

文章编号:1674-2869(2016)01-0078-04

疲劳载荷下高温波齿复合垫的蠕变波动行为

桑 聪,郑小涛*,文 翔,喻九阳,高九阳
武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:研究了疲劳载荷下柔性石墨金属波齿复合垫的力学性能和蠕变性能.对垫片进行了373 K和573 K两种温度下的循环加载实验,基于得到的应力-变形量实测数据,通过计算压缩模量和卸载模量分析了其压缩回弹特性;考虑温度和金属骨架厚度的变化,探索了蠕变-疲劳的交互作用对垫片的影响.研究表明:疲劳载荷下随着时间增长垫片压缩速率增加,回弹速率减小;在稳态蠕变阶段,蠕变-疲劳载荷的交互作用使垫片的蠕变曲线出现周期性波动,波动周期不随实验条件改变而改变.

关键词:疲劳载荷;柔性石墨金属波齿复合垫;压缩回弹曲线;蠕变

中图分类号: TB125 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.01.014

Creep Fluctuation Behavior of High Temperature Flexible Graphite Corrugated Metal Gaskets under Fatigue Loading

SANG Cong, ZHENG Xiaotao, WEN Xiang, YU Jiuyang, GAO Jiuyang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: The mechanical and creep properties of flexible graphite corrugated metal gaskets were studied. The cyclic loading tests of gaskets at temperatures of 373 K and 573 K were conducted. Based on the measured stress-strain data and the calculation of compression modulus and unloading modulus, the compression resilience characteristics of the gaskets were analyzed. Considered the influence of the temperature and the thickness, the effects of interaction between creep and fatigue on the gaskets were explored. The result shows that the compression rate of the gaskets increases and the resilience rate of the gaskets decreases with the increasing of time under fatigue load; in the steady creep stage, the creep curve of the gasket appears cyclical fluctuations under the interaction between creep and fatigue, which has no relation with the experiment conditions.

Keywords: fatigue load; flexible graphite corrugated metal gaskets; compression resilience curve; creep

1 引 言

柔性石墨金属波齿复合垫(下称波齿复合垫)以其优秀的回弹性能和密封性能在承压设备和管道密封中的应用得到飞速发展^[1].石墨层的化学稳定性、回弹性能、耐高温性与金属骨架波齿的多道线密封的结合形成的密封性能令人称道,但到目前为止,还没有建立波齿复合垫的统一标准;随着高温垫片的发展,对高温下垫片性能的研究得到越来越多的重视,而与波齿复合垫相关的研究尤

其是高温下的实验研究还需加强.由于高温下垫片的力学性能,蠕变性能等因素与常温相比有显著差异,因此对不同温度、不同尺寸的柔性石墨金属波齿垫片,在疲劳载荷下的力学性能和蠕变性能进行了实验研究.

2 实验部分

2.1 实验仪器及其性能参数

实验采用长春机械研究院生产的RPL50蠕变疲劳试验机进行实验,该试验机主要性能参数如

收稿日期:2015-11-01

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划(Q20131506);武汉工程大学研究生创新基金项目(CX2014038)

作者简介:桑 聪,硕士研究生. E-mail: 1051556478@qq.com

*通讯作者:郑小涛,博士,副教授. E-mail: xiaotaozheng@163.com

表1所示. 实验装置如图1所示.

表1 试验机主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of testing machine

参 数	数 值
最大试验力/kN	动态±50
试验力误差	±0.5%示值
变形测量误差	±0.5%(FS)
试验温度范围/K	室温至1 273
温度精度/K	0.2%(FS)±0.1
温度控制波动度/K	≤±2
温度梯度/K	≤3

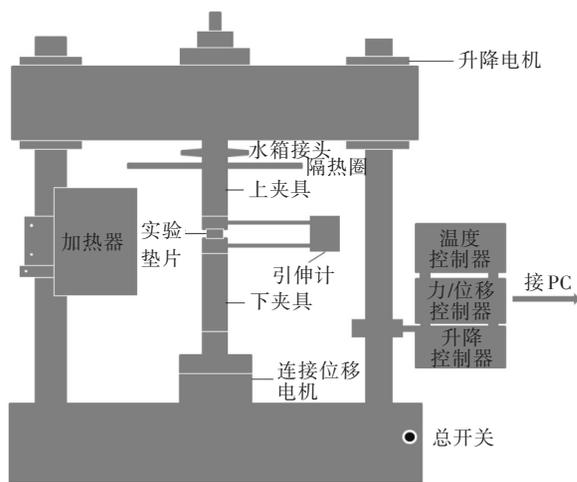


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

2.2 柔性石墨金属波齿复合垫

按标准 GB/T19066-2008^[2], 实验采用公称直径为 DN10 的基本型柔性石墨金属波齿复合垫, 垫片金属骨架材质为 304 不锈钢. 具体参数如表 2 所示, 结构和外观如图 2 所示.

表2 波齿复合垫尺寸

Tab. 2 Dimensions of flexible graphite corrugated metal gaskets

	金属骨架厚度 t	
	2.5	3.0
垫片厚度 T_0	3.5	4.0
垫片内径 D_1	23.5	23.5
垫片外径 D_2	34.5	34.5
金属骨架波齿半径 R	0.6	0.6
金属骨架波齿宽度 P	1.0	1.0
金属骨架波齿深度 h	0.27	0.27

2.3 实验方案

实验加卸载方案^[3]如表3所示.

最小垫片应力的选取: 实验采用动态循环加卸载方式进行, 因高温及高应力的作用, 垫片力卸

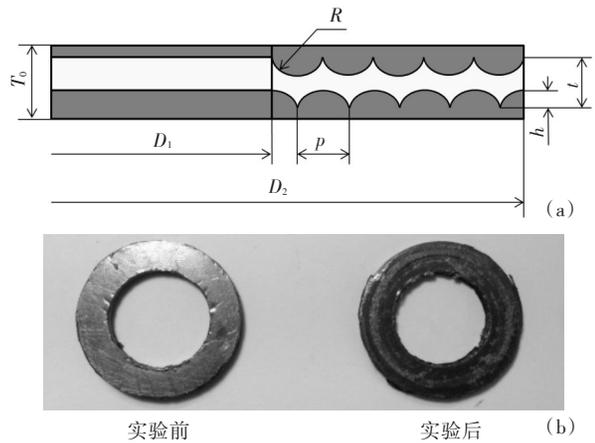


图2 基本型波齿复合垫(a)结构图; (b)实物图

Fig. 2 Fundamental form of flexible graphite corrugated metal gaskets

表3 加卸载实验方案

Tab. 3 Scheme of loading and unloading experiment

实验参数	数 值
初始垫片应力/MPa	3.5
最大垫片应力/MPa	70
最小垫片应力/MPa	0.7
加/卸载速率/MPa·s ⁻¹	0.5
加/卸载保载时间/min	0
实验温度 T/K	373, 573
循环数 N	1 000
重复性实验次数	3

载至很小(接近 0 MPa)时垫片的石墨层会粘附在实验夹具的上下表面, 故不宜将应力卸载至 0 MPa, 同时, 为保证最大加卸载应力比, 根据多次测试结果, 选择卸载至 0.7 MPa 较为合适.

3 结果与讨论

3.1 压缩模量 E_{LD} 和卸载模量 E_{UL}

操作工况下的垫片应力是否满足使用需要直接影响垫片密封结构的泄漏率^[4], 而垫片应力由垫片的压缩-回弹特性决定: 由压缩-回弹曲线(见图 3)可以确定垫片的压缩阶段的弹性模量 E_{LD} 和卸载阶段的弹性模量 E_{UL} ^[5-6], 由 E_{LD} 和 E_{UL} 则可以确定垫片应力.

$$E_{LD} = \frac{\sigma_{\max}}{\delta_{\max}} T_0 \quad (1)$$

$$E_{UL} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{UL}}{\delta_{\max} - \delta_{UL}} T_0 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: σ_{\max} 为最大垫片压缩应力, MPa; δ_{\max} 为 σ_{\max} 对应的垫片压缩量, mm; σ_{UL} 为垫片卸载应力, $\sigma_{UL} = 0.125 \sigma_{\max}$, MPa; δ_{UL} 为 σ_{UL} 对应的垫片压缩量, mm; T_0 为垫片总厚度, mm.

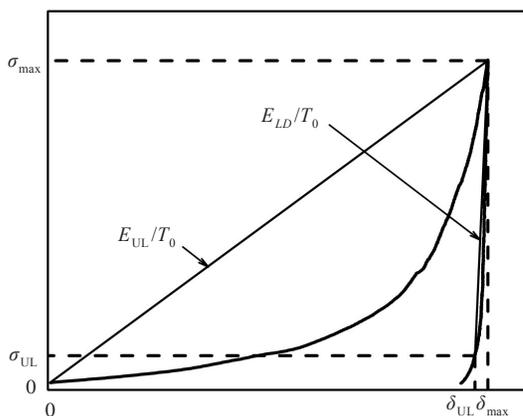


图3 波齿复合垫的单个加卸载压缩回弹曲线

Fig. 3 Single loading and unloading curve of flexible graphite corrugated metal gaskets

图3中曲线部分表示第一次加卸载过程波齿复合垫的压缩回弹曲线,分别将加载阶段曲线和卸载阶段曲线简化为直线,可以从直线方程中直接提取压缩模量 E_{LD} 和卸载模量 E_{UL} 。显然, E_{UL} 越小,垫片的回弹特性越好。

3.2 多次循环加卸载实验

对于严苛环境中承受载荷的螺栓法兰系统,在评估系统安全时,必须考虑蠕变-疲劳交互作用对材料造成的影响^[7],系统中垫片是重点评估对象。实验采用动态循环加卸载对波齿复合垫进行研究。

图4中小窗口部分为加卸载曲线的放大图,数字部分(1~1 000)为相应曲线的相应循环次数 N 。从图4中可以看出:1)加卸载循环数 $N \geq 20$,加卸载曲线趋于闭合,表示卸载后的残余变形量的累积很小;2)随着加卸载循环数 N 的增加,加载阶段曲线的斜率减小,卸载阶段曲线斜率增加(提取的 E_{LD} 和 E_{UL} 数据见图5),这是由于随着加卸载循环数 N 的增加,蠕变导致垫片材料的塑性变形引起的。

由图5可以直观地看出:1)随着循环数(时间)的增加, E_{LD} 逐渐减小,垫片材料变得更易于压缩,2)随着循环数(时间)的增加, E_{UL} 逐渐增大,垫片回弹性能变差。

3.3 蠕变波动

由于实验的每一个加卸载循环的最大应力和最小应力相同,通过分析垫片不同循环最大应力 σ_{max} 对应的最大位移 δ_{max} 的变化,同时分析残余位移 δ_{UL} 的变化,可以得到蠕变-疲劳交互作用对垫片性能的影响。

为得到普适的一般规律,进行了大量重复性实验,并将温度 T 和金属骨架厚度 t 的变化考虑在内,数据提取结果如图6所示。

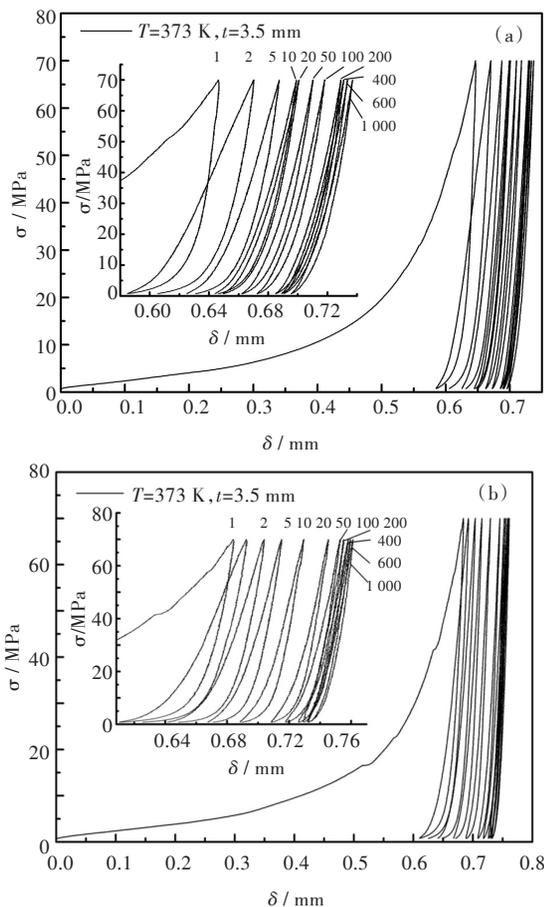
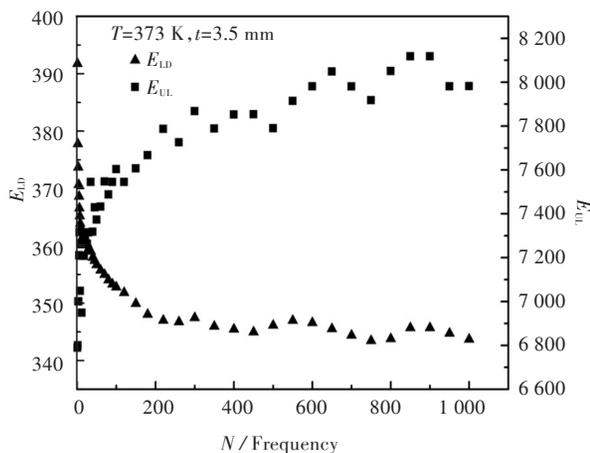


图4 不同温度波齿复合垫的加卸载曲线

Fig. 4 Loading and unloading curves of flexible graphite corrugated metal gaskets at different temperatures

图5 波齿复合垫的 E_{LD} 和 E_{UL} Fig. 5 E_{LD} and E_{UL} of flexible graphite corrugated metal gaskets

从图6中可以看出,承受相同的疲劳载荷,不同温度与不同厚度下的柔性石墨金属波齿复合垫,均表现出以下规律:1)循环数 N 小于200时为一次蠕变阶段(蠕变的减速期);2)在二次蠕变阶段(稳态蠕变),垫片的最大位移 δ_{max} 出现周期性波动式增长,且波动周期 T_F 稳定, T_F 约为400个循环;3)垫片的最大位移 δ_{max} 和残余位移 δ_{UL} 的变化规律体现了高度的一致性。

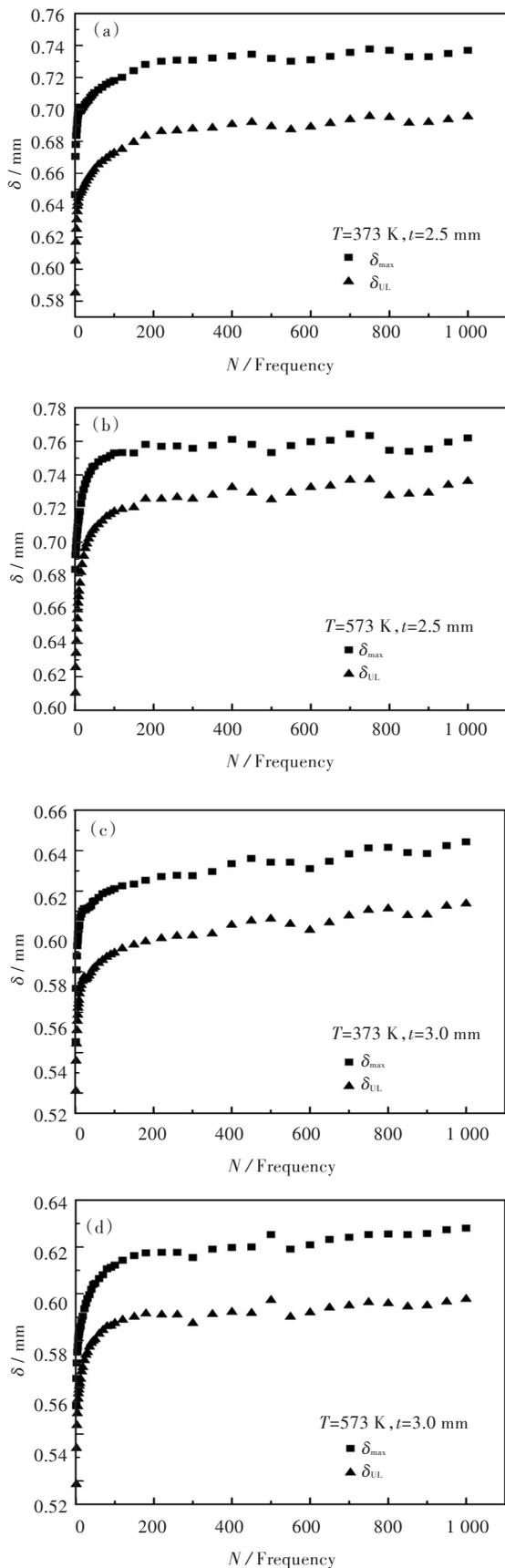


图6 波齿复合垫最大位移和残余位移

Fig. 6 Maximum and residual displacement of flexible graphite corrugated metal gaskets

承受疲劳载荷的蠕变-疲劳曲线与承受固定载荷的蠕变曲线的对比如图7所示. 在承受温度载荷和疲劳载荷过程中, 疲劳应变和蠕变应变的产生会使垫片产生形变硬化, 这种硬化会提升垫片的抗压缩能力, 垫片的蠕变量 ϵ 所呈现的波动式变化, 是蠕变-疲劳的交互作用影响的结果.

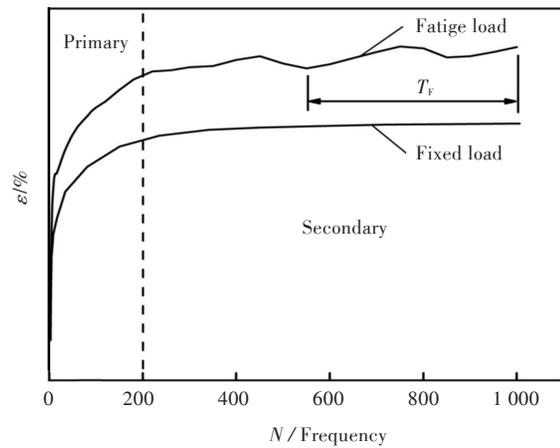


图7 波齿复合垫的蠕变波动行为

Fig. 7 Creep fluctuation behavior of flexible graphite corrugated metal gaskets

4 结 语

基于实验, 对不同温度及不同厚度的波齿复合垫进行多次循环加卸载, 研究了疲劳载荷下波齿复合垫的性能表现, 得到以下结论.

1) 疲劳载荷下, 循环次数(时间)对波齿复合垫片的压缩回弹性能有较大影响, 垫片的压缩速率与循环次数(时间)成正比, 压缩量的回弹速率与循环次数(时间)成反比.

2) 疲劳载荷下, 不同温度下波齿复合垫的蠕变均较明显. 由于蠕变-疲劳载荷的交互作用, 波齿复合垫在稳态蠕变阶段的蠕变量出现周期性波动, 波动周期与温度和金属骨架厚度无关.

参考文献:

[1] 王乐勤, 杨晖, 励行根, 等. 柔性石墨密封垫片的研究现状及发展趋势[J]. 流体机械, 2013, 41(6): 37-41.
WANG Y Q, YANG H, LI X G, et al. Present research and development trend of flexible graphite sealing gasket [J]. Fluid machinery, 2013, 41(6): 37-41.

[2] 李俊英, 吴树济, 吴凯珺, 等. 柔性石墨金属波齿复合垫片. GB/T 19066-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[3] 张增禧, 王曙, 顾伯勤, 等. 垫片高温性能及其表示方法[J]. 化工设备与管道, 2001, 38(4): 62-64.