

紧固步骤对密封性的影响

1. 前言

在密封垫片连接体中,为了防止紧固偏向一侧,做到均衡紧固,建议采用逐渐提升紧固力的施工方法。减小每一次的紧固力,增加紧固次数,此法可以缩小紧固力之差,但是相对的,会增加紧固的工作量。

对于 JIS B 2251¹⁾、ASME PCC-1²⁾等的标准,每位用户都有其自己的紧固方法。虽然有对不同紧固方法下的螺栓紧固力进行评价的数据^{3、4)},但却很少有对密封性进行评价的数据⁵⁾。

在本文中,对不同紧固方法对螺栓轴力的举动和密封性造成的影响进行了评价。

2. 试验方法

2-1)试验条件

本次的试验条件一览如 Table1 所示。

试验中使用的密封垫片选用了以柔性石墨为填料的缠绕式密封垫片(No.6596V)和辊压密封垫片(No.6500),尺寸为 JPI Class150 4inch和 JPI Class300 24inch。所有的螺栓上都贴上了应变感应探头,通过应变仪读取螺栓轴力。根据事先进行的试验结果,将密封达成面压(泄漏量 2.0×10^{-4} [Pa·m³/s·m]以下的面压)定为目标密封垫片面压。

Table1 试验条件

试验所用密封垫片	缠绕式密封垫片 No.6596V	
尺寸	JPI Class150 4inch、t 4.5	JPI Class300 24inch、t 4.5
法兰突台直径	φ 157.2	φ 692.2
螺栓	M16、8 根	M39、24 根
目标密封垫片面压 ⁽¹⁾	20MPa	40MPa
试验所用密封垫片	辊压密封垫片 No.6500	
尺寸	JPI Class150 4inch、t 1.5	JPI Class300 24inch、t 3.0
法兰突台直径	φ 157.2	φ 692.2
螺栓	M16、8 根	M39、24 根
目标密封垫片面压 ⁽¹⁾	35MPa	40MPa

注(1) 根据事先进行的试验结果,将密封达成面压定为目标密封垫片面压。

2-2)试验装置

本次所使用的试验装置如 Figure1 和 Figure2 所示。

将密封垫片装入管法兰,对紧固至规定的密封垫片面压时的螺栓轴力、法兰面间隙进行测定后,向装置内施以内压,测量泄漏量。



Figure1 试验装置(JPI Class150 4inch)



Figure2 试验装置(JPI Class300 24inch)

2-3)紧固方法

采用的紧固方法为 JIS B2251 及 ASME PCC-1,一次较小紧固量、增加紧固次数(分 13 次),以及相反的一次较大紧固量、减少紧固次数(分 3 次)(参照 Table2)。此外,以螺栓轴力为指标进行紧固。

JPI Class300 24inch 时,螺栓数为 24 根。JIS B2251 紧固时,以规定紧固扭矩的 110% 作为目标紧固扭矩。此外,采用 2 种模式进行分 13 次的紧固。一种是对角紧固,另一种是圆周紧固。

Table2 紧固方法一览

	分3次	JIS B 2251	ASME PCC-1	分13次 (对角紧固)	分13次 (圆周紧固)
到目标值为止的 紧固次数	分3次	分4次	分3次	分13次	分13次
紧固步骤	对角紧固(Figure3) · 紧固步骤 参照Table3	预紧固：对角紧固 (Figure5) ↓ 正式紧固：圆周紧固 (Figure4)	对角紧固(Figure5) · 紧固步骤 参照Table3 ↓ 圆周紧固 (Figure4)	对角紧固(Figure3) · 紧固步骤 参照Table3	圆周紧固 (Figure4)
对象螺栓	所有螺栓	预紧固： 所有螺栓 (4inch) 4根(24inch) 正式紧固： 所有螺栓 (4inch、24inch)	所有螺栓	所有螺栓	所有螺栓
到完成紧固为止的 总紧固次数	分3次	4inch：分9次 24inch：分11次	分8次	分13次	分13次
JPI Class150 4inch	○	○	○	○	
JPI Class300 24inch	○	○	○	○	○
备注	-	24inch以目标扭矩的 110%进行紧固	圆周紧固时，一直紧固至 螺母不再转动为止	-	-

备注 以螺栓轴力为指标实施紧固。

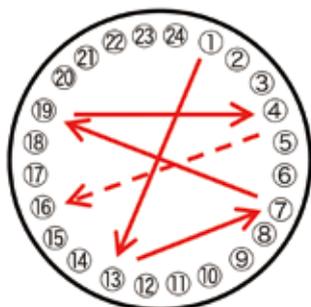


Figure3 对角紧固的紧固方法

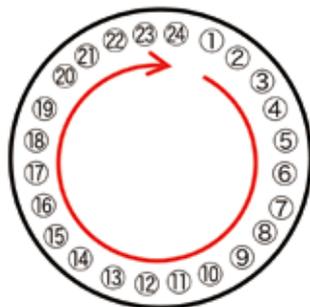


Figure4 圆周紧固的紧固方法

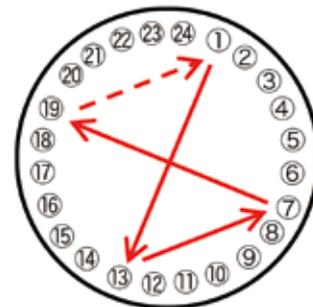


Figure5 JIS预紧固的紧固方法

Table3 对角紧固的螺栓紧固步骤

Sequence
①-⑬-⑦-⑰-④-⑯-⑩-⑳、②-⑭-⑧-⑳
⑤-⑰-⑪-㉓、③-⑮-⑨-㉑、⑥-⑱-⑫-㉒

Table4 密封性试验条件一览

试验气体	氦气
内压	2MPa
泄漏量的测量	压力下降法
密封标准	$2.0 \times 10^{-4} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}]$ 以下

2-4)密封性试验条件

密封性试验条件如Table4所示。

试验气体、内压为氦气、2MPa；泄漏量通过压力下降法测量。此外，为了消除尺寸因素的影响，将实际测得的泄漏量除以接触外周长度，计算出单位长度泄漏量。

3. 试验结果

3-1)螺栓轴力和分布

将No.6596V及No.6500紧固至目标密封垫片面压时的螺栓轴力和分布如Figure6及Figure7所示。

分3次紧固时,JPI Class150 4inch和JPI Class300 24inch都有螺栓间的轴力差较大、最小值大幅低于目标轴力的螺栓。其他方法紧固时,JPI Class150 4inch时未见紧固方法造成的螺栓轴力差。另一方面,JPI Class300 24inch时,虽然其严重程度不如分3次紧固时,但不同紧固方法下还是出现了螺栓轴力差。

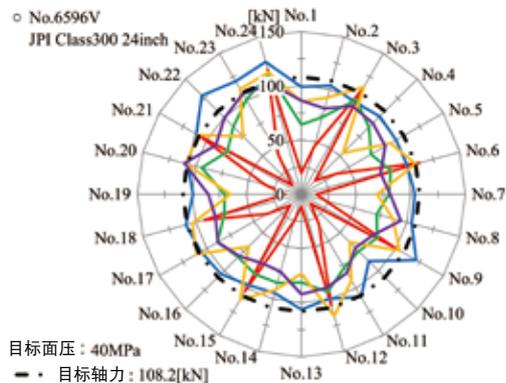
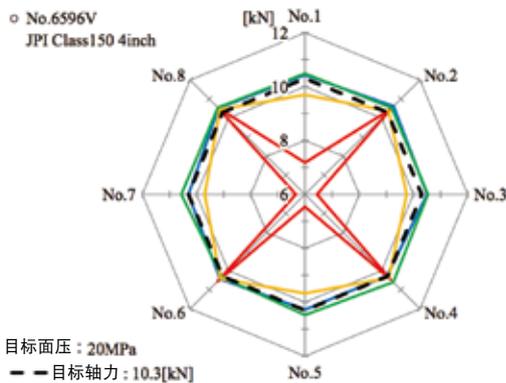


Figure6 螺栓轴力和分布(No.6596V)

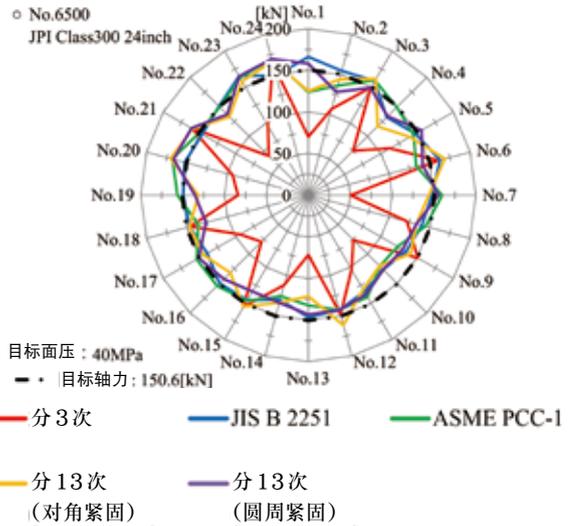
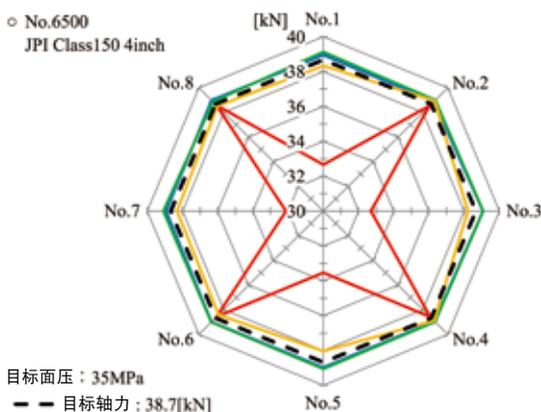


Figure7 螺栓轴力和分布(No.6500)

3-2)密封性试验

No.6596V和No.6500的密封性试验结果如Figure8和Figure9所示。

No.6596V和No.6500都出现了基于不同紧固方法的泄漏量差,在分3次进行的紧固中,两者的泄漏量都超过了密封标准(2.0×10^{-4} [Pa·m³/s·m]以下)。其他紧固方法时,泄漏量在密封标准以下。JPI Class150 4inch时,未见因紧固方法造成的泄漏量差,JPI Class300 24inch时,JIS B2251的泄漏量最小,之后按ASME PCC-1、分13次紧固(对角紧固)、分13次紧固(圆周紧固)的顺序,泄漏量依次增加。在JIS B2251中,以目标轴力的110%进行了紧固,这应是泄漏量较少的主要原因。此外,分13次进行的对角紧固和圆周紧固,其泄漏量程度相当。

螺栓轴力的①最大值、②最小值和泄漏量的汇总,如Figure10及Figure11所示。

螺栓轴力的最大值对于泄漏量的影响较小,但最小值越小呈现出泄漏量越大的趋势。在分3次进行紧固时,应是螺栓轴力的最小值未能达到可密封的密封垫片面压,所以其泄漏量较大。对No.6596V和No.6500进行比较后发现,相较于No.6500, No.6596V的螺栓轴力的最大值和最小值之差较大,其泄漏量趋势程度却相当。

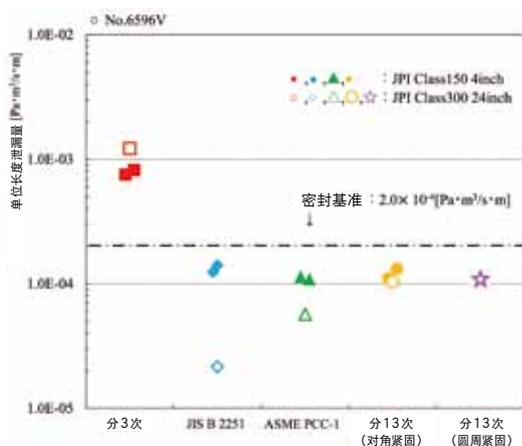


Figure8 密封性试验结果(No.6596V)

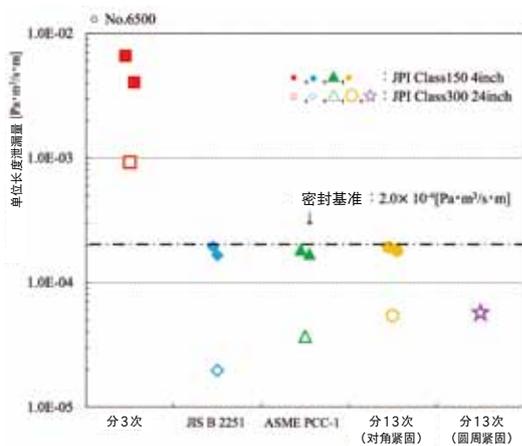


Figure9 密封性试验结果(No.6500)

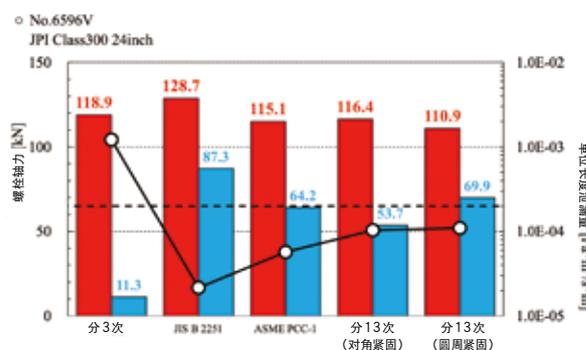
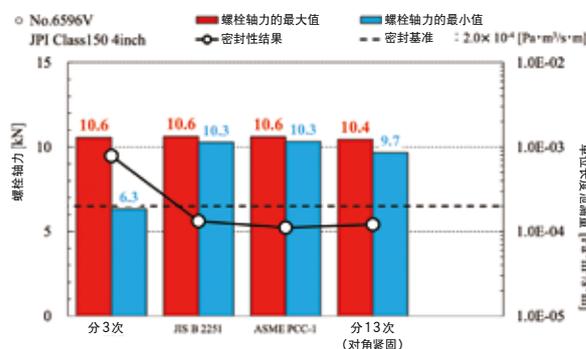


Figure10 螺栓轴力和泄漏量(No.6596V)

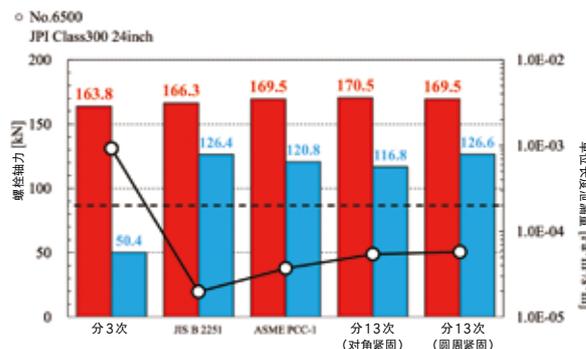
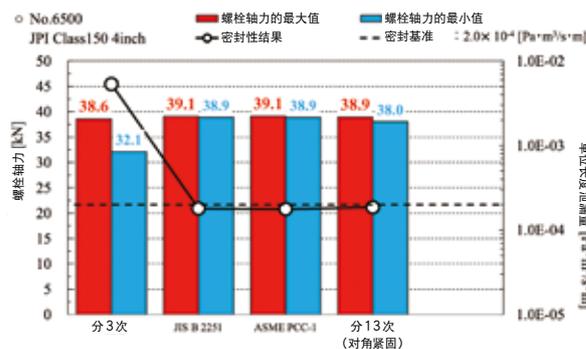


Figure11 螺栓轴力和泄漏量(No.6500)

3-3)法兰面间隙的移位置

将No.6596V和No.6500紧固至目标密封垫片面压时,法兰面间隙的最终移位置如图Figure12和Figure13所示。

No.6596V与No.6500在分3次进行紧固时,与其他的紧固方法相比,其法兰面间隙的移位置较小。在JPI Class150 4inch中,在分3次进行紧固以外的紧固方法时,未见差异;JPI Class300 24inch中, JIS B2251的移位置最大,然后是ASME PCC-1、分13次(对角紧固)、分13次(圆周紧固),从中可以看出与密封性试验结果之间是存在相关关系的。

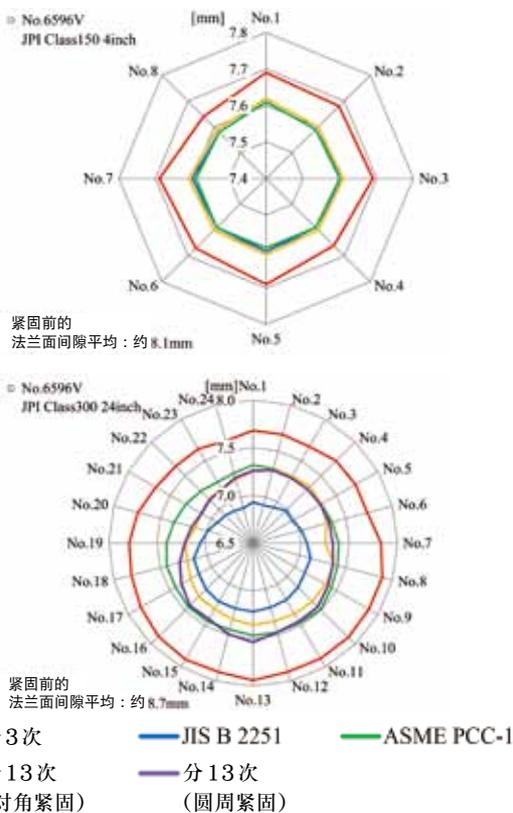


Figure 12 法兰面间隙的移位量(No.6596V)

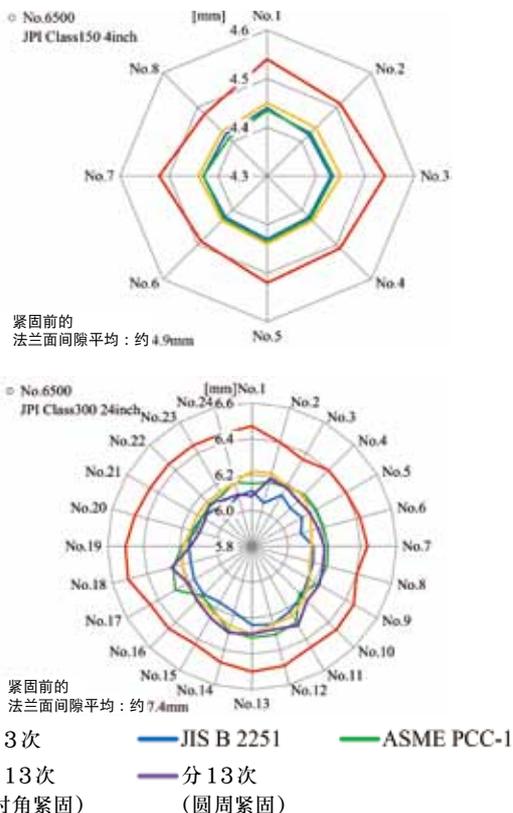


Figure 13 法兰面间隙的移位量(No.6500)

3-4) 扳手移动距离

各紧固方法下的扳手移动距离的计算结果如Figure 14所示。计算方法为沿着法兰周向的移动量，而非螺栓间以最短距离移动时的情况。

JPI Class150 4inch中未见大的差异，JPI Class300 24inch中可见基于紧固方法的差异，JIS B2251和分13次紧固(圆周紧固)可密封且效率较高。此外，JPI Class300 24inch中，ASME PCC-1至完成紧固位置的总紧固次数虽然比JIS B2251为少，但是，其扳手移动距离却较之为长。应是对角紧固时，作为紧固对象的螺栓根数之差(JIS B2251中为4根，但ASME PCC-1中为所有螺栓(24根))所致。

在分13次紧固中，对角紧固和圆周紧固时，其泄漏量、轴力的程度均相当，但在扳手移动距离上出现较大差距。可以说，紧固时，尤其是大口径时，相较于对角紧固，圆周紧固是更为高效的紧固方法。但是，本次为分13次紧固的结果，对于减少紧固次数时的影响，是今后的课题。

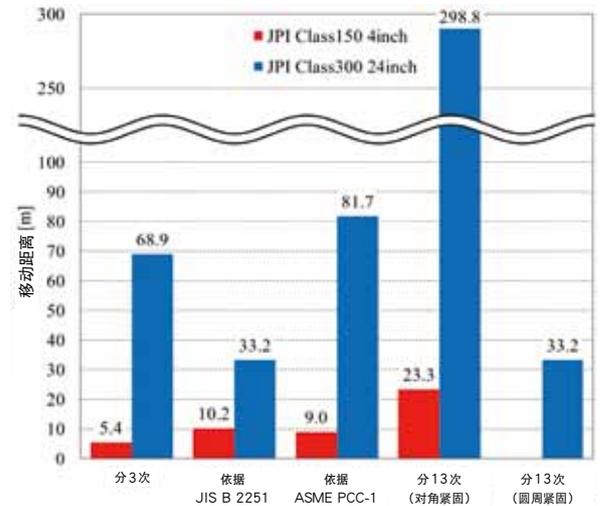


Figure 14 扳手移动距离

4. 结语

本次实验中，对JPI Class150 4inch及JPI Class300 24inch的管法兰连接件在不同紧固方法下的密封性进行了确认，并得到了以下结论。

○不同的紧固方法下，确认到了泄漏量存在差异。尤其是相较于小口径而言，大口径在这个问题上尤为显著。

- 发现螺栓轴力的最小值会对泄漏量造成影响，未达到可密封的面压时，泄漏量较大。
- 如想要提高螺栓轴力的最小值，以较大的力进行紧固、或更加均衡的紧固极为重要。
- 确认了JIS B2251及ASME PCC-1等标准方法可对螺栓轴力进行均衡的紧固。此外，在分13次紧固中，无论是对角紧固还是圆周紧固，其泄漏量、螺栓轴力方面均未见差异，但就作业效率而言，圆周紧固效率较高。
- 根据扳手的移动距离、泄漏量，认为JIS B2251的效率应该是最高的(但是，24inch时是以目标轴力的110%紧固的)。

5. 参考文献

- 1) JIS B2251, 法兰接头紧固方法(2008)
- 2) ASME PCC-1, Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly (2013)
- 3) 渡边芳和, 山口笃志, 金田忍, 辻祐一, “JIS法兰接头紧固方法的适用范围扩大(延伸PTFE密封垫片的紧固模拟)”, 山梨报告会报告论文集, 152-153(2009)
- 4) 高木知弘, “基于有限元法的管法兰连接件的紧固及力学特性评价的相关研究”, 神户商船大学博士论文(2013)
- 5) 大宫裕也, 高木爱夫, 泽俊行, 鸟居广康, “螺栓轴力的散差对带密封垫片的大口径法兰连接件密封性能造成的影响”山梨报告会报告论文集, 160-161(2010)



藤原 隆宽
研究开发本部
商品开发部



郑 兴
中国综合研究所
密封工程开发组



森本 吏一
三菱化学株式会社
冈山事业所