

# 带PTFE系列垫片螺栓法兰 连接体的高温长期特性评估

## 1. 前言

带垫片管法兰连接体在石油精炼成套设备、化学成套设备、发电成套设备等高温和长期使用条件中被广泛采用。在日本,因其高耐热性、密封性、强度、易用性和低成本,到2008年为止,主要使用石棉垫片。此前开展了很多关于石棉垫片的研究<sup>1)~5)</sup>,带石棉垫片连接体的密封性能等特性被一一判明。在日本,随着2008年开始的石棉产品禁令,使用无石棉产品成为一种义务<sup>6)</sup>,这也推动了无石棉垫片产品的开发和改良。

以往的石棉垫片主要分为含石棉填料带的缠绕密封垫片,和石棉压缩板这两大类。石棉替代方面,缠绕密封垫片在替换为膨胀石墨后没有发生严重的问题,石棉压缩板方面则开展了无石棉压缩板垫片、膨胀石墨垫片和PTFE类板材垫片的改良。<sup>7)</sup>含芳纶纤维的压缩板垫片因为含有大量橡胶成分而耐热性较低,膨胀石墨垫片则存在容易受损的问题。于是,PTFE系列垫片在日本得到了全新改良,被广泛使用。新开发的PTFE类垫片对蠕变特性这一课题实现了大幅改善,但密封垫片的应力-形变线图、基本泄漏特性(文献, JIS B 2490)及蠕变特性等机械特性的详情没有被发表。并且,相对于现有的带石棉垫片连接体的密封性能,带PTFE类垫片连接体的密封性能是否良好也不明确。

迄今为止的研究中,对常温下的带PTFE类垫片连接体的密封性能、法兰的轴应力、螺栓轴力变动(内力系数)及垫片接触应力分布等力学特性展开了研究,与带石棉压缩板垫片连接体相比,其密封性能相当出色<sup>8)</sup>,但高温下的特性仍有很多不明确的部分。<sup>8)</sup>因此,有必要对高温下的蠕变及密封性能等连接体的力学特性展开研究。

本报中,通过实验和FEM解析,以对高温下的带PTFE系列垫片管法兰连接体的蠕变特性及其影响在内的螺栓轴力变动及密封性能等力学特性的评估为目的。首先,测量PTFE类垫片的应力-形变特性、线膨胀率及基本泄漏特性等基础特性,并测量高温下的蠕变特性。通过有限元素

分析(FEM),计算带PTFE类垫片法兰连接体的螺栓轴力变化、法兰轴应力及垫片接触应力的分布,使用垫片接触应力分布和基本泄漏特性来推测各温度下的泄漏量。通过对实验中得到的螺栓轴力、法兰轴应力及泄漏量进行对比,确认FEM解析的可行性。

实验中对带PTFE系列垫片法兰连接体的密封特性、轴应力及螺栓轴力的变化进行了测量。

本研究中,评估垫片为本公司产品No.GF300。No.GF300耐热性好不含任何橡胶成分,因此不会发生热老化和经时劣化,在力学研究方面能够高精度地进行评估。

## 2. 实验装置

Figure1所示为连接体试验装置,使用该装置测量连接体的氢气泄漏量、螺栓轴力及法兰轴应力。法兰为SUS304制,尺寸为ASME/ANSI class300 2inch。结构中嵌入了加热器,以3℃/min的速度升温。使用热电偶进行温度测量和控制,并使用变位计来测量法兰颈部应力。各螺栓也带有变位计,以测量螺栓轴力。螺栓紧固依照“JIS B 2251-2008 法兰接头紧固方法”进行。

采用压力下降法测量泄漏量,使用公式(1)进行计算。

$$L = \frac{MV}{tRT_1} \left( P_1 - \frac{T_2}{T_1} P_2 \right) \quad (1)$$

此处, L: 泄漏率 [Pa·m<sup>3</sup>/s]、M: 摩尔质量[kg]、V: 装置内容积 [mm<sup>3</sup>]、t: 测量时间[s]、R: 气体系数[J/kg·K]、T<sub>1</sub>: 测量开始时温度[℃]、T<sub>2</sub>: 测量时间经过后温度[℃]、P<sub>1</sub>: 测量开始时内压[MPa]、P<sub>2</sub>: 测量时间经过后内压[MPa]。

垫片尺寸依据ASME/ANSI class300 2inch,厚度为1.5mm。作用内压为2MPa,管温度为常温、100℃及200℃。螺栓初始紧固时,以相当于平均垫片应力35MPa的螺栓轴力均为16.4kN的方式进行紧固作业。

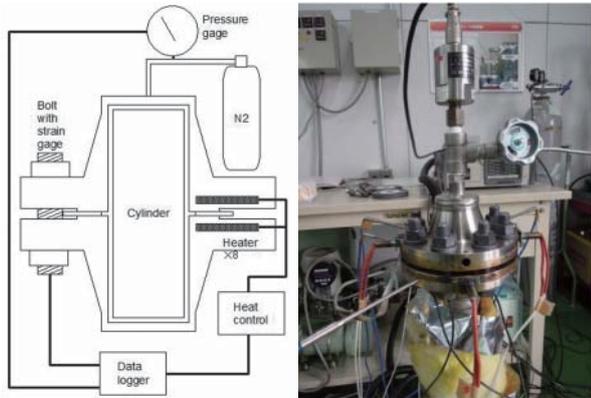


Figure1 连接体试验装置

### 3. 垫片特性测量

测量FEM解析中使用的垫片压缩特性、基本泄漏特性、线膨胀系数、及蠕变特性。

#### 3-1) 垫片应力-形变特性

使用Figure2所示装置测量常温、50℃、100℃、200℃及300℃下的垫片应力-形变关系。装置采用基于JIS 10K50A的尺寸，通过法兰内埋设的加热器加热管内壁(Figure1)。

Figure3所示为各温度下的垫片接触应力和形变测量结果。温度越高，形变越大，显示出温度依存性。这可以认为是高温导致垫片材料软化而造成的。

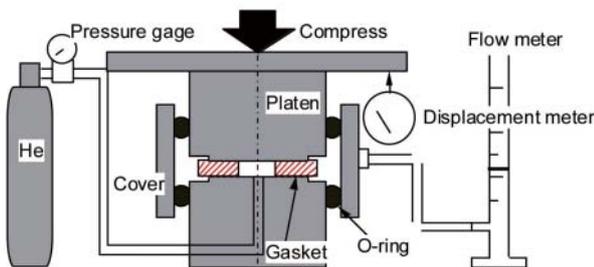


Figure2 使用法兰模块的垫片泄漏量测量装置, JIS B 2490)

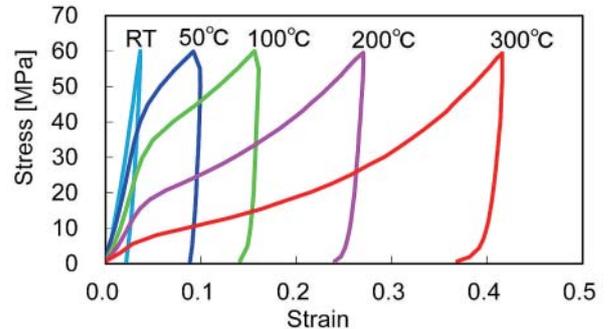


Figure3 所测量的垫片的应力-形变关系

#### 3-2) 密封特性

依据JIS B 24901<sup>1)</sup>进行常温泄漏量测量和200℃下解除负荷过程中的泄漏量测量。试验装置与压缩试验相同,使用Figure2所示装置,试验气体使用2MPa的氦气。

Figure4所示为通过试验得到的常温基本泄漏率(单位时间泄漏率, Pa·m<sup>3</sup>/s)。垫片接触应力在20MPa以上时,泄漏率在测量下限值5×10<sup>-5</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s以下,因此无法测量。

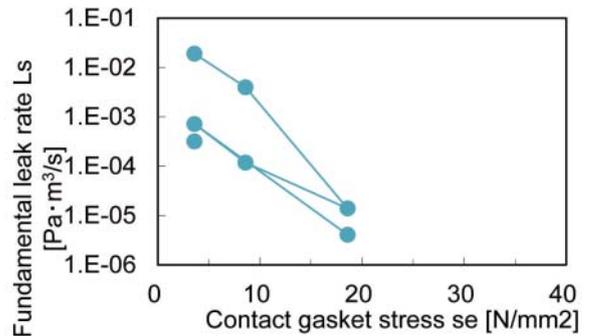


Figure4 基于法兰模块试验的常温下泄漏率-垫片接触应力关系

Figure5所示为初始垫片接触应力设为19.8、25.5及35.0MPa时的200℃下解除负荷时的基本泄漏率。由结果可知,高温时的密封特性更强。这可以推测是高温时垫片材料发生软化,更紧密地填满了法兰的微小间隙。

#### 3-3) 线膨胀率

Figure6所示为使用TMA(Thermal Mechanical Analysis)测量的线膨胀率。可以发现,温度越高线膨胀率越高。

### 3-4) 蠕变特性

针对长期使用, 采用 Figure7 所示装置测量垫片的蠕变特性。垫片尺寸为  $\phi 22 - \phi 58$ , 垫片应力为 12.5、25.0 及 35.0MPa, 温度为  $200^{\circ}\text{C}$ 。Figure8 所示为测得的垫片的蠕变。横轴表示测量时间, 纵轴表示蠕变。蠕变随时间经过而增加。此外, 垫片应力越高, 蠕变越大, 存在应力依存性。将上述试验结果通过公式(2)加以确定, 输入到有限元素(FEM)解析中。

$$\dot{\varepsilon}_c = a \cdot \sigma^n \cdot t^j \quad (2)$$

此处,  $\dot{\varepsilon}_c$ : 蠕变速度 [1/s]、 $\sigma$ : 应力 [MPa]、 $t$ : 测量时间 [s]、 $a$ 、 $n$ 、 $j$  实验得到的系数  $a = 1.61 \times 10^{-5}$  [MPa]<sup>-n</sup>、 $n = 1.25$ 、 $j = -0.915$ 。

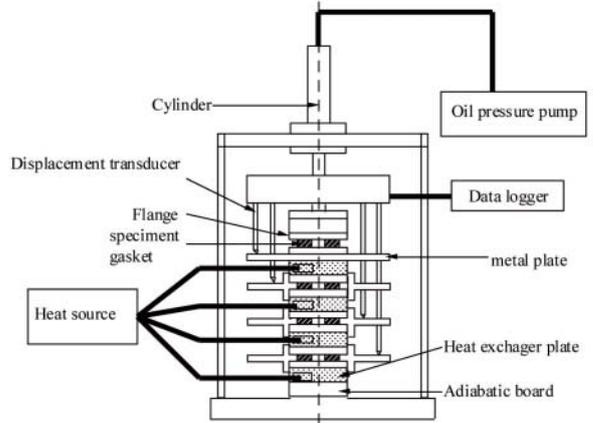


Figure7 垫片的蠕变试验装置

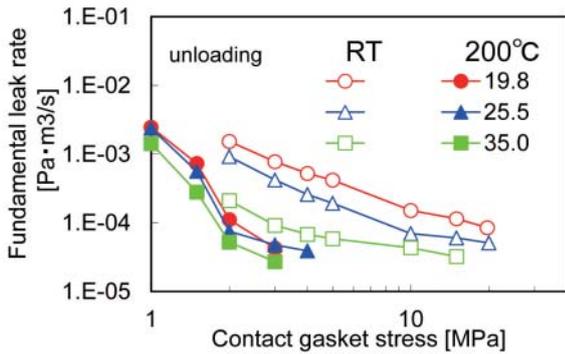


Figure5 基于法兰模块试验的常温和  $200^{\circ}\text{C}$  下解除负荷的过程中, 垫片接触应力对泄漏率的影响

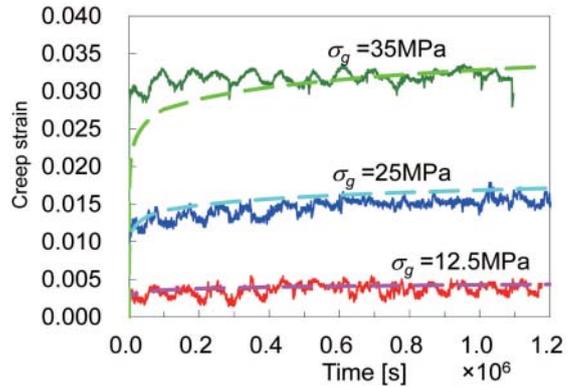


Figure8 测得的垫片的蠕变

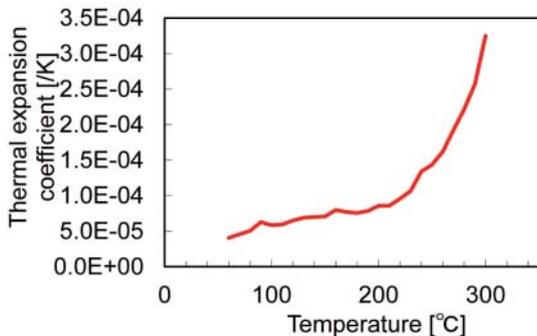


Figure6 垫片的线膨胀率

## 4. 有限元 (FEM) 解析

有限元(FEM)解析使用的是通用代码ABAQUS (Ver.6.13.4)。Figure9所示为FEM解析模型。考虑到对称性, 以轴方向为1/2, 圆周方向为1/16。螺栓与螺母视作一体, 省略螺纹。此外, 螺母从六边形简化为圆形。

Figure10所示为边界条件。螺栓的对称面承受各个螺栓应力。Step2中, 温度和内压作用于容器内侧。法兰及螺栓螺母使用弹性-导热元素、垫片使用弹塑性-导热-粘性元素进行建模。Table1所示为各材料的材料系数。

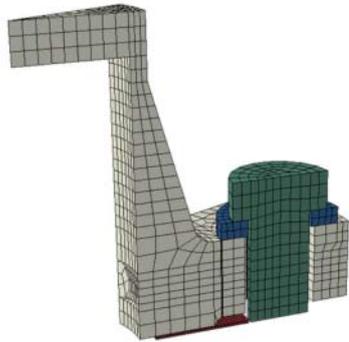


Figure9 FEM解析模型

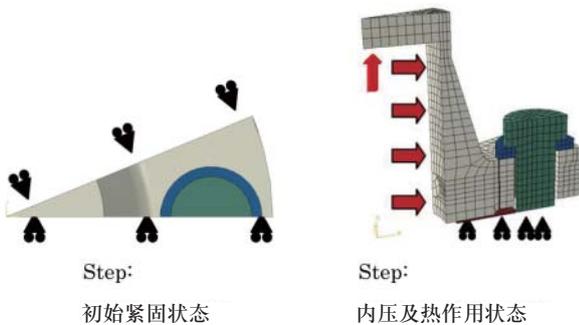


Figure 10 边界条件

Table1 各材料的材料系数

	法兰	螺栓	密封垫片
纵弹性系数[GPa]	200	200	Fig.3
泊松比	0.3	0.3	0.45
线膨胀率[1/K]	1.12 E-05	1.09 E-05	Fig.6
热传导率[W/m·K]	4.4 E-02	1.1 E-02	2.5 E-05
比热[J/kg·K]	500	500	1000
密度(常温)[kg/m <sup>3</sup> ]	7800	7800	2.3

## 5. 实验及FEM解析结果

### 5-1)螺栓轴力变化

Figure11及12所示为通过FEM解析得到的100℃及200℃条件下的螺栓轴力变化。实线表示FEM解析结果，虚线表示实验结果。该图中还标出法兰温度。初始螺栓轴力为16.4kN。将法兰加热到100℃后保持24小时，之后每隔24小时冷却至室温进行4次热循环。

通过Figure11及12，可知螺栓轴力很大程度上会受到连接体温度影响。初始加热时，由于垫片刚性下降，垫片形变的增加，即垫片厚度的减少导致轴力出现较大下降。随着热循环的温度增减，螺栓轴力也出现增减是因为各

材料之间热膨胀的差所导致的。关于螺栓轴力的变化，加热温度为100℃时相比，200℃时的轴力更大，由此可知温度的影响很大。200℃时，螺栓轴力降低了与垫片接触应力为4.3MPa相当的2kN，但未发现泄漏。

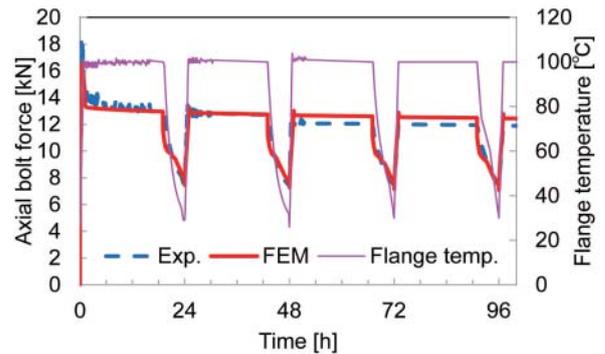


Figure 11 100℃下的连接体的螺栓轴力变化的对比

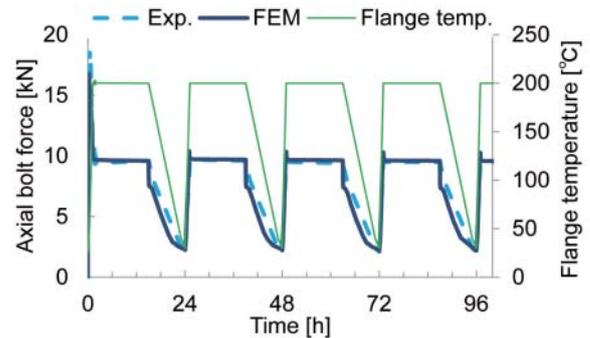


Figure 12 200℃下的连接体的螺栓轴力变化的对比

### 5-2)法兰颈部应力

Figure13所示为初始螺栓紧固时，及之后加热时的法兰颈部应力的值。图中还记载了基于ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 1<sup>(4)</sup>的计算结果。关于法兰颈部应力的值，实验结果与分析结果相当一致，显示了FEM解析的可行性。

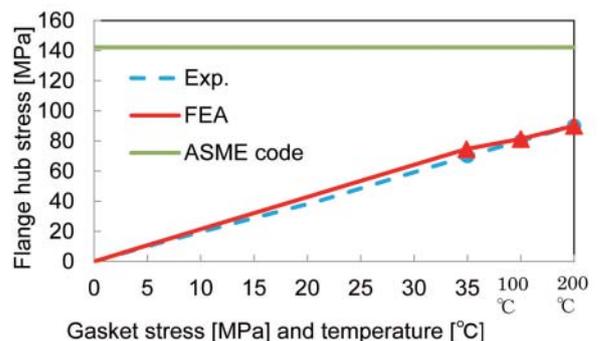


Figure13 法兰颈部应力

### 5-3) 垫片接触应力分布与泄漏率

Figure14 所示为反映初始螺栓紧固时、100℃加热时及 200℃加热时的连接体中的垫片接触应力分布的等值线图。外径侧不与法兰座接触，因此接触应力为 0。在接触部，起因于法兰旋转的外径侧垫片接触应力较大，在圆周方向上的分布很少。加热时与螺栓接触，外径侧发生部分变形。

Figure15 所示为垫片接触应力在半径方向上的平均值，Figure4 及 5 所示为使用密封特性推测的泄漏量的结果。纵轴为泄漏率除以接触外径后的单位长度泄漏率，横轴为垫片接触应力。FEM 解析结果与实验结果相当一致，显示出使用 FEM 解析进行泄漏率推测的可行性。

### 5-4) 连接体的高温长期特性预测

垫片连接体在高温长期条件下使用，因此需要对高温长期条件下的密封性能进行评估。Figure16 所示为使用 FEM 解析推测出的 10 年间的垫片接触应力变化。该图中还记载了密封极限应力(发生  $1.7 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  以上的泄漏率的应力)，当密封垫片接触应力低于该值时，视作发生泄漏。连接体条件与以往的评估相同，尺寸为 ASME/ANSI class 300 2inch，流体(管内壁)温度为 200℃。每 2 年会停运 1 次，因此在 FEM 解析时也需要列入考虑。初始垫片应力为 25MPa 时，停运时密封极限面压下降，可能会发生泄漏。

与之相对的，初始垫片应力为 35MPa 时，垫片面压保持在密封极限应力以上，可以认为能保持密封性。进行追加紧固时也一样可以保持密封特性。

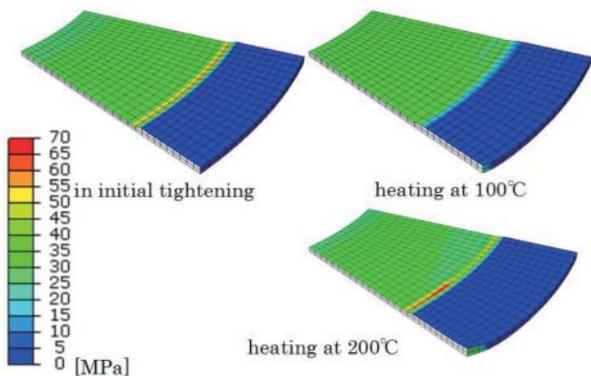


Figure 14 基于 FEM 解析的垫片接触应力分布

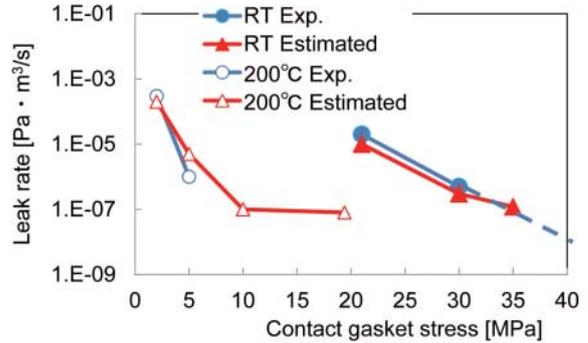


Figure 15 通过实验得到的连接体的泄漏率与通过 FEM 解析推测出的泄漏率的对比

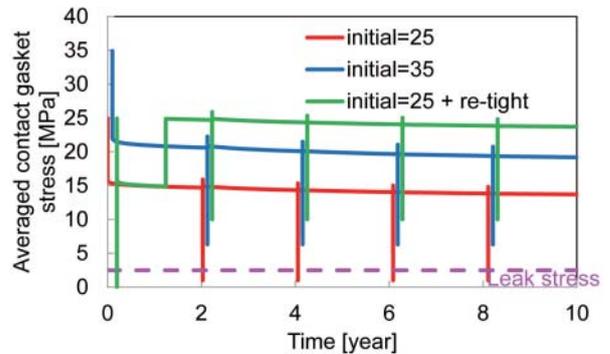


Figure 16 通过 FEM 解析推测出的 10 年间的连接体的垫片接触应力变化

## 6. 结语

本研究通过实验和 FEM 解析，对带 PTFE 系列垫片(No. GF300) 2 英寸法兰连接体的高温长期特性进行评估，表明了连接体的常温及 200℃ 下的长期健全性方面的良好性能。得到的结论如下所示。

- (1) PTFE 系列垫片(No. GF300)的压缩特性及基本密封特性中的温度依存性、蠕变特性的应力依存性等。其结果说明，常温下该带 PTFE 系列垫片连接体的密封性能良好。
- (2) 说明带 PTFE 系列垫片连接体中的螺栓轴力受到热循环的影响很大，且在 200℃ 下连接体的密封性能依然良好。确认轴应力小于 ASME Code 的计算值。
- (3) 使用通过 FEM 计算出的垫片接触应力分布和通过试验得到的泄漏率—垫片接触应力关系，对连接体的泄漏率进行了预测。此外，通过将该预测值与实验值对比，确认了泄漏量预测手段的可行性。常温下密封极限应力在 10MPa 左右，200℃ 下最大为 35MPa 左右，可以得到良好的密封特性。

(4) 提出了带PTFE系列垫片(No.GF300)螺栓法兰连接体的高温长期条件的变化预测手段。其结果,在本次研究的情况下,初始垫片接触应力设为35MPa时,可以确保长达10年的健全性,如果进行追加紧固,则健全性将变得更好。

## 7. 参考文献

- 1) TAKAKI, T., SATOU, K., YAMANAKA, Y., FUKUOKA T., “Effects of Flange Rotation on the Sealing Performance of Pipe Flange Connections”, ASME PVP Vol.478,(2004), pp.121-128.
- 2) 高木知弘, 福岡俊道, 山中幸, “基于FEM的管法兰螺栓紧固模拟”, Valqua Technology News, No.2, (2002), pp5-13
- 3) 泽俊行, 尾方尚文, 西田隆仁, “承受内压的带缠绕密封垫片管法兰连接体的应力解析与密封性能评估”, 日本机械学会论文集(A篇), 68卷671号(2002), pp. 1120-1128.
- 4) KOBAYASHI, T., NISHIDA, T., YAMANAKA, Y., “Effect of Creep-Relaxation Characteristics of Gaskets on the Bolt Loads of Gasketed Joints”, ASME PVP Vol.457,(2003), pp.111-118.
- 5) KOBAYASHI, T., NISHIDA, T., YAMANAKA, Y., “Consideration on the Representations of Sealing Behavior of Gaskets: Effects of the Internal Pressure and the Gasket Width”, ASME PVP Vol.45,(2003), pp.133-138.
- 6) 劳动安全卫生法令第318号(2008)
- 7) 日本华尔卡工业株式会社, “无石棉垫片”, 产品目录 No.ZY03,(2011).
- 8) SATO, K., MURAMATSU, A., KOBAYASHI, T., SAWA, T., “, FEM Stress Analysis and Sealing Performance of Bolted Flanged Connections using PTFE Blended Gaskets under Internal Pressure”, PVP2015-45268, Proceeding of ASME PVP 2015 Conference,m(2015)
- 10) 日本工业标准. JIS B 2251 “法兰接头紧固方法”, (2008)
- 11) 日本工业标准. JIS B 2490 “管法兰用垫片的密封特性试验方法”,(2008).
- 12) OMIYA, Y., SAWA, T., TAKAGI, Y“., Stress Analysis and Design of Bolted Flange Connections under Internal Pressure”, PVP2014-28606, Proceeding of ASME PVP 2014 Conference,(2014).
- 13) OMIYA, Y., SAWA, T., “, Stress Analysis and Sealing Performance Evaluation of Bolted Pipe Flange Connections with Smaller and Larger Nominal Diameter under Repeated Temperature Changes”, PVP2014-28730, Proceeding of ASME PVP 2014 Conference,(2014).
- 14) ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 1 “Rules for construction of Pressure Vessels” App.2, (2004).



**佐藤广嗣**  
研究开发本部 开发部