◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.201406009

压力和温度共同作用下的水泥环应力分析

许红林，张 智，施太和，熊继有

（油气藏地质及开发工程国家重点实验室（西南石油大学），四川成都 610500）

摘 要：高温高压井中井筒压力和温度变化较大，会给水泥环的力学性能带来严重影响。基于弹性力学多层厚壁圆筒理论，建立了耦合压力、温度的水泥环力学理论模型，研究了水泥环中径向应力和切向应力的分布规律。研究表明：持续套管压力值为 10～50 MPa 且井筒温度变化值为－50～50 ℃时，水泥环总体上沿径向受压，沿切向受拉，二者最大值均位于水泥环内壁；井筒温度变化值一定时，水泥环中径向压应力和切向拉应力随持续套管压力值的增大而增大；持续套管压力值一定时，水泥环中径向压应力和切向拉应力随井筒温度的升高而增大，随井筒温度降低而减小；井筒温度升高会加剧水泥环的切向受拉失效风险，井筒温度降低却可能导致水泥环径向密封失效。因此，高温高压井应考虑井筒温度变化对水泥环应力的影响，建议采用低弹性模量水泥浆固井，并提高水泥环与套管和地层的胶结强度，以提高水泥环的整体力学性能。

关键词：高温 高压 水泥环 理论模型 应力分析

中图分类号：TE26 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-0890(2014)06-0045-04

Stress Analysis of the Cement Sheath under both Pressure and Temperature

Xu Honglin, Zhang Zhi, Shi Taihe, Xiong Jiyou

(*State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation*(*Southwest Petroleum University*), *Chengdu*, *Sichuan*, 610500, *China*)

Abstract: Significant changes of the wellbore pressure and temperature in HPHT wells may bring great challenges to the mechanical integrity of the cement sheath. On the basis of the multi-layer thick wall cylinder theory of elastic mechanics, this paper proposed a mechanical theoretical model of cement sheath under both pressure and temperature, and investigated the distribution of radial and tangential stresses within cement sheath. Results of studies demonstrate that when the sustained casing pressure (SCP) is 10-50MPa and wellbore temperature change (WTC) is －50-50℃, the cement sheath is generally radially compressed and tangentially tensioned, and the maximum compressed and tangential stresses are both at the inner wall of the cement sheath. When the WTC keeps constant, both stresses increase with the increase of the pressure inside the casing. When the SCP is constant, both stresses increase with the increase of the WTC and decrease with the decrease of the WTC. A wellbore temperature increase will aggravate the possibility of tangential tensile failure in cement sheath, and a wellbore temperature decrease will lead to its failure due to radial tension. Consequently, wellbore temperature changes should be considered for their effect on the stress of the cement sheath, and the cement with lower elastic modulus and higher bond stength with casing and formation should be used to enhance the comprehensive mechanical performance of cement sheath in HPHT wells.

Key words: high temperature; high pressure; cement sheath; theoretical model; stress analysis

高温高压井在井下作业和正常生产时，井筒压力和温度会发生大幅度变化，影响水泥环的机械性能和密封性能。水泥环密封失效可导致层间气窜、环空带压和套管损坏，酸性气田还可能对环境造成污染，给公众带来危害[1]。因此，研究水泥环的应力分布规律，对于提高高温高压井中水泥环的完整性、降低环空带压风险、保证气井长期安全生产具有重要意义[2-3]。目前，基于套管-水泥环-地层耦合作用的水泥环力学理论模型[4-10]较多，但很少同时考虑压力和温度。Li Yong 等人[8]建立了非均匀地应力下耦合压力和温度的水泥环力学模型，该模型考虑的因素比较全面，但计算相对复杂。为此，笔者针对高温高压井的特点，基于弹性力学多层厚壁圆筒理论，假设井筒温度沿径向均匀变化，建立了耦合压力和温度且较为简洁的水泥环力学理论模型，分析了水泥环中径向应力和切向应力的分布规律，并提出了保护水泥环完整性的措施。

收稿日期：2014-02-13；**改回日期**：2014-10-12。

作者简介：许红林（1986—），男，四川仪陇人，2009 年毕业于西南石油大学石油工程专业，2012 年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位，在读博士研究生，主要从事油气井工程力学、复杂结构井理论与技术等方面的研究。

联系方式：13880081258，xuhlaca1986_jy@163.com。

通讯作者：张智，wisezh@126.com。

基金项目：国家自然科学基金项目“含 H_2S/CO_2 气井套管环境敏感断裂力学行为判据研究”（编号：51244007）部分研究内容。

1 水泥环力学模型

1.1 基本假设

水泥环处于套管和地层岩石之间，水泥浆凝固后套管、水泥环和地层岩石可视为一个复合圆筒。为方便建立模型，特作如下假设：1）套管、水泥环、地层岩石均为均质各向同性材料；2）套管无缺陷、水泥环完整，套管与水泥环、水泥环与地层岩石完全胶结，三者均视为厚壁圆筒；3）水泥环中无初始应力；4）套管、水泥环、地层岩石的温度沿径向均匀变化；5）复合圆筒受力视为平面应变。建立的套管-水泥环-地层岩石复合圆筒物理模型如图 1 所示。

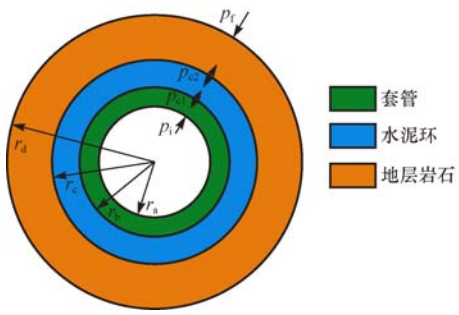

图 1 套管-水泥环-地层岩石复合圆筒物理模型

Fig. 1 Composite cylinder model of the casing-cement sheath-formation

1.2 力学模型的建立及求解

根据弹性力学基本理论，考虑温度效应时圆筒的切向应变可表示为：

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] + \alpha\Delta t \tag{1}$$

圆筒的轴向应变为：

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)] + \alpha\Delta t \tag{2}$$

根据复合圆筒平面应变假设，$\varepsilon_z \approx 0$，从而由式(2)可得：

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - \alpha E\Delta t \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)，可得：

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[(1-\nu^2)\sigma_\theta - (\nu+\nu^2)\sigma_r + (1+\nu)\alpha E\Delta t] \tag{4}$$

从而得到圆筒的径向变形量为：

$$\delta_r = \frac{r}{E}[(1-\nu^2)\sigma_\theta - (\nu+\nu^2)\sigma_r + (1+\nu)\alpha E\Delta t] \tag{5}$$

对于套管，其内壁受内压 p_i 作用，外壁受接触压力 p_{c1} 作用，由拉梅公式可得套管中径向应力和切向应力分别为：

$$\sigma_{rs} = \frac{p_i r_a^2}{r_b^2 - r_a^2}\left(1 - \frac{r_b^2}{r^2}\right) - \frac{p_{c1} r_b^2}{r_b^2 - r_a^2}\left(1 - \frac{r_a^2}{r^2}\right) \tag{6}$$

$$\sigma_{\theta s} = \frac{p_i r_a^2}{r_b^2 - r_a^2}\left(1 + \frac{r_b^2}{r^2}\right) - \frac{p_{c1} r_b^2}{r_b^2 - r_a^2}\left(1 + \frac{r_a^2}{r^2}\right) \tag{7}$$

根据假设，套管中$\partial(\Delta t)/\partial r = 0$，则由式(5)、式(6)、式(7)可得套管外壁处的径向变形量为：

$$\delta_{rso} = \frac{r_b}{E_s}\left[(1-\nu_s^2)\left(\frac{2r_a^2}{r_b^2 - r_a^2}p_i - \frac{r_b^2 + r_a^2}{r_b^2 - r_a^2}p_{c1}\right) + (\nu_s + \nu_s^2)p_{c1} + (1+\nu_s)\alpha_s E_s \Delta t\right] \tag{8}$$

对于水泥环，其内外壁分别受接触压力 p_{c1} 和 p_{c2} 的作用，水泥环中径向应力和切向应力分别为：

$$\sigma_{rc} = \frac{p_{c1} r_b^2}{r_c^2 - r_b^2}\left(1 - \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \frac{p_{c2} r_c^2}{r_c^2 - r_b^2}\left(1 - \frac{r_b^2}{r^2}\right) \tag{9}$$

$$\sigma_{\theta c} = \frac{p_{c1} r_b^2}{r_c^2 - r_b^2}\left(1 + \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \frac{p_{c2} r_c^2}{r_c^2 - r_b^2}\left(1 + \frac{r_b^2}{r^2}\right) \tag{10}$$

根据假设，水泥环中$\partial(\Delta t)/\partial r = 0$，则由式(5)、式(9)、式(10)可得水泥环内壁处的径向变形量为：

$$\delta_{rci} = \frac{r_b}{E_c}\left[(1-\nu_c^2)\left(\frac{r_c^2 + r_b^2}{r_c^2 - r_b^2}p_{c1} - \frac{2r_c^2}{r_c^2 - r_b^2}p_{c2}\right) + (\nu_c + \nu_c^2)p_{c1} + (1+\nu_c)\alpha_c E_c \Delta t\right] \tag{11}$$

由套管外壁和水泥环内壁位移连续条件可知，式(8)和式(11)中的 2 个径向变形量相等，可得：

$$\left[E_c(\nu_s + \nu_s^2) - \frac{r_b^2 + r_a^2}{r_b^2 - r_a^2}E_c(1-\nu_s^2) - \frac{r_c^2 + r_b^2}{r_c^2 - r_b^2}E_s(1-\nu_c^2) - E_s(\nu_c + \nu_c^2)\right]p_{c1} + \frac{2r_c^2}{r_c^2 - r_b^2}E_s(1-\nu_c^2)p_{c2} = \alpha_c E_c E_s \Delta t(1+\nu_c) - \alpha_s E_s E_c \Delta t(1+\nu_s) - \frac{2r_a^2}{r_b^2 - r_a^2}E_c(1-\nu_s^2)p_i \tag{12}$$

由式(5)、式(9)、式(10)，也可得到水泥环外壁处的径向变形量为：

$$\delta_{rco} = \frac{r_c}{E_c}\left\{(1-\nu_c^2)\left[p_{c1}\left(\frac{2r_b^2}{r_c^2 - r_b^2}\right) - p_{c2}\left(\frac{r_c^2 + r_b^2}{r_c^2 - r_b^2}\right)\right] + p_{c2}(\nu_c + \nu_c^2) + (1+\nu_c)\alpha_c E_c \Delta t\right. \tag{13}$$

地层岩石的内外壁分别受接触压力 p_{c2} 和地层压力 p_f 的作用，其径向应力和切向应力分别为：

$$\sigma_{rf} = \frac{p_{c2} r_c^2}{r_d^2 - r_c^2}\left(1 - \frac{r_d^2}{r^2}\right) - \frac{p_f r_d^2}{r_d^2 - r_c^2}\left(1 - \frac{r_c^2}{r^2}\right) \tag{14}$$

$$\sigma_{\theta f} = \frac{p_{c2} r_c^2}{r_d^2 - r_c^2}\left(1 + \frac{r_d^2}{r^2}\right) - \frac{p_f r_d^2}{r_d^2 - r_c^2}\left(1 + \frac{r_c^2}{r^2}\right) \tag{15}$$

根据假设，地层中$\partial(\Delta t)/\partial r=0$，则由式(5)、(14)、(15)可得地层岩石内壁处的径向变形量为：

$$\delta_{rfi}=\frac{r_c}{E_f}\left\{(1-\nu_f^2)\left[p_{c2}\left(\frac{r_c^2+r_d^2}{r_d^2-r_c^2}\right)-p_f\left(\frac{2r_d^2}{r_d^2-r_c^2}\right)\right]+p_{c2}(\nu_f+\nu_f^2)\right\}+[(1+\nu_f)c\alpha_f\Delta t] \tag{16}$$

同样地，由水泥环外壁和地层岩石内壁位移连续条件，式(13)和式(16)中的 2 个变形量应该相等：

$$\frac{2r_b^2}{r_c^2-r_b^2}E_f(1-\nu_c^2)p_{c1}+\left[E_f(\nu_c+\nu_c^2)-\frac{r_c^2+r_b^2}{r_c^2-r_b^2}E_f(1-\nu_c^2)-\frac{r_d^2+r_c^2}{r_d^2-r_c^2}E_c(1-\nu_f^2)-E_c(\nu_f+\nu_f^2)\right]p_{c2}=$$

$$\alpha_f E_f E_c\Delta t(1+\nu_f)-\alpha_c E_c E_f\Delta t(1+\nu_c)-\frac{2r_d^2}{r_d^2-r_c^2}E_c(1-\nu_f^2)p_f \tag{17}$$

联立式(12)、式(17)，可求出 p_{c1} 和 p_{c2}，然后将 p_{c1} 和 p_{c2} 代入式(9)、式(10)，可计算水泥环中的径向应力和切向应力。

2　水泥环应力分析

2.1　基本参数

高温高压气井在试压、压裂酸化(需环空加压)、完井管柱泄露等工况下，油层套管环空中会产生持续的套管压力 p_{sc}，即环空带压，同时伴随着流体的注入或产出，井筒内的温度发生变化。为分析压力和温度共同作用下水泥环中的应力分布规律，以 ϕ215.9 mm 裸眼下入 ϕ177.8 mm×12.65 mm 套管进行固井为例进行计算。井眼几何参数为：r_a = 76.25 mm，r_b = 88.90 mm，r_c = 107.95 mm，r_d = 1 079.50 mm。P110 钢级套管的材料参数为：E_s = 206 GPa，ν_s = 0.30，α_s = 1.5×10^{-5}/℃。水泥环的材料参数为：E_c = 10 GPa，ν_c = 0.25，α_c = 1.05×10^{-5}/℃。地层岩石的材料参数为：E_f = 25 GPa，ν_f = 0.25，α_f = 1.05×10^{-5}/℃。

2.2　结果分析

计算了不同持续套管压力和井筒温度变化值条件下水泥环内壁(与套管接触)和外壁(与地层接触)处的径向应力和切向应力，结果如图 2—图 5 所示(其中，图 2、图 3 分别为水泥环内、外壁径向应力，图 4、图 5 分别为水泥环内、外壁切向应力；规定应力为正表示受拉，应力为负表示受压)。

由图 2、图 3 可知：持续套管压力为 10～50 MPa且井筒温度变化值在－50～50 ℃时，水泥环沿径向总体上受压，且水泥环内壁比外壁处的压应力更大；井筒温度变化值一定时，水泥环中的径向压应力随持续套管压力的增大而增大；持续套管压力一定时，水泥环中的径向压应力随井筒温度的升高而增大，随井筒温度的降低而减小。

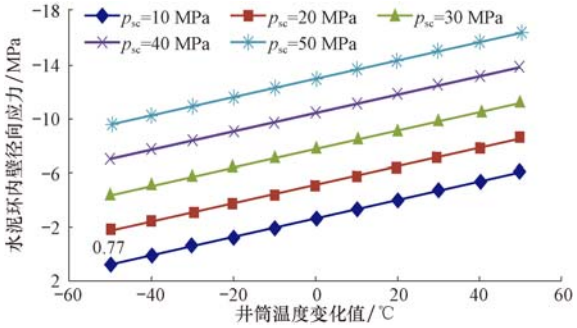

图 2　压力和温度共同作用下的水泥环内壁径向应力

Fig. 2　Radial stress at the cement sheath inner wall caused by both pressure and temperature

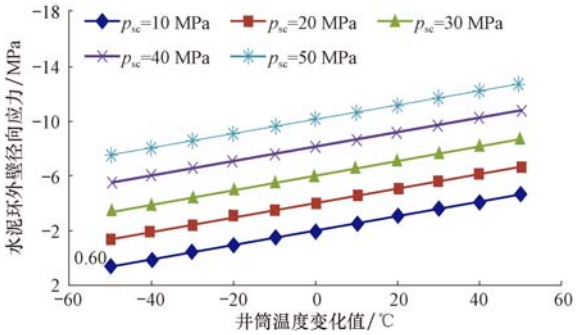

图 3　压力和温度共同作用下的水泥环外壁径向应力

Fig. 3　Radial stress at the cement sheath outer wall caused by both pressure and temperature

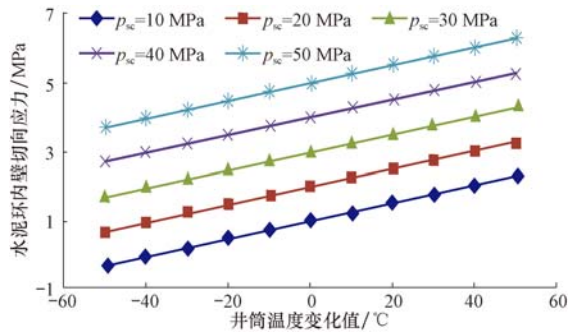

图 4　压力和温度共同作用下的水泥环内壁切向应力

Fig. 4　Tangential stress at the cement sheath inner wall caused by both pressure and temperature

由图 4、图 5 可知：持续套管压力为 10～50 MPa且井筒温度变化值在－50～50 ℃时，水泥环沿切向总体上受拉，且水泥环内壁比外壁处的拉应力更大；

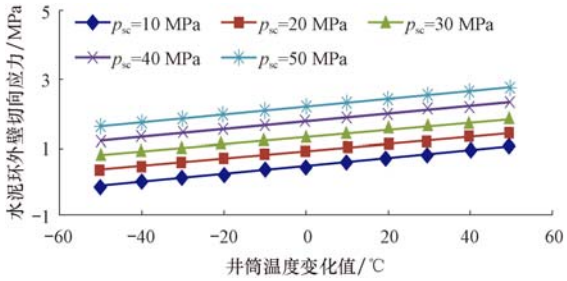

图 5　压力和温度共同作用下的水泥环外壁切向应力

Fig. 5　Tangential stress at the cement sheath outer wall caused by both pressure and temperature

井筒温度变化值一定时，水泥环中的切向拉应力随持续套管压力的增大而增大；持续套管压力一定时，水泥环中的切向拉应力随井筒温度的升高而增大，随井筒温度的降低而减小。

综合分析图 2—图 5 可知，井筒温度升高会增大水泥环中的径向压应力和切向拉应力，从而增大水泥环的切向受拉失效风险；井筒温度降低虽然能降低水泥环切向受拉失效风险，但若井筒温度降低值过大，则其产生的径向拉应力（图 2、图 3 中内外壁径向拉应力分别为 0.77 和 0.60 MPa）会使水泥环与套管或地层界面发生径向分离。因此，高温高压井应考虑井筒温度变化对水泥环整体力学性能的影响。同时，无论是切向还是径向受拉失效，水泥环内壁总先于外壁发生失效，对此一方面可采用低弹性模量水泥，降低水泥环应力水平；另一方面可提高水泥环与套管和地层的胶结强度，从而降低高温高压井水泥环的失效风险。

3　结论及建议

1）建立了考虑井筒温度变化的套管-水泥环-地层耦合作用力学理论模型，可方便地计算压力和温度共同作用下的水泥环应力。

2）压力和温度共同作用下，水泥环总体上沿径向受压，沿切向受拉，且二者最大值均位于水泥环内壁。井筒温度升高，会加剧水泥环切向受拉失效风险，井筒温度降低，则可能使水泥环发生径向密封失效。

3）为降低高温高压井的水泥环失效风险，建议采用低弹性模量水泥固井，以降低水泥环应力，同时提高水泥环与套管和地层的胶结强度。

符号说明

r_a 为套管内半径，mm；r_b 为套管外半径或水泥环内半径，mm；r_c 为水泥环外半径或地层内半径，mm；r_d 为地层外半径，mm；r 为圆筒中任意一点距圆筒中心的径向距离，mm；p_i 为套管内压，MPa；p_{c1} 为套管与水泥环界面的接触压力，MPa；p_{c2} 为水泥环与地层界面的接触压力，MPa；p_f 为地层压力，MPa；σ_r，σ_θ，σ_z 分别为圆筒径向应力、切向应力和轴向应力，MPa；ε_θ，ε_z 分别为圆筒切向应变和轴向应变；E，E_s，E_c，E_f 分别为一般圆筒、套管、水泥环和地层弹性模量，MPa；ν，ν_s，ν_c，ν_f 分别为一般圆筒、套管、水泥环和地层的泊松比；α，α_s，α_c，α_f 分别为一般圆筒、套管、水泥环和地层的线膨胀系数，1/℃；σ_{rs}，$\sigma_{\theta s}$ 分别为套管径向应力和切向应力，MPa；σ_{rc}，$\sigma_{\theta c}$ 分别为水泥环径向应力和切向应力，MPa；σ_{rf}，$\sigma_{\theta f}$ 分别为地层径向应力和切向应力，MPa；δ_r 为圆筒 r 处的径向变形量，mm；δ_{rso}，δ_{rci}，δ_{rco}，δ_{rfi} 分别为套管外表面、水泥环内表面、水泥环外表面、地层内表面径向变形量，mm；Δt 为井筒温度平均变化值，℃；p_{sc} 为油层套管中产生的持续套管压力，MPa。

参　考　文　献

References

[1] Nevio M, Augusto Z, Enrico B, et al. Intelligent and interventionlesszonal isolation for well integrity in Italy[R]. SPE 119869, 2009.

[2] NORSOK Standard D-010　Well integrity in drilling and well operations[S].

[3] 张智，周延军，付建红，等. 含硫气井的井筒完整性设计方法[J]. 天然气工业，2010，30(3)：67-69.
Zhang Zhi, Zhou Yanjun, Fu Jianhong, et al. A method of well integrity design for sour gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 67-69.

[4] Dan T M, Virgilio G, Robert L D, et al. Characterizing casing-cement-formation interactions under stress conditions: impact on long-term zonal isolation[R]. SPE 90450, 2004.

[5] Laidler A, Taoutaou S, Johnson C R, et al. A risk analysis approach using stress analysis models to design for cement sheath integrity in a multilateral well[R]. SPE 11059, 2007.

[6] 王耀锋，李军强，杨小辉. 套管-水泥环-地层系统应力分布规律研究[J]. 石油钻探技术，2008，36(5)：7-10.
Wang Yaofeng, Li Junqiang, Yang Xiaohui. Stress distribution in casing-cement-stratum[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(5): 7-10.

[7] 李静，林承焰，杨少春，等. 套管-水泥环-地层耦合系统热应力理论解[J]. 中国石油大学学报：自然科学版，2009，33(2)：63-69.
Li Jing, Lin Chengyan, Yang Shaochun, et al. Theoretical solution of thermal stress for casing-cement-formation coupling system[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(2): 63-69.

[8] Li Yong, Liu Shuoqiong, Wang Zhaohui, et al. Analysis of cement sheath coupling effects of temperature and pressure in non-uniform in-situ stress field[R]. SPE 131878, 2010.

[9] Nabipour A, Joodi B, Sarmadivaleh M. Finite element simulation of downhole stresses in deep gas wells cements[R]. SPE 132156, 2010.

[10] 高孝巧，杨浩，熊繁升，等. 油质岩原位加热井下温度场及热应力研究[J]. 断块油气田，2014，21(3)：373-377.
Gao Xiaoqiao, Yang Hao, Xiong Fansheng, et al. Temperature field and thermal stress of downhole system for in-situ heating on oil shale[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(3): 373-377.

［编辑　令文学］