

文章编号:2095-0411(2018)01-0070-06

## 热流固耦合作用下热采井套管承载有限元分析

朱庆杰,尹 晓,赵 晨,李 雪

(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213016)

**摘要:**针对稠油热采井套管损坏率远高于普通油井的现象,以辽河油田锦州采油厂锦 25 区块的热采井为研究对象,应用热流固耦合理论和有限元数值分析方法,建立了套管-水泥环-地层的三维有限元模型,通过 ADINA 数值模拟,对比研究同一区块中热采井套管和常规井套管的变形情况,定量计算套管承受的剪应力、拉应力以及有效应力随时间的变化关系。计算结果表明,套管受到的有效应力、剪应力以及发生的应变随时间的推移而增大,曲线趋势均为先缓后增,热采井套管的应力及应变明显大于常规生产井。

**关键词:**热采井;套管;热流固耦合;有限元;有效应力

中图分类号:O 621.3

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.01.011

## Finite Element Analysis of Casing Load in Thermal Recovery Well Based on Thermal-Fluid-Structural Interaction Theory

ZHU Qingjie, YIN Xiao, ZHAO Chen, LI Xue

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** It is common that the casing damage rate of thermal recovery well is much higher than that of common oil well, for which a typical three dimensional finite element model based on thermal-fluid-structural interaction theory and finite element method is constructed. Using this model we simulate the thermal recovery wells in J25 block of Jinzhou oil production plant of Liaohe Oil Field Company. Thermal recovery well's casing deformation is contrasted with the normal well's, the change of casing shear stress, tensile stress and effective stress is quantitatively calculated by the numerical simulation of ADINA. The result shows that the effective stress, shear stress and strain of casing increase with time and all their curves are from gentle to steep. The stress and strain of the casing in the thermal recovery well are obviously larger than that of the conventional production well.

**Key words:** thermal recovery well; casing; thermal-fluid-structural interaction; finite element; effective stress

收稿日期:2017-09-11。

基金项目:江苏省高校自然科学研究重大项目(16KJA170004)。

作者简介:朱庆杰(1966—),河北宁晋人,博士,教授。E-mail: 1053993644@qq.com

稠油热采是目前世界上规模最大的提高原油采收率的工程技术<sup>[1]</sup>,但由于注汽热采工艺的特殊性,套管损坏率远高于普通油井。以辽河油田<sup>[2-4]</sup>为例,随着生产时间的累积、吞吐轮次的增加,自 90 年代至今,因套管损坏导致的大修井数占大修井总数的 40%,并呈逐年递增的趋势,近 10 年来热采井套损比例更是居高不下,甚至达到了 63%,热采井套损已经严重影响到油田的开发效果,造成了巨大的经济损失。针对热采井套损,国内外专家已经开展了大量的研究,积累了宝贵的经验,但目前的研究大多是从局部、单项技术因素和定性角度进行的,重点均在高温热应力上,未能实现对外载作用和热应力作用的综合以及互动计算,热、流、固三场耦合作用下的热采井套损机理还有待完善<sup>[5-8]</sup>。本文利用 ADINA 有限元软件<sup>[9]</sup>,以辽河油田锦州采油厂锦 25 区块的热采井<sup>[10]</sup>为研究对象,应用热流固耦合理论和有限元数值分析方法,通过研究稠油热采井在生产过程中井眼附近渗流场、应力场和温度场动态相互作用,建立了套管-水泥环-地层的三维流固模型,对蒸汽吞吐工况下套管的承载及变形情况进行定量描述,研究结果可为揭示热采井套损机理提供依据,对预防套管损坏、提高套管寿命具有指导意义。

## 1 热流固耦合计算

热流固耦合理论是一门以流固耦合理论为基础的目前仍处于探索阶段的一门研究性理论。它指的是,在由渗流场、应力变形场以及变化的温度场组成的系统中,这 3 场之间的相互影响相互作用<sup>[11-13]</sup>。正在进行蒸汽吞吐开采的稠油油藏就是一个典型的热流固耦合系统。随着热蒸气的注入,热效应与流体孔隙压力导致岩石固体发生变形,假设岩石固体为各向同性材料,那么温度场引起的岩石应变为

$$\varepsilon_T = \beta_T (T - T_0) I \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_T$  为岩体应变,  $T_0$  为初始温度,  $\beta_T$  为热膨胀系数。

将油气储层看作为多孔介质材料,那么流体孔隙压力导致的岩体的体应变为

$$\varepsilon_V = -(p - p_0) / K_m \quad (2)$$

则各向同性材料各方面上的单向应变即为

$$\varepsilon_n = -(p - p_0) / 3K_m \quad (3)$$

多孔介质的孔隙压力引起的固体应变为

$$\varepsilon_p = -I(p - p_0) / 3K_m \quad (4)$$

式中:  $K_m$  为渗透张量。

已知,由应力引发的应变为

$$\varepsilon_\sigma = \frac{1}{2G} \sigma' - \frac{\gamma}{2G(1+\gamma)} (\text{tr} \sigma') I \quad (5)$$

综上所述,可以推出岩层骨架蠕变的总应变为

$$\varepsilon = \frac{1}{2G} \sigma' - \frac{\gamma}{2G(1+\gamma)} (\text{tr} \sigma') I + \beta_T (T - T_0) I - \frac{1}{3K_m} (p - p_0) I \quad (6)$$

那么,应力的表达式由上式可以解出为

$$\sigma' = \sigma + pI = 2G\varepsilon + \lambda(\text{tr} \varepsilon) I + \frac{K_b}{K_m} (p - p_0) I - 3\beta_T K_b (T - T_0) I \quad (7)$$

所以,本构方程为

$$\sigma = 2G\varepsilon + \lambda(\text{tr} \varepsilon) I - \sigma' pI - 3\beta_T K_b (T - T_0) I \quad (8)$$

已知柯西方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (9)$$

将其引入(8)式后,可得

$$\sigma_{ij} = G(u_{i,j} + u_{j,i}) + \lambda u_{k,k} - 3\beta_T K_b (T - T_0) \delta_{i,j} - \sigma' p \delta_{i,j} \quad (10)$$

再对上式进一步处理,令两边分别对  $\chi_j$  求导数,结果为

$$G \nabla^2 u_i + (G + \lambda) \epsilon_{v,i} - 3K_b \beta_T T \delta_{i,j} - \sigma' p \delta_{i,j} + f_i = 0 \quad (11)$$

式中: $p$  为参考压力; $T$  为温度; $\beta_T$  为热膨胀系数; $K_b$  为整体的体积模量。

## 2 热采井套管承载有限元模型的建立

### 2.1 有限元建模

依据 J25 区块的井网部署资料信息,选取区块中的局部地区井段的地质数据进行分析,拟建立一个包含 6 口井的 3 层地层结构域划分有限元几何模型,所选井段的井号及其井口坐标如表 1 所示。

由于在进行有限元分析计算时不可能模拟出实际工程中的所有细节问题,因此所建的有限元模型应是对实际工程问题的合理简化。为了在有限元分析中使问题既得以简化又能反映其主要特征,现做出如下假设:

表 1 采油井井号及井口坐标

井号	12-18	13-19	14-18	14-20	15-19	16-20
X/m	250	242	238	230	230	221
Y/m	103	100	109	98	105	103

1) 固井质量优良,套管、水泥环以及地层完全接触,且套管、水泥环均为理想圆管道,即水泥环和套管都没有缺陷,沿长度方向和环向均匀并稳定,不存在椭圆度等问题;

2) 建模时固体模型与流体模型分开建立,其中,固体模型在动力学分析下建立,以确定时变载荷对结构的影响,而流体模型在瞬态分析下建立;

3) 建模过程中考虑地层岩体的非线性特征,采用大变形、小位移假设,将储层岩体看作是多孔介质材料,而套管材料选用各向同性的弹性材料。

所建结构模型中,首先定义包含目标体范围的长方体,根据圣维南定理,为尽量消除边界效应的影响,地层边界尺寸需满足大于井眼直径的 5~6 倍<sup>[14]</sup>;随后通过定义两个横向切片使模型分为上中下 3 层,其中,模型中上部和下部地层为非渗透性地层,分别为油藏的盖层和底层,中间的地层是饱含流体的储层,其孔隙度、渗透率以及饱和度等物性参数来源于核磁共振分析试验结果。6 口井中选取井号 13-19,15-19,16-20 的 3 口井作为热采井,其他 3 口为普通采油井进行对比研究。为保证对比研究的客观公正,本模型中的 6 口井均选用 N80  $\varphi$  177.8mm  $\times$  8.05mm 的生产套管,水泥环厚度统一设定为 21mm。在流体模型中,热采井套管内建立高温蒸汽,储层侧向开放部位建立流入储层的侧向流体,并将储层中的油水、高温蒸汽均看作是不可压缩流体。由于将储层看作为多孔介质材料,固体模型和流体模型均需建立多孔介质流固耦合边界,其中地层在井筒的井壁处定义为第一类流固耦合边界;在开放的边界部位,即流体流入的边界面,定义为流固耦合面作为第二类流固耦合边界。所建模型如图 1 所示。

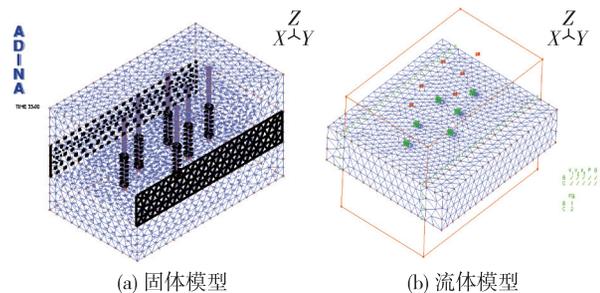


图 1 有限元模型

### 2.2 模型参数

依据辽河油田锦州采油厂 J25 区块的地质资料及热采信息,模型中的材料参数设置见表 2 和表 3。

表 2 固体模型材料物性参数

材料类型	弹性模量/(MPa)	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	摩擦角/( $^{\circ}$ )	黏聚力/(MPa)
上覆盖层	16 000	0.35	2 570	18	1.65
储层	21 000	0.28	2 800	20	1.78
下部地层	32 000	0.22	2 940	38	1.8
水泥环	73 000	0.23	2 500	24	9

表 3 流体材料参数

材料类型	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
储层内流体	920	0.5	2	2 200
蒸汽(320 $^{\circ}\text{C}$ , 12 MPa)	670	$2 \times 10^{-5}$	0.06	4 200
侧向流体(37 $^{\circ}\text{C}$ )	1 000	$6.9 \times 10^{-4}$	0.64	4 200

储层岩性以含泥岩、砾长石岩屑的砂岩为主,泥质胶结较疏松,孔隙度为 29%,渗透系数为  $2 \times 10^{-4}$  m/s。

依据区块开采的实际工况,设定模型下表面为固定约束,并在所建地层-水泥环-套管模型上施加覆盖岩层压力、水平地应力以及蒸汽注入带来的高温高压,其中水平地应力处理为储层受到的侧向流体压力,它与高温高压均在流体模型中施加,上覆岩层压力施加在固体模型中盖层的上表面。荷载时间函数如图 2 所示。

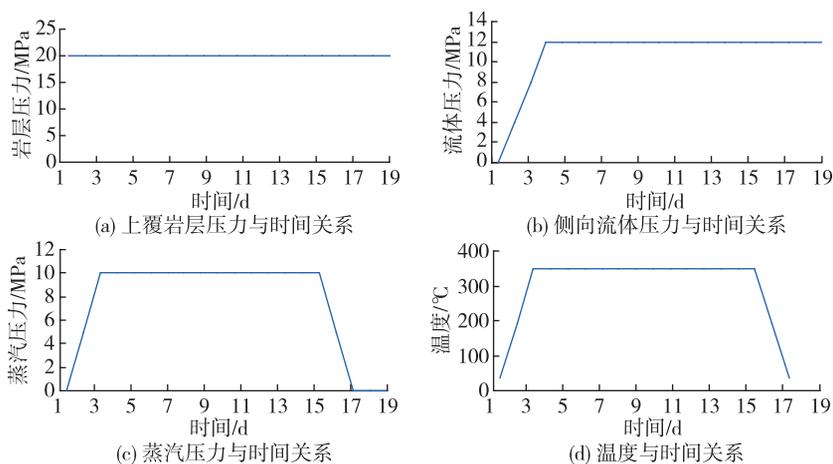


图 2 荷载时间函数

### 3 计算结果分析

通过固体模型和流体模型的耦合计算,得到的有限元计算结果为既包括固体模型又包括流体模型的整体系统模型,该模型处于套管内热应力场、地应力场及储层渗流场的共同作用下,如图 3 所示,其中,套管的变形及承载情况如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出,应变最大值出现在套管中部及底部,即储层段套管的末端;图 4(b)中显示,在储层部位的套管承受的有效应力远大于盖层部位的。因此可得出结论:在高温高压的蒸汽吞吐作业下,处于储层部位的套管段比其他部位的套管承受了更大的应力作用,更易发生套管变形。而对 J25 区块套损井进行统计分析可知,62.8%的套损发生在油层部位,这一调查结果与有限元计算结果一致,从而

验证了模拟的正确性。对各井套管在一个蒸汽吞吐周期期间的有效应力、剪应力以及应变的变化过程进行定量描述,如图 5 所示。

由图 5 可知,储层开采段套管在上覆岩层压力、高温蒸汽与储层间发生的热流固耦合以及侧向流体与储层间发生的多孔介质流固耦合的多重作用下,承受的有效应力、剪应力以及发生的应变随时间的推移而增大,曲线均为先缓后增,越到吞吐后期套管承受的应力及发生的应变越大;对热采井和普通井进行对比分析可以发现,热采井套管的应力及应变均大于正常生产井的,并且差距随时间的推移而变大,在时刻 23d 处热采井中承载最小的井 13-19 与普通生产井中承载最大的井 14-18 间的差距约为时刻 13d 处两者差距的 2 倍。因此当生产环境及生产条件均相同时,蒸汽吞吐生产引起的热流固耦合作用使得套管承受更大的载荷,从而更易发生套管损坏。

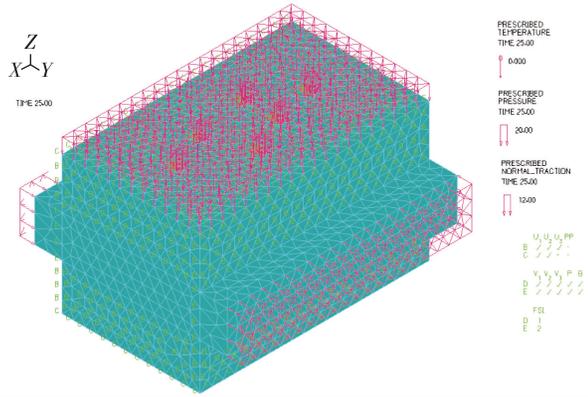


图 3 计算结果显示

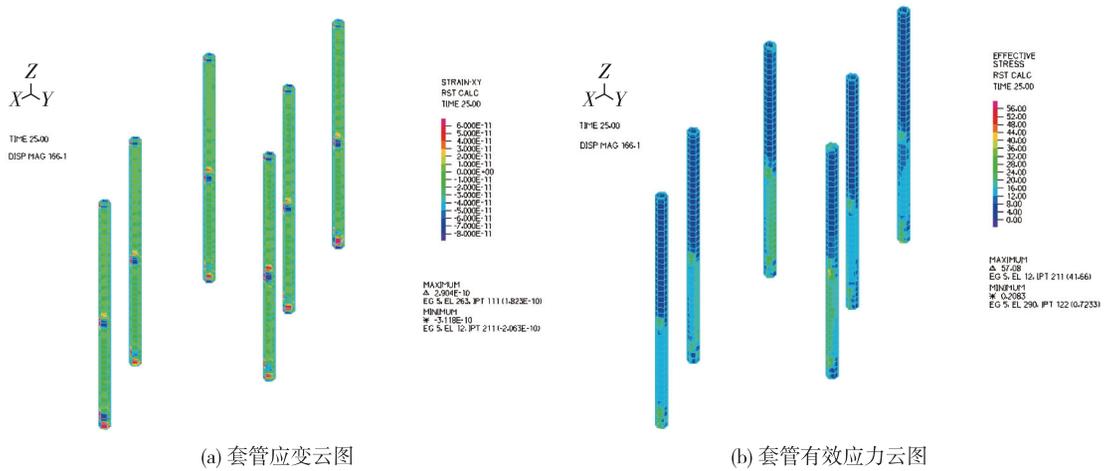


图 4 套管应变及有效应力云图

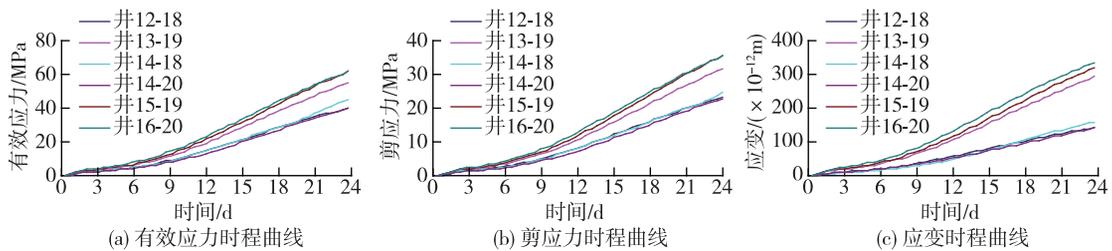


图 5 储层段套管应力与应变时程曲线

### 4 结 论

热、流、固 3 场耦合作用是影响热采井套管承载及变形的重要因素之一,它通过增大套管承受的应力、减小套管的承载能力从而使得热采套管与常规开采套管相比更易发生变形。本文借助 ADINA 融

结构、流体、热于一体进行多场耦合进而解决三维线性或非线性问题的性质,通过对实际区块中的热采井进行有限元建模,计算分析了蒸汽吞吐工况下套管的承载及变形特点,并对其进行定量描述,所得结果可为揭示热采井套损机理提供依据,为现场稠油油田合理开发及套管的安全保护提供基础数据。

### 参考文献:

- [1]张义堂.热力采油提高采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [2]文良凡,高志强,李海军,等.辽河油田套损机理及防治建议[J].内蒙古石油化工,2012(3):57-59.
- [3]王德伟.欢西油田稠油套损井综合治理技术[J].中国石油和化工标准与质量,2012(11):119-119.
- [4]刘万勇.热采水平井套损机理研究及对策[J].中外能源,2014,19(1):58-61.
- [5]GUNNAR S K, MAGNUS T J, HALLDOR P, et al. Structural modeling of the casings in high temperature geothermal wells[J]. Geothermics, 2015(55):126-137.
- [6]赵旭亮.稠油热采井套损防治措施及计算理论[J].石油地质与工程,2012(4):122-124.
- [7]YANG X, YAN Y, WANG J, et al. Strain design and experimental study of casing in thermal recovery well based on the elastic-plastic constitutive model[C]//Pipelines. Fort Worth: American Society of Civil Engineers, 2013: 1492-1500.
- [8]刘少胡,童华,郑华林,等.基于热固耦合的套管缺陷参数对其强度影响分析[J].石油机械,2015(5):92-95.
- [9]朱庆杰,任瑞,贾海波,等.基于 ADINA 的多孔介质流固耦合分析[J].常州大学学报(自然科学版),2015,27(1): 81-85.
- [10]张涛,朱庆杰,任瑞,等.基于 GIS 的 OWA 方法,在锦 25 区块套管损害中的应用[J].常州大学学报(自然科学版), 2015,27(3):51-55.
- [11]任恩齐,康志勤,吕义清.热采井套管热固耦合作用数值模拟分析[J].煤碳技术,2017,36(5):301-303.
- [12]PASQUARIELLO V, HAMMERL G, ORLEY F, et al. A cut-cell finite volume-finite element coupling approach for fluid-structure interaction in compressible flow[J]. Journal of Computational Physics, 2016,307:670-695.
- [13]LIU Y, LIU C, KANG Y, et al. Experimental research on creep properties of limestone under fluid-solid coupling [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(11):7011-7018.
- [14]冯富平,赵恩远,艾池,等.蠕变地层水泥环特性对套管应力的影响[J].石油钻采工艺,2012,34(4):36-39.

(责任编辑:殷丽莉)