

文章编号:1674-2869(2014)05-0048-05

# 25Cr2MoVA 和 15CrMo 钢的高温蠕变特性

喻九阳<sup>1</sup>,王明伍<sup>1</sup>,张红才<sup>2</sup>,郑小涛<sup>1</sup>,桑 聪<sup>1</sup>

1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205;

2. 中石化湖北化肥分公司,湖北 枝江 443200

**摘 要:**应用 RPL50 高温电子蠕变疲劳试验机,在 500 °C 的高温环境下随机对多根标准试样进行高温拉伸试验及长时间的单轴拉伸蠕变试验,并绘制两种材料的力一位移曲线及蠕变曲线. 结果表明:25Cr2MoVA 钢在 500 °C 下的屈服应力约为 310 MPa,15CrMo 钢在 500 °C 下的屈服应力约为 292 MPa;在 500 °C 高温 300 MPa 拉伸载荷作用下,25Cr2MoVA 钢起初蠕变松弛明显,随后蠕变速率快速减小,直至恒定,符合蠕变规律,500 °C 高温及 250 MPa 载荷作用下,15CrMo 钢也符合蠕变规律;拟合得到两种材料蠕变率表达式,其中 25Cr2MoVA 钢的线性回归值与实验值平均相对误差为 2.01%,15CrMo 钢的线性回归值与实验值平均相对误差为 1.35%.

**关键词:**法兰连接系统;拉伸;蠕变

**中图分类号:** TG111.8

**文献标识码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2014.05.011

## 0 引 言

某炼化厂延迟焦化装置中高温法兰连接系统长期处在高温高压工况下,因材料发生蠕变,出现应力松弛现象,致使法兰发生泄漏失效(如图 1 所示). 常用于高温螺栓法兰连接系统中的螺栓材料为 25Cr2MoVA 钢,15CrMo 钢也以其优良的材料性能成为工业上重要的高温管道及法兰材料用钢,两者在蠕变载荷下的力学性能显得尤为重要.

很多学者对 15CrMo 钢和 25Cr2MoVA 的高温性能进行了研究,南京工业大学沈轶<sup>[1]</sup>对 25Cr2MoVA 在 550 °C 下的蠕变行为进行了部分研究. 江国栋等<sup>[2]</sup>分析了汽轮机螺栓材料 25Cr2Mo1V 在高温长时间工作条件下的脆化机理. 杨瑞成<sup>[3]</sup>综合研究了 15CrMo 钢的蠕变强度、持久强度及其老化行为. 袁超<sup>[4]</sup>、程宏辉等<sup>[5]</sup>解释了 15CrMo 高温过热器弯管的失效机制. 本文通过化学成分分析、高温拉伸试验、高温蠕变实验对两种材料的特性进行了实验分析,对得到的实验数据进行了分析、拟合及讨论,最终给出了材料在 500 °C 条件下的蠕变本构方程. 两者的蠕变力学行

为是保证高温螺栓法兰连接紧密性和高温管道连接可靠性的基础,具有重要的工程价值.



图 1 高温管法兰连接泄漏失效

Fig. 1 The leakage failure of pipe flange connection

## 1 实验条件

### 1.1 化学成分分析

根据标准 GB/T3077-1999《合金结构钢》<sup>[6]</sup>对 25Cr2MoVA 钢进行化学成分分析. 同时,根据 GB/T9938-2006《石油裂化用无缝钢管》<sup>[7]</sup>对 15CrMo 钢的成分进行评价. 表 1、表 2 中,两材料各元素的质量分数均在相应标准给出的标准值范围内. 两材料化学成分分析对后续试验结果的可靠性提供了依据.

收稿日期:2014-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305310);武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2013073)

作者简介:喻九阳(1962-),男,湖北武汉人,教授,硕士. 研究方向:强化传热技术与设备、机电一体化技术和设备等.

表 1 25Cr2MoVA 钢的化学成分  
Table 1 Chemical composition of 25Cr2MoVA steel %

	各元素的质量分数					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
标准值	0.22~0.29	0.17~0.37	0.30~0.70	1.50~1.80	0.25~0.35	0.15~0.30
测试值	0.23	0.26	0.53	1.62	0.28	0.23

注:表中数据是以铁为标准的各元素的质量分数.

表 2 15CrMo 钢的化学成分  
Table 2 Chemical composition of 15CrMo steel %

	各元素的质量分数				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
标准值	0.12~0.18	0.17~0.37	0.30~0.70	0.8~1.1	0.3~0.55
测试值	0.13	0.28	0.56	0.96	0.37

注:表中数据是以铁为标准的各元素的质量分数.

1.2 试验设备

本实验采用长春机械科学研究院有限公司生产的 RPL50 高温电子蠕变疲劳试验机(图 2 所示).该试验机最大加载能力为 50 kN,量程为满量程的 1%~100%.在满量程的 1%~100%范围内,测量误差为示值的±0.5%.拉杆速度区间是 0.01~50 mm/min,拉杆最大行程为 180 mm.高温炉温度范围是 300℃~900℃,其测量误差为≤(±2)℃.该试验机功能完善,不仅具备基本的蠕变、松弛试验功能,还能进行拉压过零、低周疲劳试验、蠕变疲劳等复杂的试验.



图 2 RPL50 高温电子蠕变疲劳试验机  
Fig. 2 RPL50 type high-temperature creep fatigue testing machine

1.3 试样制备

根据国标 GB/T2039-2012<sup>[8]</sup>的规定和试验机要求,采用螺纹夹持的圆棒试样,且标距段用金相砂纸沿轴向打磨抛光.试样尺寸和实物如图 3 所

示,试样标距长度为 100 mm,直径为 10 mm.

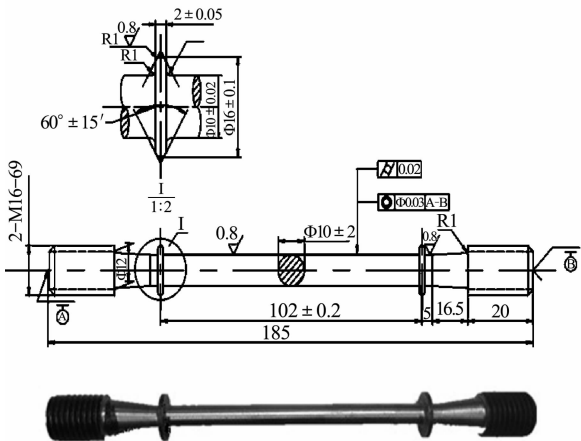


图 3 单轴蠕变试样示意图  
Fig. 3 Sketch of the uniaxial creep specimen

2 高温性能试验

2.1 高温拉伸试验

利用 RPL50 高温电子蠕变疲劳试验机的持久试验功能对 2 种材料进行高温拉伸试验.试验时,预加载荷 0.5 kN,试验温度 500℃,保温时间 30 min,温度波动不超过(±2)℃,采用负荷斜坡加载控制模式,加载速率 12 kN/min.由图 4 可知 25Cr2MoVA 钢在 500℃下的屈服应力约为 310 MPa.2 种材料拉伸断裂试样如图 5 所示.由图 6 可知 15CrMo 钢在 500℃下的屈服应力约为 292 MPa.25Cr2MoVA 及 15CrMo 钢的高温拉伸试验对后续两种材料的高温蠕变实验的预紧、加载、分析等提供依据.

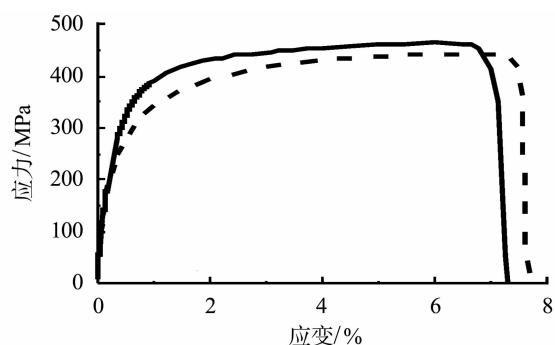


图 4 500 °C 时 25Cr2MoVA 钢的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of 25Cr2MoVA steel at 500 °C

注: — 试样1; - - 试样2



图 5 500 °C 时 15CrMo 钢的拉伸试样

Fig. 5 Tension specimen for 15CrMo steel at 500 °C

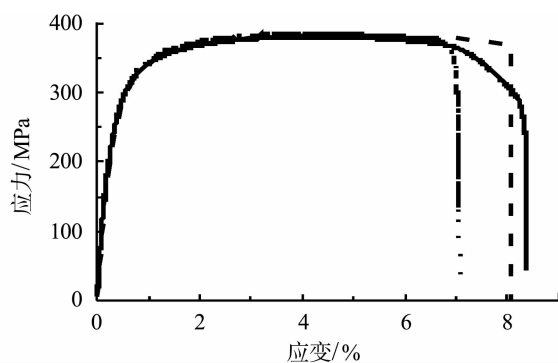


图 6 500 °C 时 15CrMo 钢的应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of 15CrMo steel at 500 °C

注: · · 试样1; - - 试样2; — 试样3

## 2.2 高温蠕变试验

螺栓材料 25Cr2MoVA 和法兰材料 15CrMo 的高温蠕变试验可利用 RPL50 试验机的蠕变试验功能进行测试. 试验时预加载荷 0.5 kN, 试验温度 500 °C, 保温时间 30 min, 温度波动不超过 ( $\pm 2$ ) °C. 25Cr2MoVA 钢的试验载荷为 300 MPa, 15CrMo 钢的试验载荷设定为 250 MPa. 采用负荷斜坡加载控制模式, 加载速率 12 kN/min. 500 °C 时 25Cr2MoVA 钢在 300 MPa 拉伸载荷下的静态蠕变曲线如图 7 所示, 且蠕变速率随时间的变化关系如图 8 所示. 500 °C 时 15CrMo 钢在 250 MPa 拉伸载荷下的静态蠕变曲线如图 9 所示, 且蠕变速率随时间的变化关系如图 10 所示.

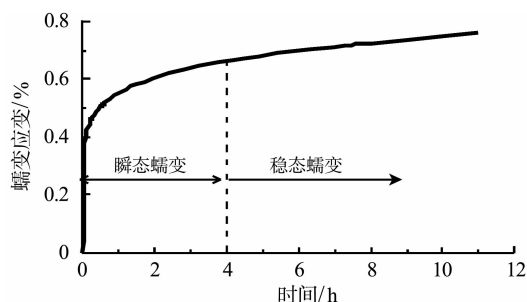


图 7 500 °C 时 25Cr2MoVA 钢在 300 MPa 拉伸载荷下的静态蠕变曲线

Fig. 7 Static creep curve of 25Cr2MoVA steel corresponding to 300 MPa tension load at 500 °C

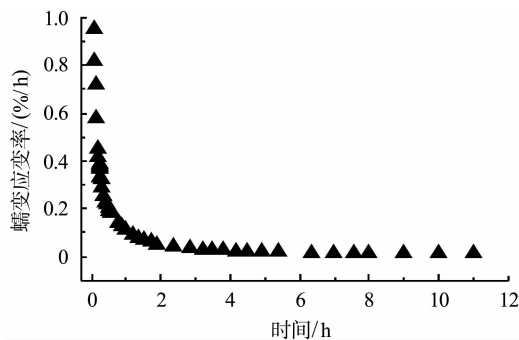


图 8 500 °C 时 25Cr2MoVA 钢在 300 MPa 拉伸载荷下的静态蠕变速率

Fig. 8 Creep strain rate of 25Cr2MoVA steel corresponding to 300 MPa tension load at 500 °C

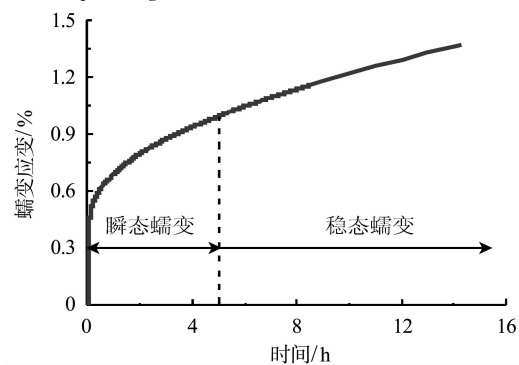


图 9 500 °C 时 15CrMo 钢在 250 MPa 拉伸载荷下的静态蠕变曲线

Fig. 9 Static creep curve of 25Cr2MoVA steel corresponding to 250 MPa tension load at 500 °C

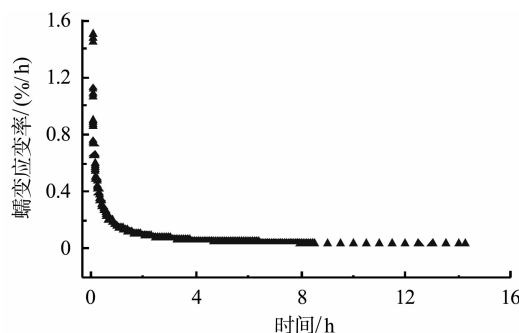


图 10 500 °C 时 15CrMo 钢在 300 MPa 拉伸载荷下的静态蠕变速率

Fig. 10 Creep strain rate of 15CrMo steel corresponding to 250 MPa tension load at 500 °C

### 3 数据分析及讨论

工程中的蠕变是指工作温度高于构件熔点 0.4 倍时,金属在持续应力的作用下(即使小于弹性极限),随时间增长均会产生缓慢的塑性变形.蠕变分三个阶段:瞬态阶段、稳态阶段、加速蠕变阶段.本文依据时间硬化理论<sup>[9]</sup>,认为蠕变率降低显示出材料硬化的主要因素是时间.故研究在温度一定时,在特定应力条件下,蠕变率与时间的关系,后期将研究蠕变率与时间、应力的关系.

实验结果表明,在初始的时间段内,两种材料试样均处于瞬态阶段,蠕变应变随时间延长迅速增加,而蠕变速率随时间延长而快速减小,直至蠕变速率恒定,进入稳态蠕变阶段.此后蠕变应变随时间延长而近似线性增长,而蠕变速率随时间基本保持在较小的稳定值,直至加速蠕变阶段.

#### 3.1 25Cr2MoVA 蠕变数据分析

500 °C 时 25Cr2MoVA 钢在 300 MPa 拉伸载荷下的静态蠕变曲线如图 11 所示.设备在使用的过程中主要涉及到瞬态蠕变、稳态蠕变,不考虑加速蠕变阶段的情况.观察蠕变数据的变化趋势,结合 Akli Nechache<sup>[10]</sup>对螺栓法兰连接中螺栓材料蠕变的研究,可将其蠕变演化方程定义为

$$\epsilon_b^c = A_1 + A_2 t + A_3 t^n \quad (1)$$

其中,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $n$  为蠕变材料常数,可通过拟合静态蠕变曲线获得,曲线拟合结果如图 11 所示,蠕变参数如表 3 所示.

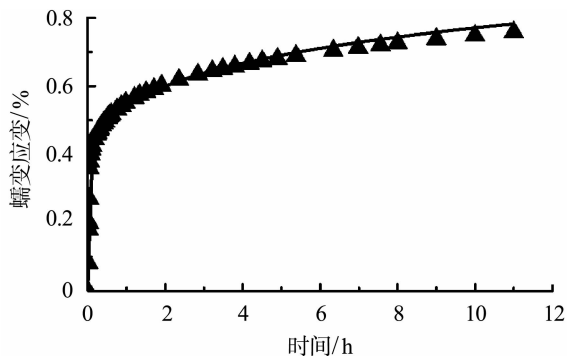


图 11 500 °C 时 25Cr2MoVA 钢在 300 MPa 拉伸载荷下的蠕变拟合曲线

Fig. 11 Creep fitting curve of 25Cr2MoVA steel corresponding to 300 MPa tension load at 500 °C

注: ▲ 实验结果; — 拟合数据

表 3 500 °C 时 25Cr2MoVA 钢在 300 MPa 拉伸载荷下的蠕变参数

Table 3 Creep parameters of 25Cr2MoVA steel corresponding to 300 MPa tension load at 500 °C

蠕变参数			
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$n$
0.001	0.001	0.538	0.15

#### 3.2 15CrMo 蠕变数据分析

500 °C 时 15CrMo 钢在 250 MPa 拉伸载荷下的静态蠕变曲线如图 12 所示.此处只涉及蠕变的第一阶段和第二阶段,不考虑蠕变第三阶段.观察蠕变数据的变化,结合 Akli Nechache<sup>[10]</sup>对法兰材料蠕变的研究,将其蠕变演化方程定义为

$$\dot{\epsilon}_f^c = B_1 + B_2 t + B_3 t^m \quad (2)$$

其中,  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  和  $m$  为蠕变材料常数,可以通过拟合静态蠕变曲线获得,曲线拟合结果如图 12 所示,蠕变参数如表 4 所示.值得注意的是,方程(2)中前两项为瞬态蠕变项,而第三项为稳态蠕变项.

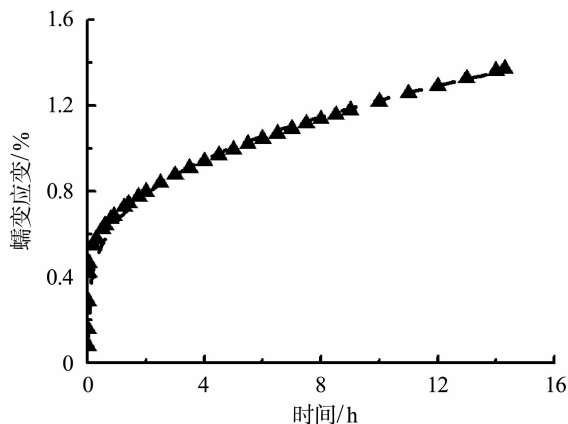


图 12 500 °C 时 15CrMo 钢在 250 MPa 拉伸载荷下的蠕变拟合曲线

Fig. 12 Creep fitting curve of 15CrMo steel corresponding to 250 MPa tension load at 500 °C

注: ▲ 实验结果; — 拟合数据

表 4 500 °C 时 15CrMo 钢在 250 MPa 拉伸载荷下的蠕变参数

Table 4 Creep parameters of 15CrMo steel corresponding to 250 MPa tension load at 500 °C

蠕变参数			
$B_1$	$B_2$	$B_3$	$m$
0.001	0.008	0.649	0.245

### 4 总结与展望

通过实验方法对螺栓法兰连接系统中常用螺栓材料(25Cr2MoVA)和法兰材料(15CrMo)进行

了高温拉伸试验和高温蠕变实验,结合实验数据分析两材料的高温特性.

a. 25Cr2MoVA 钢在 500 °C 下的屈服应力约为 310 MPa;15CrMo 钢在 500 °C 下的屈服应力约为 292 MPa.

b. 在 500 °C 高温 300 MPa 拉伸载荷作用下,对 25Cr2MoVA 钢高温蠕变实验获得的实验数据进行拟合推算得到其蠕变率表达式为

$$\dot{\epsilon}_b^c = 0.001 + 0.080 7t^{-0.85} \quad (3)$$

c. 500 °C 高温及 250 MPa 拉伸载荷共同作用下,对 15CrMo 钢高温蠕变实验获得的实验数据进行拟合推算得到其蠕变率表达式为

$$\dot{\epsilon}_f^c = 0.008 + 0.17t^{-0.755} \quad (4)$$

对两种材料拟合的蠕变演化方程进行验证,25Cr2MoVA 钢的线性回归值与实验值平均相对误差为 2.01%,15CrMo 钢的线性回归值与实验值平均相对误差为 1.35%,证明了两材料高温高压条件下蠕变应变、时间二者变化规律的数学模型的可靠性,具有一定的工程应用价值.

d. 依据对数据分析、拟合,研究对象作为优质的螺栓和法兰材料依然存在较大的蠕变损伤,这不利于法兰连接系统的紧密性.后期将通过添加碟形弹簧等元件来改善法兰连接的轴向韧性,克服蠕变松弛,并给出具体泄露控制方法.

## 致 谢

感谢国家自然科学基金和武汉工程大学研究生教育创新基金给予的资助.

## 参考文献:

- [1] 沈轶. 高温法兰连接系统可靠性及风险评价[D]. 南京:南京工业大学,2006.  
SHEN Yi. Reliability risk assessment of high temperature bolted flange system[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology,2006. (in Chinese)
- [2] 江国栋,陈彤. 25Cr2Mo1V 钢高温下工作的脆化机理研究[J]. 矿山机械,2003(7):93-95.  
JIANG Guo-dong, CHEN Tong. Embrittlement mechanism of 25Cr2Mo1V steel under high temperature[J]. Mining and Processing Equipment, 2003(7): 93-95. (in Chinese)
- [3] 杨瑞成,傅公维,王凯旋,等. 15CrMo 耐热钢 Larson-

Miller 参数值的确定与应用[J]. 兰州理工大学学报, 2003,30(3):27-30.

YANG Rui-cheng, FU Gong-wei, WANG Kai-xuan, et al. Determination of larsen-miller parameter for 15CrMo heat resistant steel and its application[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2003, 30(3):27-30. (in Chinese)

- [4] 袁超,胡正飞,吴细毛. 热电厂 15CrMo 钢管高温蒸汽氧化腐蚀机理研究[J]. 材料热处理学报,2012(33):90-95.

YUAN Chao, HU Zheng-fei, WU Xi-mao. Investigation of high-temperature steam oxidation for 15CrMo steel tube in thermal power plant[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012(33):90-95. (in Chinese)

- [5] 程宏辉,曹磊,靳惠明,等. 15CrMo 高温过热器弯管的失效分析[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2011,13(2):51-53.

CHENG Hong-hui, CAO Lei, JIN Hui-ming, et al. Failure analysis for 15CrMo super heater bent tubes [J]. Journal of Yang zhou University: Natural Science Edition, 2011, 13(2):51-53. (in Chinese)

- [6] GB/T3077-1999. 合金结构钢[S]. 北京:中国标准出版社,2000.

GB/T3077-1999. Alloy structural steel[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000. (in Chinese)

- [7] GB/T9938-2006. 石油裂化用无缝钢管[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

GB/T9938-2006. Seamless steel pipe for petroleum cracking[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)

- [8] GB/T2039-2012. 金属材料单轴拉伸蠕变试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2012.

GB/T2039-2012. Testing method for single axis tensile creep of Metallic materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)

- [9] 聂桂平. 2Cr11NiMoVNB 钢的高温蠕变特性实验研究[D]. 北京:华北电力大学,2002.

NIE Gui-ping. An experimental study on creep behaviors of 2Cr11NiMoVNB steel [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002. (in Chinese)

- [10] Akli Nechache, Abdel-Hakim Bouzid. Creep analysis of bolted flange joints[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007(84):185-194.

(下转第 58 页)