

·油气钻采工程·

# 复杂条件下油井套管损坏原因及预防措施

房锡业

(山东胜利职业学院, 山东 东营 257097)

**摘要:**在油田开采过程中,尤其是开采中后期,经常发生油井套管损坏现象,严重影响了油田的开发效益。引起油井套管损坏的因素很多,既有地质方面的,也有工程方面的。为了深入了解油井套管损坏的原因,以便采取有效措施保护套管,对地层的地质和井下工程情况进行了综合研究。首先,根据井筒中套管所受的应力场分布和作用机制,针对套管、水泥环、地层为弹性介质和塑性介质2种情况,分别建立了与之相对应的弹性和塑性数学物理模型及射孔后的流固耦合模型;然后,模拟计算分析了射孔、水泥环、地层岩性、注水压力、放喷流量、温度和压力等因素对套管受力的影响。结果表明:水泥环的弹性性质和厚度具有降低套管载荷的作用,地层的塑性和流变性对套管受力影响很大,地层压力的变化会引起套管应力的变化;可采取提高固井质量、确定射孔方向和选择合理的注水压力等措施来预防套管损坏。

**关键词:**受力模型 数值模拟 套管损坏 弹塑性地层 地应力 水泥环 射孔

**中图分类号:** TE256.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)04-0094-05

套管损坏现象是油田在开发过程中会普遍遇到的问题。据统计,套管损坏一般发生在油水井投产4~5 a后,套管损坏井约占总井数的20%<sup>[1]</sup>;尤其是在稠油开采过程中,套管损坏率可达30%~40%,有些甚至高达60%;对于岩膏层,由于其地层流变性强,套管损坏现象更加严重<sup>[2]</sup>。套管损坏以缩径、错断、弯曲变形和腐蚀破漏等为主要形式。造成套管损坏的因素十分复杂,既包括构造应力、层间滑动、地层蠕变和塑性流变等地质因素,也包括固井、射孔、注水、作业和采油工艺等工程因素<sup>[3]</sup>。要深入了解套管受损的原因,需要对地层的地质和井下情况进行详细分析。

当地层被钻开后,在井眼周围会出现应力集中的现象,井壁周围应力受到原地应力、地层孔隙压力、井内液柱压力、岩石特性和井眼几何形状等各种因素的影响。井壁表面的径向、切向和垂向应力可用解析方法求解得到<sup>[4-6]</sup>。在固井之后,套管、水泥环和地层就组合成一个弹性体或塑性体。对于新井来说,套管上的作用力为0,由于岩石的非弹性,在远场应力的长期作用下,套管壁上的作用力将从无到有,最后达到远场应力作用下的应力集中<sup>[7]</sup>。地层经过射孔之后,套管的抗挤压强度和破

裂压力都会受到影响,远场应力也会进一步向井眼集中<sup>[8-9]</sup>,当套管所受的外载超过套管本身的抗外载强度时,套管就会发生损坏。为此,笔者从地质和工程2方面入手,分析套管损坏原因,并提出预防套管损坏的有效措施,以期有效预防或减少套管损坏的发生提供理论和实践指导。

## 1 套管受力模型

当套管下入地层并经过固井后,通过水泥环与地层相连,在地应力长时间的连续作用下,套管受到一定程度的外力挤压,从而导致套管发生应变。按照应力与应变的关系,将应力低于屈服点时的应变称为弹性应变,满足弹性场规律;应力超过屈服点时的应变称为塑性应变,满足塑性场规律<sup>[10]</sup>。当射孔之后,生产过程中套管周围会进一步产生应力集中,套管的性能又会受到一定程度的影响。

研究套管的受力情况,须从地层、水泥环和套管组成的组合体入手,将套管受力模型分为弹性组合体、塑性组合体以及射孔后组合体3种类型。

### 1.1 弹性组合体

当套管为弹性介质时,根据拉梅公式<sup>[9]</sup>,套管内

收稿日期:2013-05-03。

作者简介:房锡业,男,副教授,从事测井方法及测井资料解释教学及相关研究。联系电话:(0546)8521442,E-mail:pasf@sina.com。

基金项目:国家基础研究“973”项目“深部油气储层综合地球物理探测和评价方法”(2013CB228605)。

的应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_i)}{r_2^2 - r_1^2} \times \frac{1}{r^2} + \frac{r_1^2 p_i - r_2^2 p_1}{r_2^2 - r_1^2} \\ \sigma_\theta = -\frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_i)}{r_2^2 - r_1^2} \times \frac{1}{r^2} + \frac{r_1^2 p_i - r_2^2 p_1}{r_2^2 - r_1^2} \end{cases} \quad r_1 \leq r \leq r_2 \quad (1)$$

式中:  $\sigma_r$  为径向应力, MPa;  $r_1$  为套管内径, m;  $r_2$  为套管外径, m;  $p_1$  为水泥环对套管的压力, MPa;  $p_i$  为井筒内流体对套管的压力, MPa;  $r$  为任意点到井眼中心点的径向距离, m;  $\sigma_\theta$  为周向应力, MPa。

根据平面应力条件下厚壁井筒径向位移公式, 套管外壁处的径向位移为

$$S_{s0} = \frac{1 + \nu_s}{E_s} \times \left[ -\frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_i)}{(r_2^2 - r_1^2) r_2} + \frac{(r_1^2 p_i - r_2^2 p_1) r_2}{r_2^2 - r_1^2} \right] \quad (2)$$

式中:  $S_{s0}$  为套管外壁处的径向位移, m;  $\nu_s$  为套管的泊松比;  $E_s$  为套管的杨氏模量, MPa。

当水泥环为弹性介质时, 根据拉梅公式<sup>[9]</sup>, 水泥环内的应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{r_2^2 r_3^2 (p_2 - p_1)}{r_3^2 - r_2^2} \times \frac{1}{r^2} + \frac{r_2^2 p_1 - r_3^2 p_2}{r_3^2 - r_2^2} \\ \sigma_\theta = -\frac{r_2^2 r_3^2 (p_2 - p_1)}{r_3^2 - r_2^2} \times \frac{1}{r^2} + \frac{r_2^2 p_1 - r_3^2 p_2}{r_3^2 - r_2^2} \end{cases} \quad r_2 \leq r \leq r_3 \quad (3)$$

式中:  $r_3$  为水泥环内径, m;  $p_2$  为地层对水泥环的压力, MPa。

套管的应力—应变须满足的关系式为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{dS}{dr} \\ \varepsilon_\theta = \frac{S}{r} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_\theta$  分别为径向应变和周向应变,  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;  $S$  为应变位移, m。

水泥环内壁、外壁的径向位移分别为

$$\begin{cases} S_{ci} = \frac{1 + \nu_c}{E_c} \times \left[ p_1 \frac{r_2 r_3^2 + r_2^3 (1 - 2\nu_c)}{r_3^2 - r_2^2} - p_2 \frac{2(1 - \nu_c) r_2 r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \right] \\ S_{c0} = \frac{1 + \nu_c}{E_c} \times \left[ p_1 \frac{2(1 - \nu_c) r_3 r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - p_2 \frac{r_3 r_2^2 + r_2 r_3^2 (1 - 2\nu_c)}{r_3^2 - r_2^2} \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $S_{ci}$  和  $S_{c0}$  分别为水泥环内壁和外壁的径向位移, m;  $\nu_c$  为水泥环泊松比;  $E_c$  为水泥环的杨氏模量, MPa。

当地层为弹性介质时, 根据拉梅公式<sup>[9]</sup>, 地层应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{r_3^2 r_4^2 (p_0 - p_2)}{r_4^2 - r_3^2} \times \frac{1}{r^2} + \frac{r_3^2 p_2 - r_4^2 p_0}{r_4^2 - r_3^2} \\ \sigma_\theta = -\frac{r_3^2 r_4^2 (p_0 - p_2)}{r_4^2 - r_3^2} \times \frac{1}{r^2} + \frac{r_3^2 p_2 - r_4^2 p_0}{r_4^2 - r_3^2} \end{cases} \quad r_3 \leq r \leq r_4 \quad (6)$$

式中:  $r_4$  为水泥环外径, m;  $p_0$  为地层压力, MPa。

根据平面应力条件下厚地层径向位移公式<sup>[9]</sup>, 得到地层内壁处的径向位移为

$$S_{fi} = \frac{1 + \nu_f}{E_f} \times \left[ p_2 \frac{r_3 r_4^2 + r_3^3 (1 - 2\nu_f)}{r_4^2 - r_3^2} - p_0 \frac{2(1 - \nu_f) r_3 r_4^2}{r_4^2 - r_3^2} \right] \quad (7)$$

式中:  $S_{fi}$  为地层内壁处的径向位移, m;  $\nu_f$  为地层泊松比;  $E_f$  为地层的杨氏模量, MPa。

套管、水泥环和地层三者之间须满足的应力和位移连续条件为

$$\begin{cases} p_3 = p_2 + \sigma_{sc} \ln \frac{r_3}{r_2} \\ p_0 = p_4 + \sigma_{sf} \ln \frac{r_4}{r_3} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} S_{s0} = S_{ci} \\ S_{c0} = S_{fi} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $p_3$  和  $p_4$  分别为套管与水泥环交界处的压力、水泥环与地层交界处的压力, MPa;  $\sigma_{sc}$  和  $\sigma_{sf}$  分别为水泥和地层的屈服强度, MPa。

## 1.2 塑性组合体

当套管为塑性介质时, 套管径向应力和周向应力应满足的平衡条件和屈服条件的表达式分别为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (10)$$

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \sigma_{ss} \quad (11)$$

式中:  $\sigma_{ss}$  为套管材料的屈服强度, MPa。

根据式(10)和式(11), 得到塑性套管的应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = -\sigma_{ss} \ln \frac{r}{r_1} - p_i \\ \sigma_\theta = -\sigma_{ss} \left( 1 + \ln \frac{r}{r_1} \right) - p_i \end{cases} \quad (12)$$

当水泥环为塑性介质时, 套管的应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = -\sigma_{sc} \ln \frac{r}{r_2} - p_2 \\ \sigma_\theta = -\sigma_{sc} \left( 1 + \ln \frac{r}{r_2} \right) - p_2 \end{cases} \quad (13)$$

当地层为塑性介质时, 套管的应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = -\sigma_{sf} \ln \frac{r}{r_3} - p_4 \\ \sigma_\theta = -\sigma_{sf} \left( 1 + \ln \frac{r}{r_3} \right) - p_4 \end{cases} \quad (14)$$

当套管、水泥环和地层在塑性范围内, 考虑平面应变和体积的不可压缩性, 它们的径向位移须满足的关系式为

$$\frac{1}{r} \times \frac{d(rS)}{dr} = 0 \quad (15)$$

式中:  $S$  为径向位移,  $m$ 。

式(10)一式(15)构成了套管、水泥环和地层为塑性时的应力和位移求解模型。

### 1.3 射孔后组合体

在油藏注水开发过程中,射孔孔眼受到岩层的固体变形和油藏流体的双重影响,此时套管的受力可利用流固耦合模型来描述,套管射孔后流体运动满足有源条件下的渗流方程<sup>[9]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sigma_{xx}-\alpha p)}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} + f_x = 0 \\ \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_{yy}-\alpha p)}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} + f_y = 0 \\ \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma_{zz}-\alpha p)}{\partial z} + f_z = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{yz}$ 和 $\sigma_{zz}$ 分别为套管在 $(x, y, z)$ 中各坐标轴投影所在平面的应力分量,  $MPa$ ;  $x$ 和 $y$ 分别为与井筒垂直的水平面上的横向和纵向应力,  $MPa$ ;  $z$ 为井筒方向上的应力,  $MPa$ ;  $\alpha$ 为有效应力系数;  $p$ 为压力,  $MPa$ ;  $f_x$ ,  $f_y$ 和 $f_z$ 分别为套管在 $x, y$ 和 $z$ 方向上的受力分量,  $MPa$ 。

应力与应变之间的关系式<sup>[9]</sup>为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中:  $E$  为杨氏模量,  $MPa$ ;  $\nu$  为泊松比;  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$ ,  $\varepsilon_{yz}$ ,  $\varepsilon_{xz}$ 和 $\varepsilon_{xy}$ 分别为地层在 $(x, y, z)$ 中各坐标轴投影所在平面的应变分量,  $\mu m/m$ 。

## 2 套管受力影响因素

### 2.1 射孔

根据射孔后套管受力模型,首先建立套管射孔后的网格化模型(图1a),然后通过有限元方法进行

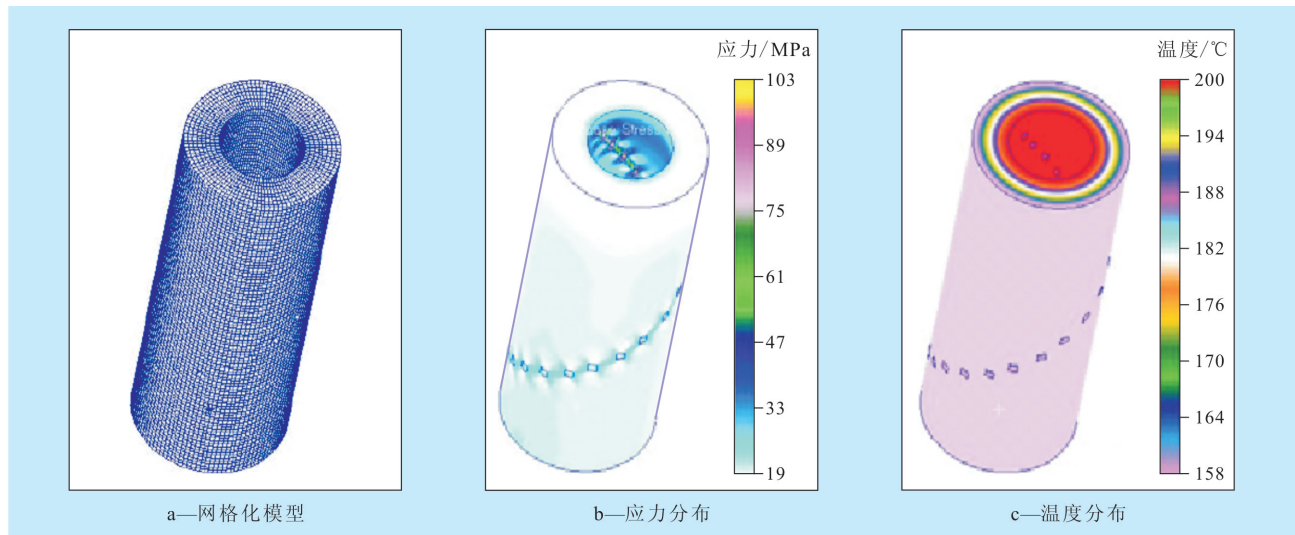


图1 套管射孔后的网格化模型及孔眼周围的套管应力和温度分布

数值求解,计算得到射孔孔眼周围的应力分布。

套管射孔后的物理模型参数如表1所示。射孔孔眼采取螺旋方式布孔,相位角为 $60^\circ$ ,模型长度为

介质	内径/ cm	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	纵波 速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	横波 速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	弹性 模量/ $10^4 MPa$	泊松比
套管	16.13	7.50	6 098	3 354	20.85	0.26
水泥环	18.16	1.92	2 823	1 729	3.0	0.15
地层	25.40	2.06	2 320	1 500	2.0	0.23

500 mm,井眼直径为177.8 mm,孔眼间隔为10.39 mm,孔眼直径为10 mm,孔密为36孔/m,水泥环厚度为30 mm。

假定最大和最小地应力分别为20和10  $MPa$ ,模拟结果(图1b,图1c)表明:射孔导致套管应力在孔眼周围明显集中,最大应力增加了1.3~1.5倍;当温度从155  $^\circ C$ 增至约200  $^\circ C$ 时,最大应力增大约26.5%,其影响程度随着温度的降低而逐步减弱。

由胜利油区胜坨2-3-25井的电磁探伤测井曲线(图2)可以看出,该井有3个射孔段,分别为



2 019~2 022, 2 024~2 028 和 2 071~2 075 m, 其中 2 071~2 075 m 射孔段套管损坏严重, 而在 2 019~2 022 m 射孔段上方的 2 015~2 019 m 处电磁探伤测井曲线负异常明显, 套管破损比射孔段更为严重, 并出现了漏失现象。这是因为该段为胶结疏松的泥岩地层, 遇水后严重膨胀发生垮塌所致。

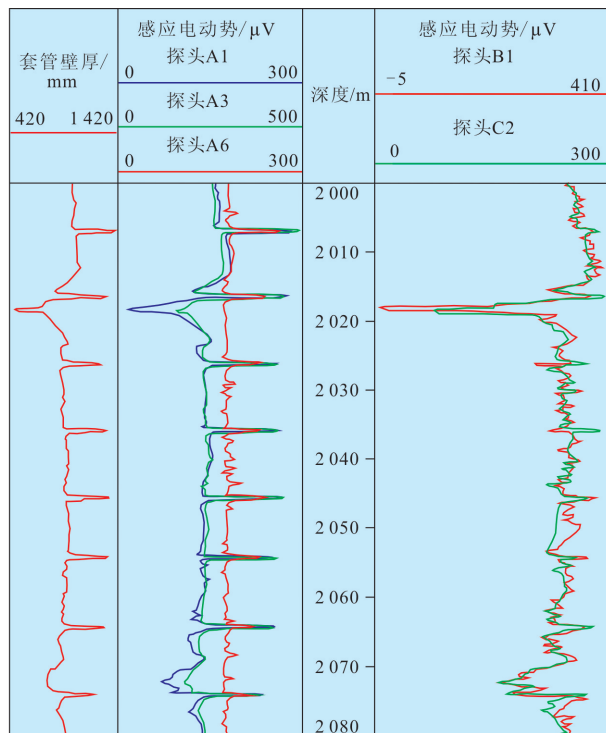


图2 胜坨2-3-25井射孔后套管的电磁探伤测井曲线

## 2.2 水泥环

水泥环对套管受力影响取决于水泥环厚度、水泥环与地层材料的差异以及地层与套管的刚度比3个方面, 其中刚度比起着关键作用。当刚度比大于等于1~2  $\nu_c$  时, 用较高弹性模量的水泥固井可降低套管载荷; 当刚度比小于1~2  $\nu_c$  时, 用较低弹性模量的水泥固井可降低套管载荷。一般情况下, 增加水泥环的厚度可以降低套管载荷。在水泥环与套管光滑接触的情况下, 套管载荷非均匀程度降低, 基本上呈均匀分布。均匀载荷时套管抗挤强度约为非均匀载荷时的5~7倍, 其变形也远小于非均匀载荷, 因而选取适当弹性模量的水泥进行固井, 不仅可降低成本, 还能减小套管应力。在非均匀载荷的条件下, 载荷椭圆度越大, 套管的应力越大, 套管越易损坏, 如果增大水泥环的弹性模量, 即可降低套管应力, 提高套管抗挤强度<sup>[11]</sup>。

当固井质量不好时, 会引起地层坍塌, 导致套管变形, 当某种构造原因作用在特定地层时也会使水泥环受到破坏。当软岩层上覆于较硬的地层构

造脊部附近时, 产生的相对运动会造成胶结水泥受损和套管被挤扁。

地应力分为最大主应力 ( $\sigma_H$ )、垂向应力 ( $\sigma_V$ ) 和最小主应力 ( $\sigma_h$ )。一般情况下为  $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ ; 当存在逆断层时, 三者关系可能变为  $\sigma_V > \sigma_H > \sigma_h$ ; 当存在正断层时, 其关系可能变成  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ 。在注水开发过程中, 三者关系变得更为复杂。对于直井中的套管, 其纵向变形受到限制, 可不考虑地应力沿纵深的变化, 因此地层中套管受力问题可简化为水平应力引起的平面应变问题。

在疏松砂岩油藏的开发过程中, 细粉砂粒易流入井筒内, 在出砂层段的套管附近形成空洞或坑道, 使油层出砂亏空或地层压力下降导致套管损坏。当上覆地层的压实作用和地层压力下降时, 周围岩石的应力平衡遭到破坏, 空洞或坑道上已卸载的岩石就可能坍塌, 使套管受到挤压并引起套管损坏, 这是造成套管损坏的主要原因之一。

## 2.3 地层岩性

岩膏层极易发生套管损坏。在远场地应力的作用下, 岩膏层往往会产生蠕变变形, 随着时间的推移, 地层的蠕变和滑移对套管产生异常高的非对称性载荷, 使套管承受非均匀挤压, 导致套管变形损坏。在断层附近的破碎带, 一般为脆性地层或泥质胶结的地层, 胶结差, 遇水易膨胀、发生变形, 也是容易发生套管损坏的区域。地应力的大小和分布对油气藏勘探、开发具有重要影响。断层处大面积岩层间的相对滑动也可能导致套管受损, 甚至挫断。由胜利油区中11-8井多臂井径测井曲线(图3)可以看出, 1 057.44~1 058.44 m 井段处的最大和最小井径分别为136和110 mm, 说明该井段处的套管

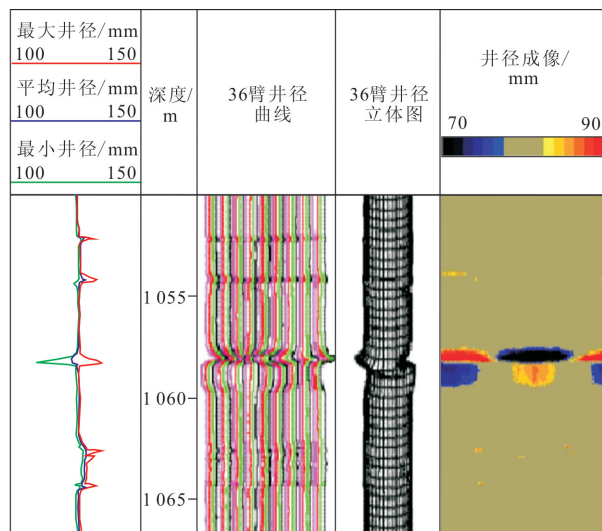


图3 中11-8井多臂井径测井曲线

发生了严重扭曲变形,甚至可能被挫断。

## 2.4 注水压力和放喷流量

注水压力对套管损坏影响较大,尤其是当注入水进入泥岩段时,泥岩吸水软化,体积膨胀,产生体积力,尤其是蒙脱石,膨胀倍数一般约为5倍,使地层在泥岩软化带发生的水平方向变形最大达40 mm,而垂直方向变形最大可达12 cm。同时,由于泥岩体积膨胀,使其成岩胶结作用力减弱,在井筒周围的地层中产生应力集中,形成最大周向应力和最小周向应力,使井眼发生椭圆变形,井中套管受挤压而变形<sup>[12]</sup>。因此,应适当降低注水压力。由岩石物理性质可知,随着注水压力的增加,油层孔隙压力增大,岩石抗剪切强度减小。当孔隙中的流体压力等于岩石承受的垂向应力时,岩石的抗剪切强度将变得很小,在外力作用下极易产生剪切破裂,导致套管被挤压而发生变形。

从图4中可以看出:放喷流量越大,套管所受的挤压力越大,越容易变形;当放喷流量相同时,地层渗透率越大,套管所受的挤压力越小。

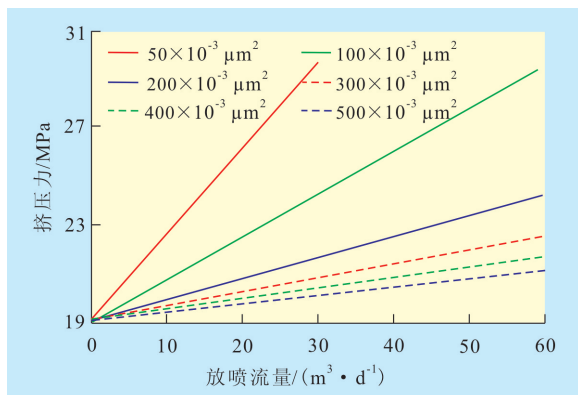


图4 油井放喷流量和地层渗透率与套管挤压力的关系

## 2.5 温度和压力

由V140套管在不同温度下的抗拉强度和屈服强度(图5)可以看出,随着温度的升高,套管抗拉强度和屈服强度均逐渐降低。

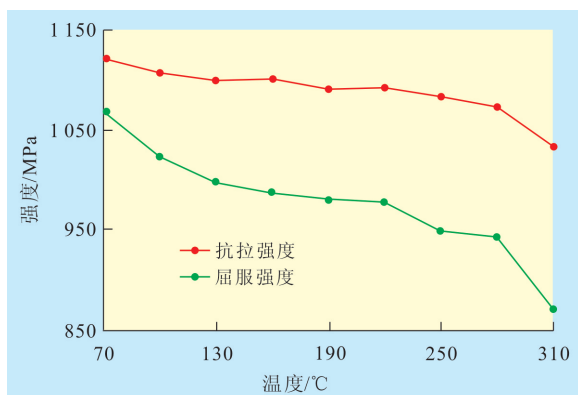


图5 地层温度对V140套管的抗拉强度和屈服强度的影响

在超高压油层中开采油气,会导致油层和相邻泥岩中的流体压力大幅度降低,原来由孔隙流体承受的上覆岩层负荷将转加到岩石骨架上,使岩石颗粒间的压力明显增加,引起地层严重变形,导致油井套管发生严重变形而损坏<sup>[13]</sup>。

## 3 套管损坏预防措施

为了保护套管,延长套管的使用寿命,使油田的生产效益最大化,笔者建议通过以下3项措施预防套管损坏。

第一,在易发生套管损坏的非油层段,保持良好的固井质量,对防止套管损坏的发生至关重要,针对引发套管损坏的力基本是一次性的特点,可下入双层组合套管来增强套管强度,提高固井质量,并为应力的释放留有充分空间。而在套管接箍处,套管强度一般较低,最容易发生破损,亦可下入双层组合套管来防止套管损坏的发生。

第二,应沿着最大水平地应力方向进行射孔,压裂改造时防止裂缝窜入泥岩隔层,控制压裂缝缝高。对于泥质含量高的油田,在开发早期应注入防膨剂。

第三,针对套管内压力对套管应力影响较大的特点,在生产过程中应尽量保持套管内压力与载荷相近,以有效减小套管应力,提高套管的抗挤压强度。通过调整注水方案,合理地保持地层压力平衡。对注入压力的选择,应以既能满足生产所需的注水量又能防止套管变形为原则,同时应将其严格控制在油层破裂压力以下。

## 4 结论

利用建立的套管、水泥环和地层为弹性介质或塑性介质时的模型,分析了射孔、水泥环、地层岩性和应力等因素对套管的受力影响。结果表明,套管损坏的主要原因不仅包括构造应力改变、地层岩性、地层蠕变和塑性流变等地质因素,还包括固井、射孔和注水等工程因素。

通过分析水泥环、地层岩性和应力对套管的受力影响,发现增加水泥环的弹性和厚度具有降低套管载荷的作用;塑性和流变性地层对套管受力影响很大;地层压力的变化会引起应力的变化。因此,在油田注水开发过程中,随着注水压力的增加,使

(下转第101页)