

注CO₂管柱预应变和循环加载力学性能实验研究

马建杰¹, 姚峰¹, 郑昕¹, 储明来²

(1. 中国石化江苏油田分公司石油工程技术研究院, 江苏 扬州 225009 2. 中国石化江苏油田分公司工程技术服务中心, 江苏 扬州 225200)

摘要:在CO₂驱提高油田采收率过程中,经常发生注采管柱断裂失效的现象,严重影响生产及驱油整体效益。通过H₂S与CO₂复合环境下管柱的预应变和循环加载实验,明确了管材力学性能的衰减规律,并分析了现场生产中对应的实际工况,提出了预防对策。经现场应用,取得了很好的预防效果,管柱断裂频次大幅下降。

关键词:硫化氢;预应变;循环加载;二氧化碳;管柱断裂

中图分类号:TE35 **文献标志码:**A

Experimental study on mechanical properties of pre-strain and cyclic loading of CO₂-injected string

MA Jianjie¹, YAO Feng¹, ZHENG Xin¹, CHU Minglai²

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China; 2. Engineering and Technical Service Center of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225200, China)

Abstract: In enhancing oil recovery by CO₂ flooding, fracture of injection-production string often occurs, seriously affecting the overall efficiency of production and oil displacement. Based on the pre-strain and cyclic loading experiments of the pipe column under the composite environment of H₂S and CO₂, the decay law of the mechanical properties of the pipe was clarified. The corresponding working conditions in the field production were analyzed, and preventive countermeasures were proposed. After field application, an excellent preventive effect was achieved, and the frequency of pipe string fracture was reduced significantly.

Key words: H₂S; pre-strain; cyclic loading; CO₂; string fracture

引用格式: 马建杰, 姚峰, 郑昕, 等. 注CO₂管柱预应变和循环加载力学性能实验研究[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(4): 484-486.

MA Jianjie, YAO Feng, ZHENG Xin, et al. Experimental study on mechanical properties of pre-strain and cyclic loading of CO₂-injected string [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4): 484-486.

CO₂驱已成为东部老油田增产的一项重要技术手段^[1-4]。江苏油田在2022年实现注CO₂近7×10⁴ t, 增油2.3×10⁴ t, 取得了较好的经济效益。但在CO₂注采过程中, 陆续有部分注采井发生管柱断脱^[5], 严重影响生产。

通过CO₂注采管柱在H₂S环境下的力学性能实验, 明确了管柱分别在受拉变形工况(预应变)和间歇注入工况(循环加载)下, 管材力学性能的变化规律, 结合现场实际, 提出了管柱失效预防对策, 为CO₂驱安全实施提供支撑。

1 管材力学性能实验

选取油田常用N80新油管管材, 截取部分加工为工字形试件(见图1), 利用美国Corrtest公司开发的高温高压慢拉伸实验装置, 对试件在H₂S-CO₂环

境下的力学性能进行研究。

1.1 预应变对管材力学性能的影响

为了研究管材在微变形条件下力学性能的变化, 在管材预应变加载后, 进行不同H₂S分压下的拉伸试验。

实验过程: 首先在空气环境对N80管材施加5%, 10%和15%的预应变, 然后将已产生预应变的管材在H₂S环境下, 进行慢应变速率拉伸实验, H₂S分压为0.1MPa和0.2MPa, 应变速率为1×10⁻⁶s⁻¹, 实验结果如图2、图3所示。

收稿日期: 2023-07-09; 改回日期: 2023-08-21。

第一作者简介: 马建杰(1983—), 高级工程师, 现主要从事油气开采方面的工作。E-mail: majianjie.jsyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石化江苏油田分公司科技攻关项目“CO₂注采井管柱失效机理研究与综合防治”(JS21013)。

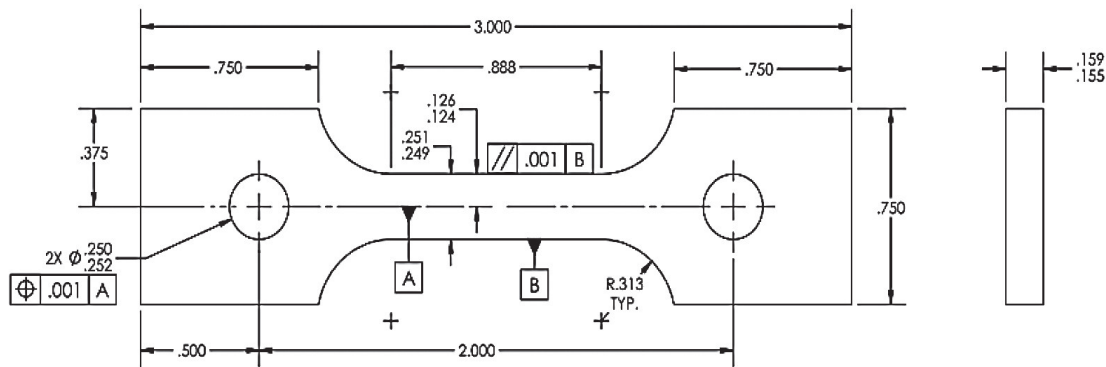


图1 慢应变速率拉伸实验试样尺寸

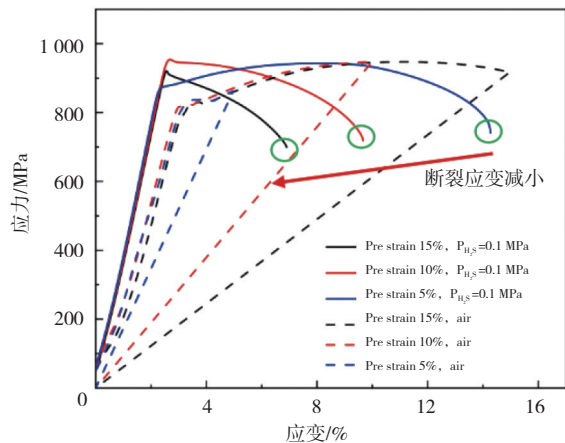


图2 H₂S分压0.1MPa不同预应变N80应力应变曲线

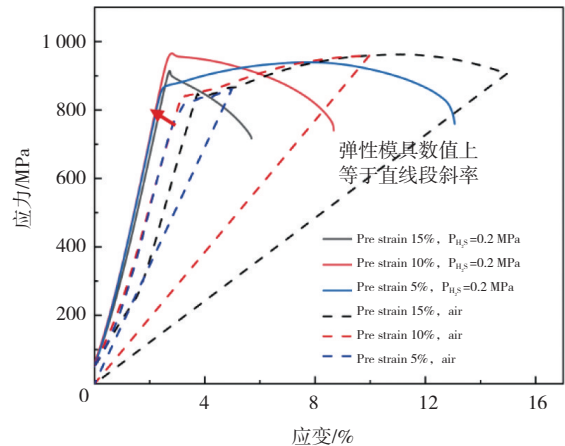


图3 H₂S分压0.2MPa不同预应变N80应力应变曲线

实验分析:①随着预应变的逐渐增加,N80管材的断裂应变逐渐减小;②当预加载应变为10%及15%时,材料的断裂模式发生明显变化:应力达到屈服点后,强度快速下降,无均匀变形或非均匀变形阶段而直接发生断裂,呈现出脆性断裂的趋势。③对比图2和图3可以看出,随着H₂S分压的升高,材料分别在5%,10%,15%预应变下的屈服强度、抗拉强度及断裂应变无明显差别。

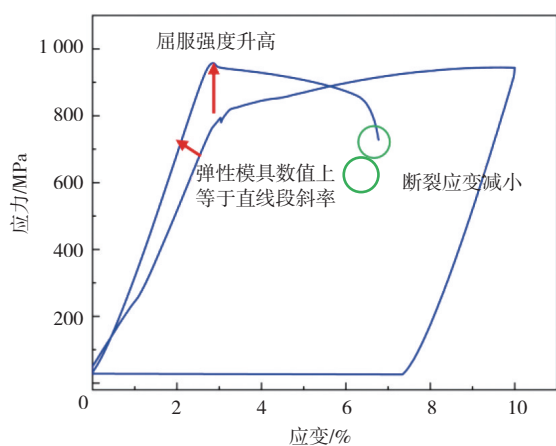
如图2,在不同加载预应变下,材料的断裂应变迅速下降(预加载5%应变断裂应变13%,预加载15%应变断裂应变6%)。说明针对H⁺与位错交互作用导致的脆性准解理断裂以及力学性能退化,主要是由于位错导致的,当材料已萌生大量位错时,H⁺会加速已萌生位错的平面滑移,位错密度越大,H⁺致位错平面滑移趋势越大,导致材料发生低应变脆断。相反,虽然H₂S分压的升高会导致H⁺浓度的升高,但针对脆性断裂过程,H⁺仅能与脆性裂纹尖端的位错发生交互作用。因此可知针对H₂S慢应变速率拉伸试验,位错密度是引起材料力学性能退化的主要因素。

1.2 循环加载对管材力学性能的影响

为了探究循环加载对N80管材力学性能的影响,进行了基于拉-压循环的循环加载慢拉伸实验,H₂S分压为0.2 MPa,应变速率为 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

实验过程:将管材加载至0.1应变后,卸载,重新加载,分析管材性能变化。

实验分析:①N80管材在H₂S环境下并不耐循环加载,循环加载一个周期以后,材料的断裂应变明显降低,对比慢应变速率拉伸试验可知,断裂应变由13.5%降低至6.8%,下降50%;②循环加载一个周期以后,材料的弹性模量,屈服强度,均匀变形段强度升高,这主要是由于循环加载过程中位错快速萌生导致的硬化,材料整体变得“硬而脆”;③循环加载实验结果与预加载应变实验结果类似,循环加载与预加载应变均会导致位错密度的快速上升,在H₂S环境服役时,由于变形产生的位错会与H⁺发生交互作用,导致在随后的加载过程中,位错的运动形式由交滑移转为平面滑移,同时也导致材料局部的强度进一步升高。

图4 N80在H₂S环境的循环加载曲线

2 管柱失效原因分析

从管材的预应变慢拉伸实验,可以得出管材在H₂S-CO₂环境下:①预应变越大,材料的断裂应变越小;②当预加载应变大于10%后,材料的断裂模式发生明显变化,无均匀变形期,整体呈脆性断裂;③预加载应变导致材料的弹性模量升高,韧性降低,抗H₂S应力腐蚀开裂性能降低。在油田现场实际生产中,新旧油管混用的情况十分普遍,部分旧油管(特别是在之前的服役过程中,遇卡后大载荷解卡拉过的油管,已经发生了一定的微变形),在H₂S-CO₂环境下因为存在预应变容易导致管柱脆断(无颈缩现象)。

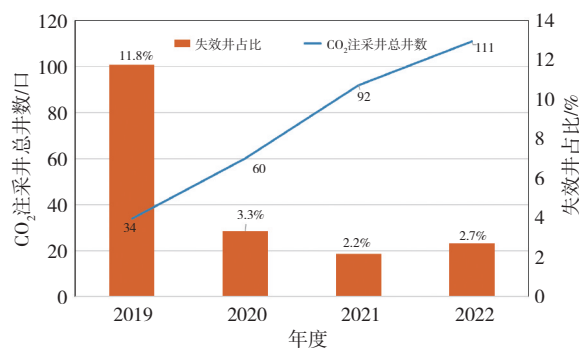
通过管材的循环加载慢拉伸实验,可以得出管材在H₂S-CO₂环境下:①循环加载导致材料的弹性模量、屈服强度明显升高,材料变得硬而脆;②循环加载卸载后,材料的断裂应变明显降低,断裂应变由13.5%降低至6.8%,下降50%。在油田现场实际生产中,CO₂注入井间歇注入时,管材不断重复加载、卸载,引起管材的断裂应变减小,韧性降低,长期循环加载、卸载后,容易导致管材性能下降,发生断裂。

3 管柱断裂预防对策

根据实验结果,针对由于预应变和循环加载而导致管柱断裂问题,从管柱材质优选、工作制度优化、防腐防垢等方面提出了预防对策。

(1)在管柱材质优选方面,选用抗应力腐蚀能力强的3Cr材质,在上部采用加厚油管以增强管柱的抗拉强度,同时尽量减少旧油管的使用;(2)在工作制度优化方面,注入井一般采用连续注入的方

式,减少间歇注入工况不断启停对管柱应力的影响;(3)在防腐防垢方面,优选防腐效果好的缓蚀剂进行井筒环空保护,同时添加杀菌剂减少SRB产生的H₂S影响。采取预防措施后,注采井失效占比大幅下降,如图5。

图5 年度CO₂注采井失效占比

4 结论和建议

(1)在CO₂-H₂S环境下,由于间歇注入、新旧油管混用等原因,管柱存在预应变及循环加载的工况,引起管材力学性能发生从韧性向脆性转变,断裂应变降低,管材整体性能下降,导致管柱发生脆性断裂。

(2)在明确机理的基础上,从材质优选、工作制度优化、防腐防垢等方面提出了预防对策,并开展综合治理,现场应用后,取得了明显的效果。

(3)在管柱失效研究方面,需要继续深化机理研究,分析“动态+多因素”条件下的失效机制及失效极限条件,为复杂工况下的失效预防提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 夏明珠,严莲荷,雷武,等.二氧化碳的分离回收技术与综合利用[J].现代化工,1999,19(5):46.
- [2] 李金永.碳达峰碳中和目标下采油厂的绿色低碳发展[J].油气田地面工程,2023,42(5):16-23.
- [3] 胡永乐,郝明强.中国石油二氧化碳驱油与埋存技术进步[C]//2016油气田勘探与开发国际会议.北京:陕西省石油学会,2016:93-94.
- [4] 江怀友,沈平平,钟太贤,等.二氧化碳埋存与提高采收率的关系[J].油气地质与采收率,2008,15(6):52-55.
- [5] 时维才,姚峰,金勇,等.二氧化碳驱注采井管柱失效原因分析及防护对策[J].石油管材与仪器,2021,7(6):74-78,83.

(编辑 韩 枫)