

· 应用与服役 ·

高强度热采套管 TP110H 的 350 °C 高温力学性能研究



吴亮亮, 吴永超, 周家祥, 张旭
(天津钢管制造有限公司, 天津 300301)

摘要: 针对热采井 350 °C 高温、17 MPa 高压以及多轮次蒸汽吞吐的特殊工况, 研究了 TP110H 在首次注汽和多轮次注采循环时的力学特性, 试验表明: TP110H 管在注热时, 产生热应力达 764 MPa, 材料产生少量的塑性应变和应力松弛效应; 15 轮次蒸汽吞吐的管柱应力基本稳定, 实验前后常温时的强度和延伸率基本没有变化; 实验前后 350 °C 时的高温屈服强度降低约 50 MPa, 抗拉强度降低约 13 MPa, 断后延伸率降低约 2%。

关键词: 热采井; 蒸汽吞吐; 套管; 应力松弛

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00194 **中图分类号:** TG142. 1

Study On 350 °C High Temperature Mechanical Properties of High Strength TP110H Thermal Production Well Casing Pipe

Wu Liangliang, Wu Yongchao, Zhou Jiexiang, Zhang Xu
(Tian Jin Pipe Corporation, Tianjin 300301, China)

Abstract: In view of the special working conditions of 350 °C high temperature, 17 MPa high pressure and multiple cycles of steam huff and puff in thermal production wells, the mechanical properties of TP110H during the first steam injection and multiple cycles of injection and production are studied. The test shows that TP110H generates thermal stress up to 764 MPa during thermal injection, and the material generates a small amount of plastic strain and stress relaxation effect. The string stress of 15 rounds of steam huff and puff is basically stable, and the strength and elongation at room temperature are basically unchanged before and after the experiment. The high-temperature yield strength at 350 °C decreases by about 50 MPa, the tensile strength decreases by about 13 MPa, and the elongation after fracture decreases by about 2%.

Key Words: Thermal Production Well; Steam Huff and Puff; Casing Pipe; Stress Relaxation

目前世界上常规原油的可采储量预计为 $1.272 \times 10^8 \text{ m}^3$, 有理由预测, 随着常规原油产量的递减, 21 世纪会以稠油开采为重点, 弥补石油能源的不足^[1]。国内也有着丰富的稠油资源, 据不完全统计, 探明和控制储量已达 16 亿吨, 且大部分油藏均为埋藏深、流动性差的沥青质稠油, 只有高温降粘后才能进行开采^[2]。稠油开采主要以循环蒸汽吞吐方式为主, 循环变温对套管材料造成一定的损伤, 引发的套损也最严重^[3-4], 据不完全统计, 近 40 年来, 热采井套损率持续高居 15% ~ 30% (局部高达 70%), 平均单井年修井费用 100 万元, 国内每年因套损投入逾 200 亿元, 经济损失巨大^[5]。

研究表明, 对于 API 标准套管, 热采井套损机理为注蒸汽阶段时, 固井后的套管柱受到水泥环的约束性热膨胀, 高温 (350 °C) 热应力超出材料弹性极限, 产生一定量的塑性应变, 即热塑性失效, 然后在蒸汽吞吐的循环变温时, 塑性应变累积, 达到材料

的塑性极限后, 产生变形、缩颈、断裂等, 引起管柱失效^[6-7]。目前, 采用非 API 高强度高热稳定性套管是缓解热采套损、延长管柱寿命的主要途径之一^[8-9]。但是, 对于高强度热采套管材料在高温 (350 °C) 和温度交变工况下的力学特性尚未进行深入研究, 因此, 本文以 TP110H 热采套管为研究对象, 分析了该材料在蒸汽吞吐工况下的性能变化, 为国内深层高粘稠油热采管柱的设计提供参考。

1 TP110H 热采套管的成分及力学性能要求

TP110H 材料为 Mn-Cr-Mo 系微合金钢, 其生产工艺流程为: EAF-LF+VD-CCM-热连轧-调质, 化学成分要求见表 1, 力学性能要求见表 2。

表 1 TP110H 管的化学成分要求 (质量分数)

Table 1 Chemical composition requirements of TP110H tube								
								%
C	Mn	Cu	Mo	Cr	Ni	P	S	Si
≤0.35	≤1.50	≤0.25	≤0.60	≤1.50	≤0.25	≤0.025	≤0.025	≤0.40

表 2 TP110H 管常温和高温力学性能要求

Table 2 Mechanical properties of TP110H tube at normal and high temperature

常温力学性能			350 °C 高温力学性能		
Rt _{0.6} /MPa	Rm/MPa	A/%	Rt _{0.6} /MPa	Rm/MPa	A/%
758 ~ 990	≥862	≥13	700 ~ 900	≥780	≥13

2 热膨胀性能

套管材料在受热时,会产生一定的热膨胀,而套管材料的成分体系和热处理方式固定后,膨胀量只跟温度有关。本文依据 GB/T 4339-2008《金属材料热膨胀特征参数的测定》进行 TP110H 和 API 套管 P110 平均线膨胀系数测定,如图 1 所示。

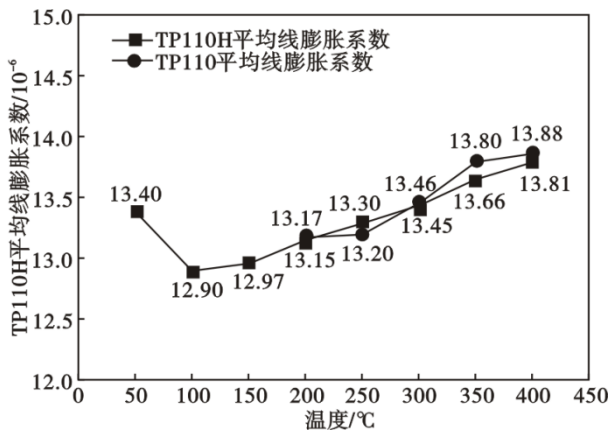


图 1 TP110H 和 P110 平均线膨胀系数

Fig. 1 Mean linear expansion coefficient of TP110H and P110

由图 1 可以看出,TP110H 和 P110 材料平均线膨胀系数基本在 (13 ~ 14) × 10⁻⁶/°C,差别不大。影响材料膨胀性能的主要因素为相变、材料成分与组织、各向异性等。TP110H 和 P110 均为调质态,热处理方式一致,成分体系都是以 Mn-Cr-Mo 为主的微合金钢,组织都是回火马氏体,升温至 350 °C 时基本不发生组织转变。因此,平均线膨胀系数差异性不明显。

3 注蒸汽过程中套管的应力应变特性

自由膨胀时,套管材料的热应变可以根据式 (1),即平均线膨胀系数和温差理论算出,

$$\varepsilon_T = \alpha \times \Delta T \quad (1)$$

式中,ε_T-热应变,α-线膨胀系数,ΔT-温差。注蒸汽时,温度由 20 °C 升温至 350 °C,TP110H 材料的热应变为 0.004 5,即 0.45%。

管柱在固井后,管壁与接箍受到水泥环和地层

的约束,不会发生自由膨胀,从而产生热应力,为轴向压缩应力,根据 SY/T 6952.1-2014《基于应变设计的热采并套管柱 第 1 部分:设计方法》,热应力可根据式 (2) 进行计算:

$$\sigma_T = E_T \times \varepsilon_T \quad (2)$$

式中,σ_T-热应力,E_T-3 温度为 T 时弹性模量。经试验测定 TP110H 在 350 °C 的弹性模量为 1.7 × 10⁵ MPa,可以计算出 350 °C 时的管柱热应力为 766 MPa。TP110H 在 350 °C 时的应力应变曲线如图 2 所示。

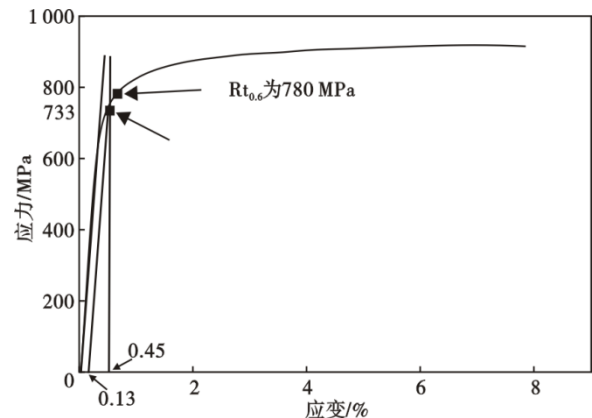


图 2 TP110H 在 350 °C 时的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of TP110H at 350 °C

由图 2 看出,TP110H 在 350 °C 时,热应变为 0.45% 时的热应力为 733 MPa,与理论值 766 MPa 存在 33 MPa 的差异,主要是因为 TP110H 在超过弹性极限后,发生连续屈服行为,应力应变曲线斜率呈下降趋势,产生塑性应变。根据应力应变曲线,可知塑性应变为 0.13%。

考虑到油田蒸汽注入和焖井的时间较长,一般可达 15 ~ 20 天,远高于实验室拉伸试验时间,因此,材料在 0.45% 应变条件下长期保持固定应变,最终应力是管柱的真实受力状态。对 TP110H 材料进行 350 °C 应力松弛试验,试验时间为 60 min,试验结果如图 3 所示。

由图 3 看出,TP110H 在 350 °C,0.45% 应变时,初始应力达到 720 MPa,60 min 后,应力降低至 660 MPa,应力降低约 60 MPa。同时,在材料松弛的过程中,初始阶段速度较快,600s 出现拐点,1 000s 后下降平缓。通过对应力-时间进行拟合,得到式 (3) 经验公式:

$$\sigma = 29.39 \times e^{\left(\frac{-t}{1430.69}\right)} + 438.81 \times e^{\left(\frac{-t}{114.67}\right)} + 654.14 \quad (3)$$

式中:σ-应力,MPa;t-时间,s。

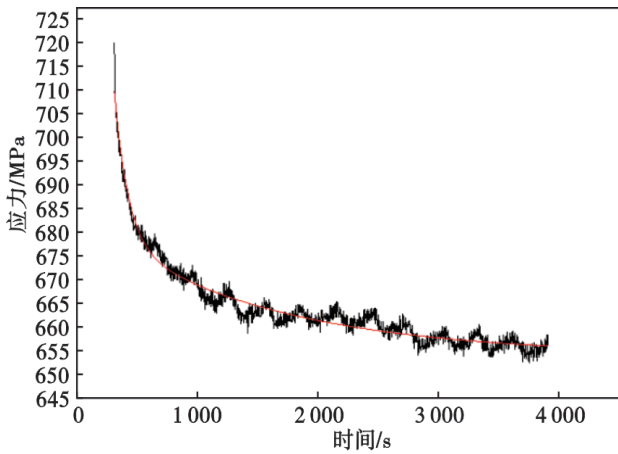


图 3 TP110H 在 350 °C、0.45% 应变的应力松弛

Fig. 3 Stress relaxation of TP110H at 350 °C and 0.45% strain

高温应力松弛为材料的固有属性,与化学成分、热处理制度、强化方式、金相组织等有直接关系,影响管柱在蒸汽吞吐过程中的应力特性。

4 蒸汽吞吐过程中套管的应力应变特性

热采井在 20 天左右的注蒸汽和焖井后,进入采油阶段,此时,管柱温度逐渐降低至地层温度,达到平衡状态,管柱由压缩应力转变为拉伸应力。多次蒸汽吞吐时,管柱在压应力和拉应力之间交替循环。此过程难以通过理论进行计算和分析,本文通过实验室实物试验模拟了管柱蒸汽吞吐过程中管柱的受力情况。试验参考标准 ISO 12835-2013《热采井用套管接头评价标准》,条件为:

套管:TP110H ;

控制方式:试样两端位置约束,采用横定位移控制;

加热:加热温度 350 °C,整管加热(带接头);

压力:17 MPa ;

循环次数:15 次;

整管试验方案流程:(1)试样准备、螺纹加工、材料常温高温性能;(2)抗粘扣评价、三上三卸;(3)注蒸汽模拟、温度 350 °C 5 天、保持轴向零应变、内压 17 MPa;(4)蒸汽吞吐模拟、15 轮次 50 ~ 350 °C 循环、内压 17 MPa、保持轴向零应变;(5)材料性能、数据分析;

试样安装如图 4 所示。

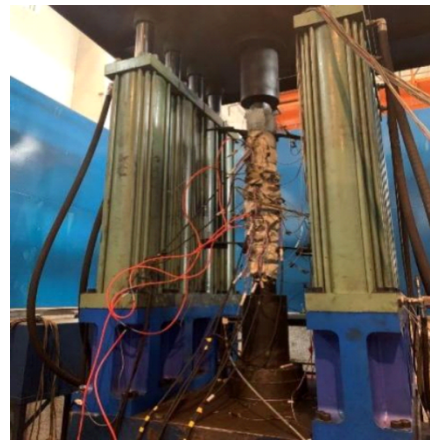


图 4 TP110H 整管试样安装

Fig. 4 Installation of TP110H whole tube tested sample

试样设备为 1 500 t 复合力试验系统,最大拉载 1 500 t,采用国际先进的应变测量和液压控制系统,可实现套管+接头的试验段应变精准测量和基于应变的载荷控制。模拟了管柱 15 轮次的蒸汽吞吐过程,试验结果如图 5 所示。

由图 5 看出,首次注汽时,管柱达到最大压应力

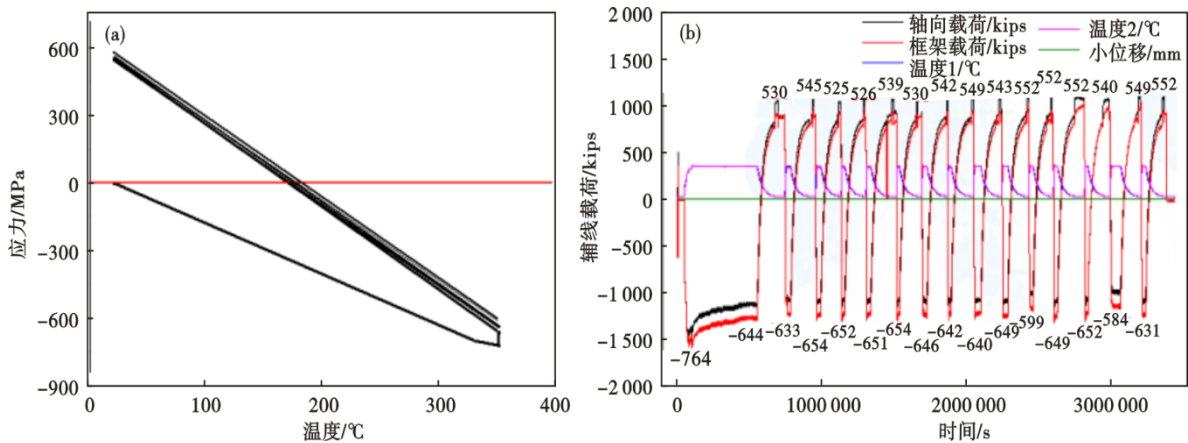


图 5 管柱 15 轮次循环试验结果

Fig. 5 Test results of 15 cycles of pipe string

-764 MPa, 保持固定应变, 5 天后管柱应力降低为 -644 MPa, 主要因为材料在 350 °C 时发生应力松弛, 5 天长时间松弛量达到 120 MPa。在随后 15 轮次温度升降循环过程中, 管柱高温为压应力, 基本稳定, 应力波动范围为 -654 ~ -584 MPa, 低温时为拉应力, 也基本稳定, 波动范围为 525 ~ 552 MPa。对蒸汽吞吐模拟实验前后样管进行力学性能检测, 结果见表 3。

对比 15 轮次试验前后的试样性能可以看出, 常温时的强度和延伸率基本没有变化, 这与常温时管柱的应力未超出弹性极限有关, 材料在常温时未产生塑性形变, 只在弹性范围承受 15 轮次的拉应力循环, 对力学性能基本没有影响。而 350 °C 时的高温屈服强度降低约 50 MPa, 抗拉强度降低约 13 MPa, 断后延伸率降低约 2%, 这与材料在 350 °C 时产生应力松弛和微量塑性应变有关, 材料发生了一定量的软化效应。

5 结论

(1) TP110H 热采井管柱在 350 °C 注蒸汽时, 产

表 3 TP110H 试验前后的拉伸性能

Table 3 Tensile properties before and after TP110H test

序号	蒸汽吞吐模拟试验前				蒸汽吞吐模拟试验后				温度 / °C
	R _{p0.2} / MPa	R _{t0.6} / MPa	R _m / MPa	A / %	R _{p0.2} / MPa	R _{t0.6} / MPa	R _m / MPa	A / %	
1	971	971	1046	22	952	949	1072	21	23
2	958	958	1033	20	932	932	1066	21	23
3	949	952	1046	20	949	945	1069	20	23
4	939	932	1037	21	962	955	1072	21	23
5	829	826	962	26	785	762	948	24	350
6	829	823	962	22	761	745	945	22	350
7	838	825	965	26	777	767	954	23	350
8	835	823	962	26	794	768	951	24	350

生约 764 MPa 的热应力, 材料产生少量的塑性应变和应力松弛效应。

(2) 15 轮次蒸汽吞吐, 管柱高温压应力波动范围为 -654 ~ -584 MPa, 低温拉应力波动范围为 525 ~ 552 MPa。实验前后常温时的强度和延伸率基本没有变化, 350 °C 时的高温屈服强度降低约 50 MPa, 抗拉强度降低约 13 MPa, 断后延伸率降低约 2%。

参考文献

- [1] 唐春燕, 刘蜀知. 稠油热采技术综述[J]. 内蒙古石油化工, 2007, 66(6): 128-130.
- [2] 杨杰. 热采井套管应力的弹塑性分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [3] 李纪顺, 贺占山, 安琳, 等. 超稠油热采技术研究[J]. 化学工程与装备, 2015, 47(4): 146-147.
- [4] 陈阳, 雒设计, 韩礼红, 等. 80 钢级热采井套管材料的研究与发展趋势[J]. 化工技术与开发, 2019, 48(5): 39-42.
- [5] 韩礼红, 谢斌, 王航, 等. 稠油蒸汽吞吐热采井套管柱应变设计方法[J]. 钢管, 2016, 45(3): 11-18.
- [6] 于登科. 超稠油热采套管损坏机理分析[J]. 内蒙古石油化工, 2013, (22): 64-66.
- [7] 王建军, 杨尚谕, 纪海涛等. 基于应变数值分析的稠油热采井套管优选[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(1): 42-45.
- [8] 卢小庆, 李勤, 李春香. 高强度稠油热采井专用套管 TP110H 的开发[J]. 钢管, 2007, 36(5): 14-17.
- [9] 唐科, 王秀敏, 彭俊, 等. 稠油热采井用 110SH-1 钢级热采套管的开发[J]. 特殊钢, 2020, 41(4): 43-47.