

温度及预紧载荷对氧化石墨烯无石棉垫片蠕变松弛和泄漏率的影响

张静全, 李遇贤, 郭子玉, 张 杰

(昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 垫片在高温长期使用过程中发生蠕变松弛导致垫片应力下降, 从而影响密封效果。因此, 采用理论模型预测垫片的蠕变松弛与确定垫片在高温环境长期使用过程中泄漏率的变化规律非常重要。通过实验测试氧化石墨烯无石棉垫片在不同温度和不同预紧载荷下的垫片应力值, 并与根据 Burgers 模型计算出的垫片应力值进行对比。然后, 通过建立泄漏率与使用时间的关系, 提出氧化石墨烯无石棉垫片在不同温度和不同预紧载荷下长期使用时的泄漏率计算方法, 并计算出该垫片随时间变化的泄漏率变化规律。结果表明: 垫片应力的松弛量随着预紧载荷的增加而增加; 随着使用时间的增加, 垫片的应力松弛变得更加平缓; 当预紧载荷相同的情况下温度越高垫片应力下降越明显; Burgers 模型对垫片应力的预测值与实验值吻合度很好, 最大误差为 4.4728%; 当温度一定时, 氧化石墨烯无石棉垫片计算的泄漏率随着预紧载荷的增加而降低; 当预紧载荷相同时, 垫片的泄漏率随着温度的增加而增加, 且泄漏率均小于密封等级 T2 的泄漏率 $2 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。研究结果为氧化石墨烯无石棉垫片在高温环境长期使用过程密封性能应用提供依据。

关键词: 氧化石墨烯; 无石棉垫片; Burgers 模型; 蠕变松弛; 泄漏率

中图分类号: TB42; TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)03-0252-07

引用格式: 张静全, 李遇贤, 郭子玉, 等. 温度及预紧载荷对氧化石墨烯无石棉垫片蠕变松弛和泄漏率的影响[J]. 中国材料进展, 2024, 43(3): 252-258.

ZHANG J Q, LI Y X, GUO Z Y, *et al.* Effect of Temperature and Preload on Creep Relaxation and Leakage Rate of Graphene Oxide Non-Asbestos Gaskets[J]. Materials China, 2024, 43(3): 252-258.

Effect of Temperature and Preload on Creep Relaxation and Leakage Rate of Graphene Oxide Non-Asbestos Gaskets

ZHANG Jingquan, LI Yuxian, GUO Ziyu, ZHANG Jie

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The creep relaxation of gasket during long-term use at high temperature leads to the decrease of gasket stress, which affects the sealing effect. Therefore, it is very important to use the theoretical model to predict the creep relaxation of the gasket and determine the variation law of the leakage rate of the gasket during long-term use at high temperature. The gasket stress values of graphene oxide non-asbestos gaskets at different temperatures and different preloads were tested through experiments and compared with the gasket stress values calculated by Burgers model. Then, by establishing the relationship between the leakage rate and the use time, the leakage rate calculation method for graphene oxide non-asbestos gasket under different temperatures and preloads for long-term use is proposed, and the leakage rate variation with time is calculated. The results show that the stress relaxation of gasket increases with the increase of preload. With the increase of using time, the stress relaxation of gasket becomes more gentle; when the preload load is the same, the higher the temperature, the more obvious the stress drop of the gasket; the predicted gasket stress values of Burgers model are in good agreement with the experimental values, and the maximum error is 4.4728%; when the temperature is constant, the calculated leakage rate of graphene oxide

non-asbestos gasket decreases with the increase of preload; when the preload is the same, the leakage rate of gasket increases with the increase of temperature and the leakage rate is less than $2 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ of sealing grade T2. The results provide a basis for the sealing performance application of graphene oxide non-asbestos gasket during long-term use at high temperature.

Key words: graphene oxide; non-asbestos gasket; Burgers model; creep relaxation; leakage rate

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51165014); 云南省科技厅面上项目(2012FB130)

第一作者: 张静全, 男, 1995 年生, 硕士研究生

通讯作者: 李遇贤, 女, 1978 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: yuxian@kmust.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202206023

1 前言

螺栓法兰系统由于易于拆卸, 在石油、化工、核能、航天航空等行业得到广泛应用^[1]。螺栓法兰系统的密封失效很少是由螺栓和法兰强度不足引起的, 大部分都是由于垫片泄漏引起的, 所以垫片在螺栓法兰系统中起着至关重要的作用^[2]。垫片是静密封中确保机器设备和传送系统安全、无泄漏工作的一种基础零部件, 是汽车、航空航天、化工、石油和船舶等工业生产中避免重大安全事故的重要保障^[3]。垫片的蠕变松弛性能是影响螺栓法兰系统密封性能的重要性能之一, 因为它会导致垫片的应力松弛, 从而引起法兰接触面之间存在间隙, 使得螺栓法兰系统密封性能下降, 甚至导致介质发生界面泄漏^[4]。而高温和预紧载荷是影响蠕变松弛和泄漏的主要因素。关于垫片的蠕变松弛性能及泄漏率, 国内外学者进行了大量的研究工作。Sato 等^[2]采用有限元计算和实验研究了高温下聚四氟乙烯混合垫片螺栓连接管法兰的力学特性, 利用有限元计算得到的接触垫片应力分布以及垫片应力与泄漏率之间的关系, 预测了螺栓管法兰连接的密封性能。徐浩等^[5]研究高温下不含垫片的螺栓连接装置的蠕变松弛机制, 结果表明, 高温下螺栓预紧力越大, 随着时间的推移损失的预紧力越大, 但残余预紧力也越大。Wasmi 等^[6]提出用四元模型预测垫片连接系统在蠕变松弛过程中的残余应力, 研究选用的垫片材料为丁苯橡胶; Housari 等^[7]在四元模型的基础上, 预测螺栓连接中垫片的蠕变下应力下降, 并考虑垫片行为、螺栓刚度和接头刚度, 选用的垫片材料同样为丁苯橡胶; Williams 等^[8]通过一组实验确定 Burgers 模型的常数, 将模型用来表征和分析垫片螺栓接头的初始和扭转载荷松弛响应, 选用的垫片材料为添加 25% 玻璃纤维增强的聚四氟乙烯。Grine 等^[9]分析了不同温度下泄漏率、垫片位移和介质内压之间的关系, 提出了高温下垫片泄漏率的预测方法。近年来氧化石墨烯 (graphene oxide, GO) 作为新型纳米增强填料在复合材料中的显著增强作用引发极大关注。GO 作为一种新型纳米增强填料, 以较低的加载量就可显著增强聚合物复合材料的力学性能^[10]。Wang 等^[11]使用 GO 来增强聚乙烯醇, 结果表明, 当 GO 的添加量从 0.5% 增加到 4% (质量分数) 时, 材料表现出增强效果。Berki 等^[12]等采用 GO 对天然橡胶胶乳进行改性, GO 和十六烷基三甲基氯化铵之间的 π -阳离子相互作用可以调整界面相, 从而调整天然橡胶纳米复合材料的相关性能。关于 GO 在复合材料的应用研究表明, GO 少量的添加就能大幅度提升材料性能^[13]。

以上研究表明, 有限元技术和 Burgers 模型是研究螺栓法兰系统蠕变松弛和泄漏率的有效手段, 但是目前相

关的研究常把重心放在非金属垫片及橡胶垫片等的蠕变松弛及泄漏率, 很少针对氧化石墨烯无石棉垫片。本文使用 Burgers 模型来研究氧化石墨烯无石棉垫片在不同温度和不同预紧载荷下的蠕变松弛, 并通过实验得出氧化石墨烯无石棉垫片的蠕变松弛实验值, 对比分析 Burgers 模型的准确性; 其次提出随时间变化的垫片泄漏率计算方法, 并讨论氧化石墨烯无石棉垫片在蠕变松弛过程中泄漏率随时间变化规律。

2 蠕变松弛理论模型

解决复合材料的非线性粘弹性问题, 最重要的是建立与材料对时间的响应一致或接近的粘弹性模型, 并通过模型建立对应的本构方程, 研究复合材料由于粘弹性特点所发生的蠕变松弛现象。考虑到氧化石墨烯无石棉垫片作为复合材料, 其蠕变松弛过程具有非线性粘弹性材料的特点, 将 Maxwell 模型和 Kelvin-Voigt 模型串联起来组成粘弹性复合材料蠕变松弛模型, 也叫 Burgers 模型^[8], 如图 1 所示。Burgers 模型由一个刚度为 E_1 的理想弹簧 1、粘度系数为 η_1 的理想粘壶 1 串联, 再加上刚度为 E_2 的理想弹簧 2 与粘度系数为 η_2 的理想粘壶 2 并联。

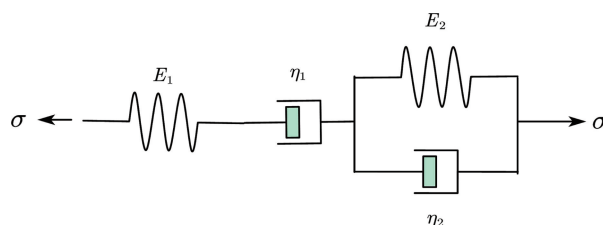


图 1 氧化石墨烯无石棉垫片的 Burgers 模型

Fig. 1 Burgers model of graphene oxide non-asbestos gaskets

当螺栓法兰垫片系统开始工作前, 首先将螺母拧紧, 如图 2 所示, 此时, 垫片受到压缩预载荷将发生压缩变形, 垫片的变形完全由弹簧 1 决定, 处于弹性形变阶段; 弹簧 1 的变形产生反弹力作用, 对于粘壶 2 和弹簧 2 并联的部分来说, 由于粘壶粘滞力的存在, 使得变形缓慢, 应变不能迅速发生, 但随着时间的增加, 恒定的应力迫使粘壶 2 进行活塞移动, 随着粘壶 2 的逐渐形变弹簧 2 也慢慢发生形变, 类似于高分子材料中分子链段运动必须克服内摩擦阻力而逐渐发展的蠕变过程的高弹形变阶段; 随着垫片受到压缩后其厚度变薄, 螺栓松弛, 垫片所受压缩载荷也逐渐下降, 因为粘壶 1 反应滞后, 弹簧 1 以及粘壶 2 和弹簧 2 并联的部分发生应变而对粘壶 1 活塞的推动作用致使其发生形变, 也就是蠕变过程的黏流形变阶段, 导致应力松弛。由此可见, 在 Burgers 模型中, 当垫片受到压缩时, 各元件表现出不同的应力和应变行为。粘壶 2 和弹簧 2 并联的部分表征了短期的蠕变

松弛行为;粘壶 1 表征了随着时间的增加应力缓慢松弛行为,长时间内的缓慢松弛特性由垫片材料决定;弹簧 1 表征了垫片的弹性行为。

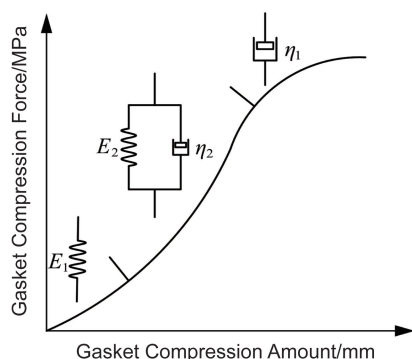


图 2 氧化石墨烯无石棉垫片承受压缩力和压缩变形曲线

Fig. 2 The compression force and compression deformation curve of graphene oxide non-asbestos gasket

Burgers 模型也可以看成是弹簧、粘壶和粘弹性元件 3 部分串联而成,设弹簧 1 的应变为 ε_1 ,粘壶 1 的应变为 ε_2 ,粘壶 2 和弹簧 2 并联的粘弹性部分的应变为 ε_3 。由图 1 可以得到如下关系:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{t}{\eta_1} \sigma_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

令总应变 $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$, 则可以得到总应变与时间 t 的关系为:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) \right) \cdot \sigma_0 \quad (4)$$

式中, σ_0 为初始压缩应力。式(4)可以预测氧化石墨烯无石棉垫片的应变与时间的关系,上式也可以写成:

$$\varepsilon(t) = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) \right] \cdot \sigma(t) \quad (5)$$

图 3 为氧化石墨烯无石棉垫片的压缩回弹曲线,由图可知施加压缩载荷并卸载后,垫片应力和应变之间的关系均呈现出非线性的特征,加载路线和卸载路线不重合,在图形上表现出滞回曲线的特征,即存在残余变形,说明垫片在卸载后均不能完全还原,而是存在一定的残余压缩量和回弹量,这也证明了垫片具有一定的粘弹性的特点。压缩回弹曲线中压缩曲线下的面积表示压缩垫片所做的功将以弹性应变能储存在垫片中,面积越大说明弹性补偿的能力越大,回弹曲线以下的面积则表示在

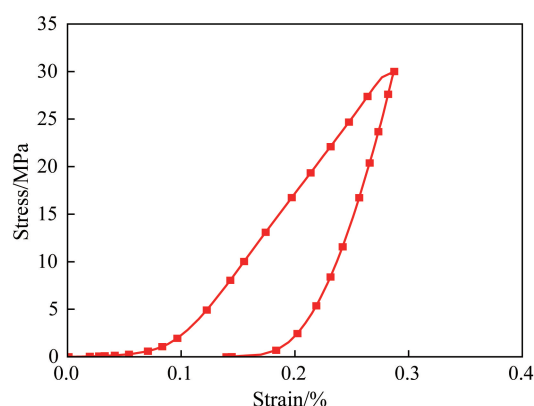


图 3 氧化石墨烯无石棉垫片压缩回弹曲线

Fig. 3 Compression rebound curve of graphene oxide non-asbestos gasket

卸载时释放出来的弹性应变能。显然,加载应力越大,则储存的弹性应变能越大,所以在垫片可承受范围内,适当增加压紧力能提高螺栓密封可靠性。应力与应变之间的变化规律符合 Burgers 模型。式(5)可以改写为:

$$\sigma(t) = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) \right]^{-1} \varepsilon_0 \quad (6)$$

式(6)将应力松弛量 $\sigma(t)$ 表达成时间的函数, ε_0 为螺栓预载荷下垫片的初始应变,可以进一步得到垫片的刚度与时间的关系表达式为:

$$E(t) = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) \right]^{-1} \quad (7)$$

垫片的刚度是比较复杂的,垫片在螺母预紧后,经历粘弹性蠕变和松弛,蠕变引起垫片厚度变化,从而引起应力松弛,垫片厚度对性能具有非线性影响,所以粘弹性行为导致的刚度损失是垫片变薄的原因,进而导致接头承受的载荷松弛。

而对于式(7)中的参数 E_1 , E_2 , η_1 , η_2 而言,可以按以下方法进行求取,当 $t=0$ 时:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_1} \quad (8)$$

当 $t>0$ 时,式(5)中的指数项可以忽略不计,在 t_1 和 t_2 时刻,应变与垫片应力之间的关系为:

$$\begin{cases} \varepsilon(t_1) = \left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} + \frac{t_1}{\eta_1} \right) \cdot \sigma(t_1) \\ \varepsilon(t_2) = \left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} + \frac{t_2}{\eta_1} \right) \cdot \sigma(t_2) \end{cases} \quad (9)$$

再取时间比较短的时刻 t_3 :

$$\varepsilon(t_3) = \left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} + \frac{t_3}{\eta_1} - \frac{1}{E_2} \cdot e^{-\frac{E_2 t_3}{\eta_2}} \right) \cdot \sigma(t_3) \quad (10)$$

联立式(8)~式(10),即可得 E_1 , E_2 和 η_1 , η_2 。

3 实验材料与方法

本文选用的垫片为氧化石墨烯无石棉垫片, 该垫片是一种低成本的垫片材料, 在低压应力作用下就能提供良好的密封性能, 并且也容易适应不平整的法兰面。采取抄取法制备氧化石墨烯无石棉垫片试样, 通过实验验证蠕变松弛模型的可行性。

3.1 原料、试剂及仪器设备

所用原料有: 无石棉纤维(纸浆纤维、芳纶纤维、矿物棉纤维、QY棉纤维), 胶乳粘合剂(丁腈胶乳、丁苯胶乳), 硫化剂(硫、氧化锌、二硫化四甲基秋兰姆), 填料(高岭土、滑石粉、云母、GO), 硫酸铝, 消泡剂, 絮凝剂。所用仪器包括: PL28-00型标准疏解机、PL12-A型水力碎浆机、PL6-C型纸样抄取器、PL8-D型电热压榨机、DZF-6090真空干燥箱、XLB-Q4004002平板硫化机、HLYL-4系列密封垫片应力松弛试验机。

3.2 实验配方

试样制备配方为: 芳纶纤维, 6 g; 纸浆纤维, 15 g; 矿物棉纤维, 15 g; QY棉纤维, 10 g; 高岭土, 20 g; 滑石粉, 8 g; 云母, 4.5 g; GO, 0.2 g; 丁腈胶乳, 8 g; 丁苯胶乳, 3 g; 硫酸铝, 9 g; 氧化锌, 0.6 g; 二硫化四甲基

秋兰姆, 0.6 g; S, 0.3 g; 消泡剂, 0.2 g; 絮凝剂, 0.1 g。

3.3 蠕变松弛实验

试样的尺寸为 $\Phi 75 \text{ mm} \times \Phi 55 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 实验温度为 25, 50, 100, 150 和 200 $^{\circ}\text{C}$, 垫片预紧载荷为 30, 40 和 50 MPa, 实验时间为 24 h。通过蠕变松弛试验机测试氧化石墨烯无石棉垫片在 5 种温度及 3 种预紧载荷下的蠕变松弛。

4 结果与讨论

4.1 蠕变松弛模型实验验证

图 4a 为垫片预紧载荷为 30 MPa 时不同温度下垫片的应力, 可知在使用时间约前 700 min 时, 垫片应力下降速率随着温度的升高而降低, 主要因为垫片在初始阶段温度越高膨胀越剧烈; 在使用时间约 700 min 后, 垫片应力下降速率随着温度的升高而升高, 并且温度为 200 $^{\circ}\text{C}$ 时垫片的应力松弛量达到最大值。图 4b 和 4c 与图 4a 有相似的变化规律。比较图 4a~4c 可知, 垫片应力的松弛量随着预紧载荷的增加而增加; 随着使用时间的增加, 垫片的应力松弛变得更加平缓。使用时间达 24 h 时, 垫片预紧载荷分别为 30, 40 和 50 MPa 时, 对应的的应力松弛量为 3.3653, 3.4509 和 4.4172 MPa。

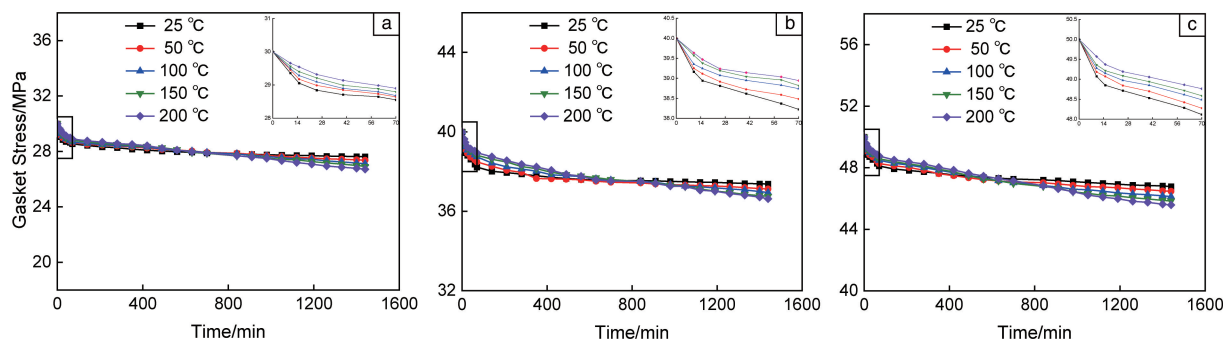


图 4 不同温度及预紧载荷下垫片应力随时间变化: (a) 30 MPa, (b) 40 MPa, (c) 50 MPa

Fig. 4 Variations of gasket stress with time under different temperatures and preloads: (a) 30 MPa, (b) 40 MPa, (c) 50 MPa

使用 Burgers 蠕变松弛模型来预测氧化石墨烯无石棉垫片的蠕变松弛性能, 需要将实验数据代入式(8)~式(10)计算出蠕变松弛模型中 4 个参数: E_1 , E_2 , η_1 和 η_2 , 表 1 列出不同预紧载荷及温度下蠕变松弛模型的 4 个参数。再将这 4 个参数代入式(6), 就可以得到垫片应力和时间的函数关系式。以预紧载荷 30 MPa 和温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 为例, 垫片应力和时间的函数关系式如式(11)所示:

$$\sigma(t) = \frac{0.342}{0.011285 + 1.45 \times 10^{-7}t + 8.9244 \times 10^{-4} \times (1 - e^{-0.04757t})} \quad (11)$$

图 5 为 5 种温度及 3 种预紧载荷下垫片蠕变松弛实验结果和模型计算结果的对比, 可以看出, 实验数据与模型计算结果吻合度很好, 之间的最大误差为 4.4728%, 这可能是由于垫片机械性能的正常变化或者实验的误差造成的。因此, 该蠕变松弛模型可以用于预测氧化石墨烯无石棉垫片的蠕变松弛行为。

表 1 不同预紧载荷及温度下蠕变松弛模型的参数

Table 1 Parameters of creep relaxation model under different preloads and temperatures

Preload/MPa	Parameter	25 ℃	50 ℃	100 ℃	150 ℃	200 ℃
30	E_1	88.612	83.795	80.228	77.137	74.102
	E_2	1 120.527 3	1 029.425	916.618	851.572	750.467
	η_1	6 898 765.201	7 232 545.454	7 425 675.239	7 613 286.383	7 723 564.053
	η_2	23 556.762 8	34 248.85	36 624.756 4	78 548.635 4	92 625.762 8
40	E_1	107.502	101.591	96.235 7	91.475 1	91.163 2
	E_2	2 278.638	1 767.287	1 443.476 1	1 207.563 1	1 196.683 5
	η_1	9 923 564.56	10 738 612.46	12 638 524.87	13 736 249.2	14 863 574.33
	η_2	72 625.365 7	86 539.532 8	89 679.651 7	176 257.597	187 326.269 4
50	E_1	125.487 6	119.251	112.964 3	106.864 7	102.168 6
	E_2	2 643.523 4	2 137.531 7	1 679.681 34	1 459.582 3	1 171.653 7
	η_1	15 836 527.35	16 756 413.4	17 685 356.76	19 735 235.63	21 635 621.5
	η_2	198 261.346 7	214 327.673	235 635.512 4	254 653.438 9	283 682.654

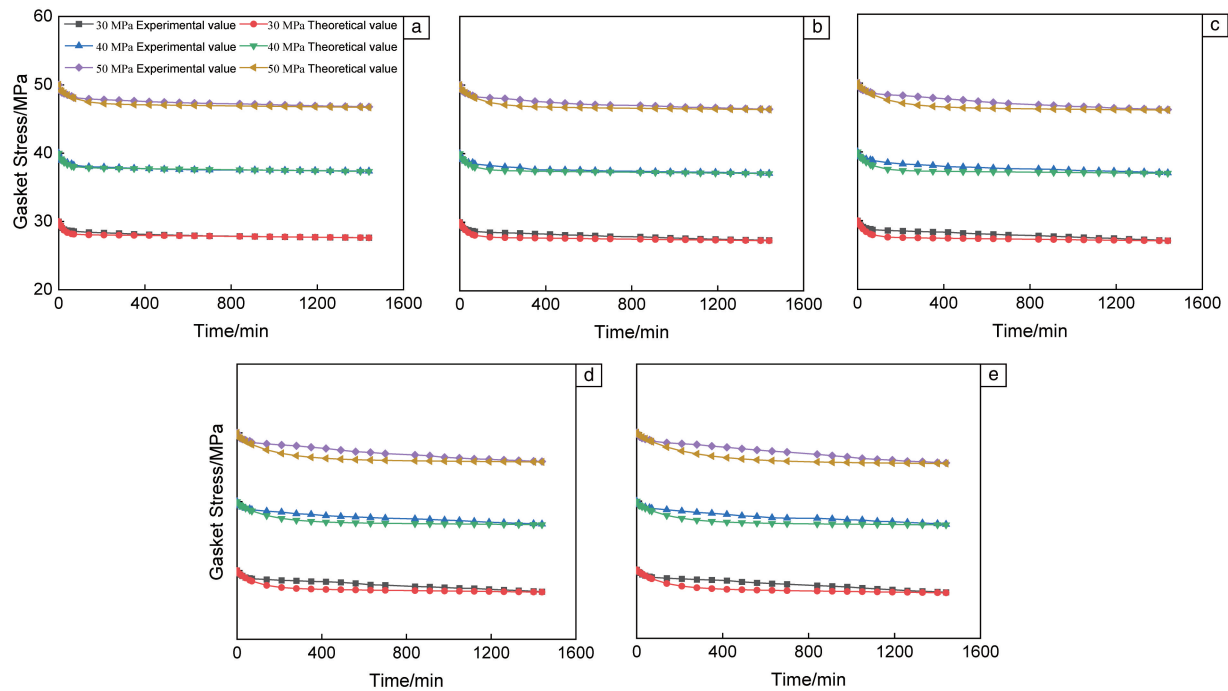


图 5 不同温度及预紧载荷下垫片蠕变松弛的实验结果和模型计算结果：(a)25 ℃，(b)50 ℃，(c)100 ℃，(d)150 ℃，(e)200 ℃
Fig. 5 Experimental and theoretical values of gasket creep relaxation under different temperatures and preloads: (a) 25 ℃，(b) 50 ℃，(c) 100 ℃，(d) 150 ℃，(e) 200 ℃

4.2 垫片泄漏率计算

为了表征氧化石墨烯无石棉垫片密封性能，美国压力容器研究委员会(PVRC)工作组提出了密封性的概念。

密封性与泄漏率成反比，PVRC 将气密性分为 5 个等级，并定义了相对于每个气密性等级的质量泄漏率，用于表征氧化石墨烯无石棉垫片的气密性，如表 2 所示。

表2 PVRC 密封等级
Table 2 PVRC sealing grade

Seal grade	Quality leakage rate, L $/(mg \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1})$	Design constant, T_c
T1	2×10^{-1}	0.1
T2	2×10^{-3}	1
T3	2×10^{-5}	10
T4	2×10^{-7}	100
T5	2×10^{-9}	1000

Bausman 等^[14]给出了实际泄漏率和最终操作气密性参数之间的关系, 如式(12)所示:

$$L = [(145P/14.7) \times (1/T_f)]^2 / 150 \quad (12)$$

式中, L 为实际泄漏率, $mg \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}$; T_f 是最终操作气密性参数, 无量纲; P 是内压, MPa。 T_f 与垫片参数和垫片应力有关, 计算公式如下:

$$T_f = (S_f/G_s)^{(1/k_i)} \quad (13)$$

$$S_f = r[\eta S_g - P(A_i/A_g)] \quad (14)$$

$$k_i = \log(\eta S_g/G_s)/\log T_p \quad (15)$$

$$T_p = (\eta S_g/G_b)^{(1/a)} \quad (16)$$

式中, G_b 、 a 和 G_s 为垫片参数, G_b 和 G_s 的单位为 MPa, a 的单位为无量纲; S_g 为垫片初始应力, MPa; S_f 为工作垫片应力, MPa; r 为应力保持系数, 介于 0.1 和 1.0 之间, 无单位; η 是装配效率, 无单位; P 为内压, MPa; A_i 为垫片内部受压面积, mm^2 ; A_g 为垫片的接触面积, mm^2 ; k_i 是垫片实验中卸载曲线的斜率, 无量纲; T_p 为气密性参数, 无量纲。

氧化石墨烯无石棉垫片在不同温度下长期使用过程中, 垫片应力也会随着使用时间变化而变化, 因此, 垫片的泄漏率也与时间有关, 为了获得垫片在高温下使用时泄漏率的计算方法, 有必要建立泄漏率与使用时间之间的关系。式(11)~式(16)建立了泄漏率、垫片参数和

垫片应力之间的关系, 但这种关系与使用时间无关。通过分析, 可以用不同温度下长期使用期间随时间变化的垫片应力代替工作垫片应力 S_f , 以考虑时间因素。在此基础上, 参考文献[15]推导出 S_g 的数值, 并再次使用最小安装垫片应力 S_m 代替垫片初始应力 S_g , 得出泄漏率、垫片参数、垫片应力与使用时间之间的关系, 从而得到在不同温度下长期使用垫片泄漏率的计算方法, 计算公式如式(17)所示:

$$L = 0.1611 \times \left(\frac{1}{S_f} \right)^{1.46413} \quad (17)$$

根据上述确定的泄漏率、垫片参数、垫片应力与使用时间之间的关系, 如果已知氧化石墨烯无石棉垫片在不同温度下长期使用期间随时间变化的垫片应力, 则可以计算出垫片随时间变化的垫片泄漏率。将实验得到的不同温度及不同预紧载荷下随时间变化的垫片应力 S_f 代入方程(17)中, 可以得到氧化石墨烯无石棉垫片在不同温度及不同预紧载荷下随时间变化的泄漏率, 从而可以得出垫片在不同温度及不同预紧载荷下的密封性, 如图6所示。从图6可以看出, 在相同的预紧载荷和温度下, 垫片的泄漏率随使用时间的增加而增加; 预紧载荷为 30 MPa 和使用时间在约前 700 min 时, 泄漏率增加速率随着温度的升高而下降, 随着时间继续增加, 泄漏率增加速率随着温度的升高而升高, 并且温度为 200 °C 时垫片的泄漏率达到最大值, 为 $1.31 \times 10^{-3} mg \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}$; 预紧载荷为 40 MPa 和使用时间在约前 600 min 时, 泄漏率升高速率随着温度的升高而下降, 随着时间继续增加, 泄漏率增加速率随着温度的升高而升高, 温度为 200 °C 时垫片的泄漏率达到最大值, 为 $8.27 \times 10^{-4} mg \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}$; 预紧载荷为 50 MPa 和使用时间在约前 500 min 时, 泄漏率增加速率随着温度的升高而下降, 随着时间继续增加, 泄漏率增加速率随着温度的升高而升高, 温度为 200 °C 时垫片的泄漏率达到最大值, 为 $6.01 \times 10^{-4} mg \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}$; 在相同的温度和使用时间下, 氧化石墨烯无石棉垫片计

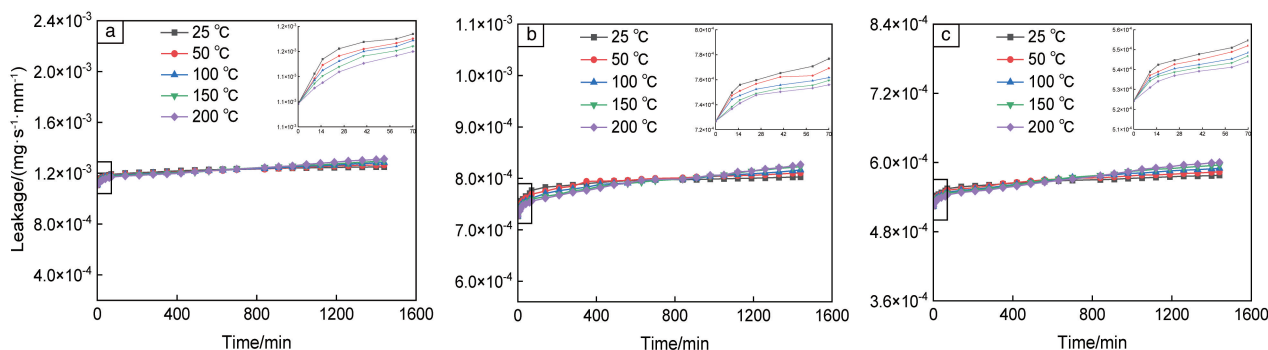


图6 不同温度及预紧载荷下垫片泄漏率随时间变化: (a) 30 MPa, (b) 40 MPa, (c) 50 MPa

Fig. 6 Variations of gasket leakage rate with time under different temperatures and preloads: (a) 30 MPa, (b) 40 MPa, (c) 50 MPa

算的泄漏率随着预紧载荷的增加而降低,且泄漏率均小于密封等级 T2 的泄漏率($2 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)。

5 结 论

(1)对氧化石墨烯无石棉垫片进行不同温度和不同预紧载荷下的蠕变松弛实验。垫片应力的松弛量随着预紧载荷的增加而增加;随着使用时间的增加,垫片的应力松弛变得更加平缓;在垫片预紧载荷相同的情况下,温度越高垫片应力下降得越明显。

(2)通过 Burgers 模型计算出垫片在不同温度和不同预紧载荷下的垫片应力值,并与实验值进行对比分析。结果表明, Burgers 模型预测值与实验值吻合度很好,最大误差为 4.4728%,因此该蠕变松弛模型可以用于预测氧化石墨烯无石棉垫片的蠕变松弛行为,并且通过 Burgers 模型预测值可以预测垫片的泄漏率。

(3)提出将氧化石墨烯无石棉垫片在不同温度及不同预紧载荷下长期使用时的垫片应力代替最终工作垫片应力,并提出氧化石墨烯无石棉垫片在不同温度和不同预紧载荷下长期使用时的泄漏率计算方法,并计算出垫片随时间变化的泄漏率变化规律。当温度相同时,垫片的泄漏率随预紧载荷的增加而减小;当预紧载荷和温度相同时,垫片的泄漏率随使用时间的增加而增加;当预紧载荷相同时,垫片的泄漏率随温度的增加而增加,且泄漏率均小于密封等级 T2 的泄漏率($2 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)。

参考文献 References

- [1] KIKUCHI T A, TSUJI H B, TSURUMI D C. Effects of Nut Thinning due to Corrosion on the Sealing Performance in Bolted Flange Joints Under Internal Pressure[C]// ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference. Prague; Czech Republic, 2018.
- [2] SATO K, SAWA T, KOBAYASHI T. Fem Stress Analysis of Long-Term Sealing Performance for Bolted Pipe Flange Connections with Ptfе Blended Gaskets Under Elevated Temperature[C]// ASME 2016 Pres-

sure Vessels and Piping Conference. Vancouver; ASME, 2016.

- [3] 蔡仁良. 流体密封技术原理与工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 530.
- CAI R L. Principle and Engineering Application of Fluid Seal Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 530.
- [4] SUN Z G, GU B Q. Journal of Pressure Vessel Technology[J], 2012, 134(1): 011211.
- [5] 徐浩, 王威, 马跃, 等. 润滑与密封[J], 2013, 38(7): 57-60.
- XU H, WANG W, MA Y, *et al.* Lubrication Engineering[J], 2013, 38(7): 57-60.
- [6] WASMI H, ABDULLAH M, JASSIM O. International Journal of Current Engineering and Technology[J], 2016, 6: 1298-1301.
- [7] HOUSARI B A, ALKELANI A A. Journal of Pressure Vessel Technology[J], 2012, 134(2): 021201-021205.
- [8] WILLIAMS J P, STONE A, REEDY R, *et al.* Journal of Pressure Vessel Technology[J], 2019, 141(2): 1-11.
- [9] GRINE L, BOUZID A H. Prediction of Leak Rates Through Porous Gaskets at High Temperature[C]// ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference, Toronto; ASME, 2018.
- [10] WANG F, WANG H Y, MAO J. Journal of Materials Science[J], 2019(1): 36-61.
- [11] WANG J C, WANG X B, XU C H, *et al.* Polymer International[J], 2011(5): 816-822.
- [12] BERKI P, KHANG D Q, MINH D Q, *et al.* Polymer Testing[J], 2018, 67: 46-54.
- [13] MCCOY T M, TURPIN G, TEO B M, *et al.* Current Opinion in Colloid & Interface Science[J], 2019, 39: 98-109.
- [14] BAUSMAN A, ANITA R, DALE A. An Exploration of Achievable Tightness in ASME B16.5 Standard Flanges for Various Gasket Technologies[C]// ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. Waikoloa; ASME, 2017.
- [15] 蔡仁良, 顾伯勤, 宋鹏云. 过程装备密封技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 259.
- CAI R L, GU B Q, SONG P Y. Sealing Technology of Process Equipment[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2006: 259.

(编辑 费蒙飞)