

带氟树脂类密封垫片的螺栓连接件的松动性评估

1. 前言

自2008年的石棉管制后，除部分产品外，密封垫片也无法再使用石棉产品了。在缠绕式密封垫片方面，使用柔性石墨填料代替石棉填料后，并未出现太大的问题。但是，在板材密封垫片方面却碰到了几个问题。石棉辊压板因其较高的耐热性，耐化学性和高强度，使用范围非常广泛。但是，使用了替代纤维的无石棉辊压垫片则纤维量较少，导致强度及耐热性等出现了大幅下降。柔性石墨密封垫片虽然具有极高的密封性，耐热性和耐化学性，但是它却极易受损，因此在操作性方面还存在一些问题。另一方面，氟树脂具有极高的耐热性和耐化学性，其密封性也非常出色，而且以往的蠕变问题也因为近年来的材料开发获得了较大的改善，因此它被广泛用来替代石棉辊压板^{1~3)}。

但是，虽说已经获得了极大的改善，但是氟树脂类密封垫片的蠕变引起的连接力度下降的问题还未完全解决，长期使用时的可靠性评估还是一个难题。因此，本公司在石棉管制以后，对带氟树脂类密封垫片的连接件的长期特性预测方法进行了研究。现在，除了密封垫片的蠕变外，使用FEM并结合考虑热膨胀及收缩，压缩特性的温度依存性等因素，还可以对带氟树脂类密封垫片的连接件的长期特性进行高精度的预测^{4~6)}。

在本技术志中，对高温环境下的带氟树脂类密封垫片的螺栓连接件的密封垫片的各项特性及法兰，螺栓的特性对轴力特性的影响进行了评估。此外，将连接件设定为是单纯单一螺栓连接件，密封垫片使用No.GF300。

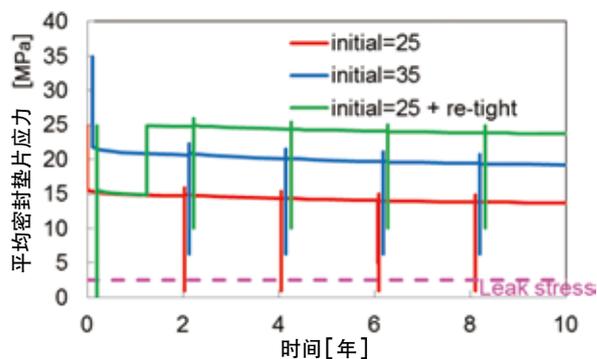


Figure 1 密封垫片应力的长期变化预测

2. FEM条件

Figure2中所示为本项研究中所使用的FE模型。以单一螺栓的连接件为对象，在单纯条件下实施了评估。此为利用轴对称元素实施了模型化，其中六边形的螺栓头及螺母简化成了面积相等的圆形。法兰及螺栓使用了弹性元素，密封垫片则使用了非线性粘弹塑性元素。在本FEM中，仅密封垫片考虑了粘弹性，关于电热则作为非常规问题进行评估。

各部件的材料常数如Table1所示。密封垫片呈现出了压缩特性较强的非线性和迟滞。此外，还能看出温度越高变形越大的温度依存性。线膨胀系数也会随温度升高而升高。在FEM中，也会考虑到这些特性。此外，还会考虑Figure5中所示的具有应力依存性的密封垫片的蠕变。对于法兰和螺栓，各特性将作为固定值处理。

通过在螺栓模型端部施加与紧固相当的压力模拟紧固，通过在连接件外缘部施与温度变化来模拟加热和冷却。在本FEM中，将计算出螺栓轴力的变化。

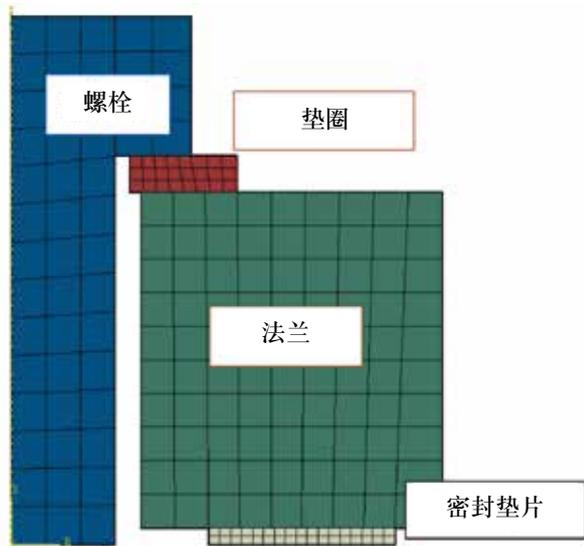


Figure2 FE模型

Table1 各部件的材料常数

	法兰	螺栓	密封垫片
材料	SUS304	SNB7	No.GF300
杨氏模量[GPa]	200	200	Fig.3
泊松比	0.3	0.3	0.45
线膨胀率[1/K]	1.12×10^{-5}	1.09×10^{-5}	Fig.4
热传导率[W/m·K]	4.4×10^{-2}	1.1×10^{-2}	2.5×10^{-5}
比热[J/kg·K]	500	500	1000
密度(常温)[kg/m ³]	7800	7800	2.3
蠕变	无	无	Fig.5

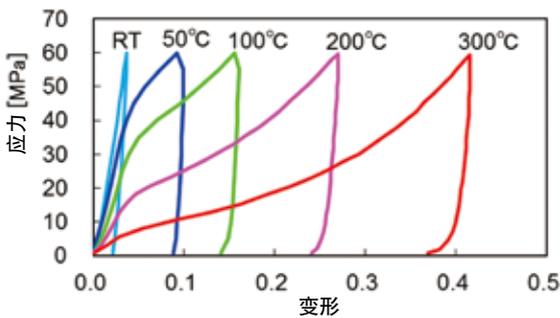


Figure3 密封垫片的应力-变形关系

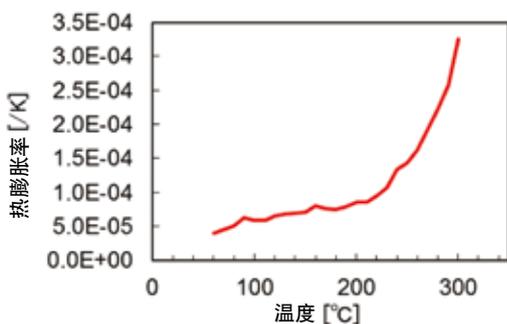


Figure4 密封垫片的线膨胀系数

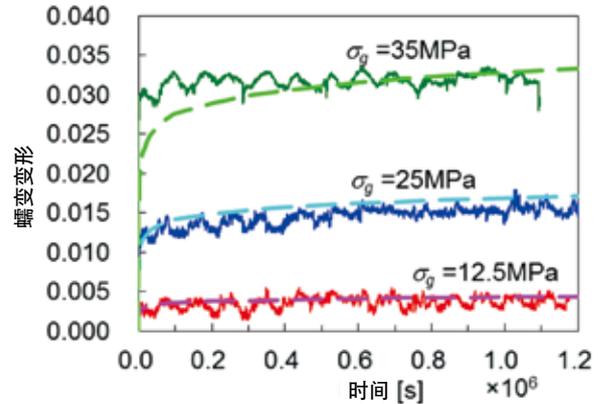


Figure5 密封垫片的蠕变

3. FEM妥当性确认实验

为了确认在第2项中所述的FEM的妥当性，对实验结果进行了比较。

Figure6所示为实验装置的概要图。主要条件与FEM相同。紧固则以粘贴在螺栓上的应变仪所测得的轴力作为指标。连接件温度则通过粘贴在法兰表面上的热电偶测量而得。快速紧固至目标轴力115kN(相当于密封垫片应力35MPa)，通过电炉加热到200℃。加热24小时后自然冷却。

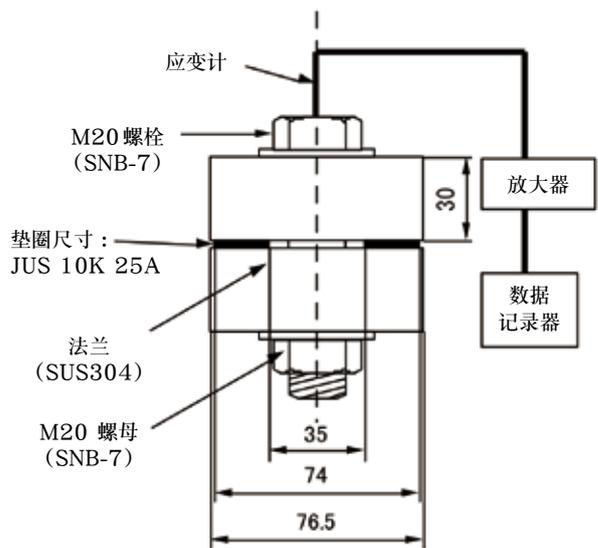


Figure6 实验装置概要

4. FEM及实验结果

单一螺栓连接件的轴力变化的FEM及实验结果如图7所示。纵轴显示为螺栓轴力，横轴显示为开始加热后(紧固后)的时间。我们可以看到，在升温中及降温中时，螺栓轴力会大幅下降，但是当温度恒定时，轴力下降就比较小。根据迄今为止的研究，我们知道在各阶段会发生如Table2中所示的现象。作为被连接件的密封垫片和法兰，会因热膨胀促使螺栓轴力增加。另一方面，当螺栓发生了热膨胀时，则螺栓轴力就会下降。加热时如图3中所示，密封垫片刚性出现下降，密封垫片被进一步压缩，导致延展的螺栓发生收缩，轴力因此下降。这个刚性变化是在温度变化时发生的，高温稳定时不会发生。密封垫片蠕变在所有阶段都有发生。

FEM结果和实验结果还是比较一致的，从而也确认了本FEM方法的妥当性。

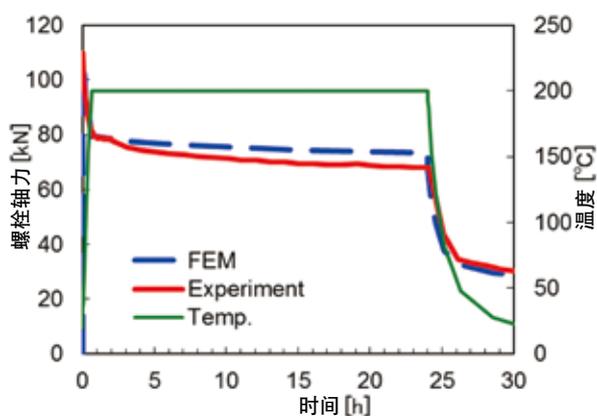


Figure7 FEM及实验结果

Table2 各阶段发生的现象对轴力的影响

	加热	高温保持	冷却
密封垫片热膨胀	↑		↓
法兰热膨胀	↑		↓
螺栓热膨胀	↓		↑
密封垫片刚性变化	↓		
密封垫片蠕变	↓	↓	↓
合计	↓	↓	↓

5. 各部件的各项特性对连接件螺栓轴力表现带来的影响

这里将对法兰，螺栓密封垫片的各部件的各项特性对连接件螺栓轴力表现带来的影响进行评估。即使现实不存在的东西，也能仅对任意特性进行变更或将其抹除，这也是FEM评估的优势。

Figure8中所示的为法兰及螺栓材料的杨氏模量和线膨胀系数对螺栓轴力表现的影响进行评估的结果。当将法兰及螺栓的杨氏模量设为1/2时，对轴力表现的影响相对较小。从Figure7的结果中可以得知，温度变化时轴力变化较大，这应该是杨氏模量对温度变化的影响较小所致。当将法兰的热膨胀率设为1/2或零时，加热时轴力大幅下降，冷却时则为增加。这应该是加热时被连接件(法兰+密封垫片)的热膨胀变小，冷却时的热收缩的影响变小了的缘故。将螺栓的热膨胀设为1/2或零时，加热时及高温稳定时与基准条件并无太大差异，但冷却时螺栓轴力出现了大幅下降。

密封垫片材料的热膨胀，蠕变，刚性变化，当仅拥有其中一项特性时的轴力表现如图9所示。此外，法兰及螺栓设为通常的条件。可以得知，热膨胀会使轴力增加，蠕变和刚性变化会使轴力减小。但是，加热时及高温稳定时的现实结果与仅刚性变化的结果非常相似。从中可以得知，各特性影响的单纯之和与综合结果并不相等。这是因为刚性变化，蠕变具有应力依存性，各特性的结果会相互作用，因此才会造成这种复杂的现象。

以上轴力表现结果还受到了各部件尺寸形状的影响，因此并不适用于所有的螺栓连接件。

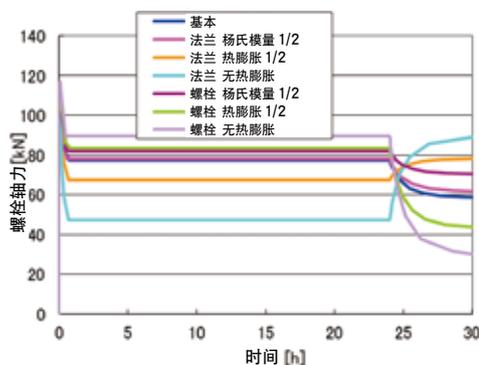


Figure8 法兰及螺栓的材料特性对连接件螺栓轴力表现带来的影响

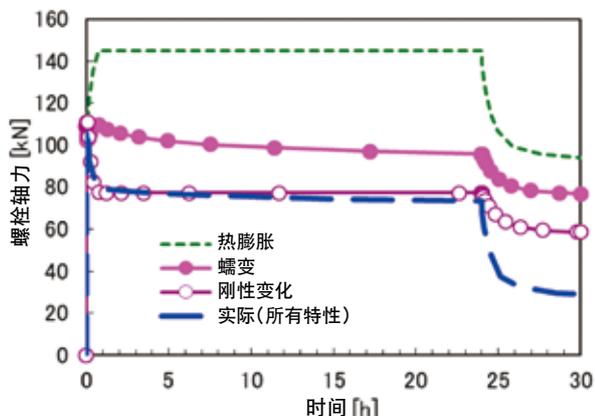


Figure9 密封垫片特性对连接件螺栓轴力表现带来的影响

6. 结语

在本技术志中，使用FEM对高温环境下的带氟树脂类密封垫片的单一螺栓连接件的密封垫片的各项特性及法兰，螺栓的特性对轴力表现造成的影响进行了评估和介绍。这里的评估仅限多种螺栓连接件条件中的极小的一部分。连接件条件可以说是无限的，对于将所有这些条件全部考虑在内的评估，目前来说，使用FEM进行评估是比较现实的。为了应对各种各样的连接件条件，我们将继续研究密封垫片连接件的评估方法。

7. 参考文献

- 1)黑河真也,“高性能无石棉板材密封垫片‘超级特殊石墨密封板No.GF300’”, Valqua Technology News, Vol.9,p5-11,(2004)
- 2)小池真二,“轧制成形带填料的氟树脂板材密封垫片 华尔卡龙™系列和 No.GF300系列”, Valqua Technology News, Vol.22, p17-22,(2012)
- 3)株式会社华尔卡:“密封垫片”, CATALOGUE No.YC08,(2020)
- 4)佐藤广嗣,野野垣肇,黑河真也,出口聪美,“利用有限元法的密封垫片连接件的长期特性预测方法的构筑”, Valqua Technology News, Vol.17, p2-8,(2009)
- 5)佐藤广嗣,“利用有限元法的氟树脂密封垫片的长期特性预测”, Valqua Technology News, Vol.29, p11-14,(2015)
- 6)佐藤广嗣,泽俊行,小林隆志,“带PTFE类密封垫片的螺栓法兰连接件的高温,长期特性评估”, Valqua Technology News, Vol.32, p33-38,(2017)



佐藤 广嗣
研究开发本部
商品开发部
密封垫片, 盘根小组