

ICS 75.020

E 13

备案号: 27466—2010

SY

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 5623—2009

代替 SY/T 5623—1997, SY/T 5430—1992

地层压力预（监）测方法

Prediction and detection methods of formation pressure

2009—12—01 发布

2010—05—01 实施

国家能源局 发布

目 次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 前言 | II |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 地层孔隙压力预（监）测方法 | 1 |
| 4 地层破裂压力预测及试验方法 | 5 |
| 5 地层坍塌压力预测方法 | 8 |
| 6 地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力预（监）测报告 | 8 |
| 附录 A（规范性附录） 相关参数计算 | 10 |
| 附录 B（资料性附录） dc 指数和声波时差法绘图规定 | 13 |
| 附录 C（资料性附录） 声波时差正常趋势线系数的确定 | 15 |
| 附录 D（资料性附录） 地层坍塌压力预测方法 | 17 |

前 言

本标准整合修订并代替 SY/T 5623—1997《地层孔隙压力预测检测方法》和 SY/T 5430—1992《地层破裂压力测定 套管鞋试漏法》。

本标准与 SY/T 5623—1997 和 SY/T 5430—1992 相比，主要变化如下：

- 增加了地层孔隙压力的实测方法；
- 增加了地层破裂压力的预测方法；
- 增加了附录 D “地层坍塌压力预测方法”。

本标准的附录 A 为规范性附录，附录 B、附录 C、附录 D 为资料性附录。

本标准由石油钻井工程专业标准化委员会提出并归口。

本标准起草单位：长江大学、中国石油大学。

本标准主要起草人：刘刚、陈勉、樊洪海、金业权。

本标准所代替标准的历次发布情况为：

- ZB E13 006—1990，SY 5623—1993，SY/T 5623—1997；
- SY/T 5430—1992。

地层压力预（监）测方法

1 范围

本标准规定了陆上和海上石油天然气钻井中砂、泥岩地层孔隙压力、破裂压力预（监）测方法。所采用的地层孔隙压力预（监）测理论建立在由泥岩欠压实程度作用而引起的孔隙流体异常高压与泥岩欠压实程度相对应的机理上，适用于有砂、泥岩层序剖面的探井和油气田初期开发直井的地层压力预测和监测；采用 dc 指数监测地层孔隙压力且使用 PDC 钻头时，可参考使用本标准。地层破裂压力预测适用于砂、泥岩层序剖面的油气井。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

SY/T 5483 常规地层测试技术规程

SY/T 5691 电缆式地层测试器测井资料解释规范

SY/T 6426 钻井井控技术规程

3 地层孔隙压力预（监）测方法

3.1 dc 指数法

3.1.1 现场资料采集

3.1.1.1 应在钻入成岩后的砂泥岩层后开始监测。

3.1.1.2 计算 dc 指数的点距可选 1m~5m 一点，进入可能的压力过渡带时应每 1m 一点。为提高绘图及计算精度，宜采用较密的采集点。

3.1.1.3 资料采集的要求为：

- 按点距采集纯钻进时间、井深、钻压、转速、钻井液密度的参数值。各参数应采用均匀层段的平均值，而不应采用瞬时值；
- 正常孔隙压力当量密度根据地层水密度确定；
- 应记录所采用的钻头尺寸及类型；
- 应记录所采用的排量及泵压；
- 出现井漏时，应记录井漏的时间、井深、层位、漏失量、钻井液密度；
- 出现溢流时，应记录时间、井深、层位、循环池液体增量、钻井液密度、关井立管压力和关井套管压力；
- 出现油气水侵时，应记录时间、井深、层位、进口和出口的钻井液密度及黏度；
- 具有测试和试油资料的层段，应获取相应的时间、井深、层位、实测孔隙压力资料。

3.1.1.4 dc 指数数据表格式见表 1。

3.1.2 dc 指数计算公式

dc 指数计算公式见式（1）。

$$dc = \frac{\rho_n}{\rho_d} \cdot \frac{\lg \frac{3.28L}{n \cdot t}}{\lg \frac{0.0685W}{d_b}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

dc —— dc 指数；

ρ_n ——正常孔隙压力当量密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）；

L ——计算 dc 指数的点距，单位为米（m）；

n ——转盘转速，单位为转每分钟（r/min）；

t ——点距 L 的纯钻进时间，单位为分（min）；

ρ_d ——实际钻井液密度（宜采用当量循环密度），单位为克每立方厘米（g/cm³）；

W ——钻压，单位为千牛（kN）；

d_b ——钻头直径，单位为毫米（mm）。

表 1 dc 指数数据

| 井深 m | 钻时 min/m | 钻压 kN | 转速 r/min | 钻井液 密度 g/cm ³ | 排量 L/s | 泵压 MPa | 钻 头 | | | | 地层 | 岩性 | dc 指数 | 地层压力 当量密度 g/cm ³ | 备注 |
|---------|-------------|----------|-------------|--------------------------------|-----------|-----------|----------|----|------------|---------------------------|----|----|------------|-----------------------------------|----|
| | | | | | | | 直径 mm | 型号 | 水眼直径 mm | 比水功率 W/mm ² | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

3.1.3 正常趋势线确定

3.1.3.1 正常趋势线的确定原则是：

- 用于确定正常趋势线的正常孔隙压力井段宜大于 300m；
- 应由泥页岩 dc 指数点来确定正常趋势线；
- 纠斜吊打、取心钻进、钻头磨合及磨损后期、井底不清洁等非正常钻进 dc 指数点不参加正常趋势线定位。

3.1.3.2 正常趋势线方程的形式见式（2）：

$$dc_n = a \times 10^{b \cdot D} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

dc_n ——正常趋势线及其延伸线上的 dc 指数值；

a ——半对数坐标图上 dc 指数与深度关系正常趋势线的截距；

b ——半对数坐标图上 dc 指数与深度关系正常趋势线的斜率；

D ——垂深，单位为米（m）。

3.1.3.3 正常趋势线方程系数 a 和 b 按以下方法确定：

- 对正常孔隙压力井段所求得 dc 指数数据，按式（2）回归确定 a ， b 值；
- 钻井较多、资料充足的地区，按式（2）回归各井的 a ， b 值，取其平均值作为该地区的正常趋势线的截距和斜率；只有当计算得到的孔隙压力值与实测压力值间的相对误差在 10% 以内时，才能作为地区性方程应用；
- 新区探井宜采用正常孔隙压力井段所取得资料回归确定 a ， b 值；在数据缺乏、回归困难时，可采用推荐 b 值为 $5.5329 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ ，并求出相应的 a 值。

3.1.4 孔隙压力当量密度计算

3.1.4.1 孔隙压力当量密度的计算可采用式 (3) 或式 (4)。

3.1.4.2 比值式的公式见式 (3)：

$$\rho_p = \frac{dc_n}{dc_a} \cdot C_d \cdot \rho_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

ρ_p ——地层孔隙压力当量密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

ρ_n ——正常孔隙压力当量密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

dc_n ——正常趋势线及其延伸线上的 dc 指数值；

C_d ——校正系数；

dc_a ——实际 dc 指数值。

注： C_d 由实测压力代入求得，无实测压力时宜取 1。

3.1.4.3 伊顿式的公式见式 (4)：

$$\rho_p = \rho_o - (\rho_o - \rho_n) \left(\frac{dc_a}{dc_n} \right)^U \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

ρ_p ——地层孔隙压力当量密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

ρ_o ——上覆岩层压力当量密度，计算公式见附录 A，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

dc_a ——实际 dc 指数值；

ρ_n ——正常孔隙压力当量密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

dc_n ——正常趋势线及其延伸线上的 dc 指数值；

U ——指数。

注：指数 U 由实测压力代入求得，无实测压力时宜取 1.2。

3.1.4.4 计算孔隙压力当量密度应注意的事项：

- 应选取 dc 指数曲线中变化趋势相同的测点进行计算，计算井段的长度不小于 3m；
- 当 dc 指数曲线由于钻头尺寸和类型改变、钻头水功率变化较大或钻遇地层不整合等原因产生整体向左或向右偏离时，应基于偏离前后孔隙压力相等的原则，将正常趋势线适当平移（斜率不变）或改用新的正常趋势线后，再做计算；
- 非砂泥岩的以及 3.1.3.1 所指明的情况相悖的 dc 指数点，不参与孔隙压力的解释和计算。其孔隙压力当量密度值等于相邻砂泥岩 dc 指数点计算的孔隙压力当量密度。

3.1.5 dc 指数录井图解释

dc 指数求解地层孔隙压力作图方法和要求参见附录 B。

3.2 声波时差法

3.2.1 声波时差资料来源

声波时差资料来源于：

- 由地震资料提取的地层层速度，其倒数即声波时差；
- 声波测井数据（取纵波数据）；
- VSP 数据。

3.2.2 声波时差及相关资料要求

声波时差及相关资料要求包括：

- 地震资料提取的地层层速度，宜在速度资料分辨能力范围内将层段划小；
- 声波测井资料应选取有比较平直的、低自然电位的、均匀低电阻率的和高自然伽马值的泥砂岩层段；

- 宜取厚度大于 2m 的砂泥岩层段；
- 应取得同层段的密度测井、感应测井、自然伽马测井、地层水密度、实测孔隙压力及钻井液密度数据；
- 对于海洋钻井，应有泥线深度和转盘面海拔高度数据。

3.2.3 正常趋势线的确定

3.2.3.1 用于确定正常趋势线的正常孔隙压力井段宜大于 300m。

3.2.3.2 计算方法一（适用于测井资料计算）。

3.2.3.2.1 计算公式见式（5）：

$$\Delta t_n = i + (\Delta t_{fw} + j - i) \phi_o \cdot e^{-K \cdot D} - j \cdot \phi_o^2 \cdot e^{-2K \cdot D} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

Δt_n ——正常趋势线及其延伸线上的声波时差，单位为微秒每米（ $\mu\text{s}/\text{m}$ ）；

i ——孔隙度—岩石骨架声波时差关系直线的截距；

Δt_{fw} ——地层水的声波时差，单位为微秒每米（ $\mu\text{s}/\text{m}$ ）；

j ——孔隙度—岩石骨架声波时差关系直线的斜率；

ϕ_o ——地表岩石孔隙度；

K ——半对数坐标图上岩石孔隙度—深度关系直线的斜率；

D ——垂深，单位为米（m）。

3.2.3.2.2 计算方法：

——对正常孔隙压力井段的声波时差，按式（5）回归确定正常趋势线方程；

——正常趋势线各系数的确定参见附录 C；

——钻井较多、声波测井资料充足的地区，按式（5）回归各井的系数值，取平均值建立该地区的正常趋势线方程；只有当计算得到的孔隙压力值与实测压力值间的相对误差在 10% 以内时，才能作为地区性方程应用。

3.2.3.3 计算方法二。

3.2.3.3.1 计算公式见式（6）：

$$\ln \Delta t_n = A \cdot D + B \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

Δt_n ——正常趋势线及其延伸线上的声波时差，单位为微秒每米（ $\mu\text{s}/\text{m}$ ）；

A ——半对数坐标图上声波时差—垂深关系正常趋势线的斜率；

D ——垂深，单位为米（m）；

B ——半对数坐标图上声波时差—垂深关系正常趋势线的截距。

3.2.3.3.2 计算方法：

——不同井深的声波时差值绘制到以纵轴为垂深、横轴为声波时差的自然对数的半对数坐标系中，系数 A 和 B 分别为回归直线的斜率和截距；

——钻井较多、声波测井资料充足的地区，按式（6）回归各井的系数值，取平均值建立该地区的正常趋势线方程；只有当计算得到的孔隙压力值与实测压力值间的相对误差在 10% 以内时，才能作为地区性方程应用。

3.2.4 孔隙压力当量密度计算

3.2.4.1 孔隙压力当量密度的计算可选用式（7）或式（8）计算。

3.2.4.2 比值式的计算公式见式（7）：

$$\rho_p = \frac{\Delta t_a}{\Delta t_n} \rho_n \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

ρ_p ——地层孔隙压力当量密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3);

ρ_n ——正常孔隙压力当量密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3);

Δt_a ——实际的岩石声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s}/\text{m}$);

Δt_n ——正常趋势线及其延伸线上的声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s}/\text{m}$)。

3.2.4.3 伊顿式的计算公式见式 (8):

$$\rho_p = \rho_o - (\rho_o - \rho_n) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_a} \right)^V \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

ρ_p ——地层孔隙压力当量密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3);

ρ_o ——上覆岩层压力当量密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3);

ρ_n ——正常孔隙压力当量密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3);

Δt_n ——正常趋势线及其延伸线上的声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s}/\text{m}$);

Δt_a ——实际的岩石声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s}/\text{m}$);

V ——指数。

注: 指数 V 由实测压力代入求得, 无实测压力时宜取 3.0。

3.2.5 作图方法和要求

声波时差求解地层孔隙压力作图方法和要求参见附录 B。

3.3 实测地层孔隙压力

3.3.1 电缆式地层测试

采用电缆式地层测试器实测地层孔隙压力的具体做法按 SY/T 5691 执行。

3.3.2 常规地层测试

采用常规地层测试实测地层孔隙压力的具体做法按 SY/T 5483 执行。

3.3.3 关井求压

关井后通过实测立管压力计算得到地层孔隙压力的具体做法按 SY/T 6426 执行。

4 地层破裂压力预测及试验方法

4.1 地层破裂压力预测方法

4.1.1 方法选择

地层破裂压力预测涉及到的计算方法较多, 且各方法适应的条件不同。各油田宜从本区域的地层特点出发, 以提高预 (监) 测精度为目的, 选用或修正现有方法。

4.1.2 伊顿法

4.1.2.1 伊顿法适用的地层为: 地层沉积较新, 受构造运动影响较小的连续沉积盆地。对于地层年代较老、构造运动影响大的地区, 效果欠佳。

4.1.2.2 伊顿法的计算公式见式 (9):

$$p_t = p_p + \left(\frac{\mu_s}{1 - \mu_s} \right) (p_o - p_p) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

p_t ——地层破裂压力, 单位为兆帕 (MPa);

p_p ——地层孔隙压力, 单位为兆帕 (MPa);

μ_s ——静态泊松比;

p_o ——上覆岩层压力, 单位为兆帕 (MPa)。

4.1.3 艾克斯劳格法

4.1.3.1 艾克斯劳格法适用的地层为：连续沉积盆地。该方法把构造应力所产生的影响从地层的泊松比中分离出来，计算时可采用岩层的实测泊松比。

4.1.3.2 艾克斯劳格法的计算公式见式 (10)：

$$p_f = p_p + \left(\frac{\mu_s}{1 - \mu_s} + \beta \right) (p_o - p_p) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

p_f ——地层破裂压力，单位为兆帕 (MPa)；

p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕 (MPa)；

μ_s ——静态泊松比；

β ——均匀构造应力系数；

p_o ——上覆岩层压力，单位为兆帕 (MPa)。

4.1.4 黄荣樽法

4.1.4.1 黄荣樽法适用的地层为：连续沉积盆地。该方法认为地层的破裂是由井壁上的应力状态决定，并考虑了非均匀地应力场的作用和地层的抗拉强度影响。

4.1.4.2 黄荣樽法的计算公式见式 (1)：

$$p_f = \left[\frac{2\mu_s}{(1 - \mu_s)} - K_{ss} \right] (p_o - p_p) + p_p + S_t \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

p_f ——地层破裂压力，单位为兆帕 (MPa)；

p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕 (MPa)；

p_o ——上覆岩层压力，单位为兆帕 (MPa)；

μ_s ——静态泊松比；

K_{ss} ——非均匀的地质构造应力系数；

S_t ——岩石抗拉强度，单位为兆帕 (MPa)。

4.1.5 Holbrook 法

4.1.5.1 Holbrook 法适用的地层为：胶结较差、岩层的抗拉强度可以忽略、井眼与地层间的连通性好的砂岩地层。

4.1.5.2 Holbrook 法的计算公式见式 (12)：

$$p_f = (1 - \phi)(p_o - p_p) + p_p \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

p_f ——地层破裂压力，单位为兆帕 (MPa)；

ϕ ——岩石孔隙度；

p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕 (MPa)；

p_o ——上覆岩层压力，单位为兆帕 (MPa)。

4.1.6 安德森法

4.1.6.1 安德森法适用的地层为：考虑井壁上应力集中的影响，假定无构造应力，地层抗张强度为 0，取均匀水平应力的条件，且认为砂岩中的泥质含量对泊松比及砂岩的变形有明显影响。

4.1.6.2 安德森法的计算公式见式 (13)：

$$p_f = \alpha \cdot p_p + \left(\frac{2\mu_s}{1 - \mu_s} \right) (p_o - \alpha \cdot p_p) \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：

p_f ——地层破裂压力，单位为兆帕 (MPa)；

α ——有效压力系数；

p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕（MPa）；

p_o ——上覆岩层压力，单位为兆帕（MPa）；

μ_s ——静态泊松比。

4.2 破裂（漏失）压力试验法

4.2.1 试验原则及要求

4.2.1.1 实测地层破裂（漏失）压力的方法适用于砂泥岩为主的地层，对于脆性地层时只做承压试验。

4.2.1.2 一般在钻穿套管鞋以下第一个砂岩层进行破裂压力试验，新井眼长度不宜超过 100m。

4.2.1.3 利用预测模型或邻井资料估算试验层的破裂压力。根据估算结果及钻井液的密度，选择合适的泵型和试压流程。

4.2.1.4 试验压力应低于井口承压设备中的最小额定工作压力，应同时低于套管中承受的最小抗内压强度的 80%；或当试验井底压力当量密度达到下部钻井施工钻井液密度要求时，应终止试验。

4.2.2 试验程序

4.2.2.1 调整钻井液性能，保证均匀稳定，满足试验要求。

4.2.2.2 上提钻头到套管鞋以上，井内灌满钻井液，关闭相应尺寸的防喷器。

4.2.2.3 缓慢开泵，向井内泵入钻井液。当裸眼长度在 5m 以内时宜选用 0.7L/s~1L/s 的排量；超过 5m 时宜选用 2L/s~4L/s 的排量。

4.2.2.4 当试验压力不再随注入量的增大而增大，或当试验压力随着注入量的增大而下降时，终止试验。

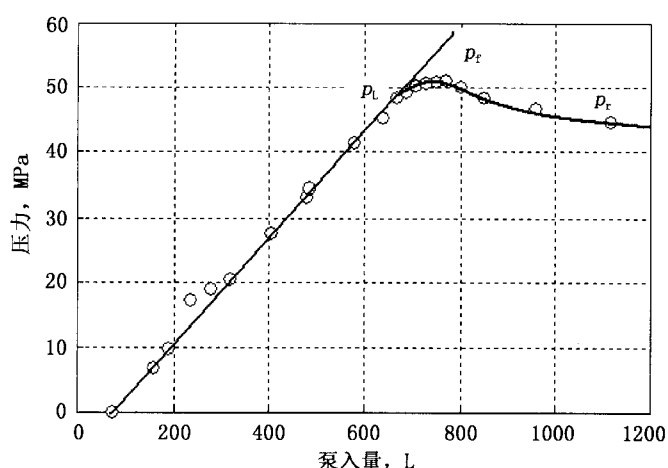
4.2.3 试验数据记录

4.2.3.1 应记录井号、试验日期、井深、地层岩性、钻井液密度、泵型号、套管直径、套管钢级、套管壁厚、套管下深及防喷器额定工作压力。

4.2.3.2 每增加 20L~50L 泵入量记录一次相应的时间、总泵入量、立管压力或套管压力。宜采用较小的泵入量间隔，以提高绘图和计算精度。试验数据记录格式见表 2。

4.2.4 试验数据处理

4.2.4.1 绘制泵入量—压力关系图。典型的泵入量随试验压力的变化关系曲线形式如图 1 所示。



p_L ——漏失压力，单位为兆帕（MPa），指试验曲线开始偏离直线的点的压力值，此点之后的压力仍有上升，但有偏离直线趋势；

p_r ——破裂压力，单位为兆帕（MPa），指试验曲线上最大压力值点的压力，此点之后压力随泵入量下降；

p_t ——传播压力，单位为兆帕（MPa），指试验曲线上压力随泵入量下降并趋于平缓时的压力。

图 1 典型的地层破裂（漏失）压力试验曲线

表 2 地层破裂（漏失）压力试验数据

| _____井 地层破裂压力（漏失）压力试验数据 | | | | |
|----------------------------|---|----------------|-------------|----|
| 试验时间 | 年 月 日 | 套管直径 mm | | |
| 井深 m | | 套管钢级 | | |
| 地层岩性 | | 套管壁厚 mm | | |
| 钻井液密度 g/cm ³ | | 套管下深 m | | |
| 泵型号 | | 防喷器额定压力 MPa | | |
| 试验方式 | 钻具内加压 <input type="checkbox"/> 环空内加压 <input type="checkbox"/> | | | |
| 时间—泵入量—压力记录 | | | | |
| 时间 h: min | 总泵入量 L | 立管压力 MPa | 套管压力 MPa | 备注 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

4.2.4.2 破裂（漏失）压力的计算公式见式（14）：

$$p_f = p_L + 0.00981 \rho_m \cdot H_L \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

p_f ——地层破裂压力，单位为兆帕（MPa）；

p_L ——漏失压力，单位为兆帕（MPa）；

ρ_m ——钻井液密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）；

H_L ——试验地层深度，单位为米（m）。

4.2.4.3 按照上述方法计算所得地层破裂压力，对于砂岩或硬的泥页岩地层，一般称为破裂压力；对于易漏失的裂缝性地层，一般称为漏失压力。

4.3 相关参数计算

泊松比、上覆岩层压力当量密度、构造应力系数、岩石抗拉强度、岩石泥质含量、岩石孔隙度和有效压力系数等参数的计算见附录 A。

5 地层坍塌压力预测方法

地层坍塌压力的预测方法参见附录 D。

6 地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力预（监）测报告

6.1 地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力预（监）测报告的表格形式

地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力预（监）测报告的表格形式见表 3。

表 3 ××井地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力数据

| 起止井深 m | 层位 | 岩性 | 钻井液当量密度 g/cm ³ | | | 钻井液密度 g/cm ³ |
|-----------|----|----|------------------------------|------|------|----------------------------|
| | | | 孔隙压力 | 破裂压力 | 坍塌压力 | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

6.2 地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力预（监）测报告的图形形式

地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力的图形形式如图 2 所示。横轴水平向右，表示地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力下的钻井液当量密度，单位为克每立方厘米（g/cm³），纵轴向下，表示垂直井深，单位为米（m）。

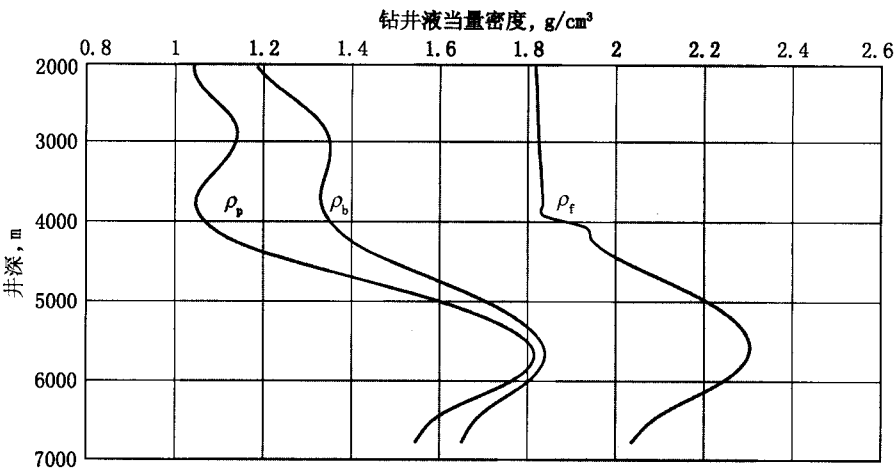


图 2 地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力预（监）测的图形形式

附 录 A

(规范性附录)

相关参数计算

注：以标准中出现的先后顺序排序。

A.1 泊松比

岩石静态泊松比的计算公式见式 (A. 1)：

$$\mu_s = A_1 + K_1 \cdot \mu_d \quad \dots\dots\dots (A. 1)$$

$$\mu_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad \dots\dots\dots (A. 2)$$

其中：

$$A_1 = a_{11} + a_{12} \lg (SD)$$

$$K_1 = k_{11} + k_{12} \lg (SD)$$

式中：

μ_s ——静态泊松比；
 SD ——三轴强度实验时的围压差，单位为兆帕 (MPa)；
 a_{ij} ， k_{ij} ——回归系数；
 μ_d ——地层的动态泊松比；
 v_s ——地层的横波速度，单位为米每秒 (m/s)；
 v_p ——地层的纵波速度，单位为米每秒 (m/s)。

注：具有全波列测井资料时 v_s 可直接读取，否则宜按 $v_s = \sqrt{11.44v_p + 18.03} - 5.866$ 求解。

A.2 上覆岩层压力当量密度

A.2.1 计算公式

上覆岩层压力当量密度的计算见式 (A. 3)。

$$\rho_o = \frac{\rho_{sw} \cdot h_{sw} + \rho_{nu} \cdot h_{nu} + \sum_{i=1}^n \rho_{bi} \cdot \Delta h}{h_{sw} + h_{nu} + \sum_{i=1}^n \Delta h} \quad \dots\dots\dots (A. 3)$$

式中：

ρ_o ——上覆岩层压力当量密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；
 ρ_{sw} ——海水密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；
 h_{sw} ——海水深度，单位为米 (m)；
 ρ_{nu} ——上部无密度测井地层段的平均密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；
 ρ_{bi} ——密度测井测得的地层密度值，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；
 h_{nu} ——用于计算上部无密度测井层段平均密度的地层厚度，单位为米 (m)；
 Δh ——密度测井散点数据深度间隔，单位为米 (m)。

A.2.2 回归方法

对深部或浅部无密度测井资料地层的上覆岩层压力当量密度，可利用已有数据回归的函数外推 (向上或向下延伸) 得到，回归模型宜采用以下两种形式中计算精度较高的公式 [见式 (A. 4) 和式 (A. 5)]：

$$\rho_o = A_p \cdot e^{B_p \cdot D} \quad \dots\dots\dots (A. 4)$$

$$\rho_o = A_p + B_p \ln D \quad \dots\dots\dots (A. 5)$$

式中：

D ——垂深，单位为米（m）；

A_p ， B_p ——上覆岩层压力当量密度回归系数。

A.3 均匀构造应力系数

均匀构造应力系数 β 具有地区性，在同一构造区域其值可视为常量，在具有实测地层破裂压力且其他参数已知的层位经反算求得，计算公式见式（A. 6）：

$$\beta = \frac{p_t - p_p - \frac{\mu_s}{1 - \mu_s}}{p_o - p_p} \quad \dots\dots\dots (A. 6)$$

式中：

β ——均匀构造应力系数；

p_t ——地层破裂压力，单位为兆帕（MPa）；

p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕（MPa）；

p_o ——上覆岩层压力，单位为兆帕（MPa）；

μ_s ——静态泊松比。

A.4 非均匀的地质构造应力系数

非均匀的地质构造应力系数 K_{ss} 具有地区性，在同一构造区域其值可视为常量，在具有实测地层破裂压力且其他参数已知的层位经反算求得，计算公式见式（A. 7）：

$$K_{ss} = -\frac{2\mu_s}{1 - \mu_s} - \frac{p_t - p_p - S_t}{p_o - p_p} \quad \dots\dots\dots (A. 7)$$

式中：

K_{ss} ——非均匀的地质构造应力系数；

μ_s ——静态泊松比；

p_t ——地层破裂压力，单位为兆帕（MPa）；

p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕（MPa）；

S_t ——岩石拉伸强度，单位为兆帕（MPa）；

p_o ——上覆岩层压力，单位为兆帕（MPa）。

A.5 岩石拉伸强度

岩石拉伸强度的计算见式（A. 8）：

$$S_t = \frac{0.0045E_d(1 - V_{cl}) + 0.008V_{cl}}{12} \quad \dots\dots\dots (A. 8)$$

式中：

S_t ——岩石拉伸强度，单位为兆帕（MPa）；

V_{cl} ——泥质在岩石中的体积含量；

E_d ——动态弹性模量，单位为兆帕（MPa）。

A.6 岩石的泥质含量

岩石的泥质含量计算见式（A. 9）：

$$V_{cl} = \frac{2^C \cdot I_{gr} - 1}{2^C - 1} \quad \dots\dots\dots (A. 9)$$

其中：

$$I_{gr} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}$$

$$GR_{max} = \max \{GR\}; GR_{min} = \min \{GR\}$$

式中：

V_{cl} ——泥质在岩石中的体积含量；

GR ——岩石自然伽马测井值，单位为 API 单位；

C ——Hilchie 指数，老地层取 2，第三纪地层取 3.7。

A.7 岩石孔隙度

岩石孔隙度的计算见式 (A. 10)：

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad \dots\dots\dots (A. 10)$$

式中：

ϕ ——岩石孔隙度；

Δt ——岩石声波时差测井值，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)；

Δt_{ma} ——岩石骨架声波时差值，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)；

Δt_f ——岩石孔隙流体声波时差值，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)。

A.8 有效压力系数

有效压力系数计算见式 (A. 11)：

$$\alpha = 1 - \frac{\rho(3v_p^2 - 4v_s^2)}{\rho_g(3v_{mp}^2 - 4v_{ms}^2)} \quad \dots\dots\dots (A. 11)$$

式中：

ρ ——岩石密度，单位为克每立方厘米 (g/cm^3)；

ρ_g ——岩石骨架体积密度，单位为克每立方厘米 (g/cm^3)；

v_{mp} ——岩石骨架的纵波速度，单位为米每秒 (m/s)；

v_{ms} ——岩石骨架的横波速度，单位为米每秒 (m/s)。

注：相关资料缺乏时，宜取 $\rho_g = 2.65 g/cm^3$ ， $v_{mp} = 5950 m/s$ ， $v_{ms} = 3000 m/s$ 。

附录 B

(资料性附录)

dc 指数和声波时差法绘图规定

B.1 dc 指数绘图规定

B.1.1 dc 指数录井图记录纸的有关规定

B.1.1.1 横坐标： dc 指数用对数尺度，从 1 到 2 相当于纸上 40mm。

B.1.1.2 纵坐标：井深用算术尺度，每大格长度为 25mm，并等分成 10 小格。

B.1.1.3 绘图比例：井深可选 1 大格表示 100m（每 5m 一点），或 1 大格表示 40m（每 2m 一点），或 1 大格表示 20m（每 1m 一点）中的任一比例。

B.1.2 dc 指数录井图绘制要求

绘制内容包括井深、钻井简况、钻速、 dc 指数、钻压、泵压、孔隙压力当量密度（记录纸中简称孔隙压力系数）、钻井液密度和岩性剖面。

B.1.3 绘制符号规定

B.1.3.1 起下钻位置、钻头尺寸和类型的标注方式：

——在“钻井简况”栏中对应井深处以“尺寸和类型”表示，例如“215P2”。

——当仅为钻头类型变化时，除相同尺寸的第一只钻头外，其余钻头可简化为“类型”，例如“P2”。

B.1.3.2 测试、试油或关井求得的孔隙压力当量密度的标注方式：

在“钻井简况”栏中对应井深处以“测试（试油或关井）
孔隙压力当量密度（数值）”表示，例如“测试
1.00”。

B.1.3.3 气侵、溢流、井塌等情况标注方式：

在“钻井简况”栏中对应井深处用文字表示，例如“溢流”。

B.1.3.4 岩性剖面标注方式：

在“岩性剖面”一栏中，按地质录井有关规定画出岩性剖面。

B.1.3.5 孔隙压力当量密度和钻井液密度曲线绘制方法：

宜在相应栏内分别以不同线型、不同颜色的线条绘制孔隙压力当量密度和钻井液密度曲线，如数值超过横坐标范围，应在图上的关键峰值点上标注具体数值。

B.1.3.6 地质分层标注方式：

将层位标注在“井深”栏内，例如东营组表示为“东营”。

B.1.3.7 绘图示例：

绘图示例如图 B.1 所示。

B.2 声波时差绘图规定

B.2.1 横坐标

当量密度用算术尺度，从 $1.0 \text{ g/cm}^3 \sim 3.0 \text{ g/cm}^3$ 相当于纸上 37.5mm，等分为 20 小格。

B.2.2 纵坐标

井深用算术尺度，每 500m 相当于纸上 25mm 为 1 大格，等分为 10 小格。

B.2.3 声波时差录井图绘制要求

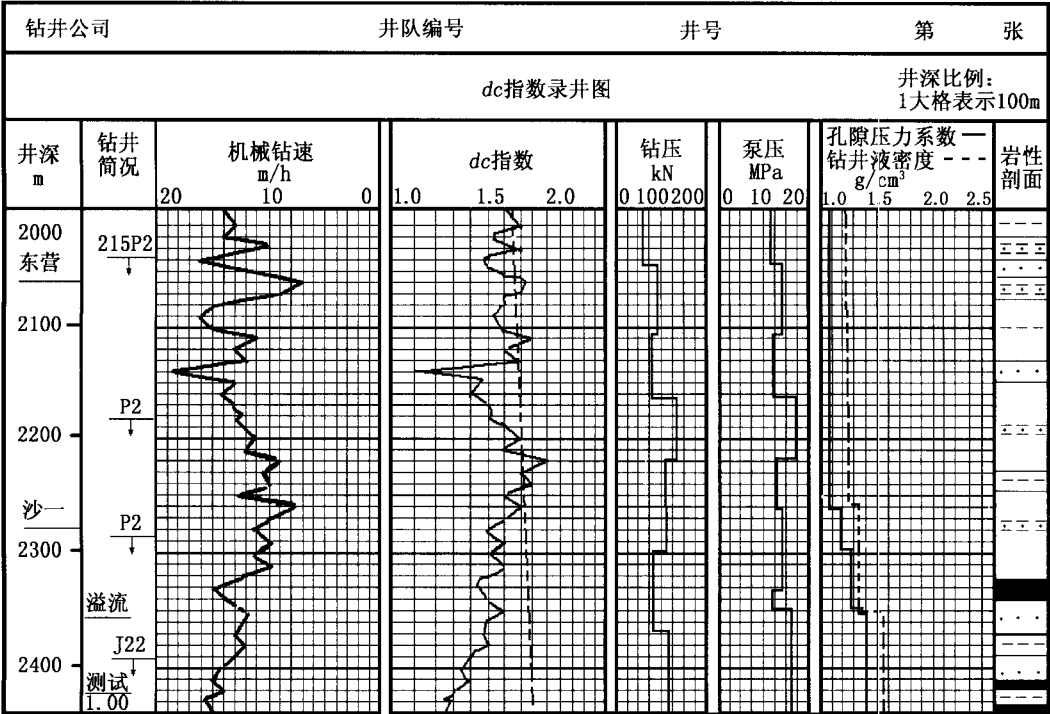
B.2.3.1 绘制内容包括：井深、上覆岩层压力当量密度、孔隙压力当量密度、钻井液密度、实测孔隙压力当量密度和岩性剖面。

B.2.3.2 宜用不同线型、不同颜色的线条绘制出孔隙压力当量密度曲线、上覆岩层压力当量密度曲线和钻井液密度曲线。

B.2.3.3 应在对应井深处用“ $\frac{\text{测试孔隙压力当量密度 (数值)}}{\text{测试点井深 (数值)}}$ ”标注出实测孔隙压力当量密度，

如 $\frac{1.86}{5600}$ 。

B.2.3.4 应在“岩性剖面”一栏中画出岩性剖面。



注：本图为示意图，未标实物比例尺

图 B.1 dc 指数录井图

附录 C

(资料性附录)

声波时差正常趋势线系数的确定

C.1 ϕ_0 和 K 的计算

C.1.1 计算公式 1:

$$\phi = \frac{\rho_g - \rho_c}{\rho_g - \rho_{fw}} \dots\dots\dots (C. 1)$$

式中:

 ϕ ——岩石孔隙度; ρ_g ——岩石骨架密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3); ρ_c ——岩石容积密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3); ρ_{fw} ——地层流体密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3)。注: ρ_g 无实测值时可用平均值 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$, ρ_{fw} 无实测值时可用平均值 $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ 。

C.1.2 计算公式 2:

$$\phi = \phi_o \cdot e^{-K \cdot D} \dots\dots\dots (C. 2)$$

式中:

 ϕ ——岩石孔隙度; ϕ_o ——地表岩石孔隙度; D ——垂深, 单位为米 (m); K ——回归系数。

C.1.3 计算步骤:

- 由密度测井数据回归岩石容积密度 ρ_c 和井深 D 的关系曲线;
- 根据 ρ_c — D 曲线上各深度的岩石容积密度, 按式 (C. 1) 计算相应深度的岩石孔隙度;
- 由岩石孔隙度数据, 用式 (C. 2) 回归岩石孔隙度 ϕ 和井深 D 的关系曲线;
- 从中求得 ϕ_0 和 K 。

C.2 Δt_{fw} 计算C.2.1 可根据地层水的当量氯化钠含量 S_{fw} 计算地层水的声波时差 Δt_{fw} 。C.2.2 当 $S_{fw} \leq 107.1 \text{ g/L}$ 时, $\Delta t_{fw} = 715 - 0.306 S_{fw}$ 。C.2.3 当 $107.1 \text{ g/L} < S_{fw} \leq 229.6 \text{ g/L}$ 时, $\Delta t_{fw} = 682 - 0.509 (S_{fw} - 107.1)$ 。C.3 i 和 j 的计算

C.3.1 计算公式 1:

$$\Delta t_{ma} = \frac{\Delta t - \phi \cdot \Delta t_{fw}}{1 - \phi} \dots\dots\dots (C. 3)$$

式中:

 Δt_{fw} ——地层水的声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s}/\text{m}$); Δt ——岩石声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s}/\text{m}$);

Δt_{ma} ——岩石骨架的声波时差，单位为微秒每米 ($\mu\text{s}/\text{m}$)；

ϕ ——岩石孔隙度。

C.3.2 计算公式 2:

$$\Delta t_{\text{ma}} = i + j \cdot \phi \quad \dots\dots\dots (\text{C. 4})$$

式中:

Δt_{ma} ——岩石骨架的声波时差，单位为微秒每米 ($\mu\text{s}/\text{m}$)；

ϕ ——岩石孔隙度；

i ——回归系数；

j ——回归系数。

C.3.3 i 和 j 的计算步骤为:

——根据各深度的岩石声波时差 Δt 、孔隙度 ϕ 和地层水声波时差 Δt_{fw} 按式 (C.3) 计算相应深度的岩石骨架的声波时差；

——由计算出的岩石骨架声波时差 Δt_{ma} ，用式 (C.4) 回归岩石骨架声波时差 Δt_{ma} 和孔隙度 ϕ 的关系直线；

——从中计算 i 和 j 。

附 录 D
(资料性附录)
地层坍塌压力预测方法

D.1 剪切破坏条件下的坍塌压力

D.1.1 对于地层的坍塌破坏服从库仑准则的硬脆性泥页岩，易发生剪切破坏。分为不考虑渗透作用和考虑渗透作用两种情况。

D.1.2 不考虑渗透作用时的地层坍塌压力。

D.1.2.1 适用的地层为：渗透率极低的泥页岩，且钻井液性能良好，不考虑钻井液向地层中的渗透，把泥页岩井壁近似看作不渗透井壁。

D.1.2.2 计算公式见式 (D.1)：

$$\rho_{bl} = \frac{\eta(3\sigma_H - \sigma_h) - 2C \cdot K_m + \alpha \cdot p_p(K_m^2 - 1)}{(K_m^2 + \eta)D} \times 100 \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

$$K_m = \operatorname{ctg} (45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

式中：

ρ_{bl} ——地层剪切坍塌压力当量密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

σ_H ——地层最大水平主应力，单位为兆帕 (MPa)；

σ_h ——地层最小水平主应力，单位为兆帕 (MPa)；

C ——岩石的黏聚力，单位为兆帕 (MPa)；

η ——应力非线性修正系数；

p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕 (MPa)；

α ——有效压力系数；

D ——垂深，单位为米 (m)；

φ ——岩石的内摩擦角，单位为度 (°)。

D.1.3 考虑渗透作用时的地层坍塌压力。

D.1.3.1 适用的地层为：渗透性好的地层。考虑钻井液向地层中的渗透，把井壁近似看作渗透井壁。

D.1.3.2 计算公式见式 (D.2)：

$$\rho_{bl} = \frac{\eta[3\sigma_H - \sigma_h - (\xi - \varphi)p_p] + K_m^2 \cdot p_p \cdot \varphi - 2C \cdot K_m}{(1 - \alpha + \varphi)K_m^2 - \eta(\xi - \varphi - 1 - \alpha)} \cdot \frac{100}{D} \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

其中：

$$\xi = \frac{\alpha(1 - 2\mu_s)}{1 - \mu_s}$$

式中：

ρ_{bl} ——地层剪切坍塌压力当量密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

σ_H ——地层最大水平主应力，单位为兆帕 (MPa)；

σ_h ——地层最小水平主应力，单位为兆帕 (MPa)；

C ——岩石的黏聚力，单位为兆帕 (MPa)；

η ——应力非线性修正系数；

p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕 (MPa)；

α ——有效压力系数；

D ——垂深，单位为米（m）；
 φ ——岩石内摩擦角，单位为度（°）。

D.2 拉伸崩落条件下的坍塌压力

D.2.1 适用的地层为：井筒钻井液压力小于地层孔隙压力时的过渡带欠压实超压低渗泥页岩。

D.2.1 计算公式见式（D.3）：

$$\rho_{b2} = \frac{100}{D}(p_p - S_t) \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中：

ρ_{b2} ——地层拉伸崩落坍塌压力当量密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）；
 p_p ——地层孔隙压力，单位为兆帕（MPa）；
 D ——垂深，单位为米（m）；
 S_t ——岩石抗拉强度，单位为兆帕（MPa）。

D.3 坍塌压力取值

坍塌压力取值见式（D.4）。

$$\rho_b = \max\{\rho_{b1}, \rho_{b2}\} \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

D.4 相关参数的计算

D.4.1 有效应力系数计算公式见式（D.5）：

$$\alpha = 1 - \frac{\rho(3v_p^2 - 4v_p^2)}{\rho_g(3v_{mp}^2 - 4v_{ms}^2)} \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

式中：

ρ ——岩石密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）；
 ρ_g ——岩石骨架体积密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）；
 v_{mp} ——岩石骨架的纵波速度，单位为米每秒（m/s）；
 v_{ms} ——岩石骨架的横波速度，单位为米每秒（m/s）；
 注：相关资料缺乏时，宜取 $\rho_m = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ， $v_{mp} = 5950 \text{ m/s}$ ， $v_{ms} = 3000 \text{ m/s}$ 。

D.4.2 应力非线性修正系数计算公式见式（D.6）：

$$\eta = \sigma_{\theta l} / \sigma_{\theta l} \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

其中：

$$\sigma_{\theta l} = 2\sigma_h - p_m$$

$$\sigma_{\theta n} = \frac{\mu_s(1-n)}{(1-n)(1-\mu_s)} p_m - \frac{(2\mu_s-1)(1-n)}{(1-\mu_s)(1-n)} p_m^n \sigma^{1-n}$$

$$p_m = 0.00981 \times D \times \rho_m$$

式中：

η ——应力非线性修正系数；
 $\sigma_{\theta l}$ ——均匀地应力下切向应力的线性弹性解，单位为兆帕（MPa）；
 $\sigma_{\theta n}$ ——均匀地应力下切向应力的非线性弹性解，单位为兆帕（MPa）；
 σ_h ——水平地应力的平均应力，单位为兆帕（MPa）；
 p_m ——钻井液液柱压力，单位为兆帕（MPa）；

ρ_m ——钻井液的密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3);

μ_s ——静态泊松比;

n ——待定系数, 资料缺乏时, 宜取 $n = 0.1$ 。

D.4.3 水平主应力计算公式见式 (D.7) 和式 (D.8):

$$\sigma_H = \frac{1}{2} \left[\frac{\varepsilon_H \cdot E_s}{1 - \mu_s} + \frac{2\mu_s (\sigma_z - \alpha \cdot p_p)}{1 - \mu_s} + \frac{\varepsilon_h \cdot E_s}{1 + \mu_s} \right] + \alpha \cdot p_p \quad \dots\dots\dots (\text{D.7})$$

$$\sigma_h = \frac{1}{2} \left[\frac{\varepsilon_H \cdot E_s}{1 - \mu_s} + \frac{2\mu_s (\sigma_z - \alpha \cdot p_p)}{1 - \mu_s} - \frac{\varepsilon_h \cdot E_s}{1 + \mu_s} \right] + \alpha \cdot p_p \quad \dots\dots\dots (\text{D.8})$$

式中:

σ_H ——最大水平地应力, 单位为兆帕 (MPa);

σ_h ——最小水平地应力, 单位为兆帕 (MPa);

ε_H ——最大水平应力方向地层构造应力系数, 可通过室内声发射试验或水力压裂法实验数据确定出某深度处的 σ_H 值, 并代入式 (D.7) 反算求得;

ε_h ——最小主应力方向地层构造应力系数, 可通过室内声发射试验或水力压裂法实验数据确定出某深度处 σ_h 值, 并代入式 (D.8) 反算求得;

σ_z ——有效垂直应力, 单位为兆帕 (MPa);

E_d ——动态弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

E_s ——静态弹性模量, 单位为兆帕 (MPa)。

D.4.4 弹性模量的计算见式 (D.9) 和式 (D.10)。

$$E_d = \frac{\rho \cdot v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (\text{D.9})$$

$$E_s = A_2 + K_2 \cdot E_d \quad \dots\dots\dots (\text{D.10})$$

其中:

$$A_2 = a_{21} + a_{22} \lg (SD)$$

$$K_2 = k_{21} + k_{22} \lg (SD)$$

式中:

E_d ——动态弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

E_s ——静态弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

ρ ——岩石密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm^3);

SD ——三轴强度实验时的围压差, 单位为兆帕 (MPa);

a_{ij} , k_{ij} ——回归系数。

D.4.5 岩石黏聚力计算见式 (D.11):

$$C = 3.326 \times 10^{-6} \sigma_c \cdot K \quad \dots\dots\dots (\text{D.11})$$

其中:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu_s)}$$

式中:

C ——岩石黏聚力, 单位为兆帕 (MPa);

σ_c ——抗压强度, 单位为兆帕 (MPa);

K ——体积弹性模量, 单位为兆帕 (MPa)。

D.4.6 岩石的内摩擦角计算见式 (D.12):

$$\varphi = 2.654 \lg \sqrt{M + M^2 + 1} + 20 \quad \dots\dots\dots (\text{D.12})$$

其中: $M = 58.93 - 1.785C$

式中:

φ ——岩石的内摩擦角, 单位为度 (°);

C ——岩石黏聚力, 单位为兆帕 (MPa)。
