

DOI: 10.3901/JME.2020.22.112

热采井口装置材料30CrMo的拉伸及蠕变性能研究

曹旭祥¹ 颜廷俊¹ 李鹏鹏¹ 王亭沂² 李 风²

(1. 北京化工大学机电工程学院 北京 100029;

2. 胜利油田技术检测中心 东营 257000)

摘要: 针对油田热采井口装置服役寿命的评价问题, 对其材料 30CrMo 进行了拉伸和蠕变性能研究。通过拉伸试验获得材料的常温和 390 °C 下的力学性能; 进行该材料在 390 °C、五个不同应力下的蠕变试验, 并对试验数据进行 Norton-Bailey 方程拟合, 得到了低应力区和高应力区蠕变本构方程; 对原始试样和五个蠕变后的试样进行扫描电镜和透射电镜观察, 发现材料长期处于 390 °C 温度下, 晶体内的碳元素扩散造成基体上析出物数量的增多及颗粒的增大, 导致材料强度的下降; 材料 30CrMo 在低应力区和高应力区的蠕变微观组织变化机理不同, 低应力区以位错热攀移为主, 高应力区以 Orowan 绕越方式为主。

关键词: 热采井口装置材料 30CrMo; 拉伸性能; 蠕变性能; Norton-Bailey 方程; 蠕变试验

中图分类号: TE38

Study on Tensile and Creep Property of Thermal Recovery Wellhead Material 30CrMo

CAO Xuxiang¹ YAN Tingjun¹ LI Pengpeng¹ WANG Tingyi² LI Feng²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Technology Testing Center of Shengli Oil Field, Dongying 257000)

Abstract: In view of the evaluation of the service life of the thermal recovery wellhead in the oil field, the tensile and creep property of 30CrMo are studied. The tensile properties at room temperature and 390 °C are obtained by tensile test; The creep tests of the material at 390 °C and five different stresses are carried out. The Norton Bailey equation is used to fit the test data, and the creep constitutive equations of low stress zone and high stress zone are obtained; Scanning electron microscope and transmission electron microscope are used to observe the original samples and five samples after creep. It is found that when the material is kept at 390 °C for a long time, the diffusion of carbon element in the crystal result in the increase of carbide quantity and particle size on the matrix, resulting in the decrease of the strength of the material. The mechanism of creep microstructure change of 30CrMo in low stress zone and high stress zone is different. The creep mechanism in low stress zone is dominated by dislocation thermal climbing, and the mechanism in high stress zone is dominated by Orowan winding.

Key words: thermal recovery wellhead material 30CrMo; tensile property; creep property; Norton-Bailey equation; creep test

0 前言

热采井口装置是指通过高温开采稠油的井口装置, 由于热采工艺的需要, 在使用过程中不但要满

足高温注蒸汽时的高温要求, 还需要满足人工举升采油时的常温开采要求^[1], 目前国内油田热采井口装置的最高使用温度能达到 390 °C、压力为 21 MPa, 在现场使用过程中, 时常会有泄漏甚至爆炸事故的发生, 严重影响了油田现场的安全生产。例如渤海某油田热采井口装置由于温度过高而导致高温蒸汽泄漏, 无法进行正常的生产^[2]; 2004 年 8 月

7 日在新疆油田发生了稠油热采井口装置的爆炸事故^[3]。金属材料在恒温恒载的长期作用下发生缓慢塑性变形的现象称为蠕变^[4], 蠕变失效是高温高压下工作设备的一种主要失效方式, 温度越高设备的蠕变现象越明显, 因此必须要考虑热采井口装置的蠕变失效^[5-6]。

高温下的蠕变性能是金属材料重要强度性能指标, 目前国内外对于材料蠕变性能的研究主要集中在航天及电力行业, 如: ZM3 合金、Cr19Ni28TiN 合金及 2Cr11NiMoVNbNB 钢等材料的蠕变性能研究^[7-10], 研究方法主要集中在如下两种: 一种是参数法唯象模型, 其特点是在试验结果的基础上进行表象上的数学描述; 另一种是通过微观或细观力学和热力学建立的物理模型进行研究^[11-12]。本文拟通过进行热采井口装置材料 30CrMo 的拉伸试验和单轴蠕变试验, 在此基础上, 研究其拉伸性能并运用参数唯象模型法研究其蠕变性能; 通过对原始试样和蠕变后的试样进行微观观察, 运用微观方法研究其蠕变微观组织变化; 为热采井口装置的设计和使用寿命评估提供科学全面的理论依据。

1 试验条件及方法

金属材料在不同温度下的拉伸及蠕变性能不同。通过常温和 390 °C 下的拉伸试验、蠕变试验及微观组织观察获得热采井口装置材料 30CrMo 钢在常温和 390 °C 下的拉伸性能、蠕变性能和蠕变微观组织变化机理。

1.1 试样制取及依据标准

从同一批热采井口装置材料中制取 $\phi 10$ mm 的常温拉伸试样(图 1)、 $\phi 5$ mm 的高温拉伸试样(图 2)和 $\phi 5$ mm 的蠕变试样。常温拉伸试验依据标准 GB/T 228.1—2010 进行; 高温拉伸试验温度为 390 °C, 依据标准 GB/T 228.2—2015 进行, 蠕变试验温度为 390 °C, 依据标准 GB/T 2039—2012 进行。



图 1 常温拉伸试样



图 2 高温拉伸试样

扫描电镜试样制取: 在原始试样及五个蠕变后的试样中心位置截取扫描电镜试样(图 3), 然后进行试样的镶嵌, 将镶嵌完的试样在砂纸上进行磨光, 最后进行抛光。抛光好的试样进行腐蚀, 腐蚀液为 $\text{CuSO}_4 + \text{HCl} + \text{水}$, 配比度: 10 g+50 mL+50 mL, 侵蚀时间为 12~20 s。



图 3 扫描电镜试样实物图

透射电镜试样的制取: 用电火花在原始试样和蠕变试样上垂直于其轴线切割一个厚度为 0.5 mm 的薄片。将薄片均匀地磨制到厚度为 100 μm 左右, 然后冲成直径为 3 mm 的圆片, 减薄工艺为电解双喷和离子减薄。电解双喷的电解液为: 5% 高氯酸+95% 酒精。最终得到直径 3 mm, 厚度在 50~100 μm 的薄片试样。

1.2 蠕变试验条件

金属材料在不同温度和不同应力下的蠕变性能是不同的, 为了研究热采井口装置材料 30CrMo 在 390 °C 下的蠕变性能, 至少需要在该温度下进行四个不同应力下的蠕变试验, 四个应力值的选取应考虑现场工况下热采井口装置的最大应力及材料在 390 °C 下的屈服强度。

1.2.1 热采井口装置强度分析

为确定蠕变试验的加载应力, 需要获得现场工况下热采井口装置所受的最大应力。研究对象为国内常用的某型号热采井口装置, 其最高工作温度为 390 °C, 高温下最大使用压力为 21 MPa。利用 SolidWorks 软件建立热采井口装置模型, 将其导入 ANSYS Workbench 中, 材料属性中分别输入

30CrMo 在常温和 390 °C 下的力学性能参数, 底座法兰下端加固定约束, 各相互作用的零部件之间建立接触对, 同时施加温度、内压、螺栓预紧力及各零部件的重力, 内部流体与外部空气的对流传热系数为 $5 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$, 具体有限元模型及边界条件如图 4 所示。

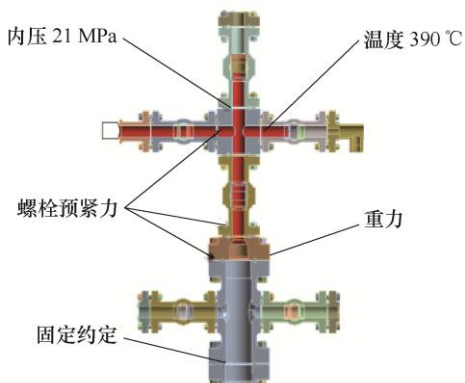


图 4 热采井口装置强度计算有限元模型及边界条件示意图

根据 ANSYS Workbench 热结构耦合模拟结果可知, 在温度和内压的共同作用下, 热采井口装置的最大应力为 175 MPa, 最大应力区位于主通径阀门下法兰与主通径的相交处, 具体位置如图 5 和图 6 所示。

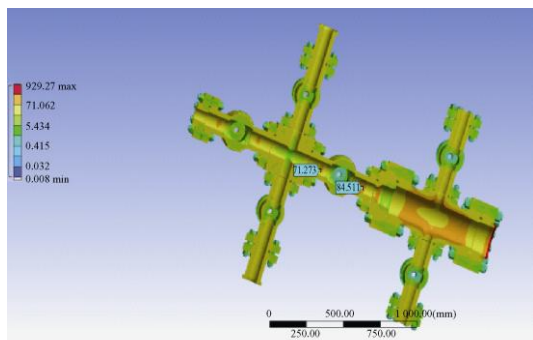


图 5 热采井口装置整体应力云图(MPa)

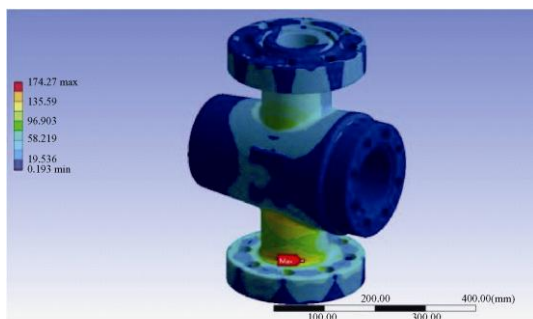


图 6 主通径阀门应力云图(MPa)

1.2.2 蠕变试验条件

根据强度分析可知热采井口装置的最大应力为

175 MPa, 根据拉伸试验结果可知热采井口装置材料 30CrMo 在 390 °C 下的屈服强度 $\sigma_s=476 \text{ MPa}$, 因此可以制定蠕变试验的加载应力值。分别为: 175 MPa(现场工况下装置的最大应力)、335 MPa($0.7\sigma_s$)、380 MPa($0.8\sigma_s$)、430 MPa($0.9\sigma_s$)和 465 MPa($0.98\sigma_s$)。具体试验条件如表 1 所示。

表 1 蠕变试验条件

编号	标距/mm	试验温度/°C	试验应力/MPa	计划试验时长/h
1	25	390	175	5 000
2	25	390	335	5 000
3	25	390	380	5 000
4	25	390	430	5 000
5	25	390	465	500

2 试验结果及数据分析

2.1 拉伸试验结果

通过拉伸试验获得了热采井口装置材料 30CrMo 常温和 390 °C 下的力学性能参数。具体结果如表 2 所示。

表 2 金属材料 30CrMo 拉伸试验结果

温度/°C	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率(%)	断面收缩率(%)	弹性模量/GPa
20	585	718	32.5	42	206.9
390	476	646	38.5	53	177.1

金属材料 30CrMo 在常温和 390 °C 下的应力-应变曲线如图 7 所示。

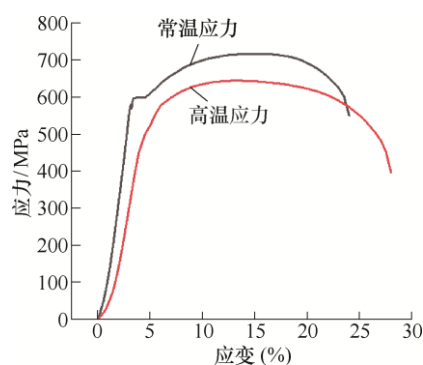


图 7 30CrMo 的应力-应变曲线

对比常温和 390 °C 下的热采井口装置材料 30CrMo 的拉伸试验结果可以发现, 在 390 °C 下, 30CrMo 的强度下降, 其中屈服强度下降了 18.6%, 抗拉强度下降了 10%; 塑性增加, 其中延伸率增加 6%, 断面收缩率增加 11%; 弹性模量减小 14.4%。在常温和 390 °C 下材料 30CrMo 的力学性能区别很

大, 在热采井口装置强度分析和材料蠕变性能研究时应该充分考虑 390 °C 下材料力学性能的变化。

2.2 蠕变试验结果及数据分析

运用参数唯象法研究热采井口装置材料 30CrMo 在 390 °C 下的蠕变性能, 通过对不同载荷下的蠕变持久试验结果进行拟合获得材料 30CrMo 的蠕变性能。

2.2.1 Norton-Bailey 本构方程

蠕变本构方程是从宏观唯象角度研究, 以蠕变试验数据为基础建立描述蠕变性能的本构方程^[13]。材料蠕变过程中, 蠕变应变不仅与应力水平有关, 还和温度以及时间有关, 所以蠕变本构方程是以温度、应力和时间为自变量的一个函数关系式。蠕变应变可以用含时间、应力以及温度的函数来表示

$$\varepsilon_c = f(\sigma, t, T) \quad (1)$$

由于只研究固定温度(即 390 °C)下的蠕变性能, 即等温条件, 所以不考虑温度因素。Norton-Bailey 本构方程可以简化为

$$\varepsilon_c = A\sigma^m t^n \quad (2)$$

式中, A 、 m 、 n 均为与材料特性、温度有关的常数^[14-16]。

2.2.2 蠕变试验结果

在蠕变试验机上进行了温度为 390 °C, 五个不同应力下的蠕变试验, 获得了热采井口装置材料 30CrMo 的蠕变应变随时间的变化数据(表 3), 具体蠕变试验结果及试验曲线见图 8。

表 3 材料 30CrMo 在不同应力下的蠕变试验结果

编号	应力/ MPa	试验时长/ h	蠕变应变 (%)	蠕变应变速率/ (%/h)
1	175	5 030	0.126	1.56×10^{-5}
2	335	4 960	0.54	9.4×10^{-5}
3	380	5 050	0.58	1.07×10^{-5}
4	430	5 000	0.906	1.42×10^{-3}
5	465	500	1.215	1.44×10^{-2}

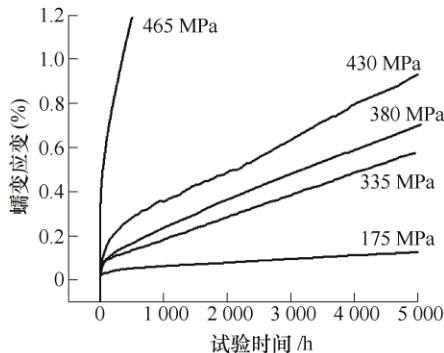


图 8 不同应力下的蠕变应变曲线

2.2.3 蠕变试验数据分析

通过蠕变试验结果可以看出: 在 390 °C、不同应力下, 金属材料 30CrMo 均发生了显著的蠕变变形, 随着应力的增大, 稳态阶段的蠕变速率逐渐增大, 相同时间内产生蠕变变形也更大。运用 origin 数据分析软件对五组蠕变试验数据进行拟合, 得到 390 °C 下, 材料 30CrMo 的 Norton-Bailey 蠕变模型参数 A 、 m 、 n 。具体拟合过程如下

$$\varepsilon_c = A\sigma^m t^n \quad (3)$$

为了方便参数拟合, 对式(3)两边取对数得到

$$\ln(\varepsilon_c) = \ln(A\sigma^m t^n) = \ln A + m \ln \sigma + n \ln t \quad (4)$$

根据式(4)可以看出, 以时间的对数 $\ln t$ 为横坐标, 蠕变应变的对数值 $\ln(\varepsilon_c)$ 为纵坐标, n 为斜率, 五个不同应力下的蠕变曲线在对数坐标系下为五条直线, 拟合五条不同应力下的蠕变直线最终得到蠕变参数如下: 低应力区(175 ~ 430 MPa): $A=1.69 \times 10^{-9}$, $m=2.6$, $n=0.49$; 高应力区(430 ~ 465 MPa): $A=2.57 \times 10^{-4}$, $m=17.15$, $n=0.34$ 。参数对应单位制为 MPa-h-K。

运用拟合出的 Norton-Bailey 方程可以计算出材料 30CrMo 在 390 °C、任意大小应力下经过任何长时间的蠕变变形。拟合曲线与试验值的对比如图 9、10 所示。

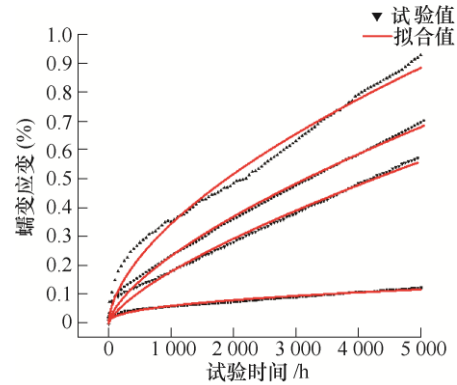


图 9 低应力区拟合值与试验值的对比

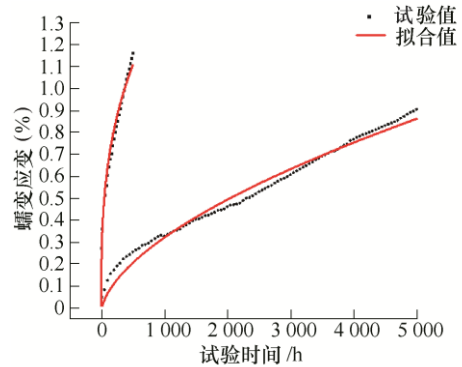


图 10 高应力区拟合值与试验值的对比

根据拟合值与试验值的对比图可以看出, 高应力区和低应力区的拟合精度都比较高。在相同温度下, 不同应力区对应不同的蠕变模型, 当装置的应力小于 430 MPa 时蠕变规律服从低应力区的蠕变模型, 应力大于 430 MPa 时服从高应力区的蠕变模型。热采井口装置在现场工况下的最大应力为 175 MPa, 因此在其结构设计和使用寿命评估中应该以低应力区的蠕变模型为依据。

2.3 金属材料 30CrMo 的蠕变微观组织分析结果

材料 30CrMo 在蠕变过程中, 发生了难以回复的塑性变形, 同时微观组织也发生了变化, 通过扫描电镜和透射电镜对比观察原始试样和蠕变后试样的微观组织, 研究材料 30CrMo 在蠕变过程中的蠕变微观组织变化机理^[17]。

2.3.1 金属材料 30CrMo 的蠕变微观组织变化简介

30CrMo 钢属于 CrMo 钢系列, 是一种第二相粒子弥散强化合金, 具体化学成分如表 4 所示。第二相粒子弥散强化是指合金除基体相以外还存在着弥散分布的第二相, 当第二相以细小弥散的微粒均匀分布与基体相中时, 将会产生显著的强化作用。其原因就在于它们与位错间的交互作用, 阻碍了位错运动, 提高了合金的变形抗力^[18]。

表 4 30CrMo 钢的化学成分 %

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo
质量分数	0.26~0.33	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25
元素	P	S	Cu	Ni	
质量分数	≤0.030	≤0.030	≤0.30	≤0.30	

对于 30CrMo 这类第二相粒子强化合金, 蠕变微观组织变化的核心问题是位错如何越过第二相粒子。通常情况下, 位错滑移遇到第二相粒子时有以下三种越过途径。

(1) Orowan 绕越机制, 在 30CrMo 基体中, 第二相粒子(含有 Cr、Mo 等元素的化合物)是位错的障碍, 当应力大于 Orowan 应力时位错以 Orowan 绕越方式通过第二相粒子相时, 会留下一个位错环。

(2) 位错切割机制, 位错在滑移过程中遇到第二相粒子障碍时, 在一定的应力条件下可以切过比较软且与基体共格的粒子。

(3) 以上两种机制一般都是在较高的应力水平下存在, 当施加应力不足以开动以上两种机制时, 位错只能通过热激活攀移机制来克服第二相粒子的阻碍^[19]。

2.3.2 扫描电镜结果分析

图 11 为六个试样的扫描电镜结果图(20 000 倍)。

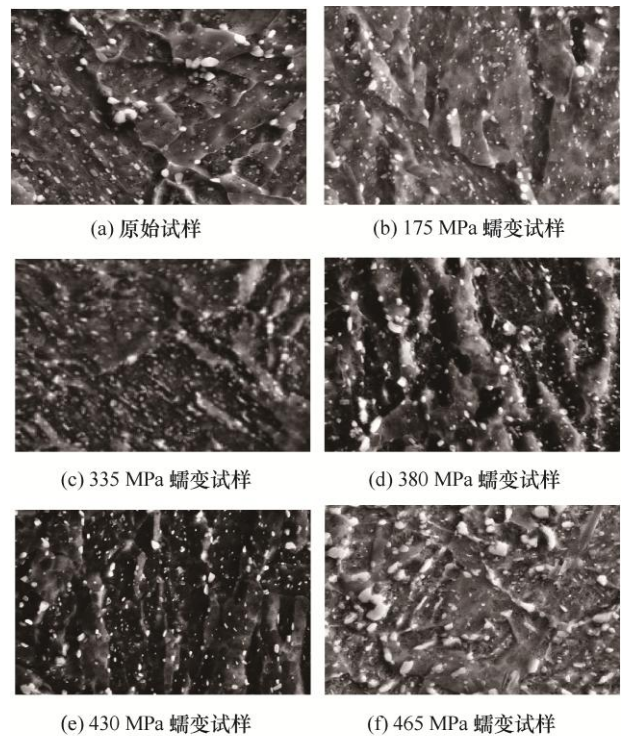


图 11 不同试样的扫描电镜图

从热采井口装置材料 30CrMo 的原始试样和 390 °C、不同应力试验应力下蠕变试样的扫描电镜观察得到的照片可以看出, 相较于原始试样, 基体中析出的白色颗粒数量都有增多, 且随着应力的增大, 颗粒会变大且数量增多; 由此可以得出: 在蠕变过程中, 由于金属长期处于 390 °C 温度下, 金属晶体内的元素开始扩散, 造成基体上析出物数量的增多以及颗粒的增大, 析出物颗粒的增大及增多会造成材料强度的降低^[20-21]。

2.3.3 透射电镜结果分析

图 12 为六个试样的透射电镜结果图。

根据原始试样及不同应力下的蠕变试样的透射电镜图可以看出, 图中的网状线即为位错线, 黑色的圆点为第二相粒子。从图 12b~12e 可以看出, 当应力小于 430 MPa 时, 位错线成网格状分布在第二相粒子周围, 随着应力的增加第二相粒子周围聚集的位错线逐渐变密集。表明: 蠕变过程中位错线在基体上滑移, 当遇到第二相粒子时由于应力不足以支撑位错绕越粒子, 所以不同方向的位错线会在第二相粒子周围聚集并形成网格状的位错线, 且随着应力的增大网格线逐渐变密。因此材料 30CrMo 在蠕变过程中, 低应力区的蠕变微观组织变化机理为位错热攀移机制。

从图 12f 可以看出, 当应力大于 430 MPa 时, 位错线以弯曲的形式分布在二相粒子周围, 由此可以表明: 此时应力已经大于绕越机制所需的临界应

力, 位错线会绕越过第二相粒子在第二相粒子周围留下一个位错环。由于材料性质和试验条件的限制, 在基体中很难看到完整的位错环。因为位错线是在与粒子发生顶碰后才会发生弯曲的, 便可说明蠕变微观组织变化机理为 Orowan 绕越机制。

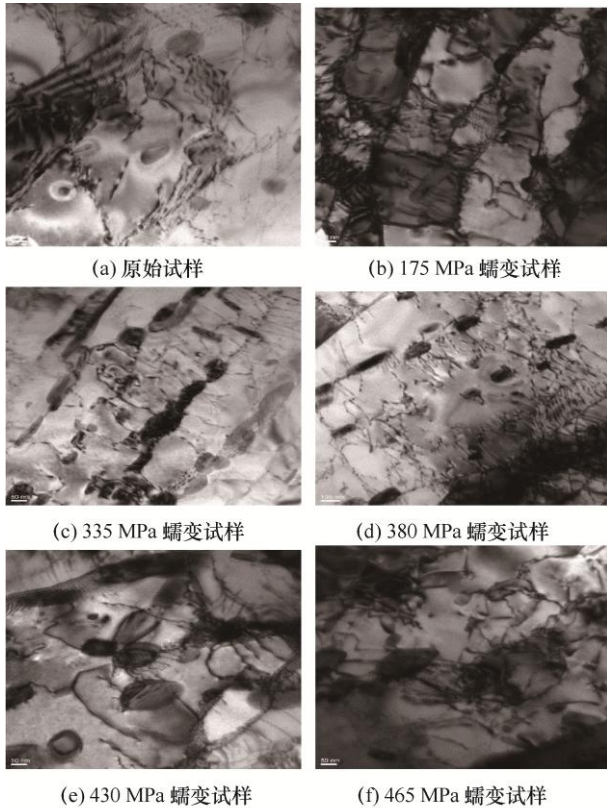


图 12 不同试样的透射电镜图

在高、低应力区金属材料 30CrMo 在宏观上蠕变均表现为材料塑性变形, 而蠕变的实质是金属材料内部位错发生滑动; 但在不同应力区位错滑移的主要机制是不相同, 材料 30CrMo 在高应力区蠕变机理为 Orowan 绕越机制, 在低应力区蠕变机理为热攀移机制。

3 结论

(1) 热采井口装置材料 30CrMo 在常温和高温下的力学性能不同, 在高温 390 °C 下, 材料 30CrMo 的强度下降, 其中屈服强度下降了 18.6%, 抗拉强度下降了 10%; 塑性增加, 其中延伸率增加 6%, 断面收缩率增加 11%; 弹性模量减小 14.4%。

(2) 390 °C 下, 材料 30CrMo 在高应力区和低应力区的蠕变本构方程不同, 高低应力区的划分以 430 MPa 为界, 热采井口装置蠕变失效分析应根据低应力区的蠕变本构方程进行。

(3) 材料 30CrMo 在蠕变过程中由于长期处于 390 °C 温度下, 晶体内的元素扩散造成基体上析出物数量的增多以及颗粒的增大, 会导致其强度降低; 材料 30CrMo 在高、低应力区的蠕变微观组织变化机理不同; 低应力区以位错热攀移为主; 高应力区以 Orowan 绕越方式为主。

由于材料 30CrMo 在常温和 390 °C 下的力学性能差别很大, 进行热采井口装置设计及寿命评估时应该用高温下材料的拉伸性能; 根据拟合得到的 Norton-Bailey 方程可以计算出 30CrMo 在 390 °C 任意应力下经历任何时长的蠕变变形, 进行热采井口装置服役寿命评估时, 应该根据此公式计算出达到最大变形时的服役时间, 即为蠕变失效时间。且有限元软件 ANSYS 已经植入 Norton-Bailey 方程, 可以直接将参数输入进去进行蠕变仿真模拟分析。根据热采井口装置材料 30CrMo 拉伸和蠕变性能的研究结论, 可以为热采井口装置的设计和服役寿命评估提供科学的理论指导。

参 考 文 献

- [1] 庄会涛, 詹良斌, 谭来顺. 热采井口装置在稠油热采中的应用[J]. 科技信息, 2014(12): 130, 162.
ZHUANG Huitao, ZHAN Liangbin, TAN Laishun. Application of thermal recovery wellhead device in heavy oil thermal recovery[J]. Science and Technology Information, 2014(12): 130, 162.
- [2] 袁博, 王颖, 郗文博, 等. 海上稠油热采井口高温 BOP 保护工艺及应用[J]. 石化技术, 2016(23): 182.
YUAN Bo, WANG Ying, XI Wenbo, et al. High temperature BOP protection process and application of offshore heavy oil thermal recovery wellhead[J]. Petrochemical Technology, 2016(23): 182.
- [3] 张佑明, 张华, 秦奎. 大长径比油气管道空间爆炸事故分析—以中国石油新疆油田分公司“8.7”稠油热采井口爆炸事故为例[J]. 安全与环境学报, 2008(3): 95-98.
ZHANG Youming, ZHANG Hua, QIN Kui. Analysis of space explosion accident of large length diameter ratio oil and gas pipeline-Taking “8.7” heavy oil thermal recovery wellhead explosion accident of PetroChina Xinjiang Oilfield Branch as an example[J]. Journal of Safety and Environment, 2008(3): 95-98.
- [4] 张诗昌, 朱明, 胡衍生, 等. 挤压态 AZ31 镁合金高温蠕变性能的实验研究[J]. 铸造技术, 2008, 29(8): 1062-1065.
ZHANG Shichang, ZHU Ming, HU Yansheng, et al.

- Experimental study on high temperature creep properties of extruded AZ31 magnesium alloy[J]. Foundry Technology, 2008, 29(8): 1062-1065.
- [5] 徐自立. 高温金属材料的性能、强度设计及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- XU Zili. Properties of high temperature metal materials, strength design and engineering application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [6] BRNIC J, TURKALJ G, CANADIJA M, et al. Creep behavior of high-strength low-alloy steel at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 499(1-2): 23-27.
- [7] 陈锦, 张鹏. ZM3 合金蠕变性能实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2005(2): 202-207.
- CHEN Jin, ZHANG Peng. Experimental study on creep properties of ZM3 alloy[J]. Journal of Northwest University of Technology, 2005(2): 202-207.
- [8] 程晓农, 陈明, 李冬升, 等. 新型 Cr19Ni28TiN 铁镍基合金的高温蠕变行为[J]. 金属热处理, 2015, 40(2): 48-51.
- CHENG Xiaonong, CHEN Ming, LI Dongsheng, et al. High temperature creep behavior of a new Cr19Ni28TiN Fe Ni base alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(2): 48-51.
- [9] 陈涛, 陈学东, 刘春娇, 等. 裂解炉管初生碳化物分类及对高温持久性能影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 109-116.
- CHEN Tao, CHEN Xuedong, LIU Chunjiao, et al. Classification of primary carbides in cracking furnace tubes and its effect on high temperature endurance performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 109-116.
- [10] 王俊崎, 余海洋, 周帼彦, 等. 尺寸效应对固支直杆弯曲小试样蠕变性能评价的影响[J]. 压力容器, 2019(1): 1-9, 23.
- WANG Junqi, YU Haiyang, ZHOU Guoyan, et al. Effect of specimen size on the creep property evaluation of small beam specimen with fixed constraints[J]. Pressure Vessel Technology, 2019(1): 1-9, 23.
- [11] 毕静, 崔学习, 张艳苓, 等. Ti-6Al-4V 钛合金薄板应力松弛行为研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 43-52.
- BI Jing, CUI Xuexi, ZHANG Yanling, et al. Study on stress relaxation behavior of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 43-52.
- [12] 刘学, 杜占辉, 王晓, 等. P92 钢高温蠕变行为与断口形貌组织分析[J]. 科技创新与应用, 2013(31): 106-107.
- LIU Xue, DU Zhanhui, WANG Xiao, et al. Analysis of high temperature creep behavior and fracture morphology of P92 steel[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2013(31): 106-107.
- [13] WILSHIRE B, SCHARNING P J. Long-term creep life prediction for a high chromium steel[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(8): 701-704.
- [14] 杨楠林. 汽轮机用耐热材料蠕变实验及 Norton-Bailey 方程研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- YANG Nanlin. Creep experiment and Norton-Bailey equation study of heat-resistant materials for steam turbine[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [15] 秦炎锋, 冯相赛, 关凯书. 小冲杆法确定蠕变 Norton 参数[J]. 华东理工大学学报, 2015, 41(4): 569-574.
- QIN Yanfeng, FENG Xiangsai, GUAN Kaishu. Determination of Norton parameters of creep by small punch method[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2015, 41(4): 569-574.
- [16] 郑相锋, 李文彬, 范辉, 等. SA-210C 钢高温单轴蠕变 Norton 方程参数研究[J]. 河北电力技术, 2014(1): 5-6.
- ZHENG Xiangfeng, LI Wenbin, FAN Hui, et al. Study on Norton equation parameters of high temperature uniaxial creep of SA-210C steel[J]. Hebei Electric Power Technology, 2014(1): 5-6.
- [17] 王钊, 王协群, 李丽华. 蠕变实验和蠕变强度[C/CD]// 全国第六届土工合成材料学术会议论文集, 2004.
- WANG Zhao, WANG Xiequn, LI Lihua. Creep experiment and creep strength[C/CD]//Proceedings of the 6th National Geosynthetics Academic Conference, 2004.
- [18] 荆洪阳, 孟珊, 赵雷, 等. Sanicro25 奥氏体耐热钢高温蠕变寿命的预测[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 165-171.
- JING Hongyang, MENG Shan, ZHAO Lei, et al. Prediction of high temperature creep life of Sanicro25 austenitic heat resistant steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 165-171.
- [19] 杨楠林, 谈建平, 轩福贞, 等. 应力水平对 In783 合金蠕变性能和蠕变机理的影响[J]. 机械工程材料, 2014(3): 31-34, 38.
- YANG Nanlin, TAN Jianping, XUAN Fuzhen, et al. Effect of stress level on creep performance and creep

- mechanism of IN783 alloy[J]. Mechanical Engineering Materials, 2014(3): 31-34, 38.
- [20] 洪鼎华, 王环丽, 李武平, 等. 在役 P92 钢蒸汽管道焊接接头中缺陷的研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 127-134.
- HONG Dinghua, WANG Huanli, LI Wuping, et al. Study on defects in welded joints of P92 steel steam pipeline in service[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 127-134.
- [21] 李克俭, 蔡志鹏, 李铁非, 等. 碳迁移对 9%Cr 和 2.25%Cr 异种钢焊接接头高温韧性的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 150-155.
- LI Kejian, CAI Zhipeng, LI Yifei, et al. Effect of carbon migration on high temperature toughness of 9%Cr and 2.25%Cr dissimilar steel welded joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 150-155.
-
- 作者简介: 曹旭祥, 男, 1992 年出生。主要研究方向为石油设备的结构设计和服役寿命评估。
E-mail: 839661339@qq.com
- 颜廷俊(通信作者), 男, 1961 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为石油设备的检测, 服役寿命评估及结构设计等。
E-mail: yantj555@163.com