

文章编号:1673-5005(2009)02-0063-07

套管-水泥环-地层耦合系统热应力理论解

李 静¹, 林承焰¹, 杨少春¹, 支印民², 陈绍维³

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 辽河油田分公司 特种油开发公司, 辽宁 盘锦 124010; 3. 胜利油田 滨南采油厂, 山东 滨州 256606)

摘要:根据弹性力学和热力学理论,推导了套管-水泥环-地层耦合系统的热应力和热位移理论计算公式,分析了系统热应力和热位移径向分布规律,以及套管温升、弹性模量、热膨胀系数、壁厚、水泥环与地层弹性模量和泊松比等参数对套管热应力和热位移的影响。结果表明:随着离套管中心径向距离的增加,径向热位移和热应力先增大后减小,最大值分别位于地层和套管外壁,而套管上 Von Mises 应力值迅速下降,最大值位于套管内壁;随着套管温升和套管、水泥环、地层弹性模量与热膨胀系数的增加,套管内壁 Von Mises 应力和外壁径向压力增大,其中套管参数变化对计算结果影响更明显。在进行稠油热采井套管抗挤毁强度计算时,应考虑热膨胀在套管外壁产生的径向压应力的影响。

关键词:热应力; 耦合系统; 理论解; 热采井

中图分类号:TE 21

文献标识码:A

Theoretical solution of thermal stress for casing-cement-formation coupling system

LI Jing¹, LIN Cheng-yan¹, YANG Shao-chun¹, ZHI Yin-min², CHEN Shao-wei³

(1. College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Special Oil Development Company, Liaohe Oilfield Branch Company, Panjin 124010, China;

3. Binnan Oil Production Plant, Shengli Oilfield, Binzhou 256606, China)

Abstract: The formulas of thermal stress and displacement for casing-cement-formation coupling system were derived based on the elastic mechanics and thermodynamics. The thermal stress and radial thermal displacement distribution of the coupling system were calculated. The effects of parameters on casing thermal stress and displacement distribution were studied, including casing temperature increment, elastic modulus, coefficient of thermal expansion, wall thickness, elastic modulus and Poisson's ratio of cement and formation. The results show that the radial displacement and stress firstly increase and then decrease with the radial distance increasing from casing center, and the maximum values are located on formation and casing external wall respectively. While the casing Von Mises (VOM) stress declines rapidly with the radial distance increasing, and the maximum value is located on the casing internal wall. Meanwhile, VOM stress on the casing internal wall and external radial stress increase with the temperature increment, elastic modulus and coefficient of thermal expansion of casing-cement-formation coupling system increasing. The variation of casing parameters has a great effect on the computational solution. The radial thermal stress on casing external wall formed by thermal expansion should be considered for calculating casing collapse strength in steam injection wells.

Key words: thermal stress; coupling system; theoretical solution; thermal well

套管损坏是目前影响稠油热采井效益的主要原因之一。由于问题的复杂性,稠油井套管损坏机理与控制技术仍须深入研究和探讨^[1-7]。目前,热采井

基本上采用预拉应力固井设计^[8-9],主要考虑温度变化引起的轴向载荷变化。实际上,随着固井工艺技术水平提高,水泥环胶结质量变好,在注蒸汽过程

收稿日期:2008-12-25

作者简介:李静(1976-),女(汉族),河南南阳人,博士研究生,主要从事油气田开发与地质方面的研究。

中,近井地带地层温度升值较大,套管和地层同时膨胀,在套管上将会形成较大的径向挤压力。由于计算复杂,温度变化对径向热应力的影响、热采井套管性能参数的变化规律及其对热应力计算结果的影响研究较少^[10]。笔者在推导套管-水泥环-地层系统的热应力和热位移理论计算公式的基础上,分析套管性能参数、水泥环与地层弹性参数对套管热应力和热位移的影响,以期对稠油热采及高温井套管强度设计提供依据。

1 热应力模型的建立和求解

热采条件下套管承受的温度载荷属于厚壁筒轴对称问题,如图1(图中, r_{ci} , r_{co} , r_m 分别为套管内、外半径和水泥环半径)所示。采用应力和位移连续法^[1,11]进行求解,根据弹性力学与热应力理论^[12],其应力应变关系为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E}[\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \alpha T(r), \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] + \alpha T(r), \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \alpha T(r). \end{cases} \quad (1)$$

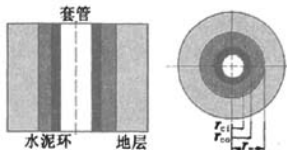


图1 套管-水泥环-地层耦合系统热应力计算模型

Fig.1 Thermal stress calculation model for casing-cement-formation coupling system

利用几何关系 $\varepsilon_r = \frac{dU}{dr}$, $\varepsilon_\theta = \frac{U}{r}$, 由平衡方程得

$$\frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{U}{r^2} = \alpha \frac{(1+\mu)}{(1-\mu)} \frac{dT(r)}{dr}. \quad (2)$$

其中

$$T(r) = T_r(z, r, t) - T_r(z, r, 0).$$

式中, ε_r , ε_θ 和 ε_z 分别为径向、周向和轴向应变, 无因次; σ_r , σ_θ 和 σ_z 分别为径向、周向和轴向热应力, MPa; $T_r(z, r, 0)$ 和 $T_r(z, r, t)$ 分别为注汽前、后的介质温度, $^{\circ}\text{C}$; μ 为介质泊松比, 无因次; E 为弹性模量, MPa; α 为介质热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; U 为热位移, m; r 为离井眼中心距离, m。

求解方程(2), 得到套管、水泥环和地层热位移和热应力通解为

$$U = \frac{(1+\mu)\alpha}{(1-\mu)r} \int_{r_i}^r T(r) r dr + C_1 r + \frac{C_2}{r}, \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{-\alpha E}{(1-\mu)r^2} \int_{r_i}^r T(r) r dr + \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{C_1}{1-2\mu} - \frac{C_2}{r^2} \right), \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\mu} \left(\frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r T(r) r dr - T_c \right) + \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{C_1}{1-2\mu} + \frac{C_2}{r^2} \right), \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{-\alpha E T(r)}{1-\mu} + \frac{2\mu E C_1}{(1+\mu)(1-2\mu)}. \quad (6)$$

式中, C_1 和 C_2 为系数。

根据稠油热采注汽井套管、水泥环和地层温度分布规律, 认为套管的温度与注汽温度相等, 不考虑径向上温度变化, 因此对于套管, $T_c(r) = T_c$, T_c 为套管内壁温升。根据数值模拟结果^[13], 假设水泥环和地层的径向温度变化近似服从指数衰减规律, 即 $T(r) = T_c \exp[-\xi(r-r_{co})]$, ξ 为温度衰减系数, 由加热半径确定, 默认值可设为 1。这样, 由式(3)~(6)可得套管、水泥环和地层的热位移与热应力通解。

(1) 对于套管($r_{ci} \leq r \leq r_{co}$):

$$U_c = \frac{(1+\mu_c)\alpha_c T_c}{(1-\mu_c)2r} (r^2 - r_{ci}^2) + C_{c1} r + \frac{C_{c2}}{r}, \quad (7)$$

$$\sigma_{rc} = \frac{-\alpha_c E_c T_c}{2(1-\mu_c)} \left(1 - \frac{r_{ci}^2}{r^2} \right) + \frac{E_c}{1+\mu_c} \left(\frac{C_{c1}}{1-2\mu_c} - \frac{C_{c2}}{r^2} \right), \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta c} = \frac{-\alpha_c E_c T_c}{2(1-\mu_c)} \left(1 + \frac{r_{ci}^2}{r^2} \right) + \frac{E_c}{1+\mu_c} \left(\frac{C_{c1}}{1-2\mu_c} + \frac{C_{c2}}{r^2} \right), \quad (9)$$

$$\sigma_{zc} = \frac{-\alpha E T_c}{1-\mu_c} + \frac{2\mu_c E_c C_{c1}}{(1+\mu_c)(1-2\mu_c)}. \quad (10)$$

(2) 对于水泥环($r_{co} \leq r \leq r_m$):

$$U_m = \frac{-(1+\mu_m)\alpha_m T_c \exp(\xi r_{co})}{(1-\mu_m)\xi r} \times \left[\exp(-\xi r) \left(\frac{1}{\xi} + r \right) - \exp(\xi r_{co}) \left(\frac{1}{\xi} + r_{co} \right) \right] + C_{m1} r + \frac{C_{m2}}{r}, \quad (11)$$

$$\sigma_{rm} = \frac{\alpha_m E_m T_c \exp(\xi r_{co})}{(1-\mu_m)\xi r^2} \times \left[\exp(\xi r) \left(\frac{1}{\xi} + r \right) - \exp(-\xi r_{co}) \left(\frac{1}{\xi} + r_{co} \right) \right] + \frac{E_m}{1+\mu_m} \left(\frac{C_{m1}}{1-2\mu_m} - \frac{C_{m2}}{r^2} \right), \quad (12)$$

$$\sigma_{\theta m} = \frac{\alpha_m E_m T_c \exp(\xi r_{co})}{1-\mu_m} \left\{ \frac{-1}{\xi r^2} \left[\exp(-\xi r) \left(\frac{1}{\xi} + r \right) - \right. \right.$$

$$\exp(\xi r_{co}) \left(\frac{1}{\xi} + r_{co} \right) \Big] - \exp(\xi r) \Big\} + \frac{E_m}{1 + \mu_m} \left(\frac{C_{m1}}{1 - 2\mu_m} + \frac{C_{m2}}{r^2} \right), \quad (13)$$

$$\sigma_{zm} = \frac{-\alpha_m E_m T_c \exp(\xi r_{co} - \xi r)}{1 - \mu_m} + \frac{2\mu_m E_m C_{m1}}{(1 + \mu_m)(1 - 2\mu_m)}. \quad (14)$$

(3) 对于地层($r_m \leq r \leq r_f$):

$$U_f = \frac{-(1 + \mu_f)\alpha_f T_c \exp(\xi r_m)}{(1 - \mu_f)\xi r} \left[\exp(-\xi r) \left(\frac{1}{\xi} + r \right) - \exp(-\xi r_m) \left(\frac{1}{\xi} + r_m \right) \right] + C_{f1} r + \frac{C_{f2}}{r}, \quad (15)$$

$$\sigma_{rf} = \frac{\alpha_f E_f T_c \exp(\xi r_m)}{(1 - \mu_f)\xi r^2} \left[\exp(-\xi r) \left(\frac{1}{\xi} + r \right) - \exp(-\xi r_m) \left(\frac{1}{\xi} + r_m \right) \right] + \frac{E_f}{1 + \mu_f} \left(\frac{C_{f1}}{1 - 2\mu_f} - \frac{C_{f2}}{r^2} \right), \quad (16)$$

$$\sigma_{zf} = \frac{\alpha_f E_f T_c \exp(\xi r_m)}{1 - \mu_f} \left\{ \frac{-1}{\xi r^2} \left[\exp(-\xi r) \left(\frac{1}{\xi} + r \right) - \exp(-\xi r_m) \left(\frac{1}{\xi} + r_m \right) \right] - \exp(-\xi r_m) \left(\frac{1}{\xi} + r_m \right) \right\} + \frac{E_f}{1 + \mu_f} \left(\frac{C_{f1}}{1 - 2\mu_f} + \frac{C_{f2}}{r^2} \right), \quad (17)$$

$$\sigma_{zf} = \frac{-\alpha_f E_f T_c \exp(\xi r_m - \xi r)}{1 - \mu_f} + \frac{2\mu_f E_f C_{f1}}{(1 + \mu_f)(1 - 2\mu_f)}. \quad (18)$$

式中,下标 c,m,f 分别代表套管、水泥环和地层。

假定水泥环与套管和地层胶结良好,则地层-水泥环-套管热应力耦合系统的边界条件和连续条件如下:

边界条件为

$$\sigma_{rc} \Big|_{r=r_{ci}} = 0, \quad \sigma_{rf} \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0.$$

连续条件为

$$\sigma_{rc} \Big|_{r=r_{co}} = \sigma_{rm} \Big|_{r=r_{co}}, \quad \sigma_{rm} \Big|_{r=r_m} = \sigma_{rf} \Big|_{r=r_m},$$

$$U_c \Big|_{r=r_{co}} = U_m \Big|_{r=r_{co}}, \quad U_m \Big|_{r=r_m} = U_f \Big|_{r=r_m}.$$

联合式(7),(8),(11),(12),(15),(16)以及边界条件和连续条件,可以求解得到3种介质中热位移和热应力通解中的6个系数,表达式为

$$C_{m1} = (CE + BF)/(AE + BD),$$

$$C_{m2} = (AF - CD)/(AE + BD),$$

$$C_{c1} = \frac{r_{co}^2 C_{m1} + C_{m2} - \frac{\alpha_c T_c (1 + \mu_c)(r_{co}^2 - r_{ci}^2)}{2(1 - \mu_c)}}{r_{co}^2 + \frac{r_{ci}^2}{1 - 2\mu_c}},$$

$$C_{c2} = \frac{r_{ci}^2}{1 - 2\mu_c} C_{c1}, \quad C_{f1} = 0,$$

$$C_{f2} = \frac{(1 + \mu_m)\alpha_m T_c \exp(\xi r_{co})}{-\xi(1 - \mu_m)} \left[\exp(-\xi r_m) \left(\frac{1}{\xi} + r_m \right) - \exp(-\xi r_{co}) \left(\frac{1}{\xi} + r_{co} \right) \right] + C_{m1} r_m^2 + C_{m2}.$$

其中

$$A = \frac{E_m}{(1 + \mu_m)(1 - 2\mu_m)} \left[r_{co} + \frac{r_{ci}^2}{r_{co}(1 - 2\mu_c)} \right] - \frac{E_c(r_{co}^2 - r_{ci}^2)}{(1 + \mu_c)(1 - 2\mu_c)r_{co}},$$

$$B = \frac{E_m}{(1 + \mu_m)r_{co}^2} \left[r_{co} + \frac{r_{ci}^2}{r_{co}(1 - 2\mu_c)} \right] + \frac{E_c \left(1 - \frac{r_{ci}^2}{r_{co}^2} \right)}{(1 + \mu_c)(1 - 2\mu_c)r_{co}},$$

$$C = \frac{-\alpha_c E_c T_c}{2(1 - \mu_c)} \left(1 - \frac{r_{ci}^2}{r_{co}^2} \right) \left(r_{co} + \frac{r_{co}}{1 - 2\mu_c} \right),$$

$$D = \left[\frac{E_m}{(1 + \mu_m)(1 - 2\mu_m)} + \frac{E_f}{1 + \mu_f} \right] r_m^2,$$

$$E = \frac{E_f}{1 + \mu_f} - \frac{E_m}{1 + \mu_m},$$

$$F = \frac{\alpha_m T_c \exp(\xi r_{co})}{\xi(1 - \mu_m)} \left[\exp(-\xi r_m) \left(\frac{1}{\xi} + r_m \right) - \exp(-\xi r_{co}) \left(\frac{1}{\xi} + r_{co} \right) \right] \left[\frac{E_f(1 + \mu_m)}{1 + \mu_f} - E_m \right].$$

将系数 $C_{m1}, C_{m2}, C_{c1}, C_{c2}, C_{f1}, C_{f2}$ 表达式代入式(7)~(18)可求得套管、水泥环和地层的径向热位移和热应力分布。

2 地层-水泥环-套管系统热应力分布与影响因素分析

计算参数见表1和表2。

表1 材料特性参数

Table 1 Characteristic parameters of materials

材料	密度 ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松 比 μ	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	外径 D_c/m
套管	7850	见表2	0.30	11.7	0.178
水泥环	1830	20	0.15	10.3	0.23
地层	2390	25	0.21	10.3	8

表 2 3 种套管在不同温度下的弹性模量

Table 2 Elastic modulus of three types of casing under different temperatures

套管类型	弹性模量 E/GPa			
	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
N80	161.18	148.18	135.18	122.18
TP90H	170.75	163.25	155.75	148.25
P110	183.51	177.51	171.51	165.51

2.1 径向热应力与热位移分布

图 2 为不同温度下 API P110, 9.19 mm 套管的热应力和热位移径向分布曲线。可以看出: 最大 Von

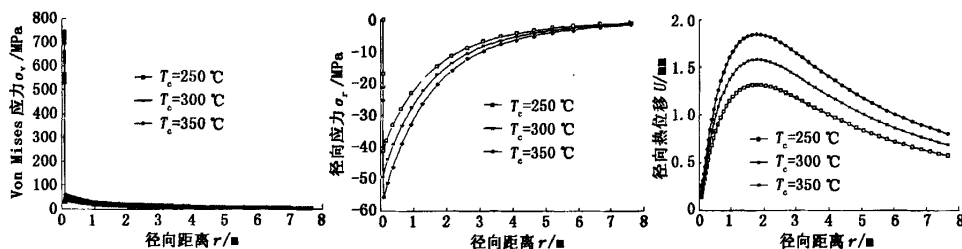


图 2 套管-水泥环-地层热应力和径向热位移分布

Fig.2 Thermal stress and radial displacement distributions for casing-cement-formation coupling system

2.2 套管材料参数对套管热应力的影响

2.2.1 壁厚

图 3 为套管温升 300 °C 时套管壁厚(δ) 对套管热应力的影响曲线。可以看出, 随着套管壁厚的增加, 套管内壁 Von Mises 应力减小, 壁厚从 6.91 mm 增加到 13.72 mm 时, N80, TP90H 和 P110 套管 Von Mises 应力减小幅度分别为 7.92%, 8.29% 和

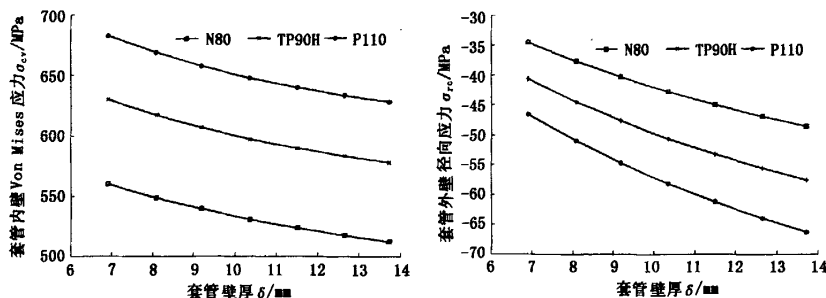


图 3 套管壁厚对套管热应力的影响

Fig.3 Effects of casing wall thickness on casing thermal stress

2.2.2 热膨胀系数

如图 4 所示, 随着热膨胀系数的增大, 套管内壁 Von Mises 应力和外壁径向压力呈线性增加。当热膨胀系数从 $0.8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 增大到 $1.6 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 时, 套管内壁热应力和外壁径向压应力增加近 1 倍。热

Mises 热应力出现在套管内壁, 随径向距离的增加, 应力值迅速下降, 在第一胶结面, 应力值出现突变, 介质弹性模量差异是引起突变的主要原因; 径向热位移随径向距离的增大先增大后减小, 最大值出现在地层中; 径向压应力(负值) 先增大后减小, 最大值位于套管外壁, 当套管温升 $T_c = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, 最大径向应力值达到 56 MPa, 如果超过套管抗挤强度, 将导致套管失效。因此, 在热采井套管强度设计与校核中, 应考虑热膨胀产生的套管径向压力对套管强度的影响。

8.47%, 增加套管壁厚可提高热采井套管抗屈服破坏能力。但由于套管壁厚增加, 径向热膨胀位移增大, 所以套管外壁径向应力增大。同时, 套管钢级越高, 其弹性模量越大, 热应力也越大。因此, 考虑增加套管钢级和壁厚来提高套管抗失效能力要考虑其热应力的负面效应。

膨胀系数是一个影响套管热应力的敏感参数, 在进行套管设计时, 要准确获取其数值及其随温度、套管类型的变化规律。对热采井而言, 热膨胀系数越小越好, 在进行套管选材时, 尽量选用热膨胀系数小的钢材。

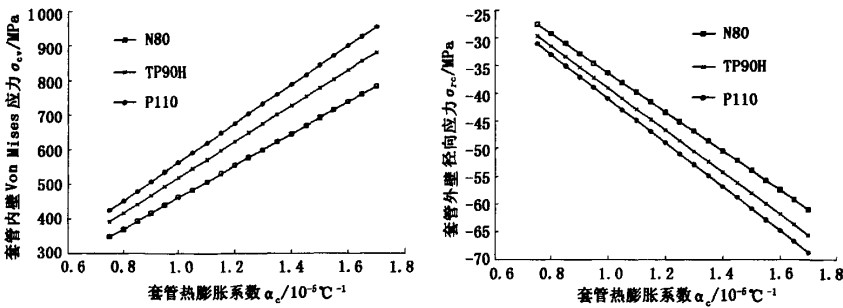


图4 套管热膨胀系数对套管热应力的影响

Fig.4 Effects of casing thermal expansion coefficient on casing thermal stress

2.2.3 弹性模量

图5为不同温度下套管热应力随套管弹性模量的变化曲线。随着套管弹性模量的降低,套管热应力降低,两者之间呈线性变化关系。套管弹性模量主要受温度的影响,随温度的增加,套管弹性模量减

小,使套管热应力降低,但温度的升高又使套管热应力增大。因此,在考虑温度对热应力影响的同时还须考虑温度对弹性模量的影响,两者对套管热应力影响的方向相反。在保证套管屈服强度的条件下,热采井应使用低弹性模量的套管材料。

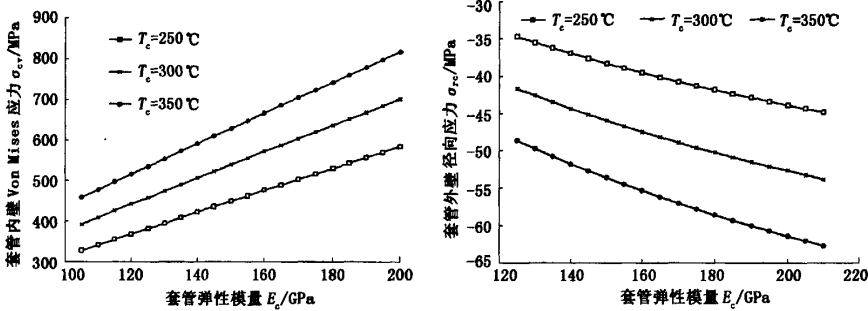


图5 套管弹性模量对套管热应力的影响

Fig.5 Effects of casing elastic modulus on casing thermal stress

2.3 水泥环和地层弹性参数对套管热应力的影响

2.3.1 水泥环弹性参数对套管热应力的影响

图6为套管升温300℃时水泥环弹性模量对P110套管热应力的影响曲线。随着水泥环弹性模量和泊松比的增加,套管热应力略有增加,泊松比对

热应力的影响随水泥环弹性模量的增加而逐渐减小。因此,在热采井水泥浆设计中,主要考虑温度对水泥强度衰减的影响,通过调整水泥石弹性参数(如加砂塑性水泥)来减小套管热应力的效果不会明显。

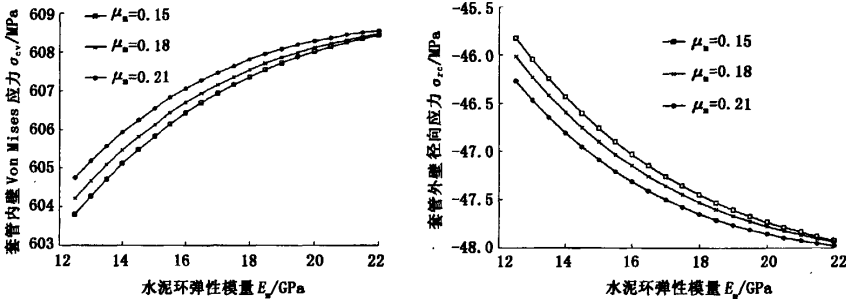


图6 水泥环弹性模量对套管热应力的影响

Fig.6 Effects of cement elastic modulus on casing thermal stress

2.3.2 地层弹性参数对套管热应力的影响

图 7 为套管温升 300 °C 时地层弹性模量对 P110 套管热应力的影响曲线。随着套管弹性模量

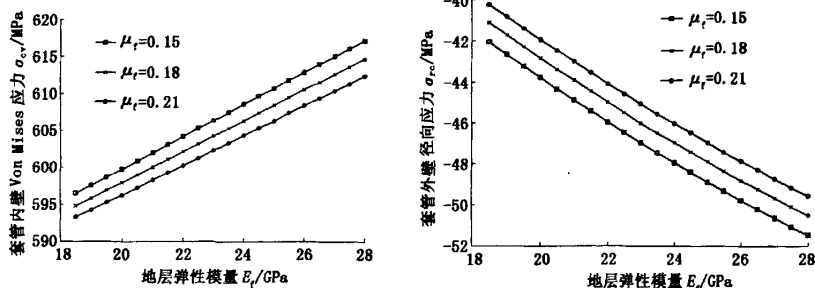


图 7 地层弹性模量对套管热应力的影响

Fig. 7 Effects of formation elastic modulus on casing thermal stress

2.4 套管温升对套管热应力的影响

图 8 为 P110 套管热应力随套管温升的变化曲

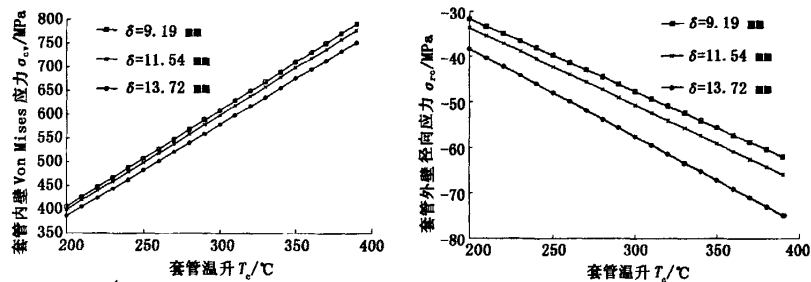


图 8 套管温升对套管热应力的影响

Fig. 8 Effects of casing temperature increment on casing thermal stress

3 结 论

(1) 套管-水泥环-地层耦合系统最大 Von Mises 热应力出现在套管内壁,随径向距离的增加,应力值迅速下降,在第一胶结面,应力值出现突变,介质弹性模量差异是引起突变的主要原因。径向热位移随径向距离的增加先增大后减小,最大值出现在地层中,而径向压应力先增大后减小,最大值位于套管外壁。

(2) 随套管温升和套管、水泥环、地层 3 种介质弹性模量与热膨胀系数的增加,套管内壁 Von Mises 应力和外壁径向压力增大,其中套管参数变化对计算结果影响更明显。

(3) 若水泥环胶结良好,稠油热采井在注汽过程中套管外壁将产生较大的径向压应力,在进行套管抗挤毁强度计算时须考虑该应力的影响。

的增加,套管热应力增大。泊松比越小,应力值越大。因此,在进行热采井套管强度设计与校核时,须考虑地层弹性参数的影响。

随着套管温升的增加,套管热应力呈线性增加。温度是影响套管热应力的主要因素。

参考文献:

- [1] 崔孝秉, 曹玲, 张宏. 注蒸汽热采井套管损坏机理研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1997, 21(3): 57-64.
CUI Xiao-bing, CAO Ling, ZHANG Hong. New development of the study on casing failure mechanism for the production wells stimulated with steam injection [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1997, 21(3): 57-64.
- [2] 王兆会, 高德利. 热采井套管损坏机理及控制技术研究进展[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 46-48.
WANG Zhao-hui, GAO De-li. The casing damage mechanisms and its control in thermal recovery wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 46-48.
- [3] 宋治, 冯耀荣. 油井管与管柱技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.

- [4] 张宇,况雨春,伍开松. 基于有限元法的热采井套损机理研究[J]. 钻采工艺, 2008, 31(4): 102-104.
ZHANG Yu, KUANG Yu-chun, WU Kai-song. Research on casing failure mechanism of thermal production well based on finite element method [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(4): 102-104.
- [5] JIANG Wu. Casing temperature and stress analysis in steam-injection wells[R]. SPE 103882, 2006.
- [6] GARSIDE R, PATTILLO P D, SATHUVALLI U B. Special issues in the stress analysis of casing strings in steam injection wells; mathematical development and design [R]. SPE 105930, 2007.
- [7] 邓虎. 热采井中套管偏心对井筒温度场和应力场的影响研究[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(3): 6-9.
DENG Hu. Effect caused by casing eccentricity in thermal well on wellbore temperature field and stress field [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(3): 6-9.
- [8] 宋洵成,赵洪山,管志川. 稠油热采井套管的预应力分析[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(4): 64-67.
SONG Xun-cheng, ZHAO Hong-shan, GUAN Zhi-chuan. Prestress analysis of casing strings in heavy oil thermal production wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(4): 64-67.
- [9] JIANG Wu, GONZALEZ M E, HOSN N. Steam injection casing design[R]. SPE 93833, 2005.
- [10] 王兆会,马兆忠. 热采井温度对套管性能的影响及预应力值计算方法[J]. 钢管, 2007, 36(4): 24-27.
WANG Zhao-hui, MA Zhao-zhong. Effect by thermal well temperature on casing properties and calculation method for pretension [J]. Steel Pipe, 2007, 36(4): 24-27.
- [11] 李子丰,马兴瑞,黄文虎. 热采井套管柱力学分析[J]. 工程力学, 1998, 15(2): 19-26.
LI Zi-feng, MA Xing-rui, HUANG Wen-hu. Mechanical analysis of casing in thermal recovery wells [J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(2): 19-26.
- [12] 徐秉业,王建学. 弹性力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [13] 余中红,刘大伟,王立洋. 注蒸汽井套管应力数值计算与工业应用[J]. 力学与实践, 2008, 30(1): 66-69.
YU Zhong-hong, LIU Da-wei, WANG Li-yang. Numerical simulation and industrial application of the casing production stress inside steam injection wells [J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(1): 66-69.

(编辑 李志芬)

(上接第62页)

- [4] 马辉,宋瑞霞,王小春. V描述子与B样条曲线[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(11): 1717-1722.
MA Hui, SONG Rui-xia, WANG Xiao-chun. V-descriptor and B-spline [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(11): 1717-1722.
- [5] SONG Rui-xia, LIANG Yan-yan, WANG Xiao-chun, et al. Elimination of gibbs phenomenon in computational information based on the V-system [C]//HU Bin. Proceedings of the Second International Conference on Pervasive Computing and Applications. Birmingham: IEEE Press, c2007: 337-341.
- [6] SONG Rui-xia, OU Mei-fang. The application of V-system in the digital image transform [C]//LIU Yun-hui. Proceedings of the IEEE International Conference on Information Acquisition. Beijing: IEEE Press, c2008: 296-301.
- [7] 欧梅芳,宋瑞霞. V系统在图像消噪中的应用 [C]//彭群生. 全国第十五届计算机辅助设计与图形学学术会议论文集, 北京:机械工业出版社, c2008: 599-602.
- [8] JENNIFER Market, CRAIG Barnett, RON Deady, et al. New processing techniques to meet challenges of LWD acoustic logging [R]. SPE 71731, 2001.
- [9] DONOHO D L. Denoised by soft threshoding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41: 613-627.
- [10] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81: 425-455.
- [11] SHARK L K, YU C. Denoising by optimal fuzzy thresholding in wavelet domain [J]. IEEE Electron Lett, 2000, 36(6): 581-582.
- [12] LIU Z G, QIAN Q Q. Adaptive shrinkage noising method of fault transient signals with multi-wavelets [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(7): 878-880.
- [13] TAO G, HE F J, YUE W Zh, et al. Processing of array sonic logging data with multi-scale STC technique [J]. Petroleum Science, 2008, 5(3): 238-241.

(编辑 修荣荣)