

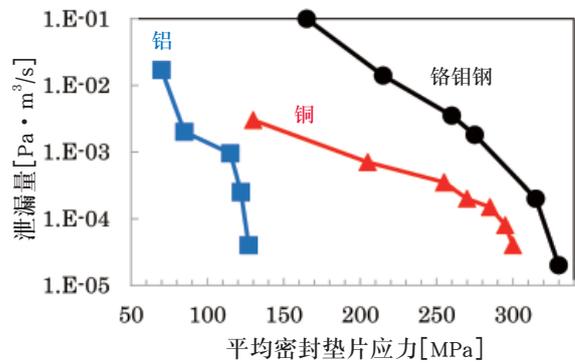
带金属平形密封垫片的管法兰连接体的基础密封特性评估

1. 前言

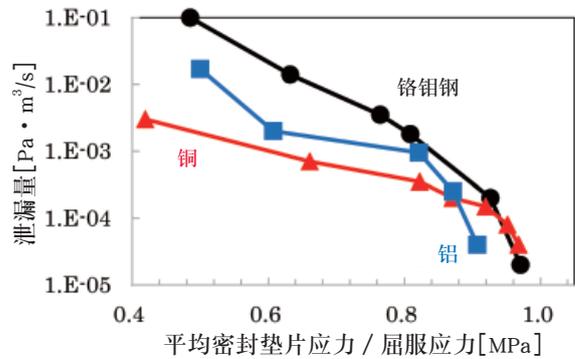
金属平形密封垫片以及环形金属密封垫片等金属密封垫片被广泛应用于炼油、石油化学、发电设备等的高温高压条件下的法兰连接体中，但经常会发生内部流体从连接体漏出的情况，这已经成为一大问题。关于此点推测是因为我们尚未完全弄清连接体的力学特性和螺栓紧固方法。关于压缩密封垫片、PTFE密封垫片、缠绕密封垫片等软质密封垫片、半金属密封垫片单体及用于连接体时的特性，ASME(美国机械协会)、HPI(日本高压技术协会)、大学及厂商都在做大量的研究。然而，目前几乎不存在与带金属密封垫片的法兰连接体相关的研究，因此此前仍未明确其特性^{1)、2)}。

此前，近藤等人已在研究中证实，密封垫片表面发生的塑性变形，可以大幅提升金属平形密封垫片单体的密封特性³⁾⁻⁷⁾。Figure1(a)展示了铬钼钢、铜、铝制金属平形密封垫片的泄漏量与平均密封垫片应力之间的关系。根据图表可知，当密封垫片应力相同时，材料的杨氏模量及表面硬度越低，其密封性越好。此外，按照平均应力相对各材料的屈服应力的比例进行整理时，结果如Figure1(b)所示，该数值在1.0附近泄漏量迅速变小。据此可知，密封垫片材料的屈服应力对金属密封垫片的密封性存在较大影响。然而，此前的研究中受限于评价装置的测定能力，只能实现 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 级的泄漏评价。

本研究是金属密封垫片的基础研究，其目的是弄清金属平形密封垫片单体以及用于连接体时的微小泄漏特性($1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 级)。研究对象材料仅限铝和铜这两类，各选取3种宽度尺寸，以刚性法兰为对象通过实验和有限元分析进行评价。此外，也使用ASME/ANSI class300 2inch法兰连接体进行评价。



(a) 泄漏量—平均密封垫片应力的关系



(b) 泄漏量—平均密封垫片应力相对屈服应力的比例的关系

Figure1 金属平形密封垫片的泄漏特性

2. 实验方法

Figure2展示了实验中所用的法兰试验机。它由万能压缩试验机(岛津制作所生产的AUTO GRAPH 500KND)、嵌入试验体金属平形密封垫片的法兰(SUS304制)、氮气瓶、压力计、泄漏量测量装置以及变形测量器构成。泄漏量测量装置可以在皂膜流量计和氮气检漏仪(ULVAC制)之间进行切换，当泄漏量约在 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下时，可以适用氮气检漏仪。密封垫片的材质分为铝(A1050)和铜(C1020)两种，直径尺寸有 $\phi 25 \times \phi 20$ 、 $\phi 30 \times \phi 20$ 、 $\phi 40 \times \phi 20$ 三种，厚度全部为3mm。加载规定的压缩载

荷后,承受4MPa氦气内压,测量泄漏量和密封垫片压缩量变形。关于密封垫片压缩以及恢复的试验顺序,铝时为使密封垫片应力按0→180→0MPa作阶段性变化,铜时为使密封垫片应力按0→450→0MPa作阶段性变化。

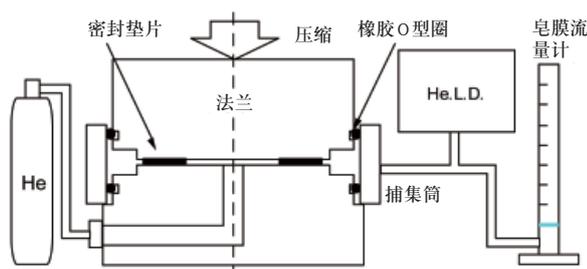


Figure2 法兰试验装置概要

3. 有限元分析方法

采用有限元分析方法对第2项中提到的实验进行评价。有限元分析采用通用代码ABAQUS。Figure3是有限元分析中所使用的带金属平形密封垫片的法兰试验装置的三维模型。原本采用轴对称模型也可以实现有效的评价,但为了与下面提到的连接体的情况保持相同条件,此处采用了三维模型。密封垫片采用弹塑性元素进行建模,法兰采用弹性元素进行建模。使用规定的压缩力压缩法兰,计算出此时的密封垫片应力、压缩量以及等效塑性变形。此处,等效塑性变形 $\bar{\varepsilon}^p$ 定义如下。

$$\bar{\varepsilon}^p = \int \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ (d\varepsilon_{xx}^p)^2 + (d\varepsilon_{yy}^p)^2 + (d\varepsilon_{zz}^p)^2 \right\} + \frac{1}{3} \left\{ (d\gamma_{xy}^p)^2 + (d\gamma_{yz}^p)^2 + (d\gamma_{zx}^p)^2 \right\}}$$

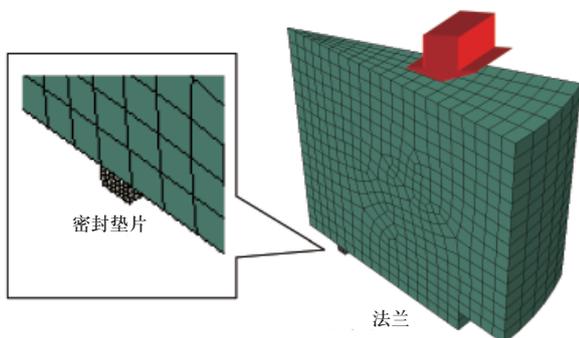


Figure3 针对法兰试验的有限元分析模型

4. 实验以及分析结果

Figure4展示了通过法兰试验获得的铝以及铜制平形密封垫片的压缩试验结果。两种材料的结果都显示外径越小(宽度越小)变形量越大。这应是由密封垫片形状的影响所致。

响所致。

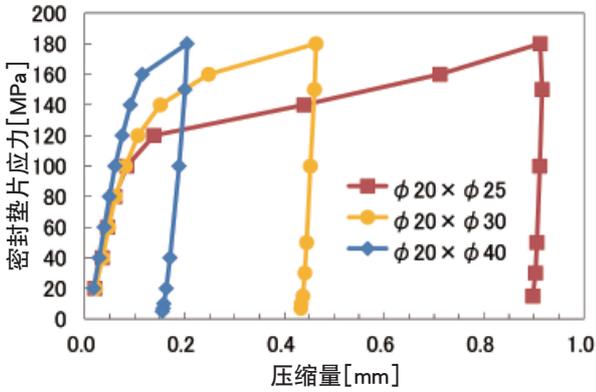
Figure5展示了直径尺寸为 $\phi 20 \times \phi 40$ 的铝平形密封垫片试验后的密封垫片以及法兰表面的情况。密封垫片表面和法兰表面两者的内径侧和外径侧均存在变色。这应是由于微细铝粉末残存,压缩导致密封垫片因泊松效应出现向内外径变形,与法兰产生了摩擦所致。

Figure6展示了通过法兰试验获得的泄漏量与平均密封垫片应力之间的关系。通过使用氦气检漏仪能够实现 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 级的微小泄漏量测定。铝以及铜制密封垫片的结果都显示,加载较高的平均密封垫片应力,泄漏量会减少,减小平均密封垫片应力,泄漏量会增加。此外,铝制密封垫片在120MPa左右泄漏量的减小程度会放缓,铜制密封垫片在250MPa左右泄漏量的减小程度会放缓。

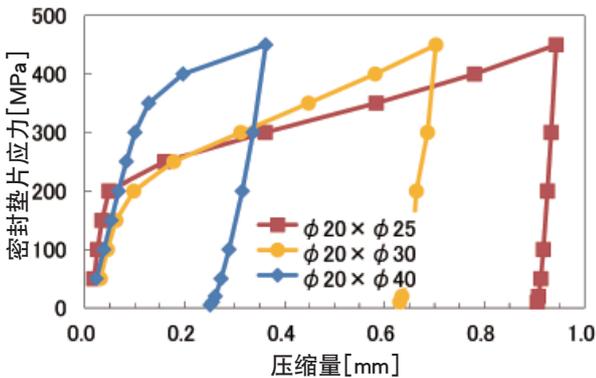
由于即使密封垫片宽度发生变化,泄漏量与平均密封垫片应力的关系也会保持不变,因此可以说我们能够通过平均密封垫片应力来调整金属平形密封垫片的密封性。

在卸压过程中,铝密封垫片在约30MPa时泄漏量会迅速增加,铜密封垫片在约50MPa时泄漏量会迅速增加。这应是由于压缩过程中获得的法兰面与密封垫片表面的贴合性消失所致。

Figure7是重现了法兰试验的有限元分析的结果。展示了密封垫片材料为铝、尺寸为 $\phi 20 \times \phi 25$ 时的密封垫片应力分布以及等效塑性变形分布的等值线图。据此可知,当平均密封垫片应力从100MPa增加到120MPa时,等效塑性变形迅速增加。这应是此时密封垫片出现较大塑性变形,较大程度填埋了法兰面的微小凹凸,提升了密封性所致。根据这个现象,可以说金属密封垫片要想发挥较高密封性,则密封垫片表面的塑性变形不可或缺。



(a) 铝平形密封垫片的压缩特性

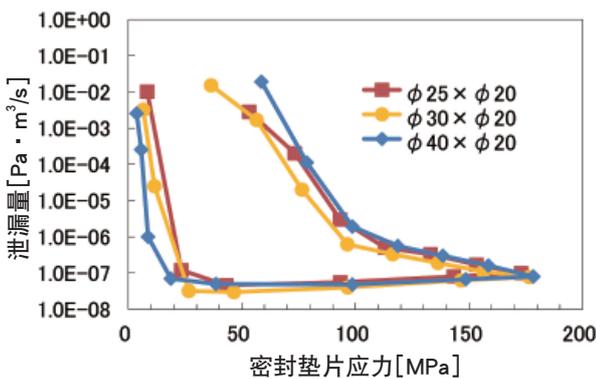


(b) 铜平形密封垫片的压缩特性

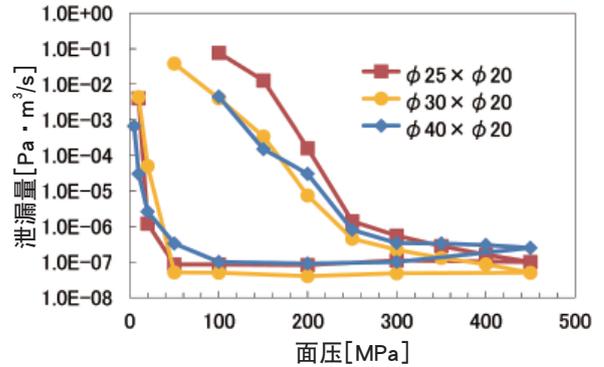
Figure4 金属平形密封垫片的压缩特性



Figure5 压缩试验后的密封垫片与法兰面



(a) 铝平形密封垫片的泄漏量—密封垫片应力关系



(b) 铜平形密封垫片的泄漏量—密封垫片应力关系

Figure6 各尺寸的泄漏量与密封垫片应力关系

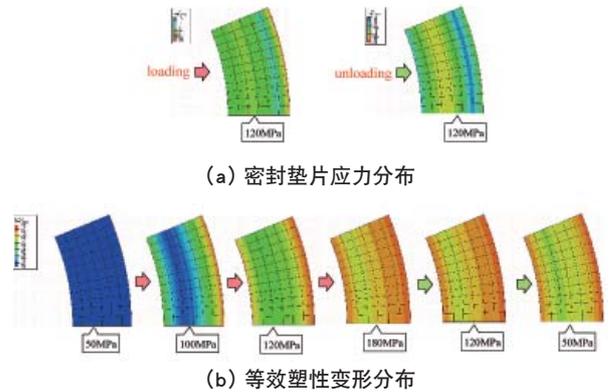


Figure7 通过有限元分析获得的各阶段中的密封垫片应力与等效塑性变形分布图

5. 带金属密封垫片的管法兰连接体的特性评价

前面的评价中采用的是理想情况下可实现均匀压缩的法兰，之后将采用实际的管法兰连接体进行特性评价。Figure8是管法兰连接体试验装置的示意图。Figure9展示了其有限元分析模型。尺寸为ASME/ANSI class300 2inch，采用8根M16螺栓。有限元分析中考虑了对称性，轴方向进行1/2分割，圆周方向进行1/16分割，整体采用1/32的模型。向螺栓的z轴对称面施加与紧固相当的压力，重现螺栓紧固情况。实验中以贴在螺栓上的应变计测得的轴力为指标进行螺栓紧固。利用相连的氦气瓶注入4MPa的氦气，通过压力下降法测定泄漏量。

Figure10以φ65×φ55的铝平形密封垫片为对象，展示了安装到法兰装置和管法兰连接体中时的泄漏量与密封垫片应力的关系。管法兰连接体中，由于采用了压力下降法，故无法测定微小的泄漏量，但大体与法兰试验的结果一致。据此可知，承受100MPa密封垫片应力时泄漏量显著减小。采用有限元分析方法计算得到的此时的密封

垫片应力和等效塑性变形的结果如Figure11所示。根据Figure11可知,在90MPa的密封垫片应力下等效塑性变形的程度比较轻微,但在100MPa的情况下,等效塑性变形突然变大。在压缩程度不一样的管法兰连接体中,密封垫片的等效塑性变形的增加,会带来密封性的显著提升。

此前的研究中,在以 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 为标准泄漏量的情况下,进行了使用了公式(1)的初始螺栓轴力的决定方法的研究⁸⁾。

$$F_{\text{fmin}} = b \times \sigma_{\text{yield}} \times \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) / (N \times 1000) \quad (1)$$

此处, F_{fmin} : 为最低限度的必要初始螺栓轴力[N]、 b : 为与金属密封垫片发生塑性变形相关的系数、 d_2 : 为密封垫片接触外径 [mm]、 d_1 : 为密封垫片接触内径 [mm]、 N : 为螺栓数量[根]。

在以 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 为标准泄漏量的情况中,对管法兰连接体的初始螺栓轴力进行研究。Figure12展示了上述ASME/ANSI class300 2inch 管法兰连接体中的3种尺寸的铝平形密封垫片与铜平形密封垫片的泄漏量-螺栓轴力关系。实线代表实验数据,○、△、□的标记代表根据公式1计算得到的数值。根据公式(1)计算得到的数值基本上是实验数据特性的延长,能够确认公式(1)的妥当性。由此判断,通过采用公式(1),能够实现合适的初始螺栓轴力的研究。

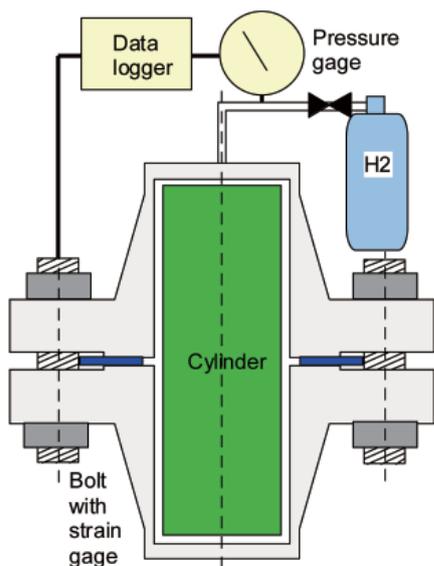


Figure8 管法兰连接体装置示意图

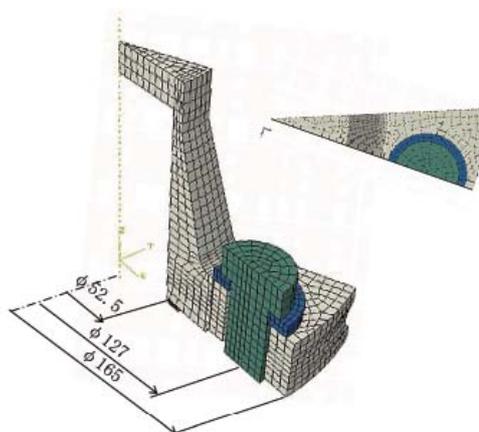


Figure9 带金属密封垫片的管法兰连接体的有限元分析模型

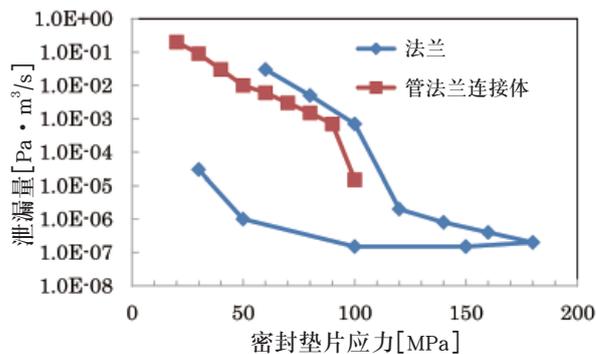


Figure10 法兰试验结果与管法兰连接体试验结果的泄漏量比较

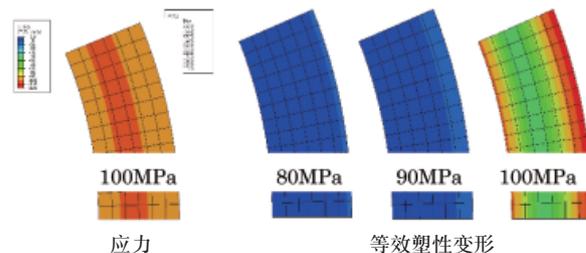
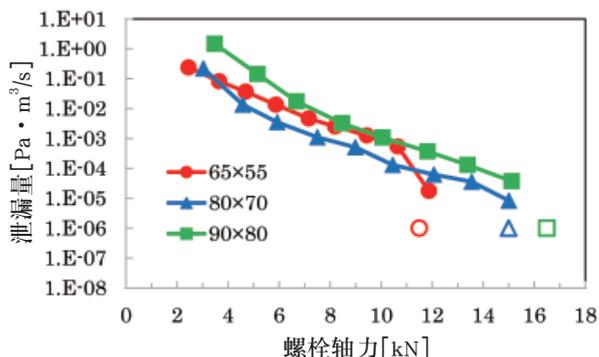


Figure11 管法兰连接体中的铝平形密封垫片的应力与等效塑性变形分布图



(a) 铝平形密封垫片

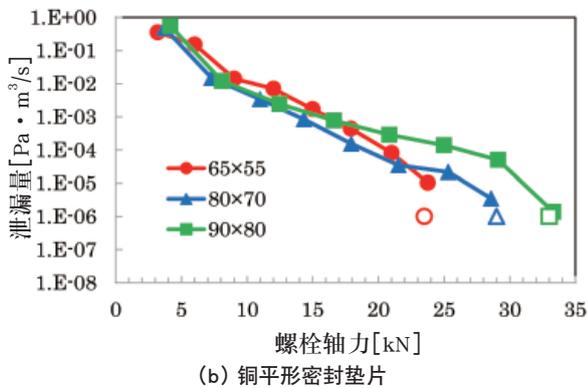


Figure12 管法兰连接体中的泄漏量测定结果与推算结果

6. 结语

本研究中通过实验和有限元分析对法兰以及管法兰连接体中的铝和铜制平形密封垫片的泄漏特性进行了评价,并得出以下结论。

- (1) 使用捕集筒回收来自密封垫片的泄漏,利用氦气检漏仪对法兰试验中的金属平形密封垫片进行了 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 级的泄漏特性评价。
- (2) 在法兰试验中,由于金属密封垫片表面屈服产生塑性变形,因此密封性得到了显著提升。此外,试验结果表明当泄漏量降到 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下时,密封性提升就会放缓。并且即使密封垫片宽度发生变化,其特性也不会改变。
- (3) 试验结果表明在 ASME/ANSI class300 2inch 管法兰连接体中,当密封垫片接触面出现部分屈服时,密封性同样会得到显著提升。
- (4) 展示了在以 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 为标准泄漏量的情况中,连接体实现密封所必须的螺栓初始紧固轴力的计算方法,并通过与实验结果进行比较,确认了其妥当性。

7. 参考文献

- 1) SAWA, T., HIGURASHI, N., AKAGAWA, H., "Stress Analysis of Pipe Flange Connections", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.113, No.4, pp.497-503 (1991.11)
- 2) 福田忠生, 尾崎公一, 加治屋纯, 早川梯二, "承受内压的配管法兰结构部的结构特性与泄漏特性(基于金属平形密封垫片的研讨)", 日本机械学会论文集, 75 卷, 756 号, pp51-56 (2009)
- 3) 近藤康治, 椿翔太, 泽俊行, 大宫祐也, "内压作用下的带金属平形密封垫片的法兰连接体的密封特性", 压力技术, Vol. 52, No.1, pp. 4-15 (2014)
- 4) 近藤康治, 椿翔太, 泽俊行, 大宫祐也, "承受内压的带环形金属密封垫片的管法兰连接体的有限元应力分析与密封性能评价", 日本机械学会论文集, 80 卷, 816 号, pp.1-13 (2014)
- 5) Kondo, K., Sawa, T., Sato, K., T., Kikuchi, and Tsubaki, S., "The sealing characteristics of bolted flange connection with metal gasket", ASME Pressure Vessels and piping Conference, PVP2012-78413 (2012)
- 6) Kondo, K., Tsubaki, S., Sawa, T., Sato, K., and Omiya, Y., "Sealing performance evaluation in bolted flange connections with ring joint gasket subjected to internal pressure", ASME Pressure Vessels and piping Conference, PVP2013-97173 (2013)
- 7) Kondo, K., Tsubaki, S., Sawa, T., Omiya, Y., and Sato, K., "FEM stress analysis and the sealing performance evaluation of bolted flange connections with metal flat gaskets", ASME Pressure Vessels and piping Conference, PVP2013-97828 (2013)
- 8) Kondo, K., and Sawa, T., "A Determination method of bolt preload for bolted pipe flange connections with metal gaskets under internal pressure", ASME Pressure Vessels and piping Conference, PVP2015-45163 (2015)



佐藤 广嗣

研究开发本部 开发部

近藤 康治 新兴PLANTECH株式会社

泽 俊行 广岛大学名誉教授

高桥聪美 研究开发本部