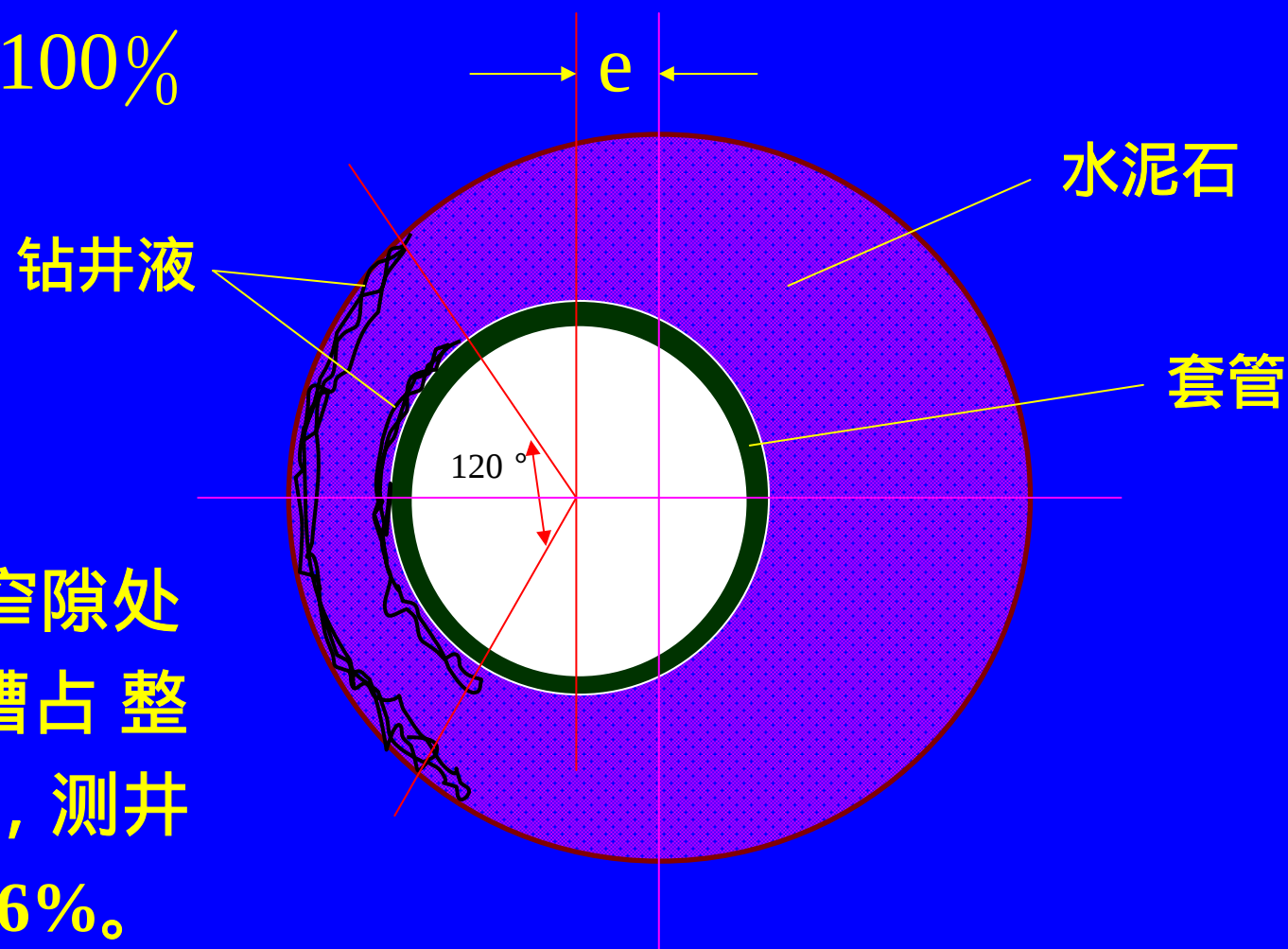


流态示意图

d.套管偏心的影响

$$S = \frac{e}{R-r} \times 100\%$$

S=50%时，窄隙处的
钻井液窜槽占整个圆周的1/3，测井
声幅值高达36%。



窄隙处钻井液窜槽示意图

e.井径扩大的影响

$$k = \frac{D_c - D_z}{D_z} \times 100\%$$

顶替模拟实验发现：当 $k = 15\%$ 时，切开井筒断面可见由井径小到井径大的扩大处，形成钻井液、前置液、水泥浆相互混掺的滞留区，水泥浆凝固后强度很低，两界面密封性能也很差。

B.提高顶替效率的措施

— 准备良好的井眼条件

— 尽可能地确保套管在井眼内居中

— 采用性能优良的前置液

— 采用合理的顶替速度

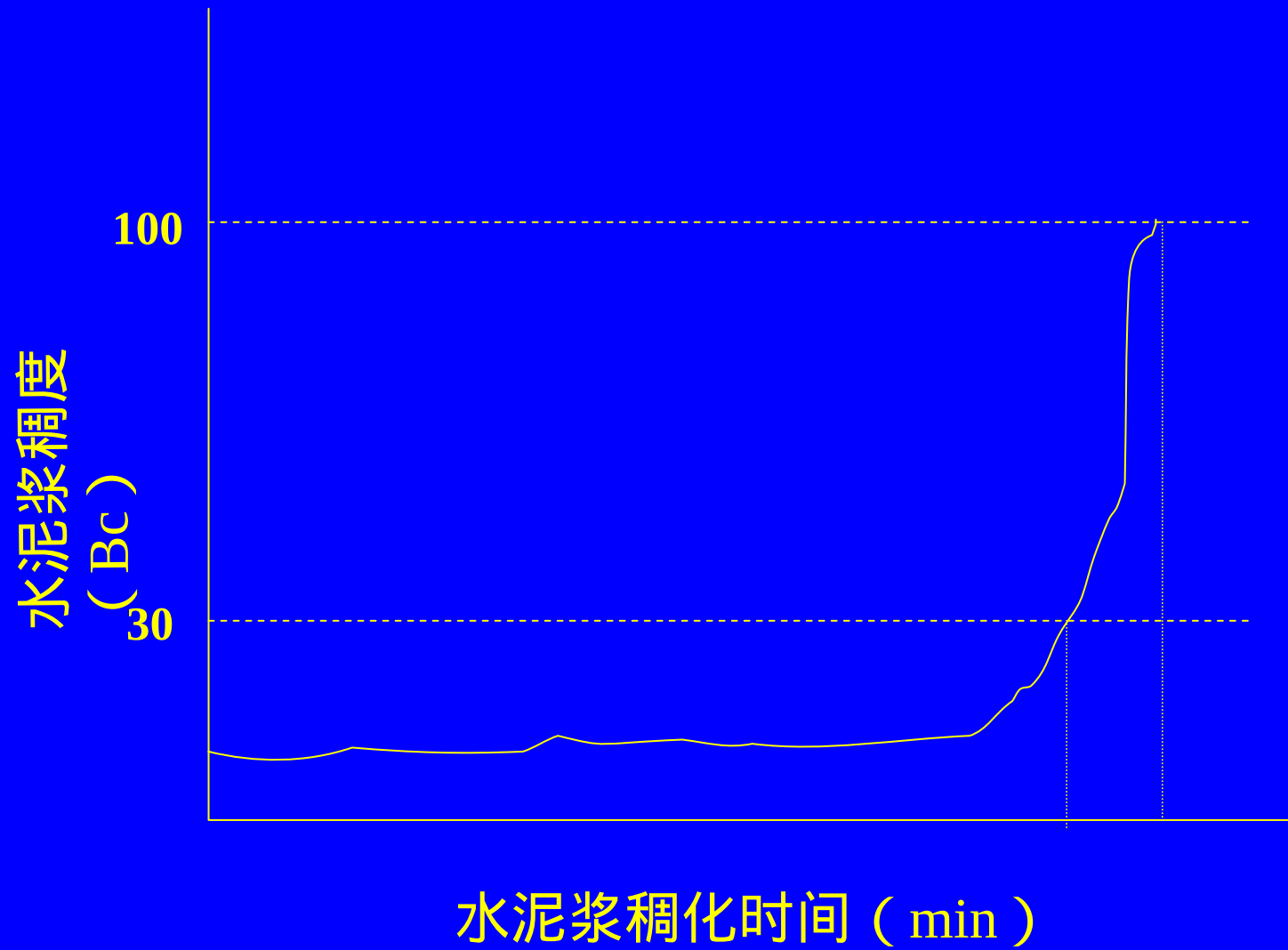
— 条件容许时坚持活动套管

2. 油气水窜机理与对策

水泥浆的物理状态变化是从刚顶替完的液态发展成静止一段时间的胶凝状态，到候凝期间低渗透性的软固相，最后发展成不渗透的固体。

气窜是一个非常复杂的问题，它与水泥浆密度的控制、钻井液的驱替、水泥的水化、水泥浆性能以及水泥与套管和地层的胶结等有关。

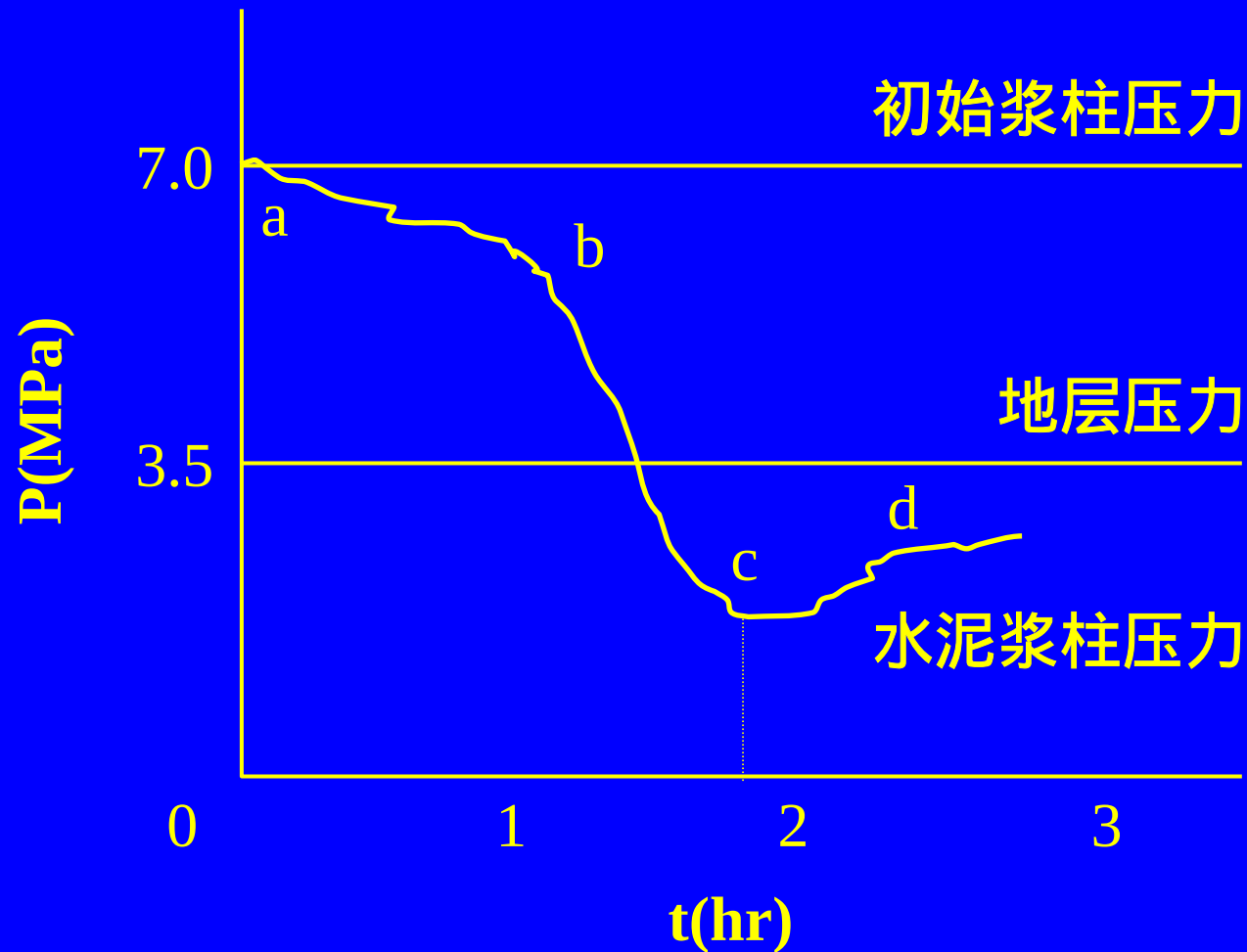
*水泥浆直角稠化性能



A.固井后水 气窜的机理

- 水泥浆柱压力变化规律
- 水窜流量的变化规律
- 固井“压差”对水侵的影响

a. 水泥浆柱压力变化规律



a-b段：起始期 迟缓期 b-c段：进入凝结期

b.水窜流量的变化规律

不同时间的水侵速率

水窜时间 (min)	10	60	120	200
水侵速率 (ml/min)	3.3	0.9	0.22	0.11
水导率 ($\times 10^{-4}\text{um}^2$)	20.7	7.55	1.38	0.69

可以看出：水泥石水导率随水窜时间增加而降低，这说明在水侵时间内，水泥浆内部的水化仍在进行，仍在不断封闭着水运移的通道，提高自身的抗窜能力。

c.固井“压差”对水侵的影响

不同压差下的水侵速率 (ml/um²)

压差 (MPa)	水侵时间 (min)			
	10	60	120	200
3.5	3.3	0.9	0.22	0.11
2	5.7	1.68	0.37	0.21
0.7	26.3	8.7	3.1	1.2

可以看出：固井后水泥浆柱压力与地层压力的“压差”越大，水侵速率越小，反之亦然。因此，在固井作业中，要保持足够高的水泥浆柱压力，通常称之为“压稳”。

B.防窜有效措施

固井后是否会发生气窜主要取决于水泥浆柱压力和地层压力，同时还与水泥浆自身的抗窜能力有关。防窜条件是

$$(P_H - P) + P_{sk} > P_p$$

防止固井后油气水窜的主要途径是

- a. 尽量增加固井后水泥浆柱的压力。
- b. 尽量减少水泥浆的“压力损失”。
- c. 尽快提高水泥浆的抗窜能力。

防窜有效措施

提高固井后水泥浆柱压力

环空加“回压”（大小 时间）

控制水泥返高

采用特种水泥固井（两凝水泥
可压缩水泥 锁水抗窜水泥）

3.水泥环界面胶结质量影响因素与对策

影响水泥环界面胶结质量的因素

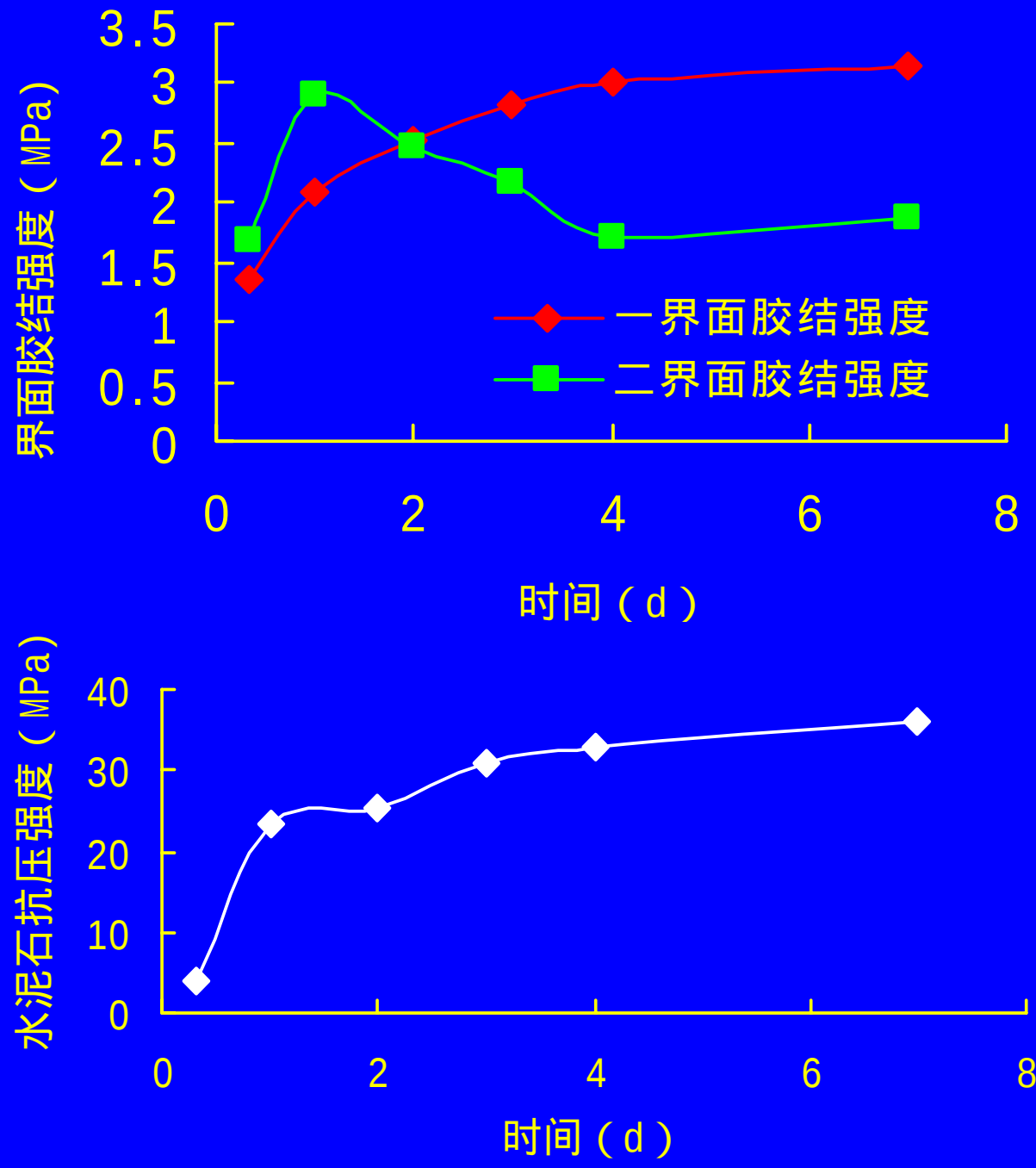
- 钻井液清洗不净
- 套管在施工中胀缩
- 水泥环在凝结硬化中体积变化
- 温度变化
- 地层水腐蚀

影响规律与对策

- 水泥环界面强度发展规律
- 界面污染对胶结的影响
- 提高水泥环密封的有效措施

水泥环界面胶结质量通常用水泥环界面胶结强度来评价。

a. 水泥环界面胶结强度发展规律



b.界面污染对胶结的影响

不同界面情况下水泥环界面的强度

界面情况		界面强度 (MPa)	抗窜能力 (MPa)
一界面	干净套管	2.50	5.2
	钻井液污染套管	0.34	4.0
二界面	干净非渗透井壁	2.39	1.80
	钻井液污染非渗透井壁	0.58	0.75
	干净渗透井壁	1.43	---
	钻井液污染渗透井壁并形成泥饼	0.17	---

c.提高水泥环密封的有效措施

- *提高顶替效率，冲洗井壁和套管壁
- *采用粘砂套管
- *采用微膨胀水泥
- *采用刮泥器
- *采用管外封隔器

环氧树脂 100%
乙二胺 8%
二丁酯 15%

•粘砂套管

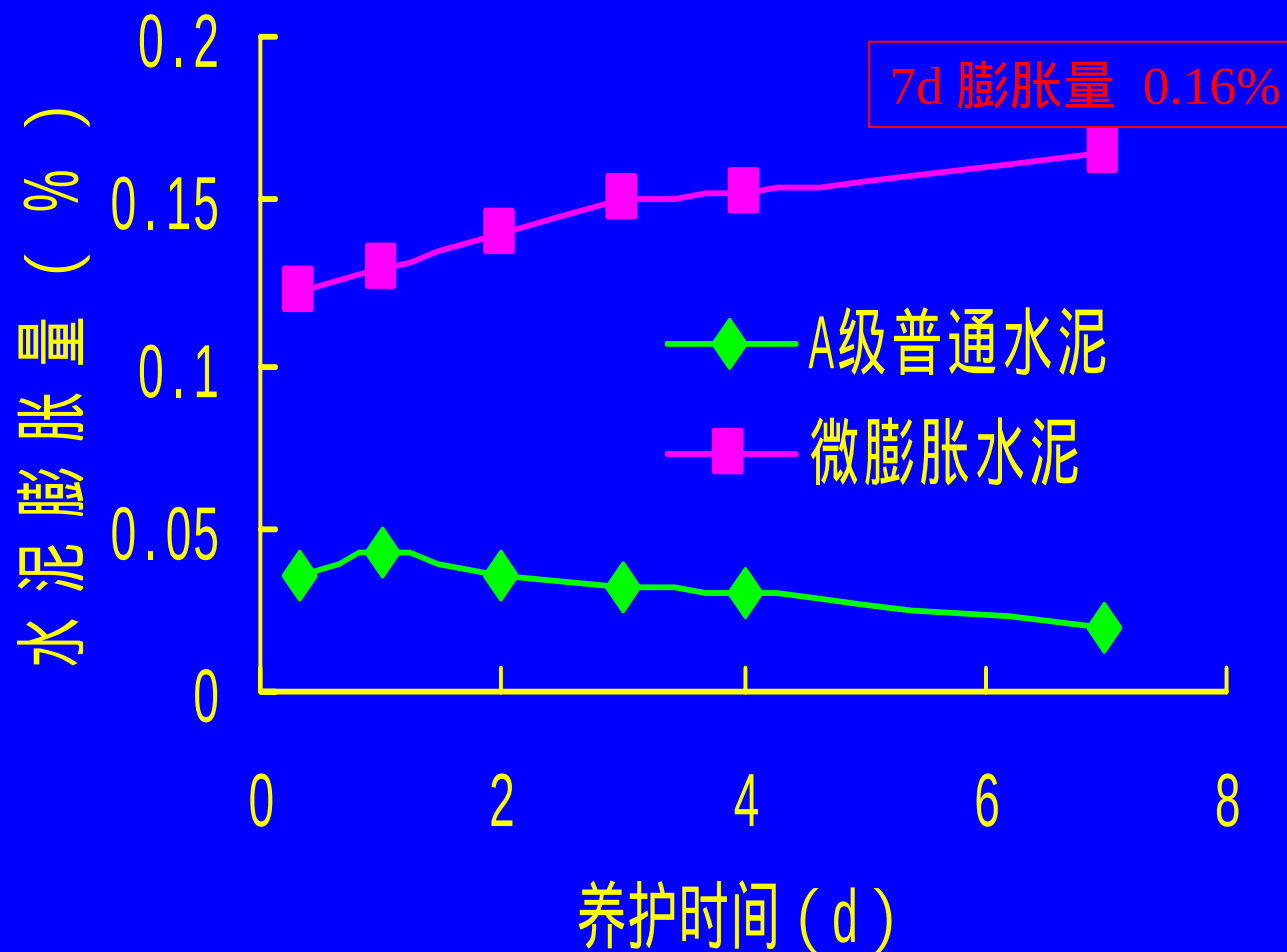
砂粘直径 2-5mm
覆盖率 75%

粘砂套管界面强度

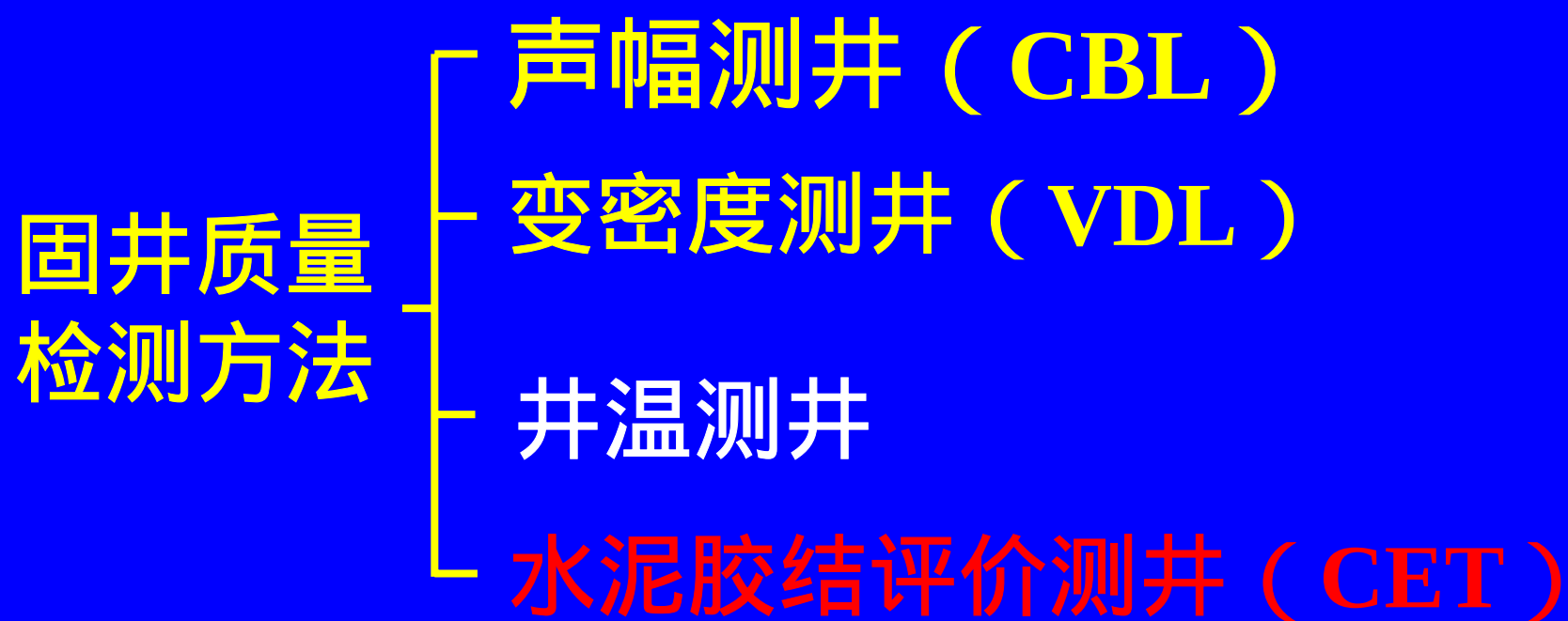
界面情况	钻井液 粘度 (s)	套管界面胶结 强度 (MPa)
未受钻井液污染的光滑套管	- -	2.50
未受钻井液污染的粘砂套管	- -	7.30
粘钻井液的光滑套管	30	0.34
粘钻井液的粘砂套管	35	2.77

微膨胀水泥水化生成柱状或针状的钙矾石（水化硫铝酸钙），其体积较反应前增加1.22-1.75倍，从而引起水泥石体积膨胀，井下的水泥环便会挤压井壁和套管壁，提高界面胶结质量。一界面提高15%，二界面提高90%。

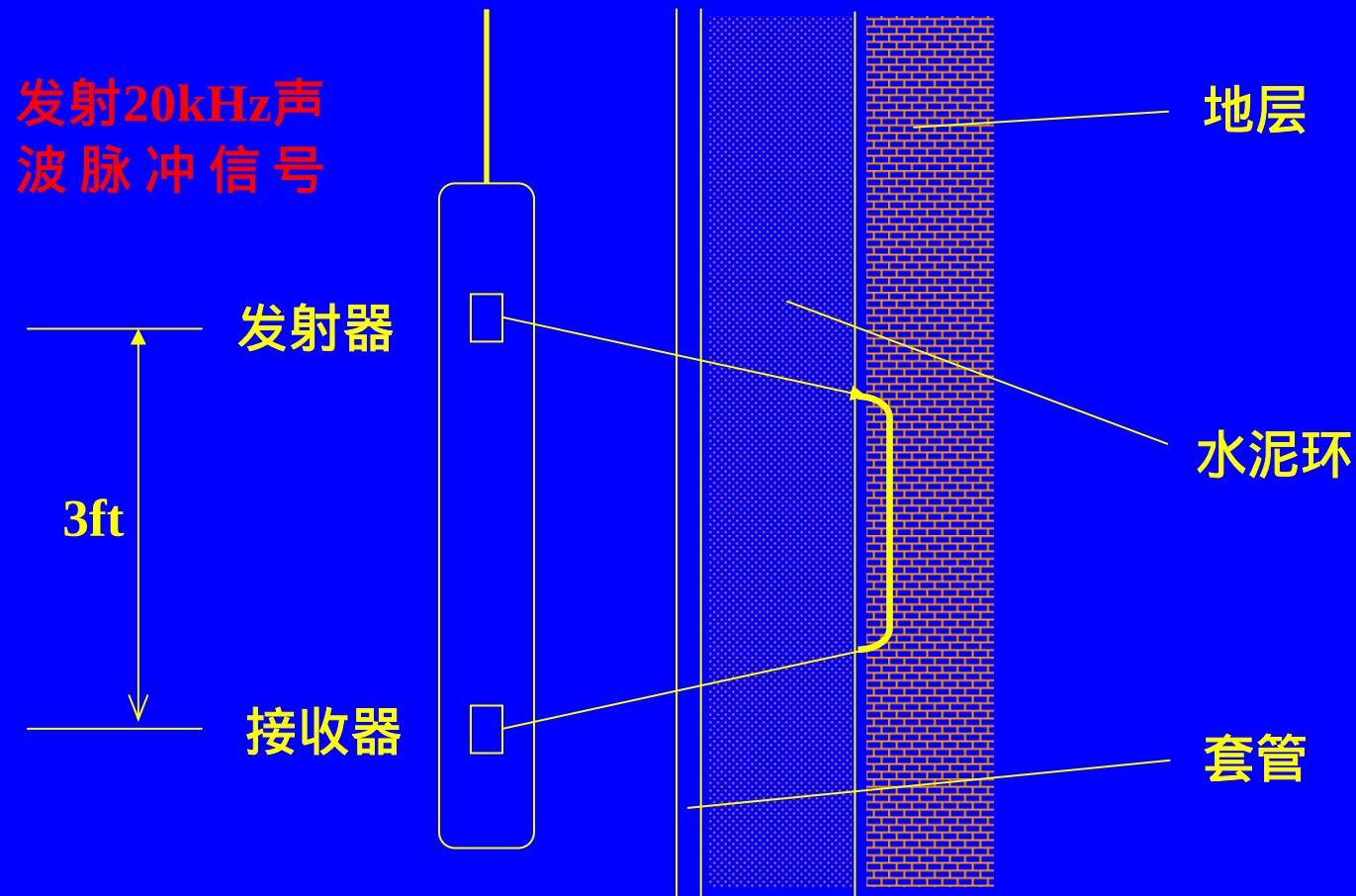
•微膨胀水泥



四、固井质量检测

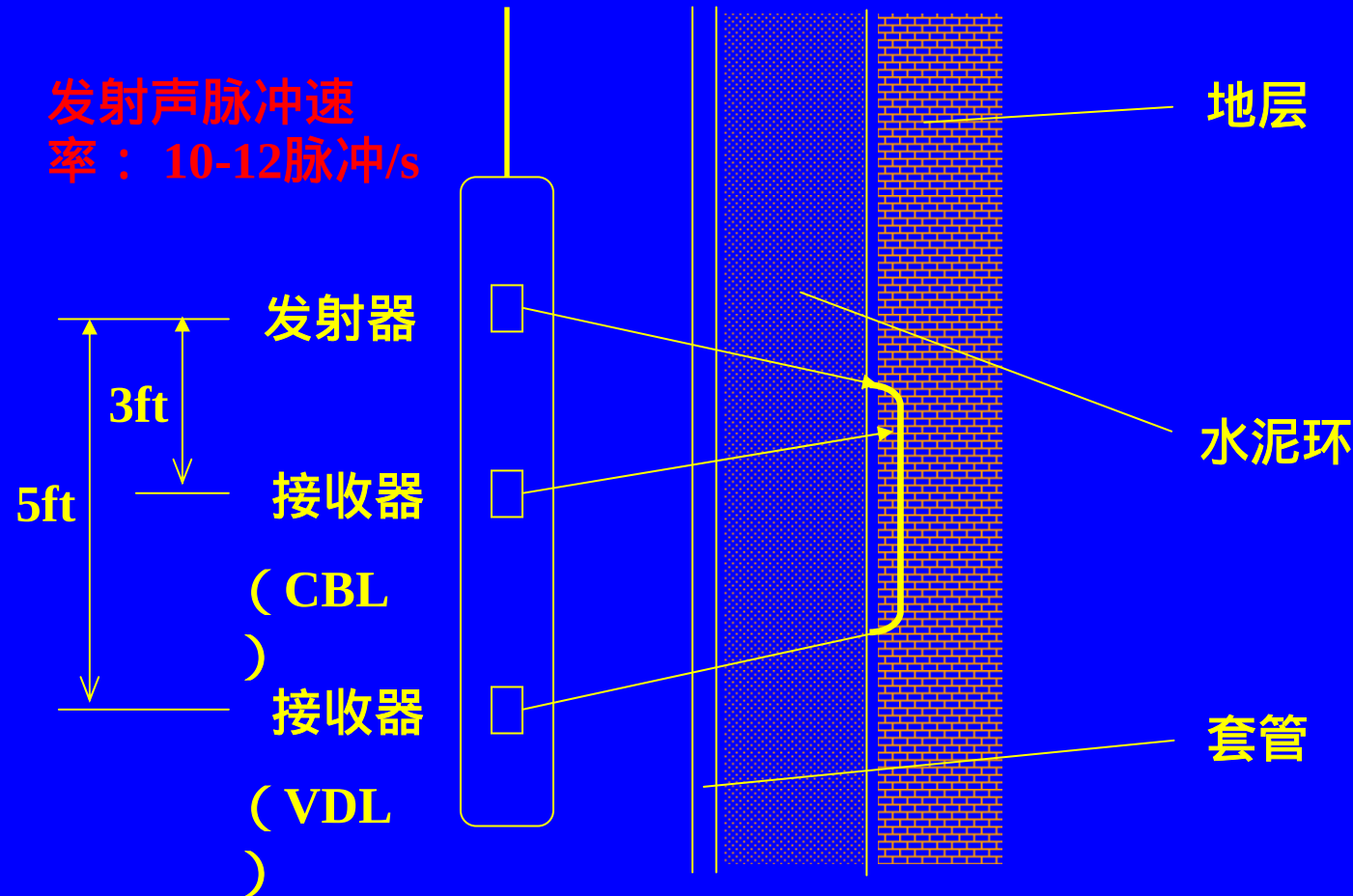


a. 声幅测井 (CBL)



胶结好，声幅小；胶结差，声幅大。

b.变密度测井 (VDL)



一界面胶结好，二界面胶结差，则套管波信号弱，地层波信号也弱；一二界面胶结都好，则套管波信号弱，地层波信号强。一界面胶结差，则很难判断二界面的胶结情况。

c.井温测井

作用：确定水泥返高，作为水泥充填程度的补充解释
测井时间：固井后12-24hr内，过早或过晚都会影响测量结果。



d.水泥胶结评价测井（CET）

CET在 360° 圆周上每隔 45° 共安排了8个换能器，并呈螺旋分布排列，这8个换能器既是发射器又是接收器。

声波脉冲的衰减率取决于环空介质的声阻抗：套管外为钻井液时，其声阻抗小，衰减很慢；套管外为水泥浆时，其声阻抗较大，衰减很快；而且，水泥石的强度越高，其声阻抗越大，声波能量衰减越快，即衰减能反映水泥石的强度。

欢迎大家批评指正!