

基于应变的热采井套管设计方法

韩来聚, 贾江鸿, 闫振来

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

摘要:提出基于应变的热采井套管设计方法,确定基于应变的设计准则,通过建立三维弹塑性有限元模型,模拟分析热采井多轮次生产过程中应力和应变变化规律,并以胜利油田 A 井为例进行实例设计。结果表明,该设计方法密切结合热采井“注-焖-采”生产过程,可考虑多轮次循环温度载荷对套管的损伤程度,通过计算多轮次生产条件下套管上的累积塑性应变,依据热采井生产轮次要求及应变准则,科学灵活地设计套管,可以为热采井套管柱设计提供新思路。

关键词:稠油油藏; 热采井; 塑性应变; 套管设计; 蒸汽吞吐

中图分类号:TE 26

文献标志码:A

A casing design method based on strain variations for wells in thermal recovery processes

HAN Lai-ju, JIA Jiang-hong, YAN Zhen-lai

(Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Engineering Corporation Limited, SINOPEC, Dongying 257017, China)

Abstract: A new casing design method based on strain variations was proposed for wells subjected in intensive thermal recovery processes, such as steam recycling for heavy oil recovery, and the corresponding design criteria were introduced. The thermal stress and strain generated on the casing tube in the wellbore were analyzed and simulated during multi-round production processes using a 3D elastic-plastic finite element method (FEM) model. A case study for casing design using the new method was conducted for a typical well used for steam injection and oil production in Shengli Oilfield. The varying load on the casing tube and its damage mode can be considered based on the thermal stress and strain due to temperature variations during the steam injection, soaking and oil production processes. The results show that the plastic strain accumulated in the casing tube during multi-round steam recycling processes is important for the damage of the casing tube, and the proposed design method is useful to provide a new casing design criteria for wells used in thermal recovery.

Key words: heavy oil reservoir; thermal recovery well; plastic strain; casing design; steam recycling

稠油热采井套管损坏问题在世界范围内都特别突出,有的套损高发区套损率甚至超过 30%,严重制约着稠油油藏的高效开发。目前在套管柱设计方面都是采用应力准则进行设计,主要有安全系数法及屈服强度校核方法。安全系数法主要是考虑完井过程中套管设计^[1],不能考虑后期高温载荷对套管的影响;屈服强度校核方法虽然能考虑后期高温载荷^[2],然而在稠油热采井注蒸汽生产过程中,高温

蒸汽、地层出砂沉降等原因导致作用在套管上的应力有可能在第一轮次就已经超出套管屈服强度,产生永久塑性变形^[3-4],采用该方法往往无法找到满足要求的套管,同时该方法无法考虑多轮次循环温度载荷对套管强度等性能的影响,因此应力设计方法无法满足热采井设计要求。笔者结合蒸汽吞吐热采井生产过程,提出基于应变的热采井套管柱设计方法,确定基于应变的设计准则,并进行实例分析,为

热采井套管设计提供新思路。

1 应变设计方法

近年来国内外从事管道研究的工作者在应变设计方法上进行了大量的研究,提出了许多具有借鉴意义的设计准则,并在多个领域进行了工程应用,主要涉及领域包括海底、极地冻土、地震带、滑坡等地段、活动断层段、沉降地带等存在大变形特点的管道设计中^[5]。国外比较有代表的规范有《油气管线系统》(CSA-Z662,极限应变为2.5%)^[6]、《海底管道系统》(DNV-OS-F101,极限应变为2.0%)^[7]和《埋地管道设计指导》(ASCE,极限应变为2.0%)等^[8];李鹤林等^[9]提出地震和地质灾害多发区的管道应采用基于应变的设计方法,开发了抗大变形管线钢;马小芳等^[10]介绍了输送管线基于应变设计方法的基本要求以及在中国的应用前景;余志峰等^[11]介绍了基于应变的设计方法在西气东输管道中应用情况,这些规范里都包括了应变设计方法,规定了极限应变。

应变设计方法要求在完井过程中套管处于弹性状态,即确保套管有一定的安全系数,同时要考虑后续的热载荷对套管产生的塑性应变,设计时应确保套管服役过程中产生的塑性应变不超过规定的塑性应变,即

$$\varepsilon_d \leq \varepsilon_c / F. \quad (1)$$

式中, ε_d 为设计应变; ε_c 为极限应变,包括压缩极限应变和拉伸极限应变等; $F \geq 1$,为安全系数。

在热采井设计中,根据热循环轮次不同,基于应变的设计包括单次热循环设计方法、循环疲劳设计方法和累积损伤设计方法3种。单次热循环设计方法规定材料一次热循环后产生的塑性应变要小于规定的塑性应变;而多次热循环时,由于套管承受多轮次温度循环载荷,每次都会产生一定的塑性应变,产生累加效应,同时套管材料会发生疲劳破坏,因此采用循环疲劳准则或者累积损伤准则进行评估。

1.1 单轮次设计准则

在轴向应变明显大于周向应变的情况下,套管的应变极限定义为造成接头破坏所需的管材本体平均纵向应变。在试验研究和数值分析的基础上,加拿大阿尔伯塔大学有学者提出以套管本体总应变达到1.5%作为单一或单周循环负荷条件下的套管应变极限值^[12],鉴于许多石油工业用管材的弹性应变极限值为0.2%~0.3%,相应的“保守”塑性应变极

限值约为1.2%,即

$$\varepsilon_p \leq 1.2\%. \quad (2)$$

式中, ε_p 为套管本体的塑形应变。

1.2 循环疲劳设计准则

蒸汽吞吐热采井需要经历多个“注-焖-采”生产过程,套管所受负荷带有明显的周期性,因此可用低周循环疲劳评估方法评估热采井套管寿命。当塑性应变范围基本不变时,采用修正的曼森科芬方程^[13-14]对套管钢材进行低周疲劳评估,

$$\Delta \varepsilon_p = 2 \varepsilon_f (N)^c. \quad (3)$$

式中, $\Delta \varepsilon_p$ 为在周期性载荷下对应的塑形应变增量; N 为完整循环的次数; ε_f 和 c 分别为与材料相符的疲劳延续系数和指数。

根据公布的周期性力学试验结果,石油工业用管材使用 $\varepsilon_f = 17.2\%$ 和 $c = -0.46$,疲劳寿命与塑性应变范围的关系如图1所示。

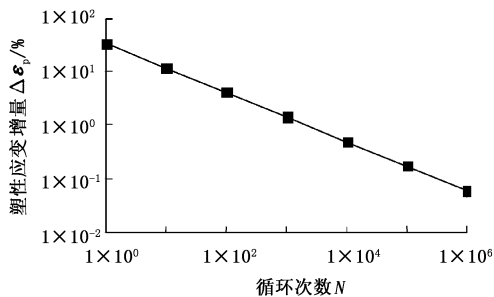


图1 套管钢低周疲劳寿命曲线

Fig. 1 Low cycle fatigue life curve for casing material

1.3 累积损伤设计准则

注蒸汽热循环过程中,在注汽加热阶段由于套管受到外面水泥环约束,套管承受较大的压缩应力;在焖井阶段,压缩应力会大幅下降,出现应力松弛;而在采油冷却阶段,由于温度的降低,套管承受拉伸应力^[15]。在第一个热循环加热过程中,套管极有可能产生压缩屈服现象,如果套管材料设计不当,将在后续的热循环中引起塑性应变累积,当累积塑性应变超过套管材料临界失效应变,套管将不能继续服役^[16-17],因此在设计过程中规定套管累积塑性应变应小于临界失效应变。 N 次循环后,累积塑性应变为

$$\varepsilon_{pcum} = \sum_{i=1}^N \varepsilon_{pi}. \quad (4)$$

式中, ε_{pi} 为第 i 次循环后的塑性应变增量; ε_{pcum} 为套管材料累积塑性应变。

目前,高温注蒸汽井注汽温度一般在350℃左右,温度变化在320℃左右^[18],在此条件下,热膨胀

产生的总机械应变为 0.4% ~ 0.5%, 对应的塑性应变为 0.2% ~ 0.3%。在该应变水平下, 依据单轮次原则, 现有套管都能满足单轮次设计要求。依据循环疲劳设计准则, 从图 1 可知, 套管材料的寿命超过 10 000 次循环, 而实际套管损坏表明, 现有热采井的热循环次数要远远小于这个数值, 这表明循环疲劳准则同样不适宜于热采井套管设计中。累积损伤设计准则可以考虑多轮次“注-焖-采”生产过程中套管发生的塑性应变累积, 包括热应变、高温蠕变及机械应变等, 当累积塑性应变超过极限值时, 套管将不能继续服役, 因此采用累积损伤准则对套管进行设计及寿命评估完全符合热采井实际生产工况。本研究借鉴国外 DNV-OS-F101 标准进行探讨。

2 计算实例分析

2.1 有限元模型

以胜利油田滨南采油厂 A 井为例, 取该井约 1.11 km 深的套管-水泥环-地层为研究对象, 沿地层垂向取 10 m, 以井眼轴线为中心, 采用 solid70 单元建立 1/4 的套管-水泥环-地层三维弹塑性有限元模型, 如图 2(蓝色部分代表套管, 壁厚 9.19 mm; 灰色部分为水泥环, 厚度 30 mm; 绿色代表地层)所示, 模型材料参数见表 1, 热采井套管高温性能参数由试验获得, 如表 2 所示。

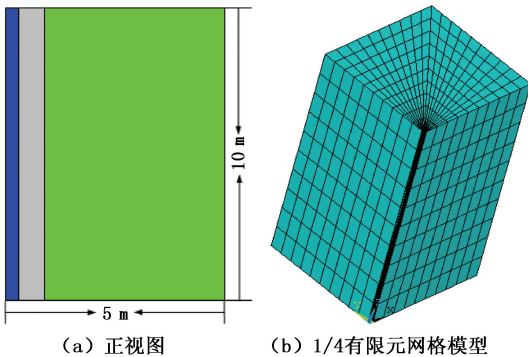


图 2 套管-水泥环-地层有限元计算模型
Fig. 2 Finite element calculation model of casing-cement-formation

表 1 材料特性参数

Table 1 Material properties parameters

材料	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数 λ / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热容 c / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	泊松比 ν
套管	7 850	43. 270	470	0. 30
水泥环	1 830	0. 810	1 004	0. 15
地层	2 390	1. 687	1 406	0. 21

表 2 套管性能参数与温度的关系

Table 2 Relationship between casing performance parameters and temperature

钢级	试验温度 T / $^\circ\text{C}$	弹性模量 E / MPa	屈服强度 P_y / MPa	抗拉强度 P_p / MPa	膨胀系数 / $^\circ\text{C}^{-1}$
FRT110H	20	192	820	920	—
	200	175	745	875	12.4×10^{-6}
	300	164	720	862	12.9×10^{-6}
	350	161	685	843	13.4×10^{-6}
N80	20	205	655	780	—
	200	165	605	745	12.8×10^{-6}
	300	136	583	795	13.1×10^{-6}
	350	120	570	753	14.4×10^{-6}

2.2 边界条件

Z 轴表示井深方向, 在模型的顶端及底端施加 Z 方向位移约束; 在 $X=0, Y=0$ 的面上施加对称约束; $X=5 \text{ m}$ 处施加最小的水平地应力; $Y=5 \text{ m}$ 处施加最大水平地应力。

注蒸汽高温循环载荷为: 在套管内壁施加初始温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 升温至 $350 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 15 d, 注汽压力为 15 MPa, 生产时间按 90 d 计算, 最后温度降至初始温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

地应力采用该地区水力压裂地应力测量资料, 对地应力数据按照深度进行回归, 得到 1.2 km 深度 3 个主应力的计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_H = 0.7 + 0.023H, \\ \sigma_h = 0.5 + 0.018H, \\ \sigma_v = 0.021H. \end{cases} \quad (5)$$

式中, σ_H 、 σ_h 和 σ_v 分别为最大水平主应力、最小水平主应力和垂向主应力, MPa。

2.3 结果分析

2.3.1 单次热循环

图 3 为单次热循环套管轴向应力随温度的变化曲线。从图 3 可知, 在注蒸汽过程中, 随着温度的升高, 套管由于受地层、水泥环的约束, 受到压缩应力的作用, 且压缩应力随温度的升高逐渐升高; 当温度升至 $260 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 压缩应力超过套管材料的屈服强度, 此后压缩应力变化较小; 当温度升至 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 焖井过程中出现了应力松弛, 轴向压缩应力大幅降低。采油生产过程(降温过程)中, 即温度从“稳热”峰值温度下降到初始环境温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 套管轴向载荷逐渐从压缩载荷变为拉伸载荷。从图 3 还可以看出, 无论是压缩过程还是拉伸过程, 两种套管受到的轴向应力均超过各自的屈服强度, 这也进一步说明, 采用应力设计方法无法满足热采井设计要求。

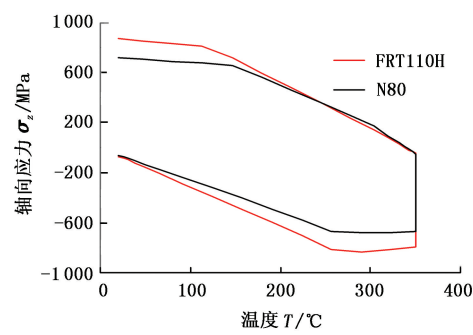


图 3 轴向应力随温度的变化

Fig. 3 Variation of axial stress with temperature

图 4 为单次热循环塑性应变随温度的变化曲线。从图 4 可知,在温度循环载荷条件下,作用在两种套管上的塑性应变各不相同,N80 套管的塑性应变明显大于 FRT110H 套管,N80 套管在第一轮次热循环塑性应变为 0.34%,因此从应变的角度考虑,FRT110H 热采井专用套管明显优于 N80 套管。

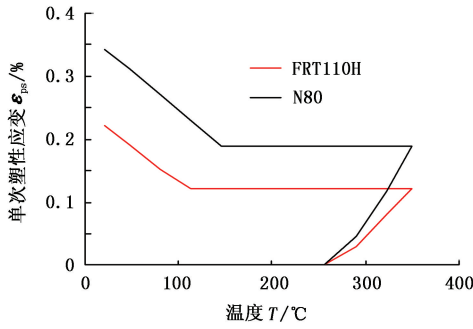


图 4 塑性应变随温度的变化

Fig. 4 Variation of plastic strain with temperature

2.3.2 累积塑性应变随轮次的关系

依据上述模型,模拟 15 个轮次的“注-焖-采”生产过程,累积塑性应变如图 5 所示。

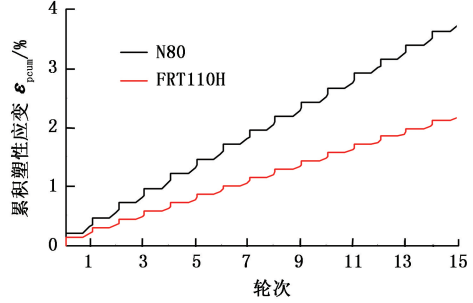


图 5 累积塑性应变与轮次的关系

Fig. 5 Relationship between accumulated plastic strain and cycles

从图 5 可知,随着注蒸汽轮次的增加,累积塑性应变逐渐增加,N80 套管塑性应变增量明显高于 FRT110H 套管,累积塑性应变也高于 FRT110H 套管。按照 DNV-OS-F101 标准规定的累积塑性应变

极限 2% 计算,N80 套管在第 7 个轮次即达到了累积塑性应变极限,而 FRT110H 套管能满足 13 个轮次的要求。由此可见,采用应变设计方法可以依据热采井注蒸汽轮次要求优选套管,提高了热采井套管设计的针对性及科学性。同时,采用该方法可以对热采井套管寿命进行评估。

3 设计方法对比

目前热采井设计方法主要是基于应力准则进行设计,主要有等安全系数和屈服强度校核方法。等安全系数法主要是通过计算完井过程中的套管外载,进行抗挤、抗拉及抗内压安全系数校核,若不能满足强度要求,则增加套管壁厚或提高钢级;屈服强度校核方法主要是通过计算后期生产过程中作用在套管上的等效应力,依据套管屈服强度进行对比优选套管。以胜利油田 A 井为例,采用应变设计方法进行设计,对该井注 10 个轮次的累积塑性应变进行计算,并和常规方法进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 不同套管设计方法结果对比

Table 3 Results comparisons of different casing design method

设计方法	设计准则	计算结果	
		N80	FRT110H
等安全系数法	抗挤系数 1 ~ 1.25	1.55	2.13
	抗内压系数:1.05 ~ 1.15	2.97	4.0
	抗拉系数:1.6 ~ 2.0	2.34	3.22
屈服强度校核方法	等效应力 (MPa) < 屈服强度 (MPa)	722	817
应变设计方法	$\epsilon_{pcum} < 2\%$	2.64%	1.42%

从表 3 可知,采用等安全系数法两种套管均能满足要求;由前面的试验可知,在 350 °C 条件下,N80 套管的屈服强度为 570 MPa,FRT110H 套管的屈服强度为 685 MPa,采用屈服强度校核方法两种套管均不能满足要求;而采用应变设计方法,在注蒸汽轮次为 10 个轮次时,FRT110H 套管能满足要求,N80 套管不能满足要求。这充分表明了应变设计方法具有独特的优越性,该方法密切结合热采井生产过程,可根据注蒸汽轮次要求科学、灵活地设计套管,克服了传统应力设计方法不能考虑多轮次生产过程中循环温度载荷对套管性能影响的不足。

4 结束语

基于应变的设计方法在地下管道设计中已经被广泛应用,借鉴管道设计思路,提出了基于应变的热

采井套管设计方法,该方法可考虑后期“注-焖-采”生产过程,允许套管发生适当的塑性变形,只要不超过套管临界塑性应变,套管可继续服役。该方法打破了传统应力设计理念,为热采井套管柱设计提供了新思路。在应变准则条件下,对热采套管高温性能具有特殊要求,如屈强比、延伸率等,因此为满足不同轮次热采井需求,需要开发系列新型热采井专用套管,并制定相应的套管设计规范及标准,从源头上提高热采井套管寿命,提高稠油油藏的勘探开发效益。

参考文献:

- [1] 陈庭根, 管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
- [2] 贾江鸿. 热采井套损机理及套管强度优化设计[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(9): 121-125.
JIA Jiang-hong. Casing failure mechanism of thermal production wells and casing strength optimization design[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(9): 121-125.
- [3] 路利军, 冯少波, 张波. 稠油热采井套管柱强度设计方法研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(2): 364-366.
LU Li-jun, FENG Shao-bo, ZHANG Bo. Method for designing casing stem strength in heavy-oil steam injection wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2): 364-366.
- [4] JIANG Wu. Casing temperature and stress analysis in steam injection wells[R]. SPE 103882, 2006.
- [5] 刘冰, 刘学杰, 张宏. 基于应变的管道设计准则[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 129-131.
LIU Bing, LIU Xue-jie, ZHANG Hong. Pipeline design code based on morphotropy strain[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 129-131.
- [6] Canadian Standards Association. Oil and gas pipeline systems[S]. Rexdale, Ontario, Canada, 2003.
- [7] DetNorske Veritas (DNV). Rules for submarine pipeline systems[S]. HØvik, Norway, 1996.
- [8] The American Society of Civil Engineers. Guidelines for the design of buried steel pipe (with addenda through February 2005) [S]. Washington, D C, USA, 2005.
- [9] 李鹤林, 李霄, 吉玲康, 等. 油气管道基于应变的设计及抗大变形管线钢的开发与应用[J]. 焊管, 2007, 30(5): 5-11.
- LI He-lin, LI Xiao, JI Ling-kang, et al. Strain based design for pipeline and development of pipe steels with high deformation resistance [J]. Welded Pipe and Tube, 2007, 30(5): 5-11.
- [10] 马小芳, 谢文江. 输送管线基于应变的设计方法在我国的前景与展望[J]. 焊管, 2010, 33(4): 62-65.
MA Xiao-fang, XIE Wen-jiang. The prospect of transfer pipeline based on strain design in China [J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(4): 62-65.
- [11] 余志峰, 史航, 佟雷, 等. 基于应变设计方法在西气东输二线的应用[J]. 油气储运, 2010, 29(2): 143-147.
YU Zhi-feng, SHI Hang, TONG lei, et al. Application of strain-based design method in west-to-east parallel gas transmission pipeline project [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(2): 143-147.
- [12] XIE Jueren. Analysis of thaw subsidence impacts on production well: SIMULIA Customer Conference, London, May 18-21, 2009[R]. London, 2009.
- [13] NOWINKA J, KAISER T. Strain-based design of tubulars for extreme-service wells[R]. SPE 105717, 2008.
- [14] KAISER T M V, YUNG V Y B, BACON R M. Cyclic mechanical and fatigue properties for OCTG materials [R]. SPE 97775, 2005.
- [15] 崔孝秉, 曹玲, 张宏, 等. 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, et al. 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.
- [16] MARUYAMA K, INOUE Y. An experimental study of casing performance under thermal recovery conditions [R]. SPE 18776, 1989.
- [17] KAISER T M V. Post-yield material characterization for thermal well design [R]. SPE 97730, 2005.
- [18] 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): 63-68.
LI Jing, LIN Cheng-yan, YANG Shao-chun, 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): 63-68.

(编辑 李志芬)