

LNG 超低温球阀的螺栓预紧力分析

李树勋¹ 尹会全¹ 赵敏捷² 杨玲霞¹ 刘太雨¹

(1. 兰州理工大学 石油化工学院//机械工业泵及特殊阀门工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 上海高中压阀门股份有限公司, 上海 201401)

摘要: 为研究温度对法兰结构螺栓预紧力的影响, 采用 ANSYS 有限元软件对液化天然气超低温球阀中法兰在不同温度下的螺栓预紧力和密封状况进行分析, 对比了不同线膨胀系数的螺栓材料在常温和低温下的预紧力状态。结果表明: 螺栓材料选用 B8M、XM-19 时, 预紧力随温度的降低而增大, 低温工况下较常温时分别增加了 24.93%、6.28%; 螺栓材料选用 Inconel625 时, 预紧力随温度的降低而减小, 低温工况下较常温时减小了 26.39%; 金属缠绕垫片的密封比压随温度的降低呈现出与螺栓预紧力相同的变化趋势。

关键词: 液化天然气; 法兰; 螺栓; 预紧力; 线膨胀系数; 密封

中图分类号: TH131.3

文章编号: 1000-565X(2021)07-0142-07

随着经济的高速发展和能源需求的逐渐增大, 液化天然气 (LNG) 作为一种清洁能源被广泛应用于工业生产和居民生活。超低温球阀是 LNG 管线运输过程中的主要截流装置之一, 设备使用温度最低可达到 -196°C , 受温度载荷的影响, 常温环境对螺栓施加的预紧力在低温工况运行时将会发生变化^[1]。同时, 法兰结构各组件发生热变形, 使得垫片的应力分布不均匀, 严重时将导致密封失效, 进而引发泄漏, 因此对低温下的螺栓预紧力进行研究显得尤为重要。

李操等^[2]通过有限元分析研究了螺栓预紧力、法兰厚度、螺栓分布状态等因素对箭体结构舱段对接面连接刚度的影响; Yan 等^[3]通过有限元仿真分析验证了预紧力预测公式在计算低温环境下螺栓预紧力变化的可行性和准确性; 杨陈等^[4]研究了温度载荷对发动机各零部件应力分布和密封性能的影响; 杜静等^[5]利用有限元方法分析了螺栓预紧力对轴承载荷分布的影响; Yang 等^[6]借助有限元接

触模型分析了螺栓在承受预紧载荷时的应力、应变状态; Nelson 等^[7]利用有限元方法研究了不同工况下单垫片和双垫片法兰接头的接触应力。以上研究只分析了螺栓预紧力变化对法兰结构各组件的应力、应变状态以及密封性能的影响, 针对线膨胀系数不同的螺栓材料在低温下的预紧力变化趋势的研究鲜有报道。本文以 LNG 超低温球阀为载体, 利用 ANSYS 有限元软件, 分析了 LNG 超低温球阀中法兰不同材料的螺栓在低温下的预紧力变化以及密封性能。

1 螺栓预紧力理论分析

螺栓预紧力是保证法兰具备良好密封性能的关键因素, 而螺栓预紧力也由于受到不同因素的影响, 在紧固期间以及阀门正常使用过程中, 均有可能出现预紧力变化的情况。因此, 需要针对螺栓预紧力变化的主要影响因素进行讨论。

当法兰螺栓分布数量较多且负载较大时, 沿顺

收稿日期: 2020-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51569012); 校企合作项目 (H1905cc020)

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51569012)

作者简介: 李树勋 (1973-), 男, 硕士, 教授, 主要从事特殊阀门研究。E-mail: gdlishuxun@126.com

时针 (或逆时针) 方向依次紧固的装配方式不再适用, 在紧固过程中将会导致先前紧固好的螺栓出现预紧力不足的现象。对于 LNG 超低温球阀, 应严格按照对称紧固的方式装配螺栓, 首先将所有螺栓预紧力从 0 增加到计算值的一半, 然后逐步均匀增加预紧力, 直至完全紧固^[8]。

在螺栓装配期间以及装配之后, 螺栓、螺母和法兰的接触区域会出现局部塑性变形, 进而导致螺栓连接件发生松弛。同时, 由于螺栓材料的粘弹性效应, 随着球阀运行时间的积累, 螺栓将发生蠕变导致预紧力损失^[9]。

LNG 超低温球阀的装配工作是在常温环境下完成的, 低温试验工况下其温度将达到 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在此温度下, 法兰螺栓系统的各个组件均会发生变形。假设因温度变化而引起的螺栓和中法兰的热变形, 均在其材料的弹性范围内, 遵循胡克定律。

当螺栓和阀体、阀盖材料的热膨胀系数不同时, 螺栓和阀体、阀盖的热弹性变形量分别如下^[10]:

$$\delta L_B = \alpha_B (t - t_0) l_B \quad (1)$$

$$\delta L_{FB} = \alpha_F (t - t_0) l_{FB} \quad (2)$$

$$\delta L_{FC} = \alpha_F (t - t_0) l_{FC} \quad (3)$$

阀体和阀盖选用同种材料, 线膨胀系数相同, 阀体和阀盖的热弹性变形量可总体表示为中法兰的热弹性变形量, 即

$$\delta L_F = \alpha_F (t - t_0) (l_{FB} + l_{FC}) \quad (4)$$

则中法兰相对于螺栓的热弹性变形量为

$$\delta L = \delta L_F - \delta L_B \quad (5)$$

式中, t_0 为球阀初始预紧时的环境温度, t 为球阀工作温度, α_B 为螺栓材料的线膨胀系数, α_F 为阀体、阀盖材料的线膨胀系数, l_B 为螺栓的有效长度, l_{FB} 和 l_{FC} 分别为阀体中法兰和阀盖的厚度。

在温度发生变化时, 螺栓及阀体、阀盖的预紧力与变形量也相应改变。当螺栓的变形量小于中法兰的变形量时, 预紧力大小由初始的 F_p 增大为 F'_p , 预紧力的变化量为 ΔF_p , 温度对预紧力及变形的影响如图 1 所示。由于螺栓与中法兰的总变形保持恒定, 螺栓的变形量由 δL_B 减小为 $\delta L'_B$, 阀体及阀盖的变形量由 δL_F 增大为 $\delta L'_F$ 。当螺栓的变形量大于中法兰的变形量时, 预紧力将发生松弛, 各组件变形量及螺栓预紧力变化趋势与前文相反, 不再详述。

结构的刚度 k 是指弹性体抵抗变形拉伸的能力, 螺栓和中法兰结构的刚度分别为

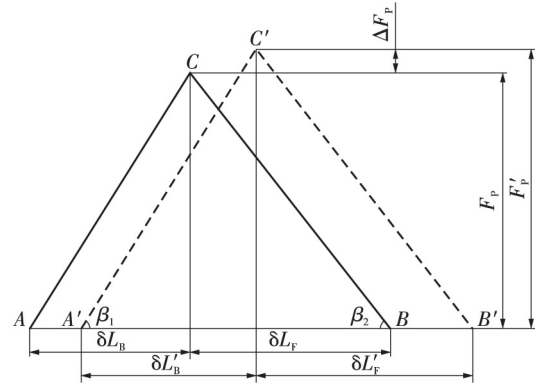


图 1 温度对预紧力及变形的影响

Fig. 1 Effect of temperature on pretension and deformation

$$k_1 = \frac{F_p}{\delta L_B} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{F_p}{\delta L_F} \quad (7)$$

因此, 螺栓预紧力的变化量 ΔF_p 可表示为

$$\Delta F_p = F'_p - F_p = \frac{\delta L'_F - \delta L'_B}{\frac{1}{\tan \beta_1} + \frac{1}{\tan \beta_2}} = \frac{\delta L'_F - \delta L'_B}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} = \frac{F_p \cdot \delta L}{\delta L_B + \delta L_F} \quad (8)$$

当螺栓和阀体、阀盖材料的线膨胀系数相同时, 由于常规材料的弹性模量随温度的降低而增大, 因此预紧力也会相应地随温度的降低而增大^[11-12]。基于常温环境的初始预紧力 F_p 在低温下将变为 F'_p , 则螺栓预紧力的变化量 ΔF_p 为

$$\Delta F_p = F'_p - F_p = \frac{\delta L'_B + \delta L'_F - F_p (\delta L_B + \delta L_F)}{\frac{\delta L_B E_B}{E'_B} + \frac{\delta L_F E_F}{E'_F}} - F_p = \frac{(1 - F_p) (\delta L_B + \delta L_F) E'_B E'_F}{E_B l_B E'_F + E_F l_F E'_B} - F_p \quad (9)$$

式中, E_B 、 E_M 分别为室温下螺栓和阀体、阀盖材料的弹性模量, E'_B 、 E'_F 分别为低温下螺栓和阀体、阀盖材料的弹性模量。

综合上述分析, 影响螺栓预紧力的因素主要有螺栓紧固顺序、材料松弛现象以及温度, 本文就温度对螺栓预紧力的影响进行下一步有限元分析。

2 LNG 超低温球阀有限元模型

2.1 材料属性

阀体、阀盖材料选用 FXM-19, 螺栓材料分别选用 B8M、XM-19、Inconel 625。通过查阅相关文

献资料,上述材料的物理性能参数如表1所示。

表1 材料的物理性能参数

Table 1 Physical property parameters of materials

名称	材料	$\alpha_t /$ ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	E / GPa	$\lambda / (\text{W} \cdot$ ($\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$))
阀体、阀盖	FXM-19	14.7	195	11.1
	B8M	15.3	195	14.1
螺栓	XM-19	14.7	195	11.1
	Inconel625	12.0	207	9.8

LNG超低温球阀垫片密封的准确计算需要考虑到垫片材料的非线性^[13-15]。金属缠绕垫片为多层缠绕式多材料弹性体,响应存在高度非线性,完整的垫片特性通过应力-应变关系表示,其加载、卸载曲线呈非线性,金属缠绕垫片的回弹性曲线如图2所示。

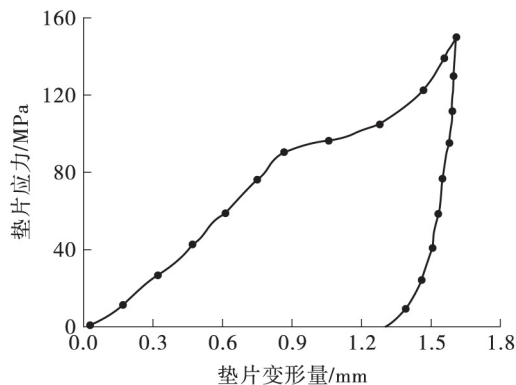


图2 金属缠绕垫片的回弹性曲线

Fig. 2 Resilience curve of metal wound gasket

2.2 网格划分

由于本研究只考虑温度载荷对球阀中法兰螺栓预紧力和密封性能的影响,因此对球阀结构进行了适当简化,在建立几何模型时忽略阀杆、球体以及阀体下部的密封结构。对球阀模型进行网格划分时,采用自适应网格划分和局部网格控制技术,金属缠绕垫片采用特殊的界面单元划分网格,并进行网格无关性验证(当单元数为473 611、561 748、613 354时,最大应力分别为299.61、316.24、317.09 MPa),最终确定网格节点数为917 003,网格单元数为561 748,网格模型如图3所示。

2.3 载荷与约束施加

为了真实模拟低温下的螺栓预紧过程,本分析将设置7个载荷步。第一个载荷步在螺栓与阀盖接触面施加螺栓预紧力238 722.3 N,并在第二个载荷步中锁定该载荷产生的形变,而后几个载荷步逐步

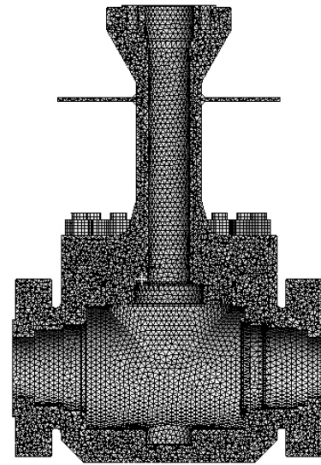


图3 球阀的网格模型

Fig. 3 Mesh model of ball valve

施加温度载荷至 $-196\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.4 接触设置

采用非对称绑定接触模拟螺母和螺栓的连接,采用非对称摩擦接触模拟螺母与阀盖以及阀盖、阀体与金属缠绕垫片间的连接,摩擦系数取0.15,采用多个载荷步施加螺栓预紧力的加载方式来模拟螺栓的拧紧过程^[16-17]。按接触设置规则,设置金属缠绕垫片密封面为接触面,阀体、阀盖密封面为目标面,设置非对称接触行为,选取增广拉格朗日算法进行计算^[18]。

3 有限元分析结果

3.1 螺栓预紧力分析

为了使分析结果清晰有序,按照空间位置沿阀盖从靠近阀体左侧法兰螺栓开始,顺时针依次编号为1#-16#。考虑到螺栓法兰系统是周期对称结构,并且所载荷和约束也是周期对称分布的,有限元分析时只选用1#-4#螺栓进行计算。不同螺栓材料的预紧力变化趋势如图4所示。

从图4可以看出,1#、2#螺栓在低温下的平均预紧力均大于3#、4#螺栓,1#、2#螺栓分布在靠近管法兰一侧,法兰螺栓系统各组件发生热变形,中法兰在与流道平行两侧的变形程度大于与流道垂直两侧的变形,使得分布在靠近管法兰两侧的螺栓受到的拉应力大于其他位置的螺栓。

由图4(a)可知,螺栓预紧力先随着温度的降低缓慢增加,在 $-120\text{ }^\circ\text{C}$ 以后增长趋势较为明显, $-196\text{ }^\circ\text{C}$ 时平均预紧力为293 360 N,较常温下的螺栓预紧力增加了24.93%。由于螺栓材料B8M

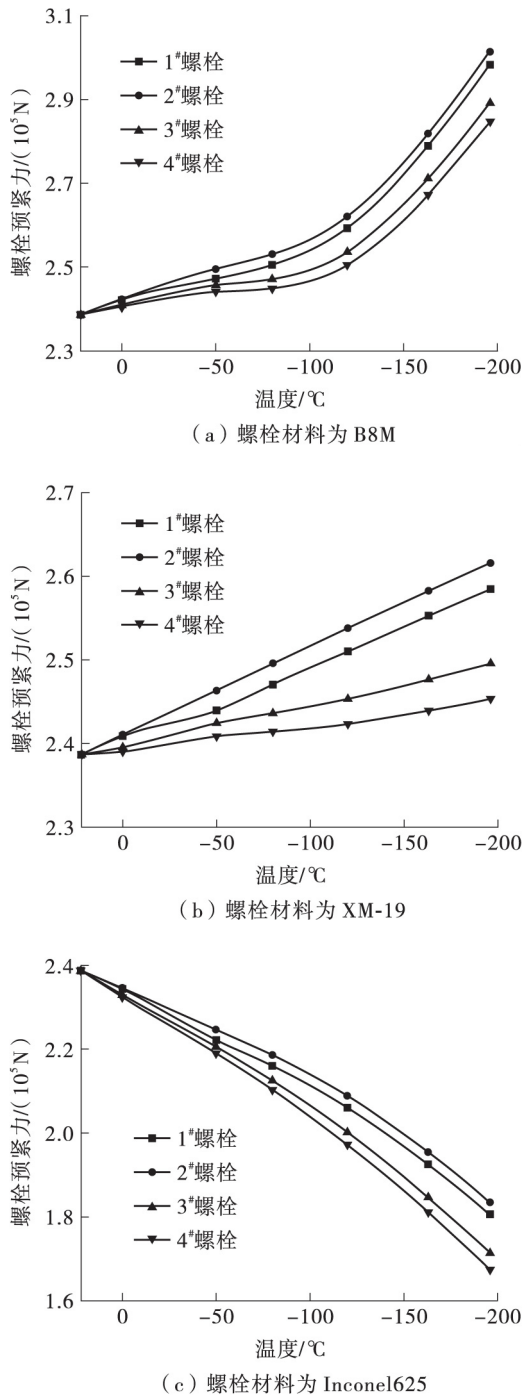


图 4 不同螺栓材料的预紧力变化

Fig. 4 Changes of pretension force of different bolt materials

的线膨胀系数大于阀体和阀盖材料 FXM-19 的线膨胀系数, 在低温环境下螺栓材料的轴向收缩程度比阀体、阀盖大, 金属缠绕垫片被进一步压紧, 能够更好地保证密封。当螺栓预紧力过大时, 即使在非螺纹区域的总拉伸应力是安全的, 但在螺栓根部会发生应力集中, 增加产生裂纹的风险。同时, 预紧力过大将导致垫片被压溃而发生泄漏。

由图 4 (b) 可知, 螺栓预紧力随温度的降低

均匀增加, 近似呈线性增长趋势, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时平均预紧力为 $253\ 725\ \text{N}$, 较常温下的螺栓预紧力增加了 6.28% 。螺栓材料 XM-19 的线膨胀系数与阀体、阀盖材料 FXM-19 的线膨胀系数相同, 随着温度的降低, 螺栓与阀体、阀盖在轴向的收缩程度也相同, 但由于材料的弹性模量会随温度的降低而增大, 使得预紧力也相应地随温度的降低略微增加。

由图 4 (c) 可知, 螺栓预紧力随温度的降低而急剧减小, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时平均预紧力为 $175\ 735\ \text{N}$, 较常温下的螺栓预紧力减小了 26.39% 。螺栓材料 Inconel 625 的线膨胀系数小于阀体和阀盖材料 FXM-19 的线膨胀系数, 在低温环境下螺栓材料的轴向收缩程度比阀体、阀盖小, 密封效果与常温相比有所下降。如果预紧力过小将使垫片无法获得足够的压紧应力, 进而引发泄漏, 因此还需要对中法兰结构的密封性能做进一步分析。

3.2 金属缠绕垫片密封比压分析

为简化计算, 选取 $1/4$ 模型分别模拟 3 种线膨胀系数不同的螺栓材料与阀体、阀盖组合在常温和低温下的垫片密封比压, 结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 金属缠绕垫片的应力分布规律基本一致, 沿径向由内而外逐渐增大, 这是因为垫片的受力不是直接施加在垫片表面, 而是在螺栓预紧力的作用下以垫片反作用力为支点发生偏转, 产生轴向位移, 造成垫片预紧比压沿径向分布不均, 形成外紧内松的分布状态。低温工况下的垫片内外侧密封比压差值比常温工况下的密封比压小。

当螺栓材料选用 B8M 时, 随温度的降低, 垫片密封比压显著提高, 最大密封比压由常温下的 $95.119\ \text{MPa}$ 增大到 $103.410\ \text{MPa}$, 较常温时增大了 8.72% ; 当螺栓材料选用 XM-19 时, 随温度的降低, 垫片密封比压略微增大, 最大密封比压由常温下的 $95.144\ \text{MPa}$ 增大到 $97.356\ \text{MPa}$, 较常温时增大了 2.33% ; 当螺栓材料选用 Inconel 625 时, 随温度的降低, 垫片密封比压减小, 最大密封比压由常温下的 $94.600\ \text{MPa}$ 减小到 $83.603\ \text{MPa}$, 较常温时减小了 11.63% 。

经计算, 金属缠绕垫片最小预紧比压为 $69\ \text{MPa}$, 螺栓选用线膨胀系数不同的 3 种材料时, 垫片平均密封比压均大于其最小预紧比压, 能够形成有效密封环带, 从而保证垫片密封而不发生泄漏。由于垫片密封受多种因素的影响, 如温度、压力等, 当螺栓法兰结构受到介质压力时, 垫片会发生回弹, 导致密封比压减小, 密封性能下降。考虑到实际工况

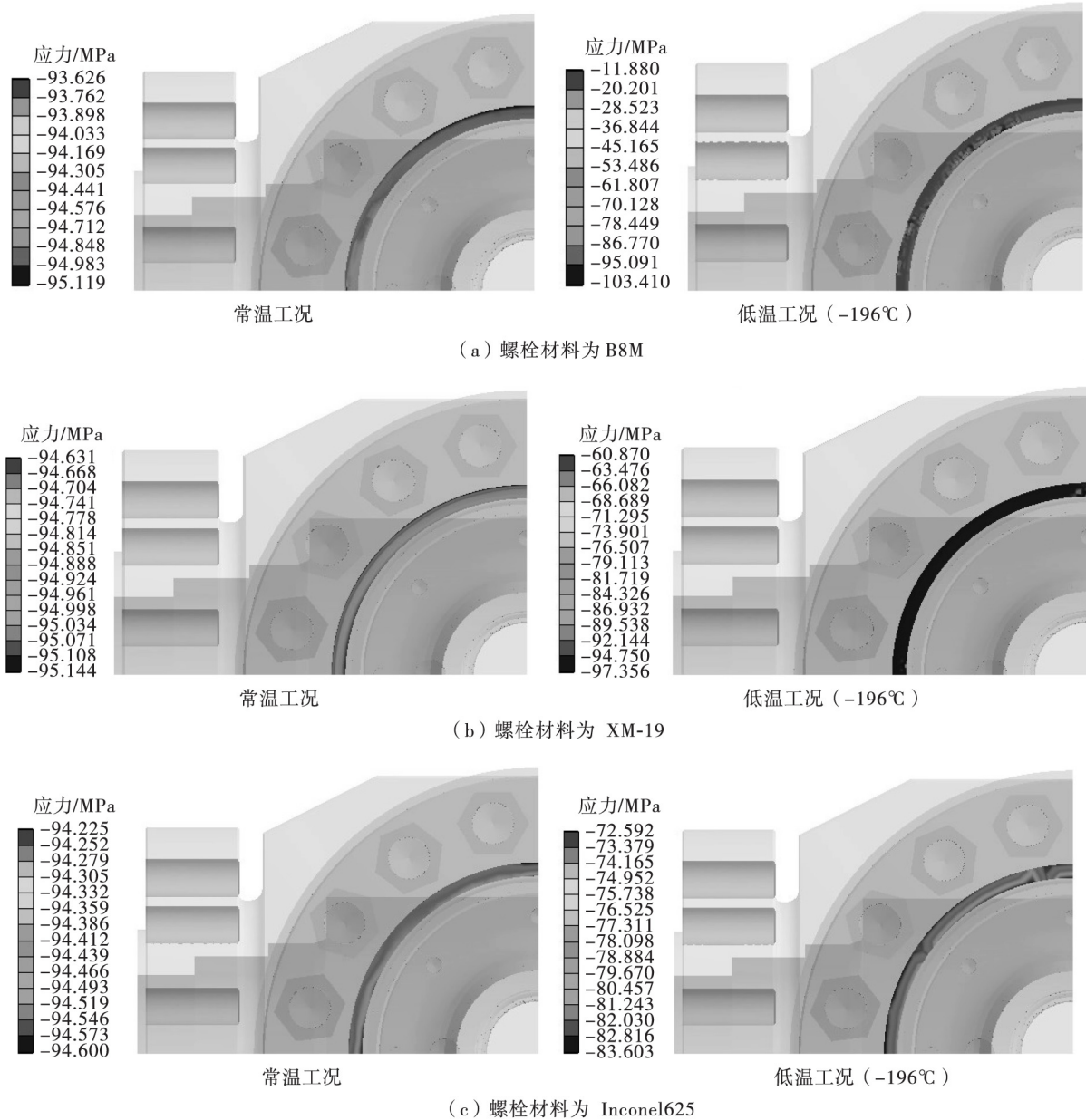


图5 不同螺栓材料下金属缠绕垫片的应力分布

Fig. 5 Stress distribution of metal wound gaskets with different bolt materials

阀体内部有介质压力的存在,当螺栓材料的线膨胀系数小于阀体和阀盖材料的线膨胀系数时,随着温度的降低,中法兰的密封性能会大幅下降。

4 结论

(1) 当螺栓材料的线膨胀系数大于法兰材料的线膨胀系数时,预紧力随温度的降低而增大,且增长趋势逐渐明显;当螺栓材料的线膨胀系数等于法兰材料的线膨胀系数时,预紧力随温度的降低而略微增大,近似呈线性增长趋势;当螺栓材料的线膨胀系数小于法兰材料的线膨胀系数时,预紧力随温度的降低而急剧减小。同时,在低温环境下,靠

近管法兰两侧螺栓的预紧力均大于其他位置螺栓的预紧力。

(2) 金属缠绕垫片应力分布沿径向由内而外逐渐增大,形成内紧外松的分布状态,且低温下垫片内外侧密封比压差值比常温时小。螺栓选用线膨胀系数不同的3种材料时,随温度的降低,金属缠绕垫片的密封比压呈现出与预紧力相同的变化趋势。垫片的平均密封比压均大于其最小预紧比压,能够保证密封。

(3) 在LNG超低温球阀的中法兰结构中,应避免螺栓材料的线膨胀系数小于阀体和阀盖材料的线膨胀系数,以免实际运行过程中垫片密封比压骤

减而造成泄漏。同时,对于LNG其他阀门,LNG泵、管道等其他低温设备的法兰结构也应避免螺栓材料的线膨胀系数小于法兰材料的线膨胀系数。

参考文献:

- [1] 陈峰,张晨,陈锐莹,等. LNG接收站管道预冷温度-应力模型[J]. 天然气工业,2019,39(9): 102-109.
CHEN Feng, ZHANG Chen, CHEN Ruiying, et al. A temperature-stress model for pipeline pre-cooling in an LNG receiving terminal [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(9): 102-109.
- [2] 李操,商显扬,周鑫,等. 箭体结构连接刚度影响因素研究[J]. 中国机械工程,2018,29(16): 1947-1951.
LI Cao, SHANG Xianyang, ZHOU Xin, et al. Study on influence factors of connection stiffness of rocket structure [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(16): 1947-1951.
- [3] YAN Yi, WEN Menggang, LI Yun. FEM analysis and preload evaluation of bolted joints subject to low temperature [C] // Proceedings of ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference. Boston: ASME, 2015: 39-48.
- [4] 杨陈,郝志勇,陈馨蕊. 热负荷对柴油机结构强度及密封性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(4): 756-760.
YANG Chen, HAO Zhi-yong, CHEN Xin-rui. Thermal load influence on stress intensity and sealing performance of diesel engine [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(4): 756-760.
- [5] 杜静,代学良,杨显刚,等. 螺栓预紧力对大型双排四点接触球轴承载荷分布的影响[J]. 太阳能学报,2017,38(10): 2645-2651.
DU Jing, DAI Xueliang, YANG Xiangang, et al. Influence of bolt pretension on load distribution of large type double row four-point-contact ball bearing [J]. Acta Energetica Sinica, 2017, 38(10): 2645-2651.
- [6] YANG Lihua, LI Zhi, YU Lie. Numerical analysis on mechanical property of bolted joint [J]. Advanced Materials Research, 2014, 2817: 1459-1463.
- [7] NELSON N R, PRASAD N S. Sealing behavior of twin gasketed flange joints [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 138: 45-50.
- [8] 张添翼,万力,史力,等. 高温气冷堆压力容器承压螺栓预紧过程的有限元模拟[J]. 核动力工程,2011,32(S1): 54-56.
ZHANG Tianyi, WANG Li, SHI Li, et al. FE simulation of bolt-up process for press-retraining bolts of HTR-PM pressure vessel [J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(S1): 54-56.
- [9] 裴瑞光,肖毅,陈豪麟,等. 复合材料螺栓连接预紧力松弛的温度-时间依存行为[J]. 复合材料学报,2016,33(4): 768-778.
PEI Ruiguang, XIAO Yi, CHEN Haolin, et al. Temperature-time dependent behavior for preload relaxation in bolted composite joints [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2016, 33(4): 768-778.
- [10] 陈长盛,王强,柳瑞锋,等. 螺栓连接对结构模态及传递特性影响研究[J]. 振动与冲击,2014,33(2): 178-182.
CHEN Chang-sheng, WANG Qiang, LIU Rui-feng, et al. Effect of bolt connection on structural vibration modes and transfer characteristics [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 178-182.
- [11] 姚星宇,王建军,翟学. 航空发动机螺栓连接薄层单元建模方法[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(12): 2269-2279.
YAO Xingyu, WANG Jianjun, ZHAI Xue. Modeling method of bolted joints of aero-engine based on thin-layer element [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(12): 2269-2279.
- [12] 康士朋,唐杰,宋林郁,等. 温度变化对包带装置预紧力影响分析与验证[J]. 宇航学报,2016,37(9): 1122-1128.
KANG Shi-peng, TANG Jie, SONG Lin-yu, et al. Analysis and verification of the effect of temperature variation on the preload of clamp band device [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(9): 1122-1128.
- [13] 刘麟,顾伯勤. 螺栓法兰连接中非线性垫片径向应力的解析计算方法[J]. 核动力工程,2010,31(4): 106-109.
LIU Lin, GU Bo-qin. Analytical method of nonlinear gasket contact stress along width direction on bolted flanged connections [J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(4): 106-109.
- [14] 冯秀,顾伯勤. 金属垫片密封连接的泄漏率计算[J]. 化工学报,2010,61(5): 1208-1212.
FENG Xiu, GU Boqin. Leakage rate calculation of metallic gasket connections [J]. CIESC Journal, 2010, 61(5): 1208-1212.
- [15] ZHENG Xiaotao, PAN Jialinzi, MA Linwei, et al.

- Pretightening range of flange joints in pipeline considering nonlinear compression resilience of gaskets [J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2019, 10(3): 44-50.
- [16] LI Ying, LIU Zhifeng, WANG Yuezheng, et al. Research on preload of bolted joints tightening sequence-related relaxation considering elastic interaction between bolts [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 160: 45-53.
- [17] 崔晓, 董彦良, 赵克定. 基于 ADINA 的组合式动密封泄漏量与摩擦力计算 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(2): 95-100.
- CUI Xiao, DONG Yan-liang, ZHAO Ke-ding. Calculation of leakage and friction of combined dynamic seals based on ADINA [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(2): 95-100.
- [18] 李伟, 段瑞春, 杨长生, 等. 螺栓法兰连接的数值模拟及接触收敛分析 [J]. *重庆大学学报*, 2016, 39(5): 10-16.
- LI Wei, DUAN Ruichun, YANG Changsheng, et al. The numerical simulation of bolted flange joints and the contact convergence analysis [J]. *Journal of Chongqing University*, 2016, 39(5): 10-16.

Analysis of Bolt Pretension of LNG Ultra-Low Temperature Ball Valve

LI Shuxun¹ YIN Huiquan¹ ZHAO Minjie² YANG Lingxia¹ LIU Taiyu¹

(1. School of Petrochemical Engineering// Machinery Industry Pump and Special Valve Engineering Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. Shanghai High and Medium Pressure Valve Co., Ltd., Shanghai 201401, China)

Abstract: In order to study the effect of temperature on the bolt pretension of flange structure, the bolt pretension and sealing conditions of flange in liquified natural gas (LNG) ultra-low temperature ball valve at different temperatures were analyzed by ANSYS finite element software, and the pretension states of bolt materials with different linear expansion coefficients at room temperature and low temperature were compared. The results show that when the bolt material is B8M and XM-19, the preload force increases with the decrease of temperature, and the pretension under the low temperature conditions increases by 24.93% and 6.28% respectively compared with normal temperature; when the bolt material is Inconel625, the pretension decreases with the decrease of temperature, and the pretension under the low temperature condition decreases by 26.39% compared with normal temperature. At the same time, the variation of the sealing specific pressure of the metal spiral wound gasket with temperature exhibits the same trend with the bolt pretension.

Key words: liquified natural gas; flange; bolt; pretension; linear expansion coefficient; seal