

气体钻井井底岩石热应力分析

仇洪云, 高德利, 郭柏云

(中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要:为研究焦耳-汤姆逊冷却效应产生的低温气体与地层的传热现象,采用热传导和热弹性理论方法求得井底温度,建立井底岩石稳态温度和热应力分布模型,并分析井底岩石稳态和非稳态情况下温度和热应力的分布规律。结果表明:井底附近岩石存在低温区,径向热应力和由负压差产生的“拉应力”叠加之后加强了井底岩石向井眼变形的趋势,促使井底岩石破裂;井底岩石热应力随井底气体温度降低而增大,保持适当的井底温度有利于钻头破碎岩石及机械钻速提高;时间对于井底岩石热应力的影响较大,在研究井底低温问题时不可忽略其影响。

关键词:钻井; 焦耳-汤姆逊冷却效应; 温度; 热应力

中图分类号: TE 21

文献标志码: A

Thermal stress analysis on bottom hole rock in gas drilling

ZHANG Hong-yun, GAO De-li, GUO Bo-yun

(Key Laboratory of Petroleum Engineering of Ministry of Education in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Heat transfer phenomena between low temperature gas caused by Joule-Thomson cooling effect and formation were studied. The bottom hole temperature was calculated by heat conduction and thermoelasticity theory method. A steady state temperature and thermal stress distribution model of bottom hole rock was developed, and the distribution laws of bottom hole rock temperature and thermal stress under steady and unsteady state were analyzed. The results show that a low temperature zone exists near bottom hole, the radial thermal stress together with the tensile stress generated by negative pressure difference enhances the bottom hole rock deformation to the wellbore and leads to rock breaking. The bottom hole rock thermal stress increases with bottom hole gas temperature decreasing, and maintaining certain bottom hole temperature helps rock breaking and the penetration rate increase. Time has a major influence on bottom hole rock thermal stress, and the effect of time can't be ignored when the low temperature bottom hole problems are studied.

Key word: drilling; Joule-Thomson cooling effect; temperature; thermal stress

钻井过程中,温度的影响研究主要集中在井筒流体和地层传热方面^[1-3],也有研究井壁围岩温度变化引起的热应力对井壁周围应力分布的改变^[4-6],气体自钻头喷嘴喷出后发生焦耳-汤姆逊冷却效应,井底低温气体与地层岩石发生热传导,由于岩石变形受到限制而产生的热应力并没有引起足够的重视。目前用试验方法研究井底应力场比较困难,主要通过数值方法^[7-8],且很少涉及到热应力。笔者从理论分析角度考虑井底焦耳-汤姆逊冷却效应,建立井底岩石稳态温度和热应力分布模型,并与井底

岩石非稳态温度和热应力分布模型进行对比,分析低温效应对井底岩石热应力分布的影响。

1 数学模型

1.1 井底温度

钻井过程中,气体通过钻杆从钻头喷嘴喷出的过程可视为渐缩喷嘴流动,对于不同的钻井流体可能产生超声速、声速、亚声速流动。声速流是否存在取决于喷嘴下游与上游压力比,如果这个比值小于

收稿日期:2012-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51221003;51274220;51174220);国家“973”重点基础研究发展计划(2010CB226703);中国石油科技创新基金项目(2011-5006-0310)

作者简介:仇洪云(1981-),女,博士研究生,研究方向为油气井力学与控制工程。E-mail:zhanghoy@163.com。

临界压力比就会产生声速或超声速流动,大于临界压力比时会产生亚声速流动。由于在声速或者超声速条件下,喷嘴处存在压力间断,容易出现井下事故,并且气体钻井中钻井流体主要用来清洗井底、携带岩屑,因此在气体钻井过程中一般要保持亚声速流动。

井底温度受井口注入温度、地温梯度、井深、钻井液的热学性质等多种因素的影响。在气体钻井中井底温度比地层温度低很多,因为在钻头喷嘴处发生了焦耳-汤姆逊冷却效应,气体通过钻头喷嘴后产生压力损失,体积突然膨胀导致气体温度下降。假设通过钻头喷嘴是一个理想气体等熵流动过程,气体以声速、亚声速通过钻头喷嘴时,喷嘴下游温度^[9]为

$$T_{\text{dn}} = T_{\text{up}} \left(\frac{p_{\text{dn}}}{p_{\text{up}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (1)$$

式中, T_{up} 和 T_{dn} 分别为钻头上、下游温度, K; p_{up} 和 p_{dn} 分别为钻头上、下游压力, N/m^2 ; k 为绝热指数。

气体以声速通过钻头喷嘴,钻头下游气体的绝对温度约下降 17%。上游温度为 54 °C 时,钻头下游温度达到 0 °C,如果地层中有水,就会出现“冰包”。当钻头上下游压力比大于临界压力比,气体以亚声速通过钻头喷嘴,上游温度为 52 °C 时,钻头下游温度达到 0 °C。当气体亚声速通过钻头时,钻头上下游压力比越大,上游温度越低,钻头下游温度越容易达到 0 °C。亚声速流动比声速流动更容易使得钻头下游温度达到 0 °C,也就是出现“冰包”、“泥包”钻头的可能性要大些。气体钻井过程中应该控制井底温度,降低出现井下事故的可能。

当钻头处于某一深度时,钻头上游的温度可能比地层温度低,气体经过钻头喷嘴后的温度要低于钻头上游温度,低温气体携岩上返对钻头又是一个冷却降温的过程。井底岩石温度高于井底温度,会在井底附近产生较高的温度梯度。

1.2 井底岩石热应力模型

1.2.1 稳态井底岩石热应力

计算井底岩石热应力首先应该确定井底岩石温度分布。经过焦耳-汤姆逊冷却效应产生的低温气体作用在井底,与井底岩石之间存在热量传递,井底岩石温度仅沿半径方向变化。

假设:地层岩石导热系数为常量;地层岩石初始时刻温度和无穷远处温度均匀,为原始地温,并且地层内无内热源产生热量;导热过程开始时井底壁面温度保持恒定。

井底岩石的温度分布模型见图 1。井底岩石温度分布可用球坐标系下的岩石温度 T 、半径 r 表示。

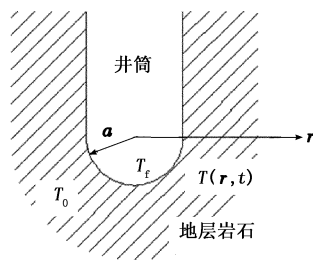


图 1 井底岩石温度分析模型

Fig. 1 Analysis model of bottom hole rock temperature

井底岩石温度分布为

$$\frac{2}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} = 0. \quad (2)$$

整理式(2)并积分得

$$T = A + \frac{B}{r}. \quad (3)$$

设井底温度为 T_f , 初始地层温度为 T_0 , 则当 $r = a$ 时, $T = T_f$; 当 $r = b$ 时, $T = T_0$, 其中 b 为某时刻温度影响到的球坐标半径, m; a 为井眼半径, m。将该边界条件代入式(3), 可以求出 A 、 B 表达式为

$$A = T_f - \frac{b(T_f - T_0)}{b - a}, B = \frac{ab(T_f - T_0)}{b - a}.$$

将 A 、 B 表达式代入式(3), 得到井底岩石温度分布的表达式为

$$T = T_f - \frac{b(T_f - T_0)}{b - a} \left(1 - \frac{a}{r} \right).$$

基于井底温度分布的假设, 球体中的温度场沿半径方向变化, 产生球对称温度场。采用热弹性理论的方法可得井底岩石热应力表达式为

$$\sigma_r = \frac{2\beta E}{1 - \nu} \left[\frac{r^3 - a^3}{(b^3 - a^3)r^3} \int_a^b \left[T_f - \frac{b(T_f - T_0)}{b - a} \left(1 - \frac{a}{r} \right) \right] \times r^2 dr - \frac{1}{r^3} \int_a^r \left[T_f - \frac{b(T_f - T_0)}{b - a} \left(1 - \frac{a}{r} \right) \right] r^2 dr \right].$$

$$\sigma_\tau = \frac{\beta E}{1 - \nu} \left[\frac{2r^3 + a^3}{(b^3 - a^3)r^3} \int_a^b \left[T_f - \frac{b(T_f - T_0)}{b - a} \left(1 - \frac{a}{r} \right) \right] \times r^2 dr + \frac{1}{r^3} \int_a^r \left[T_f - \frac{b(T_f - T_0)}{b - a} \left(1 - \frac{a}{r} \right) \right] r^2 dr - T \right].$$

当 $b \rightarrow \infty$ 时, 整理后得

$$\sigma_r = - \frac{2\beta E}{1 - \nu} \frac{1}{r^3} \int_a^r \frac{a}{r} (T_f - T_0) r^2 dr,$$

$$\sigma_\tau = \frac{\beta E}{1 - \nu} \left[\frac{1}{r^3} \int_a^r \frac{a}{r} (T_f - T_0) r^2 dr - \frac{a}{r} (T_f - T_0) \right].$$

式中, β 为热膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$; E 为弹性模量, MPa; ν 为地层泊松比。

1.2.2 非稳态井底岩石热应力

考虑时间对井底岩石温度分布的影响,井底岩石温度随井底壁面温度作用时间和径向距离变化。在一定时间限度内,边界面处的温度影响深度有限,在这个深度以外,地层仍保持原有状态。井底壁面与井底岩石的热量传递简化为一维非稳态导热问题来处理,可以得到井底岩石温度分布模型^[10]为

$$T(r, t) = \frac{a}{r} (T_i - T_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{r-a}{2\sqrt{\alpha t}} \right) + T_0.$$

其中

$$\alpha = \lambda / (\rho c), T_0 = T_b + GD.$$

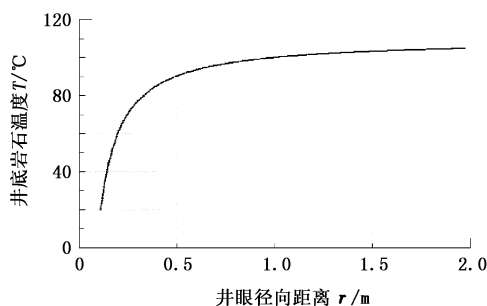
式中, λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; α 为导温系数, m^2/s ; T_b 为地表温度, $^\circ\text{C}$; G 为地温梯度, $^\circ\text{C}/\text{m}$; D 为井深, m ; t 为时间。

参照稳态热应力求解方法得到的非稳态井底岩石热应力为

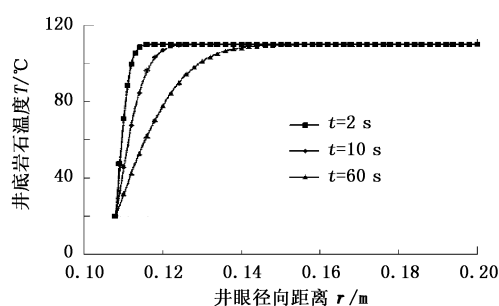
$$\sigma_r = \frac{2\beta E}{1-\nu} \left[\frac{r^3 - a^3}{(b^3 - a^3)r^3} \int_a^b \Delta T r^2 dr - \frac{1}{r^3} \int_a^r \Delta T r^2 dr \right],$$

$$\sigma_\tau = \frac{2\beta E}{1-\nu} \left[\frac{2r^3 + a^3}{2(b^3 - a^3)r^3} \int_a^b \Delta T r^2 dr + \frac{1}{2r^3} \int_a^r \Delta T r^2 dr - \frac{1}{2} \Delta T \right].$$

当 $b \rightarrow \infty$ 时,



(a) 稳态井底岩石温度



(b) 非稳态井底岩石温度

图2 井底岩石温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of bottom hole rock

由于岩石热传导系数很小,井底附近岩石存在很大的温度梯度,在井眼径向距离很小的范围内迅速达到初始地层温度。井底附近岩石温度变化用初始地层温度与某一时刻地层温度差来描述,如表1所示。

气体钻井中钻头敲击旋转钻进,钻头下方处于压缩状态的岩石破碎,在焦耳-汤姆逊冷却效应作用下井底温度低于地层岩石温度,在温差作用下发生热传导后井底附近岩石温度降低,从而地层岩石温度低于远离井底的地层岩石温度。由于上覆岩层被打开,井底壁面岩石变形不受限制,无径向热应力

$$\sigma_r = -\frac{2\beta E}{1-\nu} \frac{1}{r^3} \int_a^r \Delta T r^2 dr,$$

$$\sigma_\tau = \frac{\beta E}{1-\nu} \left[\frac{1}{r^3} \int_a^r \Delta T r^2 dr - \Delta T \right].$$

式中, ΔT 为某一时刻地层温度与初始地层温度之差, $^\circ\text{C}$ 。

2 算例分析

某气藏井深 3.0 km, 井眼直径 0.216 m, 地层岩石密度 $2.52 \text{ g}/\text{cm}^3$, 比热容为 $0.82 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$, 热传导系数 $3.42 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 地温梯度 $0.03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$, 地表温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 地层泊松比 0.251, 弹性模量 34.7 GPa , 热膨胀系数 $1 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

温度模型采用球坐标, 选取井眼径向距离分析井底岩石温度变化(图2)。由图2可以看出: 稳态井底岩石温度随着径向距离增大逐渐升高, 而后逐渐接近初始地层温度, 表明由于井底低温气体和地层岩石发生热传导, 井底附近岩石在一定范围内存在低温区, 形成了由井底到无限远处温度逐渐升高直至达到地层初始温度的分布曲线; 非稳态井底岩石温度分布受时间的影响尤为明显, 随着时间的增加低温影响范围扩大, 逐渐影响到离井底较远的岩石温度。

产生。井底附近岩石温度降低后较之没有发生热传导之前产生收缩, 井底岩石初始的压缩状态发生变化, 地层在负压差条件下产生向井内的“拉应力”, 使得地层岩石变形受到限制, 产生热应力。

图3为稳态和非稳态情况下井底岩石径向热应力分布。井底岩石受到的径向热应力随井底距离的增加而增大, 达到最大值后随着径向距离增大而逐渐减小, 存在一个峰值。由图2可以看到 $t=2 \text{ s}$ 时, 在井底径向距离 0.11 m 处温度已经降为原始地层温度, 图3中井底径向距离 0.11 m 处径向热应力也下降到零, 说明温差对井底岩石热应力的影响显著。

当钻头钻速 10 m/s、 $t=2$ s 时,钻进深度 0.005 m,径向热应力数值最大处距离井底 0.002 m,说明钻头钻进过程中会钻遇径向热应力最大处,对于钻头破岩有利。

表 1 井底岩石温差计算值

Table 1 Computing value of bottom hole rock temperature difference

径向距离 r/m	井底岩石温差 $\Delta T/^\circ\text{C}$			
	$t=2\text{ s}$	$t=10\text{ s}$	$t=60\text{ s}$	稳态
0.112	10.5	42.3	67.4	86.8
0.116	0.1	13.8	48.7	83.8
0.120	0.0	3.0	32.0	81.0
0.124	0.0	0.4	20.1	78.4
0.128	0.0	0.0	11.9	75.9
0.132	0.0	0.0	6.6	73.6

气体钻井过程中,井底压力变小,随着钻头钻进,地层岩石应力状态发生改变。井底岩石从初始

的压缩状态变为在很大负压差条件下产生向井内的拉伸状态,由于岩石抗拉强度低于抗压强度,使得这个拉应力有促使井底岩石脱离井底的趋势。气体钻井压持作用很小,岩石被打开后硬度会大大降低。井底由于温度变化产生的径向热应力在井底沿径向存在拉应力,与由于负压差产生的“拉应力”叠加之后加强了井底岩石向井眼变形的趋势,促进井底岩石破裂。

图 4 为井底岩石切向热应力分布。从图 4 可以看出,井底壁面处切向热应力最大,随着距井底距离的增加切向热应力减小,直到减小为零,非稳态切向热应力减小速度快于稳态切向热应力,由于不考虑时间的影响,稳态切向热应力曲线趋势较为平缓,影响范围也较大。切向热应力最大值超过 400 MPa,而一般岩石抗压强度小于 350 MPa,因此不能忽视切向热应力对岩石破裂的影响。

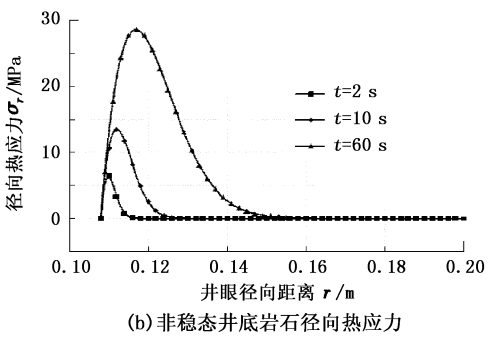
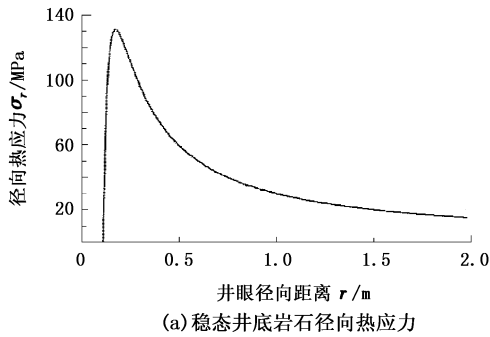


图 3 井底岩石径向热应力分布
Fig. 3 Radial thermal stress distribution of bottom hole rock

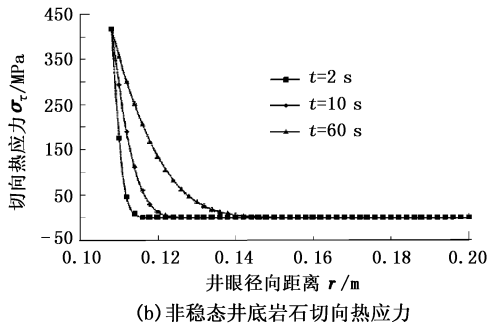
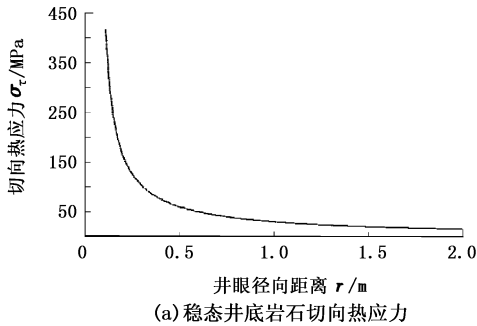


图 4 井底岩石切向热应力分布
Fig. 4 Tangential thermal stress distribution of bottom hole rock

由于井底壁面处不存在径向热应力,切向热应力最大,观察井底温度与井底岩石切向热应力之间关系可以看到,随着井底气体温度降低,在井底壁面处的切向热应力增大。气体钻井中随着井底压力降低,井底岩石沿井底方向上产生膨胀变形,从而出现微裂纹^[12]。钻头对井底岩石进行敲击,使得岩石裂

纹进一步扩大延伸,牙齿吃入岩石进行旋转,岩石产生炸裂。井底由于温度变化产生的切向热应力数值很大,并且在井底壁面处最大,有利于岩石剪切破碎。与井底岩石受到的地应力叠加之后增大井底岩石受到的地应力作用,很大程度上促进了钻头破岩,提高了气体钻井机械钻速。

3 结 论

(1)井底低温气体和地层岩石发生热传导,使得井底附近岩石存在很大的温度梯度,在一定范围内存在低温区。岩石热传导系数较小,在较短的时间内井底低温影响范围很小,随着时间延长低温影响范围逐渐扩大。

(2)井底岩石由于温度变化产生的径向热应力在井底沿径向形成拉应力,与由负压差产生的“拉应力”叠加后加大了井底岩石向井眼变形的趋势,促进了井底岩石破裂。切向应力在井壁面处最大,且数值较大,有利于剪切破碎,因此在判断岩石破裂时应考虑热应力的影响。

(3)井底岩石热应力随着井底气体温度降低而增大,保持适当的井底温度有利于井底岩石破裂,提高机械钻速。

(4)时间对于井底岩石热应力的影响较大,在研究井底低温问题时不可忽略时间因素的影响。

参考文献:

- [1] RAMEY H J. Wellbore heat transmission[R]. SPE 96, 1962.
- [2] WILLHITE G P. Over-all heat transfer coefficients in stream and hot water injection wells [R]. SPE 1449, 1967.
- [3] ROMERO J. Temperature prediction for deep-water wells; a field validated methodology [R]. SPE 49056, 1998.
- [4] DUSSEAUULT M B. Stress changes in thermal operations [R]. SPE 25809, 1993.
- [5] VINCENT M, IDELOVICI J L. Safe drilling of HP/HT wells, the role of the thermal regime in loss and gain phenomenon[R]. SPE/IADC 29428, 1995.
- [6] 蔚宝华,卢晓峰,王炳印,等. 高温井地层温度变化对

井壁稳定性影响规律研究[J]. 钻井液与完井液, 2004, 24(6):15-18.

WEI Bao-hua, LU Xiao-feng, WANG Bing-yin, et al. Law of temperature influence on wellbore stability in hot well [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004, 24(6):15-18.

- [7] 彭烨,沈忠厚,樊胜华,等. 基于开挖方法的井底应力场有限元模型[J]. 石油学报, 2006, 27(6):133-140.

PENG Ye, SHEN Zhong-hou, FAN Sheng-hua, et al. Finite element model for analyzing stress field of bottom hole based on excavating method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6):133-140.

- [8] 王敏生,唐波. 井底应力场对气体钻井井斜的影响[J]. 岩体力学, 2009, 30(8):2436-2441.

WANG Min-sheng, TANG Bo. Effects of stress field in bottom hole on borehole deviation during gas drilling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2436-2441.

- [9] LYONS William C, GUO Boyun, SEIDEL Frank A. 空气和气体钻井手册[M]. 曾义金,樊洪海,译. 北京:中国石化出版社, 2006.

- [10] ZHANG Hui, ZHANG Hongyun, GUO Boyun, et al. Analytical and numerical modeling reveals the mechanism of rock failure in gas UBD [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012(4):29-34.

- [11] 楼一珊,金业权. 岩石力学与石油工程[M]. 北京:中国石化出版社, 2006.

- [12] 刘永贵,王洪英. 徐深气田气体钻井破岩机理的初步研究[J]. 石油学报, 2008, 29(5):773-776.

LIU Yong-gui, WANG Hong-ying. Initial research on rock-breaking mechanism for gas drilling in Xushen Gas Field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5):773-776.

(编辑 李志芬)

深部盐膏岩地层套管磨损后等效应力分析

葛伟凤¹, 陈 勉¹, 金 衍¹, 卢运虎¹, 张 飞², 侯 冰¹

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油集团海洋工程有限公司 天津分公司, 天津 300451)

摘要:针对盐膏层蠕变和套管磨损联合作用下套管变形破坏的关键技术难题,结合室内盐岩蠕变试验,确定盐膏岩的蠕变参数,考虑盐膏层蠕变的影响,研究深部盐膏层非均匀地应力条件下蠕变、磨损程度、磨损位置对套管等效应力的影响。结果表明:蠕变在一定程度上降低了磨损套管抵抗外部载荷的能力,套管等效应力的非均匀性增强;随着蠕变时间的增加,套管等效应力逐渐增加,在 1 a 左右达到平衡;套管磨损越深,套管的等效应力越大且非均匀性越强;磨损位置明显改变了套管等效应力的分布规律,沿最小地应力方位磨损时,套管等效应力最大,最容易屈服;磨损位置不同时,只有当磨损程度较小时套管最大等效应力才出现在水平最小地应力方位;沿 0° 方向磨损时,只有当磨损程度较小时才会有“套管最大等效应力随磨损程度变化不大”的结论。

关键词:盐岩蠕变; 磨损程度; 磨损位置; 套管等效应力

中图分类号:TE 256 **文献标志码:**A

Analysis of equivalent stress on casings after casing wear in deep salt-gypsum formation

GE Wei-feng¹, CHEN Mian¹, JIN Yan¹, LU Yun-hu¹, ZHANG Fei², HOU Bing¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. China National Petroleum Offshore Engineering Company Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300451, China)

Abstract: Aimed to the problems of casing collapse induced by the combined effect of salt-gypsum creep and casing wear, the creep parameters of the salt-gypsum formation were determined by salt creep experiments. The effects of salt creep, wear rate and wear position on the equivalent stress on casings were analyzed by considering rock salt creep in non-uniform in-situ stress field. The results show that the ability resisting external loads of worn casing is reduced by formation creep, and the nonuniformity of equivalent stress on casings increases. The equivalent stress on casings increases gradually with creep time increasing and reaches balance in one year or so. The equivalent stress on casings and its nonuniformity increase with the wear depth increasing. The distribution of equivalent stress on casing varies with the casing wear position, and when the wear position locates along the direction of the minimum in-situ stress, equivalent stress on casing could be the largest which leads to the casing being failed more easily. The maximum equivalent stress on casings is in the direction of the minimum horizontal stress when the casing has a little wear. When the wear position locates along the direction of the maximum in-situ stress, the variation of the equivalent stress on casing with the wear rate is small only when the casing has a little wear.

Key words: rock salt creep; wear rate; wear position; equivalent stress on casings

在油气钻井中,套管起着保护井眼、隔绝油、气、水层及封固各种复杂地层的作用。深部盐膏层钻井过程中,技术套管下入之后需要继续钻进,由于钻柱转速低、摩擦阻力大且钻进时间长,致使钻柱与套管的磨损都十分严重。而且由于井深较大,致使钻柱

作用在套管上的侧向力变大,很容易造成套管磨损程度超出所允许的极限^[1-3]。磨损后的套管壁厚减薄且不均匀,各种强度以及抗腐蚀能力都有所降低,而套管又无法更换。若对磨损分析不准,极易导致套管损坏或试油事故甚至全井报废,造成巨大的经