

矿场固井 技术

顾 军 编著



石油工业出版社

矿场固井技术

顾 军 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

固井技术是现代钻井工程成套技术中的关键环节,长期以来一直是国内外钻井界致力探索的重要课题。本书汇集了作者从事固井工程理论研究和实践探索的一些成果,内容包括固井计算、固井工艺、固井工具、特种油井水泥和油井水泥外加剂等。书中建立了一些新的概念、模式和方法。

本书可供现场固井工程技术人员阅读,也可供固井技术研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿场固井技术/顾军编著.

北京:石油工业出版社,1997.12

ISBN 7-5021-2198-6

I. 矿...

II. 顾...

III. 固井-技术

IV. TE256

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 24566 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 6.75 印张 4 插页 183 千字 印 1—1000

1997 年 12 月北京第 1 版 1997 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2198-6/TE · 1841

定价: 13.00 元

前 言

随着石油勘探开发技术的发展，固井技术正引起各国石油界的极大关注。固井的目的是封隔井眼内的油气水层。若在井内达不到完全的层间封隔，油井就永远达不到它的全部产能。因固井质量问题而进行的补注水泥作业可能会对产层造成无法挽救的伤害。除可能失去储量和降低产量之外，还将会延迟投产时间。也将会发生其它问题，如向产层注汽失去控制，或不能进行二次或三次采油等。因此，提高固井质量成了亟待解决的问题。

作者一向认为，在固井技术这一研究领域中，尽管影响因素很多，但必须抓住以下三点：其一是固井工程设计的优化；其二是水泥浆体系的优选；其三是配套技术措施的强化。本书的内容正是围绕这三点展开的。

作者将近年来发表在《油田化学》、《天然气工业》和《石油钻探技术》等 10 多种期刊上的 40 多篇论文汇于一集，定名为《矿场固井技术》。冒昧地把它献给读者，以期能够抛砖引玉，促进我国矿场固井技术的进一步发展。

作者特别感谢吐哈油田各级领导的关心和支持；感谢周芝琴、杨小妹、王学良、钱峰等同志，为书稿的打印和插图清绘付出了辛勤劳动。同时，也感谢有关期刊编辑部所给予的支持。

由于作者水平有限，加之经验不足，因此书中错误及疏漏之处肯定难免，恳请读者批评指正。

顾 军

1996 年 9 月于新疆·哈密

目 录

第一章 固井计算	(1)
§ 1-1 提高声波时差法预测地层压力精度的方法	(1)
§ 1-2 计算井内波动压力的简单方法	(6)
§ 1-3 地层温度计算新方法	(9)
§ 1-4 固井压差形成真空段长度的计算	(14)
§ 1-5 水柜中水泥外加剂有效量的计算	(16)
§ 1-6 固井回压时间计算的研究	(21)
§ 1-7 固井水泥用量计算的研究	(24)
§ 1-8 探讨内管注水泥的几个计算问题	(28)
§ 1-9 油气井井口装定距的计算	(33)
§ 1-10 确定表层套管下入深度的新方法	(35)
第二章 固井工艺	(38)
§ 2-1 吐哈地区固井工艺技术	(38)
§ 2-2 固两头技术在鄯善油田技术套管固井中 的应用	(49)
§ 2-3 丘陵复杂断块油气田固井配套技术	(54)
§ 2-4 漂珠低密度水泥固井技术的应用	(60)
§ 2-5 吐哈油田内管注水泥技术的应用	(64)
§ 2-6 巴喀油田防气窜固井综合技术的应用	(69)
§ 2-7 丘陵油气田固井质量影响因素的统计分析	(74)
§ 2-8 提高大斜度井固井质量的方法	(79)
§ 2-9 胜火 1 井防漏固井综合技术的应用	(88)
§ 2-10 保护油气层水泥浆的研究与应用	(96)
§ 2-11 固井知识四则	(108)
第三章 固井工具	(115)

§ 3-1	GC-1 型管外水泥承托器	(115)
§ 3-2	套管回压阀失灵的原因分析及对策措施	(117)
§ 3-3	NCH-Ⅱ 新型内管注水泥器	(122)
第四章	特种油井水泥	(127)
§ 4-1	漂珠低密度油井水泥的试验研究	(127)
§ 4-2	微硅水泥特性研究	(131)
§ 4-3	我国钻井液转化成水泥浆技术的现状	(139)
§ 4-4	硅化 G 级水泥在深井固井中的应用	(146)
第五章	油井水泥外加剂	(152)
§ 5-1	我国常用水泥外加剂的现状	(152)
§ 5-2	吐哈油田油井水泥外加剂应用概况	(164)
§ 5-3	国内油井水泥降失水剂的研制和应用	(168)
§ 5-4	漂珠减轻剂的室内试验和现场应用	(172)
§ 5-5	固井水泥防气窜剂应用效果比较	(175)
§ 5-6	降失水剂 ST200S 的室内试验和现场应用	(180)
§ 5-7	油井水泥分散缓凝剂 TD-1A	(185)
§ 5-8	油井水泥分散剂的降失水作用	(189)
§ 5-9	QR-300A 油井水泥降失水剂试验及其 应用	(192)
§ 5-10	油井水泥早强剂在巴喀油田的应用	(197)
§ 5-11	油井水泥缓凝剂 QR-300C 的应用 性能	(201)
§ 5-12	油井水泥降失水剂 QT300 在巴喀油田的 应用	(205)
主要参考文献		(210)

第一章 固井计算

§ 1-1 提高声波时差法预测地层压力精度的方法

地层压力是固井工程设计的重要参数。本文介绍了声波时差法预测地层压力的原理和模式，详细阐述了提高预测精度的具体方法。实践证明，所推荐的方法可行而有效。

一、原理与模式

1. 原理

由于泥页岩的孔隙度与声波传播时间成正比，因此测得的泥页岩声波时差值可以反应泥页岩孔隙压力。而且，在大多数情况下，同一区块邻近地层有相等的地层压力，所以利用泥页岩声波测井资料，就可以预测邻近地层压力。

2. 模式

利用声波的差值计算地层压力的公式为

$$p_p = G_o H - (G_o - G_w)[a - b \lg(\Delta T)] \quad (1-1)$$

式中 p_p ——地层压力，kPa；

G_o ——上覆岩层压力梯度，kPa/m；

H ——井深，m；

G_w ——地层孔隙压力梯度，kPa/m；

a 、 b ——回归系数， a/b 比值反应某地区的地面压实程度，通常 $a/b=2.80\sim 2.83$ ；

ΔT ——与 H 相对应的声波时差值， $\mu s/m$ 。

二、方法与步骤

地层压力预测是分区块进行的。对某一油田进行压力预测,先按地层情况划分成几个区块,然后每个区块选 3~10 口井,分别绘出 $H-\lg(\Delta T)$ 曲线,通过对比分析,将 $H-\lg(\Delta T)$ 曲线趋势相近的进行区块数据回归,从而得出该区块的地层压力剖面。

1. 区块选井

井选得好与否,直接影响着区块总回归曲线的精度及其使用价值,因此选井时应注意以下三点:

1) 所选井的测井资料、井史和试井资料要齐全。

2) 正常井和异常井各选 2~5 口。

3) 注意该区块断裂带附近井地层压力纵向分布情况,同时也要考虑该区块中央部位地层压力的纵向分布情况。

2. 初始取值点井深的确定

确定初始取值点井深的原则是各井一致,越浅越好。

1) 如果某区块所选各井的开始测井井深基本一致,则各井以其中开始测井井深最深者为初始取值点井深。

2) 如果某区块所选各井中某井的开始测井井深比其余各井深 300m 以上,则应舍去此井。若有必要,再从该区块中另选一口井。

3. 100m 井段取值点数目的确定

100m 井段的取值点数目原则上是尽可能多,但应考虑到工作效率。经验表明:

1) 如果某区块所选各井的测井井段在 500m 以上,则 100m 井段取 2~3 点即可。

2) 如果某区块所选各井的测井井段只有 100~300m,则 100m 井段取 5~15 点为宜。

4. 取值方法

取值时,应考虑不整合、断层、沉积速度以及岩性、井径、钻井液性能、地层温度、地层水矿化度对声波时差值的影响。具体应根据微电极、声波、电阻率 (4m 或 0.25m)、自然电位、井径变化和感应等六条测井曲线进行判断。

(1) “六不取”

1) 微电极测井曲线: 应选取重合较好, 且平滑象锯齿形的层段, 否则不取。

2) 电阻率 (4m 或 0.25m) 测井曲线: 应选取趋于低值的层段, 否则不取。

3) 自然电位测井曲线: 应选取趋于正值且平滑的层段, 否则不取。

4) 井径变化测井曲线: 井径变化在 “+” “-” 一格间者可取值, 否则不取。

5) 感应测井曲线: 应选取趋于高值且平滑的层段, 否则不取。

6) 水层、干层、夹层井段的点不取。

(2) 特殊情况的处理

1) 有时某一小井段 (一般为 5~10m) 的声波曲线变化较大, 出现多个拐点, 取值比较困难。因此, 建议先取出这几个拐点的声波时差值, 然后取其平均值。此平均声波时差值即为这一小井段上任一点的声波时差值。

2) 有时 100m 井段无合乎要求的取值点, 建议可以模拟 1~2 点 (只限正常层), 因为正常层其趋势线是一条直线, 模拟 1~2 点对其趋势的影响很小 (一般相关系数大于 0.99)。

5. 异常高压层段的判断和取值

(1) 异常高压层段的判断

1) 分析测井曲线, 若某层段的声波的差值有明显的偏高现象 (注意区别钙质的影响), 即可认为有异常高压。

2) 根据试油资料, 若该层段的当量钻井液相对密度大于该井所在区块的平均地层水相对密度, 即可认为有异常高压。

3) 查阅井史, 若该井段使用的钻井液相对密度有明显升高现象 (应区分井塌的影响), 且完井总结中注有该层段 “发生溢流”、“井涌”、“井喷” 等, 即可认为有异常高压。

若以上均显示有异常高压, 即可判断该层段为异常高压段。

(2) 异常高压层段的取值

异常高压层段泥页岩声波时差值偏离正常趋势线，无需考虑其相关系数，因此取值仅按前述“六不取”原则进行即可。

6. 声波时差值的校正

取值后，应根据地层情况进行校正，主要有以下两方面：

(1) 上部地层水化影响的校正

上部地层结构疏松，多为砂泥岩。这部分地层水化影响较大，水化效应的结果使泥页岩声波时差值增大，因此应适当降低所取的声波时差值（一般约 $30\sim 50\mu\text{s}/\text{m}$ ）。

(2) 下部地层钙质影响的校正

下部地层压实程度较好，比较致密。但有时声波时差值突然下降，这是该层段钙质较高的缘故。研究表明，钙质含量每增加1%，声波时差值减小6.3%。因此，根据实际情况，应适当增加该层段的声波时差值（一般约为 $70\sim 90\mu\text{s}/\text{m}$ ）。

7. 数据回归及压力剖面的绘制

(1) 单井数据回归及压力剖面的绘制

取值校正后，将 $H-\Delta T$ 值输入计算机进行回归，然后在 $H-p_p$ 坐标上绘出单井压力剖面。

(2) 区块数据回归及其压力剖面的绘制

先绘出区块所选各井的 $H-\lg(\Delta T)$ 曲线，通过对比分析，将 $H-\lg(\Delta T)$ 曲线斜率和截距相近的各井进行平均，得出区块趋势线方程，然后在 $H-p_p$ 坐标上绘出区块压力剖面。

三、现场验证

声波时差法预测地层压力的关键问题是区块所选各井的平面布局和取值的准确性。我们选某油田某区块的3口井作为该区块的代表井。取值回归后，所得某区块的压力剖面如图1-1所示。

从图1-1可以看出：

1) 地表到2700m为正常层，其趋势线方程为 $p_{p1}=10.395H-758.642$ (kPa)。

2) 2700~3100m为异常高压段。

3) 3100m以后地层压力又趋正常，其趋势线方程为 $p_{p2}=$

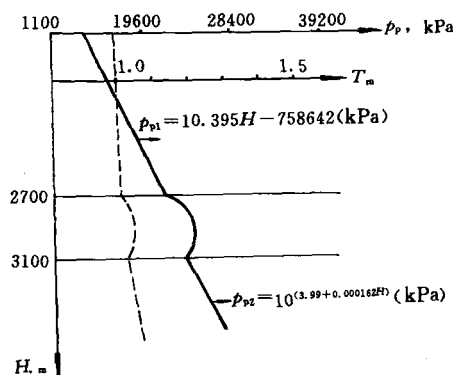


图 1-1 某油田某区块的压力剖面

$10^{3.99+0.000162H}$ (kPa)。

1. 误差对比

由回归方程 $p_{p2} = 10^{3.99+0.000162H}$ (kPa) 计算的地层压力和试油压力的对比情况见表 1-1。

表 1-1 误差对比表

井 号	试油井深 (m)	试油压力 (kPa)	计算压力 (kPa)	绝对误差 (kPa)	相对误差 (%)
某区块-17	3296.5	33205.32	33383.80	178.48	0.54
某区块-11	3315.6	33107.25	33621.12	513.87	1.55
某区块-27	3559.9	36127.70	38830.84	703.14	1.95

由表 1-1 可知，其相对误差低于 2%，完全满足现场要求。

2. 同区块验证

在某油田的实际预测中发现，在某区块中央部位，异常高压趋于低限，地层压力当量密度为 1.20g/cm^3 ；在靠近断裂带，异常高压趋于高限，地层压力当量密度为 1.33g/cm^3 。因此，在开发此区块的过程中，我们建议将技术套管下过 3100m，控制钻井液密度在 $[\rho_m + (0.05 \sim 0.10)]$ 范围内钻进。这样，既提高了钻速，又保

护了油气层。

在某区块-8井的开发过程中,由于该井位于区块的中央部位,以密度为 1.35g/cm^3 的钻井液钻开高压层,下技术套管至 3159m,然后再以密度为 1.06g/cm^3 的钻井液钻开生产层,完钻井深为 3400m。中途测试该井日产原油 200t,与未进行压力预测的同区块日产原油平均 45t 相比,某区块-8井的经济效益就相当于 4 口同区块井。

四、结论

- 1) 利用声波时差法预测地层压力,克服了现场跟踪的繁琐工作,既经济又方便。
- 2) 编制的回归程序参数少,操作方便,便于现场使用。
- 3) 所推荐的方法切实可行,精度较高。

§ 1-2 计算井内波动压力的简单方法

管柱在充满钻井液的井内运动所产生的波动压力,会使井内压力系统失去平衡而引起井下复杂和事故。以往使用的波动压力计算公式比较复杂,计算误差较大。本文介绍一种井内波动压力的简单计算方法并列举出运算实例。本方法尤其适用于现场计算。

管柱在充满钻井液的井中运动所产生的附加压力包括激动压力和抽吸压力。目前稳态波动压力计算方法有两种,即 J. A. Burkhardt 法(1960 年提出)和 G. A. Chukwu 法(1991 年提出)。J. A. Burkhardt 法计算相当复杂,误差高达 50%~100%。本文介绍 G. A. Chukwu 提出的稳态波动压力计算方法,实例计算表明其相对误差小于 50%。

一、基本方程

在忽略井内温度影响时,堵口管运动引起的波动压力梯度由下式计算

$$G_s = \frac{2K}{R} \left(\frac{\bar{p}v_p}{R} \right)^n \quad (1-2)$$

式中 G_s ——波动压力梯度, Pa/m;
 K ——流体稠度系数, Pa · sⁿ;
 n ——幂律流体指数;
 $\bar{p}$ ——无因次压力梯度;
 R ——固定外管的内半径, m;
 v_p ——管柱运动速度, m/s。

井深 H_s 处的波动压力由下式计算

$$p_s = G_s H_s \quad (1-3)$$

式中 p_s ——井深 H_s 处的波动压力, Pa;
 H_s ——某一井深, m。

二、方程参数的确定

1. 幂律流体指数 n

$$n = 3.32 \lg \frac{\Phi_{600}}{\Phi_{300}} \quad (1-4)$$

2. 流体稠度系数 K

$$K = \frac{0.4788 \Phi_{600}}{511^n} \quad (1-5)$$

式中 Φ_{600} 和 Φ_{300} 分别为 Fan35 型粘度计中 600r/min 和 300r/min 的读数。

3. 无因次压力梯度 $\bar{p}$

(1) 计算直径比 a

$$a = \frac{d_o}{d_i} \quad (1-6)$$

式中 d_i ——固定外管的内直径, m;
 d_o ——运动内管的外直径, m。

(2) 确定无因次压力梯度 $(\bar{p})$

由 n 和 a 查图 1-2, 即可得到 $\bar{p}$ 。

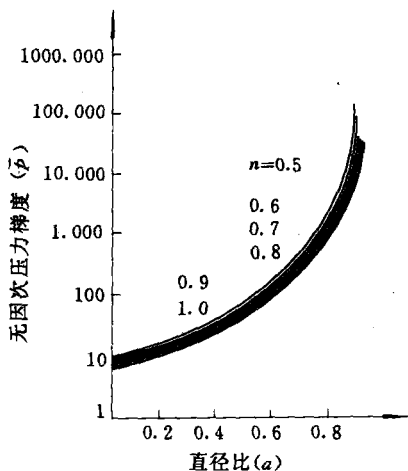


图 1-2 无因次压力梯度 $(\bar{p})$ 查值图

三、计算实例

例如某井的井身结构见图 1-3 所示。

试计算管柱以 0.426m/s 的速度运行至 2800m 时所产生的激动压力。

1. 计算幂律流体指数 n

将数据代入 (1-4) 式, 得

$$n = 3.32 \lg \frac{75}{49} = 0.6137$$

2. 计算流体稠度系数 K

将数据代入 (1-5) 式, 得 $K = 0.7817 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ 。

3. 确定无因次压力梯度 $\bar{p}$

(1) 计算直径比 a

将数据代入 (1-6) 式, 得 $a = 0.7257$ 。

(2) 确定无因次压力梯度 $\bar{p}$

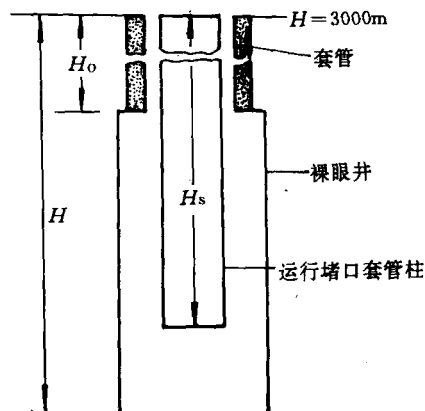


图 1-3 井身结构示意图

根据 $n=0.6137$ 和 $a=0.7257$, 查图 1-2 得 $\bar{p}=123$ 。

4. 计算激动压力梯度 G_s 。

将数据代入 (1-2) 式, 得 $G_s=525.6373\text{Pa/m}$ 。

5. 计算激动压力 p_s 。

将数据代入 (1-3) 式, 得 $p_s=1.47\text{MPa}$ 。

上述结果与用动态模拟法确定的激动压力值 (2.56MPa) 相比, 相对误差为 -42.6% 。

该方法虽然仍是近似值, 但计算简捷, 极适于现场运用。若编成程序用 PC-1500 计算机处理, 效率更高。

§ 1-3 地层温度计算新方法

地层温度是解释注水井和生产井温度测井曲线的重要参数, 也是确定水泥浆试验温度的基础。以往的经验计算公式比较复杂, 误差较大。这里介绍一种地层温度计算的新方法, 它仅需两个关井温度。实例计算结果表明, 其误差仅 1°C 。

一、方法介绍

假设注水或生产期间,某特定井深处循环液的温度保持不变。
当 $\Delta t_D > 25$ 时,地层温度可由下式计算

$$T_i = T_2 + K(T_2 - T_1) \quad (1-7)$$

式中 T_i ——地层温度,℃;

T_2 —— $\Delta t = \Delta t_2$ 时的关井温度,℃;

T_1 —— $\Delta t = \Delta t_1$ 时的关井温度,℃;

K ——无因次系数;

Δt_D ——无因次关井时间;

Δt ——关井时间, h;

Δt_1 ——第一次测井的关井时间, h;

Δt_2 ——第二次测井的关井时间, h。

(1-7) 式即为计算地层温度的简单公式。

1. 计算公式的选择

无因次关井时间由下式计算

$$\Delta t_D = \frac{a \Delta t}{r_p^2} \quad (1-8)$$

式中 a ——地层的热扩散率, cm^2/h ;

r_p ——油管半径, cm 。

若 $\Delta t_D > 25$ 时,用 (1-7) 式计算地层温度;反之则用文献* 中的公式 (2) 计算。

2. 无因次系数的确定

(1) 计算关井时间和循环时间 t_c 的比值

$$n_1 = \frac{\Delta t_1}{t_c} \quad (1-9)$$

* Kritikos, W. P.: "Two-point Method for Determination of Undisturbed Reservoir Temperature", SPESE, March 1988

$$n_2 = \frac{\Delta t_2}{t_c} \quad (1-10)$$

式中 n_1, n_2 ——分别为第一、二次测井关井时间和循环时间 t_c 的比值。

(2) 确定 K 值

由 n_1 和 n_2 查表 1-2 即得 K 值。

二、应用实例

某井在液体注入 328h 后进行温度测井。二次测井的关井时间分别为 $\Delta t_1 = 32.8\text{h}$ 、 $\Delta t_2 = 65.6\text{h}$ ，油管直径 $2r_p = 6.985\text{cm}$ ，地层的热扩散率为 $a = 121.92\text{cm}^2/\text{h}$ 。关井温度为 $T_1 = 78.8^\circ\text{C}$ 、 $T_2 = 82.3^\circ\text{C}$ 。地层温度的实测值为 93.3°C 。试用新方法确定地层温度。

1. 选择计算式

将数据代入 (1-8) 式，得

$$\Delta t_D = \frac{121.92 \times 10}{(6.985/2)^2} = 100 > 25$$

因此，可用 (1-7) 式计算地层温度。

2. 确定 K 值

由 (1-9) 式、(1-10) 式，得

$$n_1 = \frac{32.8}{328} = 0.1$$

$$n_2 = \frac{65.6}{328} = 0.2$$

由 n_1 和 n_2 查表 1-2 得 $K = 3.407$ 。

3. 计算地层温度

将数据代入 (1-7) 式，得

$$T_f = 82.3 + 3.407 \times (82.3 - 78.8) = 94.2^\circ\text{C}$$

地层温度的计算值与实测值相当吻合，相对误差小于 1%。