

中深层地热井开采对套管与水泥环性能影响的研究

叶辉兵, 张所邦, 胡胜华, 洪毅*, 刘航铭, 陈维保, 梁五宝, 万宇航

(湖北省地质局第七地质大队, 湖北宜昌 443100)

摘要: 地热井开采过程中井筒热流体造成的瞬时高温条件下, 对套管的力学性能有较大的影响。本文基于套管-水泥环-地层岩石稳态热传导数学模型计算井筒温压场, 建立中深层地热开采放热与套管相互作用力学评价的数学模型, 并对地热开采放热对套损的影响进行有限元计算和试验模拟, 得到以下结论: 在地热开采井筒放热作用下, 使套管产生了较大的椭圆度, 削弱了套管的抗挤强度。当内压达到90 MPa、套管内温度为30 °C时, 在地层径向压力不等的情况下, 内壁面应力分布极不均匀, 应力最大差值为560 MPa, 应力沿周向分层分布, 受到地层径向压力大的一侧出现大范围的应力集中区域。随着温度的升高, 套管的位移云图变化不大, 最大位移值略有增加。当温度达到120 °C后, 套管处于较为恶劣的热力环境, 热应力的变大导致套管塑性变形严重, 同时内压增大到120 MPa时, 套管内壁整体呈高应力状态, 更易导致壁面出现塑性破坏。研究成果对研究地热开采放热对套损的影响规律, 对评估套管的受力环境、水泥环强度、水泥环微间隙宽度等参数提供指导意义。

关键词: 地热开采; 套管; 水泥环; 塑性破坏; 中深层地热井

中图分类号: TE256; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)05-0093-08

Research on the influence of middle-deep geothermal well exploitation on the performance of casing and cement sheath

YE Huibing, ZHANG Suobang, HU Shenghua, HONG Yi*,

LIU Hangming, CHEN Weibao, LIANG Wubao, WAN Yuhang

(The Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang Hubei 443100, China)

Abstract: In the process of geothermal well exploitation, the transient high temperature caused by wellbore thermal fluid has a great impact on the mechanical properties of casing. This paper calculates the wellbore temperature and pressure field based on the steady-state heat conduction mathematical model of casing cement sheath formation rock, establishes the mathematical model for the mechanical evaluation of the interaction between middle-deep layer geothermal exploitation heat release and casing, and carries out the finite element calculation and experimental simulation of the influence of geothermal exploitation heat release on casing damage. The following conclusions are obtained: under the action of geothermal exploitation wellbore heat release, the casing has a large ovality, which weakens the collapse strength of the casing. When the internal pressure reaches 90MPa and the temperature in the casing is 30°C, the stress distribution on the inner wall is extremely uneven under the condition of different formation radial pressures, with the maximum difference of 560MPa. The stress is distributed in layers along the circumference, and a large range of stress concentration areas appear on the side subject to the formation radial pressure. With the increase of temperature, the displacement contour of casing changes little, and the maximum displacement increases

收稿日期: 2024-06-18; 修回日期: 2024-07-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.05.011

基金项目: 湖北省地质局项目“湖北省中深层地热井完井技术研究”(编号: KJ2022-26); 湖北省市场监督管理局项目“湖北省中深层地热井完井技术规程”(编号: T-Z-05-2023369)

第一作者: 叶辉兵, 男, 汉族, 1969年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 主要从事岩心钻探、地热井、页岩气井钻探工程技术和管理, 湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号地质科技楼, 1923913461@qq.com。

通信作者: 洪毅, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 探矿工程专业, 博士在读, 主要从事地热井及页岩气井的钻完井工程技术研究与管理, 湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号地质科技楼, 710829272@qq.com。

引用格式: 叶辉兵, 张所邦, 胡胜华, 等. 中深层地热井开采对套管与水泥环性能影响的研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(5): 93-100.

YE Huibing, ZHANG Suobang, HU Shenghua, et al. Research on the influence of middle-deep geothermal well exploitation on the performance of casing and cement sheath[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 93-100.

slightly. When the temperature reaches 120°C, the casing is in a relatively harsh thermal environment. The increase of thermal stress leads to serious plastic deformation of the casing. At the same time, when the internal pressure increases to 120MPa, the inner wall of the casing is in a high stress state as a whole, which is more likely to lead to plastic failure of the wall. The research results can provide guidance for the influence of heat release from geothermal exploitation on casing damage, and for the evaluation of casing stress environment, cement sheath strength, cement sheath micro gap width and other parameters.

Key words: geothermal exploitation; casing; cement sheath; plastic failure; middle-deep layers geothermal well

0 引言

近年来,国内地热钻井深度以1000~2000 m为主,随着地热资源开发,3000 m以深的地热井数量也逐步增加^[1-3]。随着高温高压井的开发,温度对套管性能的影响越来越引起关注,有研究表明,与常温相比,在200 °C,套管抗拉强度的下降幅度在5%以内,屈服强度的下降幅度在10%以内,随着屈服强度的降低,套管的承载能力必然改变,如果仍然以额定强度设计,安全系数会降低。

目前,针对地层高温条件下套管的力学性能影响的研究较多,宋焯焯等^[4]、李忠庆等^[5]建立水泥环与套管相互作用力学模型,研究水泥环结构参数和套管偏心率对套管强度的影响规律。通过计算结果,分析了水泥环弹性模量增加可以提高套管强度。Yang等^[6]、Rossi等^[7]、Wang等^[8]提出了一种用于超高温地热储层温控钻井的reelwell钻井方法。结合reelwell钻井3种循环模式下各流道的流动特性和传热机理,针对不同的热关联区域,建立了一套完整的瞬态传热模型。Agofack等^[9]为了热载荷对套管的影响,使用了一种改进的离散元方法(MDEM),使用真实的水泥和地层特性,研究了各向同性和各向异性边界应力。研究表明,除了套管压差外,套管压力、边界应力、水泥和岩石性质等其他参数也会影响套管力学性能。Wang等^[10]、赵向阳等^[11]、曹利民等^[12]建立了一种分析套管水泥环地层力学响应的热-力学耦合模型和分析方法。该模型可以简化为平面应变问题,在适当的边界条件下考虑了温度、压力和非均匀地应力的共同作用。开发了一种有限元方法来分析套管、水泥和地层的三维温度-应力相互作用,研究了非均匀载荷对套管和水泥应力和失效的影响。Valov等^[13]、Deng等^[14]、Chen等^[15]通过完全耦合的线性热孔隙弹性模型,描述了流体压力和非均匀地质应力对套管的机械压缩,以及套管相对于储层温度的加热或冷却。

以上文献主要研究中深层地热井中套管水泥

环相互作用机理,以及中深层地热井温度和压力对套管变形的内在原因,对于中深层地热井开采对套管的力学性能影响研究较少。中深层地热井开采过程中井筒热流体造成的瞬时高温条件,对套管的力学性能有较大的影响,本文基于以上文献研究的基础,建立中深层地热开采放热与套管相互作用力学评价的数学模型,并对中深层地热井开采对套损的影响进行有限元计算和试验模拟,分析和总结中深层地热井开采对套损的影响规律,评估套管的受力环境,水泥环强度,水泥环微间隙宽度以及井口套管的伸长量等参数。以期对预防套管变形提供措施,减少地热开采套管损坏有参考意义。

1 非均匀载荷下套管的数学力学模型

中深层地热开采过程中,地热能流体返上过程瞬时放出大量热量,而现场固井质量不好的情况下,环空存在圈闭空间,温度升高导致密闭各层套管间环空液体发生膨胀,形成环空圈闭压力。地热开采过程中井筒温度升高,导致圈闭压力升高和两端固定套管压缩载荷增加,套管挤毁失效和屈曲失效。在对井筒热应力耦合瞬态分析的过程中,基于以下基本假设:

(1)不考虑所分析层段的上下两个面的热量传递,只考虑井筒径向的热传递。(2)蒸汽直接从油管注入,均匀地与油管进行热交换,油管内表面温度一致。(3)油管和套管不存在偏心,在井内居中。(4)套管、水泥环和地层之间封固良好,不存在窜槽现象。基于套管-水泥环-地层岩石稳态热传导数学模型计算井筒温压场,套管热传导温度模型见图1。

井筒内循环介质温度场控制方程考虑成轴对称瞬态对流-传导方程:

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} + c_v \rho u \frac{\partial T}{\partial t} - K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

边界条件 $T = \bar{T}$, 给定温度值的边界,循环介质

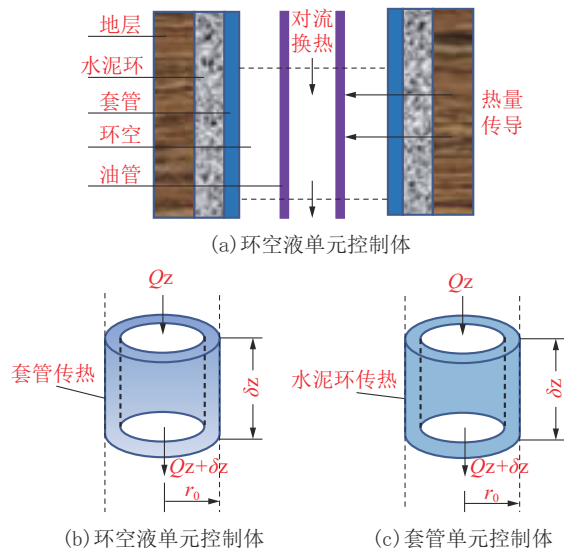


图 1 井筒与地层系统热交换及单元控制体
Fig.1 Heat exchange between wellbore and formation system and unit control body

进口边界条件为:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda(T - \bar{T}) \quad (2)$$

交换边界条件,如初始介质出口,初始条件 $T(P,0) = \bar{T}(P,0)$,井筒内任意点 P 处初始时刻 ($t=0$) 的温度值为地温值。

管壁及地层的温度场控制方程:

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} - K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: T ——温度, $^{\circ}\text{C}$; t ——时间变量, h ; K ——导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; c_v ——比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ ——介质密度, kg/m^3 ; u ——介质流速, m/s ; r ——径向坐标, m ; Z ——轴向坐标, m ; λ ——热交换系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$; n ——外法向。

边界条件: $T = \bar{T}$, $-K \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda(T - \bar{T})$, 初始条件: $T(P,0) = \bar{T}(P,0)$ 。

联立解(1)、(2)、(3)方程,即可得计算域的温度场。

套管在三轴应力下的热屈服由 Von Mises 等效应力(即材料力学中的第四强度理论)计算出,其表达式为:

$$2 \times \sigma_{vm}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (4)$$

当 σ_{vm} 大于材料的屈服极限 σ_y ,套管就发生塑性变形。在地热开采放热过程中,由于温度的变化,

套管材料的屈服强度也在变化,其表达式:

$$\sigma_y|_{T > 100\text{deg}\cdot\text{F}} = \sigma_y|_{\text{常温}} \cdot \left(1 - \frac{T - 100}{2333.3} \right) \quad (5)$$

2 地热开采放热试验分析

基于瞬态传热理论及地热开采放热实验数值(按照地热开采热推荐参数 $274468 \text{ J}/\text{kg}$)计算出井筒在分级固井过程中的瞬态温度场变化,以此确定试验的边界条件:模拟井深 4594 m ,使用某厂家生产的 $\text{O}244.48 \text{ mm} \times 11.99 \text{ mm HS110-BC}$ 型套管,施加初始受力 -898 kN ,最终受力 -1918 kN ;初始温度 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最终温度 $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$;施加初始外压 2.8 MPa ,最终压力 43.15 MPa 。

为了更直观地观察套管内外变形,对套管左端向右端切割截面1、截面2、截面3,切割前后套管变形如图2所示。

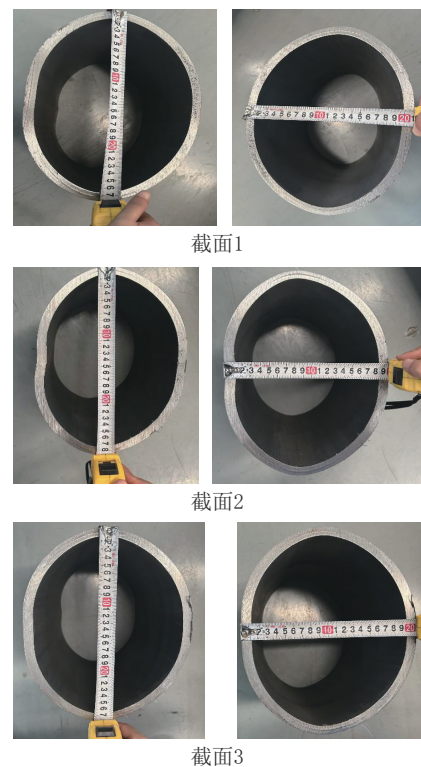


图 2 试样切割过程照片
Fig.2 Photos of sample cutting process

切开密封管后发现套管发生了明显的非均匀径向缩径变形,并检测套管变形情况和测量变形数据,截面1最大外径和最小外径分别为 275 mm 和 210 mm ,截面2最大外径和最小外径分别为 285

mm和195 mm,截面3最大外径和最小外径分别为280 mm和206 mm。测量位置的数据如表1所示。测量数据与套管变形前比较,在地热开采放热作用下,使套管发生了7.15~31.8 mm的长轴椭圆变形,即产生了较大的椭圆度,削弱了套管的抗挤强度。

表1 套管变形测量数据

Table 1 Measurement data of casing deformation

测量位置	外径/mm	
	最大	最小
截面1	250.45	243.55
截面2	259.89	234.06
截面3	275.3	216.43

如图3所示,在两个轴向,两个径向,分别安装4个应变片,采样频率为10个/s,共采集数据28万个。从应力-应变曲线图(图4)可得,轴向应力变化范围为300 MPa,应变达0.3%;周向应力变化范围为1.5 MPa,应变达0.042%。

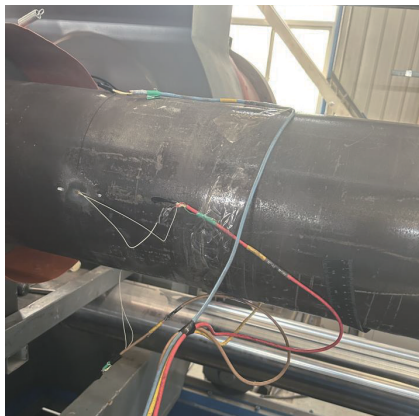


图3 应变片安装位置

Fig.3 Installation position of strain gauges

3 非均匀载荷的套损有限元计算结果分析

3.1 有限元计算模型建立

采用有限元分析软件ABAQUS对套管进行热力耦合分析,选用完全热力耦合分析方法,在分析中采用8节点六面体线性减缩积分单元C3D8T进行划分,分析中考虑套管、水泥环及地层的影响,进行载荷和边界条件的设置,对地层里层采用对称约束,外层施加地层压力,套管内壁面施加内压载荷,同时套管温度由30℃逐渐上升至150℃,有限元模型如图5所示。

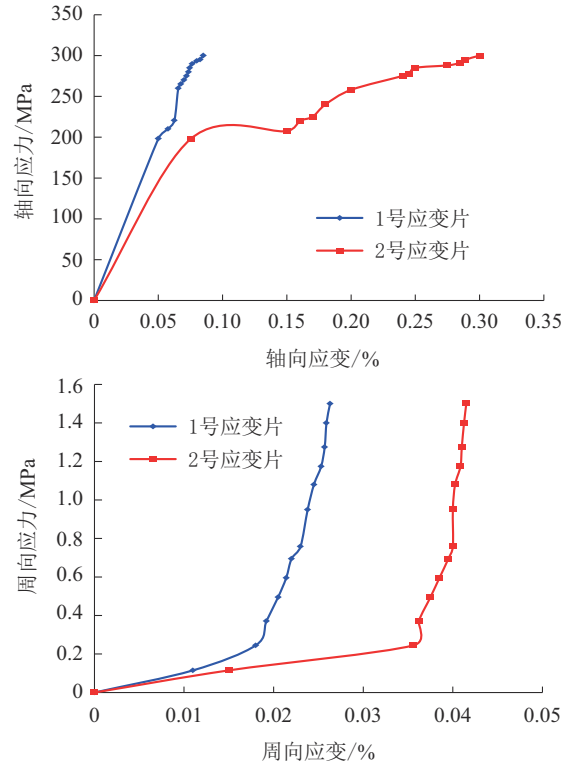


图4 轴向及周向应力应变曲线

Fig.4 Axial and circumferential stress-strain curves

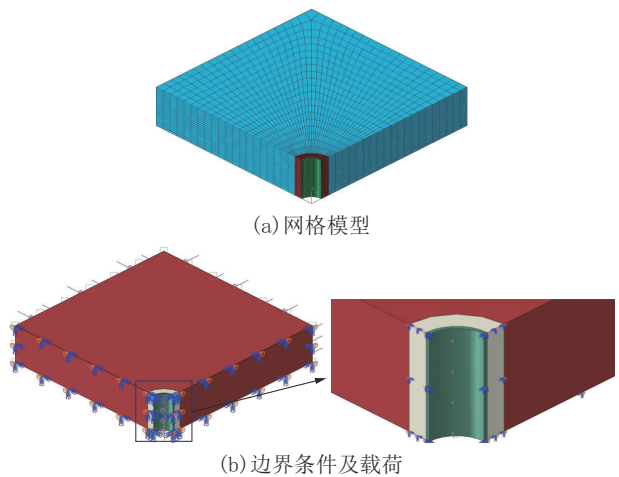


图5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

3.2 套管热应力分析

如图6所示,当内压为30 MPa、温度为30℃时,水泥环的应力在6.5~113 MPa范围内,套管的应力在166.3~645.7 MPa范围内,内壁面应力分布均匀,当温度为60℃时应力,套管应力最大值为894.2 MPa,应力沿周向分层分布,到120℃时Mises应力值已经达到1177.9 MPa。从图6整体变化云图发

现,当套管内温度从 60~150 °C,套管上下端开始出现应力集中,在高温的环境下套管上端发生塑性

变形。

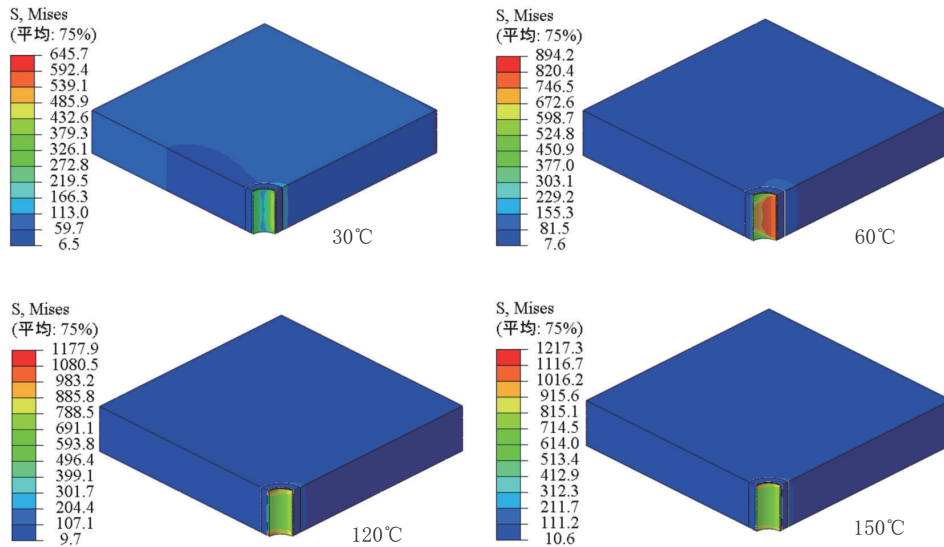


图 6 30 MPa 工况下 30~150 °C 套管 Mises 应力云图

Fig.6 Stress contour of casing at 30~150°C under 30MPa working condition

套管在内壁面受 30 MPa 内压的工况下,随着温度升高,套管内壁面沿轴线和周向方向的应力变化曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出,在 30 °C 时,套管内壁面在轴线方向上 Mises 应力值在 320~390 MPa,周向上应力值在 110~400 MPa 范围内变化。随着内壁面温度升高,整体应力值变大,周向上应力值逐渐升高,到 120~150 °C 时趋于稳定,周向应力值在 852~947 MPa 范围内。套管中段沿轴线方向的应力值在达到 60 °C 时基本稳定不变,为 750 MPa 左右,在 120~150 °C 时,只有上下端处应力值还在增大。

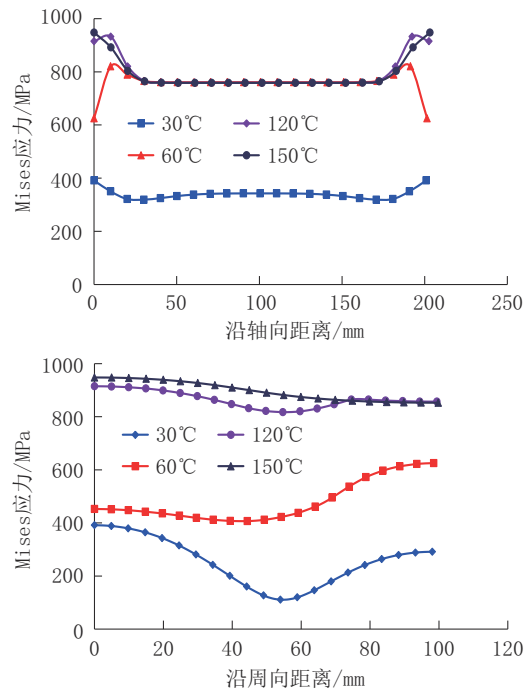


图 7 30 MPa 工况下沿轴向和周向路径应力变化曲线

Fig.7 Stress change curve along the axial and circumferential directions under 30MPa working condition

如图 8 所示,当内压达到 90 MPa 时,套管内温度为 30 °C 时,在地层径向压力不等的情况下,内壁面应力分布极不均匀,应力最大差值为 560 MPa,应力沿周向分层分布,受到地层径向压力大的一侧出现大范围的应力集中区域。当套管内温度从 60~150 °C,套管上下端开始出现应力集中,到 150 °C 时 Mises 应力值已经达到 1117.7 MPa,在高温的环境下套管端口已经出现塑性破坏。

从图 9 所示的应力变化曲线可看出,90 MPa 工况下随着温度的升高,套管内壁面中段应力值几乎不变,只有上下端应力值有所改变,当温度达到 120 °C 之后,应力变化分布趋于稳定。

当套管内壁面内压为 120 MPa 时,Mises 应力分布较均匀且最大应力值降低(如图 10 所示),套管

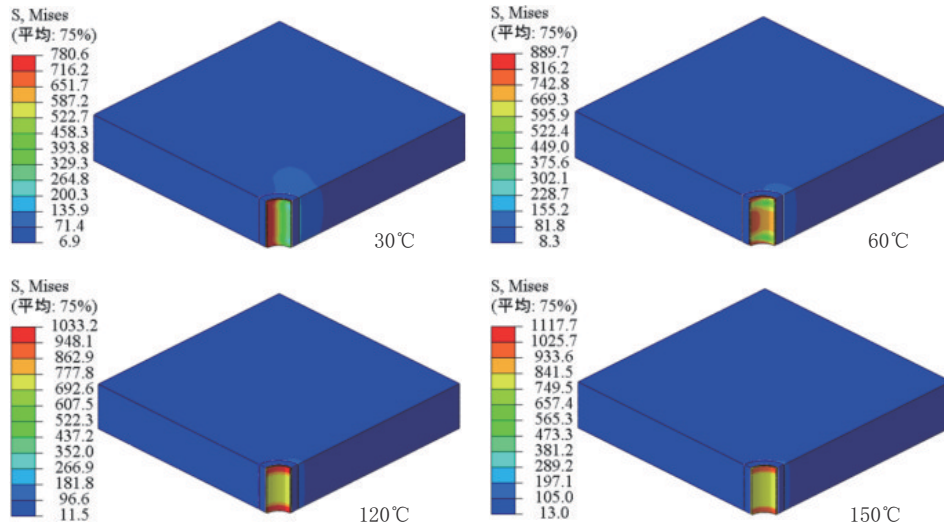


图8 90 MPa 工况下 30~150 °C 套管 Mises 应力云图

Fig.8 Stress contour of casing at 30~150 °C under 90MPa working condition

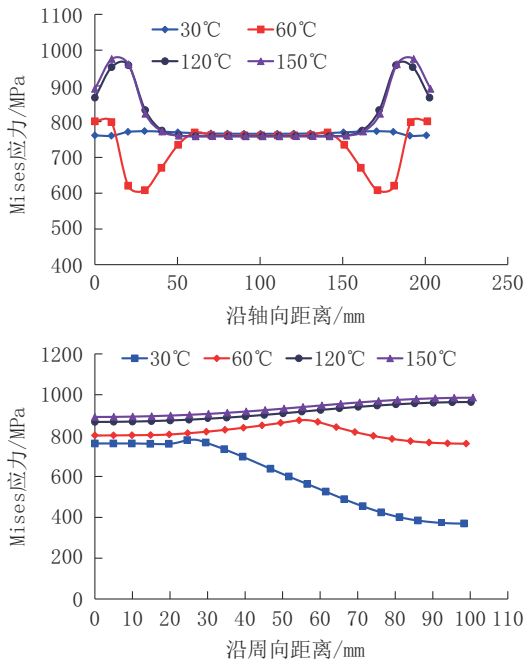


图9 90 MPa 工况下沿轴向和周向路径应力变化曲线

Fig.9 Stress variation curve along the path under 90MPa working condition

整体处于高应力状态,随着温度的升高上下端处应力值变大,出现塑性破坏的风险较大。

图 11 所示为 30 MPa 内压工况下,套管与水泥环接触的外壁面接触压力云图。从图 11 可以看出,随着内压的增大,接触压力云图基本无变化,内压的增大对套管和水泥环表面接触压力分布影响不大。如表 2 所示,当内压从 30 MPa 增大到 90 MPa,

最大接触压力值增长幅度较小,温度升高的同时接触压力增幅略有增大,当内压增大至 120 MPa 时,30~150 °C 下套管的接触压力值相比于 90 MPa 时要明显增大,平均增长 15 MPa 左右。

图 12 所示为 30 MPa、30 °C 工况套管位移云图。从图 12 可以看出,地层边缘位移较大,最大位移约为 5.6 mm,套管右边缘位移较大,最大位移约为 1.1 mm。如表 3 所示,当内压在 30~90 MPa 范围内,温度在 30~60 °C 范围内时,最大位移值有轻微变化,当温度达到 120~150 °C 后,套管处于较为恶劣的热力环境,位移值明显要大于 60 °C 工况时,热应力的变大导致套管塑性变形严重,同时内压增大到 120 MPa 时,套管内壁整体呈高应力状态,更易导致壁面出现塑性破坏。

4 结论

本文基于套管-水泥环-地层岩石稳态热传导数学模型计算井筒温压场,建立中深层地热开采放热与套管相互作用力学评价的数学模型,并对中深层地热开采放热对套损的影响进行有限元计算和试验模拟,得到以下结论:

(1) 在地热开采井筒放热作用下,使套管发生了 7.15~31.8 mm 的长轴椭圆变形,即产生了较大的椭圆度,削弱了套管的抗挤强度。

(2) 随着温度和压力增大,套管最大应力值先增大再变小最后趋于稳定,90 MPa 工况下,随着温度的升高,套管内壁面中间段应力值几乎不变,当

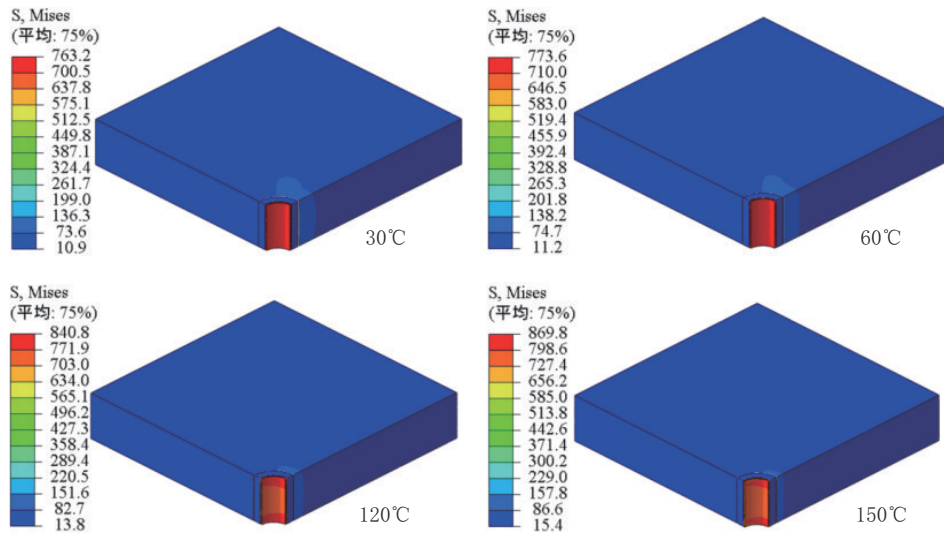


图 10 120 MPa 工况下 30~150℃ 套管 Mises 应力云图

Fig.10 Stress contour of casing at 30~150℃ under 120MPa working condition

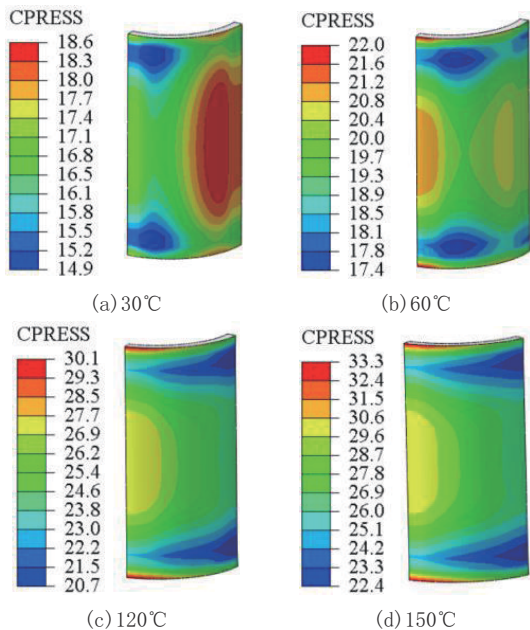


图 11 30~150℃ 套管外壁面接触压力云图

Fig.11 Contact pressure contour on outer wall of casing at 30~150℃

表 2 套管最大接触压力值 MPa

工况	30℃	60℃	120℃	150℃
30MPa	18.6	22.0	30.1	33.3
60MPa	20.1	23.4	32.2	36.5
90MPa	21.8	26.6	37.8	42.4
120MPa	36.8	41.7	52.4	57.4

表 3 套管最大位移值 mm

工况	30℃	60℃	120℃	150℃
30MPa	1.1	1.5	2.3	2.7
60MPa	1.1	1.5	2.4	2.9
90MPa	1.1	1.6	2.6	3.1
120MPa	1.7	2.1	3.0	3.5

温度达到 120℃ 之后,应力变化分布趋于稳定。当套管承受内压为 120 MPa 时,应力分布较均匀且最大应力值降低,套管整体处于高应力状态,随着温度的升高上下端处应力值变大,出现塑性破坏的风险较大。内压在 30~120 MPa 范围时,随着温度和内压的增大,接触压力云图基本无变化,对套管和水泥环表面接触压力分布影响不大。

(3) 当内压在 30~90 MPa 范围内,温度在 30~60℃ 范围内时,最大位移值有轻微变化,当温度达到 120℃,内压增大到 120 MPa 时,套管处于较为恶劣的热力环境,热应力的变大导致套管塑性变形严重,同时,套管内壁整体呈高应力状态,易导致壁面出现塑性破坏。

(4) 分析结果为地热井开采对套损的影响规律、评估套管的受力环境、水泥环强度、水泥环微间隙宽度以及套管变形等参数奠定试验和理论基础,对预防套管变形提供措施、减少地热开采套管损坏有着重要的意义。

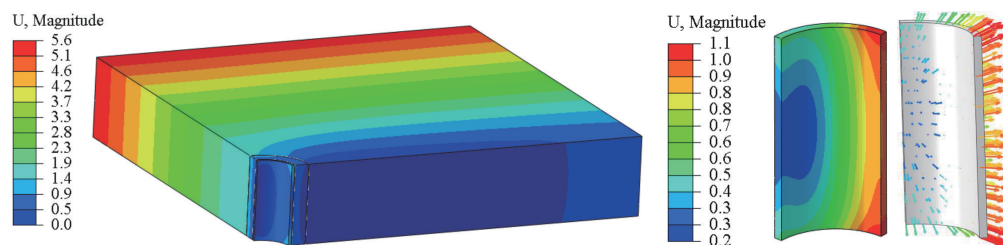


图 12 30 MPa、30 °C 工况位移云图

Fig.12 Displacement contour under 30MPa and 30°C

参考文献(References):

- [1] 许振华,陈晨,钟秀平,等.干热岩长期开采过程中水岩作用的研究进展[J].钻探工程,2023,50(S1):44-49.
XU Zhenhua, CHEN Chen, ZHONG Xiuping, et al. Research progress on water-rock interaction during long-term mining of hot dry rock[J].Drilling Engineering, 2023,50(S1):44-49.
- [2] 王勇军,聂德久,张涛,等.雄安新区D19地热勘探井钻探技术及成果[J].钻探工程,2023,50(S1):299-304.
WANG Yongjun, NIE Dejiu, ZHANG Tao, et al. Drilling technology and achievements of D19 geothermal exploration well in Xiong'an New Area[J].Drilling Engineering, 2023, 50 (S1):299-304.
- [3] 谭建国,洪毅,张所邦,等.近井口高压管汇布置结构设计及选材优化研究[J].钻探工程,2022,49(5):163-170.
TAN Jianguo, HONG Yi, ZHANG Suobang, et al. Structural design and material selection optimization for high pressure manifolds near the wellhead[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):163-170.
- [4] 宋焯炜,董泽训,李宽,等.水泥环参数和套管形状参数对套管强度的影响[J].钻探工程,2021,48(2):70-77.
SONG Yewei, DONG Zexun, LI Kuan, et al. The influencing of cement sheath parameters and casing shape parameters on casing strength[J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):70-77.
- [5] 李忠庆,李传武,朱达江.利用环空压力测试数据评价高温高压气井固井水泥环的密封完整性[J].钻探工程,2021,48(6):15-21.
LI Zhongqing, LI Chuanwu, ZHU Dajiang. Cement integrity evaluation of HTHP gas wells based on annulus pressure diagnosis test [J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):15-21.
- [6] Yang Hongwei, Li Jun, Zhang Hui, et al. Thermal behavior prediction and adaptation analysis of a reelwell drilling method for closed-loop geothermal system[J]. Applied Energy, 320(2022)119339.
- [7] Rossi Edoardo, Jamali Shahin, Wittig Volker, et al. A combined thermo-mechanical drilling technology for deep geothermal and hard rock reservoirs [J]. Geothermics, 85(2020)101771.
- [8] Wang Sheng, Li Zhijun, Chen Qiang, et al. A combined thermo-mechanical drilling technology for deep geothermal and hard rock reservoirs [J]. Geothermics, 96(2021)102196.
- [9] Agofack N, Larsen I, Opedal N, et al. Effect of casing stand-off on cracks creation around the wellbore [C]//56th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2022.
- [10] Wang Y, Gao D, Wang J, et al. Study on the Integrity Assessment and the Prevention Measures for High Temperature and High Pressure HT&HP Wellbores [C]//Offshore Technology Conference, 2020.
- [11] 赵向阳,赵聪,王鹏,等.超深井井筒温度数值模型与解析模型计算精度对比研究[J].石油钻探技术,2022,50(4):69-75.
ZHAO Xiangyang, ZHAO Cong, WANG Peng, et al. A comparative study on the calculation accuracy of numerical and analytical models for wellbore temperature in ultra-deep wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022,50(4):69-75.
- [12] 曹利民,王成文,刘宝山,等.套管-水泥-地层系统水泥层应力分析[J].山东理工大学学报(自然科学版),2022,36(1):1-7.
CAO Limin, WANG Chengwen, LIU Baoshan, et al. Stress analysis of cement layer in casing-cement-stratum system [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2022,36(1):1-7.
- [13] Valov A.V., Golovin S.V., Shcherbakov V.V., et al. Thermo-poroelastic model for the cement sheath failure in a cased and cemented wellbore [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 210(2022)109916.
- [14] Deng Kuanhai, Yuan Yue, Hao Yi, et al. Experimental study on the integrity of casing-cement sheath in shale gas wells under pressure and temperature cycle loading [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 195(2020)107548.
- [15] Chen S, Jin J Z, Shen J, et al. Monitoring Evolution of Temperature and Strain in Cement Sheath Using Embedded Optical Fiber Bragg Gratings [J]. SPE Journal, 2023,28(1):19-31.

(编辑 荐华)