

# 超高压地层组合套管的优化设计

董事尔 张文卫 张先普

(石油机械系)

**摘要** 国内许多油田深部地层的径向超高压,导致套管大量被挤毁变形,严重影响了油气的正常生产,针对这个问题,本文根据弹性力学中的厚壁筒理论和机械优化设计理论,提出了组合套管的优化设计方法。用该方法设计的组合套管,可有效地防止深部软岩地层的径向超高压所引起的套管变形或挤毁。

**主题词** 套管变形;套管压力;套管应力;套管柱设计。

**中图法分类号** TE 826.2

## 前言

在泥岩、盐岩、粘土、膏盐岩和石膏等软岩地层中,由于软岩的高蠕变特性和高膨胀特性,在钻井或水力压裂采油等施工过程中,产生巨大的径向压力,致使套管大量被挤毁变形,严重影响钻井施工和石油的产量,下面以某油田的一口套管柱设计为例(如图1所示),说明超高压地层的套管挤毁变形问题。按照图1所示的设计,在膏盐段 $5\frac{1}{2}$ "的P110钢级套管的最大抗外压力 $P_y$ 为:<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} P_y &= 2[\sigma_y] \left[ \frac{\frac{D}{t} - 1}{(\frac{D}{t})^2 - 1} \right] \\ &= 2 \times 758.3 \times \left[ \frac{13.23 - 1}{13.23^2 - 1} \right] \\ &= 106 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $[\sigma_y]$ 、 $D$ 、 $t$ 分别表示该套管的屈服极限,外径和壁厚。那么,按照极限工况,套管内部全部掏空<sup>[1]</sup>,套管受到的极限压力 $P_{\max} = rh = 2.0 \times 2815 \times 10^6 = 56.3 \text{ MPa}$  ( $2.0$ 为上覆地层的平均比重),则抗挤压安全系数 $S_c = P_y / P_{\max} = 1.88$ ,而文献[1]推荐的抗挤压安全系数仅为1.125,还有67%的强度余量,应该说这种设计是相当安全的了。然而,该地区却发生了大量的

套管挤毁变形,这说明该地区有超高压层段存在。通过大量的理论分析,有限元计算和实验研究表明,该地区在膏盐段的挤压力可达 190MPa 以上,已远远超过了现有套管的极限抗挤毁压力。因此,只有提高套管的抗挤毁压力,才能与之相适应。

目前,提高套管挤毁压力的方法有:

- (1)使用加厚壁套管;
- (2)使用高抗挤强度套管;
- (3)使用组合套管。

国内目前主要使用前两种方法来提高套管的抗挤毁压力,然而确常常无法满足要求。加厚壁套管和高抗挤强度套管需要从国外专门进口,代价非常昂贵,从各方面的因素来看,用增加壁厚和使用高抗挤强度套管的潜力有限。那么,最有效的方法是使用组合套管,这也是大家公认的。如美国 AMOCO 公司在苏伊士湾应用组合套管结构,成功地防止了深部盐岩径向超高压的破坏作用。

根据德国石油工程研究所(Institute of Petroleum Engineering,简称 ITE)的试验表明,组合套管有以下几个特点<sup>[1]</sup>:

a. 只在套管之间水泥有足够的强度,保证不会在外层套管的承载挤压过程中因水泥被挤坏而在环隙中“流动”,则双层组合套管的抗挤毁强度至少等于各层套管的抗挤毁强度之和。

b. 内外层套管偏心对组合套管抗挤毁强度无影响,试验表明,内层套管与外层套管的偏心甚至达到 100%(即内外套管相切),对组合套管的抗挤毁强度并无不良影响。

c. 变形的外层套管对组合套管的抗挤毁强度影响不大。用经过预压变形的外层套管组成的组合套管,其挤毁强度没有明显的减少。

从施工的角度来看,双层组合套管的现场应用也并不困难,因为在固井工艺上没有新的问题需要解决。采用双层组合套管时,首先下入外层套管,进行常规固井作业,水泥返高是否需要高于双层组合套管段,完全由地层特性和工艺要求决定,水泥凝固后,钻水泥塞,下入内层套管,再进行一次常规固井作业,保证水泥返至预定高度。

综上所述,组合套管是解决超高压地层径向流动的有效方法之一。通过对算例中膏盐段的双层组合套管的优化设计表明,其抗挤压能力提高了一倍多。

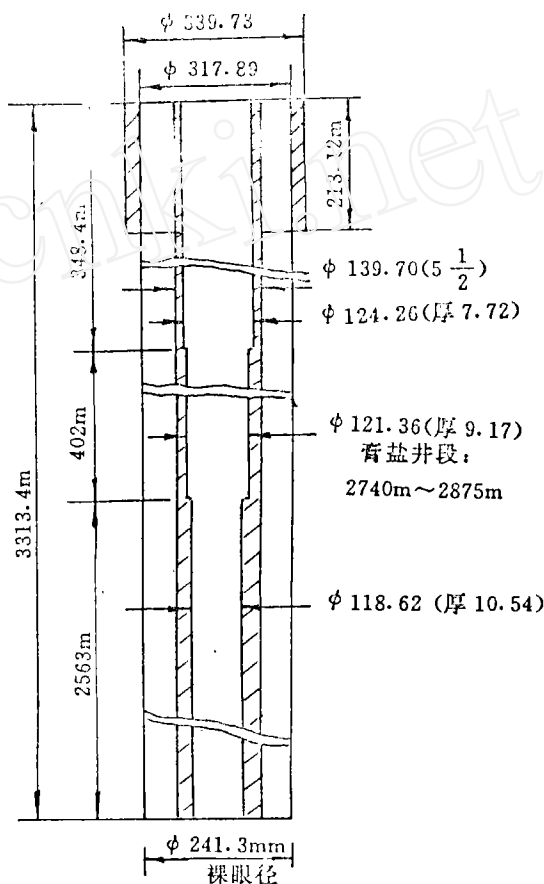


图 1 晋 45-238 套管柱剖面图

## 1 双层组合套管抗挤毁强度的理论分析

双层组合套管的截面如图2所示,在界面处存在压力、位移连续性。由广义虎克定律得出内外压均匀作用下厚壁筒的径向变形公式<sup>[2]</sup>。

$$U = \frac{1+\mu}{E} \left[ \frac{(1-2\mu)r^2 + r_H^2}{r(t_a^2 - 1)} P_i - \frac{r_H^2 + (1-2\mu)r^2 t_a^2}{r(t_a^2 - 1)} P_o \right] \quad (2)$$

式中:

$U$ ——径向变形

$t_a$ —— $r_H/r_B$

$r_H, r_B$ ——厚壁筒的内外半径

$P_i, P_o$ ——厚壁筒承受的内外压力

$r$ ——讨论点半径

$E, \mu$ ——弹性模量,泊松比

由(2)式导出应力公式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left( \frac{dU}{dr} + \frac{U}{r} \right) + \frac{E}{1+\mu} \frac{dU}{dr} \\ \sigma_t &= \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left( \frac{dU}{dr} + \frac{U}{r} \right) + \frac{E}{1-\mu} \frac{dU}{dr} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据弹性力学可知,厚壁筒径向变形  $U$  的微分方程为:

$$\frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{U}{r^2} = 0 \quad (4)$$

上式的一般解为:

$$U = C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (5)$$

式中  $C_1$  和  $C_2$  为待定系数:

另有边界条件:

$$\left. \begin{aligned} r = r_i \text{ 时, } \sigma_r &= -P_i \\ r = r_H \text{ 时, } \sigma_r &= -P_o \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

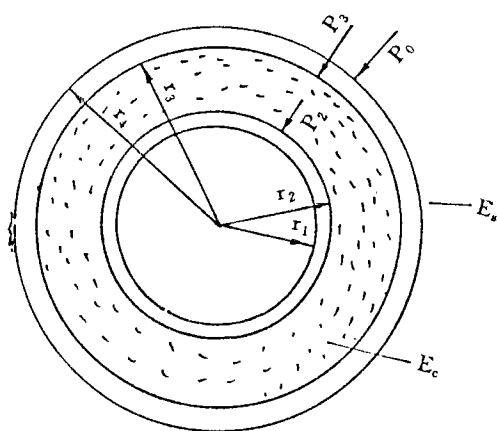


图2 双层组合套管强度分析示意图

将(5)、(6)两式代入(3)式,可以得到径向,切向和轴向三个方向的应力<sup>[1]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{r^2 + r_H^2}{r^2(t_n^2 - 1)}P_i - \frac{r^2 t_n^2 + r_H^2}{r^2(t_n^2 - 1)}P_o \\ \sigma_t &= \frac{r^2 + r_H^2}{r^2(t_n^2 - 1)}P_i - \frac{t_n^2 r^2 + r_H^2}{r^2(t_n^2 - 1)}P_o \\ \sigma_z &= \frac{2\mu}{t_n^2}P_i - \frac{2\mu t_n}{t_n^2 - 1}P_o \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

现在,只要算出组合套管界面上的压力  $P_2$  和  $P_3$ ,就可以根据(7)式计算出组合套管的径向,切向和轴向三个方向的应力,从而得出抗挤毁强度。

在压力  $P_2$  作用下,内层套管( $r=r_i, P_i=0$ ),在外界面上的径向变形由(2)得:

$$U_{1H} = -\frac{1 + \mu_i}{E_i} \left[ \frac{r_i^2 + (1 - 2\mu_i)r_i^2 t_{12}^2}{r_i(t_{12}^2 - 1)} P_2 \right] \quad (8)$$

令:

$$f_o = \frac{1 + \mu_i}{E_i} \cdot \frac{r_i^2 + (1 - 2\mu_i)r_i^2 t_{12}^2}{r_i(t_{12}^2 - 1)} \quad (9)$$

则(8)式改写为:

$$U_{1H} = -f_o P_2 \quad (10)$$

同时,可以计算出界面在压力  $P_2$  和  $P_3$  作用下,水泥环在内界面和外界面的径向变形  $U_{2B}$  和  $U_{2H}$ ,以及在  $P_3$  和  $P_o$  作用下,外层套管在外界面上的径向变形  $U_{3B}$ ,根据变形连续条件,则有:

$$\left. \begin{aligned} U_{1H} &= U_{2B} \\ U_{2H} &= U_{3B} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将有关数据代入(2)式,象求解(10)式那样,可以得到:

$$\left. \begin{aligned} U_{2B} &= f_1 P_2 - f_2 P_3 \\ U_{2H} &= f_3 P_2 - f_4 P_3 \\ U_{3B} &= f_5 P_3 - f_6 P_o \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

解联立方程得:

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= \frac{f_2 f_6}{(f_0 + f_1)(f_4 + f_5) - f_2 f_3} P_0 \\ P_3 &= \frac{(f_0 + f_1) f_6}{(f_0 + f_1)(f_4 + f_5) - f_2 f_3} P_0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:

$$f_0 = \frac{1 + \mu_s}{E_s} \cdot \frac{r_2 + (1 - 2\mu_s)r_2 t_{12}^2}{t_{12}^2 - 1} \quad (14a)$$

$$f_1 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{(1 - 2\mu_c)r_3^2 + r_3^2}{r_2(t_{23}^2 - 1)} \quad (14b)$$

$$f_2 = \frac{1 + \mu_s}{E_s} \cdot \frac{r_3^2 + (1 - 2\mu_s)t_{23}^2 r_2^2}{(t_{23}^2 - 1)r_2} \quad (14c)$$

$$f_3 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{(1 - 2\mu_c)r_3 r + r_3}{t_{23}^2 - 1} \quad (14d)$$

$$f_4 = \frac{1 + \mu_s}{E_s} \cdot \frac{r_3 + (1 - 2\mu_s)t_{23}^2 r_3}{(t_{23}^2 - 1)} \quad (14e)$$

$$f_5 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{(1 - 2\mu_c)r_3^2 + r_4^2}{r_3(t_{34}^2 - 1)} \quad (14f)$$

$$f_6 = \frac{1 + \mu_s}{E_s} \cdot \frac{r_4^2 + (1 - 2\mu_s)t_{234}^2 r_3^2}{r_3^3(t_{34}^2 - 1)} \quad (14g)$$

$$t_{12} = \frac{r_2}{r_1}, t_{23} = \frac{r_3}{r_2}, t_{34} = \frac{r_4}{r_3} \quad (14h)$$

$E_s, \mu_s; E_c, \mu_c$  分别为套管与水泥环的弹性模量与泊松比。

下面用最大剪应力理论(第三强度理论)来分析组合套管的抗挤毁强度。内层套管的  $P_1 = 0, P_0 = P_2, r = r_H$  时, 内层套管内壁的剪应力最大(分析时略去了表示方向的负号), 由(7)式得:

$$\begin{aligned} \sigma_{t, \max} &= \frac{r_H^2 + r_B^2}{r_H^2 - r_B^2} P_2 \\ &= \frac{P_2}{2} \frac{D/t}{1 - t/D} \end{aligned} \quad (15)$$

当  $\sigma_{t, \max} = \sigma_s$  时, 套管达到极限抗挤压力, 将  $\sigma_{t, \max} = \sigma_s$  代入(15)式, 得:

$$P_2 = 2\sigma_s \left[ \frac{\frac{D}{t} - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2 - 1} \right] \quad (16)$$

令(13)式中:

$$K = \frac{f_2 f_6}{(f_0 + f_1)(f_4 + f_5) - f_2 f_3} \quad (17)$$

则(13)式改写为:  $P_2 = KP_0$ , 将该式代入(16)式, 就得到双层组合套管的抗挤强度(内层套的内壁最危险):

$$P_0 = \frac{2\sigma_s}{K} \left[ \frac{\frac{D}{t} - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2 - 1} \right] \quad (18)$$

分析上式可知,  $K$  值反应了外压力传递给内层套管外表面压力的大小, 当  $K$  取得极小值时, 组合套管的抗挤毁强度达到最大, 而  $K$  主要与内外层套管的几何尺寸有关, 那么, 不同的内外层套管的组合形式将提供不同的抗挤毁压力, 故我们用优化的方法来确定最佳的组合形式。因此(17)式就是进行优化设计时的目标函数, 套管的几何尺寸就是变量。

## 2 双层组合套管优化设计的数学模型

从前面的分析可知, 目标函数为:

$$\min K = \frac{f_2 f_6}{(f_0 + f_1)(f_4 + f_5) - f_2 f_3} \quad (19)$$

约束条件为:

$$12 \geq r_2 - r_1 \geq 6 \quad (19a)$$

$$14 \geq r_4 - r_3 \geq 9 \quad (19b)$$

$$r_3 - r_2 \geq 15 \quad (19c)$$

$$r_5 - r_4 \geq 15 \quad (19d)$$

$$r_2 = 15 \quad (19e)$$

$$r_5 = 121 \quad (19f)$$

(19a, 19b) 确定了套管厚壁的变化范围, 这是根据钻井手册中所给定的套管标准来确定的; (19c, 19d) 根据工艺要求, 限制了水泥环的厚度, (19e, 19f) 保证了原采油工艺及设备都不变。通过优化设计, 使其目标函数  $K$  取得最小值, 从而使组合套管达到极限抗挤毁能力。通过优化确定了理论上的最优解(即理论上最优的套管半径)再根据标准套管尺寸, 就可以得到满

足外挤压力情况下的最佳组合套管横截面结构。

### 3 优化设计方法

从前面建立的数学模型看,该问题属于多变量多约束的极小化问题,可采用混合惩罚函数法,该方法在工程中广泛应用,具有很好的适应性和可靠性。

对于极小化约束问题的一般表达式为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ s.t. & gu(x) \geq 0 & (u = 1, 2, \dots, m) \\ & hv(x) = 0 & (v = 1, 2, \dots, q) \end{cases} \quad (20)$$

用混合法表达的惩罚函数的一般表达式为:

$$P(x, r^{(k)}, M^{(k)}) = F(x) + r^{(k)} \sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(x)} + M^{(k)} \sum_{v=1}^q [h_v(x)]^2 \quad (21)$$

混合法构造的惩罚函数(21)式同时含有障碍函数  $r^{(k)} \sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(x)}$  和衰减函数  $M^{(k)} \sum_{v=1}^q [h_v(x)]^2$ , 取:

$$M^{(k)} = \frac{1}{\sqrt{r^{(k)}}} \quad (22)$$

将惩罚因子统一用  $r^{(k)}$  表示,则混合法的惩罚函数表达式为:

$$P(x, r^{(k)}) = f(x) + r^{(k)} \sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(x)} + \frac{1}{\sqrt{r^{(k)}}} \sum_{v=1}^q [h_v(x)]^2 \quad (23)$$

式中:

$$r^{(0)} > r^{(1)} > r^{(2)} > \dots > r^{(k)} > \lim_{k \rightarrow \infty} r^{(k)} \rightarrow 0$$

在混合惩罚函数法中,惩罚项  $\sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(x)}$  的作用是限制搜索点跑出不等式约束确定的区域,而另一惩罚项  $\sum_{v=1}^q [h_v(x)]^2$  的作用是迫使搜索点向等式靠近。

## 5 优化设计的计算机实施

上面的优化方法,在计算上的编程实施过程为:

(1)选择初始点  $X^{(0)}$ 。初始点不要求为可行点,但要求满足不等式,选择适当的初始惩罚因子  $r^{(0)}$  和 (2) 递减系数  $\beta (0 < \beta < 1)$ 。实际计算时可取:

$$r^{(0)} = \max\{10^{-2}, \frac{|f^*|}{100}\} \quad (24a)$$

$$\beta = \frac{1}{3\sqrt{100}} \quad (24b)$$

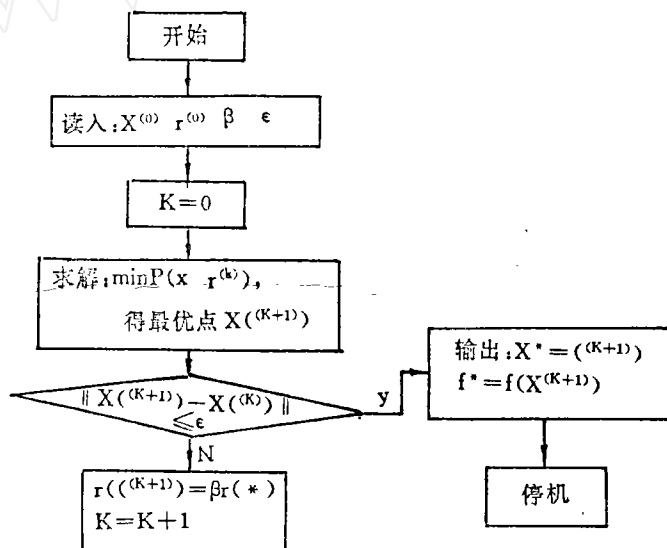


图3 混合惩罚函数结算框图

其中  $f^*$  为  $f(x)$  的约束极小值的估计值。并含计数器  $K=0$ 。

(2)求无约束极小化  $\min P(x, r^{(k)})$ , 得极小点  $X^{(k+1)}$ 。

(3)若  $X^{(k+1)}$  满足收敛精度, 即:

$$\|X^{(k+1)} - X^k\| \leq \epsilon$$

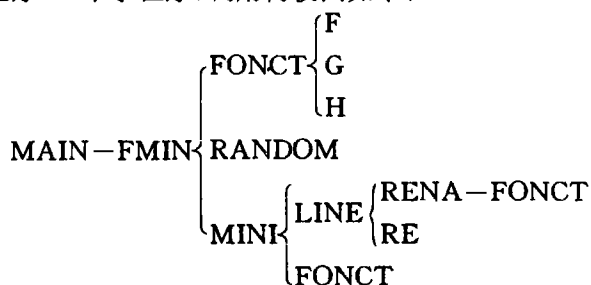
则该点为最优解, 停止计算, 否则转向(4)。

(4)取  $X^{(k+1)} = \beta r^{(k)}$ , 令  $K = K + 1$ , 转向(2)。

根据上面算法所编制的双层组合套管优化设计源程序 ODP (Aoptimization Design Program for Pipe-in-Pipe) 分为两部分, 第一部分根据优化设计理论, 计算理论上套管的最



优截面尺寸。第二部分根据 API 标准和国家标准,选取最优的套管组合方案。程序设计可靠,人机界面良好,可供油田在解决超高压井段双层组合套管设计时应用。ODP 第一部分有一个主程序 10 个子程序,调用树枝图如下:



ODP 的第二部分发为单独一个主程序。

适当修改约束条件(19a)~(19e)式,而且修改相应子程序 G 和 H,就可以得到不同约束条件下的最佳组合套管结构。

## 6 算 例

某油田井下 2750~2850m 井段为超高压段,最大外挤压力  $P=190\text{MPa}$ ,试确定该段双层组合套管的最佳选择。

根据优化设计程度 ODP,计算出理论上的最优尺寸,传力系数  $K$  及内外层套管的剪应力  $\sigma_{t1}, \sigma_{t2}$ 。

内层套管内径: $D(1)=127.99693$

内层套管外径: $D(2)=140.00000$

外层套管内径: $D(3)=175.28735$

外层套管外径: $D(4)=203.26203$

钻头直径: $D(5)=242.00000$

内层套管壁厚: $DET(1)=6.00153$

外层套管壁厚: $DET(2)=13.98734$

内层水泥环厚度: $THICK(1)=17.64367$

外层水泥环厚度: $THICK(2)=19.36899$

传力系数: $K=0.44985$

内层套管内壁剪应力: $\sigma_{t1}=669.\text{MPa}$

外层套管内壁剪应力: $\sigma_{t2}=223.\text{MPa}$

根据  $\sigma_{t1}, D(1), D(2)$ , 及  $DET(1)$ , 选择内层套管, 选 API 标准中的  $5\frac{1}{2}"\text{P110}$  钢级套管, 壁厚 10.54, 不管在强度还是在尺寸上都满足要求。再根据  $\sigma_{t2}, D(3), D(4)$ , 及  $DET(2)$  选择外层套管, J55 和 K55 钢级虽然满足强度要求, 但壁厚无法满足, 所以, 选用强度高一级的 C75 钢级, 尺寸为  $7\frac{5}{8}"$ , 壁厚为 10.92。由这两种尺寸组套管组成的双层组合套管, 其:

传力系数: $K=0.4674$

内层套管受到的压力: $P_2=88.8\text{MPa}$

内层水泥环受到的压力:  $P_3 = 96.2 \text{ MPa}$ .

### 参 考 文 献

- 1 郝俊芳, 龚伟安. 套管强度计算与设计. 石油工业出版社, 1987.
- 2 黄炎. 工程弹性力学. 清华大学出版社, 1982.
- 3 孙靖明. 机械优化设计. 机械工业出版社, 1989.

## The Optimization Design of the Pipe—in—Pipe Combination under the Deep Layer

Dong Shi'r      Zhang Wenwei      Zhang Xianpu

(Department of Mechanical Engineering)

### Abstract

Oil production is often greatly affected by the collapse of well casings under the super-high pressure of the soft rock under deep layer. Aiming at this, the authors in this paper base their discussion on the thick tube theory in the elasticity mechanics and the optimization theory and put forward a new approach towards the optimization design of the pipe—in—pipe combination to resist the super-high pressure of the soft rock under deep layer.

**Key Words:** Pipe—in—pipe; Collapsing strength; Force transmitting constant; Optimization design; SJMT method