

注汽井套管热应力计算方法对比分析^{*}

王兆会 高宝奎 高德利

(石油大学·北京)

王兆会等.注汽井套管热应力计算方法对比分析.天然气工业,2005;25(3):93~95

摘 要 许多热采井套管热应力计算模型忽略了地层影响,属于单轴热应力分析。文章首先将套管、水泥环、地层组成的井筒作为不同物质的组合体,兼顾高温条件下套管材料的弹性模量、屈服应力和热膨胀系数的变化,建立了套管三维弹性热应力计算模型。模型以全量和增量两种方式,计算常用套管的三轴热应力和单轴热应力。对比计算结果得到如下结论:三轴情况下套管出现较大环向应力,套管屈服与否不由某一轴向应力决定,而由3个主应力决定;按增量计算时,温度应力高于按全量计算的结果,因而套管承温极限低;按单轴计算时套管承温极限高于按三轴计算,随着钢级升高,单轴与三轴承温极限差别缩小;高钢级套管在抗高温方面并不具有绝对优势,要看材料的高温性能变化;如果同时考虑材料热膨胀系数随温度变化,则计算出的热应力更高,承温极限大幅度降低。

主题词 热采井 套管 应力 计算方法

注高温蒸汽热采是较成熟的稠油开采方法。在热采过程中,套管承受升温—降温循环,因而有较大热循环应力,导致许多井出现套管损坏。自20世纪60年代,许多人花费了大量精力研究解决对策。Maharaj^[1]等从理论方面进行研究,Maruyam^[2],Joao^[3]等从实验和应用角度进行了研究。经过长期的研究和实践,人们摸索出全井固井、优选套管钢级、给套管施加预应力等方法来防止套管损坏。然而现有热应力计算多是仅考虑套管的单轴热应力,有些研究尽管涉及到三轴应力,但是在实际计算推导时进行简化处理,忽略了水泥环与地层的温度变化^[4~5]。另外,不同生产厂家生产的同级产品、不同钢级产品的性质以及温度对这些性质的影响规律各不相同,导致计算复杂化。应用不同的计算方法得到的热应力相差很大,使用由这些模型确定的完井参数,在实践中一直存在难以解释的套管损坏比例偏高问题。有些大型通用计算软件虽然可以计算三轴应力,但是不能体现灵活多变的应用分析。

本文首先将套管、水泥环、地层组成的井筒视为一体,建立了套管三维热循环应力计算模型。模型中同时考虑套管材料性质的温度效应,计算套管轴向、径向和环向三轴应力随温度的变化规律。然后

以N80套管为中心,兼顾TP90H、P110套管,详细分析了不同的计算方法得到的热应力变化规律和套管的弹性承温极限。文中分析思路可供热采井设计人员参考。

一、套管三轴热应力计算模型

以单轴热应力计算为基础的设计,适合于套管没有被水泥环固定情况。一些研究虽然考虑了水泥环与地层影响,但忽略了地层温度变化。为消除这些误差,下面首先建立套管三轴热应力计算方法。

1. 基本假设

把套管—水泥环—地层简化为3个各向同性物质圆筒。套管壁较薄,且传热快,可以简化为均匀升温,其内壁简化为受内压自由边界;水泥环内外都受约束,升温后内界面正应力和径向位移与套管外表面连续,外界面正应力和径向位移与地层岩石界面连续;地层岩石恒温界可取无限远,因而无位移和应力。在各向同性体中,热膨胀系数 α 不随方向而变,所以热应变在所有各个方向都相同,轴对称组合体内没有剪应变。

设 r_1 为套管内半径, r_2 为套管外半径, r_3 为水泥环外半径, r_∞ 为地层恒温界。建立坐标如图1。

^{*} 本文系国家自然科学基金资助项目(50234030);中国石油新疆油田分公司资助。

作者简介:王兆会,1962年生,高级工程师;1984年毕业于石油大学;从事固井技术研究,在读博士研究生。地址:(834000)新疆克拉玛依钻井工艺研究院。电话:(0990)6883713。

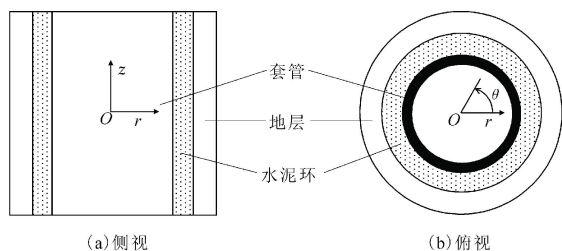


图1 井筒模型

2. 计算方法

根据基本假设,套管、水泥环和地层可以按各向同性弹性体的平面应变问题进行分析。温度应力分两步计算:

第一步,不考虑物质层之间的约束,计算热应力和变形。

应力分布为^[6]:

$$\begin{cases} \sigma_r' = \frac{E_i \alpha_i}{(1-\mu)} \left[\frac{r^2 - r_i^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_{i+1}} T r dr - \int_{r_i}^r T r dr \right] \\ \sigma_\theta' = \frac{E_i \alpha_i}{(1-\mu) r^2} \left[\frac{r^2 + r_i^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_{i+1}} T r dr + \int_{r_i}^r T r dr - T r^2 \right] \end{cases} \quad (1)$$

另外有 $\alpha' = \mu (\sigma_r' + \sigma_\theta') - E_i \alpha_i T$, 其余应力分量为零。

对应的应变为:

$$\begin{cases} \epsilon_r' = \frac{1-\mu^2}{E_i} \left(\sigma_r' - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_\theta' \right) + (1+\mu) \alpha T \\ \epsilon_\theta' = \frac{1-\mu^2}{E_i} \left(\sigma_\theta' - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_r' \right) + (1+\mu) \alpha T \end{cases} \quad (2)$$

其余应变分量为零。 $i=1, 2, 3$ 分别表示套管、水泥环和地层。

利用式(1)、式(2)和几何方程 $\epsilon_r' = \frac{du_r}{dr}$, 便可以求出相应的应力和径向位移。

第二步,根据物质层交接面的径向应力连续和径向位移连续确定最终应力。

前面求出的径向位移是在3个物质层相互独立假设下得到的,实际上在温度升高过程中,套管与水泥环交接面、水泥环与地层交接面会出现压应力,令其分别为 p_2 、 p_3 ,从而改变组合体应力和变形状态,最终达到平衡。 p_2 、 p_3 的确定与组合体应力和变形构成较复杂的耦合关系,必须联立求解,确定约束应力 σ_r'' 、 σ_θ'' 、 σ_z'' 。本文进行了详细的理论推导,并编制程序计算了有关数据。

根据叠加原理,把计算得到的应力进行叠加,得

套管的温度应力为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_r' + \sigma_r'' \\ \sigma_\theta = \sigma_\theta' + \sigma_\theta'' \\ \sigma_z = \sigma_z' + \sigma_z'' \end{cases} \quad (3)$$

最后根据套管的三轴应力计算其等效应力:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3} (\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 - \sigma_r \sigma_\theta - \sigma_r \sigma_z - \sigma_\theta \sigma_z)} \quad (4)$$

等效应力与最小屈服应力比较,可得到套管的承温极限。

二、不同方法计算套管热应力

1. 基础数据

以克拉玛依油田百重7井区主要数据为基础:井深600 m,井径241.3 mm,套管外径177.8 mm,套管壁厚9.19 mm,地层初始温度20℃。选择N80、TP90H、P110三种钢级的套管进行分析,弹性模量和屈服强度随温度的变化拟合关系式见表1,N80、P110数据源自文献[2、3],TP90H数据由天津钢管公司提供。

表1 套管性能随温度变化关系

钢级	弹性模量(MPa)	屈服强度(MPa)
N80	$-260T + 213180$	$-3 \times 10^{-10} T^5 + 3 \times 10^{-7} T^4 - 2 \times 10^{-4} T^3 + 0.0361 T^2 - 4.0036 T + 711.84$
TP90H	$-150T + 200750$	$0.0005 T^2 - 0.5351 T + 690.12$
P110	$-120T + 207510$	$-0.0007 T^2 + 0.0304 T + 758.29$

套管材料的热膨胀系数使用相同的值 $12.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,泊松比都取为0.3。假设水泥环的性质与岩石性质相同,取弹性模量 0.17×10^5 MPa,泊松比都取为0.2,线膨胀系数 $10.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

2. 按全量方法计算

由于弹性模量随温度变化,温度应力与温度的对应关系出现非线性,计算方法相应分为两种:一是按全量计算,二是按增量计算。按全量计算时,认为材料参数是在当前温度下的对应值,不考虑温度变化过程中材料性能的变化过程,计算过程比较简单。按全量计算三轴热应力时,套管与水泥环具有接触压应力(N80套管在300℃时可达28.3 MPa),因而套管具有较大环向应力。这样,套管屈服与否不由某一方向应力决定,而由三个主轴应力决定。例如N80套管在320℃时,轴向应力达到570 MPa,而等效应力只有517 MPa,因而套管并没有屈服。按单轴计算出的轴向应力与三轴的等效应力接近。N80套管三轴承温极限350℃,而单轴应力永远不会超

过 500 MPa,因而不出现屈服。P110、TP90H 钢级套管热应力随温度变化趋势相同。3 种钢级的套管承温极限如表 2。

表 2 套管承温屈服极限温度(℃)

钢级	计算方法	三轴	单轴
N80	全量	350	—
	增量	272	285
TP90H	全量	314	341
	增量	285	296
P110	全量	272	273
	增量	259	259

3.按增量方法计算

将温度变化分为若干分,分别计算温度应力,并累加,这样可以克服材料性质非线性带来的误差。由表 2 可见按增量计算的套管热应力具有如下特征。

温度应力高于按全量计算的结果,因而套管承温极限低;按单轴计算时套管承温极限高,按三轴计算时套管承温极限低;随着钢级升高,单、双轴承温极限差别缩小,而 P110 钢级这种差别消失;按增量计算时此三种材料中 TP90H 套管的承温极限最高,说明高钢级套管在抗高温方面并不具有绝对优势,要看材料的高温性能变化。

4.预应力值分析

应用基础数据得到保持套管在高温下不发生屈服需要施加的最小预应力如表 3。

表 3 套管预应力(MPa)

钢级	计算方法	280 ℃		300 ℃		320 ℃	
		三轴	单轴	三轴	单轴	三轴	单轴
N80	全量	—	—	—	—	—	—
	增量	18	—	65	25	117	56
TP90H	全量	—	—	—	—	14	—
	增量	—	—	42	7	104	47
P110	全量	27	18	97	74	171	129
	增量	77	66	155	129	241	192

注:表中“—”表示不需要施加预应力。

表 3 中显示高钢级 P110 套管需要的预应力值最高,而 N80 与 TP90H 套管需要施加的预应力相近。

5.热膨胀系数对热应力的影响

对 N80 套管,考虑材料热膨胀系数随温度的变化,热膨胀系数取自文献[3],拟合成关系式为 $\alpha_{N80} = (-0.0004 T^2 + 0.2248 T - 3.6647) \times 10^{-6}$,计算结果如表 4。

表 4 套管承温屈服极限温度(℃)

钢级	计算方法	三轴	单轴
N80	全量	160	164
	增量	209	213

由于材料热膨胀系数随温度变化显著,且温度越高 α 值越大,所以计算出的热应力远高于 $\alpha = 10.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的热应力值,因而承温极限大幅度降低。

N80 套管若考虑的温度效应,则即使在 260 ℃ 温度下,要想不出现屈服,需要 500 MPa 的预应力。实际上对于这类套管,应该以塑性设计来代替弹性设计。

三、结 论

通过以上讨论可以看出,计算方法不同,考虑的因素不同,得到的热应力以及套管的承温极限相差悬殊。因而在热采井完井设计时既要充分考虑套管材料性能的差别,又要选择合适的计算方法,才能确保套管安全。选购套管时应索取厂家关于材料高温性能变化的确切数据。

参 考 文 献

1 G Maharaj. Thermal well casing failure analysis. SPE 36143, 1996

2 Kazush M, Masao O, Yasusuke I *et al*. An experimental study of casing performance under thermal cycling condition. SPE 18776, 1990

3 Joao C R *et al*. Stress analysis of casing string submitted to cyclic steam injection. SPE 38978, 1997

4 刘坤芳,张兆银,孙晓明,孙雪冬.注蒸汽井套管热应力分析及管柱强度设计.石油钻探技术,1994;22(4)

5 杨秀娟,杨恒林,闫相祯,刘洪波.热采井套管三轴预应力设计分析.石油矿场机械,2004;33(1)

6 徐芝纶.弹性力学.北京:人民教育出版社(第二版),1982

(收稿日期 2004-10-26 编辑 钟水清)