

文章编号: 1674-2869(2016)04-0382-04

高温波齿复合垫片的循环压缩回弹性能

郑小涛, 文翔, 桑聪, 喻九阳, 徐建民

化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学), 湖北 武汉 430205

摘要:研究了柔性石墨金属波齿复合垫片在500℃时的加载速度对循环压缩回弹性能的影响。在试验温度为500℃时,对垫片进行加载速率分别为0.5 MPa/s和1 MPa/s的循环加载试验,得到垫片的应力-变形量曲线;通过计算压缩率和压缩模量,再拟合出相应的压缩-回弹本构方程。结果表明,500℃时波齿复合垫片的压缩模量随加载速率增大而增大;经过第一次压缩后,在随后的循环压缩过程中垫片的压缩模量变化较小,但显著高于初始压缩模量;垫片的最大压缩量均随循环次数而增加,表现出明显的棘轮效应,为保证连接紧密性需考虑垫片变形量;根据文章拟合的回归系数可以推测出在不同加载速率下,该类型波齿复合垫片的压缩回弹性能。

关键词:波齿复合垫片;加卸载速率;压缩率;压缩模量

中图分类号:TB125 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2016.04.013

Cyclic Compression-Resilience of Flexible Graphite Corrugated Metal Gaskets at High Temperature

ZHENG Xiaotao, WEN Xiang, SANG Cong, YU Jiuyang, XU Jianmin

Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety(Wuhan Institute of Technology),
Wuhan 430205, China

Abstract: The effect of loading speed on the cyclic compression and resilience performance of flexible graphite metal corrugated composite gasket was studied. The stress-deformation curves of the gasket were obtained at the loading rate of 0.5MPa/s and 1MPa/s respectively, under temperature of 500℃. By calculating the compression ratio and modulus, the corresponding compression resilience constitutive equation was fitted. The results show that the compression modulus of the flexible graphite corrugated metal gaskets increases with the loading rates increasing. After the first compression, the compression modulu of the gasket changes a little but it is significantly higher than the initial compression modulus. The maximum compression of the gasket increases with the increase of cycle number, which shows a significant effect of the ratchet wheel. The ratchet deformation of gaskets should be considered to ensure the tightness of bolted-flange joints. And according to the fitted coefficient, the compression resilience performance of this type of corrugated composite gasket can be inferred at different loading rates.

Keywords: flexible graphite corrugated metal gasket; loading and unloading rate; compression ratio; compression modulus

1 引言

螺栓法兰接头是压力容器和管道应用最广泛

的可拆卸密封连接形式,主要由螺栓、法兰和垫片组成;其中垫片具有复杂的非线性压缩回弹特性,是控制螺栓法兰接头泄漏的关键部件,常在高温

收稿日期:2016-03-14

基金项目:国家自然科学基金(51305310);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(CX2015023)

作者简介:郑小涛,博士,副教授. E-mail: xiaotaozheng@163.com

波动载荷条件下使用柔性石墨金属波齿复合垫片,实践证明,该垫片具有良好的密封性能^[1-2]。经不同加卸载速率及循环载荷后,柔性石墨金属波齿复合垫片的压缩回弹性能有较大的差异。目前国内对该垫片在高温条件下的加载速率及循环载荷下的压缩回弹特性研究很少,陆晓峰和顾伯勤等^[3]在之前研究的基础上,考虑垫片蠕变、螺栓应力松弛以及法兰的紧密性要求,提出了高温法兰接头的可靠性算法和寿命预测方法。GB/T 12622-2008《管法兰垫片压缩率及回弹率试验方法》^[4]中规定波形金属垫片的加卸载速度为0.5 MPa/s, Bouzid A, Nechache A^[5-6]等人采用理论分析和数值模拟方法对法兰连接热瞬态和热稳态条件下的应力分布规律进行了详细的研究。Bouzid 等人^[7-8]提出了一种计算松弛的方法,用以评估垫片蠕变对螺栓力、垫片力松弛的影响。Alkelani 等^[9]系统研究了垫片蠕变对高温法兰连接系统应力松弛行为的影响。关于垫片的加载速率(v)缺乏系统的研究,特别是高温下载荷的加载速度对波齿复合垫片的压缩回弹性能影响的研究。为此,本文选取了0.5 MPa/s和1 MPa/s两种加载速率分别进行500℃时波齿复合垫片的循环压缩回弹试验,来研究加载速率对垫片的压缩回弹性能的影响。

2 实验部分

2.1 试验仪器及垫片

试验采用长春机械研究院生产的PRL50蠕变疲劳试验机(见图1)进行实验,其中垫片夹具为自主设计,夹具上下端设计为可以抽离的钢块,下端与中心轴接触的面加工为球面,使其在加载时能够自主调节水平度,达到载荷均匀分布在试样上的目的。



图1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

试验垫片采用的柔性石墨波齿复合金属垫片由中非密封垫片厂生产加工,试验后的垫片如图2所示,垫片金属骨架的材质为304不锈钢,按照标准GB/T19066-2008加工而成,由于加工得到的实际垫片尺寸有一定的误差,经多次测量得到的平均值如表1所示。



图2 试验后的垫片

Fig. 2 Gasket after test

表1 波齿复合垫片实际尺寸

Tab. 1 Actual dimensions of the flexible graphite corrugated metal gaskets mm

parameter	gasket number	
	1	2
outer diameter of gasket	35.84	35.88
inner diameter of gasket	21.44	21.31
thickness of gasket	3.96	3.91

2.2 实验方案

根据GB/T 12622-2008的规定和实验要求,为了保证试验过程中温度的均匀性,本试验采用电阻加热炉,用3根热电偶分别测量炉内上中下3个位置的温度,整个过程中温度波动不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。试验开始前,先对垫片加热至500℃,然后保温20 min,使试样充分热膨胀后再施加轴向载荷。试验参数如表2所示。

表2 试验参数

Tab. 2 Test parameters

parameter	values
initial gasket stress / MPa	0.77
maximum gasket stress / MPa	74.1
minimum gasket stress / MPa	0.77
loading rate / (MPa/s)	0.5 1
holding time / min	0

加载速率的选取:本试验标准GB/T 12622-2008中的加卸载速率为0.5 MPa/s,因此另

外选取 1 MPa/s, 试验选取的垫片应力均为平均应力, 初始垫片应力为 0.77 MPa.

3 结果与讨论

3.1 试验测试结果

垫片的压缩量、压缩率、压缩模量、回弹量、回弹率和回弹模量都是垫片压缩回弹性能的重要指标. 由试验得到波齿复合垫片前 10 次的应力-变形量曲线, 如图 3 所示.

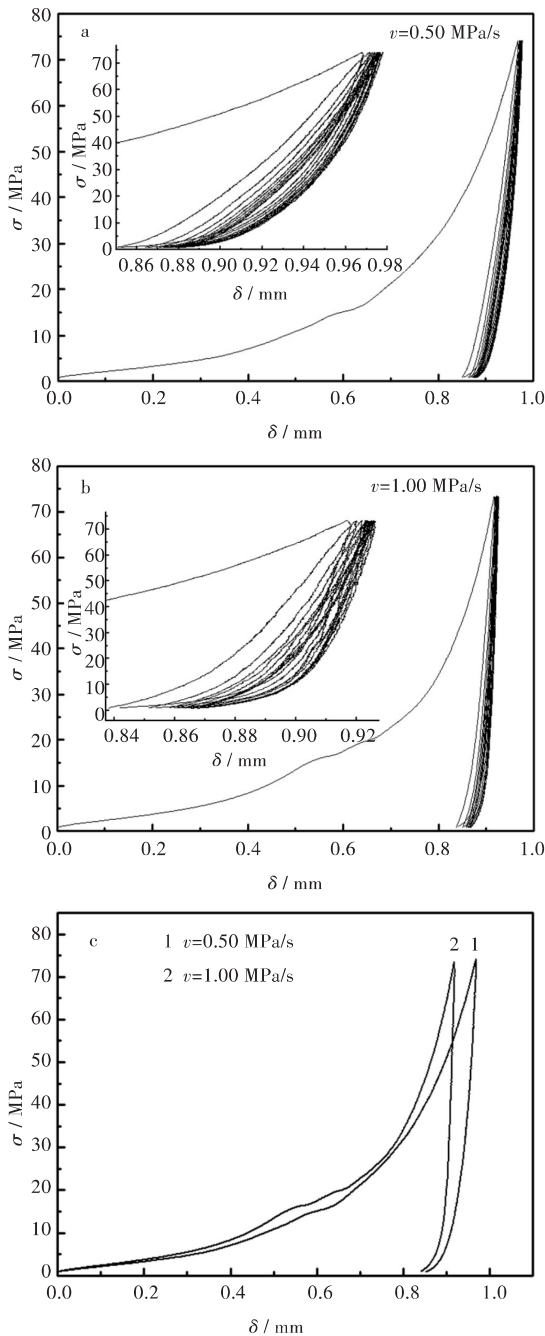


图3 垫片应力-变形量曲线

Fig. 3 Stress-deformation curves of the gasket

图 3a 和图 3b 中小窗口部分为加卸载的放大图, 能更清晰的看出: 1) 随着循环系数的增加, 最大变形量和残余变形逐渐变大; 2) 随着循环次数的增加, 加载曲线的斜率增大和卸载曲线的斜率增大, 这是由于循环次数增加会导致塑性应变累积, 使垫片发生硬化. 图 3c 对比两种加载速率下第一次循环的压缩回弹性能, 可以明显的看出两条曲线的趋势相同, 但随着加载速率的增大, 压缩量减小.

3.2 分析与讨论

为了更直观的表达垫片性能的变化规律, 计算出垫片的压缩率 S 和压缩模量 E_{LD} [6], 结果如图 4 所示.

$$S = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_{LD} = \frac{\sigma_{\max}}{\delta_1} T_3 \quad (2)$$

式(1)~(2)中, S 为垫片的压缩率; T_1 为垫片的试样在初载荷下的厚度; T_2 为垫片的试样在总载荷下的厚度; T_3 为每次循环垫片的初始厚度; E_{LD} 为垫片的压缩模量; σ_{\max} 和 δ_1 为最大垫片压缩应力及其相应的垫片压缩量的增量.

从图 4a 中可以看出, 波齿复合金属垫片的压缩率随时间而增大, 随加载速率增大而增大; 由图 4b 可以看出, 第二循环后, 压缩率缓慢增大, 由图 4c 中可以看出波齿垫的压缩模量随加载速率增大而增大, 随循环次数增大.

将试验的第一次循环曲线做拟合, 并考虑加卸载速率的影响, 得到如下压缩回弹曲线公式:

$$\text{压缩曲线: } S_G = (A_C + B_C V) D_G^{N_C} \quad (3)$$

$$\text{回弹曲线: } \frac{S_G}{S_K} = A_S + B_S \left(\frac{D_G}{D_K} \right)^{(A_V + B_V V)} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, S_G 为垫片压紧应力; D_G 为变形量; S_K 为垫片预紧应力; D_K 为不考虑蠕变时的最大变形量; V 为试验加卸载速率; A_C 、 B_C 、 N_C 、 A_S 、 B_S 、 A_V 、 B_V 均为回归系数.

不锈钢柔性石墨波齿复合垫片的回归系数及相关系数 R 见表 3 和表 4.

由拟合结果中相关系数 R 可看出拟合结果较好. 由公式(3)、(4)及表 3、表 4 中的回归系数即可推测任意加载速率下波齿复合垫片的压缩回弹性能. 对垫片可采取只做一种加载速率试验的方法, 再通过本试验得到的结果进行类比, 可以推测出其他加载速率下波齿复合垫片的性能.

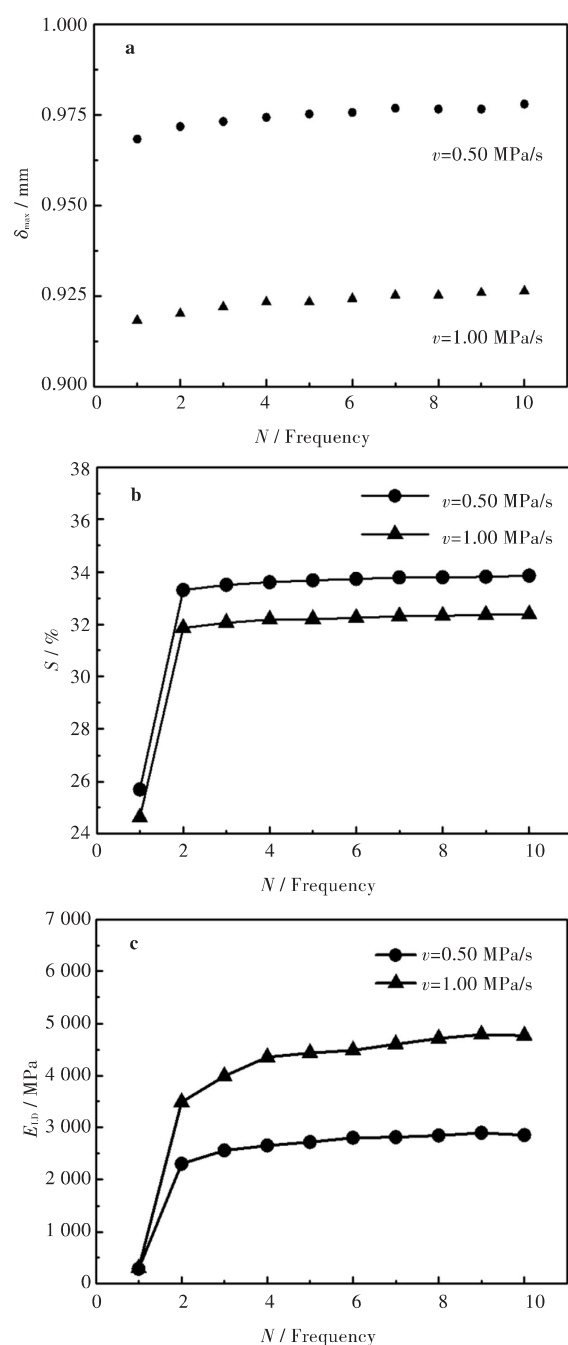


图4 垫片前10次循环的计算结果

Fig. 4 Calculated results of the first 10 cycles of the gasket

表3 垫片的压缩曲线回归系数及相关系数R

Tab. 3 Regression coefficients of compression curve of the gasket and its correlation coefficient

regression coefficient	value
A_C	59.49
B_C	37.87
N_C	3.967
R	0.989

表4 垫片的回弹曲线回归系数及相关系数R

Tab. 3 Regression coefficients of rebound curve of the gasket and its correlation coefficient

regression coefficient	value
A_S	0.007 5
B_S	1.648
A_V	24.97
B_V	31.94
R	0.983

4 结 语

试验温度为 500 ℃时,对波齿复合垫进行循环加卸载试验研究,在加卸载速率分别为 0.5 MPa/s 和 1 MPa/s 时,得到以下结论:

1)波齿复合垫片的压缩模量随加载速率增大而增大,这是由于垫片最大压缩量的增量随加载速率的增大而减小.

2)经过第一次压缩后,在随后的循环压缩过程中垫片的压缩模量变化较小,但显著高于初始压缩模量.

3)垫片的最大压缩量均随循环次数而增加,而循环次数增加会导致塑性应变累积,出现明显的棘轮效应.因此,在研究连接紧密性时需考虑垫片变形量.

4)根据文章拟合的回归系数可以推测出在不同加载速率下,该类型波齿复合垫片的压缩回弹性能.

参考文献:

- [1] 仇性启,周先军. 柔性石墨波齿复合垫片的常温性能研究[J]. 润滑与密封, 2001(3):33-34.
CHOU X Q, ZHOU X J. Study on behavior of flexible graphite gaskets reinforced by corrugated metal sheet at room temperature [J]. Lubrication and seal, 2001 (3) : 33-34.
- [2] 桑聪,郑小涛,文翔. 等. 疲劳载荷下高温柔性石墨金属波齿复合垫片的蠕变波动行为[J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38(1): 78-81.
SANG C, ZHENG X T, WEN X, et al. Creep fluctuation behavior of high temperature flexible graphite corrugated metal gasket under fatigue loading [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2016(1): 78-81.
- [3] 陆晓峰,沈 铁. 高温法兰密封接头的可靠性分析[J]. 压力容器, 2007, 23(9): 20-23.

(下转第 398 页)