

# 考虑微动磨损的法兰垫片泄漏路径研究

郭岩宝<sup>1\*</sup>, 张政<sup>1</sup>, 王德国<sup>1</sup>, 何仁洋<sup>2</sup>

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2 中国特种设备检测研究院, 北京 100029

\* 通信作者, gyb@cup.edu.cn

收稿日期: 2019-12-16

国家自然科学基金项目(51875578)和国家重点研发计划项目(2017YFC0805000, 2017YFC0805005)联合资助

**摘要** 目前, 在能源工程领域, 特别是石油和天然气工业, 站场和管道是最重要的运输方式。在天然气集输系统中, 站场占有比例较大, 其可靠性在很大程度上影响着整个管道系统的安全。由于设备和仪表的多样性, 螺栓—垫片—法兰连接是站场中主要的连接方式。此外, 密封垫片是整个系统的核心密封元件, 对管道系统的安全性能至关重要。

在天然气输送的过程中, 内部输送介质引起的压力脉动将不可避免地导致管道及连接部位发生小幅度的振动, 造成垫片与法兰密封面的微动磨损, 从而降低螺栓—垫片—法兰连接的紧密性和密封性能。通过对常用金属缠绕垫片的微动磨损试验, 观察分析了垫片与法兰密封件界面微动磨损对连接系统微泄漏的影响, 并根据密封面的磨痕尺寸, 建立了“米”字形垫片微泄漏路径单元模型。利用 FLUENT 软件对微动磨损产生的微泄漏路径单元内部的流体特性进行了数值模拟, 探究了不同管道压力和泄漏模式下泄漏过程的变化规律, 并通过柔性石墨壁面的剪力云图分析单元内部通道壁面易受高压介质冲蚀的区域。

结果表明, 泄漏模式(泄漏口数量)对泄漏路径单元内流场及流速的分布有较大影响, 一级泄漏模式入口流速较高, 但扩散能力相对较弱, 三级泄漏模式的出口流速最大; 此外, 温度变化不会直接影响内部流场变化; 微泄漏路径单元的通道入/出口界面的体积流率均随入口压力的增大而增大; 泄漏介质对柔性石墨壁面剪切力的冲蚀区域随泄漏模式产生相应变化, 与其它两种泄漏模式相比, 一级泄漏模式的壁面剪应力较大, 三级泄漏模式的最大的剪应力出现在中间区域, 对石墨壁面的冲蚀作用影响更大。总的来说, 考虑微动磨损的法兰垫片泄漏路径模型一定程度上能够为法兰垫片泄漏模型和评价体系的建立与优化提供参考。

**关键词** 微动磨损; 金属缠绕垫片; 泄漏路径; FLUENT; 数值模拟

## Study of the flange gasket leakage path under fretting wear

GUO Yanbao<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>1</sup>, WANG Deguo<sup>1</sup>, HE Renyang<sup>2</sup>

1 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China

**Abstract** Today, station and pipeline transportation are the most important methods in various energy engineering fields, especially in the oil and gas industry. In the natural gas gathering and transmission system, the gas station has a vital role, and its reliability can affect the safety of the entire pipeline system to a large extent. Due to the diversity of equipment and instruments,

引用格式: 郭岩宝, 张政, 王德国, 何仁洋. 考虑微动磨损的法兰垫片泄漏路径研究. 石油科学通报, 2020, 03: 420-428

GUO Yanbao, ZHANG Zheng, WANG Deguo, HE Renyang. Study of the flange gasket leakage path under fretting wear. Petroleum Science Bulletin, 2020, 03: 420-428. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.036

the bolt-gasket flange connection is the main mode of connection in the gas station. It is well recognized that the gasket is the core sealing element which is critical to the safety performance of the whole pipeline system.

In the process of natural gas transportation, pressure pulsations generated in the gas will inevitably cause the pipeline to vibrate a little, and act on the sealing interface of the flange and gasket in the form of fretting wear, thus reducing the tightness and sealing performance of the bolt-gasket-flange connection. Through the fretting wear test of common spiral wound gaskets (SWG), the influence of fretting wear on the interface between SWG and flange seals on the connection was observed and analyzed, and the "star" type gasket micro-leakage path unit was established according to the size effect of wear scars. FLUENT software was used to conduct numerical simulation of the fluid characteristics inside the micro-leakage path unit generated by fretting wear. We explored the variation of the leakage process under different pipeline pressures and leakage modes, and analyzed the areas vulnerable to high-pressure erosion of the internal channel wall through the stress shear cloud diagram of the flexible graphite wall.

The results show that the leakage modes (number of leakage ports) has a big impact on the distribution of the flow field and velocity in the leakage path unit. The inlet velocity of the first level leakage mode is high, but the diffusion ability is relative weak. The outlet velocity of the third level leakage mode reaches the maximum. Also, the temperature does not directly affect the change of the internal flow field. The volume flow rate of the channel inlet/outlet interface of the micro-leakage path unit increases with an increase of pressure. Moreover, the erosion region of the shear force on the flexible graphite wall varies with the leakage modes. Compared with the other two leakage modes, the first level leakage mode presents greater wall shear stress. The maximum shear stress of the third level leakage mode occurs in the middle region, and has a greater influence on the erosion of the graphite wall surface. Eventually, the leakage path model under fretting wear can finally provide references for the establishment and optimization of a flange gasket leakage model and evaluation system to a certain extent.

**Keywords** fretting wear; spiral wound gasket; leakage path; FLUENT; numerical simulation

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.036

## 0 前言

日益增长的物资需求给能源运输业带来了新的挑战和发展。在当今能源工程领域,特别是石油天然气工业领域,站场和管道运输是最重要的运输方式。在天然气集输系统中,由于设备和仪器的多样性,使得螺栓—垫片—法兰连接数量庞大,是站场的主要连接方式。垫片作为整个系统的核心密封元件,对管道系统的安全性能至关重要<sup>[1]</sup>。法兰垫片在泄漏初期都属于微小泄漏,但其可能会进一步发展成为大型泄漏,引发安全事故。因此,法兰垫片的密封性能直接关系到输送系统的运行安全<sup>[2-3]</sup>。

此外,任何表面都具有一定的粗糙度,即使在高压密封中,密封接触面也会存在微小空隙,导致界面泄漏的发生。许多研究工作开展在法兰连接系统的泄漏模型方面,包括平行圆板模型、三角沟槽模型<sup>[4]</sup>和多孔介质模型<sup>[5]</sup>。后续为了构建更加精确的模型,采用了基于分形参数的泄漏理论,使模型得到进一步完善。引入分形多孔介质理论,建立泄漏率的理论预测模型<sup>[6-7]</sup>。目前,尽管界面泄漏的机理发展已经较为清晰,但由于密封界面微观形貌的复杂性与随机性,很难构建界面泄漏机理模型。分形多孔介质输运理论的引入很好地推动了泄漏机理的研究,但这些模型均默

认密封界面为静止状态。值得注意的是,管道运输系统中产生的压力脉动可以引起弯头、减速器、阀门等特殊部位严重振动。振动幅度虽然属于微米级,但却无法避免和消除<sup>[8]</sup>。法兰连接系统的振动会引发相关关键密封元件(如螺栓、垫片等)的微动磨损,从而加速密封界面的磨损,导致管道介质泄漏<sup>[9-12]</sup>。

考虑到法兰垫片泄漏模型的研究虽然已经得到足够的重视和发展,但是随着微观研究的深入和微动磨损的介入,法兰垫片的密封与泄漏问题并没有从微观角度得到明确的解释,也因此在该领域难以做到从微观机理到宏观表征的跨接。因此,本文通过研究微动磨损对垫片密封界面的影响,进而建立密封界面的微泄漏路径单元,采用 FLUENT 软件对介质(高压天然气)在泄漏路径单元内部的流体特性进行数值模拟,分别探究了不同管道压力和不同泄漏口数量对高压天然气管道法兰垫片泄漏过程的影响,能够为泄漏模型的完善提供一定参考。

## 1 垫片密封界面微动磨损

垫片密封界面微动磨损广泛存在于高压管道的法兰连接处。通过对已失效的法兰垫片密封界面进行观察分析发现,尽管常用的金属缠绕垫片具有优异

的压缩回弹性能<sup>[13]</sup>,但是在实际苛刻的工况下(即存在振动等外界因素影响),法兰端面的粗糙峰会与垫片的密封面相互作用,引发严重的摩擦磨损行为。另外,根据API标准,管道的振动幅值最大不允许超过500  $\mu\text{m}$ ,所以对垫片与法兰端面微动磨损的位移幅值取平均,即大约控制在200  $\mu\text{m}$ (或小于200  $\mu\text{m}$ )。此外,微动磨损行为会在柔性石墨填料的密封界面上产生大量尺寸和角度不同的磨痕,其方向主要包括径向和周向两种。通过对柔性石墨填料带密封面上的磨痕整合分析,确定可以通过建立规范的“米”字型微泄漏路径单元来实现界面泄漏模型的简化。为了更好地模拟垫片泄漏初期密封面形貌,开展了相应的微动磨损试验,以输气管道的法兰端面粗糙度标准( $Ra=0.8$ )对金属缠绕垫片密封面进行了多组微动磨损试验,实验参数的设定如下:法向载荷:40 N(比压25.2 MPa),位移幅值:200  $\mu\text{m}$ ,振动频率:10 Hz,室温:25  $\pm$  2  $^{\circ}\text{C}$ 。利用三维光学形貌仪对表面磨痕进行观测。得出相应独立磨痕的宽度约为10  $\mu\text{m}$ ,以此为微泄漏路径单元模型的建立提供了尺寸数据,如图1所示<sup>[8]</sup>。

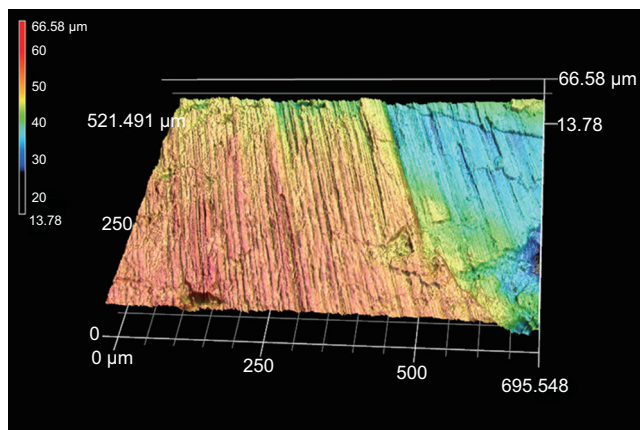
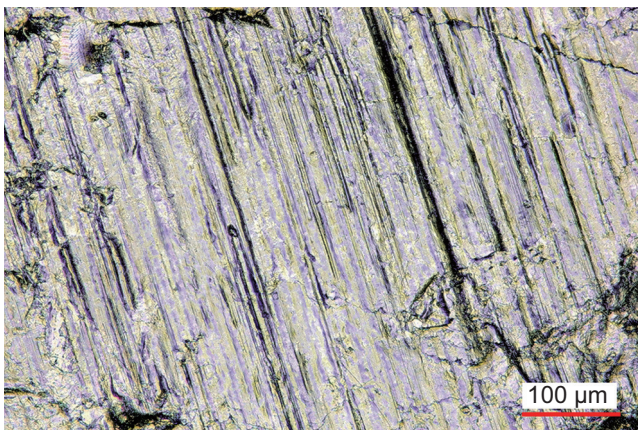


图1 垫片密封面微动磨损的表面形貌

Fig. 1 Morphology of fretting wear on gasket sealing surface

## 2 泄漏路径单元数值模型

### 2.1 网格模型

在法兰垫片密封界面微泄漏路径单元的仿真研究中,以局部柔性石墨填料密封界面和法兰端面构建三维FLUENT模型。仿真过程对高压天然气在微泄漏路径单元的运动过程进行研究,评估其泄漏速率、体积流率以及对石墨壁面的剪切力。研究不同泄漏的发展过程和影响。为了更好的模拟法兰端面粗糙峰对垫片柔性石墨密封面的微动磨损表面,设定微泄漏路径单元的通道截面为半径5  $\mu\text{m}$ 的半圆形,整个法兰一垫片密封界面由数量庞大的“米”字型泄漏路径单元构成。假定各支路之间的夹角统一为45°,并呈轴对称分布,分别以角度对其进行命名,即0°,45°,90°,135°和180°。各泄漏支路的长度为200  $\mu\text{m}$ ,整个模型采用适应比较好的四面体网格,所建网格总数为23.16万,结构质量良好,如图2所示。以出口端面中心速度为指标,对网格进行独立性分析如表1所示。当网格数为16.885万时,误差为1.59%,当网格数为31.658万时,误差仅为0.62%,最终选取网格数量为23.16万。

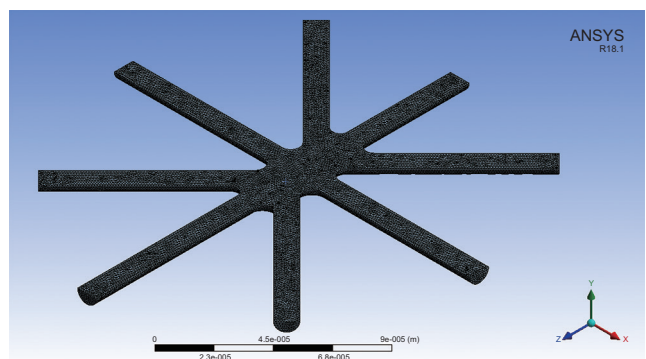


图2 网格模型

Fig. 2 Meshing model

表1 出口速度随网格数的变化

Table 1 Outlet velocity varies with grids number

序号	网格数/万	速度/(m/s)	误差/%
1	3.8750	9.8	—
2	10.7500	9.93	2.89
3	16.8850	9.98	1.59
4	23.1600	10.09	1.04
5	31.6580	10.15	0.62



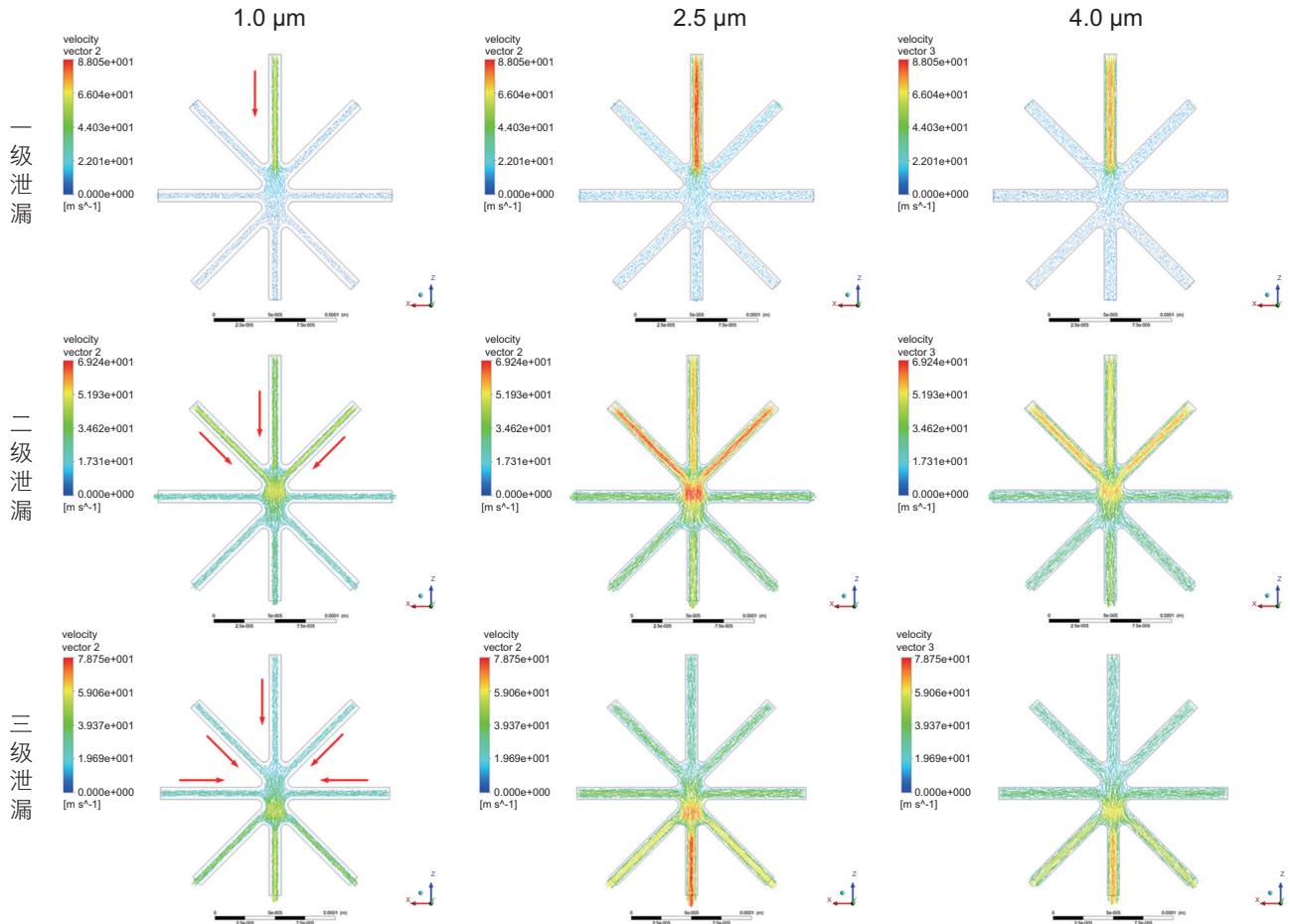


图3 微泄漏路径单元内不同高度截面的速度矢量图(入口压力为 4 MPa)

Fig. 3 The velocity vector diagrams of different height sections in the micro-leakage path unit (inlet pressure is 4 MPa)

## 2.2 边界条件

在模型中, 泄漏入口采用压力入口边界, 分别为 2 MPa, 4 MPa, 8 MPa, 12 MPa 模拟不同管道法兰连接处的内部介质的输送压力。泄漏出口同样采用压力出口边界, 但由于不同管道法兰的垫片有效密封面的宽度不同, 规定出入口相应的压差分别为 0.025 MPa, 0.05 MPa, 0.1 MPa, 0.2 MPa。选择 wall 为壁面边界条件(上平面材质为 304 不锈钢, 半圆曲面材质为柔性石墨), 两者的粗糙高度值分别设定为 0.001 mm 和 0.0005 mm。除此之外, 初步设定高压天然气在微泄漏路径单元内的温度与管道内的输送温度保持一致, 为 283 K。

## 2.3 计算方法

本文中的流体介质为高压天然气, 根据公式(1)和(2)计算得出克努森数  $K_n < 0.01$ , 所以流体在微泄漏单元内仍能满足连续性。并采用层流来描述高压天然气

在泄漏路径单元内的流动状态<sup>[14-15]</sup>。微通道泄漏过程求解采用基本稳态算法, 利用 SIMPLE 修正算法实现了速度场与压力场的关系, 保证了连续性方程的满足。

$$K_n = \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{KT}{\sqrt{2\pi d^2 p}} \quad (2)$$

式中,  $K_n$  为克努森数;  $\lambda$  为气体分子平均自由程(m);  $L$  为流场特征长度(m);  $K$  为玻尔兹曼常数,  $K=1.23 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为开氏温度(K);  $d$  为气体分子有效直径(m);  $p$  为空间压力(Pa)。

## 3 分析与讨论

### 3.1 泄漏分析

在泄漏过程中, 高压天然气在不同泄漏路径单元中的泄漏路径十分复杂, 并伴随强烈的随机性, 无法

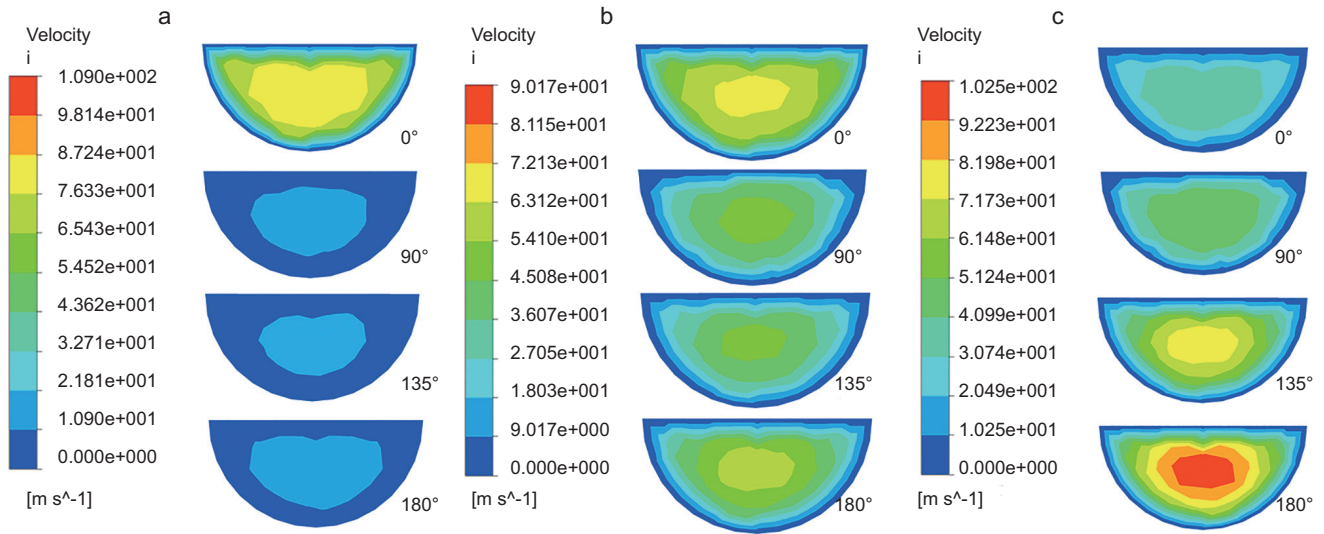


图4 微泄漏路径单元不同入口模式的入/出口速度云图, 入口压力为4 MPa(a.一级泄漏 b.二级泄漏 c.三级泄漏)

Fig. 4 Cloud diagrams of inlet/outlet velocities in different inlet modes of the micro-leakage path unit, inlet pressure is 4 MPa (a. First level leakage b. Second level leakage c. Third level leakage)

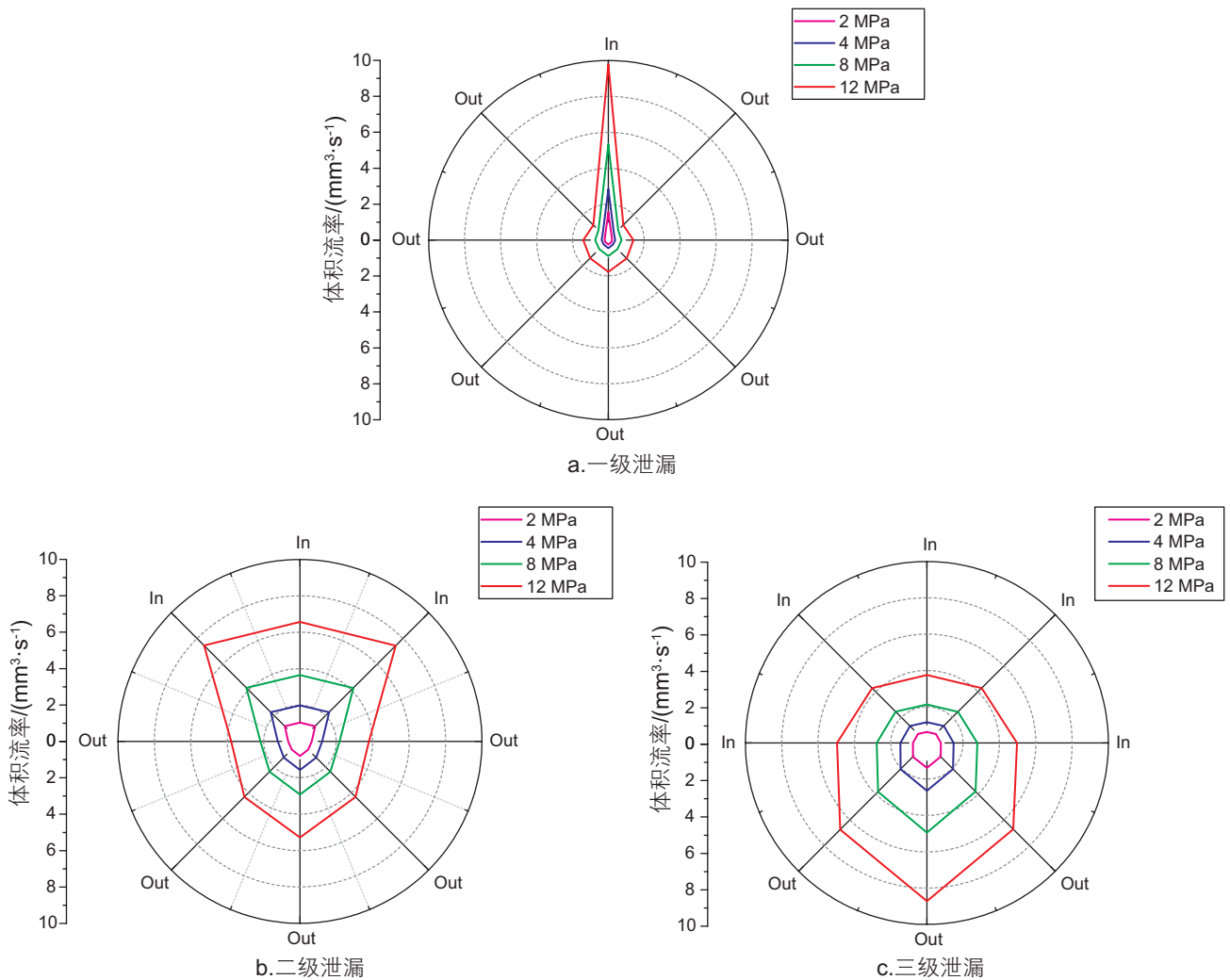


图5 入口和出口界面的体积流率(a.一级泄漏 b.二级泄漏 c.三级泄漏)

Fig. 5 Volume flow rate at inlet and outlet interfaces (a. First level leakage b. Second level leakage c. Third level leakage)

准确确定具体地路径线路。因此在仿真模拟中，我们依据泄漏路径单元内的入口数量，将其简化成为三种模式，即一级泄漏(0°入口)，二级泄漏(0°和45°入口)，三级泄漏(0°，45°和90°入口)。对4 MPa入口压力下的微泄漏路径单元的不同高度截取平面速度矢量，分别为1.0 μm，2.5 μm，4.0 μm。从图3中可以清楚的看出，当高度为2.5 μm时，一级泄漏模式的入口微通道内流速较高，但在中部区域迅速减小，未形成持续加速区域。然而，其他两种级别泄漏模式则分别在中部区域的前端和后端形成了集中加速区，且在相同入口压力下，二级泄漏模式的集中加速区明显在区域大小和速度均值上均大于三级泄漏模式。当高度分别为1.0 μm和4.0 μm，此时速度矢量截面距离上、下壁面的距离相同，可以发现近平面的流速要明显高

于近半圆形曲面的流速，尽管平面的粗糙度要高于曲面。值得注意的是，在三种不同的泄漏模式下，其微泄漏路径单元内部通道交汇处的流速整体相对较低，且未出现明显的涡流现象。

图4为微泄漏路径单元不同泄漏模式的入/出口界面速度云图。由于所有壁面均为粗糙表面，导致近壁面流速较低，约为10 m/s。在一级泄漏模式下，所有出口界面的流速非常低，平均流速约为20 m/s，其中180°和90°出口的流速相对较大，但与入口处流速相比依旧存在明显差值，此时高压天然气在泄漏的过程中，尽管在微泄漏路径单元的入口界面流速较大，但向各出口扩散运动的能力较差，一定程度上减弱了其泄漏能力。对于二级泄漏模式，出口界面的平均流速约为一级泄漏模式的2倍，达到约50 m/s。此时，微

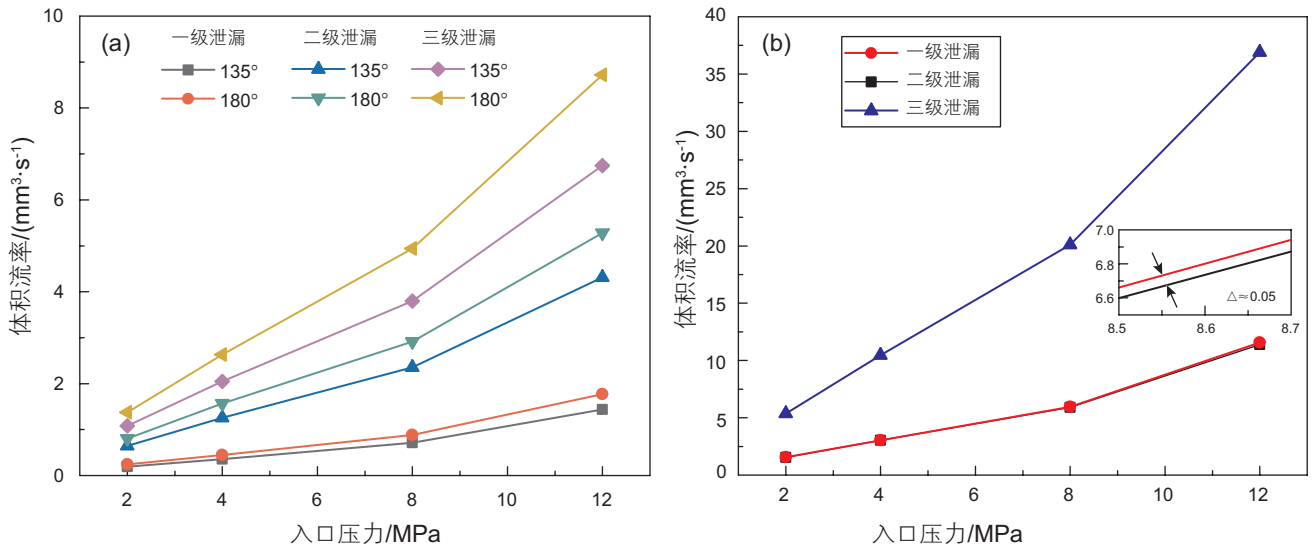


图6 微泄漏路径单元的体积流率(a.入/出口界面b.单元内部)

Fig. 6 Volume flow rate of the micro-leakage path unit (a. Inlet/outlet interface b. Interior of unit)

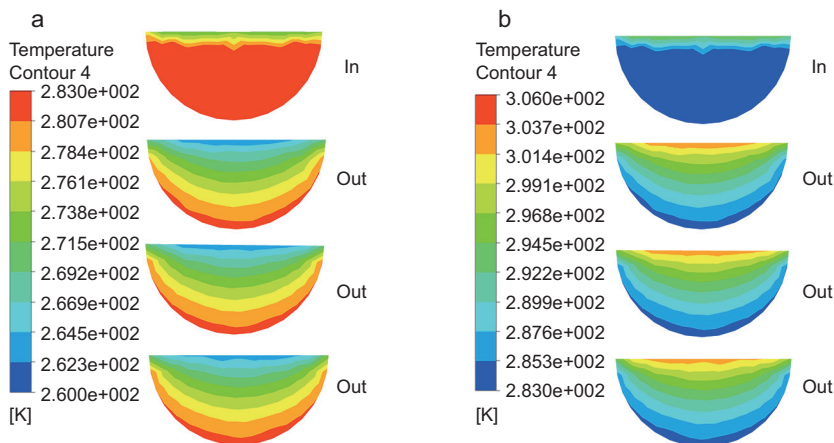


图7 微泄漏路径单元入/出口的温度云图(a.外界低温260 K; b.外界高温306 K)

Fig. 7 Temperature cloud diagram of inlet/outlet of micro-leakage path unit (a. 260K b. 306K)

泄漏路径单元入口和出口界面的流速大小均相对接近,这种情况是由于多股高压气流汇合形成集中加速区造成,随后通过出口完成泄漏,且各出口流速大小相对平均。三级泄漏模式情况下,180°泄漏出口界面的速度达到最大,所有微泄漏路径单元出口界面的平均流速都能够达到80 m/s,此时各入口通道的高压泄漏气体在中部区域后端完成混合加速,并通过180°出口完成主要泄漏,其余两个135°出口完成辅助泄漏。

随后,对三种不同泄漏模式的微泄漏路径单元入/出口界面的体积流率进行了计算,具体结果如极坐标图5所示。可以很明显看出,微泄漏路径单元入口和出口界面的体积流率均随入口压力的增大而增大。而且,不同泄漏模式下入口和出口体积流率相差较大。随着入口数量的增加,入口界面的体积流率不断减小,出口界面的体积流率不断增大。

图6a为不同入口压力与出口体积流率的曲线图,随着入口压力的增大,180°出口与135°出口界面体积流率呈逐渐增大的趋势,且增长速率也与入口压力呈正相关。此外,还可以发现180°出口界面体积流率与

135°出口界面体积流率的差值随泄漏入口数量的增加而增大,同样也随入口压力的增大而增大。图6b很好地表现了微泄漏路径单元内部的体积流率。从图中可以发现其内部的体积流率同样随着压力的增大而增大,且在一级泄漏模式和二级泄漏模式下,微泄漏路径单

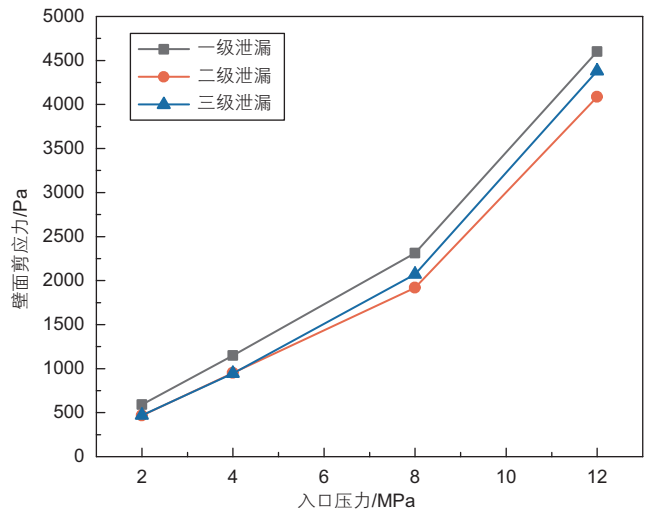


图8 柔性石墨壁面剪应力

Fig. 8 Shear stress on flexible graphite wall

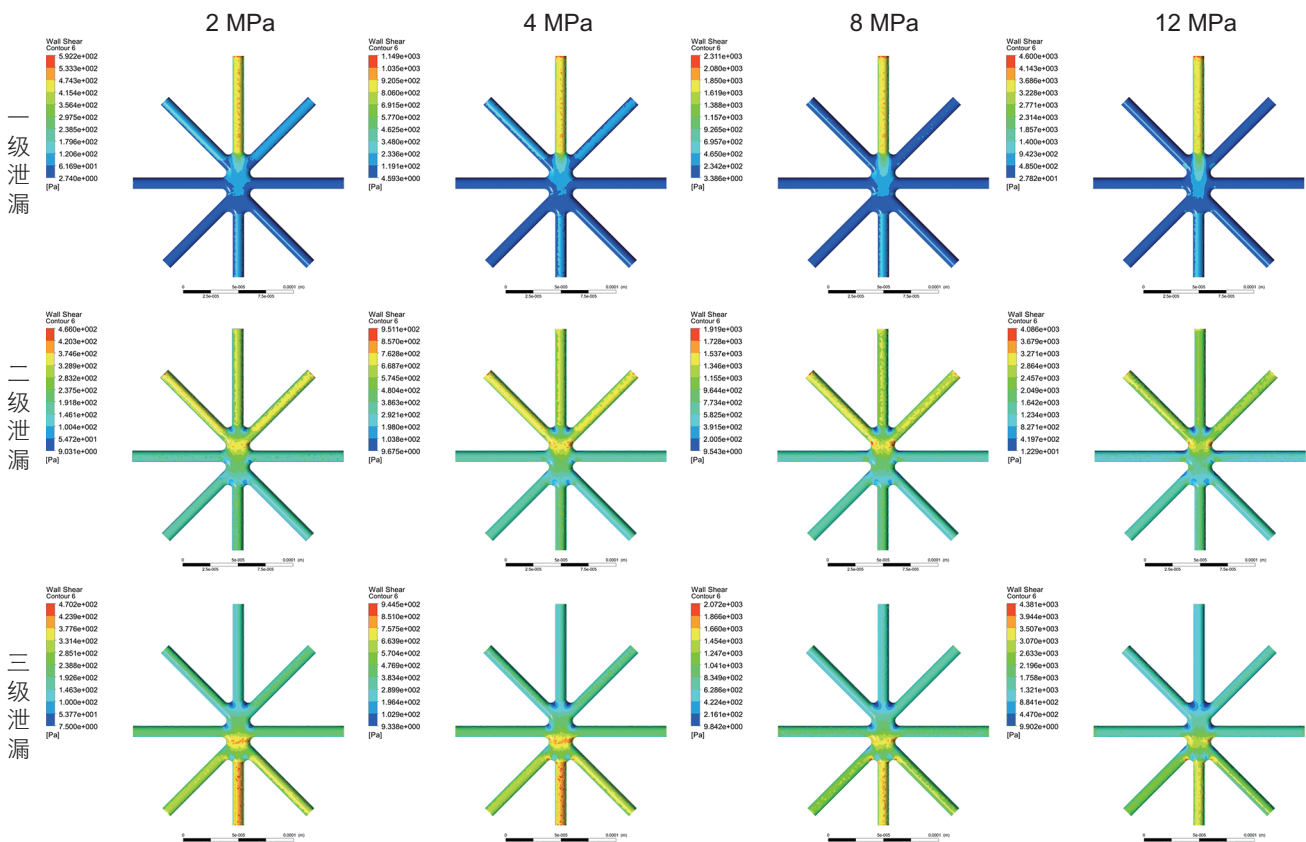


图9 微泄漏路径单元的柔性石墨壁面剪应力云图

Fig. 9 Shear stress cloud diagram of flexible graphite wall of micro-leakage path unit



元内部的体积流率几乎相同, 仅仅高出  $0.05 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。然而三级泄漏模式不论在增长速率和数值上都远高于其他两种泄漏模式, 最高可达到  $36.7 \text{ mm}^3/\text{s}$ , 约为其他两种泄漏模式的 3 倍。

综合考虑天然气输送管道所处环境存在温度变化, 即外界高温或外界低温情况。为了研究温度变化对流体介质在泄漏过程中的影响, 改变法兰垫片的温度场(设定外界高温为  $306 \text{ K}$ , 外界低温为  $260 \text{ K}$ )可以发现, 泄漏路径单元内部的温度场变化十分微小, 导致温度变化对已经形成的柔性石墨微泄漏通道内介质的流速几乎没有影响, 如图 7 所示。这种现象可能是因为微泄漏单元泄漏通道尺寸较小, 且内部气体流速过大, 导致温度对介质流速等参数无法产生相应的作用。但是, 温度作为紧密性评价的关键参数, 仍会对螺栓—垫片—法兰连接系统的紧密性产生负面影响, 即能够加速法兰螺栓螺纹间的微动磨损和蠕变等, 从而导致密封性能的降低和泄漏的加剧。

### 3.2 壁面分析

柔性石墨作为一种具有高回弹性的软材料, 依靠自身特性在两个接触界面之间形成密封<sup>[16]</sup>。但是其有效密封面会在振动等复杂条件下与法兰端面相互作用造成严重损伤。然而值得注意的是, 在微泄漏的过程中, 泄漏单元通道内的高速气流会不断冲蚀接触的石墨密封面, 一定程度上可能会造成石墨密封面的二次损伤, 从而加剧微泄漏的发生。我们对不同入口压力下的半圆形柔性石墨壁面的最大剪应力进行计算, 得到图 8 的壁面剪应力曲线。从图中可以看出, 在不同入口压力情况下, 一级泄漏模式相较于其他两种泄漏模式, 其壁面剪应力值更大, 差值最大可达 11.5%。此外, 在不同泄漏模式下, 高压区( $8\sim 12 \text{ MPa}$ )的增长速度均大于中、低压区( $2\sim 8 \text{ MPa}$ )。值得注意的是, 在低压区( $2\sim 4 \text{ MPa}$ )下, 二级泄漏模式和三级泄漏模式的最大剪应力几乎没有差距, 但当入口压力超过  $4 \text{ MPa}$ , 三级泄漏模式的壁面剪应力超过二级泄漏模式, 且差值逐渐增大。

为了更好的分析柔性石墨壁面最大剪应力的存在位置, 预测微泄漏路径单元的变化, 选取柔性石墨壁面的剪应力云图, 如图 9 所示。对于一级泄漏模式, 最大剪应力主要出现在微泄漏路径单元入口及入口微

通道的壁面; 此外, 当入口压力处于低压区( $2\sim 4 \text{ MPa}$ )时,  $45^\circ$  出口和  $180^\circ$  出口均受到轻微的剪应力, 但当入口压力超过  $8 \text{ MPa}$  时, 仅仅在  $180^\circ$  出口壁面存在较明显剪应力。这种情况可能会协同原有的微动磨损过程, 通过不断携带磨损产生的石墨磨屑, 使其泄漏通道持续加深扩大, 从而加剧高压气体的泄漏。当为二级泄漏模式时, 最高剪应力出现在中部区域的前段两侧, 即内部的集中加速区。高速泄漏的气体不断冲蚀石墨两侧壁面, 造成微泄漏路径单元中部区域体积的增加, 逐渐降低垫片的有效密封面积。对于三级泄漏模式, 壁面剪应力主要集中在中部区域后端和  $180^\circ$  出口的壁面上, 尤其在入口压力为  $4 \text{ MPa}$  时。此种泄漏模式是前述两者的结合, 对中部区域壁面和通道壁面均能产生较强的剪应力, 最终减弱垫片的密封性能。

## 4 结论

由于管道振动会造成法兰与金属缠绕垫片密封界面微动磨损, 严重破坏垫片密封面, 磨痕形成与外界相通的微泄漏路径, 加剧界面泄漏。本文依据垫片密封界面微动磨损建立“米”字型微泄漏路径单元模型, 对其进行内部流场特性的研究。

(1) 相较于一级泄漏模式, 二级和三级泄漏模式分别在中部区域的前端和后端形成了集中加速区; 且二级和三级泄漏模式的各泄漏出口流速明显高于一级泄漏模式。

(2) 温度变化在微流道中对流速未能起到明显的作用, 对已经形成的石墨微泄漏通道内的介质流速几乎没有影响。

(3) 微泄漏路径单元的通道入/出口界面的体积流率均随入口压力的增大而增大。并且入口数量的增加, 使入口界面的体积流率不断减小, 出口界面的体积流率不断增大。

(4) 在不同入口压力情况下, 一级泄漏模式相较于其他两种泄漏模式的表现出更大的壁面剪应力; 三级泄漏模式最大剪应力出现在中部区域和通道内, 对石墨壁面的冲蚀作用影响更大。

此模型的建立从界面磨损角度丰富了密封失效机理, 有助于建立准确的泄漏预测模型和新型密封材料的研发。

## 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 L 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] 张浩. 天然气输配站场风险评价研究[D]. 昆明理工大学, 2013. [ZHANG H. Research on risk assessment of natural gas transmission and distribution station[D]. Kunming University of Science and Technology, 2013.]
- [3] 庄法坤, 谢国山, 刘文, 等. 基于有限元的螺栓法兰接头密封影响因素分析[J]. *全面腐蚀控制*, 2018, 32(10): 1–7. [ZHUANG F K, XIE G S, LIU W, et al. Analysis of influencing factors on sealing performance of bolted flange joint by finite element method, 2018, 32(10): 1–7.]
- [4] LOK H H. Untersuchungen an dichtungen für apparateflansche[D]. Delft: Delft University of Technology, 1960.
- [5] 顾伯勤, 陈永林, 陆晓峰. 垫片密封技术研究现状与展望[J]. *石油化工设备*, 2001, 30(5): 41–44. [GU B Q, CHEN Y L, LU X F. Actuality and prospect of the research in gasket sealing technology[J]. *Petro-chemical equipment*, 2001, 30(5): 41–44.]
- [6] 冯秀, 顾伯勤. 金属垫片泄漏模型理论研究[J]. *润滑与密封*, 2006, 8: 78–80. [FENG X, GU B Q. Research on leakage model of metallic gasket seal[J]. *Lubrication Engineering*, 2006, 8: 78–80.]
- [7] 周先军. 非金属垫片分形泄漏模型理论分析[J]. *化工机械*, 2011, 38(2): 183–185. [ZHOU X J. Theoretical analysis of fractal leakage model for non-metallic gasket[J]. *Chemical Machinery*, 2011, 38(2): 183–185.]
- [8] ZHANG Z, WANG D G, GUO Y B. Fretting friction and wear behaviors of spiral wound gasket (SWG) sealing surface[J]. *Tribology International*, 2019, 133: 236–245.
- [9] HU J, ZHANG K, YANG Q, et al. Fretting behaviors of interface between CFRP and coated titanium alloy in composite interference-fit joints under service condition[J]. *Materials & Design*, 2017, 134: 91–102.
- [10] FERJAOUI A, YUE T, WAHAB M A, et al. Prediction of fretting fatigue crack initiation in double lap bolted joint using Continuum Damage Mechanics[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 73: 66–76.
- [11] LIU J, OUYANG H, PENG J, et al. Experimental and numerical studies of bolted joints subjected to axial excitation[J]. *Wear*, 2016, 346: 66–77.
- [12] 张良, 王新生, 李超, 等. 法兰泄漏失效原因分析[J]. *石油管材与仪器*, 2019, 5(04): 66–69. [ZHANG L, WANG X S, LI C, et al. Failure analysis of flange leakage, *Petroleum tubing and instrumentation*, 2019, 5(04): 66–69.]
- [13] 顾伯勤, 陈晔, 陆晓峰. 缠绕式垫片分级设计制造理论和技术[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(4): 168–172. [GU B Q, CHEN Y, LU X F. Theory and technology of classification design and manufacture of spiral wound gaskets[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2006, 42(4): 168–172.]
- [14] 顾伯勤. 多孔介质气体流动模型在垫片密封中的应用[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 1999, 21(1): 20–24. [GU B Q. Application of model of gases flowing through porous media to gasket sealing[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 1999, 21(1): 20–24.]
- [15] 吕祥奎, 杨文健, 许国良, 等. 密封结构中粗糙表面特征对其气密性的影响[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(23): 110–115. [LÜ X K, YANG W J, XU G L, et al. The influence of characteristic of rough surface on gas sealing performance in seal structure[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2015, 51(23): 110–115.]
- [16] SCHOLE S A, MOTUZAS J, SMART S, et al. Membrane adhesives[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(23): 9523–9533.

(编辑 马桂霞)