DOI: 10.3901/JME.2020.21.168

基于泄漏率的法兰密封结构垫片参数试验研究*

刘 炎^{1,2,3} 陈学东² 范志超² 王 璐² 薛吉林²

(1. 浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023;

2. 合肥通用机械研究院有限公司国家压力容器与管道安全工程技术研究中心 合肥 230031;

3. 浙江工业大学过程装备及其再制造教育部工程研究中心 杭州 310023)

摘要: 对于压力容器的法兰密封结构而言, 预紧比压 y 和垫片系数 m 是其设计时依据的两个重要垫片参数, 现行压力容器设计规范 ASME VIII 卷中给出的 y 和 m 取值是经验值, 且未能与泄漏率关联。对现有基于泄漏率的垫片参数标准试验方法进行分析, 指出了其存在的不足之处, 开展了石墨缠绕垫片在不同介质压力、不同加卸载循环下的密封性能试验, 提出了一种更加贴合工程实际的垫片参数 y 和 m 的试验方法。通过对不同垫片初始表面应力下泄漏率与垫片系数 m 之间关系的拟合, 得到满足不同紧密度等级所要求的 y 和 m 值, 并对 y 和 m 取值进行优化使其更加方便工程应用。新的垫片参数试验方法考虑了 y 和 m 之间的关联关系, 可更加准确全面地反应垫片特性, 为开展基于泄漏率的法兰密封结构设计, 降低石化装置泄漏率提供支持。

关键词: 法兰密封结构; 泄漏率; 垫片参数; 石墨缠绕垫片

中图分类号: TB42

Experimental Research on the Gasket Parameters of Flange Sealing Structure Based on Leakage Rate

LIU Yan^{1,2,3} CHEN Xuedong² FAN Zhichao² WANG Lu² XUE Jilin²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023;

2. National Technical Research Center on Safety Engineering of Pressure Vessel, Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230031;

3. Engineering Research Center of Process Equipment and Remanufacturing, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract: In respect of the pressure vessels, yield factor y and maintenance factor m are two significant gasket parameters for flange design. The values of y and m given in the current ASME VIII code are empirical values and not related to the leakage rate. The shortages of current standard test methods for gasket parameters of flange sealing structure based on leakage rate are analyzed. The sealing performance test of graphite spiral wound gasket under different medium pressure and different loading/unloading cycles is carried out, a more reasonable and practical test method for gasket parameters y and m is proposed. By fitting the relationship between the leakage rate of different initial gasket surface pressure and gasket maintenance factor m , the values of y and m that meet the requirements of different tightness class are obtained, and the values of y and m are optimized to make it more convenient for engineering application. The new gasket parameters test method considers the correlation between y and m , which can reflect the gasket characteristics more accurately and comprehensively, providing support for the design of flange sealing structure based on leakage rate and reducing the leakage rate of petrochemical plant.

Key words: flange sealing structure; leakage rate; gasket parameters; graphite spiral wound gasket

0 前言

法兰密封结构作为可拆卸的静密封连接, 广泛

应用于石化、核电等行业的压力容器及管道中。长期以来, 大多数密封设计只考虑螺栓法兰的强度和刚度问题, 并未系统考虑密封垫片本身的密封性能。其原因主要是由于现行压力容器标准规范中法兰密封结构设计多是依据 Waters 法, 该法所依据的两个垫片参数预紧比压 y 和垫片系数 m 是经验值, 未能

* 国家重点研发计划(2017YFF0210405)、国家自然科学基金(51605132)和国机集团重大科技专项(SINOMAST-ZDZX-2017-01)资助项目。
20200413 收到初稿, 20200702 收到修改稿

与泄漏率相关联^[1]。随着近年来各国环保法规对密封性能要求的不断提高, 提出与泄漏率相关的垫片设计参数及其标准试验测试程序, 建立基于泄漏率的法兰密封结构设计方法成为研究热点。

美国材料试验协会(ASTM)较早开展了 y 和 m 试验测试方法研究并颁布了相关标准, 几经修订, 现行标准为 ASTM F3149-15^[2], 但该方法未考虑介质压力的影响及 y 和 m 之间的关联关系, 具有一定的局限性^[3]。美国压力容器研究委员会(PVRC)提出了新的基于紧密度的法兰密封结构设计方法和新的垫片参数 G_b 、 a 和 G_s , 也给出垫片参数的试验方法 ROTT(Room Temperature Tightness Test)^[4], 但由于该设计方法仍未形成标准, 暂时无法在工程上应用。欧洲标准化委员会(CEN)颁布了基于紧密度的法兰密封结构设计标准 EN 1591^[5], 提出了新的垫片参数 Q_{smax} 、 $Q_{min(L)}$ 、 $Q_{smin(L)}$ 、 P_{QR} 、 E_G 和 α_G ^[6], 制定了垫片参数的试验标准 EN 13555^[7], 但该设计方法参数众多, 且计算过程复杂, 尚未在工程上广泛应用。

目前各国研究机构和学者仍在探索如何更加全面准确地测出传统垫片参数 y 和 m 与泄漏率关系。法国工业研究所(CETIM)提出了一种垫片参数 y 和 m 试验方法, 该方法可测出不同紧密度等级下的 y 和 m 值^[8]。美国 DALE 等^[3]建立了 PVRC 新的垫片参数 G_b 、 a 和 G_s 和传统垫片参数 y 之间的关系。国内孙召锋^[9]设计了两种测试垫片参数 y 和 m 的试验方案。方案一考虑了介质压力对垫片系数 m 的影响, 但是未能将 y 和 m 关联测试。方案二虽然将 y 和 m 进行了关联测试, 但未能体现操作工况下由于外载荷和螺栓应力松弛引起垫片表面应力减小的问题。纪一丹等^[10]对 ASTM F3149-15 的试验测试方法进行了改进, 但仍未能全面反映 y 和 m 之间的关系。

综上, 鉴于目前传统垫片参数试验方法不能全面反映 y 和 m 之间的关联关系, 而新的基于泄漏率的法兰密封结构设计方法尚未成熟或过于繁琐, 本文提出一种更加贴合工程实际的基于泄漏率的垫片参数 y 和 m 的试验测试方法, 并给出了不同泄漏率等级对应的石墨缠绕垫片 y 和 m 取值, 为开展基于泄漏率的法兰密封结构设计提供支持。

1 现行垫片参数标准试验方法分析

1.1 法兰密封结构密封机理及垫片特性分析

法兰密封结构通常由螺栓、法兰和密封垫片构成, 如图 1 所示。预紧时, 通过拧紧螺栓提供垫片所需的初始表面应力, 垫片受力变形使得垫片内部

或垫片与法兰接触面间的微小泄漏通道被阻塞, 形成初始密封。工作时, 受介质内压和外加载荷等作用, 法兰密封面发生相对分离, 此时垫片必须要有一定的回弹量来弥补法兰面的分离量, 从而使垫片上有足够的残余表面应力以保证密封。

图1 典型法兰密封结构及密封机理

大部分的密封垫片是非金属或金属-非金属复合材料, 其压缩回弹阶段的应力和变形曲线具有非线性性和迟滞性, 如图 2 所示。同样大小的垫片表面应力, 不同的加卸载过程对应不同的垫片变形量。例如, 对同样大小的垫片表面应力 σ_1 , 加载阶段对应的垫片变形量为 ε_1 ; 加载到 σ_2 再卸载到 σ_1 , 对应的变形量为 ε_2 ; 加载到 σ_3 再卸载到 σ_1 , 则对应的变形量为 ε_3 。因此, 垫片的这一特性对建立泄漏率和垫片表面应力之间的关系带来了一定困难。

图2 典型密封垫片压缩回弹过程中应力-变形量关系

1.2 传统垫片参数标准试验方法分析

传统垫片参数 y 和 m 值的现行标准试验方法 ASTM F3149-15, 在测定 y 时, 介质压力为 0.014 MPa, 垫片表面应力从 3.45 MPa 开始以 3.45 MPa 为增量逐级加载; 测定 m 时, 介质压力为 2 MPa, 垫片表面应力从 46.7 MPa 开始以 3.45 MPa 为变量逐级卸载, 分别测量每一级垫片表面应力下的泄漏率, 直至无法测量。按式(1)和(2)分别计算 y 和 m 值, 将其与泄漏率关系绘制成曲线。 y 和 m 的取值可依据要求的最大允许泄漏率或者泄漏率基本不再降低时对应的取值。

$$y = W/A_1 \quad (1)$$

$$m = (W - A_2 P)/(A_1 P) \quad (2)$$

式中, W 为垫片压紧力; A_1 为垫片接触面积; A_2 为垫片内径包含面积; P 为试验介质压力。

根据前面对垫片特性的分析可知该试验测试方法存在一些不足之处。

(1) 未考虑介质压力的影响。标准在测试 m 时, 只采用了一种介质压力(2 MPa)进行试验测试。

(2) 未考虑加卸载历程影响。标准在测试 m 时, 垫片初始表面应力只采用 46.7 MPa 这一个值。

(3) y 和 m 值是分别测试的, 未能建立二者之间的相互关系。

(4) 标准中对试验装置、垫片压紧力的加载方式、泄漏率的检测方法等均未给出明确规定。

1.3 PVRC 垫片参数标准试验方法分析

PVRC 提出了一种有别于 ASME 规范中传统法兰密封结构设计方法。该方法引入了紧密度的概念, 其定义是指在给定载荷下法兰密封结构所能限制泄漏的能力的度量, 用紧密性参数 T_p 作为其无因次量, 其计算公式如下

$$T_p = \left(\frac{P}{P^*} \right) \times \left(\frac{L_{rm}^*}{L_{rm}} \right)^s \quad (3)$$

式中, P^* 为标准大气压力, 0.0103 MPa; L_{rm}^* 为参考质量泄漏率, 对外径 150 mm 的垫片, $L_{rm}^*=1$ mg/s; L_{rm} 为质量泄漏率; s 取 0.5。

另外, PVRC 划分了 $T_1 \sim T_5$ 五个紧密度等级, 每一个紧密度等级对应的允许最大泄漏率见表 1。

表 1 PVRC-ROTT 紧密度等级对应表

紧密度类型/紧密度等级	泄漏率/[mg/(mm/s)]
经济级/ T_1	2×10^{-1}
标准级/ T_2	2×10^{-3}
紧密级/ T_3	2×10^{-5}
严密级/ T_4	2×10^{-7}
极密级/ T_5	2×10^{-9}

新垫片参数的试验包括 A、B 两个部分, 其中 A 部分试验模拟预紧工况, 可得到垫片常数 G_b 、 a ; B 部分试验模拟操作工况, 对垫片进行加载和卸载循环试验, 可得到垫片常数 G_s 。试验规定了两个介质压力等级: 高压(HP)6 MPa、低压(LP)2 MPa。高压(HP)的 A 部分试验被划分为范围在 8~160 MPa 的 13 个应力等级, 低压的 A 部分试验则被划分为范围在 8~140 MPa 的 6 个应力等级。高压的 B 部分试验包括 5 个垫片应力循环。测量垫片各接触应

力等级下的泄漏率, 按式(3)计算各应力等级下的紧密度参数, 将垫片接触应力与紧密度参数 T_p 进行拟合, 如图 3 所示^[7]。

图 3 典型垫片表面应力与紧密度参数关系图

ROTT 试验在测试垫片参数 G_b 、 a 、 G_s 考虑了介质压力及垫片加卸载历程的影响, 在采用公式(3)计算紧密度参数 T_p 时, s 值取 0.5, 即认为泄漏率与介质压力的平方成正比。根据 BROWN 等^[14]的理论和试验分析可知, s 取值大于 0.5, 通常介于 0.5~1.0 之间。此外, PVRC 提出的新的法兰设计方法目前仍未被标准规范所采纳, 因此在工程上仍无法应用。

1.4 EN 1591 垫片参数标准试验方法分析

欧洲法兰密封结构设计标准 EN1591-1 规定了六个新垫片参数, $Q_{\min(L)}$ 、 $Q_{s\min(L)}$ 、 $Q_{s\max}$ 、 E_G 、 P_{QR} 、 α_G , 可依据 EN 13555 标准进行测试。不同的紧密度等级对应的允许最大泄漏率见表 2。

表 2 EN 13555 密封性等级对应表

密封性等级	泄漏率/[mg/(mm/s)]
$L_{1.0}$	≤ 1.0
$L_{0.1}$	≤ 0.1
$L_{0.01}$	≤ 0.01

垫片密封性能试验介质压力为 4 MPa, 测量加载和卸载循环过程中每一个垫片表面应力等级下的泄漏率, 其加载过程包括 5~160 MPa 共 13 个垫片应力等级, 卸载过程的垫片初始应力点包括 7 个。将泄漏率与加卸载过程中各垫片表面应力整理成如图 4 所示^[7], 其中加载点曲线与各泄漏率水平的交点为最小预紧表面应力 $Q_{\min(L)}$, 卸载点曲线与各泄漏率水平的交点为最小工作表面应力 $Q_{s\min(L)}$ 。

图 4 EN 13555 泄漏试验泄漏率随垫片表面应力变化图

EN 13555 标准中的密封性能试验程序与 ROTT 方法基本一致，但在处理不同介质压力等级下的泄漏率时，EN 13555 通过进行多组介质压力等级下的密封性能试验，拟合得到 $Q_{smin(L)}$ 与介质压力的关系曲线。EN 13555 中除了垫片密封性能试验外，还包括了压缩试验、蠕变松弛试验和热膨胀系数试验，由于垫片参数较 PVRC 设计方法中多，且在进行法兰设计时需要计算过程进行迭代，十分繁琐，因此该法兰密封结构设计和垫片参数试验测试标准未能在欧盟以外国家中广泛应用。

2 基于泄漏率的垫片参数 y 和 m 试验研究

2.1 试验设计

ASTM F3149-15 标准严格按照 y 和 m 的定义分别进行试验测试，未考虑二者之间关系。预紧比压 y 的定义为，预紧状态下泄漏通道闭合形成初始密封时垫片所需要最小压紧载荷。实际上，工程上关心的是采用多大的螺栓预紧力(即垫片初始表面应力)，可以保证在工况下(介质内压、外加载荷和螺栓松弛等引起垫片表面应力减小)密封结构仍能满足所要求的泄漏率等级。因此，较为合理的试验测试应将垫片加载到一系列初始表面应力，然后对其进行逐步卸载，测量每一个垫片表面应力对应的泄漏率。垫片预紧比压 y 等于垫片初始表面应力，垫片系数 m 等于卸载过程中垫片表面应力与介质压力的比值。

本次试验选取五个垫片初始表面应力 $y_1 \sim y_5$ ，分别为 20 MPa、40 MPa、60 MPa、120 MPa、160 MPa，具体的加载和卸载过程垫片表面应力如表 3 所示。试验介质压力除了 ASTM F3149-15 标准规定的 2 MPa 外，增加了 1 MPa 和 4 MPa 两种工况。

表 3 各介质压力下加卸载点表

垫片表面应力加载点/MPa	垫片表面应力卸载点/MPa
20	10, 5
40	20, 10, 5
60	20, 10, 5
120	40, 20, 10, 5
160	80, 40, 20, 10, 5

2.2 试验过程

试验采用带内环和定位环型石墨缠绕垫，内外环和金属缠绕带材料为 304。垫片公称压力 Class 600(PN 110)、公称直径 DN 80。垫片结构型式和尺寸参照 GB/T 4622.2—2008《缠绕式垫片 管法兰用垫片尺寸》^[12]，如图 5 所示。

图 5 带内外环石墨缠绕垫结构图^[12]

试验装置由垫片加载系统、位移测量系统、介质压力系统、泄漏率测量系统、数据采集及控制系统等组成，可实时测量垫片的压缩变形量和泄漏率。图 6 为试验装置原理图，图 7 为试验装置实物图。

图 6 试验装置原理图

- 1. 高压氮气瓶 2. 压力表 3. 减压阀 4. 双向止回阀
- 5. 气动球阀 6. 压差传感器 7. 上压板 8. O 型圈
- 9. 垫片 10. 测试容积 11. 下压板
- 12. 质谱仪 13. 液压装置

图 7 试验装置实物图

通过液压装置压紧上压板施加垫片所需压紧应力,通过在上下压板和垫片外围设置密闭空腔收集从垫片内部泄漏出的介质气体,通过管路将氦质谱仪与密封空腔连接。泄漏率的测量采用氦质谱仪和压降法相结合,可扩大泄漏率测量范围:当泄漏率在氦质谱仪检测量程范围内时,采用氦质谱仪真空检漏法测量泄漏率;当泄漏率超出氦质谱仪量程上限时,自动切换为压降法测量,通过压力传感器测量上下压板与垫片内部密封腔内介质压力的降低,根据气体状态方程计算出泄漏率。

试验在室温下进行,垫片加/卸载过程如图8所示,加/卸载应力速率均为0.5 MPa/s。待泄漏率稳定后测量每一个垫片应力下的泄漏率大小,泄漏率稳定的判据为在20 min内泄漏率变化不大于2%。

图8 试验加载/卸载过程

2.3 试验结果分析

所有试验结束后,整理出各介质压力下泄漏率随垫片表面应力大小变化图,如图9所示。从图9中可以看出,垫片泄漏率大小与垫片表面应力和介质压力相关,泄漏率随垫片表面应力的增大而减小、随介质压力的增大而增大。

(a) 试验介质压力为1 MPa工况

(b) 试验介质压力为2 MPa工况

(c) 试验介质压力为4 MPa工况

图9 不同介质压力下泄漏率随垫片表面应力大小变化图

经典的垫片泄漏模型为多孔介质泄漏模型,即将垫片材料近似看作是各向同性的多孔介质,垫片材料内部及法兰与垫片密封面间的泄漏通道由无数个孔径不等的毛细管组成。气体通过多孔介质的流动状态可分为层流和分子流,其流率为层流流率和分子流流率之和,其泄漏率模型为^[13]

$$L = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\pi r_i^4}{8\eta c l_m} p_m + \frac{4r_i^3}{3cl_m} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \right) (p_1 + p_2) \quad (4)$$

式中, l_m 为毛细管的平均长度; η 为介质的动力粘度; c 为毛细管弯曲系数; p_1 、 p_2 为毛细管进、出口压力; p_m 为毛细管进、出口平均压力; r_i 为泄漏通道的半径; T 为开尔文温度; M 为气体摩尔质量。

从式(4)中可看出,泄漏率大小与介质压力、气体物性参数以及垫片本身的泄漏通道微观直径和平均长度相关。而垫片本身的泄漏通道直径和数量与垫片压缩量(即垫片接触应力)之间存在负指数关系

$$k = f_1(\sigma^{-m}) \quad r_i = f_2(\sigma^{-n}) \quad (5)$$

本次试验介质气体为氦气,试验温度为室温,垫片内径介质压力为 p , 外径压力为大气压,因此

式(4)中 η 、 M 、 T 均为已知常数, 垫片泄漏率模型可由下式表示

$$L = A\sigma^{-n_1}p^2 + B\sigma^{-n_2}p \quad (6)$$

式中, A , B , n_1 , n_2 均为回归系数。

而垫片系数 m 是垫片有效表面应力与介质压力的比值, 泄漏率与垫片系数 m 之间的关系可由幂函数表达。

根据式(2)分别计算垫片初始表面应力 $y_1 \sim y_5$ 五种工况下各应力卸载点对应的 m 值, m 值与泄漏率的对应关系如图 10 所示。将每种垫片初始表面应力下的 m 值与泄漏率关系按公式 $L = am^b$ 进行拟合, 拟合曲线如图 11 所示, 拟合得到的参数及拟合度见表 4。

图 10 不同垫片初始表面应力下泄漏率与 m 值关系

图 11 不同垫片初始表面应力下泄漏率与 m 值拟合曲线

表 4 拟合得到的参数及拟合度

垫片初始表面应力	a	b	R^2
y_1	2.54×10^{-4}	-1.583 51	0.979 69
y_2	1.44×10^{-4}	-1.545 74	0.967 24
y_3	1.11×10^{-4}	-1.483 56	0.880 20
y_4	1.10×10^{-4}	-2.041 27	0.955 47
y_5	3.37×10^{-5}	-0.981 02	0.478 60

由表 4 可以看出, 初始垫片表面应力 $y_1 \sim y_4$ 四种情况拟合结果较好, 但 y_5 拟合较差, 主要原因是由于在垫片初始表应力 y_5 (160 MPa) 工况下, 当试验介质压力为 2 MPa 和 4 MPa 时, 部分卸载点泄漏率测量不准确, 偏差较大。例如, 图 9b 中初始垫片表面应力为 y_5 和 y_4 分别卸载到垫片表面应力 20 MPa 时, 对应的泄漏率分别为 3×10^{-6} mg/(mm/s) 和 2.6×10^{-6} mg/(mm/s), 前者泄漏率大于后者, 不符合基本规律。为验证 y_5 工况下的泄漏率异常是否为测量不准确引起的, 选取同一批次的新垫片, 对初始垫片表面应力 y_5 的情况, 重新开展介质压力 2 MPa 和 4 MPa 两种工况下的试验测试, 得到拟合曲线的拟合系数 a 为 2.50×10^{-5} , b 为 1.945 39, 拟合度 R^2 为 0.994 2, 可较好的反应泄漏率与 m 值的关系。

根据垫片系数 m 与泄漏率的关系图中的拟合曲线或者拟合方程可以求得一定泄漏率下的垫片参数 y 和 m 的值, 如表 5 所示。

表 5 不同泄漏率等级对应的垫片参数 y 和 m 值

预紧比压 y /MPa	泄漏率水平/[mg/(mm/s)]				
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
20	0.4	1.8	7.7	33.0	141.2
40	0.3	1.3	5.6	24.9	110.4
60	0.2	1.1	5.1	23.9	112.8
120	0.3	1.0	3.2	10.0	30.9
160	0.15	0.5	1.6	5.2	17.1

3 不同泄漏率等级 y 和 m 取值优化

由表 5 可知, 对于给定的泄漏率等级, 有多对 (y, m) 值可供选择, 在进行法兰设计时, 就会得到不同的螺栓设计载荷。因此, 对 (y, m) 值优化的目的就是达到某一泄漏率水平, 即在确保满足所需紧密度等级时, 螺栓设计载荷最小, 即所需螺栓面积最小。

根据 ASME VIII-1 卷中法兰设计方法可知^[14], 预紧状态下需要最小螺栓载荷 W_{m2} 等于预紧状态下需要最小垫片压紧力, 操作状态下需要最小垫片压紧力加上由内压引起的总轴向力等于操作状态下需要最小螺栓载荷 W_{m1}

$$W_{m1} = 6.28GbmP + 0.785G^2P \quad (7)$$

$$W_{m2} = 3.14Gby \quad (8)$$

式中, b 为垫片有效密封宽度; G 为垫片压紧力作用中心圆直径。

操作状态下需要的最小螺栓面积 A_{m1} 和预紧状态下需要最小螺栓面积 A_{m2} 按公式(9)和(10)进行计算, 螺栓所需的总横截面积 A_m 取决于预紧状态和操作状态下需要最小螺栓载荷, 为 A_{m2} 和 A_{m1} 中的最大值。

$$A_{m1} = W_{m1}/S_b \quad (9)$$

$$A_{m2} = W_{m2}/S_a \quad (10)$$

$$A_m = \max(A_{m1}; A_{m2}) \quad (11)$$

式中, S_a 为常温下螺栓许用应力; S_b 为设计温度下螺栓许用应力。

螺栓所需的总横截面积 A_m 定义为以相反方式变化的两个参数的最大值, 当两个参数的值最接近时, 将达到其最小值。为了量化这两个参数的接近程度, 将 k 定义为两个参数的比值, 最后, 最优 (y, m) 值为使 k 最接近 1 的 (y, m) 组合中选取。优化后的不同泄漏率等级对应的最佳 (y, m) 值如表 6 所示。

$$k = A_{m1}/A_{m2} \quad (12)$$

表 6 优化后不同泄漏率等级对应的 (y, m) 值

泄漏率水平 /[mg/(mm/s)]	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
柔性石墨缠绕	(20,0.4)	(20,1.8)	(20,7.7)	(40,24.9)	(120,30.9)
垫片	(40,0.3)	(40,1.3)	(40,5.6)	(60,23.9)	(160,17.1)
			(60,5.1)	(120,10.0)	

4 基于泄漏率的垫片参数对比

将表 6 中试验测得的石墨缠绕垫的 y 和 m 值与 ASME VIII-1 中推荐的 $y=69$ MPa 和 $m=3$ 进行比较, 可知 ASME VIII-1 中的 y 和 m 值可保证法兰密封结构的泄漏率在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ mg/(mm/s) 之间, 若要求达到更高密封等级, 则标准中的 y 和 m 值将不满足密封要求。

表 7 给出了文献[10]中以及本文得到的不同泄漏率等级下 y 和 m 值。文献[10]中垫片系数 m 取值在泄漏率较大时相差不大, 但当泄漏率较小时其值也远小于本文推荐值。各泄漏率等级对应的 y 值均远小于本文推荐值, 其原因主要是文献在测 y 值时采用的介质压力为 0.1 MPa, 此工况下测得的 y 值太小, 实际意义不大。

表 7 不同试验方法下垫片参数对比

垫片参数	对比因素	泄漏率等级/[mg/(mm/s)]				
		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
预紧比压 y /MPa	文献[10]	5.1	7.5	11	16.1	23.6
	试验	20	40	60	120	160
垫片系数 m	文献[10]	0.4	0.8	1.6	3.1	6.0
	试验	0.4	1.3	5.1	10	17

根据表 6 中不同泄漏率等级下的 (y, m) 值, 按照 ASME VIII-1 卷中的法兰设计方法计算螺栓设计载荷。根据 ROTT 测得的垫片参数 G_b 、 a 、 G_s [3] 按 PVRC 法兰方法计算螺栓设计载荷, 计算结果如图 12 所示。法兰公称直径为 DN 80, 设计温度为常温, 设计压力为 4 MPa。图 12a 可见, 按 ROTT 垫片参数计算得到的最小螺栓载荷值要大于 ASME VIII-1 计算值, 最主要原因在于 ASME VIII-1 计算时采用垫片有效密封宽度乘以垫片接触平均直径计算垫片面积, 而 PVRC 法采用的是垫片实际接触面积。图 12b 中三种方法均采用垫片实际接触面积计算, 泄漏率较大时, 本文推荐的垫片参数与 ROTT 垫片参数计算得到的螺栓设计载荷相差不大, 当泄漏率较小时, 本文推荐的垫片参数计算得到的螺栓设计载荷大于 ROTT 垫片参数计算值。因此, 后续需开展螺栓法兰密封结构性能试验, 对比不同方法设计得到的法兰密封结构真实泄漏率, 分析各方法的准确性。

(a) 按 ASME VIII-1 方法垫片有效接触面积

(b) 按 PVRC 方法垫片实际接触面积

图 12 按不同垫片接触面积计算垫片设计载荷

5 结论

(1) 石墨缠绕垫片泄漏率大小与垫片表面应力、介质压力和加卸载历程相关。泄漏率随垫片表面应力的增大而减小, 随介质压力的增大而增大; 初始垫片表面应力越大, 卸载到相同垫片应力时的泄漏率越小。

(2) 垫片系数 m 和泄漏率存在 $L = am^b$ 的幂函数关系, 通过对不同垫片初始表面应力下泄漏率与垫片系数 m 之间关系的拟合, 能够得出不同泄漏率等级下所需的 m 值。

(3) 预紧比压 y 和垫片系数 m 之间是相互关联的, 同一泄漏率等级下, 有多组 y 和 m 值, 依据预紧和操作状态下所需螺栓面积最接近原则可得到最优的 y 和 m 值。

(4) 各测试方法中的垫片参数, 按不同垫片接触面积计算的垫片设计载荷值在各泄漏率水平下存在不同程度差别, 后续需要开展螺栓法兰密封结构性能试验, 分析各方法的准确性。

参 考 文 献

- [1] CHWN Xuedong, CAI Jun, LU Yunrong, et al. Structural design, manufacturing and maintenance technology of flange seal for pressure equipment based on leak rate control[C]// ASME Pressure Vessels & Piping Conference. 2015: 1-7.
- [2] ASTM Committee. F3149-15 Standard practice for determining the maintenance factor(m)and Yield factor(y)loading constants applicable to gasket materials and designs[S]. New York: American Society of Testing Materials, 2015.
- [3] RICE D A, WATERLAND A F, BAUSMAN A R. Exploring $M&Y$ gasket factors and their degree of correlation with proposed PVRC gasket factors[J]. Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, 2017, (2): 1-10.
- [4] ASTM Committee. F2836-2018 Standard practice for gasket constants for bolted joint design[S]. New York: American Society of Testing Materials, 2018.
- [5] European Committee for Standardization. EN1591(1)-2013 flange and their joints-design rules for gasketed circular flange connections-part 1: Calculation method[S]. British: British Standards Institution Publications, 2013.
- [6] European Committee for Standardization. EN1591(2)-2008 Flange and their joints-design rules for gasketed circular flange connections-part 2: Gasket parameters[S]. British: British Standards Institution Publications, 2008.
- [7] European Committee for Standardization. EN13555-2014 Flange and their joints gasket parameters and test procedures relevant to the design rules to gasketed circular flange connections[S]. British: British Standards Institution Publications, 2014.
- [8] HUBERT L, CÉDRIC B. Update of the 《 M and Y 》values in the new previsions of french codes CODAP and CODETI-development of a testing procedure to determine 《 M and Y 》 values for several tightness classes[J]. Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, 2009(2): 1-5.
- [9] 孙召锋. 基于泄漏率的垫片系数 m 、 y 值[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
SUN Zhaofeng. Research on the test method of the gasket parameters m and y based on the leakage rate[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015.
- [10] 纪一丹, 章兰珠. 基于泄漏率的垫片系数试验及分析[J]. 润滑与密封, 2019, 44(8): 99-103.
JI Yidan, ZHANG Lanzhu. Test and analysis of gasket factors based on leakage rate[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(8): 99-103.
- [11] BROWN W, DERENNE M, MARCHAND L. Optimized/harmonized room temperature leakage test procedure for generation of ASME & CEN code gasket factors-analytical phase[M]. New York: Welding Research Council, Inc., 2006.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4622.2-2008 缠绕式垫片 管法兰用垫片尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 4622.2-2008. Dimensions for spiral wound gaskets for pipe flanges[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [13] GU Boqin, CHEN Ye, ZHU Dasheng. Prediction of

leakage rates through sealing connections with nonmetallic gaskets[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2007, 15(6): 837-841.

- [14] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels. ASME VIII. 1-2019 ASME boiler and pressure vessel code VIII division 1 rules for construction of pressure vessels[S]. New York: American Society of

Mechanical Engineers, 2019.

作者简介: 刘炎, 男, 1992 年出生。主要研究方向为典型静密封结构密封性能。

E-mail: liuyiyan2018@163.com

王璐(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为过程装备静密封技术。

E-mail: 18505653793@163.com