

〔西德〕哈·林克

哈·欧·吕特根多尔夫

卡·施托斯

◆
赵国华译

不稳定岩层的 井壁计算原则

煤炭工业出版社

U133.37
Z349

不稳定岩层的井壁计算原则

〔西德〕哈.林克 哈.欧.吕特根多尔夫 卡.施托斯 著

赵国华译

煤炭工业出版社

H. Link H. O. Lütgendorf K. Stoss
RICHTLINIEN ZUR BERECHNUNG VON
SCHACHTAUSKLEIDUNGEN IN NICHT
STANDFESTEM GEBIRGE
Verlag Glückauf GmbH
Essen 1976

*

不稳定岩层的井壁计算原则

赵国华译

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路 6 号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787×1092¹/₃₂ 印张 1¹/₄

字数 25 千字 印数 1—7,660

1979 年 3 月第 1 版 1979 年 3 月第 1 次印刷

书号 15035·2234 定价 0.15 元

目 录

引言	1
1. 适用范围	1
2. 对井壁的基本要求	2
3. 设计载荷	2
3.1 均匀的水平压力	2
3.1.1 与围岩结合的井壁	2
3.1.2 滑动井壁	3
3.2 不均匀的水平压力	4
3.3 开采安全煤柱时井筒的附加应力	4
3.3.1 围岩的垂直运动	4
3.3.2 井筒轴向弯曲	5
3.3.3 井筒建成后产生的岩层错动	5
3.3.4 岩层不连续的相对水平位移	5
3.4 混凝土的收缩和温度下降所产生的附加应力	6
3.5 在施工中的井壁应力	6
4. 坚固性的验算	6
4.1 概论	6
4.1.1 验算的内容和形式	6
4.1.2 断面结构	7
4.1.3 各种受力状况下应力的叠加	7
4.2 径向受力的井圈抗弯强度验算	7
4.2.1 概述	7
4.2.2 井壁的抗弯强度验算 ($\lambda \leq 50$)	8
4.2.3 井壁的抗弯强度验算 ($\lambda > 50$)	9

4.2.4	不透水内壁和壁后充填混凝土井壁(无拉力锚杆) 的抗弯强度验算	9
4.3	强度验算	9
4.3.1	由均匀水平压力产生的应力	9
4.3.2	由不均匀的水平压力产生的应力	12
4.3.3	不连接或局部连接的井壁计算	14
4.3.4	在井筒保安煤柱内进行回采时 产生的附加应力	14
4.4	为了承受剪切应力和径向(分离)应力而采用 的井壁连接手段	15
4.4.1	连接形式	15
4.4.2	连接件的检验	15
4.5	连接方式(螺钉、铆接、焊接)	17
4.5.1	均匀载荷	17
4.5.2	均匀和不均匀载荷	17
4.5.3	总载荷	17
5.	井壁材料的特性值	17
5.1	允许应力	17
5.1.1	根据西德工业标准DIN21501制造的铸铁	17
5.1.2	St37号钢, 按照西德工业标准DIN17100 (St37, St37-2号, St37-3号钢)	18
5.1.3	St52号钢, 西德工业标准DIN17100(St52-3)	18
5.1.4	钢筋混凝土(圆钢等)	19
5.1.5	钢筋混凝土(预制混凝土中水泥最少用量 为300公斤/米 ³)	20
5.1.6	未加钢筋的混凝土(预制混凝土中水泥最少 用量为300公斤/米 ³)	21
5.2	铸铁、钢和混凝土的弹性模数	22
5.2.1	按照DIN21501规定的铸铁的模数为	

1050000 公斤/厘米 ²	22
5.2.2 St37号和St52号钢为2100000公斤/厘米 ²	22
5.2.3 Bn250、Bn350、Bn450、Bn550混凝土.....	22
5.3 关于 n 值.....	22
5.3.1 根据5.2.3和5.1.4节进行的应力检验.....	22
5.3.2 稳定性的验算(见附录).....	22
5.4 其它特性的工程材料.....	23
6. 附录.....	23
6.1 钢井壁(无壁后充填层).....	23
6.2 DIN21501规定的铸铁井壁(不采用壁后充填).....	23
6.3 混凝土井壁.....	25
6.4 复合井壁.....	26
文中公式符号说明.....	33

引 言

为在井壁计算方面确立一个统一的计算基础，根据现有的技术水平，特提出一些原则。

在确定这些原则时，考虑了现有的经验、施工实例、公开发表的资料和最新的试验情况。其中包括设计负荷、稳定性与应力状况的计算方法，以及关于安全性和允许应力方面的计算。

这些原则将随着经验和试验情况的改进而进一步完善。

1. 适用范围

这些原则适用于不稳定岩层、含水岩层或不含水岩层中新建立井圆筒形井壁的承压力计算。井壁的稳定性与岩层应力状态、岩石的力学特性（包括含水情况）有关。

通过矿冶地质和岩石物理学的研究，为判断所开凿岩层的岩石力学状况创造了先决条件。

这些计算原则所适用的范围：一种是混凝土井壁或通过其它承压件与围岩牢固结合的井壁（统称与围岩结合的井壁）；另一种是通过一个塑性的或稠液状的隔离层与围岩隔离的井壁（统称滑动井壁）。

这些原则不包括开凿井筒时的临时井壁。

2. 对井壁的基本要求

在设计和确定井壁时，应保证井壁的稳定性，并使其不受涌水和流砂的破坏。

3. 设计载荷

在井筒安全煤柱（不开采安全煤柱）内进行井壁承受水平压力的载荷设计时，应将井筒受附近开采影响而产生的一定的岩层移动考虑进去，即应考虑到井壁的附加应力。

进行水平压力的载荷设计时，应以各种与变形有关的力为基础。但是目前对井壁变形、岩层变形和受力作用的大小三者之间的相互关系认识还不足，有待进一步探讨。

考虑由于在井筒附近进行开采而产生的附加应力时，应将其包括在进行开采工艺所给定的临界值内。这一问题也必须进一步研究。

下面的载荷计算是井壁稳定性的设计基础：

3.1 均匀的水平压力

3.1.1 与围岩结合的井壁

均匀的水平压力 P_0 ，由水压 P_w 和均匀的岩石压力 P_g 构成：

$$P_0 = P_w + P_g \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (1)$$

其中：

$$P_w = \gamma_w \cdot \frac{h}{10} \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (2)$$

$$P_g = \lambda_g \left[\gamma_{gw} \frac{h}{10} + \gamma_g \frac{H-h}{10} \right] (\text{公斤/厘米}^2) \quad (3)$$

代入

$$\gamma_{gw} = \gamma_g - (1 - n_p) \gamma_w \quad (4)$$

在一般情况下:

$$\gamma_g = 1.85 \quad \gamma_w = 1.0$$

$$n_p = 0.3 \quad \lambda_g = 0.26 (\text{相当于 } \rho \approx 30^\circ)$$

如果局部地区调查的结果与这些标准值有出入时, 则应采用相应的调整值。

在采用调整值时, 摩擦角 ρ 与 λ_g 的关系如下:

ρ	20	25	30	35	40	45°
λ_g	0.43	0.33	0.25	0.18	0.13	0.09

中间值可以以此类推得出。

将井壁的外表面作为受力面。如外表面渗水, 从安全性来看, 应考虑水压 P_w 作用于最外的密封面上。

3.1.2 滑动井壁

如在承压井壁与围岩之间有一个隔层, 它由一定量的粘性液体构成, 则应用下一公式表示井壁上承受的水平压力 P_o :

$$P_o = P_f = \gamma_f \cdot \frac{h_f}{10} (\text{公斤/厘米}^2) \quad (5)$$

当岩石压力 P_g 不以其它方式作用时, 一般情况下 $\gamma_f \cdot h_f \geq \gamma_w \cdot h + P_g$ 。

将井壁的外表面作为受力面。如外表面能渗透壁后充填物, 则在安全设计时, 应考虑均匀的水平压力 P_o 作用于最外面的密封面。

应根据各种隔层或滑动层的特性和状况来相应地估计均

匀的水平压力 P_0 。

3.2 不均匀的水平压力

除了(3.1)段中介绍的均匀的水平压力外,假设各种井壁还承受到不均匀的水平压力 P_1 :

$$P_1 = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos 2\varphi) \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (6)$$

其中代入:

$$P_1 = 0.13 \frac{H}{10} \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (7)$$

井壁外表面作为不均匀水平压力的受力面。如果实际内径 r_i 的变化不超过 $\Delta r_i = \pm 0.00625r_a$,设计壁厚不减少时,可按公式(7)求出附加压力值 P_2 。当 Δr_i 值较大时,按照公式(7),附加压力值增大为:

$$\Delta P_2 = \frac{8(\Delta r_i - 0.00625r_a)P_0}{r_a}$$

3.3 开采安全煤柱时井筒的附加应力

如果在井筒安全煤柱内进行回采,从稳定性的角度必须考虑井壁的附加应力的问题。

3.3.1 围岩的垂直运动

3.3.1.1 与围岩结合的井壁的应力

围岩的鼓胀和延伸可全部或局部传递到与围岩结合的井壁上,因此必须考虑到这一影响。从开采方案的设计中应推导出岩层的垂直伸长,并应将垂直的推力传递到井壁上。推力的大小受到分界面中岩石抗剪强度的限制。

3.3.1.2 滑动井壁中的应力

在滑动井壁中,通过一层稠液状的护层将井壁与围岩分开,这时岩层的鼓胀和延伸对井壁的作用并不明显,而是围

岩的相对下沉速度对井壁的受力状况产生较大影响，在稳定性检查时得出围岩的相对下沉速度为2厘米/天。可以设想沿整个井壁都产生这一相对下沉速度。

此外，还应考虑滑动井壁各种分界层或滑动层的特性。

3.3.2 井筒轴向弯曲

采用与围岩结合的井壁时，曲率半径 $R = 5000$ 米；采用滑动井壁时，曲率半径则为：

$$R = \frac{l^2}{\frac{l^2}{5000} - 2a} \text{ 米} \quad (8)$$

其中：

当 $L \geq 100$ 米时， $l = 100$ 米

当 $L < 100$ 米时， $l = L$

3.3.3 井筒建成后产生的岩层错动

由于与围岩结合的井壁连续产生一个位移变形(图1)，故应考虑到岩层的错动 β 使井壁受到应力作用，在设计开泵方案中必须将其计算出来。

在采用滑动井壁时，岩层的这种错动仅直接作用在井壁的基础上(即生根壁座)。

在井壁中产生的应力必须加以证实。

3.3.4 岩层不连续的相对水平位移

在设计井壁时应考虑到相邻岩层可能产生的不连续的相对位移(可根据地区的地质条件及矿山测量预先推断，但是无法

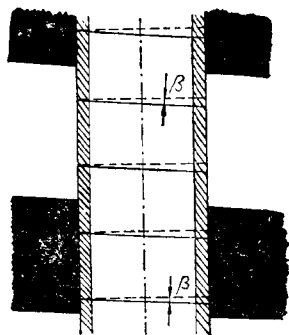


图 1

得出普遍有效的相邻岩层不连续位移值)。

在滑动井壁(即以一種稠液狀护层与围岩隔离)中,相邻岩层的相对位移量可达到相当于隔层厚度 a 的 $1/2$ 。

3.4 混凝土的收缩和温度下降所产生的附加应力

由于混凝土的收缩和温度下降,在井壁中会产生一个轴向的附加应力。为了防止或减少裂缝,在设计井筒时应考虑相应的措施,特别是设计采用与岩石连接的井壁的进风井。

3.5 在施工中的井壁应力

在施工中井壁的特殊应力状况有待证明。

4. 坚固性的验算

4.1 概论

4.1.1 验算的内容和形式

除了判断一个井壁的坚固性外,必须进行必要的稳定性验算和应力验算,在进行坚固性验算时,必须取得下列数据:

作为计算基础的设计载荷(包括是否开采井筒安全煤柱);

井壁结构和尺寸(包括简图和施工设计);

井壁材料和特性;

下井壁的方式和顺序。

通过抗弯强度、应力计算及其与允许值的比较,可以检验出井壁的坚固性。此处未列出的公式,可推导或根据原始数据算出。

多层不同材料组成的井壁原则上可以理解为复合井壁,并加以计算。全部或局部复合井壁必须验算其联结的可靠性

及其所产生的附加应力。

4.1.2 断面结构

下面将列举一些公式，它适用于在一个水平面上圆周各点上断面结构都相同的井壁。断面结构上的一些变化（例如双宾筒的接口）通过特殊检验可以掌握。

4.1.3 各种受力状况下应力的叠加

需验算下列受力状况的应力：

1. 均匀载荷（见前第3.1节）；
2. 均匀载荷与非均匀载荷的叠加（见前第3.1和第3.2节）；
3. 75%均匀载荷与全部非均匀载荷的叠加。

这些应力值不得超过下面第5.1节中的允许值。

当开采井筒安全煤柱时，要验算各种受力状况下井壁的应力。这些应力值应独立计算。最大的当量应力（由第3.3节中列举的受力状况中的一种和上述三种应力中的任一种组成）的值必须小于第5.1节中“总载荷”的允许应力值。

当量应力可以用以下的近似公式得出：

钢井壁和铸铁井壁：

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_z^2 - \sigma_t \sigma_z + 3\tau_{tz}^2} \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (9a)^*$$

混凝土井壁：

$$\sigma_v = \frac{\sigma_t + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_t - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{tz}^2} \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (9b)^{**}$$

4.2 径向受力的井圈抗弯强度验算

4.2.1 概述

在检验各种类型井壁的抗弯强度时，应假设总压力 P_0 作

* 公式9a由变形功假说而产生，忽略不计应力 σ_r 、 τ_{zr} 和 τ_{rt} 。

** 公式9b是由最大主应力假说得出，忽略不计应力 σ_r 、 τ_{zr} 和 τ_{rt} 。

用在井壁的外表面。首先要计算出各种井壁的细长比：

$$\lambda = \frac{1.8135 \cdot r_s}{i} \quad (10)$$

在验算外部作用压力 P_o 时，为了确定重心半径 r_s 和惯性半径 $i = \sqrt{J/F}$ ，应考虑各种不同井壁材料的有效断面积。如果采用多层同心但不联结的井壁，那么，压力 P_o 的一部分作用于一层内井壁表面，按照公式17 c 产生了拉应力 σ_{rw} ，每层井壁还要进行一个附加的抗弯强度验算，各层井壁的长细度要分层算出（参见4.2.4节）。

4.2.2 井壁的抗弯强度验算 ($\lambda \leq 50$)

可以进行一种简化的井壁抗弯强度验算，公式为：

$$v_k = \frac{P_k}{P_o} = \frac{\Sigma(F\sigma_k)}{P_o r_a} \cdot \frac{r_a + r_i}{2r_a} \geq v_{kerf} \quad (11)^*$$

$$v_{kerf} \geq 1.5 + \frac{\lambda}{100} \quad (12)^{**}$$

各种井壁的有效断面积为 F ， σ_k 可用下列值代入：

St37号钢 $\sigma_k = 2350$ 公斤/厘米²

St52号钢 $\sigma_k = 3500$ 公斤/厘米²

铸 铁 $\sigma_k = 1800$ 公斤/厘米²

（西德工业标准21501号）

Bn250混凝土 $\sigma_k = 240$ 公斤/厘米²

Bn350混凝土 $\sigma_k = 320$ 公斤/厘米²

Bn450混凝土 $\sigma_k = 380$ 公斤/厘米²

* 设系数 $\frac{r_a + r_i}{2r_a}$ 是考虑井圈内缘应力的增高。

** 公式 (12) 考虑了随着细长比的增加而增大的测量误差对抗弯强度的影响。

Bn550混凝土 $\sigma_k = 420$ 公斤/厘米²

如果承载井壁仅由铸铁构成的话，可以 $\sigma_k = 3250$ 公斤/厘米²代入。

4.2.3 井壁的抗弯强度验算 ($\lambda > 50$)

各种井壁的验算证明，抗弯强度为：

$$v_k = \frac{P_k}{P_o} = \frac{F}{P_o \cdot r_a} \cdot \sigma_k \geq v_{kerf} \quad (13)$$

v_{kerf} 可按照公式 (12) 推算出来；

σ_k (纵向弯曲应力) 按照各种井壁分别确定。

4.2.4 不透水内壁和壁后充填混凝土井壁 (无拉力锚杆) 的抗弯强度验算

(比较4.2.1节，附加验算)

若两层井壁分别算出其弯曲应力时，可假设水压 P_w 作用于不透水的内壁，岩石压力 P_g 作用于混凝土井壁的外表面，并且内井壁与混凝土脱离，这时要考虑两层井壁变形而产生的相互影响及对验算产生的干扰。

4.3 强度验算

4.3.1 由均匀水平压力产生的应力

在验算各种井壁的切向正应力时，假设总压力 P 作用在井壁的外表面。可由下列公式计算出切向正应力：

$$\sigma_t = - \frac{P_o r_a}{F} \left(1 + \frac{Y}{r_s} \right) \text{(公斤/厘米}^2\text{)} \quad (14)$$

Y 的正方向指向井筒内壁。按照公式 (14) 可求得正数的拉应力，和负数的压应力。应力 σ_t 不得超过5.1节给定的允许值。

径向正应力 (在一个半径为 r 的井壁面积上，当内部部分断面积为 F_i 时) 的值为 (图 2)：

$$\sigma_r = -P_o \frac{r_a}{r} \frac{F_i}{F} \left(1 + \frac{Y_i}{r_s}\right) \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (15)$$

在此种载荷状况下，切应力都是 $\tau = 0$ 。

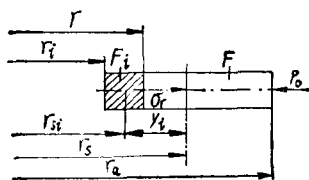


图 2

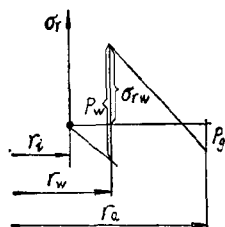


图 3

4.3.1.1 与围岩结合的井壁

采用与围岩结合的井壁，井壁外表面渗水时，应验算水压 P_w 作用于密封层外表面时的切向正应力。假设是复合井壁，切向正应力的公式为：

$$\sigma_t = - \frac{P_w r_w + P_g r_a}{F} \cdot \left(1 + \frac{Y}{r_s}\right) \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (16)$$

同时，可以按照这个假设来验算径向正应力，其值为：

当 $r_i \leq r < r_w$

$$\sigma_r = - \frac{P_w r_w + P_g r_a}{r} \cdot \frac{F_i}{F} \left(1 + \frac{Y_i}{r_s}\right) \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (17a)$$

当 $r_w \leq r \leq r_a$

$$\sigma_r = P_w \cdot \frac{r_w}{r} - \frac{P_w r_w + P_g r_a}{r} \cdot \frac{F_i}{F} \cdot \left(1 + \frac{Y_i}{r_s}\right) \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \quad (17b)$$

公式 (17b) 也适用于半径为 r_w 的分界面上的应力(见图 3)。

$$\sigma_{r_w} = P_w - \left(P_w + P_g \cdot \frac{r_a}{r_w} \right) \cdot \frac{F_i}{F} \left(1 + \frac{Y_i}{r_s} \right) \quad (\text{公斤/厘米}^2)$$

(17 c)

应力 σ , 根据5.1节不得超过允许值。

如果为了求得拉应力 σ_{r_w} (正值), 则应保证井壁的机械连接。如果在特殊情况下, 井壁间无连接物, 则应按照4.3.3节进行计算。

此处切应力同样为 $\tau = 0$ 。

4.3.1.2 滑动井壁

如采用滑动井壁时, 壁后充填物可自外层井壁表面渗入, 则应验算当壁后充填物的压力 P_f 作用于密封层外表面的切向正应力。假设为给定的复合井壁, 则可按下列公式求得切向正应力:

$$\sigma_i = - \frac{P_f \cdot r_f}{F} \left(1 + \frac{Y}{r_s} \right)$$

(公斤/厘米²) (18)

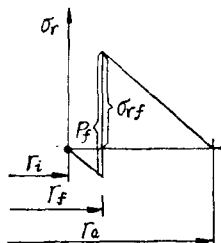


图 4

径向正应力值为:

当 $r_i \leq r < r_f$

$$\sigma_r = - P_f \cdot \frac{r_f}{r} \cdot \frac{F_i}{F} \left(1 + \frac{Y_i}{r_s} \right) \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (19 a)$$

当 $r_f \leq r \leq r_a$

$$\sigma_r = P_f \cdot \frac{r_f}{r} \left[1 - \frac{F_i}{F} \left(1 + \frac{Y_i}{r_s} \right) \right] \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (19 b)$$

当 $r = r_f$

$$\sigma_{r_f} = P_f \left[1 - \frac{F_i}{F} \left(1 + \frac{Y_i}{r_s} \right) \right] \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (19 c)$$